

中等职业学校电子信息类专业教学用书

常用电子测量 仪器

李明生 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

中等职业学校电子信息类专业教学用书

常用电子测量仪器

主 编 李明生

高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业教育电子信息类“双证课程”教材,根据职业教育电子信息类“双证课程”培养方案,及教育部颁布的电子技术应用专业教学指导方案编写,同时参考了相关行业职业资格标准或行业职业技能鉴定标准。

本书主要内容有:电子测量和仪器的基本知识,常用电子测量仪器(电子电压表、信号发生器、电子示波器、电子计数器、频率特性测试仪、频谱分析、仪晶体管特性图示仪、万用电桥、Q 表等)的基本组成、工作原理、基本操作和基本应用;本书还对逻辑分析仪、数字存储示波器和智能仪器作了一定的介绍。

本书为适应目前中等职业学校教学改革的需要,注意拓宽知识面,理论知识不求全面、系统,以够用为原则,加强实践环节的要求,注意介绍新型的电子测量仪器产品,注重培养学生的综合职业能力。

本书可作为人力资源与社会保障部国家职业资格证书考试用书,也可作为中等职业学校电子信息类专业教材及相关岗位培训用书。

本书附有防伪码和学习卡,按照本书最后一页“郑重声明”下方的说明,即可查询图书真伪,并获得学习资源。

图书在版编目(CIP)数据

常用电子测量仪器/李明生主编. —北京:高等教育出版社, 2009. 3

ISBN 978 - 7 - 04 - 025932 - 2

I. 常… II. 李… III. 电子测量设备 - 教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 003634 号

策划编辑	李宇峰	责任编辑	陆明	封面设计	于涛
版式设计	王艳红	责任校对	金辉	责任印制	尤静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 11
字 数 260 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 3 月第 1 版
印 次 2009 年 3 月第 1 次印刷
定 价 15.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25932 - 00

前 言

本书是根据教育部颁发的中等职业教育电子技术应用专业《电子测量仪器教学基本要求》编写的教材，并参考了有关行业标准。

本书在编写中力图体现以下特色：

(1) 采用模块化结构，适应弹性学制的要求。整个教材分基本模块和选用模块。不同地区、不同学制、不同类型的学校和不同的专业都可根据自身条件选择教学内容，要保证达到教学基本要求。

(2) 不强调理论系统性，注意降低理论难度，以必要和够用为原则。全书基本上不涉及电子测量仪器内部线路的分析、讨论，只以组成框图讲清仪器的工作原理，有些仪器的工作原理以工作过程代替。仪器本身的讨论只保证学生能正确操作和使用即可。

(3) 拓宽知识面。教材编写中注重常用电子测量仪器（如电子电压表、电子示波器、电子计数器等）的讨论，保证学生掌握必备的基本知识和基本技能。

(4) 引进新产品、新测量技术。为了培养学生的综合职业能力，以适应新形势的要求，本书编写中注意介绍电子测量仪器的新产品，如数字存储示波器、逻辑分析仪、智能仪器等方面的知识。

(5) 加强实践能力的培养。编写中在适当降低理论难度的同时，着重强调电子测量仪器的正确使用及其在各个领域的广泛应用，培养学生的实践能力。

书中打*号的章节是供选用的内容，属于教学基本要求中的选用模块，其余内容是教学基本要求规定必修的基础模块。

本书基础模块教学为 68 学时。学时分配方案建议如下表，供参考。

68 学时教学方案（含基础模块和实践性教学模块）

序号	课 程 内 容	学 时 数			
		合计	讲授	实验与实训	机动
1	电子测量和仪器的基本知识	4	4		
2	电子电压表	10	8	2	
3	信号源	6	6		
4	电子示波器	14	10	4	
5	电子计数器	8	6	2	
6	频域测量仪器	8	6	2	
7	电子元器件参数测量仪器	10	8	2	
8	智能仪器	4	4		
	机 动	4			4
	总 计	68	52	12	4

本书基础模块加选用模块教学为 80 学时。学时分配方案建议如下表，供参考。

80 学时教学方案（含基础模块和实践性教学模块）

序号	课 程 内 容	学 时 数			
		合计	讲授	实验与实训	机动
1	电子测量和仪器的基本知识	4	4		
2	电子电压表	10	8	2	
3	信号源	6	6		
4	电子示波器	18	14	4	
5	电子计数器	8	6	2	
6	频域测量仪器	8	6	2	
7	电子元器件参数测量仪器	10	8	2	
8	逻辑分析仪	6	6		
9	智能仪器	4	4		
机 动		6			6
总 计		80	62	12	6

本书由淮安信息职业技术学院李明生主编，苏州高级工业学校袁培德和山东电子工业学校王莉参编。其中，袁培德编写第 5、7 章，李明生编写第 1、4、6、8 章，与王莉合编第 2 章，王莉编写第 3、9 章。全书由李明生统稿。本书由刘蕴陶教授主审，陈步峥、廖文国审稿，另外湖南铁道职业技术学院赵承荻教授也审阅了此稿，提出许多宝贵的修改意见，为提高本书的质量起到很好的作用，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中还参考了扬中市光电仪器厂，HAMEG GmbH，上海沪光科学仪器厂，Tektronix 公司以及南京涌新电子有限公司相关产品技术说明书，在此也表示感谢。

由于编者学识和水平有限，不当和错误之处在所难免，敬请批评指正。

本书采用出版物短信防伪系统，用封底下方的防伪码，按照本书最后一页“郑重声明”下方的使用说明进行操作可查询图书真伪并赢取大奖。本书同时配套学习卡资源，按照本书最后一页“郑重声明”下方的学习卡使用说明，登录<http://sve.hep.com.cn>，上网学习，下载资源。

编 者
2009 年 1 月

目 录

第 1 章 电子测量和仪器的基本知识	1
1.1 测量及其意义	1
1.2 电子测量的意义和特点	1
1.3 测量方法的分类	3
1.4 测量误差的基本概念	4
1.5 测量结果的表示及有效数字	8
1.6 电子测量仪器的基本知识	8
习题	11
第 2 章 电子电压表	12
2.1 概述	12
2.2 模拟式交流电压表	16
2.3 数字电压表	24
2.4 数字多用表	30
2.5 电压表的选择和使用	34
习题	34
第 3 章 信号源	36
3.1 概述	36
3.2 正弦信号源	36
3.3 函数发生器	46
习题	50
第 4 章 电子示波器	51
4.1 概述	51
4.2 示波测试的基本原理	51
4.3 通用示波器	55
* 4.4 数字存储示波器	69
4.5 示波器的选择和使用	76
4.6 示波器的基本测量方法	79
习题	90
第 5 章 电子计数器	92
5.1 概述	92
5.2 通用电子计数器的基本组成	93
5.3 通用电子计数器的测量原理	94

5.4 电子计数器的测量误差	98
5.5 E312A 型通用电子计数器	100
习题	105
第 6 章 频域测量仪器	106
6.1 概述	106
6.2 频率特性测试仪	106
6.3 频谱分析仪	115
习题	121
第 7 章 电子元器件参数测量仪器	122
7.1 电子器件特性及参数测量仪器	122
7.2 集总参数元件测量仪器	132
习题	143
* 第 8 章 逻辑分析仪	145
8.1 数据域分析的基本知识	145
8.2 逻辑分析仪	147
习题	156
* 第 9 章 智能仪器	157
9.1 概述	157
9.2 智能仪器	157
9.3 自动测试系统	161
参考文献	166

第 1 章 电子测量和仪器的基本知识

1.1 测量及其意义

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程。在这种认识过程中，人们借助于专门的设备，依据一定的理论，通过实验的方法，求出以所用的测量单位来表示的被测量的量值或确定一些量值的依从关系。

通常，测量结果的量值由两部分组成：数值（大小及符号）和相应的单位名称。

一般地说，测量是一种比较过程，把被测的量与同种类的作为单位的量，通过一定的测量方法进行比较，以确定被测的量是该单位的若干倍。测量同一物理量所选单位越大，则测出的数值越小。

在科学技术发展过程中，测量结果不仅用于验证理论，而且是发现新问题、提出新理论的依据。历史事实证明：科学的进步、生产的发展与测量理论技术手段的发展和进步是相互依赖、相互促进的。测量手段的现代化，已被公认是科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

1.2 电子测量的意义和特点

1.2.1 电子测量的意义

随着测量学的发展和无线电电子学的应用，诞生了以电子技术为手段的测量，即电子测量。

电子测量涉及极宽频率范围内所有电量、磁量以及各种非电量的测量。目前，电子测量不仅因为其应用广泛而成为现代科学技术中不可缺少的手段，同时也是一门发展迅速、对现代科学技术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。

1.2.2 电子测量的内容

本课程中电子测量的内容是指对电子学领域内电参量的测量，主要有：

(1) 电能量的测量 如电流、电压、功率等的测量。

(2) 电路、元器件参数的测量 如电阻、电感、电容、阻抗的品质因数、电子器件参数等的测量。

(3) 电信号特性的测量 如频率、波形、周期、时间、相位、谐波失真度、调幅度及逻辑状态等的测量。

(4) 电路性能的测量 如放大倍数、衰减量、灵敏度、通频带、噪声指数等的测量。

(5) 特性曲线的显示 如幅频特性、器件特性等的显示。

上述各种待测参数中, 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。

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

1.2.3 电子测量的特点

同其他的测量相比, 电子测量具有以下几个突出的特点:

1. 测量频率范围宽

电子测量除测量直流电量外, 还可以测量交流电量, 其频率范围可低至 10^{-4}Hz , 高至 10^{12}Hz 左右。但应注意, 在不同的频率范围内, 即使测量同一种电量, 所需要采用的测量方法和使用的测量仪器也往往不同。

2. 仪器测量范围广

量程是仪器所能测量各种参数的范围。电子测量仪器具有相当宽广的量程。例如, 一台数字电压表, 可以测出从纳伏 (nV) 级至千伏 (kV) 级的电压, 其量程达九个数量级; 一台用于测量频率的电子计数器, 其量程可达 17 个数量级。

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, 特别是对频率和时间的测量, 误差可减小到 10^{-13} 数量级, 是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。电子测量的准确度高, 是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因之一。

4. 测量速度快

由于电子测量是通过电磁波的传播和电子运动来进行的, 因而可以实现测量过程的高速度, 这是其他测量所不能比拟的。只有测量的高速度, 才能测出快速变化的物理量。这对于现代科学技术的发展, 具有特别重要的意义。例如, 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, 对于遥远距离或环境恶劣的、人体不便于接触或无法达到的区域 (如深海、地下、核反应堆内、人造卫星等), 可通过传感器或通过电磁波、光、辐射等方式进行测量。

6. 易于实现测量自动化和测量仪器微机化

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, 例如在测量中能够实现程控、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。目前已出现了类型众多的带微处理器的自动化示波器、数字频率计、数字式电压表以及受计算机控制的自动化集成电路测试仪、自动网络分析仪和其他自动测试系统。

电子测量的一系列特点，使它获得极其广泛的应用。今天，几乎找不到哪一个科学技术领域没有应用电子测量技术。大到天文观测、宇宙航天，小到物质结构、基本粒子，从复杂的生命、遗传问题到日常的工农业生产、科技、国防、运输、商业、生活等各领域，都越来越多地采用了电子测量技术与设备。

1.3 测量方法的分类

一个物理量的测量可以通过不同的方法来实现。测量方法的分类形式有多种，这里仅就电子测量中最常用的分类方法作简要介绍。

1.3.1 按测量方式分类

1. 直接测量

用预先按已知标准量定度好的测量仪器，对某一未知量直接进行测量，从而得到被测量值的方式称为直接测量。例如，用通用电子计数器测量频率，用电压表测量电路中的电压，都属于直接测量。

2. 间接测量

对一个与被测物理量有确定函数关系的物理量进行直接测量，然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格，求出被测量值的方式，称为间接测量。例如，要测量已知电阻 R 上消耗的功率，先测量加在 R 两端的电压 U ，然后再根据公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 求出功率 P 之值。

3. 组合测量

在某些测量中，被测量与几个未知量有关，测量一次无法得出完整的结果，则可改变测量条件进行多次测量，然后按被测量与未知量之间的函数关系组成联立方程求解，得出有关未知量。此种方法称为组合测量，它是一种兼用直接测量与间接测量的方法。

上面介绍的三种方法中，直接测量的优点是测量过程简单迅速，在工程技术中采用得比较广泛。间接测量法多用于科学实验，在生产及工程技术中应用较少，只有当被测量不便于直接测量时才采用。至于组合测量，是一种特殊的精密测量方法，适用于科学实验及一些特殊的场合。

1.3.2 按被测信号的性质分类

1. 时域测量

时域测量是测量被测对象在不同时间的特性，这时把被测信号看成是一个时间的函数。例如，使用示波器显示被测信号的瞬时波形，测量它的幅度、宽度、上升沿和下降沿等参数。时域测量还包括一些周期性信号的稳态参量的测量，如正弦交流电压，虽然它的瞬时值会随时间变化，但是交流电压的振幅和有效值是稳态值，可用指针式仪表测量。

2. 频域测量

频域测量是测量被测对象在不同频率时的特性。这时把被测对象看成是一个频率的函数。信号通过非线性电路会产生新的频率分量，能用频谱分析仪进行分析。放大器的幅频特性，可

用频率特性图示仪予以显示。放大器对不同频率的信号会产生不同的相移，可使用相位计测量放大器的相频特性。

3. 数据域测量

对数字系统逻辑特性进行的测量。利用逻辑分析仪能够分析离散信号组成的数据流，可以观察多个输入通道的并行数据，也可以观察一个通道的串行数据。

电子测量技术还有许多分类方法，如动态与静态测量技术、模拟和数字测量技术、实时与非实时测量技术、有源与无源测量技术等。

1.4 测量误差的基本概念

测量的目的就是希望获得被测量的实际大小即真值。所谓真值，就是在一定的时间和环境的条件下，被测量本身所具有的真实数值。实际上，由于测量设备、测量方法、测量环境和测量人员的素质等条件的限制，测量所得到的结果与被测量的真值之间会有差异，这个差异就称为测量误差。测量误差过大，可能会使得测量结果变得毫无意义，甚至会带来坏处。我们研究误差的目的，就是要了解产生误差的原因和发生的规律，寻求减小测量误差的方法，使测量结果精确可靠。

1.4.1 测量误差的表示方法

测量误差有两种表示方法：绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

(1) 定义 由测量所得到的被测量值 x 与其真值 A_0 之差，称为绝对误差，即

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1)$$

式中 Δx ——绝对误差。

由于测量结果 x 总含有误差， x 可能比 A_0 大，亦可能比 A_0 小，因此 Δx 既有大小，又有正负符号。其量纲和测量值相同。

要注意，这里说的被测量值，是指仪器的示值。一般情况下，示值和仪器的读数有区别。读数是指从仪器刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字，示值是该读数表示的被测量的量值，常常需要加以换算。

式 (1.1) 中， A_0 表示真值。真值是一个理想的概念，一般来说，是无法精确得到的。因此，实际应用中通常用实际值 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，用高一级或几级的标准仪器或计量器具测量所得之值，这时绝对误差可按下式计算：

$$\Delta x = x - A \quad (1.2)$$

(2) 修正值 与绝对误差的绝对值大小相等，但符号相反的量值，称为修正值，用 c 表示。

$$c = -\Delta x = A - x \quad (1.3)$$

对测量仪器进行定期检定时，用标准仪器与受检仪器相比对，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，使用该受检仪器测量所得到的结果应加上修正值，以

求得被测量的实际值，即：

$$A = x + c \quad (1.4)$$

2. 相对误差

绝对误差虽然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的准确程度，不便于看出对整个测量结果的影响。例如，对分别为 10 Hz 和 1 MHz 的两个频率进行测量，绝对误差都为 +1 Hz，但两次测量结果的准确程度显然不同。因此，除绝对误差外，再给出相对误差的定义。

绝对误差与被测量的真值之比，称为相对误差（或称相对真误差），用 γ 表示：

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1.5)$$

相对误差没有量纲，只有大小及符号。由于真值是难以确切得到的，通常用实际值 A 代替真值 A_0 来表示相对误差，用 γ_A 来表示：

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.6)$$

γ_A 称为实际相对误差。

在误差较小，要求不大严格的场合，也可用测量值 x 代替实际值 A ，由此得出示值相对误差，用 γ_x 来表示：

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.7)$$

式中 Δx 由所用仪器的准确度等级定出。由于 x 中含有误差，所以 γ_x 只适用于近似测量。当 Δx 很小时， $x \approx A$ ，有 $\gamma_x \approx \gamma_A$ 。

经常用绝对误差与仪器满刻度值 x_m 之比来表示相对误差，称为引用相对误差（或称满度相对误差），用 γ_m 表示：

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.8)$$

测量仪器使用最大引用相对误差来表示它的准确度，这时有

$$\gamma_{mm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.9)$$

式中 Δx_m ——仪器在该量程范围内出现的最大绝对误差；

x_m ——满刻度值；

γ_{mm} ——仪器在工作条件下不应超过的最大相对误差，它反映了该仪器综合误差的大小。

电工测量仪表按 γ_{mm} 值分 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。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 $\pm 0.5\%$ ，也称准确度等级为 1.0 级。准确度等级常用符号 S 表示。

例 1.1 两个电压的实际值分别为 $U_{1A} = 100 \text{ V}$ ， $U_{2A} = 10 \text{ V}$ ；测量值分别为 $U_{1x} = 98 \text{ V}$ ， $U_{2x} = 9 \text{ V}$ 。求两次测量的绝对误差和相对误差。

解：

$$\Delta U_1 = U_{1x} - U_{1A} = (98 - 100) \text{ V} = -2 \text{ V}$$

$$\Delta U_2 = U_{2x} - U_{2A} = (9 - 10) \text{ V} = -1 \text{ V}$$

$|\Delta U_1| > |\Delta U_2|$ 。两者的相对误差分别为

$$\gamma_{A1} = \frac{\Delta U_1}{U_{1A}} = -\frac{2}{100} \times 100\% = -2\%$$

$$\gamma_{A2} = \frac{\Delta U_2}{U_{2A}} = -\frac{1}{10} \times 100\% = -10\%$$

$|\gamma_{A1}| < |\gamma_{A2}|$ 。说明 U_2 的测量准确度低于 U_1 。

例 1.2 已知某被测电压为 80 V，用 1.0 级、100 V 量程的电压表测量。若只做一次测量就把该测量值作为测量结果，可能产生的最大绝对误差是多少？

解：在实际生产过程中，经常将一次直接测量的结果作为最终结果，所以讨论这个问题很具有实践意义。仪表的准确度等级表示该仪表的最大引用相对误差，该仪表可能出现的最大绝对误差为：

$$\Delta x_m = \pm 1.0\% \times 100 \text{ V} = \pm 1 \text{ V}$$

由式 (1.9) 可知，测量的绝对误差 Δx 满足

$$\Delta x \leq x_m \cdot S\%$$

$$\gamma_x \leq (x_m \cdot S\%) / x$$

式中 S ——仪表的准确度等级。

测量中总要满足 $x \leq x_m$ ，可见当仪表的准确度等级确定后， x 越接近 x_m ，测量的示值相对误差越小，测量准确度越高。因此，在测量中选择仪表量程时，应使指针尽量接近满偏转，一般最好指示在满度值的 2/3 以上的区域。应该注意，这个结论只适用于正向线性刻度的电压表、电流表等类型的仪表。

例 1.3 被测电压的实际值在 10 V 左右，现有 150 V、0.5 级和 15 V、1.5 级两块电压表，问选用哪块表测量更为合适？

解：若用 150 V、0.5 级电压表，由式 (1.9) 可求得测量的最大绝对误差为：

$$\Delta x_{m1} = \pm 0.5\% \times 150 \text{ V} = \pm 0.75 \text{ V}$$

示值范围为 $(10 \pm 0.75) \text{ V}$ ，则测量的相对误差为

$$\gamma_{A1} = \frac{\pm 0.75}{10} \times 100\% = \pm 7.5\%$$

用 15 V、1.5 级电压表测量， $\Delta x_{m2} = \pm 1.5\% \times 15 \text{ V} = \pm 0.225 \text{ V}$ ，示值范围为 $(10 \pm 0.225) \text{ V}$

$$\gamma_{A2} = \frac{\pm 0.225}{10} \times 100\% = \pm 2.25\%$$

显然，应选用 15 V、1.5 级电压表测量。由此例可见，测量中，应根据被测量的大小，合理选择仪表量程，并兼顾准确度等级，而不能片面追求仪表的准确度级别。

1.4.2 测量误差的来源

如前所述，在一切实际测量中都存在一定的误差。现在来讨论误差的来源。

1. 仪器误差

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称为仪器误差。仪器仪表的

零点漂移、刻度不准确和非线性等引起的误差以及数字式仪表的量化误差都属于此类。

2. 理论误差和方法误差

由于测量所依据的理论不够严密或用近似公式、近似值计算测量结果所引起的误差称为理论误差。例如，峰值检波器的输出电压总是小于被测电压峰值所引起的峰值电压表的误差就属于理论误差。

由于测量方法不适宜而造成的误差称为方法误差。如用低内阻的万用表测量高内阻电路的电压时所引起的误差就属于此类。

3. 影响误差

由于温度、湿度、振动、电源电压、电磁场等各种环境因素与仪器仪表要求的条件不一致而引起的误差。

4. 人身误差

由于测量人员的分辨力、视觉疲劳、不良习惯或缺乏责任心等因素引起的误差，如读错数字、操作不当等。

1.4.3 测量误差的分类

根据性质，可将测量误差分为系统误差、随机误差和疏失误差。

1. 系统误差

在一定的条件下，误差的数值（大小及符号）保持恒定或按照一定的规律变化的误差称为系统误差。

系统误差决定了测量的准确度。系统误差越小，测量结果越准确。

2. 随机误差

在相同条件下进行多次测量，每次测量结果出现无规律的随机变化的误差，这种误差称为随机误差或偶然误差。在足够多次测量中，随机误差服从一定的统计规律，具有单峰性、有界性、对称性、相消性等特点。

随机误差反映了测量结果的精密度。随机误差越小，测量精密度越高。

随机误差和系统误差共同决定测量结果的精确度，要使测量的精确度高，两者的值都要求很小。

3. 疏失误差

疏失误差是指在一定条件下，测量值明显偏离实际值时所对应的误差。疏失误差又称粗大误差，或简称粗差。

疏失误差是由于读数错误、记录错误、操作不正确、测量中的失误及存在不能允许的干扰等原因造成的误差。

疏失误差明显地歪曲了测量结果，就其数值而言，它远远大于系统误差和随机误差。

对于上述三类误差，应采取适当措施进行防范和处理，减小以至消除它们对测量结果的影响。对于含有疏失误差的测量值，一经确认，应首先予以剔除。对于系统误差，在测量前应细心做好准备工作，检查所有可能产生系统误差的来源，并设法消除；或决定它的大小，在测量中采用适当的方法或引入修正值加以抵消或削弱。例如，为了消除或削弱固定的系统误差，可采用零示法、替代法、补偿法、交换法等测量方法。对于随机误差，可在相同条件下进行多次

测量，对测量结果求平均值来减小它的影响。

1.5 测量结果的表示及有效数字

1. 测量结果的表示

这里只讨论测量结果的数字式表示，它包括一定的数值（绝对值的大小及符号）和相应的计量单位。例如 7.1 V、465 kHz 等。

有时为了说明测量结果的可信度，在表示测量结果时，还要同时注明其测量误差值或范围。例如， (4.32 ± 0.01) V， (465 ± 1) kHz 等。

2. 有效数字及有效数字位

测量结果通常表示为一定的数值，但测量过程总存在误差，多次测量的平均值也存在误差。如何用近似数据恰当地表示测量结果，就涉及到有效数字的问题。

有效数字是指从最左面一位非零数字算起，到含有误差的那位存疑数字为止的所有各位数字。在测量过程中，正确地写出测量结果的有效数字，合理地确定测量结果位数是非常重要的。对有效数字位数的确定应掌握以下几方面的内容：

(1) 有效数字位与测量误差的关系。原则上可从有效数字的位数估计出测量误差，一般规定误差不超过有效数字末位单位的一半。例如 1.00 A，则测量误差不超过 ± 0.005 A。

(2) “0”在最左面为非有效数字。例如 0.03 k Ω ，两个零均为非有效数字。“0”在最右面或两非零数字之间均为有效数字，不得在数据的右面随意加“0”。如将 1.00 A 改为 1.000 A，则表示已将误差极限由 0.005 A 改成 0.000 5 A。

(3) 有效数字不能因选用的单位变化而改变。如测量结果为 2.0 A，它的有效数字为二位。如改用 mA 做单位，将 2.0 A 改写成 2 000 mA，则有效数字变成四位，是错误的，应改写成 2.0×10^3 mA，此时它的有效数字仍为二位。

3. 数字的舍入规则

测量数据中超过保留位数的数字，应予删略。删略的原则是“舍入规则”，与古典的“四舍五入”不同，其具体内容如下：

若需保留 n 位有效数字， n 位以后位余下的数，若大于保留数字末位（即第 n 位）单位的一半，则在舍去同时第 n 位加 1；若小于该位单位的一半，则第 n 位不变，后面的数字全部舍去；若刚好等于该单位的一半，如第 n 位原为奇数则加 1 变为偶数，原为偶数不变，后面的数字全部舍去，此即“求偶数法则”。

例 1.4 将下列数字保留三位：25.53，33.46，53.45，68.450 1，43.35。

解： 25.53 $\rightarrow$ 25.5，33.46 $\rightarrow$ 33.5，53.45 $\rightarrow$ 53.4，68.450 1 $\rightarrow$ 68.5，43.35 $\rightarrow$ 43.4。

由上述可见，经过数字舍入后，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。

1.6 电子测量仪器的基本知识

电子测量仪器是利用电子器件和线路组成的装置，用以测量各种电磁参量或产生供测量用

的电信号或能源。

1.6.1 电子测量仪器的分类

电子测量仪器一般分为专用仪器和通用仪器两大类，本课程主要研究后者。通用仪器是为了测量某一个或某一些基本电参量而设计的，它能用于各种电子测量。通用仪器按照功能，可作如下分类：

1. 信号发生器

信号发生器主要用来提供各种测量所需的信号。根据用途的不同，有各种波形、各种频率和各种功率的信号发生器。如调频调幅信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器、函数发生器等。

2. 电平测量仪器

电平测量仪器主要用于测量电信号的电压、电流、电平。如电流表、电压表、电平表、多用表等。

3. 信号分析仪器

信号分析仪器主要用来观测、分析和记录各种电量的变化。如各种示波器、波形分析仪和频谱分析仪等。

4. 频率、时间和相位测量仪器

频率、时间和相位测量仪器主要用来测量电信号的频率、时间间隔和相位。这类仪器有各种频率计、相位计、波长表以及各种时间、频率标准等。

5. 网络特性测量仪

网络特性测量仪有阻抗测试仪、频率特性测试仪及网络分析仪等，主要用来测量电气网络的各种特性。这些特性主要指频率特性、阻抗特性、功率特性等。

6. 电子元件测试仪

电子元件测试仪主要用来测量各种电子元件的各种电参数是否符合要求。根据测试对象的不同，可分为晶体管测试仪、集成电路（模拟、数字）测试仪和电路元件（如电阻、电感、电容）测试仪等。

7. 电波特性测试仪

电波特性测试仪主要用于对电波传播、干扰强度等参量进行测量。如测试接收机、场强计、干扰测试仪等。

8. 逻辑分析仪

逻辑分析仪是专门用于分析数字系统的数据域测量仪器。利用它对数字逻辑电路和系统在实时运行过程中的数据流或事件进行记录和显示，并通过各种控制功能实现对数字系统的软、硬件故障分析和诊断。面向微处理器的逻辑分析仪，则用于对微处理器及微型计算机的调试和维护。

9. 辅助仪器

辅助仪器主要用于配合上述各种仪器对信号进行放大、检波、隔离、衰减，以便使这些仪器更充分地发挥作用。各种交直流放大器、选频放大器、检波器、衰减器、记录器及交直流稳压电源等均属于辅助仪器。

10. 智能仪器

由于微型计算机的应用,微机化仪器和自动测试系统得到了迅速发展,相继出现了以微处理器为基础的智能仪器,利用 GPIB 接口母线将一台计算机和一组电子仪器联合在一起的自动测试系统,以及以微型计算机为基础,用仪器电路板的扩展箱与微型计算机内部母线相连的仪器。人们习惯上把内部装有微型计算机的新一代仪器,或者把可以进行程序控制的仪器,称为智能仪器。这是电子测量仪器一个应用广泛且很有前途的新领域。

11. 虚拟仪器

前述传统的电子测量仪器,除电源和信号源之外,都要完成以下三大功能:信号的采集和控制,信号的分析 and 处理,结果的表达与输出。这些功能都是由硬件功能模块或固化软件完成。根据对信号的分析、处理功能及相应的结果显示方式,电子测量仪器有很多不同类型:电子示波器、电子计数器、电子电压表等。这些仪器只能由仪器厂家定义和制造,而用户无法改变。

虚拟仪器则是对传统仪器概念的重大突破,它是计算机技术与电子仪器相结合而产生的一种全新的仪器模式。

虚拟仪器将仪器的三大功能全都放在计算机上完成。在微型计算机上插数据采集卡,完成对信号的采集;用计算机软件实现各种各样的信号分析与处理,完成多种不同的测试功能;用软件在计算机显示器屏幕上形象而方便地生成各种仪器的控制面板,以各种形式表达输出检测结果。

在虚拟仪器中,硬件仅仅解决信号的输入、输出,软件才是整个仪器系统的关键。仪器的功能由软件来体现,就是所谓“软件即仪器”(“Soft is instrument”)。用户可以根据自己的需要,设计自己的仪器系统,满足多种多样的应用需求,彻底打破仪器只能由厂家定义、用户无法改变的模式。

在实际使用中,用户通过鼠标和键盘操作虚拟仪器,就像操作传统的电子测量仪器一样,用户可以充分发挥自己以前使用传统仪器的特长,只需经过很少训练即可很快适应虚拟仪器的使用,有 Windows 操作经验的人更是如此。

虚拟仪器技术利用计算机技术实现和扩展传统仪器的功能,既然是使用计算机,当然离不开计算机软件编程。虚拟仪器的软件开发平台首推美国国家仪器公司(NI)的 Lab VIEW——图形化编程软件。这种图形化、交互式的编程环境,面向没有编程经验的科研及工程技术人员。使用者无需软件专业背景,经过极短时间培训后即可开始编程。Lab VIEW 除了具备其他语言所提供的常规函数功能外,还集成了大量的生成图形界面的模板,丰富实用的数据分析、数字信号处理功能以及多种硬件设备驱动功能,为用户开发仪器控制系统时节省大量时间。

1.6.2 电子测量仪器的误差

在电子测量中,由于电子测量仪器本身性能不完善所产生的误差,称为电子测量仪器的误差。它包括以下几类:

1. 固有误差

固有误差指在基准工作条件下测量仪器的误差。

基准工作条件是指一组有公差的基准值[例如环境温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 等]或有基准范围的影