

普通高等院校“十一五”规划教材

电子技术

基础实验

DIANZI JISHU JICHU SHIYAN

吴祖国 高卫东 汪小会 马国胜 主编
杨景曙 主审

本书看点:

1. 重点讲解常用仪器的使用、常用电子电路元器件的识别、选用以及主要性能参数等。
2. 本书将模拟电子电路设计与测试、数字系统设计、电路及线路实验、EDA实验等融为一体,形成了一个较为系统电子电路实验体系;
3. 每章的实验内容均按由易到难、由浅入深、循序渐进的原则编写,各章的实验内容既自成体系又相互联系,大部分实验均可在同一实验平台上完成。



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电子技术基础实验

吴祖国 高卫东 汪小会 马国胜 主编
杨景曙 主审

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书主要包括电测量的基本知识、电路与信号系统实验、模拟电子线路实验、数字逻辑电路实验、EDA 仿真实验以及常用仪器的使用说明、常用电子电路元器件的识别与主要性能参数等,共列实验项目 37 个。

本书参考教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会有关课程教学的基本要求,在总结多年实验教学改革经验的基础上编写而成。

本书可作为高校电类专业电路分析、线性电子线路、数字逻辑电路等课程的实验教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础实验/吴祖国等主编. —北京:国防工业出版社,2008.8

ISBN 978-7-118-05798-0

I. 电... II. 吴... III. 电子技术—实验 IV. TN—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086653 号

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)
腾飞印务有限公司印刷
新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 15 1/4 字数 394 千字

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

实验教学是学员检验理论正确与否、加深理解理论知识、丰富知识范畴、拓展实践技能、提高创新能力、培育创新精神的重要手段,是整个教学环节中的重要组成部分。

随着电子技术的飞速发展,新技术、新理论和新工艺层出不穷,军事装备也发生了革命性的变化,如何使学员适应这种变革,甚至引导这种变革的潮流应该值得我们认真思考。电子技术实验是电子信息专业的一门基础实验,其教学效果对学员的动手操作能力、知识应用能力以及创新能力的培养和独立思考作风的形成起到不可估量的作用。

本书参考教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会有关课程教学的基本要求,以我院新的人才培养方案为指针,集成我院电子技术实验中心多年实验教学改革经验的基础上编写而成,适合我院本科各专业使用。

本书将原来的“模拟电子电路设计与测试、数字系统设计、电路及线路实验、EDA 实验”等融为一体,形成了一个较为系统的电子电路实验教学体系。本书各章的实验内容均按由易到难、由浅入深、循序渐进的原则编写,既自成体系又相互联系,大部分实验均可在同一实验平台上完成。

全书共分五章,第一章为电测量的基本知识,第二章为电路与信号系统实验,第三章为模拟电子线路实验,第四章为数字逻辑电路实验,第五章为 EDA 仿真实验,附录 A 为常用仪器的使用说明,附录 B 为常用电子电路元件、器件的识别与主要性能参数。全书共列实验 37 个,是在总结多年实验教学经验的基础上精心设计的,包含基础实验、设计性实验和综合性实验。

本书在编写过程中得到了张兴胜、叶应流、汤红飞等同志的大力支持并提出了许多修改意见。尹学忠、韩彦征、辛友顺、邬金松、毕大庆、海磊、胡瑞等同志参加了本书部分章节的编写、文字录入、校对、实验试做等工作,在此向他们表示衷心的感谢!

杨景曙教授在百忙中审阅了本书,提出了许多宝贵意见和建议,在此向杨景曙教授表示衷心的感谢!

由于时间仓促,作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请同行和使用者批评指正,提出宝贵意见。

编 者
2008 年 7 月于合肥

目 录

第一章 电测量的基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 测量误差的基本概念	3
第三节 实验数据处理	11
第四节 实验步骤及实验故障的排除	15
第五节 实验的分析整理和结果报告	17
第二章 电路与信号系统实验	20
实验 1 电路实验基本知识与基本测量	20
实验 2 线性有源二端网络等效参数的测量	22
实验 3 二端口网络传输参数的测试	25
实验 4 电路元件伏安特性的测量	28
实验 5 典型交流信号的测量	30
实验 6 R、L、C 元件阻抗特性的测试	33
实验 7 RC 选频网络特性的测试	35
实验 8 RLC 谐振电路特性的测试	38
实验 9 一阶电路暂态响应的研究	41
实验 10 二阶动态电路响应的研究	43
第三章 模拟电子线路实验	46
实验 1 常用电子仪器仪表的使用	46
实验 2 基本放大电路静态和动态参数测试	52
实验 3 负反馈放大器交流参数测试	58
实验 4 无输出变压器的功率放大器研究	61
实验 5 集成运算放大器参数测试	65
实验 6 集成运算放大器的应用	71
实验 7 RC 有源滤波电路	76
实验 8 RC 正弦波振荡电路	81
实验 9 整流、滤波与稳压电路	83
实验 10 差分放大器参数测试	91
第四章 数字逻辑电路实验	95
实验 1 数字逻辑电路实验方法	95

实验 2	数字逻辑电路实验箱与双踪示波器操作应用	103
实验 3	TTL 集成门电路逻辑功能的测试及应用	108
实验 4	组合逻辑电路的分析、设计及验证	116
实验 5	集成单稳态触发器的测试及应用	120
实验 6	集成时基电路及其应用	123
实验 7	译码器和数据选择器的测试及应用	127
实验 8	计数器的测试及应用	131
实验 9	多功能电子数字计时器	136
实验 10	简易数字频率计	139
第五章	EDA 仿真实验	142
实验 1	电子实验工作台软件 Multisim 入门	142
实验 2	正弦稳态电路的仿真	153
实验 3	一阶 RC 电路暂态响应的仿真	155
实验 4	负反馈放大电路的仿真	156
实验 5	无输出变压器功率放大器的仿真	158
实验 6	编码、译码与显示电路的仿真	160
实验 7	异步十进制计数器的仿真	162
附录 A	常用仪器的使用说明	165
A-1	DS5022ME 数字存储示波器	165
A-2	GOS-6021 双踪示波器	175
A-3	YB1635 函数信号发生器	191
A-4	TFG2030 DDS 函数信号发生器	194
A-5	GPS-2303C 双路直流稳压电源	209
A-6	THDM-1B 模拟数字电路综合实验箱	214
A-7	UT803 数字台式万用表	217
附录 B	常用电子电路元件、器件的识别与主要性能参数	221
B-1	电阻器的简单识别与型号命名法	221
B-2	电容器的简单识别与型号命名法	225
B-3	电感器的简单识别与型号命名法	229
B-4	半导体器件的简单识别与型号命名法	230
B-5	半导体集成电路	235
参考文献		246

第一章 电测量的基本知识

第一节 概 述

1. 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以找到有用的信息,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 1.6V ,则测量值的数值为 1.6,其计量单位为 V (伏)。

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 3.2A ,表明被测量是电流单位量 A (安)的 3.2 倍。

2. 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 7 个基本单位,两个辅助单位和其他导出单位。

基本单位是指彼此无关、分别加以确定的物理量单位。导出单位是指由基本单位通过定义、定律或其他函数关系推导、派生出来的各种导出量值。为某种量制(即彼此间存在确定关系的一组量),按一定的规则确定的一组基本单位和导出单位称为单位制。

由各基本单位和导出单位便可组成各种不同的单位制。例如,静电单位制(CGSM 制)、实用单位制(MKSA 制)等。然而单位制类型过多,会给科学技术的应用带来许多麻烦和混乱。于是,在 1948 年第 9 届国际计量大会上通过一项决议,建议国际上采用一种以实用单位为基础的统—单位制。1960 年第 11 届国际计量大会上正式通过了这种单位制,并且把它命名为国际单位制,并且把它规定以 SI 作为国际单位制的简称。

我国确立了以国际单位制为基础的法定计量单位,并以法律形式强制使用。1984 年 2 月国务院颁布了《中华人民共和国法定计量单位》,决定我国法定计量单位以国际单位制为基础,并包括 16 个我国选定的非国际单位制单位[时间(分、时、天)、平面角(秒、分、度)、长度(海里)、质量(吨、原子质量单位)、体积(升)、面积(公顷)、转速(转/每分)、速度(节)、能(电子伏)、级差(分贝)和线密度(特克斯)]。

1) 国际单位制(SI)的组成

国际单位制是由国际单位制单位、国际单位制词头和国际单位制的十进倍数单位 3 部分组成。

国际单位制单位包括了基本单位、导出单位和辅助单位 3 类。基本单位共有 7 个,其名称及符号见表 1-1-1。导出单位是由基本单位按定义、定律或一定的关系式推导出来的单位。辅助单位有两个,即平面角的单位弧度(rad)和立体角的单位球面度(sr),它们在应用过程中可以任意作为基本单位或导出单位。

表 1-1-1 国际单位制基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文]	K
质量	千克(公斤)	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	S	发光强度	坎[德拉]	cd
电流	安[培]	A			

国际单位制词头采用的是十进制词头,它用来表示使单位增大或缩小的十进倍数。词头是这些倍数单位名称的一部分,它们代表的倍数从 10^{-24} ~ 10^{24} ,共有 16 个,见表 1-1-2。

表 1-1-2 国际单位制词头

因 数	词头名称		符 号	因 数	词头名称		符 号
	英文	中文			英文	中文	
10^{18}	exa	艾	E	10^{-1}	deci	分	d
10^{15}	peta	拍	P	10^{-2}	centi	厘	c
10^{12}	tera	太	T	10^{-3}	milli	毫	m
10^9	giga	吉	G	10^{-6}	micro	微	μ
10^6	mega	兆	M	10^{-9}	nano	纳	n
10^3	kilo	千	k	10^{-12}	pico	皮	p
10^2	hecto	百	h	10^{-15}	femto	飞	f
10^1	deca	十	da	10^{-18}	atto	阿	a

其他所有物理量的单位均可用 7 个基本单位导出,称为导出单位。例如电磁量的单位可由前 4 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](Q)、西[门子](S)、韦[伯](Wb)、亨[利](H)、特[斯拉](T)等。

2) 国际单位制的使用

在使用国际单位制时,必须遵循规定的使用方法。这里简要介绍如下:

(1) 词头代号与单位代号之间不留间隔。例如,km(千米)。

(2) 两个以上单位的乘积最好用中圆点作为乘号,只有当乘积结果与其他代号不相混淆时,中圆点才可以省略,但次序不能变动。例如,k·m 或 km,但不允许写成 mk。

(3) 不允许使用两个以上国际单位制词头并列构成组词头。例如,可用 $1\mu\text{F}$ (皮法),而不允许用 $1\text{m}\mu\text{F}$ (毫纳法)。

(4) 当导出单位由一个单位被另一个单位除而构成时,可用斜线、水平线或者负幂数表示。例如, m/s 、 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(5) 除了加括弧外,一个组合单位在同一行内只能用一条斜线,在复杂情况下应该用负幂或括弧。例如, m/s^2 或 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,但不应写为 m/s/s 。

(6) 选用国际单位制单位的倍数单位时,应使数值处于 0.1 ~ 1000 之间。例如, $3.4 \times 10^4\text{N}$ 可以写成 34kN ; 0.00687m 可以写成 6.87mm ; $5.4 \times 10^{-9}\text{s}$ 可以写成 5.4ns 。但在同一个量的数值表,或同一篇文章中讨论这些数值时,即使有些数值不在 0.1 ~ 1000 的范围以内,也

要求使用一致的倍数单位或分数单位。

3. 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。例如用伏安法测量电阻,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。例如含源二端口电阻网络 N 与负载连接,如图 1-1-1 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:

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

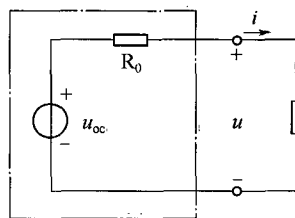


图 1-1-1 含源二端口网络与负载连接

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,但不属于直读法而属于比较测量法。

第二节 测量误差的基本概念

在实际测量中,由于测量仪器、工具的不准确,测量方法的不恰当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,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. 测量误差的定义

测量的目的是希望获得被测量的实际大小,即真值。所谓真值,就是在一定的时间和空间环境条件下,被测量本身所具有的真实数值。实际上,在一切测量中,由于各种因素(测量设备、测量方法、测量环境和测量人员素质)的影响,测量所得的量值 x 并不能准确地等于被测量的真值 A ,二者之差($x - A = \Delta x$)称为测量误差。可以说,所有测量结果都带有误差。测量误差过大,可能会使测量结果变得毫无意义,不但没有利用价值,甚至会带来危害。

研究误差的目的,就是要正确认识误差的性质,分析误差产生的原因及其发生规律,寻求减小或消除测量误差的方法,识别出测量结果中存在的各种性质的误差,学会数据处理的方法,使测量结果更接近于真值。

2. 测量误差的来源

从本章第一节关于测量基本要素的讨论不难看出,测量误差来自以下五个方面:

1) 仪器误差

仪器误差是由于测量仪器及其附件的设计、制造、检定等环节不完善,以及仪器使用过程中老化、磨损、疲劳等因素而使仪器带有的误差。例如,仪器仪表的零点漂移、刻度的不准确和非线性,以及数字仪器的量化误差等都属仪器误差。为减小仪器误差的影响,应根据测量任务,正确地选择测量方法,合理使用测量仪器,控制测量环境条件等。

2) 影响误差

影响误差是指由于各种环境因素(温度、湿度、振动、电源电压、电磁场等)与测量要求的条件不一致而引起的误差。

影响误差常用影响量来表征。所谓影响量,是指除了被测的量以外,凡是对测量结果有影响的量,即测量系统输入信号中的非被测量值信息的参量。测量中的影响量较多而且复杂,可以是来自系统外部环境(如环境温度、湿度、电源电压等)的外界影响量,也可以是来自仪器系统内部(如噪声、漂移等)的内部影响量,不过这里讨论的影响误差通常是指来自外部环境因素的外部影响量。

3) 理论误差和方法误差

由于测量原理带来的误差(如数字化测量的量化误差)或者由于测量计算公式的近似导致测量结果出现的误差称为理论误差。由于测量方法不合理(如用低输入阻抗的电压表去测量高输入阻抗电路上的电压)而造成的误差称为方法误差。

理论误差和方法误差通常以系统误差的形式出现,在掌握了具体原因及有关量值后,通过理论分析与计算,或者改变测量方法,这类误差是可以消除或修正的。

4) 人身误差

人身误差是由于测量人员的分辨能力、反应速度、视觉、固有习惯、责任心等因素,造成测量中操作不当、现象判断出错或数据读取疏失等而引起的误差。

减少或消除人身误差的措施有:提高测量人员操作技能,增强工作责任心,加强测量素质和能力的培养,采用自动测试技术等。

5) 测量对象变化误差

测量过程中由于测量对象本身的变化造成测量值不准确,如引起动态误差等。

3. 测量误差的表示方法

测量误差有绝对误差和相对误差两种表示方法。

1) 绝对误差

(1) 定义:由测量所得到的被测量值 x 与其真值 A_0 之差,称为绝对误差,即

$$\Delta x = x - A_0$$

式中: Δx 为绝对误差。

由于被测量值 x (它由测量仪器显示装置指示出来,故又称为仪器的示值) 总含有绝对误差,其值可能比 A_0 大(正误差),也可能比 A_0 小(负误差),因此, Δx 既有大小,又有符号和量纲。显然,绝对误差并不是误差的绝对值,而是其代数值。

某一时刻、某一位置或状态下,被测量的真值是客观存在的,是通过完善的测量所得到的量值,然而无误差的“完善的测量”是不可能的,所以在大多数场合被测量的真值是未知的。只有特殊情况下被测量的真值才是可知的,例如少数被测量有一个理论真值,像上面例举的三角形内角之和为 180° 。

在计量学中标准量是已知的,它们是一种约定真值。例如,长度 1 m 是光在真空中 $1/299792458\text{ s}$ 时间间隔内所行进的路程。约定真值都具有一定的不确定度,应当予以说明,长度单位 1 m 的约定真值的不确定度为 $\pm 4 \times 10^{-9}\text{ m}$ 。此外,对标准器具也采用了约定真值,是指在给定地点,由参考标准复现的量值。例如,作为参考标准(标准砝码、标准物质、标准仪器等),在其证书中所给出的值,是一种约定真值。

真值 A_0 是一个理想的概念,一般来说是无法得到的,所以实际应用中通常用十分接近被测量真值的实际值 A 来代替真值 A_0 。实际值也称为约定真值,它是根据测量误差的要求,用高级以上的测量仪器或计量器具测量所得之值作为约定真值,即实际值 A 。因而绝对误差更有实际意义的定义是

$$\Delta x = x - A$$

绝对误差表明了被测量的测量值与被测量的实际值间的偏离程度和方向。

(2) 修正值:与绝对误差的绝对值大小相等,但符号相反的量值,称为修正值,用 C 表示。

$$C = -\Delta x = A - x$$

测量仪器的修正值可以通过上一级标准的校准给出,修正值可以是数值表格、曲线或函数表达式等形式。在日常测量中,利用仪器的修正值 C 和已检仪器的示值,可求得被测量的实际值

$$A = x + C$$

2) 相对误差

绝对误差虽然可以说明测量结果偏离实际值的情况,但不能完全科学地说明测量的质量(测量结果的准确程度),不能评估整个测量结果的影响。这是因为一个量的准确程度,不仅与它的绝对误差的大小有关,而且与这个量本身的大小也有关。当绝对误差相同时,这个量本身的绝对值越大,则准确程度相对就越高,因此测量的准确程度需要用误差的相对值来说明。

(1) 相对误差、实际相对误差和示值相对误差。绝对误差与被测量的真值之比称为相对误差(或称为相对真误差),用 γ 表示。

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\%$$

相对误差是两个有相同量纲的量的比值,只有大小和符号,没有单位。由于真值是不能准确得到的,通常用实际值 A 代替真值 A_0 来表示相对误差 α ,用 γ_A 表示。

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\%$$

式中： γ_A 为实际相对误差。

在误差较小、要求不太严格的场合，也可以用测量值 x 代替实际值 A ，称为示值相对误差：

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

当 Δx 很小时， $x \approx A$ ，有 $\gamma_x \approx \gamma_A$ 。

【例】多级弹道火箭的射程为 10000km 时，其射击偏离预定点不超过 0.1km，优秀射手能在距离 50m 远处准确地射击，偏离靶心不超过 2cm，试问哪一个射击精度高？

解：火箭命中目标的相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{0.1\text{km}}{10000\text{km}} \times 100\% = 0.001\%$$

射手的命中目标的相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{2\text{cm}}{5 \times 10^2\text{cm}} \times 100\% = 0.04\%$$

火箭的射击精度比射手的射击精度高。

(2) 满度相对误差(引用相对误差) γ_m 。实际中也常用测量仪器在一个量程范围内出现的最大绝对误差 Δx_m 与该量程的满刻度值(该量程的上限值与下限值之差) x_m 之比来表示的相对误差，称为满度相对误差(或称引用相对误差)，用 γ_m 表示。

$$r_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\%$$

引用相对误差是一种简化计算和方便实用的相对误差，特别是在多挡和连续刻度的仪表中，因为各挡示值和对应真值都不一样。若其分母一律取 x_m ，则分子取为 Δx_m 。因此对于某一确定的仪器仪表，它的最大引用相对误差也是确定的，这就为计算和划分仪器的准确度等级提供了方便。

满度相对误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值：

$$\Delta x_m = r_m \cdot x_m$$

电工仪表就是按引用相对误差 γ_m 之值进行分级的。 γ_m 是仪表在工作条件下不应超过的最大引用相对误差，它反映了该仪表的综合误差大小。我国电工仪表共分 7 级：0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 及 5.0。如果仪表为 S 级，则说明该仪表的最大引用误差不超过 $S\%$ ，即 $|\gamma_m| \leq S\%$ ，但不能认为它在量程内各刻度上的示值相对误差都具有 $S\%$ 的准确度。如果某电表为 S 级，满刻度值为 x_m ，测量点示值为 x ，则电表在该测量点的最大相对误差 γ_x 可表示为

$$\gamma_x = \frac{x_m}{x} \times S\%$$

因 $x \leq x_m$ ，故当 x 越接近于 x_m 时， γ_x 越接近 $S\%$ ，其测量准确度越高。因此，在使用这类仪表测量时，应选择适当的量程，使示值尽可能接近于满度值，指针最好能偏转在不小于满度值 $2/3$ 以上的区域。

【例】某待测电流约为 100mA，现有 0.5 级量程为 0 ~ 400mA 和 1.5 级量程为 0 ~ 100mA 的两个电流表，问用哪一个电流表测量较好？

解:用 0.5 级量程为 0~400mA 电流表测 100mA 时,最大相对误差为

$$r_{x1} = \frac{x_m}{x} \times S\% = \frac{400}{100} \times 0.5\% = 2\%$$

用 1.5 级量程为 0~100mA 电流表测量 100mA 时的最大相对误差为

$$r_{x2} = \frac{x_m}{x} \times S\% = \frac{100}{100} \times 1.5\% = 1.5\%$$

上例说明,如果选择合适的量程,即使用 1.5 级仪表进行测量,也比用 0.5 级仪表测量要准确。因此,在选用仪表时,不要单纯追求高等级的仪表。应根据被测量的大小,兼顾仪表的级别和测量上限,合理地选用仪表。

(3) 分贝误差。在电子测量中还常用到分贝误差,它实际上是相对误差的对数表示形式。分贝误差是用对数形式(分贝数)表示的一种相对误差,单位为分贝(dB)。分贝误差广泛用于增益(衰减)量的测量中。下面以电压增益为例,引出分贝误差的表示形式。

设双口网络(如放大器或衰减器)的电压增益实际值为 A ,其分贝值 $G = 20\lg A$ 。若它的电压增益的测量值为 A_x ,其误差为 $\Delta A = A_x - A$ 。即 $A_x = A + \Delta A$,则增益测得值的分贝值为

$$\begin{aligned} G_x &= 20\lg(A + \Delta A) = 20\lg\left[A\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right)\right] = \\ &= 20\lg A + 20\lg\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right) = G + 20\lg\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right) \end{aligned}$$

由此得

$$\gamma_{dB} = G_x - G = 20\lg\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right)$$

式中: γ_{dB} 与增益的相对误差有关,可看成相对误差的对数表现形式,称为分贝误差,单位为 dB。若令 $\gamma_A = \frac{\Delta A}{A}$, $\gamma_x = \frac{\Delta A}{A_x}$,并设 $\gamma_A \approx \gamma_x$,则上式可写成

$$\gamma_{dB} = 20\lg(1 + \gamma_x)$$

上式即为分贝误差的一般定义式。

若测量的是功率增益,则分贝误差定义为

$$\gamma_{dB} = 10\lg(1 + \gamma_x)$$

4. 误差的分类及误差处理

1) 误差的分类

误差的分类不是绝对的,有时一个具体的误差可以归入这一类,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 1-2-1。

2) 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。

表 1-2-1 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

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做随机误差处理。

设对某被测量进行了等精度的 n 次独立测量,得值 $x_0, x_1, \dots, x_n$, 则测定值的算术平均值为

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

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 E_x , 即

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

测定值的数学期望 E_x 与测定值真值 x_0 之差,被定义为系统误差 ϵ , 即

$$\epsilon = E_x - x_0$$

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

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

将以上两式等号两边相加,得

$$\epsilon + \delta_i = x_i - x_0 = \Delta x_i$$

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。

3) 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 3 类。对误差的处理,也按这 3 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,并做出各种校正公式、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。用谐振法测量电容器的电容量 C_x 时(见图 1-2-1),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

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

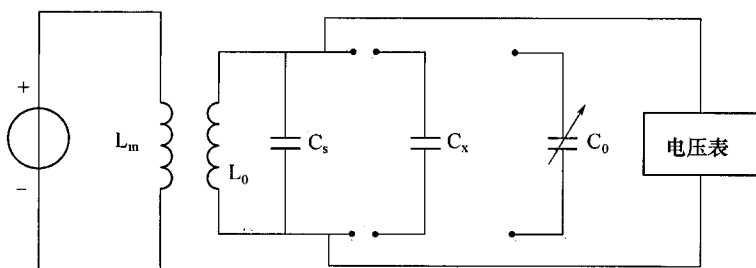


图 1-2-1 用替代法测量电容器的电容量

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。

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

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。这种方法可以消除外磁场对仪表的影响。即进行正反两次位置变换的测量, 然后将测量结果取平均值。此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, 应合理地选择量程, 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, 以减少测量者因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所造成的明显差错。

(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。在一般测量中由于仪器仪表读数装置的精度不够, 其随机误差往往被系统误差湮没。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加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

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中: $\bar{x}$ 为测量结果的算术平均值; n 为测量次数; x_i 为第 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 $(n - 1)$ 得到平均偏差平方和, 最后再

开方得到均方根误差,即

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

式中: σ 为均方根误差; n 为测量次数。

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

$$\sigma_s = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

式中: σ_s 为标准偏差。

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

$$x = \bar{x} + 3\sigma$$

(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,对大于 3σ 的数据作为过失误差处理,即数据应作废。

(4) 误差的合成分析。实际测量中,误差的来源是多方面的,单台仪器产生的误差,也与该仪器的多个组成单元有关。例如用 n 个电阻串联,则总电阻的误差就与每个电阻的误差有关。又如用间接法测量电阻消耗的功率时,需测量电阻 R 、端电压 V 和电流 I 三个量中的两个量,如何根据电阻、电压或电流的误差来推算功率的误差呢?

设最终测量结果为 y ,各分项测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,它们满足函数关系

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

并设各 x_i 间彼此独立, x_i 的绝对误差为 Δx_i , y 的绝对误差为 Δy ,则

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$$

将上式按泰勒级数展开,并略去高阶项得

$$y + \Delta y = y + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n$$

因此

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$$

已知各分项的误差,并有确定的函数(各变量偏导数存在)时,根据上式可分析和计算总的合成误差。在实际应用中,由于分项误差符号不定而可同时取正负,有时就采用保守的办法来估算误差,即将式中各分项取绝对值后再相加:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|。$$

第三节 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. 有效数字的处理

1) 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 1 V)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。

2) 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,0.0344kV 前面的两个“0”不是有效数字,它的有效数字是后三位,0.0344kV 可以写成 34.4V,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 15000Ω ,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 π 、 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。

3) 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),所以应将其余两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

$$13.6 + 0.6 + 1.67 = 15.33$$

其最后结果为 15.3。

(2) 乘除运算。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。