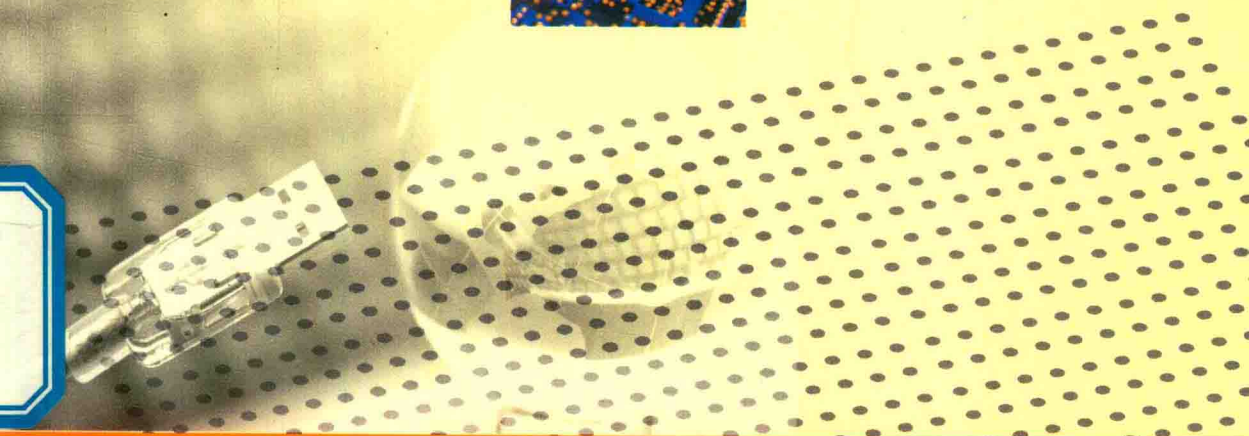
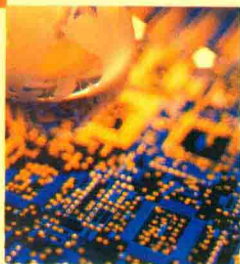


应用型本科院校“十三五”规划教材

# 电路基础实验与课程设计

第二版

主 编 田丽鸿



应用型本科院校“十三五”规划教材

# 电路基础实验与课程设计

第二版

主 编 田丽鸿

副主编 夏 晔 韩 磊 徐国峰

参 编 刘 勤 闵立清



延伸学习资料



南京大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

电路基础实验与课程设计 / 田丽鸿主编. —2 版.

—南京:南京大学出版社,2018.1

应用型本科院校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-305-19854-0

I. ①电… II. ①田… III. ①电路基础—实验—高等学校—教材 IV. ①TM133—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 012741 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

丛 书 名 应用型本科院校“十三五”规划教材

书 名 电路基础实验与课程设计(第二版)

主 编 田丽鸿

责任编辑 贾 辉 吴 汀 编辑热线 025-83686531

照 排 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 南京人文印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 13.75 字数 335 千

版 次 2018 年 1 月第 2 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-19854-0

定 价 34.00 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025)83594756

---

\* 版权所有,侵权必究

\* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书销售部门联系调换

# 前 言

实践环节是电路基础类课程的一个重要教学环节,通过实验及课程设计对学生进行基本技能的训练,可以巩固和加深理解课程的基本理论知识,培养实事求是、严肃认真的科学态度和处理实际工程问题的能力。所以,在电路课程的建设中应始终将实验及课程设计作为一个重要组成部分,使实验与课程设计的方法和手段得到不断的改进和完善。

随着计算机技术和信息技术的发展,为适应新的应用型本科人才培养模式需求,本书是根据“21世纪应用型本科计算机及信息技术实验教材编写纲要”编写,是应用型本科的规划教材。

在修订本书的过程中,考虑到应用型本科院校专业实验教学的特点,力求做到以下几点:

(1) 实践环节和仿真环节相结合。对同一实验,采用实践性实验和仿真性实验同时进行的方法,通过合理的实验步骤,将仿真性实验与实践性实验的各自特点与结论进行比较、分析,从而更为熟练地掌握不同实验方法和理论,在实验报告中体现其不同特色,更好地体现教材的互补性和新颖性。

(2) 注意实验过程中的引导作用。本着引导性和层次性的原则,本书在编写中注意层层引入,让学生根据实验任务自发思考相关理论环节,同时思考如何完成实验,如何搭建电路,不拘泥于一个电路或一个结论,以期更好地启发学生思考和分析问题,进而提高他们应用能力。

(3) 将实验报告合理安排进教材。本书在编写中,力图通过合理设计实验报告格式,将原始数据直接记入实验报告,达到效率和质量统一,使学生有更多的时间来进行实验本身的思考和分析。

(4) 课程设计环节突出综合应用能力。根据学生的知识范围和实际水平,以突出实用为原则,对课程设计进行取材,并在课程设计过程中细化要求,对理论和实践环节提出了明确标准。

(5) 注意知识的拓展性和实用性。本书增加了电路相关知识积累和实验实用常识,使其更富有启发性,有利于激发学生学习兴趣,适应素质教育的需要,全面培养学生知识、能力和素质。



参加本书编写的有:南京工程学院田丽鸿(第一章、第八章、第九章),南京工程学院夏晔(第二章、第四章主要内容),南京工程学院韩磊(第三章、第四章部分内容),南京工程学院徐国峰(第二章部分内容、第四章部分内容,第六章、第七章),南京工程学院刘勤(第五章),常州工学院闵立清(第二章、第四章部分内容),全书由田丽鸿任主编并统稿。

限于编者水平,书中会有许多考虑不周的地方,缺点错误也在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2018年1月

# 目 录

## 第一篇 电路基础实验基本知识概述

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 电路基础实验基本知识            | 1  |
| 1.1 实验基本知识概述                | 1  |
| 1.1.1 实验目的                  | 1  |
| 1.1.2 实验课程的要求               | 1  |
| 1.1.3 实验步骤及实验报告要求           | 1  |
| 1.1.4 实验注意事项                | 2  |
| 1.2 电路测量基本知识                | 3  |
| 1.2.1 电工测量方法介绍              | 3  |
| 1.2.2 测量误差基本知识              | 4  |
| 1.2.3 测量数据的合成处理             | 8  |
| 1.3 安全用电常识                  | 10 |
| 1.3.1 触电原因及其防护              | 10 |
| 1.3.2 触电急救措施                | 12 |
| 第 2 章 常用仪器仪表及实验系统介绍         | 14 |
| 2.1 电流表、电压表与功率表的使用          | 14 |
| 2.2 示波器                     | 14 |
| 2.2.1 DF4320 型双踪示波器         | 14 |
| 2.2.2 SDS1000L 型数字存储示波器     | 18 |
| 2.3 信号发生器                   | 27 |
| 2.3.1 SG1631C 函数信号发生器       | 27 |
| 2.3.2 SG1641A 函数信号发生器       | 28 |
| 2.3.3 SG1408 型数字合成/任意波信号发生器 | 30 |
| 2.4 万用表                     | 37 |
| 2.4.1 万用表介绍                 | 37 |
| 2.4.2 万用表测量二极管和三极管极性的方法     | 40 |
| 2.5 交流毫伏表                   | 41 |
| 2.5.1 TC2172A 型交流毫伏表        | 41 |
| 2.5.2 DF1930A 型交流毫伏表        | 43 |



|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 2.6   | 直流稳压电源                | 44 |
| 2.6.1 | DH1718 系列直流双路跟踪稳压稳流电源 | 45 |
| 2.6.2 | SG1731 系列直流稳压稳流电源     | 45 |
| 2.7   | TC-6720 电路分析实验箱介绍     | 48 |
| 2.7.1 | TC-6720 电路分析实验箱概述     | 48 |
| 2.7.2 | TC-6720 电路分析实验箱主要技术指标 | 49 |
| 2.7.3 | TC-6720 电路分析实验箱注意事项   | 50 |
| 2.8   | DG-3 型电工实验系统(台)介绍     | 50 |
| 2.8.1 | DG-3 型电工实验系统(台)概述     | 50 |
| 2.8.2 | DG-3 型电工实验系统(台)特点     | 51 |
| 2.8.3 | DG-3 型电工实验系统(台)注意事项   | 51 |
| 第3章   | 电路仿真软件介绍              | 53 |
| 3.1   | 电路仿真软件的发展及意义          | 53 |
| 3.2   | EWB 仿真软件介绍            | 54 |
| 3.2.1 | EWB 特点                | 54 |
| 3.2.2 | EWB 的界面               | 55 |
| 3.2.3 | EWB 的操作方法             | 59 |
| 3.3   | Multisim 10 仿真软件介绍    | 60 |
| 3.3.1 | Multisim 10 的基本操作     | 60 |
| 3.3.2 | Multisim 10 的基本分析方法   | 69 |
| 3.3.3 | Multisim 10 的典型应用     | 84 |

## 第二篇 电路基础实验

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 第4章   | 直流电路基础实验               | 90  |
| 4.1   | 指导性实验                  | 90  |
| 4.1.1 | 基尔霍夫定律                 | 90  |
| 4.1.2 | 叠加原理                   | 92  |
| 4.1.3 | 戴维南定理与诺顿定理             | 94  |
| 4.2   | 引导性实验                  | 97  |
| 4.2.1 | 叠加定理和戴维南定理             | 97  |
| 4.2.2 | 最大功率传输定理               | 100 |
| 4.3   | 设计性实验                  | 103 |
| 4.3.1 | 二端口网络参数的测量             | 103 |
| 4.3.2 | 实际电压源与实际电流源的等效变换       | 108 |
| 4.3.3 | 电阻 Y- $\Delta$ 连接与等效转换 | 112 |



|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 4.3.4 | 分压器设计实验 .....         | 116 |
| 4.3.5 | 电流表、电压表扩大量程实验 .....   | 119 |
| 第 5 章 | 交流电路基础实验 .....        | 123 |
| 5.1   | 指导性实验 .....           | 123 |
| 5.1.1 | 常用电子仪器的使用 .....       | 123 |
| 5.1.2 | 交流电路参数的测定 .....       | 126 |
| 5.1.3 | 日光灯电路及功率因数的提高 .....   | 131 |
| 5.2   | 引导性实验 .....           | 134 |
| 5.2.1 | 一阶电路的过渡过程 .....       | 134 |
| 5.2.2 | 二阶电路的过渡过程 .....       | 139 |
| 5.3   | 设计性实验 .....           | 143 |
| 5.3.1 | 直流线性二端口网络参数的测量 .....  | 143 |
| 5.3.2 | RLC 串联电路及串联谐振 .....   | 153 |
| 5.3.3 | 常用电子仪器仪表的综合应用实验 ..... | 157 |

### 第三篇 电路基础实验报告

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 第 6 章 | 直流实验报告 .....                 | 162 |
| 6.1   | 指导性实验报告(基尔霍夫定理) .....        | 163 |
| 6.2   | 引导性实验报告(叠加定理和戴维南定理) .....    | 167 |
| 6.3   | 设计性实验报告 .....                | 171 |
| 第 7 章 | 交流实验报告 .....                 | 175 |
| 7.1   | 指导性实验报告(日光灯电路及功率因数的提高) ..... | 175 |
| 7.2   | 引导性实验报告(一阶电路的过渡过程) .....     | 179 |
| 7.3   | 设计性实验报告(题目自选) .....          | 182 |

### 第四篇 电路基础课程设计

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 第 8 章 | 万用表的设计和仿真 .....        | 184 |
| 8.1   | 课程设计任务书及时间安排 .....     | 184 |
| 8.1.1 | 课程设计任务书 .....          | 184 |
| 8.1.2 | MF-16 型万用表的技术指标 .....  | 184 |
| 8.1.3 | Multisim 软件仿真、调试 ..... | 185 |
| 8.1.4 | 课程设计报告要求 .....         | 185 |
| 8.1.5 | 课程设计考核方法 .....         | 185 |
| 8.1.6 | 课程设计阶段安排 .....         | 185 |
| 8.2   | 万用表的设计和计算 .....        | 186 |





|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 8.2.1      | 电工仪表的基本知识 .....           | 186        |
| 8.2.2      | 万用表的结构和原理 .....           | 187        |
| 8.2.3      | 万用表单元电路的设计 .....          | 190        |
| 8.2.4      | 万用表整体电路的整合 .....          | 202        |
| 8.3        | 万用表的 Multisim 仿真 .....    | 204        |
| 8.3.1      | Multisim 软件的学习 .....      | 204        |
| 8.3.2      | 单元电路的仿真 .....             | 204        |
| 8.3.3      | 整体电路的仿真 .....             | 205        |
| 8.4        | 课程设计验收标准 .....            | 206        |
| 8.4.1      | 设计部分 .....                | 206        |
| 8.4.2      | 仿真部分 .....                | 206        |
| <b>第9章</b> | <b>直流稳压电源的设计与仿真</b> ..... | <b>207</b> |
| 9.1        | 课程设计任务书及时间安排 .....        | 207        |
| 9.1.1      | 课程设计任务 .....              | 207        |
| 9.1.2      | 直流稳压电源的技术指标 .....         | 207        |
| 9.1.3      | Multisim 软件仿真、调试 .....    | 207        |
| 9.1.4      | 课程设计报告要求 .....            | 207        |
| 9.1.5      | 课程设计考核方法 .....            | 207        |
| 9.1.6      | 课程设计阶段安排 .....            | 208        |
| 9.2        | 直流稳压电源的设计和计算 .....        | 208        |
| 9.2.1      | 直流稳压电源的基本知识 .....         | 208        |
| 9.2.2      | 设计方案的确定 .....             | 209        |
| 9.3        | 直流稳压电源的 Multisim 仿真 ..... | 210        |
| 9.3.1      | Multisim 软件的学习 .....      | 210        |
| 9.3.2      | 单元电路的仿真 .....             | 210        |
| 9.3.3      | 方法与步骤 .....               | 210        |
| 9.4        | 课程设计验收标准 .....            | 211        |
| 9.4.1      | 设计部分 .....                | 211        |
| 9.4.2      | 仿真部分 .....                | 211        |
|            | 参考文献 .....                | 212        |

# 第一篇 电路基础实验基本知识概述

## 第1章 电路基础实验基本知识

### 1.1 实验基本知识概述

#### 1.1.1 实验目的

实验课是高等教育中一个不可缺少的重要环节,是理论联系实际的重要手段,通过验证和巩固课堂上所学的理论知识,训练实验技能,培养实事求是、严肃认真、细致踏实的科学作风和良好的实验素质。

#### 1.1.2 实验课程的要求

通过电路基础实验课,学生在实验技能方面应达到下列要求:

(1) 正确使用万用表、电流表、电压表、功率表以及常用的一些电工实验设备;初步掌握实验中用到的信号发生器、示波器、晶体管稳压电源、晶体管毫伏表等实验仪器以及实验系统(台)的使用方法。

(2) 学会按电路图连接实验线路和合理布线,能够初步分析并排除故障。

(3) 能够认真观察实验现象,正确地读数,绘制图表、曲线,分析实验结果,正确书写实验报告。

(4) 正确地运用实验手段来验证一些定理和结论。

(5) 具有根据实验任务确定方案,设计实验线路和选择仪器设备的初步能力。

#### 1.1.3 实验步骤及实验报告要求

实验课一般分为课前预习、实验过程及实验报告三个阶段,各阶段的具体要求如下:

##### 1. 课前预习

实验能否顺利进行并达到预期效果,很大程度上取决于预习准备工作是否充分。因此,在预习过程中,应仔细阅读实验指导书和其他参考资料;明确实验的目的、内容,了解实验的基本原理以及实验的方法、步骤,清楚实验中要观察哪些现象、记录哪些数据、应注意哪些事项。

学生必须认真做好预习后,方可进入实验室进行实验。

##### 2. 实验过程

良好的工作方法和操作程序,是使实验顺利进行的有效保证,一般实验按照下列程序进行:



(1) 教师在实验前讲授实验要求及注意事项。

(2) 学生在规定的桌位上进行实验准备工作。在实验准备过程中应注意以下事项:

① 按本次实验的仪器设备清单清点设备,注意仪器设备类型、规格和数量,辅助设备是否齐全,同时了解设备的使用方法及注意事项。

② 做好记录的准备工作。

③ 做好实验桌面的整理工作,暂时不用的设备整齐地放在一边。

(3) 按实验要求连接好实验线路,经自查并请老师复查同意后,才能够合上电源。

(4) 按照实验指导书上的实验步骤进行操作、观察现象、读数,认真记录并审查数据。

(5) 结束工作。完成全部规定的实验内容,先自行核查实验数据,再经老师复查记分后,方可进行下列结尾工作:

① 切断电源,拆除实验线路。

② 做好仪器设备、桌面和环境的清洁整理工作。

③ 经教师同意后方可离开实验室。

### 3. 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,要用简明的形式将实验结果完整和认真地表达出来。报告要求文理通顺、简明扼要,字迹端正、图表清晰,结论正确、分析合理、讨论深入。

实验报告应包括下列内容:

(1) 实验目的;

(2) 实验原理;

(3) 实验线路;

(4) 实验数据、图表记录;

(5) 实验数据分析、实验结果与实验误差分析;

(6) 回答思考题;

(7) 实验小结。

总结实验完成情况,对实验方案和实验结果进行讨论,对实验中遇到的问题进行分析,简单叙述实验的收获和体会。

#### 1.1.4 实验注意事项

##### 1. 人身安全和设备安全

为确保实验过程中的安全,须遵守实验室各项安全操作规程:

(1) 不得擅自接通电源。完成电路接线后,应先自查,再经教师复查合格后方能接通电源。

(2) 不能触及带电部分。遵守“先接线、后合电源,先断电源、后拆线”的操作程序。

(3) 发现异常现象(声响、发热、焦臭等)应立刻断开电源,并及时报告指导教师检查。

(4) 爱护国家财产。实验中因违反操作规程和实验要求,损坏仪器设备者,按学院制度负责赔偿。



## 2. 线路的连接

将仪器设备合理布置,使之便于操作、读数和接线;先把元件参数调到应有的数值,调压设备及电源设备应放在输出电压最小的位置上,然后按电路图接线,实验线路应力求接得简单、清楚,便于检查,走线要合理,线的长短选择适当,防止连线短路,接线端头不要过于集中于某一点,电表接头在正常情况下不接两根导线,接线松紧要适当,不允许在线路中出现没固定端钮的裸铜接头。

## 3. 故障的检查

实验过程中常会遇到因断线、接错线等原因造成的故障,使电路工作不正常,严重时可能损坏设备,甚至危及人身安全。故接好线路后,应对电路认真检查。另外,也可用万用表、电压表来检查。

# 1.2 电路测量基本知识

前面对完成实验过程中需了解的注意事项进行介绍,下面对电路测量的一些基本知识进行介绍,以促进实验的顺利完成。

## 1.2.1 电工测量方法介绍

测量是人们认识和改造客观世界的一种必不可少的途径,与我们的生活息息相关。将被测量与作为测量标准的同类电量进行比较,以确定其量值的过程称为电工测量。按其测量手段一般可将测量方法分为三类:

### 1. 直接测量

将被测量直接与同类量相比较,不需任何计算即可得到测量结果的方法称为直接测量。直接测量法应用广泛,如用电流表直接测量电流、电压表直接测量电压、万用表直接测量电阻器的电阻值等,都属于直接测量方法。直接测量法具有简便、读数迅速等优点,但其准确度要受两方面因素制约:① 测量仪表的基本误差;② 由于测量仪表接入测量电路,仪表的内阻被引入测量电路,使电路及其工作状态发生了改变,也会影响测量准确度。因此,直接测量法的准确度比较低。

直接测量按照得到测量结果的不同方式又分为直读法和比较法两种。

#### (1) 直读法

利用直接指示数值的仪表对被测量进行测量,直接读取测量数据的方法。如利用直流电压表对直流电路中的电压参量进行测量。

直读法具有设备简单,实验操作方便等优点,应用广泛,但其测量准确度不高,最小误差约为 $\pm 0.05\%$ 。

#### (2) 比较法

将被测量与度量器放在比较仪器上进行比较,从而求得被测量的数值的方法。如利用直流电桥测量电阻阻值。

比较法测量精确度比较高,最小误差约为 $\pm 0.001\%$ ,但对测量仪表和测量条件要求较



高,操作也相对复杂些,一般只在精确度要求较高的场合采用。

## 2. 间接测量

根据被测量和其他量的函数关系,先测得其他量,然后按函数式把被测量计算出来的方法叫间接测量法。如用伏安法测量电阻阻值、直流电路中根据功率  $P = IU$  的函数关系通过测量负载的电压和电流间接得到负载的电功率等。

间接测量比直接测量复杂费时,一般只在直接测量很不方便,误差较大或缺乏直接测量的仪器等情况下才采用。间接测量还适用于某种特定条件下的测量,如可测试带电情况下的电阻值。

## 3. 组合测量

应用仪表测量时,如有若干个待求量,把这些待求量用不同方式组合(或改变测量条件来获得这种不同组合)进行测量(直接或间接),并把测量值与待求量之间的函数关系列成方程组,通过求解方程组(方程式的数量应大于待求量的个数),得到各待求量数值的方法叫组合测量或联立测量。

例如对标准线绕电阻温度系数的测量一般采用组合测量方法。已知线绕电阻阻值  $R_t$  与温度  $t$  之间的关系式为:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (1-1)$$

式(1-1)中,  $\alpha$ 、 $\beta$  为电阻线圈的电阻温度系数,  $R_{20}$  为电阻线圈在  $20^\circ\text{C}$  时的电阻值。如要测出待测量  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R_{20}$ , 则需测出三组数据(三种温度  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  条件下的对应的阻值  $R_{t1}$ 、 $R_{t2}$ 、 $R_{t3}$ ), 根据上式列出三个方程,解出联立方程组,即可得到  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R_{20}$ 。

组合测量的测量过程比较复杂,费时费力,是一种特殊的测量方法,一般用在不能单独进行直接测量或间接测量的场合。

### 1.2.2 测量误差基本知识

测量过程中,由于测量仪器、测量对象、测量方法、测量环境及测量者本身等因素的变化及影响,使测量结果往往并不能准确地反映被测对象的本来面貌,即测量误差不可避免地存在于每一次测量中。

#### 1. 测量误差的主要术语

##### (1) 真值

真值是指在一定的时间和空间条件下,某物理量客观体现的真实数据。真值是客观存在但不可测量的。测量结果只能无限接近真值,但不能完全到达。

实际的计量和测量中,常用“约定真值”和“相对真值”表示相关概念。“约定真值”是指按照国际公用的单位定义,由国家设立各种体现最高科技水平的、尽可能维持不变的单位实物标准(或基准),以法令的形式指定其所体现的量值作为计量单位的约定值。如水的沸点为  $100^\circ\text{C}$ 。“相对真值”也称为实际值,是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值。

##### (2) 标称值

标称值是指计量或测量器具上标注的量值。如标准砝码上标出的重量。标称值不一定



等于它的实际值,故在给出标称值的同时应给出它的误差范围或精度等级。

### (3) 示值

由测量器具指示或提供的被测量的值称为测量器具的指示值,简称示值。

### (4) 测量结果

由测量所得的测量值称为测量结果。在测量结果的表述中,还应包括测量不确定度和有关影响量的值。注意示值与测量结果的概念有所不同。

## 2. 测量误差的分类

测量误差一般分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

### (1) 系统误差

在同一条件下,多次重复测量同一物理量时,误差的绝对值和符号都保持不变,或在测量条件改变时按一定规律变化的误差,称为系统误差。系统误差反映了测量值偏离真值的程度。

造成系统误差的原因有两个方面:① 测量仪表本身的误差;② 测量方法的误差。

按照其误差性质,系统误差可分为恒值系统误差和变值系统误差。其中恒值系统误差因为其误差大小和方向保持不变,在误差处理中可进行修正;变值系统误差因为其误差大小和方向会发生变化,所以不容易确定,在误差估计时将其归结为系统不确定度。

系统误差的消除途径主要有两种:① 从产生系统误差的来源上考虑;② 利用特殊的测量方法消除系统误差,如交换法、代替法、对称测量法与补偿法等。

### (2) 随机误差

在相同条件下多次重复测量同一量时,误差的大小和符号受偶然因素的影响均发生变化,而且没有一定规律的误差,称为随机误差。它反映了测量值离散性的大小。

随机误差是测量过程中许多独立的、微小的、偶然的因素引起的综合结果。造成随机误差的原因与系统误差相同,但不同的是产生随机误差的因素都是互不相关、彼此独立的。例如温度变化、电磁场的微变、空气扰动甚至测试人员的感官变化等都能引起随机误差。

随机误差不可能修正,但在了解其统计规律性之后,可以控制和减少它们对测量结果的影响。

### (3) 粗大误差

明显扭曲了测量结果的异常误差称为粗大误差。粗大误差主要是由于某种不正常的原因造成的,在数据处理时,应该从测量数据中剔除含有粗大误差的数据。

在实际测量中,三种误差同时存在,但各自对测量的影响不尽相同,不可混淆。

## 3. 测量误差的表示

测量误差一般有三种表示方法。

### (1) 绝对误差

由测量所得到的被测量的值  $A_x$  与其真值  $A_0$  之差,称为绝对误差,即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-2)$$

绝对误差是有大小、正负及量纲的物理量。



式(1-2)中的真值  $A_0$  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  $A$  (也称为约定真值)来代替真值  $A_0$ 。因而绝对误差更有实际意义的定义写为:

$$\Delta = A_x - A \quad (1-3)$$

绝对误差表明了被测量的测量值与实际值的偏离程度和方向。

## (2) 相对误差

被测量的绝对误差  $\Delta$  与其真值  $A_0$  比值的百分比称为相对误差,即

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

在实际测量中,通常用被测量的实际值  $A$  来代替真值  $A_0$ ,因而实际相对误差的计算式又可以表示为

$$\delta_A = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

相对误差只有大小,没有单位。

由于相对误差给出了测量误差的清晰概念,便于对不同测量结果的误差进行比较,所以是误差计算中最常用的一种表示方法。

## (3) 引用误差

测量的绝对误差  $\Delta$  与仪表测量范围上限  $A_m$  比值的百分比称为引用误差,也称满度相对误差,即

$$\delta_F = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

引用误差是为评价测量仪表精确度等级而引入的,用以客观公正地反映测量仪表的精确度高低。

实际测量中,由于各电工仪表各指示(刻度)值在大小、正负上常存在差异,故用仪表的最大绝对误差  $\Delta_m$  与仪表测量范围上限  $A_m$  比值的百分比(称为最大引用误差)来评价仪表性能,即仪表的准确度等级  $K$ ,即

$$\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

最大引用误差越小,则仪表的准确度越高。电工指示仪表的准确度等级一般分为七级,它们所表示的基本误差见表 1-1。

表 1-1 仪表的基本误差

| 准确度等级  | 0.1       | 0.2       | 0.5       | 1.0       | 1.5       | 2.5       | 5.0       |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 基本误差/% | $\pm 0.1$ | $\pm 0.2$ | $\pm 0.5$ | $\pm 1.0$ | $\pm 1.5$ | $\pm 2.5$ | $\pm 5.0$ |

各仪表在正常工作条件下使用时,它的基本误差都不应超过表 1-1 中的规定。



综上所述,电工仪表在测量中可能产生的最大绝对误差为:

$$\Delta_m = A_m K \% \quad (1-8)$$

最大相对误差为:

$$\delta_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100 \% \quad (1-9)$$

#### 4. 减少测量误差的方法

减少测量误差必须从测量方案的选择、测量仪表的选择与各种不同测量误差的减少和消除三方面讨论。

##### (1) 测量方案的选择

根据测试对象的特点和测试环境指标,把握整体测试要求,选择合适的测量方案,减少中间环节引起的传递误差,采用必要的隔离或屏蔽措施等,都可以减少测量误差。

##### (2) 测量仪表的选择

在实际测量中,测量仪表的选择和使用是否得当,直接关系到测量结果的可靠性。因此,我们在选择和使用仪表时,必须注意以下几点:

###### ① 要考虑测量仪表工作条件

在选择仪表时,一定要避免片面追求“准确度越高越好”。因为仪表的准确度越高,对工作条件的要求也越苛刻,一旦测试环境不符合要求,引起的附加误差将会超出仪表的准确度等级,测量结果反而不准确。

###### ② 要正确选择测量仪表的量程范围

在选用仪表时,应当根据测量值来选择仪表的量程。尽量使测量的示值在仪表量程的2/3以上的一段。

###### ③ 要正确使用测量仪表

在实际测量时,要注意正确使用和操作测量仪表,减少由于使用或操作不当引起的误差,如测量前的校正等。

###### ④ 要注意测量仪表的校验和维护

测量仪表经长期工作后,其准确度会发生变化,因此,要根据计量部门的规定,定期对测量仪表进行校验和维修,以保证其正常使用。

##### (3) 各种不同测量误差的减少和消除

###### ① 系统误差的减少和消除

系统误差的减少和消除方法有:从产生误差根源上消除;用修正方法消除恒值系统误差;采用一些专门的测量技术和测量方法。典型测量方法有以下几种:替代法消除恒值系统误差;交换法消除恒值系统误差;对称测量法(交叉读数法)消除线性系统误差;半周期测量法消除周期性系统误差。

###### ② 随机误差的减少和消除

随机误差是一种大小和符号都不确定的误差。这种误差主要是由于周围环境的偶发原因引起的。随机误差不可能在一次测量中加以消除,必须用多次测量求平均值来减少或消





除。测量次数越多,测量结果的算术平均值越接近于实际值,随机误差就越小。

### ③ 粗大误差的消除

粗大误差一种严重歪曲测量结果的误差,它是由于测量者在测量过程中的粗心和疏忽造成的。如读数错误或记录错误等。这样的测量结果是不可取的。消除粗大误差的根本方法是加强测试人员的责任感,倡导认真负责和一丝不苟的工作精神。对由于疏失获取的测量结果,必须一律剔除。

## 1.2.3 测量数据的合成处理

### 1. 测量数据读取

#### (1) 近似数及舍入规则

在电子测量中,多次测量的测量结果,都是近似值,存在误差,因为它只接近实际值而不等于实际值。所以,在计算和表示中,存在近似值的舍入问题。

测量中的舍入规则如下:若保留  $N$  位有效数字,则  $N$  位以后的数字,若大于保留数字末位单位的一半,则舍去的同时第  $N$  位加 1;若小于保留数字末位单位的一半,则舍去的同时第  $N$  位不变;若等于保留数字末位单位的一半,如第  $N$  位原为奇数则加 1 变为偶数,原为偶数则不变。上述规则可归纳为“四舍六入五取偶”。

之所以采用取偶法则,首先是因为偶数常能被除尽,可以减少测量计算上的误差,其次由于按此法舍入时,当被加数的个数很多时,正负舍入误差出现的机会相等,所以在总和中,舍入误差将被抵消。

例如,将下列数据舍入到小数第二位。

|               |                |                |
|---------------|----------------|----------------|
| 12.4344→12.43 | 63.73501→63.74 | 0.69499→0.69   |
| 25.3250→25.32 | 17.6955→17.70  | 123.115→123.12 |

由上可知,每个数据经过舍入后除末位数外均可靠,末位数误差不大于 0.5(以舍入后数字的末位为单位),此 0.5 即为舍入误差的极限误差。

#### (2) 测量数据近似运算规则

测量数据近似计算后所需保留的位数原则上取决于各数中准确度最差的那一项。

① 加减规则:以小数点后位数最少的为准(各项无小数点则以有效位数最少者为准),其余各数可多取一位。例如 12.1、0.066 和 2.357 三个数相加时,计算结果只能保留小数点后一位(与小数点后位数最少的数 12.1 位数相同),即应写为  $12.1 + 0.07 + 2.36 = 14.4$ 。在计算过程中,小数点后位数较多的 0.066 和 2.357 两个数被化整后保留的小数点后面的位数,应比小数点后位数最少的数 12.1 多保留一位小数,以减少计算误差。保留过多位数并无意义。

② 乘除规则:以有效数字位数最少的数为准,其余参与运算的数字及结果中的有效数字位数与之相等或多保留一位有效数字。如 12.5 和 0.065 两个数相乘时,应以 0.065 为标准来进行化整,即  $0.065 \times 12.5 = 0.81$ 。化整更多的位数没有必要,而且容易引起误解(精度较高)。

还要注意,当近似数的第一位是 8 或 9 时,由于计算结果很可能会产生进位,所以有效数字位数应当多计一位。例如 23.5 和 96 相乘时,23.5 不应再化整。