

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

计量技术基础

赵 军 郭天太 主编

Zhao Jun Guo Tiantai

Fundamental of Metrology

清华大学出版社

内容简介



普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

本书可作为高等院校仪器科学与技术专业及相关专业的教材，也可供从事仪器科学与技术工作的工程技术人员参考。

ISBN 978-7-302-47722-4 定价：39.00元

计量技术基础

Fundamental of Metrology

赵军 郭天太 主编

Zhao Jun, Guo Tiantai

2017年12月第1版第1次印刷

ISBN 978-7-302-47722-4
定价：39.00元

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以国际单位制中的七个基本单位为主线,系统介绍了计量技术方面的基础知识。主要包括:绪论、长度计量、质量计量、时间计量、电流计量、温度计量、物质的量计量、发光强度计量和复合物理量计量等。各章均附有思考题与习题可供选用。

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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计量技术基础/赵军,郭天太主编. —北京:清华大学出版社,2017

(普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材)

ISBN 978-7-302-47155-4

I. ①计… II. ①赵… ②郭… III. ①计量—高等学校—教材 IV. ①TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 116683 号

责任编辑:许 龙

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:9.25

字 数:220千字

版 次:2017年7月第1版

印 次:2017年7月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:29.80元

产品编号:034647-01

清华大学出版社

京 北

前 言

FOREWORD

计量在国民经济中发挥着不可替代的重要作用,它涵盖了有关测量的理论与实践的各个方面。随着我国经济建设和科技事业的发展,计量在科学研究、工业制造和日常生活中的作用日益突出。但是,计量在社会发展中的重要作用还没有得到应有的重视。其中的一个重要原因,在于没有合适的切合层次不同、专业背景各异的读者需要的教材。本书试图在这一方面做出自己的努力和贡献。

计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动。由这一定义可以看出,计量单位是计量的基石,而国际单位制中的七个基本单位则构成了目前全球计量系统的基础。但是在目前的计量类教材中,对计量单位的重视明显不够,无法体现计量的特色。本书以国际单位制中的七个基本单位为主线,对相关的计量技术进行了系统介绍,尤其注重对作为计量核心环节的量值传递与溯源的介绍,密切联系计量实践,具有较好的先进性和实用性。

本书的编写人员承担中国计量大学计量类特色课程“计量学基础”和“量值传递与溯源”多年,对计量的内涵、应用及发展现状有着全面而系统的理解,这为我们编写本教材提供了重要的经验和思路。

本书由中国计量大学赵军、郭天太、孔明、王道档、刘维五位老师合作编著。其中,赵军编写了第1章、第2章、第9章第1节;郭天太编写了第4章、第5章、第9章第4节、第7节和第8节;孔明编写了第6章、第7章、第9章第5节和第6节;王道档编写了第8章、第9章第2节;刘维编写了第3章、第9章第3节。

清华大学出版社对本书的出版做了大量的工作,在此深表谢意!中国计量大学计量测试工程学院对本书的编写工作给予了大力支持。在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,加之计量涉及的内容广泛,覆盖较多学科,书中存在缺点和不足之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2017年1月于杭州

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 计量的基本概念及其意义	1
1.1.1 计量的定义与分类	1
1.1.2 国际单位制	2
1.1.3 计量的意义	3
1.2 计量的发展历史、现状与发展趋势	4
1.2.1 计量的发展历史	4
1.2.2 计量的现状与发展趋势	7
1.3 量值的传递与溯源	9
1.3.1 量值传递的基本概念	10
1.3.2 我国的量值传递体系	10
1.3.3 量值溯源的基本概念	11
1.3.4 我国的量值溯源体系	12
1.3.5 量值传递与量值溯源的比较	13
1.4 计量基准与计量标准	14
1.4.1 计量基准的建立	14
1.4.2 计量标准的建立	14
思考题	15
第 2 章 长度计量	17
2.1 长度计量的基本概念	17
2.2 长度单位“米”的定义	17
2.2.1 定义“米”的基准	17
2.2.2 长度计量的几项基本原则	19
2.3 长度的量值传递与溯源	20
2.3.1 长度国家基准仪器	20
2.3.2 长度量值传递标准器	21
2.3.3 长度量值传递方法	22
2.3.4 长度计量的基准、标准、量值传递及计量检定系统表	23
2.4 长度计量设备应用实例	27
2.4.1 测长仪	27
2.4.2 测长机	28

2.5	长度计量技术的发展	29
2.5.1	长度计量技术的发展趋势	29
2.5.2	纳米计量	30
	思考题	33
第3章	质量计量	34
3.1	质量计量的基本概念	34
3.1.1	质量计量在国民经济各部门中的作用	34
3.1.2	质量的物理概念	35
3.1.3	质量单位的发展	35
3.1.4	质量计量的发展动态	36
3.2	质量的量值传递与溯源	37
3.2.1	质量量值传递系统	37
3.2.2	砝码的检定	37
3.2.3	天平的分类与检定	40
3.3	质量计量设备应用实例	42
	思考题	44
第4章	时间计量	45
4.1	时间的基本概念	45
4.2	时间单位“秒”的定义	45
4.2.1	日、月、年的由来和发展	46
4.2.2	世界时及平太阳秒	46
4.2.3	历书时及历书秒	46
4.2.4	原子时与原子秒	47
4.2.5	国际原子时、协调世界时和闰秒	48
4.3	时间的量值传递与溯源	48
4.3.1	时间与频率的关系	48
4.3.2	时间频率量值传递	48
4.4	时间计量设备应用实例	50
4.4.1	原子钟	50
4.4.2	新型时间计量设备	50
	思考题	51
第5章	电流计量	53
5.1	电流单位“安培”的定义	53
5.1.1	电流计量的意义	53
5.1.2	电流单位	53
5.1.3	电流计量的起源	54
5.1.4	电流自然基准的研究进展	54
5.2	电流的量值传递与溯源	56
5.2.1	电流单位的复现	56
5.2.2	电学单位的保持	58

5.2.3 电流的量值传递与溯源	58
5.3 电流计量设备应用实例	62
5.3.1 分流器	62
5.3.2 电流比较仪	62
思考题	63
第6章 温度计量	64
6.1 温度单位“开尔文”的定义	64
6.2 温度计量的起源与发展	65
6.2.1 温度计的早期研究	65
6.2.2 经验温标的建立	66
6.2.3 温度计量的发展	66
6.3 温度的传递与溯源	68
6.3.1 比对	68
6.3.2 电阻温度计的检定	68
6.3.3 高温区温度传递	69
6.3.4 温度计量器具检定系统	69
6.4 温度计量设备应用实例	70
6.4.1 测温电桥	70
6.4.2 玻璃液体温度计	71
思考题	74
第7章 物质的量计量	75
7.1 物质的量单位“摩尔”的定义	75
7.1.1 物质的量单位的物理概念	75
7.1.2 物质的量的单位“摩尔”的定义	75
7.2 物质的量的量值传递与溯源	76
7.2.1 摩尔的起源	76
7.2.2 摩尔的复现及发展趋势	77
7.2.3 阿伏伽德罗常数的测量及现有水平	78
7.3 物质的量计量设备应用实例	81
思考题	83
第8章 发光强度计量	84
8.1 发光强度计量的基本概念	84
8.1.1 “坎德拉”的诞生与演变	84
8.1.2 铂凝固点黑体基准的确立	85
8.1.3 依据 K_m 值重新定义坎德拉	86
8.1.4 我国光度基准的建立	87
8.1.5 坎德拉相关辐射量和光学量的定义	87
8.2 发光强度量值传递与溯源	89
8.2.1 发光强度的传递与溯源	90
8.2.2 国家发光强度基准仪器	90

8.2.3	发光强度单位国际比对	93
8.3	发光强度计量设备应用实例	94
8.3.1	标准灯要求	94
8.3.2	检定过程	95
	思考题	98
第9章	复合物理量计量	99
9.1	电容的计量	99
9.1.1	电容计量的基本概念	99
9.1.2	标准电容器的检定	100
9.2	光照度的计量	103
9.2.1	光照度的量值传递与溯源	103
9.2.2	照度计和其相关要求	103
9.2.3	照度计量设备的应用实例	105
9.3	流量的计量	107
9.3.1	流量的定义	107
9.3.2	流量计量的内容	108
9.3.3	流量的检定	108
9.4	磁感应强度和磁通的计量	112
9.4.1	磁场计量	112
9.4.2	磁通计量	113
9.4.3	磁感应强度和磁通的计量基准与量值传递系统	113
9.5	声压的计量	116
9.5.1	声压的定义	116
9.5.2	声学量值的传递	116
9.5.3	标准传声器的计量	122
9.6	射频与微波功率的计量	124
9.6.1	射频与微波功率常用计量单位	124
9.6.2	射频与微波功率测量工具和检定系统框图	124
9.7	pH(酸度)的计量	126
9.7.1	pH的原理和定义	126
9.7.2	pH计与测量原理	126
9.7.3	pH基准和标准	127
9.7.4	pH计量器具的检定	130
9.8	放射性活度的计量	133
9.8.1	放射性活度的基本概念	133
9.8.2	放射性活度的量值传递与溯源	133
9.8.3	放射性活度测量的主要仪器	135
9.8.4	放射性活度测量的主要方法	136
	思考题	138
	参考文献	140

第1章

绪论

1.1 计量的基本概念及其意义

1.1.1 计量的定义与分类

按照 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》中的定义,计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动。计量的本质特征是测量,因而计量是实现单位统一、量值准确可靠的测量。计量是利用科学技术和监督管理手段实现测量准确和可靠的一种工作,在整个测量领域起着指导、监督、保证和仲裁作用。

测量是指通过实验获得并可合理赋予某量一个或多个量值的过程。它是人类认识自然和改造自然的一种基本手段,是科学技术研究与发展的前提和重要的基础技术,它广泛存在于现代社会的各种活动中,承担着基础性和支持性的功能。科学研究需要客观精确的测量数据;技术开发需要对材料性能和效率等进行分析测量;在生产制造中,对各类特性指标的测量是保证各生产环节符合工艺标准、实现顺利衔接的必要技术支持;在与人们生活直接相关的市场交换和社会服务领域,需要开展多种分析测量活动,如公平的测量会促进市场交易的顺利进行,产品是否符合质量标准需要通过检测来确定,而标准的提高必须以相应的分析测量技术为保障,疾病诊断和治疗需要获得关于机体指标的测量结果,保持良好的生态环境需要对大气、水体、土壤等的成分进行分析检测,等等。

计量与测量之间的关系十分密切,具有共性,都是解决“量”的问题,均属于测量领域。测量是计量的依托,没有测量就谈不到计量;计量是使测量结果真正具有价值的基础,计量又促进了测量的发展。也可以说计量是测量的一种特殊形式,它保证测量统一和量值准确。

凡是保证“计量”这一类操作有效进行以及为实现单位统一、量值准确可靠而进行的活动,都称作“计量”。这些工作包括测量单位的统一,测量方法(如仪器、操作、数据处理等)的研究,量值传递与溯源系统的建立和管理,以及同这些工作有关的法律、法规的制定和实施等。

计量涉及社会的各个领域,可以从多个角度进行分类。

计量依据其社会功能可分为以下三类:法制计量、科学计量和工业计量。

(1) 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,包括计量单位、计量器具(特别是计量基准、标准)、计量方法以及计量人员的专业技能等的明确规定和具体要求。法制计量主要涉及安全防护、医疗卫生、环境监测和贸易结算等有利害冲突或特殊领域的强制计量。例如关于衡器、压力表、电表、水表、煤气表、血压计等的计量。

(2) 科学计量:科学计量主要是指基础性、探索性、先进性的计量科学研究。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机构的主要任务。

(3) 工业计量:工业计量也称工程计量,是指各种工程、工业企业中的应用计量。例如关于能源、原材料的消耗、工艺流程的监控和产品质量与性能的计量测试等。工业计量涉及面广,是各行各业普遍开展的一种计量。

现代计量科学技术通常是按被测量的专业进行分类的,即分为十大计量。主要包括几何量计量、温度计量、力学计量、电磁计量、化学计量、光学计量、声学计量、无线电计量、时间频率计量和电离辐射计量。十大计量的具体内容如下:

(1) 几何量计量:又称长度计量,是对物体几何量的测量技术。涉及波长、刻线量具、光栅、感应同步器、量块、多面体、角度等具体的测量。生活中常用的直尺、钢卷尺,在军事和交通中广泛应用的卫星定位系统等,都是几何量计量的研究成果。

(2) 温度计量:温度是表示物体冷热程度的物理量。温度计量是利用各种物质的热效应来测量温度的计量技术。

(3) 力学计量:是对物质力学量的计量和测试。它涵盖的内容较多。

(4) 电磁计量:是根据电磁基本原理,应用各种电磁标准器和电磁仪表,对各种电磁物理量进行测量。

(5) 化学计量:是借助高精度的计量装置、计量方法和各种标准物质,通过标定工作仪器仪表,以保证化学参量的准确一致的一门计量。

(6) 光学计量:是研究光辐射量和光辐射在介质中的传播性质的测量技术。

(7) 声学计量:是通过介质把声发射器和声接收器耦合起来,从声发射器的电输入端得到一电信号,接收器端的电信号随发射器的电信号的改变而变化。

(8) 无线电计量:指对无线电技术所用全部频率范围及电气特性的测量。

(9) 时间频率计量:时间是一基本的物理量,在单位时间内周期运动重复的次数称为频率。时间是物质运动的一种表现形式,频率是时间的倒数。时间频率计量即关于时间和频率的计量。

(10) 电离辐射计量:电离辐射计量的研究对象是能产生电离的带电电离粒子和不带电粒子,或者两者混合组成的任何辐射。

1.1.2 国际单位制

计量单位也称测量单位,简称单位,它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。计量单位具有根据约定赋予的名称和符号。

国际单位制是由国际计量大会(CGPM)批准采用的基于国际量制的单位制,它是在米制的基础上发展起来的一种一贯单位制,其国际通用符号为“SI”。它由 SI 单位(包括 SI 基本单位、SI 导出单位),以及 SI 单位的倍数单位(包括 SI 单位的十进倍数单位和十进分数单位)组成,如表 1.1 所示。SI 基本单位有 7 个,分别是长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安培)、热力学温度(开尔文)、物质的量(摩尔)、发光强度(坎德拉),它们是构成 SI 的基础。SI 导出单位是用 SI 基本单位结合辅助单位以代数形式表示的单位。

表 1.1 国际单位制(SI)

量	量的符号	名称	单位符号
长度	l, h, r, x	米	m
质量	m	千克	kg
时间	t	秒	s
电流	I	安[培]	A
热力学温度	T	开[尔文]	K
物质的量	$n, (v)$	摩[尔]	mol
发光强度	I_v	坎[德拉]	cd

1.1.3 计量的意义

对于计量的意义和价值,常见的有两种回答的方法。第一种方法是利用当今流行的评价词汇:综合国力、国际竞争力、国家安全、战略意义、科学发展观、公平竞争、保护环境资源,一直到和谐社会、幸福指数等,用这些词汇来表述计量的重要性。另一种方法则是从计量的本质出发来认识计量工作的意义和价值,需要根据经济、科技、社会的新发展,不断研究计量的作用和贡献。

在人们广泛的社会活动中,每时每刻都在进行着大量的各种不同的测量,科学实验、工农业生产、商品流通、人民生活都离不开测量,而且在测量过程中都在追求测量的准确。没有准确的测量,则会出现科学实验数据虚假、工艺过程无法控制、产品加工质量低劣、能源消耗心中无数、贸易结算产生分歧、市场买卖缺斤少两、医疗卫生错诊错治、统计报表数据不实、经济管理假账真算等现象,这些现象将对国民经济的各个领域、社会活动的各个方面发生影响,使社会经济活动不能正常进行、经济秩序发生混乱。计量工作就是为测量的准确提供可靠的保证,确保国家计量单位制度的统一和全国量值的准确可靠,这是国家的重要政策。可见,计量是发展国民经济的一项重要技术基础,是确保社会活动正常进行的重要条件,是保护国家和人民利益的重要手段,在国民经济中具有十分重要的作用。

我们必须不断提高和深化对计量意义和价值的认识,同时向社会进行宣传。科学技术的新进展将改变计量基(标)准所依据的基本单位结构和科技基础,经济社会的新发展将改变计量工作的角色。

计量工作是社会经济中一项重要的技术基础和管理基础,在经济全球化以及科学技术迅猛发展的趋势下,面对我国社会主义市场经济日趋完善的新形势,计量工作到底应该怎样

定位、怎样发展,是质量技术监督部门乃至全社会都应该关注的重大课题。如果标准体系和计量体系落后,国家的一切都会落后。法制计量工作的发展改革必须确保其规模和水平与国民经济和社会发展水平相适应,功能和机制与市场经济体制相适应,运作和规范与国际惯例相适应,从而发挥法制计量的技术保证作用和技术监督作用。

只有有效的测量才是能够满足需要的测量。绝大多数测量都是采用相对法,即通过测量方法将待测对象与相应的测量标准进行比较而获得测量结果。测量标准是人们已了解的对象,通常就是作为标准的量的测量单位,它在测量中具有不可替代的作用。此外,进行测量通常要借助能复现测量单位的工具。要使测量结果具有社会应用价值,必须使测量单位得到社会的认可,并保证复现测量单位的工具准确可靠。人类社会通常用权力和法制手段来明确全社会统一采用的测量单位及复现这些测量单位的工具,它们被称为计量单位和计量基、标准。

有效的测量必须是可靠的和可比的。测量结果要得到认同,还必须具有一致性和可比性。一致性是计量的本质特性,即必须实现单位统一和量值统一。一致性反映在测量结果上,要求测量结果具有可比性。不具有可比性的测量结果,无法在科研、生产、商业、服务等领域发挥应有的作用,其“准确性”便失去意义。在经济全球化的背景下,测量工作需要具有国际一致性,即不同国家的测量数据应该能够通过量值的比对达到一致。

可靠的和可比的测量必须是可溯源的。测量结果的一致可比,需要以严格的量值传递和溯源为保障。量值传递是指通过对计量器具的校准或检定,将计量基准所实现的单位量值,通过各等级的计量标准传递到工作计量器具的活动,以保证测量所得的量值准确一致。量值溯源是量值传递的逆过程,它是指通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链,使测量结果或计量标准的值能够与规定的计量标准联系起来。量值传递与溯源将所有测量活动联结起来,使它们具有了内在一致性。由此,在不同地点、不同时间、根据不同测量目的所进行的一切分析测量活动,都因为有了量值传递与溯源的联接而具有了一致性和可比性。这种通过统一计量单位和复现计量单位的计量标准来保证测量结果准确可靠的复杂活动就是计量。

总之,在社会的发展过程中,要强化计量意识,更新计量管理观念,自觉遵守《中华人民共和国计量法》。计量是提高经济效益的重要技术基础保障。企业要适应市场的需要,必须建立和完善计量、检测手段,切实提高计量检测水平和计量管理水平,实现对人、机、料、法、环的有效控制,使计量和测试密切结合,提高计量保证的能力和水平。

1.2 计量的发展历史、现状与发展趋势

1.2.1 计量的发展历史

1. 国内发展历史

计量的历史源远流长。在人类社会发展中,计量随着社会分工和商品交换的产生应运而生,并随着科学技术和社会生产力的发展而发展。计量的发展历史大体可分为古代、近代和现代三个阶段。

中国古代计量的发生,可以追溯到四五千年以前的原始社会末期。随着生产社会化程度的提高和社会组织形式的进步,人们开始提出对时间、长度、容量、重量等计量的需要。我国古籍记载,黄帝创立了度、量、衡、里、数五个量,命大挠作甲子以记日;尧命令羲、和两人参照日月、星辰制定历法;舜东巡时协调各部落、氏族的日月和四时季节,统一音律和度量衡;夏禹使用规矩、准绳治水患并以自己的身长、体重作为长度和重量标准等。这些传说记载在一定程度上反映了上古时代计量发生的萌芽情况。

商周时期开始有计量器具和制度出现。今有传世的商代(前16世纪—前11世纪)的一支骨尺,尺长17cm,刻十个寸格;二支牙尺,尺长15.8cm,等分十寸,每寸刻十分。商代甲骨文中土地面积单位“田”字,以及采用干支记日法和“十三月”的记载。商代历法以366天为一年,一年分为12个月,每逢闰年加一个月。计量昼夜时刻的漏刻相传始于黄帝,应用于夏商。西周(约前1046—前771)的青铜器铭文中,记有“斗”“勺”为重量单位的名称,周王室和领主贵族以一定量的铜作为赏赐、交换的等价物,可推测在金属货币出现以前或同时,即在殷商后期或西周早期,重量计量已经产生并得到应用。而由于盛量谷物、交纳赋税的需要,容量计量会比重量计量出现得更早。史书记载,商周时期官府设有颁行度量衡标准和管理度量衡器具的官职。

春秋战国是计量发展繁荣的时期。公元前350年,商鞅辅助秦孝公第二次变法,把百步为亩的“阡陌”和每一顷田的“封疆”统统废除。采用二百四十步(六尺为步)为一亩、百亩为顷的大亩积制,实行百亩给一夫的授田制,确认自耕农的土地所有制,促进了小农经济的发展。秦孝公十八年(前344),商鞅借鉴齐国量制,监制了标准铜方升,“一度量、平权衡、正钧石”,推行统一的度量衡制。

秦二十六年(前221),秦始皇统一全国后,实行“一法度衡石丈尺,车同轨,书同文字”等一系列巩固中央集权的措施。以皇帝的最高权威颁布统一度量衡的诏令,命令丞相隗状、王绾和李斯等“法度量则不壹,歉(嫌)疑者皆明壹之”,立下法令,把度量衡单位制统一起来。诏令40个字,用统一的官方格式和小篆体铸刻在度量衡器物上,规定凡“舟舆所载,日月所照”都要遵照执行。同时监制了成套的权衡和容量标准器颁发到全国各地,把商鞅在战国秦实施一百多年的度量衡单位制推行到全国。至今留传下来的秦权和秦量实物有70多件,制造精良,示值准确。

三国、两晋、南北朝时期,度量衡单位量值经历了剧烈的变化过程。农村自然经济占主导地位,实物租税苛繁,促使度量衡器具使用面扩大。杆秤已普遍使用,且通行大单位量制。到北魏后期,北周的度量衡单位量值与汉末相比,尺度值增长30%,容量和衡重均增长约一倍。

公元589年隋朝建立了统一的多民族国家,就把北周达到的单位量值作为隋代的大单位量制标准。1尺合30cm,1升合600mL,1两合41.25g~43.3g,1斤合660g~693g。这是中国第二轮统一的度量衡单位量制。

唐、宋、元是我国封建社会全盛时期。到了明清,国家由一度辉煌到逐渐衰落,明代中叶出现了资本主义萌芽。这一时期近1300年的度量衡技术和管理,在单位量制基本统一的基础上稳步发展,度量衡器具技术进步,品种增多;单位名称和进位关系进一步理顺。

清末光绪二十九年(1903)规定以尺、升、两为度量衡的基本单位,终于组成了中国两千多年来独特的、统一的、科学的度量衡单位制体系。于宣统元年(1909)由国际权度局

(BIPM)制造了营造尺和库平两铂铱合金原器各一件,开始了用国际先进计量科学技术对中国古代度量衡的改造。

中国古代创造发明了许多测量原理、方法和器具,达到当时世界领先水平。

2. 西方发展历史

国外的计量也出现得很早,但同样存在着各国自行其是、交流不便的问题。

17、18世纪,西方进入近代工业文明时代。生产力的发展促进了近代自然科学的产生和发展,也扩大了社会劳动分工,促进了商品生产和流通。随着机器大工业的产生和发展、贸易的迅速发展和国际化,特别是物理学等实验科学的飞速发展,一方面,需要测量的量已从传统的度量衡剧增至上百个;另一方面,作为测量基础的计量单位要求更为准确可靠,原有的计量准确度已无法满足工业生产中的互换性要求(工业生产过程中,零件往往在许多地方完成,最后再组装)以及科学技术中精密仪器提出的需要。同时,实验科学和大机器生产(冶金)等的发展也为创建新的计量单位和计量标准(从材料和工艺上)提供了物质基础,由此带来了各类计量精度的提高,该阶段的计量准确度已达到万分之一到亿分之一。

英国物理学家牛顿深入研究和描述了经典力学的经验规律,于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。同时,牛顿力学对热学、电磁学等的研究影响,也为近代计量学的创建和测量技术的发展奠定了基石。

从伽利略到牛顿时期的近代科学革命算起,近代计量学已有300多年的历史。从18世纪50年代起,由于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,这种情况不利于交流,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个适合于各国的通用的计量单位制。

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。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,长度单位名称没有采用法语,而用古希腊语 meter,意为测量。一米的长度与当时欧洲各国原有的旧值单位数值相近。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一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年法国国民会议采纳了根据子午线弧度的长度而定义的长度单位。1799年测绘学家的大地测量工作最终完成,铸出了纯铂米和千克原器。同年12月10日,相关法律的颁布确定了米和千克的值。

1837年7月4日的法令终于确定法国从1840年1月1日开始实行“米制”。欧美的科学家创建了一种以科学实验为基础、可在国际上通用的计量单位制:根据过巴黎地球子午线1/4长度的一千万分之一建立了铂铱合金制的米原器,根据1升水在规定温度下的质量建立了铂铱合金制的千克原器,根据地球绕太阳公转周期确定了时间(历书时)单位秒等,形成了米制,也是今天国际单位制(SI)的基础。

1875年5月20日《米制公约》的签订,标志着各国计量制度开始趋向统一,计量进入了一个以宏观现象定义计量单位、以人工实物作为复现计量单位的计量标准、以实验为科学基础进行模拟测量的经典阶段。1999年,第21届国际计量大会(CGPM)决定把每年的5月20日确定为“世界计量日”。

19世纪初,米制开始走向世界。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。1954年,第十届国际计量大会决定采用米、千克、秒、安培、开氏度(后改为“开尔文”)、坎德拉6个单位作为建立新单位制的基本单位。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。

1.2.2 计量的现状与发展趋势

进入20世纪后,大工业生产的巨大发展和科学技术的重大进步,特别是以量子力学和相对论为基础的近代物理学的发展,也使计量进入了发展的新阶段。1955年签订《国际法制计量组织公约》,1960年第11届国际计量大会通过国际单位制,标志着各国计量制度的基本统一和计量的基本成熟。

1960年以后出现了一系列事件,使得现代计量的发展真正进入了一个新的时期:1960年10月出现了第一台激光器;1962年约瑟夫逊预言两块靠得很近的超导体之间存在某种量子跃迁现象,一年后实验证实了这一效应,被称为约瑟夫逊效应;1965年蓬斯和哈特发明了X射线干涉仪;1972年美国首先实现了激光频率的绝对测量,为准确测量光速提供了新的手段;1979年克里青发现了量子化霍尔效应;1984年彭尼和罗厄研制成扫描隧道显微镜;20世纪90年代,又发现了单电子隧道效应。这些事件的出现都极大地影响了现代计量发展的进程。

传统的计量方式因现代自动化仪表和计算机技术的出现正在进行划时代的变革,参量之间互相渗透,检测方法与设备的光、机、电结合,数字测量逐渐取代模拟测量,这些已成为现代计量的特点。现代计量的准确度已达到亿分之一到亿亿分之一。而现代计量最显著的标志就是由经典理论转向量子理论,由宏观物体转向微观世界。其最为突出的成就,就是以量子理论为基础的微观量子基准逐步取代过去的宏观实物基准。

20世纪上半叶以前,基本单位的量值由实物基准复现和保存。实物基准一般是根据经典物理学的原理,用某种特别稳定的实物来实现。如保存在法国巴黎国际计量局(BIPM)的铂铱合金圆柱——千克砝码原器的质量就定义为质量单位“千克”,按X型铂铱合金米尺的刻线间距离定义长度单位“米”,用一组饱和式韦斯顿标准电池的端电压平均值保持电压单位“伏特”,用一组标准电阻线圈的电阻平均值保持电阻单位“欧姆”,等等。

实物基准的局限性很大,尽管它们是用19世纪末20世纪初工业界所能提供的最好的材料及工艺制成,在当时也满足了对于计量基准的准确度及稳定性的要求,但是,这样的实物基准一旦制成后,总会有一些不易控制的物理、化学过程使其特性发生缓慢的变化,因而,它们所保存的量值也会有所变化。如铂铱合金千克砝码原器会缓慢地吸附其表面及内部的气体,表面沾上的微尘,甚至多年使用中形成的磨损及划痕均会使其质量发生变化,这些逐年积累的变化其准确数量很难确切查明。19世纪制作千克砝码原器时,一共制作了几十个,分别保存在国际计量局和各米制公约成员国,彼此的偏差在 10^{-9} 量级,目前,这些原器之间的偏差已达到 5×10^{-8} 。不能设想保存在国际计量局的千克砝码原器未变,只是其他砝码在变。一般认为保存在国际计量局的千克砝码原器也已有了 10^{-8} 量级的变化。

此外,最高等级的实物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此中断;按实物基准进行的量值传递系统庞大繁杂,从最高等级的实物基准到具体的应用场所,量值要经过多次传递,准确度也必然会有所下降。

上述问题已经使传统的量值传递系统日益不能适应需要。20世纪下半叶以来,与传统的实物基准完全不同的量子基准的出现,为解决以上问题提供了全新的途径。量子基准的准确度一般要比实物基准高几个数量级;它是一种物理实验装置,可以多处建立,不会有一旦损坏就不能准确复现的问题;按照相同原理建立的量子基准,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。国际上已正式确立的量子基准有:1960年用氪-86原子的特定能级跃迁所定义的长度单位米基准、1967年用铯-133原子的特定能级跃迁所定义的时间单位秒基准、利用1975年获得诺贝尔物理奖的约瑟夫逊效应建立的电压单位伏特基准和利用1985年获得诺贝尔物理奖的量子化霍尔效应建立的电阻单位欧姆基准。

2014年第25届国际计量大会(CGPM)在法国巴黎近郊凡尔赛市的会议中心举行。本次CGPM大会通过了若干决议,涉及国际计量一系列重大改革,包括关于国际单位制(SI)的未来修订。目前,用普朗克常数 h 、基本电荷 e 、玻尔兹曼常数 k 和阿伏伽德罗常数 N_A 重新定义千克、安培、开尔文和摩尔的工作取得显著成果,所需数据已基本满足SI重新定义的要求。其中最困难的、用于“千克”重新定义的普朗克常数测量,也已取得阶段性进展。

中国计量科学研究院从2005年起开展了旨在应对SI修订的基本物理常数测量研究项目,经过近10年的努力,在玻尔兹曼常数、普朗克常数、阿伏伽德罗常数、精细结构常数测定方面取得了令人瞩目的成果。其中,玻尔兹曼常数的测定采用两种不同方法,均获得令人满意的结果,并被CODATA收录,为该常数的国际定值做出了重要贡献。

目前,国际上关于量子基准的研究有以下趋势:

一是在国际单位制的基本单位中,其他基本单位的基于量子跃迁的自然基准也在积极探索之中。包括:利用单电子隧道效应,通过一个个数电子,来实现电流的量子基准;利用机械功率与电功率相比较,或者利用超导磁悬浮方法测定磁通量子等各种途径,来监视进而替代千克砝码原器——这是七个基本量中目前唯一还在使用的实物基准;利用X射线晶体密度法,来精密地确定阿伏伽德罗常数,这也是实现物质的量的单位——摩尔的重要途径之一。

二是探索以基本物理常数定义基本单位。由于已建立的量子基准总是伴随着某一种具体的量子物理手段,从而定义了一种基本单位,如果这种手段有了新的发展,人们就会面临着是否要改变基本单位定义的问题。例如,现在的时间(频率)单位是用铯原子的超精细能级的跃迁频率定义的,如果发现了其他复现性更好的跃迁频率(目前的候选者有钙原子、汞原子、激光等),时间(频率)单位的定义就有可能改变。但频繁改变单位定义是人们所不希望的,因此,就有必要探索更为稳定的单位定义方法。

2011年,国家质检总局发布了《“十二五”计量发展规划》及五个子规划,围绕建设和谐社会的宏伟目标,认真探索并遵循计量事业的发展规律,以加强能力建设为基础,以管理创新、科技创新为手段,以民生计量、能源计量为重点,充分发挥计量在推动科学技术进步、服务经济转型和促进社会发展、提高科学管理水平、满足经济全球一体化进程需要等方面的基础和先行作用。通过五年的发展,逐步达到:法规体系更加完善,技术基础更加坚实,量传

溯源体系更加完备, 行政监管更加有效, 服务能力显著提高, 国际地位明显提升。“十二五”期间计量发展目标如下:

(1) 建立起以新《计量法》为核心的法律法规体系。完成新《计量法》的修订, 并及时制定、修订与之配套的计量法规和规章, 逐步形成以《计量法》为主要法律依据, 计量行政法规和部门规章为配套, 地方计量法规、规章为补充的计量法律法规体系。

(2) 计量基(标)准水平逐年提高。计量基(标)准水平不断提升, 主要国家计量基(标)准实现国际等效的比例达到 80% 以上; 参加国际比对项目增加 100 项以上, 我国得到国际承认的校准测量能力(CMC)项目达到 1000 项以上, 省级(含)以上计量院(所)力争每年都有科研成果获得省部级(含)以上奖励。

(3) 量值传递与溯源体系满足社会发展需要。量值传递与溯源机制更加统一、高效, 计量基准、计量标准、工作计量器具之间的量值传递与溯源系统更加科学合理, 社会公用计量标准、国家有证标准物质能够覆盖重点计量检测领域, 量值传递与溯源体系满足经济转型、产业调整、低碳经济、节能环保等社会发展的需要。

(4) 建立起更加有效的计量监督体系。通过不断完善计量监督管理, 达到行政许可行为规范。强制检定管理到位, 计量执法有力, 计量监督有效。建立起计量违法行为基本杜绝、诚信计量体系基本建立、民生计量全面惠民、能源计量深入有效的良好计量环境。

(5) 计量技术机构服务能力明显增强。计量技术机构基础设施明显改善, 技术装备水平明显提升, 技术服务能力明显增强。构建起分工明确、服务优质、行为公正、廉洁高效的、适应市场经济发展需要的计量技术机构公共服务平台。

(6) 计量国际影响力明显提升。参加国际关键比对和承担主导实验室的项目数量不断增加, 与发达国家计量合作与交流项目不断增多, 采用国际技术标准的比例不断提高, 计量技术规范符合 WTO/TBT 协议的要求, 计量在国际计量中的地位和影响力不断增强。

1.3 量值的传递与溯源

“量值传递”和“量值溯源”从计量技术方面来说没有多少差别, 但其内涵不同。量值传递是从国家计量基准开始, 按国家计量检定系统表和计量检定规程, 逐级检定, 把量值自上而下传递到工作计量器具。而量值溯源则是从下至上追溯到计量标准, 直至国家和国际计量基准。它可不按严格的等级进行检定或校准, 打破等级或地区的界限, 中间环节少, 可使测量准确度损失少。

量值传递与量值溯源是我国量值准确统一的根本保证。量值传递体系是根据我国《计量法》按照经济合理、就地就近的原则, 按照国家计量检定系统表, 以计量检定、校准为手段, 从能复现单位量值的国家基准开始, 通过各级计量标准的逐级传递, 最终传至工作计量器具。它的主要优点是传递可靠、管理方便, 是法制计量的根本保障。

国家计量基准由国务院计量行政部门建立, 是全国量值的最高依据。县级以上地方人民政府计量行政部门根据本地区需要, 建立的社会公用计量标准经上级人民政府计量行政部门考核合格后方可使用, 社会公用计量标准器具、部门和企事业单位使用的最高标准计量器具以及实行强制检定的工作计量器具, 未按规定申请检定或检定不合格的, 不得使用。这样环