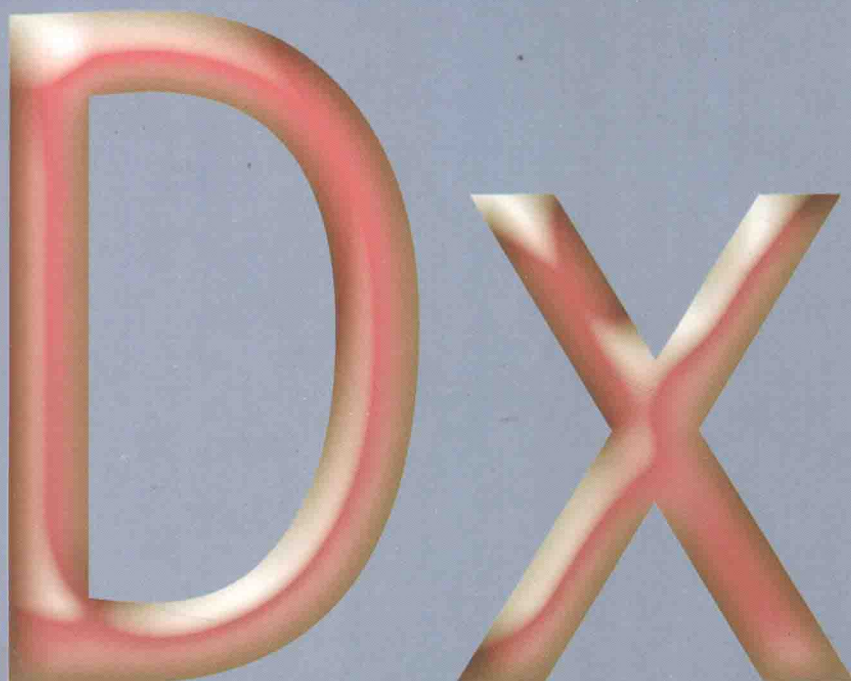


新编计量技术初级教材

电学计量

(第二版)

张建志 贾克军 丁振君 编著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

新编计量技术初级教材

电 学 计 量

(第二版)

张建志 贾克军 丁振君 编著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

图书在版编目(CIP)数据

电学计量/张建志,贾克军,丁振君编著. —2 版. —北京:中国计量出版社,2010. 10
新编计量技术初级教材

ISBN 978 - 7 - 5026 - 3333 - 2

I. ①电… II. ①张…②贾…③丁… III. ①电学—计量—技术培训—教材

IV. ①TB971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 167238 号

内 容 提 要

本书共 17 章。第一章讲述电学计量的基本概念、测量误差和测量不确定度等基础知识。第二章讲述电测量指示仪表的基本结构和工作原理,误差和准确度,主要技术特性,分类和使用等知识。第三章至第七章讲述各种电测量指示仪表的工作原理及其检定技术知识。第八章和第九章讲述直流电位差计的工作原理、测量技术及其检定技术知识。第十章和第十一章讲述了直流电桥的工作原理、测量技术及其检定技术知识。第十二章至第十六章讲述各种交流测量仪器及其测量技术,其中包括交流电路中元件的定量分析、测量用互感器的工作原理及特性、互感器校验仪的分类和工作原理、交流电位差计、电能表和电能表标准装置及其试验方法、交流电桥及其应用等内容。第十七章讲述电测装置的干扰和防护技术。

本书可作为从事电学计量的广大初中级技术人员学习培训及大中专相关专业教材及参考读物。

中国计量出版社 出版

地 址 北京和平里西街甲 2 号(邮编 100013)

电 话 (010)64275360

网 址 <http://www.zgjl.com.cn>

发 行 新华书店北京发行所

印 刷 北京市媛明印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16

印 张 20

字 数 458 千字

版 次 2010 年 11 月第 2 版 2010 年 11 月第 2 次印刷

印 数 4001—5500

定 价 42.00 元

如有印装质量问题,请与本社联系调换

版权所有 侵权必究

出版前言

为提高质量技术监督部门、技术机构和企业从事计量测试与检定工作的中青年技术人员、管理人员的专业技术水平和管理水平,中国计量出版社于20世纪80年代中期出版了由原国家计量局组织有关专家编写的一套《计量技术初级教材》,包括《长度计量》、《温度计量》、《力学计量》、《电学计量》、《无线电计量》5个分册。

该书自出版以来,以其通俗易懂、简明扼要、实用性强等特点,受到广大读者,尤其是初、中级计量人员的欢迎,为培养一代计量测试与检定人员起到了重要的作用。

1998年,为适合形势的需要,我社组织数十位长年工作在计量测试领域第一线的、有实践经验的专家(其中多数为该套教材的原作者),重新编写了该套教材,并冠以《新编计量技术初级教材》书名。新编教材的读者对象和写作风格基本不变,注重更新技术内容和采用新的国家计量检定规程和国家标准,并缩减过多的原理阐述和繁杂的、难度较大的数学推导,进一步增强实用性,使之更加贴近基层计量工作者的实际需要。

近年来,由于计量及相关技术快速发展,国家有关标准和检定规程的更新速度加快,该套教材中的许多内容已显陈旧、过时,难以适应当前人员岗位培训和开展计量工作的需要。为此,我社又组织有关专家对该套教材进行了修订。这次修订再版,主要根据新形势下基层计量人员的实际需要内容进行了调整;更新了陈旧、过时的内容;采用了新的计量检定规程和国家标准;增加了最新仪器、仪表和新技术知识介绍等。

本套教材主要供具有中等以上文化程度的、有一定专业实际工作经验的基层计量测试与检定人员、管理人员的短期岗位培训班作教材使用,目的在于使他们经过培训具备开展业务所必备的专业基础知识和基本操作技能。本套教材也可作为质量技术监督行业(相应计量工种)技术工人等级培训与考核的参考教材和相应专业的计量人员的自学用书。

虽经作者和出版社有关人员的多方努力,但本套教材仍难免存在一些这样或那样的问题,望广大读者提出宝贵意见或建议。

最后,在《新编计量技术初级教材》(第二版)问世之际,对参加组织和编写原教材的同志谨致衷心的感谢,他们的辛勤劳动为本套书的出版打下了良好的基础。

中国计量出版社

2010年9月

编者的话

本书是在《电学计量》(1998年版)基础上进行修订的,适合于从事电学计量的广大初中级技术人员进一步学习提高专业知识的需要,也可作为大(中)专文化程度的计量工作人员的参考资料。

近年来,随着科学技术的发展及标准和规程的更新,国家对计量工作提出了更高的要求。为此,我们在新编计量技术初级教材第一版的基础上,进行了修订。修订过程中,广泛听取了从事电学计量教学工作者的意见,将原教材陈旧内容和较深的原理以及繁杂和难度较大的数学推导过程进行了删减。不常用的感应分压器、电流比较仪等已不在本教材中进行阐述,因此原教材的21章缩减为本教材的17章。

本书第一章讲述电学计量的基本概念,测量误差和测量不确定度等基础知识。第二章讲述电测量指示仪表的基本结构和工作原理,误差和准确度,主要技术特性,分类和使用等知识。第三章至第七章讲述各种电测量指示仪表的工作原理及其检定技术知识。第八章至第九章讲述直流电位差计的工作原理,测量技术及其检定技术知识。第十章至第十一章讲述了直流电桥的工作原理,测量技术及其检定技术知识。第十二章至第十六章讲述各种交流测量仪器及其测量技术,其中包括交流电路中元件的定量分析,测量用互感器的工作原理及特性,互感器校验仪的分类与工作原理,交流电位差计,电能表与电能表标准装置及其试验方法,交流电桥及其应用等内容。第十七章讲述电测装置的干扰与防护技术。

第一章至第七章由河北大学质量技术监督学院贾克军编写;第八章至第十一章由河北大学质量技术监督学院张建志编写;第十二章至第十七章由河北大学质量技术监督学院丁振君编写;中国计量出版社副总编辑刘宝兰对全书进行了审定。

本书侧重于基本理论、基本概念的阐述,结合实际介绍测量技术与检定技术,尽量做到深入浅出,简明扼要,通俗易懂。

根据本教材内容,举办培训班可安排60学时,其中实验15学时。作为全日制在校学生教材使用可安排120学时,其中实验40学时。

由于笔者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请使用本书的广大师生和读者批评指正。

编者

2010年9月

目 录

第一章 电学计量的基本知识	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 电学计量的标准量具	(7)
第三节 测量误差的基础知识	(18)
第四节 测量不确定度的分类	(28)
第二章 电测量指示仪表概论	(48)
第一节 指示仪表的基本结构和工作原理	(48)
第二节 指示仪表的误差和准确度	(55)
第三节 指示仪表的主要技术特性	(58)
第四节 指示仪表的分类和使用	(61)
第三章 磁电系仪表	(67)
第一节 磁电系仪表的结构和工作原理	(67)
第二节 磁电系电流表和分流器	(71)
第三节 磁电系电压表和附加电阻	(74)
第四节 磁电系仪表的误差与特性	(80)
第四章 电磁系仪表	(82)
第一节 电磁系仪表的结构和工作原理	(82)
第二节 电磁系电流表和电压表	(84)
第三节 电磁系仪表的误差和特性	(85)
第五章 电动系仪表	(87)
第一节 电动系仪表的结构和工作原理	(87)
第二节 电动系仪表的误差和特性	(94)
第六章 其他型式的仪表	(96)
第一节 整流系仪表	(96)
第二节 静电系仪表	(98)



第三节	万用表	(101)
第四节	绝缘电阻表	(104)
第七章	电测量指示仪表的检定	(108)
第一节	概述	(108)
第二节	电测量指示仪表的检定方法	(109)
第八章	直流电位差计	(117)
第一节	直流电位差计的工作原理	(117)
第二节	直流电位差计的结构特点	(119)
第三节	直流电位差计的误差	(126)
第四节	直流电位差计的一般选用原则	(129)
第九章	直流补偿法测量技术	(130)
第一节	直流补偿法的特点及一般应用	(130)
第二节	补偿替代法的应用	(133)
第三节	差值补偿替代法的应用	(135)
第四节	直流电位差计的检定	(136)
第十章	直流电桥	(144)
第一节	单电桥的结构及工作原理	(144)
第二节	单电桥的测量误差	(145)
第三节	双电桥的结构及工作原理	(147)
第四节	直流高阻电桥	(149)
第十一章	电桥法测量技术	(152)
第一节	单电桥测量电阻的方法	(152)
第二节	低值电阻的测量方法	(154)
第三节	比较电桥法的应用	(156)
第四节	直流电桥的检定	(158)
第十二章	互感器的原理与校验	(177)
第一节	互感器的结构与基本参数	(177)
第二节	互感器的技术特性	(182)
第三节	互感器校验仪	(186)
第四节	磁势比较型互感器校验仪	(193)
第五节	自动数显型互感器校验仪及其正确使用	(197)

第十三章 交流电位差计	(201)
第一节 交流电路中的元件	(201)
第二节 极坐标型交流电位差计	(209)
第三节 直角坐标型交流电位差计	(210)
第四节 交流电位差计的一般应用	(214)
第十四章 交流电能的测量与设备	(220)
第一节 交流功率的测量	(220)
第二节 有功电能的测量	(227)
第三节 感应系电能表	(233)
第四节 特殊用途的电能表	(248)
第十五章 电能表的试验方法	(254)
第一节 试验分类及试验项目	(254)
第二节 周期检定	(255)
第三节 基本误差的测定方法	(261)
第四节 电能表的校验设备	(264)
第五节 电能表现场校验装置	(268)
第十六章 交流电桥及其应用	(272)
第一节 概述	(272)
第二节 参数的测量	(281)
第三节 高压电容电桥的特点	(288)
第四节 变压器电桥的特点	(289)
第十七章 电测装置的干扰与防护	(298)
第一节 干扰影响的原因及其防护要点	(298)
第二节 屏蔽的原理及应用	(300)
第三节 对电容性质漏电的屏蔽方法	(303)
第四节 接地与对称	(307)

第一章 电学计量的基本知识

第一节 概 述

一、测量与计量的概念

人们研究各种事物,要想深入地了解其本质属性及其规律,除了要对它作一定程度的定性分析以外,还必须从数量概念上对它作一定程度的研究。所谓“测量”就是通过物理实验的方法,对被研究的对象进行定量分析与研究的过程。而在实际工作中,为了达到定量研究的目的,往往必须对每一种对象找出一个恒定的参考量,然后再将被研究的对象与其相比较,这样才能得到一个有实际价值的数量概念。否则,缺少统一参考量的测量是没有实际意义的。由此可见,测量概念的本身包含了两层含义:一是要有一个便于与之进行比较的单位;二是要得到与已经定义过的单位进行比较所得到的数量概念。一般来说,这种数量概念指的是被研究的对象是已定义单位的多少倍或几分之几。

如:设某物体为 x_0 ,如欲确定一个同类物体 x 的大小,则只要将 x 与 x_0 进行比较,一般来说是取其二者的比值来表示其数量概念,即

$$A_x = \frac{x}{x_0} \quad (1-1)$$

这里的 A_x 便是对被研究对象 x 经过测量所得到的定量概念。

如果将式(1—1)稍加变换,就可得到

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

式(1—2)的物理意义是:一个物体的大小 x 是指它相当于 A_x 同类单位量 x_0 的大小。由于在测量过程中都是用式(1—2)这种形式来表示测量的结果,所以我们把式(1—2)称为测量的基本方程式。

根据测量的基本方程式可以看出,对于一个客观存在的物理量 x 而言,由于我们选用的测量单位 x_0 不同,那么测量所得到的比值 A_x 也将不同。例如:我们对某一个物理量 x ,先以 x_{01} 为单位与其进行比较,得到一个测量结果,即比值 $A_{x1} = \frac{x}{x_{01}}$;然后再以 x_{02} 为单位与 x 进行比较,又得到一个新的测量结果,即比值 $A_{x2} = \frac{x}{x_{02}}$ 。由于 $x_{01} \neq x_{02}$,所以肯定有 $A_{x1} \neq A_{x2}$ 。这一事实说明,要对某一物理量进行测量,其测量结果的大小与所选择的测量单位有很大的关系。

如果将上述测量结果作一下简单的变换,还可以得到

$$\frac{A_{x2}}{A_{x1}} = \frac{x_{01}}{x_{02}} \quad (1-3)$$



式(1—3)表明,对同一物理量进行测量所得到的结果,与所选用的单位大小成反比。若所选择的单位小,则测量所得到的结果就大;反之,若所选择的单位大,则测量所得到的结果就小。如果将两个不同大小的单位 x_{01} 与 x_{02} 用式(1—4)来表示它们之间的关系

$$K = x_{01}/x_{02} \quad (1-4)$$

这里 K 称为不同单位之间的换算关系,则由式(1—3)和式(1—4)可以得到一个新的关系式

$$\frac{A_{x2}}{A_{x1}} = K \quad (1-5)$$

或者可以写成为

$$A_{x2} = KA_{x1} \quad (1-6)$$

可见,换算系数具有如下的物理意义:当用一定的单位去测量某一物理量,所得到的数值(指 A_x) 乘上换算系数以后,便可得到用另一单位来表示该物理量的数值。

举例来说,电流强度可以用单位“安培”或“毫安”来表示,即取 x_{01} 为“安培”, x_{02} 为“毫安”。今用一块电流表来测量某一电路中的电流,测得结果为 $x = 0.1 \text{ A}$, 即 $A_{x1} = 0.1$ 。如果不再通过实际测量,而只通过换算便可求得此电流强度是多少毫安。即根据式(1—6)算得

$$\begin{aligned} A_{x2} &= KA_{x1} = \frac{x_{01}}{x_{02}} A_{x1} \\ &= \frac{\text{A}}{\text{mA}} \times 0.1 = 100 \end{aligned}$$

故该电流强度也可以表示为 $x = 100 \text{ mA}$ 。

由于测量工作能够给人们提供准确可信的数量概念,这就使人类在认识自然和改造自然方面必然发生质的飞跃。例如,掌握了准确的测量技术,可以不断改进各种产品的设计和生产的工艺流程;减少生产中的原材料消耗和废品率;更好地改善劳动者的工作条件;还可以比较有效地探知自然界的物质财富和能源资源。因而,测量技术是发展科学技术、促进生产发展的一项重要的技术基础工作。

鉴于测量工作的重要性,在社会的发展过程中,测量技术也得到了相应的发展。特别是到了近代,由于科学技术的不断进步,无论从科学技术本身发展的要求,还是从国内与国际间的文化、技术和贸易交流,都要求使测量工作尽量实现统一。否则,由于各个地区或各国之间尽管具备了各自的测量手段,但是由于彼此之间采用的测量单位不同,或者测量结果的准确性相差极为悬殊,那么就将给人类生活、生产和科学实验等活动带来极大的不便和困难。

为了对同一种类的同一个物理量,在不同时间、不同地点和不同条件下进行测量时能够得到彼此相同的结果,就必须采用公认的准确可靠的测量基准,只有这样的测量才有真正的实际意义。为此,在现代,每个国家都设置了专门的法权机关来领导和管理这项工作。在我国则由国家质量监督检验检疫总局专门负责这项工作。由于这项工作纳入了国家行政管辖的职权范围之内,颁发了国家计量管理条例,而且建立了相应的传递系统,制定了有关的技术文件,要求全国有关部门都得共同执行或遵守。因此,这种性质的测量工作就具有一定的法制性质。为了与一般的测量工作相区别,就把这种带有法制性质的测量工作称为“计量”

工作。

综上所述,可见计量工作不仅具有测量工作的同等意义,而且还可以利用法制手段来保证全国范围内计量制度的统一,也可以通过法制手段来抵制和克服商品交易中的缺斤少两等不法行为。因此,可以说,计量工作的主要任务是保证计量器具的准确一致和正确使用。

二、计量单位和国际单位制

由测量的概念可知,要想实现一次测量,除了要有一定的测量设备和方法之外,还必须选定相应的计量单位。而计量单位则应当是和被测量属于相同性质的物理量。否则便无法实现其相互比较。因此,计量单位是一切测量所依据的量值标准,是人类社会进行生产、科学实验和贸易往来等活动中不可缺少的工具之一。

但是,由于历史上的原因,我国过去流行的计量单位是多种多样的,很不统一。如在长度计量中有米制、尺制和英制三种;又如在电磁计量中又有绝对静电单位制、绝对电磁单位制、高斯单位制和绝对实用单位制等。这样一来,在实际应用中很不方便。而且为了复制各种单位所制造出来的计量器具也是花样繁多,既造成重复浪费又不便于管理。

所谓国际单位制,是1956年在国际计量委员会决定命名的一种在国际上通用的计量制度,并在1960年第十一届国际计量大会上正式通过而确定下来的。国际单位制中包括长度、力学、热学、电磁学、时间频率、光学、声学、放射性和化学等所有领域的计量单位,从而使科学技术、生产、国际贸易和日常生活等各个方面的计量单位都统一在一个单位制中。这样一来,用国际单位制来代替世界各国现行的各种单位制度,就可以实现计量制度在全世界范围内的统一。

在国际单位制中规定了七个基本单位,并且给出了它们的定义分别如下。

1. 长度单位——米(m)

米是光在真空中在 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内所经路径的长度。

2. 质量单位——千克(公斤)(kg)

千克是质量单位,等于国际千克原器的质量。

3. 时间单位——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。

4. 电流单位——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 $2 \times 10^{-7}\text{ N}$,则每根导线中的电流为 1 A 。

5. 热力学温度单位——开尔文(K)

热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

6. 物质的量单位——摩尔(mol)

(1)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。

(2)在使用摩尔时,基本单元应予指明,可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子,或者



这些粒子的特定组合。

例如,200.59 g 汞中所包含的原子数与 0.012 kg 碳-12 的原子数相等,则这么多汞原子的物质的量就叫 1mol。

7. 发光强度单位——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。

有了上述七个基本单位,就可以导出自然界中所有物理量的单位,后者称为导出单位。在电气测量技术领域中,为了导出各有关物理量的导出单位,只要用上述七个基本单位中的前四个(即米、千克、秒和安培)就可以了。这样规定出来的单位就叫作国际单位制的电学单位。

三、电学计量的方法与分类

一个物理量的测量可以用各种不同的方法来实现,但在一定的情况下,这些测量方法的选择则取决于被测量的性质、特点、测量条件和对测量准确度的要求等因素。因而,可以根据各种测量的性质和特点加以适当的分类。

根据获得测量结果的不同方法,可以将测量方法分为三类。

(一) 直接测量

在直接测量时,测量结果是从测量的实测数据中得到的。这种测量可以使用度量器直接与被测量相比较而得出被测量数值的大小;也可以使用按相应单位刻度的仪器仪表进行测量而加以实现。属于直接测量的方法有:用电流表测量电流、用电位差计测量电压和用电桥测量电阻等。

(二) 间接测量

在间接测量时,测量结果是通过直接测量若干个与被测量有一定函数关系的量之后,经过数据处理而得到的。例如,当测量金属导体的电阻率 ρ 时,由于电阻率和金属导体的有关参数有下列的函数关系

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (1-7)$$

式中: R ——金属导体的电阻;

S ——金属导体横截面的面积;

l ——金属导体长度。

所以可以通过直接测量 R 、 S 和 l 三个参数,然后根据式(1-7)计算出该导体的电阻率 ρ 。

可见,间接测量要比直接测量复杂一些。因此,只有当不能采用直接测量方法或者采用直接测量方法达不到所要求的准确度时,才采用间接测量的方法。

(三) 组合测量

这种测量是在多次直接测量具有一定函数关系的某些量的基础上,通过联立求解各函数关系式来确定被测量大小的方法。它比直接测量和间接测量都要复杂一些。例如,要测量一只标准电阻的温度系数 α 与 β 的值,必须采用组合测量的方法。标准电阻的阻值与温

度之间的函数关系可表示为

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (1-8)$$

式中: R_{20} ——该电阻在温度为 20 °C 时的阻值;

R_t ——该电阻在温度为 t °C 时的阻值。

由于式(1—8)中共有五个未知量,故在一次测量中,只能测得一个温度 t 及与之相对应的电阻值 R_t ,因此还剩下三个未知量。为了达到求解 α 和 β 的目的,至少必须作三次直接测量,在每一次直接测量中,都要测电阻的环境温度 t 及与之相对应的电阻实际值 R_t ,于是可以得到三种不同温度下的三个函数关系式,从而组成了一个三元一次联立方程组

$$\left. \begin{aligned} R_{t1} &= R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] \\ R_{t2} &= R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] \\ R_{t3} &= R_{20} [1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2] \end{aligned} \right\}$$

由于在此方程组中,只有 R_{20} , α 和 β 三个未知量,故可以联立求解。这种测量方法称为组合测量。

从另外一个角度出发,也可以按测量过程中读取数据的方法进行分类,按此原则分类可以分为直接读数测量法和相对比较测量法。

1. 直接读数测量法

直接读数测量法(简称直接读数法)的特点是,根据测量仪表(或器具)的读数直接可以确定被测量的大小,而作为计量单位实际复制物(即度量器)并不直接参与测量过程。当然,为了保证测量仪表(或器具)的准确可靠,应当预先以计量单位的实物标准作为依据,将测量仪表(或器具)进行准确分度。所以,这种测量方法是与计量单位进行间接比较的过程。例如,采用电压表测量电压,即属于直接读数测量法。

由于这种测量方法具有设备简单、实验操作方便等优点,因而得到了较为广泛的应用。其缺点是测量准确度较低,故只适用于一般性的测量。

2. 相对比较测量法

相对比较测量法(简称比较法)是指将被测量与度量器进行比较来获得测量结果的一种测量方法。由于这种测量方法,一般在计量工作中应用较多,因而它又可细分为四种方法。

(1) 差值法

在这种测量方法中,是通过测量仪器(或仪表)直接读取被测量 x 与某一标准量 A 的差值 α ,然后经过简单计算即可求得被测量的大小,即

$$x = A + \alpha \quad (1-9)$$

由式(1—9)可见,用这种测量方法得到的测量结果与两个因素有关:一是标准量 A ;二是测量仪器(或仪表)。因此,测量结果的准确度也必然与上两项因素有关。作为标准量 A 来说,一般都采用精度较高的度量器或仪器设备,故而 A 的误差对测量结果的影响是不大的;而作为测量仪器(或仪表)来说,一般它的精度等级是不高的,因而它对测量结果的影响是比较主要的。基于这种分析,差值法将有这样一个特点,即当标准量与测量仪器(或仪表)的精度等级一定时,如果由测量仪器(或仪表)读取的差值相对于被测量之比值越小,则测量仪器(或仪表)的误差对测量结果的影响也就越小。例如,当 $\alpha = 0.1x$ 时,测量仪器的误差将



以 $1/10$ 的比例反映到测量结果之中;而当 $\alpha = 0.01x$ 时,则测量仪器(或仪表)的误差将以 $1/100$ 的比例反映到测量结果之中。

故在采用差值法进行测量时,一般都尽量选取标准量 A 与被测量 x 相接近,就是根据这个道理。

(2) 零值法

这种测量方法也是将被测量 x 与已知的标准量 A 相比较,但是这种方法中采用的标准量 A 是一种可以调节的变量,它在测量过程中不需要另外一个测量仪器(或仪表),而只需要有一个监测标准量与被测量相平衡时的指零仪就可以了。在测量过程中,调节标准量 A 使指零仪达到指示零位时,便可以认为被测量等于标准量,即

$$x = A \quad (1-10)$$

由式(1-10)可见,这种测量方法的准确度主要是决定于可调节的标准量 A ,其次也与监测平衡状态的指零仪有很大关系。定性地说,指零仪的灵敏度越高,则由其带来的误差越小。

(3) 替代法

在测量过程中,先用测量仪器对某一标准 A 进行测量,得到一个测量结果 α_N ;然后再用该仪器对被测量 x 进行测量,又得到一个测量结果为 α_x 。在这一测量过程中,不管测量仪器的精度等级如何,只要它具有足够高的稳定性,就可以得到下列平衡方程

$$x - A = \alpha_x - \alpha_N \quad (1-11)$$

从而可以得到被测量为

$$x = A + (\alpha_x - \alpha_N) \quad (1-12)$$

在这种测量方法中,还可分为两种情况:一种是当标准量 A 可以调节的时候,可以先用测量仪器测量被测量 x ,得到一个测量结果为 α_x ;然后用标准量 A 去替代被测量 x ,这时不许改变测量仪器的读数,即在保证其读数不变的条件下,调节标准量 A 的大小,直至使测量仪器能重新读出与 α_x 相同的读数为止。这时被测量 x 就等于标准量 A ,这种方法称为完全替代法。第二种是不完全替代法,在这种测量方法中,标准量 A 是不可调节或不能连续调节的,故在两次测量中得到的测量结果 α_x 与 α_N 不可能完全相等,因此称之为不完全替代法。

在替代法测量过程中,除了要求标准量 A 与被测量 x 在数值上尽量接近以外,还要求在操作过程中保持测量仪器的高三位读数(或示值)的状态保持不变(如十进刻度盘的旋转开关不许转动等),只有这样才能消除由测量仪器引入的测量误差。正因为替代法能消除由测量仪器引入的误差,因此在高精度的测量技术中,替代法得到了广泛的应用。

(4) 重合法

重合法是将被测量的一系列均匀交替的信号与某一已知参考量相比较,当两者的信号出现重合的状态或现象时,就可以确定被测量的大小。

例如,在测量某一同步电动机的转速时,可以在其旋转轴上预先涂上一条轴向的发亮标记,然后当其旋转起来的时候,用日光灯的灯光对电动机轴上的标记进行照射,由于日光灯灯光的闪烁频率是 50 Hz ,即每秒钟闪烁 50 次,如果电动机的转速为 50 的整数倍,则反光的标记就将在旋转的轴上停止不动,否则该反光标记就将绕轴旋转。利用这种方法可以将电动机调整到额定转速,这在发电机并联运行中是一种经常采用的测量方法。

其次,在英制与公制的尺寸换算中也要用到重合法的原理。例如,将一公制刻度尺与一英制刻度尺并列放在一起,使其两者的零位对准,则可以发现下列这些刻度是因为重合而相等的:127 mm 与 5 in;254 mm 与 10 in,381 mm 与 15 in 等。

此外,在机械零件测量中经常使用的游标卡尺也是利用重合法的原理设计的,这里就不详述了。

在测量方法中,还有许多分类方法,如从精密程度来分,可以分为精密测量与工程测量;从测量的条件来分,还可以分为自动测量和手动测量、本地测量和遥控测量等。

第二节 电学计量的标准量具

一、标准量具的基本概念

所谓标准量具是指用实物来定义、保存或复现一个物理量的计量单位,以使用一定的测量方法将传递给其他测量仪器的一种计量器具。通常也将标准量具称为度量器。

在电学计量中,根据度量器在量值传递中的作用及准确度的高低,将其分为基准度量器、标准度量器和工作度量器三种。

(一) 基准度量器

用现代科学技术所能达到的最高准确度来复现和保存计量单位的度量器叫作基准度量器,也叫作基准量具。它由一个国家的法制机关来保存,并作为国家处理计量业务的法定依据和科学基础。这项任务在我国是由中国计量科学研究院来负责承担的。基准度量器又分为主基准、副基准、比较基准和工作基准。

(二) 标准度量器

标准度量器是准确度等级仅低于基准度量器的一种标准量具。它是供计量系统对工作度量器进行检定的一种手段。根据其用途和实现之可能,又可将其分为一等标准度量器和二等标准度量器。

(三) 工作度量器

工作度量器是供日常生产或生活中进行测量时使用的标准量具。按其准确度(或稳定度)指标的不同,又可分为若干个等级,其级别一般应标注在铭牌上。在电学计量标准具中通常使用的工作度量器有:标准电池、标准电阻、标准电感、标准电容、标准互感、电阻箱、电感箱、电容箱、分压箱、分流器、电流互感器和电压互感器等。

二、对标准量具的基本要求

由于标准量具是各种物理量计量单位的实物体现,因此,它在量值传递工作中占有十分重要的地位,它是各级测量仪器(或仪表)的标准。

为了保证标准量具在量值传递工作中的准确可靠,对其最基本的要求有以下三条。

(1) 复现性好,即标准量具能比较容易而又准确地复现某一种物理量的单位。

(2) 稳定性好,即能够长时期地保持其所复现的单位量值不变,而且基本上不受或少受



各种外界条件变化的影响。例如,环境温度、湿度、气压和电磁场等因素的变化所引起标准量具量值的改变,应该是小到可以忽略的。

(3)可比性强,即要求标准量具能够方便地与其他标准量具进行比较或测量,以便于标定其量值的大小或监视其量值的变化情况。

上述只是对各种标准量具提出的最基本要求,对于每一种具体的标准量具来说,还要根据其本身的特点提出一些专门而具体的要求,这些有关细节将在谈到每一种具体标准量具时分别加以介绍。

三、电学基准度量器的构成及传递体系

在电学计量中,基准度量器有电动势基准、电阻基准和电容基准,这三者共同构成了电学计量的基础。

电动势基准是采用经过严格考核与精心挑选的稳定性和其他性能极好的饱和标准电池组所组成的。由这组标准电池的电动势平均值作为电动势单位(伏特)的实现体现。

电阻基准是采用稳定性极高的阻值为 $1\ \Omega$ 的标准电阻组所组成,并以这组标准电阻的电阻平均值来体现电阻单位(欧姆)的量值。

电容基准是根据“汤姆逊—兰帕德定理”设计制造的交叉电容器,其计算电容值为 $1\ \text{pF}$ 。

电动势和电阻这两个基准的量值,是通过所谓绝对测量方法进行标定的。所谓绝对测量方法就是根据长度、质量和时间这三个基本单位来复现电学单位的方法。具体一点说,有了米、千克、秒这三个单位,就可以利用电流天平或者在磁场中来测定水的质子回旋磁比 γ_p ,从而来确定电流单位(安培)的大小;同时根据米、千克、秒这三个单位又可以经过精密测量计算电容器的有关参数,算出它的准确电容量,进而借助专用的阻抗电桥可以将电容量传递给电阻单位(Ω);有了安培和欧姆,就可以决定电动势单位——伏特。

如上所述,这种采用物理实验的方法复现某种单位的量值并用实物基准保存其单位量值的工作,叫作建立基准。为了将基准的量值可靠地传递到生产、生活和科研等实践活动的领域中去,还必须建立各种等级的标准度量器和工作度量器,属于这种性质的工作称为建立标准,简称为建标。为了使建标工作有规则地进行,我国的计量主管部门对建标的原则和方法以及为保存量值所采用的手段,都作了科学而统一的规定,这就构成了电学计量的标准传递体系,其内容如图 1—1 所示。当然,随着科学技术的发展,电学计量标准传递体系也会不

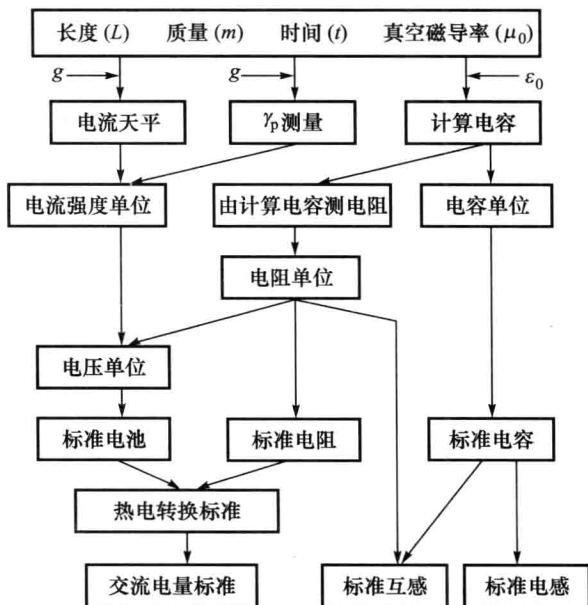


图 1—1 电学计量标准传递体系

断发生变化。例如,近几年来国际上已趋向采用“约瑟夫森效应”来建立电动势基准和电阻基准。用基本物理常数来建立计量基准,使基准度量器由实物复制体逐渐过渡到自然基准,这将是计量科学发展的必然趋势。

四、主要标准量具

(一) 标准电池

1. 结构、原理与分类

标准电池是原电池的一种,它的电动势比较稳定。但由于它的内阻很高,在充放电的情况下会产生极化现象,故不能用作供电使用。在电学计量中正是利用了标准电池电动势比较稳定这一特点,用它作为直流电动势(或电压)的基准或标准。

标准电池按其电解液的浓度不同可分为饱和标准电池和不饱和标准电池。饱和标准电池中的电解液在其允许使用的温度范围内都是饱和溶液,其内部结构如图 1—2 所示。不饱和标准电池中的电解液在其允许使用的温度范围内都是不饱和溶液,其内部结构如图 1—3 所示。由图 1—2 和图 1—3 可见,无论是饱和标准电池还是不饱和标准电池,都可以制成 H 型结构与单管型结构。由于标准电池的内部结构是由较松散的化学物质分层装入玻璃容器而形成的,其电极属于固液两相之间,因此不允许将标准电池振动或倒置。但是也有一种在管内加入微孔塞片,用来防因倒置而损坏。有的还采用同心圆型的单管型结构,可以克服 H 型结构由于两电极存在温差而引起的电动势误差。

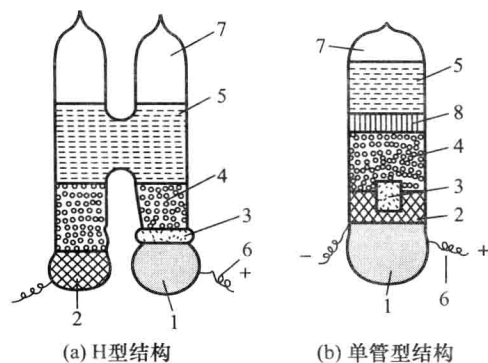


图 1—2 饱和标准电池结构示意图

1—汞(电池正极);2—镉汞齐(电池负极);

3—硫酸亚汞(去极化剂);4—硫酸镉结晶体;

5—硫酸镉饱和溶液;6—铂引线;7—玻璃容器;8—微孔塞片

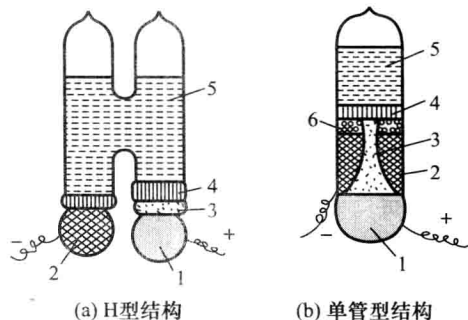


图 1—3 不饱和标准电池结构示意图

1—汞;2—镉汞齐;3—硫酸亚汞;

4—微孔塞片;5—硫酸镉浓溶液;6—石英砂

2. 标准电池的主要特性

(1) 温度特性

标准电池的最主要特性是其温度特性,原则上讲,标准电池的电动势是随着环境温度的变化而变化的。国际上统一规定,对于任何一只标准电池只给出其在 20℃ 时的电动势值,在偏离 20℃ 的条件下应用时,要根据它的温度修正公式进行计算。对于饱和标准电池而言,我国采用的温度修正公式为