

吴新开 于立言  
主编

# 电工电子 实践教程

操作实训  
基础实验  
综合实验  
电子电路系统设计  
设计与制作现代技术

人民邮电出版社  
POSTS & TELECOMMUNICATIONS PRESS

# 电工电子实践教程

吴新开 于立言 主编

人民邮电出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子实践教程 / 吴新开、于立言主编. —北京: 人民邮电出版社, 2002.4

ISBN 7-115-10105-1

I. 电... II. ①吴...②于... III. ①电工技术—高等学校—教材  
②电子技术—高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 014802 号

## 内 容 提 要

本书是机电类专业《电路原理》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》和非机电类专业《电工学》等课程的实验与实践指导教材。书中提供了电工电子实验与实践教学的基本知识和基本训练, 包括基础实验、系统设计、综合实验、电工电子工艺操作知识与训练以及现代电工电子技术 (如 EDA、印制电路自动布线软件 Protel99se) 的应用。本书内容丰富, 涉及面广, 不同专业可以根据各自的要求灵活选用。

本书可作为工科院校各专业本科生的实验教材, 其中部分内容亦适合于有关专业的研究生和专科生使用。对从事电工电子技术的工程技术人员, 本书也是一本有益的参考书。

## 电 工 电 子 实 践 教 程

- ◆ 主 编 吴新开 于立言  
责任编辑 张 鹏  
执行编辑 牛大义
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
读者热线 010-67180876  
北京汉魂图文设计有限公司制作  
北京朝阳隆昌印刷厂印刷  
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 17.5  
字数: 427 千字 2002 年 4 月第 1 版  
印数: 1-8 000 册 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10105-1/TN · 1850

定价: 25.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

# 前 言

电工技术与电子技术是高等工科院校实践性很强的技术基础课程。为了培养高素质的专业技术人才，在理论教学的同时，必须十分重视和加强实践性教学环节。如何在实践教学过程中，培养学生的实验能力、实际操作能力、独立分析问题和解决问题的能力、创新思维能力和理论联系实际的能力，是高等工科院校着力探索与实践的重大课题。

本教材是根据教学大纲的要求，适应当前教学改革的需要，总结了近几年来的实践教学改革的经验编写的。本书有如下几个方面的特点：

1. 在实验教学内容上，由原来的验证性实验发展成为四个层次的实践内容。即一定数量的基础性验证实验，约占 20%；比较复杂并要求学生独立思考的设计性实验，约占 30%；由学生自行选题设计的综合性实验，占 25%；培养学生实际操作能力的工艺操作性实践，约占 25%。

2. 元器件选择方面，除个别验证性实验仍保留分立器件外，其余均采用集成化、模块化、数字化的器件等。特别是综合型、设计型实验，学生可以选择最新器件来完成自己的设计。

3. 实验手段方面，除实物实验外，增加了 Electronics Workbench 计算机辅助分析和设计；采用 Protel99 软件来设计电路原理图和印制电路板（PCB）等内容。

4. 本教材强调培养学生的实际操作能力，增加了电工、电子实训基础和常识，为培养学生的电工电子工艺技能进行了指导。

5. 本教材集电路理论、电工技术、模拟电子技术和数字电子技术于一体，便于高等工科院校开设组合性、综合性实验。在实验的安排上，既考虑了与理论教学保持同步，又考虑了培养学生能力的循序渐进的过程。

全书共分为五篇。第一篇为操作实训篇，叙述了常用电工、电子元器件的基础知识、技术参数、特点、选用和判别方法；常用仪器仪表的基本结构及使用常识；实验技术基本理论、实验数据分析及处理、实验步骤及故障排除等，对电工电子工艺技术也作了详细的介绍。第二篇为基础实验篇，主要包括电路、模拟电子技术、数字电子技术的基础验证性实验。第三篇为系统设计篇，该篇给出了众多的综合设计性课题，主要目的是培养学生进行综合性设计的能力。第四篇为综合实验篇，综合实验是培养学生综合能力和创新能力的重要一环，本篇在介绍实例的基础上，着力让学生积极思考，从实际中寻找问题，并引导学生从事创新，解决实际问题。第五篇是现代技术篇，着重介绍电子电路计算机辅助分析和设计，计算机辅助作图和印制电路板辅助设计，并适当介绍了印制电路板的制作工艺。

全书采用上述的实验教学模式，将传统的电工、电子设计方法与现代设计手段相结合，有利于调动学生学习的积极性，有利于系统地、科学地培养学生的实际动手能力、工程设计能力及创新思维能力。

本书既是电工电子实践教学的指导书，也是电工电子技术课程设计及电工电子工艺基础的指导书。本书适用于高等工科院校、各类职业技术学院，同时对从事电工、电子技术的工

程技术人员掌握该学科的新技术，也具有一定的参考价值。

本书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：于立言高级工程师（第3、4、8、9、10、12章及附录）、曾照福讲师（第14章）、凌敏副教授（第7、9章）、倪振文高级工程师（第2章）、王俊年讲师（第1章）、黄丹副教授（第6章）、彭华林教授（第13章）、张阿南副教授（第2、5章）、俞建中高级工程师（第2、5章部分内容）和吴新开教授（第11、15章及附录）。在编写过程中，得到了湘潭工学院院长聂荣华教授和信息与电气工程系主任周少武博士的关心与支持，也得到了其他教师与实验人员的大力支持与帮助，在此感谢他们对本书的支持与关心。

由于我们的水平有限，书中难免有错误之处，诚恳地希望读者提出坦率的批评和建议，以利于我们不断修正。

编 者

# 目 录

## 第一篇 操作实训篇

<b>第 1 章 实验技术</b> .....	3
1.1 测量误差及误差分析 .....	3
1.2 实验数据处理 .....	9
1.3 实验步骤及实验故障的排除 .....	11
1.4 实验报告的编写和要求 .....	13
<b>第 2 章 常用电工电子仪器仪表的使用</b> .....	14
2.1 常用电子仪器仪表操作简介 .....	14
2.2 常用电工仪表的使用 .....	23
2.3 实验：常用电子仪器仪表的使用 .....	35
<b>第 3 章 常用电子元器件基本知识</b> .....	40
3.1 常用电子元器件简介 .....	40
3.2 实验：常用元器件的识别与测试 .....	51
<b>第 4 章 电子工艺技术</b> .....	53
4.1 锡焊技术 .....	53
4.2 装配技术 .....	54
4.3 调试技术 .....	57
4.4 实验：锡焊工艺训练 .....	59
4.5 实验：晶体管收音机组装 .....	60
<b>第 5 章 电工基础技术</b> .....	62
5.1 常用低压电器 .....	62
5.2 低压配电线路 .....	78
5.3 低压配电线路安装工艺及规程 .....	83
5.4 实验 .....	92

## 第二篇 基础实验篇

<b>第 6 章 电路基础实验</b> .....	97
---------------------------	----

6.1	线性有源一端口网络 .....	97
6.2	一阶电路的过渡过程 .....	98
6.3	交流参数的测定 .....	101
6.4	功率因数的提高 .....	103
6.5	三相星形联接电路 .....	104
<b>第 7 章</b>	<b>模拟电子技术基础实验 .....</b>	<b>107</b>
7.1	晶体管共射极单管放大电路 .....	107
7.2	负反馈放大器 .....	109
7.3	集成运算放大器的基本应用——模拟运算电路 .....	111
7.4	集成运算放大器的基本应用——波形发生器 .....	114
7.5	直流稳压电源 .....	116
<b>第 8 章</b>	<b>数字逻辑与数字系统基础实验 .....</b>	<b>119</b>
8.1	组合逻辑电路设计 .....	119
8.2	译码器和数码显示器 .....	121
8.3	触发器及应用 .....	123
8.4	计数器及应用 .....	126
8.5	555 时基电路及其应用 .....	127

### 第三篇 电子电路系统设计篇

<b>第 9 章</b>	<b>模拟电路综合设计 .....</b>	<b>133</b>
9.1	电子系统一般设计过程 .....	133
9.2	模拟电子技术综合设计举例 .....	135
9.3	音频放大器的设计 .....	139
9.4	简易开关型稳压电源的设计 .....	140
9.5	模拟电路综合设计参考课题 .....	142
<b>第 10 章</b>	<b>数字电路综合设计 .....</b>	<b>144</b>
10.1	数字电子技术综合性设计举例 .....	144
10.2	语言教室控制台电路设计 .....	148
10.3	交通信号灯控制电路设计 .....	150
10.4	乒乓球比赛游戏机电路设计 .....	151
10.5	数字电路综合性设计参考课题 .....	153

### 第四篇 综合实验篇

<b>第 11 章</b>	<b>电工综合实验 .....</b>	<b>159</b>
---------------	---------------------	------------

11.1	电气控制电路设计简介	159
11.2	异步电动机正反转控制系统设计与装调	164
11.3	电工综合实验选题参考	167
<b>第 12 章</b>	<b>电子技术综合实验</b>	<b>171</b>
12.1	简易电容量测试仪的设计与调试	171
12.2	数字钟电路设计与调试	175
12.3	电子技术综合实验选题参考	177
<b>第五篇 现代技术篇</b>		
<b>第 13 章</b>	<b>EWB 4.0 应用基础</b>	<b>183</b>
13.1	EWB 4.0 的使用	183
13.2	电子电路仿真实验举例	195
<b>第 14 章</b>	<b>电子线路原理图与印制电路板设计技术</b>	<b>198</b>
14.1	Protel 99se 软件简介	198
14.2	Protel 99 原理图 (SCH) 和印制电路板 (PCB) 设计	199
14.3	电子线路原理图与印制电路板设计题目及要求	237
<b>第 15 章</b>	<b>印制电路板制作技术简介</b>	<b>239</b>
15.1	印制电路板的选择	239
15.2	印制电路板的印制	242
15.3	印制板的化学刻蚀	244
15.4	印制电路板的机械加工	246
15.5	铜导体表面的清洗和保护	247
15.6	双面及多层印制电路板	248
15.7	印制电路板的质量检查及控制	249
<b>附录一</b>	<b>常用国产半导体管主要参数</b>	<b>250</b>
<b>附录二</b>	<b>常用逻辑符号对照表</b>	<b>253</b>
<b>附录三</b>	<b>常用集成电路引脚图</b>	<b>255</b>
<b>附录四</b>	<b>常用电气图形符号</b>	<b>260</b>
<b>附录五</b>	<b>常用低压电器参数表</b>	<b>262</b>
<b>主要参考文献</b>		<b>272</b>



# 第一篇

## 操作实训篇



# 第1章 实验技术

实验教学主要包括预习、实验操作和总结等环节，其中实验操作是培养学生实践能力的重要环节，但其它环节也不容忽视，认真学习包括预习、实验总结和实验数据处理等环节在内的实验技术，对实验操作的顺利进行以及培养学生深入研究和综合分析问题的能力，具有重要的意义。

## 1.1 测量误差及误差分析

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、技巧和专门知识的丰富，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试验过程中。

### 1.1.1 误差的定义及其表达式

#### 1. 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：

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1.1-1)$$

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，除理论真值和计量学约定真值外，真值是未知的，因此绝对误差也是未知的，在实际测量中，常用高一级精度的标准器与低一级精度的标准器或普通仪器的误差相比，若比值为 1/5（或 1/3~1/20）时，则可以认为前者是后者的相对真值，在计算绝对误差时，就用相对真值代替真值。

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

$$g = X_0 - X = -\Delta X \quad (1.1-2)$$

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

$$X_0 = X + g \quad (1.1-3)$$

## 2. 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

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1.1-4)$$

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

$$\theta = -\gamma = \frac{g}{X_0} \approx \frac{X_0 - X}{X} \quad (1.1-5)$$

由此可以求出被测量的实际值为

$$X_0 = X \cdot (1 + \theta) \quad (1.1-6)$$

## 3. 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，常有多档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 (1.1-4) 式计算，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

$$\gamma_N = \frac{\Delta X}{X_N} \times 100\% \quad (1.1-7)$$

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 和 5.0 七级。如果仪表为  $\alpha$  级则说明该仪表的最大引用误差不超过  $\alpha\%$ ，而不能认为它在各刻度点上的示值误差都具有  $\alpha\%$  的精度。设某电表的满刻度值为  $X_N$ ，测量点  $X$ ，则该电表在  $X$  点邻近处的示值误差为：

$$\Delta X \leq X_N \times \alpha \times 100\%$$

$$\gamma \leq \frac{X_N}{X} \times \alpha \times 100\%$$

一般  $X \leq X_N$ ，故  $X$  越接近  $X_N$  时，其测量精度越高。这就是为什么当使用这类仪表测量时，尽可能在仪表满刻度值的 2/3 以上量程内进行测量的原因。

## 4. 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式。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

$$A = 20 \log \alpha \quad (1.1-8)$$

A 的单位为 dB。在 (1.1-8) 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：

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

将上式与 (1.1-8) 相减，得

$$\Delta A = 20 \log \left( 1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \quad (1.1-9)$$

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

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

当  $\Delta \ll 1$  时， $\ln (1 + \Delta) \approx \Delta$ ，从式 (1.1-9) 得：

$$\Delta A = 8.686 \left( \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \quad (1.1-9a)$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \approx 0.1151 \Delta A \quad (1.1-9b)$$

由于功率比的分贝定义为  $A = 10 \log \alpha$ ， $\alpha = \frac{P_2}{P_1}$ ，故求功率比的分贝误差时，(1.1-9) 式、

(1.1-9a) 式及 (1.1-9b) 式将变为：

$$\Delta A = 10 \log \left( 1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \quad (1.1-10)$$

$$\Delta A \approx 4.343 \left( 1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right) \quad (1.1-10a)$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \approx 0.2303 \Delta A \quad (1.1-10b)$$

## 1.1.2 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，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 1.1.1。

表 1.1.1 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

续表

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

## 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，也不能事先预定，但是具有抵偿性的误差，叫随机误差。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独立的  $n$  次测量，得值  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，则测定值的算术平均值为：

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

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测定值的数学期望  $\alpha$ ，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

$$\varepsilon = \alpha_x - x_0 \quad (1.1-11)$$

$n$  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

$$\delta_i = x_i - \alpha_x \quad (i=1 \sim n) \quad (1.1-12)$$

将式 (1.1-11) 和式 (1.1-12) 等号两边相加, 得

$$\varepsilon + \delta_i = x_i - x_0 = \Delta x_i \quad (i=1 \sim n) \quad (1.1-13)$$

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。

### 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三类。对误差的处理, 也按这三类误差进行处理。

#### (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。

- 校正法。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。

- 替代法。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 1.1.1), 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, 先将高频信号发生器调谐到回路  $L_0$ 、 $C_s$ 、 $C_x$  的谐振频率上:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_s + C_x)}} \quad (1.1-14)$$

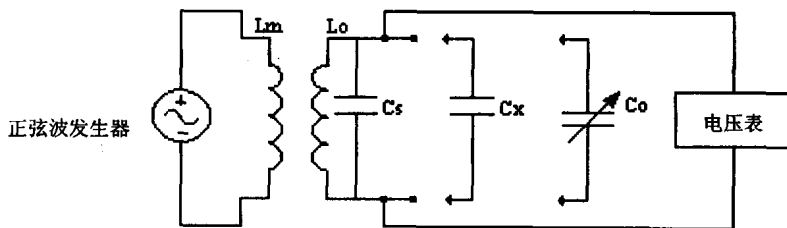


图 1.1.1 用替代法测量电容器的电容量

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:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_s + C_0)}} \quad (1.1-15)$$

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。

- 正负误差相消法。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。

- 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。

- 选择比较完善的测试方法。

- 符合仪器仪表使用条件的要求。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。

- 减少人身误差的有效方法是改进读数装置。另外，也可采用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。

- 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淹没不易被发现。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。

- 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

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1-16)$$

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。

- 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次数  $n$  减 1 得到平均偏差平方和，最后再开方得到均方根误差，即

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.1-17)$$

式中  $\sigma$  ——均方根误差。

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

$$\sigma_s = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.1-18)$$

式中  $\sigma_s$  ——标准偏差。

上式表明，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  $n$  通常取 20 就足够了。随机误差超过  $3\sigma$  的概率仅为 1% 以下，而小于  $3\sigma$  的几率占 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：

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma \quad (1.1-19)$$

### (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：

- 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；
- 反复对被测量对象进行测量，从而避免单次失误；
- 改变测量方法或测量仪表后测量同一量值；
- 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，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。

#### 1. 有效数字的概念

在测量中我们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 5 0 V 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