

内 容 提 要

本书系统地介绍了常用中、小、微型各类三相和单相交流异步电动机试验方面最新的技术标准、检测设备、仪器仪表及电气线路、操作方法、试验报告的编写和电机性能数据分析、故障判定等内容。

本书采用了图文并茂和以实例说明的形式，通俗易懂、可操作性强。

本书可作为电机生产和修理单位试验人员的培训教材，也可作为从事电机设计、制作、修理、教学和研究技术人员的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

图解交流异步电动机试验技术与质量分析/才家刚编
著. —北京：中国电力出版社，2007

ISBN 978-7-5083-5198-8

I. 图... II. 才... III. ①异步电动机-试验-图解②异步电动机-质量分析-图解 IV. TM43.06-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 011903 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 4 月第一版 2007 年 4 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 13.625 印张 554 千字
印数 0001—4000 册 定价 25.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

► [前 言]

电机试验及检测是电机研究、生产和维修过程中不可缺少的重要环节。因此，对于从事电机研究、生产和维修行业的单位来讲，具备一套符合要求的电机试验检测设备和一定数量具有一定技术水平的试验技术人员，是非常必要的。另外，对于从事电机设计和制造的技术人员，若不了解电机试验的有关知识，也将给自己的工作带来一定的困难。

本书从解决上述问题出发，汇集了我国现行最新的有关中、小、微型交流异步电动机试验、检测方面的技术标准（所采用的标准截止到2007年1月），并结合作者近30年的实践经验，对电机试验方面的理论、设备选用和组建、试验操作方法、试验数据的采集和处理、试验报告的编写和性能数据分析、故障判定等多方面内容，进行了详细介绍。本书采用了图文并茂和以实例说明的形式，各项内容都很容易理解和实施。

上海海鹰机电检测设备厂董事长兼总经理吴亚旗先生，为本书提供了有关匝间绝缘试验等方面的技术资料，在此表示诚挚的感谢。

限于作者的经验和技术水平，书中难免有不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

编著者

2007年2月



第一节 概 述

电机试验是利用仪器、仪表及有关设备，按照相关标准的规定，对电机制造和修理过程中形成的半成品和成品（或以电机为主体的配套产品）的电气性能、力学性能、安全性能及可靠性等技术指标进行的检验和试验。通过这些检验和试验，可以全部或部分地反映出被检产品的有关性能数据。用这些数据，可以判断被检产品是否符合预想的要求、品质的优劣，以及改进的目标和方向。由此可见，电机试验无论是对新产品的研制，还是对电机的批量生产及修理，都是一个极其重要的环节。

在电机生产制造和修理过程中，试验工作主要分为半成品试验和成品试验两个阶段。半成品试验主要是针对电机电工元件或组件的试验。如绕组的直流电阻测量、绕组的匝间耐电压试验、绕组对机壳和绕组相互间绝缘电阻的测定和介电强度试验（即耐电压试验）等。成品试验则是为了得到部分或全部的性能数据，而对组装成整机后的电机进行的试验。根据需要，成品试验又分为型式试验和检查试验两大类。

所谓型式试验，是指那些能够较确切地得到被试电机有关性能参数的试验。根据需要，试验可以包括标准或有关技术要求中所规定的全部项目，也可以是其中的部分项目。按国家标准规定，对电机生产单位，在下述情况下应进行型式试验。

- (1) 新设计试制的产品。本类型试验又称为“鉴定试验”。
- (2) 经鉴定定型后，小批量投产的产品。
- (3) 设计或工艺上的变更足以引起电机某些特性和参数发生变化的产品。
- (4) 检查试验结果与以前型式试验结果发生不可容许的偏差的产品。
- (5) 产品自定型投产后的定期抽查，本类型试验又称为“周期抽检试验”，简称“周检”，一般规定1年或2年为1个周期。

检查试验习惯称为“出厂试验”。它是在电机定型后批量生产时，对每台组装为成品的电机进行的部分性能试验。检查的项目中，有的能直接反映出被试电机的性能，如耐电压、绝缘电阻、噪声和振动等；有的则不能直接反映出被试电机的性能，而只能与合格样机相应的试验参数相比较后，才能粗略判断该项性能参数是否符合要求，如用空载电流、堵转电流、空载损耗和堵转损耗来判定异步电动机的功率因数、堵转电流、堵转转矩、最大转矩

及效率等性能指标水平。

对于修理后的电机试验，其试验项目和考核方法一般和电机生产时的检查试验基本相同。参考的标准有原电机附带的出厂试验数据和同规格电机的试验数据等。

本章将对有关电机试验的通用知识进行简要介绍，以便在实际工作中查阅，其中大部分也是本书中将要反复涉及的内容。

第二节 电机及电机试验常用术语及其定义

GB/T2900.25—1994《电工术语 旋转电机》规定了旋转电机常用术语及其定义。与电机试验有关的部分见表 1-1。除此之外，本书中还将涉及到其他的术语和定义，届时将根据情况给出其内容。

表 1-1 电动机及电动机试验常用术语及其定义

序号	名 称	内 容
1	额定值	通常由制造厂对电机在规定运行条件下所指定的一个量值
2	定额	一组额定值和运行条件
3	额定输出	定额中的输出值
4	负载	在给定时刻，通过机械装置施加于电机的全部机械量的数值
5	空载（运行）	电机处于零功率输出的旋转状态（其他均为正常运行状态）
6	满载；满载值	电机以其额定运行时的负载；电机满载运行时的负载
7	停机和断能	电机处于既无运动，又无电能输入时的状态
8	工作制	电机所承受的一系列负载状况的说明，包括起动、电制动、空载、停机和断能及其持续时间和先后顺序等
9	工作制类型	工作制可分为连续、短时、周期性或非周期性几种类型。周期性工作制包括一种或多种规定了持续时间的恒定负载；非周期性工作制中的负载和转速通常在允许的范围内变化
10	负载持续率	工作周期中的负载（包括起动和电制动在内）持续时间与整个周期时间之比，以百分数表示
11	堵转电流	电动机在额定频率、额定电压和转子在所有角度位置堵住时，从供电线路输入的最大稳态电流有效值
12	堵转转矩	电动机在额定频率、额定电压和转子在所有角度位置堵住时，所产生的转矩最小测得值
13	起动过程中的最小转矩（简称为最小转矩）	电动机在额定频率和额定电压下，在零转速与对应于最大转速之间所产生的稳态异步转矩的最小值。本定义不适用于转矩随转速增加而连续下降的异步电动机 ^①
14	最大转矩	电动机在额定频率和额定电压下，所产生的无转速突降的稳态异步转矩最大值。本定义不适用于转矩随转速增加而连续下降的异步电动机
15	冷却	一种热量传递过程。电机中因损耗而形成的热量被传递给初级冷却介质，该介质可以连续地被更换或在冷却器中被次级冷却介质所冷却

续表

序号	名称	内容
16	冷却介质	传递热量的气体或液体介质
17	实际冷状态	电机每一部件的温度与冷却介质温度之差 $\leq 2\text{K}$ 时的状态
18	热稳定	电机的发热元件的温度在 1h 内的变化不超过 2K 时, 称该电机达到了热稳定
19	实际平衡的电压系统	在多相电压系统中, 如电压的负序分量不超过正序分量的 1% (长期运行) 或 1.5% (不超过几分钟的短时运行), 且电压的零序分量不超过正序分量的 1%, 即称为实际平衡的电压系统
20	实际对称回路	由平衡电压供电的回路中, 如电流负序分量和零序分量均不超过正序分量的 5%, 即称该电气回路为实际对称回路
21	实际正弦波形	正弦性畸变率不超过 5% 的波形
22	实际无畸变回路	当用正弦波电压供电时, 电流的正弦性畸变率不超过 5% 的电气回路
23	电压 (电流) 波形正弦性畸变率	电压 (电流) 波形中, 不包括基波在内的所有各次谐波有效值平方和的平方根占该波形基波有效值的百分数
24	电压谐波电压因数 HVF	正弦波交流电各次谐波电压标么值 U_n (以额定电压 U_N 为基值) 的平方与本次谐波次数 n (对三相电动机不包括 3 和 3 的倍数, 通常取到 13 就足够了) 之商的和的平方根

- ① 在某些特定的转速下, 除了稳态异步转矩外, 还会产生与转子功角成函数关系的谐波同步转矩。在这些转速下, 对应于某些转子功角的加速转矩可能为负值。经验和计算表明, 这是一种不稳定的运行状态, 谐波同步转矩不会妨碍电动机的加速, 可从本定义中排除。

第三节 电机的工作制与定额

电机的工作制是指电机在运行时承受负荷的情况，包括启动、电制动、空载、断能停转，以及这些阶段的持续时间和先后顺序。

GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》中规定了旋转电机的 10 种工作制，分别用 S1 ~ S10 表示。其中 S1 为连续工作制；S2 为短时工作制；S3 ~ S8 为各种周期工作制；S9 为非周期变化工作制；S10 为离散恒定负载工作制。在产品试验时，如果没有特殊要求，S2 工作制的运行时间为 10、30、60min 或 90min；S3 ~ S8 工作制的 1 个周期时间定为 10min，负载持续率可为 15%、25%、40% 或 60%。这 10 种工作制的内容见表 1-2。

表 1-2 电机工作制分类及各工作制的内容

代码	名称	电机运行状态
S1	连续工作制	保持在恒定负载下运行至热稳定状态
S2	短时工作制	在恒定负载下按给定的加载时间运行，电机在该时间内不足以达到热稳定，随之停机和断能，停机时间足以使电机冷却到与冷却介质温度之差在 2K 以内 标注示例：S2 60min
S3	断续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段停机并断能时间 标注示例：S3 25%
S4	包括起动的断续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段对温升有显著影响的起动时间、一段恒定负载运行时间和一段停机和断能时间 标注示例：S4 25% $J_M = 0.15\text{kgm}^2$, $J_{ex} = 0.7\text{kgm}^2$ (J_M 和 J_{ex} 分别为电机和负载的转动惯量)
S5	包括启动和电制动的周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间、一段电制动时间和一段停机并断能时间 标注示例：S5 25% $J_M = 0.15\text{kgm}^2$, $J_{ex} = 0.7\text{kgm}^2$
S6	连续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段空载运行时间，无停机和断能时间。标注示例：S6 25%
S7	包括电制动的连续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间和一段电制动时间，无停机和断能时间 标注示例：S7 $J_M = 0.15\text{kgm}^2$, $J_{ex} = 0.7\text{kgm}^2$
S8	包括变速变负载的连续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段按预定转速运行的恒定负载时间和一段或几段按其他转速运行的其他恒定负载时间（如变极多速电动机），无停机和断能时间 标注示例：S8 $J_M = 0.15\text{kgm}^2$, $J_{ex} = 0.7\text{kgm}^2$ 16kW 740r/min 30% ; 40kW 1460r/min 30% ; 25kW 980r/min 40%

续表

代码	名称	电机运行状态
S9	负载和转速非周期性变化的工作制	负载和转速在允许的范围内作非周期性变化的工作制。这种工作制包括经常性过载
S10	离散恒定工作制	包括不多于4种离散负载值（或等效负载）的工作制。每一种负载的运行时间应足以使电机达到热稳定。在一个工作周期中的最小负载值可为零（空载或停机断能）

S1 ~ S8 工作制的输入电能-时间周期关系见图 1-1，其中负值表示输出电能，即电机处于发电状态。

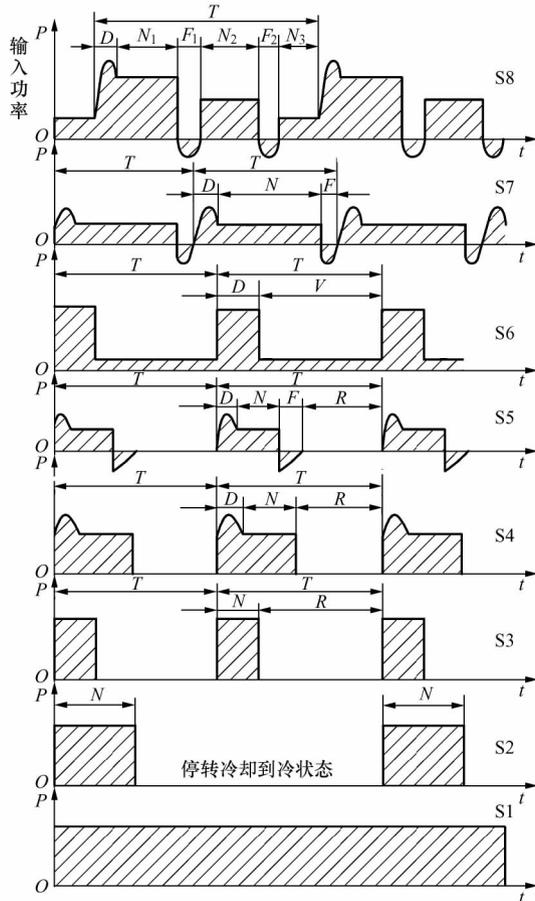


图 1-1 电机 S1 ~ S8 工作制输入电能-时间周期关系图

D—起动；N—运行；R—停转；V—空转；F—电制动

第四节 电机的安装方式及其代号

电机生产厂根据用户所用设备对电机安装方式的需要，将电机机座制成各种型式。GB/T 997—2003《旋转电机结构及安装型式》规定了各种电机结构及安装型式的代号。下面介绍其中常用部分。

常用的电动机安装型式代号由三部分组成。

(1) 第一部分为代号“IM”。是国际通用安装方式的代号，又称为IM代码。

(2) 第二部分是一个字母B或V。其中：B表示电机在使用时为卧式安装，即其轴线为水平方向；V表示电机在使用时为立式安装，即其轴线与水平方向垂直。

(3) 第三部分紧跟在第二部分之后，用1~2个阿拉伯数字组成。现将其中最常用的几种列于表1-3和表1-4中。表图中画斜线的部位是安装基础构件。

表 1-3 第三部分由1~2个阿拉伯数字组成的常用卧式安装型式 (IM B) 图示和代号

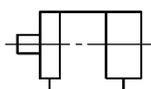
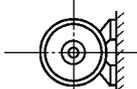
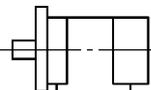
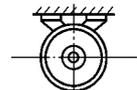
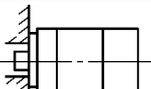
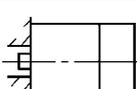
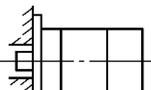
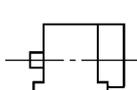
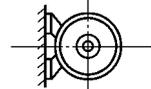
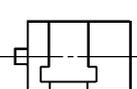
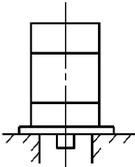
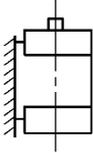
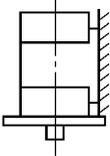
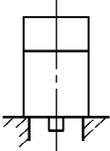
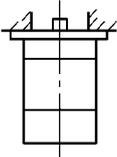
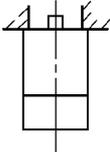
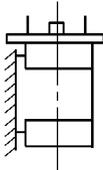
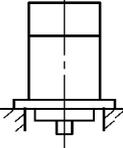
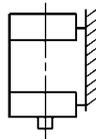
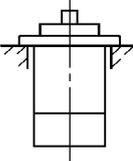
代号	图 示	说 明	代号	图 示	说 明
B3		用底脚安装在基础构件上	B7		用底脚安装在墙上。从D端看，底脚在右边
B35		借底脚安装在基础构件上，并附用凸缘端盖安装配套设备	B8		用底脚安装在天花板上
B34		借底脚安装在基础构件上，并附用凸缘平面安装配套设备	B9		D端无端盖，借D端的机座端面安装
B5		用凸缘端盖安装	B15		D端无端盖，用底脚主安装，D端机座端面辅安装
B6		用底脚安装在墙上。从D端看，底脚在左边	B20		有抬高的地脚，并用底脚安装在基础构件上

表 1-4

 第三部分由 1~2 个阿拉伯数字组成的
 常用立式安装型式 (IMV) 图示和代号

代号	图 示	说 明	代号	图 示	说 明
V1		用凸缘端盖安 装, D 端朝下	V6		用底脚安装 在墙上, D 端朝上
V15		用底脚安装 在墙上, 并用凸缘 作辅安装, D 端 朝下	V8		D 端无端盖, 借 D 端的机座端 面安装, D 端 朝下
V3		用凸缘端盖安 装, D 端朝上	V9		D 端无端盖, 借 D 端的机座端 面安装, D 端 朝上
V36		用底脚安装 在墙上, 并用凸缘 作辅安装, D 端 朝上	V10		机座上有凸缘, 并用其安装, D 端朝下
V5		用底脚安装 在墙上, D 端朝下	V16		机座上有凸缘, 并用其安装, D 端朝上

注 “D” 代表电机主轴伸, 是指电动机的传动端轴伸; 对于双轴伸电机, 指直径大的一端。
 对于双轴伸电机, 另一端用 N 表示。

第五节 电机的线端标志与旋转方向

GB 1971—2006《旋转电机 线端标志与旋转方向》（等同采用 IEC60034-8：2002《旋转电机-第8部分：线端标志与旋转方向》）对电机的线端标志与旋转方向作出了原则性的规定。下面介绍其中与本书有关的主要内容。

一、线端标志符号

电机中的绕组及有关电气元件的两个（或多个）线端均应给出特定的标志，以便于用户接线和识别。标志符号一般使用大写拉丁字母和阿拉伯数字组成，字母表示绕组和元件的类别（为了避免与数字1和0混淆，不使用字母“1”和“0”），数字用于表示同一绕组（或同一套绕组，如一相绕组）和元件的线端序号。表1-5给出了字母标志符号。

表 1-5 旋转电机线端标志符号

元件类别	元 件 名 称	线端标志符号	元件类别	元 件 名 称	线端标志符号
电源	供电导体	L	辅助 器件	交流制动器	BA
保护	保护接地端	PE		直流制动器	BD
交流 电机	定子绕组（第一相）	U		加热器	HE
	定子绕组（第二相）	V		电阻温度器	R
	定子绕组（第三相）	W		电容器	CA
	定子绕组的星点（中性导体）	N		浪涌电容器	SC
	转子绕组（第一相）	K		浪涌保护器	SP
	转子绕组（第二相）	L		开关（包逆流制动开关）	S
	转子绕组（第三相）	M		随温度升高而断开的热动开关	TB
	转子绕组的星点（中性导体）	Q		随温度升高而闭合的热动开关	TM
	单相电机的主绕组	U		热电偶	TC
	单相电机的辅绕组（起动绕组）	Z		负温度系数的热敏电阻	TN
				正温度系数的热敏电阻	TP

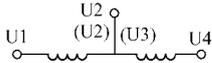
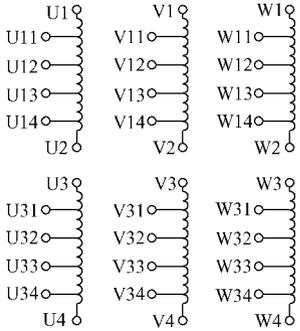
二、绕组线端标志的规则和示例

绕组线端标志的规则和示例见表 1-6。

表 1-6 绕组线端标志的规则和示例

分 类	说 明	图 例
复绕组线端	一台电机的几个引接线可以有相同的标志,但每个引接线具有完全相同的电气功能。可以连接任一相同标志的引接线	
共用线端	当用几根引接线或导体分流时,线端标志应由一个连字号分隔附加数字来表示	
	具有两套或多个独立绕组的一些多速电机,可能会在不接电的绕组内产生环流,在这种情况下,开路角接(以下用符号“Δ”表示角接)的线端标志应由一个连字号分隔附加数字后缀来表示	
省略	在不会发生混淆的条件下,数字前缀和/或后缀可以省略	
	当两个或以上元件接到同一线端时,则应标注一个标志,应优先标注后缀数字较小的标志	
	当两个或以上不同功能的元件内连接时,应视为一个整体元件,线端标志应标注包含元件基本功能的字母	
接地端	保护接地导体的线端应标注字母 PE	

续表

分 类	说 明	图 例
绕组单元	<p>每套绕组的两端标注不同的数字后缀，按照 GB/T 4026—1992《人机界面标志标识的基本方法和安全规则 设备端子和特定导体终端标识及字母数字系统的应用通则》的规定：</p> <p>第一套绕组标注 1、2 第二套绕组标注 3、4 第三套绕组标注 5、6 第四套绕组标注 7、8</p> <p>在所有的绕组中，与电源连接较近的绕组线端应标注较小的数字后缀</p>	
内连接	<p>当几套绕组元件的几个线端连接时，线端标志应标注数字较小的后缀</p>	
抽头	<p>绕组元件的抽头应按出现的顺序依次标注：</p> <p>第一套绕组标注 11、12、13 等 第二套绕组标注 31、32、33 等 第三套绕组标注 51、52、53 等 第四套绕组标注 71、72、73 等</p> <p>离绕组起头较近的抽头应标注较小的数字后缀</p>	

分 类	说 明	图 例
前 缀	<p>几套绕组是独立的 (或属于不同的电路), 但具有相似的功能, 这样的几套绕组应标注相同的字母、不同的数字前缀。每个线端应标注所在绕组 (或电路) 的相应数字前缀: 第一套绕组标注 1, 第二套绕组标注 2, 第三套绕组标注 3, ...</p> <p>对于多速电机来线端标志前缀的顺序与转速由小到大的排列相同</p>	
不同 类型 电机 的 绕 组 标 志	<p>三相电机的初级绕组线端标志应分别表示为 U、V、W, 有中性导体的表示为 N; 次级绕组线端标志应分别表示为 K、L、M、Q</p>	
两 相 电 机	<p>两相电机的线端标志由三相电机的线端标志演变而来, 省略字母 W 和 N</p>	

续表

分 类	说 明	图 例
不同 类型 电机 的 绕组 标志	单相电机的初级主绕组线端标志为 U，辅助绕组线端标志为 Z。如果一套主绕组和一套辅助绕组接到一个共用线端上，则该线端标志应根据主相的规则来标注	
	每一相组的线端标志加一前缀（按本表“前缀”的规定），前缀的数字顺序应按每相组的 U 相达到最大值的顺序而增大	

三、常用电机绕组接线图

常用异步电动机绕组接线图如图 1-2 ~ 图 1-10 所示。图中，L1、L2、L3 分别为三相交流电源的三个线端，“ Δ ”为三角形连接符号，“Y”为星形连接符号，双电压的电压比为低电压与高电压之比。

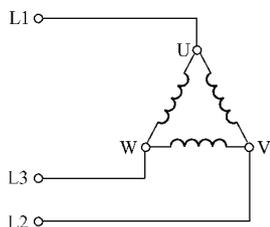


图 1-2 三相单速单电压电机定子三相 Δ 接绕组

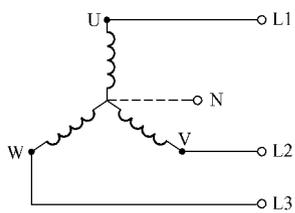


图 1-3 三相单速单电压电机定子三相 Y 接绕组（虚线和符 N 表示中性线）

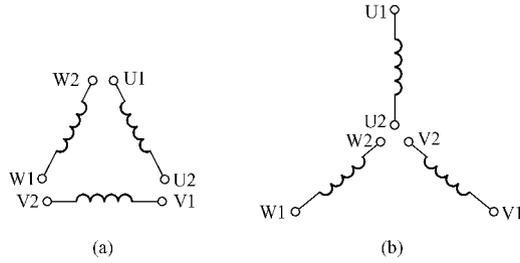


图 1-4 三相单速双电压 ($1/\sqrt{3}$) 电机定子三相绕组 (6 个出线端)
 (a) 低电压— Δ 接；(b) 高电压—Y 接

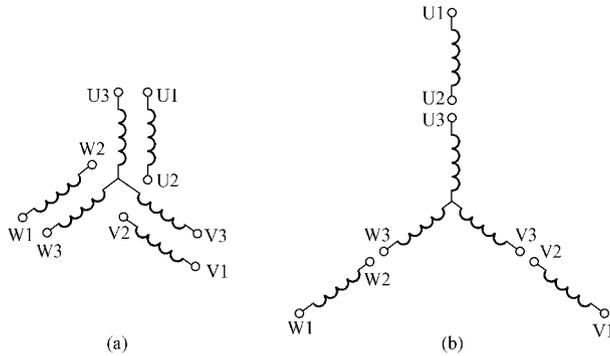


图 1-5 三相单速双电压 ($1/2$) 电机定子三相绕组 (9 个出线端, Y 接)
 (a) 低电压—并联 Y 接 (双 Y), 连接端子 U1-U3, V1-V3, W1-W3, U2-U3, V2-V3, W2-W3 ;
 (b) 高电压—串联 Y 接 (单 Y), 连接端子 U2-U3, V2-V3, W2-W3

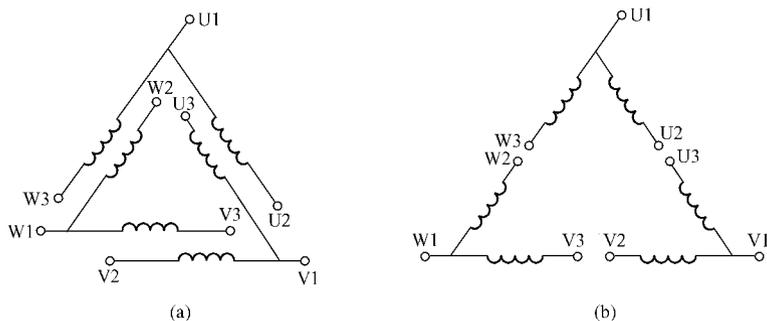


图 1-6 三相单速双电压 (1/2) 电机定子三相绕组 (9 个出线端, Δ 接)

(a) 低电压—并联 Δ 接 (双 Δ), 连接端子 U1-U3-W2, V1-V3-U2, W1-W3-V2;

(b) 高电压—串联 Δ 接 (单 Δ), 连接端子 U2-U3, V2-V3, W2-W3

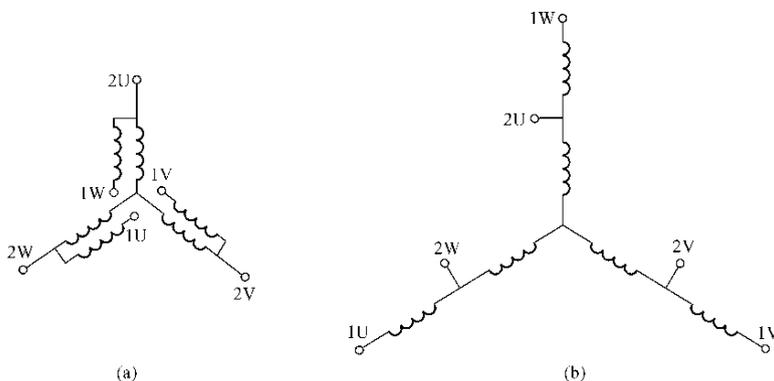


图 1-7 三相单绕组双速变转矩电机定子三相绕组 (6 个出线端, Y 接)

(a) 低速—串联 Y 接 (单 Y), 连接端子 L1-1U, L2-1V, L3-1W, 2U、2V、2W 悬空;

(b) 高速—并联 Y 接 (双 Y), 连接端子 L1-2U, L2-2V, L3-2W, 1U-1V-1W

四、旋转方向

如无特殊规定, 旋转方向应是面对电机 D 轴伸端观察轴时, 轴的旋转方向。D 端的定义见表 1-4 的注, 在必要时, 也可按专门规定。

对于本节介绍的接线方式, 在未加说明时, 其旋转方向应为顺时针。有必要时 (如与上述规定相反时), 应在电机的明显部位用箭头标注旋转方向。

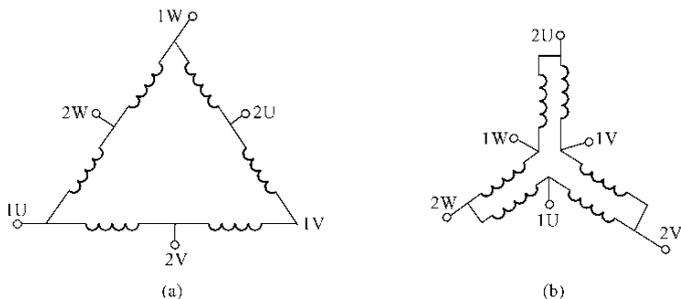


图 1-8 三相单绕组双速恒转矩电机定子三相绕组 (6 个出线端, Δ/Y 接)
 (a) 低速—串联 Δ 接(单 Δ) 连接端子 L1-1U L2-1V L3-1W 2U、2V、2W 悬空;
 (b) 高速—并联Y接(双Y) 连接端子 L1-2U L2-2V L3-2W 1U-1V-1W

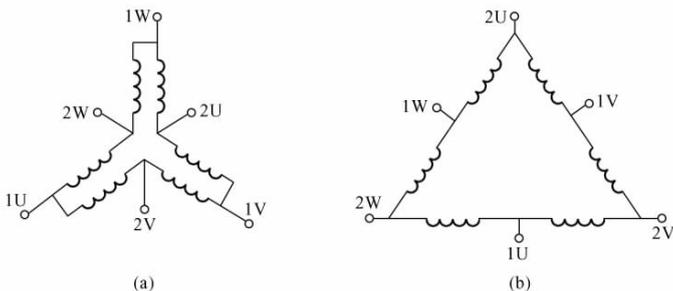
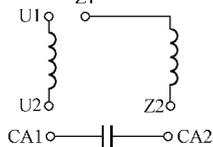


图 1-9 三相单绕组双速恒功率电机定子三相绕组 (6 个出线端, Y/ Δ 接)
 (a) 低速—并联Y接(双Y), 连接端子 L1-1U, L2-1V, L3-1W, 2U-2V-2W;
 (b) 高速—串联 Δ 接(单 Δ), 连接端子 L1-2U, L2-2V, L3-2W, 1U、1V、1W 悬空



注 顺时针方向旋转, 连接端子 L-U1, N-U2, U1-Z1, U2-CA1, CA2-Z2;
 逆时针方向旋转, 连接端子 L-U1, N-U2, U2-Z1, U1-CA1, CA2-Z2

图 1-10 单相单速电机定子绕组和电容器 (6 个出线端)

第六节 旋转电机外壳防护分级 (IP 代码)

GB 4942.1—2006《旋转电机整体结构的防护等级 (IP 代码) 分级》中规定了旋转电机外壳防护分级 (IP 代码) 的具体内容。下面介绍其中的主

要部分。

一、表示方法

1. 一般用途电机的表示方法

外壳防护等级由“IP”两个字母加两位表征数字组成，如IP23、IP54等。“IP”是国际通用的“防护等级”代码；第一位表征数字代表防固体的等级，由0到6，共7个等级；第二位表征数字代表防液体（无特殊说明时即指水）的等级，由0到8，共9个等级。

2. 有特殊用途电机的表示方法

对有特殊用途的电机，当需要增加防护内容时，可在上述数字后，用规定的字母来表示补充的防护内容。

例如，安装在船舶甲板上的开路冷却电机，在停机时进出风口都是关闭的。对此，可用字母S表示为防止进水而引起有害影响的试验是在电机静止状态下进行的，若试验是在电机运转状态下进行的，则用字母M。对适用于规定气候条件且具有附加防护特点或措施的开启式空气冷却电机，可用字母W来表示。

二、第一位表征数字（防固体等级）的内容

第一位表征数字表示电机外壳对人和机内部件的防护等级。表1-7给出了具体的防护内容。所用术语“防止”表示能防止部分人体、手持的工具或导线进入外壳，即使进入，亦能与带电或危险的转动部件（光滑的旋转轴和类似部件除外）之间保持足够的间隙。表中所写内容是以可防止的最小固体异物尺寸加以表述的。

表 1-7 第一位表征数字（防固体等级）表示的防护等级内容

等级 代码	防 护 内 容	
	详 细 含 义	简 述 含 义
0	无专门防护	无防护电机
1	能防止大面积的人体（如手）偶然或意外地触及或接近壳内带电或转动部件（但不能防止故意接触）； 能防止直径>50mm的固体异物进入壳内	防护大于>50mm固体的电机

续表

等级 代码	防 护 内 容	
	详 细 含 义	简 述 含 义
2	能防止手指或长度 $\leq 80\text{mm}$ 的类似物体触及或接近壳内带电或转动部件； 能防止直径 $> 12\text{mm}$ 的固体异物进入壳内	防护大于 12mm 固体的电机
3	能防止直径 $> 2.5\text{mm}$ 的工具或导线触及或接近壳内带电或转动部件； 能防止直径 $> 2.5\text{mm}$ 的固体异物进入壳内	防护大于 2.5mm 固体的电机
4	能防止直径或厚度 $> 1\text{mm}$ 的导线或片条触及或接近壳内带电或转动部件； 能防止直径 $> 1\text{mm}$ 的固体异物进入壳内	防护大于 1mm 固体的电机
5	能防止触及或接近壳内带电或转动部件； 虽不能完全防止灰尘进入，但进尘量不足以影响电机的正常运行	防尘电机
6	能完全防止尘埃进入	尘密电机

表 1-7 中“简述含义”一栏不作为防护型式的规定；表征数字代码 1~4 的电机所能防止的固体异物，系包括形状规则或不规则的物体，其三个相互垂直的尺寸均不超过所规定的数值；第 5 级防尘是一般的防尘，当尘的颗粒大小、属性如纤维状或粒状已作规定时，试验条件应由制造厂和用户协商确定；第 6 级防尘是严密的防尘。

对外风扇罩防护能力的规定是：当电机为 IP1X 时，应达到 1 级防固体的能力；当电机为 IP2X 及以上时，应达到 2 级防固体的能力。

三、第二位表征数字（防液体等级）的内容

第二位表征数字表示防液体（一般指水）的能力等级。其具体含义见表 1-8。

表 1-8 第二位表征数字（防液体等级）表示的防护等级内容

等级 代码	防 护 内 容	
	详 细 含 义	简 述 含 义
0	无专门防护	无防护电机
1	垂直滴水应无有害影响	防滴水电机
2	当电机从正常位置向任何方向倾斜至 15° 以内任意一角度时，垂直滴水应无有害影响	15° 防滴水电机
3	与铅垂线成 60° 角范围内的淋水应无有害影响	防淋水电机
4	承受任何方向的溅水应无有害影响	防溅水电机

续表

等级 代码	防 护 内 容	
	详 细 含 义	简 述 含 义
5	承受任何方向的喷水应无有害影响	防喷水电机
6	承受猛烈的海浪冲击或强烈喷水时，电机的进水量应不达到有害的程度	防海浪电机
7	当电机浸入到规定压力的水中经规定时间后，电机的进水量应不达到有害的程度	防浸水电机
8	电机在制造厂规定的条件下能够长期潜水，电机一般为水密型，但对某些类型电机也可允许水进入，但应不达到有害的程度	持续潜水电机

第七节 电机的冷却方式及其代码

GB/T 1993—1993《旋转电机冷却方法》规定了有关旋转电机冷却的名词术语、代号及相关内容。现简要介绍其中的主要部分。

一、旋转电机冷却方式的表示方法

旋转电机冷却方式最多用 6 部分进行表述。对于常用的中小型电机，一般没有次级冷却介质，所以只有前 4 部分。另外，若冷却介质是空气（用字母 A 表示），则其介质代号（A）可省略。省略若干代号后的标记称为简化标记，应优先使用简化标记。

（1）第一部分为 IC 两个字母。是国际通用的冷却方法代码，称为标志字母或 IC 代码。

（2）第二部分为一个数字。是冷却回路的布置代号，其表示的内容见表 1-9。

（3）第三部分为一个字母。是初级冷却介质的代号，其表示的内容见表 1-10。

（4）第四部分为一个数字。是初级冷却介质运动推动方式的代号，其表示的内容见表 1-11。

表 1-9 冷却回路的布置代号及其内容

代号	简要说明	详细内容
0	自由循环	冷却介质从周围介质直接地自由吸收，然后直接地返回到周围介质（开路）
1	进口管或进口通道循环	冷却介质通过进口管或进口通道从电机的远方介质中吸入电机，经过电机后，直接返回到周围介质（开路）
2	出口管或出口通道循环	冷却介质直接从周围介质吸入，经过电机后，通过出口管或通道回到远离电机的远方介质（开路）
3	进出管或进出通道循环	冷却介质通过进口管或通道从远方介质吸入，流经电机后，通过出口管或通道回到远方介质（开路）
4	机壳表面冷却	初级冷却介质在电机内的闭合回路内循环，并通过机壳表面把热量（包括经定子铁心和其他热传导部件传到机壳表面的热量）传递到最终冷却介质，即周围环境介质。机壳外部表面可以是光滑的或带肋的，也可以带外罩以改善热传递效果
5	内装式冷却器（用周围环境介质）	初级冷却介质在闭合回路内循环，并通过与电机成为一体的内装式冷却器，把热量传给最终冷却介质，后者为周围环境介质
6	外装式冷却器（用周围环境介质）	初级冷却介质在闭合回路内循环，并通过直接安装在电机上的外装式冷却器，把热量传递给最终冷却介质，后者为周围环境介质
7	内装式冷却器（用远方介质）	初级冷却介质在闭合回路内循环，并通过与电机成为一体的内装式冷却器把热量传递给次级冷却介质，后者为远方介质

表 1-10 冷却介质代号

冷却介质	空气	氢气	氮气	二氧化碳	氟利昂	水	油
代 号	A	H	N	C	F	W	U

表 1-11 介质推动代号表示的内容

代号	简要说明	详细内 容
0	自由对流	依靠温度差促使冷却介质运动（转子的风扇作用可忽略不计）
1	自由循环	冷却介质运动与电机转速有关，或因转子本身的作用，或为此目的专门设计，并安装在转子上的部件使介质运动，或是由转子拖动的整体风扇或泵的作用促使介质运动
5	内装式独立部件	由整体部件驱动介质运动，该部件所需动力与主机转速无关，如自带驱动电动机的风扇或泵
6	外装式独立部件	由安装在电机上的独立部件驱动介质运动，该部件所需动力与主机转速无关，如自带驱动电动机的风扇或泵
7	分装式独立部件 或冷却介质压力	与电机分开安装的电气或机械部件驱动冷却介质运动，或者是依靠冷却介质循环系统中的压力驱动冷却介质运动，如有压力的给水系统或供气系统
8	相对运动	冷却介质运动起因于它与电机之间有相对运动，或者是电机在介质中运动，或者是周围介质流过电机
9	其他部件	冷却介质由上述方法以外的其他方法驱动，应予以详细说明

注 2、3、4 三个数字备用。

二、常见电机冷却方法举例

常见电机冷却方法举例见表 1-12。

表 1-12 常见电机冷却方法举例

电机系列名称	冷却方法简述	完整标记	简化标记
Y 系列电动机	内外风扇，自扇风式	IC 4A1A1	IC 411
JS2 及 JR2 系列电动机	内风扇，自扇风式	IC 0A1A1	IC 011
Z4 系列直流电动机	外吹风强制冷却	IC 0A6A6	IC 066
带独立风机的变频电动机	外吹风强制冷却	IC 4A1A6	IC 416
无外风扇轧钢机用电动机	靠外壳的热辐射散热	IC 4A0A0	IC 400
水内冷发电机	强制水内冷	IC 7W7A7	IC 7W77
电瓶车主电动机	运行自然风冷	IC 4A8A8	IC 488

第八节 电机试验计算和最终结果的 数值修约（取位）规则

在各类电机的技术条件中，在给出有关性能数据考核标准的同时，应给出该性能数据最终计算结果的修约间隔及有效位数的规定。

电机试验中直接取得的各种量值会因电机大小、型式、计量单位的不同等原因而大小不等，甚至相差甚大。但由于考核和比较等方面的需要，很多范围较大的值被化为“标么值”的型式，从而规范到一个大体相同的数位范围内。这给统一使用修约间隔和有效位数提供了可行的条件。

电机试验计算时，一般采用确定修约间隔和有效位数两种方法，而较少用到 0.5 单位修约和 0.2 单位修约。

有关数值修约的具体方法和规定请参考国家标准 GB/T 8170—1987《数值修约规则》。

一、电机试验最终结果的修约规则

对于电机试验最终结果中用于参与考核的数据，应在该类电机的技术条件中作出规定。表 1-13 是 Y2 和 Y3 系列三相异步电动机技术条件中的有关规定。其他系列电机可参考使用。

表 1-13 Y2 和 Y3 系列三相异步电动机考核指标数值修约规定

序号	数值名称	符号	单位	修约规定	示例
1	各部位温升	$\Delta\theta$	K	修约间隔为 1	65, 77
2	堵转电流倍数	I_{KN}^*	倍	修约间隔为 0.01	6.53, 7.26
3	堵转转矩倍数	T_{KN}^*	倍		2.85, 2.31
4	最大转矩倍数	T_{max}^*	倍		3.10, 2.98
5	最小转矩倍数	T_{min}^*	倍		1.92, 1.36
6	效率	η	%	取 4 位有效位数	85.50, 92.73
7	功率因数	$\cos\varphi$	—	取 3 位有效位数	0.888, 0.861
8	噪声（声功率级）	L_w	dB (A)	修约间隔为 0.5	78.5, 79.0
9	振动（速度有效值）	v	mm/s	对 N 级修约间隔为 0.1	1.3, 1.6, 2.0
				对 R 和 S 级为 0.01	1.12, 0.56

有些标准中（特别是 1981 年以前的标准）没有明确作出修约规定，则可按表 1-13 的规定进行，或者按常规作法进行，即按技术条件中所给标准限值的位数作为修约间隔或有效位数，一般数值的修约间隔定为 10^n （ n 为

整数)。例如，某标准中给定堵转电流倍数的最低限值为 7.0，则试验结果应修约到 0.1，当给定的效率标准为 85.10% 时，效率的试验结果应取 4 位有效数位等。

二、电机试验计算过程中的数值修约规则

按常规，在求取最终结果的计算过程中，每个过程的结果都应按最终结果数值修约位数再向右推一位的方法进行修约。对于采用计算机或计算器进行连续运算的，为了简化程序和操作，建议只对最终结果按本节上述第一项的规定进行修约（有明确规定的除外）。

第九节 电机性能指标考核标准容差的一般性规定

一、保证值和容差的定义

通常，我们将电机技术条件中规定的性能指标考核标准数值称为保证值或者标准值。

“容差”是考虑到由于原材料性能在正常范围内的波动和不一致、加工的偏差及测量的误差等不可避免的因素对被试电机本身性能和实测值的影响，而给出的相对上述保证值的允许偏差范围，一般以百分数计。

在电机行业中，考核某项性能指标时，常提到“吃容差”这一说法。所谓“吃容差”，是指实测值不符合该项指标保证值的要求，但相差的数值还未超出允许容差范围时的情况。

例如，某规格电机的堵转电流倍数保证值为 ≤ 7.0 倍，容差为 $+20\%$ ，即容差值为 $+(7.0 \times 0.2) = +1.4$ 倍，考虑到容差后的标准范围为 $7.0 + 1.4 = 8.4$ 倍，也就是说，堵转电流倍数实测值不超过 8.4 即为合格，但在 $>7.0 \sim 8.4$ 之间为“吃容差”。设某电机该项指标实测值为 7.7 倍，即超出保证值 0.7 ，该值占容差值 1.4 的 50% ，则通常就说该项试验值“吃容差 50% ”。

二、国家标准中对电机性能指标容差的规定

GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》中规定了各类电机考核指标的容差(%)，有关交流异步电动机的内容见表1-14。使用时，除特殊情况外，不应超过表1-14中规定值，但在制定企业内控标准时，可以减小容差范围，即制定加严的考核标准。表1-14中的 η 和 $\cos\varphi$ 分别为效率和功率因数标准保证值， P_N 为电动机的额定功率。

表 1-14 交流异步电动机性能考核指标容差

指 标 名 称		容 差
效率 η	损耗分析法	$P_N \leq 50\text{kW}$ 时，为 $-15\% (1 - \eta)$ ； $P_N > 50\text{kW}$ 时，为 $-10\% (1 - \eta)$
	输入输出法	$-15\% (1 - \eta)$
总损耗（适用于 $P_N \geq 50\text{kW}$ 的电机）		总损耗的 -10%
功率因数 $\cos\varphi$		$-(1 - \cos\varphi) / 6$ ，但最小应不少于 -0.02 ，最大不多于 -0.07

续表

指 标 名 称	容 差
转差率（在满载和工作温度下）	$P_N < 1\text{kW}$ 时，为保证值的 $\pm 20\%$ ； $P_N \geq 1\text{kW}$ 时，为保证值的 $\pm 30\%$
堵转电流	保证值的 $+ 20\%$
堵转转矩	保证值的 $- 15\%$ 和 $+ 25\%$ （经协议可超过 $+ 25\%$ ）
最小转矩	保证值的 $- 15\%$
最大转矩	保证值的 $- 10\%$ ，但计及容差后，转矩值应不小于额定转矩的 1.6 倍或 1.5 倍（由技术条件规定）
转动惯量	保证值的 $+ 10\%$

- 注（1）仅沿一个方向标明容差时，沿另一个方向该值不规定容差。
- （2）毋需对本表中每一项或任一项规定保证值，凡保证值有容差的，应予说明，容差应按本表规定。
- （3）应注意术语“保证”一词的不同含义。保证值与典型值或样本值有区别。

第一节 电动机试验用交流电源设备

一、对试验用交流电源的质量要求

为保证试验结果的真实可靠，试验用电源应达到一定的质量要求。对正弦三相交流电源，要求的主要指标有三个：第一个是电压正弦性畸变率或谐波电压因数；第二个是频率的偏差；第三个是三相电源的三相对称性。

(一) 对电压正弦性畸变率的要求

1. 电压正弦性畸变率的定义和求取方法

电压正弦性畸变率是表述电压波形脱离正弦波程度大小的一个正弦交流电质量参数。当电压波形不是严格的正弦波时，可以通过一定的方法将其分解成一个和原频率相同的正弦波（称为“基波”）和若干个高于原频率的正弦波（统称为“高次谐波”或简称“谐波”）。反过来也可认为，那个不严格的正弦波是由这一“基波”和这些“谐波”合成而得到的。

用 U_1 代表上述基波电压的有效值， U_2 、 U_3 、 U_4 、...、 U_n 分别代表各次谐波（对三相电源不包括 3 和 3 的倍数。因为较高次的谐波数值较小，对计算结果的影响也相对较小，所以如采用计算法，通常 n 最大取到 13 就足够了）电压的有效值。电压正弦性畸变率 K_U 可用下式表示：

$$K_U = \frac{1}{U_1} \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2} \times 100\% \quad (2-1)$$

电压正弦性畸变率可利用仪器测量出基波和各次谐波的数值后用式（2-1）求得，也可将实际的电压波形摄录下来后，利用分割计算的方法求得，但这些方法都因较复杂而在一般企业难以推广。现在较实用的是用谐波分析仪直接测得畸变率数值，目前很多数字电量仪表都附带了此项功能，使原本较难的一项测量工作变得相当简单。

2. 对电压正弦性畸变率的要求

异步电动机在进行发热试验时，所用交流电源的电压正弦性畸变率不应超过 2.5%，其他试验时不应超过 5%。

(二) 对谐波电压因数的要求

1. 谐波电压因数的定义和求取方法

正弦交流电的谐波电压因数又称为 HMF 值，它的含义与电压正弦性畸变率基本相同，不同之处只在于提法和计算过程。它是 1990 年以后我国根据国际标准对交流电源的新要求开始提出来的，并在 GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》第 6.2.1.1 条中提出。GB/T 1032—2005《三相异步电动

机试验方法》采用了此考核方法。

正弦交流电的谐波电压因数（HVF 值）用下式表示：

$$\text{HVF} = \sqrt{\sum \frac{U_n^2}{n}} \quad (2-2)$$

式 (2-2) 中的 U_n 为以额定电压 U_N 为基值的谐波电压标么值， n 为谐波次数，对三相电源不包括 3 和 3 的倍数，通常取 $n \leq 13$ 就已足够。

谐波电压因数的求取方法和电压正弦性畸变率的求取方法基本相同。

2. 对谐波电压因数的要求

对于异步电动机试验的正弦交流电源的谐波电压因数（HVF 值），在发热试验时应不大于 0.015，其他试验时，对 N 设计的电机应不大于 0.03，对非 N 设计的电机应不大于 0.02。

“N 设计的电机”的定义是在 JB/T 8158—1999《电压为 690V 及以下单速笼型感应电动机的起动性能》中的第 3 项提出的，是指设计为正常转矩的三相笼型感应电动机，电动机可采用直接起动，具有 2、4、6 或 8 极，额定功率从大于 0.4kW 至 630kW，频率为 50Hz 或 60Hz。

（三）对静止变流电源电压畸变的要求

现常见的静止变流电源是交流变频电源。因其工作原理决定了它的输出电压波形远非正弦波，也就是说有较多较大的谐波存在。对它的要求，目前还没有明确的规定，有必要时，可在供需双方的协议中规定。

（四）对频率的偏差和稳定性的要求

在 GB/T 1032—2005 中，对试验用交流电源频率的偏差和稳定性作出了如下规定：

1. 对频率偏差的要求

试验电源的频率与被试电机额定频率之差应不超过被试电机额定频率的 $\pm 0.3\%$ 。

2. 对频率稳定性的要求

试验期间不允许频率发生快速变化，因为频率快速变化不仅会影响被试电机的工作状态，而且还会影响到测量装置的准确度。测量期间频率的变化量应不超过平均值的 $\pm 0.1\%$ 。

上述两项规定，对于使用电网电源的试验线路是不必担心的。

（五）当电压和频率同时出现偏差时的要求

对电压和频率同时出现偏差时的偏差允许值，在交流电机的试验方法标准中没有具体规定。但在 GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》第 6.3

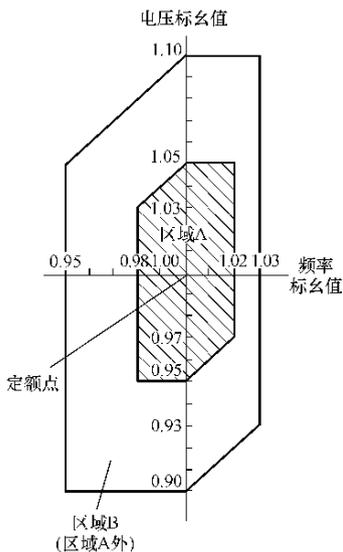


图 2-1 电压和频率同时发生偏差时的允许区域（限值）

条中提出了当电压和频率均出现偏差时，电压及频率的偏差允许值的规定：对于由交流发电机供电（无论是地区供电还是经电网供电），且频率为固定的电源上的交流电机，电压和频率的综合变化分为 A 和 B 两个区，见图 2-1。电机应能在区域 A 内连续运行，并能实现规定的基本功能（主要是输出额定转矩），但其性能不必与额定电压和频率时的性能完全相符，可能呈现某些差异，温升可较额定电压和频率时高。电机应能在区域 B 内运行，并能实现其基本功能，但其性能与额定电压和频率时的差异将大于在区域 A 内运行的电机，温升可较额定电压和频率时高，并很可能高于区域 A。不推荐在区域 B 的边界上持续运行。

上述规定是针对电机实际运行而言的，即不是对试验电源的要求，但可供参考。具体要求可在技术条件、协议等文件中规定。

（六）对三相电源对称性的要求

三相交流电源的三相不对称表现在两个方面：第一个是相角的不对称；第二个是三相电压幅值的不对称。对于电网供电的电源，相角不对称的程度很小，是可以忽略的。

由于三相电源设备不符合要求或三相负载的不对称，很可能造成三相电压幅值的不对称，这一点在试验电源与生产和生活电源混用的单位尤其明显。三相电源电压的不对称量用“不对称量分析法”得出的正序分量、负序分量和零序分量之比的百分数来表述。在 GB/T 1032—2005《三相异步电动机试验方法》中规定：电源电压的负序分

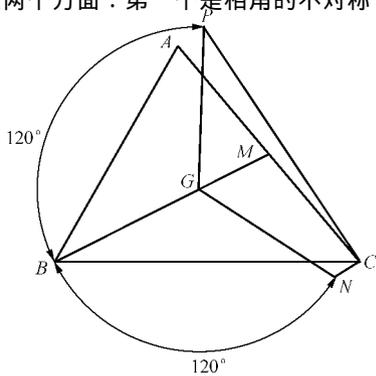


图 2-2 作图法求取三相三线制供电系统不对称三相电压的正序分量和负序分量

量不应超过正序分量的 0.5%；零序分量应予消除（在三相三线制供电系统中不会出现零序分量）。

三相电源电压的正序、负序和零序分量值可通过数学分析得到，也可用专用仪器直接测出。对于三相三线制供电系统，可用制图法求得正序和负序分量。具体作图和求取步骤如下（见图 2-2）：

(1) 测取三相线电压值。用这三个数值为三条边长作 $\triangle ABC$ 。

(2) 在 \overline{AC} 上取中点 M ，连接 \overline{BM} ，取 $\overline{GM} = \frac{1}{3} \overline{BM}$ 。

(3) 以 \overline{GB} 为原边，向左作 $\angle NGB = 120^\circ$ ，向右作 $\angle PGB = 120^\circ$ ，取 $\overline{GP} = \overline{GB} = \overline{GN}$ ，连接 \overline{CP} 、 \overline{CN} ，则正序分量为 \overline{CP} ，负序分量为 \overline{CN} 。

由于负序分量一般占正序分量的 1% 左右，所以相比之下 \overline{CN} 很小。因此，作图精度非常重要，为此，一是尺寸要准确，二是在可能的情况下，尽量将图作大些。

二、三相感应调压器

(一) 三相感应调压器的结构和试验电动机匹配能力

在交流电机试验电源设备中，三相感应调压器是最常用也是必不可少的主要设备。在进行试验时，电机的三相交流电源一般直接来自它的输出端，所以，它的性能好坏将直接影响被试电机试验数据的准确性和精度。

两种油浸式三相感应调压器的外形结构见图 2-3。

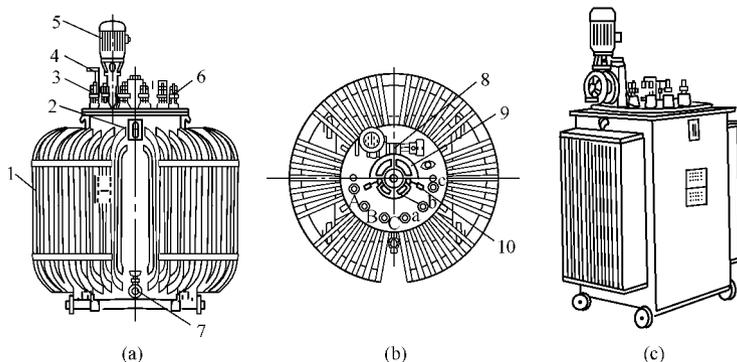


图 2-3 三相感应调压器的外形图和顶面机构布置图示例

(a) 外形图；(b) 顶面机构布置俯视图；(c) 节能型外形图

1—散热油管；2—油位（油温）；3—输入电源端子；4—手摇调压机构；5—调压伺服电动机；6—输出电源端子；7—放油阀；8—调压蜗杆（下面是高、低压端限位开关）；9—调压扇形齿轮；10—调压扇形齿轮与转子轴联结柱销

三相感应调压器的电路接线原理图和电压相量图见图 2-4。

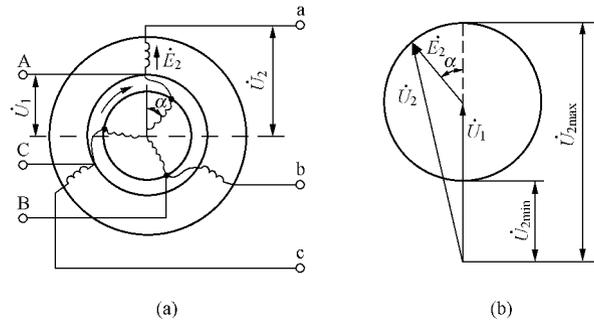


图 2-4 三相感应调压器的电路及工作原理图
(a) 接线原理图；(b) 电压相量图

表 2-1 是三相感应调压器用于低压三相异步电动机试验时的匹配能力。

表 2-1 低压 (380V/0 ~ 650V) 三相感应调压器的试验能力

三相感应调压器		被试三相异步电动机额定功率 (kW)	
额定容量 (kVA)	最大负载电流 (A)	发热试验及负载试验	满压堵转试验
100	90	40	15
160	142	63	18
200	178	90	25
250	222	110	30
400	355	160	50
630	560	250	75
1000	890	400	125

(二) 三相感应调压器的控制电路

一般情况下，试验用三相感应调压器都是在试验操作台上用按钮控制调压器上的调压用伺服电机进行调压。容量较大的调压器 (400kVA 及以上) 还在伺服电机上或调压器转子轴等部位装有电磁制动装置，用于防止调压时由于转子转动惯量所造成的转子来回摆动而使调压费时的问题。对于风冷的调压器，为了节省风冷电机的用电和减少噪声，可采用温度开关来自动控制起、停风机。图 2-5 ~ 图 2-8 为不同要求的三相感应调压器控制电路。

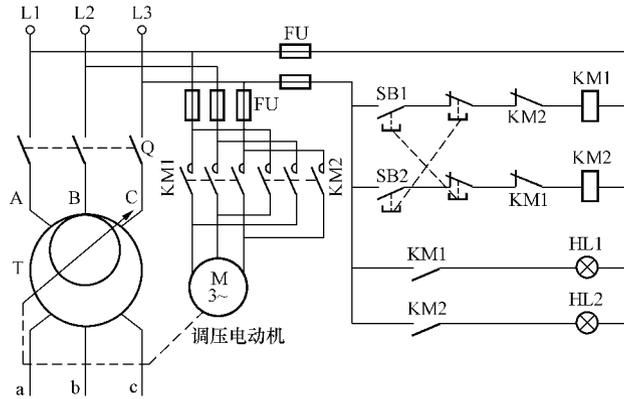


图 2-5 最简单的三相感应调压器控制电路

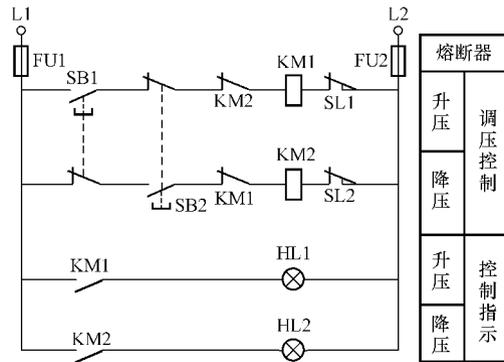
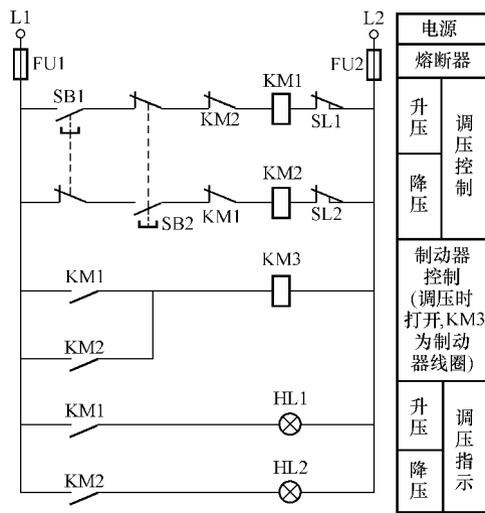


图 2-6 有升、降压限位开关的控制电路

SL1、SL2—限位开关

（三）三相感应调压器的常见故障及处理方法

由于三相感应调压器既具有三相绕线转子异步电动机的基本结构和工作原理，又有自耦变压器的工作原理，所以，它的很多故障现象及发生原因也和上述两种设备基本相同。三相感应调压器的特有故障在于其调压机构和有关转动部分。其常见故障和处理方法见表 2-2。



7 有升、降压限位开关和电磁制动器的控制电路

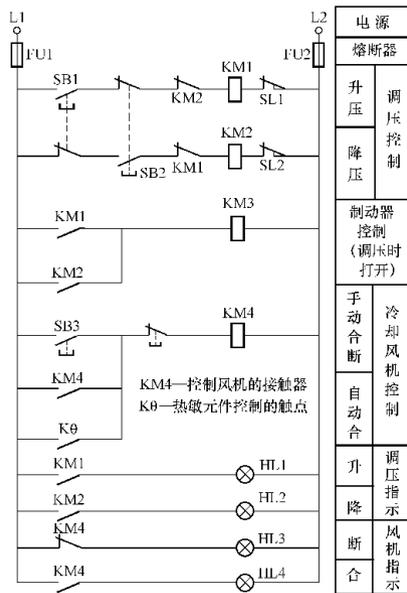


图 2-8 风冷调压器控制电路

SL1—升压限位开关 SL2—降压限位开关 KM4—控制风机的接触器 Kθ—热敏元件控制的触点

表 2-2 三相感应调压器常见故障和处理方法

故障现象	故障原因	处理方法
通电后有较大“嗡嗡”声	(1) 输入线有断相； (2) 转子绕组或定子绕组有严重的匝间短路，使输入电流较大	(1) 用测量电阻或电压的方法找出断相线，然后修理； (2) 用专用的绕组匝间测试仪测量对比或测量电阻、电压的方法找出有匝间短路相，然后拆出转子，找到短路点，更换部分或全部绕组
无输出电压	(1) 定、转子之间连线断开； (2) 转子调到输出电压等于零的位置后被卡住	(1) 打开调压器，找到断开点后重新接牢； (2) 检查出卡死的原因后修理
调压时，电压指示改变成与调压方向相反	未接限位开关〔结构见图 2-9 (b)〕或限位开关失灵或断线，转子在调压时转过了电压最大或最小位置〔旋转范围超过了 180° 电角度，如图 2-9 (a) 所示〕	将转子向相反的方向调整，回到正常调压区域后即能恢复正常。未接限位开关的，建议安装限位开关；限位开关失灵的，检查其接线和开关动作情况，根据具体情况进行修理或更换
不调压	(1) 蜗轮与转子轴脱离（当突然加大负载时，可能将联结销切断）如图 2-9 (c) 所示； (2) 转子转动过度，使蜗轮与蜗杆脱离啮合范围，如图 2-9 (d) 所示； (3) 调压机构与蜗杆脱离或伺服电机不工作	(1) 修理或更换联结部件，如联结键、销； (2) 用工具将转子转动，使蜗轮与蜗杆相啮合； (3) 修理调压机构或伺服电机（包括伺服电机的电源线和电源控制等部分）
三相输出电压不平衡	(1) 输出端子连接不牢或氧化； (2) 定、转子绕组之间连线松动； (3) 定、转子绕组有匝间短路； (4) 因轴承损坏，使定、转子之间的间隙严重不均匀	(1) 紧固联结端子或清除氧化部位； (2) 紧固松动部位； (3) 打开调压器，检查出短路点，更换绕组； (4) 更换轴承
电压调到一定高度后，调压器发出较大声响	(1) 定、转子绕组有较轻的匝间或相间短路； (2) 绕组与铁心或机壳之间绝缘有损伤，产生漏电电流 (3) 绝缘油变质或进水	(1) 拆开检查并修理； (2) 拆开检查并修理； (3) 处理或更换绝缘油

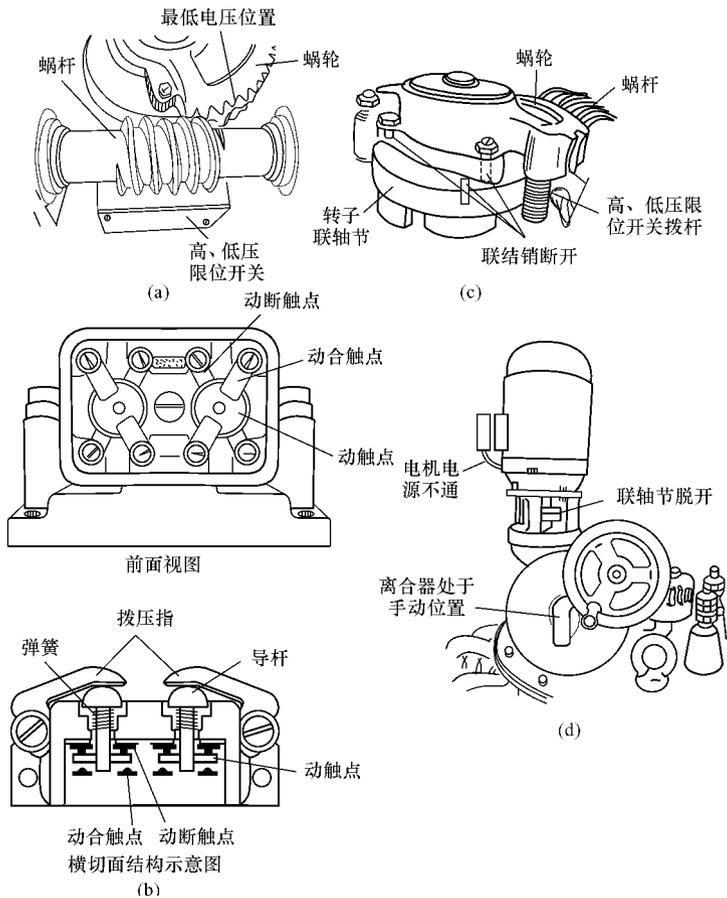


图 2-9 三相感应调压器的部分常见故障及处理方法

- (a) 蜗轮与蜗杆的啮合超过了正常范围；(b) 高、低压限位开关的结构；
(c) 联结销断裂造成蜗轮与脱节；(d) 调节装置故障造成不调压

三、接触式自耦调压器

接触式自耦调压器简称自耦调压器。在电动机试验中主要用于 10kW 以下交流电机的可调压电源和供整流用的可调电源，有单相和三相之分，但三相是三个单的组合。

接触式自耦调压器的一、二次绕组实际上是一套绕组。采用滑块（电刷）在绕组上滑动来改变二次绕组匝数，从而达到调节输出电压的目的。

单相接触式自耦调压器和三相接触式自耦调压器的外形图见图 2-10。

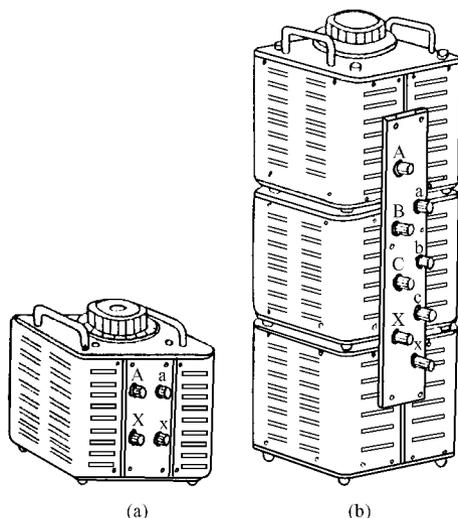


图 2-10 接触式自耦调压器的外形示例

(a) 单相接触式自耦调压器；(b) 三相接触式自耦调压器

四、交流三相单频发电机组

交流三相单频发电机组按所发电压频率来分有工频 50Hz 和 60Hz，中频 400、500Hz 和 1000Hz 等两大类。用于提供三相平衡、稳定、畸变率较小、可在较宽范围内调压的试验电源。

50Hz 机组由一台由 50Hz 电网供电的同步电动机（或直流电动机）同轴拖动一台同极数（或同转速）50Hz 他励同步发电机组成。主要作用是提供三相平衡并且能调压的交流电源。

60Hz 机组可由一套由 50Hz 电网供电的一台 10 极同步电动机同轴拖动一台 12 极 50Hz 他励同步发电机（需特殊设计，主要是考虑在 1.2 倍的转速下长期运行的可靠性要达到要求）组成；或由一台由 50Hz 电网供电的同步电动机通过三角皮带或齿形带拖动一台同极数 60Hz 他励同步发电机组成；还可由一台他励直流电动机同轴拖动一台额定转速相同或接近的他励同步发电机组成，可通过设置专用电路使其具有稳频稳压的功能。

中频机组可由两台同步电机组成或由一台直流电动机拖动一台同步发电机组成。

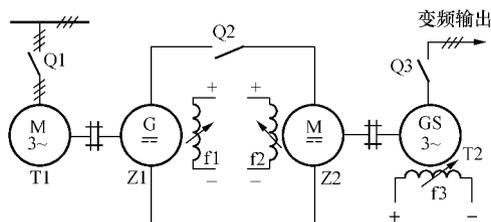
一般用调节同步发电机励磁的方式来调节发出电压的高低。

五、交流变频发电机组

交流变频发电机组可用于不同频率电动机的试验电源，但其主要用途是在对拖法（或称为回馈法，GB/T 1032—2005 中提出的 C 方法）作发热试验和负载试验时，用作负载电机（习惯称为陪试电机）的电源。

（一）“四机组”变频发电机组

传统的交流变频发电机组由 4 台电机组成，所以俗称为“四机组”。它由一台交流同步电动机（或交流异步电动机）拖动一台直流电机，再由一台直流电机拖动一台可调励的他励交流同步发电机组成，两台直流电机通过电路连接，直流电机都采用他励。其电路原理如图 2-11 所示。常用四机组中四台电机的配套关系见表 2-3 所列数据。



2-11 由四台电机组成的交流变频机组电路原理图

表 2-3 常用四机组中四台电机的配套关系参考表（电机容量单位为 kW）

电机类别		组别				备注
		I	II	III	IV	
机组中的电机和代号 (见图 2-11)	同步（或异步）电动机 T1	40	120	220	320	220kW 及以上 可用高压电机
	直流电机 Z1, Z2	35	115	190	300	他励
	同步发电机 T2	35	120	200	320	他励
直接负载法被试电机最大容量		35	120	200	320	

（二）“两机组”变频发电机组

“两机组”变频发电机组有两种组成形式，其区别在于所用的拖动电机种类。一种是交流整流子调速电动机，另一种是直流电动机。后者因调速性能较好，结构也较前者相对简单，所以应用较多。

用一台直流电动机同轴拖动一台三相同步发电机的电路原理如图 2-12 所示，其直流电机为他励。该机组直流机和同步电机的励磁可由一套专用设

备进行自动控制，做到稳频稳压。

这种变频机组一般只能用作试验电源，而不能作为反馈电源。若用作反馈电源，则需要配用可逆变的直流电源设备与直流电机相连。

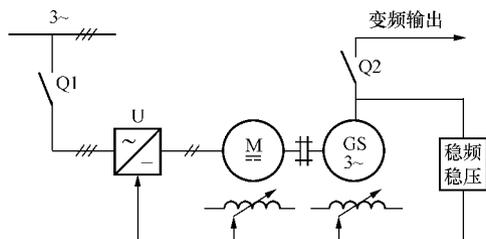


图 2-12 “两机组”变频发电机组电路原理图

六、变频器——交流变频电源

（一）简介

变频器是一种利用电子器件组成的，能将一个固定频率的交流电转变成为一个在一定范围内可调频率的交流电的静止变频电源设备，其输出频率范围一般可在输入频率的 3 倍以内，最大可达到 4 倍以上。由于使用方便、占地少、几乎无噪声等优点，现已被广泛应用于交流异步电动机的调速系统。其不足之处是输出电压波形不是正弦波，即谐波成分较多。较多的高次谐波会对被试电机试验数据的准确度产生一定的影响。另外，对其输出电压、电流及功率的测量都有一定的特殊要求，普通仪表不能保证其要求的准确度。

在电机试验中，变频器可用作额定频率为非电网频率电动机或变频调速电动机的电源设备。若用作对拖法试验中交流陪试电机的变频电源，则需增设逆变装置，所以较少采用。

（二）交流变频电源的电压、电流波形及谐波

当三相异步电动机用变频器供电时，变频器提供给电动机的电压和电流波形都不是严格的交流正弦波形，特别是电压波形，可以说根本就不是正弦波形，较常用变频器给三相异步电动机供电时，变频器输出的电压及电流典型波形见图 2-13。

用这种电压和电流波形的交流电给电机供电时，由于有较多的谐波，使电机产生比标准正弦波高得多的附加损耗。

（三）变频器输出电压、电流和功率的测量问题

常规的交流电流、电压及功率表不能准确地测量普通变频器输出电压和电流波形的电量，特别是在较低频率时（如 20Hz 以下），准确度将变得很

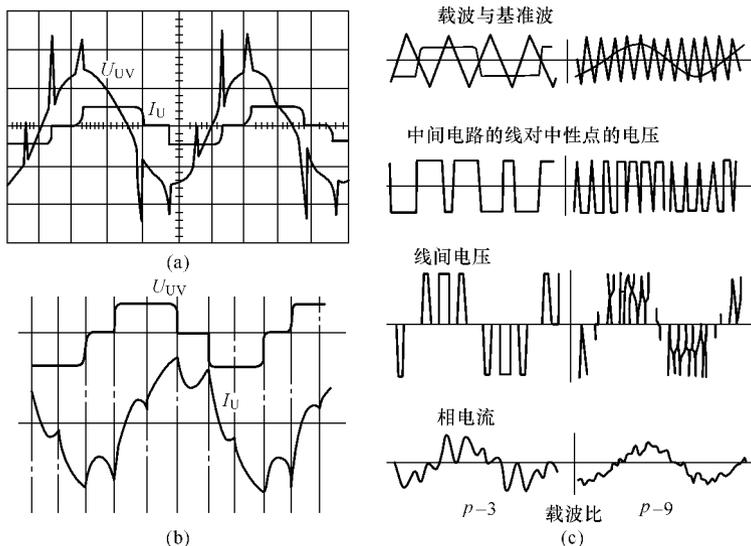


图 2-13 用变频器给三相异步电动机供电时的电压和电流典型波形

(a) 六阶波 I 型变频器驱动；(b) 六阶波 U 型变频器驱动；(c) PWM 调制 U 型变频器驱动

低。但到目前为止，能够准确测量这种交流电量的仪表还很少，并且价格较高。

在 GB/T 755.2—2003《旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法》的附录 A 中，给出了用变频器供电时笼型感应电动机确定损耗和效率时对测量仪表的要求。

传感器、互感器以及分流电阻等测试设备所要求的频率范围 f_r 应满足如下要求：对六阶梯波变频器， $f_r = 10f_1$ ；对 PWM 变频器， $f_r = 6f_p$ ，但最高为 100kHz。其中： f_1 为最高额定频率； f_p 为最高脉冲频率（载波频率）。对于六阶梯波变频器，普通的电动系仪表即能满足上述要求；对于 PWM 变频器，则必须使用宽频段的测量设备，优先选用带 AD 转换的数字式数据微处理机的电子式仪表。

另外，脉冲频率较高的场合不宜使用两表法测量三相电功率，这是由于电容电流的存在使得三相输入电流之和可能不为零。因此，应采用每相一块功率表的三表法。

表 2-4 推荐的仪表也可达到相对准确的精度，可在频率为 50Hz 左右时选用，但具体误差范围目前还没有资料给出。

表 2-4 推荐用于测量变频器输入输出电量的指针式仪表类型

电量名称		推荐选用仪表类型
变频器 输入	电 压	电磁系或整流系
	电 流	电磁系
	功 率	电动系，三相功率一般用两表或三表法测量
	功率因数	用输入电压、电流和功率计算求得
变频器 输出	电 压	整流系
	电 流	电磁系
	功 率	电动系，三相功率一般用两表或三表法测量
	功率因数	用输入电压、电流和功率计算求得

(四) 异步电动机试验用变频器的选用原则

由于不同系列和不同型号的变频器具有不完全相同的性能，有些性能差异还较大；另外，由于变频器具有多种保护功能，与配套电动机要有一个相对合理的功率配比范围。所以，试验用交流变频器的选用应尽可能按照如下原则进行。

(1) 尽可能使用该电动机用户将要配置的变频器。

(2) 所用变频器的额定容量应在被试电动机额定容量的 1.25 ~ 2.0 倍之间，表 2-5 给出了推荐匹配关系，供参考选用。

表 2-5 变频器的额定容量与被试电动机额定容量的匹配关系表

变频器额定容量 (kVA)	1	2	3	4	6	10	15			
电动机标称容量 (kW)	0.55	0.75	1.1	1.5	2.2	3	4	5.5	7.5	11
变频器额定容量 (kVA)	20	30	40	50	60	70	100	120		
电动机标称容量 (kW)	15	18.5	22	30	37	45	55	75	90	

(3) 当用于进行空载和堵转特性试验时，变频器应具有在某一频率下电压可在较大范围内调整的功能。这一要求须对变频器进行改造方能实现。

(4) 变频器应具有过电流、过电压保护功能。

七、用于回馈法进行负载试验的电子内回馈电源系统

前面介绍的“四机组”变频发电机组，用于对拖法（或称为回馈法，GB/T 1032 中提出的 C 方法）作发热试验和负载试验时负载电机（习惯称为陪试电机）的电源，在试验中，当负载电机处于发电状态时，通过机组将电能向电网回馈。该系统的缺点是投资较大、占用一定的面积、有运行噪声、控制较复杂、维护费用较高，当被试电动机的容量小于机组运行损耗时，就不会有电能回馈给电网，甚至于同时消耗电网能量，造成试验耗电增加。

目前有一种新型的电子内回馈变频电源能较好地克服上述变频机组具有的缺点。它是将从电网得到的交流电整流为直流电，然后通过逆变将直流电再变换成正弦交流电（利用滤波、变压器隔离等环节，所产生的交流电为畸变率不超过 2% 的实际正弦波），该交流电的频率可在 47 ~ 63Hz 范围内任意调整，从而代替了上述“四机组”变频发电机组的变频电源功能。回馈单元为一个智能控制同步整流，当负载电机工作在第 4 象限时（即处于发电状态时），经 DSP 采用特殊算法控制该单元，把交流电整流成直流电，回馈到本系统中的直流母线上，并通过相关环节变成交流电向被试电动机供电。因为是在系统内部进行直流回馈，所以不会污染电网。由于没有机械运行元件，所以运行噪声极小（只有变压器等发出的微量电磁噪声），并且没有机械损耗，所以和机组相比可节约大量的电能，由此可降低对试验总电源设备容量的要求。另外可作为 60Hz 电动机的试验电源和回馈试验变频电源。

该电源系统由天津升阳电子科技有限公司（原天津正大电子有限公司）研制生产。型号为 GC4000，调压范围 0 ~ 600V，额定容量有 18、30、60、100、150、200、300kVA 等多种。

第二节 试验用直流电源设备

一、直流电源的分类

电机试验中常用的直流电源主要有直流发电机组电源和静止电力变流器整流电源两大类，另外还有蓄电池、干电池等。直流发电机组电源、蓄电池、干电池等简称为直流电源；静止电力变流器电源简称为整流电源。

二、直流电源机组

试验用直流电源机组可由一台交流电网供电的交流异步电动机拖动一台直流发电机或同轴拖动两台直流发电机组成。前者称为“单联机组”，后者称为“双联机组”。其接线原理分别如图 2-14 (a)、(b) 所示。直流发电机一般为他励，额定转速为 1500r/min。

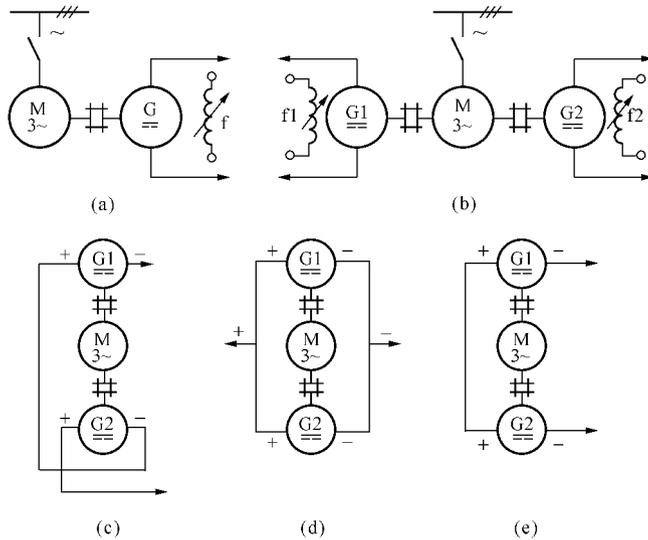


图 2-14 直流电源机组电路原理图

- (a) 单联机组；(b) 双联机组；(c) 两台直流机顺极性串联电路；
(d) 两台直流机同极性并联电路；(e) 两台直流机逆极性串联电路

双联机组的优点在于如下两个方面：

(1) 可提供较高的输出电压或电流。即当两台直流机顺极性串联时，可得到两台电机输出电压之和的输出电压，如图 2-14 (c) 所示；当两台直

流机同极性并联，并在两台直流电机输出电压相等时，机组输出电流可达到两台直流电机输出电流之和，如图 2-14 (d) 所示。

(2) 可方便地提供运行中变极性的电压。当将两台直流电机的一对同极性的输出端连接起来，剩余一对输出端向外提供直流电时，即能通过调节两台直流电机的励磁来方便地调节机组输出电压的大小和极性，如图 2-14 (e) 所示。这种接线方法可称为逆极性串联，它特别适用于作为测绘电动机转矩-转速特性曲线时负载直流电机的电源。

可进行串（逆极性）、并联输出控制的电路原理图见图 2-15。其中异步电动机采用了手动的 Y-Δ 变换降压起动电路。

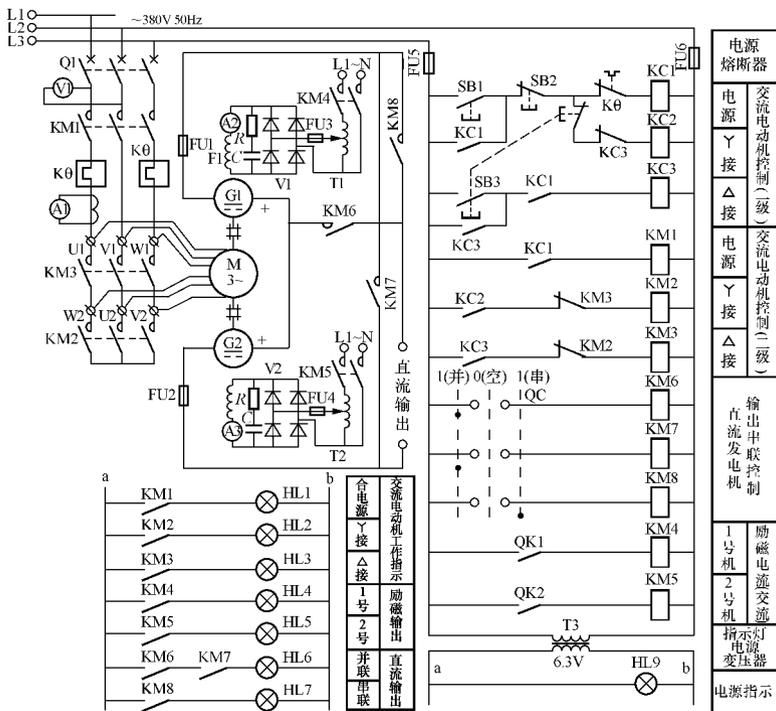


图 2-15 双联直流电源机组控制电路原理图

三、整流电源

整流电源是利用由整流元件和其他一些电工元件组成的整流器将交流电转变成直流电的直流电源。由于其设备组成简单和使用维护方便，工作性能

稳定可靠、无噪声、效率高等优点，而被广泛地应用。它的不足之处是电流的纹波因数较大。

从所用交流电的相数来分，整流电源有单相和三相两大类；对于单相者，又可以分为半波和全波两种；从所用整流元件来分，有可控和不可控两大类。

表 2-6、表 2-7 分别给出了几种不同型式的用整流二极管整流、电压不可控整流电源电路及其主要参数和优缺点。表中： R_L 为纯电阻负载； L_L 为电感负载； U_L 为负载两端的电压； I_L 为通过负载的电流； V 为整流二极管； U_2 为交流变压器二次侧相电压有效值； U_V 为整流器输出电压。

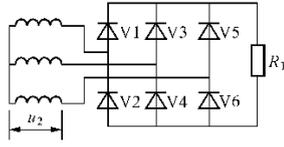
表 2-6 单相不可控整流电路及有关参数

电路名称	电路图	输出电压平均值 U_0	整流管最大反压 U_{nr}	整流管平均电流 I_{ar}	主要优缺点	适用范围
单相半波		$0.45U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$0.45I_L$	结构简单；输出电压波动很大，不易滤成平直电压	用于几十毫安、对波动要求不高的场合
单相桥式		$0.9U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$0.5I_L$	负载能力较好，输出电压易滤平直，变压器元件反压较低；元件较多，电路内阻大	要求负载电流较大、稳定性较高的场合；应用较广泛

表 2-7 三相不可控整流电路及有关参数

电路名称	电路图	输出电压平均值 U_0	整流管最大反压 U_{nr}	整流管平均电流 I_{ar}	主要优缺点	适用范围
三相带中线		$1.17U_2$	$2.45U_2$	$\frac{1}{3}I_L$	输出电压脉动较小；变压器铁心中存在直流磁通，使一次电流加大，变压器利用系数小，整流管反压大	用于容量较小的用电场合

续表

电路名称	电路图	输出电压平均值 U_0	整流管最大反压 U_{mr}	整流管平均电流 I_{ar}	主要优缺点	适用范围
三相桥式		$2.34U_2$	$2.38U_2$	$\frac{1}{3}I_1$	输出电压脉动较小, 电压数值较高, 变压器利用系数大, 可输出较大功率; 所用元件较多	广泛用于各种直流用电设备

除整流元件和滤波元件外, 组成一套整流电源还需要控制电路及整流元件过电压和过电流保护、输出稳压等一系列主要元件, 对于可调控压的, 还需配备触发电路。

四、用自耦调压器调压的整流电源

将前面介绍的不可控整流电路前边的变压器改为自耦调压器 (单相或三相的), 通过该调压器来改变整流元件的输入电压, 则能得到可变的输出直流电压, 成为一套可调控的整流电源。电路原理如图 2-16 所示。所用调压器的额定容量应为直流用电设备的 1.1 倍以上。这种整流电源结构简单、易制作、调节方便、过载能力较大, 常用于试验中的电机励磁电源。

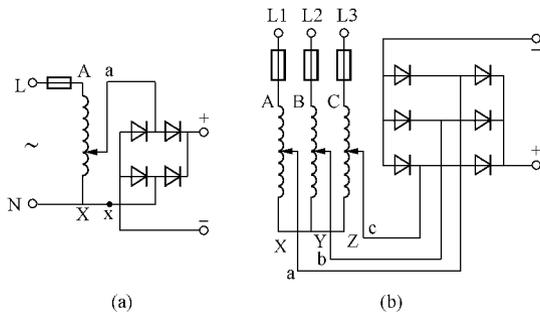


图 2-16 用自耦调压器调压的整流电源

(a) 单相电路; (b) 三相电路

第三节 电动机试验机械负载设备

电动机在进行发热试验、效率测试试验、过转矩试验及测绘转矩-转速特性曲线试验时，都要给电动机加机械负载。不同的电动机，不同的试验项目，对负载的性质及大小都有不同的要求。本节将介绍几种常用电动机机械负载设备简单工作原理、配套要求、使用方法及注意事项等方面的内容。

一、以直流发电机作负载

(一) 对直流发电机的要求

采用直流发电机作电动机的负载时，其额定转速应不低于被试电动机的额定转速；在同转速下，其额定功率应不小于被试电动机额定功率的 0.9 倍，但最好也不超过被试电动机的 10 倍；励磁应为他励。

(二) 负载的调节方法

1. 直接消耗法

直流发电机只作试验负载时，它的输出电能可直接消耗在电负载上，其电路如图 2-17 (a) 所示。电负载可采用各种电阻。为方便调节，负载电阻应做成分段可调式或连续可调式。试验时，要进行较大幅度的负载调整时，调节负载电阻的大小；进行较小幅度的调整时，调节直流发电机的励磁。

这种方法的优点是设备简单、投资少、操作方便；缺点是电能全部被消耗掉，造成能源的浪费；试验时电机的转速不能太低，否则直流发电机会因发出的电压过低而造成负载过小，甚至加不上负载。

2. 回馈法

直流发电机的电枢与一套直流发电机组相连接。直流发电机组的组成形式可为本章第二节所介绍的两种。

作为直流电源机组中的直流电机，其额定电压和功率均应不小于负载直流电机。若需要负载直流电机在正反两个转向都可工作，特别是在转速为零时仍有负载转矩，则需要直流发电机组能发出极性可变的直流电。这一点在第二节介绍的“双联直流发电机组”可方便地作到，其接线如图 2-17 (b) 所示；当使用“单联直流发电机组”时，可通过两个并联的同规格滑线电阻给电源机组中的直流发电机提供方向可变的励磁电压，如图 2-17 (c) 所示，通过调节两个滑线的位置来改变励磁电压的大小和方向，从而改变输出直流电压的方向，这种方式的缺点是要求励磁电源的容量较大，因为将有一部分电能消耗在两个滑线电阻上。

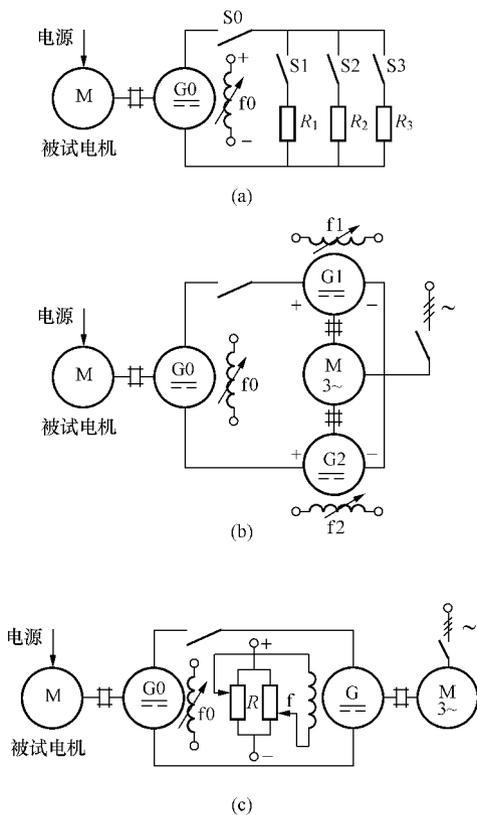


图 2-17 以直流发电机作负载的三种电路原理图

(a) 电阻消耗法电路；(b) “双联直流发电机组”回馈法电路；

(c) “单联直流发电机组”可变直流输出电压方向的电路

二、由交流异步电动机转化成的交流发电机负载

由电机原理可知，当交流异步电动机转子的转速超过其同步转速，并且有励磁的情况下，则会由电动机转化成发电机。此时，转子转速超过其同步转速越多，可输出的电量也就越多。这种性质的负载一般用于交流异步电动机的试验。其规格型号最好和被试电动机完全一致，这样，一是便于安装，二是可方便地改变两台电机的“被试”和“陪试（负载）”地位，这在要求两台电动机都作试验时，会节约大量的时间。若无上述条件，则可选用同

转速、额定功率不小于 0.9 倍被试电动机的其他异步电动机。

为这种类型的异步发电机提供的交流励磁电源有网络电源、变频电源和通过连接电容器的自励电源。下面分别给予介绍。

(一) 用电网电源励磁的异步发电机负载

作为负载的异步电机（简称陪试机）和被试电机都通过调压器（陪试机也可不通过调压器）与交流电网相接。两台电机通过皮带（一般用三角带）拖动。两个皮带轮的直径比为

大轮(装在被试电动机上): 小轮(装在陪试电机上) = (1.15 ~ 1.2): 1

这样, 当被试电动机拖动陪试电机运转时, 陪试电机就会以超过其所加电源(电网电源)频率的转速呈异步发电机状态运行, 如图 2-18 (a) 所示。

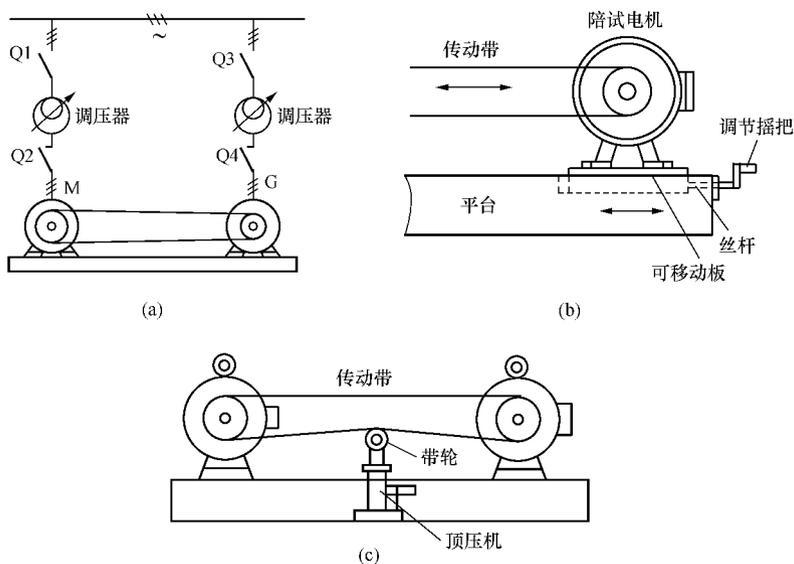


图 2-18 用电网电源励磁的异步发电机负载

(a) 电路示意图; (b) 拉陪试电机调节皮带的松紧;

(c) 顶(压)皮带调节皮带的松紧

调节皮带的松紧, 就能在一定范围内调节陪试电机的转速, 从而达到调节被试电动机输出功率的目的。调节皮带的松紧可用下述方法:

(1) 被试电动机固定安装, 陪试电机安装在一个可沿皮带方向滑动的平台上。拉(或松)陪试电机, 使两电机之间的距离变长(或变短), 如图 2-18 (b) 所示。

(2) 两台电机都固定安装在平台上。用一个专用调节带轮顶(或压)皮带, 使皮带紧或松, 如图 2-18 (c) 所示。

这种加载方式设备简单、投资少。但负载调节费时费力, 且不易稳定。使用时, 应注意两个皮带轮要安装牢固, 最好加装防护装置, 用来防止皮带突然脱落或崩断造成对试验人员的伤害。

(二) 用变频机组电源励磁的异步发电机负载

1. 线路及工作原理

被试电动机与陪试电机用联轴器(俗称“靠背轮”) 对轴联结。被试电动机通过调压器由电网或发电机组供电(电源频率为被试电机的额定值); 陪试电机由低于它本身额定频率的变频机组电源供电。调节变频电源的输出频率, 则能达到调节被试电动机输出功率的目的。该频率越低, 被试电动机输出功率越大。

采用“四机组”变频电源供电的电路原理图见图 2-19。图 2-19 中, MS 为被试交流异步电动机, 简称“被试电机”, 它由交流电网通过调压器提供额定频率的交流电; MG 为与被试电动机同额定频率和极数的交流异步电动机, 将作为异步发电机作被试电动机的负载, 被简称为“陪试电机”, 它由变频机组电源供电。

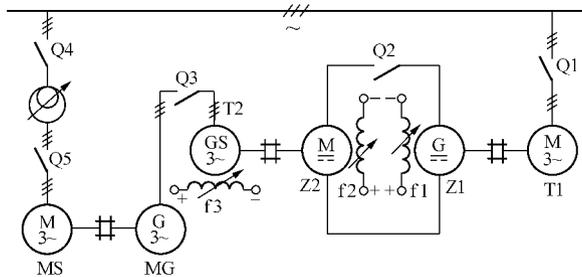


图 2-19 用“四机组”变频电源励磁的异步发电机电路接线原理图

2. 变频机组的使用及给被试电动机加负载的操作方法

(1) 起动变频机组。起动前, 应先给直流电机 Z2 加额定励磁电流(这一点很重要, 必须如此, 否则有可能造成直流电机 Z2 飞车)。之后, 再合开关 Q1 给异步电动机 T1 通电, 使 T1-Z1 机组起动运行。

合开关 Q2，接通两台直流电机的电路。缓慢地给直流电机 Z1 加励磁电流。此时机组 Z2-T2 将随之开始起动并加速。同时调节变频机组中直流电机 Z1 和同步电机 T2 的励磁，使同步发电机 T2 的输出电压和频率都达到或接近其额定值。之后，调小同步电机 T2 的励磁，使其输出电压降低到陪试电动机额定电压值的 1/2 以下。

(2) 通电试方向。先用电源调压器给被试电动机 MS 通低电压，记下被试电动机的转向；再用变频机组电源给陪试电机 MG 通低电压，观察陪试电动机的转向，两台电机的转向应一致（从一个方向看是一致的，实际上，若单独看，两台电机的转动方向是相反的），若不一致，则改变其中一台电机的电源相序，使其改变转向。

(3) 加负载运行。先用适当的电压起动被试电动机 MS，使其达到额定转速后，再给陪试电机 MG 通电，当陪试电机 MG 的容量大于变频机组容量的 1/2 时，要降压起动，即在接通陪试电机电路前，先将机组同步发电机 T2 的励磁调低，使其输出电压降到陪试电机 MG 额定电压值的 1/2 以下，再接通陪试电机 MG，稍后再增加机组同步发电机 T2 的励磁，使加在陪试电机 MG 上的电压逐步达到额定值或所需值。

若在给陪试电机通电后，电压急剧下降，说明变频机组提供的电压太低，应关断后，重新调整，使电压提高后再给陪试电机通电。

运行中，用调节变频机组直流电机 Z1 励磁的方法，改变直流电机 Z1 为 Z2 提供的电枢电压，从而改变直流电机 Z2 的转速，也就是改变同步发电机的转速，达到调节机组输出电压频率（即加在陪试电机 MG 上的电源频率）的目的。该励磁加大，则输出频率增加，反之，输出频率减小。当该频率低于陪试电机 MG 的额定频率时，陪试电机 MG 则呈发电运行状态，所加频率越低，输出电功率也越大，即给被试电动机加的负载越大，反之亦然。

用调节变频机组同步发电机 T2 励磁的方法来调节其输出电压，该励磁增加，输出电压将提高。该电压一般要达到陪试电机的额定值。

(4) 停机。先断开被试电动机 MS 的电源，再将变频机组同步发电机 T2 和直流电机 Z1 的励磁调低并关断，随之切断与陪试电机相连的电路，用开关 Q2 断开机组两直流电机之间的电路，再关断开关 Q1，断掉变频机组的电源，使机组停机。最后将直流电机 Z2 的励磁调低并关断。停机完毕。

(三) 用连接电容器自励电源转变成的异步发电机负载

在一台三相异步电动机的三相输入端并接三个电容器后，再由其他机械动力设备拖动到额定转速，该电动机就会在其转子的剩磁和电容器的共同作

用下,使其定子绕组建立起电压,并可达到额定值,成为一台自励交流异步发电机。

这种负载投资相当少,并且无上述方法中所用机组所发出的噪声,使试验环境得到改善。但其输出电能一般需采用电阻消耗掉,会造成能源的浪费。另外,较大的电机需要较大容量的电容器,使配置有一定的困难,所以一般用于 10kW 以下的电机。

1. 电容器的接法

不论所用电动机是三角形接法还是星形接法,与其相接的三个电容器都可以接成三角形或星形。但因电容器采用三角形接法时,其电容量可为星形接法时的 1/3,所以一般都采用三角形接法。另外应注意的是,电容器采用三角形接法时,其耐电压值应是星形接法时的 $\sqrt{3}$ 倍,这一点是与星形接法相比的不足之处。

可采用一组或两组电容器,建议采用两组电容器,一组为建立空载电压用;另一组在有负载时投入,如图 2-20 (a) 所示。

2. 电容器参数的选定

设电动机的额定线电压为 U_N (V),空载线电流为 I_0 (A),建立空载电压用电容器的电容量为 C_0 (μF),加负载时应投入的电容器容量为 C_f (μF),负载功率(一般用电机的额定功率)为 P (W),则:

(1) 建立空载电压用电容器的电容量 C_0 为

$$C_0 = \frac{\sqrt{3}I_0}{2\pi fU_N} \times 10^6 \quad (2-3)$$

(2) 加负载时应投入的电容器容量 C_f 为

1) 负载为纯电阻时

$$C_f = 1.25 C_0 \quad (2-4)$$

2) 负载为感性,功率因数为 $\cos\varphi$ 时

$$C_f = \frac{P \tan\varphi}{2\pi fU_N^2} \times 10^6 \quad (2-5)$$

(3) 电容器的电压等级应不小于 1.4 倍的电机额定电压。

3. 使用注意事项

(1) 所用电动机应通电运行过,这样其转子才有剩磁。

(2) 电机接上励磁电容器 C_0 后,起动到额定转速,此时就应有接近额定值的输出电压。若无,则可能是电容器及接线有断路或短路故障,若无这

些故障或有但已排除，还是无输出电压，则可能是转子无剩磁。此时可用不少于 6V 的直流电源接于一相定子绕组两端，通电几秒钟，进行充磁。

(3) 加负载的同时应投入附加电容 C_f 。

(4) 在运行中，不准无故断开电容开关，以免损坏用电设备。

(5) 若电容器电路的熔断器熔丝熔断或有必要拆下电容器时，应先用导体将电容器两电极端短路放电后才能操作，否则可能被电击。

(6) 停止用电之前，先断开负载用的电容，再去掉负载。

4. 发电机输出负载及其调节方式

可采用三相分段固体电阻或三相水电阻作为发电机的可调负载；也可通过一台调压器接一定阻值的电阻负载，用调压的方法调节输出功率；还可以通过一套三相整流装置将输出电压变成直流，然后接一套可变电阻的用电设备，通过调节电阻来改变负载的大小。分别如图 2-20 (a)、(b)、(c) 所示。

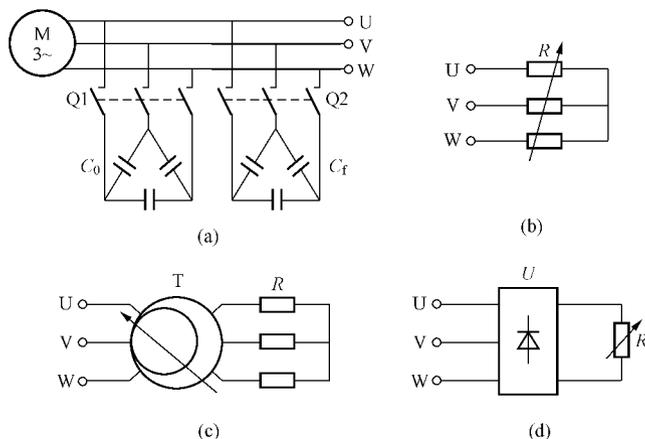


图 2-20 电容自励式三相异步发电机接线图

(a) 三相电容接线图；(b) 接三相可变电阻；(c) 通过三相调压器接三相固定电阻；(d) 通过三相整流装置接可调电阻

(四) 将绕线转子异步电动机改造成异步发电机负载

将绕线转子异步电动机的定子绕组或转子绕组如图 2-21 (a)、(b)、(c)、(d) 所示的接线方法改接后，作为励磁绕组通入直流电进行励磁，则该电动机在外动力拖动下运行时，就变成了一台交流发电机。该方法设备简

单、易操作。但输出电能一般要消耗掉，所以常用于较小容量的电机试验。

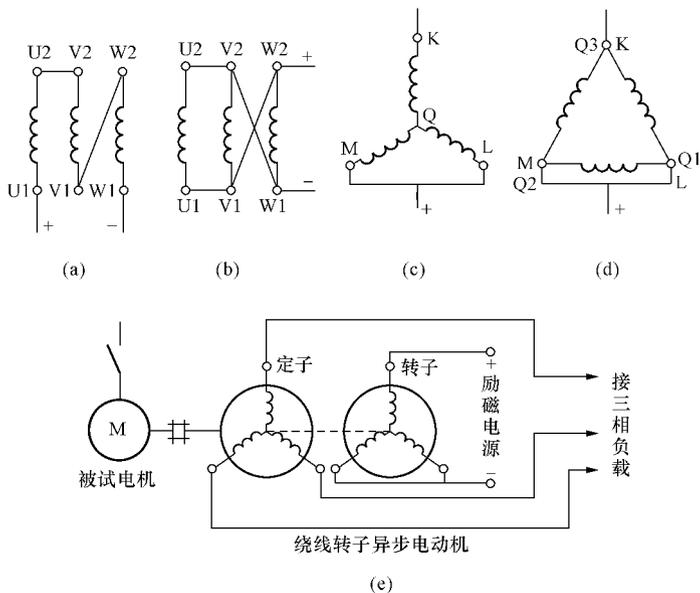


图 2-21 用绕线转子异步电动机改造成的异步发电机负载

(a) 定子串联；(b) 定子并联；(c) 转子串联；
(d) 转子并联；(e) 试验接线电路

1. 定子励磁法

将定子三相绕组按图 2-21 (a) 或 (b) 串并联或并联时，应注意其中有一相要反接 [图 2-21 (a)、(b) 中为 W 相]。此时转子三相绕组产生感应电压并在外接电负荷时输出电能，称为定子励磁法。

这种方法接线方便，但工作时转子绕组流过电流的频率由原来电动机状态时的几赫兹以下（即转差频率）变成了近 50Hz，使转子铁耗和铜耗都会比原来增大，从而有可能造成转子过热。

这种方法较适用于转子采用混嵌式绕组（如 YZR 系列电机）或叠绕组的小型电动机。它们由于转子绕组导线截面较小，所以不会出现显著的电流趋肤效应而使其铜损耗增大过多。

2. 转子励磁法

将转子三相绕组按图 2-21 (c) 或 (d) 串并联或并联作为励磁绕组，称为转子励磁法。

采用转子励磁时，电机在发电状态下的各项损耗与电动机状态时较接近。当采用图 2-21 (c) 所示的接法时，其中一相（图中为 K 相）电流较另两相大，如果该相电流不超过该电动机转子额定电流，则一般不会有问题；如该相发热严重，应在使用中设法定时轮换。

作为电动机负载时，该电机与被试电动机通过联轴器对拖运行，其未加励磁的绕组接耗电负载，电路原理如图 2-21 (e) 所示。调节励磁电流的大小，则能达到调节被试电动机负载的目的。

三、磁粉制动器负载

磁粉制动器由装有直流励磁绕组的定子、铁磁材料做成的转子，以及填充在定、转子气隙之间的高导磁材料——磁粉所组成。调节定子励磁绕组的电流即可调节其制动力矩的大小，达到调节负载大小的目的。其外形如图 2-22 所示。

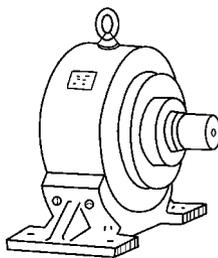


图 2-22 CZ 型机座式磁粉制动器

这种机械负载使用方便，特别适用于低转速试验。但一般要采用水冷散热，使设备复杂化，并要消耗一定的水资源；另外，其高速性能不太稳定，使用较长时间后，磁粉会因摩擦产生板结现象而减小制动能力。

表 2-8 是江苏南通诚成机电设备有限公司生产的 CZ 型机座式磁粉制动器规格型号和参数。

表 2-8 CZ 型机座式磁粉制动器的规格型号和参数

型 号	额定转矩 (N·m)	励磁电流 (A)	允许滑差功率 (kW)	额定转速 (r/min)	中心高 (mm)	轴伸直径 (mm)	冷却方式
CZ-0.2	2	0.4	0.1	478	55	9	自冷
CZ-0.5	5	0.5	0.3	573	72	12	
CZ-1	10	0.6	0.8	764	100	12	
CZ-2	20	0.6	1.6	764	120	18	水冷
CZ-5	50	0.8	3.5	669	150	22	
CZ-10	100	1.0	7.0	669	165	28	
CZ-20	200	2.0	10	478	180	35	
CZ-30	300	2.5	12	382	210	45	
CZ-50	500	2.5	14	267	240	60	
CZ-100	1000	2.5	18	172	280	60	
CZ-200	2000	3.0	25	119	325	75	
CZ-500	5000	3.0	40	76	430	90	

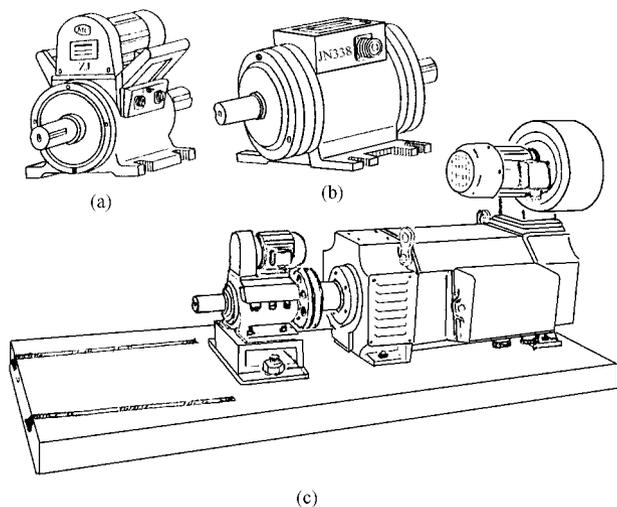
四、转矩-转速传感器与机械负载组成的测功机

以转矩-转速传感器与机械负载组成的测功机，因结构简单、组成容易、使用方便、精度较高（可达到 0.2 级或 0.1 级）和价格较低（和其他传统的测功机相比）等较多的优势，而越来越多地被采用。

（一）转矩-转速传感器

1. 转矩-转速传感器的类型

转矩-转速传感器是保障该种测功机准确度的关键设备。其关键部件是它的弹性转轴。根据产生转矩信号的原理，主要有电位差式（如 ZJ 型或 JC 型）和应变元件式（如 JN338 型）两大类。两种类型的外形图及与直流发电机组成的测功系统见图 2-23。



2-23 转矩-转速传感器外形图及与直流发电机组成的测功系统

(a) ZJ (或 JC) 型；(b) JN338-A 型；

(c) ZJ (或 JC) 型与直流发电机组成的测功系统

2. 转矩-转速传感器的使用方法及注意事项

(1) 在搬运和安装时，应轻拿轻放，防止磕碰和撞击，特别是两个轴伸更应格外注意。安装联轴节时，用力应顺其转轴的轴向方向，另一端要抵在木质物体上，以防止损伤转轴和轴承。建议将一个规格的传感器与其配套的被试电机和负载机械装置的联轴节设计成外形相同的尺寸，将传感器用的半节与轴的配合设计成过渡配合，用热套的方式将联轴节固定安装在传感器轴上。

(2) 和被试电机及机械负载三者联结时, 应尽可能做到较高的同轴度; 装在传感器上的两个联轴节应尽可能的轻, 和另一半联轴节之间应留有 2 ~ 3mm 的间隙, 必要时该间隙可用胶皮填充; 对两端联轴节的联结, 建议采用软绳或弹性齿形橡胶圈、圆形胶圈柱销等具有一定弹性的方式 (这三种联轴节的外形见本章第四节第四项内容), 以减小因少量的不同轴度对测量精度的影响。

(3) 对于 ZJ (或 JC) 型传感器, 安装时, 小电机的轴伸端 (皮带轮端) 应面向被试电机。传感器上小电机的转向应和传感器轴转向相反。在被试电机运转时, 仪表显示的转速将高于被试电机, 高出的数值为小电机带动传感器外齿轮的转速。

(4) 对于 ZJ (或 JC) 型传感器, 当试验时的转速低于规定值时 (一般为 600r/min) 应开启小电机, 否则测试精度将受到较大影响。但应注意, 此时在仪表上显示的转速将是被试电机和传感器外齿轮的转速之和, 显示的功率值是显示转速值与转矩值的计算结果。

(5) 对某些规格的 ZJ (或 JC) 型传感器, 其小电机的皮带使用一段时间后会拉长或磨损, 造成转速不稳定, 应及时修理或更换。

(6) 有些类型的传感器输出接口处有一个微型开关, 它是为补偿传感器因其转向所引起的误差而设置的。从传感器上小电机轴伸端看, 传感器轴顺时针转动时, 该开关应拨到 “+” 一边; 否则拨到 “-” 一边。

(二) 机械负载设备

原则上讲, 任何能与传感器配套的机械设备都可作为机械负载使用。但因试验时一般都要求负载量可调, 有时还需堵转, 甚至于反转 (如测试电动机的 T - n 曲线试验时), 所以, 不要求反转时, 常用他励直流电机或磁粉制动器; 需反转时, 则必须使用他励直流电机, 并由可调压和改极性的直流电源供电。

五、传统的测功机

所谓传统的测功机, 是对上述由转矩-转速传感器与机械负载组成的测功机而言的, 分别是涡流测功机、直流测功机和磁粉测功机等, 其结构分别如图 2-24 (a)、(b)、(c) 所示。

这些测功机的主要特点是将测功 (主要是转矩) 装置与机械负载组成一体 (老式的看似一体, 实际上是两部分)。但由于它们造价都相对高, 使用和维护也相对复杂, 而且自身不可精确修正的误差也较大, 准确度很难提高, 还有就是在被试电机容量范围较大的情况下, 需要配置多套, 致使总投

资高出很多，占地面积也大很多，所以，除较小容量的电动机之外，现选用者已很少，有可能被逐渐淘汰。在此不作详细的介绍。

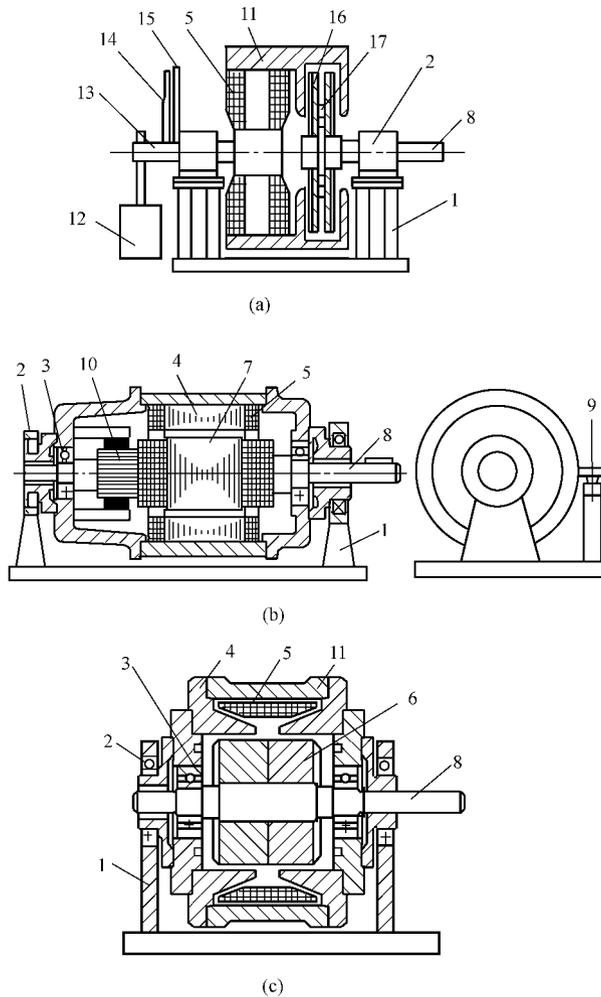


图 2-24 三种传统的测功机结构图

(a) 一种较简单的涡流测功机；(b) 直流测功机；(c) 磁粉测功机
 1 - 支架；2 - 定子轴承；3 - 转子轴承；4 - 定子铁心；5 - 定子绕组（励磁绕组）；6 - 转子铁心；7 - 转子绕组（电枢）；8 - 输入转轴；9 - 测力装置（测转矩装置）；10 - 换向器及电刷；11 - 导磁体（磁极）；12 - 平衡锤；13 - 磁极轴；14 - 指针；15 - 刻度盘；16 - 钢盘；17 - 风叶

六、测功机转矩读数的修正方法

由于测功机自身所带轴承摩擦和转子转动时受到空气的阻力等相关因素的影响,使得转矩仪表显示转矩值 T_t ($N \cdot m$) 会小于被测电动机实际的输出转矩值 T_c ($N \cdot m$)。设相差的数值为 T_{fw} ($N \cdot m$), 则

$$T_c = T_t + T_{fw} \quad (2-6)$$

T_{fw} 也被称为测功机的机械耗转矩, 在 GB/T 1032 - 2005 中, 以附录 B 的形式给出了试验和计算方法。

(一) 试验方法

1. 联结测功机

被测电动机在额定频率的额定电压下空载运行, 测功机与被试电动机联结但不加励磁。测量并记录被试电动机的如下数值: 输入功率 P_{d0} (W) 和电流 I_{d0} (A); 输出转矩 T_{d0} ($N \cdot m$) 和转速 n_{d0} (r/min); 绕组的直流线电阻 R_{td} (Ω)。按式 (2-7)、式 (2-8) 分别求出此时的定子铜损耗 P_{dCu1} (W) 和转差率 s_{d0} (r/min), 其中 n_s (r/min) 为被试电动机的同步转速, 由所用电源的频率和被试电动机的极数求得。

$$P_{dCu1} = 1.5 I_{d0}^2 R_{td} \quad (2-7)$$

$$s_{d0} = (n_s - n_{d0}) / n_s \quad (2-8)$$

2. 不联结测功机

被测电动机在额定频率的额定电压下空载运行, 但不联结测功机。测量并记录被试电动机的如下数值: 输入功率 P_0 (W) 和电流 I_0 (A); 输出转速 n_0 (r/min); 绕组的直流线电阻 R_{t0} (Ω)。按式 (2-9) 求得此时的定子铜损耗 P_{0Cu1} (W) 和转差率 s_0 。

$$P_{0Cu1} = 1.5 I_0^2 R_{t0} \quad (2-9)$$

$$s_0 = (n_s - n_0) / n_s \quad (2-10)$$

(二) 修正转矩值 T_{fw} 的计算

在 GB/T 1032 - 2005 的附录 B 中, 将式 (2-6) 中的修正转矩值 T_{fw} 用符号 k_d 来表示, 为了便于辨认, 本书仍使用符号 T_{fw} 。

$$T_{fw} = \frac{9.549}{n_{d0}} [(P_{d0} - P_{dCu1} - P_{Fe})(1 - s_{d0}) - (P_0 - P_{0Cu1} - P_{Fe})(1 - s_0)] - T_{d0} \quad (2-11)$$

式中 P_{Fe} ——电动机的铁损耗, W, 由空载试验获得。

(三) 测功机自身修正

本项仅针对可作电动机运行的直流测功机。

测功机不与被试电动机联结, 但是联轴器必须仍与测功机联结。测功机

作为电动机运行，使测功机的转速与负载试验时每点的转速相同，则测功机测得的转矩即为修正转矩 T_{fw} 。

(四) 有关说明

1. 关于测功机不可测量和修正的误差问题

对于传统的测功机，除了上述试验能得到的，因其轴承摩擦等因素造成的转矩误差修正值外，还会有因启动相关电源引线等产生的不能修正的误差。虽然很小，但在精确测量较小功率的电动机时，也可能对最终结果带来不可忽略的误差。有必要时也应进行测量和修正。

2. 关于用转矩-转速传感器组成的测功机误差修正问题

用转矩-转速传感器和直流机等机械组成的测功机已被广泛应用。由于此类测功机的误差仅发生在传感器与被试电动机靠近的一端轴承摩擦上，如果该端轴承运行正常，其损耗将会很小，一般在几瓦之内。所以一般不对其进行修正。

如要求进行修正，可按上述方法进行。但实践证明，由于误差值和所用传感器的标称转矩值相差甚远，以及传感器固有准确度的误差、测量操作所引起的误差等诸多因素的影响，使得最终误差测量值很难做到准确。所以，如有必要，最好是向传感器的生产单位索取该项数值。

七、微型电动机绳索滑轮加载法

对 100W 以下的微型电动机，可采用绳索滑轮加载法。其试验设备及安装型式如图 2-25 所示。应注意的是：滑轮与电机轴的联结要牢固，在转动

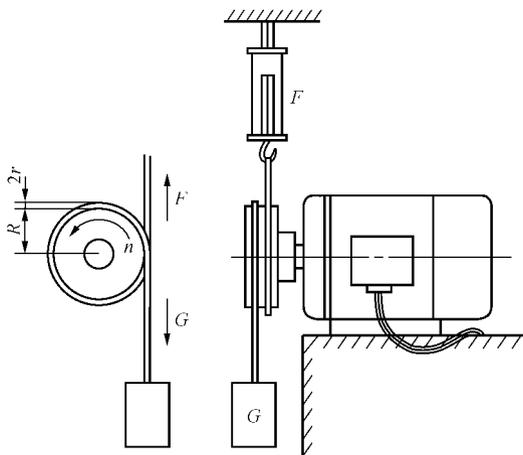


图 2-25 绳索滑轮加载法设备安装示意图

时不应有偏摆现象；滑轮与测力计下端之间的绳索在受力后应保持竖直方向；绳索可根据需要在滑轮上绕一圈或几圈，但各圈之间不可相互重叠；绳索的绕制方向应使砝码产生的力矩与被试电动机的转向（即滑轮的旋转方向）相反，见图 2-25 中标出的方向。

滑轮与绳索接触面的粗糙度应适当，以能使绳索在其上滑动，又有一定的摩擦力给被试电动机施加需要的制动力矩为准。

通过增减砝码的质量来调节绳索与滑轮之间摩擦力的大小，也就是调节制动转矩的大小，或者说是调节被试电动机负载的大小。

设砝码的重量为 G (N)。电机转动时，测力计的指示值为 F (N)，滑轮的半径为 R (m)，绳索截面半径为 r (m)，则施加在被试电动机上的制动转矩 T ($N \cdot m$) 为

$$T = (G - F)(R + r) \quad (2-12)$$

若不考虑绳索粗细对力臂长度的影响时，可将式 (2-12) 中的 r 简化掉，即

$$T = (G - F)R \quad (2-13)$$

八、发电机负载——电负载设备

在上述负载设备的内容中，多次提到用直流发电机或交流发电机作为被试异步电动机的负载问题，而发电机输出的电能将要被用电设备消耗利用。本部分内容将介绍试验用的各种用电设备。

(一) 电阻负载

电阻负载有很多种。专业厂定型生产的有铸铁电阻、绕线电阻、滑线电阻、电热管、管式电阻、盘式电阻、碳膜电阻等；自制的种类有生活用电炉、灯箱（组）、水电阻等。其中有些品种可分段调节，如铸铁电阻和白炽灯组等；有些品种可连续调节，如滑线电阻和水电阻等。下面介绍几个常用的品种。

1. 铸铁电阻

铸铁电阻的外形如图 2-26 所示。大部分都设置中间接线端子，用于分段调节。这种电阻具有阻值小、功率大的特点，主要用于大功率耗电的试验。

2. 水电阻

水电阻是利用盐的水溶液能导电的性质而制成的。一般都由试验单位自己制造，根据需要和经济条件，可简可繁，可粗可精。用作直流和单相交流

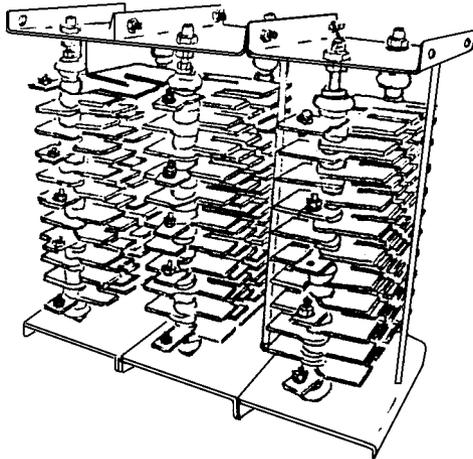


图 2-26 铸铁电阻

负载时，设置 2 片或 4 片极板；用作三相交流负载时，设置 3 片极板，并且间隔要相等。三相可调式水电阻的示意图见图 2-27。

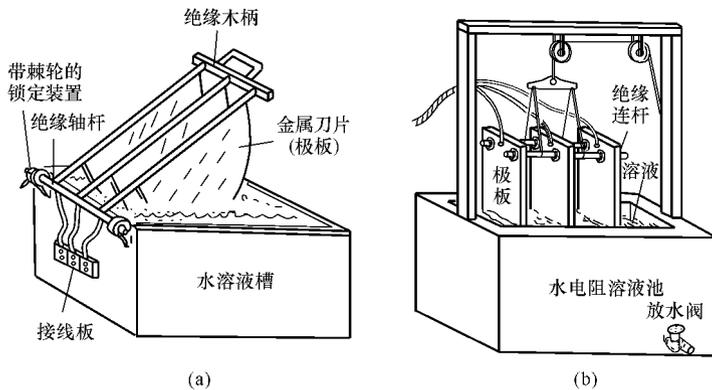


图 2-27 三相水电阻示意图

(a) 铡刀式；(b) 提拉式

水电阻所用的盐溶液常用食盐 (NaCl) 或苏打 (Na_2CO_3) 水溶液。浓度一般控制在 20% 以下，浓度高则单位面积的导电能力大，但对极板的腐蚀也会较快些。

极板可用铜板或铁板制造。对于三相水电阻，三块极板的形状应相同，

面积应相等，并要特别注意其对称性（间隔相等、进入溶液中的深度相同）。

在溶液浓度一定的前提下，调节水电阻阻值大小的方法是调节极板与溶液的接触面积或调节极板之间的距离。电阻与上述接触面积成反比关系，与极板之间的距离成正比关系。具体方法有三个：①升降极板；②用加或放的方法升降溶液的液位；③加大或减小各极板之间的距离。

水电阻简单易做、成本低、容量大、过载能力强，不足之处是：不易调节得很细；当溶液处于沸腾状态时，负载波动较大；极板易受到腐蚀而影响其导电能力或造成三相不平衡；蒸腾出的气体对环境会造成一定的污染。

3. 电阻箱

专业厂生产的电阻箱见图 2-28 (a)，其电阻丝采用电阻率较大、电阻温度系数较低的铜合金材料制造。每组的额定功率一般在 $1 \sim 10\text{kW}$ ，额定电压最高可达到 500V ，常用于较大的负载。使用时，应注意防止其温度过高而造成框架等附件的损坏，可采用风扇吹风散热。

两种自制的电阻箱见图 2-28 (b)、(c)。电阻材料分别采用电器商店出售的电热管和电炉丝。为防止其过热，可采用串联等方式降低每段电阻上的实际电压，如将两根额定电压为 220V 的电热管串联后，接入 220V 的电路中，则其功率将降到原来额定功率的 $1/4$ 。另外还可采用外加风扇吹风散热的措施进一步降低热量。

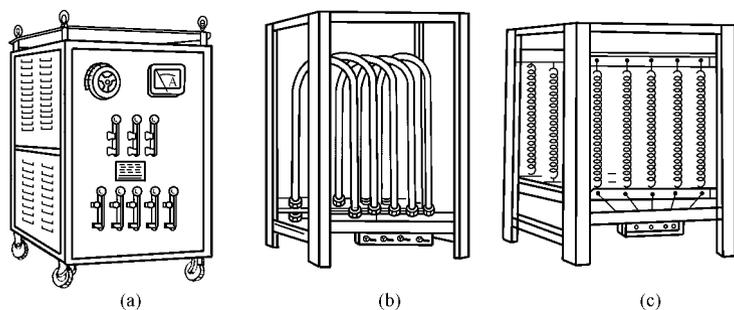


图 2-28 专用电阻箱

(a) 专用电阻箱示例；(b) 用电热管自制的电阻箱；(c) 用电炉丝自制的电阻箱

4. 灯箱式电阻负载

由若干只电灯并联组成电灯组，应使用白炽灯（其他很多品种的电灯

都不是纯电阻性质的，有些品种还不能使用直流电）。按需要可将电灯分组设置分段开关，这种可调节阻值大小的电灯组俗称为“灯箱”，其电路如图 2-29 所示。

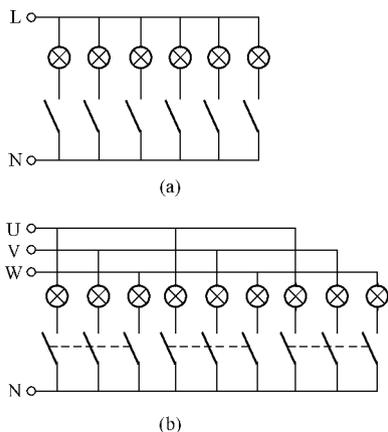


图 2-29 灯箱电路

(a) 单相可分段调节电路；(b) 三相可分段调节电路

这种电负载设备元件获得容易、制作简单、成本低、使用方便、容易察觉到故障，所以维修容易，并且产生的热量只是吸收电能的一部分（有一部分转化成光能了），所以散热较前面的纯电阻负载少很多，不必采取其他辅助的散热措施。不足之处是不容易做成较大的容量。

5. 滑线电阻器

在容量较小（几十瓦至几百瓦）并且要求在较大范围内可调的场合，可选用滑线电阻器作为电阻负载。它使用方便、工作稳定。

滑线电阻器由专业厂生产。图 2-30 给出了两种常见的实物图。其中双柱形的可根据需要，将其接成两路并联（此时电阻小）或两路串联（此时电阻大）。

（二）交流发电机的回馈负载

交流发电机发出的交流电可输送给前面介绍的变频机组，再由变频机组向电网反馈电能。变频机组的使用方法见本节第二部分第（二）项内容。

九、变频机组容量小于被试电机容量时的解决办法

当用变频机组电源给交流发电机（这里指采用回馈法作异步电动机负载试验的陪试电机——异步发电机）供电，而变频机组容量小于被试电机

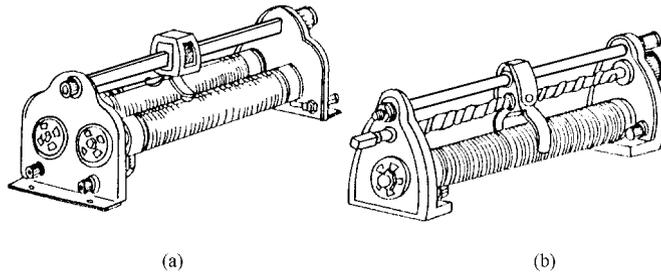


图 2-30 滑线电阻器

(a) 双柱型；(b) 单柱型

容量时，可用在发电机的输出端（变频机组的输入端）并接电阻负载的办法加大负载容量。为便于调节，所加电阻应可分段投入。其电路原理见图 2-31。

试验时，先使用变频机组加负载，在达到其允许容量后，再分级投入电阻负载至达到或略超过所需负载值。若超过所需负载值时，再用变频机组调节。

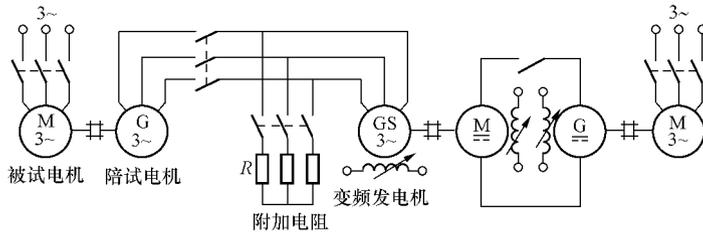


图 2-31 并电阻扩大变频机组容量的电路原理图

第四节 电机试验用工装

一、试验平台和安装固定器件

试验平台用于安装被试电机和负载设备，有专用和通用两大类。用铸铁材料制造的通用平台外形结构见图 2-32 (a)，较常用的长×宽尺寸为 2m×1m、3m×1.5m、4m×2m 等，一般为专业厂家生产。电机安装示意图见图 2-32 (b)，其中给出的螺杆、压板和垫铁为主要安装器件，一般都是自制件，其形状和尺寸要根据所用平台和要试验的电机来确定。

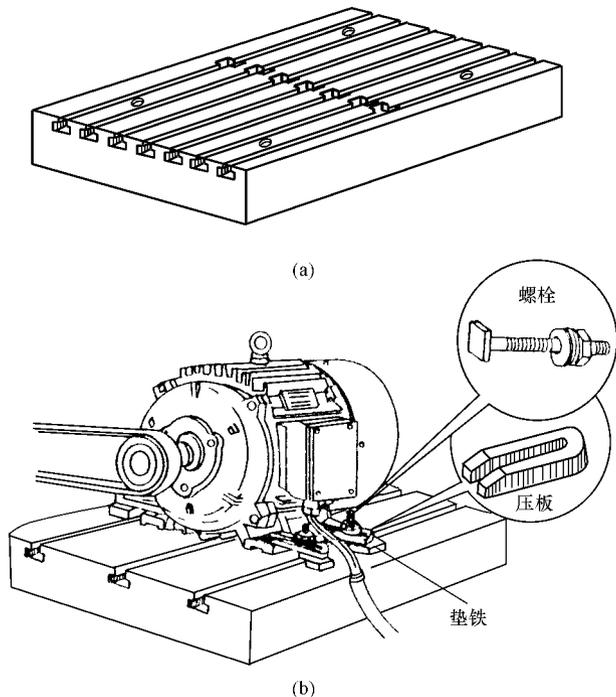


图 2-32 通用试验平台和安装固定器件

(a) 试验平台外形结构参考图；(b) 电机安装示意图及主要安装器件

二、对小功率电机发热试验用支架及散热板的规定

为防止热容量过大的铁质平台因过度传热造成电机发热试验值的不准确（小于实际值），对小功率电机试验用安装平台的尺寸要有一定的限制，有

必要时，还要求采取隔热措施。有关规定如下：

1. 以轴中心高表示机座号的电机

对于以轴中心高表示机座号的电机，试验支架及散热板应符合如下规定：

(1) 发热试验时，电机安装在铁底板上。铁底板尺寸：长×宽×厚 = 480mm×250mm×20mm。铁底板与支撑它的金属支架的接触面积应不大于 5400mm²，如图 2-33 (a) 所示。

(2) 对于自冷凸缘安装的电机，应安装在金属板上。金属板垂直固定于绝热板上，如图 2-33 (b) 所示。金属板的尺寸按表 2-9 的规定。

表 2-9 小功率自冷凸缘电机发热试验用金属板尺寸 mm

电机的机座号	63 及以上	56	50	45 及以下
金属板尺寸 (长×宽×厚)	350×350×10	300×300×10	270×270×10	240×240×10

2. 以机壳外径表示机座号的电机

对于以机壳外径表示机座号的电机，应安装在金属板上。金属板垂直固定于绝热板上，其结构同图 2-33 (b)。金属板的尺寸按表 2-10 的规定。

表 2-10 以机壳外径表示机座号的分马力电机
发热试验用金属板尺寸 mm

电机的机座号	12 ~ 24	28 ~ 45	55 ~ 90	110 ~ 160
金属板尺寸 (长×宽×厚)	48×48×3	108×108×5	210×210×5	270×270×7

3. 无底脚电机的安装装置

对于无底脚，同时利用凸缘端盖也不便安装的电机，可采用图 2-33 (c) 所示的工装固定在试验平台上。

三、架用凸缘端盖安装的电机用弯板

对带凸缘端盖不带地脚的电机（如安装方式为 B5 的电机），在进行热试验和负载试验要与负载设备对接时，需要将其安装在一个称为“弯板”的辅助工装上。这种弯板用钢板加工焊接制成，为一物多用，可将其两个平面都加工出与不同规格电机配合的止口、安装孔和轴孔，其结构和安装方式如图 2-34 所示。

四、联轴器

联轴器又被称为联轴节，俗称靠背轮，是采用对拖法进行加载试验不可

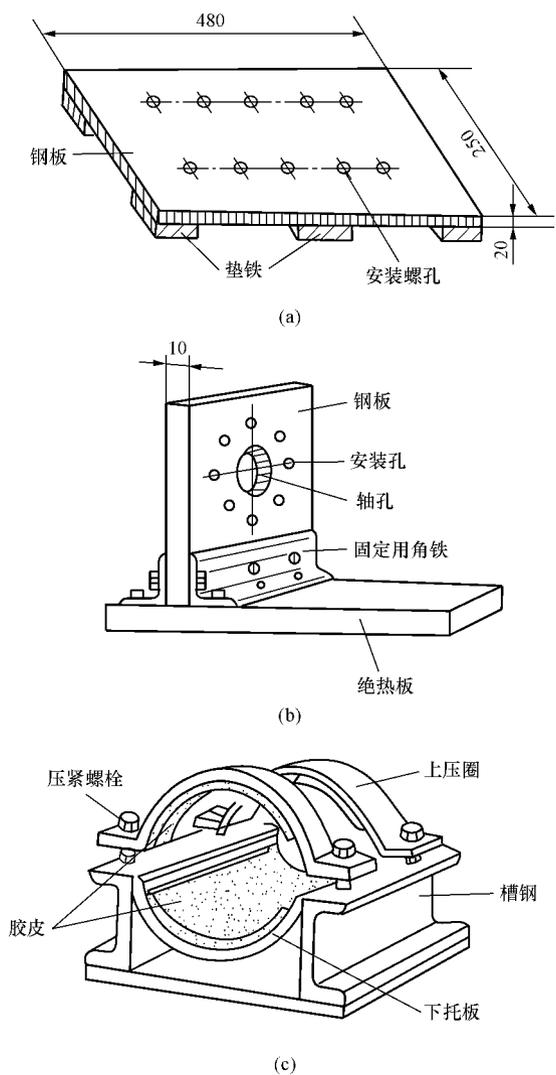


图 2-33 小功率电机发热试验用支架及散热板
 (a) 电机安装铁底板尺寸；(b) 自冷凸缘安装的电机试验支架；
 (c) 无底脚电机试验支架

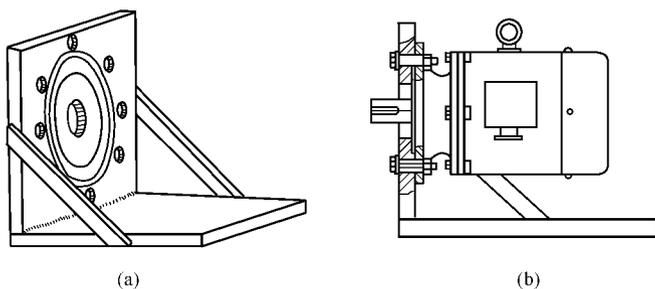


图 2-34 用凸缘安装的电机试验用弯板及安装示意图

(a) 弯板；(b) 安装图

缺少的工装。

(一) 固定轴孔尺寸的联轴器

1. 常用种类及其优缺点

试验使用联轴器时，不可能像电机实际应用时那样一次性安装固定，而是要反复地拆卸使用，所以，使用固定轴孔尺寸的联轴器和电机轴配合时，不应过紧，要稍微用力即可装上或拆下为宜，孔径尺寸公差可按基轴制 G8F 或 G8 计算。经验数据为：轴孔直径的下差用配套转轴直径的上差，上差可在下差的基础上增加 0.03mm 左右。另外，两半个联轴器之间应通过弹性材料过渡联结，其目的在于减缓被试电机与负载设备在不同轴度方面少量偏差对试验准确度的影响。

四种不同联结方式固定轴孔尺寸联轴器的结构图见图 2-35。

其各自的优缺点如下：

(1) 弹性胶圈柱销式联轴器。传递扭矩大，可减小不同轴度的影响，安装方便；结构复杂，加工量大，胶圈易磨损，需及时更换。

(2) 齿轮爪型联轴器。可直接使用标准件，成本低，结构简单，可减小不同轴度的影响，安装使用方便；传递扭矩能力较小，需经常更换齿轮形胶垫（是标准器件）。

(3) 结绳式联轴器。结构简单，可在很大程度上减小不同轴度的影响，易制造，成本低；传递扭矩能力较小，两半节联结和拆开时较费时，联结用的绳子易损坏，在试验中扭断时将会影响试验进度。

(4) 棒销式联轴器。结构简单，易制造，成本低，传递扭矩大，可在不移动电机的情况下，通过拆下棒销使两台电机脱开（和其他型式的联轴器相比这是一个较明显的优点）；两半节联结和拆开时较费时，对两端装置的

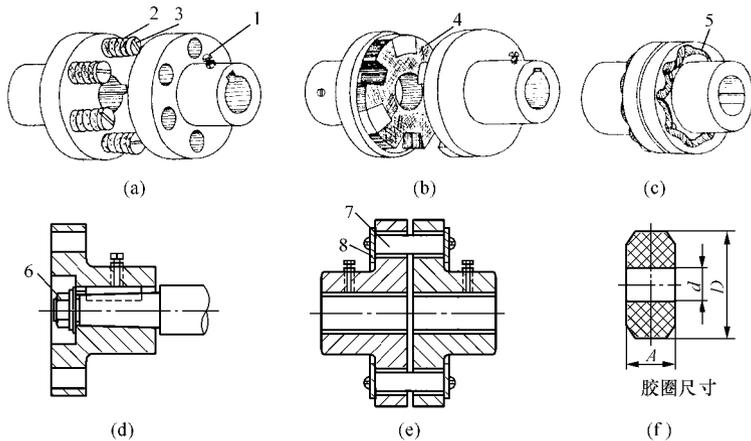


图 2-35 电机试验用固定轴孔尺寸联轴器

(a) 弹性胶圈柱销式联轴器；(b) 齿轮爪型联轴器；(c) 结绳式联轴器；

(d) 锥形轴配合方式；(e) 棒销式联轴器；(f) 胶圈尺寸

1—顶丝与锁紧螺母；2—弹性胶圈；3—柱销与固定螺母、垫圈；

4—齿轮形胶垫；5—尼龙绳；6—轴锁紧螺母；7—棒销；8—棒销挡圈

同轴度要求较高。

2. 有关说明

(1) 弹性胶圈和齿轮形胶垫均为标准件，可在风机水泵类产品商店买到，表 2-11 列出了部分弹性胶圈的尺寸。

表 2-11 标准弹性胶圈尺寸 mm

	10 _{-0.2}	14 _{-0.25}	18 _{-0.25}	24 _{-0.3}	30 _{-0.3}	38 _{-0.4}	46 _{-0.4}
内 径	10 _{-0.2}	14 _{-0.25}	18 _{-0.25}	24 _{-0.3}	30 _{-0.3}	38 _{-0.4}	46 _{-0.4}
外径	19 _{-0.25}	25 _{-0.3}	34 _{-0.4}	44 _{-0.4}	56.4 _{-0.5}	70.4 _{-0.7}	76 _{-0.7}
厚度	5 ± 0.25	7 ± 0.3	9 ± 0.4	11 ± 0.4	14 ± 0.5	18 ± 0.5	22 ± 0.5

(2) 齿轮爪型联轴器在很多水泵厂都成套生产，所以也被称为水泵爪型联轴器，可购入成品后，对其轴孔用磨床磨去少许，也可用细砂布进行打磨，打磨到能略用力即可装上或拆下电机轴为止。

(3) 其余三种一般要根据实际需要自制，其有关参数请参考《机械设计手册》相关内容，材料可用铸铁（HT200）、铸钢或 45 号圆钢，后者因强度较大可做得小一些。对结绳式联轴器，当采用 45 号圆钢时，其轮幅厚度

可为 10 ~ 20mm，穿绳孔的两个外缘应磨成较大的圆弧，以防止割断绑绳。

(4) 结绳式联轴器所用的绑绳一般采用较高强度的尼龙软绳。

(5) 联轴器结构图中所示的顶丝用于压紧轴伸键 [见图 2-35 (a)]，使联轴器与轴进一步固定。无此措施时，联轴器会因配合松动而在轴上滑动。这一点对于用过较长时间的联轴器更为重要。

(二) 多挡轴孔尺寸的联轴节

为使一套联轴器能适用于几种轴径尺寸的电机，一种方法是，在适用于最大轴径尺寸联轴节的孔内镶套，当所镶套管壁较厚时，可采用内外两个键联结，如图 2-36 (a) 所示，否则可采用一个梯形键联结，如图 2-36 (b) 所示；另一种方法是，采用钢制可锁紧的过渡套管，如图 2-37 (c) 所示，这种形式用于紧固皮带轮最合适。

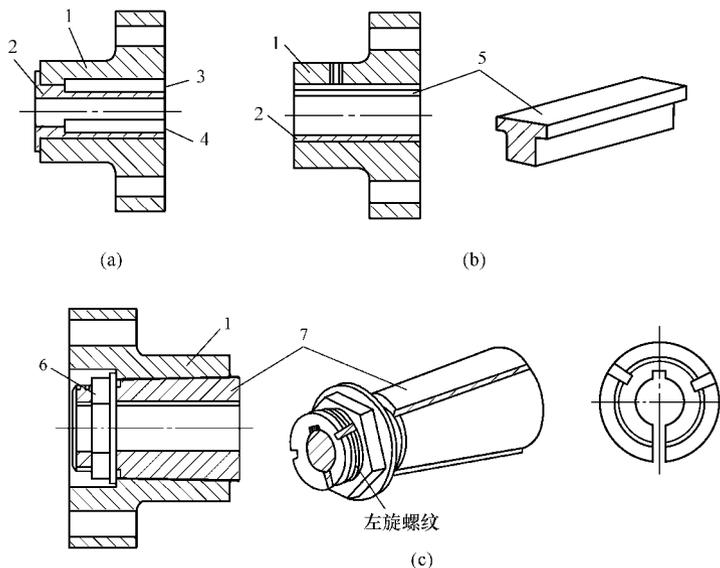


图 2-36 多挡轴孔尺寸的联轴器

(a) 双键联结镶套；(b) 梯形键联结镶套；(c) 钢制可锁紧的过渡套管

1—原联轴器；2—套管；3—外键；4—内键；5—梯形键；6—锁紧螺母；7—外锥形胀套

(三) 使用注意事项

(1) 每次使用前，应检查键槽有无开裂现象；胶圈或齿形垫圈有无破损；柱销是否松动或歪斜。如发现不良现象，应设法解决后方能使用。

(2) 为防止在试验高速旋转时，某些部件意外甩出对人员造成伤害，在必要时，应安装联轴器防护罩，如图 2-37 所示。

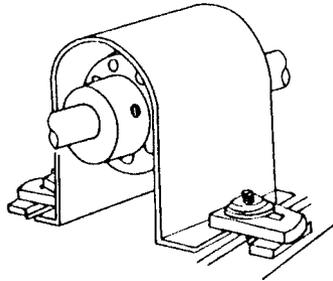


图 2-37 安装联轴器防护罩

第五节 电机试验实用配电和控制电路

本节给出一些实用的电机试验用配电和控制电路，供读者在自制试验设备时参考。图中的元器件大都没有给出具体数据，读者选用时应根据具体要求来确定。

一、三相异步电动机出厂试验配电线路

图 2-38 为三相异步电动机出厂试验配电线路的主系统框图。

配电主电路简图如图 2-39 所示。该系统采用三相感应调压器 T1 提供可变的电压；测量电流的系统使用三个电流互感器 TA2、TA3 和 TA4，一次电流分为 7 挡，分别用 KM2 ~ KM8 切换；KM9 用于封电流互感器 TA2、TA3 和 TA4 的一次绕组；可同时给 10 台电机供电进行空转试验，图 2-39 中 KM10 ~ KM19 即为控制每条输出线的开关（接触器）。

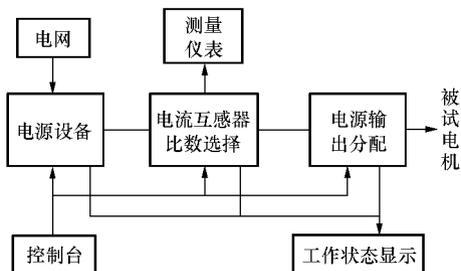


图 2-38 三相异步电动机出厂试验配电线路的主系统框图

二、单台三相异步电动机频繁起动自动控制电路

图 2-40 为一套单台三相异步电动机频繁起动自动控制电路，可完成按一定周期满压起动、断电停转，再满压起动、断电停转的（类似于 S3 工作制，但电机不加负载）自动控制。加电运行和断电停转的时间分别由时间继电器 KT1 和 KT2 调整控制。有关工作原理请读者自行分析。

三、单台三相异步电动机按一定周期正、反转的自动控制电路

实现单台三相异步电动机按一定周期正、反转的自动控制电路见图 2-41。

电路中设置了两个起动按钮 SB2 和 SB3，分别称为“正转按钮”和“反转按钮”，实际用途是，先按 SB2（正转按钮），则电动机先正转再反转；先按 SB3（反转按钮），则电动机先反转再正转。若不必要规定初始转向，则可随意按下其中的一个，被试电机则开始按规定的周期进行正、反转

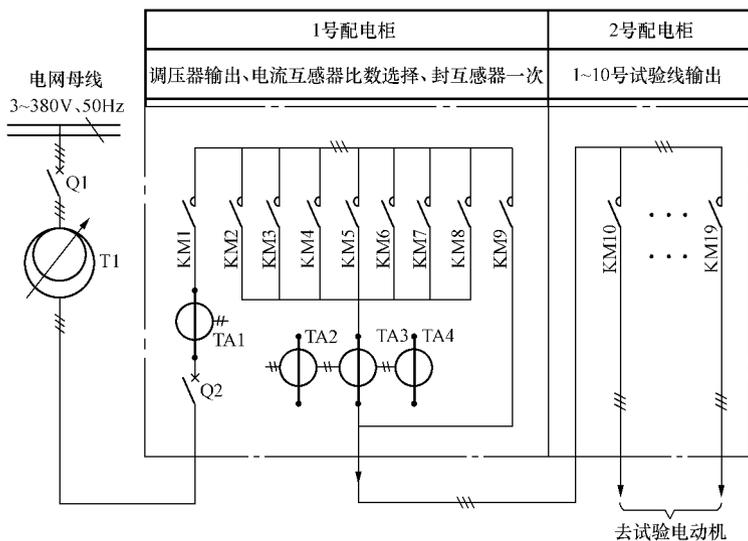


图 2-39 三相异步电动机出厂试验配电主电路简图

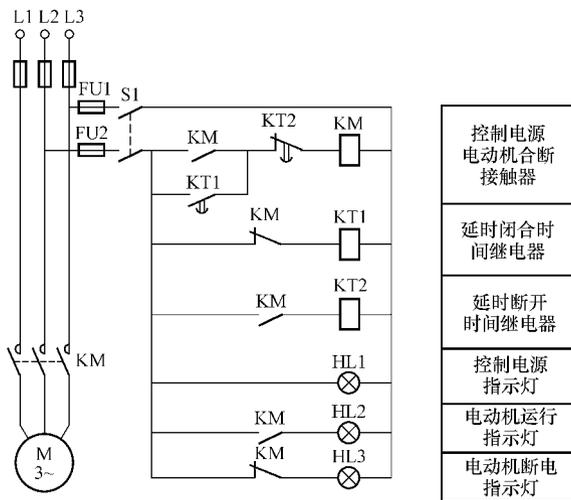


图 2-40 单台三相异步电动机频繁起动自动控制电路

交替的运行。正、反转的运行时间由时间继电器 $KT1$ 和 $KT2$ 设定。 $SB1$ 为停止按钮。

图 2-41 中使用继电器 $KT1$ 和 $KT2$ 分别合断被试电机的电源接触器 $KM1$

和 KM2，由于 KT1、KT2 可通过的电流较小，所以只能用于 10kW 以下的被试电机，若用于较大容量电机的试验，应再增加一级中间继电器，来控制电机电源接触器。另外，本线路在两个转向的转换之中没有间隔时间，换向时冲击电流较大，因此要求配置较大容量的电源和开关元件。

为克服上述不足，需增加两个时间继电器，用于控制正反转交接的时间，使电机基本停转后再通电开始另一个转向的转动。其电路如图 2-42 所示（KR 为热保护继电器）。其工作原理与图 2-41 基本相同。

上述两种电路的工作过程读者可自行分析。

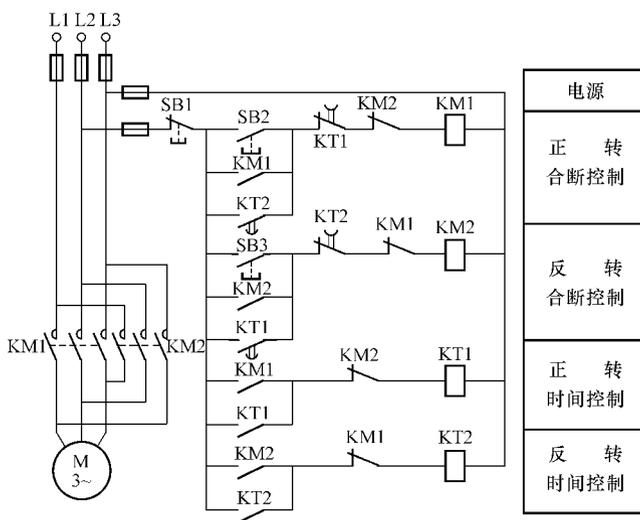


图 2-41 小容量单台三相异步电动机按一定周期正、反转的自动控制电路

四、周期工作制电机发热试验自动控制电路

在对周期工作制电机进行发热试验时，应按规定的时间周期控制被试电机的起动、加载、断电断载或制动、空转等。若用人工控制，则很难做到准确，并且劳动强度较大。

图 2-43 是一套多功能周期工作制电机发热试验自动控制电路。其控制时间的精度主要决定于所选用的两个时间继电器的准确度。

图 2-43 中，M1 为被试电动机，M2 为陪试电机，开关 S1、S2、S3 可使用普通钮子开关，KM3 和 KM4 为普通试验时设置的两路开关（接触器），在进行试验时应先闭合。

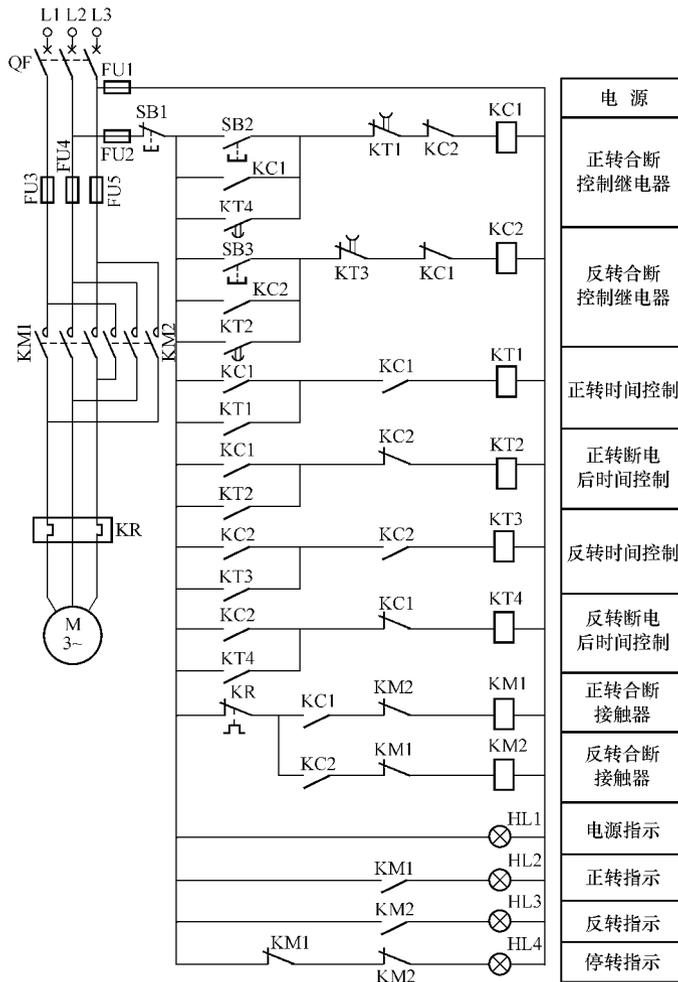


图 2-42 较大容量单台三相异步电动机按一定周期正、反转的自动控制电路

本系统可通过改变 S1、S2、S3 三个开关的工作状态来改变其功能，其对应关系如下：

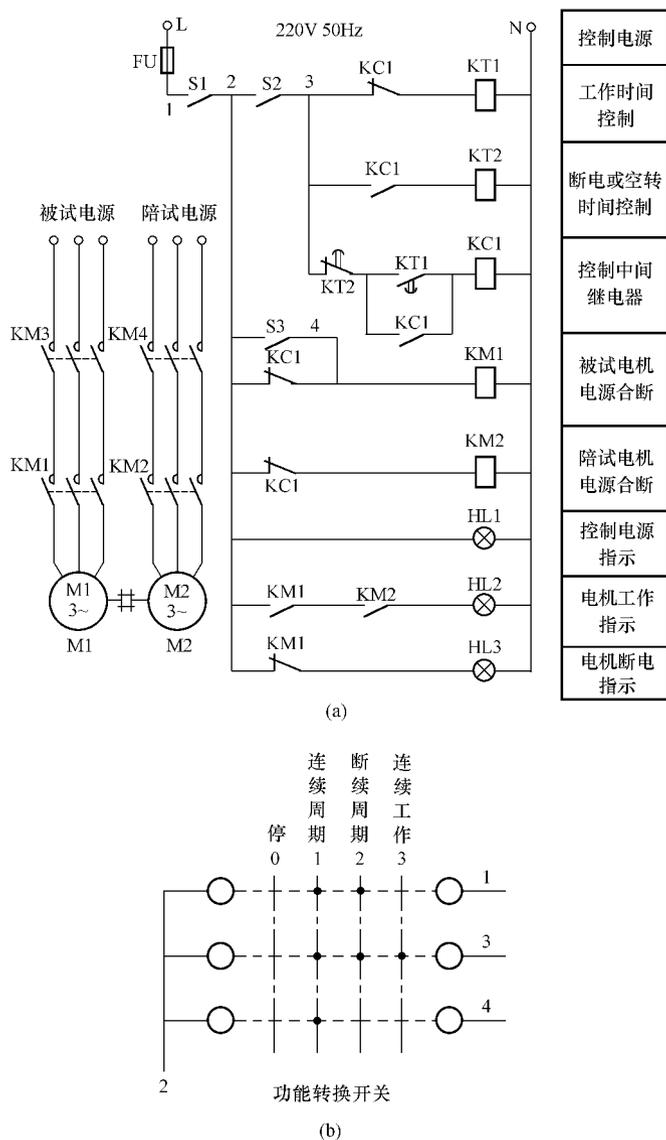


图 2-43 周期工作制电机发热试验自动控制电路
 (a) 用钮子开关的电路；(b) 用转换开关的电路（转换开关部分）

- (1) S1、S2、S3 都合——连续周期工作制。
- (2) S1、S2 合，S3 断——断续周期工作制。
- (3) S1、S3 断，S2 合——连续工作制。时间控制不工作。这样设置的目的是避免反复接线，即可将该部分永久地接在试验电源线路中，不必只在进行周期工作制的试验时才接上。

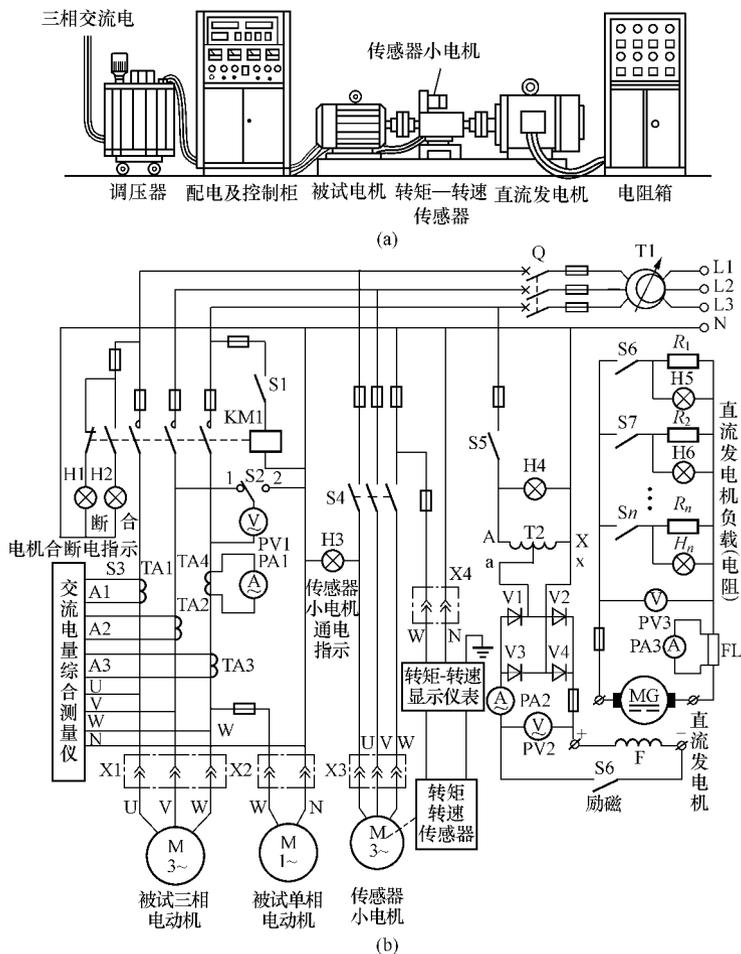


图 2-44 一种可以进行单相和三相交流电动机试验的综合电路

(a) 进行负载和热试验的设备组成示意图；(b) 综合试验线路

可选用一个万能转换开关来代替上述三个开关，进行三种功能的转换，电路如图 2-43 (b) 所示，此时要将 S1、S2、S3 拆下，按图 2-43 (b) 中标出的字母符号将转换开关接入。

五、一种可以进行单相和三相交流电动机试验的综合电路

图 2-44 是一种可以进行单相和三相交流电动机试验的综合电路。该电路采用手工接线的方法选择被试电动机的相数 (X1 接三相电动机, X2 接单相电动机)。被试电动机电压、电流和功率测量可采用三相数字表, 电压表 PV1 用于监测供电电压, 通过开关 S2 选择测量单相或三相 (实际是三相之中的一个线电压); 使用转矩-转速传感器和直流发电机组成的测功系统作为被试交流电动机的负载, 直流发电机输出的电能由电阻 (含电阻器和白炽灯泡) 消耗掉; 通过调节电阻的多少 (粗调) 和直流发电机的励磁 (用自耦调压器 T2 调节, 可做到连续微调) 来调节负载的大小。

电机试验的最终目的是通过各种测量得到被试电机的某些性能参数。试验线路和有关仪器仪表是实现这些目的的工具。本章将介绍各类交流异步电动机试验用仪器仪表及相关线路的通用内容。一些特殊试验的内容将在讲述该项试验时进行介绍。

第一节 电量测量仪表及其使用方法

一、电量测量仪表的分类

在电机试验时，需测量的电量主要有电流、电压、功率、频率和相位（功率因数）等。所以若按所测电量的种类来分，有电流表、电压表、功率表、频率表和相位（功率因数）表等。按测量原理和显示方式分，有模拟仪表（又称为指示仪表，主要为指针式仪表）、较量仪表和数字仪表三大类。按其工作原理，模拟仪表又可分为磁电系、磁电比例系、电磁系、电磁比例系、电动系、电动比例系、感应系、感应比例系、静电系、整流系和电子系等多种类型。按使用时的安装方式，可分为安装式（又称为板式）和便携式两种。按可被测电量的种类，可分为直流表、交流表和交直流两用表三类。其中交流表又可分为低频、工频、中频和高频、正弦波和非正弦波等多种。

二、仪表的误差和准确度分级

（一）仪表误差的分类

（1）基本误差。是仪表和附件在规定的条件下，由于结构和工艺上的不完善所产生的误差。它是仪表本身固有的，不可能完全消除的误差。

（2）附加误差。是指当仪表偏离了规定基本误差的工作条件时所产生的额外误差。

（二）仪表误差的表示方法

（1）绝对误差。仪表的指示值与被测量的实际值之间的差值。

（2）相对误差。绝对误差值与被测量的实际值之比，通常用百分数来表示。

（3）引用误差。绝对误差与仪表测量上限（即仪表的满量程值）比值的百分数。这种误差的表示方式在电量测量仪表中最常用。

（三）电工仪表准确度分级

我国将电工仪表准确度分为7个等级，如表3-1所示。其中：0.1级一般用作标准仪表（用于校验其他低等级的仪表）；0.2级~1.0级用于试验测量；1.5级及以上一般用于监视性测量或要求不严的工程测量。

表 3-1 电工仪表的准确度分级及其误差

仪表的准确度分级 (级)	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 (%)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

三、电机试验测量对仪表准确度的要求

在有关电机试验测量方法的标准中，都要对所用仪表的准确度提出具体的要求，以保障试验数据的准确性，正确反映被试电机的性能数据。当用于产品的型式试验时，一般要求如下（除注明者外，误差均按满量程计算，即“引用误差”）。

(1) 电流、电压、单相功率等电气测量仪表：对一般试验应不低于 0.5 级；用于 B 或 B1 法进行负载试验求取效率时（B 或 B1 法的解释见第四章中效率测试部分），应不低于 0.2 级。

(2) 三相功率表（实际为两块单相功率表组合而成的功率表，用于两表法测量三相功率）：应不低于 1.0 级（只用于一般试验）。

(3) 电流互感器和电压互感器：应不低于 0.2 级。

(4) 电量变送器：应不低于 0.2 级。

(5) 转矩测量仪（含测功机和传感器）：在进行一般试验时，应不低于 0.5 级；用于 B 或 B1 法进行负载试验求取效率时，应不低于 0.2 级。除堵转、最大和最小转矩试验以外，传感器的标称转矩应不超过被试电动机额定转矩的 2 倍，转矩变化的敏感度应达到额定转矩的 0.25%。

(6) 转速测量仪：读数误差应不超过 $\pm 1r/min$ 。

(7) 频率测量仪：应不低于 0.1 级。

(8) 电阻测量仪：应不低于 0.2 级。

(9) 温度测量仪：读数误差应不超过 ± 1 。

(10) 声级计：准确度用等级表示时，一般要求用精密级中的 I 级（最大误差为 $\pm 0.7dB$ ）。

(11) 测振仪：应不低于 5.0 级。

(12) 兆欧表：应不低于 5.0 级。

(13) 其他按具体要求确定。

若用于产品的出厂检查试验，可比型式试验时要求低一级，但有条件时，建议仍按上述要求。

四、常用指示仪表的特征、用途及扩大量程的方法

常用指示仪表的特征、用途及扩大量程的方法见表 3-2。

表 3-2 常用指示仪表的特征、用途及扩大量程的方法

仪表系列	特征及优缺点	用 途	扩大量程的方法
磁电系	仪表本身只能通过几毫安到几十毫安的电流；灵敏度高、刻度均匀；只能用于测量直流电量	测量直流电流或直流电压；用作检流计	电流表并接分流电阻（分流器）； 电压表串接分压电阻（附加电阻）
电磁系	有吸引型和排斥型两种；可交、直流两用，测量直流电时不用考虑接线的极性；电流表可直接通过较大的电流（最大可达几百安培）；结构简单，过载能力强。刻度不均匀（在初始 20% 以内不能用），准确度较低	测量交流电流、电压或直流电流、电压；直接测量值可达几百安（电流）或几千伏（电压）	测量直流和交流时，都可同电磁系仪表；测量交流电流时常使用电流互感器；测量交流电压时常使用电压互感器
电动系	由定线圈和动线圈两部分组成，定线圈可通过较大的电流；可交、直流两用；电流或电压表刻度不均匀；功率表刻度均匀；准确度较高；易受外磁场干扰	测量交流电流、电压或直流电流、电压同电磁系；功率表也可交、直流两用，但主要用于交流	
整流系	由整流电路和磁电系仪表组成；用于测量交流电量；刻度均匀；准确度较低	用于测量交流电流或交流电压	可用分流电阻或附加电阻（接于整流后）；也可用交流电流互感器或电压互感器（接于整流前）

五、电动系交流功率表的使用方法

电动系交流功率表分单相和三相两大类，并且分有功功率表和无功功率表两种。电机试验时主要使用有功功率表（以后，除非另加说明，一律指有功功率表）。

（一）单相功率表

1. 分类

电机试验用的指针式单相功率表又分为普通型（功率因数为 1）和低功率因数型（功率因数为 0.2）两种。后者用于负载功率因数较低场合（如空载和堵转试验时），目的是通过缩小量程来提高测量的准确度。

2. 接线和使用方法

常见 D26-W 型单相功率表外形及盘面器件布置图和无互感器的测量接线见图 3-1。接线时应注意如下事项：

（1）带“*”的电流端钮接电源端，另一端接负载；带“*”的电压端钮有两个接线方向，一种是与带“*”的电流端钮相接，称为“前接

法”，另一种接在负载端，称为“后接法”。有关详细内容将在本章第三节中介绍。

(2) 表内的电流线圈是由参数完全相同的两段组成的，各引出两个端点，可通过不同的连接方法得到两个成倍数的量程，如图 3-1 (b)、(c) 所示。可简记为：“一是一，二是二”，其含义是：用一个连接片时，量程是一倍；用两个连接片时，量程是二倍（是用一个连接片时量程的二倍）。

(3) 旋钮 4 用于改变表针的摆动方向。若测量中，该表的指针向零位的左边摆动时，将该旋钮旋到另一个位置（如原来在“+”的位置，现改到“-”的位置），则表针就会改向右摆动，指示出正确的数值。

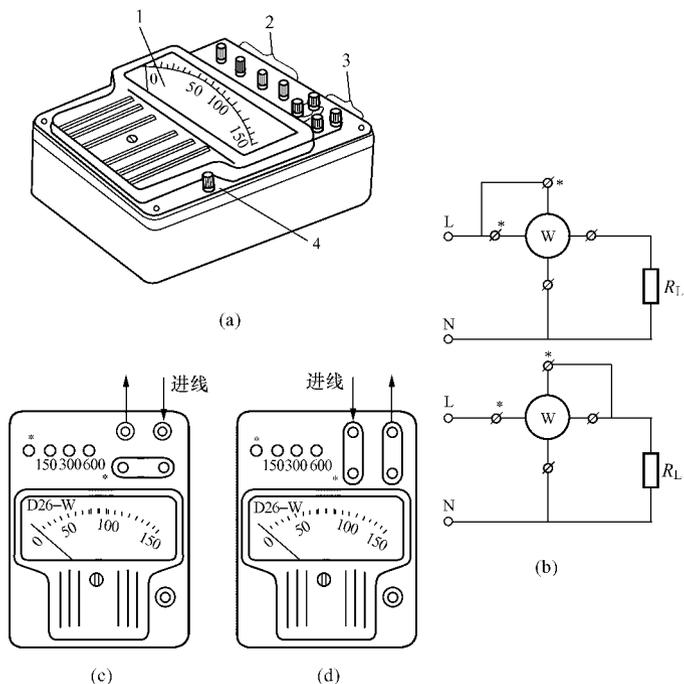


图 3-1 D26-W 型单相功率表和接线方法

(a) 外形图；(b) 测量电路接线图；(c) 小电流挡接线；(d) 大电流挡接线
1—表盘（刻度盘和指针）；2—电压端钮；3—电流端钮；4—改指针摆动方向旋钮

(二) 三相功率表

常见 D33-W 型三相功率表盘器件平面布置图和有、无电流互感器的测

量电路接线见图 3-2。从电路图中可以看出，该表实际上是两只单相功率表的组合，用于三相三线制电路的三相功率测量。其使用方法与单相功率表基本相同。

三相功率表可直接读出被测三相负载的总功率，所以比使用两块单相功率表测量三相功率方便一些，但其准确度比单相表低一到两级。

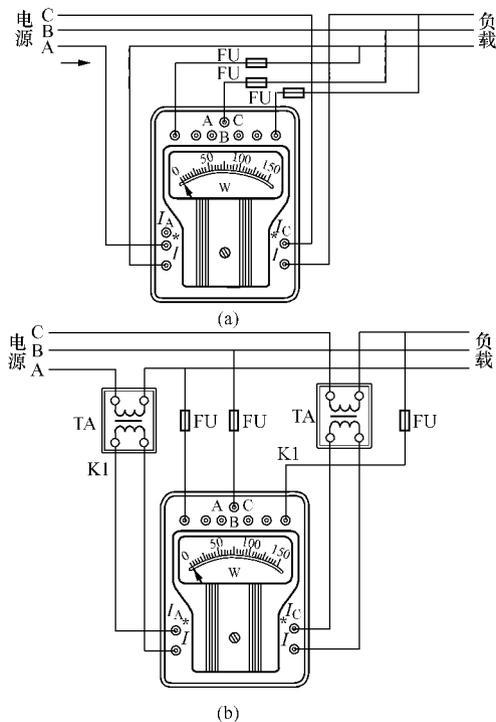


图 3-2 D33-W 型三相功率表的接线方法

(a) 无互感器；(b) 有两个电流互感器

(三) 指针式单相功率表刻度盘每格瓦数（倍数）的计算方法

1. 有电流和电压互感器比数的计算公式

当功率表的电流通过电流互感器、电压通过电压互感器与被测电路相接，所用电流互感器和电压互感器的比数分别为 B_I 和 B_U ，功率表选用的电流量程和电压量程分别为 I_e 和 U_e （单位分别为 A 和 V），功率表的功率因数为 $\cos\varphi$ ，表盘标度总格数为 G ，则该功率表刻度盘每格瓦数（习惯称为倍

数) W_g 为:

$$W_g = \frac{I_e B_1 U_e B_U \cos \varphi}{G} \quad (3-1)$$

2. 无电压互感器时的计算公式

对普通低压电机,电压表不用配备互感器,即可认为电压互感器的比数 $B_U = 1$ 。此时式(3-1)将简化为

$$W_g = \frac{I_e B_1 U_e \cos \varphi}{G} \quad (3-2)$$

3. 低压电机实用的简记计算公式

常用低压电流互感器的一次电流为 I_{HI} (单位为 A),二次电流为 5A,即 $B_1 = I_{HI} / 5$;功率表电流量程选为 5A,即 $I_e = 5A$;刻度盘总格数 $G = 150$ 。

1) 当功率表的功率因数为 1 时,则通过式(3-2)计算简化可得

$$W_g = I_{HI} \frac{U_e}{150} \quad (3-3)$$

用文字表述则为:当功率表的电流量程为 5A、总格数为 150、功率因数为 1 时,该表刻度盘每格瓦数等于电流互感器一次电流乘以功率表选用电压量程为 150 倍数的乘积。例如,当选用互感器的一次电流为 50A,功率表电压选用 600V 挡时,功率表刻度盘每格瓦数 $W_g = 50 \times (600 \div 150) = 50 \times 4 = 200W$ 。

2) 当功率表的功率因数为 0.2 时,则通过式(3-2)计算简化可得

$$W_g = I_{HI} \frac{U_e}{150} \times 0.2 \quad (3-4)$$

用文字表述则为:当功率表的电流量程为 5A、总格数为 150、功率因数为 0.2 时,该表刻度盘每格瓦数等于电流互感器一次电流乘以功率表选用电压量程为 150 倍数的乘积,再乘以 0.2 (或除以 5)。例如,当选用互感器的一次电流为 50A,功率表电压选用 600V 挡时,功率表刻度盘每格瓦数 $W_g = 50 \times (600 \div 150) \times 0.2 = 50 \times 4 \times 0.2 = 40W$,或 $W_g = 50 \times (600 \div 150) \div 5 = 50 \times 4 \div 5 = 40W$ 。

4. 有电流互感器无电压互感器时的功率表倍数简化计算表

同上述低压电机实用的两个简化计算公式的条件,则当功率表的电压量程设置为 75、150、300、600V 四挡时,可列出如表 3-3 所示的功率表倍数

(刻度盘每格瓦数) 简化计算表。

表 3-3 有电流互感器无电压互感器, 电流量程为 5A 时的功率表倍数 (每格 W 数) 简化记算表

功率表的 功率因数	功率表的电压量程 (V)			
	75	150	300	600
	功率表倍数 (刻度盘每格瓦数, 总格数为 150)			
1	$0.5I_{HI}$	$1I_{HI}$	$2I_{HI}$	$4I_{HI}$
0.2	$0.1I_{HI}$	$0.2I_{HI}$	$0.4I_{HI}$	$0.8I_{HI}$

由表 3-3 可列出所用的电流互感器各比数时的功率表倍数 (刻度盘每格瓦数) 简化计算表, 以便试验时查找记录。

5. 功率表电流为 10A 或 2.5A 时的倍数计算

当功率表的电流量程为 10A 时, 表 3-3 中数据乘以 2; 电流量程为 2.5A 时, 表 3-3 中数据除以 2。

六、电机试验中常用的指示仪表

电机试验配电监视和电量精确测量中要用到多方面的仪表, 其常用的指示仪表见表 3-4。

表 3-4 电机试验中常用的指示仪表

型 式	名 称	型 号	准确度级
安装式	直流电流表	44C1-A, 44C2-A 59C2-A, 59C5-A	1.5
	直流电压表	44C1-V, 44C2-V 59C2-V, 59C5-V	1.5
	频率表	44L1 - Hz	2.5
携带式	交直流电流表	C38-mA, C38-A C59-mA, C59-A C65-mA, C65-A	0.5
	交直流电压表	C38-mV, C38-V C59-mV, C59-V C65-mV, C65-V	0.5
	交流 功率表	D26-W, D34-W (低功率因数)	0.5
	功率 因数表	D26-cosφ D31-cosφ	1.2 1.0
	频率表	D3Hz-1, D43-Hz	0.5
	绝缘电阻表	ZC7 型: 250、500、1000、2500V	±5% 示值
	静电系高压表	Q3-V: 75、15kV	

七、电机试验中常用的数字仪表

随着科学技术的发展，很多数字仪表应用到了电机试验测量中。到目前为止，由于还没有统一的标准，所以数字仪表的规格型号和性能要求还是由生产厂家自定。数字仪表的外形也较多，形式不一。和普通指示仪表相比，数字仪表的优点体现在如下几个方面：

(1) 测量准确度可以做得较高。例如，可达到0.2级，甚至0.1级，这一点对普通指示仪表是很难做到的。

(2) 读数直观，即可直接读出实际的测量值。

(3) 可将几种不同的量在一块表上显示出来。例如，可同时显示三相电压、电流、功率和频率、功率因数等十余个电量参数，从而减小了占用体积，并且总投资可低于使用指示仪表。

(4) 可设置数据锁定和保存功能，做到多个参数同时采集和读取。一方面提高了测量的准确度和可靠性，另一方面节省人力并减轻劳动强度，这一点在进行三相异步电动机堵转试验时体现得最为明显。

(5) 可与计算机联网，实现自动测试和整个试验自动化。

第二节 电流互感器、电压互感器和分流器

对较大的交流电压、电流和功率，一般仪表的量程将不能满足，此时可通过电压互感器将高电压“降低”，通过电流互感器将大电流“变小”；对较大的直流电压、电流则通过分压电阻或分流器分走一部分等措施，得到一个仪表能“接受”的数值，然后再通过转换得到实际的测量值。本节将主要介绍传统互感器和分流器的相关知识，最后简单介绍新型的霍尔电流传感器。

一、互感器的误差及其修正方法

互感器（含电流互感器和电压互感器）在使用时会产生两项误差，即变比误差和相角误差，简称为“比差”和“角差”。

（一）不同准确度等级互感器的“比差”和“角差”

表 3-5 和表 3-6 分别为不同准确度等级的电压互感器和电流互感器误差范围。

表 3-5 电压互感器误差限值

准确度等级	误差范围	
	变比误差 (%)	相角误差 (')
0.1	±0.1	±5
0.2	±0.2	±10
0.5	±0.5	±20
1.0	±1.0	±40

表 3-6 电流互感器误差范围

准确度等级	一次电流为额定电流的百分数 (%)	误差范围	
		变比误差 (%)	相角误差 (')
0.1	50	±0.15	±6.5
	100 ~ 120	±0.10	±5.0
0.2	50	±0.30	±13.0
	100 ~ 120	±0.20	±10.0
0.5	50	±0.65	±45
	100 ~ 120	±0.50	±40

1.0	50	± 1.3	± 90
	100 ~ 120	± 1.0	± 80

(二) 变比误差

变比误差实际上就是互感器的实际变比与标定变比之差。通常以相对最大误差(%)的形式表示。前面提到的互感器准确度实际上就是指它的变比误差。

变比误差的大小除与互感器的结构、铁心材料等固有因素有关外,还与运行时所承担的负载阻抗的大小和性质(电阻负载、电感或电容负载)、通过电流的大小,以及所加电源的频率等动态因素有关。

(三) 变比误差的修正方法

设电流互感器的标称变比、实际变比和变比误差分别为 K_{IN} 、 K_{IS} 和 C_1 , 电压互感器的标称变比、实际变比和变比误差分别为 K_{UN} 、 K_{US} 和 C_U , 则

$$K_{IS} = K_{IN} (1 - C_1) \quad (3-5)$$

$$K_{US} = K_{UN} (1 - C_U) \quad (3-6)$$

其中变比误差 C_1 和 C_U 由互感器校验报告中获得。当互感器二次侧的实际负载与校验时的负载不同时,其变比误差值可由互感器不同负载时的变比特性曲线来估算。

设试验时电流、电压和功率仪表指示值(必要时为经仪表误差修正的值)分别为 I_s 、 U_s 和 P_s , 则可用下列各式求取经过互感器变比修正的三者各自实际值 I 、 U 和 P 。

$$I = K_{IS} I_s \quad (3-7)$$

$$U = K_{US} U_s \quad (3-8)$$

$$P = K_{IS} K_{US} P_s \quad (3-9)$$

(四) 相角误差

相角误差是由于受互感器所接电路电抗的影响,使其一、二次电压(或电流)之间的相位差偏离了理想的 180° 电角度。偏离的角度 δ 称为互感器的相角误差,单位为分(')。其值可正可负。相角误差对可动部分的偏转与相位有关的仪表会产生影响,属于这类的仪表有功率表、电能表和相位表(功率因数表)等。

(五) 相角误差的修正方法

对于电机试验,只在认为有必要时,才对功率测量值进行互感器相角误差修正。下面介绍其修正方法。

1. 功率测量中的相角误差分类

- (1) 功率表电压线圈回路中的相角误差 α ;
- (2) 电流互感器的相角误差 β_I ;
- (3) 电压互感器的相角误差 β_U 。

2. 相角误差 α 、 β_I 、 β_U 的求取方法

- (1) α 按下式求取

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{X_W}{R_W} \quad (3-10)$$

式中 R_W ——功率表电压线圈回路中的总电阻（包括外附加电阻）， Ω ；
 X_W ——功率表电压线圈的感抗， Ω 。 $X_W = 2\pi fL$ ，其中， L 为功率表电压线圈的电感，单位为 H ，从表的刻度盘上获得； f 为被测电压频率，单位为 Hz 。

α 值正负号的确定原则是：当为容抗时，取“+”号；为感抗时，取“-”号。无补偿的功率表的阻抗为感抗。

(2) 相角误差 β_I 和 β_U 可从互感器的校验报告中获得。当互感器二次侧的实际负载与校验时的负载不同时，其相角误差值可由互感器不同负载时的相角特性曲线来估算。

β_I （或 β_U ）值正负号的确定原则是：当互感器二次侧的电流（或电压）超前于一次侧电流（或电压）时，取“+”号；滞后时，取“-”号。无补偿时，电流互感器二次侧的电流超前于一次侧电流，而二次侧的电压滞后于一次侧电压。

3. 功率测量值的修正

修正前的视在功率 S （VA）及功率因数 $\cos\varphi_s$ 由下列各式求得（一律为单相值）：

$$S = UI \quad (3-11)$$

$$\cos\varphi_s = P/S \quad (3-12)$$

$$\varphi_s = \cos^{-1} (P/S) \quad (3-13)$$

实际的功率因数按下式求取

$$\cos\varphi = \cos(\varphi_s - \alpha + \beta_I - \beta_U) \quad (3-14)$$

相角修正系数 K_φ 用下式求得

$$K_\varphi = \cos\varphi / \cos\varphi_s \quad (3-15)$$

实际的功率值 P_C 由下式求得

$$P_C = K_\varphi P \quad (3-16)$$

上述各式中， I 、 U 为测量得到的电流和电压值， P 为经过变比修正后

的功率值，单位分别为 A、V 和 W。

二、电流互感器的用途、分类及准确度分级

(一) 用途和分类

电流互感器在交流电量测量系统中用于扩大（有时也缩小）电流表和功率表的量程。有单比数和多比数、安装式和便携式等分类方式。

用于中小型电机试验的电流互感器一次侧额定电流，常用的有如下几挡：2.5、5、10、25、50、100、200、500、1000、2000A 等，对于试验用的便携式多挡电流互感器，200A 及以上的一次绕组一般要另附加穿芯线圈；二次侧额定电流一般为 5A。

几种常见高、低压电流互感器的外形示例见图 3-3。

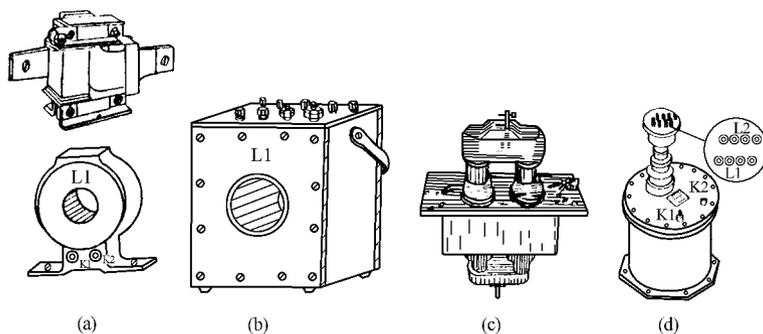


图 3-3 几种常见电流互感器的外形示例

- (a) 单比数安装式低压电流互感器；(b) 多比数便携式低压电流互感器；
 (c) 单比数安装式高压电流互感器；(d) 多比数便携式高压电流互感器

(二) 准确度分级及试验用互感器的准确度要求

电工用电流互感器的准确度分为 0.1、0.2、0.5、1.0、3.0 共 5 个等级。安装式电流互感器的准确度一般较低，常为 1.0 或 0.5 级。用于电机试验的互感器，其准确度应不低于 0.2 级（一般用 0.2 级）。

三、电流互感器的使用方法及注意事项

(一) 电流互感器的选择方法

(1) 用于监视用的安装式电流表或某些被测电流量只在一个较小范围内变化的场合时，应选用单比数的电流互感器。互感器一次侧标定电流值应在被测电流最大值的 1.1 ~ 1.2 倍之内。与监视用的安装式电流表配套时，其精度可较低些，一般为 0.5 级。

(2) 当使用直读式电流表时（安装式电流表一般为直读式，即仪表读数就是实际的测量值），所选用的电流互感器应与电流表配套。例如，电流表规定用 100/5 的互感器（在表盘上标出），则应选用一次电流为 100A，二次电流为 5A 的互感器与之配套使用。此时电流表显示的读数即是被测量的实际数值。

(3) 用于被测电流变化范围较大的场合时，应选用多比数电流互感器。互感器的一次电流最大标定值（包括附加穿芯一次线圈后的标定值）应为被测电流最大值的 1.1 倍左右。

(二) 电流互感器二次负载阻抗的匹配要求

因为电流互感器的误差与其二次电路的负载大小有关，所以每台电流互感器都标定一个额定负载，单位为 VA。因二次标定电流是已知的，例如 5A，所以可用额定阻抗限值来表示，这样使用起来会更直观。当其二次电路的实际负载阻抗小于该值时，能保证标定的准确度，否则就不能保证标定的准确度。若互感器标定额定负载和二次电流分别用 S_{2N} （单位为 VA）和 I_{2N} （单位为 A）来表示，则额定负载阻抗限值（用 Z_N 表示，单位为 Ω ，是二次电路中包括电流表和所有连线阻抗的总和）可用下式求得：

$$Z_N = \frac{S_{2N}}{I_{2N}^2} \quad (3-17)$$

例如，某电流互感器标定额定负载和二次电流分别为 10VA 和 5A，则其额定负载阻抗最高限值应为： $10\text{VA} \div (5\text{A})^2 = 0.4\Omega$ 。即该电流互感器二次电路的实际负载阻抗应不大于 0.4 Ω ，才能保证标定的准确度。

(三) 电流互感器的正确接线

(1) 电流互感器的一次应串联在被测电路中，其标有 L1 的端子应与电源相接，另一端子与负载（用电器）相接。

对穿芯式互感器，电源线应由标有 L1 的一端穿入，穿过后去接负载。电源线穿过互感器中心孔几次，即为几匝，如图 3-4 所示。

(2) 电流表或功率表的电流回路应与电流互感器的二次 K1、K2 相接。与功率表的电流回路相接时，其 K1 端应接功率表标有“*”的一端（该端被称为“发电机端”）。

(3) 标有 K2 的二次端子和铁心均应可靠接地。

接线实例如图 3-5 所示。

(四) 使用电流互感器时应注意的事项

(1) 电流互感器的铁心和二次绕组的 K2 端必须可靠接地，以保护试验人员和试验设备，免遭因绝缘损伤漏电时造成意外伤害。

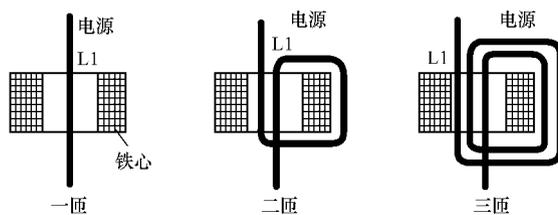


图 3-4 电流互感器穿芯匝数示例

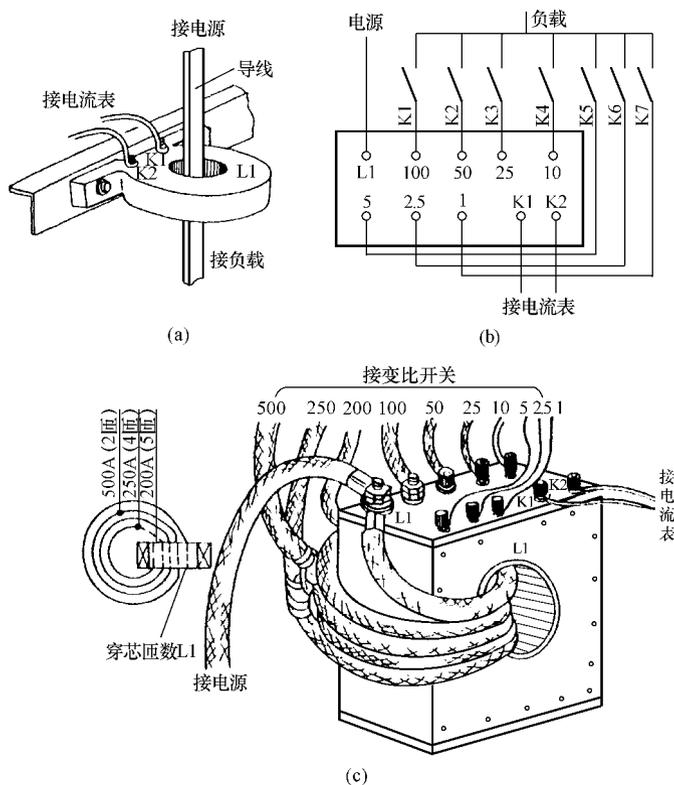


图 3-5 电流互感器接线实例

- (a) 单匝穿芯式互感器；(b) 多匝互感器；
(c) 多匝附带穿芯式互感器

(2) 在通电使用中，电流互感器的二次回路绝对不许开路。因为一次

绕组有电流时，若突然将二次回路断开，则将引起互感器的铁心过度磁化，导致铁心发热，严重时会将绕组烧毁；同时，二次回路会感应出很高的电动势，将可能危及操作人员的安全或造成互感器的匝间击穿短路。

为此，在实用线路中，通常采取如下措施：

1) 电流互感器的二次电路中不应安装熔断器。

2) 用一个开关和电流表并联相接，使用中需要读电流表的读数时开关打开，在有必要时将开关闭合，对于交流异步电动机试验，设置这一开关还有另一个更大的用途，就是在电机通电起动时，将该开关闭合，让较大起电动电流的绝大部分从开关上通过，从而避免电流表通过较大的电流而损坏，这就是所谓的“封表”，这种开关也被称为“封表开关”或“封互感器二次开关（简称封二次开关）”。

3) 对于多比数电流互感器，在通电试验测量中需更换比数时，应按着先合上预更换的比数开关，再断开原用比数开关的原则进行操作，即为“先合后断”原则。这样做的目的是避免在倒换开关时造成互感器二次短时开路的现象。

四、电流互感器及其接线的常见故障和原因

在下面的叙述中，当提到三相时，是指“三互感器三相四线制接法”，并且三相功率（有功功率）的测量采用“两表法”（见本章测量线路部分的有关内容）。

（一）绕组匝间或对地（铁心或金属外壳）短路

因使用时没有按规程进行操作，如互感器二次绕组突然开路；在测量大电流时使用了小比数；对交流异步电动机进行满压起动时没有封表等，都将有可能造成互感器绕组匝间或对地（铁心或金属外壳）击穿短路。此时将出现如下现象：

（1）当一次绕组有匝间短路时，电流表示值偏小；二次绕组有匝间短路时，电流表示值偏大。

（2）当一次绕组有对地短路时，只要一次电路和电源接通，电流表就会有电流显示，并且该电流显示值会随电源电压大小变化而变化。

（3）用于三相测量时，三相电流会出现较大的不平衡。

（4）互感器发热，严重时会出现焦糊味或冒烟现象。

（二）三相电流表显示值严重不平衡

（1）三个（或两个）互感器一次穿芯线的穿入方向或匝数不一致。

（2）改变变比的开关接线接错或某对触点虚接或线路中有的连接点松

动、虚接或氧化造成接触不良。

- (3) 某个互感器内部或外部接线有短路或断路现象。
- (4) 某个互感器一次或二次绕组有匝间或对地短路故障。

(三) 有异常响声

- (1) 紧固件松动。
- (2) 浸漆不良,造成绕组或铁心片间松动,产生电磁噪声。
- (3) 绕组有匝间或对地短路故障。

(4) 严重过载。

(四) 在进行三相电机试验测量时,两只功率表读数不正常

(1) 有一只功率表无读数,同时与该功率表串接的电流表也无读数。则可能是该相电流互感器的一次或二次绕组有开路现象,也可能是中间连线有断开处。

(2) 功率表无读数,但三相电流表都正常,则电流互感器无故障。问题发生在功率表的电压回路中(电压回路断路)。

(3) 作交流异步电动机空载试验时,两功率表的读数大体相等。不是电流互感器的故障,可能是功率表的电压线交差接错,如应接U相的接了W相,而应接W相的接了U相。

(4) 在使用某一互感器比数时,功率表和电流表读数正常,但使用其他的比数时,数据偏大。可能是正常数值比数的合、断接触器触点没打开,原因是触点粘连或控制线路出现故障造成不能切断其电磁铁线圈电路。

五、电压互感器的使用方法及注意事项

一般交流电压表可直接测量600V及以下,甚至于1kV及以下的电压,所以在进行低压电机试验时,很少用到电压互感器,而当进行高压电机试验时,则必须采用电压互感器。

(一) 电压互感器的分类和规格数据

电压互感器其实就是一个精密的降压变压器。按电压等级来分有高压和低压两大类;按测量挡数来分,有单比数和多比数之分;另外还可根据其准确度分为精密级和一般级两种。图3-6给出了几种高、低压电压互感器的外形示例。

电压互感器的二次额定电压一般为100V或 $100/\sqrt{3}$ V。其一次额定电压用于高压测量的有1、2、3、6、10、15、30、60kV等若干个级别;用于低压测量的有220、380、440、500、600V等几个级别。额定容量有15、10、5VA等几个规格。

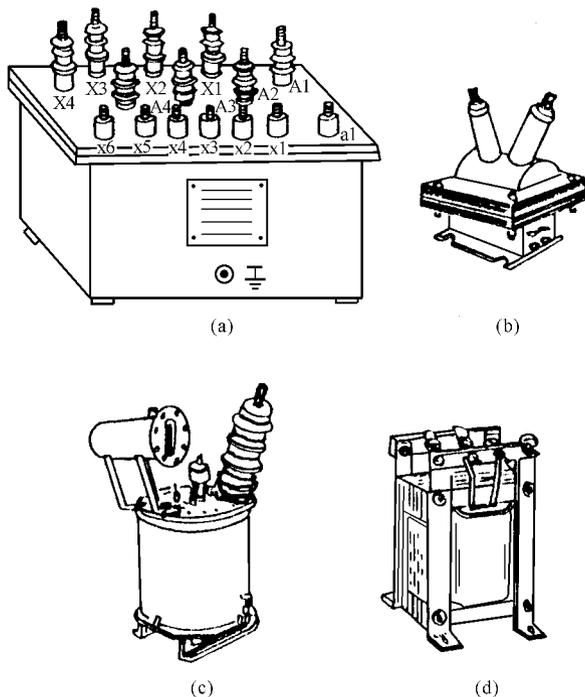


图 3-6 电压互感器外形示例

(a) 高压多比数电压互感器；(b) 浇注式单比数电压互感器；
(c) 高压油浸式电压互感器；(d) 低压电压互感器

(二) 电压互感器的测量接线及使用注意事项

(1) 电压互感器一次绕组线端分别用 A 和 X 标志，二次的两端分别用 a 和 x 标志，其极性和对应关系是：A 与 a 同极性，X 与 x 同极性。

(2) 与电路连接时，电压互感器一次绕组的两端应与被测电路并联，二次绕组与电压表连接。一、二次回路中都要加入适当容量的熔断器，以对电路意外短路起保护作用。

(3) 电压互感器在使用中，其二次回路严禁短路，否则将可能对互感器造成较大的损坏。

(4) 当采用两功率表法测量功率的线路时，电压互感器一次绕组的首端 (A 端) 应与功率表电流测量相的一次电源线相接，尾端 (X 端) 接中相；二次绕组的首端 (a 端) 应与功率表带 “*” 的电压端钮相接。详见

本章第三节中的图 3-11 ~ 图 3-13。

(5) 为保证安全，二次绕组和铁心都应可靠接地。

六、分流器及其使用方法

(一) 分流器的用途及其分类

分流器主要用于扩大磁电系直流电流表的量程，有时也用于交流电路。用电阻温度系数较低的金属材料制造。图 3-7 给出了几种不同电流等级的分流器外形示例。

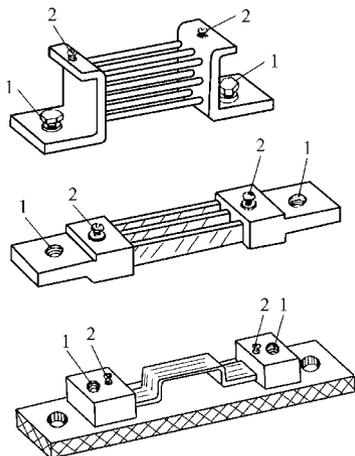


图 3-7 分流器示例

1—电源端子（电流端子）；2—仪表端子（电位端子）

专用分流器按其可通过的额定电流和由此在其两个电位端子之间产生的电压降（称为“额定压降”）分类，额定电流有很多种，而较常用的额定压降则有 75mV 和 45mV 两种。

(二) 分流器的使用方法

1. 选用分流器的方法

(1) 按所用电流表（或电流电压两用表）表盘上所标出的毫伏数选择分流器的额定压降规格。若所用电流表无此值，则用下式计算表的电压量限，然后再选择分流器的额定压降规格。

$$U_V = 1000 I_A R_A \quad (3-18)$$

式中 U_V ——表的电压量限，mV；

I_A ——电流表满刻度时的电流，A；

R_A ——电流表的内阻, Ω 。

(2) 按欲扩大的电流量程选择分流器的额定电流规格。

(3) 将选定的分流器两个电流端分别与电源和负载相连接, 电位端接电流表, 应注意电流表的端子极性要对接。

这样电流表的量程就扩大到了分流器上标定的电流值。

2. 使用分流器后电流表倍数的计算方法

对于电机试验测量, 往往一块电流表要配置多个分流器, 以解决在较大测量范围都能保证要求的测量准确度问题。此时要求所用的所有分流器的额定电压降都与所配电流表一致。这样, 分流器选定后, 电流表的满量程就是所选分流器的额定电流值, 电流表的倍数 (即其表盘刻度每格电流数) 即为分流器的额定电流除以表盘刻度总格数。

若使用单一量程的直流电流表, 则一般选用符合被测量范围的直读式, 在其表盘上会标注出所需要的分流器规格。例如, 将要测量的最大电流为 100A, 所选用的电流表上标注着 100A 和 75mV, 则应选用 100A、75mV 规格的分流器与之配套。

七、霍尔电流传感器

霍尔电流传感器是一种利用金属的霍尔效应制成的新型电流传感器。由于单独使用霍尔元件制成的互感器测量范围和测量幅度都有限, 所以在实际应用中, 一般是将霍尔元件和传统的电磁式电流互感器 (实际结构和所用材料与真正的电磁式电流传感器有一定的区别) 相结合使用。

图 3-8 为一种实用的霍尔电流传感器电路原理图。其有关工作原理请查阅相关专业技术资料。

这种电流传感器的结构比传统的电磁式电流互感器略复杂, 但其工作频

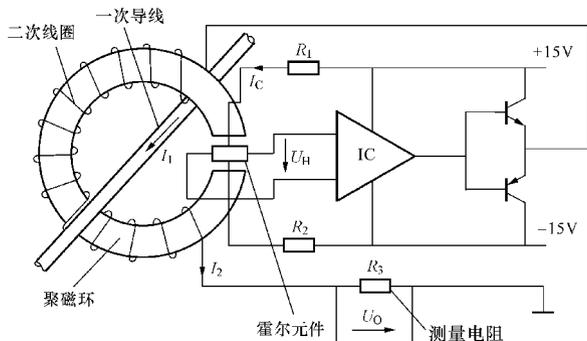


图 3-8 一种实用的霍尔电流传感器电路原理图

带较宽，可以达到 0 ~ 100kHz，特别是可适用于各种电流波形，并能方便地实现测量数字化和自动化，这些性能对于传统的测量是较难实现的。这种传感器的测量范围现已达到了 50kA，准确度为 1.0 级以上。随着该项技术的不断提高，特别是准确度的提高，这种传感器将很快得到普及，其应用范围也将会很广泛。

第三节 交流异步电动机试验测量电路

一、单相和三相电流测量电路

所用电流表可为电动系、电磁系或整流系指针式交流电流表或交流数字表。

(一) 单相电流测量电路

测量单相交流电流时，将电流表串联在电路中，当所用电流表的量程小于被测电流时，一般采用加电流互感器扩大量程的方法。其电路原理如图 3-9 (a)、(b) 所示。

(二) 三相电流测量电路

直接测量三相交流电流的电路与单相相同，只是需要三块电流表而已。当需要使用电流互感器时，线路则有些变化，并分为两互感器三表法和三互

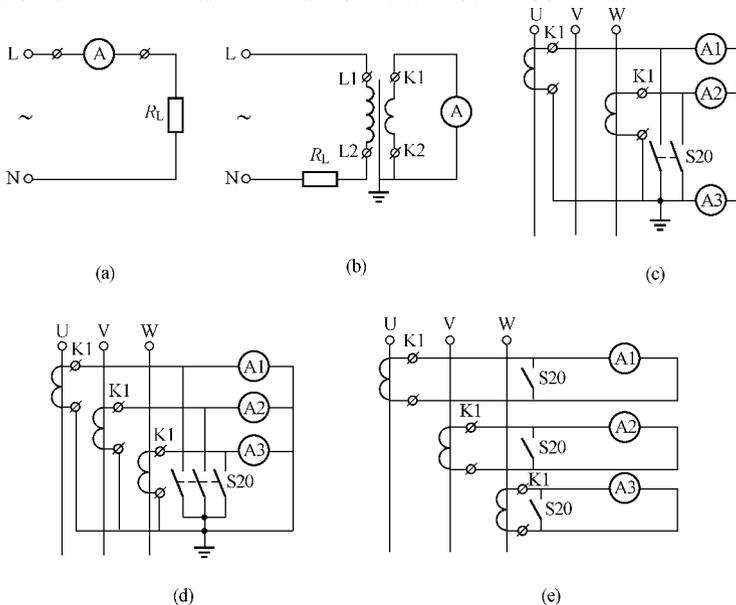


图 3-9 单相和三相交流电流测量电路

- (a) 单相直接测量线路；(b) 单相通过电流互感器的测量线路；
- (c) 三相两互感器三表法线路；(d) 三相三互感器三表法三相四线制线路；(e) 三相三互感器三表法三相六线制线路

感器三表法两种接线方式，下面将详细介绍。

1. 两互感器三表法电流测量线路

两互感器三表法线路如图 3-9 (c) 所示，其中 A1、A2、A3 三表显示

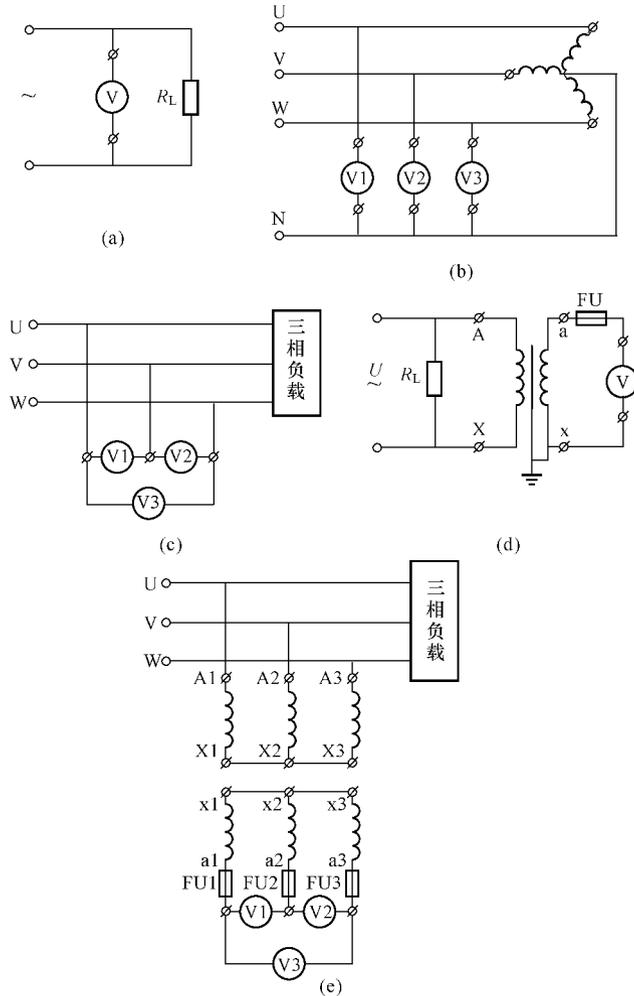


图 3-10 单相和三相电压测量线路

(a) 单相电压直接测量线路；(b) 三相相电压直接测量线路；
 (c) 三相线电压直接测量线路；(d) 单相电压通过电压互感器连接的测量线路；(e) 三相电压通过电压互感器连接的测量线路

值乘以互感器的倍数后，分别为 U、V、W 三相的线电流值。

2. 三互感器三表法的两种电流测量线路

图 3-9 (d)、(e) 分别为三互感器三表法三相四线制（三个电流互感器二次输出共为 4 条线）和三相六线制（三个电流互感器二次输出共为 6 条线）线路。开关 S20 是为防止电机在满压启动时产生较大启动电流对电流表的损坏而设置的，常被称为“封表开关”或“封互感器二次开关”（简称封二次开关。因老的电工制图标准中电流互感器文字符号为 CT，所以原习惯称为“封 CT 二次”开关。现行标准中，电流互感器的电路文字符号为“TA”）。

二、单相和三相电压测量线路

单相和三相电压直接测量线路分别如图 3-10 (a)、(b)、(c) 所示。单相和三相电压通过电压互感器连接的测量线路分别如图 3-10 (d)、(e) 所示。

在三相电压平衡的供电系统中，三相电压可通过一个三相电压转换开关接一块电压表来测量，需要时，通过转换开关的切换来观察每一相电压的具体情况。该转换开关有专用的产品，型号为 LW12-16/9.6911.2（用于三个相电压转换）和 LW12-16/9.6912.2（用于三个线电压转换）；也可选用 LW5 或 LW8 型万能转换开关（例如三相电压转换开关 LW5-15YH2/2 型）。

三、功率测量线路

除非另有说明，所测的功率一律指有功功率。对于电机试验，可使用指针对式电动系功率表或数字功率表。

（一）单相功率测量线路

单相功率测量线路如图 3-11 所示。应注意功率表电流和电压带“*”的接线端钮所接位置。电机试验较常采用电压后接法电路。

（二）三相功率测量线路

用于电动机试验测量的三相功率测量线路有两种类型，即“两表法”和“三表法”，但较常用的是“两表法”，它适用于各种接法和对称与不对称的三相负载电路，如图 3-12 所示。应注意功率表电流和电压带“*”的接线端钮所接位置。

（三）功率表方法误差的修正办法

在通电测量时，由于功率表电流回路或电压回路要产生电压降或分流功率，所以将对测量值带来一定的误差 ΔP ，使仪表显示值 P_B 略大于实际值 P_F 。这种误差属于“方法误差”。当该误差值占测量值的比例较大足以影响

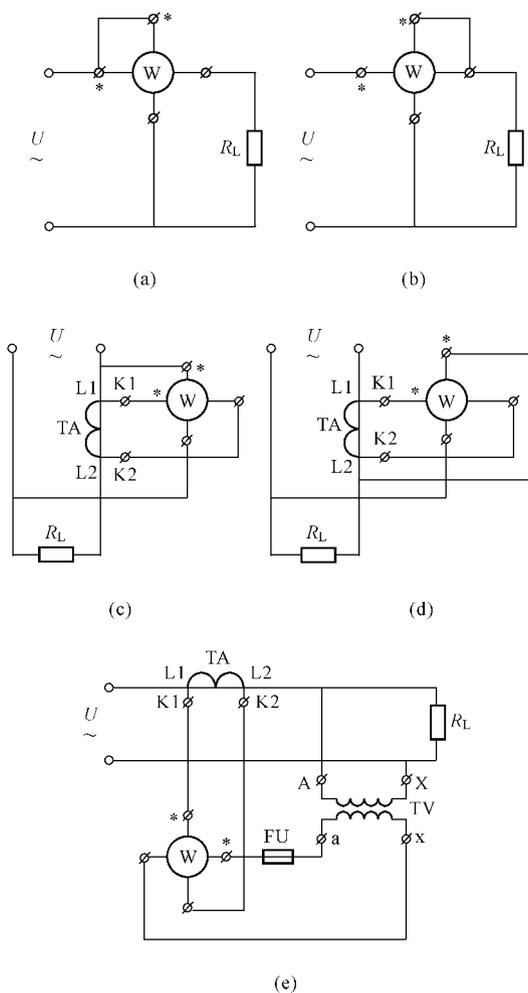
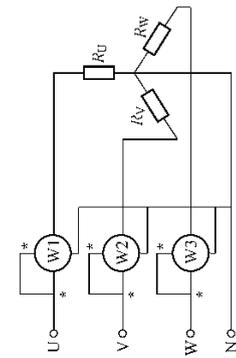
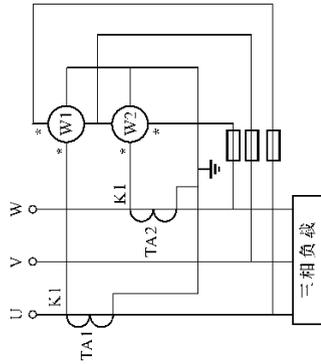
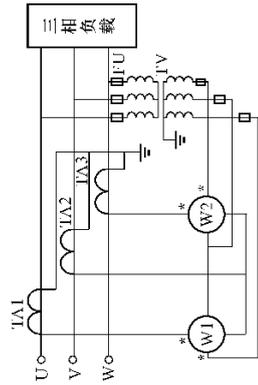
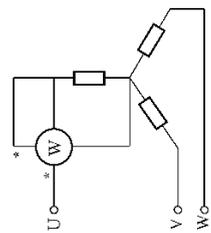
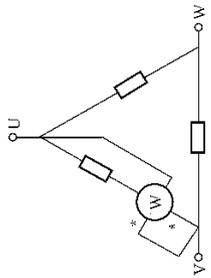
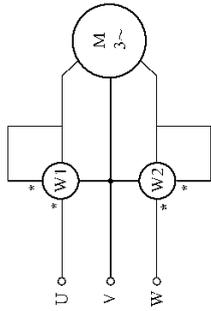


图 3-11 单相功率测量线路

(a) 电压前接法直接测量线路；(b) 电压后接法直接测量线路；
 (c) 电压前接法通过电流互感器的间接测量线路；(d) 电压后接法通过电流互感器的间接测量线路；(e) 通过电流互感器和电压互感器的间接测量线路



测量结果，或要求精密测量时，应对这些误差进行修正。下面以较简单的单相电路来介绍修正办法。其他电路可参照进行。

1. 电压前接法单相电路功率表误差的修正

对电压前接法电路，功率表电压测量量中包括负载的电压降和功率表电流回路的电压降两部分。后一部分与负载电流相互作用产生的功率即是功率表的方法误差 ΔP 。可用下式求取负载功率的实际值 P_F 。损耗和功率单位为 W 。

$$P_F = P_B - \Delta P = P_B - I^2 R_A \quad (3-19)$$

式中 I ——通过负载的电流（也是通过功率表电流回路的电流）， A ；

R_A ——功率表电流回路的直流电阻， Ω 。

例1：通过负载的电流 $I = 5A$ ，功率表电流回路的直流电阻 $R_A = 0.12\Omega$ ，功率表的示值 $P_B = 800W$ ，则负载功率的实际值 $P_F = 800 - (5)^2 \times 0.12 = 797W$ 。

电压前接法功率测量线路较适用于负载电阻远大于功率表电流回路电阻的场合。

2. 电压后接法单相电路功率表误差的修正

对电压后接法电路，功率表电流测量量中包括负载的电流和功率表电压支路的电流两部分。后一部分与负载电压相互作用产生的功率即是功率表的方法误差 ΔP 。可用下式求取负载功率的实际值 P_F 。损耗和功率单位为 W 。

$$P_F = P_B - \Delta P = P_B - (U^2 / R_V) \quad (3-20)$$

式中 U ——负载两端的电压（也是加在功率表电压支路两端的电压）， V ；

R_V ——功率表电压回路的直流电阻， Ω 。

例2：负载两端的电压 $U = 380V$ ，功率表电压回路的直流电阻 $R_V = 20000\Omega$ ，功率表的示值 $P_B = 800W$ ，则负载功率的实际值 $P_F = 800 - (380)^2 / 20000 = 792.78W$ 。

电压后接法功率测量线路较适用于负载电阻远小于功率表电压回路电阻的场合。

四、三相异步电动机试验三相电流、电压及功率综合测量线路

三相异步电动机试验一般由三相三线制供电系统供电。三相功率采用两表法测量；低压电机只用电流互感器；每相接一块电流表；电压表为一块，通过三相转换开关观测各相的电压。为保护电流互感器、电流表和功率表，应在电流互感器二次输出端（有必要时，还在电流互感器一次侧两端）加接短路开关（即封表开关和封电流互感器一次开关）；电压应设置在电机进

线端测量，即采用电压后接法电路。高压电动机则还需要使用电压互感器。

高、低压电机试验三相电流、电压及功率综合测量线路分别如图 3-13 所示。实际应用时，电流和电压互感器均为多比数的接线。

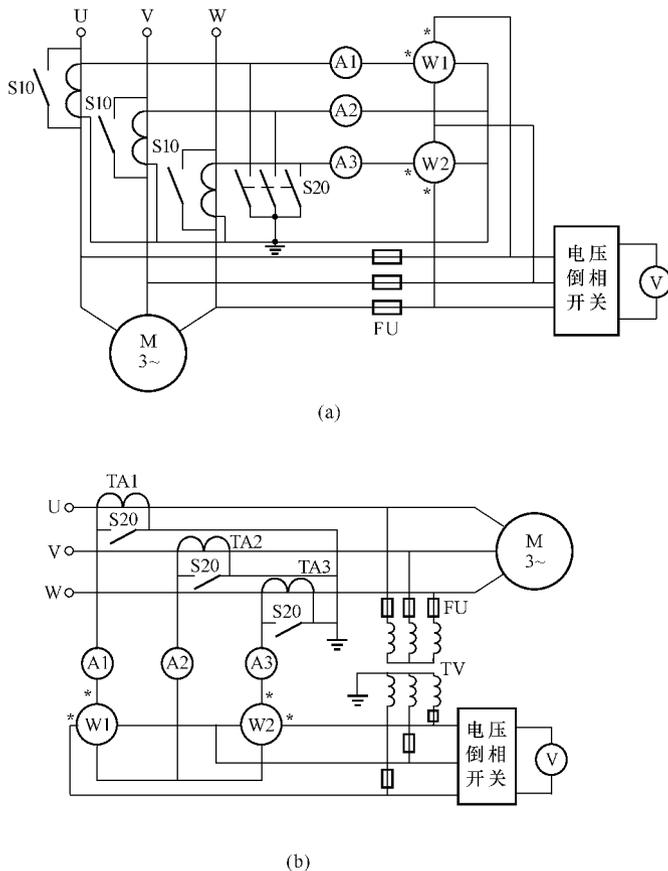


图 3-13 三相异步电动机试验三相电流、电压及功率综合测量线路
(a) 低压带电流互感器的线路；(b) 高压带电流互感器和电压互感器的线路

五、两表法三相功率测量线路常见故障

低压电机采用两表法三相功率测量线路时，最常见的故障及原因见表 3-7。

表 3-7 低压电机两表法三相功率测量线路常见故障及原因

序号	故障现象	原因
1	电路接通后, 功率表无指示	电压或电流线路不通或两路都不通。若为三相电流、电压和功率综合测量电路, 则可通过电流表或电压表的反应来判断是哪一个回路断路
2	测量中, 两表该为异号时, 实际为同号; 应为同号时, 实际为异号	有一只功率表的电压线或电流线两端反接。例如: 其中一只表带“*”号的电压接线端钮本应接 U 相, 另一个电压端钮接 V 相, 实际上带“*”号的电压端钮接了 V 相, 另一个电压端钮接了 U 相
3	两表读数在各种不同的负载功率因数下都很接近	两表电压接线相序交叉接反, 即 1 号表带“*”号的电压端钮本应接 U 相, 2 号表带“*”号的电压端钮本应接 W 相; 实际上 1 号表带“*”号的电压端钮接了 W 相, 2 号表带“*”号的电压端钮接了 U 相

六、用两表法测量三相功率时的读数计算三相负载的功率因数

设用两表法测量三相功率时两块表的读数 (不必换算成功率值) 分别为 W_1 和 W_2 (设 $|W_1| \geq |W_2|$), 则三相负载的功率因数 $\cos\varphi$ 可用式 (3-21) 求取。采用电流电压和有功功率计算法求取负载的功率因数时, 可用此式进行校核, 当两种方法所得的结果相差超过 $\pm 1\%$ 时, 说明试验测量误差过大, 应重新检查试验记录, 找出错误后重算或重新进行试验。

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}\right)^2}} \quad (3-21)$$

另外, 由式 (3-21) 可推导出两功率表读数 W_1 和 W_2 之比 (即 W_1/W_2) 与负载功率因数 $\cos\varphi$ 的对应关系, 如式 (3-22) 所示。通过式 (3-22) 可很快地判定出功率因数的数值范围。表 3-8 给出的一些特殊点和较大范围内的关系, 书后附录 L 给出了较细致的对应关系表。

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\left[\frac{(W_1/W_2) - 1}{(W_1/W_2) + 1}\right]^2}} \quad (3-22)$$

 表 3-8 两表读数 W_1 和 W_2 与负载功率因数 $\cos\varphi$ 的对应关系

两表读数之比 W_1/W_2	负载功率因数 $\cos\varphi$ 的数值或范围
$W_1/W_2 = 1$ (两者同号并相等)	$\cos\varphi = 1$
$W_1/W_2 > 0$ (两者同号但不相等)	$1 > \cos\varphi > 0.5$
$W_1 \cdot W_2 = 0$ (其中有一个为零)	$\cos\varphi = 0.5$

$W_1 / W_2 < 0$ (两者异号)	$0 < \cos\varphi < 0.5$
------------------------	-------------------------

第四节 钳形电流表

钳形电流表是可在不断开线路的情况下，测量通电线路中电流大小的一种仪表，特别适用于现场或修理行业对通电线路电流的检测。

现用的钳形电流表有传统式的指针式单功能（只能测量电流，一般为交流）型、指针式多功能型（除能测量交流电流外，还能测量交、直流电压、直流电阻等）和数字式多功能型（除能测量交流电流外，还能测量交流电压和频率、直流电压、直流电阻、电容、电感、功率、温度和确定三相交流电的相序等）等多种类型。所以说钳形电流表的名称已有些“名不符实”了。正确的名称应为“钳形万用表”，简称“钳形表”。图 3-14 中为一种多功能指针式钳形表和一种多功能数字式钳形表的外形图。

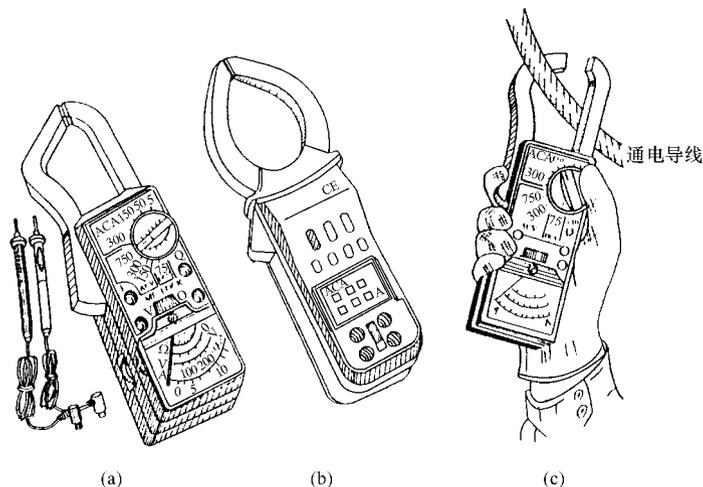


图 3-14 钳形表

(a) 多功能指针式钳形表；(b) 多功能数字式钳形表；(c) 用钳形表测量线路电流

由于种类的不同，钳形表的使用方法也会有所差异，但在测量交流电流时，都应遵守以下原则：

- (1) 事先将测量其他量用的接线去掉，以免使用中造成意外触电。
- (2) 按预定被测电流的大小正确选择量程。
- (3) 测量较高电压（交流 50V 以上）电路的电流时，必须严格按安全

要求穿戴劳保用品，如穿绝缘鞋和戴绝缘手套等。不允许直接用于测量裸导体线的电流。

(4) 测量时，应尽可能地将通电导线置于仪表钳口内空间的中心位置，这样可使测量结果最准确。

第五节 用于电机试验的测温仪器和温度传感器

在电机试验中，测量温度有两种不同的目的，一种是测量相关部位的温度变化情况，如绕组的温升、轴承的温度等，另一种是通过某一部件的温度来控制某一电路，如控制冷却风机的通断、试验电源的通断等。

一、电机试验对测温仪器的准确度要求和常用种类

在电机试验中所用测温仪的准确度以其误差来确定，一般应不超过 ± 1 。

较常使用的测温仪器有较传统的膨胀式温度计（含水银温度计和酒精温度计等）、半导体点温计、由温度传感元件和显示仪表配套的电子测温仪等，对不便直接接触的位置，可使用红外线测温仪，但应注意选用准确度较高的类型，否则误差会较大。图 3-15 给出了一些示例。

常用测量温度的传感器（传感元件）有热电偶、热敏电阻、热电阻等，另外还有一种新型的光纤温度传感器；用于控制电路的温度传感器有热敏开关、热敏电阻、热电阻等。

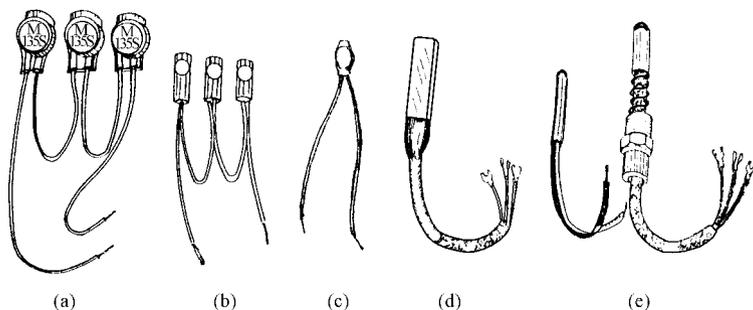


图 3-15 测量温度的传感器外形示例

(a) 热敏开关；(b) 热敏电阻；(c) 热电偶；

(d) 片状铂热电阻；(e) 柱状铂热电阻

二、热电偶

由两种不同材料的导体组成一个闭合回路，当两个结合点出现温度差时，该回路中就会出现电动势，并有电流流动。这种由于温度不同而产生电动势的现象被称为“热电效应”或“塞贝克效应”，这两种不同导体的组合

称为“热电偶”。

不同材料的电偶丝可组成不同分度号的热电偶，它们的测温范围和适用场合也各不相同。

在电机试验测温中，最常用的是 T 分度的铜-康铜热电偶。这种热电偶在 100 时的电动势为 4.277mV，长期最高工作温度为 200（短时可为 300），完全可满足电机试验温度范围的需要，另外，它的特点是稳定性好、灵敏度高、容易制作，并且价格较低。

三、测温热电阻

所有的导体都具有电阻随温度按一定规律发生变化的性质，但有些导体的这一性质更适用于进行温度的测量，常用的有铂、镍、铜、钨、铂钨合金和铂钨合金等，其中用铂或铜制作的热电阻较适用于电机试验，而钨、铂钨合金和铂钨合金较适用于制作测量低温的热电阻。

（一）铜热电阻

铜热电阻由铜丝绕制或由铜箔制成，测温范围为 - 50 ~ 150，其外形结构型式有片状和柱状两种，特点是在测温范围内线性较好、电阻温度系数大、价格较低，可用于检测 B 级及以下绝缘等级的电机各绕组、铁心、轴承、进出风及环境温度。目前国内使用的标准铜热电阻有 G、Cu50 和 Cu100 共三种分度号。

（二）铂热电阻

铂热电阻是由铂细丝绕制或由真空镀膜工艺制成的测温电阻，测温范围为 - 200 ~ 660，其外形结构型式有片状和柱状两种，特点是在高温下和氧化介质中性能稳定、测量准确度较高。微型铂热电阻的热惯性小，可用于任何绝缘等级电机的温度检测。目前国内使用的标准铂热电阻有 BA1、BA2 和 BA3 共三种分度号。除上述三种分度号外，铂热电阻还有 Pt100 和 Pt50 两种，其中 Pt100 与 BA2 的分度值完全相同，而 Pt50 则为 Pt100 分度值的 1/2。

（三）镍热电阻

镍热电阻是由镍细丝绕制或由真空镀膜工艺制成的测温电阻，测温范围为 - 50 ~ 200。这种热电阻在欧美使用得较多，国内尚无标准。它的特点是电阻温度系数较大、线性好，价格也较低，而且测量范围完全能满足一般电机测温试验的要求。

四、热敏电阻

热敏电阻是由钴、锰、镍的氧化物烧结而成，或是一个半导体 PN 结制

成的敏感元件, 根据使用要求, 可制成球状、片状、杆状或垫圈状等, 热敏元件在配上壳体、引线 and 固定件后, 即构成一个热敏电阻组件。其电阻值随温度变化而按一定的规律变化, 具有灵敏度高、体积小、热惯量小、性能稳定、寿命长、易实现远距离测量等特点。

半导体热敏元件具有各种类型的电阻-温度特性, 见图 3-16。其中负温度特性 (图 3-16 中曲线 1) 和缓交变正温度特性 (图 3-16 中曲线 4) 可用于进行温度测量, 与仪表及电源配套则可制成专用的测温计 (被称为半导体温度计, 其中较常用的是点温计), 也可作为自动测温的传感器; 临界负温度特性 (图 3-16 中曲线 2) 和开关型正温度特性 (图 3-16 中曲线 3) 可用于进行温度控制及

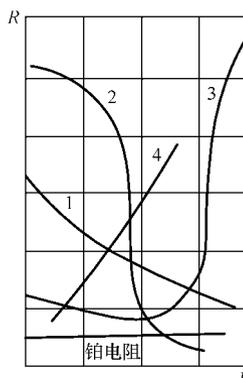


图 3-16 热敏电阻的 4 种电阻-温度特性
1—负温度系数型; 2—临界负温度型; 3—开关型; 4—缓交变正温度系数型

五、光纤温度传感器

光纤温度传感器是一种新型的温度传感器, 具有很高的灵敏度、较高的线性特性和较宽的动态范围; 其体积很小、重量轻, 并具有可挠性, 可在很小的空间和有较大振动的情况下使用; 具有耐高温、耐水和良好的绝缘性能, 因此可在高温、水中或带电的情况下进行测量, 解决了电机带电测温的难题; 同时还具有较宽的频带, 能实现高速测量。

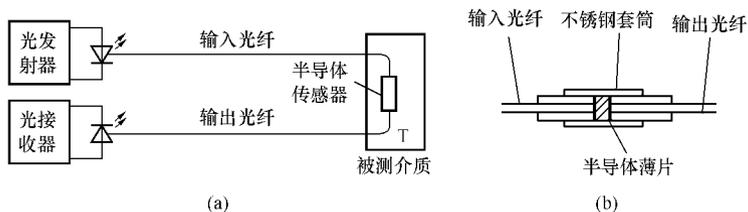


图 3-17 半导体光吸收式光纤温度传感器的结构和接线示意图

(a) 传感器接线图; (b) 半导体传感器的结构

光纤温度传感器有移相式、半导体光吸收式和内部辐射式三种类型。移相式使用较为复杂, 不便于在电机试验中使用; 半导体光吸收式可较方便地用于电机温度测量; 内部辐射式一般用于过热点的监视。

图 3-17 是半导体光吸收式光纤温度传感器的结构和接线示意图。该类温度传感器的特性是：响应时间约为 2s，测温范围为 -10 ~ 300℃，测量精确度可达到 ±1%。其特点是小巧灵敏、准确可靠、价格便宜，可满足各种电机测温的需要。

第六节 测量直流电阻的仪器和使用方法

一、常用仪器的类型

(一) 直流电阻电桥

测量电机绕组直流电阻最常用的仪器是直流电阻电桥。常用的直流电阻电桥有两大类，一类称为单臂电桥，又称为惠斯登电桥，另一类称为双臂电桥，又称为凯尔文电桥。这里的“臂”是指电桥与被测电阻的连线，单臂是每端一条连线；双臂是每端两条连线。单臂电桥用于测量 1Ω 以上的电阻；双臂电桥则用于测量 11Ω 及以下的电阻。双臂电桥和单臂电桥相比，其优点是可以基本消除引接线电阻产生的误差。

(二) 数显电子式直流电阻测量仪

数显电子式直流电阻测量仪也较常用，其外形规格很多。这种仪表的工作原理基于测量直流电阻的“电流-电压法”（详见下一节的内容）。和直流电阻电桥相比，它有使用方便、读数快捷的优势，在一定的测量范围内，还具有精度高的优点。不足之处是，测量毫欧级电阻时的精度还较低。

二、单臂电桥的使用方法和注意事项

以图 3-18 所示的 QJ23 型单臂电桥为例，说明单臂电桥的使用参数、使用方法和注意事项。

(一) QJ23 型单臂电桥的使用参数

(1) 测量范围： $1 \sim 9999000\Omega$ 。

(2) 准确度等级：在 $10 \sim 9999\Omega$ 范围内为 0.2 级，在 $1 \sim 9.999\Omega$ 范围内为 2.0 级。

(二) QJ23 型单臂电桥的使用方法

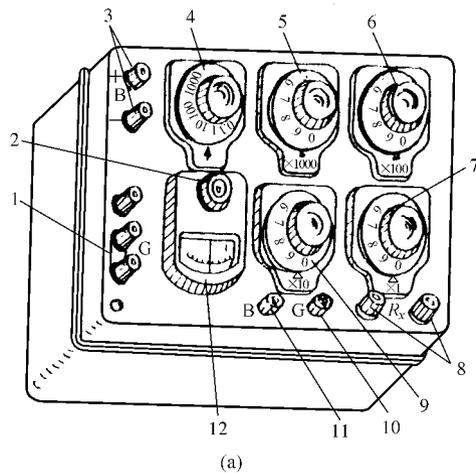
(1) 在电桥内装好 3 节 2 号干电池。若用外接电池，则应将电池正、负极用引线分别接在表盘上端钮 3（+、-）上。

(2) 按下钮 B（11），旋动旋钮 2，使检流计 12 的指针指到“0”位。

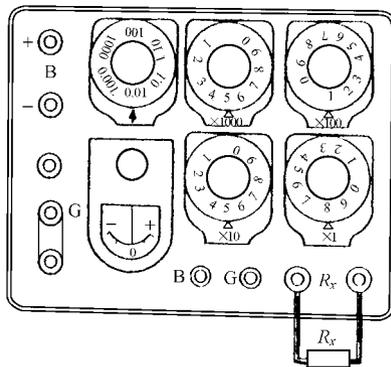
(3) 将被测电阻接于端子 8 上。两条引接线应尽可能短粗，并保证接点接触良好，否则将产生较大误差。

(4) 估计被测电阻的阻值，并按其选择倍率旋钮 4 所处倍数。选择方法见表 3-9。

(5) 进一步按被测电阻估计值选择旋钮 5（ $\times 1000$ ）的数值（将所选数值对正盘底上的箭头，下同）。其余 6、7、9 旋钮置于“0”的位置。



(a)



(b)

图 3-18 QJ23 型单臂电桥

(a) 外形；(b) 面板（测量状态）

1—检流计封开端子和连接片；2—检流计调零旋钮；3—外接电源端子；4—倍率旋钮；5— $\times 1000$ 旋钮；6— $\times 100$ 旋钮；7— $\times 1$ 旋钮；8—接被测电阻端子；9— $\times 10$ 旋钮；10—检流计按钮（G）；11—电源按钮（B）；12—检流计

表 3-9 QJ23 型单臂电桥倍率与测量范围对应表

被测电阻范围 (Ω)	1 ~ 9.999	10 ~ 99.99	100 ~ 999.9	1000 ~ 9999	10000 ~ 99990
应选倍率 (倍)	0.001	0.01	0.1	1	10

(6) 按下按钮 B (11) 后, 再按下按钮 G (10)。观看检流计指针的摆动方向。若很快摆到“+”方向, 则调大旋钮 5 ($\times 1000$) 的数值, 直到指针返回“0”位或向“-”方向摆去。

若摆向“0”位但未到“0”, 则固定旋钮 5, 改旋旋钮 9、7 或 6 (向数增大的方向), 细心调节, 使指针指到“0”为止。松开按钮 G 后再松开按钮 B (下同)。

此时, 从旋钮 5 到 9 依次读出数值, 再乘以旋钮 4 所指倍数, 即为被测电阻的阻值, 单位为 Ω 。如图 3-18 (b) 所示, 被测电阻的阻值为 $5158 \times 0.01 = 51.58\Omega$ 。

若将 5、6、7、9 都旋到了最大数值 (即 9), 表针仍在“+”的最边缘, 则先将 5 ($\times 1000$) 旋到“1”位, 再旋动倍数钮 4, 使其增大一个数量级, 例如原为 0.1 改为 1。看表针是否摆向“0”或“-”方向。若仍未动, 可再加大一级, 直到摆向“-”为止。此时, 依次旋动钮 6、7 等, 使数值减少, 到指针回到“0”为止。

总之, 指针偏向“+”时, 倍数和数值钮往大数方向调节; 指针偏向“-”时, 倍数和数值钮往小数方向调节, 直到检流计的指针指到“0”时为止。

若调节时指针摆动方向与调节旋钮的转换方向的规律与上述反应相反, 则是电池极性接反的缘故, 将电池的 +、- 极对调即可恢复正常。

(三) 注意事项

(1) 若按下按钮 G 时, 指针很快打到“+”或“-”的最边缘, 则说明预调值与实际值相差较多, 此时应选松开 G 钮, 调整有关旋钮后, 再按下 G 钮观看调整情况。长时间让检流计指针偏在边缘处会对检流计造成损害。

(2) B、G 两个按钮分别负责电源和检流计的合断。使用时应注意: 先按下 B, 再按下 G, 先松开 G, 再松开 B, 否则有可能损坏检流计。

(3) 长时间不使用时, 应将内装电池取出。

三、双臂电桥的使用方法和注意事项

以图 3-19 所示的 QJ44 型双臂电桥为例, 说明双臂电桥的使用参数、使用方法和注意事项。

(一) 测量范围和准确度

(1) 有效量程: $0.0001 \sim 11\Omega$ 。

(2) 准确度: $0.01 \sim 11\Omega$ 时为 0.2 级, $0.0001 \sim 0.0011\Omega$ 时为 1 级。

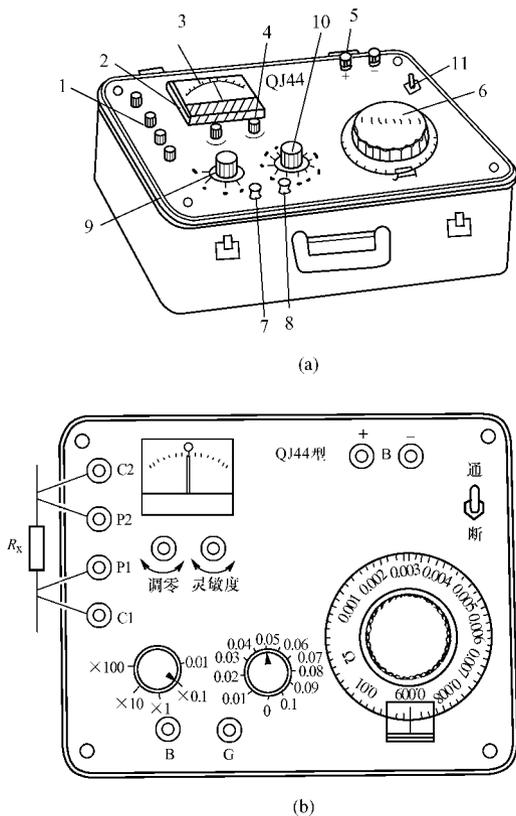


图 3-19 QJ44 型双臂电桥

(a) QJ44 型外形；(b) QJ44 型面板（测量状态）

- 1—外接引线端子；2—调零旋钮；3—检流计；
 4—检流计灵敏度旋钮；5—外接电源端钮；6—小
 数值拨盘；7—电源按钮（B）；8—检流计按钮（G）；
 9—倍数旋钮；10—大数旋钮；11—电源开关

（二）使用方法

(1) 安装好电池。内装 2 号 1.5V 干电池 4 节（并联）和 9V 叠层电池（6F22 型）2 节（并联），也可外接大容量电池。外接电池时应注意 +、- 极。

(2) 接好被测电阻 R_x 。应注意 4 条接线的位置应按图 3-22 (b) 所示，

即 P1、P2 靠近被测电阻，C1、C2 在外，分别紧靠 P1 和 P2。接线要牢固可靠，尽可能减少接触电阻。

(3) 将电源开关拨向“通”的方向，接通电源。

(4) 调整调零旋钮 2，使检流计 3 的指针指在“0”位。一般测量时，将灵敏度旋钮 4 旋到较低的位置。

(5) 按估计的被测电阻值预选倍数旋钮 9 和数值旋钮 10。倍数与被测值的关系见表 3-10。

表 3-10 QJ44 型双臂电桥倍率与测量范围对应表

被测电阻范围 (Ω)	1 ~ 11	0.1 ~ 1.1	0.01 ~ 0.11	0.001 ~ 0.011	0.0001 ~ 0.0011
应选倍率 (倍)	100	10	1	0.1	0.01

(6) 先按下电源按钮 B，再按下检流计按钮 G。先调数值旋钮 10 粗略调定数值范围，再调整大转盘（小数值）6 的位置，仔细调整，以确定最终数值。

检流计 3 的指针方向和调节旋钮 9、10、6 的方向关系，原则上同 QJ23 中有关论述。检流计指针指到“0”后，先松开 G，再松开 B。测量结果为

(10 号旋钮所指数值 + 6 号转盘所指数值) \times 9 号旋钮所指倍数

例如图 3-19 (b) 所示，被测电阻 R_x 为

$$R_x = (0.05 + 0.009) \times 0.1 = 0.0059 \Omega$$

(7) 测量完毕，将开关 11 拨向“断”，断开电源。

(三) 注意事项

除接线方法要遵循本部分第 (二) (2) 条的规定之外，其他和 QJ23 型基本相同。

第七节 用“电压—电流法” 测量直流电阻的线路和有关计算

一、测量线路和仪表的选用要求

(一) 测量线路

用“电压—电流法”测取直流电阻的测量线路有如图 3-20 所示的两种。它们的不同点在于电压表和电流表的相互位置，一般按电压表的接线位置来分，电压表接在电流表前面时称为“前接法”，否则称为“后接法”。图 3-20 中： R_x 代表被测绕组的直流电阻，单位为 Ω ；电流 I 和电压 U 的单位分别为 A 和 V。

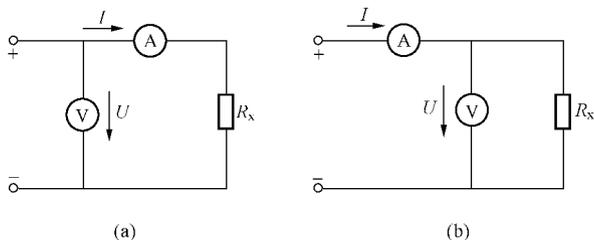


图 3-20 用“电压—电流法”测取直流电阻的测量线路

(a) 电压表前接法；(b) 电压表后接法

(二) 仪表的选用要求

所用电压表和电流表的准确度都不应低于 0.5 级；电压表的内阻应尽可能高；电流表的内阻应尽可能小，以最大限度地提高测量结果的准确度。

二、电阻的计算和误差的修正

(一) 不考虑方法误差的计算

用“电压—电流法”测取直流电阻时，不管是前接法还是后接法，都会因仪表显示的电压（或电流）值略大于被测电阻的电压（或电流）而造成一定的方法误差。

被测电阻阻值较大，并对测量结果的精度要求不太高时，可用欧姆定律公式直接求出结果，即（参见图 3-20）

$$R_x = \frac{U}{I} \quad (3-23)$$

(二) 电压表前接法误差的修正

此种方法产生误差的原因是由于电压表显示值中除含有被测电阻两端的电压降外，还包含有电流表电路的电压降。

设电流表的内阻为 R_A ，则被测电阻的实际值为

$$R_x = \frac{U - IR_A}{I} = \frac{U}{I} - R_A \quad (3-24)$$

(三) 电压表后接法误差的修正

此种方法产生误差的原因是由于电流表显示值中除含有通过被测电阻的电流外，还包含有通过电压表支路的电流。

设电压表的内阻为 R_V ，则被测电阻的实际值为

$$R_x = \frac{UR_V}{IR_V - U} \quad (3-25)$$

第八节 测量绝缘电阻的仪表——绝缘电阻表

一、仪表的分类

测量电机绝缘电阻的仪表为绝缘电阻表，有手摇发电式和电子式两类，前者俗称“摇表”，后者又称为“高阻计”。图 3-21 是两种类型绝缘电阻表外形示例。

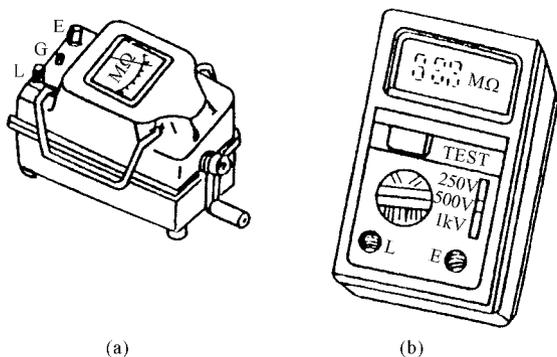


图 3-21 绝缘电阻表外形示例

(a) 手摇发电式绝缘电阻表；(b) 电子式绝缘电阻表

绝缘电阻表的规格是按其所发出的电压额定值来确定的。电机试验常用的有 250、500、1000V 和 2500V 共 4 种。

二、测量电机绕组绝缘电阻时应选用的绝缘电阻表规格

测量电机绕组绝缘电阻时，不同电压等级的电机应选用不同规格的绝缘电阻表。表 3-11 给出了选用的规定。

表 3-11 绝缘电阻表选用规定

电机额定电压 (V)	≤36	>36 ~ 500	>500 ~ 3300	>3300
绝缘电阻表规格 (V)	250	500	1000	≥2500

测量埋置在绕组内和其他发热元件中的热敏元件等的绝缘电阻时，一般应选用 250V 规格的绝缘电阻表。

三、手摇式绝缘电阻表的使用方法

手摇式绝缘电阻表的出线端有三个，分别用字母 L、G、E 标志。接线时，L 端应接被测绕组，E 端接机壳或地线，G 端一般不用。测量时，手摇发电的转速应保持在 120r/min 左右；读数应在仪表指针达到稳定以后读取，一般需摇测 1min 左右。

第九节 耐交流电压试验仪及其使用方法

耐电压试验是介电强度试验的习惯叫法，如无特殊说明，应指耐正弦交流电压试验。

一、耐交流电压试验仪的类型和工作原理

图 3-22 和图 3-23 分别为低压和高压电机交流耐电压试验设备主要组成部分的电路图和实物示例图。

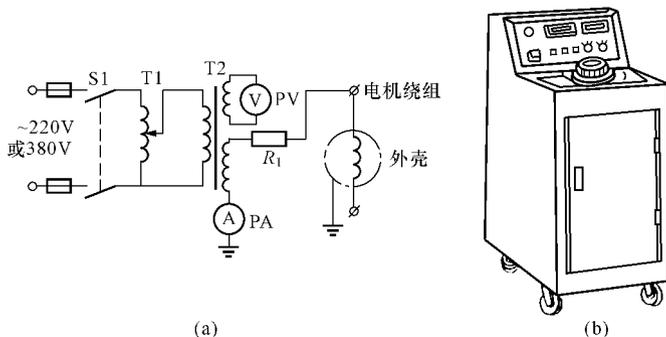


图 3-22 低压电机用耐电压试验设备电路原理图和实物示例图

(a) 电路原理图；(b) 实物示例图

如图 3-23 所示高压电机交流耐电压试验设备的工作原理是：低压交流（我国为 50Hz，380V 或 220V）通过控制开关 S1 输给调压器 T1 一次侧；调节调压器 T1 按需要输出不同数值的电压送给升压变压器 T2；升压变压器 T2 将电压升到需要数值后加到被试品上；电压表 PV 指示出试验电压；电流表 PA 指示出高压泄漏电流；电阻 R_1 的作用是在试品出现短路时，使变压器输出电流受到限制，从而避免变压器受到较大的短路电流损伤，所以也称为“限流保护电阻”，其阻值按每伏试验电压 0.2 ~ 1 Ω 设置，一般采用水电阻；球隙保护装置 Q 用于防止对被试品加过高的电压造成损坏，一般在试验前进行调整，使之在电压达到 1.1 ~ 1.15 倍试验电压时放电； R_2 是球隙保护电阻，一般按每伏试验电压 1 Ω 选配。

图 3-24 和图 3-25 分别给出了手动和半自动交流耐电压试验设备电气线路，意在供读者自制或使用参考。图中 T1 为接触式单相调压器；SE 为安装在调压器上的微动限位开关，由安装在调压部件上的拨杆（一般需自制）

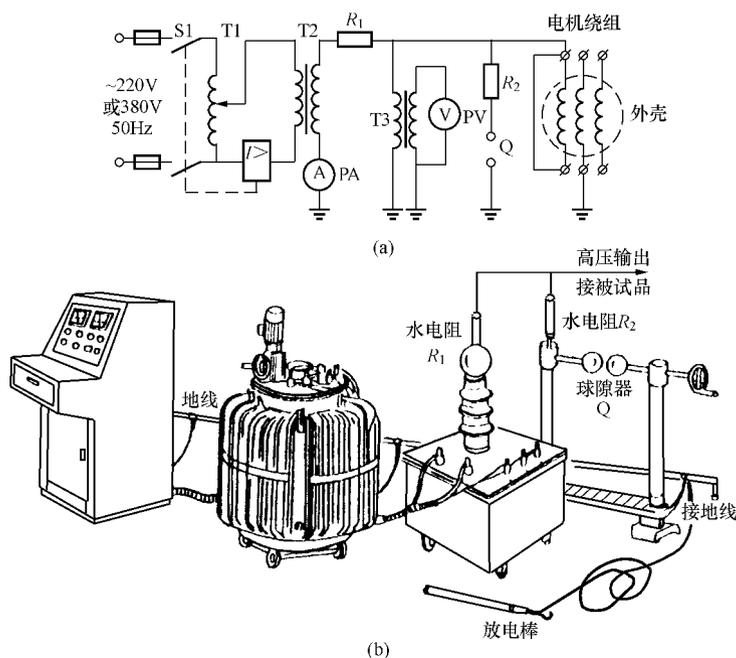


图 3-23 3kV 及以上电机用耐电压试验设备电路原理图和实物示例图

(a) 电路原理图；(b) 实物示例图

控制，只在调压器处于零电压位置时闭合，用于防止开始合试验电源时就有较高的电压输出而产生不安全因素的可能；SF 为脚踏开关，试验时应由另一个试验人员控制，目的在于提高安全性；SV 为一个过电压（或称为过电流）继电器（传感元件为一个或几个微欧级电阻），用于判断被试品是否击穿并在被试品击穿时切断试验电源，在自制时，若无法获得该元件，可在变压器低压端线路中设置一个过电流继电器，用于控制试验电源电路。

二、对耐压试验设备有关元件的要求

在国家标准中，除要求试验电压尽可能为正弦波以外，对试验设备还有如下要求（见图 3-22 和图 3-23）。

（一）对升压变压器额定容量的要求

升压变压器（T2）的额定容量应按下述原则确定：

（1）对额定电压为 1140V 及以下的电机，每 1kV 试验电压应不少于 1kVA。

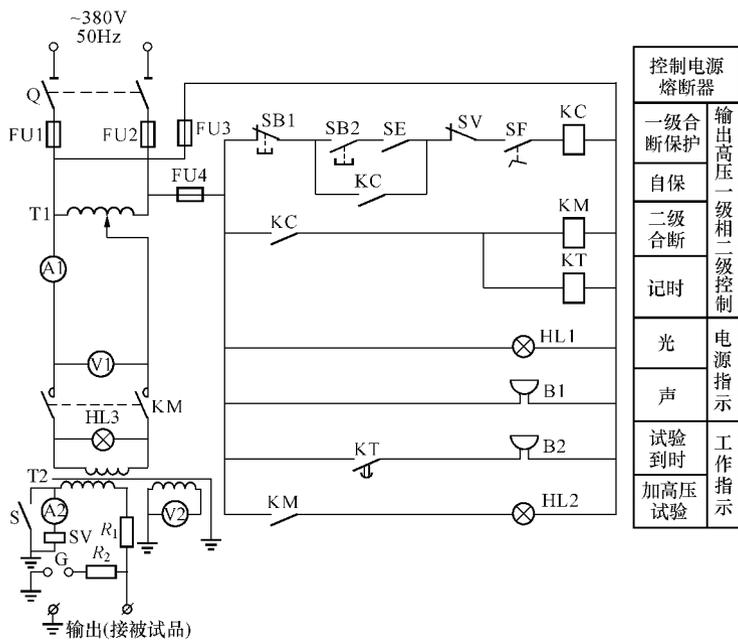


图 3-24 全手动调压交流耐电压试验设备电气线路

(2) 对额定电压大于 1140V 的电机，每 5kV 试验电压应不少于 1kVA (实践证明，这一规定对很多高压电机来说，是不够的)，或根据被试电机的电容量 C (单位为 F) 按式 (3-26) 计算求得的容量 (试验电源频率为 50Hz 时)。

$$S_T = 314 C U_T U_{TN} \times 10^{-3} \quad (3-26)$$

式中 S_T ——试验变压器最小容量，kVA；

C ——被试电机的电容量，F；

U_T ——试验电压，V；

U_{TN} ——试验变压器高压侧的额定电压，V。

(二) 对试品过电压保护的要求

对额定电压为 3kV 及以上的电机，应加球隙保护装置 (如图 3-23 所示)。

(三) 对试验电压测量和结果显示的要求

(1) 显示试验电压的电压表必须接在升压变压器 (T2) 的高压侧。可

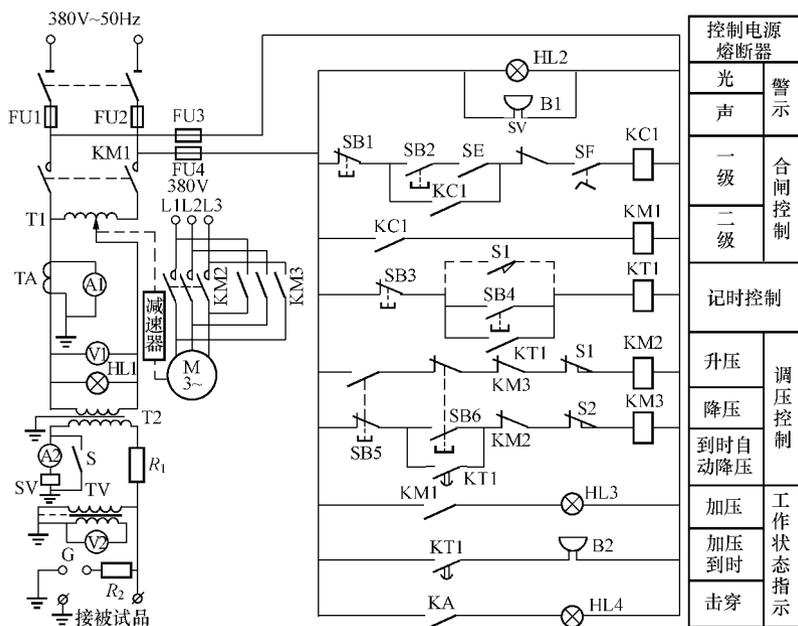


图 3-25 半自动调压交流耐电压试验设备电气线路

采用高压静电系电压表，也可通过电压互感器或专用测量线圈接低压电压表（后者如图 3-23 所示）。不允许利用变比的方式将低压电压表接在变压器的低压端。

(2) 当被试品击穿时，试验设备应具有声、光指示和自动切断电路的功能，应有手动复位措施。

(四) 其他要求

- (1) 试验设备应有可靠的接地装置。
- (2) 试验区域应有安全警示装置，如电铃和指示灯等。

三、使用注意事项

- (1) 升压变压器的高压输出端接被试绕组，低压端接地。
- (2) 被试电机外壳（或铁心）及未加高压的绕组都要可靠接地。
- (3) 试验结束后，应将被试品对地放电后再拆电压接线。

第十节 绕组匝间耐冲击电压测试仪及其使用方法

一、仪器的规格

绕组匝间耐冲击电压试验所用仪器简称为“匝间仪”。其规格按输出最高电压（峰值）划分，常用的有3、5、6、10、12、30kV等几种。应按试验电压的大小和电机额定容量来选择仪器的规格。

图3-26是几种匝间仪的外形。输出引线有三相四线和三相三线两种。

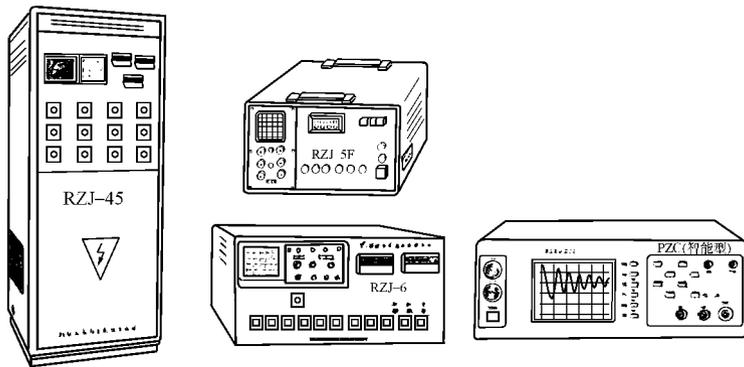


图3-26 匝间耐冲击电压测试仪外形示例

二、试验原理

尽管不同类型的电机和不同形式的绕组各有自己的试验方法标准，但其试验工作原理是基本相同的。

试验时，仪器给两个绕组轮换着加相同波形和峰值的冲击电压，并由示波器在其屏幕同一坐标系上显示这两个绕组的振荡衰减放电波形曲线。若这两个绕组的电磁参数（匝数、直流电阻、形状、磁路参数、电容量等）完全相同，则其振荡衰减放电波形曲线在幅值和振荡周期上都会完全相同，从而在屏幕上完全重合，即只看到一条曲线；若这两个绕组的电磁参数不完全相同（如匝数不相等、磁路磁阻不相等、电容量不相同等），则其振荡衰减放电波形曲线就会有差异（或频率不同，或幅值不同），从而在屏幕上不完全重合，即可看到两条不同的曲线。

由上述理论可以看出，这种试验属于对比试验。

试验所用的这两个绕组，对三相电机定子或转子，可为其任意两相；对单相电机，其中一个是被试电机的，另一个可用被试电机上相同电路和磁路

条件的另一个绕组（例如洗衣机用电机的两套绕组是相同的），若无此条件，则应另备一个符合上述条件的绕组（一般为同规格的一批电机中的一台），这个绕组被称为标准绕组。

按设计完全相同的两个绕组中，若其中一个绕组的某些线匝之间绝缘由于破损而形成了电的通路，则相当于减少了总匝数，这就造成了两个绕组有效电磁参数的不同，从而得到两个不同的放电波形曲线。

三、仪器的使用方法及注意事项

不同厂家或不同规格的仪器使用方法是有所不同的，但其主要操作过程基本相同。现对国产仪器简述如下。

(1) 将仪器可靠接地。被试品可接地，也可不接地（有特殊要求者除外）。但如采用接地方式，则必须连接可靠，不得松动或虚接，否则在试验时可能因接触不良放电而出现杂乱波形，影响对试验结果的判断。

(2) 接通电源，打开仪器电源开关。待仪器预热一段时间（一般为5~10min）后，其内部时间继电器接通高压电路，此时高压指示灯亮。仪器需预热的原因是其高压导通元件使用了电子管式闸流管，其灯丝需要加热到一定温度后才能工作。预热完成后，则可对电机进行加压试验。对用晶体闸流管（简称晶闸管）作高压导通元件的仪器，则无需预热。

(3) 调整好示波器图像。未给被试品输出电压前应是一条光亮的水平直线（实际上是两条直线完全重合在一起所形成的，调节相关装置可将两条直线上下分开，这样可以确定示波器的两路都正常）。调整好光亮线的位置、亮度和清晰度；按被试电机所需电压设定显示电压波形的比例（每格电压数）。用其自校功能键（对设置该功能的仪器）核定调出的电压波形和设定电压比例的一致性。现有仪器一般都设置了数值电压表，可直接读出电压值（峰值）。

(4) 按电机或绕组的类型选择接线方法，并接好线。

(5) 合高压开关，给被试绕组加冲击电压并调准试验电压。观察示波器显示的波形，判断是否有匝间短路等故障。

(6) 关断高压开关（对某些仪器，须将试验电压调到零后，再关断高压开关，否则再次进行试验时将不能合电源）。

(7) 被试绕组对地放电后（有些仪器自身设置放电装置），拆下引接线。

(8) 试验全部完成后，关断电源开关。

第十一节 转子转速和转差率的测量与计算

一、转速的测量方法

(一) 用机械式转速表的测量方法

机械式转速测量仪表在使用时须将其头部的橡胶头抵在电机转轴端面的中心孔中,靠摩擦力带动其转轴旋转。因此,选择的橡胶头应合适;用力要适当,并且要始终保持其转轴的轴心线和电机的轴心线重合,如图 3-27 (a) 所示。

(二) 用光电式转速表的测量方法

测试前,应事先在电机的皮带轮端面或联轴节侧面粘贴一块专用的反光片(购买转速表时的附带品)。在测试单台电机的转速时,则需在其光滑的轴伸上先包一层深颜色(最好为黑色)的胶布或用深色染料涂抹一段,再将反光片贴在胶布或涂色部位上。

测试时,按下仪表的测量开关,使其发光端对准反光片。用手操作时,应注意保持稳定,待显示数据稳定后读数,如图 3-27 (b) 所示。

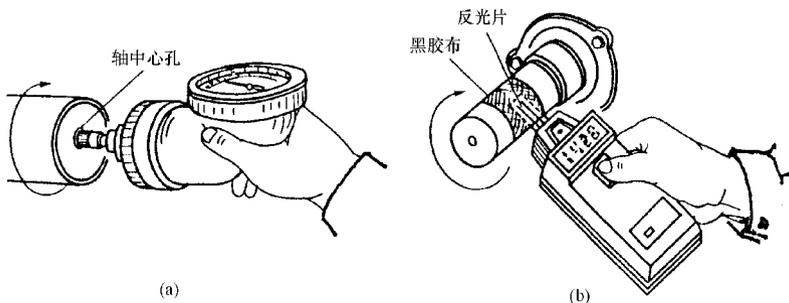


图 3-27 转速测量仪表的种类及其使用方法

(a) 机械式转速表; (b) 光电式转速表

二、转差率的测量与计算

交流异步电动机的转差率(符号为 s , 单位一般用百分数%表示)是该类电机的一个极其重要的性能参数,它是电机的转子转速 n (r/min) 与定子旋转磁场的转速 n_s (称为异步电动机的同步转速,单位为 r/min) 之差点占定子旋转磁场转速的百分数,用算式表示为

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\% \quad (3-27)$$

有时使用“转差”一词，它是转子转速与定子旋转磁场的转速之差的实际值，所以单位应为 r/min。请注意与上述转差率相区别。

(一) 测量转速计算法

(1) 由电机的极数（用极对数 p 表示，极对数等于极数的 $1/2$ ）和电源的频率 f (Hz) 计算其定子旋转磁场的同步转速 n_s (r/min)：

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (3-28)$$

电源的频率可用额定值，例如 50Hz 或 60Hz；若要精确计算，则应用频率表实测，或用光电式转速表对准与被试电机使用同一电源的日光灯灯管的一端，如图 3-28 所示，记录显示的每分钟闪动数值 R_E ，然后用式 (3-29) 求取电源频率 f (Hz)。

$$f = \frac{R_E}{60} \quad (3-29)$$

也可直接用式 (3-30) 求出被试电动机的同步转速 n_s (r/min)。

$$n_s = \frac{R_E}{p} \quad (3-30)$$

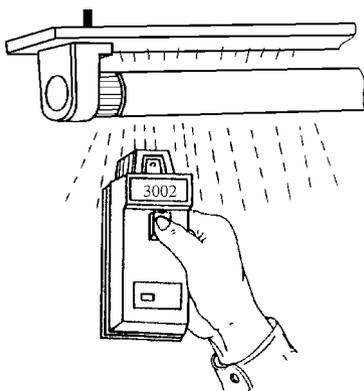


图 3-28 用光电式转速表
测量日光灯电源的频率

(2) 用转速表测量电机转子的转速 n (r/min)。

(3) 用式 (3-27) 计算得出被试电机的转差率 s (%)。

(二) 用日光灯闪光测转法

(1) 在安装在被试电机轴伸端的皮带轮端面或联轴节的侧面, 用油漆或其他染料涂上黑白相间的扇形面或横道, 分割数量与电机的极对数相同, 如图 3-29 (a) 所示。

(2) 用与被试电机相同的电源供电的一台日光灯照射上述涂色的部位。此时, 若电机加电运转, 将可看到皮带轮端面或联轴节侧面有一条白线在缓慢地旋转, 如图 3-29 (b) 所示。

(3) 当电机的负载调定后, 用秒表记录上述白道旋转 N 转所用的时间 t (s)。

(4) 用式 (3-31) 计算被试电机的转差率 s (%)。

$$s = \frac{pN}{tf} \times 100\% \quad (3-31)$$

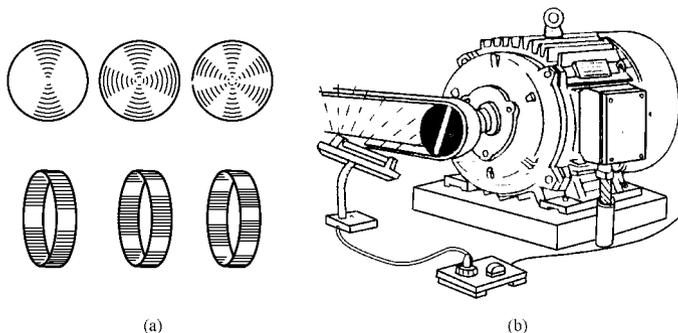


图 3-29 用日光灯闪光测转法测取异步电动机的转差率

(a) 涂色示意图; (b) 日光灯照射位置

(三) 感应线圈法

(1) 在电机的机座旁安放一个带铁心的多匝线圈 (2000 匝以上, 可用交流接触器的线圈), 线圈两端接一只 “0” 位在中心的磁电系毫伏表或指针式检流计, 如图 3-30 所示。

(2) 在电机通电运行时, 上述仪表的指针将在中心位置左右按一定的周期来回摆动。用秒表记录仪表指针摆动 N 次所用的时间 t (s)。摆动一次的概念是: 指针从中心位置 (“0” 刻度位置) 开始向一侧摆动到最大, 再回到中心位置; 再向另一侧摆动到最大, 再回到中心位置。

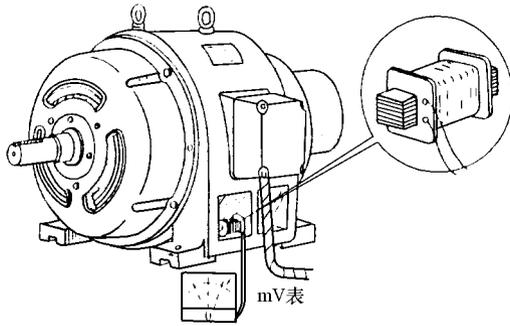
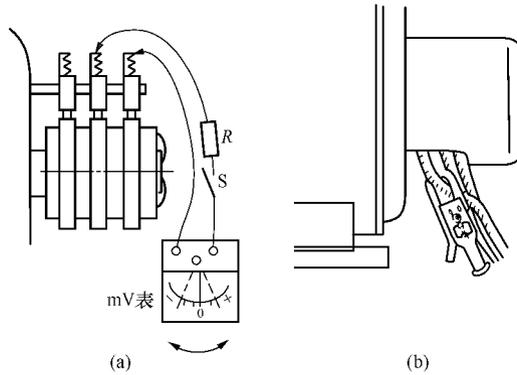


图 3-30 感应线圈法测量异步电动机的转差率

(3) 用式 (3-31) 计算被试电机的转差率 s (%)。

(四) 绕线转子电机转差率的仪表测量算法

本方法只能用于加负载过程中转子外接导线能引出的不举刷绕线转子电动机，有如下两种试验方法。



3-31 绕线转子电机转差率的仪表测量算法接线图

(a) 接毫伏表的线路；

(b) 用指针式钳形电流表测量转子的一相电流

(1) 将一只“0”位在中心的磁电系毫伏表接于电机转子两相电刷之间（请注意：此时转子三相绕组已通过外接的短路开关短路）如图 3-31 (a) 所示。当电机加负载运行时，仪表指针将在中心位置左右按一定的周期来回摆动。用秒表记录仪表指针摆动 N 次所用的时间 t (s)。用式 (3-31) 计算

被试电机的转差率 s (%)。

应注意，在电机起动过程中，转子绕组产生的电压将很高，仪表不可接入（将图 3-31 中开关 S 断开）；另外，若仪表指针摆动幅度太大，可串接一个分压（或称限流）电阻（见图 3-31 中 R）。

(2) 用一只指针式钳形电流表测量转子的一相电流。由于转子电流的频率很低，电流表的指针将在一定的位置上来回摆动，如图 3-31 (b) 所示。用秒表记录仪表指针摆动 N 次所用的时间 t (s)。用式 (3-32) 计算被试电机的转差率 s (%)。

$$s = \frac{N}{2tf} \times 100\% \quad (3-32)$$

第一节 指导试验的主要标准和试验项目

一、指导试验的主要标准

用于指导三相异步电动机整机试验的国家和行业主要标准如下：

- (1) GB 755—2000 《旋转电机 定额和性能》
- (2) GB/T 755.2—2003 《旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法》
- (3) GB/T 1032—2005 《三相异步电动机试验方法》
- (4) GB/T 20137—2006 《三相笼型异步电动机损耗和效率的确定方法》
- (5) GB 10068—2000 《轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值》
- (6) GB/T 10069.1—2006 《旋转电机噪声测定方法及限值 第 1 部分：旋转电机噪声测定方法》
- (7) GB 10069.3—2006 《旋转电机噪声测定方法及限值 第 3 部分：噪声限值》
- (8) GB 14711—2006 《中小型旋转电机安全通用要求》
- (9) GB 12350—2000 《小功率电机安全要求》
- (10) JB/T 9615.1—2000 《交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验方法》
- (11) JB/T 9615.2—2000 《交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验限值》
- (12) JB/T 10098—2000 《交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平》
- (13) JB/T 5811—1991 《交流低压电机成型绕组匝间绝缘试验规范》
- (14) GB 18613—2006 《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》
- (15) JB/T 8158—1999 《电压为 60V 及以下单速笼型感应电动机的起动性能》

二、试验项目

表 4-1 列出了国家标准中规定的普通三相异步电动机试验项目。

表 4-1 普通三相异步电动机试验项目及有关说明

项号	项目名称及说明	项号	项目名称及说明
1*	绕组冷态和热态绝缘电阻测定（出厂检查试验时可只测冷态数值）	7*	空载试验（型式试验时需测试出特性曲线）
2*	绕组直流电阻的测定	8	热试验
3*	绕组匝间耐冲击电压试验	9	效率、功率因数及转差率的测定试验
4*	绕组对地（机壳）耐冲击电压试验	10	最大转矩的测定试验
5*	绕组对地（机壳）耐交流电压试验	11	起动过程中的最小转矩测定试验
6*	堵转试验（型式试验时需测试出特性曲线）	12	振动的测定试验（出厂检查试验时为抽查项目）

续表

项号	项目名称及说明	项号	项目名称及说明
13	噪声的测定试验（出厂检查试验时为抽查项目）	17	偶然过电流试验（如已进行了第 15 项，本项可不再进行）
14	超速试验	18	转动惯量的测定（需要时进行）
15	短时过转矩试验	19	外壳防护试验（仅在样机定型时进行）
16	短时升高电压试验（如已进行了第 3 项，本项可不再进行）	20	轴电压的测定（仅对大中型和有专门要求的电机）

* 出厂检查试验和型式试验共有的项目，但其中有些项目的试验方法和要求可能有所不同。另外，有些特殊用途的电机，还会使用该类产品技术条件中规定的有关内容，在这些技术条件中，有些是国家或行业统一发布的，也有些是生产企业自定的。

第二节 绝缘电阻测定试验

国家和电机行业标准 GB 755—2000、GB 14711—2006、GB 12350—2000 等强制性标准中都规定了绝缘电阻测定试验的具体要求。

一、试验设备、测量方法及有关要求

(一) 测试时电机的状态

在进行型式试验测量电机绕组的绝缘电阻时，应分别在实际冷状态和热状态下进行；进行出厂检查试验时，可只在冷状态下进行。

(二) 所用仪表和测量方法

使用第三章第八节介绍的绝缘电阻表，并按被测电机绕组的额定电压选择仪表的规格（见表 3-11）。

对电机的各相绕组，如果它们的两个线端都已引出到电机机壳之外，则应分别测量每相绕组对机壳的绝缘电阻和各相绕组相互间的绝缘电阻。试验时，不参与试验的绕组应与机壳可靠连接。对在电机内部已做连接的三相绕组（如三相绕组已接成 Y 形或 Δ 形），则只能测量它们对机壳的绝缘电阻，如图 4-1 所示。

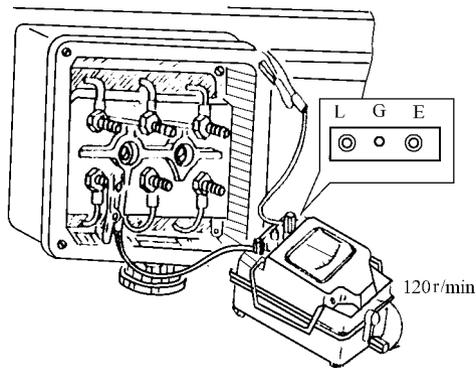


图 4-1 用手摇式兆欧表测量
三相电动机绕组的绝缘电阻

为防止被绕组在试验时的储存电荷电击，测量后，应将被测绕组对地放电后再拆测量线。这一注意事项对较大容量的电动机更为重要。

二、测量结果的判断

(一) 热状态考核标准

电机考核标准中，一般只给出热态时的绝缘电阻考核标准，并且不同种类的电机，其考核标准有所不同。

需要说明的一个问题是，在以下有关计算中的绕组额定电压数值怎样确定的问题，例如是绕组的相电压还是线电压？这一点在国家和电机行业标准中都没有明确的规定。作者认为应按如下原则：

(1) 取线电压值。

(2) 对于多种电压的电机，应取其最高电压值。例如，铭牌标出的数据是：额定电压 220/380V，接法 Δ/Y ，则应选用 380V；额定电压 220/440V，接法 $2\Delta/\Delta$ ，则应选用 440V。

这样规定的理由是，该试验不仅仅是针对绕组绝缘，同时也包括与绕组相连接的所有导线的绝缘，例如三相绕组引出线对地和相互间的绝缘，其中三相绕组引出线相互间的绝缘将要承受的最高电压就是该电机可能使用的最高线电压。

1. 普通用途电机的考核标准

电机绕组的绝缘电阻在热状态下所测得的数值应不小于用式 (4-1) 所求得的数值。

$$R_M = \frac{U}{1000 + \frac{P}{100}} \quad (4-1)$$

式中 R_M ——被试电机绕组的绝缘电阻最小允许值， $M\Omega$ ；

U ——被试电机绕组的额定电压，V；

P ——被试电机的额定功率，kW。

按式 (4-1) 计算的数值低于 $0.38M\Omega$ 时，则按 $0.38M\Omega$ 考虑。

因中型及以下电动机的容量在 $1000kW$ 以下，使上式中的 $\frac{P}{100}$ 远小于 1000 ，所以可以认为 $\frac{P}{100} \approx 0$ ，由此可进一步认为： $1000 + \frac{P}{100} \approx 1000$ 。这样，中型及以下电机绝缘电阻的考核标准则可用如下简略公式求得：

$$R_M = \frac{U}{1000} \quad (4-2)$$

这就是在一些中小型电动机技术标准中对绝缘电阻最低值标准“额定电压每 $1kV$ 不低于 $1M\Omega$ ”的来源。例如，额定电压为 $380V$ 的交流电机绕组在热状态时的绝缘电阻应不低于 $0.38M\Omega$ 。

2. 小功率电动机的考核标准

在 GB/T 5171—2002 《小功率电动机通用技术条件》中规定：小功率电动机绕组的绝缘电阻在热态时不应小于 1 MΩ。

3. 热带型电机的考核标准

在 GB 12351—1990 《热带型旋转电机环境技术要求》中规定：热带型电动机绕组的绝缘电阻在热态时不应小于下述规定的数值。

(1) 小功率电动机：0.5 MΩ。

(2) 除小功率电动机外，机座号在 630 以下的湿热带交流电机（简称中小型湿热带电机）。

1) 额定电压为 110V 及以上到 3000V 以下的、外壳防护等级为 IP22 及以上至 IP44 以下的电机（简称防护电机）：式（4-1）所求数值的 2 倍，但最低为 0.38MΩ。

2) 额定电压为 110V 及以上到 3000V 以下的、外壳防护等级为 IP44 以上的电机（简称封闭式电机）：式（4-1）所求数值的 3 倍，但最低为 0.38 MΩ。

(3) 中小型干热带电机：式（4-1）所求数值，但最低为 0.38MΩ。

(二) 冷状态下的考核标准

1. 普通用途电机的考核标准

GB 14711—2006 《中小型旋转电机安全要求》中的第 7.4.3 条规定：低压电机的冷态绝缘电阻应不低于 5MΩ。

在一般电机标准中，都没有明确给出电机在冷态时绝缘电阻的考核标准，通常只标明：“在检查试验时，电机的绝缘电阻可只在冷状态下进行测定和考核，但应保证电机在热态时的绝缘电阻值不低于式（4-1）求得值。

上述要求原则在实际工作中很难掌握，这是因为，电机绕组冷、热态时绝缘电阻之间的关系与电机试验时所处环境的温度、相对湿度以及电机绝缘材料的性能、质量、状态等很多因素有关，所以很难给出一个准确的换算关系式，也就是说，很难根据冷态绝缘电阻的大小来推断热态时的绝缘电阻值是否符合要求。

但就一般情况而言，温度越高，绝缘电阻越小。有资料给出了如下可供参考的冷、热态绝缘电阻换算公式。

$$R_{MC} \geq \frac{U}{1000} \times \frac{t_R - t_L}{5} \quad (4-3)$$

式中 R_{MC} ——冷态绝缘电阻考核值，MΩ；

t_L ——冷态测量时的绕组温度（一般用环境温度），；

t_R ——热态时的绕组温度（根据使用的绝缘耐热等级所规定的基准工作温度），；

U ——绕组的额定电压，V。

例如，当环境温度 $t = 25$ 时，对绝缘耐热等级为 B 级（所规定的基准工作温度 $t_R = 95$ ）， $U = 380V$ 的电机，绝缘电阻 R_{MC} 应不小于 $3.8 M\Omega$ ，是热态考核值的 14 倍，和 GB 14711—2006 中的规定基本相符。

2. 小功率电动机的考核标准

在 GB/T 5171—2002 《小功率电动机通用技术条件》中规定：小功率电动机绕组的绝缘电阻在冷态时应不小于 $20 M\Omega$ 。

三、吸收比的测量计算和考核标准

吸收比 K_M 是测量绝缘电阻时，试验电压施加 60s 时的测量值 R_{M60} 与施加 15s 时的测量值 R_{M15} 之比，即

$$K_M = \frac{R_{M60s}}{R_{M15s}} \quad (4-4)$$

当需要考核绝缘的吸收比时，一般规定该值不小于 1.3 为合格。

实践证明，吸收比较小说明被测绕组有可能受潮。所以，在使用中，如果测量该数值时发现其较小，则应对绕组进行烘干，并再次测量，达到标准后才能使用。

第三节 介电强度试验（耐电压试验）

介电强度试验常被称为耐电压试验（以下简称“耐压试验”）。因所加电压有交流和直流之分，所以分为耐交流电压试验和耐直流电压试验两种，两者不能相互代替。对于中、小、微型电机，如不加以注明，应理解为只要求进行耐交流电压试验。

耐压试验在电机生产的不同阶段其试验要求有所不同。除非有特殊规定，整机试验指对绕组和机壳之间的加电压试验，即习惯所说的对地耐压试验。试验时三相绕组按正常使用时的接法相连接。

一、耐交流电压试验方法和试验电压的规定

按被试电机的额定电压等级选择耐交流电压试验仪。试验方法如下：

(1) 升压变压器的高压输出端接被试绕组，低压端接地。

(2) 被试电机外壳（或铁心）及未加高压的绕组及其他电气元件（如空间加热器和测温装置等）都要可靠接地。

(3) 试验加压时间分为 1min 和 1s 两种（有特殊要求者除外）。

(4) 对于电机成品，1min 方法耐压试验电压值按表 4-2 的规定。表 4-2 中 U_N 为被试电机的额定电压，对多种电压的电机，应为最高电压值。

(5) 1min 方法试验时，加电压应从不超过试验电压全值的一半开始，然后均匀地或每步不超过全值的 5% 逐步升至全值，这一过程所用时间应不少于 10s。加压达到 1min 后，再逐渐将电压降至试验全值电压的一半以后才允许关断电源。

(6) 对于批量生产的额定功率为 5kW 及以下的电机，允许将上述 1min 试验缩短为 5s。

(7) 1s 试验方法限于批量生产的额定功率为 5kW 及以下的电机，并且试验电压要高于 1min 方法规定值（表 4-2）的 20%。

表 4-2 电机成品耐交流电压试验电压值（试验时间为 1min）

项号	电机类型或部件名称	试验电压（工频正弦交流有效值，V）
1	额定输出功率 < 1kW，且额定电压 < 100V 的绝缘绕组，项 3 除外	$500 + 2U_N$ ， U_N 为被试电机的额定电压
2	额定输出功率 < 1×10^4 kW 的绝缘绕组，项 3 除外 ^①	$1000 + 2U_N$ ，最低为 1500V

续表

项号	电机类型或部件名称	试验电压（工频正弦交流有效值，V）
3	非永久短路的异步电动机（例如用变阻器起动的绕线转子电动机）： （1）对不可逆转或只能在停转后才可逆转的电动机； （2）电动机在运行中，将初级电源反接而使其逆转或制动的电动机	1000V + 2 倍静止开路电压，该开路电压是以额定电压施加于初级绕组，而从集电环间或次级端子间测得； 1000V + 4 倍次级静止开路电压，其规定同上

① 对有一共同端子的两相绕组，公式中的电压均为在运行时任意两个端子间所出现的最高电压值。

（8）为防止被试绕组储存电荷放电击伤试验人员，试验完毕，要将被试绕组对地放电后方可拆下接线，这一点对较大容量的电机尤为必要。

（9）试验时，非试验人员严禁进入试验区；试验人员应分工明确、统一指挥、精力高度集中，所有人员距被试电机的距离都应在 1m 以上。

除控制试验电压的试验人员能切断电源外，还应在其他位置设置可切断电源的装置（如脚踏开关），并由另一名试验人员控制。

二、对重复试验和修理后绕组试验的规定

因本项试验对电机绝缘有损伤积累效应，所以，除非必需，一般不应进行重复试验。若必需时（例如用户强烈要求或某些验收检查时），则所加电压应降至第一次试验时的 80%。试验前，应检查电机的绝缘电阻，若绝缘电阻较低或电机有受潮现象，应对电机进行烘干处理，待电机的绝缘电阻达到理想值后，再进行试验。

当用户与修理商达成协议，要对部分重绕的绕组或经过大修后的电机进行耐电压试验时，则推荐采用下述细则：

（1）对全部重绕的绕组，试验电压值同新电机（见表 4-2）。

（2）对部分重绕的绕组，试验电压值为新电机试验电压值的 75%。试验前，对旧的绕组应仔细清洗并烘干。

（3）对经过大修的电机，在清洗和烘干后，应能承受 1.5 倍额定电压的试验电压，如额定电压为 100V 及以上时，试验电压至少为 1000V，如额定电压为 100V 以下时，试验电压至少为 500V。

三、对耐交流电压试验结果的判定原则

试验时，原则规定不发生击穿或闪络为合格。一般规定高压泄漏电流达到一个规定的数值后即判为不合格。

在 GB 14711—2006 中规定：

(1) 对额定电压 $\leq 1\text{kV}$ 的电机，高压泄漏电流值 $\geq 100\text{mA}$ 时，则判该电机击穿。

(2) 对额定电压 $> 1\text{kV}$ 的电机，试验结果的判别，按相关标准。

实际上，在我国北方较干燥的季节里，绝缘正常的小型低压电机在进行耐压试验时，单台的高压泄漏电流一般会在 20mA 以下。

四、耐直流电压试验

对额定电压 $\geq 6\text{kV}$ 的电机绕组，可采用直流耐压试验代替交流工频耐压试验。此时所用设备容量可远小于交流工频耐压试验设备。

(一) 试验设备

直流耐压试验设备电路原理如图 4-2 所示。其中元件可按下述原则配置。

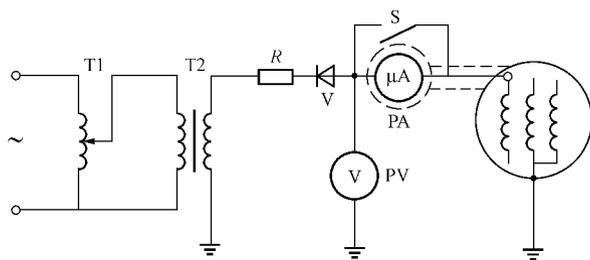


图 4-2 直流耐压试验设备电路原理图

(1) 变压器 T2 和调压器 T1 的容量按每 1kV 试验电压为 $0.2 \sim 0.5\text{kVA}$ 选择。高电压者取小值。变压器的输出电压应在被试品额定电压的 3.5 倍以上。

(2) 整流元件 V 一般采用硅整流管或硅堆，可根据需要组成半波或全波整流。其额定电流一般在 $100\mu\text{A}$ 以下；额定电压按最高输出电压选择。

(3) 限流保护电阻 R 按每伏试验电压 10Ω 选配。

(4) 高压电压表 PV 可选用静电系电压表，也可通过串电阻分压接降低电压表（相当于扩大电压表的量程）。

(二) 试验方法和注意事项

(1) 试验前，应先测量试验设备和接线本身的泄漏电流。被试品的泄漏电流应为试验时所测电流去除上述泄漏电流值后的值。

(2) 高压接线应尽可能短并绝缘良好，对地有足够距离。

(3) 试验过程中，若发现电流急剧增长或有异常放电现象，应立即关断电源。

(4) 其他同交流耐电压试验。

(三) 试验电压和时间

试验电压值最大为交流工频耐压值（有效值）的 1.7 倍；需低于 1.7 倍时，按专门的协议。加压时间为 1min。

(四) 试验结果判定方法

对试验结果的判定方法同交流耐电压试验的相关规定。

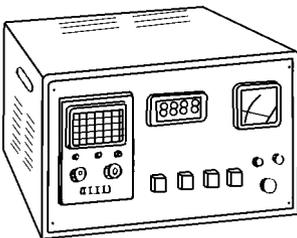
第四节 绕组对机壳（对地）耐冲击电压试验

一、试验设备

本试验所用设备称为“对地耐冲击电压试验仪”（见图 4-3）。

二、试验加压对象和有关规定

对于在 JB/T 8158《电压为 690V 及以下单速笼型感应电动机的起动性能》范围内的电动机，按 GB 755—2000 中的规定；对于高压电动机，按 JB/T 10098—2000 中的规定。



4-3 对地耐冲击电压试验仪

(1) 电机绕组及接线板等绝缘件对机壳主绝缘。

(2) 对额定电压为 1140V 及以下的电机散嵌或成型绕组的对地绝缘，应在绕组引线端子与机壳之间施加冲击电压。

(3) 对电机接线装置，应在接线端子间、接线端子与机壳之间施加冲击电压。

三、试验电压波形、数值、加压时间及结果判定

(一) 试验电压波形

试验电压波形应为标准雷电冲击电压波形，其波前时间为 $1.2\mu\text{s}$ （允差 $\pm 30\%$ ），半峰值时间为 $50\mu\text{s}$ （允差 $\pm 20\%$ ）。

(二) 试验电压数值

冲击试验电压峰值按式 (4-5) 计算，并按 GB 8170—1987 标准中的规定修约至千数位。

$$U_s = 4U + 5000 \quad (4-5)$$

式中 U_s ——电机对地绝缘冲击试验电压（峰值），V；

U ——电机额定电压（有效值），V。

例如： $U = 380\text{V}$ 时， $U_s = 4 \times 380 + 5000 = 6520\text{V}$ 。

按 GB 8170—1987 的规定，修约到千数位时，应为 7000V。

(三) 试验时间和次数

除非另有规定，冲击试验电压正负极性各施加 3 次，每次间隔时间应不少于 1s。

(四) 结果判定

由于目前国家和电机行业对该项试验仪器的显示方式及试验结果判定方

法还没有一个统一的规定，所以在此仅能介绍一些实际经验供参考使用。具体规定是：试验时，若仪器所显示的试验电压明显下降，对使用示波器显示试验电压波形的，电压波形出现异常，则说明被试绕组和相关线路的对地绝缘有损伤而被击穿，被试品本项为不合格。

第五节 绕组匝间耐冲击电压试验

电机绕组的匝间绝缘应进行耐冲击电压试验。不同类型电机的绕组试验方法及所加冲击电压值按不同的试验标准进行。

除电机总装后按标准规定进行本试验外，在电机生产的各个工序中均可进行试验，也可只选择其中某几个工序进行试验。试验所处工序和各工序所加冲击试验电压数值由生产厂自定。当整机试验有困难时，允许在装配前以绕线转子绕组和压入机壳后的定子绕组进行试验来代替整机本项试验。

绕组匝间耐冲击电压试验使用绕组匝间耐冲击电压试验仪（简称为“匝间仪”），应按试验电压的大小和被试电机的容量来选择仪器的规格。

一、交流低压电机散嵌绕组试验方法

JB/T 9615.1—2000《交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验方法》中所说的“低压电机”，是指额定电压为1140V及以下的中小型三相和单相交流电机。

（一）试验接线方法

（1）三相绕组6个线端都引出时，可按图4-4（a）所示接法，称为相接法，它较适用于无换相装置的匝间仪，需人工倒相。

（2）三相绕组已接成Y形或 Δ 形时，则可按图4-4（b）、（c）、（d）、（e）所示的方法接线。

（3）单相电动机可采用两台相同材料、相同工艺、相同规格的电机，按图4-4（f）所示的接线方法进行试验。对具有完全相同电磁参数的两套绕组的单相电动机（例如洗衣机用单相电动机），可将本机的两套绕组互为标准绕组，进行对比试验。

（二）冲击试验电压输入方向

冲击试验电压的输入方向应根据运行时电源与电机接线端子的实际接线方式进行选择。

（1）对具有一种额定电压的单速电机，若接线方向固定，冲击试验电压应从接电源端子输入绕组；若其有多种接线方式而电源进线方向不固定（例如可从U1、V1、W1端子进线，也可从U2、V2、W2端子进线），冲击试验电压应分别从可能的几种电源进线方向输入绕组。

（2）对具有多种额定电压的单速电机，冲击电压应从每种额定电压的接线方式及可能的几种电源进线方向输入绕组。

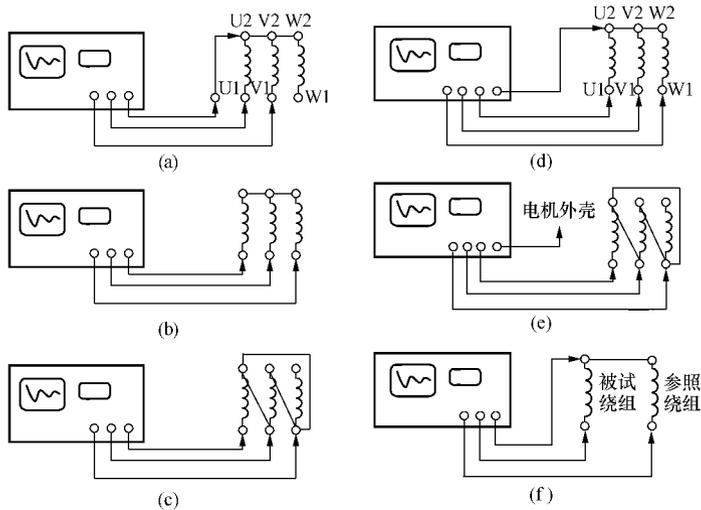


图 4-4 交流电机绕组匝间耐电压试验接线方法

(a) 相接法; (b) 三线Y接法; (c) 三线Δ接法; (d) 四线Y接法;
(e) 四线Δ接法; (f) 不同两套绕组单相电机接线方法

(3) 对变极多速电机, 冲击电压应从每种转速的接线方式及可能的每种电源进线方向输入绕组。

(三) 试验时间

标准中一般规定施加冲击电压 5 次。但因这种规定较难掌握, 而试验时间略长对绕组无有害影响, 所以一般控制在 1~2s 之间, 有必要时, 还可适当加长。

二、交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验电压限值

现行的《交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验限值》标准编号为 JB/T 9615.2—2000。

对组装后的电机试验时, 所加冲击电压 (峰值) 按式 (4-6) 计算。计算值修约到百伏。

$$U_z = 1.4KU_G \quad (4-6)$$

式中 1.4——系数, 是 $\sqrt{2}$ 取一位小数的数值;

K——电机运行系数, 见表 4-3;

U_G ——耐交流电压值, V, 见表 4-2。

例如，对一般运行的电机，当 $U_N = 380\text{V}$ 时，有

$$U_G = 2U_N + 1000 = 2 \times 380\text{V} + 1000\text{V} = 1760\text{V}$$

$$\text{则 } U_Z = 1.4 \times 1 \times 1760\text{V} = 2464\text{V}$$

修约到百伏后为 2500V。

铭牌标注为 380/660V， Δ/Y 的普通电机， U_N 应取两个电压中较高的 660V，则

$$U_G = 2 \times 660\text{V} + 1000\text{V} = 2320\text{V}$$

$$U_Z = 1.4 \times 1 \times 2320\text{V} = 3248\text{V}$$

修约到百伏后为 3200V。

表 4-3 交直流低压散嵌绕组匝间冲击电压试验电压值的计算系数 K

运行情况或要求	K	运行情况或要求	K
一般运行	1.0	剧烈振动、并用潜水、并用潜油、并用潜卤、高温运行（H级以上）、驱动磨头（装入磨床内直接驱动砂轮）	1.20
浅水潜水	1.05		
湿热环境、化工防腐、高速（大于 3600r/min）运行、一般船用	1.10		
隔爆或增安	10.5 ~ 1.20	特殊船用、耐氟制冷	1.30
屏蔽运行； 频繁启动或逆转	1.10 ~ 1.20 (根据实际情况选用)	特殊运行（可根据生产厂与用户协商确定）	1.40

注 现变频电机已大量投入使用，鉴于变频电源在供电过程中随时有出现较高浪涌电压的可能，建议将用变频器供电的电动机列入特殊运行一类中，即本项系数定为 1.4。

三、试验结果（显示波形）的判定

（一）概述

从前面的有关叙述可知，当采用双绕组对比法进行试验时，若两个绕组都正常时，两条曲线将完全重合，即在屏幕上只看到一条曲线，如图 4-5 (a) 所示。

但是，所谓的完全重合只是相对的，因为要想得到这一结果，则两相绕组的直流电阻、电感量、磁路参数（包括铁心的尺寸和在各个方向上的导磁性能、槽之间距离的一致性、定转子之间气隙的均匀度、绕组端部的形状以及与附近机座和端盖之间的距离等）、电容量等均应完全相同，客观地讲这是不可能做到的。所以，实际上只能做到无较大差异，或者说基本重合。在 JB/T 9615.2—2000 中提到的材料和生产工艺的少量差异就是指这些内容。

若两条曲线不完全重合（严格地讲是未达到“基本重合”），则有可能是被试的两个绕组存在匝间短路故障或磁路参数存在差异，也可能是仪器和接线方面的故障造成的。

在实际试验中，一般是由试验人员通过观察显示的两条不完全重合的波形曲线形状，凭经验判定被试绕组的绝缘是否正常，我们称其为“观察法”。由于经验的多少和理解的差异，用这种方法时，对某些情况会出现一些争议。在 JB/T9615.2—2000 中给出了用计算两条曲线与横轴（时间轴）所包面积差或差的面积大小，来判定被试绕组的绝缘是否正常的方法，我们称其为“算法”。这种方法一般需要专用的仪器来完成计算工作。下面分别进行介绍。

1. 用“观察法”判定试验结果

下面给出几种典型的情况供参考。因不同规格或不同厂家生产的匝间仪对绕组的同一种故障的反应会有所不同，另外，对三相绕组，不同的接线方式也会出现不同的反应，所以很难给出一个通用的判定标准。读者应不断通过试验总结经验，得出自己可行的判定标准。

(1) 两条曲线都很平稳，但有少量差异。两条曲线如图 4-5 (b) 所示。可能是由下述原因造成的：

1) 和总匝数相比而言，有极少量的匝间已完全短路。这种故障一般在匝数较多的绕组中出现。

2) 若被试电机这一个规格大部分或全部存在这种现象，则很可能是由于原始设计缺陷、所用材料或生产工艺波动等原因造成的，如定子铁心槽距不均、铁心导磁性能在各个方向不一致、绕组端部整形不规则、定转子之间的气隙不均、转子铁心槽距不均或在一个极距下三相分布不均（不能三等分）等。拆出转子后再进行试验，若曲线变为正常状态，则说明定子没有问题，应进一步查找转子和装配方面的原因。

3) 对于有较多匝数的绕组，也可能是其中一相绕组匝数略多或略少于正常值。

4) 对于多股并绕的线圈，在连线时，有的线股没有接上或结点接触电阻较大，此时两个绕组的直流电阻也会有一定差异。

5) 由两个闸流管组成的匝间仪，在使用较长时间后，会因两个闸流管或相关电路元件（如电容器的电容量及泄漏电流值等）参数的变化造成加载时输出电压有所不同或振荡周期不同，从而使两条曲线产生一个较小的差异，此时，对每次试验（如三相电机的三次试验）都将有相同的反应。但

应注意，该反应对容量较大的电机会较大，对容量较小的电机可能不明显。

6) 仪器未调整好，造成未加电压时两条曲线就不重合。

7) 被试绕组与仪器之间的连线某些连接点接触不良，使相关线路直流电阻加大。

(2) 两条曲线都很平稳，但差异较大。两条曲线如图 4-5 (c) 所示。可能是由下述原因造成的：

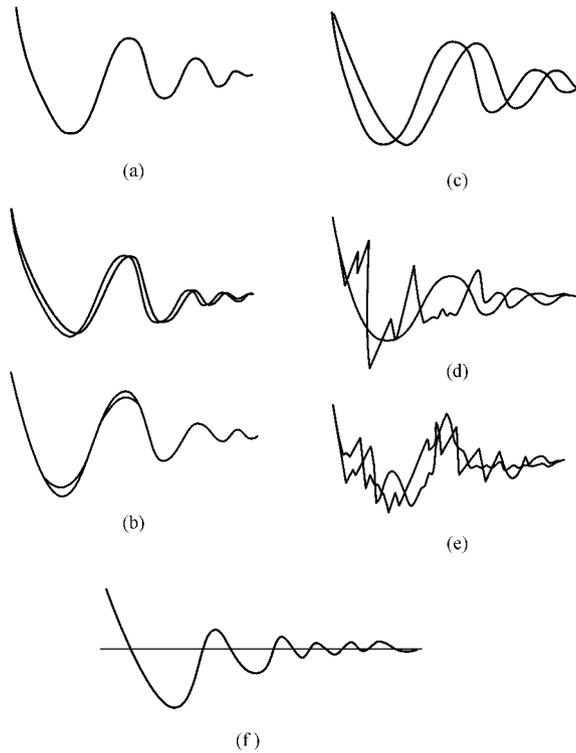


图 4-5 匝间耐电压试验波形曲线典型示例图

(a) 正常波形；(b) 有较小差异的波形；(c) 有较大差异的波形；
 (d) 有匝间短路放电的波形；(e) 两相都存在匝间短路或铁心接地不实的波形；(f) 有一相绕组断路或未加电压的波形（图中的直线）

1) 两个绕组匝数相差较多或其中一个绕组内部相距较远（从线圈匝与匝的排列顺序上来讲较远，例如总计 100 匝的绕组中的第 1 匝和第 50 匝）

的两匝或几匝已完全短路（或称金属短路），此时两个绕组的直流电阻也会有较大差异。

2) 两个绕组匝数相同，但有一个绕组中的个别线圈存在头尾反接现象，此时两个绕组的直流电阻会基本相同，但交流电抗却会相差很多（有线圈头尾反接的绕组交流电抗要比正常的小很多）。

(3) 一条曲线平稳并正常，另一条曲线出现杂乱的波形，如图 4-5 (d) 所示。其原因如下：

1) 曲线出现杂乱波形的绕组内部存在似接非接的匝间短路，在高电压的作用下，短路点产生电火花，如发生在绕组端部，则可能看到蓝色的火花，并能听到“吱、吱”的放电声。

2) 仪器接线松动或虚接。此时在电机绕组处听不到任何异常声响。

(4) 两条曲线都出现杂乱的波形。两条曲线如图 4-5 (e) 所示。原因有如下两个：

1) 被试的两套绕组都存在匝间短路故障。

2) 当铁心采用接地方式放置时，接地点松动不实。

(5) 只有一条振荡衰减曲线。当只有一条振荡衰减曲线，另一条还是原来的一条直线时，如图 4-5 (f) 所示，则是有一相绕组断路，或仪器与绕组的引接线断开，或一路无输出电压等原因造成的。

2. 利用“计算法”判断试验结果

当两条曲线不重合时，在一段时间内，每条曲线与时间轴所包罗的面积就会不同，两条曲线不重合的程度越严重，面积之差就会越大。利用这一规律，可通过计算两个波形面积差值或波形差的面积的大小来判定被试绕组的绝缘情况。

波形面积差是指在任意指定的比较判别区域内，两条试验波形曲线各自与横坐标（时间轴 t ）之间所包面积之差，如图 4-6 (a) 所示。

波形差的面积是指在任意指定的比较判别区域内，两条试验波形曲线之间的面积，如图 4-6 (b) 所示。

在检测时，可由专用仪器或计算机自动计算和判断试验结果的好坏。此时可利用两条曲线的幅值差或振荡周期差，也可利用两条试验波形面积差或波形差的面积进行计算比较，推荐选择波形差的面积作计算比较。

(二) 试验波形差异量的允许值及其设定

JB/T 9615.2—2000 中以附录的形式给出了电机绕组和线圈匝间耐电压试验波形差异量的允许值设定方法。

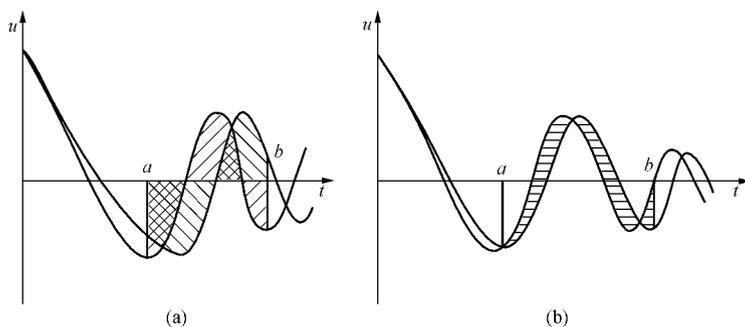


图 4-6 波形面积差和波形差的面积示意图

(a) 波形面积差；(b) 波形差的面积

1. 样本及预试验

从被试电机中任取 10 台电机绕组作为试验样本（样本容量 $n=10$ ）。以每台电机绕组作为试验样本单位（试验个体）。试验样本应与需作自动判别设定的某批电机绕组（试验总体）相一致，两者具有相同的规格、相同的材料、相同的工艺和相同的工艺特征。

试验样本的匝间绝缘应先按本标准规定的冲击试验电压峰值进行冲击电压试验。每个试验个体的试验波形显示均为 JB/T9615.1—2000 中规定的“正常无故障波形”（请注意：不一定全是完全重合的曲线），否则应补取试验个体重新试验，直至达到规定的样本容量。

2. 个体试验波形差异量

根据 JB/T 9615.1—2000 规定的试验接线方法，按 JB/T 9615.2—2000 规定，测量每个试验个体各次试验波形的差异量 X 。

取每台电机绕组各次试验波形的差异量 X （绝对值）中最大值 X_{\max} ，作为该个体的试验波形差异量 X_i 。

3. 样本试验波形差异

(1) 平均值 \bar{X} 。将测得的 10 个试验个体的试验波形差异量 X_i 按式 (4-7) 计算样本试验波形差异量的平均值 \bar{X} 。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4-7)$$

(2) 标准差 S 。按小样本标准差 S 的检算公式 (4-8)，计算样本试验波形差异量的标准差 S 。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4-8)$$

4. 总体试验波形差异量的允许值及其判别设定

总体试验波形差异量的允许值为样本标准差 S 与各试验个体的试验波形差异量中最大值 X_{\max} 或样本试验波形差异量的平均值 \bar{X} 之和。

优先推荐采用样本标准差 S 与样本试验波形差异量的平均值 \bar{X} 之和。

以总体试验波形差异量的允许值作为该批被试电机绕组（总体）匝间绝缘冲击耐电压试验时自动判别的设定值。

第六节 绕组直流电阻的测定试验

一、测量绕组直流电阻的目的和仪器选用原则

电机绕组的直流电阻是电机的一个重要参数。测定这个参数也是电机试验的一项重要内容。通过对实测电阻值的分析，可以初步判定被测电机绕组的匝数、线径、并绕根数、接线方式及接线质量等是否达到了设计或预计的要求，以及绕组匝间有无严重的短路现象等。绕组的直流电阻又是参与损耗计算和温升计算必需的一个参数。因此，绕组直流电阻的测定试验必须选择较高精度等级的测试仪表，并在操作中做到认真、细心，使所测数据具有较高的准确度和真实性。

在电机试验中测量绕组的直流电阻时，一般采用直流电阻电桥或数字电阻表，在由计算机控制的试验系统中则使用“电压电流法”。测量 1Ω 及以下的直流电阻时，若使用直流电阻电桥，应使用双臂电桥。所用仪表的准确度等级不应低于0.2级。

二、三相绕组直流电阻的测量方法

在测量绕组的直流电阻时，都要同时测量被测绕组的温度，若电机处于实际冷状态，可用周围环境温度来代替绕组温度。

三相异步电动机的定子和绕线转子都具有三相对称的绕组。在进行型式试验或其他需要精确结果的试验时，对每一相电阻应间断地测量3次，然后取3次的平均值作为测量结果。一般出厂检查试验可只测量一次。

采用“电压电流法”时，通入的电流不应大于被测绕组额定电流的 $1/10$ ，并且通电时间应尽可能短，以免绕组发热影响测量准确度。

（一）直接测量相电阻

当电机定子或转子三相绕组各相的头尾端点都引出，或三相绕组在电机内部已接成星形（Y形），但除三个相线引出外，中性线也引出时，可以分别测量各相的直流电阻。

（二）测量线电阻

当电机定子或转子三相绕组在电机内部已接成星形（Y）或三角形（ Δ ），只引出3条线时，则只能测量每两个线端之间的电阻（在有些文件中称为端电阻，但习惯称为“线电阻”，这样与“线电压”、“线电流”两个概念相呼应，有利于记忆和使用）。若需要得到每相的电阻值，则需通过专用公式进行换算。

用双臂电桥测量三相绕组直流电阻的接线方法如图 4-7 所示，其中应注意的是与电桥 P1、P2 连接的引线要靠近被测绕组。

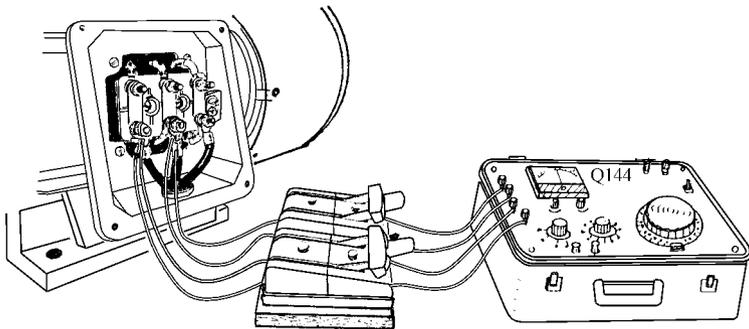


图 4-7 用双臂电桥测量三相异步电动机绕组直流电阻的接线图

三、相电阻与线电阻的换算关系

当测量值为 3 个线电阻，需要将其换算成相电阻时，可根据需要和测试数据的具体情况，决定采用下述两种办法之一进行换算。

(一) 精确换算

设 3 个相电阻分别为 R_U 、 R_V 、 R_W ，3 个线电阻分别为 R_{UV} 、 R_{VW} 、 R_{WU} ，并设 $R_m = (R_{UV} + R_{WU} + R_{VW}) / 2$ ，则 3 个相电阻和 3 个线电阻的关系为：

(1) 三相绕组星接 (Y) 时

$$\left. \begin{aligned} R_U &= R_m - R_{VW} = \frac{1}{2} (R_{UV} + R_{WU} - R_{VW}) \\ R_V &= R_m - R_{WU} = \frac{1}{2} (R_{VW} + R_{UV} - R_{WU}) \\ R_W &= R_m - R_{UV} = \frac{1}{2} (R_{WU} + R_{VW} - R_{UV}) \end{aligned} \right\} \quad (4-9)$$

(2) 三相绕组角接 (Δ) 时

$$\left. \begin{aligned} R_U &= \frac{R_{VW}R_{WU}}{R_m - R_{UV}} + R_{UV} - R_m \\ R_V &= \frac{R_{WU}R_{UV}}{R_m - R_{VW}} + R_{VW} - R_m \\ R_W &= \frac{R_{UV}R_{VW}}{R_m - R_{WU}} + R_{WU} - R_m \end{aligned} \right\} \quad (4-10)$$

(二) 求取三相平均值的简单计算

在进行电机试验时，经常要用三相电阻的平均值来计算绕组的热损耗

(习惯称为“铜损耗”或 I^2R 损耗)。当实测三个线电阻的不平衡度较小时(见下述规定),允许使用下述简单的计算方法求取三相相电阻的平均值 R_ϕ 。以下两式中, R_L 为三个实测线电阻的平均值。

(1)对三相星接(Y)绕组,当实测三个线电阻的不平衡度不超过 $\pm 2\%$ 时

$$R_\phi = 0.5R_L = R_L/2 \quad (4-11)$$

例如,对某一三相星接(Y)绕组,实测的三个线电阻分别为1.025、1.020、1.024 Ω ,其三相平均值为 $(1.025 + 1.020 + 1.024) / 3 = 1.023\Omega$,三相不平衡度为 $(1.020 - 1.023) / 1.023 = -0.293\%$,未超过 $\pm 2\%$,则相电阻平均值应为 $0.5 \times 1.023\Omega = 0.5115\Omega$ 。

(2)对三相角接(Δ)绕组,当实测三个线电阻的不平衡度不超过 $\pm 1.5\%$ 时

$$R_\phi = 1.5R_L \quad (4-12)$$

若将上述示例改为三相角接,则计算所得的三相不平衡度为 -0.293% ,未超过 $\pm 1.5\%$ 的规定。此时三相相电阻平均值应为 $1.5 \times 1.023\Omega = 1.5345\Omega$ 。

四、不同温度时导体直流电阻的换算

一般金属导体的直流电阻与其温度有一个固定的关系。这个关系用式(4-13)表示:

$$R_2 = \frac{K - t_2}{K - t_1} \times R_1 \quad (4-13)$$

式中 R_1 ——温度为 t_1 时的直流电阻, Ω ;

R_2 ——温度为 t_2 时的直流电阻, Ω ;

K ——导体的电阻温度计算系数(在0 $^\circ\text{C}$ 时,导体电阻温度系数的倒数),在电机行业标准中的一般规定是:对铜绕组, $K=235$;对常用铝绕组(主要是铸铝转子的绕组,由铝导条和端环组成), $K=225$ 。

例如,在温度为15 $^\circ\text{C}$ 时测得某铜绕组的直流电阻为10 Ω ,求该绕组在95 $^\circ\text{C}$ 时的直流电阻为多少 Ω ?

解 由题意可知, $K=235$, $R_1=10\Omega$, $t_1=15$, $t_2=95$,用式(4-13)可得

$$R_2 = \frac{K - t_2}{K - t_1} \times R_1 = \frac{235 + 95}{235 + 15} \times 10 = 12.69\Omega$$

答:该绕组在95 $^\circ\text{C}$ 时的直流电阻为12.69 Ω 。

第七节 堵转试验

一、试验目的

堵转试验的目的主要在于测取额定电压及额定频率时电机的稳态堵转定子电流和堵转转矩，它们是考核笼型转子异步电动机性能的两个主要指标，如无特殊规定，试验应在冷状态下进行。

通过对堵转电流大小和三相平衡情况的分析，能反映出电机定、转子绕组（特别是转子铸铝导条）及定、转子所组成磁路的合理性和一些质量问题。为改进设计和工艺提供有关实测数据，为故障电机查找原因和确定修理内容提供帮助。

二、试验设备和线路

（一）电源调压器

如要求试验时最高堵转电压达到被试电机的额定电压，则电源调压器的输出电压应在被试电机额定电压的 1.5 倍以下可调，其额定输出容量一般应大于被试电机的额定容量的 6 倍；因被试电机容量较大，上述要求不能满足时，调压器的额定容量至少应是被试电机额定容量的 3 倍，或输出电压（在通电试验后）等于被试电机额定电压时其输出电流不小于被试电机额定电流的 2.5~4.5 倍（容量较大的被试电机取小值，详见本节第三部分的相关规定）。

（二）堵转转矩测量设备

可用测力计（含弹簧秤、磅秤、拉或压力传感器等测力计，试验时还需要一个力臂）和磁滞测功机、直流测功机、转矩传感器（附数据显示仪表。由于转矩传感器的弹性轴在较大的冲击扭矩作用下可能产生不可恢复的永久变形，所以不建议使用该设备测试堵转转矩）等设备测量转矩。

采用弹簧秤测力法的试验线路和所用设备如图 4-8 所示。

使用测力计时，要注意所选用的力臂材料应有足够的强度，防止因强度不足造成弯曲，甚至扭断伤害试验人员，力臂和电机转轴应牢固安装。选用测力计时，应事先估计出被试电动机试验时的最大堵转转矩值。如试验最高电压可达到被试电机的额定电压，并按堵转转矩值约为额定转矩的 3 倍估算，则选用测力计的量程应为

$$F_J = 10 \frac{P_N P}{L} \quad (4-14)$$

式中 F_J ——选用测力计的量程，N；

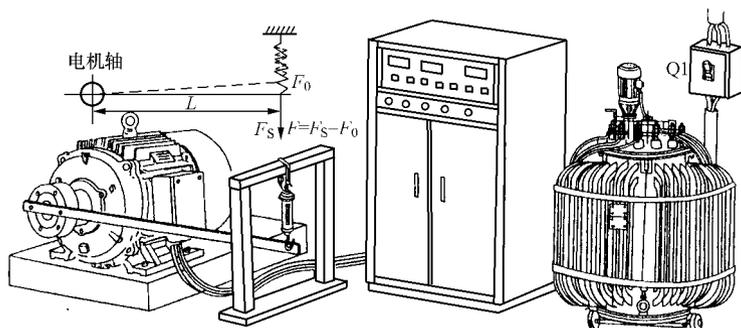


图 4-8 三相异步电动机堵转试验线路和所用设备示意图

P_N ——被试电动机额定功率，kW；

p ——电动机的极对数；

L ——力臂长度，m。

使用转矩传感器时，传感器的标称转矩应不小于假设力臂长度 $L = 1\text{m}$ 时用式 (4-14) 求得估算值的 1.2 倍，但也不应超过此估算值的 2 倍。

如果能够得到堵转转矩的设计值或同规格电动机的实测值，则利用这些数据选择测力计或转矩传感器的规格。

对因设备限制不能实测转矩的电动机（原则上规定电机容量应在 100kW 以上），堵转转矩可用“计算法”求得。

（三）电量测量仪表

电量测试仪表可采用专用的数字式三相电量测量仪，若使用指针式仪表，则主要有三块电流表、三块电压表（能确定三相电源平衡时，可用一块电压表）、三相功率表（一般用两块单相功率表），采用指针式功率表时，建议用低功率因数功率表。另外还需要一台电阻测量仪（电桥或其他电阻测量仪表）。

三、试验步骤及注意事项

电机应固定安装在试验平台上。试验前，电机应为实际冷状态（另有规定者除外）。当采用测力计时，力臂和测力计联结的那一端应略高于和电机轴伸的联结端，高出的数值以该电机的堵转转矩达到试验最高值时，力臂处于水平位置为准，如图 4-8 所示。其目的是为了消除或减少试验加力时因力臂与测力计不垂直而带来的计算误差。

（一）一般规定

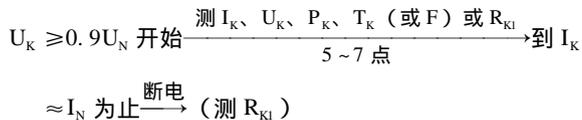
当使用测力法进行试验时，在给电机通电进行试验前，要事先记录测力

计显示的力臂重量（实际为力臂重量的一部分），即“初重”，用符号 F_0 表示，单位为 N。

试验时，施于定子绕组的电压应尽可能从不低于 $0.9U_N$ 开始，然后逐步降低电压至定子电流接近额定值为止。其间共测取 5~7 点读数，每点应同时测取三个堵转线电流 I_k (A)、三个或一个堵转线电压 U_k (V)、三相输入功率 P_k (W) 和堵转转矩 T_k ($N \cdot m$) 或力 F (N)。最后一点测试结束后，立即断电并尽快测得定子绕组一个线电阻 R_{kl} 。

试验时，电源的频率应稳定；功率表的电压回路和电压测量线路应接至被试电机的出线端；被试电机通电后，应迅速调定电压并尽快同时读取所有试验数据（对采用指针式两功率表法者，应在读数较大的那块功率表指针稳定后立即读数），每点通电时间应不超过 10s，以防止电机过热造成读数下滑或严重时烧损电机绕组。

上面的试验过程可用下面的流程图表示。



采用测力计法测取堵转转矩时，在电压较高的前两点，应注意防止在电机通电瞬间对测力计的较大冲击。为此，可采用对测力部位实施机械缓冲的方法或用较低电压通电后再迅速将电压升至需要值的方法。

对能快速测量和记录的自动测量系统，也可从低电压 ($I_k \approx I_N$) 开始，分段或连续地将电压调到接近或达到额定值，全过程试验时间应不超过 20s。

（二）试验设备能力有限时的规定

当试验设备能力有限时（包括电源容量和测量设备），可采用间接法进行试验和计算得到额定电压时的有关数值。

1. 电源容量有限时

当试验电源设备容量不能满足最高电压达到 $0.9U_N$ 时，对 100kW 以下的电机，试验时的最大堵转电流值应不低于 $4.5I_N$ ；对于 100~300kW 的电机，应不低于 $(2.5 \sim 4)I_N$ ；对于 300kW 以上的电机，应不低于 $(1.5 \sim 2)I_N$ 。在最大电流至额定电流范围内，均匀地测取不少于 4 点的读数（读数内容同前）。

2. 转矩测试能力有限时

如限于设备，不能达到实测额定电压下堵转转矩的要求时，应在每点测

试结束断电后，迅速测取定子绕组的一个线电阻 R_{kl} (Ω)。然后用“计算法”求取各点堵转转矩值 T_K ($N \cdot m$)，见式 (4-17)。对于中型及以上的电动机，在对测量精度要求不十分严格时，可只在最后测取一次 R_{kl} 值。为了区别于转矩实测法，一般称此法为“计算法”。本方法原则上只用于 100kW 以上的电机。

(三) 对分马力电机的规定

对分马力电动机（或小功率电动机），试验时，定子绕组上施加额定电压，使转子在 90° 机械角度内的三个等分位置上分别测定。此时，堵转电流取其中的最大值，堵转转矩取其中的最小值。

四、试验结果的计算

(一) 各测点数值的计算

计算各测量点的三相线电压平均值、三相线电流的平均值、三相输入功率及堵转转矩。根据所采用的试验方法，各点的堵转转矩求取方法有如下两种：

1. 用测力计进行试验时堵转转矩的求取方法

用测力计法进行堵转试验时，各测点的堵转转矩 T_K ($N \cdot m$) 由式 (4-15) 求得。

$$T_K = (F - F_0) L \cos\alpha \quad (4-15)$$

式中 F ——测量时测力计的读数， N ；

F_0 ——电机未加电时，测力计指示的数值，称为“初重”， N ；

L ——力臂长度， m ；

α ——测量时，力臂与水平方向的夹角，当此角度很小时，可取为 0° ，即

$\cos\alpha = 1$ ，此时式 (4-15) 则简化为

$$T_K = (F - F_0) L \quad (4-16)$$

2. 用测电阻法进行试验时堵转转矩的求取方法

使用每点测定定子绕组电阻的方法进行试验时，每点堵转转矩用式 (4-17) 求得：

$$T_K = \frac{9.55}{n_s} (P_K - P_{KCu1} - P_{Ks}) \quad (4-17)$$

式中 P_K ——电机输入功率， W ；

P_{KCu1} ——电机定子铜损耗， W ；

P_{Ks} ——堵转时的杂散损耗（包括铁耗）， W ，对中小型低压电机，取

$P_{Ks} = 0.05 P_K$ ；对大、中型高压电机，取 $P_{Ks} = 0.1 P_K$ ；

n_s ——被试电动机的同步转速, r/min。

因 $P_{KCu1} = 1.5 I_K^2 R_{K1}$, 对中小型低压电机取 $P_{Ks} = 0.05 P_K$, 则式 (4-17) 可直接写为

$$T_K = \frac{9.55}{n_s} (0.95P_K - 1.5 I_K^2 R_{K1}) \quad (4-18)$$

对大、中型高压电机取 $P_{Ks} = 0.1P_K$, 则式 (4-17) 可直接写为

$$T_K = \frac{9.55}{n_s} (0.9P_K - 1.5 I_K^2 R_{K1}) \quad (4-19)$$

式中 I_K ——三相堵转线电流平均值, A;

R_{K1} ——每点试验后测得的定子线电阻, Ω 。

(二) 求取额定电压时的堵转电流、转矩和输入功率

1. 堵转电流、转矩和输入功率的表示方法

在电机性能数据中所说的堵转电流、堵转转矩和堵转输入功率, 是指在堵转电压为额定电压时的数值, 分别用 I_{KN} 、 T_{KN} 和 P_{KN} 表示 (在不会引起误解时, 其下角标可去掉符号 N, 即写成 I_K 、 T_K 和 P_K , 在一些文件资料 and 标准中, 还常用 I_{st} 、 T_{st} 和 P_{st} 表示, 其下角标 st 为汉语“开始”或“起动”的英文单词 start 前两个字母)。它们的单位分别用 A、 $N \cdot m$ 和 W。

堵转电流和堵转转矩又经常用它们的标么值 (倍数) 来表示, 分别写成 I_{KN}^* 和 T_{KN}^* (或 I_K^* 和 T_K^*)。应注意的是, 它们的基值分别为被试电机的额定电流 (铭牌电流) I_N (A) 和额定转矩 T_N ($N \cdot m$)。

电动机的额定转矩 T_N ($N \cdot m$) 用式 (4-20) 求取:

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (4-20)$$

式中 P_N ——被试电机的额定功率, kW;

n_N ——被试电机的额定转速, r/min。

若转矩的单位使用 $kgf \cdot m$ (公斤力·米), 则将式 (4-20) 中的系数 9550 改成 975 即可。

2. 最高堵转试验电压 $\geq 0.9U_N$ 时堵转电流、转矩和输入功率的求法

(1) 在坐标纸上画出 3 条堵转特性曲线 $I_K = f(U_K)$ 、 $T_K = f(U_K)$ 、 $P_K = f(U_K)$ 。如最高试验电压小于被试电机的额定值, 则将曲线向上顺势延长至额定值, 如图 4-9 所示。

(2) 分别从 3 条曲线上查出 $U_K = U_N$ 时的 I_{KN} 、 T_{KN} 和 P_{KN} 。

3. 最高堵转试验电压 $< 0.9U_N$ 时额定电压堵转电流和堵转转矩的求法

(1) 在对数坐标纸上画特性曲线 $I_K = f(U_K)$ 。没有对数坐标纸时, 则

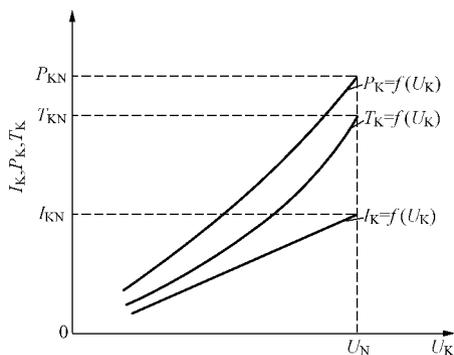


图 4-9 三相异步电动机堵转特性曲线

应先计算各点的 $\lg I_K$ 和 $\lg U_K$ ，再在普通坐标纸上画曲线 $\lg I_K = f(\lg U_K)$ ，如图 4-10 所示。将电压和电流试验值取对数的目的是将两者之间的非线性关系化为线性关系（关系曲线是一条直线），以利于通过向上延长两者的关系曲线来求取额定电压时的堵转电流值。

(2) 将上述曲线上端延长到 $\lg U_K = \lg U_N$ 时为止。从曲线上查出 $\lg U_K = \lg U_N$ 时的 $\lg I_{KN}$ 值。当使用对数坐标纸时，可直接得到额定电压时的堵转电流 I_{KN} ，否则需对 $\lg I_{KN}$ 取反对数得到堵转电流的实际值 I_{KN} 。

(3) 额定电压时的堵转转矩用式 (4-21) 求得：

$$T_{KN} = T_K \left(\frac{I_{KN}}{I_K} \right)^2 \quad (4-21)$$

式中 T_K ——堵转试验时最高电压点的堵转转矩， $N \cdot m$ ；

I_K ——堵转试验时最高电压点的堵转电流， A 。

I_{KN} ——从曲线延长线上查出 $U_K = U_N$ 时的堵转电流， A 。

在实际工作中，也可直接做堵转转矩与电压的对数曲线，并用上述方法求得额定电压时的堵转转矩值。

五、采用圆图计算法求取工作特性的深槽和双笼型电动机附加堵转试验

对深槽和双笼型电动机，当需要使用圆图计算法求取工作特性时，除前面所讲的堵转试验外，还应在 $1/2$ 倍被试电机额定频率下进行一次堵转试验（试验电源设备一般为三相交流变频发电机组，常用的变频器不能满足要求）。

试验时，堵转电流应为 $1 \sim 1.1$ 倍额定电流范围内的一个值。此时电压大约为额定值的 $15\% \sim 20\%$ 。

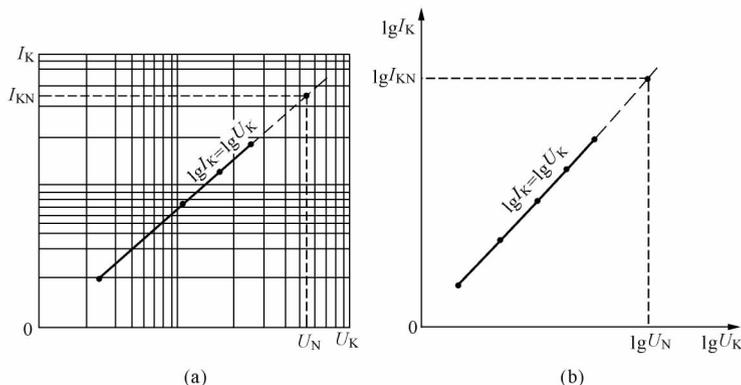


图 4-10 异步电动机对数形式的堵转特性曲线

(a) 专用对数坐标纸；(b) 普通坐标纸

六、采用等效电路法求取工作特性的附加堵转试验

需要采用等效电路（在有些资料 and 标准中称为“等值电路”）法求取工作特性的电动机，应增加在 $1/4$ 倍被试电机额定频率情况下进行的堵转试验（所用电源设备同上述第五项）。

试验时，堵转电流应为 $1 \sim 1.1$ 倍额定电流范围内的一个值。此时电压大约为额定值的 $10\% \sim 15\%$ 。

七、出厂检查试验时堵转试验的有关规定

普通三相异步电动机在出厂试验时，需进行堵转试验，即堵住电机的转子使其不能转动，加一定数值额定频率的电压，测取定子电流和输入功率，并和标准值（为一个范围，由生产厂家根据合格样机的数值自定）相比较，判断该项数据是否正常。

如无专门规定，试验应在电机处于实际冷状态下进行。

(一) 对电机堵转的方法

对于几十千瓦以下较小容量的电动机，可采用图 4-11 (a)、(b) 所示的自制夹具或卡具堵住转子轴伸，金属卡具的内套应采用铜或尼龙等材料，以避免损伤电机的轴伸表面和键槽；对于容量较大的电动机，也可用图 4-11 (c) 所示的方法将转子“支”住，所用木板应选用较硬的木材。应注意：在安放卡具或支撑木板之前，应事先给该电动机通电，观察其转动方向，以便正确选择放置卡具或支撑木板的位置（几个千瓦以下的电机可不必进行此项）；通电后，要关注所用工具的强度是否有问题，发现有危险时应尽快

断电。用木板支撑时，所有人员都应远离支撑的位置。

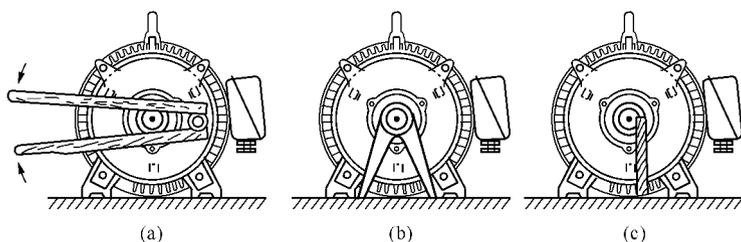


图 4-11 出厂试验时将电动机堵转的措施

(a) 用专用夹板夹住轴伸；(b) 用专用卡具卡住轴伸；(c) 用硬木板支撑轴伸

(二) 用计算机自动控制检测系统时的测量采样问题

当使用计算机自动控制检测系统时，可不必将转子堵住，利用计算机快速采样测量的优势，在电机加电后还没来得及转动或转速还很低的一段时间内，测取到各项数值（按有关定义，应是起动过程中的稳定值，即让过起动瞬间的浪涌电流，但还没有快速下降的一段数值，在起动过程中，这一稳定过程所用时间是相对较短的）。图4-12给出了一个典型的电流与时间的关系曲线。由于不同规格的电机，其起动时的过渡过程不完全相同，所以测量采样时间（从加电开始计时到开始采样的时间间隔）应通过示波器显示的电流波形得出，

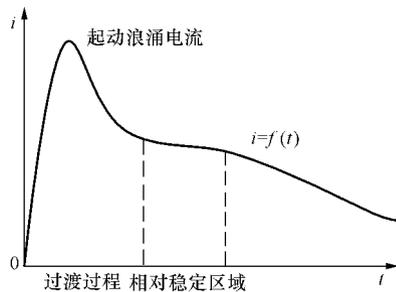


图 4-12 交流异步电动机起动过程中电流与时间的关系曲线

否则需要通过反复的对比试验得出，其方法是：先得到实际堵转时某一电压下的电流值或一段电流与电压的关系曲线，然后调定一个采样时间，由计算机控制得到同一电压时的一个电流值，和上述数值比较，如果偏差在一个理想的范围之内，则认为设定时间是合理的，否则要调整采样时间后再进行试验，直到符合要求为止。

(三) 堵转电压值的确定方法

在出厂检查试验时，不是像型式试验那样尽可能地加到额定电压，而是加到定子电流接近其额定值时的电压。不同规格的电机这一电压是不同的，但基本在额定值的 $1/5 \sim 1/4$ 之间。为了试验操作的方便，对一种额定电压

的电机，可规定一个统一的电压值，例如额定电压为 380V 的电机，规定为 100V，此时实测电流可能离额定值较远；也可以分成几段，如 70、80、90、100、110V 等，这样实测电流会很接近其额定值。所用电压值是由该类同规格电机型式试验得出的。

(四) 需测取的试验数据

试验时，应尽可能地将电压调整到标准给定的数值，然后测取三相线电流 I_{K11} 、 I_{K12} 、 I_{K13} ，三相输入功率 P_{K1} ，同时记录三相线电压值 U_{K11} 、 U_{K12} 、 U_{K13} （能够确定三相线电压平衡时，可只测量一个线电压值）。

(五) 对试验结果的判定

1. 整理试验数据

用下述公式将试验测得值进行整理和修正。

(1) 求取三相线电压、三相线电流的平均值 U_{K1} (V)、 I_{K1} (A)。

$$U_{K1} = (U_{K11} + U_{K12} + U_{K13}) / 3 \quad (4-22)$$

$$I_{K1} = (I_{K11} + I_{K12} + I_{K13}) / 3 \quad (4-23)$$

(2) 求取堵转电流的不平衡度 ΔI_{K1} (%)。

$$+ \Delta I_{K1} = \frac{I_{K1\max} - I_{K1}}{I_{K1}} \times 100\% \quad (4-24)$$

$$\text{或} \quad - \Delta I_{K1} = \frac{I_{K1\min} - I_{K1}}{I_{K1}} \times 100\% \quad (4-25)$$

式中： $I_{K1\max}$ 和 $I_{K1\min}$ 分别为三相堵转线电流实测值中的最大值和最小值。

(3) 当试验电压不等于标准给定值时，应将试验电流和输入功率修正到标准给定电压时的数值 I_K 和 P_K 。

$$I_K = I_{K1} \frac{U_{KN}}{U_{K1}} \quad (4-26)$$

$$P_K = P_{K1} \left(\frac{U_{KN}}{U_{K1}} \right)^2 \quad (4-27)$$

2. 判断试验结果是否符合要求

将上述求得的电流不平衡量和经修正的电流及输入功率值与标准（一般由制造厂根据合格样机型式试验的结果来确定）进行比较，判断是否符合要求并给出结论。

八、绕线转子电动机的堵转试验问题

由于对绕线转子电动机不考核起动性能，所以在型式试验时可不进行上述堵转特性曲线的试验，但应该进行额定定子电流的堵转试验（试验时，转子应堵住，并且将转子三相绕组在集电环上或通过引出线短路），测取该

点的堵转电压、电流和输入功率，以便用于批量生产的电机进行出厂试验时参考。

绕线转子电动机在进行出厂检查试验时，其堵转试验方法和需测量的数据与笼型转子电机基本相同，试验时转子和转子绕组的处理方法同型式试验办法，如图 4-13 所示。

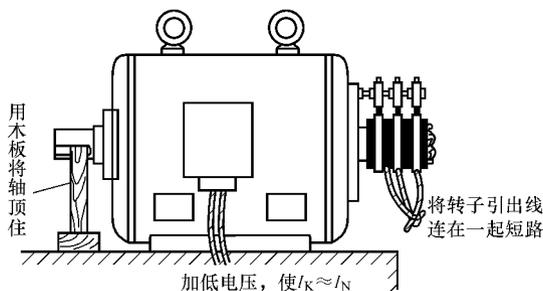


图 4-13 绕线转子电动机的出厂检查堵转试验

九、关于 JB/T 8158—1999 中提出的起动性能代号问题

在 JB/T 8158—1999 《电压为 690V 及以下单速笼型感应电动机的起动性能》中第 3 项提出了 4 种起动性能的代号问题。现将其介绍如下。

(一) N 设计

本设计为正常转矩的三相笼型感应电动机。电动机采用直接起动，具有 2、4、6 或 8 极，额定功率为 $>0.4 \sim 630\text{kW}$ ，频率为 50Hz 或 60Hz。

(二) NY 设计

本设计类似 N 设计，但采用星-三角起动，电动机星接起动时的堵转转矩和最小转矩的最小值应不低于 N 设计相应值的 25%（N 设计的数值请参见 JB/T 8158—1999 中的表 1）。

(三) H 设计

本设计为高起动转矩的三相笼型感应电动机。电动机采用直接起动，具有 4、6 或 8 极，额定功率为 $>0.4 \sim 160\text{kW}$ ，频率为 50Hz 或 60Hz。

(四) HY 设计

本设计类似 H 设计，但采用星-三角起动，电动机星接起动时的堵转转矩和最小转矩的最小值应不低于 H 设计相应值的 25%（H 设计的数值请参见 JB/T 8158—1999 中的表 4）。

第八节 空载试验

一、定义和试验目的

三相异步电动机的空载试验是给定子加额定频率的额定电压空载运行的试验。其目的主要有如下 3 个。

(1) 检查电机运转的灵活情况，初步判定噪声和振动是否符合要求。

(2) 通过测试，求得电机额定电压时的铁心损耗和在额定转速（严格地讲是空载转速）时的机械损耗（简称为“机械耗”，其中包括轴承摩擦损耗和驱动风扇造成的损耗等，所以又被称为“风摩损耗”，简称为“风摩耗”）。

这两项损耗包括在电机“五大损耗”之内（另三个分别是：定子铜损耗、转子铜或铝损耗、杂散损耗），是采用损耗分析法求取电机效率的必需参数，也是分析和改进电机性能的重要参考数据。

(3) 通过试验得出空载电流与空载电压的关系曲线（被称为“空载特性”或“空载特性曲线”）。这条曲线其实就是电机的磁化曲线。它可以反映出电机电磁设计及相关原材料质量及加工工艺的实际情况，例如：铁心材料的性能和几何尺寸、定子绕组匝数及型式、定转子气隙的大小等参数选择得是否合理；对于批量生产中的电机是否有异常变化等。

二、试验设备、试验过程和有关参数的测定方法

（一）试验设备及要求

电机试验线路示意图如图 4-14 所示。其中电源调压器的输出电压应在被试电机额定电压 20% ~ 130% 以内可调，容量应不小于被试电机的额定输入功率。

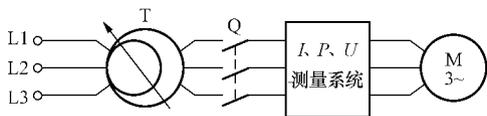


图 4-14 三相异步电动机空载试验线路示意图

测量输入功率应采用低功率因数功率表或能适用于功率因数为 0.2 以下的其他数字功率表。一般采用“两表法”测量三相功率。

对 750W 以下的电动机，不允许采用电流互感器。

(二) 试验过程和试验方法

电机在试验前,应测量三相绕组对地及相互间的绝缘电阻。如有条件,还应进行匝间和对地绝缘耐冲击电压试验,并均应符合要求。

将电机启动后,保持额定电压和额定频率空载运行到机械损耗稳定。

判定机械损耗稳定的标准是:输入功率相隔 0.5h 的两个读数之差不大于前一个读数的 3%。但在实际应用时,一般凭经验来确定,对 1kW 以下的电机一般运转 15~30min,对 1~10kW 的电机一般运行 30~60min,大于 10kW 的电机应为 60~90min,极数较多的电机或在环境温度较低的场地试验时,应适当延长运转时间。

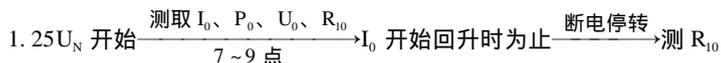
如需进行热试验,则本试验在热试验后紧接着进行即可。

试验时,施于定子绕组上的电压应从 $1.25U_N$ 开始,逐步降低到可能达到的最低电压值,即电流最小或开始不稳定或上升时为止。其间测取 7~9 点读数(多则更好),其中,在 $0.6U_N$ 以上测取 4~5 点(应在 U_N 时设置一点),在 $0.6U_N$ 以下测取 3~4 点,每点应测取下列数值:三相线电压(如可确定三相平衡时,可只测一相)、三相线电流、三相输入功率。

另外,在每点读数后还应测量定子绕组的直流电阻。有的资料建议,如在绕组中埋置了测温元件,则可测取绕组的温度,然后根据冷态时的电阻和温度经过换算得到试验时的绕组电阻。但因埋置地点不同,绕组的温度变化也会不同。所以会得到不同的阻值变化结果,使试验结果产生较大的误差。所以作者不建议采用此方法。

在每一点都测量绕组电阻有困难或对试验结果要求不十分严格时,可在上述测量全部结束后,尽快使电机断电停转,然后立即测出定子绕组的电阻。

上述试验过程可用下面的流程图表示(采用最后测量直流电阻的方法)。



三、试验结果的计算和特性曲线的绘制

设同一个测量点三相线电流分别为 I_{01} 、 I_{02} 、 I_{03} ,线电压平均值为 U_0 ,三相输入功率为 P_0 ,计量单位分别为 A、V、W;线电阻为 R_{01} (如采用测量温度的方法,应为换算得到的数值),单位为 Ω 。

(一) 对试验数据进行整理和计算

对试验结果进行下述运算和处理:

(1) 求取各试验点的三个线电压和三个线电流的平均值。

(2) 求取空载电压为额定电压值时的三相电流不平衡度。此值如果超过 $\pm 10\%$ ，则该电机本项不合格。在判定时，要注意三相电压的平衡性应符合要求。

(3) 求取各试验点的空载定子铜损耗 P_{0Cu1} 。

$$P_{0Cu1} = 1.5I_0^2 R_{01} \quad (4-28)$$

(4) 如使用电动系指针式功率表和电压表测量功率和电压，应根据功率表和电压表的接线情况，求取各测量点的仪表损耗。例如采用“电压后接法”的两功率表法时，仪表损耗为两个功率表电压支路损耗和电压表损耗之和。设两个功率表的规格相同，电压支路的电阻为 R_{wv} ，采用一只电压表，其内阻为 R_{vv} ，测点电压为 U_0 ，则仪表损耗 P_b 为

$$P_b = U_0^2 \left(\frac{2}{R_{wv}} + \frac{1}{R_{vv}} \right) \quad (4-29)$$

(5) 计算各测点的输入功率 P_0 。

$$P_0 = P_{0w} - P_b \quad (4-30)$$

式中 P_{0w} ——通过功率表的读数和互感器的倍数直接求得的空载损耗，W。

对额定电压为 380V 的电机，上述仪表损耗计算值在 20W 以下。对容量较大（例如 10kW 以上）的电机而言，该项损耗相对较小，可以忽略，如用手工计算，可直接使用仪表显示的功率值 P_{0w} ，即 $P_0 = P_{0w}$ 。若使用程序由电脑计算，则不管电机大小，一律进行该项修正。

(6) 计算各测点的铁心损耗 P_{Fe} 与机械损耗 P_m 之和 P'_0 。

$$P'_0 = P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{0Cu1} \quad (4-31)$$

(二) 绘制空载特性曲线

在同一个直角坐标系中绘制如下特性曲线（见图 4-15）。建议采用电压标么值绘制曲线（本书采用此种形式），其优点是横坐标的标尺对各种电压等级的电机都是相同的，并且额定电压时的电压标么值和电压标么值的平方都等于 1，即在同一横轴坐标点上，使得绘制和查取数据都较方便。当然，直接以电压为横轴也有直观的优点。

(1) 空载电流与空载电压标么值的关系曲线 $I_0 = f(U_0/U_N)$ 。

(2) 空载损耗与空载电压标么值的关系曲线 $P_0 = f(U_0/U_N)$ 。

(3) 铁心损耗与机械损耗之和 P'_0 与空载电压标么值平方的关系曲线。

在 GB/T 1032—2005 中要求：对应 $U_0 \leq 0.5U_N$ 时的所有测点，绘制 P'_0 与 $(U_0/U_N)^2$ 的关系曲线 $P'_0 = f[(U_0/U_N)^2]$ ；而对 $U_0 > 0.5U_N$ 时的所有测点，绘制 P'_0 与 (U_0/U_N) 的关系曲线 $P'_0 = f(U_0/U_N)$ 。即 P'_0 与空载电压的关系曲线分两部分，如图 4-15 (a) 所示。

实际工作中,如没有特殊要求,可只绘制一条曲线 $P'_0 = f [(U_0 / U_N)^2]$,如图4-15 (b)所示。

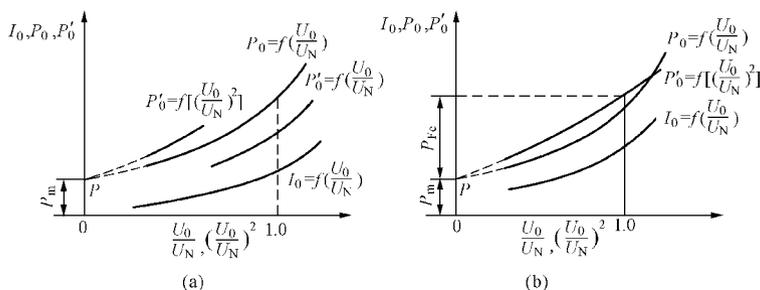


图 4-15 三相异步电动机空载特性曲线

(a) P'_0 曲线分两段的情况; (b) P'_0 曲线为一整段的情况

四、求取机械损耗及铁心损耗

将曲线 $P'_0 = f [(U_0 / U_N)^2]$ 下端的直线部分延长至与纵轴相交,交点为 P ,则 P 点的纵坐标值即为该电动机的机械损耗 P_m ,见图 4-15。

用 $(U_0 / U_N)^2 = 1$ (即 $U_0 = U_N$) 时的 P'_0 减去 P_m ,即求得该电机在额定电压时的铁心损耗 P_{Fe} 。

$$P_{Fe} = P'_0 - P_m \quad (4-32)$$

五、求取额定电压时的空载电流和空载损耗

从曲线 $I_0 = f (U_0 / U_N)$ 上查取 $U_0 / U_N = 1$ (即 $U_0 = U_N$) 时的空载电流 I_0 。

从曲线 $P_0 = f (U_0 / U_N)$ 上查取 $U_0 / U_N = 1$ (即 $U_0 = U_N$) 时的空载损耗 P_0 。

获得额定电压时的空载电流 I_0 、绕组的直流电阻 R_{01} 、机械损耗 P_m 和铁心损耗 P_{Fe} 数值后,额定电压时的空载损耗 P_0 也可用式 (4-33) 计算求得。

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{0Cu1} = P_{Fe} + P_m + 1.5 I_0^2 R_{01} \quad (4-33)$$

六、出厂检查试验时空载试验的有关规定

三相异步电动机在出厂试验时,需进行空载试验,即电机定子加额定频率的额定电压,测取定子电流和输入功率,并和标准值相比较,判断这些数据是否正常。

(一) 试验过程及需测取的试验数据

(1) 试验前,如有必要,应检查三相电压的平衡情况(对电网电源,

一般只考虑三相电压大小所引起的不平衡度),如其不平衡度达到 0.5% 以上,则应查找原因并设法排除,否则将由此对空载电流的大小,特别是三相不平衡度造成较大的影响,难以给出正确的结论。实践经验表明,当三相电压的不平衡度达到 1% 时,三相空载电流的不平衡度将高达 6% ~ 10%,或者说,当三相电压不平衡时,空载电流的三相不平衡度将是三相电压不平衡度的 6 ~ 10 倍(国际电工委员会 IEC 就此发表过的技术报告见本书附录 K)。

(2) 先将封电流互感器的开关闭合(或称封表),将电流互感器的比数选择在一次电流为被试电机额定电流的 75% ~ 35% (小容量多极数的电机对应大比数,20kW 以上的电机最大为 50%。如有样机的空载电流数值,则可将互感器的一次电流选定为该空载电流的 1.2 ~ 1.5 倍以内)。

(3) 开始给电机加电压,当电源及配电设备的容量足够时,可以直接加额定电压,否则必须采用降压起动方式,在加电压的同时,应密切注意观察电机的反应,如发现不起动、低速运转并有“嗡嗡”的声响或发出其他异常噪声等各种不正常现象时,应立即断电停机。

(4) 起动顺利完成并达到正常转速后,打开封电流互感器的开关。保持额定电压,使电机运转一段时间,尽可能地使其机械损耗达到稳定。在运转过程中,同时检查电机的噪声和振动,特别是轴承的运转情况。必要时还要测量轴承的温度。

(5) 机械损耗达到稳定后,测取三相线电流 I_{01} 、 I_{02} 、 I_{03} 和三相输入功率 P_0 ,若三相电压的不平衡度较大,还应记录三相电压值。

(二) 对试验结果的判定

(1) 用与计算堵转电流不平衡度相同的办法计算三相空载电流的不平衡度 ΔI_0 (%)。电机行业标准规定, ΔI_0 在 $\pm 10\%$ 以内为合格。如试验电源电压的不平衡度较大,在判断时应考虑其影响。

(2) 用试验测得的三相线电流平均值及输入功率值与对应的标准进行比较,判断是否符合要求并给出结论。如试验时三相电压 U_{0i} 与额定值 U_N 有偏差,则应先对测得的电流 I_{0i} 和功率 P_{0i} 进行电压修正,再和标准进行比较,修正方法见式(4-34)和式(4-35)。

需要说明的是:这两个计算式中的指数 2 和 3 是经验数据,不一定与被试电动机的实际特性相符,若要准确的数值,应通过空载试验得到实际的空载特性曲线,并从中计算出该数值,用于同规格、同工艺生产的其他电动机进行修正。

$$I_{0N} = I_{0i} \left(\frac{U_N}{U_{0i}} \right)^2 \quad (4-34)$$

$$P_{0N} = P_{0t} \left(\frac{U_N}{U_{0t}} \right)^3 \quad (4-35)$$

式中 U_N ——额定电压，V；
 U_{0t} ——试验时的空载电压，V；
 I_{0N} ——额定电压时的空载电流，A；
 I_{0t} ——试验电压时的空载电流，A；
 P_{0N} ——额定电压时的空载输入功率，W；
 P_{0t} ——试验电压时的空载输入功率，W。

第九节 热 试 验

“热试验”这一名称是 GB 755—2000《旋转电机 性能与定额》中开始提出的，在以前的标准和资料中称为“温升试验”。

一、试验目的

热试验的目的是通过试验得到电机绕组、集电环（对绕线转子电机）、轴承等部件在规定工作条件下（含电源电压、频率、转速、输出功率、工作方式和工作环境等）运行并达到温升稳定时（对短时工作制和其他有要求的特殊电机除外）的温度或温升值。温升值为稳定温度高于电机冷却介质温度的数值，单位用“开尔文”，符号为 K，不用摄氏度 的原因是将温度差值与实际温度相区别。热试验可用于考核被试电机所用绝缘材料、生产工艺能否满足电机正常工作及设计寿命的要求。另外，温升值还是计算电机定、转子绕组热损耗（简称铜耗）和求取效率的必备参数。

二、试验方法分类和负载设备

从试验时是否加负载来分，热试验有直接负载法和间接负载法两种，应尽可能创造条件采用直接负载法。

所用的负载设备可根据具体情况选用第二章中介绍的负载设备。

三、获得温升或温度值的方法

试验时，对电机不同部件的温度应采用不同的测量方法和测量仪器设备。常用的有温度计法、电阻法、埋置检温计法和红外测温法等。

（一）电阻法

电阻法是利用金属导体在一定温度范围内，其电阻值与温度之间存在一定函数关系的原理，通过测量导体电阻值的变化情况来计算其温度变化的一种测温方法。可见，电阻法是一种间接测温法。该方法特别适合用温度计不能直接接触及测量的发热元件的温度测量。

如无特别指明，导体的电阻变化是指其热态时电阻值与冷态时电阻值的差值，而热态时的电阻值是在电机温升稳定断能停转后测得的。因所测电阻值为整个导体的阻值（如一相绕组的电阻值），所以由此计算所得的导体温度（或温升）是整个导体温度（或温升）的平均值。

（二）温度计法

温度计法是将温度计的测温元件直接贴附在被测元件上获得其温度的直接测温法。所得的数值是测量点的局部温度值。所用温度计有水银或酒精等

膨胀式温度计、半导体温度计、非埋置式的热电偶或热电阻温度计等。

在电机内部或附近设置的膨胀式温度计不应使用水银的。其原因是，这些地方存在有较强的交变磁场，它通过温度计里的水银时，会在其中产生感应电流（涡流）而使水银发热，造成附加的示值上升误差，即温度表显示值将略大于被测元件实际温度值。

（三）埋置检温计法

埋置检温计法简称为 ETD 法，是用埋入电机内部的检温计（电阻检温计、热电偶或半导体检温计等）作为温度传感元件，将所得温度信号通过导线传到外接的配套仪表，从而显示出被测元件温度的一种测温方法。所测温度是测量点的局部温度值。本书第三章第五节较详细地讲述了相关内容。

应该注意的是，使用热电阻作为温度传感元件时，它将会因自身通过的电流而发热，从此对被测部位的温度值产生影响，所以应慎重选用。而热电偶及半导体，温度传感元件会更适宜此种方法。

（四）红外测温法

红外测温法较适用于电机表面（如电机外壳）和可外露（包括通过开启护盖）电机内部元件（如集电环、换向器等）温度的测量。所用设备称为“红外线测温仪”，其品种很多。

普通红外线测温仪的准确度较低，只能用于用上述方法无法测量和对试验结果要求不太高的场合，例如集电环、光线可射入的铸铝转子绕组等在运转时的温度。

四、电机部件温度（或温升）测量方法的选择原则

一般情况下，交流异步电机上需测量温度的部件有绕组、集电环、轴承、铁心等。对某些特殊用途的笼型转子电动机，如增安型和隔爆型电动机，在新产品鉴定试验时，还要测量其笼型转子的温度。它们所用的测温方法见表 4-4。

表 4-4 电机部件温度（或温升）测量方法的选择原则

电机部件名称		测 温 方 法			
		电阻法	温度 计法	埋置检 温计法	红外 测温法
绕 组	$5000 > P_N > 200$ 的交流绕组	✓		✓	
	$P_N \leq 200$ 的交流绕组	✓		✓	
	$P_N \leq 0.6$ 的非均匀分布或接线很复杂的绕组		✓		
	每槽只有一个线圈边的交流定子绕组	✓			

续表

电机部件名称		测温方法			
		电阻法	温度 计法	埋置检 温计法	红外 测温法
其他 部 件	集电环		✓		✓
	轴承		✓	✓	✓
	外壳、铁心		✓		✓
	笼型转子			✓	✓

注 P_N 为电机的额定功率（单位为 kW）；“✓”表示可选用。

检温计应均匀分布在绕组的各个部位，并应防止气流对温度的影响。在其他各种测量过程中，也都应避免空气对流等因素对测量值的影响。

对于轴承的温度检测，在 GB/T 1032—2005 中没有埋置检温计和红外测温仪两种测量方法。但考虑到测温技术的不断提高，两种测量方法在实际工作中已被广泛采用，并且它们更能反映出真实的数值，所以将其列入。但应注意的是，这样测得的数值将比在机座外面测得的数值高一些。

五、用电阻法测量和求取电机绕组温升的试验及计算过程

（一）与负载联结

选用适当的负载设备与被试电动机进行机械联结。安装要稳定可靠，要求联结后，不会给有关测量造成附加的不可修正误差。负载设备的接收容量应能方便地在一定范围内调节。当负载设备发热时，不应影响到被试电动机温度的变化。因此，有必要时，可在被试电动机与负载设备之间设置隔热装置。

（二）测量被试电机绕组的冷态直流电阻 R_l 和温度 θ_l

电机的热试验可在任一温度状态下开始进行。但必须在实际冷态时测取其绕组的直流电阻 R_l (Ω) 和当时的绕组温度 θ_l （单位为 $^{\circ}\text{C}$ ，一般用冷却介质温度代替，对采用周围空气冷却的电机则为电机所处环境的温度）。

冷态直流电阻的测试应进行 3 次，每次测量值与三次平均值之差应在三次平均值的 $\pm 0.5\%$ 范围内，取 3 次的平均值用于温升计算。建议测量三个线电阻，这样可适用于三相的各种接法，也可在与电源线相接的状态下（此时电机与电源通过开关断开）方便地测量。

对三相绕组，其温升值是以其中同一个相（线）电阻的冷、热态阻值变化来计算的，所以，在测量时应记清接线位置和测量值的对应关系。

为了给尽快地测得绕组热态时的直流电阻创造条件，可事先在电桥与电

机之间接一个刀闸 S，电机通电运行时将其断开，如图 4-7 所示。

测量环境温度的温度计应设置 2~3 个，分散着放置在距电机 1~2m 的地方，使用膨胀式温度计时，其球部应处于被试电机高度的一半处，并应防止外来辐射热及气流的影响。取所有温度计显示值的平均值作为测量结果。如图 4-16 中 1 所示。

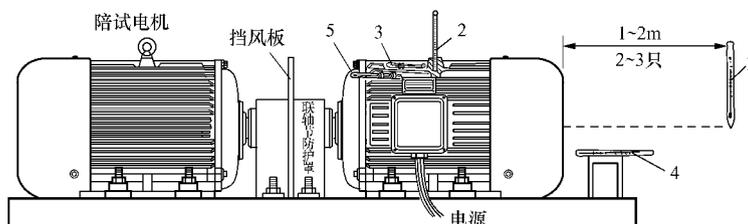


图 4-16 测量电机绕组接线开关电路和温度计的放置位置

1—测量环境温度的温度计；2—测量铁心温度的温度计；3—测量机壳表面温度的温度计；4—测量进风温度的温度计；5—测量出风温度的温度计

(三) 放置其他温度计或测温装置

试验时，还需放置如下几个温度计用于相关温度的测量。一般采用酒精膨胀式温度计或热传感元件（本书给出的是酒精温度计）。

1. 测量铁心温度的温度计

放置该温度计的目的，一是测取电机铁心的温度（或温升），二是通过其显示值的变化情况来判定该被试电机温升是否达到了稳定状态。

将温度计的球部插入电机的吊环孔内，用油腻子（用机油和石棉粉做成面团状，可反复使用）或海绵等进行固定。若被试电机无吊环，对开启式电机，应尽可能贴于铁心表面；对于封闭式电机，则贴于机壳表面。

2. 测量机壳表面温度的温度计

将温度计的球部贴于机壳表面，放置点应尽可能避开电机的风路，可用石棉油腻子或胶布等加以固定。

3. 测量电机进、出风温度的温度计

设置测量电机进、出风温度温度计的目的是取得电机进、出风温度的差值，用于了解该电机通风散热的效果。该差值小说明通风散热的效果好；反之则说明通风散热的效果差。

进风温度在距电机进风口 100mm 左右的位置测量；出风温度在距电机出风口 10mm 左右的位置测量。对于无明确出风口的电机，如封闭式电机，

则在电机外壳远离风扇的一端测量。

当温度计必须放置在电机外壳上时，为了防止电机外壳的热量影响本项目测量，应在温度计与电机外壳之间加垫隔热物质，如前面介绍的石棉油腻子等。

4. 测量定子绕组温度的测温元件

当有要求时，应在电机定子绕组端部或槽内埋置测温传感元件（或称为检温计），一般采用热电偶或热电阻等，其数量应不少于6个。应尽可能在电机嵌线时埋入，否则只能用专用胶泥将其粘在电机定子绕组的端部。在符合安全要求的前提下，应尽量将其安置在可能是最热点的位置上，并采取有效措施防止与初级冷却介质接触。引出线应用绝缘套管保护好，防止与机壳或电源线短路。

在定子槽内埋置时，对每槽具有2个或2个以上线圈边的，检温计应置于槽内绝缘线圈边之间预计为最热点的位置上；对每槽只有1个线圈边的，检温计应置于槽楔与绕组绝缘层外部之间预计为最热点的位置上。在定子绕组端部埋置时，应将检温计置于绕组端部两个相邻线圈边之间预计为最热点的位置上。

上述规定如图4-17 (a)所示。

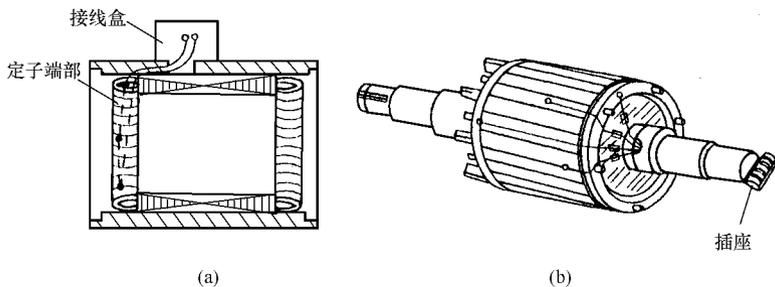


图 4-17 测量定子绕组和转子温度的测温元件放置

(a) 测量定子绕组测温元件的放置和接线；(b) 测量转子温度测温元件的放置和接线

5. 测量转子温度的测温元件

在电机转子某些部位埋置测温元件时，一般采用热电偶或热电阻。应在电机组装前埋入，对于笼型转子，应将测温元件埋入事先打好的孔内并用耐高温的环氧树脂胶封好。引线从电机轴的中心孔（专为试验而打出的）中穿出后，接于安装在轴伸端面的专用插座上。试验停机后，通过该插座与仪

表插头连接，得到转子的温度。见图4-17（b）所示。

（四）加负载运行

1. 工作制的确定

试验时，被试电机的工作制按其铭牌标注或相关规定的内容确定。对 S2 短时工作制的电机，还应明确其工作时间。对 S3 ~ S8 周期工作制的电机，还应明确每个工作周期各阶段的时间，为此，需使用可满足要求的控制设备，对 S5 及以上的工作制，这一控制设备是较复杂的。为此，可通过计算得出等效的 S1 或 S2 工作制方式进行试验。

2. 负载量的确定

若负载为能够直接显示输出功率的测功机系统，则直接加额定负载或其他要求的负载；否则，可按电机的输入电流控制负载量，例如，要求加额定负载时，则使其输入电流达到额定值。

（五）试验结束时间的确定

1. S1 连续工作制电机

加规定的负载连续运行，直至其温升稳定为止。温升稳定的定义是：相隔 30min 的两个相继读数之间温升变化（上升或下降）不超过 1K，对温升不易稳定的电机，相隔 60min 的两个相继读数之间温升变化不超过 2K 的状态（这是国家标准中的规定，但很多电机制造厂为了该试验值更准确些，都将后一种方法控制在 1K 范围内）。

试验中，应始终保持其输入电源电压和频率为额定值。

为了缩短试验时间，在试验开始的前半个小时左右的时间内，可用加大负载（例如加 1.2 倍额定负载）或堵住进风口减少通风或关闭外装冷却风机等办法（这种方法节能并且可降低运行噪声，建议优先采用），使电机温度较快地升高。

试验时，每半个小时记录一次被试电机的输入功率、电流、转速以及各点的温度值，用测功机作负载时，还应记录输出转矩（有条件时还应记录输出功率）。

2. S2 短时工作制电机

从冷状态开始，加规定的负载连续运行，直至达到规定的时间为止。每隔 15min 记录一次有关数据（同 S1）。

3. S3 ~ S8 周期工作制电机

按规定的试验周期和一个周期内各个时段的工作要求或经过计算确定的等效连续工作制运行，直至温升稳定为止。

温升稳定的确定方法是：将两个相继工作周期的相应点连成直线，其梯度应小于 2K/h ，如有必要，应在一段时间内以适当的时间间隔进行测量。

记录数据及要求与 S1 工作制试验基本相同。但应注意，每点的记录时间都应选择在一个周期内加负载运行即将结束的时候；记录时间间隔可根据具体情况控制在 $15 \sim 30\text{min}$ 之内。

4. S9 和 S10 工作制电机

按经过计算确定的等效连续工作制运行，直至温升稳定为止。其余同 S1 工作制试验。

(六) 停机测绕组热态的直流电阻 R_2

1. 停机的时间和尽快停机的办法

热试验达到热稳定或规定的时间后，应尽快使被试电机断电停转，并测量绕组的热态直流电阻和其他所需的数据（如集电环、转子的温度等）。对 S3 ~ S8 工作制电机，停机时刻应选在最后一个周期中负载运行时间的一半终止时。为尽可能地缩短被试电机断电到停机的时间，建议采取如下操作措施：

(1) 在切断电源后，立即给一相绕组通入一定电压的直流电，转子将在电磁力的作用下很快停转，称为直流制动法。

(2) 通过电源换相使电机反转制动，但应注意此时电源电流将会很大，并要求在电机将要停转时完全切断电源，以防反转。

(3) 用木板等工具摩擦联轴节或皮带轮使转子尽快停转。

(4) 对于负载为直流发电机、磁粉制动器、涡流测功机等机械的，应在断开被试电动机的电源后，稍等一些时间再断开负载的励磁电源以及发电机的电阻负载，即使用能耗法迅速降低被试电动机的转速使其停止转动。

2. 尽快测得第一点电阻值的办法

为尽快测得第一点电阻值，除试验人员日常加强测量操作技术锻炼，提高熟练程度外，建议采取如下操作措施：

(1) 事先连接好测量电阻的线路和仪表，即采用图 4-7 所示的方法。

(2) 若使用电桥，要事先调整电桥的测量位置，即通过计算和估计得出电机绕组热态电阻的大概值，并按该值调整电桥的测量位置，从而减少调整电桥的时间。

3. 热态电阻的测量要求和注意事项

(1) 用电桥测量时，其使用方法及注意事项参见第三章讲述的内容。

(2) 按国家标准规定，当电机断电到测得第一点电阻值之间的时间不

超过表 4-5 所示的数值时，则测得的第一点电阻值即可作为断电瞬间的数值，直接用于计算被测绕组的温升。但为了多台同规格电机本项试验数据相互比较，建议还要继续测量 4~5 点（相邻两点时间间隔为 20~60s），然后绘制电阻与测量时间的关系曲线 $R_2 = f(t)$ 或 $\lg R_2 = f(t)$ ，见图 4-18 (a)、(b)，然后从该曲线上查取时间为表 4-5 中规定的时间 t 时的电阻值 R_2 ，用其计算被测绕组的温升。

另外，国家标准又规定，当电机断电后所测电阻值随着时间的延长而增加，达到一个最大值之后再开始下降时，应以这个最大值参与绕组温升的计算，见图 4-18 (c)。这种情况在转速较高、容量较大的电机上是有发生的。为此，本条刚开始的国家标准规定也是不适宜的。

国家标准还规定，当电机断电后所测第一点电阻所用时间超过了表 4-5 的规定时，则允许将曲线向上延长到表 4-5 的规定时间或专门规定的时间，查出对应的电阻值用于温升计算，如图 4-18 (d) 所示。但超过的时间为表 4-5 的规定时间 2 倍以上时，确定最长允许时间和计算热态电阻的方法要通过生产方与用户达成的协议来确定。

表 4-5 电机断电到测得第一点电阻数值之间的时间规定

被试电机的额定容量 (kW)	小功率电机	≤50	51~200	201~5000
电机断电到测得第一点电阻数值之间的时间 (s)	15	30	90	120

(七) 热态介质温度 θ_2 的确定

以周围空气作为冷却介质为例，热态介质温度的确定方法如下：

(1) 对 S1 和 S3~S8 工作制的电机，取在整个试验过程最后的 1/4 时间内（一般取最后 2 点或 3 点），按相等时间间隔测得的几个温度计读数的平均值。

(2) 对 S2 短时工作制的电机，若定额为 30min 及以下，取试验开始与结束时温度计读数的平均值；若定额为 30~90min，取其 1/2 试验时间与结束时温度计读数的平均值。

(八) 计算热试验时的电机绕组温升 $\Delta\theta_1$

由上述试验和测量得到绕组冷态电阻 R_1 (Ω) 和冷态介质温度 θ_1 ()、热态电阻 R_2 (Ω) 和热态介质温度 θ_2 () 后，用式 (4-36) 计算热试验时的电机绕组温升 $\Delta\theta_1$ (K)。

$$\Delta\theta_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (K + \theta_1) + \theta_1 - \theta_2 \quad (4-36)$$

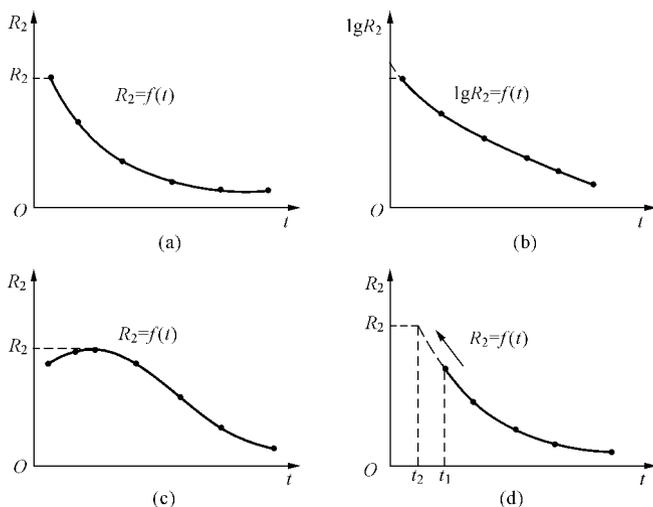


图 4-18 电机断能后绕组电阻与时间的关系曲线

 (a) $R_2 = f(t)$ 曲线；(b) $\lg R_2 = f(t)$ 曲线；

(c) 电阻先上升再下降的曲线；(d) 外推求规定时间的电阻

式中 K ——常数，实际为在 0 时导体电阻温度系数的倒数，如无专门规定，对铜绕组取 235，对铝绕组取 225。

例如：某电机进行热试验时，测得绕组的冷态电阻 $R_1 = 1.25\Omega$ ，冷态介质温度 $\theta_1 = 25$ ，热态电阻 $R_2 = 1.45\Omega$ ，热态介质温度 $\theta_2 = 27$ ；该电机为铜绕组，即 $K = 235$ 。用式 (4-36) 计算热试验时的电机绕组温升 $\Delta\theta_i$ (K) 为

$$\Delta\theta_i = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (K + \theta_1) + \theta_1 - \theta_2 = \frac{1.45 - 1.25}{1.25} (235 + 25) + 25 - 27 = 39.6$$

即该电机热试验时的电机绕组温升 $\Delta\theta_i$ 为 39.6K，按技术条件的规定修约到 1，最后结果应为 40K。

(九) 电机绕组满载温升的确定

(1) 当电机进行热试验所加负载为实际的额定负载时，如无特殊要求，上述计算求得的温升值即为被试电机绕组的满载温升。

(2) 当电机进行热试验时不能确定实际的额定负载，而以铭牌电流作为加负载的依据时，如无特殊规定，应在负载试验最后求得真正的满载电流 I_L (A) 时，对上述计算求得的温升值进行修正，求得被试电机绕组的满载

温升 $\Delta\theta_N$ (K)。试验电流 I_t (A) 取试验结束前 2~3 点的平均值。具体修正方法根据试验电流和最终满载电流的差距而定, 规定如下:

1) S1 和 S3~S8 工作制的电机:

$$\text{当 } \frac{I_t - I_L}{I_L} \times 100\% \text{ 在 } \pm 5\% \text{ 以内时 } \quad \Delta\theta_N = \Delta\theta_t \left(\frac{I_N}{I_t} \right)^2 \quad (4-37)$$

当 $\frac{I_t - I_L}{I_L} \times 100\%$ 超过 $\pm 5\%$ 但未超过 $\pm 10\%$ 时

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta_t \left(\frac{I_N}{I_t} \right)^2 \left[1 + \frac{\Delta\theta_t \left(\frac{I_N}{I_t} \right)^2 - \Delta\theta_t}{K + \Delta\theta_t + \theta_2} \right] \quad (4-38)$$

当 $\frac{I_t - I_L}{I_L} \times 100\%$ 超过 $\pm 10\%$ 时, 应调整试验电流重新试验。

2) S2 工作制的电机: 当 $\frac{I_t - I_L}{I_L} \times 100\%$ 在 $\pm 5\%$ 以内时, 按式 (4-37)

进行修正, 否则应调整试验电流重新试验。

六、等效负载法之一——降低电压负载法

当被测电机因自身结构或试验设备及电源能力不足时, 可采用等效负载法得到温升值。试验时不是加满载或根本不加实际负载, 而是通过加少量的负载和其他方式使电机达到稳定的温升, 或用一些可行的简单试验和计算求得温升值。

用于三相异步电动机的等效负载法有三种。降低电压负载法是其中之一, 此方法限于 100kW 以上的连续定额电动机使用。采用降低电压负载法时, 应进行如下试验和计算。

(一) 空载热试验

给被测电机定子绕组加额定频率的额定电压, 空载运行到温升稳定, 然后停转, 测出热电阻值并计算求得此时的绕组温升 $\Delta\theta_0$ 及铁心温升 $\Delta\theta_{Fe0}$ 。

(二) 1/2 倍额定电压和满载电流热试验

给被测电机加 1/2 倍额定电压 (频率为额定值), 调节负载使被测电机的定子电流达到满载值 (该值用后面将要讲述的效率间接测定法中“降低电压负载法试验”求得, 当要求不十分严格时, 也可使用铭牌上标注的额定电流值), 使电机运行到温升稳定, 并求出此时的绕组温升 $\Delta\theta_t$ 和铁心温升 $\Delta\theta_{Fer}$ 。

(三) 求取额定功率时的绕组温升 $\Delta\theta_N$ 和铁心温升 $\Delta\theta_{FeN}$ 。

$$\Delta\theta_t = \alpha\Delta\theta_0 + \Delta\theta_t \quad (4-39)$$

$$\Delta\theta_{\text{FeN}} = \alpha\Delta\theta_{\text{Fe0}} + \Delta\theta_{\text{Fer}} \quad (4-40)$$

式中 α ——运算系数, $\alpha = (P_0 - P_{0r}) / P_0$;

P_0 ——空载试验时的输入功率, W, 取空载热试验最后一点的数值;

P_{0r} ——1/2 额定电压时的空载输入功率, W, 在空载试验时测得。

七、等效负载法之二——降低电流负载法

对 1000kW 以上或 $I_N \geq 800\text{A}$ 的连续定额电动机, 可采用降低电流的等效负载法进行热试验。

(一) 需进行的试验和得到的数据

采用降低电流负载法时, 需要进行下列试验:

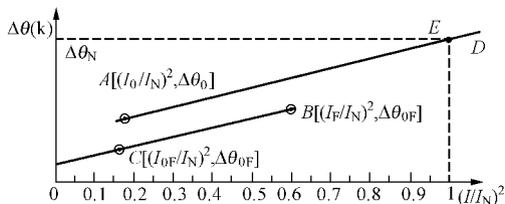
(1) 以额定频率和额定电压进行空载热试验, 确定此时的绕组温升 $\Delta\theta_0$ (K), 并记录和计算三相空载电流的平均值 I_0 (A)。

(2) 以额定频率、降低的电压和可能达到的最大电流 (最低为 0.7 倍的额定电流) 进行部分负载下的热试验, 确定此时的绕组温升 $\Delta\theta_F$ (K), 并记录和计算三相定子电流的平均值 I_F (A)。

(3) 以额定频率和对应于上述第 (2) 项试验时的电压进行空载热试验, 确定此时的绕组温升 $\Delta\theta_{0F}$ (K), 并记录和计算三相空载电流的平均值 I_{0F} (A)。

(二) 求取额定电流时的绕组温升

以下过程参见图 4-19。



4-19 用降低电流负载法确定额定电流时的温升

(1) 在以定子电流标么值的平方 $(I/I_N)^2$ 为横坐标、温升 $\Delta\theta$ 为纵坐标的坐标系中, 确定上述试验中得到的 $A[(I_0/I_N)^2, \Delta\theta_0]$ 、 $B[(I_F/I_N)^2, \Delta\theta_F]$ 和 $C[(I_{0F}/I_N)^2, \Delta\theta_{0F}]$ 三点。

(2) 连接 B 和 C 两点, 通过 A 点画一条平行于直线 BC 的直线 AD。

(3) 直线 AD 上横坐标对应于 $(I/I_N)^2 = 1$ 的点 E 所对的纵坐标数值即为额定电流 I_N 时的绕组温升 $\Delta\theta_N$ 。

八、等效负载法之三——定子叠频法

定子叠频法主要用于无配对负载的 300kW 以上电动机或较难实现对拖试验的立式电机等。

(一) 试验线路和设备

定子叠频法的试验线路如图 4-20 所示。其中主电源和辅助电源均为同步发电机，并要求辅助电源发电机的额定电流不小于被试电机额定电流，电压等级应与被试电机相同。

试验前，应先用相序仪或分别给被试电机加电看转向的方法确定主、辅助电源的相序。然后按相同的相序参照图 4-20 接线。

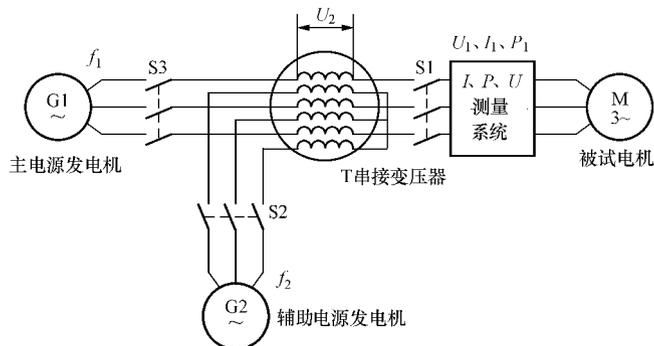


图 4-20 定子叠频法试验线路

- M—被试电动机；T—串接变压器；G1—主电源发电机；
G2—辅助电源发电机；S1—主电源开关；S2—辅助电源开关；
 U_1 、 I_1 、 P_1 —被试电动机端电压、输入电流和输入功率；
 f_1 —主电源的频率（被试电动机的额定频率）；
 f_2 —辅助电源的频率； U_2 —辅助电压

(二) 试验方法

试验时，首先用主电源起动被试电动机，使其在额定频率、额定电压下空载运行。随后，起动辅助电源机组，将其转速调节到对应于某一频率 f_2 的数值，对额定频率为 50Hz 的被试电动机，频率 f_2 应在 38 ~ 42Hz 范围内选择。然后，将辅助电源发电机投入励磁，调节励磁电流，使被试电动机的定子电流达到满载电流（该电流由后面将要讲到的“圆图算法”或“等效电路法”求得，当要求不十分严格时，也可使用铭牌上标注的额定电流值）。

在调节过程中，要随时调节主电源电压，使被试电动机的端电压保持为额定值，并同时保持辅助电源机组的转速不变（即 f_2 不变）。当调节中发现

仪表指示摆动较大或被试电动机和试验电源设备振动较大时，应先降低辅助电源的励磁，使辅助电源电压降低，然后，再调整辅助电源机组的转速，得到另一个频率 f_2 后，再重新调整辅助电源的励磁电流，使被试电动机的定子电流达到额定值。

一切正常后，连续运行，使被试电动机达到温升稳定状态，并测取有关温升值。

九、电机绕组及相关部件的温升或温度限值及有关规定

(一) 说明

GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》中给出了旋转电机绕组和相关部件的温升及温度限值和有关规定，这些限值和规定是强制性的。

本书只给出用于中型及以下连续工作制（基准条件）采用周围空气间接冷却电机的有关部分。考虑到热分级为 A 级的绝缘材料已很少用，故没有录用热分级为 A 级的有关部分。

(二) 用空气间接冷却绕组的温升限值

用空气间接冷却绕组的温升限值见表 4-6。表中 E、B、F、H 为绕组绝缘的热分级；Th 代表温度计法；R 代表电阻法；ETD 代表埋置检温计法； P_N 为电机的额定功率，单位为 kW。

表 4-6 用空气间接冷却绕组的温升限值 K

序号	电机部件	E		B			F			H		
		Th	R	Th	R	ETD	Th	R	ETD	Th	R	ETD
1	$200 < P_N < 5000$ 的交流绕组	—	75	—	80	90	—	105	110	—	125	130
2	$P_N \leq 200$ 的交流绕组，但项 3 和 4 除外	—	75	—	80	—	—	105	—	—	125	—
3	$P_N < 0.6$ 的交流绕组	—	75	—	85	—	—	110	—	—	130	—
4	无扇自冷式电机的交流绕组，囊封式绕组	—	75	—	85	—	—	110	—	—	130	—
5	表面裸露或仅涂清漆的交流绕组	80	80	90	90	—	110	110	—	135	135	—

(三) 对在非基准条件下试验或运行的电机绕组温升限值的修正

基准条件是指环境温度最高为 40℃、海拔不超过 1000m 的工作条件。表 4-6 所规定的数值即为电机在这种工作条件下运行时其绕组温升的限值。

若电机热试验或运行时所处的工作环境超过了基准条件时，则有可能对电机的散热产生一定的影响，有必要时需对表 4-6 所规定的数值进行修正。有关规定见表 4-7 ~ 表 4-9。

表 4-7 考虑非基准条件和定额对间接冷却绕组在运行地点的温升限值的修正

项号	运行条件或定额		对表 4-6 中温升限值 $\Delta\theta$ 的修正
1	环境空气的最高温度 θ_c ()	$0 \leq \theta_c \leq 40$	根据协议可以降低，但不应超过冷却介质低于 40 的数值或最高为 30K，例如第 1 项中的 F 级 R 法降为 75K
		$40 < \theta_c \leq 60$	减去冷却介质高于 40 的数值
		$\theta_c < 0$ 或 $\theta_c > 60$	按协议
2	海拔 H (m)	$1000 < H \leq 4000$ ，且最高环境空气温度无规定	不作修正。原因是，由于海拔升高所引起的冷却效果的降低可由最高环境空气温度低于 40 而得到补偿，因此总温度将不会超过 40 加上表 4-6 限定的数值 ^①
		$H > 4000$	按协议
3	$P_N < 5000\text{kW}$ ，且为短时工作制 (S2)		增加 10K
4	非周期工作制 (S9)		当电机运行时， $\Delta\theta$ 可短时超过
5	离散负载工作制 (S10)		当电机运行时， $\Delta\theta$ 可间断地超过

注 ① 设高于海拔 1km 的环境温度必须补偿量为每高出 100m 降低 1% 温度限值，则运行地点的假定最高环境温度（以最高环境空气温度为 40，海拔不超过 1km 为准）将如表 4-9 所示（以表 4-6 中第 1 项的温升限值为基准）。

表 4-8 考虑试验地点运行条件对空气间接冷却绕组在试验地点的温升限值的修正 ($\Delta\theta_T$)

项号	试验条件	试验地点经修正的温升限值 $\Delta\theta_T$	
1	试验地点基准冷却介质温度 θ_{CT} 与运行地点基准冷却介质温度 θ_c 的差异	$ \theta_c - \theta_{CT} \leq 30\text{K}$	$\Delta\theta_T = \Delta\theta$
		$ \theta_c - \theta_{CT} > 30\text{K}$	按协议

2	试验地点海拔 H_T (km) 与运行地点海拔 H (km) 的差异	$1\text{km} < H \leq 4\text{km}$ $H_T < 1\text{km}$	$\Delta\theta_T = \Delta\theta \left(1 - \frac{H-1}{10} \right)$
		$H < 1\text{km}$ $1\text{km} < H_T \leq 4\text{km}$	$\Delta\theta_T = \Delta\theta \left(1 + \frac{H_T-1}{10} \right)$
		$1\text{km} < H \leq 4\text{km}$ $1\text{km} < H_T \leq 4\text{km}$	$\Delta\theta_T = \Delta\theta \left(1 + \frac{H_T-H}{10} \right)$
		$H > 4\text{km}$ 或 $H_T > 4\text{km}$	按协议

注 $\Delta\theta$ 按表 4-6 规定, 必要时按表 4-7 作修正。

表 4-9 假定的最高环境温度与海拔的关系

海拔 (km)	绝缘耐热等级			
	E	B	F	H
	环境温度 ()			
1	40	40	40	40
2	33	32	30	28
3	26	24	19	15
4	19	16	9	3

十、集电环温度的测量及温度限值

(一) 测量方法

对绕线转子电动机的集电环温度, 可用红外线测温仪在电机运转中温升稳定后直接测量, 也可在热试验结束停机后, 用反应速度较快的半导体温度计或红外线测温仪立即进行测量。

(二) 温度限值

开启式和封闭式电机的集电环及电刷和电刷机构的温升或温度应不致于损坏其本身或任何相邻部件的绝缘。

集电环的温升或温度应不超过由电刷等级和集电环材质组件在整个运行范围内能承受的电流的温升或温度值。在现行的 GB 755—2000 和其他相关标准中没有给出具体数值。在已被 GB 755—2000 替代的 GB 755—1987《旋转电机 基本技术条件》中曾经规定, 当采用温度计法测量其温度时, 其温升限值如表 4-10 所示 (供参考)。

表 4-10 集电环及电刷和电刷机构温升限值 (GB 755—1987 中的规定)

绝缘材料耐热等级	E	B	F	H
----------	---	---	---	---

温升限值 (K)	70	80	90	100
----------	----	----	----	-----

十一、轴承温度的测量和温度限值

(一) 测量方法

轴承温度可用温度计法或埋置检温计法进行测量。测量时,应保证检温计与被测部位之间有良好的热传递,例如,所有气隙应以导热涂料填充。测量位置应尽可能地靠近表 4-11 所规定的测点 A 或 B。测点 A 与 B 之间以及这两点与轴承最热点之间存在温度差,其值与轴承尺寸有关。对压入式轴瓦的套筒轴承和内径小于 150mm 的球轴承或滚子轴承,A 与 B 之间的温度差可忽略不计;对更大的轴承,A 点温度比 B 点约高 15K。如图 4-21 所示。

表 4-11 轴承温度测量点的位置

轴承类别	测点	测 点 位 置
球轴承或 滚柱轴承	A	位于轴承室内,离轴承外圈 ^① 不超过 10mm 处 ^②
	B	位于轴承室外表面,尽可能接近轴承外圈处
滑动轴承	A	位于轴瓦 ^③ 的压力区,离油膜间隙 ^① 不超过 10mm 处 ^②
	B	位于轴瓦的其他部位

注 ①对于外转子电机,A 点位于离轴承内圈不超过 10mm 的静止部分,B 点位于静止部分的外表面,尽可能接近轴承内圈。

②测点离轴承外圈或油膜间隙的距离是从温度计或埋置检温计的最近点算起。

③轴瓦是支撑轴衬材料的部件,将轴衬压入或用其他方法固定于轴承室内,压力区是承受转子重量和径向负荷(例如皮带驱动所产生的)等综合力的圆周部分。

(二) 轴承温度限值

当采用表 4-11 中 A 点测量时,轴承温度的最高容许值为:

(1) 滚动轴承(环境温度不超过 40 时): 95 ;

(2) 滑动轴承(出油温度不超过 65 时): 80 。

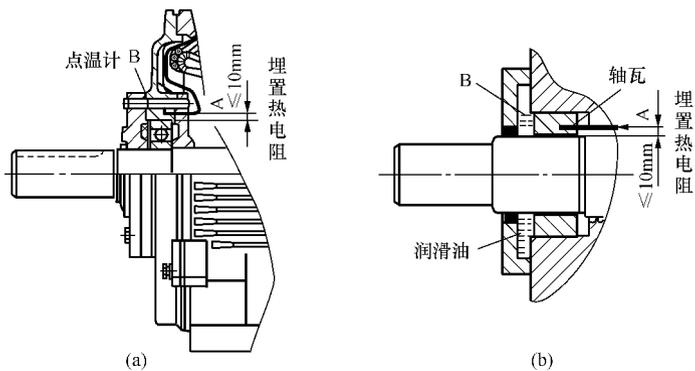


图 4-21 电机轴承温度的测量位置

(a) 球轴承或滚柱轴承；(b) 滑动轴承

第十节 负载试验

一、试验目的

根据试验时能否直接测取被试电动机的输出功率和对电机效率求取方法的具体规定不同,负载试验的目的也有所不同。但最终目的都是为了求取被试电机满载或规定负载时的效率、功率因数、电流、转矩及转差率(或转速)。对于要求效率的求取采用直接测定法的(此时试验设备必须是可以直接显示被试电动机输出机械功率或输出转矩的负载设备,如测功机等),负载试验的目的则是为了测取可直接用于计算效率的输入及输出功率,另外还有用于计算满载功率因数的定子输入电流及绘制工作曲线的其他有关数据。对于不能直接显示被试电动机输出机械功率或输出转矩的负载设备,或不论采用何种负载设备但效率要求采用间接测定法(或称为损耗分析法)的,负载试验的目的则是为准确求得被试电动机的效率、功率因数及转差率等而测取一些有关数据,一般为额定电压和额定频率时的若干组不同输出功率或输入功率下的定子电流、三相输入功率、转差率(或转速)和定子电阻等。

二、直接负载试验方法之一——额定电压负载法

(一) 试验设备能直接显示被试电动机输出功率或输出转矩时

所用设备能直接显示被试电动机输出功率或输出转矩时,让被试电动机在额定频率、额定电压及额定负载下运行到温升稳定(或在热试验后立即进行),然后,调节负载,在 $1.5 \sim 0.25$ 倍额定功率范围内测取6点读数(允许增加测点,测点多时对测试最终结果的准确度是有好处的),每点应测取三相线电流、输入功率、输出功率或输出转矩、转速(或转差)、定子绕组直流电阻(无条件时,可最后停机时尽快测量得到)或温度(需要事先埋置好测温元件)。试验过程中,每点都要保持被试电机定子电压和频率为额定值。

上述流程可用下式表示(定子绕组直流电阻采用最后停机时尽快测量的方法):

1.5 P_N 开始 $\xrightarrow{\text{保持 } U=U_N, f=f_N; \text{ 测取 } I_1, P_1, P_2, s(\text{或 } n), R_1 (\text{或 } \theta)}$ 6~9 点

$\rightarrow 0.25P_N$ $\xrightarrow{\text{断电停机}}$ (测量 R_1)

(二) 不能显示输出机械功率或转矩时

所用设备不能直接显示输出机械功率或输出转矩时,则使被试电动机在

额定电流、额定电压及额定频率下运行到温升稳定后，调节负载，在 1.5 ~ 0.5 倍额定电流（对 $I_0 > 0.5I_N$ 的电机，尽可能降至 I_0 ）之间测取 6 点读数，读数包括三相线电流、输入功率及转差率（或转速）、定子直流电阻或温度。试验中，各测点都应保持被试电机所加电压及频率为额定值。

当对试验的准确度要求不十分严格时，可在上述试验结束后，尽快停机测出定子绕组的直流电阻。对热试验后立即进行本项试验者，可不测，而用热试验后测得的电阻值代替。

上述流程可用下式表示（定子绕组直流电阻采用最后停机时尽快测量的方法）：

$$1.5I_N \text{ 开始} \xrightarrow[\text{6 ~ 9 点}]{\text{保持 } U = U_N, f = f_N \text{ 测取 } I_1, P_1, s(\text{或 } n), R_1(\text{或 } \theta)} \rightarrow 0.5I_N$$

断电停机 → (测量 R_1)

三、直接负载试验方法之二——降低电压负载法

首先使被试电动机在额定频率、1/2 额定电压和 1/2 额定电流下运行到接近热稳定状态。然后保持额定频率和 1/2 额定电压不变，在 0.6 倍额定电流至空载电流范围内测取 6~7 点，每点读数包括三相线电流、输入功率及转差率（或转速）。上述试验结束之后，立即停机测取定子直流电阻。

上述流程可用下式表示：

$$0.6I_N \text{ 开始} \xrightarrow[\text{6 ~ 7 点}]{\text{保持 } U = 0.5U_N, f = f_N \text{ 测取 } I_1, P_1, s(\text{或 } n)} \rightarrow I_0 \text{ 断电停机} \rightarrow \text{测}$$

量 R_1

四、直接负载试验法试验结果的计算

(一) 各试验点定子电流 I_1 的计算

求出各测量点的三相线电流平均值 I_1 。

(二) 将定子电阻修正到规定温度时的数值和定子铜损耗 P_{cu1} 的计算

(1) 将试验前测得的冷态（温度为 θ_0 ）定子直流电阻（三线电阻平均值） R_t 修正到规定温度 θ_j 时的线电阻值 R_1 (Ω)。式 (4-41) 用于铜绕组，若为其他材料的绕组，式中的常数 235 将改变，例如铝绕组改为 225。

$$R_1 = R_t \frac{235 + \theta_j}{235 + \theta_0} \quad (4-41)$$

在国家标准 GB/T 1032—2005 中，对规定温度有如下两种解释：一种称为“基准工作温度”，其规定如表 4-12 所示；另一种是将环境温度（或称

基准冷却介质温度) 确定为一个固定值, 一般为 25 , 此时式 (4-41) 中的 θ_j 应更换为

$$\theta_j = \theta_N - \theta_A + 25 \quad (4-42)$$

式中 θ_N ——额定负载热试验结束时测得的定子绕组最高温度, ;

θ_A ——额定负载热试验结束时的冷却介质温度, 。

表 4-12 电机绕组基准工作温度

电机绝缘等级	E	B	F	H
GB/T 1032—2005 中规定	75	95	115	130

(2) 用修正到规定温度 θ_j 时的线电阻值 R_l (Ω) 和各试验点的定子线电流 I_1 计算各试验点的定子铜损耗 P_{Cu1} (W)。

$$P_{\text{Cu1}} = 1.5 I_1^2 R_l \quad (4-43)$$

(三) 转差率 s 的求取

1. 求取各试验点的转差率 s_t

当试验时不是采用仪表直接测得各点的转差率时, 则应根据实际试验测量方法, 应用第三章第十一节讲述的相应办法求出各试验点的转差率 s_t 。

2. 对各试验点的转差率 s_t 进行温度修正

将用仪器直接测得或通过其他途径求得的各点转差率值修正到规定温度, 其意义和方法与定子绕组直流电阻的修正相同。修正公式如下:

$$s_r = \frac{K + \theta_j}{K + \theta_2} \cdot s_t \quad (4-44)$$

式中 s_r ——修正到规定温度时的转差率;

s_t ——试验时测得或求得的转差率;

K ——电阻温度常数, 铸铝转子取 225, 铜导线转子 (绕线或铜条转子) 取 235;

θ_j ——规定温度, ;

θ_2 ——测试转差率时, 转子绕组的温度 (), 在一般情况下, 转子温度不易直接测得。此时可用定子温度代替, 即其中 θ_2 为电机热试验时求得的定子绕组温升与环境温度之和, 环境温度为热试验结束前一段时间内环境温度的平均值 (见本章第九节《热试验》的第五项第 (七) 条规定)。

第十一节 杂散损耗的测定试验和有关规定

一、杂散损耗的定义和试验目的

杂散损耗是三相异步电动机“五大损耗”之一。它是指用间接法测定电机效率时，未包括在另外四种损耗之内的其他各种损耗之和，如铸铝转子导条间的“横向电流”损耗、齿谐波产生的齿部脉振损耗、绕组端部漏磁在其邻近的金属构件中造成的磁滞损耗和涡流损耗等。杂散损耗又可以分成基波杂散损耗和谐波杂散损耗两部分，后者常被称为高频杂散损耗。

杂散损耗测定试验即是实测上述两部分损耗的试验，它是用间接法测定电动机效率的一个重要试验项目。用实测法求得的杂散损耗值也是帮助设计人员改进和提高电机性能的一项主要参数。

实测高频杂散损耗的方法较多，常用的有反转法、输入输出法和回馈法三种。下面分别进行介绍。

二、基频杂散损耗的测定方法

(一) 试验方法

将电机转子取出，但端盖等其他结构件应按正常安装状态就位，实际上就是一台无转子的电机。

先给定子绕组施加额定频率的低电压，使定子电流 $I_1 = 1.1I_N$ 。然后，调节所加电压，在 $1.1 \sim 0.5I_N$ 范围内测取 6~7 点读数，每点读数包括三相线电流 I_1 (A) 和输入功率 P_1 (W，采用低功率因数功率表)，最后断电并立即测取定子绕组的直流电阻 R_1 (Ω)。如图 4-22 所示。

(二) 求取基频杂散损耗

(1) 用式 (4-45) 求出各测量点的基频杂散损耗 P_{sf} (W)。

$$P_{sf} = P_1 - 1.5 I_1^2 R_1 \quad (4-45)$$

(2) 绘制基频杂散损耗 P_{sf} 和定子电流 I_1 的关系曲线 $P_{sf} = f(I_1)$ ，其中 $I_1 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ ， I_0 为 $U_0 = U_N$ 时的空载电流（获得 I_0 的空载试验可在本试验前或试验后进行）。

三、采用反转法测定高频杂散损耗的试验和计算过程

(一) 反转法所用设备和试验线路

采用反转法测定高频杂散损耗时，被试电机应在其他机械的拖动下反转，在接近其同步转速下运行。拖动它的机械可以是和其功率相等或接近、极数相同的异步电动机，称为“异步机反转法”；也可以是测功机、校正过

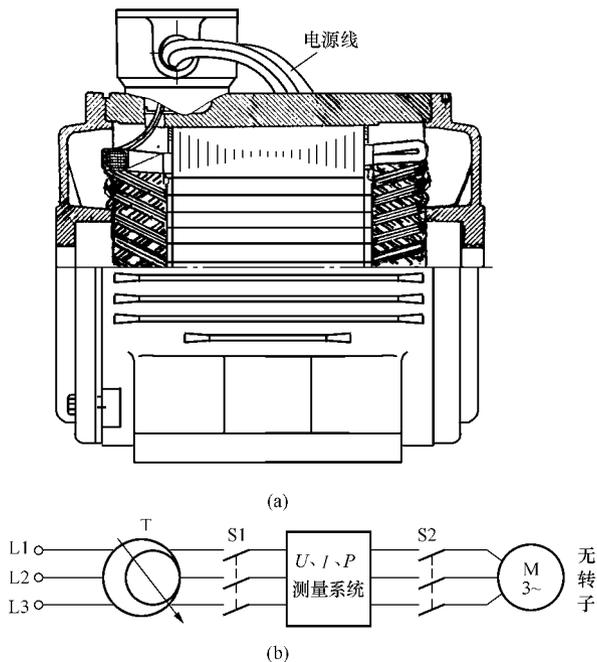


图 4-22 实测基频杂散损耗的试验设备及接线示意图

(a) 电机组装图；(b) 试验线路示意图

的直流机（在电动机状态下进行校正）、由转矩转速传感器和直流电动机等组成的测功设备等（以下将这三种设备统称为测功机），称为“测功机反转法”。

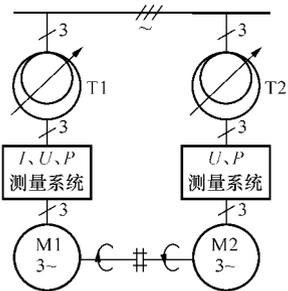


图 4-23 用异步机反转法实测高频杂散损耗的试验线路

M1—被试电机；M2—陪试电机

在以下的讲述中，将上述所说的拖动机统称为“陪试电机”或“辅助电机”，它们在试验时均通过联轴器和被试电机联结。被试电动机通过一台三相调压器供电。异步机反转法中的陪试电机一般也采用三相调压器供电，试验线路如图 4-23 所示。

测功机反转法中陪试电机的供电应能保证机组的转速保持在被试电机的同步转速。为得到较高的测试精度，在此转速下，测功机的功率最好应为被试电机额定功率的 15% 左右，转矩传感器的标称转矩也应为被试电动机额定转

矩的 15% 左右。用测功机做拖动机械时的试验线路和负载试验相同。

被试电机及采用异步机反转法试验时的陪试电机的功率测量都应采用低功率因数功率表。

(二) 反转法试验步骤

1. 检查反转

对被试电机和陪试电机分别用各自的电源通电看其转向，从同一方向看，两者应相反。一般通过联轴器的转向判定，联轴器的两半节转向应相反，否则应调整。

2. 空转运行

用陪试电机拖动被试电机空转运行，转速应等于或接近被试电机的同步转速，至机械损耗稳定为止。

3. 反转预热

在上述基础上，开始给被试电机通电，电源频率应为被试电机的额定值，电压以使被试电机定子电流达到额定值为准。运行 10min。

如试验紧接热试验或负载试验进行，则不需进行上述第 2 和第 3 两项。

4. 数据测试

(1) 调节被试电机的输入电压，在 1.5 ~ 0.5 倍额定电流范围内测取 6 ~ 9 点，要和负载试验的测点数相同，并且各点电流值应尽可能为负载试验时的实测电流 I_1 和额定电压时的空载电流 I_0 的平方差的平方根，即 $\sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ ，这样做的结果将便于以后在求取效率时的绘图、查数和计算。

每点读数包括：

1) 被试电动机的数据：被试电动机的输入功率 P_1 (W) 和三相线电流 I_1 (A)。

2) 陪试电机的数据：陪试电机为测功机时，读取其输出转矩 T_a (N·m) 和转速 n (r/min)；为校正过的直流电动机时，读取其电枢电流 I_a (A) 和转速 n (r/min)；为异步电动机时，读取其输入功率 P_{a1} (W)。

(2) 上述测试结束后，断开被试电机电源，根据陪试机的不同读取下列数值：

1) 对测功机为输出转矩 T_{a0} (N·m)。

2) 对校正过的直流电动机为电枢电流 I_{a0} (A)。

3) 对异步电动机为输入功率 P_{a0} (W)。

(3) 测试完毕后，迅速断电停机并测量被试电动机的定子线电阻 R_1 (Ω)。

试验时应注意做到：①在整个测试过程中，机组运转的转速应尽可能保持等于或接近于被试电动机的同步转速；②陪试电机为异步电动机时，其所加电压应为额定值；③每组测量值应尽可能同时读取。

5. 异步机反转法试验过程的简易流程

对于陪试电机为异步机的反转法，上述试验过程可用如下的简易流程图描述（其中 M1 为被试电机，M2 为陪试电机，其他量的代号同上述内容中的定义）：

M1 与 M2 反转，M2 拖动 M1 到接近 $n_s \rightarrow$ M1 加低电压，使 $I_1 = I_N$ ，历时 10min \rightarrow 调节 M1 的输入电压，在 $1.5 \sim 0.5 I_N$ 范围内测取 6~9 点 M1 的 I_1 和 P_1 以及 M2 的 $P_{a1} \rightarrow$ M1 断电 \rightarrow 测取 M2 的 $P_{a0} \rightarrow$ M2 断电停机 \rightarrow 尽快测得 M1 的 R_1 。

（三）反转法求取高频杂散损耗的步骤

1. 整理试验数据

求出各试验点被试电动机的定子电流平均值 I_1 (A)、输入功率 P_1 (W)、陪试电机前几点的输入功率 P_{a1} (W) 和最后空载点的输入功率 P_{a0} (W)，停机后所测被试电动机定子线电阻 R_1 (Ω)。

其中，对陪试电机的输入功率 P_{a1} ，当陪试电机为测功机时，为其输出功率，应由其转矩 T_a 和转速 n 求得；当陪试电机为校正过的直流电动机时，应根据校正曲线 $I_a = f(T)$ 上查取每点 I_a 对应的转矩值 T ，再与对应转速进行运算求得。 P_{a0} 求法也如此。

2. 计算用高频杂散损耗的求取

将上述整理过的各点试验值代入下式，求出各试验点的“计算用高频杂散损耗” P'_{sh} (W)。

$$\begin{aligned} P'_{sh} &= P_{a1} - P_{a0} - (P_1 - 1.5 I_1^2 R_1) \\ &= P_{a1} - P_{a0} - P_1 + 1.5 I_1^2 R_1 \end{aligned} \quad (4-46)$$

3. 绘制 P'_{sh} 与定子电流 I_1 的关系曲线

绘制曲线 $P'_{sh} = f(I_1)$ 。如已实测基频杂散损耗 P_{sf} ，则应将两条曲线绘制在同一个坐标上，如图 4-24 所示。

4. 求取总杂散损耗

如高频和基频杂散损耗都已实测，并按上述要求绘制出了与定子电流 I_1 的关系曲线，则可在曲线上查出对应于各电流点的两个杂散损耗值。然后用式 (4-47) 求出总的杂散损耗。

$$P_s = P_{sh} + P_{sf} = P'_{sh} + 2P_{sf} \quad (4-47)$$

如果没有实测基频杂散损耗 P_{sf} ，在规定允许的情况下，可用式 (4-48)

求取总的杂散损耗。

$$P_s = (1 + 2C)P'_{sh} \quad (4-48)$$

式中 C ——本类型电动机基频杂散与高频杂散损耗比值的统计系数，例如对普通小型笼型转子异步电动机，取 $C=0.1$ 。

四、采用输入—输出法测定高频杂散损耗和求取总杂散损耗的试验计算过程

(一) 测功机输入-输出法

本方法的试验线路及设备要求和温升及负载试验完全相同，试验方法步骤和负载试验基本相同。

在求取杂散损耗前，应得到以下数据：

- (1) 由空载试验得到的额定电压时的铁损耗 P_{Fe} (W)；
- (2) 由空载试验得到的机械损耗 P_m (W)；
- (3) 由负载试验所测电流及定子电阻求得的各点定子铜耗 P_{Cu1} (W)；
- (4) 由负载试验所测转差率 s ，通过计算求得的转子铜损耗（对铸铝转子，实际应为铝损耗，但习惯称为转子铜损耗） P_{Cu2} (W)。计算公式为

$$P_{Cu2} = s(P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe}) \quad (4-49)$$

各负载电流点的杂散损耗为

$$P_s = P_1 - P_2 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m) \quad (4-50)$$

绘制负载上升及下降时杂散损耗 P_s

对定子电流 I_1 的两条关系曲线 $P_s = f(I_1)$ ，取两条曲线的平均曲线，各负载电流下的杂散损耗在平均曲线上查取，见图 4-25。

因所得杂散损耗为输入功率与输出功率之差再去掉其他可求得的四项损耗后的剩余部分，所以又称其为“剩余损耗”。

4-25 输入-输出法所测杂散损耗与定子电流的关系曲线

- 1—负载上升曲线；2—负载下降曲线；
3—平均曲线

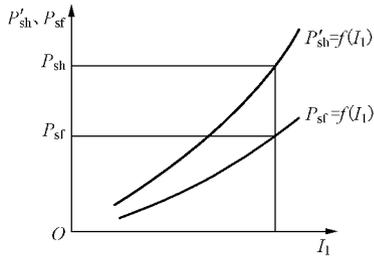
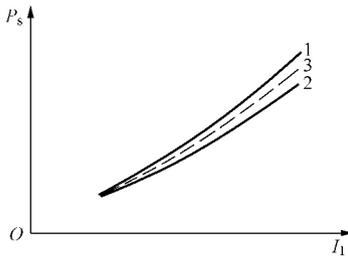


图 4-24 杂散损耗曲线



与 GB/T 1032—2005、GB/T 20137—2006 和 GB 18613—2002 等有关试验方法标准中，给出了用线性回归法确定用式 (4-50) 求

的杂散损耗是否达到要求的办法（详见本节第六、七部分）。

（二）回馈法

回馈法的试验设备及线路与同方法的负载试验基本相同，但必须用和被试电机同规格的电机作陪试电机。试验方法、步骤与同方法的负载试验相比，只需在每点再加测陪试电机的输出功率 P'_2 、输出电流 I'_1 和转差率 s' （用闪光法时，注意要用陪试电机的电源做闪光灯的电源；用测转速等方法求取转差率时，应注意其同步转速值应用陪试电机电源的频率求得），最后也要测取陪试电机的定子电阻。

被试电机和陪试电机的总杂散损耗 ΣP_s （W）按下式计算求得。

$$\Sigma P_s = P_1 - P'_2 - \Sigma P \quad (4-51)$$

式中 ΣP ——两台电机除杂散损耗之外的其他损耗之和，W。

其中铁损耗、机械损耗由各自的空载试验求得；定子绕组的 I^2R 损耗按试验时的电阻值求得；转子绕组的 I^2R 损耗按电机的运行状态分别求取。

作为电动机运行时，转子绕组 I^2R 损耗用式（4-49）求取。作发电机运行时，转子绕组损耗为

$$P'_{Cu2} = s'(P'_2 + P'_{Cu1} + P'_{Fe}) \quad (4-52)$$

被试电机的杂散损耗 P_s 按式（4-53）计算求得：

$$P_s = P_{Cu2} \Sigma P / (P_{Cu2} + P'_{Cu2}) \quad (4-53)$$

上述试验结束后，将陪试电机的电源频率提高并超过被试电机的电源频率，其电压保持为额定值，作为电动机运行。而被试电机电源仍保持额定电压及额定频率，反过来作发电机运行。此时，调高陪试电机的电源频率，使被试电机增加负载，反之，减小负载。

用和第一次同样的方法测取几组读数并计算求得被试电机的几点杂散损耗。

应注意：此时被试电机和陪试电机的运行状态都发生了改变，各项损耗都应重新求得。

最后，绘制两种状态下，被试电机的杂散损耗与其定子电流的关系曲线，并绘制两条曲线的平均曲线（类似图 4-25）。各负载电流时的杂散损耗从平均曲线上查取。

五、绕线转子电动机的另一种直接测定法

此方法用于效率试验方法 E 和 F。试验时，转子通以直流电进行励磁，定子绕组通过电流表（或通过电流互感器的一次绕组）短接，以读取定子电流，利用其他动力把被试电动机的转子拖动到同步转速，如图 4-26 所示。

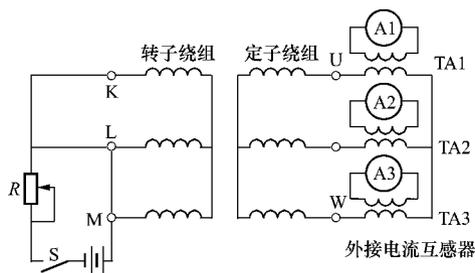


图 4-26 绕线转子电动机的另一种直接测定法的接线原理图

调节转子励磁电流，使定子绕组中产生的感应电流达到规定的负载杂散损耗电流值。测取 6 个负载点，每点测取加励磁时的转子输入功率 P_r (W)、定子绕组线电流 I_1 (A) 和直流感电阻 R_1 (Ω)，最后将转子励磁电流调到零（即关断励磁电源），测出不加励磁时的转子输入功率 P_f (W)。

用式 (4-54) 计算各试验点的杂散损耗 P_t (W)，之后，绘制 P_t 与 I_1^2 的关系曲线 $P_t = f(I_1^2)$ ，通过该曲线求得所需的负载杂散损耗值 P_s 。

$$P_t = P_r - P_f - 1.5 I_1^2 R_1 \quad (4-54)$$

六、采用测功机输入—输出法求取杂散损耗（对应效率测试的 B 法）的确认问题

（一）杂散损耗不正常的表现和粗略判定方法

当采用测功机输入-输出法（对应效率测试的 B 法）利用式 (4-50) 求取杂散损耗时，有可能因试验设备安装不稳定、同轴度较差或测量准确度较差等原因，造成所得杂散损耗值与实际值相差较远的情况，有时在负载较小的几点中甚至会出现负值。这种结果自然是不可接受的，必须予以更正。

我们不可能知道真实的杂散损耗究竟是多少，但经多次试验，可大体了解它的数值范围，有资料给出中小型电机在额定负载时的杂散损耗在其额定功率的 1% ~ 3% 之间（表 4-14 给出了 GB 18613—2002 中对不同额定功率电动机杂散损耗的限值，可供参考），其他负载点时，可按与电流平方成正比的关系进行计算。

（二）用线性回归法确定杂散损耗的可信度

在我国的标准 GB/T 1032—2005 《三相异步电动机试验方法》和 GB/T 20137—2006 《三相笼型异步电动机损耗和效率的确定方法》中，给出了用线性回归法确定用式 (4-50) 求出的杂散损耗（在此应称为“剩余损耗”）

是否达到要求的办法。它的原理是建立在杂散损耗与电动机输出转矩的平方成线性关系（或者说杂散损耗是输出转矩的 2 次函数）的基础之上。设杂散损耗为 P_s (W)，电机的输出转矩为 T (N·m)，A 为函数（直线）的斜率，B 为截距，则

$$P_s = AT^2 + B \quad (4-55)$$

通过一系列的计算，求得反映测量准确性的相关系数 r 。当 $r < 0.9$ （对于效率试验的 B 方法）或 $r < 0.95$ （对于效率试验的 B1 方法）时，应去掉测量值中的“坏点”，重新计算 r ；若 r 值上升，即 $r \geq 0.9$ （或 0.95），则计算结束；若 r 仍小于 0.9（或 0.95），则可认为试验数据不能使用，必须重新调整试验设备或检查仪器仪表，消除不利因素或误差，再次进行试验并进行上述线性回归计算，直至达到满意为止。

在回归计算达到满意后，用求得的斜率 A 和各测点的输出转矩 T ，用式 (4-56) 计算求取各点“真正”的杂散损耗 P_s 。

$$P_s = AT^2 \quad (4-56)$$

七、杂散损耗的线性回归过程及有关规定

下面介绍线性回归的详细计算和处理步骤等方面的内容。

（一）准备工作

（1）用式 (4-57) 求出每一测量点的剩余损耗 P_L (W)，式中符号的含义同式 (4-50)。

$$P_L = P_1 - P_2 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m) \quad (4-57)$$

（2）根据负载试验的输出转矩值 T 和式 (4-57) 求出的剩余损耗 P_L 进行有关的计算，并将结果填入表 4-13。为了计算公式简便和便于读者掌握，将表中最后一行的各项求和分别用一个符号表示，并设负载试验测点总数 $n = 6$ ，给出一组实测数据进行计算。

表 4-13 剩余损耗线性回归数据汇总表

测点序号	P_L	P_L^2	T^2	T^4	$P_L T^2$
1	281	78961	2581	6661561	725261
2	257	66049	2190	4796100	562830
3	225	50625	1657	2745649	372825
4	161	25921	930	864900	149730
5	114	12996	413	170569	47082
6	53	2809	104	10816	5512
Σ	$E = \Sigma P_L$ = 1091	$F = \Sigma P_L^2$ = 237361	$G = \Sigma T^2$ = 7875	$H = \Sigma T^4$ = 15249595	$I = \Sigma P_L T^2$ = 1863240

实例数据为：

剩余损耗 P_L (W) : 281, 257, 225, 161, 114, 53

输出转矩 T (N·m) : 50.8, 46.8, 40.7, 30.5, 20.3, 10.2

(二) 求取线性方程的斜率 A 和截距 B

用下列算式分别计算线性方程的斜率 A 和截距 B：

$$A = \frac{n \sum P_L T^2 - \sum P_L \sum T^2}{n \sum T^4 - (\sum T^2)^2} = \frac{nI - EG}{nH - G^2} \quad (4-58)$$

$$= \frac{6 \times 1863240 - 1091 \times 7875}{6 \times 15249595 - 7875^2} = \frac{2587815}{29481845} = 0.087776562$$

$$B = \frac{1}{n} (\sum P_L - A \sum T^2)$$

$$= \frac{1}{n} (E - AG) \quad (4-59)$$

$$= \frac{1}{6} (1091 - 0.087776562 \times 7875) = 66.6266$$

(三) 计算相关系数 r

用下列算式求取相关系数 r：

$$r = \frac{n \sum P_L T^2 - \sum P_L \sum T^2}{\sqrt{[n \sum T^4 - (\sum T^2)^2][n \sum P_L^2 - (\sum P_L)^2]}}$$

$$= \frac{nI - EG}{\sqrt{[nH - G^2][nF - E^2]}} \quad (4-60)$$

$$= \frac{6 \times 1863240 - 1091 \times 7875}{\sqrt{[6 \times 15249595 - 7875^2][6 \times 237361 - 1091^2]}} \approx 0.985$$

(四) 计算各负载点的杂散损耗

若上述计算的相关系数 $r \geq 0.9$ (或 0.95), 则可用式 $P_s = AT^2$ 计算得到各负载点“真正”的杂散损耗 P_s 。

上例计算所得的相关系数 $r = 0.985 \geq 0.95$, 所以认为试验数据是符合要求的。根据计算斜率 $A = 0.087776562$ 和各试验点的输出转矩值, 可求得各试验点的杂散损耗 P_s (W) 为

227, 192, 145, 82, 36, 9

八、GB 18613—2002 中规定的杂散损耗限值

在国家标准 GB 18613—2002 的表 3 中规定了杂散损耗限值 (本标准已被 GB 18613—2006 代替, 并删除了有关杂散损耗限值的内容), 现列入到表

4-14 中。表中 P_N 为电机额定功率； P_s/P_{1N} (%) 为杂散损耗占额定输入功率的百分比。给出此表的目的是让大家了解实际的杂散损耗值占额定输出功率的比例统计值，因为实践表明，表 4-14 中给出的数据虽不一定等于实际实测值，但不会相差太多。

表 4-14 GB 18613—2002 中的规定的杂散损耗限值

P_N (kW)	P_s/P_{1N} (%)	P_N (kW)	P_s/P_{1N} (%)	P_N (kW)	P_s/P_{1N} (%)
0.55 ~ 1.1	2.5	11	2.0	55 ~ 75	1.6
1.5	2.4	15 ~ 18.5	1.9	90 ~ 110	1.5
3 ~ 4	2.3	22 ~ 30	1.8	132 ~ 160	1.4
5.5 ~ 7.5	2.1	37 ~ 45	1.7	200 ~ 315	1.3

九、GB/T 1032—2005 中规定的杂散损耗推荐值

在国家标准 GB/T 1032—2005 中的第 9.5.4 条规定了杂散损耗采用推荐值时可供选用的三种方法，其具体规定见表 4-15。表中： I_N 为定子额定电流； I_1 为各试验点的定子电流； I_0 为空载电流； P_{1N} 为额定输出时的输入功率； P_{sN} 为额定输出时的杂散损耗推荐值； P_s 为其他输出功率时的杂散损耗计算值。

表 4-15 GB/T 1032—2005 中第 9.5.4 条规定的确定杂散损耗推荐值的三种方法

方法序号	电机额定输出功率 P_N (kW)	额定负载时杂散 损耗推荐值 P_{sN} 的计算方法	其他负载时的 杂散损耗 P_s 计算方法
方法 1	$P_N \leq 1$	$P_{sN} = 0.025 P_{1N}$	$P_s = P_{sN} \frac{I_1^2 - I_0^2}{I_N^2 - I_0^2}$
	$1 < P_N < 10000$	$P_{sN} = [0.025 - 0.0051g(P_N)] P_1$	
方法 2	$1 \leq P_N \leq 90$	$P_{sN} = 0.018 P_N$	
	$90 < P_N \leq 375$	$P_{sN} = 0.015 P_N$	
方法 3	$375 < P_N \leq 1850$	$P_{sN} = 0.012 P_N$	
方法 3	无限制	$P_{sN} = 0.005 P_{1N}$	$P_s = P_{sN} (I_1/I_N)^2$

第十二节 效率的确定方法

三相异步电动机的效率是最重要的考核指标。它的好坏几乎与设计的所有主要参数，以及所有主要部件的材质、结构、生产工艺及操作方法有关。

一、效率确定方法的分类

三相异步电动机效率的确定方法有多种，但大体可分为三类：第一类是直接测定法；第二类是间接测定法，又称为损耗分析法；第三类是通过简单试验后再利用理论计算的方法。GB/T 1032—2005《三相异步电动机试验方法》参考了 IEC60034：1972、IEC61972：2002 和 NEMA Std112—1996 等有关标准，进一步将三相异步电动机效率的确定方法进行了分类，并用代号表示，见表 4-16。以下将详细介绍各种方法的内容。

2006 年 8 月国家发布的《三相笼型异步电动机损耗和效率的确定方法》GB/T 20137—2006，又专门介绍了 GB/T 1032—2005 中介绍的一些方法，其中主要是 B1 和 E1 法。相关内容将在本章第二十六节中进行介绍。

表 4-16 三相异步电动机效率的确定方法分类

序号	方法代号	名称	相关说明
1	A	输入-输出法	直接测定效率值。通常仅限于效率不大于 80% 的电动机
2	B	输入-输出 损耗分析法	实测杂散损耗，铁耗由空载试验获得
3	B1		试验方法同 B 法，铁耗由电压、电流、功率等数据计算获得
4	C	双机对拖 回馈法	实测杂散损耗，直流电阻等修正到环境温度为 25℃，效率的确定采用损耗分析法
5	C1		试验和计算方法同 C 法，但进行直流电阻温度修正为规定的基准温度（见表 4-12）
6	E	损耗分析法	杂散损耗用直接测量法获得
7	E1		杂散损耗使用推荐值
8	F	等效电路法	杂散损耗用直接测量法获得
9	F1		杂散损耗使用推荐值
10	G	降低电压 负载法	杂散损耗用直接测量法获得
11	G1		杂散损耗使用推荐值
12	H	圆图计算法	

二、A 法测定效率——效率的直接测定法

A 法被称为“效率的直接测定法”，又常被称为“输入-输出法”，因试验时能直接得到求取效率的两个数据——输入电功率 P_1 和输出机械功率 P_2 ——而得名。本方法原则上限定用于满载效率不超过 80% 的电动机。

有些标准中称其为“制动法”。

(一) 试验设备

本方法关键在于具备能直接测定电动机输出机械功率（或转矩）的测功设备。设备的组成、试验线路及试验操作过程同本章第十节“负载试验”中二、（一）条所述内容。

为保证系统的综合测试精度，所用测功机的功率（或转矩传感器的标称转矩），在与被试电动机同样的转速下，应不超过被试电动机额定功率（或转矩）的 2 倍。

(二) 试验方法

在被试电机加规定的负载运行到温升稳定或规定的时间后（按规定的进行试验时，被试电机绕组所达到的温度与实际温升稳定所达到的温度之差应不超过 5K），调节负载在 1.5 ~ 0.25 倍额定功率范围内变化，测取负载下降和上升时的两条工作特性曲线。每条曲线测取 6 点读数（允许更多），每点读数包括：三相线电压（应保持额定值）、三相线电流 I_1 (A)、输入功率 P_1 (W)、转速 n (r/min)、输出转矩 T (N·m)，有条件时还应记录输出功率 P_2 (W)。最后断电停机，在规定的时间内（见本章第九节《热试验》）测得定子绕组的直流电阻 R_1 (Ω)，否则应按热试验后求取热电阻的有关规定进行外推修正。在有条件时，优先采用事先在绕组中埋置测温元件获得每点定子绕组温度或电阻的方法。试验时，还应记录环境温度 θ ()。

(三) 按 GB /T 1032—2005 中规定对试验结果的处理方法

1. 输出转矩的修正

对用测功机测得的各点输出转矩值，应再补加测功机风摩擦所消耗的转矩值后才是被试电动机的输出转矩，有关测功机风摩擦所消耗的转矩值求取方法见第二章。

2. 输出转速的修正

试验时的冷却介质温度应换算到 25 。此时，电动机的转速应按式 (4-61) 换算

$$n_{\text{ref}} = n_s - (n_s - n_t) \frac{K + \Delta\theta_2 + 25}{K + \Delta\theta_2 + \theta_1} \quad (4-61)$$

- 式中 n_{ref} ——换算到冷却介质为 25 时的转速, r/min ;
 n_t ——试验时测得的转速, r/min ;
 $\Delta\theta_2$ ——试验时的转子温升,若无法测得,允许用定子温升代替, K ;
 θ_t ——试验时冷却介质温度, ;
 n_s ——被试电机的同步转速, r/min ;
 K ——导体电阻温度系数,铜导体为 235,铝导体为 225。

3. 定子绕组损耗的修正

定子绕组损耗 I^2R 的修正量 ΔP_{Cul} (W) 按式 (4-62) 计算:

$$\Delta P_{\text{Cul}} = 1.5 I_t^2 R_t \left(\frac{K + \Delta\theta_t + 25}{K + \Delta\theta_t + \theta_t} - 1 \right) \quad (4-62)$$

- 式中 I_t ——试验时的定子绕组线电流, A ;
 $\Delta\theta_t$ ——试验时的定子绕组温升, K ;
 R_t ——试验时的定子绕组线电阻, Ω 。

4. 被试电机修正后的输出功率

被试电机修正后的输出功率 P_2 (W) 为

$$P_2 = \frac{T_c n_{\text{ref}}}{9.55} - \Delta P_{\text{Cul}} \quad (4-63)$$

5. 求取各测点效率

用式 (4-64) 求取各试验测点的效率 η (%)。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (4-64)$$

6. 效率曲线的绘制和满载效率值的确定

用上述计算出的各点效率值作效率与输出功率的关系曲线 $\eta = f(P_2)$, 对测试出负载上升和下降两条曲线的, 还应绘出“平均曲线”。从平均曲线上查出对应于被试电机额定输出功率 $P_2 = P_N$ 时的效率值, 即为该电机的实际满载效率值。如图4-27所示。

(四) 按 GB /T 755. 2—2003 中规定对试验结果的处理方法

GB/T 755. 2—2003 《旋转电机 (牵引电机除外) 确定损耗和效率的试验方法》中的第 5 章《多相感应电机》对采用“制动试验”(即上述“输入-输出法”中所述的“测功机试验”)进行效率试验的结果处理方法规定如下(见该标准 5. 2. 3. 1 制动试验): 当电机在额定转速、额定电压和额定电流下运行时, 其输出与输入之比即为效率。试验应在尽可能接近额定规定的时间终了时所达到的温度下进行, 绕组电阻不必作温度修正。

该标准没有讲述其他电流点的测试和效率的计算以及绘制效率与输出功

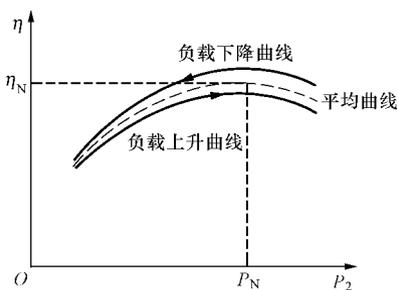


图 4-27 负载上升和下降的 $\eta = f(P_2)$

曲线和“平均曲线”率的关系曲线等问题，并且用于效率计算的两个数据是在“额定转速、额定电压和额定电流下运行时”取得的。从字面上来理解，可认为这样求得的效率即为额定功率时的效率。

但是，实际试验中，上述工作状态时电动机的输出功率不一定是额定值（当然输入功率也不会是额定值），自然由此求得的效率也不一定是额定功率时的数值。这项差异在某些试制产品上有时会较大。这一点应引起读者的注意。

另外，该标准规定电阻不用进行温度修正，使得计算得以简化。但在一定程度上会造成不同环境温度试验值的差异。

三、B (B1) 法定测定效率——输入—输出损耗分析法

B (B1) 法被称为“输入-输出损耗分析法”，是对电机进行效率认证（主要是考核高效电机的效率）时，推荐（或者是必须）采用的一种效率测试方法。

本方法含有 B 和 B1 两种方法，两者的区别只在于确定铁心损耗的方法有所不同。

（一）有关说明

采用 B (B1) 法求取效率时，需在额定电压和额定频率下进行直接负载试验和空载试验，取得若干组输入电流、输入功率、输出功率（或转矩）、转速以及铁心损耗和机械损耗值，再对有关试验值进行相关修正（主要是对热损耗的温度修正和对输出转矩的修正），并求出修正后的输入功率和输出功率，最后用输出功率与输入功率相比求出各试验点的效率，并绘制效率与输出功率的关系曲线，在该曲线上查取额定输出功率时的效率值，即

为“满载效率”。

通常还利用计算过程中得出的额定电压和频率时的相关数据，在与上述效率曲线同一个坐标系中绘制出输入电流、输入功率、输出转矩、转差率（或转速）等对输出功率的关系曲线，即统称为“电机工作特性曲线”。

（二）所需数据的来源和处理过程

采用此方法时，关键是通过相关试验得到额定频率和额定电压时的若干组不同负载量情况下的 5 种损耗值，即定子铜耗、转子铜耗、铁心损耗（简称“铁耗”）、机械损耗和杂散损耗。下面分别介绍它们的来源和处理过程。

1. 定子铜损耗 P_{Cu1}

定子铜损耗 P_{Cu1} 用式 (4-65) 计算并修正到环境温度为 25 时的数值。其中的定子电阻 R_N 应用热试验结束时立即测得的数值（或利用测量绕组温度的方法换算得到的数值）； θ_N 为绕组热态温度； θ_1 为热态时的环境温度； K 为常数，对铜绕组为 235。

$$P_{Cu1} = 1.5 I_1^2 R_N \frac{K + \theta_N - \theta_1 + 25}{K + \theta_N} \quad (4-65)$$

2. 转子铜损耗 P_{Cu2}

转子铜损耗 P_{Cu2} 由式 $P_{Cu2} = s (P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe})$ 计算求得。其中的转差率 s 应修正到规定温度。

3. 铁心损耗 P_{Fe}

(1) B 方法。铁心损耗 P_{Fe} 由空载试验获得。认为是一个只与定子电压有关的量。负载试验时，定子电压恒为额定值，所以认为各电流点的铁心损耗不变。

(2) B1 方法。认为铁心损耗主要与定子电压有关，但与定子电流及输入功率也有一定关系。先利用定子电流 I_1 、定子绕组电阻 R_1 及输入功率 P_1 等根据式 (4-66) 求得一个电压 U_b ，然后通过空载试验的有关曲线得到对应 U_b 的铁心损耗。

$$U_b = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} I_1 R_1 \cos \varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_1 R_1 \sin \varphi \right)^2} \quad (4-66)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U I_1}; \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$$

式中 U ——负载试验时的定子电压，V；

I_1 ——负载试验时的定子电流，A；

R_t ——温升稳定时的定子绕组直流电阻， Ω ；

P_1 ——负载试验时的输入功率，W。

4. 机械损耗 P_m

机械损耗 P_m 由空载试验获得，是一个主要与转速有关的量。负载试验时，各电流点的转速变化不大，所以也可认为是一个不变的量。

5. 杂散损耗 P_s

采用输入-输出法实测，并应进行线性回归确定其合理性，然后进行再次计算得到（见本章第十一节第七部分的相关内容）。

四、C (CI) 法测定效率——双机对拖反馈法

本方法含 C 和 CI 两种方法，两者的不同只在于在对定子与转子铜损耗（或直流电阻）进行温度修正时所用温度值的规定不相同。

（一）试验设备

试验时，用一台同规格或不同规格但同步转速与被试电动机相同、功率不小于被试电动机额定功率 90% 的其他三相异步电动机（称为“陪试电机”）与其用联轴器相联结。被试电动机接额定频率的电源；陪试电机接可变频率的电源（其频率至少在其额定值的 90% ~ 110% 范围内可调）。试验中，总会有一台电机在以异步发电机状态运行，其输出的电能通过变频电源机组向电网或另一台电机回馈。因此将此方法称为“回馈法”。

可见，本试验需要一套变频电源机组或其他形式的回馈电源设备。有关这些设备的组成方法见第二章。

（二）试验方法

1. 空载试验

按本章第八节介绍的方法对两台电动机进行空载试验，并确定有关损耗。

2. 负载试验

负载试验分如下两步进行。在两次试验时，测量仪表及互感器的接线位置不变，由于功率反向流动，所以仪表的校正误差可减至最小。仪用互感器的相角误差是积累的，精确校正相角误差极为重要，因为这种误差将使求得的损耗小于真实值。

第一步：被试电机在额定频率的额定电压下作电动机运行，陪试电机在额定电压和低于额定频率下作发电机运行。调节陪试电机的频率，将被试电动机的负载调到额定值（一般指其定子电流），运行到热稳定状态。

调整负载进行试验，其调整方法和记录的数据同本章第十节的“直接负载试验方法之一——额定电压负载法”。

第二步：陪试电机在额定电压和高于额定频率下作电动机运行，此时被试电机仍保持额定频率和额定电压，但改作发电机运行。调节陪试电机的频率，将被试电动机的负载调到额定值（一般指其定子电流），运行到热稳定状态。

调整负载进行试验，其调整方法和记录的数据与第一步相同，应注意的是，各负载点的电流值应与第一步各对应点的数值尽可能接近。

按上述第一步所述的方法测取各种数据并计算各种损耗值。

(三) 负载杂散损耗的确定方法

采用间接的方法确定负载杂散损耗。其步骤如下：

(1) 用第一步测得的试验数据，按下述方法求取被试电机在电动机状态下的负载杂散损耗。

1) 利用测得的电流值，计算在试验温度下每台电机的定子 I^2R 损耗（即铜损耗 P_{Cu1} ）。

2) 计算电动机转子铜损耗： $P_{MCu2} = S_M (P_{1M} - P_{MCu1} - P_{MFe})$ 。式中， S_M 、 P_{1M} 、 P_{MCu1} 和 P_{MFe} 分别为电动机的转差率、输入功率、定子铜损耗和铁心损耗。

3) 计算发电机转子铜损耗： $P_{GCu2} = S_G (P_{2G} - P_{GCu1} - P_{GFe})$ 。式中， S_G 、 P_{2G} 、 P_{GCu1} 和 P_{GFe} 分别为发电机的转差率、输出功率、定子铜损耗和铁心损耗。

4) 由测得的总损耗 ΣP （等于电动机的输入功率与发电机的输出功率之差，即 $\Sigma P = P_{1M} - P_{2G}$ ）减去两台电机的定子 I^2R 损耗（即 $P_{MCu1} + P_{GCu1}$ ）、转子 I^2R 损耗（即 $P_{MCu2} + P_{GCu2}$ ）、铁心损耗（即 $P_{MFe} + P_{GFe}$ ）和机械损耗（即 $P_{Mm} + P_{Gm}$ ），即得两台电机的总杂散损耗 ΣP_s 。

5) 假设负载杂散损耗与转子电流的平方成正比（因为转子电流不可能测得，而转子铜损耗 P_{Cu2} 也与转子电流的平方成正比，所以一般用转子铜损耗 P_{Cu2} 代替转子电流的平方来进行计算），可求得被试电机在电动机状态下的负载杂散损耗 P_{Ms} 为

$$P_{Ms} = \Sigma P_s P_{MCu2} / (P_{MCu2} + P_{GCu2}) \quad (4-67)$$

(2) 利用第二步测得的试验数据，按上述 (1) 的方法，求取被试电机在发电机状态下的负载杂散损耗 P_{Gs} 。

$$P_{Gs} = \Sigma P_s P_{GCu2} / (P_{MCu2} + P_{GCu2}) \quad (4-68)$$

(3) 求取负载杂散损耗的平均值和近似的转子电流平均值。以被试电机在电动机状态和发电机状态下,各负载点求得结果的平均值,作为负载杂散损耗的平均值 P_{sL} 。

$$P_{sL} = (P_{Ms} + P_{Gs})/2 \quad (4-69)$$

用式(4-70)分别求取电动机状态和发电机状态下的转子电流近似值 I_2 。之后,取被试电机两种状态下转子电流近似值的平均值 I_{2ave} 。

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2} \quad (4-70)$$

式中 I_1 ——测定负载杂散损耗时的定子电流(电动机状态和发电机状态), A;

I_0 ——空载额定电压时的定子电流, A。

(四) 利用线性回归分析修匀负载杂散损耗数据

(1) 负载杂散损耗的平均值 P_{sL} 与转子电流近似值的平均值 I_{2ave} 的平方呈线性函数关系,见式(4-71),对其试验数据进行线性回归(将本章第十一节第七部分的相关内容中的转矩 T 换成电流 I_{2ave})。

$$P_{sL} = A(I_{2ave})^2 + B \quad (4-71)$$

(2) 根据用上述方法求得的斜率 A 和各负载点的转子电流平均值 I_{2ave} 确定杂散损耗 P_s 。

(五) 在规定温度时定、转子铜损耗的确定

在规定温度时定、转子铜损耗的确定方法与前面介绍的完全相同。但其中“规定温度”的确定应根据是 C 方法还是 $C1$ 方法按下述规定: C 方法应将环境温度修正到 25 ; $C1$ 方法应按被试电机使用的绝缘选用表 4-12 所给出的温度。

五、 E ($E1$) 法测定效率——损耗分析法

本方法也有 E 和 $E1$ 两种方法,两者的不同只在于获得杂散损耗的方法不同。实际上,就试验方法而言,本方法与前面讲过的几种方法没有本质上的区别。

本方法要求测定被试电动机的输入电功率 P_1 ,用此功率减去各项损耗得出输出功率 P_2 ,再用两者之比求得效率 η 。

各项损耗的求得方法如下:

- (1) 铁心损耗和机械损耗由电动机空载试验求得。
- (2) 在规定温度时定、转子铜损耗的确定方法同 C ($C1$) 法。
- (3) 负载杂散损耗的确定方法按下述规定:
对于 E 方法,应实测;对于 $E1$ 方法,应采用推荐值。

六、F (F1) 法测定效率——等效电路法

(一) 说明

F 或 F1 法被称为“等效电路法”。等效电路算法，是根据电动机空载和堵转试验的部分数据，利用电机等效电路中有关参数的关系来间接求取电机效率和其他部分特性数据的方法，是间接求取三相异步电动机效率的方法之一。

本方法在因被试电机容量较大而试验设备能力不足时被采用，当为了给电机控制系统提供某些参数时（如变频电源的控制参数设定），也可能借用此方法。

(二) 三相异步电动机的等效电路

三相异步电动机一相的等效电路如图 4-28 所示。图中： R_1 为定子绕组相电阻； x_1 为定子漏抗； R_2 为折算到定子侧的转子相电阻； x_2 为折算到定子侧的转子漏抗； s 为转差率， G_{Fe} 为铁耗等值电导， B_m 为主励磁导纳。

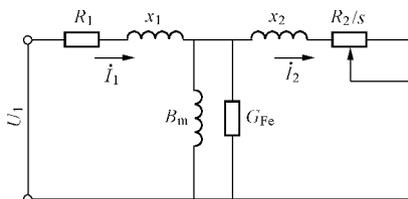


图 4-28 三相异步电动机等效电路
(一相)

(三) 所需的试验及有关规定

等效电路中的参数需通过空载试验、阻抗试验和堵转试验得到的数据导出。

1. 空载试验

空载试验的方法同本章第八节。由本项试验求得额定频率和额定电压下的空载电流、空载损耗、铁心损耗、机械损耗，以及试验后的定子绕组直流电阻。

2. 阻抗试验

在一个或几个频率、电压/或负载下，测取电压、电流、输入功率和定子绕组直流电阻（或温度）的数值，这些数据被认为是阻抗部分的数据。如被试电动机为绕线转子，试验时，应将转子三相绕组在出线端短路。

应在额定电流下测量电抗，重要的是等效电路计算中用到的电抗值应为计及饱和和深槽影响的正确值，否则计算求得的功率因数将大于实际值。

实际上, 本项试验一般均指低频堵转试验。低频堵转试验的试验方法及需记录的试验数据同本章第七节。但试验时的电源频率应为额定值的 1/4 (所以必须要有宽调频的变频电源设备), 调整输入电压, 使定子电流为额定值。

对于笼型转子电机, 其转子可在任意角度下进行试验。对于绕线转子电机, 由于其阻抗与定、转子之间的相对位置有关, 所以试验较为复杂, 试验时应事先确定转子在某一相对位置时阻抗的平均值 (有关方法请参考 GB/T 1032—2005 原文)。

(四) 计算过程及有关规定

利用等效电路计算法求取电机特性法的过程和有关规定见表 4-17。表中 I、U、R 均为相值, 功率或损耗为三相值, 各量的单位均为法定计量单位, 即电流为 A、电压为 V、功率或损耗为 W、频率为 Hz、转速为 r/min、时间为 s、电阻和电抗、阻抗为 Ω 等。

表 4-17 等效电路计算法求取电机特性过程

序次	项 目	计算过程及说明
1	必备参数: 相电流、相电压、相电阻、相电抗、三相功率或损耗	(1) 额定数值: $P_N; U_N; I_N; f_N; n_n$ (2) 定子相电阻: R_1 (修正到基准工作温度) (3) 额定电压 ($U_0 = U_N$) 时的空载试验数据: $P_0、P_{Fe}、P_m、I_0、R_{l0}$ (试验后测得) (4) $f = f_N/4$ 时的堵转数据: $P_{1K}、U_{1K}、I_{1K}、f_K、R_{1K}$ (试验后测得) (5) 杂散损耗 P_s , 实测或推荐值
2	求定子电抗设计值 $[x_1]$ 求转子电抗设计值 $[x_2]$ 求定、转子电抗的比值	$[x_1] = x_1^* (3 U_N^2 / P_N)$ $[x_2] = x_2^* (3 U_N^2 / P_N)$ 式中 x_1^* 和 x_2^* 分别为定、转子电抗的标么值 $\left[\frac{x_1}{x_2} \right] = \left[\frac{x_1^*}{x_2^*} \right]$
3	励磁电抗的估算值	$[x_m] \approx \frac{U_N}{I_0} - [x_1] \quad \left[\frac{x_1}{x_m} \right] = \left[\frac{x_1}{x_m} \right]$
4	求等效电路中的参数 (1) x_m 和 x_1 的近似值	假定: $x_1 = [x_1]$, $\frac{x_1}{x_m} = \left[\frac{x_1}{x_m} \right]$, $\frac{x_1}{x_2} = \left[\frac{x_1}{x_2} \right]$ 则 $x_m = \frac{3U_N^2}{Q_0 - 3I_0^2 x_1} \left[\frac{1}{1 + \frac{x_1}{x_m}} \right]^2 \frac{x_{1K} f_N}{f_K}$

续表

序次	项 目	计算过程及说明
4	(2) 求 x_m 和 x_1 的精确值(用迭代法) (3) 求转子电抗 x_2 (4) 求励磁电纳 B_m (5) 求铁心电导 G_{Fe} (6) 求转子电阻 R_2	利用上述求得的 x_1 和 x_m 的近似值,重新计算出 x_1/x_m ,仍取 $x_1/x_2 = [x_1/x_2]$,利用同样的方法再次求出 x_1 、 x_m 和 x_{1K} 不断重复上述过程,直到相邻两次求得的 x_1 和 x_m 相差不超过前一个数值的 $\pm 0.1\%$ 为止 $x_2 = \frac{x_1}{\left[\frac{x_1}{x_2} \right]}$ $B_m = 1/x_m$ $G_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{3U_N^2} \left(1 + \frac{x_1}{x_m} \right)^2$ $R_2 = \left(1 + \frac{x_2}{x_m} \right)^2 \left(\frac{P_{1K}}{3I_{1K}^2} - R_{1K} \right) - \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^2 x_{1K}^2 G_{Fe}$ 对绕线转子电机,用下式求取 R_2 $R_2 = R'_2 K_u^2$ 式中 R'_2 为换算到基准工作温度时的转子电阻; K_u 为定转子电压比(转子电压为开路电压)
5	求取工作特性预备参数	(1) 假设转差率 s 为设计值 (2) $Z_2 = \sqrt{C R_2 / s^2 + x_2^2}$ (3) $G_2 = R_2 / s Z_2^2$ (4) $G = G_2 + G_{Fe}$ (5) $B_2 = x_2 / Z_2^2$ (6) $B = B_2 + B_m$ (7) $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ (8) $R = (G/Y^2) + R_1$ (9) $x = (B/Y^2) + x_1$ (10) $Z = \sqrt{R^2 + x^2}$
6	求定、转子电流 I_1 和 I_2	$I_1 = U_N / Z$ $I_2 = I_1 / (Z_2 Y)$
7	求输入功率 P_1	$P_1 = 3I_1^2 R$
8	求各项损耗和总损耗	$P_{Cu1} = 3I_1^2 R_1$ $P_{Fe} = 3I_1^2 G_{Fe} / Y^2$ $P_{Cu2} = 3I_2^2 R_2$ $\Sigma P = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m + P_s$ 式中 $P_s = P'_s (I_2 / I_1)^2$ (P'_s 为 I_1 对应的值 $I_1 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$); P_m 由空载试验求得

续表

序次	项 目	计算过程及说明
9	求输出功率	$P_2 = P_1 - \Sigma P$, 当 $ (P_2 - P_N)/P_N < 0.001$ 时, 上述计算有效, 否则要重新假设转差率, 再开始新一轮 5 至 9 项的计算, 直到符合上述要求为止。新假设的转差率估算方法见表后面的“注”
10	计算满载效率和功率因数	$\eta = (P_2/P_1) \times 100\%$ $\cos \varphi = R/Z$
11	计算满载转矩和转速	$n_N = (1 - s)n_s$ $T_N = 9.549P_2/n_N$

注 在上述计算过程中, 如计算到第 9 项时所求得的 P_2 值与额定功率之差在 P_N 的 $\pm 0.1\%$ 以内时, 则认为所假设的转差率 s 合适, 并继续往下计算, 否则应重新假设转差率 s , 再重复第 5~9 项计算。设前一次假设的转差率为 s_1 , 则重新假设的转差率 s_2 可按下式估算:

$$s_2 = s_1 \left(1 + \frac{P_N - P_2}{P_N} \right) \quad (4-72)$$

式中 P_2 ——前一次求得的输出功率。

也可将多次计算所得的数据, 绘制转差率 s 、定子电流 I_1 、输入功率 P_1 、效率 η 、功率因数 $\cos \varphi$ 各参数与输出功率 P_2 的关系曲线, 从曲线上查取额定功率 P_N 所对应的性能数据。

七、G (G1) 法测定效率——降低电压负载法

G (G1) 效率的测定法为“降低电压负载法”, 是间接测定效率的方法之一。在电源或负载能力不能满足进行满压满载负载试验时采用。G 和 G1 法的不同点在于是使用实测还是使用推荐的杂散损耗。下面介绍其试验步骤和计算方法。

(一) 需进行的相关试验

(1) 进行额定电压 U_N 时的空载试验, 并求得额定电压时的空载电流 I_0 、空载损耗 P_0 、铁心损耗 P_{Fe} 和机械损耗 P_m 。

(2) 对 G 方法, 按规定进行实测杂散损耗, 求得额定功率时的杂散损耗值 P_s ; 对 G1 法采用推荐的杂散损耗值 P_s 。

(3) 被试电机定子加额定频率、电压 $U_t = 0.5 U_N$, 并使定子电流等于 $0.5 I_N$, 运行到温升接近稳定后进行负载试验。在 $0.6 I_N$ 到空载电流 I_0 范围内测取 5~7 点读数 (记录数据同普通试验)。试验全过程都要保持电压稳定在开始调定的数值上 ($0.5 U_N$)。测试完毕后, 尽快停机并测量定子绕组的直流电阻 R_{F1} 。

(二) 需进行的有关计算

(1) 将试验测得或计算求得的各点转差率修正到规定的工作温度, 记为 s_r 。

(2) 分别做试验时定子电流 I_{1r} (A)、温度修正后的转差率 s_r 与输入功率 P_{1r} (W) 的关系曲线。如图 4-29 所示。

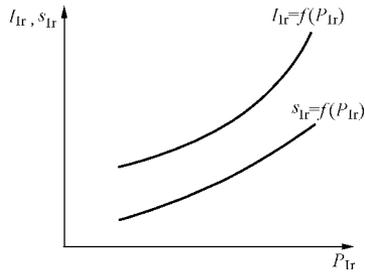


图 4-29 降低电压负载法定子电流、

转差率与输入功率的关系曲线

(三) 额定功率时效率的计算步骤

(1) 假设 $I_{1r} = 0.5I_N$ ，从图 4-29 的曲线 $I_{1r} = f(P_{1r})$ 上查出对应的 P_{1r} 。

则额定电压 U_N 时的输入功率 P_1 用下式求得：

$$P_1 = P_{1r} (U_N / U_r)^2$$

(2) 用下式求取满载电流 I_L (A)。

$$I_1 = \sqrt{(I'_{1r})^2 + \Delta I_0^2 - 2I'_{1r}\Delta I_0 \cos(0.5\pi + \varphi_r)}$$

$$I'_{1r} = I_{1r} \frac{U_N}{U_r}$$

$$\varphi_r = \cos^{-1} \frac{P_{1r}}{\sqrt{3}U_r I_{1r}}$$

$$\Delta I_0 = I_0 \sin \varphi_0 - I_{0r} \left(\frac{U_N}{U_r} \right) \sin \varphi_{0r}$$

$$\varphi_0 = \cos^{-1} \frac{P_0}{\sqrt{3}U_N I_0}$$

$$\varphi_{0r} = \cos^{-1} \frac{P_{0r}}{\sqrt{3}U_r I_{0r}}$$

式中 I_0 、 P_0 ——分别为电动机在额定电压时的空载电流和损耗，从空载特性曲线上求取。

I_{0r} 、 P_{0r} ——分别为电动机在电压 U_r 时的空载电流和损耗，从空载特性曲线上求取。

(3) 从图 4-29 的曲线 $I_{1r} = f(P_{1r})$ 上查出 $I_{1r} = I_L$ 对应的 P_{1r} , 再在曲线 $s_r = f(P_{1r})$ 上查出 P_{1r} 对应的 s_r , 此 s_r 即为额定功率 P_N 时的转差率 s_L 。

(4) 用满载电流 I_L 和修正到基准工作温度的定子电阻求出满载时的定子铜损耗 P_{Cu1} ; 用满载转差率 s_L 和其他参数求出满载时的转子铜损耗 P_{Cu2} 。

(5) 用式 $P_2 = P_1 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m + P_{si})$ 计算求出输出功率 P_2 。若此 P_2 与被试电机的额定功率 P_N 之差超过 $\pm 0.001 P_N$ 时, 则应重新假设 I_{1r} , 重复进行上述计算至 $P_2 - P_N$ 在 $\pm 0.001 P_N$ 以内为止。

(6) 用式 $\eta = P_2 / P_1$ 求出满载效率 η 。

八、H 法测定效率——圆图计算法

H 法被称为“圆图计算法”。下面介绍其试验步骤和计算等有关内容。

(一) 需进行的相关试验

(1) 测取定子绕组相电阻, 并转换到基准工作温度时的数值 R_1 。

(2) 对绕线转子电动机, 还应测取转子绕组的相电阻并换算到基准工作温度, 之后再用定、转子电压比 K_V (电机定子加额定电压, 转子三相开路时, 定子线电压与转子线电压之比) 进行折算。设折算前为 R'_2 , 折算后为 R_2 , 则 $R_2 = R'_2 K_V^2$ 。

(3) 由额定电压、额定频率的空载试验, 求得定子三相空载电流平均值 I_0 和空载输入功率 P_0 。

(4) 由堵转电流为 1.0 ~ 1.1 倍额定电流、电源频率为额定值的堵转试验, 求得该条件下的堵转相电流 I_K 、堵转相电压 U_K 和堵转输入功率 P_K 。

(5) 对于深槽和双鼠笼转子电动机, 还应在 0.5 倍额定频率下进行上述堵转试验, 试验时的堵转电流为 1.0 ~ 1.1 倍额定电流, 求得该条件下的堵转相电流 I'_K 、堵转相电压 U'_K 和堵转输入功率 P'_K 。

(二) 求取满载时的效率、功率因数等有关性能参数的计算过程

普通笼型异步电动机及绕线转子电动机计算过程见表 4-18。

普通笼型异步电动机是指转子由同样高度的导条组成, 并且其高度对铜导条不大于 10mm, 对铝导条不大于 16mm。

深槽式和双笼型电动机的性能参数圆图计算法计算过程见表 4-19。

表 4-18 普通笼型异步电动机及绕线型转子电动机性能参数圆图计算法过程

序次	项 目	计算过程及说明
1	求空载电流的有功分量 I_{0R} 求空载电流的无功分量 I_{0X}	$I_{0R} = P_0 / 3U_N$ $I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2}$

续表

序次	项 目	计算过程及说明
2	由 $f = f_N$ 堵转试验求取： 等值阻抗 Z_K 、等值电阻 R_K 及等值电抗 X_K	$Z_K = U_K / I_K$ $R_K = P_K / 3I_K^2$ $X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$
3	求取电机的 R 、 X 、 Z	对 E、B 级绝缘： $R = R_K$ 对 F、H 级绝缘： $R = 1.13R_K$ $X = X_K \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
4	求堵转电流 I_{KN} 及其有功分量 I_{KR} 和无功分量 I_{KX}	$I_{KN} = U_N / Z$ $I_{KR} = I_{KN} R / Z$ $I_{KX} = I_{KN} X / Z$
5	求取额定功率 P_N 时的效率 η 、功率因数 $\cos\varphi$ 、转差率 s 和定子电流 I_1 的预备参数	$K = I_{KR} - I_{OR} \quad H = I_{KX} - I_{OX}$ $I_{2K} = \sqrt{H^2 - K^2}$ 由 $\tan\alpha = H / K$ 求出 α 、 $\cos\alpha$ 、 $\sin\alpha$ $K_1 = I_{2K}^2 R_1 / U_N$ $K_2 = K_1 R_2 / R_1 \text{ (对绕线转子电动机)}$ $K_2 = K - K_1 \text{ (对普通笼形转子电动机)}$ $I_R = (P_N + P_s) / 3U_N$ $a = 0.5 I_{2K} - I_R \cos\alpha$ $b = a - \sqrt{a^2 - I_R^2}$ $b_1 = b \cos\alpha \quad b_2 = b \sin\alpha$ $c = b_1 K_2 / K$ $d = c - I_R$
6	满载定子电流有功分量 I_{1R} 满载定子电流无功分量 I_{1X} 定子电流 I_1	$I_{1R} = I_{OR} + b_1 + I_R$ $I_{1X} = I_{OX} + b_2$ $I_1 = \sqrt{I_{1R}^2 + I_{1X}^2}$
7	功率因数 $\cos\varphi$	$\cos\varphi = I_{1R} / I_1$
8	转差率 s	$s = c / d$
9	求出 5 项损耗 P_{Fe} 、 P_m 、 P_{Cu1} 、 P_{Cu2} 、 P_s 后，求总损耗 ΣP	铁心损耗 P_{Fe} 和机械损耗 P_m 由空载试验获得；定子铜损耗 $P_{Cu1} = 3 I_1^2 R_1$ ；杂散损耗 P_s 由试验或推荐值得到；转子铜（铝）损耗用公式 $P_{Cu2} = s (P_N + P_m + P_s) / (1 - s)$ 求得 $\Sigma P = P_{Fe} + P_m + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_s$
10	求满载效率 η	$\eta = [P_N / (P_N + \Sigma P)] \times 100\%$

表 4-19 深槽式和双笼型电动机的性能参数圆图计算法计算过程

序次	项 目	计算过程及说明
1	求空载电流的有功分量 I_{0R} 求空载电流的无功分量 I_{0X}	$I_{0R} = P_0 / 3U_N$ $I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2}$
2	由 $f = f_N$ 堵转试验求取： 等值阻抗 Z'_k 、等值电阻 R'_k 及等值电抗 X'_k	$Z'_k = U'_k / I'_k$ $R'_k = P'_k / 3I_k'^2$ $X'_k = \sqrt{Z_k'^2 - R_k'^2}$
3	由 $f = 0.5f_N$ 堵转试验求取： 等值阻抗 Z''_k 、等值电阻 R''_k 及等值电抗 X''_k	$Z''_k = U''_k / I''_k$ $R''_k = P''_k / 3I_k''^2$ $X''_k = \sqrt{Z_k''^2 - R_k''^2}$
3	求取电机的 R 、 X 、 Z (1) 求系数 h 和 m (2) 求等值电阻 R (3) 求等值电抗 X (4) 求等值阻抗 Z	$h = (2 X''_k - X'_k) / (R'_k - R''_k)$ $m = (4 + h^2) / 3$ $R = R'_k - m(R'_k - R''_k)$ 对 E、B 级绝缘 $R = 1.13[R'_k - m(R'_k - R''_k)]$ 对 F、H 级绝缘 $X = X''_k + m(2 X''_k - X'_k)$ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
4	求额定电压堵转电流 I_{KN} 及其有功分量 I_{KR} 和无功分量 I_{KX}	$I_{KN} = U_N / Z$ $I_{KR} = I_{KN} R / Z$ $I_{KX} = I_{KN} X / Z$
5	求取额定功率 P_N 时的效率 η 、功率因数 $\cos\varphi$ 、转差率 s 和定子电流 I_1 的预备参数	$K = I_{KR} - I_{0R} \quad H = I_{KX} - I_{0X}$ $I_{2K} = \sqrt{H^2 - K^2}$ 由 $\tan\alpha = H / K$ 求出 α 、 $\cos\alpha$ 、 $\sin\alpha$ $K_1 = I_{2K}^2 R_1 / U_N$ $K_2 = K - K_1$ $I_R = (P_N + P_s) / 3U_N$ $a = 0.5 I_{2K} - I_R \cos\alpha$ $b = a - \sqrt{a^2 - I_R^2}$ $b_1 = b \cos\alpha \quad b_2 = b \sin\alpha$ $c = b_1 K_2 / K$
6	满载定子电流有功分量 I_{1R} 满载定子电流无功分量 I_{1X} 定子电流 I_1	$I_{1R} = I_{0R} + b_1 + I_R$ $I_{1X} = I_{0X} + b_2$ $I_1 = \sqrt{I_{1R}^2 + I_{1X}^2}$

续表

序次	项 目	计算过程及说明
7	功率因数 $\cos\varphi$	$\cos\varphi = I_{1R}/I_1$
8	转差率 s	$s = c/d$
9	求出 5 项损耗 P_{Fe} 、 P_m 、 P_{Cu1} 、 P_{Cu2} 、 P_s 后求总损耗 ΣP	铁心损耗 P_{Fe} 和机械损耗 P_m 由空载试验获得；定子铜损耗 $P_{Cu1} = 3 I_1^2 R_1$ ；杂散损耗 P_s 由试验或推荐值得到；转子铜（铝）损耗用公式 $P_{Cu2} = s (P_N + P_m + P_s) / (1 - s)$ 求得 $\Sigma P = P_{Fe} + P_m + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_s$
10	求满载效率 η	$\eta = [P_N / (P_N + \Sigma P)] \times 100\%$

第十三节 除效率以外其他 满载性能的确定方法

前面已经讲述了额定电压时的堵转电流、堵转转矩以及满载效率等三项性能考核指标的试验计算和确定方法。下面继续介绍满载功率因数、转差率、转矩、输入电流和温升的相关内容。为了和铭牌额定值相区别，而将这些量所用字母的下角标写成“L”，例如满载电流为 I_L 。以下的特性曲线都在图 4-30 中。

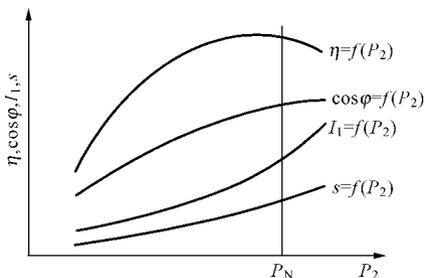


图 4-30 三相异步电动机工作特性曲线

一、满载功率因数的直接确定方法

当采用前面讲述的加额定电压和额定负载直接负载法进行试验时，先利用下述计算公式求得每一试验点的功率因数 $\cos \varphi$ ，然后再绘制功率因数 $\cos \varphi$ 和输出功率 P_2 的关系曲线（和效率曲线共用一个坐标系，其他性能曲线同此） $\cos \varphi = f(P_2)$ ，从该曲线上查取 $P_2 = P_N$ 时的功率因数值，即为满载功率因数 $\cos \varphi_L$ 。

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}I_1 U_1} \quad (4-73)$$

式中 $\cos \varphi$ ——每点的功率因数计算值；

P_1 ——每一点的三相输入功率，W；

I_1 ——每一点的输入线电流（三相平均值），A；

U_1 ——每一点的输入线电压（三相平均值），V。

二、满载转差率的直接确定方法

当采用前面讲述的加额定电压和额定负载的直接负载法进行试验时，先按所选用的测试方法求出每一试验点的转差率并换算到基准工作温度，然后

再绘制转差率 s 和输出功率 P_2 的关系曲线 $s = f(P_2)$ ，从该曲线上查取 $P_2 = P_N$ 时的转差率值，即为满载转差率 s_L 。

三、满载转矩的直接确定方法

同上述条件时，可先用式 (4-74) 求出各试验点的输出转矩值 $T (N \cdot m)$ ，再绘制转矩 T 与输出功率 $P_2 (W)$ 的关系曲线 $T = f(P_2)$ ，从该曲线上查取 $P_2 = P_N$ 时的转矩值，即为满载转矩 T_L 。

$$T = 9.549 \frac{P_2}{n} \quad (4-74)$$

式中 n ——对应试验点的转速，应由折算到基准工作温度时的转差率反算求得，即 $n = n_s (1 - s)$ ，其中 n_s 为被试电机的同步转速， r/min 。

还可以用前面求得的满载转差率求出满载转速后，用式 (4-74) 直接求出满载转矩。工作曲线中一般不出现转矩特性曲线。

四、满载输入电流的直接确定方法

同上述条件时，先求出各试验点三相输入线电流实测值的平均值 $I_1 (A)$ ，再绘制电流 I_1 与输出功率 P_2 的关系曲线 $I_1 = f(P_2)$ ，从该曲线上查取 $P_2 = P_N$ 时的 I_1 值，即为满载电流 I_{1L} 。

五、满载温升的直接确定方法

用上述方法求得满载定子电流后，用本章第九节《热试验》中式 (4-37) 或式 (4-38) 介绍的方法将热试验时得到的温升值进行电流修正，得出满载温升。

六、性能数据的间接确定方法

当无法采用前面讲述的方法进行试验时，满载效率和上述性能数据可采用间接法求得。常用的有圆图法和等效电路法。详见前面讲述的相关内容。

第十四节 最大转矩、最小转矩、转矩—转速特性曲线的测定试验

一、最大转矩、最小转矩的定义和转矩—转速特性曲线

(一) 最大转矩的定义

三相异步电动机的最大转矩是指电动机在额定电压和额定频率下，所产生的无转速突降的稳态异步转矩最大值（本定义不适用于转矩随转速增加而连续下降的电动机），符号为 T_{\max} ，如图 4-31 所示。

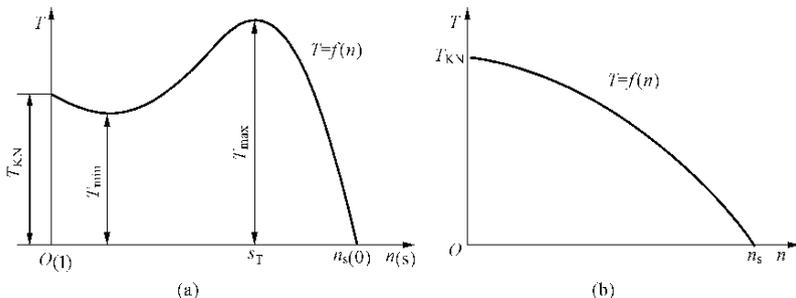


图 4-31 三相异步电动机的转矩-转速（或转差）特性曲线

(a) 一般电动机；(b) 转矩随转速的升高一直下降的电动机（例如力矩电动机）

(二) 最小转矩的定义

三相异步电动机的最小转矩是指电动机在额定电压和额定频率下，在零转速（起动时）与对应于最大转矩的转速之间所产生的稳态异步转矩的最小值（本定义不适用于转矩随转速增加而连续下降的电动机，见图 4-31，符号为 T_{\min} 。

这里应当注意的是“稳态异步转矩的最小值”几个字。因为在实际测试中，最小转矩点附近的一段区域内，转矩值一般是跳动很大的振荡曲线，从定义来看，应取其平均值为最小转矩结果，而不应取振荡曲线的最低值，如图 4-37 所示。

(三) 转矩-转速（或转差）特性曲线

图 4-31 (a) 为一般用途三相异步电动机的转矩-转速（或转差）曲线，称为 $T-n$ 曲线或 $T-s$ 曲线，习惯称为 $M-s$ 曲线（因为以前曾用符号 M 代表转矩）。其中，对应于最大转矩点的转差率称为“临界转差率”，用 s_T 表示。

由电机理论可知， s_T 与转子电阻成正比。所以，改变转子电阻的大小，

可以改变最大转矩点的前后位置，转子电阻大到一定值时，最大转矩可最终移到起动点，即 $s=1$ 点，见图 4-32，这一情况即前边定义中所注的转矩随转速的增加而连续下降的电动机所具有的特性。

二、求取最大转矩和最小转矩的目的

求取最大转矩的目的是考核被试电动机的短时过载能力。求取最小转矩的目的是考核被试电动机的起动能力。

三、实测最大转矩的方法

国家标准规定，100kW 以下电动机的最大转矩应采用实测法。

(一) 接近额定电压时的实测试验和计算方法

试验时，要求产生最大转矩时的电机端电压应在被试电机额定电压的 0.9 ~ 1.1 倍之内。此时用转矩与电压的平方成正比的关系对转矩进行修正才不会产生较大的误差。

1. 试验设备选用原则

测试三相异步电动机转矩-转速曲线的设备有如下几个主要部分组成：

(1) 被试电动机的电源。可选用第二章介绍的几种交流调压电源，最高电压应不低于被试电机额定电压的 1.2 倍。电源的容量应不小于被试电机额定容量的 6 倍。

(2) 被试电机电压及电流测量设备。可选用电动系电压表、电流表，也可选用数字式三相电流和电压表。当使用模拟式绘图仪（或称 X-Y 记录仪、函数记录仪）绘制转矩-转速曲线求取最大转矩时，要求同时在绘图仪上显示“电压-转速”曲线（最好还给出“电流-转速”曲线），此时则还应配备电压变送器（需要给出“电流-转速”曲线时，还需要电流变送器）。

(3) 试验负载和转矩测量设备。各种测功机都可以作为被试电动机的输出转矩测试设备并同时作为机械负载。

转矩-转速传感器加适当的机械负载组成的测功设备广泛用于本项试验。这主要是因为这种设备投资少、精度高，可方便地将转矩和转速信号通过二次仪表（转矩-转速仪）以数字量的形式同时显示出来，并可将模拟量送入到绘图仪中，或将数字量送入到计算机中，绘出转矩-转速特性曲线图。其机械负载可选用直流电机、磁粉制动器等。

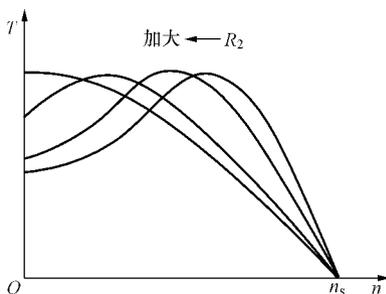


图 4-32 三相异步电动机转子电阻与最大转矩的关系

转矩-转速传感器的标称转矩 T_C (单位为 $N \cdot m$) 应参考设计值及其他同规格电机的实测值来确定 (后者更好), 一般应为上述数值的 1.2 倍左右。若无上述数值, 可在被试电动机额定转矩的 3 倍左右进行选择, 此时, 可根据被试电动机的额定功率 P_N (单位用 kW) 和极对数 p 用下式来估算

$$T_C = (8 \sim 12)pP_N \quad (4-75)$$

负载设备的额定功率折算到被试电动机的转速后 (一般按功率与转速成正比的关系进行折算), 应在被试电动机额定功率的 2 倍以上。

(4) 绘图仪器。转矩-转速曲线应采用仪器自动绘制。绘制仪器可用函数记录仪或其他绘图仪器 (包括计算机)。这些绘图仪应具备同时绘制两条 (或三条) 特性曲线的功能。也可在绘制一条曲线的同时, 将另一条曲线的数据暂存, 待第一条曲线绘制完成后, 再绘制第二条曲线。一条为“转矩-转速关系曲线”, 另一条为“电机端电压与转速的关系曲线”, 若有第三条, 则应是“被试电机定子电流与转速的关系曲线”。

另外, 若利用计算机进行电机试验的综合测量和绘制各种特性曲线, 则可将转矩-转速仪的模拟量或数字量输出接到计算机的接口上, 或将转矩-转速传感器的输出信号通过专用接口直接输入到计算机中, 再利用计算机中所加的专用软件, 在屏幕上显示和通过打印机打印出所要的上述曲线。

(5) 负载机械的负载。有些负载可将从被试电机方面吸收的机械能在其内部直接或间接地转化成热能消耗掉, 例如磁粉制动器和涡流测功机等。这类负载无须再加第二级负载。若所用负载设备是发电机, 则须将由机械能转化成的电能输出给另一级消耗电能的负载。此时, 可选用电负载, 如各种电阻负载、直流-交流机组反馈型负载等。

2. 使用转矩-转速传感器的设备组成和线路举例

设被试的三相异步电动机为 Y160L-4, 其额定功率为 15kW, 额定电压为 380V, 额定转速为 1420r/min。根据上述数据 ($P_N = 15\text{kW}$, $p = 4/2 = 2$), 可以确定:

(1) 电源调压器 T 最高输出电压应不低于 460V; 额定容量应不小于 90kVA; 可选用 100 kVA、输出电压为 0 ~ 650V 的三相感应调压器。

(2) 转矩转速传感器的标称转矩应为 $(8 \sim 12)pP_N = (8 \sim 12) \times 2 \times 15 = 240 \sim 360 N \cdot m$, 按照传感器的规格档次, 应选用标称转矩为 $500 N \cdot m$ 的传感器 ($500 N \cdot m$ 以下的一挡为 $200 N \cdot m$, 若被测电动机的最大转矩小于 3 倍额定转矩值, 则可以考虑使用)。

(3) 负载直流机容量不应小于 30kW, 额定转速为 1500r/min。可选用

Z4-180-21 型他励直流电机。

(4) 负载直流电机的电源部分可参考第二章有关内容, 建议采用可改变电源极性的双直流机组电源。当然, 若只考虑测试最大转矩部分曲线, 也可将直流发电机输出的直流电用电阻直接消耗掉。

(5) 绘图仪可选用任一型号的两笔或三笔函数记录仪 (X-Y 记录仪), 也可使用专用的计算机系统。

上述设备组成及线路如图 4-33 所示。

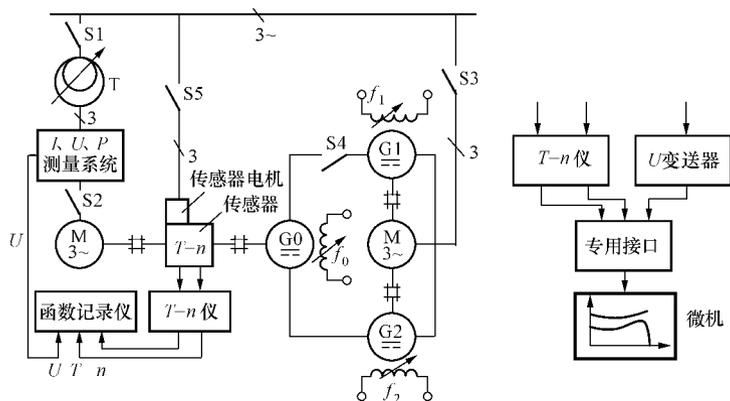


图 4-33 T-n、U-n 曲线测试设备及线路示意图

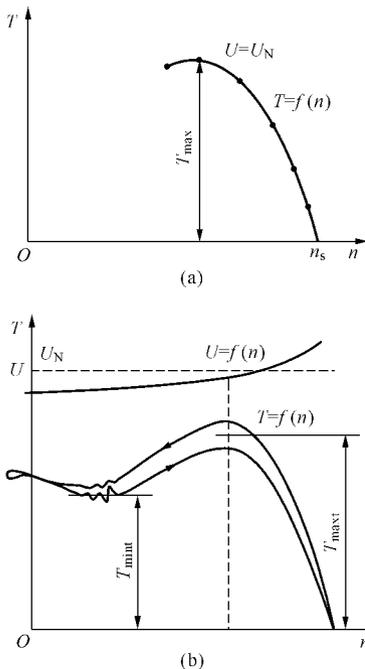
3. 使用转矩-转速传感器加直流机负载法时的试验步骤

使用转矩-转速传感器加直流机负载法时, 可使用描点法或连续绘图法进行试验。

(1) 描点绘制曲线的方法。可从空载开始, 逐渐加大负载, 并按一定的梯度 (例如一个梯度为额定转矩的 $1/10$) 设定一个试验点, 在一个试验点上稳定运转一定时间, 待显示数据稳定后, 记录下相关数据, 再调高到下一个试验点进行试验, 直至使转矩值达到某一最大值后开始下降为止, 在接近最大值时应减缓增加负载的速度。试验时同时记录各点的转速和电压值, 有要求时还应记录电流值。如图 4-34 (a) 所示。

按与电压的平方成正比的关系将各试验点的转矩值修正到额定电压的数值后, 在一张坐标纸上点出转矩与转速的对应坐标点, 并将各点连成一条光滑的曲线, 被试电动机的最大转矩从曲线上求得。

(2) 连续绘制曲线的方法。只要配置了绘图仪或计算机测试系统, 一般都采用连续调节负载的方法, 并连续地绘制出空载至超过最大转矩之间减速和加速的两



4-34 接近额定电压时的实测转矩曲线
(a) 描点法的转矩-转速关系曲线；(b) 连续绘制的转矩-转速关系曲线和电压-转速关系曲线

条曲线。每条曲线测绘时间应在 10 ~ 15s 之内。同时测绘出转速与电压的关系曲线。

当试验时最大转矩点的电压不低于额定电压的 90% 时，可按转矩与电压平方成正比的关系将曲线上的两个最大转矩值修正到额定电压时的数值，两个数值的平均值即为所求的最大转矩值。如图 4-34 (b) 所示。

如果试验时最大转矩点的电压低于额定电压的 90%，则应重新调整电压进行试验。

(二) 电源和负载设备能力不足时的实测试验和计算方法

在国家标准中规定，若限于试验电源容量和负载设备的能力，对于 100kW 以上的被试电动机可采用降低电压进行试验的方法。此时电源的额定容量应不小于被试电机的 2 倍，负载可接受的功率应小于被试电机的额定功率。

按实际所用电源和负载设备的能力，在允许的最高电压及以下，用与

上述第 (一) 项讲述的各种方法测取 3 个或更多不同电压（电压值在额定值的 1/3 ~ 2/3 之间）时的最大转矩值。

用上述求得的几组数值，在对数坐标纸上绘制最大转矩与电压的关系曲线，若没有专用的对数坐标纸，则在普通坐标纸上作最大转矩与电压的对数关系曲线。向上延长曲线到电压为被试电机的额定电压为止。该点对应的转矩即为额定电压时的最大转矩，如图 4-35 所示。

四、最大转矩的圆图算法

(一) 有关说明

对 100kW 以上的电动机，如限于电源和负载设备的能力，或者因被试电机的结构特殊不能与试验负载联结（如立式电机），可采用绘制圆图法或圆图算法求取最大转矩。

实际上，圆图算法是将相关参数（对于图中来讲为线段或角）在圆

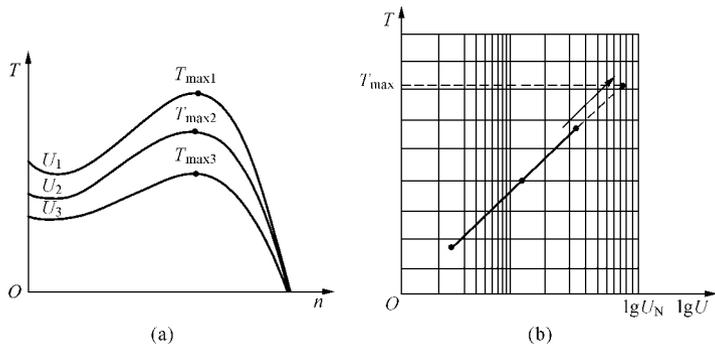


图 4-35 电源和负载设备能力不足时实测最大转矩的试验和计算方法
(a) 不同电压时的转矩-转速关系曲线;(b) 用最大转矩与电压的对数
关系曲线求取额定电压时的最大转矩

图中的几何关系转化成了数值运算关系。但圆图计算法和绘制圆图法相比，具有精度高和省时省力的优点，特别是使用了计算机编制试验报告后，编制一个很小的计算程序，计算机就会自动地将前面试验计算所得的相关数据取出，参与求取最大转矩的计算，不足 1s 的时间即可得到所要的结果。

虽然圆图算法已被广泛采用，但为了使读者了解它的来源，本书还是将圆图的绘制和通过圆图求取最大转矩的过程详细地介绍出来。

(二) 圆图绘制和求取最大转矩的过程

1. 绘制圆图所需的试验和试验数据

应注意，下述所要求的电流、电压和电阻都为相值。本部分包含笼型转子和绕线转子的内容。

(1) 测定被试电机的定子绕组相电阻，并将其换算到基准工作温度时的数值，该值用符号 R_1 表示，单位为 Ω 。

(2) 进行空载试验，得出额定电压及额定频率时的空载相电流 I_0 (A) 和空载输入功率 P_0 (W)、机械损耗 P_m (W)。

(3) 进行堵转试验，求得 2.5 倍额定相电流 I_K (A) 对应的相电压 U_K (V) 以及堵转输入功率 P_K (W)。

(4) 电机的额定功率 P_N (W)、额定相电流 I_N (A)、额定相电压 U_N (V) 和额定转差率 s (实际值，不是百分数)。

2. 计算求取绘制圆图的数据

计算求取绘制圆图的数据相关项目和计算公式见表 4-20。

表 4-20 计算求取绘制圆图的数据相关项目和计算公式

序次	项 目	计 算 公 式
1	求空载电流有功分量	$I_{0R} = (P_0 - P_m) / 3U_N$
2	求空载电流无功分量	$I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2}$
3	求额定电压时的堵转功率	$P_{KN} = P_k (I_{KN} / I_k)^2$
4	求额定电压时的堵转电流	$I_{KN} = I_k U_N / U_k$
5	求堵转电流有功分量	$I_{KNR} = P_{KN} / 3U_N$
6	求堵转电流无功分量	$I_{KNX} = \sqrt{I_{KN}^2 - I_{KNR}^2}$
7	求定、转子绕组的合成电阻	$R_1 = P_{KN} / I_{KN}^2$ (笼型转子) $R_1 = R_1 + K_2^2 R_2$ (绕线转子)

3. 绘制圆图及求取最大转矩的过程

下面介绍绘制圆图及求取最大转矩的过程，请参见图 4-36。

(1) 以电流为横轴，在横轴上选定比例尺 A/mm。应尽可能地将图作大，因图越大，作图越方便，同时越准确。

(2) 在纵轴上取 $ON' = I_{0R}$ 。

(3) 作 $N'N$ 平行于横轴，取 $N'N = I_{0X}$ 。

(4) 作直线 NU ， NU 与 $N'N$ 的延长线的夹角为 α ， $\sin\alpha = 2I_0 R_1 / U_N$ 。

(5) 在纵轴上取 $OS' = I_{KNR}$ 。

(6) 作 SS' 平行于横轴，取 $SS' = I_{KNX}$ 。

(7) 连接 NS 。 NS 被称为功率线。

(8) 作 NS 的垂直平分线，与 NU 交于 C 点。

(9) 以 C 点为圆心， CN 为半径作电流圆。

(10) 由 S 点作 SU 垂直于 NU 。

(11) 在 SU 上取 T 点，使 $TU = SU \cdot R_1 / R_1$ ，连转矩线 NT 。

(12) 作 CT_m 垂直于 NT ，并与电流圆交于 T_m 点。

(13) 由 T_m 点作 $T_m T'_m$ 垂直于 NU ，并与 TN 交于 T'_m 点。

(14) 最大转矩 T_{max} ($N \cdot m$) 按下式计算

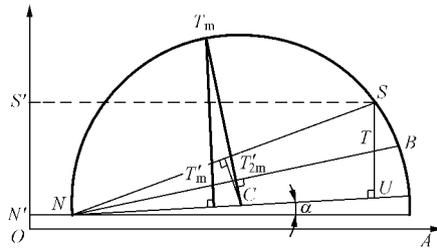
$$T_{max} = 9.549 \times 3U_N \cdot A \cdot \overline{T_m T'_m} \cdot \beta / n_s = 28.647 U_N \cdot A \cdot \overline{T_m T'_m} \cdot \beta / n_s$$

式中 U_N ——电动机的额定相电压，V；

A ——电流的比例尺，A/mm；

$\overline{T_m T'_m}$ ——线段 $T_m T'_m$ 的长度，mm；

β ——电动机的容量系数，对 10kW 及以上的笼型转子电动机，取 0.9，对绕线转子及 10kW 以下的笼型转子电动机，取 1.0。



4-36 用圆图法求取三相异步电动机的最大转矩

(三) 用圆图计算法求取最大转矩的过程

用圆图计算法求取最大转矩所需要的试验数据和绘图法完全相同。表 4-21 给出了计算过程。其中转差率 s 和杂散损耗 P_s 如未实测，则按括号内的说明取值。

表 4-21 用圆图计算法求取最大转矩的过程

序次	项目	计算公式和说明
1	整理试验数据	(1) 空载三相定子电流平均值 I_0 、空载损耗 P_0 、机械损耗 P_m (2) 堵转 [$I_K = (2 \sim 2.5) I_N$] 三相定子电压平均值 U_K 、电流平均值 I_K 和输入功率 P_K (3) 换算到基准工作温度时的定子相电阻 R_1 及转差 s (可由额定转速求取)；杂散损耗 P_s (可取额定功率的 0.5%)
2	(1) 求取空载电流的有功分量 I_{0R} (2) 求取空载电流的无功分量 I_{0X}	$I_{0R} = (P_0 - P_m) / 3U_N$ $I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2}$
3	(1) 求取额定电压时的堵转电流 I_{KN} (2) 求取额定电压时的堵转功率 P_{KN} (3) 求取堵转电流的有功分量 I_{KNR} (4) 求取堵转电流的无功分量 I_{KNX}	$I_{KN} = I_K U_N / U_K$ $P_{KN} = P_K (U_N / U_K)^2$ $I_{KNR} = P_{KN} / 3U_N$ $I_{KNX} = \sqrt{I_{KN}^2 - I_{KNR}^2}$

续表

序次	项目	计算公式和说明
4	求取最大转矩的计算中间参数	(1) $K = I_{KNR} - I_{OR}$ (2) $H = I_{KNX} - I_{OX}$ (3) $r = 0.5(H + K^2/H)$ (4) $I_{2K} = \sqrt{K^2 + H^2}$ (5) $K_1 = I_{2K}^2 R_1 / U_N$ (6) 由 $\tan\beta = H/K_1$ 求出 β 和 $\tan(\beta/2)$ (7) $T = 3rU_N \tan(\beta/2)$ (8) $P_e = (P_N + P_m + P_s)/(1 - s)$
5	求取最大转矩倍数 K_T	$K_T = T_{\max}/T_N = \gamma T/P_e$ 式中： γ 为电机容量系数，对 10kW 及以上的笼型转子电动机，取 0.9，对绕线转子及 10kW 以下的笼型转子电机，取 1.0
6	求取最大转矩值 T_{\max}	$T_{\max} = K_T \cdot T_N$ 式中 T_N 为电机的额定转矩

五、最小转矩的测试方法

(一) 描点测试法

采用描点法单独测量最小转矩时，可先在低电压下确定被试电动机出现最小转矩的中间转速（一般为同步转速的 $1/13 \sim 1/7$ 范围内的某一转速，机组在该转速下能稳定运行而不升速）。断开被试电机的电源，调节测功机使其转速约为中间转速的 $1/3$ ，然后，合上被试电机的电源，调节测功机负载，直到转矩值达到最小。读取此转矩值和被试电机端电压。通过电压修正，得到额定电压时的最小转矩值。

(二) 测试转矩-转速曲线的求取方法

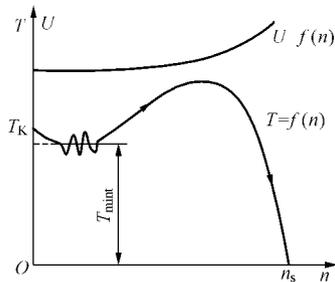


图 4-37 利用实测的转矩-转速特性曲线求取最小转矩

本试验一般和测取最大转矩试验同时进行，测绘出一条完整的转矩-转速曲线，然后取由堵转到空载的曲线上处于堵转至最大转矩对应的转速范围内的转矩最小值（修正到额定电压时的数值）即为最小转矩值。

试验设备及方法同前面讲述最大转矩测试时提到的转矩-转速曲线测绘相关内容。

应注意的是：所取数值应该是一个

较小区域内的平均值，而不应该是振荡波形的最小值，如图 4-37 所示。

试验时电机的电压应在额定值的 95% ~ 105% 范围内。否则，应调整电压重新试验。

当限于电源容量或负载设备能力不能将电压达到上述值时，可采用与最大转矩相同的降低电压法进行试验并绘制对数曲线求取额定电压时最小转矩。

(三) 实测法试验结果的计算

当试验时的电压 U_t 在 $(0.95 \sim 1.05) U_N$ 范围内时，应按与电压的平方成正比的关系将实测的最小转矩 $T_{\min t}$ 修正到 U_N 时的数值 T_{\min} ，即

$$T_{\min} = T_{\min t} \left(\frac{U_N}{U_t} \right)^2 \quad (4-76)$$

当 $U_t < 0.95 U_N$ 时，应在 $(1/2 \sim 2/3) U_N$ 范围内，均匀地测取 3 个或更多不同电压下的最小转矩 $T_{\min t}$ 。然后，作曲线 $\lg T_{\min t} = f(\lg U_t)$ ，并从该曲线的延长线上查出 $U_t = U_N$ 时的 T_{\min} 值，即为额定电压 U_N 时的最小转矩 T_{\min} 。有关方法和规定同最大转矩相关内容。

(四) 用反转制动法求取最小转矩

1. 说明

在不具备上述较先进的试验设备的单位，可采用反转制动法。应注意，该方法试验难度较大，需要较高的控制技术，用人较多并且必须配合得当，否则不但得不到所需数值，还有可能对被试电机造成较大的损坏。

本方法是 GB 1032—1968 中介绍的一种方法，在 GB 1032—1985 和 GB/T 1032—2005 中没再采用。其原因就是测量准确度较低、试验技术难度大和容易对设备及试验电动机造成损伤。之所以在此提出，只是想为不具备条件的场合提供一种可行的方法。

2. 试验设备及线路

将一台用作陪试的三相异步电动机与被试电动机用联轴器联结，所用的陪试电动机最好为 6 极及以上，在与被试电机同一转速时，其功率应为被试电动机额定功率的 1.5 ~ 2 倍。

陪试电动机应预先在测功机上进行校正，在 $(1/4 \sim 1/3) U_N$ 范围内测取 5 ~ 6 条反转制动特性曲线 $T = f(n)$ 。如图 4-38 所示，这些特性曲线应平滑，否则应重新选定电机进行校正。

被试电动机及陪试电动机各用一台调压器供电。试验线路如图 4-39 所示。

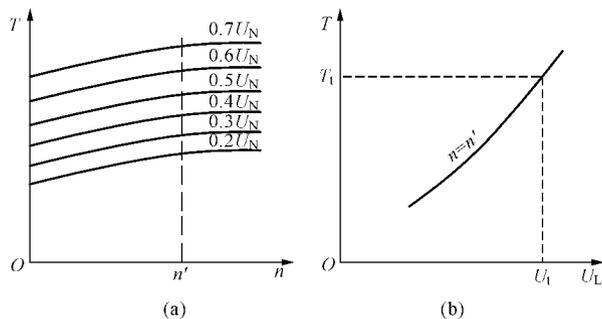


图 4-38 陪试负载电机的反转制动曲线

(a) $T=f(n)$ 曲线; (b) $T=f(U)$ 曲线

3. 操作步骤

(1) 分别给两台电机通电检查转向, 应使两者相反。

(2) 按被试电动机技术条件中规定的最小转矩保证值估算试验时可能出现的最小转矩值 (普通三相异步电动机实测的最小转矩为额定转矩的 1.0 ~ 1.8 倍), 再按被试电动机同步转速的 (1/13 ~ 1/7) 估算其中间转速, 从陪试电动机的制动曲线上估算相应的陪试电机外施电压。

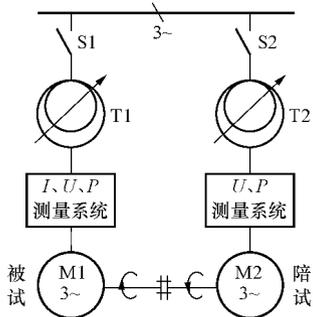


图 4-39 异步机反转制动法
测取最小转矩试验线路

接通电源前, 两电机电源电压应调至所需的数值。试验人员应做好明确分工, 并由一名有经验的试验员担任指挥。

(3) 试验时, 两台电机同时合电源后, 若机组按被试电动机的转向迅速启动至正常运行转速, 说明陪试电机制动转矩太小, 应断电停机。适当调高陪试电机的电源电压或降低被试电机的电源电压, 再次加电试验。如果通电后机组按陪试电机的转向在某一低转速下稳定运行, 则是制动转矩过大, 也应断电停机, 适当调低

陪试电机的电压, 再次加电试验。

当两电机通电后, 机组在被试电动机的某一中间转速稳定运行, 称为临界工作状态, 此时, 略微调高被试电动机的电源电压, 机组转速就会很快加速到正常值。迅速同时读取此时的转速、被试电动机的电压、电流和陪试电动机的电压。

电机每次通电调试时间一般不应多于 10s。为防止被试电动机过热，应在试验中采取有效的散热措施，或适当延长断电时间。因为过热会影响测试结果，严重时可能损坏电机。

4. 试验结果的计算

(1) 按试验中测得的中间转速 n' ，从陪试电动机的反转制动曲线 [见图 4-38 (a)] 上查出对应于 n' 的各电压与转矩值。利用这些值作曲线 $T=f(U_L)$ ，如图 4-38 (b) 所示。

(2) 根据所得的陪试电动机电压值 U_L ，从上述曲线 $T=f(U_L)$ 上查出对应的转矩 T_L ，此值即为被试电动机在电压 U_L 和电流 I_L 时的最小转矩 T_{\min} 。

(五) 一种定性的试验方法

当因被试电动机容量较大或试验设备能力不足等原因，不能实现上述的试验时，可使用异步电动机反转法得到一个是否合格的定性结果。

试验时需要一台与被试电动机同规格的已经作过堵转试验并得到了堵转特性曲线的电动机，作为陪试电机，用联轴器与被试电动机相联结，各用一台调压器或可调压的电源机组供电（试验线路见图 4-39）。

接线后，先分别用各自的电源供电，看其旋转方向，从同一方向来看应相反。

由陪试电动机的堵转特性曲线，查出等于被试电动机最小转矩合格数值 T_{\min} 的堵转转矩数值所对应的堵转电压 U_{K1} 。

事先将陪试电动机的电源电压调整到略大于上述电压值 U_{K1} （大出的多少视电源的容量大小而定，应尽可能保证在试验时所能保持的电压为 U_{K1} ）。被试电动机为略大于额定电压 U_N 。

先给陪试电动机加电压，待其还没来得及起动之前，给被试电动机加电压（此时陪试电动机的电压会下降很多，若所剩电压距离 U_{K1} 较大，则应迅速将其调整到等于或接近 U_{K1} ，或停机重新调整陪试电动机的电源电压后，再进行试验）。观察电动机的转向，若朝被试电动机应该的转向旋转并且加速到正常转速，则说明其最小转矩大于陪试电动机当时电压下的堵转转矩；若朝陪试电动机应该的转向旋转并且加速到正常转速，则结果也正好相反。只要能确定试验结果，就要尽快地断掉两台电动机的电源，以防止通电时间过长对电动机和试验线路及设备的损伤（因为此时两台电动机的电流都会很大）。

若是第一种结果，可将陪试电动机的电源电压调高一些，再进行上述试验，如试验电源和线路允许，可作到出现第二个结果为止。此时，可粗略地

得到被试电动机的最小转矩数值，即出现第二个结果之前的那次试验中陪试电动机所加电压时所对应的堵转转矩。

为了防止参与试验的电动机和试验设备过热，每次试验之间应给出一定的间隔时间。

应该说明的是：本方法是作者实践中曾经使用过的方法，虽然和上述第（四）项介绍的反转制动法基本相同，但还是不完全一样，更不是国家和行业标准中规定的内容，所以仅供读者参考使用。

第十五节 振动的测量、评定及限值

电机振动的测量、评定及限值的现行国家标准为 GB 10068—2000《轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值》，它等效于国际电工委员会的标准 IEC 60034—14：1996。该标准适用于额定输出功率为 50MW 以下、额定转速为（600 ~ 3600）r/min 的三相交流和直流电机。对于立式电机和凸缘安装的电机，该标准仅适用于能在自由悬置状态下进行测量的电机。该标准不适用于在运行地点安装的电机。

一、对测量量值的规定

在 GB 10068—2000 中规定：振动测量量值是电机轴承处的振动速度有效值和轴承内部或附近的轴相对振动位移。

振动速度有效值用 V （或 v ）表示，单位用 mm/s。它是电机轴承振动烈度的判据。

轴相对振动位移是沿测量方向的振动位移峰-峰值。由于该标准中规定本项考核仅对用滑动轴承、额定功率大于 1000kW 的 2 极和 4 极电机，超出了本书的适用范围，故不作介绍。

另外，某些出口电机和一些国内电机用户还采用振动振幅值来考核电机的振动，振幅值又分为单振幅和双振幅两种。后者又称为峰-峰值，用 S_{p-p} 表示，单位一般用 mm。

二、测量仪器及设备

（一）测量仪器

测量电机振动速度有效值和振动振幅值的仪器简称为“测振仪”。图 4-40 是我国生产的几种便携式测振仪外形。测量所用的传感器装置的总耦合质量应小于被试电机质量的 1/50，以免干扰被试电机运行时的振动状态。

（二）半键

对轴伸带键槽的电机，如无专门规定，测量振动时应在轴伸键槽中填充一个半键。半键可理解成高度为标准键一半的键或长度等于标准键一半的键。前者简记为“全长半高键”，后者简记为“全高半长键”，见图 4-41。

应当注意的是：配用这两种半键所测得的振动值是有差别的。因前者与调电机转子动平衡时所用的半键相同，所以，在无说明的情况下，一般应采用前一种，后一种只在某些特殊情况下使用，例如在用户现场需要测量振动，但没有加工第一种半键的能力时。

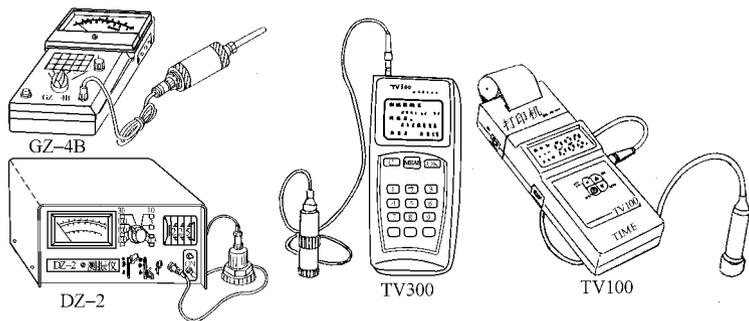


图 4-40 几种国产便携式测振仪外形

(三) 弹性悬挂或支撑装置

机座号为 400 及以下的电机应采用弹性安装；机座号大于 400 的电机可采用弹性安装，也可采用刚性安装。弹性安装是指用弹性悬挂或支撑装置将电机与地面隔离。弹性悬挂采用弹簧或强度足够的橡胶带等。

弹性支撑可采用乳胶海绵、胶皮（用于机座号大于 250 的电机）或弹簧等。为了电机安装稳定和压力均匀，弹性材料上可加放一块有一定刚度的平板。但应注意，该平板和弹性材料的总质量不应大于被试电机的 1/10。标准中没有规定弹性支撑海绵、胶皮垫和刚度过渡平板的尺寸要求，但在使用中，建议按电机噪声测试中的相关要求，即按被试电机投影面积的 1.2 倍裁制，或简单地按被试电机长（不含轴伸长）和宽（不含设在侧面的接线盒等）各增加 10% 作为它们的长与宽进行裁制。如图 4-41 所示。

当电机安装之后，弹性悬挂或支撑装置的伸长量或压缩量的最小值 δ (mm) 与其额定转速 n_N (r/min) 有关，应符合图 4-42 的规定。

标准中没有规定最大伸长或最大压缩量，但行业中一般掌握在原长的或原厚度的 0.4 倍。

电机在规定的条件下运转时，电机及其自由悬置系统沿 6 个可能自由度的固有振动频率应小于被试电机相应转速频率的 1/3。

电机转速频率 f_n (Hz) 用式 (4-77) 求取：

$$f_n = \frac{n}{60} \quad (4-77)$$

式中 n ——电机的转速，r/min。

固有频率 f_0 (Hz) 用式 (4-78) 求取：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4-78)$$

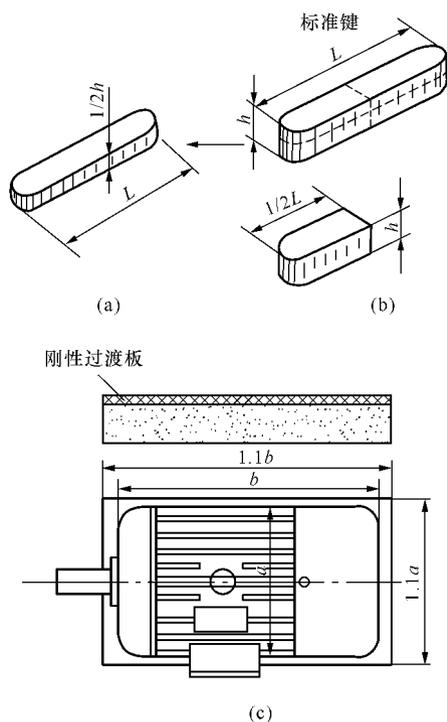


图 4-41 测振动用半键和弹性支撑器件

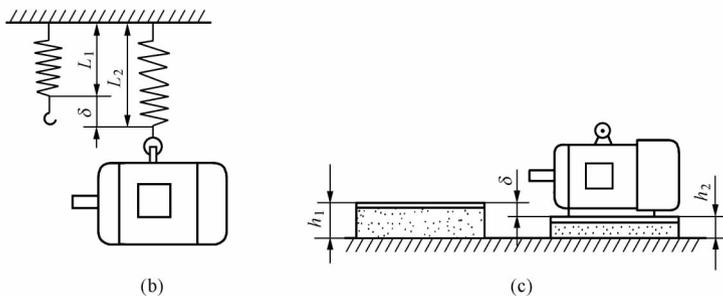
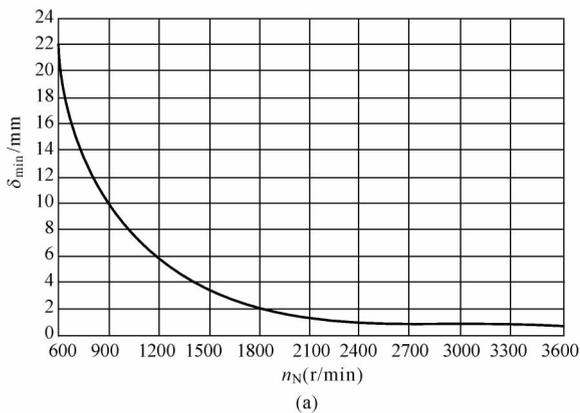
(a) 全长半高半键；(b) 全高半长半键；(c) 弹性支撑器件

式中： K 为弹性材料的弹性常数； m 为振动系统的质量。由于弹性常数 $K = \frac{mg}{\delta}$ ， g 为重力加速度，取 $g = 9800 \text{ mm/s}^2$ ； δ 为伸长量或压缩量，单位为 mm 。所以式 (4-78) 可简化为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} \approx 0.5 \sqrt{\frac{1}{\delta}} \quad (4-79)$$

$$\delta = 0.25 \frac{1}{f_0^2} \quad (4-80)$$

当 $f_0 = \frac{1}{3} f_n = \frac{1}{3} \times \frac{n}{60} = \frac{n}{180}$ 时，则有弹性悬挂最小伸长量或弹性支撑最小压缩量 δ 与电机转速 n 的关系式如下：



4-2 弹性悬挂或支撑装置的伸长量或压缩量的最小值与其额定转速关系图

(a) $\delta - n_N$ 关系曲线；(b) 弹性悬挂示意图；(c) 弹性支撑示意图

$$\delta = \frac{8100}{n^2} \quad (4-81)$$

图 4-42 (a) 即根据式 (4-81) 绘出的 (由于上述公式推导过程采用了近似值, 所以两者会有一定的差距)。表 4-22 给出了几对常用值, 使用中的其他转速可用式 (4-81) 计算求得。

表 4-22 测量振动时弹性安装装置的最小伸长或压缩量

电机额定转速 n_N (r/min)	600	720	750	900	1000	1200	1500	1800	3000	3600
最小伸长或 压缩量 δ (mm)	22	15.5	14.5	10	8	5.5	3.5	2.5	0.9	0.6

(四) 刚性安装装置

机座号大于400的电机一般采用刚性安装。刚性安装装置应具有一定的质量，一般应大于被试电机质量的2倍，并应平稳、坚实。

在电机底脚上，或在座式轴承或定子底脚附近的底座上，在水平与垂直两方向测得的最大振动速度应不超过在邻近轴承上沿水平或垂直方向所测得的最大振动速度的25%。这一规定是为了避免试验安装的整体在水平方向和垂直方向的固有频率出现在下述范围内：①电机转速频率的10%；②2倍旋转频率的5%；③1倍和2倍电网频率的5%。

(五) 对测试环境的要求

进行试验时，附近不应有其他较大的振动源，具体规定是：电机未运转时所测整个系统的静态振动速度值不应大于电机运转时所测振动速度的25%。

三、测定方法

(一) 安装

按有关要求选择安装方式和安装装置。对于刚性安装，电机应紧固在装置上，并避免因紧固力不均、安装平面不平等原因造成附加振动。对于V1型立式电机，应将电机安装在一个专用的台形支架上；对于B5型卧式电机，最好采用弹性悬挂的方法，如果设备条件不足时，对较小的电机，可直接放在海绵垫上，电机较大时，建议放在一个合适的V型支架上，支架与电机之间应加垫海绵或胶皮等物质以减少附加振动和噪声，如图4-43所示。

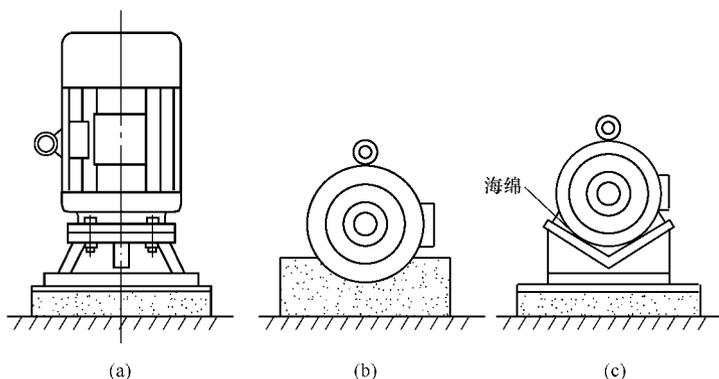


图4-43 V1和B5型电机的安装

(a) V1型通过台型支架安装；(b) B5型直接放在海绵垫上；

(c) B5型通过V型支架安装

(二) 安装半键

将合适的半键全部嵌入键槽内。当使用“全高半长”半键时，应将半键置于键槽轴向中间位置。然后，用特制的尼龙或铜质套管将半键套紧在轴上。无这些专用工具时，可用胶布等材料将半键绑紧在轴上。如图 4-44 所示。固定一定要绝对可靠，以免高速旋转时甩出，造成安全事故。

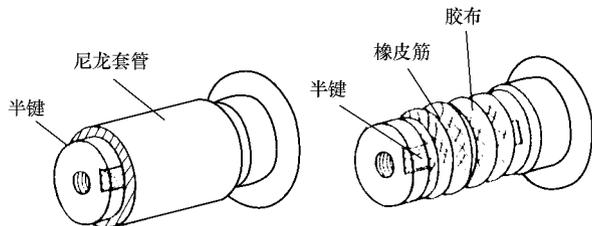


图 4-44 半键安装要求

(三) 电机运行状态

如无特殊规定，电机应在加额定频率的额定电压无输出的空载状态下运行。对多速电动机，应分别在每一个转速下运行和测量。对调速电动机，应在整个调速范围内进行测量或通过试测找到最大振动值的转速下进行测量。

(四) 测量点的位置

(1) 对带端盖式轴承的电机，按图 4-45 (a) 所示。

(2) 对不拆卸零部件不可能按上述图 4-45 (a) 布置测点的电机，则按图 4-45 (b) 所示位置。这是中小型电机常用的一种测点布置方法。

对于第⑥点，若因电机该端有风扇和风罩而无法测量，而该电机又允许反转时，可用反转后在第①点位置再测一次得到的数值代替要求的第⑥点。

(3) 对具有座式轴承的电机，按图 4-45 (c) 所示。

四、测量结果的确定

(1) 一般情况下，以所测所有数据中的最大一个数值作为该电机的振动值。

(2) 交流异步电动机，特别是 2 极电机，常常会出现 2 倍转差频率振动速度拍振，在这种情况下，振动烈度（速度有效值）可由式 (4-82) 确定：

$$V_{r.m.s} = \sqrt{\frac{1}{2}(V_{\max}^2 + V_{\min}^2)} \quad (4-82)$$

式中 V_{\max} ——最大振动速度有效值；

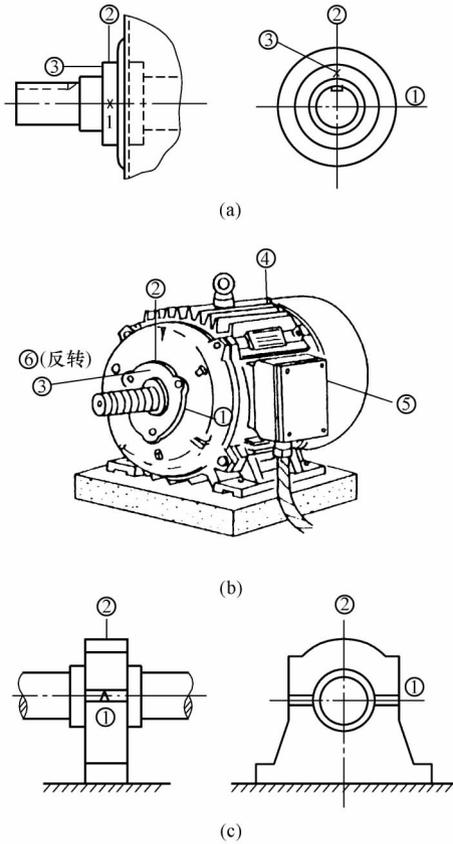


图 4-45 振动测点的布置示意图

注：图中①~⑥为测量点

(a) 用于电机一端或两端推荐测量点；(b) 不拆卸零部件，不能按图 (a) 测量时的测量点；(c) 座式轴承的测量点

V_{\min} ——最小振动速度有效值。

五、振动限值

(一) 振动烈度（振动速度有效值）限值

振动采用振动速度有效值，其限值应符合表 4-23 的规定。表中列出了 N、R、S 共 3 个等级，分别称为常规级（普通级）、降低级（较高级）和特殊级（优级）。一般应使用 N 级；R 级多用于机床电机；S 级则用于对振动

要求特别严格的特殊场合，并且仅适用于机座号为 400 及以下的电机。

对于要求比表 4-23 中数值更小的电机，推荐从数系 0.45、0.71、1.12、1.8mm/s 中选择限值。

制造厂和用户应考虑到检测仪器可能有 $\pm 10\%$ 的测量误差。

(二) 交流电机 2 倍电网频率振动速度的限值

2 极交流电机有明显的 2 倍电网频率振动。为了正确评定这部分振动成分，要求电机遵循前面所讲第三项内容的规定，进行刚性安装。

对轴中心高 $H > 225\text{mm}$ 的 2 极电机，上述评定应作为基本的电机型式试验内容，以确定明显的 2 倍电网频率振动的存在。若确实存在，则应采用刚性安装，且不应超过表 4-23 中 $H > 400\text{mm}$ 刚性安装时的振动限值。

表 4-23 电机振动烈度（速度有效值）限值 mm/s

等级	额定转速 (r/min)	电机在自由悬置状态下测量				刚性安装
		$56 < H \leq 132$	$132 < H \leq 225$	$225 < H \leq 400$	$H > 400$	$H > 400$
N	600 ~ 3600	1.8	2.8	3.5	3.5	2.8
R	600 ~ 1800	0.71	1.12	1.8	2.8	1.8
	>1800 ~ 3600	1.12	1.8	2.8	2.8	1.8
S	600 ~ 1800	0.45	0.71	1.12	—	—
	>1800 ~ 3600	0.71	1.12	1.8	—	—

第十六节 电机噪声测定方法及限值

有关电机噪声的国家标准有 GB/T 10069.1—2006 《旋转电机噪声测定方法及限值 第1部分：旋转电机噪声测定方法》和 GB 10069.3—2006 《旋转电机噪声测定方法及限值 第2部分：噪声限值》。注意后者是强制性标准。其中 GB/T 10069.1—2006 代替原有的 GB/T 10069.1—1988 《噪声工程测定方法》和 GB 10069.2—1988 《噪声简易测定方法》，GB 10069.3—2006 代替原有 GB/T 10069.1—1988 《噪声工程测定方法》，其基本内容与国际标准 ISO 1680：1999 《声学 旋转电机发射的空气噪声测试规程》完全一致，仅增加了在近似自由场声压法测试简化测点规定的附录和用振速法测试负载噪声的附录。

本节将重点介绍上述两个标准中的主要内容，另外介绍一些有关噪声的其他知识。

一、声音的量度

在此，只以声音在空气中的传播为例，并假定声源为一个质点。

(一) 声压和声压级

声波引起空气质点的振动，使得空气的压强在大气压强附近按声频起伏变化。这种压强称为“声压”，其单位用微帕（ μPa ）。有关压强的单位换算关系是：

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 = 10^{-5}\text{b} = 10\mu\text{b} = 0.1\text{mm 水柱} \quad (4-83)$$

在声学中，通常用声压级来代替声压作为声音的物理评价指标。声压级与声压的关系是：

$$L_p = 20\lg \frac{P}{P_0} \quad (4-84)$$

式中 L_p ——声压级，dB；

P ——声压， μPa ；

P_0 ——基准声压，是一个参考量，一般用最低可闻声阈的声压值，即 $20\mu\text{Pa}$ 作为基准声压。

声压级的单位（严格讲不叫单位）是分贝，符号为 dB。它是一个相对单位，没有量纲。分贝是贝尔的 $1/10$ 。

用声压级代替声压度量声音的好处是：可把一般人耳刚能听到的声压（ $20\mu\text{Pa}$ ）到可震破人耳膜的声压（ $20 \times 10^6 \mu\text{Pa}$ ）这一数百万级（ 10^6 ）声压值表示的声音量度范围缩小到 $0 \sim 120\text{dB}$ 的范围内，从而便于使用和分辨

记录。

(二) 声强和声强级

声强是在一定时间内稳定声场中瞬时声压与其声速度乘积的时间平均值，单位为 W/m^2 ，符号为 I_0 。

声学上也常用声强级（单位为 dB，符号为 L_I ）代表声强。它们之间的关系是：

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (4-85)$$

式中 I ——声强， W/m^2 ；

I_0 ——基准声强， W/m^2 ， $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ 。

(三) 声功率和声功率级

声功率是声源在单位时间内幅射的总声能，符号为 W ，单位为瓦（符号为 W ）。

声功率在声学中也常用声功率级（符号为 L_w ，单位为 dB）来表示。它们之间的关系是：

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (4-86)$$

式中 W_0 ——基准声功率， W ， $W_0 = 10^{-12} W$ 。

(四) 声功率级与声压级的关系

在现行的电机噪声考核标准中，大部分采用声功率级，少部分采用声压级。这是因为，声功率级只与声源的总功率有关；而声压级则与声压和测量点到声源的距离两个因素有关，即在给出声压级数值的同时，还应给出测量距离，所以表述不如声功率级方便。

到目前为止，还很少有能直接测量声功率级的仪器，而一般只能测量声压级。但可以根据测量时的一些具体参数，将声压级换算成声功率级。严格地讲，它们之间的换算关系是比较复杂的，与测量时的环境因素（如温度、气压、湿度的高低，以及试验地点所放置的其他物品的大小和反射声音的性能等）有关。但在一般测量中，可采用如下的简单关系式。

$$L_w = L_p + 10 \lg \frac{S}{S_0} \quad (4-87)$$

式中 S ——测量声压时，所用包络面的面积（具体计算见本节以后测量部分内容）， m^2 ；

S_0 ——基准面面积， m^2 ， $S_0 = 1 m^2$ 。

(五) 声级的计权

在表述噪声级测量方法和测量数值时，要注明它属于哪一种测量计权，

电机噪声测量一般采用“A”计权。

声级的计权是指使用仪器对人耳所能听到的声音频率范围内不同频率段的声级数值进行不同程度的衰减。有3种计权方式，分别用A、B、C三个字母表示。其中A计权是对500Hz以下的低频段进行较大衰减、对高频段较少衰减直至不衰减的一种计权方式，它较准确地反映了人耳对不同频率噪声的感觉程度，即对于相同声压或声功率的声音，人耳对频率较高的感觉较灵敏（或者说听起来感觉较刺激、难受），而对频率较低的感觉不太灵敏（或者说听起来感觉不太难受）。

一般人耳所能听到的声音频率范围在20~20000Hz之间。由此，低于20Hz的声音称为“次声波”，而高于20000Hz的声音称为“超声波”。人耳对频率在3000~5000Hz以内的声音感觉比较强烈。

二、测试仪器和设备

（一）声级计

声级计是用以测量声级数值的仪器，因常用于测量噪声声级，所以被习惯称为噪声仪。常用的声级计测量显示值为声压级值，具有A、B、C三种计权或只有A计权。声级计的准确度表示方法与其他仪表不同，它将不同最大误差的仪表分成4个类型号，各种类型声级计的最大误差和级别名称见表4-24。用于电机噪声测量时应选用I级的精密声级计。有些现在生产的声级计已不按此规定。

从测量数值的显示方式来分，常用的声级计有指针式和数字式两大类。另外，还有一种可通过测量电机的振动来转换成噪声级被称为“振动噪声仪”的噪声测量仪。图4-46是几种声级计的外观示例。

表4-24 声压级声级计准确度分类及级别名称对应表

类型号(级)	0	I	II	III
固有最大误差(dB)	±0.4	±0.7	±1.0	±1.5
级别名称	精密声级计		普通声级计	

（二）电机安装设备

电机进行噪声测试时，若为空载运行，则应根据被试电机的大小决定其安装设备。较小电机（一般规定机座号为400及以下）可采用弹性安装方式；较大电机通常采用刚性安装方式。其有关要求和电机振动试验设备基本相同。

对于弹性安装，弹性悬挂或支撑装置的最大（或最小）伸长量或弹性支撑最大（或最小）压缩量以及弹性支撑的面积和有效质量要求等与电机

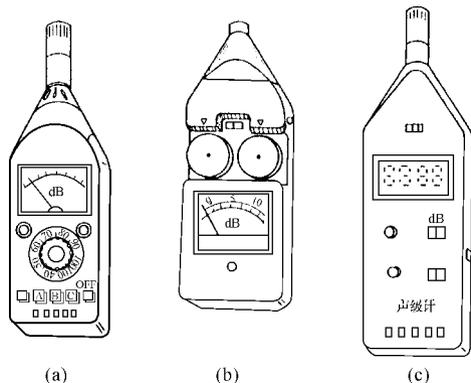


图 4-46 几种声级计的外观示例

(a) 指针式；(b) 轻便指针式；(c) 数字式

振动测量安装设备的有关要求完全相同（见本章第十五节）。

三、测试场地

进行电机噪声测试时，应有一个符合要求的测试场地，声学中称为“声场”。按严格要求，应为“半自由声场”。

“半自由声场”是除地面为一个坚实的声音反射面外，在其他方向，声波均可无反射地向无限远处传播的场地。实际上这种理想的场地是没有的。特别建造的消声室（可由四壁和屋顶的特殊材料将室内物体发出的绝大部分声能吸收而不反射）可认为基本符合要求。另外，空旷的广场或几百平方米以上平面面积和十几米以上高度的空房间也可认为基本符合要求。

对于一般电机生产和修理单位，建造标准的消声室是较困难的。除非要求特别严格，一般较空旷的场地或室内（被试电机周围 5m 以内无较大反射物）即可使用。有的资料中将这类场地称为“类半自由声场”。

如对测试结果的准确度要求较高，在“类半自由声场”或条件更差的场地进行测试时，还可通过有关反射影响的修正使测试结果达到要求。

四、电机噪声声压级的测量方法

（一）电机的安装

单台电机空载运行测试时，电机的安装方式、安装设备及相关要求与 GB 10068—2000 电机振动测量中的规定基本相同，不同点只在于可不安装本键。

较小电机可采用弹性安装方式；较大电机通常采用刚性安装方式。安装时，应注意尽量减少由包括基础在内的所有安装部件产生结构噪声的辐射和

传递。

电机采用刚性安装时，必须安装于适合该电机尺寸足够的面（例如按生产厂使用说明书规定的地脚或凸缘）上。电机不应由于受到不正确的垫片或紧固件调整而导致附加安装应力。

对于 VI 型立式电机，应将电机安装在一个专用的台形支架上；对于 B5 型卧式电机，当电机较小时，可直接放在海绵垫上，电机较大时，建议放在一个合适的 V 型支架上，支架与电机之间应加垫海绵或胶皮等物质以减少附加噪声，也可采用弹性悬挂的方法。安装示意图见图 4-43。

（二）电机的运行状态

如无特殊规定，测试时，电机应处于空载运行状态，并在可产生最大噪声的情况下运行。所供电源的质量应符合要求，这一点对测量结果的准确度很重要。

（1）应保持其电压和频率均为额定值。

（2）对于多速电机，应分别在各个转速下空载进行。

（3）对可逆运行的电机，应双向都可运行，除非两个方向的噪声不同才应按设计的一个方向进行试验。

（4）对用变频电源供电的异步电动机，应采用变频电源供电（变频器的规格型号应尽可能使用该电机将要使用的品种，否则有可能造成与使用现场不同的测量结果），并在规定的调频范围内进行试验。取最大值作为试验结果。建议先从最小频率到最大频率缓慢调频运行，找到最大噪声点后，再设定在该频率空载运行并测其噪声值。

当有规定时，电机可加规定的负载。

（三）电机噪声测量点的布置规定

以下内容是根据 GB/T 10069.1—2006 附录 C 并结合 GB 10069.1—1988 中相关内容给出的。

1. 半球面测点布置法

对于机座号（或中心高）为 225 及以下、长度不超过 1m 的电机，可采用半球面测点布置法布置测点。具体方法如下：

（1）将电机安放在测量场地的中心位置。以电机在地面（反射面）上的垂直投影中心为球心，想象出一个向下扣着的半球，所有测点都将在这个半球的表面上。

（2）根据被测电机的大小，半球的半径 r 有所不同，对机座号为 90 及以下的电机， $r=0.4\text{m}$ ，此时等效包络面（半个球面）的面积 $S=2\pi r^2=2\times$

$3.14 \times 0.4^2 \approx 1\text{m}^2$ ；对机座号为 100 及以上的电机， $r = 1\text{m}$ ，此时等效包络面（半个球面）的面积 $S = 2\pi r^2 = 2 \times 3.14 \times 1^2 \approx 6.28\text{m}^2$ 。

(3) 测试时，声级计的测头应距地面（反射面）250mm，并使其轴线对准半球包络面的球心。

(4) 测点个数，对机座号为 90 及以下的电机，规定为水平方向前、后、左、右共 4 个，机座号为 90 以上到 225 的电机，除上述 4 个点以外，还在电机的正上方距地面 1mm 的位置加 1 个点，其具体位置见图 4-47。有必要时，应将该布置图在测试报告中给出。

2. 平行六面体测试面测点布置法

机座号为 225 以上或长度超过 1m 的电机，应采用平行六面体测试面测点布置法。平行六面体测试面测点布置法曾被称为等效矩形或方箱形面测点布置法。它可以被想象为被试电机放在一个长方形的包装箱内，该包装箱的底就是安放被试电机的地面（或其他安装面），四壁和顶盖作为一个整体的“罩子”，所有测点将布置在这个长方体形的罩子上。各测点距被试电机表面的距离均为 1m。

对于较小尺寸的电机，可在电机的前、后、左、右及正上方各设置一个测点，四周几个测点距地面的高度为电机的轴中心高加弹性支撑的高度，但最低为 250mm，如图 4-48（a）所示；对较大尺寸的电机，当按上述方法布点，相邻两个测点之间的距离超过 1m 时，应适当增加测点，并调整测点位置，如图 4-48（b）所示。

设被试电机的长（不含轴伸）、宽（不含侧面的接线盒）、高（不含顶面的接线盒）分别为 L 、 M 、 H （见图 4-49）；并设 $a = 0.5L + 1$ ， $b = 0.5M + 1$ ， $c = H + 1$ 。则该测点包络面的面积 S （ m^2 ）为

$$S = \frac{4(ab + bc + ca)(a + b + c)}{a + b + c + 2} \quad (4-88)$$

3. 增加测点的原则

当按上述测点布置方法进行测量，出现两相邻测点的测量值相差超过 5dB 的情况时，应在这两点之间增加一点。对于半球面测点布置法，所加点的位置应处于图 4-50（a）所示的位置；对于平行六面体测试面测点布置法，应加在原两点的中间位置或长方形地面的顶点位置，如图 4-50（b）所示。加点的多少以达到两相邻点的测量值之差小于 5dB 为准。

五、对试验环境影响因素的修正

当试验环境的背景噪声（或称环境噪声）相对较大或周围的物体产生反射等对电机噪声测量值产生影响时，应对测量值进行适当的修正。具体规

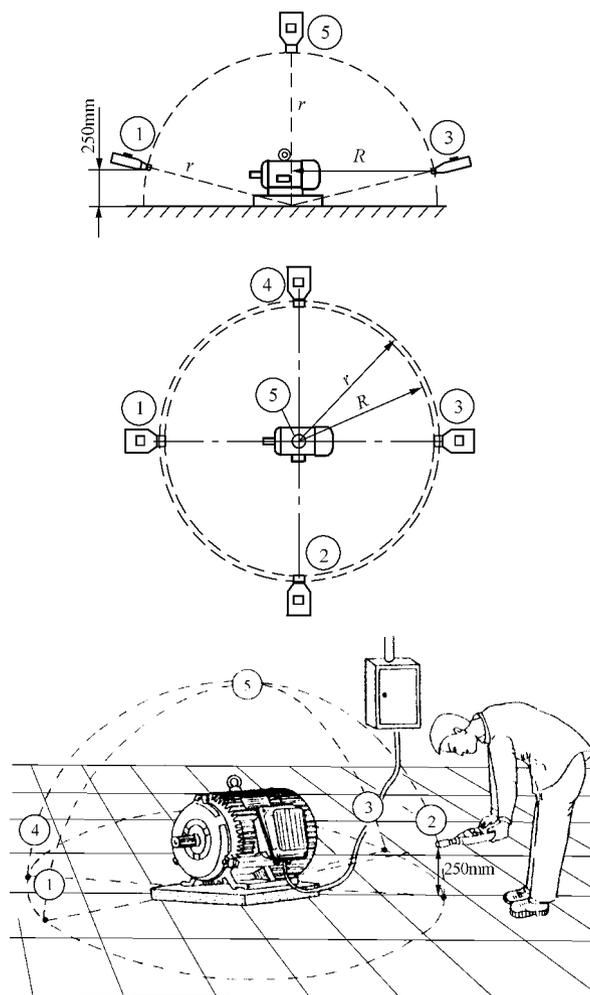


图 4-47 半球面测点布置法测点位置

定如下。

(一) 对试验环境背景噪声影响的修正

在 GB/T 10069.1—2006 中没有明确地给出对试验环境背景噪声影响的修正内容。以下给出的是 GB/T 10069.1—1988 中的规定，供参考使用。

设试验环境的背景噪声为 L_H ；试验测量值为 L_T ； $L_T - L_H = \Delta L$ (dB)。

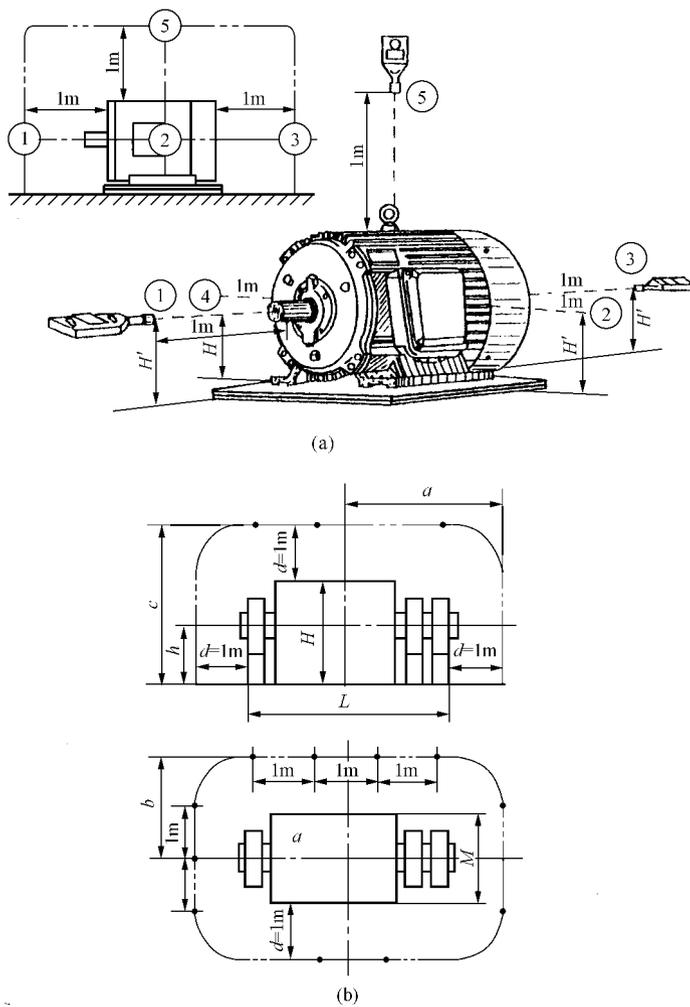


图 4-48 平行六面体面测点布置法测点位置

(a) 较小电机 5 点布置图；(b) 较大电机多点布置图

- (1) 当 $\Delta L > 10\text{dB}$ 时, 不必修正。
- (2) 当 $\Delta L < 4\text{dB}$ 时, 测量无效, 应设法降低背景噪声后重新试验。
- (3) 当 $4\text{dB} \leq \Delta L \leq 10\text{dB}$ 时, 应从试验测量值 L_T 中减去一个修正值 K_1 。

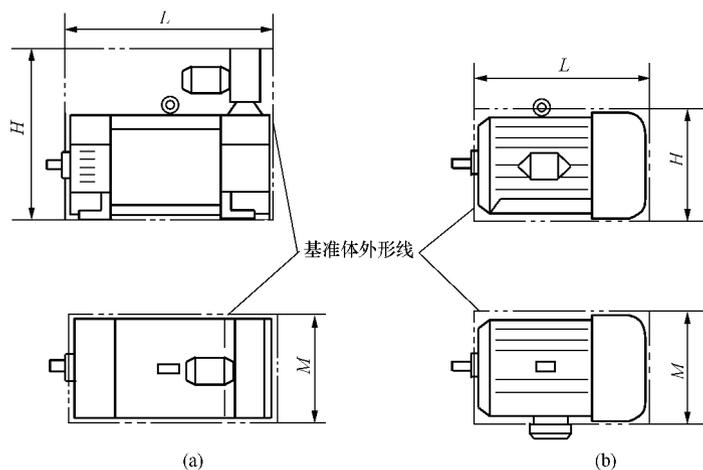


图 4-49 电机尺寸的确定实例

(a) 突出部分应考虑的电机电；(b) 突出部分不需考虑的电机电

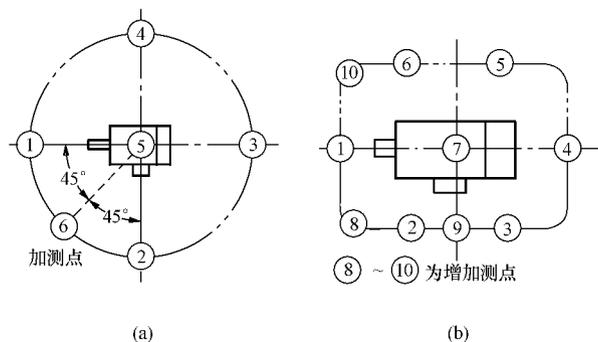


图 4-50 增加测点的位置

(a) 半球面测点布置法；(b) 平行六面体测试面测点布置法

修正值 K_1 见表 4-25 所列。当为非整数时，可通过插值法求取，或用表 4-25 提供的几个点绘制一条曲线，然后从曲线上查取。

 表 4-25 试验环境的背景噪声影响的修正值 K_1 dB

ΔL (dB)	4	5	6	7	8	9	10
修正值 K_1	2.2	1.7	1.3	1.0	0.8	0.6	0.4

例如, 试验环境的背景噪声为 $L_H = 65\text{dB}$; 试验测量值为 $L_T = 71\text{dB}$; 即 $\Delta L = L_T - L_H = 71 - 65 = 6\text{dB}$ 。由表 4-25 可得修正值 K_1 为 1.3dB , 则该点的实际噪声值 $L = L_T - K_1 = 71 - 1.3 = 69.7\text{dB}$ 。

(二) 对试验环境温度和大气压影响的修正

一般不考虑此项修正, 如有必要 (如该影响大于 0.5dB 时), 按式 (4-89) 进行计算修正值 K_2 。

$$K_2 = 10 \lg \left(\sqrt{\frac{293}{293 + t}} \times \frac{P_0}{100} \right) \quad (4-89)$$

式中 t ——试验环境温度, ;

P_0 ——试验环境的大气压强, kPa 。

(三) 对试验环境反射影响的修正

对试验环境反射影响的修正应根据测试环境而定。

(1) 当测试环境为自由场 (或标准的消声室内) 时, 不修正。

(2) 其他情况下, 按有关规定进行修正 (由于内容较复杂, 本书未给出)。

六、试验结果的确定方法

(一) 简易计算法

一般情况下, 可用取所有测量值的平均值, 再减去试验环境影响修正值的简单方法。即

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{i1} - K_1 \quad (4-90)$$

式中 n ——测点总数;

i ——测点序号;

L_{i1} ——第 i 点的实测噪声值, dB ;

K_1 ——修正环境噪声值, dB 。

例如, 5 个测量值分别为: $72, 75, 74, 73, 71$ (单位为 dB); 环境噪声为 65dB , 则计算步骤如下:

(1) 5 个测量值的平均值为 $(72 + 75 + 74 + 73 + 71) / 5 = 73\text{dB}$ 。

(2) 测量平均值和环境噪声的差值为 $73 - 65 = 8\text{dB}$, 由表 4-25 查得环境噪声修正值为 0.8dB 。

(3) 被测电机的实际噪声为 $73 - 0.8 = 72.2\text{dB}$, 按电机试验数据修约要求, 修约间隔为 0.5dB , 则最终结果应为 72dB 。

(二) 精密计算法

当有争议或需要精确结果时, 应利用下式进行计算求得最终结果 L 。

$$L = 10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_i - K_{i1})} \right] - K_2 - K_3 \quad (4-91)$$

式中 n ——测点总数；

i ——测点序号；

L_i ——第 i 点的实测噪声值，dB；

K_{i1} ——第 i 点的实测环境噪声修正值，dB；

K_2 ——对试验环境温度和大气压影响的修正值，dB；

K_3 ——对试验环境反射影响的修正值，dB。

以上面的实测数据为例，并假设试验环境温度和大气压影响的修正值和试验环境反射影响的修正值都为 0，用式 (4-91) 计算可得：

$$\begin{aligned} L &= 10 \lg \left[\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 10^{0.1(L_i - K_{i1})} \right] - 0 - 0 \\ &= 10 \lg \left[\frac{10^{7.1} + 10^{7.46} + 10^{7.34} + 10^{7.22} + 10^{6.97}}{5} \right] = 72.52 \end{aligned}$$

按电机试验数据修约要求，应为 72.5dB。

可见精密计算比简易计算多了 $72.52 - 72.2 = 0.32\text{dB}$ ，即相差 0.44%。

七、声功率级和声压级之间的转换

声功率级和声压级之间的关系在本节第一部分中进行了介绍，关系式为式(4-87)。

下面以实测噪声为声压级数值为例，举例介绍它们之间的转换关系。

(一) 半球面测点布置法转换关系

前面已经介绍，半球面测点布置法用于机座号（或中心高，下同）为 225 及以下、长度不超过 1m 的电机。

(1) 当球面的半径为 0.4m 时，半个球面的面积为 $2 \times 3.14 \times 0.4^2 = 1.0048 \approx 1\text{m}^2$ ，即式 (4-87) 中的 $S = 1\text{m}^2$ ，而 $10 \lg (1/1) = 0$ 。所以，这种情况下声功率级和声压级之间数值关系相等，即： $L_w = L_p$ 。

(2) 当球面的半径为 1m 时，半个球面的面积为 $2 \times 3.14 \times 1^2 = 6.28\text{m}^2$ ，即式 (4-87) 中的 $S = 6.28\text{m}^2$ ， $10 \lg (6.28/1) \approx 8$ 。所以，这种情况下声功率级和声压级之间数值关系为： $L_w \approx L_p + 8$ 。

(二) 平行六面体测试面测点布置法转换关系

平行六面体测试面测点布置法用于机座号（或中心高）为 225 以上或长度超过 1m 的电机。此时测量包络面的面积 S 用式 (4-88) 求取。表 4-26 给出了 Y 系列（IP44）及 Y2 系列（IP54）中小型电机使用本方法测

量包络面时，声功率级和声压级之间差值的计算平均值（误差在 ± 0.2 dB 之间），即式（4-87）中的 $10\lg \frac{S}{S_0}$ 。

表 4-26 Y (IP44) 及 Y2 系列 (IP54) 电机使用平行六面体测量包络面布点法测量噪声时，声功率级和声压级之间的差值

电机的中心高 (mm)	250	280	315	355	400	450	500
$10\lg (S/S_0)$ (dB)	12	12.2	12.7	13.3	13.7	14.5	16

八、电机负载噪声的测试方法

对电机加负载时所产生的噪声进行测定并给与评价，是真正有意义的工。Y2 系列 (IP54) 电机的技术条件以及新的噪声限值标准中已列出了负载噪声限值标准。但由于试验时受负载机械噪声的影响，使该项测量工作具有相当大的难度。

下面提供几种方法供大家参考选用。

(一) 外拖法 (负载隔离法)

被试电机置于噪声试验场内，负载机械置于与试验场地具有声隔离的地方，两者之间通过一根长轴联结。长轴两端和中间可加轴承座进行支撑并采用低噪声滚动轴承或滑动轴承；与电机联结的一端采用万向节，以利于不同中心高电机的安装联结。

试验时，被试电机加额定或规定的负载，运行到稳定后开始进行测量。

(二) 对拖叠加法

选择噪声比被试电机小 4dB 以上的负载设备（例如低噪声的磁粉制动器，也包括其他可用的电机，例如去掉外风扇可在短时间内安全运行的电机），通过联轴器与被试电机联结。当加负载运行达到稳定后，开始进行噪声测试（采用去掉陪试电动机外风扇降低环境噪声的方法时，可在此时去掉或关闭外风扇，也可采用封闭进风口的办法）。

试验时，先测出单台被试电机的空载噪声和与负载联结后空载运行的噪声差值 ΔL ，再测量规定的负载运行时的噪声值。被试电机的负载噪声即为上述所测负载噪声与 ΔL 之差。

为了尽可能地减小负载设备产生噪声的影响，可采用以下办法：

(1) 如用电机作负载，可用堵负载电机进风口的办法减小其通风噪声，这种办法对转速较高的电机效果最明显，但应注意时间不能过长。

(2) 用海绵或泡沫塑料等将负载设备盖住，在一定程度上隔离其噪声，同样应注意时间不能过长。

(三) 用测量电机的振动值来换算成噪声值的方法

1. 说明

利用声音是由机械振动所产生的原理，通过测量电机表面振动值，再利用一系列关系式进行换算得到被试电机的噪声值的办法，这是一种最不受环境及负载设备噪声影响的负载噪声测试方法。该方法现已由国家标准 GB/T 16539—1996《声学 振动法测定噪声声功率级用于封闭机器的测量》进行了详细的规定。

本方法一般需使用专用的振动噪声测量仪。图 4-51 给出了其中一种类型的外形图。

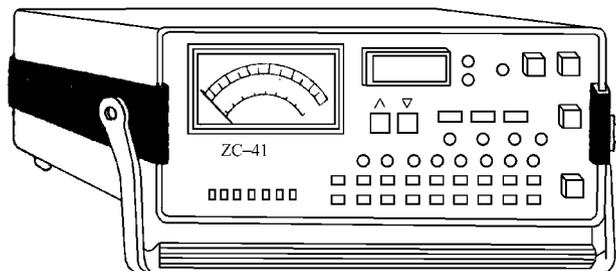


图 4-51 专用振动噪声测量仪示例

GB/T 1006.1—2006 的附录 D 讲述了用测振法测试电机负载噪声增量的程序，现摘录如下。

2. 对试验装配的要求

被试电机联结负载的装配应能保证平稳运行，不会产生附加噪声。在未加载时测得的振动速度声功率级不应大于单台电机空载振动速度声功率级 2dB，或加载时的振动速度声功率级不出现负增量，即使出现负值，也不应超过 -1dB。

3. 试验前的准备

必须按 1 级或 2 级精度的方法测定单台电机的空载声功率级 L_w 。

用堵进风口、拆除风扇或其他方法测定风扇声功率级 L_{FW} ；同一规格的电机可以只测一次，在风扇未改变设计时此数据可一直使用。

4. 负载噪声增量测试程序

(1) 电机在不加载的工况下运行，用振动噪声测量仪测定各点的速度级 L_{vi} ；此时振动噪声测量仪上声源尺寸档位置的确定应根据电机的长宽高的平均值设定。测点的配置与电机尺寸有关，机座号（原文为轴中心高）

为 225 以下且长度不超过 1m 的电机, 在端盖 1/2 半径处、接线盒旁、与接线盒成 90° 方向的机壳中心处以及风罩壳体 1/2 处 (无外风罩者, 则测相应机壳处) 共 4 点; 对机座号 (原文为轴中心高) 为 225 以上或长度超过 1m 的电机, 应适当增加测点均匀布于电机表面, 至少应在与接线盒成 90° 方向的机壳上增加 1 点, 即此处中心的两侧各布一个测点。

(2) 电机在额定负载的工况下运行, 按上述规定测定各点的速度级 L_{vin} 。

5. 测试结果的计算

(1) 电机外表面积 S_1 (m^2) 的计算。对一般基本系列, 当轴中心高为 H (m), 电机长 (不包括轴伸长) 为 L (m) 时

$$S_1 = 8H(H + L) \quad (4-92)$$

(2) 用测速法测定两种工况下速度功率级的计算。设测点数为 n , 未加载和加额定负载时的速度功率级 L_{v0} 和 L_{vn} 分别为

$$L_{v0} = 10 \lg \left[\left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{vi}} \right) / n \right] + 10 \lg S_1 \quad (4-93)$$

$$L_{vn} = 10 \lg \left[\left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{vni}} \right) / n \right] + 10 \lg S_1 \quad (4-94)$$

(3) 两种工况下声功率级的计算。未加载和加额定负载时的声功率级 L_{w0} 和 L_{wn} 分别为

$$L_{w0} = 10 \lg (10^{0.1L_{v0}} + 10^{0.1L_{pw}}) \quad (4-95)$$

$$L_{wn} = 10 \lg (10^{0.1L_{vn}} + 10^{0.1L_{pw}}) \quad (4-96)$$

(4) 负载噪声增量的计算。额定负载工况超过空载工况声功率级增加量 Δ 为

$$\Delta = L_{wn} - L_{w0} \quad (4-97)$$

九、电机噪声限值

在 GB 10069.3—2006 《旋转电机噪声测定方法及限值 噪声限值》和 GB 10069.3—2002 《小功率旋转电机噪声测定方法及限值》中分别给出了中、小型和微型旋转电机的噪声限值标准。

(一) 电机空载 A 计权声功率级限值

当电机在空载状态下运行进行噪声测试时, 其 A 计权声功率级限值如表 4-27 ~ 表 4-29 所列。表 4-27 和表 4-28 的限值是由测试不确定度等级为 2 级精度和生产离散性而确定的。

(二) 额定负载工况超过空载工况的 A 计权声功率级允许最大增加量

当要求测定和考核电机的负载噪声时, 其考核标准是同一台电机额定负载工况时所测噪声数值超过空载工况时所测噪声数值的 A 计权声功率级值。

其限值见表 4-30（此表对 50Hz 和 60Hz 电机供电均适用）。

表 4-27 冷却方式为 IC01、IC11、IC21、IC411、IC511、IC611 六种方式的
单速三相笼型感应电动机空载 A 计权声功率级限值 dB

额定输出功率 P_N (kW)	8 极		6 极		4 极		2 极	
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
$1.0 < P_N \leq 2.2$	71	71	71	71	71	71	81	85
$2.2 < P_N \leq 5.5$	76	76	76	76	76	76	86	88
$5.5 < P_N \leq 11$	80	80	80	80	81	81	91	91
$11 < P_N \leq 22$	84	84	84	84	88	88	94	94
$22 < P_N \leq 37$	87	87	87	87	91	91	96	100
$37 < P_N \leq 55$	89	90	90	91	94	95	98	101
$55 < P_N \leq 110$	92	93	94	95	97	98	100	104
$110 < P_N \leq 220$	96	97	98	99	101	102	103	107
$220 < P_N \leq 400$	98	99	101	102	105	106	107	110

表 4-28 中小型旋转电机（表 4-27 规定的除外）
空载 A 计权声功率级限值 dB

额定转速 n (r/min)	$n \leq 960$		$960 < n \leq 1320$		$1320 < n \leq 1900$		$1900 < n \leq 2360$		$2360 < n \leq 3150$		$3150 < n \leq 3750$	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
冷却方式类型	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
防护型式类型	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
输出功率 P_N (kW)	A 计权声功率级限值 (dB)											
$1 \leq P_N \leq 1.1$	73	73	76	76	77	78	79	81	81	84	82	88
$1.1 < P_N \leq 2.2$	74	74	78	78	81	82	83	85	85	88	86	91
$2.2 < P_N \leq 5.5$	77	78	81	82	85	86	86	90	89	93	93	95
$5.5 < P_N \leq 11$	81	82	85	85	88	90	90	93	93	97	97	98
$11 < P_N \leq 22$	84	86	88	88	91	94	93	97	96	100	97	100
$22 < P_N \leq 37$	87	90	91	91	94	98	96	100	99	102	101	102
$37 < P_N \leq 55$	90	93	94	94	97	100	98	102	101	104	103	104
$55 < P_N \leq 110$	93	96	97	98	100	103	101	104	103	106	105	106
$110 < P_N \leq 220$	97	99	100	102	103	106	103	107	105	109	107	110
$220 < P_N \leq 550$	99	102	103	105	106	108	106	109	107	111	110	113

注（1）表中冷却方式类型一栏的“ A ”代表 IC01、IC11、IC21 三种方式；“ B ”代表 IC411、IC511、IC611 三种方式。

（2）表中防护型式类型一栏的“ C ”代表 IP22、IP23 两种方式；“ D ”代表 IP44、IP55 两种方式。

表 4-29 小功率异步电动机 (IP44) A 计权声功率级限值

电机功率 (W)	6 ~ 50	>50 ~ 250	>250 ~ 750	>750 ~ 1000
同步转速 (r/min)	A 计权声功率级限值 (dB)			
1500	60	65	70	75
3000	65	70	75	80

表 4-30 额定负载工况超过空载工况的 A 计权声功率级允许最大增加量

额定输出功率 P_N (kW)	电 机 极 数			
	8	6	4	2
	负载超过空载的噪声最大限值 (dB)			
$1.0 < P_N \leq 11$	8	7	5	2
$11 < P_N \leq 37$	7	6	4	
$37 < P_N \leq 110$	6	5	3	
$110 < P_N \leq 400$	5	4	3	

第十七节 非正常工作条件试验

电机在运行时,有时会遇到来自电源、负载等的波动或意外变化造成的非正常工作条件。电机应具备应付这些非正常工作条件的能力,其中包括短时过电压、短时过转矩或偶然过电流(超载)、短时超速等。

在国家或行业标准中,规定了这些项目的试验方法和考核标准,其中有些考核内容是基本标准(例如 GB 755—2000)中的规定,有些电机的标准可能严于这些规定,届时应按被试电机的考核标准执行。对“短时过电压”一项是否进行,应按被试电机的考核标准执行,例如 Y 系列三相异步电动机的技术条件中就规定:“如果进行了匝间耐冲击电压试验,短时过电压试验可不进行”;而 Y2 系列(IP54)三相异步电动机的技术条件中根本就没有规定此项目;又如,对超速试验,GB 755—2000 中规定:“超速试验并非必要,但当有协议作出规定时应进行试验”。

以下文中: P_N 为电机的额定输出功率; U_N 为电机的额定电压; I_N 为电机的额定电流; n_N 为电机的额定转速。

一、偶然过电流试验

GB 755—2000 中提出:“规定旋转电机的过电流能力是为了使电机与控制和保护装置相匹配。本标准不要求作考核过电流能力的试验”。所以,是否进行试验以及考核标准,应按被试电机技术条件中的规定。

(1) 试验方法。 $P_N \leq 315\text{kW}$ 和 $U_N \leq 1\text{kV}$ 的三相异步电动机,电流达到 $1.5I_N$,历时不少于 2min;对 $P_N > 315\text{kW}$ 的三相异步电动机,不规定本项试验。

(2) 合格标准。试验后,电机绕组和转子等相关部件未发生损坏和有害变形,即为合格。

二、短时过转矩试验

(一) 试验方法

1. 一般用途的电动机

(1) 普通电动机:过转矩值至少为额定转矩的 1.6 倍,历时 15s,此时,电压和频率应保持额定值。

(2) S9 工作制的电动机按该工作制所规定的过转矩试验值。

2. 特定用途的电动机

(1) 对要求高起动转矩的电动机(如起重用电动机)和具有特殊起动

特性的电动机（例如用变频电源或由静止变流电源供电的电动机），按协议规定进行。

（2）特殊设计以保证起动电流小于 $4.5I_N$ 的笼形转子电动机，过转矩值可低于上述 1.（1）项（普通电机）规定的 1.6 倍额定转矩，但不应低于 1.5 倍额定转矩，历时 15s。

（二）合格标准

试验中，电动机的转速应无突变；试验后，各部件应无有害变形。

三、短时过电压试验

本项试验在有规定时进行。

（1）试验方法、电压值和加压时间。

1）试验时电动机的运行状态和有关规定。对于普通笼型转子电动机，试验时电机应处于空载运行状态。允许提高频率或转速，但不应超过额定转速的 115% 或超速试验中规定的转速；对绕线转子电动机，试验时转子应静止，转子三相绕组应开路。

2）试验电压。试验电压应为 1.3 倍定子额定电压。

3）试验时间。①一般电机为 3min。②在 130% 额定电压下空载电流超过额定电流的电机，可以缩短为 1min。

（2）合格标准。电机不出现冒烟、匝间短路等使绕组被损坏的现象为合格。

四、超速试验

（一）试验方法

不同的电机按不同的转速以空载转速运行进行超速试验，对与负载整体联结而不便临时脱开的电动机，“空载转速”应理解为最轻负载下的转速。如无特殊规定，各种电机的超速时间均为 2min。各种电机的超速值如下：

（1）一般用途的电机为 1.2 倍最高额定转速。

（2）在某种情况下可被负载反驱动的电机，为机组规定的飞逸转速，但不应低于 1.2 倍最高额定转速。

（二）合格标准

无永久性的异常变形和妨碍电机正常运行的其他缺陷，且转子绕组在试验后能满足耐电压试验的要求，则为合格。

五、小功率电机的较长时间堵转试验

（一）需进行本项试验的电机类型

当电动机用于下列场合时，应对其进行较长时间的堵转试验。

- (1) 电动机的堵转转矩小于其额定转矩。
- (2) 用手起动的电动机。
- (3) 用于远距离控制或自动控制设备中的电动机。
- (4) 用于无人看管并需要连续工作的电动机。

(二) 试验有关规定

(1) 对于电容电动机，除工作时有人看管外，要进行本项堵转试验。此时将电容器逐个地短路或开路，两者中选最不利的情况进行。

(2) 试验应在额定电压和电动机处于实际冷状态下加额定电压进行，从电动机通电开始计时。

(三) 堵转试验时间

(1) 对用于手持电器、手动开关控制通断电或类似工作状态的电气设备中的电动机，试验时间为 30s。

(2) 对用于必须有人操作看管的电气设备中的电动机（电容电动机电容器短路或开路堵转试验除外），试验时间为 5min。

(3) 对用于其他场合的电动机，试验时间为电动机达到热稳定状态所需的时间。

(4) 如果电动机用于有计时器控制工作时间的电器设备中，则试验时间为计时器允许的最长时间，但对于既可用计时器控制又可不用计时器控制的电器设备中使用的电动机，应按不用计时器控制的工作状态所规定的试验工作时间。

(四) 试验结果的判定标准

(1) 电动机在上述规定的堵转时间结束或保护器动作瞬间，其绕组温度不应超过表 4-31 中规定的限值（表中 E、B、F、H 为绝缘耐热等级）。

表 4-31 小功率电机的较长时间堵转试验后的绕组温度限值

被 试 电 机 类 型	被试电机的绝缘等级			
	E	B	F	H
	允许的极限温度 ()			
试验时间为 30s 或 5min，或由计时器控制工作时间和使用时有人看管的电动机	215	225	240	260
阻抗保护电动机	165	175	190	210
保护器在第 1h 内起保护作用的电动机	215	225	240	260
保护器在第 1h 后起保护作用的电动机	190	200	215	235

(2) 试验期间不应出现闪络或有熔化的金属。

(3) 试验结束并冷却至室温时，电动机应能承受 1000V、1min 耐交流电压试验而不击穿。

六、小功率三相电动机缺相运行试验

小功率三相异步电动机在额定电压和额定负载下，断开一相电源进行试验。试验时间和试验合格标准同上述第五项“小功率电机的较长时间堵转试验”中第（四）条的规定。

第十八节 电机外壳防护等级试验

电机外壳防护等级试验的有关内容在 GB 4942.1—2006《旋转电机整体结构的防护等级（IP 代码）分级》中给出。

一、有关规定

(1) 电机外壳防护等级试验所用电机应是清洁的新制品，所有部件均应就位，并按制造厂规定的方式安装。

(2) 两种防护等级中，“0”级均无需试验。

(3) 对于第一位表征数字（防固体能力）为 1 和 2，第二位表征数字（防液体能力）为 1~4 的防护等级，如直观检查已能断定达到所要求的防护等级时，则不须再做试验。但如有怀疑，则应按以下的规定进行试验。

(4) 在进行防液体试验时，如无规定，即认定为防水试验。

(5) 防水试验应用清水进行。在试验过程中，电机壳内的潮气可能部分凝结，应避免将冷凝的露水误认为进水；按试验要求，表面积计算的误差不应大于 10%。

(6) 在对电机通电情况下进行试验时，应采取充分的安全措施。

(7) 在下述条文中，术语“足够的间隙”的含义如下：

1) 对低压电机（额定电压不超过 1000V），除光滑的旋转轴等非危险部件外，试具（试球、试指或导线等）应不能触及带电或转动部件。

2) 对高压电机（额定电压超过 1000V），当试具置于最不利的各个位置时，电机应能承受适用于该电机的耐电压试验。

耐电压试验可用测量试具与电机壳内带电部件之间的空气间隙尺寸来代替。该间隙尺寸应能保证电机在电场分布最不利的情况下通过耐电压试验。

二、防固体能力试验方法及认可条件

（一）“1”级防护

用直径为 $50^{+0.05}_0$ mm 的刚性试球对外壳各开启部分加 45~55N 的力做试验。

如试球未能穿过任一开启部分并与电机内部运行时带电或转动部件保持足够的间隙，则认为符合要求。

（二）“2”级防护

1. 试验方法之一——试指试验

用图 4-52 所示的金属试指做试验。试指的两个关节可绕其轴线向同一

方向弯曲 90° 。用不大于 10N 的力将试指推向外壳各开启部分。如能进入外壳，应注意活动至各个可能的位置。试验时，应使机壳内转动部件缓慢地转动。如试指与壳内带电及转动部件保持足够的间隙，则认为符合要求。但允许试指与光滑的旋转轴及类似的非危险部件接触。

试验低压电机时，可在试指和机壳内带电部件之间接入一个串联有适当指示灯的低压电源（不低于 40V ）。对仅用清漆、油漆、氧化物及类似方法涂覆的导电部件，应用金属箔包覆，并将金属箔与运行时带电的部件连接。试验时如指示灯不亮，则认为符合要求。

试验高压电机时，用耐电压试验来检验足够的间隙或按本节第一条中（7）、2）项的原则测量间隙尺寸。

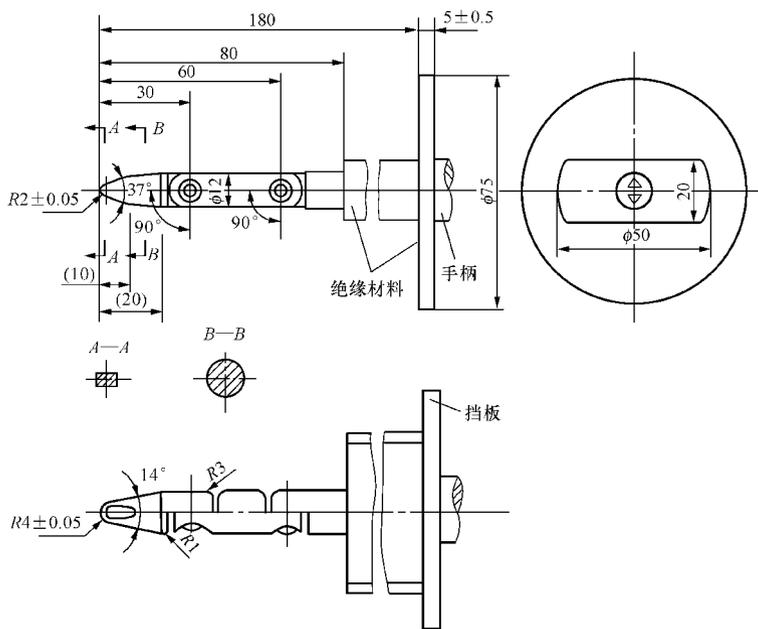


图 4-52 标准试指

2. 试验方法之二——试球试验

用直径为 $12.5^{+0.05}_0$ mm 的刚性试球对外壳各开启部分加 $27 \sim 33\text{N}$ 的力做试验。

如试球未能穿过任一开启部分，或进入的一部分与电机内部带电或转动

部件保持足够的间隙，则认为符合要求。

(三) “3”级防护

用直径为 $2.5^{+0.05}_0$ mm 直的钢丝或棒施加 2.7 ~ 3.3N 的力做试验。钢丝或棒的端面应无毛刺，并与轴线垂直。

如钢丝或棒不能进入，则认为符合要求。

(四) “4”级防护

用直径为 $1^{+0.05}_0$ mm 直的钢丝或棒施加 0.9 ~ 1.1N 的力做试验。钢丝或棒的端面应无毛刺，并与轴线垂直。

如钢丝或棒不能进入，则认为符合要求。

(五) “5”级防护

1. 防尘试验

用如图 4-53 所示的设备进行试验。在一个适当密封的试验箱内，盛有呈悬浮状态的滑石粉，滑石粉应能通过筛丝间名义宽度为 $75\mu\text{m}$ 、筛丝名义直径为 $50\mu\text{m}$ 的金属方孔筛。滑石粉的用量按每立方米试验箱容积 2kg 计算，使用次数应不超过 20 次。

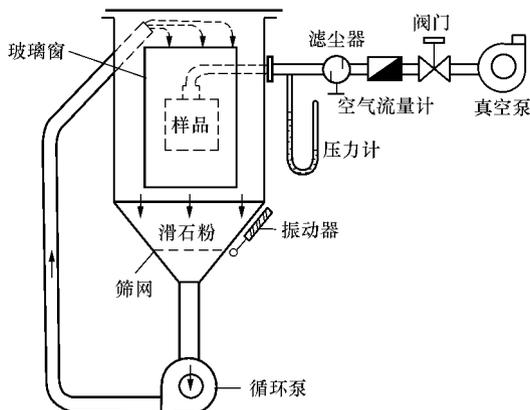


图 4-53 防尘试验设备

电机外壳属于第一种外壳，即在正常工作循环时，由于热效应而导致机壳内气压低于环境气压的外壳。

试验时，电机被支撑于试验箱内。用真空泵抽气，使电机壳内气压低于环境气压。如外壳只有一个泄水孔，则抽气管应接在专为试验而开的孔上，但对在运行地点封闭的泄水孔除外（此种泄水孔试验时应保持关闭）。

试验是利用适当的压差将箱内空气抽入电机。如有可能，抽气量至少为 80 倍壳内空气体积，抽气速度应不超过每小时 60 倍壳内空气体积。在任何情况下，压力计上的压差应不超过 2kPa (20mbar)，如图 4-53 压力计所示。

如抽气速度达到每小时 40 至 60 倍壳内空气体积，则试验进行至 2h 为止。如抽气速度低于每小时 40 倍壳内空气体积，且压差已达到 2kPa (20mbar)，则试验应持续到抽满 80 倍壳内空气体积或试满 8h 为止。

如不能将整台电机置于试验箱内做试验，可采用下述任一种方法代替。

(1) 用电机外壳的各独立部件，如接线盒、集电环罩壳等做试验。

(2) 用电机有代表性的部件，如门、通风孔、接合件或轴封等构件做试验。试验时，这些部件上密封薄弱部位所装的零件，如端子、集电环等，均应安装到位。

(3) 用与被试电机有相同结构比例的较小电机做试验。

(4) 按制造厂与用户协议的条件做试验。

上述 (2) 和 (3) 两种方法，试验时抽出电机的空气体积应为原电机所规定的数值不变。

试验后，如滑石粉积聚的量和部位同一般尘埃（如不导电、不易燃、不易爆或无化学腐蚀的尘埃）积聚的情况一样，不足以影响电机的正常运行，则认为符合要求。

2. 钢丝试验

如电机在运行中泄水孔是开启的，则应按“4”级防护的试验方法，用直径为 1mm 的钢丝做试验。

(六) “6”级防护

试验方法与“5”级基本相同。以无滑石粉进入为合格。

三、防液体（水）能力试验方法及认可条件

(一) “1”级防护试验方法

用滴水设备进行试验，其原理如图 4-54 所示。设备整个面积的滴水应均匀分布，并能产生每分钟 3~5mm 的降水量（如用相当于图 4-54 的设备，即每分钟水位降低 3~5mm）。

被试电机按正常运行位置放在滴水设备下，设备底部应大于被试电机。除预定安装在墙上或天花板上的电机外，被试电机的支撑物应不小于电机的底部。

对安装在墙上或天花板上的电机，应按正常使用位置安装在木板上，木

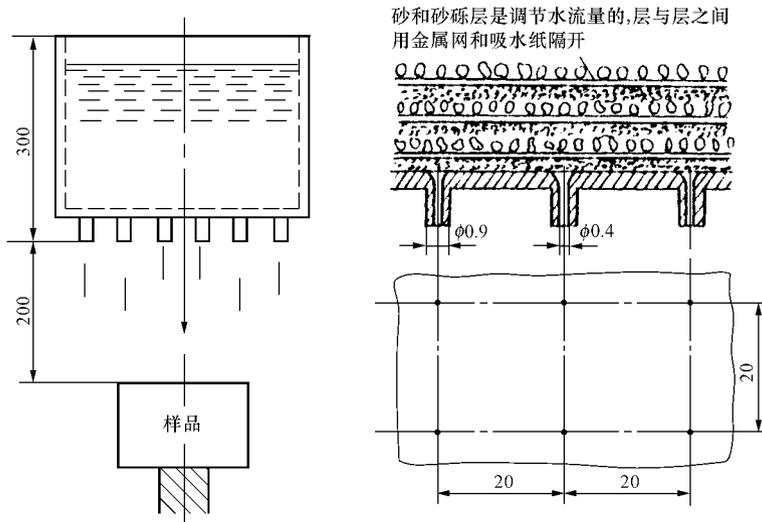


图 4-54 防滴试验设备

板的尺寸应等于电机在正常使用时与墙或天花板的接触面积。

试验时间为 10min。

(二) “2”级防护试验方法

滴水设备和降水量与第“1”级相同。

在电机 4 个固定的倾斜位置上各试验 2.5min，这 4 个位置在两个相互垂直的平面上与垂直线各倾斜 15° 。

全部试验时间为 10min。

(三) “3”级防护试验方法

当被测电机的尺寸和形状能容纳于如图 4-55 所示的半径不超过 1m 的摆管式淋水器下时，则用此设备进行试验。如不可能，则用图 4-56 所示的手持式淋水器进行试验。

1. 用摆管式淋水器进行试验

总流量应调整至平均每孔 (0.067 ~ 0.074) L/min 乘以孔数，总流量应用流量计测量。

摆管在中心点两边各 60° 角的弧段内部有喷水孔，并固定在垂直位置上。被测电机置于转台上并靠近半圆摆管的中心，转台绕其垂直轴线以适当

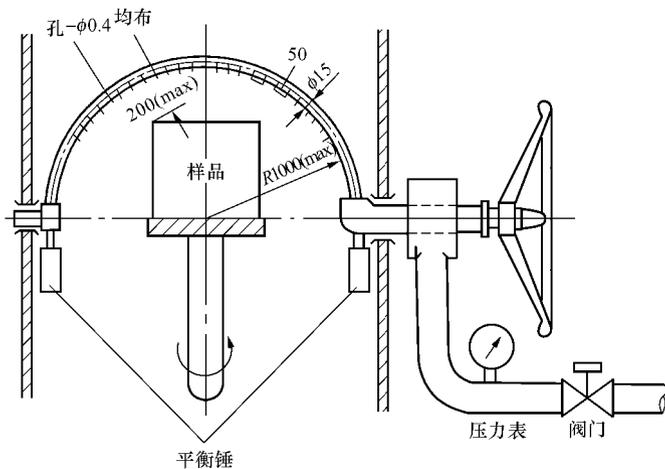


图 4-55 摆管式淋水和溅水试验设备

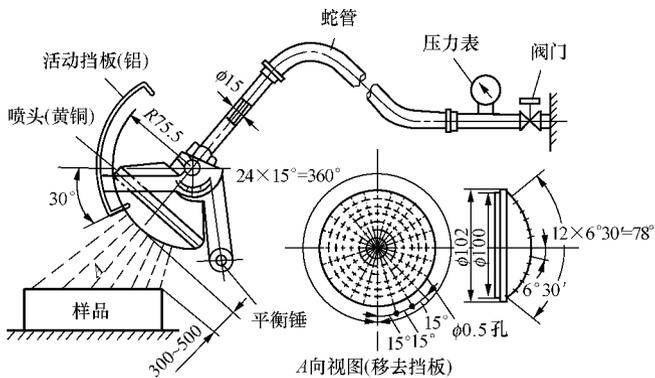


图 4-56 手持式淋水和溅水试验设备

的速度转动，使电机各部分在试验中均被淋湿。

试验时间为 10min。

2. 用手持式淋水器进行试验

试验时应装上活动挡板。

水压调整到水流量为 (9.5 ~ 10.5) L/min, 压力约为 80 ~ 100kPa (0.8 ~ 1.0bar)。

试验时间按被试电机计算的表面积 (不包括任何安装表面和散热片) 每平方米为 1min, 但至少为 5min。

(四) “4”级防护试验方法

采用如图 4-55 或图 4-56 所示设备的条件同上述第“3”级的有关内容。

1. 用摆管式淋水器进行试验

摆管在 180°的半圆内布满喷水孔。试验时间、转台转速及总水流量与第“3”级相同。被试电机的支撑物应开孔, 以免挡住水流。摆管以 60°/s 的速度向每边摆动至最大限度, 使电机在各个方向均受到喷水。

2. 用手持式淋水器进行试验

拆去淋水器上的活动挡板, 使电机在各个方向均受到喷水。喷水率与单位面积的喷水时间与第“3”级相同。

(五) “5”级防护试验方法

采用如图 4-57 所示的标准喷嘴做试验。自喷嘴喷出的水流从各个可能的方向喷射电机。应遵循的条件如下:

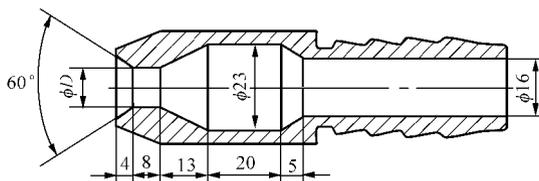


图 4-57 喷水试验用标准喷嘴

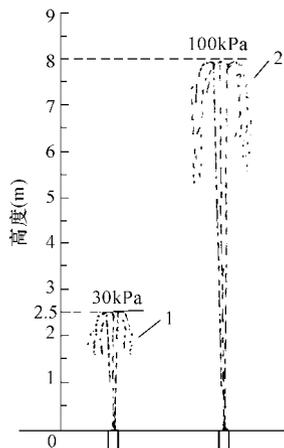
(1) 喷嘴内径: 6.3mm。

(2) 水流量: 约为 (11.9 ~ 13.2) L/min。

(3) 喷水水压: 约为 30kPa (0.3bar)。水压的测量可以喷嘴喷出水的高度代替 (喷水高度为 2.5m), 如图 4-58 中 1 所示。

(4) 试验时间: 按被试电机计算的表面积每平方米为 1min, 但至少为 3min。

(5) 喷嘴距离: 与被试电机表面相距约 3m, 如图 4-59 所示。如有必要, 当向上喷射电机时, 为保证适当的喷射量, 此距离可缩短。



4-58 喷水高度和压力的关系缩短。

1—水压 30kPa (0.3bar), 相当于喷出
出水的高度为 2.5m; 2—水压 100kPa
(1bar), 相当于喷出水的高度为 8m

(六) “6”级防护试验方法

试验设备与第“5”级相同。应遵循的
条件如下：

- (1) 喷嘴内径：12.5mm。
- (2) 水流量：约为 (95 ~ 105) L/min。
- (3) 喷水水压：约为 100kPa (1bar)，
相当于喷出水的高度为 8m (见图 4-58 中
2)。

(4) 试验时间：按被试电机计算的表
面积每平方米为 1min，但至少为 3min。

(5) 喷嘴距离：与被试电机表面相距
3m，如图 4-59 所示。如有必要，当向上喷
射电机时，为保证适当的喷射量，此距离可

(七) “7”级防护试验方法

1. 方法之一——浸水试验

将电机完全浸入水中做试验，并满足如

下条件 (见图 4-60)：

- (1) 水面应高出电机顶点至少为 150mm。
- (2) 电机底部低于水面至少为 1m。
- (3) 试验时间至少为 30min。

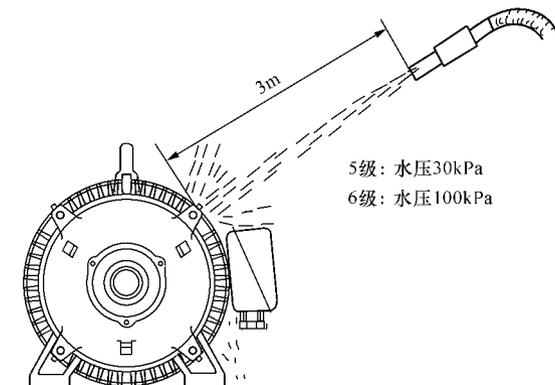


图 4-59 “5”和“6”级防水试验 (喷水试验)

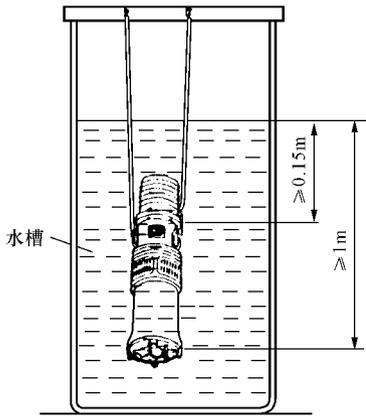


图 4-60 “7”级防水试验方法之一
(浸水试验)

(4) 水与电机的温差应不大于 5K。

2. 方法之二——充气试验

如果制造厂与用户达成协议，试验可用下述方法代替：电机内部充气，使其气压比外部高出 10kPa (0.1bar)，试验时间为 1min。当无空气漏出时，则认为符合要求。检查漏气的方法可将电机恰好淹没于水中或用肥皂水涂在电机表面。如图 4-61 所示。

(八) “8”级防护试验方法

试验条件按制造厂与用户的协议，但不应低于第“7”级的要求。

(九) 认可条件

(1) 电机的进水量应不足以影响电机的正常运行；不是预定在潮湿状态下运行的绕组和带电部件应不潮湿，且电机内的积水应不浸及这些部件。电机内部的风扇叶片允许潮湿，同时，如有排水措施，亦允许水沿轴端漏入。

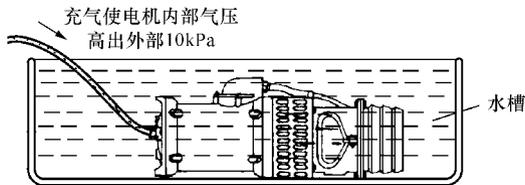


图 4-61 “7”级防水试验方法之二 (充气试验)

(2) 如电机在静止状态下做试验，应在额定电压下空载运转 15min 后，再作耐电压试验，其试验电压应为新电机试验值的 50%，但不应低于被试电机额定电压的 125%。

如电机在转动状态下做试验，则可直接作上述耐电压试验。

在试验后，如电机能符合 GB 755—2000 中的要求而无损坏（绕组、导线及导电器件对机壳及相互间无击穿或闪络现象），则认为试验合格。

第十九节 转子转动惯量的计算和测定试验

转子转动惯量的大小对电机的起动和制动性能有着直接的影响。在有必要时应该进行确定。转子转动惯量大小的标准，在国家和行业标准中都没有具体规定，需要时，一般由用户和制造厂协商确定。

转动惯量用符号 J 来表示，单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，是我国和国际标准中的标准物理量。但在工程中，习惯采用 GD^2 来表示。两者之间的关系是：

$$J = \frac{1}{4} \text{GD}^2 \quad (4-98)$$

转子转动惯量的确定方法有计算法和实测法两种。实测法又有单钢丝法、双钢丝法、辅助摆摆动法和惯性回转法等。下面介绍实际操作和计算过程。

一、粗略计算法

虽然电机转子是一个比较规整的圆柱体，但因其至少由 3 种不同的材料组成，并且相互交叉（如铁心槽内铸有铝条或嵌有铜导线等），形状也不一定很规则，所以较难用理论计算的方法得到准确的数据。

在要求不高时，可将转子看成一个密度均匀的圆柱体，在秤其质量 m 后，用计算圆柱体转动惯量的公式进行计算求得。

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (4-99)$$

式中 J ——转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

m ——转子质量， kg ；

r ——转子半径， m 。

二、用假转子辅助的单钢丝实测法

此方法适用于转子质量不超过 50kg 的小型电机。由于需制作一个假转子，所以成本较高，试验也较费时。

1. 假转子制作要求

- (1) 材料密度均匀，最好采用轧制圆钢。
- (2) 外圆圆整，端面平整。
- (3) 尽量使其质量及形状与被试转子相同。

制作完成后，精确测量出它的外形尺寸（对于圆柱体，主要是底面的直径）和质量，并用式（4-99）计算出它的转动惯量 J_a ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

2. 测试步骤

(1) 将假转子可靠地悬挂在钢丝下。钢丝的另一端牢固地系于一个支架上。应注意钢丝必须系在假转子的直径中心，使其自然下垂时轴线与水平线垂直。钢丝长度在2m左右，其截面直径视假转子质量而定，即当假转子悬挂后应不使其有明显的伸长变形，但又不能太粗，太粗则会影响测试摆动及钢丝本身不能被拉直而引起较大误差。

(2) 试验时，将假转子旋转 $30^\circ \sim 45^\circ$ ，然后松手，让其靠钢丝的扭力来回自由旋转。用秒表记录假转子旋转一个周期所用的时间。为了计时准确，要让过开始的第1~2个周期再开始计时，记录摆动几个周期所用的时间，取其平均值作为假转子一个旋转周期所用的时间 T_a (s)。计时起点和终点应在摆动速度最大的位置，及摆动中心位置。如图4-62 (a) 所示。

(3) 用已调整好动平衡的被试转子换上上述假转子，用同样的方法求出该真转子的摆动周期 T (s)。如图4-62 (b) 所示。

(4) 用下面的公式计算求出被试转子的转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

$$J = \left(\frac{T}{T_a} \right)^2 J_a \quad (4-100)$$

三、双钢丝实测法

双钢丝实测法和单钢丝实测法相比，具有试验成本低、准确度高的优点，因此实际应用较多，但安装较复杂。下面介绍其试验过程。

(一) 悬挂转子

将被试转子用两条相同长度的钢丝悬挂于一个支架下，如图4-63所示。应使被试转子的轴线保持在竖直方向。钢丝的长度一般不应大于2m，以减少因扭转摆动时引起钢丝长度的变化。为了便于安装，钢丝上下两端的距离可以不等宽。钢丝直径的选择应以能满足承重的机械强度为准，不宜太粗，

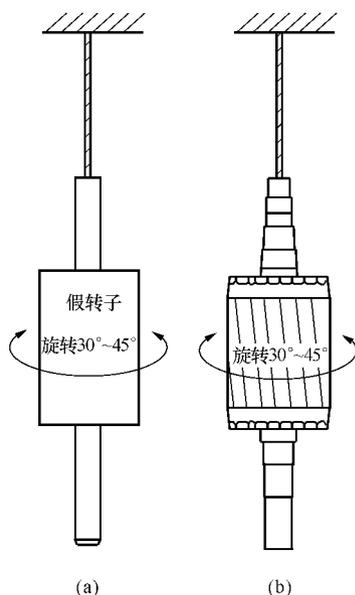


图4-62 用假转子辅助的单钢丝实测法测量转子的转动惯量

- (a) 测量假转子的摆动周期；
(b) 测量真转子的摆动周期

否则会因不能拉直而引起一定的测量误差。

(二) 测试步骤

(1) 将转子由静止状态旋转到不足 10° 的角度后松开手，让其靠钢丝的扭力自由来回旋转摆动。用与单钢丝法同样的方法测定出几个摆动周期的平均值 T (s)。

(2) 用下式计算求出被试转子的转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

$$J = \frac{T^2 m g a b}{4 \pi^2 L} \approx 0.2485 \frac{T^2 m a b}{L} \quad (4-101)$$

式中 T ——摆动一个周期的时间，s；

m ——转子质量，kg；

g ——重力加速度， $g = 9.81 \text{m/s}^2$ ；

a ——两钢丝上端距离的一半，m；

b ——两钢丝下端距离的一半，m；

L ——钢丝两端竖直方向距离，m。

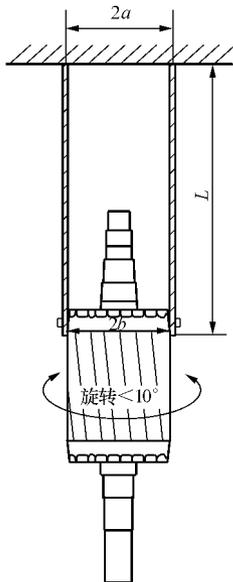


图 4-63 用双钢丝实测法的安装图

四、辅助摆摆动实测法

对已装成整机的电机转子或较大的转子，可采用辅助摆摆动实测法测定其转动惯量。该方法操作较容易，但精度较差。为了校核试验的准确度，可采用不同质量的摆锤重复测定一个转子的转动惯量值，取较稳定的数值作为试验结果。

(一) 对电机的要求

转子按正常方式安装在电机中。为了保证电机转子转动灵活，必须采用滚动轴承，并且进行必要的润滑。若电机为滑动轴承，则必须将转子单独架在平衡机上。对装有电刷的绕线转子电机，测试时必须将电刷全部提起。

(二) 对辅助摆的制作和安装要求

辅助摆由摆锤和连杆组成。

摆锤呈圆柱形，其质量应在能克服被试电机转子的转动惯量的前提下尽可能轻，一般设计成其转动惯量不大于被试电机转子的转动惯量的 10%。

连杆的质量应尽可能轻,最好用木料制做。其长度按电机的大小来选择(摆动周期与连杆的长度成正比关系),对10kW以上的电机,应使摆动周期在3~8s以内;对1~10kW的电机,应使摆动周期在1~3s以内。

将辅助摆牢固地安装在轴伸上,使辅助摆能自然下垂,并使其轴线与竖直线重合。如图4-64所示。

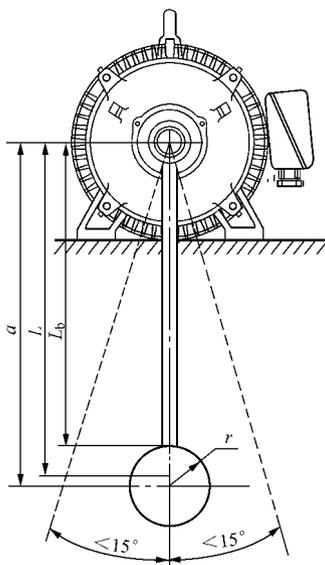


图 4-64 辅助摆摆动实测法安装图

(三) 实测步骤

(1) 拨动摆锤,使其抬起后与竖直线所成角度在 15° 之内。放开摆锤,让其像钟摆一样自由摆动。记录几个摆动周期所用时间并求出一个周期的平均值 $T(s)$ 。

(2) 计算求取转子的转动惯量 $J(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 。当要求精密计算时,用式(4-102);若连杆的质量很小,可以忽略时,可采用式(4-103)。

$$J = \frac{T^2(m_a + m_b)Lg}{4\pi^2} - J_a - J_b \approx 0.2485T^2(m_a + m_b)L - J_a - J_b \quad (4-102)$$

$$J = m_a r \left(\frac{T^2 g}{4\pi^2} - r \right) = m_a r (0.2485T^2 - r) \quad (4-103)$$

式中 m_a ——摆锤的质量, kg;
 m_b ——连杆的质量, kg;
 J_a ——摆锤对电机轴线的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $J_a = m_a (0.5r^2 + a^2)$;
 r ——摆锤的半径, m;
 a ——摆锤重心与电机轴中心线的距离, m;
 J_b ——连杆对电机轴线的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $J_b = 0.25L_0^2 m_b$;
 L ——电机轴线至辅助摆锤与连杆的共同体之重心的距离, m;
 L_0 ——连杆(含电机轴伸半径)的长度, m;
 g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{m/s}^2$ 。

五、空载减速实测法

本方法适用于组装后的电机。其优点是不需任何辅助装置,且不论电机采用何种轴承,都可以进行测定,所以更适用于较大的电机;缺点是准确度较差,另外需事先测出被试电机的机械损耗,为此,需要一定的仪器设备和试验能力。

(一) 试验前的准备工作

试验前,要将被试电机空转一定时间,使其机械损耗达到稳定状态,并测出电机的机械损耗 P_m (有关测试方法见本章第八节《空载试验》的相关内容)。

(二) 试验步骤和注意事项

(1) 用提高电源频率或其他机械拖动等方法,使被试电机的转速超过其额定值的 1.1 倍。然后,切断电源或脱离原动机,让电机自行减速停转。

(2) 在电机转速从 1.1 倍下降到 0.98 倍额定转速,或从 1.05 倍下降到 0.9 倍额定转速的过程中,精确测量下降的转速差 Δn (r/min) 及 Δn 变化所用的时间 Δt (s)。

为了能准确地读取电机的转速,最好采用能直接观看到转速连续下降过程的转速表,如指针式转速表,如图 4-65 所示。如有条件,使用小型的测速发电机和记录仪器相结合,绘制出转速和时间的关系曲线,则可得到相对准确的结果。

(3) 用上述测得的数据,通过下式求取被试电机转子的转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

$$J = \frac{91.2 P_m \Delta t}{n_N \Delta n} \quad (4-104)$$

式中 P_m ——被试电机的机械损耗, W;

n_N ——被试电机的额定转速，r/min。

(4) 当被试电机不能超过额定转速时，可在 1 ~ 0.8 倍额定转速之间进行测定。这时的 P_m 应为 0.9 倍额定转速时的机械损耗值。

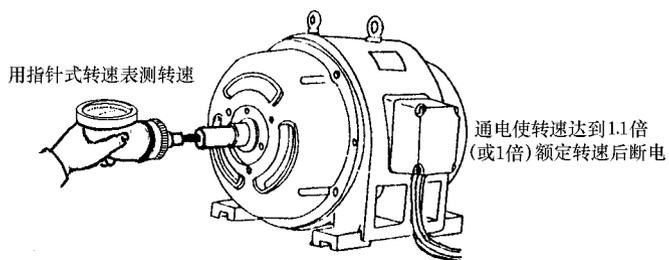


图 4-65 用空载减速法实测转子的转动惯量

第二十章 电机轴电压的测定试验

一、试验目的和范围

测定电机轴电压的目的是为了解电机轴电流的大小。

电机的轴电流大到一定程度时，会造成电机轴承过热、轴承或轴颈出现伤疤或斑点，甚至烧坏轴承，并可产生细小的金属颗粒进入轴承润滑油（油）中，使轴承磨损。

这种损害主要发生在大中型电机中（特别是2极电动机和使用变频电源供电的某些电动机）。所以本项试验也只对大中型电机，并且对中型电机，只对个别因使用时发现轴电流对轴承产生严重影响的电机在改进设计时进行测定。

二、试验测试方法

测试时，被测电机应在额定电压、额定转速下运行。用量程为100mV的高内阻交流毫伏表（如晶体管或热电势毫伏表、数字毫伏表等）先测定

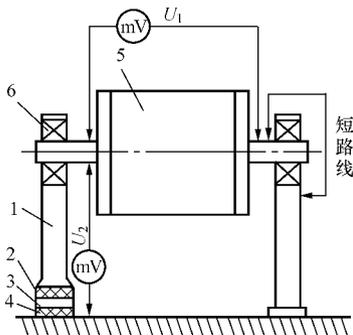


图 4-66 轴电压测量位置示意图

1—轴承座；2、4—绝缘垫片；

3—金属垫片；5—电机转子；6—轴承

轴电压 U_1 。然后，将转轴一端与其轴承座短接，测量另一端轴承座对地的电压 U_2 。测点表面与电压表引线应接触良好。

试验时，还应同时分别检查轴承座与金属垫片、金属垫片与金属底座间的绝缘电阻。

测量位置见图 4-66。

三、合格标准

在各种大、中型电机的国家或行业标准中都将测定轴电压列入到试验项目中，并给出试验方法，但一般没有明确规定合格标准，在有些标准中给出的最高限值是 500mV。因此，当

需要进行本项试验时，在没有明确标准时，应视具体情况制定内控标准。

第二十一节 电机接触电流的测定试验

电机应有良好的绝缘性能。在正常工作时，电机的接触电流或泄漏电流应不超过规定值。GB 14711—1993《中小型旋转电机安全通用要求》中规定了中小型电机接触电流的限值及测定方法（本标准已由 GB 14711—2006 代替，在 GB/14711—2006 中没有明确规定此项试验，所以是否进行该项试验，应由制造厂规定）；GB 12350—2000《小功率电动机的安全要求》中规定了小功率电机泄漏电流的测定方法。

一、中小型电机

（一）接触电流的限值

对 660V 及以下且机座号为 160 及以下的交流电机，其热态接触电流应不大于 5mA。其他电机的限值在有必要时应在产品的技术条件中规定。

（二）接触电流测量接线

三相中小型交流电机测量接线分别如图 4-67 (a) 所示。图中 M 采用如

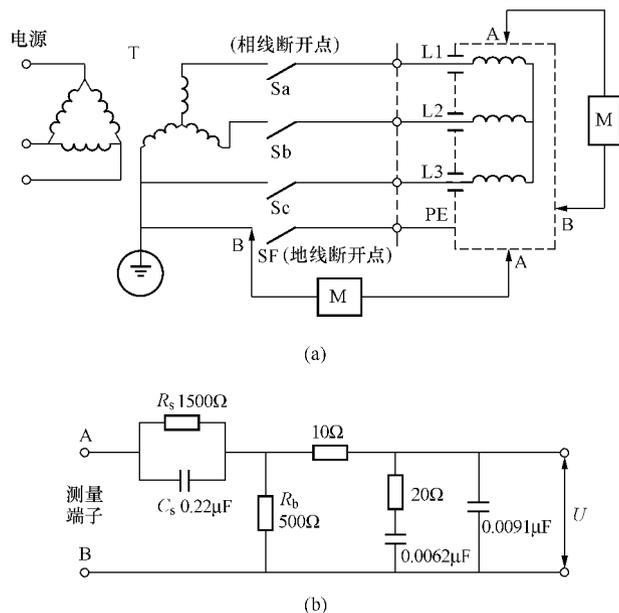


图 4-67 三相中小型交流电机接触电流测量接线图

(a) 接线图；(b) M 网络

图 4-67 (b) 所示的网络。

(三) 接触电流测定方法

1. 测量时电机的状态

接触电流应在电机温升试验后进行测量。试验电源电压为电机最高额定电压的 105%，试验电源频率为电机工作频率。

2. 试验加压位置和测试方法

接触电流应在电机上易同时触及的金属零部件之间、电机上易触及的金属部件与地之间测量。

(1) 轮流断开其中的任一相（用开关 L），且断开保护接地（用开关 E）的情况下，测取接触电流的最大值。

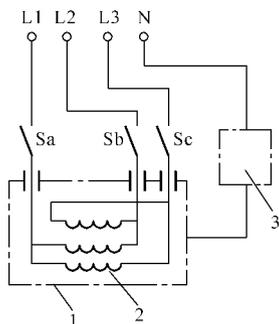


图 4-68 小功率电动机泄漏电流试验接线图

1—电机上易触及到的金属部件；
2—电机绕组；3—泄漏电流测量仪

最大的泄漏电流。

(三) 合格标准

电动机泄漏电流不应过大，其最高限值由被试电机的技术条件规定。

(2) 测量时，电机应与地绝缘。测量电极为试棒，A 端电极每次接入时，A 端电极应先接地，然后再依次接到每个可触及的其他零部件上进行测量。

二、小功率电机

(一) 试验接线

试验接线见图 4-68。

(二) 试验方法

有条件时，该试验应在温升试验后进行。试验时电机加 1.06 倍的额定电压，其运行方式由产品标准制定。电机应与大地绝缘。

试验时，应轮流断开 Sa、Sb、Sc 三个开关中的一个，闭合另外两个，以测得最

第二十二节 采用 B 法求取效率的型式 试验报告计算和编制实例

一、说明

现在，绝大部分的电机生产厂家都已采用计算机计算和编制电机的试验报告，有的是先由人工读表记录，然后通过键盘将试验数据输入到计算机中，计算机按编制的专用程序计算和编制打印出一套规整的试验报告；有的直接通用自动采集系统将试验量直接传递到计算机中，并自动或通过人工命令完成编制试验报告的全部工作。

很显然，采用计算机完成这项工作比人工要快得多，好得多。但是，计算机的这套专用程序要源于本章前面讲述的所有内容，要编制它，则必须学懂、会用所有的计算公式，搞清各相关量之间的关系；另外，在使用程序时，还要经常遇到修正“坏点”、调整某些试验数据等问题，要想熟练地处理这些问题，也需要全面的技术理论和实践知识。再者，目前在一些较小的生产单位，特别是修理单位，还在使用全人工编制试验报告的办法。因此，全面地讲述一遍型式试验报告的记录、计算和编制过程是必要的。

现以一台型号为 Y132S-4 的普通三相异步电动机，采用 GB/T 1032—2005 中规定的 B 方法进行效率试验和计算为例，说明其主要性能数据的记录、计算、绘制特性曲线、汇总试验结果和给出结论的方法和过程。其中所用到的计算公式全部都在前面的各章节中讲述过，在此将直接使用。为了书写方便，在不会引起误解的情况下，有些量的代号（主要是其下角标）可能与前面介绍的有一些差别。

为了文字简练和清晰，在本例的计算过程中，除特别注明外，电压、电流、电阻均为“线”值，单位分别为 V、A 和 Ω ；输入电功率的测量采用两表法，仪表读数分别用 W_1 、 W_2 来表示，单位为 W（有时输入和输出功率标定为 kW）；转矩单位为 $N \cdot m$ ；转速单位为 r/min ；时间单位为 s；温度单位为 $^{\circ}C$ 。

二、汇总与试验有关的铭牌数据（额定数据）

与试验有关的铭牌数据，或称额定数据见表 4-32。

三、测定定子三相绕组的绝缘电阻

在电机三相绕组连接成 Δ 之前，用 500V 规格的绝缘电阻表测量三相绕组对地和相互间的绝缘电阻，填入表 4-33 中。以其中最小值为最后结果。

表 4-32 铭牌数据 (额定数据)

项目	型号	容量 P_N (kW)	电压 U_N (V)	电流 I_N (A)	频率 f_N (Hz)	接法	额定转速 n_N (r/min)	绝缘 等级	工作制	冷却 方式
内容	Y132S-4	5.5	380	11.6	50	Δ	1440	B	S1	IC411

表 4-33 绕组绝缘电阻测试记录表

项目	三相绕组对地	三相绕组相与相之间		
		U—V	U—W	V—W
绝缘电阻实测值 (M Ω)	500	500	500	500

四、测定定子三相绕组的冷态直流电阻

在电机三相绕组连接成 Δ 后,在实际冷状态下,用0.2级的双臂电桥或数字式微欧计测量三相绕组的直线条电阻,测量三次,取三次的平均值作为试验结果,同时测量环境空气温度 θ_1 ()。计算三个线电阻的平均值 R_{01} (Ω)并换算到基准工作温度(95)时的数值 R_j (Ω)。如需相电阻,可在三相绕组连接成 Δ 前逐相进行测量,也可用线电阻进行换算。将上述测量和计算结果填入表4-34中。

表 4-34 定子三相绕组的冷态直流电阻记录及换算表

测量端	冷态线电阻测量值及平均值 (Ω)				冷态环境 温度 θ_1 ()	冷态线电阻平均值 R_{01} (Ω)
	第1次	第2次	第3次	平均值		
U1—V1	1.317	1.318	1.319	1.318	25.0	1.318
U1—W1	1.316	1.318	1.320	1.318		
W1—U1	1.317	1.319	1.320	1.318		
换算到环境温度为25 时的线电阻数值 R_l (Ω)					$1.318 \times \frac{235+25}{235+25} = 1.318$	
换算成环境温度为25 时的相电阻 R_1 (Ω)					$1.318 \times 1.5 = 1.977$	

五、堵转试验

采用堵转电压大于0.9倍额定电压、堵转转矩用测力计加力臂实测的方法。

(一) 试验数据汇总

试验共测量7点。具体数值见表4-35。

(二) 试验结果计算

(1) 计算各试验点的三相电流平均值 I_k (A)。

(2) 计算各试验点的输入功率 P_k (W)。

(3) 计算各试验点的转矩 $T_k = (F - F_0) \cdot L$ 。式中, F 为测力计显示值, F_0 为电机未加电时测力计显示值 (称为“初重”), 单位为 N , L 为力臂长度, 单位为 m 。

上述计算结果见表 4-36。

(三) 绘制堵转特性曲线和求取额定电压时的堵转数据

(1) 在同一直角坐标纸上绘制特性曲线 $I_k = f(U_k)$ 、 $P_k = f(U_k)$ 和 $T_k = f(U_k)$ 三条堵转特性曲线, 见图 4-69。

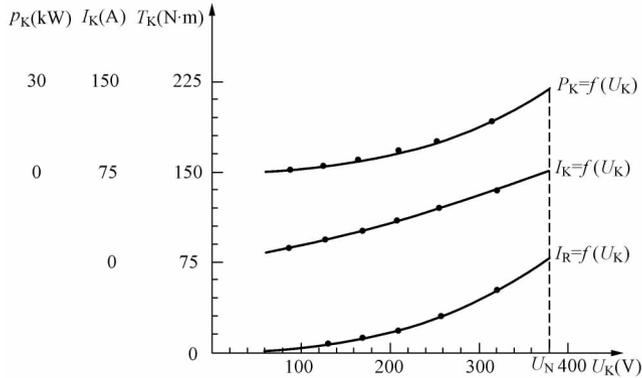


图 4-69 堵转特性曲线

(2) 从上述曲线 (或向上的延长线) 上查取 $U_k = U_N$ 时的堵转电流 I_{kN} 、输入功率 P_{kN} 和转矩 T_{kN} , 见表 4-36。

(3) 若采用圆图计算法求取最大转矩, 则还要从曲线上查出 $I_k = 2.5 I_N$ 时的堵转电压 U_k 和输入功率 P_k , 见表 4-36。

表 4-35 堵转试验数据记录表

测点 序号	堵转电压 U_k (V)		堵转电流 I_k (A)				堵转输入功率 P_k (W)			力 F (N)
	U_k	倍	I_{k1}	I_{k2}	I_{k3}	倍	W_1	W_2	倍	
1	95.0	4	8.17	7.70	7.80	10	68.5	2.0	400	11.6
2	80.0	4	6.25	6.10	6.20	10	45.2	0.4	400	8.8
3	128.5	2	9.70	9.03	9.32	5	107.5	-1.0	100	6.5
4	107.2	2	7.50	7.12	7.48	5	70.8	-1.8	100	5.2

续表

测点 序号	堵转电压 U_K (V)		堵转电流 I_K (A)				堵转输入功率 P_K (W)			力 F (N)
	U_K	倍	I_{K1}	I_{K2}	I_{K3}	倍	W_1	W_2	倍	
5	83.0	2	5.50	5.24	5.18	5	37.4	- 2.0	100	4.6
6	124.0	1	7.57	7.35	7.30	2.5	77.0	- 7.0	25	4.0
7	78.5	1	4.53	4.40	4.38	2.5	28.0	- 3.0	25	3.6
力臂长度 $L: 1\text{m}$						初重 $F_0: 3.4\text{N}$				

表 4-36 堵转试验结果汇总表

测点序号	堵转电压 U_K (V)	堵转电流 I_K (A)	堵转输入功 P_K (W)	堵转转矩 T_K (N · m)
1	380	78.90	28200	80.42
2	320	62.73	18240	52.96
3	257	46.75	10650	30.40
4	214.4	36.83	6900	17.65
5	166	26.53	3540	11.77
6	124	18.52	1750	5.88
7	78.5	11.09	625	1.96
曲线上 $U_K = U_N = 380\text{V}$ 时		$I_{KN}: 79.8\text{A}$	$P_{KN}: 28.223\text{kW}$	$T_{KN}: 80.12\text{N} \cdot \text{m}$
曲线上 $I_K = 2.5I_N = 2.5 \times 11.6 = 29\text{A}$ 时			$U_K: 158\text{V}$	$P_K: 3.203\text{kW}$

六、热试验

采用直接负载法进行热试验。试验负载设备为转矩-转速传感器（标称转矩为 $50\text{N} \cdot \text{m}$ ）加直流电机的测功机，采用控制输出功率等于额定功率 5.5kW 的加载方法。用电阻法求取稳定温升。

为了减少试验时间，试验刚开始的 0.5h 内，将电流提高到额定值的 1.2 倍左右，同时将风罩的进风孔用纸板堵住。

（一）试验控制及数据记录

按每 0.5h 记录一次试验数据的要求，试验数据记录和温升稳定后测量 $U1-U1$ 间的热态线电阻与时间的对应数据，见表 4-37。

表 4-37 热试验记录表

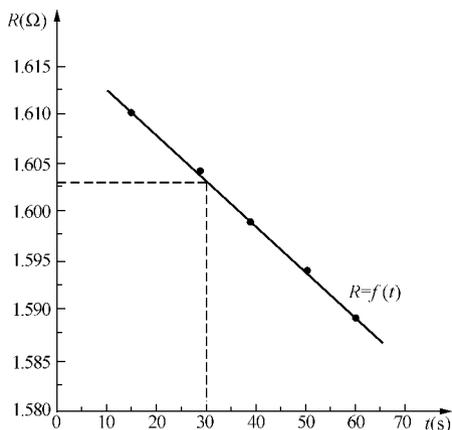


图 4-70 热态电阻与时间的关系曲线

但为了标准的统一,本例采用从曲线上求得 $t = 30\text{s}$ 时的电阻 1.6032Ω 作为断电瞬间的热态电阻值用于温升计算的方法。计算结果为 55K , 见表 4-37。

若想得到真正断电瞬间的热电阻,则将图 4-70 中的曲线向上顺势延长到与纵轴相交,交点即为断电瞬间的热电阻,本例为 1.614Ω ,可以求得此时的温升为 57.39K 。比 30s 的数值 55.26 多了 2.13K 。

七、负载试验

本例采用在热试验达到温升稳定后先进行负载试验,之后恢复额定负载运行一段时间(10min 左右),再停机测量热电阻的试验顺序。

本例负载试验中采用测量转速计算转差率的方法,用埋置测温元件求取每点定子绕组的直流电阻 R_1 。

在本例中,测量其输入功率和电压的仪表损耗和被试电机容量相比,数值较小,对试验精度基本无影响,故不进行修正。若认为有必要,则每个试验点的该项损耗均为

$$380^2 \times \left(\frac{1}{R_V} + \frac{2}{R_{WV}} \right) = 144400 \times \left(\frac{1}{75000} + \frac{2}{20000} \right) = 16.4\text{W}$$

式中的 R_V 和 R_{WV} 分别为电压表和功率表电压线路的直流电阻,分别为 75000Ω 和 20000Ω 。采用 1 块电压表和 2 块单相功率表的测量线路。

试验数据见表 4-38。

表 4-38

负载试验记录表

试验中应保持不变的条件					定子线电压为额定值 380V；电源频率为额定值 50Hz								
测点 序号	定子电流 I_1 (A)					输入功率 P_1 (W)				直流 电阻 R_1 (Ω)	输出 转矩 T (N·m)	输出 转速 n (min)	输出 功率 P_2 (W)
	I_{11}	I_{12}	I_{13}	倍	I_1	W_1	W_2	倍	P_1				
1	5.55	5.56	5.42	2.5	13.78	52.0	25.1	100	7710	1.610	43.43	1451	6600
2	5.01	5.00	4.87	2.5	12.40	46.9	22.0	100	6890	1.609	38.57	1456	5937
3	4.40	4.40	4.21	2.5	10.84	40.7	18.0	100	5870	1.607	32.84	1462	5076
4	3.90	3.90	3.71	2.5	9.59	36.0	14.5	100	5050	1.606	26.33	1465	4079
5	3.30	3.30	3.11	2.5	8.09	30.0	10.0	100	4000	1.605	21.71	1472	3379
6	2.52	2.53	2.40	2.5	6.21	22.9	3.5	100	2640	1.603	14.21	1477	2219

八、空载试验

(一) 空载试验原始记录数据

空载试验采用三块满量程为 5A 的电流表；一块满量程为 600V 的电压表，其电阻为 75000Ω ，接于被试电机出线端（在功率表之后）；采用两块 $\cos\varphi=0.2$ 的低功率因数功率表，电压后接，量程为 600V，此时电压回路的电阻为 20000Ω 。

采用每点都测量绕组直流电阻的方法。

空载原始记录表格和数据见表 4-39。

表 4-39 空载试验原始记录表格和数据

测点 序号	空载电压 U_0 (V)		空载电流 I_0 (A)				空载输入功率 P_0 (W)			线电阻 (Ω)	
	U_{01}	倍	I_{01}	I_{02}	I_{03}	倍	W_1	W_2	倍		
1	105	4	6.89	6.70	6.23	1	99.6	- 68.0	16	1.49	
2	100	4	5.91	5.58	5.27	1	81.0	- 55.8	16	1.49	
3	95	4	5.12	4.83	4.55	1	66.8	- 44.8	16	1.49	
4	90	4	4.61	4.38	4.03	1	57.0	- 37.6	16	1.48	
5	85	4	4.05	3.83	3.60	1	48.0	- 30.2	16	1.48	
6	70	4	6.10	5.70	5.40	0.5	63.3	- 36.3	8	1.47	
7	65	4	5.42	5.10	4.90	0.5	54.6	- 28.3	8	1.47	
8	60	4	5.02	4.60	4.50	0.5	47.3	- 23.0	8	1.46	
9	55	4	4.57	4.20	4.07	0.5	40.3	- 17.5	8	1.46	
10	50	4	4.15	3.78	3.69	0.5	34.4	- 12.8	8	1.45	
11	45	4	3.62	3.40	3.25	0.5	28.3	- 8.60	8	1.44	
停机后的绕组 线电阻 R_0		—		电压表电阻 R_V		$1 \times 75k\Omega$		功率表电压回路电阻 R_{wv}		$2 \times 20k\Omega$	

(二) 空载试验数据计算和列表

1. 计算各试验点的实测数据和推算有关量

本例采用机械损耗和铁损耗之和 P'_0 与电压标么值的平方 $(U_0/U_N)^2$ 关系的整条曲线。有关计算均以第一点为例。

(1) 求取各点电压的标么值 U_0/U_N 和标么值的平方 $(U_0/U_N)^2$ 。

(2) 求取各点电流值的三相平均值 I_0 (A) 并计算三相不平衡度 ΔI_0 。

(3) 计算每点仪表显示的输入功率 P_{ow} (W)。

(4) 计算每点的仪表损耗 ΔP_0 (W)。例如第一点为

$$\Delta P_0 = U^2 \left(\frac{1}{R_V} + \frac{2}{R_{wV}} \right) = 420^2 \left(\frac{1}{75000} + \frac{2}{20000} \right) = 19.992 \text{ W} \approx 20 \text{ W}$$

(5) 计算每点实际输入功率 (仪表显示的 P_{ow} 与该点仪表损耗 ΔP_0 之差) P_0 (W)。例如第一点为

$$P_0 = P_{ow} - \Delta P_0 = 505.6 - 20 = 485.6 \text{ W}$$

(6) 计算每点的空载定子铜损耗 P_{0Cu1} (W)。例如第一点为

$$P_{0Cu1} = 1.5 I_0^2 R = 1.5 \times 6.607^2 \times 1.49 = 97.6 \text{ W}$$

(7) 计算每点的空载损耗 P_0 与空载定子铜损耗 P_{0Cu1} (W) 之差 P'_0 (W), 即铁耗与机械耗之和 $P_{Fe} + P_m$ (W)。例如第一点为

$$P'_0 = P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{0Cu1} = 485.6 - 97.6 = 388.0 \text{ W}$$

2. 计算及试验结果列表

将上述计算值及试验结果列表, 见表 4-40。

表 4-40 空载试验计算结果汇总表

测点 序号	U_0 (V)	$\frac{U_0}{U_N}$	$\left(\frac{U_0}{U_N}\right)^2$	I_0 (A)	P_{ow} (W)	ΔP_0 (W)	P_0 (W)	P_{0Cu1} (W)	P'_0 (W)
1	420	1.105	1.222	6.607	505.6	20.0	485.6	97.6	388.0
2	400	1.053	1.108	5.587	403.2	18.1	385.1	69.8	315.3
3	380	1.000	1.000	4.833	352.0	16.4	335.6	52.2	283.4
4	360	0.947	0.898	4.340	310.4	14.7	295.7	41.8	253.9
5	340	0.895	0.801	3.827	284.8	13.1	271.7	32.5	239.2
6	280	0.737	0.543	2.867	216.0	8.9	207.1	18.1	189.0
7	260	0.684	0.468	2.570	210.4	7.7	202.7	14.6	188.1
8	240	0.632	0.399	2.353	194.4	6.5	187.9	12.1	175.8
9	220	0.579	0.335	2.140	182.4	5.5	176.9	10.0	166.9
10	200	0.526	0.277	1.937	172.8	4.5	168.3	8.2	160.1
11	180	0.474	0.224	1.712	157.6	3.7	153.9	6.3	147.6
额定电压 380V 时的数据	空载输入 P_0		空载电流 I_0		铁耗 P_{Fe}		机械耗 P_m		铜耗 P_{0Cu1}
	337W		4.83A		165W		120W		52W

3. 绘制空载特性曲线和求取额定电压时的铁心损耗 P_{Fe} 和机械损耗 P_m

在同一直角坐标纸上绘制特性曲线 $I_0 = f(U_0/U_N)$ 、 $P_0 = f(U_0/U_N)$ 和

$P'_0 = f [(U_0/U_N)^2]$ 三条曲线 (有的单位只绘制第一条和第三条曲线)。为了直观,也可绘制 $I_0 = f (U_0)$ 、 $P_0 = f (U_0)$ 和 $P'_0 = f [(U_0^2/10000)]$ 三条曲线。本例采用第一种。

绘制时,先选好坐标和适当的比例尺,将各坐标点标在坐标系中,并用不同的符号加以区别,再用曲线板进行圆滑地连接,见图4-71。

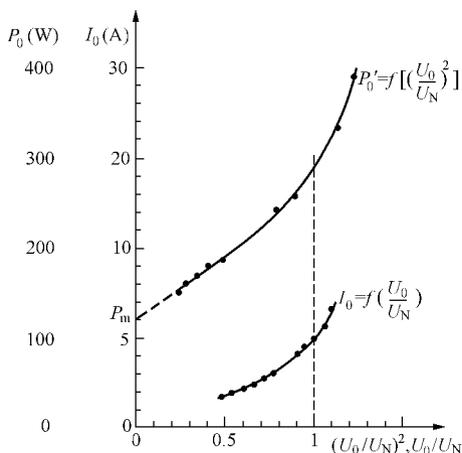


图 4-71 空载特性曲线

在绘制过程中,如有明显偏离曲线的点,首先检查该点数据的计算和原始数据是否有误,若找不出问题,则应将其删除。当几个点上下在较小的范围内跳动时,绘制的曲线应取其平均走势(以后的曲线绘制均同此办法)。

4. 求取额定电压时的铁心损耗 P_{Fe} 、机械损耗 P_m

(1) 将曲线向下延长至与纵轴相交于 P_m 点,则该点的纵坐标即为机械损耗 P_m 。本例为 120W。

(2) 从曲线 $P'_0 = f [(U_0/U_N)^2]$ 上查取 $U_0/U_N = 1$ 时的 P'_0 (本例为 285W),则额定电压时的铁心损耗 P_{Fe} 即为

$$P_{Fe} = P'_0 - P_m = 285 - 120 = 165(W)$$

5. 求取额定电压时的空载损耗 P_0 和空载电流 I_0

(1) 在曲线 $I_0 = f (U_0/U_N)$ 上查取 $U_0/U_N = 1$ 时的 I_0 ,本例为 4.83A。

(2) 额定电压时 P_0 的求取方法有两种,一种是在曲线 $P_0 = f (U_0/U_N)$ 上查取 $U_0/U_N = 1$ 时的 P_0 ;另一种是用前面求得的额定电压时的空载电流 I_0

和铁心损耗 P_{Fe} 及机械损耗 P_m 用下式计算求得（式中 R_0 为空载试验后测得的定子线电阻，本例为 1.49Ω ）。

$$\begin{aligned} P_0 &= P'_0 + P_{0Cu} = P_{Fe} + P_m + 1.5I_0^2 R_0 \\ &= 165 + 120 + 1.5 \times 4.83^2 \times 1.49 = 337(\text{W}) \end{aligned}$$

将上述结果填入到表 4-40 中。

九、满载效率、功率因数、定子电流、绕组温升、转矩和转差率的确定

（一）计算和汇总相关数据

按负载试验时各试验点所得数据列表（见表 4-38）并填入到表 4-42 中。

其中包括如下内容：

1. 各试验点的定子线电流 I_1

由表 4-38 《负载试验记录表》计算求得。

2. 各试验点的输入功率 P_1

由表 4-38 《负载试验记录表》计算求得。

3. 各试验点的定子铜耗 P_{Cu}

由前面求得的定子电流 I_1 和温升试验后立即测得的定子线电阻 R_j （本报告使用计算温升的热电阻值）用式（4-65）计算并换算到环境温度为 25 时的数值。其中绕组热态温度 θ_N 为温升值 $\Delta\theta$ （55K）与热态环境温度 θ_2 （26，式 4-65 中的 θ_1 ）之和 $55 + 26 = 81$ ，例如第一点：

$$\begin{aligned} P_{Cu} &= 1.5I_1^2 R_j \frac{K + \theta_N - \theta_1 + 25}{K + \theta_N} \\ &= 1.5 \times 13.78^2 \times 1.610 \times \frac{235 + 81 - 26 + 25}{235 + 81} \\ &= 458.5\text{W} \end{aligned}$$

4. 各试验点的铁心损耗 P_{Fe}

由空载试验求得， $P_{Fe} = 165\text{W}$ 。因为采用 B 方法，所以各试验点均使用此值。

若采用 B1 方法，则先利用每一点的定子电流 I_1 、定子绕组电阻 R_i 及输入功率 P_1 等根据式（4-66）求得一个电压 U_b ，然后通过空载试验的有关曲线得到对应 U_b 的铁心损耗。为了让大家进一步了解这种运算，下面以本例的实际数据计算出这种情况下的铁心损耗，并和 B 方法进行比较。

负载试验第 1 点的定子电压 U 、定子电流 I_1 、定子绕组电阻 R_i 及输入功率 P_1 分别为： $U = 380\text{V}$ ， $I_1 = 13.78\text{A}$ ， $R_i = 1.61\Omega$ ， $P_1 = 7710\text{W}$ ，则

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI_1} = \frac{7710}{1.732 \times 380 \times 13.78} = 0.85$$

$$\sin\varphi_1 = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = \sqrt{1 - 0.85^2} = 0.5266$$

$$\begin{aligned} U_{b1} &= \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} I_1 R_t \cos\varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_1 R_t \sin\varphi \right)^2} \\ &= \sqrt{\left(380 - \frac{\sqrt{3}}{2} \times 13.78 \times 1.61 \times 0.85 \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times 13.78 \times 1.61 \times 0.5266 \right)^2} \\ &= 363.8\text{V} \end{aligned}$$

当 $U_0 = U_{b1} = 363.8\text{V}$ 时，从空载特性曲线 $P'_0 = f[(U_0/U_N)^2]$ 上可得到 $P_{Fe} = 145\text{W}$ 。

负载试验第3点的定子电压 U 、定子电流 I_1 、定子绕组电阻 R_t 及输入功率 P_1 分别为： $U = 380\text{V}$ ， $I_1 = 10.84\text{A}$ ， $R_t = 1.61\Omega$ ， $P_1 = 5870\text{W}$ 。利用与上述相同的计算过程可得第三点的 $U_{b3} = 367.5\text{V}$ 。

当 $U_0 = U_{b3} = 367.5\text{V}$ 时，从空载特性曲线 $P'_0 = f[(U_0/U_N)^2]$ 上可得到 $P_{Fe} = 150\text{W}$ 。

负载试验第6点的定子电压 U 、定子电流 I_1 、定子绕组电阻 R_t 及输入功率 P_1 分别为： $U = 380\text{V}$ ， $I_1 = 6.21\text{A}$ ， $R_t = 1.61\Omega$ ， $P_1 = 2640\text{W}$ 。利用与上述相同的计算过程可得第三点的 $U_{b3} = 374.3\text{V}$ 。

当 $U_0 = U_{b3} = 374.3\text{V}$ 时，从空载特性曲线 $P'_0 = f[(U_0/U_N)^2]$ 上可得到 $P_{Fe} = 160\text{W}$ 。

从上述三点的计算结果可知，这种计算所得的铁心损耗比只与电压有关的方法相对较低一些，这是由于负载电流的去磁作用所造成的，负载电流越大，去磁作用越强，计算所得的铁心损耗也相对越小。

5. 各试验点的机械损耗 P_m

由空载试验求得， $P_m = 120\text{W}$ 。各试验点均使用此值。

6. 各试验点的转子铜（铝）耗 P_{Cu2}

(1) 由表 4-38 《负载试验记录表》中的转速求取每点的转差率，再用式 (4-44) 将其换算到环境温度为 25 时的数值。注意此处的电阻温度系数 K 用铝的数值，即 $K = 225$ ；另外，转子温度 θ_2 因不易测量而用定子的温度代替，定子的温度为热试验时求得的定子绕组温升 55K 加上热态环境温度 26，即 $\theta_2 = 55 + 26 = 81$ 。例如第一点

$$s_r = \frac{K + \theta_1}{K + \theta_2} \cdot s_t = \frac{235 + 81 - 26 + 25}{235 + 81} \cdot \frac{1500 - 1451}{1500} = 0.0327$$

(2) 用式 (4-49) 求取各点的转子铜（铝）损耗。例如第一点为

$$P_{Cu2} = s_r(P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe})$$

$$=0.0327(7710 - 458.5 - 165)$$

$$=231.7\text{W}$$

7. 杂散损耗 P_s

(1) 用式 (4-57) 求出每一测量点的剩余损耗 P_L (W), 例如第一点为

$$P_L = P_1 - P_2 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m)$$

$$= 7710 - 6600 - (458.5 + 231.7 + 165 + 120)$$

$$= 134.8\text{W}$$

将结果列入到表 4-41 中。

(2) 根据负载试验的输出转矩值 T 和剩余损耗 P_L 进行有关的计算, 并将结果填入表 4-42 中, 其中试验点数 $n=6$, 由于所使用的转矩转速传感器损耗误差很低, 只有几瓦, 和显示的功率数值相比可以忽略, 所以转矩数值直接使用了试验时所得的实际值。

表 4-41 剩余损耗线性回归数据汇总表

测点序号	P_L	P_L^2	T	T^2	T^4	$P_L T^2$
1	134.8	18171.0	43.43	1886.2	35557618	254255
2	110.7	12254.5	38.57	1487.6	2213087	164682
3	88.6	7850.0	32.84	1078.5	1163088	95552
4	70.0	4900.0	26.33	693.3	480622	48529
5	48.4	2342.6	21.71	471.3	222146	22812
6	25.1	630.0	14.21	210.9	40773	5068
Σ	$E = \Sigma P_L$ = 478	$F = \Sigma P_L^2$ = 46148		$G = \Sigma T^2$ = 5819	$H = \Sigma T^4$ = 7677334	$I = \Sigma P_L T^2$ = 590898

(3) 求取线性方程的斜率 A 和截距 B 。

用式 (4-58) 和 (4-59) 分别计算线性方程的斜率 A 和截距 B :

$$A = \frac{n \Sigma P_L T^2 - \Sigma P_L \Sigma T^2}{n \Sigma T^4 - (\Sigma T^2)^2} = \frac{nI - EG}{nH - G^2}$$

$$= \frac{6 \times 590898 - 478 \times 5819}{6 \times 7677334 - 5819^2} = 0.062598605$$

$$B = \frac{1}{n} (\Sigma P_L - A \Sigma T^2) = \frac{1}{n} (E - AG)$$

$$= \frac{1}{6} (478 - 0.062598605 \times 5819) = 18.956452$$

(4) 计算相关系数 r 。

用式(4-60)求取相关系数 r :

$$\begin{aligned} r &= \frac{n\sum P_L T^2 - \sum P_L \sum T^2}{\sqrt{[n\sum T^4 - (\sum T^2)^2][n\sum P_L^2 - (\sum P_L)^2]}} \\ &= \frac{nI - EG}{\sqrt{[nH - G^2][nF - E^2]}} \\ &= \frac{6 \times 590898 - 478 \times 5819}{\sqrt{[6 \times 7677334 - 5819^2][6 \times 46148 - 478^2]}} = 0.994 \end{aligned}$$

(5) 计算各负载点的杂散损耗

上述计算的相关系数 $r=0.994$, 符合用B方法 ≥ 0.9 的要求, 则可用式 $P_s = AT^2$ 计算得到各负载点“真正”的杂散损耗 P_s 。

根据计算斜率 $A=0.062598605$ 和各试验点的输出转矩值, 可求得各试验点的杂散损耗 P_s (W) 并填入表4-42中, 例如第一点为

$$P_s = AT^2 = 0.062598605 \times 43.43^2 = 118.1W$$

8. 计算输出功率、效率和功率因数

(1) 分别用以下各式计算输出功率 P_2 (W)、效率 η (%) 和功率因数 $\cos\varphi$ 。例如第一点为

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m + P_s) \\ &= 7710 - (458.5 + 231.7 + 165 + 120 + 118.1) \\ &= 6617W \end{aligned}$$

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{6617}{7710} \times 100\% = 85.82\%$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}I_1 U_1} = \frac{7710}{1.732 \times 13.78 \times 380} = 0.850$$

(2) 数据列表。将上述数据列入表4-42中。

(二) 绘制工作特性曲线

利用表4-42中的数据, 以输出功率 P_2 为横轴, 其他为纵轴, 在同一坐标纸上绘制下述工作特性曲线。应注意将纵坐标设法按曲线的不同分开层次, 做到既分布均匀, 又避免相互交叉, 见图4-72。

(1) 定子电流特性曲线: $I_1 = f(P_2)$ 。

(2) 转差率特性曲线: $s = f(P_2)$ 。

(3) 效率特性曲线: $\eta = f(P_2)$ 。

(4) 功率因数特性曲线: $\cos\varphi = f(P_2)$ 。

表 4-42 定子电流、效率、功率因数、转差率和输出转矩计算表

测点序号	定子电流 I_1 (A)	定子铜耗 P_{Cu1} (W)	铁心损耗 P_{Fe} (W)	机械损耗 P_m (W)	转子铜耗 P_{Cu2} (W)	杂散损耗 P_s (W)	输入功率 P_1 (W)	输出功率 P_2 (W)	效率 η (%)	功率因数 $\cos\varphi$	转差率 s (%)	输出转矩 T (N·m)
1	13.78	458.5	165	120	231.7	118.1	7710	6617	85.82	0.850	3.27	43.43
2	12.40	371.1			186.2	93.1	6890	5955	86.42	0.844	2.93	38.57
3	10.84	283.2			137.2	67.5	5870	5097	86.83	0.823	2.53	32.84
4	9.59	221.6			108.7	43.4	5050	4391	86.96	0.800	2.33	26.33
5	8.09	157.6			68.8	29.5	4000	3459	86.48	0.751	1.87	21.71
6	6.21	92.7			36.4	12.6	2640	2213	83.84	0.646	1.53	14.21
从特性曲线上得到的 $P_2 = P_N = 5.5\text{kW}$ 时的满载数值					I_1	P_1	s	η	$\cos\varphi$	T		
					11.52A	6.35kW	3.93%	86.6%	0.836	36.1N·m		

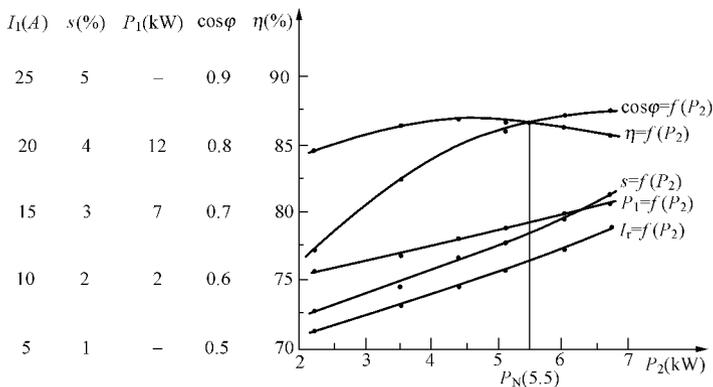


图 4-72 工作特性曲线

(三) 确定额定输出功率时的性能数据

从上述工作特性曲线上查取对应于 $P_2 = P_N = 5.5\text{kW}$ 时的定子电流、效率、功率因数、输入功率和转差率。这些数据一般会接近于铭牌、样本或技术条件标准等文件给出的对应数值，但不一定相等，有些差距还可能较大。为了和额定值相区别，一般将它们称为“满载值”，例如“满载电流”、“满载效率”等。

满载的输出转矩通过满载转差率和额定输出功率计算求得。本例为 $71.69\text{N} \cdot \text{m}$ 。

本例的满载数值见表 4-42 最下一行。

(四) 计算满载定子绕组温升

本例最后求得的定子满载电流为 11.52A，而热试验稳定时的定子电流为 11.61A，两者之差的百分数为 -1.33%，在 ±5% 之内，所以使用简单的温升修正公式将热试验得到的温升 55K 修正到满载时的数值。

$$\Delta\theta_{IL} = 55 \times \left(\frac{11.52}{11.61} \right)^2 \approx 54\text{K}$$

十、最大转矩和最小转矩测试试验及计算

(一) 所选用的设备和试验过程

本例被试电动机的额定功率为 5.5kW，采用满压实测整条转矩-转速关系曲线法，求取最大转矩和最小转矩。

采用 200N·m 的转矩-转速传感器（按估算公式为 $10 \times 2 \times 5.5 = 110\text{N} \cdot \text{m}$ ，若考虑转矩-转速传感器具有 1.2 倍的过载能力，可以选择 100N·m 的规格，但考虑到较小容量的电动机最大转矩倍数可能超过 3 倍，所以选用 200N·m 规格会更好些）配用直流电机（由双联直流发电机组供电）组成的测功系统进行加载；通过函数记录仪同时绘制转矩与转速、电机端电压与转速的两条关系曲线。

先由空载到堵转（或者到反转），然后再由堵转到空载，绘制转速下降和上升两条曲线，每条曲线的绘制时间在 15s 左右。

试验所得转矩与转速、电机端电压与转速的两条关系曲线如图 4-73 所示（对原实测曲线抖动较大的非关键部位进行了适当的修整）。

(二) 求取最大转矩

从曲线的定标点（A 点）40N·m/50mm 可以算出坐标系中的纵轴（转矩和电压轴）为每 1mm 代表 0.8N·m。由此可计算出两条转矩曲线各自的最大转矩点 B 和 C 点的数值 $T_{\max1}$ 、 $T_{\max2}$ 分别为 113.6N·m 和 122.4N·m，通过电压曲线得到 B、C 两点所对应的电压 U_1 、 U_2 分别为 383V 和 383.8V。

由于试验时的电压与额定电压相差在额定电压的 ±10% 之内，可以利用转矩与电压的平方成正比的关系将实测数据进行修正，得到额定电压时的数值 $T_{\max1N}$ 、 $T_{\max2N}$ 。

$$T_{\max1N} = T_{\max1} \left(\frac{U_N}{U_1} \right)^2 = 113.6 \left(\frac{380}{383} \right)^2 = 111.83\text{N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max2N} = T_{\max2} \left(\frac{U_N}{U_2} \right)^2 = 122.4 \left(\frac{380}{383.8} \right)^2 = 119.99\text{N} \cdot \text{m}$$

取上述 $T_{\max1N}$ 、 $T_{\max2N}$ 两个数值的平均值为被试电动机额定电压时的最大转矩值 T_{\max} ，即

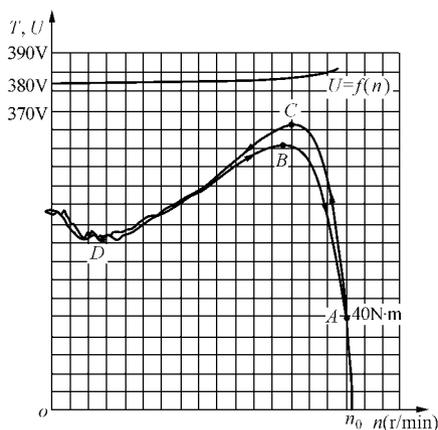


图 4-73 转矩-转速与电压-转速关系实测曲线

$$T_{\max} = (T_{\max 1N} + T_{\max 2N})/2 = 115.91 \text{ N} \cdot \text{m}$$

为额定转矩 T_N 的 3.18 倍 ($T_N = 9.549P_N/n_N = 9.549 \times 5500 \div 1440 = 36.47N \cdot m$)。

(三) 求取最小转矩

从堵转到空载的转矩曲线上得到起动过程中的最小转矩点 D 点的数值为 $72.8N \cdot m$ ，该点对应的电压 U_3 为 $378.1V$ 。

由于试验时的电压与额定电压相差在额定电压的 $\pm 5\%$ 之内，可以利用转矩与电压的平方成正比的关系将实测数据进行修正，得到额定电压时的数值 T_{\min} 。

$$T_{\min} = T_{\min t} \left(\frac{U_N}{U_3} \right)^2 = 72.8 \left(\frac{380}{378.1} \right)^2 = 73.53N \cdot m$$

为额定转矩 T_N ($36.47N \cdot m$) 的 2.02 倍。

十一、噪声测试及计算

本例是机座号为 132 的普通 5.5kW 三相异步电动机，按噪声测试标准的规定，应采用半球面法布置 5 个测点，球面半径为 1m。

测量采用显示声压级的声级计。实测数据如表 4-43 所示。

由于实测值与环境噪声值相比，相差 30dB 左右，已远大于 10dB，所以也无需对其进行环境噪声修正。

另外，每两相邻点的数据差都小于 5dB，所以不用另加测点，并采用计

算5点平均值的简单方法取得声压级的最终结果，再加8dB转化成声功率级。

表 4-43 噪声测试数据及计算结果

测点序号	1	2	3	4	5	环境
实测数据 L_p [声压级, dB (A)]	59	60	62	59	60	30
试验结果	声压级 L_p : 60dB (A) 转化成声功率级 L_w : 68dB (A)					

十二、振动测试及计算

振动测量量为“振动速度有效值”，单位为 mm/s。共测量6点，其中第6点为反转后轴伸端沿轴向的测点。实测数据如表4-44所示。

取其中最大值作为最终试验结果。

表 4-44 振动测试数据及计算结果

测点序号	1	2	3	4	5	6
实测数据 (速度有效值, mm/s)	0.95	0.80	0.75	1.00	0.85	0.95
试验结果	1.00mm/s					

十三、其他试验

除上述试验外，还应过转矩试验、超速试验、耐电压试验、匝间耐冲击电压试验等。在此不详细讲述，只将其试验数据列于下面的性能汇总表中。

十四、试验结果汇总

将上述主要试验数据和计算结果汇总于一个表中（见表4-45）。表中的一些数据来源如下：

（一）定子铜损耗

定子铜损耗用最后求得的满载电流与换算到基准工作温度时的定子电阻求得。

（二）转子铜损耗

转子铜损耗用最后求得的满载转差率和相关损耗求得。

（三）满载转矩

满载转矩用满载转差率和额定输出功率求得。

（四）计算倍数的基值

（1）转矩倍数的基值——额定转矩，为用铭牌数据求得的数值
36.47 N·m。

（2）堵转电流倍数的基值——额定电流，为铭牌电流 11.6A。

(五) 短时过转矩倍数

短时过转矩倍数按最大转矩标准值去掉容差的数值 (2.07)。

该表还包括有关考核标准 (包括其容差), 对于新设计试制的产品试验, 还应给出对应的设计值用于和试验值相比对。

吃容差的计算方法是:

吃容差的百分数 = (实测值 - 不含容差的标准值) ÷ 容差值 × 100%。

例如本例的“满载效率”吃容差的百分数 = (88 - 86.6) / (88 - 86.2) × 100% = 77.8%。

表 4-45 三相异步电动机性能数据汇总表
 型号: Y132S-4 5.5kW 380V 50Hz 11.6A Δ接 1440r/min
 B 级绝缘 S1 工作制

数据名称	单位	标准值	含容差	试验值	备注和结论
绝缘电阻 (热态)	MΩ	≥0.38	—	500	合格
25 时的定子相电阻	Ω			1.977	
额定电压时空载线电流	A			4.83	
额定电压时空载输入功率	W			337	
额定电压时的铁耗	W			165	
机械损耗	W			120	
环境温度为 25 时的定子铜耗	W			320.5	
环境温度为 25 时的转子铜耗	W			171.8	
杂散损耗	W			81.6	
总损耗	W			858.9	
满载线电流	A			11.52	
额定电压时堵转输入功率	kW			28.223	
额定电压时的堵转转矩	N·m			80.12	
额定电压时的堵转线电流	A			79.8	
满载转矩	N·m			36.1	
堵转电流/额定电流	倍	≤7.0	≤8.4	6.88	合格
堵转转矩/额定转矩	倍	≥2.2	≥1.87	2.20	合格
最大转矩/额定转矩	倍	≥2.3	≥2.07	3.18	合格
最小转矩/额定转矩	倍	≥1.1	≥0.94	2.02	合格
满载效率	%	≥88.0	≥86.2	86.6	吃容差 77.8%
满载功率因数	-	≥0.84	≥0.81	0.836	吃容差 13.3%

续表

数据名称	单位	标准值	含容差	试验值	备注和结论
满载转差率	%			2.93	
定子绕组温升 (电阻法)	K	≤80	-	54	合格
定子铁心温升 (温度计法)	K			30	
机座表面温升 (温度计法)	K			29	
轴承温度 (温度计法)		≤95	-	45	合格
进风温度/出风温度				26/39	
短时过转矩	N·m, s	75.5, 15		75.5, 15	合格
匝间耐冲击电压	V	2500		2500	合格
绝缘强度 (耐电压)	kV, s	1.76, 60		1.76, 60	合格
2min 超速	r/min	1728		1728	合格
噪声 (声功率级)	dB (A)	≤78	≤81	68	合格
振动 (速度有效值)	mm/s	≤1.8	-	1.0	合格

第二十三节 用异步机反转法 实测杂散损耗的实例

一、说明

本例被试电动机为 Y160M-4 (380V、50Hz、22.6A、1460r/min、接法 Δ、绝缘等级 B 级、S1 工作制), 采用异步机反转法进行试验并求得高频杂散损耗, 基频杂散损耗用经验系数进行计算。

二、高频杂散损耗试验

高频杂散损耗试验数据见表 4-46。

表 4-46 高频杂散损耗试验数据记录表

测点 序号	被试电机数据				陪试电机数据				高频杂散损耗 P'_{sh} (W)
	定子电流 I_1 (A)				输入功率 P_1 (W)		输入功率 P_{a1} (W) (最后一点为 P_{a0})		
	I_{11}	I_{12}	I_{13}	倍	$W_1 \times 20$	$W_2 \times 10$	$W_1 \times 40$	$W_2 \times 40$	
1	56.2	56.2	56.0	0.5	100.0	- 59.3	60.1	- 14.7	452
2	49.2	49.2	49.3	0.5	78.2	- 48.2	56.9	- 18.8	338
3	42.7	42.8	42.9	0.5	59.7	- 38.0	53.8	- 20.2	306
4	35.0	34.3	34.9	0.5	41.0	- 27.0	51.2	- 23.4	215
5	27.9	27.3	27.3	0.5	26.4	- 17.7	48.7	25.7	132
6	20.0	19.5	19.5	0.5	13.0	- 9.0	46.8	- 27.8	79.2
7	—	—	—	—	—	—	44.7	- 30.0	—

注 停机后立即测得的被试电机定子绕组线电阻 R_1 为 0.5326Ω。

三、计算各试验点的高频杂散损耗

(1) 计算各试验点的电流平均值 I_1 和功率值 P_1 及 P_{a1} 或 P_{a0} 。

(2) 用式 $P'_{sh} = P_{a1} - P_{a0} - (P_1 - 1.5I_1^2R_1)$ 计算各试验点的高频杂散损耗 P'_{sh} 。例如第一点：

$$\begin{aligned}
 P'_{sh} &= P_{a1} - P_{a0} - (P_1 - 1.5I_1^2R_1) \\
 &= 1816 - 588 - (1407 - 1.5 \times 28.1^2 \times 0.5326) \\
 &= 452\text{W}
 \end{aligned}$$

(3) 将上述计算值填入表 4-46 中。

四、绘制高频杂散损耗与定子电流的关系曲线

绘制高频杂散损耗与定子电流的关系曲线 $P'_{sh} = f(I_1)$ ，见图 4-74。

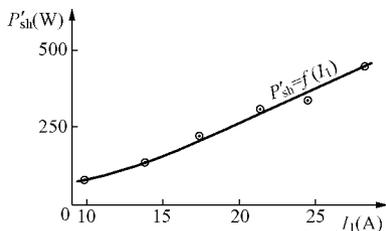


图 4-74 高频杂散损耗与定子电流的关系曲线 $P'_{sh} = f(I_1)$

五、效率计算时求取各试验点杂散损耗的方法

在最后确定各试验点的效率时，各试验点的杂散损耗数值由负载试验点的定子电流和空载电流来确定在杂散损耗与电流的关系曲线求取问题。

具体做法是：

(1) 用公式 $I'_1 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ 算出在高频杂散损耗与电流的关系曲线上查找该电流点所对应的高频杂散损耗数值 P'_{sh} ，例如第一点负载电流为 28.73A，空载电流为 8.5A，则第 1 点的 I'_1 为

$$I'_1 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2} = \sqrt{28.73^2 - 8.5^2} = 27.44\text{A}$$

(2) 在高频杂散损耗与电流的关系曲线（见图 4-74）上查找电流为 27.44A 点所对应的高频杂散损耗数值 P'_{sh} 为 435W。

(3) 利用式 $P_s = (1 + 2C) P'_{sh}$ ，设定系数 $C=0.1$ ，即 $P_s = 1.2 P'_{sh}$ ，求出该试验点的总杂散损耗 P_s 。

$$P_s = 1.2 P'_{sh} = 1.2 \times 435 = 522\text{W}$$

所有 7 个试验点的高频杂散损耗数值 P'_{sh} 见表 4-47。

表 4-47 以电流值 $\sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ 从高频杂散损耗曲线上查取对应的高频杂散损耗和总杂散损耗值

试验点序号	1	2	3	4	5	6	7
$\sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ (A)	27.44	25.02	22.10	20.10	16.86	13.61	9.64
高频杂散损 P'_{sh} (W)	435	380	315	272	205	150	77
总杂散损耗 P_s (W)	522	456	378	326.4	246	180	92.4

第二十四节 采用圆图计算法求取 最大转矩的计算实例

国家标准规定,对于 100kW 以上的电动机,如限于设备能力,不能实测最大转矩时,可以通过相关的试验后,用圆图计算法求取最大转矩。

现以一台 Y450L2-10 的普通低压三相异步电动机为例,说明用圆图计算法求取最大转矩的过程。

该电动机铭牌所标额定值和经过相关试验获得的原始数据见表 4-48,其中杂散损耗按额定功率的 0.5% 给出,满载转差率为实测值。计算过程见表 4-49。

表 4-48 利用圆图计算法求取最大转矩的原始数据

电机型号: Y450L2-10

出厂编号: 10088

序号	项 目	代号	数值
1	额定功率	P_N	355kW
2	额定相电压	U_N	380V
3	额定频率	f_N	50Hz
4	额定相电流	I_N	424.4A
5	额定转速	n_N	595r/min
6	接法	Δ	—
7	绝缘等级	F	—
8	空载相电流	I_0	206A
9	空载损耗	P_0	8660W
10	机械损耗	P_m	1258W
11	$2.5I_N$ (相电流)	I_k	1061.2A
12	$2.5I_N$ 时的堵转相电压	U_k	183V
13	$2.5I_N$ 时的堵转输入功率	P_k	144300W
14	基准工作温度时的相电阻	R_1	0.007062 Ω
15	满载转差率	s	0.0103
16	满载杂散损耗	P_s	1775W

表 4-49 用圆图计算法求取最大转矩的过程

序次	项 目	计算公式和说明
1	(1) 求取空载电流的有功分量 I_{0R} (2) 求取空载电流的无功分量 I_{0X}	$I_{0R} = (P_0 - P_m) / 3U_N$ $= (8660 - 1258) \div (3 \times 380) = 6.49$ $I_{0X} = \sqrt{I_0^2 - I_{0R}^2} = \sqrt{206^2 - 6.49^2} = 205.9$
2	(1) 求取额定电压时的堵转电流 I_{KN} (2) 求取额定电压时的堵转功率 P_{KN} (3) 求取堵转电流的有功分量 I_{KNR} (4) 求取堵转电流的无功分量 I_{KNX}	$I_{KN} = I_K U_N / U_K = 1061.2 \times 380 \div 183 = 2203.6$ $P_{KN} = P_K (U_N / U_K)^2 = 144300 \times (380 \div 183)^2 = 622202$ $I_{KNR} = P_{KN} / 3U_N = 622202 \div (3 \times 380) = 545.79$ $I_{KNX} = \sqrt{I_{KN}^2 - I_{KNR}^2} = \sqrt{2203.6^2 - 545.79^2} = 2135$
3	求取最大转矩的计算中间参数	$(1) K = I_{KNR} - I_{0R} = 545.79 - 6.49 = 539.3$ $(2) H = I_{KNX} - I_{0X} = 2135 - 205.9 = 1929.1$ $(3) r = 0.5 (H + K^2 / H)$ $= 0.5 (1929.1 + 539.3^2 \div 1929.1) = 1040$ $(4) I_{2K} = \sqrt{K^2 + H^2} = \sqrt{539.3^2 + 1929.1^2} = 2003$ $(5) K_1 = I_{2K}^2 R_1 / U_N = 2003^2 \times 0.00706 \div 380 = 80.46$ $(6) \text{由 } \tan \beta = H / K_1 = 1929.1 \div 80.46 = 23.98$ <p>求出 $\beta = 87.61^\circ$ 和 $\tan (\beta / 2) = 0.9592$</p> $(7) T = 3rU_N \tan (\beta / 2)$ $= 3 \times 1040 \times 380 \times 0.9592 = 1137183$ $(8) P_e = (P_N + P_m + P_s) / (1 - s)$ $= (355000 + 1258 + 1775) \div (1 - 0.0103) = 361759$
4	求取最大转矩倍数 K_T (倍)	$K_T = T_{max} / T_N$ $= \gamma T / P_e = 0.9 \times 1137183 \div 361759 = 2.829$
5	求取最大转矩值 T_{max} (N·m)	$T_{max} = K_T \cdot T_N = 2.829 \times (9.549 \times 355000 \div 595) = 16118$ <p>式中 $T_N = 9.549 \times P_N / n_N$, 为电机的额定转矩</p>

第二十五节 三相异步电动机试验报告分析

一、对试验报告内容的检查

一台电机经过型式试验并编制出试验报告后，应对试验报告的内容进行详细地检查。检查的内容包括如下几个方面。

(1) 各项考核指标是否达到了标准的要求。

(2) 最后结果中的数据是否处于正常范围内。正常情况下，这些数据和考核标准，特别是设计值或原有同规格的电机试验值不会有较大的差异。

(3) 若同时试验了2台同规格的电机，则将它们进行对比。两者的同一性能数据应较接近。特别是效率、功率因数、满载电流和满载转矩等项目，相差一般应在 $\pm 2\%$ 之内。温升一般不会相差5K以上。

(4) 检查各条特性曲线是否正常。正常情况下，应有75%以上的点在曲线上。曲线的走势和形状应符合正常的规律。

二、对不合格项目的分析

当出现不合格项目时，应对其进行分析，有必要时结合拆机直观检查等，找出不合格的原因，提出改进或其他处理措施。

表4-50给出了三相异步电动机试验数据与电机所用材料、生产工艺及制造过程等方面的相互关系，供分析时参考。在分析的原因中未考虑电源电压等外界因素，或者说，前提是外界因素符合要求。

表4-50 三相异步电动机主要性能与有关因素的关系

项目	与有关因素的关系
(一) 效率 偏低	1. 定子铜损耗大 (1) 定子绕组电阻大 1) 导线电阻率大或线径小或并绕根数少 2) 连线错误或接点焊接不牢 3) 匝数多于正常值 (2) 定子电流大 1) 其他4项损耗有较大的增加 2) 定子绕组不对称，使三相不平衡 3) 气隙严重不均匀 4) 匝数少于正常值，此时电阻将少于正常值 5) 绕组接线有错误 2. 转子铜损耗大 (1) 转子绕组（导条）电阻大 1) 铝（铜）的电阻率较大 2) 铸铝转子导条或端环内有气孔或氧化铝等杂质，局部有细条等 3) 转子铁心槽不齐、错片或反片等，使槽的有效截面积减小 4) 因铸铝时铝水的温度过高或过低或加热时间过长，造成铝的组织酥松，电阻率增加 5) 铸铝时用错铝料，例如普通铝转子使用了合金铝 6) 用错转子

续表

项目	与有关因素的关系
(一) 效率 偏低	(2) 转子电流大
	1) 用错转子
	2) 铸铝时用错铝料, 例如合金铝转子使用了普通铝
	3) 转子铁心叠压不实, 造成大面积的片间进铝, 使转子横向电流过大
	3. 杂散损耗较大
	(1) 定子绕组型式或节距选择不当
	(2) 定、转子槽配合选择不当
	(3) 气隙过小或严重不均匀
	(4) 转子导条与铁心严重短路
	(5) 定子绕组端部过长
	(6) 开口槽转子的槽口未车开
	4. 铁心损耗偏大
	(1) 硅钢片质量较差
	(2) 定子铁心片间绝缘不好
	1) 未进行绝缘处理或未处理好
	2) 铁心叠压时的压力过大, 使片间绝缘破坏
	3) 车定子内膛或用锉锉槽时, 将铁心片与片短路
	(3) 铁心片数不足, 重量少
	1) 码片数量不足
	2) 叠压压力较小, 未压实
	3) 冲片毛刺较大
	4) 涂漆过厚
	(4) 磁路过于饱和, 此时空载电流与电压的关系曲线弯曲得较严重
	(5) 空载杂散损耗较大, 因试验时它被包含在铁耗中, 使铁耗显得较大
	(6) 用火烧或通电加热等方法拆出绕组时, 造成铁心过热, 使导磁性能下降和片间绝缘损坏
	5. 风摩损耗较大
	(1) 轴承或轴承装配质量不好, 此时轴承将严重发热
(2) 外风扇用错 (如 2 极电机使用了 4 极的风扇) 或扇叶角度有误	
(3) 机座和两端盖轴承室不同轴度较大	
(4) 轴承室直径小于标准值, 使轴承外圈受压变形, 造成轴承摩擦损耗加大	
(5) 轴承室内加入的润滑脂过多或油脂质量不好	
(6) 定、转子相擦 (俗称“扫膛”)	
(7) 转子轴向尺寸不正确, 造成两端顶死, 使转动不灵活	
(8) 活动端 (一般为轴伸端) 的轴承盖轴向尺寸较长, 将轴承挤死	
(9) 油封或甩水环等部件安装不正或变形, 产生较大的摩擦阻力	

续表

项目	与有关因素的关系
(二) 功率 因数 偏低	1. 气隙过大或定转子轴向错位 2. 铁心质量不符合要求(原因同铁心损耗较大的内容) 3. 绕组匝数少于正常值 4. 磁路设计过于饱和 5. 槽斜度过大
(三) 堵转 转矩 偏小	1. 转子电阻较小 (1) 铝(铜)过纯或用错牌号 (2) 用错转子 2. 转子槽口宽度较小 3. 应为开口槽,但实际加工成了闭口槽或半闭口槽 4. 定、转子气隙过小或不均匀 5. 定子绕组匝数过多或节距太小 6. 转子槽斜度过大或定、转子槽配合不合理 7. 铸铝转子片间进铝较严重 8. 有严重的断条故障
(四) 堵转 电流 偏大	1. 转子电阻较小 2. 气隙过大或定转子严重错位 3. 定子绕组匝数少于正常值或节距较短 4. 铁心重量不足 5. 铸铝转子铁心片间严重进铝 6. 铁心质量较差或磁路过于饱和 7. 定子绕组端部长度小于设计值
(五) 最大 转矩 较小	1. 定、转子气隙过小或不均匀 2. 转子槽斜度过大或定、转子槽配合不合理 3. 定子绕组匝数过多 4. 转子有断条
(六) 温升 较高	1. 损耗大(同效率低的原因) 2. 用错风扇,应用大风扇,实用了小风扇 3. 进风口或出风口被堵塞或设计尺寸较小 4. 散热不良和导热不良,此时出风温度与进风温度之差较小 (1) 浸漆质量未达到要求,在绕组内部存在较多的气孔 (2) 机座与铁心接触不密合,造成导热面积减少 5. 定、转子气隙较小,甚至于局部有扫膛现象

续表

项目	与有关因素的关系
(七) 噪声大	1. 机械噪声大 (1) 使用了较大的风扇 (2) 轴承质量不佳甚至损坏, 轴承内油脂过多或过少 (3) 轴承装配质量不符合要求, 例如与转轴或轴承室不同轴度较大、轴向受压等 (4) 定、转子气隙较小或不均, 造成局部有扫膛现象 (5) 进风或出风的风路设计不合理, 例如在局部产生旋涡 (6) 某些部件松动或因设计尺寸问题 (例如挡风板太大太薄) 造成共振 2. 电磁噪声 (1) 定、转子槽配合不合理, 特别是变极多速电机, 因各极数不能全部兼顾, 所以容易在其中一个极数中产生较大的电磁噪声 (2) 定、转子气隙较小或不均 (3) 定子铁心叠压不实, 浸漆不透, 通电产生交变磁场后, 可活动的片产生高频振动 (4) 浸漆质量未达到要求, 绕组端部有些线松动, 在交变的磁场作用下产生高频噪声 (5) 定子绕组节距或转子槽斜度不合理 (6) 因设计原因或铁心质量原因造成磁路饱和较严重
(八) 振动大	1. 轴承质量较差或装配不良, 轴承室过紧或过松 2. 因轴承盖止口高或波形弹簧过硬、多片等原因, 使两端轴承均被卡死 3. 转子动平衡精度不符合要求 4. 定、转子气隙不均, 局部有扫膛现象 5. 转子有断条, 此时负载电流将按一定的周期大小摆动 6. 部件装配不到位, 地脚不平或安装不稳定

第二十六节 GB/T 20137—2006 《三相笼型异步电动机损耗和效率的确定方法》简介

一、说明和相关规定

1. 适用范围

GB/T 20137—2006 《三相笼型异步电动机损耗和效率的确定方法》等同采用 IEC61972 : 2002 《三相笼型感应电动机损耗和效率的确定方法》，适用于三相笼型异步电动机，并规定了如下两种确定效率的方法：

方法 1——电动机试验使用转矩测量装置，根据测试结果求取负载杂散损耗值。

方法 2——电动机试验不测量转矩，采用推荐的负载杂散损耗值。

除非另有规定，否则方法 1 宜用于 150kW 及以下的电动机。

由于该标准中的主要内容都与 GB/T 1032—2005 中相应的内容基本相同，所以在此仅作简单地介绍。

2. 关于测量仪器仪表的准确度

(1) 试验测量所用的电量仪表、仪用互感器、转矩测量装置的准确度皆应达到 0.2 级（误差不超过满量程的 $\pm 0.2\%$ ）。

(2) 频率测量仪表的准确度为满量程的 $\pm 0.1\%$ ；转速测量仪表的读数误差应在 $\pm 1\text{r/min}$ 范围内。

(3) 温度测量仪允许误差为 ± 1 。

3. 不确定度限值

(1) 不确定度限值是指确定实际效率的不确定度。不确定度反应试验方法和测试仪表的误差。

(2) 采用方法 1 时，效率不确定度通常在 $\pm 0.5\%$ 的范围内，总损耗的不确定度在 $\pm 0.5\% / (1 - \eta)$ 的范围内。方法 2 不实测负载杂散损耗，所以无法确定评价效率不确定度限值。对已测取的各项损耗而言，通常其不确定度在已测损耗 $\pm 0.1\%$ 的范围内。

二、试验程序

(一) 负载试验

(1) 本试验开始记录试验数据之前，定子绕组温度与额定负载热试验测得的温度之差应不大于 5 。

(2) 对于方法 1，应用符合上述规定的测量装置测量转矩。

(3) 用合适的设备给电动机加负载, 调节负载, 从最大负载开始, 而后依次降低到最小值, 试验应尽快进行, 以减少试验期间电机温度的变化。一般记录 6 个负载点的数据 (宜在不小于 25% 和 100% 额定负载之间大致均匀选取 4 个负载点, 其余 2 个在大于 100% 但不超过 150% 额定负载之间均匀选取), 每一点包括输入电压 U 、频率 f 、电流 I 、功率 P_1 和输出转矩 T 、转速 n 。每个负载点测量期间, 电源频率的波动应在 $\pm 0.3\%$ 之内。

确定最大负载读数之前和最小负载读数之后的定子绕组直流电阻值 R 。100% 额定负载及更大负载时的电阻为最大负载读数之前的电阻值, 小于 100% 额定负载的电阻值可用 100% 额定负载读数之前和 25% 最小负载读数之后的电阻值, 并按与负载成线性关系来确定。也可以用安装在绕组上的热敏元件测量各负载点的定子绕组温度, 根据测得的绕组温度及试验前测得的温度和电阻, 确定各负载点的定子绕组电阻值。

(二) 空载试验

负载试验后, 被试电动机立即与负载脱开 (对于水冷电机, 负载试验后, 应立即切断水流)。对被试电动机施以额定频率的不同电压。在 125% 和 60% 额定电压之间, 至少取 4 个 (间隔大致均匀) 电压点, 包括 100% 额定电压。在 50% 和约 20% 额定电压或线电流最小或线电流不稳定时电压之间, 间隔大致均匀取 3 个或更多的电压点。

按电压降低的顺序测取读数, 试验应尽快进行。

在每一个电压点处, 测取输入电压 U_0 、电流 I_0 、功率 P_0 , 采用在最高电压读数之前和最低电压读数之后测量电阻的方法确定各电压点的定子绕组的直流 R_0 。每一电压点处的电阻值可用线性内插法确定, 起点是最高电压读数之前电阻值, 末点是最低电压读数之后的电阻值。也可以用安装在绕组上的热敏元件测量定子绕组温度的方法确定各电压点的电阻值。根据测得各电压点的绕组温度及试验前测得的温度和电阻, 确定各电压点处的电阻值。

(三) 效率的确定

确定效率需要进行温度换算和损耗分析。

1. 用空载试验数据确定机械损耗和铁心损耗

用空载试验数据确定机械损耗和铁心损耗的方法与本章第十二节《效率的确定方法》第三部分中有关 B1 方法的内容完全相同。

2. 负载杂散损耗的确定

(1) 要求用方法 1 时, 负载杂散损耗的确定方法与本章第十二节《效

率的确定方法》第三部分中有关 B1 方法的内容大体相同（具体作法详见本章第十一节第七部分的相关内容），要求对杂散损耗进行线性回归时所得相关系数不小于 0.95。

少量的不同在于如下两点：

1) 用实测的电源频率 f (Hz) 和转速 n (r/s, 请注意, 本标准转速单位的规定与常用的 r/min 不同) 以及极对数 p 计算转差率 s , 即

$$s = 1 - np/f \quad (4-105)$$

2) 当实测的输出转矩（对测转矩装置所引起的误差修正后的数值）和转速分别用 T (N·m) 和 n (r/s) 表示时, 输出功率 P_2 (W) 的计算公式为

$$P_2 = 2\pi Tn \quad (4-106)$$

(2) 要求用方法 2 时, 负载杂散损耗使用推荐值。推荐值的计算根据被试电动机的额定功率而定, 见表 4-51, 表中 P_1 为被试电机的输入功率, 单位为 kW。

认为非额定负载的负载杂散损耗与定子电流平方和空载电流平方之差成正比变化。

表 4-51 中的计算关系可用图 4-75 来表示, 使用时可根据额定功率及输入功率来查取。

应该说明的是, 图 4-75 的曲线不代表平均值, 而是大量实测值的上包络线, 在大多数情况下, 用此推荐值计算所得效率值会比方法 1 低。

表 4-51 负载杂散损耗推荐值与电机额定功率的对应关系

电机的额定功率 P_N (kW)	负载杂散损耗推荐值 (kW)
≤ 1	$0.025P_1$
$1 < P_N < 10000$	$[0.025 - 0.0051 \log_{10}(P_N)] P_1$
$\geq 10\ 000$	$0.005P_1$

3. 基准冷却介质温度的修正

(1) 定子绕组电阻的换算。将额定负载热试验确定的定子绕组电阻换算到基准冷却介质温度为 25 , 换算公式及相关规定如下

$$R_s = R_N \frac{235 + 25 + \theta_N - \theta_c}{235 + \theta_N} \quad (4-107)$$

式中 R_s ——换算到基准冷却介质温度为 25 后的定子绕组电阻, Ω ;

R_N ——额定负载热试验结束时确定的定子绕组电阻, Ω ;

θ_N ——额定负载状态下的定子绕组温度, ;

θ_c ——基准冷却介质温度（对于用周围空气冷却的, 为负载试验时

的环境温度)，。

实际上，式（4-107）是式（4-61）或式（4-62）中关于电阻修正的那部分。

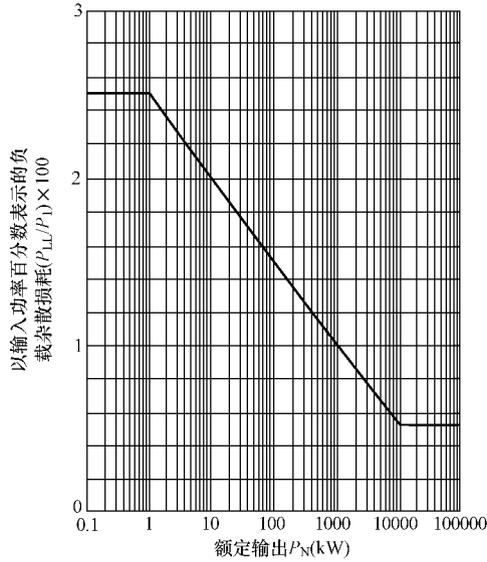


图 4-75 负载杂散损耗推荐值

(2) 转差率的换算。转差率的温度换算如下：

$$s_s = S(R_s/R_N) \quad (4-108)$$

式中 s_s ——换算到基准冷却介质温度为 25 后的转差率；

s ——负载试验时测定的转差率；

R_s ——换算到基准冷却介质温度为 25 后的定子绕组电阻， Ω ；

R_N ——额定负载热试验结束时确定的定子绕组电阻， Ω 。

本章将介绍绕线转子及几种常用的特殊用途三相异步电动机的特有试验项目及试验方法，其余常规项目请按前面第四章所讲述的内容进行。

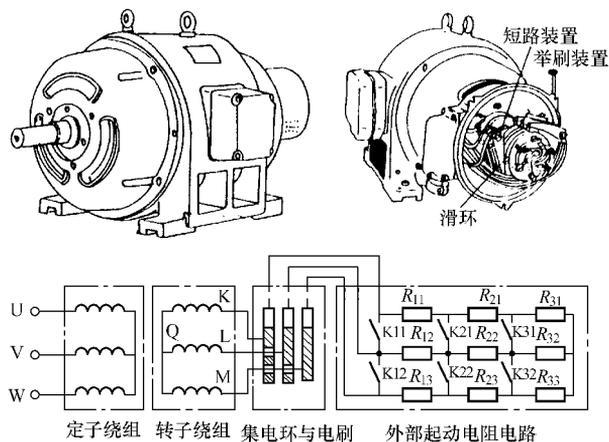
第一节 绕线转子三相异步电动机试验

一、绕线转子三相异步电动机简介

绕线转子三相异步电动机的主要特点是其转子绕组可与外加电阻相串联，并通过改变外加电阻的阻值来改变转子绕组回路的总电阻，从而改变其起动电流和起动转矩。在一定范围之内，外加电阻大，则起动电流小并且起动转矩大。

由其特点可知，此类电动机主要用于电源容量较小并需要高起动转矩的场合；因调节其转子外加电阻可在一定范围内调速，所以在一些需小范围调速的设备上也有应用。

图 5-1 是两种绕线转子三相异步电动机的外形示例和电路原理图。



5-1 绕线转子三相异步电动机的外形示例和电路原理图

二、绕线转子三相异步电动机特有通用试验项目及试验方法

(一) 定、转子电压比的测定试验

定、转子电压比是绕线转子三相异步电动机技术条件中给定的一项考核指标。测定绕线转子三相异步电动机定、转子电压比的试验又被称为测量转子开路电压试验。

1. 试验方法

试验通电前，为防止通电时由于转子铁心内感应电流的作用产生转矩，使转子转动，应先用器械将转子堵住。堵转子之前，要先通电观看转子转动方向，然后装设堵卡器具。对较小容量的电机，可用强度较高的木板支撑在电机轴伸的键槽处。

试验时，转子三相绕组开路。给定子绕组加额定频率的额定电压 U_{1N} 。在每两个集电环间测量三个绕组产生的感应电动势（习惯称为转子线电压 U_{21} 、 U_{22} 、 U_{23} ）。如图 5-2 所示。

测量时应使用绝缘符合要求的电压表和表笔，要注意防止触电。

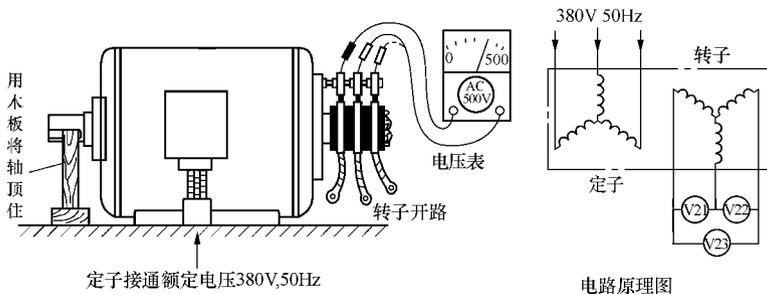


图 5-2 绕线转子三相异步电动机电压比测定试验示意图

2. 试验结果计算和处理

计算所测转子三个线电压的不平衡度。当定子三相电压平衡时，该值应不超过 $\pm 3\%$ （非国家或行业标准，请参考使用）。

用转子三个线电压的平均值 U_2 和定子额定电压 U_{1N} 相比求取电压比 B_U ，见式 (5-1)。

$$B_U = \frac{U_{1N}}{U_2} \quad (5-1)$$

电压比一般不用百分数或简化的分数，而是直接以定子额定电压为分子的分数形式给出。例如当 $U_{1N} = 380\text{V}$ ， $U_2 = 320\text{V}$ 时，电压比 $B_U = 380/320$ 。

当试验时定子电压实测值与额定值有差距时，应按正比关系将其修正到额定值时的数值。例如 $U_{1N} = 380\text{V}$ ，而实测值为 400V ，转子电压实测值为 340V ，则额定定子电压时的电压比为

$$B_U = \frac{380}{340 \times \frac{380}{400}} = \frac{380}{323}$$

电压比的考核标准应由生产单位在内部标准中给出。一般是直接用实测的转子电压与其额定值（转子额定开路电压，或简称转子额定电压、转子电压，在铭牌中给出）相差的百分数来表示。该百分数应在 $\pm 3\%$ 以内（非国家或行业标准，请参考使用）。

（二）转子绕组直流电阻的测定

三相绕线转子异步电动机的三相转子绕组一般都接成星形，并且在电机内部已封好，不引出中性线。所以在电机外部只能测量三个线电阻。

如无特殊规定，应在三个集电环间进行测量。

（三）转子绕组温升的测定

试验方法和有关计算同定子绕组的发热试验。应注意的是：在温升稳定停机测量热态直流电阻的过程中，接于定、转子绕组的两块电桥不能反复地合断各自的电源，否则将会因绕组产生感应电动势而影响另一块电桥的测量。可在一开始就将两块电桥的电源按钮（B按钮）按下并锁住，测量时只合、断检流计按钮（G按钮）。

三、绕线转子三相异步电动机出厂检查试验项目及试验方法

绕线转子三相异步电动机在进行出厂检查试验时，应进行如下项目：

（1）分别测量定、转子两套绕组的绝缘电阻和直流电阻。

（2）测量定、转子电压比或者是额定定子电压时的转子开路电压，方法见本节第二、（一）条所述的内容。

（3）进行低电压下的堵转试验。所加电压和需测取的数据与普通笼型转子三相异步电动机出厂堵转试验相关内容。试验时，应将转子堵住，无提刷装置的，转子绕组应在集电环上短路或将其三相引出线连接在一起短路；有提刷装置的，将提刷装置放置在“运行”位置。

（4）进行额定电压时的空载试验。试验时，转子绕组的处理方法同上述堵转试验。

（5）分别对定、转子绕组进行匝间耐冲击电压和对地（机壳）耐交流电压试验。

四、YZRW系列起重及冶金用涡流制动绕线转子三相异步电动机试验

本类电动机由一台绕线转子电动机和与其转子同轴相连的涡流制动器组成。在经常受到机械振动和冲击的户内各种型式的起重及冶金辅助设备中作为动力。

（一）基本参数和技术要求

1. 工作制

基准工作制为 S3（断续周期工作制），基准负载持续率为 40%，涡流

制动器的负载持续率为 15%，每个工作周期为 10min。

2. 三相绕组的接法

定子三相绕组为 Y 接，可只引出三条相线，也可引出中性线。

3. 涡流制动器的励磁电源

涡流制动器的励磁采用直流电源，电压为 $80 \pm 15\text{V}$ 。

4. 涡流制动器的考核指标

涡流制动器的考核指标有如下 3 个（具体数值见表 5-1）：

（1）额定制动力矩：涡流制动器在转速为 100r/min、励磁绕组达到热稳定时的制动力矩。

（2）限定制动力矩：涡流制动器在转速为（950 ~ 1000）r/min、励磁绕组达到热稳定时的制动力矩。

（3）涡流制动器转子的转动惯量 GD^2 。

表 5-1 YZRW 系列电动机涡流制动器的考核指标

电动机机座号	112	132	160	180	200	225	250	280
额定制动力矩 (N·m)	7	18	64	118	170	235	390	590
限定制动力矩 (N·m)	26	64	196	245	390	540	785	1180
转动惯量 GD^2 (kg·m ²)	0.5	1.2	2.3	5.0	7.5	11.5	21	35

5. 发热部件的温度或温升

发热部件的温度或温升限值见表 5-2。

表 5-2 YZRW 系列电动机温升及温度限值

发热部件	F 级绝缘	H 级绝缘
	(环境空气温度 40)	(环境空气温度 60)
定、转子绕组和制动器励磁绕组温升 (电阻法)	95K	100K
集电环温升 (温度计法)	90K	90K
制动器电枢表面温度 (温度计法)	150	150
轴承温度 (温度计法)	95	115

6. 绕组的绝缘电阻

各绕组的热态绝缘电阻应不小于表 5-3 中规定的数值。表中 U_N 为定子额定电压， U_2 为转子的额定开路电压， U_{FN} 为制动器励磁绕组的额定励磁电压，单位均为 V。

7. 绕组绝缘耐交流电压

各绕组耐交流电压的数值应按表 5-3 中的规定，试验时间为 1min。

表 5-3 YZRW 系列电动机各绕组的热态绝缘电阻限值和耐交流电压值

绕组名称	项 目	技 术 标 准
定子绕组	热态绝缘电阻 (MΩ)	$0.001U_N$
	耐交流电压 (V)	$2U_N + 1000$
转子绕组	热态绝缘电阻 (MΩ)	$0.0025U_2$
	耐交流电压 (V)	$4U_2 + 1000$
制动器励磁绕组	热态绝缘电阻 (MΩ)	1
	耐交流电压 (V)	$2U_{FN} + 1500$

8. 超速

电机超速时, 应空载运行, 制动器不加励磁, 转速为 1.2 倍最大转速, 历时 2min。最大转速为被试电动机同步转速的 2.5 倍。

9. 噪声

电机在空载无制动励磁的运行状态下测试噪声, 考核标准略。

10. 转子开路电压和转动惯量

转子开路电压和转动惯量见相关标准。

(二) 发热试验方法

试验按 S3 工作制加负载运行, 工作周期如图 5-3 所示。也可经折算将 S3 工作制等效为 S1 工作制或 S2 工作制进行试验。

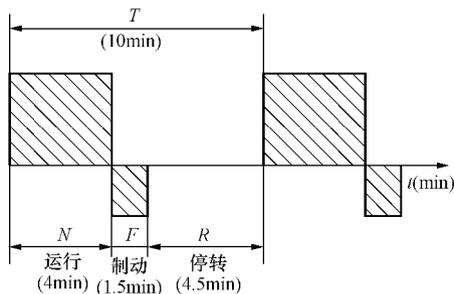


图 5-3 YZRW 系列电动机工作周期图

试验时, 制动器应加额定制动力矩。温升测定应在温升稳定的最后一个周期中最大负载时间一半终止时进行。

(三) 制动器额定制动力矩及机械特性曲线的测定试验

1. 实测法

试验时被试电机应达到温升稳定状态。

可用测功机等测功设备测出整条制动曲线，即制动力矩和电机转速的关系曲线 $T_Z = f(n)$ ，从曲线上查取 $n = 100\text{r/min}$ 时的制动力矩值。或将被试电动机拖动到 100r/min 的转速后，逐渐给制动器励磁绕组加励磁电压到其额定值，如此时转速下降，应调整到 100r/min 。读取此时的制动力矩。

2. 用绘图计算的间接试验方法

如限于试验设备能力，可采用测出一定数量的相关参数后通过绘图计算的方法，间接地求出制动器的额定制动力矩。具体试验和计算过程如下（电阻、电流、功率和损耗、力矩的单位分别为 Ω 、A、W 和 $\text{N}\cdot\text{m}$ ）：

(1) 被试电动机转子绕组外接三相可调电阻 R_w ，制动器由可调的整流电源供电。

(2) 试验前或试验后测出定子绕组的直线条电阻 R_1 。

(3) 通过空载试验，求得被试电机的铁心损耗 P_{Fe} 和机械损耗 P_m 。

(4) 试验时，给制动器加不同的励磁电流 I_F （不少于 5 次，其中应包括额定励磁电流的一次）。起动被试电动机，通过切换串接在电机转子绕组上的外接电阻 R_w 来逐步改变电机的转速 n 。测出与电机转子转速相对应的输入功率 P_1 、定子线电流 I_1 。

(5) 用公式 $P_{Cu1} = 1.5I_1^2 R_1$ 求出定子铜耗 P_{Cu1} 。

(6) 用下式求取各测试点的制动力矩 T_Z 。式中 n_s 为被试电动机的同步转速。

$$T_Z = 9.549(P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} - P_m) / n_s \quad (5-2)$$

(7) 绘制制动器不同励磁电流时的制动力矩与转速的关系曲线 $T_Z = f(n)$ ，如图 5-4 所示。

(8) 从 $I_F = I_{FN}$ 对应的 $T_Z = f(n)$ 曲线上查出 $n = 100\text{r/min}$ 时的制动力

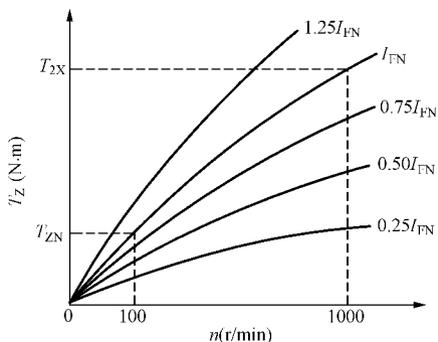


图 5-4 涡流制动器的机械特性曲线 $T_Z = f(n)$

矩,即为额定制动力矩 T_{ZN} ;查出 $n = 1000\text{r}/\text{min}$ 时的制动力矩,即为限定制动力矩 T_{ZX} 。

五、冶金及起重用强迫通风型绕线转子三相异步电动机试验

(一) 基本型式

该类电动机适用于经常有机械振动及冲击、频繁起动、制动(电气的或机械的)及逆转的户内各种型式的起重机械及冶金辅助设备的电力传动动力。额定功率在 132kW 及以下。基准工作制为 S1,用户需要时也可制成 S2 ~ S7 工作制。

根据通风的型式,该类电动机分为 YZRG 和 YZRF 两个系列。两者的技术条件合为一个,编号为 JB/T 7078-2002。

YZRG 系列采用管道通风,由用户自备送风管道,其风量与风压应按使用说明书中的规定。

YZRF 系列采用自带扇风机,一般要配用进风过滤器。

(二) 技术要求和试验特点

该类电动机各部位温升或温度的限值、超速值及时间、绕组绝缘电阻限值及耐电压等方面的规定和前面讲过的 YZRW 系列电动机完全相同。

该类电动机在进行发热试验时,须在电动机起动的同时,按技术条件的要求从电机的进风口通入风压、风量;温升稳定后,在切断电源的同时,必须停风。

六、YZR-Z 系列起重专用绕线转子三相异步电动机试验

(一) 基本型式和技术要求

该类电动机适用于要求过载能力较大(最大转矩较大)、每小时起动次数较少的起重机和类似设备。工作制有 S2、S3、S4、S5 共 4 种,基准工作制的 S3 (40%)。定子绕组为 Y 接。

该类电动机的技术条件编号为 JB/T 7842—1995。

该类电动机的主要性能及试验方法与前面讲过的绕线转子电动机基本相同。对于发热试验,应按不同的工作制选择相应的试验方法。

下面重点介绍发热试验方面的内容。

(二) S2 短时工作制电动机的发热试验特点

如电动机指定用于几种不同时间和负载的短时定额,试验应在能产生最高温升的定额值下进行;若额定值不能事先确定,则试验应对所有指定的短时定额值进行。

试验方法同第四章介绍的普通 S2 工作制三相异步电动机,关于绕组热

态直流电阻测量问题，见本节第三项内容中相关部分。

(三) S3 断续周期工作制电机的发热试验特点

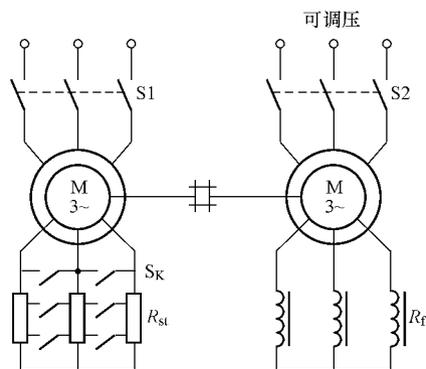
对于 S3 工作制电机，如无特殊规定，每个工作周期为 10min，负载持续率按铭牌上的规定。

(四) S4 断续周期工作制电机的发热试验特点

1. 试验设备

应按指定的每小时等效起动次数和负载持续率进行试验，并规定转动系统的额定惯量率 $FI=2$ 。

试验线路见图 5-5。其中 R_{st} 为被试电动机 M 的转子绕组外接起动电阻，宜采用铬铁铝电阻，并应不少于 3 级，电阻全值应使电动机起动电流的平均值限定在规定工作制时额定电流的 2 倍以内，各级电阻的短接时间应能保证起动电流的峰值不变，起动时间应不大于电动机通电时间的 30%； M_e 为负载电机，一般采用同规格的绕线转子电动机，其转子外接频敏电阻 R_f 或电抗器，试验时该电机处于反转制动运行状态，以获得恒定转矩特性，串接频敏电阻后，应使转子功率因数在 0.5（滞后）以下。



5-5 S4 工作制 YZR-Z 系列绕线转子电动机发热试验线路

2. 试验方法及有关计算

(1) 根据被试电动机指定的每小时等效起动次数 Z 和被试电动机与负载电机及传动设备（主要是联轴节）的转动惯量总和 GD^2 ，求得被试电动机的试验工作周期 $T(s)$ 和接电时间 $t(s)$ 。负载持续率用 FC 表示（%），则

$$T = \frac{3600}{Z} \quad (5-3)$$

$$t = T \cdot FC \quad (5-4)$$

(2) 根据 T 和 t 调整控制设备的试验时间控制器。按给定的负载（或定子电流）进行发热试验到温升稳定。

(3) 每小时等效起动次数 Z 按等值发热原理折算如下：

1) 点动结束时，若电动机的转速不超过额定转速的 25%，则 4 次点动相当于 1 次起动。

2) 电制动（制动到额定转速的 1/3）1 次相当于 0.8 次起动。

试验时，传动系统的惯量率 FI （%）按式（5-5）计算：

$$FI = \frac{GD_m^2 + G_{ext}^2}{GD_m^2} \times 100\% \quad (5-5)$$

式中 GD_m^2 ——电动机转子的转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

GD_{ext}^2 ——外加负载系统的转动惯量（折算到电动机轴上）， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

若试验在非额定的 FI 下进行，则可根据负载电机转动惯量的大小，改变每小时等效起动次数，以保证惯量率与每小时等效起动次数的乘积为常数。

选择试验设备时，一般应满足 $FI=2 \sim 8$ 的要求。

3. S5 断续周期工作制电机的发热试验特点

S5 工作制电机的发热试验允许按等效发热折算成 S4 工作制进行。

第二节 电动葫芦用锥形转子制动 三相异步电动机试验

一、常用系列及其技术条件

常用的电动葫芦用锥形转子制动三相异步电动机型号有 YEZS、YEZX、YREZ、YBFZ 和 YBEZX 等。它们的技术条件如下：

(1) JB/T 7076 - 2002 YEZS 系列起重用双速锥形转子制动三相异步电动机 技术条件

(2) JB/T 7562 - 2002 YEXX 系列起重用锥形转子制动三相异步电动机 技术条件

(3) JB/T 7564 - 1994 YREZ 系列起重用锥形绕线转子制动三相异步电动机 技术条件

(4) JB/T 10252 - 2001 YBFZ、YBEZX 系列起重用隔爆锥形转子制动三相异步电动机 技术条件

二、制动的工作原理

该类型电机的主要特点是利用其锥形转子的特殊结构在通电时产生电磁拉力，打开制动机构，使电机正常运转。图 5-6 是一台 YEZ（含 YEZS 和 YEXX）系列起重用锥形转子制动三相异步电动机的结构。现以此为例讲述其工作原理。

从图 5-6 中可以看到，该类电动机的定子内圆和转子外圆均为圆锥形，其锥形制动环镶于风扇制动轮 5 上；静制动环 6 镶在后端盖 9 上。

(1) 定子通电前，即电机静止时，转子在弹簧 1 和 2 的作用下，沿轴向向前轴伸方向平移，使外风扇上的制动环和端盖上的静制动环相接触，其静摩擦力可阻止转子的转动（包括带一定的转矩）。

(2) 定子通电后，由于电磁力的作用，转子将沿轴向向风扇端平移，从而压缩弹簧 1 和 2 并使制动环离开静制动环，使转子脱离制动状态，开始加速运转达到正常工作转速。

(3) 定子断电后，作用在转子上的电磁力随之消失，在弹簧力的作用下，动、静制动环相擦并产生制动力矩，使转子很快停转并处于制动状态。

三、基本参数

该类电动机的定额是断续工作制 S4，负载持续率不低于 25%，每小时等效启动次数不低于 120 次。电源频率为 50Hz，同步转速为 1500r/min。

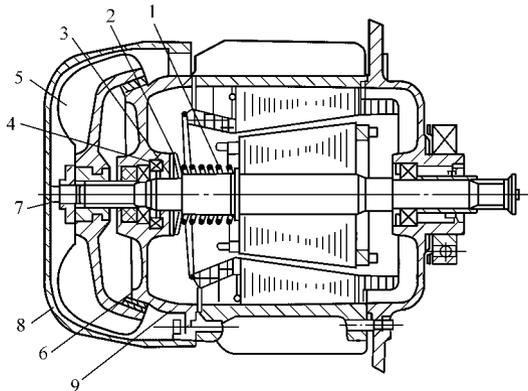


图 5-6 YEZ 系列起重用锥形转子制动三相异步电动机的结构

1—制动弹簧；2—缓冲蝶形弹簧；3—支撑圈；4—推力轴承；

5—风扇制动轮；6—锥形静制动环；7—调整螺母；8—风罩；9—后端盖

4.5kW 及以下的额定转速为 1380r/min；7.5kW 及以上的额定转速为 1400r/min。允许最大转速为 3750r/min。定子三相绕组一般为 Y 接，并只引出三个出线端。

四、特殊试验项目及试验方法

(一) 制动试验

制动试验包括静制动力矩和制动时间两项参数的测定试验。其试验设备和试验方法见本章第三节。

(二) 降压试验

(1) 试验前，被试电机应加额定负载工作到温升稳定。

(2) 试验时，被试电机安装于电动葫芦上或用经过验证的模拟负载方法带动额定负载，用额定频率但电压为 90% 额定值的电源给其供电，分别进行常速、慢速提升和运行试验。

(3) 试验中电机能正常工作为合格。

(三) 超速试验

用提高电源频率或由其他机械拖动的方法，将被试电动机转子的转速提高到最大转速的 1.1 倍，运行 2min。当使用其他机械拖动时，应使用释放装置将制动机构打开，脱离制动状态。

第三节 制动电动机的制动性能试验

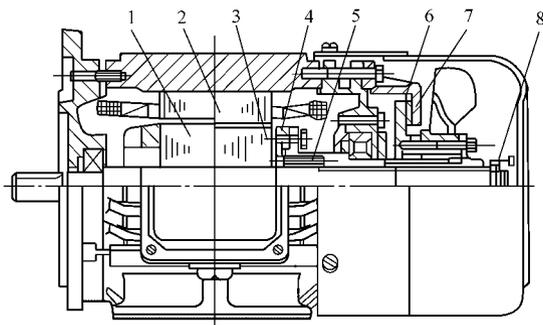
前一节介绍的锥形转子制动电动机即为电磁制动电动机的一个类型，另外还有若干种类型，例如 YEP 和 YEJ 系列等。

该类电动机试验的主要特点在于制动性能试验，其中包括静制动力矩和制动时间的测定两项试验。下面将介绍有关内容。

一、电机类型、结构和制动工作原理

(一) 旁磁式自制动型

图 5-7 是 YEP 系列旁磁式自制动型电机结构。该类电动机的技术条件编号为 JB/T 6448—1992。



5-7 YEP 系列旁磁式自制动型三相异步电动机结构

(a) 有外风扇式；(b) 无外风扇式

1—转子；2—定子；3—分磁铁；4—衔铁；5—弹簧；6—制动环；

7—制动端盘（可调）；8—调节装置（螺钉）

其制动工作原理如下：

当定子绕组通电产生旋转磁场时，它在转子分磁铁 3 中产生一个轴向磁吸力，吸引衔铁 4 向转子铁心方向移动，从而压缩弹簧 5 并带动制动环 6 离开静止的制动端盘 7，使转子脱离制动状态并开始运转。定子断电后，分磁铁 3 的磁力也随之消失，制动机构的可动部分在弹簧力的作用下向转子铁心的反方向移动并与静止制动盘 7 接触产生制动力矩，将转子制动停转。

(二) 电磁制动型

图 5-8 是 YEJ 型电磁制动型三相异步电动机的结构。该类电动机的技术

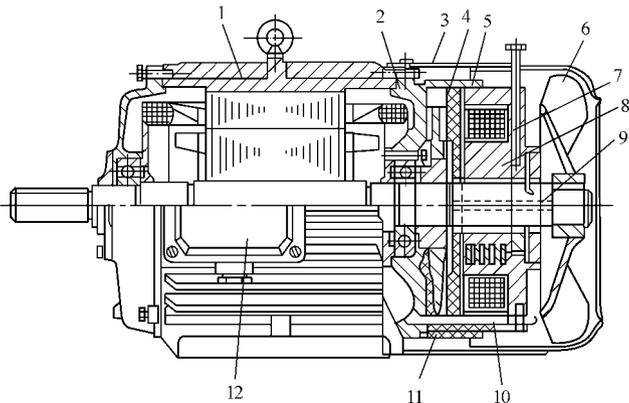


图 5-8 YEJ 系列电磁制动电动机

- 1—电动机；2—端盖；3—风罩；4—制动盘；5—密封圈；6—风扇；
7—激磁绕组；8—铁心；9—锥型弹簧；10—制动弹簧；
11—反作用弹簧；12—接线盒

条件编号为 JB/T 6456—1992。

其制动工作原理如下：

电磁制动电动机由一台普通三相异步电动机配一个电磁制动器组成，制动器安装在非工作轴伸端。制动器的励磁电流一般为直流电，根据不同的控制要求，可由单独直流电源供给，或从电机接线端引入交流电通过整流后供给。制动类型可分为两种，一种是在不加电的情况下，利用制动器的弹簧力对电机转子产生制动力，励磁线圈通电后，由电磁力将制动盘与固定在转子轴上的磨擦片脱开，消除制动状态，称为断电制动；另一种是制动器励磁线圈在不加电的时候无制动力矩，转轴可自由转动，励磁线圈通电后，即产生制动力，给转轴施加制动力矩，称为通电制动。前一种应用的比较多，所以我们主要介绍这一种的有关内容。

制动器又可分为 A 型和 B 型两种。A 型的励磁电流较小，容易实现单独供电，可以比较方便地通过人工对电机的制动时间及力度进行控制，图 5-9 (a) 为一个常用的电源电路。图 5-9 中 KM 为控制电机三相电源开关的接触器触点，其中 KM4 是一个动合辅触点；F 为电磁铁励磁线圈；V1、V2 为整流二极管，可用 2CZ 型；R₁、R₂ 为压敏电阻，用于对整流管和制动器励磁线圈的过电压保护。

B 型制动器励磁电流较大，一般由电机电源供电，其接线见图 5-9

(b)。B 型制动器靠较大的电机起动电流实现快速吸合，靠电机运行电流保持吸合状态。一般只在 20kW 以上的电机上应用。

A 型也称为并联型或电压型，B 型则称为串联型或电流型。

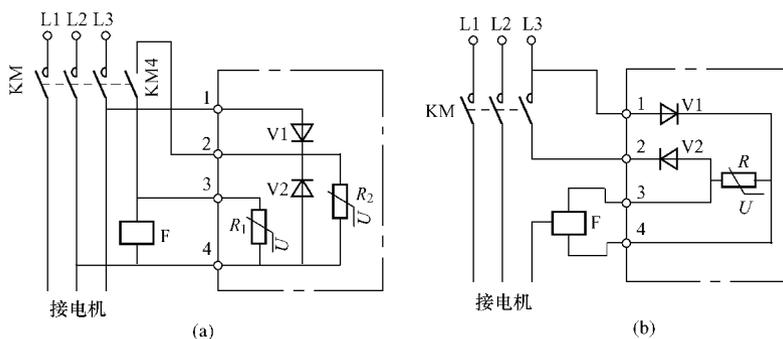


图 5-9 断电制动型制动器励磁电路

(a) A 型；(b) B 型

(三) 杠杆式制动型

电动机的制动结构如图 5-10 所示。制动装置安装在电机非轴伸端的端盖上，它由制动轮和抱闸组成。制动轮和轴装在一起，抱闸装在端盖上，其夹紧力由弹簧产生。

电动机的定子铁心比转子铁心稍长，在定子长出的部分内圆处，装有若干个半圆弧形衔铁。定子通电后，产生旋转磁场，同时也吸引衔铁到定子铁心上。衔铁向上移动，通过杠杆推动斜面滑块克服弹簧的作用力，将抱闸撑开，电动机开始转动。

定子断电后，吸力消失，斜面滑块在弹簧压力作用下滑出，抱闸夹住制动轮，使电动机停转。

二、静制动力矩测定试验

进行静制动力矩测定试验时，被试电机应处于制动状态。因此时不加载，所以可在任何环境中进行。现行的测定方法有如下 3 种。

(一) 测力计拉绳法

将一段结实的布带按图 5-11 (a) 所示压绕在电机的轴伸上，布带的末端系在测力计（如弹簧秤）下端的钩子上。

拉动测力计，时刻注意观察测力计的读数和电机转轴的动静。当转轴刚刚开始转动的时刻，记下测力计的指示值 F (N)。

测量出电机轴伸的直径（也可从电机样本或其他资料中查得） D (m)。

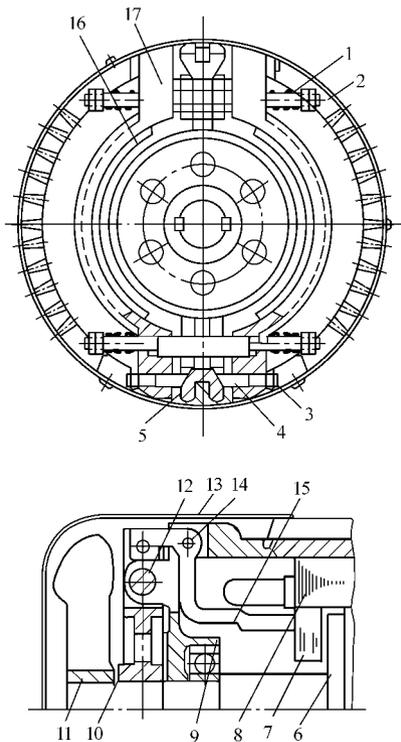


图 5-10 杠杆式自制动异步电动机

- 1—弹簧；2—调节螺母；3—调节螺钉；4—调节块；5—斜面滑块；6—转子；
7—弧形衔铁；8—定子；9—端盖；10—制动轮；11—风扇；12—刹车轴；
13—风罩；14—杠杆轴；15—杠杆；16—磨擦带；17—抱闸

若 D 值较小，且包裹的布带较厚，为了得到较准确的测量结果，则应测量包括布带在内的直径尺寸，则该被试电机的静制动力矩 M ($N \cdot m$) 用式 (5-6) 求取。

$$M = \frac{1}{2}FD \quad (5-6)$$

此方法的力臂较短，因此需用较大的拉力。所以只适用较小容量的电机。

对于较大一些的电机，可在其轴伸上安装一个联轴节或皮带轮，将布带包绕在轮的外圆或系在柱销上，加大力臂长度。如图 5-11 (b) 所示。

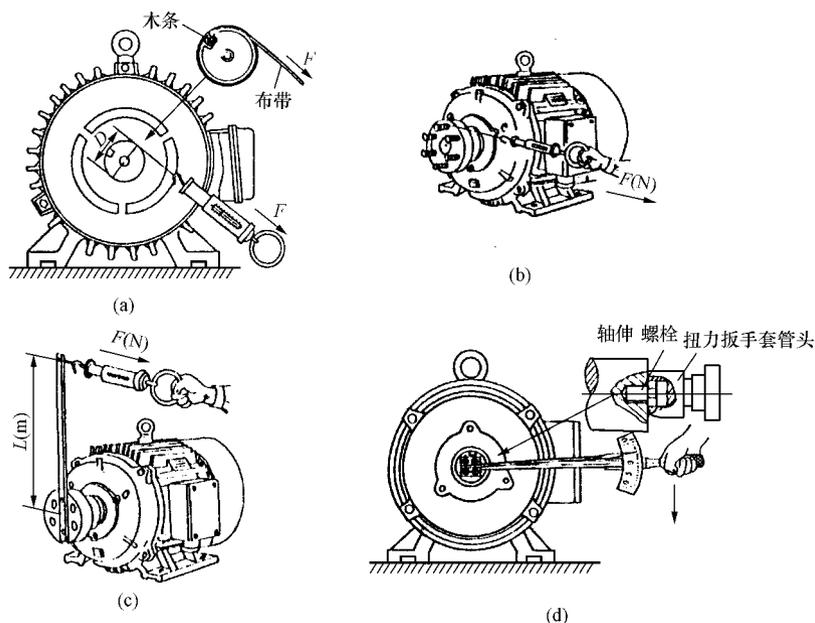


图 5-11 制动电机静制动力矩的测量方法

(a) 利用轴伸的测力计拉绳法；(b) 利用联轴节的测力计拉绳法；
(c) 测力计杠杆法；(d) 利用扭力扳手测定法

(二) 测力计杠杆法

测力计杠杆法如图 5-11 (c) 所示。所用杠杆为扁铁等材料，一端直接或通过联轴节、皮带轮等固定在被试电机轴伸端面。试验方法同上述(一)。若测力计读数为 F (N)，力臂长度为 L (m)，则制动力矩 M (N·m) 为

$$M = F \cdot L \quad (5-7)$$

(三) 用扭力扳手测定法

扭力扳手又被称为力矩扳手，常被用于旋紧或检查有扭力要求的螺丝（如内燃机的缸盖固定螺栓螺母、电机的安装螺栓等）。图 5-11 (d) 所示的是一种指针指示型，现已有数字显示的产品。

采用本方法时，需用电钻将电机轴伸端面中心孔进一步打深打大并攻丝（套出螺纹），将一个合适的螺栓拧入该螺孔中，旋到不能再旋进为止。用扭力扳手朝旋紧上述螺栓的方向用力旋转，在电机轴开始转动的时刻读取扭

力扳手的示值,该值即可认为是所需的静制动力矩。此方法因一般扭力扳手的测量准确度较低,所以只能用于要求不高的场合。

三、制动时间的测定试验

制动电动机的制动时间是指被试电动机空载运行到机械损耗稳定后,自断电时起到电机制动到完全停转为止所用的时间。该时间一般不会大于1s(有关要求见表5-4)。

由于该段时间太短,所以用普通计时仪表无法测定。下面推荐一种使用多线录波仪和测速发电机相配合的测定方法。

(一) 试验设备和线路

试验设备和线路如图5-12(a)所示。其中:S1为电源总开关;S2为被试电机电源开关;1为被试电动机;2为测速发电机,如无专用的测速发电机,可用大小较合适的电动玩具直流电动机,在其轴伸端套上一个机械离心式转速表用的胶皮头,如无这种专用的配件,则可套一段胶皮管,使用时与电机轴端中心孔的接触方法见图5-12(b)所示;3为分压电阻箱,可采用FF4型(永青示波器厂生产),也可用两个10kΩ左右和一个1kΩ左右的普通电位器代替,10kΩ的电位器接于开关S2的前后两端,1kΩ的电位器接测速发电机,通过它们将较高的电压降低后送给多线录波器4,如图5-12(c)所示;4为多线录波器,可采用上海电表厂生产的SC14型光线录波器,当然,也可通过专用软件用计算机记录和打印有关图形。

(二) 试验方法步骤

(1) 按图5-12(a)所示接好分压电阻箱、示波器和测速发电机的所有接线,将分压电阻(或电位器)的分压比(或电阻)置于最大位置。

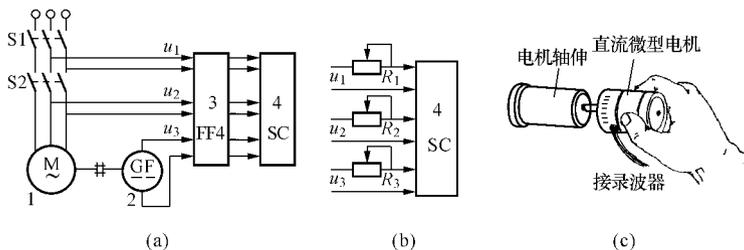


图 5-12 制动电动机制动时间测定试验设备和线路

(a) 试验电机和试验设备连接图;(b) 用电位器代替分压电阻箱的接线图;
(c) 用玩具电机作测速发电机的使用方法

(2) 给被试电动机加电,空载运行。在此期间,打开录波器的电源使其显示开关 S2 前后两个交流电压的波形,再将测速发电机与被试电机轴端接触,使其产生电压并通过分压电阻输入到录波器中。将上述 3 个电压波形分别调整在一个合适的位置并使其波动幅度大小适当。

(3) 电机空载运行到机械损耗稳定(一般运转 0.5~1h)后,将测速发电机与被试电机轴端接触,使其产生电压,并做好测绘曲线的一切准备工作。

在确定切断被试电机电源前的 1s 左右,打开录波器的录制(走录像纸)开关,开始录波;切断被试电机电源并在电机完全制动停转后停止录波。

(三) 对所录波形的分析和试验结果的确定

假设所录波形如图 5-13 所示,即 u_1 为开关 S2 前的交流电压波形,用于记录时间,当使用的电源频率为 50Hz 时,每一个完整的波形(或称为一个周期)占用时间为 $1s/50=0.02s$; u_2 为开关 S2 后(即被试电机接线端)的交流电压波形,用于记录电机的断电时刻; u_3 为测速发电机的直流电压波形(有较多的脉动成分,但不影响试验结果),用于记录电机的停转时刻。

由图中的记录曲线可以看出 A 点为电机断电时刻; B 点为电机停转时刻。A 和 B 之间的 u_1 电压波形为 6 个完整波,即占用时间为 $t_E=6 \times 0.02s=0.12s$ 。该时间即为被试电动机空载制动时间。

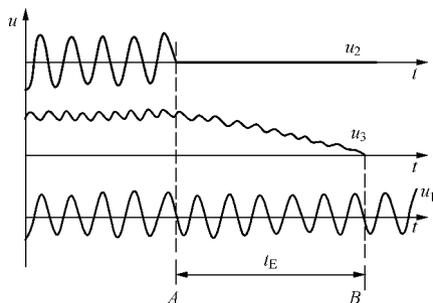


图 5-13 制动时间测试记录曲线

四、YEJ 系列电磁制动电动机制动性能指标

YEJ 系列电磁制动电动机制动性能指标包括静制动力矩(最小值允许

值)、空载制动时间(最大值允许值)和励磁功率(最大值允许值)。具体考核数值见表 5-4 所示。

表 5-4 YEJ 系列电磁制动电动机制动性能指标

机座号	80	90	100	112	132	160	180	200	225
静制动力矩 (N·m)	7.5	15	30	40	75	150	220	300	450
空载制动时间 (s)	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
励磁功率 (W)	50	60	80	110	130	150	150	200	200

第四节 YCT 及 YCTD 系列电磁调速电动机试验

一、YCT 及 YCTD 系列电磁调速电动机基本结构

YCT 及 YCTD 系列电磁调速电动机主要由一台普通的三相异步电动机和一台涡流离合器（简称离合器）及电磁调速控制器（以下简称控制器）组成，常见的结构如图 5-14 所示。

YCT 系列电磁调速电动机的技术条件编号为 JB/T 7123—1993。YCTD 系列电磁调速电动机的技术条件编号为 JB/T 6450—1993。

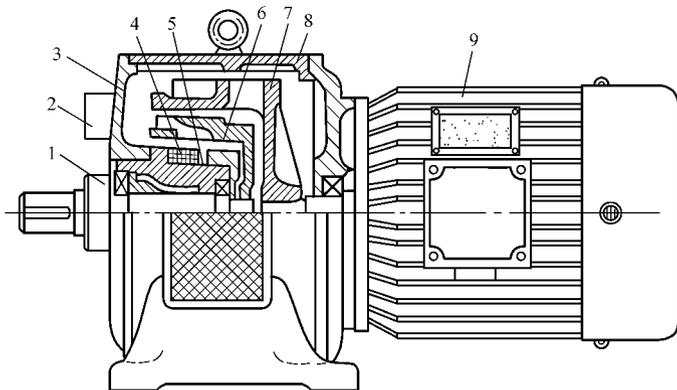


图 5-14 YCT 及 YCTD 系列电磁调速电动机基本结构

1—测速发电机；2—调速控制接线盒；3—端盖；4—励磁线圈；
5—托架；6—磁极；7—电极；8—机座；9—拖动电机

二、标称功率、额定转矩和额定调速范围

YCT 及 YCTD 系列电磁调速电动机的标称功率、额定转矩和额定调速范围是该类调速电动机 3 个主要使用数据。技术条件中的规定见表 5-5。

三、特有或有特殊要求的试验项目、试验方法及要求

YCT 及 YCTD 系列电磁调速电动机特有或有特殊要求的试验项目主要集中在它的电磁调速方面。下面介绍这些项目的具体试验方法和有关要求。

（一）绕组绝缘电阻的测定试验和对地耐电压试验

应分别测定电动机离合器励磁绕组和测速发电机绕组对地（机壳）的绝缘电阻，以及对其进行对地耐交流电压试验。耐交流电压试验历时均为 1min。

- (1) 离合器励磁绕组的绝缘电阻应不小于 $0.25\text{M}\Omega$ 。
- (2) 离合器励磁绕组耐交流电压：YCT 系列为 1500V ，YCTD 系列为 1275V 。
- (3) 测速发电机绕组耐交流电压：YCT 系列为 700V ，YCTD 系列为 600V 。
- (二) 直流电阻的测定试验
- 应分别测定电动机定子绕组和离合器励磁绕组的直流电阻。
- (三) 空载时测速发电机电压的测定试验
- 调速电动机空载运行，转数调整到 $1000\text{r}/\text{min}$ 。测量测速发电机的输出电压有效值。该电压值应不低于 20V ，不高于 35V 。

表 5-5 YCT 及 YCTD 系列电磁调速电动机的标称功率、
额定转矩和额定调速范围

机座号		标称功率 (kW)	额定转矩 (N·m)	额定调速 (r/min)	
				YCT 系列	YCTD 系列
112-4A	100-4A	0.55	3.6	1230 ~ 125	1250 ~ 100
112-4B	100-4B	0.75	4.9		
132-4A	112-4A	1.1	7.1		
132-4B	112-4B	1.5	9.7		
160-4A	132-4A	2.2	14.1	1250 ~ 125	1300 ~ 100
160-4B	132-4B	3	19.2		
180-4A	132-4C	4	25.2		
200-4A	160-4A	5.5	35.1		1350 ~ 100
200-4B	160-4B	7.5	47.7		
225-4A	180-4A	11	69		
225-4B	180-4B	15	94		
250-4A	200-4A	18.5	116	1320 ~ 132	1375 ~ 100
250-4B	200-4B	22	137		
280-4A	225-4A	30	189		1375 ~ 250
315-4A	250-4A	37	232		
315-4B	250-4B	45	282		
355-4A	280-4A	55	344	1340 ~ 440	1400 ~ 250
355-4B	315-4A	75	469		
355-4C	315-4B	90	564		

(四) 电动机在额定最高转速、额定转矩时励磁电流的测定试验

电动机的转速在额定最高转速并加负载使输出转矩达到额定值，测取离合器的励磁电流值；也可使电动机堵转，调节励磁电流使拖动电机的定子电流达到额定值，此时的励磁电流即为所求的额定励磁电流。

(五) 自然机械特性的测定试验

电动机工作在热稳定状态下，测定离合器在不同励磁电流时的转差率自 $0 \sim 1$ （或 0 到额定最低值）范围内的转矩-转速关系曲线。以额定最高转速、额定转矩时的励磁电流为 100%，分别测取接近于 25%、50%、75%、100% 励磁电流下的转矩-转速关系曲线 $T = f(n)$ 。这些特性曲线即为调速电动机的自然机械特性。

(六) 人工机械特性的测定试验

电动机工作在热稳定状态下，通过调速控制器测定额定最高转速 n_{\max} 、中间平均转速 $0.5(n_{\max} + n_{\min})$ 和额定最低转速 n_{\min} 三种情况下的机械特性曲线 $T = f(n)$ 。在每个转速下，使负载转矩由额定值至 5% 额定值范围内变化。记录相应的转速值，至少应测取三点。绘出三条机械特性曲线 $T = f(n)$ 。根据这三条曲线校核转速变化律。

(七) 离合器的发热试验

离合器的发热试验应使电机在额定电压、额定频率及闭环控制下进行。

1. YCT 系列电机

对 YCT 系列电机，在额定转矩时，分别在额定最高转速 n_{\max} 和额定最低转速 n_{\min} 两种情况下各进行一次发热试验。

2. YCTD 系列电机

对 YCTD 系列电机，按功率大小分成如下三种试验方法：

(1) 标称功率在 11kW 及以下的电机，在额定转矩时，分别在额定最高转速 n_{\max} 和额定最低转速 n_{\min} 两种情况下各进行一次发热试验。

(2) 标称功率在 15 ~ 30kW 的电机，在额定转矩时，分别在额定最高转速 n_{\max} 和 1/3 额定最高转速两种情况下各进行一次发热试验。

(3) 标称功率在 37kW 及以上的电机，在额定转矩、额定最高转速 n_{\max} 和 4/9 额定转矩、2/3 拖动电机铭牌转速两种情况下各进行一次发热试验。

用电阻法求得励磁绕组的温升；用点温计或热电偶测取轴承室和电枢的温度。取所测值中最大值为试验结果。

离合器励磁绕组的温升值与其绝缘等级有关，具体限值同普通电机绕组，即采用电阻法时，B 级绝缘为 80K，F 绝缘为 105K；离合器电枢的温升

限值没有明确的规定，以不达到其本身或其他邻近的绝缘或其他材料有损坏危险的数值为准。

(八) 离合器静态剩余转矩的测定试验

电动机在冷态强磁（直流电压为 90V）后，测取无励磁电流下的堵转转矩，即为离合器静态剩余转矩。该转矩应不大于额定转矩的 3%。

(九) 离合器堵转转矩的测定试验

试验时所用的设备和安装要求同普通异步电动机。拖动电动机加额定频率的额定电压，逐渐增加离合器的励磁电流，测定其制动转矩到额定转矩的 2 倍为止，同时测定最大励磁电压时的堵转转矩值。

(十) 热态短时过转矩试验

发热试验结束后，紧接着进行本项试验。电机加额定频率的额定电压，闭环控制在转速为额定最大转速的情况下，逐渐增加负载至 1.6 倍的额定转矩，历时 15s。

(十一) 热态超速试验

热态短时过转矩试验后，紧接着进行本项试验。电机加额定频率的额定电压，闭环控制下空载运行。逐渐增加励磁电流，使其输出转速达到 1.2 倍的额定最高转速，历时 2min。

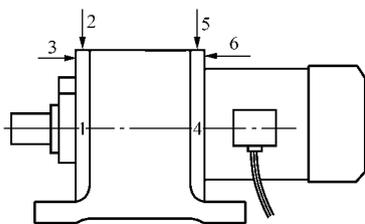


图 5-15 电磁调速电动机振动测量点的位置

(十二) 空载振动和噪声的测定试验

有关试验设备和试验方法同普通电动机。但应按图 5-15 标注的测点位置进行测量，并在规定的调速范围内（一般规定为 600r/min 至额定最高转速）产生最大振动或最大噪声的转速下进行试验测定。

空载振动和噪声的限值见表 5-6。噪声容差为 +3dB。

表 5-6 YCT 系列电磁调速电动机空载振动和噪声的限值

项 目		限 值							
振 动	电机机座号	112 ~ 132			160 ~ 225			250 ~ 355	
	速度有效值 (mm/s)	1.8			2.8			4.5	
噪 声	电机额定功率 (kW)	0.55 ~ 1.1	1.5 ~ 2.2	3.0 ~ 5.5	7.5 ~ 11	15 ~ 22	30 ~ 37	45 ~ 55	75 ~ 90
	声功率级 [dB (A)]	75	78	82	86	90	97	99	103

四、对配套控制器的要求

(一) 对转速变化率 δ_1 的要求

所用的配套控制器应能保证调速电动机在额定电压、额定频率和规定的调速范围内连续、平滑地调速，并接受测速负反馈信号，保证转速变化率 δ_1 ，一级要求的电机 $\delta_1 \leq 1.8\%$ ，二级要求的电机 $\delta_1 \leq 2.5\%$ 。

转速变化率 δ_1 用式 (5-8) 求取：

$$\delta_1 = \frac{n_{10} - n_e}{n_{\max}} \times 100\% \quad (5-8)$$

式中 n_{10} ——调速电动机在 10% 额定转矩时的转速（在 n_e 控制器同一给定信号下，减小转矩至 10% 额定转矩时的转速），r/min；

n_e ——调速电动机在额定转矩时的转速（在控制器某一给定信号下，在调速范围内的某一转速），r/min；

n_{\max} ——调速电动机在额定转矩时的额定最高转速，r/min。

(二) 对稳速精度 δ_2 的要求

调速电机的稳速精度 δ_2 应 $\leq 1\%$ 。稳速精度 δ_2 用式 (5-9) 计算求得

$$\delta_2 = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}} \times 100\% \quad (5-9)$$

式中 n_{\max} ——在规定的运行时间内，以 10min 的间隔周期连续测量若干个转速 n_t 中的最大值，r/min；

n_{\min} ——在规定的运行时间内，以 10min 的间隔周期连续测量若干个转速 n_t 中的最小值，r/min；

n_t ——在 t 时间内的平均转速，r/min， t 取 1s 或 1.25s。

五、对电磁调速控制器的试验及相关要求

以下内容中所讲到的端子序号请参考图 5-16。

(一) 带电部分与外壳的绝缘电阻测量

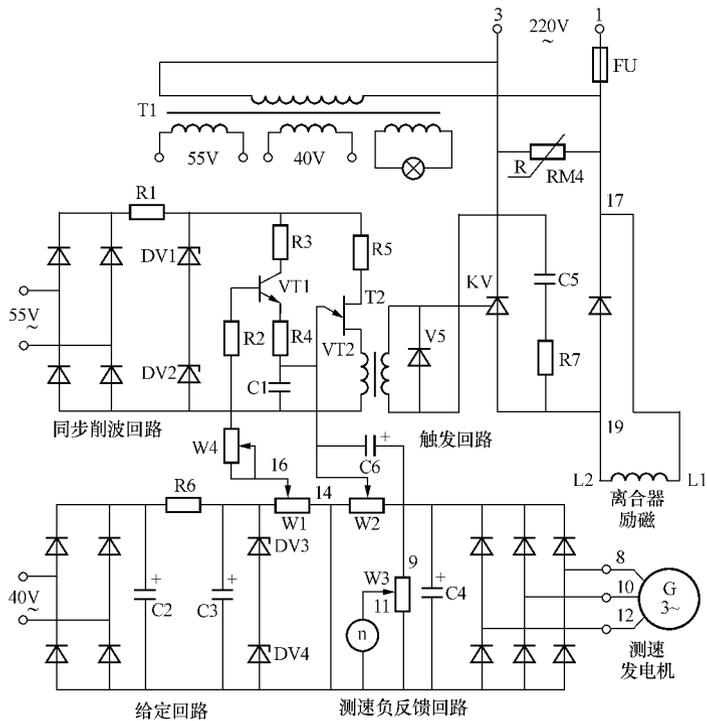
将控制器的电源输入端 1 和 2 与直流输出端 3 和 4 相互短路，用 500V 规格的绝缘电阻表测量上述短接点与控制器外壳或插座（插头）外壳之间的绝缘电阻。在正常工作温度时，应不低于 $1M\Omega$ 。

(二) 耐交流电压试验

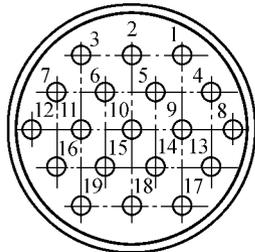
按上述（一）的方法将 1、2、3、4 端短路，在短接点与控制器外壳或插座（插头）外壳之间加交流电压进行试验，试验方法同普通异步电动机。试验电压和时间分别为 1500V 和 1min。以不击穿为合格。

(三) 在额定调速范围内调速时电机转速变化率的测定试验

测定时，首先将控制器给定电位器调至最大，再调节反馈电位器，用转



ZTK1型控制器原理线路图



控制器插孔顺序图

图 5-16 电磁调速电动机控制器电路及插座孔位置示例

速表测量调速电动机的转速，直到额定最高转速，并将校表电位器调到控制器的转速表指示为实际转速。

在调速电动机额定最高转速和额定最低转速发热试验后的热态时，在闭环控制状态下，分别测取其机械特性。在上述两种情况下分别使负载转矩由额定值至 $1/10$ 额定值范围内变化，记录相应的转速值，至少测取 3 点。给出相应的两条闭环机械特性曲线 $n=f(T)$ 。取有关数据，用式 (5-8) 求取转速变化率 δ_1 。 δ_1 的计算结果应符合技术条件的要求。

(四) 调速精度的测定试验

调速电动机在额定电压、额定频率、额定最高转速和 50% 额定输出转矩下，运行 20min 后，其控制器的电源电压从 198 ~ 242V 范围内变化（此时拖动电机保持电源电压和频率为额定值），在 1h 时间内每隔 10min 连续测量若干个转速值。取其中的最大值和最小值，用式 (5-9) 求取调速精度 δ_2 。调速精度 δ_2 应 $\leq 1\%$ 。

(五) 高低温循环试验

先将控制器的印刷线路板置于 (-40 ± 3) 的低温箱内存放 30min，然后取出置于试验室的环境温度下保持 2 ~ 3min，再放入温度为 $(+60 \pm 3)$ 的高温箱内存放 30min，再取出置于试验室的环境温度下保持 2 ~ 3min。如此循环 5 次。

试验后，用于调速电动机的控制时，其转速变化率仍能满足相关要求为合格。

(六) 高温存放试验

将控制器的印刷线路板置于 85 的高温箱内连续存放 72h，然后取出置于试验室的环境温度下恢复。待恢复到试验室的环境温度后用于调速电动机的控制时，其转速变化率仍应能满足相关要求为合格。

(七) 环境性能试验

将控制器置于 40 的高温箱内并将其与调速电动机连接，给其通电，调速电动机加 50% 的额定负载运行 4h 后，测量电机的转速变化率。然后，将控制器的通电输出端断开，置于 - 10 的低温箱内 4h 后，再与调速电动机连接并起动 3 次。

试验后，电机的转速变化率能满足相关要求为合格。

(八) 发热试验

控制器的输出端接入一个可变的电阻器，使控制器的输出电流为其额定值，待温升稳定后，用点温计、热电偶或其他温度计测量晶闸管与续流二极管连接母线的温度，该温度减去环境温度（测量和确定同普通电机的发热试验）即为温升。该温升值应不高于 55K。

（九）耐振试验

用机械方法或过渡结构将控制器牢固地安装在振动试验台的工作台面上。分别在3个相互垂直的轴向上进行多点定频耐振试验。在整个试验过程中，控制器处于带电工作状态，并且每10min测量一次电机的转速变化率。

试验过程中，电机的转速变化率应符合要求；试验后，控制器的箱体结构及零部件应无机械损伤、变形或紧固件松动现象。

（十）跌落试验

控制器的跌落试验在平滑、坚固的水泥地面或钢质的试验台上进行。跌落时，控制器底面与地面夹角不应大于 3° 。跌落试验进行3次。

试验后，控制器的箱体结构及零部件应无机械损伤、变形或紧固件松动现象；电机的转速变化率应符合要求。

第五节 井用潜水电动机试验

井用潜水电动机的分类主要在于它适用的潜水深度，有普通和深水之分。其试验设备也主要区别于试验用井的深度。下面介绍该类电动机特有或有特殊要求的试验项目、试验方法和有关考核内容。

一、主要系列和相关参数

(一) 主要系列和技术条件编号

常用的潜水三相异步电动机有 YLB 系列深井水泵用电动机和 YQS（充水式）系列井用潜水电动机两种，其技术条件的编号分别为 JB/T 7126—1993 和 JB/T 2818—1991。另外还有 YQSY（充油式）系列和 YQSP（屏蔽式）系列等。

(二) 相关参数

(1) 电动机的安装方式一般为 IMV3，工作制为 S1。

(2) YLB 系列的潜水深度可达 7m 以上，其余为 7m 以下。水温应不高于 20℃；水中固体含量（重量比）应不超过 0.01%，氯离子含量不超过 400mg/L；水的 pH 值在 6.5~8.5 范围之内。

(3) 充水式电机的内腔必须充满清水或其他制造厂规定配制的水溶液。

二、特有或有特殊要求的试验项目、试验方法和有关考核标准

(一) 发热试验和负载试验

井用潜水三相异步电动机在进行发热试验和负载试验时，应按技术条件的规定组装成套后潜入试验专用的井中，其泵的出水口与试验水循环管路联结，在试验循环管路中安装有节门、流量计及水压测量装置（水压表或水压传感器等）。通过循环管路，水将返回到试验井中。

试验时，调节出水管的节门，则可调节出水量的多少和压力，从而达到调节被试电动机负载的目的。

按规定的单位时间出水量或定子输入电流进行试验，并在规定的时间内完成发热试验和负载试验。试验的有关规定同普通电机。

(二) 绕组和连线绝缘电阻的测定及耐交流电压试验

1. 试验方法

试验时，应先将被试电机浸于接近室外的水中达 12h，再进行绝缘电阻的测量和交流耐电压试验。

2. 绝缘电阻的合格标准

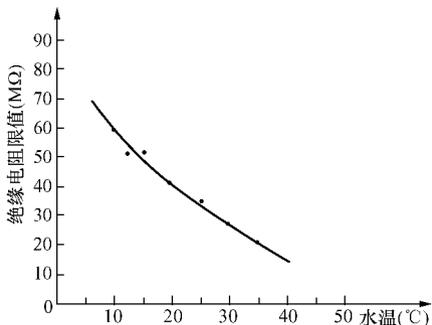
当按上述方法进行处理后立即进行测量时，对聚乙烯型和交联聚乙烯型

绕组的充水式电机，应不低于 $15\text{M}\Omega$ ；充油式和屏蔽式电机不应低于 $100\text{M}\Omega$ ；对聚氯乙烯型绕组，其绝缘电阻的限值与水温有关，见表 5-7。可利用表中给出的数据绘制一张关系图（见图 5-17），用于查找其他温度时的绝缘电阻限值。

当电机在接近于工作温度时，对充水式电机，应不低于 $0.5\text{M}\Omega$ ；充油式和屏蔽式电机不应低于 $1\text{M}\Omega$ 。

表 5-7 并用潜水电动机聚氯乙烯型绕组不同水温时的绝缘电阻的限值

水温 ()	10	15	20	25	30	35
绝缘电阻限值 ($\text{M}\Omega$)	60	50	40	33	25	20



5-17 并用潜水电动机聚氯乙烯型绕组绝缘电阻限值与水温的关系曲线

(三) 内腔耐压力试验

电机在组装后，应进行内腔耐压力试验。

对充水式和屏蔽式电机，其内腔所加压力为 0.05MPa ，历时 5min 。试验后，应无渗漏现象，当轴伸处的油封唇口朝外安装时，允许轴伸表面有微量渗漏，但应不影响试验的正常进行。对充油式电动机，在总装注油后，其内腔应能承受 0.2MPa 的压力，历时 5min 而无渗漏现象。

(四) 止推轴承承受推力试验

本试验可于轴承装配前在专用的试验台上进行。试验时，止推轴承的外圈放入工装槽内（相当于装入电机的轴承室内），内圈装在一根试验用假轴上，该假轴应用尼龙或紫铜等材料制作。用压力计配以压力杠杆机构（用于小机座号电机）或专用的油压机加压试验。压力加在假轴端，应注意压力方向应为轴向。

不同的机座号加不同的压力，详见表 5-8。

表 5-8 止推轴承承受推力试验所加的压力对应表

电机的机座号		100	150	175	200	250	300 ~ 400
承受的压力 (kN)	普通型止推轴承	1.5	6	8	10	15	22
	高推力型止推轴承	2.5	10	13	18	25	36

(五) 充油电动机的机械密封检查

对充油式电动机，在规定的条件下运行 24h 后，检查其机械密封处的泄漏量，应不多于 2.4ml。

第六节 YLJ 系列力矩三相异步电动机特有试验

一、性能特点简介

YLJ 系列力矩三相异步电动机一般用于卷绕机的动力，其现行技术条件编号为 JB/T 6297—1992。该类电动机的定额是从空载到堵转之间负载和转速连续变化的 S9 工作制的非周期工作制。与普通异步电动机相比，它有一个最特殊的规定是：一般情况下，它不是给出功率，而是给出额定堵转转矩，单位为 $N \cdot m$ 。具体规格有如下 18 个：

0.5, 1, 1.6, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 16, 25, 40, 60, 80, 100, 125, 160, 200。

额定堵转转矩和额定堵转电流是此类电动机的两项最重要的性能指标，它们是电动机在额定频率的额定电压下，按规定允许堵转时间时限测定的堵转转矩和电流值。

规定允许堵转时间时限的多少与电机的大小和外壳防护等级有关，机座号大的时间短。例如：外壳防护等级为 IP21 的最小机座号（63）电机为 30min；同类防护等级的最大机座号（180L）电机为 2min。

二、特有或有特殊要求的试验项目、试验方法和有关考核标准

（一）额定堵转电流和额定堵转转矩的测定试验

在额定频率和额定电压下，将电机从实际冷态开始堵转，在规定允许堵转时间时限测取的电流和转矩即为额定堵转电流 I_0 （A）和额定堵转转矩 T_0 （ $N \cdot m$ ）。

（二）堵转发热试验

试验前，先在实际冷态下测取定子绕组的冷态直流电阻。然后，在额定频率和额定电压下，将电机从实际冷态开始堵转，在规定的允许堵转时间时限后立即停电（但风机应继续运行），测取定子绕组的热态直流电阻，用普通电机温升计算的方法计算求取绕组的堵转温升值。

（三）运行发热试验

运行发热试验可紧接着堵转发热试验进行，若需进行机械特性测定试验，则应在机械特性测定试验后紧接着进行。

堵转发热试验后，紧接着给电机加额定频率的额定电压，使电机空载运行 30min 后，测取定子电流 I_0 （A）。然后，调节电机端电压，将电机的转速控制在 0.5 倍的同步转速（转速偏差 $\pm 10r/min$ ），使定子电流 I_0 （A）控制

在 $\sqrt{\left(\frac{I_d}{2}\right)^2 + 0.8I_0^2}$ (当 $I_0 > 0.55I_d$ 时) 或 $\frac{1}{2}\sqrt{I_d^2 + I_0^2}$ (当 $I_0 \leq 0.55I_d$ 时) 连续运行到温升稳定, 之后, 停机测取定子绕组的热态直流电阻并计算绕组的温升值。试验中的有关规定同普通电机。

(四) 机械特性测定试验

被试电机在堵转发热试验后, 立即从堵转至空载测定其机械特性。全部过程中, 转矩和转速读数应在 7 点以上。用测得的读数绘制机械特性曲线 $T = f(n)$, 见图 5-18。

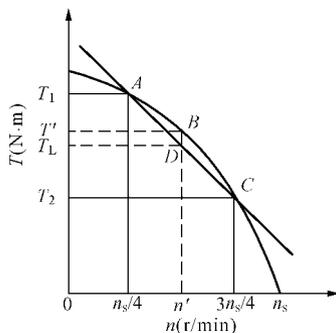


图 5-18 力矩电机机械特性曲线 $T = f(n)$

(五) 特性系数 K 和转矩最大变化率 δ 的求取

在机械特性曲线 $T = f(n)$ 上查出对应于 $1/4$ 同步转速的转矩值 T_1 和 $3/4$ 同步转速的转矩值 T_2 (见图 5-18), 则该被试电机的特性系数为

$$K = T_1/T_2 \quad (5-10)$$

转矩最大变化率 δ 用式 (5-11) 求取:

$$\delta = \frac{T' - T_L}{T'} \times 100\% = \frac{\Delta T}{T'} \times 100\% \quad (5-11)$$

式中 T' ——对应于实测机械特性曲线 $T = f(n)$ 上 $n = n'$ 时的转矩值, $N \cdot m$;

T_L ——对应于实测机械特性曲线 $T = f(n)$ 上转速 n 为 $1/4$ 和 $3/4$ 同步转速的两坐标点 A 和 B (见图 5-18) 连线构成的实测机械特性曲线 \overline{AB} 上转速 n 为 n' 时的转矩值 (图 5-18 中的 D 点对应的转矩值), $N \cdot m$;

n' ——实测机械特性曲线与机械特性之间转矩偏差最大时所对应的转速, r/min 。

第七节 变频调速电动机的试验方法

一、用变频器供电时的试验方法

交流变频调速电动机的额定电压和额定频率是指电动机输出恒转矩和恒功率特性间的转折点相对应的电动机工作电压和频率。

交流变频调速电动机的试验项目在 JB/T 7118—2004《YVF2 系列 (IP54) 变频调速专用三相异步电动机技术条件 (机座号 80 ~ 315)》中规定,其大部分项目的试验方法、要求和普通异步电动机基本相同,在如下几个方面的有特殊要求。

(一) 50Hz 时的电动机发热试验

先起动冷却风机,将变频器的输出频率调整到 50Hz,电动机带负载在额定转矩下运行。待温升稳定或达到规定的时间或周期后,停机(但冷却风机应继续运行)测量绕组的热态直流电阻及轴承等其他部件的温度。用普通电机的方法求取有关温升和温度值。

(二) 5Hz 时的电动机发热试验

5Hz 时的发热试验完成后,立即起动电动机,将变频器的输出频率调整到 5Hz,电动机带负载在额定转矩下运行。待温升稳定或达到规定的时间或周期后,停机(但冷却风机应继续运行)测量绕组的热态直流电阻及轴承等其他部件的温度。用普通电机的方法求取有关温升和温度值。

(三) 负载特性试验

在上述发热试验完成后,紧接着重新起动被试电动机带负载运行。将变频器的输出频率分别调至 3 (5)、15、30、50Hz,测取被试电动机在额定转矩、110% 额定转矩和 80% 额定转矩各点处的转矩值。随后,分别在 60、80、100Hz 的频率下,测取被试电动机在标称功率、110% 标称功率、80% 标称功率各点处的转矩值(此时的标称功率应折算成转矩)。最后绘制出被试电动机的负载特性曲线,见图 5-19。

在测试过程中,电动机应平稳运转,无明显的转矩脉动现象。

(四) 噪声测定试验

在变频电源供电的情况下,先起动冷却风机,分别在 20、50Hz 和 100Hz 三点频率(有要求时可增加其他频率点)下空载运行并测定电机的最大噪声值。有关试验方法和规定同普通电机。

(五) 振动测定试验

在变频电源供电的情况下,起动冷却风机,分别在 20、50Hz 和 100Hz

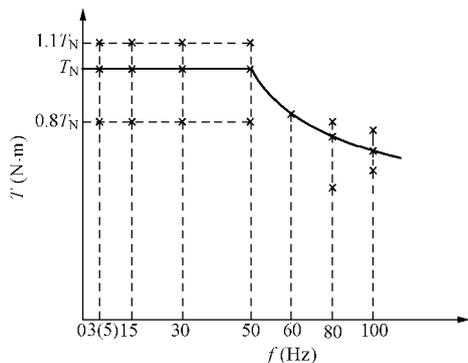


图 5-19 交流变频电动机负载特性曲线

三点频率下空载运行并测定电机的最大振动速度有效值。有关试验方法和规定同普通电机。

(六) 超速试验

电动机加额定电压，4kW 及以下的频率为 150Hz，4kW 以上的频率为 120Hz，空载运行 2min 的超速试验后，不发生有害变形。

(七) 堵转试验、最大和最小转矩试验

在额定电压和额定频率下，进行堵转试验、最大和最小转矩试验。

(八) 过转矩试验

过转矩试验在热试验后紧接着进行，在额定电压、额定频率下逐渐增加转矩，到额定转矩的 1.8 倍，历时 15s，应无转速突变、停转及发生有害变形。

(九) 绝缘电阻、耐交流电压和匝间耐冲击电压试验

本条 3 个试验的试验方法和普通电动机完全相同。不同点在于考核标准和试验电压值。

绝缘电阻应不低于 0.69MΩ；耐交流电压试验的电压值为 2380V，时间为 1min；匝间耐冲击电压试验的电压值（峰值），对机座号为 100 及以下的电动机为 3300V，对机座号为 100 以上的电动机为 3670V（容差为 $\pm 3\%$ ，波前时间为 0.5μs）。

二、确定损耗和效率的方法

国家标准 GB/T 755.2—2003《旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法》中的附录 A 给出了变频器供电笼型转子感应电动机确定损耗和效率的暂定方法。该方法适用于额定频率为 120Hz 及以下由变频器供

电的笼型感应电动机，所用变频器具有中间电路，其型式包括常用的脉宽调制式（PWM）的 I 型和 U 型（以下文中常提到的六阶梯波变频器属于脉冲控制变频器的一种特殊情况）。下面介绍该标准中的主要内容。

（一）推荐的方法

额定频率为 50Hz 或 60Hz 的交流异步电动机，按其额定功率推荐以下几种方法。

（1）额定功率 $\leq 50\text{kW}$ 、I 型或 U 型变频器供电的电动机采用输入-输出法。如经制造厂与用户协议，本方法也可用于额定功率较大的电动机。

（2）额定功率 $> 50\text{kW}$ 、I 型或 U 型变频器供电的电动机采用损耗分析法。

（3）在试验间做试验的电机（与定额无关）可用正弦波供电的损耗分析法并补充由 U 型变频器供电的空载试验。

（4）热量法适用于 I 型或 U 型变频器供电的任意定额的电动机。

（二）采用输入-输出法确定效率

本方法是一种优先采用的试验方法。它直观、易操作，并且因其输入功率和输出功率为直接显示，各项正常损耗和附加损耗均包括在两者的差值中，所以准确度相对较高。保证本方法所求效率值准确性的关键在于输入电功率和输出机械功率测量设备的准确度。

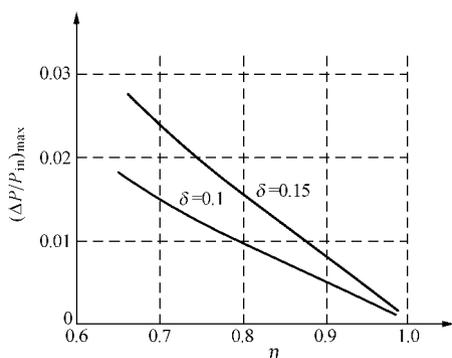
为使求得的电动机效率处于所要求的相对容差范围内，功率测量的最大相对误差 $(\Delta P/P_{in})_{\max}$ 应如图 5-20 所示随效率的增加而下降。图中 δ 为 GB 755—2000 中规定的标准容差值。假设输入功率 P_{in} 和输出功率 P_{out} 的误差相等，在此简化的基础上作出曲线。图 5-20 即是关系式 $(\Delta P/P_{in})_{\max} = \delta (1 - \eta) / (1 + \eta)$ 的图形。

如制造厂与用户达成协议，也可以测量变频器连同电动机的输入和输出功率，以确定整个系统的总效率。在这种情况下，不能单独地确定电动机的效率。另外，所配用的变频器应是用户将要配套的规格型号。

（三）损耗分析法确定效率

1. 损耗的分类和说明

电动机由变频器供电时，除产生由标准的正弦交流电所产生的各项损耗外，还将因变频器提供的输入电压和电流中较多谐波产生的一些额外附加损耗，这些附加损耗包括定子绕组中的附加铜损耗、转子绕组（笼条和端环）中的附加铜损耗和附加铁耗等几部分。这些附加损耗中，有些较难用常规的方法求出。



5-20 输入和输出功率测量的最大相对误差 $(\Delta P/P_{in})_{\max}$

在进行空载试验时，由于一般使用的变频器不能在较大的范围内调节其输出电压和转子铁损耗已不能忽略两方面的因素，而不能像通过调压器输入正弦交流电时那样求得机械损耗和铁损耗。

在进行负载试验时，因谐波产生涡流造成的损耗不能被准确地测得，将给转子铜耗的计算带来较大的误差。

由于上述原因，在使用损耗分析法确定效率时，必须作一些假设和修正。使用 I 型和 U 型变频器供电时，应采用不同的假设和修正要求。

2. 方波输出 I 型变频器供电时的假设与修正

假定由空载到满载之间的电流波形不变，则相对谐波含量与负载无关。同时，假定附加铁耗主要是由于漏磁通反向而产生的。在这些假定的前提下，因谐波而产生的附加损耗主要取决于电流，且将随定子电流有效值的平方而变化。

进行空载试验时，测得的输入功率和用直流电阻求得的定子绕组损耗之差，包含了恒定损耗（基频损耗）和因涡流导致电阻增加的定子绕组附加损耗、因谐波而产生的转子绕组损耗和附加铁耗。

进行负载试验时，如无其他规定，为了弥补在空载和负载状态下转子绕组谐波损耗的差值以及定子绕组谐波涡流损耗，满载损耗应增加 0.5% 输入功率（在 0.5% 输入功率的杂散损耗推荐值以外），并且认为这些损耗随定子电流的平方而变化。

3. U 型变频器供电时的假设与修正

在这里只介绍适用于六阶梯波和 PWM 型变频器的内容。

假设谐波电流的绝对值与负载的大小无关，利用变频器供电的空载和负

载两种试验就可求得效率。附加损耗包括在空载试验求得的“恒定损耗（铁耗和机械损耗之和）总和”之中，因而损耗分析法中只考虑因转差基频电流所产生的那部分转子铜耗，这些损耗可用不同于常规的负载试验确定，等于转差率与传输给转子的基频功率的乘积，后者也就是电动机吸收的功率减去定子绕组的铜损耗和包括机械损耗的“恒定损耗之和”，机械损耗可用自减速法确定，因基频而产生的负载杂散损耗总值按第四章中推荐值的方法求取。

图 5-21 给出了谐波功率及相应的附加损耗示意图，图中符号的含义是： $P_{in,f}$ 为基频输入功率； P_s 为传输给转子的功率； P_{out} 为输出功率； $P_{in,h}$ 为谐波输入功率； $P_{out,h}$ 为谐波输出功率。只有正弦波电压供电时的恒定损耗为已知时，才有可能分离出附加损耗。

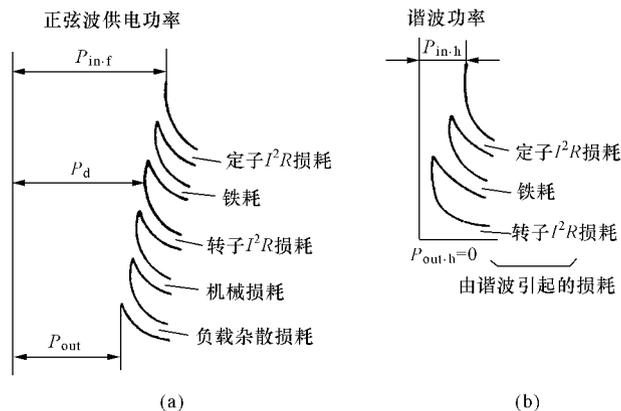


图 5-21 功率及损耗分流图

(a) 正弦波供电；(b) 因非正弦波供电的谐波功率及相应的附加损耗

(四) 热量法确定效率

热量法特别适用于变频器供电的电动机。这是因为采用热量法确定损耗时，损耗的测量与电压和电流的波形无任何关系。用热量法确定效率的方法在国家标准 GB/T 5321—2005 《热量法测定电机的损耗和效率》中给出。

1. 试验装置和计算公式

如图 5-22 所示的装置中，散耗电阻器所吸收的功率很容易测量。因此，利用式 (5-12) 可计算出电动机的损耗 P_v (W)。

$$P_v = P_d \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2} \quad (5-12)$$

式中 P_d ——散耗电阻器所吸收的功率，W；
 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ——如图 5-22 所示各点测得的温度，。

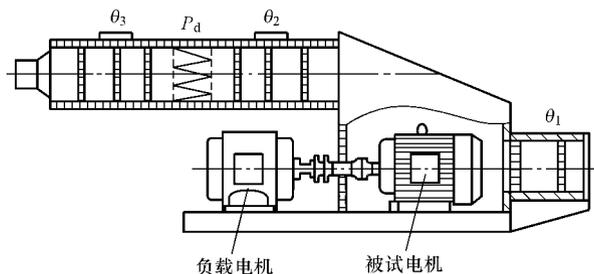


图 5-22 热量校正法试验装置示意图

2. 温度和温升的测量方法

这种测量方法的准确度高低主要取决于 $(\theta_2 - \theta_1)$ 和 $(\theta_3 - \theta_2)$ 温升的幅值。在 GB/T 5321—2005 中规定的空气温升的测量方法如下：

(1) 测量仪表可为电阻测温仪、热电偶、热敏电阻或精度达到 0.1 的水银温度计。

(2) 开启式通风系统电动机的空气温升是用进、出口空气温度差来确定的。为了提高测量精度，出风口的温度应采用分格测量法，每格的面积约为 $(0.1 \times 0.1) \text{ m}^2$ ，每格的温度都要测量，取各出风口温度测量值的平均值。

(3) 封闭循环通风系统电动机的空气温升是用空气冷却器的进、出口空气温度差来确定的。若测试人员可以接近空气冷却器热空气侧，则可用水银温度计测量热空气的温度。否则，热空气的温度应用电气测温计测定，但电气测温计不应接触空气冷却器。出口空气温度应在若干点进行测量，取各点的平均值作为出口空气的温度。

(五) 正弦波供电试验的损耗分析法并补充以考虑附加损耗的总增量确定效率

通常，标准设计的电动机和变频器只在运行地点才连接在一起，在众多情况下，以正弦波供电时，电动机的已知损耗叠加以总增量确定效率的方法较为方便。但如前面所述，不可能规定出适合于变化极为广泛的变频线路和控制方法的适用数值。

关于总增量，目前的状况是对一定的输出范围和变频线路搜集到的试验

数据只能作出有限的说明如下。

为确定以输入功率百分数表示的附加损耗，以三相异步电动机用正弦交流电源供电和用变频器供电，在相同输出功率的条件下进行了试验。

额定输出功率在 30 ~ 1015kW 之间的电动机，以六阶梯波 I 型变频器供电，在 50Hz 或 60Hz 运行时，因变频器供电而产生的附加损耗为输入功率的 0.6% ~ 1.25%。所以，可将额定输出在 30kW 及以上的电动机由变频器供电而产生的附加损耗假定为输入功率的 1%。U 型变频器供电的电动机，其附加损耗的数值与脉冲频率、脉冲发生线路以及调制指数有关。正弦基准波调制的 PWM 型变频器供电时的试验结果显示，附加损耗值的变化范围从几乎可以忽略直到输入的 3%。所以，可将由六阶梯波 U 型变频器供电而产生的附加损耗假定为输入功率的 1.5%。

第八节 60Hz 电机用 50Hz 供电 进行试验的计算方法

一、说明

对于较小的电机生产厂和修理单位，往往没有专用的 60Hz 试验电源。如有 60Hz 的异步电动机需要进行试验，则可采用 50Hz 的电源进行试验，然后使用一些折算公式粗略地求得 60Hz 时的数据。这里之所以使用“粗略”两个字，是因为在折算中所使用的公式均建立在假设被试电机在两种频率时的磁路相关系数相同的基础之上，其实这是不可能的，有时差异还较大。

本部分介绍的内容来自国内某电机科研单位的验证资料，是否完全准确，还需要读者在实践中不断地进行验证。

二、试验方法

用 50Hz 电源供电进行试验时，所加的额定电压应降低到 $\frac{50}{60}U_{N60}$ ，其中 U_{N60} 为 60Hz 时的额定电压。

例如被试电机在 60Hz 时的额定电压 U_{N60} 为 440V，用 50Hz 电源供电进行试验时，所加的额定电压应降低到 $\frac{50}{60} \times 440 = 367V$ 。

以 50Hz 作为额定频率、 $\frac{50}{60}U_{N60}$ 作为额定电压，按前面第四章介绍的试验方法进行各项试验并计算出所需的结果。

三、试验数据的折算

将 50Hz 的试验数据代号加“'”，如电压为 U' ；折算到 60Hz 的数据正常书写。

(1) 定子电流： $I_1 = I_1'$

(2) 输入功率： $P_1 = (U_{N60}/U') P_1'$

(3) 转差率： $s = s' [P_{Cu2} / (P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe})]$

其中 $P_{Cu2} = P'_{Cu2}$ ； $P_{Cu1} = P'_{Cu1}$ ； $P_{Fe} = P'_{Fe} \times (60/50)^{3/2} = 1.315P'_{Fe}$

(4) 机械损耗： $P_m = 1.2P'_m$

(5) 杂散损耗： $P_s \approx P'_s$

(6) 效率和功率因数：根据上述数值计算求出。

(7) 温升：按试验值和最后求得的满载电流修正得出。

(8) 堵转电流： $I_{KN} = I'_{KN}$

(9) 堵转转矩： $T_{KN} = T'_{KN}$

(10) 最大转矩： $T_{max} = T'_{max}$

(11) 空载电流：由于空载电流中绝大部分是励磁电流，所以空载电流的大小与电机铁心磁密有较密切的关系。而电机设计时所选的磁密不同，有的较饱和，有的不太饱和，这就造成了电压和频率变化时，空载电流变化的不确定性。当电压按频率的变化比例降低时，空载电流将无较大的变化，但一般不会相等。当然，如无法进行验证，可认为两者相等。

(12) 空载损耗： $P_0 \approx 1.1P'_0$

第一节 三相异步电动机出厂标准的确定原则

一、说明

三相异步电动机出厂标准中包含着两种类型。其中一类是当时即可给出明确结论的标准，它们是绝缘电阻、直流电阻的三相不平衡度、匝间耐冲击电压能力、绕组对地耐电压能力、堵转和空载三相电流的不平衡度等项目，我们可以称其为“绝对标准”；另一类是和被试电机同型号同规格合格样机型式试验的实测数据相对比的项目，因考虑到所用原材料质量的波动、生产工艺及加工过程中不可避免的误差以及试验测量误差等不确定但还属于正常因素的影响，而在原样机试验数据的基础上，给出一个上下波动的允许范围，也就是常说的“上、下限”，在进行出厂试验时，只要试验数据落在了这一范围内，就认为接近或达到了样机的水平，但不能明确地给出它符合技术条件的情况，因此我们可称其为“相对标准”，它们是绕组的直流电阻、堵转电流、堵转输入功率、空载电流、空载输入功率共5项数据的大小范围。

严格地讲，“相对标准”的给出是一个较难的技术计算和推导过程。这是因为，它所包含的5个数据，特别是后4个数据中，每一个都与电机的关键性能参数有关，并且有的关系还是相互矛盾的。最明显也是最突出的是堵转电流，过大就会自身超标（堵转电流是考核电机的一个重要指标），过小是堵转转矩较小的反映，而堵转转矩也是考核电机的一个重要指标，所以给它确定出厂标准就要相当谨慎。

制定出厂标准主要的依据是电机性能参数的正常波动范围和样机实测数据符合标准的具体情况。

二、三相异步电动机性能参数正常波动范围

电机性能参数正常波动范围是在一个较长的时间内由多台电机实测数据统计出来的。它是制定出厂标准的一个重要依据，也是电机使用和修理验收的一个重要参考依据。表6-1给出了我国某电机生产厂的统计值。

表6-1 三相异步电动机性能参数正常波动范围

序号	性能参数名称及代号	正常波动范围 (%)	序号	性能参数名称及代号	正常波动范围 (%)
1	绕组电阻 R	±2	4	堵转电流 I_k	±4
2	空载电流 I_0	±6	5	堵转损耗 P_k	±8
3	空载损耗 P_0	±10	6	堵转转矩 T_k	±3

续表

序号	性能参数 名称及代号	正常波动范围 (%)	序号	性能参数 名称及代号	正常波动范围 (%)
7	最大转矩 T_{\max}	± 3	10	功率因数 $\cos\varphi$	± 1.5
8	最小转矩 T_{\min}	± 4	11	转差率 s	± 2.5
9	满载效率 η	± 1.5	12	满载温升 $\Delta\theta$	± 5

三、三相异步电动机出厂试验数据与电机主要性能数据的关系

这里所讲的出厂数据是指空载电流 I_0 、空载输入功率（简称空载损耗）

P_0 、堵转电流 I_K 和堵转输入功率（简称堵转损耗） P_K 。它们和电机几个主要性能参数在理论上的关系如下。

(1) 空载电流 I_0 大，则功率因数 $\cos\varphi$ 低。

(2) 空载损耗 P_0 大，则效率 η 低。

(3) 堵转电流 I_K 大，则额定电压时的堵转电流 I_{KN} 将可能超过考核标准；堵转电流 I_K 小，则可能造成额定电压时的堵转转矩 T_{KN} 达不到标准要求，因为堵转转矩与堵转电流成正比关系。

(4) 堵转损耗 P_K 大，则效率 η 低；堵转损耗 P_K 小，则可能造成最大转矩 T_{\max} 达不到标准要求，因为最大转矩与堵转损耗成近似的成正比关系。

四、制定三相异步电动机出厂标准的原则和步骤

(一) 三相异步电动机出厂标准的两种类型介绍

我国电机生产行业中，三相异步电动机出厂标准有如下两种不同的制定方法。

1. 合格区法

利用电机原理和数学计算的方法得出一系列关系式，再将样机试验数据和考核标准值代入到这些关系式中，得出几个控制公式，使用时，将实测数据再代入到相应的控制公式中，联合判定该电机是否合格，该方法被称为“合格区法”。该方法从理论上来讲控制精度较高，但计算和使用都较繁琐，并有时会因标准给的范围太宽而造成误判现象，所以现已很少使用。

2. 上、下限法

根据合格样机的试验数据以及考核标准，给出出厂各项试验数据的最高和最低限值，或者说是允许波动的范围，称为单数值“上、下限法”。和第一种方法相比，虽然控制精度略差，但计算和使用都简单得多，所以使用较广，也是本书推荐的方法。下面重点介绍其制定原则和制定步骤。

(二) 制定三相异步电动机出厂标准的原则和步骤

制定三相异步电动机出厂标准的原则和步骤如下：

(1) 尽可能多地汇总合格样机的型式试验数据，计算出各相关项的平均值和波动范围（最大值和最小值）。

(2) 对空载电流，若上述最大值所对应的功率因数已达到了考核的最低限，则该最大值即为出厂标准中空载电流的最高限值。空载电流可不设最低限值。若认为有必要（例如防止用错转子或气隙过小造成扫膛），则可将上述统计的空载电流最低值放宽一些（例如放宽3%）作为出厂标准中空载电流的最低限值。

(3) 空载损耗可只设最高限值。考虑到该项数值在简单的出厂试验时，受运转时间、试验自然环境（主要是环境温度）等因素的影响较大，所以可在上述样机数据最大值的基础上再增加10%左右。若出厂试验时高于给出的最大值标准，应将电机的运转时间适当延长，得到较稳定的空载损耗之后再进行比较和判定。

(4) 试验环境条件对堵转电流和堵转损耗两项数值大小的影响较小，所以应严格按照样机的波动统计值给出上、下限值的控制范围。

五、三相异步电动机出厂标准（上、下限法）的建议数值

表6-2给出了三相异步电动机出厂试验的各试验数值上、下限（在合格样机相关数值平均值的基础上）及三相不平衡度的考核标准。应该说明的是，这些标准中，除空载电流的三相不平衡度考核标准是行业标准所规定的之外，其余全部是作者根据多年的实际经验给出的。虽然是多年经验的积累，但是否完全准确，还需要大家在实践中继续考验，使之不断完善。同时希望大家根据自己的具体情况，制定更符合实际的标准，特别是对样机相关指标已接近不合格边缘的项目，其上限或下限的数值就不一定还和表中的一样都是一个数值（百分数）。

表6-2 三相异步电动机在出厂试验试验
数值上、下限及三相不平衡度的考核标准

项 目		限 值		说 明
		上限	下限	
直流电阻	大小	+2%	-2%	对并绕根数 ≥ 3 的绕组，可放宽到 $\pm 3\%$
	三相不平衡度			
空载电流	大小	+8%	—	可设置下限，一般不超过-15%
	三相不平衡度	+10%	-10%	三相电源电压应平衡

续表

项 目	限 值		说 明
	上 限	下 限	
空载输入功率	+20%	—	不设置下限
堵转电流	大小	+5%	-5%
	三相不平衡度	+3%	-3%
堵转输入功率	+10%	-10%	
转子开路电压或电压比	+3%	-3%	仅对绕线转子电动机

第二节 三相异步电动机在出厂试验及使用中出现的异常现象分析

当出厂试验数据超出标准时，应对其进行分析，找出产生的原因并设法加以解决。现将出厂试验时（包括日常使用和修理后的试验）出现的异常现象及其原因对应关系讲述如下。

一、通电后不起动，也无任何声响

(1) 配电设备中有两相或三相全部电路未接通。问题一般发生在熔断器或开关触点上。

(2) 电机内有两相或三相全部电路未接通。问题一般发生在接线部位。

二、通电后不起动或缓慢转动并发出“嗡嗡”的异常声响

(1) 配电设备中有一相电路未接通或接触不实。问题一般发生在熔断器、开关触点或导线接点处。例如熔断器的熔丝熔断、接触器或空气开关三相触点接触压力不平衡、导线连接点松动或氧化等。

(2) 电机内有一相电路未接通。问题一般发生在接线部位。如连接片未压紧（螺丝松动）、引出线与接线柱之间垫有绝缘套管等绝缘物质、电机内部接线漏接或结点松动、一相绕组有断路故障等。

(3) 绕组内有严重的匝间、相间短路或对地短路。

(4) 有一相绕组的头尾交叉接反或绕组内部有接反的线圈。

(5) 定、转子严重相擦（俗称“扫膛”）。

(6) 电源电压过低。

三、三相电阻不平衡度较大

(1) 三相绕组匝数不相等。

(2) 电阻较小的一相绕组有严重的匝间短路故障。

(3) 多股并绕的绕组，在连接点有的线股未连接好（漏接或漏焊）。

(4) 有较严重的相间短路故障。

四、三相电阻平衡，但都较大或较小

(一) 三相电阻平衡，但都较大的原因

(1) 匝数多于正常值。

(2) 各相绕组本应并联后引出，但错接成了串联引出或并联支路数少于正常值（例如应2路并联错接成了1路串联，或4路并联接成了2路并联，此时电阻增加到正常值的4倍）。

(3) 端部过长。

(4) 所用电磁线的电阻率较大或线径小于标准值。

(二) 三相电阻平衡,但都较小的原因

三相电阻平衡但都较小的原因与电阻较大的各项原因相反。

五、空载电流三相不平衡度超过标准限值

(1) 同三相电阻不平衡度较大的原因。

(2) 磁路严重不均匀。其中包括:定、转子之间的气隙严重不均;铁心内外圆严重不同心;铁心各部位导磁能力严重不均衡等。

(3) 绕组有对地短路故障。

六、空载电流较大或较小

(一) 空载电流较大的原因

(1) 定子绕组匝数少于正常值。

(2) 定、转子之间的气隙较大。

(3) 铁心硅钢片质量较差(出厂时为不合格品或用火烧法拆绕组时将铁心烧坏)。

(4) 铁心长度不足或叠压不实造成有效长度不足。

(5) 因叠压时压力过大,将铁心硅钢片的绝缘层压破,或原绝缘层的绝缘性能就达不到要求。

(6) 绕组接线有错误。如应三相星接实为三相角接(空载电流是正常值的3倍以上)、并联支路数多于设计值(例如应1路串联实为2路并联,或2路并联实为4路并联,此时电流将成倍数地增长)。

(7) 额定频率为60Hz的电机通入了50Hz的交流电(所加电压仍为60Hz的额定数)。此时的空载电流将是正常值的1.2倍以上(理论上是1.2倍,但由于电机设计时一般将额定电压时的铁心磁密选择在磁化曲线的“膝部”,即线性部分以上,所以实际上要大于1.2倍,实测数据表明,最高可达1.7倍以上)。

(8) 电源电压高于额定值。在额定电压附近(特别是高于额定电压时),空载电流与电压的平方(甚至于3次方以上)成正比,所以空载电流的增加将远大于电压的增加。

(二) 空载电流较小的原因

空载电流较小的原因与较大的各项原因大体相反。不同点在于电流减小的幅度将小于因上述原因使空载电流增加的幅度。例如,应为角接的电机接成了星接,则空载电流降为正确接法的 $1/3$;当使用相同的电压,但用60Hz

的电源给 50Hz 的电机通电时,空载电流将减小到 60Hz 数值的 $1/1.2$ (即 $50/60 \approx 0.83$) 以下,但一般不会减小到 0.8 倍以下。

七、空载损耗较大

(1) 因装配不当造成转子转动不灵活,或轴承质量不佳、轴承内加润滑脂过多等原因,使机械摩擦损耗过大。

(2) 错用了大风扇或扇叶较多的风扇。

(3) 铁心硅钢片质量较差(出厂时为不合格品或用火烧法拆绕组时将铁心烧坏)。

(4) 铁心长度不足或叠压不实造成有效长度不足。

(5) 因叠压时压力过大,将铁心硅钢片的绝缘层压破或原绝缘层的绝缘性能就未达到要求。

(6) 定、转子气隙之间存在异物(例如浸渍漆或槽纸等)或有较高的定子片,造成定转子相互摩擦(俗称“扫膛”)。

(7) 电磁线的电阻率较大。

(8) 匝数多于设计值或线径较细。

八、堵转电流较大或较小

(一) 堵转电流较大的原因

(1) 同空载电流较大的所有原因。

(2) 转子铸铝的电阻率小于设计要求,即铝的成分太纯(含铁等杂质的量过少)。

(3) 用错了转子,并且所用的转子电阻小于应用的转子。

(4) 转子槽口较小或未车开。

(5) 定子绕组端部长度较小。

(二) 堵转电流较小的原因

堵转电流较小的原因与较大的原因大体相反。另外,转子导条内存在气孔或因叠片及后道工序加工时造成的错片(片与片之间的槽未对齐)使导条的有效面积减小等原因,使得转子电阻大于正常值,也是一些常见的原因。

九、堵转电流三相不平衡度超过标准限值

(1) 同定子三相电阻和空载电流不平衡的原因。

(2) 转子有严重的细条或断条现象。

(3) 转子槽数不能被 3 整除,有时会影响堵转电流的三相不平衡度。

十、堵转损耗较大或较小

堵转损耗较大或较小的原因与堵转电流较大或较小的原因基本对应相同。

第三节 Y 和 Y2 系列普通三相异步电动机 额定电压时的空载电流和额定电流时的 堵转电压统计值

一、额定电压时的空载电流统计值

三相异步电动机空载电流的大小与电机的容量和极数有关。总体来说，容量大的电机空载电流相对较小；同一个机座号的电机，极数多（转速低）的电机空载电流相对较大。

表 6-3 和表 6-4 分别给出了 Y 系列（IP44）和 Y2 系列（IP54）三相异步电动机分段和各规格额定电压时的空载电流范围统计平均值，供读者在试验时参考，特别是对修理行业的读者，一般没有样机的数值用来对比，所以这些统计值更重要。但在参考使用时应注意，表中的数值是来自国内某电机生产厂的统计平均值，因此，第一要注意实际情况可能略高或略低于表中的数值；第二要注意它不能全盘代表其他厂产品的情况。所以只能供参考，而不可作为标准使用。表中 I_0/I_N （%）为空载电流占额定电流的百分数，Y 和 Y2 系列三相异步电动机的额定电压为 380V（3kW 及以下为星接；4kW 及以上为角接），额定频率为 50Hz。

表 6-3 Y 和 Y2 系列三相异步电动机空载电流统计平均值范围

机座号范围	80 ~ 90	100 ~ 160	180 ~ 225	250 ~ 280	315 ~ 355
I_0/I_N （%）	40 ~ 70	30 ~ 65	30 ~ 50	25 ~ 45	25 ~ 40

二、额定电流时的堵转电压统计值

表 6-4 给出了额定电流时的堵转电压统计值，给出这些数值的目的是为读者提供一些电机出厂或修理后进行堵转试验的参考数据，特别是电机修理行业的读者，可以补充没有样机参考数据的不足。

表 6-4 Y 和 Y2 系列三相异步电动机额定电压时的空载电流和
额定电流时的堵转电压统计平均值

机座号	I_0/I_N （%）	堵转 电压（V）	机座号	I_0/I_N （%）	堵转 电压（V）	机座号	I_0/I_N （%）	堵转 电压（V）
80 ₁ -2	50	90	90S-2	47	80	100L-2	40	80
80 ₂ -2	42		90L-2	40		112M-2	36	70

续表

机座号	I_0/I_N (%)	堵转 电压(V)	机座号	I_0/I_N (%)	堵转 电压(V)	机座号	I_0/I_N (%)	堵转 电压(V)	
132S1-2	31	80	160M-4	37	90	225M-6	33	90	
132S2-2	30		160L-4	38	80	250M-6	26	80	
160M1-2	30	70	180M-4	35	70	280S-6	30		80
160M2-2	30	80	180L-4	35	60	280M-6	31	90	
160L-2	29		200L-4	34	70	315S-6	32		80
180M-2	30	70	225S-4	30		315M1-6	32	80	
200L1-2	29	60	225M-4	29		315M2-6	32		
200L2-2	30	70	250M-4	28		315M3-6	34	80	
225M-2	24		280S-4	28		355M1-6	35		
250M-2	28		280M-4	30		355M2-6	35	70	
280S-2	26		315S-4	35		355M3-6	36		
280M-2	27		315M1-4	34		355L1-6	33	90	
315S-2	30		315M2-4	30		355L2-6	34		
315M1-2	27		60	315L1-4		30	132S-8	65	
315M2-2	28			315L2-4	32	132M-8	66	100	
315L1-2	28			355M1-4	30	160M1-8	55		100
315L-2	27			355M2-4	27	160M2-8	57	90	
315L2-2	25	355L1-4		30	160L-8	56	90		
355M1-2	26	355L2-4		31	180L-8	52		100	
355M2-2	23	50		90S-6	70	100	200L-8		48
355L1-2	22			90L-6	70	110	225S-8	48	100
355L2-2	22			100L-6	67	100	225M-8	46	
801-4	66			110	112M-6	64	100	250M-8	43
802-4	65		100	132S-6	55	90	280S-8	45	90
90S-4	60			132M1-6	54	90	280M-8	45	
90L-4	55		90	132M2-6	56	100	315S-8	38	90
100L1-4	55		70	160M-6	48		100	315M1-8	
100L2-4	53			160L-6	50	80	315M2-8	41	90
112M-4	50		180L-6	45	80		315M3-8	41	
132S-4	43	80	200L1-6	42		80	355M1-8	41	90
132M-4	43	80	200L2-6	43	80	355M2-8	40	90	

续表

机座号	I_0/I_N (%)	堵转 电压(V)	机座号	I_0/I_N (%)	堵转 电压(V)	机座号	I_0/I_N (%)	堵转 电压(V)
355L1-8	39	80	315M1-10	53	80	355M2-10	44	90
355L2-8	40		315M2-10	58	90	355L1-10	50	
315S-10	53	90	355M1-10	50		355L2-10	46	

应说明的是，表中的电压值是对应电流为额定值时的电压圆整到十位数的数值，例如某电机电流为额定值时的电压为 75 ~ 80V，则圆整到 80V，为 70 ~ 74V 时就圆整到 70V，所以此时的电流将不一定是额定电流，但与额定电流相差最大不会超过 $\pm 8\%$ ，一般在 $\pm 5\%$ 以内。

其他的说明与空载电流统计值相同。

单相异步电动机因其使用的电源较方便，而被广泛地应用于各类家用电器、小型电动工具和设备中。其现行试验方法的标准编号为 GB/T 9651—1988，另外，单相串励电动机的试验方法标准编号为 GB/T 8128—1987。

本章将重点介绍几种常用系列的特有试验项目和试验方法。

第一节 单相交流异步电动机的原理接线图

单相交流异步电动机的种类相当多，但绝大多数系列的区别主要在于它们的起动方式。主要有分相起动和罩极起动（又称为遮极起动）两种，其中分相起动又称为裂相起动，并且分为电阻分相、电容分相两大类。后一种应用较广，并且品种较多，有单值电容起动、单值电容起动并运转和双值电容三种型式。除上述两种类型外，还有一种称为串励电机的单相交流电动机，该类电机严格地讲应称为交、直流两用电动机。下面介绍几种主要系列的原理接线图。其工作原理请参看其他资料。

一、分相起动类单相交流异步电动机

此类电动机都具有两套绕组，其中一套称为起动绕组，又被称为副绕组或辅绕组；另一套为主绕组，又被称为工作绕组。一般情况下，两套绕组在匝数、线径等方面有所不同，但对于特殊用途的电机，如需要正、反两个转向都运行的电动机，例如洗衣机用电动机，两套绕组会完全相同。主、辅绕组在定子铁心圆周上的位置是相差 90° 电角度（对 2 极电机，空间位置相差也是 90° ；对 4 极电机，空间位置相差将是 45° ）。

（一）电阻分相型

在电动机的辅绕组电路中串联一个电阻或将辅绕组设计成其直流电阻大于主绕组。由于两绕组在定子铁心圆周上的位置是相差 90° 电角度和阻抗的不同，使两绕组中的电流产生相位差，从而产生起动转矩，使电机的转子起动，当转速达到同步转速的 80% 左右时，用离心开关自动断开辅绕组的电源，由主绕组产生的旋转磁场使电机运转。其电路原理图如图 7-1（a）所示。

（二）单值电容起动型

将电阻分相型中的电阻换成电容（当然绕组参数也将有所变化），即成为单值电容起动型单相电动机。其电路原理图见图 7-1（b）所示。

（三）单值电容起动并运转型

与单值电容起动型相比，由图 7-1（c）可见，去掉离心开关即成为

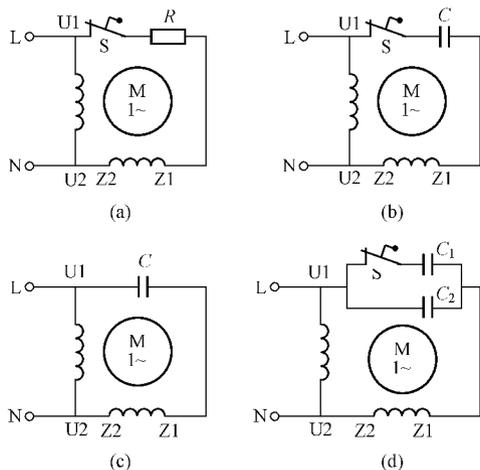


图 7-1 分相起动型单相交流异步电动机电路原理图

- (a) 电阻分相起动型；(b) 单值电容分相起动型；
(c) 单值电容分相起动并运行型；(d) 双值电容型

型的单相电动机。其中电容器将长期接在辅绕组回路中，这样，辅绕组在起动和运行中都将通电工作。这种类型电机的结构较简单，应用也较广泛。

(四) 双值电容型

双值电容型是前两种电容分相电机线路的组合。其电路原理图如图 7-1 (d) 所示。一般情况下，两个电容的电容量是不相同的。这种类型的电机结构较复杂，但效率和功率因数都较高，常用在容量较大的设备中。

二、罩极起动类单相交流异步电动机

罩极起动类单相交流异步电动机的定子铁心多数做成凸极式，每极绕有一个工作绕组，并与单相电源相接；在磁极极靴的一边开有一个槽，用短路的铜环把部分（约占 1/3）磁极圈起来，称为罩极线圈，俗称短路环。其结构及电路原理图（极数为 2）如图 7-2 所示。

三、单相串励式电动机

单相串励式电动机也称为单相换向器式电动机。它的转子不像前几种那样是铸铝转子，而是类似直流电机那样的绕线转子（称为电枢），其定子绕组和转子绕组通过换向器串联，如图 7-3 所示。

此种单相异步电动机可以通过改变输入电压的大小来调速。其转速为

$$n = \frac{60aE}{p\Phi N} \quad (7-1)$$

式中 E——旋转电动势，V；
 a——定子绕组并联支路数；
 p——极对数；
 Φ ——主磁通，Wb；
 N——电枢总导体数。

此类电动机也可以使用直流电，所以也被称为交、直流两用电动机。

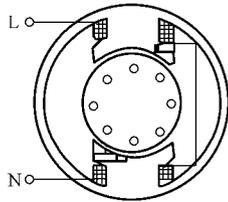


图 7-2 罩极起动类单相交流异步电动机结构及电路原理图

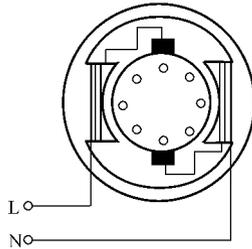


图 7-3 单相串励式交流异步电动机结构及电路原理图

四、单相多速电动机

常用的单相多速电动机有如下两种：

(1) 反向变极变速和双运行绕组变速。反向变极变速适用于两种转速比为 1:2 的变速要求；双运行绕组变速适用于其他转速比的变速要求。其转子均为铸铝转子。

反向变极变速分相式双速单相异步电动机定子绕组接线原理见图 7-4。

当开关 S2 接在图中位置时，相邻两极的电流方向相反，电机为 4 极；

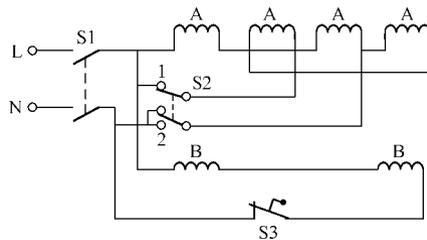


图 7-4 反向变极双速单相异步电动机定子绕组接线原理图

A—主绕组；B—辅绕组；S1—电源开关；S2—换极开关；S3—离心开关

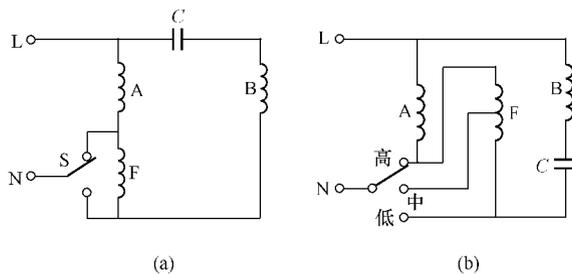


图 7-5 用辅助绕组变速的单相异步电动机电路原理图

(a) 双速电机；(b) 三速电机

A - 主绕组；B—辅绕组（起动绕组）；F—辅助绕组

当开关 S2 接在图中 1 的位置时，相邻两极的电流方向相同，电机为 8 极。

(2) 用辅助绕组变速。对电容式单相异步电动机，可用改变绕组外加电压的方法达到变速的目的。一般利用改变主绕组和辅助绕组的连接方式来改变加在主绕组上的电压。辅助绕组和主绕组的绕向相同，并放在同一个槽内。接线原理如图 7-5 所示。

第二节 单相异步电动机的通用试验

本节主要介绍在前面几章中没有介绍或有特殊要求的试验项目，与“三相异步电动机试验”类似者将作简单介绍。

一、试验电源及电气测量

试验电源为交流单相电源，其电压的正弦性畸变率应小于 5%（进行发热试验时应小于 2.5%）。电源频率与额定频率之差应在额定频率的 $\pm 1\%$ 之内。

对电气测量仪表的准确度要求与交流三相电动机相同。因单相电动机一般容量较小，所以较少使用电流互感器。在测量电压和对仪表误差进行修正时，有以下特点：

（一）电压的测量特点

对小功率单相电动机，在进行电压测量时，应按图 7-6 接线。电压表先接至电机端 1，将电压调至所需的数值 U_D ，然后，将电压表迅速接至电源端 2，保持电源端电压 U_Y 不变，读取其他仪表的读数。

在额定电压 U_N 下作空载试验或额定负载 P_N 下进行负载试验时，若 $(U_Y - U_D) < 0.01U_N$ ，则电压表可固定在电源端进行测量。此时，全部试验都不必换接开关 S。

（二）仪表误差的修正

对 180W 及以下单相异步电动机的输入功率测量值，应就具体选定的测量线路对仪表误差进行修正。

1. 采用电压表前接法时功率仪表误差的修正

采用电压表前接法时（图 7-6 中开关 S 合在 1 的位置），功率仪表误差的修正公式如下：

$$P_1 = P_w - I_A^2 R_{Aw} \quad (7-2)$$

式中 P_1 ——修正后的输入功率，W；

P_w ——功率表显示的输入功率，W；

I_A ——电流表显示的输入电流，A；

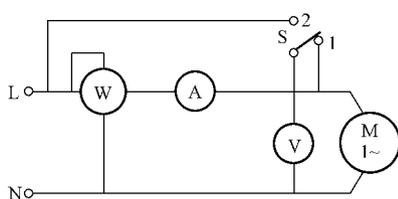


图 7-6 小功率单相电动机测量接线图

R_{Aw} ——电流表和功率表电流线圈直流电阻之和, Ω 。

2. 采用电压表后接法时功率仪表误差的修正

采用电压表后接法时(图7-6中开关S合在2的位置)仪表误差的修正公式如下:

$$P_1 = P_w - \frac{U_v^2}{R_v} - I_A^2 R_A \quad (7-3)$$

式中 P_1 ——修正后的输入功率, W;

P_w ——功率表显示的输入功率, W;

U_v ——电压表显示的输入电压, V;

R_v ——电压表回路直流电阻, Ω ;

R_A ——电流表的直流电阻, Ω 。

3. 采用电压表后接法时电流仪表误差的修正

采用电压表后接法时(图7-6中开关S合在2的位置)电流仪表误差的修正公式如下:

$$I = I_A - \frac{U_v}{R_v} \quad (7-4)$$

式中 I ——修正后的输入电流, A;

I_A ——电流表显示的输入电流, A;

U_v ——电压表显示的输入电压, V;

R_v ——电压表回路直流电阻, Ω 。

二、绝缘电阻的测定试验

(一) 绝缘电阻表的选用原则

电动机的额定电压 $\leq 36V$ 时,采用250V规格的绝缘电阻表;电动机的额定电压 $> 36V$ 时,采用500V规格的绝缘电阻表。

(二) 测量方法

主、辅绕组的头、尾端均引出时,应分别测量两套绕组的绝缘电阻;否则,只能测量两套绕组共同对机壳的绝缘电阻。

对电容单相电动机,测量时,电容器应接入到辅绕组的回路中(另有协议者除外)。

三、绕组直流电阻的测定试验

本项测量方法同三相电机。但因单相电机绕组的直流电阻一般都较大,所以较常用单臂电桥。

四、空载试验

(一) 空载电流和空载损耗的测定试验

试验方法和过程与普通三相异步电动机的试验方法基本相同，不同点只在于试验数据只有一相。

(二) 转子绕组等值电阻的测定试验

本项试验应紧接着空载试验进行。

在转子静止的状态下，给主绕组加低电压，使通过主绕组的电流达到或接近额定值。测取电机的输入电压 U_{K0} (V)、电流 I_{K0} (A) 和输入功率 P_{1K0} (W)，然后用式 (7-5) 求取转子绕组的等值电阻 R'_2 (Ω)。

$$R'_2 = \frac{P_{1K0}}{I_{K0}^2} - R_{10} \quad (7-5)$$

式中 R_{10} ——空载试验后测得的主绕组直流电阻， Ω 。

(三) 试验结果计算

用以下两式分别计算空载功率因数 $\cos\varphi_0$ 和定子绕组铜损耗 P_{Cu0} (W)。

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{I_0 U_0} \quad (7-6)$$

$$P_{Cu0} = I_0^2 (R_{10} + 0.5R'_2) \quad (7-7)$$

(四) 电容运行电机主、辅绕组有效匝数比的测定试验

试验时，电动机空载运行，辅绕组开路。对主绕组施加额定频率的额定电压 U_N (V)，测量辅绕组两端的感应电动势 E_f (V)。然后，将主绕组开路，给辅绕组施加额定频率的额定电压 U_f (U_f 应不小于 E_f 的 118%)，测量主绕组两端的感应电动势 E_m (V)，则主、辅绕组有效匝数比 K 为

$$K = \sqrt{\frac{U_f E_f}{U_N E_m}} \quad (7-8)$$

五、堵转试验

试验时，使用测力设备将转子堵住。先在定子绕组上加额定频率的低电压，使定子电流接近于额定值。保持上述电压不变，调节机座或转子，使定、转子的相对位置发生变化，分别测出堵转转矩为最小和堵转电流为最大的两个位置，做好位置标记后，断开电源。

当用调节机座的方法时，做好标记后即可将机座固定；用调节转子的方法时，对使用杠杆原理测量堵转转矩的，应按照标记调整机座位置，使测量转矩的力臂恢复至与测力计相垂直后，再将机座固定。然后，在上述两个位置状态下，分别重新给电机加电压进行堵转试验，第一点电压应尽可能地加到 1.1 倍的额定值。试验测点数和各试验点应测取的数据同三相电机。

在同一个坐标系中，分别绘制堵转转矩、堵转电流与堵转电压的关系曲

线，并从曲线上查取堵转电压为额定电压时的堵转转矩和堵转电流。

对小功率电机，可分别在上述两个位置上，只进行额定电压一点的试验。

每点加电压的时间应不超过 5s。

六、发热试验

(一) 额定负载发热试验

发热试验采用直接负载法，负载设备一般采用测功机。

试验前应精确测量绕组的冷态直流电阻和环境温度。试验时，给被试电动机加额定频率的额定电压，使其输出额定功率。各种工作制电机的试验步骤、试验方法及计算方法等规定与三相电动机中讲述的相同。

(二) 堵转发热试验

对电容起动和电阻起动的单相电动机，需进行堵转发热试验。该项试验应在电机处于热状态或紧接着满载发热试验进行。试验时，将转子堵住，给电机加额定电压持续 5s 后断开电源。之后，立即测量主、辅绕组的直流电阻，计算求取两套绕组温升值的方法同三相电动机试验中所述。

(三) 空载发热试验

对电容运行（含单、双值电容两种）的单相电动机，需进行空载发热试验。试验应在额定频率和额定电压下进行，直至达到热稳定。然后，断电测量绕组的热态直流电阻，并计算求取温升值。

七、工作特性曲线的求取试验

单相异步电动机的工作特性曲线与三相异步电动机的基本相同。测取过程中转差率的测量或计算方法也与三相异步电动机完全相同。

效率的测定采用直接法。试验设备、试验线路及试验方法与额定负载发热试验相同，试验过程及有关计算方法与三相异步电动机采用输入-输出法（A 方法）时基本相同（对小功率电机可只测取负载下降时的工作曲线）。

采用间接法（损耗分析法）测定效率时，5 种损耗中的定子铜耗、转子铜耗与三相异步电动机有所不同，具体计算方法如下：

(一) 定子铜耗 P_{Cu1} (W) 的计算

(1) 电阻和电容起动的单相异步电动机

$$P_{Cu1} = I_m^2 R_{1m} \quad (7-9)$$

(2) 电容运行和电容起动及运行单相异步电动机

$$P_{Cu1} = I_m^2 R_{1m} + I_f^2 (R_{1f} + R_C) \quad (7-10)$$

$$R_C = \frac{P_C}{I_C^2}$$

式中 I_m ——电机主绕组电流，A；
 I_f ——电机辅绕组电流，A；
 R_{1m} ——电机主绕组直流电阻（换算到基准工作温度）， Ω ；
 R_{1f} ——电机辅绕组直流电阻（换算到基准工作温度）， Ω ；
 R_c ——电容器等效电阻， Ω ；
 P_c ——电容器损耗，W，在电容器端电压等于或接近于额定工作电压时，用低功率因数表测得；
 I_c ——在测取 P_c 时测得的电容器电流，A。

(二) 转子铜耗 P_{Cu2} (W) 的计算

(1) 电阻和电容起动的单相异步电动机

$$P_{Cu2} = \frac{K_\alpha + \theta_1}{K_\alpha + \theta_2} \left(sP_e + I_1^2 R'_{2t} \frac{1-s}{2-s} \right) \quad (7-11)$$

(2) 电容运行和电容起动及运行单相异步电动机

$$P_{Cu2} = \frac{K_\alpha + \theta_1}{K_\alpha + \theta_2} \left\{ sP_e + [I_m^2 + (KI_f)^2 - 2KI_f I_m \sin \varphi] R'_{2t} \frac{1-s}{2-s} \right\} \quad (7-12)$$

$$\cos \varphi = \frac{I_1^2 - (I_m^2 + I_f^2)}{2I_m I_f} \quad (7-13)$$

式中 I_1 ——总定子电流，A；
 I_m ——主绕组电流，A；
 I_f ——辅绕组电流，A；
 R'_{2t} ——负载试验时，转子绕组的等效电阻， Ω ，且

$$R'_{2t} = \frac{R_1 R'_2}{K} \quad (7-14)$$

K_α ——电阻温度常数，对铜绕组取 235，铝绕组取 225；
 θ_j ——基准工作温度，；
 θ_2 ——负载试验时的转子绕组温度，如无法获得，允许用定子绕组温度代替，；
 s ——负载试验时测得的转差率；
 P_e ——电磁功率， $P_e = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe}$ ，W；
 K ——主、辅绕组间有效匝数比；
 φ ——主、辅绕组电流之间的相位差角， $0^\circ < \varphi < 180^\circ$ ；
 R_1 ——负载试验后测得的定子绕组直流电阻， Ω 。

八、电容器两端电压的测定试验

电容运行（含单值电容和双值电容）的单相异步电动机，应在电动机

额定运行（电压、频率、输出功率均为额定）时，测量辅绕组回路中电容器两端的电压值。

九、耐交流电压试验

除下述要求外，其他要求与三相异步电动机同一试验相同。

(1) 试验时，电容电动机的电容器、离心开关必须与绕组连接同正常工作一样。

(2) 单对主绕组回路进行试验时，辅绕组应和铁心或机壳相连接。

(3) 单对辅绕组回路进行试验时，应注意高电压只能施加在辅绕组回路中的绕组两端，主绕组回路应和铁心或机壳相连接。

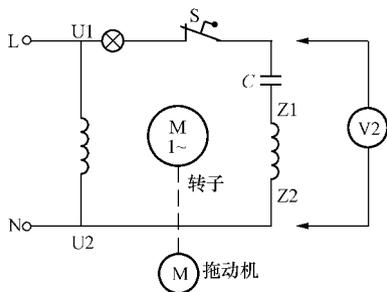
十、起动过程中起动元件（离心开关）断开转速的测定试验

试验方法有如下两种：

(1) 记录仪表或转矩测量仪法。用记录仪表或转矩测量仪录取被试电机从开始加电压到达到额定转速的转矩-转速关系曲线。在起动元件（离心开关）断开的瞬间，曲线将出现一个较大的波动，此时的转速即为起动过程中起动元件（离心开关）的断开转速。

(2) 拖动法。用可调速的电动机拖动被试电动机空转运行，在被试电动机起动元件回路（不包括起动继电器）中串联一个指示灯或并联一只电压表（可并在辅绕组和电容器两端，也可并在离心开关两端），并给被试电机施加一定的电压，如图 7-7 所示。较缓慢地调节拖动电动机的转速，由低速逐渐升高。注意观察指示灯或电压表，当电动机处于停转或低速状态时，指示灯或电压表 V2 应有指示（达到电源电压）或 V1 无指示；当指示灯熄灭或电压表指示 V2 回到零位或 V1 开始有电压指示（达到电源电压）时，此瞬时的转速即为起动元件（离心开关）的断开转速。

测量转速应采用指针式的转速表。



7-7 拖动法起动过程中起动元件断开转速的测定试验线路

十一、其他试验项目

以下试验项目的试验方法与三相异步电动机基本相同：

- (1) 最大转矩测定试验。
- (2) 最小转矩测定试验。
- (3) 短时过转矩试验。
- (4) 超速试验。
- (5) 匝间耐冲击电压试验。
- (6) 短时过电压试验。
- (7) 空载噪声测定试验。
- (8) 空载振动测定试验。
- (9) 转子转动惯量测定试验。

第三节 交流电风扇试验特点

一、台扇、壁扇、台地扇（落地扇）的试验项目及试验方法

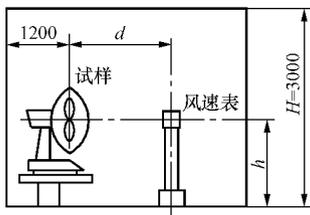
（一）调速比的测定试验

在额定电压和额定频率下，电扇的摇头机构处于不动作状态，风扇在最高转速挡运转 1h 后，测量此时的转速，即为最高转速挡的转速 n_h (r/min)。之后，立即将风扇转换到最低转速挡，运转 1h 后，测量此时的转速，即为最低转速挡的转速 n_l (r/min)，则调速比 T (%) 为

$$T = \frac{n_l}{n_h} \times 100\% \quad (7-15)$$

（二）风量及使用值的测定试验

1. 对风量试验室的要求



对风扇进行严格的风量试验时，应在专用的风量试验室中进行。专用的风量试验室内应设置试验屏，试验屏的尺寸应符合以下要求（参见图 7-8。试验屏的长、宽、高尺寸允许误差为 $\pm 15\text{mm}$ ）：

(1) 风量试验室屏的长度 L ：对 400mm 及以下的电风扇，为 4.5m；对 400mm 以上的电风扇，为 10m；

(2) 风量试验室屏的宽度 B ：4.5m。

(3) 风量试验室屏的高度 H ：3m。

2. 试验品的放置和试验操作注意事项

(1) 在电风扇送风的一边，除放置风速表及搁架外，整个试验室内应无其他障碍物存在。在试验过程中，试验人员可以在风扇进风的一边停留，仅在需要操作风速表或读数时，才允许进入送风一边，并应尽快地离开。

图 7-8 台扇、壁扇、台地扇的专用风量试验室布置尺寸示意图

(2) 对 400mm 及以下的电风扇，应安放于扇翼中心与试验室前墙面距离不小于 1.8m 的位置；对 400mm 以上的落地扇，该距离应不小于 6m。

(3) 扇翼中心与试验室左右两侧墙面距离应不小于 1.8m。

(4) 扇翼中心与试验室后墙面距离应不小于 1.2m。

(5) 被试风扇为壁扇时, 要将其安装在一块平板上, 该平板的尺寸至少应为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 。

(6) 风速表应在试验平面上沿着与扇翼轴线呈垂直相交的水平线上任意一边移动, 风速表翼片的轴线应始终与风扇扇翼的轴线相平行。风速表的架设应对气流的阻碍尽可能地少。

(7) 风扇的扇翼平面与风速表翼片平面之间应平行, 这两个平行面之间的距离为测试距离 d , 它应是被试风扇扇翼直径的 3 倍。

(8) 扇翼中心距地面高度 h :
对 400mm 及以下的电风扇为 1.2m ;
对 400mm 的落地扇为 1.5m。

3. 测试和记录

(1) 测定前, 应使被测风扇在规定的电压下至少运转 1h。然后, 在最高转速并且摇头的情况下测量风扇的输入功率 P_1 (W)。再调整风扇, 使其在最高转速和不摇头的情况运转。

(2) 试验测试电路见图 7-9。

(3) 试验时, 风扇的电动机轴线应与水平线平行, 在距离扇翼轴线 20mm 左右两点上开始测定, 并以 40mm 的增量沿着水平直线逐点向两边进行测定, 直至平均速度下降到低于 $24\text{m}/\text{min}$ 时为止。

(4) 风速表在每个位置的持续测试时间不得少于 1min。风速指示值除以该段测试时间, 即为被测风速 (m/min)。

(5) 任何圆环的平均风速应是圆环平均半径上左右两个风速读数的平均值。

(6) 记录试验室内的温度、相对湿度和大气压等大气条件, 并在报告中说明。

4. 计算试验结果

(1) 总风量用式 (7-16) 计算求取:

$$Q = \sum V \cdot S = \sum V \cdot 2\pi r d \times 10^{-6} \quad (7-16)$$

式中 Q ——总风量, m^3/min ;

V ——同一半径上圆环的平均风速, m/min ;

r ——圆环的平均半径, m ;

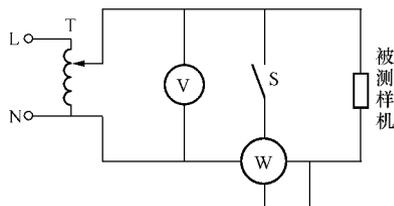


图 7-9 风扇风量及使用值的测定试验电路

d ——圆环的宽度, $d=0.04\text{m}$;

S ——圆环的面积, m^2 。

(2) 使用值 K 用式 (7-17) 求取:

$$K = Q / P_1 \quad (7-17)$$

(三) 摇头机构试验

(1) 被试风扇在额定频率的额定电压下运转, 其摇头机构处于工作状态。

(2) 用测角器对风扇的摆动角度进行测量, 并观察其动作的平稳情况。若摇头机构有一个以上摇摆面, 则各摇摆面均须测试。

(3) 试验时, 为了便于记录风扇摆动位置, 允许降低被测风扇的转速。

(4) 在最高转速挡用秒表计时, 测定风扇每分钟的摆动次数。

二、吊扇的测试项目及试验方法

(一) 调速比的测定试验

对配有调速器的吊扇, 应测定其调速比。测定方法与台扇相同。

(二) 风量及使用值的测定试验

1. 对风量试验室的要求

对吊扇进行严格的风量试验时, 应在专用的风量试验室中进行。

专用的风量试验室内应设置试验屏, 对试验室及试验屏的尺寸及有关要求如下 (见图 7-10):

(1) 试验屏内部尺寸: 长 $L=4.5\text{m}$, 宽 $B=4.5\text{m}$, 高 $H=3\text{m}$ 。尺寸允许误差为 $\pm 15\text{mm}$ 。

(2) 试验屏的顶部, 除了中心留有圆形孔口 (顶口) 外, 应该均被顶屏盖住。顶孔的直径应比被试吊扇的扇翼直径大 $10\% \sim 20\%$, 开有顶孔的中央顶屏隔板厚度应该大于 6mm 。

(3) 试验屏底部与地面应离开 450mm , 并可提供适当的空气出口。

(4) 试验屏四周与外屏墙之间的距离应相等, 其距离为 $1 \sim 1.25\text{m}$ 。

(5) 试验屏之外的顶板或任何会干扰气流的凸梁都应该在顶孔之上不少于 1m 。即外屏天花板或凸梁离地面的距离应不少于 4m 。

2. 试验品的放置、试验操作方法和注意事项

(1) 被试吊扇的扇翼平面应处在试验屏顶部圆孔上缘的平面中。

(2) 风速表的翼叶平面应与吊扇扇翼平面平行, 其距离为 1.5m 。风速表应能在一个水平面的 4 条半对角线上移动。

(3) 除了允许在试验屏内放置风速表及其搁架外, 整个试验室内应无

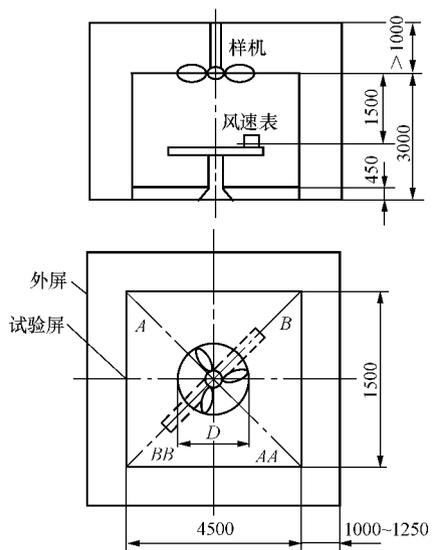


图 7-10 吊扇的专用风量试验室布置尺寸示意图

其他障碍物存在。风速表的架设应尽可能地减少对气流的影响。

3. 风量及使用值的测定试验及计算

风量及使用值的测定试验及计算方法、试验电路均与台扇试验的相应内容相同。

第四节 单相交流串励电动机试验特点

单相交流串励电动机的转速与其极对数无关，可交直流两用。这些都与普通单相异步电动机不同，所以其试验也有一些特殊的规定。该类电动机的试验方法标准编号为 GB/T 8128—1987。下面进行重点地介绍。

一、试验前的检查工作

除一般电机的检查项目外，还应重点检查换向器部分。其中有些检查可在电动机通入低电压并在低转速下进行。具体要求如下：

(1) 换向器不应偏心。

(2) 电刷与换向器接触面积应为电刷截面积的 75% 以上。

(3) 压电刷的弹簧压力应适当并均匀。

(4) 电刷和刷盒（或称为刷握）的装配应适当，电刷在其内应能自由滑动。

(5) 换向器表面应光滑，无划痕和烧灼的痕迹，换向片间的绝缘材料（一般为云母）应低于换向器表面。

二、堵转电流和堵转转矩的测定试验

试验方法与普通电动机相同，但只要要求测定额定频率、额定电压一点的堵转电流、功率和堵转转矩，不必作堵转特性曲线。试验时间应不多于 5s。

试验前，应在 50% 额定电压下，在一个电枢槽距内顺电动机旋转方向连续移动定子位置，找出转矩为最小的点，之后立即断电，固定好这一位置；再给电机加额定电压，以上述点为起点，将定子逆着电动机旋转方向移动，每移动 2° 测量一点转矩值，共测量 5 点。

如试验时电压未达到额定值，则应对试验所得的电流、功率和转矩值进行电压修正，求出额定电压时的数值。修正方法同三相电动机相关规定。

三、额定负载试验

应采用测功机直接测出电动机的输出功率或输出转矩（此时还需用转速表测出转速）。试验时，给被试电动机加额定频率的电压，加负载使其输出额定功率（或转矩），此时转速也应为额定值。

用被试电机的输出和输入功率直接计算求取效率。

四、换向检查试验

在额定频率的额定电压下，使电动机的转速达到 1.5 倍的额定值，在负载为额定值时，观测换向器上的火花。该火花不大于 2 级为合格。

火花等级的确定标准见附录 E。

五、超速试验

被试电动机在低电压下空载运行或在其他机械的拖动下运行，转速达到额定转速的 1.5 倍，历时 2min。

六、绕组对机壳的绝缘耐交流电压试验

试验电压为 1000V，时间为 1min。

第五节 单相离合器电动机试验

单相离合器电动机的技术条件编号为 JB/T3697—1992。和普通单相交流电容电动机相比，其试验特点在于它的离合器部分的试验。下面介绍有关内容。

一、离合器加速时间和制动时间的测定试验

(一) 试验设备

试验设备及安装方式如图 7-11 所示。对所用设备及安装要求如下：

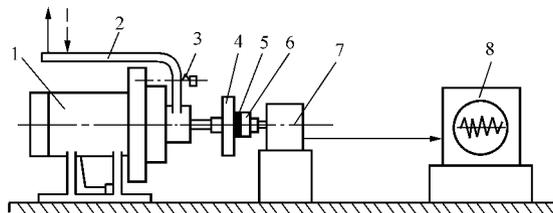
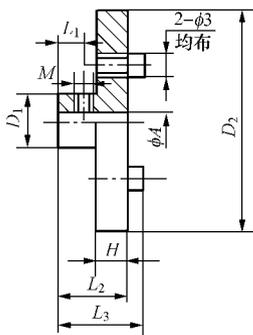


图 7-11 单相离合器电动机的离合器试验设备安装示意图

- 1 - 被试电动机；2 - 离合器拉杆；3 - 拉杆压力弹簧；4 - 惯性轮；
5 - 弹性垫；6 - 联轴节；7 - 测速发电机；8 - 录波仪（示波器）

1. 惯性轮和联轴节

惯性轮安装于离合器轴上，其转动惯量 $GD^2 = 0.003\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，实际应用时，常将惯性轮和与电机联结的联轴节做成一体。其结构尺寸（铝质材料）



见图 7-12 及表 7-1。

2. 弹性垫圈

夹在电动机惯性轮和测速发电机联轴节之间，用于减小因少量的不同轴度对试验的影响。其结构尺寸如图 7-13 所示。

3. 测速发电机

可使用直流测速发电机，也可使用交流测速发电机，按图 7-11 的正规专用试验设备要求，应将其固定安装在试验台上，并用联轴器可靠地与
被试电动机进行联结，其输出电压信号送给录波器。

图 7-12 惯性轮和联轴节结构图

如无上述条件,也可使用本书第五章第三节《制动电动机的制动性能试验》中介绍的用玩具电机代替专用测速发电机的方法。但此时应注意被试电动机所配惯性轮的转动惯量应达到标准要求。

表 7-1 惯性轮和联轴节结构尺寸表 mm

名称	配合器件	D_1	D_2	ϕA	ϕB	L_1	L_2	L_3	H	M
联轴节	测速发电机轴	$\phi 10$	$\phi 32$	配测速电机轴	26	3	10	14	3	2
	离合器轴	$\phi 28$	$\phi 32$	$15_0^{+0.027}$	26	10	24	28	3	4
惯性轮	离合器轴	$\phi 28$	$\phi 100$		26	10	30	34	10	4

4. 录波器(示波器)

可选用光线录波器或 x-y 记录仪等。

5. 试验线路和计时问题

当使用 x-y 记录仪进行录波时,记录仪的输入信号只有测速发电机的输出电压信号。试验计时用记录仪的走纸速度来转换。

当使用多线光线录波器时,则使用本书第五章第三节《制动电动机的制动性能试验》中介绍的试验线路,这种计时较精确,建议采用。

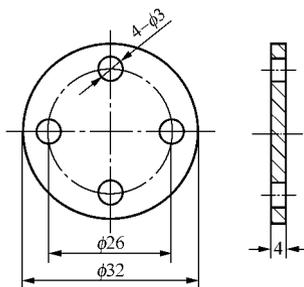


图 7-13 弹性垫圈结构尺寸图

(二) 试验方法

按图 7-11 安装好试验设备后,先调整拉杆的压力弹簧,用测力计在拉杆末端将拉杆提起,使离合器摩擦片与电机轴端的惯性轮接触。此时拉力应为 20N(正差为 0N,负差为 1.5N)。调整完毕后,使拉杆复位。

接通电源,使被试电动机空载运行。

突然但均匀地提起拉杆,使离合器摩擦片与电机轴端的惯性轮接触后,将拉杆自然放下,使拉杆自由复位。这一过程应在 3s 内完成。在操作拉杆的同时,用录波器记录测速发电机的输出电压波形变化情况。

所用试验设备和线路的不同,将得到不同的记录波形。根据这些波形的变化情况来求取被试电机离合器的加速时间和制动时间,如图 7-14 所示。

第一次试验完成后,隔 2s 左右再进行一次试验,如此共进行 5 次。取 5 次的算术平均值作为被试电机离合器加速时间和制动时间的最后结果。

JB/T3698—1992 中规定,离合器加速时间应不大于 0.30s,制动时间应不大于 0.25s。

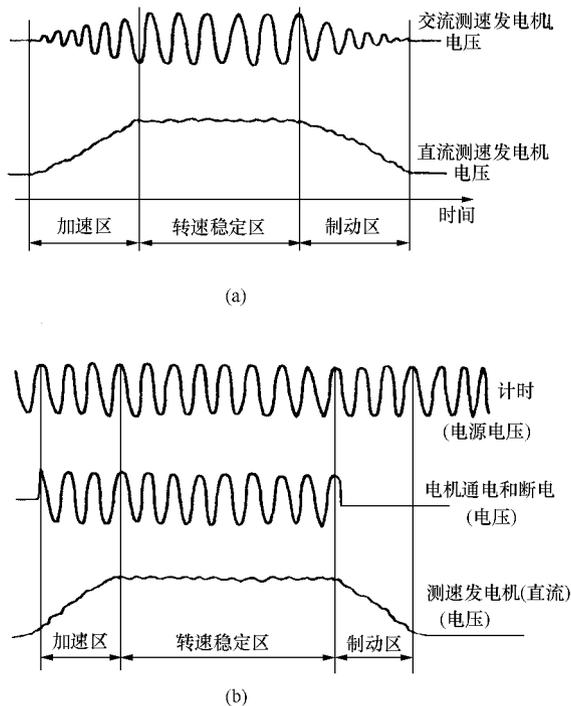


图 7-14 离合器的加速时间和制动时间记录波形

(a) 用 x-y 记录仪进行录波时的波形；(b) 用多线光线录波器时的波形

二、电动机空载起动时间的测定试验

试验时，离合器应处于合上的状态。给电动机加额定频率的额定电压，使之空载起动。记录电机从开始加电到达到额定转速所用的时间，即为电动机空载起动时间。

JB/T3698—1992 中规定，电动机空载起动时间应不大于 5s。

三、电容器两端电压的测定试验

当电动机加额定频率的额定电压起动或运行时，分别测量电容器两端的电压值。

两种情况下的电压值都不应大于所用电容器所标定的额定电压。

四、振动和噪声测定试验

试验时，被测电机在离合器处于合上的状态下空载运行，所加电源的电

压和频率均为额定值。电动机可在弹性悬挂的状态下进行测试。

五、发热试验

在进行发热试验时，被试电动机应安装在绝热底板上，如用铁板安装，则必须用橡胶防震块安装于摇篮式底盘上，使被试电机与铁底板隔热。试验和计算方法同单相电容电机。

第六节 洗衣机用单相电动机试验

以双桶式洗衣机为例，介绍洗衣机用单相电动机专用的试验项目和试验方法。

一、XD 型洗衣机用电动机试验

XD 型洗衣机洗衣用电动机使用单相 220V、50Hz 交流电源，同步转速为 1500 r/min，功率等级分为 90、120、180 和 250W 四种，采用电容起动并运行。

该类单相电动机在使用中要长期正反转交替运行。因此，在进行发热试验时，建议使用与洗衣时相同的工作周期进行运转。

其余试验与普通电容起动并运行的单相交流电动机完全相同。

二、XD 型洗衣机脱水用电动机试验

XD 型洗衣机脱水用电动机使用单相 220V、50Hz 交流电源，同步转速

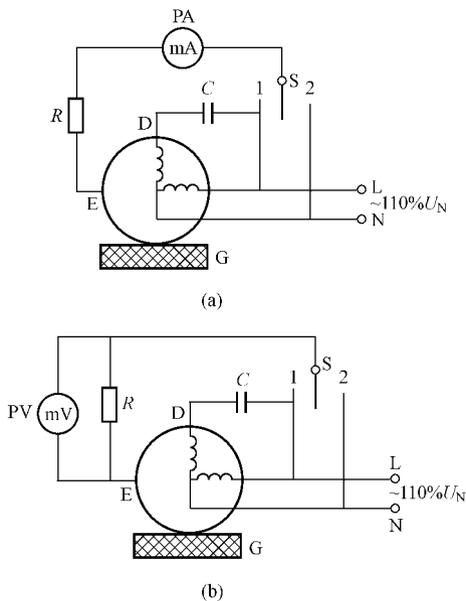


图 7-15 洗衣机脱水用电动机泄漏电流测定试验

(a) 电流法试验线路；(b) 电压法试验线路

S - 单刀双掷开关；PA - 交流 mA 表；PV - 交流 mV 表；R - 定值电阻 (1750 ± 250) Ω ；

E - 电动机端盖螺丝；C - 电容器；G - 绝缘垫；D - 被试电动机

为 1500 r/min，功率等级分为 25、30、40、45 和 60W 等多种，采用电容启动并运行，工作制为 S1。

(一) 泄漏电流测定试验

本试验应在发热试验后紧接着进行。试验线路见图 7-15。

试验时，给电机的出线端加 1.1 倍的额定电压 (242V)，开关 S 接 1 时测出 I_1 (电流法) 或 U_1 (电压法)；再将开关 S 接 2，测出 I_2 (电流法) 或 U_2 (电压法)。

对于图 7-15 (a) 的电流法， I_1 和 I_2 中的较大值即为所求泄漏电流；对于图 7-15 (b) 的电压法，取 U_1 和 U_2 中的较大值除以电阻 R 所得之商即为所求泄漏电流 I，即 $I = U/R$ 。标准中规定，该泄漏电流不应大于 0.5mA。

(二) 引出线强度试验

对三根引出线分别进行检查。其检查方法如下：以其中一根引出线的端头为固定端，轻轻悬吊电机，保持静止状态，持续 10s。试验中和试验后不应有断裂和外皮损坏等现象。

(三) 电容器两端电压的测定试验

电动机按正常工作状态接线并加额定频率的额定电压，施加 30% 额定功率的负载运行。测量电容器两端的电压。

该电压不应超过所用电容器所标定的额定电压。

(四) 发热试验

给电动机配置的电容器的电容值容差为 $\pm 10\%$ ，试验时的环境温度应保持在 20 ± 5 。

试验时，被试电动机带额定功率的直接负载，连续运行 15min 后断电停转，并在 15s 内测得绕组的热态直流电阻，求取绕组温升。

(五) 空载低电压起动试验

给被试电机加额定频率 40% 的额定电压，空载起动。

电机应能起动并达到正常工作转速。

(六) 耐振动试验

将被试电机分别以垂直 (轴伸向上) 和水平位置固定于专用的振动试验台上。以频率为 300 次/min、双振幅为 20mm 的振动条件，各试验 20min。试验时，电机不加电。

上述试验完成后，对被试电机进行空载低电压起动和绝缘电阻的测定两项试验，试验结果均应合格。

(七) 15min 堵转试验

将被试电机的转子堵住，给其施加额定频率的额定电压，历时 15min。

断电后 15s 内，用 500V 绝缘电阻表测量定子绕组对机壳的绝缘电阻。

试验中，允许被试电机冒烟或出臭味，但不应有着火现象；试验后测得的绝缘电阻应大于 $1M\Omega$ 。

(八) 电压波动试验

将被试电动机 M 按图 7-16 所示安装在一个专用的试验支架上。其轴伸朝上并安装上一个模拟负载的钢质圆盘 P（尺寸和质量见表 7-2）。

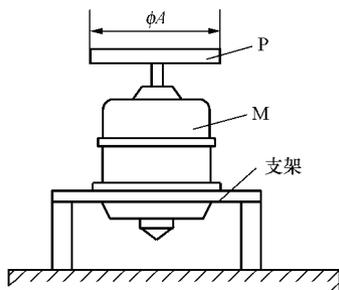


图 7-16 脱水电机模拟试验装置

给被试电机加额定频率、1.1 倍和 0.9 倍额定电压进行两次起动试验。电机应能在 1min 内起动并达到稳定运行转速。

表 7-2 脱水电机模拟试验装置中圆盘 P 的尺寸和质量

被试电机额定容量 (W)	25, 30	40, 45	60
圆盘质量 (kg)	4	5	7
圆盘直径 ϕA (mm)	150		

(九) 耐久性试验

被试电机的安装方式同电压波动试验（见图 7-16）。

试验时，给被试电机施加额定频率的额定电压，按运行 3min、断电 2min 的工作周期运转，累计达 1000h。

上述试验完成后，对被试电机进行空载低电压起动和绝缘电阻的测定（在试验后的 15s 内，用 500V 绝缘电阻表测量）两项试验，试验结果均应合格。

第七节 电容器电容量的测定和故障判断

现已有很多数字万用表和多用钳形电流表附带直接测量较小电容器电容量的功能，可直接使用。在不具备这些功能的电表时，可用下面介绍的一些方法测量电容器的电容量和判断常见故障。

一、电容器好坏的简易判断方法

在检查已使用过的电容器时，应先用导线（或其他金属）将其两极相连放电，以免因其内部储存的电荷对试验人员产生电击损伤。

（一）万用法

应使用指针式万用表。将万用表的功能旋钮旋转到电阻一栏的 $\times 10\text{k}\Omega$ 或 $\times 1\text{k}\Omega$ 挡。两只表笔各接电容器的一个电极，通过万用表指针的反应来判定被试电容器的好坏。参见图 7-17。

（1）表针很快摆到 0Ω 处，然后慢慢地向 ∞ 端走动，最后停在一个位置上。所停位置离 ∞ 处越近，说明质量越好（漏电流较小），反之说明质量较差，严重时不能使用（使用后电容器会严重发热）。

表针很快摆到 0Ω 处后，不往回走动，说明该电容器内部已短路，不能再使用。

（2）接通后表针不摆动，说明该电容器内部已断路，不能再使用。

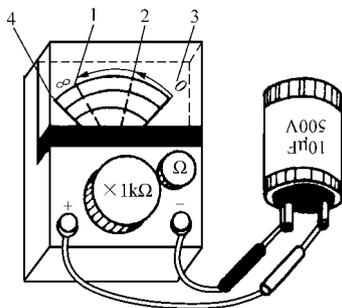


图 7-17 用万用表粗略检查电容器的质量

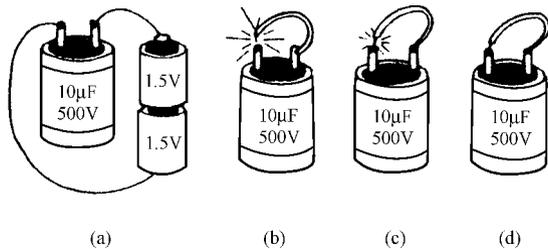
- 1 - 表针返回较多（好的）；2 - 表针返回较少（差的）；
3 - 表针不返回（内部短路的）；4 - 表针不动（内部断路的）

（二）充、放电法

在用导线对使用过的电容器放电时，若发出较大的火花和放电声，则说

明该电容器是好的。若无上述现象，手头又没有万用表时，可采用充、放电的方法简单地检查它的好坏。

如图 7-18 所示，先用电池给被试电容器充电 [见图 7-18 (a)]，再用一段导线，其一端与电容器的一个电极相接，用另一端去点电容器的另一个电极，若产生较大的放电火花，则该电容器是较好的，见图 7-18 (b)；产生的火花较小，说明该电容器质量较差或电容量较小，见图 7-18 (c)；不放电者，已损坏，见图 7-18 (d)。

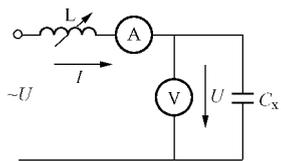


7-18 采用充、放电的方法简单地检查电容器的好坏

(a) 充电；(b) 较大的放电火花 (好的)；
(c) 产生的火花较小 (较差或电容量较小的)；(d) 不放电 (坏的)

二、用电压表和电流表测定电容器的容量

测量线路如图 7-19 所示。应采用内阻较大的电压表。为使电流表获得足够大的读数，可串联一个适当的可调电感 L 。在没有专用的可调电感时，可使用自耦调压器的二次侧线圈代替。



给测试电路加交流电压 (一般用 50Hz 交流市电)，调节电感量 L ，使电流表指示为其满量程的 90% 左右。记录电流和电压表的指示值 I (A) 和 U (V)，则被测电容器的电容量 C_x (H) 为

$$C_x = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{I}{U} \quad (7-18)$$

图 7-19 用电压和电流表测定电容器容量的测试电路 式中 f ——电源频率，Hz。

如考虑提高计算精度，可从电流表的读数中去掉电压表支路的电流。

三、利用分压比的关系测定电解电容器的容量

测量线路如图 7-20 所示。其中 C_n 为已知电容量的标准电容； C_x 为待测

电容；C为隔直（流）电容，用以保障电压表测量 C_n 和 C_x 两端电压的交流分量；E为直流电源，供给 C_n 和 C_x 直流偏压；R为限流电阻，用以防止电解电容器击穿后直流电源被短路形成较大的电流，其阻值应远大于被测电容器的容抗 $1/\omega C_x$ ；PV_n和PV_x为电压表，应选用内阻较大的类型，这样的电压表自身损耗较小，可使通过电压表及电容器C的电流忽略不计。

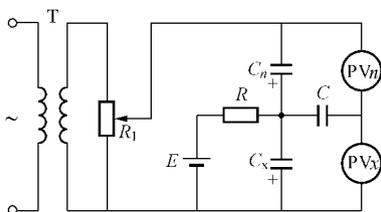


图 7-20 利用分压比的关系测定电解电容器容量的测量线路

接线时，应注意两个电解电容器的极性。

另外，直流电源E的电压应选择适当，一方面在电解电容器上电压的直流分量应大于交流分量的最大值；另一方面，直流分量与交流分量最大值之和不应超过电解电容器所能承受的电压值。

被测电容器的电容量用式(7-19)计算。

$$C_x = C_n \frac{U_n}{U_x} \quad (7-19)$$

这种测量方法较简单，但精度较差，适用于验收标定值已知的电解电容。

第八节 电机接触电流的测定试验

电机应有良好的绝缘性能。在正常工作时，电机的接触电流或泄漏电流应不超过规定值。GB 14711—1993《中小型旋转电动机安全通用要求》中规定了中小型电机泄漏电流的测定方法。GB 12350—2000《小功率电动机的安全要求》中规定了小功率电机泄漏电流的测定方法。

一、中小型电机

(一) 接触电流的限值

对 660V 及以下且机座号为 160 及以下的交流电机，其热态接触电流应不大于 5mA。

其他电机的限值在有必要时应在产品的技术条件中规定。

(二) 接触电流测量接线

单相交流电机测量接线如图 7-21 (a) 所示。图中 M 采用图 (b) 所示的网络。

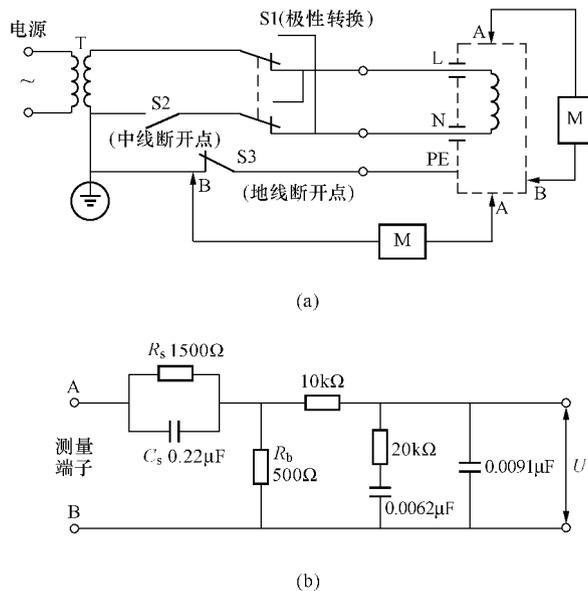


图 7-21 单相交流电机接触电流测量接线图

(a) 测量接线图；(b) M 网络

(三) 接触电流测定方法

1. 测量时电机的状态

接触电流应在电机温升试验后进行测量。试验电源电压为电机最高额定电压的 105%，试验电源频率为电机工作频率。

2. 试验加压位置和测试方法

接触电流应在电机上易同时触及的金属零部件之间、电机上易触及的金属部件与地之间测量。

(1) 将电机绕组两端依次转换至电源的不同极性（用开关 S1），且分别在断开保护接地（用开关 S3）和断开中线（用开关 S2）的情况下，测取接触电流的最大值。

(2) 测量时，电机应与地绝缘。测量电极作为试棒，A 端电极每次接入时，A 端电极应先接到地，然后再依次接到每个可触及的其他零部件上进行测量。

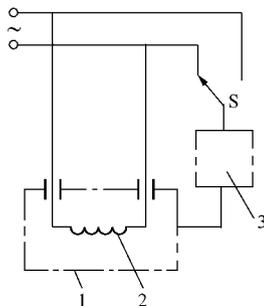


图 7-22 小功率单相电动机
泄漏电流试验接线图

1—电机上易触及到的金属部件；
2—电机绕组；3—泄漏
电流测量仪

二、小功率电机

(一) 试验接线

试验接线见图 7-22。

(二) 试验方法

有条件时，该试验应在温升试验后进行。试验时电机加 1.06 倍的额定电压，其运行方式由产品标准制定。电机应与大地绝缘。

试验时，对于单相电机，应将开关 S 转换到电源的不同极性，以测得最大的泄漏电流。

(三) 合格标准

电动机泄漏电流不应过大，其最高限值由被试电机的技术条件规定。

第九节 单相异步电动机常见故障分析

单相异步电动机常见故障分析见表 7-3。

表 7-3 单相异步电动机常见故障分析

序号	故障现象	原因分析
1	电源电压正常, 通电后电机不启动	(1) 电源接线开路 (电机完全无声响) (2) 主绕组或辅绕组开路 (3) 离心开关触点未闭合, 使辅绕组不能通电工作 (4) 起动电容器接线开路或内部断路 (5) 对遮极电机, 遮极线圈 (短路环) 开路或脱落 (6) 对串励电动机, 未上电刷或因电刷过短、卡住等原因不能与换向器接触, 或电刷引线断开, 或电枢绕组内部开路
2	电源电压正常, 通电后电机在低速下旋转, 并有嗡嗡声和振动感, 电流保持在一定数值上不上下降	(1) 负载过重 (2) 电机定转子相擦 (3) 轴承卡死, 原因有: 轴承装配不良; 轴承内油脂固结; 轴承滚子支架或滚子破损 (4) 对串励电动机, 换向片间短路或电枢绕组内部短路, 或电刷偏离中心线过多 (对电刷可移动的电机)
3	通电后, 电源熔断器很快熔断	(1) 绕组匝间或对地严重短路 (2) 电机引出相线接地 (3) 电容器短路
4	电机启动后, 转速低于正常值	(1) 主绕组有匝间或对地短路故障 (2) 主绕组内有线圈反接故障 (3) 离心开关未断开, 使辅绕组不能脱离电源 (4) 负载较重或轴承损坏 (5) 对串励电动机, 换向片间短路或电枢绕组内部短路, 或电刷与换向器接触不良
5	电机运行时, 很快发热	(1) 绕组 (含主绕组和辅绕组) 有匝间或对地短路 (2) 主绕组和辅绕组之间有短路故障 (末端联结处以外) (3) 启动后, 离心开关未断开, 使辅绕组不能脱离电源 (4) 主绕组和辅绕组相互交错 (5) 工作电容损坏或用错容量 (6) 定、转子铁心相擦或轴承损坏 (7) 负载较重 (8) 对串励电动机, 换向片间短路或电枢绕组内部短路, 或电刷与换向器接触不良

续表

序号	故障现象	原因分析
6	电机运行噪声和振动较大	(1) 浸漆不良, 造成铁心片间松动, 产生电磁噪声 (2) 离心开关损坏 (3) 轴承损坏或轴向窜动过大 (4) 定、转子气隙不均或轴向错位 (5) 电机内部有异物 (6) 对串励电动机, 换向片间短路或电枢绕组内部短路, 或电刷与换向器接触不良 (换向片间的云母高出换向片或换向片粗糙, 或电刷过硬、压力过大等)

附录 A 国际单位制的基本单位及辅助单位名称及符号

类别	量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	类别	量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
基本 单位	长度	L, l	米	m	基本 单位	热力学 单位	开 [尔文]	K	
	质量	m	千克	kg					
	时间	t	秒	s	辅助 单位	平面角	-	弧度	rad
	电流	I	安 [培]	A		立体角	-	球面度	sr

附录 B 国际单位制中有专门名称的导出单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	其他表示式例
频率	f	赫 [兹]	Hz	s^{-1}
力, 重力	F, W, (P, G)	牛 [顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
能量, 功, 热	E, W, Q	焦 [耳]	J	$N \cdot m$
功率	P	瓦 [特]	W	J/s
电位, 电压, 电动势	U, E	伏 [特]	V	W/A
电容	C	法 [拉]	F	C/V
电阻	R (r)	欧 [姆]	Ω	V/A
电导	G (γ)	西 [门子]	S	A/V
磁通量	Φ	韦 [伯]	Wb	$V \cdot s$
磁通量密度, 磁感应强度	B	特 [斯拉]	T	Wb/m^2
电感	L	亨 [利]	H	Wb/A
压力, 压强, 应力	P	帕 [斯卡]	Pa	N/m^2
摄氏温度	θ (t)	摄氏度		K

附录 C 国家选定的非国际单位制单位及其符号

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系
时 间	分, 时, 天	min, h, d	1 min = 60s, 1h = 60min, 1d = 24h
旋转速度	转每分	r/min	1 r/min = (1/60) s^{-1}
级 差	分贝	dB	—

附录 D 常用非法定计量单位与法定计量单位之间的换算关系表

量的名称及符号	法定计量位 名称及符号	惯用的非法定计量单位		换算关系
		名称	符号	
长度 L, l	米, m	英寸	in	1 in = 0.0254m
		英尺	ft	1 ft = 0.3048m
		码	yd	1 yd = 0.9144m
		英里	mile	1 mile = 1609.34m

续表

量的名称及符号	法定计量单位名称及符号	惯用的非法定计量单位		换算关系
		名称	符号	
质量 m	千克, kg 克, g 吨, t	磅	lb	1lb = 0.453592kg
力 F	牛 [顿] N	千克力	kgf	1kgf = 9.80665N
		磅力	lbf	1lbf = 4.4482N
功率 P	瓦 [特] W	千克力米每秒	kgf · m/s	1kgf · m/s = 9.80665W
		米制马力	马力 *	1 马力 (米制) = 735.499W
		英制马力	hp	1hp = 745.700W
		电工马力 **		1 电工马力 = 746W
		千卡每小时	kcal/h	1kcal/h = 1.163W
磁通量 ϕ	韦 [伯] Wb	麦克斯韦	Mx	1Mx = 1×10^{-8} Wb
磁通量密度, 磁感应强度 B	特 [斯拉] T	高斯	Gs	1Gs = 10^{-4} T
力矩 M 转矩, 力偶矩 T	牛 [顿] 米 N · m	千克力米	kgf · m	1kgf · m = 9.80665N · m
		磅力英寸	lbf · in	1lbf · in = 0.112985N · m
		磅力英尺	lbf · ft	1lbf · ft = 1.35582N · m
压力, 压强 P	帕 [斯卡] Pa	千克力每平方米	kgf/m ²	1kgf/m ² = 9.80665Pa
		巴	bar	1bar = 1×10^5 Pa
		工程大气压	at	1at = 9.80665×10^4 Pa
		标准大气压	atm	1atm = 1.013250×10^5 Pa
		米水柱	mH ₂ O	1mH ₂ O = 9.80665×10^3 Pa
		毫米汞柱	mmHg	1mmHg = 1.333224×10^2 Pa

注 * 米制马力单位符号, 在法国用 ch 或 CV, 在德国用 PS。

** 用于电工日常简易计算。

附录 E 电机换向火花等级的确定标准

火花等级	电刷下的火花程度	换向器及电刷的状态
1	无火花	换向器上没有黑痕, 电刷上没有灼痕
$1 \frac{1}{4}$	电刷边缘仅有小部分 (约 $1/5 \sim 1/4$) 有断续的几点状火花	
$1 \frac{1}{2}$	电刷边缘有大部分 (约 $1/2$ 电刷边缘) 有连续的较稀的颗粒状火花	换向器上有黑痕, 但不发展, 用汽油能擦除; 同时在电刷上有轻微的灼痕

火花等级	电刷下的火花程度	换向器及电刷的状态
2	电刷边缘有大部分或全部有连续的较密的颗粒状火花, 开始有断续的舌状火花	换向器上有黑痕, 用汽油不能擦除, 同时在电刷上有灼痕。若短时出现这一级火花, 换向器上不会出现灼痕, 电刷不会烧焦或损坏
3	电刷整个边缘有强烈的火花, 并伴有爆裂声响	换向器上黑痕相当严重, 用汽油不能擦除; 同时在电刷上有灼痕。若在这一级火花下短时运行, 换向器上就会出现灼痕, 电刷将被烧焦或损坏

附录 F 三相交流异步电动机产品名称与代号

代号	系列名称	代号	系列名称
Y	基本系列异步电动机	YBI	隔爆型装岩机用
YA	增安型	YBJ	隔爆型绞车用
YACJ	增安型齿轮减速	YBK	隔爆型矿用
YACT	增安型电磁调速	YBLB	隔爆型立式深井泵用
YAD	增安型多速	YBPG	隔爆型高压屏蔽式
YADF	增安型电动阀门用	YBPJ	隔爆型泥浆屏蔽式
YAH	增安型高滑差率	YBPL	隔爆型制冷屏蔽式
YAQ	增安型高起动转矩	YBPT	隔爆型特殊屏蔽式
YAR	增安型绕线转子	YBQ	隔爆型高起动转矩
YATD	增安型电梯用	YBR	隔爆型绕线转子
YB	隔爆型	YBS	隔爆型运输机用
YBB	隔爆型耙斗式装岩机用	YBT	隔爆型轴流局部扇风机
YBC	隔爆型采煤机用	YBTD	隔爆型电梯用
YBCJ	隔爆型齿轮减速	YBY	隔爆型链式运输机用
YBCS	隔爆型采煤机用水冷	YBZ	隔爆型起重用
YBCT	隔爆型电磁调速	YBZD	隔爆型起重用多速
YBD	隔爆型多速	YBZS	隔爆型起重用双速
YBDF	隔爆型电动阀门用	YBU	隔爆型掘进机用
YBEG	隔爆型杠杆式制动	YBUS	隔爆型掘进机用冷水
YBEJ	隔爆型附加制动器制动	YBXJ	隔爆型摆线针轮减速
YBEP	隔爆型旁磁式制动	YCJ	齿轮减速
YBGB	隔爆型管道泵用	YCT	电磁调速
YBH	隔爆型高转差率	YD	多速
YBHJ	隔爆型回柱绞车用	YDF	电动阀门用

续表

代号	系列名称	代号	系列名称
YDT	通风机用多速	YQSY	井用（充油式）高压潜水
YEG	制动（杠杆式）	YQY	井用潜油
YEJ	制动（附加制动器式）	YR	绕线转子
YEP	制动（旁磁式）	YRL	绕线转子立式
YEZ	锥形转子制动	YS	分马力
YG	辊道用	YSB	电泵（机床用）
YGB	管道泵用	YSDL	冷动塔用多速
YGT	滚筒用	YSL	离合器用
YH	高滑差率	YSR	制冷机用耐氟
YHJ	行星齿轮减速	YTD	电梯用
YHT	换向器式（整流子）调速	YTID	电梯用多速
YI	装煤机用	YUL	装入式
YJI	谐波齿轮减速	YX	高效率
YK	大型二极（快速）	YXJ	摆线针轮减速
YLB	立式深井泵用	YZ	冶金及起重
YLJ	力矩	YZC	低振动低噪声
YLS	立式	YZD	冶金及起重用多速
YM	木工用	YZE	冶金及起重用制动
YNZ	耐振用	YZJ	冶金及起重用减速
YOJ	石油井下用	YZR	冶金及起重用绕线转子
YP	屏蔽式	YZRF	冶金及起重用绕线转子（自带风机式）
YPG	高压屏蔽式		
YPJ	泥浆屏蔽式	YZRG	冶金及起重用绕线转子（管道通风式）
YPL	制冷屏蔽式		
YPT	特殊屏蔽式	YZRW	冶金及起重用涡流制动绕线转子
TQ	高起动转矩		
YQL	井用潜卤	YZS	低振动精密机床用
YQS	井用（充水式）潜水	YZW	冶金及起重用涡流制动
YQSG	井用（充水式）高压潜水	YVF	变频调速专用

附录 G 交流单相异步电动机产品名称与代号

代号	系列名称	代号	系列名称
YU	电阻起动	YIF	仪用轴流
YC	电容起动	YYJ	电影放映机用
YY	电容运行	YYP	电影洗片机用
YL	双值电容	YSK	双轴伸空调器用
YJ	罩(遮)极	YSY	电容运转风扇
YJF	罩(遮)极(方形)	YSZ	电容运转页式风扇
YUX	电阻起动(高效率)	YZF	罩(遮)极风扇
YCX	电容起动(高效率)	YDN	电容运转内转子吊扇
YYX	电容运行(高效率)	YDW	电容运转外转子吊扇
Y LX	双值电容(高效率)	YPS	电容运转排气扇
YUR	制冷机用耐氟电阻起动	YPZ	罩(遮)极排气扇用
YCR	制冷机用耐氟电容起动	YXB	电容运转波轮式洗衣机用
YYR	制冷机用耐氟电容运行	YXG	电容运转滚筒式洗衣机用
YLR	制冷机用耐氟双值电容	YYG	洗衣机甩干机用
YDL	离合器	YZM	低振动精密机床用
YDB	机床用电泵		

附录 H 潜水电泵系列名称与字母代号对照表

代号	系列名称	代号	系列名称
Q	机械密封式潜水异步电泵(上泵)	QSG	充水式高压潜水电泵(上泵)
QX	机械密封式潜水异步电泵(下泵)	QSGX	充水式高压潜水电泵(下泵)
QY	充油式潜水异步电泵(上泵)	QDX	机械密封式单相异步潜水电泵
QYX	充油式潜水异步电泵(下泵)	QU	半干式潜水异步电泵(上泵)
QYG	充油式高压潜水异步电泵(上泵)	QUX	半干式潜水异步电泵(下泵)
QYGX	充油式高压潜水异步电泵(下泵)	QZ	潜水直流电泵
QS	充水式潜水异步电泵(上泵)	QKSG	矿井用高压潜水电泵
QSX	充水式潜水异步电泵(下泵)		

附录 I 纺织机械专用三相异步电动机系列名称与字母代号对照表

代号	系列名称	代号	系列名称
FD	电锭电机	FOX	纺织用扁式结构高效电机
FLD	纺织用导辊力矩电机	FRZ	纺织用电轴电机
FLJ	纺织用卷绕力矩电机	FS	纺织用小功率电机
FOS	梳棉机用扁式结构电机	FX	纺织用高效电机

附录 J 电机综合标准

序号	标准编号	标准名称
1	GB 755—2000	旋转电机 性能与定额
2	GB/T 997—2003	旋转电机 结构及安装方式(IM代号)

续表

序号	标准编号	标准名称
3	GB/T 1971—2006	旋转电机 线端标志与旋转方向
4	GB/T 1993—1993	旋转电机 冷却方式
5	GB/T 755.2—2003	旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法
6	GB/T 4942.1—2006	旋转电机整体结构的防护等级（IP代码）分级
7	GB/T 5171—2002	小功率电动机 通用技术条件
8	GB/T 5321—2005	热量法测定电机的损耗和效率
9	GB/T 10068—2000	轴中心高56mm及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值
10	GB/T 10069.1—2006	旋转电机噪声测定方法及限值 第1部分：旋转电机噪声测定方法
11	GB 10069.3—2006	旋转电机噪声测定方法及限值 第3部分：噪声限值
12	GB 12350—2000	小功率电动机的安全要求
13	GB/T 12351—1990	热带型旋转电机环境技术要求
14	GB/T 13002—1991	旋转电机装入式热保护 旋转电机的保护规则
15	GB 13232—2006	旋转电机装入式热保护 热保护器通用规则
16	GB/T 13394—1992	电工技术用字母符号 旋转电机量的符号
17	GB/T 13599—1992	旋转电机装入式热保护 热保护系统用热检测器和控制单元
18	GB 14711—2006	中小型旋转电机安全要求
19	GB/T 16439—1996	交流伺服系统 通用技术条件
20	GB/T 10761—2005	热带微电机 基本技术要求
21	GB/T 7345—1994	控制微电机 基本技术要求
22	GB/T 7344—1997	交流伺服电动机 通用技术条件
23	GB/T 12785—2002	潜水电泵 试验方法
24	GB/T 17948.1 - 2000	旋转电机绝缘结构功能性评定 散绕组试验规程 热评定与分级
25	GB/T 16318—1996	旋转牵引电机 基本试验方法
26	GB/T 1093—1983	牵引电机 基本试验方法
27	GB 18211—2000	微电机安全通用要求
28	GB 15703—1995	隔爆型电机 基本技术要求
29	GB/T 2900.25—1994	电工术语 旋转电机
30	GB 18613—2006	中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级
31	GB 20294—2006	隔爆型起重冶金和屏蔽电机安全要求
32	JB/T 6204—2002	高压交流电机定子线圈及绕组绝缘耐电压试验规范
33	JB/T 6480.2—1999	牵引电机 产品型号编制方法
34	JB/T 6480—1992	牵引电机 基本技术条件

续表

序号	标准编号	标准名称
35	JB/T 3140—1982	高压电机使用于高海拔地区的防电晕标准
36	JB/T 5811—1991	交流低压电机成型绕组匝间绝缘试验方法及限值
37	JB/T 7608—1994	高压交流电机线圈绝缘介质损耗角正切试验方法及限值
38	JB/T 8439—1996	高压电机使用于高海拔地区的防电晕 技术要求
39	JB/T 9543—1999	小功率齿轮减速异步电动机 通用技术条件
40	JB/T 9615.1—2000	交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘 试验方法
41	JB/T 9615.2—2000	交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘 试验限值
42	JB/T 10098—2000	交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平
43	JB/T 7836.1—2005	电机用加热器 第1部分：通用技术条件
44	JB/T 7836.2—2005	电机用加热器 第2部分：普通型翅片式管电加热器
45	JB/T 7836.3—2005	电机用加热器 第3部分：防爆型翅片式管电加热器
46	JB/T 7590—2005	电机用钢质波形弹簧 技术条件
47	JB/T 2834—2005	电机用刷握及集电环
48	JB/T 10500.1—2005	电机用埋置式热电阻 第1部分 一般规定、测量方法和检验规范
49	JB/T 10500.2—2005	电机用埋置式热电阻 第1部分 铂热电阻技术条件
50	JB/T 10500.3—2005	电机用埋置式热电阻 第1部分 铜热电阻技术条件
51	JB/T 10508—2005	中小电机用槽楔 技术条件
52	FZ/T 99001—1991	纺织机械旋转电机 基本技术条件
53	SN/T 0247—1993	出口电机检验规程
54	SN 0577—1996	进口废电机检验规程（试行）

附录 K

三相异步电动机标准

序号	标准编号	标准名称
1	GB/T 1032—2005	三相异步电动机试验方法
2	GB/T 20137—2006	三相笼型异步电动机损耗和效率的确定方法
3	GB/T 761—1965	三相异步电动机额定功率、电压及转速（0.6~100kW）
4	GB/T 20161—2006	变频器供电的笼型感应电动机应用导则
5	JB/T 1009—1991	YS系列三相异步电动机 技术条件
6	JB/T 9616—1999	Y系列（IP44）三相异步电动机 技术条件（机座号80~315）
7	JB/T 5274—1991	Y系列（IP44）三相异步电动机 技术条件（机座号355）
8	JB/T 10391—2002	Y系列三相异步电动机
9	JB/T 5271—1991	Y系列（IP23）三相异步电动机 技术条件（机座号160~280）
10	JB/T 5272—1991	Y系列（IP23）三相异步电动机 技术条件（机座号315~355）

续表

序号	标准编号	标准名称
11	JB/T 5273—2002	Y—H 系列 (IP44) 船用三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 355)
12	JB/T 1270—1991	YR 系列 (IP23) 三相异步电动机 技术条件 (机座号 315 ~ 355)
13	JB/T 5269—1991	YR 系列 (IP23) 三相异步电动机 技术条件 (机座号 160 ~ 280)
14	JB/T 7119—1993	YR 系列 (IP44) 三相异步电动机 技术条件 (机座号 132 ~ 315)
15	JB/T 8680.1—1998	三相异步电动机技术条件 第一部分: Y2 系列 (IP54) 三相异步电动机 (机座号 63 ~ 355)
16	JB/T 8680.2—1998	三相异步电动机技术条件 第一部分: Y2—E 系列 (IP54) 三相异步电动机 (机座号 80 ~ 280)
17	JB/T 5330—1991	振动源三相异步电动机 技术条件
18	JB/T 6222—1992	盘式制动异步电动机
19	JB/T 6226—1992	大型火电设备风机用电动机 技术条件
20	JB/T 6297—1992	YLJ 系列力矩三相异步电动机 技术条件
21	JB/T 6447—1992	Y CJ 系列齿轮减速三相异步电动机 技术条件 (机座号 71 ~ 280)
22	JB/T 6448—1992	YEP 系列 (IP44) 旁磁制动三相异步电动机 技术条件 (机座号 71 ~ 280)
23	JB/T 6449—1992	YH 系列 (IP44) 高滑差率三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 280)
24	JB/T 6450—1992	YCTD 系列电磁调速电动机 技术条件 (机座号 100 ~ 315)
25	JB/T 6456—1992	YEJ 系列 (IP44) 电磁制动三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 225)
26	JB/T 6519—1992	风扇磨煤用大中型三相异步电动机 技术条件
27	JB/T 6741—1993	YSD 系列变极双速三相异步电动机
28	JB/T 7118—2004	YVF2 系列 (IP54) 变频调速专用三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 315)
29	JB/T 7075—2002	YZD 系列起重用多速三相异步电动机 技术条件
30	JB/T 7076—2002	YEZS 系列起重用双速锥形转子制动三相异步电动机 技术条件
31	JB/T 7120—1993	YZC 系列 (IP44) 低振动低噪声三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 160)
32	JB/T 7123—1993	YCT 系列电磁调速电动机 技术条件 (机座号 112 ~ 355)
33	JB/T 7125—1993	小型平面制动三相异步电动机 技术条件
34	JB/T 7126—1993	YLB 系列深井水泵用三相异步电动机 技术条件 (机座号 132 ~ 280)

序号	标准编号	标准名称
35	JB/T 7127—1993	YD 系列 (IP44) 变极多速三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 280)
36	JB/T 7128—2007	YTM、YHP、YMPS 系列磨煤机用异步电动机 技术条件
37	JB/T 7132—1993	CK 系列三相异步电动机 技术条件 (机座号 63 ~ 315)
38	JB/T 7593—2007	Y 系列高压三相异步电动机 技术条件 (机座号 355 ~ 630)
39	JB/T 10314.1—2002	YRKS、YRKS—W、YRQF 系列高压绕线转子三相异步电动机 技术条件 (机座号 355 ~ 630)
40	JB/T 10314.2—2002	YRKK、YRKK—W 系列高压绕线转子三相异步电动机 技术条件 (机座号 355 ~ 630)
41	JB/T 10315.1—2002	YKS、YKS—W、YQF 系列高压三相异步电动机 技术条件 (机座号 355 ~ 630)
42	JB/T 10315.2—2002	YKK、YKK—W 系列高压三相异步电动机 技术条件 (机座号 355 ~ 630)
43	JB/T 10444—2004	Y2 系列高压三相异步电动机 技术条件 (机座号 355 ~ 560)
44	JB/T 10447—2004	Y3 系列 (IP55) 三相异步电动机 技术条件 (机座号 63 ~ 355)
45	JB/T 10485—2004	变频调速专用三相异步电动机 绝缘规范
46	JB/T 7594—1994	YR 系列高压三相异步电动机 技术条件
47	JB/T 10445—2004	YR 系列 10kV 绕线转子三相异步电动机 技术条件 (机座号 450 ~ 630)
48	JB/T 10446—2004	Y 系列 10kV 三相异步电动机 技术条件 (机座号 450 ~ 630)
49	JB/T 7823—2007	三相扁平型直线异步电动机
50	JB/T 8158—1999	电压为 690V 及以下单速三相笼型感应电动机的起动性能
51	JB/T 8681—1998	YDT 系列 (IP44) 变极多速三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 315)
52	JB/T 8682—1998	YM 系列木工用三相异步电动机 技术条件
53	JB/T 8733—1998	YG 系列辊道用三相异步电动机 技术条件 (机座号 112 ~ 225)
54	JB/T 8955—1999	YZR2 系列起重机冶金用绕线转子三相异步电动机 技术条件
55	JB/T 8956—1999	YZTD 系列塔式起重机用多速三相异步电动机 技术条件
56	JB 8972—1999	YA 系列增安型三相异步电动机 技术条件 (机座号 315 ~ 355)
57	JB/T 8658—1997	外转子低噪声三相异步电动机
58	JB/T 9546—1999	YLI 系列卷绕用力矩三相异步电动机 技术条件
59	JB 5337—1991	YW 系列无火花型三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 315)

续表

序号	标准编号	标准名称
60	JB 5338—1991	YB 系列隔爆型 (d11 CT4) 三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 315)
61	JB 6200—1992	YASO 系列小功率增安型三相异步电动机 技术条件 (机座号 56 ~ 90)
62	JB/T 5869—2005	YBZS 系列起重用隔爆型双速三相异步电动机 技术条件
63	JB 6202—1992	YBF 系列风机用隔爆型三相异步电动机 技术条件 (机座号 63 ~ 160)
64	JB/T 6455—1992	YB—H 系列船用隔爆型三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 280)
65	JB 6763—1993	YA—W、YA—WF1 系列户外、户外防腐增安型三相异步电动机 (机座号 80 ~ 280)
66	JB 7565. 1—2004	隔爆型三相异步电动机技术条件 第 1 部分: YB2 系列隔爆型三相异步电动机 (机座号 63 ~ 355)
67	JB 7565. 2—2004	隔爆型三相异步电动机技术条件 第 2 部分: YB2—W、YB2—TH、YB2—THW、YB2—TA、YB2—TAW 系列隔爆型三相异步电动机 (机座号 63 ~ 355)
68	JB 7565. 3—2004	隔爆型三相异步电动机技术条件 第 3 部分: YB2—F1、YB2—WF1、YB2—F2、YB2—WF2 系列防腐、户外防腐隔爆型三相异步电动机 (机座号 63 ~ 355)
69	JB 7565. 4—2004	隔爆型三相异步电动机技术条件 第 4 部分: YB2 系列隔爆型 (Exd II CT1 ~ T4) 三相异步电动机 (机座号 63 ~ 355)
70	JB 7565. 5—2004	隔爆型三相异步电动机技术条件 第 5 部分: YB2 系列风机用隔爆型三相异步电动机 (机座号 63 ~ 355)
71	JB 8671—1997	YBGB、YBGB—W 系列管道泵用隔爆型三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 315)
72	JB 8672—1997	YBJ 系列轿车用隔爆型三相异步电动机 技术条件
73	JB 8673—1997	YBI、YI 系列装岩机用三相异步电动机 技术条件
74	JB 8674—1997	YB 系列高压隔爆型三相异步电动机 技术条件 (机座号 355 ~ 400)
75	JB 9593. 1—2002	煤矿用隔爆型三相异步电动机 技术条件 第 1 部分: YBK2 系列煤矿井下用隔爆型三相异步电动机 (机座号 100 ~ 315)
76	JB 9595—1999	YA 系列增安型三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 280)
77	JB 9596—1999	YB—W、YB—TH、YB—WTH 系列隔爆型三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 315)
78	JB 6216—2002	P 系列屏蔽电动机技术条件
79	JB 6217—2005	PB 系列隔爆型屏蔽电动机 技术条件
80	JB 6262—1993	矿用隔爆型潜水电泵
81	JB 6762—2004	矿用隔爆型潜污水电泵

序号	标准编号	标准名称
82	JB 5869—1991	YBZS 系列起重用隔爆型双速三相异步电动机 技术条件
83	JB/T 7565. 2—2002	隔爆型三相异步电动机技术条件 第 2 部分 YB2—W、YB2—TH、YB2—THW、YB2—TA、YB2—TAW 系列隔爆型三相异步电动机 (机座号 63 ~ 355)
84	JB/T 8670—1997	YBDF2 系列阀门电动装置用隔爆型三相异步电动机 技术条件
85	JB/T 9593. 1—2002	煤矿用隔爆型三相异步电动机技术条件 第 1 部分 YBK2 系列煤矿井下用隔爆型三相异步电动机 (机座号 100 ~ 315)
86	JB/T 10352—2002	YFB 系列粉尘防爆型三相异步电动机技术条件 (机座号 63 ~ 355)
87	JB/T 10353. 1—2002	燃油加油机用隔爆型电动机技术条件 第 1 部分 YBJY 系列燃油加油机用隔爆型三相异步电动机 (机座号 63 ~ 100)
88	JB/T 50136. 1—1999	隔爆型三相异步电动机可靠性指标评定方法 (实验室法)
89	JB/T 50136. 2—1999	隔爆型三相异步电动机隔爆组件可靠性指标评定方法 (实验室法)
90	JB/T 5275—1991	Y-W、Y-WF 系列户外及户外化工防腐蚀性三相异步电动机技术条件 (机座号 80 ~ 315)
91	JB/T 5803—1991	污水污物潜水电泵 技术条件
92	JB/T 5870—2002	YZR 系列起重及冶金用中型高压绕线转子三相异步电动机技术条件
93	JB/T 5879—1991	YSB 系列三相机床冷却电泵
94	JB/T 6216—1992	P 系列屏蔽电动机 技术条件
95	JB/T 8670—1997	YBDF2 系列阀门电动装置用隔爆型三相异步电动机 技术条件
96	JB/T 2195—1998	YBF2 系列阀门电动装置用三相异步电动机 技术条件
97	JB/T 3699—1992	三相离合器电动机
98	JB/T 7567—1994	船用稳索绞车三相异步电动机 技术条件
99	JB/T 7075—2002	YZD 系列起重用多速三相异步电动机 技术条件
100	JB/T 7076—2002	YEZS 系列起重用双速锥形转子制动三相异步电动机 技术条件
101	JB/T 7077—2002	YZRE 系列起重及冶金用电磁制动绕线转子三相异步电动机技术条件
102	JB/T 7078—2002	YZRF、YZRG 系列起重及冶金用强迫通风型绕线转子三相异步电动机 技术条件
103	JB/T 7124—1993	Y-F 系列防腐型三相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 315)
104	JB/T 56105—1999	起重及冶金用系列三相异步电动机可靠性试验方法
105	JB/T 10104—1999	YZ 系列起重及冶金用三相异步电动机 技术条件
106	JB/T 10105—1999	YZR 系列起重及冶金用绕线转子三相异步电动机 技术条件

续表

序号	标准编号	标准名称
107	JB/T 6216—2002	P 系列屏蔽电动机技术条件
108	JB/T 5797—1991	一般船用三相异步电动机 技术条件
109	JB/T 5799—1991	船舶轴流风机用三相异步电动机 技术条件
110	JB/T 5800—1991	Y-H 系列 (IP23) 船用三相异步电动机 技术条件 (机座号 160 ~ 315)
111	JB/T 5801—1991	YZ-H 系列船用三速起重用三相异步电动机 技术条件
112	JB/T 7562—2002	YEZX 系列起重用锥形转子制动三相异步电动机 技术条件
113	JB 7563—1994	YZE 系列起重及冶金用电磁制动三相异步电动机 技术条件
114	JB 7840—1995	YZRW 系列起重及冶金用涡流制动绕线转子三相异步电动机 技术条件
115	JB 7841—1995	YZZ 系列升降机电磁制动三相异步电动机 技术条件
116	JB 7842—1995	YZR-Z 系列起重专用绕线转子三相异步电动机 技术条件
117	JB/T 10221 - 2000	YZRSW 系列塔式起重机电流制制动绕线转子双速三相异步电动机 技术条件
118	JB/T 10532 - 2001	YBEZ、YBEZX 系列起重机电流制制动绕线转子三相异步电动机 技术条件
119	JB/T 10533 - 2001	YBEZ、YBESE 系列起重机电磁制动三相异步电动机 技术条件
120	JB/T 10273 - 2001	数控机床交流主轴电动机通用技术条件
121	JB/T 10274 - 2001	数控机床交流伺服电动机通用技术条件
122	JB/T 10275 - 2001	数控机床交流主轴驱动单元通用技术条件
123	JB/T 10276 - 2001	数控机床交流伺服驱动单元通用技术条件
124	JB/T 10360 - 2002	YZ2 系列起重及冶金用三相异步电动机 技术条件
125	JB/T 56105 - 1999	起重及冶金用三相异步电动机可靠性试验方法
126	JB/T 8158—1995	电压为 660V 及以下单速三相笼型异步电动机的起动性能
127	JB/T 3699—1992	三相离合器电动机
128	JB/T 7118—2004	YVF2 系列 (IP54) 变频调速专用三相异步电动机技术条件 (机座号 80 ~ 315)
129	CEEIA 133—2003	中小型电机产品质量分等 起重及冶金用三相异步电动机
130	FZ/T 99001—1991	FYD 型和 FYDZ 型电锭电动机
131	FZ/T 99001—1991	纺织用 FO 系列三相异步电动机
132	FZ/T 99001—1991	纺织用 FW 小功率三相异步电动机
133	FZ/T 99001—1991	纺织用 JFO2、FO2 系列高能指标三相异步电动机
134	FZ/T 99001—1991	FX 系列纺织用高效率三相异步电动机 技术条件
135	FZ/T 99001—1991	FXD 系列纺织用高效率多速三相异步电动机

附录 L 单相异步电动机标准

序号	标准编号	标准名称
1	GB/T 9651—1988	单相异步电动机 试验方法
2	GB/T 8128—1987	单相串励电动机 试验方法
3	JB/T 1010—1991	YU 系列电阻起动异步电动机 技术条件
4	JB/T 1011—1991	YC 系列电容起动异步电动机 技术条件
5	JB/T 1012—1991	YY 系列电容运转异步电动机 技术条件
6	JB/T 2663—1999	ADP 系列交流伺服电动机 技术条件
7	JB/T 3698—1992	单相离合器电动机
8	JB/T 3758—1996	家用洗衣机用电动机 通用技术条件
9	JB/T 4052—1994	家用缝纫机电机及其调速器
10	JB/T 4269—2002	罩极异步电动机通用技术条件
11	JB/T 4270—2002	房间空调器风扇电动机通用技术条件
12	JB/T 4376—2002	水泵用小功率异步电动机技术条件
13	JB/T 5887—1991	家用真空吸尘器用单相串励电动机风机技术条件
14	JB 6201—1992	YBDC 系列隔爆型电容起动单相异步电动机技术条件 (机座号 71 ~ 100)
15	JB/T 6737—1993	吸排油烟机用电动机 通用技术条件
16	JB/T 6738—1993	封闭式制冷压缩机用单相异步电动机 通用技术条件
17	JB/T 7577—1994	清水泵用电容运转异步电动机 技术条件
18	JB/T 7588—1994	YL 系列双值电容单相异步电动机 技术条件 (机座号 80 ~ 132)
19	JB/T 7578—1994	食物搅碎器用串励电动机
20	JB/T 7591—1994	小型单相异步电动机起动元件通用技术条件
21	JB/T 7614—1994	交流力矩电动机 通用技术条件
22	JB/T 8157—1999	小型单相串励电动机 通用技术条件
23	JB/T 8954—1999	YZLP 系列平车用双值电容异步电动机 技术条件
24	JB/T 9541—1999	家用换气扇用电动机 通用技术条件
25	JB/T 9542—1999	双值电容单相异步电动机 技术条件
26	JB/T 9547—1999	单相电动机起动用离心开关 技术条件
27	JB/T 9542—1999	小功率齿轮减速异步电动机 通用技术条件
28	JB/T 8954 - 1999	YZLP-Z 系列平车用双值电容单相异步电动机 技术条件
29	JB/T 6201 - 1992	YBDC 系列隔爆型电容起动异步电动机 技术条件 (机座号 71 ~ 100)

附录 M 指示仪表表盘标注图形符号的含义

分类	符号	符号含义	分类	符号	符号含义
仪表工作原理符号		磁电系仪表	仪表工作原理符号		磁电系比例表

续表

分类	符号	符号含义	分类	符号	符号含义
仪表工作原理符号		电磁系仪表	工作位置符号		标度尺位置为垂直的
		电磁系比例表			标度尺位置为水平的
		电动系仪表			标度尺位置与水平面倾斜成一定角度。例：60°
		电动系比例表	绝缘强度符号		不进行绝缘强度试验
		铁磁电动系仪表			绝缘强度试验电压为500V
		感应系仪表			绝缘强度试验电压为2kV
		静电系仪表	外界条件分组符号		防外磁场能力。框中*号为仪表原理符号时为Ⅰ级；Ⅱ为2级；Ⅲ为3级
		整流系仪表			防外电场能力。框中*号含义同上
	直流			使用环境组别。△中*号用A、A1、B、B1和C表示组别(见相关资料)	
电量种类符号		直流	端钮和调零器符号		正端钮和负端钮
		交流(单相)			多量限仪表的公共端钮或功率表、无功功率表、相位表的电源端钮
		交流和直流			接地用的端钮(或螺钉、螺杆)
准确度等级符号		具有单元件的三相平衡负载交流		与外壳相连的端钮	
	1.5	以标度尺量限百分数表示的准确度等级比例：1.5级		与屏蔽相连接的端钮	
		以标度尺长度百分数表示的准确度等级例：1.5级		调零器	
		以指示值百分数表示的准确度等级。例：1.5级			

附录 N 不平衡电压对三相笼型感应电动机性能的影响

(国际电工委员会报告 IEC892, 第一版, 1987 年)

以下内容是本附录标题全文中的摘要, 主要是该文件中《概述》的内容。该文件由郭钟璠高级工程师翻译。

本报告是由 IEC 第 2 技术委员会《旋转电机》编写的。

施加于三相笼型感应电动机的线电压值互不相等时, 电动机定子绕组内的相电流也互不相等。百分率不大的电压不平衡将会引起百分率大得多的电流不平衡。

不平衡电压施加于三相感应电动机, 将出现“负序电压分量”, 此负序电压分量在电机气隙中产生与转子转向相反的磁场, 从而促使产生大电流。微小的负序电压分量可使电机绕组中的电流大大超过电压平衡状态下的数值。因而, 在特定负载和特定的电压不平衡百分率下运行, 电动机的温升将大于以平衡电压运行于相同条件下电动机的温升。

(一) 适用范围

本报告适用于不平衡电压对三相笼型感应电动机性能的影响。

(二) 电压对性能的影响

不平衡电压对性能的影响如下:

1. 电流

在正常运行转速下。电流将大大地不平衡, 约为电压不平衡程度的 6 ~ 10 倍; 堵转时电流的不平衡与电压不平衡程度相同, 但堵转时在功率略有增加。

2. 转矩

电压不平衡时, 电动机的堵转转矩、最小转矩以及最大转矩都将下降。若电压不平衡极端严重, 电动机将不能正常工作。

3. 满载转速

电动机在不平衡电压下运行时, 满载转速略有下降。

4. 噪声和振动

随同电压(电流)不平衡程度的增大, 电动机的噪声和振动可能增强。振动可能损害电动机或整个驱动系统。

(三) 不平衡百分率的计算

电动机用户从三相电压读数可以方便地用下式确定电压的不平衡百分率 ΔU (%), 取其中较大的数值作为评定的结果

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_p}{U_p} \times 100\%$$

或

$$\Delta U = \frac{U_{\min} - U_p}{U_p} \times 100\%$$

式中 U_{\max} ——三个电压值中最大的一个数值，V；

U_{\min} ——三个电压值中最小的一个数值，V；

U_p ——三个电压值的平均数值，V。

例如：现测得某电路供电的三相电压数值分别为 220、215V 和 210V。请计算三相电压的不平衡百分率 ΔU (%)。

解 由题中给出的三相电压数值可知：

(1) 三相电压值的平均数值为 $U_p = (220V + 215V + 210V) / 3 = 215V$ 。

(2) 三个电压值中最大和最小的一个数与平均值之差均为 5V。

(3) 三相电压的不平衡百分率 $\Delta U = \frac{U_{\max} - U_p}{U_p} \times 100\% = \frac{220 - 215}{215} \times$

$100\% = 2.33\%$ 。

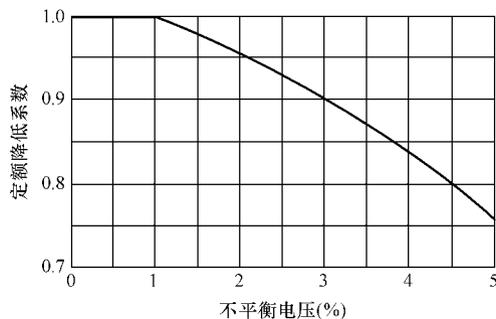
经分析计算，该三相电压系统的实际负序分量占正序分量数值的百分数可高达 18%，可见远比上述计算得到的数值高。

若电压的不平衡百分率超过 5%，则有必要研究电流的负序分量。

(四) 降低电动机的定额以防止过热

电压不平衡量超过标准允许值时，为了减少电动机发生过热危险的可能性，有必要降低电动机的定额。

对 N 设计的电动机，降低定额的数值见下图。



N-1 因电压不平衡而降低电动机定额的典型系数

(五) 降低定额电动机的过载保护装置

当一台电动机因运行于不平衡电压而降低定额时，其过载保护的选择和整定应综合考虑电动机所采用的降低定额系数以及因不平衡电压而引起的电流增加。这是一个复杂的问题。

如缺乏明确的根据，建议这样选择和（或）调整过载保护：在最小值时对施加的降低定额系数和不平衡电压不致于跳闸。

对预计会发生电压不平衡的场合，建议用户宁可装设对最大电流值起反应而不是对电流的平均值起反应的过载保护装置。

附录 O 两功率表读数之比 W_1/W_2 与功率因数 $\cos\varphi$ 的对应关系表

W_1/W_2	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	W_1/W_2
+0.9	0.996	0.997	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	+0.9
+0.8	0.982	0.984	0.986	0.988	0.989	0.990	0.992	0.993	0.994	0.995	+0.8
+0.7	0.956	0.959	0.962	0.965	0.968	0.971	0.973	0.976	0.978	0.980	+0.7
+0.6	0.918	0.922	0.926	0.931	0.935	0.939	0.942	0.946	0.950	0.953	+0.6
+0.5	0.866	0.872	0.877	0.883	0.888	0.894	0.899	0.903	0.908	0.913	+0.5
+0.4	0.803	0.810	0.816	0.823	0.829	0.836	0.842	0.848	0.854	0.860	+0.4
+0.3	0.731	0.739	0.746	0.754	0.761	0.768	0.775	0.782	0.789	0.796	+0.3
+0.2	0.655	0.662	0.670	0.678	0.686	0.693	0.701	0.709	0.716	0.720	+0.2
+0.1	0.577	0.584	0.592	0.600	0.608	0.616	0.623	0.631	0.639	0.647	+0.1
+0.0	0.500	0.508	0.515	0.523	0.530	0.538	0.553	0.553	0.561	0.569	+0.0
-0.0	0.500	0.493	0.485	0.478	0.470	0.463	0.456	0.449	0.441	0.434	-0.0
-0.1	0.429	0.420	0.413	0.406	0.399	0.392	0.386	0.379	0.372	0.366	-0.1
-0.2	0.359	0.353	0.346	0.340	0.334	0.327	0.321	0.315	0.309	0.303	-0.2
-0.3	0.297	0.291	0.285	0.279	0.274	0.268	0.262	0.257	0.251	0.246	-0.3
-0.4	0.240	0.235	0.230	0.224	0.219	0.214	0.209	0.204	0.199	0.194	-0.4
-0.5	0.189	0.184	0.179	0.175	0.170	0.165	0.161	0.156	0.152	0.147	-0.5
-0.6	0.143	0.139	0.134	0.130	0.126	0.122	0.117	0.113	0.109	0.105	-0.6
-0.7	0.101	0.097	0.094	0.090	0.086	0.082	0.078	0.075	0.071	0.068	-0.7
-0.8	0.064	0.060	0.057	0.054	0.050	0.047	0.043	0.040	0.037	0.034	-0.8
-0.9	0.030	0.027	0.024	0.021	0.018	0.015	0.012	0.009	0.006	0.003	-0.9
W_1/W_2	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	W_1/W_2

注 查表方法示例：设测试时两功率表读数分别为 $W_1 = 25.5$ 、 $W_2 = 50$ ，即 $W_1/W_2 = 0.51$ ，则在 W_1/W_2 所对列（表中两侧）找到 +0.5，再在 W_1/W_2 所对行（表中上、下两行）中找到 0.01，+0.5 所在行与 0.01 所在列的交点处的数值 0.872 即为测试时的功率因数 $\cos\varphi$ 。

求取 W_1/W_2 时, 应使 $|W_1| \leq W_2$, 即使 W_1/W_2 在 ± 1 之内。

附录 P Eh-star 法实测杂散损耗介绍

本方法是欧洲电机检测部门使用的一种实测杂散损耗的方法, 据资料介绍, 具有试验简单易行, 并且准确度还相对较高 (介于确定效率的 B 方法和反转法之间) 的优点, 我国于 2007 年初开始组织在行业内对其进行验证, 实践经验和具体结果还有待发布。本书以附录的形式将其介绍给大家, 供参考使用。

一、试验方法

试验前应按常规准确测定绕组的直流电阻, 并进行热试验、负载试验和空载试验, 取得相关数据, 其试验方法和有关规定与 GB/T 1032—2005 中介绍的完全相同。

最关键的是进行下面的“不平衡空载试验”, 或者叫“不平衡电压下的空载试验”。其试验方法和有关规定如下:

(一) 试验线路

按图 P-1 所示的线路连接被试电动机。

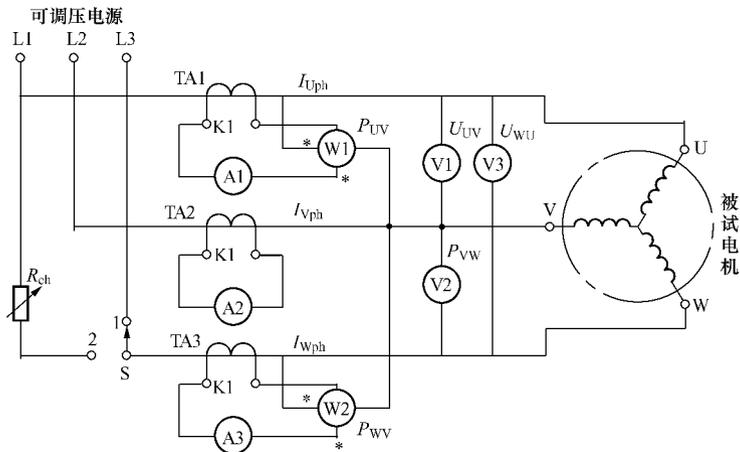


图 P-1 Eh-star 法实测杂散损耗的空载试验线路

试验时, 被试电动机的三相绕组一律接成 Y 形 (如正常为 Δ 接也要改成 Y 接), 其中性点必须悬空, 以免产生零序电流。

所接电阻 R_{ch} 应有足够的功率, 保证试验时通过需要的电流, 并且不会因发热造成阻值有较大的变化甚至损坏, 推荐其可承载的电流应不小于被试

电动机额定相电流的 1.5 倍, 其阻值 R_{eh} 应在一定范围内可调, 它的典型数据 (计算值 R'_{eh}) 为:

(1) 对于 Y 接设计的电动机

$$R'_{\text{eh}} = \frac{0.2U_{\text{N}}}{\sqrt{3I_{\text{N}}}} \quad (\text{P-1})$$

(2) 对于 Δ 接设计的电动机

$$R'_{\text{eh}} = \frac{0.2\sqrt{3}U_{\text{N}}}{\sqrt{I_{\text{N}}}} \quad (\text{P-2})$$

测量仪表包括三个电流表 (包括必要的三个电流互感器)、三个电压表、两个功率表 (必须采用两表法, 不可采用三相功率表), 其准确度应不低于 0.2 级。

(二) 试验过程

1. 试验前的准确工作

(1) 试验前, 被试电动机应经过其他的试验使其达到机械损耗稳定。但为了避免三相不平衡发热, 本试验应从冷态开始并尽快完成试验。

(1) 试验前, 应准确地测定 V 和 W 相之间的电阻 R_{11vw} 。如果使用安置在绕组上的测温元件测量绕组的温度变化来得到运行以后的电阻, 则还应记录此时绕组的温度 θ_1 。

2. 试验过程和相关事项

(1) 试验时, 调节电阻 R_{eh} , 使正序电流 R_{ips} 保持小于负序电流 R_{ins} 的 30% 和转速保持在接近额定转速范围内。建议开始试验时, 实际的电阻 R_{eh} 与计算值 R'_{eh} 相差不大于 20%。

(2) 试验电流。

1) 对于 Y 接设计的电动机

$$I_{\text{t}} = \sqrt{I_{\text{N}}^2 - I_0^2} \quad (\text{P-3})$$

2) 对于 Δ 接设计的电动机

$$I_{\text{t}} = \sqrt{I_{\text{N}}^2 - I_0^2} / \sqrt{3} \quad (\text{P-4})$$

(2) 试验电压。

1) 对于 Y 接设计的电动机

$$U_{\text{t}} = U_{\text{N}} \quad (\text{P-5})$$

2) 对于 Δ 接设计的电动机

$$U_{\text{t}} = \sqrt{6}U_{\text{N}} \quad (\text{P-6})$$

(3) 对大型电动机, 应在无电阻器 R_{eh} (图 P-1 中的开关 S 在 1 的位置,

此时给电动机加三相对称的电压)的情况下,降低电压(25%~45% U_N)起动,电动机起动完成后,再将开关S置于位置2。小型电动机可直接带已接好的电阻器 R_{e1} 起动,这样就不必设置开关S。

(4) 改变电源电压,以测量V相电流为基准,第1点的电流为额定相电流的150%,然后逐步下降,到额定相电流的75%为止,前后共测取6点读数,读数包括三个相电流表的数值(I_U 、 I_V 、 I_W)、三个线电压表的数值(U_{UV} 、 U_{VW} 、 U_{WU})、两个功率表的数值(P_{UV} 、 P_{WV})以及转速 n 。注意,上述所说的各量值已是经过折算(例如经过电流互感器比数的折算)后的实际数值,将在以后的计算中直接应用。

(5) 若用事先安置在绕组上的测温元件所测温度换算电阻,则在每个试验点测量并记录绕组的温度 θ_2 。否则,在上述试验结束后,应尽快用仪器测量V、W两端之间的电阻 R_{11vw} ,之后再继续测量5点左右,同时记录各测量点到断电时刻的时间(同热试验)。

(6) 计算时所用V、W两端之间的电阻 R_{11vw} 按下述规定获得:

1) 直接测量电阻时,100%至最小试验电流之间的点,用试验结束时测得的电阻外推到断点瞬间所得到的数值(外推方法见热试验相关内容);100%以上试验电流点,用试验之前和结束时测得的电阻值,根据与电流线性关系确定各试验点的电阻值。

2) 使用绕组温度换算法得到电阻时,用试验前测得的电阻 R_1 和温度 θ_1 以及试验中各试验点测得的温度 θ_2 求取各试验点的电阻 R_2 。

$$R_2 = \frac{R_1(235 + \theta_2)}{(235 + \theta_1)} \quad (\text{P-7})$$

(7) 为了得到准确的试验结果,在全部试验中,实测转差率应不大于2倍额定转差率,用转速表示时,为 $n \geq n_s - 2(n_s - n_N)$ 。如不符合此要求,则要增大 R_{e1} 的阻值重复进行试验。如果在低于100%额定相电流时电动机运转仍不稳定,则删去这些点的试验数据。

二、杂散损耗的计算

(1) 根据试验结果求取以下复数电压和复数电流。

$$\underline{U}_{UV} = U_{UV} \quad (\text{P-8})$$

$$U'_{WU} = \frac{U_{VW}^2 - U_{WU}^2 - U_{UV}^2}{2U_{UV}} \quad (\text{P-9})$$

$$U''_{WU} = \sqrt{U_{WU}^2 - U_{WU}'^2} \quad (\text{P-10})$$

$$U'_{VW} = -U_{UV} - U'_{WU} \quad (\text{P-11})$$

$$U''_{VW} = -U''_{WU} \quad (\text{P-12})$$

$$I'_V = - \frac{(P_{UV} - P_{VW}) + U_{WU} I_W}{U_{UV}} \quad (\text{P-13})$$

$$I''_V = \sqrt{I_V^2 - I'^2_V} \quad (\text{P-14})$$

$$k_1 = \frac{1}{2I_V^2} (I_W^2 - I_U^2 - I_V^2) \quad (\text{P-15})$$

$$I'_U = k_1 I'_V + \sqrt{\left(k_1^2 - \frac{I_U^2}{I_V^2}\right) (I_V^2 - I_V^2)} \quad (\text{P-16})$$

$$I''_U = \frac{k_1 I_V^2 - I_U I'_V}{I''_V} \quad (\text{P-17})$$

$$I'_W = - I'_U - I'_V \quad (\text{P-18})$$

$$I''_W = - I''_U - I''_V \quad (\text{P-19})$$

(2) 根据复数线电压和复数线电流求取内线电压和内线电流。

$$\underline{U}_{iUV} = \underline{U}_{UV} + \frac{1}{2} R_{\parallel VW} (I_V - I_U) \quad (\text{P-20})$$

$$\underline{U}_{iVW} = \underline{U}_{VW} + \frac{1}{2} R_{\parallel VW} (I_W - I_V) \quad (\text{P-21})$$

$$\underline{U}_{iWU} = \underline{U}_{WU} + \frac{1}{2} R_{\parallel VW} (I_U - I_W) \quad (\text{P-22})$$

式中 $R_{\parallel VW}$ ——在被试电动机 V、W 两端所测到的电阻。

(3) 分解为正序分量和负序分量 ($a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$)。

$$\underline{U}_{iLLps} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{iUV} + a \underline{U}_{iVW} + a^2 \underline{U}_{iWU}) \quad (\text{P-23})$$

$$\underline{U}_{iLLns} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{iUV} + a \underline{U}_{iWU} + a^2 \underline{U}_{iVW}) \quad (\text{P-24})$$

(4) 求取内相电压 U_i 的正序分量和负序分量。

$$\underline{U}_{ips} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}} \underline{U}_{iLLps} \quad (\text{P-25})$$

$$\underline{U}_{ins} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}} \underline{U}_{iLLns} \quad (\text{P-26})$$

(5) 求取不对称内相电压。

$$\underline{U}_{iU} = \underline{U}_{ips} + \underline{U}_{ins} \quad (\text{P-27})$$

$$\underline{U}_{iV} = a^2 \underline{U}_{ips} + a \underline{U}_{ins} \quad (\text{P-28})$$

$$\underline{U}_{iW} = a \underline{U}_{ips} + a^2 \underline{U}_{ins} \quad (\text{P-29})$$

(6) 求取铁耗等效电阻：

$$R_{Fe} = \frac{U_t^2}{P_{Fe}} \quad (P-30)$$

式中 U_t ——根据被试电动机设计接法的不同，用式 (P-5) 或 (P-6) 求得；

P_{Fe} ——由正常的空载试验，并遵照效率的确定方法之 B1 法求得（见第四章第十二节中第三部分相关内容）。

$$I_{FeU} = \frac{U_U}{R_{Fe}} \quad (P-31)$$

$$I_{FeV} = \frac{U_V}{R_{Fe}} \quad (P-32)$$

$$I_{FeW} = \frac{U_W}{R_{Fe}} \quad (P-33)$$

(6) 求取内相电流。

$$I_{jU} = I_U - I_{FeU} \quad (P-34)$$

$$I_{jV} = I_V - I_{FeV} \quad (P-35)$$

$$I_{jW} = I_W - I_{FeW} \quad (P-36)$$

(7) 求取内相电流的正序分量和负序分量。

$$I_{ips} = \frac{1}{3}(I_{jU} + a I_{jV} + a^2 I_{jW}) \quad (P-37)$$

$$I_{ins} = \frac{1}{3}(I_{jU} + a^2 I_{jV} + a I_{jW}) \quad (P-38)$$

正序电流 I_{ips} 的绝对值应小于负序电流 I_{ins} 绝对值的 30%，以获得准确的结果。如果不符合此条件，则应改变电阻 R_{ch} 的阻值重新进行试验。

(8) 求取电磁功率。

$$P_{\delta ps} = 3(U'_{ips} I'_{ips} + U''_{ips} I''_{ips}) \quad (P-39)$$

$$P_{\delta ps} = 3(U'_{ins} I'_{ins} + U''_{ins} I''_{ins}) \quad (P-40)$$

(9) 求取负载杂散损耗。

$$P_{LLasym} = (1 - s)(P_{\delta ps} - P_{\delta ns}) - P_m \quad (P-41)$$

$$k = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{ips}}{I_{ins}}\right)^2} \quad (P-42)$$

$$P_{Lr} = kP_{LLasym} \quad (P-43)$$

式中 P_m ——被试电动机的机械损耗，由正常的空载试验求得。

三、负载杂散损耗数据的回归分析

设负载杂散损耗 P_{Lr} 与 $(I_{ins}/I_t)^2$ 呈线性关系，即

$$P_{Lr} = A(I_{ins}/I_t)^2 + B \quad (P-44)$$

式中 A和 B——分别为该二次函数的斜率和截距。

利用与效率确定方法之 B 法相同的回归分析，确定试验数据的准确性和求得最终的杂散损耗。

额定负载时的杂散损耗 $P_S = A$ ，即 $I_{ins}/I_t = 1$ ， $B = 0$ 时的 P_{Lr} 。