



高等学校试用教材

# 电 测 试 技 术

上海铁道学院 吴家麟 主编

中国铁道出版社

高等学校试用教材

# 电 测 试 技 术

上海铁道学院 吴家麟 主编

西南交通大学 秦世荣 主审

中 国 铁 道 出 版 社

1994年·北京

(京)新登字 063 号

### 内 容 简 介

本书主要介绍误差理论与数据处理、常用电测量指示仪表、波形测试技术、电压及电能的测量、电路参数的测量、时间与频率和相位的测量、非电量的测试技术、信号的频域测量、数据域测试、电测技术中的抗干扰和微机在测试技术中的应用。

本书是高等院校电气类、自动化类专业的测量课教材,也可供其它工程技术人员参考。

高等学校试用教材

### 电测试技术

上海铁道学院 吴家麟 主编

西南交通大学 秦世荣 主审

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 方军 封面设计 陈东山

中国铁道出版社印刷厂印

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:17.75 字数:442 千

1994 年 9 月 第 4 版 第 1 次印刷  
印数:1—2000 册

ISBN7-113-01728-2/TP·175 定价:10.20 元 3.00 元

## 前 言

随着科学技术和生产的发展,对测试技术提出了越来越高的要求。科学研究的成果,必须通过测量手段来验证;工业生产过程和产品质量的控制需要有一定的测量手段进行监视和检查。这里的测量手段包括测量方法和测量仪器、仪表等。这就是说,现代化的仪器、仪表和先进的测量方法是科学实验和生产实践的必要手段,其水平的高低是科学技术水平的重要标志。在大工业生产中,花在测量方面的工时与费用约占总工时与费用的  $1/4 \sim 1/3$ 。由于科学技术和生产的发展,特别是电子技术和计算机技术渗透到测试技术,给测试技术带来了革命性的变化,使被测对象,测量仪器、仪表,测量方法乃至测量原理等方面都与传统的测试技术发生很大变化;使测量的准确度、灵敏度和测量速度大大提高,并实现了连续的、自动的测量。同时,国民经济各个部门、科学技术各个领域不断提出新的要求,就以测量来说,已从时域测量发展到频域测量。计算机技术的发展要求进行数据域测量,而以测量方法来说,已从人工测量发展到自动测试。显然,这就要求各类科技人员对测试技术方面的知识要不断更新提高。

目前,国内供高等院校电气类、自动化类专业使用的测量课教材,以传统电气测量内容为主,因此不能适应科学技术和生产发展的需要。本教材试图兼顾电气测量、电子测量和自动测试等诸方面的内容,对传统的电气测量内容作了大量压缩,用较大篇幅介绍数字化测量技术、微机化仪器,还介绍了在电气技术和自动化技术中常用的非电量测试技术。

本书从应用技术观点出发,主要阐述测量原理、测量方法、测量仪器和数据处理。共包括四方面内容:一、误差理论及数据处理(第二章);二、常用电测量指示仪表(第三章);三、各种测试技术(第四、五、六、七、八、九、十、十一章);四、测试技术中的抗干扰(第十二章)。

本书是根据铁道部 1991~1995 年编审出版规划,由电力牵引与传动控制和铁道电气化专业教学指导委员会推荐出版的,供高等院校电气类和自动化类各专业作为测量课教材。本书的计划教学学时约需 102 学时,各校使用时,可根据教学对象和教学要求作适当删减。

学习本课程时,要求学生有数学、电路、模拟电子电路、数字电子电路、微机等方面的知识。通过本课程的学习,使学生能根据测试任务,选择适当的测量方法和仪器,正确地组成测试系统,并对测量结果作出正确评价。

本书由上海铁道学院吴家麟主编,西南交通大学秦世荣担任主审,参加编写的有吴家麟(第一、五、七、八、十一章)、任恒良(第二、九、十、十二章)和高庆(第三、四、六章)。

另外,上海铁道学院郑瞳炽教授在编写过程中给予了热情指导和帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中不足之处,希望广大读者批评指正。

编 者

1992. 12

## 本书主要符号说明

|           |                   |                   |              |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------|
| $A$       | 电场能量              | $T_r$             | 上升时间         |
| $A_0$     | 真值、放大器开环增益        | $T_s$             | 被测信号周期       |
| $B$       | 磁感应强度             | $U$               | 直流电压或交流电压有效值 |
| $C$       | 修正值、仪表常数          | $\bar{U}$         | 交流电压平均值      |
| $CMR$     | 共模抑制比             | $U_{cm}$          | 共模电压         |
| $D$       | 损耗因数              | $U_G$             | 地电位电压        |
| $D_f$     | 偏转灵敏度             | $U_R$             | 基准电压         |
| $f_B$     | 频带宽度              | $U_s(T)$          | 取样信号         |
| $f_c$     | 时钟脉冲频率            | $U_{\sim}$        | 交流分量有效值      |
| $f_{LF}$  | 滤波器中心频率           | $w$               | 线圈匝数         |
| $f_s$     | 取样速率              | $W$               | 电能           |
| $h_y$     | 偏转因数              | $W_i$             | 权            |
| $H$       | 磁场强度              | $\alpha$          | 偏转角          |
| $IM$      | 互调失真度             | $\delta$          | 随机误差         |
| $K$       | 分压系数、分流系数、非线性失真系数 | $\varepsilon$     | 系统误差         |
| $M$       | 电磁转动力矩            | $\nu$             | 残差           |
| $\bar{M}$ | 平均力矩              | $\rho$            | 取样密度、电阻率     |
| $M_p$     | 阻尼力矩              | $\sigma$          | 标准偏差         |
| $M_a$     | 反作用力矩             | $\sigma(x)$       | 测量值的标准偏差     |
| $M(X)$    | 测量值的数学期望          | $\hat{\sigma}(x)$ | 测量值的标准偏差估计值  |
| $n$       | 转速                | $\sigma(\bar{x})$ | 算术平均值的标准偏差   |
| $N$       | 计数脉冲读数            | $\sigma(\delta)$  | 随机误差的标准偏差    |
| $P$       | 阻尼系数、功率           | $\psi$            | 相位角、相位差      |
| $S$       | 截面积               | $\omega$          | 角频率          |
| $SMR$     | 串模抑制比             | $\omega_0$        | 自由振荡角频率      |
| $S_s$     | 扫描速度              | $\Delta$          | 绝对误差         |
| $S_x$     | 被测量 $X$ 的灵敏度      | $\gamma$          | 相对误差         |
| $T_c$     | 时钟脉冲周期            | $\gamma_{ab}$     | 以分贝表示的相对误差   |
| $T_f$     | 下降时间              | $\phi$            | 磁通、不确定度      |
|           |                   | $\psi$            | 磁通链          |

# 目 录

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>第一章 绪 论 .....</b>        | <b>1</b>   |
| 第一节 测试技术的意义及其特点 .....       | 1          |
| 第二节 电测试技术研究的主要内容 .....      | 2          |
| <b>第二章 误差理论与数据处理 .....</b>  | <b>6</b>   |
| 第一节 测量误差的基本概念 .....         | 6          |
| 第二节 测量误差按性质的分类及测量结果评价 ..... | 8          |
| 第三节 随机误差的统计特性及处理 .....      | 11         |
| 第四节 系统误差的判别及处理 .....        | 18         |
| 第五节 误差的合成和分配 .....          | 22         |
| 第六节 测量数据的处理及表示 .....        | 29         |
| <b>第三章 常用电测量指示仪表 .....</b>  | <b>39</b>  |
| 第一节 电测量指示仪表的一般知识 .....      | 39         |
| 第二节 磁电系仪表 .....             | 43         |
| 第三节 电动系仪表 .....             | 58         |
| 第四节 测量用互感器 .....            | 65         |
| 第五节 感应系电度表 .....            | 69         |
| <b>第四章 波形测试技术 .....</b>     | <b>74</b>  |
| 第一节 概 述 .....               | 74         |
| 第二节 示波器的基本原理 .....          | 75         |
| 第三节 通用示波器 .....             | 77         |
| 第四节 示波器的多波形显示 .....         | 86         |
| 第五节 取样示波器 .....             | 88         |
| 第六节 记忆、存贮示波器 .....          | 91         |
| 第七节 示波测试技术 .....            | 97         |
| <b>第五章 电压及电能的测量 .....</b>   | <b>100</b> |
| 第一节 概 述 .....               | 100        |
| 第二节 直流电压的测量及直流电流的测量 .....   | 101        |
| 第三节 直流数字电压表 .....           | 104        |

|             |                         |            |
|-------------|-------------------------|------------|
| 第四节         | 交流电压的测量                 | 113        |
| 第五节         | 脉冲电压的测量                 | 119        |
| 第六节         | 高电压大电流的测量               | 121        |
| 第七节         | 功率和电能的测量                | 124        |
| 第八节         | 数字万用表及数字化测量技术           | 128        |
| <b>第六章</b>  | <b>电路参数的测量</b>          | <b>137</b> |
| 第一节         | 概 述                     | 137        |
| 第二节         | 直流单电桥                   | 139        |
| 第三节         | 直流双电桥                   | 141        |
| 第四节         | 交流电桥及 $Q$ 表             | 143        |
| 第五节         | 自动 $R, L, C$ 测试仪        | 152        |
| 第六节         | 低电阻和高电阻的测量              | 154        |
| <b>第七章</b>  | <b>时间、频率和相位的测量</b>      | <b>158</b> |
| 第一节         | 概 述                     | 158        |
| 第二节         | 时间标准                    | 158        |
| 第三节         | 频率的测量                   | 159        |
| 第四节         | 时间的测量                   | 162        |
| 第五节         | 相位的测量                   | 164        |
| 第六节         | 提高测频、测周准确度的方法           | 168        |
| <b>第八章</b>  | <b>非电量的测试技术</b>         | <b>171</b> |
| 第一节         | 概 述                     | 171        |
| 第二节         | 常用传感器                   | 173        |
| 第三节         | 信号调理电路                  | 184        |
| 第四节         | 传感器在测量技术中的应用            | 190        |
| 第五节         | 霍尔传感器的应用和磁场的测量          | 191        |
| <b>第九章</b>  | <b>信号的频域测量(波形参数的测量)</b> | <b>195</b> |
| 第一节         | 信号波形非线性失真的测量            | 195        |
| 第二节         | 频谱分析                    | 199        |
| <b>第十章</b>  | <b>数据域测试</b>            | <b>205</b> |
| 第一节         | 概 述                     | 205        |
| 第二节         | 逻辑状态分析仪                 | 208        |
| 第三节         | 逻辑定时分析仪                 | 218        |
| <b>第十一章</b> | <b>微型计算机在测试技术中的应用</b>   | <b>224</b> |
| 第一节         | 概 述                     | 224        |



|             |                        |            |
|-------------|------------------------|------------|
| 第二节         | 微机化仪器的典型功能及其实现·····    | 226        |
| 第三节         | 智能仪器和个人仪器·····         | 232        |
| 第四节         | 自动测试系统·····            | 239        |
| <b>第十二章</b> | <b>电测技术中的抗干扰</b> ····· | <b>244</b> |
| 第一节         | 干扰与防护·····             | 244        |
| 第二节         | 噪声源与噪声耦合方式·····        | 245        |
| 第三节         | 几种常用的抗干扰措施·····        | 250        |
| <b>习 题</b>  | ·····                  | <b>259</b> |
| <b>参考文献</b> | ·····                  | <b>273</b> |

# 第一章 绪 论

## 第一节 测试技术的意义及其特点

### 一、测试技术的作用与地位

测试就是人们对反映客观世界运动状态的一些物理量、几何量、化学量等进行测量与试验(实验)。通过测试,人们对自然现象获得定性了解和定量掌握,总结出客观规律,上升为理论;再通过测试来检验这些理论是否正确。正确的理论能指导人们认识和改造客观世界;通过测试能检验改造的效果。因而从某种意义上说,科学的发展、突破是以测试技术的水平为基础。测试的水平已被公认为一个国家的科学技术水平和现代化水平的重要标志之一。

随着科学技术发展和生产发展的需要,测试技术已经发展成为一门较完整的技术学科。测试对国民经济各个领域都是至关重要的。现代工业大生产有20~30%的工时和费用用于测试方面。借助测试技术实现对产品质量管理,检测产品质量,提供最佳加工信息,达到最高生产效率。在科学研究领域中,许多重大科学成果的获得,首先依赖于新的测试手段。当然,科学技术的发展也对测试技术的发展起着巨大的推动作用。

铁路运输事业的发展,在很大程度上与测试技术的水平密切相关。为了保证行车安全,为了实现铁道运输的电气化自动化,必须学习和掌握测试技术,以便正确选择测量原理和方法及测量所需要的技术和器具,组成合适的测试系统,完成必需的测试任务。

随着科学技术的发展,测试技术已成为不可缺少的技术领域。通过不断寻找反映客观物质运动的内容(所谓信息)中各种量(所谓信号),及这些量之间的定性和定量关系,并寻求最佳的信号拾取、变换、处理、存贮、传输、控制、显示及记录,可组成各种控制和监测系统。

### 二、测试技术的分类

测试技术主要研究被测量的测量原理、测量方法、测量仪器和测量数据处理等几方面。

测量就是将被测量与同类单位量进行比较。人们所要研究的内容和测量的量是极其丰富的。通常任何一个信息(或任何一种物质运动)内涵着多种信号(或者说多个量),而一个信号(或量)可包含着不同信息。根据具体被测量从不同观点出发,测试技术有不同的分类法。

电测试技术所要测量的被测对象,一般包括下列几类参量:

- (1)有关电磁能的量 电流、电压、功率、电能、电(磁)场强度等;
- (2)有关电信号特征的量 频率、相位、波形参数、脉冲参数、频谱、相关系数等;
- (3)电路参量 电阻、电容、电感、品质因数、功率因数等,此外还有网络特性参数,如传递函数、增益、灵敏度、分辨率、频带宽度等;
- (4)非电参量 温度、压力、重量、速度、位移、长度、振动等。

在测试技术中,通常将被测量分为电量和非电量两大类。因此,相应的测量方法有电参量的电测法、非电量的电测法与非电测量法。

从电路、信号与系统的理论分析方法来看,可以把测试技术的测量方法分为时域测量、频域测量和数据域测量。通常,频域测量主要研究被测参数和频率的关系、测量增益、相移等。它包括单频正弦波的静态测量、正弦波扫频测量(用扫频仪)和白噪声广谱测量(用频谱分析仪)。时域测量主要研究被测参量和时间的关系、测量稳态量和动态量。它包括单频正弦波稳态测量(用指示仪表)、阶跃波瞬态测量和冲击波随机振动动态测量。数据域测量主要用逻辑分析仪对数字量进行测量,研究数字系统的故障侦查、故障定位、故障诊断,以及数据流的检测和显示等。频域测量、时域测量和数据域测量三者之间既有区别又有联系,是相辅相成互为补充的。通过傅氏变换与反变换可将信号时域分析和频域分析联系起来,通过  $A/D$ 、 $D/A$  转换可实现数域和模拟域(包括时域与频域)技术上的联系。

随着科学技术的迅速发展,特别是电子技术和计算机技术的突飞猛进,给测试技术带来了革命性的变化,给各种控制系统开辟了新的途径。按传统的观念,通常把利用常用电工仪表进行的测量称为电磁测量,把利用电子技术进行的测量称为电子测量。由于电子技术与计算机技术渗透到测试技术和自动控制工程中,使几乎所有电磁测量中常用仪表的功能可由电子仪器、数字仪表和智能仪器来实现,而且很多非电量的测量可用各种功能的传感器由电测法来实现。总之,测试技术的内容在不断更新发展。但目前在工业生产中电磁机械式仪表,在国内外仍然广泛使用着。因此,本书尽量注意到这个现实情况,内容的取舍尽量做到合理,将电磁测量和电子测量内容尽量融为一体。

### 三、电测试技术的特点

测试技术所涉及的知识面极其广泛,被测对象相当繁杂。但实践证明不管是电量或非电量均采用电测法,这是因为电测法具有突出优点。

(1)量程范围大 量程是测量范围上限值与下限值之差。一台多量程电磁仪表可达几个数量级,一台数字频率计的量程可达十几个数量级。

(2)频率范围广 虽然电磁仪表可测量的信号频率低,范围较窄,但是电子仪器的测量频率除测量直流电量外,还可以测量  $10^{-4}\text{Hz}$  至数  $\text{THz}$  ( $1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$ ) 的信号。

(3)测量准确度高 目前电磁仪表的误差可小到  $10^{-3}$ ,而数字频率计准确度可达  $10^{-13}$  的量级。由于目前频率测量的准确度最高,人们常常把其它参数变换成频率信号再进行测量。

(4)测量速度快 一般电磁测量速度很容易达  $10^2\sim 10^3$  次/s,而在自动控制中的数据采集速度可高达  $10^6$  次/s 以上。

(5)易于实现多功能多量程的测量 以微机为核心组成的智能仪器可实现自动转换量程、多路数据采集和数据处理功能,还能由直接测量得到的结果通过换算求得许多其它有关参数的值,从而实现多功能测量。

(6)易于实现遥测和测量过程的自动化 由于电信号可作长距离传输,有利于远距离操作与自动控制。尤其是智能仪器具有自动调节、自动校准、自动记忆等功能。

## 第二节 电测试技术研究的主要内容

据上所述,电测试技术包括测量原理、测量方法、测量仪表与系统和测量数据处理等。

## 一、测量原理

测量原理是指用什么样的原理去测量。在科学研究和生产中所需要测量的量,有各种物理量、几何量、化学量等多种多样。随着科学技术的发展,测量的领域在不断扩大,参数范围在不断扩大,而且在很多情况下需要测试的信息又往往包含着多种信号,在测量时需要把被测量从信息中提取,不同性质的被测量可用不同测量原理,同一被测量亦可用不同的测量原理。因此,测量原理所涉及知识面甚广,需要有物理学、化学、电工学、电子学、热学、力学、光学、声学等多种基础知识。例如用磁电式仪表测量直流电流原理是电流在磁场中产生的力效应,用水银温度计测温度是利用物体受热后体积要膨胀的原理,用水银温度计测温度的原理与用半导体点温度计测温度的原理是完全不一样的,等等。

## 二、测量方法

测量方法是完成测量任务所采用的方法。从不同角度出发,测量方法的分类也不同。

按测量手续的不同,可分为直接测量、间接测量与组合测量法。

### 1. 直接测量法

借助于测量仪器将被测量与同性质的标准量进行比较,直接测出被测量的数值,称为直接测量法。这种方法的特点是所测得的数值就是被测量本身的值。直接测量的优点是测量过程简单,但测量精度难于提高。例如精度最高的磁电式电流表仅为 0.1 级。

### 2. 间接测量法

先通过测量与被测量有确定函数关系的其它物理量,然后根据函数关系式计算出被测量,称为间接测量法。例如,导线的电阻率  $\rho$  不便于用直接测量法测量,这时可通过直接测量导线的电阻  $R$ 、长度  $l$  和直径  $d$ ,然后由式  $\rho = \pi d R / 4l$  求得电阻率  $\rho$  的值。这种测量方法常可得到较高的测量精度,实验室中常用这种方法。

### 3. 组合测量法

当被测量有多个,虽然被测量与某中间量有一定函数关系,但由于关系式中有多个未知量,需要改变测试条件,测出一组数据,经过求解联立方程组才能得到测量结果,这样的测量方法称为组合测量法。

按测量方法分类常有:直读式和比较式。

### 1. 直读式

用指示仪表直接读取被测量的数值,称为直读式测量法。用这种方法测量时,标准量具不直接参与测量过程,而是先用标准量具对仪表刻度进行校准,然后以间接方法实现被测量与标准量的比较,如用磁电式电压表测量直流电动机的端电压。这种测量方法的测量过程简单、方便,但测量精度较低。在工程测量中广泛采用此测量方法。

### 2. 比较法

根据被测量与标准量进行比较时的特点不同,比较法又可分为零位法、微差法和替代法等。

(1)零位法 在测量系统(或装置)中用指零仪表将被测量与标准量进行比较,并连续改变标准量使指零仪表指示为零(即使得测量装置处于平衡)的测量方法称为零位法。例如用天平

测重就是属于零位法。

零位法的优点是测量精度比较高,但测量过程较复杂,不适用于测量变化迅速的信号。

(2)微差法 用测量未知的被测量与已知的标准量之差值,来确定被测量的数值的测量方法,称为微差法。通常使标准量  $N$  与被测量  $X$  很接近,因此若选用灵敏度高的直读式仪表来测量差值  $\Delta$ ,即使测量  $\Delta$  的精度不高,也能达到较高的测量精度。例如:若  $\Delta \approx 0.01X$ ,而测量  $\Delta$  的误差为百分之一,那么总的测量误差仅为万分之一。

微差法的优点是反应快,测量精度高,特别适用于在线控制参数的测量。

(3)替代法 在测量装置中,调节标准量,使得用标准量来代替被测量时测量装置的工作状态保持不变,用这样的办法来确定被测量的方法称为替代法。

替代法大大地减小了内部和外部因素对测量结果的影响,使测量结果准确度仅取决于标准量的准确度和测量装置的灵敏度。

### 三、测量仪器、仪表

测量仪器、仪表是进行测量所需要的技术工具的总称。它包括各种指示式仪器、仪表、比较式仪器、仪表、记录式仪表、示波器、积算仪表、数字仪表、智能仪器和校检装置等。通常把利用电子技术对各种信息进行测量的设备,统称为电子测量仪器,把传统的利用电磁机械构成的测量装置称为电工仪表。

电工仪表具有简单、小型、方便等优点,但灵敏度及内阻低,频率范围窄,适用于电磁测量。电磁测量的测量对象主要是电学量:电流、电压、功率、电能、电荷、相位、频率、电阻、电容、电感和磁学量、磁感应强度、磁场强度等。

电子测量仪器具有灵敏度和输入电阻高、频率范围宽、测量速度快、精度高、误差小等许多优点。它不但能测量电学量和磁学量,还能测量传输特性、频率特性、冲激响应等。

按所用电路技术与分析处理方法的不同可分为:模拟式的和数字式的测量仪器。

按被测量的特征与分析处理方法不同分为:频域的、时域的和数据域的测量仪器。

按结构特点不同分为:袖珍式、便携式、台式、架式、插件式和组合式测量仪器。

按操作方式不同分为:手动的、自动的、可遥控的和智能的测量仪器。

近年来由于电子技术与计算机技术等科学技术的发展与广泛应用,使测量仪器与测试技术发生了根本性的变化,导致测量仪器和测试技术朝多功能、高精度、自动化与智能化方向发展。新一代的测量仪器与测试技术有三种结构体系:(1)以国际标准化仪用接口总线为基础,可编程的通用的自动测试系统;(2)以通用微处理器系统为核心构成智能化的测量仪器;(3)以通用微型计算机为基础构成个人计算机仪器系统。研究新的测试模型,以最低限度的硬件、充分利用计算机软件的控制与运算处理能力是测试技术的一个重要课题。

### 四、数据处理

在测量过程中,由于人们对于客观认识的局限性,测量工具不可能十分精确;测量方法不可能完美无缺,再加上环境影响或测量工作中的疏忽等多种原因,会产生测量误差。当测量误差超过一定限度时,测量工作和测量结果将是没有意义的,甚至会给工作带来危害。随着科学技术的发展,对测量精确度的要求越来越高。为了科学地评定各种测量方法和测量仪器的精

度,需要研究测量误差的理论和测量数据处理的方法。

## 五、本课程主要内容

由于近代测试技术的发展,内容极其广泛、繁杂,而且在不断充实更新。电测试技术是电气技术和电力传动与控制类专业的技术基础课,因此本课程不可能对电测试技术的全部内容予以介绍。本课程主要任务是使读者了解电测试技术中最基本的测量原理和测量方法;掌握一定的测量误差分析和测量数据处理能力。在介绍电测试技术时将模拟测试技术和数字测试技术相结合,并适当介绍一些现代新技术,以适应技术发展趋势的需要。本课程对常用仪器、仪表的工作原理,使用方法和具体电路只作简要介绍。把重点放在基本测试原理、基本测量方法、误差分析和数据处理上。

本课程是一门理论性和实践性都很强的课程,在教学过程中需要安排一定数量的教学实验,使学生在掌握电测试技术的同时,动手能力也得到必要的锻炼,以培养从事科学实验的初步能力。

测试技术是一门对科学技术新成就十分敏感的学科。科学技术的发展不断地向测试技术提出新任务、新课题,一切新定理、推论、设想只有通过试验和测量并得到验证之后,才能上升为新理论和新技术。所以,电测试技术不仅集中了仪器、仪表制造业有关人员的才能和智慧,而且集中了整个机械、电气、电子、自动化等多种学科的很多科学技术成果和解决问题的思路与方法。因此,在学习电测试技术时不仅要学习测量原理、方法,还要学习解决问题的思路,培养自己独立工作能力,并随着科学技术的发展不断更新测试技术知识。

## 第二章 误差理论与数据处理

### 第一节 测量误差的基本概念

#### 一、测量误差来源

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。一个量的真实大小称为真值。真值是一个理想概念,在具体测量过程中,由于人们对客观事物认识的局限性、测量器具的不准确、测量手段的不完善以及测量环境的变化或者测量工作中的疏忽或错误等原因,都会使测量结果与被测量的真值存在一定差异,这种差异称为测量误差。

现代科学技术的发展和生产水平的提高对减小测量误差提出了越来越高的要求。在许多情况下,测量结果的价值完全由其准确程度决定,当测量误差超过一定限度时,测量结果是没有意义的,甚至是有害的。随着对误差理论及数据处理研究的日益深入、测量器具性能的不断提高和新的测量方法的不断出现,我们可将测量误差控制得愈来愈小。

掌握一定的误差理论和数据处理知识,是科技人员必备的基本素质之一。由此,在测量工作中人们能够合理地设计和组织实验,正确地使用测量器具和测量方法,确切地评价及计算测量结果,以给出尽可能接近于真值的数据及其可信情况。

#### 二、测量误差按表示方法分类

按表示方法,测量误差通常可分为绝对误差和相对误差。

##### 1. 绝对误差 $\Delta x$

绝对误差又称为绝对真值误差。它可表示为被测量的给出值  $x$  与其真值  $A_0$  之差。

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

在测量中给出值  $x$  一般就是被测量的测得值,但它也可以是仪器的显示值、量具或元件的标称值(或名义值)、近似计算的近似值等。

在某一确定的时空条件下,被测量的真值是客观存在的,但真值很难完全确定,而只能尽量接近它。在一般测量工作中,如某值按规定要求达到了其误差可忽略不计,则可用此值来代替真值。实际工作中,一般把高一级的标准仪器或计量标准比对所测得的量值  $A$  来代替真值  $A_0$ ,  $A$  称为实际值。除了实际值可用来代替真值使用外,还可以用已修正过的多次测量的算术平均值来代替真值使用。

由上可见,绝对误差的实际计算式为:

$$\Delta x = x - A \quad (2-1-2)$$

绝对误差可能是正值或负值,当  $x$  大于  $A$  时,  $\Delta x$  是正值;当  $x$  小于  $A$  时,  $\Delta x$  是负值。

我们定义与绝对误差  $\Delta x$  大小相等,符号相反的量值为修正值  $c$ ,即

$$c = -\Delta x = A - x \quad (2-1-3)$$

在比较准确的仪器中,常用表格、曲线或公式的形式给出修正值,供使用者在获得给出值

后,根据式(2-1-3)加以修正以求出实际值。在智能化仪器中,修正值可以先编成程序贮存在仪器中,在测量过程中仪器可以对测量结果自动进行修正。

## 2. 相对误差 $\gamma$

绝对误差的表示具有直观的优点,但其大小往往不能确切地反映测量的准确程度。例如测量两个电压,其中  $U_1=10\text{V}$ ,绝对误差  $\Delta U_1=0.5\text{V}$ ,而  $U_2=100\text{V}$ ,绝对误差  $\Delta U_2=1\text{V}$ 。尽管  $\Delta U_2$  大于  $\Delta U_1$ ,但不能由此得出  $U_1$  的测量比  $U_2$  的测量正确的结论。事实上,  $U_1$  的测量误差对  $U_1=10\text{V}$  来说占 5%,而  $U_2$  的测量误差对  $U_2=100\text{V}$  来说仅占 1%。为弥补绝对误差不能表示测量精度的不足,人们提出了相对误差的概念。相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差、引用(或满度)相对误差及分贝误差等。

实际相对误差是用绝对误差  $\Delta x$  与被测量的实际值  $A$  之比的百分数,记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (2-1-4)$$

示值相对误差是用绝对误差  $\Delta x$  与被测量的测得值  $x$  之比的百分数来表示,记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2-1-5)$$

引用(或满度)相对误差是用绝对误差  $\Delta x$  与仪器的满刻度值  $x_m$  之比的百分数来表示,记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (2-1-6)$$

常用的电工仪表分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级,此类仪表是按  $\gamma_m$  值来进行分级的,例如,1.5 级的电表就表明其  $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$ 。由于式(2-1-6)中  $x_m$  是一个常数,所以此式给出的是绝对误差的大小。若某仪表的等级是  $s$  级,其满刻度值是  $x_m$ ,则测量的绝对误差上限值为

$$\Delta x \leq x_m \times s\% \quad (2-1-7)$$

其对应的示值相对误差上限值为

$$\gamma_x \leq \frac{x_m \cdot s\%}{x} \quad (2-1-8)$$

由式(2-1-8)可见,当仪表等级选定后,  $x$  愈接近  $x_m$ ,则  $\gamma_x$  的上限值愈小,测量愈准确,一般应使被测量之值尽可能在仪表满刻度值的三分之二以上。

**【例 2-1】** 检定 2 级量程 100V 的电压表,在 40V 刻度上,标准电压表读数为 39V,试问此表是否合格?

**【解】**

$$A=39\text{V}, x=40\text{V}, x_m=100\text{V}$$

$$\Delta x = x - A = 40 - 39 = 1\text{V}$$

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\% < 2\%$$

所以此表是合格的。

**【例 2-2】** 某一电流表测出电流值为  $88\mu\text{A}$ ,标准表测出为  $90\mu\text{A}$ ,试求其误差。

**【解】** 绝对误差:

$$\Delta x = 88 - 90 = -2\mu\text{A}$$

$$\text{实际相对误差: } \gamma_A = \frac{\Delta x}{A} = \frac{-2}{90} \times 100\% = -2.2\%$$



### 三、电子测量仪器误差的表示方法

误差除了用于表示测量结果的准确程度之外,也是电子测量仪器中重要的质量指标。测量仪器在出厂前由检验部门对其误差指标进行严格的检验。国家标准\*GB6592—86《电子测量仪器误差的一般规定》对工作误差、固有误差给出了统一的定义,其它一些与工作条件有关的误差,如影响误差和稳定误差,可由产品标准给出。

(1)固有误差 是在基准工作条件下测得的仪器误差。基准工作条件通常是一组比较严格的条件,例如一般规定温度为  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,交流电源为  $220\text{V}\pm 2\%$ ,  $50\text{Hz}\pm 1\%$  等。固有误差大致能反映仪器本身的准确程度,同时在基准条件下也便于对仪器的检验与检定。

(2)工作误差 是在仪器标准或产品说明书所给出的额定工作条件下测定的仪器误差极限。额定工作条件包括仪器本身的全部使用范围和全部外部工作条件,因此在最不利的组合情况下会产生最大误差,从而也就决定了工作误差以误差极限的方式给出。这种表示方法的优点是,使用者可用其直接估算测量结果误差的最大范围。缺点是,由于仪器在实际使用过程中构成最不利组合的可能性很小,因此,用其估计测量结果的误差会偏大。

影响误差在某种因素(如温度、频率)的影响特别大,且在工作误差中起重要作用时可单独列出,它是一种误差的极限。稳定误差专门用来表示误差随时间的变化。

目前有些仪器中的说明书还用到基本误差和附加误差的形式,这是我国 60 年代有关技术条件中规定使用的误差表征方法。其中基本误差和固有误差类似,但测量条件较宽,例如温度为  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。附加误差与影响误差也有某些相似,它是指由于仪器超出规定的正常工作条件时所增加的误差,用百分数表示。

例如, MF-20 型晶体管多用表就是用这种误差标准的。基本误差:直流电压、电流为  $\pm 2.5\%$ ,附加误差:电池电压降至  $5.5\sim 4.5\text{V}$  时(额定值为  $6\text{V}$ ),附加  $\pm 1\%$ 。环境温度在  $0\sim 40^{\circ}\text{C}$  范围(额定值为  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ),每变化  $10^{\circ}\text{C}$  附加  $\pm 2.5\%$ 。

采用基本误差与附加误差的形式,对掌握各分项误差大小有利,但在估计仪器的总误差时要进行误差的合成。

## 第二节 测量误差按性质的分类及测量结果评价

测量误差根据其性质可分为系统误差、随机误差和粗大(或疏忽)误差。

### 一、系统误差

在相同条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,按一定规律变化的误差称为系统误差。

产生这种误差的原因很多,常见的有:

(1)测量设备的缺陷,例如刻度的偏差、指针安装偏心、电表零点不准等。

(2)测量时的环境(如温度、湿度、电源电压及频率等)不适合仪器要求条件。

(3)测量方法不完善,所依据的理论不严密或采用了近似计算公式等。例如用图 2—2—1 所示方法测量电阻  $R$  两端的电压和流过  $R$  的电流时,都存在着测量方法误差。在图 2—2—1