



高等院校电类专业基础课规划教材

电工电子技术实验教程

曹才开 曹帅 汤群芳 编著
刘辉 袁川来



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等院校电类专业基础课规划教材

电工电子技术实验教程

曹才开 曹 帅 编著
汤群芳 刘 辉 袁川来

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是由湖南省高校电子技术教学研究会组织省内部分高等院校教师在多年教学研究、实验室建设和教材建设的基础上编写而成的。

全书共有7章,内容包括:电工测量与仪器使用基础知识、电路分析实验项目、电气控制与PLC控制实验项目、模拟电子电路硬件实验项目、数字电子技术实验项目、电力电子技术实验项目、电工电子技术EWB仿真实验项目。

本实验教材不但有大量的基本技能实验项目,而且有一定量的中等难度和提高性实验项目,以适应不同层次、不同实验条件的要求。实验项目所需要的设备、仪器和器材具有通用性,可供各个层次的教学选用。全书共有86个电工电子技术实验项目,其中硬件实验项目75个,虚拟实验项目11个。在这86个实验项目中,基本技能训练项目34个,设计性实验项目29个,综合性实验项目23个。

本书可供本科非电类各专业作为《电工电子技术》(电工学)课程实验教材使用;也可以作为应用性本科电气工程和电子信息工程各专业的《电路分析》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《电力电子技术》和《电气控制与PLC》等课程的实验教材使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术实验教程/曹才开等编著. —北京:电子工业出版社,2014.1

高等院校电类专业基础课规划教材

ISBN 978-7-121-22264-1

I. ①电… II. ①曹… III. ①电工技术—实验—高等学校—教材 ②电子技术—实验—高等学校—教材
IV. ①TM-33 ②TN-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第317854号

策划编辑:束传政

责任编辑:贺志洪

特约编辑:徐 堃 王 纲

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18 字数:458千字

印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:3000册 定价:38.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



前 言

电工测量技术是各类工科专业学生必须具备的测量知识,电工电子技术实验是实践教学中进行基本技能训练的重要环节。本书是湖南省高校电子技术教学研究会组织省内部分高等院校教师在多年电工电子技术实验教学和教材建设的基础上编写而成的,是电工电子技术实践教学改革的成果和实践教材建设的经验结晶。

全书共分7章。第1章是电工测量基础知识,包括测量误差的基本知识;电工测量仪器的基本知识;常用仪器仪表的使用说明;常用电学量的测量技术等内容。第2章为电路分析实验项目,包括直流电阻电路、动态电路、正弦交流电路和变压器的实验项目。第3章为电气控制与PLC控制实验项目。第4章和第5章分别为模拟电子电路硬件实验项目和数字电子技术实验项目。第6章为电力电子技术实验项目。第7章为电工电子技术虚拟实验项目。

如果《电路分析》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《电力电子技术》和《电气控制与PLC》等五门课程分别编写独立的实验教材,显得内容太多;而实际使用的实验项目太少,必然造成实验教材大部分内容没有使用的结果。本教材力求克服这个问题,将五门课程的实验项目汇集于一书,使用十分方便,避免了浪费教材资源。

本书的主要特色如下:

(1) 根据由浅入深、提高学生综合动手能力和创新能力的原则,设计了一批基本技能训练项目、设计性实验项目和综合性实验项目。这些实验项目较系统地训练了学生的基本操作技能、常用仪器设备的使用、工程测量知识、电路设计技术及各种测量方法,巩固了理论知识,培养他们严谨的科学态度和工程意识。

(2) “硬件实验”与“虚拟实验”相结合。这样,让学生不但掌握常用电子仪器的使用方法,而且掌握现代电子设计技术,通过使用许多精密仪器,学会现代检测技术,提高综合运用知识的能力和动手的能力,开阔了视野。

(3) 课程基本内容与工程应用相结合,较好地处理了教学内容的继承与更新,先进性与实用性的关系。

(4) 课程实验与实验室建设相结合。为了满足“双基实验室”建设、“示范实验室”建设的要求(设计性、综合性实验项目占课程开设的总实验项目的70%以上),共创建了29个设计性实验项目和23个综合性实验项目,还有34个基本技能训练实验项目,足够课程实



验项目选用。

(5) 具有广泛的适用性。本实验教材不但有大量的基本技能实验项目，而且有一定量的中等难度和提高性实验项目，以适应不同层次、不同实验条件的要求。实验项目所需要的设备、仪器和器材具有通用性。

(6) 本书突出基本技能训练，突出工程应用，突出新的测量手段和方法，突出创新意识。

本书由湖南工学院曹才开教授担任总策划、统稿和校稿工作。参加本书编写工作的有：曹才开（第1章和第2章），湖南工学院曹帅（第3章和第4章），湖南工学院汤群芳（第5章），长沙学院刘辉（第6章），湖南工业大学袁川来（第7章，附录A~E）。各章实验项目的验证工作由编写各章的人员完成。

在本书的编写过程中，得到了湖南省高校电子技术教学研究会和参编学校的大力支持，谨致以衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请各位读者提出宝贵意见。

编 者

2013年4月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海滨区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 电工测量与仪器使用基础知识	1
1.1 引言	1
1.2 测量误差	2
1.2.1 测量误差的几个术语	2
1.2.2 测量误差的来源	3
1.2.3 测量误差的表示	4
1.2.4 测量误差的消除方法	7
1.3 电工测量仪器的基本知识	9
1.3.1 电工仪表的分类和符号	9
1.3.2 电工仪表的选用常识	11
1.4 常用仪器仪表的使用	12
1.4.1 万用表的使用	12
1.4.2 930FD 4 $\frac{1}{2}$ 位数字多用表的使用	13
1.4.3 低功率因数功率表的使用	14
1.4.4 YB2100 系列交流毫伏表的使用	15
1.4.5 CA8120A 示波器的使用	17
1.4.6 兆欧表的使用	22
1.5 常用电学量的测量技术	23
1.5.1 电流的测量	23
1.5.2 电压的测量	24
1.5.3 电功率的测量	25
1.6 半导体二极管、三极管的测量	27
1.6.1 半导体二极管的测量	27
1.6.2 半导体三极管的测量	28
第 2 章 电路分析实验项目	29
2.1 常用电子仪器仪表的使用	29
2.2 直流电压(电位)、电流的测量	33
2.3 有源二端网络的戴维南等效参数测量(设计性实验)	35
2.4 线性网络的叠加性和齐次性实验	36
2.5 磁电系表头的应用(设计性实验)	38
2.6 一阶 RC 电路的零输入响应与零状态响应	40

2.7	RL 电路的方波响应 (设计性实验)	43
2.8	RLC 串联电路的谐振特性	44
2.9	正弦电路中电阻器、电感器和电容器参数的测量	46
2.10	R、L、C 元件阻抗特性的测量	49
2.11	日光灯电路及功率因数的提高 (设计性实验)	50
2.12	无源单口网络的等效阻抗与导纳的测量 (综合性实验)	53
2.13	三相交流电路电压、电流的测量	55
2.14	对称三相负载中的功率测量	57
2.15	变压器的空载特性和外特性的测量 (设计性实验)	59
2.16	变压器参数的测试 (综合性实验)	62
第 3 章	电气控制与 PLC 控制实验项目	65
3.1	三相鼠笼式异步电动机的检测 (综合性实验)	65
3.2	三相异步电动机正、反转的继电器—接触器控制	69
3.3	继电器—接触器控制线路故障的检查 (综合性实验)	71
3.4	单相电容式电动机的故障检修 (设计性实验)	75
3.5	PLC 基本指令训练	77
3.6	混料罐实验 (设计性实验)	81
3.7	红绿灯控制实验 (设计性实验)	82
3.8	传输控制实验 (设计性实验)	83
3.9	LED 数码显示实验 (设计性实验)	84
3.10	功能指令实验 (设计性实验)	85
3.11	电梯模型控制实验 (设计性实验)	87
3.12	电动机自动往复运动实验 (设计性实验)	89
3.13	广告艺术灯控制器设计实验 (设计性实验)	90
3.14	乒乓球模拟比赛 (设计性实验)	92
3.15	三相异步电动机启、停的 PLC 控制	93
3.16	三相异步电动机正、反转的 PLC 控制 (设计性实验)	95
3.17	三相异步电动机反接制动的 PLC 控制 (设计性实验)	98
3.18	抢答器程序设计 (设计性实验)	99
第 4 章	模拟电子电路硬件实验项目	102
4.1	共射极单管放大电路的研究	102
4.2	场效应管放大器	105
4.3	负反馈放大电路的研究	108
4.4	差动放大器的设计 (设计性实验)	111
4.5	基本运算电路的测试	113
4.6	音频集成功率放大器设计与研究	117
4.7	有源带通与高通滤波器的设计 (设计性实验)	119

4.8	RC 正弦波振荡器的设计与调试 (设计性实验)	123
4.9	LC 正弦波振荡器的设计与调试 (设计性实验)	125
4.10	函数信号发生器的组装与调试 (综合性实验)	127
4.11	电压/电流转换电路	129
4.12	半导体直流稳压电源的设计与测试 (综合性实验)	132
4.13	蓄电池充电控制电路的设计 (设计性实验)	136
4.14	单相桥式半控整流电路的测量 (综合性实验)	139
4.15	多重反馈电路的研究 (综合性实验)	142
第 5 章	数字电子技术实验项目	145
5.1	基本门电路的逻辑功能测试	145
5.2	组合逻辑电路的设计与调试 (设计性实验)	148
5.3	集成触发器的功能测试	153
5.4	编码器与译码器	155
5.5	数据选择器	158
5.6	移位寄存器	160
5.7	多谐振荡器与单稳态触发器的设计 (综合性实验)	166
5.8	集成计数器的设计 (设计性实验)	169
5.9	555 时基电路及其应用 (综合性实验)	171
5.10	A/D 转换器测试	176
5.11	D/A 转换器测试与应用 (综合性实验)	180
5.12	电子秒表组装与调试 (综合性实验)	183
5.13	多路智力竞赛抢答器的设计 (综合性实验)	187
第 6 章	电力电子技术实验项目	190
6.1	SCR、GTO、MOSFET、GTR、IGBT 的特性测试	190
6.2	锯齿波同步移相触发电路	193
6.3	单相半波可控整流电路	195
6.4	单相桥式半控整流电路	198
6.5	单相桥式全控整流及有源逆变电路 (综合性实验)	201
6.6	三相半波可控整流电路	203
6.7	三相桥式半控整流电路	206
6.8	三相桥式全控整流及有源逆变电路 (综合性实验)	208
6.9	单相交流调压电路	211
6.10	双向晶闸管组成的单相交流调压电路	214
6.11	单相交流调功电路	216
6.12	全桥 DC/DC 变换电路 (综合性实验)	218
6.13	直流斩波电路 (综合性实验)	220

* 第 7 章 电工电子技术 EWB 仿真实验项目	223
7.1 引言	223
7.2 EWB 软件简介	223
7.2.1 基本功能	223
7.2.2 EWB 的工作界面	224
7.3 EWB 的操作方法	228
7.3.1 创建电路	228
7.3.2 虚拟仪器仪表的使用	232
7.4 EWB 仿真实验项目	234
7.4.1 直流电路的节点分析法 (综合性实验)	234
7.4.2 一阶电路三要素分析法 (综合性实验)	236
7.4.3 集成运算放大器的基本运算电路 (综合性实验)	239
7.4.4 RC 有源低通与带阻滤波器	242
7.4.5 方波—三角波发生器设计与研究 (设计性实验)	244
7.4.6 运算放大器组成万用表设计与调试 (设计性实验)	247
7.4.7 集成运算组成的负反馈放大电路 (综合性实验)	250
7.4.8 交通灯控制电路的设计 (综合性实验)	253
7.4.9 双音报警电路的设计与测试 (设计性实验)	258
7.4.10 水泵自动控制电路的设计 (综合性实验)	260
7.4.11 数控步进电机电路的设计 (设计性实验)	262
附录 A 实验须知	264
附录 B 实验课前的指导	265
附录 C 实验报告示范	268
附录 D 常用模拟集成电路芯片	271
附录 E 常用数字集成电路芯片	274
参考文献	279



第1章

电工测量与仪器使用基础知识

本章所介绍的内容是电工测量最常用的基础知识,所涉及的测量仪表在电子电路设计、分析中应用极为广泛。电工测量要解决的主要问题是测量方法的选择、数据的分析和处理、测量设备的选用等。本章主要内容有:测量误差的基本知识;电工测量仪器的基本知识;电流、电压、电功率的测量;半导体二极管、三极管的测量。

1.1 引言

测量是以确定量值为目的的一组操作,是人类对自然界的客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中,操作人员需借助于专门的仪器设备,通过实验方法,求出以所采用的测量单位表示的被测量的数值大小。电工测量就是借助于测量设备,将被测量的电量或磁量,与作为测量单位的同类标准进行比较,从而确定被测电量或磁量的过程。

电工测量的数据主要是反映电和磁特征的物理量,如电流(I)、电压(U)、电功率(P)、电能(W)等;反映电路特征的物理量,如电阻(R)、电容(C)、电感(L)等;反映电和磁变化规律的物理量,如频率(f)、相位(φ)、功率因数(λ)等。对被测量与标准量进行比较的测量设备,包括测量仪器和作为测量单位参与测量的度量器。进行电量或磁量测量的各种仪器、仪表,统称为电工测量仪表。

进行电工测量时,应根据测量的目的和被测量的性质,选择不同的测量仪表和不同的测量方法。在测量过程中,由于采用测量仪表的不同、度量器是否直接参与以及测量结果如何取得等,形成了不同的测量方法。这些方法的选择,一般与被测量的特性、测量条件及对准准确度的要求等有关。测量方法可以根据各种不同的特征来分类。

1. 按获得被测量结果的方式不同分类

(1) 直接测量:直接测量时,测量结果是从一次测量的实验数据中得到的。此时,可以使用度量器直接参与被测量比较,而得出被测数值的大小;也可以使用按相应单位刻度的仪表直接测量出。如用欧姆表测量电阻、用电压表测量电压和用电流表测量电流等,都属于直接测量。

(2) 间接测量:间接测量时,测量结果是通过直接测量几个与被测量有一定函数关系的中间量而得到的。例如测量导体的电阻系数时,可以通过直接测出该导体的电阻 R 、长度 l 和截面 S 之值,然后按电阻与长度、截面积的关系式求出电阻系数 ρ 。

(3) 组合测量:若被测量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,这种测量方法称为组合测量。组合测量是一种特殊的精密测量方法,操作手续复杂,花费时间长,多用于科

学实验等特殊场合。

2. 按获得测量对象数值的方法不同分类

(1) 直读测量法：直读测量法的实质，是根据测量仪表的读数来判断被测量大小，作为测量单位的度量器并不直接参与测量。为了能直接读取被测量，这些测量仪表已按被测量的单位预先刻好分度，因而实际上也是与度量器的间接比较。采用直读测量法进行测量，由于具有设备简单和实验方便等一系列优点，因而得到了广泛的应用；其缺点是测量准确度因受仪表准确度的限制而较低。

(2) 比较测量法：在测量过程中，被测量需与度量器直接作比较的所有测量方法，都属于比较测量法。也就是说，比较测量法的特点，就是在测量过程中，要有度量器的直接参与。这种测量方法准确度较高，但测量时操作比较复杂，测量速度也比较慢，适于精密测量。

1.2 测量误差

1.2.1 测量误差的几个术语

1. 真值

测量的目的是希望通过测量求取被测量的真值 (true value)。所谓真值，是指在一定条件下，被测量客观存在的真正值。一般情况下，真值往往是测不到的。人们常用约定真值来代替真值。凡精度高一级仪器的误差与精度低一级仪器的误差相比，前者小于后者的 $1/5 \sim 1/20$ 时，则高一级仪器的测量值可认为是低一级仪器测量值的约定真值。

2. 标称值

标称值是计量或测量器具上标注的量值，如标准砝码上标出的“1kg”，标准电池上标出的“1.0186V”。由于制造上不完备、测量不准确及环境条件的变化，标称值并不一定等于它的实际值，所以在给出量具标称值的同时，通常应给出它的误差范围或准确度的等级。对于被测对象来说，同样存在着标称值不一定等于实际值的情况。

3. 示值

从测量仪器（设备）直接读到或经公式推算出的量值叫做示值，也称测量值。

4. 准确度

准确度 (accuracy) 既可用于说明测量结果，也可用于测量仪器的示值。当用于测量结果时，表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。当用于测量仪器时，定义为测量仪器给出接近于真值的能力。在所有这些场合中，准确度均为一种定性的概念而非定量的。因此，准确度不像测量误差、测量不确定度，它不是物理量，它没有一个定量的定度。测量误差定义为测量结果减去被测量之真值，是两量之差，可以定量地给出。准确度则不能。所谓定量，就是用量值表达。例如，我们说某测量仪器的示值误差为 -2.8mA ，这是定量的表达，给出了量值。但我们绝不能说这一测量仪器的准

准确度为 -2.8mA 或是 $\pm 2.8\text{mA}$ ，或是小于等于 2.8mA 。当某个测量仪器的引用误差不大于 0.01 时 (1%)，该仪器的准确度为 1 级。但只是准确度为 1 级，而绝非准确度为 1% 。注意， 1% 是个量值。

5. 重复性

在相同条件下，对同一被测量连续进行多次测量所得各指示值间的重合程度（一致性）叫做重复性。所谓相同条件，就是重复条件，它包括相同测量程序、相同测量条件、相同观测人员、相同测量设备和相同地点。

6. 误差公理

由于真值是量的定义的完整体现，其本质是不可确知的（不存在完美无缺的测量）；再加上在实际测量中，测量设备不准确，测量方法（手段）不完善，测量程序不规范，测量环境因素等影响的存在，导致测量结果与真值之差的测量误差也是不可确知的，导致了测量结果或多或少地偏离被测量的真值。所以，测量误差的存在是不可避免的，也就是说“误差不可确知，一切测量结果都有误差”，这就是误差公理。人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因，认识误差的规律、性质，进而找出减小误差的途径与方法，以求获得尽可能接近真值的测量结果。

1.2.2 测量误差的来源

测量误差是由测量仪器的误差以及测量辅助设备、测量方法、外界环境、操作技术等多种误差因素共同作用的结果，其主要来源如下所述。

1. 仪器误差

仪器（仪表）本身及其附件所引入的误差称为仪器误差。例如，由于刻度不准、调解机构不完善等原因造成的读数误差；内部噪声引起的误差；由于元器件老化、环境改变等原因造成的稳定性误差等都属于仪器误差，也称为工具误差。

2. 影响误差

影响误差又称环境误差，指由于各种环境因素与要求的条件不一致而造成的误差。例如，当环境温度、湿度或电源电压等因素要求一不致时，将会产生误差，这就是影响误差。

3. 理论误差

由于测量方法建立在近似公式或不完整的理论基础之上，或是用近似值来计算测量结果，由此引起的误差称为理论误差。

4. 方法误差

由于测量方法不合理而造成的误差称为方法误差。例如，用普通万用表测量高内阻回路的电压，就会因万用表的输入电阻较低而引起误差，这就是方法误差。

5. 人身误差

由于测量者的分辨能力、感官疲劳、固有习惯或责任心等因素而引起的误差，称为人身误差。例如，视觉疲劳所引起的视差就属于此类误差。

1.2.3 测量误差的表示

1. 绝对误差

绝对误差等于被测量的示值与其真值之差,用公式表示为

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1.1)$$

式中, ΔA 为测量结果的绝对误差; A_x 为示值, 在具体应用中可以用测量值、标称值、计算近似值或定值代替; A_0 为被测量的真值 (实际值)。通常把标准表的指示值认作被测量的实际值, 又用这个实际值来代替真值。

与绝对误差符号相反的值称为修正值或修正量, 用 C 表示, 即

$$C = -\Delta A = A_0 - A_x \quad (1.2)$$

可得

$$A_0 = C + A_x \quad (1.3)$$

即实际值等于示值与修正量之和。

测量仪器的修正值一般通过计量部门检定给出, 用于对仪表示值进行校正, 以消除误差。

例 1.1 某电流表的量程为 1mA, 通过检定, 知其修正值为 -0.02mA。用该电流表测量某一电流, 示值为 0.78mA。试问: 被测电流的实际值和测量中存在的绝对误差各为多少?

解 求被测电流的实际值:

$$A_0 = C + A_x = -0.02 + 0.78 = 0.76(\text{mA})$$

求绝对误差:

$$\Delta A = A_x - A_0 = 0.78 - 0.76 = 0.02(\text{mA})$$

本例中, 绝对误差也可以由修正值直接求得, 即 $\Delta A = -C = 0.02\text{mA}$ 。

2. 相对误差

当被测量不是同一个值时, 绝对误差的大小不能反映测量的准确度, 这时该用相对误差的大小来判断测量的准确度。相对误差等于绝对误差与约定值之比。

当约定值为被测量的真值时, 称为真值相对误差或实际相对误差。一般用百分数的形式表示, 即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1.4)$$

当约定值为被测量的测量结果, 即仪器的示值时, 称为示值相对误差或标称相对误差。一般用百分数的形式表示为

$$\gamma_x = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (1.5)$$

由于真值的不可确定性, 在实际的工程应用中常常用 γ_x 代替 γ_0 。

在测量实践中, 测量结果准确度的评价常常使用相对误差, 因为它方便、直观。相对误差愈小, 准确度愈高。

分贝误差用 γ_{dB} 表示, 这是一种用分贝 (dB) 表示的相对误差。当绝对误差值,

$\Delta A \ll 1$ 时, 它与示值相对误差 γ_x 之间存在如下简单关系。

对于电流、电压类的电参数,

$$\gamma_{dB} = 8.69 \gamma_x (\text{dB}) \quad (1.6)$$

对于功率类的电参数,

$$\gamma_{dB} = 4.3 \gamma_x (\text{dB}) \quad (1.7)$$

例如, DW-3 型高频微伏表测电压时的误差为 1.5dB, 如用示值相对误差表示, 为

$$\gamma_x = \gamma_{dB} / 8.69 = 1.5 \times 0.115 \approx 0.17 = 17\%$$

综上所述, 除分贝误差外, 其他相对误差都是一个只有大小和符号, 而没有量纲的百分数。

3. 引用误差

相对误差可以表示测量结果的准确度, 但不足以说明仪表本身的准确性能, 所以用引用误差来表示仪表的准确性。而且, 为了评价测量仪表的准确性, 引入了准确度等级。引用误差定义为绝对误差与测量仪表量程之比, 用百分数表示, 即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1.8)$$

式中, γ_n 为引用误差; A_m 为测量仪表的量程。

测量仪表的各指示(刻度)值的绝对误差有正有负, 有大有小。所以, 确定测量仪表的准确度等级应用最大引用误差, 即最大绝对值 $|\Delta A|_m$ 与量程之比。若用 γ_{nm} 表示最大引用误差, 有

$$\gamma_{nm} = \frac{|\Delta A|_m}{A_m} \times 100\% \quad (1.9)$$

我国规定, 电测量仪表的准确度等级指数 a 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等 7 级。它们的基本误差(最大引用误差)不能超过仪表准确度等级指数 a 的百分数, 即

$$\gamma_{nm} \leq a\% \quad (1.10)$$

依照上述规定, 不难得出: 电测量仪表在使用时所产生的最大可能误差可由下式求出:

$$\Delta A_m = \pm A_m \times a\%$$

$$\gamma_x = \pm (A_m / A_x) \times a\%$$

例 1.2 某 1.0 级电压表, 量程为 300V, 当测量值分别为 $U_1 = 300\text{V}$, $U_2 = 200\text{V}$, $U_3 = 100\text{V}$ 时, 试求这些测量值的(最大)绝对误差和示值相对误差。

解 绝对误差为

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \pm 300 \times 1.0\% = \pm 3(\text{V})$$

示值相对误差分别为

$$\gamma_{U_1} = (\Delta U_1 / U_1) \times 100\% = (\pm 3 / 300) \times 100\% = \pm 1.0\%$$

$$\gamma_{U_2} = (\Delta U_2 / U_2) \times 100\% = (\pm 3 / 200) \times 100\% = \pm 1.5\%$$

$$\gamma_{U_3} = (\Delta U_3 / U_3) \times 100\% = (\pm 3 / 100) \times 100\% = \pm 3.0\%$$

由上例不难看出: 测量仪表产生的示值测量误差不仅与所选仪表等级指数有关, 而且与所选仪表的量程有关。量程 A_m 和测量值 A_x 相差愈小, 测量准确度愈高。所以在选择仪表量程时, 测量值应尽可能接近仪表满度值, 一般不小于满度值的 2/3。这样, 测量结果的相对

误差将不会超过仪表准确度等级指数百分数的 1.5 倍。这一结论只适合于以标度尺上量程的百分数划分仪表准确度的一类仪表,如电流表、电压表、功率表;而对于测量电阻的普通型欧姆表,是不适合的,因为欧姆表的准确等级等级是以标度尺长度的百分数划分的。可以证明,欧姆表的示值接近其中值电阻时,测量误差最小,准确度最高。

4. 容许误差

容许误差指的是在正常使用条件下,可能产生的最大测量误差范围,它是衡量测量仪表的最重要的指标。测量仪器的准确度、稳定度等指标都可用容许误差来表征。按照国家标准 GB 6592-2005《电子测量仪器误差的一般规定》的规定,容许误差可用工作误差、固有误差、影响误差、稳定性误差来描述。

1) 工作误差

工作误差是在额定工作条件下仪器误差的极限值,即来自仪器外部的各种影响量和仪器内部的影响特性为任意可能的组合时,仪器误差的最大极限值。这种表示方式的优点是使用方便,即可利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围;不足的是由于工作误差是在最不利组合下给出的,而在实际测量中最不利组合的可能性极小,所以,由工作误差估计的测量误差一般偏大。

2) 固有误差

固有误差是当仪器的各种影响量和影响特性处于基准条件下,仪器所具有的误差。由于基准条件比较严格,所以,固有误差可以比较准确地反映仪器所固有的性能,便于在相同条件下对同类产品进行比较和校准。

3) 影响误差

影响误差是当一个影响量处在额定使用范围内,而其他所有影响量处在基准条件时,仪器所具有的误差,如频率误差、温度误差等。

4) 稳定性误差

稳定性误差是在其他影响和影响特性保持不变的情况下,在规定的时间内,仪器输出的最大值或最小值与其标称值的偏差。

容许误差的表示方法既可以是绝对误差形式,也可以是相对误差形式,或者是二者结合起来表示。

例如, WQ-5 万用电桥技术说明书中标明测量电感时的误差为:

- 测量范围为 $1 \sim 122.1\text{H}$ 时,误差为 $\pm 2\%$;
- 测量范围为 $1 \sim 1000\mu\text{H}$ 时,误差为 $\pm (2\% + 1\mu\text{H})$ 。

这里标明的误差就是容许误差。

应特别注意,容许误差是指仪器不应超出的误差最大范围,而不是某一确定仪器的最大误差值。例如,某电压表的标称容许误差为 $\pm 1\%$,我们只能说这台电压表的误差超出 $\pm 1\%$ 的可能性很小,至于这台电压表的误差值究竟是多少,并不知道;或者说,对于一批这样的电压表,大部分的误差值不会超过 $\pm 1\%$,至于每台电压表的误差值究竟是多少,并不知道。

1.2.4 测量误差的消除方法

产生误差的来源多种多样,因此,要消除误差,只能根据不同的测量目的,对测量仪器、仪表、测量条件、测量方法及步骤进行全面分析,以发现测量误差,进而分析测量误差,然后采用相应的措施,将误差消除或减弱到与测量要求相适应的程度。下面介绍消除误差的基本方法。

1. 从产生误差的来源上消除

从产生误差的来源上消除是消除或减弱测量误差的最基本的方法。它要求实验者对整个测量过程要有一个全面、仔细的分析,弄清楚可能产生测量误差的各种因素,然后在测量过程中予以消除。产生误差的来源多种多样,因此要消除测量误差,只能根据不同的测量目的,对测量仪表从根源上来消除。具体来说,选择准确等级高的仪器设备,以消除仪器的基本误差;使仪器设备工作在其规定的工作条件下,使用前正确调零、预热,以消除仪器设备的附加误差;选择合理的测量方法,设计正确的测量步骤,以消除方法误差和理论误差;提高测量人员的测量素质,改善测量条件(选用智能化、数字化仪器仪表等),以消除人身误差。

2. 利用修正的方法来消除

利用修正的方法是消除或减弱测量误差的常用方法,在智能化仪表中得到广泛应用。所谓修正的方法,就是测量前或测量过程中,求取某类测量误差的修正值,而在测量的数据处理过程中手动或自动地将测量读数或结果与修正值相加,从测量读数或结果中消除或减弱该类测量误差。若用 C 表示某类测量误差的修正值,用 A_x 表示测量读数或结果,则不含该类测量误差的测量读数或结果 A 可用下式求出:

$$A = A_x + C \quad (1.11)$$

修正值的求取有以下三种途径:

① 从有关资料中查取:如仪器仪表的修正值可以从该表的检定证书中获取。

② 通过理论推导求取:如指针式电流表、电压表电阻不够小或不够大引起方法误差的修正值,可由下式求出:

$$C_I = \frac{R_A}{R_{ab}} I_x \quad (1.12)$$

$$C_V = \frac{R_{ab}}{R_V} U_x \quad (1.13)$$

式中, C_I 和 C_V 为电流表、电压表读数的修正值; R_A 和 R_V 为电流表、电压表读数的内阻; R_{ab} 为被测网络的等效含源支路的入端电阻; I_x 和 U_x 为电流表、电压表的读数。

③ 通过实验求取:对影响测量读数(结果)的各种因素,如温度、湿度、频率、电源电压等变化引起的测量误差,可通过实验作出相应的修正曲线或表格,供测量时使用。对不断变化的系统的测量误差,如仪器的零点误差、增益误差等采取现测现修的方法解决。智能化仪表中采用的三步测量、实时校准均缘于此法。

3. 利用特殊的测量方法来消除

测量误差的特点是大小、方向恒定不变,具有可预见性。所以,可选用特殊的测量方法