



高等学校 规划教材  
电子信息类

# 电子测量技术基础

杨吉祥 詹宏英 梅杓春



东南大学出版社

584 7M93  
Y276

高等学校电子信息类规划教材

# 电子测量技术基础

杨吉祥 詹宏英 梅杓春



A0925706

东南大学出版社

## 内 容 提 要

本书系全国高等学校电子信息类专业“九五”规划部级重点教材。书中主要讲述各种电信号、电子元器件及网络参数、以及数字系统的测试原理和测量方法。具体内容包括:误差理论和数据处理,电压和电流测量,时间和频率测量,信号源,信号波形的显示和测量,信号分析,逻辑分析仪,电子元器件及网络参数测量,数字系统测试及数字电路的可测性设计等。本书可用作《电子测量原理》或《电子仪器》课程的教材。

读者对象:测控技术及电子仪器类专业的师生和相关工程技术人员。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术基础/杨吉祥主编;詹宏英,梅杓春编.  
南京:东南大学出版社,1999.7  
ISBN 7-81050-491-6

I.电… II.①杨… ②詹… ③梅… III.电气测量-高等学校-教材 IV.TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 29243 号

东南大学出版社出版发行  
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:洪焕兴

江苏省新华书店经销 扬中市印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:23.5 字数:598千字

1999年8月第1版 1999年8月第1次印刷

印数:1-3000 定价:28.00元

# 前 言

本教材系按原电子工业部的《1996-2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由电子仪器与检测技术专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由东南大学杨吉祥担任主编，主审周渭，责任编委周渭。

本教材的参考学时数为60~80学时。其主要内容包括：误差理论与测量不确定度；电压、电流及电阻测量原理，电压测量中共模干扰、串模干扰的抑制及误差分析；时间与频率的测量，频率稳定度的测量及调制域分析；信号的产生，包括合成信号源、函数发生器及任意波形的产生原理；信号波形的显示技术，示波管、液晶显示器及示波器的工作原理与技术性能，数字存储示波器的工作原理；信号分析技术，包括频谱分析测量、失真度测量、调制度测量及相位噪声测量；电子元件、器件参数测量及微波网络分析；数字系统测试技术，包括组合电路与时序电路测试，随机测试与穷举测试，微处理器测试及LSI测试系统，测试生成及响应分析技术，逻辑分析仪原理；数字电路可测性设计技术，包括扫描通路、内建自测试及边界扫描测试等技术。全书重点阐述电子测量原理和测试技术，且反映了测量新技术。本书可用作测控技术与仪器类专业的“电子测量原理”课程及其他电类专业的“电子测量仪器”课程教材。

使用本教材时应注意加强实践性环节。本教材的教学过程中必须开设相应的实验，以达到理论联系实际。

本教材由杨吉祥编写1、7、8、9、10、11章并负责全书统稿，南京邮电学院梅杓春编写第2、4章，东南大学詹宏英编写3、5、6章。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1999年元月



# 绪 论

## 1.1 引言

测量的目的是准确地获取被测参数的值。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。因而,测量是人类认识事物不可缺少的手段。离开测量,人类就不能真正准确地认识世界。物理定律是定量的定律,只有通过精密的测量才能确定它们的正确性。光谱学的精密测量帮助人们揭示了原子结构的秘密;对 X 射线衍射的研究揭示了晶体的结构;用射电望远镜才能发现类星体和脉冲星。这类例子举不胜举。另一方面,科学技术的发展也推动了测量技术的发展。即使像时间这样的基本量,在以前很长一段时期内一直用沙钟和滴漏进行极其粗略的测量,直到伽利略对摆的观察才启发人们用计数周期的谐振系统(如钟表)来测量时间。目前,使用铯原子谐振和氢原子谐振来测量时间,其准确度相当于在 30 万年内误差小于 1 秒。可见,现代测量仪器是科学研究的成果之一,而测量仪器又促进了科学技术的发展,两者的关系是相辅相成的。

电子测量是指利用电子技术进行的测量。在电子测量中采用的仪器称为电子测量仪器,简称电子仪器。电子测量分为两类,一类是测电压、电容或场强之类的电量;另一类是运用电子技术来测量压力、温度或流量之类的非电物理量。本书主要讨论第一类电子测量仪器。近 20 多年来,电子技术,特别是微电子技术和计算机技术的迅猛发展促进了电子仪器技术的飞跃发展。电子仪器与计算机技术相结合使功能单一的传统仪器变成先进的智能仪器和由计算机控制的模块式测试系统。微电子技术及相关技术的发展,不断为电子仪器提供各种新型器件,如 ASIC(专用集成电路)、信号处理器芯片、新型显示器件及新型传感器件等等,不仅使电子仪器变得“灵巧”、功能强、体积小、功耗低,而且使过去难以测试的一些参数变得容易测试。调制域仪器的出现就是一例。电子仪器及测量技术的发展又是其他技术发展的保证。微型计算机采用总线结构,信号多路传输,信息仅在某些指定时刻有效,因而采用传统的示波器、电压表之类仪器对计算机系统进行测试难以奏效,必须采用如逻辑分析仪、特征分析仪、仿真器及微机开发系统之类的新型数据域测试仪器,进行测试、调试和故障诊断。微电子技术的飞跃发展,使数字电路的集成度和工作速度不断提高。在一个芯片内可包含数百万个器件,但芯片的引脚数是有限的,为了通过有限的引脚对高度复杂的芯片进行全面测试,不仅要求研究新的测试理论和测试算法,开发大型先进的测试系统,而且要求采用新的电路设计,即数字电路的可测性设计技术、内建自测试技术及边界扫描设计技术。以前,数字电路的设计者所追求的目的是实现所要求的逻辑功能;现在,除了逻辑功能外,还要求设计的电路可测和易测。若设计时不考虑测试问题,则可能面临这样的情况,即采用当今世界上最先进的测试设备也无法对电路进行全面测试,因而不能投产。包括协议分析仪在内的新型通信仪器的出现保证了计算机网络和通信产业的迅速发展;光纤测试仪器的出现促进了光纤通信的发展。

## 1.2 电子测量的特点

与其他测量相比,电子测量及仪器具有下列主要特点:

### 1) 信号频率范围宽

被测电信号的频率范围低至直流,高至 300GHz(毫米波段上限)。在不同频段,许多电量的测量原理、方法及仪器是不同的。例如,测量频率、时间的频率计数器,在较低频段,常采用直接计数法。但在微波频段,由于受电子器件工作速度的限制,必须把微波信号频率变成较低的中频频率后再进行计数,因而微波频率计数器与通用计数器的工作原理是有差别的。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范围也在不断提高。

### 2) 量程广

电子仪器所测电量的大小往往相差很大,因而仪器必须具有宽广的量程。例如,电压测量仪器要能测出从纳伏(nV)至千伏级的电压,量程达 12 个数量级;电阻测量仪器要能测出从  $10^{-5}\Omega$  至  $10^9\Omega$  以上的电阻;频率测量仪器要测出从  $10^{-5}\text{Hz}$  至  $10^{11}\text{Hz}$  以上的频率,等等。

### 3) 测量精确度高

电子仪器的测量精确度可达到较高的水平。例如,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。相比之下,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。由于在电子仪器中采用性能越来越高的微处理器、DSP(数字信号处理)芯片,对测量结果进行各种数据处理,使测量误差减小,测量精确度进一步得到提高。

### 4) 测量速度快

由于电子测量是采用电子技术来实现的,因而测量速度快,这对某些要求快速测量和实时测控的系统来说是很重要的。例如,在工业自动控制系统中,对各种机械运转的状态及设备的参数要及时进行测试,并对测量结果进行运算,最后向机械或设备发出控制信号。又如,在洲际导弹的发射过程中要快速测出它的运动参数,通过计算机运算,向它发出控制信号,修改其运动轨迹,使之达到预定的目标。

### 5) 易于实现测量过程自动化

由于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用标准总线连接起来组成自动测试系统,在计算机的控制下,自动执行测量、数据处理及记录等操作,省却了烦琐的人工操作。

### 6) 易于实现仪器小型化

随着微电子器件集成度的不断提高,可编程器件及 ASIC 电路的采用,电子仪器正向着小型化发展。特别是随着模块式仪器系统的采用,把多个仪器模块连同计算机装入一个机箱内组成自动测试系统,使之更为紧凑。这对某些场合,如军事、航空等领域的使用是有重要意义的。

## 1.3 电子仪器及测试系统的发展

20 世纪 70 年代以来,计算机技术和微电子技术的惊人发展给电子仪器及自动测试领域产生了巨大的影响。20 多年来,在仪器和测试领域发生了四个重要的事情,它们是智能仪器、GPIB(General Purpose Interface Bus)接口总线、个人仪器及 VXI 总线系统的出现。这些技术的采用,改变了并且将继续改变仪器和测试领域的发展进程,使之朝着智能化、自动化、小型化、模块化和开放式系统的方向发展。

### 1.3.1 智能仪器

目前,人们习惯把内含微型计算机和 GPIB 接口的仪器称为智能仪器,以区别于传统的电子仪器。当然,这些仪器所具有的智能水平是各不相同的,有的高些,有的低些,总的来说,随着科学技术的发展,智能仪器所具有的智能水平将会不断提高。

#### 1. 智能仪器的特点

微处理器的出现,引起了仪器技术的一场革命。由于它具有体积小、价格低、可靠性高、功能强及使用灵活方便等优点,通过它能容易地把计算机技术应用于各种电子仪器,不仅使仪器具有某种智能,而且正在出现新一代的产品。

微处理器的应用之所以给电子仪器以惊人的冲击,其主要原因在于它增强了仪器的功能。电子仪器及测量技术一旦与计算机技术相结合,就大大增强了灵活性,许多原来用硬件逻辑难以解决或根本无法解决的问题用软件就能迎刃而解。例如,传统的数字多用表(DMM)能测量交流/直流电压、电流及电阻,但带微处理器的数字多用表除此之外还能测诸如百分数偏离、偏移、比例、最小/最大、极限、统计(平均值、方差、均方差、均方根值)等多种参数,甚至在外加传感器后还能测量温度、压力等非电参数。传统的频率计数器能测量频率、周期、时间等参数,但带微处理器的通用计数器却还能测量电压、相位、上升时间、占空比、压摆率、漂移及比率等等多种参数。

计算机技术引入电子仪器后不但增强了仪器的功能,同时也提高了仪器的性能指标。通过微处理机的数据处理和存储等能力,可容易地实现各种自动校正、多次测量平均等技术,从而提高了测量精度。

智能仪器的一个特点是操作自动化,因而被称为自动测试仪器。传统仪器面板上的开关与旋钮均被键盘代替,仪器操作人员要做的工作仅是按键,从而省却了繁琐的人工调节。智能仪器通常都能自选量程、自动校准,有的还能自动调正测试点,这既方便了操作,又提高了测试精度。例如,有的智能示波器测量系统能自动寻找波形,自动设置合适的幅度增益及扫速范围,使被测波形能自动在屏幕上稳定显示,大大简化了人工操作。

智能仪器的另一个特点是具有对外接口功能,通常都具有 GPIB 标准接口,能够容易地接入自动测试系统中接受遥控,进行自动测试。

仪器中采用微处理器后能实现“硬件软化”,许多传统的硬件逻辑都可用软件取代。例如,传统数字电压表的数字电路部分通常采用了大量的计数器、寄存器、译码显示电路及复杂的逻辑控制电路。在智能仪器中,只要速度跟得上,这些电路都可用软件取代。这样非但降低了成本,而且减小了体积,降低了功耗并提高了可靠性。

现代智能仪器通常都具有功能很强的自测试与自诊断技术,它能够自己诊断自己的功能是否正常。若发生故障,自己能确定故障发生的部位,从而大大提高了仪器的可靠性,简化并加快了仪器的维修工作。

## 2. 智能仪器的组成

在物理结构上,微型计算机内含于电子仪器,微处理器及其支持部件是整个测试电路的一个组成部分。但是从计算机的观点看,测试电路与键盘、GPIB 接口及显示器等部件一样,仅是计算机的一种外围设备。智能仪器的基本组成如图 1-1 所示。显然,这是典型的计算机结构,与一般计算机的差别仅在于它多了一个“专用的外围设备”——测试电路;同时,还在于它与外界通信通常都通过 GPIB 接口进行。既然智能仪器具有计算机结构,因此它的工作方式和计算机一样,而与传统的测试仪器差别较大。微处理器是整个智能仪器的核心,固化在只读存储器内的程序是仪器的“灵魂”。系统采用总线结构,所有外围设备(包括测试电路)和存储器都“挂”在总线上,微处理器按地址对它们进行访问。微处理器接受来自键盘或 GPIB 接口的命令,解释并执行这些命令,诸如发出一个控制信号到某个电路,或者进行某种数据处理等等。既然测试电路是微型计算机的外围设备之一,因而在硬件上它们之间必然有某种形式的接口,从简单的三态门、译码器、A/D 和 D/A 转换器到程控接口等等。微处理器通过接口发出各种控制信息给测试电路,以规定功能,启动测量,改变工作方式等等。微处理器通过查询或测试电路向微处理器提出中断请求,使微处理器及时了解测试电路的工作状况。当测试电路完成一次测量后,微处理器读取测量数据,进行必要的加工、计算、变换等处理,最后以各种方式输出,如送到显示器显示,打印机打印,或送给系统的主控制器等等。

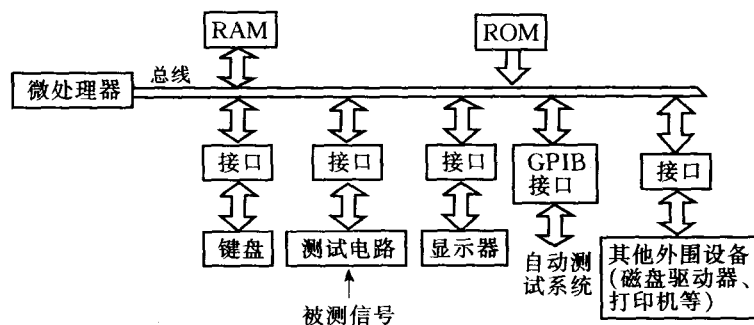


图 1-1 智能仪器的基本组成

虽然智能仪器中的测试电路仅是作为微型计算机的外围设备而存在,仪器中引入微处理器后有可能降低对测试硬件的要求,但仍不能忽视测试硬件的重要性,有时提高仪器性能指标的关键仍然在于测试硬件的改进。

### 1.3.2 GPIB 接口及自动测试系统

随着科学技术和生产的不断发展,测试任务日趋复杂,对测试系统在功能、速度及精度等方面的要求也越来越高,人工测试已很难满足这些要求,为此必须发展自动测试。

早期的自动测试系统都是根据具体的测试任务而设计的专用系统,其最大缺点是组建困难且不通用。组建者必须花很多时间设计和制造系统中各仪器设备及控制计算机的专用



接口电路及测试软件。不同系统中的仪器接口互不通用,即使在同一个测试系统中,当测试内容改变时,也可能要重新设计接口电路,这严重地影响了自动测试技术的发展。

为此,美国 HP 公司于 20 世纪 70 年代初,首先提出了接口标准化方案,并于 1974 年正式命名为 HP-IB 接口总线。后来得到了美国电气与电子工程师学会(IEEE)和国际电工委员会(IEC)的承认,分别命名为 IEEE-488 和 IEC-625 标准,通称 GPIB 标准。使用 GPIB 标准接口,可将不同厂家生产的各种型号的仪器用一条统一的无源标准总线方便地联接起来组建成各种自动测试系统,而无需在接口硬件方面再做任何工作,大大方便了系统的组建,因而得到了广泛的应用,使自动测试技术翻开了新的一页。

图 1-2 表示典型的电压和频率参数的自动测试系统。计算机是系统的控制器,它根据预先编制好的测试程序,首先设定频率合成器的各种功能,并启动工作,让它输出要求幅度和频率的信号,加到被测器件,然后命令数字多用表和频率计数器对被测器件输出信号的幅度和频率进行测量。测量数据可送到计算机系统的显示器显示,或送到打印机进行打印。

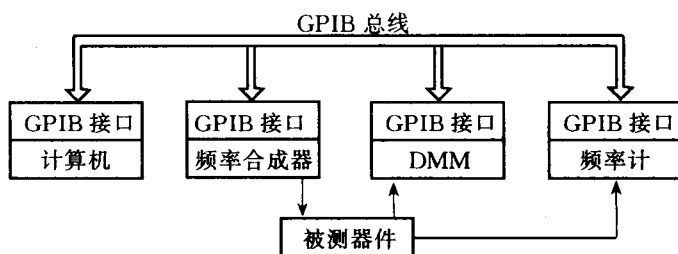


图 1-2 GPIB 测试系统举例

### 1.3.3 个人仪器系统

GPIB 接口总线标准的提出,解决了独立仪器的互连问题,但 GPIB 自动测试系统存在着硬件冗余度高,却又不能起容错作用的缺点。在 GPIB 系统中的各个独立仪器都具有键盘、显示器、存储器、微处理器、机箱及电源等部件,这些资源相互重复而又不能共享。例如,某台仪器的存储器损坏时,通常不能借用其他仪器中的存储器,这样就造成资源浪费,且系统体积庞大。

1981 年美国 Northwest Instrument System 公司首先提出的个人仪器系统有效地克服了 GPIB 测试系统的上述缺点。所谓个人仪器,就是以个人计算机为基础的仪器。个人仪器与独立仪器已完全不同,它们本身大都不带显示器及键盘等部件,仅具备必需的测试部件,以插件板的形式作为个人计算机的附件,构成自动测试系统。个人仪器的突出优点是性能/价格比高,开发周期短,使用方便及结构紧凑,因而受到广泛重视。

早期的个人仪器把仪器插件板直接插入个人计算机的扩展槽口内,仪器板直接挂在个人计算机的内部总线上。这种个人仪器的优点是结构简单、成本低和容易实现,缺点是仪器板数受到微机内扩展槽口数的限制,机箱内部干扰大,散热不易,仪器板尺寸受机内空间限制及加重微机电源负担等,因而不宜用作微弱信号、高精度、大功率及微波等测量。为了克服这些缺点,就将仪器卡移到微机箱外的插件箱内,在计算机的扩展槽口内仍需插入一块接口板,该接口板与插件箱之间可通过微机总线进行通信。

图 1-3 表示一种混合式的个人仪器结构,在微机内部的扩展槽口内插入了仪器卡,在

微机外部的插件箱内也有仪器卡。

在 20 世纪 90 年代以前,个人仪器多数建立在 ISA 总线上,其性能比不上建立在 VME 总线基础上的 VXI 模块式仪器。虽然由于它结构简单,价格低廉,仍有部分中小仪器公司不放弃该领域,但毕竟未受到广泛重视。90 年代个人计算机采用 PCI 总线,又为个人仪器的发展带来新机遇。PCI 总线比 VME 总线性能更优良,它在 64 位下传输速率达到 264MB/s。为使 PCI 进入仪器领域,美国 NI 公司把 PCI 扩展成 PXI 总线。目前,已推出多种性能优良的基于 PCI 的个人仪器,以及 PXI 总线仪器。可以预料,以 GPIB 总线为主的台式仪器、VXI 总线为主的模块式仪器,以及以 ISA/PCI 总线为主的个人仪器,三者将互为补充,共同发展。

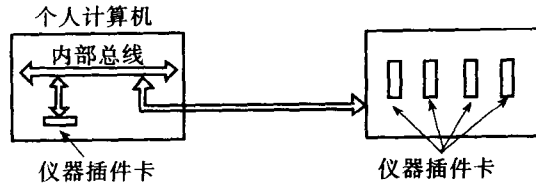


图 1-3 个人仪器系统

### 1.3.4 VXI 总线系统

由于个人仪器系统消除了 GPIB 测试系统中硬件冗余及体积大等问题,使性能/价格比得到很大提高,加上其他许多优点,在 20 世纪 80 年代很快得到发展,国外一些仪器生产厂家纷纷推出了自己的个人仪器系统,有的还定义了自己的个人仪器总线。这些个人仪器的尺寸、电气指标、接口及总线没有统一的标准,互不通用,这就影响了个人仪器的进一步发展。为此,美国五家有影响的仪器公司在 1987 年 7 月成立了 VXI 联合会,一致同意在 VME 微机总线的基础上开发模块式仪器标准总线。1987 年 10 月、1988 年 6 月和 1989 年 7 月分别发表了 VXI 总线规范 1.1、1.2 和 1.3 文本。VME 总线是 1981 年美国 Motorola 公司德国分部为 16 位微处理器 68000 系列而开发的微机总线,后来成为 IEEE P1014 标准。

VXI 总线的技术规范中规定了四种尺寸的插件板,较小的 A 和 B 尺寸是 VME 总线标准规定的插板尺寸,用于中等性能、可携带及低成本的系统。C 尺寸用于高性能及中等成本的系统,最大的 D 尺寸用于最高性能和最高成本的系统。

图 1-4 表示了 HP 公司于 1988 年推出的 C 尺寸主机架及 C 尺寸插板,在每个插板上有连接器插头,插入主机箱的母板上。母板上有 13 列槽口,因而最多可插入 13 个插件板。A 尺寸插板上只有一个连接器  $P_1$ ,B 和 C 尺寸的插板上有两个连接器  $P_1$  和  $P_2$ ,D 尺寸插板上有连接器  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$ 。每个连接器有 3 列,每列有 32 个引脚,因而每个连接器有 96 个引脚;3 个连接器共有 288 个引脚。

由图 1-4 可见,在主机架的后部有一块母板,这是一块 12 层印制板,上面制有 VXI 总线。母板上还有 13 列连接器插座,供插入仪器模块。主机架的上、下部都有导轨,前端还有装配托架,使插板容易插入插座并固定住。C 尺寸的机架也可插入 B 尺寸的插板,但要利用运送器。

主机架的后部(位于母板和后面板之间)分上、下两层放置电源和冷却设备。上部提供了 VXI 标准规定的七种电源,下部是冷却用风扇。

母板上的 13 列插座按自左向右的顺序进行编号,最左列插座称为 0 号槽口,最右列插座为 12 号槽口。0 槽插件装有系统的公用资源,提供公用时钟及插件识别等信号,对系统资源进行管理,还具有 VXI 总线与其他总线(GPIB、RS-232C 等)间的转接器,其他 12 个槽口插入用户选定的仪器模块。图 1-5 是 HP 公司的 C 尺寸主机架的 VXI 仪器系统实

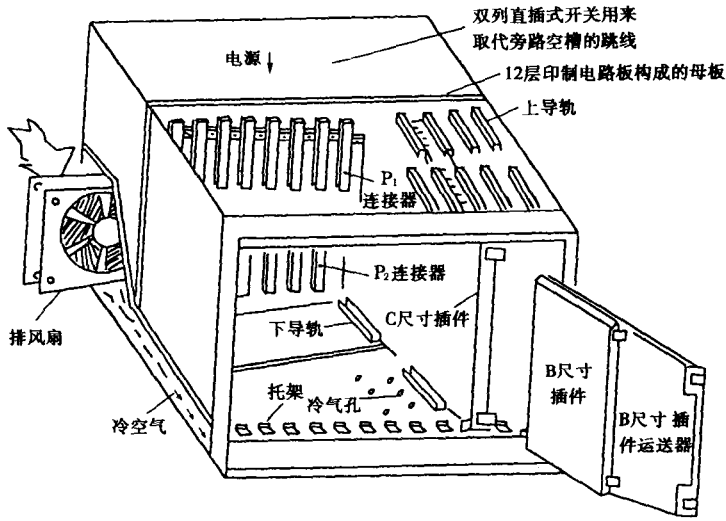


图 1-4 VXI 主机架实例

例。个人计算机是主控制器,通过 GPIB 总线与主机架相连。为了简化控制和便于编程,由鼠标器驱动交互测试发生器提供软面板,进行人机对话。0 槽插件还通过 RS-232C 接口与终端机相连。

图 1-5 中数字化仪器占用了两个标准的插板宽度,所以主机架中共有 12 个插件,其中有的一个插件构成一个仪器,有的由两个插件构成一个仪器。当一个主机架不够用时,与主计算机相连的 GPIB 总线还可接至其他 VXI 主机架。

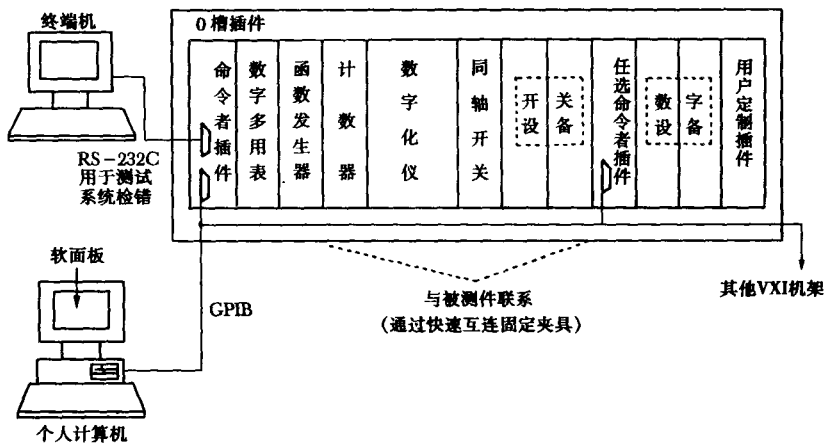


图 1-5 VXI 总线系统实例

### 1.3.5 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,具有虚拟仪器面板、足够的仪器硬件及通信功能的测量信息处理系统,其结构如图1-6所示。由图可见,虚拟仪器利用计算机强大的软件环境,建立图形化的虚拟仪器面板,完成测试所需的各种采集、控制、数据分析与显示的全部功能。

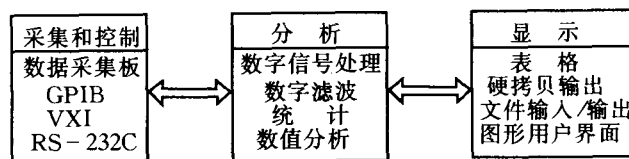


图 1-6 虚拟仪器典型组成

虚拟仪器实质上是软件和硬件相结合的产物,常见的虚拟仪器有两种:

(1) 用虚拟仪器代替某种传统的实物仪器,不需实物仪器参与即可完成全部仪器功能。这种虚拟仪器通常由微型计算机及 A/D、D/A 变换器等通用硬件和应用软件等部分组成。计算机加上 A/D 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,如果再配上传感器,就可测量各种非电量。计算机加上 D/A 及其他辅助电路就可产生任意波形,包括扫频、调频等信号。计算机加上 A/D、D/A 变换器就可实现扫频分析、反馈控制等功能。

(2) 常见的虚拟仪器主要是对实物仪器的映射。这里的虚拟仪器大多要与 VXI, GPIB, RS-232C 等接口及其所连的仪器硬件配合工作,因此,它实际上是虚拟仪器程序。这种虚拟仪器在界面上模仿实物仪器,通常具有与实物仪器类似的软前面板,并具有可操作性。在功能上,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。

相对于传统仪器而言,虚拟仪器的优势是明显的。它充分利用计算机的软件资源,通过软件完成测试任务。它的软、硬件具有开放性、模块化、可重复使用及互换性等特点,使用户可以根据自己的需要定位仪器的功能。用户甚至只需对软件灵活组合、集合,就可组建功能不同的多种虚拟仪器。

## 1.4 电子测量仪器的分类

电子测量仪器有多种分类方法,总的可分为通用和专用两大类。通用电子仪器有较广泛的应用范围,如示波器、多用表及通用计数器等。专用电子仪器有特定的用途,例如,光纤测试仪器用于测试光纤的特性,通信测试仪器用于测试通信线路及通信设备。另外,电子仪器还可按工作频段分为超低频、音频、视频、高频及微波等;按电路原理可分为模拟式和数字式;按仪器结构可分为便携式、台式、架式、模块式及插件式等;按使用条件又可分为 I、II 和 III 组仪器。I 组仪器为高精度度仪器,要求工作环境温度为 10~30℃,湿度为 30%、(20~75)%RH,只允许有轻微的振动;II 组仪器要求环境温度为 0~40℃,湿度为 40%、(20~90)%RH,仪器在使用中允许有一般的振动和冲击,通用仪器应符合该组要求;III 组仪器可工作在室外环境,要求温度为 -10~50℃,湿度为 50%、(5~90)%RH,在运输过程中允许受到振动与冲击。

按照被测参量的特性,电子仪器可分为下列几类:

### 1) 测量电信号的仪器

该类仪器用于测量电信号的种种特性。它们又可分为时域仪器、频域仪器及调制域测试仪器三大类。

(1) 时域测试仪器 这类仪器用于测试电信号在时域的种种特性,例如观察和测试信号的时基波形(示波器);测量电信号的电压、电流及功率(电压表、电流表及功率计);测量电信号的频率、周期、相位及时间间隔(通用计数器、频率计、相位计及时间计数器等);测量脉冲占空比、上升沿、下降沿、上冲;测量失真度及调制度等。

(2) 频域测试仪器 该类仪器用于测量信号的频谱、功率谱、相位噪声功率谱等,典型仪器有频谱分析仪、信号分析仪等。

(3) 调制域测试仪器 调制域描述了信号的频率、周期、时间间隔及相位随时间的变化关系,如图 1-7 所示。美国 HP 公司于 1987 年首先推出了调制域分析仪。使用调制域分析仪可测量诸如压控振荡器(VCO)的暂态过程和频率漂移;调频和调相的线性及失真;数据和时钟信号的相位抖动;脉宽调制信号;扫描范围、周期及线性;旋转机械的启动及运转状况;锁相环路的捕捉及跟踪范围;捷变频信号等。当然也可无间隔地测量稳态信号的频率、周期及相位等。

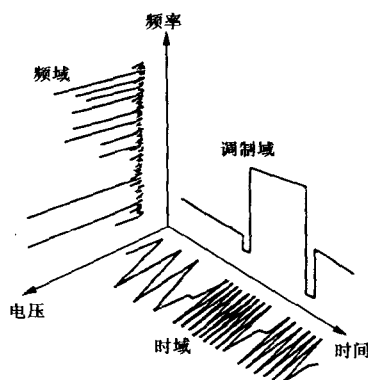


图 1-7 时域、频域和调制域

### 2) 测量电子元器件及电路网络参数的仪器

这类仪器包括:

(1) 测量电阻、电容、电感、阻抗、导纳及 Q 值等电子元件参数的仪器。

(2) 测量半导体分立器件、模拟集成电路及数字集成电路等电子器件特性的仪器。

(3) 测量各类无源和有源电路网络特性的仪器,包括测量电路的传输系数、频率特性、冲激响应、灵敏度、驻波比及耦合度等特性的仪器。

### 3) 数据域测试仪器

这类仪器所测试的不是电信号的特性,而是各种数据,主要是二进制数据流。它们所关心的不是信号波形、幅度及相位等信息,而是关心信号在特定时刻的状态“0”和“1”,这些特定时刻包括时钟、读/写、输入/输出、选通及芯片选择等信号的有效沿。因此,用数据域测试仪器测试数字系统的数据时,除了输入被测数据流外,还应输入选通信号,以正确选通输入数据流。数据域测试的另一个特点是输入通道数多,例如,当测试微型计算机的地址或数据总线时可多达 32 或 64 路。该类仪器还有丰富的显示、触发及跟踪等功能。

## 1.5 本课程的任务

电子测量的内容很广泛,本课程主要讨论以下几方面的内容:

(1) 主要电参数的测量 包括电压、电流、电阻、频率、时间等的测量;电子元件(阻抗)及集成电路参数的测量;微波网络的分析。还讨论了各种电子测量都要使用的信号源。

(2) 电信号显示和分析 包括在时域的波形显示和在频域的分析技术。前者讨论了示波器

的原理及使用,后者讨论了频谱分析技术,还涉及了失真度、调制度及相位噪声等测试技术。

(3) 数字技术受到越来越多的重视,因此本书讨论了数字电路的测试原理、数字系统的可测性设计技术,还介绍了数字系统的基本测试仪器——逻辑分析仪。

(4) 作为电子测量技术的基础——误差理论初步。

本书重点介绍基本测量原理和方法、基本测试技术及误差分析,对一些常用电子仪器的基本组成也进行了讨论。

## 2.1 测量误差

### 2.1.1 测量误差的基本概念

测量就是通过实验来求出被测量的量值,因此测量过程就要涉及到标准和误差这两个重要问题。首先,求出被测量的量值的过程实际上是把待测量直接或间接地与一个同类已知量相比较,而拿这个已知量作为比值单位,求出被测量与其比值,这个比值连同单位一起作为被测量的量值。所以在测量过程中必须要有一个体现计值单位的量作为标准,而且大家要采用同一标准,测量结果才有意义。其次,人们通过各种方法所得到的测量值与真值之间总是有差别的,这个差别就是测量误差。

#### 1. 参考标准

测量中所使用的标准称为计量标准,一般来说,计量标准有以下三种类型:

(1)用理论来定义计量标准的真值 例如,电流的计量标准理论安培的定义为:流过真空中相距 1m 的两条无限小圆形截面的平行导线而能在此两导线间产生  $2 \times 10^{-7} \text{N/m}$  相互作用力的恒定电流。这样的真值是理想的概念,实际上是不可知的。因为要知道它,就必须测量它,要测量它又需要用某种标准作比较,这样陷入无穷的循环而仍然得不到真值。所以绝对的真值如同真理一样,是不可知的,人类只能通过科学技术的不断进步而无限地逼近它。

(2)指定值  $A_s$  由于真值是不可知的,所以一般由国家设立各种尽可能维持恒定不变的实物标准,以法令的形式指定以它所体现的量值作为计量单位的指定值。例如,指定以国家天文台保存的铯钟组所产生的特定条件下铯原子射束超精细能级跃迁频率的平均值作为 9 192 631 770Hz,或者说把这种微波振荡的 9 192 631 770 个周期的平均持续时间作为 1 原子秒。再例如,指定以国家计量局保存的铂铱合金圆柱体千克原器的质量为 1kg。在国际上,通过互相对比来保证各个国家间在一定程度上的相互一致。

(3)实际值  $A$  在日常大量的测量中,不可能一一与国家基准直接比对,所以国家还设立了由一系列各级计量标准构成的量值传递网,把国家基准所体现的计量单位通过逐级比对传递到千百万日常使用的工作仪器或量具中去。每一级比对中,都以上一级标准器的量值作为近似真值,称之为实际值。

#### 2. 测量误差与测量不确定度

科学研究的实际证明,所有的测量都受到误差的影响。我们已经知道,在一定的时空条件下,一个量的真值是一个客观存在的确定数值,而在不同的时空条件下,量的真值往往是不同的。在测量过程中,当人们对同一物理量进行多次重复测量时,测量结果并不一样,这就是由于人们对客观规律认识的局限性,测量器具不准确,实验手段不完善,周围环境的影

响,测量人员技术水平高低等原因,使得测量值只能反映它与被测量某种程度上的近似,这种近似是用误差来衡量的。评定测量结果是否有效或有效程度如何,也是用误差来衡量的。测量技术水平、测量结果的可靠性、测量工作的全部意义和价值都在于误差的大小。

不确定度是建立在误差理论基础上的一个新概念。误差的数字指标称为不确定度,它表示由于测量误差的存在而对被测量的真值缺乏了解的程度,是所给出的测量值的可能含有的(未知的)误差出现范围的一种评定。一个测量结果,只有当知道它的测量不确定度时才有意义。即一个完整的测量结果,不仅要表示其量值大小,还应同时给出相应的测量不确定度,以表明该测量结果的可信程度。

长期以来,国内外对误差理论以及测量不确定度的概念、符号和表达式存在着不同程度的分歧和混乱,造成了国际间交流的困难。为此,国际计量局于1980年作出了《实验不确定度的规定建议书 INC-(1980)》,国际计量委员会随后采纳了该建议书,这一建议书使不确定度的计算及说明在国际上有了共同的基础。近10多年来,在 INC-1(1980)的基础上,不确定度的评定及表示得到了进一步的发展。1993年国际不确定工作组制定了《Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement》,经国际计量局等七个国际组织批准实行,由国际标准化组织(ISO)公布。我国在1991年由国家技术监督局批准了技术规范 JJG1027-91《测量误差及数据处理》,并于1992年10月实施(试行)。该技术规范规定了我国要以 INC-1(1980)《建议书》为依据,统一理解测量不确定度的概念。本教材摒弃旧的对不确定度的描述,采用了符合国际和国家标准的对误差理论和测量不确定度的表征方法。

### 3. 研究误差理论的目的

由于在测量中误差是普遍存在的,所以研究误差的来源及其规律,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。随着测量技术的发展,测量中的误差可以逐步减小,但不可能做到完全没有误差。有时即使为了减少一点误差也要化费大量人力和物力的代价,所以还要根据实际工作需要确定测量的精度。

我们研究误差理论的目的是:

(1)充分利用测量数据,合理、正确地处理数据,以在给定的测量条件下得出被测量的最佳估计值。

(2)根据数据处理的结果正确表示出测量不确定度。测量结果的使用与其不确定度有密切的关系,不确定度愈小,可信度越高,使用价值愈高;不确定度愈大,可信度愈低,使用价值也低。测量不确定度表示得过大,对产品质量会造成危害;过小则在人力、物力方面造成浪费。

(3)正确地分析误差来源及规律,以便在测量中合理地选择仪器、方法及环境,消除不利因素,完善检测手段,提高测量准确度。

#### 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 (absolute error)

设测量值为  $x$ , 被测量真值为  $A_0$ , 则绝对误差  $\Delta x$  表示为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (2-1)$$



由于真值  $A_0$  一般无法得到,故式(2-1)只有理论上的意义,这样定义的绝对误差称为真误差(true error)。在实际中采用约定真值  $A$ 。约定真值定义为:对于给定目的而言,被认为充分接近真值,可用于替代真值的量值。约定真值  $A$  可以是前面提过的指定值、实际值、标准值等,还可以是最佳估计值,即修正过的多次测量的算术平均值。误差可表示为

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

在测量中还常用到修正值的概念。与绝对误差绝对值相等,符号相反之值称为修正值,一般用  $C$  表示:

$$C = -\Delta x = A - x \quad (2-3)$$

一般测量仪器在说明书中以数字、表格、曲线或公式的形式给出工厂检定的修正值。利用修正值可求出仪器的实际值

$$A = x + C \quad (2-4)$$

例如,某电流表的量程为 1mA,说明书中给出其修正值为  $-0.01\text{mA}$ 。当用该电流表测一未知电流时,其测量值为  $0.78\text{mA}$ ,则可求出被测电流的实际值为

$$A = 0.78 + (-0.01) = 0.77\text{mA}$$

在自动测量仪器中,修正值可存储在内存中,测量时仪器根据预先编制好的程序对测量结果进行修正。

## 2. 相对误差(relative error)

绝对误差并不能完全表示测量的质量,它的大小不能作为比较测量结果准确度高低的依据。当我们测量两个频率,其中一个频率为  $100\text{Hz}$ ,其绝对误差  $\Delta f_1$  为  $1\text{Hz}$ ;另一个频率为  $100\text{kHz}$ ,其绝对误差  $\Delta f_2$  为  $10\text{Hz}$ 。后者的绝对误差虽然是前者的 10 倍,但后者的测量准确度却比前者为高。也就是说,测量的准确程度,除了与误差的大小有关以外,还和被测量的大小有关。在绝对误差相等的情况下,测量值越小,测量的准确程度越低;测量值越大,测量的准确程度越高。为了能确切地反映测量的准确程度,一般情况下采用相对误差的概念。相对误差又叫相对真误差,它是绝对误差与被测量的真值之比,常用百分数表示。若用  $\gamma$  表示相对误差,则

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times (100\%) \quad (2-5)$$

在实用中,真值往往代之以约定真值,有时甚至代之以测量结果。

根据相对误差中所取的相对参考值,相对误差又可分为:

### 1) 实际相对误差

实际相对误差,是用绝对误差  $\Delta x$  与被测量的实际值  $A$  的百分比值来表示的相对误差,记为

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

### 2) 标称相对误差

标称相对误差又称为示值相对误差,是用绝对值  $\Delta x$  与仪器的测定值  $x$  的百分比值来表示的,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times (100\%) \quad (2-6)$$

这种方法只适合在误差较小的情况下,作为一种近似计算。