

配多媒体教学资料包

全国高等职业教育教学改革示范系列规划教材

本书特色

- >> 紧密结合工程实践，突出**测量原理**与**仪器性能**
- >> 融入智能仪器与自动测试、虚拟仪器等**新技术**
- >> 从**内容**到**形式**，体现更多**新意**和**特色**，突出示范引领性
- >> **教学资源**升级，配**习题答案**、**教学课件**、**实训指导手册**等

(第2版)

电子测量技术与仪器

李 飏 汪 涛 主 编 杨敏跃 杨俊卿 副主编
张大彪 主 审



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

教学改革示范系列规划教材

电子测量技术与仪器

(第2版)

李 驷 汪 涛 主 编

杨敏跃 杨俊卿 副主编

张大彪 主 审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以培养学生电子测量基本技术和工程应用能力为目标,重点介绍了信号发生器、电子示波器、电子计数器、电压测量仪器、频域测量仪器、元件参数测量仪器等常用测量仪器的基本原理和使用方法,以及智能仪器与自动测试技术、虚拟仪器技术等先进测试技术。本书深入浅出,通俗易懂。除各章均配备了习题外,还配有实训指导手册、教学课件及习题答案,更方便学生学习与教师授课使用。

本书可作为应用型本科和高等职业院校电子、通信、控制与检测等专业的教学用书,也可作为相关专业工程技术人员和广大电子爱好者的参考用书。

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

电子测量技术与仪器 / 李骥, 汪涛主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2017.7
ISBN 978-7-121-31783-5

I. ①电… II. ①李… ②汪… III. ①电子测量技术—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 124165 号

策划编辑: 王昭松

责任编辑: 王昭松 特约编辑: 马凤红

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

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: 14 字数: 367.4 千字

版 次: 2010 年 11 月第 1 版

2017 年 7 月第 2 版

印 次: 2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 37.00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254015 wangzs@phei.com.cn QQ: 83169290。

第2版前言

电子测量技术是对物质世界的信息进行测量与控制的基本手段。它融合了微电子技术、计算机技术、通信技术、网络技术、新元器件与新材料技术、现代测试技术、现代设计制造技术和现代工艺技术等,是现代工业生产中应用最多、使用最广的技术之一。

电子测量仪器用于检测各类电子材料、产品、装备和系统的性能和质量,其在国民经济各行业中应用十分广泛。据中国电子仪器行业协会不完全统计,2016年电子测量仪器行业完成新产品鉴定36项,新产品继续向数字化、软件化、智能化、宽带化、集成化、多功能化、电路专用化、误差分析模型化、测试系统模块化、高精度、高稳定性方向发展。

电子测量技术与仪器是电子技术、通信技术、控制与检测技术等专业学生必修的专业课。近年来,微电子技术、大规模集成电路、信号处理芯片、新型显示器件和计算机技术的飞速发展促进了电子仪器的发展,使得功能单一的传统测量仪器逐步向智能仪器和模块式自动测试系统方向发展。大型生产企业的生产线,通常采用大量先进的智能仪器和自动测试系统。所以,编写适用于应用型本科和高等职业院校培养对象,以现代仪器应用为目标的电子测量技术与仪器教材,具有非常重要的意义。

本书以培养应用型人才为目标,突出工程应用的特点;紧密结合电子测量工程实践,突出测量基本原理和仪器的性能特点;把电子测量领域的新知识、新设备收入进来,从内容到形式都有新意和特色。本书以8大类常用测量仪器为主线,详细介绍了测量基本原理和仪器的使用方法。由于本课程涵盖知识面广,实践性强,所以要求教学过程中要结合一定数量的实验和实训,使学生能熟练应用电子测量仪器和测量设备进行工程测量,相关专业的技术人员通过查阅本书也能完成测量工作。

本书在测量仪器举例时,尽量照顾到目前学校的现有设备,同时也收集了近年来出现的智能与数字式新仪器,并用专门章节介绍了智能仪器与自动测试技术、虚拟仪器技术等先进测试技术。除各章均配备了习题外,还配有实训指导手册、教学课件及习题答案,更方便学生学习与教师授课使用。

全书共分9章。第1、2、3、4章由天津市第一轻工业学校汪涛编写;第5、6章由天津石油职业技术学院杨敏跃编写;第7、8章由江西现代职业技术学院杨俊卿编写;第9章由天津渤海职业技术学院李骥编写;全书由李骥整理。李骥编写实训指导手册;杨敏跃编写习题答案;汪涛进行教学课件制作。本书由李骥、汪涛任主编;杨敏跃、杨俊卿任副主编;张大彪教授任主审。在此,对原编者孙胜利和祁宇翔的工作表示由衷的感谢。

由于作者学识水平有限,书中还有许多不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2017年4月

目 录

第1章 电子测量与仪器基本概念	(1)
1.1 测量方法概述	(1)
1.1.1 测量的意义	(1)
1.1.2 电子测量	(2)
1.2 测量误差分析	(4)
1.2.1 测量误差	(4)
1.2.2 测量结果的数据处理	(6)
1.3 电子测量仪器概述	(7)
1.3.1 电子测量仪器的分类	(7)
1.3.2 电子测量仪器的误差	(8)
1.3.3 测量系统的组成	(9)
1.4 电子测量误差的表示方法	(9)
1.4.1 电子测量误差的定义	(9)
1.4.2 电子测量误差的表示方法	(10)
1.5 电子测量中的干扰	(12)
1.5.1 干扰源	(12)
1.5.2 干扰耦合的途径及其抑制方法	(13)
1.5.3 串模(常态)干扰和共模(共态)干扰	(13)
1.5.4 电子测量接地	(14)
实训一 测量数据处理实训	(17)
本章小结	(18)
习题1	(19)
第2章 信号发生器	(20)
2.1 信号发生器概述	(20)
2.1.1 信号发生器的分类	(20)
2.1.2 信号发生器的发展趋势	(21)
2.2 低频信号发生器	(21)
2.2.1 低频信号发生器基本组成	(21)
2.2.2 低频信号发生器工作原理	(22)
2.2.3 DF1027A、DF1027B 低频信号发生器	(24)
2.3 高频信号发生器	(28)
2.3.1 高频信号发生器的基本组成和原理	(28)
2.3.2 YB1051 高频信号发生器	(29)
2.4 函数信号发生器	(31)
2.4.1 函数信号发生器的基本原理	(31)

2.4.2	YB1602 函数信号发生器	(34)
2.5	合成信号发生器	(36)
2.5.1	直接合成法	(36)
2.5.2	间接合成法	(37)
2.6	电视信号发生器	(38)
2.6.1	电视信号发生器性能简介	(38)
2.6.2	使用方法	(39)
2.7	脉冲信号发生器	(40)
2.7.1	脉冲信号发生器的基本组成	(41)
2.7.2	主要技术指标	(42)
2.7.3	使用方法	(42)
	实训二 低频信号发生器的使用	(44)
	实训三 高频信号发生器的使用	(45)
	本章小结	(46)
	习题 2	(47)
第 3 章	电子示波器	(48)
3.1	概述	(48)
3.2	示波管及波形显示原理	(49)
3.2.1	示波管的构造及工作原理	(49)
3.2.1	波形显示原理	(51)
3.3	电子示波器电路构成及原理	(54)
3.3.1	电子示波器组成框图及主要技术指标	(54)
3.3.2	垂直通道	(55)
3.3.3	水平通道	(58)
3.4	SS—5702 双踪示波器	(62)
3.4.1	SS—5702 双踪示波器主要性能指标	(62)
3.4.2	SS—5702 双踪示波器前面板及开关旋钮	(63)
3.4.3	SS—5702 双踪示波器的使用	(64)
3.5	双扫描示波器	(68)
3.6	取样示波器	(69)
3.7	数字存储示波器	(70)
3.7.1	数字存储示波器的工作原理	(70)
3.7.2	数字存储示波器的特点	(72)
3.8	智能数字 DSO401 示波器	(72)
3.8.1	按键说明	(72)
3.8.2	操作说明	(72)
3.8.3	“触发”设置菜单	(73)
3.8.4	“测量”设置菜单	(74)
3.8.5	“设置”菜单	(75)

实训四 示波器的应用	(76)
本章小结	(77)
习题 3	(78)
第 4 章 电子计数器	(80)
4.1 电子计数器简介	(80)
4.1.1 电子计数器分类	(81)
4.1.2 电子计数器主要技术指标	(81)
4.2 电子计数器工作原理	(82)
4.2.1 电子计数器基本组成	(82)
4.2.2 电子计数器测频原理	(83)
4.2.3 电子计数器测周期原理	(84)
4.2.4 电子计数器测时间间隔原理	(85)
4.3 电子计数器的测量误差	(86)
4.3.1 测量误差的来源	(86)
4.3.2 测频误差分析	(88)
4.3.3 测周误差分析	(89)
4.3.4 智能数字单片机电子计数器的发展	(91)
4.4 电子计数器的使用	(92)
4.4.1 自检	(92)
4.4.2 电子计数器的使用方法	(92)
4.4.3 电子计数器测量频率范围的扩大	(94)
4.4.4 基于单片机构成产品的自动计数器	(95)
实训五 电子计数器测量实训	(98)
本章小结	(99)
习题 4	(99)
第 5 章 电压测量仪器	(101)
5.1 电压测量简介	(102)
5.1.1 电压测量的特点	(102)
5.1.2 电压测量仪器分类	(102)
5.2 数字式电压表	(103)
5.2.1 数字式电压表的组成	(103)
5.2.2 A/D 转换器	(104)
5.2.3 数字式电压表的主要技术指标	(108)
5.2.4 数字万用表及使用方法	(109)
5.3 模拟式电子电压表	(116)
5.3.1 模拟式直流电压表	(116)
5.3.2 放大—检波式电子电压表	(117)
5.3.3 检波—放大式电子电压表	(118)
5.3.4 外差式电子电压表	(120)

5.3.5 热电偶变换式电子电压表	(120)
5.3.6 模拟电子电压表的使用	(121)
5.3.7 电平的测量	(122)
实训六 台式数字万用表测量实训	(124)
实训七 模拟电子电压表测量实训	(125)
本章小结	(126)
习题 5	(127)
第 6 章 频域测量仪器	(128)
6.1 频率特性测试仪	(128)
6.1.1 频率特性的测试方法	(128)
6.1.2 频率特性测试仪的组成	(130)
6.1.3 频率特性测试仪的工作原理	(133)
6.1.4 BT—3 型频率特性测试仪的主要技术指标	(134)
6.1.5 BT—3 型频率特性测试仪的使用方法	(135)
6.1.6 测试实例	(139)
6.2 频谱分析仪	(140)
6.2.1 频谱分析仪分类	(140)
6.2.2 基本工作原理	(140)
6.2.3 主要技术指标	(142)
实训八 扫频仪测量实训	(143)
实训九 频谱仪测量实训	(144)
本章小结	(146)
习题 6	(146)
第 7 章 元件参数测量仪器	(147)
7.1 电阻、电感和电容的测量	(147)
7.1.1 阻抗的概念	(147)
7.1.2 电阻的特性与测量	(148)
7.1.3 电感的特性与测量	(150)
7.1.4 电容的特性与测量	(153)
7.2 二极管、三极管与场效应管的测量	(155)
7.2.1 半导体二极管的测量	(155)
7.2.2 晶体三极管的测量	(157)
7.2.3 场效应管的测量	(158)
7.3 集成电路的测试	(159)
7.3.1 中小规模集成电路的一般测试	(160)
7.3.2 集成电路测试仪	(163)
7.3.3 大规模数字集成电路的 JTAG 测试	(164)
实训十 电子元器件的识别与检测	(166)
本章小结	(166)

习题 7	(167)
第 8 章 智能仪器与自动测试系统	(168)
8.1 智能仪器与自动测量技术的发展历史	(168)
8.2 智能仪器与个人仪器	(170)
8.2.1 智能仪器	(170)
8.2.2 个人仪器	(173)
8.3 自动测试系统	(173)
8.3.1 自动测试系统的组成	(173)
8.3.2 自动测试系统的总线	(174)
本章小结	(179)
习题 8	(180)
第 9 章 虚拟仪器技术	(181)
9.1 虚拟仪器技术简介	(181)
9.1.1 虚拟仪器的一般概念	(181)
9.1.2 虚拟仪器的组成	(182)
9.1.3 虚拟仪器的特点	(183)
9.2 图形化软件编程平台 LabVIEW	(183)
9.2.1 LabVIEW 简介	(183)
9.2.2 LabVIEW 编程环境	(184)
9.2.3 基本 VI 简介	(186)
9.3 LabVIEW 模板	(187)
9.3.1 工具模板 (Tools Palette)	(187)
9.3.2 控制模板 (Controls Palette)	(188)
9.3.3 功能模板 (Functions Palette)	(190)
9.4 LabVIEW 的数据类型	(191)
9.5 LabVIEW 的程序结构	(192)
9.5.1 For 循环	(193)
9.5.2 While 循环	(194)
9.5.3 选择结构	(195)
9.6 LabVIEW 的图形显示功能	(195)
9.6.1 事后记录波形图控件 (Waveform Graph)	(195)
9.6.2 实时趋势图控件 (Waveform Chart)	(197)
9.7 LabVIEW 编程入门	(198)
9.7.1 虚拟正弦波仿真信号发生器功能描述	(198)
9.7.2 创建一个新的 VI	(198)
9.7.3 设计 VI 前面板	(199)
9.7.4 设计框图程序	(200)
9.7.5 运行和调试 VI 程序	(201)
9.7.6 创建 VI 图标、保存 VI	(203)

9.7.7 编辑 VI.....	(203)
9.8 数据采集	(204)
9.8.1 数据采集基础.....	(204)
9.8.2 模拟输入	(208)
9.8.3 模拟输出	(210)
实训十一 构建信号采集与分析系统.....	(211)
本章小结	(213)
习题 9.....	(213)
参考文献	(214)

第1章

电子测量与仪器基本概念

【本章要点】

1. 要求掌握电子测量、测量误差、误差分析和电子测量仪器的基本概念。
2. 学习电子测量的基础知识和原理，掌握在电子测量中误差的产生和处理方法。
3. 学习电子测量中的干扰及其抑制方法，掌握电子仪器接地的概念及测量仪器的使用注意事项。

【本章难点】

1. 电子测量仪器的误差分析。
2. 电子测量中的干扰及其抑制方法。
3. 电子测量仪器的主要误差（允许误差、基本误差和附加误差）。

1.1 测量方法概述

1.1.1 测量的意义

1. 测量

测量是以确定量值为目的的操作。在这一过程中，常需借助专门的设备，将被测量与选作单位的同类量进行比较，从而取得用数值和单位共同表示的测量结果。例如，用温度计去测温度、用秤去称物体的质量、用电流表去测电流的大小等。量值是由数值和计量单位的乘积所表示的量的大小。没有计量单位的数值是不能作为量值的，也是没有物理意义的。

2. 测量方法

为了取得准确的测量结果，必须合理选择电子测量仪器和测量方法。对于各种测量方法，可以从不同的角度进行分类。

（1）按测量结果的获取方法分类。

① 直接测量法。是指不必对与被测量有函数关系的其他量进行测量就能直接得到被测量值的测量方法。例如，用等臂天平测量质量、用电压表测量电压、用数字频率表测量频率等都属于直接测量。直接测量法具有操作简便、读数迅速等优点，但是除受到仪表基本误差的



限制外,还由于仪表接入被测电路后,仪表的内阻会使电路的工作状态发生变化,因而其测量准确度较低。

② 比较测量法。是指将被测量与度量器在比较仪器中进行比较的测量方法。比较测量法又可分为3种。

- 零位测量法,又称零指法或平衡法。它是通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的(或已知其值的)量,用平衡法确定被测量值的测量方法。例如,用电桥和指零仪测量阻抗。
- 微差测量法。它是将被测量与同其量值只有微小差别的同类已知量相比较,并测出这两个量值间的差值以确定被测量值的测量方法。例如,标准电池的相互比较采用的就是这种方法。
- 替代测量法。它是将选定的且已知其值的量替代被测量,使在指示装置上得到相同效应以确定被测量值的测量方法。

比较测量法的优点是准确度和灵敏度都较高,缺点是设备复杂、操作麻烦,一般用于精密测量。

③ 间接测量法。是指通过对与被测量有函数关系的其他量进行测量才能得到被测量值的测量方法。例如,通过测量液柱高度来测量大气压;先用电压表和电流表测出电阻两端的电压和流过电阻的电流,再用欧姆定律算出电阻值等。间接测量法的误差比直接测量法的误差大。

(2) 按被测量的性质分类。

① 时域测量法。用于测量交流电压、交流电流等随时间变化的量。其稳态值、有效值可用电压表、电流表等测量;其瞬时值可通过示波器显示其随时间变化的规律。

② 频域测量法。主要用于测量放大电路的增益、相移及网络的频率特性等。通过频域测量得出其频率特性曲线或频谱特性曲线,用以分析被测量与频率的关系。

③ 数据域测量法。是指对数字量进行的测量。用具有多个输入通道的逻辑分析仪,可同时观测许多单次并行的数据。例如,可以观测微处理器地址线、数据线上的信号,既可以显示时序波形,又可以用“0”和“1”显示其逻辑状态。

1.1.2 电子测量

电子测量是指以电子技术为基本手段的一种测量。在电子测量过程中,以电子技术理论为依据,以电子测量仪器和设备为手段,对各种电量、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量,还可以通过各种传感器对非电量进行测量。

1. 电子测量的意义

电子测量涉及从直流到极宽频率范围内所有电量、磁量及各种非电量的测量。如今,电子测量已成为一门发展迅速、应用广泛、精确度越来越高、对现代科学技术的发展起着巨大推动作用的独立学科。

电子测量在信息技术产业中的地位尤为显著。信息技术产业的研究对象及产品无一不与电子测量紧密相连,从元器件的生产到电子设备的组装与调试,从产品的销售到维护都离不开电子测量。如果没有统一和精确的电子测量,就无法对产品的技术指标进行鉴定,也就无法验证产品的质量。所以,从某种意义上说,电子测量的水平是衡量一个国家科学技术水平



的重要标志之一。

2. 电子测量的内容

通常所说的电子测量是指对电子学领域内电参量的测量，其基本内容如下所述。

- ① 电能量的测量，包括电流、电压、功率、电场强度等的测量。
- ② 电路元器件参数的测量，包括电阻、电容、电感、电子器件（电子管、晶体管、场效应管等）参数的测量。
- ③ 电信号特性的测量，包括波形、频率、周期、时间、相位、失真度、调制度、逻辑状态等的测量。

④ 电路性能的测量，包括增益、衰减、灵敏度、通频带、噪声系数等的测量。

⑤ 特性曲线的显示测量，包括幅频特性曲线、器件特性曲线等的显示测量。

另外，通过传感器，可将温度、压力、流量、位移等非电量转换成电信号后进行测量，但这不属于本书讨论的范围。

3. 电子测量的特点

与其他测量相比，电子测量具有以下特点。

(1) 测量频率范围宽。电子测量的频率范围极宽，低至 10^{-4} Hz 以下，高至 10^{12} Hz 以上。在不同的频率范围内，电子测量所依据的原理、使用的测量仪器、采用的测量方法也各不相同。

(2) 测量值范围广。电子测量的另一个特点是被测对象的量值大小相差悬殊。例如，从宇宙飞船上发射到地球的信号功率通常低于 10^{-13} W，而远程雷达发射的脉冲功率可高达 10^8 W 以上，两者之比为 $1:10^{21}$ 。一般情况下，一台测量仪器是难以覆盖如此宽广的范围的。电子测量的这一特点要求电子测量仪器应具有足够的测量范围。

(3) 测量准确度高。电子测量的准确度比其他测量方法高得多。例如，长度测量的准确度最高为 10^{-8} 量级；而电子测量中对频率和时间的测量，由于采用原子频标做基准，故可使其测量准确度优于 10^{-13} 量级，这是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。因此，为了提高测量准确度，人们往往把其他参数转换成频率或时间后再进行测量。电子测量的这一特点，是它在现代科学技术中广泛应用的原因之一。

(4) 测量速度快。由于电子测量是基于电子运动和电磁波传播的原理进行的，因此，它具有其他测量无法比拟的高速度，这也是它在现代科学技术中得到广泛应用的另一个原因。例如，原子核的裂变过程、航空器和航天器的运行参数等的测量，都需要高速度的电子测量。

(5) 易于实现遥测。通过各种类型的传感器，采用有线或无线的方式，可以实现对人体不便于接触或无法达到的领域（如深海、地下、卫星、高温炉、核反应堆内等）的远距离测量，即遥测。

(6) 易于实现测量的自动化。由于电子测量的被测量和它所需要的控制信号都是电信号，所以非常有利于直接或通过模数转换与计算机相连接，实现自动记录、数据运算和分析处理，组成各种自动测试系统。

电子测量在具备上述优点的同时，还存在测量易受干扰、误差处理较为复杂等缺点。

4. 电子测量的分类

电子测量常见的分类方法有以下几种。



- (1) 根据测量手段的不同,分为直接测量和间接测量。
- (2) 根据测量性质的不同,分为时域测量、频域测量和数据域测量。
- (3) 根据测量过程的控制不同,分为人工测量和自动测量。
- (4) 根据被测量与测量结果获取地点的关系,分为本地测量和远地测量。
- (5) 根据被测量在测量过程中是否变化,分为动态测量和静态测量。
- (6) 根据对测量精度的要求不同,分为工程测量和精密测量。
- (7) 根据工作频率的不同,分为低频测量、高频测量和微波测量等。

5. 我国电子测量仪器行业的发展现状

近年来,我国电子测量仪器行业发展迅速,在若干重大科技领域均取得了突破性进展,仪器的可靠性和稳定性有了很大的提高,本土仪器取得了长足的进步,特别是在通用电子测量设备和汽车电子设备的研发方面,与国外先进产品的差距正在快速缩小。模块化和虚拟技术的发展,为我国的测试测量仪器行业带来了新的发展契机,加上国家和各级政府的日益重视,为电子测量仪器产业提供了前所未有的动力和机遇。

目前,国内电子仪器行业已经形成了一批电子仪器开发、生产的骨干企业,研究和开发出了一批具有自主知识产权、达到国际先进水平的同类产品。

针对“时域”“频域”“数域”“阻抗域”“调制域”等5域的电子测量仪器,我国都开发了相应的产品,并已应用到了国防、科研、生产等各个领域。

1.2 测量误差分析

1.2.1 测量误差

任何物理量必然存在一个真实的数值,这个数值称为真值。真值是在研究某物理量时在所处条件下严密定义的量值,只是一个理想的概念,一般说来是不可能准确知道的。一切测量的目的都是为了尽可能准确可靠地获得真值。但由于人们对客观规律认识的局限性、测量工具的不准确、测量手段的不完善及测量过程中可能出现的疏忽和失误,都会使测量值与真值不同。测量值与被测量真值的差别就是测量误差。

1. 测量误差的分类与特性

根据误差的性质和特点,测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差3类。

(1) 系统误差。是指在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号保持恒定或在条件改变时按某种确定规律变化的误差。例如,仪表标度的偏差,使用时仪器零点未调准,温度、湿度、电源电压变化,测量方法不当等造成的误差均属于系统误差。

系统误差的特点是,测量条件一经确定,误差即为一确定数值。用多次测量取平均值的方法并不能改变系统误差的大小。造成系统误差的原因很多,但也是有规律可循的。例如,对零点不准的仪器可重新调零;对受温度影响的物理量,可在大量测量、反复分析的基础上得出经验公式以对测量值进行修正,或采取相应的技术措施等都可消除或减小系统误差。

(2) 随机误差。是指在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号都以不确定方式变化的误差。每次出现的误差都是偶然的,没有复现性,因此,随机误差也称偶然误差。



随机误差是由那些对测量值影响微小又互不相关的多种因素共同造成的。例如，温度及电源电压的频繁波动，测量仪器、元器件的噪声，电磁场的干扰和测量人员人为操作的偶然变化等。

一次测量的随机误差没有规律，也无法控制，但足够多次、重复测量所出现的随机误差服从统计规律，因此，可以通过对多次测量值取算术平均值的方法，来减小随机误差对测量结果的影响。

(3) 粗大误差。是指在对同一被测量的多次测量过程中，测量值明显偏离实际值所形成的误差。粗大误差产生的原因可能是错误操作、仪器的不稳定乃至故障、测量条件的突然变化（如电网电压波动、强磁场、强振动）等引起仪器示值的明显偏差。

由于粗大误差是在不正常的情况下出现的，测量数据误差大，甚至是错误的，因此，粗大误差也称为差错。这样的测量数据（又称为坏值）应剔除不用。如果确认误差是由于仪器发生故障而引起的，则应对有故障的仪器进行检修和校正。

对上述3类不同性质的误差要用不同的方法处理。除粗大误差外，系统误差和随机误差大多同时存在于测量结果中，若经过分析发现系统误差大于随机误差，则应按系统误差的处理方式处理，如加修正值等；反之，则应按随机误差的处理方式处理。两者的影响相近时，则要分别进行误差处理。

2. 处理系统误差的一般方法

测量误差是多种误差因素共同作用的结果。随机误差可在大量测量后取平均值消除，关键是要消除系统误差。对于系统误差的来源必须认真分析，从而采取相应措施，以减小其对测量结果的影响。

(1) 仪器误差。即仪器的基本误差。这是由于测量仪器及其附件本身不完善而引起的误差。例如，电桥中的标准电阻、示波器的探头等都含有误差。仪器零位偏移、标度不准及非线性等引起的误差均属仪器误差。仪器误差可通过在测量结果上加修正值（包括利用修正公式或修正曲线）的方法进行修正。

(2) 使用误差。又称操作误差或安装误差。这是由于在使用仪表过程中未严格遵守操作规程而引起的误差。例如，将按规定应水平放置的仪表垂直安放、仪表接地不良、测试引线太长、未考虑阻抗匹配及仪器操作方法不当等，都会产生使用误差。为了避免使用误差，必须严格遵守仪表安装工艺和操作规程。

(3) 影响误差。是由于各种环境因素与要求条件不一致所造成的误差。例如，温度、湿度、电源电压、电磁场影响等所引起的误差。为了克服这种误差，应注意仪器设备使用的环境条件。要求严格时，测量应在恒温、恒湿和电磁屏蔽的专门实验室中进行。一般情况下，可对测试设备进行环境测试，确定多种外界因素的影响程度，从而对测量结果进行适当的修正。

(4) 人员误差。是由测量者的分辨能力、固有习惯、心理、工作态度等因素引起的误差。为降低人员误差，测量人员要经过严格训练，熟练掌握操作技能，并要养成专心致志、一丝不苟的工作作风。

(5) 方法误差。由于测量方法不合理或采用的计算公式不恰当所造成的误差称为方法误差或理论误差。例如，用普通万用表测量电路中高阻值电阻两端的电压，由于万用表电压挡内阻不高，形成分流作用而引起的误差即为方法误差。对方法误差，可通过理论分析来进行修正，或采用更科学的测量方法来消除。



3. 误差极限

误差极限又称最大允许误差，它是由相关标准、技术规范等所规定的仪器仪表误差的极限。一般仪器技术说明书上所标明的误差即指误差极限。

误差极限既可采用绝对误差，又可采用各种相对误差，或者用两者结合的形式表示。误差极限是指某一类仪器不应超出的误差的最大范围，并不是指某一台确定仪器的实际误差。

一般，仪器仪表的误差有以下4种。

① 固有误差（又称基本误差）。是在规定的一组影响量（如环境温度、湿度、时间、辅助电源频率、电磁场影响等）的基准条件下给出的误差。

② 影响误差（又称附加误差）。是当一个影响量在额定使用范围内任取一值，而其他影响量均处于基准条件时所测得的误差。

③ 工作误差。是在额定工作条件下的仪器误差极限。

④ 稳定误差。是仪器的标称值在其他影响量保持恒定的情况下，在规定时间内所产生的误差极限。

4. 测量结果的评定

对测量结果的评定，常采用正确度、精密度和精确度等参数。

（1）正确度。指测量值与真值接近的程度，反映系统误差的影响。

（2）精密度。指测量值相互之间接近的程度，反映随机误差的影响。

（3）精确度。又称准确度，有时也简称精度，反映系统误差与随机误差综合影响的程度。精确度高，表明测量结果既精密又正确。

以打靶为例，如果10发子弹密集地打中靶子但偏离靶心，称为精密度高，正确度低；若10发子弹均中靶但分散在靶心四周，称为精密度低，正确度高；若10发子弹密集地打中靶心，则精密度、正确度都高，也就是说精确度高。参数测量也是如此，多次测量数据很接近时称为精密度高；如果这些数据又都接近真值，则正确度也高，称为高精度测量。

1.2.2 测量结果的数据处理

获得大量测量数据后，如何处理这些数据以减小误差并得出最佳的数据结论，是测量工作中最后的也是最重要的一项任务。数据处理包括数据整理、计算和分析等工作，有时还要把数据制成表格或图形，最后归纳出经验公式。

1. 有效数字的正确表示

（1）由于测量过程中不可避免地存在误差，同时计算时还经常用到 π 、 $\sqrt{2}$ 等无理数，它们只能取近似值，所以最终数据总是近似的。测量结果的位数不必太多，也不宜太少，应取得恰当，这就提出了有效数字的问题。

（2）有效数字是那些能够正确反映测量准确度的数字，是指从一个数据的左起第一个非零数字开始，直到最右边的一个数字（包括“0”在内）。有效数字的最末一位是近似数字，它可以是测量中估计读出的近似数字，也可以是按规修正后的近似数字。

（3）有效数字的位数是根据所使用的测量仪器的准确度来确定的。例如，已知某仪器的测量误差为 $\pm 0.005\text{ V}$ ，电压测量值为 3.851 V ，则应取 3.85 V ，即取3位有效数字。通常作测量记录时，每一个数据只能最末一位数字是估计读数，而其他各位数字都必须是准确可靠的。



(4) 数字“0”在数据中可能是有效数字,也可能不是有效数字。例如,0.030 80 MHz,前面的两个“0”不是有效数字,中间及末尾的“0”都是有效数字。若换成另一单位,变换为30.80 kHz,则前面的“0”就不起作用了。数字末尾的“0”很重要。例如,30.8的有效数字为3位,表示测量结果精确到十分位;30.80的有效数字为4位,表示测量结果精确到百分位。

2. 测量数据的舍入规则

测量数据是近似值,在计算中为了保留规定的位数,需要对多余的位数进行舍入处理。常用的“四舍五入”规则是不合理的,因为5是1~9的中间数字,也应该有舍有入才能平衡。所以,测量技术中规定,小于5舍,大于5入,等于5时采取偶数法则。也就是说,以保留数字的末位为基准,它后面的数字大于5时,末位数字加1,小于5时舍去;恰好等于5时,若5后有非0数字,则5可以进位;若5后为0,则将末位凑成偶数(即末位原为奇数时加1,原为偶数时不加)。为了帮助记忆,归纳成如下口诀。

4舍6入5待定,5后非0则可进,

5后为0前位定,偶则舍去奇则进。

例如,将下列数字保留3位。

- ① 13.844→13.8 (因为4<5);
- ② 13.864→13.9 (因为6>5);
- ③ 13.851→13.9 (因为5后非0);
- ④ 13.850→13.8 (因为8是偶数,5舍);
- ⑤ 13.750→13.8 (因为7是奇数,5入)。

1.3 电子测量仪器概述

测量仪器是用于检出或测量一个量或为测量目的供给一个量的器具。采用电子技术测量电量或非电量的测量仪器称为电子测量仪器。

电子测量仪器是信息产业的基础,伴随着信息技术的发展而发展,由最初的电子管仪器,经过晶体管仪器,再发展到集成电路仪器;由模拟仪器,经过数字仪器,再发展到智能仪器。我国的电子测量仪器产业从无到有,已形成一个具有科研、生产和经营的较完整的体系。

1.3.1 电子测量仪器的分类

电子测量仪器品种繁多,按功能分类可分为专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器是为特定目的而专门设计制造的,只适用于特定的测量对象和测量条件。通用仪器的灵活性好,应用面广,按其功能进行分类,主要可以分为以下几类。

(1) 信号发生器。用于提供测量所需的各种波形的信号,如低频信号发生器、高频信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器和噪声信号发生器等。

(2) 信号分析仪器。用于观测、分析和记录各种电量的变化,包括时域、频域和数字域分析仪,如电压表、示波器、电子计数器、频谱分析仪和逻辑分析仪等。

(3) 网络特性测量仪器。用于测量电气网络的频率特性、阻抗特性等,如频率特性测试