




普通高等教育测控信息技术规划教材

计量学基础

Fundamental of Metrology

李东升 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TB9
26

普通高等教育测控信息技术规划教材

计 量 学 基 础

主 编 李东升
副主编 赵 军 顾龙方
参 编 朱维斌 陆 艺 范伟军
尹招琴 徐立恒 刘文献
主 审 侯 宇



机械工业出版社

本书系统地介绍了有关计量学方面的基础知识。主要包括：绪论、物理量和计量单位、测量误差与测量不确定度、计量器具、量值传递与溯源、计量管理、几何量计量、力学计量、电磁学计量、温度计量、时间频率计量、光学计量、电子学计量、声学计量、化学计量、电离辐射计量、标准物质等。各章均附有思考题可供选用。

本书为高等学校测控技术与仪器专业的教材，也可作为信息类、管理类和其他有关专业的教材，同时可供新进入计量测试、质检、标准行业的科技人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

计量学基础/李东升主编. —北京: 机械工业出版社,
2006.7

普通高等教育测控信息技术规划教材
ISBN 7-111-19260-5

I. 计… II. 李… III. 计量学-高等学校-教材
IV. TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 057855 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 贡克勤、王保家

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张莉娟

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

·184mm×260mm·13.75 印张·339 千字

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

测控信息技术规划教材编审委员会

主任委员	陈光禔	电子科技大学
副主任委员	裘祖荣	天津大学
	蔡 萍	上海交通大学
	王 祁	哈尔滨工业大学
	梅杓春	南京邮电学院
	韩雪清	机械工业出版社
	童玲 (兼秘书长)	电子科技大学
委 员	王寿荣	东南大学
	林 君	吉林大学
	潘英俊	重庆大学
	赵跃进	北京理工大学
	黄元庆	厦门大学
	吕乃光	北京机械工业学院
	石照耀	北京工业大学
	杨理践	沈阳工业大学
	何 涛	湖北工学院
	梁清华	辽宁工学院
	赵 建	西安电子科技大学
	刘 娜	北京石油化工学院
	王保家	机械工业出版社

前 言

计量是保证单位统一和量值准确可靠的活动，是国民经济和社会发展的重要技术基础。计量学是研究测量的科学，是所有学科赖以发展的重要支柱之一，也是评价一个国家科学技术水平的重要标志之一。从人们日常的生活到国民经济各领域及国防军工、航空航天领域，都需要计量做保障，离开了计量，就寸步难行。科学要发展，计量需先行。计量学是一个不断挑战极限、追求卓越的学科领域，是一个先导性的学科，对我国经济建设具有重要支撑作用。

我国近年来测控信息类专业招生人数大幅度扩张，恰逢国家目前也大力发展计量测试事业，因此，将有相当数量人员毕业后要从事计量测试领域的工作。为此，许多高等学校都开设了计量学方面的课程，为学生进行入门性的教育，也为今后在本领域就业打下一些有益而必要的基础。但苦于缺少适用的教材，因此，为满足当前本科人才培养的需要而编写了此书。

本书系普通高等教育测控信息技术规划教材之一，由中国计量学院李东升教授任主编，赵军高级工程师、顾龙方副教授任副主编。由中国计量学院副校长侯宇教授担任本书主审。参加本书编写的人员有：李东升（第一章），赵军（第二章、第三章），顾龙方（第六章），朱维斌（第九章、第十一章、第十三章），陆艺（第四章、第五章、第七章），范伟军（第十二章、第十六章），尹招琴（第八章、第十章），徐立恒（第十五章、第十七章），刘文献（第十四章），硕士生王强绘制了部分插图。中国计量学院计测学院对本书的编写工作给予了大力的支持，在此表示衷心的感谢！

本书编写中参阅了施昌彦主编的《现代计量学概论》、王立吉编著的《计量学基础》以及国防科工委科技与质量司组织编写的计量系列丛书等 28 部著作和论文，在此向文献作者表示衷心感谢。

由于科学技术的不断发展和编者的水平有限，本书中肯定存在缺点和不足，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言			
第一章 绪论	1		
第一节 计量的作用和意义	1		
第二节 计量学、计量和测量	3		
第三节 计量的对象、内容和特点	5		
第四节 计量学的分类	6		
第五节 计量学的创立与发展	8		
第六节 我国计量的起源和发展简史	16		
思考题	20		
第二章 物理量和计量单位	21		
第一节 量制和单位制	21		
第二节 国际单位制	23		
第三节 我国的法定计量单位	30		
思考题	31		
第三章 测量误差和测量不确定度	32		
第一节 常用计量术语	32		
第二节 测量误差的基本概念	34		
第三节 测量不确定度的基本概念	37		
第四节 测量误差	39		
第五节 测量误差的合成	43		
第六节 测量不确定度的评定	43		
思考题	48		
第四章 计量器具	49		
第一节 计量器具的分类及特征	49		
第二节 计量器具的结构和组成	55		
第三节 计量器具的管理	58		
思考题	59		
第五章 量值的传递与溯源	60		
第一节 概 述	60		
第二节 量值传递与溯源的方式	62		
第三节 计量检定	67		
第四节 比对	71		
第五节 国家计量检定系统表及计量检定 规程	73		
思考题	76		
第六章 计量管理	77		
第一节 计量管理的概念	77		
第二节 计量管理的基本方法	79		
第三节 我国的计量管理体系	80		
第四节 标准对计量的要求	82		
第五节 测量管理体系	85		
思考题	91		
第七章 几何量计量	92		
第一节 几何量计量的基本名称与 概念	92		
第二节 几何量计量的基准原理与 方法	93		
第三节 几何量计量的传递和校准	96		
第四节 几何量计量的发展	99		
思考题	102		
第八章 力学计量	103		
第一节 基本名称与概念	103		
第二节 力学计量的基准原理	105		
第三节 力学计量的传递方法	110		
第四节 力学计量的发展	111		
思考题	113		
第九章 电磁学计量	114		
第一节 电磁学计量的基本名称和 概念	114		
第二节 电磁学计量单位的复现	115		
第三节 电磁学计量的传递方法	117		
第四节 电磁学计量的发展	122		
思考题	123		
第十章 温度计量	124		
第一节 温度计量的基本名称与概念	124		
第二节 温度计量的基准原理	127		
第三节 温度计量的传递方法	131		
第四节 温度计量的发展	133		
思考题	135		
第十一章 时间频率计量	136		
第一节 时间频率的基本名称与概念	136		
第二节 时间频率的基准	138		
第三节 时间频率的传递和校准	140		
第四节 时间频率计量的发展	143		

思考题	146	思考题	181
第十二章 光学计量	147	第十五章 化学计量	182
第一节 光学计量的基本名称与概念	147	第一节 化学计量的基本名称与概念	182
第二节 光学量计量基准	150	第二节 化学计量的基准原理和方法	183
第三节 光学量的传递与校准	151	第三节 化学计量的溯源与检定	188
第四节 光学计量的发展	157	第四节 化学计量的发展	190
思考题	158	思考题	192
第十三章 电子学计量	159	第十六章 电离辐射计量	193
第一节 电子学计量的基本名称与 概念	159	第一节 电离辐射计量的基本名称与 概念	193
第二节 电子学计量单位的标准	160	第二节 电离辐射量计量	196
第三节 电子学计量的传递和校准	165	第三节 电离辐射量的传递与校准	200
第四节 电子学计量的发展	167	思考题	200
思考题	168	第十七章 标准物质	201
第十四章 声学计量	169	第一节 标准物质的基本概念	201
第一节 声学计量的基本概念	169	第二节 标准物质的研制	203
第二节 空气声计量	170	第三节 标准物质举例	209
第三节 超声计量	174	思考题	212
第四节 水声计量	177	参考文献	213

第一章 绪 论

第一节 计量的作用和意义

一、计量与科学技术

任何事物都是由一定的“量”组成的，并通过“量”来体现其状态。为了认识“量”并确切获得其量值，只有采用计量方法。例如，著名的万有引力定律被牛顿的敏锐观察所揭示，在百余年后经卡文迪许（Cavendish）的精密扭秤实验而得到了确认。爱因斯坦的相对论是通过水星近日点移动、光线在重力场中的弯曲、引力红移三大实验得到了验证。总之，从经典的牛顿力学到现代的量子力学，各种定律、定理，都是通过观测、分析、研究、推理和实际验证才被揭示、承认和确立。计量正是上述过程的重要技术基础。

历史上三次大的技术革命，都充分地依靠了计量，同时也促进了计量的发展。至于人们广泛谈论和关注的所谓第四次技术革命，将引起科技、经济和社会的重大变革，人类将进入“超工业社会”或“信息社会”。那时，不可再生的石化燃料能源将替换成可再生的太阳能、海潮发电等新能源，钢铁、橡胶等传统产业将被电子工业、化学工业、宇航工程、海洋工程、遗传工程等新兴产业所取代等。这场技术革命的先导是微电子学和计算机，而集成电路又可以说是先导的核心。集成电路的研制，没有相应的计量保证是不可想像的。比如，硅单晶的物理特性、几何参数、超纯水、超纯气的纯度、化学试剂、光刻胶的性能、膜层厚度、层错位错、离子注入深度、浓度、均匀度以及工艺监控测试图形等均需精密计量与控制。

总之，科学技术的发展，特别是物理学的成就，为计量的发展创造了重要的前提。同时也对计量提出了更高的要求，推动了计量的发展；而计量的成就，又促进了科技的发展。正如门捷列夫所说：没有计量，就没有科学。

二、计量与生产

计量被称为“工业生产的眼睛”，渗透在产品生产的每个环节，是评定产品等级的依据。计量是科学生产的技术基础，社会化大生产的本身就要求有高度的计量保证，从原材料的筛选到定额投料，从工艺流程监控到产品的质量检验，都离不开计量。计量检测是产品质量的基础。在现代化生产中，核心目的是实现最佳经济效益。原材料进厂要把关，生产工艺要严格控制，终端产品要进行科学评价，各环节的信息要源源不断地进行反馈。正是各种计控的需要决定了计量在工业生产中的技术基础地位，使其成为特殊的生产力。可以说没有工业计量就没有优质产品，就没有企业的效益。世界工业国家首先认识到了工业计量的这种地位和作用，他们将计量检测同原材料和工艺并列为现代化生产的三大支柱。农业生产，特别是现代化的农业生产，亦必须有计量保证。例如，电离辐射育种是近年发展起来的一项重要增产

措施。我国已用该法培育出许多农作物新品种。其中鲁棉一号可使棉花大面积地成倍增产。利用电离辐射照射,可以实现农产品和食物的防腐保鲜,是辐射加工工业的一个重要方面。所有这些,都需要相应的计量保证,否则不仅达不到预期的效果,反而会造成不应有的损失。事实充分表明,科学生产和技术创新,都离不开计量。

三、计量与国防

计量对国防,特别是尖端技术的重要性尤为突出。现代战争需要现代化的武器装备做保证。国防尖端系统庞大复杂,涉及的科学技术领域广、技术难度高,要求计量的参数多、精度高、量程大、频带宽。比如,远程洲际弹道导弹、人造地球卫星及宇宙飞船的运行等,都需要高精度的时间和时间计量,同时要求高稳定性和高准确度的频率控制。在现代武器系统中都安装了用于接收全球定位系统的卫星信号的传感器,而武器上的计时器就是计算信号从卫星到接收器所用的时间来确定自身位置的,从而校正航向、准确地击中目标。所以,要使导弹命中率高,就要提高计时器的准确性和关键零件的制造精度,否则,就会出现“差之毫厘,谬之千里”的情况。目前导弹的最高打击精度可达到几米范围内。

由于计量测试提供了所需的数据,保证了各种部件、分系统和整个系统的可靠性,同时,还可以缩短研制周期、节约大量人力、物力和时间。例如,美国某航空喷气发动机公司在研制一种新型发动机的过程中,需要进行大量的计量测试。据测算,当计量仪器的误差为 0.75σ 时,需要进行200次实验,耗资2000万美元;当仪器误差减小到 0.5σ 时,只需要进行28次实验,仅耗资280万美元。

2005年我国“神舟”6号飞船的发射成功,标志着我国宇航计量技术达到国际领先水平。

可见,在国防建设中,计量测试是极其重要的技术基础,具有明显的技术保障作用,不仅可以节约资金,争取时间,而且还能为指挥员的判断与决策提供可靠的依据。

四、计量与人民生活

在现代生活中,无论是衣、食、住、行、柴、米、油、盐,还是医疗卫生保健、社会服务、环境与安全等,都离不开计量,可以说计量科学技术时刻伴随你。比如,日常买卖中的计量器具是否准确,家用电能表、煤气表和水表是否合格,以至公共交通的时刻是否准确,出租车计价器、加油站流量表等是否准确都是人们关心的话题。

食品是人类生活的必需品,其品质直接关系到人们的健康。在粮食的生产过程中,施化肥可以增产,洒农药可以杀虫和除草,但化肥和农药大多对人体有害,必须控制在一定的剂量之内,否则将会导致积累性中毒。即使是多年停止使用农药和化肥的土地,其残留成分仍然会在土壤中存在,依然能在产出物中检测到。例如山东出口日本的大蒜被拒收就属于这种情况。再如我国是茶叶的原产地,但因为药残等原因使印度成为茶叶出口大国。另外,食品在加工过程中,往往要加入一些添加剂,如色素、味剂、防腐剂等,都必须经过鉴定和计量,否则也会导致不良的后果,危害人们的健康。2004年有毒奶粉事件被媒体曝光,2005年出现了苏丹红事件,引起人们极大关注。所以,用现代食品安全计量测试技术去不断发现危及人类健康的有害物质,成为当前普遍关注与研究的热点。

近年来,随着城市的迅速发展,各种污染日趋严重,几乎成了一种难以根除的公害。世

界各国，特别是工业比较发达的国家，对环境保护工作都给予了高度的重视。其中，关键的一环，就是进行有效的计量监测，诸如对大气、水质以及噪声等进行监测。为减小噪声，一些国家对汽车的衰音程度和排放情况作了明文规定，不合格者不准驾驶。目前，世界的大城市，为减少噪声污染，大都有不准机动车鸣笛的禁令。

至于水和空气对人的重要性是不言而喻的。人口的社会调查表明，一些水质良好、空气新鲜的地区，特别是山区，人们的平均寿命较长，相反地，水质不好、空气污染严重的地区，人们的发病率较高，寿命普遍偏低。近年来，通过对空气的计量测试，发现当空气中的负离子浓度较大时，空气便格外新鲜，对人体具有一定的医疗保健作用。顺便提一下，为了改善人们的生活环境，近年来出现了人工负离子发生器。但应当注意，该类装置必须经过必要的计量检测方能安全使用。

在医疗卫生方面，计量测试的作用亦越来越明显。现代医学对疾病的预防、诊断和治疗，对科学仪器的依赖越来越多。而计量和化验的数据不准，将会带来严重的后果。计量测试水平的不断提高促使一些新的医用计量测试器具不断问世。

五、计量与贸易

在经济全球化的时代，频繁大量的进出口商品的质量直接关系到国家利益。在国际贸易的双边或多边协议中，都把检验商品用的计量器具的量值是否溯源到国家基准或国际基准作为协议的重要内容之一。科学、准确、公正的检测数据是涉外索赔成功的关键。因此，计量是打破贸易壁垒的重要手段。先进的计量手段可以保护国家利益免受巨额损失。例如，按国际惯例和合同条款，一般货物皆以上岸的计量结果作为结算的依据。过去我国出口原油，由于缺乏精确可靠的计量手段，往往采取多装油而避免索赔罚款的作法甚至出现过多给了油，反而被船主以超重为由提出索赔的憾事。当前，我国每年都有大量原油进口，若原油的测量精度提高 0.1%，都会给我国带来显著的经济效益，一年便可少损失大量原油，不仅可获得明显的经济效益，而且还可提高我国的计量声誉。

从上面的一些事例可以看出，计量是科学技术进步、经济和社会发展的重要技术基础。另一方面，随着社会的发展，对计量的要求亦越来越高，从而激励了计量本身的发展。如今，可以毫不夸张地说，任何科学、任何部门、任何行业乃至任何活动，都直接或间接地、有意或无意地需要计量。计量水平的高低，已成为衡量一个国家的科技、经济和社会发展程度的重要标志之一。

第二节 计量学、计量和测量

一、概述

计量这个名词对现代人来说并不陌生，其实过去几千年里一直被称为“度量衡”，其原始含义是关于长度、容积和质量的测量，主要器具为尺、斗、秤。在我国是从 1953 年才开始使用计量这个词汇，而今天所谈及的现代计量学则已远远超过了这个范畴，被赋予了愈来愈广泛的内容。

在认识世界的过程中，就必须对各种“量”进行分析与确认，既要分清量的性质，又要

确定其具体量值。计量正是达到这种目的的重要手段。可以说计量是对“量”的定性分析和定量确认的过程，是实现单位统一和量值准确可靠的活动。在生产、生活、贸易、科研中必须借助测量手段进行测量活动来认识事物。测量手段和测量方法的准确性、可靠性和测量结果的一致性为测量的基本条件。这里有必要对计量与测量的概念和含义上的区别加以简要解释，计量是可以溯源到标准量的测量，属于有依据的测量。对同一量值来说，都是先进行测量实验，再逐步形成计量方法，有先后次序的差别。计量学就是研究测量、保证量值统一和准确的科学。它既是基础科学，又是应用科学，最重要的它还是先导科学。计量有着悠久的历史，它伴随着社会的发展而发展，成为我们认识自然和改造自然的重要手段。计量的基本含义是由数和单位来表示事物的物理量，控制和识别量的多少。因此，有必要分清计量学、计量和测量的概念。

二、测量

测量以确定被测量的量值为目的。首先，需要选择相应的测量原理和方法，选择测量标准和仪器设备，必要时，需要使用相应仪器设备的检定规程（规范）。然后，进行一组操作。这样的“一组操作”，可以是手动的、自动的、简单的、复杂的、高准确度的、低准确度的。例如，使用激光测量系统、坐标测量机、天平测量物体的长度（角度）、体积（形状）、重量（质量）属于测量，我们在家中用体温计和血压计测量体温和血压，也属于测量。测量的最终目标是获得被测量的数值，从而实现从定性分析到定量确认的转化。

三、计量学

计量学是关于测量的科学，是研究各种物理量测量技术的学科，是提高物理量量化精确性的科学，属于物理学的一个分支，其理论基础是物理学和数学。它涵盖有关测量的理论与实践的各个方面。随着科学技术的发展，计量学已成为一门研究测量理论和实践的综合性学科，它和物理学的各分支学科、化学、天文学、环境科学以及法学紧密结合、互相渗透，成为这些学科的基础和前沿，是现代科学技术的一个重要组成部分，成为所有学科赖以发展的支柱。

这里引用欧洲人的一个哲学理念：凡是不可测量的量，都是不能被改善的量。因此，计量学研究领域的一个主要任务是逐步将不可测量的量转化为可测量的量，从而起到推动社会的发展和进步的作用。

四、计量

计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动。这种“活动”包括测量操作活动以及其他科技活动，如法制活动、管理活动等。实现单位统一和量值准确可靠是计量的根本出发点，单位统一是量值准确的前提条件，因此，建立各个量的单位以实现对各种物理量进行分别定性和互相区分是非常必要的。量值准确是指测量结果具有合理的准确度。而可靠是指在不同条件下，同类被测量量值具有可比性。为了达到这个要求，必须由政府部门和社会组织开展系列活动，包括科学研究和测量技术研究，建立基准标准和保证测量结果具有溯源性和技术条件，制定法律、法规和技术规范，开展行政监督管理等。

第三节 计量的对象、内容和特点

一、计量的对象

计量的对象主要是物理量，但随着科技的进步、经济和社会的发展，目前计量早已突破了物理量的范畴，而逐步扩展到工程量、化学量、生理量和心理量。计量所涉及的科学领域，也已从自然科学扩展到社会科学。当前普遍开展的有几何量、热学、力学、电磁学、无线电电子学、时间频率、光学、电离辐射、声学 and 化学量计量，即所谓的十大计量是传统的计量对象。同时，在一些高新技术领域（如：生物、医学、环保、信息、航天和软件等的专业领域）的计量测试也已逐步开展起来了。

二、计量的内容

1) 计量（测量）单位和单位制。

2) 计量器具（测量仪器）：包括建立、复现、维护、保存和使用计量基准，计量标准和工作计量器具。

3) 量值传递和量值溯源：包括检定、校准、测试、检验与检测。传递是由高到低，而溯源则是由低到高，两者是路径相同、方向相反的运动。

4) 物理常量、材料与物质特性的测定。

5) 测量理论与数据处理、不确定度及其方法。

6) 计量管理、计量保证与计量监督。

其中计量器具和测量数据是对计量的定性分析和定量确认，是进行管理最为常用的手段。

三、计量的基本特性

计量是通过技术和法制的手段实现测量单位的统一和量值的准确可靠，而协调这些环节之间的关系则要依靠计量管理，因此完整的计量概念中应包括计量管理。谈到计量的基本特性，就应包括计量管理的特性。

1. 计量的技术特性

(1) 一致性 一致性是计量工作的本质，是指在计量单位统一的基础上，无论何时、何地，采用何种方法，使用何种计量器具，以及由何人测量，只要符合有关的要求，其测量结果就应在允许范围内。也就是说，测量结果应该是可重复、可复现、可比较的。这对现代化生产、国内外贸易、人民生活、高科技武器系统研制等都是非常重要的。

(2) 准确性 准确性是计量工作的核心，是指测量结果与被测量真值的一致程度。其实，计量的一致性是在计量的准确性基础上的。量值的准确可靠，是计量的目的和归宿。由于实际上不存在完全准确无误的测量，因此在给出量值的同时，必须给出测量不确定度或允许误差范围，否则，所进行的测量的品质就无从判断，量值也就不具备充分的社会实用价值。所谓量值的准确，是指在一定的不确定度、误差极限或允许误差范围内的准确。

(3) 溯源性 溯源性是准确性和一致性的必要条件,是指任何一个测量结果或计量标准的量值,都能通过一条具有规定不确定度的连续比较链与计量基准联系起来,使所有的同种量值都可以按照这条比较链通过校准向测量的源头追溯,最后要溯源到同一源头——计量基准(国家基准或国际基准)。

(4) 法制性 法制性是一致性和准确性的保证。为了在全国范围内实现单位的统一和量值的准确,国家必须对统一使用的计量单位、复现单位量值的国家计量标准以及进行量值传递的手段、方法等做出法律上的规定,作为各行业共同遵守的准则,这就是计量的法制性。我国是通过政府制定的计量法律、法令来规范和约束计量活动和行为,各计量主管部门也可以根据自身特点和实际情况,制定相应的条例、办法等,与国家法律、法令配套形成自己的法规体系,保证本行业、本部门内计量的一致性和准确性的有效实现。法制性一方面体现在计量依法监督管理,即计量的法制管理,另一方面也体现在由法定的计量机构出具的证书、报告、测量结果均具有法律效力。在所有科学领域中只有计量学与法律、法规和行政管理结合得如此紧密,这也是计量的鲜明特色。

(5) 社会性 计量的社会性是由现代计量学是一门综合性的技术基础性的学科,涉及众多专业领域这一广泛性所决定的。计量与国民经济各部门、人民生活的各方面、商贸活动各领域有着密切的联系,对维护社会经济秩序具有重要的作用。计量的质量是各方各面产品、活动的质量的基础和保障条件。

2. 计量的管理特性

计量或计量技术的上述五个特性,也能反映出计量管理的特性,但单从计量管理的性质和特点方面看,计量管理还具有技术性、服务性、群众性、权威性等特点。

综上所述,计量是技术和管理的结合体,具有双重性。计量依靠计量技术作物质基础,实现单位量值的统一,同时又依靠计量管理的监督职能,保证计量制度的统一和量值的准确可靠。计量技术和计量管理是支撑计量的两根支柱,缺一不可。

通过分析计量的特性可见计量不同于一般的测量。测量是以确定量值为目的的操作,一般不具备、也不必具备计量的技术特性。所以,计量又严于一般的测量,在这个意义上可以狭义地认为,计量是与测量结果置信度有关的、与不确定度联系在一起的规范化测量。

第四节 计量学的分类

一、计量学的分类

由于计量学研究的领域和应用涉及诸多方面,因此可以将计量学分为多种不同的类别。例如:把涉及计量单位的换算、计量器具基本特性、测量数据处理等共性问题的内容称为通用计量学;把涉及长度、温度、硬度等特定量具体应用的内容称为应用计量学;把涉及自动测量、在线测量、动态测量等测量技术和测量方法的内容称为技术计量学;把涉及量的定义和单位的实现、复现等测量理论的内容称为理论计量学;把涉及计量工作中法制管理的内容称为法制计量学;把涉及计量在国民经济中作用和效益评估的内容称为经济计量学或效益计量学等。当前国际上趋向于把计量学分为科学计量、工程计量和法制计量三类,分别概括计量学的基础、应用和社会事业三方面的内容。这里计量学通常简称计量。

二、科学计量

科学计量是指基础性、探索性、先行性的计量科学研究，用最新的科学技术成果精确地定义和实现计量单位，并为科技创新和高科技的发展提供可靠的测量技术基础。科学计量属于精确科学，通常是国家计量研究机构的主要任务，包括计量单位与单位制的研究、计量基准与标准的研制、物理常量与精密测量技术的研究、量值溯源与量值传递系统的研究、量值比对方法与测量不确定度的研究等。定义单位和建立计量单位体系是科学计量的核心内容。

科学计量的标志性成果是科学家们花费一百多年的时间在米制的基础上研究建立了国际单位制（SI），并根据其基本单位和导出单位的复现，在各国建立起计量基准标准体系。追求单位定义在理论上和实用上不断完善，使复现的不确定度越来越小，在测量技术中普遍使用日新月异的现代高新技术，都是科学计量的努力目标。

三、工程计量

工程计量也称工业计量，是指各种工程、工业、交通运输、能源、信息等行业中的应用计量。例如：能源和原材料的物流和消耗计量测试，生产工艺流程的监控，产品（工程）质量与性能测试等。随着一系列高新技术的出现，促使若干物理量和化学量的测量从单参数向多参数、从静态量向动态量发展。计量测试技术和工艺加工控制技术相结合，加速了在线测量和自动控制的综合应用。近年来，同位素、激光、超导、计算机、新型传感器、纳米等新技术在现代化生产和工程计量技术中得到广泛应用，使量限向两端扩展。工程量标准的建立，大大加快了工程计量和测试技术的现代化。工程计量测试能力是发展生产力的重要因素，标志着国家的科学技术现代化水平和实力。

四、法制计量

国际法制计量组织（OIML）把“法制计量”界定为：“由公众权力机构或按其要求制定并实行一整套法定的、技术的及行政管理的程序，其目的是用法规或合同的方式来规定并保证与社会管理、贸易、健康、安全、环境等，有关测量工作的质量和可靠性”。我国 JJF 1001—1998“通用计量术语及定义”中把法制计量（Legal Metrology）定义为：“计量的一部分，即与法定计量机构所执行工作有关的部分，涉及到对计量单位、测量方法、测量设备和测量实验室的法定要求”。从上述定义可以看出，法制计量的内容主要有二：其一，国家政府机关通过制定、实施计量法律、法规、规章，对一部分计量单位、测量方法、测量（计量）器具、测量（计量）数据和测量实验室实行法定监督管理。其二，使用计量器具的单位，依据法规或合同规定，保证与贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测、资源控制、社会管理等有关测（计）量结果的公正性和可靠性，以取得用户的信任。

关于法制计量的范围，国际法制计量组织确定为需要大量测量、存在各方利益冲突、测量结果需要特殊信任的领域。主要包括商业贸易、服务、公用事业、医疗卫生、人身安全、环境监控、资源控制、特殊信任等各方面。事实上，随着科学技术的发展和社会进步，法制计量的范围将进一步扩大。至于各国在某个领域是否实行强制管理，其必要性和有效性，要根据目前掌握的技术手段以及实行强制管理所增加的财政支出和有关方面负担的可承受程度来决定。

综上所述,科学计量是计量学的基础部分,包括基础理论和基础设施,它既为工程计量提供测量技术手段,又为法制计量提供技术保障;工程计量是计量学应用于生产建设中的部分;法制计量是计量学在社会经济生活应用中受到法定管理的方面,它并不是与科学计量、工程计量并列的计量学中第三个组成部分,而是与这两者相交叉重叠的研究领域。

第五节 计量学的创立与发展

一、计量学的创立

现代计量学的创始,可追溯到17世纪前后,当时欧洲的科学迅速发展,物理学已发展成为一种测量科学或者叫做实验科学,已引入“物理量”的概念。物理量经过实际测量加以定义,并将相关的物理量建立数学关系,用来描述或论证物理现象,创立了科学理论,为计量学的发展奠定了基础。例如,伽利略创造了脉搏计、水柱温度计、流体静力学天平、望远镜等测量器具。帕斯卡在1653年提出帕斯卡定律,测定了大气压强量值,测得一个大气压强为76cmHg ($1\text{cmHg} = 1.3\text{kPa}$)。牛顿给质量、动量、惯性和力的基本概念以确切的科学定义,在1685年完成了万有引力定律和机械运动三定律的论证和描述,建立起完整的经典力学体系。牛顿力学对电磁学、热学等的研究产生重大影响,也为计量学的创始和测量技术的发展奠定了基石。1714年,德国物理学家华伦海特发明了水银温度计,并制定了华氏温标。1742年,瑞典物理学家摄尔西斯建立了摄氏温标。

从18世纪中期到末期,发生了以蒸汽机的广泛应用为标志的第一次技术革命。18世纪60年代,英国发明家瓦特、克拉克等在蒸汽机的研制和改进中,对蒸汽压力、热膨胀系数、燃料的燃烧效率、能量的转换等参数做了大量测试,掌握了热力循环理论和蒸汽机的工作原理。蒸汽机带动了各种机器的运转,同时出现了火车和轮船,使工业和交通大为改观,生产力也迅速提高。经典力学、热力学成为科技发展的理论基础,计量学中的力学、热学、几何量计量随之发展起来。

19世纪,进入了以电的应用为标志的第二次技术革命时期。欧姆于1827年发表了欧姆定律及其公式。1831年,法拉第相继发表了电磁感应定律、电解定律和磁光效应理论。其后,麦克斯韦在法拉第的实验研究基础上,发展了场的概念,预言了电磁波的存在,证明了定量描述电磁波的传播速度和光速相同,于1873年确立了电磁波理论。后来赫兹利用感应线圈的振荡电流产生了电磁波,并计算出电磁波速度和光速基本相同,发现电磁波和光波一样具有反射、折射、干涉等现象,证实了麦克斯韦的电磁理论。麦克斯韦电磁理论突破了经典力学的束缚,实现了人类对自然认识的又一次飞跃。在电磁学理论上,涌现出一大批电磁应用的创造发明,迅速推动了电磁计量、无线电计量的发展。这期间,热力学进一步发展,卡诺建立了热力循环理论,焦耳创立了焦耳定律,开尔文等人都对确立能量守恒和转化定律做出了贡献,为热力学第一定律打下基础。1850年,克劳修斯用精确的数学形式表述了热力学第二定律,最终形成了专门研究能量关系的学科——热力学。1869年,门捷列夫公布了元素周期律。1871年,列出了经过修改的第二张“化学元素周期表”,它揭示了宇宙物质构成的秘密,使化学知识纳入了科学的系统。门捷列夫曾留下一句名言:“科学从测量开始”。

1875年，“米制公约”的签订促进了各国计量制度走向统一，成为现代计量学创立的标志。

二、米制的产生及其发展

18世纪中叶，世界各国的计量制度和计量单位杂乱无章，科学家们使用各种计量单位来表述他们的实验结果，这种状况不利于交流，也影响科学研究。统一计量单位制度成为世界各国科学、文化、经济、交流的迫切要求，科学家们开始寻找一种适用于各国的通用计量单位制。

米制建立于18世纪90年代，是法国大革命的第一个科学成果。1790年，国民议会责成巴黎科学院组成计量改革委员会，委员由当时的一批著名科学家担任。有被称为近代化学之父的科学家、国民议会议员拉瓦锡尔为计量改革委员会主席，委员有天文学家拉普拉斯、数学家拉格朗日、物理学家库仑等。改革委员会成立了测量、计算、试验摆的振动、研究蒸馏水的重量（质量）以及比较古代计量制度五个小组。1791年，改革委员会提议以赤道到北极的地球子午线的一千万分之一作为基本长度单位。考虑到能在全世界通用，单位名称没有采用法语，而用古希腊语 Meter，意为测量。1米的长度与当时欧洲各国原有的旧制单位数值相近。面积和体积的单位分别是平方米和立方米的十进倍数单位与分数单位。质量或重量的单位是1立方分米的水在密度为最大时（温度为4℃）的质量（或重量）。由于这种单位制度完全以米为基础，因此称为米制。

1791年，国民议会采纳了以米为基本单位的计量制度的建议。随即，由德朗布尔（Delambre）和麦卡恩（Mechain）两位博士带队着手测量从法国敦刻尔克，经过巴黎到西班牙巴塞罗那之间的地球子午线弧长；拉瓦锡尔（Lavoisier）等人测量给定体积的水的质量（或重量）。由于测量地球子午线需要较长时间，1793年改革委员会又提议采用已有的测量数值建立临时的单位标准。并根据已有测量地球子午线长度的数据，设定了1米的长度，制作了一支黄铜尺作为米的临时标准。1794年5月，拉瓦锡尔逝世后，由他的助手们完成了4℃时1立方分米水的质量的准确测量，并用烧结铂制作一个千克砝码，即千克基准。1795年4月7日，国民议会颁布了采用米制的法令。

在测量地球子午线时，科学家们延长了测量的距离。向北，由敦刻尔克延长到与格林威治差不多的相同的纬圈上（约N51°）；向南，由巴塞罗那延长到地中海的福尔门特拉岛（约N38.5°）。整个子午线长为12.5°，其中点接近北极点和赤道之间的中央纬圈（即N45°）。可以说测量中是历尽了千辛万苦，还曾被西班牙警方误认为法国的密探。测量工作大概在1796年完成，归来时受到英雄般的欢迎，拿破仑给予极高评价：“胜利如过眼烟云，但这项成就将永存于世”。通过实测结果求得巴黎所在经度圈上一个象限的子午线长等于当时法国古尺5130740督亚士（Toise），以一个象限子午线的一千万分之一，即0.5130740督亚士（Toise）为1米的标准长度。根据测量结果制作了基准米尺。该尺用宽25.3mm、厚4mm的铂板制成，两端面之间的距离为1m。

1799年6月22日，米和千克这两件原器被保存在巴黎共和国档案局里（因而称为“档案局米”和“档案局千克”），并从法律上分别给出1m和1kg的值。事实上，不久发现这两个档案局原器的值都偏离了原来的定义。档案局米尺比地球子午线长度的四千万分之一短了约0.2mm；档案局千克等于1.000028dm³最大密度水的质量，比原来定义准确等于1dm³的

水的质量大 28mg。但是如果要重新测量地球子午线的长度很不容易，因此就直接用这两个档案局实物原器分别作长度单位米和质量单位千克的基准。

19 世纪后半期，米制已被欧洲、美洲的许多国家接受，把所有单位构成一种逻辑关系逐渐成为迫切要求。英国科学促进协会 (BAAS) 在关于单位制概念的发展中起了重要作用。该协会的标准委员会选定力学领域中的厘米、克和秒三个基本单位构成力学单位制 (GSX)，出现了第一个一贯单位制，但这个单位制只适用于力学领域。

1861 年，英国科学促进协会专门组织了一个委员会解决电学中的单位。法拉第、汤姆逊 (开尔文公爵)、麦克斯韦、韦伯等科学家都用力学量 (长度、时间、力) 和功的单位 (厘米、秒) 和克表示电学量的方程定义。1783 年，出现了绝对静电单位制 (CGSE) 和绝对电磁单位制 (CGSM)。两种单位制采用的基本单位都是厘米、克和秒，但由于导出单位选择的定义方程式不同，同一种物理量在两种单位制的量纲也不一样。为了解决这一矛盾，提出了高斯单位制。高斯制将所有的电学量都用 CGSE 单位制，所有的磁学量都用 CGSM 单位制。对于同时包含有电学量和磁学量的公式，则增加与真空中的光速 c 的有关系数，使全部电学量和磁学量的量纲和单位都能符合其物理含义。但是在其导出单位的量纲式中，经常出现分数指数，使用很不方便，于是，英国科学促进协会建议采用某些实用单位。

1881 年，第一次国际电学大会采用了安培、伏特和欧姆等实用单位，构成了“国际制”实用单位，并将安培和欧姆建立了实物标准。19 世纪末，陆续增加了库仑、法拉、焦耳、瓦特、亨利、韦伯、高斯、麦克斯韦等单位。这些实用单位在电学领域可以满足一贯性原则，但当它们和力学量一起出现时，就破坏了一贯性原则。1901 年，意大利科学家乔吉建议把米·千克·秒单位制中的力学单位和实用电学单位结合起来，形成包括长度、时间、质量和一个电学性质的量在内的四个基本量的一贯单位制，这个电学量单位可以取安培或欧姆。此建议受到科学界普遍重视，但对于第四个量和电学性质的单位的选择问题，有许多不同的见解。经过有关国际组织的长期讨论，1935 年国际计量委员会会议决定，选用安培作为第四个量的基本单位。下一步需要制定新的电学量单位方便而准确的换算因数，但由于第二次世界大战而未能做出最后决定。1946 年，国际计量委员会正式肯定了 1935 年关于采用实用单位制，即米·千克·秒·安培单位制 (MKSA) 的决定，后来成为国际单位制的一部分。

三、国际单位制的诞生

第二次世界大战以后，出现了进一步加强国际间科技、经济合作的总趋势。但在科教、商贸中存在着多种不同的计量单位制，多种单位制长期并存严重地影响了国际间的交流和合作。

1948 年，第九届国际计量大会责成国际计量委员会制定一种所有“米制公约”签署国都能接受的实用计量单位制。1954 年，第十届国际计量大会根据决定采用米 (m)、千克 (kg)，秒 (s)，安培 (A)，开氏度 ($^{\circ}\text{K}$) 和坎德拉 (cd) 六个单位为建立新单位制的基本单位。1956 年，国际计量委员会把上述六个基本单位作为基础的单位制称为“国际单位制”。1960 年第十一届国际计量大会正式定名为“国际单位制”，符号为“SI”。从 1795 年法国颁布采用米制起，到 1960 年国际单位制诞生，其间经历了一个半世纪多的漫长历程。

20 世纪，计量在世界范围内全面发展，技术飞速进步，各主要国家 (如：德国、苏联、英国、美国、日本国、法国等) 都建立起现代计量技术研究机构，许多国家在原有本国度量