

高等职业教育电子信息类贯通制教材

· 电子技术专业



电子测量与仪器

· 宋悦孝 主编

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等职业教育电子信息类贯通制教材(电子技术专业)

电子测量与仪器

宋悦孝 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共9章,分别为:电子测量与仪器基础知识、测量用信号发生器、电压测量与电压表、波形测试与仪器、频域测量与仪器、电子元器件测量与仪器、频率和时间测量与仪器、数据域测量与仪器、智能测试仪器与系统。

本书内容取材于生产和教学实践,融合了部分国内外电子测量新技术和新方法,并介绍了较先进的测量仪器,例如三次积分式A/D转换器、阻抗的数字化测量、不平衡电桥、电子计数器的频率扩展技术、数据域测量与仪器、智能DVM的使用等。本书立足于学生能力的培养与提高,在理论知识的够用与实用原则的基础上,不失其广博性,侧重于电子测量基本原理在电子测量实践中的应用,突出常用仪器的正确操作与应用,大部分仪器都有实例介绍,便于学生的理解掌握。每章后都附有小结和习题,既方便学生自学又便于教学。

本书可作为高等职业院校或中等职业学校电子与信息技术类专业及相近专业电子测量与仪器课程的教材,尤其适合作为高等职业技术学院电子与信息技术类专业电子测量与仪器课程教材。亦可供高等院校相关专业师生学习参考,还可供从事电子产品生产、检验、维修等工作的技术人员参考。

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

电子测量与仪器/宋悦孝主编.—北京:电子工业出版社,2003.8
高等职业教育电子信息类贯通制教材.电子技术专业
ISBN 7-5053-8766-9

I.电… II.宋… III.①电子测量—高等学校:技术学校—教材②电子测量设备—高等学校:技术学校—教材 IV.TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第069183号

责任编辑:朱怀永

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:13 字数:332.8千字

版 次:2003年8月第1版 2003年8月第1次印刷

印 数:5000册 定价:17.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言



本书是根据教育部制定的高职高专培养目标和对本课程的教学基本要求,结合全国高等职业技术教育现状,经编者多年的教学调研与实践编写而成,可作为电子与信息技术类专业及相近专业教材。

本书共9章,以电子测量仪器为线索编排各章内容,参考学时为66学时。各章内容安排如下:第1章电子测量与仪器的基础知识(4学时);第2章测量用信号发生器(6学时);第3章电压测量与电压表(8学时);第4章波形测试与仪器(16学时);第5章频域测量与仪器(6学时);第6章电子元器件测量与仪器(8学时);第7章频率和时间测量及仪器(6学时);第8章数据域测量与仪器(6学时);第9章智能测试仪器与系统(6学时)。

基于本课程实践性强的特点及高职教育的培养目标,教材内容上侧重电子测量技术与电子仪器的有机融合,强调知识的实用性和广博性。尽量按照学生的学习规律编排内容,内容叙述上力求线索清晰、简明扼要、通俗易懂、重点突出。本书从电子测量与仪器的基本概念开始讨论,使学生加强对课程基础知识的了解,明确学习目的。其他章节基本上按照如下顺序编排:仪器简介、仪器基本组成原理的分析、典型仪器实例的介绍、仪器操作应用的重点介绍,其间有机地穿插测量方法与技术的讨论。既注意知识的系统性,又强调合理的思维逻辑性,便于学习和掌握。另外,每章前有学习参考和要点,每章后有小结与习题,书后有部分习题参考答案,便于教师组织课堂教学、实践教学和学生自学。

本书以生产实践中普遍使用的通用仪器为典型仪器,介绍的测量方法与技术取材于生产实践,教材内容具有普遍适应性。编者结合多年的教学经验,在对多个院校调研的基础上组织编写该教材,其深度符合高职院校教学需要,尽量体现新技术、新工艺、新知识在电子测量与仪器方面的应用,融合了部分国内外、电子测量新技术和新方法,符合社会发展潮流。

本教材由宋悦孝担任主编,统编全稿,并编写第1,3,4,6,9章。韩敬东编写第2,5章,并对本书的全部内容进行了校核。李耀明编写第7,8章。在编写过程中,北京信息职业技术学院姜邈和徐洁教授,山东信息职业技术学院高级讲师李述香,对本教材的编写提出了许多宝贵意见,并对部分内容进行了修订。编写过程中,还得到了部分厂家和各学校领导的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

本书还配有教学指南、电子教案及习题答案(电子版),请有些需要的教师与电子工业出版社联系,我们将免费提供。E-mail:ve@phei.com.cn

由于编者水平有限,并且时间仓促,书中难免存在错误不当之处,恳请广大读者批评指正。

编者
2003.4



目 录



第 1 章 电子测量与仪器的基础知识	(1)
1.1 电子测量概述	(1)
1.1.1 电子测量的意义及内容	(1)
1.1.2 电子测量的特点	(2)
1.1.3 电子测量方法	(2)
1.2 电子测量仪器的基本知识	(3)
1.2.1 电子测量仪器的分类	(3)
1.2.2 电子测量仪器的主要技术指标	(4)
1.2.3 电子测量仪器的误差	(5)
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)
1.4 测量结果的表示及测量数据的处理	(11)
1.4.1 测量结果的表示	(11)
1.4.2 有效数字的处理	(12)
1.4.3 测量数据的处理	(13)
本章小结	(13)
习题 1	(14)
第 2 章 测量用信号发生器	(15)
2.1 概述	(15)
2.1.1 信号发生器的分类	(15)
2.1.2 信号发生器的主要技术特性	(16)
2.1.3 信号发生器的一般组成	(17)
2.1.4 利用信号发生器的测量方法	(17)
2.2 正弦信号发生器	(18)
2.2.1 低频信号发生器	(19)
2.2.2 高频信号发生器	(22)
2.2.3 合成信号发生器	(26)
2.3 函数信号发生器	(28)
2.3.1 工作原理及结构	(28)
2.3.2 ASI01D 型函数信号发生器简介	(30)
本章小结	(32)
习题 2	(32)
第 3 章 电压测量与电压表	(33)

3.1	概述	(33)
3.1.1	电压测量的基本要求	(33)
3.1.2	交流电压的表征	(34)
3.1.3	电子电压表的分类	(36)
3.2	直流电流、直流电压的测量	(38)
3.2.1	直流电流的测量	(38)
3.2.2	直流电压的测量	(39)
3.3	模拟式交流电压表	(39)
3.3.1	低频交流电压表	(40)
3.3.2	高频交流电压表(峰值交流电压表)	(44)
3.3.3	模拟式电压表实例	(47)
3.3.4	使用方法及注意事项	(49)
3.4	数字电压表	(51)
3.4.1	主要技术指标	(51)
3.4.2	A/D 变换器	(54)
3.4.3	直流数字电压表实例	(58)
	本章小结	(59)
	习题 3	(60)
第 4 章	波形测试与仪器	(61)
4.1	概述	(61)
4.2	波形测试的基本原理	(62)
4.2.1	阴极射线示波管	(62)
4.2.2	波形显示原理	(63)
4.3	通用示波器的基本组成及技术指标	(65)
4.3.1	基本组成	(65)
4.3.2	主要技术指标	(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	(69)
4.4.4	输出放大器	(69)
4.5	通用示波器 X 通道(水平系统)	(70)
4.5.1	触发电路	(70)
4.5.2	扫描电路	(72)
4.5.3	X 放大器	(74)
4.6	示波器的多波形显示	(75)
4.6.1	双踪显示原理	(75)
4.6.2	双踪示波器的基本组成	(76)
4.7	示波器的选择使用	(77)
4.7.1	示波器的选用	(77)
4.7.2	示波器的正确使用	(78)
4.8	示波器的应用	(83)
4.8.1	测量电压	(83)
4.8.2	测量时间	(85)

4.8.3	测量相位差	(85)
4.8.4	测量频率	(86)
4.8.5	测量调幅系数	(87)
4.9	取样示波器	(88)
4.9.1	工作原理	(88)
4.9.2	组成	(90)
4.9.3	技术指标	(91)
4.10	数字存储示波器	(91)
4.10.1	工作原理	(91)
4.10.2	工作方式	(92)
4.10.3	显示方式	(93)
	本章小结	(94)
	习题4	(95)
第5章	频域测量与仪器	(97)
5.1	频率特性测试仪工作原理	(97)
5.1.1	频率特性测量法	(97)
5.1.2	扫频仪工作原理	(97)
5.1.3	产生扫频信号的方法	(98)
5.1.4	频标产生电路	(99)
5.1.5	技术指标	(100)
5.2	AH1254B型宽频带扫频仪	(100)
5.2.1	性能指标	(100)
5.2.2	工作原理	(101)
5.2.3	面板结构图	(102)
5.2.4	扫频仪的检查、校正及使用	(104)
5.2.5	扫频仪的应用	(105)
5.3	频谱仪	(107)
5.3.1	频谱仪的组成及工作原理	(108)
5.3.2	频谱仪组成原理实例	(109)
5.3.3	频谱仪的技术指标	(109)
5.3.4	频谱仪的使用	(110)
5.3.5	频谱仪的应用	(111)
	本章小结	(112)
	习题5	(112)
第6章	电子元器件测量与仪器	(113)
6.1	概述	(113)
6.2	伏安法及数字化测量	(114)
6.2.1	伏安法	(114)
6.2.2	阻抗的数字化测量	(115)
6.3	电桥法测量集中参数元件	(116)
6.3.1	交流电桥	(116)
6.3.2	不平衡电桥	(120)
6.4	谐振法测量集中参数元件	(122)
6.4.1	Q表的组成及工作原理	(122)

6.4.2	测量电感	(123)
6.4.3	测量电容	(124)
6.4.4	Q 表实例及使用方法	(124)
6.5	晶体管特性图示仪及应用	(126)
6.5.1	晶体管特性图示仪的组成	(127)
6.5.2	阶梯波发生器	(128)
6.5.3	晶体管特性图示仪的使用	(129)
6.5.4	晶体管特性图示仪特性曲线测试举例	(133)
	本章小结	(135)
	习题 6	(135)
第 7 章	频率和时间测量及仪器	(137)
7.1	概述	(137)
7.1.1	无源测频法	(137)
7.1.2	比较法	(138)
7.2	电子计数器概述	(139)
7.2.1	分类	(139)
7.2.2	基本组成	(139)
7.2.3	主要技术指标	(141)
7.3	通用电子计数器	(142)
7.3.1	测量频率	(142)
7.3.2	测量周期	(143)
7.3.3	测量频率比	(144)
7.3.4	测量累加计数	(144)
7.3.5	测量时间间隔	(145)
7.3.6	自检(自校)	(145)
7.4	电子计数器的测量误差	(146)
7.4.1	测量误差的来源	(146)
7.4.2	测量误差的分析	(147)
7.4.3	频率扩展技术	(148)
7.5	通用电子计数器实例	(149)
7.5.1	技术指标	(149)
7.5.2	工作原理	(150)
7.5.3	电子计数器的使用及注意事项	(151)
7.6	数字相位计	(151)
7.6.1	瞬时值数字相位计	(151)
7.6.2	平均值数字相位计	(153)
	本章小结	(154)
	习题 7	(154)
第 8 章	数据域测量与仪器	(156)
8.1	数据域测量的基本概念	(156)
8.1.1	数据域测量的特点	(156)
8.1.2	数字系统的特点	(156)
8.1.3	数据域测试仪器设备	(157)
8.1.4	逻辑笔和逻辑夹	(158)

8.2	数据域测试技术	(159)
8.2.1	逻辑电路的简易测试	(159)
8.2.2	数据域测试方法	(159)
8.2.3	故障类型、故障测试及故障定位	(160)
8.3	逻辑分析仪	(161)
8.3.1	逻辑分析仪的分类	(161)
8.3.2	逻辑分析仪的特点	(161)
8.3.3	逻辑分析仪的组成	(162)
8.3.4	逻辑分析仪的触发方式	(162)
8.3.5	逻辑分析仪的显示方式	(164)
8.3.6	逻辑分析仪的应用	(167)
	本章小结	(169)
	习题8	(170)
第9章	智能测试仪器与系统	(171)
9.1	智能仪器概述	(171)
9.1.1	智能仪器的组成	(171)
9.1.2	GPIB 标准接口	(172)
9.1.3	智能仪器的特点	(174)
9.2	智能仪器的典型处理功能	(175)
9.2.1	硬件故障的自检功能	(175)
9.2.2	自动测量功能	(175)
9.3	智能仪器实例——智能化 DVM 简介	(177)
9.3.1	概述	(177)
9.3.2	典型智能 DVM 介绍	(180)
9.4	自动测试系统、个人仪器与虚拟仪器	(186)
9.4.1	自动测试系统	(186)
9.4.2	个人仪器及系统	(186)
9.4.3	虚拟仪器	(188)
	本章小结	(190)
	习题9	(191)
	部分习题答案	(192)
	参考文献	(194)

第1章 电子测量与仪器的 的基础知识



学习参考:本章主要讲述电子测量与仪器的基础知识,要求通过本章的学习了解电子测量的方法、电子测量仪器的分类与主要指标、测量结果的表示、测量数据的处理,灵活掌握电子测量误差的表示方法及分类,掌握有效数字的处理。)

本章要点:电子测量的方法,测量误差的表示方法与分类,有效数字的处理等。

1.1 电子测量概述

1.1.1 电子测量的意义及内容

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,例如某测量结果为9.3V是正确的,而测得的结果为9.3或 $9\frac{1}{3}$ V是错误的。

广义的电子测量是指利用电子技术进行的测量。狭义的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

狭义电子测量的内容主要包括:

(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、损耗率等参量的测量。

(3) 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) 电子设备性能的测量

电子设备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、器件特性等特性的测量。

上述各种参量中,频率、时间、电压、相位、阻抗等是基本参量,其他的为派生参量,基本参量的测量是派生参量测量的基础。电压测量则是最基本、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。

1.1.2 电子测量的特点

电子测量技术及电子测量仪器的应用十分广泛、发展十分迅速,对科学技术的发展起着巨大的推动作用,从某种意义来讲,电子测量水平代表着一个国家的科技水平。这是因为电子测量有着其他测量无法相比的众多优点。其特点如下。

(1) 频率范围宽

电子测量的频率范围几乎可以覆盖整个电磁频谱,可达 $10^{-5}\text{Hz} \sim 100\text{GHz}$,而且随着电子技术的发展,将向更高频段和更低频段发展。

(2) 量程广

量程是指测量范围的上限和下限之差。电子测量仪器具有相当宽的量程。如一台高灵敏度的数字电压表,可测出 $10\text{ nV} \sim 1\text{ kV}$ 的电压,量程达 12 个数量级(即 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^3$);而数字式频率计的量程甚至可达 17 个数量级以上。

(3) 精确度高

电子测量的精确度比其他测量方法要精确得多,特别是对频率和时间的测量,精确度可达到 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 数量级,是目前物理量测量中最精确的测量方法。

(4) 测量速度快

电子测量是通过电磁波的传播和电子的运动来进行工作的,因而可实现高速度测量。

(5) 便于实现遥测遥控

电子测量可以通过有线或无线系统借助于测量仪器和传感器进行遥测遥控,这是电子测量的一个突出优点。

(6) 易于实现测量过程自动化

大规模集成电路和微型计算机的应用为电子测量技术与计算机技术的结合提供了有利条件,从而实现测量过程的自动化与智能化。

1.1.3 电子测量方法

测量结果可以通过不同的测量方法来获得。电子测量的方法有很多种,如直接测量、间接



测量与组合测量等。

(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,例如用电压表测量电压等。

(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。伏安法测量电阻值 R 的方法即属于间接测量法,它是先测出流过电阻的电流 I 及电阻两端的电压 U 后,再利用公式 $R = U/I$ 来测量电阻值 R 。

(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,无法通过直接测量或间接测量得出被测量的结果,需要改变测量条件进行多次测量,然后按被测量与有关未知量间的函数关系联立方程组,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。例如测量在环境温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时某电阻的阻值,已知任意温度下电阻阻值的计算式为

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$$

式中, R_t 和 R_{20} 分别为环境温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 和 20°C 时的电阻值; α 和 β 为电阻温度系数, α, β 与 R_{20} 均为不受温度影响的未知量。

显然,可以利用直接测量或间接测量的方法测出某温度下的电阻阻值,而以直接测量或间接测量法测出任意温度下的电阻阻值是不现实的。如果改变测试温度,分别测出三种不同测试温度下的电阻值,代入上述公式,求解由此得到的联立方程组,得出未知量 α, β, R_{20} 后,代入上式即可得出任意温度下的电阻阻值。

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;模拟测量(分为时域测量和频域测量)和数据域测量等。

测量时应对被测量的物理特性、测量允许时间、测量精度要求以及测量所需费用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 电子测量仪器的基本知识

1.2.1 电子测量仪器的分类

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。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。专用仪器是为实现特定目的专门设计制造的,适于测量特定对象的参量。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(信号源)

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) 示波器

示波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

频率测量仪器是用于测量信号频率、周期等的仪器,如指针式、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用于测量电阻、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

信号分析仪器是用于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

模拟电路特性测试仪是用于分析模拟电路幅频特性、噪声特性等特性的仪器,如扫频仪、噪声系数测试仪等。

(8) 数字电路特性测试仪

数字电路特性测试仪是用于分析数字电路逻辑等特性的仪器,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。

1.2.2 电子测量仪器的主要技术指标

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

(1) 频率范围

频率范围是指能保证仪器其他指标正常工作的有效频率范围。

(2) 准确度

测量准确度又称为测量精度,它描述的是由于测量结果在测量过程中受各种因素的影响而产生的与被测量真实值间的差异程度,即测量误差。测量准确度通常以不确定度或容许误差的形式给出。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。由于不确定度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。容许误差是为了描述测量仪器的测量准确度而规定的,利用仪器进行测量时,允许仪器产生的最大误差。

(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,例如基准工作条件、正常条件、额定工作条件等。

(6) 响应特性

一般说来,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} 。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。

1.2.3 电子测量仪器的误差

电子测量仪器的误差是指由于受测量仪器等因素的影响而产生的测量误差,是误差的主要来源,也是电子测量仪器的一项重要质量指标,主要包括以下几种。

(1) 固有误差

固有误差是指在基准工作条件(见表1-1)下,由于仪器本身而产生的容许误差。它大致反映了仪器的最高测量精度,通常用于仪器误差的检验和对比。

表1-1 IEC(国际电工委员会)推荐的基准条件

影响量(影响因素)	基准数值或范围	公差
环境温度	20°C, 23°C, 25°C, 27°C, 未指明时为20°C	±1°C
相对湿度	45% ~ 75%	
大气压强	101 kPa	



(续)

影响量(影响因素)	基准数值或范围	公差
交流供电电压	额定值	$\pm 2\%$
交流供电频率	50 Hz	$\pm 1\%$
交流供电波形 ^①	正弦波	$\beta \leq 0.05$
支流供电电压 ^②	额定值	$\Delta U/U_0 \leq \pm 1\%$
通风	良好	
太阳辐射效应	避免直射	
周围大气速度	0 ~ 0.2 m/s	
振动	测不出	
大气中沙、尘、盐、污染气体或水蒸气、液态水等	均测不出	
工作位置	按制造厂规定	

① β 称为失真因子,交流供电波形应保持在 $(1 + \beta)\sin\omega t$ 与 $(1 - \beta)\sin\omega t$ 所形成的包络之内。

② ΔU 为电压峰-峰值, U_0 为直流供电电压额定值。

(2) 基本误差

基本误差是指在正常工作条件(见表 1-2)下,由于仪器方面而产生的容许误差。与基准工作条件相比,仪器在正常工作条件下的工作环境较差。

表 1-2 IEC 推荐的正常条件

规定条件	数值或范围及其他要求	规定条件	数值或范围及其他要求
环境温度	$(20 \pm 5)^\circ\text{C}$	外界电磁场干扰	应避免
相对湿度	$(65 \pm 15)\%$	外界机械振动和冲击	应避免
大气压强	$(750 \pm 30)\text{mmHg}$	仪器负载、输入、输出功率、电压、频率等	符合技术条件的规定
交流供电电压	额定值 $\pm 2\%$ (额定值)		

(3) 工作误差

工作误差是指在仪器额定工作条件下,在任一点上求得的仪器某项特性的误差。额定工作条件是指仪器说明书中给出的仪器本身的全部使用范围和全部外部工作条件,是仪器不利工作环境条件的组合,产生的误差最大,通常以极限形式给出。工作误差包括仪器固有误差(或基本误差)及各种因素共同作用的总效应,在仪器说明书中必须给出,固有误差则可视情况给出。

(4) 影响误差

影响误差用于表明某一项影响量,即影响因素,对仪器测量误差的影响。例如温度误差、频率误差等,一般在某一影响量对测量影响比较大时才给出,它是一种误差的极限。

(5) 稳定误差

稳定误差是仪器标称值在其他影响量和影响特性保持恒定的情况下,在规定时间内产生的误差极限,习惯上以相对误差形式给出或者注明最长连续工作时间。



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、相对误差和容许误差。

1. 绝对误差

(1) 定义

测量所得的测量值 x 与真值 A_0 之差称为绝对误差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - A_0$$

式中, x 称为被测量的给出值、示值或测量值,习惯上统称为示值; A_0 称为被测量的真值。

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字,而示值则是由仪器刻度盘、显示器上的读数经换算而成的。

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或计量器具所测得的测量值 A 来代替, A 称为被测量的实际值。绝对误差的计算式为

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

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、符号相反的测量值,称为修正值,用 C 表示,即

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

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 进行修正得出被测量的实际值,即

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

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真实值的程度,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。

相对误差包括实际相对误差、示值相对误差和满度相对误差。

(1) 实际相对误差

绝对误差 Δx 与实际值 A 之比,称为实际相对误差,用 γ_A 表示为

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

(2) 示值相对误差

绝对误差 Δx 与测量值 x 之比,称为示值相对误差,用 γ_x 表示为

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

(3) 满度相对误差

绝对误差 Δx 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,用 γ_m 表示。满度相对误差是为了计算和划分电工仪表的准确度等级而引入的相对误差,其计算式为

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

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 $\pm 5.0\%$,在无标准仪表对比的情况下,是不可能确定测量值偏离方向的,所以应带有“ \pm ”号。

由式(1-6)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,实际测量绝对误差 Δx 应满足:

$$\Delta x \leq x_m \gamma_m \quad (1-7)$$

$$\gamma_x \leq \frac{x_m \gamma_m}{x} \quad (1-8)$$

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。而当仪表准确度等级选定后,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,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这样的非线性刻度电工仪表,应尽量使指针处于满度值的 1/2 左右的区域。

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 100V 和 50V,而用万用表测得的值分别是 90V 和 40V,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, $U_{A1} = 100V$, $U_{A2} = 50V$, $U_{x1} = 90V$, $U_{x2} = 40V$ 。

第一次测量 $\Delta U_1 = 90V - 100V = -10V$

$$C_1 = -\Delta U_1 = 10V$$

$$\gamma_{A1} = \Delta U_1 / U_{A1} \times 100\% = -10V / 100V \times 100\% = -10\%$$

第二次测量 $\Delta U_2 = 40V - 50V = -10V$

$$C_2 = -\Delta U_2 = 10V$$