

电子信息工程专业本科系列教材

DIANZI XINXI GONGCHENG ZHUANYE BENKE XILIE JIAOCAI

电子测量技术基础

DIANZI CELIANG JISHU JICHU

10011010010010010010110010101010000111101010101001011000100101000
1001101001001001010010110010101010000111101010101001011000100101000
1001101001001001010010110010101010000111101010101001011000100101000
1001101001001001010010110010101010000111101010101001011000100101000
100110100100101010101010000111101010101001011000100101000

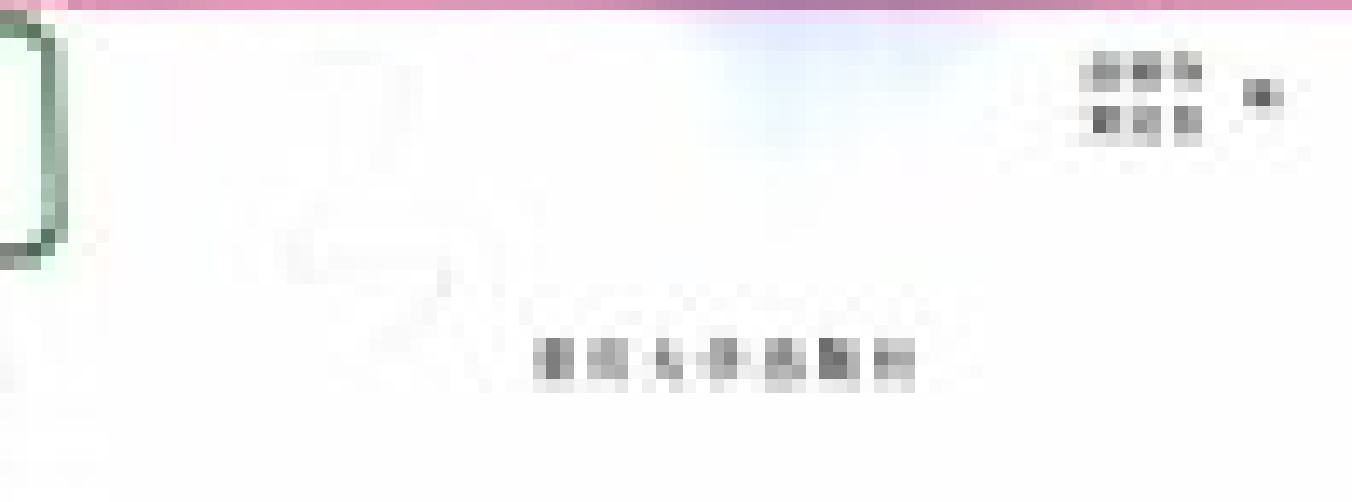
01011010101
110001101010
01001010101
0010101010
0101010101
001001001010101011001
010101010101010101010
010100101010101010110
0100010101010101011010
0101010001010101011010
0101010100101010101010
0101101010101001010
10001101010101010
0001010100101010
0101010010101010
0101010101010

DIANZI CELIANG JISHU JICHU

赵徽存 编
黄进良

3

重庆大学出版社



电子测量技术基础

赵徽存 黄进良 编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书系高等学校本科系列“电子信息”类专业规划教材,书中主要介绍电子测量的原理和方法。具体内容有测量误差与数据处理、测试信号的产生、电信号的波形显示、测试信号的分析、频率和时间的测量、电压的测量、数据域的测量、智能仪器等。本书在透彻讲述基本概念和原理以外,突出先进的测试技术及仪器。每章附有小结和精选的习题。

本书可作为“电子测量技术”、“电子仪器”课程的教材,也可作为电子信息类工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术基础/赵徽存,黄进良主编. —重庆:重庆大学出版社,2004.6

(电子信息工程专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-2853-0

I. 电... II. ①赵...②黄... III. 电子测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 033314 号

电子测量技术基础

赵徽存 黄进良 编

责任编辑:彭 宁 刘昌明 版式设计:彭 宁

责任校对:任卓惠 责任印制:张立全

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆科情印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:337千

2004年5月第1版 2004年5月第1次印刷

印数:1—4 000

ISBN 7-5624-2853-0/TN·64 定价:18.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

本教材根据 2001 年本科系列教材会议精神,由与会电子信息专家商榷出版的教材。本书全面系统地介绍电子测量技术、仪器和基本原理、方法,并对实际应用和典型产品做了一些介绍。

本教材的参考时数为 60 ~ 70 学时,其主要内容包括:误差理论与不确定度;测量信号的分析、产生,包括函数信号发生器、任意波形发生器;直接数字频率合成技术;信号波形的显示技术,包括示波管及普通示波器的工作原理,特殊功能的示波器:如带读出功能的示波器,取样示波器,数字存储示波器的工作原理;频率与时间的测量,相位差的数字化测量;电压的测量包括低频电压、高频电压、微波电压的测量,特别介绍电压的数字化测量,测量误差分析,测量中的串模干扰,共模干扰的抑制等;除时域测量还介绍数据域的测量、频域的测量及相关仪器;最后介绍智能仪器的有关知识。全书重点介绍电子测量原理和技术,突出反映了测量的新技术、新仪器。

本书可作为电子信息类专业,本科电子测量课程的教材;也可作为其他电类专业学生的参考资料,对于广大从事信息技术研究、开发的工程技术人员,本书也有参考价值。

电子测量技术是实践性很强的一门课程,学生除掌握必要的理论知识,还应有较强的动手能力。使用本教材时,应增加实践性环节,安排必要的实验,力求理论联系实际。

本书共分 10 章,第 1、2、3、4、5、6、7、8 章由赵徽存编写,并负责全书统稿,第 9、10 章由黄进良编写。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏和错误,希望专家、读者批评指正。

编者
2003 年 7 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电子测量	1
1.2 电子测量的特点	1
1.3 计量的基本概念	2
1.4 电子测量仪器平台	5
第2章 测量误差与数据处理	8
2.1 测量误差的基本概念	8
2.2 随机误差分析	12
2.3 系统误差	17
2.4 粗大误差的判断	21
2.5 误差的合成与分配	24
2.6 测量数据的处理	28
小结	39
习题	39
附录1 正态分布在对称区间的积分表	42
附录2 t 分布在对称区间的积分表	43
第3章 测试信号的产生	44
3.1 函数信号发生器	44
3.2 任意波形发生器	50
3.3 射频合成信号源	51
小结	60
习题	60
第4章 电信号的波形观测	62
4.1 示波器的结构	62
4.2 示波器多波形显示	70
4.3 高性能示波器	74
小结	82
习题	83
第5章 频率和时间的测量	84
5.1 电子计数器测频	84

5.2	微波频率计数器	91
5.3	频率及时间标准	94
5.4	计数器测量相位差	95
	小结	98
	习题	98
第6章	电压测量	100
6.1	电压测量的特点与分类	100
6.2	模拟式直流电压的测量	102
6.3	交流电压的表征和测量	106
6.4	低频电压的测量	109
6.5	高频电压的测量	114
6.6	脉冲电压的测量	117
6.7	电压的数字化测量	118
	小结	128
	习题	128
第7章	测试信号的分析	130
7.1	频谱分析仪	131
7.2	调制域分析	137
	小结	140
	习题	141
第8章	数据域测试	142
8.1	数据域测试的概念	142
8.2	数字测试系统	142
8.3	数字信号发生器	143
8.4	逻辑分析仪	146
8.5	可测性设计技术	150
	小结	151
	习题	151
第9章	D/A 转换和 A/D 转换	153
9.1	D/A 转换器 (DAC)	153
9.2	A/D 转换器 (ADC)	168
9.3	数据采集系统	178
	小结	188
	习题	189
第10章	智能仪器	191
10.1	智能仪器的特点、组成	191

10.2 智能仪器中的数据转换及控制	194
10.3 键盘及其接口	195
10.4 显示器及其接口	202
小结	206
习题	207
参考文献	208

第 1 章

绪 论

本章从信息测试的角度出发,介绍电子测量的特点,电子测量技术的基本原理和方法。同时,介绍一些有关计量的基本概念。最后,提出通用测试仪器平台的概念,为今后分析各种电子测试仪器打下初步基础。

1.1 电子测量

测量是通过实验方法对客观事物取得定量信息,即数量概念的过程。通过测量能使人们对事物有定量的概念,从而发现事物的规律性。人们通过对客观事物大量的观察和测量,形成定性和定量的认识,归纳、建立起各种定理和定律,而后又要通过测量来验证这些认识、定理和定律是否符合实际情况。经过如此反复实践,逐步认识事物的客观规律,并用以解释和改造世界。

测量科学的先驱凯尔文说:一个事物你如果能够测量它,并且能用数字来表达它,你对它就有了深刻的了解;但如果你不知道如何测量它,且不能用数字表达它,那么,你的知识可能就是贫乏的,是不令人满意的。测量是知识的起点,也是你进入科学殿堂的开端。

电子测量是指利用电子技术进行的测量。电子测量中采用的仪器称为电子仪器。电子测量分为两类,一类是对各种电量、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量;另一类是通过各种敏感器件和传感装置对非电量进行测量。本书主要讨论第一类电子测量。

1.2 电子测量的特点

和其他测量相比,电子测量及电子仪器具有下列主要特点:

1. 频率测试范围宽

测试范围是指能检测到的信号频率的最小值和最大值的范围。电子测试仪器可以检测出非常宽的频率范围,从直流至 300 GHz。在不同的频段测量的原理、方法和仪器可能不同。随着电子技术的发展,电子元器件性能的提高,电子仪器的工作频率也在不断提高。

2. 测量仪器的量程广

要测量的电量大小往往相差很大,因而电子仪器必须具有宽广的量程。量程是测量范围的上下限值之差或上下限值之比。随着电子测量技术的不断发展,单台测量仪器的量程可以达到很高。例如高档次的数字电压表直接测量电阻值,由 $3 \times 10^{-5} \Omega$ 到 $3 \times 10^8 \Omega$,量程为 $1:10^{13}$ 。较完善的电子计数式频率计,其量程达 $1:10^{17}$ 。

3. 测量的精确度高

电子仪器的测量精确度可达到较高水平。长度测量的最高精确度达 10^{-8} 量级,力学测量的最高精确度达 10^{-9} 量级,而对频率和时间的测量,由于采用了原子频标作为基准,使测量的精确度达到 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 量级,这是目前人类在测量精确度方面达到的最高水平。

4. 测量速度快

由于电子测量采用了电子技术,测量速度较快,这对于某些要求快速测量和实时测控的系统来说是重要的。

5. 易于实现测量过程自动化

现代仪器都带有标准程控接口,在各仪器之间,仪器与计算机之间,能方便地使用标准总线连接起来组成自动测试系统,大大提高测试的效率。

1.3 计量的基本概念

计量学研究的主要内容是校准,用于校准的设备通常称为“计量器具”。校准的目的是确保测试仪器在使用中的测量误差限制在允许的范围内,或者是确保测量仪器的精度符合测试的要求。

1.3.1 校准方法

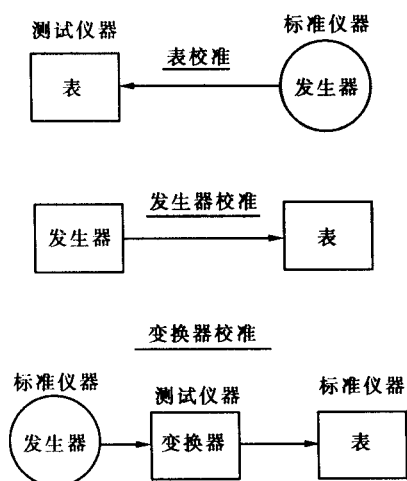


图 1.1 直接比较法校准的方框图

校准实际上就是将一台精度已知的仪器(称做标准仪器)与一台未知精度的仪器(被校准仪器)进行比较的过程。完成这个比较有两个基本方法,直接比较法和间接比较法。

1. 直接比较法

图 1.1 给出了基本的直接比较法校准的几个例子。

如果未知精度的测量仪器是一台测量仪表,标准仪器是信号发生器。信号发生器向测量仪表输出一个标准激励信号。测量仪表的示值与信号发生器指示值比较,就可以得出测量结果。

2. 间接比较法

间接比较法是将标准仪表与测量仪表进行比较,标准信号发生器与测试信号发生器进行比较,标

准传感器与测量传感器进行比较,图 1.2 给出了间接比较法校准的例子。

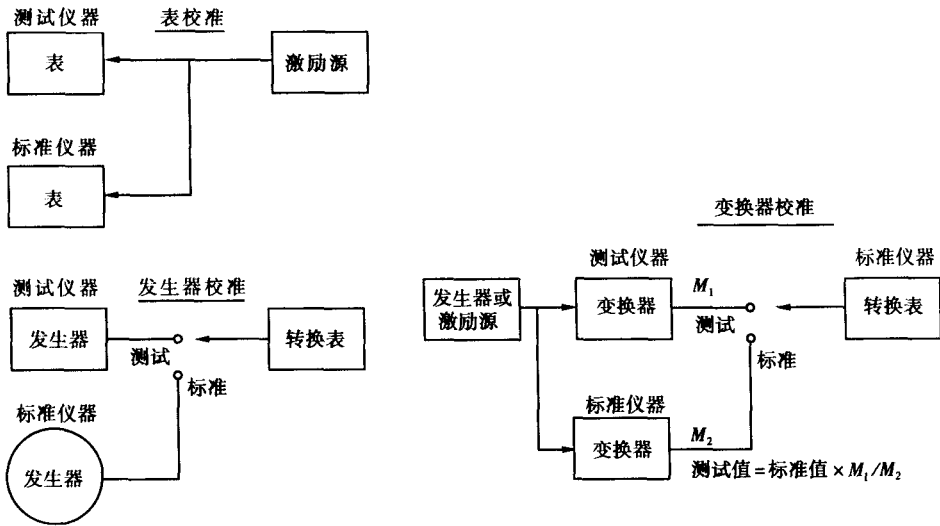


图 1.2 间接比较法校准方框图

测试仪器是仪表,则用同一激励信号同时加到测试仪器和标准仪器上。通过测试仪器和标准仪器的显示值比较来校准。比较过程中激励信号应该是不变的,而它的绝对值并不重要。

除上述两种外,还有一种比例计比较法。在测量仪器中有一类特殊的仪器,这就是比例计。这类仪器有很高的分辨率,用以测试标准仪器和测试仪器之间的比值。如果标准仪器和测试仪器的值相当,则可以通过交换两次进行测量来排除比例计的误差。常用的比例计有开尔文(Kelvin)比例电桥(电阻比较),变换器测试装置(变换比例测试)和分析天平(质量比较)等。

1.3.2 测量标准

测量标准是指那些用来进行校准的测量设备或提供参考标准的设备。测量标准包含以下几种:

1. 主基准

主基准也称原始基准,具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具,经国家鉴定批准,作为统一全国计量单位量值的最高依据。它保存在国家级计量单位中,它的应用多数限制在最高级别的校准中。

2. 副基准

副基准其地位仅次于国家基准,平时用来代替国家基准使用。它是通过直接或间接与国家基准比对、确定其量值并经国家鉴定批准的计量器具。

3. 工作基准

工作基准经与主基准或副基准比对,并经国家鉴定批准、实际用以检定下属计量标准的计量器具。

1.3.3 量值的传递与跟踪、检定与比对

1. 测量基准的层次

测量标准的层次如图 1.3 所示,“原始基准”由政府有关机构保存,它们是极为精确实验或物理现象的结果。“原始基准”是“副基准”或“工作基准”进行比较的最终裁决标准。

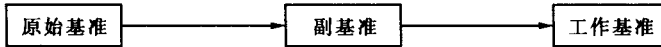


图 1.3 测量基准层次图

量值的传递,指的是把一个物理量单位通过各级标准、基准及相应的辅助手段准确地传递到日常工作所使用的测量仪器、量具,以保证量值统一的全过程。测量仪器、量具在制造完毕时,必须按照规定等级的标准(工作标准)进行校准,该标准又要定期地用更高等级和标准进行检定,一直到国家级的工作基准,如此逐级进行。同样,测量仪器在使用过程中也要按照法定规程,定期由上级计量部门进行检定,并发给检定合格证书。

2. 比对、检定与校准

比对——在相同条件下,对相同准确度等级的同类基准、标准或工作计量器具之间的量值进行比较,目的是考核量值的一致性。

检定——用高一级准确度的计量器具对低一级准确度的计量器具进行比较,以达到全面评定被检计量器具的计量性能是否合格的目的。

校准——指被校的计量器具与高一等级的计量标准相比较,以确定被校计量器具的示值误差。一般检定要比校准包括更广泛的内容。

1.3.4 国际测量单位制

当前,所使用的测量单位都是国际单位制(SI)。国际单位制中,有 7 个是基本的国际单位:

(1)米(m,长度)。1 米等于氮⁸⁶原子从能级 2 跃至能级 5 时,发射的射线在真空中波长的 1 650 763. 73 倍。

(2)千克(kg,质量)。千克是质量单位,它等于国际标准千克原器的质量。

(3)秒(s,时间)。秒的定义是铯¹³³原子由基态跃至第二激发能级射线周期的 9 192 631 770 倍。

(4)安培(A,电流)。两根放置在真空中相距 1 m 的无限长平行导线,当导线间产生的相互作用力为每米 2×10^{-7} 牛顿时,导线内流过的电流。

(5)开尔文(K,温度)。是热力学温度的单位。是水的三相点热力学温度的 1/273. 16。

(6)摩尔(mol,物质质量)。摩尔是一系统的物质质量,该系统中所包含的基本单元数与 0. 012 kg 碳¹²的原子数目相等。

(7)坎德拉(cd,光强度)。是指白金在冻点温度,当其压力为每平方米 101 325 牛顿时,在黑盒中 1/600 000 平方米表面的光密度。坎德拉是光强度的基本单位。

基本单位是那些可以彼此独立地加以规定的物理量单位,由基本单位通过定义,定律及其他函数关系派生出来的单位称为导出单位。目前,大约已有 30 种单位可认为是 SI 的导出单位,包括频率、功率及欧姆等这样一些很简单的量。

1.4 电子测量仪器平台

1.4.1 电子测试仪器的信息流程

测量是检测出客观世界的待测信息或待测事件的物理性能参数的过程。图 1.4 给出一个理想仪器的结构模型。测量仪器可以看成是一个将客观物理量转换成测量信息量的变换器,它有两个接口,输入端与待测物理量连接,输出端与人的感官相连。图 1.5 给出了现代电子测量仪器工作的信息流图和具体方框图。

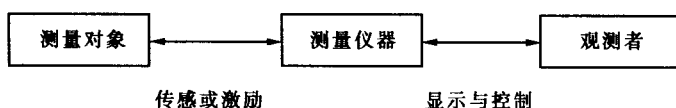


图 1.4 理想测量仪器的结构模型

1. 被测对象的连接

要进行一次测量,首先将被测对象连接到测量仪器的输入端,才能测得被测对象的物理特性。被测对象不同,连接的方式可能不同。对于直流或低频测量,可以简单地用导线将被测信号引入仪器的输入端,对于射频或微波信号,则应该用同轴电缆或波导连接,对于受分布参数影响的参数测量还应使用测试夹具。这些测试接口的设计在仪器设计中十分重要,应给予足够的重视。

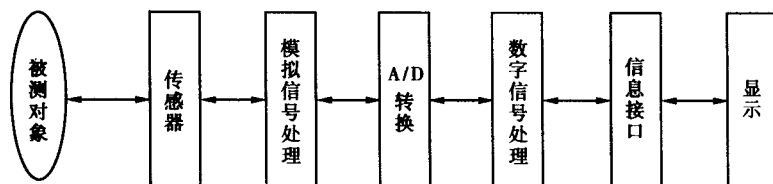


图 1.5 测试仪器工作的信息流图

2. 传感器

作为仪器前级的信号转换部件,直接与被测对象连接,它将被测的物理量转换成相应的电信号。在非电量的电测量中,可以用压电晶体将压力转换成电压,用热电偶将温度转换成电压,等等。理想的传感器应对特定的物理量特别敏感,同时具有良好的转换线性度。

3. 模拟信号处理

模拟信号处理完成微弱信号的放大、滤波、信号合成等任务。有时,它还将模拟信号与参考信号进行比较。因为测试值是由待测值与参考值比较而产生的。因此,不少仪器都有内部参考信号。例如,频率计数器就有内部标准时钟信号作为比较信号,它是频率计数器精度的保证。

4. 模拟/数字(A/D)转换

由于数字信号在信号的处理,存储及传输等方面都具有独特的优点。因此,测试仪器大都将模拟信号转换成对应的数字信号,然后进行处理。其转换过程由取样和量化两个步骤实现。

A/D 转换位数越多,分辨率就越高,仪器测试精度也就可以做得越高。

5. 数字信号的处理

现代测试仪器的系统中,常常使用计算机来完成仪器的控制和优化处理。A/D 转换器输出的数字信号都由一个或多个数字信号处理器来进行计算和处理,并从中提取出有用的测试结果。

数字信号处理器还具有校准测试数据的功能。数字信号处理器能调整仪器的输出,将输出值进行修正。对于测量产生的随机误差,可以方便地用数字信号处理进行统计平均来减少。

6. 信息接口

信息接口用于测试结果的显示和将测试数据与外部计算机进行数据通信。仪器的信息接口分为人机接口和计算机接口两种。

(1) 人机接口。人机接口是仪器和操作人员之间的接口。它的图形显示和对仪器的控制都应符合人的视觉习惯。用户需要的信息都能以适当的方式显示出来,并提供仪器的在线帮助,以提高测试效率。

(2) 计算机接口。计算机接口是仪器与计算机可靠通信的保证。仪器和计算机都有相同的标准,为保证可靠地通信,仪器和计算机双方通信协议也应一致。

1.4.2 电子测试仪器平台

虽然现今的测试仪器品种繁多,结构也各不相同,但是,可以用一个通用的测试仪器平台来表示目前各种仪器的组成。图 1.6 给出了仪器平台的结构。

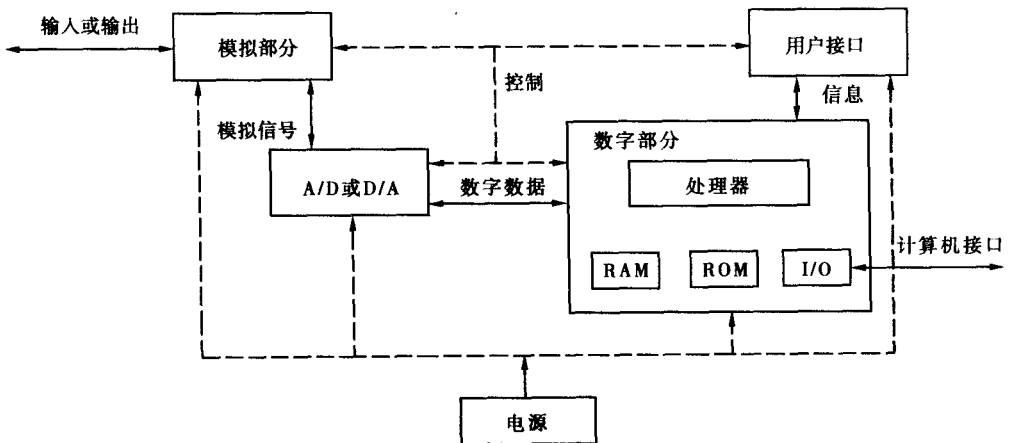


图 1.6 仪器平台结构

由图 1.6 可见,一台通用的仪器平台是由模拟部分、A/D 或 D/A 转换器、数字部分的处理器、随机存储器(RAM)、只读存储器(ROM),计算机的输入/输出(I/O)接口,用户接口及电源组成。

1.4.3 虚拟仪器

虚拟仪器是一种功能意义上的仪器,通常是指以计算机为核心的,由强大的测试应用软件支持的,具有虚拟仪器面版,足够的仪器硬件及通信功能的信息处理系统,其结构如图 1.7

所示。

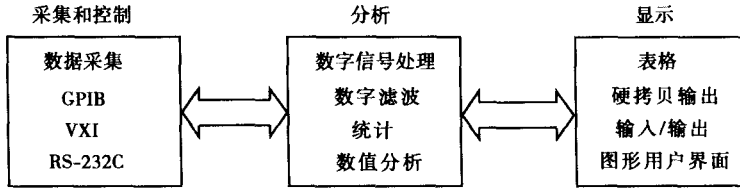


图 1.7 虚拟仪器典型组成

虚拟仪器实质上是软件和硬件相结合的系统,常见的虚拟仪器有两种:

(1)用虚拟仪器取代某种传统的实物仪器,完成实物仪器的全部功能。它们由计算机和通用的硬件,如 A/D、D/A 变换器、应用软件等各部组成。例如,计算机加上 A/D 转换器及其他少量辅助电路、编制各种软件就可实现数据采集、波形显示、电压测量、时间测量、频率测量及频谱分析等各种功能,取代传统的示波器、电压表、频率计、频谱分析仪等仪器。如果配上相应的传感器,就可实现对非电量的电测量。

(2)有一种虚拟仪器要与 VXI、GPIB、RS-232C 等 3 种总线及其所连的仪器硬件配合工作,实际是虚拟仪器程序。这种虚拟仪器在界面上模仿实物仪器,由计算机内部强大的图形环境和在线帮助功能建立起来的虚拟面板所替代,人们称之为“软面板”。这种虚拟仪器等同于仪器或系统的控制程序,起一种图形化控制程序和显示测量结果的作用。

和传统的仪器比较,虚拟仪器对软件更具依赖性。具有模块化及开放性和互换性的特点和资源复用性,同时可方便、经济地组建或重构自动测试系统。更可贵的是虚拟仪器可借助通用数据采集装置,通过编制不同的软件测试方案,可构造任意功能的仪器,即是定义仪器的功能。虚拟仪器大多应用在测控系统中。

第 2 章

测量误差与数据处理

2.1 测量误差的基本概念

2.1.1 测量误差及其来源

1. 测量误差及研究测量误差的目的

测量的目的就是通过实验,获得被测量的量值。但是由于对客观规律认识的局限性、测量器具不准确、测量手段不完善、测量条件的变化及测量工作中的疏忽或错误等原因,都会使测量结果与真值不同,这种差异就是测量误差。由于在测量中误差是普遍存在的,因此研究误差的来源及其规律性,减小和尽可能消除误差,以得到准确的实验结果是非常重要的。

研究误差理论的目的是:

(1) 合理和正确地处理获得的测量数据,在约定的条件下得出被测量的最佳估计值。

(2) 研究误差的根源、认识误差的性质和特点,在测量中合理制订测量方案,正确选择测量方法和测量仪器,消除不利因素,提高测量的准确度。

2. 测量误差的来源

(1) 理论误差与方法误差

由于测量时所依据的理论不严密或使用不适当的简化,用近似公式计算测量结果时所引起的误差,称为理论误差。

由于测量方法不合理所造成的误差称为方法误差。例如用低输入阻抗的普通电压表去测量高阻抗回路的电压,由于负载效应引起的误差就是方法误差。

(2) 仪器误差

由于仪器本身及其附件性能不够完善,造成的测量误差称为仪器误差。例如刻度不准确产生读数误差以及元件老化、环境改变等原因引起的误差等。在测量中,仪器误差往往是主要的。

(3) 影响误差

由于各种环境因素与要求的条件不一致,所造成的误差称为影响误差。例如测量时,由于温度、湿度、电源电压等因素影响所造成的误差。

(4) 人为误差

由于测量者的素质,例如反应速度、分辨能力、视觉疲劳、固有习惯、责任心等因素引起的误差称为人为误差。

在测量过程中,为了获得准确的测量结果,对误差来源必须认真分析,并采取相应的措施,尽量减小误差的影响。

2.1.2 测量误差的定义

测量结果与被测量真值之差称为误差。按表示方法可把测量误差分为绝对误差和相对误差两种。

1. 绝对误差

设测量值为 x , 被测量的真值为 A_0 则绝对误差 Δx 表示为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (2.1)$$

由于真值 A_0 一般无法得到,通常将(2.1)式改成

$$\Delta x = x - A \quad (2.2)$$

式中 A 为被测量的实际值。

实际值是能满足规定准确度要求,用来代替真值的量值。在实际测量中,通常用高一级的标准仪器所测得的量值作为被测量的实际值,也可以是经过修正的多次测量的算术平均值。

在测量中还常用到修正值的概念。与绝对误差的绝对值相等,符号相反之值称为修正值,用 c 表示:

$$c = -\Delta x = A - x \quad (2.3)$$

一般测量仪器在说明书中常用数字、表格、曲线或公式的形式给出经仪器制造厂检定的修正值。利用修正值可求出仪器测量的实际值。

$$A = x + c \quad (2.4)$$

例如电流表的量程为 10 mA,说明书中给出其修正值为 -0.1 mA,当用该电流表测量某支路电流,测得值为 8.2 mA,则被测电流实际值为

$$A = x + c = 8.2 + (-0.1) = 8.1 \text{ mA}$$

最后需要说明,绝对误差的大小和符号分别表示示值偏离实际值的程度和方向,不能用它来说明测量的准确程度,描述测量的准确程度时,要使用相对误差的概念。

2. 相对误差

相对误差定义为绝对误差与约定值之比值,常用百分数来表示,也可以用分贝数来表示。约定值可以是实际值、示值或量程的满度值。由于约定值不同,相对误差有不同的名称:

(1) 实际相对误差, r_A

$$r_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (2.5)$$

(2) 示值相对误差, r_x

$$r_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2.6)$$