

计量学基础

王立吉 编著

中国计量出版社

计量学基础

王立吉 编著

中国计量出版社

内 容 提 要

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編著的。书中系統、全面地介绍了計量学的基本原理、方法和技術。内容包括計量单位制、計量誤差与数据处理、計量器具、量值传递与檢定测试、計量管理；同时，分章介绍了长度、光学、电离辐射、力学、声学、热工、化学、电磁、无线电、时间频率等十大計量科技领域的基础知識。

本书可作为培养計量专业人才的教材，也可供各專業計量人員自学阅读，还可供高等院校相近專業師生参考。

計 量 学 基 础

王立吉 編著

—*

中国計量出版社出版

北京和平門外11区7号

中国計量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*

开本 850×1168/32 印张 9.875 字数 256 千字

1988年9月第1版 1988年9月第1次印刷

印数 1—15 000

ISBN 7-5026-0152-X/TB·130

定价 3.20 元

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，并推动计量学的发展；而计量学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学要求而编著的，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

目 录

第一章 绪论.....	(1)
第一节 计量学.....	(1)
第二节 计量的特点、作用与意义.....	(5)
一、计量的特点.....	(5)
二、计量的作用与意义.....	(7)
第三节 常见计量学名词.....	(17)
第二章 计量单位制.....	(23)
第一节 计量单位与单位制.....	(23)
一、量、量制、量纲.....	(23)
二、计量单位与单位制.....	(24)
第二节 国际单位制.....	(25)
一、米制的起源与发展.....	(26)
二、国际单位制.....	(29)
第三节 我国的法定计量单位.....	(38)
一、中华人民共和国法定计量单位.....	(38)
二、法定计量单位定义.....	(41)
三、法定计量单位使用方法.....	(45)
四、量、数值及下角标的使用规则.....	(54)
五、全面推行法定计量单位的意见.....	(56)
第三章 计量误差与数据处理.....	(59)
第一节 计量误差.....	(59)
一、计量误差的定义.....	(59)
二、计量误差的分类.....	(62)
三、间接计量的误差.....	(74)
四、计量误差的合成.....	(76)
五、微小误差准则.....	(78)
六、计量不确定度.....	(79)

第二节 数据处理.....	(80)
一、等精度与不等精度计量	(80)
二、算术平均值与最小二乘法原理	(81)
三、有效数字及其运算规则	(84)
四、数字的舍入规则	(86)
五、测试数据的取舍	(87)
六、已定系统误差的修正	(88)
七、计量结果	(88)
第四章 计量器具	(89)
第一节 计量器具及其分类.....	(89)
一、计量基准.....	(90)
二、计量标准.....	(95)
三、普通计量器具	(95)
第二节 计量器具的制造、使用和维修	(97)
一、计量器具的制造	(97)
二、计量器具的使用	(97)
三、计量器具的维修	(99)
第五章 量值传递与检定测试	(100)
第一节 量值传递.....	(100)
一、国家计量检定系统	(100)
二、量值传递的基本方法.....	(100)
第二节 检定测试.....	(103)
一、计量检定规程	(103)
二、检定测试的基本条件	(104)
三、检定测试的主要方法	(105)
四、检定测试中器具合格的判断.....	(108)
第三节 国际比对与检定.....	(111)
第六章 计量科技的主要领域 (上)	(114)
第一节 几何量计量.....	(114)
一、长度单位“米”	(115)
二、几何量计量器具	(119)
三、阿贝原则.....	(119)

四、端度计量	(120)
五、线纹计量	(121)
六、角度计量	(122)
七、平直度计量	(124)
八、粗糙度计量	(125)
九、几何量计量动态	(129)
第二节 光学计量	(132)
一、光度计量	(133)
二、光辐射计量	(138)
三、激光计量	(139)
四、成象光学计量	(140)
五、色度计量	(141)
六、光学计量动态	(141)
第三节 电离辐射计量	(143)
一、电离辐射的基本概念	(144)
二、电离辐射计量的主要内容	(146)
三、电离辐射计量动态	(148)
第七章 计量科技的主要领域 (中)	(149)
第一节 力学计量	(149)
一、质量计量	(149)
二、容量计量	(152)
三、密度计量	(154)
四、力值计量	(156)
五、重力计量	(159)
六、硬度计量	(161)
七、振动与冲击计量	(163)
八、力学计量动态	(165)
第二节 声学计量	(166)
一、声学计量的基本内容	(166)
二、声学计量的主要方法	(168)
三、声学计量的主要标准器	(175)
四、声学计量动态	(175)

第三节 热工计量	(176)
一、温度计量.....	(177)
二、压力计量.....	(181)
三、真空计量.....	(183)
四、流量计量.....	(186)
五、热物性计量.....	(188)
六、热工计量动态.....	(190)
第四节 化学计量	(190)
一、化学计量的基本特点.....	(192)
二、化学计量的主要内容.....	(192)
三、化学计量动态.....	(200)
第八章 计量科技的主要领域 (下)	(201)
第一节 电磁计量	(201)
一、电学计量.....	(201)
二、磁学计量.....	(217)
三、电磁计量动态.....	(222)
第二节 无线电计量	(223)
一、无线电计量的特点.....	(224)
二、无线电计量的主要内容.....	(225)
三、无线电计量动态.....	(243)
第三节 时间频率计量	(243)
一、时间单位“秒”.....	(245)
二、时间频率基准、标准.....	(248)
三、时间频率的计量方法.....	(251)
四、时间频率计量动态.....	(253)
第四节 物理常数的测定	(253)
一、物理常数.....	(253)
二、物理常数的测定.....	(254)
三、物理常数测定动态.....	(259)
第九章 计量管理	(260)
第一节 管理的一般概念	(260)
一、管理的对象、过程和目的.....	(260)

二、管理的基本原则	(261)
三、管理的作用和意义	(263)
第二节 计量管理的基本任务	(263)
一、计量管理的总任务	(264)
二、国家计量主管部门的主要职责	(265)
三、各部门、各级地方政府的计量管理机构的主要职责	(265)
四、企业、事业单位的计量管理机构的主要职责	(266)
第三节 计量管理的主要方式	(266)
一、计量的行政管理	(266)
二、计量的科技管理	(267)
三、计量的法制管理	(268)
附录：中华人民共和国计量法	(275)
第四节 国际计量组织	(280)
一、“米制公约”组织	(280)
二、国际法制计量组织	(283)
三、国际计量技术联合会	(285)
四、亚洲和太平洋地区计量合作组织	(287)
五、经互会计量分组委员会	(288)
六、西欧计量协会	(288)
第十章 我国的计量概况与展望	(289)
第一节 我国的计量概况	(289)
一、近年来的主要成就	(290)
二、主要差距	(291)
第二节 展望	(300)

第一章 绪 论

第一节 计 量 学

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、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，过去在我国称为“度量衡”，其原始含义是关于长度、容积和质量的计量，主要器具为尺、斗、秤。随着科技的进步、生产的发展，计量的概念和内容在不断地变化和发展。

人类为了生存和发展，必须认识自然、利用自然、改造自然。计量正是达到这种目的的一种重要手段。世间任何事物，都是通过一定的“量”来体现的；只有通过计量，才能得出具体的量值。

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平方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。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”，完全相符。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 = 1 000 寸 = 10 000 分；

量制：1 斛 = 10 斗 = 100 升 = 1 000 合 = 2 000 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，以保证度量衡的准确统一。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。

封建社会崩溃，开始了资本主义时期，进而向社会主义、共产主义发展。由于科学技术和社会生产的迅速发展，对计量的要求越来越高，传统的古典度量衡已远远不能满足时代的需要。于是，以新理论为基础，以新技术为条件的现代计量，便逐渐形成和发展起来（参见本章第二节），以致出现了一门新兴的、综合性的学科——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与被计量的具体量无关的计量学部分。例如，关于计量单位的一般理论和实际问题（单位制的结构、公式中计量单位的换算）、计量误差与数据处理、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、不涉及具体的被计量的量，而应用计量学则是关于特定量的计量，如长度计量、时间频率计量等。

(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。

(4) 理论计量学——涉及计量理论问题的计量学部分。例如，关于量和计量单位的理论、计量误差理论、计量信息论等。

(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、器具、工业设备以及在生产中用来检查和确保有关品质要求的计量方法、计量器具、计量结果等。

(6) 法制计量学——为了保证公众安全、国民经济和适当的计量准确度，根据技术和法律要求而涉及计量单位、计量方法和计量器具的计量学部分。

(7) 经济计量学——关于计量的经济效益的计量学部分。这是近年来出现的一门边缘学科，涉及面甚广。比如，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、产品质量的提高、物质资源的节约、国民经济的管理、卫生保健以及环境保护等方面的作用等。

当然，计量学的上述分类不是绝对的，而是突出了某一方面的计量问题。在实际研究和具体计量中，往往并不、也没有必要去严格区分。

计量学的范围，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、生产的发展，计量学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。近年来，计量学的发展更加迅速，以至囊括了生理量和心理量等的计量。可以说，一切可计量的量的计量测试，皆属于计量学的范围。计量学所涉及的科学领域，已从自然科学扩展到社会科学。

计量学研究的基本内容有：

计量单位与单位制；

复现计量单位的基准、标准的建立、复制与保存，以及普通计量器具；

量值传递与检定测试；

计量误差（计量不确定度）与数据处理，以及计量人员的计量技能；

物理常数和材料与物质特性的测定；

计量管理等。

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）、力学、热工、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，一些新的计量领域正在逐渐形

成，如生理量及心理量的计量等。

上述的计量领域，并不是孤立、绝对的，而是彼此联系、相互影响的。许多实际的计量问题，往往可能涉及到两个甚至几个计量领域。

第二节 计量的特点、作用与意义

前已提及，计量，过去在我国称为度量衡，其原始含义为长度、容积、质量的计量，主要器具为尺、斗、秤。虽然随着社会的发展，其含义亦在不断变化和发展，但仍无法摆脱历史遗留的局限性，不能适应现代科技和生产发展的需要。于是，从五十年代起，便逐渐以“计量”取代“度量衡”。这是必要的。可以说，计量是度量衡的发展；也可以说，计量是现代度量衡。显然，“计量”比“度量衡”更确切、更概括、更科学。这是毫无异议的。

从概念上说，计量学是关于计量理论与实践的知识领域；计量是为确定量值而进行的一组操作（这里对量值和操作未加任何限定，是泛指）；而测试，则是具有一定探索（试验）性的计量。近年来，往往将不是严格按照约定规程或成熟方案进行的计量统称为测试。

一、计量的特点

概括起来，计量应具有下列基本特点。

（一）准确性

准确性是计量的基本特点，它表征的是计量结果与被计量量的真值的接近程度。严格地说，只有量值，而无准确程度的结果，不是计量结果。也就是说，计量不仅应明确地给出被计量量的值，而且还应给出该量值的误差范围（不确定度），即准确性。否则，量值便不具备明确的社会实用价值。所谓量值的统一，也是指在一定准确范围内的统一。

（二）一致性

计量单位的统一，是量值统一的重要前提。无论在任何时

间、地点、利用任何方法、器具，以及任何人进行计量，只要符合有关计量所要求的条件，计量结果就应在给定的误差范围内一致。否则，计量将失去其社会意义。计量的一致性，不仅限于国内，而且也适于国际。

（三）溯源性

在实际工作中，由于目的和条件的不同，对计量结果的要求亦各不相同。但是，为使计量结果准确一致，所有的量值都必须由相同的基准（或标准）传递而来。换句话说，任何一个计量结果，都能通过连续的比较链与原始的标准器具联系起来。这就是溯源性。“溯源性”是“准确性”和“一致性”的技术归宗。因为，任何准确、一致都是相对的，是与当代的科技水平和人们的认识能力密切相关的。也就是说，“溯源”可以使计量科技与人们的认识相对统一，从而使计量的“准确”与“一致”得到基本保证。就一国而论，所有的量值都应溯源于国家基准（或标准）；就世界而论，则应溯源于国际基准（或标准）或相应的约定标准。否则，量出多源，不仅无准确一致可言，而且势必造成技术上和应用上的混乱，以致酿成严重的社会后果。

（四）法制性

计量本身的社会性就要求有一定的法制保障。也就是说，量值的准确统一，不仅要有一定的技术手段，而且还要有相应的法律和行政管理，特别是那些对国计民生有明显影响的计量，更必须有法制保障。否则，量值的准确统一便不能实现，计量的作用便无法发挥。

可见，严格地说，计量是量值准确统一的测量；计量源于测量，而又严于一般测量。过去，所谓狭义计量，主要是指计量单位及其基准、标准与量值传递等；如今，广义计量，则包括了所有的测量。因而在实际工作或文献资料中，往往并不、也没有必要去严格区分“计量”与“测量”。国内如此，国际亦如此。顺便提一下，在翻译外文资料时，比如英文 measurement，可译为“计量”，也可译为“测量”，视具体情况和惯例而定。不过，从

发展的角度看，似以统一用“计量”为好。

二、计量的作用与意义

随着科技的进步、生产的发展，计量的作用和意义已日益明显。下面略举几例，便可见一斑。

（一）计量与科学技术

众所周知，科学技术是人类生存和发展的一个重要基础。没有科学技术，便不可能有人类的今天。任何科学技术都是为了探讨、分析、研究、掌握和利用事物的客观规律；而所有事物的基础都是“量”，体现形式仍然是“量”。为了准确地获得量值，只有通过计量。比如，哥白尼关于天体运行的学说，只是在伽俐略发明了望远镜、进行了实际观察之后才得以确立的；著名的万有引力定律，尽管早已被牛顿所揭示，但直到百年之后，经过实际计量的验证，才被确认；爱因斯坦的相对论，也是在频率精密计量的基础上才得到了比较明确的验证；李政道和杨振宁关于弱相互作用下宇称不守恒的理论，也是吴健雄等人在美国标准局进行了专门的计量测试才验证的。总之，从经典的牛顿力学到现代的量子力学，各种定律、定理，都是经过实际验证才得以确立或被承认的。计量正是所有验证的技术基础与重要手段。

历史上三次大的技术革命，都充分地依靠了计量，同时也促进了计量本身的发展。以蒸汽机的广泛应用为主要标志的第一次技术革命，导致以机器为主的工厂取代了以手工为基础的作坊，使生产力得以迅速的提高，从而确立了资本主义的生产方式。当时，经典力学和热力学是社会科技发展的重要理论基础。在蒸汽机的研制和应用的过程中，都需要对蒸汽压力、热膨胀系数、燃料的燃烧效率、能量的转换等进行大量的计量测试。力学和热工计量，就是在这种情况下发展起来的。另外，机械工业的兴起，使几何量的计量得到了进一步的发展。

以电的产生和应用为基本标志的第二次技术革命，更加推动了社会生产的发展。欧姆定律、法拉第电磁感应定律以及麦克斯

韦电磁波理论等,为电磁现象的深入研究和广泛应用、电磁计量和无线电计量的开展,提供了重要的理论基础。例如,1821年西贝克发现的热电效应,为热电偶的诞生奠定了物理基础;而各种热电偶的研制成功,则对温度计量、电工计量以至无线电计量等提供了一种重要手段,促进了相应科技的发展。为了实际计量地球运动的相对速率,迈克尔逊等人利用物理学的成就,研制出了迈克尔逊干涉仪,从而为长度计量提供了一个重要方法。1892年,迈克尔逊用镉光(单色红光)作为干涉仪的光源,计量了保存于巴黎的铂铱合金标准米尺的长度,获得了相当精确的结果(等于1 553 163.5个红光波长)。直至近百年后的今天,利用各种干涉仪精密计量长度,仍然是几何量计量的一个重要方法。普朗克关于能量状态的量子化假说,指出物体在辐射和吸收能量时,其带电的线性谐振子可以和周围的电磁场交换能量,以致能从一个能级跃迁到另一个能级状态,并且最小能量子的能量为 $\Delta E = h\nu$ (h ——普朗克常数, ν ——频率)。爱因斯坦在普朗克假说的基础上,提出了光不仅具有波动性,而且还具有粒子性,即光是以速度 c 运动的粒子(光子)流,其最小单元(光子)的能量为 $\Delta E = h\nu$,从而说明不同频率的光子具有不同的能量。上述理论成功地解释了光电效应,成了热辐射计量的基础,同时也使计量开始从宏观进入微观领域。

随着量子力学、核物理学的创立和发展,电离辐射计量逐渐形成。核能及化工等的开发与应用,导致了第三次技术革命。在这个时期,科学技术和社会生产的发展更加迅速。原子能、化工、半导体、电子计算机、超导、激光、遥感、宇航等新技术的广泛应用,使计量日趋现代化,由经典计量进入量子计量的新阶段,计量的宏观实物基准逐步向自然(量子)基准过渡。新的米定义和原子频标的建立,有着相当重要的意义。长度和频率的精密测定,促进了现代科技的发展。比如光速的测定、原子光谱的超精细结构的探测、航海、航天、遥感、激光等许多科技领域,都是以频率和长度的精密计量为重要基础的。