



“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会”组织

电 工 电 子 实 验 系 列 教 材

# 电路与电子技术实验教程

潘 岚 主 编

朱承高 主 审



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会”组织

电工电子实验系列教材

全篇内容

TM13-33  
19

# 电路与电子技术实验教程

潘 岚 主编  
朱承高 主审



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 内容简介

本书是由教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会与高等教育出版社共同策划组织的示范性电工电子实验系列课程教材建设项目的首批入选教材。

本书强调对实验过程、实验线路的设计,强调 CAD 工具的应用能力,强调实验的预习,力求通过实验教学模式的改革使学生的工程实践能力得到锻炼。全书分为上、下两篇,共 9 章。在上篇实验工具中,主要介绍了电路与电子技术实验中目前常用的仪器仪表及电路分析、系统开发工具。这些软、硬件工具的介绍都以实际应用为主,具有使初学者能够快速掌握工具功能、基本使用方法的特点。在下篇实验项目中,给出了电路分析基础、模拟电子技术与数字电子技术实验共 34 个。这些实验有些是传统基础实验,如戴维宁定理与最大功率传输定理、单管放大电路的研究、集成门电路的参数测试等,但本书着重要求学生根据理论知识进行实验过程的设计。大量的实验项目均为设计性实验,即要求学生根据实验任务完成电路的设计与仿真,并设计实验过程完成所要求的测试。书中还给出了一部分综合性实验项目,如移相脉冲发生电路需综合电路与模拟电子技术有关知识,矩形波发生电路、A/D 综合应用电路等需综合模拟电子技术与数字电子技术有关知识。

本书可作为高等学校电工、电子类及仪器仪表类专业本、专科学生电路与电子技术实验课程的教材,亦可供从事电工电子技术工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术实验教程 / 潘岚主编. —北京: 高等教育出版社, 2005. 11

ISBN 7-04-017750-1

I. 电... II. 潘... III. ①电路-实验-高等学校-教材②电子学-实验-高等学校-教材 IV. ①TM13-33  
②TN01-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 117455 号

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 济南新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 14

字 数 330 000

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

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

网上订购 <http://www.landaco.com>

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

版 次 2005 年 11 月第 1 版

印 次 2005 年 11 月第 1 次印刷

定 价 17.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 17750-00

# 总 序

如何通过实践环节来培养工科大学生的创新意识以及如何更好地开展实验教学等问题已成为当前高等院校工科专业教学改革的热点与难点问题。《教育部关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》(教高[2003]1号文件)中明确指出:“理论教学与实践教学并重。要高度重视实验、实习等实践性教学环节,通过实践培养和提高学生的创新能力。要大力改革实验教学的形式和内容,鼓励开设综合性、创新性实验和研究型课程。”但是,目前实验教材的现状却不容乐观,正式出版的实验教材品种很少;多数院校的实验教材都是校内讲义,验证性实验内容偏多,综合性、设计性实验内容很少,不利于学生能力培养;优秀实验教材不多,与理论教材相比尤其明显。这样,众多学校很难选到合适的优秀实验教材。

鉴于上述情况,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会与高等教育出版社共同策划组织了示范性电工电子实验系列课程教材的建设项目,该项目以国家电工电子教学基地院校为基础,发挥这些院校在理论教学和实践教学方面的示范作用,组织编写电工电子实验系列教材。

2003年12月在云南大学召开了“电工电子实验系列课程教学与教材建设研讨会”,成立了“电工电子实验系列教材编审委员会”(见附件)。30余所院校的参会代表围绕电工电子实践教学所涉及的知识点进行了充分研讨,确定了电工电子实践教学基本要求,为实验教材的编写提供参考依据。通过研讨达成了以下共识:

(1) 实验教学是非常重要的教学环节,是学生学习科技知识的重要手段。学生应能通过实验获取科学知识、验证相关理论,培养创新能力。

(2) 从培养学生能力的角度,实验一定要单独设课,而且要有不同于理论课程的实验课程体系。要改变依附于某一理论课程的原有模式。

(3) 实验能力培养包含实验设计、测试与仪器使用、仿真、简单故障排除、数据分析、实验报告与总结、查阅器件手册等方面的能力。

(4) 实验教学应按基础性、设计性、综合性等不同层次、循序渐进地提出要求。

2004年4月14日~15日在华中科技大学召开了由全体编审委员会成员参加的教材评审会。本着保证水平、突出特色、宁缺毋滥的原则,编审委员会成员对东南大学、华中科技大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、西安电子科技大学、上海交通大学、浙江大学等15所院校申报的38种实验教学改革成果教材进行了评审。评出首批入选的教材有:东南大学、西安交通大学的两套实验系列教材,上海交通大学、哈尔滨工业大学和浙江大学的3种电路课程实验教材,华中科技大学、浙江大学和南京航空航天大学的3种电子技术课程实验教材,北京交通大学的信号处理课程实验教材,西安电子科技大学的电磁场课程实验教材,上海交通大学、西

## 总 序

---

安交通大学、厦门大学和 中国计量学院的 4 种非电类电工学课程实验教材。

希望这些优秀实验系列教材的出版能推动各高校的实验教学改革,真正达到培养学生创新能力的目的。

教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任



2004 年 6 月

附件：“电工电子实验系列教材”编审委员会成员名单

专 家 组	蔡惟铮	哈尔滨工业大学	
	唐 介	大连理工大学	
	孙肖子	西安电子科技大学	
	谢自美	华中科技大学	
	朱承高	上海交通大学	
主 任 委 员	王志功	东南大学	
副 主 任 委 员	孙雨耕	天津大学	
委 员	马西奎	西安交通大学	
	胡仁杰	东南大学	
	陈洪亮	上海交通大学	
	陈后金	北京交通大学	
	王小海	浙江大学	
	王永军	东北大学	
	杨 浩	重庆大学	
	殷瑞祥	华南理工大学	
	段哲民	西北工业大学	
	王成华	南京航空航天大学	
	罗 杰	华中科技大学	
	朱 红	电子科技大学	
	林育兹	厦门大学	
	秘 书	韩 颖	高等教育出版社

# 前 言

对实验教学环节的改革是目前各高校教学改革热点问题,其宗旨是加强对大学生实践能力的培养,以提高大学生的综合素质。电工学、电路分析基础、电子技术是理工科专业重要的学科基础课程,这些课程的实验教学环节对学生的电子技术应用能力的培养作用尤为突出。

目前,实践教学改革的成果主要还体现在实验教学内容的改革中,即在实验教学中加强设计性实验、综合性实验的比例,减少验证性实验和内容。我们认为实践教学改革的重点是实验教学观念的改革,为了使实验教学真正发挥培养学生实践能力的作用,实验教学的改革应该是从实验内容到实验教学模式的全面改革。因为如果仅仅是实验内容改革为设计性实验,而实验进行方式仍然是传统的即有详细实验步骤说明和实验数据记录表格,学生只要按实验指导书一步一步进行就可完成实验,则起不到对实验能力培养的目的。

在我们传统的实验教学中,往往给学生一本详细说明实验原理与实验步骤的实验指导书,这不仅限制了实验内容的不断更新,更限制了学生的创造性,并且助长了部分学生对实验指导书的依赖性,使实验完全变成了一个按指示进行的操作过程。有些学生甚至在实验完成后都不知道实验结果的意义。因此,我们在实验指导书中只提出需完成的实验内容,并给出实验室提供的用于完成本实验的设备和元器件等条件,让学生根据实验要求自行设计实验过程来完成实验内容。对于在实验中所需的集成芯片的功能、管脚图、参数等也不在实验指导书中给出,而是要求学生通过到图书馆查找元器件手册或利用任何其他手段来获得。

实验过程的进行方式是保证达到实验目的的关键,为了体现我们在实验内容改革中的特点,我们的实验教学模式是:由实验指导书获得实验要求→查找实验中有关集成芯片的信息→用CAD完成设计线路的仿真→进入实验室完成相应实验的硬件实现→根据实验结果完成实验报告。这种教学模式使实验过程不仅仅只在实验室中进行,它要求学生利用课外时间完成实验准备工作,这包括有关元器件资料的查找、实验线路的设计与CAD仿真。

本教材有以下几个特点:

1. 本教材力图摆脱实验教材对实验设备的依赖性,教材中所涉及的实验内容均可由通用电子仪器及元器件实现。
2. 本教材强调实验方案的设计,对一些传统的验证性实验,通过要求学生进行实验方案设计的方法,可以在不改变实验设备的情况下使实验变为设计性实验。
3. 本教材强调仿真工具在实验教学中的应用,所有实验都要求有仿真结果,使学生在一定的硬件条件下,可自行设计实验线路。
4. 本教材强调实验的预习环节,力图根除在实验教学中普遍存在的“进实验室之前不知道要干什么,出实验室之后不知道干了什么”的现象。
5. 本教材的实验内容包括电路、模拟电子技术与数字电子技术,内容涵盖广,既适用于仪器

仪表类非电类专业,也适用于电类专业使用。

本教材在结构上分为上、下两篇。其中上篇为“实验工具”,主要内容是介绍在实验过程中需使用的软、硬件工具。本教材因强调培养学生对实验过程、实验内容的设计能力,因此对实验工具介绍的重点放在对各类通用电子电路设计软件的介绍,主要有以下章节内容:实验数据的误差分析与处理、常用电工电子实验仪器与仪表、OrCAD/PSpice9 基本使用方法、Multisim2001 使用入门、MAX + plus II 10.0 使用入门、ispDesign Expert 开发系统使用入门等。

下篇为“实验项目”,主要内容包括电路基础实验、模拟电子技术实验、数字电子技术实验,共 34 个实验。在实验的设计中,对每一个实验都明确提出了实验目的、实验任务、预习要求、实验仿真要求、实验报告要求等内容。在实验的设计中突出了实验教学模式的改革,对实验过程、实验内容的设计要求学生通过预习完成,并利用仿真工具在进入实验室之前对所设计内容进行验证。这些实验有些是传统基础实验,如戴维宁定理与最大功率传输定理、单管放大电路的研究、集成门电路的参数测试等,但本书着重要求学生根据理论知识进行实验过程的设计。大量的实验项目均为设计性实验,即要求学生根据实验任务完成电路的设计与仿真,并设计实验过程完成所要求的测试。书中还给出了一部分综合性实验项目,如移相脉冲发生电路需综合电路与模拟电子技术有关知识,矩形波发生电路、A/D 综合应用电路等需综合模拟电子技术与数字电子技术有关知识。

本书由潘岚任主编,上篇第 1 章、下篇由潘岚执笔,上篇第 2、3、4、6 章由吴霞执笔,上篇第 5 章、下篇实验 3.11、3.12 由沈小丽执笔,下篇实验项目中所有仿真分析内容由卢飒执笔,全书由潘岚统稿。

本书由上海交通大学朱承高教授担任主审,朱承高教授在百忙中抽出时间对本书进行了精心的审核,对本书提出了很多宝贵的意见和建议。朱承高教授高深的学术造诣、认真负责的学术精神,给我们留下了深刻的印象,在此深表感谢。

由于编者水平有限,本书错误、疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

编 者  
2005 年 7 月



# 目 录

## 上篇 实验工具

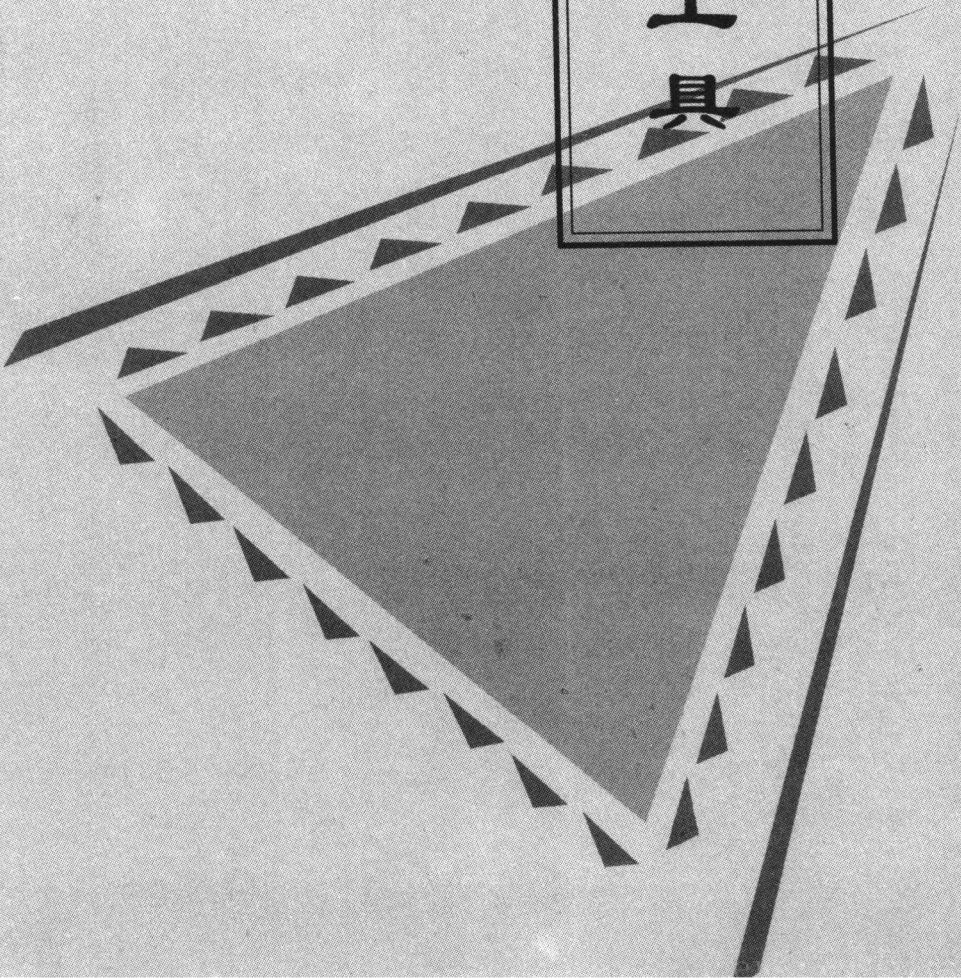
1 实验数据的误差分析与处理	3	3.3 设置仿真分析类型	45
1.1 测量误差的表示方法	3	3.4 仿真波形观测	46
1.1.1 绝对误差	3	3.4.1 Probe 的基本使用方法	46
1.1.2 相对误差	4	3.4.2 使用 Probe 观测波形时的一些常用设置	49
1.1.3 引用误差	4	4 Multisim2001 使用入门	55
1.2 误差的来源与分类	5	4.1 Multisim2001 简介	55
1.2.1 测量误差的来源	5	4.1.1 Multisim2001 的功能与特点	55
1.2.2 测量误差的分类	7	4.1.2 Multisim2001 工作界面	55
1.3 减小误差的基本方法	7	4.2 Multisim2001 使用方法举例	57
1.3.1 减小系统误差的方法	7	4.2.1 电路原理图输入	57
1.3.2 减小随机误差的方法	9	4.2.2 仿真实验分析	66
1.3.3 减小粗大误差的方法	9	5 MAX + plus II 10.0 使用入门	72
1.4 实验数据的记录与处理	10	5.1 MAX + plus II 10.0 简介	72
1.4.1 数据的有效数字	10	5.2 MAX + plus II 10.0 的基本使用方法	73
1.4.2 实验数据的读取与记录	11	方法	73
1.4.3 实验数据的处理	13	5.2.1 项目设计文件的建立	73
2 常用电工电子实验仪器与仪表	15	5.2.2 项目设计文件的编译	78
2.1 万用表	15	5.2.3 项目的时序仿真	80
2.1.1 指针式万用表	15	5.2.4 器件编程与配置	84
2.1.2 数字式万用表	18	6 ispDesign Expert 开发系统使用入门	88
2.2 交流毫伏表	19	6.1 ispDesign Expert 简介	88
2.3 功率表	21	6.1.1 ispDesign Expert 的功能与特点	88
2.4 示波器	22	6.1.2 ispDesign Expert 项目管理器工作界面	89
2.5 函数信号发生器	28	6.2 ispDesign Expert 使用方法举例	90
3 OrCAD/PSpice9 基本使用方法	31	6.2.1 创建新项目	90
3.1 概述	31	6.2.2 顶层原理图输入	92
3.1.1 OrCAD/PSpice9 系统的构成	31		
3.1.2 OrCAD/PSpice9 的主要功能	32		
3.2 绘制电路原理图	35		

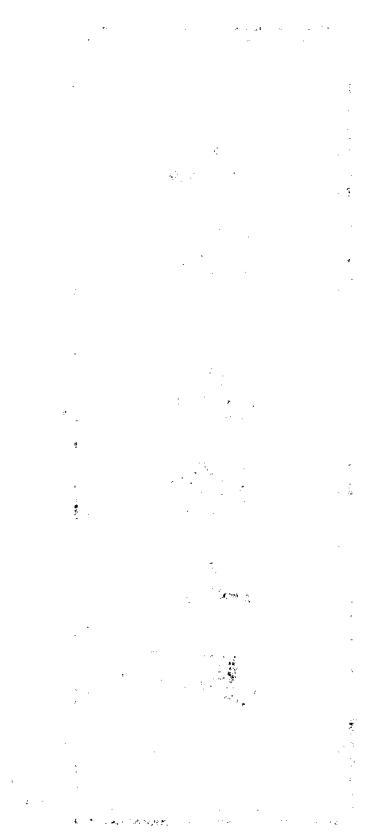
6.2.3 创建模块的硬件描述语言文件 .....	100	测试向量的编译 .....	104
6.2.4 原理图、ABEL-HDL 源文件及		6.2.5 仿真测试 .....	105
		6.2.6 器件适配与下载 .....	107

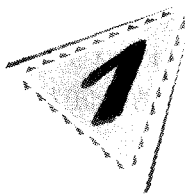
## 下篇 实验项目

1 电路基础实验 .....	113	.....	163
实验 1.1 常用电子仪器的使用 .....	113	实验 2.6 运算放大器的非线性应用 .....	166
实验 1.2 电路元件的伏安特性 .....	116	实验 2.7 有源滤波电路 .....	169
实验 1.3 叠加定理 .....	121	实验 2.8 文氏电桥振荡电路 .....	171
实验 1.4 戴维宁定理与最大功率 传输定理 .....	124	实验 2.9 输出电压可调的直流稳压 电源 .....	174
实验 1.5 简单正弦交流电路 .....	126	实验 2.10 移相脉冲发生电路 .....	177
实验 1.6 日光灯电路与功率因数的 提高 .....	132	实验 2.11 正弦波发生电路 .....	179
实验 1.7 串联谐振电路 .....	135	3 数字电子技术实验 .....	181
实验 1.8 RC 电路的滤波特性 .....	138	实验 3.1 集成逻辑门芯片的参数 测试 .....	181
实验 1.9 三相交流电路的测量 .....	139	实验 3.2 组合逻辑电路设计 1 .....	186
实验 1.10 一阶 RC 电路的暂态 过程 .....	142	实验 3.3 组合逻辑电路设计 2 .....	188
实验 1.11 二阶电路的暂态过程 .....	147	实验 3.4 时序逻辑电路设计 1 .....	191
2 模拟电子技术实验 .....	151	实验 3.5 时序逻辑电路设计 2 .....	195
实验 2.1 单管放大电路的研究 .....	151	实验 3.6 计数与显示 .....	199
实验 2.2 负反馈对放大电路性能的 影响 .....	158	实验 3.7 555 定时器的应用 .....	200
实验 2.3 场效晶体管放大电路的 研究 .....	159	实验 3.8 矩形波发生电路 .....	203
实验 2.4 运算放大器的线性应用 1 .....	161	实验 3.9 节拍脉冲发生电路 .....	204
实验 2.5 运算放大器的线性应用 2		实验 3.10 D/A 综合应用电路 .....	206
		实验 3.11 A/D 综合应用电路 .....	208
		实验 3.12 时序逻辑电路设计 3 .....	210

上篇 实验工具







# 实验数据的误差分析与处理

在科学实验与生产实践的过程中,为了获取表征被研究对象的特征的定量信息,必须准确地进行测量。在测量过程中,由于各种原因,测量结果和待测量的客观真值之间总存在一定差别,即测量误差。因此,分析误差产生的原因,如何采取措施减少误差,使测量结果更加准确,对实验人员及科技工作者来说是必须了解和掌握的。

## 1.1 测量误差的表示方法

由于测量误差的客观存在,因此为了表示被测量的测量结果的准确度,一般用绝对误差、相对误差和引用误差来定量表示测量结果与被测量实际值之间的差别。

### 1.1.1 绝对误差

绝对误差是指测量仪器的示值与被测量的真值之间的差值。假设被测量的真值为  $A_0$ , 测量仪器的示值为  $X$ , 则绝对误差为

$$\Delta X = X - A_0 \quad (1.1.1)$$

在某一时间及空间条件下,被测量的真值虽然是客观存在的,但一般无法测得,只能尽量逼近它。故常用高一级标准测量仪器的测量值  $A$  代替真值  $A_0$ , 为区别起见,将  $A$  称为被测量的实际值,则

$$\Delta X = X - A \quad (1.1.2)$$

在测量前,测量仪器应由高一级标准仪器进行校准。校准指用比被校测量仪器精度高的测量仪器(称为标准仪器)与被校测量仪器进行比较,以确定被校测量仪器的示值误差。校准应满足的基本要求有:

(1) 环境条件:校准如在校准室进行,则环境条件应满足实验室要求的温度、湿度等规定;校准如在现场进行,则环境条件以能满足仪表现场使用的条件为准。

(2) 仪器:作为校准用的标准仪器其误差范围应是被校仪器误差范围的  $1/3 \sim 1/10$ 。

(3) 人员:进行校准的人员应需有效的考核,并取得相应的合格证书。

校准量常用修正值  $C$  表示。高一级标准仪器的示值(即实际值)减去测量仪器的示值所得的差值,就是测量仪器的修正值  $C$ 。实际上修正值就是绝对误差,只是符号相反,即

$$C = -\Delta X = A - X \quad (1.1.3)$$

利用某仪器的修正值便可得该仪器所测被测量的实际值  $A$ , 即

$$A = X + C \quad (1.1.4)$$

例如:用一电压表测量电压时,电压表的示值为  $1.1 \text{ V}$ ,通过鉴定得出该电压表修正值为  $-0.01 \text{ V}$ ,则被测电压的实际值为

$$A = [1.1 + (-0.01)] \text{ V} = 1.09 \text{ V}$$

修正值给出的方式可以是曲线、公式或数表。对于自动测试仪器,修正值则预先编制成有关程序,存于仪器中,测量时对误差进行自动修正,所得结果便是实际值。

### 1.1.2 相对误差

测量不同大小的被测量时,绝对误差往往不能确切地反映出被测量的准确程度。例如:设测一个大小为  $100 \text{ V}$  电压时,绝对误差为  $\Delta X_1 = +2 \text{ V}$ ;测一个  $10 \text{ V}$  电压时,绝对误差为  $\Delta X_2 = 0.5 \text{ V}$ ,虽然  $\Delta X_1 > \Delta X_2$ ,可实际  $\Delta X_1$  只占被测量的  $2\%$ ,而  $\Delta X_2$  却占被测量的  $5\%$ 。显然,后者的误差对测量结果的影响更大。因此,工程上常采用相对误差来比较测量结果的准确程度。

用绝对误差  $\Delta X$  与被测量的实际值  $A$  之比的百分数来表示的误差称为相对误差,记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A} \times 100\% \quad (1.1.5)$$

### 1.1.3 引用误差

相对误差虽然可以说明测量结果的准确度,并衡量测量结果和被测量实际值之间的差异程度,但还不足以用来评价指示仪表的准确度,为此引入了引用误差的概念。

用绝对误差  $\Delta X$  与仪器的满刻度值  $X_m$  之比的百分数来表示的误差称为引用误差,记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1.1.6)$$

仪表的准确度用来表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。它是反映测量质量好坏的重要标志之一,准确度低则测量误差大;准确度高则测量误差小。

我国电工仪表的准确度等级  $s$  就是按引用误差  $\gamma_m$  分级的,按  $\gamma_m$  大小依次划分成  $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.5$  及  $5.0$  七级。比如某电压表  $s = 0.5$ ,即表明它的准确度等级为  $0.5$  级,它的引用误差不超过  $0.5\%$ ,即  $|\gamma_m| \leq 0.5\%$  (习惯上也写成  $\gamma_m = \pm 0.5\%$ )。

**例 1.1.1** 用量程为  $300 \text{ V}$  的电压表测量实际电压为  $218 \text{ V}$  的电压时,电压表的示值为  $214 \text{ V}$ ,试求各种误差。

**解:** 根据定义,得被测电压的绝对误差为

$$\Delta U = U - U_0 = (214 - 218) \text{ V} = -4 \text{ V}$$

相对误差为

$$\gamma_A = \frac{\Delta U}{U_0} \times 100\% = \frac{-4 \text{ V}}{218 \text{ V}} \times 100\% = -1.83\%$$

引用误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta U}{U_m} \times 100\% = \frac{-4 \text{ V}}{300 \text{ V}} \times 100\% = -1.33\%$$

## 1.2 误差的来源与分类

### 1.2.1 测量误差的来源

测量误差的来源很多,根据误差产生的情况,主要可以分成以下几个方面。

#### 1. 仪器误差

仪器误差是指由于测量仪器本身的电气或机械等性能不完善所造成的误差。因此,减小仪器误差的方法是配备性能优良的仪器并定时对测量仪器进行校准。

#### 2. 使用误差

使用误差又称为操作误差,指测量过程中因操作不当而引起的误差。减小使用误差的方法是测量前详细阅读仪器的使用说明书,严格遵守操作规程,提高实验技巧和对各种仪器的操作能力。

例如:在万用表表盘上常有“ $\perp$ ”、“ $\text{—}$ ”、“ $\angle 60^\circ$ ”等符号,它们表示该万用表在使用时的位置分别是:垂直、水平和与水平面倾斜成 $60^\circ$ 。若测量者在使用时不按规定位置放置,则会带来误差。又如在使用万用表电阻挡测电阻前不調零所带来的误差,更是显而易见的。

#### 3. 方法误差

方法误差又称理论误差,它是指由于使用的测量方法不完善、理论依据不严密或者对某些经典测量方法作了不适当的修改简化而产生的误差,即指凡是在测量结果的表达式中没有得到反映的因素,而实际上这些因素在测量过程中又起到一定的作用所引起的误差。例如,用伏安法测电阻时,若直接以电压表示值与电流表示值之比作测量结果,而不计仪表本身内阻的影响,就会引起方法误差。

下面以伏安法测电阻为例来说明方法误差的产生。根据欧姆定律,对于线性电阻,其阻值 $R$ 为

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.2.1)$$

式中, $U$ 为被测电阻两端电压, $I$ 为流经电阻的电流。由于实际电流表的内阻不是零,电压表的内阻也不等于无穷大,因此实际的两种伏安法测量电阻阻值的电路(如图1.2.1和图1.2.2所示)都不可避免地会出现方法误差。此外,对于阻值不同的电阻,两种测量方法产生的方法误差也有很大差异,分析如下。

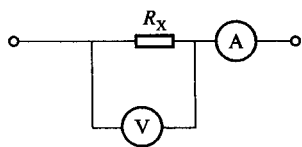


图 1.2.1 电流表外接伏安法

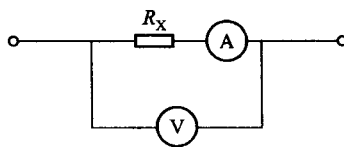


图 1.2.2 电流表内接伏安法

设被测电阻的阻值为 $R_x$ ,电流表和电压表内阻分别为 $R_A$ 和 $R_V$ ,当采用图1.2.1所示电流表外接电路时,电流表的读数并不是通过 $R_x$ 的实际电流,而是通过 $R_x$ 和 $R_V$ 并联电路的总电流,于是有

$$R_{\text{测}} = \frac{U}{I} = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} < R_x \quad (1.2.2)$$

其绝对误差为

$$|\Delta R| = |R_{\text{测}} - R_x| = \left| \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} - R_x \right| = \frac{R_x^2}{R_V + R_x} \quad (1.2.3)$$

其相对误差为

$$\gamma_A = \frac{|\Delta R|}{R_x} = \frac{R_x}{R_V + R_x} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

由上式可知,当  $R_x \ll R_V$  时,相对误差较小,即图 1.2.1 所示电流表外接法适于测量阻值较小的电阻。

在图 1.2.2 所示电流表内接电路中,电流表读数就是流过被测电阻  $R_x$  的电流,但电压表的读数却不是  $R_x$  两端的电压,而是  $R_x$  与  $R_A$  串联电路两端的电压,所以有

$$R_{\text{测}} = \frac{U}{I} = R_x + R_A > R_x \quad (1.2.5)$$

其绝对误差为

$$|\Delta R| = |R_{\text{测}} - R_x| = (R_x + R_A) - R_x = R_A \quad (1.2.6)$$

其相对误差为

$$\gamma_A = \frac{|\Delta R|}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} \times 100\% \quad (1.2.7)$$

由上式可知,当  $R_x \gg R_A$  时,相对误差较小,即图 1.2.2 所示电流表内接法适于测量阻值较大的电阻。

例如:在电压表、电流表内阻分别为  $R_V = 50 \text{ k}\Omega$ 、 $R_A = 5 \Omega$  时,若被测电阻为  $R_x = 10 \Omega$ ,则用电流表外接法得相对误差为

$$\gamma_A = \frac{R_x}{R_V + R_x} \times 100\% = \frac{10}{50\,000 + 10} \times 100\% \approx 0.02\%$$

用电流表内接法得相对误差为

$$\gamma_A = \frac{R_A}{R_x} \times 100\% = \frac{5}{10} \times 100\% = 50\%$$

若被测电阻  $R_x = 5 \text{ k}\Omega$  时,则用电流表外接法得相对误差为

$$\gamma_A = \frac{R_x}{R_V + R_x} \times 100\% = \frac{5\,000}{50\,000 + 5\,000} \times 100\% \approx 9.1\%$$

用电流表内接法得相对误差为

$$\gamma_A = \frac{R_A}{R_x} \times 100\% = \frac{5}{5\,000} \times 100\% = 0.1\%$$

一般地,当被测电阻  $R_x < \sqrt{R_A R_V}$  时,可视为小电阻,应采取电流表外接电路;当  $R_x > \sqrt{R_A R_V}$  时,可视为大电阻,应采取电流表内接电路。所以,测量过程中产生的方法误差可以通过合理选择测量方法加以限制。



### 1.2.2 测量误差的分类

测量误差按性质和特点可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

#### 1. 系统误差

系统误差指在相同条件下重复测量同一量时,大小和符号保持不变或按照一定规律变化的误差。系统误差一般可通过实验或分析方法,查明其变化规律及产生原因,即可减少或消除。电子技术实验中系统误差常来源于测量仪器的调整不当和使用方法不当。

#### 2. 随机误差

随机误差也称为偶然误差,指在相同条件下多次重复测量同一量时,大小和符号无规律变化的误差。随机误差不能用实验方法消除,但由于随机误差是符合概率统计规律的,因此可以从随机误差的统计规律中了解它的分布特性,从而对测量结果的可靠性作定量分析,并对误差进行消除。

#### 3. 粗大误差

粗大误差是一种过失误差。这种误差往往是由于测量者对仪器不了解、粗心等原因,导致测量结果严重偏离正确值。此外,测量条件的突然变化也会引起粗大误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,必须根据理论分析及统计检验方法的某些准则去判断哪个测量值是坏值,然后去除。

## 1.3 减小误差的基本方法

根据上述三类误差产生的原因,可采用不同的方法对不同类型的误差加以消除,以保证测量值尽可能准确。

### 1.3.1 减小系统误差的方法

#### 1. 对测量结果进行校准

对仪器定期进行检定,并确定校准值的大小,检查各种外界因素,如温度、湿度、气压、电场、磁场等对仪器指示的影响,并作出各种校准公式、校准曲线或图表,用它们对测量结果进行校准,能有效地减少系统误差,提高测量结果的准确度。

#### 2. 替代法

替代法是指用一个可变的标准量代替被测量,且保持整个测量系统的工作状态不变,则仪表本身和外界因素所产生的系统误差对测量结果没有影响。它常常被广泛应用在测量元件参数上,如用电桥法或谐振法测量电容器的电容和线圈的电感量,可以消除对地电容、导线的分布电容、分布电感和电感线圈中的固有电容等因素对测量值的影响。也可用此法测量电阻阻值,以排除温度等外界因素对测量结果的影响。

图 1.3.1 即采用替代法测量电阻的线路。图中  $R_x$  为被测电阻,  $R_p$  为可调标准电阻,  $R$  为一般可调电阻。测量时先将开关 S 合向“1”,使被测电阻  $R_x$  接入电路,调节  $R$  使电流表的示数为合适数值,然后将 S 合向“2”接入可调标准电阻  $R_p$ ,调节  $R_p$  使电流表的示数与  $R_x$  接入时的相同。若测量电路的所有其他条件不变,则  $R_x = R_p$ 。可以看出,这种测量方法可以排除在测量过