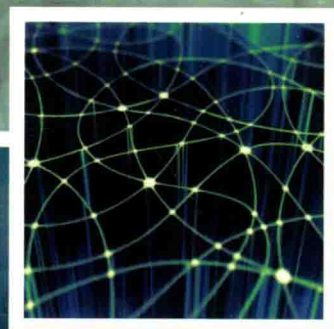




仪器科学与技术学科研究生教学用书

量子计量学概论

张宝武 李东升 郭天太 ○ 编著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

仪器科学与技术学科研究生教学用书

量子计量学概论

张宝武 李东升 郭天太 编著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

全书共分为7章,分别简要讲述了计量学、国际单位制及基本单位,量子计量学基础,时间和长度单位量子基准,电学量单位量子基准,质量和物质的量单位量子基准,发光强度单位和热力学温度单位量子基准,纳米计量和太赫兹计量等内容,就本学科涉及的七个基本单位最前沿的量子化研究成果进行逐一展示。考虑到研究生生源的基础多样性,全书侧重科普性、通俗性和叙述性的内容,图文并茂,有利于读者自学。

本书可作为仪器仪表工程和仪器科学与技术专业的研究生教材,也可供计量相关专业高年级本科生及各级计量部门和机构的从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

量子计量学概论/张宝武,李东升,郭天太编著. —武汉:华中科技大学出版社,2015.11
ISBN 978-7-5680-1406-9

I. ①量… II. ①张… ②李… ③郭… III. ①量子-计量-研究 IV. ①TB939

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284357 号

量子计量学概论

张宝武 李东升 郭天太 编著

策划编辑:万亚军

责任编辑:王 晶

封面设计:原色设计

责任校对:马燕红

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:7.75

字 数:195千字

版 次:2015年12月第1版第1次印刷

定 价:19.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

计量学是现代科学的重要组成部分,对社会进步和国计民生具有重要作用。从 20 世纪下半叶开始,计量学和量子物理学相结合,逐渐发展成为量子计量学。它主要任务是:加强计量科技基础及前沿技术研究,特别是物理常数等精密测量和量子计量基准研究;建立新一代高准确度、高稳定性量子计量基准;突破关键技术,建立一批经济社会发展急需的国家计量基标准、社会公用计量标准;加快改造和提升国家计量基标准能力和水平。世界范围内的计量领域正面临以量子物理为基础的自然基准取代实物基准的重大技术革命,这将对各领域的测量精度产生深远影响。为此,夯实计量基础、完善计量体系、提升计量整体水平已成为提高国家科技创新能力、增强国家综合实力、促进经济社会又好又快发展的必然要求。

为了计量专业的学生更好地了解计量学的发展,掌握必备的量子计量学方面的基础知识,为今后在本领域就业打下良好基础,编者在充分搜集有关量子计量方面文献资料的基础上,在已有讲义基础上整理编写了本书。

本书是根据中国计量大学硕士研究生的教学计划和“现代计量学”课程教学大纲的要求编写的。本书是仪器仪表工程和仪器科学与技术专业的一门主干课程,其宗旨是让学生在公共课程的学习之上,对本专业涵盖的内容,特别是计量单位研究前沿有更深入的了解和学习。

仪器仪表工程和仪器科学与技术专业是两个综合性、应用性很强的专业,它涉及的知识面相当广泛。本书的编写既考虑到专业的这一特点,又考虑到要避免罗列繁复的内容和深奥的理论,因而在选材上力求突出重点并实现与本专业其他课程的有机衔接。学习本课程原则上应该具有量子力学、原子物理、激光技术和光学等基础。在学习本课程时,如果能够对相关计量企事业单位进行参观、学习,增强对计量工作的感性认识,则对学好本课程极有益处。

本书由中国计量大学张宝武博士、李东升教授和郭天太博士共同编写完成,具体分工如下:李东升编写了第 1、3 章;郭天太编写了第 5、6 章;张宝武编写了第 2、4、7 章。全书由张宝武统稿。

在本书的编写过程中,参考并借鉴了国内外同行的若干文献,在此向有关专家及作者表示衷心的感谢。另外,书中的部分文字、图表、公式和参考文献等由中国计量大学的研究生王毅、刘兵、饶文燕、郑婷婷、宋贺和霍剑锋等处理完成,在此一并表示感谢。

浙江省仪器科学与技术重中之重学科对本书的出版给予了资助,在此表示衷心的感谢!华中科技大学出版社万亚军编辑和王晶编辑为本书的及早出版做了大量的工作,在此深表谢意!

最后需要说明的是,计量学的研究和应用更新很快,单就我国在光钟方面的研究来说,2015 年 9 月底又有了新的内容:我国铯光钟数据首次被国际采纳。因此,限于水平和经验,编者在内容的组织、材料的选择以及编写中难免有不妥或错误之处,敬望读者批评指正。

编 者

2015 年 12 月

目 录

第 1 章 计量学、国际单位制及基本单位	(1)
1.1 计量学	(1)
1.2 国际单位制	(3)
1.3 基本单位	(4)
思考题	(8)
第 2 章 量子计量学基础	(9)
2.1 波粒二象性	(9)
2.2 原子结构理论	(16)
2.3 冷原子物理	(30)
思考题	(49)
第 3 章 时间和长度单位量子基准	(51)
3.1 时标和守时	(51)
3.2 原子钟的历史	(54)
3.3 原子钟的工作原理	(55)
3.4 各类时频装置	(58)
3.5 长度单位量子基准	(66)
思考题	(72)
第 4 章 电学量单位量子基准	(74)
4.1 实物基准	(74)
4.2 量子化基准	(75)
4.3 交流约瑟夫森效应	(77)
4.4 量子化霍尔效应	(80)
4.5 单电子隧道效应	(81)
思考题	(82)
第 5 章 质量和物质的量单位量子基准	(83)
5.1 质量单位量子化出发点	(83)
5.2 单晶硅粒子法	(84)
5.3 功率天平法	(86)
5.4 金粒子收集法	(87)
5.5 能量天平法	(88)

5.6	物质波频率法	(89)
5.7	物质的量单位量子基准	(92)
	思考题	(93)
第 6 章	发光强度单位和热力学温度单位量子基准	(94)
6.1	发光强度单位量子基准	(94)
6.2	热力学温度单位量子基准	(96)
	思考题	(98)
第 7 章	纳米计量和太赫兹计量	(99)
7.1	纳米计量	(99)
7.2	太赫兹计量	(103)
	思考题	(110)
参考文献	(111)

第 1 章 计量学、国际单位制及基本单位

1.1 计 量 学

《国际通用计量学基本术语》(中国计量出版社,1993年)把计量学(metrology)定义为关于测量的科学;把测量(measurement)定义为以确定量值为目的的一组操作;把计量定义为实现单位统一、量值准确可靠的活动。由此可见,计量学是一门有关测量的学科,涵盖有关测量的理论与实践的各个方面。测量是一种具体操作或实验过程,是计量学的实际应用。计量是通过技术和法制的手段来实现测量单位的统一和量值的准确可靠,依靠计量管理和协调这些环节之间的关系。

计量学是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。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。其中,科学计量是指基础性、探索性和先行性的计量科学研究,它是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(exact science),通常是国家计量研究机构的主要任务,其核心内容是定义单位和建立计量单位体系。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。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”。

测量是为了确定被测对象的量值而进行的操作过程,其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,使人们更加深入地对物体、物质和自然现象的属性加以认识和掌握,增强对自然规律的确信性和科学性。测量的目的在于确定量值,这是测量定义的核心内涵,是有别于其他操作的本质特征。定义中,测量具体是什么样的操作过程未做限定,它可以是一个简单的徒手动作或半自动动作,如:称体重、量体温或量血压,用尺测量居室的面积,斟满一杯(升)啤酒等,对测量准确度要求不高;也可以是一组复杂的科学实验过程,其整个过程是从明确或定义被测量开始,包括测量原理和方法的选定,选用测量标准和仪器设备,控制影响量的取值范围,进行实验和计算,直到获得具有适当不确定度的测量结果,如:激光频率的绝对测量,地球到月球的距离测量,纳米测量等。测量过程就是把被测量与一个作为测量单位(计量单位)的标准量进行比较,以求其比值的过程。它可以用一个测量基本方程式来表示,即

$$Q = KQ_0$$

(1-1)

式中： Q ——被测量；
 K ——比值；
 Q_0 ——标准量。

由此可知，为了实现测量，关键点在于比较。为此，一个完整的测量过程应该由以下四部分组成，有时也称为测量过程的四要素。

1. 被测对象和被测量

测量的对象是多种多样的，不同的被测对象有不同的被测量，如孔的被测量是直径，箱体零件的被测量是长、宽、高等，螺纹的被测量有螺距、中径和牙型等。被测对象和被测量的特征是设计测量方法的主要依据，因此，在测量过程中对被测对象和被测量进行分析研究是首要的工作。

2. 测量单位(计量单位)和标准量

国际单位制含有七个基本单位：米、秒、千克、安培、坎德拉、摩尔和开尔文，以及两个辅助单位弧度和球面度。另外，还有基于这些基本单位的导出单位、倍数单位和分数单位等。

在测量过程中，要根据不同的测量领域和被测对象，选择大小恰当的计量单位。

3. 测量方法

测量方法是指完成测量任务所用的方法、量具和器具，以及测量条件的总和。当没有现成的量具或者器具时，需要自行拟定测量方法，这就需要根据被测对象和被测量的特点(形体大小和精度要求等)确定标准量，拟定测量方案、工件的定位、读数和瞄准方式，以及测量条件等。

基本的测量方法一般有：直接测量和间接测量，绝对测量和相对测量，接触测量和非接触测量，单项测量和综合测量，手动测量和自动测量，以及主动测量(也叫在线测量)和被动测量等。

在测量过程中，要根据被测对象和被测量的特点和准确度要求，选用相应的测量方法。

4. 测量不确定度(精确度)

在科学技术和生产中，进行着大量的测量工作，由于测量的不准确，测量结果必有分散。分散程度用不确定度表征，因此，一切测量必有不确定度。

测量不确定度定义为表征合理赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系的参数。也就是说，测量结果变化的不肯定，是被测量真值在某个量值范围的估计。它的大小表征了测量结果的可信程度。一个完整的测量结果应包含被测量值的估计值与分散性参数两部分。例如，被测量的测量结果为 $x \pm U$ ，则 x 是被测量的估计值，它具有的测量不确定度为 U 。

与测量不确定度相似的是测量误差，它定义为测量结果减去被测量的真值，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-2)$$

式中： Δx ——测量误差；
 x ——测量结果(被测量的估计值)；
 x_0 ——被测量的真值。

不确定和误差都和测量结果有关，前者是对测量结果的不能肯定的程度，后者是指测量结果相对真值的差异大小。两者都是评定测量结果质量高低的重要指标，但是反映的角度不同。测量误差是以真值或者约定真值为中心，表明测量结果偏离真值；而不确定度是以估计值为中心，表明测量结果的分散性。在数值上，误差可正可负，即误差=测量结果-真值；

而不确定度是恒为正,用标准差及其倍数表示。另外,测量不确定度是由人们经过分析和评定得到的,因而与人们的认识程度有关,测量结果可能非常接近真值(即误差很小),但是由于人们的认识不足,评定得到的不确定度可能比较大;也可能测量误差实际上比较大,但是由于人们的分析估计不足,给出的不确定度却偏小。因此,在进行不确定度分析时,应该充分考虑各种影响因素,并对不确定度的评定加以验证。

上述测量四要素可以通过以下例子来简单说明:测量人员用玻璃液体摄氏温度计测量某一个房间的温度为 $t = (20.1 \pm 0.02) ^\circ\text{C}$,其中被测对象是房间,被测量是温度,测量方法是测量人员利用玻璃液体温度计直接测量,测量单位是摄氏度,测量估计值为 $t = 20.1 ^\circ\text{C}$,测量不确定度为 $0.02 ^\circ\text{C}$ 。

现代计量学的创立可追溯到17世纪前后,当时欧洲的科学发展非常迅速,物理学已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。物理量依据实际测量结果加以定义,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。18世纪中叶之前,世界各个国家,甚至同一国家的不同地区或者城市使用的计量单位往往不同,计量制度和计量单位杂乱无章。科学家们使用多种计量单位表述实验结果。这种状态极其不利于科学研究和交流,严重阻碍国家间、地区间的经济贸易交流。因此,统一计量单位制度已成为世界各国科学、文化和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计量单位制度。1875年5月20日,法、德、美、俄等17个国家的代表在巴黎“米制外交会议”上共同签署了著名的《米制公约》,并组成国际计量大会(CGPM)。这极大地促进了各国计量制度走向统一,标志着现代计量学的初步建立。此后,计量科学家们经过一百多年的努力,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方式,在几个主要国家建立起现代计量技术研究机构,使许多国家在本国原有度量衡基础上采纳米制,接受国际单位制,参加国际法制计量公约组织,建立起本国现代计量技术、行政和法规体系。一百多年来,国际米制公约组织在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方面发挥了巨大的作用。为了纪念《米制公约》的签署,1999年第二十一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”。中国于1976年12月参加《米制公约》,于1977年5月20日正式加入米制公约组织。

1.2 国际单位制

18世纪后半叶,力学、热学、光学和静电学已经成为物理学的几门基础学科,测量的范围也从简单的度量衡扩展到所有的力学量、热工量、电磁学量和光学量,各种物理量都选择了合适的单位,建立起了数学关系。19世纪后半叶,米制已被欧洲和美洲的许多国家接受,此时,把所有单位构成一种逻辑关系(即单位制)逐渐成为迫切要求。1901年,意大利科学家乔吉建议用长度、时间和质量联合一个电学性质的量形成四个基本量的一贯单位制,这个电学量可以是安培或者欧姆。经过有关国际组织的长期讨论,1935年,国际计量委员会决定,选用安培作为第四个量的基本单位。1946年,国际计量委员会肯定了关于采用米、千克、秒和安培单位制(MKSA)的决定。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征求意见决定采用米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开氏度($^\circ\text{K}$)和坎德拉(Cd)等

六个单位作为建立新单位制的基本单位。1960年,第十一届国际计量大会将上述新单位制正式定名为“国际单位制”,用法文“Système international d’Unités”的缩写符号“SI”来标记。从此,国际单位制正式诞生。1967年,第十三届国际计量大会将热力学温度单位开氏度(°K)改称开尔文(K)。1971年,第十四届国际计量大会将物质的量的单位摩尔(mol)增列为国际单位制的第七个基本单位。此后,经过不断的完善和丰富,现在已经构建了一套由上述七个基本单位为基础,加以两个辅助单位(弧度 rad 和球面度 sr),以及众多导出单位、专门名词和词头的,严密、完整、科学的单位制,如图 1-1 所示。另外,考虑到一些国家的风俗习惯,以及某些领域内计量单位使用的现状,国际单位制还容许两种情况单位的存在:与 SI 并用的单位,与 SI 暂时并用的单位。

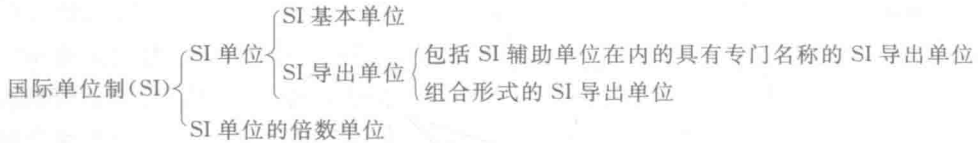


图 1-1 国际单位制的构成

表 1-1 显示了国际单位制中七个基本物理量及其单位的相关信息。

表 1-1 七个基本物理量及其单位的相关信息

物理量的名称	量纲	单位名称	单位符号
长度	L	米	m
质量	M	千克(公斤)	kg
时间	T	秒	s
电流	I	安[培]	A
热力学温度	Θ	开[尔文]	K
物质的量	N	摩[尔]	mol
发光强度	J	坎[德拉]	cd

1.3 基本单位

图 1-1 中的计量树显示了国际单位制对人类科学的贡献。由图 1-1 可以看出,国际单位制中的七个基本物理量及其单位是人类各个学科分支的基础,更是十大计量领域的基础,其重要性不言而喻。另外,由于复现基本单位的方法和实体(计量基准)的准确度,决定了该单位体系中全部导出单位的准确度,任何导出单位计量基准的准确度都不可能超过基本单位计量基准的准确度。因此,基本单位的大小一经确定就不允许再变动,以免影响各个导出单位的量值。所以,许多国家常以法律、法规的形式确定它们的定义。从这一点上讲,计量学的发展过程其实就是基本单位选择和确定的过程,是基本单位复现精度提高的过程。

自 1960 年国际单位制诞生至今,国际计量局及世界各国的计量研究部门始终把基本单位计量基准的研究放在首要位置,并且在历届国际计量大会上对国际单位的基本单位名称、定义和符号做过修正,以便使其更科学、更严格、更能反映当代科学技术的发展水平。特别

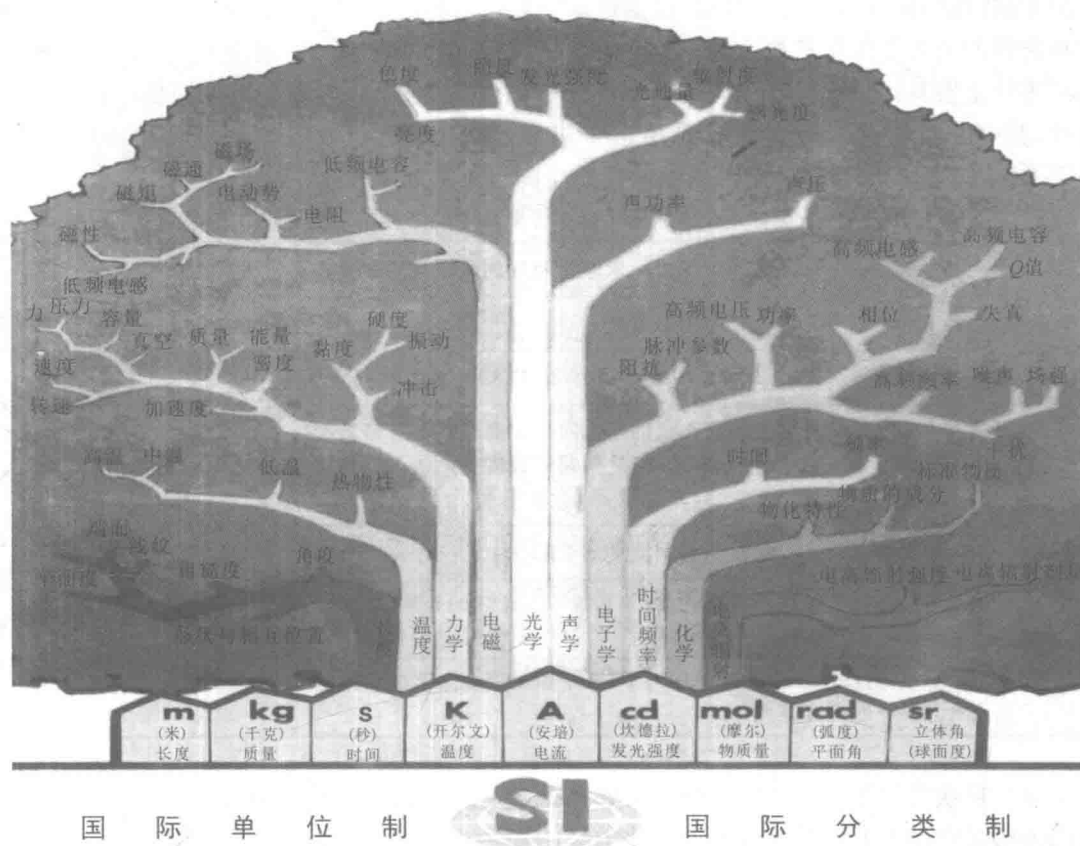


图 1-1 计量树

是 20 世纪 60 年代以来,科学技术突飞猛进,以量子物理为基础的计量基准的研究取得了一系列成果,使计量基本单位的复现与量子现象密切相关,逐渐形成了量子计量学。量子计量学以时间或频率单位为基础,以一些重要的基本物理常数为中介,实现了一些基本单位或与基本单位密切相关的导出单位的定义或复现方法。这里对基本单位定义和复现方式的发展阶段做一个概要的总结。

1. 原始阶段

这一时期主要利用人、动物或者自然物作为计量基准,没有充分的科学依据。计量基准复现方式多用人体的某一部分、动物的丝毛、植物果实、乐器以及某种能力等。例如:中国古代的布手知尺,掬手为升,十发为程和黄钟律管等;古埃及的尺度是以人的胳膊到指尖的距离为依据的,称为“肘尺”(46.4 cm);英国的码是亨利一世将其手臂向前平伸,从鼻尖到指尖的距离(0.9144 m);英尺是查理曼大帝的脚长(0.3048 m);英寸是埃德蒙英王手拇指关节的长度(25.4 mm);而英亩则是两牛同扼,一日翻耕土地的面积(4047 m²)。

2. 经典阶段

这一时期开始于 1790 年法国国民议会决议,发展于 1875 年《米制公约》的签订,成熟于 1960 年国际单位制的命名,以经典物理现象和理论作为科学基础,以人工实物或宏观现象作为计量单位的定义或者复现方式。

例如:以法国为首的西方国家根据地球子午线 1/4 长度的一千万分之一定义米,并通过铂铱合金制米原器加以复现,与此同时,制作了千克原器,形成了一种基于所谓自然不变现

象的米制,成为国际单位制的基础;根据地球公转周期制定了时间单位秒(历书时)。中国在这种宏观的或人工实物基准的使用上时间更早,相传在大禹治水时,就使用了“准绳”、“规”、“矩”等计量器具;公元前 221 年,秦始皇统一中国后即颁布诏书,建立了全国统一的度量衡制度,其中度制和量制的大部分采用了十进制,并实行定期检定计量器具的法制管理。表 1-2 总结了国际单位制中七个基本单位的经典定义或复现方式。

表 1-2 国际单位制中七个基本计量单位的经典定义或复现方式

米(m)	米是 1 个标准大气压下国际米原器两端刻线记号间轴线在 0 °C 时的距离
千克(kg)	千克等于国际千克原器的质量
秒(s)	秒为一历书秒,即从 1899 年 12 月 31 日 12 时起算的一个回归年的 $1/31556925.9747$
安培(A)	安培是在真空中相距 1 米的两无限长而圆截面可忽略的平行直导线内通过一恒定电流,若这恒定电流使得这两条导线之间每米长度上产生的力等于 2×10^{-7} N,则这个恒定电流的电流强度就是 1 安培(A)
开尔文(K)	开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$
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
坎德拉(cd)	坎德拉是在 101325 帕压力下,处于铂凝固点温度的黑体的 $1/600000$ 平方米表面在垂直方向上的发光强度

这类宏观实物基准复现方式的主要缺点是随着时间的推移或者地点的变化,其量值不可避免地受物理或者化学性能缓慢变化的影响而发生改变,从而影响了基本单位的复现和量值保存,并限制了准确度的提高。总结起来,它们的不足主要表现在如下几个方面。

(1) 最高的计量基准为某种实物。这样的实物基准一旦制成后,总会有一些不易控制的物理的和化学的过程,以及使用中的磨损等原因使它的特性发生缓慢微小的变化,因而它所保存的量值也会有所改变。

(2) 最高等级的实物计量基准全世界只有一个或一套,一旦由于天灾、战争或其他原因发生意外损坏,就无法完全一模一样地复制出来,原来连续保存的单位量值也会因之中断。

(3) 量值传递检定系统庞大繁杂,从最高等级的实物基准到具体应用场所,量值要经过多次传递,准确度也必然会有所下降。

3. 现代阶段

鉴于计量单位经典定义或复现方式的不足,计量科学家们不得不慎重考虑 1870 年英国物理学家和数学家麦克斯韦所提的建议,即长度、质量和时间的单位应当建立在原子波长、频率和原子质量中,而不是在运动着的星体或物体上。现代阶段开始于 1892 年迈克尔逊干涉仪对国际米原器的测定,发展于各种计量基准的量子复现方式。复现理论由经典转为量子,复现方式由宏观实物转为微观量子现象。例如,国际上已正式确立的量子基准有长度单位米基准、时间单位秒基准、电压单位伏特基准和电阻单位欧姆基准。这一时期大致又可分为以下两个阶段。

1) 基于特定原子的特定的量子跃迁现象来复现基本单位

从经典理论来看,物质世界在做连续、渐进的宏观运动;而在微观量子体系中,事物的发展是不连续的、跳跃的,也就是量子化的。由于原子的能级非常稳定,跃迁时辐射信号的周

期自然也非常稳定。因此,跃迁所对应的量值是固定不变的。这类微观量子基准的典型例子为1960年以氩-86原子的 $1p^{10}$ 和 $5d^5$ 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的1650763.73倍来定义米;1967年以铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间来定义秒。

2) 基于基本物理常数来复现基本单位

基于特定原子的特定的量子跃迁现象来复现计量单位的定义确实提高了SI基本单位的准确性、稳定性和可靠性。但是,它们仍然与某种原子的特定量子跃迁过程有关,因而尚不具备普遍适用性。例如,米在1960年定义在氩-86原子跃迁谱线上,如果后面发现比这更好的谱线,则米定义又要重新定义。显然,最好的方案莫过于用基本物理常量(普适常量)定义计量单位。为此,1983年第十七届国际计量大会将米定义为光在真空中在 $1/299792458$ s的时间间隔内所行进的长度,即认为真空中光速作为一个定义值,恒为 299792458 m/s(约为30万千米)。由此可知,米事实上变成了秒的导出单位。这种定义通过不变的光速给出了空间和时间的联系,使得新定义的米只依赖于目前测量不确定度最小($10^{-15} \sim 10^{-16}$ 量级)的频率,从而具有更高的准确性、稳定性、可靠性和普适性。1999年以来,利用飞秒(10^{-15} s)脉冲激光所产生的梳状频谱,即所谓飞秒锁相梳状激光技术,可以容易地把光学频率与微波频率联系起来。该技术在近3年所取得的成就,实际上已远远超过以往30年的成就总和,以此为基础的“光钟”已研制成功,其频率复现性可达 10^{-18} 量级。未来,当用光频标取代目前实用的铯-133原子微波频率基准时,秒的定义将会再次发生改变。表1-3总结了七个基本单位量子化或物理常数定义。从上面的描述中可以看出,量子计量基准至少有如下几个优点。

(1) 量子计量基准的准确度一般要比实物计量基准高几个数量级。

(2) 量子计量基准是一种物理实验装置,可以多处建立,不会有一旦损坏不能准确复现的问题。

(3) 按照相同原理建立的量子计量基准,所复现的量值也相同,避免了计量基准的量值多次逐级传递而造成的一系列问题。

表 1-3 七个基本单位量子化或物理常数定义

单位	定 义
米	米是光在真空中在 $1/299792458$ s的时间间隔内所行进的长度
千克	设想基于阿伏加德罗常数 N_A 、普朗克常量 h 建立量子基准
秒	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9192631770个周期的持续时间
安培	设想基于单电子 e 隧道效应建立量子基准
开尔文	设想基于玻尔兹曼常数 k 建立量子基准
摩尔	设想基于阿伏加德罗常数 N_A 建立量子基准
坎德拉	设想一定频率光的光子数来建立量子基准

随着全球经济一体化和高新技术的迅速发展,计量的重要性日益突出。国家计量体系作为国家基础设施的组成部分,既是科学技术和经济发展的支撑条件之一,又是工业竞争力的重要组成部分。为此,各个国家的计量科学家都在利用最新的科技成果不断完善国际单位制及其实验基础。从表1-3可以看出,以基本物理常数,如玻尔兹曼常数 k 、阿伏加德罗常

数 N_A 、电子电荷 e 、真空中光速 c 、普朗克常量 h 等为基础来重新定义一套更为科学合理的计量单位制受到了极大的重视,因为这些物理常数不随时间、地点而异,也不受环境、实验条件和材料性能的影响,用各种不同实验方法测量的结果理论上是一致的。另外,由图 1-2 可知,至今,在七个基本单位中,秒具有最高的测量精度(预计达到 10^{-18} 量级),比其他的物理量高出 4 个量级以上。并且,其他物理量都通过基本物理常数和时间的单位直接或者间接地联系起来。因此,计量学的发展趋势就是利用最新科技成果使基本单位的定义及其基(标)准建立在某些特定的基本物理常数上,以时间单位和频率量为基础,实现与基本计量单位密切相关的导出单位的定义,通过一些基本物理常数或组合常数来定义一组基本单位的新单位制体系。

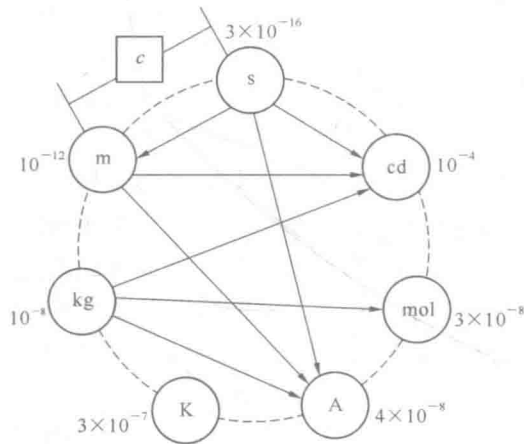


图 1-2 七个基本单位的相互关系

思考题

1. 什么是计量? 什么是测量? 测量的基本公式如何?
2. 从计量的角度说明测量和计量的区别。
3. 简述测量过程的四要素。
4. 社会上现行的十大计量有哪些?
5. 试述科学计量的核心内容。
6. 计量学分为哪三个类别?
7. 现代计量学初步建立的标志是什么?
8. 世界计量日是哪天? 为什么是这一天?
9. 详细列出国际单位制中七个基本物理量,以及它们对应的基本单位和符号。
10. 请问作用力是否为基本物理量? 它的定义式如何表示?
11. 简述基本计量单位在计量中的意义。
12. 试述实物基准的缺点和量子化的意义。
13. 分别给出长度基本单位的经典定义和量子定义。
14. 分别给出时间基本单位的历史时秒定义和原子时秒定义。
15. 给出长度基本单位的经典定义和常数化定义。

第 2 章 量子计量学基础

随着科学技术的快速发展,20 世纪以前基于经典物理学发展起来的计量学已逐渐不能满足工农业生产和科学研究工作的需要。这主要是因为基本单位的计量基准是一些具体的宏观实物。由于一些不易控制的物理和化学过程的影响,这些实物基准所保存的量值会发生缓慢变化。因此,为七个基本单位寻找更加稳定、准确、易于保存和复现的定义是计量科学家们共同面临的基本研究命题。20 世纪量子物理学的光辉成就为计量科学提供了飞跃式发展的机会。它通过基本定理或基本物理常数将宏观计量和微观量子现象相联系,为进一步提高基本单位计量准确性提供了理论和实验依据,逐渐形成了以量子物理学和计量学相结合的量子计量学。它的研究内容为利用量子现象来复现计量单位,建立计量基准,使之以实物基准向量子基准过渡。到目前为止,在七个基本单位中,除质量单位千克(kg)以外的其他六个基本单位均已经直接或间接实现了量子基准,量子计量基准是基于一种物理实验装置,可以在任何时间、任何地点重复建立,量值复现的准确性也获得了大幅的提高。

为了使读者更好地理解量子基准的原理和内容,本章将分波粒二象性、原子结构理论和冷原子物理等三个方面来介绍与量子计量学有关的物理学概念和基本知识。这些理论和概念在建立量子基准时起着很大的作用,是建立原子钟来复现秒定义,应用激光技术来复现米定义,理解各种量子化效应来建立各种复现电学量单位定义器件的物理基础。

2.1 波粒二象性

2.1.1 普朗克的能量子假说

任何物体在任何温度下发射电磁波的现象称为热辐射。同时,任何物体在任何温度下都会吸收和反射外界射来的电磁波。为了系统地研究物体的发射、吸收和反射电磁波的规律,类似动力学中的质点,人们设想有一种理想物体,它能全部吸收外来各种波长的电磁辐射,而当它被加热时,它又能最大程度地辐射出各种波长的电磁波。这种理想物体被称为黑体。现实情况下,一个由任何材料构成的、绝热的、开有一个小孔的空腔就可以认为是一种良好的黑体模型。这是因为进入小孔的电磁辐射,要被空腔壁多次吸收和反射,以至于射入的电磁辐射基本上不会再从小孔逃逸出来,如图 2-1 所示,而当空腔受热时,空腔会发出电磁辐射。

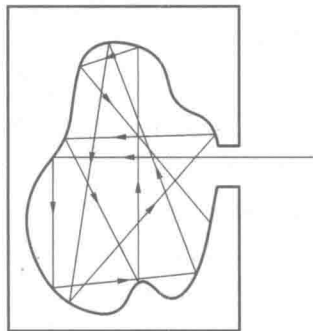


图 2-1 黑体的实际模型

实验发现,黑体辐射含有多种频率成分,而且不同频率成分的电磁波的强度也不同,并且辐射能量与波长的关系只随黑体的温度而变化,而与空腔的形状和制作空腔的材料无关,如图 2-2 所示。

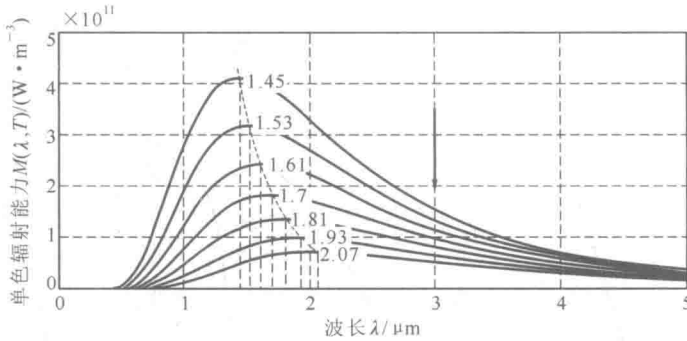


图 2-2 在不同温度下,黑体单色辐射能力与波长的关系

针对图 2-2 的实验数据,许多物理学家试图从经典电磁理论、经典热力学和统计物理学出发,对黑体辐射的频率分布做出说明,但是都未能如愿,甚至得到了与实验不符的结果。其中最具有代表性的是瑞利-金斯公式。他们把分子物理学中能量按自由度均分的原理用于电磁辐射理论,得到的辐射能量公式在长波处接近实验结果,而在短波处和实验明显不符,特别在短波(高频)区域包括紫外以至 X 射线、 γ 射线,其理论显示,随着频率的增高而有更高的辐射强度,甚至是趋于“无限大”。这就是物理学上所谓的“紫外灾难”。在这之前,1893 年,维恩从辐射按波长分布类似于麦克斯韦的分子速度分布出发,得到了一个在短波处和实验结果接近,而在长波处相差很大的公式。

1900 年,普朗克在深入研究实验数据之后,在维恩公式和瑞利-金斯公式之间找到了一个与实验结果符合极好的黑体辐射公式。图 2-3 所示为 1500 K 时辐射强度实验数据与上述三种理论曲线的比较。他的成功在于提出了一个与经典物理概念完全不同的新假设:黑体中的电子振动可以看成一维谐振子,它吸收或者发射电磁辐射能量时,谐振子的能量只能取最小能量单位 ϵ 的整数倍的值。换句话说,黑体吸收或发射电磁辐射能量的方式是不连续的,只能以 ϵ 为基本单元的“量子”的方式进行。最小能量单位 ϵ 与谐振子的频率 ν 成正比,表示为 $\epsilon = h\nu$,其中比例常数 h 对所有谐振子都是相同的,称为普朗克常量。根据实验测定,普朗克常量的国际推荐值为 $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。按照这个假设,谐振子吸收或发射的能量可表示为 $E = n\epsilon$,其中 $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 为量子数。

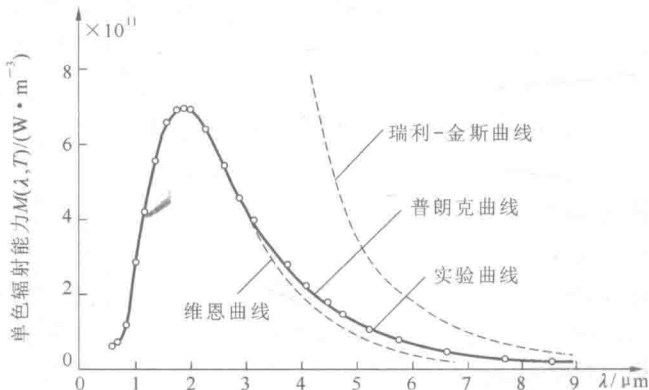


图 2-3 1500 K 时辐射强度实验数据与三种理论曲线的比较

后来,研究发现:(1) 谐振子发射或吸收不同能量的能力与其自身所具有的能量相对等;(2) 当谐振子的温度为绝对零度时,它仍然具有一个最小的能量,称为零点能。这表明上述普朗克假设中量子数 n 不可能取 0。普朗克假设也可以描述如下:频率为 ν 的谐振子,其具有的能量只能是能量子 ϵ 的整数倍,即只能是 $n\epsilon$ 中的一个值。因此,谐振子的能量是按量子数 n 做阶梯式分布的。后来人们把谐振子所处的某个能量状态形象地称为谐振子的某个能级,一维谐振子阶梯式能量分布图称为能级图,如图 2-4 所示。

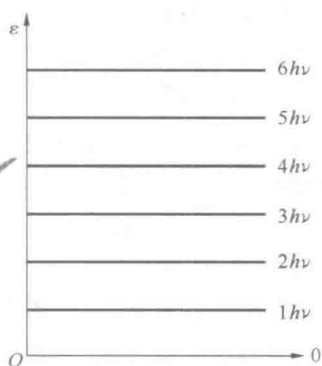


图 2-4 谐振子阶梯式能量分布

普朗克这个假设与经典物理能量连续的概念是格格不入的,虽说非常完美地解释了实验现象,具有划时代的意义。但是,不论是普朗克本人还是他的同时代人,当时对这一点都没有充分的认识。文献资料显示,在此概念提出的最初 5 年内,普朗克的工作几乎无人问津。普朗克本人更是内心不安,诚惶诚恐,认为自己是和谐物理学的破坏者,所以在这以后许多年内,普朗克都在企图将能量子纳入经典物理学的框架内,企图用连续性来代替这种不连续性。当然最后还是证明这些努力都是徒劳的。

2.1.2 爱因斯坦的光量子假说

最早明确地认识到普朗克的发现具有开创新纪元意义的是爱因斯坦。1905 年,爱因斯坦在著名论文《关于光的产生和转化的一个试探性观念》中发展了普朗克的能量子假说,提出了光子概念,很好地解释了光电效应现象。下面简要回忆一下赫兹的光电效应。

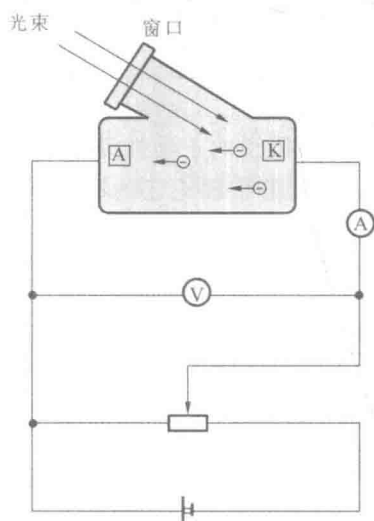


图 2-5 光电效应原理

如图 2-5 所示,当合适频率的入射光透过石英窗射向金属电极 K 时,电极将发射具有一定动能的电子。在该电极 K 与电极 A 间施加电压 U ,可在检流计中检测到光电流。这就是 1887 年赫兹发现的光电效应。这个实验显示:

- (1) 每种金属都有一固定的频率 ν_0 ,称为截止频率(也称红限)。只有当入射光频率大于或等于 ν_0 时,才会有光电流产生,否则,无论光强度多大,都不会产生光电流。
- (2) 光电流强度和入射光强度成正比。
- (3) 光电子动能和入射光频率成线性增长关系,而与入射光强度无关。
- (4) 当入射光的频率大于截止频率时,只要光照射金属表面即可产生光电子,无需积累时间。

经典光电理论在解释上述结论时遇到了极大的困难。这主要表现在,经典光电理论认为光的能量应由光的强度决定,即由光的振幅决定,与光的频率无关,而光的频率只决定光的颜色。光电流是金属内电子吸收入射光能量后逸出金属表面所产生的,因此,光电流是否产生,以及产生后光电子的动能大小都应当由光强度决定。另外,按照经典理论,电子逸出金属所需的能量需要一定的时间来积累。

为了解决经典光电理论与光电效应实验规律之间的矛盾,在 1905 年,爱因斯坦在本