



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电路实验教程

于建国 宣宗强 编著
王松林 高建宁

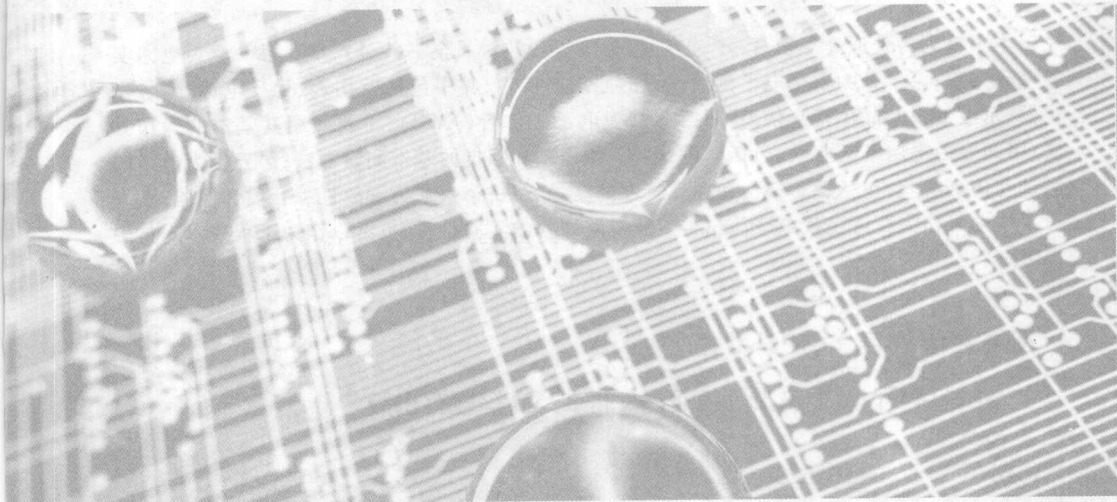


高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

内容简介



电路实验教程

于建国 宣宗强 编著
王松林 高建宁



高等教育出版社
Higher Education Press



内容简介

本书被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分六章。第一章为电路实验基础知识;第二章为常用电子测量仪器的原理与使用,其中包括万用表、稳压电源、信号发生器、示波器以及晶体管毫伏表等;第三章为电子工作台(EWB),主要介绍其基本的操作方法;第四章为电路基础实验,包括电压、电流、相位差和阻抗的基本测量方法;第五章为电路的测试与仿真实验,包括瞬态特性和频率特性的测量方法;第六章为开放性综合设计实验。

本书可作为高等院校电气信息类专业电路课程的实验教材,也可以作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验教程 / 于建国等编著. —北京: 高等教育出版社, 2008.12

ISBN 978-7-04-025236-1

I.电... II.于... III. 电路—实验—高等学校—教材
IV.TM13-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第170272号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 王莉莉 封面设计 赵阳 责任绘图 吴文信
版式设计 余杨 责任校对 俞声佳 责任印制 陈伟光

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 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京七色印务有限公司

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>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 14.25
字 数 260 000

版 次 2008年12月第1版
印 次 2008年12月第1次印刷
定 价 18.20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 25236-00

前 言

“电路实验”是与电气信息类专业的基础课程“电路”相配套的实验课。通过实验,能够使读者巩固基础理论知识,培养实践能力,提高实际动手、分析问题和解决问题的能力,启发读者的创新意识和创新思维潜力。

本书编写的实验分三部分,其中第一部分为基础性实验,共有十四个实验。这部分内容与基础理论教学相配合,通过实验,验证、巩固和扩充某些重点理论知识;学习有关电子测量的一些基础知识,以及常用电子测量仪器、设备的使用方法和基本测量技术,使读者学会和掌握基本的操作技能。第二部分为测试与仿真实验,共有八个实验。这部分实验是实际动手测试和软件仿真实相结合,将实际动手操作得到的结果与专用仿真软件在计算机仿真的结果相比较,还可以根据需要改变实验电路中的元件参数,以了解电路特性的变化趋势。第三部分为综合设计性实验,共有十一个实验。这些实验主要是为了培养读者创新能力而设计的。通过实验,培养读者运用所学知识制定实验方案、选择实验方法、分析误差、处理数据和编写实验报告等从事专业技术工作所必需的初步能力和良好作风。

本书是在西安电子科技大学出版社出版的“电路、信号与系统实验”一书的基础上,根据课程的发展和需要编写的。在原教材的编写和教学实验过程中,西安电子科技大学的史耀宗、车文光、程增熙、杨熙信、宣宗强、杨荣录、王亚聪等做出了大量的工作。在本教材的编写过程中,于建国和王松林负责总策划,提出编写计划。于建国任主编,宣宗强、王松林、高建宁参与了部分内容的编写,研究生骆育、杜华、方莉在文字输入和绘图方面给予了很多帮助,刘畅生、王水平和李杰等提出了建设性意见,在此对他们表示感谢。

由于编者水平有限,在本次编写中定会有不足和错误的地方,恳请专家和读者批评指正。

编者

2008.5

目 录

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第一章 电路实验基础知识 | 1 |
| 1.1 概述 | 1 |
| 1.2 电路实验课的目的和意义 | 3 |
| 1.3 实验室规则 | 3 |
| 1.4 电路实验课的学习方法及要求 | 4 |
| 1.5 预习报告和实验报告要求 | 6 |
| 1.6 电子基本测量的意义与范围 | 7 |
| 1.7 测量误差与实验数据处理 | 8 |
| 1.8 电路故障检查与排除方法 | 17 |
| 第二章 常用电子测量仪器的原理和使用 | 21 |
| 2.1 万用表 | 21 |
| 2.2 直流稳压电源 | 32 |
| 2.3 示波器 | 36 |
| 2.4 信号发生器 | 57 |
| 2.5 YB2172 型交流毫伏表 | 61 |
| 2.6 Q 表 | 63 |
| 第三章 电子工作台(EWB) | 67 |
| 3.1 电子工作台(EWB)简介 | 67 |
| 3.2 EWB 的基本界面 | 68 |
| 3.3 EWB 的基本操作 | 75 |
| 3.4 电路的创建 | 82 |
| 3.5 仪器的使用 | 90 |
| 3.6 电路仿真实验举例 | 103 |
| 第四章 电路基础实验 | 108 |
| 实验一 直流电压、电流和电阻的测量 | 108 |
| 实验二 基本元件的伏-安特性测量 | 114 |

| | | |
|-----------------------|---------------------|-----|
| 实验三 | 线性有源一端口网络特性测量与戴维宁定理 | 117 |
| 实验四 | 叠加定理 | 122 |
| 实验五 | 基尔霍夫定律与特勒根定理 | 124 |
| 实验六 | 示波器使用练习 | 126 |
| 实验七 | 阻抗的测量 | 129 |
| 实验八 | 互感的测量 | 134 |
| 实验九 | 耦合谐振电路 | 137 |
| 实验十 | Q 表 | 139 |
| 实验十一 | 非线性电阻网络的伏安特性 | 142 |
| 实验十二 | 非线性电阻网络转移特性的综合 | 147 |
| 实验十三 | 三相电路的电压及电流的测量 | 151 |
| 实验十四 | 三相电路功率的测量 | 156 |
| 第五章 电路的测试与仿真实验 | | 161 |
| 实验一 | 一阶电路的瞬态响应 | 161 |
| 实验二 | 一阶电路的应用 | 169 |
| 实验三 | 二阶电路的瞬态响应 | 174 |
| 实验四 | RLC 串联谐振电路 | 178 |
| 实验五 | LC 滤波器 | 185 |
| 实验六 | 二阶 RC 网络的频率特性 | 190 |
| 实验七 | 负阻抗变换器 | 193 |
| 实验八 | 回转器 | 198 |
| 第六章 开放性综合设计实验 | | 203 |
| 实验一 | 模拟万用表的设计 | 203 |
| 实验二 | 基本运算单元电路设计 | 210 |
| 实验三 | 有源滤波器设计 | 210 |
| 实验四 | 波形的产生与转换电路设计 | 211 |
| 实验五 | 移相器设计与实现 | 212 |
| 实验六 | 衰减器的设计与实现 | 212 |
| 实验七 | 小功率电源变压器设计 | 213 |
| 实验八 | 双路直流稳压电源的设计与实现 | 214 |
| 实验九 | 非线性负电阻和混沌电路的设计与实现 | 214 |
| 实验十 | 音频分离电路的设计与实现 | 215 |
| 实验十一 | 旋转器的设计与实现 | 216 |
| 参考文献 | | 218 |

第一章 电路实验基础知识

1.1 概述

在科学技术工作中,为阐明某一现象常需创造出特定的条件,借以观察现象的变化和结果,这一工作的全过程称为实验。历史上许多著名的实验表明:实验工作在科学发展的过程中起着重大作用,它不仅仅是验证理论的客观标准,还常常是新的发明和发现的线索或依据。1820年奥斯特在—项实验中观察到放置在通有电流的导线周围的磁针会受力偏转,他由此认识到电流能产生磁场。从此使原来分立的电与磁的研究开始结合起来,开拓了电磁学这一新领域。1873年麦克斯韦建立了完整的电磁场方程(即麦克斯韦方程组),预言了电磁波,并提出光的本质也是电磁波的论点。1887年赫兹做了电磁波产生、传播和接收的实验,这项实验的成功不仅为无线电通信创造了条件,还从电磁波传播规律上确认了它和光波—样具有反射、折射和偏振等特性,终于证实了麦克斯韦的论点。在门捷列夫之前,化学已有相当的发展,从大量实验中对已发现的化学元素如氢、氧、钾、钠等都有—定认识,确定了这些元素各自具有的化学性质。但是,这种认识是孤立的,只是肯定了各元素的个性。门捷列夫整理了前人的大量实验结果,研究诸元素间性质上的联系,终于发现了元素周期律,并据此预言—些当时尚未发现的元素的存在和它们应有的性质。他的这些预言后来都为实验证实,周期律大大推进了化学理论的进展。最后,用天文学上发现海王星的例子来进一步说明实验研究导致新的科学发现的过程。在人们对刚刚发现的天王星进行大量观测和分析之后产生了一个疑问,为什么它的实际位置与用万有引力定律计算的理论位置并不符合?这导致人们思考,或是引力定律自身存在问题,或是另有一颗未知的行星在起作用。这引起当时才23岁的英国大学生亚当斯和法国青年勒威耶的兴趣。他们受后—估计的启发,利用已掌握的天文资料,经数年努力,先后独立地用数学方法推算出那颗未知行星的运行轨道,随后又经柏林天文台观测证实,海王星就这样被发现了。

实验在科学技术工作中所具有的重要意义是很明显的。然而,要做好实验工作,还需注意以下几个重要方面。

一般地讲,一次完整的实验应包括定性与定量两方面的工作。做实验首先强调观察,集中精力于研究对象,观察它的现象、它对某些影响因素的响应、它的变化规律和性质等,这些属于定性;对研究对象本身的量值、它响应外部条件而变化的程度等做数量上的测量和分析属于定量。定性是定量的基础,定量是定性的深化,二者互为补充。

在完成定性观察和定量测量取得实验数据之后,工作并未结束。实验的重要一环是对数据资料进行认真整理和分析,去粗取精,去伪存真,由此及彼,由表及里,以求对实验的现象和结果得出正确的理解和认识。

对实验结果的正确理解十分重要,如果亚当斯和勒威耶企图用观察天王星所得资料去否定引力定律,他们势必走向成功的反面。事实上,后来成为天文学家的勒威耶的经历足以说明问题。他在研究工作中还曾发现距太阳最近的水星轨道也与用引力定律得出的计算值不一致。于是他套用海王星的经验又去寻找新的行星,结果却遭失败。问题出在哪里?半个世纪后,爱因斯坦的相对论问世人们才搞清楚。原来万有引力定律的精确性是有条件的,越靠近太阳误差越大,用它计算水星轨道时需做适当修正才能与实际符合。

那么,面对实验数据和结果,怎样才能正确地理解和认识它呢?对于探索性实验,这个问题比较复杂,因为有主观和客观多种因素在起作用,但就主观因素讲,主要依赖于实验者学识水平的高低和研究能力的强弱。所谓学识水平,主要指理论知识的深度和广度以及科学的思想方法。所谓研究能力,是指自学能力、思维能力、分析与综合能力、实验操作能力、运用已有知识解决实际问题能力等的综合。学识与能力的提高,需长期学习和实践积累,非朝夕之功。至于学校教学计划中安排的实验课题,因其内容是成熟的,目的是明确的,结果是预知的,又有教师的指导,所以任务是不难完成的。但是,为使学生较为系统地获得有关实验的理论和有重点地培养有关实验的基本技能,实验课的设置又是必不可少的。我们的目的不是要学生完成多少个实验,而是希望学生在完成实验的过程中,在知识的增长和能力的培养上有最高的收益。

基于上述目的,本书列出了较多的实验课题,其中有些是基本要求,有些则是较高要求。在每个实验课题的指导书中,编写了实验所需的基本理论知识。在规定的教学时间内不要求学生把所有实验全部做一遍,但希望学生在接受必需的基本训练之后(或训练之余),能够根据自己的条件和兴趣,选做几个综合性较强的实验。选做的实验内容不一定全是理论课中讲过的,因而可以使实验者从查阅资料、掌握知识开始,经过确定实验方案(确定方法、选择仪器、制定实验步骤),观察实验现象,测量和分析数据,排除可能出现的故障,直到得出正确

的实验结果并写出完整的报告为止,在实验研究的全过程中得到较为系统的训练。诚然,这需要实验者有充分的实验准备,要多花一些时间和精力,但这对于实验者知识和能力的提高无疑是有益的。

1.2 电路实验课的目的和意义

电路基础实验是学生进入电子技术基础课学习阶段的第一门实验课,是一门以应用理论为基础、专业技术为指导且操作性很强的课程。它侧重于理论指导下的实践、实验技能的培训以及综合能力的提高,为后续实验课、技术基础课、专业课的学习以及今后的工作打下一个良好的基础。

电路基础实验课是一个入门课程,同学们接触到的多为一些简单的、基本的,有时甚至是有枯燥、教条的内容。但对于初次涉足工程问题的初学者来说,这些都是最基础和非常重要的,是未来工程师所必备的。本课程中遇到的、要解决的这些表面上看似很简单、很教条的问题,却是今后工作道路上的铺路石,是通往成功之路的先决条件。

本课程开设的目的:

- ① 配合理论基础教学,验证、巩固和扩充某些重点理论知识。
- ② 学习有关电子测量的一些基础知识,以及常用电子测量仪器、设备的使用方法和基本测量技术。
- ③ 通过实验训练,培养学生严谨的科学实验态度及良好的操作习惯和善于发现问题、分析问题和解决实际问题的能力。
- ④ 培养学生运用所学知识制定实验方案、选择实验方法、进行数据处理和误差分析及编写实验报告等从事专业技术工作所必需的初步能力和良好作风。
- ⑤ 培养学生的创新意识和能力。

1.3 实验室规则

- ① 按时上课,未完成实验不得早退,未经主管部门同意,不得更改实验时间。
- ② 学习必须听从教师的指导,做好课前预习,按时按编组进行实验。
- ③ 实验必须以严肃的态度进行,严格遵守实验室的有关规定和仪器设备的操作规程,出现问题应及时报告指导教师,不得自行处理,不得挪用其他桌上仪器设备。
- ④ 爱护教学设备和器材,实验中要做到胆大、心细、有条不紊,实验完毕需经指导教师检查认可后,方可拆除线路,并将仪器设备恢复原状,归放整齐。

⑤ 保持实验室肃静、整洁,做到三轻:说话轻、走路轻、关门轻。不得在实验室内吸烟,不得乱抛果皮纸屑。每次实验完毕,应指派专人打扫实验室卫生。

⑥ 借用实验室器材、仪器设备、工具等,应按规定制度办理,履行登记手续。丢失和损坏实验器材、设备,应由本人写出书面报告,视情节轻重,给予批评教育,并部分或全部赔偿经济损失。

⑦ 实验室不得储存大量易燃、易爆和剧毒物品,少量储存应有专人负责管理。注意防火、防盗,无关人员未经允许不得进入实验室。

⑧ 离开实验室要关好门窗、切断电源,节假日要有保安措施,遇有可疑情况应立即报告上级主管部门和保卫处。

1.4 电路实验课的学习方法及要求

实验课由于自身的特点,其学习方法有别于理论课。掌握一个良好的学习方法、按照规定的要求去做和养成良好的操作习惯是必要的。

实验课与其他理论课相比,具有自己的特殊性。它主要体现在两个方面:

(1) 受实验环境的限制

实验环境是由实验室空间、室内设备及实验秩序构成的,它的好坏直接影响着实验课的开设和教学效果。

(2) 操作性很强

在实验室里,除了面对课堂和课本以外,学生们还要面对各种各样的仪器。要完成一个实验,达到实验目的,必须先了解所用仪器的功能、特点,熟悉它们的操作规程,掌握正确的使用方法。当然,做到这一点,要多接触仪器,通过实际操作,不断积累经验,以掌握其正确的使用(测量)方法和技巧。

在上实验课时,同学们要做到以下几方面:

① 不得迟到、缺课。

② 自觉维护实验室秩序,保持良好的实验环境。

③ 既动手又动脑,要先想到、后手到,避免盲目操作。

④ 胆大心细,不断积累实践经验。

⑤ 认真对待实验课的每一个环节,养成良好的习惯。

这里有必要对“胆大心细”进行说明:

首先是当对仪器的使用还不熟练时,面对各种仪器和仪器上面的各种旋钮、开关、按键,感到无从下手,具有害怕心理,怕万一操作不当会损坏仪器;或是调出了一个实验结果,但不理想,就不敢进一步做调整,怕把这个不理想的结果弄丢。这些都是对仪器还不熟悉、操作不熟练的表现。此时需要大胆地按照操作规程及基本要求进行操作、调整,以尽快地熟悉并掌握仪器,如有困难,可在指导

教师的帮助下进行。

心细就是要在仪器的调整及实验操作过程中不要盲动,对每一步操作要有目的,对每一项测量要做到心中有数,以免造成不良后果。

要想学好实验课,顺利地完成实验内容,一般应注意并要做到以下几点:

(1) 端正学习态度,明确实验目的

要真正认识和理解实验课开设的意义。学生毕业后进入社会,不仅需要广博的理论知识,而且还要具备较强的实际动手的能力,这样才能在工作中具有竞争力。因此在实验课的学习中,要有积极主动的态度,开动脑筋,多动多练,不能只凭一时兴趣,更不能敷衍了事和投机取巧。

(2) 学习方法

实验课的学习应分三个环节:课前预习,课堂上的实际动手操作和课后总结。而且每一个环节都有明确的任务和作用。

① 课前预习。

课前预习质量的好坏直接影响实验的成功与否及实验效果的好坏。其任务是要弄清楚实验内容、实验目的,了解实验方法、实验要求和注意事项。根据实验要求制定出实验方案、完成实验的操作步骤,并设计出测量数据的记录格式。除此之外,还应通过理论分析与计算(有条件的话,先做仿真),对实验结果做到心中有数,以保证实验中结果的正确性和理论与实际的“一致性”。

② 课堂操作。

课堂操作的任务是将预习中制定的实验方案在实验中具体实施的过程。在此过程中,同学们要做到脑勤、手勤,善于发现问题、思考问题到最后解决问题;对实验中出现的问题以及原始测量数据应作详细记录。其实,课堂操作完成一个实验内容只是一种手段,而在实验中提高综合实际动手能力,培养善于观察、发现问题及思考、解决问题的习惯,锻炼应变能力才是目的。

③ 课后总结。

课后总结的任务:对前两个环节的评估(一般以实验报告的形式给出),提高撰写实验报告或科技论文的能力。其具体工作为:在明确实验目的的前提下,掌握巩固实验方法的原理,对原始测量数据进行整理,对实验结果进行分析,得出相应的结论;对实验方法进行归纳改进,并找出实验成功或失败的原因,写出心得。

总结是一个非常重要的环节,而且是收获环节。

1.5 预习报告和实验报告要求

1. 预习报告的要求

预习报告的编写一般包括:实验题目,实验原理,实验内容,使用仪器与元器件,实验电路,实验方法及步骤,数据记录表格等。

预习报告有两个作用:一是通过预习真正了解实验的目的,为实验制定出合理的实验方案,在进入实验室后就可按预习报告有条不紊地进行实验;二是为实验后的总结提供原始资料。

在编写预习报告时,内容要具体、完整,不要写对实验操作无指导意义的内容,也不要将内容写得太笼统、太简单,否则在实验时连自己都不清楚应该怎样做,那就失去了预习报告的作用。因此,预习报告一定要有较强的实用性,重点突出,详略适当。

2. 实验报告的要求

实验做完后要写出相应的实验报告,这是一项很有价值的工作。但是,要写出一份高质量的实验报告不是很容易的事。首先它取决于个人对实验内容了解多少,通过实际操作对仪器、实验方案掌握了多少,通过实验测量数据、得到的结果进行分析又有了哪些新的认识和体会;其次,就是怎样把这些内容、资料、数据有机地结合在一起。

一份高质量的实验报告应该是:内容具体完整,观点明确,叙述条理清楚,层次布局合理,书写工整,实验结果的表达形式明了有效(采用数据表格方式表示,或采用图形、曲线表示),可读性强,可信度高等。

对以本书作为教材的学生,我们要求按下列格式书写实验报告:

(1) 实验题目

(2) 实验目的

(3) 实验原理

(4) 实验仪器(要按实际使用的仪器,写明仪器型号与名称)

(5) 实验内容

① (第一实验内容)标题。

② (第一实验内容)原理线路图及实验条件(包括元件参数、输入信号参数等)。

③ (第一实验内容)数据表及数据处理结果(包括误差计算和分析)。

④ (第一实验内容)曲线图或波形图。

⑤ (第一实验内容)结论(在充分了解实验原理的基础上,对实验数据、曲线或波形分析对比后得出的结论,如实验验证了哪个理论?学到何种测量方法

和技巧?)。

- ⑥ (第二实验内容)标题。
- ⑦ (第二实验内容)线路及实验条件。
- ⑧ (第二实验内容)数据表。
- ⑨ (第二实验内容)曲线或波形图。
- ⑩ (第二实验内容)结论。

(6) 回答问题(回答实验指导书中提出的问题或教师指定的问题)在写实验报告时,应注意以下几个方面:

① 写实验报告要用实验报告纸,封面要用实验报告封面纸。
② 数据记录和数据处理要注意数据的有效位数(详见“1.7节测量误差与实验数据处理”)。记录和填写数据时,如有错误,不能随意涂改。正确的方法应在需改正数据中央打上一条斜杠,然后在其上方写上正确数据。

③ 曲线和波形应认真地画在坐标纸上。坐标代表的物理量、单位及坐标刻度均要标明。需要互相对比的曲线或波形,应画在同一坐标平面上,而不必一条曲线(或波形)一张图,但每条曲线(或波形)必须标明参变量或条件。图应布在相应实验内容的数据表下面。如果图集中安排在报告的最后,则每个图必须标明是哪个实验内容的何种曲线(或波形)。

④ 实验数据的原始记录应写上实验者的姓名,并由指导教师检查签字后方为有效。实验报告必须附有教师签字的原始数据纸,否则视为无效报告。正式报告中的数据表要认真填写,不能用原始记录纸代替。

⑤ 教师批改后发还的实验报告要妥善保存,以便复习和课程结束时与教师核对成绩。

1.6 电子基本测量的意义与范围

在做实验的过程中,实验结果是否正确、电路工作是否正常、系统是否满足设计要求,以及电路故障的检查、参数的调整,都需要通过测量来确定。测量方法的正确、测量结果真实可以使实验人员顺利地达到预定目标。如果在测量方面出现问题,可能会将人们引入歧途,或者是得到一个与事实不符的错误结论。因此,测量不论是在人们的日常生活中还是在科学实验中都具有普遍的意义。

电子基本测量的范围包括以下几个方面:

- ① 器件参数测量,如电阻器的阻值、电容器的容量、电感线圈的电感、晶体管的 h_{be} 参数等。
- ② 电量参数测量,如电压、电位、电流、功率、频率、相位、时间等。

③ 系统参数测量,如输入阻抗、输出阻抗、网络函数等。

1.7 测量误差与实验数据处理

1. 测量误差

(1) 测量误差的基本概念

要取得对某一物理量的数量认识,必须对它进行测量。被测物理量的实际大小称为该量的真实值,把测量结果称为测量值。在测量过程中因使用的仪器、采用的方法、所处的环境及人员操作技能等多种因素影响而造成的测量值与真实值之间的误差统称为测量误差。与仪表误差一样,测量误差也用绝对误差和相对误差来计量。

① 绝对误差:

绝对误差 ΔX 定义为测量值 X 与被测量真实值 A_0 之差。事实上,真实值 A_0 是无法测得的,只能理论推导或者实验逼近,所以在计量测量误差时,多采用具有更高准确度等级的仪器的测量值 A 来代替 A_0 ,通常称 A 为被测量的实际值。于是有

$$\Delta X = X - A_0 \approx X - A \quad (1-7-1)$$

利用某项测量的绝对误差,可对该项测量值进行修正。修正值定义为绝对误差的负值,表示为 C ,则

$$C = -\Delta X = A - X \quad (1-7-2)$$

修正值 C 通常是在校准仪器时给出的,给出形式可以是数据也可以是曲线。当测量中得到测量值 X 后,查知所用仪器的修正值 C ,便可据式(1-7-2)求得被测量的实际值。例如用某电压表测电压,电压表示值为 10 V,该表在 10 V 刻度处的修正值是 -0.03 V,则被测电压的实际值是 9.97 V。

② 相对误差:

相对误差 r 定义为绝对误差 ΔX 占实际值 A 的百分数,即

$$r = \frac{\Delta X}{A} \times 100\% \quad (1-7-3)$$

相对误差能够表明某项测量的准确程度。例如测得电流 I_1 为 10 mA,知其绝对误差为 0.2 mA;测得电流 I_2 为 1 A,知其绝对误差为 5 mA。比较两项测量的绝对误差,显然是前者小,后者大;但前者的相对误差 $r_1 = 2\%$,后者的相对误差 $r_2 = 0.5\%$,可见后者的测量准确度优于前者。

利用由式(1-7-3)定义的相对误差来表示仪表的测量准确度并不方便,因为被测量值不是固定不变的。例如,用同一只电压表测量两个不相等的电压,尽管绝对误差相等还会得出不同的相对误差值。因此,为划分仪表的准确度,统

—规定取仪表刻度的上量限作为式(1-7-3)的分母,称为满度相对误差。

(2) 测量误差的种类及其主要来源

测量误差按其性质分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差(或差错)。

① 系统误差:

系统误差具有一定的规律性。凡在一定条件下对同一物理量进行多次重复测量时,其值不随测量次数变化的误差,或者当条件改变时,其值随测量次数按一定规律变化的误差,统称系统误差。数值恒定不变的系统误差又称恒值系统误差,数值按一定规律变化的误差又称变值系统误差。例如,某一标称值为1 k Ω 的电阻,其实际值是1 082 Ω ,则此电阻的阻值误差是系统误差: $\Delta R = (1\ 000 - 1\ 082)\ \Omega = -82\ \Omega$ 。此误差值在条件不变的情况下,不管测量多少次都是固定不变的。再如,使用中的标准电池,其电动势会因放电而逐渐下降,即电动势的实际值与标称值间的误差会逐渐增大,这就是变值系统误差。变值系统误差还可按误差值的变化规律分为累加型、周期型和复杂变化型三种类型。

系统误差的主要来源如下:

- 仪器误差:指因仪器自身机电性能不完善引起的误差。此项误差范围已由仪器的技术说明书给出。
- 使用误差:又称操作误差,它是在使用时对仪器的安装、调节、操作不当造成的误差。例如,把规定水平放置的仪表垂直放置,使用时未按要求对仪器进行预热、校零,仪器引线过长等都会引起使用误差。减少和消除使用误差的方法是严格按照仪器的技术规程操作,熟练掌握实验操作技巧,提高对实验现象的观察和分析能力。
- 方法误差:测量中依据的理论不严密,或者不适当地简化测量公式所引起的误差称为方法误差。例如,在某些情况下用电压表测电压和用电流表测电流时,完全不考虑仪表内阻对测量的影响,将会导致不能容许的误差。
- 影响误差:主要指外界环境(温度、湿度、电磁场等)超出仪器允许的工作条件引起的误差。为避免此项误差的产生,应保证电子仪器所要求的额定工作条件。
- 人身误差:测试者个人痼习(如读表时习惯性偏高或偏低)引起的误差。为消除此项误差,要求实验者必须提高操作技巧,改变不良习惯。

② 随机误差:

在相同条件下对同一物理量进行多次重复测量(称等精度测量)时,其值具有随机特性的误差称为随机误差,也称偶然误差。所谓随机特性,就各次测量而言是指误差值(绝对值和符号)的出现无规律,不可能依据前面的测量结果去预言下次测量的误差值;就总体而言是指当测量次数足够多时,误差值的分布满足统计规律,即绝对值小的误差出现率高,绝对值大的误差出现率低,绝对值相等

的正误差和负误差的出现机会均等,具有对称性。随机误差的概率密度分布如图 1-7-1 所示,称为正态分布^①。

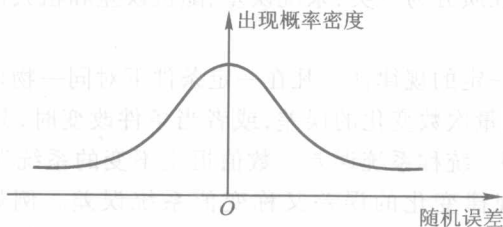


图 1-7-1 随机误差的正态分布曲线

导致随机误差的因素很多,例如仪器或被测设备中所用元器件的热噪声,测量现场的外界影响(如温度、振动、电磁场微变、电网电压波动)等。这些影响因素的特点是彼此互不相关,各自的变化毫无规律,但一般说来,它们的变化程度以及对被测量的影响是较弱的,这使得随机误差通常很小,只有当使用高灵敏度和高分辨率的仪器进行精密测量时才显出它的影响。

③ 粗大误差:

粗大误差又称疏失误差或差错,它是因仪器故障,测量者操作、读数、计算、记录错误或存在着不能容许的干扰导致的。这种误差通常数值甚大,明显地超过正常条件下的系统误差和随机误差。

粗大误差通过认真复查一般是能够发现和及时纠正的,当然也有未及时发现或难于纠正的可能。凡确认含有粗大误差的数据均称坏值,测量数据中的坏值应剔除不用。

(3) 测量误差对测量结果的影响

一般地讲,任何一次测量误差 ΔX 中均包含有系统误差 ε 和随机误差 δ ,且有 $\Delta X = \varepsilon + \delta$ 。如果对某一物理量在条件不变的情况下进行 n 次测量,便得到 n 个等精度测量值 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 。设该物理量实际值为 A ,第 i 次测量的绝对误差为 $\Delta X_i = \varepsilon_i + \delta_i$,则第 i 次测量值为

$$X_i = A + \Delta X_i = A + \varepsilon_i + \delta_i \quad (1-7-4)$$

式中, ε_i 和 δ_i 分别是第 i 次测量的系统误差和随机误差。由于测量条件不变,故各次测量的系统误差相等, ε_i 可改写为 ε 。今对 n 次测量结果求算术平均值,且令测量次数 n 无限加多,有

^① 绝大多数随机误差符合正态分布规律,也有少数误差按其他规律分布,这里不予介绍。

$$\bar{X} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = A + \varepsilon + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-7-5)$$

根据随机误差具有正、负值对称分布的特点可知,因正、负误差相互抵消,故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$ 。这表明,采用求取多次测量平均值的方法可以消除($n \rightarrow \infty$ 时)或减弱(n 为有限时)随机误差对测量结果的影响,式(1-7-5)可改写为

$$\bar{X} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = A + \varepsilon \quad (1-7-6)$$

所以,在消除系统误差之后,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, \bar{X} 就等于被测量的实际值 A 。在有限次测量情况下,只在测量次数足够多,算术平均值 \bar{X} 可以作为 A 的最佳估值。可以看出,系统误差 ε 的作用是使 \bar{X} 偏离实际值 A ,即系统误差的存在直接导致测量的准确度下降。

下面讨论随机误差的影响。

由式(1-7-4)和式(1-7-6)可知,第 i 次测量值为

$$X_i = A + \varepsilon + \delta_i = \bar{X} + \delta_i \quad (1-7-7)$$

由于各次测量的随机误差 δ_i 值彼此不等,所以式(1-7-7)表明各次测量值分布在以 \bar{X} 为中心的一个区间内。也就是说,随机误差的作用是使各次测量结果具有分散性,它直接影响测量的精密度。

测量误差对测量结果的影响可用图 1-7-2 来说明。图中“○”表示被测量的真实值或实际值,“•”表示测量值,“×”表示多次测量值的算术平均值。图 1-7-2(a)中数据点密集,说明测量精密度高,但系统误差大,使 \bar{X} 值偏离真实值远,说明测量准确度低;图 1-7-2(b)中数据点分散,说明测量精密度差,但因系统误差小,使 \bar{X} 值仍相当靠近真实值;图 1-7-2(c)表明这一列测量结果既准确又精密,在误差理论中称为测量精确度高。

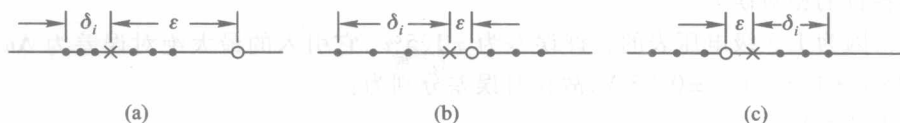


图 1-7-2 测量误差对测量结果的影响

2. 实验数据的处理

(1) 实验数据和有效数字^①

^① 此部分内容在普通物理实验课中已有详述,本处仅摘其要点以便应用。