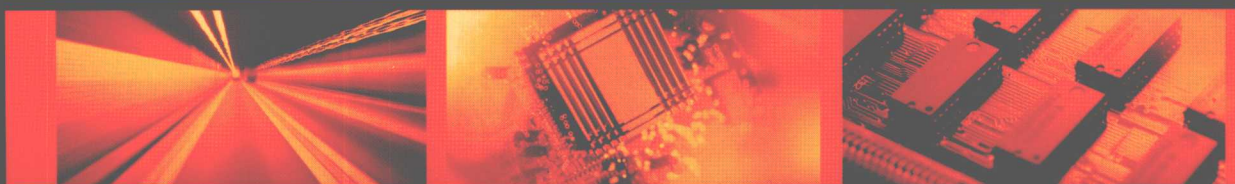




高职高专“十一五”电子信息类专业规划教材

电子测量技术



李延廷 主编



赠送电子课件等



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高职高专“十一五”电子信息类专业规划教材

电子测量技术

主 编 李延廷
副主编 李宗宝 王铁文
参 编 孙 巍
主 审 赵便华



机械工业出版社

本书共 8 章, 主要内容包括电子测量概述、简单电子测量仪器、信号发生器、信号示波测量技术、电子元器件和电路特性的测量、数据域测量技术、电路仿真测量技术及自动测量技术。同时, 为了便于教学、自学和自我检测, 各章都含有学习目标、小结、习题和实训项目, 在本书最后还提供了各章习题的参考答案。

本书具有较强的系统性、实用性和先进性, 注重科学性与通俗性的有机结合, 尽量淡化复杂的理论分析, 强调对学生实践能力的培养。

为方便教学, 本书配有免费电子课件, 凡选用本书作为授课教材的学校, 均可来电索取, 咨询电话: 010-88379375, Email: cmpgaozhi@sina.com。

本书可作为高职高专院校、技师学院、中等职业技术学校及成教学院的电子技术应用专业、电子与信息技术专业、汽车电子技术专业、通信专业及相关专业的教材, 也可作为同类培训教材及电子测量技术人员及其他电类专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子测量技术/李延廷主编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 7

高职高专“十一五”电子信息类专业规划教材

ISBN 978-7-111-27309-7

I. 电… II. 李… III. 电子测量 - 高等学校: 技术学校 - 教材
IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 104004 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: 于 宁 责任编辑: 关晓飞 版式设计: 霍永明

责任校对: 李秋荣 封面设计: 王伟光 责任印制: 邓 博

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14 印张 · 346 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-27309-7

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

前 言

当前,国家正在大力发展高等职业教育,并不断地探索适合职业教育的教学内容、教学模式、教学方法及教学手段等。正是在这种大环境下,我们以高职高专教育的基本要求为出发点,经过对若干电子类、通信技术类及相关技术类高职高专毕业生就业岗位的工作需要进行充分调查、分析和总结后,确定了本书的编写内容和编写方式,并力求使本书能够较好地适应高职高专院校“电子测量技术”课程教学的需要。

本书的显著特点是它的实用性、先进性及理论与实践的统一性,且在编写时力求做到科学性与通俗性的有机结合,知识面广度适中,技能训练项目较多,以强化培养学生的电子测量技能。

本书的第1章、第6~8章由北京信息职业学院李延廷编写,第2、3章由大连职业技术学院李宗宝编写,第4章主要由烟台职业学院孙巍编写,第5章主要由广东机电职业技术学院王铁文编写,另有第4、5章的小部分内容由李延廷编写。本书由李延廷担任主编并负责统稿,由北京信息职业学院赵便华担任主审。

本书可作为高职高专院校、技师学院、中等职业技术学校及成教学院的电子技术应用专业、电子与信息技术专业、汽车电子技术专业、通信专业及相关专业的教材,也可作为同类培训教材及电子测量技术人员及其他电类专业工程技术人员的参考书。本书的参考学时数为90学时(包含实训教学的学时数)。

在本书编写过程中,得到了机械工业出版社、编写者所在单位的领导和同仁的支持,在此表示感谢。尽管编者在内容的组织和编写方面尽了最大努力,但由于编者水平所限,本书难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 电子测量概述 1

- 1.1 电子测量的意义 1
- 1.2 电子测量的特点 1
- 1.3 电子测量的内容 2
- 1.4 电子测量的方法 3
- 1.5 电子测量仪器的分类 4
- 1.6 电子测量常识 5
- 1.7 测量误差的基本概念 5
 - 1.7.1 测量误差的表示方法 5
 - 1.7.2 测量误差的产生原因和分类 8
- 1.8 测量结果的处理 9
 - 1.8.1 有效数字的处理 9
 - 1.8.2 测量数据的表示方法 10
- 本章小结 11
- 习题一 11

第2章 简单电子测量仪器 12

- 2.1 数字万用表 12
 - 2.1.1 数字万用表的组成 12
 - 2.1.2 数字万用表的特点及主要技术指标 12
 - 2.1.3 数字万用表实例 13
- 2.2 电容电感表 16
 - 2.2.1 电容电感表的组成 16
 - 2.2.2 电容电感表实例 16
- 2.3 晶体管毫伏表 17
 - 2.3.1 晶体管毫伏表的组成 17
 - 2.3.2 晶体管毫伏表实例 18
- 2.4 超高频毫伏表 19
 - 2.4.1 超高频毫伏表的组成 19
 - 2.4.2 超高频毫伏表实例 19
- 2.5 数字频率计 21

- 2.5.1 数字频率计的组成 21
- 2.5.2 数字频率计的主要测量功能 22
- 2.5.3 数字频率计实例 23
- 2.6 实训1: 基本电学量的测量 27
- 2.7 实训2: 数字频率计的使用 28
- 本章小结 29
- 习题二 29

第3章 信号发生器 31

- 3.1 信号发生器的组成和分类 31
 - 3.1.1 信号发生器的基本组成 31
 - 3.1.2 信号发生器的分类 32
 - 3.1.3 信号发生器的主要性能指标 32
- 3.2 低频信号发生器 33
 - 3.2.1 低频信号发生器的组成 34
 - 3.2.2 低频信号发生器实例 35
- 3.3 高频信号发生器 36
 - 3.3.1 高频信号发生器的组成 36
 - 3.3.2 高频信号发生器的分类 37
 - 3.3.3 高频信号发生器实例 38
- 3.4 函数信号发生器 40
 - 3.4.1 函数信号发生器的基本组成 41
 - 3.4.2 函数信号发生器实例 42
- 3.5 电视信号发生器 45
 - 3.5.1 电视信号发生器的组成 45
 - 3.5.2 电视信号发生器的主要技术指标 46
 - 3.5.3 电视信号发生器的使用方法 47
- 3.6 实训1: 低频信号发生器的使用 49
- 3.7 实训2: 高频信号发生器的使用 50
- 3.8 实训3: 函数信号发生器的使用 52
- 3.9 实训4: 电视信号发生器的使用 53
- 本章小结 54
- 习题三 55



第4章 信号示波测量技术 56

4.1 模拟示波器 56

4.1.1 波形显示原理 56

4.1.2 通用模拟示波器 60

4.1.3 示波器的面板 61

4.1.4 示波器的使用方法 63

4.2 数字存储示波器 67

4.2.1 数字存储示波器的基本组成及特点 67

4.2.2 CGC2000 系列数字存储示波器 68

4.2.3 CGC2000 系列数字存储示波器的使用方法 72

4.3 频谱分析仪 74

4.3.1 频谱分析的基本概念 75

4.3.2 频谱分析仪的基本组成 78

4.3.3 频谱分析仪的分类 78

4.3.4 频谱分析仪的主要技术指标 81

4.3.5 频谱分析仪的应用 82

4.3.6 AT5010 型频谱分析仪 84

4.4 实训1: 模拟示波器的使用 86

4.5 实训2: 数字存储示波器的使用 88

4.6 实训3: 频谱分析仪的使用 89

本章小结 90

习题四 91

第5章 电子元器件和电路特性的测量 92

5.1 低频电路元件参数的测量 92

5.1.1 电阻的测量原理和方法 92

5.1.2 电容的测量原理和方法 93

5.1.3 电感的测量原理和方法 94

5.1.4 QS18A 型便携式万用电桥 95

5.2 高频电路元件参数的测量 97

5.2.1 谐振法测量原理 97

5.2.2 高频 Q 表测量原理 97

5.2.3 QBG-3 型高频 Q 表 100

5.3 晶体管特性参数的测量 104

5.3.1 晶体管特性图示仪 104

5.3.2 JT-1 型晶体管特性图示仪 105

5.3.3 使用方法和使用注意事项 108

5.3.4 测试实例 109

5.4 电路失真度的测量 111

5.4.1 失真度测量概述 111

5.4.2 BS1 型失真度测量仪 112

5.5 电路频率特性的测量 115

5.5.1 频率特性的测量方法 115

5.5.2 频率特性测试仪的基本组成 115

5.5.3 频率特性测试仪的主要技术指标 116

5.5.4 频率特性测试仪的使用方法 117

5.5.5 频率特性测试仪测试实例 119

5.6 实训1: 万用电桥与 Q 表的使用 121

5.7 实训2: 晶体管特性图示仪的使用 122

5.8 实训3: 失真度测量仪的使用 122

5.9 实训4: 频率特性测试仪的使用 123

本章小结 124

习题五 124

第6章 数据域测量技术 125

6.1 数据域测量概述 125

6.1.1 数据域测量的基础知识 125

6.1.2 数据域测量系统的组成 126

6.2 数据域测量设备 127

6.2.1 逻辑笔 127

6.2.2 数字信号源 127

6.3 逻辑分析仪 129

6.3.1 逻辑分析仪概述 129

6.3.2 逻辑分析仪的触发方式 130

6.3.3 逻辑分析仪的显示方式 131

6.3.4 TEK318 型逻辑分析仪 133

6.4 误码测试仪 135

6.4.1 误码测试仪概述 135

6.4.2 HDB88521 型误码测试仪 136

6.5 实训1: 逻辑分析仪的使用 137

6.6 实训2: 误码测试仪的使用 138

本章小结 139

习题六 140

第7章 电路仿真测量技术 141

7.1 电路仿真测量技术概述 141

7.2 Multisim8 142

7.2.1 Multisim8 的工作窗口 142

7.2.2 Multisim8 的虚拟仪器 145



7.3 电路原理图的设计	151	8.2.2 虚拟仪器的硬件组成	173
7.3.1 电路原理图设计的步骤	152	8.2.3 虚拟仪器的软件组成	175
7.3.2 电路原理图设计实例	152	8.3 测量软件开发工具	175
7.4 电路仿真测量	154	8.3.1 常用测量软件开发工具	176
7.4.1 电路仿真测量实例1: 基尔霍夫 电压定律	154	8.3.2 虚拟仪器图形编程软件 LabVIEW	176
7.4.2 电路仿真测量实例2: 单级放大 器	154	8.4 创建虚拟仪器	183
7.4.3 电路仿真测量实例3: 反相加 法电路	159	8.5 数据采集设备的连接和设置	184
7.4.4 电路仿真测量实例4: LC 振荡 电路	160	8.5.1 数据采集过程	184
7.4.5 电路仿真测量实例5: 十进制计 数器	160	8.5.2 数据采集设备	184
7.4.6 电路仿真测量实例6: 双边带调 幅电路	162	8.5.3 LabVIEW 数据采集系统的组成	186
7.5 实训1: 熟悉 Multisim8	164	8.5.4 数据采集设备的设置与测试	187
7.6 实训2: 设计电路原理图	165	8.6 模拟信号采集	190
7.7 实训3: 电路仿真测量1	165	8.6.1 数据采集通道	190
7.8 实训4: 电路仿真测量2	167	8.6.2 数据采集函数	191
本章小结	168	8.7 信号调理	191
习题七	168	8.7.1 信号调理设备的类型	191
第8章 自动测量技术	170	8.7.2 信号调理设备的设置	192
8.1 自动测量系统概述	170	8.8 自动测量系统的设计	192
8.1.1 自动测量系统的基本组成	170	8.8.1 温度测量原理	192
8.1.2 自动测量系统的发展过程	171	8.8.2 在 Traditional DAQ 系统中进行 温度测量	193
8.1.3 自动测量系统的组建	172	8.9 实训1: 熟悉 LabVIEW	193
8.2 虚拟仪器	172	8.10 实训2: 设计虚拟电子仪器(应变 测量系统)	195
8.2.1 虚拟仪器概述	172	本章小结	198
		习题八	198
		习题参考答案	200
		参考文献	218

第1章 电子测量概述

本章学习目标：

- 1) 了解电子测量的意义、特点、内容及方法。
- 2) 掌握电子测量仪器的分类和电子测量常识。
- 3) 掌握测量误差的表示方法、测量误差产生的原因和分类。
- 4) 掌握有效数字的处理方法和测量数据的表示方法。

1.1 电子测量的意义

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程。在认识客观世界时，人们首先通过观察形成定性的认识，再进行测量得到定量的认识，并在此基础上总结出客观规律。因此，测量是揭示未知科学知识的重要手段。科学的进步与测量技术的进步是相互依赖、相互促进的。测量不仅用于验证理论，而且是发现新问题、提出新理论的重要依据。

随着测量学和电子学的发展和相互融合，出现了以电子技术作为基础的测量手段，即电子测量。从广义上讲，电子测量是指利用电子技术进行的测量，但从狭义上看，则是特指各种电参量和电性能的测量。目前，电子测量已经成为一门发展迅速、应用广泛、精确度高、对现代科技的发展起着重大推动作用的独立学科。从某种意义上说，近代科学技术的水平是由电子测量的水平来保证和体现的。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。

1.2 电子测量的特点

电子测量与其他测量方法相比，主要具有下列的显著特点：

1. 测量频率范围宽

电子测量不仅可以测量直流电量，而且可以测量交流电量。在测量交流电量时，可测量频率范围宽，下限可达 10^{-4}Hz ，上限高达 THz 量级。但在实际测量中，应特别注意：由于各仪器的频率响应范围不尽相同，即便是测量同一种电量，使用的测量方法和测量仪器也可能不同。例如，普通示波器的可测量频率范围常为 $0 \sim 20\text{MHz}$ ，若测量频率超过 20MHz 的交流信号的周期或频率，则必须改换其他仪器（如频率计）。

2. 仪器的量程宽

量程是仪器测量范围的上限值与下限值之差。电子测量仪器常常具有相当宽的量程。例如：一台数字电压表可以测量从纳伏（nV）级至千伏（kV）级范围的电压，其量程达 9 个数量级；一台频率计的量程常常可达到 17 个数量级。

3. 测量精度高

电子测量的精度比其他测量方法高得多，特别是对频率和时间的测量，误差可减小到



10^{-13} 量级。

4. 测量速度快

电子测量是通过电磁波的传播和电子运动来进行的，因此可以实现测量过程的高速度。只有测量的高速度，才能测出快速变化的事物或物理量，这对于现代科学技术的发展具有特别重要的意义。例如，瞬态信号的波形、原子核的裂变过程、导弹的发射速度、人造卫星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

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器实现遥测。例如，对于高速运动的、远距离或环境恶劣的、人体不便于接近或无法到达的区域（如深海、地下、人造卫星等），可通过传感器或电磁波、光、辐射等方式进行测量。

6. 易于实现测量自动化

由于大规模集成电路和微型计算机的应用，使电子测量出现了崭新的局面。电子测量与计算机技术相结合，使测量仪器智能化，可以实现测量过程的自动化。例如，数字存储示波器在测量中能实现程控、自动量程转换、自动校准、自动诊断故障和自动修复，对于测量结果可以自动记录，自动进行数据运算、分析和处理。这类仪器还有数字万用表、数字电容表、数字频率计、逻辑分析仪、网络分析仪及一些自动测试系统等。

正是基于电子测量具有上述的特点，所以可使它广泛应用到科学技术、社会生活等的许多方面。一个国家的电子测量技术水平往往标志着这个国家的科技水平。这就使得电子测量技术在现代科技中占有十分重要的地位，也使得电子测量技术得到迅速的发展。

1.3 电子测量的内容

随着电子技术的不断进步，电子测量的内容日益丰富。在本书中，电子测量主要涉及电子学领域的电学参量、元器件特性及电路特性等方面的测量。要具体介绍的内容如下：

1. 信号发生器

信号发生器又称信号源，主要介绍信号源的作用、种类、主要性能指标，通用低频和高频信号发生器的组成、原理、特性和应用。

2. 电能量测量

电能量测量主要指电压、电流、功率及效率等的测量。

3. 时频测量

时频测量主要介绍电子计数法测量时间和频率，通用计数器的作用、使用方法及应用。

4. 阻抗特性测量

阻抗特性测量主要指电路、元器件参数的测量，如电阻、电感、电容、品质因数等的测量。

5. 电路性能测量

电路性能的测量包括放大倍数、输入阻抗、输出阻抗、衰减、灵敏度、通频带、噪声指数及失真度等的测量。

6. 时域测量

时域测量主要介绍模拟示波器和数字示波器的作用、工作原理、使用方法，以及用示波



器测量波形、周期、频率、相位、失真度、调幅度及逻辑状态的方法等内容。

7. 频域测量

频域测量主要介绍扫频仪和频谱分析仪的作用、使用方法及用于测量幅频特性和信号频谱等内容。

8. 数据域测量

数据域测量主要介绍数据域基本概念，逻辑分析仪的作用、使用方法及应用等内容。

9. 自动测量技术

自动测量技术主要介绍自动测试系统的组成、发展概况、总线接口、测试软件等内容。

上述的各种待测量中，频率、电压、时间、阻抗等是基本电参数，对它们的测量是其他许多派生参数测量的基础。

1.4 电子测量的方法

一个电参量的测量可以通过不同的方法实现。电子测量方法的分类形式有多种，这里仅介绍几种常用的方法。

1. 按测量手段分类

(1) 直接测量 用已经标定好的测量仪器对被测量直接进行测量并获得测量值的方法称为直接测量。例如，用频率计测频率，用万用表测量电压、电流、电阻，用数字示波器测量正弦交流信号的电压和周期等。

(2) 间接测量 先对与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量，然后按照函数关系求出被测量值的方法称为间接测量。例如，要测量放大电路的输入阻抗，可先测量放大电路输入端的输入电压和输入电流，再依据欧姆定律即可计算出输入电阻；要测量电阻消耗的功率，可先测量电阻两端的电压及流过电阻的电流，再根据功率的计算公式即可求出电阻的功率值。

(3) 组合测量 在被测量与多个未知量有关时，可通过改变测量条件进行多次测量，根据被测量与未知量之间的函数关系组成方程组，求出有关未知量的数值。这种测量方法称为组合测量，它是一种兼用直接测量与间接测量的方法。

上述方法中，直接测量的测量过程简单、速度快，在工程技术中运用较广；间接测量多用于科学实验，在生产和工程技术中应用较少；组合测量的过程复杂、测量时间长，但精度较高，适用于科学实验及一些特殊的场合。

2. 按被测信号性质分类

(1) 时域测量 时域测量是指对被测对象随时间变化的特性进行的测量。在这种测量中，把被测信号看成时间的函数。例如，用示波器可观测正弦交流信号的波形、峰峰值电压、周期、上升时间、下降时间以及两路同频信号的相位差。

(2) 频域测量 频域测量是指对被测对象在不同频率时的特性进行的测量。在这种测量中，把被测信号看成频率的函数。例如，用频谱分析仪观测调幅收音机接收的高频信号的频谱、谱线的数量、各谱线的频率；用扫频仪观测放大器的幅频特性曲线和增益。

(3) 数据域测量 数据域测量是指对数字系统的逻辑特性进行的测量。例如，用逻辑分析仪可以分析离散信号组成的数据流，还可观察多个通道输入的并行数据及单个通道的串



行数据。

(4) 随机测量 随机测量是指对各类噪声、干扰信号等随机量进行的测量。例如,用示波器观察一些电路在静态时的输出信号。

另外,电子测量方法还有其他的分类形式,如动态测量与静态测量、模拟测量与数字测量、实时测量与非实时测量、有源测量与无源测量等。

1.5 电子测量仪器的分类

电子测量仪器一般可分为通用仪器和专用仪器两大类。通用仪器是为测量某个或某些基本电参量而设计的仪器,能较广泛地用于多种电子测量,如万用表、频率计和示波器等。专用仪器是各个专业领域中测量特殊参量的仪器,如 GSM (全球移动通信系统) 手机测试仪、汽车解码器、汽车发动机综合分析仪等。

通用电子测量仪器按照其功能可以分为以下几类:

1. 信号发生器

信号发生器是用来提供各种指定幅度、频率和波形的信号的仪器,如低频信号发生器、高频信号发生器、函数信号发生器及字信号发生器等。

2. 电平测量仪器

电平测量仪器是用来测量电压、电流等参数的仪器,如电压表、电流表及万用表等。

3. 时间、频率和相位测量仪器

时间、频率和相位测量仪器是用来测量电信号的频率、时间间隔和相位的仪器,如频率计、相位计及波长表等。

4. 电子元器件测量仪器

电子元器件测量仪器是用来观测各种电子元器件的电参数或特性曲线的仪器,如晶体管特性图示仪、集成电路测试仪及元件(电阻、电容和电感)参数测试仪等。

5. 信号分析仪器

信号分析仪器是用来观察、分析和记录各种电量变化的仪器,如示波器、波形分析仪及频谱分析仪等。

6. 网络特性测量仪器

网络特性测量仪器是用于测量电气网络各种特性(如频率特性、阻抗特性和功率特性等)的仪器。如阻抗测试仪、扫频仪及网络分析仪等。

7. 电波特性测量仪器

电波特性测量仪器是用于对电磁波传播、干扰强度等参量进行测量的仪器,如接收测试机、场强计及干扰测试仪等。

8. 逻辑分析仪

逻辑分析仪用于对数字系统的数据域进行测量。利用该仪器可对数字逻辑电路和数字系统的数据流或事件进行记录、显示,并可对数字系统的故障进行分析和诊断。



1.6 电子测量常识

在电子测量实训室进行电子测量实训时，应熟悉一些电子测量常识。

1. 电子测量环境条件

电子测量仪器是由各种电子元器件构成的，往往不同程度地受到温度、湿度、大气压、振动、电网电压、电磁干扰等外界环境的影响。因此，在用相同的仪器、相同的测量方法测量相同的物理量时，有可能出现不同的结果。

2. 电子测量仪器的布置和连接

在进行电子测量时，常常需要多台测量仪器和辅助设备。电子测量仪器的布置方式、连接方法等常会对测量结果、仪器和实训者的安全产生或多或少的的影响。

在摆放和连接仪器时，应注意：尽量使仪器的刻度盘或显示器与实训者的视线垂直，以减小视差；使用频繁的仪器放在便于操作的地方；在多台仪器叠放时，应将体积小、重量轻的放在上面；散热较多的仪器应与其他仪器保持一定距离；电子测量仪器之间的连线原则上应尽量短、少交叉，以免引起信号串扰或寄生振荡等。

3. 电子测量仪器的接地

电子测量仪器的接地分为安全接地和技术接地两种。安全接地是为了保证实训者的安全。安全接地将仪器的机壳与大地相连，防止机壳上积累的静电荷或仪器漏电对仪器和实训者造成伤害。为此，实训室管理者应经常检查总地线是否正常、各种仪器的机壳是否带电。

技术接地则是为了保障仪器设备能够正常工作。技术接地的“地”并非大地，而是等电位点，即测量仪器与被测电路的基准电位点。技术接地一般有一点接地和多点接地两种，前者适用于直流或低频电路的测量，后者适用于高频电路的测量。

1.7 测量误差的基本概念

在一定条件下，被测量本身的真实数值称为真值。测量的目的是为了获得真值。然而，在实际测量中，由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的素质等方面的制约，测量结果与被测量的真值之间会有一定的差别，这个差别就是测量误差。测量误差过大，将使根据测量工作得出的结论失去价值，甚至会给工作带来危害。人们研究误差的目的，就是要了解误差产生的原因和规律，寻求减小测量误差的方法，使测量结果准确可靠。但应注意：不要过分追求误差小，只要测量误差在允许的范围内即可。

1.7.1 测量误差的表示方法

测量误差有绝对误差和相对误差两种表示方法。

1. 绝对误差

(1) 定义 被测量值与其真值之差称为绝对误差。若设被测量值为 x ，其真值为 A_0 ，绝对误差为 Δx ，则

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

注意：这里所说的被测量值是指仪器的指示值。在实际测量中， x 、 A_0 将被物理量的习



惯表示符号代替。如测量电流, 则式 (1-1) 将写成 $\Delta I = I_x - I_0$ 的形式。

由于被测量值 x 总含有误差, x 可能比 A_0 大, 也可能比 A_0 小。因此, Δx 既有大小, 又有正负。 Δx 的量纲和被测量值相同。绝对误差可以说明测量结果偏离真值的程度和方向。

例 1.1 某个待测电流, 其真值为 160mA, 用电流表测量的指示值为 158mA, 则绝对误差为

$$\Delta I = I_x - I_0 = 158\text{mA} - 160\text{mA} = -2\text{mA}$$

被测量的真值是客观存在的, 但无法得到, 因此, 在实际测量中通常用实际值 A 来代替真值 A_0 。实际值又称为约定真值, 它是根据测量误差的要求, 用高一级的标准仪器或器具测量所得的数值。这时, 绝对误差可表示如下:

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

(2) 修正值 与绝对误差的大小相等, 但符号相反的量值称为修正值。若修正值用 C 来表示, 则

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

对测量仪器进行定期检定时, 要用标准仪器与受检仪器相对比, 以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。在日常测量中, 用式 (1-3) 的变形式

$$A = x + C \quad (1-4)$$

来修正测量值, 以求出被测量的实际值。

例 1.2 某个待测电压, 其示值为 60.84mV, 用万用表测量时的修正值为 0.02mV, 则被测电压的实际值为

$$U_A = U_x + U_c = 60.84\text{mV} + 0.02\text{mV} = 60.86\text{mV}$$

2. 相对误差

绝对误差与被测量的真值的比值称为相对误差。若相对误差用 γ_0 表示, 则

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

相对误差是两个具有相同量纲的量的比值, 只有大小和符号, 没有量纲, 能确切地反映测量的准确程度。

在实际测量中, 常用实际值 A 代替式 (1-5) 中的真值 A_0 , 这样得到的相对误差称为实际相对误差, 常用 γ_A 来表示。实际相对误差 γ_A 可表示为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

例 1.3 现有两个待测电压, 其实际值分别为 200V、20V, 用万用表测量的示值分别为 201V、21V, 则两个被测电压的绝对误差和实际相对误差分别为

$$\Delta U_1 = U_{x1} - U_{A1} = 201\text{V} - 200\text{V} = 1\text{V}$$

$$\Delta U_2 = U_{x2} - U_{A2} = 21\text{V} - 20\text{V} = 1\text{V}$$

$$\gamma_{A1} = \frac{\Delta U_1}{U_{A1}} \times 100\% = \frac{1}{200} \times 100\% = 0.5\%$$

$$\gamma_{A2} = \frac{\Delta U_2}{U_{A2}} \times 100\% = \frac{1}{20} \times 100\% = 5\%$$

通过计算可看出, $\Delta U_1 = \Delta U_2$, 但 $\gamma_{A1} < \gamma_{A2}$, 这意味着相对误差可以更好地反映测量的



准确程度。

在误差较小、要求不太严格时，也可以用被测量值 x 代替实际值 A ，这样得到的相对误差称为示值相对误差，常用 γ_x 来表示。示值相对误差 γ_x 可表示为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-7)$$

当 Δx 很小时， $x \approx A$ ，则 $\gamma_x = \gamma_A$ 。

在实际测量中，还可使用绝对误差与仪器的满刻度值 x_m 的比值来表示相对误差，称为引用相对误差（或称满度相对误差），用 γ_m 来表示。引用相对误差 γ_m 可表示为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-8)$$

测量仪器使用最大引用相对误差来表示其准确度，这时有

$$\gamma_{mm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中， Δx_m 为仪器在该量程范围内出现的最大绝对误差； x_m 为满刻度值； γ_{mm} 为仪器在工作条件下不应超过的最大相对误差，它反映仪表的综合误差的大小。

电工测量仪表可按 γ_{mm} 值分为 7 个准确度等级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。0.1 级表示该仪表的最大引用相对误差不会超过 $\pm 0.1\%$ ；1.0 级表示该仪表的最大引用相对误差不会超过 $\pm 1.0\%$ ，但超过 $\pm 0.5\%$ 。准确度等级也常用符号 S 表示。 $S=1$ ，说明仪表的满刻度相对误差 $\gamma_{mm} \leq \pm 1\%$ 。

由上述内容可知，测量的绝对误差 Δx 和相对误差 γ_x 满足以下关系：

$$\Delta x \leq x_m S\% \quad (1-10)$$

$$\gamma_x \leq \frac{x_m S\%}{A_x} \quad (1-11)$$

由式 (1-10) 可知，当一个仪表的等级 S 确定后，测量绝对误差的最大值与仪表刻度的上限 x_m 成正比。因此，所选仪表的满刻度值不应比被测量值 x 大很多。同样，由式 (1-11) 知，在仪表等级 S 确定后， x 越接近 x_m ，则测量相对误差越小，测量准确度越高。因此，在测量中选择仪表量程时，一般应使被测量的值在仪表满刻度的 $2/3$ 以上。**应注意：**该结论只适用于正向线性刻度的电压表、电流表等仪表；而对于反向刻度的仪表（如万用表的欧姆档），由于在设计或检定仪表时均以中值电阻为基准，故在使用这类仪表时应尽可能使表针指在中心位置附近区域，在中心位置时的测量准确度最高。

例 1.4 某被测电压为 75V，用 0.5 级、100V 量程的电压表进行测量，则单次测量可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta x_m = \gamma_{mm} \times x_m = \pm 0.5\% \times 100V = \pm 0.5V$$

例 1.5 某待测电压的实际值约为 25V，现用两个量程和准确度等级分别为 100V、1.0 级和 50V、1.5 级的电压表进行测量，则用 100V、1.0 级的电压表进行测量的最大绝对误差和最大示值相对误差分别为

$$\Delta x_{m1} = \gamma_{mm1} \times x_{m1} = \pm 1.0\% \times 100V = \pm 1.0V$$

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta x_{m1}}{x_1} \times 100\% = \frac{\pm 1.0}{25} \times 100\% = \pm 4.0\%$$



用 50V、1.5 级的电压表进行测量的最大绝对误差和最大示值相对误差分别为

$$\Delta x_{m2} = \gamma_{mm2} \times x_{m2} = \pm 1.5\% \times 50V = \pm 0.75V$$

$$\gamma_{x2} = \frac{\Delta x_{m2}}{x_2} \times 100\% = \frac{\pm 0.75}{25} \times 100\% = \pm 3.0\%$$

可见，用准确度等级低的 50V、1.5 级电压表测量带来的误差较小。因此，在实际测量中，不宜片面追求准确度等级，而应兼顾准确度等级和量程。

1.7.2 测量误差的产生原因和分类

1. 误差来源

由前面的分析可知，任何实际的测量都存在一定的误差。误差产生的原因很多，主要原因如表 1-1 所示。

表 1-1 误差产生的原因

误差名称	原 因
仪器误差	仪器及附件的电气和机械性能不完善，如未标定好、刻度不准、零点漂移及非线性等
理论误差	测量所依据的理论不严密或用近似公式及近似计算测量结果等
方法误差	测量方法不合理，如用模拟万用表测量高内阻回路的电压
使用误差	仪器安装、调节、放置或使用不当等
人身误差	由测量人员的分辨力、视觉疲劳、不良习惯或缺乏责任心等因素引起
影响误差	由外界环境引起，如温度、湿度、电磁干扰、电网电压等引起

2. 测量误差的分类

根据测量的性质和特点，可将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差 在一定条件下，误差的数值保持恒定或按照一定规律变化，这种误差称为系统误差，如万用表零点不准、测量方法不合理等引起的误差。系统误差越小，测量结果越准确。

(2) 随机误差 在同一条件下进行的多次测量的结果出现无规律的变化，这种误差称为随机误差，如外界干扰或操作者感官无规则的微小变化等因素引起的误差。在足够多次的测量中，随机误差服从一定的统计规律，具有单峰性、有界性、对称性及抵偿性等特点。随机误差越小，测量精度越高。

(3) 粗大误差 在一定条件下，测量值显著偏离实际值的误差，称为粗大误差。粗大误差是由于测量方法错误、操作不正确、读数错误、瞬间强干扰、仪器工作不正常等原因引起的。粗大误差明显地歪曲了测量结果，其数值远远大于系统误差和随机误差。

在测量中，应采取恰当的措施减小甚至消除上述误差对测量结果的影响。对于含有粗大误差的测量值，在进行数据处理时，应首先予以剔除。对于系统误差，在测量前应做好准备工作，排查可能的系统误差源并设法消除，或先确定误差的大小，再采用适当的方法引入修正值加以削弱或消除。对于随机误差，可在相同条件下进行多次测量，并对多次测量结果求平均值来加以减小。



1.8 测量结果的处理

在测量时,要认真地记录测量结果,对与理论值或估算值相差甚远的数据,在未查明原因前,不要轻易舍掉,更不要修改,因为这些数据可能反映出测量仪器存在的故障或是某种科学新发现的信号。在此基础上,就可以对测量数据进行分析 and 整理,并得出合理的结论。测量结果的处理是电子测量的重要组成部分,其内容主要分为有效数字的处理和测量数据的表示方法。

1.8.1 有效数字的处理

1. 有效数字

测量结果通常用由若干位数字组成的数据来表示。若想用数据来恰当地表示测量结果,就必须探讨有效数字的问题。

有效数字是指从最左边第一位非零数字开始,直到右边最后一个数字为止的所有数字。如测量电流为 0.460A ,该电流值中的4、6、0三个数字是有效数字,左边的一个0是非有效数字,而数字最右边的0是有效数字;最末位的0是估测数字(称为欠准数字),末位数字前面的有效数字都是准确数字。为了准确地使用有效数字,应特别注意以下几个方面:

1) 不能随便在测量数字的最后面增减数字0。增加或减少数字0后,虽然测量值的大小没有改变,但测量准确程度将被人为夸大或降低。

2) 有效数字不能因单位变化而变化。如测量结果为 6.0V ,其有效数字位数为两位,若将单位改成 mV 后,将 6.0V 改写成 6000mV ,则有效数字位数变成4位,这是错误的,应改写成 $6.0 \times 10^3\text{mV}$,有效数字的位数仍为两位。

3) 测量误差原则上可由有效数字的位数估计出来,一般规定测量误差不超过末位有效数字的一半。例如: 13.6mA ,则测量误差不超过 $\pm 0.3\text{mA}$; 3.20V ,则测量误差不超过 $\pm 0.005\text{V}$ 。

2. 有效数字的舍入原则

在记录测量结果时,若给出的数字的位数超过要保留的有效数字的位数,则多出的数字位应删掉。删掉多出的数字位的原则是“四舍五入”,其具体内容如下:遇到大于5的数,则前一位加1;遇到小于5的数,则舍去;遇到等于5的数,若5前面的数字为偶数则舍掉,若5前面的数字为奇数则前一位加1。

经过数字舍入后,新数字的末位是欠准数字,末位以前的数字为准确数字。末位欠准的程度不超过该位单位的一半。

实际上,有效数字的位数是由误差范围决定的,不能随便增减。在写带有绝对误差的数字时,有效数字的末位应与绝对误差取齐,即两者的欠准数字所在的数字位必须相同。如 $(9600 \pm 1)\text{kHz}$,可写成 $9.600\text{MHz} \pm 1\text{kHz}$,但不能写成 $9.6\text{MHz} \pm 1\text{kHz}$ 。当有效数字的单位与误差的单位相同时,有效数字的单位可不必标出。

3. 近似运算法则

在处理数据时,经常进行数据的近似运算。近似运算要遵循的主要规则如下:

1) 在进行加减运算时,计算结果有效数字的取舍以精度最差的运算项为准。精度最差



项是小数点后有效数字位数最少者。

2) 在进行乘除运算时, 计算结果的有效数字位数与参加运算的项中有效数字位数最少者相同, 而与小数点无关。

3) 在对参加运算的数据取舍时, 可多留一位, 以免引起积累误差。

1.8.2 测量数据的表示方法

在实际测量中, 常用的测量数据表示方法主要有列表法、图解法和经验公式法等。列表法简单、方便, 数据易于比较、参考, 而图解法和公式法比较直观, 容易看出数据的变化趋势。本节仅简要介绍图解法和经验公式法。

1. 图解法

图解法是指利用测量数据画出一(或多)条曲线, 以直观地描述数据的变化规律, 如二极管的伏安特性曲线、晶体管的输出特性曲线及放大器的幅频特性曲线等。

由于测量数据存在误差或错误, 测量数据具有一定的离散性, 很难得到平滑的曲线, 需要用专门的方法进行曲线修匀。

(1) 作图要点 首先要选好坐标。通常选用直角坐标, 有时也用极坐标。若自变量的范围很宽, 可以选用对数坐标, 如绘制放大器的幅频特性曲线即采用对数坐标。坐标的比例可视需要而定。绘制曲线图时, 应选用坐标纸。在曲线发生急剧变化的位置, 应多取一些测量数据。

(2) 修匀曲线 将各个数据点连接成光滑曲线的过程称为曲线的修匀。由于测量误差的存在, 不同人员所作的曲线可能有不小的差异。为了提高作图的精度, 可以用分组平均法修匀。该方法是将相邻的若干个数据分为一组, 估计各组的几何重心点的位置, 然后将重心点连接起来。用分组平均法修匀曲线的方法如图 1-1 所示。由于这种方法减小了随机误差的影响, 从而使曲线更符合实际情况。

2. 经验公式法

经验公式是在实际测量基础上总结出来的, 并可在一定的条件下使用。这种公式以数学表达式的形式反映事物的内在规律性, 便于从理论上研究事物的量与量之间的关系。

在获得的已修匀曲线的基础上, 依据其形状估算出经验公式。在误差理论中, 常采用最小二乘法和回归分析法等方法确定经验公式。

(1) 最小二乘法 最小二乘法的原理: 在同一精度的测量中, 最佳值是能使各测量残差 ($\nu_i = x_i -$

$\bar{x}$) 的二次方和 (即 $\sum_{i=1}^n \nu_i^2$) 为最小的那个值。这种

方法能充分利用误差的抵偿作用有效减小随机误差的影响, 因此所得结果具有最大的可信赖性。

(2) 回归分析法 回归分析法是一种处理多个变量之间相互关系的常用数理统计方法。回归分析包括根据测量数据确定函数类型和确定函数的参数两个方面的任务。函数类型通常

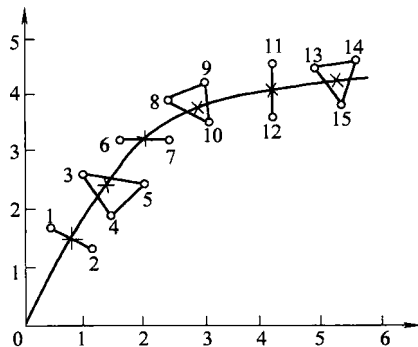


图 1-1 用分组平均法修匀曲线