

封面设计 / 电脑制作: 傅化群

电路、信号与 系统实验

ISBN 7-5606-0621-0



9 787560 606217 >

ISBN 7-5606-0621-0/TN · 0121

定价: 10.50 元

TN91
2647

电路、信号与系统实验

(修订版)

于建国
程增熙 杨荣录 编
王亚聪

西安电子科技大学出版社

1998

内 容 简 介

本书共编写电路、信号与系统实验 30 个。前 15 个实验属基础型,后 15 个则为综合性较强的实验。在相应实验的指导书中,分别介绍该实验所需的电子测量仪器和基本测量方法。测量仪器包括万用表、稳压电源、信号发生器、示波器、元件参数测量仪器及电子式电压表等。实验仪器均选用通用型。基本测量方法包括电压与电流的测量、相位差的测量、网络频率特性的测量、阻抗的测量和暂态特性的测量等。

本书是与无线电技术中的“电路分析基础”及“信号与系统”两门课程紧密配合的实验课教材,除可作为高等院校无线电技术及相关专业学生的实验课教材和实验参考书外,也适合于广大的无线电爱好者自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路、信号与系统实验/程增熙等编. —修订版. —西安:西安电子科技大学出版社,1998.8
ISBN 7-5606-0621-0

I. 电… II. 程… III. ①电子电路—电路分析—实验
②信号系统—实验 IV. TN711.1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 12149 号

责任编辑 杨 兵 张国栋

出版发行 西安电子科技大学出版社
(西安市太白南路 2 号)

邮 编 710071

电 话 (029)8227828

经 销 新华书店

印 刷 空军电讯工程学院印刷厂

版 次 1992 年 6 月第 1 版

1998 年 8 月修订版

1998 年 8 月第 3 次印刷

开 本 787×1092 毫米 1/16 印张 10.625

字 数 244 千字

印 数 13 001~20 500 册

定 价 10.50 元

ISBN 7-5606-0621-0/TN·0121

* * * 如有印制问题可调换 * * *

修订版前言

“电路、信号与系统实验”是与“电路分析基础”和“信号与系统”这两门无线电技术类专业的重要基础理论课程相配合的实验课。根据加强学生能力培养及实验独立设课的要求，“电路、信号与系统实验”课形成了自己相对完整的体系，概括起来本课程的设置目的有三：

第一，配合理论基础教学，验证、巩固和扩充某些重点理论知识。

第二，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。

第三，通过一系列实验，培养学生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、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。

根据上述目的，本书编写了电路、信号与系统实验 30 个。前 15 个实验属基础训练型，实验内容、要求、方法、步骤等写得较为详细、具体；后 15 个实验属提高型，内容上综合性较强，指导也比较原则。在每个实验的指导书中，介绍了该实验所需的仪器及基本测量方法等基础知识，以利学生在教师指导下进行实验。在整体安排上，遵循由浅入深，从简到繁，循序渐进的原则。

本书初版于 1981 年。在 16 年教学实践中，根据“电路、信号与系统”理论课的内容和实验设备的发展与更新情况，并参考了国内外数所高校同类课程的设置现状，于 1985 年、1988 年和 1991 年对本教材进行了三次修订。本次修订，是在前面工作的基础上，针对部分实验设备更新情况，以及教学过程中存在的一些问题，对本教材进行了重编或改写，并在全书中较多地吸取了近几年来实施本课程教学的教师们实践和探索的经验。参与本次修订的几位编者，均是实施本课程教学 10 多年的教师。

本书由程增熙编写实验须知、实验十五和实验十七；于建国编写实验一到实验四、实验二十五到实验三十；杨荣录编写实验五到实验八、实验二十到实验二十四；王亚聪编写实验九到实验十四、实验十六、实验十八和实验十九。全书由程增熙统稿。

在本书数次编写出版工作中，电路、信号与系统实验教研室的同志们做了大量工作。本书初版是在车文光同志主编的《电路基础实验讲义》的基础上由史耀琮同志完成的。史耀琮同志是前四版的主编。车文光同志也参加了本书第三

ABD 86/04

版的编写。俞忠勋、张雅兰、贝健等同志为本书中基础实验的选材、设计做了大量工作。本次修订中，杨熙信、宣宗强同志又提出了很多宝贵意见，并参与了组织工作。因此，本书是集体劳动的成果。

由于编者水平有限，本次修订中定有不足或错误之处，恳请读者和专家批评指正。

编者

1997年7月

前 言

“电路、信号与系统实验”是与“电路分析基础”和“信号与系统”这两门无线电技术类专业的重要基础理论课程相配合的实验课。根据加强学生能力培养及实验独立设课的要求，“电路、信号与系统实验”课形成了自己相对完整的体系。概括起来本课程的设置目的有三：

第一，配合理论基础教学，验证、巩固和扩充某些重点理论知识；

第二，学习有关电子测量的一些基础知识，学习常用电子测量仪器、设备的使用方法和基本测量技术；

第三，通过一系列实验，培养学生运用所学知识，制定实验方案、选择实验方法、分析误差、处理数据、编写实验报告等从事专业技术工作的必需的初步能力和良好作风。

根据上述目的，本书在第一部分中编写了“电路、信号与系统实验”必备的基础知识。这部分内容，可在课程进行中分数段由教师集中讲授，或在有关实验之前指定学生阅读。本书的第二部分是 30 个实验的指导书，前 15 个实验属基础训练型，实验内容、要求、方法、步骤等写得较为详细、具体。后 15 个实验属提高型，内容上综合性较强，指导也比较原则。在整体安排上，遵循由浅入深，从简到繁，循序渐进的原则。

本书初版于 1981 年。在 10 年教学实践中，根据“电路、信号与系统”理论课的内容和实验设备的发展和变更情况，并参考了国内外数所高校同类课程的设置现状，曾于 1985 年和 1988 年对本教材进行了两次修订再版工作。本次改编，是在前面工作的基础上，针对部分实验设备更新情况，仅对部分章节和少数实验进行了重编或改写，并在全书中较多地吸取了近几年来实施本课程教学的教师们实践、探索的经验。

在本书的数次编写出版工作中，电路实验室和教研室的同志们做了大量工作。本书初版稿是在车文光同志主编《电路基础实验讲义》的基础上完成的。车文光同志还参加了本书第三版的改编工作。俞忠勋、张雅兰、贝健等同志为本书中基础实验的选材、设计做了大量工作。前两次改编，曾经过电路实验室的

集体讨论。本次改编中，杨熙信、车文光同志又提出了很多宝贵意见。因而，本书是集体劳动的产物。

由于编者水平有限，本次改编中定有不足或错误之处。恳请读者批评指正。

编 者

1991年7月

目 录

第一部分 实验须知	1
一、实验的意义和方法——原则性指导	2
二、实验室规则	3
三、实验报告要求	3
四、测量误差与实验数据处理	4
第二部分 实验指导书	15
实验一 万用表的使用	16
实验二 万用表的设计、组装和测试	30
实验三 直流电源外特性与戴维南定理	33
实验四 基尔霍夫定律与特勒根定理	38
实验五 示波器使用练习	40
实验六 一阶电路的暂态响应	57
实验七 一阶电路的应用实例	64
实验八 二阶电路的暂态响应	67
实验九 阻抗的测量	70
实验十 RLC 串联谐振电路	78
实验十一 Q 表	84
实验十二 互感的测量	90
实验十三 耦合谐振电路	93
实验十四 二阶 RC 网络的频率特性	97
实验十五 LC 滤波器	100
实验十六 有源滤波器	103
实验十七 信号频谱的测量	108
实验十八 信号通过线性电路	113
实验十九 取样定理	116
实验二十 基本运算单元	119
实验二十一 连续系统的模拟	124
实验二十二 离散系统的模拟	127
实验二十三 微分方程的模拟求解	131
实验二十四 状态方程的模拟求解	135
实验二十五 非线性电阻网络的伏安特性	138
实验二十六 非线性电阻网络转移特性的综合	143
实验二十七 负阻抗变换器	146
实验二十八 回转器	151

实验二十九 旋转器	155
实验三十 实验数据处理	158
参考书目	161

第一部分 实验须知



一、实验的意义和方法——原则性指导

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，借以观察它的变化和结果，我们把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讯创造了条件，还从电磁波传播规律上确认了它和光波一样具有反射、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、钠等等都有了一定认识，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，并据以预言了一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，我们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：

—般讲，—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—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,为使同学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。我们的目的不是要同学完成多少个实验,而是希望同学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同学们把所有实验全部做一遍,但希望同学们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止,在实验研究的全过程上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。

二、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) 学生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,不得挪用其它桌上仪器设备。
- (4) 爱护教学设备和器材,实验中要做到大胆、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。

三、实验报告要求

1. 实验报告格式

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。

⑪ (第三实验内容)标题。

.....

(6) 回答问题(回答实验指导中提出的问题或教师指定的问题)。

2. 注意事项

(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“四、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。图应贴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。

四、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。我们把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

$$\Delta X = X - A_0 \approx X - A \quad (0-1)$$

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

$$C = -\Delta X = A - X \quad (0-2)$$

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(0-2)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

$$r = \frac{\Delta X}{A} \times 100\% \quad (0-3)$$

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(0-3)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，用同一块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，统一规定取仪表刻度的上量限作为式(0-3)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： $\Delta R = 1\,000 - 1\,082 = -82\ \Omega$ 。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，完全不考虑电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 0-1 所示，称正态分布*。

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露出它的影响。

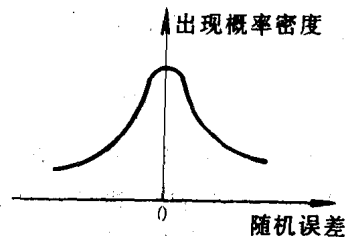


图 0-1 随机误差的正态分布曲线

③ 粗差：

粗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 $\Delta X = \epsilon + \delta$ 。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 $\Delta X_i = \epsilon_i + \delta_i$ ，则第 i 次测量

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

值为

$$X_i = A + \Delta X_i = A + \epsilon_i + \delta_i \quad (0-4)$$

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

$$\bar{X} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = A + \epsilon + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (0-5)$$

根据随机误差具有正、负值对称分布的特点可知，因正、负误差相互抵偿，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 (0-5) 可改写为

$$\bar{X} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = A + \epsilon \quad (0-6)$$

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，只要测量次数足够多，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 (0-4) 和式 (0-6) 可知，第 i 次测量值为

$$X_i = A + \epsilon + \delta_i = \bar{X} + \delta_i \quad (0-7)$$

由于各次测量的随机误差 δ_i 值彼此不等，所以式 (0-7) 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 0-2 来说明。图中“ $\circ$ ”表示被测量的真实值或实际值，“ $\cdot$ ”表示测量值，“ $\times$ ”表示多次测量值的算术平均值。图 (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 (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 (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。

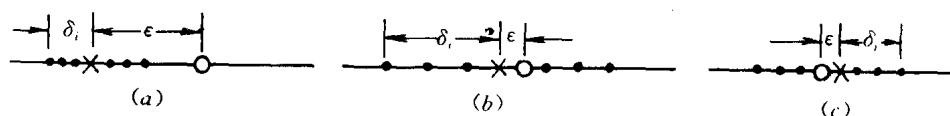


图 0-2 测量误差对测量结果的影响

2. 实验数据的处理

(1) 实验数据和有效数字*

直接测量数据是从测量仪表上直接读取的。读取数据的基本原则是允许最后一位有效数字 (包括零) 是估读的欠准数字，其余各高位都必须是确知数字。测量结果的有效数字位

* 此部分内容在普通物理实验课中已有详述，本处仅摘其要以便应用。

数应该取得与测量误差相对应,例如测得电压值为 5.672 V,测量误差为 ± 0.05 V,则测量结果应为 5.67 V。

测量结果中有时会出现多余的有效数字,此时应按下述舍入原则处理:当多余的有效数字不等于 5 时,按大于 5 则入,小于 5 则舍的原则处理;当多余的有效数字等于 5 时,要看该数字的前一位数是奇数还是偶数,奇数则入,偶数则舍。例如,把下列箭头左端的数各删掉一位有效数字,按上述原则即得右端之结果:

$$\begin{array}{ll} 4.186 \rightarrow 4.19 & 62.734 \rightarrow 62.73 \\ 0.825 \rightarrow 0.82 & 0.815 \rightarrow 0.82 \end{array}$$

间接测量数据是通过直接测量数据进行加、减、乘、除等运算得到的。运算结果应取的有效数字位数原则上由参加运算诸数中精度最差的那个数来决定。例如, $10.8725 + 6.13 + 21.432 = 38.4345$, 应取 38.43; $3.98 \times 4.125 / 2.5 = 6.567$, 应取 6.6。这种处理方法比较简单,适用于要求不很严格的场合。若需精确计算,尚有严格规则可循,可查阅误差理论的有关内容。

(2) 单次测量数据的处理

在大多数以工程为目的的测量中,对被测量只需进行一次测量,这时测量误差大小与测量方法和仪器选用有直接关系。这种单次测量结果的表达,除测量值外还需标明测量的百分误差。分几种情况简述如下:

① 在已知被测量实际值 A 的情况下,单次测量的百分误差为

$$r_x = \frac{X - A}{A} \times 100\% \quad (X \text{ 为测得值})$$

② 当被测量的实际值未知时,若用直接测量法,单次测量的最大可能误差应取仪器的容许误差。其相对误差的计算举例如下:

用量程为 50 V, 1.5 级的电压表测量两个电压,读数分别为 7.5 V 和 10 V,求各自的相对误差。

因为 1.5 级电压表的容许误差为 $\pm 1.5\%$,它引入的最大绝对误差为 $\Delta u = 50 \times (\pm 1.5\%) = \pm 0.75$ V,故相对误差分别为

对于 7.5 V

$$r = \frac{\pm 0.75}{7.5} \times 100\% = \pm 10\%$$

对于 10 V

$$r = \frac{\pm 0.75}{10} \times 100\% = \pm 7.5\%$$

可见,用同一块电压表测量不同电压时,指针偏转越接近满度值,测量越准确。

③ 对于用间接法得到的测量结果,需根据测量时依据的函数关系及对中间量的最大误差估值(利用上述直接法估出)作具体处理。

例 1 设被测量 $X = A \pm B$, A 和 B 是直接测得的中间量,试估算其相对误差。

设被测量 X 、 A 和 B 的绝对误差分别为 ΔX 、 ΔA 和 ΔB ,则有

$$X + \Delta X = (A + \Delta A) \pm (B + \Delta B)$$

$$\Delta X = \Delta A \pm \Delta B$$

考虑最坏情况