

高等职业教育电子技术技能培养规划教材
Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

电子测量 与应用

陆绮荣 顾炳根 主编



Electronical Surveying and Application

降低理论难度，内容通俗易懂
引入项目教学，激发学习兴趣
提供设计项目，培养工作技能

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等职业教育电子技术技能培养规划教材

Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

电子测量 与应用

陆绮荣 顾炳根 主编

Electronical Surveying
and Application

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电子测量与应用 / 陆绮荣, 顾炳根主编. —北京: 人民
邮电出版社, 2009. 5
高等职业教育电子技术技能培养规划教材
ISBN 978-7-115-19575-3

I. 电… II. ①陆…②顾… 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023760号

内 容 提 要

本书根据项目式教学的要求组织全书内容, 每个项目按照“项目要求”→“相关知识”→“项目实施”→“扩展知识”的形式编排, 使学生能够轻松掌握电子测量的基本技能和相关知识。

本书共包含 10 个项目, 分别介绍常用电子测量仪器的校准、按元器件报表为生产准备电路元器件、基尔霍夫电压定律和电流定律的验证、电压表波形响应的研究、测频测周法的误差分析、低频小信号放大器动态特性测试、波形参数测量、二极管开关变频器组合频率的特性分析、单片机最小系统的测试及个人仪器系统的设计与应用。

本书可作为高职高专院校电子类专业的教材, 对从事相关工作的技术人员也具有参考价值。

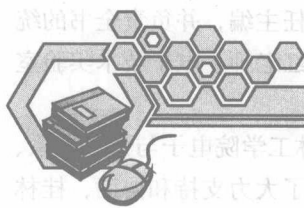
高等职业教育电子技术技能培养规划教材 电子测量与应用

-
- ◆ 主 编 陆绮荣 顾炳根
责任编辑 潘春燕
执行编辑 赵慧君
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京世纪雨田印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 15.75
字数: 403 千字 2009 年 5 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2009 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-19575-3/TN

定价: 27.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154



随着电子测量与仪器技术的发展,电子测量仪器经历了由模拟仪器发展到数字仪器,又由数字仪器发展到智能仪器的过程。电子测量仪器以电路技术为基础,融合电子测试测量技术、计算机技术、通信技术、数字技术、软件技术、总线技术等组成单机或自动测试系统,以电量、非电量、光量的形式,测量被测对象的各项参数或控制被测系统的运行。目前,电子测量仪器已全方位应用于国民经济各个领域,是实现国家科技进步和原创核心技术必不可少的设备条件。

目前,全国各高职院校电子类及相关专业普遍开设了电子测量与仪器课程,电子测量技术已经成为这类专业学生的基本技能要求,一本适合于高职院校培养目标的好的电子测量教材也因此显得尤为重要。

作者在编写教材过程中,力求在内容、结构以及项目与相关知识的衔接方面充分体现高职高专教育的特色,同时将一些生动的操作实例融入到教材中,以提高学生的学习兴趣,使他们能够轻松掌握电子测量的操作技能。本书与其他同类教材相比,具有以下特点。

(1) 本书按照项目式的教学要求组织教材内容。每个项目按照“项目要求”→“相关知识”→“项目实施”→“扩展知识”的形式编排内容。

(2) 本书对测量原理的讲解力求突出基本概念,语言通俗易懂、便于自学;对测量方法突出操作应用;对测量仪器仪表不过多涉及工作原理和内部单元具体电路,重点介绍仪器使用。

(3) 本书每个项目后均附有一定数量的习题,以帮助学生进一步巩固基础知识、强化实践技能。同时,本书还配备了 PPT 教学课件、习题答案、教学大纲、项目实验指导书等教学资料,读者可到人民邮电出版社教学服务与资源网(www.ptpedu.com.cn)免费下载使用。

本书的参考学时为 64 学时,其中理论学时为 44 学时,实践环节为 20 学时,参考学时分配如下。

项 目	课 程 内 容	学 时 分 配	
		讲 授	实 验
项目 1	常用电子测量仪器的校准	6	2
项目 2	按元器件报表为生产准备电路元器件	4	2
项目 3	基尔霍夫电压定律和电流定律的验证	2	2
项目 4	电压表波形响应的研究	6	2
项目 5	测频测周法的误差分析	4	2
项目 6	低频小信号放大器动态特性测试	6	2
项目 7	波形参数测量	4	2
项目 8	二极管开关变频器组合频率的特性分析	4	2
项目 9	单片机最小系统的测试	4	2
项目 10	个人仪器系统的设计与应用	4	2
	课时总计	44	20



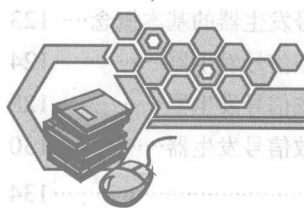
本书由桂林工学院陆绮荣老师、桂林工学院南宁分院顾炳根老师担任主编，并负责全书的统稿工作；桂林工学院电工电子实验室王文成老师、现代电子实验室刘月红老师、电子技术实验室蒋小华老师协助编写了项目实施内容并完成书中图片拍摄工作。

本书在编写过程中，得到了桂林工学院教材建设基金资助，同时桂林工学院电子与计算机系、桂林工学院南宁分院、桂林工学院博文管理学院的相关领导和老师给予了大力支持和协助，桂林工学院博文管理学院电子信息工程专业 06-1、06-2 班同学参与了项目实践，并提出宝贵意见。在此，向所有关心和支持本书的各方面人士表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 2 月



目 录

项目 1 常用电子测量仪器的校准1

项目要求1

相关知识2

知识 1 测量、计量和校准的基本
概念2

知识 2 测量的分类2

知识 3 电子测量仪器与应用3

知识 4 常用测量术语4

知识 5 测量误差及其表示法5

知识 6 仪表选择的一般原则6

知识 7 测量误差的估计和处理8

知识 8 测量结果的描述与处理12

项目实施13

扩展知识22

知识 9 电子测量技术的特点22

知识 10 电子测量技术的发展23

知识 11 测量误差的合成24

知识 12 测量误差的分配27

知识 13 等精度测量结果的数据
处理29

知识 14 实验曲线的绘制31

知识 15 最佳测量方案选择32

知识 16 测量数据的计算机处理和
分析32

习题34

项目 2 按元器件报表为生产准备 电路元器件36

项目要求36

相关知识37

知识 1 Protel DXP 环境下电路元
器件的描述37

知识 2 电阻和电位器的测量39

知识 3 电容的测量42

知识 4 电感的测量45

知识 5 半导体二极管的测量48

知识 6 半导体三极管的测量50

知识 7 集成门电路的测量51

项目实施54

扩展知识58

知识 8 智能化 RLC 参数测试仪58

知识 9 晶体管图示仪的工作原理
与应用60

习题64

项目 3 基尔霍夫电压定律和电流 定律的验证65

项目要求65

相关知识65

知识 1 本项目涉及的电路定理及
定义66

知识 2 直流电压的测量66

知识 3 直流电流的测量68

项目实施72

扩展知识73

知识 4 输入电阻 R_i 的测量73

知识 5 输出电阻 R_o 的测量73

知识 6 直流电子负载73

习题74

项目 4 电压表波形响应的研究75

项目要求75

相关知识75

知识 1 电压的特点75

知识 2 电压的量值表示76



知识 3 模拟电压表	77	知识 2 信号发生器的基本概念	123
知识 4 数字多用表	85	知识 3 低频信号发生器	124
项目实施	85	知识 4 正弦信号发生器	128
扩展知识	92	知识 5 函数信号发生器	130
知识 5 交流电流的测量	92	项目实施	134
知识 6 分贝的测量	94	扩展知识	137
知识 7 失真度的测量	96	知识 6 高频信号发生器	137
知识 8 噪声电压的测量	98	知识 7 扫频信号发生器	140
习题	98	知识 8 脉冲信号发生器	142
项目 5 测频测周法的误差分析	100	习题	143
项目要求	100	项目 7 波形参数测量	145
相关知识	100	项目要求	145
知识 1 本项目涉及的概念和方法	101	相关知识	145
知识 2 电子计数器面板及控键 示意图	102	知识 1 波形参数的定义与基本 测量方法	145
知识 3 电子计数器的主要电路 技术	103	知识 2 示波器的作用、分类和 主要技术指标	146
知识 4 电子计数器测量频率	104	知识 3 示波器测试的基本原理	147
知识 5 电子计数器测量周期	107	知识 4 通用示波器	152
知识 6 电子计数器的自校	109	知识 5 示波器的多波形显示	154
知识 7 中界频率的确定	110	知识 6 数字存储示波器	155
项目实施	111	知识 7 示波器的应用	159
扩展知识	114	项目实施	167
知识 8 电子计数器累加计数和 计时	114	扩展知识	171
知识 9 电子计数器测量频率比	114	知识 8 取样示波器	171
知识 10 电子计数器测量时间间隔	115	知识 9 记忆存储示波器	174
知识 11 提高测量准确度的方法	116	知识 10 示波器功能的扩展	175
知识 12 其他测量时间和频率的 方法	117	习题	176
习题	120	项目 8 二极管开关变频器组合频 率特性分析	178
项目 6 低频小信号放大器动态 特性测试	121	项目要求	178
项目要求	121	相关知识	178
相关知识	122	知识 1 频率变频电路	178
知识 1 动态特性指标描述及测量 方法	122	知识 2 时域和频域分析特点	179
		知识 3 常用频域测试仪器	179
		知识 4 频率特性的基本测量 方法	180



知识 5 频谱分析仪工作原理及 应用	181	知识 6 误码仪	215
项目实施	188	习题	218
扩展知识	191	项目 10 个人仪器系统的设计与 应用	219
知识 6 频率特性测试仪的应用	191	项目要求	219
知识 7 频谱分析仪的其他应用	196	相关知识	219
习题	197	知识 1 智能仪器	220
项目 9 单片机最小系统的测试	198	知识 2 自动测试系统	222
项目要求	198	知识 3 虚拟仪器	224
相关知识	199	知识 4 数据采集技术	231
知识 1 数据域测试的概念	199	项目实施	234
知识 2 数字系统的故障和故障 模型	201	扩展知识	240
知识 3 逻辑电路的简易测试	202	知识 5 可互换虚拟仪器	240
知识 4 逻辑分析仪	203	知识 6 网络化仪器与远程测控 技术	241
项目实施	210	习题	242
扩展知识	215	参考文献	243
知识 5 模块化的逻辑分析仪	215		

项目1

常用电子测量仪器的校准

本项目通过“常用电子测量仪器的校准”阐述电子测量的基本概念，包括测量与计量的基本概念、电子测量误差和误差处理、电子技术的特点、电子测量技术应用领域和电子测量技术的发展趋势。

项目要求

【项目内容】

对常用电子测量仪器 MF14 型模拟万用表、Fluke 8808A 数字多用表、SS1972 可跟踪直流稳压电源、EM32501DDS 任意波形发生器、CA9020 型号示波器进行校准。通过校准，查明和确定被测仪器所指示的量值与标准所复现的量值之间的关系，即确定被测仪表是否符合规定的技术指标要求，是否可以作为工作仪表使用。

【知识要求】

仪器使用之前必须按规定进行校准。如采用 MF14 型模拟万用表测量电阻，要进行调零；采用示波器进行测量，要采用校准波形对通道垂直灵敏度和扫描因数进行校准。要顺利完成校准工作，应了解校准规程，了解测量与计量的基本概念，掌握测量数据记录、正确处理和正确表达的方法。



相关知识

知识 1 测量、计量和校准的基本概念

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。在这个过程中,人们借助专门的设备(如电子电压表、信号发生器、电子示波器等),把被测量与标准的同类单位量进行比较,从而确定被测量与标准的同类单位量之间的数值关系,最后用数值和单位共同表示测量结果。测量的实质就是将被测量与标准量在测量设备上进行比较,得出被测量量值的过程。

为了保证测量结果的准确性和一致性,即保证同一量在不同的地方,采用不同的测量手段所得结果应该是一致的,国家以《计量法》的形式规范测量过程,而计量就是具有法制效力的基准量的测量。计量是测量的一种特殊形式,是测量工作发展的客观需要;而测量是计量联系生产实际的重要途径,没有测量就没有计量,没有计量就会使测量数据的准确性、可靠性得不到保证,测量就会失去价值。因此,测量与计量是相辅相成的。

校准则比测量更高一个层次。校准是在规定条件下,为确定测量仪器或测量系统所指示的量值,或实物量具或参考物质所代表的量值,与对应的由标准复现的量值之间关系的一组操作。

根据定义,校准的对象中的测量仪器、测量系统、实物量具或参考物质,统称测量设备。校准的目的是为了确定测量设备与对应的标准所复现的量值的关系。校准是一组操作,其结果既可给出被测量的示值,又可确定示值的修正值。校准结果可以记录在校准证书或校准报告中。

知识 2 测量的分类

1. 按测量性质的分类

被测对象种类繁多,性质千差万别,为方便起见,可根据被测量的性质将测量大致分为时域测量、频域测量、调制域测量、数据域测量和随机测量 5 大类。

(1) 时域测量

时域测量是指测量与时间有函数关系的量(如正弦信号、脉冲信号等)。这些量的稳态值、有效值等参数可用电压表等仪器测量;这些量的瞬态值可用示波器等仪器直接观测并测量。

(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)。可通过频谱分析仪等仪器分析电路的幅频、相频或频谱特性。

(3) 调制域测量

调制域测量是指测量与调制相关的量(如调制度、调频和调相的线性及失真、脉宽调制信号、锁相环路的捕捉及跟踪等)。

(4) 数据域测量

数据域测量是指对数字逻辑量进行测量。例如用具有多个输入通道的逻辑分析仪,可以同时观测并行数据的时序波形,也可用“1”和“0”显示其逻辑状态。

(5) 随机测量

随机测量主要是指对各类随机的噪声信号、干扰信号的测量。



2. 按测量手段的分类

对同一类性质的被测量进行测量时,由于测量原理不一样,选择的测量设备、采用的测量手段也可能不一样,常用的有直接测量、间接测量和组合测量3种。

(1) 直接测量

直接测量是指可以直接得到被测量的量值的测量。例如用均值电压表测量电压,可直接读出被测电压的平均值;用电子计数器测量频率,可直接读出频率数等。

(2) 间接测量

间接测量是指采用其他直接测量的量的结果,然后按一定的函数关系进行计算,最后才求得被测量的量值的测量。例如测量电阻 R 上消耗的直流功率,可以先直接测量电阻 R 两端电压 U 、电阻 R 支路流过的电流 I ,再根据函数关系 $P = UI$,计算出电阻 R 上消耗的功率。

(3) 组合测量

组合测量是指在某些测量中,被测量与多个未知量有关,测量一次无法得出确切的结果,需改变测量条件进行多次测量,然后根据被测量与未知量的函数关系列方程组求解才能得出被测量的测量方法。如图1.1所示测量有源二端网络的内阻 R_0 ,其中 U_{AB} 为网络端口电压, E 为等效电动势,图中 R_0 和 E 均为未知量,采用直接或间接测量都不能得出结果,可采用组合测量法。改变二端网络的负载 R_L ,得到不同的电压表读数 U_{AB1} 、 U_{AB2} 和不同的电流表读数 I_1 、 I_2 ,代入回路电压定律 $E = IR_0 + U_{AB}$ 得

$$E = I_1 R_0 + U_{AB1}$$

$$E = I_2 R_0 + U_{AB2}$$

两式联立求解得

$$R_0 = (U_{AB2} - U_{AB1}) / (I_1 - I_2)$$

通常测量过程是复杂的,在某类性质的测量过程中,如频域测量中,有的被测量采用直接测量手段测量,有的被测量采用间接测量手段测量,有的则采用组合测量手段测量。

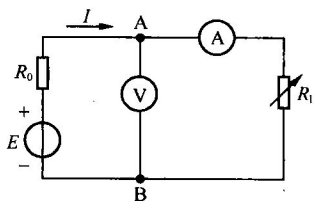


图1.1 用组合测量法测量有源二端网络的内阻

知识3 电子测量仪器与应用

根据被测量的性质,电子测量的内容主要涉及电能量的测量、电信号特性测量、电子电路性能测量、特性曲线的显示与测量等。表1.1所示为常用电子测量仪器与应用。后续部分中将以表1.1中所列的测量方法、测量对象的特点,并详细分析相应测量仪器工作原理、特性及应用方法。

表1.1

常用电子测量仪器与应用

测量方法	测量仪器	主要应用范围
时域测量	电子电压表	对正弦电压或周期性非正弦电压的峰值、有效值、平均值测量
	电子计数器	测量信号的频率、频率比、周期、时间间隔和累加计数等
	电子示波器	实时测量不同波形信号的电压值、周期、相位、频率、脉冲信号的前沿、脉冲、时间延迟等
	测量用信号源	提供测试用信号,如正弦、脉冲、函数、噪声信号等
频域测量	频率特性测试仪	测量电子线路的幅频特性、带宽、回路的 Q 值等
	频谱分析仪	测量电路的频谱、功率谱等振幅传输特性和相移特性
	网络分析仪	对网络特性进行测量



续表

测量方法	测量仪器	主要应用范围
调制域测量	调制域分析仪	测量调制度、调频和调相的线性及失真、脉宽调制信号、锁相环路的捕捉及跟踪等
数据域测量	数字信号发生器	提供串行、并行数据及任意数据流信号
	逻辑分析仪	监测数字系统的软、硬件工作程序
	数据通信分析仪	数据通信网和传输设备的误码、延时、告警和频率的测量
随机测量	噪声系数分析仪	对噪声信号进行测量
	电磁干扰测试仪	对电磁干扰信号进行测量

知识 4 常用测量术语

常用的测量术语有以下几条。

1. 一次测量和多次测量

一次测量是对 1 个被测量进行 1 次测量的过程，又称为必须测量。

多次测量是对 1 个被测量进行不止一次的测量。多次测量可以观测结果的一致性，可以反映测量结果的精确度。一般要求高的精密测量都应进行多次测量，如仪器的校准等。

2. 等精度测量和非等精度测量

等精度测量是指保持测量条件不变，进行的多次测量。等精度测量的每一次都有同样的可靠性，也就是每一次测量结果的精度都是相等的。

非等精度测量与等精度测量对应，是指测量条件不能维持不变情况下的多次测量，其测量结果的可靠性程度是不一样的。

3. 真值与最佳值

真值是指被测量本身具有的真实值，一般用 A_0 表示。然而在实际测量过程中，由于人们认识的局限性、测量手段的不完善及测量工具的不准确等因素的影响，一般真值不可知。

理想情况下，在排除系统误差的前提下，当多次测量的次数趋近于无穷时，被测量的算术平均值 $\bar{x}$ 称为该值的数学期望，数学期望即为真值 A_0 。但是测量次数是有限的，满足一定测量精度的、有限次测量的算术平均值则为最佳值 A 。

4. 示值

示值也称为测量值，是指测量器具的读数装置所指示出来的被测量的数值，一般用 x 表示。

5. 测量误差

测量误差定义为测量结果与被测真值的差异。通常可以分为绝对误差和相对误差 2 种。

6. 测量准确度

测量准确度是指测量结果与真值之间一致的程度。准确度是一种定性概念而非定量概念，对准确度描述采用准确度等级，一次成功的测量应是准确度高的测量。

7. 测量精度

测量精度是对测量值重复性程度的描述。一般来说，不存在没有误差的测量结果，也不存在没有精度要求的测量系统，所有测量对测量值都有精度要求。

本项目在时域范围内，采用直接测量法，对直流电压、交流电压进行多次等精度测量，最后测量结果以测量平均值和不确定度形式描述。



知识 5 测量误差及其表示法

1. 测量误差的来源

所有的测量结果都有误差,这是因为造成误差的原因有多方面,常见的误差来源有以下几个方面。

(1) 仪器误差

仪器本身所引入的误差称为仪器误差,这是测量误差的主要来源之一。例如仪器原理的近似性,性能不完善或使用时调整不当等。

(2) 方法误差

测量方法不完善或测量原理不严密所引起的误差称为方法误差。例如用输入阻抗较低的普通万用表测量高内阻回路的电压。

(3) 人身误差

由于测量人员的感觉和运动器官不完善产生的误差称为人身误差,例如斜视读数引起的误差。

(4) 环境误差

由于各种环境因素与要求的测量条件不一致所造成的误差称为环境误差,这也是产生测量误差的主要原因之一。例如环境温度、预热时间、电源电压等与所要求的测试条件不一致产生的误差。

进行测量时,首先应充分考虑可能引起测量误差的因素,从源头消除测量误差的产生。

2. 绝对误差及其表示法

绝对误差定义为测量结果与被测量的真值的差值。绝对误差为

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

式中, Δx —— 绝对误差;

x —— 被测量的读测值;

A_0 —— 被测量的真值。

真值 A_0 是一个理想值,是不可知的。实际应用时,常用精度高一级的标准器具的示值作为实际值来代替真值,这时绝对误差表示为

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

式中, Δx —— 绝对误差;

x —— 被测量的读测值;

A —— 被测量的实际值。

这是常用的表达式。

3. 修正值及其含义

把与绝对误差大小相等、符号相反的量值称为修正值:

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

式中, c —— 绝对误差的修正值。

修正值通常由上一级标准检定或由生产厂家给出,利用测量值与已知修正值相加,可计算被测量的实际值。如用某电流表测电流,电流表的示值为 0.83mA,查该电流表的技术说明书,该电流表在 0.8mA 及其附近的修正值是 +0.01mA,那么被测电流的实际值为

$$A = [0.83 + (+0.01)] \text{mA} = 0.84 \text{mA}$$



由此可以看出,修正值与测量示值具有相同量纲,其大小和符号表示了示值偏离真值的程度和方向,上例中测量示值比真值偏小 0.01mA,故修正值为+0.01mA。

4. 相对误差及其表示法

绝对误差虽然可以反映测量误差的大小和方向,但不能说明测量的准确程度,因此引入相对误差的概念。在实际使用时,相对误差有 3 种不同的表示形式。

(1) 实际相对误差

实际相对误差定义为绝对误差与被测量的实际值的百分比:

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

式中, γ_A —— 实际相对误差;

Δx —— 绝对误差;

A —— 被测量的实际值。

(2) 示值相对误差

示值相对误差又称标称相对误差,定义为绝对误差与被测量的读数值的百分比:

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

式中, γ_x —— 示值相对误差;

Δx —— 绝对误差;

x —— 被测量的读数值。

示值可直接通过测量仪表的读数装置获得,这是应用较多的一种表示法。

(3) 满度相对误差

满度相对误差又称引用相对误差,定义为绝对误差与被测量所在量程的满刻度值的百分比:

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

式中, γ_m —— 满度相对误差;

Δx —— 绝对误差;

x_m —— 被测量所在量程的满刻度值。

知识 6 仪表选择的一般原则

1. 仪表准确度等级概念

在连续刻度仪表的某一量程内,不同值处的绝对误差一般不相等,若采用满度相对误差的方法来计算相对误差,式中的分母始终是不变的,这给计算和定性分析带来了方便。因此,这种表示法也是应用较多的方法。但在实际应用中,满度相对误差数值一般较小,如 0.1%或 0.5%等,为简化,常引入仪表等级,即仪表准确度等级的表示法:

$$s\% = \gamma_{\max} \quad (1-7)$$

式中, s —— 仪表等级;

$\gamma_{\max}$ —— 满度相对误差最大值。

常用电工仪表分为 ± 0.1 , ± 0.2 , ± 0.5 , ± 1.0 , ± 1.5 , ± 2.5 , ± 5.0 共 7 个等级。仪表等级越大,满度相对误差越大,则测量的准确度就越低。



当仪表等级 s 一定时, 最大满度相对误差也确定。由式 (1-6)、(1-7) 可以看出, 此时满度相对误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值 $\Delta x_{\max}$ 。其中

$$\Delta x_{\max} = \gamma_{\max} \cdot x_m \quad (1-8)$$

式中, $\Delta x_{\max}$ —— 某确定量程绝对误差的最大值;

$\gamma_{\max}$ —— 满度相对误差最大值;

x_m —— 某确定量程刻度的满度值。

一般的测量仪器在同一量程不同值处的绝对误差不可能处处相等, 所以满度误差实际上是一种相对允许误差, 是一个误差保持在规定极限内的级别。该级别规定了误差允许的最大范围。在这个范围中仪表测量误差满足:

$$\Delta x \leq \Delta x_{\max} \quad (1-9)$$

式中, Δx —— 绝对误差;

$\Delta x_{\max}$ —— 某确定量程绝对误差的最大值。

2. 量程选择

由于满度误差是一种相对允许误差, 是一个大致范围, 准确的相对误差应根据示值相对误差判定。

根据式 (1-6)、(1-7) 可得:

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \leq s\% \quad (1-10)$$

那么测量的绝对误差为

$$\Delta x \leq x_m \cdot s \quad (1-11)$$

测量示值相对误差为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \leq \frac{x_m \cdot s}{x} \times 100\% \quad (1-12)$$

实际测量时, 并不是每次测量的示值都会达到满刻度值, 在 s 一定的情况下, 从式 (1-12) 可以看出, 示值 x 越接近满刻度值 x_m , 示值相对误差值 γ_x 值越小, 测量准确度越高; 而示值越小, 示值相对误差越大, 测量准确度越低。只有当示值与满刻度值相等时, 示值误差才等于满度误差的最大值。

由此应当注意, 在使用连续正向刻度的电压表、电流表时, 为了减少测量中的示值误差, 在进行量程选择时应尽可能使示值接近满刻度值, 一般示值以不小于满刻度的 $2/3$ 为宜。

3. 仪表等级选择

前面已知, 仪表等级数越大, 满度相对误差越大, 测量准确度就越低, 为了获得较高的测量准确度, 是否可以只要求仪表等级数越小越好呢? 下面通过一个例题来说明。

例 1.1 要测一个 12V 左右的电压, 现有 2 块电压表, 其中一块量程为 150V、 ± 1.5 级, 另一块量程为 15V、 ± 2.5 级, 问选用哪块电压表合适?

解: 要判断哪块电压表合适, 即判断哪块表的测量准确度更高。

(1) 对 150V、 ± 1.5 级电压表, 根据式 (1-12) 得

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \leq \frac{x_m \cdot s}{x} \times 100\%$$



$$= \frac{150 \times 1.5}{12} \times 100\% = 18.75\%$$

(2) 对 15V、 ± 2.5 级电压表, 同样根据式 (1-12) 得

$$\begin{aligned} \gamma_x &= \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \leq \frac{x_m \cdot S}{x} \times 100\% \\ &= \frac{15 \times 2.5}{12} \times 100\% = 3.125\% \end{aligned}$$

从计算结果可以看出, 用 15V、 ± 2.5 级的电压表测量所产生的示值相对误差小, 所以选用 15V、 ± 2.5 级的电压表较为合适。

由此可知, 尽管 15V 电压表的准确度低, 但被测电压示值 x 接近满刻度值 x_m , 符合前面提到的量程选择原则, 因此在进行仪表选择时, 应注意, 同样量程的仪表, 当然仪表等级数越小, 测量越准确; 而对于不同量程、不同等级的仪表, 我们应该根据被测量的大小, 兼顾仪表级别和量程上限, 合理选择仪表。

在本项目中, 主要对电子测量仪表的基本误差和示值误差进行测量, 用于校准的仪表比工作仪表高一个仪表等级即可。如 MF14 型模拟万用表仪表等级: 直流为 ± 2.5 级、交流为 ± 5 级, 可选择 DO30 万用表检定表直接测量, 还可采用数字电压表和高精度的电压输出装置进行比对测量。

知识 7 测量误差的估计和处理

按照误差的基本性质和特点, 可把误差分为系统误差、随机误差和粗大误差 3 大类。不同的误差采用不同的处理方法。

1. 系统误差的判断和处理

(1) 系统误差的定义和产生原因

系统误差是指等精度测量时, 误差的数值保持恒定或按某种函数规律变化的误差。

系统误差产生的原因很多, 但主要是仪器误差、环境误差、方法误差以及理论误差等。

(2) 系统误差的特点

系统误差具有以下特点。

① 系统误差是一个恒定不变的值或是确定的函数值。

② 多次重复测量, 系统误差不能消除或减少。

③ 系统误差具有可控制性或修正性。

(3) 系统误差的判断

测量结果是否含有系统误差, 可根据系统误差的特点来判断。常用方法有以下几种。

① 理论分析法。凡属由于测量方法或测量原理引入的误差, 只要对测量方法和测量原理进行定量分析, 就可以找到误差的大小。

② 校准和对比法。当怀疑测量结果可能有系统误差时, 可用准确度更高的测量仪器进行重复测量以发现误差。

③ 改变测量条件法。多数情况下, 系统误差为恒差。若改变测量条件, 如改变测量者、测量



方法和环境条件等,然后根据测量条件改变前后的数据进行比较。若改变后出现另一确定的恒差,即可判断存在系统误差。

④ 剩余误差观察法。剩余误差是指任意一次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差,用 ν_i 表示。剩余误差观察法就是将各个剩余误差制成表格或曲线,来判断有无系统误差。为了直观起见,通常将剩余误差画成曲线。这是一种较常用的方法。

图 1.2 (a)、(b)、(c)、(d) 为 4 种典型的剩余误差图。图 1.2 (a) 显示剩余误差 ν_i 大体上正负相同,无明显变化规律,可以认为不存在系统误差;图 1.2 (b) 显示 ν_i 有明显的递增趋势,可以认为存在累进性系统误差;图 1.2 (c) 显示的剩余误差 ν_i 大小和符号大体呈现余弦函数变化,可以认为存在周期性系统误差。图 1.2 (d) 显示的剩余误差 ν_i 既存在累进性变化特点,又有周期性变化特点,可认为同时存在累进性系统误差和周期性系统误差。

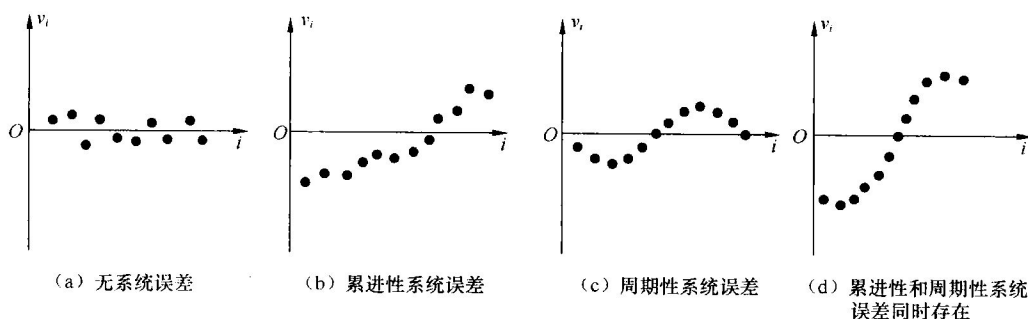


图 1.2 剩余误差的图形表示

⑤ 公式判断法。通常有马林科夫判据和阿卑-赫梅特判据,可分别用来判定有无累进性系统误差和周期性系统误差。详细说明可参阅有关文献。

(4) 系统误差的处理

产生系统误差的原因很多,可通过以下 2 种途径来消除。

① 消除系统误差产生的根源。在测量工作开始前,尽量消除产生误差的来源,或设法防止受到误差来源的影响,这是减小系统误差最好、也是最根本的方法。

如在一般的工程测量中,可事先检定出测量仪器的固有误差,整理出误差表格或误差曲线作为修正值。最后用修正值加上测量示值求测量的实际值。

② 采用典型测量技术消除系统误差。在测量过程中,可以采用一些专门的测量技术和测量方法,借以消除或减弱系统误差。这些技术和方法往往要根据测量的具体条件和内容来决定。如零示法、微差法、代替法和交换法等。

2. 随机误差的估计和处理

(1) 随机误差的定义和产生原因

随机误差是指等精度测量同一量时,误差的绝对值和符号均以不可预定的方式无规则变化的误差。

随机误差是不可预测和不可避免的,是许多因素造成的很多微小误差的总和。如测量仪器元器件产生噪声带来的误差,或电源电压波动带来的误差等。

(2) 随机误差的特点

随机误差具有以下 4 个主要特点。