

高职高专电子类规划教材建设教材
精品课程

传感器原理及应用

主 编	洪志刚			
副主编	杜维玲	熊小青	吴再华	高俊祥
	周哲民			
编 委	(按笔画顺序排序)			
	刘 奕	成治平	杜维玲	吴再华
	周 玲	周哲民	洪志刚	高见芳
	高俊祥	熊小青		
主 审	黄会雄			

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用/洪志刚主编. —长沙:中南大学出版社,
2007.8

ISBN 978-7-81105-544-3

I. 传... II. 洪... III. 传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 115244 号

传感器原理及应用

主编 洪志刚

☐责任编辑 陈应征

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编 410083

发行科电话 0731-8876770

传真 0731-8710482

☐印 装 长沙市宏发印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 17.5 ☐字数 436 千字

☐版 次 2007 年 8 月第 1 版 ☐2007 年 8 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 81105 - 544 - 3

☐定 价 30.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

传感器技术是测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术、微电子学、光学、声学、精密机械、仿生学和材料科学等众多学科相互交叉的综合性和高新技术密集型前沿技术之一,是现代新技术革命和信息社会的重要基础,是自动检测和自动控制技术不可缺少的重要组成部分。目前,传感器技术已成为我国国民经济不可或缺的支柱产业的一部分。传感器在工业部门的应用普及率已被国际社会作为衡量一个国家智能化、数字化、网络化的重要标志。

本书是按照高职高专电子信息类专业的《传感器原理及应用》课程教学大纲的要求,集作者多年来教学科研之经验,参考国内外有关资料编写而成的。按照先叙述每个大类传感器的定义、分类、工作原理,再分别介绍各种具体传感器的结构、原理、型号、技术参数、应用电路设计等思路来编写。

本书对当前使用较多的几类传感器,如应变式、电感式、电容式、压电式、磁电式、光电式传感器的基本原理,静动态特性,信号调节电路及其应用都作了较为详细的分析,对光纤、气敏、湿敏和智能等新型传感器也作了介绍。

本书内容丰富、全面,结构新颖。具有各种传感器实物彩图,更适合高职高专学生学习需要,避免了过多的公式推导和有关传感器设计制造方面的内容。叙述简明,深入浅出。注重学生自我学习能力的提高和动手能力的提高,并有相关英文资料以及相关产品外观和生产厂家的介绍。

本书可作为高等院校电子信息类专业高职高专教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书由中山职业技术学院洪志刚副教授主编,湖南商务职院黄会雄老师主审,写作分工如下:洪志刚编写了第1、8章,太原工业学院杜维玲老师编写了第13章;湖南科技职院成治平副教授编写了第6章,刘奕老师编写了第11章,高见芳老师编写了第12章,湖南铁路职业技术学院熊小清老师编写了第2、10章,运城学院周玲老师编写了第3章,湖南信息技术职业学院吴再华老师编写了第4章,湖南化工职业技术学院周哲民老师编写了第5、7章,衡阳财经职业技术学院高俊祥老师编写了第9章。

限于作者的水平,书中疏漏不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2007年6月于长沙

目 录

第 1 章 传感器概述	(1)
1.1 传感器的定义及分类	(1)
1.2 传感器的作用与地位	(2)
1.3 传感器技术的发展动向	(4)
1.3.1 发现新现象	(4)
1.3.2 开发新材料	(4)
1.3.3 采用微细加工技术	(5)
1.3.4 多功能集成传感器的研究	(5)
1.3.5 智能传感器的研究	(5)
1.3.6 航天传感器的研究	(5)
1.3.7 仿生传感器的研究	(5)
1.4 传感器的特性及标定	(6)
1.4.1 传感器的静态特性	(6)
1.4.2 传感器的动态特性	(8)
1.4.3 传感器的无失真测试条件	(12)
1.4.4 传感器的标定	(14)
习题 1	(14)
第 2 章 电阻应变式传感器	(15)
2.1 电阻应变式传感器概述	(15)
2.2 电阻应变式传感器的工作原理	(15)
2.3 电阻应变片	(16)
2.3.1 材料的应变效应	(16)
2.3.2 电阻应变片的结构	(18)
2.3.3 应变片的种类、材料及参数	(18)
2.3.4 应变片的粘贴技术	(20)
2.3.5 电阻应变片的主要特性	(21)
2.3.6 电阻应变片的信号调节电路	(24)
2.4 电阻应变片式传感器	(29)
2.4.1 应变片式传感器	(29)
2.4.2 压阻式传感器	(31)
2.4.3 电阻应变式传感器的温度误差及其补偿	(40)

2.5 电阻应变片式传感器应用实例	(42)
2.5.1 电阻应变仪	(42)
2.5.2 电子衡器	(43)
2.5.3 平面膜片式压力传感器	(45)
2.5.4 手提式数字电子秤	(45)
习题2	(46)
第3章 电感式传感器	(47)
3.1 概 述	(47)
3.2 变磁阻式传感器	(48)
3.2.1 工作原理	(48)
3.2.2 输出特性	(49)
3.2.3 测量电路	(51)
3.2.4 变磁阻式传感器的应用	(52)
3.3 差动变压器式传感器	(53)
3.3.1 工作原理	(53)
3.3.2 基本特性	(55)
3.3.3 差动变压器式传感器测量电路	(55)
3.3.4 差动变压器式传感器的应用	(58)
3.4 电涡流式传感器	(59)
3.4.1 工作原理	(60)
3.4.2 基本特性	(61)
3.4.3 电涡流形成范围	(62)
3.4.4 电涡流式传感器的应用	(63)
习题3	(65)
第4章 电容式传感器	(66)
4.1 概 述	(66)
4.2 电容式传感器的工作原理和结构	(67)
4.2.1 变极距型电容传感器	(67)
4.2.2 变面积型电容式传感器	(68)
4.2.3 变介质型电容式传感器	(69)
4.3 电容式传感器的灵敏度及非线性	(71)
4.4 电容式传感器的测量电路	(73)
4.4.1 调频测量电路	(73)
4.4.2 运算放大器式电路	(74)
4.4.3 二极管双 T 形交流电路	(74)

4.4.4 脉冲宽度调制电路	(75)
4.5 电容式传感器的应用	(77)
4.5.1 电容式压力传感器	(77)
4.5.2 电容式加速度传感器	(77)
4.5.3 差动式电容测厚传感器	(78)
4.5.4 电容式料位传感器	(78)
习题4	(79)
第5章 压电式传感器	(80)
5.1 概 述	(80)
5.2 工作原理	(80)
5.2.1 压电效应	(80)
5.2.2 压电材料	(81)
5.3 压电式传感器调节电路	(84)
5.3.1 压电式传感器等效电路	(84)
5.3.2 压电式传感器调节电路	(85)
5.4 压电式传感器的应用	(87)
5.4.1 压电式测力传感器	(88)
5.4.2 压电式加速度传感器	(89)
5.4.3 压电式金属加工切削力测量	(90)
5.4.4 压电点火器的发火元件	(91)
5.4.5 压电式玻璃破碎报警器	(91)
习题5	(92)
第6章 磁电式传感器	(93)
6.1 概 述	(93)
6.2 磁电感应式传感器	(93)
6.2.1 工作原理	(93)
6.2.2 磁电感应式传感器基本特性	(95)
6.2.3 磁电感应式传感器的调节电路	(96)
6.2.4 磁电感应式传感器的应用	(97)
6.3 霍尔传感器	(98)
6.3.1 霍尔效应及霍尔元件	(98)
6.3.2 霍尔式传感器的应用	(103)
习题6	(105)

第7章 热电式传感器	(106)
7.1 概 述	(106)
7.2 热电偶	(106)
7.2.1 热电偶的基本原理	(106)
7.2.2 热电偶的类型及结构	(109)
7.2.3 热电偶的应用	(115)
7.3 热电阻	(119)
7.3.1 金属热电阻	(119)
7.3.2 半导体热敏电阻	(122)
7.3.3 集成温度传感器的应用	(126)
习题7	(128)
第8章 光电式传感器	(130)
8.1 概 述	(130)
8.2 光电器件	(132)
8.2.1 光电管	(132)
8.2.2 光电倍增管	(133)
8.2.3 光敏电阻	(136)
8.2.4 光敏二极管和光敏晶体管	(138)
8.2.5 光电池	(140)
8.2.6 光电耦合器件	(142)
8.2.7 电荷耦合器件	(143)
8.2.8 光电传感器的应用	(147)
8.3 光纤传感器	(150)
8.3.1 概述	(150)
8.3.2 光纤的结构和传输原理	(150)
8.3.3 光纤传感器	(153)
8.4 红外传感器	(154)
8.4.1 红外辐射	(154)
8.4.2 红外探测器	(155)
8.4.3 红外传感器的应用	(156)
8.5 色敏光电传感器	(158)
8.5.1 色敏光电传感器的基本原理	(158)
8.5.2 色敏光电传感的基本特征	(159)
习题8	(160)

附录	(161)
第9章 气敏、湿敏传感器.....	(165)
9.1 气敏传感器	(165)
9.1.1 半导体气敏传感器	(165)
9.1.2 红外吸收式气敏传感器	(175)
9.1.3 接触燃烧式气敏传感器	(177)
9.1.4 湿式气敏传感器	(178)
9.1.5 气敏传感器的应用	(179)
9.2 湿敏传感器	(181)
9.2.1 氯化锂湿敏电阻	(182)
9.2.2 半导体陶瓷湿敏电阻	(182)
习题9	(185)
第10章 超声波传感器	(186)
10.1 超声波及其物理性质	(186)
10.1.1 声波、超声波及应用.....	(186)
10.1.2 超声波的声速、波长、指向性和分类	(186)
10.1.3 超声波的传播特性	(188)
10.2 超声波换能器及耦合技术	(189)
10.2.1 超声波换能器	(189)
10.2.2 超声波的发生	(190)
10.2.3 超声波的接收	(191)
10.3 超声波传感器的应用	(192)
10.3.1 超声波探伤	(192)
10.3.2 超声波测液位	(194)
10.3.3 超声波测厚度	(196)
10.3.4 超声波测物位	(197)
10.3.5 超声波测流量	(197)
习题10	(204)
第11章 核辐射传感器	(205)
11.1 概 述	(205)
11.2 核辐射及其性质	(205)
11.2.1 α 射线.....	(205)
11.2.2 β 射线.....	(206)

11.2.3	γ 射线	(206)
11.3	核辐射探测器	(207)
11.3.1	电离室	(207)
11.3.2	正比计数管	(208)
11.3.3	盖革——弥勒计数管	(208)
11.3.4	闪烁计数器	(209)
11.3.5	半导体探测器	(211)
11.4	核辐射传感器的应用	(211)
11.4.1	核辐射厚度计	(211)
11.4.2	辐射式物位计	(212)
11.4.3	X 荧光材料成分分析仪	(213)
习题 11		(213)
第 12 章	数字式传感器	(214)
12.1	概 述	(214)
12.2	码盘式传感器	(214)
12.2.1	接触式编码器	(215)
12.2.2	光电式编码器	(216)
12.2.3	电磁式编码器	(218)
12.3	光栅式传感器	(219)
12.3.1	光栅的结构	(219)
12.3.2	光栅的工作原理	(219)
12.3.3	光栅传感器的测量原理	(220)
12.4	磁栅式传感器	(222)
12.4.1	磁栅的结构	(222)
12.4.2	磁栅传感器的工作原理	(223)
12.4.3	磁栅传感器的测量原理	(223)
12.5	感应同步器	(225)
12.5.1	感应同步器的结构和类型	(225)
12.5.2	感应同步器的工作原理	(226)
12.6	频率式传感器	(227)
12.6.1	频率式传感器的工作原理	(227)
12.6.2	频率式传感器的测量原理	(229)
12.7	数字式传感器的应用	(230)
12.7.1	光电增量编码器在电脑绣花机中的应用	(230)
12.7.2	频率传感器在测温上的应用	(231)
习题 12		(232)

第 13 章 其他传感器	(233)
13.1 微波传感器	(233)
13.1.1 微波传感器及其分类	(233)
13.1.2 微波传感器的组成	(233)
13.1.3 微波传感器的应用	(235)
13.2 超导传感器	(239)
13.2.1 超导光传感器	(239)
13.2.2 超导微波传感器	(240)
13.2.3 超导磁场传感器	(240)
13.3 生物传感器	(241)
13.3.1 生物传感器的基本知识	(241)
13.3.2 酶传感器	(242)
13.3.3 微生物传感器	(244)
13.3.4 免疫传感器	(246)
13.3.5 生物组织传感器	(249)
13.3.6 半导体生物传感器	(249)
13.4 机器人传感器	(251)
13.4.1 机器人传感器及其类型	(251)
13.4.2 触觉传感器	(252)
13.4.3 接近觉传感器	(259)
13.4.4 视觉传感器	(261)
13.4.5 听觉、嗅觉、味觉及其他传感器	(262)
习题 13	(263)

第1章 传感器概述

本章要点

- 传感器定义
- 传感器的分类
- 传感器的作用和在电子系统中的地位
- 传感器的发展动向
- 传感器的静、动态特性
- 传感器的无失真测试条件
- 传感器的标定

1.1 传感器的定义及分类

传感器是能感受规定的被测量并按照一定的规律将其转换成可用输出信号的器件或装置。在有些学科领域，传感器又称为敏感元件、检测器、转换器等。这些不同提法，反映了在不同的技术领域，只是根据器件用途对同一类型的器件使用着不同的技术术语而已。如在电子技术领域，常把能感受信号的电子元件称为敏感元件，如热敏元件、磁敏元件、光敏元件及气敏元件等，在超声波技术中则强调的是能量的转换，如压电式换能器。这些提法在含义上有些狭窄，而传感器一词是使用最为广泛而概括的用语。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量，那么无论是信号转换或信息处理，获得最佳数据的显示与控制都是不可能实现的。

传感器的输出信号通常是电量，它便于传输、转换、处理、显示等。电量有很多形式，如电压、电流、电容、电阻等，输出信号的形式由传感器的原理确定。

通常传感器由敏感元件和转换元件组成，组成框图如图1-1所示。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分，转换元件是指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。由于传感器的输出信号一般都很微弱，因此需要有信号调节与转换电路对其进行放大、运算调制等。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换电路可能安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。此外，信号调节转换电路以及传感器工作必须有辅助的电源，因此信号调节转换电路以及所需的电源都应作为传感器组成的一部分。

传感器技术是一门知识密集型技术，它与许多学科有关。传感器的原理各种各样，其种类十分繁多，分类方法也很多。

(1)根据输入物理量可分为：位移传感器、压力传感器、速度传感器、温度传感器及气敏传感器等。

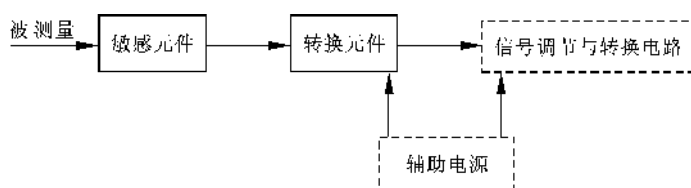


图 1-1 传感器组成框图

(2)根据工作原理可分为：电阻式、电感式、电容式及电势式等。

(3)根据输出信号的性质可分为：模拟式传感器和数字式传感器。即模拟式传感器输出模拟信号，数字式传感器输出数字信号。

(4)根据能量转换原理可分为：有源传感器和无源传感器。

有源传感器将非电量转换为电能量，如电动势、电荷式传感器等；无源传感器不起能量转换作用，只是将被测非电量转换为电参数的量，如电阻式、电感式及电容光焕发式传感器等。传感器分类如表 1-1 所示。

对于初学者和应用传感器的工程技术人员来说，应先从工作原理出发，了解各种传感器，而对工程上的被测对象应着重于如何合理选择和使用传感器。

1.2 传感器的作用与地位

人类社会已进入信息时代，信息技术对社会的发展、科学的进步起着决定性的作用。人们的社会活动主要依靠对信息资源的开发与获取以及传输与处理。信息的采集离不开传感器技术，传感器作为一个能将被测的非电量变换成电量的器件，是连接被测对象和检测系统的接口，科学研究与自动控制过程中所获取的所有信息，都要通过传感器获取，并通过它转换为容易处理的电信号。传感器位于信息采集系统之首，属于感知、获取及检测信息的窗口，并提供给系统赖以进行处理和决策所必须的原始信息。没有传感技术，整个信息技术的发展就成了一句空话。科学技术越发达，自动化程度越高，信息控制技术对传感器的依赖性就越大。

传感器技术是新技术革命和信息社会的重要技术基础，是现代科技的开路先锋，也是当代科学技术发展的一个重要标志，它与通信技术、计算机技术构成信息产业的三大支柱之一。如果说计算机是人类大脑的扩展，那么传感器就是人类五官的延伸。当集成电路、计算机技术飞速发展时，人们才逐步认识信息摄取装置——传感器没有跟上信息技术的发展而惊呼“大脑发达，五官不灵”。从 20 世纪 80 年代起，逐步在世界范围内掀起了一股“传感器热”。美国早在 80 年代就声称世界已进入传感器时代，日本则把传感器技术列为十大技术之首。日本工商界人士声称“支配了传感器技术就能够支配新时代”。世界技术发达国家对开发传感器技术都十分重视。美、日、英、法、德和独联体等国都把传感器技术列为国家重点开发关键技术之一。美国国家长期安全和经济繁荣至关重要的 22 项技术中有 6 项与传感器信息处理技术直接相关。关于保护美国武器系统质量优势至关重要的关键技术，其中 8 项为无源传感器。美国空军 2000 年举出 15 项有助于提高 21 世纪空军能力的关键技术，传感器

表 1 - 1 传感器分类表

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电参数	电阻	移动电位器角点改变电阻	电位器传感器	位移
		改变电阻丝或片的尺寸	电阻丝应变传感器、半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应(电阻的温度系数)	热丝传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、辐射热
			热敏电阻传感器	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏电阻传感器	光强
		利用电阻的湿度效应	湿敏电阻	湿度
	电容	改变电容的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
	电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移
		涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度、含水量
		利用压磁效应	压磁传感器	力、压力
		改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	位移
			旋转变压器	位移
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
		利用拾磁信号	磁栅	
	数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移
电能量	电动势	温差电动势	热电偶	温度热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光强
	电荷	辐射电离	电离室	离子计数、放射性强度
		压电效应	压电传感器	动态力、加速度

技术名列第二。日本对开发和利用传感器技术相当重视并列为国家重点发展六大核心技术之

一。日本科学技术厅制定的 20 世纪 90 年代重点科研项目中有 70 个重点课题,其中有 18 项与传感器技术密切相关。美国早在 20 世纪 80 年代初就成立了国家技术小组(BTG),帮助政府组织和领导各大公司与国家企事业单位的传感器技术开发工作。美国国防部将传感器技术视为 2007 年 20 项关键技术之一,日本把传感器技术与计算机、通信、激光半导体、超导并列为六大核心技术,德国视军用传感器为优先发展技术,英、法等国对传感器的开发投资逐年升级,苏联军事航天计划中的第五条列有传感器技术。

正是由于世界各国普遍重视和投入开发,传感器发展十分迅速,在近十几年来其产量及市场需求年增长率均在 10% 以上。目前世界上从事传感器研制生产的单位已增至 5000 余家。美国、欧洲、俄罗斯各国从事传感器研究和生产厂家有 1000 余家,日本有 800 余家。

基于上述原因,愈来愈多的科技工作者和企业对传感器技术予以了高度重视,促使传感器技术加速发展,以适应信息处理技术的需要。因此,20 世纪 80 年代以来世界各国都将传感器技术作为重点研究领域。

1.3 传感器技术的发展动向

传感器技术所涉及的知识非常广泛,渗透于各个学科领域,但是它们的本质依然是利用物理定律和物质的物理、化学和生物特性将非电量转换成电量。所以,如何采用新技术、新工艺,探索新理论,高质量的转换效能是总的发展途径。

目前,传感器技术的主要发展方向有两点:一是对传感器本身的研究,研究传感器的新现象,开发传感器的新材料和新工艺;二是对传感器系统的研究,研究如何将检测功能与信号处理技术相结合,实现传感器的集成化和智能化。

1.3.1 发现新现象

利用物理现象、化学效应和生物效应是各种传感器工作的基本原理,重新认识各种已发现的物理现象、化学效应和生物效应(如压电效应、热释电现象、磁阻效应等),以探索新现象和发现新效应是传感技术发展的一项重要工作,是研制新型传感器的重要基础。例如日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破。高温超导磁传感器的灵敏度比霍尔器件高,仅次于超导量子干涉器件,而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单,它可用于磁成像技术。又如利用核磁共振吸收的磁传感器能检测 10^{-7} T 的地球磁场强度;利用约瑟夫逊效应的磁传感器(SQUID)能检测 10^{-11} T 的极弱磁场强度;利用约瑟夫逊效应热噪声温度计,能检测 10^{-6} K 的超低温。由此看来,各种新现象及新效应的发现,可极大地增大传感器的检测极限和应用领域。值得一提的是,检测极弱信号传感器技术的发展,不仅能促进传感器技术本身的发展,甚至能导致一些新兴学科的诞生,意义十分重大。

1.3.2 开发新材料

传感器材料是传感器技术发展的重要基础。随着物理学和材料科学的发展,人们可以根据对所需材料功能的要求任意控制它们的成分,从而设计制造出用于各种传感器的功能材料。目前最为成熟、先进的材料技术是以硅加工为主的半导体制造技术,例如半导体氧化物可以制造各种气体传感器,而陶瓷传感器工作温度远高于半导体,光导纤维的应用是传感器

材料的重大突破,用它研制的传感器与传统的相比具有突出的优点。有机材料作为传感器材料的研究引起了国内外学者的极大兴趣。

1.3.3 采用微细加工技术

将硅集成电路加以移植并发展,形成了传感器的微细加工技术。这种技术能将电路尺寸加工到光波长数量级,并能形成低成本超小型传感器的批量生产。半导体技术中的加工方法如氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀以及蒸镀、溅射薄膜工艺等都可引进用于传感器制造,从而制作出各式各样的新型传感器。例如,利用光刻、扩散工艺已制造出压阻式传感器;利用薄膜工艺已制造出快速响应的气敏、湿敏传感器;日本横河公司利用各向异性腐蚀技术进行高精度三维技术加工,在硅片上构成孔、沟、棱锥、半球等各种形状的微型机械元件,并制作出全硅谐振式压力传感器。

1.3.4 多功能集成传感器的研究

硅压阻式复合传感器可以同时测量压力和温度;催化金属栅与 MOSFET 相结合的气体传感器已广泛用于检测氧、氨、乙醇、乙烯和一氧化碳等气体的浓度;日本丰田研究所开发出同时检测 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 等多离子传感器。这种传感器的芯片尺寸为 $2.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$,仅用一滴液体,如一滴血液即可同时快速检测出其中所含各离子的浓度,这对医院临床非常适用和方便。

1.3.5 智能传感器的研究

智能传感器是一种带微处理器的传感器,它不仅具有信号检测与转换的功能,同时还具有记忆、存储、信息处理、自诊断、自校准和自适应等功能。典型产品如美国霍尼尔公司的 ST-3000 型智能传感器,其芯片尺寸为 $3\text{mm} \times 4\text{mm} \times 2\text{mm}$,采用半导体工艺在同一芯片上制作 CPU 与 EPROM 和静压、压差、温度等三种敏感元件。

1.3.6 航天传感器的研究

随着航天技术的发展,航天器需要越来越多的传感器对各种信息参数进行检测,从而保证航天器按预定的设计程序正常工作。例如,航天飞机上安装有 3500 只左右的传感器,对其指标性能都有严格的要求,如小型化、低功耗、高精度、高可靠性等都有具体的技术指标,为了满足这些要求,必须采用新理论、新技术研制出新型的航天传感器。

1.3.7 仿生传感器的研究

仿生传感器就是模仿人的感觉器官的传感器,即视觉、听觉、嗅觉、味觉及触觉等传感器。在机器人技术向智能化高级机器人发展的今天,对仿生传感器的研究应该给予高度的重视。目前,只有视觉与触觉传感器解决得比较好,其他几种还远不能满足机器人发展的需要。因此,研究人体感觉传感器,开发模仿人体嗅觉、味觉和触觉等感觉的仿生传感器,使其功能尽量逼近人体自身的功能,是今后传感器发展的重要课题。

1.4 传感器的特性及标定

在生产过程和科学实验中,要对各种各样的参数进行检测和控制,要求传感器能感受被测非电量的变化并将其不失真地变换成相应的电量,这取决于传感器的基本特性,即输出 - 输入特性。如果把传感器看作二端口网络,即有两个输入端和两个输出端,那么传感器的输出 - 输入特性是与其内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来描述。

1.4.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出 - 输入关系。只考虑传感器的静态特性时,输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。

衡量静态特性的重要指标有线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看,希望具有线性关系,即具有理想的输出—输入关系。但实际遇到的传感器大多为非线性,如果不考虑迟滞和蠕变等因素,传感器的输出与输入关系可用一个多项式表示:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (1-1)$$

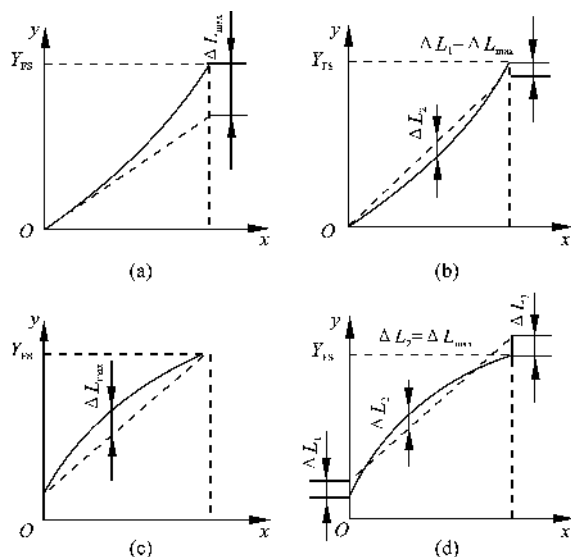


图 1-2 几种直线拟合方法

(a)理论拟合; (b)过零旋转拟合; (c)端点连线拟合; (d)端点平移拟合

式中 x ——输入量;

y ——输出量;

a_0 ——输入量为零时的输出量;

$a_1, a_2, \dots, a_n$ ——非线性项系数。

各项系数不同,决定了特性曲线的具体形式各不相同。

静特性曲线可通过实际测试获得。在实际使用中,为了标定和数据处理方便,希望得到线性关系,因此引入各种非线性补偿环节。如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理,从而使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。但如果传感器非线性的方次不高,输入量变化范围较小时,可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段,如图1-2所示,使传感器输出-输入特性线性化,所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差(或线性度),通常用相对误差 r_L 表示,即:

$$r_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 $\Delta L_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

Y_{FS} ——满量程输出。

从图1-2中可见,即使是同类传感器,拟合直线不同,其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多,一般是在标称输出范围中和标定曲线的各点偏差平方之和最小(即最小二乘法原理)求取的拟合直线的拟合精度最高。

2. 灵敏度

灵敏度 S 是指传感器的输出量增量 Δy 与引起输出量增量 Δy 的输入量增量 Δx 的比值,即:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-3)$$

传感器的灵敏度如图1-3所示。对于线性传感器,它的灵敏度就是它的静态特性的斜率,即 $S = \Delta y / \Delta x$ 为常数;而非线性传感器的灵敏度为一变量,用 $S = dy/dx$ 表示。

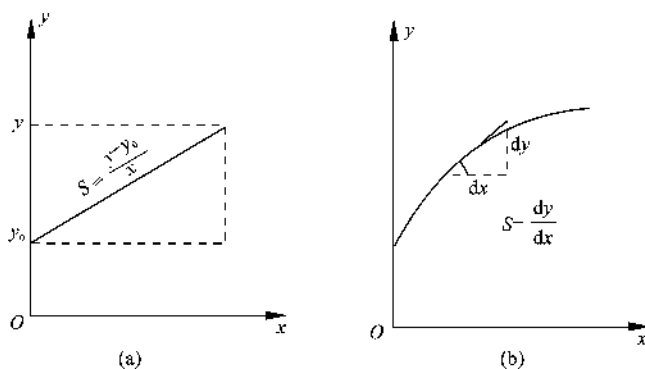


图1-3 传感器的灵敏度

3. 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程期间其输出-输入特性曲线不重合的现象称为迟滞,如图1-4所示。也就是说,对于同一大小的输入信号,传感器的正反行程输出信号大小可能不相等。产生这种现象的主要原因是由于传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的。例如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间

隙、紧固件松动等。迟滞大小通常由实验确定。

迟滞误差 r_H 可由式(1-4)计算：

$$r_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——正反行程输出值间的最大差值。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度,如图1-5所示。

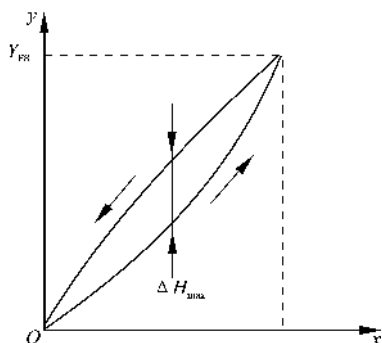


图1-4 迟滞特性

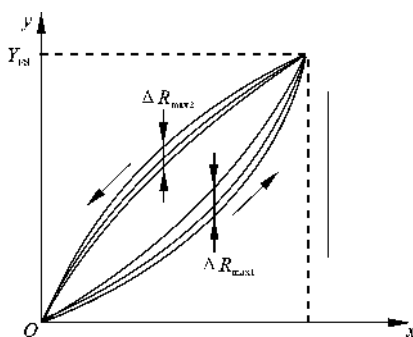


图1-5 重复性

不重复性指标一般采用输出最大不重复误差 $\Delta R_{\max}$ 与满量程输出 Y_{FS} 的百分比表示：

$$r_R = \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

重复性误差属于随机误差,常用标准偏差表示,也可用正反行程中的最大偏差表示,即：

$$r_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 σ ——标准偏差。

误差服从正态分布,其标准偏差 σ 可以根据贝赛尔公式计算,即：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1-7)$$

式中 y_i ——测量值；

$\bar{y}$ ——测量值的算术平均值；

n ——测量次数。

1.4.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指其输出与随时间变化的输入量之间的响应特性。当被测量随时间变化(即是时间的函数)时,则传感器的输出量也是时间的函数,其间的关系要用动态特性来表示。一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,

这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。为了说明传感器的动态特性,下面简要介绍动态测量水温的实验过程。在被测温度随时间变化或传感器突然插入被测介质中以及传感器以扫描方式测量某温度场的温度分布等情况下,都存在动态测温问题。如把一支热电偶从温度为 t_0 环境中迅速插入一个温度为 t_1 的恒温水槽中(忽略插入时间),这时热电偶测量的介质温度从 t_0 突然上升到 t_1 ,而热电偶反映出来的温度从 t_0 变化到 t_1 需要经历一段时间,即有一段过渡过程,如图 1-6 所示。热电偶反映出来的温度与介质温度的差值就称为动态误差。

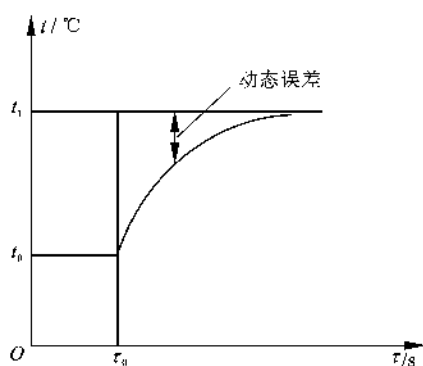


图 1-6 热电偶动态测温过程曲线

造成热电偶输出波形失真和产生动态误差的原因,是因为温度传感器有热惯性(由传感器的比热容和质量大小决定)和传热热阻,使得在动态测温时传感器的输出总是滞后于被测介质的温度变化。如带有套管的热电偶的热惯性要比裸热电偶大得多,这种热惯性是热电偶固有的,这种热惯性决定了热电偶测量快速温度变化时会产生动态误差。影响动态特性的“固有因素”任何传感器都有,只不过它们的表现形式和作用程度不同而已。

动态特性除了与传感器的固有因素有关之外,还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说,我们在研究传感器动态特性时,通常是根据不同输入变化规律来考察传感器的响应的。

虽然传感器的种类和形式很多,但它们一般可以简化为一阶或二阶系统(高阶可以分解成若干个低阶环节),因此一阶和二阶传感器是最基本的。传感器的输入量随时间变化的规律是各种各样的,下面在对传感器动态特性进行分析时,采用最典型、最简单的正弦信号和阶跃信号作为标准输入信号。对于正弦输入信号,传感器的响应称为频率响应或稳态响应;对于阶跃输入信号,则称为传感器的阶跃响应或瞬态响应。

1. 瞬态响应特性

传感器的瞬态响应是时间响应。在研究传感器的动态特性时,有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析。这种分析方法是时域分析法,传感器对所加激励信号响应称瞬态响应。常用激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。下面以传感器的单位阶跃响应来评价传感器的动态性能指标:

(1) 一阶传感器的单位阶跃响应

在工程上,一般将下式:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (1-7)$$

视为一阶传感器单位阶跃响应的通式。式中 $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为传感器的输入量和输出量,均是时间的函数, τ 为表征传感器的时间常数,具有时间“秒”的量纲。

一阶传感器的传递函数:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (1-8)$$

对初始状态为零的传感器,当输入一个单位阶跃信号:

$$X(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-9)$$

时,由于 $x(t) = 1(t)$, $x(s) = \frac{1}{s}$, 则传感器输出的拉氏变换为:

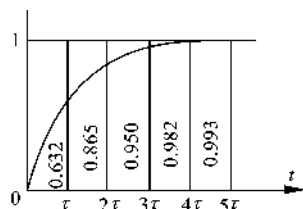
$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \frac{1}{s} \quad (1-10)$$

那么,一阶传感器的单位阶跃响应信号为:

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-11)$$

相应的响应曲线如图 1-7 所示。

由图 1-7 可见,传感器存在惯性,它的输出不能立即复现输入信号,而是从零开始,按指数规律上升,最终达到稳态值。理论上传感器的响应只在 t 趋于无穷大时才达到稳态值,但实际上当 $t = 4\tau$ 时其输出达到稳态值的 98.2%, 可以认为已达到稳态。



τ 越小,响应曲线越接近于输入阶跃曲线,因此 τ 值 图 1-7 一阶传感器单位阶跃响应
是一阶传感器重要的性能参数。

(2) 二阶传感器的单位阶跃响应

二阶传感器的单位阶跃响应的通式为:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 X(t) \quad (1-12)$$

式中 ω_n ——传感器的固有频率;

ξ ——传感器的阻尼比。

二阶传感器的传递函数:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1-13)$$

则传感器输出的拉氏变换:

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1-14)$$

二阶传感器对阶跃信号的响应在很大程度上取决于阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 。固有频率 ω_n 由传感器主要结构参数所决定, ω_n 越高,传感器的响应越快。当 ω_n 为常数时,传感器的响应取决于阻尼比 ξ , 图 1-8 为二阶传感器的单位阶跃响应曲线。

阻尼比 ξ 直接影响系统响应的超调量和振荡次数。 $\xi = 0$ 为临界阻尼,超调量为 100%, 产生等幅振荡,达不到稳态。 $\xi > 1$ 为过阻尼,无超调也无振荡,但达到稳态所需时间较长。 $\xi < 1$ 为欠阻尼,衰减振荡,达到稳态值所需时间随 ξ 的减小而加长。 $\xi = 1$ 时响应时间最短。但实际使用中常按稍欠阻尼调整, ξ 取 0.7 ~ 0.8 为较好。

(3) 瞬态响应特性指标

① 时间常数 τ : 一阶传感器时间常数 τ 越小,响应速度越快。

② 延时时间: 从输入加上到传感器输出达到稳态值的 50% 所需时间。

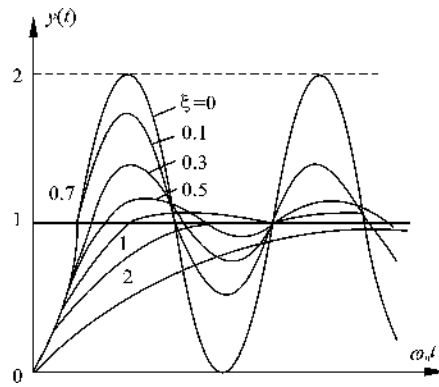


图 1-8 二阶传感器单位阶跃响应

③ 上升时间：从输入加上到传感器输出达到稳态值的 90% 所需时间。

④ 超调量：传感器输出超过稳态值的最大值。

2. 频率响应特性

传感器对正弦输入信号的响应特性，称为频率响应特性。

频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性。

(1) 一阶传感器的频率响应

将一阶传感器的传递函数中的 s 用 $j\omega$ 代替后，即可得频率特性表达式，即：

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1-15)$$

幅频特性：

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T(\omega) + 1}} \quad (1-16)$$

相频特性：

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1-17)$$

图 1-9 为一阶传感器的频率响应特性曲线。

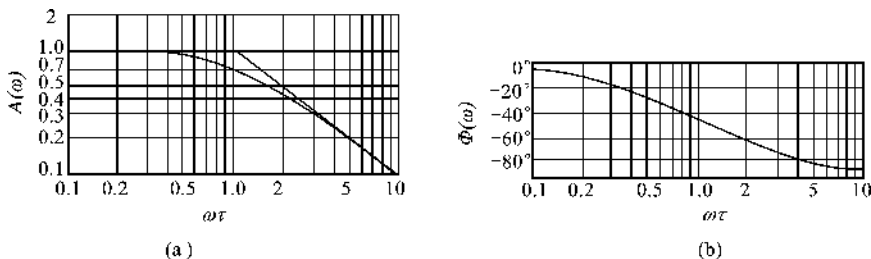


图 1-9 一阶传感器频率响应特性

从式(1-15)、(1-16)和图 1-9 看出：时间常数 τ 越小，频率响应特性越好。当 $\omega\tau \leq 1$ 时， $A(\omega) \approx 1$ ， $\Phi(\omega) \approx 0$ ，表明传感器输出与输入为线性关系，且相位差也很小，输出 $y(t)$ 比较真实地反映输入 $x(t)$ 的变化规律。因此，减小 τ 可改善传感器的频率特性。

(2) 二阶传感器的频率响应

二阶传感器的频率特性表达式、幅频特性、相频特性分别为：

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 2j\xi \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1-18)$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 2\xi^2 \frac{\omega}{\omega_n}}} \quad (1-19)$$

$$\Phi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2} \quad (1-20)$$

图 1-10 为二阶传感器的频率响应特性曲线。从式(1-17)、(1-18)和图 1-10 可见，传感器的频率响应特性的好坏主要取决于传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 。

当 $\xi < 1$, $\omega_n \gg \omega$ 时, $A(\omega) \approx 1$, $\Phi(\omega)$ 很小, 此时, 传感器的输出 $y(t)$ 再现了输入 $x(t)$ 的波形。通常固有频率 ω_n 至少应大于被测信号频率 ω 的 3~5 倍, 即 $\omega_n \geq (3 \sim 5)\omega$ 。

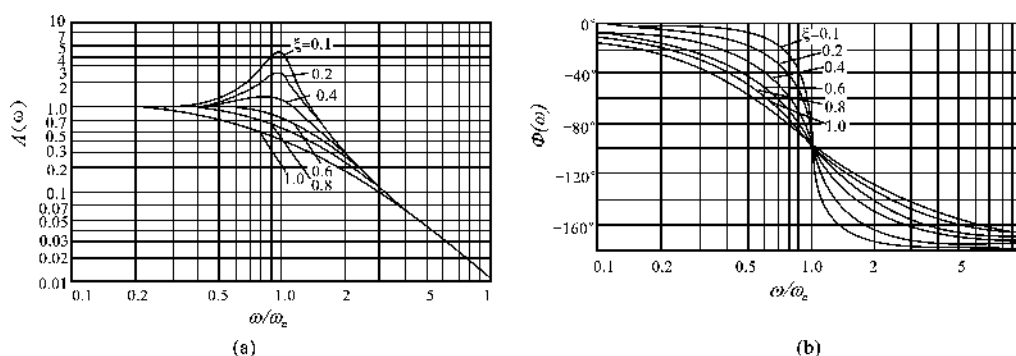


图 1-10 二阶传感器频率响应特性

为了减小动态误差和扩大频率响应范围, 一般是提高传感器固有频率 ω_n 。而固有频率 ω_n 与传感器运动部件质量 m 和弹性敏感元件的刚度 k 有关, 即 $\omega_n = 1/2(k/m)$ 。增大刚度 k 和减小质量 m 可提高固有频率, 但刚度 k 增加, 会使传感器灵敏度降低。所以在实际中应综合各种因素来确定传感器的各个特征参数。

(3) 频率响应特性指标

① 当传感器的增益保持在一定值内的频率范围为传感器频带或通频带, 应有上、下截止频率。

② 时间常数 τ : 用时间常数 τ 来表征一阶传感器的动态特性。 τ 越小, 频带越宽。

③ 固有频率 ω_n : 二阶传感器的固有频率 ω_n 表征了其动态特性。

1.4.3 传感器的无失真测试条件

对于任何一个传感器(或测试装置), 总是希望它们具有良好的响应特性, 精度高、灵敏度高, 输出波形无失真的复现输入波形等。实现上述要求, 需要满足一定的条件, 称此条件

为传感器的无失真测试条件。

设传感器输出 $y(t)$ 和输入 $x(t)$ 满足下列关系：

$$y(t) = A_0 x(t - \tau_0) \quad (1-21)$$

式中 A_0 和 τ_0 都是常数。

此式说明传感器的输出波形与输入波形精确的相似，只不过对应瞬时放大了 A_0 倍和滞后了 τ_0 ，输出的频谱(幅值谱和相位谱)和输入的频谱完全相似。可见，满足式(1-21)能使输出的波形无失真地复现输入波形。

对式(1-21)取傅立叶变换得：

$$y(j\omega) = A_0 \cdot e^{-j\omega\tau_0} \cdot x(j\omega) \quad (1-22)$$

可见，若输出波形要无失真的复现输入波形，则传感器的频率响应 $H(j\omega)$ 应当满足：

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = A_0 e^{-j\omega\tau_0} \quad (1-23)$$

幅频特性：

$$A(\omega) = A_0 = \text{常数} \quad (1-24)$$

相频特性：

$$\varphi(\omega) = -\tau_0 \omega \quad (1-25)$$

这就是说，从精确地测定各频率分量的幅值和相对相位来说，理想的传感器的幅频特性应该是常数(即水平直线)，相频特性应该是线性关系，否则就会产生失真。 $A(\omega)$ 不等于常数所引起的失真称为幅值失真， $\varphi(\omega)$ 与 ω 不呈成线性关系所引起的失真称为相位失真。

应该指出，满足式(1-24)、(1-25)所示的条件，传感器的输出仍滞后于输入一定的时间 τ_0 。如果测试的目的是精确地测出输入波形，那么上述条件完全可以保证满足要求。但在其他情况下，如测试结果要用作反馈控制信号，则上述条件是不充分的。因为输出对输入时间的滞后可能破坏系统的稳定性，这时只有 $\varphi(\omega) = 0$ 才是理想的。

从实现测试波形不失真条件和其他工作性能综合来看：

对于一阶传感器，时间常数 τ 越小，则响应越快。对斜波函数的响应，其时间滞后稳定误差将越小。对正弦输入的响应幅值增大。因此，一阶传感器的时间常数 τ 原则上愈小愈好。

对于二阶传感器，其特性曲线中有两段值得注意：

一般而言，在 $\omega < 0.3\omega_n$ 范围内， $\varphi(\omega)$ 的数值较小，而且 $\varphi(\omega) \sim \omega$ 特性接近于直线。 $A(\omega)$ 在该范围内的变化不超过 10%，因此这个范围是理想的工作范围。在 $\omega > (2.5 \sim 3)\omega_n$ 的范围内， $\varphi(\omega)$ 接近 180° ，且差值很小，如在实测或数据处理中用减去固定相位差值或把测试信号反相 180° 的方法，则也接近于可不失真地恢复被测信号波形。若输入信号频率范围在上述两者之间，则因为传感器的频率特性受阻尼比 ξ 的影响较大而需作具体分析。

分析表明， ξ 愈小，传感器对斜波输入响应的稳态误差 $2\xi/\omega_n$ 愈小。但是对阶跃输入的响应，随着 ξ 的减小，瞬态振荡的次数增多，超调量增大，过渡过程增长。在 $\xi = 0.6 \sim 0.7$ 时，幅值比在比较宽的范围内保持不变。计算表明，当 $\xi = 0.7$ 时，在 $\omega = (0 \sim 0.58)\omega_n$ 的频率范围中，幅值特性 $A(\omega)$ 的变化不会超过 5%，同时在一程度下可认为在 $\omega < \omega_n$ 的范围内，传感器的 $\varphi(\omega)$ 也接近于直线，因而产生的相位失真很小。

1.4.4 传感器的标定

传感器的标定分为静态标定和动态标定两种。静态标定的目的是确定传感器静态特性指标,如线性度、灵敏度、滞后和重复性等。动态指标标定的目的是确定传感器的动态特性参数,如频率响应、时间常数、固有频率和阻尼比等。有时根据需要也要对横向灵敏度、温度响应、环境影响等进行标定。

1. 传感器的静态特性标定

对传感器进行静态特性标定,首先要创造一个静态标准条件;其次是选择与被标定传感器的精度要求相适应的一定等级的标定用的仪器设备,然后才能开始对传感器进行静态特性标定。

传感器的静态特性标定所需的静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是物理量)及环境温度一般为室温(20 ± 5)、相对湿度不大于85%,大气压力为(101 ± 8)kPa的情况。

传感器的静态特性标定所需仪器设备的精度至少要比被标定的传感器的精度高一个等级。这样通过标定确定的传感器的静态性能指标才是可靠的,所确定的精度才是可信的。

2. 传感器的动态特性标定

传感器的动态标定主要是研究传感器的动态响应。对于一阶传感器,与动态响应有关的参数主要是时间常数 τ ;对于二阶传感器,影响动态响应的主要是固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 两个参数。

传感器的动态特性标定的一种较好的方法是通过测量传感器的阶跃响应来确定传感器的时间常数、固有频率和阻尼比。当然还可以利用正弦信号输入,测定输出和输入的幅值比和相位差,从而确定传感器装置的幅频特性和相频特性,然后根据其频率特性分别求出一阶传感器装置的时间常数 τ 和二阶传感器装置的固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 。

习题 1

- 1-1 什么叫传感器?它由哪几部分组成?说出各部分的作用及其相互间的关系。
- 1-2 简述传感器的作用和地位及传感器技术的发展方向。
- 1-3 传感器的静态特性指什么?衡量它的性能指标主要有哪些?
- 1-4 传感器的动态特性指什么?常用的分析方法有哪几种?
- 1-5 解释传感器的无失真测试条件。
- 1-6 传感器的标定有哪几种?为什么要对传感器进行标定?

第2章 电阻应变式传感器

本章要点

- 电阻应变式传感器的概念和工作原理
- 电阻应变效应、压阻效应
- 电阻应变片的种类、特性及温度效应的补偿
- 电阻应变式力传感器
- 电阻应变式压力传感器
- 电阻应变式加速度传感器

2.1 电阻应变式传感器概述

电阻应变式传感器是利用金属的电阻应变效应制造的一种测量微小变化量(机械)的传感器。将电阻应变片粘接到各种弹性敏感元件上,可构成测量力、压力、力矩、位移、加速度等各种参数的电阻应变式传感器。它是目前用于测量力、力矩、压力、加速度、重量等参数最广泛的传感器之一。

虽然新型传感器不断出现,为测量技术开拓了新的领域。但是,由于电阻应变测试技术具有以下独特优点,可以预见在今后它仍将是一种主要的测试手段。

- (1)这类传感器结构简单,使用方便,性能稳定、可靠;
- (2)易于实现测试过程自动化和多点同步测量、远距测量和遥测;
- (3)灵敏度高,测量速度快,适合静态、动态测量;
- (4)可以测量各种物理量。

因此在航空航天、机械、化工、建筑、医学、汽车工业等领域有很广的应用。

2.2 电阻应变式传感器的工作原理

电阻应变式传感器由弹性敏感元件与电阻应变片构成。弹性敏感元件在感受被测量时将产生变形,其表面产生应变。而粘结在弹性敏感元件表面上的电阻应变片将随着弹性敏感元件产生应变,因此,电阻应变片的电阻值也产生相应的变化。这样,通过测量电阻应变片的电阻值变化,就可以确定被测量的大小了。

弹性敏感元件的作用就是传感器组成中的敏感元件,要根据被测参数来设计或选择它的结构形式。电阻应变片的作用就是传感器中的转换元件,是电阻应变式传感器的核心元件。

电阻应变式传感器的基本原理是将被测量的变化转换成传感器元件电阻值的变化,再经过转换电路变成电信号输出。其类型很多,常用来测量力、压力、位移、应变、扭矩、加速度

等,是目前使用最广泛的传感器之一。

2.3 电阻应变片

2.3.1 材料的应变效应

导电材料的电阻与材料的电阻率、几何尺寸(长度与截面积)有关,在外力作用下发生机械变形,引起该导电材料的电阻值发生变化,这种现象称为电阻应变效应。

设有一段长为 l , 截面积为 A , 电阻率为 ρ 的导体(如金属丝), 它在未受外力时的原始电阻为:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{\pi r^2} \quad (2-1)$$

式中 ρ ——电阻丝的电阻率, 单位为 $\Omega \cdot m$;

l ——电阻丝的长度, 单位为 m ;

A ——电阻丝截面积, 单位为 m^2 。

当金属丝在轴向外力 F 作用下而被拉伸(或压缩)时, 其 l 、 A 和 ρ 均发生变化, 如图2-1所示, 因而导体的电阻随之发生变化。通过对式(2-1)两边取对数后再作微分, 即可求得其电阻相对变化:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-2)$$

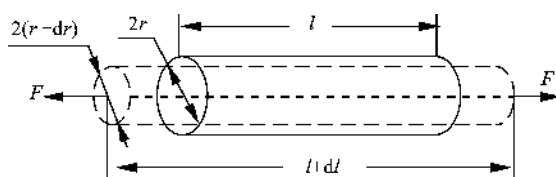


图 2-1 导体受拉伸后的参数变化

若电阻丝是圆的, 则 $A = \pi \cdot r^2$, r 为电阻丝的半径, 对 r 微分得 $dA = 2\pi \cdot r dr$, 则

$$\frac{dA}{A} = \frac{2\pi r \cdot dr}{\pi \cdot r^2} = 2 \frac{dr}{r} \quad (2-3)$$

令 $\frac{dl}{l} = \varepsilon_x$ 为材料的轴向应变, $\frac{dr}{r} = \varepsilon_y$ 为金属丝径向应变。轴向应变和径向应变的关系可表示为:

$$\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x \quad (2-4)$$

式中 μ ——金属材料的泊松系数。

而 $\frac{dA}{A} = \frac{2\pi r \cdot dr}{\pi \cdot r^2} = 2 \frac{dr}{r}$, 代入式(2-2)可得:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-5)$$

对于金属导体或半导体, 上式中右边末项电阻率相对变化的受力效应是不一样的, 分别

讨论如下：

1. 金属材料的应变电阻效应

勃底特兹明通过实验研究发现，金属材料的电阻率相对变化与其体积相对变化之间有如下关系：

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (2-6)$$

式中 C ——由一定的材料和加工方式决定的常数；

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{dA}{A} = (1 - 2\mu)\varepsilon_x \quad (2-7)$$

代入式(2-5)，并考虑到实际上 $\Delta R/R$ ，故可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]\varepsilon_x = K_m \varepsilon_x \quad (2-8)$$

式中 $K_m = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)$ ——金属丝材的应变灵敏系数(简称灵敏系数)。

上式表明：金属材料的电阻相对变化与其线应变成正比。这就是金属材料的应变电阻效应。

对于金属材料， $K_0 = K_m = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)$ 。可见它由两部分组成：前部分为受力后金属丝几何尺寸变化所致，一般金属 $\mu \approx 0.3$ ，因此 $(1 + 2\mu) \approx 1.6$ ；后部分为电阻率随应变而变的部分。以康铜为例， $C \approx 1$ ， $C(1 - 2\mu) \approx 0.4$ ，所以此时 $K_0 = K_m \approx 2.0$ 。显然，金属丝材的应变电阻效应以结构尺寸变化为主。对其他金属或合金， $K_m = 1.8 \sim 4.8$ 。

2. 半导体材料的应变电阻效应

史密兹等学者很早发现，锗、硅等单晶半导体材料受到应力作用时，其电阻率会发生变化，这种现象就称为压阻效应。半导体材料的压阻效应：

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi \sigma = \pi \cdot E \varepsilon_x \quad (2-9)$$

式中 σ ——作用于材料的轴向应力；

π ——半导体材料在受力方向的压阻系数；

E ——半导体材料的弹性模量。

同样，将式(2-9)代入式(2-5)，并写成增量形式可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\mu) + E\pi]\varepsilon_x = K_s \varepsilon_x \quad (2-10)$$

式中 $K_s = 1 + 2\mu + \pi E$ ——半导体材料的应变灵敏系数。

实际情况并非如此简单。当硅膜片承受外应力时，必须同时考虑其纵向(扩散电阻长度方向)压阻效应和横向(扩散电阻宽度方向)压阻效应。由于扩散型力敏传感器的扩散电阻厚度(即扩散深度)只有几微米，其垂直于膜片方向的应力远比其他两个分量小而可忽略。

综合式(2-8)和式(2-10)可得半导体丝材的应变电阻效应为：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \varepsilon_x \quad (2-11)$$

式中 K_0 ——半导体丝材的灵敏系数。

对于半导体材料 $K_0 = K_s = (1 + 2\mu) + \pi E$ 。它也由两部分组成：前部分同样为尺寸变化所致；后部分为半导体材料的压阻效应所致，而且 $\pi E \gg (1 + 2\mu)$ ，因此半导体丝材的 $K_0 = K_s \approx$

πE 。可见, 半导体材料的应变电阻效应主要基于压阻效应。通常 $K_s = (50 \sim 80) K_m$ 。

2.3.2 电阻应变片的结构

电阻应变片的结构形式很多, 但其主要组成部分基本相同。图 2-2 给出了丝式、箔式和半导体 3 种典型应变片的结构形式及其组成。

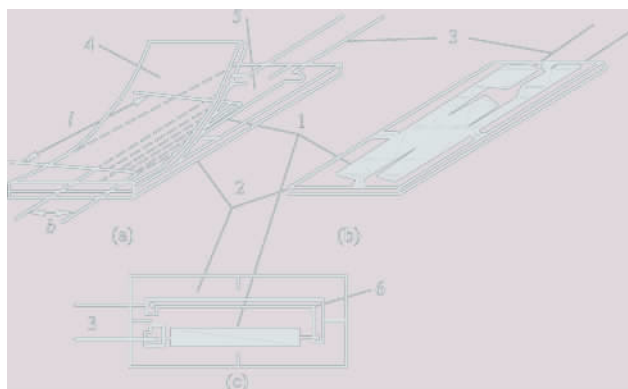


图 2-2 典型应变片的结构及组成

(a) 丝式 (b) 箔式 (c) 半导体式

1—敏感栅 2—基底 3—引线 4—盖层 5—粘结剂 6—电极

电阻丝应变片是用直径为 0.025mm 具有高电阻率的电阻丝制成的。为了获得高的阻值, 将电阻丝排列成栅网状, 称为敏感栅, 并粘贴在绝缘的基片上, 电阻丝的两端焊接引线。敏感栅上面粘贴有保护用的覆盖层, 如图 2-2 所示。

(1) 敏感栅: 应变计中实现应变 - 电阻转换的敏感元件。它通常由直径为 0.015 ~ 0.05mm 的金属丝绕成栅状, 或用金属箔腐蚀成栅状。图中 l 表示栅长, b 表示栅宽。其电阻值一般在 100Ω 以上。

(2) 基底: 为保持敏感栅固定的形状、尺寸和位置, 通常用粘结剂将其固结在纸质或胶质的基底上。应变片工作时, 基底起着把试件应变准确地传递给敏感栅的作用。为此, 基底必须很薄, 一般为 0.02 ~ 0.04mm。有用专门的薄纸制成的基片称为纸基, 有用粘结剂和有机树脂薄膜制成的胶基。

(3) 引线: 它起着敏感栅与测量电路之间的过渡连接和引导作用。通常取直径为 0.1 ~ 0.15mm 的低阻镀锡铜线, 并用钎焊与敏感栅端连接。

(4) 盖层: 用纸、胶做成覆盖在敏感栅上的保护层, 起着防潮、防蚀、防损等作用。

(5) 粘结剂: 在制造应变片时, 用它分别把盖层和敏感栅固结于基底。在使用应变计时, 用它把应变片基底再粘贴在试件表面的被测部位。因此它也起着传递应变的作用。

2.3.3 应变片的种类、材料及参数

1. 金属丝式应变片

金属丝式应变片有回线式和短接式两种, 如图 2-3 所示。

回线式应变片是将电阻丝绕制成敏感栅粘结在各种绝缘基底上而制成的, 它是一种常用

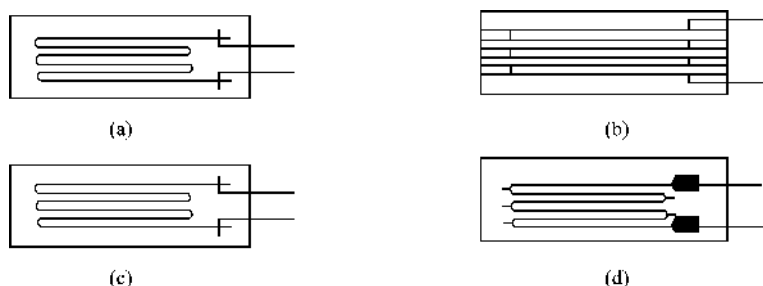


图 2-3 丝式应变片结构

的应变片。其敏感栅材料直径在 $0.012 \sim 0.05\text{mm}$ 之间,以 0.025mm 左右为最常用。其基底很薄(一般在 0.03mm 左右),粘贴性能好,能保证有效地传递变型。引线多用 $0.15 \sim 0.30\text{mm}$ 直径的镀锡铜线与敏感栅相连接,制作简单,性能稳定,成本低,易粘贴,但其应变横向效应较大。常见的回线式应变片构造如图 2-3(a)、(c)所示。

短接式应变片两端用直径比栅线直径大 $5 \sim 10$ 倍的镀银丝短接起来而构成。优点是克服了横向效应,但制造工艺复杂。常用材料:康铜、镍铬铝合金、铁铬铝合金以及铂、铂钨合金等。短接式应变片构造如图 2-3(b)、(d)所示。

2. 金属箔式应变片

金属箔式应变片是利用照相制版或光刻技术将厚 $0.003 \sim 0.01\text{mm}$ 的金属箔片制成所需图形的敏感栅,也称为应变花,如图 2-4 所示。

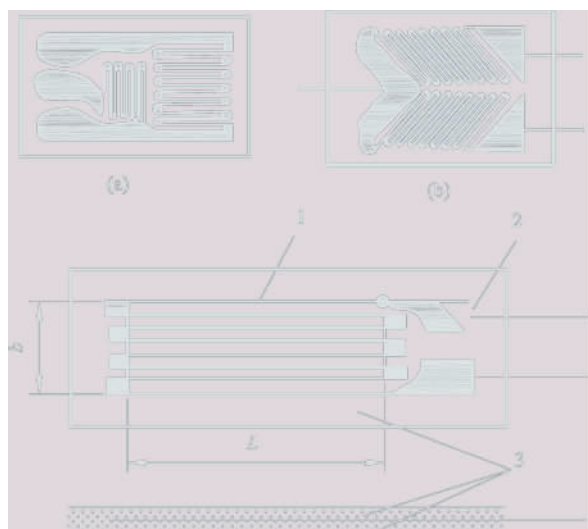


图 2-4 金属箔式应变片

1—敏感栅 2—引线 3—基底

它具有很多优点:

- ①可制成多种复杂形状尺寸准确的敏感栅,其栅长 L 可做到 0.2mm ,以适应不同要求;
- ②与被测件粘结面积大;

③散热条件好，允许电流大，提高了输出灵敏度；

④横向效应小，可以忽略。

⑤蠕变和机械滞后小，疲劳寿命长。

缺点：电阻值的分散性比金属丝的大，有的相差几十欧姆，需做阻值调整。在常温下，金属箔式应变片已逐步取代了金属丝式应变片。

3. 金属薄膜应变片

薄膜应变片是薄膜技术发展的产物。它是采用真空蒸发或真空沉积等方法，在薄的绝缘基片上形成厚度在 $0.1\mu\text{m}$ 以下的金属电阻材料薄膜的敏感栅，最后加上保护层。

优点：应变灵敏系数大，允许电流密度大，工作范围广，可达 $-197\sim 317$

缺点：难于控制电阻与温度和时间变化关系。

4. 半导体应变片

半导体应变片的工作原理是基于半导体材料的电阻率随作用应力而变化的所谓“压阻效应”。所有材料在某种程度上都呈现压阻效应，但半导体的这种效应特别显著，能直接反映出很微小的应变。

常见的半导体应变片是用锗和硅半导体材料作为敏感栅，一般为单根状，如图 2 - 5 所示。根据压阻效应，半导体和金属丝一样可以把应变转换成电阻的变化。

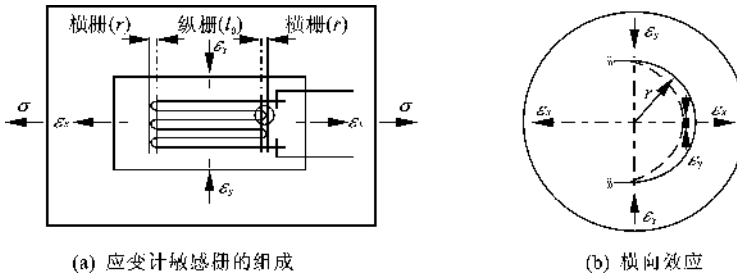


图 2 - 5 半导体应变片

半导体应变片的优点是尺寸、横向效应、机械滞后都很小，灵敏系数极大，因而输出也大，可以不需放大器直接与记录仪器连接，使得测量系统简化。它的缺点是电阻值和灵敏系数随温度稳定性差，测量较大应变时非线性严重；灵敏系数随受拉或压而变，且分散度大，一般在 $3\% \sim 5\%$ 之间，因而使得测量结果有 $\pm 3\% \sim 5\%$ 的误差。

2.3.4 应变片的粘贴技术

应变片是用粘结剂粘贴到被测件上的，粘结剂形成的胶层必须迅速地将被测件的应变传递到敏感栅上。粘结剂的性能及粘贴工艺的质量直接影响着应变片的工作特性，如零漂、蠕变、滞后、灵敏系数等。可见选择粘结剂和正确的粘结工艺与应变片的测量精度有着极其重要的关系。

1. 粘结剂的选择

粘结剂的主要功能是要在切向准确传递试件的应变。因此，它应具备：与试件表面有很高的粘结强度，一般抗剪强度应大于 $9.8 \times 10^6 \text{Pa}$ ；弹性模量大，蠕变、滞后小，温度和力学性

能参数要尽量与试件匹配；抗腐蚀，涂刷性好，固化工艺简单，变形小，使用简便，可长期贮存；电绝缘性能、耐老化与耐温耐湿性能均良好。一般情况下，粘贴与制作应变计的粘结剂是可以通用的。但是，粘贴应变计时受到现场加温、加压条件的限制。通常在室温工作的应变计多采用常温、指压固化条件的粘结剂；非金属基应变片若用在高温工作时，可将其先粘贴在金属基底上，然后再焊接在试件上。

2. 应变片的粘贴

准备：试件——在粘贴部位的表面，用砂布在与轴向成 45° 的方向交叉打磨至 R_a 为 $6.3\ \mu\text{m}$ →清洗净打磨面→划线，确定贴片坐标线→均匀涂一薄层粘结剂作底；应变计——外表和阻值检查→刻划轴向标记→清洗。

涂胶：在准备好的试件表面和应变片基底上均匀涂一薄层粘结剂。

贴片：将涂好胶的应变片与试件，按坐标线对准贴上→用手指顺轴向滚压，去除气泡和多余胶液→按固化条件固化处理。

复查：贴片偏差应在许可范围内，阻值变化应在测量仪器预调平范围内，引线和试件间的绝缘电阻应大于 $200\text{M}\Omega$ 。

接线：根据工作条件选择好导线，然后通过中介接线片（柱）把应变片引线和导线焊接，并加以固定。

防护：在安装好的应变片和引线上涂以中性凡士林油、石蜡（短期防潮）；或石蜡 - 松香 - 黄油的混合剂（长期防潮），或环氧树脂、氯丁橡胶、清漆等（防机械划伤）作防护用，以保证应变计工作性能稳定可靠。常用的粘结剂类型：硝化纤维素型、氰基丙烯酸型、聚酯树脂型、环氧树脂类和酚醛树脂类等。

粘贴工艺：被测件粘贴表面处理，贴片位置的确定、贴片、干燥固化、贴片质量检查、引线的焊接与固定，以及防护与屏蔽等。

2.3.5 电阻应变片的主要特性

1. 静态特性

为了正确选用电阻应变片，应该对影响其工作特性的主要参数进行了解。

(1) 灵敏系数(K)

当具有初始电阻值 R 的应变片粘贴于试件表面时，试件受力引起的表面应变，将传递给应变片的敏感栅，使其产生电阻相对变化 $\Delta R/R_0$ 。实验证明，在一定的应变范围内，有下列关系：

$$\Delta R/R = K\varepsilon_x \quad (2-12)$$

式中 ε_x ——应变片轴向应变；

K ——应变片的灵敏系数。

它表示安装在被测试件上的应变片，在其轴向受到单向应力时引起的电阻相对变化 $(\Delta R/R)$ ，与此单向应力引起的试件表面轴向应变 (ε_x) 之比。

必须指出，应变片的灵敏系数 K 并不等于其敏感栅整条应变丝的灵敏系数 K_0 ，一般情况下， $K < K_0$ 。这是因为，在单向应力产生双向应变的情况下， K 除受到敏感栅结构形状、成型工艺、粘结剂和基底性能的影响外，尤其受到栅端圆弧部分横向效应的影响。应变片的灵敏系数直接关系到应变测量的精度。因此， K 值通常采用从批量生产中每批抽样，在规定条件

下通过实测确定——即应变片的标定；故 K 又称标定灵敏系数。上述规定条件是：①试件材料取泊松比 $\mu_0 = 0.285$ 的钢；②试件单向受力；③应变计轴向与主应力方向一致。

(2) 横向效应及横向效应系数 (H)

金属应变片的敏感栅通常都呈栅状。它由轴向纵栅和圆弧横栅两部分组成，如图 2-5 (a) 所示。由于试件承受单向应力 σ 时，其表面处于平面应变状态中，即轴向拉伸 ε_x 和横向收缩 ε_y 。粘贴在试件表面上的应变片，其纵栅和横栅各自主要分别敏感 ε_x 和 ε_y ，如图 2-5 (b)。从而引起总的电阻相对变化为：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y = K_x (1 + \alpha H) \varepsilon_x \quad (2-13)$$

式中 K_x ——纵向灵敏系数，它表示当 $\varepsilon_y = 0$ 时，单位轴向应变 ε_x 引起的电阻相对变化；

K_y ——横向灵敏系数，它表示当 $\varepsilon_x = 0$ 时，单位横向应变 ε_y 引起的电阻相对变化；

$\alpha = \varepsilon_y / \varepsilon_x$ ——双向应变比；

$H = K_y / K_x$ ——双向应变灵敏系数比。

式(2-13)为一般情况下应变 - 电阻转换公式。它表明：

在标定条件下，有 $\alpha = \varepsilon_y / \varepsilon_x = -\mu_0$ ，则：

$$\Delta R / R = K_x (1 - \mu_0 H) \varepsilon_x = k \varepsilon_x \quad (2-14)$$

式中： $k = K_x (1 - \mu_0 H)$ 。

由式(2-14)可见，在单位应力、双向应变的情况下，横向应变总是起着抵消纵向应变的作用。应变片这种既敏感纵向应变，又同时受横向应变影响而使灵敏系数及相对电阻比都减小的现象，称为横向效应。其大小用横向效应系数 H (百分数) 来表示，即：

$$H = K_y / K_x \times 100\% \quad (2-15)$$

由于横向效应的存在，在非标定条件下(即①试件取泊松比 $\mu \neq 0.285$ 的一般材料；②主应力与应变片轴向不一致，由此引起的应变场为任意的 ε_x 和 ε_y ，倘若仍用标定灵敏系数 K 的应变片进行测试，将会产生较大误差。其相对误差为：

$$e = \frac{H}{1 - \mu_0 H} (\mu_0 + \alpha) \quad (2-16)$$

若单向应力与应变片轴向一致，则有 $\alpha = -\mu$ ，则式(2-16)变成：

$$e = \frac{H}{1 - \mu_0 H} (\mu_0 - \mu) \quad (2-17)$$

由此可见，要消减横向效应产生的误差，有效的办法是减小横向效应系数 H 。理论分析和实验表明：对丝绕式应变片，纵栅 l_0 愈长，横栅 r 愈小，则 H 愈小。因此，采用短接式或直角式横栅〔见图 2-3(b)、(d)〕，可有效地克服横向效应的影响。箔式应变片(花)(见图 2-4)就是据此设计的。

(3) 机械滞后 (Z_j)

实用中，由于敏感栅基底和粘结剂材料性能，或使用中的过载，过热，都会使应变计产生残余变形，导致应变片输出的不重合。这种不重合性用机械滞后 (Z_j) 来衡量。它是指粘贴在试件上的应变片，在恒温条件下增(加载)、减(卸载)试件应变的过程中，对应同一机械应变所指示应变量(输出)之差值，见图 2-6 所示。通常在室温条件下，要求机械滞后 $Z_j < 3 \sim 10 \mu\varepsilon$ 。实测中，可在测试前通过多次重复预加、卸载，来减小机械滞后产生的误差。

(4) 蠕变(θ)和零漂(P_0)

粘贴在试件上的应变片,在恒温恒载条件下,指示应变量随时间单向变化的特性称为蠕变。如图2-7中 θ 所示。

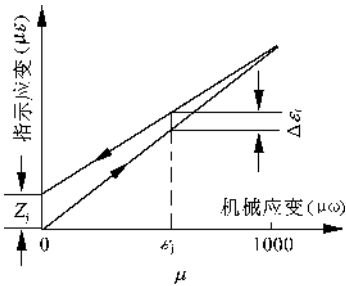


图 2-6 应变片的机械滞后特性

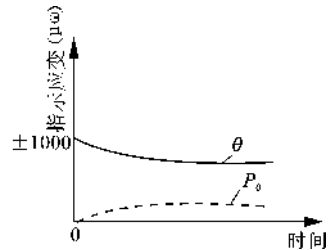


图 2-7 应变片的蠕变和零漂特性

当试件初始空载时,应变片示值仍会随时间变化的现象称为零漂。如图2-7中的 P_0 所示。蠕变反映了应变计在长时间工作中对时间的稳定性,通常要求 $\theta < 3 \sim 15 \mu s$ 。引起蠕变的主要原因是,制作应变片时内部产生的内应力和工作中出现的剪应力,使丝栅、基底,尤其是胶层之间产生的“滑移”所致。选用弹性模量较大的粘结剂和基底材料,适当减薄胶层和基底,并使之充分固化,有利于蠕变性能的改善。

(5) 应变极限(ε_{lim})

应变片的线性(灵敏系数为常数)特性,只有在一定的应变限度范围内才能保持。当试件输入的真实应变超过某一限值时,应变片的输出特性将出现非线性。在恒温条件下,使非线性误差达到10%时的真实应变值,称为应变极限 ε_{lim} 。如图2-8所示。应变极限是衡量应变片测量范围和过载能力的指标,通常要求 $\varepsilon_{lim} \geq 8000 \mu \varepsilon$ 。影响 ε_{lim} 的主要因素及改善措施,与蠕变基本相同。

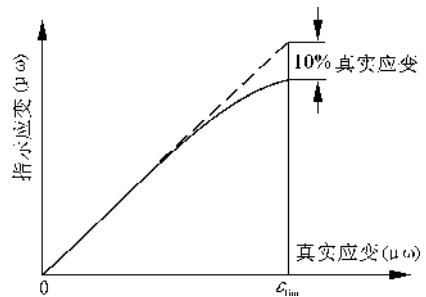


图 2-8 应变片的应变极限特性

2. 动态特性

实验表明,机械应变波是以相同于声波的形式和速度在材料中传播的。当它依次通过一定厚度的基底、胶层(两者都很薄,可忽略不计)和栅长 l 而为应变计所响应时,就会有时间的滞后。应变片的这种响应滞后对动态(高频)应变测量,尤其会产生误差。应变片的动态特性就是指其感受随时间变化的应变时之响应特性。

(1) 对正弦应变波的响应

应变片对正弦应变波的响应是在其栅长 l 范围内所感受应变量的平均值。因此,响应波的幅值将低于真实应变波,从而产生误差。图2-9表示一频率为 f ,幅值为 ε_0 的正弦波,以速度 v 沿着应变片纵向 x 方向传播时,在某一瞬时 t 的分布图。应变片 midpoint x_l 的瞬时应变为:

$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \sin(2\pi/\lambda)x_l$, 而栅长 l 范围 $\{x_l \pm (1/2)l\}$ 内的平均应变为:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{l} \int_{x_t+1/2}^{x_t+1/2} \varepsilon_0 \sin \frac{2x\pi}{\lambda} dx = \left(\sin \frac{l\pi}{\lambda} / \frac{l\pi}{\lambda} \right) \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} = \left(\sin \frac{l\pi}{\lambda} / \frac{l\pi}{\lambda} \right) \varepsilon_t \quad (2-18)$$

由此产生的相对误差为：

$$e = \left| \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_t}{\varepsilon_t} \right| = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} - 1 = \frac{\lambda}{l\pi} \sin \frac{l\pi}{\lambda} \quad (2-19)$$

考虑到 $\frac{l\pi}{\lambda} \ll 1$ ，将 $\sin \frac{l\pi}{\lambda} / \frac{l\pi}{\lambda}$ 展成级数，并略去高阶小量后可解得：

$$|e| = \frac{1}{6} \left(\frac{l\pi}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{lf\pi}{v} \right)^2 \quad (2-20)$$

由上式可见，粘贴在一定试件（ v 为常数）上的应变片对正弦应变的响应误差随栅长 l 和应变频率 f 的增加而增大。在设计应用应变计时，就可按上式给定的 e 、 l 、 f 三者关系，根据给定的精度 $[e]$ ，来确定合理的 l 或工作频限 f ，即：

$$l < l_{\max} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{6[e]} \text{ 或 } f_{\max} < \frac{v}{l\pi} < \sqrt{6[e]} \quad (2-21)$$

(2) 对阶跃应变波的响应

应变波为阶跃波时（如图 2-10 中曲线 a），由于应变波通过敏感栅全部长度需要时间，所以应变片所反映的波形经过一定时间的延迟，才能达到最大值。应变片的理论和实际输出波形如图 2-10 曲线 b 和 c 所示。

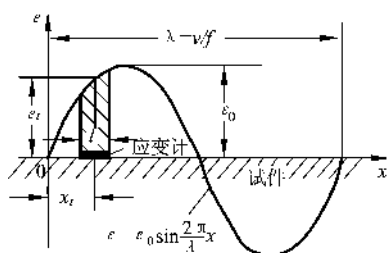


图 2-9 应变片对正弦应变波的响应

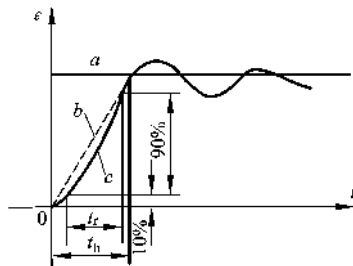


图 2-10 阶跃应变波的响应曲线

a——试件产生的阶跃机械应变波；

b——传播速度为 v 的应变波，通过栅长 l 而滞后一段时间 $t_k = l/v$ 的理论响应特性；它的上升工作时间： $t_r = 0.8l/v$ ；工作频限： $f \approx 0.44v/t_r$ 。

(3) 疲劳寿命(N)

以上讨论的应变片对动态应变的频响特性，当在 $(l/\lambda) \ll 1$ （通常为 $l/\lambda = 1/10 \sim 1/20$ ）的前提下，是能满足一般工程测试要求的。实际衡量应变片动态工作性能的另一个重要指标是疲劳寿命。它是指粘贴在试件上的应变片，在恒幅交变应力作用下，连续工作直至疲劳损坏时的循环次数。它与应变片的取材、工艺和引线焊接、粘贴质量等因素有关，一般要求 $N = 10^5 \sim 10^7$ 次。

2.3.6 电阻应变片的信号调节电路

电阻应变片把机械应变信号转换成 $\Delta R/R$ 后，由于应变变量及其应变电阻变化一般都很微小，既难以直接精确测量，又不便直接处理。因此，必须采用转换电路或仪器，把应变片的

$\Delta R/R$ 变化转换成电压或电流变化。通常采用电桥电路实现这种转换。根据电源的不同,电桥分直流电桥和交流电桥。

1. 直流电桥

(1) 直流电桥平衡条件

电桥如图 2-11(a) 所示, 图中 U 为供桥电源电压, R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为桥臂, R_L 为负载内阻, 负载电流 I_L 为:

$$I_L = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_L(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)} \cdot U$$

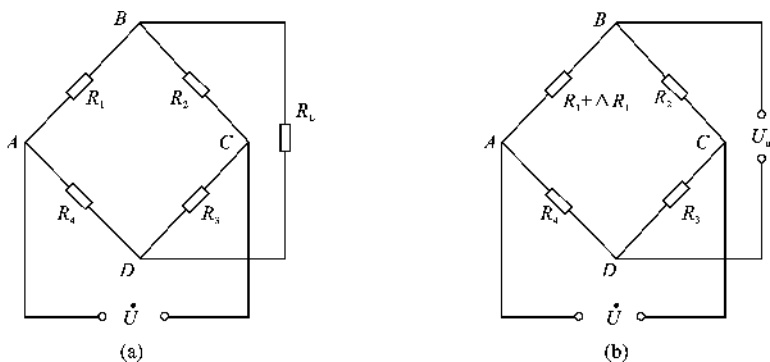


图 2-11 直流电桥

$I_L = 0$ 时电桥平衡, 则平衡条件为:

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0 \quad (2-22)$$

这说明要使电桥平衡, 其相邻两臂电阻的比值应相等或相对两臂电阻的乘积相等。

(2) 直流电桥电压灵敏度

应变片工作时, 其电阻变化很小, 电桥相应输出电压也很小。要推动记录仪工作, 须将输出电压放大, 为此必须了解 $\Delta R/R$ 与电桥输出电压的关系。如图 2-11(b), 设 R_1 为工作应变片, 由于应变使电阻变化 ΔR_1 , R_2 、 R_3 和 R_4 为固定电阻。 U_o 为输出电压, 并设 $R_1 =$, 初始状态电桥平衡, $U_o = 0$, 当有 ΔR_1 时, 电桥输出电压:

$$U_o = \frac{\frac{R_4}{R_3} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} \cdot U \quad (2-23)$$

设桥臂比 $n = R_2/R_1$, 由于电桥初始平衡有 $R_2/R_1 = R_3/R_4$, 略去分母中的 $\Delta R_1/R_1$, 可得:

$$U_o = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot U \quad (2-24)$$

电桥灵敏度定义为:

$$S_u = \frac{U_o}{\Delta R_1/R_1} \quad (2-25)$$

可得单臂工作应变片的电桥电压灵敏度为:

$$S_u = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot U \quad (2-26)$$

显然, S_u 与电桥电源电压成正比, 同时与桥臂比 n 有关。

U 值的选择受应变片功耗的限制。 U 值确定后, 取 $\frac{dS_n}{du} = 0$, 即 $\frac{1-n}{(1+n)^3} = 0$ 可知 $n=1$ 时,

即 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ 时, S_u 电桥的电压灵敏度最高。

此时, 由(2-24)得:

$$U_o = \frac{U \Delta R_1}{4 R_1} \quad (2-27)$$

由(2-25)得: $S_u = \frac{U}{4}$

上两式说明, 当电源电压 U 及应变片电阻相对变化一定时, 电桥的输出电压及其电压灵敏度与各桥臂的阻值无关。

由式(2-24)、(2-25)的非线性误差为:

$$e_\varphi = \frac{U_o - U'_o}{U_o} = \frac{\Delta R_1 / R_1}{1 + n + \Delta R_1 / R_1}$$

式中 U'_o 为实际输出。如果 $n=1$, 则:

$$e_\varphi = \frac{\Delta R_1 / 2R_1}{1 + \Delta R_1 / 2R_1}$$

将分母 $1 + \Delta R_1 / 2R_1$ 按幂级数展开:

$$\frac{1}{1 \pm x} = 1 + \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2} + \frac{1}{x^3} + \dots$$

得: $e_\varphi = \Delta R_1 / 2R_1$

可见非线性误差 e_φ 与 $\Delta R_1 / R_1$ 成正比, 有时能够达到可观的程度。

为了减小和克服非线性误差, 常采用差动电桥。如图 2-12(a), 试件上安装两个工作应变片, 一片受拉, 一片受压, 然后接入电桥相邻臂, 跨在电源两端。电桥输出电压:

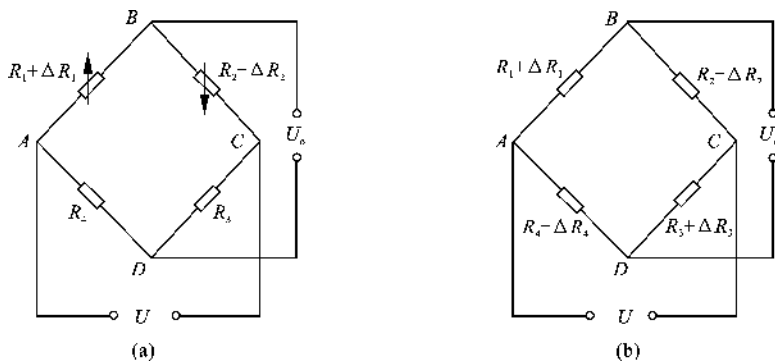


图 2-12 差动电桥

$$U_o = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) U$$

设初始时 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, $\Delta R_1 = \Delta R_2$, 则:

$$\Delta U_o = \frac{U \Delta R_1}{2 R_1} \quad (2-28)$$

可见输出电压 U_o 与 $\Delta R_1 / R_1$ 成严格的线性关系, 没有非线性误差, 而且电桥灵敏度:

$$S_u = \frac{U_o}{\Delta R_1 / R_1} = \frac{U}{2}$$

跟式(2-25)比显然提高了一倍, 还具有温度补偿作用。

为了提高电桥灵敏度或进行温度补偿, 在电桥臂中往往安置多个应变片。电桥也可采用二臂或四臂电桥。如图2-12(b)为四臂电桥, 同理可得电桥输出电压为:

$$U_o = U \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-29)$$

电压灵敏度为: $S_u = U$, 为单臂情况下的四倍(二臂情况下为单臂时的两倍)。

利用电桥的特性不仅可以提高灵敏度, 还可以抑制干扰信号, 因为当电桥的各臂或相邻两臂同时有某一个增量时, 对电桥的输出没有影响。

直流电桥的优点: 高稳定度的直流电源易于获得, 电桥调节平衡电路简单, 传感器至测量仪表的连接导线的分布参数影响小等。

但是后续要采用直流放大器, 容易产生零点漂移, 线路也比较复杂。因此应变电桥现在多采用交流电桥。

2. 交流电桥

交流电桥的原理电路如图2-13所示。

Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 为复阻抗, $\dot{U}$ 为交流电压源, 开路输出电压为 $\dot{U}_o$, 根据交流电路分析(和直流电路类似)可得交流电桥的平衡条件为: $Z_1 Z_2 = Z_3 Z_4$

且: $Z_i = R_i + jX_i = Z_i e^{j\varphi_i} (i = 1, 2, 3, 4)$

式中 R_i 、 X_i ——各桥臂电阻和电抗;

Z_i 、 φ_i ——各桥臂复阻抗的模和幅角。

因此, 式(2-24)的平衡条件必须同时满足:

$$Z_1 Z_2 = Z_3 Z_4 \text{ 和 } \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \quad (2-30)$$

$$\text{或 } R_1 R_3 - R_2 R_4 = X_1 X_3 - X_2 X_4 \text{ 和 } R_1 X_3 + R_3 X_1 = R_2 X_4 + R_4 X_2 \quad (2-31)$$

设交流电桥的初始状态是平衡的, 当工作应变片 R_1 改变 ΔR_1 , 引起 Z_1 变化 ΔZ_1 , 可算出:

$$U_o = \frac{\frac{Z_4 \Delta Z_1}{Z_3 Z_1}}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{\Delta Z_1}{Z_1}\right) \left(1 + \frac{Z_4}{Z_3}\right)} U \quad (2-32)$$

略去 $\Delta Z_1 / Z_1$, 并设初始时 $Z_1 = Z_2$, $Z_3 = Z_4$, 则:

$$U_o = \frac{U \Delta Z_1}{4 Z_1} \quad (2-33)$$

电桥的调平就是确保试件在未受载、无应变的初始条件下, 应变电桥满足平衡条件(初

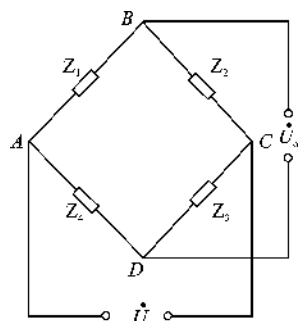


图 2-13 交流电桥

始输出为零)。在实际的应变测量中,由于各桥臂应变片的性能参数不可能完全对称,加之应变片引出导线的分布电容如图 2-14(其容抗与供桥电源频率有关),严重影响着交流电桥的初始平衡和输出特性。因此必须进行预调平衡。由图 2-14 和式(2-31)可见:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ 和 } R_3 C_2 = R_4 C_1$$

对全等臂电桥,上式即为:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \text{ 和 } C_1 = C_2$$

上式表明:交流电桥平衡时,必须同时满足电阻和电容平衡两个条件。下面分别简介。

(1) 电阻调平法

① 串联电阻法 如图 2-15(a)所示,图中 R_5 由下式确定:

$$R_5 = \left[|\Delta r_3| + \left| \Delta r_3 \frac{R_3}{R_1} \right| \right]_{\max} \quad (2-34)$$

式中 Δr_1 和 Δr_3 ——桥臂 R_1 与 R_2 和 R_3 与 R_4 的偏差。

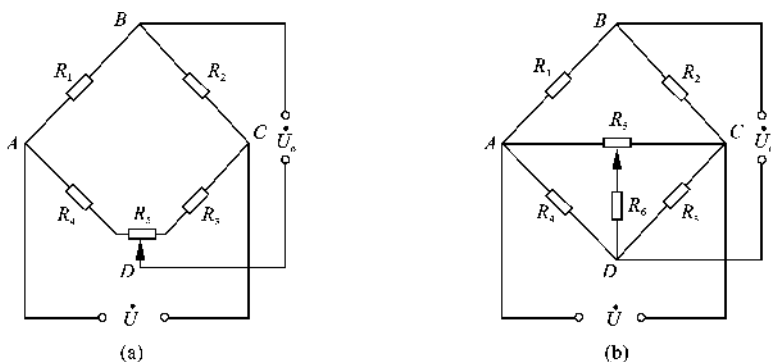


图 2-15 电阻调平桥路

(a) 串联法; (b) 并联法

② 并联电阻法 如图 2-15(b)所示。多圈电位器 R_5 对应于电阻应变仪面板上的“电阻平衡”旋钮。调节 R_5 即可改变桥臂 AD 和 CD 的阻值比,使电桥满足平衡条件。其可调平衡范围取决于 R_6 的值: R_6 愈小,可调范围愈大,但测量误差也愈大。因此,要在保证精度的前提下选得小些。 R_5 可采用 R_6 相同的阻值。 R_6 可按下式确定:

$$R_6 = \frac{R_3}{\left(\left| \frac{\Delta r_1}{R_1} \right| + \left| \frac{\Delta r_3}{R_3} \right| \right)_{\max}} \quad (2-35)$$

(2) 电容调平法

① 差动电容法 如图 2-16(a)所示。 C_3 和 C_4 为同轴差动电容;调节时,两电容变化大小相等,极性相反,以此调整电容平衡。

② 阻容调平法 如图 2-16(b)所示。它靠接入 T 形 RC 阻容电路起到电容预调平的作用。

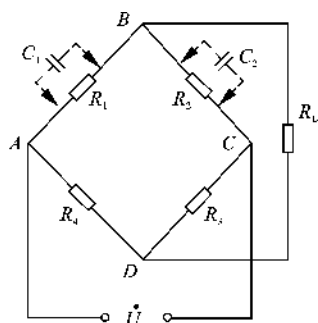


图 2-14 交流电桥分布电容影响

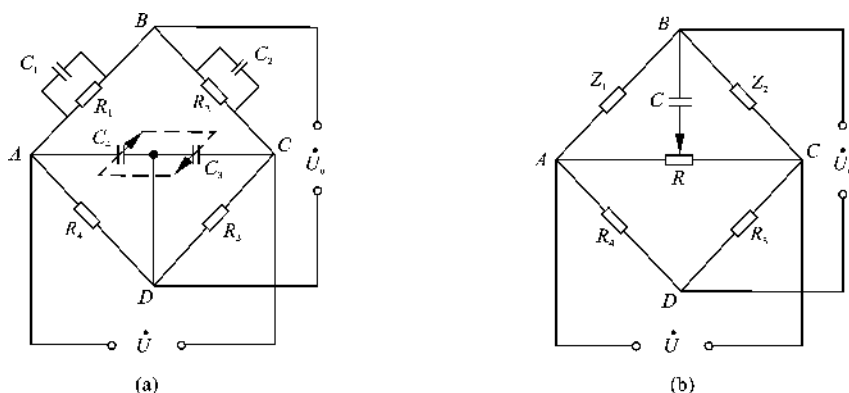


图 2-16 电容调平桥路

(a)差动法；(b)阻容法

必须注意：在同时具有电阻、电容调平装置进行阻抗调平的过程中，两者应不断交替调整才能取得理想的平衡结果。

2.4 电阻应变片式传感器

电阻应变片有两方面的应用：一是作为敏感元件，直接用于被测试件的应变测量；另一是作为转换元件，通过弹性元件构成传感器，用以对任何能转变成弹性元件应变的其他物理量作间接测量。用作传感器的应变片，应有更高的要求，尤其非线性误差要小 $< 0.05\% \sim 0.1\% \text{ F.S.}$ 。

应变片式传感器有如下应用特点：

(1)应用和测量范围广。用应变片可制成各种机械量传感器，如测力传感器可测 $10^{-1} \sim 10^7 \text{ N}$ ，压力传感器可测 $10^3 \sim 10 \text{ Pa}$ ，加速度传感器可测到 10^3 m/s^2 级。

(2)分辨力($1\mu\epsilon$)和灵敏度高，尤其是用半导体应变片，灵敏度可达几十 mV/V ；精度较高(一般达 $1\% \sim 3\% \text{ F.S.}$ ，高精度达 $0.1\% \sim 0.01\% \text{ F.S.}$)。

(3)结构轻小，对试件影响小；对复杂环境的适应性强，易于实施对环境干扰的隔离或补偿，从而可以在高低温、高压、高速、强磁场、核辐射等特殊环境中使用；频率响应好。

(4)商品化，选用和使用都方便，也便于实现远距离、自动化测量。

因此，目前传感器的种类虽已繁多，但高精度的传感器仍以应变片式应用最普遍。它广泛应用于机械、冶金、石油、建筑、交通、水利和宇航等部门的自动测量与控制或科学实验中，近年来在生物、医学、体育和商业等部门亦已得到开发应用。

2.4.1 应变片式传感器

1. 测力传感器

应变片式传感器的最大用武之地还是称重和测力领域。这种测力传感器的结构由应变片、弹性元件和一些附件所组成。视弹性元件结构形式(如柱形、筒形、环形、梁式、轮辐式等)和受载性质(如拉、压、弯曲和剪切等)的不同，它们有许多种类。

2. 压力传感器

压力传感器主要用来测量流体的压力。视其弹性体的结构形式有单一式和组合式之分。单一式是指应变片直接粘贴在受压弹性膜片或筒上。膜片式应变压力传感器的结构、应力分布及布片,与固态压阻式传感器雷同。图 2 - 17 为筒式应变压力传感器。图中(a)为结构示意图;(b)为材料取 E 和 μ 的厚底应变筒;(c)为 4 片应变片布片。工作应变片 R_1 、 R_3 沿筒外壁周向粘贴,温度补偿应变片 R_2 、 R_4 贴在筒底外壁,并接成全桥。当应变筒内壁感受压力 P 时,筒外壁的周向应变为:

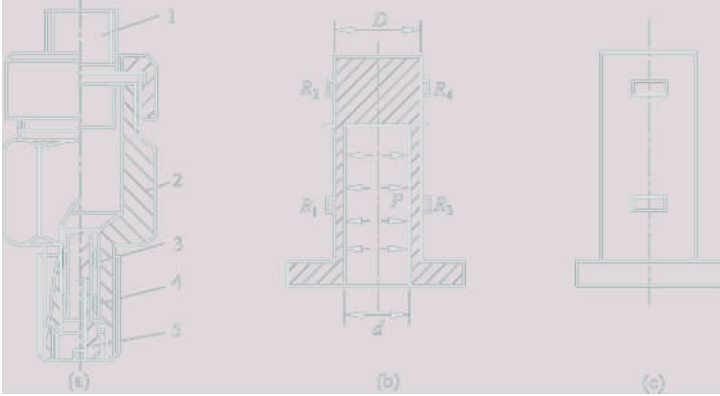


图 2 - 17 筒式应变压力传感器

(a)结构示意图;(b)筒式弹性元件;(c)应变计布片

1—插座; 2—基体; 3—温度补偿应变片; 4—工作应变片; 5—应变筒

对厚壁筒:

$$\varepsilon_t = \frac{(2 - \mu)d^2}{(D^2 - d^2)E} \cdot P \quad (2 - 36)$$

对薄壁筒:

$$\varepsilon_t = \frac{(2 - \mu)d}{(D - d)E} \cdot P \quad (2 - 37)$$

组合式压力传感器则由受压弹性元件(膜片、膜盒或波纹管)和应变弹性元件(如各种梁)组合而成。前者承受压力,后者粘贴应变片。两者之间通过传力件传递压力作用。这种结构的优点是受压弹性元件能对流体高温、腐蚀等影响起到隔离作用,使应变片具有良好的工作环境。

3. 位移传感器

应变式位移传感器是把被测位移量转变成弹性元件的变形和应变,然后通过应变片和应变电桥,输出正比于被测位移的电量。它可用来近测或远测静态与动态的位移量。因此,既要求弹性元件刚度小,对被测对象的影响反力小,又要求系统的固有频率高,动态频响特性好。

图 2 - 18(a)为国产 YW 系列应变式位移传感器结构。这种传感器由于采用了悬臂梁 - 螺旋弹簧串联的组合结构,因此它适用于较大位移(量程 $> 10 \sim 100\text{mm}$)的测量。其工作原理如图 2 - 18(b)所示。

由于测量杆位移 d 为悬臂梁端部位移量 d_1 和螺旋弹簧伸长量 d_2 之和。由材料力学可知,

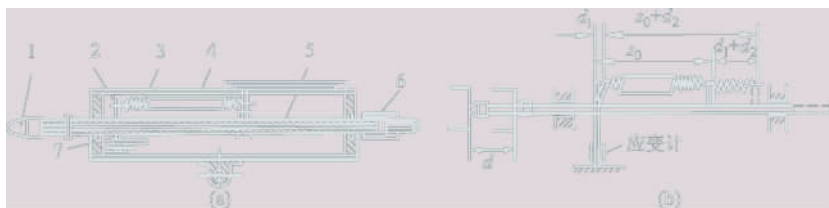


图 2-18 YW 型应变式位移传感器

(a)传感器结构；(b)工作原理

1—测量头；2—弹性元件；3—弹簧；4—外壳；5—测量杆；6—调整螺母；7—应变片

位移量与贴片处应变 ε 之间的关系为：

$$d = d_1 + d_2 = K\varepsilon \quad (2-38)$$

上式表明： d 和 ε 呈成线性关系，其比例系数 K 与弹性元件尺寸、材料特性参数有关； ε 通过 4 片应变片和应变仪测得。

4. 其他应变片式传感器

利用应变片除可构成上述主要应用传感器外，还可构成其他应变片式传感器，如通过质量块与弹性元件的作用，可将被测加速度转换成弹性应变，从而构成应变片式加速度传感器。如通过弹性元件和扭矩应变片，可构成应变片式扭矩传感器，等等。应变片式传感器结构与设计的关键是弹性体形式的选择与计算，应变片的合理布片与接桥。

2.4.2 压阻式传感器

硅压阻式传感器由外壳、硅膜片和引线组成，其核心部分是做成杯状的硅膜片，通常叫做硅杯。外壳则因不同用途而异。在硅膜片上，用半导体工艺中的扩散掺杂法做四个相等的电阻，经蒸镀铝电极及连线，接成惠斯登电桥，再用压焊法与外引线相连。膜片的一侧是和被测系统相连接的高压腔，另一侧是低压腔，通常和大气相通，也有做成真空的。当膜片两边存在压力差而发生形变时，膜片各点产生应力，从而使扩散电阻的阻值发生变化，电桥失去平衡，输出相应的电压，其电压大小就反映了膜片所受的压力差值。通常硅膜片在受压时的形变非常微小，其弯曲挠度远小于硅膜片的厚度，并且膜片常取圆形。因而求膜片上的应力分布，可以归结为弹性力学中的小挠度圆薄板应变问题。

设均布压力为 P ，则薄板上各点的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t 与其作用半径 r 有如下关系：

$$\sigma_r = \frac{3P}{8h^2} [r_0^2(1+\mu) - r^2(3+\mu)] \quad (2-39)$$

$$\sigma_t = \frac{3P}{8h^2} [r_0^2(1+\mu) - r^2(1+3\mu)] \quad (2-40)$$

式中 r 、 h ——膜片的工作面半径、厚度；

μ ——泊松比(硅取 $\mu=0.35$)。

均布压力 P 产生的应力是不均匀的，且有正应力区和负应力区。利用这一特性，选择适当的位置布置电阻，使其接入电桥的四臂中，两两电阻在受力时一增一减，且阻值增加的两

个电阻和阻值减小的两个电阻分别对接。这样既提高输出灵敏度，又部分地消除阻值随温度而变化的影响。因此，压阻式传感器广泛采用全等臂差动桥路。

压阻式传感器的基本应用就是测压，其工作原理如上所述。但是，根据不同的使用要求，它的结构形式、外形尺寸和材料选择，有很大的差异。例如，用于动态或点压力测量，要求体积很小，生物医学用传感器，尤其是植入式传感器，则更要求微型化，其材料选取还应考虑与生物体相容；化工领域或在有腐蚀性气体、液体中使用的传感器，则要求防爆、防腐蚀；在岩土力学研究中使用的传感器，则应考虑岩土与传感器材料的匹配，以及由于传感器的埋入而对原有应力场的影响等问题；气象部门要用绝对压力传感器，它在结构及形式上要考虑真空腔的设计；石油勘探部门不仅要求量程能达 600 大气压，而且温度要求在 200 下使用，等等。用户应根据自己的需要，选用合适的产品。压阻式压力传感器的性能指标主要有：量程，目前最高量程达 $6 \times 10^5 \text{ Pa}$ ；精度，一般在 $0.2\% \sim 0.5\% \text{ F. S.}$ 之间，最高达 $0.1\% \text{ F. S.}$ ；满量程输出，通常不低于几十毫伏；零点温漂，每摄氏度引起零位输出漂移，一般要求小于 $5 \times 10^{-1} \text{ F. S. / } ^\circ\text{C}$ ；零点时漂，要求小于 $0.3\% \text{ F. S. / 4h}$ ；阻抗，从几十欧到几千欧不等，用户可根据阻抗匹配及功耗要求进行选择；工作电压，一般 $5 \sim 10\text{V}$ ；工作温度，一般不高于 80°C ，但专门设计制造的高温传感器可达 400°C 。目前，国内生产扩散硅压力传感器的厂家很多，选用时可参考厂家说明书。

1. 压阻式力传感器

压阻式力传感器种类很多，主要有：柱(筒)式力传感器、悬臂梁式力传感器、薄壁圆环式力传感器、轮辐式力传感器、轴剪切力传感器、筒式压力传感器、膜片式压力传感器等。

(1) 柱(筒)式力传感器

图 2 - 19 为柱(筒)式力传感器，弹性敏感元件为实心或空心的柱体(截面积为 S ，材料弹性模量为 E)，当柱体轴向受拉(压)力 F 作用时，在弹性范围内，应力 σ 与应变 ε 成正比关系。

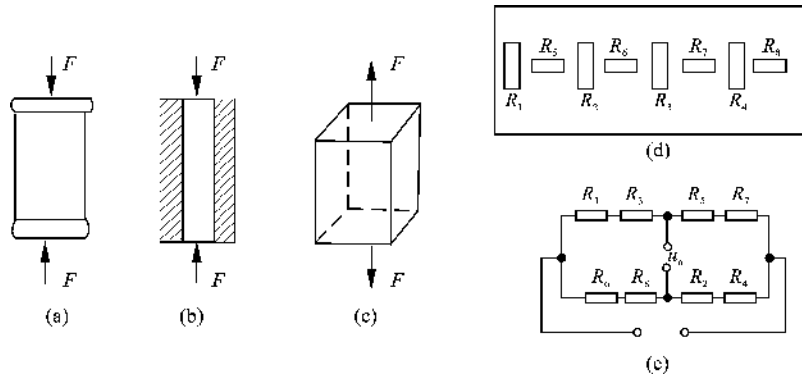


图 2 - 19 柱式力传感器

轴向应变：

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{SE} \tag{2 - 41}$$

横(周)向应变：

$$\varepsilon_y = - \mu \varepsilon$$

应变片粘贴在弹性柱体外壁应力分布均匀的中间部分,沿轴向和周向对称地粘贴多片应变片。贴片在柱面上的展开位置及其在桥路中的连接如图 2-19(d)和(e)所示。

图 2-19 中作用力 F 在各应变片上产生的应变分别为:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon + \varepsilon_t = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 &= -\mu\varepsilon + \varepsilon_t = \varepsilon_6 = \varepsilon_7 = \varepsilon_8\end{aligned}$$

式中 μ ——柱体材料的泊松比;

ε_t ——温度 t 所引起的附加应变;

ε ——柱体在 F 作用下的轴向应变($\varepsilon = F/SE$)。

全桥接法的总应变 ε_0 为

$$\varepsilon_0 = 2(1 + \mu)\varepsilon \quad (2-42)$$

电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{U_i}{4} K \varepsilon_0 = \frac{U_i}{2} K(1 + \mu) \frac{F}{SE}$$

从而得到被测力 F 为

$$F = \frac{2ES}{K(1 + \mu)U_i} U_o \propto U_o \quad (2-43)$$

地磅秤一般采用柱式力传感器。

(2) 悬臂梁式力传感器

如图 2-20 所示,当力 F 作用在弹性臂梁自由端时,悬臂梁产生变形,在梁的上、下表面对称位置上应变大小相当,极性相反,若分别粘贴应变片 R_1 、 R_4 和 R_2 、 R_3 ,并接成差动电桥,则电桥输出电压 U_o 与力 F 成正比。

对等截面梁(图 2-20(a)):

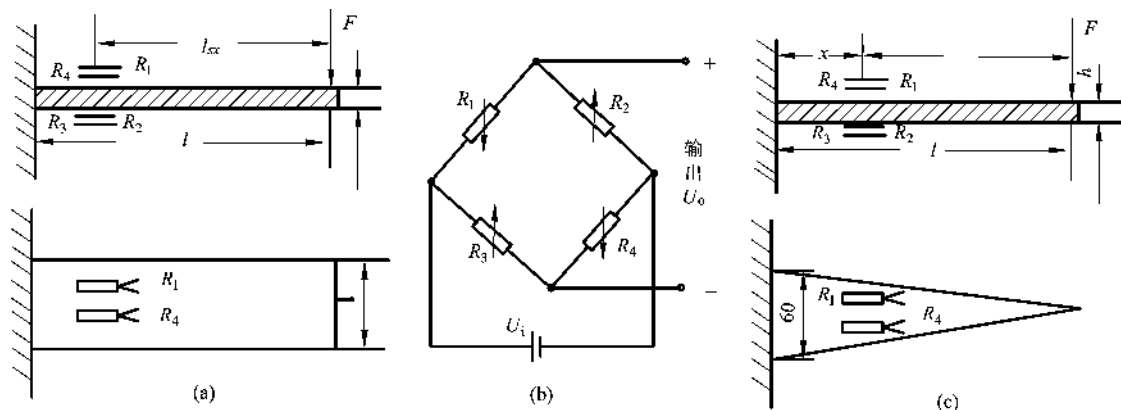


图 2-20 悬臂梁式力传感器

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fl_x}{bh^2E}; \varepsilon_1 = \varepsilon_4 = \varepsilon_x, \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_x$$

则:

$$U_o = \frac{U_i}{4} K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) = U_i K \varepsilon_x = U_i K \frac{6Fl_x}{bh^2E} \quad (2-44)$$

被测力 F 为：

$$F = \frac{bh^2E}{6Kl_x U_i} U_o \quad (2-45)$$

等强度梁(图 2-20(c))， $\varepsilon_x = \frac{6Fl}{b_0 h^2 E}$ ，不随应变片粘贴位置变化：

$$U_o = U_i K \varepsilon_x = U_i K \frac{6Fl}{b_0 h^2 E} \Rightarrow F = \frac{bh^2E}{6KU_i} U_o \quad (2-46)$$

其他特殊悬臂梁力传感器如图 2-21 所示，电子秤一般采用悬臂梁式力传感器。

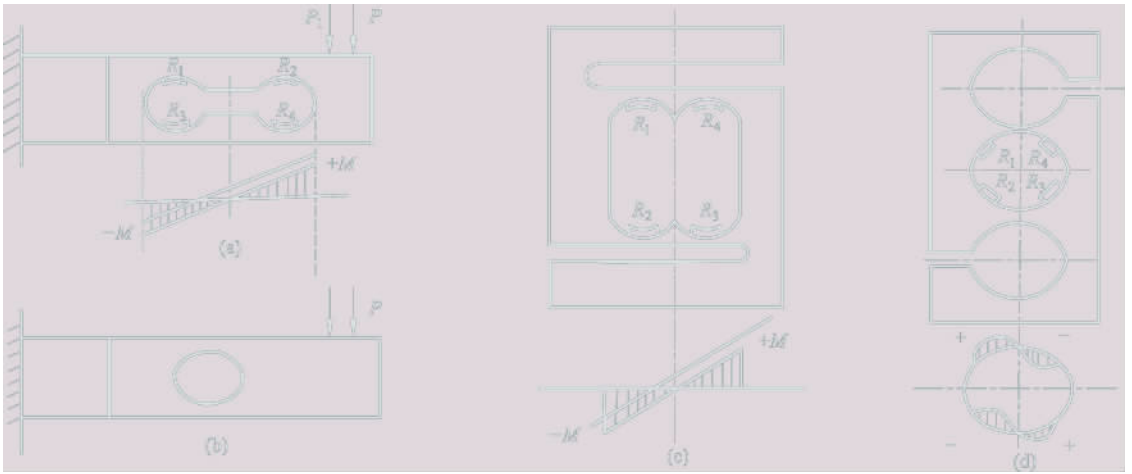


图 2-21 特殊梁式力传感器

(a)双孔梁；(b)单孔梁；(c)、(d)S型梁

(3) 薄壁圆环式力传感器

薄壁圆环式力传感器如图 2-22 所示。感受应变为：

$$\varepsilon = \pm \frac{3F(R - h/2)}{bh^2E} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \quad (2-47)$$

(4) 轮辐式力传感器

如图 2-23 所示。在距离中间加力部位为 l_x 的截面上的弯矩为：

$$M = \frac{1}{8} F(1 - 2l_x)$$

在 l_x 截面处的上、下表面应变为：

$$\varepsilon = \frac{M}{Ebh^2/6} = \frac{3(1 - 2l_x)}{4Ebh^2} F \quad (2-48)$$

按图 2-23 粘贴应变片并接成全桥差动电路，则电桥输出指示的总应变与外力 F 的关系为：

$$\varepsilon_0 = 4\varepsilon = \frac{3(1 - 2l_x)}{Ebh^2} F \quad (2-49)$$

电桥输出电压为：

$$U_o = U_i K \frac{3(1 - 2\nu_x)}{Ebh^2} F$$

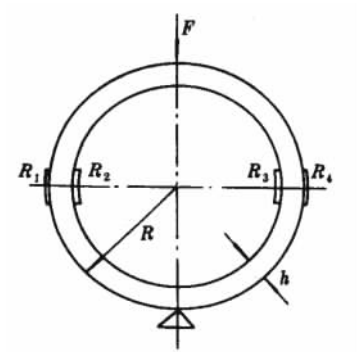


图 2-22 薄壁圆环式力传感器示意图

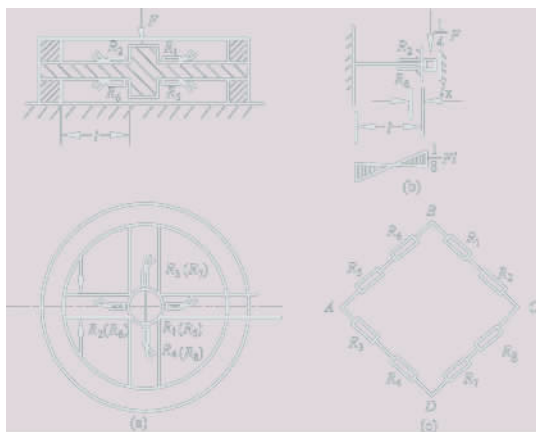


图 2-23 轮辐式力传感器示意图

(5) 轴剪切力传感器

应变片的粘贴方式和测量电桥的连接如图 2-24 所示，当弹性轴剪切力作用时，应变片受拉力，受压应力，其应变为：

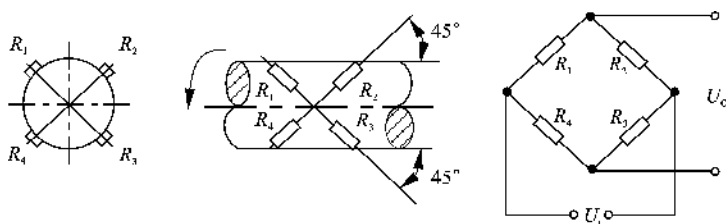


图 2-24 轴剪切力传感器

$$\varepsilon = \pm \frac{5(1 + \mu)}{ED^3} M \quad (\text{实心轴}) \quad (2-50)$$

$$\varepsilon = \pm \frac{16(1 + \mu)D}{\pi E(D^4 - d^4)} M \quad (\text{空心轴}) \quad (2-50')$$

式中 D——轴外径，mm；
d——轴内径，mm；
M——扭矩，N·m；
 μ ——轴材料泊松比；
E——轴材料弹性模量。

电桥输出电压：

$$U_o = U_i K \varepsilon \quad (2-51)$$

这种力传感器主要用于扭矩测量。

(6) 筒式压力传感器

如图 2-25 所示,被测流体压力 p 作用于筒体内部,沿筒周向贴应变片,感受应变为:

$$\varepsilon = \frac{(2 - \mu)}{E(n^2 - 1)} P \quad (2-52)$$

式中 P ——待测流体压力;

μ ——筒材料泊松比;

E ——筒材料弹性模量;

$n = D_0/D$ ——筒外径与内径之比;

对于薄壁圆筒:

$$\varepsilon = \frac{pD}{2hE}(1 - 0.5\mu) \quad (2-52')$$

式中, $h = (D_0 - D)/2$ ——壁厚。

在筒径向或筒的实心底部贴温度补偿应变片,这种压力传感器一般用于管道、枪(炮)受力测量。

(7) 膜片式压力传感器

如图 2-26(a)所示,周边固定弹性膜片受均匀压力 P 作用时,膜片的应变

$$\varepsilon_r = \frac{3p}{8h^2E}(1 - \mu^2) \cdot (R^2 - 3r^2) \quad (\text{径向}) \quad (2-53)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3p}{8h^2E}(1 - \mu^2) \cdot (R^2 - r^2) \quad (\text{切向}) \quad (2-53')$$

式中 p ——待测压力;

h 、 R ——膜片厚度和半径;

E 、 μ ——膜片材料弹性模量和泊松比 $r = 0$, ε_r 和 ε_t 达到正最大值

$$\varepsilon_{\text{rmax}} = \varepsilon_{\text{tmax}} = \frac{3pR^2}{8h^2E}(1 - \mu^2) \quad (2-54)$$

$r = r_c = R/\sqrt{3} \approx 0.58R$ 时, $\varepsilon_r = 0$;

$r > 0.58R$ 时, $\varepsilon_r < 0$;

$r = R$ 时, $\varepsilon_t = 0$, ε_r 达到负最大值

$$\varepsilon_r = -\frac{3pR^2}{4h^2E}(1 - \mu^2) \quad (2-55)$$

适当粘贴应变片,如图 2-26(a)所示,使粘贴在 $r > r_c$ 区域的径向应变片 R_1 、 R_4 感受的应变与粘贴在 $r < r_c$ 内的切向应变片 R_2 、 R_3 感受的应变相等,它们的极性相反,这样便于接成差动电桥。

若 $\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = -\varepsilon_2 = -\varepsilon_3 = \varepsilon_{\text{tmax}}$, 则电桥输出电压

$$U_o = U_i K \varepsilon_{\text{tmax}} = U_i K \frac{3pR^2}{8h^2E}(1 - \mu^2) \quad (2-56)$$

膜片式压力传感器的应变片一般利用金属箔作成如图 2-26b 所示应变花的形式。

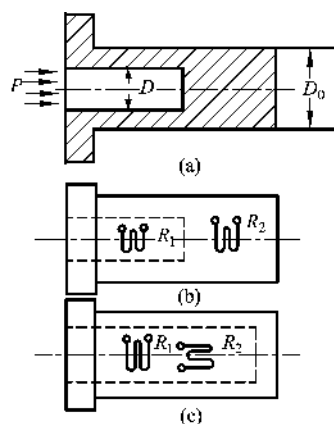


图 2-25 筒式压力传感器

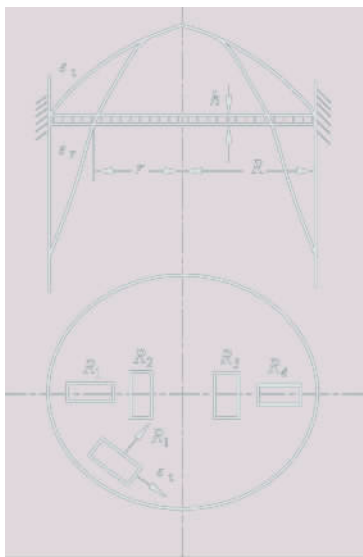


图 2 - 26a 膜片式压力传感器

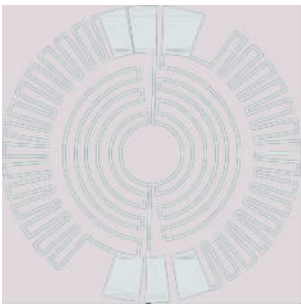


图 2 - 26b 圆箔式应变片

2. 组合式压力传感器

组合式压力传感器，如图 2 - 27 所示。它是利用几种弹性元件组合而成。

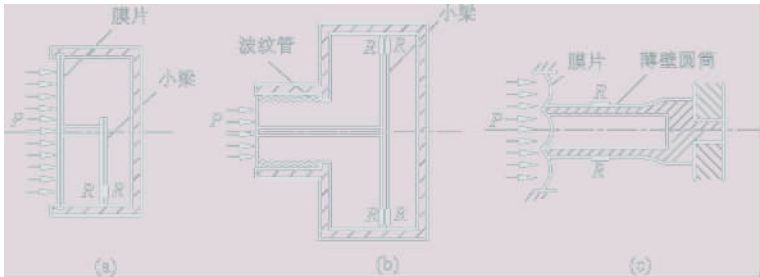


图 2 - 27 组合式压力传感器

3. 压阻式加速度传感器

压阻式加速度传感器的原理结构如图 2 - 28 所示。它采用(100)晶面的 N 型硅单晶作为悬臂梁。在其根部沿(110)和(110)晶向各扩散两个 P 型电阻，并接成电桥。当悬臂梁自由端的质量块受加速度作用时，悬臂梁受弯矩作用产生应力，其方向为梁的长度方向。从而使四个电阻中两个电阻的应力方向与电流一致，另两个电阻的应力方向与电流垂直。

压阻式加速度传感器用来测量振动加速度时，其固有频率按下式计算：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{Ebh^3/4ml^3} \tag{2 - 57}$$

式中 E 为材料的弹性模量。只要正确选择尺寸和阻尼，就可以用来测量低频加速度。

如图 2 - 29 所示的一量程为 100m/s²的加速度传感器，其参数如下 l = 1cm，b = 0.3cm，

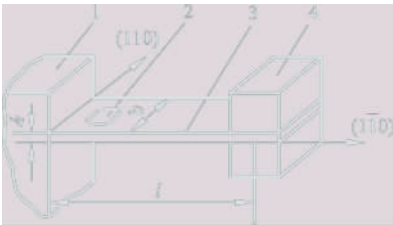


图 2 - 28 压阻式加速度传感器原理结构
1—基座； 2—扩散电阻； 3—硅梁； 4—质量块

$h = 0.015\text{cm}$, 质量块 $m = 0.76\text{g}$, 固有频率 $f_0 = 100\text{Hz}$ 。当使用 6V 的恒压源供电时 , 满量程输出为 60mV ; 其体积约为 $(5 \times 5 \times 12)\text{mm}^3$; 质量只有 1.5g 。

压阻式加速度传感器结构简单 , 外形小巧 , 性能优越 , 尤其可测量低频加速度。它除了航空部门用于飞行器风洞试验和飞行试验等多种过载与振动参数的测试外 , 在工业部门可用于发动机试车台各段振动参数的测试。特别是对于从零赫兹开始的低频振动 , 是前述压电式加速度传感器难于测得的。在高速自动绘图仪的笔架上装有消振器 , 其核心元件就是两只小型压阻式加速度传感器。它在感受抖动信号后可以进行前置控制 , 从而有效地消除了抖动。在建筑行业 , 可用它来监测高层建筑在风力作用下顶端的晃动 , 以及大跨度桥梁的摆动。在体育运动和生物医学等部门 , 也需要大量的小型加速度传感器。随着自动化技术和微处理机技术深入到各个领域 , 对低频振动和过载测试的需要日益广泛。这将促使微小型压阻式加速度传感器更快地发展 , 得到更广泛的应用。电阻应变式加速度传感器如图 2 - 29 所示。

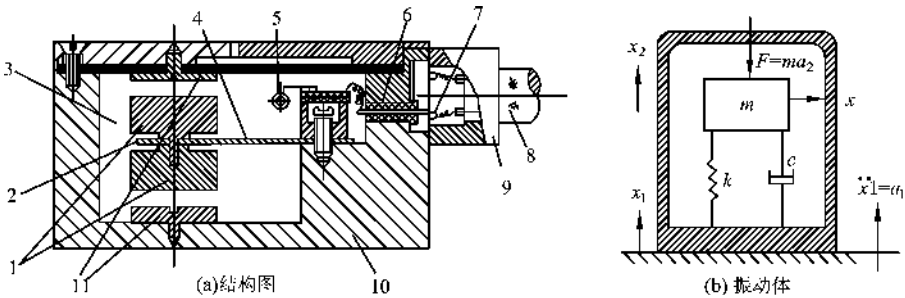


图 2 - 29 应变式加速度传感器

- 1—质量块； 2—应变梁； 3—硅油阻尼液； 4—应变片； 5—温度补偿电阻；
6—绝缘套管； 7—接线柱； 8—电缆； 9—压线板； 10—壳体； 11—保护块

- ①结构：由惯性质量块、弹性悬臂梁和电阻应变片组成 , 如图 2 - 29(a)所示。
- ②原理：加速度 $a \rightarrow$ 质量块惯性作用力 $ma \rightarrow$ 悬臂梁变形 $\varepsilon \rightarrow$ 电阻应变片产生电阻变化 ΔR 。
- ③特性分析：
数学模型：加速度传感器可等效为一质量 - 弹簧 - 阻尼二阶系统 , 如图 2 - 29(b)所示
运动方程：

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c \frac{dx_1}{dt} + kx = 0 \quad (2-58)$$

式中 k ——弹性梁弹性系数；

m ——质量块质量；

x_1 、 x_2 ——壳体和质量块的位移；

x ——质量块与壳体间相对位移， $x = x_2 - x_1$ 。

设 $x_1 = x_{1m} \sin \omega t$ 则

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{d^2 (x + x_1)}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2} - \omega^2 x_{1m} \sin \omega t$$

由此得

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = m\omega^2 x_{1m} \sin \omega t = F_m \sin \omega t \quad (2-59)$$

式中， $F_m = m\omega^2 x_{1m}$ 为质量块在壳体振动（加速运动）时惯性力的幅值。这样加速度传感器就等效为在正弦策动力（ $F_m \sin \omega t$ ）作用下的二阶振动系统，输出量为质量块与壳体相对位移。

幅频特性：

$$|H(j\omega)| = \frac{x_m}{F_m} = \frac{K}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2 (\omega/\omega_n)^2}} \quad (2-60)$$

相频特性：

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (2-61)$$

式中 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ——系统固有频率；

$\zeta = c/(2\sqrt{km})$ ——系统阻尼比；

$K = 1/k$ ——静态灵敏度；

x_m ——质量块与壳体间相对位移的幅值。

若令：

$$M = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2 (\omega/\omega_n)^2}}$$

则：

$$x_m = MKF_m = M \cdot \frac{1}{k} m\omega^2 x_{1m} = M \frac{a_{1m}}{\omega_n^2} \quad (2-62)$$

式中 $a_{1m} = \omega^2 x_{1m}$ ——壳体加速度的幅值；

x_{1m} ——质量块与壳体间相对位移 x 的幅值。

当 $\zeta = 0.6 \sim 0.7$ ， $\omega/\omega_n = 0.8 \sim 0.4$ 时， $M \approx 1$ ，则

$$x_m = \frac{a_{1m}}{\omega_n^2} \quad (2-63)$$

被测加速度：

$$a_1 = \omega_n^2 x$$

位移 x 使梁变形 ε ，粘贴在梁上的应变片电阻值变化 ΔR ，电桥输出正比于 ΔR ，输出电压

U_0 与加速度 a_1 成正比关系。

2.4.3 电阻应变式传感器的温度误差及其补偿

1. 温度误差

用应变片测量时,希望其电阻只随应变而变,而不受其他因素的影响。但实际上环境温度变化时,也会引起电阻的相对变化,从而产生温度误差。设工作温度变化为 Δt ,则由此引起粘贴在试件上的应变片电阻的相对变化为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = a_t \Delta t + K(\beta_s - \beta_t) \cdot \Delta t \quad (2-64)$$

式中 a_t ——敏感栅材料的电阻温度系数;

K ——应变片的灵敏系数;

β_s 、 β_t ——试件和敏感栅材料的线膨胀系数。

上式即应变片的温度效应;相对应的热输出为:

$$\varepsilon_t = \frac{(\Delta R/R)_t}{K} = \frac{1}{K} \alpha_t \Delta t + (\beta_s - \beta_t) \Delta t \quad (2-65)$$

由式(2-64)和式(2-65)不难看出,应变计的温度效应及其热输出由两部分组成:前部分为热阻效应所造成;后部分为敏感栅与试件热膨胀失配所引起。在工作温度变化较大时,这种热输出干扰必须加以补偿。

2. 温度补偿

热输出补偿就是消除 ε 对测量应变的干扰。常采用温度自补偿法和桥路补偿法。

(1) 温度自补偿法

温度自补偿法是通过精心选配敏感栅材料与结构参数来实现热输出补偿的。

①单丝自补偿应变计。由式(2-65)可知,欲使热输出 $\varepsilon = 0$,只要满足条件:

$$\alpha_t = -K(\beta_s - \beta_t) \quad (2-66)$$

在研制和选用应变片时,若选择敏感栅的合金材料,其 α 、 β_t 能与试件材料的 β_s 相匹配,即满足式(2-66),就能达到温度自补偿的目的。为使这种自补偿应变片能适用于不同 β_s 材料的试件,实际常选用康铜、卡玛、伊文、铁铬铝等合金作栅材,并通过改变合金成份及热处理规范来调整 α ,以满足对不同材料试件的热输出补偿。这种自补偿应变计的最大优点是结构简单,制造、使用方便。

②双丝自补偿应变片。这种应变片的敏感栅是由电阻温度系数为一正一负的两种合金丝串接而成,如图 2-30 所示。应变片电阻 R 由两部分电阻 R_a 和 R_b 组成,即 $R = R_a + R_b$ 。当工作温度变化时,若 R_a 栅产生正的热输出 ε_a 与 R_b 栅产生负的热输出 ε_b ,能大小相等或相近,就可达到自补偿的目的,即:

$$\frac{-\varepsilon_{bt}}{\varepsilon_{at}} \approx \frac{R_a}{R} / \frac{R_b}{R} = \frac{R_a}{R_b} \quad (2-67)$$

满足上式的参数,可在同种试件上通过试验确定。这种应变片的特点与单丝自补偿应变

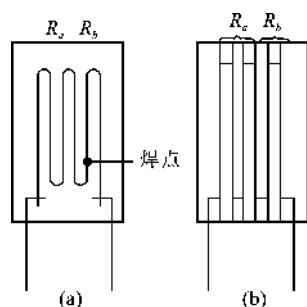


图 2-30 双丝自补偿应变片
(a)丝绕式; (b)短接式

片相似,但只能在选定的试件上使用。

(2) 桥路补偿法

桥路补偿法是利用电桥的和、差原理来达到补偿的目的。

① 双丝半桥式

这种应变片的结构与双丝自补偿应变片雷同。不同的是,敏感栅是由同符号电阻温度系数的两种合金丝串接而成,而且栅的两部分电阻 R_1 和 R_2 分别接入电桥的相邻两臂上:工作栅 R_1 接入电桥工作臂,补偿栅 R_2 外接串接电阻 R_B (不敏感温度影响)后接入电桥补偿臂;另两臂照例接入平衡电阻 R_3 和 R_4 ,如图 2-31 所示。当温度变化时,只要电桥工作臂和补偿臂的热输出相等或相近,就能达到热补偿目的,即:

$$\varepsilon_{1t} = \frac{\Delta R_{1t}}{K R_1} \approx \frac{\Delta R_{2t}}{K(R_2 + R_B)} = \varepsilon_{2t} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_B} \quad (2-68)$$

而外接补偿电阻为:

$$R_B \approx R_2 \left(\frac{\varepsilon_{2t}}{\varepsilon_{1t}} - 1 \right) \quad (2-69)$$

式中 ε_{1t} 、 ε_{2t} ——工作栅和补偿栅的热输出。

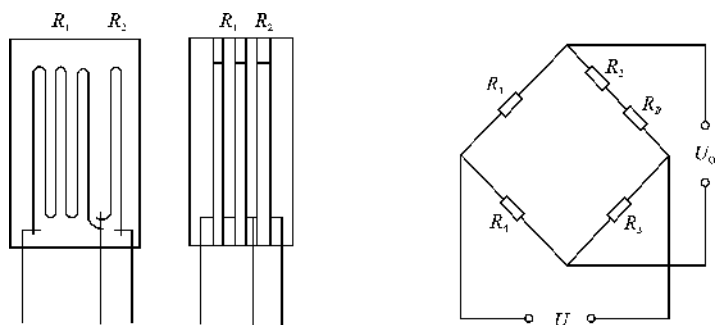


图 2-31 双丝半桥式热补偿应变片

这种热补偿法的最大优点是调整 R_B 值,不仅可使热补偿达到最佳状态,而且还适用于不同线膨胀系数的试件。缺点是对 R_B 的精度要求高,而且当有应变时,补偿栅同样起着抵消工作栅有效应变的作用,使应变片输出灵敏度降低。为此应变片必须使用 ρ 大、 a_t 小的材料作工作栅,选 ρ 小、 a_t 大的材料作补偿栅。

② 补偿块法

这种方法是用两个参数相同的应变片 R_1 、 R_2 。 R_1 贴在试件上,接入电桥工作臂, R_2 贴在与试件同材料、同环境温度、但不参与机械应变的补偿块上,接入电桥相邻臂作补偿臂(R_3 、 R_4 同样为平衡电阻),如图 2-32 所示。这样,补偿臂产生与工作臂相同的热输出,通过差接桥,起了补偿作用。这种方法简便,但补偿块的设置受到现场环境条件的限制。

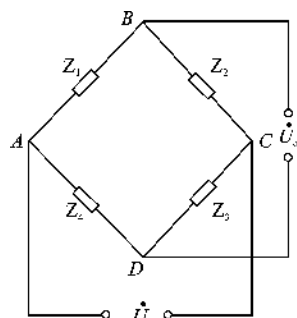


图 2-32 补偿块半桥热补偿应变片

③差动电桥补偿

差动电桥补偿巧妙地安装应变片而不需补偿并能得到灵敏度的提高,如图 2-33 所示。测悬梁的弯曲应变时,将两个应变片分别贴于上下两面对称位置, R_A 、 R_B 特性相同,所以两电阻变化值相同而符号相反。将 R_A 、 R_B 按图 2-19 接在 R_1 、 R_2 的位置,因电桥输出电压比单片时增加 1 倍。当梁上下温度一致时, R_B 与 R_A 可起温度补偿作用。这种方法的优点是简单可行,使用普通应变片可对各种试件在较大范围内进行补偿,因而最为常用。

④热敏电阻补偿

热敏电阻补偿电路如图 2-34 所示。热敏电阻 R_t 与应变片处在相同的温度下,当应变片的灵敏度随温度升高而下降时,热敏电阻 R_t 的阻值下降,使电桥的输入电压随温度升高而增加,从而提高电桥的输出电压。选择分流电阻 R_s 的值,可以使应变片灵敏度下降对电桥输出的影响得到很好的补偿。在上述常用方法的补偿原理基础上作进一步扩展,还可引出其他一些补偿方法。如在测量电桥输出端接入热敏元件补偿法,采用共基底双栅(或四栅)应变计,接成半桥(或全桥)的补偿法等等。

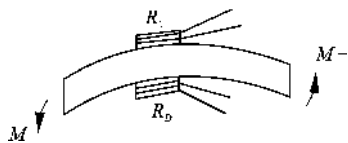


图 2-33 差动电桥补偿安装位置示意

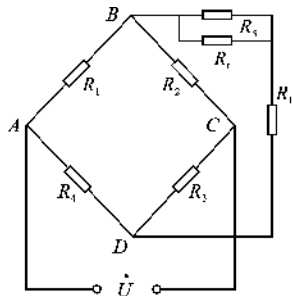


图 2-34 热敏电阻补偿电路

2.5 电阻应变片式传感器应用实例

2.5.1 电阻应变仪

电阻应变仪是利用应变片直接测量应变的专用仪器,在科研和工业生产中常常需要研究机械设备构件或组件承受应变的状况,测量构件形变时的应变力,如高压容器(高压气瓶、高压锅炉),生产过程中必须采用应变测量方法检测耐压和变形时压力。火炮生产需了解火炮发射时炮管形变,飞机导弹研制时要在特殊的“风洞”实验场中模拟高空状态下飞行时机身、机翼等各部件的形变情况。汽车制造需测试汽车底盘承压时的形变。电阻应变仪按测量应变力的频率可分为静态应变仪和动态应变仪,按应变力频率又可细分为:静态,5Hz;静态动态,几百赫;动态,5kHz;超动态,几十千赫。图 2-35 是交流电桥电阻应变仪原理框图,主要由电桥、振荡器、放大器、相敏检波器、滤波器、转换和显示电路组成。

电桥(半桥或全桥)用 400~2000Hz 高频正弦电压提供桥压,可测应变频率低于桥压频率的 10 倍,如桥压 20kHz,可测量 20~200Hz 频率应变力,电桥输出调幅调制波。放大器采用窄频带交流放大器,将电桥输出的调幅波进行放大,以满足相敏检波器的要求。振荡器产生

等幅正弦波,提供电桥电压和相敏检波器的参考电压。振荡频率(载波)一般要求不低于被测信号频率的6~10倍。相敏检波器,将放大后的调幅波,用检波器将它还原(解调)为被测应变信号波形。一般检波器只有单相电压(或电流)输出,不能区分双相信号,如果应变有拉应变和压应变,以中心(静止)位置为转折点,要求区分两边不同位置时,可通过相敏检波电路区分双相信号。相移器,相敏检波器的参考信号与被测信号有严格的相位关系,由移相电路实现。滤波器,相敏检波输出的被测信号是被低频应变信号调制的高频信号,包括被检测的低频信号外,还有高频信号,为了还原被检测的信号,必须用低通滤波器去掉高频分量,保留低频应变信号。

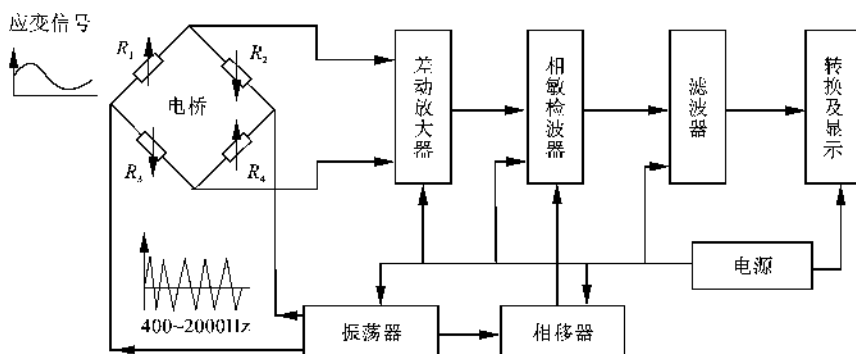


图 2-35 应变仪原理框图

2.5.2 电子衡器

随着技术的进步,由称重传感器制作的电子衡器已广泛地应用到各行各业,实现了对物料的快速、准确的称量,特别是随着微处理机的出现,工业生产过程自动化程度的不断提高,称重传感器已成为过程控制中的一种必需的装置,从以前不能称重的大型罐、料斗等重量计测以及吊车秤、汽车秤等计测控制,到混合分配多种原料的配料系统、生产工艺中的自动检测和粉粒体进料量控制等,都应用了称重传感器,目前,称重传感器几乎运用到了所有的称重领域,如高速定量分装系统。本系统由微机控制称重传感器的称重和比较,并输出控制信号,执行定值称量,控制外部给料系统的运转,实行自动称量和快速分装的任务。系统采用 MCS-51 单片机和 V/F 电压频率变换器等电子器件,其硬件电路框图如图 2-36 所示,用 89C51 作为中央处理器,BCD 拨码盘作为定值设定输入器,物料装在料斗里,其重量使传感器弹性体发生变形,输出与重量成正比的电信号,传感器输出信号经放大器放大后,输入 V/F 转换器进行 A/D 转换,转换成的频率信号直接送入微处理器中,其数字量由微机进行处理。微机一方面把物重的瞬时数字量送入显示电路,显示出瞬时物重,另一方面则进行称重比较,开启和关闭加料口、放料于箱中等一系列的称重定值控制。

在整个定值分装控制系统中,称重传感器是影响电子秤测量精度的关键部件,选用 GYL-3 应变式称重测力传感器。四片电阻应变片构成全桥桥路,在所加桥压不变的情况下,传感器输出信号与作用在传感器上的重力和供桥桥压成正比,而且,供桥桥压的变化直接影响电子秤的测量精度,所以要求桥压很稳定。毫伏级的传感器输出经放大后,变成了 0~10V

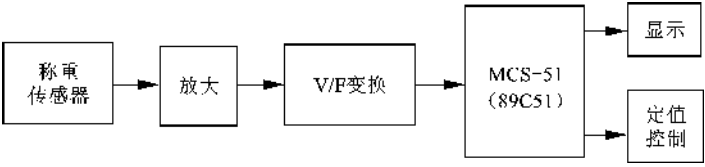


图 2 - 36 原理框图

的电压信号输出，送入 V/F 变换器进行 A/D 转换，其输出端输出的频率信号加到单片机的 T_1 上。

在微机内部由定时器 0 作计数定时，定时器 0 的定时时间由要求的 A/D 转换分辨率设定。定时器 1 的计数值反映了测量电压大小即物料的重量。在显示的同时，单片机还根据设定值与测量值进行定值判断。测量值与给定值进行比较，取差值提供 PID 运算，当重量不足，则继续送料和显示测量值。一旦重量相等或大于给定值，控制接口输出控制信号，控制外部给料设备停止送料，显示测量终值，然后发出回答令，表示该袋装料结束，可进行下袋的装料称重。

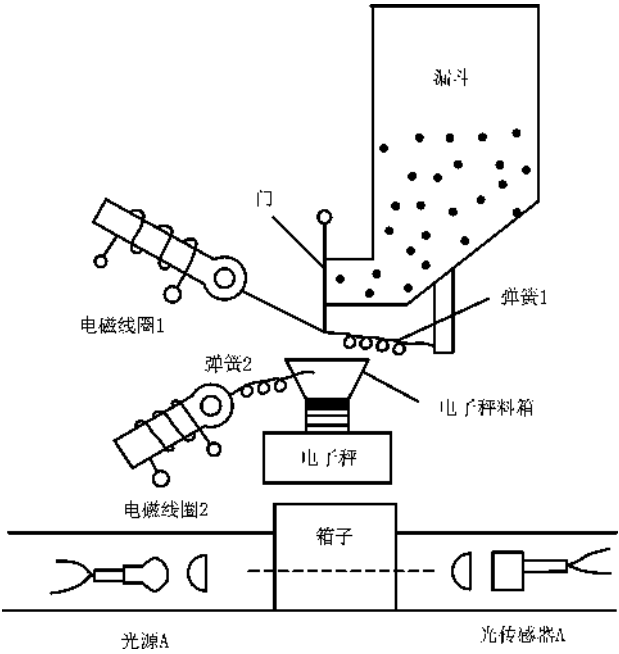


图 2 - 37 自动称重和装料装置

图 2 - 37 所示为自动称重和装料装置。每个装料的箱子或袋子沿传送带运动，直到装有料的电子秤下面，传送带停止运动，电磁线圈 2 通电，电子秤料斗翻转，使料全部倒入箱子或袋子中，当料倒完，传送带马达再次通电，将装满料的箱子或袋子移出，并保持传送带继续运行，直到下一次空袋或空箱切断光电传感器的光源，与此同时，电子秤料箱复位，电磁线圈 1 通电，漏斗给电子秤自动加料，重量由微机控制，当电子秤中的料与给定值相等时，

电磁线圈 1 断电, 弹簧力使漏斗门关上。装料系统开始下一个装料的循环。当漏斗中的料和传送带上的箱子足够多时, 这个过程可以持续不断地进行下去。必要时, 操作人员可以随时停止传送带, 通过拨码盘输入不同的给定值, 然后再启动, 即可改变箱或袋中的重量。本系统选用不同的传感器, 改变称重范围, 则可以用到水泥、食糖、面粉加工等行业的自动包装中。

2.5.3 平面膜片式压力传感器

图 2-38 所示为压力应变计原理电路。

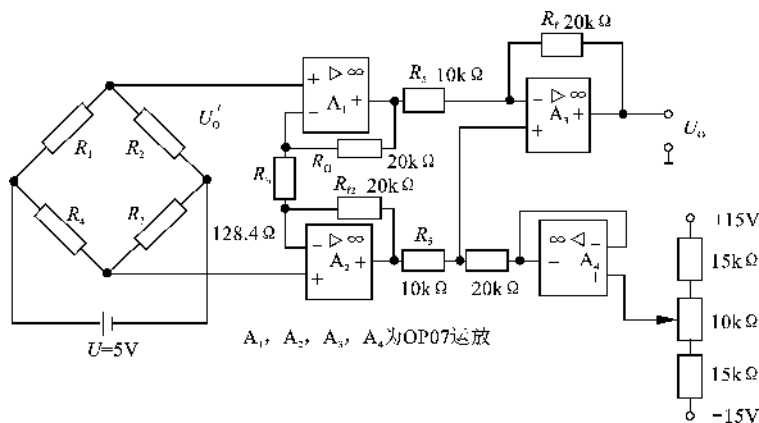


图 2-38 压力应变片

2.5.4 手提式数字电子秤

准 S 形称重传感器如图 2 - 39 所示。

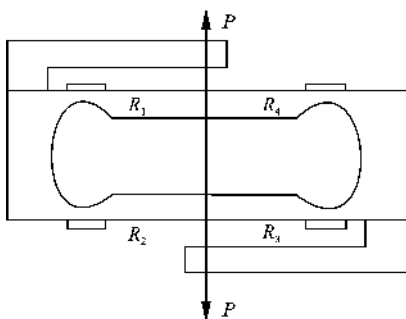


图 2-39 准 S 形称重传感器

习题 2

2 - 1 简述电阻应变片产生热输出(温度误差)的原因及其补偿方法。

2 - 2 试述应变电桥产生非线性的原因及消减非线性误差的措施。

2 - 3 如何用电阻应变片构成应变式传感器?对其各组成部分有何要求?

2 - 4 现有栅长为 3mm 和 5mm 两种丝式应变片,其横向效应系数分别为 5% 和 3%,欲用来测量泊松比 $\mu = 0.33$ 的铝合金构件在单向应力状态下的应力分布(其应力分布梯度较大)。试问:应选用哪一种应变片?为什么?

2 - 5 现选用丝栅长 10mm 的应变片检测弹性模量 $E = 2 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 、密度 $\rho = 7.8 \text{g/cm}^3$ 的钢构件承受谐振力作用下的应变,要求测量精度不低于 0.5%。试确定构件的最大应变频率限。

2 - 6 为什么常用等强度悬臂梁作为应变式传感器的力敏元件?现用一等强度梁:有效长 $l = 150 \text{mm}$,固支处宽 $b = 18 \text{mm}$,厚 $h = 5 \text{mm}$,弹性模量 $E = 2 \times 10^5 \text{N/mm}^2$,贴上 4 片等阻值、 $K = 2$ 的电阻应变片,并接入四等臂差动电桥构成称重传感器。试问:(1)悬臂梁上如何布片?又如何接桥?为什么?(2)当输入电压为 3V,有输出电压为 2mV 时的称重量为多少?

2 - 7 何谓压阻效应?扩散硅压阻式传感器与贴片型电阻应变式传感器相比有什么优点,有什么缺点?如何克服?

2 - 8 一应变片的电阻 $R = 120 \Omega$, $k = 2.05$,用作应变片为 $800 \mu\text{m/m}$ 的传感元件。(1)求 $\Delta R/R$ 和 ΔR ; (2)若电源电压 $U = 3 \text{V}$,惠斯登电桥初始平衡,求输出电压 U_0 。

2 - 9 在材料为钢的实心圆柱形试件上,沿轴线和圆周方向各贴一片电阻为 120Ω 的应变片 R_1 和 R_2 ,把这两片应变片接入差动电桥(如图 2 - 19),若钢的泊松系数 $\mu = 0.285$,应变片的灵敏度系数 $k = 2$,电桥电源电压 $U = 2 \text{V}$,当试件受轴向拉伸时,测得应变片的电阻变化 $\Delta R_1 = 0.48 \Omega$,求电桥的输出电压 U_0 为多少?

第3章 电感式传感器

本章要点

- 电感式传感器的定义、原理、种类、特性及用途
- 变磁阻式传感器的结构、原理及应用
- 差动变压器式传感器的结构、原理及应用
- 电涡流式传感器的结构、原理及应用

3.1 概 述

电感式传感器(inductance type transducer)是利用电磁感应原理将被测非电量如位移、压力、流量、振动等转换成线圈自感量 L 或互感量 M 的变化,再由测量电路转换为电压或电流的变化量输出的一种传感器。由铁芯和线圈构成的将直线或角位移的变化转换为线圈电感量变化的传感器,又称电感式位移传感器。这种传感器的线圈匝数和材料导磁系数都是一定的,其电感量的变化是由于位移输入量导致线圈磁路的几何尺寸变化而引起的。当把线圈接入测量电路并接通激励电源时,就可获得正比于位移输入量的电压或电流输出。

根据工作原理的不同,电感式传感器可分为变磁阻式传感器(variable reluctance transducer)、变压器式传感器(transformer type transducer)和电涡流式传感器(eddy current type transducer)等种类。

电感式传感器有以下特点:

- (1)工作可靠,寿命长;
- (2)灵敏度高,分辨率高(位移变化 $0.01\mu\text{m}$,角度变化 $0.1''$);
- (3)测量精度高,线性好(非线性误差可达 $0.05\% \sim 0.1\%$);
- (4)性能稳定,重复性好。

电感式传感器的主要缺点是灵敏度、线性度和测量范围相互制约,存在交流零位信号,传感器自身频率响应低,不适用于高频动态测量。

电感式传感器主要用于位移测量和可以转换成位移变化的机械量(如力、张力、压力、压差、加速度、振动、应变、流量、厚度、液位、比重、转矩等)的测量。这种传感器能实现信息的远距离传输、记录、显示和控制,在工业自动控制系统中被广泛采用。在实际应用中,这三种传感器多制成差动式,以便提高线性度和减小电磁吸力所造成的附加误差。

带有模拟输出的电感式接近传感器是一种测量式控制位置偏差的电子信号发生器,其用途非常广泛。例如:可测量弯曲和偏移,可测量振荡的振幅高度,可控制尺寸的稳定性,可控制定位,可控制对中心率或偏心率。

当金属物体接近模拟传感器的感应面时使模拟传感器 LC 振荡量衰减,利用这一点的变化量,转换为电流输出量,输出电流的大小直接和金属物体与模拟传感器感应面之间距离远

近成正比例关系。

电感传感器还可用作磁敏速度开关、齿轮链条测速等。该类传感器广泛应用于纺织、化纤、机床、机械、冶金、机车、汽车等行业的链轮齿速度检测，链输送带的速度和距离检测，齿轮链计数转速表及汽车防护系统的控制等。另外该类传感器还可用在给料管系统中小物体检测、物体喷出控制、断线监测、小零件区分、厚度检测和位置控制等。

电感式传感器种类很多，本章主要介绍变磁阻式、变压器式和电涡流式三种传感器的结构、原理及应用。

3.2 变磁阻式传感器

变磁阻式传感器是将位移、转速、加速度等非电物理量转换为磁阻变化的传感器。

3.2.1 工作原理

变磁阻式传感器的原理结构如图 3 - 1 所示。它由线圈、铁芯和衔铁三部分组成。铁芯和衔铁由导磁材料如硅钢片或坡莫合金制成，在铁芯和衔铁之间有气隙，气隙厚度为 δ ，传感器的运动部分与衔铁相连。当衔铁移动时，气隙厚度 δ 发生改变，引起磁路中磁阻变化，从而导致电感线圈的电感值变化，因此只要能测出这种电感量的变化，就能确定衔铁位移量的大小和方向。

根据电感定义，线圈中电感量可由下式确定：

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I} \quad (3-1)$$

式中 Ψ ——线圈总磁量；
 I ——通过线圈的电流；
 N ——线圈的匝数；
 Φ ——穿过线圈的磁通。

由磁路欧姆定律，得

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} \quad (3-2)$$

式中： R_m ——磁路总磁阻。对于变隙式传感器，因为气隙很小，所以可以认为气隙中的磁场是均匀的。

若忽略磁路磁损，则磁路总磁阻为：

$$R_m = \frac{L_1}{\mu_1 S_1} + \frac{L_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \quad (3-3)$$

式中 μ_1 ——铁芯材料的导磁率；
 μ_2 ——衔铁材料的导磁率；

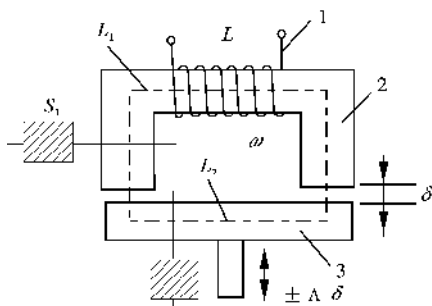


图 3 - 1 变磁阻式传感器
 1—线圈 2—铁芯(定铁芯)
 3—衔铁(动铁芯)

L_1 ——磁通通过铁芯的长度；

L_2 ——磁通通过衔铁的长度；

S_1 ——铁芯的截面积；

S_2 ——衔铁的截面积；

μ_0 ——空气的导磁率；

S_0 ——气隙的截面积；

δ ——气隙的厚度。

通常气隙磁阻远大于铁芯和衔铁的磁阻，即：

$$\frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \gg \frac{L_1}{\mu_1 S_1}; \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \gg \frac{L_2}{\mu_2 S_2}$$

则式(3-3)可近似为：

$$R_m = \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \quad (3-4)$$

联立式(3-1)、式(3-2)及式(3-4)，可得：

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2\delta} \quad (3-5)$$

上式表明，当线圈匝数为常数时，电感 L 仅仅是磁路中磁阻 R_m 的函数，只要改变 δ 或 S_0 均可导致电感变化，因此变磁阻式传感器又可分为变气隙厚度 δ 的传感器和变气隙面积 S_0 的传感器。使用最广泛的是变气隙厚度 δ 式电感传感器。

3.2.2 输出特性

设电感传感器初始气隙为 δ_0 ，初始电感量为 L_0 ，衔铁位移引起的气隙变化量为 $\Delta\delta$ ，从式(3-5)可知， L 与 δ 之间是非线性关系，特性曲线如图3-2所示，初始电感量为：

$$L_0 = \frac{\mu_0 S_0 N^2}{2\delta_0} \quad (3-6)$$

当衔铁上移 $\Delta\delta$ 时，传感器气隙减小 $\Delta\delta$ ，即 $\delta = \delta_0 - \Delta\delta$ ，则此时输出电感为 $L = L_0 + \Delta L$ ，代入式(3-5)并整理，得：

$$L = L_0 + \Delta L = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} = \frac{L_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \quad (3-7)$$

当 $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ 时，可将上式用泰勒级数展开成级数形式为：

$$L = L_0 + \Delta L = L_0 \left[1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right) + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (3-8)$$

由上式可求得电感增量 ΔL 和相对增量 $\Delta L/L_0$ 的表达式，即：

$$\Delta L = L_0 \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right) + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (3-9)$$

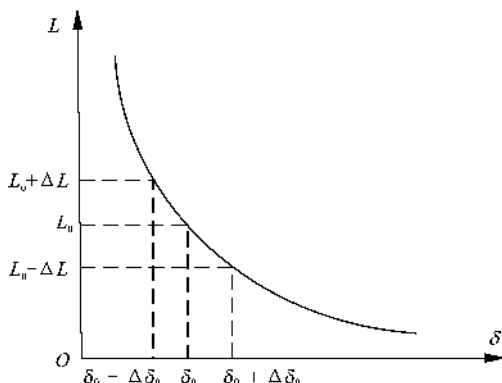


图 3-2 变隙式电感传感器的 $L-\delta$ 特性

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right) + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (3-10)$$

当衔铁上移 $\Delta \delta$ 时, 传感器气隙减小 $\Delta \delta$, 即 $\delta = \delta_0 - \Delta \delta$, 则此时输出电感为 $L = L_0 + \Delta L$, 代入式(3-6)式并整理, 得:

$$\Delta L = \Delta L_0 \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right) + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (3-11)$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right) + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (3-12)$$

对式(3-10)、(3-12)作线性处理, 忽略高次项, 可得:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

灵敏度:

$$K_0 = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\frac{\Delta \delta}{\delta_0}} = \frac{1}{\delta_0} \quad (3-13)$$

由此可见, 变间隙式电感传感器的测量范围与灵敏度及线性度相矛盾, 所以变隙式电感式传感器用于测量微小位移时是比较精确的。为了减小非线性误差, 实际测量中广泛采用差动变隙式电感传感器。

图3-3所示为差动变隙式电感传感器的原理结构图。由图可知, 差动变隙式电感传感器由两个相同的电感线圈 I、II 和磁路组成, 测量时, 衔铁通过导杆与被测位移量相连, 当被测体上下移动时, 导杆带动衔铁也以相同的位移上下移动, 使两个磁回路中磁阻发生大小相等, 方向相反的变化, 导致一个线圈的电感量增加, 另一个线圈的电感量减小, 形成差动形式。当衔铁往上移动 $\Delta \delta$ 时, 两个线圈的电感变化量 ΔL_1 、 ΔL_2 分别由式(3-9)及式(3-11)表示, 当差动使用时, 两个电感线圈接成交流电桥的相邻桥臂, 另两个桥臂由电阻组成, 电桥输出电压与 ΔL 有关, 其具体表达式为:

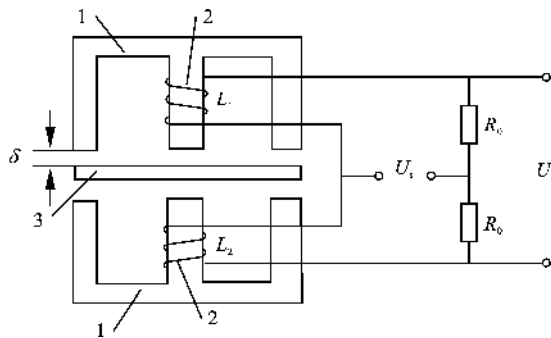


图3-3 差动变隙式电感传感器的结构原理

1—铁芯; 2—线圈; 3—衔铁

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 2L_0 \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right) + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right]$$

对上式进行线性处理, 忽略高次项得:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2 \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (3-14)$$

比较单线圈和差动两种变间隙式电感传感器的特性，可以得到如下结论：

① 差动式比单线圈式的灵敏度高一倍。

② 差动式的非线性项等于单线圈非线性项乘以 $(\Delta\delta/\delta_0)$ 因子，因为 $(\Delta\delta/\delta_0) \ll 1$ ，所以差动式的线性度得到明显改善。

为了使输出特性得到有效改善，构成差动的两个变隙式电感传感器在结构尺寸、材料、电气参数等方面均应完全一致。

3.2.3 测量电路

电感式传感器的测量电路有交流电桥式、交流变压器式以及谐振式等多种形式。

1. 交流电桥式测量电路

图3-4所示为交流电桥式测量电路，把传感器的两个线圈作为电桥的两个桥臂 Z_1 和 Z_2 ，另外两个相邻的桥臂用纯电阻代替，对于高Q值($Q = \omega L/R$)的差动式电感传感器，其输出电压：

$$U_o = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{j\omega \Delta L}{R_0 + j\omega L_0} \approx \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3-15)$$

式中 L_0 ——衔铁在中间位置时单个线圈的电感；

ΔL ——单线圈电感的变化量。

将 $\Delta L = L_0 (\Delta\delta/\delta_0)$ 代入式(3-15)得 $\dot{U}_o = \dot{U}_{AC} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$ ，可见电桥输出电压与 $\Delta\delta$ 有关。

2. 交流变压器式测量电路

交流变压器式测量电路如图3-5所示，电桥两臂 Z_1 、 Z_2 为传感器线圈阻抗，另外两桥臂为交流变压器次级线圈的 $1/2$ 阻抗。当负载阻抗为无穷大时，桥路输出电压：

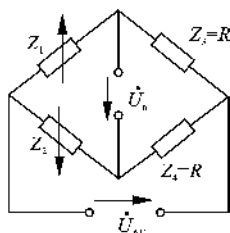


图 3-4 交流电桥测量电路

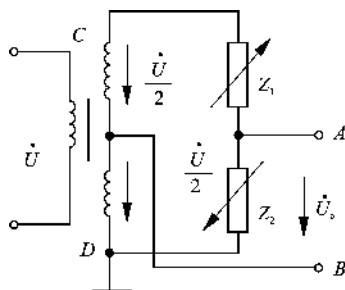


图 3-5 交流变压器式测量电路

$$\dot{U}_o = \frac{Z_1 \dot{U}}{Z_1 + Z_2} - \frac{\dot{U}}{2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{\dot{U}}{2} \quad (3-16)$$

当传感器的衔铁处于中间位置，即 $Z_1 = Z_2 = Z$ 时，有 $U_o = 0$ ，电桥平衡。当传感器衔铁上移时，即 $Z_1 = Z + \Delta Z$ ， $Z_2 = Z - \Delta Z$ ，此时：

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (3-17)$$

当传感器衔铁下移时, 则 $Z_1 = Z - \Delta Z$, $Z_2 = Z + \Delta Z$, 此时:

$$U_0 = -\frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = -\frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (3-18)$$

从式(3-17)及式(3-18)可知, 衔铁上下移动相同距离时, 输出电压的大小相等, 但方向相反, 由于 U 是交流电压, 输出指示无法判断位移方向, 必须配合相敏检波电路来解决。

3. 谐振式测量电路

谐振式测量电路有谐振式调幅电路, 如图 3-6 所示和谐振式调频电路如图 3-7 所示。

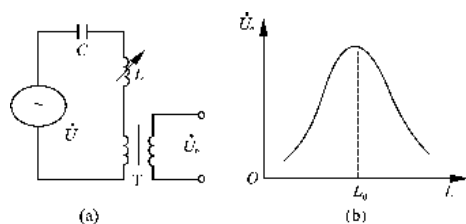


图 3-6 谐振式调幅电路

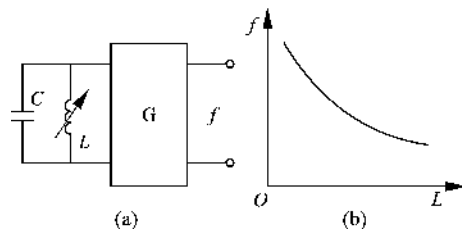


图 3-7 谐振式调频电路

在调幅电路中, 传感器电感 L 与电容 C 和变压器原边串联在一起, 接入交流电源, 变压器副边将有电压 $\dot{U}_0$ 输出, 输出电压的频率与电源频率相同, 而幅值随着电感 L 而变化。图 3-6(b)所示为输出电压 $\dot{U}_0$ 与电感 L 的关系曲线, 其中 L_0 为谐振点的电感值, 此电路灵敏度很高, 但线性差, 适用于线性要求不高的场合。

调频电路的基本原理是传感器电感 L 变化将引起输出电压频率的变化。一般是把传感器电感 L 和电容 C 接入一个振荡回路中, 其振荡频率

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

当 L 变化时, 振荡频率随之变化。根据 f 的大小即可测出被测量的值。图 3-7(b)表示 f 与 L 的特性, 它具有明显的非线性关系。

3.2.4 变磁阻式传感器的应用

图 3-8 所示是变隙电感式压力传感器的结构图。它由膜盒、铁芯、衔铁及线圈等组成, 衔铁与膜盒的上端连在一起。

当压力进入膜盒时, 膜盒的顶端在压力 P 的作用下产生与压力 P 大小成正比的位移。于是衔铁也发生移动, 从而使气隙发生变化, 流过线圈的电流也发生相应的变化, 电流表指示值就反映了被测压力的大小。

图 3-9 所示为变隙式差动电感压力传感器, 它主要由 C 形弹簧管、衔铁、铁芯和线圈等组成。

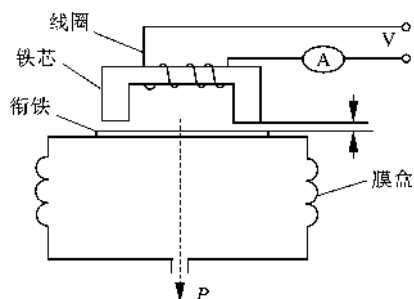


图 3-8 变隙电感式传感器结构图

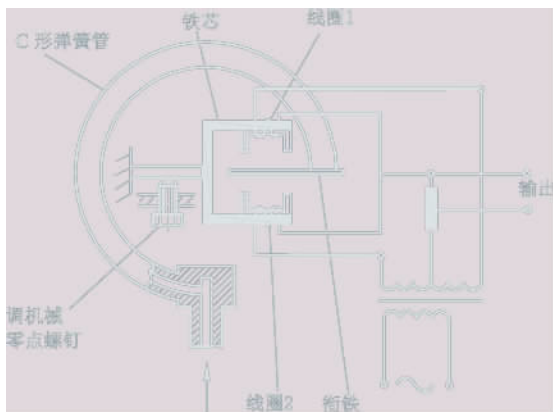


图 3-9 变隙式差动电感压力传感器

当被测压力进入C形弹簧管时，C形弹簧管产生变形，其自由端发生位移带动与自由端连接成一体衔铁运动，使线圈1和线圈2中的电感发生大小相等、符号相反的变化，即一个电感量增大，另一个电感量减小。电感的这种变化通过电桥电路转换成电压输出。由于输出电压与被测压力之间成比例关系，所以只要用检测仪表测量出输出电压，即可得知被测压力的大小。

3.3 差动变压器式传感器

把被测的非电量变化转换为线圈互感量变化的传感器称为互感式传感器。这种传感器是根据变压器的基本原理制成的，并且次级绕组都用差动形式连接，故称差动变压器式传感器。差动变压器结构形式较多，有变隙式、变面积式和螺线管式等，但其工作原理基本一样。非电量测量中，应用最多的是螺线管式差动变压器，它可以测量1~100mm范围内的机械位移，并具有测量精度高、灵敏度高、结构简单、性能可靠等优点。

3.3.1 工作原理

螺线管式差动变压器结构如图3-10所示，它由初级线圈、两个次级线圈和插入线圈中央的圆柱形铁芯等组成。

螺线管式差动变压器按线圈绕组排列的方式不同可分为一节、二节、三节、四节和五节等类型，如图3-11所示。一节式灵敏度高，三节式零点残余电压较小，通常采用的是二节式和三节式两类。

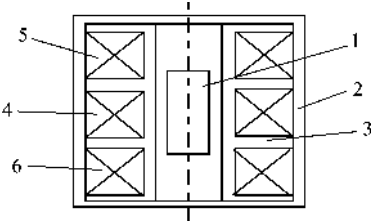


图 3 - 10 螺线管式差动变压器结构

1—活动衔铁；2—导磁外壳；
3—骨架；4—匝数为 N_1 的初级线圈；
5—匝数为 N_{2a} 的次级线圈；6—匝数为 N_{2b} 的次级线圈

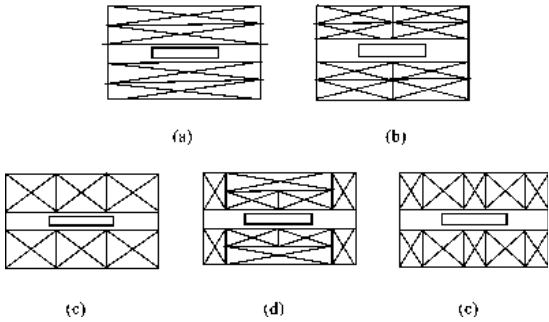


图 3 - 11 线圈排列方式

(a)一节式；(b)二节式；(c)三节式；
(d)四节式；(e)五节式

差动变压器式传感器中两个次级线圈反向串联，并且在忽略铁损、导磁体磁阻和线圈分布电容的理想条件下，其等效电路如图 3 - 12 所示。当初级绕组 N_1 加以激励电压 U_1 时，根据变压器的工作原理，在两个次级绕组 N_{2a} 和 N_{2b} 中便会产生感应电势 $\dot{E}_{2a}$ 和 $\dot{E}_{2b}$ 。如果工艺上保证变压器结构完全对称，则当活动衔铁处于初始平衡位置时，必然会使两互感系数 $M_1 = M_2$ 。根据电磁感应原理，将有 $\dot{E}_{2a} = \dot{E}_{2b}$ 。由于变压器两次级绕组反向串联，因而 $\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = 0$ ，即差动变压器输出电压为零。

活动衔铁向上移动时，由于磁阻的影响， N_{2a} 中磁通将大于 N_{2b} 中磁通，使 $M_1 > M_2$ ，因而 $\dot{E}_{2a}$ 增加，而 $\dot{E}_{2b}$ 减小。反之， $\dot{E}_{2b}$ 增加， $\dot{E}_{2a}$ 减小。因为 $\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = 0$ ，所以当 $\dot{E}_{2a}$ 、 $\dot{E}_{2b}$ 随着衔铁位移 x 变化时， $\dot{U}_2$ 也必将随 x 变化。图 3 - 13 给出了变压器输出电压 $\dot{U}_2$ 与活动衔铁位移 x 的关系曲线。实际上，当衔铁位于中心位置时，差动变压器输出电压并不等于零，我们把差动变压器在零位移时的输出电压称为零点残余电压，记作 $\dot{U}_x$ 。它的存在使传感器的输出特性不过零点，造成实际特性与理论特性不完全一致。

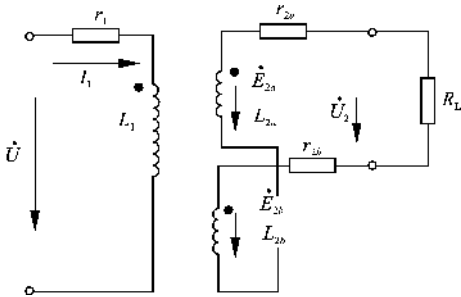


图 3 - 12 差动变压器等效电路

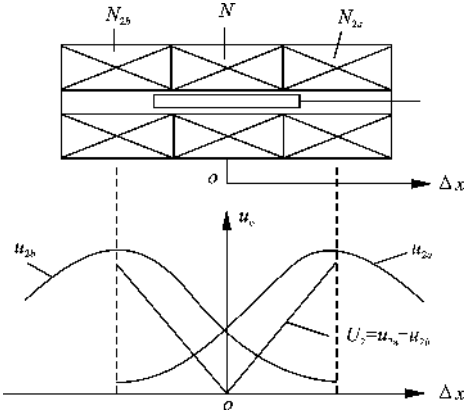


图 3 - 13 差动变压器的输出电压特性曲线

零点残余电压主要是由传感器的两次级绕组的电气参数与几何尺寸不对称，以及磁性材

料的非线性等问题引起的。零点残余电压的波形十分复杂,主要由基波和高次谐波组成。基波产生的主要原因是:传感器的两个次级绕组的电气参数和几何尺寸不对称,导致它们产生的感应电势的幅值不等、相位不同,因此不论怎样调整衔铁位置,两线圈中感应电势都不能完全抵消。高次谐波中起主要作用的是三次谐波,产生的原因是由于磁性材料磁化曲线的非线性(磁饱和、磁滞)。零点残余电压一般在几十毫伏以下,在实际使用时,应设法减小 U_x , 否则将会影响传感器的测量结果。

3.3.2 基本特性

差动变压器等效电路如图 3-12 所示。当次级开路时有:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1} \quad (3-19)$$

式中 ω ——激励电压 $\dot{U}_1$ 的角频率;

$\dot{U}_1$ ——初级线圈激励电压;

$\dot{I}_1$ ——初级线圈激励电流;

r_1 、 L_1 ——初级线圈直流电阻和电感。

根据电磁感应定律,次级绕组中感应电势的表达式分别为:

$$\dot{E}_{2a} = -j\omega M_1 \dot{I}_1; \dot{E}_{2b} = -j\omega M_2 \dot{I}_1$$

由于次级两绕组反向串联,且考虑到次级开路,则由以上关系可得:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = -\frac{j\omega(M_1 - M_2)\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1} \quad (3-20)$$

输出电压的有效值为:

$$\dot{U}_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)\dot{U}_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \quad (3-21)$$

下面分三种情况进行分析:

(1) 活动衔铁处于中间位置时, $M_1 = M_2 = M$, 故 $\dot{U}_2 = 0$

(2) 活动衔铁向上移动时, $M_1 = M + \Delta M$, $M_2 = M - \Delta M$, 故:

$$\dot{U}_2 = -\frac{2\omega\Delta M\dot{U}_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

与 $\dot{E}_{2a}$ 同极性。

(3) 活动衔铁向下移动时, $M_1 = M - \Delta M$; $M_2 = M + \Delta M$, 故:

$$\dot{U}_2 = -\frac{2\omega\Delta M\dot{U}_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

与 $\dot{E}_{2b}$ 同极性。

3.3.3 差动变压器式传感器测量电路

差动变压器输出的是交流电压,若用交流电压表测量,只能反映衔铁位移的大小,而不能反映移动方向。另外,其测量值中将包含零点残余电压。为了达到能辨别移动方向及消除零点残余电压的目的,实际测量时,常常采用差动整流电路和相敏检波电路。

1. 差动整流电路

这种电路是把差动变压器的两个次级输出电压分别整流，然后将整流的电压或电流的差值作为输出，图 3-14 给出了几种典型电路形式。图中(a)、(c)适用于交流负载阻抗，(b)、(d)适用于低负载阻抗，电阻 R_0 用于调整零点残余电压。

下面结合图 3-14(c)，分析差动整流电路的工作原理。

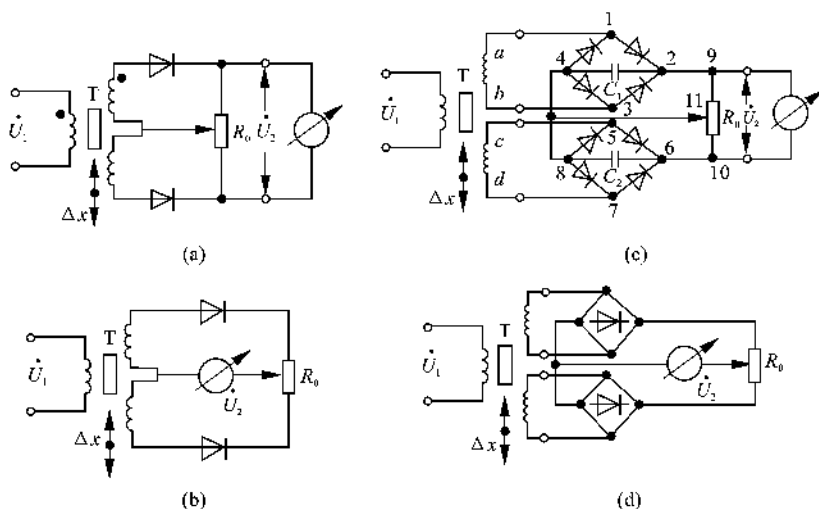


图 3-14 差动整流电路

从图 3-14(c)电路结构可知，不论两个次级线圈的输出瞬时电压极性如何，流经电容 C_1 的电流方向总是从 2 到 4，流经电容 C_2 的电流方向从 6 到 8，故整流电路的输出电压为：

$$U_2 = U_{24} - U_{68} \quad (3-22)$$

当衔铁在零位时，因为 $U_{24} = U_{68}$ ，所以 $U_2 = 0$ ；当衔铁在零位以上时，因为 $\dot{U}_{24} > \dot{U}_{68}$ ，则 $U_2 > 0$ ；而当衔铁在零位以下时，则有 $U_{24} < U_{68}$ ，则 $U_2 < 0$ 。

差动整流电路具有结构简单，不需要考虑相位调整和零点残余电压的影响，分布电容影响小和便于远距离传输等优点，因而获得广泛应用。

2. 相敏检波电路

电路如图 3-15 所示。 VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 为四个性能相同的二极管，以同一方向串联成一个闭合回路，形成环形电桥。输入信号 u_2 (差动变压器式传感器输出的调幅波电压) 通过变压器 T_1 加到环形电桥的一个对角线。参考信号 u_0 通过变压器 T_2 加入环形电桥的另一个对角线。输出信号 u_L 从变压器 T_1 与 T_2 的中心抽头引出。平衡电阻 R 起限流作用，避免二极管导通时变压器 T_2 的次级电流过大。 R_L 为负载电阻， u_0 的幅值要远大于输入信号 u_2 的幅值，以便有效控制四个二极管的导通状态，且 u_0 和差动变压器式传感器激磁电压 u_1 由同一振荡器供电，保证两者同频、同相(或反相)。

由图 3-16(a)、(c)、(d)可知，当位移 $\Delta x > 0$ 时， u_2 与 u_0 同频同相，当位移 $\Delta x < 0$ 时， u_2 与 u_0 同频反相。

$\Delta x > 0$ 时， u_2 与 u_0 为同频同相，当 u_2 与 u_0 均为正半周时，见图 3-15(a)，环形电桥中二极管 VD_1 、 VD_4 截止， VD_2 、 VD_3 导通，则可得图 3-15(b) 的等效电路。

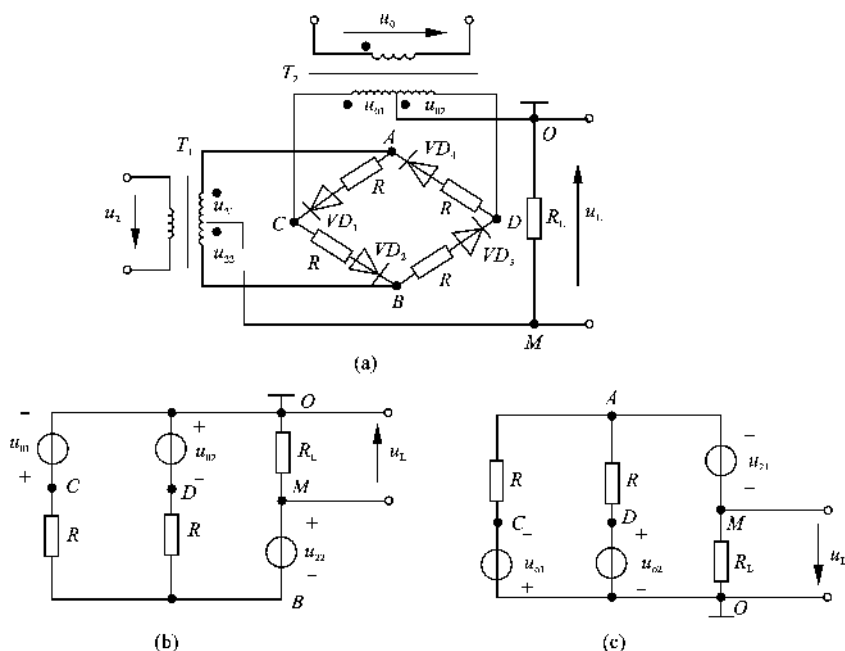


图 3-15 相敏检波电路

$$u_{10} = u_{20} = \frac{u_0}{2n_2}; u_{21} = u_{22} = \frac{u_2}{2n_1}$$

根据变压器的工作原理,考虑到 O、M 分别为变压器 T_1 、 T_2 的中心抽头,则有:

$$u_{01} = u_{02} = \frac{u_0}{2n_2}; u_{21} = u_{22} = \frac{u_0}{2n_1};$$

式中: n_1 、 n_2 为变压器 T_1 、 T_2 的变比。

采用电路分析的基本方法,可求得图 3-15(b) 所示电路的输出电压 u_L 的表达式:

$$u_L = \frac{R_L u_2}{n_1 (R_1 + 2R_L)} \quad (3-23)$$

同理,当 u_2 与 u_0 均为负半周时,二极管 VD_2 、 VD_3 截止, VD_1 、 VD_4 导通。其等效电路如图 3-15(c) 所示,输出电压 u_L 表达式与式(3-23)相同,说明只要

位移 $\Delta x > 0$, 不论 u_2 与 u_0 是正半周还是负半周,负载 R_L 两端得到的电压 u_L 始终为正。

当 $\Delta x < 0$ 时 u_2 与 u_0 为同频反相。采用上述相同的分析方法不难得到:当 $\Delta x < 0$ 时,不论 u_2 与 u_0 是正半周还是负半周,负载电阻 R_L 两端得到的输出电压 u_L 表达式总是为:

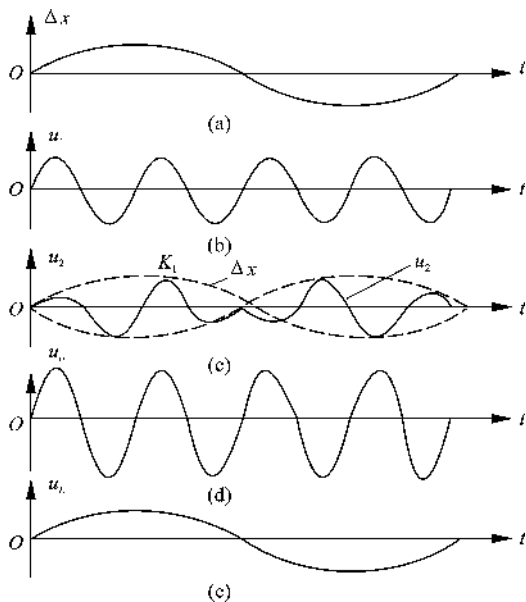


图 3-16 波形图

$$u_L = - \frac{R_L u_2}{n_1 (R_1 + 2R_L)} \quad (3-24)$$

所以上述相敏检波电路输出电压 u_L 的变化规律充分反映了被测位移量的变化规律, 即 u_L 的值反映位移 Δx 的大小, 而 u_L 的极性则反映了位移 Δx 的方向。

3.3.4 差动变压器式传感器的应用

差动变压器式传感器可以直接用于位移测量, 也可以测量与位移有关的任何机械量, 如振动、加速度、应变、比重、张力和厚度等。

图 3-17 所示为差动变压器式加速度传感器的结构示意图。它由悬臂梁 1 和差动变压器 2 构成。测量时, 将悬臂梁底座及差动变压器的线圈骨架固定, 而将衔铁的 A 端与被测振动体相连。当被测体带动衔铁以 $\Delta x(t)$ 振动时, 导致差动变压器的输出电压也按相同规律变化。

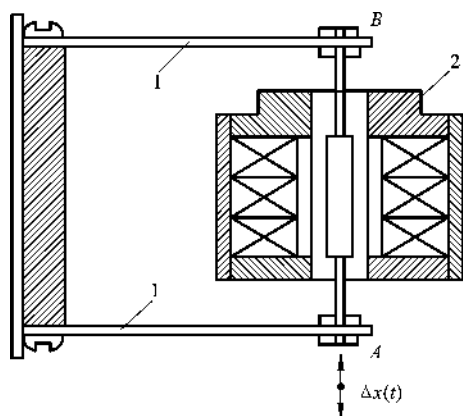


图 3-17 差动变压器式加速度传感器原理图

图 3-18 所示为半桥式电感传感器用于微小位移检测的调节电路。利用 AD698 与半桥式差动电感传感器联合使用, 可以高精度地将机械位移信号转换成单极性或双极性直流电压信号输出进行位移测量。经对 2mm 量程的半桥式位移传感器实际使用, 检测精度达 $0.1\mu\text{m}$ 。该变送电路运行稳定, 精度高, 适用于各种量程的半桥式电感位移传感器, 具有很高的实用价值。

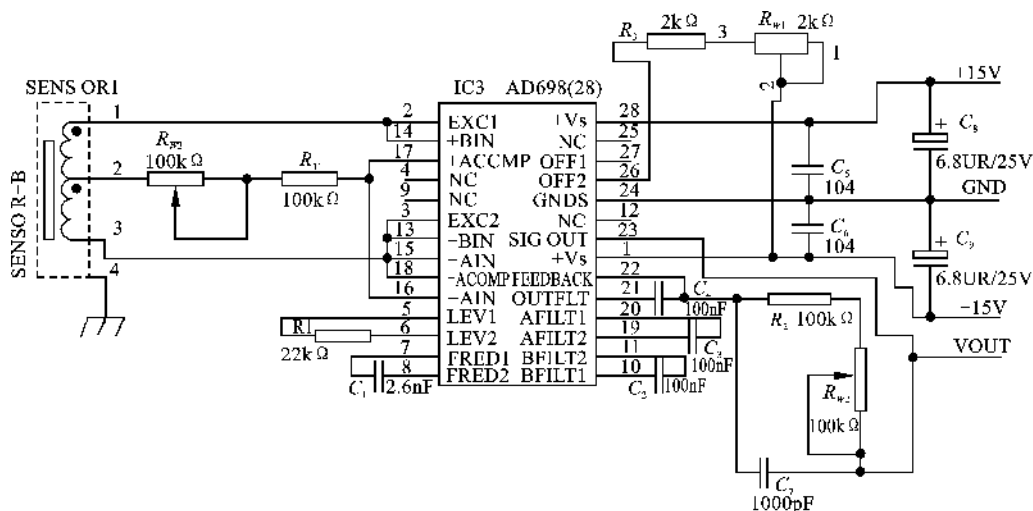


图 3-18 半桥式电感位移传感器调节电路

3.4 电涡流式传感器

根据法拉第电磁感应原理,块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中作切割磁力线运动时,导体内将产生呈旋涡状的感应电流,此电流叫电涡流,以上现象称为电涡流效应。

根据电涡流效应制成的传感器称为电涡流式传感器。按照电涡流在导体内的贯穿情况,此传感器可分为高频反射式和低频透射式两类,但从基本工作原理上来说仍是相似的。电涡流式传感器最大的特点是能对位移、厚度、表面温度、速度、应力、材料损伤等进行非接触式连续测量,另外还具有体积小、灵敏度高、频率响应宽等特点,应用极其广泛。

利用电涡流效应将位移等非电被测量转换为线圈的电感或阻抗变化的变磁阻式传感器。电涡流效应是指金属导体置于交变磁场中会产生电涡流,且该电涡流所产生磁场的方向与原磁场方向相反的一种物理现象。电涡流传感器的敏感元件是线圈,当给线圈通以交变电流并使它接近金属导体时,线圈产生的磁场就会被导体电涡流产生的磁场部分抵消,使线圈的电感量、阻抗和品质因数发生变化。这种变化与导体的几何尺寸、导电率、导磁率有关,也与线圈的几何参量、电流的频率和线圈到被测导体间的距离有关。如果使上述参量中的某一个变动,其余皆不变,就可制成各种用途的传感器,能对表面为金属导体的物体进行多种物理量的非接触测量。这种传感器的优点是结构简单、频率响应宽、灵敏度高、测量线性范围大、抗干扰能力强、体积小等,它是一种很有发展前途的传感器。电涡流式传感器按用途可分为测量位移、接近度和厚度的传感器;按结构可分为变间隙型、变面积型、螺管型和低频透射型4类。

(1)变间隙型 这种传感器结构很简单,主要元件是一个固定于传感器端部的线圈。当被测导体与线圈之间的间隙发生变化时,就引起线圈电感、阻抗和品质因数变化,从而能在接到线圈上的测量电路内得到正比于间隙变化的电流或电压变化。为改善性能可在线圈内加入磁芯。

(2)变面积型 这种传感器由绕在扁矩形框架上的线圈构成,它利用被测导体和传感器线圈之间相对覆盖面积的变化所引起的电涡流效应强弱的变化来测量位移。为补偿间隙变化引起的误差常使用两个串接的线圈,置于被测物体的两边。它的线性测量范围比变间隙型的大,而且线性度较高。

(3)螺管型 这种传感器由螺管和插入螺管的短路套筒组成,套筒与被测物体相连。套筒沿轴向移动时,电涡流效应引起螺管阻抗变化。这种传感器有较好的线性度,但是灵敏度较低,具有与螺管型电感式传感器(见电感式传感器)相似的特性,但没有铁损。

(4)低频透射型 它由分别位于被测金属板材两面的发射线圈和接收线圈组成,适于测量金属板材的厚度。发射线圈 L_1 接到振荡器上后所产生的磁力线穿过金属板 M ,于是在接收线圈 L_2 两端产生感应电压 u_2 。由于金属板内产生电涡流使到达 L_2 的磁力线减小。金属板的厚度 δ 越大,透射的磁力线越少,因而 u_2 也就越小。 u_2 与 δ 之间呈指数变化关系: $u_2 \propto e^{-\delta/h}$,式中 h 为磁力线的贯穿深度。贯穿深度取决于激励频率,为使贯穿深度大于板材厚度,要将频率选得低些。频率低还可改善线性度。激励频率一般选在 500Hz 左右。

电涡流式传感器能实现非接触式测量,而且是根据与被测导体的耦合程度来测量,因此可以通过灵活设计传感器的构形和巧妙安排它与被测导体的布局来达到各种应用的目的。在

测量位移方面,除可直接测量金属零件的动态位移、汽轮机主轴的轴向窜动等位移量外,它还可测量如金属材料的热膨胀系数、钢水液位、纱线张力、流体压力、加速度等可变换成位移量的参量。在测量振动方面,它是测量汽轮机、空气压缩机转轴的径向振动和汽轮机叶片振幅的理想器件。还可以用多个传感器并排安置在轴侧,并通过多通道指示仪表输出至记录仪,以测量轴的振动形状并绘出振动图。在测量转速方面,只要在旋转体上加工或加装一个有凹缺口的圆盘状或齿轮状的金属体,并配以电涡流传感器,就能准确地测出转速。此外,利用导体的电阻率与温度的关系,保持线圈与被测导体之间的距离及其他参量不变,就可以测量金属材料的表面温度,还能通过接触气体或液体的金属导体来测量气体或液体的温度。电涡流测温是非接触式测量,适用于测低温到常温的范围,且有不受金属表面污物影响和测量快速等优点。保持传感器与被测导体的距离不变,还可实现电涡流探伤。探测时如果遇到裂纹,导体电阻率和导磁率就发生变化,电涡流损耗,从而输出电压也相应改变。通过对这些信号的检验就可确定裂纹的存在和方位。电涡流传感器还可用作接近度传感器和厚度传感器以及用于金属零件计数、尺寸检验、粗糙度检测和制作非接触连续测量式硬度计。

3.4.1 工作原理

图 3 - 19 为电涡流式传感器的原理图,该图由传感器线圈和被测导体组成线圈——导体系统。

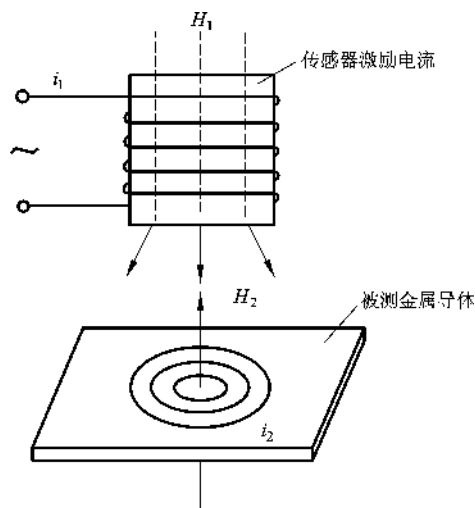


图 3 - 19 电涡流传感器原理图

根据法拉第定律,当传感器线圈通以正弦交变电流 I_1 时,线圈周围空间必然产生正弦交变磁场 H_1 ,使置于此磁场中的金属导体中感应电涡流 I_2 , I_2 又产生新的交变磁场 H_2 。根据楞次定律, H_2 的作用将反抗原磁场 H_1 ,导致传感器线圈的等效阻抗发生变化。由上可知,线圈阻抗的变化完全取决于被测金属导体的电涡流效应。而电涡流效应既与被测体的电阻率 ρ 、磁导率 μ 以及几何形状有关,又与线圈几何参数、线圈中激磁电流频率有关,还与线圈与导体间的距离 x 有关。因此,传感器线圈受电涡流影响时的等效阻抗 Z 的函数关系式为:

$$Z = f(\rho, \mu, r, f, x) \quad (3 - 25)$$

式中 r ——线圈与被测体的尺寸因子。

如果保持上式中其他参数不变,而只改变其中一个参数,传感器线圈阻抗 Z 就仅仅是这个参数的单值函数。通过与传感器配用的测量电路测出阻抗 Z 的变化量,即可实现对该参数的测量。

3.4.2 基本特性

电涡流传感器简化模型如图 3-20 所示。模型中把在被测金属导体上形成的电涡流等效成一个短路环,即假设电涡流仅分布在环体之内,模型中 h 由以下公式求得:

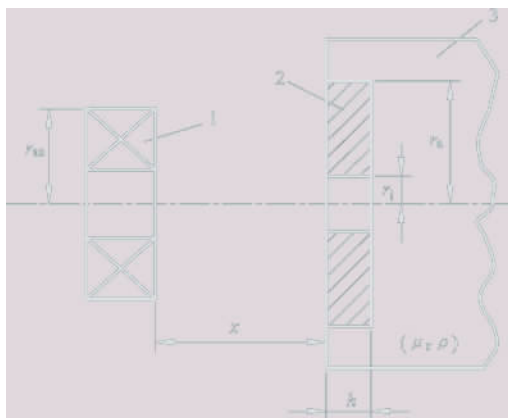


图 3-20 电涡流传感器简化模型

1—传感器线圈；2—短路环；3—被测金属导体

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} \quad (3-26)$$

式中： f ——线圈激磁电流的频率。

根据简化模型,可画出等效电路如图 3-21 所示。图中 R_2 为电涡流短路环等效电阻,其表达式为:

$$R_2 = \frac{2\pi\rho}{h \ln \frac{r_n}{r_1}} \quad (3-27)$$

根据基尔霍夫第二定律,可列出如下方程:

$$R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega L_2 I_2 = U_1 \quad (3-28)$$

式中 ω ——线圈激磁电流角频率;

R_1 、 L_1 ——线圈电阻和电感;

L_2 ——短路环等效电感;

R_2 ——短路环等效电阻。

由式(3-27)和式(3-28)解得等效阻抗 Z 的表达式为:

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = R_1 + \frac{\omega_2 M_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j\omega [L_1 - \frac{\omega_2 M_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2] = R_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (3-29)$$

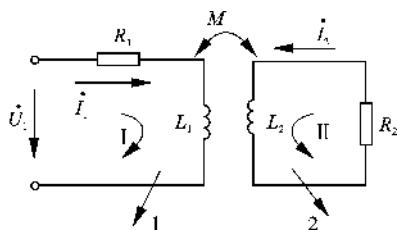


图 3-21 电涡流传感器等效电路图

1—传感器线圈；2—电涡流短路环电路

式中 R_{eq} ——线圈受电涡流影响后的等效电阻；

L_{eq} ——线圈受电涡流影响后的等效电感。

线圈的等效品质因数 Q 值为：

$$Q = \frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \quad (3-30)$$

综上所述：根据电涡流式传感器的简化模型和等效电路，运用电路分析的基本方法得到的式(3-29)和式(3-30)，即为电涡流的基本特性。

3.4.3 电涡流形成范围

1. 电涡流的径向形成范围

线圈-导体系统产生的电涡流密度既是线圈与导体间距离 x 的函数，又是沿线圈半径方向 r 的函数。当 x 一定时，电涡流密度 J 与半径 r 的关系曲线见图 3-22 所示。

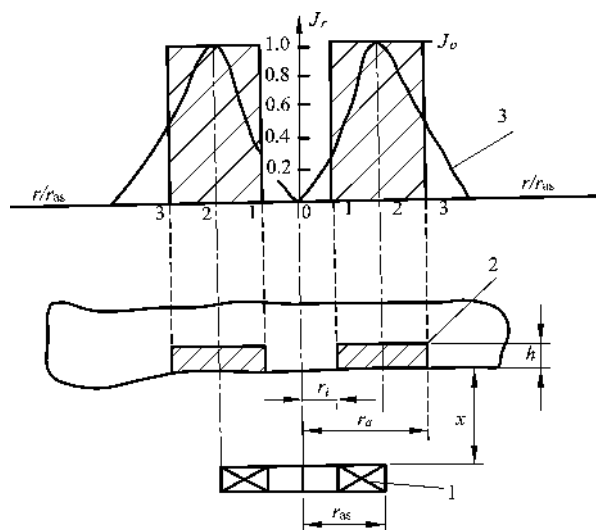


图 3-22 电涡流密度 J 与半径 r 的关系图

1—线圈；2—电涡流环；3—电涡流密度曲线

由图可知(图中 J_o 为金属导体表面电涡流密度，即电涡流密度最大值。 J_r 为半径 r 处的金属导体表面电涡流密度)：

①电涡流径向形成的范围大约在传感器线圈外径 r_{as} 的 1.8 ~ 2.5 倍范围内，且分布不均匀；②电涡流密度在短路环半径 $r=0$ 处为零；③电涡流的最大值在 $r=r_{as}$ 附近的一个狭窄区域内；④可以用一个平均半径为 r_{as} ($r_{as} = (r_i + r_a)/2$) 的短路环来集中表示分散的电涡流(图中阴影部分)。

2. 电涡流强度与距离的关系

理论分析和实验都已证明，当 x 改变时，电涡流密度发生变化，即电涡流强度随距离 x 的变化而变化。根据线圈—导体系统的电磁作用，可以得到金属导体表面的电涡流强度为：

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{1-x}{\sqrt{x^2 + r_{ax}^2}} \quad (3-31)$$

式中 I_1 ——线圈激励电流；
 I_2 ——金属导体中等效电流；
 x ——线圈到金属导体表面距离；
 r_{ar} ——线圈外径。

根据上式作出归一化曲线，如图 3-23 所示。

以上分析表明：

① 电涡强度与距离 x 呈非线性关系，且随着 x/r_{as} 的增加而迅速减小。

② 当利用电涡流式传感器测量位移时，只有在 x/r_{as} (一般取 0.05 ~ 0.15) 的范围才能得到较好的线性和较高的灵敏度。

3. 电涡流的轴向贯穿深度

由于趋肤效应，电涡流沿金属导体纵向的 H_1 分布是不均匀的，其分布按指数规律衰减，可用下式表示：

$$J_d = J_0 e^{-d/k} \quad (3-32)$$

式中 d ——金属导体中某一点至表面的距离；
 J_d ——沿 H_1 轴向 d 处的电涡流密度；
 J_0 ——金属导体表面电涡流密度，即电涡流密度最大值；
 h ——电涡流轴向贯穿深度(趋肤深度)。

3.4.4 电涡流式传感器的应用

1. 低频透射式涡流厚度传感器

图 3-24 所示为透射式涡流厚度传感器结构原理图。在被测金属的上方设有发射传感器线圈 L_1 ，在被测金属板下方设有接收传感器线圈 L_2 。当在 L_1 上加低频电压 $\dot{U}_1$ 时，则 L_1 上产生交变磁通 ϕ_1 ，若两线圈间无金属板，则交变磁场直接耦合至 L_2 中， L_2 产生感应电压 $\dot{U}_2$ 。如果将被测金属板放入两线圈之间，则 L_1 线圈产生的磁通将导致在金属板中产生电涡流。

此时磁场能量受到损耗，到达 L_2 的磁通将减弱为 ϕ_1' ，从而使 L_2 产生的感应电压 $\dot{U}_2$ 下降。金属板越厚，涡流损失就越大， $\dot{U}_2$ 电压就越小。因此，可根据 $\dot{U}_2$ 电压的大小得知被测金属板的厚度，透射式涡流厚度传感器检测范围可达 1 ~ 100mm，分辨率为 0.1 μ m，线性度为 1%。

2. 高频反射式涡流厚度传感器

图 3-25 所示是高频反射式涡流测厚仪测试系统原理图。为了克服带材不够平整或运行过程中上下波动的影响，在带材的上、下两侧对称地设置了两个特性完全相同的涡流传感器

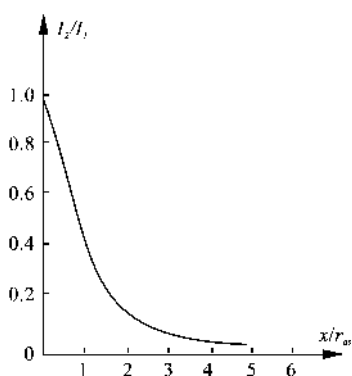


图 3-23 电涡流强度与距离归一化曲线

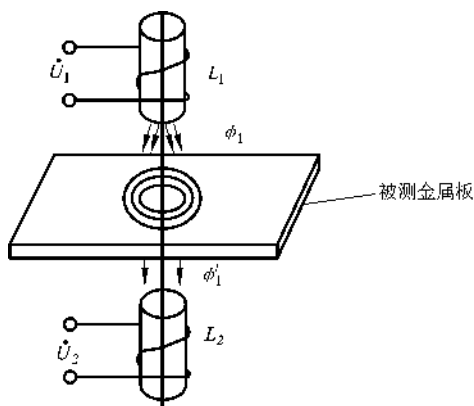


图 3-24 透射式涡流厚度传感器结构原理图

S_1 、 S_2 。 S_1 、 S_2 与被测带材表面之间的距离分别为 x_1 和 x_2 。若带材厚度不变，则被测带材上、下表面之间的距离总有 $x_1 + x_2 = \text{常数}$ 的关系存在。两传感器的输出电压之和为 $2U_0$ ，数值不变。如果被测带材厚度改变量为 $\Delta\delta$ ，则两传感器与带材之间的距离也改变了一个 $\Delta\delta$ ，两传感器输出电压此时为 $2\dot{U}_0 + \Delta\dot{U}$ 。 $\Delta\dot{U}$ 经放大器放大后，通过指示仪表电路即可指示出带材的厚度变化值。带材厚度给定值与偏差指示值的代数数和就是被测带材的厚度。

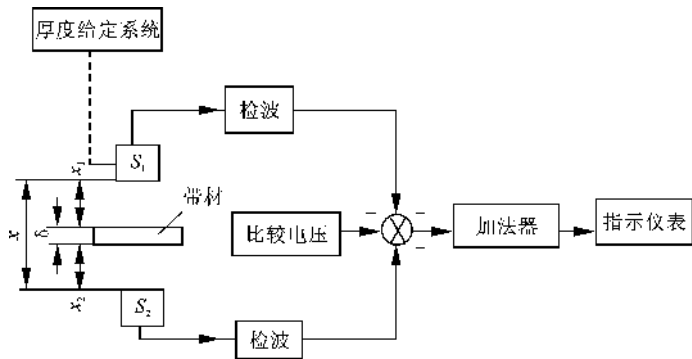


图 3 - 25 高频反射式涡流测厚仪测试系统图

3. 电涡流式转速传感器

图 3 - 26 所示为电涡流式转速传感器工作原理图。在软磁材料制成的输入轴上加工一键槽，在距输入表面 d_0 处设置电涡流传感器，输入轴与被测旋转轴相连。

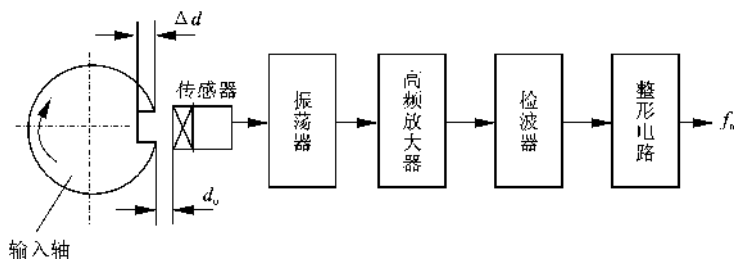


图 3 - 26 电涡流式转速传感器工作原理图

当被测旋转轴转动时，输出轴的距离发生 $d_0 + \Delta d$ 的变化。由于电涡流效应，这种变化将导致振荡谐振回路的品质因素变化，使传感器线圈电感随 Δd 的变化而发生变化，它们将直接影响振荡器的电压幅值和振荡频率。因此，随着输入轴的旋转，从振荡器输出的信号中包含有与转数成正比的脉冲频率信号。该信号由检波器检出电压幅值的变化量，然后经整形电路输出脉冲频率信号 f_n 。该信号经电路处理便可得到被测转速。

这种转速传感器可实现非接触式测量，抗污染能力很强，可安装在旋转轴近旁长期对被测转速进行监视。最高测量转速可达 600000r/min 。

习题3

3-1 分析比较变磁阻式自感传感器、差动变压器式互感传感器和电涡流传感器的工作原理和灵敏度。

3-2 试设计一个测量空气压缩机主轴径向振动的传感器和测量系统，画出原理框图并简述工作过程。

3-3 某线性差动变压器式传感器激励电源工作频率为 200Hz，峰-峰电压为 6V，若衔铁运动频率为 20Hz 的正弦波，它的位移幅值为 $\pm 2\text{mm}$ ，已知传感器的灵敏度为 2V/mm ，试画出激励电压、输入位移和输出电压波形，并画出适当的测量电路。

3-4 什么是电涡流？电涡流传感器为什么属于电感传感器？（提示：从其等效电路的阻抗计算来说明。）

第 4 章 电容式传感器

本章要点

- 电容式传感器的定义、作用、种类和应用场合
- 电容式传感器的工作原理
- 变极距型传感器的结构、工作原理及调节电路设计
- 变面积型电容式传感器的结构、工作原理及调节电路设计
- 变介质型电容式传感器的结构、工作原理及调节电路设计

4.1 概 述

电容式传感器是将被测量如尺寸、位移、压力等非电量的变化转化成电容量的变化的一种传感器。目前电容式传感器已在位移、振动、角度、加速度等机械量的精密测量,以及压力、差压、液面、料面、成分含量等方面的测量得到了广泛应用。电容式传感器的精度和稳定性也日益提高。作为一种频响宽、可非接触测量的传感器,电容式传感器应用广泛,有着很好的发展前景。

电容式传感器的优点是:结构简单,体积小,分辨率高;可实现非接触测量;动态响应好;温度稳定性好,本身发热极小;能在高温辐射和强振动等恶劣环境下工作。

其缺点是:电容量小(一般为几十到几百微法);功率小,输出阻抗高,因此,负载能力差,易受外界干扰产生不稳定现象。

如图 4-1 所示为各种形式的电容式传感器。

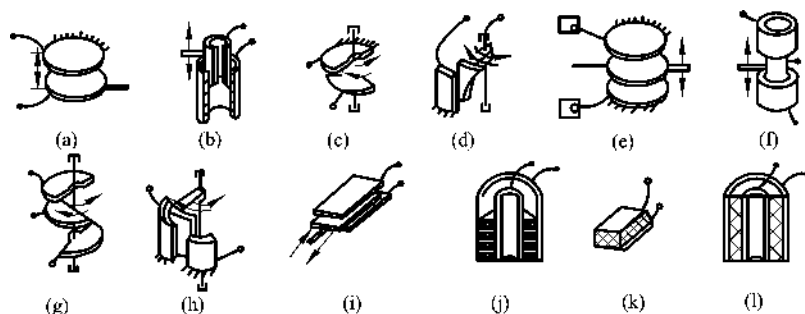


图 4-1 各种形式的电容式传感器

4.2 电容式传感器的工作原理和结构

电容式传感器的基本原理是基于物体间的电容量与其结构参数之间的关系。由绝缘介质分开,两个平行金属板组成的平板电容器,如图4-2所示。

由物理学可知,如果不考虑边缘效应,其电容量为:

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{\delta} \quad (4-1)$$

式中, S 为极板相对覆盖面积, δ 为两平行极板间距离, ε_r 为极板间介质相对介电常数, ε_0 为真空介电常数; ε 为电容极板间介质的介电常数,且满足 $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ 。

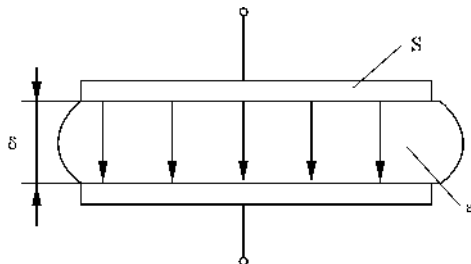


图4-2 平行板电容器结构示意图

当被测参数变化使得式(4-1)中的 S 、 δ 或 ε 发生变化时,电容量 C 也随之变化。如果保持其中两个参数不变,若仅改变其中一个参数,就可把该参数的变化转换为电容量的变化 ΔC ,这就组成了电容式传感器。在实际使用中,电容式传感器常以改变平行板间距来进行测量,因为这样获得的测量灵敏度高于改变其他参数的电容式传感器的灵敏度。改变平行极板间距 δ 的传感器可以测量微米数量级的位移,改变面积 S 的传感器则适用于测量厘米级的位移,改变介电常数式的传感器适用于液面和厚度的测量。

根据上述原理可知,电容式传感器有三种基本类型,即变极距型(变间隙型)、变面积型和变介质型。而它们的电极形状又有平板型、圆柱型和球平面型三种。

4.2.1 变极距型电容传感器

如图4-3所示为该传感器的结构原理图。

图4-3中,1为固定极板;2为可动极板,其位移是被测量变化引起的,初始位移为 δ 。当可动极板向上移动时,设初始电容为 C_0 ,则电容量增大 ΔC 后,电容为:

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\varepsilon S}{\delta - \Delta\delta} = \frac{\varepsilon S}{\delta} \frac{1}{1 - \Delta\delta/\delta} = C_0 \frac{(1 + \Delta\delta/\delta)}{1 - (\Delta\delta/\delta)^2} \quad (4-2)$$

式(4-2)说明,传感器的输出特性 $C = f(\delta)$ 不是线性关系,而是如图4-4成非线性关系。但当极距的变化远小于极板的初始距离,即 $\Delta\delta/\delta \ll 1$ 时, $1 - (\Delta\delta/\delta)^2 \approx 1$,上式可以简化为:

$$C \approx C_0 (1 + \Delta\delta/\delta) \quad (4-3)$$

此时可认为 C 与 $\Delta\delta$ 呈近似线性关系,所以变极距型电容式传感器只有在 $\Delta\delta/\delta$ 很小时,才有近似的线性输出。

另外,在 δ 较小时,对于同样的 $\Delta\delta$ 变化所

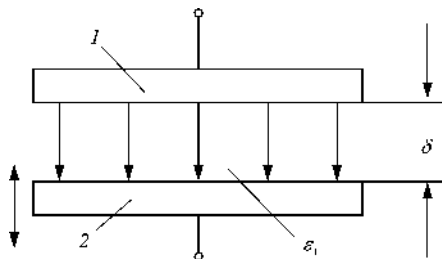


图4-3 变极距型电容传感器结构原理图

1—固定极板; 2—可动极板

引起的 ΔC 可以增大,从而使传感器灵敏度提高。但 δ 过小,容易引起电容器击穿或短路。为此,极板间可采用高介电常数的材料(云母、塑料膜等)作介质,如图 4-5 所示。

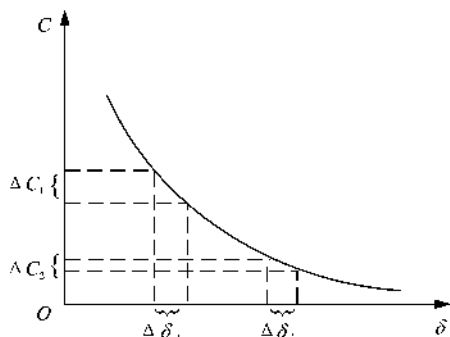


图 4-4 电容量与极板间距离的关系

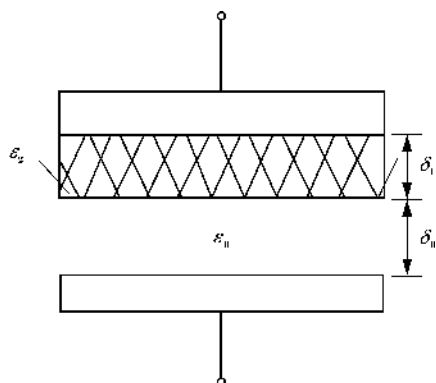


图 4-5 放置云母片的电容器

此时电容 C 变为

$$C = \frac{S}{\frac{\delta_g}{\epsilon_0 \epsilon_g} + \frac{\delta_0}{\epsilon_0}} \quad (4-4)$$

式中, δ_0 为空气隙厚度; δ_g 为云母片的厚度; ϵ_0 为空气的介电常数,取 $\epsilon_0 = 1$; ϵ_g 为云母的相对介电常数,取 $\epsilon_g = 7$ 。

云母片的相对介电常数是空气的 7 倍,其击穿电压不小于 1000 kV/mm,而空气仅为 3 kV/mm。因此有了云母片,极板间起始距离可大大减小。

一般变极板间距电容式传感器的起始电容在 20 ~ 100 pF 之间,极板间距离在 25 ~ 200 μm 的范围内,最大位移应小于间距的 1/10,故这类传感器在微位移测量中应用最广。

4.2.2 变面积型电容式传感器

图 4-6 是一直线位移电容式传感器的原理图。被测量通过动极板移动引起两极板有效覆盖面积 S 改变,从而得到电容量的变化。

当动极板相对于定极板沿长度方向平移 Δx 时,则电容变化量为:

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \Delta x \cdot b}{\delta} \quad (4-5)$$

式中 $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r ba / \delta$ 为初始电容。

电容相对变化量为:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta x}{a} \quad (4-6)$$

这种形式的传感器其灵敏度为常数,即其输入与输出呈线性关系。

图 4-7 是电容式角位移传感器原理图,当动极板有一个角位移 θ 时,与定极板间的有效覆盖面积就发生改变,从而改变了两极板间的电容量。

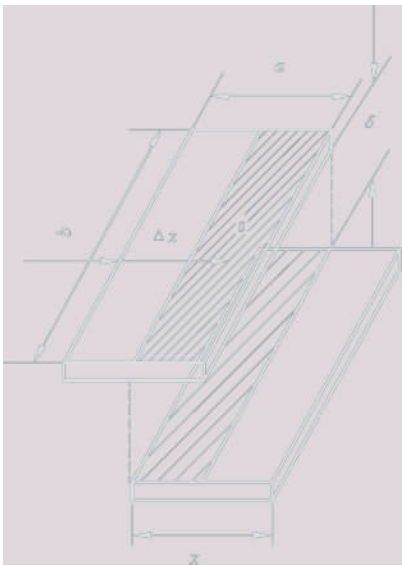


图 4-6 电容式线位移传感器原理图

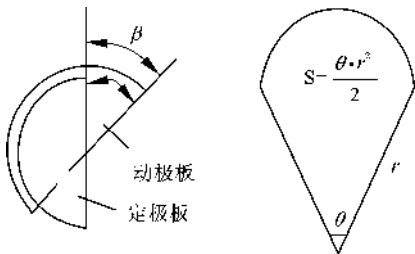


图 4-7 电容式角位移传感器原理图

当 $\theta = 0$ 时，则

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{\delta_0} \tag{4-7}$$

式中， ε_r 为介质相对介电常数 δ_0 为两极板间距离； S_0 为两极板间初始覆盖面积。

当 $\theta \neq 0$ 时，则

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0 (1 - \frac{\theta}{\pi})}{\delta_0} = C_0 - C_0 \frac{\theta}{\pi} \tag{4-8}$$

从上式可以看出，传感器的电容量 C 与角位移 θ 呈线性关系。

4.2.3 变介质型电容式传感器

各种电介质材料的相对介电常数如表 4-1 所示。变介质型电容传感器有较多的结构型式，如图 4-8 所示。可用来测量纸张、绝缘薄膜等的厚度，也可用来测量粮食、纺织品、木材或煤等非导电固体介质的湿度。

表 4-1 电介质材料的相对介电常数

材料	相对介电常数 ε_r	材料	相对介电常数 ε_r
真空	1.000 00	硬橡胶	4.3
其他空气	1 ~ 1.2	石英	4.5
纸	2.0	玻璃	5.3 ~ 7.5
聚四氟乙烯	2.1	陶瓷	5.5 ~ 7.0

续上表

材料	相对介电常数 ε_r	材料	相对介电常数 ε_r
石油	2.2	盐	6
聚乙烯	2.3	云母	6 ~ 8.5
硅油	2.7	三氧化二铝	8.5
米及谷类	3 ~ 5	乙醇	20 ~ 25
环氧树脂	3.3	乙二醇	35 ~ 40
石英玻璃	3.5	甲醇	37
二氧化硅	3.8	丙三醇	47
纤维素	3.9	水	80
聚氯乙烯	4.0	钛酸钡	1 000 ~ 10 000

图 4 - 8 为一种常用的变介质型电容传感器结构形式。利用此传感器可以测量被测介质的插入深度。

图中两平行电极固定不动，极距为 δ ，相对介电常数为 ε_{r2} 的电介质以不同深度插入电容器中，从而改变两种介质的极板覆盖面积。

(1)无介质插入情形，为一简单平行板电容器，初始电容为

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} L_0 b_0}{\delta_0} \tag{4 - 9}$$

式中 b_0 表示极板的宽度。

(2)有介质插入情形

此时相当于两段电容并联，因而传感器总电容量 C 为：

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 b_0 \frac{\varepsilon_{r1} (L_0 - L) + \varepsilon_{r2} L}{\delta_0} \tag{4 - 10}$$

电容的相对变化量为：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \left(\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} - 1 \right) \frac{L}{L_0} \tag{4 - 11}$$

可见，电容量的变化与电介质 ε_{r2} 的移动量 L 呈线性关系。

图 4 - 9 为检测液面高度的电容式液位变换器结构原理图，被测介质的相对介电常数为 ε_1 ，液面高度为 h ，电容器的总高度为 H ，内筒外径为 d ，外筒内径为 D ，此时相当于两个同心圆柱状极板间构成电容并联组成电容式传感器，其容量为：

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon(H - h)}{\ln \frac{D}{d}} \\ &= \frac{2\pi\varepsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h(\varepsilon_1 - \varepsilon)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi h(\varepsilon_1 - \varepsilon)}{\ln \frac{D}{d}} \end{aligned} \tag{4 - 12}$$

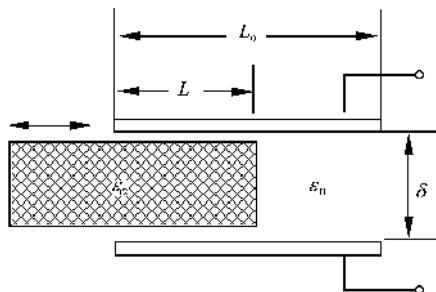


图 4-8 变介质型电容式传感器结构图

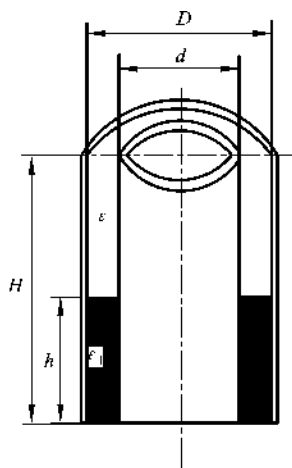


图 4-9 电容式液位变换器结构原理图

上式表明，此电容器的电容增量正比于被测液位高度 h 。

4.3 电容式传感器的灵敏度及非线性

由以上分析可知，除变极距型电容传感器外，其他几种形式的电容式传感器的输入量与输出量之间的关系均为线性的，其灵敏度很容易得到，以下只讨论变极距型的平行板电容传感器的灵敏度与非线性。

假设极板间只有一种介质时，如图 4-3 的情形。其电容表达式为： $C = \frac{\epsilon S}{\delta}$ ，初始电容为：

$C_0 = \frac{\epsilon S}{\delta_0}$ 。当极板距离有一个增量 $\pm \Delta\delta$ 时，则传感器电容的增量为：

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0 \pm \Delta\delta} = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left(\frac{1}{1 \pm \Delta\delta/\delta_0} \right) \quad (4-13)$$

当满足 $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ 时，将上式展开成泰勒级数得

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (4-14)$$

其灵敏度为：

$$k_g = \frac{C_0}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (4-15)$$

当 $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ 时，可略去高次项，得电容的增量近似为 $\Delta C = C_0 (\Delta\delta/\delta_0)$ ，电容传感器的灵敏度近似为：

$$k_g = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta\delta} = \frac{1}{\delta_0} \quad (4-16)$$

由式(4-16)可知，单位输入位移所引起的输出电容相对变化量的大小与 δ_0 呈反比关系。

如果考虑式(4-14)中的线性项与二次项，则：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right) \quad (4-17)$$

由此可得出传感器的相对非线性误差为：

$$\frac{(\Delta \delta / \delta_0)^2}{|\Delta \delta / \delta_0|} \times 100\% = \left| \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right| \times 100\% \quad (4-18)$$

由式(4-16)与式(4-18)可以看出,要提高灵敏度,应减小起始间隙 δ_0 , 但非线性误差却随着 δ_0 的减小而增大。

由以上分析可以看出,在一般情况下,电容式传感器的灵敏度并非常数。只有 $\Delta \delta / \delta \ll 1$ 时才认为其输入输出接近线性关系。这意味着使用这种形式的传感器时,被测量范围不能太大,为了在比较大的范围内使用此种传感器,可适当增大极板间的初始距离,以保证 $\Delta \delta / \delta$ 不致过大,但会带来灵敏度下降的缺点,同时也使电容传感器的初始值小,寄生电容的干扰作用将增加。

在实际应用中,为了提高灵敏度、减小非线性误差,以及克服某些外界条件(如电源开关,环境温度)变化的影响,常采用差动式传感器,其原理结构如图4-10所示。

测量前将动极板调至中间位置,上下电容相等。测量过程中,中间极板向上或向下平移,就会引起电容量的上增下减或相反的变化。除此以外,它还能消除外界干扰所造成的测量误差。

当动极板移动 $\Delta \delta$ 时,电容器 C_1 的间隙 δ_1 变为 $\delta_0 - \Delta \delta$, 电容器 C_2 的间隙 δ_2 变为 $\delta_0 + \Delta \delta$, 则

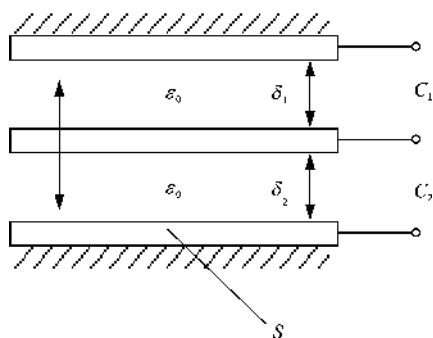


图4-10 差动平板式电容传感器结构图

$$C_1 = C_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0}} \quad (4-19)$$

$$C_2 = C_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}} \quad (4-20)$$

在 $\Delta \delta / \delta < 1$ 时,分别按幂级数展开得

$$C_1 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (4-21)$$

$$C_2 = C_0 \left[1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (4-22)$$

电容值总的变化量为

$$\Delta C = 2C_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (4-23)$$

其灵敏度为：

$$k_g = 2 \frac{C_0}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (4-24)$$

略去高次项,则 $\Delta C / C_0$ 与 $\Delta \delta / \delta_0$ 近似成为如下的线性关系：

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (4-25)$$

如果只考虑式(4-23)中的线性项和三次项,则电容式传感器的相对非线性误差近似为

$$\frac{2|(\Delta \delta / \delta_0)^3|}{2|\Delta \delta / \delta_0|} \times 100\% = \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2 \times 100\% \quad (4-26)$$

比较式(4-16)与(4-18)和式(4-24)与式(4-26)可知:差动式平板电容器不仅使其灵敏度提高一倍,而且非线性误差也大大降低了,线性度得到了改善。

4.4 电容式传感器的测量电路

电容式传感器中电容值以及电容变化值都十分微小,这样微小的电容量还不能直接为目前的显示仪表所显示,也很难为记录仪所接收。为了便于传输、记录和显示输出,必须采用某种合适的测量电路,以检出这一微小电容增量,并将其转换成与其成单值函数关系的电压、电流或者频率。电容转换电路主要有调频电路、运算放大器式电路、二极管双T型交流电桥、脉冲宽度调制电路等。

4.4.1 调频测量电路

调频测量电路原理框图如图4-11所示,其中 C_x 为电容变换器。它把电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分。当输入量导致电容量发生变化时,振荡器的振荡频率就发生变化。

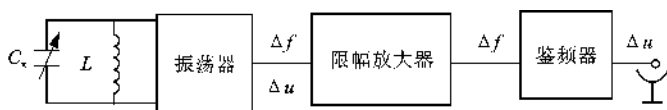


图 4-11 调频测量电路原理框图

虽然可将频率作为测量系统的输出量,用以判断被测非电量的大小,但此时系统是非线性的,不易校正,因此必须加入鉴频器,将频率的变化转换为电压振幅的变化,再经过放大就可以用仪器指示或记录仪记录下来。

调频振荡器的振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi(LC)^{1/2}} \quad (4-27)$$

式中, L 为振荡回路的电感; C 为振荡回路的总电容,且 $C = C_1 + C_2 + C_0 \pm \Delta C$ 。其中, C_1 为振荡回路固有电容; C_2 为传感器引线分布电容; $C_0 \pm \Delta C$ 为传感器的电容。

当被测信号为0时, $\Delta C = 0$,则 $C = C_1 + C_2 + C_0$,所以振荡器有一个固有频率 f_0

$$f_0 = \frac{1}{2\pi[(C_1 + C_2 + C_0)L]^{1/2}} \quad (4-28)$$

当被测信号不为0时, $\Delta C \neq 0$,振荡器频率有相应变化,此时频率为

$$f = \frac{1}{2\pi[(C_1 + C_2 + C_0 + \Delta C)L]^{1/2}} = f_0 + \Delta f \quad (4-29)$$

调频电容传感器测量电路具有较高灵敏度,可以测至 $0.01 \mu\text{m}$ 级位移变化量。频率输出易于用数字仪器测量和与计算机通讯,抗干扰能力强,可以发送、接收以实现遥测遥控。

4.4.2 运算放大器式电路

运算放大器的开环放大倍数 K 非常大,而且输入阻抗 Z_i 很高。运算放大器的这一特点可以使其作为电容式传感器的比较理想的测量电路。

图 4-12 是运算放大器式电路原理图。将电容传感器接于放大器反馈回路,输入电路接固定电容,构成反相放大器。该测量电路的最大特点是能克服变极距型电容传感器的非线性。

由运算放大器工作原理可得:

$$\dot{U}_o = -\frac{C}{C_x} \dot{U}_i \quad (4-30)$$

如果传感器为一只平行板电容,则 $C_x = \varepsilon S / \delta$,代入式(4-30),有

$$\dot{U}_o = -\frac{C\delta}{\varepsilon S} \dot{U}_i \quad (4-31)$$

式中“-”号表示输出电压 V_o 与电源电压 V_i 相位相反。

可见,运算放大器的输出电压与极板间距离 δ 呈线性关系。因此,运算放大器式电路解决了单个变极板间距式电容传感器的非线性问题,但要求 Z_i 及放大倍数足够大。同时,为保证仪器精度,还要求电源电压的幅值和固定电容 C 值稳定。

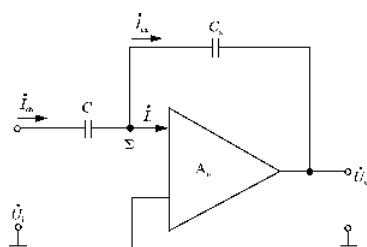


图 4-12 运算放大器式电路原理图

4.4.3 二极管双 T 形交流电路

二极管双 T 形交流电路如图 4-13 所示。

e 是高频电源,它提供了幅值为 U 的对称方波, VD_1 、 VD_2 为特性完全相同的两只二极管,固定电阻 $R_1 = R_2 = R$, C_1 、 C_2 为传感器的两个差动电容。当传感器没有输入时, $C_1 = C_2$ 。

电路工作原理如下:

当在 e 的正半周时。二极管 VD_1 导通、 VD_2 截止,于是电容 C_1 充电,在随后负半周出现时,电容 C_1 上的电荷通过电阻 R_1 向负载电阻 R_L 放电,流过 R_L 的电流为 I_1 。

当在 e 的负半周时, VD_2 导通、 VD_1 截止,则电容 C_2 充电,在随后出现正半周时, C_2 通过电阻 R_2 向负载电阻 R_L 放电,流过 R_L 的电流为 I_2 。根据上面所给的条件,则电流 $I_1 = I_2$,且方向相反,在一个周期内流过 R_L 的平均电流为 0。

若传感器输入不为 0,则 $C_1 \neq C_2$,那么 $I_1 \neq I_2$,此时 R_L 上必定有信号输出,其输出在一个周期内的平均值为:

$$U_o = I_L \cdot R_L = \left[\frac{1}{T} \int_0^T |i_1(t) - i_2(t)| dt \right] \cdot R_L \approx \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} \cdot R_i U_i \cdot f \cdot (C_1 - C_2) \quad (4-32)$$

式(4-32)中, f 为电源频率。

当 R_L 已知,式(4-32)中,令: $\frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} \cdot R_L = M$ (常数)

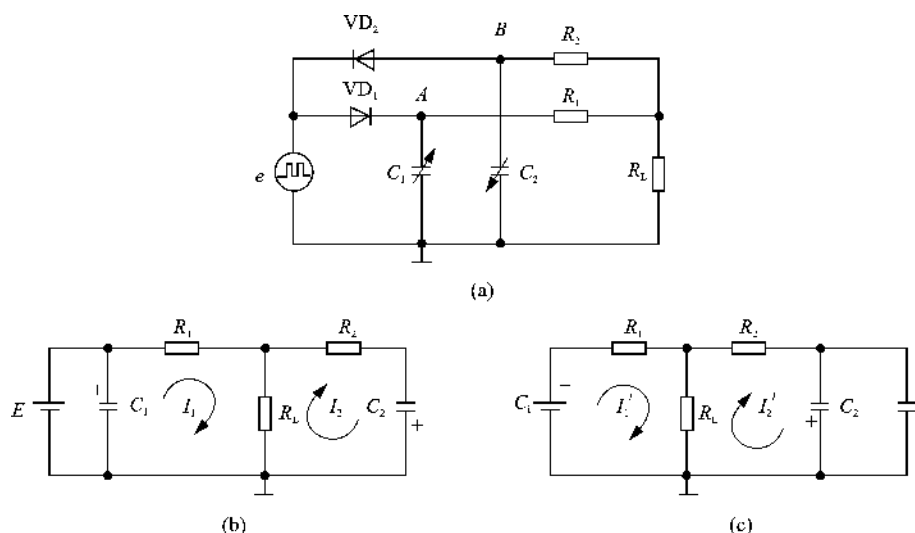


图 4-13 二极管双 T 形交流电路

则式(4-32)可改写为：

$$U_o = U_i \cdot f \cdot M \cdot (C_1 - C_2) \quad (4-33)$$

从式(4-33)可知，输出电压 U_o 不仅与电源电压幅值和频率有关，而且与 T 形网络中的电容 C_1 和 C_2 的差值有关。当电源电压确定后，输出电压 U_o 是电容 C_1 和 C_2 的函数。

电路的灵敏度与电源电压幅值和频率有关，故输入电源要求稳定。当 U 幅值较高，使二极管 VD_1 、 VD_2 工作在线性区域时，测量的非线性误差很小。电路的输出阻抗与电容 C_1 、 C_2 无关，而仅与 R_1 、 R_2 及 R_L 有关，为 $1 \sim 100 \text{ k}\Omega$ 。输出信号的上升沿时间取决于负载电阻。对于 $1 \text{ k}\Omega$ 的负载电阻上升时间为 $20 \mu\text{s}$ 左右，故可用来测量高速的机械运动。

4.4.4 脉冲宽度调制电路

脉冲宽度调制电路如图 4-14 所示，图中 C_1 、 C_2 为差分式电容传感器，利用对传感器电容的充放电使电路输出脉冲的宽度随电容式传感器的电容量变化而变化，通过低通滤波器就能得到对应被测量变化的直流信号。

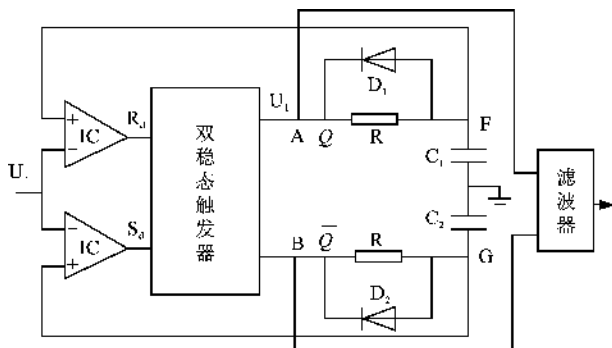


图 4-14 双 T 差动脉冲调宽式测量电路

差动电容传感器、双稳态触发器、比较器及低通滤波器有机配合,实现信号的转换。

1. 电路工作原理

(1) 正半周

设上电后 RS 触发器 $R_d = S_d = 0$ 。Q=1、Q=0, 差动电容传感器上电压 $U_F = U_G = 0$, Q 点输出电压 U_1 通过 R_1 对 C_1 充电, U_F 渐增(C_2 如有电荷, 通过二极管 D_2 快速放掉)。当 $U_F > U_r$ 时, 比较器 IC_1 翻转, $R_d = 1$, 双稳态触发器复位。

(2) 负半周

这时 $R_d = 1$ 、 $S_d = 0$ 、Q=0、Q=1, C_1 通过 D_1 快速放电, Q 输出电压 U_1 通过 R 对 C_2 充电, U_G 渐增。当 $U_G > U_r$ 时, 比较器 IC_2 翻转, $S_d = 1$ 、 $R_d = 0$, 双稳态触发器置位。Q=1, Q=0。在 A、B 两点输出方波电压 U_{AB} , 经低通滤波器得到其平均值 U_o 。

从以上的分析可知: 比较器的输出控制双稳态触发器的状态。双稳态触发器的输出提供差动电容器的电压。电容端的电压控制比较器的翻转。

2. 各点电压的波形

设 $C_1 > C_2$, C_1 充电速度慢于 C_2 充电速度, U_A 持续时间长于 U_B 的持续时间。各点电压波形如图 4-15 所示。 U_{AB} 经低通滤波后, 就可得到一直流电压 U_o 为:

$$U_o = U_A - U_B = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_1 - \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1 \quad (4-34)$$

式中, U_A 、 U_B 分别为 A 点和 B 点的矩形脉冲的直流分量; T_1 、 T_2 分别为 C_1 和 C_2 的充电时间; U_1 为触发器输出的高电位。

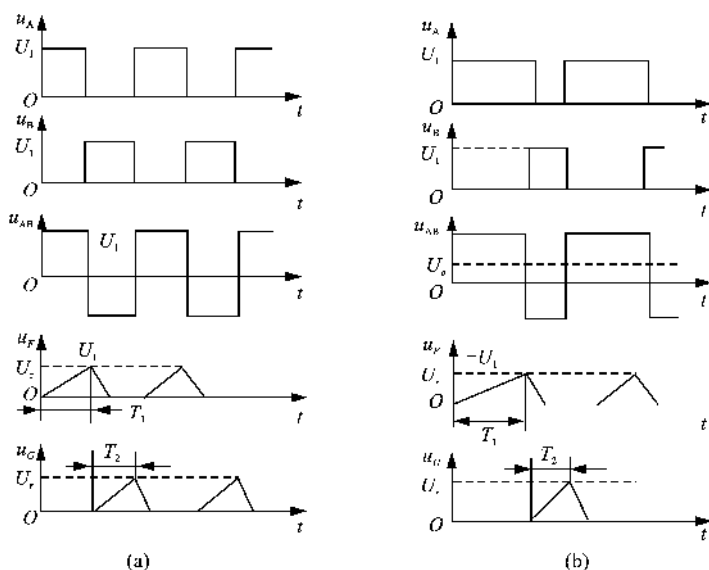


图 4-15 脉冲宽度调制波形

C_1 、 C_2 的充电时间为:

$$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}, T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r} \quad (4-35)$$

式中 U_r ——为触发器的参考电压。

设 $R_1 = R_2 = R$ ，则得：

$$U_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_r \quad (4-36)$$

可以看出，输出的直流电压与传感器两电容差值成正比。

4.5 电容式传感器的应用

随着新工艺、新材料问世，特别是电子技术的发展，电容式传感器的应用越来越广泛。电容式传感器可用来测量直线位移、角位移、振动振幅（可测 $0.05 \mu\text{m}$ 的微小振幅），尤其适合测量高频振动振幅、加速度等机械量，还可用来测压力、液位、粮食中的水分含量、非金属材料的涂层、油膜厚度、电解质的湿度、密度、厚度等。下面简单介绍几种电容式传感器的应用。

4.5.1 电容式压力传感器

图 4-16 为差分电容式压力传感器的结构图。它由一个膜片动电极和两个在凹形玻璃上电镀成的固定电极组成差分电容器。

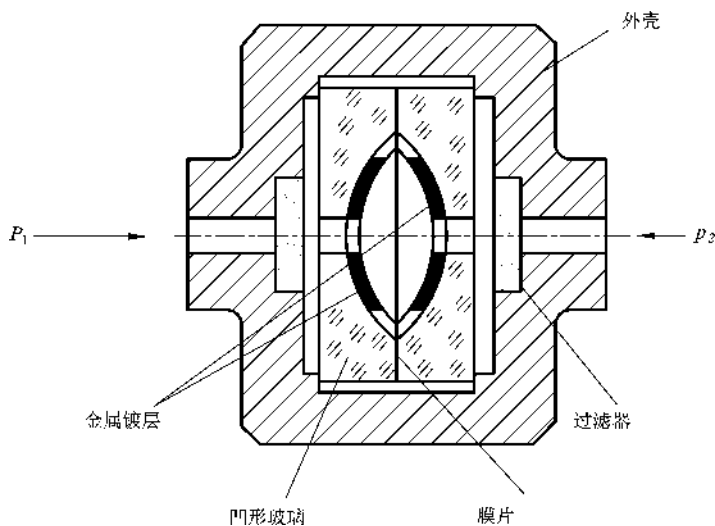


图 4-16 差分式电容式压力传感器

当被测压力作用于膜片并使之产生位移时，使两个电容器的容量一个增加，一个减小，该电容的变化经测量电路转换成电压或电流输出，它反映了压力的大小。

4.5.2 电容式加速度传感器

图 4-17 为差分电容式加速度传感器的结构图。它有两个固定极板，中间的质量块的两个端面作为动极板。

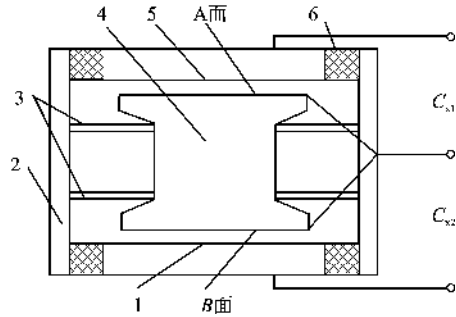


图 4 - 17 差分式电容加速度传感器

1、5—为固定极板； 2—为壳体； 3—为簧片； 4—为质量块； 6—为绝缘体

当传感器壳体随被测对象在垂直方向作直线运动时，传感器壳体固定在被测振动体上，振动体的振动使壳体相对重量块运动，因而与壳体 2 固定在一起的两固定极板 1、5 相对质量块 4 运动，致使固定极板 5 与质量块 4 的 A 面(磨平抛光)组成的电容 C_{x1} 值以及下面的固定极板 1 与质量块 4 的 B 面组成的电容 C_{x2} 值随之改变，组成的电容质量块因惯性相对静止，因此将导致固定电极与动极板间的距离发生变化，一个增加，一个减小。它们的差值正比于被测加速度。由于采用空气阻尼，气体黏度的温度系数比液体小得多。因此这种加速度传感器的精度较高，频率响应范围宽，量程大，可以测很高的加速度。

4.5.3 差动式电容测厚传感器

差动式电容测厚传感器结构图如图 4 - 18 所示。传感器上下两个极板与金属板上下表面间构成电容传感器。如果中间金属板的厚度有变化，将导致它与上下两个极板间的距离发生变化，从而引起电容量的变化。将总电容量作为交流电桥的一个臂，电容的变化将使得电桥产生不平衡输出，从而实现对厚度的检测。

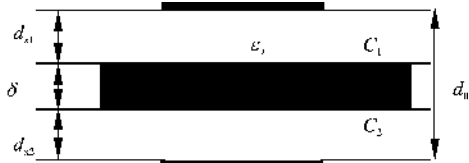


图 4 - 18 差动式电容测厚传感器

$$C_{x1} = \frac{\epsilon_r S}{d_{x1}} \quad C_{x2} = \frac{\epsilon_r S}{d_{x2}}$$

4.5.4 电容式料位传感器

图 4 - 19 所示为用电容传感器测量颗粒体、粉料位及液位的情况。由于固体摩擦力较大，容易“滞留”，所以一般采用单极式电容传感器，可用电极棒及容器壁组成的两极来测量非导电固体或液体的料位，或在电极外套以绝缘套管，测量导电体的料位，此时电容的两极由物料及绝缘套中电极组成。

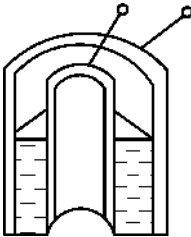


图 4 - 19 电容式料位传感器

习题 4

4 - 1 有一只变极距电容传感元件，两极板重叠有效面积为 $8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，两极板间的距离为 1 mm，已知空气的相对介电常数是 1.0006，试计算该传感器的位移灵敏度。

4 - 2 简述电容式传感器的工作原理。

4 - 3 电容式传感器的测量电路有哪些？

4 - 4 简述电容式传感器的优点。

4 - 5 采用运算放大器作为电容传感器的测量电路，其输出特性是否为线性？为什么？

第 5 章 压电式传感器

本章要点

- 压电效应
- 压电式传感器的等效电路
- 压电式传感器的信号调节电路
- 压电式加速度传感器
- 压电式测力传感器

5.1 概 述

压电式传感器是以某些电介质(如石英晶体或压电陶瓷、高分子材料)的压电效应为基础而工作的。在外力作用下,在电介质表面产生电荷,从而实现非电量电测的目的。因此是一种典型的自发电式传感器。压电传感元件是力敏感元件,它可以测量最终能变换为力的那些非电物理量,例如动态力、动态压力、振动加速度等。

5.2 工作原理

5.2.1 压电效应(Piezoelectric Effect)

压电现象是 100 多年前居里兄弟研究石英时发现的。那么,什么是压电效应呢?由物理学知,一些离子型晶体的电介质(如石英、酒石酸钾钠、钛酸钡等)不仅在电场力作用下,而且在机械力作用下,都会产生极化现象。

(1) 在这些电介质的一定方向上施加机械力而产生变形时,就会引起它内部正负电荷中心相对转移而产生电的极化,从而导致其两个相对表面(极化面)上出现符号相反的束缚电荷 Q (如图 5-1(a)所示),且 Q 与外应力张量 T 成正比:

$$Q = dT \quad (5-1)$$

式中 d ——压电常数

当外力消失后,又恢复不带电原状;当外力变向,电荷极性随之而变。这种现象称为正压电效应,或简称压电效应。

(2) 如果在这些电介质的极化方向施加电场,这些电介质就在一定方向上产生机械变形或机械应力,当外电场撤去时,这些变形或应力也随之消失,这种现象称之为逆压电效应,或称之为电致伸缩效应。其应变 S 与外电场强度 E 成正比:

$$S = d_i E \quad (5-2)$$

式中 d_i ——逆压电常数。

可见,具有压电性的电介质(称压电材料),能实现机电能量的相互转换,如图5-1(b)所示。

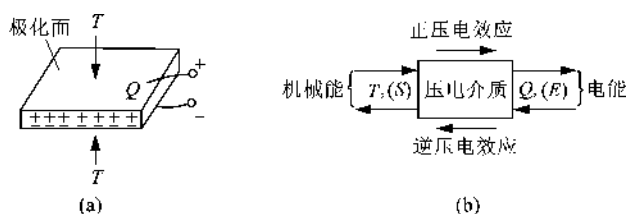


图5-1 压电效应原理图

(a)正压电效应; (b)压电效应的可逆性

5.2.2 压电材料

目前压电材料可分为三大类:

一是压电晶体(单晶),它包括压电石英晶体和其他压电单晶;

二是压电陶瓷(多晶半导瓷);

三是新型压电材料,又可分为压电半导体和有机高分子压电材料两种。

在传感器技术中,目前国内外普遍应用的是压电单晶中的石英晶体和压电多晶中的钛酸钡与锆钛酸铅系列压电陶瓷。

压电材料的主要特性参数有:

(1)压电常数:它是衡量材料压电效应强弱的参数,直接关系到输出灵敏度;

(2)弹性常数:它与压电器件的固有频率和动态特性有关;

(3)介电常数:对于一定形状、尺寸的压电元件,其固有电容与介电常数有关;而固有电容又影响着压电传感器的频率下限;

(4)机械耦合系数:在压电效应中,其值等于转换输出能量(如电能)与输入能量(如机械能)之比的平方根;它是衡量压电材料机电能量转换效率的一个重要参数;

(5)电阻:压电材料的绝缘电阻将减小电荷泄漏,从而改善压电传感器的低频特性;

(6)居里点:压电材料开始丧失压电特性时的温度称为居里点。

1. 压电晶体

(1)石英晶体(SiO_2)

石英晶体是一种应用广泛的压电晶体。它是二氧化硅单晶,属于六角晶系。如图5-2(a)和(b)所示是天然石英晶体的外形图,它为规则的六角棱柱体。石英晶体有三个晶轴:z轴又称光轴,它与晶体的纵轴线方向一致;x轴又称电轴,它通过六面体相对的两个棱线并垂直于光轴;y轴又称机械轴,它垂直于两个相对的晶柱棱面。

通常把沿电轴(x轴)方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“纵向压电效应”;

而把沿机械轴(y轴)方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“横向压电效应”;

在光轴(z轴)方向受力时则不产生压电效应。

纵向压电效应产生的电荷为:

$$Q_{xx} = D_{xx} F_x \quad (5-3)$$

式中 Q_{xx} 为垂直于 x 轴平面上的电荷, D_{xx} 为压电系数,下标的意义为产生电荷的面的轴向及

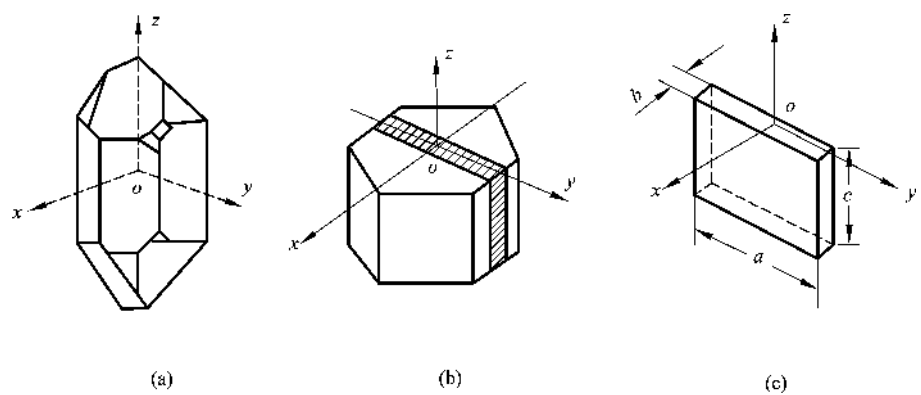


图 5 - 2 石英晶体

施加作用力的轴向； F_x 为沿晶轴 x 方向施加的压力。

由上式看出，当晶片受到 x 向的压力作用时， Q_{xx} 与作用力 F_x 成正比，而与晶片的几何尺寸无关。如果作用力 F_x 改为拉力时，则在垂直于 x 轴的平面上仍出现等量电荷，但极性相反。

横向压电效应产生的电荷为：

$$Q_{xy} = D_{xy} \frac{a}{b} F_y \tag{5 - 4}$$

式中 Q_{xy} 为 y 轴向施加压力，在垂直于 x 轴平面上的电荷。 D_{xy} 为压电系数， y 轴向施加压力，在垂直于 x 轴平面上产生电荷时的压电系数； F_y 为沿晶轴 y 方向施加的压力。

石英晶体的上述特性与其内部分子结构有关。为了较直观的了解石英晶体的压电效应，将石英晶体的硅离子和氧离子排列在垂直于晶体 z 轴的 xy 平面上的投影如图 5 - 3 所示。图中是一个单元组体中构成石英晶体的硅离子和氧离子，在垂直于 z 轴的 xy 平面上的投影，等效为一个正六边形排列。当石英晶体未受外力作用时，正、负离子正好分布在正六边形的顶角上，形成三个互成 120° 夹角的电偶极矩 P_1 、 P_2 、 P_3 。如图 5 - 3(a)所示。

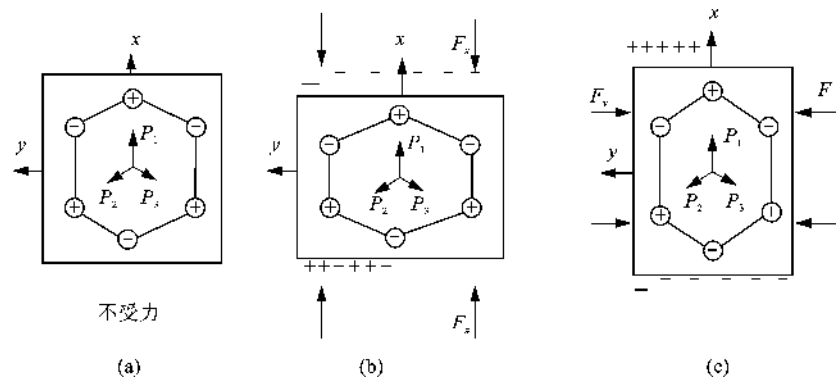


图 5 - 3 石英晶体压电效应机理示意图

因为 $P = qL$ ， q 为电荷量， L 为正负电荷之间距离。此时正负电荷重心重合，电偶极矩的

矢量和等于零,即 $P_1 + P_2 + P_3 = 0$, 所以晶体表面不产生电荷,即呈中性。注:图中 $\oplus$ 代表 Si^{4+} , $\ominus$ 代表 2O^{2-} 。

当石英晶体受到沿 x 轴方向的压力作用时,晶体沿 x 方向将产生压缩变形,正负离子的相对位置也随之变动。如图 5-3(b)所示,此时正负电荷重心不再重合,电偶极矩在 x 方向上的分量由于 P_1 的减小和 P_2 、 P_3 的增加而不等于零,即 $(P_1 + P_2 + P_3)_x > 0$ 。在 x 轴的负方向出现正电荷,电偶极矩在 y 方向上的分量仍为零,不出现电荷。

当晶体受到沿 y 轴方向的压力作用时,晶体的变形如图 5-3(c)所示,与图 5-3(b)情况相似, P_1 增大, P_2 、 P_3 减小。在 x 轴上出现电荷,它的极性在 x 轴正向为正电荷。在 y 轴方向上不出现电荷。

如果沿 z 轴方向施加作用力,因为晶体在 x 方向和 y 方向所产生的形变完全相同,所以正负电荷重心保持重合,电偶极矩矢量和等于零。这表明沿 z 轴方向施加作用力,晶体不会产生压电效应。

当作用力 F_x 、 F_y 的方向相反时,电荷的极性也随之改变。

压电石英的主要性能特点是:①压电常数小,时间和温度稳定性极好;②机械强度和品质因素高,且刚度大,固有频率高,动态特性好;③居里点 573℃,无热释电性,且绝缘性、重复性均好。

(2) 其他压电单晶

在压电单晶中除天然和人工石英晶体外,锂盐类压电和铁电单晶如铌酸锂(LiNbO_3)、钽酸锂(LiTaO_3)、锆酸锂 LiGeO_3 等材料,也已在传感器技术中日益得到广泛应用,其中以铌酸锂为典型代表。

铌酸锂是一种无色或浅黄色透明铁电晶体。从结构看,它是一种多畴单晶。它必须通过极化处理后才能成为单畴单晶,从而呈现出类似单晶体的特点,即机械性能各向异性。它的时间稳定性好,居里点高达 1200℃,在高温、强辐射条件下,仍具有良好的压电性,且机械性能,如机电耦合系数、介电常数、频率常数等均保持不变。此外,它还具有良好的光电、声光效应,因此在光电、微声和激光等器件方面都有重要应用。不足之处是质地脆、抗机械和热冲击性差。

2. 压电陶瓷

(1) 压电陶瓷的极化处理

压电陶瓷是一种经极化处理的人工多晶铁电体。所谓“多晶”,它是由无数细微的单晶组成;所谓“铁电体”,它具有类似铁磁材料磁畴的“电畴”结构。每个单晶形成一个单电畴,无数单晶电畴的无规则排列,致使原始的压电陶瓷呈现各向同性而不具有压电性(如图 5-4(a)所示)。要使之具有压电

性,必须做极化处理,即在一定温度下对其施加强直流电场,迫使“电畴”趋向外电场方向作规则排列(如图 5-4(b));极化电场去除后,趋向电畴基本保持不变,形成很强的剩余极化,从而呈现出压电性(如图 5-4(c))。

(2) 常用的压电陶瓷

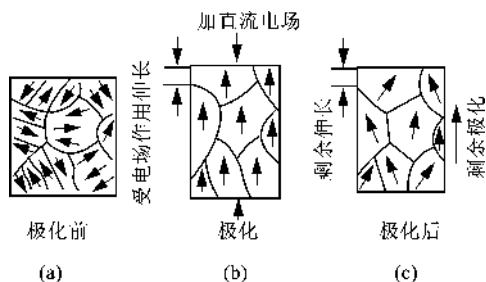


图 5-4 BaTiO_3 压电陶瓷的极化

传感器技术中应用的压电陶瓷,按其组成基本元素多少可分为:

①二元系压电陶瓷 主要包括钛酸钡 BaTiO_3 , 钛酸铅 PbTiO_3 , 锆钛酸铅系列 $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3$ (PZT)和铌酸盐系列 $\text{KNbO}_3 - \text{PbNb}_2\text{O}_3$ 。其中以钛酸钡,尤其以锆钛酸铅系列压电陶瓷应用最广。

②三元系压电陶瓷 目前应用的 PMN,它由铌镁酸铅 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 、钛酸铅 PbTiO_3 、锆钛酸铅 PbZrO_3 三种成分配比而成。另外还有专门制造耐高温、高压和电击穿性能的铌锰酸铅系、镁碲酸铅等。

③综合性能更为优越的四元系压电陶瓷也已经研制成功。

压电陶瓷的特点是:压电常数大,灵敏度高;制造工艺成熟,可通过合理配方和掺杂等人工控制来达到所要求的性能;成型工艺性也好,成本低廉,利于广泛应用。随着信息产业的飞速发展,压电陶瓷频率器件(滤波器、谐振器、陷波器、鉴频器等)已在音视频、通讯、计算机周边等领域大量应用。在日常生活中,如电子打火机、煤气灶、热水器的点火都要用到压电点火器。

3. 新型压电材料

(1)压电半导体

硫化锌(ZnS)、碲化镉(CeTe)、氧化锌(ZnO)、硫化镉(CdS)等,这些材料显著的特点是:既具有压电特性又具有半导体特性。因此既可用其压电性研制传感器,又可用其半导体特性制作电子器件;也可以两者合一,集元件与线路于一体,研制成新型集成压电传感器测试系统。

(2)有机高分子压电材料

某些合成高分子聚合物,经延展拉伸和电极化后具有压电性的高分子压电薄膜,如聚氟乙烯(PVF)等。另外,还有高分子化合物中掺杂压电陶瓷 PZT 或 BaTiO_3 粉末制成的高分子压电薄膜。

5.3 压电式传感器调节电路

5.3.1 压电式传感器等效电路

从功能上讲,压电器件实际上是一个电发生器。设压电材料的相对介电常数为 ε_r ,极化面积为 A ,两极面间距离(压电片厚度)为 t 。这样又可将压电器件视为具有电容 C_a 的电容器,且有:

$$C_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / t \quad (5-5)$$

当压电晶体受外力作用时,在电极表面产生等量的正、负电荷 Q ,则其开路电压(假设开路电阻无穷大)为 $U_a = Q/C_a$ 。因此,从性质上讲,压电器件实质上可以等效为一个电压源和一个电容器串联,如图 5-5(a)所示;也可以等效为电荷源和一个电容器并联,如图 5-5(b)所示。

必须指出,上述等效电路及其输出,只有在压电器件本身理想绝缘、无泄漏、输出端开路(即 $R_a = R_L = \infty$)条件下才成立。在构成传感器时,总要利用电缆将压电器件接入测量线路或仪器。这样,就引入了电缆的分布电容 C_c ,测量放大器的输入电阻 R_i 和电容 C_i 等形成的

负载阻抗影响；加之考虑压电元件并非理想元件，它内部存在泄漏电阻 R_a ，则由压电元件构成传感器的实际等效电路如图 5-6(a) 所示。

在实际使用中，如仅用单片压电元件工作的话，要产生足够的表面电荷就要很大的作用力，因此一般采用两片或两片以上压电元件组合在一起使用。由于压电元件是有极性的，因此连接方法有两种：并联连接和串联连接。

并联连接：两压电元件的负极集中在中间极板上，正极在上下两边并连接在一起，此时电容量大，输出电荷量大，适用于测量缓变信号和以电荷为输出的场合。

串联连接：上极板为正极，下极板为负极，在中间是一元件的负

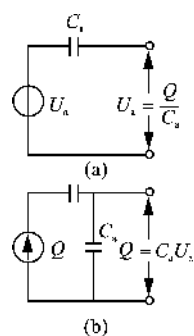


图 5-5 等效电路

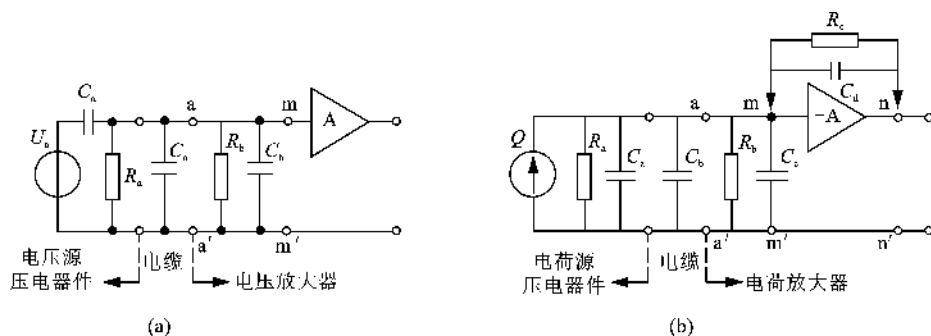


图 5-6 压电式传感器实际等效电路和测量电路

极与另一元件的正极相连接，此时传感器本身电容小，输出电压大，适用于要求以电压为输出的场合，并要求测量电路有高的输入阻抗。

5.3.2 压电式传感器调节电路

1. 电压放大器

电压放大器又称阻抗变换器。它的主要作用是把压电元件的高输出阻抗变换为传感器的低输出阻抗，并保持输出电压与输入电压成正比。

当需要压电元件输出电压时，可把它等效成一个与电容串联的电压源，如图 5-6(a) 所示。在开路状态，其输出端电压和电压灵敏度分别为：

$$U_a = Q/C_a \quad (5-6)$$

$$K_g = U_a/F = Q/(C_a F) \quad (5-7)$$

式中 F ——作用在压电元件上的外力。

当需要压电元件输出电荷时，则可把它等效成一个与电容相并联的电荷源，如图 5-6(b) 所示。同样，在开路状态，输出端电荷为：

$$Q = C_a U_a \quad (5-8)$$

式中 U_a ——极板电荷形成的电压。这时的输出电荷灵敏度为：

$$K_q = Q/F = C_a U_a/F \quad (5-9)$$

显然 K_g 与 K_q 之间有如下关系：

$$K_g = K_q / C_a \quad (5-10)$$

图 5-6(a) 中, 设施加在压电元件上某方向的交变力 $F = F_m \sin \omega t$, 压电传感器产生的电压为:

$$U_a = \frac{Q}{C_a} = \frac{dF}{C_a} = \frac{dF_m}{C_a} \sin \omega t \quad (5-11)$$

式中: d 为压电元件某方向的压电系数, C/N ; F 为交变力的瞬时值, N ; F_m 为交变力的幅值, N ; ω 为交变力的角频率, rad/s 。放大器输出电压为:

$$U_a = \frac{U_a}{\frac{1}{j\omega C_a} + \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}}} \cdot \frac{\frac{R}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot A = \frac{AdF_m j\omega R}{1 + j\omega R(C_a + C_i + C_c)} \sin \omega t \quad (5-12)$$

式中: U_o 为放大器的输出电压, V ; A 为放大器的电压放大倍数; R_a 为一片压电元件的漏电阻 Ω ; C_c 为连接电缆的等效电容, F ; R_i 、 C_i 分别为放大器的输入电阻 Ω , 输入电容 F ; R 为 R_a 与 R_i 的并联等效电阻; C 为 C_a 与 C_i 的并联等效电容。当 R_a 和 R_i 都为无限大, 则 $\omega R(C_a + C_i + C_c) \gg 1$, 也无电荷漏电, 则:

$$U_o = \frac{AdF_m}{C_a + C_i + C_c} \sin \omega t \quad (5-13)$$

可见, 电压放大器输出电压 U_o 与 C_a , C_c , C_i 有关; 另外, U_o 还与 ω 有关, 说明压电传感器不能用于静态测量。

2. 电荷放大器

电荷放大器实质上是负反馈放大器, 它的基本电路如图 5-7 所示。放大器等效电路如图 5-8 所示。

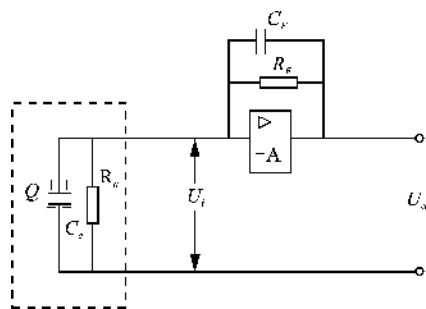


图 5-7 放大器基本电路图

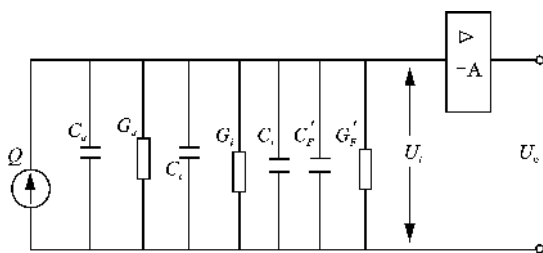


图 5-8 放大器等效电路图

当放大器开环增益和输入电阻、反馈电阻相当大时, 输出电压为:

$$U_o = \frac{-AQ}{(1+A)C_f + C_a + C_c + C_i} \quad (5-14)$$

式中 C_a ——传感器压电元件的电容;

C_c ——电缆电容;

C_i ——放大器输入电容;

C_F ——放大器反馈电容。

当 A 足够大时, $(1 + A)C_F \gg C_a + C_c + C_i$, 则:

$$U_o = \frac{-Q}{C_F} \quad (5-15)$$

可见, 电荷放大器的输出电压与 C_a 、 C_c 和 C_i 无关, 当 C_F 确定后, 只与 Q 成正比。工作时, 压电元件与二次仪表配套使用必定与测量电路相连接, 这就要考虑连接电缆电容 C_a 、放大器的输入电阻 R_i 和输入电容 C_i 。

由于不可避免地存在电荷泄漏, 利用压电式传感器测量静态或准静态量值时, 必须采取一定措施, 使电荷从压电元件经测量电路的漏失减少到足够小的程度; 而在作动态测量时, 电荷可以不断补充, 从而供给测量电路一定的电流, 故压电式传感器适宜作动态测量。

电荷放大器的实际电路举例:

设计电荷放大器时, 为了基本满足 R_i 近似无限大的条件, 所选运算放大器的输入阻抗应大于 $1010M\Omega$, 至少不应小于 $109M\Omega$; 开环增益一般应达到 $90dB$ 。本例中 $200M\Omega$ 和 R_i 电阻是为了防止放大器饱和而加入的, $22k\Omega$ 电阻可以在一定程度上实现对输入端的保护作用。

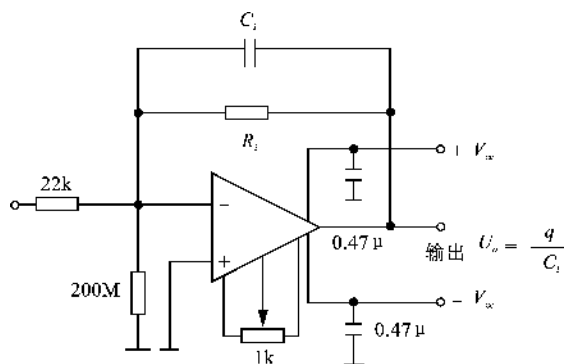


图 5-9 电荷放大器的实用电路

由此可知:

① 电荷放大器的输出电压仅与输入电容量和反馈电容有关, 若保持 C_F 数值不变, 输出电压正比于输入电荷量。

② 当 $(1 + A)C_F \gg 10(C_a + C_c + C_i)$ 时, 认为传感器的灵敏度与电缆电容无关, 更换电缆或使用较长的电缆时, 不用重新校正传感器的灵敏度。

③ 为了得到必要的测量精度, C_F 的温度和时间稳定性要好, 实际电路中, 考虑到被测量的大小, C_F 的容量做成可选择的。

④ 考虑到电容负反馈线路在直流工作时, 相当于开路状态, 因此对电缆噪声比较敏感, 放大器的零漂也比较大, 为了减小零漂, 提高放大器工作的稳定性, 一般在反馈电容的两端并联一个电阻 R_F ($1010k\Omega \sim 1014k\Omega$) 提高直流反馈。

电荷放大器的优点突出, 缺点是线路较复杂, 调整困难, 成本较高。

5.4 压电式传感器的应用

凡是能转换成力的机械量如位移、压力、冲击、振动加速度等, 都可用相应的压电传感

器测量，它们用以实现力电转换功能的基本结构是共同的。

压电式传感器的基本结构如下：

(1)基座和外壳

为隔离试件应变和环境声、磁、热干扰，并增强刚性，基座通常都很厚，并采用刚度大的不锈钢或钛合金材料；壳体取用与基座相同的材料，起密封、屏蔽作用。

(2)压电元件

根据设计需要，可取压电晶体或陶瓷。结构形式较多采用双晶片并联形式。压电加速度传感器中常采用平板式或圆筒式结构，取厚度压缩或剪切变形方式。

(3)敏感元件

指加速度传感器中的 $m-k-c$ 系统，位移传感器中的弹簧，或压力传感器中的弹性膜片（盒）等。 $m-k-c$ 系统中质量块通常采用高比重合金，以利缩小结构和尺寸。

(4)预载件

即压块、弹簧或螺栓螺母等，用以对压电元件施加预紧力。加预紧力的作用是：①消除压电元件内外接触面的间隙，提高传感器弹性系统的刚度，从而获得良好的静态（灵敏度和线性）、动态特性；②足够的预紧力，才能确保拉力、剪力和扭矩传感器获得足够的正压力后靠摩擦传递切向力；③利用预载对外力的分载原理，可用它来实现对外力的分载调节，用以改变传感器的灵敏度、线性或量程。

(5)引线及接插件

用以与外接电缆连接。

压电式传感器的应用特点：

(1)灵敏度和分辨率高，线性范围大，结构简单、牢固，可靠性好，寿命长；

(2)体积小，重量轻，刚度、强度、承载能力和测量范围大，动态响应频带宽，动态误差小；

(3)易于大量生产，便于选用，使用和校准方便，并适用于近测、遥测。

5.4.1 压电式测力传感器

压电式测力传感器是利用压电元件直接实现力电转换的传感器，在拉、压场合，通常较多采用双片或多片石英晶片作压电元件。它刚度大，测量范围宽，线性及稳定性高，动态特性好。当采用大时间常数的电荷放大器时，可测量准静态力。按测力状态分，有单向、双向和三向传感器，它们在结构上基本一样。

压电式测力传感器是利用压电材料所具有的压电效应所制成的。压电式压力传感器的基本结构如图 5-10 所示。由于压电材料的电荷量是一定的，所以在连接时要特别注意，避免漏电。

压电效应是压电传感器的主要工作原理，压电传感器不能用于静态测量，由于外力作用在压电元件上产生的电荷只有在无泄漏的情况下才能保存，这实际上是不可能的，因此压电式传感器不能用于静态测量。压电元件在交变力的作用下，电荷可以不断补充，可以供给测量回路以一定的电流，故只适用于动态测量。所以这决定了压电传感器只能够测量动态的压力。

压电式测力传感器的优点是具有自生信号，输出信号大，较高的频率响应，体积小，结

构坚固。其缺点是只能用于动能测量。需要特殊电缆，在受到突然振动或过大压力时，自我恢复较慢。

5.4.2 压电式加速度传感器

压电式加速度传感器又称压电加速度计。它也属于惯性式传感器。它是利用某些物质如石英晶体的压电效应，在加速度计受振时，质量块加在压电元件上的力也随之变化。当被测振动频率远低于加速度计的固有频率时，则力的变化与被测加速度成正比。

图 5 - 11 是一种压电式加速度传感器的结构图。它主要由压电元件、质量块、预压弹簧、基座及外壳等组成。整个部件装在外壳内，并用螺栓加以固定。压电式加速度传感器压电元件一般由两块压电晶片组成。在压电晶片的两个表面上镀有电极，并引出引线。在压电晶片上放置一个质量块，质量块一般采用比较大的金属钨或高比重的合金制成。然后用一硬弹簧或螺栓、螺帽对质量块预加载荷，整个组件装在一个基座的金属壳体中。为了隔离试件的任何应变传送到压电元件上去，避免产生假信号输出，所以一般要加厚基座或选用由刚度较大的材料来制造，壳体和基座的重量差不多占传感器重量的一半。

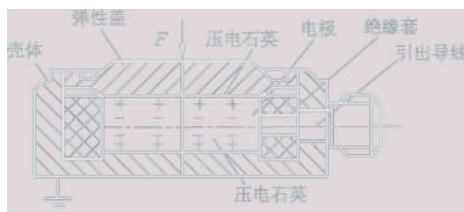


图 5 - 10 压电式测力传感器的基本结构

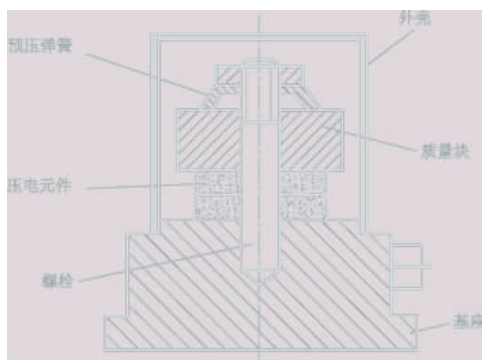


图 5 - 11 压电式加速度传感器的结构图

测量时，将传感器基座与试件刚性地固定在一起。当传感器受振动力作用时，由于基座和质量块的刚度相当大，而质量块的质量相对较小，可以认为质量块的惯性很小。因此质量块受到与基座相同的运动，并受到与加速度方向相反的惯性力的作用。这样，质量块就有一正比于加速度的应变力作用在压电晶片上。由于压电晶片具有压电效应，因此在它的两个表面上就产生交变电荷（电压），当加速度频率远低于传感器的固有频率时，传感器给输出电压与作用力成正比，亦即与试件的加速度成正比，输出电量由传感器输出端引出，输入到前置放大器后就可以用普通的测量仪器测试出试件的加速度；如果在放大器中加进适当的积分电路，就可以测试试件的振动速度。

当加速度传感器和被测物一起受到冲击振动时，压电元件受质量块惯性力的作用，根据牛顿第二定律，此惯性力是加速度的函数，即：

$$F = ma \quad (5 - 16)$$

式中 F ——质量块产生的惯性力；

m ——质量块的质量；

a ——加速度。

此时惯性力 F 作用于压电元件上,因而产生电荷 q ,当传感器选定后, m 为常数,则传感器输出电荷为:

$$q = dF = dma \quad (5-17)$$

q 与加速度 a 成正比。因此,测得加速度传感器输出的电荷便可知加速度的大小。

压电加速度传感器的结构形式主要有压缩型、剪切型和复合型三种。

压电式加速度传感器是一种常用的加速度计。它具有结构简单、体积小、重量轻、使用寿命长等优点。压电式加速度传感器在飞机、汽车、船舶、桥梁和建筑的振动与冲击测量中已经得到了广泛的应用,特别是航空和宇航领域中更有它的特殊地位。压电式传感器也可以用来测量发动机内部燃烧压力的测量与真空度的测量。也可以用于军事工业,例如用它来测量枪炮子弹在膛中击发的一瞬间的膛压的变化和炮口的冲击波压力。它既可以用来测量大的压力,也可以用来测量微小的压力。

随着电子技术的发展,目前大部分压电式加速度计在壳体内都集成放大器,由它来完成阻抗变换的功能。这类内装集成放大器的加速度计可使用长电缆而无衰减,并可直接与大多数通用的仪表、计算机等连接。一般采用 2 线制,即用两根电缆给传感器供给 $2 \sim 10\text{mA}$ 的恒流电源,而输出信号也由这两根电缆输出,大大方便了现场的接线。

5.4.3 压电式金属加工切削力测量

图 5-12 是利用压电陶瓷传感器测量刀具切削力的示意图。

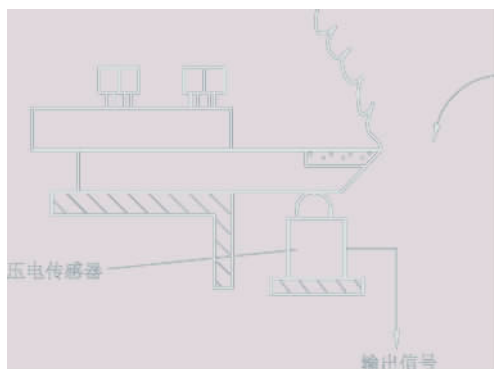


图 5-12 压电式刀具切削力的示意图

切削力: 金属切削时,刀具切入工件,使被加工材料发生变形并成为切削所需的力,称为切削力。

切削力的来源: 测力仪的测量原理是利用切削力作用在测力仪的弹性元件上所产生的变形,或作用在压电晶体上产生的电荷经过转换处理后,读出 F_z 、 F_x 和 F_y 的值。

由于压电陶瓷元件的自振频率高,特别适合测量变化剧烈的载荷。图中压电传感器位于车刀前部的下方,当进行切削加工时,切削力通过刀具传给压电传感器,压电传感器将切削力转换为电信号输出,记录下电信号的变化便测得切削力的变化。

5.4.4 压电点火器的发火元件

图 5-13 是利用压电陶瓷制造的发火元件示意图。当压电陶瓷元件接受机械冲击时,即刻产生的高压脉冲电压可达数千伏,瞬间电流可达数万安,并在电极尖端放电而产生电弧。此功能用于电子打火机、燃灶、导弹引爆器中的点火器的发火元件。由于压电陶瓷具有陶瓷的基本性能,即强度高、硬度大、耐磨损、抗氧化,故用压电陶瓷制作的火石在电子打火机和燃气灶的点火器中使用寿命长,打火次数可达 100 万次以上。也由于压电陶瓷能量转换灵敏精确且转换效率高,故用在导弹引爆装置中作为点件,其引爆准确率相当高几乎无失误。

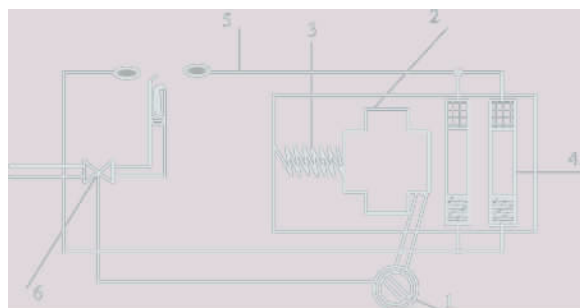


图 5-13 压电陶瓷制造的发火元件示意图

1—凸轮开关；2—冲击砧；3—弹簧；
4—陶瓷压电组件；5—导线；6—气阀

分析用压电陶瓷实现电子点火的工作过程：液化气电子点火装置如图 5-13 所示,当迅速按下手动凸轮开关 1 时,气阀 6 打开,同时凸轮凸出部分推动冲击砧 2,冲击砧对弹簧 3 向左压缩,当凸轮凸出部分离开冲击砧时,冲击砧在弹簧弹力作用下,迅速撞击陶瓷压电组件 4,压电效应产生,在其两极面上产生大量电荷,通过导线 5 在尖端放电产生火花,液化气被着火点燃。

5.4.5 压电式玻璃破碎报警器

压电式玻璃破碎探测器又称压电式玻璃破碎报警器,通常利用压电式拾音器,装在面对玻璃的位置,它只对高频的玻璃破碎声音进行有效的检测,不会受到玻璃本身振动的影响。目前普遍应用于玻璃门、窗的防护。玻璃破碎入侵探测器外形及内部电路如图 5-14 所示。

利用压电陶瓷的压电效应(压电陶瓷在外力作用下产生扭曲、变形时将会在其表面产生电荷),可以制成玻璃破碎入侵探测器。

将探测器贴在门窗玻璃上,上下表面分别用导线连接到控制电路上,一旦玻璃被重力打击或破裂,压电效应产生,经控制电路处理,报警器将产生声光报警。该不该报警由控制电路辨别决定。汽车经过、人走路、刮风等引起的振动要排除,只有打击玻璃才报警。这样就

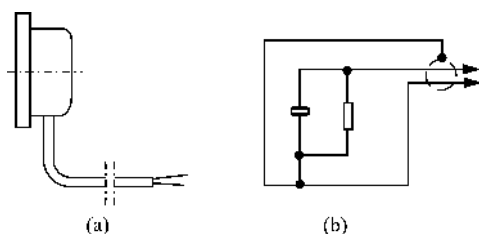


图 5-14 压电式玻璃破碎报警器

(a)外形；(b)内部电路

减少了大量的误报警。小到几十平方厘米，大到几平方米的不同厚度、规格的玻璃均可使用。安装时要注意粘贴牢固可靠，如与开关式报警器配套使用则效果更好。在居民住宅中再把门锁控制连成一体则是最简单实用的一套不错的防盗报警系统。

习题 5

- 5 - 1 为什么压电式传感器不能用于静态测量，只能用于动态测量？而且是频率越高越好？
- 5 - 2 简述石英晶体和压电陶瓷的工作原理。
- 5 - 3 简述压电式传感器的特点及主要的应用。
- 5 - 4 简述压电点火元件的工作原理。

第6章 磁电式传感器

本章要点

- 磁电式传感器的工作原理
- 磁电感应式传感器的结构、工作原理、技术参数和应用
- 霍尔式传感器的结构、工作原理、技术参数和应用

6.1 概 述

磁电式传感器简称感应式传感器,也称电动式传感器。磁电式传感器是通过磁电作用将被测量转换成感应电动势的一种传感器。它是一种机——电能量变换型传感器,不需要外部供电电源,电路简单,性能稳定,输出阻抗小,又具有一定的频率响应范围(一般为10~1000Hz),适用于振动、转速、扭矩等测量。但这种传感器的尺寸和重量都较大。

磁电式传感器分为磁电感应式传感器和霍尔式传感器两类。按工作原理不同,磁电感应式传感器可分为恒定磁通式和变磁通式,即动圈式传感器和磁阻式传感器。

6.2 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器又称磁电式传感器,是利用电磁感应原理将被测量(如振动、位移、转速等)转换成电信号的一种传感器。它不需要辅助电源,就能把被测对象的机械量转换成易于测量的电信号,是一种有源传感器。由于它输出功率大,且性能稳定,具有一定的工作带宽(10~1000 Hz),所以得到普遍应用。

6.2.1 工作原理

根据电磁感应定律,当导体在稳恒均匀磁场中,沿垂直磁场方向运动时,导体内产生的感应电势为:

$$e = \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| = Bl \frac{dx}{dt} = Blv \quad (6-1)$$

式中 B ——稳恒均匀磁场的磁感应强度;

l ——导体有效长度;

v ——导体相对磁场的运动速度。

当一个 W 匝线圈相对静止地处于随时间变化的磁场中时,设穿过线圈的磁通为 φ ,则线圈内的感应电势 e 与磁通变化率 $\frac{d\varphi}{dt}$ 有如下关系:

$$e = -W \frac{d\varphi}{dt} \quad (6-2)$$

根据以上原理，人们设计出两种磁电式传感器结构：变磁通式和恒定磁通式。变磁通式又称为磁阻式，图 6 - 1 是变磁通式磁电传感器，用来测量旋转物体的角速度。

图 6 - 1(a)为开磁路变磁通式，线圈、磁铁静止不动，测量齿轮安装在被测旋转体上，随被测体一起转动。每转动一个齿，齿的凹凸引起磁路磁阻变化一次，磁通也就变化一次，线圈中产生感应电势，其变化频率等于被测转速与测量齿轮上齿数的乘积。这种传感器结构简单，但输出信号较小，且因高速轴上加装齿轮较危险而不宜测量高转速的场合。

图 6 - 1(b)为闭磁路变磁通式传感器，它由装在转轴上的内齿轮和外齿轮、永久磁铁和感应线圈组成，内外齿轮齿数相同。当转轴连接到被测转轴上时，外齿轮不动，内齿轮随被测轴而转动，内、外齿轮的相对转动使气隙磁阻产生周期性变化，从而引起磁路中磁通的变化，使线圈内产生周期性变化的感应电动势，显然，感应电动势的频率与被测转速应成正比。

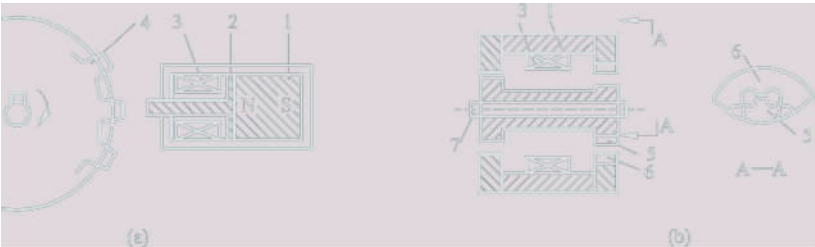


图 6 - 1 变磁通式磁电传感器结构
1—永久磁铁； 2—软磁铁； 3—感应线圈；
4—铁齿轮； 5—内齿轮； 6—外齿轮

图 6 - 2 为恒定磁通式磁电传感器的典型结构图。它由永久磁铁、线圈、弹簧、金属骨架等组成。

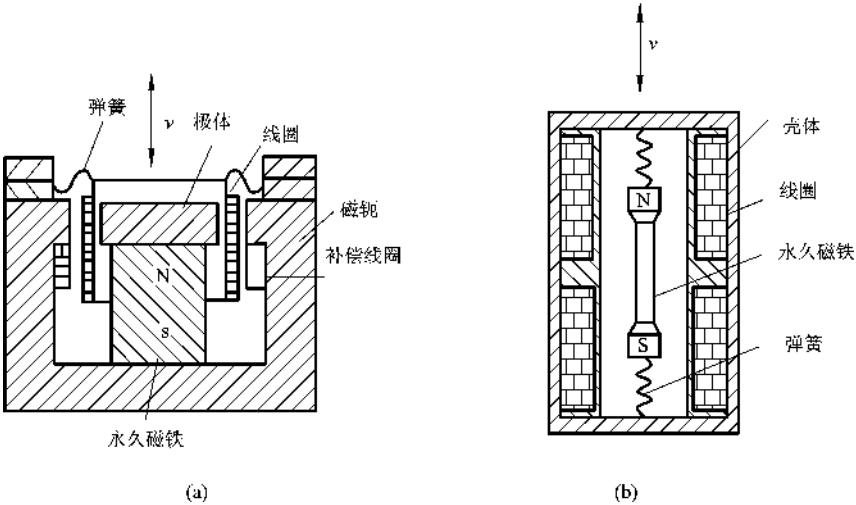


图 6 - 2 恒定磁通式磁电传感器结构图
(a)动圈式； (b)动铁式

磁路系统产生恒定的直流磁场,磁路中的工作气隙固定不变,因而气隙中磁通也是恒定不变的。其运动部件可以是线圈(动圈式),也可以是磁铁(动铁式),动圈式(图6-2(a))和动铁式(图6-2(b))的工作原理是完全相同的。当壳体随被测振动体振动时,由于弹簧较软,运动部件质量相对较大,当振动频率足够高(远大于传感器固有频率)时,运动部件惯性很大,来不及随振动体一起振动,近乎静止不动,振动能量几乎全被弹簧吸收,永久磁铁与线圈之间的相对运动速度接近于振动体振动速度,磁铁与线圈的相对运动切割磁力线,从而产生感应电势为:

$$e = - B_0 l W v \quad (6-3)$$

式中 B ——工作气隙磁感应强度;
 l ——每匝线圈平均长度;
 W ——线圈在工作气隙磁场中的匝数;
 v ——相对运动速度。

6.2.2 磁电感应式传感器基本特性

当测量电路接入磁电传感器电路时,如图6-3所示,磁电传感器的输出电流 I_0 为:

$$I_0 = \frac{E}{R + R_f} = \frac{B_0 l W v}{R + R_f} \quad (6-4)$$

式中 R_f ——测量线路输入电阻;
 R ——线圈等效电阻。

传感器的电流灵敏度为:

$$S_I = \frac{I_0}{v} = \frac{B_0 l W}{R + R_f} \quad (6-5)$$

而传感器的输出电压和电压灵敏度分别为:

$$U_0 = I_0 R_f = \frac{B_0 l W R_f}{R + R_f} \quad (6-6)$$

$$S_U = \frac{U_0}{v} = \frac{B_0 l W R_f}{R + R_f} \quad (6-7)$$

当传感器的工作温度发生变化或受到外界磁场干扰、受到机械振动或冲击时,其灵敏度将发生变化,从而产生测量误差,其相对误差为

$$\gamma = \frac{dS_L}{S_L} = \frac{dB_0}{B_0} + \frac{dL}{L} - \frac{dR}{R} \quad (6-8)$$

1. 非线性误差

磁电式传感器产生非线性误差的主要原因是:由于传感器线圈内有电流 I 流过时,将产生一定的交变磁通 φ_i ,此交变磁通叠加在永久磁铁所产生的工作磁通上,使恒定的气隙磁通变化,如图6-4所示。当传感器线圈相对于永久磁铁磁场的运动速度增大时,将产生较大的感应电势 e 和较大的电流 I ,由此而产生的附加磁场方向与原工作磁场方向相反,减弱了工作磁场的作用,从而使得传感器的灵敏度随着被测速度的增大而降低。当线圈的运动速度与图6-4所示方向相反时,感应电势 e 、线圈感应电流反向,所产生的附加磁场方向与工作磁场同向,从而增

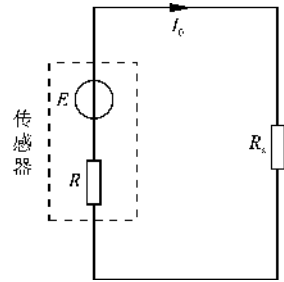


图6-3 磁电式传感器测量电路

大了传感器的灵敏度。其结果是线圈运动速度方向不同时，传感器的灵敏度具有不同的数值，使传感器输出基波能量降低，谐波能量增加，即这种非线性特性同时伴随着传感器输出的谐波失真。显然，传感器灵敏度越高，线圈中电流越大，这种非线性失真越严重。

为补偿上述附加磁场干扰，可在传感器中加入补偿线圈，如图 6 - 2(a)所示。补偿线圈通以经放大 K 倍的电流。适当选择补偿线圈参数，可使其产生的交变磁通与传感线圈本身所产生的交变磁通互相抵消，从而达到补偿的目的。

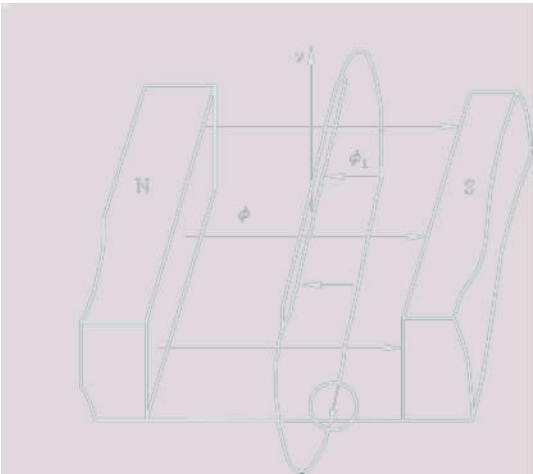


图 6 - 4 传感器电流的磁场

2. 温度误差

当温度变化时，式(6 - 8)中右边三项都不为零，对铜线而言每摄氏度变化量为： $dl/l \approx 0.167 \times 10^{-4}$ ， $dR/R \approx 0.43 \times 10^{-2}$ ， dB/B 每摄氏度的变化量决定于永久磁铁的磁性材料。对铝镍钴永久磁合金， $dB/B \approx - 0.02 \times 10^{-2}$ ，这样由式(6 - 3)可得近似值如下：

$$\gamma_t \approx \frac{- 4.5\%}{10}$$

这一数值是很可观的，所以需要进行温度补偿。补偿通常采用热磁分流器。热磁分流器由具有很大负温度系数的特殊磁性材料做成。它在正常工作温度下已将空气隙磁通分流掉一小部分。当温度升高时，热磁分流器的磁导率显著下降，经它分流掉的磁通占总磁通的比例较正常工作温度下显著降低，从而保持空气隙的工作磁通不随温度变化，维持传感器灵敏度为常数。

6.2.3 磁电感应式传感器的调节电路

磁电式传感器直接输出感应电势，且传感器通常具有较高的灵敏度，所以一般不需要高增益放大器。但磁电式传感器是速度传感器，若要获取被测位移或加速度信号，则需要配用积分或微分电路。图 6 - 5 为一般调节电路结构框图。

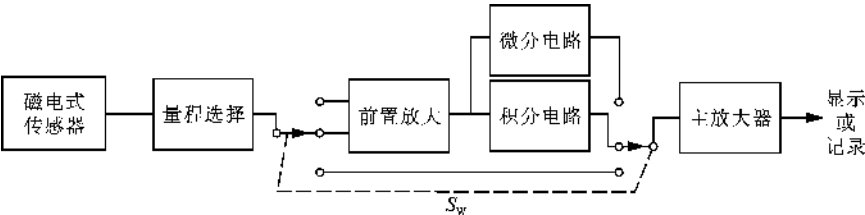


图 6 - 5 磁电式传感器调节电路结构框图

6.2.4 磁电感应式传感器的应用

1. 动圈式振动速度传感器

图 6-6 是动圈式振动速度传感器的结构示意图。其结构主要特点是：钢制圆形外壳，里面用铝支架将圆柱形永久磁铁与外壳固定成一体，永久磁铁中间有一小孔，穿过小孔的芯轴两端架起线圈和阻尼环，芯轴两端通过圆形膜片支撑架空且与外壳相连。工作时，传感器与被测物体刚性连接，当物体振动时，传感器外壳和永久磁铁随之振动，而架空的芯轴、线圈和阻尼环因惯性而不随之振动。因而，磁路空气隙中的线圈切割磁力线而产生正比于振动速度的感应电动势，线圈的输出通过引线输出到测量电路。该传感器测量的是振动速度参数，若在测量电路中接入积分电路，则输出电动势与位移成正比；若在测量电路中接入微分电路，则其输出与加速度成正比。

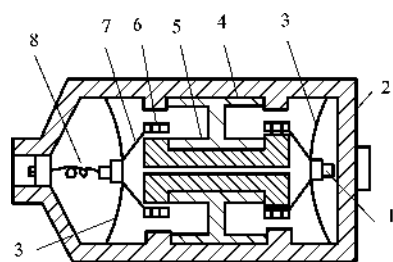


图 6-6 动圈式振动速度传感器

1—芯轴；2—外壳；3—弹簧片；4—铝支架；
5—永久磁铁；6—线圈；7—阻尼环；8—引线

2. 磁电式扭矩传感器

图 6-7 是磁电式扭矩传感器的工作原理图。在驱动源和负载之间的扭转轴的两侧安装有齿形圆盘。它们旁边装有相应的两个磁电传感器。

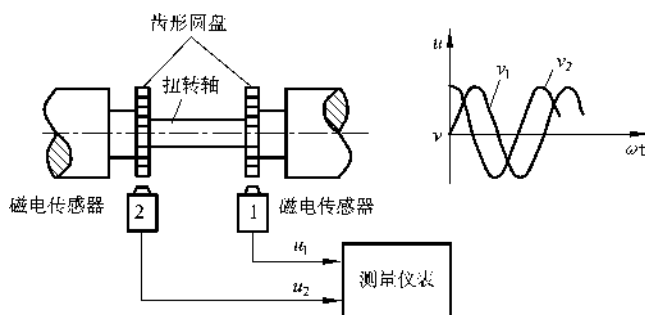


图 6-7 磁电式扭矩传感器工作原理图

磁电式传感器的结构见图 6-8 所示。传感器的检测元件部分由永久磁铁、感应线圈和铁芯组成。永久磁铁产生的磁力线与齿形圆盘交链。当齿形圆盘旋转时，圆盘齿凸凹引起磁路气隙的变化，于是磁通量也发生变化，在线圈中感应出交流电压，其频率在数值上等于圆盘上齿数与转数的乘积。

当扭矩作用在扭转轴上时，两个磁电传感器输出的感应电压 u_1 和 u_2 存在相位差。这个相位差与扭转轴的扭转角成正比。这样，传感器就可以把扭矩引起的扭转角转换成相位差的电信号。

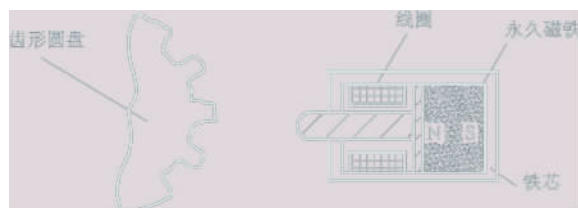


图 6-8 磁电式传感器结构图

6.3 霍尔传感器

霍尔传感器是基于霍尔效应的一种传感器。1879 年美国物理学家霍尔首先在金属材料中发现了霍尔效应，但由于金属材料的霍尔效应太弱而没有得到应用。随着半导体技术的发展，开始用半导体材料制成霍尔元件，由于它的霍尔效应显著而得到了应用和发展。霍尔传感器广泛用于电磁、压力、加速度、振动等方面的测量。

6.3.1 霍尔效应及霍尔元件

1. 霍尔效应

置于磁场中的静止载流导体，当它的电流方向与磁场方向不一致时，载流导体上平行于电流和磁场方向上的两个面之间产生电动势，这种现象称为霍尔效应。该电动势称霍尔电动势。如图 6-9 所示，在垂直于外磁场 B 的方向上放置一导电板，导电板通以电流 I ，方向如图所示。导电板中的电流使金属中自由电子在电场作用下做定向运动。此时，每个电子受洛伦兹力 f_l 的作用， f_l 的大小为：

$$f_l = eBv \quad (6-9)$$

式中 e ——电子电荷；

v ——电子运动平均速度；

B ——磁场的磁感应强度。

f_l 的方向在图 6-9 中是向内的，此时电子除了沿电流反方向做定向运动外，还在 f_l 的作用下漂移，结果使金属导电板内侧面面积累负电子，而外侧面面积累正电荷，从而形成了附加内电场 E_H ，称霍尔电场，该电场强度为

$$E_H = \frac{U_H}{b} \quad (6-10)$$

式中 U_H ——为电位差；

b ——为金属导电板宽度。

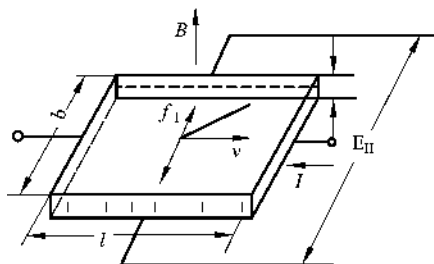


图 6-9 霍尔效应原理图

霍尔电场的出现，使定向运动的电子除了受洛伦兹力作用外，还受到霍尔电场力的作用，其力的大小为 eE_H 此力阻止电荷继续积累。随着内、外侧面面积累电荷的增加，霍尔电场增大，电子受到的霍尔电场力也增大，当电子所受洛伦兹力与霍尔电场作用力大小相等方向

相反,即

$$eE_H = eBv \quad (6-11)$$

时,则

$$E_H = Bv \quad (6-12)$$

此时电荷不再向两侧面积累,达到平衡状态。

若金属导电板单位体积内电子数为 n , 电子定向运动平均速度为 v , 则激励电流 $I = nevbd$, 即

$$v = \frac{I}{nebd} \quad (6-13)$$

将式(6-13)代入式(6-12)得

$$E_H = \frac{IB}{nebd} \quad (6-14)$$

将上式代入式(6-10)得

$$U_H = \frac{IB}{nebd} \quad (6-15)$$

式中令 $R_H = 1/ne$, 称之为霍尔常数, 其大小取决于导体载流子密度, 则

$$U_H = \frac{R_H IB}{d} = K_H IB \quad (6-16)$$

式中 $K_H = R_H/d$ 称为霍尔片的灵敏度。

由式(6-16)可见, 霍尔电势正比于激励电流及磁感应强度, 其灵敏度与霍尔系数 R_H 成正比而与霍尔片厚度 d 成反比。为了提高灵敏度, 霍尔元件常制成薄片形状。霍尔元件激励极间电阻 $R = \rho l/(bd)$, 同时 $R = U/I = El/I = vl/(\mu nevbd)$ (因为 $\mu = v/E$, μ 为电子迁移率), 则:

$$\frac{\rho l}{bd} = \frac{1}{\mu nevbd} \quad (6-17)$$

解得:

$$R_H = \mu\rho \quad (6-18)$$

从式(6-18)可知, 霍尔常数等于霍尔片材料的电阻率与电子迁移率 μ 的乘积。若要霍尔效应强, 则希望有较大的霍尔系数 R_H , 因此要求霍尔片材料有较大的电阻率和载流子迁移率。一般金属材料载流子迁移率很高, 但电阻率很小; 而绝缘材料电阻率极高, 但载流子迁移率极低, 故只有半导体材料才适于制造霍尔片。日前常用的霍尔元件材料有: 锗、硅、砷化镓、锑化铟等半导体材料。其中 N 型锗容易加工制造, 其霍尔系数、温度性能和线性度都较好。N 型硅的线性度最好, 其霍尔系数、温度性能同 N 型锗。锑化铟对温度最敏感, 尤其在低温范围内温度系数大, 但在室温时其霍尔系数较大。砷化镓的霍尔系数较小, 温度系数也较小, 输出特性线性度好。表 6-1 为常用国产霍尔元件的技术参数。

2. 霍尔元件基本结构

霍尔元件的结构很简单, 它是由霍尔片、四根引线和壳体组成的, 如图 6-10(a)所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片, 引出四根引线: 1、1' 两根引线加激励电压或电流, 称激励电极(控制电极); 2、2' 引线为霍尔输出引线, 称霍尔电极。霍尔元件的壳体是用非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装的。在电路中, 霍尔元件一般可用两种符号表示, 如图 6-10(b)所示。

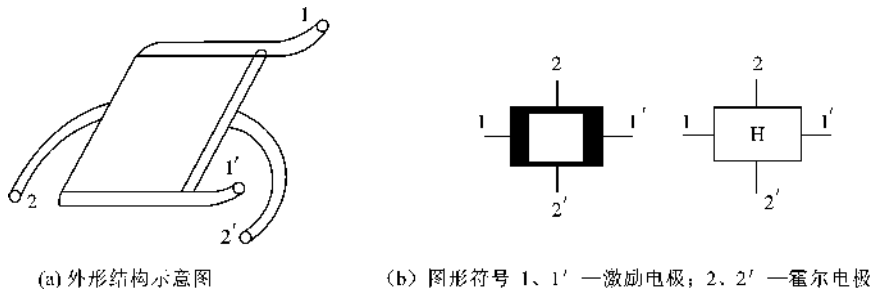


图 6 - 10 霍尔元件

3. 霍尔元件基本特性

(1)额定激励电流和最大允许激励电流 当霍尔元件自身温升 10 时所流过的激励电流称为额定激励电流。以元件允许最大温升为限制所对应的激励电流称为最大允许激励电流。因霍尔电势随激励电流增加而线性增加，所以使用中希望选用尽可能大的激励电流，因而需要知道元件的最大允许激励电流。改善霍尔元件的散热条件，可以使激励电流增加。

(2)输入电阻和输出电阻 激励电极间的电阻值称为输入电阻。霍尔电极输出电势对电路外部来说相当于一个电压源，其电源内阻即为输出电阻。以上电阻值是在磁感应强度为零，且环境温度在 20 ±5 时所确定的。

(3)不等位电势和不等位电阻 当霍尔元件的激励电流为 I 时，若元件所处位置磁感应强度为零，则它的霍尔电势应该为零，但实际不为零。这时测得的空载霍尔电势称为不等位电势，如图 6 - 11 所示。产生这一现象的原因有：

- ①霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位面上；
- ②半导体材料不均匀造成了电阻率不均匀或是几何尺寸不均匀；
- ③激励电极接触不良造成激励电流不均匀分布等。

表 6 - 1 常用国产霍尔元件的技术参数

参数名称/单位	符号	HZ - 1 型	HZ - 4 型	HT - 2 型	HS - 1 型
		材料(N 型)			
		Ge(111)	Ge(100)	InSb	InAs
电阻率/(Ω · cm)	ρ	0.8 ~ 1.2	0.4 ~ 0.5	0.008 ~ 0.005	
几何尺寸/mm ²	1 × b × d	8 × 4 × 0.2	8 × 4 × 0.2	8 × 4 × 0.2	8 × 4 × 0.2
输入电阻/Ω	R _i	110(1 ± 0.2)	45(1 ± 0.2)	0.8(1 ± 0.2)	1.2(1 ± 0.2)
输出电阻/Ω	R _a	100(1 ± 0.2)	40(1 ± 0.2)	0.5(1 ± 0.2)	1(1 ± 0.2)
灵敏系数/(mV/(mA · T))	K _H	> 1.2	> 4.0	0.18(1 ± 0.2)	0.1(1 ± 0.2)
不等位电阻/Ω	r _a	< 0.07	< 0.02	< 0.005	< 0.003
寄生直流电势/μV	U	< 150	< 100		
额定控制电流/mA	I	20	50	300	200

续表

参数名称/单位	符号	HZ - 1 型	HZ - 4 型	HT - 2 型	HS - 1 型
		材料(N 型)			
		Ge(111)	Ge(100)	InSb	InAs
霍尔电势温度系数 / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	σ	0.04%	0.03%	- 1.5%	
内阻温度系数 / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	δ	0.5%	0.3%	- 0.5%	
热阻 / ($^{\circ}\text{C}/\text{mW}^{-1}$)	R_a	0.4	0.1		
工作温度 / $^{\circ}\text{C}$	T	- 10 ~ +45	- 40 ~ +75	0 ~ +40	- 40 ~ +60

不等位电势也可用不等位电阻表示，即：

$$r_o = \frac{U}{I}$$

(6 - 19)

式中 U ——不等位电势；
 r_o ——不等位电阻；
 I ——激励电流。

由式(6 - 19)可以看出，不等位电势就是激励电流流经不等位电阻 r_o 所产生的电压，如图 6 - 11 所示。

(4)寄生直流电势 在外加磁场为零、霍尔元件用交流激励时，霍尔电极输出除了交流不等位电势外，还有一直流电势，称为寄生直流电势。其产生的原因有：

- ①激励电极与霍尔电极接触不良，形成非欧姆接触，造成整流效果；
 - ②两个霍尔电极大小不对称，则两个电极点的热容不同，散热状态不同而形成极间温差电势。
- 寄生直流电势一般在 1 mV 以下，它是影响霍尔片温漂的原因之一。

(5)霍尔电势温度系数 在一定磁感应强度和激励电流下，温度每变化 1 $^{\circ}\text{C}$ 时，霍尔电势变化的百分率称为霍尔电势温度系数。它同时也是霍尔系数的温度系数。

4. 霍尔元件不等位电势补偿

不等位电势与霍尔电势具有相同的数量级，有时甚至超过霍尔电势，而实用中要消除不等位电势是极其困难的，因而必须采用补偿的方法。分析不等位电势时，可以把霍尔元件等效为一个电桥，用分析电桥平衡来补偿不等位电势。

图 6 - 12 为霍尔元件的等效电路，其中 A、B 为霍尔电极，C、D 为激励电极，电极分布电阻分别用 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 表示，把它们看作电桥的四个桥臂。理想情况下，

电极 A、B 处于同一等位面上， $r_1 = r_2 = r_3 = r_4$ ，电桥平衡，不等位电势 U_o 为 0。实际上，由于 A、B 电极不在同一等位面上，此四个电阻阻值不相等，电桥不平衡，不等位电势不等于零。此时可根据 A、B 两点电位的高低，判断应在某一桥臂上并联一定的电阻，使电桥达到平衡，从而使

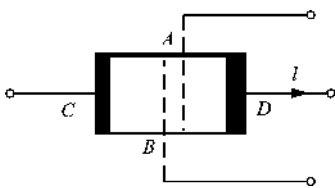


图 6 - 11 不等位电势示意图

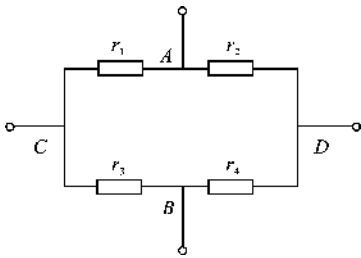


图 6 - 12 霍尔元件的等效电路

不等位电势为零。几种补偿线路如图 6 - 13 所示。图(a)、(b)为常见的补偿电路,图(c)、(d)相当于在等效电桥的两个桥臂上同时并联电阻,图(d)用于交流供电的情况。

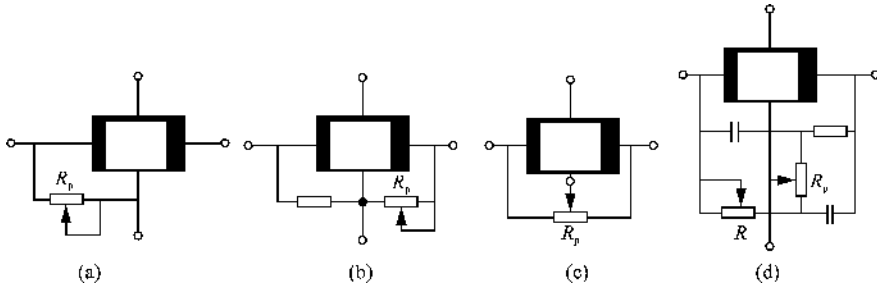


图 6 - 13 不等位电势补偿电路

5. 霍尔元件温度补偿

霍尔元件是采用半导体材料制成的,因此它们的许多参数都具有较大的温度系数。当温度变化时,霍尔元件的载流子浓度、迁移率、电阻率及霍尔系数都将发生变化,从而使霍尔元件产生温度误差。

为了减小霍尔元件的温度误差,除选用温度系数小的元件或采用恒温措施外,由 $U_H = K_H IB$ 可看出:采用恒流源供电是个有效措施,可以使霍尔电势稳定。但也只能是减小由于输入电阻随温度变化所引起的激励电流 I 的变化的影响。

霍尔元件的灵敏系数 K_H 也是温度的函数,它随温度变化将引起霍尔电势的变化。霍尔元件的灵敏度系数与温度的关系可写成:

$$K_H = K_{H0} (1 + \alpha \Delta T) \quad (6 - 20)$$

式中 K_{H0} ——温度 T_0 时的 K_H 值;

$\Delta T = T - T_0$ ——温度变化量;

α ——霍尔电势温度系数。

大多数霍尔元件的温度系数 α 是正值,它们的霍尔电势随温度升高而增加 $\alpha \Delta T$ 倍。但如果同时让激励电流 I_0 相应地减小,并能保持 $K_H \cdot I_0$ 乘积不变,也就抵消了灵敏系数 K_H 增加的影响。图 6 - 14 就是按此思路设计的一个既简单、补偿效果又较好的补偿电路。电路中 I_s 为恒流源,分流电阻 R_p 与霍尔元件的激励电极相并联。当霍尔元件的输入电阻随温度升高而增加时,旁路分流电阻 R_p 自动地增大分流,减小了霍尔元件的激励电流 I_H ,从而达到补偿的目的。

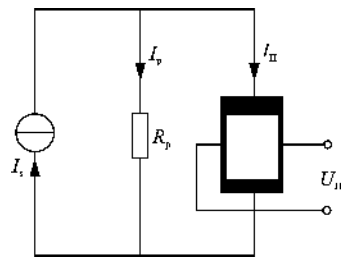


图 6 - 14 恒流温度补偿电路

在图 6 - 14 所示的温度补偿电路中,设初始温度为 T_0 ,霍尔元件输入电阻为 R_{i0} ,灵敏系数为 K_{H0} ,分流电阻为 R_{p0} ,根据分流概念得:

$$I_{H0} = \frac{R_{p0} I_0}{R_{p0} + R_{i0}} \quad (6 - 21)$$

当温度升至 T 时,电路中各参数变为:

$$R_i = R_{i0}(1 + \delta\Delta T) \quad (6-22)$$

$$R_p = R_{p0}(1 + \beta\Delta T) \quad (6-23)$$

式中 δ ——霍尔元件输入电阻温度系数；

β ——分流电阻温度系数。

则

$$I_H = \frac{R_p I_s}{R_p + R_i} = \frac{R_{p0}(1 + \beta\Delta T)I_s}{R_{p0}(1 + \beta\Delta T) + R_{i0}(1 + \delta\Delta T)} \quad (6-24)$$

虽然温度升高了 ΔT ，为使霍尔电势不变，补偿电路必须满足温升前、后的霍尔电势不变，即 $U_{H0} = U_H$ ，则：

$$K_{H0} I_{H0} B = K_H I_H B \quad (6-25)$$

有：

$$K_{H0} I_{H0} = K_H I_H \quad (6-26)$$

将式(6-20)、(6-21)、(6-24)代入上式，经整理并略去 $\alpha\beta(\Delta T)^2$ 高次项后得

$$R_{p0} = \frac{(\delta - \beta - \alpha)R_{i0}}{\alpha} \quad (6-27)$$

当霍尔元件选定后，它的输入电阻 R_{i0} 和温度系数 δ 及霍尔电势温度系数 α 是确定值。由式(6-27)即可计算出分流电阻 R_{p0} 及所需的温度系数 β 值。为了满足 R_{p0} 及 β 两个条件，分流电阻可取温度系数不同的两种电阻的串、并联组合，这样虽然麻烦但效果很好。

6.3.2 霍尔传感器的应用

1. 霍尔式微位移传感器

霍尔元件具有结构简单、体积小、动态特性好和寿命长的优点，它不仅用于磁感应强度、有功功率及电能参数的测量，也在位移测量中得到广泛应用。

图 6-15 给出了一些霍尔式位移传感器的工作原理图。图 6-15(a) 是磁场强度相同的两块永久磁铁，同极性相对地放置，霍尔元件处在两块磁铁的中间。由于磁铁中间的磁感应强度 $B=0$ ，因此霍尔元件输出的霍尔电势 U_H 也等于零，此时位移 U_{H0} 。若霍尔元件在内磁铁中产生相对位移，霍尔元件感受到的磁感应强度也随之改变，这时 U_H 不为零，其量值大小反映出霍尔元件与磁铁之间相对位置的变化量。这种结构的传感器，其动态范围可达 3mm，分辨率为 0.001mm。

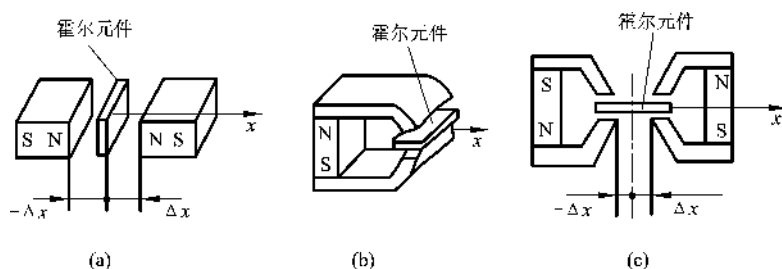


图 6-15 霍尔式位移传感器的工作原理示意图

(a) 磁场强度相同传感器；(b) 简单的位移传感器；(c) 结构相同的位移传感器

图 6 - 15(b)是一种结构简单的霍尔位移传感器,是由一块永久磁铁组成磁路的传感器,在霍尔元件处于初始位置 $\Delta x = 0$ 时,霍尔电势 U_H 不等于零。

图 6 - 15(c)是一个由两个结构相同的磁路组成的霍尔式位移传感器,为了获得较好的线性分布,在磁极端面装有极靴,霍尔元件调整好初始位置时,可以使霍尔电势 $U_H = 0$ 。这种传感器灵敏度很高,但它所能检测的位移量较小,适合于微位移量及振动的测量。

2. 霍尔式转速传感器

图 6 - 16 是几种不同结构的霍尔式转速传感器。转盘的输入轴与被测转轴相连,当被测转轴转动时,转盘随之转动,固定在转盘附近的霍尔传感器便可在每一个小磁铁通过时产生一个相应的脉冲,检测出单位时间的脉冲数,便可知被测转速。根据磁性转盘上小磁铁数目的多少就可确定传感器测量转速的分辨率。

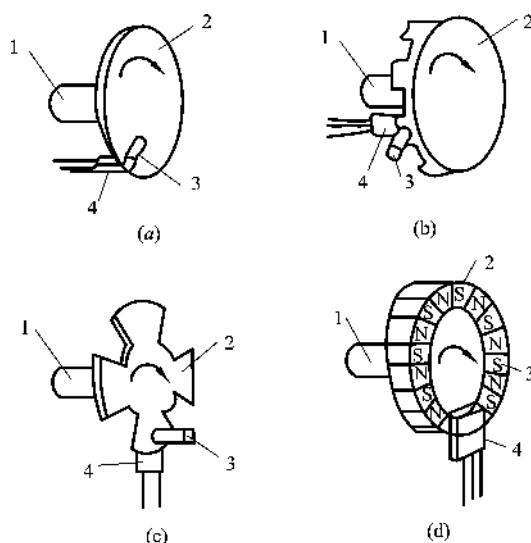


图 6 - 16 几种不同结构的霍尔式转速传感器

1—输入轴； 2—转盘； 3—小磁铁； 4—霍尔传感器

3. 霍尔计数装置

霍尔集成元件是将霍尔元件和放大器等集成在一块芯片上。它由霍尔元件、放大器、电压调整电路、电流放大输出电路、失调调整及线性度调整电路等几部分组成,有三端 T 形单端输出和八脚双列直插型双端输出两种结构。它的特点是输出电压在一定范围内与磁感应强度呈成线性关系。霍尔开关传感器 SL3501 是具有较高灵敏度的集成霍尔元件,能感受到很小的磁场变化,因而可对黑色金属零件进行计数检测。图 6 - 17 是对钢球进行计数的工作示意图和电路图。当钢球通过霍尔开关传感器时,传感器可输出峰值 20 mV 的脉冲电压,该电压经运算放大器($\mu A741$)放大后,驱动半导体三极管 V(2N5812)工作,V 输出端便可接计数器进行计数,并由显示器显示检测数值。

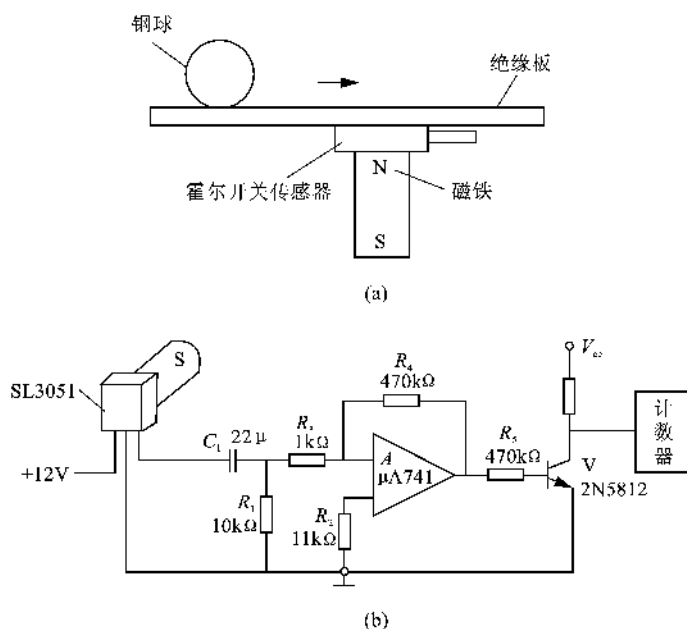


图 6-17 霍尔计数装置的工作示意图及电路图

习题 6

- 6-1 简述变磁通式和恒磁通式磁电传感器的工作原理。
- 6-2 磁电式传感器的误差及其补偿方法是什么？
- 6-3 磁电式传感器测量扭矩的工作原理是什么？
- 6-4 什么是霍尔效应？霍尔电势与哪些因素有关？
- 6-5 影响霍尔元件输出零点的因素有哪些？怎样补偿？
- 6-6 温度变化对霍尔元件输出电势有什么影响？如何补偿？
- 6-7 试证明霍尔式位移传感器的输出电压 U_H 与位移 Δx 成正比关系。
- 6-8 试分析霍尔元件输出接有负载 R_L 时，利用恒压源和输入回路串联电阻 R 进行温度补偿的条件。
- 6-9 要进行两个电压 U_1 、 U_2 乘法运算，若采用霍尔元件作为运算器，请提出设计方案，并画出测量系统的原理图。

第 7 章 热电式传感器

本章要点

- 热电式传感器的种类、结构工作原理及应用
- 热电偶的结构工作原理及调节电路
- 热电阻的结构工作原理及调节电路
- 热释电传感器的结构工作原理及调节电路
- 集成温度传感器

7.1 概 述

热电式传感器是一种利用敏感元件的电磁参数随温度变化而变化的特性来测量温度的装置。在各种热电式传感器中,把温度量转换为电势和电阻的方法最为普遍。其中将温度转换为电势的热电式传感器叫热电偶温度传感器,将温度转换为电阻值的热电式传感器叫电阻式温度传感器。金属热电式传感器简称热电阻,半导体式传感器简称热敏电阻。热电式传感器目前在工业生产中得到了广泛的应用,并且可以选用定型的显示仪表和记录仪来进行显示和记录。在计算机控制系统中,热电式传感器的输出信号可直接进入 I/O 卡,进行信号的预处理、显示和控制。

7.2 热电偶 (Thermocouple Sensors)

热电偶由于性能稳定、结构简单、制造方便、测温范围宽、热惯性小、准确度高、输出信号便于远传的特点,在工业和科研领域中得到广泛应用。常用的热电偶,低温可测到 -50°C ,高温可达到 $+1600^{\circ}\text{C}$ 。若配用特殊材料,其温度范围可达到 $-150^{\circ}\text{C} \sim +2000^{\circ}\text{C}$ 。如图 7-1 所示,热电偶温度传感器将被测温度转换成毫伏级热电势,通过连接导线与显示表构成温度检测系统,从而实现温度的显示、记录和调节。

7.2.1 热电偶的基本原理

1. 热电效应

1821 年,德国物理学家赛贝克(T. J. Seebeck)用两种不同金属组成闭合回路,并用酒精灯加热其中一个接触点(称为结点),发现放在回路中的电流表指针发生偏转。如果用两盏酒精灯对两个结点同时加热,指针的偏转角反而减小。显然,指针的偏转说明回路中有电动势产生并有电流在回路中流动,电流的强弱与两个结点的温差有关。

据此,赛贝克发现和证明了将两种不同性质的导体 A、B 组成闭合回路,如图 7-2 所示。若节点(1)、(2)处于不同的温度($T \neq T_0$)时,两者之间将产生一热电势,在回路中形成

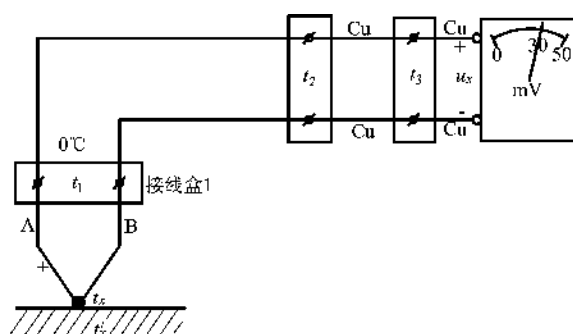


图 7-1 热电偶测温示意图

一定大小的电流,这种现象称为热电效应。两种不同材料的导体所组成的回路称为“热电偶”,组成热电偶的导体称为“热电极”,热电偶产生的电动势称为热电势。热电偶的两个结点中,置于温度为 T 的被测对象中的结点称之为测量端,又称为工作端或热端;而置于参考温度为 T_0 的另一结点称之为参考端,又称自由端或冷端。其电势由接触电势(珀尔帖电势)和温差电势(汤姆逊电势)两部分组成。

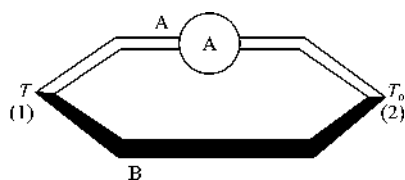


图 7-2 热电效应示意图

(1) 接触电势

当两种金属接触在一起时,由于不同导体的自由电子密度不同,在结点处就会发生电子迁移扩散。失去自由电子的金属呈正电位,得到自由电子的金属呈负电位。当扩散达到平衡时,在两种金属的接触处形成电势,称为接触电势。其大小除与两种金属的性质有关外,还与结点温度有关。

在温度为 T 时的接触电势:

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (7-1)$$

式中 $E_{AB}(T)$ ——A、B 两种金属在温度 T 时的接触电势;

k ——波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} (\text{J/K})$;

e ——电子电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19} (\text{C})$;

N_A 、 N_B ——金属 A、B 的自由电子密度;

T ——结点处的绝对温度。

(2) 温差电势

热电回路各电势示意图如图 7-3 所示。对于单一金属,如果两端的温度不同,则温度高端的自由电子向低端迁移,使单一金属两端产生不同的电位,形成电势,称为温差电势。其大小与金属材料的性质和两端的温差有关,可表示为:

$$E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT \quad (7-2)$$

式中 $E_A(T, T_0)$ ——金属 A 两端温度分别为 T 与 T_0 时的温差电势;

σ_A ——温差系数；

T 、 T_0 ——高、低温端的绝对温度。

对于图 7-3 所示 A、B 两种导体构成的闭合回路，总的温差电势为：

$$E_A(T, T_0) - E_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (7-3)$$

于是，回路的总热电势为：

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) + \int_{T_0}^T (\sigma_A -$$

$\sigma_B) dT$

(7-4)

由此可以得出如下结论：

如果热电偶两电极的材料相同，即 $N_A = N_B$ ， $\sigma_A = \sigma_B$ ，虽然两端温度不同，但闭合回路的总热电势仍为零。因此，热电偶必须用两种不同材料作热电极。

如果热电偶两电极材料不同，而热电偶两端的温度相同，即 $T = T_0$ ，闭合回路中也不产生热电势。

在实际测温时，必须在热电偶闭合回路中引入连接导线和仪表。

2. 热电偶基本定律

(1) 中间导体定律

设在图 7-4 的 T_0 处断开，接入第三种导体 C，如图 7-5 所示。若三个结点温度均为 T_0 ，则回路中的总热电势为：

$$E_{AB}(T_0) + E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) = 0 \quad (7-5)$$

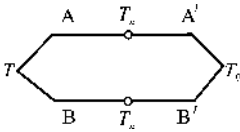


图 7-4 热电偶连接导线示意图

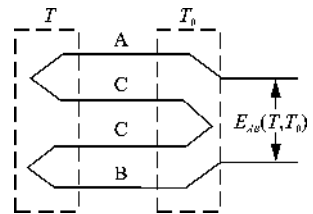


图 7-5 标准电极定律示意图

若 A、B 结点温度为 T ，其余结点温度为 T_0 ，而且 $T > T_0$ ，则回路中的总热电势为：

$$E_{ABC}(T_0) = E_{AB}(T_0) + E_{BC}(T_0, \rho) + E_{CA}(T_0, \rho) \quad (7-6)$$

由式(7-5)可得：

$$-E_{AB}(T_0) = E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) \quad (7-7)$$

将式(7-6)代入式(7-8)可得：

$$E_{ABC}(T, T_0) = E_{AB}(T, \rho) - E_{AB}(T_0, \rho) \quad (7-8)$$

结论：导体 A、B 组成的热电偶，当引入第三导体时，只要保持其两端温度相同，则对回路总热电势无影响，这就是中间导体定律。利用这个定律可以将第三导体换成毫伏表，只要

保证两个接点温度一致,就可以完成热电势的测量而不影响热电偶的输出。根据这一定律,可以将热电偶的一个接点断开接入第三种导体,也可以将热电偶的一种导体断开接入第三种导体,只要每一种导体的两端温度相同,均不影响回路的总热电动势。在实际测温电路中,必须有连接导线和显示仪器,若把连接导线和显示仪器看成第三种导体,只要它们的两端温度相同,则不影响总热电动势。若在热电偶回路中接入多种导体,只要每种导体两端的温度相同,也可以得到相同的结论。

(2) 连接导体定律与中间温度定律

在热电偶回路中,如图7-4所示,若导体A、B分别与连接导线A'、B'相接,接点温度分别为 T 、 T_n 、 T_0 ,则回路的总热电势为:

$$E_{ABBA'}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (7-9)$$

连接导体定律:回路的总电势等于热电偶电势 $E_{AB}(T, T_n)$ 与连接导线电势 $E_{A'B'}(T_n, T_0)$ 的代数之和。连接导体定律是工业上运用补偿导线进行温度测量的理论基础。

中间温度定律:当导体A与A'、B与B'材料分别相同时,则式(7-9)可写为:

$$E_{AB}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (7-10)$$

回路的总热电势等于 $E_{AB}(T, T_n)$ 与 $E_{AB}(T_n, T_0)$ 的代数之和。 T_n 称为中间温度。中间温度定律为制订分度表奠定了理论基础。热电偶的热电势只取决于构成热电偶的两个电极A、B的材料性质以及A、B两个节点的温度值 T 、 T_0 ,而与温度热电极的分布以及热电极的尺寸和形状无关。

中间温度定律在热电偶测温中应用极为广泛。根据该定律,我们可以在冷端温度为任一恒定值时,利用热电偶分度表求出工作端的被测温度值。

例如,用镍铬—镍硅热电偶测量炉温时,当冷端温度 $T_0 = 30^\circ\text{C}$ 时,测得热电势 $E(T, T_0) = 39.17\text{mV}$,求实际炉温。

由 $T_0 = 30^\circ\text{C}$ 查分度表得 $E(30, 0) = 1.2\text{mV}$,根据中间温度定律得:

$$E(T, 0) = E(T, 30) + E(30, 0) = 39.17 + 1.2 = 40.37(\text{mV})。$$

则查表得炉温 $T = 946^\circ\text{C}$ 。

(3) 标准电极定律

图7-5为标准电极定律示意图。图中C为标准电极,接在热电偶A、B之间,形成三个热电偶组成的回路。经过推导得:

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \quad (7-11)$$

表明标准电极C与各种电极配对时的总热电势为两电极A、B配对后的电势之差。由于铂的物理和化学性能稳定,熔点高,易提纯,通常采用纯铂丝制成标准电极C。由此可见,只要知道两种导体分别与标准电极组成热电偶时的热电动势,就可以依据标准电极定律计算出任意两种导体组成热电偶时的热电动势。从而简化了热电偶的选配工作。

7.2.2 热电偶的类型及结构

1. 热电偶的类型

常用热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类。所谓标准热电偶是指国家标准规定了其热电势与温度的关系、允许误差、并有统一的标准分度表的热电偶。标准热电偶有与其配套的显示仪表可供选用。非标准化热电偶在使用范围或数量级上均不及标准化热电偶,

一般也没有统一的分度表，主要用于某些特殊场合的测量。

我国从 1991 年开始采用国际计量委员会规定的“1990 年国际温标”(简称 ITS - 90)的新标准。按此标准，共有 8 种标准化了的通用热电偶，如表 7 - 1 所示。表中所列热电偶中，写在前面的热电极 为正极，写在后面的为负极。对于每一种热电偶，还制定了相应的分度表，并且有相应的线性化集成电路与之对应。国际电工委员会向世界各国推荐 8 种热电偶作为标准化热电偶。

表 7 - 1 8 种国际通用热电偶特性表

名 称	分 度 号	测温范 围/	100 时的 热电势/mV	1000 时的 热电势/mV	特 点
铂铑 ₃₀ - 铂铑 ₆	B	50 ~ 1820	0. 033	4. 834	熔点高，测温上限高，性能稳定，精度高， 价昂贵，热电势小，线形差；只适用于高温域 的测量
铂铑 ₁₃ - 铂	R	- 50 ~ 1768	0. 647	10. 506	性能稳定，复现性好；但热电势较小，不 能在金属蒸气和还原性气体中使用，多用于精 密测量
铂铑 ₁₀ - 铂	S	- 50 ~ 1768	0. 646	9. 587	优点同上；但性能不如 R 热电偶；长期以 来曾经作为国际温标的法定标准热电偶
镍铬 - 镍硅	K	- 270 ~ 1370	4. 096	41. 276	热电势大，线性好，稳定性好，价廉；多 用于工业测量
镍铬硅 - 镍硅	N	- 270 ~ 1300	2. 744	36. 256	是一种新型热电偶，各项性能均比 K 热 电偶好，适宜于工业测量
镍铬 - 铜镍 (康铜)	E	- 270 ~ 800	6. 319	—	线性好，耐高湿度，价廉；但不能用于还 原性气体；多用于工业测量
铁 - 铜镍 (康铜)	J	- 210 ~ 760	5. 269	—	价格低廉，在还原性气体中较稳定；但纯 铁易被腐蚀和氧化；多用于工业测量
铜 - 铜镍 (康铜)	T	- 270 ~ 400	4. 279	—	价廉，加工性能好，离散性小，性能稳定， 线性好，精度高；多用于低温域测量。

注：铂铑₃₀表示该合金含 70% 铂及 30% 铑，以下类推。

我国标准化热电偶也有 8 种，分别是：铂铑 10 - 铂(分度号为 S)、铂铑 13 - 铂(R)、铂铑 30 - 铂铑 6(B)、镍铬 - 镍硅(K)、镍铬 - 康铜(E)、铁 - 康铜(J)、铜 - 康铜(T)和镍铬硅 - 镍硅(N)。下面简要介绍常用的几种：

(1) 铂铑 10 - 铂热电偶

组成：由 $\varphi 0.5\text{mm}$ 的纯铂丝和直径相同的铂铑丝制成，分度号为 S。铂铑丝为正极，纯铂丝为负极。

特点：热电性能好，抗氧化性强，宜在氧化性、惰性气体中连续使用。长期适用的温度为 1400°C ，超过此温度时，即使在空气中纯铂丝也将再结晶而使晶粒增大。短期使用温度为 1600°C 。在所有的热电偶中，它的准确度等级最高，通常用作标准或测量高温的热电偶，其使用温度范围广 ($0 \sim 1600^\circ\text{C}$)，均质性及互换性好。

其缺点是价格昂贵，热电势较小，需配灵敏度高的显示仪表。

(2) 镍铬 - 镍硅（镍铝）热电偶

组成：镍铬为正极，镍硅为负极，分度号为 K。

特点：使用温度范围宽 ($50 \sim 1300^\circ\text{C}$)，高温下性能较稳定，热电动势和温度的关系近似线性，价格便宜，因此是目前工矿企业用量最大的一种热电偶。它适用于在氧化性和惰性气体中连续使用，短期使用温度为 1200°C ，长期使用温度为 1000°C 。

(3) 镍铬 - 康铜热电偶

组成：镍铬为正极，康铜为负极，分度号为 E。

特点：它的最大特点是在常用热电偶中热电动势最大，即灵敏度最高，适宜在 $50 \sim 870^\circ\text{C}$ 范围内的氧化性或惰性气体中使用，尤其适宜在 0°C 以下使用。在湿度大的情况下，较其他热电偶耐腐蚀。

(4) 铜 - 康铜热电偶

组成：纯铜为正极，康铜为负极，分度号为 T。

特点：在金属热电偶中准确度最高，热电丝均匀性好，使用温度范围为 $-200 \sim 350^\circ\text{C}$ 。

表 7-2 铂铑₁₀ - 铂热电偶分度表(分度号: S 冷端温度为 0°C)

测量端温度 / $^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热 电 动 势 / mV									
0	0.000	0.055	0.133	0.173	0.235	0.299	0.365	0.432	0.502	0.573
100	0.645	0.719	0.795	0.872	0.950	1.029	1.109	1.190	1.273	1.356
200	1.440	1.525	1.611	1.698	1.785	1.873	1.962	2.051	2.141	2.232
300	2.323	2.414	2.506	2.599	2.692	2.786	2.880	2.974	3.069	3.164
400	3.260	3.356	3.452	3.549	3.645	3.743	3.840	3.938	4.036	4.135
500	4.234	4.333	4.432	4.532	4.632	4.732	4.832	4.933	5.034	5.135
600	5.237	5.339	5.442	5.544	5.648	5.751	5.855	5.960	6.064	6.169
700	6.274	6.380	6.486	6.592	6.699	6.805	6.913	7.020	7.128	7.236
800	7.345	7.454	7.563	7.672	7.782	7.892	8.003	8.114	8.225	8.336
900	8.448	8.560	8.673	8.786	8.899	9.012	9.126	9.240	9.355	9.470
1000	9.585	9.700	9.816	9.932	10.048	10.165	10.282	10.400	10.517	10.635

续表

测量端温度/	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热 电 动 势 /mV									
1100	10.745	10.872	10.991	11.110	11.229	11.348	11.467	11.587	11.707	11.827
1200	11.947	12.067	12.188	12.308	12.429	12.550	12.671	12.792	12.913	13.034
1300	13.155	13.276	13.397	13.519	13.640	13.761	13.883	14.004	14.125	14.247
1400	14.368	14.489	14.610	14.731	14.852	14.973	15.094	15.215	15.336	15.456
1500	15.576	15.697	15.817	15.937	15.057	16.176	16.296	16.415	16.534	16.653
1600	16.771	16.890	17.008	17.125	17.243	17.360	17.477	17.594	17.711	17.826
1700	17.942	18.056	18.170	18.282	18.394	18.504	18.612			

表 7 - 3 最常用的热电偶技术资料

热电偶名称	分度	热电极材料			电阻率 20℃时 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	100℃时电 势 (参比端 0℃) /mV	使用温度/℃		允许误差/℃			
		极性	识别	化学成分			长期	短期	温度 (℃)	允许 误差	温度 (℃)	允许 误差
铂铑-铂		正	较硬	90%Pt 10%Rh	0.24	0.643	1300	1600	≤ 600	± 2.4	> 600	$\pm 0.4\%t$
		负	较软	100%Pt	0.16							
镍铬-镍硅和 镍铬-镍铝		正	不亲磁	9%~10% Cr,0.4% Si,其余 Ni	0.68	4.10	1000	1300	≤ 400	± 4	> 400	$\pm 0.75\%t$
		负	稍亲磁	2.5%~3% Si,Co $\leq$ 0.6%其 余Ni	0.25~0.38							
铜-康铜		正	红色	100%Cu	0.017	4.26	300	300	-200 ~-40	$\pm 2\%t$	-40~ 400	$\pm 0.75\%t$
		负	银白色	60%Cu 40Ni	0.49							

2. 热电偶的结构

热电偶的基本结构是由热电极，绝缘材料和保护管组成。

热电偶简单分为装配式热电偶，铠装式热电偶和特殊形式热电偶；按使用环境细分有耐高温热电偶，耐磨热电偶，耐腐热电偶，耐高压热电偶，隔爆热电偶，铝液测温用热电偶，循

环硫化床用热电偶,水泥回转窑炉用热电偶,阳极焙烧炉用热电偶,高温热风炉用热电偶,汽化炉用热电偶,渗碳炉用热电偶,高温盐浴炉用热电偶,铜、铁及钢水用热电偶,抗氧化钨铼热电偶,真空炉用热电偶,铂铑热电偶等。

工业热电偶作为测量温度的传感器,通常与显示仪表、记录仪表或计算机等配套使用。可以直接测量各种生产过程中气体、液体、熔体及固体表面的温度。

(1) 普通热电偶

普通工业装配式热电偶作为测量温度的感应元件,通常和显示仪表、记录仪表和计算机控制系统配套使用。它可以直接测量各种生产过程中从 0 到 1800 范围的液体、蒸汽和气体介质温度。热电偶通常由热电极、绝缘管、保护套管和接线盒等几个主要部分组成,其常见外形结构如图 7-6 所示。

①热电极 又称偶丝,它是热电偶的基本组成部分。普通金属做成的偶丝,其直径一般为 0.5~3.2mm,贵金属做成的偶丝,直径一般为 0.3~0.6mm。偶丝的长度则由使用情况、安装条件,特别是工作端在被测介质中插入的深度来决定,通常为 300~1000mm,常用的长度为 350mm。

②绝缘管 又称绝缘子,它是用于热电极之间及热电极与保护套管之间进行绝缘保护的零件。形状一般为圆形或椭圆形,中间开有二个、四个或六个孔。偶丝穿孔而过。材料为粘土质、高铝质、刚玉质等,材料选用视使用的热电偶而定。在室温下,绝缘管的绝缘应在 5MΩ 以上。

③保护套管 它是用来保护热电偶感温元件免受被测介质化学腐蚀和机械损伤的装置。保护套管应具有耐高温、耐腐蚀的性能,要求导热性能好,气密性好。其材料有金属、非金属以及金属陶瓷三大类。保护套管的材料选择主要是依据被测介质和使用的环境条件。金属材料有铝、黄铜、碳钢、不锈钢等,其中 1Cr18Ni9Ti 不锈钢是目前热电偶保护套管使用的典型材料。非金属材料有高铝质(85%~90% Al_2O_3)、刚玉质(99% Al_2O_3),使用温度都在 1300 以上。金属陶瓷材料如氧化镁加金属钼,这种材料使用温度在 1700,且在高温下有很好的抗氧化能力,适用于钢水温度的连续测量。形状一般为圆柱形。

④接线盒 根据被测量温度的对象及现场环境条件,设计有普通式、防溅式、防水式和接插座式等四种结构形式。用来固定接线座和作为连接补偿导线的装置。

普通式接线盒无盖,仅由盒体构成,其接线座用螺钉固定在盒体上,适用于环境条件良好、无腐蚀性气体的现场。防溅式、防水式接线盒有盖,且盖与盒体是由密封圈压紧密封,适用于雨水能溅到的现场或露天设备现场。插座式接线盒结构简单、安装所占空间小,接线方便,适用于需要快速拆卸的环境。

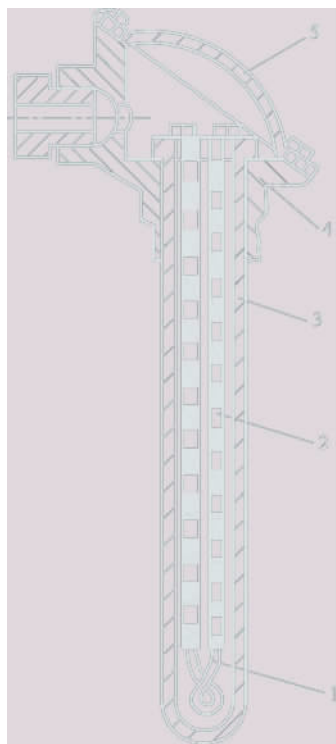


图 7-6 普通热电偶结构示意图

1—热电极；2—绝缘套管；
3—保护管；4—接线盒；5—接线盒盖

(2) 隔爆热电偶

防爆原理：利用间隙隔爆原理，设计具有足够强度的接线盒等部件，将所有会产生火花、电弧和危险温度的零部件都密封在接线盒内，当腔内发生爆炸时，能通过接合面间隙熄火和冷却，使爆炸后的火焰和温度不传到腔外。

结构特点：隔爆热电偶的接线盒在设计时采用防爆的特殊结构，它的接线盒是经过压铸而成的，有一定的厚度、隔爆空间，机构强度较高；采用螺纹隔爆接合面，并采用密封圈进行密封，因此，当接线盒内一旦放弧时，不会与外界环境的危险气体传爆，能达到预期的防爆、隔爆效果。

使用场合：工业用的隔爆型热电偶多用于化学工业自控系统中（由于在化工生产厂、生产现场常伴有各种易燃、易爆等化学气体、蒸汽）。适用于 d II CT6 温度组别区间内的具有爆炸性气体危险的场所内。

(3) 铠装热电偶

铠装热电偶，国际上又称之为无机物绝缘热电偶，是由不锈钢保护管、氧化镁绝缘粉、热电偶丝材组合，经模具压实的坚实整体，具有耐压、抗震、可挠、小型化、热响应时间快、安装方便、使用寿命长、机械强度好等优点，广泛应用于航空航天、原子能、石油、化工、冶金、机械、电力能源等工业部门和科研教学领域。铠装热电偶具有能弯曲、耐高压、热响应时间快和坚固耐用等许多优点，它和工业用装配式热电偶一样，作为测量温度的变送器，通常和显示仪表、记录仪表和计算机控制系统配套使用，同时亦可作为装配式热电偶的感温元件。它可以直接测量各种生产过程中从 0 ~ 800 范围内的液体、蒸汽和气体介质以及固体表面的温度。

铠装热电偶的制造工艺：把热电极材料与高温绝缘材料预置在金属保护管中、运用同比例压缩延伸工艺、将这三者合为一体，制成各种直径、规格的铠装偶体，再截取适当长度，将工作端焊接密封、配置接线盒即成为柔软、细长的铠装热电偶，其外形如图 7-7 所示。

铠装热电偶的特点：

① 小型化（直径最小可达 0.25mm），热惯性小，使用方便。

② 时间常数小。露头型铠装热电偶的时间常数仅为 0.05s，适宜用于动态温度的测量。

③ 机械性能好，且可做成各种形状，以满足复杂对象的温度测量。

内部的热电偶丝与外界空气隔绝，有着良好的抗高温氧化、抗低温水蒸气冷凝、抗机械外力冲击的特性。铠装热电偶可以制作得很细，能解决微小、狭窄场合的测温问题，且具有抗震、可弯曲、超长等优点。

铠装热电偶的结构原理是由导体、高绝缘氧化镁、外套 1Cr18Ni9Ti 不锈钢保护管，经多次一体拉制而成。铠装热电偶产品主要由接线盒、接线端子和铠装热电偶组成基本结构，并配以各种安装固定装置组成。铠装热电偶分绝缘式和接壳式两种。

① **接壳式** 热电偶的测量端与金属套管接触合并在一起。适用于测量温度高、压力高、腐蚀性较强的介质。

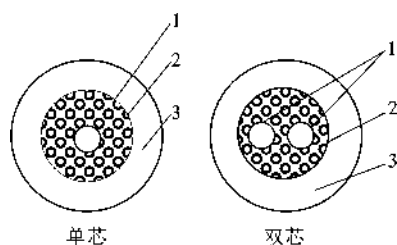


图 7-7 铠装热电偶断面结构图

1—热电极；2—绝缘材料；3—套管（即外壳）

②绝缘式 热电偶的测量端焊接后填以绝缘材料再与金属套管焊接。适用范围同接壳式,特点是偶丝与保护金属套管不接触,具有电气绝缘性能。

③圆接插式 金属套管端头部分的直径为原直径的一半,故时间常数更小。

④扁接插式 分为接壳型和绝缘型两种,其时间常数最小,反应速度更快。

铠装热电偶冷端连接补偿导线的接线盒的结构,根据不同的使用条件,有不同的形式。如简易式、带补偿导线式、插座式等,这里不作详细介绍了,选用时可参考有关资料。

由于铠装热电偶具有寿命长、机械性能好、耐高压、可挠性等许多优点,因而深受欢迎。

(4)薄膜热电偶

它是由两种金属薄膜制成的一种特殊结构的热电偶。薄膜的制作方法有许多种,如真空蒸镀、化学涂层和电泳等。测量端既小又薄,约为数百埃到数千埃($1 \text{ 埃} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-4} \mu\text{m}$)。由于测量端的热容量很小,可以用于微小面积上的温度测量,且响应快,其时间常数可达微秒级,因而可测瞬变的表面温度。其次,它的尺寸小,不会造成被测流体通路的堵塞。薄膜热电偶的结构有三种:片状与针状热电偶,以及将热电极材料直接蒸镀在被测表面的热电偶。片状结构的低温薄膜热电偶常用的有铁-康铜、铜-康铜和铁-镍等。测温范围为 $-200 \sim +300$ 。铁-镍薄膜热电偶的外形及温度热电势关系曲线如图7-8所示。其热电势率为 0.032 mV/ ,时间常数 $T < 0.01 \text{ s}$,薄膜厚度在 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 之间。

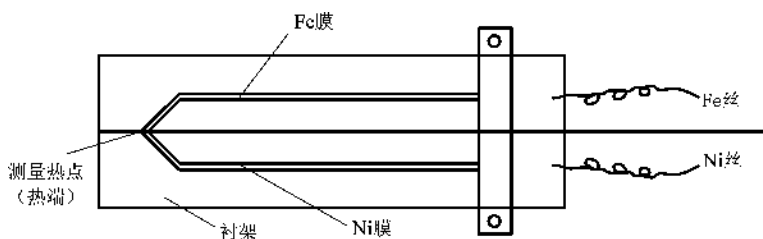


图 7-8 铁-镍薄膜热电偶

(5)吹气型热电偶

吹气型热电偶的结构原理是在铠装热电偶感温元件和外保护管之间构成一定的气路,在气路中,通入一定压力的惰性气体,以排除或减少热电偶在高温、高压条件下还原气体的渗入,微量钽元素的加入,增加了吹气型热电偶的吸气特性,从而延长了铠装热电偶的使用寿命。它是30万吨合成氨装置中不可缺少的测温装置。

7.2.3 热电偶的应用

1. 热电偶的冷端补偿

由热电偶测温原理已经知道,只有当热电偶的冷端温度保持不变时,热电势才是被测温度的单值函数。在实际应用时,往往由于热电偶的热端与冷端离得很近,冷端又暴露于空间,容易受到周围环境温度波动的影响,因而冷端温度难以保持恒定。为此常采用下述几种冷端温度补偿或处理方法。

(1)冰浴法:在实验室条件下常将热电偶冷端置于冰点恒温槽中,使冷端温度恒定在 0 时进行测温,这种方法称为冰浴法。测量时将热电偶的热电极冷端分别插入冰点恒温槽中两

根玻璃试管的底部，并与底部存有少量清洁的水银相接触，如图 7-10 所示。水银上面应存放少量蒸馏水(或变压器油)，最好还用石蜡封口，以防止水银蒸汽逸出。插入水银的冷端分别通过铜导线接至温度显示仪表。温度显示或测量仪表可以看作铜导线，而且铜导线与热电偶的热电极相接的两接点温度均在 0。

(2)冷端温度修正：热电偶分度表是以冷端温度为 0 为基础而制成的，所以如欲直接利用分度表根据显示仪表的读数求得温度必须使冷端温度保持为 0。如果冷端温度不为 0，则必须对仪表指示值进行修正，例如冷端温度恒定在 $T_0 > 0$ 时，则测得的热电势将小于该热电偶的分度值，因此为了求得所测的真实温度，可利用 $E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$ 进行修正。

(3)冷端补偿导线：实际测温时，由于热电偶长度有限，自由端温度将直接受到被测物温度和周围环境温度的影响。例如，热电偶安装在电炉壁上，而自由端放在接线盒内，电炉壁周围温度不稳定，波及接线盒内的自由端，造成测量误差。虽然可以将热电偶做得很长，但这将提高测量系统的成本，是很不经济的。工业中一般是采用补偿导线来延长热电偶的冷端，使之远离高温区。必须注意的四个问题：一是两根补偿导线与热电偶两个热电极的接点必须具有相同的温度；二是各种补偿导线只能与相应型号的热电偶配用；三是必须在规定的温度范围内使用；四是极性切勿接反。用补偿导线代替部分热电偶丝作为热电偶的延长部分，使冷端移到离开被测介质较远的地方，如图 7-10 所示，这样可节省较多的贵金属热电偶材料。必须注意补偿导线的热电特性与所取代的热电偶丝一样。表 7-4 列出了各种热电偶补偿导线的材料，选用时务必不能搞错。同时注意，对于具有补偿导线的热电偶，其冷端温度应该是补偿导线的末端温度。

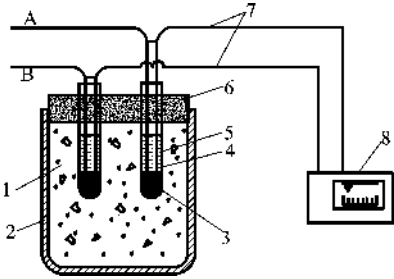


图 7-9 冰浴法接线图

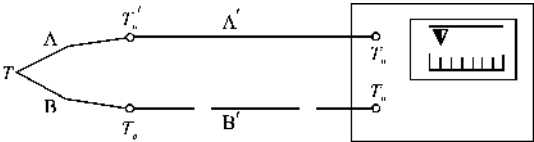


图 7-10 补偿导线在测温回路中的连接

表 7-4 常用热电偶补偿导线

热电偶名称	补偿导线				工作端为 100℃ 冷端为 0℃ 时的 标准热电势 /mV
	正极		负极		
	材料	颜色	材料	颜色	
铂铑 - 铂	铜	红	镍铜	白	0.64 ± 0.03
镍铬 - 镍硅	铜	红	康铜	白	4.10 ± 0.15
镍铬 - 康铜	镍铬	褐绿	康铜	白	6.95 ± 0.30
铜 - 康铜	铜	红	康铜	白	4.10 ± 0.15

(4)冷端补偿器：上面讲到的热电偶测温可用补偿导线把冷端移到温度较稳定的地方，

但不能保持其冷端温度的恒定,用查分度表方法计算热电势也不方便,而采用冷端补偿器即可解决矛盾。其原理是利用不平衡电桥所产生的不平衡电压来补偿热电偶参考端温度变化而引起的热电势的变化。图 7-11 是补偿器接入热电偶回路的原理图。补偿器由一电桥组成, $R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega$, 用锰铜丝绕制,电阻值不随温度变化。 R_4 用铜丝绕制,电阻值随温度变化。国产冷端补偿器的平衡温度有 0 和 20 两种。当冷端平衡温度为 20 时使 $R_4 = 1\Omega$, R_5 为供配用不同分度表号的热电偶作为调整补偿器供电电压用。桥路供电电压为直流 4V。当温度为 20 时,因为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 所以电桥平衡,故 a、b 两端没有电压输出。当温度不等于 20 时,a、b 两端就会有一个不平衡电压 E_{ab} 输出,另外将指示仪表的机械零位调整在 +20 的位置(即预设机械零位电势 E_{20}),因而指示仪表的总电势就等于热电偶的热电势、补偿电势和机械零位电势的代数和,而后两项之和实际是冷端温度相对于 0 的热电势,如果指示仪表直接按温度刻度,则仪表所指示的即是被测物体的温度。这种方法主要用于工业测量仪表中。根据所配用的热电偶可按有关规定选用不同型号的冷端补偿器。

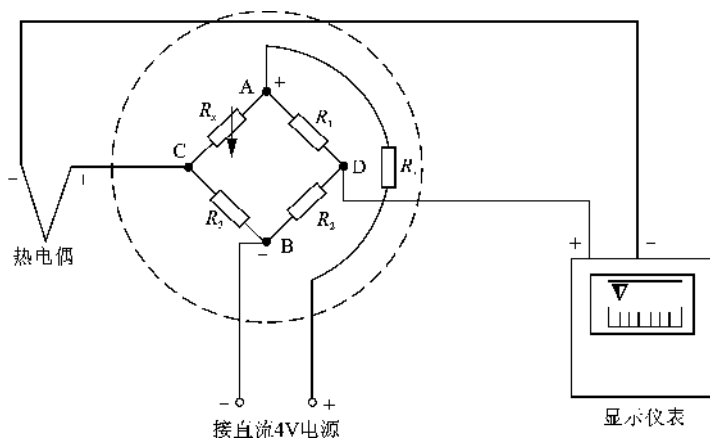


图 7-11 冷端温度补偿器线路

(5) 仪表机械零点调整法:当热电偶与动圈式仪表配套使用时,若热电偶的冷端温度比较恒定,对测量精度要求又不太高时,可将动圈仪表的机械零点调整至热电偶冷端所处的 t_0 处,这相当于在输入热电偶的热电势前就给仪表输入一个热电势 $E(t_0, 0)$ 。这样,仪表在使用时所指示的值约为 $E(t_0, 0) + E(t, t_0)$ 。进行仪表机械零点调整时,首先必须将仪表的电源及输入信号切断,然后用螺钉旋具调节仪表面板上的螺钉,使指针指到 t_0 的刻度上。当气温变化时,应及时修正指针的位置。此法虽有一定的误差,但非常简便,在工业上经常采用。

2. 常用热电偶及测温线路

常见热电偶测温线路形式如下:

(1) 测量某一点的温度

图 7-12(a、b)都是一支热电偶和一个仪表配用的连接电路,用于测量某一点的温度。AB 为热电偶, A'B' 为补偿导线。这两种连接方式的区别在于:图 7-13(a)中的热电偶冷端被延伸到仪表内,图 7-13(b)中的热电偶冷端在仪表外面, R_0 为连接冷端与仪表的导线电阻。

(2) 测量两点之间的温度差

图 7 - 13 是用两支热电偶和一个仪表配合测量两点之间温差的线路。图中用了两支型号相同的热电偶并配用相同的补偿导线。工作时，两支热电偶产生的热电动势方向相反，故输入仪表的是其差值，这一差值正反映了两支热电偶热端的温差。为了减少测量误差，提高测量精度，要尽可能选用热电特性一致的热电偶，同时要保证两热电偶的冷端温度相同。

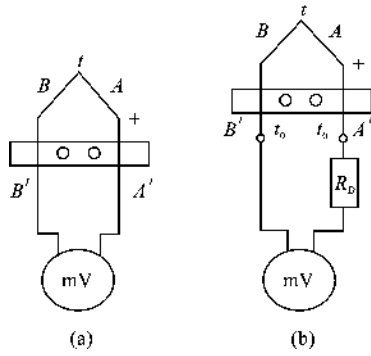


图 7 - 12 测量某点温度

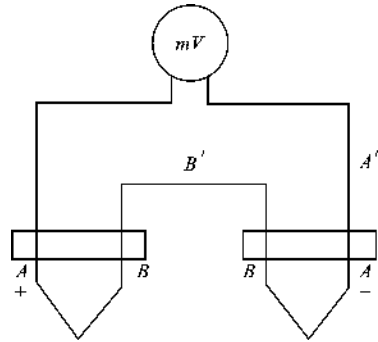


图 7 - 13 测量两点温差

(3) 热电偶并联线路

有些大型设备，需测量多点的平均温度。可以通过热电偶并联的测量电路来实现，如图 7 - 14 所示。将 n 支同型号热电偶的正极和负极分别连接在一起的线路称并联测量线路。如果 n 支热电偶的电阻均相等，则并联测量线路的总热电动势等于 n 支热电偶热电动势的平均值，即：

$$E_{\text{并}} = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n} \tag{7 - 12}$$

热电偶并联线路中，当其中一支热电偶断路时，不会中断整个测温系统的工作。

(4) 热电偶串联线路

将 n 支同型号热电偶依次按正负极相连接的线路称串联测量线路，如图 7 - 15 所示。串联测量线路的总热电动势等于 n 支热电偶热电动势之和，即：

$$E_{\text{串}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = nE \tag{7 - 13}$$

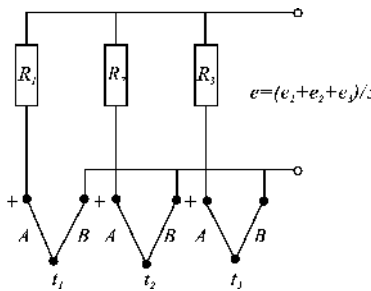


图 7 - 14 热电偶并联

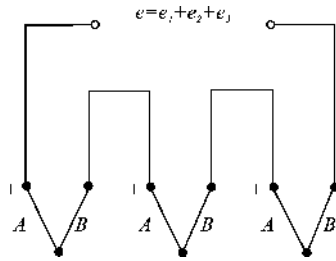


图 7 - 15 热电偶串联

串联线路的主要优点是热电动势大，仪表的灵敏度大为增加。缺点是只要有一支热电偶

断路,整个测量系统便无法工作。

3. 热电偶的选择、安装使用和校验

热电偶的选用应该根据被测介质的温度、压力、介质性质、测温时间长短来选择热电偶和保护套管。安装点要有代表性,安装方法要正确。通常要求将热电偶安装在管道的中心线位置上,并使热电偶的测量端面向流体,以便热端与被测介质充分接触,提高测量的准确度,尽可能测得介质的真实温度。

热电偶要定期校验,校验的方法是用标准热电偶与被校验热电偶在同一校验炉或恒温水槽中进行对比。

4. 热电偶测温误差分析

热电偶的测温误差主要由下列因素引起:

①热电偶的非均匀性分度误差:由于电偶材料粗细不均匀或不纯等原因,会使热电偶的温差电性与统一的分度表产生一定误差,此误差不应超过有关标准;

②因冰水不纯使热电偶冷端(即参比端)达不到真正的冰点(0°C)因而引起误差。因此对于精密测量,要求用纯净水制成的冰和水;

③热电偶由于长期处于高温环境会氧化变质,致使其热电性能发生变化而引起误差;

④热电偶的极间、电偶对之间及其与大地间不良的绝缘或测量仪表精度不高都会造成热电势的损失而影响测量的精确性。

国内主要的热电式传感器厂商有:

北京莱格超精光电研究所、北京鑫诺金传感技术开发有限公司、久茂自动化(大连)有限公司、欧姆龙(中国)有限公司、宝鸡麦克传感器有限公司、上海倍加福自动化有限公司、天津今明仪器有限公司、霍尼韦尔(中国)投资有限公司、北京思瑞明科技发展有限公司、北京昆仑海岸传感技术中心、北京新蓝雅思科技有限公司。

7.3 热电阻

热电阻(Thermal Resistive Sensors)是利用导体的电阻随温度变化而变化的特性来测量温度的。热电阻传感器可分为金属热电阻式和半导体热电阻式两大类,前者简称热电阻,后者简称热敏电阻。

7.3.1 金属热电阻

1. 热电阻测温原理

热电阻测温是基于金属导体的电阻值随温度的增加而增加这一特性来进行温度测量的。热电阻大都由纯金属材料制成,目前应用最多的是铂电阻,有时也用铜电阻。通常是把纯铂细丝绕在云母或陶瓷架上。在某些特殊情况里,可将金属丝绕在待测温度的材料上,或装入被测物质中。在测极低温的范围时,亦可将碳质小电阻或渗有砷的锗晶体,封入充满氢气的管中。将铂丝线圈接入惠斯登电桥的一只臂,另三只臂用一可变电阻与两个假负载电阻。电阻将按下列公式而随温度发生变化:

$$R = R_0(1 + At) \quad (7-14)$$

式中 R 是 t 时的电阻, R_0 是 0°C 时的电阻 A 是常数。比较精确的公式是:

$$R = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (7-15)$$

式中 B 是常数。电阻温度计在 $-260 \sim +1200$ 范围内,可作极精确的测定。它适用范围广,远远超出水银温度计,可作测温的标准。

2. 热电阻材料的特点

热电阻材料必须具有以下特点:

(1) 高温系数、高电阻率。这样在同样条件下可加快反应速度,提高灵敏度,减小体积和重量。

(2) 化学、物理性能稳定。以保证在使用温度范围内热电阻的测量准确性。

(3) 良好的输出特性。即必须有线性的或者接近线性的输出。

(4) 良好的工艺性,以便于批量生产、降低成本。

适宜制作热电阻的材料有铂、铜、镍、铁等。

铂、铜为应用最广的热电阻材料。虽然铁、镍的温度系数和电阻率均比铂、铜要高,但由于存在着不易提纯和非线性严重的缺点,因而用得不多。

铂容易提纯,在高温和氧化性介质中化学、物理性能稳定,制成的铂电阻输出-输入特性接近线性,测量精度高。

铂电阻阻值与温度变化之间的关系可以近似用下式表示:

在 $0 \sim 660$ 温度范围内:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (7-16)$$

在 $-190 \sim 0$ 温度范围内:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (7-17)$$

式中 R_0 、 R_t ——分别为 0 和 t 的电阻值;

A ——常量($3.9647 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$);

B ——常量($-5.847 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}^2$);

C ——常量($-4.22 \times 10^{-12} / ^\circ\text{C}^3$)。

铂电阻制成的温度计,除作温度标准外,还广泛应用于高精度的工业测量。由于铂为贵金属,一般在测量精度要求不高和测温范围较小时,均采用铜电阻。铜在 $-50 \sim 150$ 范围内铜电阻化学、物理性能稳定,输出-输入特性接近线性,价格低廉。铜电阻阻值与温度变化之间的关系可近似表示为:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (7-18)$$

式中 A ——常量($4.28899 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$);

B ——常量($-2.133 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}^2$);

C ——常量($1.233 \times 10^{-9} / ^\circ\text{C}^3$)。

当温度高于 100 时易被氧化,因此适用于温度较低和没有浸蚀性的介质中工作。

3. 热电阻的结构

(1) 普通型热电阻

WZP 型(圆柱形)铂热电阻感温元件是一个由铂丝绕制在绝缘体上制成的元件。WZP 型薄膜电阻的感温元件

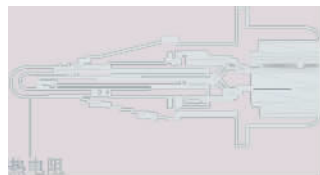


图 7-16 热电阻的内部结构

是由陶瓷做基片,采用先进真空溅射、光刻、激光调阻等工艺手段制成的。其内部结构如图 7-16 所示。

(2) 铠装热电阻

铠装热电阻是由感温元件(电阻体)、引线、绝缘材料构成。它的外径一般为 $\varphi 2 \sim \varphi 8 \text{ mm}$,最小可达 $\varphi 0.5 \text{ mm}$ 。铠装铂电阻与普通型热电阻相比,它有下列优点:①体积小,内部无空气间隙,热惯性小,测量滞后小;②机械性能好、耐振,抗冲击;③能弯曲,便于安装;④使用寿命长。

(3) 端面热电阻

端面热电阻感温元件由特殊处理的电阻丝材绕制,紧贴在温度计端面,它与一般轴向热电阻相比,能更正确和快速地反映被测端面的实际温度,适用于测量各种机件的端面温度。

(4) 隔爆型热电阻

隔爆型热电阻通过特殊结构的接线盒,能把内部爆炸性混合气体因受到火花或电弧等影响而发生的爆炸局限在接线盒内,生产现场不会引起爆炸。隔爆型热电阻可用于 B1a ~ B3c 级区内具有爆炸危险场所的温度测量。

(5) 薄膜铂电阻

薄膜铂电阻是使用最新的薄膜技术而制造的温度传感器。与其他类型的热电阻比较,此产品具有适于大批量生产,一致性好,成本低及尺寸小等特点。此项技术具有 20 世纪 90 年代后期的技术水平。

(6) 一体化数显温度变送器

将热电阻与电子线路安装在同一壳体内,可直接读出温度值,且可输出 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 的标准信号。

4. 热电阻测温系统的组成

热电阻测温系统一般由热电阻、连接导线和显示仪表等组成。必须注意以下两点:

(1) 热电阻和显示仪表的分度号必须一致

热电阻把温度量转换成电阻值,这样就可以通过测量电阻来测量温度。测量电阻通常可利用欧姆表或电桥。平衡电桥法如图 7-17,如果电阻 $R_1 = R_2$,当热电阻 R_t 阻值随温度变化时,调节电位器 R_w 的电刷位置 x ,使电桥处于平衡状态,则有:

$$R_t = \frac{x}{L} R_0 = n R_0 \quad (7-19)$$

式中 L 、 R_0 ——电位器有效长度和总电阻;

x ——电刷位置。

(2) 为了消除连接导线电阻变化的影响,必须采用三线制接法。采用三线制是为了消除连接导线电阻引起的测量误差,如图 7-17(b)所示。这是因为测量热电阻的电路一般是不平衡电桥。热电阻作为电桥的一个桥臂电阻,其连接导线(从热电阻到中控室)也成为桥臂电阻的一部分,这一部分电阻是未知的且随环境温度变化,造成测量误差。采用三线制,将导线一根接到电桥的电源端,其余两根分别接到热电阻所在的桥臂及与其相邻的桥臂上,这样消除了导线线路电阻带来的测量误差。工业上一般都采用三线制接法。热电偶产生的是毫伏信号,不存在这个问题。

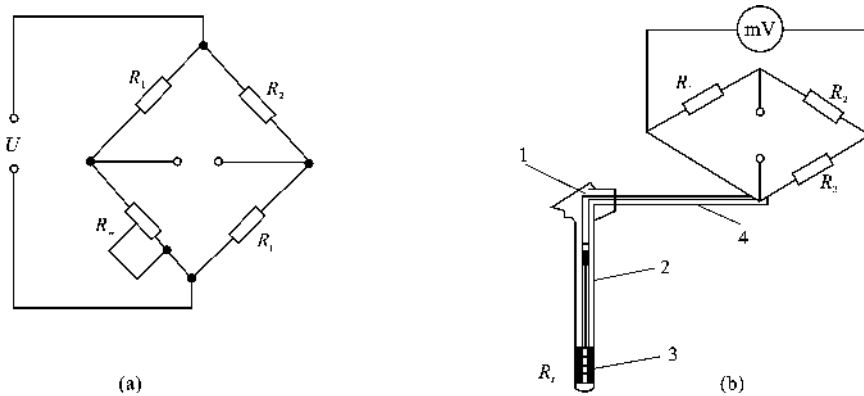


图 7-17 平衡电桥法测温系统

7.3.2 半导体热敏电阻

热敏电阻是一种开发早、种类多、发展较成熟的敏感元器件。热敏电阻由半导体陶瓷材料组成，利用的原理是温度引起电阻变化。若电子和空穴的浓度分别为 n 、 p ，迁移率分别为 μ_n 、 μ_p ，则半导体的电导为：

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (7-20)$$

因为 n 、 p 、 μ_n 、 μ_p 都是依赖温度 T 的函数，所以电导是温度的函数，因此可由测量电导而推算出温度的高低，并能做出电阻 - 温度特性曲线。这就是半导体热敏电阻的工作原理。热敏电阻包括正温度系数热敏电阻(PTC)和负温度系数(NTC)热敏电阻以及临界温度热敏电阻(CTR)。它们的电阻——温度特性如图 7-18 所示。

热敏电阻的主要特点是：

- ①灵敏度较高，其电阻温度系数要比金属大 10 ~ 100 倍以上，能检测出 10^{-6} 的温度变化；
 - ②工作温度范围宽，常温器件适用于 - 55 ~ 315 ，高温器件适用温度高于 315 （目前最高可达到 2000 ），低温器件适用于 - 273 ~ 55 ；
 - ③体积小，能够测量其他温度计无法测量的空隙、腔体及生物体内血管的温度；
 - ④使用方便，电阻值可在 0.1 ~ 100k Ω 间任意选择；
 - ⑤易加工成复杂的形状，可大批量生产；
 - ⑥稳定性好、过载能力强；
- 缺点是互换性差，非线性严重。

1. PTC 热敏电阻

(1) 特点

PTC(Positive Temperature Coefficient)热敏电阻于 1950 年出现，随后 1954 年出现了以钛

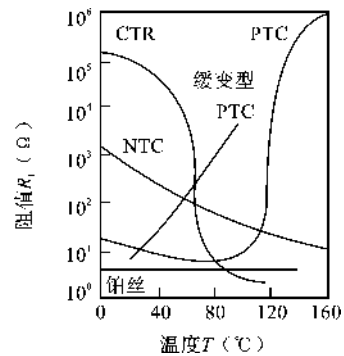


图 7-18 几种热敏电阻阻值 - 温度曲线

酸钡为主要材料的 PTC 热敏电阻,其特点是在某一温度下电阻值急剧增加、具有正温度系数的热敏电阻现象或材料,可专门用作恒定温度传感器。

典型的 PTC 热敏电阻是以 BaTiO_3 或 SrTiO_3 或 PbTiO_3 为主要成分的烧结体,其中掺入微量的 Nb、Ta、Bi、Sb、Y、La 等氧化物进行原子价控制而使之半导化,常将这种半导体化的 BaTiO_3 等材料简称为半导(体)瓷;同时还添加增大其正电阻温度系数的 Mn、Fe、Cu、Cr 的氧化物和起其他作用的添加物,采用一般陶瓷工艺成形、高温烧结而使钛酸钡等及其固溶体半导化,从而得到正特性的热敏电阻材料。其温度系数及居里点温度随组分及烧结条件(尤其是冷却温度)不同而变化。

实验表明,在工作温度范围内,PTC 热敏电阻的电阻 - 温度特性可近似用实验公式表示:

$$R_T = R_{T_0} \exp B_p (T - T_0) \quad (7-21)$$

式中 R_T 、 R_{T_0} 表示温度为 T 、 T_0 时电阻值, B_p 为该种材料的材料常数。

(2) 工程应用举例

PTC 热敏电阻在工业上可用作温度的测量与控制,也用于汽车某部位的温度检测与调节,还大量用于民用设备,如控制瞬间开水器的水温、空调器与冷库的温度等方面。下面介绍 PTC 热敏电阻在加热器、马达、变压器、大功率晶体管等电器的加热和过热保护方面的应用。

① 负载过电流、过热保护

PTC 热敏电阻除用作加热元件外,同时还能起到“开关”的作用,兼有敏感元件、加热器和开关三种功能,称之为“热敏开关”,如图 7-20 和图 7-21 所示,电流通过元件后引起温度升高,即发热体的温度上升,当超过居里点温度后,电阻增加,从而限制电流增加,于是电流的下降导致元件温度降低,电阻值的减小又使电路电流增加,元件温度升高,周而复始,因此具有使温度保持在特定范围的功能,又起到开关作用。利用这种阻温特性做成加热源,作为加热元件应用的有暖风器、电烙铁、烘衣柜、空调等,还可对电器起到过热保护作用。热敏电阻也适用于手提电脑及手机中的锂离子电池和镍氢电池的短路及发热保护。当手机电池过充电或短路时,电池发热,电池内部线路板上的 PTC 阻值上升,将电流限制在安全范围内。某些水货手机电池内部用普通电阻代替 PTC,在发生短路故障时,保护作用很差。

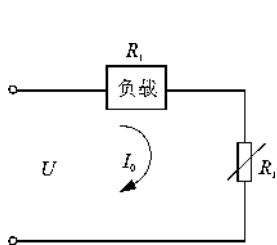


图 7-20 直接保护原理图

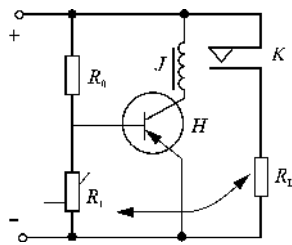


图 7-21 间接保护原理图

② PTCR 在电视机消磁电路中的应用

PTCR 在电视机消磁电路中的应用如图 7-22 所示。彩色显像管的栅网、荫罩等部件都是用金属材料做成的,易受到地磁场或机内、外杂散磁场的影响,会使这些金属部件磁化,

使图像色彩出现异常,因此彩色电视机都设有自动消磁电路。附着在显像管上的消磁线圈与 PTCR 串联组成消磁电路。刚开机时,PTCR 冷电阻很小(为 $12 \sim 18\Omega$),流过消磁线圈的 50Hz 电流很大,产生很强的交变磁场,电流同时也流过 PTCR,使其温度上升,其阻值在几秒内迅速增大,电流逐渐减小,呈衰减波形,磁场逐渐减弱起到消磁的作用。为了减小维持电流,可紧贴 PTCR 旁边,设置一个小功率加热电阻,使 PTCR 在电视机工作期间一直保持较高的温度,流过消磁线圈的电流可维持在很小的水平,以减小耗电。

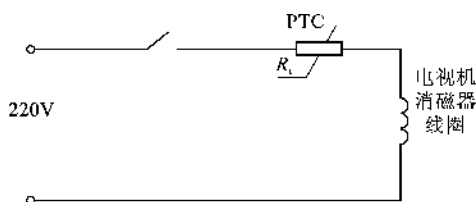


图 7-22 PTC 消磁电路原理图

2. NTC 热敏电阻

(1) 特点

NTC(Negative Temperature Coefficient)是指随温度上升电阻呈指数关系减小、具有负温度系数的热敏电阻现象和材料。该材料是利用锰、铜、硅、钴、铁、镍、锌等两种或两种以上的金属氧化物进行充分混合、成型、烧结等工艺而成的半导体陶瓷,可制成具有负温度系数(NTC)的热敏电阻,其电阻率和材料常数随材料成分比例、烧结气氛、烧结温度和结构状态不同而变化。现在还出现了以碳化硅、硒化锡、氮化钽等为代表的非氧化物系 NTC 热敏电阻材料。

NTC 热敏半导瓷大多是尖晶石结构或其他结构的氧化物陶瓷,具有负的温度系数,电阻值可近似表示为:

$$R_T = R_{T_0} \exp B_n (1/T - 1/T_0) \quad (7-22)$$

式中 R_T 、 R_{T_0} 分别为温度 T 、 T_0 时的电阻值, B_n 为材料常数。陶瓷晶粒本身由于温度变化而使电阻率发生变化,这是由半导体特性决定的。

(2) 工程应用举例

① 用 NTC 热敏电阻来测量 CPU 的温度

笔记本电脑中,对 CPU 测温采用的是 NTCR,测温点在 CPU 背面的底部。当 CPU 超温时,NTCR 测得 CPU 的温度,并通知冷风扇控制电路系统,系统会自动降低 CPU 工作频率和提高风扇转速;当 CPU 温度继续升高时,为防止烧毁 CPU,系统将停止所执行的程序,这就出现俗语说的“死机”。

② 基于热敏电阻的电机过热保护器

电机过热保护器电路原理如图 7-23 所示。 R_{t1} 、 R_{t2} 和 R_{t3} 为 NTC 热敏电阻,安装在三相绕组附近。温度低时, R_{t1} 、 R_{t2} 和热敏电阻电阻升高,三极管不导通,继电器不吸合,电机正常运行。当电机运行温度高时, R_{t1} 、 R_{t2} 和 R_{t3} 热敏电阻电阻降低,三极管导通,继电器吸合,电机停止,从而达到电机过热保护的目。

3. CTR 热敏电阻

临界温度热敏电阻 CTR(Critical Temperature Resistor)具有负电阻突变特性,在某一温度

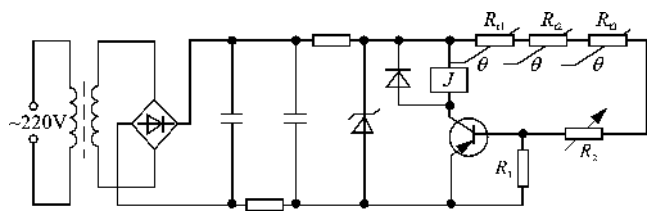


图 7-23 电机过热保护器电路原理图

下，电阻值随温度的增加急剧减小，具有很大的负温度系数。构成材料是钒、钡、锶、磷等元素氧化物的混合烧结体，是半玻璃状的半导体，也称 CTR 为玻璃态热敏电阻。骤变温度随添加锆、钨、钼等的氧化物而变化，这是由于不同杂质的掺入，使氧化钒的晶格间隔不同造成的。若在适当的还原气氛中五氧化二钒变成二氧化钒，则电阻急变温度变大；若进一步还原为三氧化二钒，则急变消失，产生电阻急变的温度对应于半玻璃半导体物性急变的位置，因此产生半导体 - 金属相移，CTR 能够用于控温报警。

4. 有机高分子 PTC 热敏电阻

有机高分子 PTC 热敏电阻是近年来发展起来的新型 PTC 热敏电阻。它具有许多优异的性能，目前全世界的年产量正快速递增。

高分子 PTC 热敏电阻是由填充炭黑颗粒的聚合物材料制成。这种材料具有一定的导电能力，因而能够通过额定的电流。如果通过热敏电阻的电流过高时，它的发热功率大于散热功率，此时热敏电阻的温度将开始不断升高，同时热敏电阻中的聚合物基体开始膨胀，这将使炭黑颗粒分离，并导致电阻上升，从而非常有效地降低了电路中的电流。这时电路中仍有很小的电流通过，这个电流使热敏电阻维持足够温度从而保持在高电阻状态。当故障排除之后，高分子 PTC 热敏电阻很快冷却，并将恢复到原来的低电阻状态，这样又像一只新的热敏电阻一样可以重新工作了。以有机高分子为基体的 PTC 热敏电阻与陶瓷 PTC 热敏电阻相比，PTC(正温度系数)特性更明显，安全电流可以做得很大，起始零功率电阻值更小，电流过载时的断流速度非常快，无拖尾弊病，具有起始零功率阻值小、电流过载时断流速度快、安全电流大，具有自恢复性、故障排除后可反复使用，无须更换等特点。有机高分子 PTC 热敏电阻又经常被人们称为自恢复保险丝，由于具有独特的正温度系数电阻特性，因而极为适合用作过流保护器件。

表 7-5 热敏电阻的应用

家用电器	电熨斗、电冰箱、电饭煲、洗衣机、电暖壶、烘干机、电烤箱、空调机、电热毯、热水器、热得快、电磁炉
汽车电子	电子喷油嘴、空调机、发电机防热装置、电热座椅
测量仪器	流量计、风速表、真空计、浓度计、湿度计、空气传感器、环境监测仪
办公设备	复印机、传真机、打印机、扫描仪
农业园艺	温室控制、人工气候箱、烘干系统
医疗器具	体温计、人工透析、散热系统
工业生产	电动机过热保护

7.3.3 集成温度传感器的应用

集成温度传感器是采用硅半导体集成工艺，因此亦称硅传感器或单片集成温度传感器。随着 PC 机和工业自动化的发展，集成温度传感器得到了广泛的应用，几乎渗透到了所有的电子系统。例如手提电话一般用一个或多个温度传感器监视电池组。笔记本电脑可能会用四个或更多个温度传感器监测 CPU 电池交流适配器和 PCMCIA 卡的温度。与传统的温度传感器(RTDs 热敏电阻和热电偶)相比集成温度传感器具有很多优越性。例如不需要线性化或冷补偿，提供更好的噪声特性，可以与数字系统直接连接等。

1. 集成温度传感器的基本原理

集成温度传感器的测温基础是 PN 结的温度特性。硅二极管有个特性，当环境温度改变时，其 PN 结的正向电压降 VD 以 - 2mV/ 改变。通常，20 时，其 VD 约 600mV。当环境温度增加 100 时，即从 20 变化到 120 时，这时其正向电压降 VD 约为 400mV[600mV - (2mV/ ×100)]。电路的测温范围取决于二极管许可的工作温度范围。大多数二极管可以工作在 - 20 到 150 。由此可以看出，半导体硅材料的 PN 结正向导通电压与温度变化呈线性关系，所以可将感受到的温度变化转换成电压的变化量。二极管正向电压与温度之间的函数关系如图 7 - 24。集成温度传感器内部除了 PN 结之外，还有恒流源、放大器等集成电路。PN 结一般是由三极管集电极与基极短接而得到，在集成温度传感器内部，两只测温晶体管(带隙型温度传感器)的 b - e 结压降的不饱和值 V_{be}之差 ΔV_{be}，与热力学温度 T 的下述关系，实现对温度的检测：

$$\Delta V_{be} = (KT/q)\ln(I_{c1}/I_{c2}) \tag{7 - 23}$$

式中 I_{c1}、I_{c2}——两支晶体管的集电极电流密度，为固定值；
T——绝对温度；
K——波尔兹曼常数；
q——电荷量。

这样两个 PN 结正向电压之间的差与温度呈线性关系。如果两个电流源的精度较高，温度可由 ΔV_{be} 计算得到，而与 PN 结的初始正向电压物理尺寸泄漏和其他特性无关。

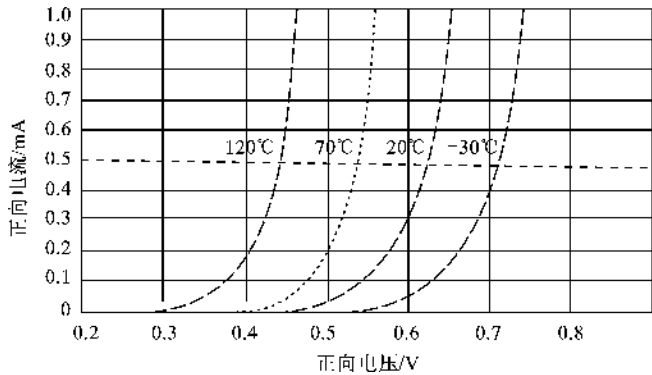


图 7 - 24 二极管正向电压与温度之间的函数曲线

2. 集成温度传感器的主要分类

集成温度传感器可分为：模拟型集成温度传感器和数字型集成温度传感器。模拟输出型集成温度传感器是在 20 世纪 80 年代问世的，它是将温度传感器集成在一个芯片上，可完成温度测量及模拟信号输出功能的专用 IC 模拟。集成温度传感器的主要特点是测温误差小、价格低、响应速度快（热惯性小）、体积小、功耗低、输出电压幅度大、互换性好、无须冷端补偿等优点。模拟型的输出信号形式有电压型和电流型两种。电压型的灵敏度多为 $10\text{mV}/$ （以摄氏温度 0°C 作为电压的零点），电流型的灵敏度多为 $1\mu\text{A}/\text{K}$ （以绝对温度 0K 作为电流的零点），电流输出型集成温度传感器，在一定温度下，它相当于一个恒流源。因此它不易受接触电阻、引线电阻、电压噪声的干扰，具有很好的线性特性。

3. 集成温度传感器的应用实例

集成温度传感器具有线性好、精度适中、灵敏度高、体积小、使用方便等优点，得到了广泛应用。AD590 是美国模拟器件公司生产的单片集成电路温度传感器。

流过器件的电流等于器件所处环境的热力学温度（开尔文）度数。

AD590 的测温范围为 $-55 \sim +150$ 。

AD590 的电源电压范围为 $4 \sim 30\text{V}$ 。电源电压可在 $4 \sim 6\text{V}$ 范围变化，电流变化 $1\mu\text{A}$ ，相当于温度变化 1K 。AD590 可以承受 44V 正向电压和 20V 反向电压，因而器件反接也不会被损坏。

AD590 共有 I、J、K、L、M 五挡，其中 M 档精度最高，在 $-55 \sim +150$ 范围内，非线性误差为 ± 0.3 。

AD590 可用来测量热力学温度、摄氏温度、两点温度差、多点最低温度、多点平均温度的具体电路，广泛应用于不同的温度控制场合。由于 AD590 精度高、不需辅助电源、线性好，常用于测温和热电偶的冷端补偿。

信号转换调理就是将温度信号转化为电信号，然后调理为可采集的电压信号。具体电路参见图 7-25。

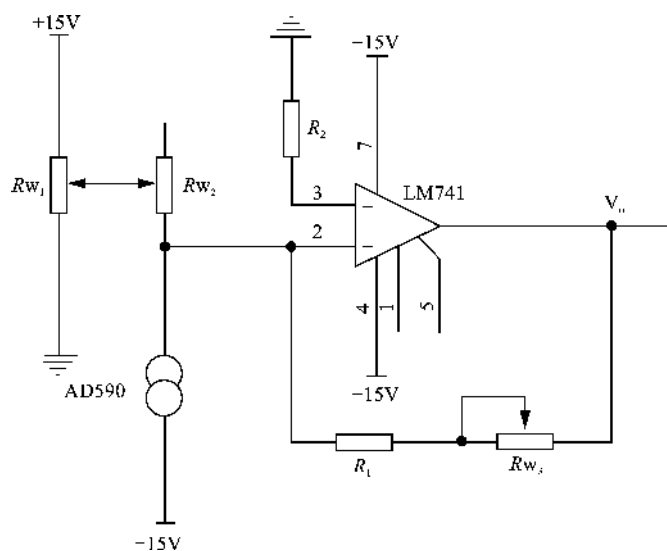


图 7-25 信号转换调理电路原理图

其中 AD590 是一种两端式的集成温度传感器,以 T_0 - 2 形式封装,如图 7 - 26 所示。

主要技术参数如下:

(1) 测温范围: $-55 \sim +150$

(2) 工作电压: $+4 \sim +30\text{V}$ 。

由于 AD590 是一种恒流源形式的温度传感器,只要在其两端加上一定工作电压,则其输出电流随温度变化而变化,其线性电流输出为 $1\mu\text{A/K}$;它以热力学温度零点作为零输出点。

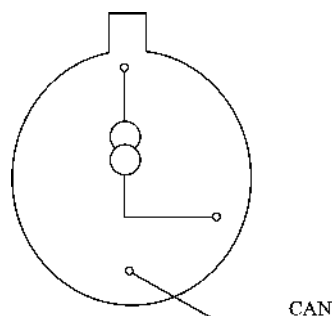


图 7 - 26 AD590 外引脚

(3) 精度:经过激光平衡调整,AD590 校准精度可达 ± 0.5 ,在全温区范围内,线性度可达 ± 0.3 (AD590M),精度可达 1。

由于 AD590 是一种电流型的温度传感器,因此具有较强的抗干扰能力,适用于计算机远距离温度测量和控制。远距离信号传递时,可采用一般的双绞线来完成;其电阻比较大,因此不需要精密电源对其供电,长导线上压降一般不影响测量精度;不需要温度补偿和专门的线性电路;由于以上独特优点,AD590 在温度测控领域中得到广泛的应用。

热电式传感器厂商信息:南平市瑞光电子厂。台湾威达光电有限公司,上海润安工业传感器有限公司。浙江省洞头县华隆经贸有限公司。广东施耐德工业控制有限公司。常州世纪精达传感器有限公司。

习题 7

7 - 1 在炼钢厂中,有时直接将廉价热电极(易耗品,例如镍铬、镍硅热偶丝,时间稍长即熔化)插入钢水中测量钢水温度,如图 7 - 27 所示。试说明测量钢水温度的基本原理?为什么不必将工作端焊在一起。要满足哪些条件才不影响测量精度?采用上述方法是利用了热电偶的什么定律?如果被测物不是钢水,而是熔化的塑料行吗?为什么?

7 - 2 用热电偶测温时为什么要进行冷端温度补偿?其冷端温度补偿的方法有哪几种?

7 - 3 热电阻温度计有哪些主要优点?

7 - 4 热电偶结构由哪几部分组成?

7 - 5 用镍铬 - 镍硅(K)热电偶测温度,已知冷端温度 t_0 为 40°C ,用高精度毫伏表测得这时的热电势为 29.186mV ,求被测点温度。

7 - 6 图 7 - 28 为利用 XCT - 101 型动圈仪表组成的热电偶测温、控温电路。请正确连线。

7 - 7 请简要叙述一下热敏电阻的优缺点及改进措施。

7 - 8 要测 1000°C 左右的高温,用什么类型的热电偶好?若要测 1500°C 左右的高温呢?

7 - 9 使用 K 型热电偶,基准接点为 0°C 、测量接点为 30°C 和 900°C 时,温差电动势分别为 1.203mV 和 37.326mV 。当基准接点为 30°C ,测温接点为 900°C 时的温差电动势为多少?

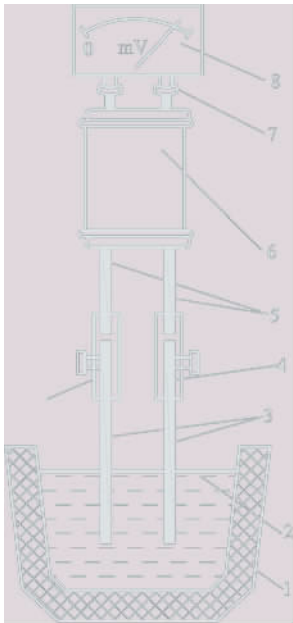


图 7 - 27 用浸入式热电偶测量 熔融金属示意图

1—钢水包； 2—钢熔融体； 3—热电极； 4、7—补偿导线接线柱；
5—补偿导线； 6—保护管 8—毫伏表； 9、10—毫伏表接线柱

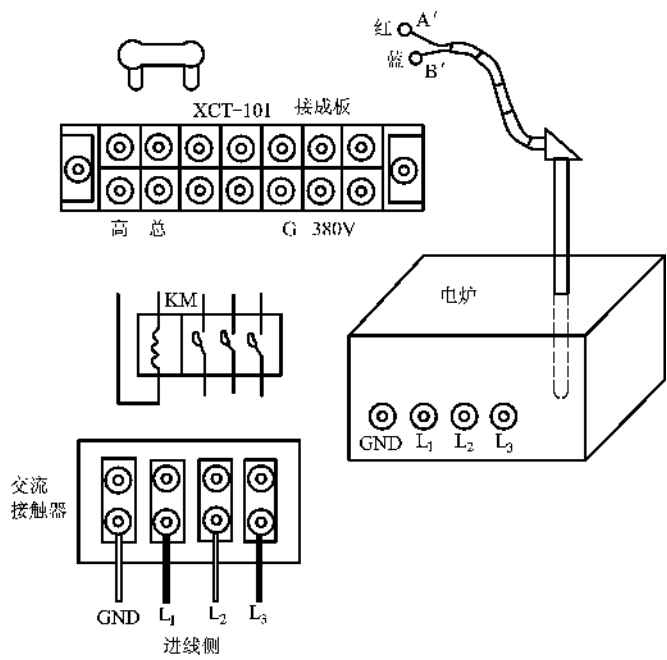


图 7 - 28 利用 XCT - 101 型动圈仪表组成的热电偶测温、控温电路

第 8 章 光电式传感器

本章要点

- 光电式传感器的工作原理与分类
- 常用光电器件的结构、工作原理、参数及应用
- 光纤传感器的结构、工作原理和应用
- 红外传感器的结构、工作原理和应用
- 色敏光电传感器的工作原理和应用

8.1 概 述

光电式传感器是将被测量的变化量转换为光量的变化，再通过光电子元件把光量的变化转换成电信号的一种测量装置。它的转换原理是基于光电效应。光电效应分为外光电效应、内光电效应和光伏特效应三种。

光电式传感器通常由光路和电路两大部分组成。光路部分实现被测信号对光量的控制和调制；电路部分完成从光信号到电信号的转换。图 8 - 1(a)为测量光量时的组成框图，图 8 - 1(b)是测量其他物理量时的组成框图。

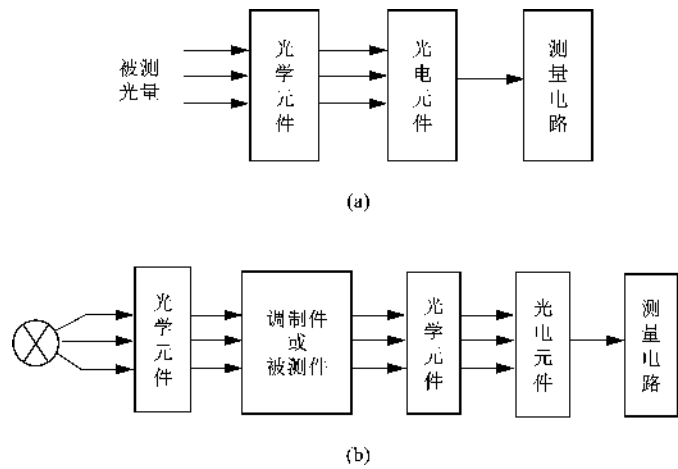


图 8 - 1 光电式传感器的基本组成

一束光是由一束以光速运动的粒子流组成的，这些粒子称为光子。光子具有能量，每个光子具有的能量由下式确定：

$$E = h\nu$$

(8 - 1)

式中 h ——普朗克常数 $=6.626 \times 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$;

ν ——光的频率(s^{-1})。

所以光的波长越短,即频率越高,其光子的能量也越大;反之,光的波长越长,其光子的能量也就越小。

在光线作用下,物体内的电子溢出物体表面向外发射的现象称为外光电效应。向外发射的电子叫光电子。基于外光电效应的光电器件有光电管、光电倍增管等。

光照射物体,可以看成一连串具有一定能量的光子轰击物体,物体中电子吸收的入射光子能量超过溢出功率 A_0 时,电子就会溢出物体表面,产生光电子发射,超过部分的能量表现为溢出电子的动能。根据能量守恒定理:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_0^2 + A_0 \quad (8-2)$$

式中 m ——电子质量;

v_0 ——电子溢出速度。

式(8-2)为爱因斯坦光电效应方程式,由式可知:光子能量必须超过溢出功率 A_0 ,才能产生光电子;入射光的频谱成分不变,产生的光电子与光强成正比;光电子溢出物体表面时具有初始动能 $\frac{1}{2}mv_0^2$,因此对于外光电效应器件,即使不加初始阳极电压,也会有光电流产生,为使光电流为零,必须加负的截止电压。在光线作用下,物体的导电性能发生变化或产生光生电动势的效应称为内光电效应。内光电效应又可分为以下两类。

(1)光电导效应:在光线作用下,对于半导体材料吸收了入射光子能量,若光子能量大于或等于半导体材料的禁带宽度,就激发出电子—空穴对,使载流子浓度增加,半导体的导电性增加,阻值减低,这种现象称为光电导效应。光敏电阻就是基于这种效应的光电器件。

(2)光伏特效应:在光线的作用下能够使物体产生一定方向的电动势的现象称为光伏特效应。基于该效应的光电器件有光电池。

光电式传感器具有很多优良特性,例如,具有频谱宽、不受电磁干扰的影响、非接触测量、体积小、重量轻、造价低等优点。特别是20世纪60年代以来,随着激光、光纤、CCD技术的起步与发展,光电式传感器也得到了飞速发展,广泛地应用在生物、化学、物理和工程技术等各个领域。

光纤(Optical Fiber)是20世纪70年代发展起来的一种新型的光电子技术材料,它与激光器、半导体光电探测器一起形成了光电子学。光纤的研究最初是为了通讯的需要,后来把光纤通讯、直接信息交换和把待测量与光纤内部的导光联系起来,形成了光纤传感器。光纤传感器具有灵敏度高、响应速度快、动态范围大、抗电磁干扰能力强、超高电绝缘、防燃、防爆、安全性能高、耐腐蚀、材料资源丰富、成本低、体积小、灵巧轻便、使用方便等优点。光纤传感器可实现的传感物理量很广,广泛应用于对磁、声、力、温度、位移、旋转、加速度、液位、转矩、应变、光、电流、电压、传像以及某些化学量的测量等,应用前景十分广阔。

红外辐射技术是近年来发展起来的一门新型技术学科。在科学研究、军事工程和医学方面有着极其重要的作用。它的重要工具就是红外辐射传感器,它是遥感技术、空间科学的敏感部件,能将红外辐射量的变化转换为点亮变化的装置称为红外传感器,一般分为光电红外传感器和热敏红外传感器两大类。

8.2 光电器件

8.2.1 光电管

1. 光电管的结构

光电管有真空光电管和充气光电管两种,两者结构相似,它们由一个涂有光电材料的阴极 K 和一个阳极 A 封装在真空玻璃壳内,如图 8-2(a)所示。光电管的特性主要取决于光电管阴极材料。光电管阴极材料有:银氧铯、铯铯、铯银氧铯以及多碱光电阴极等。

2. 光电管的工作原理

如图 8-2(b)所示,将阳极 A 接电源正极,阴极 K 接电源负极。无光照时,因光电管阴极不发射光电子,电路不通 $I=0$ 。当入射光照射在阴极上时,光电管阴极就发射光电子,由于阳极的电位高于阴极,阳极便会收集由阴极发射来的电子,在光电管组成的回路中形成光电流 I ,并在负载 R_L 上输出电压 U_o 。在入射光的频谱成分和光电管电压不变的条件下,输出电压与入射光通量成正比。

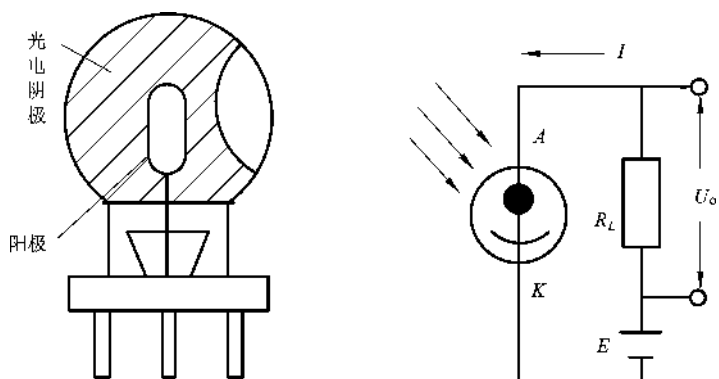


图 8-2 光电管的结构

(a)结构; (b)原理

3. 光电管的主要特征

光电管的性能主要由伏安特性、光照特性、光谱特性、响应时间、峰值探测率和温度特性来描述。下面仅对其主要性能作简单介绍。

(1) 伏安特性

光电管的伏安特性指在一定的光通量照射下,其阳极和阴极之间的电压 U_{AK} 与光电流 I 之间的关系,即 $I = f(U_{AK})$,如图 8-3 所示。

当阳极电压 U_A 较小时,阴极发射的光电子只有一部分被阳极收集,其余部分仍返回阴极。因此,随着阳极电压 U_A 的升高,阳极在单位时间收集到的光电子数增多,光电流 I 增大,此时伏安特性呈线性关系。

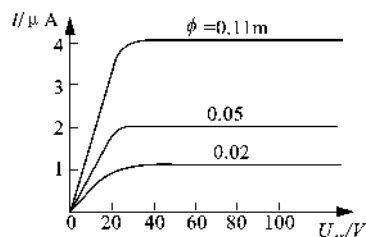


图 8-3 伏安特性曲线

当阳极电压 U_A 升高到一定数值时, 阴极发射的光电子全部被阳极收集, 成为饱和状态。这时, 阳极电压再升高, 光电流也不再增加。

(2) 光谱特性

光电管的光谱特性通常指阳极和阴极之间所加电压不变时, 入射光的波长 λ (或频率 ν) 与其绝对灵敏度的关系, 即 $K = f(\nu) |_{U=U_C}$, 它主要取决于阴极材料。阴极材料不同的光电管适用于不同的光谱范围。另一方面, 同一光电管对于不同频率 (即使光强度相同) 的入射光, 其灵敏度也不同。

(3) 光电特性

光电特性指在光电管阳极电压和入射光频谱不变的条件下, 入射光的光通量与光电流之间的关系。在光电管阳极电压 U 足够大, 使光电管工作在饱和状态下, 入射光通量和光电流呈线性关系。即 $I = f(\Phi) |_{U=U_C}$, 如图 8-4 所示。曲线 1 为氧铯阴极光电管的光电特性, 曲线 2 为铯铯阴极光电管的光电特性。光电特性曲线的斜率称为光电管的灵敏度 K :

$$K = \frac{dI}{d\Phi} = \frac{I}{\Phi} \quad (8-3)$$

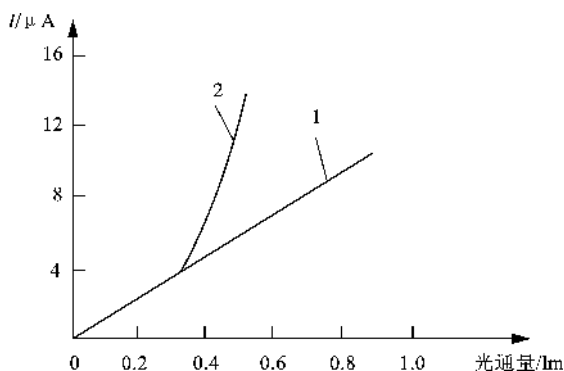


图 8-4 光电管的光电特性

(4) 暗电流

将光电管置于无光的黑暗条件下, 当施加正常的使用电压时, 光电管产生微弱电流。此电流称为暗电流, 它主要由漏电流引起的。

8.2.2 光电倍增管

光电管的灵敏度很低, 当入射光微弱时, 光电管产生的光电流很小, 只有几十微安, 造成测量误差, 甚至无法检测。为提高光电管灵敏度, 在光电阴极 K 与阳极 A 之间安装一些倍增极, 就构成了光电倍增管。倍增极过去又叫打拿级。它是基于二次发射原理, 故又称其为二次发射体。所谓二次发射, 是由高速电子冲击物体使其产生电子发射的现象。二次电子由三部分组成: 一次电子打出来的二次电子; 一次电子打在二次发射体上被弹回来成为二次电子; 一次电子打在二次发射体上打出二次电子后, 本身又离开二次发射体表面成为二次电子。

1. 光电倍增管的结构

如图 8-5 所示。光电倍增管由光电阴极 K、倍增电极 $D_1 \sim D_n$ 以及阳极 A 三部分组成。光电阴极由半导体光电材料铯铷做成。倍增电极使在镍或铜 - 钼衬底上涂铯铷材料而形成。通常有 12 ~ 14 级, 多者达 30 级, 阳极用来最后收集电子。

2. 光电倍增管的工作原理

光电倍增管中各倍增电极上均加有电压, 阴极电位最低。各倍增电极的电位依次升高。由于相邻两个倍增电极之间有电位差, 因此存在加速电场对电子加速。从阴极发出的光电子, 在电场加速下, 打在电位较阴极高的第一倍增级上, 打出 3 ~ 6 倍的二次电子; 被打出来的二次电子再经加速电场加速, 又打在比第一倍增电极电位高的第二倍增电极上, 电子数又增加 3 ~ 6 倍; 如此不断连续倍增, 直到最后一级倍增电极产生的二次电子被更高电位的阳极收集为止。其电子数将达到阴极发射电子数的 $10^5 \sim 10^6$ (100 万) 倍。可见, 光电倍增管的放大倍数是很高的。因此, 在很微弱的光照时, 它能产生很大的光电流。

3. 光电倍增管的主要参数

(1) 二次电子发射系数 σ : 二次电子数与一次电子数之比:

$$\sigma_1 = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_2}{N_1}; \sigma_2 = \frac{I_3}{I_2} = \frac{N_3}{N_2}; \dots; \sigma_n = \frac{I_{n+1}}{I_n} = \frac{N_{n+1}}{N_n}$$

(2) 利用系数 θ : 由于存在电子散射现象, 前一级电子不可能全部打在下一级的倍增极上, 故存在利用系数 θ 。

(3) 倍增系数 M:

$$M = \theta \sigma^n = \frac{I_A}{I_K} \cdot \beta \quad (8-4)$$

式中 θ ——二次电子利用系数;

σ ——二次电子发射系数;

n——倍增电极的级数;

I_A ——阳极电流;

I_K ——光电阴极的光电流;

β ——电流放大倍数。

(4) 暗电流: 将光电流倍增管置于黑暗中, 管上施加正常电压, 管中有微小电流流过, 此电流便称为暗电流。

倍增管产生暗电流的原因有: 光电阴极和倍增电极的热电子发射; 阴极与其他各电极之间的漏电流; 产生漏电流的原因有二: 一是多余的铯原子沉积于各电极之间, 导致绝缘电阻下降; 二是管基受潮, 使玻璃内硅酸盐水解形成电解液, 导致绝缘电阻下降, 离子反馈和光反馈, 场致发射。

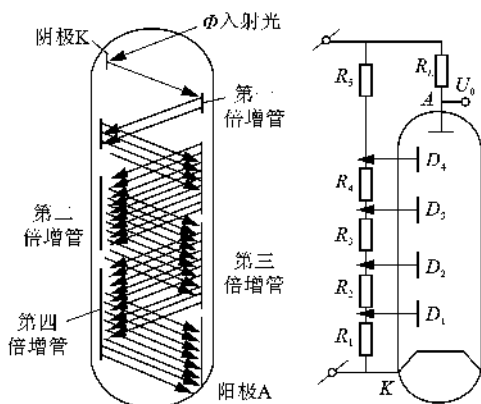


图 8-5 光电倍增管的结构

减小倍增管的暗电流的方法是：尽量减小光电阴极与倍增电极的热电子发射；消除管内多余的铯原子和保持管壳干燥；将管内抽成真空，清除离子反馈和光反馈；将管内电极边缘转弯、尖角修圆，减小场致发射。

(5) 光电阴极灵敏度和光电倍增管总灵敏度：一个光子在阴极上打出的平均电子数叫做光电阴极的灵敏度，即：

$$S_K = \frac{I_K}{\Phi} \quad (8-5)$$

式中 I_K ——光电管阴极电流；

Φ ——入射光通量，即光子个数。

一个光子在阳极上产生的平均电子数叫做倍增管的总灵敏度。即：

$$S = \frac{I_A}{\Phi} \quad (8-6)$$

式中 I_A ——阳极电流；

Φ ——入射光通量，即光子个数。

则：

$$S = \frac{I_A}{\Phi} = \frac{\beta I_K}{\Phi} = \beta S_K \quad (8-7)$$

其最大灵敏度可达 $10A/lm$ 。使用光电倍增管时应注意：由于倍增管的灵敏度很高，所以不能受强光照射，以免使其损坏。

(6) 光电倍增管的伏安特性

其伏安特性与光电管相类似，即 $I_A = f(U_{AD})|_{\Phi=C}$ ，如图 8-6 所示，也有线性区和饱和区。

(7) 光电倍增管的光电特性

即 $I_A = f(\Phi)|_{V_{AC}=C}$ ，如图 8-7 所示。由该曲线可知：当光电管在 $10^{-12} \sim 10^{-4}lm$ 范围内，曲线有较好的线性关系；当光线太大，超过 $10^{-4}lm$ 时，曲线明显弯曲，因此，在实际使用中，光电流不要超过 $1mA$ 。

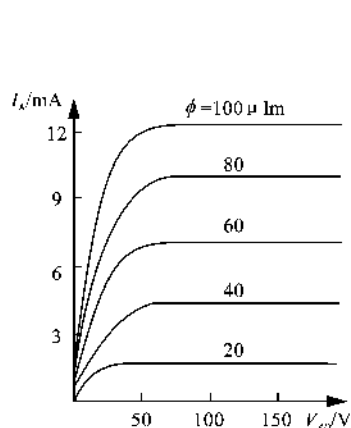


图 8-6 光电倍增管的伏安特性

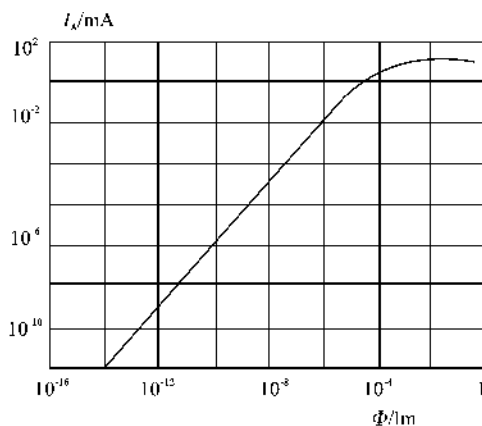


图 8-7 光电倍增管的光电特性

8.2.3 光敏电阻

1. 光敏电阻的结构与工作原理

光敏电阻又称光导管，它几乎都是用半导体材料制成的光电器件。光敏电阻没有极性，纯粹是一个电阻器件，使用时既可加直流电压，也可以加交流电压。无光照时，光敏电阻值（暗电阻）很大，电路中电流（暗电流）很小。当光敏电阻受到一定波长范围的光照时，它的阻值（亮电阻）急剧减小，电路中电流迅速增大。一般希望暗电阻越大越好，亮电阻越小越好，此时光敏电阻的灵敏度高。实际光敏电阻的暗电阻值一般在兆欧量级，亮电阻值在几千欧以下。光敏电阻的结构很简单，如图 8-8(a) 为金属封装的硫化镉光敏电阻的结构图。在玻璃底板上均匀地涂上一层薄薄的半导体物质，称为光导层。半导体的两端装有金属电极，金属电极与引出线端相连接，光敏电阻就通过引出线端接入电路。为了防止周围介质的影响，在半导体光敏层上覆盖了一层漆膜，漆膜的成分应使它在光敏层最敏感的波长范围内透射率最大。为了提高灵敏度，光敏电阻的电极一般采用梳状图案，如图 8-8(b) 所示。图 8-8(c) 为光敏电阻的接线图。



图 8-8 光敏电阻结构

(a) 结构图；(b) 电极图；(c) 接线图

2. 光敏电阻的主要参数

光敏电阻的主要参数有：

(1) 暗电流：光敏电阻在不受光照射时的阻值称为暗电阻，此时流过的电流称为暗电流。

(2) 亮电流：光敏电阻在受光照射时的电阻称为亮电阻，此时流过的电流称为亮电流。

(3) 光电流：亮电流与暗电流之差称为光电流。

3. 光敏电阻的基本特性

(1) 伏安特性

在一定照度下，流过光敏电阻的电流与光敏电阻两端的电压的关系称为光敏电阻的伏安特性。图 8-9 为硫化镉光敏电阻的伏安特性曲线。由图可见，光敏电阻在一定的电压范围内，其 $I-U$ 曲线为直线。说明其阻值与入射光量有关，而与电压电流无关。

(2) 光照特性

光敏电阻的光照特性是描述光电流 I 和光照强度之间的关系，不同材料的光照特性是不同的，绝大多数光敏电阻光照特性是非线性的。

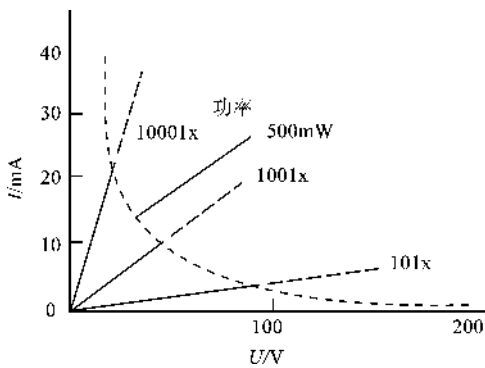


图 8-9 硫化镉光敏电阻的伏安特性

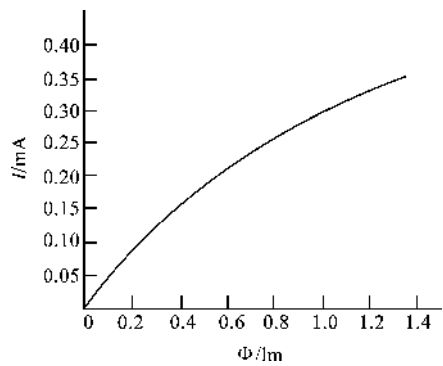


图 8-10 光敏电阻的光照特性

(3) 光谱特性

光敏电阻对入射光的光谱具有选择作用，即光敏电阻对不同波长的入射光有不同的灵敏度。光敏电阻的相对光敏灵敏度与入射波长的关系称为光敏电阻的光谱特性，亦称为光谱响应。图 8-11 为几种不同材料光敏电阻的光谱特性。对应于不同波长，光敏电阻的灵敏度是不同的，而且不同材料的光敏电阻光谱响应曲线也不同。从图中可见硫化镉光敏电阻的光谱响应的峰值在可见光区域，常被用作光度量测量(照度计)的探头。而硫化铅光敏电阻响应于近红外和中红外区，常用做火焰探测器的探头。

(4) 频率特性

实验证明，光敏电阻的光电流不能随着光强改变而立刻变化，即光敏电阻产生的光电流有一定的惰性，这种惰性通常用时间常数表示。大多数的光敏电阻时间常数都较大，这是它的缺点之一。不同材料的光敏电阻具有不同的时间常数(毫秒数量级)，因而它们的频率特性也就各不相同。图 8-12 为硫化镉和硫化铅光敏电阻的频率特性，相比较，硫化铅的使用频率范围较大。

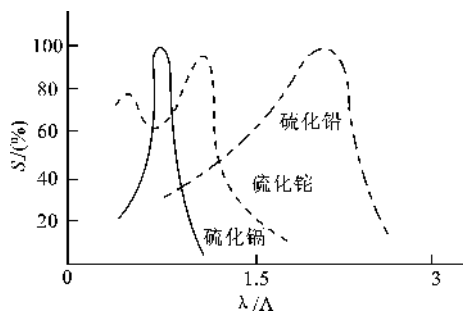


图 8-11 光敏电阻的光谱特性

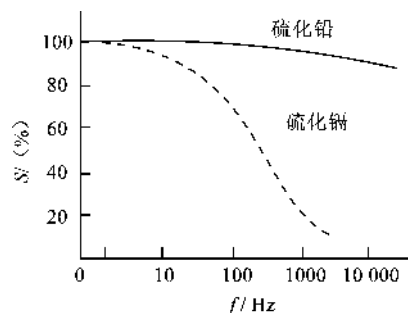


图 8-12 光敏电阻的频率特性

(5) 温度特性

光敏电阻和其他半导体器件一样，受温度影响较大。温度变化时，影响光敏电阻的光谱响应，同时光敏电阻的灵敏度和暗电阻也随之改变，尤其是响应于红外区的硫化铅光敏电阻受温度影响更大。图 8-13 为硫化铅光敏电阻的光谱温度特性曲线，它的峰值随着温度上升

向波长短的方向移动。因此,硫化铅光敏电阻要在低温、恒温的条件下使用。对于可见光的光敏电阻,其温度影响要小一些。光敏电阻具有光谱特性好、允许的光电流大、灵敏度高、使用寿命长、体积小等优点,所以应用广泛。此外许多光敏电阻对红外线敏感,适宜于红外线光谱区工作。光敏电阻的缺点是型号相同的光敏电阻参数参差不齐,并且由于光照特性的非线性,不适宜于测量要求线性的场合,常用作开关式光电信号的传感元件。几种光敏电阻的特性参数见本章附录表 8-1 所示。

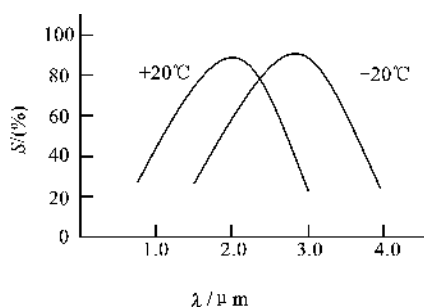


图 8-13 硫化铅光敏电阻的光谱温度特性

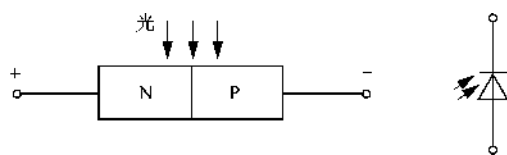


图 8-14 光敏二极管结构简图和符号

8.2.4 光敏二极管和光敏晶体管

1. 结构原理

光敏二极管的结构与一般二极管相似。它装在透明玻璃外壳中,其 PN 结装在管的顶部,可以直接受到光照射(见图 8-14)。光敏二极管在电路中一般是处于反向工作状态(见图 8-15),在没有光照射时,反向电阻很大,反向电流很小,反向电流称为暗电流,当光照射在 PN 结上,光子打在 PN 结附近,使 PN 结附近产生光生电子和光生空穴对,它们在 PN 结处的内电场作用下作定向运动,形成光电流。光的照度越大,光电流越大。因此光敏二极管在不受光照射时处于截止状态,受光照射时处于导通状态。

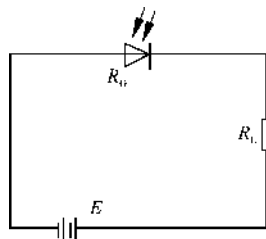


图 8-15 光敏二极管接线图

光敏晶体管与一般晶体管很相似,具有两个 PN 结,如图 8-16(a)所示,只是它的发射极一边做得很大,以扩大光的照射面积。光敏晶体管接线如图 8-16(b)所示,大多数光敏晶体管的基极无引出线,当集电极加上相对于发射极为正的电压而不接基极时,集电结就是反向偏压,当光照射在集电结时,就会在集电结附近产生电子—空穴对,光生电子被拉到集电极,基区留下空穴,使基极与发射极间的电压升高,这样便会有大量的电子流向集电极,形成输出电流,且集电极电流为光电流的 β 倍,所以光敏晶体管有放大作用。

光敏晶体管的光电灵敏度虽然比光敏二极管高得多,但在需要高增益或大电流输出的场合,需采用达林顿光敏管。图 8-17 是达林顿光敏管的等效电路,它是一个光敏晶体管和一个晶体管以共集电极连接方式构成的集成器件。由于增加了一级电流放大,所以输出电流能力大大加强,甚至可以不必经过进一步放大,便可直接驱动灵敏继电器。但由于无光照时的暗电流也增大,因此适合于开关状态或位式信号的光电变换。

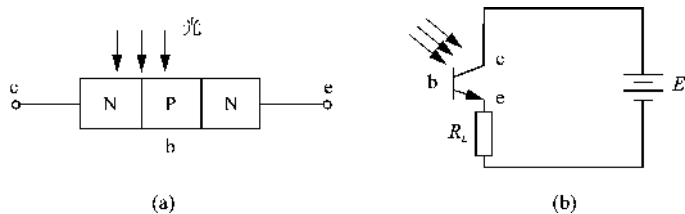


图 8 - 16 NPN 型光敏晶体管结构简图和基本电路
(a)结构简化模型；(b)基本电路

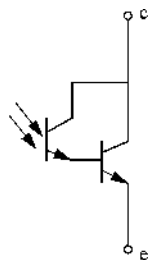


图 8 - 17 达林顿光敏管的等效电路

2. 基本特性

(1)光谱特性

光敏管的光谱特性是指在一定照度时，输出的光电流(或用相对灵敏度表示)与入射光波长的关系。硅和锗光敏二(晶体)极管的光谱特性曲线如图 8 - 18 所示。从曲线可以看出，硅的峰值波长约为 $0.9\mu\text{m}$ ，锗的峰值波长约为 $1.5\mu\text{m}$ ，此时灵敏度最大，而当入射光的波长增长或缩短时，相对灵敏度都会下降。一般来讲，锗管的暗电流较大，因此性能较差，故在可见光或探测赤热状态物体时，一般都用硅管。但对红外光的探测，用锗管较为适宜。

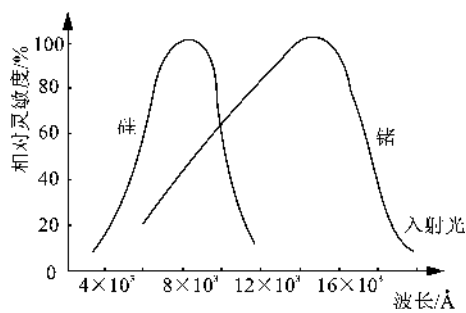


图 8 - 18 光敏二极(晶体)管的光谱特性

(2)伏安特性

图 8 - 19(a)为硅光敏二极管的伏安特性，横坐标表示所加的反向偏压。当光照时，反向电流随着光照强度的增大而增大，在不同的照度下，伏安特性曲线几乎平行，所以只要没达到饱和值，它的输出实际上不受偏压大小的影响。图 8 - 19(b)为硅光敏晶体管的伏安特性。纵坐标为光电流，横坐标为集电极 - 发射极电压。从图中可见，由于晶体管的放大作用，在同样照度下，其光电流比相应的二极管大上百倍。

(3)频率特性

光敏管的频率特性是指光敏管输出的光电流(或相对灵敏度)随频率变化的关系。光敏二极管的频率特性是半导体光电器件中最好的一种，普通光敏二极管的频率响应时间达

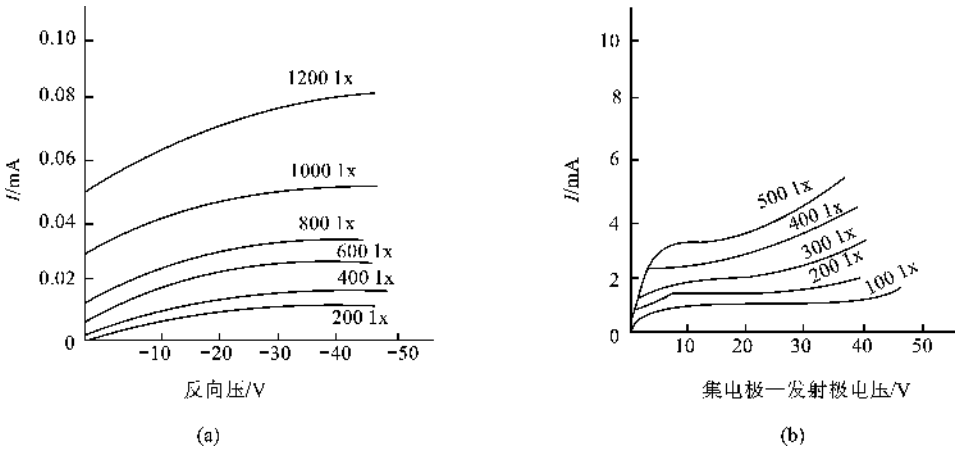


图 8 - 19 硅光敏管的伏安特性

10 μ s。光敏晶体管的频率特性受负载电阻的影响，图 8 - 20 为光敏晶体管频率特性，减小负载电阻可以提高频率响应范围，但输出电压响应也减小。

(4) 温度特性

光敏管的温度特性是指光敏管的暗电流及光电流与温度的关系。光敏晶体管的温度特性曲线如图 8 - 21 所示。从特性曲线可以看出，温度变化对光电流影响很小，如图 8 - 21(b)，而对暗电流影响很大，如图 8 - 21(a)，所以在电子线路中应该对暗电流进行温度补偿，否则将会导致输出误差。

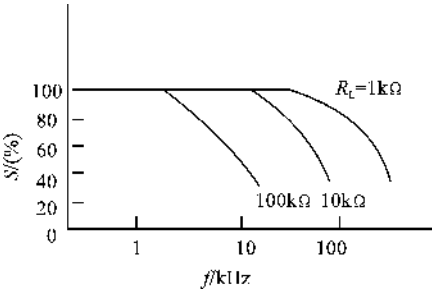


图 8 - 20 光敏晶体管的频率特性

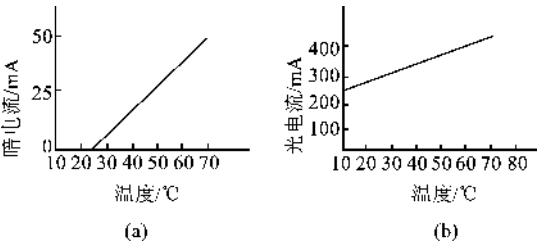


图 8 - 21 光敏晶体管的温度特性

8.2.5 光电池

光电池是一种直接将光能转换为电能的光电器件。光电池在有光线作用时实质就是电源，电路中有这种器件就不需要外加电源。

光电池的工作原理是基于“光伏效应”，图 8 - 22 为硅光电池原理图。它实质上是一个大面积的 PN 结，当光照射到 PN 结的一个面，例如 P 型面时，若光子能量大于半导体材料的禁带宽度，那么 P 型区每吸收一个光子就产生一对自由电子和空穴，电子 - 空穴对从表面向内迅速扩散，在结电场的作用下，最后建立一个与光照强度有关的电动势。

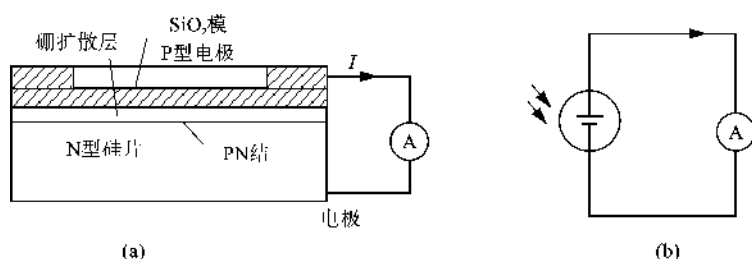


图 8-22 硅光电池原理图
(a)结构示意图；(b)等效电路

光电池基本特性有以下几种。

(1) 光谱特性

光电池对不同波长的光的灵敏度是不同的。图 8-23 为硅光电池和硒光电池的光谱特性曲线。从图中可知，不同材料的光电池，光谱响应峰值所对应的入射光波长是不同的，硅光电池波长在 $0.8\mu\text{m}$ 附近，硒光电池在 $0.5\mu\text{m}$ 附近。硅光电池的光谱响应波长范围为 $0.4 \sim 1.2\mu\text{m}$ ，而硒光电池只能为 $0.38 \sim 0.75\mu\text{m}$ 。可见，硅光电池可以在很宽的波长范围内得到应用。

(2) 光照特性

图 8-24 为硅光电池的光照特性，光电池在不同光照度下，其光电流和光生电动势是不同的，它们之间的关系就是光照特性。图 8-24 为硅光电池的短路电流和开路电压与光照的关系曲线。从图中看出，短路电流在很大范围内与光照强度呈线性关系，开路电压（即负载电阻 R_L 无限大时）与光照度的关系是非线性的，并且当照度在 2000lx 时就趋于饱和了。因此用光电池作为测量元件时，应把它当作电流源的形式来使用，不宜用作电压源。

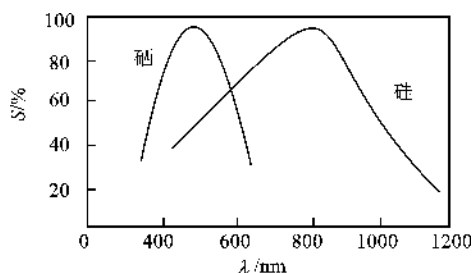


图 8-23 硅光电池的光谱特性

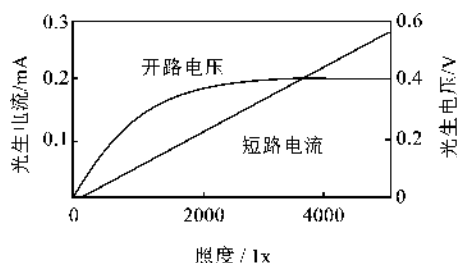


图 8-24 硅光电池的光照特性

(3) 频率特性

图 8-25 分别给出硅光电池和硒光电池的频率特性，横坐标表示光的调制频率。由图可见，硅光电池有较好的频率响应。

(4) 温度特性

光电池的温度特性是描述光电池的短路电流和开路电压随温度变化的情况。由于它关系到应用光电池的仪器或设备的温度漂移，影响到测量精度或控制精度等重要指标，因此温度特性是光电池的重要特性之一。光电池的温度特性如图 8-26 所示。从图中可以看出，开路电压随温度升高而下降的速度较快，而短路电流随温度升高而缓慢增加。由于温度对光电池的工作有

很大影响，因此把它作为测量元件使用时，最好能保证温度恒定或采取温度补偿措施。

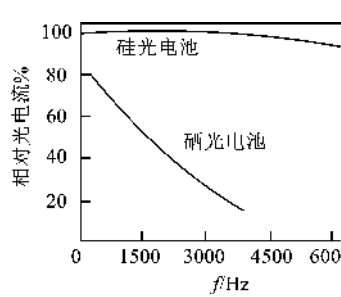


图 8 - 25 硅光电池的频率特性

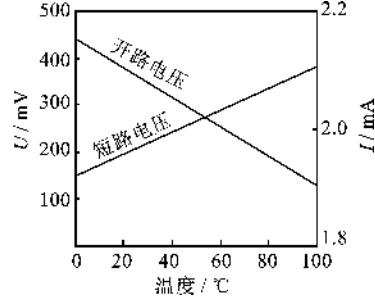


图 8 - 26 硅光电池的温度特性

8.2.6 光电耦合器件

光电耦合器件是由发光元件(如发光二极管)和光电接收元件合并使用，以光作为媒介传递信号的光电器件。根据其结构和用途不同，它又可分为用于实现电隔离的光电耦合器和用于检测有无物体的光电开关。

1. 光电耦合器

光电耦合器的发光元件和接收元件都封装在一个外壳内，一般有金属封装和塑料封装两种。发光器件通常采用砷化镓发光二极管，其管芯由一个 PN 结组成，随着正向电压的增大，正向电流增加，发光二极管产生的光通量也增加。光电接收元件可以是光敏二极管和光敏三极管，也可以是达林顿光敏管。图 8 - 27 为光敏三极管和达林顿光敏管输出型的光电耦合器。为了保证光电耦合器有较高的灵敏度，应使发光元件和接收元件的波长匹配。

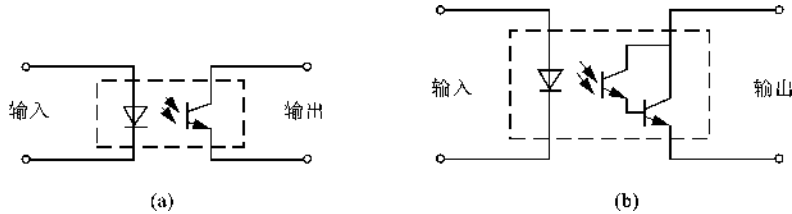


图 8 - 27 光电耦合器组合形式

2. 光电开关

光电开关是一种利用感光元件对变化的入射光加以接收，并进行光电转换，同时加以某种形式的放大和控制，从而获得最终的控制输出“开”、“关”信号的器件。图 8 - 28 为典型的光电开关结构图。图 8 - 28(a)是一种透射式的光电开关，它的发光元件和接收元件的光轴是重合的。当不透明的物体位于或经过它们之间时，会阻断光路，使接收元件接收不到来自发光元件的光，这样就起到了检测作用。图 8 - 28(b)是一种反射式的光电开关，它的发光元件和接收元件的光轴在同一平面且以某一角度相交，交点一般即为待测物所在处。当有物体经过时，接收元件将接收到从物体表面反射的光，没有物体时则接收不到。光电开关的特点是小型、高速、非接触，而且与 TTL、MOS 等电路容易结合。

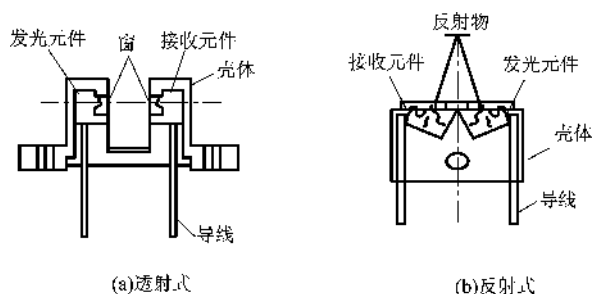


图 8-28 光电开关的结构

用光电开关检测物体时，大部分只要求其输出信号有“高一低”(1-0)之分即可。图 8-29 是光电开关的基本电路示例。图(a)、(b)表示负载为 CMOS 比较器等高输入阻抗电路时的情况，图(c)表示用晶体管放大光电流的情况。

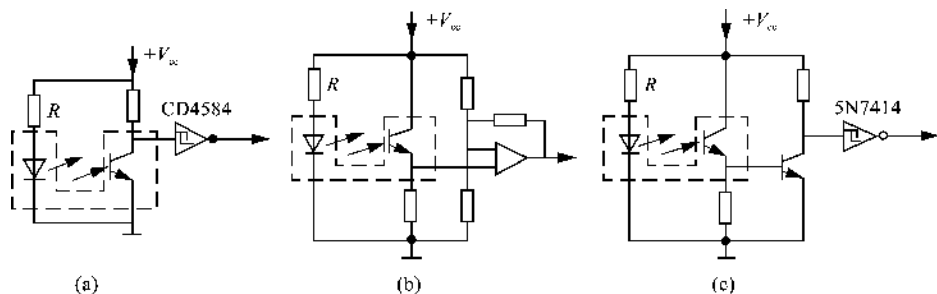


图 8-29 光电开关的基本电路

光电开关广泛应用于工业控制、自动化包装线及安全装置中作为光控制和光探测装置。可在自动控制系统中用作物体检测、产品计数、料位检测、尺寸控制、安全报警及计算机输入接口等。

8.2.7 电荷耦合器件

电荷耦合器件 (Charge Couple Device, 缩写为 CCD) 是一种大规模金属氧化物半导体 (MOS) 集成电路光电器件。它以电荷为信号，具有光电信号转换、存储、转移并读出信号电荷的功能。CCD 自 1970 年问世以来，由于其独特的性能而发展迅速，广泛应用于航天、遥感、工业、农业、天文及通讯等军用及民用领域信息存储及信息处理等方面，尤其适用以上领域中的图像识别技术。

1. CCD 的结构及工作原理

(1) 结构

CCD 是由若干个电荷耦合单元组成的。其基本单元是 MOS (金属 - 氧化物 - 半导体) 电容器，如 8-30(a) 所示。它以 P 型 (或 N 型) 半导体为衬底，上面覆盖一层厚度约 120nm 的 SiO_2 ，再在 SiO_2 表面依次沉积一层金属电极而构成 MOS 电容转移器件。这样一个 MOS 结构称为一个光敏元或一个像素。将 MOS 阵列加上输入、输出结构就构成了 CCD 器件。

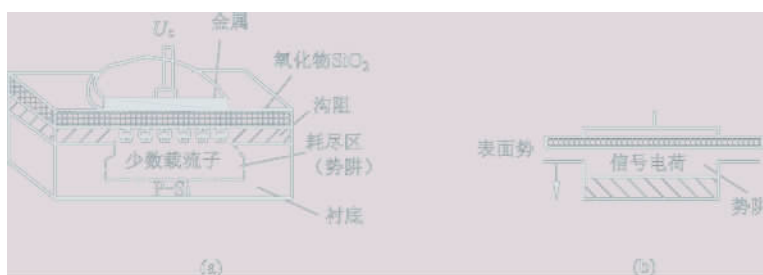


图 8-30 MOS 电容器
(a)MOS 电容截面；(b)势阱图

(2)工作原理

构成 CCD 的基本单元是 MOS 电容器。与其他电容器一样，MOS 电容器能够存储电荷。如果 MOS 电容器中的半导体是 P 型硅，当在金属电极上施加一个正电压 U_g 时，P 型硅中的多数载流子(空穴)受到排斥，半导体内的少数载流子(电子)吸引到 P-Si 界面处来，从而在界面附近形成一个带负电荷的耗尽区，也称表面势阱，如图 8-30(b)所示。对带负电的电子来说，耗尽区是个势能很低的区域。如果有光照射在硅片上，在光子作用下，半导体硅产生了电子-空穴对，由此产生的光生电子就被附近的势阱所吸收，势阱内所吸收的光生电子数量与入射到该势阱附近的光强成正比，存储了电荷的势阱被称为电荷包，而同时产生的空穴被排斥出耗尽区。并且在一定的条件下，所加正电压 U_g 越大，耗尽层就越深，Si 表面吸收少数载流子表面势(半导体表面对于衬底的电势差)也越大，这时势阱所能容纳的少数载流子电荷的量就越大。

CCD 的信号是电荷，那么信号电荷是怎样产生的呢？

CCD 的信号电荷产生有两种方式：光信号注入和电信号注入。CCD 用作固态图像传感器时，接收的是光信号，即光信号注入。图 8-31(a)是背面光注入方法，如果用透明电极也可用正面光注入方法。当 CCD 器件受光照射时，在栅极附近的半导体内产生电子-空穴对，其多数载流子(空穴)被排斥进入衬底，而少数载流子(电子)则被收集在势阱中，形成信号电荷，并存储起来。存储电荷的多少正比于照射的光强，从而可以反映图像的明暗程度，实现光信号与电信号之间的转换。所谓电信号注入，就是 CCD 通过输入结构对信号电压或电流进行采样，将信号电压或电流转换成信号电荷。图 8-31(b)是用输入二极管进行电注入，该二极管是在输入栅衬底上扩散形成的。当输入栅 IG 加上宽度为 Δt 的正脉冲时，输入二极管 PN 结的少数载流子通过输入栅下的沟道注入 ϕ_1 电极下的势阱中，注入电荷量 $Q = I_D \Delta t$ 。

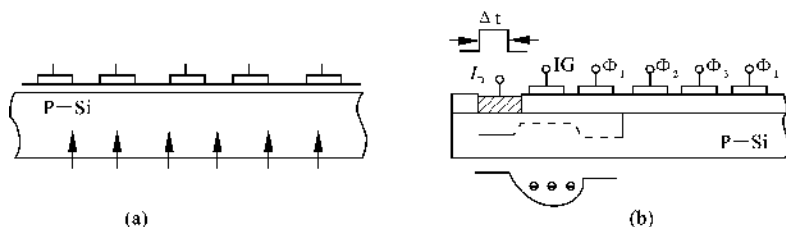


图 8-31 电荷注入方法

CCD 最基本的结构是一系列彼此非常靠近的 MOS 电容器, 这些电容器用同一半导体衬底制成, 衬底上面涂覆一层氧化层, 并在其上制作许多互相绝缘的金属电极, 相邻电极之间仅隔极小的距离, 保证相邻势阱耦合及电荷转移。对于可移动的电荷信号都将力图向表面势大的位置移动。

为保证信号电荷按确定方向和路线转移, 在各电极上所加的电压严格满足相位要求, 下面以三相(也有二相和四相)时钟脉冲控制方式为例说明电荷定向转移的过程。把 MOS 光敏元电极分成三组, 在其上面分别施加三个相位不同的控制电压 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 , 三相 CCD 时钟控制电压 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 的波形见图 8-32 所示。

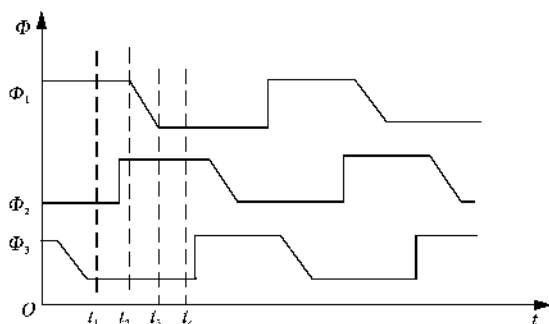


图 8-32 三相 CCD 时钟电压脉冲波形

三相 CCD 电荷转移过程见图 8-33, 当 $t=t_1$ 时, Φ_1 相处于高电平, Φ_2 、 Φ_3 相处于低电平, 在电极 1、4 下面出现势阱, 存储了电荷。在 $t=t_2$ 时, Φ_2 相也处于高电平, 电极 2、5 下面出现势阱。由于相邻电极之间的间隙很小, 电极 1、2 及 4、5 下面的势阱互相耦合, 使电极 1、4 下的电荷向电极 2、5 下面势阱转移。随着 Φ_1 电压下降, 电极 1、4 下的势阱相应变浅。在 $t=t_3$ 时, 有更多的电荷转移到电极 2、5 下势阱内。在 $t=t_4$ 时, 只有 Φ_2 处于高电平, 信号电荷全部转移到电极 2、5 下面的势阱内。随着控制脉冲的变化, 信号电荷便从 CCD 的一端转移到终端, 实现了电荷的耦合与转移。图 8-34 是 CCD 输出端结构示意图。它实际上是在 CCD 阵列的末端衬底上制作一个输出二极管, 当输出二极管加上反向偏压时, 转移到终端的电荷在时钟脉冲作用下移向输出二极管, 被二极管的 PN 结所收集, 在负载 R_L 上就形成脉冲电流 I_o 。输出电流的大小与信

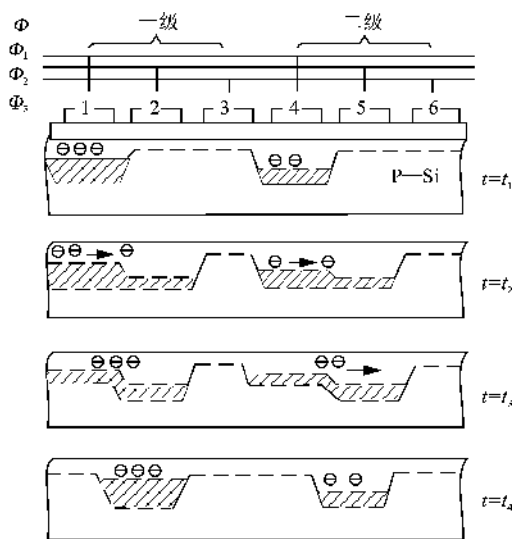


图 8-33 三相 CCD 电荷转移过程

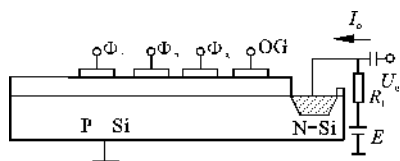


图 8-34 CCD 输出端结构

号电荷大小成正比,并通过负载电阻 R_L 变为信号电压 U_o 输出。

2. CCD 的应用(CCD 固态图像传感器)

电荷耦合器件用于固态图像传感器中,作为摄像或像敏的器件。CCD 固态图像传感器由感光部分和移位寄存器组成。感光部分是指在同一半导体衬底上布设的由若干光敏单元组成的阵列元件,光敏单元简称“像素”。固态图像传感器利用光敏单元的光电转换功能将投射到光敏单元上的光学图像转换成电信号“图像”,即将光强的空间分布转换为与光强成正比的、大小不等的电荷包空间分布,然后利用移位寄存器的移位功能将电信号“图像”传送,经输出放大器输出。根据光敏元件排列形式的不同,CCD 固态图像传感器可分为线型和面型两种。

(1)线型 CCD 图像传感器

线型 CCD 图像传感器是由一列 MOS 光敏单元和一列 CCD 移位寄存器构成的,光敏单元与移位寄存器之间有一个转移控制栅,基本结构如图 8-35(a)所示。转移控制栅控制光电荷向移位寄存器转移,一般使信号转移时间远小于光积分时间。在光积分周期里,各个光敏单元中所积累的光电荷与该光敏元上所接收的光照强度和光积分时间成正比,光电荷存储于光敏单元的势阱中。当转移控制栅开启时,各光敏单元收集的信号电荷并行地转移到 CCD 移位寄存器的相应单元。当转移控制栅关闭时,MOS 光敏单元阵列又开始下一行的光电荷积累。同时,在移位寄存器上施加时钟脉冲,将已转移到 CCD 移位寄存器内的上一行的信号电荷由移位寄存器串行输出,如此重复上述过程。

图 8-35(b)为 CCD 的双行结构图。光敏元中的信号电荷分别转移到上下方的移位寄存器中,然后在时钟脉冲的作用下向终端移动,在输出端交替合并并输出。这种结构与长度相同的单行结构相比较,可以获得高出两倍的分辨率;同时由于转移次数减少一半,使 CCD 电荷转移损失大为减少;双行结构在获得相同效果情况下,又可缩短器件尺寸。由于这些优点,双行结构已发展成为线型 CCD 图像传感器的主要结构形式。

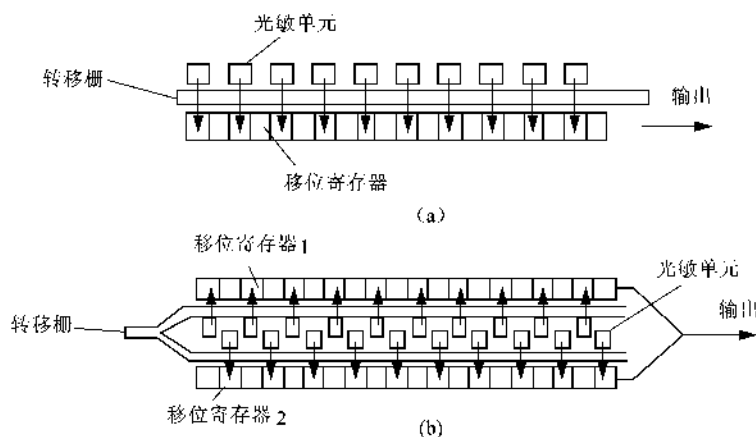


图 8-35 线型 CCD 图像传感器

(a)单行结构; (b)双行结构

线型 CCD 图像传感器可以直接接收一维光信息,不能直接将二维图像转变为视频信号输出,为了得到整个二维图像的视频信号,就必须用扫描的方法。线型 CCD 图像传感器主要用于测试、传真和光学文字识别技术等方面。

(2) 面型 CCD 图像传感器

按一定的方式将一维线型光敏单元及移位寄存器排列成二维阵列,即可以构成面型 CCD 图像传感器。

面型 CCD 图像传感器有三种基本类型:线转移型、帧转移型和行间转移型。

图 8-36(a)为线转移面型 CCD 的结构图。它由行扫描发生器、感光区和输出寄存器等组成。行扫描发生器将光敏元件内的信息转移到水平(行)方向上,驱动脉冲将信号电荷一位一位地按箭头方向转移,并移入输出寄存器,输出寄存器亦在驱动脉冲的作用下使信号电荷经输出端输出。这种转移方式具有有效光敏面积大、转移速度快、转移效率高等特点,但电路比较复杂,易引起图像模糊。

图 8-36(b)为帧转移面型 CCD 的结构图。它由光敏元面阵(感光区)、存储器面阵和输出移位寄存器三部分构成。图像成像到光敏元面阵,当光敏元的某一相电极加有适当的偏压时,光生电荷将收集到这些光敏单元的势阱里,光学图像变成电荷包图像。当光积分周期结束时,信号电荷迅速转移到存储器面阵,经输出端输出一帧信息。当整帧视频信号自存储器面阵移出后,就开始下一帧信号的形成。这种面型 CCD 的特点是结构简单,光敏单元密度高,但增加了存储区。图 8-36(c)所示结构为行间转移型的结构图,是用得最多的一种结构形式。它将光敏单元与垂直转移寄存器交替排列。在光积分期间,光生电荷存储在感光区光敏单元的势阱里;当光积分时间结束,转移栅的电位由低变高,信号电荷进入垂直转移寄存器中。随后一次一行地移动到输出移位寄存器中,然后移位到输出器件,在输出端得到与光学图像对应的一行行视频信号。这种结构的感光单元面积减小,图像清晰,但单元设计复杂。面型 CCD 图像传感器主要用于摄像机及测试技术。

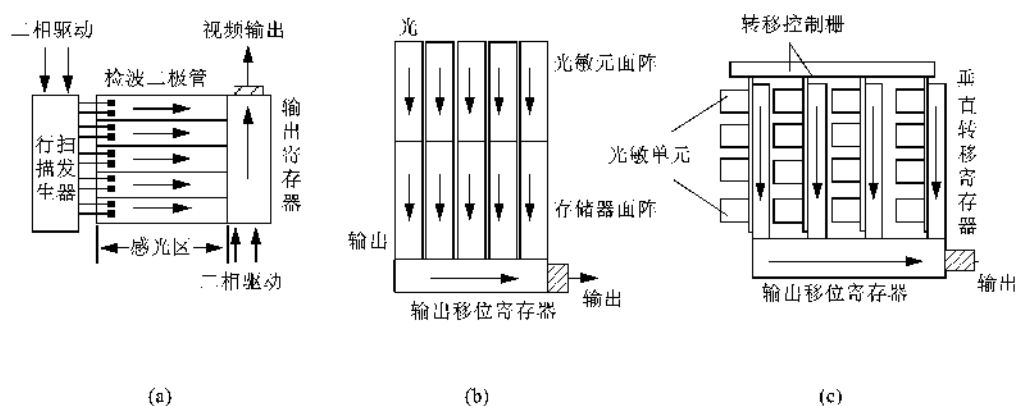


图 8-36 面型 CCD 图像传感器结构

8.2.8 光电传感器的应用

1. 火焰探测报警器

图 8-37 是采用以硫化铅光敏电阻为探测元件的火焰探测器电路图。硫化铅光敏电阻的暗电阻为 $1\text{M}\Omega$, 亮电阻为 $0.2\text{M}\Omega$ (在光强度 $0.01\text{W}/\text{m}^2$ 下测试), 峰值响应波长为 $2.2\mu\text{m}$, 硫化铅光敏电阻处于 V_1 管组成的恒压偏置电路, 其偏置电压约为 6V , 电流约为 $6\mu\text{A}$ 。 V_1 管集

电极电阻两端并联 $68\mu\text{F}$ 的电容,可以抑制 100 Hz 以上的高频,使其成为只有几十赫兹的窄带放大器。 V_2 、 V_3 构成二级负反馈互补放大器,火焰的闪动信号经二级放大后送给中心控制站进行报警处理。采用恒压偏置电路是为了在更换光敏电阻或长时间使用后,器件阻值的变化不至于影响输出信号的幅度,保证火焰报警器能长期稳定的工作。

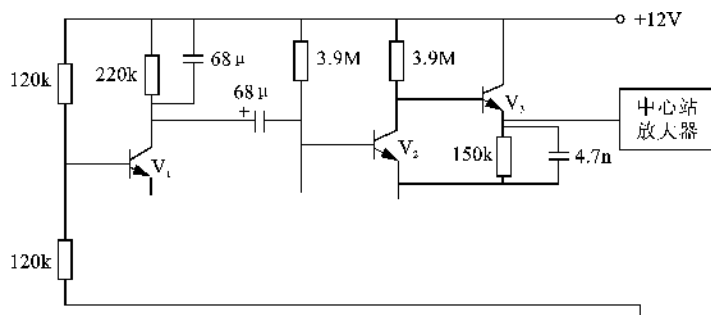


图 8-37 光电式纬线探测器原理电路图

2. 光电式纬线探测器

光电式纬线探测器是应用于喷气织机上,判断纬线是否断线的一种探测器。图 8-38 为光电式纬线探测器原理电路图。

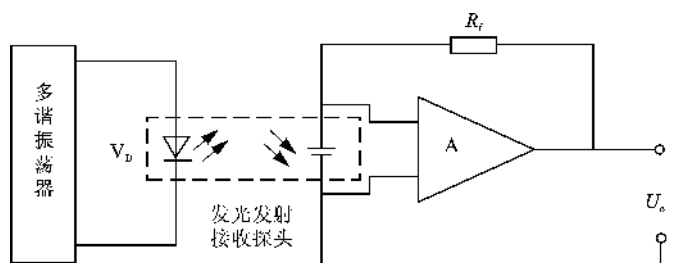


图 8-38 光电式纬线探测器原理电路图

当纬线在喷气作用下前进时,红外发光管 VD 发出的红外光,经纬线反射,由光电池接收,如光电池接收不到反射信号时,说明纬线已断。因此利用光电池的输出信号,通过后续电路放大、脉冲整形等,控制机器正常运转,或关机报警。

由于纬线线径很细,又是摆动前进,形成光的漫反射,削弱了反射光的强度,而且还伴有背景杂散光,因此要求探纬器具有高的灵敏度和分辨率。为此,红外发光管 VD 采用占空比很小的强电流脉冲供电,这样既能保证发光管使用寿命,又能在瞬间有强光射出,以提高检测灵敏度。一般来说,光电池输出信号比较小,需经放大、脉冲整形,以提高分辨率。

3. 燃气器具中的脉冲点火控制器

由于燃气是易燃、易爆气体,所以对燃气器具中的点火控制器的要求是安全、稳定、可靠。为此电路中有这样一个功能,即打火确认针产生火花,才可以打开燃气阀门;否则燃气阀门关闭,这样就保证使用燃气器具的安全性。图 8-39 为燃气器具中高压打火确认电路原理图。在高压打火时,火花电压可达 1 万多伏,这个脉冲高电压对电路工作影响极大,为了

使电路正常工作,采用光电耦合器 V_B 进行电平隔离,大大增加了电路抗干扰能力。当高压打火针对打火确认针放电时,光电耦合器中的发光二极管发光,耦合器中的光敏三极管导通,经 V_1 、 V_2 、 V_3 放大,驱动强吸电磁阀,将气路打开,燃气碰到火花即燃烧。若高压打火针与打火确认针之间不放电,则光电耦合器不工作, V_1 等不导通,燃气阀门关闭。

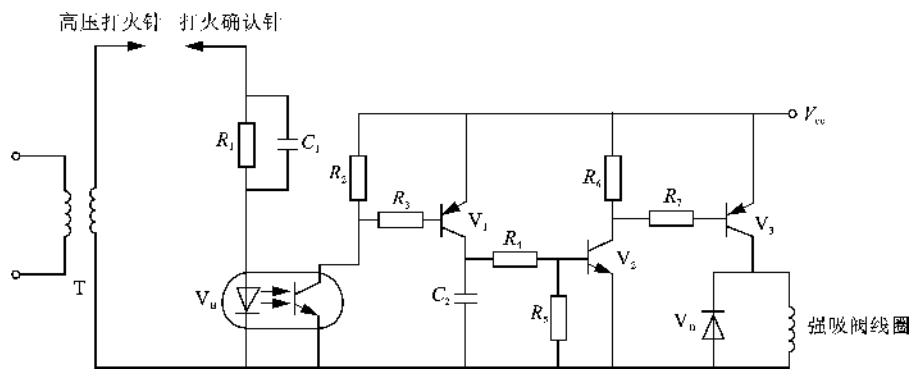


图 8 - 39 燃气热水器的高压打火确认原理图

4. CCD 图像传感器应用

CCD 图像传感器在许多领域内获得了广泛的应用。前面介绍的电荷耦合器件 (CCD) 具有将光像转换为电荷分布,以及电荷的存储和转移等功能,所以它是构成 CCD 固态图像传感器的主要光敏器件,取代了摄像装置中的光学扫描系统或电子束扫描系统。

CCD 图像传感器具有高分辨率和高灵敏度,具有较宽的动态范围,这些特点决定了它可以广泛应用于自动控制和自动测量,尤其适用于图像识别技术。CCD 图像传感器在检测物体的位置、工件尺寸的精确测量及工件缺陷的检测方面有独到之处。

下面是一个利用 CCD 图像传感器进行工件尺寸检测的例子。图 8 - 39 为应用线型 CCD 图像传感器测量物体尺寸系统。物体成像聚焦在图像传感器的光敏面上,视频处理器对输出的视频信号进行存储和数据处理,整个过程由微机控制完成。根据光学几何原理,可以推导被测物体尺寸的计算公式,即:

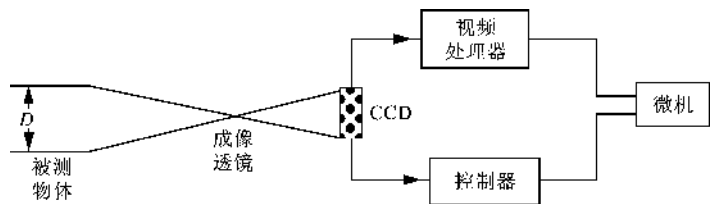


图 8 - 40 CCD 图像传感器工件尺寸检测系统

$$D = \frac{np}{M} \tag{8 - 8}$$

式中 n ——覆盖的光敏像素数;
 p ——像素间距;

M——倍率。

微机可对多次测量求平均值,精确得到被测物体的尺寸。任何能够用光学成像的零件都可以用这种方法,实现不接触的在线自动检测的目的。

8.3 光纤传感器

8.3.1 概述

光纤传感器是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种新技术,它是伴随着光纤及光通信技术的发展而逐步形成的。

光纤传感器和传统的各类传感器相比有一定的优点,如不受电磁干扰,体积小,重量轻,可绕曲,灵敏度高,耐腐蚀,高绝缘强度,防爆性好,集传感与传输于一体,能与数字通信系统兼容等。光纤传感器能用于温度、压力、应变、位移、速度、加速度、磁、电、声和 pH 值等 70 多个物理量的测量,在自动控制、在线检测、故障诊断、安全报警等方面具有极为广泛的应用潜力和发展前景。

8.3.2 光纤的结构和传输原理

1. 光纤结构

光导纤维简称光纤,它是一种特殊结构的光学纤维,结构如图 8-41 所示。中心的圆柱体叫纤芯,围绕着纤芯的圆形外层叫包层。纤芯和包层通常由不同掺杂的石英玻璃制成。纤芯的折射率 n_1 略大于包层的折射率 n_2 ,光纤的导光能力取决于纤芯和包层的性质。在包层外面还常有一层保护套,多为尼龙材料,以增加机械强度。

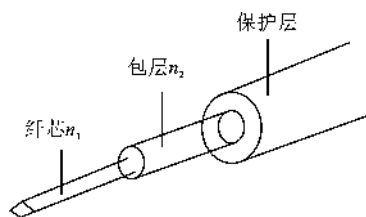


图 8-41 光纤的基本结构

2. 光纤传光原理

众所周知,光在空间是直线传播的。将光纤光的传输限制在光纤中,并随着光纤能传送很远的距离,光纤的传输是基于光的全内反射。设有一段圆柱形光纤,如图 8-41 所示,它的两个端面均为光滑的平面。当光线射入一个端面并与圆柱的轴线成 θ_i 角时,在端面发生折射进入光纤后,又以 φ_i 角入射至纤芯与包层的界面,光线有一部分透射到包层,一部分反射回纤芯。但当入射角 θ_i 小于临界入射角 θ_c 时,光线就不会透射界面,而全部被反射,光在纤芯和包层的界面上反复逐次全反射,呈锯齿波形状在纤芯内向前传播,最后从光纤的另一端面射出,这就是光纤的传光原理。

根据斯涅耳(Snell)光的折射定律,由图 8-41 可得:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta' \quad (8-9)$$

$$n_1 \sin \varphi_i = n_2 \sin \varphi' \quad (8-10)$$

式中 n_0 为光纤外界介质的折射率。

若要在纤芯和包层的界面上发生全反射,则界面上的光线临界折射角 $\varphi_c = 90^\circ$,即 $\varphi' \geq \varphi_c = 90^\circ$ 。而

$$n_1 \sin \theta' = n_1 \sin \left[\frac{\pi}{2} - \varphi_i \right] = n_1 \cos \varphi_i = n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_i} = n_1 \sqrt{1 - \left[\frac{n_2}{n_1} \sin \varphi \right]^2} \quad (8-11)$$

当 $\varphi' = \varphi_c = 90^\circ$ 时, 有:

$$n_1 \sin \theta' = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8-12)$$

所以, 为满足光在光纤内的全内反射, 光入射到光纤端面的入射角 θ_i 应满足:

$$\sin \theta_i < \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\theta_i \leq \theta_c = \arcsin \left[\frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right] \quad (8-13)$$

一般光纤所处环境为空气, 则 $n_0 = 1$ 。

实际工作时需要光纤弯曲, 但只要满足全反射条件, 光线仍然继续前进。可见这里的光线“转弯”实际上是由光的全反射所形成的。

3. 光纤基本特性

数值孔径(N_A)定义为:

$$N_A = \sin \theta_c = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8-14)$$

数值孔径是表征光纤集光本领的一个重要参数, 即反映光纤接收光量的多少。其意义是: 无论光源发射功率有多大, 只有入射角处于 $2\theta_c$ 的光锥角内, 光纤才能导光。如入射角过大, 光线便从包层逸出而产生漏光。光纤的 NA 越大, 表明它的集光能力越强, 一般希望有大的数值孔径, 这有利于提高耦合效率; 但数值孔径过大, 会造成光信号畸变。所以要适当选择数值孔径的数值, 如石英光纤数值孔径一般为 $0.2 \sim 0.4$ 。

4. 光纤模式

光纤模式是指光波传播的途径和方式。对于不同入射角度的光线, 在界面反射的次数是不同的, 传递的光波之间的干涉所产生的横向强度分布也是不同的, 这就是传播模式不同。在光纤中传播模式很多不利于光信号的传播, 因为同一种光信号采取很多模式传播将使一部分光信号分为多个不同时间到达接收端的小信号, 从而导致合成信号的畸变, 因此希望光纤信号模式数量要少。

一般纤芯直径为 $2 \sim 12 \mu\text{m}$, 只能传输一种模式称为单模光纤。这类光纤的传输性能好, 信号畸变小, 信息容量大, 线性好, 灵敏度高, 但由于纤芯尺寸小, 制造、连接和耦合都比较困难。纤芯直径较大 ($50 \sim 100 \mu\text{m}$), 传输模式较多称为多模光纤。这类光纤的性能较差, 输出波形有较大的差异, 但由于纤芯截面积大, 故容易制造, 连接和耦合比较方便。

5. 光纤传输损耗

光纤传输损耗主要来源于材料吸收损耗、散射损耗和光波导弯曲损耗。目前常用的光纤材料有石英玻璃、多成分玻璃、复合材料等。在这些材料中, 由于存在杂质离子、原子的缺陷等都会吸收光, 从而造成材料吸收损耗。

散射损耗主要是由于材料密度及浓度不均匀引起的, 这种散射与波长的四次方成反比。因此散射随着波长的缩短而迅速增大。所以可见光波段并不是光纤传输的最佳波段, 在近红外波段 ($1 \sim 1.7 \mu\text{m}$) 有最小的传输损耗。因此长波长光纤已成为目前发展的方向。光纤拉制时粗细不均匀, 造成纤维尺寸沿轴线变化, 同样会引起光的散射损耗。另外纤芯和包层界面

的不光滑、污染等，也会造成严重的散射损耗。

光波导弯曲损耗是使用过程中可能产生的一种损耗。光波导弯曲会引起传输模式的转换，激发高阶模进入包层产生损耗。当弯曲半径大于 10cm 时，损耗可忽略不计。

8.3.3 光纤传感器

1. 光纤传感器的工作原理及组成

光纤传感器原理实际上是研究光在调制区内，外界信号(温度、压力、应变、位移、振动、电场等)与光的相互作用，即研究光被外界参数的调制原理。外界信号可能引起光的强度、波长、频率、相位、偏振态等光学性质的变化，从而形成不同的调制。

光纤传感器一般分为两大类：一类是利用光纤本身的某种敏感特性或功能制成的传感器，称为功能型(Functional Fiber，缩写为 FF)传感器，又称为传感型传感器；另一类是光纤仅仅起传输光的作用，它在光纤端面或中间加装其他敏感元件感受被测量的变化，这类传感器称为非功能型(Non Functional Fiber，缩写为 NFF)传感器，又称为传光型传感器。

在用途上，非功能型传感器要多于功能型传感器，而且非功能型传感器的制作和应用也比较容易，所以目前非功能型传感器品种较多。功能型传感器的构思和原理往往比较巧妙，可解决一些特别棘手的问题。但无论哪一种传感器，最终都利用光探测器将光纤的输出变为电信号。

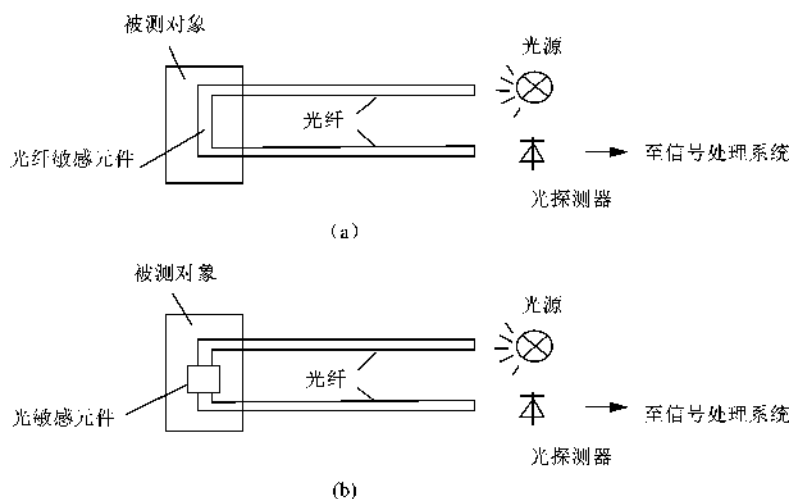


图 8-42 光纤传感器组成示意图

(a) 传感型；(b) 传光型

2. 光纤传感器的组成

光纤传感器由光源、敏感元件(光纤或非光纤的)、光探测器、信号处理系统以及光纤等组成，如图 8-42 所示。由光源发出的光通过源光纤引到敏感元件，被测参数作用于敏感元件，在光的调制区内，使光的某一性质受到被测量的调制，调制后的光信号经接收光纤耦合到光探测器，将光信号转换为电信号，最后经信号处理得到所需要的被测量。

3. 光纤传感器的应用

(1) 光纤加速度传感器

光纤加速度传感器的组成结构如图 8-43 所示。它是一种简谐振子的结构形式。激光束通过分光板后分为两束光，透射光作为参考光束，反射光作为测量光束。当传感器感受加速度时，由于质量块 M 对光纤的作用，从而使光纤被拉伸，引起光程差的改变。相位改变的激光束由单模光纤射出后与参考光束会合产生干涉效应。激光干涉仪干涉条纹的移动可由光电接收装置转换为电信号，经过信号处理电路处理后便可以正确地测出加速度值。

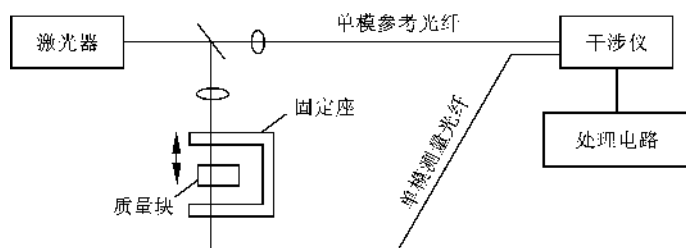


图 8-43 光纤加速度传感器结构简图

(2) 光纤温度传感器

光纤温度传感器是目前仅次于加速度、压力传感器而被广泛使用的光纤传感器。根据工作原理它可分为相位调制型、光强调制型和偏振光型等。这里仅介绍一种光强调制型的半导体光吸收型光纤传感器，图 8-44 为这种传感器的结构原理图。它由半导体光吸收器、光纤、光源和包括光探测器在内的信号处理系统等组成的。光纤是用来传输信号，半导体光吸收器是光敏感元件，在一定的波长范围内，它对光的吸收随温度 T 变化而变化。图 8-45 为半导体的光透过率特性。半导体材料的光透过率特性曲线随温度的增加向长波方向移动，如果适当地选定一种在该材料工作波长范围内的光源，那么就可以使透射过半导体材料的光强随温度而变化，探测器检测输出光强的变化即达到测量温度的目的。

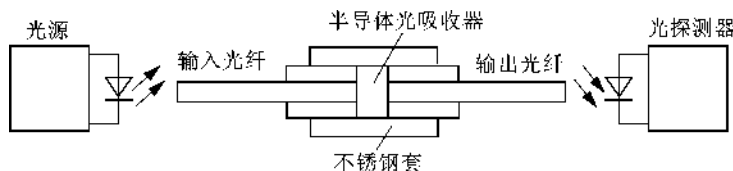


图 8-44 半导体光吸收型光纤温度传感器结构原理图

这种半导体光吸收型光纤传感器的测量范围随半导体材料和光源而变，一般在 $-100 \sim +300$ 温度范围内进行测量，响应时间约为 2s。它的特点是体积小、结构简单、时间响应快、工作稳定、成本低、便于推广应用。

(3) 光纤旋涡流量传感器

光纤旋涡流量传感器是将一根多模光纤垂直装入管道，当液体或气体流经与其垂直的光纤时，光纤受到流体涡流的作用而振动，振动的频率与流速有关。测出频率就可知流速。这种光纤旋涡流量传感器的结构示意图如图 8-46 所示。

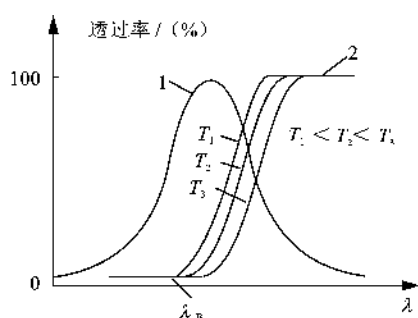


图 8-45 半导体的光透过率特性

1—光源光谱分布；2—吸收边沿透射

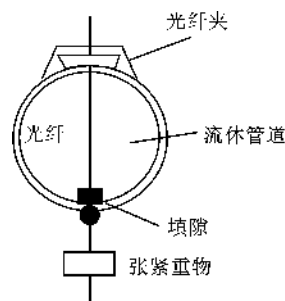


图 8-46 光纤旋涡

当流体运动受到一个垂直于流动方向的非流线体阻碍时,根据流体力学原理,在某些条件下,在非流线体的下游两侧产生有规则的旋涡,其旋涡的频率 f 与流体的流速可表示为

$$f = St \cdot \frac{v}{(1 - 1.27d)/d}$$

$$f = St \cdot \frac{v}{d} \quad (8-15)$$

式中 v ——流体流速；

d ——流体中物体的横向尺寸大小；

St ——斯特罗哈尔(Strouhal)系数,它是一个无量纲的常数,仅与雷诺数有关。

在多模光纤中,光以多种模式进行传输,在光纤的输出端,各模式的光就形成了干涉图样,这就是光斑。一根没有外界扰动的光纤所产生的干涉图样是稳定的,当光纤受到外界扰动时,干涉图样的明暗相间的斑纹或斑点发生移动。如果外界扰动是流体的涡流引起的,那么干涉图样斑纹或斑点就会随着振动的周期变化来回移动,这时测出斑纹或斑点的移动,即可获得对应于振动频率 f 的信号,根据式(8-15)即可推算流体的流速 v 。

这种流体传感器可测量液体和气体的流量,因为传感器没有活动部件,测量可靠,而且对流体流动不产生阻碍作用,因此压力损耗非常小。这些特点是孔板、涡轮等许多传统流量计所无法比拟的。

8.4 红外传感器

8.4.1 红外辐射

红外辐射俗称红外线,它是一种不可见光。由于是位于可见光中红色光以外的光线,故称红外线。它的波长范围大致在 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$,红外线在电磁波谱中的位置如图 8-47 所示。工程上又把红外线所占据的波段分为四部分,即近红外、中红外、远红外和极远红外。红外辐射的物理本质是热辐射,一个炽热物体向外辐射的能量大部分是通过红外线辐射出来的。物体的温度越高,辐射出来的红外线越多,辐射的能量就越强。红外光的本质与可见光或电磁波性质一样,具有反射、折射、散射、干涉、吸收等特性,它在真空中也以光速传播,

并具有明显的波粒二相性。红外辐射和所有电磁波一样,是以波的形式在空间直线传播的。它在大气中传播时,大气层对不同波长的红外线存在不同的吸收带,红外线气体分析器就是利用该特性工作的,空气中对称的双原子气体,如 N_2 、 O_2 、 H_2 等不吸收红外线。而红外线在通过大气层时,有三个波段透过率高,它们是 $2 \sim 2.6 \mu m$ 、 $3 \sim 5 \mu m$ 和 $8 \sim 14 \mu m$,统称它们为“大气窗口”。这三个波段对红外探测技术特别重要,因此红外探测器一般都工作在这三个波段(大气窗口)之内。

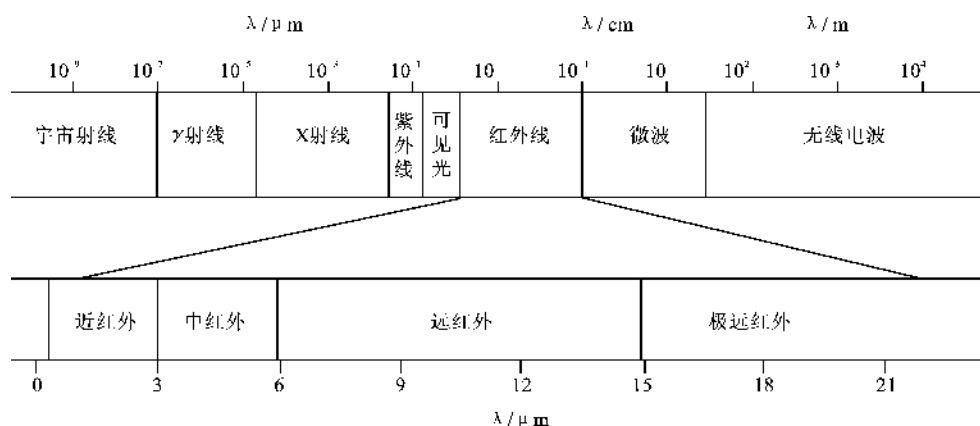


图 8-47 电磁波谱图

8.4.2 红外探测器

红外传感器一般由光学系统、探测器、信号调理电路及显示单元等组成。红外探测器是红外传感器的核心。红外探测器是利用红外辐射与物质相互作用所呈现的物理效应来探测红外辐射的。红外探测器的种类很多,按探测机理的不同,分为热探测器和光子探测器两大类。

1. 热探测器

热探测器的工作机理是:利用红外辐射的热效应,探测器的敏感元件吸收辐射能后引起温度升高,进而使某些有关物理参数发生相应变化,通过测量物理参数的变化来确定探测器所吸收的红外辐射。与光子探测器相比,热探测器的探测率比光子探测器的峰值探测率低,响应时间长。但热探测器的主要优点是响应波段宽,响应范围可扩展到整个红外区域,可以在常温下工作,使用方便,应用相当广泛。

热探测器主要有四类:热释电型、热敏电阻型、热电阻型和气体型。其中,热释电型探测器在热探测器中探测率最高,频率响应最宽,所以这种探测器倍受重视,发展很快。这里我们主要介绍热释电型探测器。

热释电型红外探测器是根据热释电效应制成的,即电石、水晶、酒石酸钾钠、钛酸钡等晶体受热产生温度变化时,其原子排列将发生变化,晶体自然极化,在其两表面产生电荷的现象称为热释电效应。用此效应制成的“铁电体”,其极化强度(单位面积上的电荷)与温度有关。当红外辐射照射到已经极化的铁电体薄片表面上时引起薄片温度升高,使其极化强度降低,表面电荷减少,这相当于释放一部分电荷,所以叫做热释电型传感器。如果将负载电

阻与铁电体薄片相连,则负载电阻上便产生一个电信号输出。输出信号的强弱取决于薄片温度变化的快慢,从而反映出入射的红外辐射的强弱,热释电型红外传感器的电压响应率正比于入射光辐射率变化的速率。

2. 光子探测器

光子探测器的工作机理是:利用入射光辐射的光子流与探测器材料中的电子互相作用,从而改变电子的能量状态,引起各种电学现象——这种现象称为光子效应。根据所产生的不同电学现象,可制成各种不同的光子探测器。光子探测器有内光电和外光电探测器两种,后者又分为光电导、光生伏特和光磁电探测器等三种。光子探测器的主要特点是灵敏度高,响应速度快,具有较高的响应频率,但探测波段较窄,一般需在低温下工作。

8.4.3 红外传感器的应用

1. 红外测温仪

红外测温仪是利用热辐射体在红外波段的辐射通量来测量温度的。当物体的温度低于1000℃时,它向外辐射的不再是可见光而是红外光了,可用红外探测器检测其温度。如采用分离出所需波段的滤光片,可使红外测温仪工作在任意红外波段。

图8-48是目前常见的红外测温仪方框图。它是一个包括光、机、电一体化的红外测温系统,图中的光学系统是一个固定焦距的透射系统,滤光片一般采用只允许 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 的红外辐射能通过的材料。步进电机带动调制盘转动,将被测的红外辐射调制成交变的红外辐射线。红外探测器一般为(钽酸锂)热释电探测器,透镜的焦点落在其光敏面上。被测目标的红外辐射通过透镜聚焦在红外探测器上,红外探测器将红外辐射转换为电信号输出。

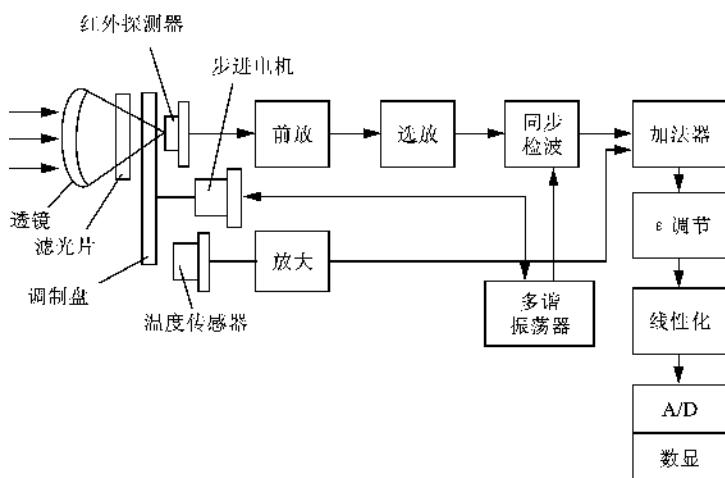


图8-48 红外测温仪方框

红外测温仪的电路比较复杂,包括前置放大、选频放大、温度补偿、线性化、发射率(ε)调节等。目前已有一种带单片机的智能红外测温器,利用单片机与软件的功能,大大简化了硬件电路,提高了仪表的稳定性、可靠性和准确性。

红外测温仪的光学系统可以是透射式,也可以是反射式。反射式光学系统多采用凹面玻

璃反射镜，并在镜的表面镀金、铝、镍或铬等对红外辐射反射率很高的金属材料。

2. 红外线气体分析仪

红外线气体分析仪是根据气体对红外线具有选择性的吸收的特性来对气体成分进行分析的。不同气体其吸收波段(吸收带)不同，图 8 - 49 给出了几种气体对红外线的透射光谱，从图中可以看出，CO 气体对波长为 $4.65\mu\text{m}$ 附近的红外线具有很强的吸收能力，CO₂ 气体则发生在 $2.78\mu\text{m}$ 和 $4.26\mu\text{m}$ 附近以及波长大于 $13\mu\text{m}$ 的范围，对红外线有较强的吸收能力。如分析 CO 气体，则可以利用 $4.26\mu\text{m}$ 附近的吸收波段进行分析。

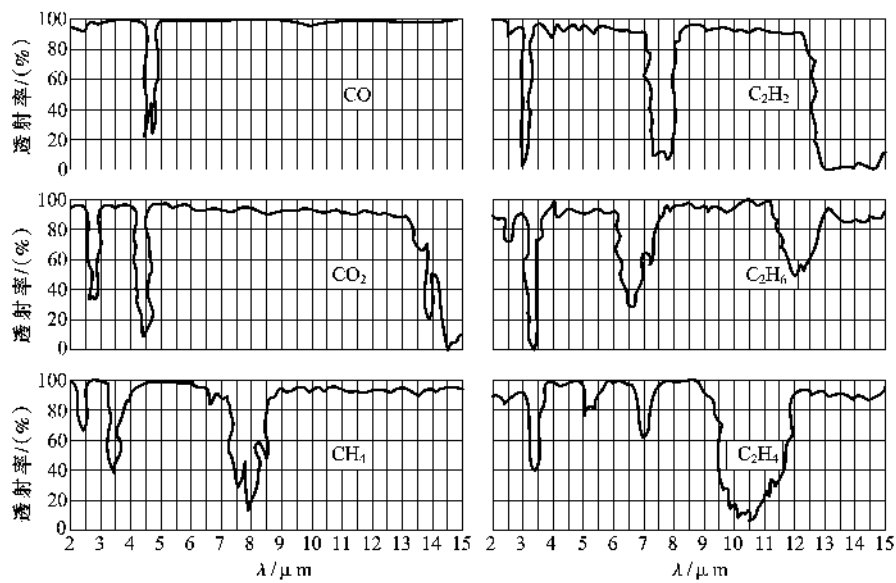


图 8 - 49 几种气体对红外线的透射光谱

图 8 - 50 是工业用红外线气体分析仪的结构原理图。该分析仪由红外线辐射光源、气室、红外检测器及电路等部分组成。

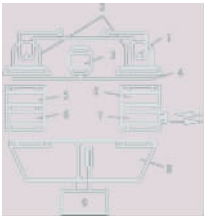


图 8 - 50 红外线气体分析仪结构原理图

- 1—光源； 2—抛物体反射镜； 3—同步电机； 4—切光片；
5—滤波气室； 6—参比气室； 7—测量气室； 8—红外探测器

光源由镍铬丝通电加热发出 $3 \sim 10\mu\text{m}$ 的红外线，切光片将连续的红外线调制成脉冲状的红外线，以便于红外线检测器信号的检测。测量气室中通入被分析气体，参比气室中封入不吸收红外线的气体(如 N₂ 等)。红外检测器是薄膜电容型，它有两个吸收气室，充以被测

气体, 当它吸收了红外辐射能量后, 气体温度升高, 导致室内压力增大。

测量时(如分析 CO 气体的含量), 两束红外线经反射、切光后射入测量气室和参比气室, 由于测量气室中含有一定量的 CO 气体, 该气体对 $4.65\mu\text{m}$ 的红外线有较强的吸收能力, 而参比气室中气体不吸收红外线, 这样射入红外探测器的两个吸收气室的红外线光造成能量差异, 使两吸收室压力不同, 测量边的压力减小, 于是薄膜偏向定片方向, 改变了薄膜电容两电极间的距离, 也就改变了电容 C 。如被测气体的浓度愈大, 两束光强的差值也愈大, 则电容的变化量也愈大, 因此电容变化量反映了被分析气体中被测气体的浓度。图 8-50 所示结构中还设置了滤波气室, 其目的是为了消除干扰气体对测量结果的影响。所谓干扰气体, 是指与被测气体吸收红外线波段有部分重叠的气体, 如 CO 气体和 CO_2 在 $4\sim 5\mu\text{m}$ 波段内红外吸收光谱有部分重叠, 则 CO_2 的存在对分析 CO 气体带来影响, 这种影响称为干扰。为此在测量边和参比边各设置了一个封有干扰气体的滤波气室, 它能将与 CO_2 气体对应的红外线吸收波段的能量全部吸收, 因此左右两边吸收气室的红外能量之差只与被测气体(如 CO)的浓度有关。

8.5 色敏光电传感器

色敏光电传感器是半导体光敏传感器中的一种。它是基于内光电效应将光信号转换为电信号的光辐射探测器件。但不管是光电导器件还是光生伏特效应器件, 它们检测的都是在一定波长范围内光的强度, 或者说光子的数目。而半导体色敏器件则可用来直接测量从可见光到红外波段内单色辐射的波长。这是近年来出现的一种新型光敏器件。

8.5.1 色敏光电传感器的基本原理

色敏光电传感器相当于两只结构不同的光电二极管的组合, 故又称光电双结二极管。其结构原理及等效电路如图 8-51 所示。

在图中所示的 $\text{P}^+ - \text{N} - \text{P}$ 不是晶体管, 而是结深不同的两个 $\text{P} - \text{N}$ 结二极管, 浅结的二极管是 $\text{P}^+ - \text{N}$ 结; 深结的二极管是 $\text{P} - \text{N}$ 结。当有入射光照射时, P^+ 、 N 、 P 三个区域及区间的势垒区中都有光子吸收, 但效果不同。如上所述, 紫

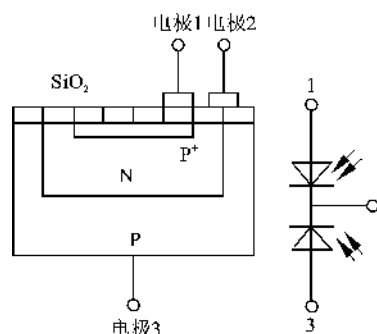


图 8-51 色敏光电传感器结构和等效电路图

外光部分吸收系数大, 经过很短距离已基本吸收外部。在此, 浅结的即是光电二极管对紫外光的灵敏度高, 而红外部分吸收系数较小, 这类波长的光子则主要在深结区被吸收。因此, 深结的那只光电二极管对红外光的灵敏度较高。这就是说, 在半导体中不同的区域对不同的波长分别具有不同的灵敏度。这特性给我们提供了将这种器件用于颜色识别的可能性, 也就是可以用来测量入射光的波长。将两只结深不同的光电二极管组合, 就构成了可以测定波长的半导体色敏传感器。在具体应用时, 应先对该色敏器件进行标定。也就是说, 测定不同波长的光照射下, 该器件中两只光电二极管短路电流的比值 $\text{ISD2}/\text{ISD1}$, ISD1 是浅结二极管的短路电流, 它在短波区较大。 ISD2 是深结二极管的短路电流, 它在长波区较大。因而二者的比值与入射单色光波长的关系就可以确定。根据标定的曲线, 实测出某一单色光时的短路电

流比值，即可确定该单色光的波长。

图 8 - 52 表示了不同结深二极管的光谱响应曲线。图中 VD1 代表浅结二极管 ,VD2 代表深结二极管。

8.5.2 色敏光电传感的基本特征

1. 光谱特性

色敏光电器件的光谱特性是表示它所能检测的波长范围 ,不同型号之间略有差别。图 8 - 53(a)给出国产 CS - 1 型色敏光电器件的光谱特性 ,其波长范围是 400nm ~ 1000nm。

2. 短路电流比 - 波长特性

短路电流比 - 波长特性是表征半导体色敏度器件对波长的识别能力，是赖以确定被测波长的基本特性，图 8 - 53(b)表示上述 CS - 1 型色敏光器件的短路电流比 - 波长特性曲线。

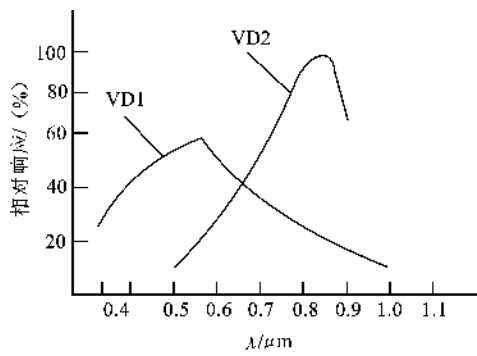


图 8 - 52 硅色敏管中 VD1 和 VD2 的光谱响应曲线

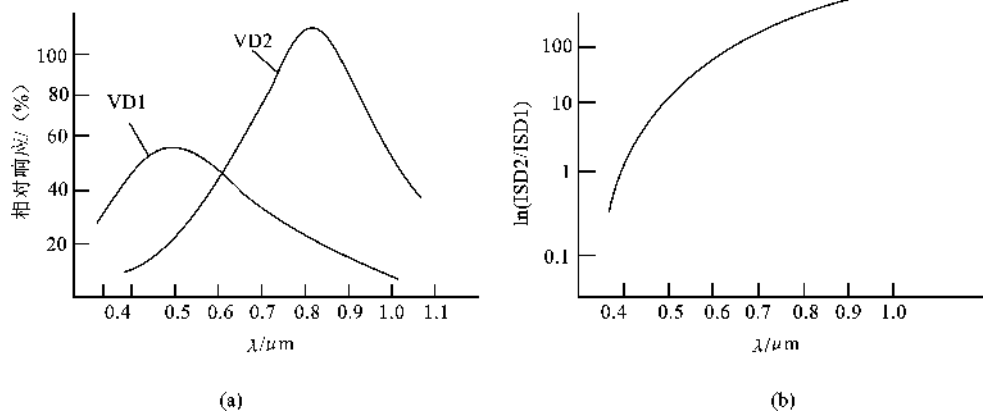


图 8 - 53 色敏光电器件特性

3. 温度特性

由于色敏光电器件测定的是两只光电二极管短路电流之比，而这两只光电二极管是做在同一块材料上的，具有相同的温度系数。这种内部补偿作用使色敏光电器件的短路电流比对温度不十分敏感，所以通常可不考虑温度的影响。

习题 8

8 - 1 什么叫光电效应？光电效应有哪几种？什么叫外光电效应、内光电效应、光电导效应、光生伏特效应？

8 - 2 提高光电倍增管放大倍数的正确方法是什么？为什么不用增加倍增级数的方法来提高光电倍增管的放大倍数？

8 - 3 光电倍增管产生暗电流的原因是什么？如何减小或消除之？

8 - 4 光敏三极管与普通三极管有何异同？

8 - 5 光纤按工作原理分类可以分为哪几类？按信息传输形式分类可以分为哪几类？

8 - 6 光纤传感器按其传感器原理分类分为哪些？光纤传感器有哪几种不同的调制形式？

8 - 7 光纤传感器具有哪些特点？

8 - 8 红外光有哪些特点？红外测温有何特点？

附录

表 8 - 1 几种光敏电阻的特性参数

型 号	材料	面积 (mm ²)	工作温 度(K)	长波限 (μm)	峰值探测率 (cmh ^{$\frac{1}{2}$} _z /W)	响应时 间(s)	暗电阻 值 MΩ	亮电阻值 kΩ(100lx)
MG41 - 21	Cds	φ9.2	233 ~ 343	0.8		$\leq 2 \times 10^{-2}$	≥ 0.1	≤ 1
MG42 - 04	CdS	φ7	248 ~ 328	0.4		$\geq 5 \times 10^{-2}$	≥ 1	≤ 10
P397	PbS	5 × 5	298	298	2×10^{10} [1300 , 100 , 1]	$1 \sim 4 \times 10^{-4}$	2	
P791	PbSe	1 × 5	298		1×10^9 [λ _m , 100 , 1]	2×10^{-6}	2	
9903	PbSe	1 × 3	263		3×10^9 [λ _m , 100 , 1]	10^{-5}	3	
OE - 10	PbSe	10 × 10	298		2.5×10^9	1.5×10^{-6}	4	
OTC - 3MT	InSb	2 × 2	253		6×10^8 [λ _m , 100 , 1]	4×10^{-6}	4	
Ge(Au)	Ge		77	8.0	1×10^{10}	5×10^{-8}		
Ge(Hg)	Ge		38	14	4×10^{10}	1×10^{-9}		
Ge(Cd)	Ge		20	23	4×10^{10}	5×10^{-8}		
Ge(Zn)	Ge		4.2	40	5×10^{10}	$< 10^{-6}$		
Ge - Si(Au)			50	10.3	8×10^9	$< 10^{-6}$		
Ge - Si(Zn)			50	13.8	10^{10}	$< 10^{-6}$		

表 8 - 2 2CU 型硅光敏二极管的基本参数

	光谱响应范围 /nm	光谱峰值波长 /nm	最高工作电压 $U_{\max}/V$	暗电流 $I_D/\mu A$	光电流 $I_L/\mu A$	灵敏度 $S/\mu A/\mu W$	响应时间/s	结电容 /pF	使用温度/ °C
测试 条件 型号			$I_D < 0.1\mu A$ $H < 0.1\mu W/cm^2$	$U = U_{\max}$	$U = U_{\max}$	$U = U_{\max}$ 入射光波长 9000nm	$U = U_{\max}$ 负载电阻 1000Ω	$U = U_{\max}$	
2CU1A	400 ~ 1100	860 ~ 900	10	<0.2	>80	≥0.5	10^{-7}	<5	- 55 ~ - 125
2CU1B			20	<0.2	>80			<5	
2CU1C			30	<0.2	>80			<5	
2CU1D			40	<0.2	>80			<5	
2CU1E			50	<0.2	>80			<5	
2CU2A			10	<0.1	≥30			<5	
2CU2B			20	<0.1	≥30			<5	
2CU2C			30	<0.1	≥30			<5	
2CU2D			40	<0.1	≥30			<5	
2CU2E			50	<0.1	≥30			<5	
2CU5A			10	<0.1	≥10			<2	
2CU5B			20	<0.1	≥10			<2	
2CU5C			30	<0.1	≥10			<2	

表 8 - 3 3DU 型硅光敏晶体管的基本参数

测试 条件	$U_{CC} = U_{max}$	$U_{CC} = U_{max}$ 入射光照 度 1000lx		$U_{CC} = U_{max}$ 频率 1kHz		$U_{CC} = 10V$ 负载电阻/ Ω			
型号	光谱响应 范围/nm	光谱峰值 波长/nm 最高工作电 压 U_{max}/V	暗电流 μA	光电流 μA	结电容 /pF	响应时 间/s	收集 极最 大电 流/mA	最大功 耗/mW	
3DU11	400 ~ 1100	860 ~ 900	10	< 0.3	≥ 0.5	< 10	10^{-5}	20	150
3DU12			30	< 0.3	≥ 0.5	< 10		20	150
3DU13			50	< 0.3	≥ 0.5	< 10		20	150
3DU21			10	< 0.3	≥ 1.0	< 10		20	150
3DU22			30	< 0.3	≥ 1.0	< 10		20	150
3DU23			50	< 0.3	≥ 1.0	< 10		20	150
3DU31			10	< 0.3	≥ 2.0	< 10		20	150
3DU32			30	< 0.3	≥ 2.0	< 10		20	150
3DU33			50	< 0.3	≥ 2.0	< 10		20	150
3DU41			10	< 0.5	≥ 4.0	< 10		20	150
3DU42			30	< 0.5	≥ 4.0	< 10		20	150
3DU43			50	< 0.5	≥ 4.0	< 10		20	150
3DU51A			15	< 0.2	≥ 0.3	< 5		10	50
3DU51B			30	< 0.2	≥ 0.3	< 5		10	50
3DU51C			30	< 0.2	≥ 0.1	< 5		10	50

表 8 - 4 硅光电池 2CR 型特性参数

	开路电压/mV	短路电流/mA	输出电流/mA	转换效率/%	面积/mm ²
2CR11	450 ~ 600	2 ~ 4		> 6	2.5 × 5
2CR21	450 ~ 600	4 ~ 8		> 6	5 × 5
2CR31	450 ~ 600	9 ~ 15	6.5 ~ 8.5	6 ~ 8	5 × 10
2CR32	550 ~ 600	9 ~ 15	8.6 ~ 11.3	8 ~ 10	5 × 10
2CR33	550 ~ 600	12 ~ 15	11.4 ~ 15	10 ~ 12	5 × 10
2CR34	550 ~ 600	12 ~ 15	15 ~ 17.5	12 以上	5 × 10
2CR41	450 ~ 600	18 ~ 30	17.6 ~ 22.5	6 ~ 8	10 × 10
2CR42	500 ~ 600	18 ~ 30	22.5 ~ 27	8 ~ 10	10 × 10
2CR43	550 ~ 600	23 ~ 30	27 ~ 30	10 ~ 12	10 × 10
2CR44	550 ~ 600	27 ~ 30	27 ~ 35	12 以上	10 × 10

续上表

	开路电压/mV	短路电流/mA	输出电流/mA	转换效率/%	面积/mm ²
2CR51	450 ~ 600	36 ~ 60	35 ~ 45	6 ~ 8	10 × 20
2CR52	500 ~ 600	36 ~ 60	45 ~ 54	8 ~ 10	10 × 20
2CR53	550 ~ 600	45 ~ 60	54 ~ 60	10 ~ 12	10 × 20
2CR54	550 ~ 600	54 ~ 60	54 ~ 60	12 以上	10 × 20
2CR61	450 ~ 600	40 ~ 65	30 ~ 40	6 ~ 8	φ17
2CR62	500 ~ 600	40 ~ 65	40 ~ 51	8 ~ 10	φ17
2CR63	550 ~ 600	51 ~ 65	51 ~ 61	10 ~ 12	φ17
2CR64	550 ~ 600	61 ~ 65	61 ~ 65	12 以上	φ17
2CR71	450 ~ 600	72 ~ 120	54 ~ 120	>6	20 × 20
2CR81	450 ~ 600	88 ~ 140	66 ~ 85	6 ~ 8	φ25
2CR82	500 ~ 600	88 ~ 140	86 ~ 110	8 ~ 10	φ25
2CR83	550 ~ 600	110 ~ 140	110 ~ 132	10 ~ 12	φ25
2CR84	550 ~ 600	132 ~ 140	132 ~ 140	12 以上	φ25
2CR91	450 ~ 600	18 ~ 30	13.5 ~ 30	>6	5 × 20
2CR101	450 ~ 600	173 ~ 288	130 ~ 288	>6	φ25

第9章 气敏、湿敏传感器

本章要点

- 气敏传感器的定义、特点、分类及应用；
- 湿敏传感器的种类、结构工作原理及应用。

9.1 气敏传感器

气敏传感器是指能将被测气体的类别、浓度和成分转换为与其成一定关系的电量输出的装置或器件。气敏传感器必须满足下列条件：

- (1)能够检测爆炸气体、有害气体的允许浓度和其他基准设定浓度，并能及时给出显示、报警和控制信号；
- (2)对被测气体以外的共存气体或物质不敏感；
- (3)性能长期稳定性好；
- (4)响应快、重复性好；
- (5)使用维护方便、价格便宜。

由于气体种类繁多，性质各不相同，不可能用一种传感器检测所有类别的气体，因此，能实现气—电转换的传感器种类很多。按照构成气敏传感器的材料可分为半导体和非半导体两类。目前实际使用最多的是半导体气敏传感器。气敏传感器从结构上区分可分为两大类：干式与湿式气敏传感器。凡构成气敏传感器的材料为固体者均称为干式气敏传感器；凡利用水溶液或电解液感知待测气体的称为湿式气敏传感器。

气敏传感器主要用于工业上天然气、煤气、石油化工等部门的易燃、易爆、有毒、有害气体的监测、预报和自动控制；在防治公害方面监测环境污染气体；在民用方面用于煤气、火灾报警、控制等。

9.1.1 半导体气敏传感器

1. 半导体气敏传感器及其分类

半导体气敏传感器是利用半导体气敏元件同气体接触，造成半导体性质发生变化，以此检测特定气体的成分及其浓度。半导体气体传感器与其他气体传感器相比，具有快速、简便、灵敏等优点，因而有着广阔的发展前景。

半导体气敏传感器按照半导体与气体的相互作用是在其表面，还是在内部，可分为表面控制型和体控制型；按照半导体变化的物理性质，可分为电阻型和非电阻型两种。半导体气敏元件的详细分类参见表9-1。电阻型半导体气敏元件是利用半导体接触气体时，其阻值的改变来检测气体的成分或浓度，而非电阻型半导体气敏传感元件根据其其对气体的吸附和反应，使其某些有关特性变化对气体进行直接或间接检测。

电阻式半导体气敏传感器用 SnO_2 、 ZnO 等金属氧化物材料制作敏感元件，利用其阻值的变化来检测气体浓度，常称半导体气敏电阻。气敏元件有多孔质燃结体、厚膜以及目前正在研制的薄膜等几种电阻式导体传感器具。根据气体的吸附和反应，利用半导体的功函数，对气体进行直接或间接的检测。正在开发的金属/半导体结型二极管和金属栅 MOS 场效应晶体管敏感元件，主要利用它们与气体接触后的整流特性以及晶体管作用的变化，制作对表面单位直接测定的传感器。

2. 主要特性及其改善

(1) 气体选择性及其改善

半导体气敏传感器的气敏材料对气体的选择性表明材料主要对哪种气体敏感。金属氧化物半导体对各种气体敏感的灵敏度几乎相同。因此，要制造出气体选择性好的元件很不容易，其选择性能不好或使用时逐渐变坏，都会给气体的检测和控制带来很大的影响。

表 9 - 1 半导体气敏元件分类

	主要物理特性	类型	气敏元件	检测气体
电阻值	电阻	表面控制型	SnO_2 , ZnO 等的烧结体、薄膜、厚膜	可燃性气体
		体控制型	$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CO}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$,氧化铁(烧结体)、氧化锡 SnO_2	酒精 可燃性气体、氧气
非电阻值	二极管整流特性	表面控制型	铂 - 硫化镉、铂 - 氧化钛(金属 - 半导体结型二极管)	氢气 一氧化碳、酒精
	晶体管特性		铂栅、钽栅 MOS 场效应管	氢气、硫化氢

改善气敏元件的气体选择性常用的方法：

- ①向气敏材料掺杂其他金属氧化物或其他添加物；
- ②控制气敏元件的烧结温度；
- ③改善元件工作时的加热温度。

应该注意，以上三种方法只有在实验的基础上进行不同的组合，才能获得较为理想的气敏选择。

(2) 气体浓度特性

传感器的气体浓度特性表示被测气体浓度与传感器输出之间的确定关系。

(3) 初始稳定、气敏响应和复原特性

无论哪种类型(薄膜、厚膜、集成片或陶瓷)的气敏元件，其内部有加热丝，一方面用来烧灼元件表面油垢或污物，另一方面可起加速被测气体的吸、脱作用。加热温度一般为 200 ~ 400 ，图 9 - 1 是气敏传感器外形及其加热电路与工作电路基本原理图。

气敏传感器按设计规定的电压值使加热丝通电加热之后，敏感元件的电阻值首先是急剧地下降，一般 2 ~ 10min 过渡过程时达到稳定的电阻值输出状态，称这一状态为“ 初始稳定状态 ”。达到初始稳定状态的时间及输出电阻阻值除与元件材料有关外，还与元件所处大气环境条件有关。达到初始稳定状态以后的敏感元件才能用于气体检测。

当加热的气敏元件表现接触并吸附被测气体时，首先是被吸附的分子在表面自由扩散 (称为物理吸附) 而失去动能。这期间，一部分分子被蒸发掉，剩下的一部分则因热分解而固

定在吸附位置上(称为化学吸附)。若元件材料的功函数比吸附气体分子的电压亲和力小时,则被吸附气体分子就会从元件表面夺取电子而以阴离子形式吸附。具有阴离子吸附性质的气体称为氧化性气体,例如 O_2 、 NO_x 等。若气敏元件材料的功函数大于被吸附气体的离子化能量,被吸附气体将把电子给予元件而以阳离子形式吸附。具有阳离子吸附性质的气体称为还原性气体,如 H_2 、 CO 、 HC 和乙醇等。

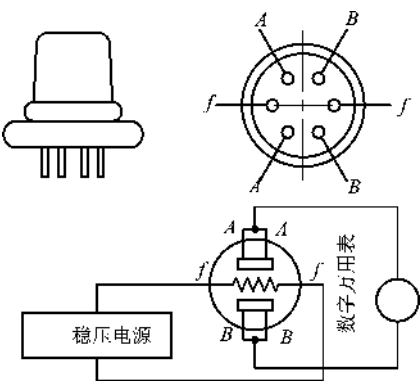


图 9 - 1 气敏传感器外形及其基本原理图

氧化性气体吸附于 N 型半导体或还原性气体吸附于 P 型半导体敏感材料,都会使载流子数目减少而表现出元件电阻值增加的特性;相反,还原性气体吸附于 N 型、氧化性气体吸附于 P 型半导体气敏材料,都会使载流子数目增加而表现出元件电阻减少的特性。见图 9 - 2 所示。

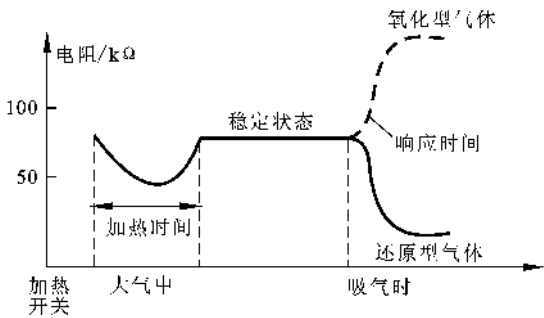


图 9 - 2 N 型半导体吸附气体时器件阻值变化

达到初始稳定状态的气敏元件,迅速置入被测气体之后,其电阻值变化的速度称为气敏响应速度特性。各种元件响应特性不同,一般情况下,元件通电 20s 之后才能出现阻值变化后稳定状态。

测试完毕,把传感器置于大气环境中,其阻值复原到保存状态的数值速度称为元件的复原特性,它与敏感元件的材料及结构有关,也与大气环境条件有关。一般约 1min 左右便可复原到不用时保存电阻的 90%。

(4)灵敏度的提高与稳定改善

气敏传感器的气敏元件对被测气体敏感程度的特性称为气敏传感器的灵敏度。

目前,一般用金属或金属氧化物材料的催化作用来提高传感器的灵敏度。最有代表性的催化剂有 Pd、Pt 等白金系催化物。此外,Cr 能促进乙醇分解;Mo、W 等能促进 H_2 、 CO 、 N_2 、 O_2 的吸附与反应速度;MgO、PbO、CdO 等掺杂物也能加速被测气体的吸附或解吸的反应速度。

SnO_2 、 ZnO 是典型的气敏半导体材料,它们兼有吸附和催化剂的双重功能。例如丙烷气体在 SnO_2 表面燃烧过程大致可以认为如图 9 - 3 所示的两条途径之一进行:①→②→③或者

④→⑤→⑥，因此，N 型半导体气敏材料 SnO_2 的电阻值减小。

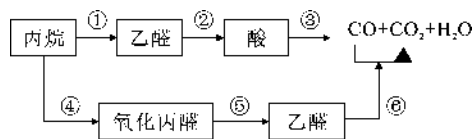


图 9-3 丙烷的燃烧过程

Sb_2O_3 对于原子控制的 SnO_2 具有减小电阻与催化的双重作用，若将其掺于 SnO_2 母材，则燃烧过程按①→④→⑤的途径进行，最后生成乙醛。⑥的反应只能进行 50%，其中气体 CO 的生成量减少。于是灵敏度比充分燃烧(①→③)时大大降低。向 SnO_2 掺加金属 Pb 可以促进①→③的反应过程而使元件的灵敏度提高。由此可以看出增加气敏元件灵敏度的方法很多，而绝非是单一性的，研制新型元件时应充分注意到这一点。

此外，元件的烧制过程对于其长期稳定性有较大影响。向母材掺添加物不但可以改变元件的灵敏度，还可以控制和改变烧结过程。添加物大体可分为两类：一类是促进烧结过程的“融剂”，另一类是阻止烧结过程的“缓融剂”。 SnO_2 的融剂有 MnO 、 CuO 、 ZnO 、 Bi_2O_3 等。与此相反，“缓融剂”可使烧结有充分的时间与过程，从而使元件有较好的长期稳定特性， CdO 、 PbO 、 CaO 等可以作为 SnO_2 的缓融剂。

(5) 温度、湿度影响及其他问题

气敏元件一般裸露于大气中，因此设计与使用时必须注意环境因素对气敏元件特性的影响。图 9-4 所示为 SnO_2 气敏元件的温湿度特性。另外，气敏元件加热丝的电压值决定了敏感元件的工作温度，因此，它是影响气敏元件各种特性的一个不可忽视的重要因素。

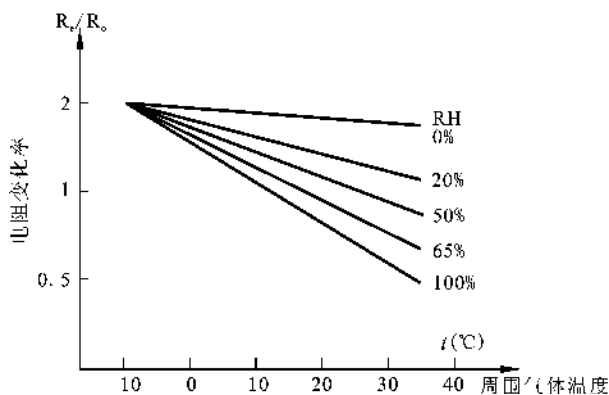


图 9-4 SnO_2 气敏元件的温湿度特性

3. 电阻式半导体气敏传感器(气敏电阻)

(1) 表面控制型气敏电阻

它是利用半导体表面因吸附气体引起半导体元件电阻值变化的特性制成的。多数以可燃性气体为检测对象，但如果吸附能力很强，即使非可燃性气体也能作为检测对象。这种类型

的传感器具有气体检测灵敏度高、响应速度比一般传感器快、实用等优点,开发、研究和应用最早。传感器的材料多数采用 SnO_2 和 ZnO 等较难还原的氧化物,也有研究采用有机半导体材料的。这类传感器一般均掺有少量的贵金属(如 Pt 等)作为激活剂。

①结构和电阻特性

图 9-5 列举了四种类型的气敏元件。多孔质烧结体敏感元件图 9-5(a)是在传感器的氧化物材料中添加激活剂以及黏结剂(Al_2O_3 , SiO_2)混合成型后烧结而成的。因组分和烧结条件不同,所以传感器的性能各异。一般来说,空隙率越大的敏感元件,其响应速度快。薄膜敏感元件图 9-5(b)是采用淀积、溅射等工艺方法,在绝缘的衬底上涂一层半导体薄膜(厚度在几微米以下)而构成的。根据成膜的工艺条件,膜的物理、化学状态有所变化,对传感器的性能也有所影响。厚膜敏感元件图 9-5(c),一般是将传感器的氧化物材料粉末调制好之后,加入适量的添加剂、黏结剂以及载体配成浆料,然后再将这种浆料印刷在基片(厚度在几微米至几十微米)上,再经 400~800 温度烧结 1 小时而制成的。图 9-5(d)为多层结构气敏元件。不论哪种敏感元件,均需采用电加热器。根据不同的加热方式,半导体气敏元件又分为直热式(国产 QN 型和日本费加罗 TGS[#]109 型气敏传感器等)和旁热式(国产 QM-N5 型和日本费加罗 TGS[#]812、813 型气敏传感器)两种。

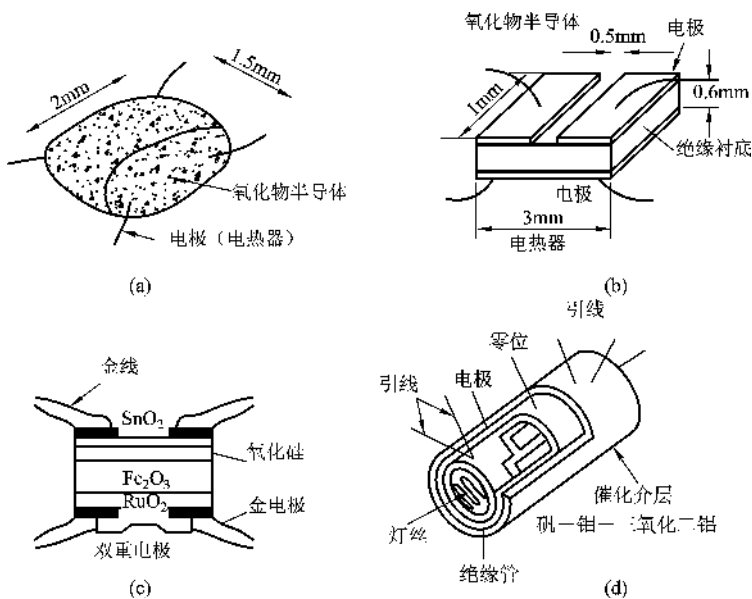


图 9-5 各种半导体气敏元件结构示意图

阻值的测定,采用敏感元件与基准电阻器串联,加外加电压,再根据基准电阻器上的电压值来求出气敏元件的电阻值。气体报警器就是利用测量的阻值变化作为蜂鸣器的报警信号。

敏感元件的阻值 R 与空气被测气体的浓度 C 成对数关系变化,如图 9-6 所示。

$$\lg R = m \lg C + n \quad (9-1)$$

式中, m 、 n 均为常数。 n 与气体检测灵敏度有关,除了随传感器材料和气体种类不同而变化

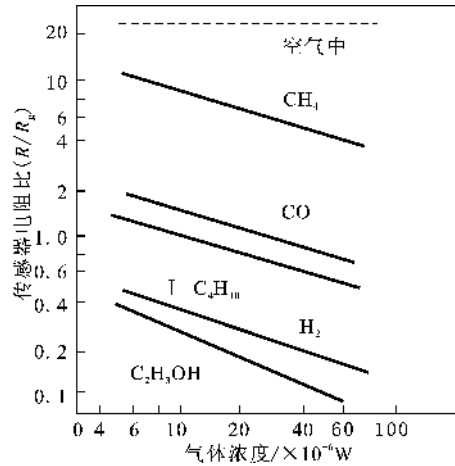


图 9 - 6 SnO_2 气敏元件的阻值与被测气体浓度的关系

外，还会由于测量温度和激活剂的不同而发生大幅度的变化。m 表示随气体浓度而变化的传感器的灵敏度(也称为气体分离率)，对于可燃性气体， $m=1/3 \sim 1/2$ 。

②传感器类型

a. 氧化锡类气敏传感器

SnO_2 是典型的 N 型半导体，是气敏传感器的最佳材料。其检测对象为 CH_4 、 C_3H_8 、 CO 、 H_2 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 H_2S 等可燃性气体和呼出气体中的酒精、 NO_x 等。气体检测灵敏度如图 9 - 7 所示。随气体的种类、工作温度、激活剂等不同而差异很大，添加铂的敏感元件的最佳工作温度也随气体种类的不同而不一样，对 CO 为 200 以下，对 C_3H_8 (丙烷)约为 300，对 CH_4 (甲烷)为 400 以上。

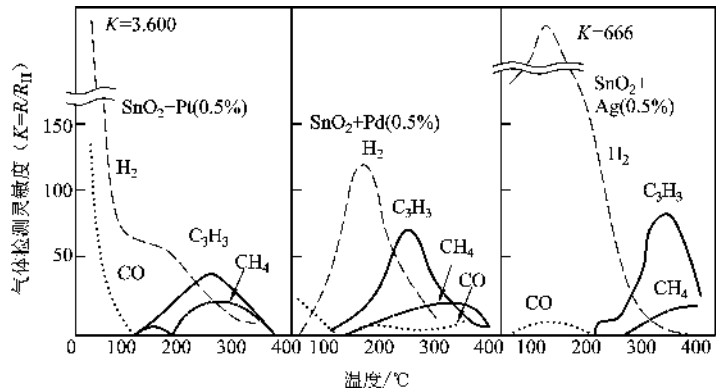


图 9 - 7 SnO_2 气敏元件的气体检测灵敏度与温度的关系

SnO_2 类气敏传感器中，研究得较多的是烧结体、薄膜、厚膜等型式的敏感元件。将氧化锡和金属锡经过处理后获得的氧化锡粉末做原料，经烧结后制成烧结体敏感元件(将铂电极和加热丝埋入 SnO_2 材料中，烧结温度 700 ~ 900)。 SnO_2 以直径 0.01 ~ 0.05 μm 的晶粒组成

约 1μm 以下沙粒状的形式存在于其中。晶粒的大小对气体检测灵敏度则无甚影响。

表 9 - 2 列出了各种添加剂的添加效果。加添加剂后，气体检测灵敏度的最高值 R_M 和气体检测灵敏度达到最高值时的温度 T_M 均发生很大变化，所以对添加效果必须从两个方面统筹兼顾。

表 9 - 2 添加贵金属的 SnO₂ 敏感元件气体检测灵敏度最高值及其温度

贵金属名称	0.02% 一氧化碳	0.8% 氢	0.2% 丙烷	0.5% 甲烷
氧化锡	4(350)	37(200)	49(350)	20(450)
铂	136(室温)	3600(室温)	38(275)	19(300)
铅	12(室温)	119(150)	75(250)	20(325)
银	8(100)	666(100)	89(350)	24(400)
铜	7(200)	98(300)	48(325)	20(350)
镍	7(2000C)	169(250)	67(300)	9(350)

b. 氧化锌及其他类气敏传感器

ZnO 类气体传感器与 SnO₂ 类相比，最佳工作温度范围要高出 100 。

金属氧化物中，还有不少可用作气敏传感器的材料，如氧化钨、氧化钒、氧化镉、氧化钛、氧化铬等。用这些金属氧化物制成气敏传感器的工作正在研究之中。

此外，也有不少人用有机半导体做传感器的材料产生浓厚的兴趣，但研究成功的例子甚少。

③工作原理

对表面控制型传感器来说，半导体表面气体的吸附和反应同敏感元件的阻值有着密切的关系。一般来说，如果半导体表面吸附有气体，则半导体和吸附的气体之间会有电子施受发生，造成电子迁移，从而形成表面电荷层。例如，吸附了像氧气这类电子复合量大的气体后，半导体表面就会失去电子，被吸附的氧气所俘获(负电荷吸附)。

$$\frac{1}{2}O_2(g) + ne \rightarrow O_{(ad)}^{n-}$$

(9 - 2)

式中， $O_{(ad)}^{n-}$ 表示吸附的氧气，其结果是 SnO₂、ZnO 类的 N 型半导体的阻值减小。正电荷吸附的气体与之相反。这只是一般的规律。在具体应用于半导体气敏传感器时，有需要注意两点：一是吸附在半导体表面与半导体材料进行电子施受的气体是何种气体；二是多晶半导体敏感元件的显微结构与电阻和传感器特性之间存在什么关系。

当半导体气敏传感器置于空气中时，其表面吸附的氧气是 O_2^- 、 O^- 、 O^{2-} 之类的负电荷，当与被测气体进行反应时，其结果如下：



如式(9 - 3)和式(9 - 4)所示，被氧气俘获的电子释放出来，半导体的电阻就减小。如果将式(9 - 2)和式(9 - 3)或者式(9 - 2)和式(9 - 4)组合，不外乎是将传感器的表面作为一种催化剂，使 H₂ 和 CO 触媒燃烧。支配传感器阻值增减变化的是氧化吸附，可理解为可燃性气体能起到改变其浓度的作用。这种半导体表面触媒燃烧存在气体检测灵敏度与气体的易燃性

成正比的倾向。此外,如果改变传感器的工作温度,会产生如图9-8所示的两者峰值非常一致。

多孔质烧结体敏感元件与厚膜敏感元件都是多晶体结构,是如图9-8(a)所示的晶粒集合体。各晶粒之间如图9-8(b)所示的那样,与其他的晶粒相互接触乃至成颈状结合。重要的是,这样的结合部位在敏感元件中是阻值最大之处,是它支配着整个敏感元件的阻值高低。由此可见,结合部位的形状对传感器的性能影响很大。因气体吸附而引起的电子浓度的变化是在表面空间电荷层内发生的,所以在颈状结合的情况下,颈部的宽度与空间电荷层的深度一致时,敏感元件的阻值变化最大。在晶粒接触的情况下,接触部分形成一个对电子迁移起阻碍作用的势垒层。这种势垒层的高度随氧的吸附和与被测气体的接触而变化,可认为会引起阻值的变化。在没有激活剂的场合,如图9-8(c)所示,吸附的氧气与被测气体之间必须直接反应。激活剂图9-8(d)所示通过吸附被测气体,或者通过激活,来促进表面反应。在晶粒的结合部分存有适量的激活剂。这对于传感器来说是很重要的。

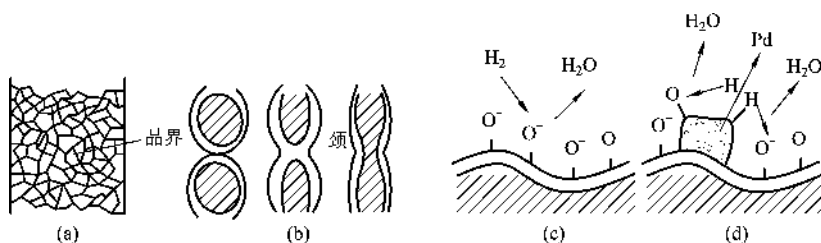


图9-8 多孔质烧结体敏感元件的气敏机理

(2)体控制型气敏电阻

在采用反应性强、容易还原氧化物作为材料的传感器中,即使是在温度较低条件下,也可因可燃性气体而改变其体内的结构组成(晶格缺陷),并使敏感元件的阻值发生变化。即使是难还原的氧化物,在反应性强的温度范围内,其体内的晶格缺陷也会受影响。像这类体感应气体的传感器,关键问题是不仅要保持敏感元件的稳定性,而且要能在气体感应时保持氧化物半导体材料本身的晶体结构。

①氧化二铁类气敏传感器

这是以 γ - Fe_2O_3 和 α - Fe_2O_3 为主体的多孔质烧结体传感器。将它作为检测甲烷(CH_4)和丙烷(C_3H_8)等用的气体传感器,显示出良好的性质。

以 α - Fe_2O_3 为主要材料的城市用煤气传感器通过晶粒的微细化和提高孔隙率,提高了传感器的气体检测灵敏度。此外,在调制敏感元件时注入 SO_4^{2-} 离子,也能提高传感器的气体检测灵敏度。但其机理目前尚不明确。

②钙钛矿类传感器

一般来说,钙钛矿类氧化物的热稳定性很好,用它作为下面要介绍的燃烧控制用传感器的敏感材料,也是很吸引人的。图9-9是用在三氧化二铝陶瓷基片上成形的镍酸镧薄膜敏感元件测定空气燃烧比的应用实例,钙钛矿类氧化物,在还原性气氛中一般不太稳定,有待在此方面作出进一步的改进后,方能应用于燃烧控制。

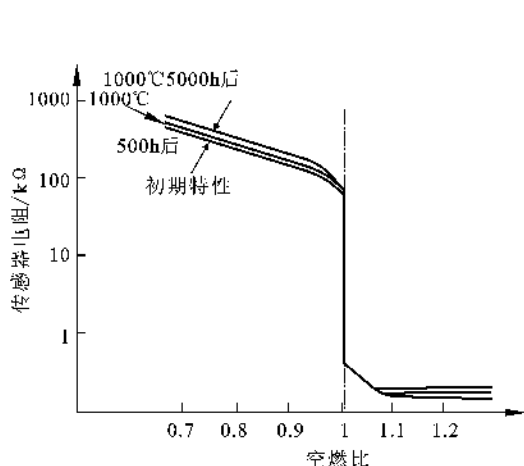
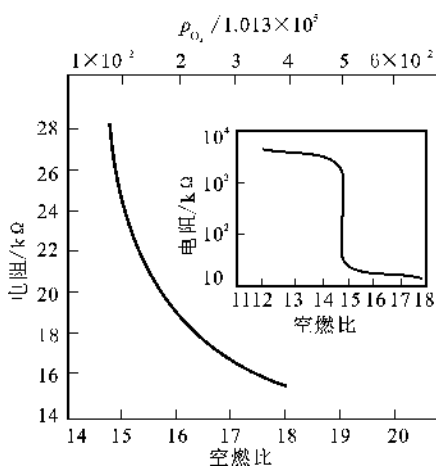


图9-9 燃烧控制用的镍酸镧传感器的特性

图9-10 $\text{CO}_{0.3}\text{Mg}_{0.7}\text{O}$ 敏感元件的敏感特性

③燃烧控制用的气敏传感器

半导体敏感元件的电阻值会因温度变化而产生很大的变化,这是无法避免的。因此有必要使其保持在一定的温度范围内或者对其进行温度补偿。氧化钛气敏传感器是N型半导体,其在空气燃料比大于1的区域内,呈高阻特性,从而使空气燃料比的检测变得困难。对于这一缺点,只要采用P型半导体就不难克服。以P型氧化钴半导体为主要材料,并掺加氧化镁作稳定剂,制成 $\text{CO}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ ($x > 0.5$)的敏感元件,其特性非常好,如图9-10所示。而且在贫气区域的控制性能也很好。这是因为添加了氧化镁,使得氧化钴的抗还原稳定性得到了增强的缘故。

半导体气敏传感器,在燃烧控制的应用领域,如果采用高温方式工作的话,就能在燃烧排气达到平衡状态后测定氧分压,这对于控制空气燃料比的应用是相当适宜的。但是,在防止不完全燃烧和误点火的应用中,最好用检测不完全燃烧气体的方法。

4. 非电阻式半导体气敏传感器

(1) 二极管气敏传感器

如果二极管的金属与半导体的界面吸附有气体,而这种气体又对半导体的禁带宽度或金属的功函数有影响的话,则其整流特性就会变化。在掺钨的硫化镉上,薄薄地蒸发一层钼膜的钼-硫化镉二极管气体传感器,可用来检测 H_2 。钼-氧化钛、钼-氧化锌、钼-氧化钛之类的二极管气体敏感元件亦可应用于 H_2 检测。 H_2 对钼-氧化钛二极管整流特性的影响如图9-11所示。在 H_2 浓度急剧增高的同时,正向偏置条件下的电流也急剧增大。所以,在一定的偏压下,通过测电流值就能知道 H_2 的浓度。电流值之所以增大,是因为吸附在钼表面的氧化由 H_2 浓度的增高而解吸,从而使肖特基势垒层降低的缘故。

(2) MOS 二极管传感器

MOS 二极管敏感元件的结构如图9-12所示。利用其电容-电压(C-U)特性可检测气体,这种敏感元件以钼、铂等金属来制薄膜(厚 $0.05 \sim 0.2 \mu\text{m}$,二氧化硅的厚度为 $0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$)。C-U特性的测试结果如图9-13所示。与在空气中相比,在氢气中的C-U特性明显的有变化,这是因为在无偏置的情况下钼的功函数在氢气中低的原因。半导体平带的偏置电

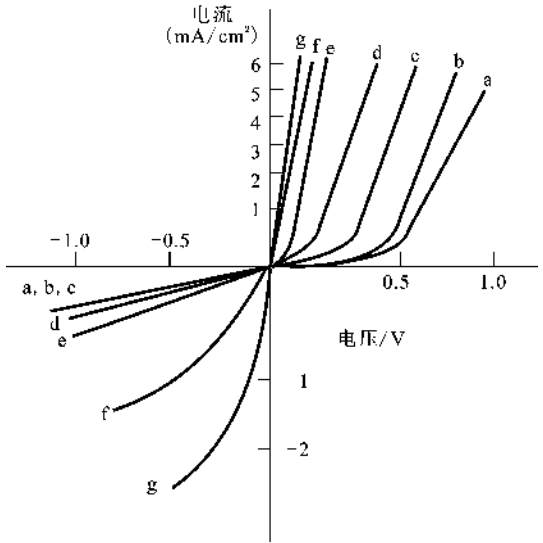


图 9 - 11 铅 - 二氧化钛二极管敏感元件的伏安特性曲线

压 U_F 如图 9 - 14 所示。因为它随氢气浓度的变化而变，所以可以利用这一特性使之成为敏感元件。

利用如图 9 - 15 所示的敏感元件的光电特性可检测氢气。用两只二极管，一只为钯 MOS 二极管，另一只是在钯上面再蒸镀一层金德金 - 钯 - MOS 基准二极管，其原理与上面所述的相同。

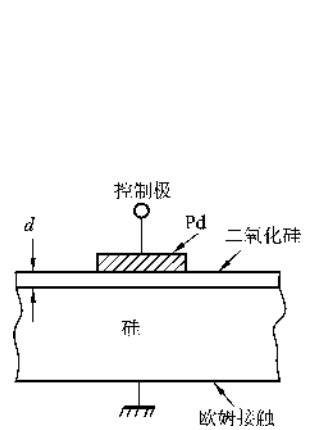


图 9 - 12 钯 - MOS 二极管敏感元件

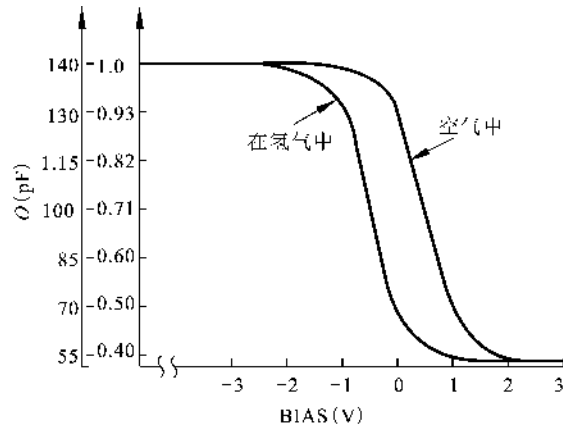


图 9 - 13 钯 - MOS 二极管敏感元件的 C - U 特性

(3) MOS 场效应晶体管传感器

MOS 场效应晶体管传感器如图 9 - 16 所示。它是一种二氧化硅层做得比普通的 MOS 场效应晶体管薄 $0.01\mu\text{m}$ ，而且金属栅采用钯薄膜 $0.01\mu\text{m}$ 的钯 - MOS 场效应晶体管。其漏极电流 I_D 由栅压控制。将栅极与漏极短路，在源极与漏极之间加电压， I_D 可由下式表示：

$$I_D = \beta(U_G - U_T)^2 (\beta \text{ 是常数})$$

式中， U_T 是 I_D 流过的最小临界电压值。

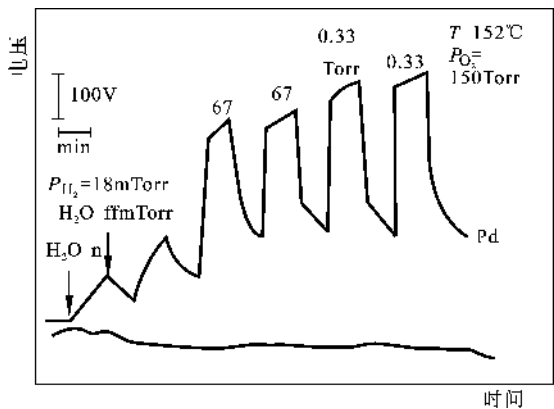


图 9 - 14 钯 - MOS 二极管敏感元件的平带电压与氢气浓度的关系

在钯 - MOS 场效应管中， U_T 会随空气中所含氢气浓度的增高而降低。所以可以利用这一特性来检测氢气。钯 - MOS 场效应管传感器，不仅可以检测氢气，而且还能检测氨气等容易分解出氢气的气体。为了获得快速的气体响应特性，有必要使其工作在 120 至 150 左右的温度范围内，不过，使用硅半导体的传感器，还存在着长期稳定性较差的问题，有待今后解决。

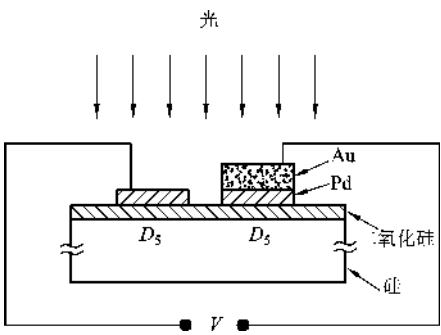


图 9 - 15 应用光电势的钯 - MOS 二极管敏感元件

9.1.2 红外吸收式气敏传感器

利用不同种类或不同浓度的气体对红外线吸收不同的特性可以制成红外吸收式气敏传感器。图 9 - 17 是电容麦克型红外吸收式气敏传感器结构图。它包括两个构造形式完全相同的光学系统：其中一个红外光入射到比较槽，槽内密封着某种气体；另一个红外光入射到测量槽，槽内通入被测气体。两个光学系统的光源同时（或交替）以固定周期开闭。当测量槽的红外光照射到某种被测气体时，根据气体种类的不同，将对不同波长的红外光具有不同的吸收特性，同时，同种气体而不同浓度时，对红外光的吸收量也不相同。因此，通过测量槽红外光强的变化就可知道被测气体的种类和浓度。因为采用两个光学系统，所以检出槽内的光量

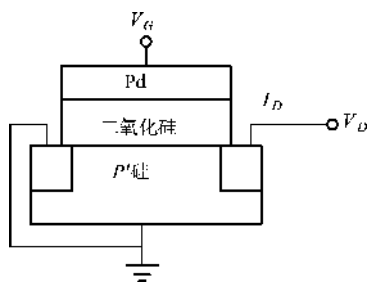


图 9 - 16 钯 - MOS 场效应管敏感元件

差值将随被测气体种类不同而不同。同时，这个差值对于同种被测气体而言，也会随气体的浓度增高而增加，由于两个光学系统以一定周期开闭，因此光量差值以振幅方式输入到检测器。

检测器也是密封有一定气体的容器。两种光量差值振幅的周期性变化，被检测器内气体吸收后，可以变为温度的周期性变化，而温度的周期性变化最终体现为竖隔薄膜两侧的压力变化，而以电容量的改量输出至放大器。

图 9 - 18 是量子型红外光敏元件气敏传感器。它以红外光敏元件取代图 9 - 17 中的检测器，可以直接把光量变为电信号，同时光学系统与气体槽也都合二为一，而大大简化了传感器的构造。这种结构的另一个特点是可以通过改变红外滤光片而提高量子型红外光敏元件的灵敏度和适合其红外光谱响应特性。也可以通过改换滤光片来增加被测气体的种类和扩大测量气体的浓度范围。

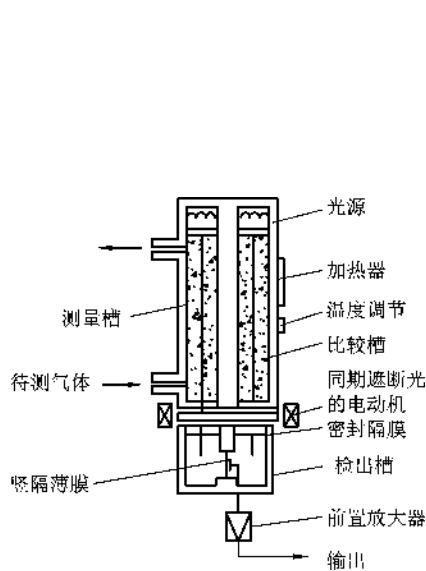


图 9 - 17 电容麦克型红外吸收式气敏传感器结构

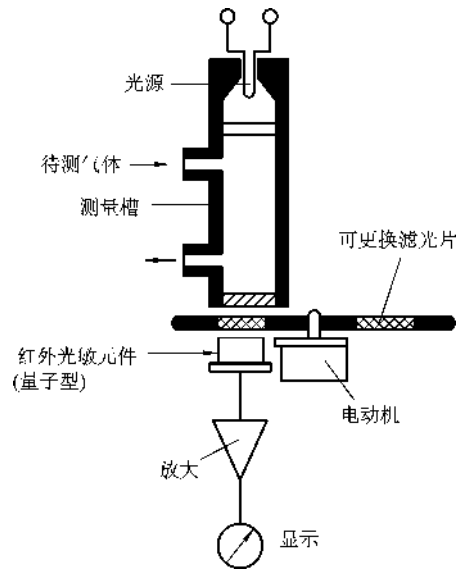


图 9 - 18 量子型红外光敏元件气敏传感器结构

9.1.3 接触燃烧式气敏传感器

一般将在空气中达到一定浓度、触及火种可引起燃烧的气体称为可燃性气体。表 9 - 3 列出了主要可燃性气体及其爆炸浓度范围。引起爆炸浓度范围的最小值称为爆炸下限 ,最大值称为爆炸上限。

表 9 - 3 典型可燃性气体的主要特性

气体名称		化学式	空气中的爆炸 界限 / Vol%	容许浓度 / $\times 10^{-6}$	密度 ($\rho_{\text{空}} = 1$)
碳化氢及其派生物	甲烷	CH ₄	5.0 ~ 15.0		0.6
	丙烷	C ₃ H ₈	2.1 ~ 9.5	1000	1.6
	丁烷	C ₄ H ₁₀	1.8 ~ 8.4		2.0
	汽油气		1.3 ~ 7.6	500	3.4
	乙炔	C ₂ H ₂	2.5 ~ 81.0		0.9
	甲醇	CH ₃ OH	5.5 ~ 37.0	200	1.1
醇	乙醇	C ₂ H ₅ OH	3.3 ~ 19.0	1000	1.6
醚	乙醚	C ₂ H ₅ O	1.7 ~ 48.0		2.6
无机气体	一氧化碳	CO	12.5 ~ 74.0	50	1.0
	氢	H ₂	4.0 ~ 75.0		0.07

* Vol% 表示体积百分比。

接触燃烧式气敏传感器结构与测量电路原理如图 9 - 19 所示。将铂金等金属线圈埋设在氧化催化剂中便构成接触燃烧式气敏传感器见图 9 - 19(a) ,一般在金属线圈中通以电流,使之保持在 300 ~ 600 的高温状态,当可燃性气体一旦与传感器表面接触,燃烧热进一步使金属丝温度升高,从而电阻值增大。其电阻值增量为:

$$\Delta R = \rho \Delta T = \rho H / h = \rho \alpha \theta / h \tag{9 - 5}$$

式中 ΔR ——电阻值增量 ;
 ρ ——铂金丝电阻温度系数 ;
 H ——可燃性气体燃烧热量 ;
 θ ——可燃性气体的分子燃烧热量 ;
 h ——传感器的热容量 ;
 α ——传感器催化能决定的常数 ;
 ρ 、 h 、 α ——为取决于传感器自身的参数 ;
 θ ——由可燃性气体种类决定。

接触燃烧式气敏传感器测量电路如图 9 - 19(b)所示, F_1 是气敏元件, F_2 是温度补偿元件, F_1 、 F_2 均为铂金电阻丝。 F_1 、 F_2 与 R_3 、 R_4 组成惠斯登电桥,当不存在可燃性气体时,电桥处于平衡状态 ;当存在可燃性气体时, F_1 的电阻值增量 ΔR ,使电桥失去平衡,输出与可燃性

气体的种类或浓度成比例的电信号。图 9 - 19(c)是这种气敏传感器的几种典型特性曲线。

接触燃烧式气敏传感器的优点是对气体的选择性好、线性好,受温度、湿度影响小,响应快。其缺点是对低浓度可燃性气体灵敏度低,敏感元件受催化剂侵害后其特性锐减,金属丝易断。

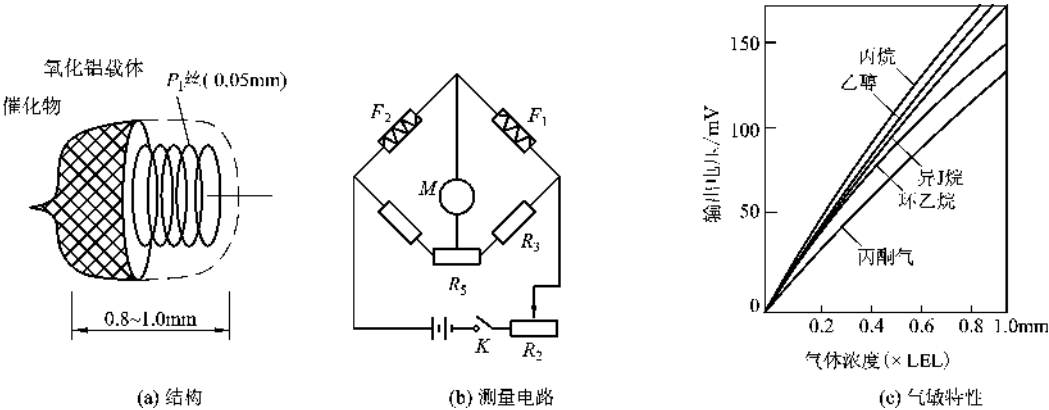


图 9 - 19 接触燃烧式气敏传感器 F_1 —敏感元件 F_2 —补偿元件

9.1.4 湿式气敏传感器

由湿式气敏元件构成的固定电位电解气敏传感,是湿式方法测量气体参数的典型方法。由于此方法用电极与电解液,因此是一种电化学方法。

固定电位电解气敏传感器的原理是当被测气体通过隔膜扩散到电解液中后,不同气体在不同固定电压作用下发生电解,通过测量电流的大小,就可测得被测气体参数。

固定电位电解气敏传感器的工作方式有两种:图 9 - 20(a)为极谱方式,其固定电压由外部供给;图 9 - 20(b)为原电池方式,其固定电解电压由原电池供给。原电池方式采用的比较电极多用 Pd、Cd、Zn 或其氧化物、氯化物为原料。根据不同气体选择不同电位的灵活性来看,原电池方式不太方便。

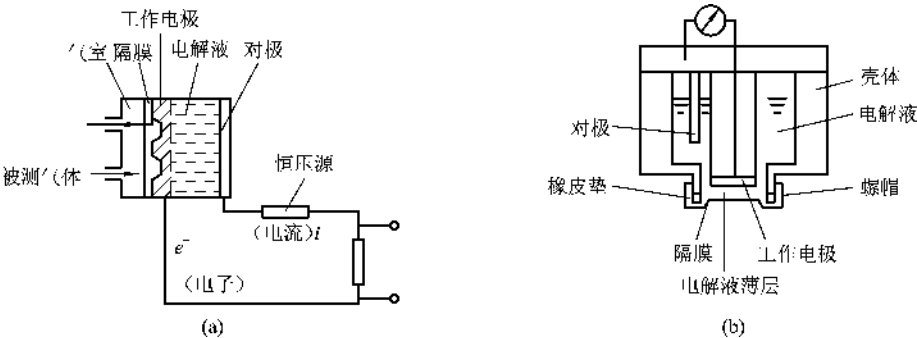


图 9 - 20 固定电位电解气敏传感器构造

固定电位电解气敏传感器使用和维护比较简单,低浓度时气体选择性好,而且体积小,

重量轻。

9.1.5 气敏传感器的应用

各类易燃、易爆、有毒、有害气体的检测和报警都可以用相应的气敏传感器及其相关电路来实现,如气体成分检测仪、气体报警器、空气净化器等等已用于工厂、矿山、家庭、娱乐场所等。下面给出几个典型实例。

1. 简易家用气体报警

图9-21是一种最简单的家用气体报警器电路,采用直热式气敏传感器 TGS109,当室内可燃性气体浓度增加时,气敏器件接触到可燃性气体而电阻值降低,这样流经测试回路的电流增加,可直接驱动峰鸣器 BZ 报警。对于丙烷、丁烷、甲烷等气体,报警浓度一般选定在其爆炸下限的 1/10,通过调整电阻来调节。

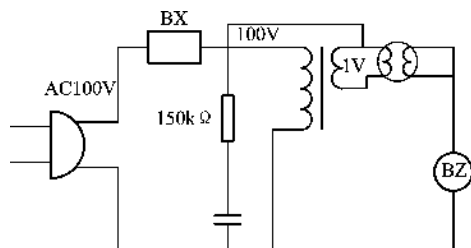


图 9-21 最简单的家用气体报警器电路

2. 有害气体鉴别、报警与控制电路

图9-22给出的是一种有害气体鉴别、报警与控制电路图,一方面可鉴别实验中有无有害气体产生,鉴别液体是否有挥发性;另一方面可自动控制排风扇排气,使室内空气清新。MQS2B是旁热式烟雾、有害气体传感器,无有害气体时阻值较高(10kΩ左右),有有害气体或烟雾进入时阻值急剧下降,A、B两端电压下降,使得B的电压升高,经电阻R₁和R_p分压、R₂限流加到开关集成电路TWH8778的选通端⑤脚,当⑤脚电压达到预定值时(调节可调电阻R_p可改变⑤脚的电压预定值),①、②两脚导通。+12V电压加到继电器上使其通电,触点J1-1吸合,合上排风扇电源开关自动排风。同时②脚+12V电压经R₄限流和稳压二极管DW₁稳压后供给微音器HTD电压而发出滴滴声,而且发光二极管发出红光,实现声光报警的功能。

3. 可燃性气体浓度检测电路

图9-23给出的是一种检测电路原理图,它可用于家庭对煤气、一氧化碳、液化石油气等泄露实现监测报警。图中U257B是LED条形驱动器集成电路,其输出量(LED点亮只数)与输入电压呈成线性关系。LED被点亮的只数取决于输入端⑦脚电位的高低。通常IC⑦脚电压低于0.18V时,其输出端②~⑥脚均为低电平,LED₁~LED₅均不亮。当⑦脚电位等于0.18V时,LED₁被点亮;⑦脚电压为0.53V时,则LED₁和LED₂均点亮;⑦脚电压为0.84V时,LED₁~LED₃均点亮;⑦脚电压为1.19V时,LED₁~LED₄均点亮;⑦脚电压等于2V时,则使LED₁~LED₅全部点亮。U257B的额定工作范围为8V~25V,输入电压最大5V,输入电流0.5mA,功耗690mW。采用低功耗、高灵敏的QM-N10型气敏检测管,它和电位器R_p组成电

下面介绍一些至今发展比较成熟的几类湿敏传感器。

9.2.1 氯化锂湿敏电阻

氯化锂湿敏电阻是利用吸湿盐类潮解,离子导电率发生变化而制成的测湿元件。该元件的结构如图 9-25 所示,由引线、基片、感湿层与电极组成。氯化锂通常与聚乙稀醇组成混合物,在氯化锂(LiCl)溶液中, Li 和 Cl 均以正负离子的形式存在,而 Li^+ 对水分子的吸引力强,离子水合程度高,其溶液中的离子导电能力与浓度成正比。当溶液置于一定温湿场中,若环境相对湿度高,溶液将吸收水分,使浓度降低,因此,其溶液电阻率增高。反之,环境相对湿度变低时,则溶液浓度升高,其电阻率下降从而实现对湿度的测量。氯化锂湿敏元件的湿度—电阻曲线如图 9-26 所示。

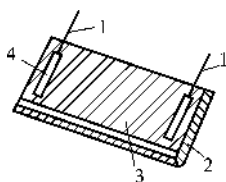


图 9-25 湿敏电阻结构示意图

1—引线； 2—基片； 3—感湿器； 4—金属电阻

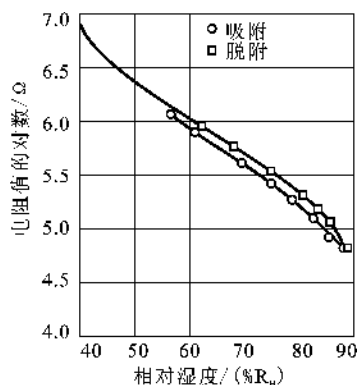


图 9-26 氯化锂湿度 - 电阻特性曲线

由图可知,在 50% ~80% 相对湿度范围内,电阻与湿度的变化呈线性关系。为了扩大湿度测量的线性范围,可以将多个氯化锂含量不同的器件组合使用,如将测量范围分别为 (10% ~20%)RH, (20% ~40%)RH, (40% ~70%)RH, (70% ~90%)RH 和 (80% ~90%)RH 五种元件配合使用,就可自动地转换完成整个湿度范围的测量。

氯化锂湿敏元件的优点是滞后小,不受测试环境风速影响,检测精度高达 $\pm 5\%$,但其耐热性差,不能用于露点以下测量,器件性能的重复性不理想,使用寿命短。

9.2.2 半导体陶瓷湿敏电阻

半导体陶瓷湿敏电阻通常是用两种以上的金属氧化物半导体材料混合烧结而成的多孔陶瓷。这些材料有 $\text{ZnO} - \text{Li}_2\text{O} - \text{V}_2\text{O}_5$ 系、 $\text{Si} - \text{Na}_2\text{O} - \text{V}_2\text{O}_5$ 系、 $\text{TiO}_2 - \text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 系、 Fe_3O_4 等,前三种材料的电阻率随湿度增大而下降,故称为负特性湿敏半导体陶瓷,最后一种的电阻率随湿度的增大而增大,故称为正特性湿敏半导体陶瓷(为叙述方便,有时称将半导体陶瓷简称为半导瓷)。

1. 负特性湿敏半导瓷的导电机理

由于水分子中的氢原子具有很强的正电场,当水在半导瓷表面吸附时,就有可能从半导瓷表面俘获电子使半导瓷表面带负电。如果该半导瓷是 P 型半导体,则由于水分子吸附使表面电势下降。若该半导瓷为 N 型,则由于水分子的附着使表面电势下降。如果表面电势下降

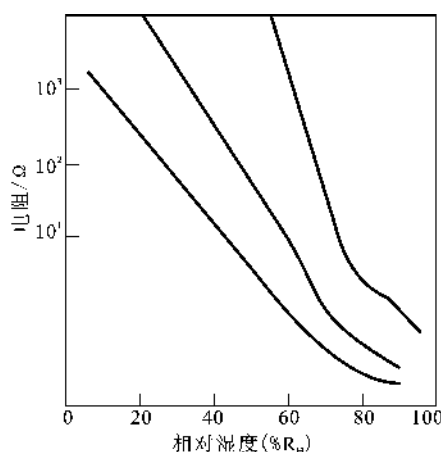
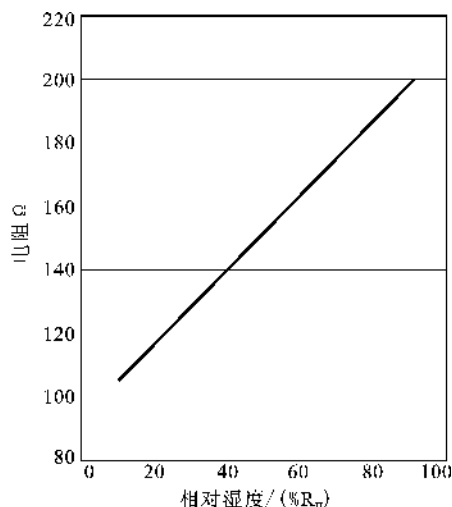


图9-27 几种半导体湿敏负特性

较多,不仅使表面层的电子耗尽,同时吸引更多的空穴达到表面层,有可能使到达表面层的空穴浓度大于电子浓度,出现所谓表面反型层,这些空穴称为反型载流子。它们同样可以在表面迁移而对电导做出贡献。由此可见,不论是N型还是P型半导体,其电阻率都随湿度的增加而下降。图9-27表示了几种负特性半导体阻值与湿度的关系。

2. 正特性湿敏半导体的导电机理

正特性湿敏半导体的导电机理认为这类材料的结构、电子能量状态与负特性材料有所不同。当水分子附着半导体的表面使电势变负时,导致其表面层电子浓度下降,但还不足以使表面层的空穴浓度增加到出现反型程度,此时仍以电子导电为主。于是,表面电阻将由于电子浓度下降而加大,这类半导体材料的表面电阻将随湿度的增加而加大。如果对某一种半导体,它的晶粒间的电阻并不比晶粒内电阻大很多,那么表面层电阻的加大对总电阻并不起多大作用。不过,通常湿敏半导体材料都是多孔的,表面电导占的比例很大,故表面层电阻的升高必将引起总电阻值的明显升高;但是,由于晶体内部低阻支路仍然存在,正特性半导体的总电阻值的升高没有负特性材料的阻值下降得那么明显。图9-28给出了 Fe_3O_4 正特性半导体湿敏电阻阻值与湿度的关系曲线。

图9-28 Fe_3O_4 半导体的正湿敏特性

3. 典型半导体湿敏元件

(1) $\text{MgCr}_2\text{O}_4 - \text{TiO}_2$ 湿敏元件

氧化镁复合氧化物-二氧化钛湿敏材料通常制成多孔陶瓷“湿-电”转换器件,它是负特性半导体, MgCr_2O_4 为P型半导体,它的电阻率低阻值特性好,结构如图9-29所示,在

MgCr₂O₄ - TiO₂陶瓷片的两面涂覆有多孔金电极。金电极与引出线烧结在一起，为了减少测量误差，在陶瓷片外设置由镍铬丝制成的加热线圈，以便对器件加热清洗，排除恶劣气氛对器件的污染。整个器件安装在陶瓷基片上，电极引线一般采用铂 - 钨合金。

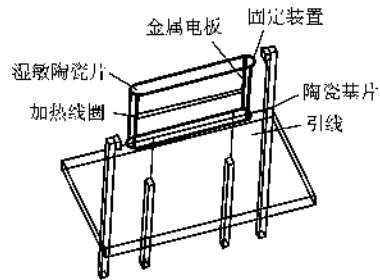


图 9 - 29 MgCr₂O₄ - TiO₂ 陶瓷湿度传感器的结构

MgCr₂O₄ - TiO₂陶瓷湿度传感器的相对湿度与电阻值之间的关系，如图 9 - 30 所示。传感器的电阻值既随所处环境的相对湿度而减少，又随周围环境温度的变化而有所变化。

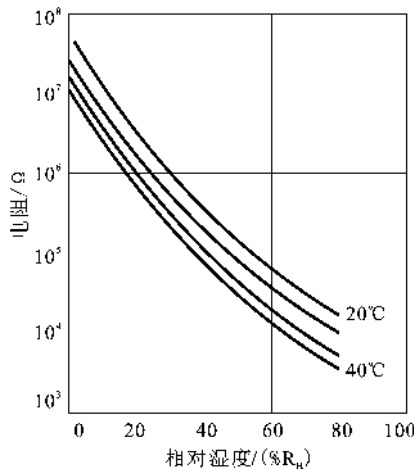


图 9 - 30 MgCr₂O₄ - TiO₂ 陶瓷湿度传感器相对湿度与电阻的关系

(2) ZnO - Cr₂O₃陶瓷湿敏元件

ZnO - Cr₂O₃湿敏元件的结构是将多孔材料的电极烧结在多孔陶瓷圆片的两表面上，并焊上引线，然后将敏感元件装入有网眼过滤的方形塑料盒中用树脂固定而做成的，其结构如图 9 - 31 所示。

ZnO - Cr₂O₃传感器能连续稳定地测量湿度，而无须加热除污装置，因此功耗低于 0.5W，体积小，成本低，是一种常用的测湿传感器。

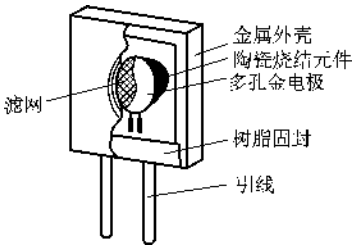


图 9 - 31 ZnO - Cr₂O₃ 陶瓷湿敏传感器结构

习题9

- 9 - 1 半导体气敏传感器有哪几种类型？
- 9 - 2 试叙述表面控制型半导体气敏传感器的工作原理。
- 9 - 3 为什么多数气敏器件都附有加热器？
- 9 - 4 如何提高半导体气敏传感器对气体的选择性和气体检测灵敏度？
- 9 - 5 利用热导率式气敏传感器原理，设计一真空检测仪表，并说明其工作原理。
- 9 - 6 湿敏传感器的原理是什么？简述其类型特征及用途。

第 10 章 超声波传感器

本章要点

- 超声波的物理性质
- 超声波发生器的种类、结构及工作原理
- 超声波接收器
- 超声波传感器在探伤、测液位、测厚度、测流速、测料位等方面的应用原理

10.1 超声波及其物理性质

10.1.1 声波、超声波及应用

人耳听见的声波(机械波),频率在 20Hz ~ 20kHz 的范围内时,称为可闻声波。低于 20Hz 的机械振动人耳不可闻,称为次声波。频率高于 20kHz 的机械振动波称为超声波。超声波技术是一门以物理、电子、机械及材料学为基础的通用技术,超声波技术通过超声波的产生—传播—接收几个物理过程来完成。超声波在液体、固体中衰减很小,穿透能力强,特别是不透光的固体能穿透几十米;当超声波从一种介质入射到另一种介质时,在界面上会产生反射、折射和波形转换,由于超声波的这些特性,使它在检测技术中获得广泛应用。如:超声波测距、测厚、测流量、无损探伤、超声成像等等。超声波为直线传播方式,频率越高绕射越弱,但反射能力越强,利用这种性质可以制成超声波测距传感器。超声波在空气中传播速度较慢,为 340m/s,这一特点使得超声波应用变得非常简单,可以通过测量波的传播时间,测量距离、厚度等。

10.1.2 超声波的声速、波长、指向性和分类

1. 声速

声波的传播速度取决于介质的弹性系数、介质的密度以及声阻抗。介质的声阻抗 Z 等于介质的密度 ρ 和声速 c 的乘积。常用介质材料的密度、声阻抗与声速如表 10 - 1 所示。

$$Z = \rho \cdot c \tag{10 - 1}$$

表 10 - 1 常用材料的密度、声阻抗与声速(环境温度为 0℃)

材料	密度 ρ /	声阻抗 Z	纵波声速 c_l	横波声速 c_s
	10^3kg/m^3	$/(10 \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
钢	7.8	46	5.9	3.23
铝	2.7	17	6.32	3.08

续上表

材料	密度 $\rho /$	声阻抗 Z	纵波声速 c_l	横波声速 c_s
	10^3 kg/m^3	$/(10 \text{ MP} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{ km} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{ km} \cdot \text{s}^{-1})$
铜	8.9	42	4.7	2.05
有机玻璃	1.18	3.2	2.73	1.43
甘油	1.26	2.4	1.92	...
水(20°C)	1.0	1.48	1.48	...
油	0.9	1.28	1.4	...
空气	0.0013	0.0004	0.34	...

在固体介质中声波的速度为：

(1)纵波声速：

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{细棒}) \tag{10 - 2}$$

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \mu)^2}} \quad (\text{薄板}) \tag{10 - 3}$$

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} \quad (\text{无限大介质}) \tag{10 - 4}$$

(2)横波声速：

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{无限大介质}) \tag{10 - 5}$$

(3)表面波声速：

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \mu)}} \tag{10 - 6}$$

在上列各式中 E——杨氏弹性模量；

ρ ——密度；

μ ——泊松比；

K——体积弹性模量；

G——剪切弹性模量。

将式(10 - 5)除式(10 - 4)得， $c_s = c_L \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}}$ 。因此，在固体中，横波的声速约是纵波的一半。

2. 波长

超声波的波长 λ 与频率 f 的乘积恒等于声速 c ，即

$$\lambda \cdot f = c \tag{10 - 7}$$

3. 指向性

超声波声源发出的超声波束以一定的角度逐渐向外扩散。指向角 θ 与超声源的直径 D 、以及波长 λ 之间的关系为：

$$\sin\theta = 1.22\lambda/D \quad (10-8)$$

4. 超声波的波型

超声波的波型有纵波、横波、表面波(亦称瑞利波)和兰姆波。

10.1.3 超声波的传播特性

超声波是一种在弹性介质中的机械振荡,它是由与介质相接触的振荡源所引起的。设有某种弹性介质及振荡源,如图 10-1 所示。振荡源在介质中可产生两种形式的振荡,即横向振荡如图 10-1(a)所示和纵向振荡如图 10-1(b)所示。横向振荡只能在固体中产生,而纵向振荡可在固体、液体和气体中产生。为了测量在各种状态下的物理量多数采用纵向振荡。超声波的传播速度与介质的密度和弹性特性有关。对于液体及气体,其传播的速度为:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho B_g}} \quad (10-9)$$

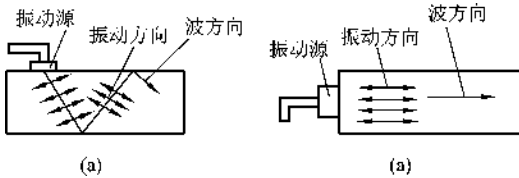


图 10-1 介质中的振荡形式

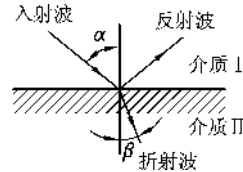


图 10-2 超声波的反射和折射

式中 ρ ——介质的密度;
 B_g ——绝对压缩系数。

在固体中的传播速度为 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$

式中 E ——固体的弹性模量;
 μ ——泊松比。

(1)超声波的一种传播特性是在通过两种不同的介质时,产生折射和反射现象,如图 10-2 所示。图中具有下列关系:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (10-10)$$

式中 c_1 、 c_2 ——分别为超声波在介质 I 和介质 II 中的速度;
 α ——入射角;
 β ——折射角。

设 α_0 为临界入射角,当 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时 $\beta = 90^\circ$, 则

$$\sin\alpha = \frac{c_1}{c_2} \quad (10-11)$$

当 $\alpha > \alpha_0$ 时,则只产生反射波。

(2)超声波的另一种传播特性是在通过同种介质时,随着传播距离的增加,其强度因介质吸收能量而减弱。设超声波进入介质时的强度为 I_0 ,通过介质后在距离声源 d 处的强度为 I ,则有

$$I = I_0 e^{-2Ad} \quad (10-12)$$

式中 d ——介质的厚度；

A ——介质对超声波能量的吸收系数。

对于液体介质，超声波能量的吸收系数为：

$$A = \frac{4\pi^2 f^2}{c^3 \rho} \left[\frac{4}{3} \eta + \frac{K-1}{c_p} \lambda \right] \quad (10-13)$$

式中 f ——超声波频率；

c ——超声波速度；

ρ ——介质粘度；

η ——导热系数；

$K = c_p / c_v$ ——恒压及恒容情况下的热容量。

对于固体介质，超声波能量的吸收系数为：

$$A = \frac{2\pi f}{Q_c} \quad (10-14)$$

式中 Q_c ——介质的质量因数。

介质的吸收程度和频率与介质密度有很大关系。气体很小，故超声波在其中衰减很快，尤其在 f 较高时衰减更快。故超声波仪表主要用于固体及液体中。

10.2 超声波换能器及耦合技术

10.2.1 超声波换能器

以超声波作为检测手段，必须产生超声波和接收超声波。完成这种功能的装置就是超声波换能器，或者超声波探头。超声波探头主要由压电晶片组成，既可以发射超声波，也可以接收超声波，小功率超声探头多作探测用。超声波探头按其工作原理可分为：压电式、磁致伸缩式、电磁式等，在检测技术中以压电式最为常用。按其结构可分为：直探头（纵波）、斜探头（横波）、表面波探头（表面波）、兰姆波探头（兰姆波）、双探头（一个探头反射、一个探头接收）、聚焦探头、冲水探头、水浸探头、空气传导探头以及其他专用探头等。

1. 以固体为传导介质的超声探头

(1) 单晶直探头 超声波的发射和接收虽然均是利用同一块晶片，但时间上有先后之分，所以单晶直探头是处于分时工作状态，必须用电子开关来切换这两种不同的状态。

(2) 双晶直探头 它是由两个单晶探头组合而成，装配在同一壳体内。其中一片晶片发射超声波，另一片晶片接收超声波。

(3) 斜探头 当斜楔块与不同材料的被测介质（试件）接触时，超声波产生一定角度的折射，倾斜入射到试件中去，折射角可通过计算求得。

(4) 聚焦探头 聚焦探头采用曲面晶片来发出聚焦的超声波。

(5) 箔式探头 利用聚偏二氟乙烯（PVDF）高分子薄膜，制作出的薄膜式探头称为箔式探头。

2. 以空气为传导介质的超声探头

此类超声探头的发射换能器和接收换能器一般是分开设置的，两者结构也略有不同。

3. 耦合剂

耦合剂是用来排除探头和被测物体之间的空气,使超声波能有效地穿入工件达到检测目的。如果选择种类或使用方法不当,将造成误差或耦合标志闪烁,无法测量。应根据使用情况选择合适的种类,当使用在光滑材料表面时,可以使用低粘度的耦合剂;当使用在粗糙表面、垂直表面及顶表面时,应使用粘度高的耦合剂。高温工件应选用高温耦合剂。其次,耦合剂应适量使用,涂抹均匀,一般应将耦合剂涂在被测材料的表面,但当测量温度较高时,耦合剂应涂在探头上。

常用的耦合剂有水、机油、甘油、水玻璃、胶水、化学浆糊等。有时为了减少耦合剂的成本,还可在单晶直探头、双晶直探头或斜探头的侧面,加工一个自来水接口。

10.2.2 超声波的发生

1. 压电式超声波发生器

压电式超声波发生器就是利用压电晶体的电致伸缩现象制成的。常用的压电材料为石英晶体、锆钛酸铅压电陶瓷等。在压电材料切片上施加交变电压,使它产生电致伸缩振动,而产生超声波,如图 10-3 所示。压电材料的固有频率 f 与晶片厚度 d 有关,即

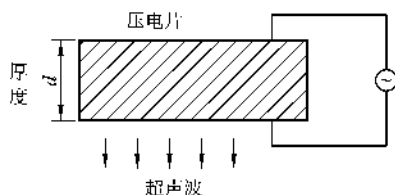


图 10-3 压电式超声波发生器

$$f = n \frac{c}{2d} \quad (10-15)$$

式中, $n=1, 2, 3, \dots$ 是谐波的级数 c 为波在压电材料里的传播速度(纵波):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (10-16)$$

式中, E 为杨氏模量; ρ 为压电材料的密度。对于石英晶体 $E=7.70$, $\rho=2654\text{kg/m}^3$; 对于锆钛酸铅 $E=8.300$, $\rho=7400\text{kg/m}^3$ 。因此,压电材料的固有频率为:

$$f = \frac{n}{2d} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (10-17)$$

根据共振原理,当外加交变电压频率等于晶片的固有频率时,产生共振,这时产生的超声波最强。压电式超声波发生器可以产生几十 kHz 到几十 MHz 的高频超声波,产生的声强可达几十 W/cm^2 。

各种压电式超声波换能器的结构如图 10-4 所示。

2. 磁致伸缩超声波发生器

磁致伸缩效应的大小,即伸长缩短的程度,不同的铁磁物质其情况不相同。镍的磁致伸缩效应最大,它在一切磁场中都是缩短的。如果先加一定的直流磁场,再加一交流电时,它可工作在特性最好的区域。磁致伸缩超声波发生器把铁磁材料置于交变磁场中,使它产生机械尺寸的交替变化,即机械振动,从而产生超声波。磁致伸缩超声波发生器是用厚度为 $0.1 \sim 0.4\text{mm}$ 的镍片叠加而成的,片间绝缘以减少涡流电流损失。其结构形状有矩形、窗形等,如图 10-5 所示。

超声波发生器的机械振动固有频率的表达式与压电式的相同,即式(10-17)

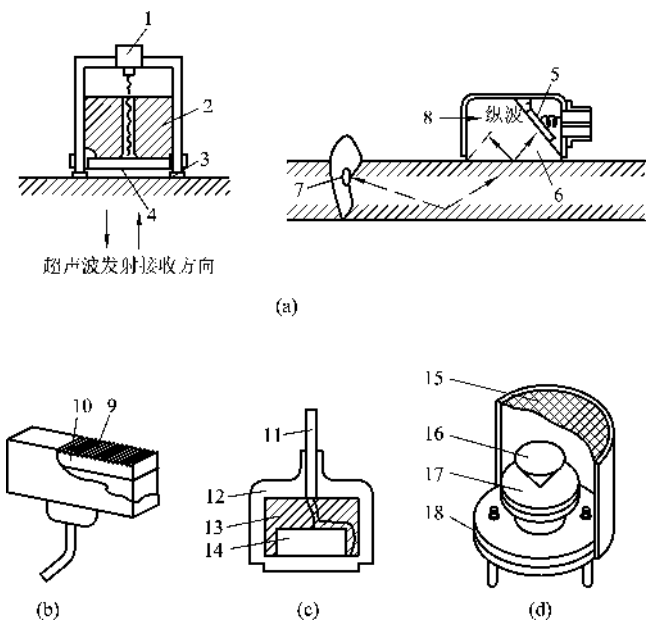


图 10 - 4 各种压电式超声波换能器的结构

1—接栓；2、8、10、13—吸音材料；3—前面板；4、5、9、14、17—振子；
6—波导楔；7—缺陷；11—电缆；12—橡胶盒；15—滤网；16—喇叭；18—端子板

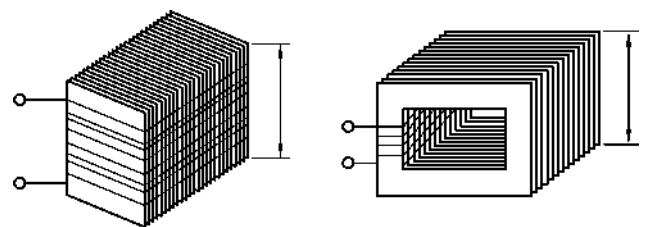


图 10 - 5 磁致伸缩超声波发生器

如果振动器是自由的，则 $n = 1, 2, 3, \dots$ ；如果振动器的中间部分固定，则 $n = 1, 3, 5, \dots$ 。磁致伸缩超声波发生器的材料，除镍外，还有铁钴钒合金（铁 49%，钴 49%，钒 2%）和含锌、镍的铁氧体。磁致伸缩超声波发生器只能用在几万 Hz 的频率范围以内，但功率可达十万 W，声强可达几 kW/cm^2 ，能耐较高的温度。

磁致伸缩效应与电致伸缩效应同样是二次非线性效应，使用中加直流偏置磁场。图 10 - 6 所示即为典型的结构，图 10 - 6(a)是角形振子，图 10 - 6(b)是圆筒形振子，图 10 - 6(c)是采用铁氧体角形振子。这种换能器上限频率到 100kHz 左右，主要用于海洋测量鱼群探测器和声纳。

10.2.3 超声波的接收

超声波的传播波型主要可分为纵波、横波、表面波等几种。在超声波技术中，除了需要

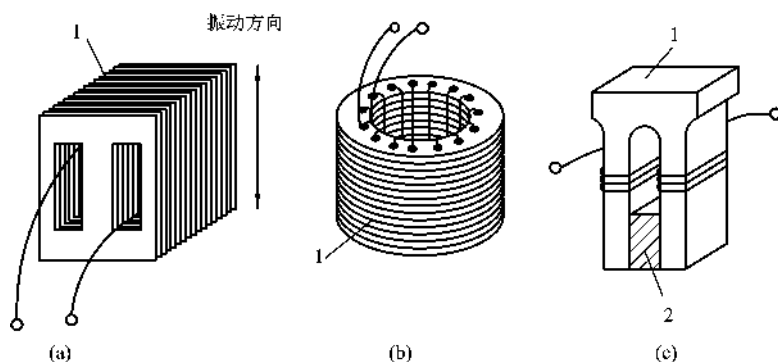


图 10-6 磁致伸缩型振子的形状

1—发射接收波面；2—偏置用磁头

能产生一定频率和强度的超声波发生器以外，还需要能接收超声波的接收器。一般的超声波接收器是利用超声波发生器的逆效应而进行工作的。当超声波作用到压电晶体片上时，使晶片伸缩，则在晶片的两个界面上产生交变电荷。这种电荷先被转换成电压，经过放大后送到测量电路，最后记录或显示出结果。它的结构和超声波发生器基本相同，有时就用同一个超声波发生器兼做超声波接收器。

磁致伸缩超声波接收器是利用磁致伸缩的逆效应而制成的。当超声波作用到磁致伸缩材料上时，使磁致材料伸缩，引起它的内部磁场（即导磁特性）的变化。根据电磁感应，磁致伸缩材料上所绕的线圈获得感应电动势，并将此电动势送到测量电路及记录显示设备。它的结构也与发生器差不多。

10.3 超声波传感器的应用

超声波由于具有频率高、波长短、绕射现象小，特别是方向性好、能够成为射线而定向传播等特点。超声波对液体、固体的穿透本领很大，尤其是在阳光或不透明的固体中，它可穿透几十米的深度。超声波碰到杂质或分界面会产生显著反射形成回波，碰到活动物体能产生多普勒效应。因此超声波检测广泛应用于工业、国防、生物医学等方面。

10.3.1 超声波探伤

超声波探伤法是利用超声波在物体中传播的一些物理特性来发现物体内部的不连续性，即缺陷或伤的一种方法，是无损检验的一种重要手段。常用的超声波探伤法有共振法、穿透法、脉冲反射法等。

1. 共振法

共振法是根据声波（频率可调的连续波）在工件中呈共振状态来测量工件厚度或判断有无缺陷的方法。这种方法主要用于表面较光滑的工件的厚度检测，也可用于探测复合材料的粘合质量和钢板内的夹层缺陷检测。声波在工件内传播时，如入射波与反射波同相位（即工件厚度为超声波波长 λ 的一半或成整数倍时），则引起共振。共振法测厚的公式为：

$$\delta = n \frac{\lambda}{2} = \frac{nc}{2f} \quad (10-18)$$

在测得共振频率 f 和共振次数 n 后,便可计算材料的厚度。共振法的特点是:可精确地测厚,特别适宜测量薄板及薄壁管;工件表面光洁度要求高,否则不能进行测量。

2. 穿透法

穿透法又称透射法,穿透法是将两个探头分别置于工件相对的两面,一个发射超声波,使超声波从工件的一个界面透射到另一个界面,在该界面处用另一个探头来接收。根据超声波穿透工件后的能量变化情况,来判断工件内部质量。工件内无缺陷时,接收到的超声波能量较强;一旦有缺陷,声波受缺陷阻挡,则将在缺陷后形成声影,这样就可根据接收到的超声波能量的大小来判定缺陷的大小。探测灵敏度除与仪器有关外,还取决于声影的缩小,声影的缩小则是由于声波在缺陷边缘绕射造成的。

在缺陷后 l_1 的距离内,声影是不缩小的,其值为:

$$l_1 = \frac{R^2}{\lambda} \quad (10-19)$$

式中 R ——缺陷半径;

λ ——波长。

在 l_1 后声影偏转一个角度 α ,而后逐渐减小,声影变为一点时的最大距离 l 为灵敏度的极限值。 α 可用下式求得:

$$\sin \alpha = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (10-20)$$

式中, D ——缺陷的直径。

在穿透法探伤中,可采用连续波和脉冲波两种不同的方法。穿透法具有以下特点:

- (1)探测灵敏度较低,不易发现小缺陷;
- (2)根据能量的变化即可判断有无缺陷,但不能定位;
- (3)适宜探测超声波衰减大的材料;
- (4)可避免盲区,适宜探测薄板;
- (5)指示简单,便于自动探伤;
- (6)对两探头的相对距离和位置要求较高。

3. 脉冲反射法

脉冲反射法是将脉冲超声波入射至被测工件后,传播到有声阻抗差异的界面上(如缺陷与工件的界面)时,产生反射声波,波在工件的反射状况就会显示在荧光屏上,根据反射的时间及形状来判断工件内部缺陷及材料性质的方法。如图 10-7、10-8 所示,根据入射声波类型的不同可分成如下几种:纵波探伤法、横波探伤法、表面波探伤法、兰姆波探伤法。

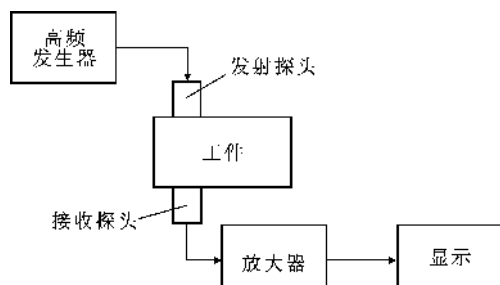


图 10-7 穿透法探伤示意图

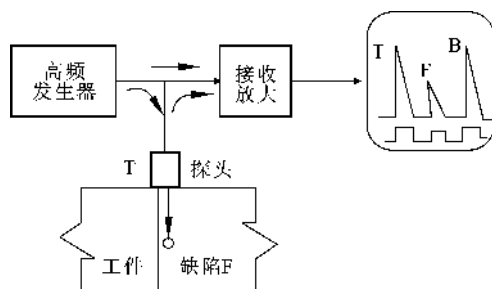


图 10-8 反射法探伤示意图

(1)纵波探伤法

纵波探伤法是使超声波波束垂直或倾斜入射(倾斜角不大于临界角)被测工件而进行探伤的方法。

(2)横波探伤法

横波探伤法是声波以一定角度入射到工件产生波型转换而利用横波进行探伤的方法。

(3)表面波探伤法。

这种方法是表面波沿着工件的表面传播来进行探伤的方法。

(4)兰姆波探伤法

这种方法是兰姆波沿着板(或壁管)两表面及中间传播来进行探伤的方法。

脉冲反射法的特点是 探测灵敏度高 ;能准确地确定缺陷的位置和深度 ;可用不同波型探测 ,应用范围广。

为使探头有效地向工件发射超声波和有效地接收超声波,必须使探头和工件探测面之间有良好的声耦合。良好的声耦合可以通过填充耦合介质来实现,以避免空气的存在,因为空气层的存在将使声能几乎完全被反射。探头和工件的耦合方式可分直接接触法和液浸法二种。液浸法与接触法的特点:

①接触法比液浸法简单、灵活,但接触法的波形不稳定(因受手工操作时压力的影响),而液浸法波形稳定;

②液浸法不必将探头与工件直接接触,便于实现自动化探伤;

③液浸法适宜探测表面粗糙的工件,不磨损探头晶片;

④液浸法的声束方向可连续改变,易探测倾斜的缺陷;

⑤液浸法可控制波束,可以用聚焦探头提高灵敏度;

⑥液浸法要求用清洁的液体,否则会降低探测灵敏度。

10.3.2 超声波测液位

在化工、石油和水电等部门,超声波被广泛用于油位、水位等的液位测量。图 10-9 所示为脉冲回波式测量液位的工作原理图。探头发出的超声脉冲通过介质到达液面,经液面反射后又被探头接收。测量发射与接收超声脉冲的时间间隔和介质中的传播速度,即可求出探头与液面之间的距离。根据传声方式和使用探头数量的不同,可以分为单探头液介式(图 10-9(a))、单探头气介式(图 10-9(b))、单探头固介式(图 10-9(c))、双探头液介式(图 10-9(d))等数种。

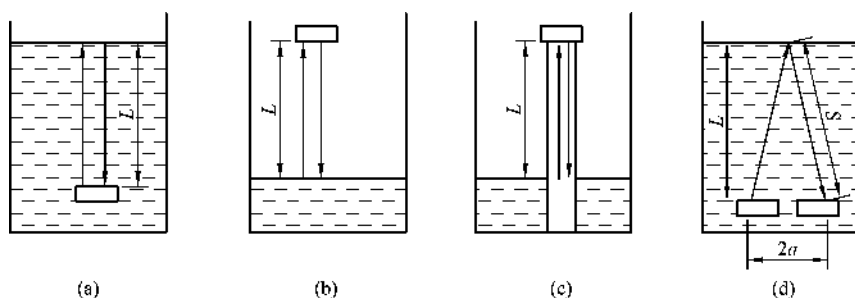


图 10 - 9 脉冲回波式超声液位测量

在生产实践中,有时只需要知道液面是否升到或降到某个或几个固定高度,则可采用图 10 - 10 所示的超声波定点式液位计,实现定点报警或液面控制。图 10 - 10(a)、(b)为连续波阻抗式液位计的示意图。由于气体和液体的声阻抗差别很大,当探头发射面分别与气体或液体接触时,发射电路中通过的电流也就明显不同。因此利用一个处于谐振状态的超声波探头,就能通过指示仪表判断出探头前是气体还是液体。图 10 - 10(c)、(d)为连续波透射式液位计示意图。图中相对安装的两个探头,一个发射,另一个接收。当发射探头发生频率较高的超声波时,只有在两个探头之间有液体时,接收探头才能接收到透射波。由此可判断出液面是否达到探头的高度。超声波测液位还可以利用回声原理进行工作,如图 10 - 11 所示。当超声波探头向液面发射短促的超声脉冲,经过时间 t 后,探头接收到从液面反射回来的回音脉冲。因此探头到液面的距离 L 可由下式求出:

$$L = \frac{1}{2}ct \quad (10 - 21)$$

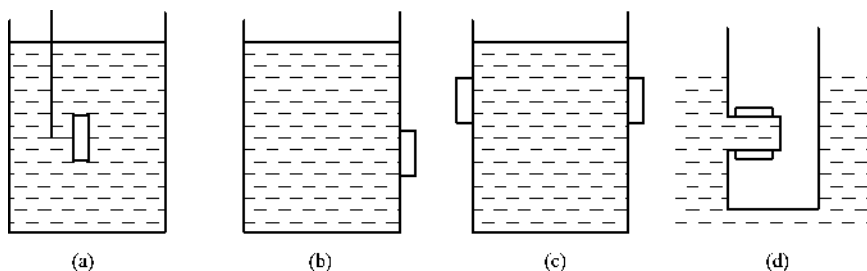


图 10 - 10 超声波定点式液位计

式中, c 为超声波在被测介质中的传播速度, t 为超声波发生器发出超声波到接收到超声波的时间差。由此可见,只要知道超声波的速度,通过精确测量时间 t 的方法,就可以测量出距离 L 。超声波速度 c 在各种不同的液体中是不同的,即使在同一种液体中,由于温度和压力的不同,其值也是不同的。因为液体中有其他成分的存在及温度的不均匀都会使超声波速度发生变化,引起测量的误差,故在精密测量时,要考虑采取补偿措施。利用这种方法也可以测量料位。

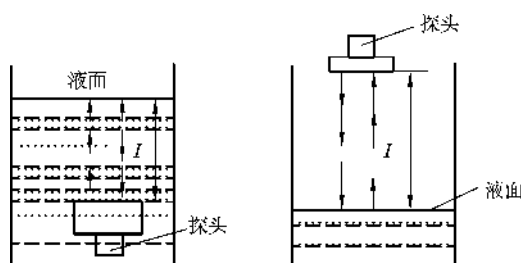


图 10 - 11 超声波测液位示意图

10.3.3 超声波测厚度

超声波测厚仪是根据超声波脉冲反射原理来进行厚度测量的，当探头发射的超声波脉冲通过被测物体到达材料分界面时，脉冲被反射回探头，通过精确测量超声波在材料中传播的时间来确定被测材料的厚度。凡能使超声波以一恒定速度在其内部传播的各种材料均可采用此原理测量。超声波测厚仪具有小型、轻便、测量速度快、精高等优点。超声波测厚仪从原理上分主要有共振式和脉冲反射式两种。

1. 共振式测厚仪

用频率可变的连续正弦波信号激励压电片，压电片向材料中发射与所加频率相同的超声波，在材料中传播的超声波波长和频率有下式关系：

$$c = f\lambda \quad (10 - 22)$$

式中 c ——材料中传播的超声波声速；

f ——超声波频率；

λ ——超声波波长。

改变激励信号频率，则压电片发射的超声波频率改变，也就是超声波波长改变。当工件的厚度为半波长的整数倍时，则在工件内引起共振，即形成驻波。由此可得出：

$$f_n = nf_1 = \frac{nc}{2\delta} \quad (10 - 23)$$

式中 c ——材料中传播的超声波声速；

n ——整数；

δ ——工件厚度。

由上式可看出，任何两个相邻共振频率之差都等于基波频率 f_1 ，即 $f_n - f_{n-1} = nf_1 - (n-1)f_1 = f_1$ 。所以，当得知厚度共振的两个相邻共振频率时，就可求出厚度为：

$$\delta = \frac{c}{2(f_n - f_{n-1})} \quad (10 - 24)$$

共振法测厚的精度可达 0.1% ~ 1%，测厚范围 1 ~ 100mm，最薄可测 0.1mm，对于一定的被测材料来说，厚度测量范围不但与振荡器工作频率有关，还与采用基波共振或谐波共振的指示方式等因素有关。通常检测金属厚度的频率范围为 0.7 ~ 3MHz，测薄试样时也有用到 25MHz 以上的，对于声波衰减较大的材料，由于共振不明显，相应的测量精度也低些。

2. 脉冲反射式测厚仪

图 10 - 12 所示为脉冲回波法检测厚度的工作原理。超声波探头与被测物体表面接触。

主控制器控制发射电路,使探头发出的超声波到达被测物体底面反射回来,该脉冲信号又被探头接收,经放大器放大加到示波器垂直偏转板上。标记发生器输出时间标记脉冲信号,同时加到该垂直偏转板上。而扫描电压则加在水平偏转板上。因此,在示波器上可直接读出发射与接收超声波之间的时间间隔 t 。被测物体的厚度 h 为:

$$h = ct/2 \quad (10 - 25)$$

式中, c ——超声波的传播速度。

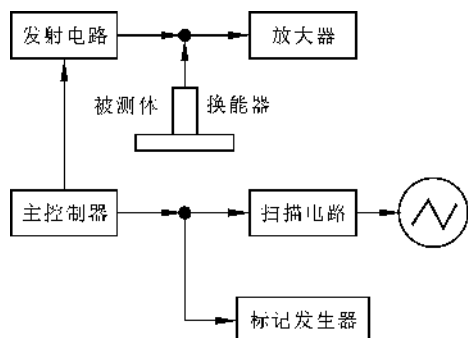


图 10 - 12 声波测厚工作原理图

我国 20 世纪 60 年代初期自行设计成 CCH - J - 1 型表头式超声波测厚仪,近期又采用集成电路制成数字式超声波测厚仪,其体积小可以握在手中,重量不到 1kg,精度可达 0.01mm。

10.3.4 超声波测物位

超声波物位传感器是一种非接触式的物位传感器,应用领域十分广泛。其工作原理是,工作时向液面或粉体表面发射一束超声波,被其反射后,传感器再接收此反射波。设声速一定,根据声波往返的时间就可以计算出传感器到液面(粉体表面)的距离,即测量出液面(粉体表面)位置。传感器敏感元件有两种,一种是由线圈、磁铁和膜构成的,另一种是由压电式磁致伸缩材料构成的。前者产生的是 10kHz 的超声波,后者产生的是 20 ~ 40kHz 的超声波。超声波的频率愈低,随着距离的衰减愈小,反射效率也小。因此,应根据测量范围、物位表面状况和周围环境条件来决定所使用的超声波传感器。高性能的超声波物位传感器由微机控制。以紧凑的硬件进行特性调整和功能检测。它可以准确地区别信号波和噪声,因此,可以在搅拌器工作的情况下测量物位。此外,在高温或吹风时也可检测物位,特别是可以检测高粘度液体和粉状体的物位。

超声波传感器测距基本电路主要由振荡发射电路、接收检测电路两部分组成,电路原理框图见图 10 - 13。由反向器①②组成 RC 振荡器,振荡信号经门电路③④⑤⑥完成功率放大,通过 CP 耦合,传送给超声波振子,产生超声波发射信号。注意超声波振子一般不加直流电压,因为长期加入直流电压会使传感器特性变差。接收到的超声波信号极微弱,需要增益高的放大电路用于检测反射波,运算放大器 A 对 mV 级左右信号放大处理,输出的高频信号电压接检波、放大、开关电路输出或报警。

图 10 - 14 采用脉冲时序描述测距原理,测距是通过定时控制电路、触发电路、门电路变换为与距离有关的信号,用时钟脉冲对这个信号的发送和接收之间的延迟时间进行计数,计数器的输出值就是相应距离。已知计数器系统中超声波速度 340m/s 与距离 S 的关系为: $S = 340\text{m/s} \times (n \times 25\mu\text{s})$ 。

10.3.5 超声波测流量

超声流量计(简称 USF)是通过检测流体流动时对超声束(或超声脉冲)的作用,以测量体积流量的仪表。下面主要介绍用于测量封闭管道液体流量的 USF。20 世纪 70 年代随着电子技术的发展,性能日益完善的各种型号 USF 投入市场。由于 USF 测量原理是长度与时间

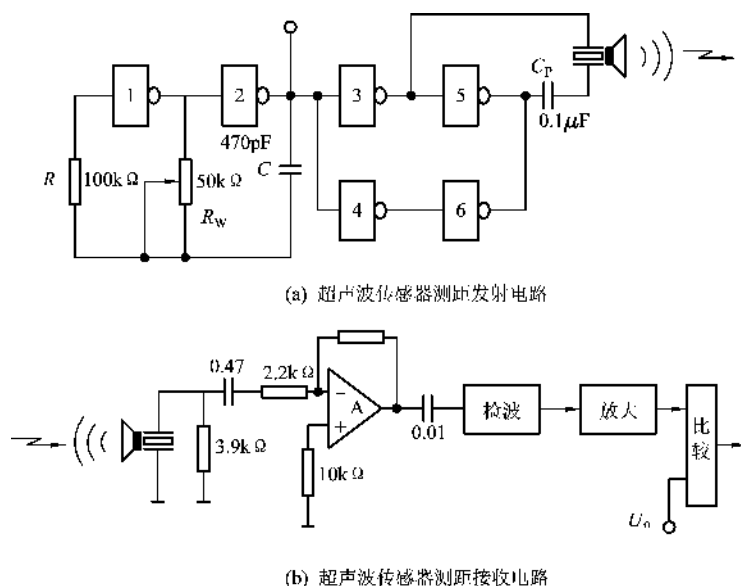


图 10 - 13 超声波传感器测距电路原理框图

两个基本量的结合，其导出量溯源性较好，可据此建立流量基准。

1. 工作原理

封闭管道用 USF 按测量原理分类有：传播时间法、多普勒效应法、波束偏移法、相关法、噪声法。下面讨论用得最多的是传播时间法和多普勒效应法的仪表。

(1) 传播时间法

利用超声波测流量对被测流体并不产生附加阻力，测量结果不受流体物理和化学性质的影响。超声波在静止和流动流体中的传播速度是不同的，进而形成传播流量的工作原理图。图 10 - 15 中 v 为流体通过换能器 1、2 之间声道上平均流速， c 为超声波在静止流体中的传播速度， θ 为超声波传播方向与流体流动方向的夹角， L 超声波在换能器之间传播路径的长度， x 传播路径的轴向分量。

声波在流体中传播，顺流方向声波传播速度会增大，逆流方向则减小，同一传播距离就有不同的传播时间。利用传播速度之差与被测流体流速之关系求取流速，称之为传播时间法。根据顺流和逆流时间和相位上的变化，由此可求得流体的流速，流速乘以管道的横截面积就可以求得流量。按测量具体参数不同，分为时差法、相位差法和频差法。现以时差法阐明工作原理。

① 流速方程式

当换能器 2 为发射探头、换能器 1 为接收探头时，超声波传播速度为 $c + v\cos\theta$ ，于是顺流传播时间 t_{21} 为：

$$t_{21} = \frac{L}{c + v\cos\theta} \quad (10 - 26)$$

当换能器 1 为发射探头、换能器 2 为接收探头时，超声波传播速度为 $c - v\cos\theta$ ，于是逆流传播时间 t_{12} 为：

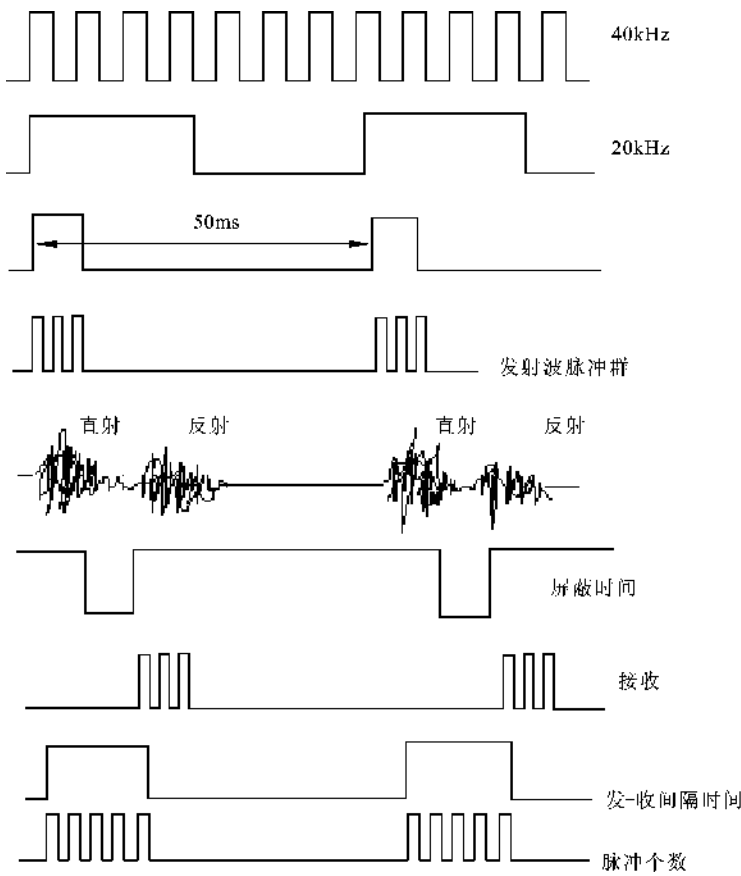


图 10 - 14 超声波传感器测距原理时序波形图

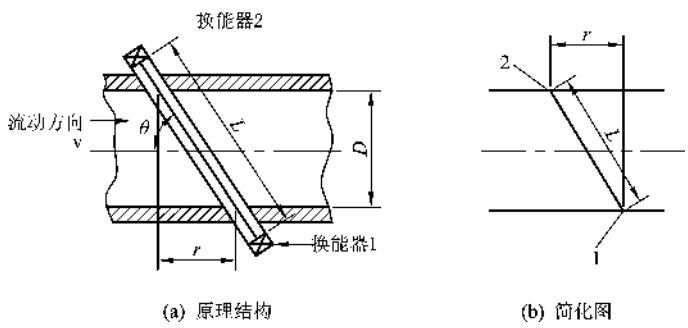


图 10 - 15 传播时间法原理

$$t_{12} = \frac{L}{c - v \cos \theta} \quad (10 - 27)$$

时差：

$$\Delta t = t_{12} - t_{21} = \frac{2Lv \cos \theta}{c^2 - v^2 \cos^2 \theta} \quad (10 - 28)$$

由于 $c \gg v$, 于是式(10 - 28)可近似为:

$$\Delta t \approx \frac{2Lvcos\theta}{c^2} \quad (10 - 29)$$

流体的平均流速为:

$$v \approx \frac{c^2}{2Lcos\theta} \Delta t \quad (10 - 30)$$

该测量方法精度取决于 Δt 的测量精度, 同时应注意 c 并不是常数, 而是温度的函数。

时(间)差法与频(率)差法和相差法间原理方程式的基本关系为:

$$\Delta f = f_{21} - f_{12} = \frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \quad (10 - 31)$$

$$\Delta \varphi = 2\pi f(t_{12} - t_{21}) \quad (10 - 32)$$

式中 Δf ——频率差;

$\Delta \varphi$ ——相位差;

f_{21} 、 f_{12} ——超声波在流体中的顺流和逆流的传播频率;

f ——超声波的频率。

从中可以看出, 相位差法本质上和时差法是相同的, 而频率与时间有时互为倒数关系, 三种方法没有本质上的差别。目前相位差法已不采用, 频差法的仪表也不多。

②流量方程式

传播时间法所测量和计算的流速是声道上的线平均流速, 而计算流量所需是流通横截面的面平均流速, 二者的数值是不同的, 其差异取决于流速分布状况。因此, 必须用一定的方法对流速分布进行补偿。此外, 对于夹装式换能器仪表, 还必须对折射角受温度变化进行补偿, 才能精确地测得流量。体积流量 q_v 为:

$$q_v = \frac{v_m}{K} \cdot \frac{\pi D_N^2}{4} \quad (10 - 33)$$

式中 K ——流速分布修正系数, 即声道上的线平均流速 v_m 或面平均流速 v_m 和平面平均流速 v 之比, $K = v_m/v$; D_N ——管道内径。

K 是单声道通过管道中心(即管轴对称流场的最大流速处)的流速(分布)修正系数。管道雷诺数 Re_D 变化 K 值将变化, 仪表范围度为 10 时, K 值变化约为 1%; 范围度为 100 时, K 值约变化 2%。流动从层流转变为紊流时, K 值变化约 30%。所以要精确测量时, 必须对 K 值进行动态补偿。

③K 值进行动态补偿

夹装式换能器 USF 除了做流速分布修正外, 必要时还要做声道角变化影响的修正。根据斯纳尔(Snall)定律, 式(10 - 33)和图 10 - 16, 声道角 θ 随流体中声速 c 的变化而变化, 而 c 又是流体温度的函数(以水为例, 见图 10 - 17), 因此, 必须对 θ 角进行自动跟踪补偿, 以达到温度补偿的目的。

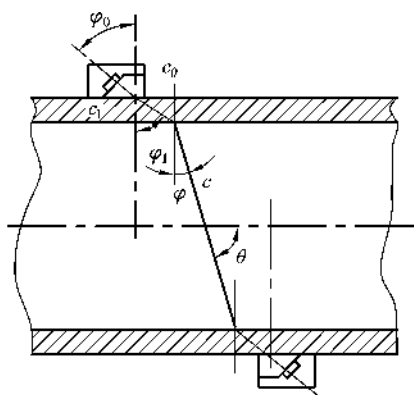


图 10-16 外夹装换能器超声传播途径

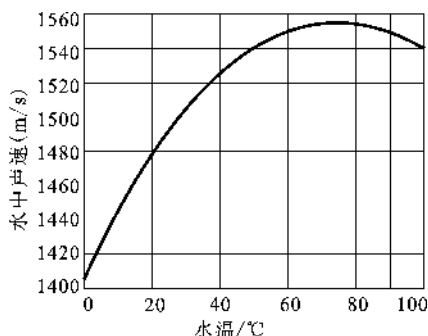


图 10-17 水中声速和水温的关系

$$\frac{\sin \varphi_0}{c_0} = \frac{\sin \varphi_1}{c_1} = \frac{\sin \varphi}{c} \quad (10-34)$$

式中 φ_0 ——超声在声楔中的入射角；

φ_1 、 φ ——超声在管壁、流体中的折射角；

c_0 、 c_1 、 c ——声楔、管壁、被测流体的声速。

θ 角不但受流体声速影响，还与声楔和管壁材料中的声速有关。然而因为一般固体材料的声速变化比液体声速温度变化小一个数量级，在温度变化不大的条件下对测量精确度的影响可以忽略不计。但是在温度变化范围大的情况下（例如高低温换能器工作温度范围 -40 ~ +200）就必须对声楔和管壁中声速的大幅度变化进行修正。

(2) 多普勒(效应)法

多普勒(效应)法 USF 是利用在静止(固定)点检测，从移动源发射声波产生多普勒频移现象来检测流速的。

① 流速方程式

如图 10-18 所示，超声换能器 A 向流体发出频率为 f_A 的连续超声波，经照射域内液体中散射体悬浮颗粒或气泡散射，散射的超声波产生多普勒频移 f_d ，接收换能器 B 收到频率为 f_B 的超声波，其值为：

$$f_B = f_A \frac{c + v \cos \theta}{c - v \cos \theta} \quad (10-35)$$

式中， v ——散射体运动速度。

多普勒频移 f_d 正比于散射体流动速度：

$$f_d = f_B - f_A = f_A \frac{2v \cos \theta}{c} \quad (10-36)$$

测量对象确定后，式(10-36)右边除 v 外均为常量，移行后得：

$$v = \frac{c}{2 \cos \theta} \frac{f_d}{f_A} \quad (10-37)$$

② 流量方程式

多普勒法(效应)USF 的流量方程式形式上与式(10-33)相同，只是所测得的流速是各

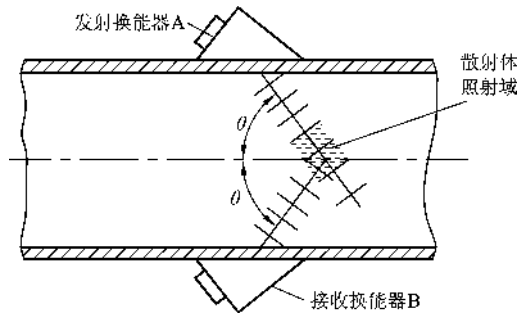


图 10 - 18 多普勒法超声流量计原理图

散射体的速度 v (代替式中的 v_m) 与载体液体管道平均流速数值并不一致; 方程式中流速分布修正系数 K 以 K_d 代替, K_d 是散射体的“照射域”在管中心附近的系数; 其值不适用于在大管径或含较多散射体达不到管中心附近就获得散射波的系数。

③液体温度影响的修正

式(10 - 36)中有流体声速 c , 而 c 是温度的函数, 液体温度变化会引起测量误差。由于固体的声速温度变化影响比液体小一个数量级, 即在式(10 - 37)中的流体声速 c 用声楔的声速 c_0 取代, 以减小用液体声速

时的影响。因为从图 10 - 19 可知 $\cos\theta = \sin\varphi$, 再按斯纳尔定律 $\frac{\sin\varphi}{c} = \frac{\sin\varphi_0}{c_0}$, 根据式(10 - 37)

便可得式(10 - 38), 其中 $\frac{c_0}{\sin\varphi_0}$ 可视为常量。

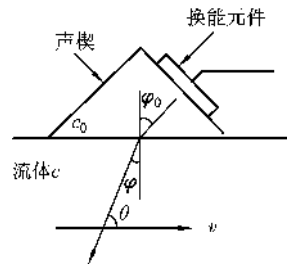


图 10 - 19 声楔的射角

$$v = \frac{c_0}{2\sin\varphi_0} \cdot \frac{f_d}{f_A} \quad (10 - 38)$$

④散射体的影响

实际上多普勒频移信号来自速度参差不一的散射体, 而所测得各散射体速度和载体液体平均流速间的关系也有差别。其他参量如散射体粒度大小组合与流动时分布状况, 散射体流速非轴向分量, 声波被散射体衰减程度等均影响频移信号。

2. 超声流量计组成

USF 主要由安装在测量管道上的超声换能器(或由换能器和测量管组成的超声流量传感器)和转换器组成。转换器在结构上分为固定盘装式和便携式两大类。换能器和转换器之间由专用信号传输电缆连接, 在固定测量的场合需在适当的地方装接线盒。夹装式换能器通常还需配用安装夹具和耦合剂。图 10 - 20 是系统组成示例, 此例是测量液体用传播时间法单声道 Z 法夹装式 USF。

3. 超声流量计分类

可以从不同角度对超声流量测量方法和换能器(或传感器)进行分类。

(1)按测量原理分类

封闭管道用 USF 按测量原理分类有 5 种, 如上述, 现在用得最多的是传播时间法和多普

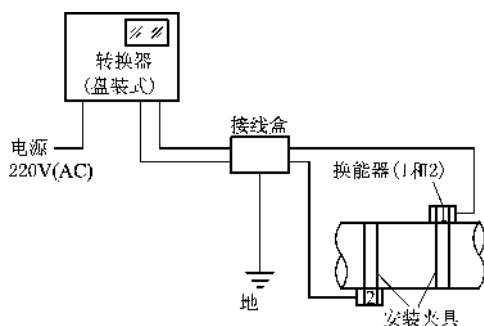


图 10 - 20 USF 系统组成

勒法两大类。

(2) 按被测介质分类

按被测介值分类有气体用和液体用两类。传播时间法 USF 两种介质各自专用，因换能器工作频率各异，通常气体在 100 ~ 300kHz 之间，液体在 1 ~ 5MHz 之间。气体仪表不能用夹装式换能器，因而固体和气体边界间超声波传播效率较低。

(3) 传播时间法按声道数分类

按声道数分类常用的有单声道、双声道、四声道和八声道四种。近年又出现三声道、五声道和六声道。四声道及以上的多声道配置对提高测量精度起很大作用。各声道按换能器分布位置，又可分为以下几种。

- ①单声道 有 Z 法(透过法)和 V 法(反射法)两种。
- ②双声道 有 X 法(2Z 法、交差法)、2V 法和平行法三种。
- ③四声道 有 4Z 法和平行法两种。
- ④八声道 有平行法和两平行四声道交差法二种。

(4) 按换能器安装方式分类

按要装方式分类有可移动安装和固定安装二种。

4. 超声流量计 (USF) 的优缺点和局限性

(1) 优点

①USF 可作非接触测量。夹装式换能器 USF 可无须停流截管安装，只要在已设管道外部安装换能器即可，这是 USF 在工业用流量仪表中具有的独特优点，因此可作移动性(即非定点固定安装)测量，适用于管网流动状况评估测定。

②USF 为无流动阻挠测量，无额外压力损失。流量计的仪表系数是从实际测量管道及声道等几何尺寸计算求得的，即可采用干法标定，除带测量管段式外，一般不需作实流校验。

③USF 适用于大型圆形管道和矩形管道，且原理上不受管径限制，其造价基本上与管径无关。对于大型管道不仅带来方便，可认为在无法实现实流校验的情况下是优先考虑的选择方案。

④多普勒 USF 可测量固相含量较多或含有气泡的液体。

⑤USF 可测量非导电性液体，在无阻挠流量测量方面是对电磁流量计的一种补充。因易于实行与测试方法(如流速计的速度 - 面积法、示踪法等)相结合，可解决一些特殊测量问

题,如速度分布严重畸变测量,非圆截面管道测量等。某些传播时间法 USF 附有测量声波传播时间的功能,即可测量液体声速以判断所测液体类别。例如,油船泵送油品上岸,可核查所测量的是油品还是仓底水。

(2)缺点和局限性

①传播时间法 USF 只能用于清洁液体和气体,不能测量悬浮颗粒和气泡超过某一范围的液体;反之多普勒法 USF 只能用于测量含有一定异相的液体。

②外夹装换能器的 USF 不能用于衬里或结垢太厚的管道,以及不能用于衬里(或锈层)与内管壁剥离(若夹层夹有气体会严重衰减超声信号)或锈蚀严重(改变超声传播路径)的管道。

③多普勒法 USF 多数情况下测量精度不高。

④国内生产现有品种不能用于管径小于 DN 25mm 的管道。

习题 10

10 - 1 超声波有哪些传播特性?

10 - 2 超声波发生器种类及其工作原理是什么?它们各自的特点是什么?

10 - 3 应用超声波传感器探测工件时,为什么要在探头与工件接触处要有一层耦合剂?

10 - 4 根据已学过的知识设计一个超声波探伤实用装置(画出原理框图),并简要说明它探伤的工作过程。

第 11 章 核辐射传感器

本章要点

- 核辐射概念；
- 放射源的种类及应用
- 核辐射探测器的结构、工作原理
- 核辐射探测器的应用

11.1 概 述

核辐射传感器是核辐射检测仪表的重要组成部分。它是利用放射性同位素在蜕变成另一元素时发出射线来进行测量的。利用核辐射可以精确、迅速、自动、非接触、无损检测各种参数，如线位移、角位移、板料厚度、覆盖层厚度、探伤、密闭容器的液位、转速、流体密度、强度、温度、流量、材料的成分等。核辐射传感器包括放射源、探测器以及电信号转化电路等。

11.2 核辐射及其性质

众所周知，各种物质都是由一些最基本的物质所组成。人们称这些最基本的物质为元素。组成每种元素的最基本单元就是原子，每种元素的原子都不是只存在一种。具有相同的核电荷数 Z 而有不同的中子数 N 的原子所构成的元素称同位素。假设某种同位素的原子核在没有外力作用下，自动发生衰变，衰变中释放出 α 射线、 β 射线、 γ 射线、X 射线等，这种现象称为核辐射。而放出射线的同位素称为放射性同位素，又称放射源。

实验表明，放射源的强度是随着时间按指数定理而减低的，即

$$J = J_0 e^{-\lambda t} \quad (11-1)$$

式中： J_0 ——开始时的放射源强度；

J ——经过时间为 t 以后的放射源强度；

λ ——放射性衰变常数。

放射性同位素种类很多，由于核辐射检测仪表对采用的放射性同位素要求它的半衰期比较长（半衰期是指放射性同位素的原子核数衰变到一半所需要的时间，这个时间又称为放射性同位素的寿命），且对放射出来的射线能量也有一定要求，因此常用的放射性同位素只有 20 种左右，例如 Sr^{90} （锶）、 Co^{60} （钴）、 Cs^{137} （铯）、 Am^{241} （镅）等。

下面就核辐射中使用的主要射线及性质作说明。

11.2.1 α 射线

放射性同位素原子核中可以发射出 α 粒子。 α 粒子的质量为 4.002775u （原子质量单

位),它带有正电荷,实际上即为氦原子核,这种 α 粒子流通常称作 α 射线。放射出 α 粒子后同位素的原子序数将减少两个单位而变为另一个元素。一般 α 粒子具有40~100MeV的能量,平均寿命为几微秒到 10^{10} 年。它从核内射出的速度为20km/s, α 粒子的射程长度在空气中为几厘米到十几厘米。

α 射线通过气体时,使其分子或原子的轨道电子产生加速运动,如果此轨道电子获得足够大的能量,就能脱离原子成为自由电子,从而产生一对由自由电子和正离子组成的离子对,这种现象称为电离。如在相互作用中,轨道电子获得的能量还不足以使它脱离原子成为自由电子,仅使电子从低能级跃迁至较高能级,则称这种相互作用为激发。 α 离子在穿经物质时,由于激发和电离,损失其动能,最后停滞在物体之中,与其中两个电子结合,成为中性的氦原子。一般说来,其电离效应较激发效应显著。

α 粒子在物质中运动时会改变运动方向,这种现象称为散射。由于散射效应,按原来方向进行的 α 粒子的数目将减少,但远小于电离和激发效应引起的 α 粒子的数目的减少。

在检测技术中, α 射线的电离效应、透射效应和散射效应都有应用,但以电离效应为主,用 α 粒子来使气体电离比其他辐射强得多。

11.2.2 β 射线

β 粒子的质量为0.000549u,带一个单位的电荷。它所带的能量为100keV~几兆电子伏特。 β 粒子的运动速度均较 α 粒子的运动速度快很多,在气体中的射程可达20m。

和 α 粒子一样, β 粒子在穿经物质时,会使组成物质的分子或原子发生电离,但与 α 射线相比 β 射线的电离作用较小。由于 β 粒子的质量比 α 粒子小很多,因此更易被散射。 β 粒子在穿经物质时,由于电离、激发、散射和激发次级辐射等作用,使 β 粒子的强度逐渐衰减,衰减情况大致服从如下的指数规律:

$$J = J_0 e^{-\mu h} \quad (11-2)$$

式中: J_0 和 J —— β 粒子穿经厚度为 h 、密度为 ρ 的吸收体前后的强度;

μ ——线性吸收系数。

β 射线与 α 射线相比,透射能力大,电离作用小。在检测中主要是根据 β 辐射吸收来测量材料的厚度、密度或重量,根据辐射的反射来测量覆盖层的厚度,利用 β 粒子具有较大的电离能力来测量气体流的。

11.2.3 γ 射线

原子核从不稳定的高能激发态跃迁到稳定的基态或较稳定的低能态,并且不改变其组成过程称为 γ 衰变(或称 γ 跃迁)。发生 γ 跃迁时所放射出的射线称 γ 射线或 γ 光子。对于放射性同位素核衰变时放射的 γ 射线,或者内层轨道电子跃迁时发射的X射线,它们和物质作用的主要形式为光电效应。当一个光子和原子相碰撞时,将其能量全部交给某一轨道电子,使它脱离原子,光子则被吸收,这种现象称为光电效应。光电效应也伴随有次级辐射产生。当 γ 射线通过物质时,由于发生光电等效应的结果,它的强度将减弱,它也遵循如式(11-2)所示的指数衰减规律。

与X射线相比, γ 射线的吸收系数小,它透过物质的能力最大,在气体中的射程为几百米,并且能穿透几十厘米的固体物质,其电离作用最小。在测量仪表中,根据 γ 辐射穿透力

强这一特性来制作探伤仪、金属厚度计和物位计等。

11.3 核辐射探测器

核辐射探测器又称核辐射接收器，它是核辐射传感器的重要组成部分。核辐射探测器的作用是将核辐射信号转换成电信号，从而探测出射线的强弱和变化。由于射线的强弱和变化与测量参数有关，因此它可以探测出被测参数的大小及变化。这种探测器的工作原理或者是根据在核辐射作用下某些物质的发光效应，或者是根据当核辐射穿过它们时发生的气体电离效应。

当前常用的核辐射探测器有：电离室、正比计数管、盖革 - 弥勒计数管、闪烁计数器和半导体探测器等。

11.3.1 电离室

电离室是利用射线对气体的电离作用而设计的一种辐射探测器，它的重要部分是两个电极和充满在两个电极间的气体。气体可以是空气或某些惰性气体。电离室的形状有圆柱体和方盒状。

如图 11 - 1 所示，在电离室两侧放置相互绝缘的电极板，电极间加上适当电压，放射线进入电极间的气体中，在核辐射的作用下，电离室中的气体介质即被电离，离子沿着电场的作用线移动，这时在电离室的电路中产生电离电流。核辐射强度越大，在电离室产生的离子对越多，产生的电流亦越大。电流 I 与两个电极间所加的电压 U 的关系曲线如图 11 - 2 所示（曲线 1、2 和 3 分别代表不同的辐射强度下的特性曲线）。图中线段 OU_1 称为线性段，在这一线段上，当电压不大时，电离室中的离子的移动速度亦不大，有部分离子在移动时就重新复合，而只有余下的部分离子能够到达电极上。电极上电压愈高，离子移动速度越快，离子复合就愈为减少，电流就会增加。线段 U_1U_2 称为饱和段，在这段上的工作电压很大，所以实际上全部生成的离子都能到达电极上。此时电流将与所加电压无关。一般电离室工作在特性曲线的饱和段，其输出电流正比于射到电离室上的核辐射强度。

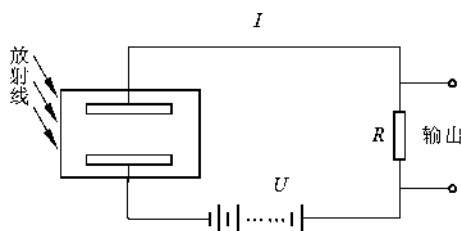


图 11 - 1 电离室结构示意图

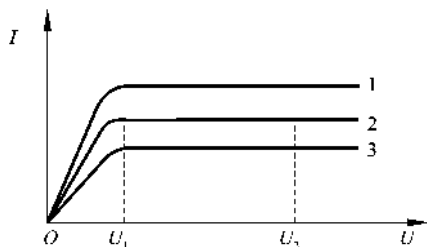


图 11 - 2 电离室的特性曲线

电离室内所充气体的压力、极板的大小和两极间的距离对电离电流都有较大的影响，例如增大气体压力或增大电极面积都会使电离电流增大，电离室的特性曲线也将向增大电离电流的方向移动。

在核辐射检测仪表中,有时用一个电离室,有时用两个电离室。为了使两个电离室的特性一样,以减少测量误差,通常设计成差分电离室,如图 11-3 所示。在高电阻上流过的电流为两个电离室收集的电流之差,这样可以避免高电阻等放大器、环境温度等变化而引起的测量误差。

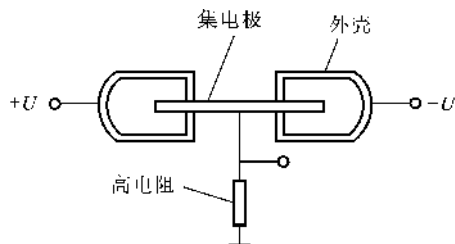


图 11-3 差分电离室

电离室主要用来探测 α 、 β 粒子。在同样条件下,进入电离室的 α 粒子比 β 粒子所产生的电流大 100 多倍。利用电离室测量 α 、 β 粒子时,其效率可以接近 100%,而测量 γ 射线时,则效率很低。这是因为 γ 射线没有直接电离的本领,它是靠从电离室的壁上打出二次电子,而二次电子起电离作用,因此, γ 射线的电离室必须密闭。一般 γ 电离室的效率只有 1% ~ 2%。

11.3.2 正比计数管

正比计数管的结构如图 11-4 所示。它是由圆筒形的阴极和作为阳极的中央芯线组成的,内封有稀有气体、氮气、二氧化碳、氢气、甲烷、丙烷等气体。当放射线射入使气体产生电离时,由于在芯线近旁电场密度高,电子碰撞被加速,在气体中获得足够的能量,碰撞其他气体分子和原子而产生新的离子对;此过程反复进行而被放大,人们将此过程称为气体放大。放大作用仅限于芯线近旁,所以可得到与放射线的入射区域无关的一定的放大倍数,由于放大而产生的阳离子迅速离开气体放大区域而产生输出脉冲。输出脉冲的大小正比于因放射线入射而产生电子、正离子对的数目,而电子、正离子对数正比于气体吸收的放射线的能量。因此,正比计数管可以探测入射放射线的能量。

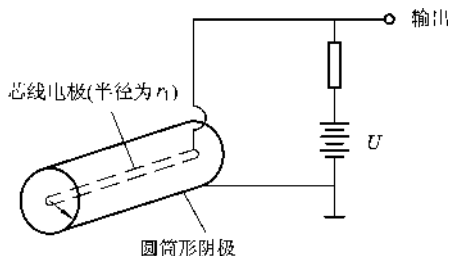


图 11-4 正比计数管的结构模型

正比计数管大多数是圆柱形或者球形、半球形。其阳极很细,阴极直径较大,这主要是为了在外加电压较小的情况下,使阳极附近仍能有很强的电场,以便有足够大的气体放大倍数。

正比计数管可以在很宽的能量范围内测定入射粒子的能量,能量分辨率相当高,分辨时间很短,并且可作快速计数。

11.3.3 盖革 - 弥勒计数管

盖革 - 弥勒计数管也是根据射线对气体的电离作用而设计的辐射探测器。它与电离室不同的地方主要在于工作在气体放电区域,具有放大作用。其结构如图 11-5 所示。计数管以金属圆筒为阴极,以筒中心的一根钨丝或钼丝为阳极,筒和丝之间用绝缘体隔

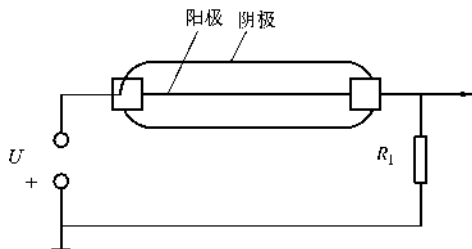


图 11-5 盖革 - 弥勒计数管

开。计数管内充有氩、氦等气体。为了便于密封,计数管常用玻璃作外壳,而阴极用金属或石墨涂覆于玻璃表面,内部或在外壳内用金属筒作阴极。

在盖革-弥勒计数管中,阴极和阳极间施加比计数管高的电压。 X 射线、 α 射线、 β 射线入射使产生比正比计数管激烈的气体放大,原离子所在区域沿中央丝极传播到整个计数管内。由于电子漂移速度很快,很快地被收集,于是在中央丝极周围形成一层正离子,称为正离子鞘。正离子鞘的形成使阳极附近的电场变弱,直到不再能产生离子的增殖,此时原始电离的放大过程就停止了。放大过程停止后,在电场作用下,正离子鞘向阴极移动,给出一个与正离子鞘的总电荷有关,而与原始电离无关的脉冲输出。在第一次放大过程停止以及电压脉冲出现后,计数管并不回到原始的状态。由于正离子鞘到达阴极时得到一定的动能,所以正离子也能从阴极中打出次级电子。同时由于正离子鞘到达了阴极,中央阳极电场已恢复,因此这些次级电子又能引起新的离子增殖,像原先一样再产生离子鞘,再产生电压脉冲,造成所谓连续放电现象。为了克服这个问题,必须采取特殊的方法使放电猝灭。猝灭放电的方法有两种:一种是采用猝灭电路,用来降低中央丝极的电压,使其降低到发生碰撞电离所需电压以下;另一种方法是在计数管中放入少量猝灭性气体。这种自猝灭型计数管又可分为两种:一种是充惰性气体和少量酒精、乙醚或石油醚的蒸气,称为有机管;另一种是管内充惰性气体和卤素气体,称为卤素管。

盖革-弥勒计数管由于有气体放大作用,所产生的电流比电离室的离子流大好几千倍,因此它不需要高电阻,其负载电阻一般不超过 $1M\Omega$,输出的脉冲一般为几伏到几十伏。图 11-6 为计数管的特性曲线,在一定的核辐射照射下,当增加二极管间的电压时,在一定范围内只能增加脉冲的幅度 U ,而计数率 N 只有微弱的增加。图中 ab 段对应的曲线称为计数管的坪。 J_1 、 J_2 代表入射的核辐射强度,且 $J_1 > J_2$ 。由图可知,在外电压 U 相同的情况下,入射的核辐射强度越强,盖革-弥勒计数管内产生的脉冲数 N 越多。计数管所加电压由所加气体决定,卤素计数管为 $280 \sim 400V$,有机计数管为 $800 \sim 1000V$ 。

11.3.4 闪烁计数器

物质受放射线的作用而被激发,在由激发态跃迁到基态的过程中,发射出脉冲状的光的现象称为闪烁现象。能产生这样发光现象的物质称为闪烁体。闪烁计数器先将辐射能变为光能,然后再将光能变为电能而进行探测,它由闪烁体和光电倍增管两部分组成,如图 11-7 所示。

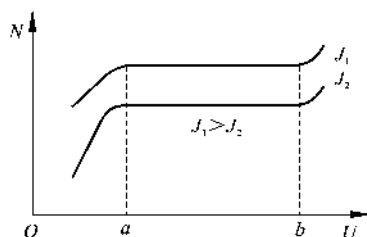


图 11-6 计数管的特性曲线

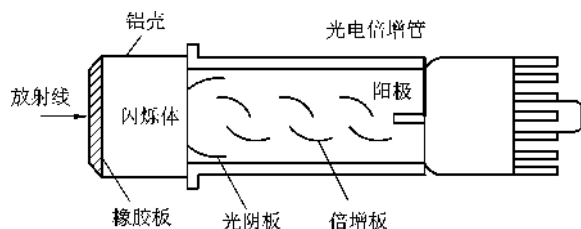


图 11-7 闪烁计数器

闪烁晶体的种类很多，按化学组成成分可分为有机和无机两大类，按物质形态分则可分为固态、液态和塑料等类型。通常使用固态闪烁体，其中有银激活的硫化锌 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 、铊激活的碘化钠 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 、铊激活的碘化铯 $\text{CsI}(\text{Tl})$ 、金激活的碘化锂 $\text{LiI}(\text{Au})$ 等。有机闪烁体中应用最广的有蒽、芪、三联苯和萘等。通常使用的物质列于表 11 - 1。

表 11 - 1 主要闪烁晶体及检测对象

	材料	检测对象
无机材料	$\text{NaI}(\text{Tl 掺杂})$	γ 射线
	$\text{CsI}(\text{Tl})$	$\alpha \beta \gamma$
	$\text{CsI}(\text{Na})$	$\alpha \beta \gamma$
	$\text{LiI}(\text{Eu})$	α
	$\text{ZnS}(\text{Ag})$	α
	$\text{CaFz}(\text{Eu})$	X β
玻璃		$\alpha \beta \gamma$
气体	Xe	荷电离子
	Kr	荷电离子
	Ar	荷电离子
	He	荷电离子
有机材料		$\alpha \beta \gamma$ 高速中性离子
		$\alpha \beta \gamma$ 高速中性离子
		$\alpha \beta$ (低能) 高速中性离子

光电倍增管的作用为接收闪烁体发射的光子将其变为电子，并将这些电子倍增放大为可测量的脉冲。光电倍增管可以分为电场聚焦型和无聚焦型两类。在每一类中，按照次阴极的几何形状及排列方式的不同又分为几种。放射性同位素检测仪表中常用的 GDB—19 和 GDB—10 分别为直线聚焦型和百叶窗式无聚焦型。光电倍增管的基本特性有光特性、阳极的电流电压特性、光阴极的光谱响应等。入射到光阴极上的光通量 F 与阳极电流 i_a 之间的关系称为此光电倍增管的光特性，一般光电倍增管的 i_a 与光通量 F 成正比。在一定的光通量 F 中，光电倍增管的阳极电流与工作电压的关系是电流随工作电压的增加而急剧上升，上升到某一值后达到饱和。光谱响应是指光阴极发射光电子的效率随入射光波长而变化的关系。在组合闪烁计数器时，光电倍增管的光谱灵敏度范围必须和闪烁晶体发出的光谱相配合。

闪烁计数器负载电阻上产生脉冲，其幅度一般为零点几伏到几伏，较盖革 - 弥勒计数管的输出脉冲的幅度为小。闪烁计数器的输出脉冲与入射粒子的能量成正比，它探测 γ 射线的效率在 20% ~ 30% 以上，比盖革 - 弥勒计数管和离子室高很多；它探测 α 、 β 射线的效率接近 100%。由于闪烁体中一次闪烁的持续时间很短，故最大计数率一般为 $10^6 \sim 10^8$ 数量级。若输出采用电流法，则记录的辐射强度不受限制。

11.3.5 半导体探测器

半导体探测器是近年来迅速发展起来的一种射线探测器。我们知道荷电粒子—入射到固体中就和固体中的电子产生相互作用并失去能量而停止。入射到半导体中的荷电粒子在此过程产生电子和空穴对。而 X 射线或 γ 射线由于光电效应、康普顿散射、电子对生成等而产生二次电子，此高速的二次电子经过与荷电粒子的情况相同的过程而产生电子和空穴。若取出这些生成的电荷，可以将放射线变为电信号。

就半导体而言，主要使用的是 Si 和 Ge，对 GaAs、CdTe 等材料也进行了研究。目前，开发的半导体传感器有 PN 结型传感器、表面势垒型传感器、锂漂移型传感器、非晶硅传感器等。

11.4 核辐射传感器的应用

11.4.1 核辐射厚度计

透射式厚度计如图 11 - 8 所示，它是利用射线穿透物质的能力来制成的检测仪表。它的特点是放射源和核辐射探测器分别置于被测物体的两侧；射线穿过被测物体后射入核辐射探测器。由于物质的吸收，使得射入核辐射探测器的射线强度降低，降低的程度和物体的厚度等参数有关。如前所述，射到探测器的透射射线强度 J 和物体厚度 t 的关系为：

$$J = J_0 e^{-\mu \rho t} \tag{11 - 3}$$

式中： ρ ——被测材料的密度；
 μ ——被测材料对所用射线的质量吸收系数；
 J_0 ——没有被测物体时射到探测器处的射线强度。

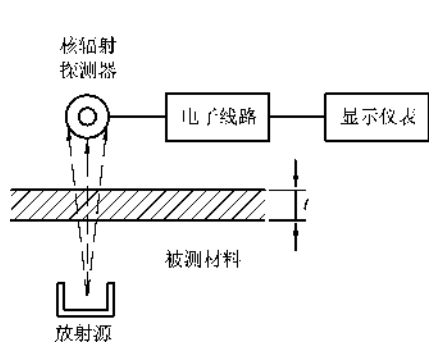


图 11 - 8 透射式厚度计

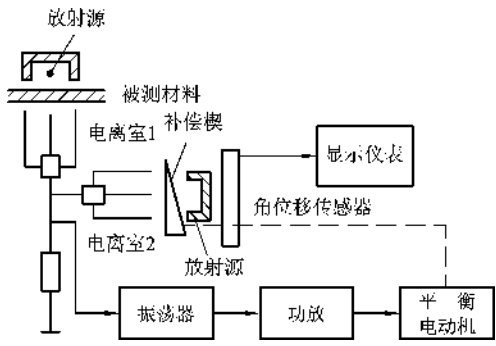


图 11 - 9 零位法透射式厚度计

对于一定的放射源和一定的材料就有一定的 μ 和 ρ ，则测出 J 和 J_0 ，即可计算确定该材料的厚度 t 。放射源一般用 β 、X 或 γ 射线。图 11 - 9 所示为零位法透射式厚度计。放射源的 β 射线穿过被测物体射入测量电离室 1， β 射线也穿过补偿楔射入补偿电离室 2。这两个电离室接成差式电路，流过电阻上的电流为两个电离室的输出电流之差。该电流差在电阻上产生的电压降，使振荡器振荡，变为交流输出，在经放大后加在平衡电动机上，使电动机正转或反转，带动补偿楔移动，直到两个电离室接收的射线强度相等，使电阻上电压降等于零为止；

根据补偿楔的移动量可测知厚度。

还可以用散射法测量厚度。散射法是指利用核辐射被物体后向散射的效应制成的检测仪器。这种仪器的特点是放射源和核辐射探测器可置于被测物质的同一侧，射入的被测物质中的射线，由于和被测物质的相互作用，而使得其中的一部分射线反向折回，并进入位于与放射源同侧的核辐射探测器而被测量。射到核辐射探测器处的后向散射射线强度与放射源至被测物质的距离，以及与被测物质的成分、密度、厚度和表面状态等因素有关，因此改变其中一个参数而保持其他参数不变，则测得的射线强度将仅随该参数而变化。利用这种方法可测量薄板的厚度、覆盖层厚度、材料的成分、密度等参数。这种方法的优点为非接触测量，且不损坏被测物质。

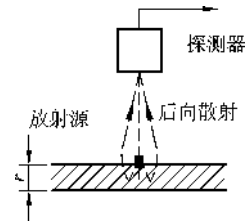


图 11 - 10 β 散射式厚度测量

后向散射测量厚度的示意图如图 11 - 10 所示。射线强度与散射体厚度之间的关系式为：

$$J_{散} = J_{饱和} (1 - e^{-k\rho t}) \tag{11 - 4}$$

式中： t 和 ρ ——散射体的厚度和密度；

$J_{散}$ 和 $J_{饱和}$ ——厚度为 t 和厚度为“无限大”时的后向散射 β 射线强度；

k ——与射线能量有关的系数。

11.4.2 辐射式物位计

可以应用 γ 射线检测物位。测量物位的方法有很多，图 11 - 11 给出了其中一些典型的应用实例。

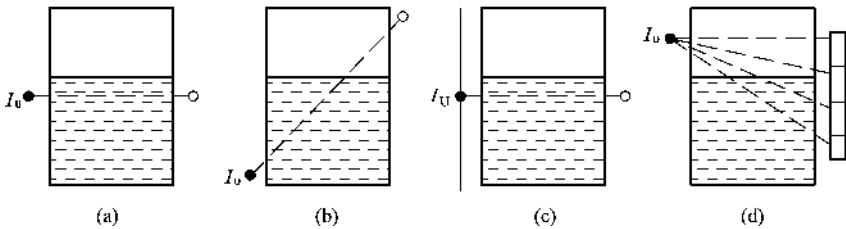


图 11 - 11 辐射式物位计的测量原理框图

图 11 - 11(a)是定点测量的方法。将射线源 I_0 与探测器安装在同一平面上，由于气体对射线的吸收能力远比液体或固体弱，因而当物位超过和低于此平面时，探测器接收到的射线强度发生急剧变化。可见，这种方法不能进行物位的连续测量。

图 11 - 11(b)是将射线源和探测器分别安装在容器的下部和上部，射线穿过容器中的被测介质和介质上方的气体后到达探测器。显然，探测器接收到的射线强弱与物位的高度有关。这种方法可对物位进行连续测量，但是测量范围比较窄（一般为 300 ~ 500mm），测量准确度较低。

为了克服图 11 - 11(b)存在的上述缺点，可采用线状的射线源，如图 11 - 11(c)；或采用线状的探测器，如图 11 - 11(d)。虽然对射线源或探测器的要求提高了，但这两种方法既可

以适应宽量程的需要,又可以改善线性特性。

11.4.3 X 荧光材料成分分析仪

射到物质上的核辐射所产生的次级辐射称为次级荧光射线(如特征 X 射线),荧光射线的能谱和强度与物质的成分、厚度及密度等有关。利用荧光效应可以检测覆盖层厚度、物质成分、密度和固体颗粒的粒度等参数。荧光式材料成分分析仪具有分析速度快,精度高,灵敏度高,应用范围广,成本低,易于操作等优点,已经得到广泛应用。

能量色散 X 射线荧光成分分析仪是根据初级射线从样品中激发出来的特征 X 射线荧光对材料成分进行定性分析和定量分析的。即初级射线从样品中激发出来的多种能量的各组成元素的特征 X 射线射入探测器,该探测器输出一个和射入其中的 X 射线能量成正比的脉冲,这些脉冲输给脉冲高度分析器、定标器和显示记录仪器,给出以 X 射线荧光能量为横坐标的能谱曲线,由能谱曲线的峰位置及峰面积的大小,就可以求出样品中含有什么元素及它的质子含量。

能量色散型 X 射线荧光分析仪的探头部分如图 11 - 12 所示。它由放射源、探测器、样品台架孔板、滤光片和安全屏蔽快门等组成。在 X 荧光分析仪中,低能/射线源和 X 射线源用得最多。常用的探测器有正比计数管、闪烁计数管和锂漂移硅半导体探测器。要根据具体的场合合理地选用。

放射源、样品和探测器间的几何布置也是一个重要问题。如图 11 - 13 所示,将放射源表面中心点和样品表面中心点的连线方向与表面中心点的连线方向间的夹角当作散射角 θ ,散射角 θ 的选择取决于所用射线能量、探测器形式和所测样品。选择合适的散射角可以使能谱曲线上的散射峰和散射光子的逃逸峰对所测荧光峰的干扰最小。最常用的散射角为 $90^\circ \sim 180^\circ$,这种布置可使探头结构简单、尺寸较小、使用方便。

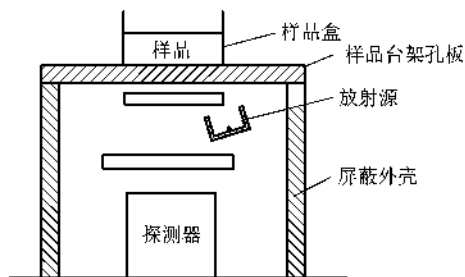


图 11 - 12 X 射线荧光分析仪的探头示意图

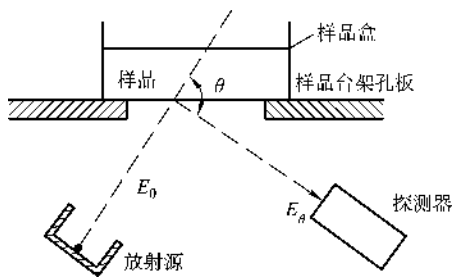


图 11 - 13 散射角示意图

习题 11

- 11 - 1 什么是放射性同位素? 辐射强度与什么有关系?
- 11 - 2 试说明 α 、 β 、 γ 射线的特性。
- 11 - 3 试说明用 β 射线测量物体厚度的原理。
- 11 - 4 试用核辐射原理设计一个物体探伤仪,并说明其工作原理。

第 12 章 数字式传感器

本章要点

- 码盘式传感器(Encoder Sensor)的结构、工作原理及应用
- 光栅式传感器(Grating Transducer)的结构、工作原理及应用
- 磁栅式传感器(Magnetic Grating Transducer)的结构、工作原理及应用
- 感应同步式传感器(Inductive Sync transducer)的结构、原理及应用
- 频率式传感器(Frequency Transducer)的结构、原理及应用

12.1 概 述

随着微型计算机的迅速发展,对信号的检测、控制和处理必然进入数字化阶段。前面介绍的传感器大部分是模拟式传感器,与计算机等数字系统配接时,必须经过 A/D 转换器将模拟信号转换成数字信号,才能输入到计算机等数字系统。这样增加了系统的复杂性,而且 A/D 转换器的转换精度受到位数和参考电压精度的限制,系统的总精度也将受到限制。

数字式传感器(Digital Sensor)能够直接将非电量转换为数字量,这样就不需要 A/D 转换,直接用数字显示。数字式传感器与模拟式传感器相比有以下优点:测量精度和分辨率高,稳定性好,抗干扰能力强,便于与微机接口,适宜远距离传输等。

数字式传感器的发展历史不长,到目前为止它的种类还不太多。它有两种类型:一种是以编码方式产生代码型的数字信号;另一种是输出计数型的离散脉冲信号。

代码型数字传感器又称编码器,它输出的信号是数字代码,每一个代码对应一个输入量的值。这类传感器有绝对式光电编码器和接触式码盘等;计数型数字传感器又称脉冲数字传感器,它输出的脉冲数与输入量成正比。这类传感器有增量式光电脉冲编码器、光栅传感器等。

数字式传感器可以测量线位移,也可以测量角位移,还可用来计数。如计数型传感器加上计数器可用来检测输送带上的产品个数,数字式传感器在自动检测和自动控制中得到了日益广泛的应用。

目前常用的数字式传感器有五大类:码盘式传感器、光栅式传感器、磁栅式传感器、感应同步式传感器、频率输出式传感器。

12.2 码盘式传感器(Encoder Sensor)

将机械转动的模拟量(位移)转换成以数字代码形式表示的电信号,这类传感器称为编码器。编码器主要分为脉冲盘式和码盘式编码器两种。编码器以其高精度、高分辨率和高可靠性被广泛用于各种位移的测量。

脉冲盘式编码器的输出是一系列脉冲,需要一个计数系统对脉冲进行加减(正向或反向旋转时)累计计数,一般还需要一个基准数据即零位基准,才能完成角位移测量。

码盘式传感器又称绝对编码器,它可将角度直接转换为数字编码,它在任意位置都可给出与位置相对应的固定数字码输出,能方便地与数字系统及计算机连接。

按编码器的结构形式,码盘式传感器有接触式、光电式、电磁式等几种。后两种为非接触式编码器。非接触式编码器具有非接触、体积小和寿命长,且分辨率高的特点。三种编码器相比较,光电式编码器的性价比最高,它作为精密位移传感器在自动测量和自动控制技术中得到了广泛的应用。在此重点介绍码盘式传感器。

12.2.1 接触式编码器

1. 结构

接触式编码器由码盘和电刷组成。码盘利用制造印刷电路板的工艺在铜箔板上制作某种码制图形(如 8421 码、循环码等)的盘式印刷电路板。电刷是一种活动触头结构,在外界力的作用下,旋转码盘是电刷与码盘接触处就产生某种码制的某一数字编码输出。

2. 工作原理

图 12-1(a)是一个四位 8421 码制的编码器的码盘示意图。涂黑处为导电区,将所有导电区连接到高电位(“1”);空白处为绝缘区,为低电平(“0”)。四个电刷沿某一径向安装,四位二进制码盘上有四圈码道,每个码道有一个电刷,电刷经电阻接地。当码盘转动某一角度后,电刷就输出一个数码;码盘转动一周,电刷就输出 16 种不同的四位二进制数码。

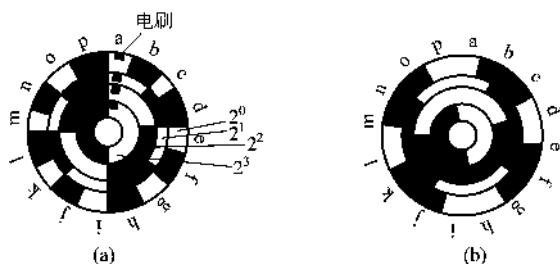


图 12-1 接触式四位二进制码盘
(a)8421 码的码盘;(b)四位循环码的码盘

由此可知,二进制码盘所能分辨的旋转角度为 $\alpha = 360^\circ / 2^n$ 。如 $n = 4$,则 $\alpha = 22.5^\circ$ 。位数越多,分辨的角度越小。当然分辨的角度越小,对码盘和电刷的制作和安装要求越严格。当 n 多到一定位数后,一般为 $n > 8$,这种接触式码盘将难以制作。另外,8421 码制的码盘,在正、反向旋转时,因为电刷安装不精确引起的机械误差会产生非单值误差。

3. 提高精度的途径

接触式编码器提高精度的方法主要是采用循环码盘和扫描法。

采用 8421 码制码盘因为电刷安装不精确容易引起机械误差,从而产生非单值误差。解决这一问题的方法之一就是采用循环码盘。循环码盘结构如图 12-1(b)所示,其编码如表 12-1 所示。循环码的特点是相邻两个数码之间只有一位变化,即使制作和安装不准,产生

的误差最多也只是一个比特，这就是可以避免因制作或安装不精确而带来的非单值误差的主要原因。因此，采用循环码盘比采用 8421 码盘的精度高。

表 12 - 1 电刷在不同位置时对应的数码

角度	电刷位置	二进制码(B)	循环码(R)	十进制数
0	a	0000	0000	0
1	b	0001	0001	1
2	c	0010	0011	2
3	d	0011	0010	3
4	e	0100	0110	4
5	f	0101	0111	5
6	g	0110	0101	6
7	h	0111	0100	7
8	i	1000	1100	8
9	j	1001	1101	9
10	k	1010	1111	10
11	l	1011	1110	11
12	m	1100	1010	12
13	n	1101	1011	13
14	o	1110	1001	14
15	p	1111	1000	15

扫描法有 V 扫描、U 扫描和 M 扫描三种。它是在最低位码道上安装一个电刷，其他位码道上均安装两个电刷：一个电刷位于被测位置的前边，称为超前电刷；另一个放在被测位置的后边，称为滞后电刷。这种方法的原理是根据二进制码的特点设计的。8421 码制的二进制码是从最低位向高位逐级进位的，最低位变化最快，最高位逐渐减慢。当某一个二进制的第 i 位是 1 时，该二进制码的第 i + 1 位和前一个数码的 i + 1 位状态是一样的，故该数码的第 i + 1 位真正输出要从滞后电刷读出。相反，当某一个二进制码的第 i 位是 0 时，该数码的第 i + 1 位的输出要从超前电刷读出。

除此之外，还可以利用码盘组合来提高其分辨率。比如可采用双盘编码器，它的特点是由两个分辨率较低的码盘组合成为高分辨率的编码器。

12.2.2 光电式编码器

接触式编码器的分辨率受电刷的限制不可能很高。而光电式编码器由于使用了体积小、易于集成的光电元件代替机械的接触电刷，其测量精度和分辨率能达到很高的水平。所以在自动控制和测量技术中得到了极其广泛的应用。

1. 结构和工作原理

光电式码盘的最大特点是非接触式，它主要由安装在旋转轴上的编码圆盘（码盘）、窄缝以及安装在圆盘两边的光源和光敏元件等组成。基本结构如图 12 - 2 所示。码盘由光学玻璃制成，其上刻有许多同心码道，每位码道上都有按一定规律排列的透光和不透光部分，即亮区和暗区。码盘构造如图 12 - 3 所示，当光源将光投射在码盘上时，转动码盘，通过亮区的光线经窄缝后，由光敏元件接收。光敏元件的排列与码道一一对应，对应于亮区和暗区的光敏元件输出的信号，前者为“1”，后者为“0”。当码盘旋至不同位置时，光敏元件输出信号的组合，反映出按一定规律编码的数字量，代表了码盘轴的角位移大小。

对于图 12 - 3 所示的 6 位二进制码盘，最内圈码盘一半透光，一半不透光，最外圈一共分成 $2^6 = 64$ 个黑白间隔。每一个角度方位对应于不同的编码。例如零位对应于 000000（全黑）；第 23 个方位对应于 010111。这样在测量时，只要根据码盘的起始和终止位置，就可以确定角位移，而与转动的中间过程无关。一个 n 位二进制码盘的最小分辨率，即能分辨的角度为 $\sigma = 360^\circ / 2^n$ ，一个 6 位二进制码盘，其最小分辨的角度 $\alpha \approx 5.6^\circ$ 。

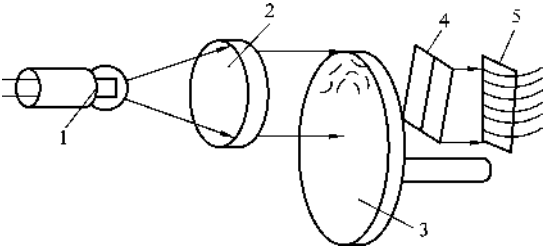


图 12 - 2 光电式编码器示意图

1—光源；2—透镜；3—码盘；4—光电元件组；5—光栅

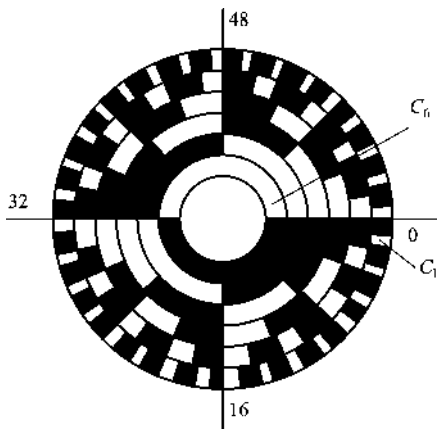


图 12 - 3 六位二进制码盘构造

2. 提高分辨率的方法

光电编码器的精度和分辨率取决于光电码盘的精度和分辨率。提高光电式编码器测量精度和分辨率的方法有常规的增加码盘刻线数和光学分解技术（即插值法）两种。目前已生产径向线宽为 6.7×10^{-8} rad 的码盘，其精度达到了 1×10^{-8} 。显然比接触式的码盘编码器精度要高出很多数量级。

采用光学分解插值技术提高分辨率的光电编码器如图 12 - 4 所示，图中码盘在 14 位的码道上增加了 1 条专用附加码道。附加码道的扇形区的形状和光学的几何结构与前十四位有所差异，并且使它与光学分解器的多个光敏元件相配合，产生较为理想的正弦波输出。通过平均电路进一步处理，消除码盘的机械误差，从而获得更理想的正弦或余弦信号。附加码道输出的正弦或余弦信号在插值器中按不同的系数叠加在一起，形成多个相移不同的正弦信号输出。各正弦信号再经过零比较器转换为一系列脉冲，从而细分了附加码道的光电元件输出

的正弦信号，于是产生了附加低位的有效数位。图 12 - 4 所示的 19 位光电码盘器的插值器产生 16 个正弦波信号。每两个正弦信号之间的相位差为 $\pi/8$ ，从而在 14 位编码器的最低有效数位间隔内插入了 32 个精确等分点，即相当于附加 5 位二进制的输出，使编码器的分辨率从 2^{-14} 提高到 2^{-19} ，角位移小于 $3''$ 。可见，利用光学分解技术插值法使得光电编码器的测量精度和分辨率更高。

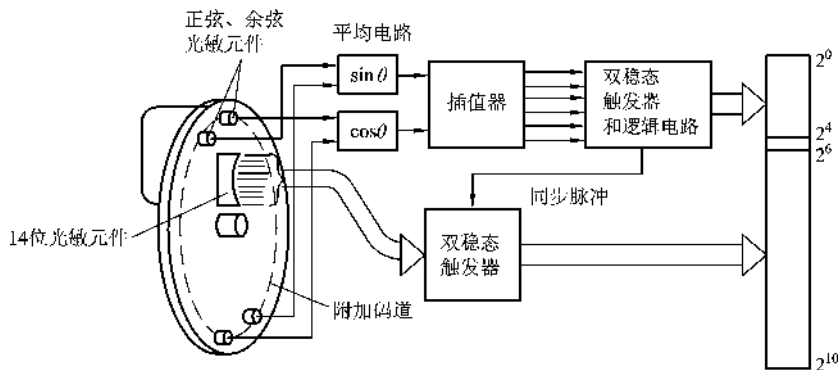


图 12 - 4 用插值法提高分辨率的光电编码器

光电码盘的优点是没有触点磨损，因而允许高速运转。缺点是其结构较为复杂，光源寿命较短。

12.2.3 电磁式编码器

电磁式编码器是近几年发展起来的新型传感器。它主要由磁鼓与磁阻探头组成，它的构成如图 12 - 5 所示。

多极磁鼓常用的有两种：一种是塑磁磁鼓，在磁性材料中混入适当的粘合剂，注塑成形；另一种是在铝鼓外面覆盖一层粘结磁性材料而制成。

多极磁鼓产生的空间磁场由磁鼓的大小和磁层厚度决定，磁阻探头由磁阻元件通过微细加工技术而制成，磁阻元件电阻值仅和电流方向成直角的磁场有关，而与电流平行的磁场无关。

电磁式编码器的码盘上按照一定的编码图形，做成磁化区（导磁率高）和非磁化区（导磁率低），采用小型磁环或微型马蹄形磁芯作磁头，磁环或磁头紧靠码盘，但又不与码盘表面接触。每个磁头上绕两组绕组，原边绕组用恒幅恒频的正弦信号激励，副边绕组用作输出信号，副边绕组感应码盘上的磁化信号转化为电信号，其感应电势与两绕组匝数比和整个磁路的磁导率有关。当磁头对准磁化区时，磁路饱和，输出电压很低，如磁头对准非磁化区，它就类似于变压器，输出电压会很高，因此可以区分状态“1”和“0”。几个磁头同时输出，就形成了数码。

电磁式编码器有精度高，寿命长，工作可靠等特点，对环境条件要求较低，但成本较高。

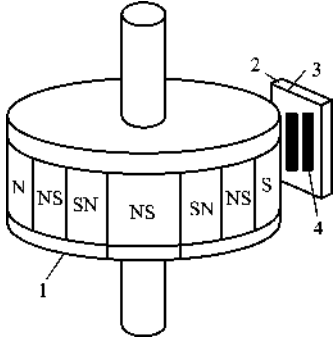


图 12 - 5 电磁式编码器的基本结构

1—磁鼓；2—气隙；3—磁敏传感部件；4—磁敏电阻

12.3 光栅式传感器(Grating Transducer)

光栅传感器广泛用于测量位移、角度、长度、速度、加速度、振动等物理量。

12.3.1 光栅的结构

在镀膜玻璃上均匀刻制许多有明暗相间、等间距分布的细小条纹(又称为刻线),这就是光栅,图 12-6 为透射光栅的示意图。图中 a 为栅线的宽度(不透光), b 为栅线间宽(透光), $a+b=W$ 称为光栅的栅距(也称光栅常数)。通常 $a=b=W/2$,也可刻成 $a:b=1.1:0.9$ 。目前常用的光栅每毫米刻成 10、25、50、100、250 条线条。

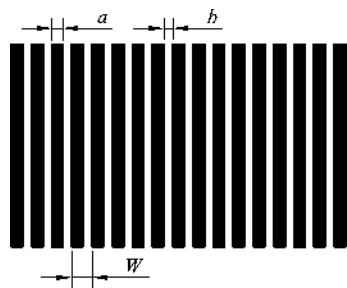


图 12-6 透射光栅示意图

12.3.2 光栅的工作原理

把两块栅距相等的光栅(光栅 1、光栅 2)面相对叠合在一起,中间留有很小的间隙,并使两者的栅线之间形成一个很小的夹角 θ ,如图 12-7 所示,这样就可以看到在近于垂直栅线方向上出现明暗相间的条纹,这些条纹叫莫尔条纹。由图 12-7 可见,在 $d-d$ 线上,两块光栅的栅线重合,透光面积最大,形成条纹的亮带,它是由一系列四棱形图案构成的;在 $f-f$ 线上,两块光栅的栅线错开,形成条纹的暗带,它是由一些黑色叉线图案组成的。因此莫尔条纹的形成是由两块光栅的遮光和透光效应形成的。

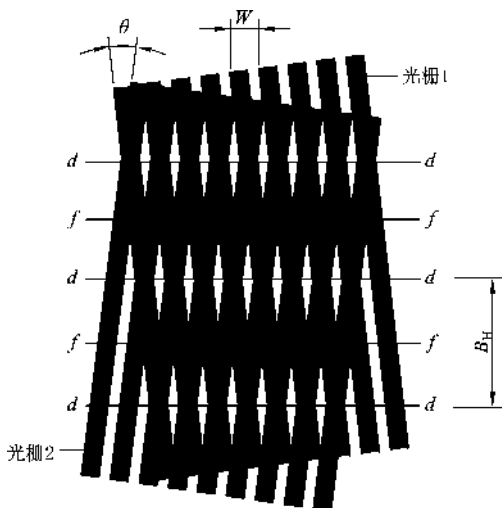


图 12-7 光栅莫尔条纹的形式

莫尔条纹测量位移具有以下三个方面的特点。

(1)位移的放大作用:当光栅每移动一个光栅栅距 W 时,莫尔条纹也跟着移动一个条纹宽度 B_H ,如果光栅作反向移动,条纹移动方向也相反。莫尔条纹的间距 B_H 与两光栅线纹夹角 θ 之间的关系为:

$$B_H = \frac{W}{\sin \frac{\theta}{2}} \approx \frac{W}{\theta} \quad (12-1)$$

θ 越小, B_H 越大,这相当于把栅距 W 放大了 $1/\theta$ 倍。例如 $\theta=0.1^\circ$, 则 $1/\theta \approx 573$, 即莫尔条纹宽度 B_H 是栅距 W 的 573 倍,这相当于把栅距放大了 573 倍,说明光栅具有位移放大作用,从而提高了测量的灵敏度。

(2)莫尔条纹移动方向：如光栅 1 沿着刻线垂直方向向右移动时，莫尔条纹将沿着光栅 2 的栅线向上移动；反之，当光栅 1 向左移动时，莫尔条纹沿着光栅 2 的栅线向下移动。因此根据莫尔条纹移动方向就可以对光栅 1 的运动进行方向判断。

(3)误差的平均效应：莫尔条纹由光栅的大量刻线形成，对线纹的刻画误差有平均抵消作用，能在很大程度上消除短周期误差的影响。

12.3.3 光栅传感器的测量原理

光栅传感器作为一个完整的测量装置包括光栅读数头、光栅数显表两大部分。

光栅读数头利用光栅原理把输入量(位移量)转换成相应的电信号；光栅数显表是实现细分、辨向和显示功能的电子系统。

1. 光栅读数头

光栅读数头主要由标尺光栅、指示光栅、光路系统和光电元件等组成。标尺光栅的有效长度即为测量范围。指示光栅比标尺光栅短得多，但两者一般刻有同样的栅距，使用时两光栅互相重叠，两者之间有微小的空隙。标尺光栅一般固定在被测物体上，且随被测物体一起移动，其长度取决于测量范围，指示光栅相对于光电元件固定。光栅读数头的结构示意图见图 12-8。

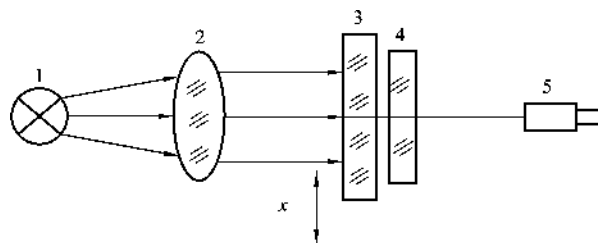


图 12-8 光栅读数头结构示意图

1—光源；2—透镜；3—标尺光栅；4—指示光栅；5—光电元件

前面分析的莫尔条纹是一个明暗相间的带。从图 12-7 看出，两条暗带中心线之间的光强变化是从最暗到渐暗，到渐亮，一直到最亮，又从最亮经渐亮到渐暗，再到最暗的渐变过程。主光栅移动一个栅距 W ，光强变化一个周期，若用光电元件接收莫尔条纹移动时光强的变化，则将光信号转换为电信号，接近于正弦周期函数，如图 12-9 所示，若以电压输出，即：

$$u_o = U_o + U_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi x}{W}\right) \quad (12-2)$$

式中： u_o ——光电元件输出的电压信号； U_o ——输出信号中的平均直流分量； U_m ——输出信号中正弦交流分量的幅值。由式(12-2)可见，输出电压反映了位移量的大小。

2. 光栅数显表

光栅读数头实现了位移量由非电量转换为电量，位移是向量，因而对位移量的测量除了确定大小之外，还应确定其方向。为了辨别位移的方向，进一步提高测量的精度，以及实现数字显示的目的，必须把光栅读数头的输出信号送入数显表做进一步的处理。光栅数显表由整形放大电路、细分电路、辨向电路及数字显示电路等组成。

(1)辨向原理

采用图 12 - 8 中一个光电元件的光栅读数头, 无论主光栅作正向还是反向移动, 莫尔条纹都作明暗交替变化, 光电元件总是输出同一规律变化的电信号, 此信号不能辨别运动方向。为了能够辨向, 需要有相位差为 $\pi/2$ 的两个电信号。图12 - 10 为辨向的工作原理和它的逻辑电路。在相隔 $B_H/4$ 间距的位置上, 放置两个光电元件 1 和 2, 得到两个相位差 $\pi/2$ 的电信号 u_1 和 u_2 (图中波形是消除直流分量后的交流分量), 经过整形后得两个方波信号 u'_1 和 u'_2 。

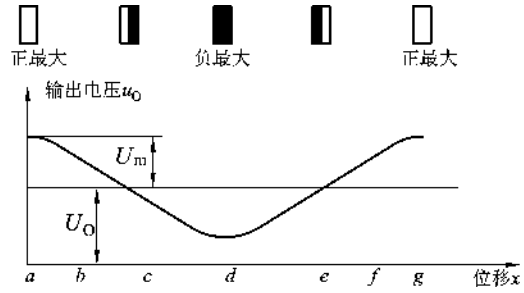


图 12 - 9 光栅位移与光强、输出电压的关系

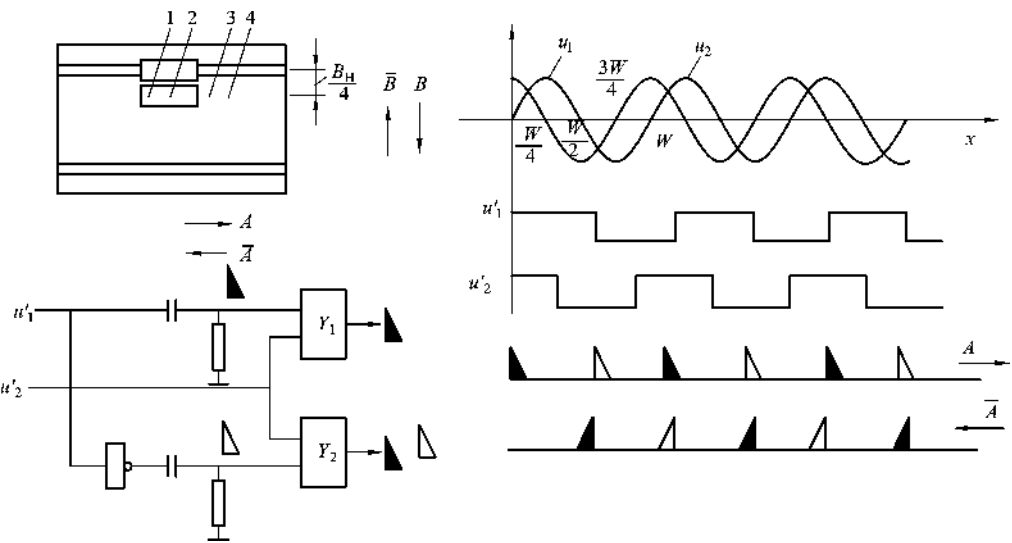


图 12 - 10 辨向逻辑工作原理

1、2—光电元件；3、4—光栅

A(A)—光栅移动方向；B(B)—对应的莫尔条纹移动方向

从图中波型的对应关系可看出, 当光栅沿 A 方向移动时, u'_1 经微分电路后产生的脉冲, 正好发生在 u'_2 的“1”电平时, 从而经 Y_1 输出一个计数脉冲; 而 u'_1 经反相并微分后产生的脉冲, 则与 u'_2 的“0”电平相遇, 与门 Y_2 被阻塞, 无脉冲输出。在光栅沿 A 方向移动时, u'_1 的微分脉冲发生在 u'_2 为“0”电平时, 与门 Y_1 无脉冲输出; 而 u'_1 的反相微分脉冲则发生在 u'_2 的“1”电平时, 与门 Y_2 输出一个计数脉冲, 则说明 u'_2 的电平状态作为与门的控制信号, 来控制不同的移动方向时, u'_1 所产生的脉冲输出。这样就可以根据运动方向正确地给出加计数脉冲或减计数脉冲, 再将其输入可逆计数器, 实时显示出相对于某个参考点的位移量。

(2)细分技术

由前面讨论的光栅测量原理可知, 以移过的莫尔条纹的数量来确定位移量, 其分辨率为

光栅栅距。为了提高分辨率和测量比栅距更小的位移量，可采用细分技术。所谓细分，就是在莫尔条纹信号变化一个周期内，发出若干个脉冲，以减小脉冲当量，如一个周期内发出 n 个脉冲，即可使测量精度提高到 n 倍，而每个脉冲相当于原来栅距的 $1/n$ 。由于细分后计数脉冲频率提高到了 n 倍，因此也称之为 n 倍频。细分方法有机械细分和电子细分两类。下面介绍电子细分法中常用的四倍频细分法，这种细分法也是许多其他细分法的基础。

由上述辨向原理可知，在相差 $B_H/4$ 位置上安装两个光电元件，得到两个相位相差 $\pi/2$ 的电信号。若将这两个信号反相就可以得到 4 个依次相差 $\pi/2$ 的信号，从而可以在移动一个栅距的周期内得到 4 个计数脉冲，实现 4 倍频细分。也可以在相差 $B_H/4$ 位置上安放 4 个光电元件来实现 4 倍频细分。

这种方法不可能得到高的细分数，因为在一个莫尔条纹的间距内不可能安装更多的光电元件。但它有一个优点，就是对莫尔条纹产生的信号波型没有严格要求。

12.4 磁栅式传感器

磁栅传感器(Magnetic Grating Transducer)由磁栅(即磁盘)、磁头和检测电路组成。磁栅用于记录一定功率的正弦或矩形信号；磁头的作用是读写磁栅上的磁信号，并转换为电信号。

12.4.1 磁栅的结构

磁栅结构如图 12 - 11 所示，磁栅是由不导磁的金属带作基体，在基体上均匀涂覆一层薄磁膜，然后用写磁带方式由磁头写上节距为 W 的正弦或短形波。图 12 - 11(a)为尺形长磁栅；12 - 11(b)为带形长磁栅；12 - 11(c)为同轴形长磁栅；12 - 11(d)为圆磁栅。图 12 - 12 为磁栅剖面结构图。

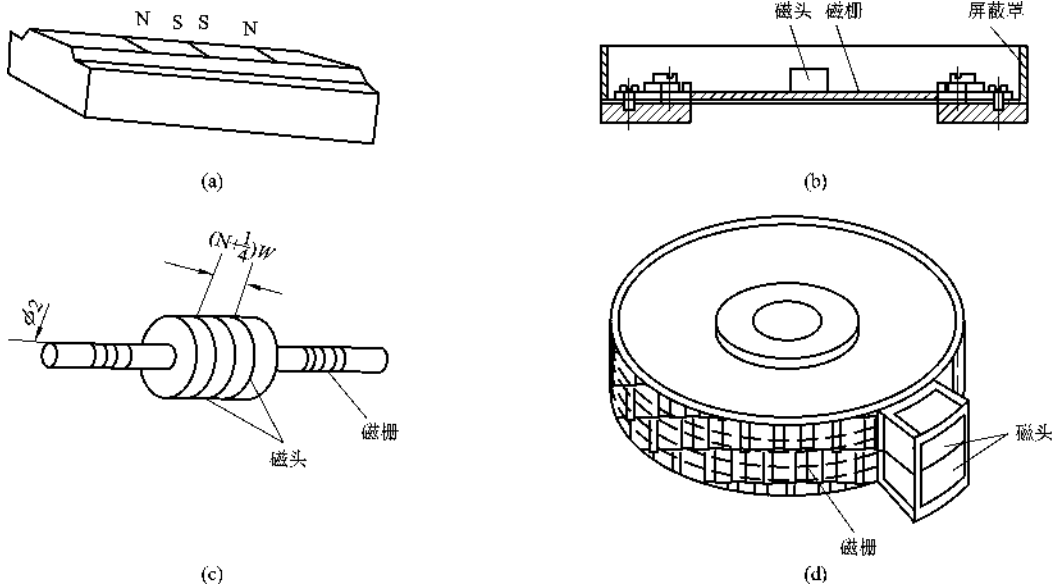


图 12 - 11 几种常用的磁栅结构

(a)尺形长磁栅；(b)带形长磁栅；(c)同轴形长磁栅；(d)圆磁栅

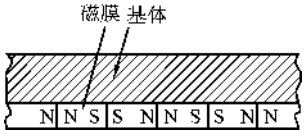


图 12-12 磁栅剖面结构

12.4.2 磁栅传感器的工作原理

磁栅传感器的磁头一般分为静态和动态两种，由读取信号的方式决定。

静态磁头的结构如图 12-13(a)所示，静态磁头与磁栅间无相对运动，一般由若干个磁头串行连接构成多间隙静态磁头体。在 H 铁芯上绕激磁线圈 L_1 和输出线圈 L_2 ，当在激磁绕组上施加交变激磁信号时，H 铁芯的中间部分在每个周期内两次被激磁信号作用产生磁通导致饱和。此时因铁芯的磁阻很大，磁栅上的信号磁通不能通过磁头，使得输出绕组无感应电势输出。只有当激磁信号两次过零时，铁芯不饱和，磁栅上的信号磁通才能通过铁芯在输出绕组上产生感应电势。输出电压可用下式表示：

$$u = U_m \sin \frac{2\pi x}{W} \sin \omega t \quad (12-3)$$

式中： U_m ——幅值系数； x ——磁头与磁栅的相对位移； W ——磁栅的节距； ω ——激磁信号的角频率。

动态磁头仅有一组输出绕组，如图 12-13(b)。动态磁头只有相对运动才有信号输出，输出信号的幅值随运动速度而变化。为了保证一定幅值的输出，通常规定磁头以一定速度运行。因此，动态磁头不适合长度测量。当磁头以一定速度运行时，磁头输出一定频率的正弦信号，且在 N-N 处信号达到正向峰值，在 S-S 处信号达到负向峰值。

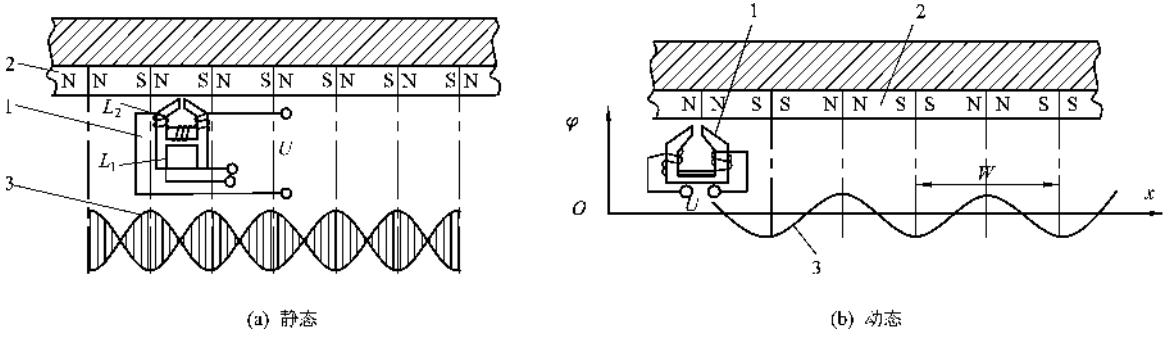


图 12-13 静、动态磁头的工作原理
1—磁头；2—磁栅；3—输出波形

12.4.3 磁栅传感器的测量原理

实际应用中，磁栅传感器测量常采用鉴幅法和鉴相法两种。

1. 鉴幅法

一般采用两个多间隙静态磁头来读取磁栅上的磁信号。若两磁头的间距为 $(n \pm 1/4)W$ (n 为正整数), 那么两激磁信号的相差为 $\pi/4$ 。

由前述内容可知, 两磁头输出信号相差 $\pi/2$ 。若两磁头的激磁绕组加同相的正弦激磁信号, 则两磁头的输出信号为:

$$u_1 = U_m \sin \frac{2\pi x}{W} \sin \omega t, u_2 = U_m \cos \frac{2\pi x}{W} \cos \omega t$$

经滤除高频载波后, 得到与位移量 x 成正比的信号为:

$$U'_1 = U_m \sin \frac{2\pi x}{W} \quad (12-4)$$

$$U'_2 = U_m \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (12-5)$$

式中, U'_1 、 U'_2 是与位移成正比的正弦信号, 经过适当处理后便可得到位移量, 这就是所谓的鉴幅法。

2. 鉴相法

若激磁绕组上施加相位差为 $\pi/4$ 的正弦激励信号或将输出信号移相 $\pi/2$, 则两磁头输出信号为 $u_1 = U_{1m} \sin \frac{2\pi x}{W} \cos \omega t, u_2 = U_{2m} \cos \frac{2\pi x}{W} \sin \omega t$ 。将 u_1 与 u_2 叠加, 在 $U_{1m} = U_{2m} = U_m$ 的条件下:

$$u_1 + u_2 = U_m \sin \left(\frac{2\pi x}{W} + \omega t \right) \quad (12-6)$$

上式表示输出信号是一个幅值不变, 但相位与磁头、磁栅相对位移量有关的信号, 这就是鉴相法。

图 12-14 给出了常用鉴相法的测量电路框图。

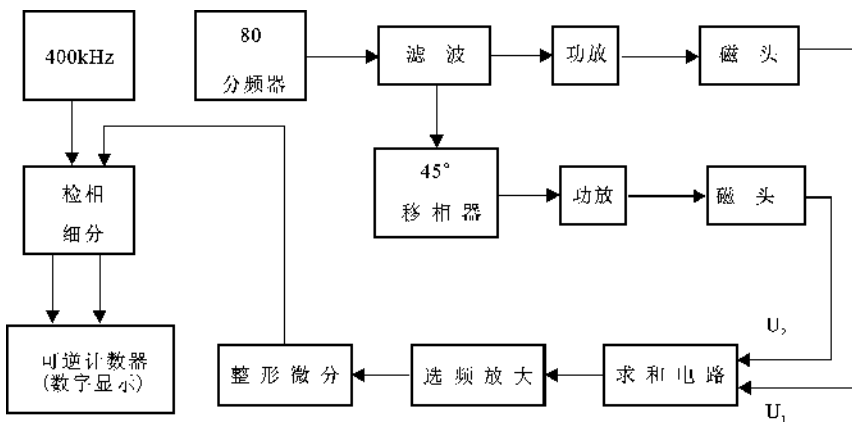


图 12-14 鉴相法的测量电路框

12.5 感应同步器(Inductive Sync Transducer)

感应同步器是一种多极感应元件,它主要用于测量线位移、角位移、转速、振动以及坐标镗床、铣床及其他机床的定位、数控和数显,也常用于雷达天线定位跟踪和某些仪表的分度装置等。感应同步器具有精度高、工作可靠、寿命长、抗干扰能力强等特点。

11.5.1 感应同步器的结构和类型

感应同步器主要有直线式同步器和旋转式同步器两大类。直线同步器又分为标准型、窄型和带型。它具有精度高、可扩展、用途广等特点。旋转式同步器具有精度高、极数多、易于误差补偿等特点,且精度与极数成正比。

1. 直线感应同步器

直线感应同步器的绕组结构如图 12 - 15 所示,它由定尺和滑尺两部分组成。定尺和滑尺均用绝缘粘合剂将铜箔粘贴在基板上(一般为钢板),再用光刻技术或其他方法将铜箔板(厚度约为 1mm 左右)制成印刷电路形式的绕组,其截面结构如图 12 - 15(a)所示。定尺表面涂有耐切削液的保护层,绝缘表面贴有绝缘的铝箔,防止静电感应。在定尺长度为 250mm 的范围内均匀分布绕组和节距,其截面结构如图 12 - 15(b)所示。滑尺上分布有间断绕组,分为正弦和余弦两部分,且两绕组相差 90° 相角。两相绕组的中心线距为 $l_1 = \left(\frac{n}{2} + \frac{1}{4}\right)W_2$, n 为正整数,其截面结构如图 12 - 15(d)、(e)所示,两相绕组节距相同,均为 $W_1 = 2(a_1 + b_1)$ 。

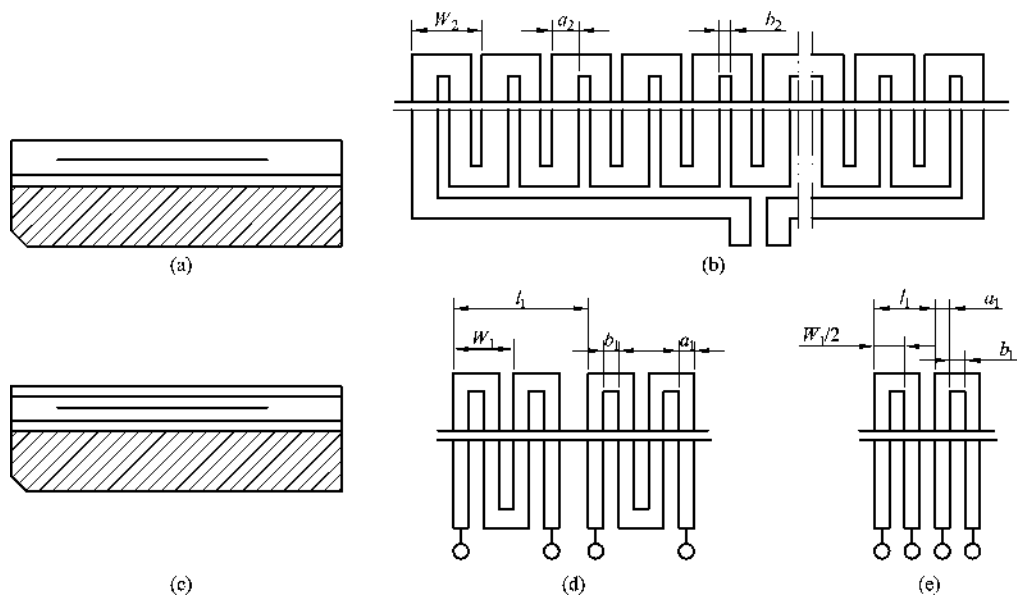


图 12 - 15 直线感应同步器的绕组结构及截面结构

(a)定尺;(b)定尺绕组;(c)滑尺;(d)W形滑尺绕组;(e)U形滑尺绕组

一般情况,定尺节距为 2mm(标准型),定尺绕组的导片宽度由下式决定:

$$\alpha_2 = \frac{nW_2}{\gamma} \quad (12-7)$$

式中： γ ——谐波次数；

n ——正整数；显然， $\alpha_2 < \frac{W_2}{2}$ 。

根据式(12-7)，可以选取导片宽度来消除谐波次数。

滑尺的节距 $W_1 = W_2$ ，其绕组的导片宽度按式(12-7)来选择。

2. 旋转式感应同步器

旋转式感应同步器由定子和转子两部分组成，它们成圆片形状，如图 12-16 所示。定子、转子分别相当于直线式感应同步器的定尺和滑尺。目前，旋转式感应同步器的直径一般为 50mm、76mm、178mm 和 302mm 等几种。径向导体极数有 360、720 和 1080 几种。转子绕转轴旋转，通常采用导电环直接耦合输出或者通过耦合变压器将转子初级感应电势经气隙耦合到定子次级上输出。

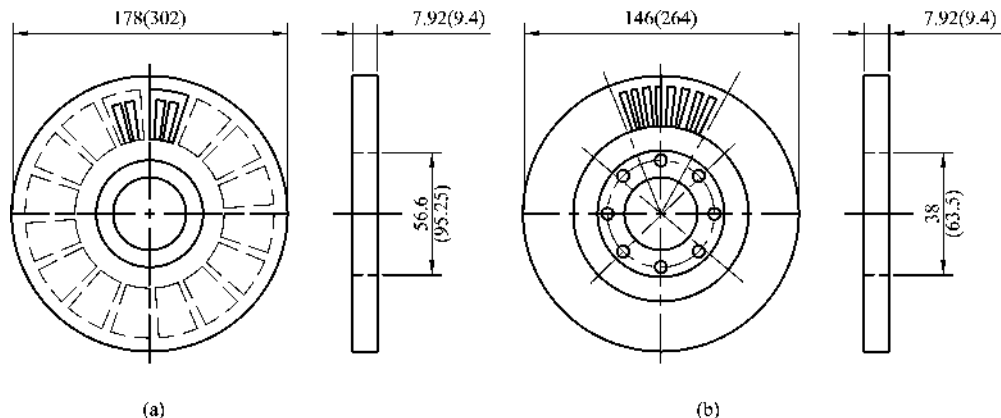


图 12-16 旋转式感应同步器外形结构
(a)定子；(b)转子

旋转式感应同步器在极数相同的情况下，同步器的直径越大，其精度越高。

12.5.2 感应同步器的工作原理

图 12-17 为感应同步器的工作原理图，在使用时，感应同步器的定尺和滑尺相互平衡，且其间有一定的气隙，如图 12-17(a)所示。定尺固定不动，滑尺相对定尺移动。当滑尺上的正弦绕组和余弦绕组分别以 1~10kHz 的正弦电压激磁时，在定尺绕组上将产生同频率的感应电势。定尺上的感应电势的大小与激磁频率、激磁电流、两绕组间的间隙以及两绕组的相对位置有关。如果在滑尺的余弦绕组上加正弦激磁电压，图 12-17(b)可说明感应同步器的感应电势与位置的关系。

当滑尺位移到 A 点时，余弦绕组左右侧的两块导片内的电流在定尺中产生的感应电势之和为零。当滑尺继续平移时，感应电势逐渐增大，直到 B 点时，即滑尺移到 1/4 节距位置，耦合磁通最大，感应电势也最大。当滑尺继续右移，定尺绕组中感应电势随耦合磁通减小而

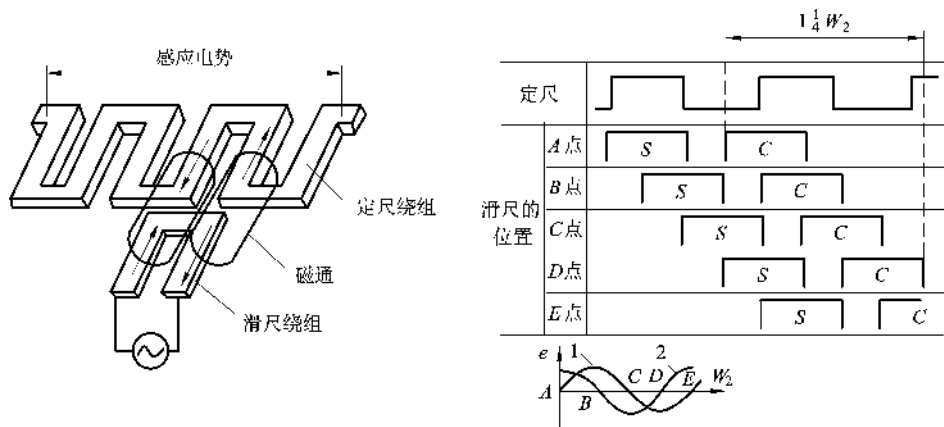


图 12 - 17 感应同步器的工作原理

1—由 C 激磁的感应电势曲线；2—由 S 激磁的感应电势曲线

减小，直至 $1/2$ 节距时，感应电势变为 0。滑尺再右移，定尺中的感应电势开始增大，电流方向改变。当滑尺移到 $3/4$ 节距(D 点)时，定尺中的感应电势达到负的最大。在移动一个整节距(E 点)时，两绕组的耦合状态又回到初始位置，定尺中的感应电势为 0。这样，定尺上的感应电势随滑尺相对定尺的移动呈现周期性变化。

同理，可得到滑尺正弦绕组上加余弦激磁的定子感应电势，如图 12 - 17(b)曲线 2 所示。所加激磁电压一般为 $1 \sim 2\text{V}$ ，过大的激磁电压将引起太大的激磁电流，使得温升过高，导致其工作的不稳定。

12.6 频率式传感器

频率式传感器(Frequency Transducer)是能直接将被测非电量转换成与之相对应的且便于处理的频率信号的检测器件。频率式传感器一般有两种类型：一种是利用振荡器实现将被测量的变化转变为振荡器的振荡频率。常用的振荡器有 RC 振荡电路和石英晶体振荡电路两种。另一种是利用机械振动系统实现，通过其固有振动频率的变化来反映被测参数。

12.6.1 频率式传感器的工作原理

1. RC 振荡式频率传感器

温度—频率传感器就是 RC 振荡式频率传感器，电路如图 12 - 18 所示。该电路由运算放大器和反馈网络文氏电桥正弦波发生器利用热敏电阻 R_T 测量温度，且 R_T 作为 RC 振荡器的一部分。当外界温度 T 变化时，电阻也随之变化。RC 振荡器的振荡频率可由下式决定：

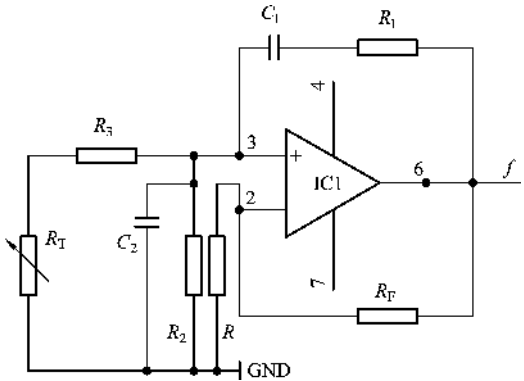


图 12 - 18 RC 振荡式频率传感器

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{R_3 + R_T + R_2}{C_1 C_2 R_1 R_2 (R_3 + R_T)}}} \quad (12-8)$$

式中与温度 T 的关系为：

$$R_T = R_0 e^{B(T - T_0)} \quad (12-9)$$

式中 B 为热敏电阻的温度系数； R_T 、 R_0 分别为 $T(K)$ 和 $T_0(K)$ 时的阻值。

电阻 R_2 、 R_3 的作用是改善其线性特性，流过 R_T 的电流应尽可能小，这样可以减小 R_T 的自身发热对测量精度造成的影响。

2. 弹性体频率传感器

任何弹性体在外界力的作用下就会有形变发生，只要外力克服阻力，弹性体就会产生一定的振荡频率，即固有振荡频率，弹性体频率传感器就是利用这一原理来测量有关物理量的。

设弹性物体的质量为 m ，弹性模量为 E ，材料刚度为 K ，则弹性体的初始固有频率 f_0 为：

$$f_0 = h \sqrt{\frac{EK}{m}} \quad (12-10)$$

式中 h 为与量纲有关的常量。

弹性体频率传感器有振弦式、振膜式和振筒式几种，下面以振弦式为例来介绍频率传感器的工作原理。

振弦张力频率传感器包括振弦、磁铁、夹紧装置等三个主要部分，原理图如图 12-19 所示。将一根细的金属丝置于永久磁铁所产生的磁场内，振弦的一端固定，另一端与被测量物体的运动部分连接，并使振弦拉紧。作用于振弦上的张力就是传感器的被测量。

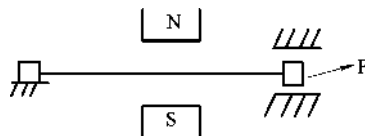


图 12-19 振弦张力频率传感器工作原理图

振弦的固有振动频率可用下式表达：

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\rho}} \quad (12-11)$$

$$F = A\sigma$$

式中： L ——振弦的有效长度；

ρ ——振弦的线密度， $\rho = \frac{m}{L}$ ， m 为其质量；

A ——弦的截面积；

σ ——弦的应力。

当振弦确定后， L 、 m 均为已知量，那么振弦的固有振荡频率应由张力 F 决定，即由其应力决定。因此，根据振弦的振动频率可以测量力和位移等物理量。

振弦的激振方式有连续激振和间歇激振两种，如图 12-20 所示。连续激振方式使用了两个电磁线圈，当振弦被激励后，接收线圈 1 产生感应电势，经放大后，正反馈线圈至激励线圈 2，以维持振弦的连续振荡。间歇激振方式应用了电磁铁，当激励电路产生脉冲电流给激励线圈后，电磁铁将振弦吸住。在激励脉冲电流为零时，电磁铁松开振弦，于是振弦随激励脉冲电流频率而产生振荡。为了克服阻尼作用对振弦振动的衰减，必须间隔一定时间激励一次。

振弦式传感器的输入—输出特性关系如图 12 - 21 所示，一般为非线性关系。为了得到线性输出，可以选取曲线中近似直线的一段，如 $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 。当应力 σ 在 $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 之间变化时，若振弦的振动频率为 $1 \sim 2\text{kHz}$ 左右，其非线性误差可小于 1%。除此之外，也可以用两根振弦构成差动式振弦传感器。通过测量两根振弦的频率差来表示应力，这样可以大大地减小传感器的温度误差和非线性误差。

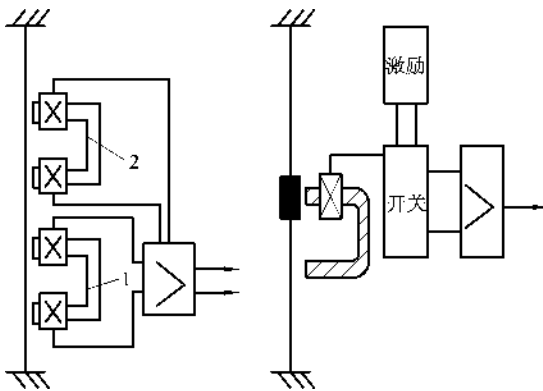


图 12 - 20 振弦激励方式原理图
(a)连续激励方式；(b)间歇激励方式

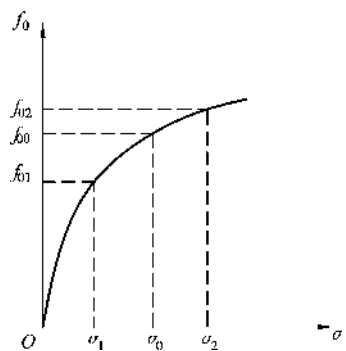


图 12 - 21 振弦式传感器的输入 - 输出特性

由于连续激励振弦容易疲劳，连续振荡产生热膨胀现象。因此尚需考虑振弦的热膨胀系数产生的温度误差。在实际使用时，究竟选用何种方式，要根据被测量的工作状态和要求而定。

12.6.2 频率式传感器的测量原理

图 12 - 22 所示为频率式传感器的测量原理框图。频率传感器已将被测非电量转换为频率信号，因此可用两种方式来测量，一种是测量其输出信号的频率；另一种是测量其周期。前者适用于振荡频率较高的情况，后者适用于振荡频率较低的情况。根据具体情况，也可自行设计测频或测时的专用电路。

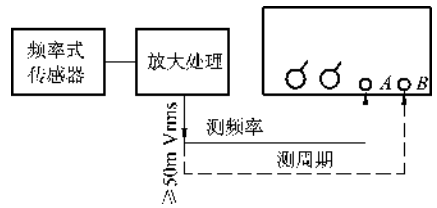


图 12 - 22 频率式传感器的测量原理框图

由图 12 - 22 电路测量频率和周期的原理，可得：

$$f_x = \frac{N_x}{T_G} \quad (12 - 12)$$

或：

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{1}{\tau N_0} \quad (12 - 13)$$

式中： N_x ——在闸门时间 T_G 内的被测信号； τ ——机内时钟脉冲(时基) f_0 的周期。

图 12 - 23 所示为频率传感器的测量方法及其波型图。

必须注意：当被测振荡频率低于所选用的通用计数器的内部石英晶体振荡器的频率(时钟频率)时，必须采用周期或时间间隔测量功能，或者采用等精度计数器，否则将会由于数字

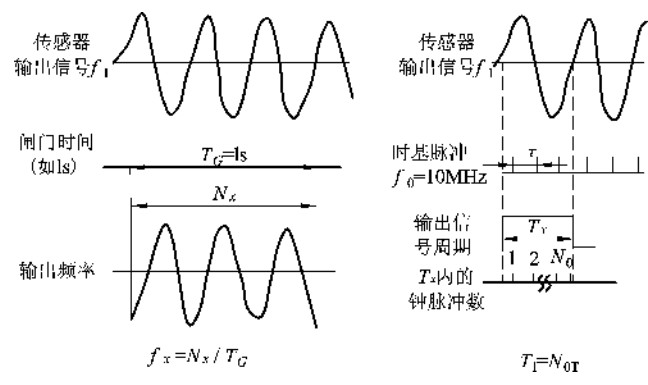


图 12-23 频率传感器的测量方法及其波形图
(a)测频波形图；(b)测周期波形图

仪器固有的 ± 1 误差而造成极大的测量误差。例如，传感器输出信号频率为 1Hz，若仍然采用测频方法测量，取测量闸门时间为 1s，测量结果可能会产生 100% 的误差。在这种情况下，为了提高测量精度，可以利用周期测量法或多周期测量法。

12.7 数字式传感器的应用

12.7.1 光电增量编码器在电脑绣花机中的应用

电脑绣花机是迄今为止缝纫设备中最先进、最复杂的机电一体化设备，绣花机在电脑控制下完成一切花样的缝绣动作。电脑和机头机械是绣机的主体，实现电脑对机头机械自动运行控制的主要部件之一就是光电增量编码器。

光电增量编码器在电脑绣花机中的作用主要有两个：一是确定机头针杆进针的位置；二是检测绣机的转速。

1. 绣花机控制信号的形成

电脑绣花机的入布、出布等信号的产生可采用如图 12-24 所示电路。

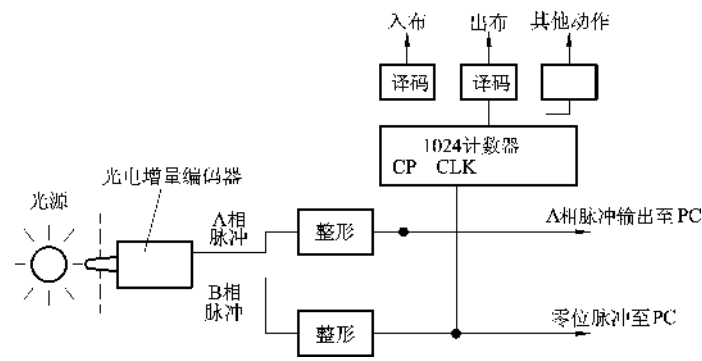


图 12-24 电脑绣花机控制信号产生电路

电脑绣花机通常采用每转输出 512 ~ 1024 个脉冲,转速 1000r/min,每转输出 1 个零位脉冲的光电编码器控制绣花机动作。例如,使用每转为 1024 个脉冲的增量编码器,需要将入布、出布等信号的相位转换成对应的脉冲数。根据图 12 - 24 的动作时间,入布对应第 492 个脉冲,出布对应第 654 个脉冲。光电编码器每旋转一圈,A 相能输出 1024 个脉冲,B 相输出 1 个脉冲,经过整形后,A 相脉冲加到计数器的 CLK 端。当分别记数到 492 和 654 个脉冲时,译码器分别输出入布和出布等译码信号。该信号经光电隔离后输出给电脑,电脑根据出布信号产生控制 X、Y 方向的步进电机动作。电脑在接收到入布、出布信号后,分别从内存中读取一条所必要的数据以及其他的控制动作信号。这样就可以控制绣花机的正常运转,使绣花机完成绣品的刺绣。

2. 刺绣机转速的测量

增量编码器除直接用于测量角位移外,还常用来测量转轴的转速,测量转速的方法有两种:一种是在给定的时间间隔内对编码器的输出脉冲进行计数,这种方法测量的是平均转速,测量原理框图见图 12 - 25(a)所示。例如,一个每转 $P = 720$ 个脉冲的光电编码器,若计数器的闸门时间为 1s,测得编码器的频率为 $f = \frac{N}{T} = 1440(\text{Hz})$,则其分辨率为 $\frac{1}{1440}$ 。若转速为 1200r/min,则分辨率可达 $\frac{1}{14400}$ 。因此,这种测量方法的分辨率随被测速度而变,测量精度取决于计数时间间隔。另一种方法是用编码器输出的脉冲周期作为计数器的门控信号,而计数脉冲则是计数器的时钟脉冲,时钟脉冲周期远小于编码器输出脉冲的周期。这种方法测量的是瞬时转速,图 12 - 25(b)为测量原理框图。例如,时钟频率为 1MHz,对于每转 100 个脉冲的编码器,在 100r/min 时,码盘每个脉冲周期为 0.006T 内,可获得 6000 个时钟脉冲的计数,即分辨率为 $\frac{1}{6000}$ 。显然,提高时钟信号频率可以提高分辨率。

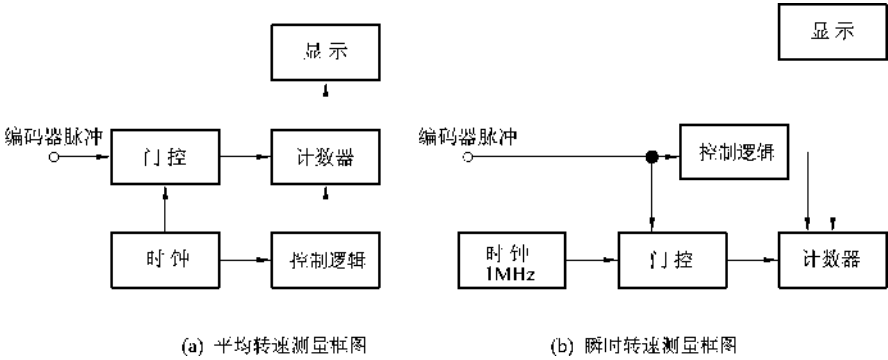


图 12 - 25 编码器测量转速框图

12.7.2 频率传感器在测温上的应用

利用热电偶和压控振荡器可以构成频率式温度测量系统,见图 12 - 26 所示。图中 BG_1 、 BG_2 构成晶体管放大电路, BG_3 单晶体管组成张弛振荡电路。当热电势 U_i 增

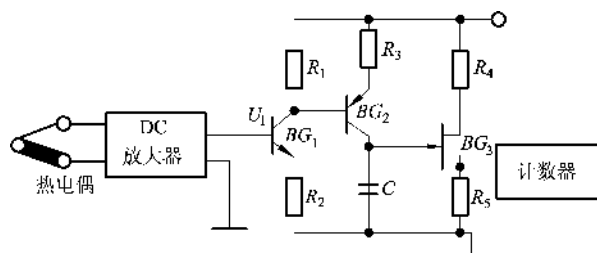


图 12 - 26 频率传感器测量温度

大时, BG_1 管的集电极电流 I_{C1} 增大, 使 BG_1 的集电极电位 U_{C1} 降低, 即 BG_2 的基极电位降低, 这相当于晶体管 BG_2 的输出电阻减小。同理, 当 U_i 减小时, BG_2 的输入电阻变大。因此, U_i 的变化, 改变了对电容的充电时间常数, 也就改变了输出脉冲的频率。

习题 12

- 12 - 1 数字式传感器有何特点? 它可分为哪几种类型?
- 12 - 2 如何实现提高光电码盘式传感器的精度和分辨率?
- 12 - 3 光栅传感器的组成及工作原理是什么?
- 12 - 4 什么是光栅的莫尔条纹? 莫尔条纹是怎样产生的? 它具有什么特点?
- 12 - 5 试述光栅传感器中莫尔条纹的辨向和细分的原理。
- 12 - 6 码盘式转角—数字传感器的工作原理是什么? 其基本组成部分有哪些?
- 12 - 7 三进制码与循环码各有何特点? 说明它们相互转换的原理。
- 12 - 8 一个 21 码道的循环码码盘, 其最小分辨率 θ 为多少? 若每一个 θ 所对应的圆弧长度至少为 0.01mm, 请问码盘直径有多大?
- 12 - 9 感应同步器有哪几种? 试述它们的工作原理。

第 13 章 其他传感器

本章要点

- 微波传感器种类、结构、工作原理及应用
- 各种超导传感器的结构、工作原理及应用
- 各种生物传感器的结构、工作原理及应用
- 各种机器人传感器的结构、工作原理及应用

13.1 微波传感器(Microwave Sensor)

微波是波长为 $1\text{mm} \sim 1\text{m}$ 的电磁波,可以细分为三个波段:分米波、厘米波、毫米波。微波既具有电磁波的性质,又不同于普通无线电波和光波的性质,是一种相对波长较长的电磁波。微波具有下列特点:定向辐射的装置容易制造;遇到各种障碍物易于反射;绕射能力差;传输特性好,传输过程中受烟雾、火焰、灰尘、强光的影响很小;介质对微波的吸收与介质的介电常数成比例,水对微波的吸收作用最强。

13.1.1 微波传感器及其分类

微波传感器就是利用微波特性来检测某些物理量的器件或装置。由发射天线发出微波信号,遇到被测物体时信号将被吸收或反射,使微波功率发生变化。若利用接收天线,接收到通过被测物或反射回来的微波信号,并将它转换成电信号,再经过信号处理即可显示被测量,从而实现微波的检测。

根据微波传感器的原理,可将其分为反射式和遮断式两类。

1. 反射式微波传感器

反射式微波传感器是通过检测被测物反射回来的微波功率或经过的时间间隔来测量被测量的对象。通常它可以测量物体的位置、位移、厚度等参数。

2. 遮断式微波传感器

遮断式微波传感器是通过检测接收天线收到的微波功率大小来判断发射天线与接收天线之间有无被测物体或被测物体的厚度、含水量等参数的。

13.1.2 微波传感器的组成

微波传感器通常由微波发射器(即微波振荡器)、微波天线及微波检测器三部分组成。

1. 微波振荡器及微波天线

微波振荡器是产生微波的装置。由于微波波长很短,即频率很高($300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$),要求振荡回路中具有非常微小的电感与电容,因此不能用普通的电子管与晶体管构成微波振荡器。构成微波振荡器的器件有调速管、磁控管或某些固态器件,小型微波振荡器也可以采

用体效应管。

由微波振荡器产生的振荡信号需要用波导管(管长为 10cm 以上,可用同轴电缆)传输,并通过天线发射出去。为了使发射的微波具有尖锐的方向性,天线要具有特殊的结构。常用的天线如图 13 - 1 所示,其中有喇叭形天线(图 13 - 1(a)(b))、抛物面天线(图 13 - 1(c)(d))、介质天线与隙缝天线等。

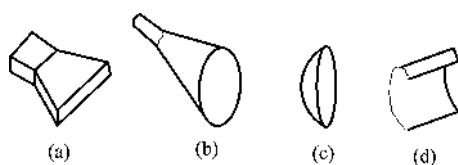


图 13 - 1 常用的微波天线

(a)扇形喇叭天线;(b)圆锥形喇叭天线;(c)旋转抛物面天线;(d)抛物柱面天线图

喇叭形天线结构简单,制造方便,可以看作是波导管的延续。喇叭形天线在波导管与空间之间起匹配作用,可以获得最大能量输出。抛物面天线使微波发射方向性得到改善。

2. 微波检测器

电磁波作为空间的微小电场变动而传播,所以使用电流 - 电压特性呈现非线性的电子元件作为探测它的敏感探头。与其他传感器相比,敏感探头在其工作频率范围内必须有足够快的响应速度。作为非线性的电子元件,在几兆赫以下的频率通常可用半导体 PN 结,而对于频率比较高的可使用肖特基结。在灵敏度特性要求特别高的情况下可使用超导材料的约瑟夫逊结检测器、SIS 检测器等超导隧道结元件,而在接近光的频率区域可使用由金属 - 氧化物 - 金属构成的隧道结元件。

微波的检测方法有两种,一种是将微波变化为电流的视频变化方式,另一种是与本机振荡器并用而变化为频率比微波低的外差法。

微波检测器性能参数有:频率范围、灵敏度 - 波长特性、检测面积、FOV(视角)、输入耦合率、电压灵敏度、输出阻抗、响应时间常数、噪声特性、极化灵敏度、工作温度、可靠性、温度特性、耐环境性等。

3. 微波传感器的特点

微波传感器作为一种新型的非接触传感器具有如下特点:

- ① 有极宽的频谱(波长为 1.0 mm ~ 1.0m)可供选用,可根据被测对象的特点选择不同的测量频率;
- ② 在烟雾、粉尘、水汽、化学气氛以及高、低温环境中对检测信号的传播影响极小,因此可以在恶劣环境下工作;
- ③ 时间常数小,反应速度快,可以进行动态检测与实时处理,便于自动控制;
- ④ 测量信号本身就是电信号,无须进行非电量的转换,从而简化了传感器与微处理器间的接口,便于实现遥测和遥控;
- ⑤ 微波无显著辐射公害。

微波传感器存在的主要问题是零点漂移和标定尚未得到很好的解决。其次,使用时外界环境因素影响较多,如温度、气压、取样位置等。

13.1.3 微波传感器的应用

1. 微波液位计

微波液位计如图 13 - 2 所示。相距为 S 的发射天线与接收天线相互成一定角度。波长为 λ 的微波从被测液面反射后进入接收天线。接收天线接收到的微波功率将随着被测液面的高低不同而有所差异。

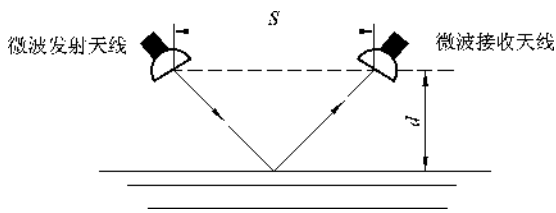


图 13 - 2 微波液位计

2. 微波湿度传感器

水分子是极性分子，常态下成偶极子形式，杂乱无章地分布着。在外电场作用下，偶极子会形成定向排列。当微波场中有水分子时，偶极子受场的作用而反复取向，不断从电场中得到能量（储能），又不断释放能量（放能），前者表现为微波信号的相移，后者表现为微波衰减。这个特性可用水分子自身介电常数 ε 来表征，即：

$$\varepsilon = \varepsilon' + \alpha \varepsilon'' \tag{13 - 1}$$

式中 ε' ——储能的度量；
 ε'' ——衰减的度量；
 α ——常数。

ε' 与 ε'' 不仅与材料有关，还与测试信号频率有关，所以极性分子均有此特性。一般干燥的物体，如木材、皮革、谷物、纸张、塑料等，其 ε' 在 1 ~ 5 范围内，而水的 ε' 则高达 64，因此如果材料中含有少量水分子时，其复合 ε' 将显著上升， ε'' 也有类似性质。

使用微波传感器，测量干燥物体与含一定水分的潮湿物体所引起的微波信号的相移与衰减量，就可以换算出物体的含水量。

图 13 - 3 给出了测量酒精含水量的仪器框图。图中 MS 产生的微波功率经分功率器分成两路，再经衰减器 A_1 、 A_2 分别注入到两个完全相同的转换器 T_1 、 T_2 中。其中， T_1 放置无水酒精， T_2 放置被测样品。相位与衰减测定仪（PT、AT）分别反复接通两电路（ T_1 和 T_2 ）输出，自动记录与显示它们之间的相位差与衰减差，从而确定样品酒精的含水量。

3. 微波测厚仪

微波测厚仪是利用微波在传播过程中遇到被测物体金属表面被反射，且反射波的波长与速度都不变的特性进行测厚的。

微波测厚仪原理如图 13 - 4 所示，在被测金属物体上下两表面各安装一个终端器。微波信号源发出的微波，经过环行器 A、上传输波导管传输到上终端器，由上终端器发射到被测物体上表面上，微波在被测物体上表面全反射后又回到上终端器，再经过传输导管、环行器

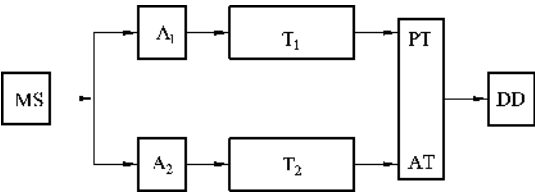


图 13-3 酒精含水量测量仪框图

A、下传输波导管传输到下终端器。由下终端器发射到被测物体下表面的微波，经全反射后又回到下终端器，再经过传输导管回到环行器 A。因此被测物体的厚度与微波传输过程中的行程长度有密切关系，当被测物体厚度增加时，微波传输的行程长度便减小。

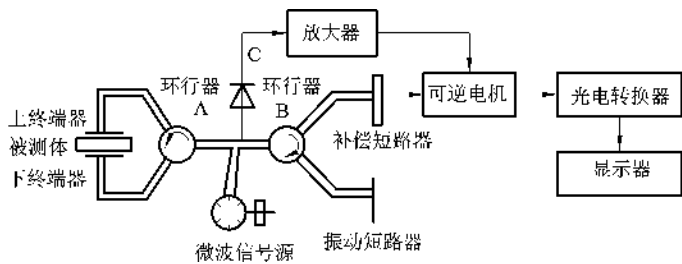


图 13-4 微波测厚仪原理图

一般情况下，微波传输的行程长度的变化非常微小。为了精确地测量出这一微小变化，通常采用微波自动平衡电桥法，前面讨论的微波传输行程作为测量臂，而完全模拟测量臂微波的传输行程设置一个参考臂(图 13-4 右部)。若测量臂与参考臂行程完全相同，则反相叠加的微波经过检波器 C 检波后，输出为零。若两臂行程长度不同，两路微波叠加后不能相互抵消，经检波器后便有不平衡信号输出。此不平衡差值信号经放大后控制可逆电机旋转，带动补偿短路器产生位移，改变补偿短路器的长度，直到两臂行程长度完全相同，放大器输出为零，可逆电机停止转动为止。

补偿短路器的位移与被测物厚度增加量之间的关系式为：

$$\Delta S = L_B - (L_A - \Delta L_A) = L_B - (L_A - \Delta h) = \Delta h \tag{13-2}$$

式中： L_A ——电桥平衡时测量臂行程长度；

L_B ——电桥平衡时参考臂行程长度；

ΔL_A ——被测物厚度变化 Δh 后引起的测量臂行程长度变化值；

Δh ——被测物厚度变化；

ΔS ——补偿短路器位移值。

由上式可知，补偿短路器位移值 ΔS 即为被测物厚度变化值 Δh 。

4. 微波辐射计(温度传感器)

任何物体，当它的温度高于环境温度时，都能够向外辐射热能。微波辐射计能测量对象的温度。普朗克公式在微波领域可近似为：

$$L_0(\lambda, T) = \frac{2CkT}{\lambda^4} \quad (13-3)$$

就微波辐射计而言,它以一定的频带宽检测来自物体的微波辐射辉度 $L(\lambda, T)$ 。由于此电信号输出正比于物体的发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 和绝对温度的乘积,因此微波辐射计指示的温度不是物体的真实温度,而是辉度温度 $\varepsilon(\lambda, T)T_0$ 。

图 13-5 给出了微波温度传感器的原理方框图。图中 T_i 为输入(被测)温度, T_c 为基准温度, C 为环行器, BPF 为带通滤波器, LNA 为低噪声放大器, IFA 为中频放大器, M 为混频器, LO 为本机振荡器。

微波温度传感器最有价值的应用是微波遥测,将它装在航天器上,可以遥测大气对流层的状况,可以进行大地测量与探矿,可以遥测水质污染程度,确定水域范围,判断植物品种等。

5. 微波测定移动物体的速度和距离

微波测定移动物体的速度和距离是利用雷达

能动地将电波发射到对象物,并接收返回的反射波的能动型传感器。若对在距离发射天线为 r 的位置上以相对速度 v 运动的物体发射微波,则由于多普勒效应,反射波的频率 f_r 发生偏移,如下式所示:

$$f_r = f_0 + f_D \quad (13-4)$$

式中 f_D 是多普勒频率,并可表示为:

$$f_D = \frac{2f_0 v}{c} \quad (13-5)$$

当物体靠近靶时,多普勒频率 f_D 为正;远离靶时, f_D 为负。输入接收机的反射波的电压 u_e 可用下式表示:

$$u_e = U_e \sin \left[2\pi(f_0 + f_D)t - \frac{4\pi f_0 r}{c} \right] \quad (13-6)$$

中括号[]内的第二项是因电波在距离 r 上往返而产生的相位滞后。用接收机将来自发射机的参照信号 $U_e \sin 2\pi f_0 t$ 与上述反射信号混合后,进行超外差检波,则可得到如下式那样的具有两频率之差,即 f_D 的差拍频率的多普勒输出信号:

$$u_d = U_d \sin \left(2\pi f_D t - \frac{4\pi f_0 r}{c} \right) \quad (13-7)$$

因此,根据测量到的差拍信号频率,可测定相对速度。但是,用此方法不能测定距离。为此考虑发射频率稍有不同的两个电波 f_1 和 f_2 ,这两个波的反射的多普勒频率也稍有不同。若测定这两个多普勒输出信号成分的相位差为 $\Delta\varphi$,则可利用下式求出距离 r :

$$r = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi(f_2 - f_1)} \quad (13-8)$$

6. 微波无损检测

微波无损检测是综合利用微波与物质的相互作用,一方面微波在不连续界面处会产生反射、

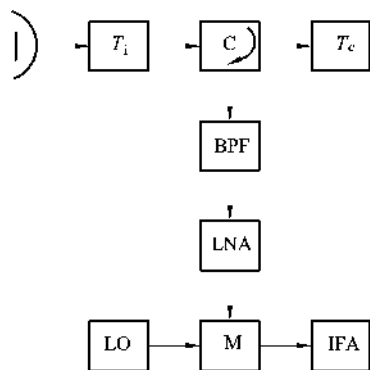


图 13-5 微波温度传感器原理方框图

散射、透射，另一方面微波还能与被检材料产生相互作用，此时的微波场会受到材料中的电磁参数和几何参数的影响。通过测量微波信号基本参数的改变即可达到检测材料内部缺陷的目的。

复合材料在工艺过程中，由于增强了纤维的表面状态、树脂粘度、低分子物含量、线性高聚物向体型高聚物转化的化学反应速度、树脂与纤维的浸渍性、组分材料热膨胀系数的差异以及工艺参数控制的影响等因素，因此，在复合材料制品中难免会出现气孔、疏松、树脂开裂、分层、脱粘等缺陷。这些缺陷在复合材料制品中的位置、尺寸以及在温度和外载荷作用下对产品性能的影响，可用微波无损检测技术进行评定。

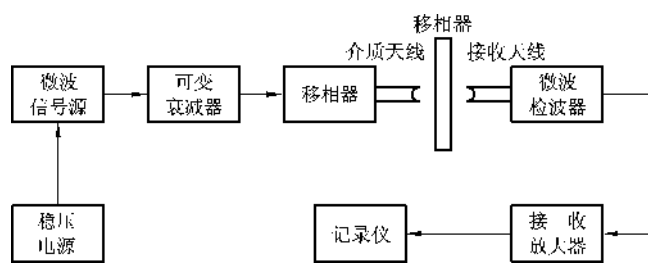


图 13 - 6 微波无损检测方框图

微波无损检测系统主要由天线、微波电路、记录仪等部分组成，如图 13 - 6 所示。当以金属介质内的气孔作为散射源，产生明显的散射效应时，最小气隙的半径与波长的关系符合公式：

$$K\alpha \approx 1 \tag{13 - 9}$$

式中： $K=2\pi/\lambda$ ，其中 λ 为波长； α ——气隙的半径。

当微波的工作频率为 36.5GHz 时， $\alpha=1.0\text{mm}$ ，也就是说， $\lambda=6\text{mm}$ 时，可检出的孔隙的最小直径约为 2.0mm。从原理上讲，当微波波长为 1mm 时，可检出最小的孔径大约为 0.3mm。通常，根据所需检测的介质中最小气隙的半径来确定微波的工作频率。

13.2 超导传感器(Superconductive Sensor)

自 1911 年发现水银的超导现象及 1986 年发现稀土氧化物超导体以来，世界各国对超导理论的研究非常重视，近十年来发展了超导光传感器、超导微波传感器和超导磁场传感器几种。

13.2.1 超导光传感器(Superconductive Optical Sensor)

超导光传感器有超导可见光传感器和超导红外光传感器。

1. 超导可见光传感器

超导陶瓷的多晶膜通常是由 200 ~ 300nm 的晶粒构成的，在各晶粒之间存在着像半导体晶界一样的势垒，其厚度约为 2nm。它可以作为隧道型的约瑟夫逊结工作，称为边界约瑟夫逊结(BIJ)。

图 13 - 7 为使用超导可见光传感器检测来自光导纤维的光信号的情况。若光子入射到超导体多晶膜中，则在约瑟夫逊结中的电流将发生变化。因此，通过测量电流的变化，可以检测光信号大小，这就是可见光超导传感器的工作原理。

桥型约瑟夫逊结传感器如图 13 - 8 所示，它在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 陶瓷薄膜上形成沟槽，再制作

约瑟夫逊结。当光线照射到结上时，流过结的电流发生变化。它可以测量光信号大小，也可以作为光控开关。

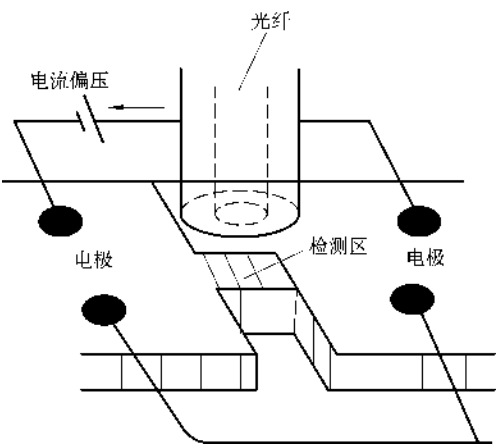


图 13-7 可见光超导传感器的原理图

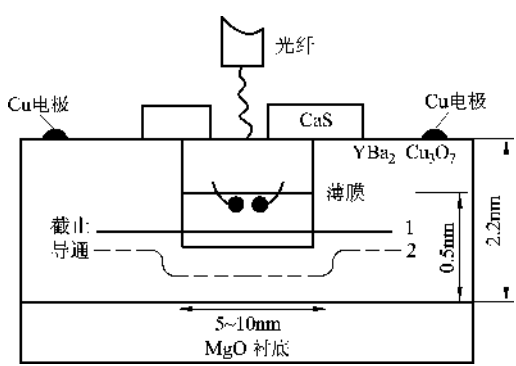


图 13-8 桥型约瑟夫逊结传感器结构

2. 超导红外传感器

超导红外传感器的原理是利用超导体中存在能隙，当红外辐射照射到超导体上时，“对粒子”分裂变为“准粒子”，又因红外线的能量高于能隙，可产生大量准粒子。因此导致超导体电特性发生变化，可以检测红外辐射的能量大小。

13.2.2 超导微波传感器(Superconductive Microwave Sensor)

若两个超导体之间存在能量差，则在超导隧道结元件内存在准粒子流。当受到微波辐射时，准粒子流发生变化，其隧道结器件的电流—电压特性发生变化。因此，可利用这个特性检测微量。一般将用于微波检测的隧道结器件为 SIS 混频器，高温超导 SIS 混频器可检测频率为 10THz 的微波信号。

13.2.3 超导磁场传感器(Superconductive Magnetic Sensor)

超导磁场传感器原理如图 13-9 所示，当超导环受到磁场作用时(见图 13-9(a))由于迈斯纳效应，环中有电流 I_s 流动，并可抵消磁场作用，使环内磁场为零。

I_s 与外磁场强度 B 成正比，因此，若测量出 I_s 的大小，则可确定磁场强度 B 的值。一般将具有隧道结的超导环称为超导量子干涉器件，把具有一个隧道结的超导环称为交流量子干涉器件；把具有两个隧道结的超导环称为直流量子干涉器件。

应该指出：电流 I_s 并不是与外加磁场强度 B 成严格的正比关系，而是与磁通($\Phi = B \cdot S$)成正比，其中 S 为超导环的面积。因此，准确地说，超导量子干涉器件是磁通传感器。

13.3 生物传感器(Biological Sensor)

将生物工程技术与电子技术结合，利用生物体中的奇特功能，制造出类似于生物感觉器

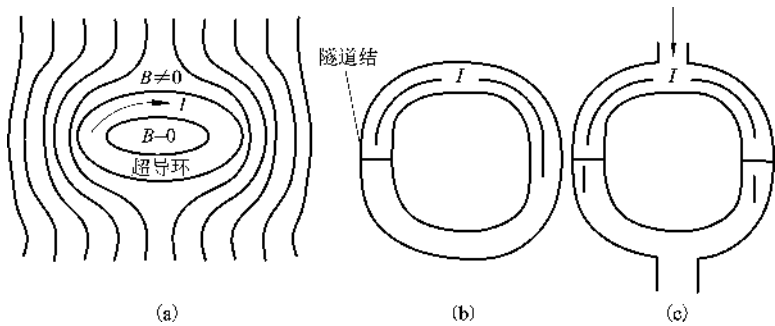


图 13 - 9 超导磁场传感器原理图

官功能的各种传感器，是国内外传感器技术研究的一项新课题。

生物传感器是利用各种酶、微生物、抗体、抗原、激素等生物或生物物质细胞、细胞组织等做成的用以检测与识别生物体内的化学成分的传感器。

13.3.1 生物传感器的基本知识

1. 生物传感器的基本原理

生物传感器的基本原理结构如图 13 - 10 所示，它由生物敏感膜和变换器组成。

生物敏感膜又称分子识别元件，是利用生物体内具有奇特功能的物质制成的一种膜。它与被测物质相接触时会发生物理或化学变化的生化反应，可以对分子进行识别。生物敏感膜是生物传感器的关键元件，根据选材的不同，可以制成酶膜、全细胞膜、免疫膜、复合膜等。各种膜的生物物质见表 13 - 1。

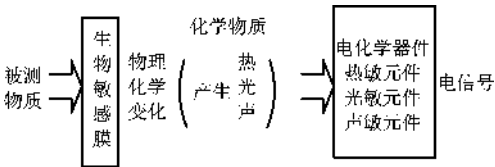


图 13 - 10 生物传感器基本原理结构图

表 13 - 1 生物传感器的分子识别元件

分子识别元件	生物活性材料
酶膜	各种酶类
全细胞膜	细菌、真菌、动植物细胞
组织膜	动植物组织切片
细胞器膜	线粒体、叶绿体
免疫功能膜	抗体、抗原、酶标抗原等

2. 生物传感器的分类

(1)按所用生物活性物质不同可以将生物传感器分为五大类，即酶传感器、微生物传感器、免疫传感器、细胞传感器和细胞器传感器。

(2)按所用器件不同分为六类：即生物电极传感器、半导体生物传感器、光生物传感器、热生物传感器、压电晶体生物传感器和介体生物传感器。

随着生物技术和新型生物传感器的出现，近年来又出现了新的分类方法。如直径在微米级甚至更小的生物传感器统称为微型生物传感器；凡是以分子之间特异识别并接合为基础的生物传感器统称为亲和生物传感器；以酶压电传感器、免疫传感器为代表，能同时测定两种以上指标的生物传感器称为多功能传感器，如滋味传感器、嗅觉传感器、鲜度传感器、血液成分传感器等；由两种以上不同的分子识别元件组成的生物传感器称为复合生物传感器，如多酶传感器、酶－微生物传感器等等。

13.3.2 酶传感器(Enzyme Sensor)

1. 酶传感器的结构

酶是生物体内具有催化作用的活性蛋白质，可以催化许多生物化学反应。生物细胞的代谢就是由成千上万个不同的酶控制的。酶的催化效率极高，而且具有高度的专一性，即只能对特定的待测生物量进行选择催化，并且有化学放大作用。因此，利用酶的特性可以制造出高灵敏度及选择性好的传感器。

酶传感器是由酶敏感膜和电化学电极器件构成的，如图 13 - 11 所示。它既有酶的分子识别能力和选择催化功能，又具有电化学电极响应快、操作简便的优点。

2. 酶传感器的分类

酶传感器按照所测电极参数的不同，可分为电流型和电位型两种。

电流型酶传感器是由与酶催化反应有关物质电极反应所得到的电流来确定反应物的浓度，一般采用氧电极、 H_2O_2 电极等；电位型酶传感器是通过电化学传感器件测量敏感膜电位来确定与催化反应有关的各种物质浓度。一般采用 NH_3 电极、 CO_2 电极、 H_2 等。

表 13 - 2 列出了各种类型酶传感器。

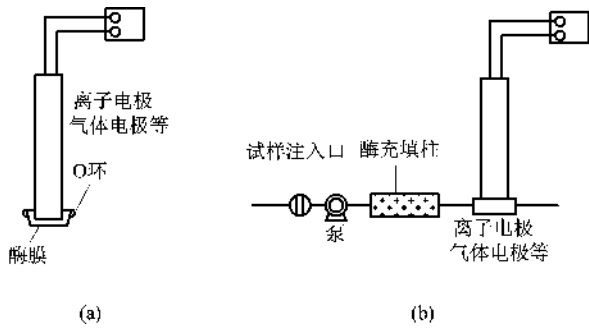


图 13 - 11 酶传感器的结构
(a)密接型传感器；(b)分离型传感器

表 13 - 2 酶传感器分类

检测方式		被测物质	酶	检出物质
电流型	氧检测方式	葡萄糖	葡萄糖氧化酶	O_2
		过氧化氢	过氧化氢酶	O_2
		尿酸	尿酸氧化酶	O_2
		胆固醇	胆固醇氧化酶	O_2
	过氧化氢检测方式	葡萄糖	葡萄糖氧化酶	H_2O_2
		L - 氨基酸	L - 氨基酸氧化酶	H_2O_2

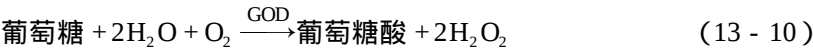
续表

检测方式		被测物质	酶	检出物质
电位型	离子检测方式	尿素	尿素酶	NH ₄ ⁺
		L - 氨基酸	L - 氨基酸氧化酶	NH ₄ ⁺
		D - 氨基酸	D - 氨基酸氧化酶	NH ₄ ⁺
		天门冬酰胺	天门冬酰胺	NH ₄ ⁺
		L - 酪氨酸	酪氨酸脱羧酶	CO ₂
		L - 谷氨酸	谷氨酸脱氧酶	NH ₄ ⁺
		青霉素	青霉素酶	H ⁺

3. 酶传感器的工作原理

以葡萄糖酶传感器为例说明其工作原理与检测过程，如图 13 - 12 所示。葡萄糖酶传感器的膜为葡萄糖氧化酶，它固定在聚乙烯酰胺凝胶上，其电化学器件为 Pt 阳电极和 Pb 阴电极，中间溶液为强碱溶液，并在阳电极表面覆盖一层透氧气的聚四氟乙烯膜，形成封闭式氧电极。它避免了电极与被测液直接接触，防止了电极毒化。如果为开放式，它浸入含蛋白质的介质中，蛋白质会沉淀在电极表面上，从而减小电极的有效面积，使电流下降，使传感器受到毒化。

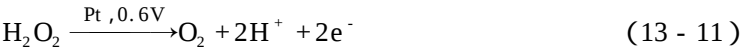
当测量时，葡萄糖酶传感器插入到被测葡萄糖溶液中，由于酶的催化作用而产生过氧化氢，其反应式为：



式中，GOD 为葡萄糖氧化酶。

由上式可知，葡萄糖氧化时产生 H₂O₂，而 H₂O₂ 通过选择性透气膜，在 Pt 电极上氧化，产生阳极电流。葡萄糖含量与电流成正比，由此可测出葡萄糖溶液的浓度。

在 Pt 电极阳极上加 0.6V 电压，则 H₂O₂ 在 Pt 电极上产生的氧化电流为：



式中：e⁻ 为形成电流的电子。

4. 酶传感器的主要特性

目前酶传感器已实用化，在市场上出售的商品达 200 多种。一些酶传感器的主要特性列于表 13 - 3 中。

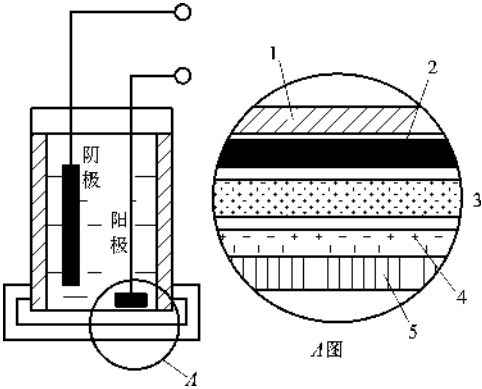


图 13 - 12 葡萄糖酶传感器
1—Pt 阳极；2—聚四氟乙烯膜；3—固相酶膜；
4—半透膜多孔层；5—半透膜致密层

表 13 - 3 一些酶传感器的主要特性

传感器	酶膜	固定方法	电化学器件	稳定性 /d	响应时间 /min	测量范围 / (mg · L ⁻¹)
葡萄糖	葡萄糖氧化物酶	共价法	O ₂ 电极	100	1/6	1 ~ 5 × 10 ²
麦芽糖	糖化淀粉酶	共价法	铂电极	—	6 ~ 7	10 ⁻² ~ 10 ³
半乳糖	葡萄糖氧化物酶	吸附法	铂电极	20 ~ 40	—	10 ~ 10 ³
乙醇	乙醇氧化酶	交联法	O ₂ 电极	120	1/2	5 ~ 10 ³
酚	酪氨酸酶	包埋法	铂电极	—	5 ~ 10	5 × 10 ⁻² ~ 10
儿茶酚	儿茶酚 1,2 氧化酶	交联法	O ₂ 电极	30	1/2	5 ~ 2 × 10 ³
丙酮酸	丙酮酸氧化物酶	吸附法	O ₂ 电极	10	2	10 ~ 10 ³
尿酸	尿酸酶	交联法	O ₂ 电极	120	1/2	10 ~ 10 ³
L - 氨基酸	L - 氨基酸氧化物酶	共价法	氨气体电极	70	—	5 ~ 10 ²
D - 氨基酸	D - 氨基酸氧化物酶	包埋法	氨离子电极	30	1	5 ~ 10 ²
L - 谷氨酰胺	谷氨酸酶	吸附法	氨离子电极	2	1	10 ~ 10 ⁴
L - 谷氨酸	谷氨酸盐脱氧酶	吸附法	氨离子电极	2	1	10 ~ 10 ⁴
L - 天门冬酰胺	天门冬酰胺酶	包埋法	氨离子电极	30	1	5 ~ 10 ³
L - 酪氨酸	L - 酪氨酸 10 羧基酶	吸附法	CO ₂ 气体电极	20	1 ~ 2	10 ~ 10 ⁴
L - 乙氨酸	L - 乙氨酸羧基酶脱氧化物酶	交联法	O ₂ 电极	—	1 ~ 2	10 ³ ~ 10 ⁴
L - 精氨酸	L - 精氨酸 10 羧基酶氧化物酶	交联法			1 ~ 2	10 ³ ~ 10 ⁴
L - 苯基丙氨酸	L - 苯基丙氨酸氨酶	—	氨气体电极	—	10	
L - 蛋氨酸	L - 蛋氨酸氨酶	交联法	氨气体电极	90	1 ~ 2	1 ~ 10 ³
尿素	尿素酶	交联法	氨气体电极	60	1 ~ 2	10 ~ 10 ³
胆甾醇	胆甾醇酯酶	共价法	铂电极	30	3	10 ~ 5 × 10 ³
中性脂	脂肪脂	共价法	pH 电极	14	1	5 ~ 5 × 10
磷脂质	磷酸化酶	共价法	O ₂ 电极	30	2	10 ² ~ 5 × 10 ³
一元胺	一元胺氧化物醇	包埋法	pH 电极	7 以上	4	10 ~ 10 ²
青霉素	青霉素酶	包埋法	pH 电极	7 ~ 14	0.5 ~ 2	10 ~ 10 ²
苦杏仁	β - 糖王代酶	吸附法	氰离子电极	3	10 ~ 20	1 ~ 10 ³
肌酸	肌酸酶	吸附法	氨气体电极	—	2 ~ 10	1 ~ 5 × 10 ³
过氧化氢	过氧化氢酶	包埋法	O ₂ 电极	30	2	1 ~ 10 ²
磷酸根离子	磷酸酶葡萄糖氧化物酶	交联法	O ₂ 电极	120	1	10 ~ 10 ³
硝酸根离子	硝酸还原酶亚硝酸还原酶	—	氨离子电极	—	2 ~ 3	5 ~ 5 × 10 ²
亚硝酸根离子	亚硝酸还原酶	交联法	氨气体电极	120	2 ~ 3	5 ~ 10 ³
硫酸根离子	丙烯基硫酸酶	交联法	铂电极	30	1	5 ~ 5 × 10 ³
汞离子	尿素酶	共价法	氨气体电极	—	3 ~ 4	1 ~ 10 ²

4. 酶传感器的应用

葡萄糖传感器广泛应用于临床化验分析、蔗糖工业生产等。除测定葡萄糖、蔗糖外，还被应用于乳糖、半乳糖、次黄苷的分析。也可将葡萄糖氧化酶作为生物样品的标记物，将葡萄糖电极应用于抗原、抗体及受体等的测定；氨基酸传感器可用于氨基酸生产线的分析和监控；乙醇传感器用于检测酒精中乙醇的含量，该传感器的检测范围为 $10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ，响应时间为 15s；尿素传感器用于临床全血、血清尿液等样品中尿素的测定和尿素生产线上的分析；青霉素传感器用于发酵槽中青霉素生产程序的控制。

酶传感器除了上述介绍的各种传感器外，酶还可制成有机酸盐电极、苯甲酸盐电极、亚硝酸盐电极等。随着科学技术的不断发展，各学科的交叉渗透，各种酶传感器将随之出现。

需要指出的是酶传感器中酶敏感膜使用的酶是将各种微生物通过复杂工序精炼出来的，因此，其造价很高，性能也不太稳定。

13.3.3 微生物传感器(Microbial Sensor)

用微生物作为识别元件制成的传感器称为微生物传感器。

微生物传感器从工作原理上可分为呼吸机能型和代谢机能型两种。微生物传感器的结构如图 13 - 13 所示，与酶相比，微生物更经济，耐久性也好。

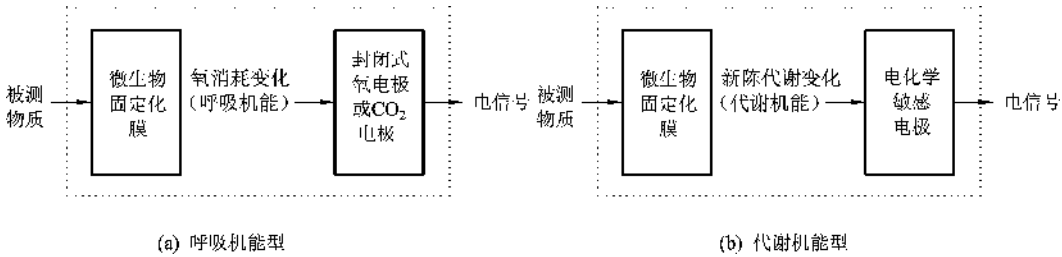


图 13 - 13 微生物传感器基本结构

1. 呼吸机能型微生物传感器

微生物呼吸机能有好气性和厌气性两种。好气性微生物生长需要氧气，因此，可以通过测量氧气来控制呼吸机能，并了解其生理状态。厌气性微生物则相反，它不需要氧气，氧气的存在会妨碍微生物的生长，因而可以通过测量碳酸气消耗及其他生成物来探知其生理状态。由此可知，呼吸机能型微生物传感器是由微生物固定化膜和 O_2 电极(或 CO_2)组成。

图 13 - 14 是呼吸机能型微生物传感器型的生物化学耗氧量传感器。将这种传感器放入含有机化合物的被测溶液中，于是有机物向微生物膜扩散，而被微生物摄取(称为资化)。

由于微生物呼吸量与有机物资化前后不同，可通过测量 O_2 电极转变为扩散电流值，从而间接测定有机物浓度。

图 13 - 15 为这种传感器的响应曲线，曲线稳定电流值表示传感器放入待测溶液氧饱和状态缓和溶液中(为磷酸盐缓冲液)微生物的吸收水平。当溶液加入葡萄糖或谷氨酸等营养源后，电流迅速下降，并达到新的稳定电流值，这说明微生物在资化葡萄糖等营养源时呼吸机能增加，即氧的消耗量增加，导致向 O_2 电极扩散的氧气量减少，故使电流值下降，直到被

测溶液向固化微生物膜扩散的氧量与微生物呼吸消耗的氧量之间达到平衡，便得到相应的稳定电流值。由此可见，这个稳定值与未添加营养时的电流稳定值之差与样品中有机物浓度成正比。

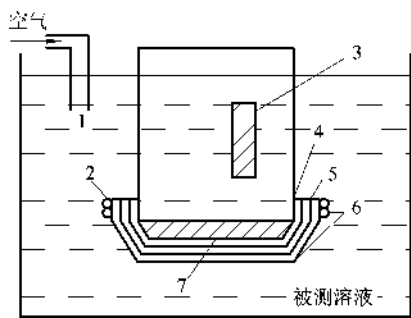


图 13-14 呼吸机型传感器

1—电解液；2—O 形环；3—Pb 阴极；4—聚四氟乙烯；
5—固化微生物膜；6—尼龙网；7—Pt 阳极

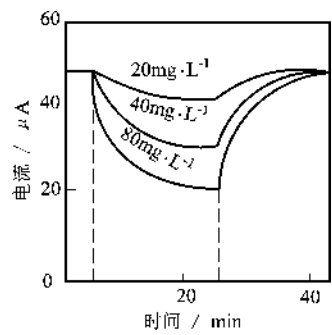


图 13-15 生物耗氧传感器响应曲线

2. 代谢机能型微生物传感器

微生物传感器的微生物敏感膜与离子选择性电极(或燃料电池型电极)相结合就构成了代谢机能型微生物传感器。

代谢机能型传感器的基本原理是微生物使有机物资化而产生各种代谢生成物，这些代谢生成物中含有遇电极产生电化学反应的物质，即电极活性物质。

图 13-16 为甲醛传感器结构示意图，将产生氢的酪酸梭状芽菌固定在低温胶冻膜上，并把它装在燃料电池 Pt 电极上。Pt 电极、 Ag_2O_2 电极、电解液 ($100\text{mol}/\text{m}^3$ 磷酸缓冲液) 以及液体连接面组成传感器。当传感器浸入含有甲酸的溶液时，甲酸通过聚四氟乙烯膜向酪酸梭状芽菌扩散，被资化后产生 H_2 ，而 H_2 又穿过 Pt 电极表面上的聚四氟乙烯膜与 Pt 电极产生氧化反应而产生电流。此电流与微生物所产生的 H_2 含量成正比，而 H_2 含量又与待测甲酸浓度有关，因此，传感器能测定发酵溶液中的甲酸浓度。

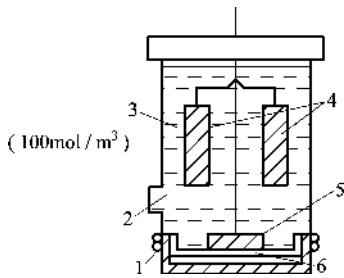


图 13-16 甲醛传感器示意图

1—圆环；2—液体连接面；3—电解液；
4— Ag_2O_2 电极(阴极)；5—Pt 电极；6—聚四氟乙烯膜

表 13-4 列出了一些微生物传感器的主要性能。

微生物传感器与酶传感器相比有价格便宜、性能稳定的优点，但其响应时间较长，达数分钟，且选择性较差。目前微生物传感器已成功地应用于发酵工业和环境检测中。例如，测定江河及废水的污染程度；医学中测量血清中微量氨基酸，有效地诊断尿毒症和糖尿病等。

表 13 - 4 一些微生物传感器的主要特性

传感器	微生物	固定方法	电化学器件	稳定性 /d	响应时间 /min	测量范围 /(mg · L ⁻¹)
葡萄糖	P. fluorescens	包埋法	O ₂ 电极	14 以上	10	5 ~ 2 × 10
脂化糖	B. lactofermentem	吸附法	O ₂ 电极	20	10	20 ~ 2 × 10 ²
甲醇	未固定菌	吸附法	O ₂ 电极	30	10	5 ~ 2 × 10
乙醇	T. brassicae	吸附法	O ₂ 电极	30	10	5 ~ 3 × 10
醋酸	T. brassicae	吸附法	O ₂ 电极	20	10	10 ~ 10 ²
蚁酸	C. butyricum	包埋法	燃料电池	30	30	1 ~ 3 × 10 ²
谷酰胺酸	E. Coli	吸附法	CO ₂ 电极	20	5	10 ~ 8 × 10 ²
乙胺酸	E. Coli	吸附法	CO ₂ 电极	14 以上	5	10 ~ 10 ²
谷酰胺	S. flara	吸附法	氨气电极	14 以上	5	20 ~ 10 ³
精胺酸	S. faecium	吸附法	氨气电极	20	1	10 ~ 170
天门冬酰胺	B. Cadavaris	吸附法	氨气电极	10	5	5 × 10 ⁻⁹ ~ 90
氨	硝化菌	吸附法	O ₂ 电极	20	5	5 ~ 45
制霉菌素	S. cerevisiae	吸附法	O ₂ 电极	—	60	1 ~ 8 × 10 ²
烃酸	L. arabinosus	包埋法	pH 电极	30	60	10 ⁻² ~ 5
维生素 B1	L. fermenti	—	燃料电池	60	360	10 ⁻³ ~ 10 ⁻²
头孢霉菌素	C. freumdil	包埋法	pH 电极	7 以上	10	10 ⁻² ~ 5 × 10 ²
BOD	T. Cutaneum	包埋法	O ₂ 电极	30	10	5 ~ 3 × 10
菌数	—	—	燃料电池	60	15	10 ⁶ ~ 10 ¹¹ (个/mL)

3. 微生物传感器的应用

微生物传感器研制的主要工作是微生物膜的制备，按照不同微生物菌膜制成了不同用途的传感器。如利用佛鲁奥森假单胞菌制成的葡萄糖菌膜与氧电极组合，在发酵过程中应用微生物电极测定葡萄糖的含量；利用鞭毛甲基单胞菌制成菌膜通过与氧化甲烷同化，呼吸消耗氧，再利用甲烷电极测量系统来控制测定发酵过程中各发酵阶段甲烷的含量；利用对头孢菌素酶，与细菌胶原膜和 pH 电极形成固定化微生物传感器用于抗生素的测量。

除上述应用之外，还可以利用微生物传感器测定醇、氨、BOD 等。随着科学技术中新技术的发展，新型微生物传感器不断涌现。例如，燃料电池型微生物电极、光微生物电极、酶 - 微生物电极等等，为生命科学和生物医学等领域提供了先进的检测手段。

13.3.4 免疫传感器(Immuno Sensor)

利用抗体可以识别抗原并具有与抗原相结合的功能制成的生物传感器称为免疫传感器。

1. 免疫传感器的结构原理

免疫传感器的基本原理是免疫反应。它是利用了固定化抗体(是一种免疫球蛋白)膜与

相应的抗原(是一种进入机体后能刺激机体产生免疫反应的物质)的特异反应,此反应的结果使生物敏感膜的电位发生变化,进而测定有关物质。例如,用心肌磷质胆固醇及磷质抗原固定在醋酸纤维膜上,就可以对梅毒患者血清中的梅毒抗体产生有选择性的反应,其结果使膜电位发生变化。

图 13 - 17 为上述免疫传感器的结构原理图,图中 2、3 两室之间有固定化抗原膜,而 1、3 两室之间没有固定化抗原膜。在 1、2 室内注入 0.9% 的生理盐水,当在 3 室内倒入食盐水时,由于抗体和固定化抗原膜上的抗原相结合,使膜表面吸附了特异的抗体。而抗体是有电荷的蛋白质,从而使抗原固定化膜带电状态发生变化,于是 1、2 室内的电极间有电位差产生。

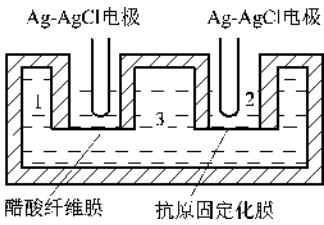


图 13 - 17 免疫传感器结构原理图

根据上述原理,可以把免疫传感器与酶免疫分析法结合起来进行超微量测量。它是利用酶为标识剂的化学放大,也就是指微量酶(E)使少量基质(S)生成多量生成物(P)。当酶是被测物时,一个 E 应相对许多 P,测量 P 对 E 来说就是化学放大。根据这种原理制成的传感器称为酶免疫传感器。

2. 免疫传感器的类型

免疫传感器主要有非酶免疫传感器和酶免疫传感器。

表 13 - 5 列出了目前已有一些免疫传感器。

表 13 - 5 一些免疫传感器

传感器	被测物质	受体	变换器件
非酶免疫传感器	白朊	抗白朊	Ag - AgCl 电极
	绒毛膜促性腺激素 HcG	抗 HcG	TiO ₂ 电极
	Siphylis	心类脂质	Ag - AgCl 电极
	血型	血型物质	Ag - AgCl 电极
	各类抗体	抗原 - 束缚脂质体(TPA ⁺ 标记)	TPA ⁺ 电极
酶免疫传感器	白朊	抗白朊(放氧酶标记)	O ₂ 电极
	免疫球蛋白苷氨酸(IgG)	抗 IgG(放氧酶标记)	O ₂ 电极
	绒毛膜促性腺激素 HcG	抗 HcG(放氧酶标记)	O ₂ 电极
	甲脂蛋白(AFP)	抗 AFP(放氧酶标记)	O ₂ 电极
	乙型肝炎表面抗原(HbsAg)	抗 HBs(PoD)标记	I - 电极

3. 免疫传感器的应用

胰岛素可以促进人和动物的合成代谢,同时抑制分解代谢。若缺少胰岛素,则血糖值增高。因此,测定血液中胰岛素浓度和血糖值对诊断、治疗糖尿病有很重要的作用。图 13 - 18 为免疫传感器测定胰岛素含量的简图,图 13 - 19 为测定胰岛素得到的标准曲线。由图可以

看出，可检出胰岛素的浓度范围为 $4 \times 10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ mol/L}$ ，最小检出浓度 $4 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$ 。

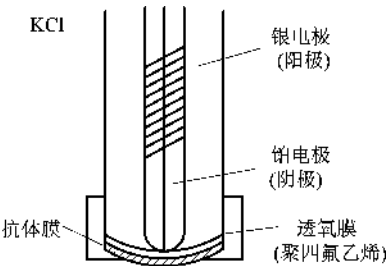


图 13-18 免疫传感器测定胰岛素

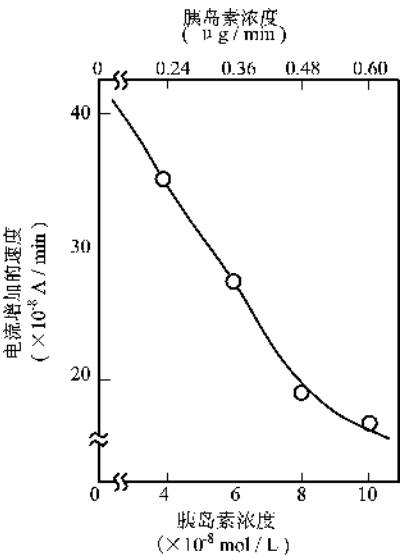


图 13-19 测定胰岛素得到的标准曲线
温育 pH 8.0 30 min 测定 pH 7.0 10mmol/L H_2O_2

人绒毛膜促性腺激素(hCG)是一种雌性激素，是诊断早期妊娠的重要指标。图 13-20 为测定 hCG 酶免疫传感器的结构图，图 13-21 为电流增加速度与 hCG 浓度的关系曲线。

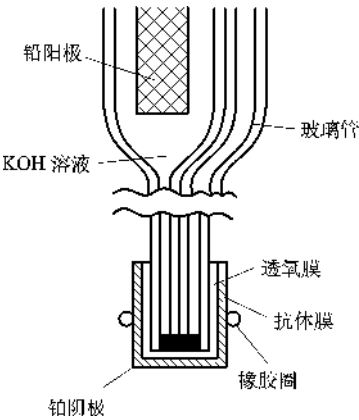


图 13-20 测定 hCG 酶免疫传感器的结构图

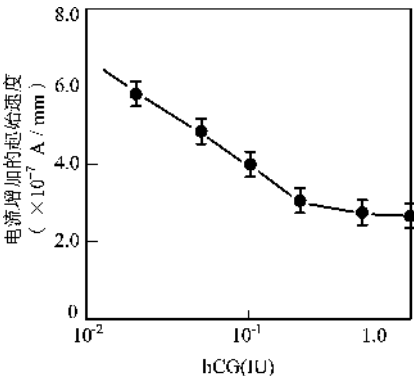


图 13-21 电流增加速度与 hCG 浓度的关系曲线
过氧化氢酶标记 hCG 浓度为 0.4IU/mL

目前正在研究的诊断癌症用的传感器把 α 甲胎蛋白(AFP)作为癌诊断指标。它将 AFP 的抗体固定在膜上组成酶免疫传感器，可检测 10^9 gAFP ，这是一种非放射性超微量测量方法。

13.3.5 生物组织传感器(Biological Tissue Sensor)

生物组织传感器是以动植物组织细胞切片作为分子识别元件，并与相应的变换元件构成生物组织传感器。生物组织传感器有很多特点：首先生物组织含有丰富的酶类，这些酶在适宜的自然环境中可以得到相当稳定的酶活性，许多组织传感器工作寿命比相应的酶传感器寿命长得多；其次，在所需要的酶难以提纯时，直接利用生物组织可以得到足够高的酶活性；再就是组织识别元件制作简便，一般不需要采用固定化技术。

生物组织传感器分为植物组织传感器和动物组织传感器。利用相应的生物组织制成的各种传感器可以测定抗坏血酸、谷氨酰氨、腺苷等。

生物组织传感器制作的关键是选择所需要的酶活性较高的动、植物的器官组织。表 13 - 6列出了几种组织传感器的构成。

表 13 - 6 几种组织传感器的构成

底物	生物催化材料	基础电极
腺苷	鼠小肠粘膜细胞	NH ₃ 电极
5 - AMP	兔肌肉 兔肌肉丙酮粉	NH ₃
谷酰氨	猪肾细胞 猪肾细胞线粒体	NH ₃
鸟嘌呤	兔肝	NH ₃
酪氨酸	甜菜	O ₂ 电极
胱氨酸	黄瓜叶	NH ₃ 电极
谷氨酸	南瓜	CO ₂ 电极
多巴胺	香蕉肉	O ₂ 电极
丙酮酸	玉米仁	CO ₂ 电极
尿素	刀豆浆	NH ₃ 电极
过氧化氢	牛肝	O ₂ 电极
L - 抗坏血酸	南瓜或黄瓜果皮	O ₂ 电极

生物组织传感器具有酶传感器、免疫传感器等的功能，可用作酶活性检测、组织抗体抗原反应。组织传感器虽然在若干情况下可取代酶传感器，但在具体实用化中还有一些问题，如选择性差、动植物材料不易保存等。

13.3.6 半导体生物传感器(Semiconduct Biosensor)

半导体生物传感器是将生物分子识别元件(生物敏感膜)与半导体器件相结合构成的传感器。目前常用的半导体传感器有半导体光电二极管及其场效应管等。

半导体生物传感器的特点体现在：构造简单，成本低，便于批量生产；属于固态传感器，其机械性能好，抗震性能好，寿命长；输出阻抗低，便于与后续电路匹配；可能单片化、集成化、智能化；可实现多功能、多参数测量，是研究生物芯片与生物计算机的基础。

1. 酶光敏二极管

酶光敏二极管是一种新型的光生物传感器。它由催化发光反应的酶和光敏二极管器件组合构成，如图 13 - 22 所示。在硅光敏二极管的表面透镜上涂上一层过氧化氢酶膜，就构成了检测

过氧化氢的酶光敏二极管。当二极管表面接触到过氧化氢时，利用过氧化氢的催化作用，加速发光反应，产生的光子照射至硅光敏二极管的 PN 结，使二极管 PN 结的导通状态随之发生改变，并将其发光效应转换成光敏二极管的光电流，从而检测出过氧化氢及其浓度的大小。

2. 酶场效应管(ENFET)

酶场效应管(ENFET)是由酶敏感膜与氢离子场效应管(pH - ISFET)两部分构成，如图 13 - 23 所示。

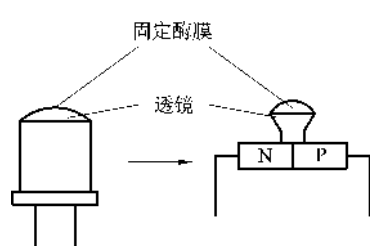


图 13 - 22 酶光敏二极管的结构

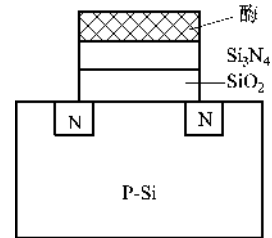


图 13 - 23 酶场效应管的结构

酶场效应管(ENFET)的工作原理如图 13 - 24 所示。在去掉金属的场效应管的栅极绝缘膜($\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2$)上固定生物敏感膜，测量时，利用酶的催化作用，使待测的有机分子反应生成 ISFET 能够响应的离子。 Si_3N_4 表面离子浓度发生变化时，其表面电荷也随之变化。由于场效应管的栅极对表面电荷非常敏感，所以同时引起栅极电位的变化，这样就对漏极电流进行了调控，从而测出所需信号。

3. 免疫场效应管(IMFET)

免疫场效应管(IMFET)是由识别免疫反应的分子功能性膜和场效应管(FET)结合构成，见图 13 - 25。先把抗体固定在有机膜上，再把带抗体的有机膜覆在 FET 栅极上，即制成 IMFET。

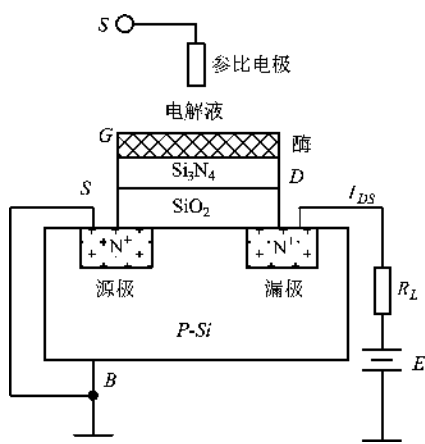


图 13 - 24 酶场效应管的工作原理

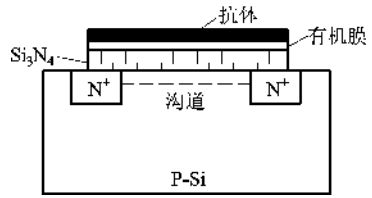


图 13 - 25 IMFET 的结构

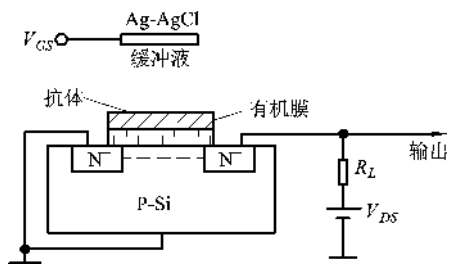


图 13 - 26 IMFET 的测量电路

用 IMFET 具体测量时，如图 13 - 26 所示电路。基片与源极接地，漏极接电源。测量时，将抗体(或抗原)放入缓冲液中，参比电极为 Ag - AgCl。抗体是蛋白质，蛋白质为两性电解质(正负电荷数随 pH 而变)，所以抗体的固定膜具有表面电荷，此膜的电位随电荷变化而变化，因此，可根据抗体膜的膜电位变化测定抗原的结合量。

13.4 机器人传感器 (Robot Sensor)

机器人是一种在计算机控制下能模拟人的种种行为如感觉、听觉、视觉、嗅觉等，并具有自动行走、手工操纵、自动捕获信息、处理信息等能力，且又足以完成有效操作的行为装置。

13.4.1 机器人传感器及其类型

1. 机器人传感器

机器人传感器指的是在机器人工作时能够把机器人目标物特性(或参量)转变为电信号输出的一种装置。也就是说，机器人通过传感器实现类似于人类的行为能力。

机器人的应用范围日益扩大，要求它从事的工作越来越复杂，对环境适应能力的要求越来越高，并且要求能进行精确的定位和控制。因而对机器人传感器的需求不仅十分必要，而且具有更多、更高的要求。因此，研究机器人传感器是一项重要的课题。

2. 机器人传感器的类型

机器人传感器一般分为内部检测传感器和外部检测传感器两大类。

内部检测传感器主要是检测运动学及动力学参数，是以机器人本身的坐标轴来确定其位置，是安装在机器人自身中用来感知它自己的状态，以调整和控制机器人的行为的传感器。这类传感器通常有位置、加速度、速度及压力等传感器。

外部检测传感器用于机器人对周围环境及目标物的状态特征获取信息，使机器人与环境能发生相互作用，从而使机器人对环境有自校正和自适应功能。这类传感器通常有触觉、接近觉、视觉、听觉、嗅觉、味觉等传感器。

表 13 - 7 列出了这些传感器的分类和功用，本章主要介绍几种外部检测传感器。

表 13 - 7 机器人外部检测传感器的分类

传感器	检测内容	检测器件	应用
触觉	接触 把握力 荷重	限制开关 应变仪、半导体感应元件 弹簧变位测量器	动作顺序控制 把握力控制 张力控制、指压控制
	分布压力 多元力 力矩 滑动	导电橡胶、感应高分子材料 应变仪、半导体感应元件 压阻元件、马达电流计 光学旋转检测器、光纤	姿势、形状判别 装配力控制 协调控制 滑动判定力控制

续表

传感器	检测内容	检测器件	应用
接近觉	接近 间隔 倾斜	光电开关、LED、激光、红外光 光电二极管、光电三极管 电磁线圈、超声波传感器	动作顺序控制 障碍物躲避 轨迹移动控制、探索
视觉	平面位置 距离 形状 缺陷	ITV 摄像机、位置传感器 测距器 线图像传感器 面图像传感器	位置决定控制 移动控制 物体识别、判别 检查、异常检测
听觉	声音 超声波	麦克风 超声波传感器	语言控制(人机接口) 移动控制
嗅觉	气体成分	气体传感器、射线传感器	化学成分探测
味觉	味道	离子敏感计、pH 计	化学成分探测

13.4.2 触觉传感器(Tactile Sensor)

人的触觉是人类感觉的一种，它通常包括热觉、冷觉、痛觉、压觉和力觉等。

机器人触觉实际上是人的触觉的某些模仿，是有关机器人和对象之间的直接接触的感觉。内容包含以下几种：触觉，压觉，力觉，接近觉和滑觉等。

1. 触觉传感器

触觉传感器检测“手”和“皮肤”与对象物体是否接触以及接触对象物体的部位和接触模型，以达到决定位置、控制速度、探索和控制路径、识别物体的姿态和形状等目的。

典型的触觉传感器如图 13 - 27 所示。

图 13 - 27(a)所示为平板上安装着多点通、断传感器附着板的装置。此传感器平时为接通状态，当与物体接触时，弹簧收缩，上、下板间电流断开。它就相当于一个开关，即输出“0”和“1”两种信号。可以用于控制机械手的运动方向和范围、躲避障碍物等。

图 13 - 27(b)所示为采用海绵中含碳的压敏电阻传感器，每个元件呈圆筒状。上、下有电极，元件周围用海绵包围。其触觉的工作原理是：元件上加压力时，电极间隔缩小，从而使电极间的电阻值发生变化。

图 13 - 27(c)所示是使用压敏导电橡胶的触觉结构。采用压敏橡胶的触觉，与其他元件相比，其元件可减薄，其中还可安装高密度的触觉传感器。另外，因为元件本身有弹性，对操作物体无操作，元件制作与处理容易等，所以，在实用与封装方面有许多优点。可是，由于导电橡胶有迟滞和响应延迟，接触电阻的误差也大，因此，要想获得实际的应用，还需做更大的努力。

图 13 - 27(d)所示为进行高密度触觉封装的触觉元件。其工作原理是：在结点与赋有导电性的石墨纸之间留一间隙，加外力时，碳纤维纸与氨基甲酸乙酯泡沫产生如图所示的变形，结点与碳纤维纸之间形成导通状态，触觉的复原力是由富有弹性与绝缘性的海绵体——氨基甲酸乙酯造成的。这种感觉，以极小的力工作，能进行高密度封装。

图 13 - 27(e) ~ (i)所示为采用斯坦福研究所研制的导电橡胶制成的触觉传感器。这种

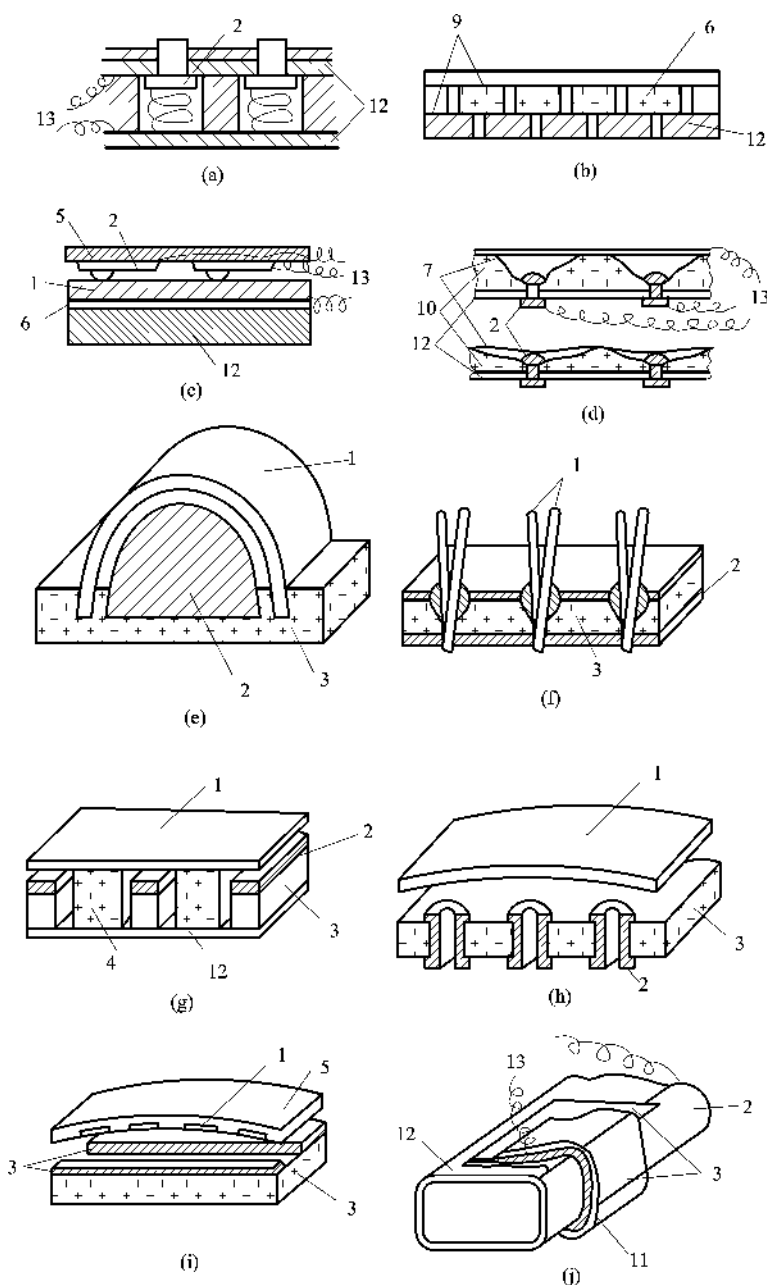


图 13-27 典型的触觉传感器

1—导电橡胶；2—金属；3—绝缘体；4—海绵状橡胶；5—橡胶；6—金属箔；7—碳纤维；
8—含碳海绵；9—海绵状橡胶；10—氨基甲酸乙脂泡沫；11—镀青铜；12—衬底；13—引线

传感器与以往的传感器的不同在于它是利用两个电极的接触。其中图 13-27(f)的触觉部分有相当于人的头发的突起，一旦物体与突起接触，它就会变形，夹住绝缘体的上下金属成为导通的结构，这是以往的传感器所不具备的功能。

图 13-27(j)所示的触觉传感器的原理为：与手指接触进行实际操作时，触觉中除与接

触面垂直的作用力外，还有平行的活动作用力。因此，这种触觉传感器要有非常耐滑的动力。人们以提高触觉传感器的接触压力灵敏度作为研制这种传感器的主要目的。用镀青铜箔覆盖手指表面，通过它与手指之间或者手指与绝缘的金属之间的导通来检测触觉。

随着光纤传感器在测量领域应用的不断延伸，在机器人触觉传感器研究中光纤传感器也得到了足够的重视。图 13 - 28 是一种触须式光纤触觉传感器，其原理是利用光纤微弯感生的由芯模到包层模的耦合，使光在芯模中再分配，通过检测一定模式的光功率变化来探测外界对之施加压力的大小。图 13 - 28 所用的光纤是 $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 的多模光纤，波纹板是由两块相互啮合的 V 型槽板组成。为了保持平衡，在槽的另一端放置一根不通光的虚设光纤。板的 V 型槽设计为 3mm。当触须接触到物体时，波纹板的上盖相对于下盖位移，使光纤产生位移，通过测量光信号的衰减可间接得知触觉的大小。

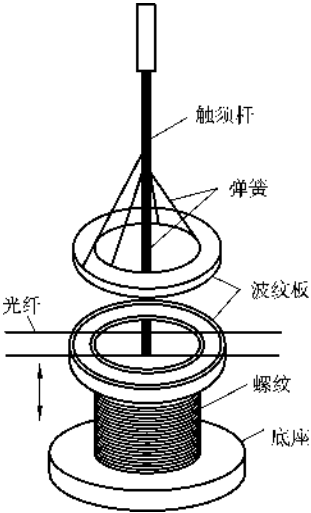


图 13 - 28 触须式光纤触觉传感器

近年来，人们在进行所谓“人工皮肤”的研究。这种“皮肤”实际上是一种由单个触觉传感器按一定形状(如矩阵)组合在一起的阵列式触觉传感器。“人工皮肤”传感器可用于表面形状和表面特性的检测。具有资料报道，目前的“皮肤”触觉传感器的研究主要着重于两个方面：一是选择更为合适的敏感材料，现有的材料主要有导电橡胶、压电材料、光纤等；另一方面是将集成电路工艺用到传感器的设计和制作中，使传感器和处理电路一体化，形成大规模或超大规模阵列式触觉传感器。图 13 - 29 所示是 PVF2 阵列式触觉传感器。

2. 压觉传感器

压觉传感器检测对象物体对传感器的压力、感受压力分布等，达到控制握力、弹性、识别所握物体的目的等。导电橡胶、感应分子、应变计、光电器件和霍尔元件常被用作敏感元件，通过把分散的敏感元件排列成矩阵式格子设计成分布型压觉传感器。

图 13 - 30 所示为一种传感器的原理图，它是在小型调整器的轴上安装了线性弹簧。一个传感器有 10mm 的有效行程，在此范围内，将力的变化转换为遵从虎克定律的长度位移，以便进行检测。

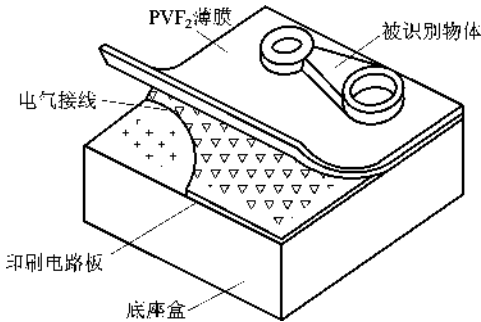


图 13 - 29 PVF2 阵列式触觉传感器

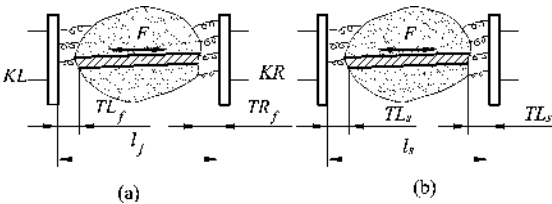


图 13 - 30 压觉传感器的原理图

图 13 - 30 给出了手指握住物体的状态，其中图 13 - 30(a)给出了手指从图 13 - 30(b)状态稍微握紧情况。整个手指所受的压力，可通过将一侧手指的全部传感器上的这种力相加求得。用这种触觉传感器，也可能鉴别物体的形状和评价其硬度。

图 13 - 31 与图 13 - 32 给出了两种分布型压觉传感器。图 13 - 33 是读出系统阵列，该系统实现压觉传感器阵列的接口、控制和信号输出作用。由计数器或微机分别发出行、列地址信号，经译码器和多路转换器产生选通某单元的电容的电压信号，信号检测放大（该放大器采用电容构成负反馈回路），放大器输出的信号以并行方式送给多路转换器。图像中各敏感元件的信号通过扫描按一定时序经 A/D 变换后，由微处理器采集，并进行零位移补偿和灵敏度不均匀性补偿后输出。

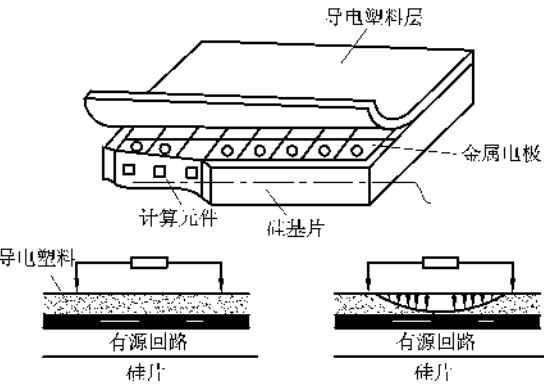


图 13 - 31 高密度智能压觉传感器

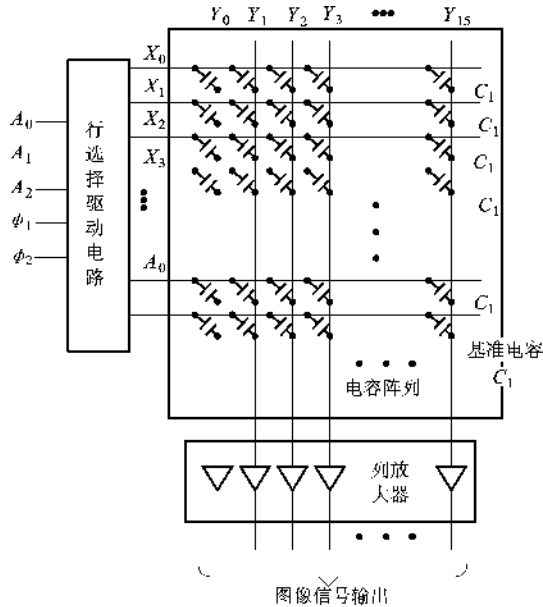


图 13 - 33 压觉传感器阵列图

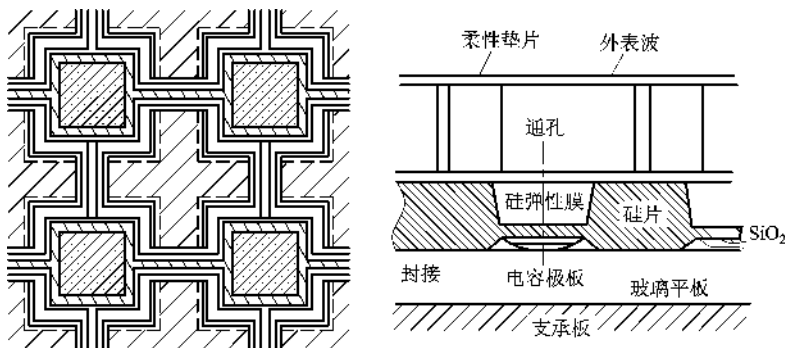


图 13 - 32 电容压觉传感器

(a)四个硅电容压觉传感器；(b)图的剖视图

分布型压觉传感器本身相对于力的变化基本上不发生位置变化，能检测其位移量。压觉

传感器有如下优点：可以多点支撑物体，从操作的观点来看，能牢牢抓住物体。

3. 力觉传感器

力觉传感器主要用于检测和控制机器人臂及手腕的力矩和力。

力觉传感器的作用有：感知是否夹起了工件或是否夹持在正确部位；控制装配、打磨、研磨抛光的质量；装配中提供信息，以产生后续的修正补偿运动来保证装配质量和速度；防止碰撞、卡死和损坏机件。

用于力觉传感器的主要有应变片、压电式、电容式、光电式和电磁力等。由于应变式的价格便宜，可靠性好，且易于制造，因此被广泛采用。

机器人力觉传感器主要包括关节力传感器、腕力传感器、基座传感器等。

(1) 关节力传感器

关节力传感器是直接通过驱动装置测定力的装置。如关节由直流电机驱动，则可用测定转子电流的方法来测关节的力；关节由油压装置带动，则可由测背压的方法来测定力的大小。这种测力装置的程序中包括对重力和惯性力的补偿，此种测定方法的优点是不需要分散的传感器。但测量精度和分辨率不仅受手的惯性负荷及其位置变化的影响，还受自身关节不规则的摩擦力矩的影响。

图 13-34 为应变式关节力传感器简图，此装置在机器人的第 1、2 关节的谐波齿轮的柔轮的输出端安装一个连接输出轴的弹性法兰盘，在其衬套上贴应变片，直接测出力矩，并反馈至控制系统进行力和力矩的控制。衬套弹性敏感部位厚 2mm，宽 5mm，其优点是不占额外空间，计算方法简单，响应快。

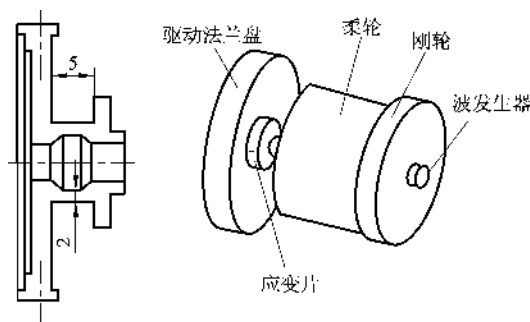


图 13-34 应变式关节力传感器

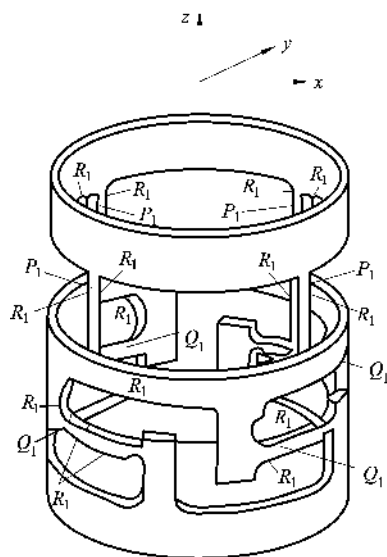


图 13-35 简式六自由度腕力传感器

(2) 腕力传感器

机器人在完成装配作业时，通常要把轴、轴承、垫圈及其他环形零件装入到别的零部件中去。其中心任务一般包括确定零件的重量、将轴类零件插入孔里、调整零件的位置、拧动螺钉等，这些都是通过测量并调整装配过程中零件的相互作用力来实现的。

腕力传感器可以是应变式、电容式或压电式。

图 13-35 是一种筒式六自由度腕力传感器,此传感器能测出六个力(力矩)。铝制主体呈圆筒状,外侧由八根梁支撑,手指尖和手腕部相连接。指尖受力时,梁受影响而弯曲,从粘贴在梁两侧的八组应变片(R_1 与 R_2 为一组)的信号,可以算出加在 x 、 y 、 z 轴上的力与各轴的力矩。每根梁上有缩紧部分,是为了减小弯曲刚性,加大应变片部分的应变量而设计的。

图 13-36 是挠性件十字排列的腕力传感器,应变片贴在十字梁上,用铝材切成框架,其内的十字梁为整体结构。为了增强其敏感性,在与梁连接处的框臂上,还要切出窄缝。该传感器可测的六个自由度的力和力矩,其信号由 16 个应变片组成 8 个桥式电路输出。

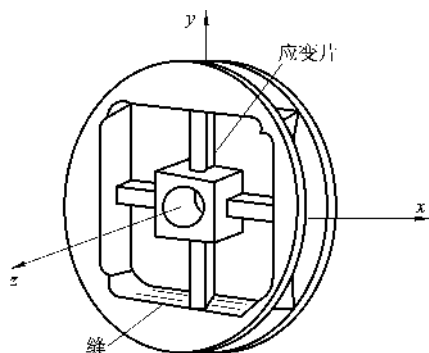


图 13-36 挠性件十字排列的腕力传感器

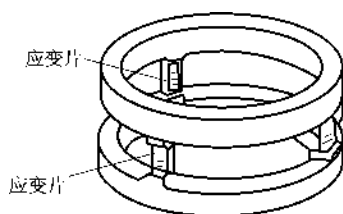


图 13-37 挠性杆与螺孔相连的腕力传感器

(3) 基座力传感器

图 13-38 为可分离的基座传感器系统,将传感器安装在基座上,机械手装配时用来测量安装在工作台上工件所受的力,此力是装配轴与定位误差所产生的。测出力的数据用来控制机器人手的运动。基座传感器的精度低于腕力传感器。

还有一种基座力传感器系统,由装在工作台上的三块铝板构成(40×2.5),

中间一块板上部内装有与上板相连接的 4 个垂直排列的力传感器,中间板下部有相同的四个水平排列的力传感器,并与下板相连,用以测量纵横力。

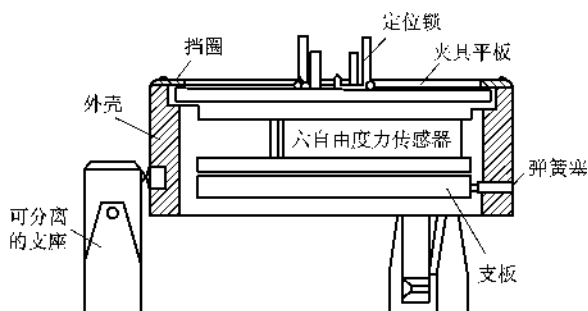


图 13-38 基座力传感器

(4) 力觉传感器的应用

图 13-39 是精密装配的自适应微调定心装置的计算机 - 传感器 - 伺服调节系统方框图,该系统将传感器的信号经计算机处理后送微调伺服装置进行装配校正,或传至主机,当手指的力超过阈值时可令手臂制动。

4. 滑觉传感器

滑觉传感器主要检测物体接触面之间相对大小和方向的传感器。例如,机器人的手爪,就是利用滑觉传感器判断是否握住物体,以及应该使用多大的力等。

通常采用如下方法来检测滑动:将滑动转换成滚球和滚柱的旋转;用压敏元件和触针,检测滑动时的微小振动;检测出即将发生滑动时,手爪部分的变形。同时压力通过手爪载荷

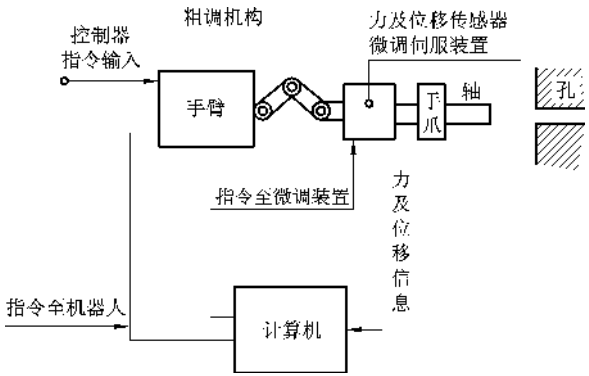


图 13 - 39 微调定心装置的计算机 - 传感器 - 伺服调节系统方框图

检测器，检测手爪的压力变化，从而推断出滑动的大小等。

图 13 - 40 所示是经常被使用的两种滑觉传感器。图(a)是滚球滑觉传感器，其球的表面是导体和绝缘体配制成的网眼，从物体的接触点可以获取断续的脉冲信号，它能检测全方位的滑动。图(b)是滚轴滑觉传感器，当手爪中的物体滑动时，将使滚轴旋转，滚轴带动安装其中的光电传感器和缝隙圆板而产生脉冲信号。

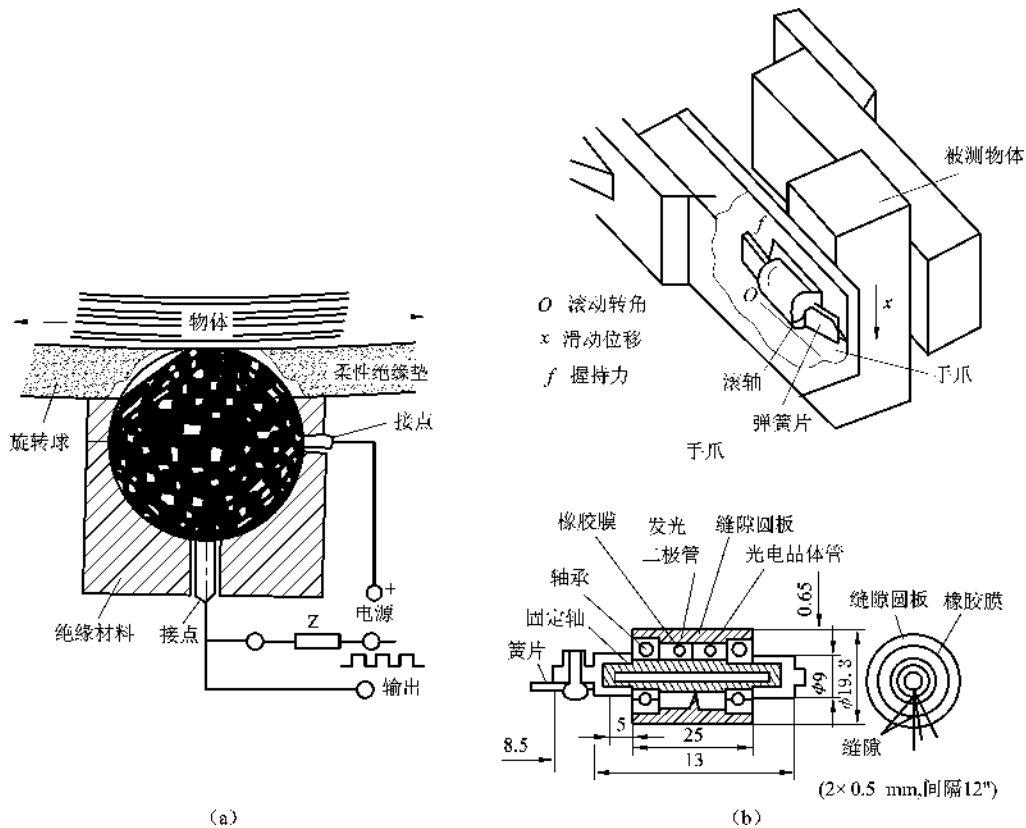


图 13 - 40 滑觉传感器
(a)滚球滑觉传感器；(b)滚轴滑觉传感器

滑觉传感器产生的这些信号通过计数器和 D/A 转换器,输出模拟电压信号,通过反馈系统构成闭环控制。经过系统的不断自动调节来修正握力,达到消除滑动的目的。

13.4.3 接近觉传感器

接近觉传感器(Proximity Sensor)是检测对象物体与传感器距离信号的一种传感器,是指机器人能感知相距几毫米至几十厘米内对象物质或障碍物的距离、对象物的表面性质等的传感器。其目的是在接触对象前得到必要的信息,以便后续动作。这种感觉是非接触的,是介于触觉和视觉之间的感觉。

接近觉传感器有电磁式、光电式、电容式、气动式、超声波式、红外式等类型,实际使用时根据对象物体性质而定。如金属物一般采用电磁感应式传感器,而塑料、木质等非金属物可采用光电式、超声波和微波式等传感器。

1. 电磁式接近觉传感器

整块的金属置于变化着的磁场中时,或者在固定磁场中运动时,金属体内部会产生涡流,涡流的大小随对象物体表面与线圈的距离大小而变化。

图 13-41 所示电磁式接近觉传感器,高频信号 i_s 施加于邻近金属一侧的电感线圈 L 上, L 产生的高频电磁场作用于金属板的表面。由于趋肤效应,高频电磁场不能透过具有一定厚度的金属板,仅作用于表面的薄层内,而金属板表面感应的涡流产生的电磁场又反作用于线圈 L 上,改变了电感的大小(磁场强度的变化也可以用另一组检测线圈检测出来),从而感知传感器与接近物体之间距离的大小。

这种传感器的精度比较高,响应速度快,而且可以在高温环境下使用。由于工业机器人(如焊接机器人)的工作对象大多是金属部件,因此这种传感器用得较多。

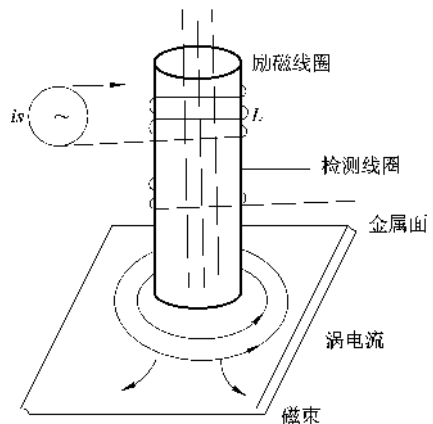


图 13-41 电磁式接近觉传感器

2. 电容式接近觉传感器

由平行板电容器知识可知,在忽略边缘效应的情况下,其电容为:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \quad (13-12)$$

式中: A ——极板面积; d ——极板间距离; ε_r ——相对介电常数; ε_0 ——真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$; ε ——电容极板间介质介电常数。

由式(13-12)可知电容的变化反映了极板间距离的变化。将此电容接在电桥电路中,利用上述原理即可反映传感器表面与对象物体间距离的变化。或者把电容当作 RC 振荡器中的元件,也可检测距离。

图 13-42 是一种能检测金属和非金属物体的新型的电容接近觉传感器原理图。传感器本身由两个极板构成,其中极板 1 由一个固定频率的正弦电压激励,极板 2 外接电荷放大器,0 为接近物体,在传感器两极板和被接近物三者之间形成一交变电场。当靠近被测对象时,

极板 1、2 之间的电场受到影响，可以认为是被接近物阻断了极板 1、2 间连续的电力线。电场的变化引起极板 1、2 间电容 C_{12} 的变化，由于电压幅值恒定，所以电容的变化直接反映出极板 2 上电荷的变化。

电容式接近传感器具有对物体的颜色、构造和表面都不敏感，且实时性好的优点。一般的电容接近觉传感器是将传感器本身作为一个极板，被接近物作为另一个极板。这种结构要求障碍物是导体，而且必须接地，并且容易受到对地电容的影响。图 13 - 42 所示的传感器使用时，被检测对象可以是不接地的。另外也能检测非导体，其引起极板 1、2 间电容变化的原理有待进一步研究。

3. 气动式接近觉传感器

气动式接近觉传感器的原理如图 13 - 43 所示，由一个较细的喷嘴喷出气流，如果喷嘴靠近物体，则内部压力会发生变化，这一变化可用压力计测量出来。图中曲线表示在某种气压源 P_s 的情况下，压力计的压力与距离之间的关系。这种传感器的特点是结构简单，尤其适合于测量微小位移。

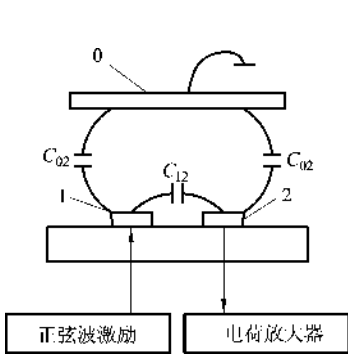


图 13 - 42 电容接近觉传感器原理图

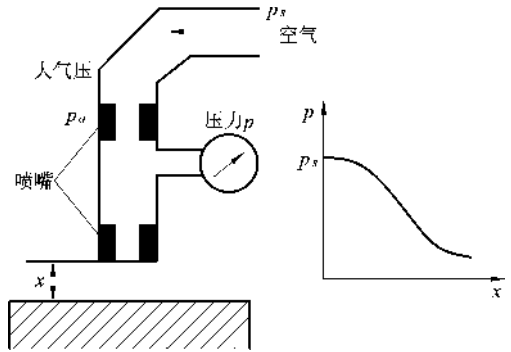


图 13 - 43 气动式接近觉传感器的原理

4. 光纤接近觉传感器

图 13 - 44 是一种利用发光元件和感光元件的光轴相交而构成的光纤接近觉传感器。当对象物体处于光轴焦点时，反射光量出现峰值，图 13 - 44 收信号最强，利用这一特点可以测定对象物体的位置。

5. 反射角度式接近觉传感器

图 13 - 45 所示的反射角度式接近觉传感器中，将 n 个发光元件沿横向直线排列，使其按扫描顺序发光，再根据反射光量的变化及其时间，求出反射角，从而确定对象物体的距离。

6. 超声波式、红外线式、光电式接近觉传感器

超声波式接近觉传感器适用于较长距离和较大物体的探测，例如对建筑物等进行探测，因此，一般把它用于移动机器人的路径探测和躲避障碍物。

红外线式接近觉传感器可以探测到机器人是否靠近人类或其他热源，这对安全保护和改变机器人行走路径有实际意义。光电式接近觉传感器的应答性好，维修方便，目前应用较广，但使用环境受到一定的限制，如对象物体的颜色、粗糙度、环境光度等都可能对其产生影响。

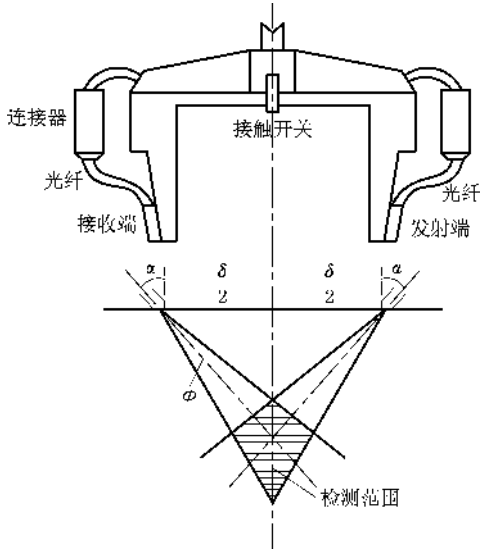


图 13-44 光纤接近觉传感器

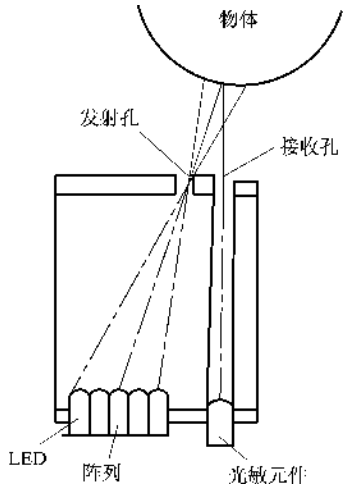


图 13-45 反射角度式接近觉传感器

13.4.4 视觉传感器

视觉传感器(Vision Sensor)主要检测或确定被敏感对象的明暗度、位置距离、运动方向、形状特征等。其工作过程可分为检测、分析、描绘和识别几个主要步骤。

视觉传感器的典型结构原理如图 13-46 所示，它包括信息获取和处理两部分，这样才能把对象物体特征通过分析处理、描绘后识别出来。由此看来，它已经不像普通传感器那样单一了，应属于智能传感器的范畴。

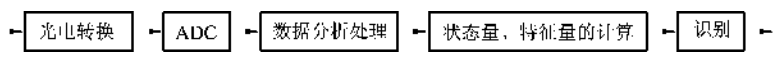


图 13-46 视觉传感器的典型结构原理

1. 视觉检测

视觉检测主要利用图像输入设备将视觉信号转换成电信号。

常用的图形信号输入设备有摄像管和固态图像传感器。摄像管分为光导摄像管(如电视摄像装置的摄像头)和析像管两种，前者是存储型，后者是非存储型。固态图像传感器分为线阵传感器和面阵传感器。

输入给视觉检测部件的信息形式有亮度、颜色、距离等，这些信息一般可以通过电视摄像机获得。亮度信息用 A/D 转换器按 4~10bit 量化，再以矩阵形式构成数字图像，储存于计算机内。若采用彩色摄像机可获得各点的颜色信息；对三维空间的信息还必须处理距离信息，常用于处理距离信息的方法有光投影法和立体视法。

为了得到视觉效果，景物的照明也是很重要的因素，设计一个很好的照明系统，对景物进行照明，使得图像处理变得简单。最佳光源是亮度高、相干性、方向性和单色性好的激光光源。

2. 视觉图像分析

被视图像被划分为各个组成部分的预处理过程为视觉图像分析。即把摄取到的所有信号去掉杂波和无价值像素，重新把有价值的像素按线段或区域等排列成有像素的集合。

视觉图像分析的算法有边缘检测法、门限法和区域法三种。

边缘检测法是通过图像进行微分运算，在计算结果中选择某一阈值以上的点，求出明暗变化的交界点，重新构造一幅新图。图 13 - 47 是边缘检测的一个实例，图(a)为机械零件，图(b)为用微分技术处理后的结果。

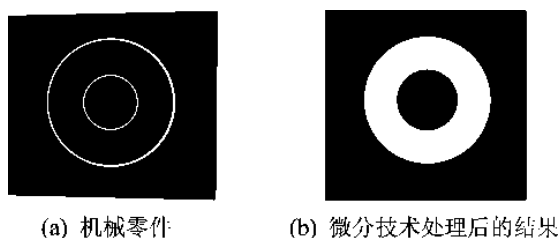


图 13 - 47 微分技术求取边缘

门限法是按某种局部性质进行局部阈值或总体阈值，然后限制并抽取成加工图像信息的方法。局部阈值常用于物与环境的图像信息特性区别不明显的灰度图像；总体阈值适用于被测物体图像信息的一些特性相对于背景变化很显著的情况。

区域法是把亮度大体一致的像素集合，合并为一个区域进行归纳的方法。它先通过连续亮度相同的相邻点把画面分割成许多小区域，然后根据小区域的亮度差和边界形状把相邻小区域进行合并，构成有较大含义的区域。此法同样适用于颜色和距离信息，主要用于物体之间或物体与背景环境间难于用门限法或边缘检测法区分的情况。

3. 描绘和识别

图像信息的描绘是利用求取平面图形的面积、周长、直径、孔数、顶点数、二阶矩阵、周长平方与总面积之比以及直线数目、弧的数目、最大惯性矩和最小惯性矩之比等方法，把这些方法中隐含的图像特征提取出来的过程。

识别是对描绘过程的物体给予标志，如钳子、螺帽等名称。

13.4.5 听觉、嗅觉、味觉及其他传感器

1. 听觉传感器

具有语音识别功能的传感器称为听觉传感器。

一台高级的机器人不仅能听懂人讲的话，而且能讲出人能听懂的语言。赋予机器人这些智慧的技术统称为语音处理技术，前者为语音识别技术，后者为语音合成技术。听觉传感器是人工智能装置，为机器人中必不可少的部件，它是利用语音信息处理技术制成的。

图 13 - 48 所示为语音识别的听觉传感器控制系统框图。

机器人由听觉传感器实现了“人 - 机”对话。

2. 味觉与嗅觉传感器

味觉和嗅觉传感器也称为化学感觉传感器。它的功能是确定对象物体的酸、甜、苦、辣

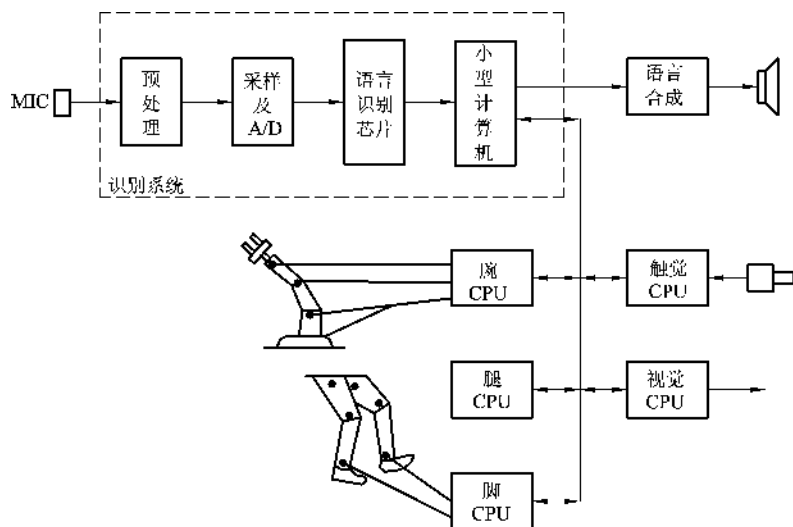


图 13-48 语音识别的听觉传感器控制系统框图

及芳香等的程度。一般味觉可探测溶于水中的物质，嗅觉用于探测气体状的物质。通常探测化学物质时，嗅觉比味觉更敏感。

实用的味觉传感器有 pH 计、化学分析器等；嗅觉传感器主要采用气敏传感器、射线传感器等。在放射线、高温煤烟、可燃性气体以及其他有毒气体的恶劣环境下，开发检测放射线、可燃气体及有毒气体的传感器是很重要的，这对于我们了解环境污染、预防火灾和毒气泄漏报警具有重大的意义。

此外，还有纯工程学的传感器，如检测磁场的磁传感器，检测各种异常的安全用传感器和电波传感器等。

总之，机器人传感器是机器人研究中必不可缺的课题。虽然，目前机器人的感觉能力和处理意外事件的能力还非常有限，但可预言，随着新材料、新技术的不断出现，新型实用的机器人传感器将会得到更快的发展。

习题 13

- 13-1 微波传感器由几部分组成？微波传感器分几类？
- 13-2 举例说明微波传感器的应用。
- 13-3 超导传感器有哪些？
- 13-4 生物传感器包括哪些？
- 13-5 叙述酶、微生物传感器的基本工作原理。
- 13-6 叙述免疫传感器的基本工作原理。
- 13-7 如何用生物传感器诊断一个病人是否得了糖尿病？
- 13-8 机器人传感器包括几大类？举例说明外部检测传感器各有何用途。
- 13-9 视觉传感器是如何获取外界信息的？

参考文献

1. 费业泰. 误差理论与数据处理. 北京:机械工业出版社,2000
2. 梁晋文等. 误差理论与数据处理. 北京:中国计量出版社,2001
3. 施昌彦. 测量不确定度评定与表示指南. 北京:中国计量出版社,2000
4. 王绍纯. 自动检测技术. 北京:冶金工业出版社,1995
5. 强锡富. 传感器. 北京:机械工业出版社,1989
6. [日]森村正直,山崎弘朗著. 传感器工程学. 孙宝元译. 大连:大连工学院出版社,1988
7. 陶宝祺,王妮. 电阻应变式传感器. 北京:国防工业出版社,1993
8. 张福学. 现代实用传感器电路. 北京:中国计量出版社,1997
9. 吴道悌. 非电量电测技术. 西安:西安交通大学出版社,2001
10. 徐恕宏. 传感器原理及其设计基础. 北京:机械工业出版社,1989
11. 黄贤武,郑筱霞. 传感器原理及应用. 成都:电子科技大学出版社,1999
12. 黄继昌等编著. 传感器的原理及应用实例. 北京:人民邮电出版社,1998
13. 严钟豪,谭祖根. 非电量检测技术. 北京:机械工业出版社,1983
14. 贾伯年,俞朴. 传感器技术. 南京:东南大学出版社,1990
15. 康昌鹤等. 气温敏感器件及其应用. 北京:科学出版社,1987
16. 郭振芹. 非电量电测量. 北京:中国计量出版社,1990
17. 牛德芳. 半导体传感器原理及其应用. 大连:大连理工大学出版社,1994
18. 实用电子电路手册编写组编. 实用电子电路手册. 北京:高等教育出版社,1991
19. 吴东鑫. 新型实用传感器应用指南. 北京:电子工业出版社,1998
20. 刘迎春,叶湘滨. 传感器原理设计与应用(第四版). 北京:国防科技大学出版社,2002
21. 余瑞芳. 传感器原理. 北京:航空工业出版社,1995
22. 魏文广等. 现代传感技术. 沈阳:东北大学出版社,2001
23. 王家桢,王俊杰. 传感器与变送器. 北京:清华大学出版社,1996
24. 单成祥. 传感器的理论与设计基础及其应用. 北京:国防工业出版社,1999
25. 施文康等. 检测技术. 北京:机械工业出版社,2000
26. 侯国章. 测试与传感器技术. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998
27. 金篆芷,王明时. 现代传感器技术. 北京:电子工业出版社,1995
28. 杜维等. 过程检测技术及仪表. 北京:化学工业出版社,1999
29. 盛克仁. 过程测量仪表. 北京:化学工业出版社,1992
30. 何适生. 热工参数测量及仪表. 北京:水利电力出版社,1990
31. 范玉久. 化工测量及仪表. 北京:化学工业出版社,2001
32. 尹雪飞,陈克安. 集成电路速查大全[M]. 西安:西安电子科大出版社,2000
33. 丁镇生. 传感及其遥控遥测技术应用[M]. 北京:电子工业出版社,2002
34. 何希才. 传感器及其应用电路[M]. 北京:电子工业出版社,2001
35. 何道清. 传感器与传感技术. 北京:科学出版社,2004
36. 张洪润,张亚凡. 传感器技术与应用教程. 北京:清华大学出版社,2005. 4
37. 马西秦. 自动检测技术. 北京:机械工业出版社,2006. 1