

计量技术与应用

JILIANG JISHU YU YINGYONG

全卫国 苏杰 赵文杰 编著



中国质检出版社
中国标准出版社

计量技术与应用

全卫国 苏 杰 赵文杰 编著

中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

计量技术与应用/仝卫国, 苏杰, 赵文杰编著. —北京: 中国质检出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-5026-3998-3

I. ①计… II. ①仝… ②苏… ③赵… III. ①计量—基本知识 IV. ①TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 073598 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了计量学的基本理论及其实际应用。全书共 11 章, 主要阐述了计量学基础知识, 包括基本概念、计量检定和计量管理等问题; 计量技术的实际应用, 主要是电力系统相关参数的计量, 包括热工参数如温度、压力和流量的计量原理及方法, 电磁参数和电能的计量原理及方法; 常用计量仪器的原理及使用。

本书可作为工业计量与管理部门工程技术人员、相关领域科技工作者的技术参考, 也可作为高等院校相关专业的教学用书及自学参考书。

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)64275323 发行中心: (010)51780235

读者服务部: (010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 20.25 字数 485 千字

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月第一次印刷

*

定价 48.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

前 言

计量学的原理与应用是现代工业发展的技术基础，也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志。随着科学技术的发展和工业自动化水平的提高，对计量技术的要求也不断提高。现代工业企业对计量技术的重视程度不断提高，对专业的计量技术人员的需求也不断增加。本书正是在这一背景下组织编写的。

本书编写过程中，注重计量学原理等基础性内容的论述，使读者对计量学基础知识有一个系统了解，从而为计量技术的实际应用打下坚实的基础。

计量技术在实际应用中的重要性不断提高，本书较为全面地论述了计量技术在电力行业的应用，主要侧重于热工参数与电磁参数的实用计量技术。在应用计量学的十大分类专业中，系统全面地论述了其中的两个专业，并对其他专业也有涉及，所以，本书既可以作为电力行业计量从业人员的技术参考，也可作为其他行业计量技术人员提供借鉴。本书还可作为大专院校相关专业，如测控技术与仪器、工业自动化、计量测试技术等专业学生的教材和教学参考书，推荐学时为40~60学时。

本书主要内容包括计量学基础、计量技术应用和常用计量仪器原理三部分。计量学基础主要包括：计量学概论；量和单位；量值传递和计量检定；计量检定方法；计量的管理与监督。计量技术应用包括：热工参数，如温度、压力和流量的计量检定技术和方法；电磁参数和电能参数的计量检定技术和方法。常用计量仪器原理部分则包括了常用的电位差计、电桥、检流计、数字万用表和信号发生器的构成原理及使用方法。

全书由仝卫国、苏杰和赵文杰共同编写完成，由仝卫国负责组织和统稿工作。在编写过程中得到了很多领导、专家以及同事和学生的帮助支持，在此表示感谢。

本书在编写过程中，力图做到内容的科学性、系统性和实用性，以适应工程技术人员实际工作及有关专业学生系统学习的需要。

由于编者水平所限，书中的疏漏及错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2014年11月

目 录

第 1 章 计量学概论	(1)
1.1 计量与计量学	(1)
1.2 计量的特点及作用	(2)
第 2 章 量和单位	(7)
2.1 量与量纲	(7)
2.2 计量单位	(8)
2.3 国际单位制基本单位	(15)
第 3 章 量值传递与计量检定	(24)
3.1 量值传递	(24)
3.2 计量检定	(31)
第 4 章 计量检定方法	(38)
4.1 直接计量法和间接计量法	(38)
4.2 直接比较法和替代计量法	(40)
4.3 微差计量法和零位计量法	(41)
4.4 静态计量和动态计量	(42)
4.5 其他计量方法	(43)
第 5 章 计量管理与监督	(45)
5.1 计量管理的任务及体系	(45)
5.2 计量管理的内容与方式	(47)
第 6 章 温度计量	(49)
6.1 概述	(49)
6.2 ITS-90 国际温标	(53)
6.3 标准温度计	(60)
6.4 热电偶温度计的检定	(77)
6.5 热电阻温度计的检定	(84)
6.6 辐射高温计的检定	(92)
第 7 章 压力计量	(104)
7.1 概述	(104)
7.2 压力标准器	(110)
7.3 常用压力计的检定	(141)
第 8 章 流量计量	(157)
8.1 概述	(157)

8.2	静态容积法水流量标准装置	(165)
8.3	静态质量法液体流量标准装置	(172)
8.4	标准体积管流量标准装置	(176)
8.5	气体流量标准装置	(180)
8.6	标准节流装置的检定	(185)
第 9 章	电磁参数的计量	(200)
9.1	概述	(200)
9.2	电学量的计量	(210)
9.3	磁学量的计量	(231)
第 10 章	电能的计量	(239)
10.1	概述	(239)
10.2	电能计量方法	(242)
10.3	常用电能表的检定	(259)
第 11 章	常用计量仪器	(274)
11.1	直流电位差计	(274)
11.2	电桥	(280)
11.3	磁电系检流计	(292)
11.4	数字万用表	(298)
11.5	信号发生器	(305)
参考文献		(316)

第 1 章 计量学概论

1.1 计量与计量学

1.1.1 计量与计量学概述

随着人类生产实践和社会活动的不断发展，对计量的需求开始萌发并不断发展。在我国古代，计量被称作“度量衡”，且仅限于用“尺、斗、秤”进行的计量，即长度、体积和质量的计量。随着科学技术和生产力的不断发展，计量的适用范围日益扩大，内容不断充实，计量学已远远超出了“度量衡”的范畴。我国现代计量测试工作始于 20 世纪 50 年代，经过数十年的发展和积累，已建成了门类齐全、覆盖全国的计量测试网络和体系，在生产、科研和经济贸易中发挥着重要的作用。

一般认为，计量就是用一个规定的标准已知量与同类型的未知量相比较而加以测定的过程，是实现单位统一和量值准确可靠的测量。在一定意义上，计量等同于测量，在英文表示上都是同一个词（measurement）。但计量和测量之间还是存在着很大的区别，如计量本身具有法制的含义，而测量仅指为确定被测量值而进行的全部操作，不具有法制含义。

计量学是关于测量的科学。它也是关于测量理论与实践的一门学科，是现代科学的重要组成部分。计量学的研究内容概括起来主要有 3 个方面，即计量理论、计量技术和计量管理。具体内容包括：

- （1）研究计量单位及其基准、标准的建立、复制、保存和使用；
- （2）研究计量方法和计量器具的计量特性；
- （3）研究计量的不确定度；
- （4）研究计量人员的计量能力以及计量法制和管理。

此外，计量学的研究内容也包括研究物理常数、标准物质和材料特性的准确测定等。随着生产发展和科技进步，计量学的内容也会不断丰富和发展。

1.1.2 计量学的分类

（1）目前，我国按计量专业划分为几何量、热工、力学、电磁学、电子学、时间频率、电离辐射、光学、声学、化学等十大计量领域，每一领域又由若干分项技术组成。

（2）根据任务的性质，计量学又可分为通用计量学、理论计量学、应用计量学和法制计量学等。

其中，通用计量学研究的是计量学中带有共性的问题。如计量单位的一般知识，单位的换算和单位制；测量误差与数据处理及测量的不确定度；计量器具的计量特性问题等。

理论计量学是关于计量理论问题的计量学。如关于量和计量单位的理论、计量误差理论、计量信息论等。

应用计量学研究的是计量学在特定领域中的应用，是涉及具体物理现象的计量技术。如天文计量、工业计量、气象计量、海洋计量、医疗计量等。

法制计量学研究的是与计量单位、计量器具和计量方法有关的法制、技术和行政管理。如确定法定计量单位、法定计量机构；建立法定计量基准和标准；制定和贯彻计量法律和法规，进行计量检定；对制造、修理、销售、进出口和使用中的计量器具实行依法管理；保护国家、集体和公民免受不准确和不诚实测量的危害；以立法形式实行强制的计量监督等。

(3) 当前，国际上趋向于把计量学分为科学计量、工程计量、法制计量，分别代表计量基础、应用和政府起主导作用的社会事业 3 个方面。

科学计量主要是指基础性、探索性、先行性的计量科学研究，通常用最新的科技成果来精确地实现计量单位，并为最新的科技发展提供可靠的测量基础。科学计量通常是国家计量科学研究单位的主要任务，包括计量单位与单位制的研究、计量基准与标准的研制、物理常数与精密测量技术研究、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。

工程计量也称为工业计量，是指各种工程、工业企业中的实用计量。如关于能量、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。工程计量涉及面甚广，随着产品技术含量提高和复杂性的增大，为保证经济贸易全球化所必须的一致性和互换性，它已成为生产过程控制不可缺少的环节，是各行各业普遍开展的一种计量。工程计量测试能力实际上是一个国家工业竞争力的重要组成部分。

法制计量的主要特征是政府主导，即由政府或代表政府的机构管理，它还有一个特征是直接传递到公众一端，即直接与最终用户的计量器具及其测量结果有关。法制计量主要涉及与安全防护、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等的计量。

(4) 国际法制计量组织则根据计量学的应用领域，将其分为工业计量学、商业计量学、天文计量学、医用计量学等。

当然，计量学的上述划分不是绝对的，而是突出某一方面的计量问题。在实际工作中，往往没有必要去严格区分。

1.2 计量的特点及作用

1.2.1 计量的特点

概括起来说，计量应具有准确性、一致性、溯源性和法制性等 4 个基本特点。

(1) 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测量的真值的接近程度。计量不仅应给出被测量的量值，而且还要给出该量值的不确定度（或误差范围），即准确度。否则，计量结果便不具备充分的社会使用价值。所谓量值统一，即是指在一定准确程度内的统一。

(2) 一致性。计量单位的统一是量值一致的重要前提。在任何时间，任何地点，采用任何计量方法，使用任何计量器具以及任何人进行计量，只要符合计量的有关要求，计量结果就应在给定的不确定度（或误差范围）内一致。计量的一致性，不仅适用于国内计量，也可适用于国际间的计量。

(3) 溯源性。为了保证计量结果的准确一致，所有同种类的量值都必须由同一个计量基准（或原始标准）传递而来。也就是说，任何一个计量结果，都能通过连续的比较而溯源到计量基准，这就是溯源性。可以说，溯源性是准确性和一致性的技术保证。在一个国家内，所有的量值都应溯源到国家计量基准；在国际上，则应溯源到国际计量基准或约定的计量基准。否则，量值出于多源，不仅无准确一致可言，而且会造成技术和应用上的混乱，以致酿成严重后果。

(4) 法制性。计量本身的社会性就要求有一定的法制保障。量值的准确一致，不仅要求有一定的技术手段，而且还要有相应的法律、法规和行政的管理。特别是那些对于国计民生有显著影响的计量，诸如社会安全、医疗保障、环境保护以及贸易结算中的计量，更必须要有法制的保障。否则，量值的准确一致便不能实现，计量的作用也无从发挥。

1.2.2 计量与相关概念

1.2.2.1 计量与测量

从定义上看，测量是通过实验获得并可合理赋予某量一个或多个量值的过程；计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动。计量涉及整个测量领域，并按法律规定，对测量起着指导、监督、保证的作用。

由于计量也是两种物质的直接或间接的比较过程，从这一意义上说，计量是测量的组成部分。不同的是：一般的技术测量是指用已知的标准单位对不明量值的物质进行比较，以求得该物质的数量；测量的任务是给出明确的数量概念。而计量是指用标准器具对已知量值的同类量进行比较，实现正确的测量；其任务是对测量结果给出可靠性概念，起到统一量值的作用，从技术上保证测量结果的准确和一致，在数量上和质量上正确地反映客观物质的真实情况，使人们得到一个正确的认识。可以说，计量是一种特定的测量，进行计量不仅是为了确定量值以比较量的大小，而且也是为了统一量值。

1.2.2.2 计量与测试

测试是具有试验研究性质的测量。测试的范围很广，其往往是对一种新事物在没有固定成熟的单位量值或测量手段和测量方法的情况下进行的一种探索性的测量。有的测试项目可用现有的计量手段，即利用已有的基准器、标准器去解决；有的测试项目需要研究一些新的测试技术、测试方法或测试手段去解决。从历史的发展来看，人们要获得对客观物质数量方面的认识，一般都是先从测试开始，经过反复的试验和多种方法的比较，形成一种公认的、标准的单位量值或最妥善的测试方法和手段。

计量、测量、测试三者有着密切的关系。计量是搞好测量的保证，测量是计量效果的具体体现；计量为测试研究提供基础条件，测试为计量开拓新的领域，提供新的技术手段和方法；测试是测量工作的先导，测量是测试工作的成熟化、固定化。

1.2.2.3 实验与试验

在计量或测量过程中不可避免的要进行相关的实验或试验，两者之间存在着一定的差

别。从定义上讲，实验是科学研究中，为检验某一理论或假设而进行的某种操作或从事的某种活动；而试验是为了考察某事物的效果或性能而从事的某种活动。

实验是对抽象的知识理论所进行的实际操作，用以证明其正确性或推演出新的结论，有尝试新的或未知知识的含义。试验是为了确定某一具体问题所进行的工作，是一种常规性的检验操作。相比较而言，实验的范围较广，主要是验证已形成的理论，进行的时间相对较短；试验的范围较窄，用以验证新的知识或事物，可能进行相对较长的时间。实验不一定是试验，但试验一定要实验。

1.2.3 计量在电力行业中应用的意义

随着我国经济的发展和人民生活水平的不断提高，对电力的需求也在不断增长，电力生产企业的生产负荷不断增加，对计量工作的要求也在不断提高。电力行业计量系统的建立、标准量具和专用测试装置的使用、检定规程和技术规范的制定等都需要根据本行业的特点按不同要求分别加以确定，特别是随着许多新技术的开发和应用，计量测试工作呈现出许多不同于以往的新景象。

在电力系统中，发电厂需要测量大量的过程参数和状态参数。这些参数主要包括热工参数、电磁参数以及振动、位移、转速等机械量。其中，热工参数是与热工过程相关的物理量，包括温度、压力、流量、液位等非电物理量。电磁参数是指与电磁现象有关的物理量，包括电压、电流、功率因数及频率、谐波分析等电气量和磁性材料、磁场强度等磁学量，电磁参数也是供电部门、电网、变电站所需要监测的参数。这些参数涉及多个专业，对于它们的计量也涉及计量学的多个分支，如热工量计量、电磁量计量以及机械量计量等。

随着现代测控技术的发展，发电企业生产部门所需的仪器设备大量增加。一个 300 MW 的发电机组需要超过 3 000 台的传感器及其配套的变送器及监控仪表，一个大型发电厂所拥有的仪器设备可达上万台，这些仪器设备的性能是否能合乎要求直接关系到发电企业的安全经济运行。计量工作是保证仪器设备正常运行的必要手段和技术支持，因而各个发电厂对计量工作的重视程度越来越高，计量工作已经成为电力系统安全高效生产的基本保障。

计量技术也直接关系到发电和电网企业生产的安全性和经济性，没有计量测试工作的电力生产过程是不可想象的。计量工作作为独立于电力生产过程的一个领域或部门，有效地保证了电力生产的正常进行。同时，计量技术属于一种专用技能，需要专门培养和考核才能胜任。

1.2.4 与计量相关的国际组织简介

1.2.4.1 国际计量大会（CGPM）

国际计量大会（General Conference of Weights & Measures，法文简称 CGPM）成立于 1875 年。作为“米制公约”的最高组织形式，每 4 年召开一次大会，讨论和批准新的基本计量学研究结果及国际范围内的计量学决议，普及和改进国际单位制。第一届国际计量大会召开于 1889 年。

国际计量委员会（CIPM）是 CGPM 的领导机构。它的任务是：指导和监督国际计量局的工作；建立各国计量机构间的协作；组织会员国承担国际计量大会决定的计量任务，并进行指导和协调工作；监督国际计量基准的保存工作。国际计量委员会（CIPM）下设 10 个咨

询委员会。

- (1) 电磁咨询委员会 CCEM (原电学咨询委员会 CCE);
- (2) 光度学和辐射度咨询委员会 CCPR (原光度学咨询委员会 CCP);
- (3) 温度咨询委员会 CCT;
- (4) 长度咨询委员会 CCL (原米定义咨询委员会 CCDM);
- (5) 时间频率咨询委员会 CCTF (原秒定义咨询委员会 CCDS);
- (6) 电离辐射测量标准咨询委员会 CCEMRI;
- (7) 单位咨询委员会 CCU (原单位制委员会 CCU);
- (8) 质量及相关量咨询委员会 CCM;
- (9) 物质质量咨询委员会 CCQM;
- (10) 声学、超声、振动咨询委员会 CCAUV。

国际计量局 (BIPM) (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 是国际计量大会和国际计量委员会的执行机构, 是一个常设的世界计量科学研究中心。它的主要任务是保证世界范围内计量单位的统一; 研究发展国际单位制; 确定计量基本单位的定义; 建立与保存国际计量基准; 探索建立新的计量基准和提高现有基准的精度; 进行检定和比对工作等。

我国于 1977 年 5 月 20 日加入“米制公约”组织, 截至 2014 年 7 月, “米制公约”的签字国有 56 个。

1.2.4.2 国际法制计量组织 (OIML)

国际法制计量组织 (International Organization of Legal Metrology, OIML) 1955 年 10 月 12 日成立, 总部设在巴黎。现已有 95 个国家和地区参加, 我国于 1985 年 4 月正式加入该组织。

国际法制计量组织的主要任务是讨论和研究国际计量立法和制定法制计量条例、统一计量方法和检定规程、汇集和形成各国法制计量的文献库、促进各国间的交流与合作等。

国际法制计量大会 (CGML) 是 OIML 的最高决策机关, 一般每 4 年召开一次。领导与咨询机构是法制计量委员会 (CIML), 由每个成员国的各一名代表组成, 每两年召开一次。国际法制计量大会的主要任务是: 制定国际法制计量组织的技术政策和工作计划; 研究国际法制计量组织的工作任务及执行方式, 并下达给国际法制计量局或有关工作组、专家及其他计量机构; 检查、监督国际法制计量局和秘书处的工作情况; 审议并通过“国际法制计量委员会建议”, 并提交国际法制计量大会审批。

国际法制计量局 (BIML) 是国际法制计量组织的常设执行机构, 局址设在法国巴黎, 由固定的工作人员组成, 在国际法制计量委员会的监督和领导下开展工作。该局的作用主要是保证国际法制计量大会及委员会决议的贯彻执行, 协助有关组织机构、各成员国之间建立联系, 指导与帮助国际法制计量组织秘书处的工作。

技术委员会 (TC) 和分技术委员会 (SC) 是国际法制计量组织的技术工作机构。技术委员会主要负责研究法制计量的常见问题、法制人员的培训问题, 协调与其合作的分技术委员会的工作, 审议和通过向国际法制计量委员会和国际法制计量大会提交的国际建议和国际文件。分技术委员会主要负责起草递交技术委员会的工作计划, 根据有关机构的研究项目和各国现行的规章条例拟定“资料草案”。

1.2.4.3 国际标准化组织 (ISO)

国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 成立于 1947 年, 是一个全球性的非政府组织, 是国际标准化领域中一个十分重要的组织。ISO 的宗旨是: 在世界范围内促进标准化工作的发展, 以利于国际物资交流和互助, 并扩大知识、科学、技术和经济方面的合作。其主要任务是: 制定国际标准, 协调世界范围内的标准化工作, 与其他国际性组织合作研究有关标准化问题。

ISO 的组织机构分为非常设机构和常设机构。ISO 的最高权力机构是 ISO 全体大会 (General Assembly), 是 ISO 的非常设机构。1994 年以前, 全体大会每 3 年召开一次。全体大会召开时, 所有 ISO 团体成员、通信成员、与 ISO 有联络关系的国际组织均派代表与会, 每个成员有 3 个正式代表的席位, 多于 3 位以的代表以观察员的身份与会; 全体大会的规模大约 200~260 人。大会的主要议程包括年度报告中涉及的有关项目的活动情况、ISO 的战略计划以及财政情况等。ISO 中央秘书处承担全体大会、全体大会设立的 4 个政策制定委员会、理事会、技术管理局和通用标准化原理委员会的秘书处的工作。1994 年开始, 根据 ISO 新章程, ISO 全体大会改为一年一次。我国在 1978 年正式加入 ISO。

1.2.4.4 国际电工委员会 (IEC)

国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 成立于 1906 年, 是世界上成立最早的国际性电工标准化机构。1947 年 ISO 成立后, IEC 曾作为电工部门并入 ISO, 但在技术上、财务上仍保持其独立性。IEC 负责有关电气工程和电子工程领域中的国际标准化工作, 其他领域则由 ISO 负责。

IEC 的宗旨是促进电工、电子领域中标准化及有关方面问题的国际合作, 增进相互了解。为实现这一目的, 出版包括国际标准在内的各种出版物, 并希望各国家委员会在其本国条件许可的情况下, 使用这些国际标准。IEC 的工作领域包括电力、电子、电信和原子能方面的电工技术, 现已制定国际电工标准 3000 多个。

IEC 的最高权力机构是理事会, IEC 的技术工作由执委会 (CA) 负责。IEC 现已成立了 82 个技术委员会、1 个无线电干扰特别委员会 (CISPR)、1 个 IEC/ISO 联合技术委员会 (JICI)、127 个分技术委员会和 700 个工作组。全世界约有 10 万名电工、电子领域的专家长年无偿地为 IEC 工作, 制修订 IEC 国际标准。我国 1957 年参加 IEC, 目前是 IEC 理事局、执委会和合格评定局的成员。

第2章 量和单位

2.1 量与量纲

2.1.1 量的概念

量是描述自然界物质运动规律的一个最重要的概念。量按其性质可以分为可测量和可数量两种。

其中，可测量表示现象、物体或物质可定性区别和定量确定的属性，简称量。由定义可知，被研究的对象可以是自然现象，也可以是物质本身，一般视为物理量，如长度，时间，热力学温度等。

可数量是指不能通过测量得到的量，也可称为统计量。如3个苹果，8支铅笔，10辆汽车等。可数量主要侧重于说明被测个体的数目，而不强调被测对象的单位（个、支、辆等）。因此，可数量实际上仍然是一个“数”的概念，不属于“量”的范畴。所以，在不加以说明的情况下，通常所指的量都是指可测量。

在科学研究、生产实践以及人类活动的各个领域，人们经常需要对各种量进行测量，并以相应的单位表示结果。这些测量构成了科学技术的基础。由此可见，量和单位对于科学技术和国民经济的发展以及人民生活水平的提高都具有重要的意义。

2.1.2 量的分类

在科学技术的各个领域，需要使用许多种量。根据量在计量学中所处的地位和作用，量有很多不同的分类方法。一般情况下，量可分为基本量和导出量两类。

彼此间存在确定关系的一组量，称为量制。在量制中，约定地认为在函数关系上彼此独立的量，称为基本量。例如，力学领域公认的基本量有3个：长度、质量和时间。在量制中，由基本量的函数所定义的量，称为导出量。如，速度量定义为位移（长度）与时间的比值，所以速度就是一个导出量；其他的如力、功率、电阻、电感等都是导出量。

通常用基本量符号的组合，作为特定量制的缩写名称。例如，基本量为长度 l 、质量 m 和时间 t 的力学量制的缩写名称为 (l, m, t) 量制。

2.1.3 量纲

以给定量制中基本量的幂的乘积表示某量的表达式称为量纲。由基本量的幂的乘积来表示导出量的表达式，称为量纲公式，简称量纲式。量纲皆以大写的正体拉丁字母和希腊字母表示。

由于量纲式的系数恒为 1，所以量纲式表达的只是导出量与基本量之间的定性关系。基本量的量纲就是它本身。在国际单位制（SI）中，规定的 7 个基本量的量纲为：长度——L、质量——M、时间——T、电流——I、热力学温度—— Θ 、物质的量——N 和发光强度——J。因此，包括基本量在内的任何量的量纲一般表达式为

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta \quad (2-1)$$

式中， $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta$ 为量纲指数。

所以，基本量的量纲式，如长度、质量、时间等可以表示如下：

$$\dim l = L$$

$$\dim m = M$$

$$\dim t = T$$

导出量的量纲式，如速度、力、能量可以表示如下：

$$\dim v = \frac{L}{T} = LT^{-1}$$

$$\dim F = M(L/T^2) = LMT^{-2}$$

$$\dim E = F \cdot l = L^2 MT^{-2}$$

任何量的表达式，其等号两边必须具有相同的量纲式，这一规则称为“量纲法则”。应用这个法则可以检查物理公式的正确性。例如，冲量公式为

$$F \cdot t = m(v_2 - v_1)$$

等号左边项的量纲为

$$\dim(F \cdot t) = LMT^{-2} \cdot T = LMT^{-1}$$

等号右边项的量纲为

$$\dim[m(v_2 - v_1)] = LMT^{-1}$$

可见，只有等号两边诸量的量纲相同，才表明上列公式可能是正确的。

在量纲表达式中，基本量量纲的指数全部为零的量，称作无量纲量。所以，无量纲的量是一个纯数；例如，线性形变、摩擦系数、折射率、马赫数等都是无量纲量。对于无量纲量，其单位是数字 1，表示其量值时一般不明确写出单位 1。但数字 1 和单位还不完全一样，单位前可以加词头构成倍数单位，而在 1 前面加词头构成倍数单位就不合适了。

2.2 计 量 单 位

2.2.1 单位的概念

计量单位是根据约定定义和采用的标量，任何其他同类量可与其比较使两个量之比用一个数表示，简称单位。计量单位是一个共同约定的特定参考量，具有名称、符号和定义，其数值为 1。国际法制计量组织把“数值等于 1 的量”作为单位的定义。

表示计量单位的约定符号称为单位符号。例如，米、千克、秒就是计量单位，它们的单位符号分别为 m、kg、s。计量单位是同种量值比较的基础。用数和一定的计量单位相乘表示的物质的量称为量值。例如，1 m，2 kg，3 s 等。量值单位有明确的定义和名称，是数值

为 1 的固定量。

需要特别说明，量的大小是物质的一种客观属性，与所选择的单位无关，而量值则因所选择的单位不同而表现出不同的数值。

在多种单位制并存的情况下，同一个量的两种计量单位之比 k 称为“单位换算系数”。例如，在国际单位制中，力的单位是牛顿，而在 CGS 制中，其单位是达因（dyn）。它们的换算系数为

$$k = \frac{[\text{N}]}{[\text{dyn}]} = \frac{1 \times [\text{m}][\text{kg}][\text{s}]^{-2}}{1 \times [\text{cm}][\text{g}][\text{s}]^{-2}} = 1 \times 10^5$$

即

$$1[\text{N}] = 1 \times 10^5 [\text{dyn}]$$

计量单位的定义，特别是基本单位的定义不是一成不变的，是在实践中逐步形成的。随着科学技术的发展而重新定义，可以体现出当代计量学发展的成就和水平。

2.2.2 单位制

单位制是对于给定量制的一组基本单位、导出单位、其倍数单位和分数单位及使用这些单位的规则。单位制是由一组选定的基本单位和由定义方程式与比例因数确定的导出单位组成的一个完整的单位体制。

给定量制中基本量的计量单位，称为基本单位。在国际单位制中，基本单位有 7 个，即米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔和坎德拉。在给定量制中，基本量约定地认为是彼此独立的，但是相对应的基本单位并不都是彼此独立的。例如，电流是独立的基本量，但它的单位“安培”的定义中，包含了其他基本单位米、千克和秒；又如，在长度单位“米”的定义中，也包含了基本单位秒；发光强度单位“坎德拉”的定义中，也包含了功率单位瓦特，从而与米、千克和秒有关。

给定量制中导出量的测量单位，称为导出单位。在单位制中，导出单位可以用基本单位和比例因数表示，而对于有些导出单位，为了使用方便，给予了专门的名称和符号。例如，在 SI 中，力的单位名称为牛 [顿]，符号为 N；能量的单位名称为焦 [耳]，符号为 J；电势的单位名称为伏 [特]，符号为 V 等。

基本单位有严格的、公认的定义，许多国家常以法律、法规的形式确定它们的定义。基本单位的大小一经确定就不允许再变动，因为这将关系到由它导出的各个导出单位的量值。但是，基本单位可以任意选定。由于基本单位选择的不同，所以组成的单位制也就不同。如市制、英制、米制和国际单位制等。在国际单位制形成之前，世界范围内使用的单位制有多种，其中主要有米制和英制。多种单位制并存的情况极大地阻碍了生产力的发展和科学技术与文化的交流，因此统一单位制成为世界各国的共同需要。国际计量委员会（CIPM）在 1956 年将经过 21 个国家同意的计量单位制草案命名为国际单位制，以国际通用符号 SI 来表示。1960 年第 11 届国际计量大会正式通过了 SI。随后，一些国际组织，如国际法制计量组织（OIML）和国际标准化组织（ISO）等，也采用了国际单位制。

2.2.3 分数单位与倍数单位

对于给定量制和选定的一组基本单位，由比例因子为 1 的基本单位的幂的乘积表示的导出单位，称为一贯导出单位。在给定量制中，每个导出量的测量单位均为一贯导出单位的单位制，称为一贯单位制。在国际单位制中，全部 SI 导出单位都是一贯单位。但 SI 单位的倍

数和分数单位不是一贯单位。

在长期的计量实践中，对于不同的计量对象，需要选用大小适当的计量单位。在同一种量的许多单位中选用某个单位并赋予独立的定义，其他单位都是以这个单位为基础进行定义，从而形成“主单位”。所以，主单位就是具有独立定义的单位，而倍数单位和分数单位都是按主单位来定义的单位。

给定测量单位乘以大于1的整数得到的测量单位，称为倍数单位。例如，千米是米的一个十进制倍数单位；小时是秒的非十进倍数单位。

给定测量单位除以大于1的整数得到的测量单位，称为分数单位。例如，毫米是米的一个十进分数单位，克是千克的一个十进分数单位。

设立倍数单位和分数单位的目的是为了使用方便，一个主单位往往不能适应各种需要。但在使用中，一定要注意单位的一致性和可对比性。为了测量和计算的精确，尽量使用相同的单位。

2.2.4 国际单位制 (SI)

2.2.4.1 国际单位制的建立

国际单位制 (SI) 是由国际计量大会 (CGPM) 批准采用的基于国际量制的单位制，包括单位名称和符号、词头名称和符号及其使用规则。国际单位制是由米制充实完善后得到的一种单位制。米制名称的由来是因为这种单位制最初只选择了一个基本单位——米，其他单位都由米导出的。米制的长度单位为米，等于地球子午线长度的四千万分之一；质量单位千克由米导出，等于1立方分米纯水在温度为4℃时的质量。1795年4月7日，法国政府颁布法令，使米制在法国首先合法化。1799年12月10日，确定了铂基准原器“档案局米”和“档案局千克”作为米和千克的值。这些原器用铂铱合金 (90%铂和10%铱) 制造，米原器是横截面为X形的线纹尺，千克原器则为直径和高相等 (39mm) 的圆柱形砝码。1840年1月1日起开始实行米制。

由于米制简易、适用，其他国家亦开始有所采用。1875年，20个国家的代表在巴黎举行了米制外交大会，签署了“米制公约”。该公约规定：在法国设立国际计量局 (BIPM)，国际计量局由国际计量大会 (CGPM) 和国际计量委员会 (CIPM) 管辖。其目的是保证米制的国际间的统一和发展。一百多年来，国际米制公约组织对保证国际计量标准统一、促进国际贸易发展和加速科技进步发挥了巨大的作用。1999年，第21届国际计量大会决定把每年的5月20日确定为“世界计量日”。

1948年召开的第9届国际计量大会作出决定，要求国际计量委员会创立一种简单而科学的供所有米制公约成员国均能使用的实用单位制。1954年第10届国际计量委员会决定采用“米、千克、秒、安培、开尔文和坎德拉”作为基本单位，1960年第11届国际计量委员会决定将以这6个单位为基本单位的实用计量单位制命名为“国际单位制”，并规定其符号为“SI”。1974年第14届国际计量大会又决定增加物质的量的单位“摩尔”作为基本单位。因此，目前国际单位制共有7个基本单位。

国际单位制作为国际计量大会推荐采用的一种一贯单位制，是一种比较科学和完善的单位制。它具有以下特点：

(1) 科学性。国际单位制以反映物质世界基本性质的物理量作为单位基础，能以数学方

程式形式表示物理现象，并构成物理单位。

(2) 通用性。国际单位制包括了科学技术和国民经济各个领域内的计量单位，几乎可以代替所有其他单位制和单位；不仅适用于任何科学技术领域，也适用于商品流通领域及人民生活。

(3) 简明性。采用国际单位制可以取消其他单位制的一些单位，明显地简化量的表达式，省略了各个单位制之间的换算，避免多种单位制的并用，消除了很多混乱的现象。

(4) 实用性。国际单位制的基本单位和大多数导出单位的主单位量值都比较实用，而且保持了历史连续性，适应各类计量的需要。

(5) 准确性。国际单位制的 7 个基本单位，都有严格的科学定义。目前除质量单位外，其他 6 个基本单位都实现了自然基准，并达到了较高准确度的复现和保存，其相应的计量基准代表当代科学技术所能达到的最高计量准确度，从而最终保证测量的单位统一和量值传递的准确可靠。

2.2.4.2 国际单位制 (SI) 的主要内容

国际单位制是由 SI 单位 (包括 SI 基本单位和 SI 导出单位) 和 SI 单位的倍数单位 (包括 SI 单位的十进倍数和分数单位) 构成的，如图 2-1 所示。

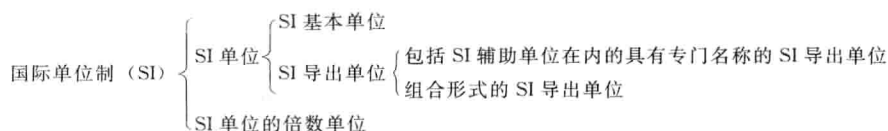


图 2-1 国际单位制的构成

(1) SI 基本单位及其定义

国际单位制 SI 中基本单位有 7 个，它们是：米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔和坎德拉，其对应的量的名称、单位符号和定义如表 2-1 所示。

表 2-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	单 位 定 义
长度	米	m	米等于光在真空中 299 792 458 分之一秒时间间隔内所经路径的长度
质量	千克 (公斤)	kg	1 千克等于国际千克原器的质量
时间	秒	s	秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间
电流	安 [培]	A	在真空中，截面积可忽略的两根相距 1 m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N，则每根导线中的电流为 1 A
热力学温度	开 [尔文]	K	热力学温度开尔文是水三相点热力学温度的 1/273.16
物质的量	摩 [尔]	mol	摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12 的原子数目相等。在使用摩尔时，基本单元可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或是这些粒子的特定组合，应予以指明
发光强度	坎 [德拉]	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 1/683 W/sr