

新编计量技术初级教材

# 电学计量

刘庆余 李继纲 编著



中国计量出版社

新编计量技术初级教材

# 电 学 计 量

刘庆余 李继纲 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

电学测量/刘庆余,李继纲编著. —北京:中国计量出版社,1999.5

新编计量技术初级教材

ISBN 7-5026-1143-6

I.电… II.①刘… ②李… III.电学-计量-教材 IV.TB971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 34844 号

## 内 容 提 要

全书共二十一章。第一章讲述电学计量的基本概念;第二章讲述测量误差的基础知识;第三章至第八章讲述各种电测量指示仪表的工作原理及其检定的技术知识;第九章至第十二章讲述直流电位差计与直流电桥的工作原理及其测量技术;第十三章至第二十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,电流比较仪、交流电位差计与感应分压器的基本工作原理,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;第二十一章讲述电测装置的干扰与防护技术。

本书可作为电学计量人员专业培训班教材,也可作为具有初中以上文化程度的计量工作人员的自学参考书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787mm×1092mm 16开本 印张25.75 字数630千字

1999年6月第1版 1999年6月第1次印刷

\*

印数1—4000 定价:38.00元

## 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。

该套书自出版以来,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。

在全面贯彻我国《质量振兴纲要》的今天,以“质量为中心,以标准化和计量工作为基础,”对计量工作提出了更新、更高的要求。另外,该套书问世以后的十几年来,计量技术与其他科学技术一样,发展也十分迅速。这样,就使得原教材的内容显得陈旧、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。

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技术人员、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》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基础。

中国计量出版社

1998年9月

# 序 言

本书是在《电学计量》(85年版)基础上进行修订的初级专业教材,适合于从事电学计量的广大初级技术人员进一步学习提高的需要,也可作为具有大(中)专文化程度的计量工作人员的自学参考资料。

本书共二十一章,第一章讲述电学计量的基本概念;第二章讲述测量误差的基础知识,增加了关于测量不确定度的第七节;第三章至第八章讲述各种电测量指示仪表的工作原理及其检定的技术知识;第九章至第十二章讲述直流电位差计与直流电桥的工作原理及其测量技术;第十三章至第二十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,电流比较仪、交流电位差计与感应分压器的基本工作原理,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;第二十一章讲述电测装置的干扰与防护技术。

第一章、第二章的第一节至第六节、第九章至第二十一章由辽宁省计量测试技术研究所教授级高级工程师刘庆余编写;第二章的第七节、第三章至第八章由国家质量技术监督局辽宁省技术培训中心高级工程师李继纲编写;中国计量出版社副总编辑刘宝兰同志对全书进行了审校及整理。

本书的特点是,在基本理论方面着重阐述物理概念,在结合实际方面尽量作到深入浅出,简明扼要,通俗易懂。

根据本教材的内容,举办训练班可安排260学时,若每周讲授10学时,则需26周的时间。由于笔者水平有限,难免有错误与不到之处,恳请广大读者指正。

编 者  
1998.6

# 目 录

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 第一章 电学计量的基本概念 .....      | (1)   |
| 第一节 测量与计量的概念 .....       | (1)   |
| 第二节 计量单位和国际单位制 .....     | (3)   |
| 第三节 电学计量的方法与分类 .....     | (4)   |
| 第四节 电学计量的标准量具 .....      | (7)   |
| 第二章 测量误差的基础知识 .....      | (18)  |
| 第一节 误差的概念与分类 .....       | (18)  |
| 第二节 消除系统误差的基本方法 .....    | (22)  |
| 第三节 随机误差与算术平均值原理 .....   | (26)  |
| 第四节 粗差的判断准则 .....        | (36)  |
| 第五节 关于误差合成的概念 .....      | (38)  |
| 第六节 近似计算与数据处理原则 .....    | (48)  |
| 第七节 关于测量不确定度 .....       | (54)  |
| 第三章 电测量指示仪表概念 .....      | (75)  |
| 第一节 指示仪表的基本结构和工作原理 ..... | (75)  |
| 第二节 指示仪表的主要零部件 .....     | (78)  |
| 第三节 指示仪表的误差和准确度 .....    | (82)  |
| 第四节 指示仪表的主要技术特性 .....    | (85)  |
| 第五节 指示仪表的分类 .....        | (89)  |
| 第六节 指示仪表的正确选择和使用 .....   | (90)  |
| 第四章 磁电系仪表 .....          | (95)  |
| 第一节 磁电系仪表的结构和工作原理 .....  | (95)  |
| 第二节 磁电系电流表和分流器 .....     | (98)  |
| 第三节 磁电系电压表和附加电阻 .....    | (102) |
| 第四节 磁电系检流计 .....         | (103) |
| 第五节 磁电系仪表的误差与特性 .....    | (109) |
| 第五章 电磁系仪表 .....          | (111) |
| 第一节 电磁系仪表的结构和工作原理 .....  | (111) |
| 第二节 电磁系电流表和电压表 .....     | (113) |
| 第三节 电磁系仪表的误差和特性 .....    | (114) |
| 第六章 电动系仪表 .....          | (116) |
| 第一节 电动系仪表的结构和工作原理 .....  | (116) |
| 第二节 电动系电压表和电流表 .....     | (117) |
| 第三节 电动系功率表 .....         | (118) |

|      |                 |       |
|------|-----------------|-------|
| 第四节  | 功率表的正确接线        | (119) |
| 第五节  | 低功率因数功率表        | (121) |
| 第六节  | 电动系相位表和频率表      | (122) |
| 第七节  | 电动系仪表的误差和特性     | (127) |
| 第八节  | 铁磁电动系仪表         | (128) |
| 第七章  | 其他型式的仪表         | (134) |
| 第一节  | 整流系仪表的结构和工作原理   | (134) |
| 第二节  | 变换器式相位表、频率表和功率表 | (136) |
| 第三节  | 静电系仪表的结构和工作原理   | (140) |
| 第四节  | 静电系电压表          | (141) |
| 第五节  | 万用表的结构和工作原理     | (143) |
| 第六节  | 绝缘电阻表的结构和工作原理   | (146) |
| 第八章  | 电测量指示仪表的检定      | (149) |
| 第一节  | 直流补偿法           | (150) |
| 第二节  | 热电比较法           | (152) |
| 第三节  | 数字电压表法          | (153) |
| 第四节  | 直接比较法           | (154) |
| 第五节  | 相位表和频率表的检定      | (156) |
| 第六节  | 热电比较仪           | (163) |
| 第九章  | 直流电位差计          | (169) |
| 第一节  | 直流电位差计的工作原理     | (169) |
| 第二节  | 直流电位差计的结构特点     | (170) |
| 第三节  | 直流电位差计的测量灵敏度    | (181) |
| 第四节  | 直流电位差计的误差       | (182) |
| 第五节  | 直流电位差计的一般选用原则   | (185) |
| 第十章  | 直流补偿法测量技术       | (188) |
| 第一节  | 直流补偿法的特点及其一般应用  | (188) |
| 第二节  | 补偿替代法的应用        | (190) |
| 第三节  | 差值补偿替代法的应用      | (192) |
| 第四节  | 热电势影响及其消除方法     | (194) |
| 第五节  | 零位电势和热电势的测量方法   | (195) |
| 第六节  | 直流电位差计的检定       | (197) |
| 第十一章 | 直流电桥            | (200) |
| 第一节  | 单电桥的结构及工作原理     | (200) |
| 第二节  | 单电桥测量线路的灵敏度     | (201) |
| 第三节  | 单电桥的测量误差        | (202) |
| 第四节  | 单电桥的典型线路        | (204) |
| 第五节  | 双电桥的结构与工作原理     | (206) |
| 第六节  | 双电桥的误差分析        | (209) |

|      |                |       |
|------|----------------|-------|
| 第七节  | 三次平衡电桥         | (211) |
| 第八节  | 直流高阻电桥         | (213) |
| 第十二章 | 电桥法测量技术        | (216) |
| 第一节  | 单电桥测量电阻的方法     | (216) |
| 第二节  | 低值电阻的测量方法      | (218) |
| 第三节  | 比较电桥法的应用       | (220) |
| 第四节  | 置换电桥法的应用       | (222) |
| 第五节  | 直流电桥的检定        | (224) |
| 第十三章 | 交流电路中的元件       | (230) |
| 第一节  | 概述             | (230) |
| 第二节  | 电阻器            | (230) |
| 第三节  | 电感线圈           | (232) |
| 第四节  | 电容器            | (233) |
| 第五节  | 线路屏蔽对元件参数的影响   | (235) |
| 第六节  | 交流电路中的阻抗与导纳    | (237) |
| 第十四章 | 互感器的原理与应用      | (239) |
| 第一节  | 概述             | (239) |
| 第二节  | 互感器的结构与基本参数    | (240) |
| 第三节  | 互感器的等效电路       | (242) |
| 第四节  | 电流互感器的向量图与误差公式 | (244) |
| 第五节  | 电流互感器的技术特性     | (246) |
| 第六节  | 双级电流互感器        | (248) |
| 第七节  | 电压互感器的向量图与误差公式 | (248) |
| 第八节  | 电压互感器的技术特性     | (251) |
| 第九节  | 电流、电压负载箱及其特性   | (251) |
| 第十节  | 互感器的正确使用       | (252) |
| 第十五章 | 互感器校验仪         | (255) |
| 第一节  | 概述             | (255) |
| 第二节  | 电位比较型互感器校验仪    | (255) |
| 第三节  | 电流比较型互感器校验仪    | (259) |
| 第四节  | 磁势比较型互感器校验仪    | (262) |
| 第五节  | 平衡电桥式互感器校验仪    | (267) |
| 第六节  | 自动数显型互感器校验仪    | (268) |
| 第七节  | 互感器校验仪的正确使用    | (269) |
| 第十六章 | 电流比较仪          | (272) |
| 第一节  | 电流比较仪的工作原理     | (272) |
| 第二节  | 补偿式电流比较仪       | (274) |
| 第三节  | 自动平衡式电流比较仪     | (275) |
| 第四节  | 电流比较仪的应用       | (276) |



|       |               |       |
|-------|---------------|-------|
| 第十七章  | 交流电位差计        | (280) |
| 第一节   | 概述            | (280) |
| 第二节   | 极坐标型交流电位差计    | (280) |
| 第三节   | 直角坐标型交流电位差计   | (281) |
| 第四节   | 交流电位差计的一般应用   | (284) |
| 第十八章  | 感应分压器         | (290) |
| 第一节   | 自耦式感应分压器      | (290) |
| 第二节   | 双级自耦式感应分压器    | (292) |
| 第三节   | 自耦式感应分压器的负载误差 | (293) |
| 第四节   | 简单隔离式感应分压器    | (295) |
| 第五节   | 双级隔离式感应分压器    | (297) |
| 第十九章  | 交流电能的测量与设备    | (300) |
| 第一节   | 交流功率的测量       | (300) |
| 第二节   | 有功电能的测量       | (306) |
| 第三节   | 无功电能的测量       | (307) |
| 第四节   | 感应系电能表        | (312) |
| 第五节   | 电子式电能表        | (318) |
| 第六节   | 特殊用途的电能表      | (327) |
| 第七节   | 电能表的试验方法      | (331) |
| 第八节   | 电能表的校验设备      | (341) |
| 第二十章  | 交流电桥及其应用      | (368) |
| 第一节   | 交流电桥的特点与平衡条件  | (368) |
| 第二节   | 交流电桥的分类与一般用途  | (369) |
| 第三节   | 收敛性与可调参数的选择   | (372) |
| 第四节   | 电桥元件残余分量的影响   | (373) |
| 第五节   | 电容与损耗系数的测量    | (376) |
| 第六节   | 电感与互感的测量      | (379) |
| 第七节   | 高压电容电桥的特点     | (383) |
| 第八节   | 变压器电桥的特点      | (384) |
| 第九节   | 电流比较仪电桥的特点    | (389) |
| 第十节   | 双边变压器比例电桥的特点  | (391) |
| 第二十一章 | 电测装置的干扰与防护    | (394) |
| 第一节   | 干扰影响的原因及其防护要点 | (394) |
| 第二节   | 静电屏蔽的原理与应用    | (396) |
| 第三节   | 磁屏蔽的原理与应用     | (397) |
| 第四节   | 电磁屏蔽的原理与应用    | (398) |
| 第五节   | 对电容性质漏电的屏蔽方法  | (398) |
| 第六节   | 接地与对称         | (402) |

# 第一章 电学计量的基本概念

## 第一节 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意: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

$$x = A_x \cdot x_0 \quad (1.2)$$

此式的物理意义是:一个物体的大小  $x$  是指它相当于  $A_x$  个同类单位量  $x_0$  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  $A_{x1} = x/x_{01}$ ;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  $A_{x2} = x/x_{02}$ 。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  $x_{02}$  用下式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系数,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

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

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,或者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技术监督局专门负责这项工作。由于这项工作纳入了国家的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了一定的法制性质,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之为“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,它是保证我国向四个现代化目标稳步前进的一项重要技术基础。

## 第二节 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  $1/299\,792\,458$  秒的时间间隔内行程的长度。

### 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)

安培是一恒定电流,若保持在处于真空中相距1米的两根无限长而圆截面可忽略的平行直导线内,则此两导线之间产生的力在每米长度上等于  $2 \times 10^{-7}$  牛顿。

### 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  $0.012$  千克碳-12的原子数目相等。

(2)在使用摩尔时,对结构粒子应予指明,可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子,或者是这些粒子的特定组合体。

例如,  $200.59$  克汞中所包含的原子数与  $0.012$  千克碳-12的原子数相等,则这么多汞原子的物质的量就叫1摩尔。

### 7. 发光强度单位——坎德拉(cd)

坎德拉是在  $101\,325$  帕斯卡压力下,处于铂凝固温度的  $1/600\,000$  平方米表面垂直方向上

的光强度。

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，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做国际单位制的电学单位。

### 第三节 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系数  $\rho$  时，由于电阻系数和金属导体的有关参数有下列的函数关系

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \quad (1.7)$$

式中： $R$ ——金属导体的电阻；

$S$ ——其横截面的面积；

$l$ ——其长度。

所以可以通过直接测量  $R$ 、 $S$  与  $l$  三个参数，然后根据式(1.7)计算出该金属导体的电阻系数  $\rho$ 。

可见，间接测量是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  $\alpha$  与  $\beta$  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以表示为

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (1.8)$$

式中： $R_{20}$ ——该电阻在温度为  $20^{\circ}\text{C}$  时的阻值；

$R_t$ ——该电阻在温度为  $t^{\circ}\text{C}$  时的阻值。

由于在式(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  $\alpha$  与  $\beta$  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  $R_{20}$ 、 $\alpha$  与  $\beta$  三个未知量,故可以联立求解。这种测量方法称为组合测量。

从另外一种角度出发,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  $\alpha$ ,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,一般都是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十分之一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)的误差将以百分之一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量  $A$  进行测量,得到一个测量结果  $\alpha_N$ ;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  $\alpha_x$ 。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  $\alpha_x$ ;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  $\alpha_x$  相同的读数为止。这时被测量  $x$  就等于标准量  $A$ ,这种方法称之为完全替代法。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  $\alpha_x$  与  $\alpha_N$  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,在测量某一台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 50Hz,即每秒钟内闪烁 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:127mm 与 5in;254mm 与 10in,381mm 与 15in 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,这里就不一一详述了。

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等。

## 第四节 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其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。

#### 1. 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。

#### 2. 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。

#### 3. 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。在电学计量标准量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)的实物体现。

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  $\gamma_p$ ,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( $\Omega$ );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,叫做建立基准。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之为建立标准,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。

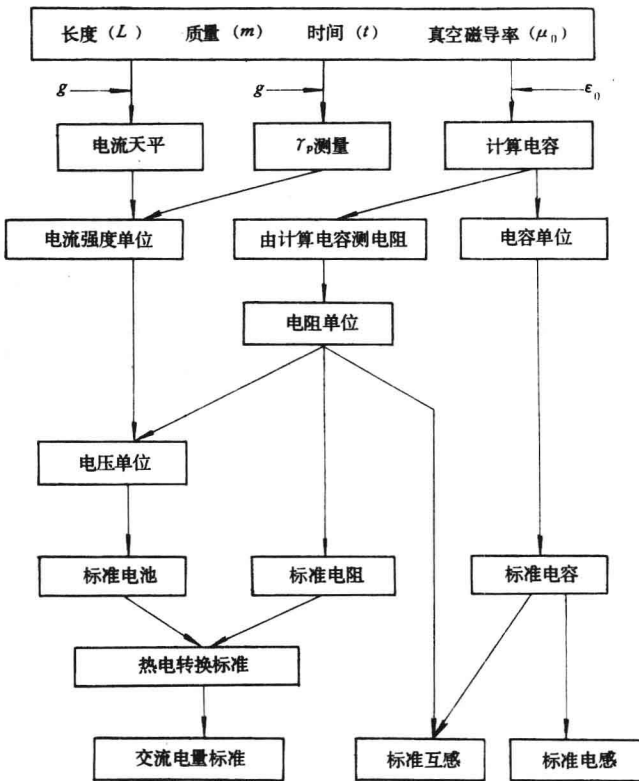


图 1.1 电学计量标准传递体系