



普通高等教育“十二五”规划教材  
电工电子实验课程系列教材

# 电子技术基础实验教程

**第2版**

廉玉欣 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

电工电子实验课程系列教材

# 电子技术基础实验教程

第 2 版

主 编 廉玉欣

参 编 侯云鹏 史庚苏 岳艳玲



机械工业出版社

本书是在 2010 年出版的《电子技术基础实验教程》的基础上,由从事多年实践教学的教师编写,侧重于对学生实践操作能力及综合设计能力的培养。

全书共分为 8 章,内容是:电子技术实验的基础知识、常用电子仪器的使用方法、模拟电路基础型实验、数字电路基础型实验、电子电路设计型实验、印制电路板工艺、安装与焊接工艺、常用电子元器件。

本书的实验题目较多,每个实验题目都包含实验必备知识、参考实验电路和思考题,其内容和难易程度基本上满足了不同层次的教学要求。

本书可作为高等院校电类本科生“电子学”课程的实验教材,也可供相关专业的工程技术和科研人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础实验教程/廉玉欣主编. —2 版. 北京:  
机械工业出版社, 2013. 2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 40961 - 8

I. ①电… II. ①廉… III. ①电子技术 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 309406 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 刘丽敏

版式设计: 张 薇 责任校对: 程俊巧

责任印制: 张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 2 月第 2 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·16.75 印张·415 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 40961 - 8

定价: 34.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

随着实验教学模式的改革以及实验设备的更新,为了满足学生对电子技术基础实验内容更高层次的要求,我们在2010年出版的《电子技术基础实验教程》体系框架下,对书中一些章节进行了更新和修订。修订内容主要包括:

1) 第2章的电子仪器仪表采用当前技术先进的安捷伦数字示波器和万用表,并对章节中的一些内容进行了更新和调整。

2) 第3章中增加了“电子仪器仪表的使用”等模拟电路基础型实验。

3) 根据数字电路基础实验目前的教学模式,将第4章中的组合逻辑电路设计实验拆分为两部分实验内容。增加“随机存储器(RAM)的应用”,并对本章内容进行了修订。

4) 第5章的电子电路设计型实验做了较大的修改,在设计的过程中,特别注重培养学生的创新能力,增加了9个设计型实验题目。

5) 为了强化对学生工程技能和动手能力的培养,增加了第6章“印制电路板工艺”和第7章“安装和焊接工艺”内容,并在7.3节中增加焊接实验内容。

6) 第8章重新修订了常用电子元器件内容,增加了集成电压比较器和常用敏感元器件内容。

《电子技术基础实验教程》是参编教师多年教学经验的总结,内容由浅入深,循序渐进,不仅有利于学生对理论知识的消化吸收,而且对实践操作具有直接指导意义,有助于完成对学生动手能力、综合设计能力和创新能力的全面培养。

参加此版编写工作的有哈尔滨工业大学电工电子实验教学中心的廉玉欣(第1、5、6、7、8章,第3章3.5~3.12节,第4章4.5~4.10节),侯云鹏(第3章3.1~3.4节)、史庚苏(第2章)和岳艳玲(第4章4.1~4.4节)4位老师,全书由主编廉玉欣统稿、定稿。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者提出宝贵意见,以便于本教程的不断修订和完善。

# 第1版前言

电子技术基础实验是面向高等工科院校电类专业学生开设的电类基础实践课，是重要的实践教学环节。这种实践环节是将理论知识付诸于实践的重要手段，有利于培养学生的自学能力、实践能力和创新能力。

随着科学技术的飞速发展，社会对人才的需求不仅要具有丰富的知识，还要求具有较强的动手能力、较高的综合素质，并具备一定的工程能力和创新能力。另外，随着实验教学形式的改革，在教学中发现学生更渴求包含更多解决实际操作问题的实验教材。基于以上原因，我们编写了“电子技术基础实验教程”，融入我们的实践教学心得，希望能给学生更多帮助。

本教程具有如下特点：

1) 内容由浅入深，循序渐进，既易于学生接受，又达到增强学生实践能力的目的。

2) 实验项目中的注意事项及思考题，是参编教师多年教学经验的总结。不仅有利于学生对理论知识的消化吸收，而且对实践操作具有直接指导意义。

3) 强化对学生动手能力的培养。

4) 侧重对学生综合设计能力的培养，例如专设第5章为电子电路设计型实验。

5) 注重对学生工程技能的培养。

实验内容丰富，不同院校教师可根据学生专业、水平等实际情况选用。

本教程吸取了哈尔滨工业大学电工电子实验教学中心所有教师的实践教学经验，并在大家的支持与指导下完成，由廉玉欣担任主编，负责全书的文字润饰和统稿。参加本书编写工作的有廉玉欣（第1、5、6章，第3章3.1~3.4节）、张武（第2、4章）和史庚苏（第3章3.5~3.9节）三位老师。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者提出宝贵意见，以便于本教材的不断修订和完善。

编 者

# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

## 第1章 电子技术实验的基础知识 ..... 1

### 1.1 电子技术实验课的意义与要求 ..... 1

#### 1.1.1 电子技术实验课的目的与意义 ..... 1

#### 1.1.2 电子技术实验课的特点及 学习方法 ..... 1

#### 1.1.3 电子技术实验的一般要求 ..... 3

### 1.2 实验室的安全操作规程 ..... 4

#### 1.2.1 人身安全 ..... 4

#### 1.2.2 仪器及器件安全 ..... 4

### 1.3 电子测量中的误差分析 ..... 5

#### 1.3.1 测量误差产生的原因及其分类 ..... 5

#### 1.3.2 削弱和消除系统误差的主要 措施 ..... 5

#### 1.3.3 误差的各种表示方法 ..... 6

#### 1.3.4 误差的估计 ..... 7

### 1.4 实验数据处理 ..... 10

#### 1.4.1 测量读数的处理 ..... 10

#### 1.4.2 实验数据的处理方法 ..... 12

### 1.5 基本测量方法 ..... 13

#### 1.5.1 电压的测量 ..... 13

#### 1.5.2 电流的测量 ..... 14

#### 1.5.3 时间和频率的测量 ..... 14

#### 1.5.4 输入电阻和输出电阻的测量 ..... 16

#### 1.5.5 电压增益及频率特性的测量 ..... 17

### 1.6 电子电路的调试及故障分析处理 ..... 19

#### 1.6.1 电子电路的调试 ..... 19

#### 1.6.2 电子电路的故障分析与处理 ..... 20

## 第2章 常用电子仪器的使用方法 ..... 23

### 2.1 DF1731SB3AD 三路直流稳压电源 ..... 23

### 2.2 Agilent U1241B 型数字万用表 ..... 26

### 2.3 Agilent U1252A 型数字万用表 ..... 28

### 2.4 Agilent DSO5032A 型数字示波器 ..... 31

### 2.5 Agilent 33220A 型函数/任意波形信号 发生器 ..... 36

### 2.6 Agilent DSO-X2002A 型数字示波器 ..... 39

### 2.7 DA-16D 型交流毫伏表 ..... 45

### 2.8 EEL-69 型模拟、数字电子技术 实验箱 ..... 46

## 第3章 模拟电路基础型实验 ..... 49

### 3.1 电子仪器仪表的使用 ..... 49

### 3.2 单管放大电路的测试 ..... 53

### 3.3 射极跟随器 ..... 61

### 3.4 差分放大电路 ..... 65

### 3.5 互补功率放大电路 ..... 69

### 3.6 集成运算放大器的线性应用 ..... 74

### 3.7 集成运算放大器非线性应用电路 ..... 82

### 3.8 波形发生电路 ..... 90

### 3.9 RC 有源滤波器 ..... 96

### 3.10 线性稳压电源 ..... 101

### 3.11 开关稳压电源控制器 SG3524 及 其应用 ..... 105

### 3.12 模拟乘法器运算电路 ..... 109

## 第4章 数字电路基础型实验 ..... 111

### 4.1 TTL 与非门的参数和特性测试 ..... 111

### 4.2 集成逻辑门的简单应用电路 ..... 116

### 4.3 编码器与译码器的应用 ..... 122

### 4.4 加法器与数据选择器及其应用 ..... 131

### 4.5 集成触发器及其应用 ..... 137

### 4.6 中规模计数器及其应用 ..... 145

### 4.7 移位寄存器及其应用 ..... 153

### 4.8 A/D 和 D/A 转换器 ..... 156

### 4.9 555 集成定时器及其应用 ..... 164

### 4.10 随机存储器的应用 ..... 169

## 第5章 电子电路设计型实验 ..... 173

### 5.1 电子电路设计实验的意义与要求 ..... 173

#### 5.1.1 电子电路设计实验的目的与 意义 ..... 173

#### 5.1.2 电子电路设计实验的要求 ..... 173

### 5.2 模拟电路设计实验 ..... 177

#### 5.2.1 逻辑信号电平测试器 ..... 177

#### 5.2.2 水温控制系统 ..... 180

#### 5.2.3 精密整流器设计 ..... 182

|                     |                   |            |                    |                    |     |
|---------------------|-------------------|------------|--------------------|--------------------|-----|
| 5.2.4               | 函数信号发生器设计         | 185        | 6.3.2              | 工厂生产印制电路板的工艺<br>流程 | 220 |
| 5.2.5               | 压控波形发生器           | 187        | 6.4                | Protel 软件          | 222 |
| 5.2.6               | OCL 功率放大器的设计      | 188        | 6.4.1              | Protel 的使用         | 222 |
| 5.2.7               | 电热毯保护电路           | 189        | 6.4.2              | 电路原理图编辑            | 223 |
| 5.2.8               | 集成运算放大器的交流<br>放大器 | 191        | 6.4.3              | PCB 设计             | 229 |
| 5.2.9               | 温度监测与控制系统         | 192        | <b>第7章 安装与焊接工艺</b> | <b>234</b>         |     |
| 5.2.10              | 声光控延时开关           | 194        | 7.1                | 元器件的安装             | 234 |
| 5.2.11              | 光电越限报警器           | 195        | 7.1.1              | 安装工艺要求             | 234 |
| <b>5.3 数字电路设计实验</b> |                   | <b>196</b> | 7.1.2              | 安装方式               | 234 |
| 5.3.1               | 交通信号灯控制电路         | 196        | 7.1.3              | 常用电子元器件的安装         | 235 |
| 5.3.2               | 汽车尾灯控制电路          | 198        | 7.2                | 焊接工艺               | 238 |
| 5.3.3               | 数字频率计             | 200        | 7.2.1              | 焊接的物理过程            | 238 |
| 5.3.4               | 抢答电路的设计           | 204        | 7.2.2              | 手工焊接工具             | 238 |
| 5.3.5               | 彩灯控制系统            | 205        | 7.2.3              | 焊接材料               | 239 |
| 5.3.6               | 数字钟               | 206        | 7.2.4              | 手工焊接的操作方法          | 240 |
| 5.3.7               | 数字秒表              | 207        | 7.3                | 逻辑信号电平测试器焊接实验      | 243 |
| 5.3.8               | 倒计时定时器            | 208        | <b>第8章 常用电子元器件</b> | <b>245</b>         |     |
| 5.3.9               | 光电计数器             | 209        | 8.1                | 电阻器                | 245 |
| 5.3.10              | 投币电话控制器           | 209        | 8.1.1              | 电阻器的分类             | 245 |
| <b>第6章 印制电路板工艺</b>  |                   | <b>211</b> | 8.1.2              | 电阻器型号命名和识别方法       | 246 |
| 6.1                 | 印制电路板的设计基础        | 211        | 8.1.3              | 电位器                | 249 |
| 6.1.1               | 印制电路板结构           | 211        | 8.2                | 电容器                | 250 |
| 6.1.2               | 元器件封装             | 212        | 8.2.1              | 电容器的型号和简介          | 250 |
| 6.1.3               | 焊盘和过孔             | 214        | 8.2.2              | 电容器的主要特性指标         | 251 |
| 6.2                 | 印制电路板设计的基本原则      | 215        | 8.3                | 常用半导体器件            | 254 |
| 6.2.1               | 布局                | 215        | 8.3.1              | 半导体分立器件型号命名<br>方法  | 254 |
| 6.2.2               | 布线                | 216        | 8.3.2              | 常用半导体二极管           | 254 |
| 6.2.3               | 焊盘大小              | 217        | 8.3.3              | 常用半导体三极管           | 256 |
| 6.2.4               | 抗干扰技术             | 217        | 8.4                | 集成运算放大器            | 257 |
| 6.2.5               | 去耦电容配置            | 218        | 8.5                | 集成电压比较器            | 259 |
| 6.2.6               | 各元器件之间的接线         | 219        | 8.6                | 常用敏感元器件            | 260 |
| 6.3                 | 印制电路板制作的基本原则      | 220        | <b>参考文献</b>        | <b>262</b>         |     |
| 6.3.1               | 手工制作印制电路板         | 220        |                    |                    |     |

# 第1章 电子技术实验的基础知识

## 1.1 电子技术实验课的意义与要求

### 1.1.1 电子技术实验课的目的与意义

电类专业的电子技术与非电类专业的电工学是两门重要的技术基础课，其显著特点是具有很强的实践性，具有工程特点。所以，加强实践环节，进行严格的工程训练和技能培养是培养学生全面素质，提高创新能力必不可少的教学环节。在学校里，这种实践和训练是通过各种实验课程来完成的，因此实验教学在人才培养中具有十分重要的作用。

实验教学和理论教学是相辅相成互相促进的，许多理论概念必须通过实践才能获得更清晰、更深入的理解；在实践中获得的丰富知识和经验有利于主动地学习理论，实验过程会加深对理论教学内容的理解。一般来说，对事物的了解和认识有了理论上的描述和实际观察才是比较全面和深刻的，所以重视实验环节和重视理论学习具有同样的重要意义。

实际的工程问题往往是比较复杂的，涉及器件、电路、工艺、环境等诸多方面的实际因素，使得一些实验现象和结果与书本上写的、课堂上讲的往往存在一定的差别。分析实验中出现的现象，解决实验中出现的现象和问题不但需要有深厚的理论来指导，更需要在实践中积累起来的丰富经验和实验能力。因此只有书本知识，缺乏实际经验和能力往往是不能很好地解决实际问题的。分析解决实验过程中出现的现象和问题可以促使实验者独立思考，学习新的知识，从而扩大知识面，增强理论联系实际的能力，培养创新意识和研究性思维，这也是科学工作者应该具备的能力和素质。

### 1.1.2 电子技术实验课的特点及学习方法

#### 1. 电子技术实验的特点

电子技术实验课程具有以下一些特点：

1) 电子器件（如半导体、集成电路等）品种繁多，特性各异。在进行实验时，首先就面临如何正确、合理地选择电子器件的问题。如果选用不当，则将难以获得满意的实验结果，甚至造成电子器件的损坏。因此，必须对所用电电子器件的性能有所了解。

2) 电子器件（特别是模拟电子器件）的特性参数分散性大，电子元件（如电阻、电容等）的元件值也有较大的偏差。这就使得实际电路性能与设计要求的有一定的差异，实验时就需要进行调试。调试电路所花费的精力有时甚至会超过制作电路所花费的精力。对于已调好的电路，若更换了某个元器件，也有个重新调试的问题。因此，掌握调试方法，积累调试经验是很重要的。

3) 模拟电子器件的特性大多数都是非线性的。因此，在使用模拟电子器件时，就有一个如何合理地选择与调整工作点以及如何使工作点稳定的问题。而工作点是由偏置电路确定

的,因此偏置电路的设计与调整在模拟电路中占有极其重要的地位。另一方面,模拟电子器件的非线性特性使得模拟电路的设计难以精确,因此通过实验进行调试是必不可少的。

4) 模拟电路的输入输出关系具有连续性、多样性与复杂性。这就决定了模拟电路测试手段的多样性与复杂性。针对不同的问题采用不同的测试方法,是模拟电路实验的特点之一。而数字电路的输出输入关系比较简单,但各测试点电平之间的逻辑关系或时序关系则应搞得非常清楚。

5) 测试仪器的非理想特性(如信号源具有一定的内阻、示波器和毫伏表输入阻抗不够高等),会对被测电路的工作状态有影响。了解这种影响,选择合适的测试仪器和分析由此引起的测试误差,是模拟电路实验中的一个不可忽视的问题。

6) 电子电路中的寄生参数(如分布电容、寄生电感等)和外界的电磁干扰,在一定条件下可能对电路的特性有重大影响,甚至因产生自激而使电路不能工作。这种情况在工作频率较高时尤容易发生。因此,元器件的合理布局 and 合理连接方式,接地点的合理选择和地线的合理安排,必要的去耦合屏蔽措施等在模拟电路实验中是相当重要的。

7) 电子电路(特别是模拟电子电路)各单元电路相互连接时,经常会遇到一个匹配问题。尽管各单元电路都能正常工作,若未能做到很好地匹配,则相互连接后的总体电路也可能不能正常工作,为了做到匹配,除了在设计时就要考虑到这一问题,选择合适的元件参数或采取某些特殊的措施外,在实验时也要注意这一问题。

电子技术实验的上述特点决定了电子技术实验的复杂性,也决定了实验能力和实际经验的重要性。了解这些特点,对掌握电子技术实验的实验技术,分析实验中出现的问题和提高实验能力是很有益的。

## 2. 电子技术实验的学习方法

为了学好电子技术的实验课,在学习时应注意以下几点:

1) 掌握实验课的学习规律。实验课是以实验为主的课程,每个实验都要经历预习、实验和总结三个阶段,每个阶段都有明确的任务与要求。

预习——预习的任务是弄清实验的目的、内容、要求、方法及实验中应注意的问题,并拟定出实验步骤,画出记录表格。此外,还要对实验结果做出估计,以便在实验时可以及时检查实验结果的正确性。预习的是否充分,将决定实验能否顺利完成和收获的大小。

实验——实验的任务是按照预定的方案进行实验。实验的过程既是完成实验任务的过程,又是锻炼实验能力和培养实验作风的过程。在实验过程中,既要动手,又要动脑,要养成良好的实验作风,要做好原始数据的记录,要分析与解决实验中遇到的各种问题。

总结——总结的任务是在实验完成后,整理实验数据,分析实验结果,总结实验收获和写出实验报告。这一阶段是培养总结归纳能力和编写实验报告能力的主要手段。一次实验收获的大小,除决定于预习和实验外,总结也具有重要作用。

2) 应用已学理论知识指导实验的进行。首先要从理论上研究实验电路的工作原理与特性,然后再制订实验方案。在调试电路时,也要用理论来分析实验现象,从而确定调试措施。盲目调试是错误的,虽然有时候也能获得正确的结果,但对调试电路能力的提高不会有什么帮助。对实验结果的正确与否及与理论的差异也应从理论的高度来进行分析。

3) 注意实际知识与经验的积累。实际知识和经验需要靠长期积累才能丰富起来。在实验过程中,对所用的仪器与元器件,要记住它们的型号、规格和使用方法。对实验中出现的

各种现象与故障，要记住它们的特征。对实验中的经验教训，要进行总结。

4) 增强自觉提高实际工作能力的意识。要将实际工作能力的培养从被动变为主动。在学习过程中，有意识地、主动地培养自己的实际工作能力。不应依赖于老师的指导，而应自己解决实验中的各种问题。要不怕困难与失败，从一定意义上来说，困难与失败正是提高自己实际工作能力的良机。

### 1.1.3 电子技术实验的一般要求

为了使实验能够达到预期效果，确保实验的顺利完成，为了培养学生良好的工作作风，充分发挥学生的主观能动作用，对学生提出如下基本要求：

#### 1. 实验前的要求

1) 实验前要充分预习，包括认真阅读理论教材，深入了解本次实验的目的，弄清实验电路的基本原理，掌握主要参数的测试方法。

2) 阅读实验教材中关于仪器使用的章节，熟悉所用仪器的主要性能和使用方法。

3) 估算测试数据、实验结果。

#### 2. 实验中的要求

1) 按时进入实验室并在规定时间内完成实验任务。遵守实验室的规章制度，实验后整理好实验台。

2) 严格按照科学的操作方法进行实验，要求接线正确、布线整齐、合理。

3) 按照仪器的操作规程正确使用仪器，不得野蛮操作。

4) 实验中出现故障时，应利用所学知识冷静分析原因，并能在教师的指导下独立解决。对实验中的现象和实验结果要能进行正确的解释。

5) 测试参数时要做到心中有数，细心观测，做到原始记录完整、清楚，实验结果正确。

#### 3. 实验后的要求

撰写实验报告是整个实验教学的重要环节，是对工程技术人员的一项基本训练，一份完美的实验报告是一项成功实验的最好答卷，因此实验报告的撰写按照以下要求进行：

1) 注明实验环境和条件。如实验日期、使用仪器仪表的名称与编号等。

2) 整理实验数据，描绘测试波形，列出数据表格或画出测试曲线。

3) 对实验结果进行理论分析，作出简要的结论，对实验误差进行简单的分析。

4) 分析实验中出现的故障或问题，总结排除故障、解决问题的方法。

5) 实验的收获和体会以及对改进实验的意见与建议。

6) 回答思考题。

## 1.2 实验室的安全操作规程

为了人身与仪器设备安全,保证实验顺利进行,进入实验室后要遵守实验室的规章制度和实验室安全规则。

### 1.2.1 人身安全

实验室中常见的危及人身安全的事故是触电,它是人体有电流流过时产生的强烈的生理反应。轻者是身体局部产生不适,严重的将产生永久性伤害,直至危及生命。为了避免事故的发生,进入实验室后应遵循以下规则:

- 1) 实验时不允许赤脚,各种仪器设备应用良好的接地线。
- 2) 仪器设备、实验装置中通过强电的连接导线应有良好的绝缘外套,芯线不得外露。
- 3) 在进行强电或具有一定危险性的实验时,应有两人以上合作;测量高压时,采用单手操作并站在绝缘垫上,或穿上厚底胶鞋。在接通交流 220V 电源前,应通知实验合作者。
- 4) 万一发生触电事故时,应迅速切断电源,如距电源开关较远,可用绝缘器将电源线切断,使触电者立即脱离电源并采取必要的急救措施。

### 1.2.2 仪器及器件安全

- 1) 使用仪器前,应认真阅读使用说明书,掌握仪器的使用方法和注意事项。
- 2) 使用仪器时,应按照要求正确接线。
- 3) 实验中要有目的地操作仪器面板上的开关(或旋钮),切忌用力过猛。
- 4) 实验过程中,精神必须集中。当嗅到焦臭味、见到冒烟和火花、听到“噼啪”响声、感到设备过热及出现熔丝熔断等异常现象时,应立即切断电源,在故障未排除前不得再次开机。
- 5) 搬动仪器设备时,必须轻拿轻放;未经允许不得随意调换仪器,更不准擅自拆卸仪器设备。
- 6) 仪器使用完毕,应将面板上各旋钮、开关置于合适的位置,如将万用表功能开关旋至“OFF”位置等。
- 7) 为保证器件及仪器安全,在连接实验电路时,应该在电路连接完成并检查完毕后,再接电源及信号源。

## 1.3 电子测量中的误差分析

在电子技术实验中,被测量有一个真实值,简称为真值,它由理论计算求得。在实际测量该量时,由于受到测量仪器精度、测量方法、环境条件或测量者能力等因素的限制,测量值与真值之间不可避免地存在着差异。这种差异称为测量误差。学习有关测量误差和测量数据处理知识,以便在实验中合理地选用测量仪器和测量方法,并对实验数据进行正确的分析、处理,获得符合误差要求的测量结果。

### 1.3.1 测量误差产生的原因及其分类

#### 1. 系统误差

在规定的测量条件下,对同一量进行多次测量时,如果误差的数值保持恒定或按某种确定规律变化,这就是系统误差。例如,仪表零点不准,温度、湿度、电源电压等变化造成的误差,便属于系统误差。

系统误差产生的原因有:

1) 工具误差:测量时所用的装置或仪器仪表本身的缺点而引起的误差。例如,仪器校准不好,定标不准等。

2) 外界因素影响误差:没有按照技术要求使用测量工具,或使用不正确以及周围环境不合乎要求而引起的误差。

3) 方法误差或理论误差:这是一种测量方法所依据的理论不够严格,或采用不适当的简化和近似公式等引起的误差。例如,用伏安法测量电阻时,若直接从电压表的显示值和电流表的显示值之比作为测量的结果,而不计及电表本身内阻的影响,就往往引起不能允许的误差。

4) 人身误差:人身误差是测量者个人特点所引起的误差。例如,有人读指示刻度习惯于超过或欠少,测量者视力的差别造成读数偏高或偏低等。

#### 2. 偶然误差

偶然误差也称随机误差。在规定的测量条件下对同一量进行多次测量时,如果误差的数值发生不规则的变化,则这种误差为偶然误差。例如,热骚动、外界干扰和测量人员感觉器官无规律的微小变化等引起的误差,便属于偶然误差。

尽管每次测量某个量时,其偶然误差的变化是不规则的,但是实践证明,如果测量的次数足够多,则偶然误差平均值的极限就会趋近于零。所以,多次测量某个量的结果,它的算数平均值则接近于其真值。

#### 3. 过失误差

过失误差(又称粗大误差)是指在一定的测量条件下,测量值明显地偏离真值时的误差。从性质上来看,可能属于系统误差,也可能属于偶然误差。但是它的误差值一般都明显地超过相同条件下的系统误差和偶然误差,例如读错刻度、记错数字、计算错误及测量方法不对等引起的误差。通过分析,确认是过失误差的测量数据,应该予以删除。

### 1.3.2 削弱和消除系统误差的主要措施

消除或尽量减小系统误差是进行准确测量的条件之一,所以在进行测量之前,必须预先

估计一切产生系统误差的根源，有针对性地采取措施来消除系统误差。

### 1. 对误差加以修正

在测量之前，应对测量所用量具、仪器、仪表进行检定，确定它们的修正值。把测得的这些仪表的测量值加上修正值，就可以求得被测物理量的实际值（真值），以消除工具误差。

### 2. 消除误差来源

测量之前应检查所有仪器设备的调整和安放情况。例如，仪表的指针是否指零，仪器设备的安放是否合乎要求，电表之间必须远离，并注意避开过强的外部电磁场影响等。测试过程中，要严格按照规定的技术条件使用仪器，如果外界条件突然改变，则应停止测量。此外，让不同的测量人员对同一个量进行测量，或用不同的方法对同一个量进行测量，也有利于发现系统误差。

### 3. 采用正负误差相消法

用这种方法需要测两次，第一次是在系统误差为正值条件下测量，然后改变测量条件使系统误差为负值再测一次，将两次测量的结果取平均，由于某种原因引起的系统误差就被抵消掉了。例如，由于外界磁场的影响，仪表的读数会产生附加误差，若把仪表转动  $180^\circ$  再测一次，外磁场将对读数产生相反的影响而引起负的附加误差。两次结果取平均，正负误差可以抵消。

## 1.3.3 误差的各种表示方法

误差的表示方法分为绝对误差和相对误差。

### 1. 绝对误差

如果用  $A_0$  表示被测量值的真值，用  $x$  表示测量值（测量仪器的示值），则绝对误差  $\Delta x$  定义为

$$\Delta x = x - A_0$$

在实际工作中，被测量的真值一般不易测得，所以，经常用高一级标准仪器测量被测量的指示值  $A$  代替（逼近）真值，则有

$$\Delta x = x - A$$

测量中还经常用到修正值的概念。在测量前，所用测量仪器应用高一级标准仪器进行校正，校正量常用修正值  $\delta x$  表示，则其定义为

$$\delta x = -\Delta x = A - x$$

可见，修正值就是绝对误差，只是符号相反。利用修正值便可以得到该仪器所测量的实际值，即

$$A = x + \delta x$$

例如，用某一电压表测量一个电压，电压表的示值为  $2.5\text{V}$ ，其修正值为  $+0.01\text{V}$ ，则被测电压的真值为  $2.5 + 0.01 = 2.51\text{V}$

### 2. 相对误差

绝对误差往往不能表明测量的精度。例如，测量两个电压  $U_1 = 20\text{V}$ ， $U_2 = 200\text{mV}$ ，它们的绝对误差分别为  $\Delta U_1 = 0.2\text{V}$  和  $\Delta U_2 = 20\text{mV}$ ，虽然  $\Delta U_1 > \Delta U_2$ ，但实际  $\Delta U_1$  只占被测电压  $U_1$  的  $1\%$ ， $\Delta U_2$  却占被测电压  $U_2$  的  $10\%$ ，显然后者的误差对测量结果相对影响较大。为了

表明测量精度,经常采用相对误差。相对误差一般有如下几种:

### (1) 实际相对误差

实际相对误差  $\gamma$  定义为绝对误差  $\Delta x$  与被测量真值  $A$  的比值,用百分数表示,即

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

实际相对误差可为正值,也可负值。

### (2) 示值相对误差

一般被测量的真值  $A$  和测试仪表的指示值  $x$  相差不大,当在工程上不能确定真值时,常用测试仪表的指示值  $x$  近似代替真值进行计算,为此定义示值相对误差为

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

示值相对误差在实际测量中应用较广泛。

### (3) 满度相对误差

满度相对误差  $\gamma_m$  定义为绝对误差  $\Delta x$  与测量仪表满刻度值  $x_m$  的比值,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\%$$

显然,满度相对误差  $\gamma_m$  与仪表满刻度值  $x_m$  的乘积即为该仪表的最大绝对误差。我国电工仪表的准确度就是按满度相对误差来规定等级的。

## 1.3.4 误差的估计

### 1. 直接测量中误差的估计

一个完整的测量数据必须包括测量数据和测量误差两部分。只有测量数据而不知其误差,那么这个数据的可靠性就无法确定。例如,测得某电压为 50V,若它的相对误差为  $\pm 1\%$ ,那么这个测量结果是比较准确的。若其相对误差达到  $\pm 50\%$ ,那么这个测量数据就毫无意义了。

进行一般的工程测量时,只需对测量量进行一次测量,这时需要考虑的误差主要是系统误差,包括:

#### (1) 所用仪表或度量器的基本误差

若在测量中用的是  $\alpha$  级仪表,其量程为  $x_m$ ,则读数为  $x$  时,测量结果的最大绝对误差为

$$\Delta x = \pm \alpha\% x_m$$

最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\pm \alpha\% x_m}{x} \times 100\%$$

为了提高测量的准确度,减少测量误差,应选择合适的满刻度值(量程)。当用指针式仪表进行测试时,应使指针尽量接近满量程,一般要求指针指示于仪表刻度盘的  $2/3$  以上。

#### (2) 仪表不在规定条件下工作时引起的附加误差

工作位置、温度、频率、电压、外磁场等,无论哪一个偏离了规定的条件都会使仪表产生附加误差。它们所产生的附加误差大小在国家标准中有具体规定。

#### (3) 由于测量方法不当而引起的误差也应计入测量误差中。

**例** 用量程为 20A 的 1.5 级的电流表, 在 30℃ 的室温下测量  $I = 15\text{A}$  的电流, 试估计它的测量误差。

**解** 1) 基本误差

$$\gamma = \frac{\pm 1.5\% \times 20}{15} \times 100\% = \pm 2\%$$

2) 由于仪表使用温度超出规定温度 ( $20 \pm 2$ )℃ 的范围 (超出 8℃), 会产生附加误差。按规定附加误差为指示值的  $\pm 1.5\%$ 。

3) 总的测量误差为前两者之和, 即  $\pm 3.5\%$ 。

## 2. 间接测量误差中的误差估计

直接测量产生的误差必然会引起间接测量的误差。间接测量的量与直接测量的量之间的函数关系不同, 直接测量误差引起间接测量的误差也不同。可以用误差传递公式来计算间接测量误差。

(1) 被测量为两个量之和

设间接测量的量  $y$  与两个直接测量的量  $x_1$  和  $x_2$  之间的函数关系为

$$y = x_1 + x_2$$

直接测量  $x_1$  和  $x_2$  时, 测量值与实际值  $A_{x_1}$  和  $A_{x_2}$  之间的绝对误差分别为  $\Delta x_1$  和  $\Delta x_2$ , 即

$$x_1 = A_{x_1} + \Delta x_1$$

$$x_2 = A_{x_2} + \Delta x_2$$

假设  $y$  的绝对误差为  $\Delta y$ ,  $y$  的实际值为  $A_y$ , 则有

$$y = A_y + \Delta y = x_1 + x_2 = A_{x_1} + A_{x_2} + (\Delta x_1 + \Delta x_2) = A_y + (\Delta x_1 + \Delta x_2)$$

所以间接测量的绝对误差为

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

和函数相对误差为

$$\gamma_y = \frac{\Delta y}{A_y} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{A_y} = \frac{A_{x_1} \Delta x_1}{A_y A_{x_1}} + \frac{A_{x_2} \Delta x_2}{A_y A_{x_2}}$$

$$\gamma_y = \frac{A_{x_1}}{A_y} \gamma_{x_1} + \frac{A_{x_2}}{A_y} \gamma_{x_2}$$

若近似地用测量值  $x_1$ 、 $x_2$  和计算值  $y$  代替实际值  $A_{x_1}$ 、 $A_{x_2}$  和  $A_y$ , 则有

$$\gamma_y \approx \frac{x_1}{y} \gamma_{x_1} + \frac{x_2}{y} \gamma_{x_2}$$

其中,  $\gamma_{x_1}$  和  $\gamma_{x_2}$  分别为测量  $x_1$  和  $x_2$  时的相对误差。

可见, 在所有的相加量中, 数值最大的那个量的局部误差在合成误差中占主要比例。为了减小合成误差, 首先要减小这个量的局部误差。此外, 合成相对误差不会大于局部相对误差的最大者。

(2) 被测量为两个量之差

设间接测量的量  $y$  与两个直接测量的量  $x_1$  和  $x_2$  之间的函数关系为

$$y = x_1 - x_2$$

间接测量的绝对误差为

$$\Delta y = \Delta x_1 - \Delta x_2$$

差函数相对误差为

$$\gamma_y \approx \frac{x_1}{y} \gamma_{x_1} - \frac{x_2}{y} \gamma_{x_2}$$

间接测量的误差可能为正值或负值，但应取最坏情况来计算间接测量误差，所以最不利的情况是

$$\Delta y = |\Delta x_1| + |\Delta x_2|$$

$$\gamma_y \approx \left| \frac{x_1}{y} \gamma_{x_1} \right| + \left| \frac{x_2}{y} \gamma_{x_2} \right|$$

(3) 被测量为两个量的积或商

$$\gamma_y = \frac{\Delta y}{A_y} \approx \frac{A_{x_1} \Delta x_2 + A_{x_2} \Delta x_1}{A_{x_1} A_{x_2}} = \frac{\Delta x_1}{A_{x_1}} + \frac{\Delta x_2}{A_{x_2}} = \gamma_{x_1} + \gamma_{x_2}$$

$$\gamma_y = \frac{\Delta y}{A_y} \approx \frac{A_{x_2} \Delta x_1 + A_{x_1} \Delta x_2}{A_{x_2}^2} \frac{A_{x_2}}{A_{x_1}} = \frac{\Delta x_1}{A_{x_1}} - \frac{\Delta x_2}{A_{x_2}} = \gamma_{x_1} - \gamma_{x_2}$$

计算积、商函数时，先计算相对误差较为方便，因为  $\gamma_y = \gamma_{x_1} \pm \gamma_{x_2}$ 。如需要计算绝对误差，则将已算出的  $\gamma_y$  代入  $\Delta y = \gamma_y y$  即可。

## 1.4 实验数据处理

实验数据的处理包括正确记录实验数据，对实验数据进行计算，绘制曲线等。

### 1.4.1 测量读数的处理

#### 1. 有效数字的概念

实验中测量的数均为近似数，它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成。如何用近似数恰当地表示测量结果，就涉及有效数字的问题。例如，由电压表测得的电压为 20.5V，这是个近似数，其中 20 是可靠数字，而末位的 5 是欠准数字。再如电压测量的结果可能记为 3V，也可能记为 3.00V，从数值的角度来看，它们似乎没有区别，但从测量的意义来看，它们有根本的不同。记为 3V 表示 3 以后的小数位的数量是没有测出来的量，它完全可能不是“0”。而 3.00V 表明 3 以后的两位小数测量到了，而且第一位小数确实就是 0，是准确的，第二位的 0 位欠准数。由此可见，对测量结果的数字记录应有严格的要求。在测量中判断哪些数应该记或不该记，应该以误差作为标准。有误差的那位数字前面的各位数字都是可靠数字，均应记；有误差的那位数字为欠准数，也应记；而有误差的那位数字后面的各位数字都是不确定的，是无意义的，都不应该记。因此，从第一位非零数字起到那位欠准数字为止的所有各位数字都为有效数字。

例如，测量一个电阻，记录其值为  $20.56\Omega$ ，其中 2056 是 4 位有效数字。又如测量一个电压，记录其值为 0.0075V，只有 75 两位有效数字。再如，测量一电流，记录其值为 2000mA，是 4 位有效数字，若以 A 为单位记录此数，应写成 2.000A，不能写成 2A。由此三例总结出用有效数字记录测量结果时应注意如下几点：

1) 用有效数字来表示测量结果时，可以从有效数字的位数估计测量的误差。一般规定误差不超过有效数字末位单位数字的一半。例如，测量结果记为 2.000A，小数点后第三位为末位有效数字，其单位数字为 0.001A，单位数字的一半即 0.0005A，测量误差可能为正或负，所以 2.000A 这一记法表示测量误差为  $\pm 0.0005A$ 。由此可见，记录测量的结果有严格的要求，不要少记有效数字位数，少记会带来附加误差；也不要多记有效数字位数，多记则夸大了测量精度。

2) 有关“0”是否为有效数字的问题。非零数字中间的“0”是有效数字，“0”在最左面是非有效数字（即有效数字位数与小数点位置无关），“0”在最右面应为有效数字。若测量精度达不到，不能在数字右面随意加“0”，如上述第三例中记为 2000mA 或 2.000A，说明测量误差达到  $\pm 0.0005A$ ，若测量误差是  $\pm 0.005A$ ，那就只能记为 1.00A。

3) 有效数字不能因为采用的单位不同而增或减。如上述第三例中，用 A 作单位，记作 2.000A，用 mA 作单位，则记作 2000mA，二者均为 4 位有效数字。又如，有一测量结果记为 1A，它是一位有效数字，若欲用 mA 为单位，不能记为 1000mA，因为 1000 是 4 位有效数字，这样记夸大了测量精度，这时应记作  $1 \times 10^3mA$ ，它仍是一位有效数字。再如，一个记录数字为  $24.6 \times 10^5\Omega$ ，它表示有 3 位有效数字，若用  $k\Omega$  为单位，应记作  $24.6 \times 10^2k\Omega$ ，不能记作 2460k $\Omega$ ，若用  $M\Omega$  作单位，应记作 2.46M $\Omega$ 。总之，单位变化时，有效数字位数不应变化。