

高等学校教材

# 电路实验与实践

王勤 余定鑫 等编著



高等教育出版社

## 内容提要

本书是为高等学校工科电类专业编写的实验教材。内容涉及电测量的基本知识、常用电测量仪表及仪器设备的应用、常用电子元件的检测、供电与安全用电、元件的装配与焊接技术、直流电路、交流电路、谐振电路、RC 电路、非正弦周期性电流电路、二端网络及仿真实验等方面。内容注重实用性和新颖性,所编的 30 个实验都有相应的原理介绍,因此本书可单独设课使用。

本书可作为大专院校电类专业的实验教材,也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路实验与实践/王勤 余定鑫等编著. —北京:  
高等教育出版社,2004.7 (2005 重印)

ISBN 7-04-014535-9

I. 电... II. ①王...②余... III. 电路-实验-教材  
IV. TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 022020 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 刘素馨 封面设计 李卫青 责任绘图 吴文信  
版式设计 马静如 责任校对 王雨 责任印制 孔源

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 北京明月印务有限责任公司

开 本 787×1092 1/16  
印 张 17.75  
字 数 430 000

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 2004 年 7 月第 1 版  
印 次 2005 年 7 月第 3 次印刷  
定 价 20.70 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 14535-00

# 前 言

本书是国家电工电子教学基地实验系列教材之一,是培养实验能力和技能的基础教材。

培养实验能力和实际技能是高等工科院校教育的重要内容之一,实验是帮助学生学习和运用理论处理实际问题,验证、消化和巩固基本理论,获得实验技能和科学研究方法的重要环节。

“电路实验”是自动控制、电气技术及测试技术等专业所学课程中的基本课程。它不仅要求学生验证抽象的电路理论知识,还要求学生必须掌握电工测量方法的基本知识、电工测量仪器仪表的使用及基本实验设计技能。

本书是为高等学校工科电类专业编写的一本实验教材,是适应当前教学改革的需要,总结了近年来的实践教学改革的经验编写的。所编写的实验内容主要满足电路课程对实践环节的要求。针对电类专业的特殊性,本书在内容安排上将遵循循序渐进的原则,选题上注重实用性、延续性、趣味性和新颖性,并尽可能反映当代电路理论。

本书不隶属和局限与某一特定的“电路”理论教材。为此,书中的每个实验都介绍了相关原理,从而本书可独立使用。

全书共分10章,第1至第5章系统介绍了电路实验基础知识及实验的一般方法,第6章至第9章涉及电路基本实验、综合设计性实验,突出能力与技能的培养,强调理论对实验的指导作用。其中基本实验主要用于学生验证电路理论中的一些重要基本原理;简单的综合设计性实验部分既要求学生运用所学的基本理论和基本方法,也补充少量其他课程的部分知识,这样既有助于提高学生的求知欲,也有利于提高学生分析问题和解决实际问题的能力。第10章PSPICE在电路实验中的应用,主要目的是使学生初步了解计算机在电路理论中的应用,也作为教学中计算机应用不断发展的总体规划的一个环节,为日后进一步学习相关的EDA知识打下基础。本书可作为大学电类各专业本、专科电路实验教材,也可作为高年级学生课程设计及相关专业技术人员的参考书。

本书是在南京航空航天大学国家电工电子教学基地建设多年来电路实验教学的基础上编成的,由富有经验的教师和工程技术人员共同编写,参加编写的教师有:王勤、余定鑫、王芸、沈晓凡、任为民、谷曼。由王勤任主编,余定鑫任副主编。

自1981年“电路实验”单独设课以来,先后有20多位教师参加本课程的教学、教材讨论以及实验室工作,他们为编写本书提供了大量资料,提出了许多建议,做了大量的工作。曲民兴教授、潘双来教授为本书大纲的制定、编写提出了宝贵意见,在此一并致以衷心感谢。

本书由东南大学魏维柱担任主审,对全书作了仔细的审阅,提出了许多宝贵意见。

由于我们学识有限,书中不妥之处在所难免,诚恳地希望使用或参考该教材的同行、读者提出坦率的批评和建议。意见请寄南京航空航天大学自动化学院。

编者

2003年10月

# 目 录

绪论 .....	1	传输定理 .....	133
第 1 章 电测量的基本知识 .....	4	6.4 特勒根定理与互易定理 .....	137
1.1 实验误差分析和仪表的准确度 .....	5	6.5 运算放大器和受控电源 .....	140
1.2 实验数据处理 .....	11	6.6 电阻网络设计与实现 .....	147
1.3 实验步骤及实验故障的排除 .....	17	第 7 章 交流电路 .....	149
1.4 实验的分析整理和结果报告 .....	19	7.1 交流电路参数的测定 .....	149
第 2 章 常用电测量仪表及仪器设备		7.2 功率因数的提高 .....	155
的应用 .....	23	7.3 三相电路 .....	158
2.1 电测量指示仪表 .....	23	7.4 互感电路 .....	165
2.2 电子仪器设备的应用 .....	38	7.5 延迟开关的设计 .....	169
2.3 虚拟仪器的概念 .....	54	7.6 感性负载断电保护电路的设计 .....	169
2.4 直流仪表的使用 .....	55	第 8 章 谐振电路、RC 电路 .....	171
第 3 章 常用电子元器件的检测 .....	58	8.1 常用电子仪器的使用 .....	171
3.1 电阻器与电位器 .....	58	8.2 谐振电路 .....	177
3.2 电容器 .....	62	8.3 RC 网络的频率特性 .....	182
3.3 电感器 .....	65	8.4 一阶电路的方波响应 .....	188
3.4 晶体管与集成电路 .....	66	8.5 二阶电路的方波响应 .....	194
3.5 常用元器件的识别与检测 .....	71	8.6 移相电路设计 .....	197
第 4 章 供电与安全用电 .....	73	第 9 章 非正弦周期性电流电路、二端	
4.1 发电与输电概述 .....	73	口网络 .....	202
4.2 配电系统 .....	74	9.1 二端口网络参数的测定 .....	202
4.3 安全用电 .....	83	9.2 RC 有源滤波器及非正弦周期信号的	
4.4 日光灯 .....	89	谐波分析 .....	204
4.5 日光灯的安装操作实践 .....	93	9.3 双 T 型选频网络的研究与设计 .....	208
第 5 章 元器件的装配与焊接技术 .....	95	9.4 负阻抗变换器及其应用 .....	210
5.1 印制电路板的设计与制作 .....	95	9.5 回转器电路设计 .....	214
5.2 元器件的装配和焊接 .....	96	第 10 章 仿真实验 .....	218
5.3 电子组装技术简介 .....	101	10.1 PSPICE 软件及其应用 .....	218
5.4 电子线路原理图与印制电路板		10.2 Electronics Workbench 5.0 的应用	
设计技术简介 .....	103	简介 .....	232
第 6 章 直流电路 .....	129	10.3 用 PSPICE 软件进行直流电路仿	
6.1 概述 .....	129	真(一) .....	243
6.2 基尔霍夫定律和叠加定理 .....	130	10.4 用 PSPICE 软件进行直流电路仿	
6.3 戴维宁定理、诺顿定理和最大功率		真(二) .....	253

10.5 用 PSPICE 软件进行正弦稳态电路 仿真 .....	256	的研究 .....	262
10.6 用 PSPICE 软件进行无源滤波器的 频率特性分析 .....	259	10.8 周期信号的傅里叶分析 .....	265
10.7 用 PSPICE 软件进行电路瞬态响应		10.9 用 EWB 软件进行交流电路的测量 .....	269
		10.10 用 EWB 软件进行电路的时域分析 ...	273
		<b>参考书目</b> .....	276

# 绪 论

科学实验是人类认识自然、检验理论正确与否的重要手段。通过实验取得重大的成果在科学史上屡见不鲜。科学的实验与实践形成了丰富的电路理论,而这种理论又是电力电子技术发展的重要基础。1785年库仑用实验方法测定静电作用和静磁相互作用,发表了库仑定律,为静电学奠定了科学基础。1800年伏特第一个制成用铜片、浸盐水的纸片、锌片依次重叠起来获得连续电流的电堆。1820年奥斯特和安培先后在实验中发现电流的磁效应和电磁作用都是电流与电流作用的“电动力”。1826年欧姆发表重要实验报告,提出电路的实验定律“欧姆定律”。1834年法拉第通过十几年的实践,发现了电磁感应现象,动磁生电的奥秘由此揭开。1873年麦克斯韦用数学方法创立了电磁场理论,而赫兹在1888年通过电磁波的发生和接收实验,证明了电磁波的存在。1876年爱迪生在新泽西州建立了世界上第一所工业实验室,组织一批专门人才,从而开创了现代科学研究正确途径。终其一生,爱迪生共获1093项发明。1881年瓦堡发表磁滞回线的实验观察结果,这是最早的磁滞现象的研究。对电子学产生革命性影响的晶体管,最初是以巴丁、希拉顿和肖克莱为首的一大批理论家和实验家经过一系列艰苦的实验,克服了材料、工艺、测量技术等方面的种种困难,并对当时的若干理论问题进行了深入探讨及发展后,于1947年底在实验室里研制出来的。

20世纪50年代初期半导体晶体管的出现,20世纪60年代半导体集成电路的出现,直至今日超大规模集成电路的使用,反映了微电子技术的飞跃发展。由于各种电力电子器件的出现,使得电子技术不仅在计算机、通信、信号测量与变换等领域中占主导地位,而且在电力系统、工业控制系统中亦得到广泛的应用。这些成就是由无数的科学家、工程技术人员在实验中研究开发成功的。可以说,在电工技术、电子技术的发展中,每一类新概念、新理论的建立,每一项新产品的开发成功,每一种新技术的应用与推广,都不能离开实验与实践。

理论是实验工作的指导,为实验提供了科学依据,实验现象和结果需要从理论上加以分析提高。实验是一项手脑并用、理论与实际密切配合、富于创造性的劳动过程。21世纪已经开始,面向新知识经济的大学生任重道远。电路实验和实践的内容涉及电路的基本理论、工程实践等基础内容。我们期望学生通过实验与实践的培训,能将理论与实践相结合,巩固所学习的理论知识;掌握电路的连接、电工测量及故障排除等实验技巧;能正确使用常用的电工仪器仪表;能正确地采集和处理实验数据;能分析、观察实验中的问题。在实验的过程中,培养严肃认真的科学态度和细致踏实的作风及创新意识和能力。

学校在建设实验室、装备实验设备方面投入了大量的人力、物力,为学生创造了一个优良的实验环境和条件,同学们应珍惜这一良好的条件,积极地参与、利用,并虚心地接受指导老师的指导,遵守实验室规则,做好实验,认真探讨、总结,写好报告,为今后学习专业课程和研究打下扎实的基础。以下是几点要求。

## 一、实验前的预习

1. 必须熟悉学生实验守则和安全操作规程。

2. 认真阅读实验指导书,明确实验目的、内容,对实验原理要从理论概念上弄清楚。对实验可能出现的现象及结果等要有一个事先的分析和估计,尽可能做到心中有数。

3. 预先阅读所需用的仪器设备使用说明书,了解操作注意事项,熟悉各旋钮、按键、开关的功能和作用,以便进行实验时能顺利操作和测试。

4. 写好实验预习报告,将实验中要求测量的数据表格预先画好,以便有条理的进行测试。对于要求预先进行理论计算的内容也要完成,并将数据填入表格。

## 二、实验时的操作

1. 仪器设备要合理布局

仪器设备布局原则是:摆放布局合理,即位置、距离适当,跨线尽量短;便于操作,读数方便;连线简单。

2. 准确搭接线路

首先要核实所接线路元件数据及参数是否正确。一般先接串联支路,后接并联支路,最好每个接线点不要多于两根导线。严禁带电接线、拆线或换接线路。同时,要考虑元件和仪表的极性、参考方向、公共地端与电路图的对应位置等。接好线路后复查,确认无误后,才能接通电源。

3. 安全地操作

通电后要集中精力,首先看现象,再操作、读数。如果出现异常现象,如烧断熔丝、出现冒烟、有焦糊味、有异常响声、仪表卡表等,应立即切断电源,保持现场,请示指导老师后再做故障处理,排除故障后方能继续进行实验操作。

4. 准确地读取数据

读取数据时,姿势要正确,指针式仪表做到“眼、针、影为一直线”。要记下所用仪表的倍率、单位,同时要根据所选用仪表量程和刻度实际情况,合理取舍读数的有效数字,不可增多或删除有效位数。原始数据不得随意修改。

## 三、实验后的整理

实验完成后,不要忙于拆除线路。应先断开电源,待检查实验所得的数据没有遗漏和明显错误后再拆线。一旦发现异常,需要在原有的实验线路下查明原因,并作出相应的分析。

全部实验结束后,应该将所用的实验设备复归原位,导线整理成束,清理实验台,然后离开实验室。

## 四、实验故障分析及排除

实验进行中,故障的出现是常有的事情。分析和排除出现的故障,是培养同学综合分析问题能力的一个重要方面,有了一定的理论基础和较熟练的实验技能,故障的排除就容易些。对故障产生的原因及查找故障的方法,见第1章内容。

## 五、实验数据的记录与处理

实验线路接好后,需要在实际测量之前进行一下预测,此时不必仔细读取数据和记录,主要观察各个被测量的变化情况和出现的现象。通过预测可以让实验者对实验全过程有一个数量的概念,了解被测量的变化范围,从而选择合适的仪表量程。

预测结束,就可以进行实际实验操作,观察现象,完成预习报告中要求的内容。实验数据应该记录在拟订好的表格里,并注明名称和单位。如果需要重新测量,则要在原来的表格边重新记录所得到的数据,不要轻易涂改原始数据,以便比较和分析。在测量过程中,应该尽可能地及时对数据做初步分析,以便及时发现问题,当即采取措施,以提高实验的质量。

## 六、实验后的总结报告

要写出符合要求的总结报告。能按规范绘制各种图表曲线,对实验的内容、过程、结果应有分析、归纳、判断。报告的格式要求见第1章内容。

## 七、特别注意人身和设备的安全问题

由于本课题的特点,离开电与仪器、仪表等,实验是不可能进行的,因此必须对用电安全予以特别的重视,切实防止发生人身和设备的安全事故。在实验中要求切实遵守实验室的各项安全操作规程,认真听指导教师讲解实验注意事项。要特别注意,在进行强电实验时,不得擅自接通电源,不得触及带电部分,严禁带电拆卸连接导线,必须牢记“先接线后合电源,先断电源后拆线”的操作程序。

实验前应阅读所用的仪表仪器的简介,实验时按照仪器仪表的使用方法去使用,注意额定值,不了解性能及使用方法不得擅自使用。使用时,必须轻拿轻放,保持表面清洁,如发现异常现象(有声响、发热、有焦臭味)应立即切断电源,待查明原因,排除故障后再进行实验。



# 第 1 章 电测量的基本知识

## 一、测量的概念

科学实验离不开测量。测量是指以获取被测对象量值为目的的全部操作。人们从获得的测量值中可找到有用的信息,从而用它来认识事物,解决问题,掌握事物发展变化的规律。

被测量的量值一般由两个部分组成,即数值(包括大小和符号)和相应的单位。例如:测得某元件两端的电压为 8.6 V,则测量值的数值为 8.6, V(伏)为其计量单位。

测量的实质是将被测量与标准的同类单位量进行比较。如电流的测量值为 3.2 A,这表明被测量是电流单位量 A(安)的 3.2 倍。

## 二、测量单位制

测量时采用国际单位制(也称为 SI 制),这是我国法定的计量单位制。SI 制包括七个基本单位,两个辅助单位和其他导出单位。

七个基本单位是:米(m)、千克(kg)、秒(s)、安[培](A)、开[尔文](K)、摩尔(mol)、坎德拉(cd)。

两个辅助单位是:弧度(rad)和球面度(sr)。

其他所有物理量的单位均可用七个基本单位导出,称为导出单位。例如电磁量的单位可由前四个基本单位导出。常用的电磁学的单位有:牛[顿](N)、焦[耳](J)、瓦[特](W)、库[仑](C)、伏[特](V)、法[拉](F)、欧[姆]( $\Omega$ )、西[门子](S)、韦[伯](Wb)、亨[利](H)、特[斯拉](T)等。

## 三、测量的分类

### 1. 测量方式

从如何得到最终测量结果的角度分类,有三种测量方式。

#### (1) 直接测量

能够用测量仪器仪表直接获得测量结果的测量方式称为直接测量。在这种方式下,测量结果是将被测量与标准量直接比较,或者是通过使用事先刻好刻度的仪表获得的。例如用直流电桥测量电阻,用电压表测量电压等均属于直接测量。

#### (2) 间接测量

若被测量与几个物理量存在某种函数关系,则可先通过直接测量得到这几个物理量的值,再由函数关系计算出被测量的数值,这种测量方式称为间接测量。例如伏安法测量电阻,先用电压表、电流表测出电压和电流值,然后由欧姆定律  $R = U/I$  计算出电阻值,这一测量过程就属于间接测量。间接测量时,测量目的与测量对象不一致。

### (3) 组合测量

当有多个被测量,且它们与几个可直接或间接测量的物理量之间满足某种函数关系时,可通过联立求解函数关系式(方程组)获得被测量的数值,这种测量方式称为组合测量方式。例如含源一端口电阻网络  $N$  与负载连接,如图 1-1 所示。在图示参考方向下,其端口的伏安关系式为: $u = u_{oc} - R_0 i$

为了测量  $N$  的开路电压  $u_{oc}$  和等效电阻  $R_0$ ,可先后改变负载值,两次测取端口电压和电流值  $u_1, i_1$  和  $u_2, i_2$ ,并将它们代入上式,得到下述方程组

$$\begin{cases} u_1 = u_{oc} - R_0 i_1 \\ u_2 = u_{oc} - R_0 i_2 \end{cases}$$

解此方程组便可求得参数  $u_{oc}$  和  $R_0$ 。

#### 2. 测量方法

从如何获取测量值的角度分类,测量方法有两种。

##### (1) 直读测量法

直接根据仪器仪表的读数得到测量值的方法称为直读法,例如,用电流表测量电流,用功率表测量功率等。直读法的特征是度量器(标准量)不直接参与测量过程。

直读法的优点是设备简单、操作简便;缺点是测量的准确度不高。

##### (2) 比较测量法

将被测量与标准量(或称度量器)直接进行比较而获得测量结果的方法称为比较测量法,例如,用电位差计测量电压,用电桥测量电阻等。该方法的特征是标准量(度量器)直接参与测量过程。

比较测量法具有测量准确、灵敏度高的优点,适合精密测量。但其缺点是测量操作过程较为麻烦,所用仪器设备的价格较高。

应注意测量方式和测量方法概念上的区别。例如用功率表测量功率既是直接测量方式又属于直读法,而用电桥测量电阻则是直接测量方式,不属于直读法而属于比较测量法。

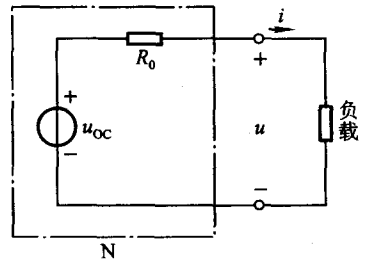


图 1-1 含源一端口网络与负载连接

## 1.1 实验误差分析和仪表的准确度

在实际测量中,由于测量仪器、工具的不准确,测量方法的不完善以及各种因素的影响,实验中测得的值和它的真实值并不完全相同,这种矛盾在数值上的表现即为误差。随着科学水平的提高和人们的经验、技巧和专业知识的丰富,误差可以被控制得越来越小,但是不能使误差降为零,这就是所谓的误差公理:一切实验结果都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验过程中。

## 1.1.1 误差的定义及其表达式

### 一、绝对误差

绝对误差是一个被测量的测定值与其真值之差,也称为真误差,可用下式表示

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-1)$$

式中, $X$ ——被测量的测定值;

$X_0$ ——被测量的真值;

$\Delta X$ ——测量的绝对误差。

一般来说,真值  $X_0$  是一个理想的概念,除理论真值和计量学约定真值外,真值是无法精确得知的,只能使测量结果尽量地接近真值。因此,实际应用中通常用实际值来代替真值  $X_0$ 。

实际值又称约定真值,它是根据测量误差的要求,用高一级或高数级的标准仪器或计量器具测得之值。比如说,当标准仪器误差仅为被比较仪器误差的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{20}$  时,则可认为标准仪器的测量值为约定真值,即实际值  $X_0$ 。

另外,在实际测量中常常用到校正值的概念,它与绝对误差数值相等,符号相反,即

$$g = X_0 - X = -\Delta X \quad (1-2)$$

在高准确度的仪器仪表中,常常给出校正值或校正曲线,因此,当知道了给出值  $X$  及相应的校正值  $g$  以后,便可求出被测量的真值,即

$$X_0 = X + g \quad (1-3)$$

### 二、相对误差

绝对误差的表示方法有其不足之处,因为它不能确切地反映出测量的准确程度,例如测量两个电阻,其中电阻  $R_1 = 10 \Omega$ ,绝对误差  $\Delta R_1 = 0.1 \Omega$ ;电阻  $R_2 = 1000 \Omega$ ,绝对误差  $\Delta R_2 = 1 \Omega$ 。从例子中可以看到,尽管  $\Delta R_1$  小于  $\Delta R_2$ ,但不能由此得出测量电阻  $R_1$  较测量电阻  $R_2$  的准确度高的结论。因为  $\Delta R_1 = 0.1 \Omega$  相对于  $10 \Omega$  来讲为  $1\%$ ,而  $\Delta R_2 = 1 \Omega$  相对于  $1000 \Omega$  来讲为  $0.1\%$ ,即  $R_2$  的测量比  $R_1$  的测量更准确。由此又引出了相对误差(又称误差率)的概念,定义为:测量的绝对误差与被测量的真值的比值,即

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-4)$$

相对误差通常用于衡量测量(或量具及测量仪器)的准确度。相对误差越小,准确度越高。与绝对校正值  $g$  相对应,还有相对校正值  $\theta$ ,它与相对误差等值反号,即

$$\theta = -\gamma = \frac{g}{X_0} \approx \frac{X_0 - X}{X} \quad (1-5)$$

由此可以求出被测量的实际值为

$$X_0 = X(1 + \theta) \quad (1-6)$$

### 三、引用误差

引用误差是一种简化的实用方便的相对误差的表现形式,常在多挡和连续刻度的仪器和仪表中应用。这类仪表的可测范围不是一个点,而是一个量程。这时若按式(1-4)计算,由于分母的改变,计算很麻烦。为了计算和划分准确度等级的方便,通常取该仪器仪表量程中的测量上限(满刻度值)作为分母。由此引出“引用误差”的概念:绝对误差与测量仪器量程(满刻度值)的百分比称为引用误差,即

$$\gamma_N = \frac{\Delta X}{X_N} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中, $\gamma_N$ ——引用误差;

$X_N$ ——测量仪表的量程。

通常电工仪表的精度等级( $\alpha\%$ )分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0七级。

### 四、分贝误差

在无线电、声学等计量中,常用分贝误差来表示相对误差,因此,分贝误差实际上是相对误差的另一种表示方法。设两个电压的比值为

$$\alpha = \frac{U_2}{U_1}$$

在工程上有时采用对数的形式来表示,即

$$A = 20 \lg \alpha \quad (1-8)$$

$A$  的单位为 dB。在式(1-8)中,如果比值  $\alpha$  产生一个误差  $\Delta\alpha$ ,则对应  $A$  产生一个误差  $\Delta A$ ,故有

$$A + \Delta A = 20 \lg(\alpha + \Delta\alpha)$$

将上式与式(1-8)相减,得

$$\Delta A = 20 \lg\left(1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) \quad (1-9)$$

该式给出了比值的相对误差  $\Delta\alpha/\alpha$  与分贝误差(dB)之间的关系,由于

$$\lg(1 + \Delta) = 0.43431 \ln(1 + \Delta)$$

当  $\Delta \ll 1$  时,  $\ln(1 + \Delta) \approx \Delta$ ,从式(1-9)得

$$\Delta A = 8.686 \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) \quad (1-9a)$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \approx 0.1151 \Delta A \quad (1-9b)$$

由于功率比的分贝定义为  $A = 10 \lg \alpha$ ,  $\alpha = \frac{P_2}{P_1}$ ,故求功率比的分贝误差时,式(1-9)、式(1-9a)、式(1-9b)将变为

$$\Delta A = 10 \lg\left(1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) \quad (1-10)$$

$$\Delta A \approx 4.343 \left(1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) \quad (1-10a)$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \approx 0.2303\Delta A$$

(1-10b)

## 1.1.2 误差的分类及误差处理

### 一、误差的分类

误差的分类不是绝对的,一个具体的误差可以归入这一类,有时又可以归入另一类。一般情况下常用的测量误差分类的方法见表1-1。

表1-1 测量误差的分类

按表示方式	相对误差
	绝对误差
	引用误差
	分贝误差
按来源	工具误差
	使用误差
	人身误差
	环境误差
	方法误差
按性质	系统误差
	随机误差
	过失误差

### 二、系统误差和随机误差的数学表述

在相同条件下多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,按某一确定的规律变化的误差称为系统误差。例如标准器量值的不准确、仪器示值不准确而引起的误差。在一个测量中,如果系统误差很小,那么测量结果就可以很准确。

在相同的条件下多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号均发生变化,其值时大时小,其符号时正时负,没有确定的变化规律,也不能预定,但是具有抵偿性的误差,称为随机误差。随机误差主要是由于各种影响量,例如电源的波动、磁场的微变、热起伏、空气扰动、气压及温度的变化、测量人员感觉器官的生理变化等一些互不相关的独立因素对测定值的综合影响所造成的。

系统误差和随机误差之间的划分并不是绝对的,随着人们对误差来源及其变化规律认识的加深,往往有可能把以往认识不到而归为随机误差的某项误差予以澄清而明确为系统误差。反之,当认识不足,测试条件有限时,也常会把系统误差当作随机误差处理。

设对某被测量进行了等精度的  $n$  次独立测量,得值  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 则测定值的算术平均值为

$$\bar{x} = \left( \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中  $\bar{x}$  为样本均值, 或称取样平均值。

当测量次数  $n$  趋于无穷时, 则取样平均值的极限被定义为测定值的数学期望  $\alpha_x$ , 即

$$\alpha_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

测定值的数学期望  $\alpha_x$  与测定值真值  $x_0$  之差, 被定义为系统误差  $\varepsilon$ , 即

$$\varepsilon = \alpha_x - x_0 \quad (1-11)$$

$n$  次测量中各次测量值  $x_i (i=1 \sim n)$  与其数学期望  $\alpha_x$  之差, 被定义为随机误差  $\delta_i$ , 即

$$\delta_i = x_i - \alpha_x \quad (i=1 \sim n) \quad (1-12)$$

将式(1-11)和式(1-12)等号两边相加, 得

$$\varepsilon + \delta_i = x_i - x_0 = \Delta x_i \quad (i=1 \sim n) \quad (1-13)$$

即各次测量的系统误差和随机误差的代数和等于其绝对误差。

### 三、误差处理

按误差的性质, 可以将误差分为系统误差、随机误差和过失误差三类。对误差的处理, 也按这三类误差进行。

#### 1. 系统误差的处理

系统误差将直接影响测量的准确性, 为了减小或消除系统误差, 通常采用如下方法。

##### (1) 对测量结果进行校正

对仪器定期进行检定, 并确定校正值的大小, 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, 并作出各种校正公式、校正曲线或图表, 用它们对测量结果进行校正, 以提高测量结果的准确度。

##### (2) 采用替代法测量

替代法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量和线圈的电感量。采用这种方法的优点是可以消除对地电容、导线的分布电容、分布电感和电感线圈中的固有电容等影响。例如用谐振法测量电容器的电容量  $C_x$  时(见图 1-2), 由于电感线圈  $L_0$  总是存在固有电容  $C_s$ , 所以测得的结果已不是真实的电容量  $C_x$ , 它已被并联的  $C_s$  所偏离。为了消除后者的影响, 可把谐振法和替代法结合起来进行测量。测量分两步进行, 先将信号发生器频率调到回路  $L_0$ 、 $C_s$ 、 $C_x$  的谐振频率上, 即

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0(C_s + C_x)}} \quad (1-14)$$

然后用标准可变电容器  $C_0$  代替  $C_x$ , 调整  $C_0$  使  $L_0$ 、 $C_s$ 、 $C_0$  调谐到原来的谐振频率  $f$  上

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0(C_s + C_0)}} \quad (1-15)$$

比较以上两式, 得到  $C_x = C_0$ , 由此可知: 标准可变电容器  $C_0$  的数值就是所要测定的电容器  $C_x$  的电容量。

##### (3) 采取正负误差相消法

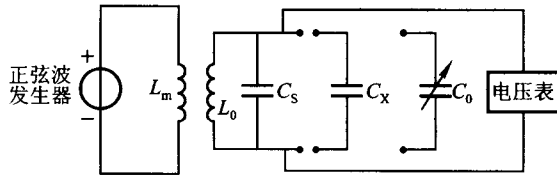


图 1-2 用替代法测量电容器的电容量

这种方法可以消除外磁场对仪表的影响。进行正反两次位置变换的测量,然后将测量结果取平均值。该方法也可用于消除某些直流仪器接头的热电动势的影响,其方法是改变原来的电流方向,然后取正、反两次数据的平均值。

(4) 注意仪表量程的选择

在仪表准确度已确定的情况下,量程大就意味着仪表偏转很小从而增大了相对误差。因此,合理地选择量程,并尽可能使仪表读数接近满偏位置。

(5) 选择比较完善的测试方法

(6) 符合仪器仪表对使用条件的要求

若不符合使用条件的要求就会带来附加误差,因此,正确使用和改善测量环境,防止外界因素的干扰,都可以减少系统误差而提高测量的准确度。

(7) 减少人身误差的有效方法是改进读数装置

另外,也可由不同的测量者对同一被测量对象进行测量,可减少测量者个人习惯和生理因素造成的人身误差。

(8) 多次测量取其算术平均值,以防止测量仪器仪表和人为因素的偶发性的明显差错。

2. 随机误差的处理

随机误差只是在进行精密测量时才能发现它。在一般测量中由于仪器仪表读数装置的精度不够,则其随机误差往往被系统误差湮没不易被发现。因此,在精密测量中首先应检查和减小系统误差,然后再来做消除和减小随机误差的工作。由于随机误差是符合概率统计规律的,故可以对它作如下处理。

(1) 采用算术平均值计算

因为随机误差数值时大时小,时正时负,采用多次测量求算术平均值就可以有效地增多误差相互抵消的机会。若把测量次数  $n$  增加到足够多,则算术平均值就近似等于欲求结果。即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-16)$$

式中,  $\bar{x}$ ——测量结果的算术平均值;

$n$ ——测量次数;

$x_i$ ——第  $i$  次的测量值。

(2) 采用均方根误差或标准偏差来计算

每次测量值与算术平均值之差称为偏差。用偏差的平均数来表示随机误差是一种方法,正负偏差的代数和和测量次数增大时趋向于零,为了避开偏差的正负符号,可将每次偏差平方后相

加再除以测量 $(n-1)$ 得到平均偏差平方和,最后再开方得到均方根误差,即

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-17)$$

式中, $\sigma$ ——均方根误差;

$n$ ——测量次数。

为了估计测量结果 $\bar{x}$ 的精密性,又常采用标准偏差这个概念。即

$$\sigma_s = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-18)$$

式中, $\sigma_s$ ——标准偏差。

式(1-18)表明,测量次数 $n$ 越大测量精密性越高。但 $\sigma$ 与 $n$ 的平方根成反比,因此精密性提高随 $n$ 的增大而减缓,故通常 $n$ 取20就足够了。随机误差超过 $3\sigma$ 的概率仅为1%以下,而小于 $3\sigma$ 的概率占99%以上。对于标准偏差 $\sigma$ 也是如此,最大值不易超过 $3\sigma$ 。可以将测量结果考虑随机误差后写为

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma \quad (1-19)$$

### 3. 过失误差的处理

过失误差是应该避免的。为了发现和排除过失误差,除了测量者认真仔细以外,还可以注意做好以下的工作。

- (1) 在正式测量之前可以做试探性测量,即进行粗测,以便正式测量时核对。
- (2) 反复对被测量对象进行测量,从而避免单次失误。
- (3) 改变测量方法或测量仪表后测量同一量值。
- (4) 当进行精密测量时,对于大于 $3\sigma$ 的数据作为过失误差处理,即数据应作废。

## 1.2 实验数据处理

实验中要对所测量的量进行记录,得到实验数据,对这些实验数据需要进行很好的整理、分析和计算,并从中得到实验的最后结果,找出实验的规律,这个过程称为数据处理。

### 1.2.1 测量中有效数字的处理

在测量数据的记录和计算中,该用几位数字来表示测量或计算结果是有一定规则的,这就涉及到有效数字的表示及其运算规则问题。

#### 一、有效数字的概念

在测量中必须正确地读取数据,即除末位数字可疑欠准确外,其余各位数字都是准确可靠的。末位数字是估计出来的,因而不准确。例如,用一块量程50V的电压表(刻度每小格代表1V)测量电压时,指针指在34V和35V之间,可读数为34.4V,其中数字“34”是准确可靠的,



称为可靠数字,而最后一位“4”是估计出来的不可靠数字,称为欠准数字,两者结合起来称为有效数字。对于“34.4”这个数,有效数字是三位。

有效数字位数越多,测量准确度越高。如果条件允许的话,能够读成“34.40”,就不应该记为“34.4”,否则降低了测量准确度。反过来,如果只能读作“34.4”,就不应记为“34.40”,后者从表面看好像提高了测量准确度,但实际上小数点后面第一位就是估计出来的欠准确数字,因此第二位就没有意义了。在读取和处理数据时有效数字的位数要合理选择,使所取得的有效数字的位数与实际测量的准确度一致。

## 二、有效数字的正确表示方法

1. 记录测量数值时,只允许保留一位欠准确数字。

2. 数字“0”可能是有效数字,也可能不是有效数字。例如0.034 kV前面的两个“0”不是有效数字,它的有效数字是后三位,0.034 kV可以写成34.4 V,它的有效数字仍然是三位,可见前面的两个“0”仅与所用的单位有关。又如“30.0”的有效数字是三位,后面的两个“0”都是有效数字。必须注意末位的“0”不能随意增减,它是由测量仪器的准确度来确定的。

3. 大数值与小数值都要用幂的乘积的形式来表示。例如,测得某电阻的阻值为15 000  $\Omega$ ,有效数字为三位时,则应记为 $15.0 \times 10^3 \Omega$ 或 $150 \times 10^2 \Omega$ 。

4. 在计算中,常数(如 $\pi$ 、 $e$ 等)以及因子的有效数字的位数没有限制,需要几位就取几位。

5. 当有效数字位数确定以后,多余的位数应一律按四舍五入的规则舍去,称为有效数字的修约。

## 三、有效数字的运算规则

### 1. 加减运算

参加运算的各数所保留的位数,一般应与各数小数点后位数最少的相同,例如13.6、0.056、1.666三个数相加,小数点后最少位数是一位(13.6),所以应将其余二数修约到小数点后一位数,然后再相加,即

$$13.6 + 0.1 + 1.7 = 15.4$$

为了减少计算误差,也可在修约时多保留一位小数,计算之后再修约到规定的位数,即

$$13.6 + 0.06 + 1.67 = 15.33$$

其最后结果为15.3。

### 2. 乘除运算

乘除运算时,各因子及计算结果所保留的位数以百分误差最大或有效数字位数最少的项为准,不考虑小数点的位置。例如0.12、1.057和23.41三个数相乘,有效数字最少的是0.12,则

$$0.12 \times 1.1 \times 23 = 3.036$$

其结果为3.0。

### 3. 乘方及开方运算

运算结果比原数多保留一位有效数字。例如

$$(15.4)^2 = 237.2$$