



新中国计量事业的发展概况（三）

王拥军 编著

# 目 录

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 力学计量的简要介绍 .....     | 1   |
| 质量计量和力值计量 .....     | 2   |
| 硬度计量的创立与发展 .....    | 10  |
| 振动冲击与转速计量 .....     | 13  |
| 容量与密度计量 .....       | 17  |
| 重力加速度绝对测量 .....     | 20  |
| 压力计量的建立与发展 .....    | 23  |
| 应用极为广泛的真空计量 .....   | 25  |
| 流量计量的建立与发展 .....    | 29  |
| 热学计量的发展与研究 .....    | 32  |
| 电学和磁学计量的发展概况 .....  | 49  |
| 时间与频率计量的发展概况 .....  | 71  |
| 无线电计量的发展和研究 .....   | 85  |
| 光学计量的发展概况 .....     | 101 |
| 光学计量概述 .....        | 101 |
| 光度计量 .....          | 102 |
| 辐射计量 .....          | 107 |
| 激光参数计量 .....        | 110 |
| 色度与光学材料特性计量 .....   | 114 |
| 电离辐射计量的发展概况 .....   | 117 |
| 声学计量的发展概况 .....     | 135 |
| 化学计量的发展概况 .....     | 150 |
| 概述 .....            | 150 |
| 化学计量的发展 .....       | 153 |
| 化学计量的研究成果及其应用 ..... | 155 |
| 标准物质的研制、应用及管理 ..... | 160 |

## 力学计量的简要介绍

力学量包括质量、力值、速度、加速度、压力、容量、密度、流量及转速等量。力学计量工作的任务是：在全国范围内实现上述单位量值的统一和保证量值的准确可靠；建立上述各种量值的基准、标准；研究相应的量值传递系统；研制有关的测试仪器及制定检定规程以及对有关计量器具进行定型鉴定等，为《计量法》在力学领域内的贯彻执行提供技术保证。

力学计量是经典计量的重要内容之一。随着工农业生产，国防建设和科学技术的发展，八十年代，力学计量已开展的项目有质量、容量、密度、力值、硬度、振动、转速、压力、流量、真空和重力加速度的绝对测量等。它们在冶金、煤炭、电力、石油化工、机械制造、轻工纺织、航天航空、地震预报、医疗卫生、交通运输、国内外贸易以及国防建设等各部门中得到了广泛应用。

中国力学计量的发展大体上经历了三个阶段。

### （一）五十年代的组建阶段。

新中国成立初期，中央技术局度量衡管理处重点抓了国内衡器的量值统一。第一个五年计划期间为适应大规模工业建设和国防建设需要，机械工业部门开展了测力硬度计量工作，对所属厂矿企业的材料试验机和硬度计等进行检定。一九五八年，一机部工具研究院的计量部份并入国家计量局后，成立了国家计量局力学处，处下分设质量密度室、测力硬度转速室、流量压力室和真空组等。这是中国力学计量从度量衡转向工业计量，为

生产服务的重要转折。

### （二）六十年代前半期的普及发展阶段。

一九五九年，国家计量局开始研制建立质量、密度、压力、测力和硬度等方面的部份计量基准和标准，并开展了相应的检定传递工作。有些地方计量机构的力学计量部门也开始进行了这方面的检定工作。但是，各地发展不平衡，不少地方计量部门的工作还只限于度量衡范围。由于缺乏检定力量和设备，许多计量器具只得远途送到国家计量局检定。为了进一步在全国范围内推动力学计量的开展，国家计量局通过举办学习班或派技术人员深入基层等方法，帮助地方计量部门开展工作。一九六三年在上海召开了第一届全国计量机构的力学科长会议。会议交流了各地开展力学计量的经验，提出地方计量部门要根据需要，由低到高、由粗到精、循序渐进地尽快开展力学计量工作。这次会议对全国力学计量工作的发展起到了一定的推动作用。

### （三）六十年代中期的研究提高阶段。

工农业生产和国防建设的发展，要求建立力学计量的国家基准、标准以及制定相应的检定系统和检定规程。为此，计量部门采用了电子、激光、传感器和计算机等先进技术，使力学计量在广度和深度、量限和准确度等方面发展到一个新的阶段，满足了国民经济建设的需要。

## 质量计量和力值计量

质量计量是以国家千克基准砝码为基础的。千克是中国法定计量单位制的一个基本单位。

### 一、质量计量的发展过程

### （一）国家千克基准及其量值传递系统的建立。

旧中国留下来的只是 2 个不锈钢砝码，一些古代铜衡，几台普通天平和 1 台只有支架和横梁的日本帝国主义扶植的“满洲国”傀儡政权时期的原器天平。

为了满足第一个五年计划期间各部门对质量计量的迫切要求，国家计量局从一九五六年到一九六一年，先后从苏联引进了经苏联门捷列夫计量科学研究院检定、编号为№17，№22，№36 和№45 的 4 个不锈钢砝码，确定其为中国当时的千克工作基准；并引进了克组、毫克组工作基准和一等标准砝码。与此同时，国家计量局实验工厂研制了编号为№9 和№10 的 2 个千克副基准砝码，20 个千克工作基准砝码；北京玉器厂研制了 20 个水晶克工作基准砝码。其中有的分配到省、市计量部门，作为最高标准，为统一国内的质量量值创造了条件。

一九六五年计量院从奥地利引进了 1 台原器天平，其分度值和变动性均为 0.16 毫克。为了提高该原器天平的计量性能，计量院于一九六五至一九六七年期间进行了调修，使之达到空载与满载分度值均不大于 0.037 毫米，变动性不大于 0.033 毫克。一九六五年，该院又引进了经国际计量局检定的、国际统一编号为№60 和№61 的两个铂铱合金千克砝码，其中№60 被定为质量国家基准，准确度为  $8 \times 10^{-9}$ 。

由国家千克基准砝码在新原器天平上检定出的 3 个千克砝码被定为国家千克副基准，再由千克副基准在原器天平上检出 23 个千克砝码被定为工作基准砝码。

同时，国内自行研制出不同称量、不同准确度等级的天平。

通过不同等级的天平与千克基准砝码传递下来的不

同等级砝码相组合，在全国各级地方计量部门和一些工业部门建立了相应等级的质量标准。计量院等单位还制订了砝码，天平和秤的检定规程。这样，在全国范围内形成了比较完整的质量检定系统，其量值可溯源到国际计量局保存的国际千克原器。此外，计量院、计量分院和上海天平厂合作研制了称量为 1 千克的真空计量学天平。

### （二）大称量天平的研制。

为了满足大型衡器检定和其它大质量测试的需要，一九六五年，计量院实验工厂研制成称量为 2 吨，准确度为  $1 \times 10^{-6}$  的机械式等臂天平。为检定国内 1 兆牛力基准测力机的砝码，一九七五年测试院、沈阳天平厂和航天部共同研制成称量为 3 吨，准确度为  $1 \times 10^{-6}$  的机械式等臂天平。此后航天部计量站、航空部三〇四所及个别省级计量部门根据各自需要也建立了类同的 3 吨天平。

在轨道衡方面，国家计量局于一九七三年在铁道部标准计量所建立了国家轨道衡计量站，负责全国轨道衡的检定工作。该所已建立了 100 吨标准轨道衡和 2 列动态检衡车。

### （三）采用新技术研制电子衡量仪器。

随着冶金、煤炭等工业和对外贸易的发展，愈来愈多的部门要求解决快速、动态和自动称重问题。电子技术特别是微机技术和快速响应传感元件的出现与发展，为上述问题的解决提供了条件。

一九六八年至一九七三年，计量院和北京光学仪器厂合作，以及一九七五年至一九八〇年计量院单独进行，先后研制了称量为 1 克、分度值为 1 微克以及称量为 2

克、分度值为 1 微克的电子微量天平。进入八十年代后，甘肃红山材料试验机厂，承德仪表厂等单位先后研制并生产出动态电子轨道衡。计量院等单位还研制成功 50 吨电子汽车衡，10 吨动态电子秤及机车秤等。

计量院还会同有关地方计量部门，于一九七八年在国内海拔 4—3000 米的不同地区进行了空气浮力对衡量影响的试验，其结果已用到砝码检定规程和砝码的国家标准中。

## 二、质量计量在国民经济中的作用

随着质量计量的不断发展与完善，它在国民经济中发挥了愈来愈重要的作用。据一九八〇和一九八一两年的不完全统计，由于外贸商检部门采用计量仪器对粮、棉、油、糖、化肥、橡胶等大宗进口商品把好了称量关，仅因短重获得索赔款约 3500 万美元。淮南发电厂每天耗煤约 5000 吨，采取准确称重措施后，每天减少煤耗 300—400 吨。首都钢铁公司一九八〇年五月安装动态电子轨道衡后，半年减少损失 130 万元。

质量计量工作保证了国家外贸工作的正常进行，促进了企业的科学管理，在国民经济建设中的作用是举足轻重的。

凡是可以改变物体的运动状态或使物体变形的作用称为力。在中国的法定计量单位制中，力的单位为牛顿（N）。

力值计量多与材料的力学机械性能有关，即与材料在不同条件下抵抗外力（如：拉力、压力、剪切力、扭力等）的能力有关，此外还有喷气发动机、飞机和火箭发动机推力，以及船舶锚链的拉力和轧钢机轧制力的测量。

力值计量的基本任务是保证测量力的仪器设备所测力值的准确可靠和正确使用，以统一全国的力值。

### 一、力值计量的普及与发展

五十年代初期，国内仅少数几个单位有测力计，用于本部门材料试验机的检定。随着国民经济的恢复和大规模经济建设的开始，国内进口了大量的材料试验机。一机部计量检定所于一九五四年从瑞士进口了 5 千牛到 1 兆牛的几套弹性环和水银箱式标准测力计，对一机部所属厂矿企业的材料试验机进行了统一检定。与此同时，二机部计量部门也开展了这项工作。

一九五八年国家计量局抽调部份技术人员和设备支援有关省（市）计量部门，加强地方测力计量工作，同时举办学习班为地方培训人员。到一九六〇年底，绝大部分省（市）计量机构都已开展力值计量工作。但当时还没有检定测力计用的标准测力机。国家计量局对 10 千牛以下的测力计采用借助反向器通过人工直接加砝码的方法进行检定；对 10 千牛以上的测力计，则采用“串联”方法检定。

一九五九年，三机部在国家计量局帮助下研制成功中国第一台 500 千牛液压式力标准测力机，承担了当时国内 500 千牛以下测力计的检定。一九六〇年底，国家计量局从民主德国进口 1 台 1 兆牛杠杆式标准测力机。这是国家当时最高力值标准，对统一 1 兆牛以下全国力值发挥了重要作用。一九六三年，国家计量局和长春材料试验机厂分别研制成 5 千牛静重式基准测力机和 60 千牛杠杆式标准测力机。从一九五九年以来这些标准测力机检定了各种测力仪器约 1 万台（件）。

### 二、力值计量的研究与提高



### （一）建立大力值标准。

根据宇航工业和其它部门的需要，一九六一至一九六六年间，国家计量局负责设计，上海重型机床厂负责制造，为七机部一院研制成功了 5 兆牛液压式标准测力机。一九六六至一九八〇年间，计量院、计量分院和上海重型机床厂在第一台 5 兆牛标准测力机的基础上，经过改进和提高，又研制了第二台 5 兆牛液压式标准测力机。该机力值准确度优于  $5 \times 10^{-4}$ ，达到了世界先进水平。这 2 台标准的建立，不仅解决了宇航工业中的大力值精密测量和全国 1 兆牛至 5 兆牛各种测力仪器的检定问题，同时在其它部门也发挥了应有的作用。例如，八十年代初，镇江锚链厂试验锚链拉力用的 5 兆牛试验机，经计量院对其检定出证后，该厂出口的锚链得到国际劳埃德船级社的认可和免检。其出口价格可提高三分之一。一九八六年测试院研制成了 50 兆牛力源装置

### （二）建立 1 兆牛以下高准确度力值检定系统。

从六十年代后期开始，计量院实验工厂、北京计量仪器厂、长春材料试验机厂和红山材料试验厂等单位研制并生产了 60 千牛静重式标准测力机，60 千牛、100 千牛、300 千牛和 1 兆牛杠杆式标准测力机，600 千牛、2 兆牛液压式标准测力机。

为保证全国标准测力机的力值一致准确，需建立力值国家基准，一九六四至一九六七年，计量院和长春材料试验机厂共同研制成功 100 千牛静重式基准测力机，力值范围为 2 至 100 千牛，力值准确度为  $1 \times 10^{-5}$ 。该机安装在计量分院。

一九六六到一九七七年研究建立了 1 兆牛静重式基准测力机。该机由计量院于一九六六年开始研究设计，

后因“文化大革命”中断，一九六九年继续进行。一九七一年该机的研制任务转交计量分院负责，两院联合研制。一九七七年完成并通过国家鉴定。该机测量范围为 20 千牛—1 兆牛，力值准确度为  $1 \times 10^{-5}$ 。该机会先后与联邦德国物理技术研究院，意大利国家计量研究所的基准机进行过主分量的力值比对与寄生分量的测试。结果表明，该机主分量与上述两国差异不大于  $5 \times 10^{-5}$ ，寄生分量与欧洲经济共同体的静重机的寄生分量水平相当。

六十年代后期，计量院、测试院和三机部三〇四所、长春材料试验机厂和红山材机厂等单位合作先后研制了 10 千牛—1 千牛不同量程的光学式标准测力计，其变动度和长期不稳定性均为  $5 \times 10^{-4}$ 。一九七七年计量院研制了激光式标准测力计，其量程为 300 千牛—1 兆牛，其变动度和长期不稳定性优于  $3 \times 10^{-4}$ 。利用这些测力计除对若干杠杆式和液压式力标准进行了检定和比对，使其准确度达到  $5 \times 10^{-4}$  外，还系统地研究了和国环状测力计的温度修正系数及力与变形的函数关系。

八十年代初，计量院，测试院、三机部三〇所等单位分别从联邦德国、英国等引进高精度传感器与配套仪表，用于力标准机的比对与检定。利用这种方法可使杠杆式力标准机的力值准确度提高到  $3 \times 10^{-4}$ 。

### （三）建立动态力和扭矩标准。

为了解决不同形式的力值统一问题，国家在下列领域中开展了研究工作。

一九六九至一九七一年间，计量院会同北京计量仪器厂、三机部三〇四所和冶金部钢铁研究院共同研制成摆锤式冲击试验机检定装置，初步解决了这种冲击试验

机的检定问题。为了进一步提高材料冲击试验结果的可靠性和可比性，在一九八〇至一九八五年，计量院会同北京市计量局，宁夏吴忠材料试验机厂和冶金部钢铁研究院共同研制成标准摆锤式冲击机组与标准冲击块。这套标准的建立及有关理论的系统研究，使中国在摆锤式冲击机方面的计量研究达到了较高水平。

根据国防工程的需要，一九七七年计量院会同工程兵八九〇〇二部队着手研究动态力标准。一九八一年完成了动态力匹配误差的研究，一九八三年建立了 1 兆牛落锤式冲击力标准，其测力范围为 100 千牛至 1 兆牛，力值上升时间不大于 0.4 毫秒，系统的幅值准确度优于  $\pm 5\%$ 。

为了解决扭转试验机与扭矩传感器的检定，计量院在一九八三至一九八四年间，建立了由青山试验机厂生产的 1 千牛米和 5 千牛米 2 台标准扭矩机。此后，应航空工业部和民航总局要求，计量院研制成扭矩扳手测量仪，为飞机的制造业和修理业做出一定贡献。

#### （四）测力与称重传感器的研究与生产。

为了满足各部门测力与称重的需要，从七十年后期开始，计量院会同科学院化学所、冶金部钢铁研究院等单位研究并生产出各种类型的电阻应变式传感器及不同规格的应变计。已先后研制成功的传感器有板环型、双孔型、S 型、轮辐型、梁式、柱式等，其负荷范围为 50 牛至 1 兆牛。其线性、重复性等单项指标达到或优于满量程的 0.03%。计量院等单位还研制了相应的测试仪器与高稳定度直流电源。这些工作为国防、科研，特别是为工农业生产做出一定的贡献。

## 硬度计量的创立与发展

硬度是衡量材料性能和产品质量的重要指标之一，硬度试验在工业生产以及国防建设中得到广泛应用。

硬度试验方法按被试验材料分为金属和非金属两种。国内外应用最多的是金属材料的布氏、洛氏、表面洛氏、维氏、显微和肖氏等硬度试验方法。

硬度计量的基本任务是研究建立国家硬度基准与标准，通过标准硬度块，按照相应的技术法规所规定的方法和程序，把硬度量值从基准传递到工作硬度计上，从而保证全国硬度量值的准确一致。

### 一、硬度计量的初创

五十年代初，中国还没有专门机构对各部门使用的硬度计进行统一检定与维修，硬度计失准情况比较严重，经常引起部门间的产品质量纠纷，甚致导致产品成批报废。这种情况在军工生产中尤为突出。从一九五四年起，一机部计量检定所和二机部计量部门（军工系统）开展了硬度计量工作。最初，从国外买来硬度块，对各厂矿企业的硬度计进行检定。

一九五八年，国家计量局抽调部分科技人员分别到内蒙、新疆、四川、浙江和吉林等省、自治区筹建地方计量机构开展硬度计量工作。一九五九年，在天津召开了第一届全国测力硬度计量经验交流会。这次会议大大促进了绝大部分省、自治区、直辖市计量部门硬度计量工作的开展。

### 二、洛氏硬度基准的建立及其量值传递

洛氏基准的建立经历了建立临时洛氏硬度基准、新

洛氏硬度基准和激光洛氏硬度基准三个阶段。

（一）临时洛氏硬度基准的建立。一九五八年后，各部门从苏联、民主德国、联邦德国等国家进口许多硬度块。实践中发现，用不同国家的硬度块检定同一台硬度计，其结果很不一致。为解决该问题，一九五九年国家计量局决定用苏联提供的基准洛氏硬度块组作为中国临时洛氏硬度基准（下称旧基准），用意大利 A—200 型光学硬度计做为标准洛氏硬度计，对全国的标准硬度块进行定度。这在当时为统一全国硬度值起了一定的作用。

（二）新洛氏硬度基准的建立。随着实践的深入，在旧基准值的传递过程中发现了某些不合理现象。经调查研究和试验分析表明，这是由于苏联当时提供的基准块本身存在偏差造成的。因此需要建立中国新的洛氏硬度基准。一九六一年国家计量局研究建立了由直接加荷式高准确度硬度计和基准压头组组成的新洛氏基准（以下简称新基准）。该基准与民主德国、苏联等国的基准比对后，确认该基准是准确、可靠和实用的。

由于新旧洛氏基准之间存在大约—2HRC 的偏差，因此在采用新基准时涉及全国各生产单位的大量图纸资料上的硬度指标是否需要修改的复杂问题，对绝大部分图纸资料中的洛氏指标不需要修改。为了解决实际存在的问题，一九六三年国家计量局在北京召开了全国贯彻新硬度基准会议。

此后用新基准值统一了全国的洛氏硬度量值，保证了生产的顺利进行，在外贸方面也发挥了其应有的作用。如一九六九年中国进出口公司从日本进口了一批轴承，经中方检查发现其硬度值超差。但日方以两国洛氏硬度基准值不一致为理由拒绝赔款。后经比对，两国洛氏硬

度基准值只差 0.19HRC，日方只好赔偿，3,600 万日元。

（三）激光洛氏和表面洛氏基准的建立。由于新基准采用螺旋显微镜测量压痕深度，效率很低，存在人为读数误差。为了提高洛氏基准准确度，消除人为读数误差，实现测量自动化，计量院、计量分院和宁夏吴忠材料试验机厂等 8 个单位于一九七四年联合组成课题组，研制激光式高准确度全自动洛氏和表面洛氏硬度基准，并于一九八一年研制成功。

该基准的主要技术指标达到世界先进水平，洛氏硬度的综合示值误差优于 $\pm 0.15\text{HR}$ ，表面洛氏硬度的综合示值误差优于 $\pm 0.2\text{HR}$ 。激光洛氏硬度基准与新基准值是一致的。

### 三、其它各类硬度基准的建立及其量值传递

一九六五年计量院建立了直接加荷式布氏硬度基准。该机的最大负荷为 29.42 千牛，布氏硬度的示值综合误差优于 $\pm 0.5\%$ 。同年，该院还建立了直接加荷式维氏硬度基准，维氏硬度的示值综合误差优于 $\pm 1\%$ 。

一九七八年，计量院与上海第二光学仪器厂和上海轻工局计量所等单位共同研究，建立了显微硬度基准。该基准使用直接加荷法，自动加卸负荷，显微硬度的示值综合误差优于 $\pm (1.5-3.0)\%$ 。

一九八一年，测试院会同有关单位研究建立了肖氏硬度基准。该机加卸负荷与硬度测量均实现自动化、数字化。肖氏硬度的示值综合误差优于 $\pm 1\text{HSD}$ 。一九八四年广东省计量科学研究所在上海第二光学仪器厂、广州试验仪器厂和广州橡胶制品研究所的协作下，研究建立了常规型橡胶硬度基准。该机在 30—95 IRHD 范围内的示值综合误差优于 $\pm 0.3\text{IRHD}$ 。

标准硬度块是把各种硬度基准量值传递到工作硬度计的标准量具。五十年代国内使用的大量标准硬度块都是进口的。六十年代初，为新洛氏硬度基准传递的需要，国家计量局组织上海工具厂首次研制生产几万块标准硬度块。此后，国内有关单位和生产厂家在研制标准硬度块方面作了大量工作。全国每年需要的几十万块各种硬度块都是由国内生产供应。

通过硬度测量，还可以近似地得到材料或产品的强度性能。过去，各种硬度之间以及硬度与强度间的换算关系表均由不同国家引进，其换算值互相很不一致。计量院会同有关单位，利用国内已建立的各种硬度基准和高准确度材料试验机，通过大量试验研究，于八十年代初分别编制出中国的黑色金属的硬度与强度换算表和有色金属的硬度与强度换算表等。

## **振动冲击与转速计量**

### **一、振动冲击计量**

振动是物体运动的一种形式，从物理学观点可以认为所有的物体都会产生程度不同的振动。振动与人类的生产和生活密切相关。有害的振动会给人类的生产活动和科学试验带来巨大的损失。据美国一九六〇年统计，过去在火箭、导弹事故中，约有 40%是由于振动故障造成的。一九七三年，日本发生过 30 万千瓦双内冷发电机因振动过大造成机毁人亡事故。与此相反，人们也可以利用振动为人类服务，如爆炸探矿法，就是利用测振仪器测出炸药爆炸后的应力波传播来确定矿床位置和形状的。医学上现在也有利用振动原理来诊断、治疗疾病等。

因此，振动测量在国民经济各部门得到了广泛应用。确保各部门使用的各种振动冲击测量仪器的准确一致，是振动冲击计量工作的基本任务。

### （一）振动计量基准的建立。

五十年代，苏、美等国为满足其宇航和科学技术发展的需要，相继建立了振动标准。六十年代初，国家计量局在苏州试验仪器厂协作下试制了1台频率为10—50赫的机械标准振动台，随后又建立了30—50赫的临时振动标准。

一九六五年以后，振动测量的应用部门愈来愈多，每年都有大量振动仪器进口，同时国内有些厂家也开始生产振动仪器，产品的规格和数量不断增加。因此，这些使用中和新制的各种测振仪器的检定问题急待解决。

七十年代初，计量院和测试院在有关单位协作下分别研究和建立了高频、中频、低频振动基准。在研制这些基准中，为提高其性能采用了各种新技术。如高频振动基准，采用激光干涉原理，利用贝塞尔函数零值法和比值法提高微振幅的测量准确度和量限，该基准的加速度准确度为1—3.5%。中频振动基准的振动台，其动圈采用空气轴承导向，振幅测量采用激光干涉原理，利用计数法和多周期平均法改善，提高了振动台的性能和振幅测量准确度。该基准的加速度准确度为0.5—1%。计量分院研制的低频振动基准，采用了激光测量振幅技术，振动台动圈采用油压轴承导向，空气弹簧支承以及磁悬等先进技术。提高了振动台的技术性能和振幅测量准确度。该基准的加速度准确度为0.5—1.0%，并在此基础上经改进又为其他部门研制了一批振动测量标准装置，发挥了很好的经济效益。此外，计量院于一九八一年还



建立了横向灵敏度检定装置。

随后，航天部一院计量站、航空部三〇四所以及上海、北京等计量部门也先后采用类似技术分别建立了高频、中频或低频振动标准。

## （二）冲击计量标准的建立。

在研究建立振动基准的同时，计量院先后建立了最大加速度为 1 万米每平方秒、脉冲宽度为 0.5—20 毫秒的冲击加速度校准装置和最大加速度为 10 万米每平方秒，总准确度不大于 $\pm 5\%$ 的落球式冲击校准装置。根据国防工程的需要，中国计量科学研究院在工程兵 89002 部队和北京自动化所的协作下，于一九七九年研究建立了最大加速度为 10 万米每平方秒，脉冲宽度为 0.8—1 毫秒，总准确度不大于 $\pm 5\%$ 的冲击标准装置。该标准装置是采用空气炮作为冲击源，用二氧化碳激光器作光源，利用多普勒效应测量冲击速度，采用快速数据采集和计算机系统计算出冲击加速度。

## （三）振动、冲击基准标准的作用。

振动、冲击基准标准建立后，首先统一了国内振动、冲击的量值。其次用以仲裁由于振动、冲击量值不一致所引起的产品质量纠纷。如某厂从某国引进的一种发动机生产线，在样机验收时双方振动测量结果不一致，开始时对方怀疑是中方仪器有问题，但经测试院检定后，对方承认是他们的仪器有问题。振动冲击基准、标准的建立也促进了国内测振仪器的生产。七十年代以前，国内使用的测振仪器主要由丹麦等国进口。其间，虽然国内有些厂家开始生产某些测振仪器，但由于缺乏高准确度的检测手段，无法正确评价这些仪器的质量。振动冲击基准、标准建立后，为生产厂改进和提高测振仪器质

量提供了准确的数据。

## 二、转速计量

转速是评价机器转动性能的重要物理量。如衡量发动机性能的重要指标——功率，就是通过测量发动机的扭矩和转速求得的。发电机发出的频率正确与否，也是由其准确的转速测量控制的。有些动力机械的转速控制更是保证其安全运行的重要手段，六十年代初，河北某电厂因转速表失准，汽轮机转速过高，引起机器爆炸，厂房被毁。保证广泛应用的各種转速测量仪器的示值一致准确，是转速计量的主要任务。

根据生产需要，国家计量局于一九六二年用从苏联进口的 TX—4 转速装置，经调试后建立了测量范围为 40—40000 转每分，准确度不大于  $\pm 0.1\%$  的国家转速标准。

一九六三年，国家计量局对从瑞士进口的转速装置加以改进，采用频闪测速法建立了测量范围为 30—40000 转每分，准确度不大于  $\pm 0.05\%$  的转速标准，提高了原标准的准确度。

为满足科研、生产等部门提出的高准确度、高转速的测量要求，计量院在杭州手表厂、天津电气传动研究所的协作下，于一九七九年研究建立了测量范围为 30—100000 转每分，准确度不大于  $\pm 5 \times 10^{-5}$  的国家转速标准。此外，计量院还与湖北省计量测试研究所共同研究建立了准确度不大于  $\pm 1 \times 10^{-4}$  的 10 万转每分的转速标准。

截至一九八六年，全国绝大部分地方计量部门都建立了 4 万转每分的转速标准。八十年代的转速计量已可满足国民经济的需要。

## 容量与密度计量

### 一、容量计量

在工农业生产、运输、贸易和日常生活中，人们常用量杯、滴定管、油罐、油车等计量贮存或运输各种液体或气体。这些器具称为容器，而它所能贮存液体或气体的体积则称为容量。容器在医药卫生、石油化工、国内外贸易等方面得到广泛应用。容量计量的任务是保证这些容器的体积准确一致。

五十年代初期，容量计量主要用于与人民生活相关的商业贸易领域。一九五六年，国家计量局组织部分省（市）计量人员集中标定了几套量程为 2.5 毫升至 2 升的一等玻璃量器。一九六四年，上海市计量管理处受国家计量局委托，为其它省市计量部门研制生产了一批量程为 5 至 10 升的一等标准金属量器和 2 升以下的一等玻璃量器，并为这些计量部门培训了容量计量人员，开展全国小容量（玻璃量器）计量工作。当时全国大容器的检定工作主要委托商业部石油公司进行，国家计量部门负责监督管理。

一九六三年，国家计量局会同商业部、石油部、中国人民解放军总后勤部和物资局等单位对全国 1.1 万辆油罐车进行了检定，编制了不同类型的容积表 110 种。

为适应石油化学工业和国内外贸易发展新的需要，一九八〇年，计量院正式成立了容量实验室，其任务是重点研究大容量容器新的检定方法和研究建立中容量（标准金属量器）的基准标准。到一九八六年底，已研制出了 1 套新的大容量检测设备，编制了相应的检定规

程。此外，还研制了 1 台分度值为 1 克的自动操作的一吨容量标准天平，以及准确度优于  $1 \times 10^{-4}$  的高准确度金属标准量器，为石油化工产品的国内外贸易提供了必要手段。

## 二、密度计量

密度是物体单位体积所具有的质量。在石油化工、酿造和制糖等工业生产中，密度计量是控制生产流程，衡量产品质量的主要参数。在商品交易中，用容量法或流量法计量石油化工产品数量时，需要准确测量其密度值。在航海、气象等行业也需要测量水或空气的密度值等。保证各种密度计量器具的量值准确一致，是密度计量所要解决的主要问题。

### （一）密度计量的初期发展。

新中国成立初期，全国只有沈阳市计量所有一套日本帝国主义扶植的“满洲国”傀儡政权时期留下来的分度值为 0.02% 的密度计。随着酿酒业的发展，急需解决国内酒精计的统一问题。因此，一九五五年该所用日本帝国主义扶植的“满洲国”傀儡政权时期留下的那套密度计检定出一套分度值为 0.1%、标准温度为 15 摄氏度的酒精计作为国家临时酒精计标准。

一九五三年，上海市计量局建立了密度实验室。他们以上海天文仪器厂生产的经沈阳市计量所检定的、分度值为 0.1% 的密度计，用分度值相同的联邦德国密度计和酒精作参考，开展了密度计的检定工作。

一九五五年，国家计量局委托上海市标准计量管理处和上海天文仪器厂制造了 3 套分度值为 0.05% 的酒精计组，由上海市计量管理处用静力衡量法定度。并于一九五八年将其中 1 套送往苏联用静力衡量法再次进行了

定度。一九五八年，国家计量局会同商业部，手工业合作总社发出联合通知，废除标准温度为 15 摄氏度的原国家临时酒精计标准，确定以经苏联定度的分度值为 0.05%、标准温度为 20 摄氏度的酒精计组（23 支）作为国家酒精计基准。

一九五九至一九六〇年，国家科委计量局会同上海市计量管理处和上海天文仪器厂设计研制了 4 套（46 支）高准度密度计。用静力衡量法对这些密度计定度，一九六四年正式建立国家基准密度计组，其密度范围为 0.65—2.00 克每立方米，准确度为 0.4 分度（相当于  $2 \times 10^{-5}$ — $8 \times 10^{-5}$  克每立方米），达到了世界先进水平。

六十年代前期，国家计量局建立了一等标准密度小组，一等标准酒精计组和一等标准海水计组。其间，制定和修订了浮计检定规程。与此同时，地方计量部门也建立了相应的密度计标准。

## （二）密度计量的迅速发展。

六十年代，中国石油工业迅速发展，在石油的生产和销售以及科研设计等方面，对密度计量和密度温度系数的准确性提出了更高的要求。新中国成立以后国内一直采用苏联沙柯夫密度温度系数，但实践证明这个系数不完全适合中国情况。为了确定中国自己的密度温度系数，一九六六年，石油部会同计量院和有关石油生产、使用单位，用比重瓶法对 136 种油样测得 5000 多组密度—温度数据，经计算机处理后，得到了石油密度温度系数和标准温度下的密度关系式。以此为基础编制了相应的石油密度计量表，并作为国家标准颁布实行。

为能快速、自动、准确地测量管线中原油、成品油或天然气等的密度，在七十年代初，大庆油田科学研究

设计院与哈尔滨工业大学共同研制出单管振动式密度计，其静态准确度为 0.1%。此后该院又同上海自动化仪表九厂一起研制出双管振动式密度计，在 0.83—0.85 克每立方厘米范围内，其准确度为 0.001 克每立方厘米。

由于天然气开采的需要，一九七五年，川汉天然气输气工程提出输气工程中输送天然气的密度准确测量问题。为此，上海自动化仪表研究所与开封仪表厂等单位先后研制成功振动式气体密度计及旁通式和内插式振动型密度计，其准确度分别为 0.1% 和 0.2%。为了解决上述新型的气体液体密度计的检定问题，计量院于一九七八年至一九八一年分别研制成功了准确度为 0.0001 克每立方米的动态液体密度计标准装置和准确度为 0.04% 的气体密度计标准装置。

为建立国家基准压力计，在一九八三至一九八五年间，中国计量院进行了水银密度的精确测定工作。在 20 摄氏度时，对两种水银样品测得的密度分别为 13545.858 千克每立方米和 13545.856 千克每立方米，其平均值准确度优于  $2 \times 10^{-6}$ （包括标准样品的误差）。

## 重力加速度绝对测量

重力加速度 (g) 是物理学的一个基本物理量。绝对重力值的准确测定在物理学、地球物理学、计量学、空间科学等方面都有重要的科学意义。因此，从十六世纪意大利物理学家伽里略开始，许多物理学家都为研究重力加速度做出了重大贡献。

### 一、重力加速度绝对测量的发展过程

一九〇四年，德国波茨坦大地测量研究所用可倒摆

精确测定绝对重力加速度，获得了当时世界上最准确的  $g$  值，并以此点为基点建立了波茨坦重力系统。

五十年代，中国引用波茨坦系统绝对重力值，建立了中国的重力基线，开展了一等重力测量，但准确度很低（ $1 \times 10^{-5}$ ），不能满足科学技术发展的需要。

计量院于一九六五年开始着手重力加速度绝对测定的研究。一九六八年，国家某重要国防工程要求提供准确度为  $1 \times 10^{-6}$  的绝对重力加速度值。这对科研工作是一个很大的推动。开始时采用对称自由运动方案（上抛法），经多年实验，始终未能获得实验数据。一九七〇年重新组成课题组，总结了经验教训，改变了方案，开展了自由落体三位置法的研究。由于受当时设备条件的限制，该方案无法采用某些发达国家使用的多道分析的测长定时技术。后来受武汉大学对该方案意见的启发，课题组提出了符合法技术方案。经多方计算论证和反复实践，终于研制成符合测时电路，使自行设计研制的固定式绝对重力仪获得了数据。在此基础上，又继续研究改进，特别是解决了落体光心和质心的重合问题，一九七四年成功地获得准确度为  $1 \times 10^{-6}$  的重力加速度值。一九七五年正式研制成功第一台固定式激光重力仪，准确度为  $1 \times 10^{-7}$ 。

一九七六年根据国防、地震等部门的要求，计量院开始研制可移式绝对重力仪。经过多个方案的试验，一九七九年终于在固定式激光绝对重力仪上完成了可移性等试验，并使测量准确度提高到  $\pm 0.00002$  厘米每平方秒。一九八〇年国家计量局组织进行国家鉴定，确认第一代可移激光绝对重力仪（NIM- I 型）的准确度为  $1.6 \times 10^{-8}$ 。但该仪器在测点应用中，暴露出一些问题，如

笨重、效率低、存在某些变动性系统误差。

一九八四年在科学基金资助下，计量院又开始研究第二代可移式绝对重力仪（NIM—II型），并于一九八五年做出模拟装置。它由高真空室、干涉仪、电子计时系统组成，采用自由落体多位置法原理，一次下落测量 400 个数据。

中国研制的这两种可移式绝对重力仪，先后参加了两次国际比对。中国是继美国、苏联、意大利之后第四个与国际计量局的绝对重力仪进行相互比对的国家。中国的 NIM—I 型重力仪在国际计量局 A3 点测量结果为：980.925914 厘米每平方秒， $\pm 0.000016$  厘米每平方秒。该值曾被苏联科学院院士布朗什教授引用评定国际重力原点的准确度。

绝对重力仪第二次国际比对是根据国际大地测量协会的建议，为筹建新的国际绝对重力基准网而进行的，有中、美、苏、法、意 5 国 6 台仪器参加。这次 6 台仪器同时对巴黎国际计量局的 A、A3、A4、A5、A6、A7 点位进行测量，然后由 7 台高准确度相对重力仪测出各点位与 A 点的重力差，统一归算到 A 点进行比较。中国装置在 A4 点的测量结果是：980.926313 厘米每平方秒  $\pm 0.0000138$  厘米每平方秒，达到国际先进水平，取得了参加国际绝对重力基准网的资格。

## 二、重力加速度绝对测量研究成果的应用

一九七五年，固定式绝对重力仪研制成功后，计量院用该仪器对中国使用的波茨坦重力系统值进行了复测，确定该系统存在  $\pm 0.0134$  厘米每平方秒误差。

一九八〇年至一九八三年，计量院使用 NIM—I 型可移式绝对重力仪，在北京和河北、江苏、安徽、广东、



广西、云南等省、市建立了 14 个绝对重力点，为建立中国新的重力网做出了贡献。计量院先后向航天、测绘、地震等 13 个部门提供精确重力值，也向朝鲜民主主义人民共和国提供了数据。一九八〇年，还参加了中国科学院组织在云南对日全蚀进行联合观察的大型科学考查活动，为日全蚀研究积累了资料。

一九八六年初，计量院应用 NIM—II 型可移式绝对重力仪为浙江省标准计量局传感器实验室精确测定了  $g$  值。接着又与国家地震局地质所等单位协作，用 NIM—II 型模拟装置与多台高准确度相对重力仪配合，对北京、昆明、滇西及中美地震联合实验场开展了绝对与相对重力仪的联合观测研究，行程数千公里，取得了一批有价值的数字，为研究中国重力场变化积累了宝贵的资料。

## 压力计量的建立与发展

压力是现代化生产和科学研究中一项重要参量。凡在工业上使用的各种锅炉系统、液压管道、压力加工以及科学试验中，都用各种压力仪器仪表来指示和控制生产过程，以保证产品质量和科学实验，保障生产和人身安全。

### 一、压力基准、标准的建立

压力计量工作在新中国成立以前，无专门机构进行，新中国成立以后才开始起步。到了五十年代末期，从苏联引进了 1 套一等标准活塞式压力计，其测量范围为（0.01—250）兆帕，测量准确度为  $2 \times 10^{-4}$ ，和同量程的二等标准活塞式压力计，其测量准确度为  $5 \times 10^{-4}$ 。同时成立了压力实验室，翻译和编写有关压力计量和测

试方面的技术资料 and 检定规程，并积极培养人员和准备各种必要的条件，为建立国家计量基准和标准作好准备。

一九五九年，又从苏联引进了 1 套测量范围为 0.04—60 兆帕的工作基准压力计。一九六〇年，中国试制成功了一等标准活塞式压力计，还制成了 1 台白光干涉的汞柱气压计，用于大气压力测量和对气压计的量值传递。

为使压力计量立足于国内，在六十年代中期，中国又加工出 1 套 3 台活塞式压力计，再加上原引进的 2 台，组成了临时基准器。一九七二年，又试制成了 1 套国家压力基准器，测量上限为 10 兆帕。该基准器的测量准确度为  $\pm 2.1 \times 10^{-5}$ 。通过两年的考察，性能稳定，于一九七四年正式作为国家压力基准使用。

在八十年代初，上海市标准计量管理局，自行设计制造了超高压标准装置，它采用可控间隙活塞结构，其测量上限为 2500 兆帕，准确度为  $2 \times 10^{-3}$ ，为统一国内超高压测试创造了条件。八十年代，计量院压力室又自行研制了 1 台高压工作基准，其测量范围为 4—100 兆帕，仪器的准确度可达到  $3 \times 10^{-5}$ ，可用于工作介质精度较小的环境。通过国际比对，基本符合要求。

在微压方面，一九六一年建立了基准微压计，其测量上限达 3.923 千帕（400 毫米水柱），准确度为  $\pm 0.39$  帕。一九七四年又建立了 1 台带有控温装置的基准微压计，其测量上限为 2.452 千帕，准确度为  $\pm 0.13—0.15$  帕。

一九七九年，为适应绝对压力传感器等的量值传递和测试，建立了 1 台 106.7 千帕的绝对压力装置，准确度达到  $1 \times 10^{-4}$ 。一九八六年还研制成了基准液体压力计，测量范围为 0—120 千帕，表压和差压的综合准确度

优于 0.25 帕，达到国际先进水平。

## 二、压力量值的传递

压力计量工作，除了建立国家基准和标准外，大量的任务是搞好量值传递和测试。

早在五十年代，国家计量局就组织有关人员，带着标准仪器设备，深入基层计量部门，开展压力量值的传递工作。同时，为给各地方计量部门和部分厂矿企业提供相应的标准器，还组织了有关生产单位，试制并成批生产了压力标准器。六十年代初，各省（市）计量部门、各仪表生产厂已建立起成套一等标准活塞式压力计，为开展量值传递打下了基础。七十年代中期，由计量院实验工厂生产，经该院压力室反复试验考察后，为上海、湖北、陕西、辽宁、四川和天津等省（市），先后提供了压力工作基准器，以负责有关经济协作区和生产厂产品的测试、检定及一等标准活塞式压力计的量值传递。

压力计量人员深入生产现场，为能源、水泥、冶金、化工等企业做了大量测试工作，为促进生产、保障安全贡献了一定的力量。

## 应用极为广泛的真空计量

真空技术的应用极为广泛，如电子工业中的电子管，半导体和集成电路元件的生产，冶金工业中的钢铁冶炼、钢水真空脱氧、高级金属材料的电子束冶炼，金属加工工业中的真空热处理、电子束焊接，轻工、化工、医疗和食品工业中的真空冷冻干燥，真空精馏以及产品的真空包装，低温瓶的生产等，在近代科学技术中的宇宙模拟、低温技术、粒子加速器、核聚变装置、表面物理等

等，都离不开真空技术。真空技术和真空仪表生产的发展对真空测量提出了要求。中国的真空计量工作在标准建立、真空量值传递、人员培训以及为国民经济服务方面，都取得了很大的成绩。

### 一、真空计量标准的建立

#### （一）标准压缩式真空计。

一九五九年，国家计量局从武汉玻璃仪器厂选购了 1 台座式压缩式真空计作为临时标准。一九六三年研制了新的一等标准压缩式真空计，为检定和测试工作发挥了较好的作用。经多年研究和改进，于一九七七年建成了 1 套新的标准压缩式真空计标准，于一九八三年召开了国家鉴定会，正式通过鉴定，作为基准压缩式真空计（图），其测量范围为  $(1 \times 10^{-3} - 1)$  帕，准确度为  $(2 - 0.2)\%$ 。

六十年代，复旦大学和上海市标准计量局等单位共同研制了二等标准压缩式真空计，也较好地解决了毛细管磨毛和内径均匀性的测量问题。航天部五一〇所，在压缩式真空计的毛细管内采用滴油的办法，也有效地解决了毛细压低值的波动。

#### （二）玻璃低真空膨胀法标准装置。

膨胀法标准装置，操作方便，检定效率高、没有汞，不需要液氮，也便于推广。一九六七年，中国计量科学研究院、湖北省计量局、北京市计量局及武汉玻璃仪器厂，用两年时间，共同研制了检定范围为  $(1.3 \times 10^{-1} - 4 \times 10)$  帕，准确度为 5% 的二等标准玻璃低真空膨胀法标准装置，并及时推广到 16 个省、市计量部门及一些科研和生产单位使用，对工业用热导式真空计开展了检定工作。在保证产品质量方面起了积极作用。

一九八三年到一九八五年，计量院与武汉玻璃仪器厂协作，又研制出新型膨胀法标准装置，其主要性能指标为：测量范围（ $7 \times 10^{-2} - 4 \times 10$ ）帕，准确度为 5%。该装置的定量传递阀是金属结构的电磁阀，主阀采用玻璃电磁无脂球阀。装置的压力静态保持性能大大提高，保证了测量精度，扩大了测量范围，除可用于低真空计检定外，还能在（ $7 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$ ）帕范围内对一些高真空计进行检定。航天部五一〇所，在六十年代也曾建立了 1 套玻璃结构的膨胀法真空装置，供本系统使用。

### （三）金属膨胀法真空标准装置。

一九七四年，计量院、天津市标准计量局和北京计量仪器厂协作，共同研制金属结构的膨胀法真空标准装置。该装置测量范围宽，检定效率高。经过五年努力，于一九七八年研制成功，并于同年召开了鉴定会。该装置的测量范围是（ $2.5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}$ ）帕，准确度 $\pm 5\%$ 。共研制了 3 台，分配给三家研制协作单位。分给计量院的那 1 台，又经过改进，使装置的准确度提高到 3%。

### （四）流导法真空标准装置。

由于高真空和超高真空技术的发展，上述所建立的标准装置的量限，都不能满足要求。为此，一九六七年由计量院负责，沈阳真空技术研究所和北京玻璃仪器厂参加，共同研制动态流导法真空标准装置。在研制过程中首先攻克了四级大抽速玻璃油扩散泵，解决了获得高真空的技术难关。然后集中力量，先后研制出了玻璃小孔、玻璃无脂电磁阀和流量计等一些主要部件，达到了国外同类标准装置的先进水平，于一九七七年通过鉴定。该装置的测量范围为（ $10^{-6} - 10^{-2}$ ）帕时，准确度为 5—3%，在  $10^{-7}$  帕时，为 10%。

航天部五一〇所，上海市标准计量局也研制成类似的装置，这些装置的建立，为解决超高真空的计量和测试，起了积极的作用。

#### （五）标准电离真空计。

标准电离真空计，由标准线路和标准电离规管组成。其测量范围为（ $10^{-5}$ — $10^{-1}$ ）帕，压强准确度等于或优于 10%，用于工作用（工业用）电离真空计的检定和比对。

标准电离真空计线路，最早有指针式电子管型和数显晶体管型两种，分别由成都仪器厂和黑龙江省标准计量局研制成功，并于一九七一年通过国家鉴定。

一九八四年，成都滨江仪器厂也生产出 BD2—A、BD2—B 和 BD2—C3 种型号的标准线路、并于同年十二月经国家鉴定认可。

为了与标准线路配套，一九七四年吉林省标准计量局与计量院合作研制了标准电离规管。在此基础上又经过近七年的共同努力，于一九八一年研制成功，并达到国际同类标准水平，经试用后，于一九八二年通过鉴定。

#### （六）高真空相对校准装置。

为了用标准电离真空计对工作用电离真空计进行直接比较检定，必须建立真空度可调稳定度高的相对校准装置。一九七四年曾试制了一种相对校准系统，因其稳定性较差和其它缺陷而不能使用。后来由计量院负责，武汉玻璃仪器厂参加，于一九八三年开始经过两年努力，于一九八五年完成高真空相对校准装置，于同年十月通过鉴定，其校准范围（ $10^{-5}$ — $10^{-1}$ ）帕，压力稳定度为  $\pm 0.5\%$ 。

### 二、真空计量的量值传递

真空计量标准建立后，必须逐级传递下去，才能保证真空量值的统一。中国自一九五九年筹建真空计量以来，除计量院和测试院外，已有 16 个省、市的计量局开展了真空计量的工作，有的还研制了一些标准。此外，一些大专院校、科研单位、厂矿企业也建立了真空计量室。

为保证计量单位的统一和量值的准确一致，必须加强计量管理。为此，计量院在六十和七十年代，曾举办了两次为期一个月的学习班。一些地方计量部门和各工业部的真空计量机构，也举办过各种类型的真空计量技术学习班，为搞好真空计量工作打下了良好基础。一九八四年，国家计量局对全国各省、市计量检定人员又组织了统一考核，使工作人员水平有了较大提高。

计量院一九八四年十月参加了国际计量局组织的真空量值国际比对。比对用的参考规是联邦德国的磁悬浮规。中国使用的标准设备是膨胀法真空标准装置。比对结果表明，中国的真空计量水平同其它 5 国的水平相当。

## 流量计量的建立与发展

在工业生产中，流体（水、蒸汽、燃料油等）的流量直接反映出设备的热效率和负荷的高低等情况。因此，严格监视流体的流量，对于安全生产，提高经济效益具有重要意义。

在流量计量方面，旧中国只有一些简单的水表装置，主要集中在上海、北京等几个大城市。

新中国成立后，仪表业有了相应的发展，先后建立起一些大中型仪表厂。流量测量仪表也由引进逐步发展

成为自行设计制造，品种也不断增加。为确保仪表准确可靠，各计量部门和仪表厂先后建立了流量计量和测试设备。

为适应工业发展的需要，国家计量局于一九五六年，在技术处内成立了流量计量专业组，以开展流量计量的研究和管理的工作。该专业组成立后的第一件工作就是在全国范围内进行了深入细致的调查研究，并在此基础上，提出了流量计量标准和测试技术的发展规划。

### 一、流量基准、标准的建立

第一个五年计划期间，苏联援建的大型厂矿的流量测量仪表，多半是节流装置（如孔板、喷嘴和文丘利管等）。为了解决各工业部门的流量测量和节流装置的设计和计算问题，国家计量局和上海市计量管理处，共同翻译出版了苏联的《27—54 检定规程》，作为设计节流装置的参考。

为了提高和统一流量计量，一九五九年，国家计量局流量室开始转向建立基准、标准的研制工作。当时，解决密封管道中的流速测量迫在眉睫。不仅急需研制一次元件的标准——毕托管，更重要的是提高二次仪表差压测量准确度。经过充分的研究，认为建立工作基准微压计是一种较为合适的途径，要求测量范围为 3.9 千帕，测量准确度为  $\pm 0.39$  帕。这个项目于一九六三年研制成功，并通过国家鉴定，作为国家工作基准，填补了中国微压计量的空白，其测量准确度达到了当时苏联的水平。

一九六三年国家计量局实验工厂开始筹建和研制液体流量标准装置和钟罩式气体流量标准装置，于一九六六年完成并通过国家鉴定；同时又与江淮仪表厂共同研制成功了 50 升的钟罩式气体流量标准装置；后又与丹东



计量衡器厂合作,研制了 500 升和 2000 升的标准气体装置。

为了扩大测量范围,提高测量精度,一九八一年对原来的水流量装置进行了一次改进,将流量的范围由 45 立方米每小时扩大到 146 立方米每小时,准确度由  $\pm 0.2\%$  提高到  $\pm (0.1-0.15)\%$ 。

一九八六年建立了音速喷嘴法气体流量标准装置,并通过了国家鉴定。这就将气体流量的测量范围由 120 立方米每小时扩大到 1000 立方米每小时,对天然气等能源计量提供了可靠保证。

## 二、流量计量的量值传递

为了保证量值的准确传递,计量院一九六六年制定了流量计量的传递系统。此外还建立了一套中间标准(即标准流量计组)。该标准是从开封仪表厂、天津东方红仪表厂大批生产的涡轮流量计中挑选出来的准确度高、稳定性能好的 50 和 25 厘米管径的涡轮流量计。

一九七九年,又与哈尔滨市龙江仪表厂合作,研制腰轮流量计的标准,一九八三年通过鉴定,准确度达到  $\pm 0.2\%$ 。

与此同时,各厂矿企业和研究单位,如开封仪表厂、上海自动化仪表研究所等,也相继建立了各自的流量计量装置。为了保证全国流量量值统一,在一九七三年至一九七五年期间,曾组织全国性的流量检定试点小组。在此基础上,成立了华东、中南、华北、西南、西北、东北等大区的流量计量协作组。

由于科研、生产单位的流量装置的建立和仪表制造的迅速发展,对装置和仪表的检定方法比较混乱,量值不一致,急待统一各种流量计和装置的检定方法。继一

九七五年制定液体、气体流量装置的检定规程之后，相继又制定出各种有关流量计专业的规程。到一九八六年，已制订出 20 余种检定规程。此外，结合规程的实施，从一九八〇年起，举办不同类型的学习班，为各部门培训了一批技术人才，促进了流量计量工作的发展。

### 三、流量计量为工业生产服务

一九七三年计量院与哈尔滨龙江仪表厂共同为大庆油田筹建流量计量的外输站而研制了标准体积管和检定容积式流量计。一九七七年建成，准确度达到 0.03%。

一九八〇年以后，全国各计量部门为节约能源做了大量的测试工作，收到应有的效果。如合肥钢铁公司第二钢铁厂转炉炼钢用的吹氧枪，是用柴油作冷却剂的。对冷却系统进行自动地准确计量后，使吨钢柴油耗量从 10 千克下降到 8.4 千克，经济效益明显提高。

总起来看，流量计量工作，经过了近三十年的发展，先后建立了各项基、标准装置，开展了全国的量值传递工作。但是，较之其它计量专业在满足科研、生产的需要方面，还存在较大的差距。

## 热学计量的发展与研究

### 一、热学计量的基本内容

热学计量的基本内容，主要包括两部分：测温学和量热学。测温学是利用各种物质的热效应来研究测量物体温度的科学，研究内容有：国际实用温标的复现；国家基准和标准的建立 新型测温仪器和测试装置的研究；利用新技术探索新的测温方法以及检定系统和检定规程

的制定等，以保证全国温度单位量值的统一。

量热学是研究测量物体热参数的技术。主要内容有：建立比热容、热导率、热流等标准装置，以保证热学参数的准确可靠。

## 二、温度计量的基本内容及其重要性

温度是物体冷热程度的量度。物体的冷热状态是直接由物体内部分子的平均动能决定的，平均动能越大，物体就越热，温度就越高。所以，温度是物体分子运动的平均动能的量度。

在生产活动中，温度的准确测量和控制对提高产品质量，降低成本，提高工作效率，节约能源都有着巨大的作用。在冶金工业的生产流程中，需要准确地控制冶炼过程中的温度状况。在合成氨的化学反应中，要求温度控制在 500 摄氏度 $\pm$ 5 摄氏度。在尖端科学技术中，对温度（尤其是动态温度）、超高温、超低温的测量的要求更高，如弹头进入大气层时，要经受几千度的超高温，而提高信息接受灵敏度的关键部件需要在极低温（甚至液氮）的条件下工作。这都要作预先的温度测量和试验。此外还有医疗、食品工业、农业等都需要准确的温度测量和控制。总之，温度是一个很重要的物理参数，它渗透国民经济各个领域。

## 三、温标的概念及其发展

温度测量是一项较为复杂的工作，它直接与物体的各种性质有关。比如物质的体积，压强、电阻等都随温度而变化。人们就利用这些随温度变化的物理特性来进行温度测量。各种温度计，如玻璃液体温度计、热电偶、电阻温度计以及辐射温度计等，都是利用这一原理制成的。由于制造温度计的材料不同，测量范围也不同，对

于同一物体的温度，用不同的温度计测量，就会出现差异。这样就会给生活、生产以及国际交往带来众多不便。因此，迫切需要一个公认的温度表示方法，即需要建立“温标”（或称温度标尺）。简单地说，温标就是温度的数值表示法。建立温标的目的就是确定温度的起始值和它的基本单位。历史上，曾出现过各种温标：

（一）经验温标（包括华氏温标、摄氏温标、列氏温标）。这些温标的共同特点都是用冰点和水沸点作为分度点，在这两个点之间，有不同的温度间隔。

（二）热力学温标。这种温标只要选定一个固定点（水三相点），热力学温标上的温度值就可完全确定。八十年代中期，国际上公认热力学温度是最科学、最基本的，一切温度测量最终都应以此为准。

（三）理想气体温标。它是以理想气体的压强和体积都随温度而变化的原理为基础的。

（四）国际实用温标。为统一各国之间的温度量值。在一九二七年第七届国际计量大会上，通过了一九二七年国际温标。

自从第一个国际温标问世五十多年来，经过了几次重大补充和修订，相继出现了一九四八年国际温标，一九六八年国际实用温标；一九六八年国际实用温标一九七五年修订版等。一九六八年国际实用温标在国际上是在一九六九年一月一日起实施的。中国于一九七三年一月一日开始在全国实施国际实用温标。

另外，在一九七六年，国际计量委员会批准了 0.5—30 K 范围暂行温标（EPT-76），并予以公布实施，该温标是为低温测量制订的。

#### 四、温度计量的发展

在旧中国，国弱民穷，生产落后，温度计量技术得不到发展，工业中使用的测温仪器保管不善，严重失准。新中国成立三十七年来，温度计量经历了从无到有、从粗到精地逐步发展过程。到一九八六年中国已能复现国际实用温标所规定的全部定义固定点，已建立了国家基准和标准 10 余项，建立和健全了全国计量网点，开展了量值传递工作，培养出大批专业技术骨干，还开展了直接为生产、科研服务的测试工作。所有这些，不仅说明中国的温度计量事业已经取得相当可观的成就，而且保证了全国量值的准确一致，为国民经济的发展起了一定的促进作用。温度计量的发展过程可概括为以下几个阶段：

第一阶段（一九五三至一九六〇年）。该时期的主要任务是建立组织机构，创造条件，开展业务。一九五三年，一机部计量检定所，下设热力组负责温度计量，在该部所属企业中，作了必要的调查并开展了检定。一九五五年国家计量局技术处下设立了热学组，任务是搞好自身建设，为早日开展温度计量工作作好全面准备。为加速发展温度计量工作，又把中国科学院物理研究所的测温组调入国家计量局，并成立了温度组。国家计量局在组建机构的同时还积极准备仪器设备。曾向苏联等国引进了部分标准仪器，很快开展了检定工作。一九五八年国家计量局成立热工处，处下设有高温和中低温 2 个实验室，负责基准的建立和全国的量值传递。从那时起，各项条件和人员素质都有所提高，并且集中了物力和人力，增强了技术力量。这在温度计量发展历程中是一个重大的转折。一九五八年在计量为生产服务的口号下，温度计量工作者深入到冶金、机械等企业进行现场测试，

推动各省（市）计量工作的开展。国家计量局热工处于一九五八到一九五九年间，先后举办了两次全国性的温度计量人员学习班，培训了一批技术骨干，为各地区、各部门开展工作准备了条件。另外，通过派遣技术人员出国实习和邀请苏联专家来华工作等方式，学习国外的先进技术和经验，使计量工作获得较快的发展。

第二阶段（一九六一至一九六六年）。这一时期国民经济处于稳步发展阶段，对温度计量的准确性提出了较高的要求，迫切需要建立计量基准和标准。经过计量部门的努力和各有关单位的支持，先后建立了基准光学高温计、基准温度灯、基准热电偶和基准铂电阻温度计以及相应的一、二等标准。在低温方面为复现氧沸点作好了准备。另外，还组织力量，进行深入的调查研究，制定了一九六三至一九七二年计量事业发展规划中的第二中心问题——热学计量，确定了研究方向。

国家基准和各级标准的建立，不仅为开展量值传递和精密测试创造了条件，而且，为推动各地区、各部门计量事业的发展，建立全国计量网起了决定性的作用。到一九六六年底，28个省、自治区、直辖市都有了专门机构，不同程度地开展了温度量值的传递工作。这一阶段的工作为以后的温度计量发展打下了基础。

第三阶段（一九六六至一九七六年）。一九六五年计量院成立后，取消处一级机构，将原来的高温和中低温两个实验室合为温度室，集中力量开展研究和测试工作。但因十年动乱，温度计量事业未能得到健康的发展。直到一九七二年才逐渐恢复检定和研究工作。

一九六九年十月，温度室将一些主要计量基准搬到计量分院保存，同时选调 16 名技术骨干到计量分院工

作。由于人力、物力的分散，整个温度计量工作的发展在不同程度上受到一定阻碍。

第四阶段（一九七六到一九八六年）。温度室为了有成效地为生产服务，逐步开展了一些测试项目的研究工作，加快了研究工作的速度，如光电高温比较仪、高温铂电阻温度计、低温氩、氧三相点等，先后于一九八〇年和一九八一年完成，并通过鉴定，均达到了国际水平。

在这一阶段，温度计量得到了迅速发展和提高，国际性学术交流频繁。美、英、日、联邦德国、法和澳大利亚等国，派专家来华参观访问和举行学术座谈。中方也派专家去上述国家进行合作研究或访问，相互进行了学术交流。在中国还举行了两次国际性温度计量和测试方面的学术讨论会，小型的专题讨论会更是频频进行。

除此以外，国际计量委员会温度咨询委员会和国际计量技术联合会温度测试技术专业委员会，先后于一九八〇年和一九八二年，分别接纳了中国参加工作，成为两委员会的成员。

地方各级计量部门，也开展了温度计量方面的测试、技术咨询和技术仲裁等工作，使温度计量工作逐步向纵深发展。

## 五、温度计量的研究成果

新中国成立以后，随着温度计量工作的发展，温度计量领域取得了大量成果，其中包括建立了国家计量基准 10 项，各级计量标准 20 多项。

（一）利用辐射测温法建立金凝固点以上的国际实用温标

### 1、基准光学高温计的建立。

中国利用物体辐射准确测量高温的工作，实际上是

从一九五八年开始的。当时国内迫切需要，但在短期内，本身又不具备研制条件，所以从苏联引进了ЭОП—51M型基准光学高温计，其测量范围为800—6000（必要时可延伸到10000）摄氏度。准确度为 $\pm(0.1-1.5)\%$ ；ЛТ—3和ЛТ—1型钨带温度灯2套，测量范围为900—2200摄氏度，准确度为 $\pm(2-4)$ 摄氏度；ОП—48型二等标准光学高温计1台、测量范围为（900—4000）摄氏度，准确度为 $\pm(0.2-1.5)\%$ 。基准光学高温计和钨带温度灯引进后，立即组织力量安装调试，并作了金凝固点和温标的延伸试验，经过分析对比，符合原设计要求和允许误差，批准作为临时国家基准，开展量值传递工作。此外还进口1台СПК—3型客观光谱高温计，它在金点的复现准确度为 $\pm 0.05$ 摄氏度，准确度比光学高温计的高了10倍。1400—2000摄氏度的准确度为 $\pm(0.1-1.0)$ 摄氏度。它是用光电倍增管作接收器，所以灵敏度好，而且还可复现亮温温标和颜色温标。如准确选定有效波长，也可检定温度灯。该仪器经性能试验后，开展了对温度灯的检定。与此同时，提出了建立中国自己基准光学高温计的设计方案。通过模拟试验，与三机部第六研究所合作，试制了3台样机，在此基础上经过调试和论证，并参照ЭОП—51M光学高温计的技术要求，制定了较为满意的设计方案，组织协作单位进行试制。计量院实验工厂在温度室和长度室组成的技术小组配合下，采取边加工、边试验、边改进的办法，克服了高温计小灯泡灯丝的特殊几何形状的研磨和旋转挡板加工的困难，终于完成了试制任务，为制成光学高温计奠定了基础。上海光学玻璃厂、沪光玻璃厂等协助解决了1400摄氏度以上高温测量用的吸收玻璃。



钨带温度灯是高温计量的重要标准器具。要使光学高温计能保证足够的准确度，必须要有高质量、高稳定度的钨带温度灯，要求不足 1 毫米厚的钨带垂直、光滑，温度分布均匀。从五十年代开始在北京和上海等地试制，上海亚明灯泡厂的产品达到了要求，至八十年代仍供应全国各地。一九七二年，为了扩大温度灯的使用范围，计量院与三机部三〇四所合作，研制成 2500 摄氏度的标准钨带灯供量值传递使用。

上述几个主要部件研制成功后，黑体炉、石墨坩埚等辅助设备由计量院实验工厂完成设计和制造，实验工作由计量院温度室进行。先用纯度为 99.999% 的黄金复现金凝固点，然后再用旋转档板和吸收玻璃延伸温标 800—2000 摄氏度。经过几年的多次试验和考察，并通过复杂的分析计算，于一九六四年全部完成，达到的指标是：金凝固点的准确度为  $\pm 0.5$  摄氏度，1400 摄氏度为  $\pm 1.5$  摄氏度和 2000 摄氏度时为  $\pm 4.6$  摄氏度。

## 2、基准光电比较仪的研究。

中国于一九七二年开始了基准光电高温比较仪的研究。这种仪器的优点：一是可提高复现温标的准确度，以代替基准光学高温计；二是应用现代新技术；三是采用光电元件作为感温器。接受可见光和红外辐射，还可向高温和低温方向扩展。

此外，基准光电比较仪，还具有准确度高、反应速度快、可自动、连续测温等优点。且能消除光学元件、过渡光源以及接收器固有不稳定性的影响。

光电高温比较仪的研制是一项大型的研究课题，任务繁重，技术复杂。为此，计量院和计量分院组织了哈尔滨工业大学和上海工业自动化仪表研究所等单位，采

取分工负责、定期讨论的办法进行协作研制。该仪器可用来复现金凝固点以上的国际实用温标。全部实验任务于一九八〇年完成，各项指标分别为：金凝固点的准确度为 $\pm 0.07$  摄氏度；延伸到 1400 摄氏度时为 $\pm 0.1—\pm 0.28$  摄氏度；在 1400—2000 摄氏度范围内为 $\pm 0.33—\pm 1.2$  摄氏度；确定有效波长的准确度为 $\pm 0.2$  纳米。一九八〇年通过国家鉴定，达到了国际水平。

为了验证光电高温比较仪的可靠性和复现温标的水平，曾与联邦德国物理技术研究院的真空灯作了比对，在金凝固点上，双方吻合的程度在（0.1—0.2）摄氏度以内。与英国物理研究所的真空灯和充气灯作了同样的比对。在 2000 摄氏度时，吻合在 $\pm 2$  摄氏度之内。

基准光电高温比较仪建成后，在全国范围内开展了量值传递工作，从此取代了长期使用的目测基准光学高温计。

3、标准辐射高温计检定装置和精密光电高温计的研制。

为了满足企业远距离、自动化测温的要求，计量院曾与上海电炉厂、北京计量仪器厂和云南仪表厂等单位合作，先后于一九七二年和一九八二年研制成标准辐射高温计检定装置和精密光电高温计。标准辐射高温计检定装置研制成后，全套装置交湖北省计量局，委托他们负责量值传递。

为了提高光学高温计的测温上限、扩大测温范围，根据一九六三至一九七二年科学技术发展规划，对碳弧热源（常用温度 3200 摄氏度）等高温热源进行了较深入的研究。电弧的喷火口（弧坎）温度为 3800 摄氏度，利用它可以提高延伸温标的参考点，而且可通过不同厚度

的吸收玻璃（或不同开角的档板）进行分度，还可用于直接检定 2000—3200 摄氏度光学高温计。这种热源对超高温或等离子体温度很有应用价值。

## （二）利用热电测温法建立国家基准热电偶以复现温标

热电偶测温的原理是以物体的热电效应为依据的。它是将两根不同的金属导线组成闭合回路。当两端温度不同时，回路内产生热电流，相应的电势称为热电势，根据热电势与温度的关系来进行温度测量。建立基准热电偶的目的：一是复现温标，因为国际温标规定，630.74—1064.43 摄氏度范围内的标准内插仪器是铂铑 10—铂热电偶；二是解决量值统一问题。由于热电偶结构简单，使用方便，量限宽，精度高，并适宜远距离测量和控温，故而得到极其广泛的应用。

计量院从一九五八年起，在苏联专家的指导下，做了必要的筹备工作：向国外订购了铂铑 10—铂丝、高纯金属（纯度为 99.999%的金和银等）以及高准确度的电测量设备等，并作了热电偶的各项性能试验，如均匀性、稳定性和复现性等。这样既培养了人员，取得了经验，又为立足国内作了积极的准备，如先后安排云南贵金属研究所、上海合金厂等单位试制热电偶丝，计量院化学室、沈阳冶炼厂等研究金属的提纯和分析，计量院实验工厂设计加工了金、银、铜、锑和锌 5 个定点炉和退火炉以及精洗处理等的必要设备。一九五九年高温实验室试制了第一批热电偶，并在国际温标规定的定义固定点上作了多次分度实验，选出了其中几支性能优良的作为中国的临时基准。此后又经过多次重复试验和逐年的考察，于一九六一年通过鉴定，定为国家基准。一九七九

年,将其中 2 支编号为 62—6 和 74—03 的热电偶送国际计量局作了比对。结果表明,在金 (1064.43 摄氏度)、银 (961.93 摄氏度) 和铈 (630.755 摄氏度) 3 个固定点的偏离都在 0.1—0.2 摄氏度的范围内符合,而且与国际计量局的分度结果完全相符。

除了金点和银点外,又增加了铜点 (1084.88 摄氏度) 和锌点 (419.58 摄氏度),用铜、铈和锌 3 个固定点分度工作基准热电偶。工作基准热电偶的建成满足了量值传递的需要。

双铂铑热电偶在国外已有广泛的应用。这种热电偶的两个极都是铂铑合金制成的,因而提高了抗污染能力和机械强度。它的使用温度比铂铑—铂热电偶高,长期使用到 1600 摄氏度,短期可达 1800 摄氏度,尤其在钢水测温中应用时,优点更突出。根据生产和使用部门的实际需要,计量院于一九七五年成功地建成了双铂铑热电偶标准,为高温范围用接触法测温创造了条件。

### （三）利用电阻测温法复现国际实用温标

根据国际温标规定,基准铂电阻温度计是复现 13.81 开至 630.74 摄氏度范围国际实用温标的重要内插仪器。现将各温度范围内的国际实用温标的复现情况分述如下:

1、利用电阻温度计复现 0—630.74 摄氏度范围内的国际实用温标。它采用的固定点是:水三相点 (0.01 摄氏度)、水沸点 (100 摄氏度) 或锡凝固点 (231.9681 摄氏度) 以及锌凝固点,并用规定的内插公式计算出各温度下对应的电阻值。这一基准铂电阻温度计的建立,解决了中温范围内使用的各种温度计的量值的统一问题。在基准建立之前,曾用冰点、水沸点和硫点 (444.6

摄氏度)分度了标准铂电阻温度计,并以此作为临时标准,在 $-30-300$  摄氏度范围把温度量值传给中央气象局、北京、上海等几个单位。建立这一基准的关键是制造出高准确度的铂电阻温度计。六十年代初,计量院曾自己动手制造,后来与云南仪表厂合作,经过多次反复试验,终于制成。此后,将全部技术条件和工艺交云南仪表厂生产。电阻温度计制成后,在规定的固定点上分度,得到了满意的结果,于一九六一年完成,并通过国家鉴定。在水三相点、水沸点和锌点的准确度分别为 $\pm 0.0007$  摄氏度; $\pm 0.0029$  摄氏度和 $\pm 0.002$  摄氏度。后向英国进口了史密斯—III型测温电桥,在计量分院搬迁后,又重新建立了1套装置,用锡点代替水沸点,其复现性分别达到:水三相点 $0.0001$  摄氏度;锡点 $0.0002$  摄氏度和锌点 $0.0003$  摄氏度。经多年的考察,证明该基准是稳定可靠的。

2、用低温铂电阻温度计,复现 $13.81-273.15$  开范围内的国际温标。

五十年代初,国民经济对低温测量的要求不迫切。到五十年代末,计量院热工处温度室也只对氧点( $-182.962$  摄氏度)作了必要的筹备。一九六一年,计量院首次完成了氧点的复现工作,复现性为 $0.003$  摄氏度,一九六五年,又提高到 $\pm 0.0014$  摄氏度,开展了铂电阻温度和铜—康铜热电偶的检定。

一九六八年国际实用温标公布后,计量院开始建立 $13.81-90.188$  开之间的温标,并对低温范围内所有固定点进行了全面的研究,全部工作于一九七四年完成。所得结果为:氧三相点( $54.361$  开)的复现性为( $1-2.5$ )毫开;氦沸点( $27.102$  开)的为( $0.6-0.8$ )毫

开；平衡氢沸点（20.28 开）的为（1—2.6）毫开；25/76 标准大气压下氢液态和汽态间的平衡点（17.042 开）的为（2.2—4.7）毫开和平衡氢三相点（13.81 开）的为（2—4.3）毫开。

低温温标的建立，为进一步满足对低温的应用起了重要作用。但与国际先进水平相比，还有一定的差距。

由于用三相点和凝固点代替沸点具有许多优点，所以有些国家开始研制密封三相点容器。中国于一九七九年开，已研制成氩和氧两种密封三相点容器。用氩密封三相点容器代替氧点，复现性可提高 0.1 毫开。与加拿大、法国相比，相差 0.2—0.3 毫开。氧的密封三相点容器的复现性为 0.1 毫开。一九八六年又重新复现了 13.81 开至 273.15 开间的国际实用温标，水三相点复现性为 0.1—0.2 毫开，水沸点复现性为 0.3—0.5 毫开，温标准确度为 2—3 毫开。关于 14 开以下的温标，曾设计制造了声学温度计，因经费困难而暂停研究。

一九七六年，国际上公布 0.5—30 开低温临时温标后，从一九八四年开始，计量院用超导转变点作为温标的固定点来分度低温温度计，获得了初步结果，如铅超导转变点与美国标准样品的差值—2.5—1 毫开，对于铜则为—0.2—0.1 毫开。4—90 开之间的比热容标准已经完成，6—280 开之间的金属热导率标准也正在进行中。

### 3、基准用高温铂电阻温度计的研究。

自一九二七年以来，国际温标已经过多次修订，但都规定用铂铑 10—铂热电偶作为 630.74—1064.43 摄氏度范围的内插仪器。然而由于材料本身的不均匀性以及铑的氧化，往往会造成误差，而且它与热力学温度有较

大的偏离，在 800 摄氏度时偏离 0.5 摄氏度，这引起了国际上科学界的不满。从五十年代开始，各国对高温铂电阻温度计进行了大量研究，国际计量委员会温度咨询委员会曾一再敦促各国广泛开展这项研究工作，为今后修改温标作好技术上的准备。

自一九七七年开始，计量院温度室与云南仪表厂等单位合作，经过几年的努力，先后试制成 60 多支高温铂电阻温度计。这种温度计选用了 3 种骨架，即：十字骨架、鸟笼式骨架和片状骨架。经试验，片状骨架具有独特的优点，它可使感温元件的应力减小，从而提高稳定性。骨架是用石英或兰宝石制成的，绕制感温元件的铂丝，其直径为 0.4 毫米，温度计的电阻值接近 0.25 欧（在零摄氏度时）。根据几年的实验结果，在高温（1070—1100 摄氏度）退火 100 小时前后的  $R$  变化平均为 1 毫开。1064 摄氏度时，绝缘电阻高达 27 兆欧。一九八四年在国际计量局副局长奎恩的建议下，曾将 20 支温度计送到美国、加拿大以及国际计量局进行试验，以便共同确认其性能后，用来替代国际温标规定为 630.74—1064.43 摄氏度范围内插仪器的铂铑—铂热电偶。

用高温铂电阻温度计复现温标的结果是：在水三相点的复现性为 0.2 毫开；银点为 1.3 毫开；金点为 1.2 毫开。

与此同时，计量分院、北京玻璃研究所和三机部三〇四所等也研制成了同类型的高温铂电阻温度计，达到了相同的水平。

#### （四）利用气体测温法复现热力学温标

复现热力学温标的最可靠的手段是气体温度计。历次国际温标的修改，也都是以气体温度计测定的结果为

依据的。工业发达的国家，都拥有气体温度计，为国际温标的修订和研究提供依据。

根据科学发展规划，中国的低温气体温度计研究是从一九六五年开始的，由计量院负责。由于“文化大革命”的干扰，工作进展缓慢。一九六九年，该课题转交计量分院继续研究。一九七〇年后，经计量分院申请，列为中国科学院的重点科研项目。一九七一年四月中国科学院批准了经费 30 万元，基建面积 300 平方米，计量分院温度室大部分的力量投入了这项研究任务。为与高温范围内热力学温标相适应，又提出了建立高温氮气体温度计的课题，于一九七二年获得批准。到一九七八年，获得了试验数据，氮点的准确度为 $\pm 0.05$  开，锌点为 $\pm 0.5$  开。这一研究成果，曾在一九七九年举行的全国性温度计量学术讨论会上进行了交流。

#### （五）测温新技术的开发和应用

根据国外的发展动向，利用现代新技术来提高中国温度计量水平，是一种切实可行的策略。八十年代，对密封式凝固点容器的研究，在国外已得到足够的重视。它便于携带，只要有控温炉，就可以得到温坪（相平衡态时的温度），以便校验铂电阻温度计和各种热电偶。复现准确度要比开放式的高，定点物质不受污染，无需更换，可以节约资金。测试院于一九八一年，首先研制成了铜密封凝固点容器，复现准确度为 $\pm 10-15$  毫开。一九八二年又研制成铟和锌密封凝固点容器和氯化钠密封式的容器。该点在国际温标上的位置十分重要，因为它的温度在 800 摄氏度附近，正好在铟与银点之间，故而很受国际上的重视。

钨带温度灯作为辐射光源，是光学高温计和光电高



温度计及其使用中必不可少的，但其质量远不能满足高准确度测量的要求。测试院于一九八二年先利用反馈致稳钨带灯的新技术，电子反馈控制技术和光子探测器件，使钨带灯的稳定性显著提高后，一九八四年正式列下提高钨带温度灯性能的研究课题，一九八六年完成研究任务并通过国家鉴定。

此外，测试院对一等标准光学高温计作了技术改造。用光子探测器件作接收器代替用人眼平衡亮度的老方法，提高了灵敏度，降低了劳动强度，减少了人为的误差。

### （六）材料热物性的研究

材料科学是现代科学技术的重要分支。国际上不少科学发达的国家对材料的热物性，如热膨胀系数、导温系数、导热率、扩散率、发射率、吸收率、比热容以及熵等作了深入的研究。国内有些单位，如中国科学院上海硅酸盐研究所，沈阳金属研究所以及冶金部北京钢铁研究院等，从六十年代初开始做了大量的工作，经过多年的努力取得了很多成果。一九八〇年底，在国内召开热膨胀系数鉴定会期间，全国同行会聚一起，经过充分酝酿，推荐测试院为中国热物性计量测试中心。此后，测试院成立了热物性室，把热物性测量列为该院的重点工作。

测试院建立的热物性测试装置有（-40—1000）摄氏度范围内的热膨胀系数测量装置，其准确度达 $\pm (2 \times 10^{-7})$  开、（90—293）开范围内平均热膨胀系数测量装置，其准确度达 $(1.3 \times 10^{-7})$  每开。

### 六、温度计量在国民经济中的作用

温度计量技术人员始终坚持为生产服务。根据生产

发展的需要，在不同时期以不同的对象为服务重点。五十年代重点为钢铁生产服务；六十年代为机械工业生产服务；七十至八十年代为企业节约能源服务。地方计量部门与生产单位接触机会更多，为生产服务的贡献更大。

### （一）为钢铁工业服务

在六十年代，北京、辽宁、上海，天津等省、市计量局的技术人员，分别参加首都钢铁公司、鞍山钢铁公司、上海钢厂、天津钢厂会战组，为钢水连续测温 and 高温定碳所需要的测温元件（主要是热电偶）进行现场检定，并帮他们安装使用。热电偶保护管在高温中容易破碎，他们深入现场共同试验，在鞍钢氧气顶吹转炉上，采用双标准砖，插入 4 支热电偶，使其处于不同的深度，实现了测温元件交替工作的方法，使连续使用时间长达 180 多小时，获得中国大型转炉炼钢曲线，提高了工作效率。

### （二）为建材行业服务

七十年代后期，重点研究水泥生产中的测温技术，计量院温度室专门成立了测试组，研制成快速测温枪。在国家建材局的支持下，先后到 7 省市 10 余家小水泥厂，对立窑的预热、烧成、冷却带以及熟料的烟道温度进行测量。对青铜峡水泥厂作了全面的热工测试，对立窑进行了改造，安装了仪表，更换了风机，使产量大幅度地提高，曾获得宁夏自治区科技大会奖。此后，不少基层计量单位也开展了这项工作。如安庆市计量局对该市第二砖厂进行了准确的温度测量和严格控制，选定了合理的窑温曲线，调整了操作程序，使产品合格率由原来的 57.2% 上升到 64.1%，产量比以前增长 1.8 倍。为了满足各地的需要，计量院将快速测温枪组装成套后，交河北

遵化县计量所负责生产，供全国有关单位使用。

### （三）为节约能源服务

八十年代初，为配合节约能源，开展了热平衡测试。一九八二年计量院成立了工程测试室。在国家经委能源局的支持下，拨款 10 余万，订购了所需的仪器设备。他们首先在北京的有关厂家开展热平衡测试，其中温度是主要参数之一，每台锅炉测完后，提出总结意见和修改方案，供厂方参照执行。经测试的工厂，在炉窑验收中都达到了合格标准。另外，在国家计量局教育处的组织下，举办了热平衡测试学习班，为各部门培训了一批技术骨干，收到了很好的效果。八十年代中期，各省市及各部门和大型企业，都开展了热平衡测定，不少单位组织了自己的专业队伍，为节约能源而辛勤工作。

此外，对粮食保管、食品冷藏等与人民生活密切相关的部门，也作了测试，颇受使用单位的欢迎。

综上所述，温度计量，随着社会主义建设的发展，经过了曲折的道路，取得不少成果，有的已达到世界水平。但在很多方面，还存在着相当差距，不能满足实际需要。

## 电学和磁学计量的发展概况

自从发现电磁现象之后，就有了电磁计量。在现代社会生产中，任何一个部门都不能离开电磁计量技术。这不仅因为电磁量可直接检测，而且由于电磁信号特别便于处理和传输。现代众多测量工作，如长度、热工、力学、光学、放射性、化学等领域都借助于各种传感器，

把被测量转换成电磁信号来处理。电磁计量中发展起来的各种概念和方法，也往往为其它分支学科所借鉴。

电磁测量的迅速发展，需要计量单位的统一，量值的准确一致，并要求不断解决在不同应用条件下电磁参数的测量方法和检测设备。电磁计量的任务就是统一电磁单位，研制能够复现单位的基准标准，开展量值传递，并不断研究测量方法和测量装置，更好地为国民经济服务。

描述电磁现象，在国际单位制（SI）中有四个基本单位，即米、千克、秒和安培。各国保存电磁基本单位都采用实物基准，基准的定值，是将公认的国际计量局所保存的实物基准与绝对测量的结果相比较，得出其与理论值相接近的程度，由此定出该基准器的值。然后，各国再根据它定出本国主基准的值，以保证测量数据的统一。

### **电学和磁学计量的发展**

在旧中国，电磁计量工作面很窄，主要集中在电力部门和电机制造部门，计量标准极少，而且都是从国外买来的，全国没有统一计量标准，更没有统一的计量制度，难以保证量值的准确一致。

新中国成立以后，随着电力工业、电机、电器制造工业的发展，电磁计量也相应地发展起来。在五十年代，水电部技术改进局、一机部电气科学研究所、哈尔滨电表研究所、上海电工仪表研究所、七机部第十一研究所和第十研究所以及中国科学院等单位先后开展了一些电磁计量工作。第二个五年计划开始实施时，由于建设的需要，各单位强烈要求电磁计量的统一。国家计量局于一九五八年建立了电学处。该处下设基准实验室和电测

量实验室，一九六一年又建立了磁学计量实验室。一九六〇至一九六一年期间着手建立电磁计量的实物基准。前航天部第二研究院院长蔡金涛，在新中国成立前夕辗转保护了旧政府的标准电阻、标准电池，为建立新中国的欧姆、伏特基准及五十年代初期的量值传递起了重要作用。

一九六三年六月国家科委制定了《1963—1972 年科学技术发展规划纲要（草案）》，其中计量部分的第四中心问题是电磁计量，明确规定了中国电磁计量的方针和任务。国家计量局根据上述规划，有计划、有步骤地建成了中国的电磁计量体系。电磁计量的发展过程大致可分为以下几个阶段。

#### （一）筹建时期（一九五八至一九六三年）。

国家计量局于一九五八至一九六一年间建立了电学和磁学计量实验室。筹建期间，采取边建、边干和边学的方针，把有限的人力、物力组织起来，充分利用，在最短时间内完成了规定任务。

##### 1. 电压基准组的筹备。

从一九五六年起，一机部电气科学研究院、上海电仪仪器厂等单位就进行了标准电池的研制，在筹建电压基准组时，首先在国内调集了一批标准电池，同时还接受了苏联选送给中国的后备基准电池，组成了包含 10 只标准电池的中国临时电压基准组。一九五九年又由苏联引进 4 只标准电池，替代了临时电压基准组中的 4 只，重新组成电压基准组。一九六一年五月，国家计量局邀请中国计量技术与仪器制造学会筹委会的有关专家讨论后，批准其为“国家临时伏特基准组”，初步统一了全国电压单位。该基准组保存在计量院的  $(20 \pm 1)$  摄氏度的

油槽中，当时标准电池比较仪分辨率为 1 微伏，利用此比较仪进行电压单位的传递。临时基准组的单个电池的电动势年变化为 10 微伏，整组年变化为  $\pm 4$  微伏，传递准确度为  $\pm 2$  微伏。

## 2. 基准电阻器的筹备。

五十年代末，国家计量局将一机部电器科学研究所和水电部技术改进局的两套标准电阻器送往苏联检定后，作为中国的传递标准。在一九五九至一九六〇年，又相继选送了一批标准电阻器到苏联检定，同时还对由苏联进口的一批电阻器进行了考查，加速筹建中国的电阻基准。与此同时，开展了 0.01 级标准电阻的检定传递工作。

## （二）攻关时期（一九六三至一九七八年）。

此期间主要是执行一九六三——一九七二年的十年规划。国家建立了伏特基准组与欧姆基准组；进行了电磁量单位的绝对测量，并全面开展了交、直流仪器、电量、磁参量及磁性材料的检定测试业务。

## 1. 实物基准的建立。

### （1）伏特基准的建立。

一九六五年十二月，由国家鉴定委员会通过并批准，正式建立了中国的国家伏特基准组。它由 20 只标准电池组成，单个电池电动势年变化小于 0.3 微伏，整组平均年变化（0.2—0.3）微伏。除主基准外，还组建了副基准，工作基准。主基准保存在测试院。

在此期间，扬州师范学院、上海电工仪器厂、长城电工仪器厂等单位都能生产高质量的标准电池。计量院又对一大批国产标准电池进行了长期考查，选出了一批可以补充到伏特基准组中的优质电池，并将其中一些电

池送给国际计量局、联邦德国物理技术研究院，得到了好评。

一九七四年，从国产标准电池中优选出 35 个高质量标准电池进行了温度系数研究，并确立了中国的标准电动势—温度公式：

$$E_t = E - \{39.94(t - 20) + 0.929(t - 20)^2 - 0.0090(t - 20)^3 + 0.00006(t - 20)^4\} \times 10^{-6} \text{V}$$

这标志着中国在建立伏特基准的研究和制造方面已取得了很大进展。

## （2）欧姆基准的建立。

一九六四年，国家计量局进行了标准电阻的优选工作，对 100 余只标准电阻器作了长期考查和分析后，选出一批组成临时基准。另外，从各省、市计量部门选调了 32 只标准电阻器，补充并建成了国家欧姆基准组，副基准组和工作基准组。经考查后于一九七四年一月正式通过国家鉴定，经国家计量局批准定为国家欧姆基准。同时，还建立了由 6 只苏制标准电阻器组成的副基准，以 6 只国产标准电阻器组成的比较基准以及用 6 套苏制标准电阻器组成的工作基准。从一九六五年起，中国即已开始对标准电阻器的研究工作。计量院与上海电表厂协作，研制出高稳定度的标准电阻器，经长期考察，选出了高质量的标准电阻器补充了中国的欧姆基准组，并由 6 只增加到 10 只。至此，中国电阻单位已建成完整的基准体系。

在建立国家欧姆基准的同时，计量院与计量分院在一九六五至一九七〇年还相应研制了高准确度的四跨线原理电阻传递电桥和 XQJ—3 型电阻基准比较装置，保证了电阻单位的传递。

国家欧姆主基准保存在测试院，其整组年变化小于0.2微欧。

## 2. 绝对测量。

六十年代初，中国曾用计算电感法进行阻抗的绝对测量研究，并制成了一个可按尺寸计算出电感量的电感线圈，但因其本身的缺点，后决定改用计算电容法。

一九六五年以后，为进一步提高中国电磁量单位的复现水平，计量院成立了计算电容与核磁共振课题组。当时这两个课题都是电磁计量领域中各国主攻的目标。因为课题内容既有电阻和电流单位的绝对测量，也包括了电容、电感以及强、弱磁感应强度的绝对测量内容，同时，两个课题结合可以导出整个电磁学的各种单位。但由于十年动乱，两课题直到一九七八和一九七七年才分别通过国家鉴定。计算电容本体的准确度达到 $\pm 3.5 \times 10^{-7}$ ，电阻绝对测量的准确度为 $\pm 4.8 \times 10^{-7}$ 。用核磁共振法在弱磁场下绝对测量质子回旋磁比的准确度为 $\pm 0.89 \times 10^{-6}$ ，在强场下绝对测量的准确度为 $\pm 3.5 \times 10^{-6}$ ，强弱场法结合绝对测量电流的准确度为 $\pm 1.8 \times 10^{-6}$ 。以上两项成果均进入了国际先进水平行列，尤其是用核磁共振法绝对测量电流更引起了国际上的重视，一九八三年国际基本物理常数平差中已采用了中国的测量数值。

通过两项课题的研究，不但取得了成果，更重要的是培养了一批有能力的技术骨干，他们都是工作中的中坚力量。另外，课题的研究也带动了整个电磁计量工作，计算电容课题中研制的电容—电容（C—C）电桥、电容—电阻（C—R）直角电桥、电感—电感（L—L）电桥、感应分压器校验装置以及核磁共振课题中研制的基准电



磁铁、稳流源、稳场仪、零场空间的建立，地磁场自动补偿、频率测量和线圈计算方法等都对以后的电磁测量起到了借鉴作用。

一九七二年，计量分院开始进行用约瑟夫森效应监视和测量  $2e/h$  的研究工作。此项研究成果于一九八五年十二月通过了国家鉴定，用  $2e/h$  复现电压的准确度达到  $\pm 3 \times 10^{-8}$ 。

### （三）同生产结合时期（一九七八至一九八六年）。

中共十一届三中全会后，在对外开放、对内搞活的方针指引下，电磁计量工作有了新的进展。电磁量的复现与保存已有一定基础，电磁计量科研成果直接为国民经济服务。仅计量院就完成了科研项目近 40 项，如音频交流电量标准的建立，保证了音频范围内电能供应、讯号传输、设备操作的可靠运行。特别是对准确计量电能、以利节能更有其重要意义。又如建立了弱磁场标准 3 米线圈系统，为地震预报、地质、地球物理、航天、航海等领域的计量仪器开展了量值传递，进行了弹簧重力仪的磁性能试验，卫星零部件剩磁测量，为地质部门的磁化率与磁场测定以及磁屏蔽效果试验等提供了条件。仅在地质仪器方面，就节省了零场空间的建立费用达数 10 万元，为航天部门解决了在地磁场中测量卫星整星磁矩问题，从而节约了建造大型零磁空间的投资 300 多万元。

这个时期，国内变压器电桥和比率技术的应用也发展很快。如上海沪光仪器厂的高压电桥，桂林电表厂의 阻抗比较电桥，上海电表厂及黑龙江省计量研究所的电流比较仪电桥和电位差计，广州市标准计量所的测温电桥，常州电子仪器厂的电容电桥等。

这个时期，尤其是在《中共中央关于科学技术体制

改革的决定》发表后，电磁计量领域坚持为国民经济服务的方向，开展了横向联合与开发。如计量院利用强磁场标准开展了全国霍尔片的质量评比，召开了霍尔片应用技术交流会，对促进中国霍尔片生产、提高产品性能，推动霍尔传感技术的应用具有积极作用；利用弱磁场标准承担了葛洲坝工程高压电磁场干扰的测量，给出了可靠的数据，避免了上百万元的浪费。尤其在磁带测试领域，他们开展了广泛服务：在完成“磁带磁粉磁性参数测量”课题基础上开发的 TRM—2000 型 BH 仪，主要性能指标已达到国外同类产品水平，某些性能还优于国外，而价格还不到国外的七分之一，具有明显的经济效益；在完成“直流带磁通绝对测量”课题基础上，为珠海华声磁带厂建立了盒式磁带磁平的定标装置，不仅使该厂有了标准依据，还为其产品进入国际市场创造了条件。他们还承担了国家经委质量局委托广播电视部、化工部、航天部联合组织的“一九八五年 6.3 毫米专业录音磁带全国质量评比”活动的全部测试任务。广播电视部和化工部有关磁带产品生产许可证发放的检测也交由计量院承担；中国磁记录材料工业协会的质量监测部也挂靠在计量院。显然，将研究成果尽快变成生产力、直接为国民经济服务，已经有了一个良好的开端。

这段时期，不少研究成果都受到了各方面的嘉奖。音频电量标准获得国家科技进步三等奖；超导量子器件和超导磁强计获得国家计委、国家经委、国家科委、财政部联合颁发的“六五”国家科技攻关奖。获得国家计量局科学技术进步奖的有：弱磁场标准、互感角差与四端时间常数标准、超导量子干涉器在电磁计量中的应用、数字电压表标准装置、高精度电感电桥、QJB—1 型直流

比较仪测温电桥、直流标准分压箱绝对校验仪（以上为计量院研制）。武汉国家高电压计量站和天津互感器厂共同研制的建立 5A—60KA/5A 工频大电流比例国家标准，上海市计量技术研究所的高磁场标准装置、电容损耗角标准和传递装置等也都获得了国家计量局的科技进步奖。计量院研制的点结射频超导量子干涉器在全国超导器件统一测试评比中获第一名。

综上所述，中国电磁计量经历了初创时期和发展时期，逐步建立起具有国际水平的基准、标准及传递系统；同时，在为国民经济服务方面建立了全国计量网点，形成了比较完整的电磁计量体系。

### **电学和磁学计量的研究成果及其应用**

中国电学和磁学计量的研究成果遍布于全国各地，应用于各个领域。主要有以下几个方面。

#### **一、实物基准**

一九六六年中国保存的欧姆基准和伏特基准无论稳定性还是比较准确度，都已进入国际先进行列。国际计量局在进行多次比对和检定后，证明中国的保存单位数值与国际基准符合得很好。其相互关系是

$$\Omega_{\text{NIM-84}} = \Omega - \text{BI} + 0.5 \mu \Omega$$

$$\text{VNIM-83} = \text{V} - \text{BI}$$

#### **二、绝对测量与自然基准**

##### **（一）电容、电感、电阻的绝对测量。**

八十年代，准确度最高的阻抗绝对测量系统仍是用计算电容法实现的，该系统如图所示，其中的核心部分——“计算电容”是一个几何尺寸可准确测量的真空介质电容器，根据长度基准和光速值可求出其电容量。但其容量一般不超过 1 皮法，故需用一电容过渡电桥传递

到较大的电容量，再通过一个实现的直角电桥传递出电阻的绝对值，并经过直流传递过程，欧姆的绝对值即可导出。同样，根据  $L=1/\omega c$  方程，采用谐振电桥就可进行电感的绝对测量，导出绝对亨利。

中国的计算电容主体的电容量名义值是 0.5 皮法，准确度为  $\pm 3.5 \times 10^{-7}$ 。

通过一台专门设计的电容基准过渡电桥，经过 1.10 皮法标准电容器传递到 100 皮法标准石英电容器上，作为保存电容单位的临时工作基准，同时亦相应传递到 10、100、1000、10000 皮法的标准电容器上，用以进行电容量值检定。

用计算电容法绝对测量电阻包括：计算电容绝对测量 0.01 微法的电容器，用电容电阻电桥传递 10 欧姆的交流标准电阻，进行电阻的交流过渡、交直流转换、直流过渡，最后对 1 欧的国家电阻基准进行标定。该测量系统的准确度为  $\pm 4.8 \times 10^{-7}$ 。

用计算电容法绝对测量电感是在专用的变压器电感电桥上，采用电容与电感串联谐振和并联谐振的方法，通过频率和电容传递出电感器的绝对数值。1000 赫下对一个选定的 0.1 亨的电感线圈进行测量，其准确度小于  $\pm 5 \times 10^{-6}$ 。

从所达到的指标以及 10 皮法电容标准参加国际巡回比对的结果，说明中国的计算电容法进行阻抗绝对测量已进入了国际先进水平行列。

## （二）电流、磁感应强度的绝对测量。

绝对测量电流实际上是要求出  $K=ANL/A_{abs}$ ，除直接测量的电流天平和佩拉特电动力计法外，还有通过基本物理常数的间接测量法，其中最可行的是将两种不同的

测量的方法结合起来得到 K 值的所谓核磁共振法。它有很多优点，在同一个实验室采用这种方法高准确度地绝对测量安培，只有中国已经实现。该项目在有关院校和工厂的大力协作下，由计量院完成并于一九七七年通过鉴定。

外在磁感应强度为 B 的磁场中的质子，由于塞曼效应将产生能级分裂，质子所占有能级的能量差等于从一个能级跃迁到另一个能级的量子能。可以导出， $\omega_p = (4\pi\mu_p/h)B = \gamma_p \cdot B$  在测量  $\gamma_p$  时，困难的不是  $\omega_p$  的测量，而是要建立一个稳定、均匀的场，并准确地计算或测量它。因此，根据场强不同，实验中又分为强场法和弱场法。

强场法包括场源系统、磁天平系统、电流测量系统和频率测量系统。所测（强）与电流成正比，测量准确度为  $\pm 3.5 \times 10^{-6}$ 。此装置还是较强磁场的磁感应强度基准装置。

弱场法包括场源系统、地磁场补偿、电流测量及频率测量系统。所测（弱）与电流成反比，测量准确度为  $\pm 0.89 \times 10^{-6}$ 。其中的石英骨架赫姆霍兹线圈又是磁感应强度基准器，用它来复现磁感应强度单位，准确度优于  $1 \times 10^{-6}$ 。

利用强、弱场法与电流的比例关系，将两关系式相除，即可得到 K 值。中国的

$$K = 1 - (3.46 \pm 1.80) \times 10^{-6}$$

（三）约瑟夫森效应监视伏特。

当两块相互绝缘的超导体靠得足够近，且加以电压 V 时，所构成的超导结中不但有直流电流流过，还有交流电流并产生相应的电磁辐射。辐射频率  $\nu$ 。反之，若

用频率为 $\omega$ 的电磁波辐照约瑟夫森结时，结两端会有相应直流电压 $V_n$ 产生， $V_n = (nh/4\pi e) \cdot \omega$ （其中 $n$ 为整数）。当已知值时，由频率 $\omega$ 就可定出电压值。至八十年代中期，值还不够准确，但由于是基本物理常数，其值在误差要求范围内可认为是稳定不变的，故可用 $\omega$ 来监视伏特的变化。一九七二年国际计量局推荐使用 $2e/h = 483594.0 \text{ GHz/V}$ 来保存各国的电压单位。

航天部二院计量站在一九八四年十月通过鉴定，复现电压的准确度为 $\pm 3 \times 10^{-7}$ 。测试院于一九八五年十二月通过国家鉴定，复现电压的准确度为 $\pm 3.3 \times 10^{-8}$ 。鉴定结论是此项成果当时处于国内领先地位，达到同类装置的国际水平。

#### （四）磁通量的绝对测量。

磁通是磁学量的重要参数，磁通量的变化与感应电动势相关，而且磁通密度即是磁感应强度，所以磁通实际上是联系电测量和磁测量之间的相关参数。中国原有的磁通基准是一九六三年由苏联引进的康贝尔线圈，因该线圈计算有误，后重新计算并引入改正值后作为基准使用。

计量院于一九八六年建立了磁通工作基准，使用石英骨架，名义值为10毫亨，准确度优于 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 。

磁通工作基准传递装置包括差值冲击补偿装置和磁势平衡式直流电流比较仪电桥，采用差值冲击补偿法进行同名义值磁通量具的比较，而同名义值和不同名义值磁通常数的比较过渡靠磁势平衡式直流电流比较仪电桥实现。用两种方法对10毫亨进行比较在 $1 \times 10^{-5}$ 内符合。采用比较仪电桥后，可使不同名义值互感（向1毫亨传递）的传递准确度提高一个数量级。

装置的准确度，对各种方法均小于  $3 \times 10^{-5}$ 。

### 三、音频交流电量标准

中国音频电量标准于一九八二年正式建成，采用热电式交直流转换原理，如一交流电流和一直流电流通过同样大小的电阻，产生相同热量，即认为两者等效。核心部件是具有中国特色的“有保护对的多元热电变换器”，利用它从直流电基准导出等效的交流电标准。该标准采用计量院研制的“两级并联等电位屏蔽电流互感器”和“等电位屏蔽感应分压器”来扩展电流和电压量程，构成音频电流标准，音频电压标准和音频功率标准，在工频条件下，测量电压的准确度优于  $\pm 2 \times 10^{-5}$ ，电流准确度优于  $\pm 3 \times 10^{-5}$ ，功率准确度优于  $\pm (3-5) \times 10^{-5}$ 。

由于在生产、科研、国防建设和人民生活中，所使用的电量绝大部分是音频范围的交流电，特别是 50 赫工频交流电是生产生活的主要电源。在飞机、坦克中往往使用 400 赫交流电，军舰、船舶中则经常使用 1500 赫或 2500 赫交流电，导弹、雷达和火炮的控制仪器还使用各种音频交流电。因此，建立此标准是保证音频范围内的电能供应、讯号传输、设备操作的可靠基础条件，特别是对准确计量电能，对节约能源更有重要意义。

### 四、精密电测量

#### （一）音频电压比率标准。

该标准在音频范围内可以给出交流电压的精密比率，作为检定交流分压器、衰减器的标准，也可作为传感器线性检定的标准。此外，还可以作为高准确度电抗电桥使用，主要技术指标列于表。年稳定度优于  $1 \times 10^{-8}$ ，该装置用两向平衡参考电压法获得上述单盘检定的技术指标，为当时的国际先进水平。该装置从一九六

六年开始使用以来，已对进口高精度感应分压器及变压器和测量电桥开展了检定，解决了不少研究和生产中的测量问题。

一九七四年建立的应变仪检定装置是用电测技术解决力学计量领域应变测量中二次仪表的精密检定和示值统一，并可进一步为传感器的检定提供有效技术手段。该装置是根据中国“感应分压器—电阻匹配网络”与“电阻式应变仪模拟网络”等效原理研制成功的。装置的准确度为  $(1-2) \times 10^{-4}$ ，并与美国、丹麦等国的有关产品进行过比较，到八十年代仍是国际上的最高水平。由于应变仪使用面很广，该装置的研究成果已由广东和上海制成商品仪器。

### （二）工频高压比例标准。

主要包括 18 千伏交流高压分压器，600 伏、180 伏工频感应分压器及校验系统，电压比较仪、电源设备及试验台等几部份。该标准的各部分先后于一九六四至一九六九年建成，一九七一年正式鉴定。在 18 千伏时，准确度为  $3 \times 10^{-5}$ ，低压下用感应分压器的输出端，准确度优于  $2 \times 10^{-6}$ ，一九七三年量程扩大到 35 千伏。

### （三）工频大电流比例标准。

电流比较仪及其测试系统于一九六一至一九六九年先后建成 2000 安和 5000 安，准确度优于  $(1-2) \times 10^{-5}$ ，当时属于国际先进水平之列。其论文在一九六一年国际计量技术联合会召开的会议上发表，受到好评。国家高压计量站、天津互感器厂建立的《5A×60KA/5A 工频大电流比例国家标准》，准确度达到  $1 \times 10^{-6}$ 。

### （四）时间常数的测量。

电阻时间常数是交流电阻的一个重要特征参数，它



直接反映交流电阻引起的角差。计量院于一九六七年建成两端时间常数标准，在一九八〇年又建立了一套四端电阻时间常数测量标准，填补了国内空白。由于中国在八十年代中期尚未正式建立交流电阻阻值标准和传递系统，因此，通过电阻时间常数还可以用于间接测量交流电阻和交直流变化值。

#### （五）高准确度电感电桥。

该电桥于一九八五年通过鉴定，具有量限宽、准确度高、频带宽、操作方便等特点，电桥线路也有独到之处。

计量院研制的这台变形的麦克斯韦—维恩电桥，用固定电容器及电导元件与多位感应分压器相结合，代替常用的可变电容箱和电导箱，从而极大地提高了等效可调元件的准确度和稳定度。同时采用电源平衡网络减小了电桥指零仪端的泄漏影响，在电源平衡网络中，创造性地引入了高  $Q$ （品质因数）电感，从而扩展了频率使用范围。

电桥测量范围为 1 纳亨到 1000 亨，频率为 50—2500 赫，电桥准确度为  $3 \times 10^{-5}$ 。该电桥又可作为电容比较仪使用。由于设计了输出阻抗很低的多档感应分压器，所以可获得  $2 \times 10^{-6}$  的比较测量准确度。

#### （六）精密电容电桥及标准电容器。

计量院与哈尔滨电工仪表研究所联合研制的 XQS—6 型精密电容电桥及 BR 系列标准电容器于一九八五年十二月通过部级鉴定。电容测量范围 1 阿法到 1 微法，频率为 40 赫到 20 千赫，电桥准确度为  $1 \times 10^{-5}$ ，比较测量的准确度为  $1 \times 10^{-7}$ ，电导测量范围  $10^{-4}$ — $10^{-16}$  西门子，石英电容器的稳定性优于  $1 \times 10^{-6}$ 。该电桥首次

采用了隔断屏蔽系统及机内控温的内附标准电容，有效地提高了小电容的测量准确度及电桥稳定性和对环境温度的适应性，电桥采用微机进行数据处理及误差修正。BR 系列标准电容器及内附标准电容器在结构及工艺上均有特色和进展，具有良好的稳定性、损耗因数小的特点。

该项成果为中国电容量值传递提供了重要的标准装置，可作为一等标准电容器及其传递装置，同时也为电子工业、大型计算机制造、通讯导航、地震预报和新型绝缘材料研制等部门所急需。

#### （七）电容器损耗因数的绝对测定。

该课题于一九八五年十二月通过部级鉴定，在 1 千赫下达到的指标列于表。

所研制的测试系统可在 60 赫到 10 千赫频率范围内进行损耗因数测定，从而解决了工频及音频范围内衡量电容器质量，研究介电材料性能的损耗测试标准，并为音频下对电路元件不纯量进行精密测量及相位测量提供了依据。因此本成果对电容元件、电子仪器、测量功率和节能等有关的生产、科研和国防部门均有重要作用。

#### （八）超导电流比较仪。

超导电流比较仪是利用超导体的完全抗磁性并以超导量子干涉器作指零仪制成。

该比较仪在结构上有创新，它比常温比较仪的相应指标高三个数量级。其比例误差为  $2.9 \times 10^{-11}$ ，噪声为  $1.2 \times 10^{-10}$  安匝。达到了国际先进水平，超导电流比较仪可用于创建中国的新型电压基准，也可用于常温比较仪所解决不了的精密测量问题。

#### （九）数字功率表标准。

该标准于一九八五年十一月通过技术鉴定，它在功率测量方面具有频率宽、功率因数范围宽的特点，主要部件都具有自身的特点，取得了一系列成果。如三端式无源新型乘法器，高性能的电压跟随器，交流贴箔平面电阻分压器等。另外，由测量装置与信号电源构成的大闭环交流电压、电流、功率测量系统在国内第一次在该标准中实现，从而提高了功率测量的稳定度。该标准中的成果得到国际同行的好评。

该标准测量频带为 40 赫—10 千赫，功率因数范围为  $\cos\phi=0-1$ ，功率测量结果的极限准确度（修正系统误差后）为  $5\times 10^{-5}-1.0\times 10^{-4}$ （时）。

#### （十）交流平均值电压标准。

交流电压有三个表征量：有效值、平均值和峰值。它们是直流电压的导出量。与此对应，交直流电压转换标准也有有效值、平均值和峰值电压标准之分。随着数字仪表和交流磁测量技术的发展，建立交流平均值电压标准并进行量值传递，是计量部门的一项重要课题。

该课题于一九八四年通过国家鉴定，其电压测量范围是—600 伏，频率范围是 40—20 千赫，基本量程准确度为  $\pm 3\times 10^{-4}$ 。主要技术指标达到了国际先进水平。

该标准装置的研究成功，填补了国内空白，具有较明显的经济效益和社会效益。现已作为国家唯一标准开展了交流数字电压表，平均值电压表、磁测量交流仪表和平均值转换标准的检定测试。

#### （十一）高值电阻标准。

一九八六年计量院完成了高阻标准和高阻标准装置，量限为 10—10 欧，准确度为  $10^{-6}$  量级到  $5\times 10^{-3}$ 。在研究过程中，在电桥理论方面有一定创造性，课题达

到了国际先进水平。在研究进程中还协作完成了“空气恒温系统”及“低温泵槽”的研制工作。具有较好的经济及社会效益。

### 五、磁参量的测量和量值传递

在电磁计量领域，磁参量也是一个重要方面，磁参量测量涉及面很广，除磁测仪器和磁性材料生产外，还有地球物理、地质探矿、地震、航天、航空、航海以及天体磁场、生物磁场的研究，加速器中磁体强磁场和超导强磁场测量等。

#### （一）弱磁场测量。

中国的弱磁场标准是按尺寸计算出磁感应强度的赫姆霍兹线圈，准确度优于  $1 \times 10^{-6}$ 。

弱磁场标准装置的标准磁场在 10 纳特—0.03 毫特范围内准确度为  $1.93 \times 10^{-6} \pm 0.27$  纳特，在 0.1 毫特至 1 毫特范围内准确度为  $27.5 \times 10^{-6} \pm 0.27$  纳特，用于检定弱磁场测量仪器及磁感应强度量具。该装置能提供一个均匀的零场空间，用于各种精密弱磁测试，中国发射的卫星中的一些零部件的剩余磁矩测量就是在此装置的线圈系统中进行的。弱磁场测量和检定，对环境要求非常严格，主要是避免磁污染及电磁干扰。为此，计量院在一九六六年于北京西郊卧佛寺附近建立了一个无磁性实验室。

计量院还利用光磁共振原理研制成光泵磁场梯度仪，供地球物理和地质勘探部门使用，仪器准确度达到 0.035 纳特。

#### （二）中磁场标准。

利用流水式核磁共振章动原理，计量院于一九八六年建成了国家二等标准，场强范围为 0.001—0.05 特，

准确度为 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 。它的建立，实现了该段范围测量仪器的高准确度定标和相应精密磁场的测试，它和强场标准一起承担着中国磁感应强度的量值传递任务。

### （三）强磁场标准。

强磁场标准是极头经过精密加工、能在较大范围产生均匀磁场的一套电磁铁系统。能产生 0.04—1.8 特的标准磁场，准确度为 $3 \times 10^{-3}$ — $3.2 \times 10^{-5}$ 。磁场测量采用核磁共振磁强计。一九八一年计量院建成该装置用于各种特斯拉计的检定及对霍尔片定标。

### （四）超强磁场标准。

计量院于八十年代完成的超强磁场标准用核磁共振法定标，探头需在低温下工作，探杆很长，采用铝粉探头，用抑制法激发高模振荡检出信号。

为与核磁共振法定标校对，还研究了抽拉线圈法。采用保温套管，使测量线圈伸入低温磁场时仍可保持室温。采用数字积分器提高了线圈抽拉过程所产生感应电势的积分准确度。

以上两种方法相互比对，在 0.1% 范围内符合。

课题组还研制了磁阻效应低温测场仪，改进了探头工艺，在 2—11.6 特的场强范围内，准确度可达 0.1%，并用计算机设计了外线性补偿网络。

### （五）超导量子器件。

超导量子器件是八十年代国际上致力发展的高灵敏器件。计量院于一九八五年研制成的超导量子器件，在国内具有较高水平，所达到的指标为：等效磁通噪声小于，等效输入电流噪声约等于 $2 \times 10^{-11}$  安，噪声电压为 $6.8 \times 10^{-14}$  伏。用这种器件，可制成超导磁强计和梯度仪，用来测量人体的心磁图、脑磁图、对研究人体的病

变，特别是早期发现矽肺病有一定作用。此外，还可制成灵敏度极高的超导检流计等。

## 六、磁性材料测量

中国是世界上发现和应用磁性材料最早的国家之一。磁性材料在机电、仪表、计算机、通讯、医疗和国防等领域有着广泛的应用，测量材料的磁性参数是评价材料质量和进行产品设计的依据。国内相当多的磁性材料研究和生产、使用单位及计量部门都开展了磁性材料的磁性测量工作。

对磁性材料，主要是研究其  $B$  和  $H$  的关系，根据幅度、相位、波形、频率的不同，派生出整个磁测量的各个领域。它的特点是非线性、多值性并和磁化过程与方式有关，为了能得到稳定、可以相互比较的测量结果，就必须研究标准的测量方法以及符合标准方法的标准测量装置。方法和装置相辅相成，两者不可偏废，并通过发放标准样品，统一国内各种磁性材料的量值。

### （一）永磁材料磁性测量。

一九七三年，计量院使用冲击法及回线法在国内首先研制成功自动测量装置。到一九八四年又和计算机联机运行，形成了自动测试系统。每年的检定量超过 600 台（件），检定对象为金属永磁、铁氧体永磁和稀土永磁等材料。

### （二）软磁材料直流磁特性测量。

一九六七年计量院建成软磁材料直流磁特性测量装置，可对软磁合金（主要是铁镍合金）和纯铁的直流磁性能进行测量，使用冲击法，发放的标准试样有环形及条形两种。

### （三）软磁材料音频磁特性测量。

一九七九年，计量院通过“软磁材料音频损耗测量”课题的国家鉴定。该标准主要使用电桥法，采用变压器电桥、可测量硅钢和其它软磁合金的音频损耗和电感磁导率，对外发放的标准试样可保证铁损测量准确度为2%，音频磁导率准确度为4%。

#### （四）弱磁和无磁材料的磁性测量。

弱磁和无磁材料在国防、地质、计量仪器和仪表制造、电视、化工等部门都有重要应用，计量院于六十年代末就建立了古依法磁化率绝对测量装置，最大测量误差为4%。一九八三年又研制成弱磁钢标准测量装置，其测量准确度为1—2%。

#### （五）电工钢片的计量。

磁性材料中电工钢片占90%以上，是国民经济的基础材料之一。电工钢片的磁性测量，关系到机电产品的质量、运行安全和能源消耗。中国电工钢片生产单位和较大的使用单位以及一些计量部门都有测量电工钢片磁性的能力。七十年代初，计量院已开始发放标准试样以校准测量装置，并承担向国外索赔的检定任务。一九八二年，计量院主持制定了有关国家标准（GB3655—83），完成了向国际电工委员会标准的过渡。在组建新标准的装置时，又研制成功磁感峰值镇定系统，并提出了一项新的维持磁通波形正弦的反馈模式，使得在 $B=2T$ 深度饱和时仍能保持磁通正弦。中国采用这种方法取得的研究成果在一九八四年国际应用磁学会上公布。

#### （六）精密磁测量装置。

该装置是这一领域的综合性计算机控制的测量系统。励磁电源在计算机控制下对被测样品励磁，励磁过程中磁场强度和试样的磁感应强度变化的瞬时值由高准

确度,快速模拟—数字转换器转换为数字量返回计算机,计算机通过数据处理,从定义出发求出各种待测参数。该装置可用来研究各种不同测量方法、方法对测量结果的影响,并将以其强的软件功能,高效率地对外开展测试服务。硅钢损耗的测量准确度为 1.0%,磁化曲线的测量准确度已达到 0.5%,明显地优于传统的测量方法和设备。

### （七）磁带计量。

磁带是记录和存贮信息的带状磁性介质,可对声音、图像等各种模拟信号及各种码制数字信息进行记录、存贮和重放,属于信息技术。广泛用于广播通讯、电影电视、文化教育、计算技术、自动控制、卫星遥感等一系列重要领域。它的磁性参数测试与磁性材料特点相同,但其参数测试还扩展到几何、物理、电声、视频等方面,参数很多,且要求动态测试。磁带是进行数据、声音、图像记录、存贮的工具,没有准确的标准,传递的信息,价值是不大的。中国磁带工业起步较晚,无论数量和质量都不能满足国内需要,以致长期大量进口。形成这种局面的原因固然很多,没有建立一套完整的磁带基准、标准及计量测试系统是其中的一个重要原因。

#### 1. 直流带磁通绝对测量。

直流带磁通绝对测量是为解决校准带磁平部份的定标装置,用等效的直流磁通传递出中长波的磁通值,即先在一台高精度走带机上用标准磁头对精选的磁带进行直流录制,同时测出所用直流电流值。然后,在直流带磁通测量装置上测出相应磁带的直流磁通值。最后,用同一走带机、同一磁头,以某一频率、对同一盘磁带录音,当所用交流电流的有效值与直流录制的电流相等时,



再加上各种损耗修正，则认为此时磁带上的交流有效磁通值是与直流磁通等同的。

该标准于一九八四年正式通过国家鉴定，其直流磁通采用改进的冲击法，可测量单片磁带的磁通，灵敏度达 30 纳韦伯每毫米每米，属国内最高水平。整个装置测直流磁通的准确度小于 1%，测交流磁通的准确度小于 5%，完全符合国际电工委员会标准的要求。

## 2. 广播录音磁带基准。

该项基准装置由计量院完成并于一九八五年通过国家鉴定。可测量专业磁带的偏磁比、最大输出电平、磁带相对灵敏度、参考电平—偏磁噪声比、信号—偏磁噪声比、参考电平—直流噪声比、参考电平—复印比、消磁衰减、均匀性变化等项参数。其测量准确度为  $\pm 0.5\text{dB}$ 。

## 3. 磁带、磁粉磁性参数测量。

该标准由计量院完成并于一九八六年通过国家鉴定，可测量  $H_c$ （矫顽力） $< 80$  千安每米的磁带、磁粉试样。磁化螺线管使用安全、可靠，采用了双通道 12 比特数据采集和计算机系统，可自动处理测量结果，打印磁性参数并绘出磁滞回线，使得测量准确、方便，而且大大缩短了测量时间，使测高场时，螺管不致发热，测量准确度为 1%， $H_c$  为 1.4%， $\sigma$ （比饱和磁化强度）为 1.3%， $B$ （剩磁）为 1.2%。

# 时间与频率计量的发展概况

时间是一个基本物理量。时间单位秒（s）是国际单位制中的一个基本单位。频率是时间的倒数，其单位是

赫兹（Hz）。时间和频率有着密切的关系，都广泛应用于人类生活、经济、生产、国防和科学研究，因此在科学技术飞速发展的今天，时间频率计量显得更为重要。

时间与频率计量的主要任务是保证时间频率量值的统一，其内容是建立并保持时间和频率的基准和标准，建立守时系统，研究并实现时间频率量值的传递；通过国际间的比对提高基准的准确度，并取得国际上的量值一致；探索研究新型时间频率基准；研究检定和测试方法；制定检定系统和检定规程。

国民经济和科学技术的发展对时间频率计量水平的要求在地不断地提高。人造地球卫星的发射，导弹的制导，深海探测，空间跟踪，高速多路通讯，基础科学研究，大地测量，地震学，电子学，量子电子学，天文学，计量学等领域都对时间频率计量提出愈来愈高的要求。对于时间计量不仅要确定准确的时刻，还要取得均匀的时间间隔，对于频率计量既要求高准确度，还要求高稳定度。例如，在导航定位和大地测量中，时间差 1 微秒，定位就差 300 米。卫星、导弹、火箭的发射场以及分布在全国各地和海洋上的观测站，都要求有统一的时间，时间的同步准确度达到 1 微秒。在高速多路通讯中，要求时间测量准确到几个纳秒。因此，发展时间与频率计量事业，提高时间频率计量技术和管理水平，在四个现代化建设中有着十分重要的意义。

### 一、时间频率计量的基本概念

时间无时无刻不在伴随着人们，但人们的感官感觉不到它，它既无开始也无终止，永流不息，一逝不返。时间是一种介质，一切物质都在这一无限的介质中运动着，一切事件和现象也都在该介质中发生、进行和消亡。

时间有两个含义：一是时刻，指连续流逝的时间的某一瞬间；另一是时间间隔，指两个时刻之间间隔的长短。频率来自对周期现象的测量，即在单位时间内，事件和现象反复发生的次数。

人类早在几千年以前就开始测量时间。发展至今，用以计时的钟可以说是至臻完善、精益求精了，然而人类所创造的时间基准器、时标和各式各样的计时器都是以物体或物质的周期运动或周期现象为基础的。持续近三千年之久的传统计时器都是基于地球自转或公转的周期运动。人们用天文观测的方法，以地球自转或公转的周期运动为基础来确定秒的长短，这种以天文秒长建立的时间尺度称为天文时。随着科学技术的发展，秒的定义也在不断演变。

一九五八年秒定义为“一个平太阳日的  $1/86400$ ”。该时间尺度称为平均太阳时，根据国际协定，又将英国格林威治天文台所在子午线（本初子午线）的平均太阳时称为零类世界时（UT0）。本世纪三十年代，天文学家发现地球自转有极移的变化，对此进行修正后的时间尺度为一类世界时（UT1）。后来又发现地球自转速度不均匀，随季节而变化，又经修正而产生二类世界时（UT2）。UT2 时间尺度主要对导航和定位很实用，它具有  $10^{-8}$  量级准确度（ $1 \times 10^{-8}$  相当于年差  $1/3$  秒）。一九六〇年，秒的定义即改为“一历书时秒等于回归年的  $31556925.9747$  分之一”。该时间尺度称为历书时。采用历书时需要经过三年观测，才能得到  $2 \times 10^{-9}$  的准确度（ $1 \times 10^{-9}$  相当于年差  $1/30$  秒）。六十年代，科学家们利用微波电子学的成就及分子光谱学研制出原子钟。从此，以量子微观运动为依据的原子时（TAI）开始取代

以天体宏观运动为基础的天文时。一九六七年第十三届国际计量大会决定采用新的秒定义：“秒是铯—133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁辐射的 9192631770 个周期的持续时间。”

确定了时间单位——秒的定义，还需要用特定的实物（钟），从适当选取的某一起点开始，对单位秒长进行连续不断的积累（守时），构成一个时间参考坐标系，形成时间尺度，即时标。以天文观测定义秒所形成的时标称为天文时标。天文时标大都用天文摆钟和石英钟进行守时；以原子钟所复现的秒形成的时标，称为原子时标，用原子钟进行守时。国际计量大会确定原子时的定义为“国际原子时是国际时间局（BIH）根据国际单位制中秒的定义，以各参加国有关部门、实验室运转的原子钟读数为依据而确定的时标”。该时标称为国际原子时（TAI）。国际时间局提供的原子时准确度为  $1 \times 10^{-13}$ 。

由于原子时 TAI 比天文时 UT1 快，而 UT1 与人们生活、测绘、定位和导航关系密切，故从一九七二年起，国际上采用协调世界时 UTC。协调世界时也是一种原子时标，即将国际原子时经过置闰秒的修正，使它和世界时 UT1 的时刻接近。

各种时标所能达到的准确度为：

世界时： $3.5 \times 10^{-8}$

历书时： $1.8 \times 10^{-10}$

原子时： $1 \times 10^{-12}$

## 二、计时技术的发展

公元前十三、四世纪中国就出现了圭表，用以观测冬至、夏至，以此来测量回归年的长。到公元前四世纪又出现了日晷、火闹钟和铜壶滴漏。铜壶滴漏是应用最

久的计时器之一，用到一九〇〇年。

中国早在公元七二三年就发明了机械钟，其中以宋朝苏颂发明的水运仪象台最科学。欧洲直到一六〇二年伽里略发现了摆的等时性原理，才制成机械钟。一九二〇年，英国人肖特制成作为守时钟使用的天文摆钟，日差为 0.001 秒。

一九二七年，马里森根据石英晶体的压电效应，应用电子技术研制出第一台石英钟。石英钟问世的意义在于人造钟表的稳定性第一次超过地球自转或公转的稳定性，是一种稳定可靠的守时钟，广泛应用于工业、国防和科学研究，并已推广到生活用石英电子手表和电子钟。八十年代，计量院、电子工业部等部门都研制和生产出高水平的石英晶体振荡器和石英钟。

一九四八年，世界上出现了应用氨分子微波吸收原理的氨分子钟，一九五五年又出现了铯原子钟，一九五六年国际上已生产出商品小铯钟。从一九五五至一九七〇年间，各先进工业国家都在研制原子钟，这使原子钟的准确度达到  $1 \times 10^{-13}$ （相当于三十万年差 1 秒）。

中国在一九四九年以前，只有南京紫金山天文台进行与计时有关的天文观测，上海徐家汇观象台进行测时，没有实现全国统一的计时，也没有时间频率的量值传递。

### 时间频率计量的发展

新中国成立时，上海徐家汇观象台用天文测时和机械式子母钟守时，并通过上海真如电台发播短波时号报时。时号主要用于航船定位和导航，尚未进行全国时间频率的计量工作。一九五八年上海徐家汇观象台使用石英钟进行守时，通过无线电短波（呼号为 BPV）授时，以后又发播标准频率信号，工作取得显著成绩。一九五

九年国家科委将国家计量局的时间频率计量工作委托给中国科学院紫金山天文台徐家汇观象台。国家计量局在一九六〇年底开始筹备建立时间频率计量实验室，先进行时间与频率仪器仪表的检定工作。在这一阶段，中国时间频率计量工作侧重于天文观测。当时世界时基准是以上海天文台为中心，由南京紫金山天文台、北京天文台、武汉测时台形成世界时测时系统。一九六二年，世界时基准通过鉴定，其发播准确度优于  $2 \times 10^{-9}$ ，日稳定度优于  $\pm 1 \times 10^{-10}$ ，长期稳定度为 1.3 毫秒，达到当时世界水平。

国家计量局时间频率实验室于一九六一年开始建立地下石英钟，经安装调试，到一九六二年守时工作运转顺利，长期日稳定度优于  $1 \times 10^{-10}$ 。对外服务已开展石英晶体振荡器、电子计数式频率计、外差式频率计、航海天文钟、电秒表和秒表的检定工作。在此期间，实验室组织科研人员开始探索建立中国的时间频率基准，与清华大学师生合作试制了 1 台简单的铯原子束试验装置。一九六二年，这台装置移交给国家计量局，并在此基础上重新设计了真空室、C 场永磁屏蔽、微波谐振腔及全部电子线路。一九六五年初，国家计量局确定研制铯原子钟为重点项目，并于一九六六年二月首次在国内观测到铯原子跃迁的拉姆赛（Ramsey）谱线，通过手动控制测量了跃迁频率，准确度在  $10^{-9}$  量级。一九六七年，国际上决定以铯原子跃迁定义秒，从此，时间频率计量从委托与筹备阶段走向全面发展的阶段。

一九六九年，周恩来总理接见了计量院、上海天文台和其它从事时间频率计量的科技人员，明确指示要加紧研制铯原子时间频率基准。科技人员克服了种种困难

设计加工了 3 台长 5 米的二级选态铯原子钟。

一九七八年计量院研制成第一台 3 米实验室型铯钟，准确度达到  $1 \times 10^{-11}$ ，在一九七八年的全国科技成果展览会上展出。该装置于同年移交给上海天文台作为时间频率标准用于守时。这一成就标志着中国时间频率计量已从天文时过渡到原子时，并证明中国确有能力独立自主地进行铯钟的研制工作。

3 米铯钟的准确度与国际先进水平还差两个数量级，作为国家基准显然是不够的。人造地球卫星的发射，火箭和航天技术等领域都对时间频率计量提出了更高的要求。计量院决定继续进行铯原子时间频率基准的研制工作。

计量院一九八一年研制成两台时间频率基准装置铯原子钟 Cs—II 和 Cs—III，为了配合基准的工作，还建立了一套完整的守时系统，即原子时标 TA (NIM)，一九八一年四月在国家科委的科研成果鉴定会上通过鉴定。其技术指标为：

铯原子时间频率基准的准确度： $8 \times 10^{-12}$

原子时标 TA (NIM) 的准确度： $1 \times 10^{-12}$

均匀性： $1 \times 10^{-13}$

铯原子时间频率基准的建立是一项综合性的科研成果，与计量学、物理学、电子学、高真空技术、高导磁材料及其加工、精密机械加工和精密测量技术都有密切的联系，反映了中国在这些材料方面的水平。它作为时间频率的临时基准是中国时间频率量值传递和统一的物质基础，是检定和测量各级时间频率标准的技术依据，具有重要意义。

一九八四年，计量院着手解决 Cs—III 基准所具有的

潜力和设计中存在的缺陷以及电子线路老化等问题，采用新二极选态磁铁，以使准确度提高到  $3 \times 10^{-13}$ ，并有连续工作半年的寿命。一九八六年二月，该基准已通过鉴定。在检定测试方面，一九七八年以后，计量院时间频率处先后开展了利用电视和卫星发播标准时间频率信号的研究并获得成功，在晶体振荡器方面开始了温度补偿晶体振荡器的研制。

### 时间频率计量的研究成果及其应用

#### 一、铯原子时间频率基准 Cs—II 和 Cs—III 的建立

铯原子时间频率有两个部分：束管部分和线路部分。铯束管部分的所有零部件都放在一个长 5.3 米的不锈钢圆筒真空室内。金属铯在炉中被加热形成蒸汽而呈束状从炉口喷出，在飞经选态磁铁时，其中一束原子被离散掉；另一束通过中央缝，处于微波激励场的照射下。微波频率的电磁场使铯原子产生跃迁。跃迁后的原子沿直线继续运动，经第二偏转磁铁，偏转而散射到检测器上，检测器上就出现有规律的离子流输出信号。离子流输出信号经过电子控制电路，可以鉴别出晶体振荡器内所发生的变化，而与原子跃迁频率进行比较。电子伺服电路所产生的控制信号调节晶体振荡器的变容二极管，使石英晶体振荡器的频率锁定在原子跃迁所对应的中心频率的分数值上。晶体振荡器输出频率一般为 5 兆赫、2.5 兆赫或 1 兆赫，可作为基准频率输出信号使用，又可通过分频获得秒信号作为标准秒信号使用。铯原子基准的用途是校准原子时标 TA (NIM)。

要铯原子基准达到较好的准确度有很多困难。例如谐振腔的加工机械不对称性为  $\pm 0.01$  毫米时，谐振腔的相位差为  $0.5 \times 10^{-13}$ ，二级多普勒效应会导致频移；磁



场的不均匀性也会产生频移；原子跃迁频率的重叠，谐振腔带来的频率牵引，电子线路的频谱不纯以及伺服电路引起的相位变化，束管本身的噪声都是影响原子钟准确度的重要因素。因此必须在确定技术指标前进行分项的测试。

七十年代，中国除计量院研制的大型实验室型铯钟外，还有电子工业部、上海市标准计量管理局研制了商品小铯钟、铷频标；上海天文台和上海市标准计量管理局研制了氢频标，准确度在  $10^{-12}$  量级。

## 二、原子时标的建立

中国原子时标 TA (NIM) 是于一九八〇年六月九日八时开始守时的，以铯原子钟基准所复现的国际单位制秒长进行连续积累。此时标由铯基准钟予以校准，称为受控时标，具有  $8 \times 10^{-13}$  的准确度和  $1 \times 10^{-13}$  的均匀性。

原子时标 TA (NIM) 由 3 台连续运转的美国惠普公司 5061A 型商品小铯钟产生，这 3 台小铯钟置于具有恒温  $24$  摄氏度  $\pm 0.1$  摄氏度，防地磁及电磁屏蔽的密封钟房内。与守时钟配套的有罗兰—C 长波接收机、分频钟、相位微跃器等辅助设备。钟组通过接收美国海军罗兰—C 导航台所发射的标准时间和标准频率信号，与国际时间局协调世界时 UTC 同步。同时，定期将钟组的运转数据寄给国际时间局，参加国际原子时的合作；根据国际时间局给出的修正值修正原子时标数据，使中国时标与国际协调世界时 UTC 保持一致。原子时标为全国提供原子时 TA (NIM)、协调世界时 UTC (NIM)，地方（北京）时 BT 和标准频率，直接用于检定和测试以及内部科研工作，还为电视发播和卫星发射提供标准时间频率信号。

到一九八六年，原子时标 TA (NIM) 已正常运转了六年，与国际时间局协调世界时经常比对的结果，其频率准确度优于  $5 \times 10^{-13}$ 。

一九八一年五月，计量院将原子时标 TA (NIM) 与该时标同步后的搬运原子钟运往法国，与巴黎天文台的原子时标作了比对。搬运钟连续运转 212 小时，搬运里程两万公里，获得了很好的比对数据，修正了过去罗兰—C 延迟计算不准所带来的偏差 4.17 微秒，从而使 UTC (NIM) 与 UTC (BIH) 时刻保持同步，准确度为 0.1 微秒。

此外，中国科学院陕西天文台与上海天文台也都建立了自己的原子时标，用于为导航服务，并通过短波和长波发播标准时频信号，开展授时服务。

### 三、时间频率量值传递的发展

时间频率计量传递量值的方法有：真接比对（检定和测试），搬运钟比对，利用短波、长波、电视以及卫星发布比对等，形成一个完整的检定系统。用传统的直接比对法既浪费人力物力，不能保证被检测的仪器仪表在运输途中不改变技术指标。在一九八一年全国计量工作会议上，钱学森教授曾经指出：为了适应科学技术发展的需要，量值传递应当利用无线电信息形成传递各种量值网络。时间频率值正是可以利用电磁波高度准确地传递的一种量值。

利用彩色电视和卫星发播标准时间信号比短波和长波方法的准确度高，而且不需要单独建立发播台，可直接利用国家已有的电视网和卫星站，覆盖面积广，操作简单。

#### （一）利用电视发播标准时间频率信号的研究。

一九七八年，计量院决定与广播电视部和中央电视台合作，开展利用电视发播标准时间频率信号的研究。一九八四年，该院先后研制成利用电视发播标准时间和频率信号的发播装置共 4 套。该装置分为频率和时间两部分，其中频率发播装置于一九七九年起试播，时间发播装置于一九八五年试播。

### 1. 频率发播装置。

一九七九年，计量院将一台经原子时标 TA (NIM) 定期校准过的商品小铯钟放在中央电视台。该铯钟的 5 兆赫频率输出信号经过频率综合成为 4.43361875 兆赫频率信号。以此作为电视台发播用的彩色副载波，通过同步机用发射机发播。使用单位用相应的校频接收机接收到电视节目插入的副载波标准频率，再综合成 5 兆赫标准频率。用这一标准频率信号可以校准用户工作用的频率标准设备。由于中央电视台的合作，发播装置在试播的六年中工作始终稳定可靠。

### 2. 时间发播装置。

时间发播装置是利用彩色电视扫描逆程发播标准时间的设备。时间发播装置传送的信息有三部分：1 兆赫标准频率、秒脉冲和以编码形式传送的时、分、秒时刻信号。

由小铯钟分频得到的 1 兆赫标准频率，经过脉冲调剂，在电视场扫描中每场都传送，只传 12 个波，以 12 微秒的门脉冲对 1 兆赫进行调制而形成脉冲调制的 1 兆赫标准频率；用铯钟产生的秒脉冲和复合同步脉冲频率，通过移相过程实现秒脉冲对行同步脉冲的锁定，产生出标准秒脉冲信号；时、分、秒时刻信号是以不归零的 BCD 码形成的。将标准 1 兆赫信号、秒脉冲和时刻编码信号

以一定的格式叠加在一起,构成发播格式所规定的波形,然后用色同步机产生的复合同步信号一起输送到电视播控中心的插入器,即形成提供用户使用的标准时间频率信号。

一九八四年,该项科研成果通过国家鉴定,技术指标达到国际水平:

校频准确度: 优于  $5 \times 10^{-12}/30$  分钟

稳定度:  $\leq 5 \times 10^{-12}$

传递准确度: 0.1 微秒 (北京地区)

0.2 微秒 (外地)

利用彩色电视发播标准时间频率实施以后,全国有五、六个单位生产彩色电视副载频接收机,一九八六年已有 300 多家用户利用彩色电视副载频接收机校准他们的频率标准,其中包括计量、工业、国防等部门。通讯部门采用副载波统一通讯网络的频率值。中央人民广播电台也将此频率用于中波同步广播电台。在测绘部门,测距仪器中的主要部件是晶体振荡器,而且绝大多数是在野外使用。仪器的数量大,送检不便。使用校频仪接收电视标准频率讯号可以经常校准测距仪的晶体振荡器,从而提高测绘的准确度和可靠性。使用电视信号进行时间频率的校准工作,用户可以足不出户,较之传统的将仪器直接送计量部门检定的方法,既能节约大量人力物力,又能保证校准工作的质量。单从频标来看,校频仪就相当于一台小铯钟,使用此方法就可以少买铯频率标准和小铯钟,连同检定费用,全国每年可节约百万元以上,有明显的经济效益。同时,中央电视台由于使用小铯钟所产生的 4.43361875 兆赫频率,也提高了彩色电视的发播质量。

## （二）利用卫星发播标准时间频率信号的研究。

利用卫星发播标准时间频率信号的特点是传递准确度高，覆盖面积广，操作不复杂，特别适用于野外工作。国际时间局也提倡利用全球卫星定位系统 GPS 进行 UTC 时标的国际比对，以提高世界各国原子时的准确度。根据中国幅员广大，电视传输网络不够普遍的情况，计量院于一九七八年着手探索。该项科研工作与航天、邮电和国防等部门有密切联系，先做了两年的筹备工作。课题开展以后，得到国防科工委、航天部、邮电部、有关大学的支持合作。一九七九年，计量院利用试验装置，通过“交响乐”卫星与联邦德国物理技术研究院进行了双向法时间比对（在中国南京和联邦德国莱斯汀之间），同步准确度达到 10 纳秒，准确度为 80 纳秒。这一结果证明中国有能力进行这方面的研究，在这基础上制订了课题方案和研究程序。经过几年的研究，该课题已于一九八六年九月全面完成，并通过了国家鉴定。实际达到的技术指标为：

1. 模拟信道：在载噪比大于 0 分贝时，时间传递误差。 $\leq 3$  纳秒

定时合成误差  $< 63$  纳秒

校频误差  $\leq 3 \times 10^{-12}$

在主站经过多普勒补偿后：

主站接收的频率相对误差  $< 1 \times 10^{-13}$

全国范围内用户接收的频率相对误差  $< 1 \times 10^{-10}$

2. 数字信道：在载噪比  $\leq 15$  分贝时时间传递误差  $< 1$  纳秒

定时合成误差：单向法： $< 63$  纳秒

双向法： $7$  纳秒

测距误差： $<3$  米。

此结果表明，超过原定技术指标，达到了国际先进水平，使中国授时能力进入了纳秒级，在中国计量测试、数字通讯、导航定位、宇航测控及大地测量等技术的发展中将发挥重要作用。

### （三）时间频率的检定和测试。

一九七〇年以前，时间频率的检定和测试手段比较落后，没有较高水平的标准仪器和测试仪器，一般使用单位也没有高水平的时间频率标准，检定准确度和稳定度不超过  $10^{-9}$  量级。当时只检定一般晶体振荡器、频率综合器、电子计数式频率计、航海天文钟、电秒表和机械式秒表等。随着国民经济的发展，各部门标准仪器的技术指标逐步提高。

一九七八年以后，中国引进了一部分商品小铯钟和铷频率标准，并自行研制生产出铷频率标准和高稳定度晶体振荡器，检定工作的水平提高了。七十年代后期，已开展了高准确度时间频率仪器（如小铯种、铷钟、高稳定晶体振荡器）的检定工作。一九八六年，计量院能够检定、测试国产铷频率标准及高稳定度晶体振荡器，验收进口小铯钟和铷频率标准，检定的准确度从  $10^{-9}$  提高到  $10^{-12}$  数量级。同时已经开展短期稳定度的测试，在时域频域上进行多指标的测试。从一九七〇到一九八六年，计量院为计量部门、国防科工委、科研机关、气象、测绘、邮电、电子工业、航天工业、铁道、石油化工、机械工业、各军兵种和体育部门所属有关单位检定测试了上万台仪表，满足了国民经济建设和国防建设的需要。

在七十年代中期至八十年代的十多年内，计量院编

写了秒表、航海天文钟、外差式频率计、高稳定度晶体振荡器、铷频标、原子频标、电视校频仪以及比相器的检定规程，并编制了全国时间频率检定系统。在此期间，还举办了各种时频技术学习班，培养了地方计量工作人员，提高了他们的技术水平。

## 无线电计量的发展和研究

无线电计量是以无线电电子学中经常遇到并需要测量的高频及微波电磁参量为研究对象的。但是，近代无线电计量工作频段的低端，往往与直流和交流电磁计量交叉，其高端则可达亚毫米波段。无线电计量大体上是指 30 千赫—300 吉赫频段的电磁计量。许多国家将无线电计量称为高频电磁计量、射频或微波计量。其研究重点是某些较为基本、易于独立测量的参量，某些基本电磁参量的相互关系可用图形表示。如电流和电阻的乘积为电压，磁通的时间微分为电压，电压和电流的乘积为功率。图中，圆圈内的参量与能量有关；电阻、电容、电感与电路有关；时间与频率有关。

近代无线电电子学的分支越来越多、越来越细。因而在高频和微波领域内，需要测量的电磁参量为数很多，大致可分为两大类：

（一）表征信号特征的参量（即前述与能量和时间有关的参量）。诸如电压、电流、功率、电磁场强度、频率、波长、波形参数（包括失真度）、脉冲参数、调制参数、频谱参数（频率成分、频谱纯度、边带噪声）、噪声参数（噪声温度、信噪比）等。

（二）表征网络特征的参量（即前述电路参量）。如集总参数电路参量（电阻、电导、电抗、电纳、电感、电容）、反射参量（输入输出阻抗、电压驻波比、反射系数）、传输参量（衰减、增益、相移、群延迟等）、表征无线电元器件及设备特性的参量（如灵敏度、效率、噪声系数、电子管跨导、晶体管参数等）、元器件谐振特性参量（谐振频率、带宽、 $Q$  值等）、介质电磁特性参量（损耗角正切、介电常数、导磁率等）等。

但是，在这些参量中，比较重要的参量为数并不多，仅有频率、电压、功率、衰减、阻抗和噪声等。这些参量是无线电计量工作者予以特别关注的，其它参量大多可由上述基本参量导出。

无线电计量所包含的内容是不断变化和发展的。例如，电子管电压表问世之前，热偶式电流表是最通用的无线电测量仪器之一。鉴于电子管电压表具有寄生参量影响小、量程和频率宽、输入阻抗高、过载能力强等优点，很快就取代了常用的高频电流表。所以，六十年代以前研制的高频电流标准，许多国家已搁置不用，而电压却成为无线电计量的基本项目之一。随着频率的增高，出现了分布参数系统。在微波频段上，功率计量又取代了电压计量的重要地位；频率原是无线电计量的传统项目，后被分离出去与时间计量合并，称为时间频率计量；随着微电子技术的兴起，大规模集成电路的出现和数字系统的广泛应用，半导体参量测量和数据域测量正在崭露头角。

无线电技术是一项应用广泛的技术，无论是大型飞机、导弹、卫星等所含的复杂电子系统，还是电视机、电子仪器，都是由为数很多的零部件组成。这些零部件



的各种参数的一致性和测量准确度，是确保系统或整机性能的关键。无线电计量标准和测试手段，是导航定位、邮电通信、大地测量、广播电视及其它科学研究、工业生产和国防建设各个领域不可缺少的基础条件。此外，无线电计量还渗透到环境保护、医疗卫生等日常生活中。随着通信、导航、雷达、广播、电视、微波理疗、微波炉等辐射电磁波的设备日益增多（至一九八〇年全国有40多万台），城市背景噪声增高，控制电磁污染已受到广泛重视。

新中国成立以前，中国无线电工业非常薄弱，只能用国外电子管组装少量收音机，计量工作更是空白。解放后，无线电计量事业得到迅速发展，取得了巨大成就。不仅能研制、生产品种繁多的精密测量仪器和装置，而且建立了30多项国防工程、工业生产和科学研究急需的无线电计量国家标准。八十年代初，中国无线电计量基本可以立足国内，满足国内常规计量和精密测量的需求。

### **无线电计量的发展**

#### **一、无线电计量的起步**

无线电计量是五十年代中期，为满足国内电子工业和国防科研、生产的急需，从零起步，逐渐建立和发展的。五十年代中期至六十年代中期，是无线电计量的初创阶段。这一期间大多数测量仪器由苏联和东欧诸国进口，而且只围绕高频信号发生器、示波器等通用仪器开展部分计量测试工作。一九六三年，计量院设计加工的3厘米波导回转衰减器，是国内最早的无线电计量工作标准。这一阶段的计量工作，主要是围绕通信和雷达等直接为国防军事服务的无线电电子工业技术进行的。国家计量局无线电处创建于一九五八年，一九六三年以前

隶属于国防科委第十研究院。该处一九六五年建立的 3 厘米波导量热式小功率标准装置，是国内第一个无线电计量国家标准。

一九五五年成立的国防科委五院二分院计量室无线电计量组，是中国最早的无线电计量机构，它是航天工业部二院计量站的前身。电子工业部在这个阶段建立了几十个部属无线电仪器工厂，参照苏联图纸生产测量仪器。六十年代初开始才自行设计。

## 二、无线电计量的初步发展

六十年代中期至七十年代中期，是无线电计量的发展阶段。此期间以为国防军事服务为主，在国防工程迫切需要的厘米波段上建立了一系列微波标准。例如，5 厘米波导小功率国家标准和 7.5 厘米波导低温热噪声标准等，就是为卫星通信工程配套服务而建立的。在此期间，各省、自治区、直辖市的计量机构的无线电计量工作也得到了相应的发展。例如上海市标准计量管理局研制了衰减、电压、功率等多项计量标准；辽宁省计量局建立了中电压和 3 厘米波导小功率量值传递装置；浙江省标准计量局研制和批量生产了失真度测量装置。电子工业部又新建了一批部属无线电仪器厂，开始研制和批量生产无线电精密测量仪器和工作标准仪器；此外，电子工业部在这一阶段建立了 6 个大区一级电子计量站和制定了中国无线电测量仪器的型谱系列（包括时间频率计量）。十年动乱中，计量机构体制受到严重冲击，负责计量基准、标准建立的计量院无线电处的隶属关系多次变动，工作重点也随之改变，严重影响了无线电计量的正常发展。尽管形势不利，工作困难，广大无线电计量人员仍做出了应有贡献。在这一阶段中计量院研制出近

## 10 项准确度达到国际水平的国家计量标准。

航天工业部二院计量站为满足国防军事工程的计量测试要求，独立研制本部门急需的计量标准。为开展邮电通信和卫星地面站所需的计量工作，邮电部建立了邮电通信计量中心，并有数家部属厂生产测量仪器。各省、自治区、直辖市相继建立了一批生产无线电测量仪器的工厂。如北京无线电仪器厂、北京无线电仪器二厂、上海无线电仪器厂、南通无线电仪器厂、南京电讯仪器厂等。这为无线电计量事业的新发展打下了基础。

### 三、无线电计量的迅速发展

中共十一届三中全会后，无线电计量进入了一个新的发展阶段。其工作重点从单纯为国防需要转向为民用生产服务；从注重研究计量标准到广泛开展各种精密测试；从闭关自守到向国际开放和进行广泛的学术交流。特别是一九八〇年以后。计量研究机构开始利用自己的技术优势，广泛为国民经济建设服务。例如，计量院配合卫生、劳保部门对辐射、漏场等电磁环境进行监测；为解决各单位急需，还小批量生产部分工作标准和精密测量仪器，诸如热噪声源、微电位计、标准介质样品、精密功率计和稳辐器等，节省了大量外汇。

计量院无线电处作为国家级的无线电计量研究机构，与许多国家的相应国家级计量机构保持经常性的业务联系和技术交流活动，并正式参加了国际计量委员会电学咨询委员会射频工作组组织的无线电参量的国际比对。此外，还开始援助第三世界国家的无线电计量工作。与此同时还研制出了一批国家标准，诸如高频和微波介质、标准装置高精度网络分析仪、六端口装置、自动时域脉冲测量装置、功率标准等，并研究了配备通用接口

和采用电子微型计算机的自动测量技术。

八十年代初期，计量测试院成立了无线电处，研制了3厘米波导复介电常数和导磁率测量装置和小功率传递装置。有关部门的无线电计量也有较大发展。据一九八四年六月的统计，电子工业部所属6个区域计量站，拥有各类标准仪器200余台套。电子工业部部属厂、所还研制了多种无线电计量部级标准和精密测量系统，如脉冲功率、衰减、阻抗、噪声等标准装置，以及扫频测量系统和标量网络分析仪等。无线电仪器生产也有了发展，如电子工业部已可批量生产电压、功率、阻抗、衰减、噪声等工作标准装置和数十种精密测量仪器。无线电测量仪器的品种与规格已基本满足国内需要，为无线电计量提供了一定的物质基础。

一九七九年以后，国防科工委成立了以航天部二院计量站为主体的第二计量测试研究中心，并在部属研究院和基地建立了二级计量站和基层计量室。在此期间，航天部二院计量站先后研制了10多项无线电部级计量标准和建立了时间频率计量中的频域测量标准。邮电部成立了多个大区二级计量站，邮电通信计量中心建立了10项部级无线电计量标准。电子工业部以解决元器件计量为中心任务在筹建部门计量测试研究中心。

### **无线电计量的研究成果及其应用**

#### **一、高频电压计量标准的建立**

高频电压是无线电计量的基本参量和传统测试项目之一。对于高频电压表、信号发生器、发射机、接收机等设备来说，电压参量是主要技术指标之一；许多无线电参量的单位与电压有关，如电场强度的单位是伏每米，而失真、调制等参量与电压测量的关系更为直接。电压

参量是国内最早开展的无线电计量项目。一九七〇年前后，已建立了中电压标准。一九七七年建立的高频中电压标准频率范围为：10—3000 兆赫，量程为 0.1—2 伏，准确度为  $\pm (0.21-0.7)\%$ ，已达到国际先进水平。其中测辐射热器座具有独特之处，曾获得一九八〇年国家发明四等奖。高频小电压标准，由中电压标准传递得到，达到较高水平。频率范围为 20 赫—1000 兆赫，量程为 1 微伏—1 伏，准确度为  $\pm (0.2-3)\%$ 。为了解决国内 10 赫—1 兆赫低频电压计量的急需，计量院与成都标准计量局协作，于一九七九年研制了低频电压测量装置，量程为 0.25—100 伏，准确度为  $\pm (0.02-0.1)\%$ 。

## 二、功率计量标准的建立

功率参量是考核无线电元器件、仪器设备的重要指标。发射机输出功率、接收系统灵敏度、各种器件和系统的负荷能力等，都要求测量微波功率。又如雷达站或导航系统，必须准确测量发射机输出功率和天线的辐射功率，才能保证飞机和轮船的安全。高频电压、衰减和场强标准的量值可由功率量值标准导出。一九六五年计量院建立的 3 厘米波导小功率标准，曾获得一九七八年全国科学大会奖，其覆盖频段为 8.2—12.4 吉赫，在 10 毫瓦电平上的准确度为  $\pm 0.5\%$ 。一九七五年，该院又建立了 5 厘米波导小功率国家标准，频率范围为 3.95—5.85 吉赫，量程为 0.1—10 毫瓦，准确度为  $\pm 0.3\%$ 。一九七八年计量院建立同轴宽带 1—8 吉赫小功率标准，在 10 毫瓦电平上的准确度为  $\pm (0.17-0.26)\%$ 。一九八一年加以改进，应用自动反馈技术将测量时间减少到 2 分钟，并采用了单板机进行自动数据处理。

一九八〇年，计量院与福建 8460 厂协作，研制了 3

厘米波导小功率传递标准装置。到一九八五年测试院、电子工业部的几个区域计量站和国防科工委的有关基地，均装备了该传递标准。电子工业部一九八一年还将该标准装置列为出口的精密电子仪器。

一九八二年，计量院和日本电子技术综合研究所，进行了 3 厘米波导和同轴功率的国际比对，比对结果相互符合。

### 三、衰减计量标准的建立

衰减计量是无线电计量的一个重要项目。高频电压和微波功率标准通常只能建立在一定电平范围内，而大功率（高电压）及微小功率（微电压）的测量则必须依靠衰减器来实现。例如，中国的小电压标准，就是通过精密衰减器，由中电压量值标准传递而得到的。随着电子技术的发展，发射机的功率愈来愈大，接收机的灵敏度愈来愈高，因而对衰减计量无论在频段，还是在量程和准确度等方面，都提出了愈来愈高的要求。此外，许多高频和微波器件，衰减是衡量其指标的一项重要参量。如电调(PIN)调制衰减器和隔离器的插入损耗和隔离度，定向耦合器的耦合度和方向性，海底和地面通信电缆的衰减等。

衰减计量研究工作的主要内容是：研制各种类型的标准衰减器和量值传递与精密测量用的各种衰减装置。衰减计量是国内无线电计量中开展较早的项目之一，一九六三年即研制了 3 厘米波导回转衰减器。一九六六年和一九七五年，计量院先后用调制技术，建立了 3 厘米和 5 厘米波导衰减标准装置，量限为 0—40 分贝，准确度为每 10 分贝 $\pm 0.004$  分贝。为解决邮电系统中同轴电缆多路通信中的衰减计量问题，一九八〇年计量院与邮

电通信计量中心协作，共同研制了电信载频衰减国家标准；其频率范围为 100 千赫—30 兆赫，量程为 0—80 分贝，准确度为  $(1-3) \times -4A$  分贝，其中 A 为被测衰减量。一九八〇年计量院建成 30 兆赫中频截止衰减器国家标准（图），其量程为 0—100 分贝，准确度为  $(1-3) \times 10^{-4}A$  分贝。此后，又利用 30 兆赫截止衰减器标准和中频替代装置，建立了 2 厘米波导衰减标准测量装置；其频率范围为 12.4—18.0 吉赫，量程为 0—50 分贝，准确度为  $\pm (0.003 + 2 \times 10^{-4})$  分贝。10 分贝范围内为  $\pm 0.003$  分贝，20—50 分贝范围内为  $\pm 0.02$  分贝。

一九八三年计量院与澳大利亚国家计量所在 30 兆赫和 3 厘米波导频段进行衰减量值国际比对，其后又参加了亚太地区国际比对。比对结果表明，中国的衰减量值与国际上是一致的。一九八五年的美国《微波》杂志将计量院的衰减计量水平列为世界先进水平。

#### 四、阻抗计量标准的建立

阻抗是无线电计量的一个基本参量。根据频率和电路形式的不同，阻抗分为集总参数阻抗和分布参数（或微波）阻抗两类。任何无线电仪器设备和测量系统中，元器件之间的连接均要求阻抗匹配。阻抗参量的测量几乎影响到全部无线电计量标准的准确度，许多无线电参量是国内较早开展的计量项目之一。六十年代，计量院采用谐振法建立了高频品质因素值国家标准。频率范围为 50 千赫—50 兆赫，有效品质因素值范围为 50—500，准确度为  $\pm (2-5) \%$ 。

长期以来，集总参数高频阻抗计量一直是国内无线电计量的薄弱环节。中共十一届三中全会后，高频计量得到了较快的发展。一九八四年，计量院用精密空气介

质同轴线、短路器和标准 50 欧同轴负载及失配负载作标准器，采用引进的阻抗分析仪作为校准装置，较快地建立了高频阻抗标准装置，基本上满足了国内常规高频阻抗计量的要求。

七十年代，计量院在 3 厘米波导频段上，采用调配反射计技术建立了微波阻抗国家标准装置。频率范围为 8.2—10.0 吉赫，反射系数模（ $|\Gamma|$ ）的准确度为  $\pm (2 \times 10^{-3} + 3 \times 10^{-3} |\Gamma|)$ ，反射系数相角的准确度为  $\pm 0.7$  度（被测  $|\Gamma| > 0.05$  时）。该频段的阻抗标准也曾与日本电子技术综合研究所进行国际比对，一致性很好。八十年代完成的高准确度自动网络分析仪所建立的同轴阻抗标准，其频率范围为 0.1—2.0 吉赫，反射系数模的准确度为  $\pm (1 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-3} |\Gamma|)$ ，相角的准确度为  $\pm [0.2 \pm \text{tg}^{-1} (0.001/|\Gamma|)]$  度。高准确度自动网络分析仪还可用于建立该频段的衰减量值国家标准，其频率范围为 0.1—2.0 吉赫，0—80 分贝，准确度为  $\pm [0.01 + (0.5 - 2) \times 10^{-3} A]$ ，相角准确度为  $\pm (0.1 - 0.5)$  度。

### 五、噪声计量标准的建立

收音机、电视机以及任何无线电设备中的电压、电流或功率，均包含有无法避免的噪声。这里所指的是电噪声，而不是声学噪声。任何一台无线电设备或测量仪器，其灵敏度的提高最终受到其内部噪声的限制。在雷达作用距离的公式中，可以明显地看到噪声的影响：

$$Y_{\max} = \alpha SQR(PS/F)$$

式中， $P_s$  为雷达发射功率， $F$  为雷达接收机噪声系数， $\alpha$  为比例常数。显然，降低接收机噪声系统，相当于提高了雷达发射机的功率，而要直接提高发射机功率



则要付出很高的代价。

随着宇宙通信、射电天文、雷达技术、电子对抗的迅速发展，正确测量诸如参量放大器等微波器件和接收机的噪声系数，已成为无线电技术十分重要的任务。全部噪声测量中，都要采用已知噪声输出功率的标准噪声源。噪声计量的主要内容是，建立标准噪声源以及相应的检定装置，并校准其它次级标准噪声源。中国在研制噪声标准方面做了大量工作，波导噪声标准所覆盖的频段在微波诸参量是最齐全的。

由于标准噪声源产生的噪声具有连续的频谱，其大小可用每单位带宽的功率，即用功率谱密度来表示。然而，由于噪声功率电平极低，因此，这种噪声通常是与电阻产生的热噪声进行比较来处理的；将标准噪声源的噪声输出功率，用与此标准噪声源阻抗相等的电阻所产生的热噪声来等效，即用所谓等效噪声温度（单位为开）或超噪比表示。一九六七年计量院建立的 3 厘米波导高温噪声国家标准，是国内较早研制的无线电计量标准之一。七十年代，高温波导噪声标准已覆盖了从 2.6—40.0 吉赫中的 6 个常用波导频段，其指标为：超噪比校准范围为 0—18 分贝，准确度 $\pm 0.1$  分贝。一九七九年研制的同轴高温噪声国家标准，是计量院与上海无线电仪器厂等单位协作研制成的，频率范围为 600 兆赫和 800 兆赫，673 开 $\pm 1.5$  开，超噪比校准的范围为 0—20 分贝，准确度为 $\pm 0.1$  分贝。中国研制的同轴噪声标准中的标准噪声源、以及高温同轴负载终端电阻器的设计制造工艺有独创之处，受到国际上同行专家的好评。七十年代中期，为配合中国卫星通信工程的测试需要，计量院在 3.3—4.9 吉赫和 3.95—5.85 吉赫 2 个波导频段上，研

制了低温噪声国家标准。低温电阻器置于 77 开的液氮中，校准准确度为  $\pm 0.6$  开。一九八六年噪声参量标准参加了国际计量局射频工作组组织的国际比对。

## 六、相位计量标准的建立

在导航、制导、雷达跟踪和相控阵雷达技术等军事电子学中，在自动控制及稳定系统中，相位的精密测量是确保整个系统性能的关键。相位参量原来是表征简谐振荡信号在某一瞬时状态的物理量，其数学描述是指正弦或余弦函数的幅角。例如一个正弦信号的瞬时值  $y$  与幅度  $A$  的关系为：

$$y = A \sin(\omega t + \Phi)$$

式中幅角  $(\omega t + \Phi)$  被定义为相位。由此可知，相位是时间  $t$  的线性函数。一般而言，人们感兴趣的不是相位的绝对值，而是两个信号之间的相位差。所以，习惯上人们将相位测量称作相移测量。计量院从一九七六到一九八三年采用时间间隔测量技术，先后建立了  $(0.6 - 1)$  吉赫和  $(2 - 4)$  吉赫 2 个频段的同轴相移国家标准和  $(3.95 - 5.85)$  吉赫、 $(8.2 - 12.4)$  吉赫、 $(12.4 - 18.0)$  吉赫 3 个波导频段的相移国家标准，量程均为  $(0 - 360)$  度，准确度均为  $\pm 0.1$  度（通用法）或  $\pm 0.02$  度（平均法）。

## 七、场强计量标准的建立

伴随着电磁能应用范围的扩大，电磁干扰的问题日益严重。它不仅影响仪器设备正常工作，造成信号失误、控制失效，而且严重威胁人体健康。例如，经海运和空运后，高灵敏度的微波功率探头和检波晶体有损坏，究其原因没有采取屏蔽措施，无意中遭受了过强的电磁辐射。又如，雷达发射机附近住户家中的日光灯，会因

发射机的强大功率而自动点燃。因此，对电磁波的生物效应和电磁兼容的研究，已引起国内外的严重关注。场强测量和国家标准的研究已成为无线电计量的重点研究项目之一。场强计量分为强场和弱场 2 个量程。弱场测量主要用于广播、电视和通信部门，强场测量应用较广泛，涉及军用和民用诸多领域。为了建立中国微波场强国家标准，一九八三年，计量院建成了 5 厘米波段场强标准用的微波暗室，其指标为  $9.5 \times 4.2 \times 2.8$  米，静区反射电平（静度）优于  $-30$  分贝。一九八三年开始，在（0—500）兆赫频段上，采用横电磁波传输室技术，研制高频强场国家标准，量程为（0.1—300）伏每米，准确度为  $\pm 1$  分贝。

#### 八、其它计量标准的建立

社会生产中，高频、微波测量，对材料的介质电特性测量，特别是聚合物的损耗角正切的测量，以及苯、环已烷等“标准”液体的介电和损耗特性的测量是十分迫切需要的。在工业生产中，要应用无线电测量技术对各种技术领域中广泛应用的材料，进行严格的质量控制。例如，用于宽带海底电缆和各种电缆中的聚乙烯、电容介质、高频和微波集成电路的基片材料氧化铝等。

一九八二年和一九八四年，计量院采用谐振法（包括集总电路、空腔和敞式腔谐振器）在 2 个频段上建立了高频和微波介质标准测量装置。3 厘米微波介质标准装置覆盖了（8.2—12.4）吉赫频段，介电常数测量范围为（1—20），有些复合材料可达 40，准确度为  $\pm 0.3\%$ ，损耗角正切（ $\text{tg } \delta$ ）范围为  $1 \times 10^{-4}$ — $2 \times 10^{-3}$ ，准确度为  $\pm 7\%$ 。高频介质材料电性能精密测量装置的频段为（0.1—100）兆赫介电常数测量范围为（ $e-10$ ），准确

度为 $\pm 0.5\%$  ( $3\sigma$ )，损耗角正切测量范围为 $10^{-2}$ — $10^{-5}$ ，准确度为 $\pm (10\% + 1 \times 10^{-5})$ 。

脉冲波形参量的测量是电子测量的重要内容。在国内无线电仪器产品中，有 30%左右的产品是各类示波器和图示仪器。

一九八六年，计量院建立了一套脉冲标准与自动检验装置，其指标为：测量（10 微伏—200 毫伏）的低频方波幅度的准确度为 $\pm (0.1\% + 10 \text{ 微伏})$ ；测量（0.2—50）伏的低频方波幅度的准确度为 0.05%；测量（50 毫伏至 50 伏）的高速脉冲幅度，准确度为 $\pm (0.5\% + 1 \text{ 毫伏})$ ，测量上升时间的准确度为 $\pm (1\% + 5 \text{ 皮秒})$ 。

光纤通讯具有容量大、保真度高、系统成本比同轴或波导通讯系统低廉等优点。中国从八十年代起，大力发展和研究光纤通讯系统。为满足与光纤通讯有关的计量测试要求，计量院一九八四年开展了光纤基带宽度标准测试装置的研究。光纤基带宽度是决定光纤通讯系统信息容量速率的重要指标。因此光纤基带宽度是制造厂和使用部门都十分关心，而又易于引起争议的一项指标，亟待计量部门能够提供测量数据。已建的光纤基带宽度标准测试装置的指标为：工作波长 1.3 微米，动态范围 20 分贝，测量上限 1.5 吉赫，测量准确度为 $\pm 5\%$ 。

### 九、半导体计量

进入八十年代，中国半导体集成电路的生产以 60—70%的年递增率发展，一九八五年产量达 1 亿块。参量检测方法不统一，参量量值不准确，甚至有些参量没有测量手段等因素，严重妨碍微电子工业的进一步发展。为提高产品质量和成品率，改进生产工艺，降低生产成本，并尽快缩小与世界先进水平的差距，必须加速发展有关

半导体参量的测量研究工作。

一九八〇年，中国正式开始半导体参量测量的研究工作，并逐步明确半导体参量测量工作的任务，制定了该项工作的发展规划。微电子工业的计量，突破了传统的计量学科界限，是一门综合性很强的计量学科，包括电学参量、电子参量、几何参量、光学、化学超纯水、气体和试剂等等多种参量的测量问题。其中许多量已进入微区、微量、微电子学领域。如几何参量的测量小到十分之几纳米、超纯水有害杂质参量小到  $10^{-6}$  级，电流小到皮安（ $10^{-12}$ ），功率小到皮瓦（ $10^{-12}$ ）。半导体参量测量的特点可归纳为：参量多、量限宽、实时性强。其任务包括：（1）半导体材料特性计量，如硅单晶电阻率；扩展电阻、掺杂浓度以及其径向和纵向分布特性；少数载流子寿命；硅氧含量、碳含量。对较有前途的新型化合物砷化镓材料，也应研究其测量方法，建立相应的计量标准和量值传递方法。（2）建立半导体器件生产过程中的工艺参量监控用标准，以保证工艺处于可控及最佳状态，提高产品成品率。其中如经氧化、扩散、外延、注入等工艺形成的薄膜（约 0.5—50 微米）的精密测量和光刻掩模板线宽和间距测量，都需要先进的测量方法和保证测量仪器的准确度。随着超大规模集成电路的发展，量限要求达 0.5—10 微米，绝对误差要求达 0.1—0.05 微米。此外，为了保证工艺参数测量的“在线性”，将普遍采用微电子测试图形法。该方法利用与生产器件工艺兼容的测试图形结构，通过电学测量方法监测某些电参量和非电量，以保证工艺参量和设备运行处于最佳状态；主要优点是监测无破坏性，图形结构不占芯片的主要面积，比一般的“陪管”作用大。（3）建立半导体

器件参量的计量标准。由于器件参量种类繁多，测量仪器从单机到系统均较复杂，为保证其准确性，亟待建立相应的标准。

半导体计量属中国第六和第七个五年计划的科技攻关项目。计量院一九八二年和一九八五年分别建立了不同量限的硅单晶电阻率国家标准，主要技术指标达到国际先进水平。一九八五年已研制多项计量标准，如用于监控互补型金属氧化物半导体（CMOS）和晶体管—晶体管逻辑（TTL）集成电路的微电子测试图形版图已设计制造。一九八六年完成了其相应的微电子图形自动测量系统。已建立的计量标准保证了量值统一、提高了成品率，取得了一定的经济效益和社会效益。

#### 十、量值传递和精密测量

为保证无线电参量量值的准确统一，计量院将已建立的国家标准量值逐级传递到现场测量仪器，已建立的国家标准参量，均建立了相应的量值传递装置或精密测量系统。针对无线电参量的不同情况和现状，制定了电压、功率、衰减、阻抗、噪声、场强、相移等十余个参量的检定系统。为使各级计量部门依据上述检定系统和有关文件规定，能对计量标准和现场无线电测量仪器的计量性能（如准确度、灵敏度、稳定度等）进行评定，制定了一系列参量仪器检定工作必须遵守的检定规程。无线电仪器检定规程分为 9 类：电压表、信号参量、元器件参量、脉冲、衰减、功率、阻抗、噪声、相位参量以及综合参量。自一九七六年起，国家计量局已颁布 56 种无线电仪器检定规程。电子工业部从一九八一年起，也积极编制电子仪器的检定方法和规程：一九八二年编制和颁布了 38 种，一九八五年又分别颁布了检定规程

60 种。

## 光学计量的发展概况

### 光学计量概述

#### 一、辐射与光

电磁波辐射中,波长从 10 纳米到 0.1 毫米的这个范围称为光学辐射。人类肉眼能按颜色和明亮程度感知的一部分辐射,也就是波长从 400 纳米到 780 纳米部分,称为可见光,即人们所说的光。人眼看不见的,一般就称为辐射。图表示光学辐射在电磁波辐射中所占有的部分。

光学计量就是研究光学辐射范围内的计量基准和标准及其测量方法。

#### 二、中国光学计量的概况

在旧中国,根本没有统一的光学计量标准,即使是轻工业比较发达的上海、重庆等城市的几家灯泡厂,也都是把外国生产的灯泡买来作标准,并以目测方法进行检验。

新中国成立后,一九五八年长春光学精密机械研究所(简称光机所)开始筹建光度基准的研究工作。当时利用日本帝国主义扶植的“满洲国”傀儡政权时期大连南满株式会社(铁路方面)建立并留在科学院大连化学物理研究所(简称大连化物所)的测光装置(有 3 米光轨、滑车、2 只戊烷灯)进行实验。国家计量局于一九

五九年正式委托长春光机所筹建光度计量基准。

为加速光学计量建设，国家计量局于一九六〇年底抽调部分科技人员成立光学计量实验室。

六十年代，红外探测技术的发展以及激光新技术的问世促进了光学事业的发展。当时，在激光防护、育种、医疗、加工和电影、电视、摄影、胶片、染料、涂料、纺织、玻璃、交通讯号等各方面需要，积极筹建相应的计量标准，以评定产品质量。与此同时，开展了诸如人民大会堂的灯光、激光防护、电影、电视、新闻灯等的测试服务工作，促进了光学计量的发展。自一九七三至一九八三年间，除建立中国光度基准（包括光强基准、光通量副基准）外，还先后建立了激光功率、激光能量标准以及光谱辐亮度、光谱辐照度标准、色度标准、光亮度标准、光源色温、光透射密度、曝光量等光学方面常用量标准，初步满足了国内光学工业生产和国民经济各方面发展的需要。

## 光度计量

光度计量是研究用人类眼睛衡量光量强弱的一种测量科学。人类眼睛近似于照相机的光学系统。它由瞳孔、水晶体和视网膜组成。人眼对光最敏感的波长为 555 纳米，其相对灵敏度从 555 纳米向两边（即向短波和长波长）不断减小，构成一钟形曲线，称为光谱光视效率，用  $V(\lambda)$  表示。根据人眼对光的明亮适应程度，又可分为明视觉和暗视觉效率，分别用  $V(\lambda)$  和  $V'(\lambda)$  表示，如图所示。因此，光度学是一个视觉过程反映出来的生理、心理物理量，它是研究光度计量的技术基础。



## 一、光度计量的发展过程

一九五九年以后,随着工农业迅速发展,照明光源的光度计量标准和测试问题已十分突出。中国曾计划向苏联订购和送检光度标准灯,苏方不予提供和进行检定。向日本订购的标准灯,到货又没有数据。从英国进口标准灯却又不提供色温值。在此困难情况下,为筹建光学实验室,国家计量局于一九五九年底抽调部分科技人员去长春光机所学习和参加光度基准的研究工作。一九六三年以后,在长春光机所取得阶段成果的基础上,国家计量局光学室对光度基准又进行了深入研究。

该室在研究光强基准的同时,也研究和建立了 2353 开和开色温的光通量副基准。光强单位坎德拉和光通量副基准于一九七四年建成并通过了国家鉴定。

在建立光强基准和光通量副基准的基础上,为满足照度测量的需要,计量院于一九七四年又建立了照度标准并研制了照度计检定装置。为把基准量值传递到生产中使用的标准灯上,国家计量局一九六三年选用苏联的光度标准灯作为仿制对象,与上海亚明灯泡厂协作,经三年努力,于一九六六年制成 BZ—1 到 BZ—7 光强标准灯和 BZ—8 到 BZ—11 光通量标准灯。

随着中国电光源、光学仪器、航天技术的发展和计量部门量值传递的开展,对标准灯提出更高要求。为此,计量院与计量分院于一九七三年又重新研制了新的球形玻壳、灯丝呈平面锯齿排的 BDQ 型光强标准灯和 BDT 型光通量标准灯系列,并由上海亚明灯泡厂制造。在与各国实验室间比对中发现,中国研制的标准灯的性能稳定,抗震性能优于联邦德国亚斯令灯。一九八四年正式通过国家鉴定。

鉴于电影电视工业发展的需要,一九七三年国家计委电影电视办公室向计量部门提出建立国家级的测光标准和胶片密度、感光度、色度计量标准的要求,并拨专款建造实验楼和提供研究经费。计量院于一九七三年组成自动分布光度计研制课题组。自行设计和制造了由DJS—7型计算机控制、测量数据可自动处理的大型自动分布光度计。一九八二年通过国家鉴定。

一九七九年根据国际计量委员会光度与辐射度咨询委员会通告,计量院与计量分院组织人力,利用已研制成的电校准辐射计和光强单位坎德拉测定最大光谱光效率( $K_m$ )值,其值等于684流明每瓦,一九七七年将数据报送国际计量委员会,该委员会采纳了中国的数据。

一九七九年第十九届国际计量大会通过了发光强度单位——坎德拉的新定义,计量院根据坎德拉的新定义于一九八二年完成了新光度基准的研究工作。同年将结果报送到国际计量委员会光度与辐射度咨询委员会。

人眼光谱光视效率 $V(\lambda)$ 是光度学的基础,过去一直沿用欧洲人眼的的数据,中国根据国际照明委员会的要求,用异色视亮度匹配法,于一九八一至一九八三年间测定了中国人眼的 $V(\lambda)$ 。一九八四年报送国际照明委员会1.4专业委员会,经讨论将中国测得的值平均在国际照明委员会明视觉光谱光效率值中。

## 二、光度计量的研究成果及其应用

### (一) 建立光度计量基准。

六十年代中国的光度基准是根据国际计量委员会推荐的尺寸制作的。制作坩埚和观察管的氧化钪纯度要求达到99.98%。纯氧化钪由上海化工厂提炼,再经计量院光学室用碳弧熔融,玛瑙钵研细,用纯盐水、蒸馏水反

复清洗焙烘然后用木模成型。所用的铂，其电阻温度比为 1.390—1.3922，由科学院贵金属所和上海热工仪表所提纯。

根据光强单位的定义，计量院于一九七二年完成了 2042 开色温下的发光强度坎德拉的研究，又用升温滤光器把光强色温逐步过渡到 2353 开和 2854 开的光强副基准、光通量副基准及其工作基准上去，组成一套完整的基准组。

中国光强基准是在国外实验室铂凝固温度亮度起伏较大这一点上作了进一步研究，在找到了控制光亮起伏的最佳条件基础上，达到起伏不超过 $\pm 0.3\%$ 的水平，即凝固曲线和熔化曲线的平直部分达到一致的亮度。一九七八年，国际计量局局长贾科莫（P.Giacomo）博士在参观中国装置时说：“在我参观过的各国光度基准器中，这样好的铂凝固曲线还是第一次看到”。最后误差分析结果：光强单位的误差为 $\pm 0.33\%$ ；2353 开光通量副基准灯组误差为 $\pm 0.46\%$ ；2788K 光通量副基准灯组为 $\pm 0.71\%$ 。为考察中国的光度单位与国际上的一致性，一九七八年中国将 4 只 2042 开光强副基准灯送往国际计量局进行比对。从与国际计量局的世界平均值比对结果来看，中国的基准值是相当好的。结果列于表：

由光强度单位导出的光照度、亮度和色温度等的单位量值与国际上的量值也是一致的。即色温的准确度为：2042 开 $\pm 5.6$  开；2353K $\pm 7.2$  开；2854 开 $\pm 10.6$  开；3200 开 $\pm 13.9$  开。光照度标准的准确度为 $\pm 1\%$ ，光亮度标准的准确度在  $2 \times 10^{-4}$ — $2 \times 10$  坎德拉每平方米的数量限内为 $\pm 1.3$ — $2.5\%$ 。

（二）自动化的大型高准确度分光光度计。

七十年代为测量光源的总光通量, 计量院研制了一种直接测量和经反射镜测量相结合的复合式分布光度计。直接测量距离从 1.6 米到 2.4 米, 连续可调, 适宜于小线度小功率的光源, 容易得到高准确度。反射镜系统测量距离为 7 米, 适宜于大线度。该分光光度计用 DJS—7 型计算机控制, 全自动测量和数据处理, 实时给出测量结果, 还可把信号送往  $x-y$  记录仪, 描出光源光强的空间分布的极坐标曲线。

### (三) $K_m$ 值测定。

根据一九七九年国际计量委员会光度、辐射度咨询委员会要求, 中国对最大光谱光效能值进行了实验测定。计量院和计量分院分别测得的  $K_m$  值为 682 流明每瓦和 684 流明每瓦, 并把 684 流明每瓦这一值报送国际计量委员会。现把各国测定的  $K_m$  值列于表。

从表中可知, 中国测得的  $K_m$  值是处在平均值中, 这引起了国际计量局对中国光学计量的重视。

### (四) 复现光度基准的新定义。

一九七九年国际计量大会通过的光度单位的新定义为: “坎德拉—光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为  $540 \times 10$  赫兹的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为  $1/683$  瓦每球面度”。

中国于一九七三年建立了以铂凝固点黑体的光度基准, 一九七七年又用实验测定了  $K_m$  值, 这就为用辐射法复现新光强单位的定义打下理论基础和技术基础。复现的关键: 一是所用电校准辐射计的准确度, 二是  $V(\lambda)$  滤光器相对光谱分布的准确测量, 三是所用的测量方法。中国用电校准辐射计实现光强单位的准确度为  $\pm 0.28\%$ 。一九八二年将此结果报送国际计量委员会光度、辐射度

咨询委员会，得到与会代表的好评，要求把中国的研究报告在国际上发表（后刊登在《计量学》《Metrologia》1983年，第19卷，第85至92页上）。

#### （五）中国人眼明视觉光视效率的测定。

根据国际照明委员会的要求，要用异色视亮度匹配法，以A光源（色温2854K）作参考光源，在2度视场条件下测定16名观察者，10度视场条件下测定9名观察者的明视觉 $V(\lambda)$ 。在挑选观察者时，已注意到中国是多民族国家，故包括了汉、满、蒙、朝鲜、维吾尔等民族，从年龄上看，主要属中青年。严格挑选观察者后，测得了中国人眼的数据。一九八四年将测得的 $V(\lambda)$ 结果报送国际照明委员会1.4专业委员会。经讨论分析后，同意将中国测得的平均值计入国际照明委员会明视觉光谱光效率值中。

六十年代以后，中国的光度计量从无到有，走出了自己的道路。除光强基准外还完整地建立了光通量副基准、工作基准，照度、亮度、色温、弱光标准。对光通量测量实现了自动化。在测量 $K_m$ 值和按新定义复现光度基准方面，在国际上享有一定声誉。

## 辐射计量

随着科学技术的发展，人们不仅要了解宽光谱范围的辐射与物质的相互作用，而且还想知道不同波长辐射与物质的相互作用时的不同特性。因为只有了解这些特性后，才能对自然界的各种物质作出深入的研究。如感光材料，它并不是对所有的光都一样敏感；植物的光合作用也因不同波长而异。光学辐射以不同的温度向外发

射，矿藏资源不同，存在于自然界的温度也各异，不同矿藏温度，辐射出各自的光谱分布。遥感技术就是利用物体这一特性，通过卫星、飞机来探测地面的各种作物和地下的矿藏；在军事上更有它的特殊用途。因此，需要建立准确的光谱辐射标准和提高光谱测量技术。

### 一、辐射计量的发展过程

六十年代初，红外技术已广泛用于军事上，如导弹发射、跟踪、红外夜视；在医疗上，如紫外杀菌治病、矿工的紫外浴；农业上，如诱杀害虫等。但这些都需用光谱辐射标准来检测各种红外、紫外辐射源。一九六三年，在长春光机所指导下，计量院开始筹建标准黑体辐射源。经过十年努力于一九七三年底正式建成了近紫外、可见和近红外（0.25—2.5 微米）光谱区的辐亮度标准。一九七三年开始研究实用光谱辐射照度标准。由于高温黑体炉工作系统复杂，操作麻烦，计算复杂。因而常用的是它的次级标准。次级标准采用钨带灯，该院与上海亚明灯泡厂合作研制，共研制了两种：BW—2000 和 BDW 型灯，作为光谱辐亮度的次级标准和传递用灯。光谱辐照度灯采用沈阳光华灯泡厂研制的 1000 瓦石英溴钨灯。全部项目于一九七五年完成并通过国家鉴定。

六十年代后期，国内红外探测器发展迅速，为标定其特性，各部门自制和进口了一些黑体炉，但测得的结果很不统一。为统一量值，计量院从一九六五年开始筹建 500 至 1000 开全辐射标准，一九七〇年搬至计量分院，于一九八〇年正式完成，通过鉴定。

为提高综合防治农业虫害的黑光灯的产品质量，计量院于一九七六年与华东电子管厂合作测试了黑光灯的紫外辐射功率，于一九七七年利用已建光谱辐射标准建

立了黑光灯光谱辐射功率标准。

由于科学技术和工业的发展，对光源提出了更高的要求，要求光源光效高，光色好，这就需要用光谱技术找出最有效的光源光谱范围和辐射强度，需要用计量标准和测量技术来检测光源和探测器的性能以及测量仪器的特性。计量院于一九七七年着手研制宽光谱辐射自动测量装置，一九八二年完成并通过鉴定。

一九八〇至一九八四年间，计量院还研究建立了波长为（250—200）纳米的远紫外辐射标准和（200—170）纳米的真空紫外辐射标准。

## 二、辐射计量的研究成果及其应用

从六十年代开始，辐射计量测试工作得到了迅速发展，从过去的军用逐步走向民用。许多过去用光度法可以满足的测试工作，而今要用光谱辐射测量来代替，所以光谱辐射计量的应用范围正在不断扩大，今后还会有更大的发展。

### （一）（0.25—2.5）微米光谱辐亮度和辐照度标准。

该两项标准是应用普朗克的绝对黑体辐射定律实现的。标准辐射源采用高温黑体炉，传递标准用钨带灯和溴钨灯。光谱辐亮度的准确度：波长（0.25—2.5）微米为 $\pm 2.5$ — $\pm 7.5\%$ 。光谱辐照度的准确度：波长（0.25—2.5）微米为 $\pm 4$ — $\pm 8\%$ 。500—1000 开尔文的标准黑体辐射装置是由标准黑体炉、辐射计罩和探测器三部分组成，其测量辐照度的准确度为 $\pm 1.1\%$ 。

### （二）黑光灯标准。

黑光灯标准发射的波长在（300—400）纳米（“长波紫外辐射”）范围内，在连续区辐照度的准确度与光谱区辐照度的准确度分别为 $\pm 4$ — $6\%$ 及 $4.5$ — $5\%$ 。300—450

纳米光谱内总辐照度的准确度为 $\pm 5\%$ 。

### (三) 自动光辐射计。

该辐射计是自行设计研制的，可用来测量辐亮度和辐照度。测辐亮度时，把发光面成象在单色仪狭缝上；测光谱辐照度时，让光源首先照射到一个具有较理想的漫射白板上，然后再把漫射板上反射出的光引入单色仪狭缝。测量过程都能自动地完成。测量装置的准确度为：多次实测得出结果的相对误差，测光谱辐亮度为 $\pm 0.5 - \pm 1.5\%$ ；测光谱辐照度为 $\pm 1 - \pm 2\%$ 。

(四) 远紫外和真空紫外 (250—170) 纳米波长的工作标准。

用英国标准标定的传递标准氙灯进行传递。测量装置是计量院自行设计的，其准确度分别为 $\pm 8.2\%$ 和 $\pm 10\%$ 。

六十年代以后，相继完成了紫外、可见、近红外的光谱辐射标准和 500—1000 开的全辐射标准，完成了黑光灯的光谱辐射功率标准。

## 激光参数计量

激光在六十年代初以崭新的面貌问世后，引起了科学技术界的极大关注，并很快在工业、农业、科学技术和军事上得到应用。那时虽预见到激光应用前景，但只着重于新型激光器和应用方面的研究，对其各个参数的测量和计量标准的研究到七十年代才提出，故激光参数计量起步较晚。

### 一、激光参数计量的发展过程

中国的激光参数计量是从一九七三年援越抗美战场



上激光致盲的防护开始研究的。当时，国家计委、国家科委、国防科委联合提出激光防护课题。防护课题实际上是激光功率和能量测量问题。

在研究、建立激光功率、能量标准的任务下达后，计量院集中一部分力量，经过研究后决定采用电校准辐射计来建立激光功率计量的最高标准，并于一九七五年正式完成。由于国内不少单位因各自的需要也研制和进口了测激光参数的仪器，为从中选优，于一九七五年七月在上海召开了激光功率计比对会。计量院和计量分院研制的电校准辐射计被推选为（0.1—100 毫瓦）量程的国家激光功率计量标准。计量院的标准锥形能量计因考核时间较短，被定为（10-2—1）焦耳的国家临时标准，一九八〇年后正式定为国家标准。由于瓦级激光器产量增加，上海市标准计量管理局、复旦大学等联合研制了激光中功率计，一九七八年又作了改进，并被批准为（0.1—30）瓦激光功率标准。

随着激光应用领域的扩大，激光功率和能量量程需要扩大，对建立大功率、大能量计量标准变得更为迫切。国内一些单位开始研究（20—300）瓦的大功率标准。对于已研制成的大功率标准于一九七七年在广州召开了比对会。会上，计量院的激光大功率计被评为（20—300）瓦级的国家临时标准。

一九七八年在北京召开了鉴定会，由计量院研制的激光能量计检定装置和激光大能量标准（1—40 焦耳）通过了鉴定。

由于国际上出现的热释电辐射计，除了光谱响应范围宽，可自校外，还具有响应快、灵敏度高等特点，并且测量下限可达  $10^{-6}$  瓦级。计量院于一九七九年着手两

个方面的研究工作：一是研究热释电辐射计；二是研究建立 0.85 微米的光纤功率计校准装置。这两项研究分别于一九八四年和一九八五年完成。

## 二、激光参数计量的研究成果及其应用

电校准辐射计是用以测量激光功率和光辐射功率的。它的工作原理是：当辐射计接收面的黑层吸收光辐射后，接收面温度升高，装在接收面背面的热电堆冷热端之间就产生热电势输出。切断光束后，在接收面上的加热丝上通以电流加热接收面。此时热电堆也产生一热电势输出。调节电功率，使两者所产生的热电势输出相等，加以修正后即可测得光功率。也就是电功率取代了激光功率。计量院利用这一原理研究了两种辐射计。一种是平面补偿型，另一种是锥腔补偿型。测量范围为（0.1—100）毫瓦，波长范围为（0.3—15）微米。其准确度分别为 $\pm 0.35\%$ 和 $\pm 0.32\%$ 。

一九八〇年中国计量科学研究院与联邦德国物理技术研究院的电校准辐射计进行了国际比对。测得的结果符合在 $\pm 0.3\%$ 以内（联邦德国物理技术研究院报导的准确度为 $\pm 0.3\%$ ）。但是，中国的辐射计的灵敏度大大优于其它国家的辐射计的灵敏度。

上海市标准计量管理局及复旦大学等单位研制的激光中功率计标准，其原理与结构形式与电校准辐射计相同。改进后的中功率计标准的准确度为 $\pm 3\%$ 。

激光大功率计计量标准是一种流水式功率计，原理是激光束被锥腔吸收后变成热，热量被流过锥腔夹层的水带走，使出口水温升高。用热电堆测出出口与入口处之间水温差所产生温差电势，就得光功率。计量院研制的标准流水功率计测量激光功率的范围为（20—5000）

瓦（包括前后两种功率计），被测波长范围为（0.3—15）微米，测量准确度 $\pm 3\%$ 。

在建立激光功率标准的同时，计量院积极开展建立脉冲激光能量计量标准的研究。

为适应无选择性能量计（如碳斗）检定的需要，利用已建标准激光功率计，用模拟激光束方法，将发散的光用透镜会聚，提高光束辐射功率，按这样的原理设计了能量计检定装置。该装置的测量范围为：功率 10 毫瓦—0.6 瓦；脉宽  $10^{-3}$ —1 秒，脉冲能量为  $10^{-4}$ —1 焦耳。装置的准确度为 $\pm 3\%$ 。

建立的激光小能量标准，即 Z 型能量计，是一种以电校准的锥形能量计。工作量程为  $10^{-2}$ —1 焦耳，对脉宽  $10^{-3}$  秒以下激光，可承受的能量密度为 0.1 焦耳每平方厘米，准确度为 $\pm 1.6\%$ 。

激光大能量标准，即 B 型能量计，其准确度为 $\pm 1.5\%$ 。重复性 $\pm 0.2\%$ ，对脉宽为  $10^{-3}$  秒的激光可承受的能量密度为 30 焦耳每平方厘米，可测激光束能量上限为 40 焦耳。

电校准热释电辐射计的测量范围为  $10^{-6}$ — $10^{-1}$  瓦，极限误差为 $\pm 2.5\%$ 。平衡时间为 5 秒。

波长为 0.85 微米的光纤功率计检定装置是为检定波长为 0.85 微米的光纤功率计而建立的。校准范围为  $10^{-3}$ — $10^{-8}$  瓦，准确度为 $\pm 5\%$ 。

从七十年代开始，为适应激光技术的发展，满足国防建设和国家重点攻关的研究项目的需要，计量院独立自主地研究建立了适应不同范围的激光辐射功率和能量测量的计量标准。这些标准相继达到了国际水平，中国成为国际上建立激光参量计量标准较全面的国家之一。

同时也培训了一批激光计量、测试的专业队伍，编制了四种检定规程。自八十年代起，已在北京、上海、辽宁、四川、陕西、湖北、江苏、广东等省、市建立了量值传递网。

## 色度与光学材料特性计量

人眼的视觉不但能从物体各部分发射光或反射光的强度来辨别物体形象，而且还能对不同波长的光作出选择性的反应，这就是色觉。色觉大大地丰富了人们对客观世界的认识能力。根据人眼视觉特性和国际协议的规定，进行色测量的学科叫色度学。色度就是色特性的定量表示。

### 一、色度与光学材料计量的发展过程

六十年代中期，随着建筑照明、交通信号、染料涂料、印染纺织、造纸印刷、电影和军事科学技术的发展，国内不少单位开始研制测色仪器，因此需要有计量标准来评价和统一测量结果。计量院于一九七一年开始研究色度计量，一九七六年十月完成了色度标准的研制并通过国家鉴定。此外，根据国家计委电影电视办公室一九七六年电视科研新产品试制计划，为规定中国彩色显像管三基色色度点，保证显像管生产中的色度量值准确和统一，一九七六年四月在南京召开的全国彩色电视三基色范围研究、彩色荧光粉攻关扩大会议上，确定“立即着手建立彩色电视三基色荧光辐射色度标准”。其中第一项就是彩色电视三基色荧光辐射标准课题。一九七七年被计量院列为正式课题，一九八〇年正式完成了研究。

随着电影事业的发展，从五十年代起，国内已有不

少感光胶片厂。由于各厂出产的胶片感光度很不统一，摄影师们纷纷提出意见，因此出现了建立计量标准的要求。

一九七三年，国家计委电影电视办公室向计量院提出建立国家胶片密度、感光度等计量标准的要求。

一九七四年计量院开始研制漫透射视觉密度标准，一九七六年建立。由于彩色胶片用量增加很快，因此，要求计量院进行彩色密度标准的研究。一九七九年完成了这项研究工作。

一九七五年，计量院又筹建曝光量标准装置，一九七七年完成。一九七八年国家标准局召开的电影胶片光度标准和测试会议上，要求计量部门建立光楔密度标准装置。计量院于一九七九年开始研究建立这项标准装置，一九八一年通过了鉴定。

此外，根据国家科委为发展遥感技术的需要，在一九八〇至一九八四年，计量院还研究建立了 185—2500 纳米波长范围的漫反射比标准，准确度为  $\pm (1.9-0.3)\%$ 。

## 二、色度与光学材料计量的研究成果

### （一）建立色度标准。

色度学最基本的原理是色匹配的三色学说，即任何一种颜色，都能用线性无关的三个原色适当相加混合而与之匹配。要建立色度标准，只要准确测出反射样品或透射样品的光谱反射比或透射比，按指定的光源和色匹配函数进行计算，就可得到引起人眼色觉的辐射值即三刺激值和色坐标。中国的色度标准是一九七六年建立的。

测色标准板用双球法作绝对测量而得反射比。此标准板由氧化镁或硫酸钡粉末压制而成。测色标准板绝对

光谱反射比的重复性和各标准板之间的量值一致性为 $\pm 0.002$ — $\pm 0.004$ ，其绝对反射比的准确度为 $\pm 0.6\%$ 。

工作测色标准板校准色测量装置，检定白板和色板的标准度 $< \pm 0.01$ 。根据光谱光度测色的误差传递，色坐标  $x$ 、 $y$  的误差范围为 $\pm 0.0005$ — $\pm 0.005$ ，可见区总反射比的误差范围为 $(\pm 0.2—0.5)\%$ 。

计量院于一九八〇年用联邦德国物理技术研究院压制的硫酸钡样品进行实验室间的比对测量，结果在 440 至 750 纳米波长范围，相对偏差的平均值为 $\pm 0.11\%$ 。证明中国此项工作达到国际水平。

电视三基色标准的色度坐标的准确度 $\Delta x$ ， $\Delta y$  为 $\pm 0.002$ — $\pm 0.003$ 。

## （二）建立视觉漫射密度标准。

感光胶片经曝光和化学加工后，能显示被摄物体的影象，影象的浓淡用光学密度来衡量，用透射比的倒数的常用对数来表示。

计量院一九七九年研究、设计并制造成 1 台标准光学密度测量装置。密度的测量范围为 0—4D（D 为密度值）。装置单次测量结果与平均值的最大偏差，密度在 2 以内小于 $\pm 0.007D$ ，在 4 以内小于 $\pm 0.01D$ 。综合各种影响得出的误差为 $\pm 0.003$ 。标准装置的准确度为 $\pm 0.005$ 。

一九八〇至一九八一年，计量院与联邦德国物理技术研究院交换了测量摄影阶梯密度片 75231（计量院标准）和 2,3（联邦德国物理技术研究院标准）作比对。两个研究院的密度准确度均为 $\Delta D = \pm 0.005D$ 。比对表明，两国标准间的量值是一致的。

彩色密度标准是用光谱光度法实现彩色累积密度标准。最后得到的彩色密度标准的准确度为 $\Delta D$  红 =  $\pm$

0.006,  $\triangle D_{\text{绿}} = \pm 0.011$ ,  $\triangle D_{\text{兰}} = \pm 0.027$ 。

### （三）曝光量标准装置。

胶片的感光度数是用曝光量来测量的。计量院一九七七年所建的曝光量标准装置能准确测定自然昼光下的曝光量。该装置的测量准确度为 $\pm 1.5\%$ 。即曝光量对数的绝对误差不大于 $\pm 0.01$ 对数单位。

### （四）光楔密度测量装置。

光楔又称级谱，是感光仪的重要部件。计量院一九八一年建立的光楔密度测量装置采用积分球，按漫入射垂直接收的方式测定光楔密度。装置的准确度为： $\triangle D = \pm 0.01D$ 。

中国从一九七六至一九八六年间，根据电影电视工业、胶片工业、印刷、纺织、染料涂料、交通信号和军事工业的需要，相继建立了上述各项标准。其中有些已达到国际水平。这些量值的传递工作，除已在辽宁、四川、河北、上海等省市计量部门建立量值传递网点外，其它大部分直接由计量院发放检查测量仪器的标准来实现的。计量院每年要提供 5000 至 6000 件的标准样品和测试数据，社会效益相当显著。

## 电离辐射计量的发展概况

### 一、电离辐射与电离辐射计量

电离辐射是由能够产生电离的带电粒子或非带电粒子，或两者混合组成的辐射。带电粒子有电子、质子、 $\alpha$  粒子等，不带电粒子有光子、中子等。这些粒子与物质的原子和分子作用，可以产生激发和电离等现象。可

见光、红外光和紫外光辐射以及一些极低能的 X 光子不属于电离辐射的范畴。

所谓电离，是电离辐射与物质的原子或分子作用，使原子或分子中的电子获得足够大的能量，挣脱原子的束缚而脱离原子。所谓激发，是电离辐射与物质的原子或分子作用，使原子从较低能态激发到较高能态。简言之，可以认为电离辐射最终主要通过电离和激发过程释放能量并传递给物质。

以这类现象为对象，从不同角度研究对它们的测量，例如对  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子、中子、X 射线和 Y 射线的测量，以及这种测量的标准化，就是电离辐射计量的任务。

## 二、电离辐射计量的基本内容

（一）研究和建立电离辐射计量领域的测量理论和方法。测量理论包括电离辐射（X 射线、Y 射线、 $\beta$  射线等）与物质作用的理论、空腔电离理论等。测量方法包括计数法、量热法、电离法、化学法等。

（二）建立电离辐射计量的基准器和标准器。其中包括自由空气电离室照射量基准器，空腔电离室照射量基准器、量热计吸收剂量基准器、硫酸亚铁吸收剂量计、 $4\pi\beta - \gamma$  符合法放射性活度基准器、锰浴法中子源强度基准器等。

（三）研究和确定辐射量量值和单位。电离辐射计量领域有 20 多个物理量，如照射量、吸收剂量、剂量当量、比释动能、放射性活度、注量率（例如：中子注量率）、中子源强度等。其中最常用的物理量为照射量、吸收剂量、剂量当量和放射性活度。它们的单位分别是库仑每千克（C/kg）、焦耳每千克（J/kg）或戈端（Gy）、焦耳每千克（J/kg）或希沃特（Sv）和每秒（S-1）或贝



可勒尔 (Bq)。暂可并用的专用单位分别为伦琴 (R)、拉德 (rad)、雷姆 (rem) 和居里 (Ci)。

(四) 建立量值传递系统、制定检定规程并进行定期检定和监督工作。为了保证全国的测量量值可靠、准确和一致,除了建立基准器、标准器之外,还需建立和制定各种量值的传递系统和检定规程。

(五) 承担电离辐射领域中的计量测试任务。从一八九五年德国科学家伦琴发现 X 射线开始不到一百年的时间内,原子和原子核科学技术形成了一个庞大的研究和应用领域,其中包括军事、工业和科学技术领域中的应用,所有这些方面都离不开电离辐射计量测试工作。

### 三、电离辐射计量的发展

#### (一) 电离辐射计量的初创

十九世纪末,由于 X 射线和天然放射性核素的发现,人类开始认识到电离辐射现象。这种发现最先在医学上得到了应用。在旧中国,北平、上海、南京、杭州、西安等大城市已开始用 X 射线机和镭针对病人进行诊断和治疗。一九二五年孙中山患肝癌时,北平协和医院曾用镭针为他作过治疗。由于医学上的应用,医生们很早就要求准确测量电离辐射。新中国成立初期,协和医院徐海超教授用维克多伦剂量计对北京、上海、杭州等大医院的 X 射线机输出量(即照射量)进行测量。他发现一般医院用自己的剂量计测出的值与他的剂量计测出值相差 15%甚至相差 50%。肿瘤放射治疗要求吸收剂量测准到  $\pm 5\%$ ,才能获得良好治疗效果。如果吸收剂量不足,会使肿瘤复发率显著增加,而吸收剂量过量则会损伤好的组织。可见,两种剂量计测量值相差 50%,在当时也是不允许的。由于问题的严重性,徐海超教授开始在自己

的实验室筹建标准电离室，这也是中国开始最早的电离辐射计量工作。

一九五五年，中国科学院原子能研究所（简称原子能所）成立，一九五七年第一座实验性核反应堆投入运转。同时，在高等院校核科学和技术人材的培养迅速增加。一九五八年，由于加速研制核武器以及同位素和辐射技术在医学、农业、工业部门的应用，中国原子能事业开始蓬勃发展，因而对建立电离辐射计量提出了迫切要求。

### （二）从委托到建立国家计量局电离辐射实验室

一九五八年，国家计量局决定统一管理电离辐射计量工作。根据对新型计量项目采取委托的方针，国家计量局于一九五九年委托原子能所建立电离辐射计量的基准器和标准器。鉴于原子能研究所难以承担全国的计量检定工作和计量监督管理工作，加之对类似 X 射线照射量的计量工作无人接受委托，一九六〇年国家计量局决定收回委托项目，成立电离辐射实验室。

在委托期间，原子能研究所为电离辐射计量培养了科技人员，并提供了技术上的帮助。

### （三）电离辐射计量的快速发展

电离辐射实验室的成立，标志着中国电离辐射计量工作从起步进入到加速建设的新阶段。一九六二年制定了电离辐射计量发展规划列入了《1963—1972 年计量科学技术发展规划》。列入的项目有：X 射线和 Y 射线照射量基准器和标准器的建立和研究，吸收剂量测量的研究；放射性活度基准器和标准器的研究；标准放射性同位素制样的制备和供应；标准放射性同位素制样的性能和制备方法的研究；中子源标准的建立和研究。这个规划系

统、全面地确定了电离辐射计量的发展方向。此后，经国家科委批准，电离辐射实验室兴建实验楼，一九六五年建成并投入使用。

一九五八至一九六五年是电离辐射计量进行基础建设和初步解决国内迫切要求的重要发展时期。一九五八年国家计量局派出筹建电离辐射计量工作的负责人到苏联门捷列夫计量科学研究院进行技术考察学习，并由国外引进必需的仪器设备，形成电离辐射计量的技术和设备基础。

一九六〇年，电离辐射实验室一成立就开始设计加工第一个基准器，即 60—250 千伏 X 射线照射量基准器。经过将近三年的努力，克服了机械加工上的困难，终于在一九六三年八月基本建成了该项基准器。一九六四年五月经国家计量局批准，开始开展国内医用照射量计的检定工作，解决了当时医用照射量量值不准确的迫切问题。

到一九六五年，电离辐射实验室的一些急用标准器和基准器相继建成。它们是：测量放射性核素活度的  $4\pi\beta$  正比计数装置（按苏联图纸制成）、锰浴法中子源强度测量装置、测量  $\alpha$  放射性核素活度的量热计、测量 Y 射线照射量的石墨空腔电离室、热中子注量率基准装置等，解决了原子能事业中最基本的测量统一问题。

一九五九到一九六五年，电离辐射实验室除先后派出 10 多人到原子能研究所学习电离辐射计量技术外，又接受上海、北京、辽宁等省市计量机构的技术人员到电离辐射实验室学习技术，为后来电离辐射实验室的发展及省、市计量机构电离辐射计量的建立储备了技术力量。这些人员后来都成为中国电离辐射计量领域的技术骨干

或业务领导力量。

一九六六到一九七六年期间，电离辐射计量同其它事业一样，亦遭受“文化大革命”的破坏，中共十一届三中全会以后才得到发展。一九七八年装备了 Ge (Li) 多道谱仪，一九七八年开始动工兴建 500 平方米的新辐照大厅，一九八〇年从加拿大进口了 7000 居里的 Co Y 射线源。一九六六到一九八六年期间，计量院电离辐射实验室先后建成：标准立体角  $\beta$  放射性活度测量装置、小立体角  $\alpha$  闪烁计数器装置、Y 放射源相对测量装置、 $4\pi\beta$  (PC) - Y 符合法放射性活度基准装置、 $2\pi\alpha \cdot 2\pi\beta$  粒子发射率测量装置、 $4\pi\chi$  - Y 符合法放射性活度测量装置、液体闪烁法计数装置、 $2\pi\alpha \cdot 2\pi\beta$  射线石墨吸收剂量量热计、热释光计数器装置、Y 放射源相对测量装置、液体闪烁法计数装置、热释光剂量测量装置，硫酸亚铁化学剂量计、低水平  $\beta$  射线源测量装置、镭基准监测量热计等。与此同时，测试院电离辐射实验室先后建成：60—250 千伏 X 射线自由空气电离室、10—50 千伏 X 射线照射量测量装置、 $2\pi$  弱  $\alpha$  ( $\beta$ ) 计数装置、 $4\pi\beta$  - Y 符合法放射性活度测量装置、高压  $4\pi\chi$  - Y 符合法放射性活度测量装置、 $4\pi\beta$  (PC) - Y (GeLi) 符合法放射性活度测量装置、14 兆电子伏中子注量率测量装置等。至一九八六年，电离辐射计量领域已建成国家基准和标准 20 多项，基本上满足了国内电离辐射计量仪器检定和测试的需要。

在同一时期，由于核工业的发展和医用 X 射线诊断机和治疗机的增加，为了满足其对电离辐射计量的要求，上海市标准计量管理局、北京市标准计量局等先后成立了电离辐射计量实验室。不久，辽宁、湖北、四川、陕

西、河南、贵州、甘肃、黑龙江、安徽、福建、广东、湖南等省的计量机构也相继筹建或建立了电离辐射计量室。

至一九八六年,上海市标准计量管理局已建项目有: 60—300 千伏中能 X 射线照射量测量装置, 10—50 千伏低能 X 射线照射量测量装置、Co 射线低照射量率测量装置、硫酸亚铁化学剂量计、低能 X 射线测量装置、工业辐照大剂量测试装置、 $4\pi\beta$  正比计数器、 $4\pi\beta - \gamma$  符合计数器、低水平  $\alpha$ 、 $\beta$  测量装置、小立体角放射性活度测量装置和  $4\pi\gamma$  井形电离室测量装置等。

至一九八六年,北京市标准计量局建成项目有: 有限立体角计数装置、盖革  $4\pi\beta$  计数装置、60—250 千伏 X 射线照射量测量装置、Co  $\gamma$  射线照射量测量装置等。一九八五年该局与机械工业部自动化研究所、清华大学、北京工业学院联合研制成 DHJ—25 型电子回旋加速器, 为建立国家高能 X 和电子束吸收剂量基准提供了辐射场。

至一九八六年,湖北省计量局建成的项目有: Co  $\gamma$  射线照射量测量装置、中能 X 射线照射量测量装置、 $4\pi\beta - \gamma$  符合计数器等。

一九七八年以后, 电离辐射计量开始进行广泛的学术交流, 国际间的交往越来越活跃。

一九七八年中国计量测试学会设立了电离辐射计量专业委员会, 成为全国电离辐射计量学术活动的中心, 第二年在长沙举行了第一次学术报告会, 一九八六年三月在重庆举行了第二次学术报告会。

一九七九年, 国际计量委员会电离辐射测量标准咨询委员会 (CCEMRI) 接收中国观察员参加第一、第二、

第三组的会议。从一九八一年起，中国已是该委员会第一、第二组中的成员国。

一九七八至一九八二年，计量院先后邀请各国专家来华讲学，其中有第一个用  $4\pi\beta - \gamma$  符合法测量放射性核素活度的专家、英国国家物理研究所副所长 P.J.凯姆平，英国国家物理研究所中子实验室主任 E.J.阿克斯顿，美国标准局电离辐射计量专家 M.B.玛恩等。同时，中国也派出专业人员分别去国际计量局、法国电离辐射实验室、美国标准局、英国国家物理研究所进修与工作和数批专业人员参加国际学术会议、进行项目考察及商谈技术合作。

一九七八和一九八二年，中国参加了国际计量局组织的两次大型放射性核素比活度测量的国际比对。

#### 四、电离辐射计量的研究成果及其应用

##### （一）X、Y 射线剂量学

X 射线和 Y 射线的测量是电离辐射计量领域中的重要部分。在电离辐射计量筹建阶段，这一部分就受到极大重视。

电离辐射经常用来使物质发生物理变化（核反应堆的材料试验）、化学变化（塑料的聚合）、生物变化（癌的治疗）。所以在使用这些辐射时，必须进行测量和核对。在这类情形中，并不是从辐射源中产生辐射的观点来考虑它，而是从材料被辐照的观点来考察。剂量学这一名称就是指表征这类辐射的量的测量。

对于 X 和 Y 射线，人们以它产生的空气的电离来进行测量。首先，X 和 Y 射线在空气中产生快速次级电子，随后，快速电子引起原子的激发和电离。早期的伦琴单位一直在演变。一九八〇年国际辐射单位和测量委员会

第 33 号报告规定照射量的定义为：“照射量  $X$  是  $dQ$  除以  $dm$  之商，其中  $dQ$  是当质量  $dm$  的空气体积元中释放出来的所有电子（负的和正的）在空气中完全被阻止时，空气中所产生某一种符号的离子总电荷的绝对值。照射量的专用单位是伦琴（R）， $1R=2.58 \times 10^{-4}C/kg$ ”。除了照射量的测量之外，同样重要的有吸收剂量和其它物理量的测量。

### 1、X 射线照射量基准装置。

60—250 千伏 X 射线照射量基准装置是国家计量局电离辐射实验室成立后最先建立的项目之一。一九六〇年开始设计基准自由空气电离室，一九六二年六月完成加工，一九六三年八月完成实验工作和研究报告，一九六四年五月经国家计量局批准，立即开始进行医用照射量计的检定工作。

60—250 千伏 X 射线照射量基准装置（图）由 X 射线发生器、平行板型自由空气基准电离室、自由空气监督电离室和小电流测量系统组成。在激发电压为 60—250 千伏范围，测量范围为  $2.58 \times 10^{-4} - 2.58 \times 10^{-4}$  库仑每千克。复现照射量单位的准确度为  $\pm 1.5\%$ ，一九八六年提高到  $\pm 0.48\%$ 。这是中国建立的第一台电离辐射剂量学基准装置，它在中国电离辐射计量史上有着重要的作用。一九八六年，它和 Y 射线照射量基准等一起构成剂量学计量工作的主要部分。同时制定了有关量值传递的检定系统，即由照射量基准器直接校准标准照射量计，再由标准照射量计用替代法或直接比对法校准工作照射量计，保证一定准确度要求的量值传递。

另外，一九七九年测试院电离辐射实验室建立了同样的照射量基准，它承担着云南、贵州、四川三省的量

值传递工作。

为了解决医院 X 射线诊断机照射量的监测和剂量仪表生产部门仪表的检定问题，把基准的工作范围向低能扩展。一九六六年开始设计加工 10—60 千伏 X 射线照射量基准器，于一九七三年完成。它复现照射量单位的准确度为  $\pm 5.0\%$ ，每年可校准这类仪表几十台。

一九八五年十一月测试院建成了 10—50 千伏 X 射线照射量测量装置，测量范围为  $2.58 \times 10^{-6} - 2.58 \times 10^{-3}$  库仑每千克秒，准确度优于 0.5%。上海市标准计量管理局也进行了类似的工作。

## 2、石墨空腔电离室 Y 射线照射量基准器。

石墨空腔电离室 Y 射线照射量基准器也是较早建立的基准器项目。研制工作从一九六三年开始，一九六五年建成投入使用。该基准器测量的对象是常用的 Y 射线源  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  的射线照射量。医学上用钴针、镭针、钴治疗机治疗癌症；地质探矿上用镭源校准探矿仪表；工业上用钴机探伤，用 Y 射线源测厚、测料位和液位等。这些方面除使用 Y 射线源之外，还使用 Y 射线剂量仪表。一九六五年以前，这些射线源和剂量仪表都未检定过，测量量值极为混乱，有些仪表示值相差较大，因此迫切要求建立 Y 射线照射量基准器，保证测量的准确和统一。

该基准器是由 Y 射线源、石墨空腔电离室和电测量系统组成的。它复现照射量单位的准确度为  $\pm 2\%$ ，测量  $\text{Ra}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Cs}$  等 Y 射线源，其量程为 0.05—0.5 伦琴每分。该基准器每年平均检定几十个 Y 射线源和 10 多台照射量计。

## 3、石墨量热计吸收剂量基准装置。



随着辐射应用的发展，人们认识到受辐照材料吸收的能量——吸收剂量的重要性。例如，农业上要求知道种子中的吸收剂量，医学上要求知道被照病人组织中的吸收剂量，辐射加工中要求知道被辐射物中的吸收剂量。所以必须建立吸收剂量的基准器和标准器。

按照国际辐射单位和测量委员会规定，吸收剂量的定义为：“吸收剂量  $D$  是除以  $dm$  所得的商，其中是电离辐射授与质量为  $dm$  的物质的平均能量”。

石墨量热计吸收剂量基准装置由  $\gamma$  辐射场、石墨量热计（包括惠斯登电桥、控温系统和真空系统）组成。 $\gamma$  辐射场给量热计提供直径为 10 厘米的照射束，控温使石墨介质处在适当的热学条件下，抽真空是为了减少空气热传导损失。从量热计受照射后测得的能量就能得出石墨中的吸收剂量。计量院于一九八五年建成  $\gamma$  射线石墨吸收剂量量热计，准确度为  $\pm 1.0\%$ 。

#### 4、硫酸亚铁化学剂量计。

硫酸亚铁剂量计（即 Fricke 剂量计）是医学、生物学、辐射化学、食品辐射加工及科研工作中常规测量吸收剂量的主要手段。

它的测量溶液由水、硫酸、硫酸亚铁和氯化钠组成。当吸收电离辐射能量后，体系中的二价铁离子（ $Fe^{2+}$ ）转变成三价铁离子（ $Fe^{3+}$ ）。用紫外分光光度计测定三价铁离子的浓度变化。溶液中的吸收剂量可以从辐射前后溶液光密度之差、三价铁离子（ $Fe^{3+}$ ）的摩尔消光系数、每吸收 100 电子伏时三价铁离子的化学产额、溶液的光程长度和溶液的密度得出。

计量院于一九七五年开始筹建此装置，一九七八年八月建成。一九八五年测量吸收剂量的范围为 40—400

戈瑞，准确度为 $\pm 2\%$ 。

## （二）放射性活度测量

放射性活度是衡量放射性核素发生自发变化（核跃迁）的物理量。它的定义是：“在给定时刻处于特定能态下的一定量放射性核素的放射性活度  $A$  是  $dN$  除以  $dt$  所得的商。其中  $dN$  是在时间间隔  $dt$  内能态发生自发核跃迁数的期望值。”

测量放射性活度的绝对方法有多种，通常使用的方法有： $4\pi\beta$  正比计数法、 $4\pi\beta - \gamma$  符合法、 $4\pi X - \gamma$  符合法，液体闪烁  $4\pi\beta - \gamma$  符合法、低水平  $\beta$  射线计数法和  $\alpha/\beta$  量热计法等。

### 1、 $4\pi\beta$ 放射性活度基准器。

$4\pi\beta$  放射性活度测量装置由  $4\pi\beta$  正比计数器、放大器、定标器 and 高压电源组成。它是早期建立的基准装置之一。一九五九年由国家计量局委托原子能研究所筹建，一九六五年建成。在研制阶段，该装置曾为中国第一颗原子弹制造中的“燃耗值测定”提供了 Mo、Zr、Sr、Ba 等标准放射源。

由于放射源自吸收修正带入的误差难以克服，加之后来效率示踪法、液体闪烁法的发展， $4\pi\beta$  放射性活度测量装置在日常检定中已很少使用，但在放射性核素生产、医学、环境监测、仪表刻度及军事上，曾起过不可低估的历史作用。

### 2、 $4\pi\beta - \gamma$ 符合法放射性活度基准装置。

凡是放射性核素在 1 次  $\beta$  衰变时同时发射 1 个  $\gamma$  光子的情况， $4\pi\beta - \gamma$  符合法就能适用。将放射源放在正比计数器内，正比计数器记录  $\beta$  粒子。用碘化钠晶体和光电倍增管组成闪烁计数器，记录  $\gamma$  射线。再用适当的

电子设备（符合线路）对发生的符合事件进行记录。

设用  $\epsilon_{\beta}$  和  $\epsilon_{\gamma}$  分别表示  $\beta$  道和  $\gamma$  道的计数效率， $\beta$  道、 $\gamma$  道和符合道的计数率分别为：

$$N_{\beta} = N \epsilon_{\beta}$$

$$N_{\gamma} = N \epsilon_{\gamma}$$

$$N_C = N \epsilon_{\beta} \epsilon_{\gamma}$$

可得到：

$$\text{活度} : N = N_{\beta} N_{\gamma}$$

这就是理想情况下表示  $4\pi\beta - \gamma$  符合法原理的一般公式。实际上，根据这一原理，还要考虑偶然符合等修正。应用效率外推技术，则可以用于测量有复杂衰变谱的核素。

计量院于一九七二年建成  $4\pi\beta - \gamma$  符合法放射性活度基准装置。用它测量的核素及放射性活度值的准确度： $\text{Na}$  为  $\pm 1\%$ ； $\text{Mn}$  为  $\pm 1\%$ ； $\text{Zr}$  为  $\pm 1.7\%$ ； $\text{Mo}$  为  $\pm 2.5\%$ ； $\text{I}$  为  $\pm 3.5\%$ ； $\text{Cs}$  为  $\pm 1\%$ ； $\text{Pm}$  为  $\pm 2.5\%$ ； $\text{S}$  为  $\pm 3\%$  和  $\text{Au}$  为  $\pm 2\%$ 。测试院于一九七三年建成同样的装置，可测量的核素及放射性活度值的准确度： $\text{Co}$  为  $\pm 0.19\%$ ； $\text{I}$  为  $\pm 0.44\%$ ； $\text{Cs}$  为  $\pm 0.37\%$ ； $\text{Au}$  为  $\pm 0.28\%$ ； $\text{Cs}$  为  $\pm 2.0\%$ ； $\text{Sr-Y}$  为  $+0.71\% - 1.30\%$ ； $\text{Tl}$  为  $+0.65\% - 1.27\%$ 。测试院还建成  $4\pi\beta(\text{PC}) - \gamma(\text{GeLi})$  符合法放射性活度测量装置，可测量的核素及放射性活度值的准确度： $\text{U}$  为  $\pm 0.47\%$ ； $\text{Am}$  为  $\pm 0.30\%$ ； $^{237}\text{Np}$  为  $\pm 0.74\%$ ； $\text{Se}$  为  $\pm 1.5\%$ ； $\text{Co}$  为  $\pm 0.31\%$ ； $\text{Cs}$  为  $\pm 0.30\%$ 。一九七八年和一九八二年两院同时参加国际计量局组织的测量  $\text{Cs}$  和  $\text{Cs}$  溶液的国际比对，测量水平接近于国际比对的平均值。

3、 $4\pi X - \gamma$  符合法放射性活度测量装置。

到一九八六年，常用的人工和天然放射性核素有

100 种左右。其中有 60 多种为  $\beta$  发射体核素，可用  $4\pi\beta$  计数法或  $4\pi\beta - \gamma$  符合法测量。还有 20 多种是电子捕获核素，它们发射 X 射线，有的还伴随其它射线，如  $\alpha$  射线等。由于这些放射性核素不发射  $\beta$  射线、 $\alpha$  射线，当引入人体时，对人的伤害要比  $\beta$  或  $\alpha$  放射性核素小得多，所以在医学上得到了广泛应用。这种放射性核素通常要用  $4\pi X - \gamma$  符合法测量。

一九七五年，测试院开始研制高压  $4\pi\beta - \gamma$  符合法放射性活度测量装置，一九七九年建成。建成后测量的核素及放射性活度值的准确度： $Mn$  为  $\pm 0.24\%$ ； $Cr$  为  $\pm 0.28\%$ ； $Co$  为  $\pm 0.52\%$ ； $Zn$  为  $\pm 0.31\%$ ； $Co$  为  $\pm 0.11\%$ ； $Cs$  为  $\pm 0.23\%$ ； $Cs$  为  $\pm 0.40\%$ 。

一九七九年与英国国家物理研究所进行测量  $Mn$  溶液比活度的双边比对，比对结果相一致。

一九七六至一九八三年，计量院建立了相同的测量装置。

4、液体闪烁  $4\pi\beta$  计数法和  $4\pi\beta - \gamma$  符合法放射性活度测量装置。

液体闪烁计数法的原理，主要之点是液体闪烁源是放射性核素溶液与液体闪烁体均匀混合而成。因此它的优点是：避免了源自吸收；计数系统的死时间较小；对低能  $\beta$  粒子和  $\alpha$  粒子有较高的探测效率。它可以测量各种  $\beta - \gamma$  发射体放射性核素，也可测量电子捕获核素。对于低能纯  $\beta$  放射性核素（如  $^3H$ 、 $^{14}C$  等）的测量更有其特点。

计量院于一九七八年建成该基准，到一九八六年用它测量的核素及放射性活度值的准确度均有提高。 $Cs$  为  $\pm 2.5\%$ ； $Ce - Pr$  为  $\pm 0.4\%$ ； $Mo - Tc$  为  $1.2\%$ ； $Zr - Nb$  为  $\pm 0.5\%$ ；

Cs 为 $\pm 0.44\%$ ；Co $\pm 0.09\%$ ；C 为 $\pm 0.3\%$ ；H 为 $\pm 0.80\%$ 。

#### 5、 $\alpha/\beta$ 量热计和镭基准监督测量热计。

$\alpha/\beta$ 量热计一九六三年开始研究，于一九六五年建成。这个项目也是国内最先建成的基准项目之一。它是一种热流型量热计，由恒温体、吸收体、热电堆三个部分组成。是用于测量强 $\alpha/\beta$ 放射性核素放射性活度的装置。测量 1—5 毫居里的 Ra 放射源的准确度为： $\pm 2.5\%$ ；测量 5 毫居里以上的 Ra 放射源的准确度为： $\pm 1.4\%$ 。

由于医学上用镭针治疗子宫癌、地质探矿上用标准镭源校准仪表，荧光粉制造上需要激发发光的镭源或钷源等， $\alpha/\beta$ 量热计放射性活度基准的检定任务日益增多，为国民经济建设解决了不少实际问题。一九六七年，北京市两个化工厂从国外进口了一批 Pm 溶液，按订货单规定，每瓶含 10 居里的 Pm，但经本基准测定，每瓶仅含 1 居里左右，相差 10 倍。中方向外商提出了索赔，使国家免遭一次重大经济损失，引起了各国对本基准的重视。

一九八一年三月计量院建成镭基准监督测量热计，采用了相关补偿法，可以在温度变化 10 摄氏度的环境中测 20 毫克镭源，单次测量标准偏差为 $\pm 0.03\%$ ，可以保证全国镭源量值的统一。

#### 6、低水平 $\beta$ 放射性活度测量装置。

在环境监测、辐射防护、医学、生物学、食品卫生、宇宙射线研究、考古方面都需要极低放射性活度的标准样品，或者要求测定极低放射性活度的样品。为了满足这方面的需要，计量院于一九七六年建成了低水平 $\beta$ 放射性活度测量装置。它是把一个 $4\pi\beta$ 圆柱形正比计数器装在一个圆柱形 $4\pi$ 屏蔽计数器中，用反符合法消除

本底计数。这种办法可使本底计数率降至每分钟 7 个计数左右。整个计数器部分被放置在四壁由 3 层金属组成的屏蔽室内。第一层为铅壁，厚 5 厘米，第二层为铁壁，厚 5 厘米，第三层为黄铜壁，厚 1 厘米。它可测量 10-5—10-3 微居每克的 Sr—Y 和 Cs 样品，测量的准确度分别为  $\pm 6\%$  和  $\pm 8.5\%$ 。

#### 7、 $4\pi$ Y 电离室放射性活度测量装置。

$4\pi$  Y 电离室放射性活度测量装置由井型电离室和电测系统组成。计量院于一九七五年建成能测量 Co 等多种核素。它可测量 30 微居以上的 Co 溶液，其准确度为  $\pm 1.1\%$ ；测量 3 微居  $^{60}\text{Co}$  溶液，其准确度为  $\pm 5.0\%$ 。由于在临床应用中多使用短寿命的放射性核素，这种操作简单、不需要重新制备样品的装置就成了医用核素活度值传递的理想设备。

### （三）中子计量

中子在核技术，特别是核能应用方面有重要的地位。在中国，各种反应堆的设计和运行、中子治疗癌症、中子反应截面测量、用中子衍射方法研究物质结构、中子活化分析，放射性核素生产、射线照相、生物学分析、中子测井和中子防护等方面科研与实际应用的需求，使中子计量处于日益重要的地位。但是，由于中国计量部门受条件限制，直至一九八五年单能中子源注量率标准、单能中子注量率标准和中子剂量标准等仍远不能满足国内应用的需要。

#### 1、锰浴法中子源强度测量装置。

锰浴法测量中子源强度的装置由直径 106 厘米，高 108 厘米装满硫酸亚锰的铝制桶（和溶液在一起称为锰桶）和测量系统构成。将中子源放在锰桶中心，由源所

发射的快中子先被慢化（主要是氢散射的结果）。当中子与介质处于热平衡时，就具有很高的俘获效率。

中子源的发射率等于溶液中和源中中子的被俘获率及中子从溶液中逃逸率的总和。即：

$$Q = Q_{Mn}(1/f)k$$

其中， $Q_{Mn}$  是每秒被溶液中锰核俘获的中子数，可以测定其值； $f$  是溶液中被锰核俘获的中子数与含有的元素总和俘获的中子数之比； $K$  是修正系数，通过它可以对下列各种情形造成的系统误差进行修正。即：因锰桶和支撑源的架的存在而引起源中的中子被吸收；快中子被溶液中氧和硫吸收；被溶液中的杂质吸收，以及中子从锰桶中逃逸等产生的误差进行的修正。

为了使辐射达到饱和，则辐射时间  $t$  和  $Mn$  的半衰期（小时）相比要长得多。这时每秒被  $Mn$  俘获的中子数和衰变数（ $Mn$ ）一样多，而在从溶液中取出源时（ $t=0$ ），放射性活度  $Q_{Mn}$  等于  $Q_{Mn}$ 。实际上，源是在  $t$  时末被取出的，根据衰变定律，由此时的测量值可推算出  $Q_{Mn}$ 。

为要测量被辐照溶液的相对放射性活度，将一闪烁探测器（碘化钠晶体和光电倍增管）浸在锰桶中，在源的部位计数由  $Fe^*$  发射的射线。这种放射性活度的相对测量是通过一次绝对校准而实现的。即在锰桶中的放射性活度消失之后，用经过符合法放射性活度基准预先测定过其活度的一定量  $Mn$  溶液加到锰桶中。因此可以得到：

$$Q_{Mn} = A \rho_{源} / \rho_{溶液}$$

其中  $\rho_{源}$  表示在辐照的锰桶中得到的计数率，而  $\rho_{溶液}$  是将放射性活度为  $A$  的溶液加到锰桶中以后测得的计数率。有了每秒被溶液中锰核俘获的中子数  $Q_{Mn}$ ，由  $Q$

$=Q_{Mn} (1/f)K$  即可得到被测中子源的强度。

计量院于一九七二年建成了镅浴法中子源强度测量装置。用本装置校准镅—铍中子源强度, 测量范围为  $5 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10$  中子每秒时, 其准确度为  $\pm 4.8\%$ 。

## 2、热中子注量率标准场。

中子与介质处于热平衡时, 按照中子能量分类, 此时的中子称为热中子。

热中子注量率标准场是在直径 60 厘米、高 60 厘米的石蜡圆柱体中放一个直径 20 厘米、高 20 厘米的石墨圆柱体, 再在石墨圆柱体中心挖一个直径 5 厘米、高 5 厘米的空腔。把 6 个标准镅—铍中子源均匀布放在距石墨圆柱等距离的石蜡圆柱体中。使镅-铍中子源的中子经过慢化, 在石墨空腔中形成均匀恒定的热中子场。用金片活化法进行校准, 空腔中心的热中子注量率为  $1.2 \times 10^4$  中子每平方厘米秒, 测量结果的准确度为  $\pm 5.2\%$ 。

计量院于一九七〇年建成热中子注量率标准场, 借助于它可以校准小型中子探测器, 乳胶中子剂量计, 玻璃中子剂量计等。

## 3、14 兆电子伏中子注量率测量装置。

为了研究中子测量仪器的能量响应, 需要建立各种单能中子注量率标准。一九八二年, 测试院与四川大学协作建成 14 兆电子伏中子注量率测量装置。测量 14 兆电子伏中子注量率的准确度为  $\pm 1.1\%$ 。装置建成后曾与英国国家物理研究所、中国科学院原子能研究所、上海科技大学射线应用研究室、西南核物理化学研究所以及广东省测试分析研究所的测量装置进行过比对测量, 比对结果在所给误差范围内与英国国家物理研究所、中国科学院原子能研究所相一致, 为统一中国 14 兆电子伏中



子注量率量值起到了重要作用。

## 声学计量的发展概况

### 一、声学计量的意义

声学是研究一切固体、液体和气体中机械振动的产生、传播、接收和影响的科学。各种声音每时每刻都伴随着人们，有些声音的频率远远超出了人耳所能感受的范围。人们能获得的最低振动频率是几十分钟一次（约为  $10^{-4}$  赫），最高频率可达 10 亿赫。20—20000 赫的声音一般称为可听声，高于 2 万赫的声音称为超声，低于 20 赫的声音称为次声。由于电子技术和电声换能器的迅速发展，声波的产生、接收及其测量技术已完全改观。现代声学已冲破研究振动本身规律的界限而发展成为一种新技术并渗透到广播、电影、电视、录音、房屋建筑、工业生产、医药卫生、航海、海防、渔业、语言、音乐、戏剧、生理、心理等生产、生活和科学领域中去。它的应用范围极广，并有独特的功能。例如用来搜索舰艇，引导武器攻击和水下通讯，导航和捕鱼。研究海底地质结构以及测量海底深度等。超声检测已经应用到金属、岩石、混凝土和塑料等方面。直径达数米的水轮发电机的主轴内部是否存在裂痕，主要利用声学方法探测，超声全息照像可以直接把人体被检部位的血管、肿瘤等显示在电视的屏幕上，从而替代了对人体有害的 X 射线检查。超声波还可用来检查化学反应过程、测量流体的流速、液面的高度和物体的厚度、焊接铝件、清洗机械零件、净化空气和治疗疾病。语言声学和听觉声学的研究

和测量使通讯质量（清晰、正确）提高；用语言控制机械的运转可以节省人力。噪声测量有助于控制机器设备的噪声水平，噪声控制可使航天飞行器的机件免于声疲劳的破坏。次声可以用来预报台风和海啸。

在声学技术的应用中，声功率的强弱、声压的大小以及声频率的高低是十分重要的参量。这些声学参量的测量和研究是声学技术利用的基础。声学测量所用的设备的准确程度以及测量的方法都是声学计量的研究对象。八十年代以前，由于声学测量工作落后，国家为此在经济上受到损失。例如七十年代，中国精密机床和家用电器出口香港和东南亚，由于辐射噪声超出国际上规定的噪声限，曾发生过多多次退货和索赔的事件。八十年代以后，国家在声学标准化和计量方面采取了一系列措施，制定机器设备噪声测定方法的标准，并在产品铭牌上标明声功率数值等，这就更加需要准确的声学计量了。

## 二、声学计量的内容

在声学计量中，声压、声强、声功率和质点速度是基本参量。声压是声波在介质中引起的压力与静压的差值。声压是有效声压的简称，其单位为帕斯卡（简称帕，符号为 Pa）。在空气中正常人耳刚刚能听到的声压为  $2 \times 10^{-5}$  帕，称为听阈声压；人耳感到疼痛的压力为 20 帕、称为痛阈声压；两者相差 100 万倍，因此“帕”的使用很不方便，为此选择了另外一种标度——“分贝”（dB），它是一个无量纲的单位。声压用分贝表示时称为声压级。声压级的定义为：声压与基准声压比值的常用对数乘以 20。在空气中基准声压一般取  $2 \times 10^{-5}$  帕；在水中取  $1 \times 10^{-5}$  帕。当使用分贝标度时，在空气中人的听阈为零分贝（0dB），痛阈为 120 分贝。大声讲话的

声压级约为 90 分贝。织布机的声压级约为 100 分贝以上。火箭发射时的声压级可达 180 分贝。因此声音测量的动态范围为 0—180 分贝。声强是在某一点上与指定方向垂直的单位面积上单位时间内通过的平均声能，单位为瓦每平方米 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )。声强用分贝表示时称为声强级。声强级的定义为：声强与基准声强之比值的常用对数乘以 10，基准声强取为  $10^{-12}$  ( $1\text{pW}/\text{m}^2$ )。声功率是声源在单位时间内放射出的总能量。声功率用分贝表示时称为声功率级。声功率级的定义为：声功率与基准声功率之比值的常用对数乘以 10，基准声功率取为  $10^{-12}$  瓦 ( $1\text{pW}$ )。质点速度是介质中某一尺度甚小于波长而甚大于分子尺度的质点，由于声波的通过而引起的相对于整个介质的振动速度，一般是指有效值。单位用米每秒 ( $\text{m}/\text{s}$ ) 表示。

### 三、声学计量的发展

据吴承洛著《中国度量衡史》称：中国古代曾将声音定为度量衡的根本标准。这可能是古代社会重视“礼乐”，常用律管吹出的音频与尺子相互核对之故。但声学计量本身在历史上始终没有人将这些经验加以总结、提高并使之向前发展。新中国成立后，声学计量成为计量工作的组成部分，承担着为国民经济建设服务的任务。一九五八年中国科学院、南京大学和二机部等开展有限的声学计量工作，但当时缺乏应有的计量标准器。

#### （一）准备阶段

声学计量开展最早的是中国科学院电子学研究所（简称电子所），一九五七年建立有声学筹备组。该筹备组一九五八年与国家计量局协商后，首先着手调查研究工作。他们在上海了解生产和研究部门有关声学计量方面的基本情况和对声学计量的要求。上海电声设备厂和

利润厂生产传声器、扬声器、电话机和耳机等，但由于条件所限，均不能进行严格的检验。国家计量局于一九五九年召开了一次具有历史意义的会议。这次会议研究开展声学计量和建立声学基准和标准问题。苏联顾问阿列辛、电子所所长马大猷、计量局局长鞠抗捷、副局长钟林等出席了会议。会上强调了工作开展的次序是先空声和超声计量，后水声计量。会议商定，国家计量局于一九五九年起陆续派出 2 名大学毕业生到电子所实习并研究建立瑞利盘声压基准，所需设备由国家计量局实验工厂加工。一九五九年，国家计量局委托电子所筹建声学计量基准。为了培训声学计量专业人员，国家计量局于一九六〇年举办了一次声学计量训练班，人员来自地方计量机构。一九六〇年底国家计量局成立声学实验室，负责各项筹备工作。

## (二) 发展阶段

一九六二年，国家计量局编制的《1963—1972 年计量科学发展规划》中，包括了声学计量的十年发展规划。这一规划的制定，不但使一九七二年以前的工作有了方向，还为以后的规划打下了基础。在这一阶段中，声学计量体系的建立方法，是首先建立声学计量的基准标准，然后再传递到工作测量仪器。首先将瑞利盘法声压基准收回国家计量局。该局声学实验室于一九六三年完成了 25—3000 赫频段内的声压基准（准确度为 0.5 分贝）。一九六四年，完成了 50—2000 赫，耦合腔声压基准（准确度 $<0.1$  分贝）。一九六五年，完成了低频段（4—250 赫）活塞发声器的声压基准（准确度为 0.2—0.4 分贝）。这几项基准的建立使空气声量值的统一有了初步的基础。为了量值的传递，于一九六五至一九六六年建造一

小消声室。在一九六五至一九七五年期间还做了听力测量工作，在计量分院进行了建立水声计量基础的准备工作，为此建造消声水池等设施。

### （三）提高阶段

中共十一届三中全会以后，整个计量工作有了进一步的发展。声学计量基准的高频段部分得到了填补，即建立了传声器的自由场互易校准的成套装置（1000—20000 赫），利用新的设备，提高耦合腔互易校准装置的准确度。研制的电容传声器主要指标已达到国外的先进水平。在听力方面除在气导方面有了标准仿真耳，在骨导方面也建立了骨导听力零级和标准仿真乳突装置。水声计量方面，建成了自由场水声的声压基准和压电补偿法低频声压基准。建立的水声基准无论在频率范围和准确度方面均已达到国际先进水平。超声功率测量采用了辐射压力法建成瓦和毫瓦级超声功率一级标准。声学测试工作也有了很大进展，研究出了对机器设备噪声功率的测量方法，建成标准噪声源和制定了声学计量国家标准。

### 四、空气声计量基准、标准的建立与发展

进行声学各参量的测定时，声压和质点速度的测量对任何声学测量几乎都是必要的。特别是声压的测量更为重要，从声压可以间接求得声强、声功率和质点速度。但声压的直接测量比较困难，需要借助电声换能器，即可将声能换成电能，或将声压换成电压来测量。测量电压比较容易，而有了电压值就可求得声压值。换能器是一统称，包括传声器、扬声器、耳机或水听器等。空气声计量所用的基准就是基准传声器。它是一种稳定性极好，灵敏度很高，且必需具有经绝对方法校准并标定出

的灵敏度。绝对校准方法有多种，其中校准准确度较高的有互易法、瑞利盘法、活塞发声器等。不同方法适应于不同的频率范围。

### （一）瑞利盘法声压基准。

一九五九年，国家计量局声学试验委托组在马大猷教授的指导下开始进行瑞利盘法声压基准的建立工作。它是利用一细丝将瑞利小盘悬挂在气流中，当小盘受到声波作用时发生偏转，利用偏转角度即可确定声压大小。此法的准确度约为 0.5 分贝。一九六三年完成这一课题时，频率为 25—3000 赫时的测量准确度不小于  $\pm 0.5$  分贝。当时它作为声压基准曾起到了统一量值的作用，也为建立耦合腔互易法声压基准起了旁证作用。

### （二）互易法声压基准。

互易法是根据互易原理提出的一种计量学方法。互易法依靠 3 只可以互易的电声换能器，其接收灵敏度（电压/声压）与发射响应（声压/电压）之比必须等于互易参量的一个常数。此参量决定于介质、频率和边界条件。建立空气声压基准，在低频段用耦合腔互易法，在高频时要用自由场互易法。

1. 耦合腔互易法。这是国际上建立声压基准的通用方法。用三只为一组的线性、无源和可逆的换能器（或其中至少一只必需是可逆的）。将两只换能器依次地耦合在一刚性小腔内，其中一只作为发射器，另一只作为接收器。用接收器的开路输出与发射器输入电流之比可以推导出两只换能器声压灵敏度的乘积。通过三次同样的测量会得出一组灵敏度的乘积。然后通过简单的计算即可求出每只换能器的灵敏度值，从而算出声压值。

计量院在一九六四年建成这一声压基准装置作为国

家临时基准，测量准确度为 0.07 分贝，工作频率为 50—2000 赫。由于这一装置的准确度高，因而代替了瑞利盘声压装置。计量院用耦合腔校准了三组：B & K4160 型（3 只），4144 型（3 只）和 4132 型（3 只），共 9 只电容传声器，经多年的考核，证明它们的性能很稳定。这 9 只电容传声器就是中国声学计量的基准器，可用于传递声压量值和进行国际比对，以保证中国声学量值在国内外的统一。计量院于一九七八年利用 B & K4143 型电容传声器耦合腔互易装置将中频校的准确度提高到 0.05 分贝，与国际电工委员会标准 IEC—327 的指标一致。它已经成为中国声学量值的溯源装置。

2. 自由场互易法。进行 10 千赫以上的声压计量时，耦合腔互易法难以满足要求，因而需要建立自由场互易法校准装置。测试院和南京大学接受国家计量局下达的任务，于一九八四年十月完成了自由场互易法空气声声压基准的建立任务。这一方法的原理基本上与耦合腔互易法相同，但必需在一个性能良好的消声室中进行。在消声室内，发射用的传声器与接收用的传声器之间应有足够的距离（例如不小于 20 厘米）以保证在接收点上有平面声波存在。建成的成套装置在 1.25—20 千赫的频段内，校准的准确度为 0.22 分贝，接近当时的国际水平。这一基准的建立使空气声计量技术和声学量值的溯源装置进一步完整化。

3. 电容传声器的研制。经过互易法的校准测出灵敏度的电容传声器称为基准传声器。中国声学计量使用的标准传声器历来都是从丹麦进口的，因为其稳定性好、变化小，而且灵敏度高。

为使声学计量中所用的电容传声器立足于国内，早

在一九六三年国家计量局就自行设计加工电容传声器。虽经反复研究、试制和改进，但始终达不到技术指标。因此不能作为标准传声器使用。一九八五年测试院所试制的直径 23.77 毫米电容传声器与标准电容传声器所要求的性能有所差异，但已可以作为测试用。一九八〇年以后，声学所又在过去的基础上试制了一种电容驻极体传声器。

### 五、听力测定及其标准的建立

听力测定的研究范围是听力损失、听阈的确定和听力零级测定。听力损失是指受试者的听力相对于标准听力失聪或耳聋的程度，用相对零级的差值来表示。零级即听力零级的简称，是指听力正常健康的青年人（通常为 17—25 岁）用耳机听音时的可听阈级，通过仪器——仿真耳的输出而得出一组对应频率的声压级，这组声压级在听力计上标为“0 分贝”，故称零级。国际上规定标准零级的目的是用它来统一使用中的听力计。听阈是指声音的强度逐渐减弱下来直到听不到时的声音为界限。每个频率的纯音信号都有它最低的可听界限称为听阈。听力零级和听阈有所不同，听阈是双耳听觉，零级是单耳听觉。听阈来自非接触测量，即受试者在消声室中位于离声源某一距离的声场中测定的，而零级是在隔声室中来自接触式的测定，即将耳机贴在受试者耳翼上测定的。

此外，测听技术又分空气传导（气导）和骨传导（骨导）两种传导声音的方法。气导是指声音通过空气耦合到听觉接收系统，例如用送话器传导声音。骨导是指声音通过头骨接触振动系统例如将骨导耳机（骨振器）放在人的额、颧、顶或枕部等。



### （一）气导听力测定与仿真耳的建立。

计量院于一九六六年开始听力测定工作，与北京市耳鼻喉研究所等单位共同协作，测定了中国 20 个民族计 318 人的外耳频率响应，并在这基础上进行仿真耳的研制。一九七一至一九七三年，又分别在北京、广州和兰州测定了 100 名听力正常人耳的气导听力零级。

标准仿真耳是模拟人耳性能的标准仪器，用来检定听力计和测试耳机。八十年代，全国使用的标准仿真耳是七十年代中红声电声器材厂按 IEC-318 要求制造。中国于一九八〇年决定采用一九七五年国际标准 ISO-389 听力零级，并制定了中国国家标准《校准纯音听力标准零级》。

中国科学院心理学研究所和北京耳鼻喉研究所等单位从一九八一年起分别对正常人的听阈与性别、年龄的关系进行了研究，并于一九八五年制定了听力测量方法的国家标准。

### （二）骨导听力测定与标准仿真乳突的建立。

当人耳鼓膜受到损伤后，外界声音达不到人的听觉中枢，这时人耳就失聪了，但借助头骨的传导，声音仍可通过骨传导达到内耳和听觉中枢，因此需要进行骨导的听力测定。听力计和助听器常附有骨导耳机（骨振器）。

标准仿真乳突的用途是检定听力计和助听器上的骨导耳机，它是模拟人头骨导性能的装置，也可用来测定人的骨导听力零级。骨导听力零级与气导听力零级的意义和作用完全相同。

一九八〇至一九八五年期间，计量院为开展具有骨导耳机的听力计和助听器的检定和测试，建立了这一标准装置。在此期间，曾对 444 个人头的乳突部位和前额

部位的机械阻抗进行了测定。结果证明 IEC-373 规定的仿真乳突符合中国人头有关部位的机械阻抗。于是就将若干台进口的仿真乳突作为中国的计量标准仪器，并测定了 106 人正常听力的骨导零级，其平均值与其它几个国家测得的骨导零级有较好的符合。计量院已利用该仿真乳突正式开展听力计检定和助听器测试，以便保证各医院使用的听力计准确和一致。该项工作收到很大的社会效益。

此外，中国科学院心理学研究所与计量院等单位协作，进行骨导听力零级国家标准的制定工作。电子工业部也研制了骨导发射装置，用于高噪声环境条件下的通讯。

## 六、超声测量

### （一）超声功率一级标准装置。

六十年代初期，北京、上海等城市的各部门、各单位都在制造超声发生器并迅速应用到生产和生活中去。当时虽在某些地方曾产生了一些效果，但也出现虚假现象。超声作用的机理和哪些参数是关键因素，都需进一步研究和测试。国家科委为此责成国家计量局开展超声波的研究和测量工作，特别需要的是测定超声功率。国家计量局对电学法、热学法、力学法和光学法进行过试验，认为力学法和热学法较为成熟。到一九八四年，广东省测试研究所与计量研究院协作，利用辐射压力原理建立了瓦级和毫瓦级超声功率标准装置。瓦级超声功率一级标准装置的声功率输出为 0.5—20 瓦，连续波的频率范围为 0.5—15 兆赫，测量的准确度为 5%。毫瓦级超声功率一级标准装置安装在一隔振性能良好的基础上，连续波的频率范围为 0.5—15 兆赫，测量 1—500 毫瓦功

率的准确度为 5%。这两种标准装置通过一九八五年四月的全国比对,证明其性能良好。这两台标准建立后,不仅取得了量值的统一,还对产品质量的提高有很大作用。如通过该装置检定才发现,北京超声仪器厂生产的超声胎心诊断仪的功率大于国家标准的规定(会引起染色体的畸变)。保定定兴厂生产的多普勒胎心诊断仪功率大出标准规定一个数量级,也是在检定后才知道的。

## (二) 超声功率的二级标准装置。

为了将超声功率值从一级标准传递到现场测量仪器(准确度高于 30%),需要借助便携式二级标准装置(准确度达 10%)来检定。一九八三年以前,国内已经建立的二级标准有:上海交通大学的声光法瓦级超声功率标准,工作频率可达 8 兆赫。陕西师范大学的应变仪式瓦级超声功率标准,工作频率为 1.2—10 兆赫。浙江大学的链条法瓦级标准,工作频率为 500 千赫—1 兆赫。通过上述的二级超声功率标准的检定,使医用超声治疗机和诊断仪准确和量值统一,这对患者是一个福音。

## 七、水声计量基准、标准的建立

水声计量的主要任务是建立水声声压基准和标准装置,以便对水听器或水声换能器进行校准。声纳设备中的关键器件是水声换能器。它是水面舰艇、潜艇以及水下防御系统和水下作战的重要设备之一,对捕鱼、导航和海底资源开发也是有效的工具。为保证声纳设备及音响鱼雷产品的质量,一九六五年,国家计量局、计量院的有关领导和科学院声学所所长汪德昭协商后,明确了声学所只能承担建立水声计量基准方法的研究工作,量值传递和检定任务由计量分院负责。

### (一) 耦合腔互易法和自由场互易法水声声压基准

的建立。

科学院声学所于一九六四年就开始研究常压下的耦合腔声压互易校准（其原理与空气声耦合腔互易校准相同），一九七九年建成低频带（20—2000 赫）高压下的耦合腔互易校准装置。在 0—2000 牛每平方厘米的静压下，校准的准确度为 0.5 分贝。一九六九年开始组成水听器的联合校准工作组，参加单位有声学所、计量分院、六机部七二一厂、六一三厂、七院的七〇六所。一九七二年建成自由场互易法水声声压基准装置，工作频率为 100 赫—100 千赫校准准确度为  $\pm 0.7$  分贝。凡联合工作组的成员都有该项装置。有的水声自由场建立在消声水池中，如计量分院；有的建立在水库中，如国防系统的一些单位。

计量分院的水声计量工作从六十年代中期开始筹建，首先建造了容积为  $6.4 \times 4.4 \times 4.4$  米的消声水池。参加联合工作组以后，于一九七二年建立了频率范围为 2—200 千赫的自由场互易法水声声压基准，其校准准确度为 0.7 分贝，达到了国际水平。该院于一九七六年又以压电双辐射零值法（压电补偿法）建立水声声压低频基准，于一九七九年建成，频率范围为 1—2000 赫，校准准确度为 0.5 分贝，达到了国际水平。

为了完成水声计量的完整体系，需要建立 100 千赫—5 兆赫高频段水声声压的计量基准，这对于兆赫级超声换能器的校准是必要的。计量分院于一九八一年开始研制高频水声声压基准装置，于一九八五年建成。该装置在频率 0.1—2.5 兆赫时，准确度为 0.9 分贝，在 2.5—5 兆赫时，准确度为 1.1 分贝（置信率均为 95%）。

（二）标准水听器的研制和水声测试。

标准水听器是水声计量的基准器，计量分院于一九七二至一九七六年间研制与生产的 7401B 型和 7401D 型标准水听器和科学院声学所一九七四年制成的 CS-1 (A) 型标准水听器以及六机部七二一厂生产的标准水听器都已符合 IEC-500 的要求，已在国内十几个单位使用。

一九七八年，声学所又完成了水听器相位一致性检测的研究工作，提出了一种“精确测定水听器相位一致性新方法——脉冲平衡法”，并研制了专用测试设备“精密脉冲小相角测试仪”。在 4—10 千赫频段内，在一般水池（6×5×7.5 米）中测试水听器相位一致性的准确度为 0.3—1.2 度。为了扩展该脉冲相角测试仪的测试相角范围，一九八〇年该所又完成了“高精度步进式移相器”的研制工作。此仪器在 2—20 千赫频段内和 0—360 度的移相范围内，移相准确度为 0.4 度，移相后的信号幅度变化小于 0.2 分贝。

#### 八、声学计量专用测量设施的建造

声学测量的专用设施是消声室、半消声器、混响室、隔声室、测听室和消声水池等。如果没有这些设备，就不能获得高准确度的测量结果。它们在建造时都有特殊要求。

（一）消声室模拟自由声场。消声室模拟自由声场，即声音在此室内只有直达声可以听得到，在室内六个边界都有效地吸收所有入射声音，对自由场互易校准传声器、电声器件的测试和家用电器的性能检验都是必要的设施。半消声室除地面的坚硬的平面外，其它五个面与消声室一样，用于测定机器设备的声功率。

新中国成立后，国内声学计量和研究单位及大学，如科学院声学所、南京大学、同济大学、电子工业部、

计量分院、湖北省计量测试研究所等单位都先后建造了较大的消声室。计量分院和南京大学的消声室是互易法声压基准装置的一个重要组成部分。该院的消声室于一九七一年建成，其有效空间为  $7.2 \times 5.2 \times 4.8$  米，采用双层墙隔声结构，系统的自振频率为 5 分贝，吸声尖劈的低频截止频率为 70 赫，室内本底噪声不大于 20 分贝（C）。

（二）混响室模拟混响声场。该场与消声室的要求相反，六个界面均由反射较大的坚硬材料建成。有的混响室还装有扩散体，使声场增加扩散程度，混响室的混响时间较长。它也可用作传声器的互易校准，测量吸声材料的吸声系数以及噪声源声功率的测定等。声学所、南京大学、同济大学等已建成较大的混响室。

（三）消声水池。该水池主要用来进行水下自由场互易校准水听器，水声换能器测量方法的研究以及它的参量的常规测量。计量分院于一九七一年建成消声水池，其底部座落在细砂的基础上，水池外壁四周与房间墙壁间充以矿渣棉。池内装有橡胶板吸音材料做成的尖劈，其下限截止频率为 3 千赫，可用频段为 2—200 千赫。水池上装有一套换能器坐标测量系统。声学所建造的消声水池系将一大水池隔成两个水池，其中大的面积为  $7.5 \times 15$  米，小的面积为  $6.5 \times 7.5$  米，深度均为 5 米。水池配备一套完整的水声测量设备用以测量水听器的接收灵敏度、发射换能器的发送电压响应和电流响应并能自动描绘换能器的指向性图案。

## 九、声学量值的传递及声学测试工作

为保证中国声学计量量值的准确和统一，从一九六二年起，全国计量检定系统逐步建立起来。除上述声学

计量基准和标准外，已逐步形成了声学计量组织体系。六十年代初期只有中央机构——国家计量局负责它们的建立声学计量基准和标准，并初步开展声级计的测试工作。七十年代初，除计量院和计量分院开展声学计量工作外，各大区的计量机构也先后在武汉、上海、广州、黑龙江、江苏和江西等地开展某些检定工作。到八十年代中期，在计量系统中从事声学计量的科技人员已达 100 余人。声学计量部门已经用现有的标准器和精密声学测试仪对外开展大量的声学测试工作。其测试对象包括电视机、收录机、收音机、扬声器、音响视听设备以及电声器件的电声性能的测试、机电产品和家用电器的噪声功率的测试以及各种超声换能器和水声换能器等参数的测量等，对于科研、生产、国防及国民经济的发展起着积极促进的作用。

其它部门的计量机构，如科学院声学所，电子部第三研究所，中国船舶公司所属的研究单位也建立了某些标准装置，除为本部门服务外，在向国家计量局或地方计量机构办理申请手续并经批准后，在一定范围内开展声学检定工作。

在七十年代以后，计量院共编写了十几种声学检定规程。八十年代以后，该院和测试院参加全国声学标准化技术委员会，与有关单位共同制定声学标准化文件共有 30 多种，并已经国家标准局批准。这些标准化文件的制定对于促进声学产品质量的提高有着很大的作用。

## 化学计量的发展概况

### 概述

化学计量是化学领域内实现准确一致测量的科学，其基本任务是：建立、保存化学计量基准、标准并传递其量值，确立有关量值的溯源性；研制和颁发各种化学成分和物理化学特性的标准物质；对标准物质进行全国统一的计量管理，以保证法制计量的实施。在化学计量中，被测的量一般分为物理化学特性量和化学成分量两大类。

#### 一、物理化学特性计量的主要范围

电化学性质：水溶液酸度（pH）、水溶液电导率等；

热化学性质：燃烧热、反应热、热容等；

物质性质：粘度、湿度等；

分子量性质：聚合物分子量及分子量分布等；

微粒性质：粒度及其分布浊度等。

#### 二、化学成份计量的主要范围

基准试剂纯度国家基准；

环境标准物质：水、气、飘尘、生物土壤等；

冶金标准物质：钢铁，合金、有色金属，金属中气体、冶炼原料等；

地质标准物质：岩石、矿石、矿物、河流沉积物等；

核材料标准物质：铀矿石、铀钍化合物、标准辐射源等；

建筑材料标准物质：水泥、玻璃等；



化工标准物质：农药、纯气体等；

煤炭标准物质：煤、焦炭标准物质等；

食品标准物质：大米、小麦、蔬菜、肉类等；

临床化学与医药标准物质：血液、人体组织和体液、药物等。

在化学计量中，基准、标准装置、标准方法、标准数据和标准物质都是统一量值的有效手段。其中标准物质作为统一和传递量值的实物标准，在化学计量中占有特别重要的地位。标准物质是具有高度均匀性、良好稳定性和量值准确性的一种计量标准。其标准值具有准确程度范围，并附有检定证书。标准物质一般分为：化学成分、物理化学特性和工程技术特性三大类，其中化学成份标准物质在数量和品种上占绝大多数。

### 三、标准物质的作用

在化学分析和测量中，标准物质广泛用于校准测量仪器、评价测量方法和确定材料或产品的特性量值，在量值传递和保证测量一致性方面起着重要的作用，即：

作为“控制物质”：将标准物质与被测物质同时进行分析，当用标准物质得到的分析结果与证书值在规定的限度内一致时，则认定被测物质的分析结果是可信的；

作为“校准物质”：将标准物质用于仪器的定度（包括直接校准或制作校准曲线）；

作为“已知物质”：用标准物质评价新的测量方法和仪器的准确度。

由此可见，标准物质的标准值必须准确，才能用以统一和传递量值。确定标准物质的标准值并给出其准确度范围的过程称为“定值”，这是标准物质研究工作的重要环节。

#### 四、对标准物质定值的方法

（一）以量的物理或化学的定义，基本单位，基本常数为基础定值；

（二）在一个实验室内，用两种以上不同物理或化学原理的高准确度的测量方法定值；

（三）在多个合作实验室内，用相同或不同原理的方法进行测量，由主持实验室对合作实验室的数据进行统计分析定值；

（四）在基准、标准仪器上与起始标准物质直接比对定值。

第四种方法一般用于二级标准物质的定值。

标准物质与传统的计量标准器具相比，有以下特点：

标准物质与被测物质在化学组成、特性、量限、形态等方面都要求尽量接近，才能减小测量误差。由于化学分析和测量对象的多样性和复杂性（如被测物质形态包括固液气态；被测物质的化学成份，包括无机化合物和有机化合物中的主体纯度、常量、痕量和超痕量组分），因而标准物质的品种繁多；

在化学测量中，标准物质需经历物理或化学变化并被消耗，因而要求标准物质以批量制备，具有良好的均匀性和稳定性；

用标准物质校准仪器或方法，可在实验室或生产过程的现场进行。这克服了送检仪器方式中耽搁时间及运输中可能受到损害的缺点。标准物质具有使用方便，经济可行，工作效率高等优点，因而在国民经济各部门得到了广泛使用。以上这些特点决定了国家对标准物质进行统一的计量管理的必要性与重要性。只有专业性的技术管理工作贯穿于标准物质的制备、均匀性及稳定性检

验、定值、认证、储存、发售及使用的全过程，才能保证标准物质的质量。

## 化学计量的发展

### 一、起步阶段（一九五五至一九六五年）

国家计量局成立以后，开始学习苏联经验筹备各项计量工作。一九五八年，该局派科技人员去苏联门捷列夫计量科学研究院实习化学计量，并在一九六〇年筹建实验室。在一九六三至一九七二年的十年规划中列入了建立化学计量基准、标准，开展计量用纯物质的提纯与分析以及开展全国性分析用标准样品的研究等任务。从此，中国化学计量工作开始有计划地发展。

一九六一至一九六五年间，国家计量局完成了 25 摄氏度水溶液酸度基准和标准、燃烧热标准、毛细管粘度计临时工作基准等三项计量基准、标准的建立及相应的标准物质的研制，并在全国范围内开展量值传递。这些基、标准的建立解决了全国大量生产和广泛使用的酸度计、热量计和粘度计的校准问题，从而加强了工业产品的质量控制在。中国自制和颁发标准物质，结束了标准物质单靠国外进口的困难以及长期存在的量值混乱状况。部分省、市计量部门对上述新制和使用中的仪器开展了检定、测试服务和监督管理，方便了用户，促进了量值的统一。

### 二、曲折发展阶段（一九六六至一九七九年）

从一九六八到一九七一年，化学计量工作停顿达四年之久。造成这种局面的主要原因：一是受当时极左思潮的影响，认为计量工作是“管、卡、压”，应该取消；

二是认识上的局限性。一九七二至一九七九年间，计量院开始建立一批新的化学计量基准、标准，如基准试剂纯度国家基准、气体成份标准、湿度基准、水溶液电导率工作基准、燃气热值标准和聚合物分子量标准等。对已建的化学计量基准、标准，也进行了扩大量限范围的研究。

### 三、全面发展阶段（一九八〇至一九八六年）

一九七七年“文化大革命”结束后，国家计量局将发展中国标准物质和建立国家标准物质研究与管理中心，作为重点项目列入一九七八至一九八五年计量科学发展八年规划。

一九七九年中共十一届三中全会以后，工业、外贸和科研等部门要求以更快的速度发展工业质量控制，对外贸易及国际间学术交流用的标准物质的研究。《环境保护法》和《食品卫生法》的颁布，对环境、食品等标准物质也提出了迫切的需要。

国家计量局于一九七八年、一九七九年两次在北京召开由计量、工业、企业、科研等部门参加的全国性会议，研究加速中国标准物质发展问题，提出了发展中国标准物质的方针及建立合理的管理体制的建议，即：组织和依靠国内各部门的技术力量和设备，从事标准物质的研究和生产，标准物质根据其准确度等级分为一级（国家级）和二级（部门级）两级，分别由国家计量部门和工业主管部门进行质量管理；国家应建立标准物质的专业管理部门，统一进行对全国标准物质的技术管理工作，以保证标准物质的法制性和权威性。这些建议得到了方毅副总理和国家科委武衡副主任的赞同。一九八〇年，国家科委正式批准建立标准物质研究所，以加强中国标

准物质的研究工作，规定该所负责全国标准物质的技术管理工作。同年，在制定第六个五年计划时，各工业部门将各类标准物质的研究与生产列入本部门的发展计划。这些都标志着中国标准物质进入了全面发展的新阶段，以后的六年中，中国国家级标准物质的品种、数量有了迅速增长，研制水平显著提高。

## 化学计量的研究成果及其应用

### 一、水溶液酸度基准、标准的建立

水溶液酸度是电化学特性量，在化工、轻工、医疗等部门有广泛的应用。在工业上酸度的准确控制和测量与工业产品的质量有密切关系，如在化肥生产过程中，如果酸度控制失准，就可能造成产品报废；在医疗诊断中，如果酸度测定失准，就可造成医疗事故。

六十年代初期，国民经济各部门使用大量的酸度计，但缺乏计量标准，酸度计的制造及使用部门迫切要求建立酸度计量标准，以解决仪器的校准问题。

计量院于一九六〇至一九六八年间建立了 0—95 摄氏度水溶液酸度基准，即根据酸度定义，以氢—银、氯化银电极和标准缓冲溶液组成的无液接界电池为测量体系，用电位法实现测量。测量准确度为  $\pm 0.005 - \pm 0.008\text{pH}$ ，达到了国际上同类基准的先进水平。

为了进行酸度量值传递，计量院在一九六二至一九六五年建立了氢—甘汞电极电池体系 25 摄氏度水溶液酸度标准，其测量准确度为  $\pm 0.01\text{pH}$ 。同时，与北京化工厂合作研制了四草酸氢钾等 7 种 pH 标准物质，并由该厂生产和发售。

一九八〇年，上海市标准计量管理局研制了一种血液酸度标准物质，满足了医疗诊断部门的需要。

为了满足工业部门高温玻璃电极校准的要求，在一九七二年一九七三年期间，计量院、上海市标准计量管理局、上海电光器件厂合作建立了 100—150 摄氏度水溶液酸度标准，其准确度为  $\pm 0.04\text{pH}$ 。

水溶液酸度基准、标准的建立，使全国有了统一的 pH 标度，解决了数以万计的工业和实验室酸度计的标准，为工业流程开展酸度测试服务提供了条件，在国民经济各部门取得良好的效果。

## 二、燃烧热基准、标准的建立

燃烧热是热化学特性量，在科研和工业上有广泛的应用。在科学应用上，可借助测定标准物质的燃烧来复现和传递热量单位——焦耳，准确的燃烧热数据是获得标准热化学数据的基础。在工业上，燃料热值是判断燃料质量的重要指标，其准确测定直接关系到燃料能源的开发与合理利用。

六十年代初，中国电力、煤炭等部门广泛使用工业氧弹热量计，但由于缺乏计量标准而量值混乱。国家计量局于一九六〇至一九六五年建立了等温外套型燃烧热标准装置，以苏联门捷列夫计量科学研究院颁发的标准物质——苯甲酸作为起始标准，准确度为 0.1%。同时，研制了量热标准苯甲酸并开展量值传递工作。一九七〇年以后，该标准物质移交成都化学试剂厂生产和发售。

一九六四至一九六八年期间，计量院建成燃烧热基准，即根据焦耳定义，用电标定高精密等温外套型氧弹热量计的能当量，制成并发售了纯度为 99.999% 的量热基准苯甲酸，其燃烧热测定的准确度为 0.02%，达到国

际上同类基准的水平。

一九七七至一九八五年，为适应冶金工业和城市煤气等部门统一燃气热值量值的要求，采用氧弹量热法建立了燃气热值标准装置，并研制了燃气热值标准物质甲烷，其准确度为 0.2%。燃烧热基准、标准的建立是统一全国热量和燃料热值量值、解决工业氧弹热量计和气体热值仪校准的基础。为节能技术改造、企业能耗计量、能源政策的贯彻、工业产品质量控制和国防工业中的火药爆炸热值的测定提供了计量标准。

### 三、粘度基准、标准的建立

粘度是表征流体内摩擦的特性量，广泛用于石油、化工、航空、科研等部门。粘度的准确测量与石油等工业产品质量控制、航空安全、节能等均有密切关系。如果各种工业发动机润滑油类的粘度测定失准，就会引起机器零件损坏；航空用油粘度测定失准，就会导致飞行事故。因此，粘度是石油产品特别是国防航空用油严格控制的指标。粘度的准确测量对保证聚合物、陶瓷、玻璃等工业产品的质量也有重要的作用。

国家计量局于一九六〇至一九六五年间建立了中国毛细管粘度计临时工作基准，以国际公认的美国标准局于一九五二年发布的 20 摄氏度纯水粘度值作为起始标准，借助一系列标准粘度油采用阶升法校准。工作基准由不同内径的一组乌式毛细管粘度计组成。其测定范围为 1—103 平方毫米每秒，总不确定度约为 0.5%。一九六六至一九六七年，计量院研制了可忽略表面张力和动能改正结构的粘度计，并进一步扩大量限。改善后的毛细管粘度计基准由 27 支组成，测定范围为 1—105 平方毫米每秒，总不确定度为 0.1—0.4%，达到国际上同类

基准的先进水平。一九八一年开始,中国参加了由美国材料测试学会 D—2 委员会主持的粘度量值国际年度比对,历年比对的结果说明中国与各主要国家计量部门测量数据的平均值在 0.2%内吻合。这证明中国粘度量值是准确可靠的。

一九六五至一九八〇年间,省、市计量部门和工业部门建立了 22 个粘度计量一级站,各大工业企业建立了约 60 个二级站,检定了数 10 万支工作粘度计。一九八〇年以后,计量院直接发售标准粘度油传递量值,大大方便了用户。粘度计量基准、标准的使用在国民经济中取得了很大的社会效益。

#### 四、湿度基准、标准的建立

湿度是表征气体中水蒸汽含量的特性量,是气象和工业控制中的重要参数。七十年代以后,航天、原子能工业、通讯电缆、合成材料等近代科学技术的发展,对环境湿度的测量和控制以及气体中痕量水蒸汽含量的准确测定,提出了很高的要求。国民经济中各种湿度测量仪器的迅速发展迫切要求湿度量值的统一。

一九七七至一九八一年,计量院建立了湿度基准。采用重量法,即精确测量干燥剂所吸收水蒸汽的质量、干燥气体体积和密度。其湿度测量范围为 0.2—15 毫米每克,准确度为 0.31%,达到国外同类基准的水平,并于一九七八至一九八六年间研制了内渗式水渗透管和外渗式水渗透管两种标准物质作为传递标准,量限分别为  $(3-80) \times 10^{-6}$  和  $(50-2000) \times 10^{-6}$ ,准确度均优于 3%。

湿度基、标准建立后,工业部门用的标准湿度发生器得到准确的校准,各种精密湿度发生器、湿度测量仪



器和湿敏传感器有了定期的检定，这些都对工业产品质量控制和安全生产等方面产生了重要作用。同时，进口的湿度测量仪有了质量把关，避免了经济损失。湿度计量工作的开展促进了新型测湿仪器的生产。

### 五、水溶液电导率基准的建立

水溶液电导率是电化学特性量，广泛用于电力、化工、海洋、医药等部门。水溶液电导率是工业上水质质量监测的重要指标，其准确测定直接与安全生产和人民健康有关。国民经济各部门使用了数以万计的电导仪，但长期缺乏计量标准。

一九七九至一九八二年，计量院建立了水溶液电导率工作基准。该基准以一九七六年国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）推荐的 25 摄氏度下氯化钾水溶液电导率的标准值为起始标准，在合理设计的电导池内，用电阻比对法测量。在 15—35 摄氏度温度范围内，浓度为  $1D-0.001D$  的范围内，测定的准确度为 0.03—0.07%，测得的氯化钾水溶液的电导率，与国际推荐值一致。该项基准建立后，通过发售标准物质氯化钾和开展电导测量仪器的检定，统一了量值，在环境监测、工业水质监测的质量控制和安全生产等方面都有广泛的效益，同时还促进了海水盐度新标准的建立。

### 六、基准试剂纯度国家基准的建立

基准试剂的化学纯度是一个重要的化学分量。在分析化学中，合乎纯度要求的基准试剂是准确进行容量分析的基础。基准试剂在国民经济各部门的使用极其广泛。实际使用是将基准试剂配制成标准溶液作为容量分析的起始标准。如果基准试剂质量不合格，则必然造成化学分析结果失准，从而影响到工业产品质量或科研数

据的可靠性。根据国际上的规定和中国化学工业的统一要求，作为工作基准试剂的主体纯度应为  $100.00 \pm 0.05\%$ 。然而由于分析方法的局限，过去不同化工厂生产的基准试剂的纯度长期存在量值混乱状况。

七十年代初，化工部门迫切需要国家级的基准试剂（纯度为  $100.00 \pm 0.02\%$ ）用以控制工作基准试剂的质量。计量院于一九七一至一九八四年间建立了基准试剂纯度国家基准。该基准的建立采用绝对测量法，借助恒电流高精密库仑滴定法确定基准试剂的化学纯度。测定邻苯二甲酸氢钾（酸碱反应）、碳酸钠（酸碱反应）、重铬酸钾（氧化还原反应）、三氧化二砷（氧化还原反应）、氯化钠（沉淀反应）及乙二胺四乙酸二钠（络合反应）等基准试剂主体纯度的准确度优于  $0.01\%$ ，达到国际先进水平。北京化工厂与计量院已合作研制了 5 种国家级的基准试剂。

该基准建立后，通过发售国家级基准试剂校准化学试剂生产厂的分析方法，统一了基准试剂纯度的量值，促进了化学试剂质量的提高，在临床分析、原子能工业及光学仪器校准等方面，都有广泛的应用。

## 标准物质的研制、应用及管理

新中国成立以后，各部门制备和使用的化学成份标准物质共有十多类约 600 个品种，现仅就几个类别或品种的国家级标准物质研制情况作一概述。

### 一、环境标准物质

在环境监测和治理中，准确一致的监测数据是正确评价环境质量和污染治理的重要依据。中国《环境保护

法》的实施要求提供环境监测质量保证。一九八〇年环境保护部门开始有计划地发展环境标准物质。一九八〇至一九八六年间环境标准物质已有所发展，如已研制并颁发了大气、水质、河流沉积物、大气中微粒、生物等环境标准物质。

### （一）水质标准物质。

一九八〇至一九八六年，计量院接受国务院环境保护办公室的委托，按计划完成了水质标准物质的研制。该标准物质的研制有以下特点：

标准物质配制浓度是根据中国卫生标准选择的，被定值成分的量限一般为 100 万分之几到 10 亿分之几量级；

标准物质配制的基体组成是根据对全国 22 个江河水系调查的结果确定的；

对用重量法配制的初级标准溶液的浓度用库仑法或重量分析标定；

配制过程中对容器及基体溶液中痕量成分的空白值进行监测，以考查制备各个环节中可能引入的污染；

采用重量和容量两种浓度标度（克每克或克每毫升），其中容量浓度标度通过精密测定标准物质在各温度下的密度值换算。

用高精度仪器监测整个配制过程及考查标准物质的均匀性与稳定性。

采用重量配制法及两种以上参比方法平行进行定值，互相验证。

到一九八六年为止，已研制成 9 种水质标准物质，包括水中痕量镉、水中痕量铅、水中痕量汞、水中痕量氰、水中痕量氟及水中痕量砷 6 种单组分标准物质及水

中痕量硝酸根、硫酸根、氯离子混合标准物质及含量各为百万分之几和十亿分之几量级的水中铜、铬、镉、镍、铅、锌种混合标准物质。这些标准物质保证值的准确度对百分之几量级为 1—3%，对十亿分之几量级为 5—8%，稳定期为两年以上，达到了国外先进水平。水质标准物质已用于全国环境监测系统中水质分析方法和仪器的校准，在水电、卫生、防疫、冶金、石油化工科研等部门中也有广泛应用。

## （二）气体混合物标准物质。

计量院于七十年代初开始研究气体标准物质。一九七二至一九八三年间，先后建立了 3 种绝对测量装置和方法，即称量法标准配气装置，渗透管法和扩散管法。根据一九八〇年国务院环境保护办公室的委托任务，计量院于一九八〇至一九八六年完成了大气监测标准物质的研制计划，共研制了钢瓶气、渗透管、扩散管等气体标准物质 15 种，达到了国际水平。

称量法标准配气装置配气范围可以从痕量到常量，准确度为  $\pm 1\%$ ，稳定期为一年以上。研制成的标准物质有氮中甲烷、氮中一氧化碳、氮中二氧化碳、氮中一氧化氮等。用渗透管法配制标准物质，污染组分含量可以从 100 万分之几到 10 亿分之几量级，准确度为 1—2%，使用寿命为一年。已研制成二氧化硫渗透管、二氧化氮渗透管、硫化氢渗透管、氨渗透管及氟化氢渗透管等。用扩散管法配制标准物质含量可从 100 万分之几到 10 亿分之几量级，准确度为 1%，已研制成苯扩散管和戊烷扩散管等标准物质。

以上气体混合物标准物质在环境监测、化工、煤炭、电子、石油等部门发挥了重要的作用。

## 二、冶金标准物质

一九五一年，全国钢铁检验委员会发布第一批用于钢铁工业中现场分析质量控制的“标准样品”，这是中国最早的标准物质。随着冶金工业的发展，从一九五一至一九八六年，冶金、机械、航空工业等部门生产和使用的冶金标准物质约有 400 种，其中已有 85 种经过技术认证确定为国家级标准物质，包括：生铁、铸铁、碳素钢、普碳钢、低合金钢、合金工具钢、纯铁、铜合金、铝合金及金属中气体标准物质等。

新中国成立三十七年来，全国冶金标准物质不但在数量上、品种上有了很大发展，而且在质量上和研制水平上也在不断提高。如上海材料研究所和徐州热铸造研究所等单位，用雾化制粉先进工艺代替以前的铸锭和切削加工工艺制备金属标准物质，减少了标准物质的污染，提高了均匀性。标准物质中的被测元素由以前几个增到 20 多个，其含量由常量范围扩展到痕量范围；标准物质的定值技术有了很大发展；在对标准物质的均匀性、稳定性检验及标准值准确度估计等方面，也采用了合理的数据统计分析方法等。

实践表明，冶金标准物质的研制和使用，对提高钢铁和有色金属产品的质量、冶金产品进出口的商品检验质量控制、冶金新产品的研究及促进分析技术的发展等，都发挥了重要的作用。

## 三、地质标准物质

地质标准物质主要包括岩石、矿石等。准确的岩、矿分析数据是评价岩矿质量、制定矿石价格和矿产开发的重要依据。早在五十年代，地质部门就生产和使用管理样品，用以监控个别组分的分析质量。一九七六至一

九七九年间,西安地质矿产研究所等 17 个单位研制了首批岩石和矿石标准物质,即铬铁矿和超基性岩,该标准物质是在 17 个试验室内采用多种分析技术,对其中 25 个常量和痕量组分进行分析在提供的 4700 多个测试数据的基础上定值的。该标准物质的使用效果良好,曾与加拿大、法国等进行了交流。随着地球化学探矿工作的发展,地质部门对研制和使用地球化学标准物质提出了迫切的要求。由于地球化学标准物质被测定的元素或成份很多(主要是痕量成份)、研制难度大,地质矿产部组织了地球物理,地球化学勘察研究所等 41 个单位进行了部门内外的大合作,从一九七八到一九八三年成功地研制了 8 个水系沉积物标准物质。这些标准物质是在 39 个实验室内采用火花源同位素稀释质谱等 17 种近代分析技术,在得到的 7000 多个分析数据的基础上确定其保证值的。数据的统计分析用电子计算机完成。该标准物质在国内使用和国际交流中都得到好评。截至一九八六年,发布的国家级地质标准物质有铬铁矿、超基性岩、水系沉积物、金银地质标准物质等 16 种。

#### 四、食品标准物质

食品标准物质包括粮食、蔬菜、肉类等,是中国新近发展的一类标准物质。鉴于对食品中营养和有害成分的监测质量与人民健康、食品研究和食品进出口贸易商检质量控制等密切相关,从一九八〇年开始,商业、环境等部门积极开展食品标准物质的研制工作。北京市环境保护中心和商业部谷物油脂化学研究所、食品检测研究所等部门成功地研制了大米粉、小麦粉、猪肝、甘兰等 4 种国家级食品标准物质。在研制过程中,邀请了国外有关实验室参加分析比对工作。

食品标准物质已用于食品分析与检验同类基体样品时用的分析方法和仪器的校准，并可用于卫生、环境保护、食品研究和农牧等各个领域，在《食品卫生法》的贯彻和食品对外贸易商检把关等方面也有重要作用。

### 五、标准物质的技术管理

标准物质研究所自一九八一年成立以后，为了确定标准物质质量值的溯源性和法制性，对中国标准物质进行了大量技术管理工作，主要有：

（一）制定有关标准物质的各种技术规范和法制性文件。如《标准物质的名词术语》、《标准物质的技术规范》、《一级标准物质的审定及授权生产办法》、《标准物质证书编写规则》等。

（二）组织对国家级标准物质的认证。一九八一年，在中国计量测试学会成立了标准物质专业委员会，它是国家计量局授权对中国国家级标准物质认证的技术终审组织。经该委员会技术审定合格的标准物质报国家计量局审批后，作为国家级标准物质颁布。

（三）组织标准物质的国内外学术交流。标准物质研究所经常组织全国性的标准物质方面的学术交流会或讨论会，并参加有关标准物质方面的国际活动，多次参加有关标准物质的国际会议。

（四）编制、发布《中华人民共和国标准物质目录》。该目录于一九八四年首次发布，此后每年发布新增加的国家级标准物质。

标准物质的技术管理有力地促进了中国标准物质的发展和研制水平的提高，加强了全国发展标准物质的计划性，在保证化学计量量值的统一和国家有关法令的贯彻等方面起了重要的作用。