

# 电子测量仪器与应用

贺晓华 李嘉安娜 主编

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 电子测量仪器与应用

主 编 贺晓华 李嘉安娜  
副主编 谢完成 李和平 谢 平  
          吴水平 刘桂兰  
主 审 刘罗仁 黄爱辉

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书结构层次清晰,内容详实,图文并茂,共分为8个单元。单元1 主要介绍电子测量方法、电子测量仪器的分类与发展,电子测量误差与测量结果的表示;单元2 主要介绍常用的电压测量仪器;单元3 介绍信号发生器的工作原理、技术指标与应用;单元4 介绍示波器的工作原理、技术指标、使用方法及其应用;单元5~单元7 主要介绍频率、时间、电子元器件参数、频域信号等的测量方法,以及测试仪表的工作原理、主要技术指标与应用;单元8 主要介绍虚拟“电子工作台”Multisim 的工作界面、仿真电路的绘制方法、虚拟电子仪器的使用方法。

每个单元前面有明确的教学目标,后面有思考与练习,单元2~单元8 均根据单元内容和高校实训条件编写了较详细的技能训练项目,每个训练项目都有明确的技能考核评价条目,突显教学特色。

本书可作为高等院校电子类、电气类、自动化类、机电类和其他相关专业的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

电子测量仪器与应用/贺晓华,李嘉安娜主编. —北京:北京理工大学出版社,2016.1  
ISBN 978-7-5682-1116-1

I. ①电… II. ①贺… ②李… III. ①电子测量设备-高等学校-教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第195689号

---

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/13.5

字 数/316千字

版 次/2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

定 价/48.00元

责任编辑/陈莉华

文案编辑/陈莉华

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 前言

## Preface

本书是根据目前高校教育的特点,从电子测量仪器与应用的教学实际出发,在教学实践中通过对教学内容的总结提炼而成的,使教材内容更加合理实用、更加符合教学规律。主要特点如下:

(1) 以“教、学、做”一体化为主导,以电子测量仪器为中心,力求将电子测量技术与相关电子仪器有机融合,介绍各种电子测量仪器的使用与操作方法,具有很强的操作性和先进的应用性。

(2) 从本课程的教学目标和任务出发,以常用的电子测量仪器为主线,对教材内容进行了精心提炼,如对电子测量的特点和测量的内容等做简单介绍,对实训室现有的仪器和电子技术生产实践中常用的仪器进行了重点介绍。

(3) 从高校人才培养目标出发,对电子测量术语和测量原理只做简要说明,对实际的技能操作训练内容和步骤做详细的介绍,使教材内容更贴近生产实践,注重和强调理论联系实际,更合理实一体化教学。

(4) 为了加强直观性、方便教学,尽量采用实际的仪器外形图来增加学生的感性认识,对仪器电路原理介绍时,尽量与仪器面板结构结合进行对应介绍,更有利于加深对理论知识的理解。

参加本书编写的有贺晓华(单元4、单元6)、谢完成(单元2)、李和平(单元8)、谢平(单元1)、吴水平(单元3)、刘桂兰(单元7),还有中国移动通信集团广东有限公司东莞分公司李嘉安娜(单元5和附录)。本书由贺晓华、李嘉安娜担任主编,由刘罗仁教授、黄爱辉副教授主审。在编写过程中,游新娥教授、谢完成教授、辜纯健老师等对本书提出了许多宝贵的意见,同时得到了仪器厂家和校企合作企业的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

在本书编写过程中,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。

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

# 目 录

## Contents

▶ 单元1 电子测量与仪器的基本知识 .....	1
1.1 电子测量概述 .....	1
1.1.1 电子测量的意义和内容 .....	1
1.1.2 电子测量的方法 .....	2
1.2 电子测量仪器的基础知识 .....	3
1.2.1 电子测量仪器的发展 .....	3
1.2.2 电子测量仪器的分类 .....	4
1.2.3 电子测量仪器的主要技术指标 .....	5
1.2.4 电子测量实验室的常识 .....	6
1.3 测量误差的基本概念 .....	7
1.3.1 测量误差的表示方法 .....	7
1.3.2 测量误差的来源 .....	9
1.3.3 测量误差的分类 .....	10
1.3.4 电子测量仪器的误差 .....	12
1.4 测量结果的表示及有效数字 .....	14
1.4.1 测量结果的表示 .....	14
1.4.2 有效数字的处理 .....	15
技能训练 常用仪器的认识与使用 .....	17
▶ 单元2 电压测量与电压表应用 .....	19
2.1 电压测量 .....	19
2.1.1 电压测量对仪表的要求 .....	19
2.1.2 交流电压的表征 .....	20
2.2 电子电压表 .....	21
2.2.1 电子电压表的种类 .....	21
2.2.2 直流电流、直流电压的测量 .....	24
2.2.3 模拟式交流电压表 .....	25
2.2.4 数字式电压表 .....	30

技能训练 交流毫伏表的应用 .....	37
<b>► 单元3 测量用信号发生器 .....</b>	<b>42</b>
3.1 信号发生器概述 .....	42
3.1.1 信号发生器的分类 .....	42
3.1.2 信号发生器的主要性能指标 .....	43
3.1.3 信号发生器的一般组成 .....	44
3.2 正弦信号发生器 .....	45
3.2.1 低频信号发生器 .....	45
3.2.2 高频信号发生器 .....	49
3.3 函数信号发生器 .....	51
技能训练 函数信号发生器的应用 .....	53
高频信号发生器的应用 .....	57
<b>► 单元4 波形测试与仪器 .....</b>	<b>60</b>
4.1 示波器概述 .....	60
4.2 波形测试的基本原理 .....	61
4.2.1 阴极射线示波管 .....	61
4.2.2 波形显示原理 .....	62
4.3 通用示波器的基本组成及性能指标 .....	65
4.3.1 基本组成 .....	65
4.3.2 主要特性指标 .....	66
4.4 通用示波器Y通道垂直系统 .....	67
4.4.1 输入电路 .....	67
4.4.2 前置放大器 .....	69
4.4.3 延迟级 .....	70
4.4.4 输出放大器 .....	71
4.5 通用示波器X通道(水平系统) .....	72
4.5.1 触发电路 .....	72
4.5.2 扫描电路 .....	74
4.5.3 X放大器 .....	77
4.6 示波器的多波形显示 .....	77
4.6.1 双踪显示 .....	78
4.6.2 双扫描显示 .....	79
4.7 示波器的选择与使用 .....	81
4.7.1 示波器的选用 .....	81

4.7.2 示波器的正确使用 .....	82
4.8 示波器的应用 .....	86
4.8.1 测量电压 .....	86
4.8.2 测量时间 .....	88
4.8.3 测量相位差 .....	89
4.8.4 测量频率 .....	90
4.8.5 测量调幅系数 .....	91
4.9 数字存储示波器 .....	93
4.9.1 工作原理 .....	93
4.9.2 工作方式 .....	94
4.9.3 显示方式 .....	95
4.9.4 数字示波器 .....	96
技能训练 示波器的应用 .....	101
► 单元5 电路元器件参数的测量 .....	108
5.1 阻容元件的测量 .....	108
5.1.1 电阻的测量 .....	108
5.1.2 电容的测量 .....	110
5.1.3 电感的测量 .....	113
5.2 二极管、三极管的测量 .....	115
5.2.1 半导体二极管的测量 .....	115
5.2.2 半导体三极管的测量 .....	116
5.3 晶体管特性图示仪 .....	118
5.3.1 晶体管特性图示仪的基本组成 .....	118
5.3.2 晶体管特性图示仪的工作原理 .....	118
技能训练 元器件参数测量仪器的应用 .....	120
► 单元6 频率和时间的测量 .....	125
6.1 概述 .....	125
6.1.1 无源测频法 .....	126
6.1.2 比较测频法 .....	127
6.1.3 电子计数器概述 .....	128
6.2 通用电子计数器的测量功能 .....	131
6.2.1 测量频率 .....	131
6.2.2 测量周期 .....	132

6.2.3	测量频率比 .....	132
6.2.4	测量时间间隔 .....	133
6.2.5	自检（自校） .....	134
6.2.6	电子计数器的测量误差 .....	135
技能训练	多功能频率计的应用 .....	137
<b>▶ 单元7 频率特性测试仪的应用 .....</b>		<b>141</b>
7.1	扫频仪的工作原理 .....	141
7.1.1	频率特性测量方法 .....	141
7.1.2	扫频仪的工作原理 .....	141
7.1.3	产生扫频信号的方法 .....	143
7.1.4	频标产生电路 .....	143
7.2	扫频仪的主要性能指标 .....	144
技能训练	扫频仪的应用 .....	145
<b>▶ 单元8 计算机仿真测量技术 .....</b>		<b>151</b>
8.1	概述 .....	151
8.1.1	Multisim 10.0 的工作界面 .....	151
8.1.2	Multisim 的操作使用方法 .....	153
8.2	电路仿真测试举例 .....	165
8.2.1	电路基础应用举例 .....	165
8.2.2	模拟电路应用举例 .....	166
8.2.3	数字电路应用举例 .....	168
技能训练	计算机仿真电路测试 .....	171
<b>▶ 附录1 MF-47型万用表的组装与调试 .....</b>		<b>174</b>
<b>▶ 附录2 数字示波器的使用 .....</b>		<b>188</b>
<b>▶ 附录3 数字示波器的使用练习（GDS-1102A-U） .....</b>		<b>196</b>
<b>▶ 参考文献 .....</b>		<b>205</b>



# 单元 1

## 电子测量与仪器的基本知识

### 教学目标

1. 了解电子测量的方法、电子测量仪器的分类及电子测量仪器的主要性能指标；
2. 掌握电子测量结果的表示方法、误差的表示方法；
3. 掌握有效数字的处理，测量数据的处理方法。

### 1.1 电子测量概述

#### 1.1.1 电子测量的意义和内容

##### 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，例如某电流测量结果为 10.4 mA 是正确的，而测得的结果为 10.4 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) 电信号特性的测量

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) 电路性能的测量

电路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、器件特性等的显示测量。电量测量则是最基本、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 电子测量的方法

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及电阻两端的电压  $U$  后, 再利用公式  $R = U/I$  来测量电阻  $R$  的值。

### 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。

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 电子测量仪器的基础知识

### 1.2.1 电子测量仪器的发展

测量中用到的各种电子仪表、电子仪器及辅助设备统称为电子测量仪器, 它的发展大致经历了模拟仪器、数字化仪器、智能仪器和虚拟仪器共四个阶段。

#### 1. 模拟仪器

模拟仪器是出现较早、仍然比较常见的测量仪器, 如指针式万用表、晶体管毫伏表等。它们的指示机构是电磁机械式的, 借助指针显示测量结果。

#### 2. 数字化仪器

数字化仪器是目前很普遍的测量仪器, 如数字电压表、数字频率计等。数字化仪器将模拟信号的测量变换为数字信号的测量, 并以数字形式给出测量结果, 具有比模拟仪器测速快、测量准确度高、抗干扰性能好、操作方便等诸多优点。

#### 3. 智能仪器

智能仪器内置微处理器, 既能进行自动测试, 又具有一定的数据处理功能, 可取代部分脑力劳动。智能仪器的功能模块多以硬件(或固化的软件)形式存在, 无论是开发还是应用, 均缺乏一定的灵活性。

#### 4. 虚拟仪器

##### 1) 虚拟仪器的基本概念

虚拟仪器(Virtual Instrument, VI)是以一种全新的理念于20世纪90年代发展起来的仪器, 主要用于自动测试、过程控制、仪器设计和数据分析等。虚拟仪器强调“软件即仪器”, 即在仪器设计或测试系统中尽可能用软件代替硬件, 所以用户可以在通用计算机平台上, 根据用户自己的需求来定义和设计仪器的测试功能, 其实质是充分利用计算机的新技术来实现和扩展传统仪器的功能。

##### 2) 虚拟仪器的组成

虚拟仪器主要由计算机、仪器模块和软件三部分组成。仪器模块的功能主要靠软件实现, 通过编程在显示屏上构成信号发生器、示波器或数字万用表等传统仪器的软面板, 而信

号发生器产生信号的波形、频率、占空比、幅值等，示波器的测量通道、偏转灵敏度、时基因数、极性、触发信号等均用鼠标或按键进行设置，操作使用更加方便，而且虚拟仪器具有更强的分析处理能力。

### 3) 虚拟仪器的特点

与传统仪器相比，虚拟仪器具有高效、开放、操作简便灵活、功能强大、性价比高等优点，其特点如下。

(1) 智能化程度高，处理能力强。

(2) 复用性强，费用低。用相同的硬件可构成多种不同测试功能的仪器，这些仪器的功能更加灵活、高效、开放、费用更低。通过与计算机网络连接，还可实现虚拟仪器的分布式共享，更好地发挥仪器的使用价值。

(3) 可操作性强，易用灵活。可由用户针对对不同需要设计不同的操作显示界面，使仪器操作更加直观、简便、易于理解，而且测量结果可以直接进入数据库或通过网络发送。测量结束后，还可打印、显示所需的报表或曲线，使得仪器的可操作性大大提高。

## 1.2.2 电子测量仪器的分类

电子测量仪器种类繁多，主要包括通用仪器和专用仪器两大类。专用仪器是为特定目的专门设计制作的，适于对特定对象的测量。通用仪器是指应用面广、灵活性好的测量仪器。

按照仪器功能，通用电子测量仪器分为以下几类。

### 1. 信号发生器

信号发生器是在电子测量中提供符合一定技术要求的电信号产生仪器，如正弦信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器、随机信号发生器等。

### 2. 电压测量仪器

电压测量仪器是用于测量信号电压的仪器，如低频毫伏表、高频毫伏表、数字电压表等。

### 3. 波形测试仪器

波形测试仪器是用于显示信号波形的仪器，如通用示波器、取样示波器、记忆存储示波器等。

### 4. 频率测量仪器

频率测量仪器是测量信号频率、周期等的仪器，如数字式频率计等。

### 5. 电路参数测量仪器

电路参数测量仪器是测量电阻、电感、晶体管放大倍数等电路参数的仪器，如电桥、Q表、晶体管特性图示仪等。

### 6. 信号分析仪器

信号分析仪器是测量信号非线性失真度、信号频谱特性等的仪器，如失真度测试仪、频谱仪等。

### 7. 模拟电路特性测试仪器

模拟电路特性测试仪器是分析模拟电路幅频特性、噪声特性等的仪器，如扫频仪、噪声系数测试仪等。

### 8. 数字电路特性测试仪器

数字电路特性测试仪器是分析数字电路逻辑特性等的仪器，如逻辑分析仪、特征分析仪等，是数据域测量不可缺少的仪器。

测量时应根据测量要求，参考被测量与测量仪器的有关指标，结合现有测量条件及经济状况，尽量选用功能相符、使用方便的仪器。

## 1.2.3 电子测量仪器的主要技术指标

电子测量仪器的性能指标主要包括频率范围、准确度、量程与分辨力、稳定性与可靠性、环境条件、响应特性以及输入/输出特性等。

### 1. 频率范围

频率范围即有效频率范围，是指能保证仪器其他指标正常工作的输入信号或输出信号的频率范围。

### 2. 准确度

准确度既可用于说明测量结果与被测量真值之间的一致程度，即测量准确度，也可用于描述测量仪器给出值接近于真值的能力，即测量仪器准确度。

准确度通常以允许误差或不确定度的形式给出。不确定度是指在对测量数据进行处理的过程中，为了避免丢失真实数据而人为扩大的测量误差，是一个定量的量，由于它在一定程度上能反映出测量数据的可信程度而得名。不确定度的数值越大，丢失真实数据的可能性越小，即可信度越高。准确度不同于允许误差和不确定度，它是一种定性的概念而非定量的量。因为准确度是通过测量结果或测量仪器给出值表明真值（或实际值）所处的范围而非确定的数值。

### 3. 量程与分辨力

量程是指测量仪器的测量范围。分辨力是指通过仪器所能直接反映出来的被测量变化的最小值，即指针式仪表刻度盘标尺上最小刻度代表的被测量大小或数字仪表最低位的“1”所表示的被测量大小。同一仪器不同量程的分辨力不同，通常以仪器最小量程的分辨力（最高分辨力）作为仪器的分辨力。

### 4. 稳定性与可靠性

稳定性是指在一定的工作条件下，在规定时间内，仪器保持指示值或供给值不变的能力。可靠性是指仪器在规定的条件下，完成规定功能的可能性，是反映仪器是否耐用的一种综合性和统计性质量指标。

### 5. 环境条件

环境条件即保证测量仪器正常工作的工作环境，如基准条件、正常条件、额定工作条件等。

### 6. 响应特性

一般来说，仪器的响应特性是指输出的某个特征量与其输入的某个特征量之间的响应关系或驱动量与被驱动量之间的关系。例如，峰值检波器的响应特性为检波器输出的平均值 $\bar{U}_0$ 约等于交流输入信号的峰值 $\hat{U}_i$ 。

### 7. 输入特性与输出特性

输入特性主要包括测量仪器的输入阻抗、输入形式等。输出特性主要包括测量结果的指

示方式、输出电平、输出阻抗、输出形式等。

### 1.2.4 电子测量实验室的常识

#### 1. 电子测量实验室的环境条件

电子测量仪器是由各种电子元器件构成的。它们往往不同程度地受到诸如温度、湿度、大气压强、振动、电网电压、电磁场干扰等外界环境的影响，因此，在同一环境条件下，用同一台仪器及同样的测量方法去测量同一个物理量，就会出现不同的测量结果。

#### 2. 电子测量仪器的放置及连线

##### 1) 电子测量仪器的放置

在测量前应安放好各仪器的位置，要注意以下两点：

(1) 在摆放仪器时，尽量使仪器的指示电表或显示器与操作者的视线平行，以减少视差；对那些在测量中需要频繁操作的仪器，其位置的安放应便于操作者的使用。

(2) 在测量中，当需要两台或多台仪器重叠放置时，应把重量轻、体积小的仪器放在上层；对散热量较大的仪器还要注意它自身散热及对相邻仪器的影响。

##### 2) 电子测量仪器之间的连线

电子测量仪器之间的连线原则上要求尽量短，尽量减少或消除交叉，以免引起信号的串扰和寄生振荡。例如：图 1-1 中，图 (a)、(c) 是正确的连线方法，图 (b) 连接线太长，图 (d) 连接线有交叉。

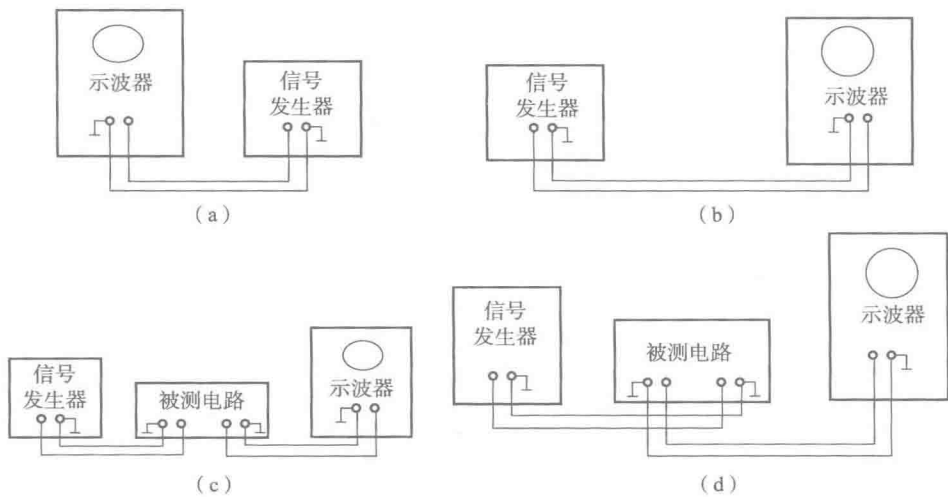


图 1-1 电子测量仪器之间的连线

#### 3. 电子测量仪器的接地

电子测量仪器的接地有两层含义，即以保障操作者人身安全为目的的安全接地和以保证电子测量仪器正常工作为目的的技术接地。

##### 1) 安全接地

安全接地即将机壳和大地连接。这里所说的“地”是指真正的大地。

为了消除隐患，一般可采取以下措施：

(1) 在实验室的地面上铺设绝缘胶。

(2) 仪器的电源插头应采用“三星”插头，其中“一星”为接地端（另一端连接在仪器的外壳上）。

(3) 电子实验室的总地线可用大块金属板或金属棒深埋在附近的地下，并撒些食盐以减少接触电阻，再用粗导线引入实验室。通过接地线，泄漏电流就流入大地这个巨大的导体。

## 2) 技术接地

技术接地是一种防止外界信号串扰的方法。这里所说的“地”，是指等电位点，即测量仪器及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方式。

一点接地适用于直流或低频电路的测量，即把测量仪器的技术接地点与被测电路的技术接地点连在一起，再与实验室的总地线（大地）相连；多点接地则应用于高频电路的测量。

在电子测量过程中，为避免干扰，大多数电子测量仪器的两个输入端中一端为接地端，与仪器的外壳相连，并与连接被测对象的电缆引线外层屏蔽线连接在一起，这个端点通常用“⊥”表示。如果同时使用多台仪器，则需要将它们“⊥”端均接在一起，即“共地”。仪器外壳则可通过电源插头中的接地端与大地相连，可能避免外界电磁场的干扰，提高测量稳定性。因此，在电子测量中，一定注意不要将接地端与非接地端任意调换。

## 1.3 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。

### 1.3.1 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，称之为被测量值的实际值。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

$$A = C + x$$

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。

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\%$$

当相对误差公式中的  $A_0$  分别用实际值、示值或满度值代替时，对应地称为实际相对误差、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100 V、50 V,而用万用表测得的值分别是90 V、40 V,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:  $\Delta U_2 = 40 \text{ V} - 50 \text{ V} = -10 \text{ V}$

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

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

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40 V左右的电压,现有两块电压表,其中一块量程为50 V、1.5级,另一块量程为100 V、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。

## 1.3.2 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。