

计量学基础

(修订版)

王立吉 编著

中国计量出版社

修订版前言

本书的第一版,原本是为我国第一所计量高等学校——中国计量学院所写的教材。承蒙该院以及有关高等院校与社会各界广大读者的厚爱,原书问世后,已印刷了多次。

此次修订再版,除对原书的内容进行了必要的调整与润色外,还补充了10多年来计量科技的新内容、重要进展与突出成就。比如,有的计量术语的名称与定义,虽已沿用了多年,但仔细推敲起来,总觉得不甚确切和稳妥,尤其是与其密切相关的术语之间缺乏协调和自洽。本书作为“计量学基础”专著,不能不予以必要的关注。至于增加的内容,比较集中的章节有概率分布、测量不确定度、计量测试的品质保证以及计量发展趋势等。

本修订版,力求保持原版的特色、注重基本概念和条理,使读者能够较全面和系统地认识计量学、熟悉和掌握计量所必需的基础知识,并概括地了解计量的发展趋势。不妥之处,请读者予以指正。

本书的修订再版,得到了中国计量出版社有关领导和陈小林等同志的大力支持,谨致诚挚的谢意!

作者

1997年2月于北京

原 版 前 言

计量学是关于计量理论与实践的知识领域,是一门综合性的学科,是现代科学的重要组成部分。计量学的形成和发展与科技的进步和生产的发展密切相关。科技越进步、生产越发展,就越需要计量,并推动计量的发展;而计量越发展,则越促进科技的进步和生产的发展。计量对社会发展和国计民生的积极作用与重要意义已日益明显,受到了世界各国的普遍重视。如今,可以毫不夸张地说,任何一个科技领域,任何一种生产过程,以至任何一项社会活动,都离不开计量。正如聂荣臻同志所指出的:科技要发展,计量须先行;没有计量,寸步难行。

近年来,我国的计量工作取得了很大的进展,获得了可喜的成果。我国计量工作的基本法——《中华人民共和国计量法》已于1985年9月正式公布。这标志着我国的计量事业进入了一个新的发展阶段。然而,比较全面和系统地论述计量学基础的著作,至今尚不多见。本书是根据中国计量学院培养计量专业人才的教學要求而编著的,主要目的在于使读者比较全面和系统地了解计量学,熟悉计量所必需的基础知识。

本书是参考国内外有关文献资料,并结合本人从事计量工作的体会写成的。由于水平所限,加之时间较紧,不妥之处在所难免,请读者批评指正。

本书的出版,承蒙陈宽基、倪伟清、徐孝恩以及陈小林等同志的热情支持与帮助,谨致以衷心的感谢!

作 者

1985年11月于杭州

DF 16/09

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 计量学	(1)
一、计量	(1)
二、计量学	(1)
第二节 计量的范围、内容与分类	(3)
一、计量的范围	(3)
二、计量的内容	(3)
三、计量的分类	(4)
第三节 计量的发展阶段	(5)
一、古典计量阶段	(5)
二、经典计量阶段	(9)
三、现代计量阶段	(9)
第四节 计量的特点、作用与意义	(10)
一、计量的特点	(10)
二、计量的作用与意义	(12)
第二章 计量单位制	(21)
第一节 计量单位与单位制	(21)
一、量、量制、量纲	(21)
二、计量单位与单位制	(22)
第二节 国际单位制	(24)
一、米制的起源与发展	(24)
二、国际单位制	(27)
三、国际单位制外的单位	(36)
第三节 我国的法定计量单位	(38)
一、法定计量单位的构成	(39)

二、法定计量单位定义	(40)
三、法定计量单位使用方法	(45)
四、量、数值及下角标	(54)
五、全面推行法定计量单位的意见	(56)
第三章 测量误差	(59)
第一节 常用计量术语	(59)
第二节 测量误差	(62)
一、测量误差的定义	(63)
二、测量误差的主要来源	(65)
三、测量误差的分类	(66)
四、间接测量的误差	(88)
五、测量误差的合成	(90)
第四章 测量不确定度、数据处理	(92)
第一节 测量不确定度	(92)
一、测量不确定度的概念	(92)
二、测量不确定度的分类	(93)
三、标准不确定度及其评定	(94)
四、合成不确定度	(96)
五、范围(扩展、展伸)不确定度	(97)
六、不确定度的报告	(97)
第二节 数据处理	(98)
一、等精度与不等精度测量	(99)
二、算术平均值与最小二乘法原理	(100)
三、有效数字及其运算规则	(102)
四、数值修约及其规则	(104)
五、测试数据的取舍	(106)
六、微小误差准则	(107)
七、已定系统误差的修正	(108)
八、测量结果	(109)
第五章 计量器具	(110)

第一节 计量器具及其分类	(110)
一、计量基准器具	(111)
二、计量标准器具	(113)
三、普通计量器具	(113)
四、计量器具的特征	(114)
第二节 计量器具的辅助设备	(115)
第三节 计量器具的制造、使用与维修	(116)
一、计量器具的制造与销售	(116)
二、计量器具的使用	(116)
三、计量器具的维修	(118)
第六章 量值传递、溯源与检定测试	(120)
第一节 量值传递	(120)
一、国家计量检定系统	(120)
二、量值传递的基本要求	(121)
第二节 溯源	(123)
第三节 检定测试	(124)
一、检定测试	(124)
二、检定测试的基本要求	(126)
三、检定测试的主要方法	(127)
四、检定测试中器具合格的判断	(130)
第四节 国际比对与检定	(133)
第七章 计量测试的品质保证	(135)
第一节 品质保证	(135)
一、计量测试品质保证是时代需求	(135)
二、计量测试品质保证的主要环节	(136)
第二节 量值传递或溯源的传统方式	(137)
一、逐级周期检定	(137)
二、巡回检定	(138)
三、利用标准物质、标准信号进行检定	(139)

第三节 新型量值传递或溯源方式——计量保证方案	(140)
一、计量保证方案	(140)
二、计量保证方案的实施	(140)
三、测量过程的统计控制	(143)
第八章 计量科技的主要领域(上)	(158)
第一节 几何量计量	(158)
一、长度单位“米”	(158)
二、几何量计量器具	(162)
三、阿贝原则	(164)
四、端度计量	(164)
五、线纹计量	(166)
六、角度计量	(167)
七、平直度计量	(169)
八、粗糙度计量	(170)
九、几何量计量动态	(176)
第二节 光学计量	(178)
一、光度计量	(178)
二、光辐射计量	(185)
三、激光计量	(186)
四、成像光学计量	(187)
五、色度计量	(187)
六、光学计量动态	(188)
第三节 电离辐射计量	(193)
一、电离辐射的基本概念	(195)
二、电离辐射计量的主要内容	(197)
三、电离辐射计量动态	(199)
第九章 计量科技的主要领域(中)	(200)
第一节 力学计量	(200)
一、质量计量	(200)

二、容量计量	(204)
三、密度计量	(205)
四、力值计量	(207)
五、重力计量	(210)
六、硬度计量	(212)
七、振动与冲击计量	(214)
八、力学计量动态	(216)
第二节 声学计量	(217)
一、声学计量的基本内容	(218)
二、声学计量的主要方法	(219)
三、声学计量的主要标准器	(226)
四、声学计量动态	(227)
第三节 热工计量	(227)
一、温度计量	(228)
二、压力计量	(236)
三、真空计量	(238)
四、流量计量	(241)
五、热物性计量	(242)
六、热工计量动态	(244)
第四节 化学计量	(245)
一、化学计量的基本特点	(246)
二、化学计量的主要内容	(246)
三、化学计量动态	(254)
第十章 计量科技的主要领域(下)	(255)
第一节 电磁计量	(255)
一、电学计量	(255)
二、磁学计量	(273)
三、电磁计量动态	(277)
第二节 无线电计量	(278)
一、无线电计量的特点	(279)

二、无线电计量的主要内容	(280)
三、无线电计量动态	(298)
第三节 时间频率计量	(299)
一、时间单位“秒”	(300)
二、时间频率基准、标准	(303)
三、时间频率的计量方法	(309)
四、时间频率计量动态	(311)
第四节 物理常数的测定	(312)
一、物理常数	(312)
二、物理常数的测定	(312)
三、物理常数测定动态	(317)
第十一章 计量管理	(319)
第一节 管理的一般概念	(319)
一、管理的对象、过程和目的	(319)
二、管理的基本原则	(320)
三、管理的作用和意义	(321)
第二节 计量管理的基本任务	(322)
一、计量管理的总任务	(322)
二、国家计量主管部门的主要职责	(323)
三、各部门、各级地方政府的计量管理机构的主要职责	(324)
四、企业、事业单位的计量管理机构的主要职责	(324)
第三节 计量管理方式	(325)
一、计量行政管理	(325)
二、计量科技管理	(326)
三、计量法制管理	(327)
附录：中华人民共和国计量法	(332)
第四节 国际计量组织	(337)
一、“米制公约”组织	(337)
二、国际法制计量组织	(339)
三、国际计量联合会	(342)

四、亚洲和太平洋地区计量规划组织	(345)
第十二章 计量发展趋势	(346)
第一节 我国的计量概况	(346)
一、近年来的主要成就	(347)
二、主要差距	(348)
第二节 计量发展趋势	(350)
一、由宏观到微观	(350)
二、由常态到超常态	(354)
三、由静态到动态	(356)
四、由手动到自动	(357)
五、由逐级周期量传到统计控制	(361)
六、由传统领域到新兴领域	(362)

第一章 绪 论

第一节 计 量 学

一、计 量

计量，过去在我国称为“度量衡”，其原始含义是关于长度、容积和质量^①的测量，主要器具为尺、斗和秤。尽管随着时代的前进，“度量衡”亦在不断地变化和发展，但仍难以摆脱历史遗留的局限性，以致不能适应科技、经济和社会发展的需要。于是，从50年代开始，便逐渐以“计量”取代了“度量衡”。可以说，“计量”是“度量衡”的发展，也有人称“计量”为“现代度量衡”。

人类为了生存和发展，必须认识自然、利用自然、改造自然，而自然界的一切事物都是由一定的“量”组成的，并且是通过“量”来体现的。或者说，“量”是一切现象、物体或物质可定性区别与定量确定的一种属性。因此，要认识五光十色的大千世界、为人类造福，就必须对各种“量”进行分析和确认，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。所以，可以说，计量是对“量”的定性分析和定量确认的过程。

二、计 量 学

计量学，概括地说，是关于测量理论与实践的知识领域，是

^① “质量”是一种量的名称，我国在生活和贸易中，通常习惯地将其称为“重量”。

现代科学的一个重要组成部分。

从学科发展来看，计量原本是物理学的一部分，或者说是物理学的一个分支。随着科技、经济和社会的发展，计量的概念和内容也在不断地扩展和充实，以致逐渐形成了一门研究测量理论与实践的综合性学科——计量学。

就学科而论，计量学又可分为：

(1) 通用计量学——涉及计量的一切共性问题而不针对具体被测量的计量学部分。例如，关于计量单位的一般知识（诸如单位制的结构、计量单位的换算等），测量误差与数据处理，测量不确定度、计量器具的基本特性等。

(2) 应用计量学——涉及特定计量的计量学部分。通用计量学是泛指，不针对具体的被测量；应用计量学则是关于特定的具体量的计量，如长度计量、频率计量等。

(3) 技术计量学——涉及计量技术，包括工艺上的计量问题的计量学部分。例如，自动测量、在线测量等。

(4) 理论计量学——涉及计量理论的计量学部分。例如，关于量和计量单位的理论、测量误差理论等。

(5) 品质计量学——涉及品质管理的计量学部分。例如，关于原料、材料、设备以及生产中用来检查和保证有关品质要求的计量器具、计量方法、计量结果的品质管理等。

(6) 法制计量学——涉及法制管理的计量学部分。例如，为了保证公众安全、国民经济和社会的发展，根据法律、技术和行政管理的需要而对计量单位、计量器具、计量方法和计量精确度（或不确定度）以及专业人员的技能等所进行的强制管理。

(7) 经济计量学——涉及计量的经济效益的计量学部分。这是近年来人们相当关注的一门边缘学科，涉及面甚广。例如，计量在社会生产体系中的经济作用和地位，计量对科技发展、生产率的增长、产品品质的提高、物质资源的节约、国民经济的管理、医疗保健以及环境保护方面的作用等。

当然，计量学的上述划分不是绝对的，而是突出了某一方面

的计量问题。在实际工作中，往往并不、也没有必要去严格区分。

第二节 计量的范围、内容与分类

一、计量的范围

计量的范围，在相当长的历史时期内，主要是各种物理量的计量测试。随着科技的进步、经济和社会的发展，计量已突破了传统的物理量的范畴，扩展到化学量以及工程量的计量测试。近年来，计量的发展更加迅速，以至囊括了生理量和心理量等的计量测试。可以说，一切可测量的计量测试，皆属于计量的范围。计量所涉及的科学领域，已从自然科学扩展到社会科学。

当前，比较成熟和普遍开展的计量科技领域有几何量（亦称长度）、热工、力学、电磁、无线电、时间频率、声学、光学、化学和电离辐射计量，即所谓的十大计量。

另外，随着现代科技的发展，一些新的计量领域，如生物工程、环保工程、宇航工程等计量测试，正在逐渐形成。

上述计量领域的划分是相对的，并无严格规定。有的国家将电磁（主要是关于直流和低频电磁量的计量测试）和无线电计量合在一起称为电学计量，也有的将电磁、无线电和时间频率计量合在一起统称为电学计量。再者，各计量领域不是孤立的，而是彼此联系、相互影响的。许多实际的计量测试问题，往往可能涉及两个甚至更多的计量领域。

二、计量的内容

计量的内容，概括地说，包括计量理论、计量技术与计量管理，并主要体现于下列方面：

- (1) 计量单位与单位制；
- (2) 计量器具，包括复现计量单位的计量基准、标准器具以及普通（工作）计量器具；

- (3) 量值传递、溯源与检定测试；
- (4) 物理常数以及材料与物质特性的测定；
- (5) 测量误差、测量不确定度与数据处理以及计量人员的专业技能；
- (6) 计量管理。

三、计量的分类

(一) 科学计量

科学计量主要是指基础性、探索性、先行性的计量科学研究，例如关于计量单位与单位制、计量基准与标准、物理常数、测量误差、测量不确定度与数据处理等。科学计量通常是计量科学研究单位，特别是国家计量科学研究单位的主要任务。

(二) 工程计量

工程计量，在国内外的计量文献中通常称为工业计量，系指各种工程、工业企业中的应用计量。例如，关于能源、原材料的消耗、工艺流程的监控以及产品品质与性能的计量测试等。工程计量涉及面广，是各行各业普遍开展的一种计量。

(三) 法制计量

法制计量，是为了保证公众安全，国民经济和社会发展，根据法制、技术和行政管理的需要，由政府或官方授权进行强制管理的计量，包括对计量单位、计量器具（特别是计量基准、标准）、计量方法和计量精确度（或不确定度）以及计量人员的专业技能等的明确规定和具体要求。

从实际工作来看，法制计量主要是涉及与安全防护、医疗卫生、环境监测和贸易结算等有利害冲突或需要特殊信任领域的强制计量。例如，关于衡器、压力表、电表、水表、煤气表、血压计以及血液中酒精含量（如司机和高空作业者上岗前与在岗期间血液中酒精含量）等的计量。

计量的上述分类是相对的。有人主张把科学计量称为基础计量，而将工程计量和法制计量统称为应用计量。这看来似乎概括

性较强，但实际上却忽略了法制计量的特殊性，它是工程计量所不能类比的；两者必须区别对待，不应相提并论。

第三节 计量的发展阶段

计量的发展，大体上可分为以下3个阶段。

一、古典计量阶段

古典计量阶段，是以权力和经验为主的初级阶段，没有或者没有充分的科学依据。

早在原始社会后期，由于生产力的逐渐提高，开始出现社会分工。先是农业和畜牧业分开，即所谓的第一次社会大分工；继之则是手工业和农业分开，即第二次大分工。社会分工带来了经常性的产品交换和以交换为目的的商品生产。我国古书《易·系辞》中所记载的“日中为市”，便反映了当时的产品交换情景。从我国陕西半坡村发掘的一个原始社会村落的遗址来看，屋基排列整齐，方圆有致，若没有一定的计量保证，显然是不可能的。最近，一个可与陕西半坡遗址相媲美的新石器时代文化遗址，经过几年的发掘，已在甘肃省秦安县大地湾初显于世。出土各类文物八千余件，其中有我国已收录的年代最早的绘画、记事符号和彩陶珍品。遗址中的一些房址保存相当完整，其中有的房屋设有主室、侧室、后室及门前附属建筑等，是我国已发现的年代最早的殿堂式建筑。室内地坪光洁平整，使用了人造轻骨料作集料的混凝土。经抗压试验，这种人工混凝土至今每方厘米仍能抗压一百公斤。这些珍贵的文化遗产，都是原始计量的佐证。

奴隶社会时期，生产力进一步提高，商品生产不断扩大，原始计量已逐渐形成。在我国，关于大禹治水的故事，几乎有口皆碑，是古代水利工程的佳话。若没有一定的计量知识，是不可想象的。相传当时大禹就使用了“准绳”和“规”、“矩”等计量器具。许多出土的商代青铜器，制作之精美、比例之匀称，亦为举

世罕见，皆是我国古代计量发展的物证。

封建社会时期，铁器和耕牛已普遍使用，生产力更加提高，计量亦随之有了较快的发展。在我国，秦商鞅于公元前344年监造的铜方升（现存上海博物馆），不仅作工精细，而且在其壁上刻有“爰积十六尊五分尊壹为升”的铭文，对升的容积作了明确的规定。公元前221年，秦始皇统一中国后，即颁布诏书，以最高法律的形式统一了全国的度量衡制度，使我国古代计量进入了一个新的历史时期，对封建社会的发展起了重要的作用，至今仍被广为传颂。据《汉书·律历志》记载，秦代的度量衡制度为：

度制：1引=10丈=100尺=1000寸=10000分；

量制：1斛=10斗=100升=1000合=2000龠；

衡制：1石=4钧，1钧=30斤，1斤=16两，1两=24铢。

可见，该制度在当时是比较先进的，其中的度制和量制的大部皆采用了十进制，尤为突出。秦代不仅颁布了度量衡制度，而且还实行了定期检定等严格的法制管理，以保证度量衡的精确统一。比如，规定各地使用的度量衡器具至少每年要校正一次，并将校正的时间定为每年的春分和秋分时节，因为届时的气温适宜，不冷不热，所谓“昼夜均而寒暑平”，对器具的影响较小，便于保证校正的精度。这种利用天然条件保持温度相对稳定的作法，是相当聪明而简易的，可以说是原始的“恒温”措施。另外，还明文规定了各种度量衡器具的允许误差。如果所使用器具的误差，超过了所规定的允许范围，便要受到处治，罚以凯甲或盾牌等。这样，计量已从原始的度量衡发展为比较完善的古典度量衡。直到十九世纪中叶，清朝末期，米制正式传入我国为止，两千多年的历代封建王朝的度量衡制度，基本上都是沿用了秦制。

在计量的古典阶段，作为计量水平主要体现的计量基准皆是相当简陋的，大体上可归纳如下。

（一）以人体的某一部分作为基准

例如，我国古代所谓的“布手知尺”、“掬手为升”，就是以部分人体作为基准的。河南安阳出土的两支商代象牙尺，一支长为

15.78 cm，另一支长为 15.80 cm，每支上都刻有十寸，每寸又都刻有十分，相当精密，现分别藏于中国历史博物馆和上海博物馆，是我国最早的尺实物，与历史文献中所记载的“布手知尺”相符，便是珍贵的例证。另外，“十发为程，十程为分”（程是我国古代的一种长度单位）的记载，则是以人的头发为基准的见证。

埃及古代的尺度是以人的胳膊肘到指尖的距离为依据的，称为“腕尺”，其长约 46 cm。

英国的“码”，是英国国王亨利一世将其手臂向前平伸，从其鼻尖到指尖的距离；英尺是英王查理曼大帝的脚长；英寸是英王埃德加的手姆指关节的长度。

德国在十六世纪曾将英尺定义为：“星期日立于教堂门首，礼拜完毕后，令走出教堂之男子 16 名，高矮不拘，随遇而定，各出左足前后相接，取其长度的十六分之一”。

上述这些，都是以人体的某部分为计量基准的典型事例。

（二）以动物的丝毛或某些能力为基准

例如，我国史书中关于“蚕所吐丝为忽”、“十忽为秒，十秒为豪，十豪为厘，十厘为分”，“豪，兔豪也，十豪为秭”，以及“十马尾为一分”的记载等，皆说明当时确曾以动物的丝毛等物作为计量基准。

英亩为二牛同轭一日翻耕土地之面积，便是以牛的翻地能力（数量）为基准的。

（三）以植物果实为基准

例如，我国古代曾以一黍为一分，十分为一寸，……等来定长度；又曾将一千二百颗黍子所占的体积定为容量单位“龠”，将一百颗黍子的质量定为质量单位“铢”，等等。

在英国，曾以“自穗之中间部分取大麦 36 粒，头尾相接排列之长度”为英尺的定义。

另外，在古代还有以一颗麦粒的质量来定义质量单位的，称为“谷”，并有一磅为七千谷之说。

再如，衡量宝石的质量单位“克拉”，即是以生长在地中海沿