

高等职业教育电子信息类贯通制教材

电子技术专业

# 电子测量与仪器 (第2版)

● 宋悦孝 主编 张伟 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会  
电子工程类专业教学指导分委员会

# 电子测量与仪器

## (第2版)

王长坤 主编 陈 伟 副主编



清华大学出版社

高等职业教育电子信息类贯通制教材（电子技术专业）

# 电子测量与仪器

## （第2版）

宋悦孝 主编  
张 伟 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书可作为高职、高专院校或中等职业学校电子类、电气类、自动化类、机电类和其他相近专业的教材。本书分为9章,第1章主要介绍电子测量方法、电子测量仪器的分类与发展,电子测量数据处理与测量结果的表示;第2章主要介绍常用信号发生器的工作原理、技术指标与应用;第3~8章主要介绍电压、频率、时间、相位、电子器件参数、频域信号、数据域信号等的测量方法,以及测试仪表的工作原理、技术指标与应用;第9章主要介绍独立智能仪器的基本组成、典型处理功能与应用,以及自动测试系统、个人仪器、虚拟仪器的基本组成等。

本书还配有教学指南、电子教案及习题答案(电子版),以方便教学使用,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子测量与仪器 / 宋悦孝主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2009.2

高等职业教育电子信息类贯通制教材·电子技术专业

ISBN 978-7-121-06918-5

I. 电… II. 宋… III. ①电子测量—高等学校: 技术学校—教材 ②电子测量设备—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 088037 号

策划编辑: 李光昊

责任编辑: 李光昊

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 15.75 字数: 400 千字

印 次: 2009 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 23.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。



本书是在第1版的基础上,根据目前职业教育的特点,从电子测量与仪器的实际应用出发,通过对内容的总结提高、修改增删而成的,使本书内容更加合理实用、更加符合教学规律、更加突出职教特色。主要做了如下几方面的修订。

(1) 从本课程的教学目的和任务出发,对内容精心提炼,删除了电子测量特点介绍等内容,增加了AT6011型频谱仪实例、示波器双扫描显示等内容。

(2) 根据目前职业教育的特点,对内容进行了更加合理的编排,例如第1章,使之更加符合教学规律。

(3) 从职业学校人才培养目标出发,增加了电子测量术语实际称呼说明,使内容更加贴近生产实践,避免引起概念混淆,例如,增加了对示波器V/DIV称呼等的说明。

(4) 为了方便教学,增加了参考实验与课程设计,更有利于组织教学与自学。

(5) 为了增强学生岗位竞争力,提高工作适应能力,对教材中引用的英文缩写均给出英文全称。

参加本书修订的有宋悦孝(第1、3、4章)、韩敬东(第2、5章)、李耀明(第8、9章)、陈兆梅(第6章、附录)、张文(第7章)。本书由宋悦孝担任主编,由张伟教授主审。在修订过程中得到了李克教授和部分生产厂家的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

在本书第1版使用期间,不少兄弟院校师生提出了许多宝贵意见和建议,在此深表谢意!

为了方便教师教学,本书还配有教学指南、电子教案及习题答案(电子版),请有此需要的教师登录华信教育资源网(<http://www.huaxin.edu.cn> 或 <http://www.hxedu.com.cn>)免费注册后再进行下载,如有问题,请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系(E-mail:hxedu@phei.com.cn)。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在错误或不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者



|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 电子测量与仪器的基础知识 .....</b> | <b>1</b>  |
| 1.1 电子测量概述 .....                | 1         |
| 1.1.1 电子测量的意义及内容 .....          | 1         |
| 1.1.2 电子测量方法 .....              | 2         |
| 1.2 测量误差的基本概念 .....             | 3         |
| 1.2.1 测量误差的表示方法 .....           | 3         |
| 1.2.2 测量误差的来源 .....             | 5         |
| 1.2.3 测量误差的分类 .....             | 6         |
| 1.3 电子测量仪器的基础知识 .....           | 8         |
| 1.3.1 电子测量仪器的发展 .....           | 8         |
| 1.3.2 电子测量仪器的分类 .....           | 9         |
| 1.3.3 电子测量仪器的主要技术指标 .....       | 10        |
| 1.3.4 电子测量仪器的误差 .....           | 11        |
| 1.4 测量结果的表示及测量数据的处理 .....       | 12        |
| 1.4.1 测量结果的表示 .....             | 12        |
| 1.4.2 有效数字的处理 .....             | 13        |
| 1.4.3 测量数据的处理 .....             | 15        |
| 本章小结 .....                      | 15        |
| 习题 1 .....                      | 16        |
| <b>第 2 章 测量用信号发生器 .....</b>     | <b>17</b> |
| 2.1 概述 .....                    | 17        |
| 2.1.1 信号发生器的分类 .....            | 17        |
| 2.1.2 信号发生器的主要性能指标 .....        | 18        |
| 2.1.3 信号发生器的一般组成 .....          | 19        |
| 2.2 正弦信号发生器 .....               | 20        |
| 2.2.1 低频信号发生器 .....             | 20        |
| 2.2.2 高频信号发生器 .....             | 24        |
| 2.2.3 合成信号发生器 .....             | 27        |
| 2.3 函数信号发生器 .....               | 29        |
| 2.3.1 工作原理及结构 .....             | 29        |

|              |                         |           |
|--------------|-------------------------|-----------|
| 2.3.2        | AS101D 型函数信号发生器简介 ..... | 31        |
| 2.4          | 脉冲信号发生器 .....           | 33        |
| 2.4.1        | 分类 .....                | 34        |
| 2.4.2        | 工作原理与主要性能指标 .....       | 34        |
| 2.4.3        | 脉冲信号发生器的使用 .....        | 35        |
|              | 本章小结 .....              | 37        |
|              | 习题 2 .....              | 37        |
| <b>第 3 章</b> | <b>电压测量与电压表 .....</b>   | <b>38</b> |
| 3.1          | 概述 .....                | 38        |
| 3.1.1        | 电压测量的基本要求 .....         | 38        |
| 3.1.2        | 交流电压的表征 .....           | 39        |
| 3.1.3        | 电子电压表的分类 .....          | 41        |
| 3.2          | 直流电流、直流电压的测量 .....      | 43        |
| 3.2.1        | 直流电流的测量 .....           | 43        |
| 3.2.2        | 直流电压的测量 .....           | 44        |
| 3.3          | 模拟式交流电压表 .....          | 44        |
| 3.3.1        | 均值电压表 .....             | 45        |
| 3.3.2        | 峰值电压表 .....             | 47        |
| 3.3.3        | 有效值电压表 .....            | 51        |
| 3.3.4        | 模拟式电压表实例 .....          | 52        |
| 3.3.5        | 使用方法及注意事项 .....         | 53        |
| 3.4          | 数字电压表 .....             | 54        |
| 3.4.1        | 主要性能指标 .....            | 54        |
| 3.4.2        | A/D 变换器 .....           | 57        |
| 3.4.3        | 直流数字电压表实例 .....         | 62        |
|              | 本章小结 .....              | 63        |
|              | 习题 3 .....              | 64        |
| <b>第 4 章</b> | <b>波形测试与仪器 .....</b>    | <b>65</b> |
| 4.1          | 概述 .....                | 65        |
| 4.2          | 波形测试的基本原理 .....         | 66        |
| 4.2.1        | 阴极射线示波管 .....           | 66        |
| 4.2.2        | 波形显示原理 .....            | 67        |
| 4.3          | 通用示波器的基本组成及性能指标 .....   | 69        |
| 4.3.1        | 基本组成 .....              | 69        |
| 4.3.2        | 主要性能指标 .....            | 70        |
| 4.4          | 通用示波器 Y 通道（垂直系统） .....  | 72        |
| 4.4.1        | 输入电路 .....              | 72        |
| 4.4.2        | 前置放大器 .....             | 74        |
| 4.4.3        | 延迟级 .....               | 74        |

|              |                        |            |
|--------------|------------------------|------------|
| 4.4.4        | 输出放大器 .....            | 76         |
| 4.5          | 通用示波器 X 通道（水平系统） ..... | 76         |
| 4.5.1        | 触发电路 .....             | 76         |
| 4.5.2        | 扫描电路 .....             | 78         |
| 4.5.3        | X 放大器 .....            | 81         |
| 4.6          | 示波器的多波形显示 .....        | 81         |
| 4.6.1        | 双踪显示 .....             | 82         |
| 4.6.2        | 双扫描显示 .....            | 83         |
| 4.7          | 示波器的选择使用 .....         | 85         |
| 4.7.1        | 示波器的选用 .....           | 85         |
| 4.7.2        | 示波器的正确使用 .....         | 86         |
| 4.8          | 示波器的应用 .....           | 90         |
| 4.8.1        | 测量电压 .....             | 90         |
| 4.8.2        | 测量时间 .....             | 92         |
| 4.8.3        | 测量相位差 .....            | 93         |
| 4.8.4        | 测量频率 .....             | 94         |
| 4.8.5        | 测量调幅系数 .....           | 95         |
| 4.9          | 取样示波器 .....            | 97         |
| 4.9.1        | 工作原理 .....             | 97         |
| 4.9.2        | 组成 .....               | 98         |
| 4.9.3        | 主要性能指标 .....           | 99         |
| 4.10         | 数字存储示波器 .....          | 100        |
| 4.10.1       | 工作原理 .....             | 100        |
| 4.10.2       | 工作方式 .....             | 101        |
| 4.10.3       | 显示方式 .....             | 102        |
| 本章小结         | .....                  | 103        |
| 习题 4         | .....                  | 104        |
| <b>第 5 章</b> | <b>频域测量与仪器 .....</b>   | <b>106</b> |
| 5.1          | 扫频仪的工作原理与主要性能指标 .....  | 106        |
| 5.1.1        | 频率特性测量方法 .....         | 106        |
| 5.1.2        | 扫频仪工作原理 .....          | 106        |
| 5.1.3        | 产生扫频信号的方法 .....        | 107        |
| 5.1.4        | 频标产生电路 .....           | 108        |
| 5.1.5        | 扫频仪的主要性能指标 .....       | 109        |
| 5.2          | AH1254B 型宽频带扫频仪 .....  | 110        |
| 5.2.1        | 性能指标 .....             | 110        |
| 5.2.2        | 工作原理 .....             | 110        |
| 5.2.3        | 面板结构图 .....            | 111        |
| 5.2.4        | 扫频仪的检查、校正及使用 .....     | 113        |

|              |                         |            |
|--------------|-------------------------|------------|
| 5.2.5        | 扫频仪的应用 .....            | 114        |
| 5.2.6        | 高频阻抗的测量 .....           | 116        |
| 5.3          | 频谱仪 .....               | 117        |
| 5.3.1        | 工作原理 .....              | 117        |
| 5.3.2        | 组成实例 .....              | 119        |
| 5.3.3        | 主要性能指标解析 .....          | 119        |
| 5.4          | 频谱仪的使用 .....            | 120        |
| 5.4.1        | 使用注意事项 .....            | 120        |
| 5.4.2        | 频谱仪的操作与使用 .....         | 121        |
| 5.4.3        | 频谱仪的应用 .....            | 124        |
|              | 本章小结 .....              | 125        |
|              | 习题 5 .....              | 126        |
| <b>第 6 章</b> | <b>电子元器件测量与仪器 .....</b> | <b>127</b> |
| 6.1          | 概述 .....                | 127        |
| 6.2          | 伏安法及数字化测量 .....         | 128        |
| 6.2.1        | 伏安法 .....               | 128        |
| 6.2.2        | 阻抗的数字化测量 .....          | 129        |
| 6.3          | 电桥法测量集中参数元件 .....       | 131        |
| 6.3.1        | 交流电桥 .....              | 131        |
| 6.3.2        | 不平衡电桥 .....             | 136        |
| 6.4          | 谐振法测量集中参数元件 .....       | 137        |
| 6.4.1        | Q 表的组成及工作原理 .....       | 137        |
| 6.4.2        | 测量电感 .....              | 138        |
| 6.4.3        | 测量电容 .....              | 139        |
| 6.4.4        | Q 表实例及使用方法 .....        | 140        |
| 6.5          | 晶体管特性图示仪及应用 .....       | 141        |
| 6.5.1        | 晶体管特性图示仪的组成 .....       | 142        |
| 6.5.2        | 阶梯波信号源 .....            | 144        |
| 6.5.3        | 晶体管特性图示仪的使用 .....       | 145        |
| 6.5.4        | 晶体管特性图示仪特性曲线测试举例 .....  | 148        |
|              | 本章小结 .....              | 150        |
|              | 习题 6 .....              | 150        |
| <b>第 7 章</b> | <b>频率和时间测量与仪器 .....</b> | <b>152</b> |
| 7.1          | 概述 .....                | 152        |
| 7.1.1        | 无源测频法 .....             | 152        |
| 7.1.2        | 比较测频法 .....             | 154        |
| 7.2          | 电子计数器概述 .....           | 155        |
| 7.2.1        | 分类 .....                | 155        |
| 7.2.2        | 基本组成 .....              | 156        |

|              |                       |            |
|--------------|-----------------------|------------|
| 7.2.3        | 主要性能指标 .....          | 157        |
| 7.3          | 通用电子计数器的测量功能 .....    | 158        |
| 7.3.1        | 测量频率 .....            | 158        |
| 7.3.2        | 测量周期 .....            | 159        |
| 7.3.3        | 测量频率比 .....           | 159        |
| 7.3.4        | 测量累加计数 .....          | 160        |
| 7.3.5        | 测量时间间隔 .....          | 160        |
| 7.3.6        | 自检(自校) .....          | 161        |
| 7.4          | 电子计数器的测量误差 .....      | 162        |
| 7.4.1        | 测量误差的来源 .....         | 162        |
| 7.4.2        | 测量误差的分析 .....         | 164        |
| 7.4.3        | 频率扩展技术 .....          | 164        |
| 7.5          | 通用计数器实例 .....         | 165        |
| 7.5.1        | 性能指标 .....            | 165        |
| 7.5.2        | 工作原理 .....            | 166        |
| 7.5.3        | 电子计数器的使用及注意事项 .....   | 167        |
| 7.6          | 数字相位计 .....           | 167        |
| 7.6.1        | 瞬时值数字相位计 .....        | 168        |
| 7.6.2        | 平均值数字相位计 .....        | 169        |
|              | 本章小结 .....            | 170        |
|              | 习题 7 .....            | 170        |
| <b>第 8 章</b> | <b>数据域测量与仪器 .....</b> | <b>172</b> |
| 8.1          | 数据域测量的基本概念 .....      | 172        |
| 8.1.1        | 数据域测量的特点 .....        | 172        |
| 8.1.2        | 数字信号与数字系统的特点 .....    | 172        |
| 8.1.3        | 数据域测试仪器设备 .....       | 173        |
| 8.1.4        | 逻辑笔和逻辑夹 .....         | 174        |
| 8.2          | 数据域测试技术 .....         | 175        |
| 8.2.1        | 数字电路的简易测试 .....       | 175        |
| 8.2.2        | 数据域测试方法 .....         | 175        |
| 8.2.3        | 故障类型、故障测试及故障定位 .....  | 176        |
| 8.3          | 逻辑分析仪 .....           | 177        |
| 8.3.1        | 逻辑分析仪的分类 .....        | 177        |
| 8.3.2        | 逻辑分析仪的组成 .....        | 177        |
| 8.3.3        | 逻辑分析仪的触发方式 .....      | 178        |
| 8.3.4        | 逻辑分析仪的显示方式 .....      | 180        |
| 8.3.5        | 逻辑分析仪的主要性能指标与应用 ..... | 183        |
|              | 本章小结 .....            | 186        |
|              | 习题 8 .....            | 187        |

第 9 章 智能测试仪器与系统 ..... 188

9.1 智能仪器概述 ..... 188

9.1.1 智能仪器的组成 ..... 188

9.1.2 GPIB 接口 ..... 189

9.1.3 智能仪器的特点 ..... 191

9.2 智能仪器的典型处理功能 ..... 192

9.2.1 硬件故障的自检功能 ..... 192

9.2.2 自动测量功能 ..... 192

9.3 智能仪器实例——智能化 DVM 简介 ..... 194

9.3.1 概述 ..... 194

9.3.2 典型智能 DVM 介绍 ..... 197

9.4 自动测试系统、个人仪器与虚拟仪器 ..... 203

9.4.1 自动测试系统 ..... 203

9.4.2 个人仪器及系统 ..... 204

9.4.3 虚拟仪器 ..... 206

本章小结 ..... 207

习题 9..... 208

附录 ..... 209

附录 A 实验指导书 ..... 209

附录 B 课程设计指导书——数字电压表课程设计 ..... 232

参考文献 ..... 239

# 第1章 电子测量与仪器的基础知识



**学习参考：**本章主要讲述电子测量与仪器的基本知识，要求通过本章的学习了解电子测量的方法、电子测量仪器的分类与主要性能指标、测量结果的表示、测量数据的处理，灵活掌握电子测量误差的表示方法及分类，掌握有效数字的处理。

**本章要点：**电子测量的方法，测量误差的表示方法与分类，有效数字的处理等。

## 1.1 电子测量概述

### 1.1.1 电子测量的意义及内容

#### 1. 电子测量的意义

测量的目的就是获得用数值和单位共同表示的被测量的结果，是人们借助于专门的设备，依据一定的理论，通过实验的方法将被测量与已知同类标准量进行比较而取得测量结果。被测量的结果必须是带有单位的有理数，例如某测量结果为  $9.3\text{V}$  是正确的，而测得的结果为  $9.3$  或  $9\frac{1}{3}\text{V}$  是错误的。

广义的电子测量是指利用电子技术进行的测量。狭义的电子测量是指对电子技术中各种电参量所进行的测量。

#### 2. 电子测量的内容

电子测量与其他测量相比，具有测量频率范围宽、量程广、精确度高、测量速度快、易于实现遥测遥控等优点。电子测量已被广泛应用于各个领域，大到天文观测、航空航天，小到物质结构、基本粒子，无不运用电子测量技术。狭义电子测量的内容主要包括如下几个方面。

##### (1) 能量的测量

能量的测量指的是对电流、电压、功率、电场强度等参量的测量。

##### (2) 电路参数的测量

电路参数的测量指的是对电阻、电感、电容、阻抗、品质因数等参量的测量。

##### (3) 信号特性的测量

信号特性的测量指的是对频率、周期、时间、相位、调制系数、失真度等参量的测量。

##### (4) 电子设备性能的测量

电子设备性能的测量指的是对通频带、选择性、放大倍数、衰减量、灵敏度、信噪比等参量的测量。



### (5) 特性曲线的测量

特性曲线的测量指的是对幅频特性、相频特性、器件特性等特性的测量。

上述各种参量中,频率、时间、电压、相位、阻抗等是基本参量,其他的为派生参量,基本参量的测量是派生参量测量的基础。电压测量则是最基本、最重要的测量内容。

非电量的测量属于广义电子测量的内容,可以通过传感器将非电量变换为电量后进行测量。本书主要讨论狭义电子测量内容。

## 1.1.2 电子测量方法

为了达到测量目的,正确选择测量方法是极其重要的,它直接关系到测量工作的正常进行和测量结果的有效性。测量方法的分类主要有以下几种方法。

### 1. 按照测量性质分类

按照测量性质分类,测量方法有时域测量、频域测量、数字域测量和随机量测量四种。

#### (1) 时域测量

时域测量是指测量与时间有函数关系的量。如电压、电流等,它们的稳态值和有效值一般可以用仪表直接测量,而瞬时值可用示波器通过显示的波形来观测。

#### (2) 频域测量

频域测量是指测量与频率有函数关系的量。如电路增益、相移等,可以通过分析电路的幅频和相频特性或频谱特性等进行测量。

#### (3) 数字域测量

数字域测量是指对数字逻辑量进行的测量。如用逻辑分析仪可以同时观测许多单次并行数据。对于计算机的地址线、数据线上的信号,既可显示其时序波形,也可用“1”或“0”显示其逻辑状态。

#### (4) 随机量测量

随机量测量主要是指对各种噪声、干扰信号等随机量的测量。

### 2. 按照测量手段分类

按照测量手段分类,测量方法有直接测量、间接测量、组合测量等方法,间接测量与组合测量同属于非直接测量方法。

#### (1) 直接测量

直接测量是指借助于测量仪器等设备可以直接获得测量结果的测量方法,例如用电压表测电压等。

#### (2) 间接测量

间接测量是指对几个与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量,然后通过公式计算或查表等求出被测量的测量方法。伏安法测量电阻 $R$ 的方法即属于间接测量法,它是先测出流过电阻的电流 $I$ 及电阻两端的电压 $U$ 后,再利用公式 $R=U/I$ 来测量电阻值 $R$ 的。

#### (3) 组合测量

组合测量是建立在直接测量和间接测量基础上的测量方法。当无法通过直接测量或间接测量得出被测量的结果时,需要改变测量条件进行多次测量,然后按照被测量与有关未知量间的函数关系组成联立方程组,求解方程组得出有关未知量,最后将未知量代入函数式而得



出测量结果。例如,测量在任意环境温度  $t^{\circ}\text{C}$  时某电阻的阻值,已知任意温度下电阻阻值的计算式为:

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

式中,  $R_t$ 、 $R_{20}$  分别为环境温度为  $t^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻值;  $\alpha$ 、 $\beta$  为电阻温度系数,  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $R_{20}$  均为不受温度影响的未知量。

显然,可以利用直接测量或间接测量的方法测出某温度下电阻的阻值,而以直接测量或间接测量法测出任意温度下电阻阻值是不现实的。如果改变测试温度,分别测出三种不同温度下的电阻值,代入上述公式,求解由此得到的联立方程组得出未知量  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R_{20}$  后,代入上式即可得出任意温度下电阻的阻值。

电子测量的方法还有很多,如人工测量和自动测量;动态测量和静态测量;精密测量和工程测量;低频测量、高频测量和超高频测量等。

测量时应应对被测量的物理特性、测量允许时间、测量精度要求以及经费情况等方面进行综合考虑,结合现有的仪器、设备条件,择优选取合适的测量方法。

## 1.2 测量误差的基本概念

测量的目的是得到被测量的真实结果,即真值。但由于人们对客观规律认识的局限性,不可能得到被测量的真值。测量值与被测量真值之间的差异称为测量误差。

### 1.2.1 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有三种:绝对误差、相对误差和允许误差。

#### 1. 绝对误差

##### (1) 定义

被测量的测量值  $x$  与真值  $A_0$  之差称为绝对误差,用  $\Delta x$  表示,即

$$\Delta x = x - A_0$$

式中,  $x$  为被测量的给出值、示值或测量值,习惯上统称为示值,  $A_0$  为被测量的真值。

注意,示值和仪器的读数是有区别的,读数是从仪器刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数据,而示值则是由仪器刻度盘、显示器上的读数经换算而得到的。

真值  $A_0$  是一个理想的概念,实际上是不可能得到的,通常用高一级标准仪器所测得的测量值  $A$  来代替,称之为被测量的实际值。绝对误差的计算式为

$$\Delta x = x - A$$

绝对误差的正负号表示测量值偏离实际值的方向,即偏大或偏小。绝对误差的大小则反映出测量值偏离实际值的程度。

##### (2) 修正值

与绝对误差大小相等、符号相反的量值称为修正值,用  $C$  表示,即

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

修正值通常是在用高一级标准仪器对测量仪器校准时给出的。当得到测量值  $x$  后,要对测量值  $x$  进行修正以得到被测量的实际值,即

$$A = C + \Delta x$$



修正值有时给出的方式不一定是具体数值,也可能是一条曲线或一张表格,和绝对误差一样都有大小、符号及量纲。

## 2. 相对误差

虽然绝对误差可以说明测量结果偏离实际值的情况,但不能确切反映测量结果偏离实际值的程度,为了克服绝对误差的这一不足,通常采用相对误差的形式来表示。

相对误差包括实际相对误差、示值相对误差和满度相对误差。

### (1) 实际相对误差

绝对误差 $\Delta x$ 与实际值 $A$ 之比,称为实际相对误差,用 $\gamma_A$ 表示为

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

### (2) 示值相对误差

绝对误差 $\Delta x$ 与测量值 $x$ 之比,称为示值相对误差,用 $\gamma_x$ 表示为

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

### (3) 满度相对误差

绝对误差 $\Delta x$ 与仪器满度值 $x_m$ 之比,称为满度相对误差或引用相对误差,简称为满度误差或引用误差,用 $\gamma_m$ 表示。它是为了描述电工仪表的准确度等级而引入的相对误差,计算式为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-1)$$

指针式电工仪表的准确度等级通常分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0共七级,分别表示仪表满度相对误差所不超过的百分比。如某型万用表面板上的“~5.0”,表示该型万用表测量交流量时的满度相对误差为 $\pm 5.0\%$ ,在无标准仪表比对的情况下,是不可能确定测量值偏离方向的,所以应带有“ $\pm$ ”号。

由式(1-1)计算出的绝对误差是用该仪表测量时可能产生的最大误差 $\Delta x_m$ ,即

$$\Delta x_m = x_m \gamma_m$$

实际测量的绝对误差 $\Delta x$ 应满足

$$\begin{aligned} \Delta x &\leq \Delta x_m \\ \gamma_x &\leq \frac{\Delta x_m}{x} \end{aligned}$$

可见,对于同一仪表,所选量程不同,可能产生的最大绝对误差也不同。而对于同一量程,在无修正值可以利用的情况下,在不同示值处的绝对误差一般按最坏的情况处理,即认为仪器在同一量程各处的绝对误差是常数且等于 $\Delta x_m$ 。所以当仪表准确度等级选定后,一般情况下,测量值越接近满度值时,测量相对误差越小,测量越准确。

因此,在一般情况下,应尽量使指针处在仪表满度值的三分之二以上区域。但该结论只适用于正向线性刻度的一般电工仪表。对于万用表电阻挡等非线性刻度电工仪表,应尽量使指针处于满度值的1/2或1/2以下区域。

相对误差只有大小和符号,没有单位。

**【例 1-1】**已知用电压表校准万用表时测得的两个电压值分别是100V、50V,而用万用表测得的值分别是90V、40V,求两次测量的绝对误差、修正值、实际相对误差分别是多少?



解: 根据题意知,  $U_{A1}=100\text{V}$ ,  $U_{A2}=50\text{V}$ ,  $U_{x1}=90\text{V}$ ,  $U_{x2}=40\text{V}$ 。

第一次测量:  $\Delta U_1=90\text{V}-100\text{V}=-10\text{V}$

$$C_1=-\Delta U_1=10\text{V}$$

$$\gamma_{A1}=\Delta U_1/U_{A1}\times 100\%=-10\text{V}/100\text{V}\times 100\%=-10\%$$

第二次测量:  $\Delta U_2=40\text{V}-50\text{V}=-10\text{V}$

$$C_2=-\Delta U_2=10\text{V}$$

$$\gamma_{A2}=\Delta U_2/U_{A2}\times 100\%=-10\text{V}/50\text{V}\times 100\%=-20\%<\gamma_{A1}$$

由此可见, 第一次测量要比第二次测量准确。由于被测量的实际值是确定的, 所以绝对误差的计算式中只有“-”, 而无“±”。

【例 1-2】如果要测量一个 40V 左右的电压, 现有两块电压表, 其中一块量程为 50V、1.5 级, 另一块量程为 100V、1.0 级, 问应选用哪一块表测量比较合适?

解: 根据题意, 因为要测量的是同一个被测量, 故只要比较两块表测量时产生的绝对误差即可。

第一块电压表测量的绝对误差为

$$\Delta U_1\leq 50\text{V}\times(\pm 1.5\%)=\pm 0.75\text{V}$$

第二块电压表测量的绝对误差为

$$\Delta U_2\leq 100\text{V}\times(\pm 1.0\%)=\pm 1.0\text{V}>\Delta U_1$$

答: 应选用第一块电压表测量。

### 3. 允许误差

一般情况下, 线性刻度电工仪表的指示装置对它的测量结果影响比较大, 但因其指示装置构造的特殊性, 使得无论测量值是多大, 产生的误差总是比较均匀的, 所以线性刻度电工仪表的准确度通常用满度相对误差表示。而对于结构较复杂的电子测量仪器来说, 由某一部分产生极小的误差, 就有可能由于累积或放大等原因而产生很大的误差, 因此不能用满度相对误差而用允许误差来表示它的准确度等级。

允许误差又称为极限误差或仪器误差, 是人为规定的某类仪器测量时不能超过的测量误差的极限值, 可以用绝对误差、相对误差或二者的结合来表示。例如, 某一数字电压表基本量程的误差为  $\pm 0.006\% U_x \pm 0.0003\text{V}$ ,  $U_x$  为读数, 它是用绝对误差和相对误差的组合来表示的。

## 1.2.2 测量误差的来源

产生测量误差的原因是多方面的, 主要来源包括以下几类。

### (1) 仪器误差

仪器误差是由于仪器本身及其附件的电气和机械性能不完善而引起的误差。如由于仪器零点漂移、刻度非线性等引起的误差。

### (2) 使用误差

使用误差又称为操作误差, 是由于安装、调节、使用不当等原因引起的误差。如测量时由于阻抗不匹配等原因引起的误差。

### (3) 人身误差

人身误差是由于人为原因而引起的误差, 如读错数据等。



#### (4) 环境误差

环境误差又称为影响误差,是由于仪器受到外界的温度、湿度、气压、震动等影响而产生的误差。如数字电压表性能指标中常单独给出的温度影响误差。

#### (5) 方法误差

方法误差又称为理论误差,是由于测量时使用的方法不完善、所依据的理论不严格等原因引起的误差。例如,在图 1.1 中,由于电流表测得的电流还包括流过电压表内阻的电流,所以电阻的测量值要比电阻实际值小,由此产生的误差属于方法误差。

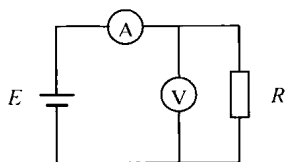


图 1.1 伏安法测量电阻

测量工作中,应对误差来源进行认真分析,采取相应的措施减小误差源对测量结果的影响,提高测量准确度。

### 1.2.3 测量误差的分类

根据测量误差的性质和特点,测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

#### 1. 系统误差

##### (1) 定义

在规定的测量条件下,对同一量进行多次测量时,如果测量误差能够保持恒定或按照某种规律变化,则这种误差称为系统误差或确定性误差,简称为系差。如电表零点不准,温度、湿度、电源电压变化等引起的误差。

##### (2) 分类与判断

系统误差根据其性质特征的不同分为恒定系统误差和变值系统误差。

① 恒定系统误差简称为恒定系差,误差的大小及符号在整个测量过程中始终保持恒定不变。

② 变值系统误差简称为变值系差,误差的大小及符号在测量过程中会随测试的某个或几个因素按照累进性规律、周期性规律或某一复杂规律等确定的函数规律变化。

具有累进性规律的变值系差称为累进性系差,

图 1.2 (a) 和图 1.2 (b) 所示的累进性系差分别具有线性递增和线性递减的规律, $\Delta u_i$  为每次测量的误差, $i$  为测量次数。

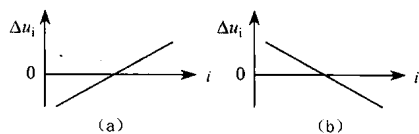


图 1.2 累进性系差

具有周期性规律的变值系差称为周期性系差。

按照某一复杂规律变化的变值系差称为按复杂规律变化的系差。

系统误差的发现和判断除了可以用理论分析法、校准和比对法、改变测量条件法、公式判断法外,比较简单的是剩余误差观察法。

剩余误差  $v_i$  是单次测量值与多个测量值的算术平均值的差,即  $\Delta x_i$ ,具体内容参见 1.4.3。剩余误差观察法根据剩余误差大小、符号的变化规律,来判断有无系差和系差类型,如图 1.3 所示。图 1.3 (a) 表明剩余误差大致上正负相同,无明显变化规律,可以认为不存在系差;图 1.3 (b) 说明剩余误差呈现线性递增的规律,可以认为存在累进性系差;图 1.3 (c) 表明剩余误差大小、符号呈现周期性变化,可以认为存在周期性系差。