

怎样在物理实验中使用微处理机

高宗仁

(中国科学院物理研究所)

引言

微处理机的原始定义是在一块半导体单晶片上实现传统的计算机中央处理部件全部功能的大规模集成电路。近年来,随着微处理机的迅速发展及其在各个领域中日益广泛的应用,已经形成了一门新的电子技术——微处理机应用技术。在应用技术中,我们往往将微处理机理解为微处理机系列片子以及能与其配合使用的各种大规模集成电路的总称,其中包括单片式微型计算机、微处理机、存储器、输入/输出接口、模数转换器和数模转换器等。

微处理机应用技术与传统电子技术的基本区别如下:

(1) 在设计微处理机系统时尽可能采用大规模集成电路片子,这些片子都具有较强的功能。例如,一块微处理机片子(MPU)就具有传统的中央处理机的全部功能,一块存储器片子(RAM或ROM)就相当于一台传统的存储器,而一块模数转换器片子(ADC)就能够实现快速模数转换等等。因此,实际上任何一项设计都应称为系统设计。这样设计出来的系统既不同于传统的电子学系统,也不同于小型电子计算机控制的系统。传统的电子学系统不具备任何判断、贮存和处理能力,可称为“笨”的系统。而小型机控制的系统只是将传统的“笨”的系统与小型计算机联起来,赋予一定的贮存、处理能力。但是,由于这两部分是分开设计的,其性能必然受到较大的限制,而且造价较高。微处理机系统则是一个统一设计的完整系统,它具有判断、贮存、处理等能力,并能够进一步设计成

具备自动校准、自动换档和自动诊断等功能的“智能”系统。

(2) 传统电子学系统的功能全都由电路来实现。而微处理机系统不仅需要依靠硬件,同时也需要依靠软件,而整个系统的功能则是软件和硬件的综合效果。而且,针对各种具体系统的不同要求(如数据的采集速度和处理能力,应用的灵活性、可靠性,以及造价等),可以设计成以硬件为主的系统,也可以设计成以软件为主的系统。因此,微处理机系统比传统的电子学系统,具有大得多的设计灵活性。

(3) 为了发展微处理机系统,需要特殊的仪器和工具,如各种微处理机开发系统、逻辑分析仪和只读存储器的写入装置等等。这些仪器和工具往往本身就是特殊设计的微处理机系统。

显然,应用微处理机技术将产生出新一代的电子设备和系统。如将其应用到实验室去,必将使科学实验条件发生巨大的变革。

为促进这方面的工作,本文介绍微处理机技术在物理实验中的若干可能应用,它也适用于其它一些实验领域。

这里主要介绍三个方面的应用:实验数据的采集和处理,实验过程的控制,自动化仪器系统(关于微处理机应用的一些基本知识可以参阅“介绍微型计算机及其在物理实验中的某些应用”一文^[1])。

一、实验数据的采集和处理

物理实验中首先必须采集实验数据。由于被采集的电信号有模拟信号和数字信号之分,

而且信号的性质(如变化速度、幅度等)也有很大的不同,因而数据采集的具体方式可以是千变万化的。但是,数据采集的基本框图却大体相同,如图1所示。

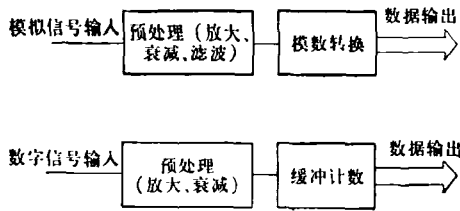


图1 数据采集框图

其次,对于采集的数据还需要去伪存真,提取有用的数据,或者对采集的数据进行某种形式的变换,诸如进行积分、微分或者由时间域变换为频率域等,这类过程统称为数据处理。

由此可见,一切数字式的物理测量仪器和各种谱仪实际上都是数据采集和处理系统。

由于篇幅限制,不可能对数据的采集和处理进行全面论述。下面重点讨论在微处理机系统中实现物理实验数据的采集和处理的几个主要方面:

1. 模数转换器的应用

目前已经有各种类型的模数转换器单片和模块,它们可以应用于不同方面。这些模数转换器不仅包括转换部分,还往往带有接口,能够直接与微处理机相联接。模数转换器通常可以在微处理机的程序控制下工作,也可以采用直接数据通道方式,将数据直接送入存储器内。在后一种方式中,微处理机只用于设定参数和采集后的数据处理。由于目前一般微处理机的速度不够快,这种使微处理机退居二线的工作方式对于实现快速采集通道是十分有用的。在大多数用微处理机控制的谱仪中,数据采集部分都是这种工作方式。又如,我们可以用一片采样速率为30兆赫、精度为8位的模数转换器和存取时间为30毫微秒的存储器片子构成一路视频信号的快速采集通道。由于每一路通道中都有一个缓冲存储器,我们就不难实现一个具有多路快速采集通道的微处理机系统(见图2)。

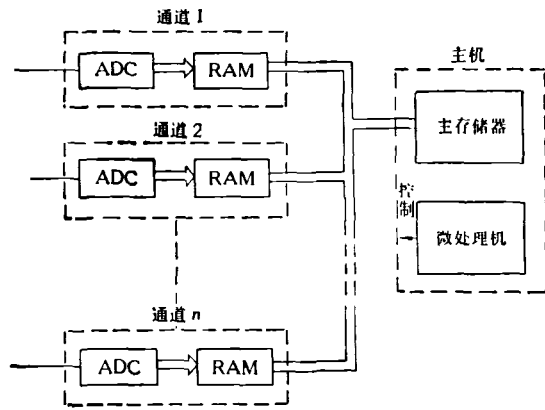


图2 微处理机控制的多通道数据采集处理系统

在图2中,如果采集通道的路数 $n=10$,每一路的采样速率为30兆赫,则此系统每秒采集的数据总数将高达 3×10^8 位组。此速度对于不设缓冲存储器的小型机系统是绝对不可能达到的。

微处理机系统的设计十分灵活,我们可以方便地利用微处理机的程序控制功能,设计出各种形式的模数转换器,以满足不同的需要。在这样的系统中,微处理机既作控制,又是模数转换器的组成部分。

图3是一个逐位比较型的模数转换器,其工作程序框图见图4。微处理机在转换过程中起控制寄存器的作用。

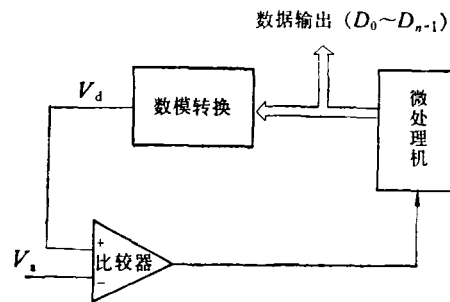


图3 逐位比较型的模数转换器

对于一个8位的逐位比较型模数转换器,变换一个数据约需执行50条指令,需时几百微秒。此速度对于一般数字式温度控制系统已是足够快了。

由于采用了软件和硬件相结合的工作方

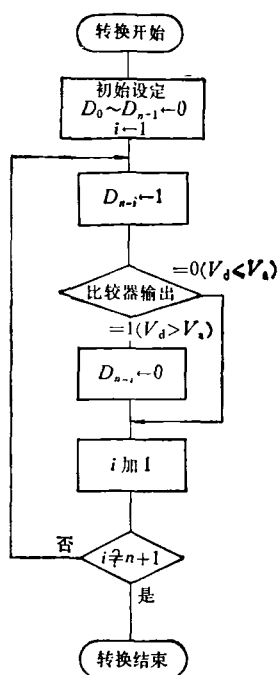


图4 逐位比较型模数转换器的工作程序框图

式，我们容易按照不同的需要做成各种类型的模数转换器。图5是一种双积分比较型的模数转换器，它比起逐位比较型模数转换器，具有较强的噪声抑制能力。这种模数转换器的工作程序框图见图6。

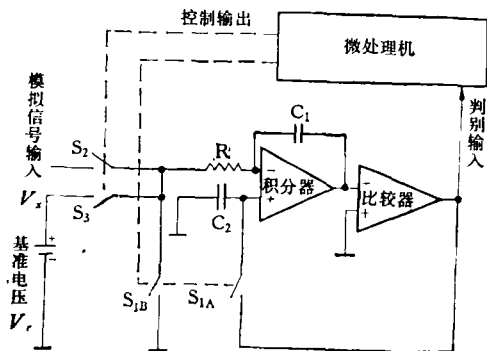


图5 双积分比较型模数转换器
($V_x = V_r \times T_2 / T_1$, T_1 是 V_x 的固定充电积分时间, T_2 是 V_r 的放电积分时间)

在图6中，转换开始的准备阶段，实际上完成了一项自动校零功能。

物理测量中常需要高精度的模数转换器。下面介绍一种利用微处理机的控制功能来提高模数转换器精度的方法，这种方法在微处理机

物理

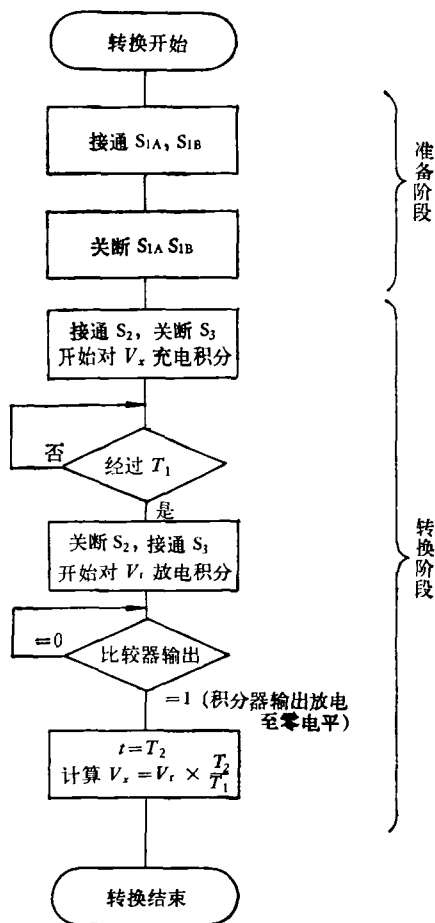


图6 双积分比较型模数转换器的工作程序框图

技术中经常采用。例如，我们可以用一个8位的硬件乘法器片子实现16位或32位的乘法等等。当然，随着乘法位数的增加，其速度会相应地下降。

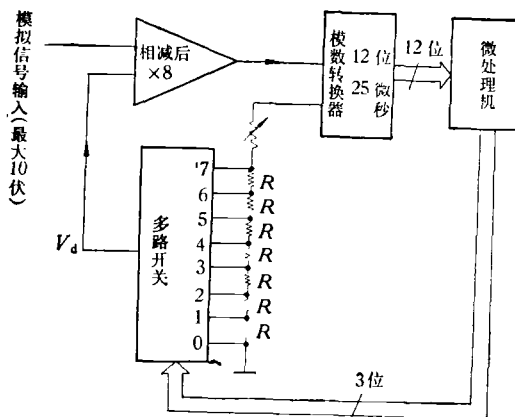


图7 15位、100微秒的模数转换器

在图7所示的模数转换器中,15位中的高3位由微处理机判断决定.由于应用对分法来选择多路开关,最多四次就能够确定高3位.因此,如原模数转换器的精度是12位,其转换时间为25微秒,则上述系统的精度可达到15位,而转换时间约为100微秒.

在以上几个例子中,微处理机是作为模数转换器的一个组成部分进行工作的.因此,转换后的数据自动保存在微处理机控制的存储器内,而不需要在模数转换器与微处理机之间设置专门接口.

最后,应当指出,利用微处理机的处理功能还能够对采集通道的增益和非线性等系统误差进行校正.另外,在作预处理的模拟电路中,不可避免地存在零点漂移现象.在微处理机控制下,通过自动测量校零值,可以容易地将漂移值从其实测值中经计算扣除.

2. 提取微弱信号的数字技术^[2]

在物理量的测量中,有时信号十分微弱,而且往往淹没在很强的背景噪声和严重的漂移之中.对这些微弱信号的提取,过去大多采用模拟技术.例如,实验室中常用模拟式的锁相放大器或取样积分器来提取和放大微弱信号.在这类模拟式设备中,由于不可能兼有高的信号噪声比和强的漂移抑制能力,使它们难于满足一些特殊实验的要求.此外,为了进一步处理数据,还需要将其模拟输出信号经过模数转换,成为数字信号.这将使整个系统的级数增加,而级数增加必然会引进更多的噪声和误差.图8表示传统处理微弱信号的一种框图.

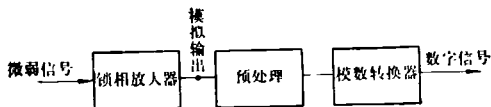


图8 传统处理微弱信号的框图

采用微处理机技术就能够克服上述缺点.提取微弱信号和数字化的工作是一起进行的,不必分成两步做,因此能够大大减少系统本身带来的噪声、漂移和非线性畸变等.而且,当信号弱至一定程度,信号本身就呈现量子化的数

字性质.如此时仍采用模拟技术,则可先将本来可以直接计数的微弱信号加以积累,变换为模拟信号,经过处理以后,再将输出进行数字化成为数字信息,就更加显得不合理了.对具有这种性质的微弱信号,现在大多采用光子计数的方法来检测,这实际上也是一种数字技术,属于微处理机技术的范畴.

为了具体说明微处理机技术,下面介绍一种通用的数字锁相技术,它还兼有平均器和光子计数的特点(见图9).

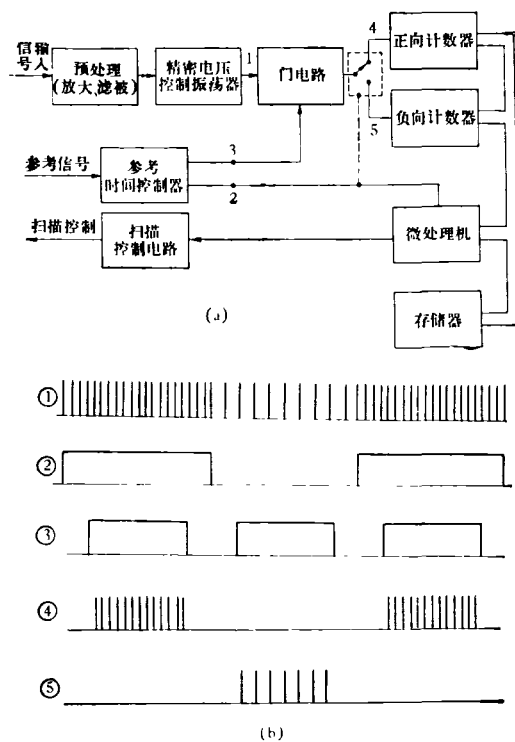


图9 数字锁相技术的框图(a)和波形图(b)

输入的微弱信号经过预处理(放大、滤波等)后,由电压控制振荡器变换为一系列脉冲,脉冲的重覆频率正比于输入信号的幅度.脉冲信号由开关控制,轮流送入正向计数器和负向计数器进行计数,此开关的换向应与参考信号同步.为了严格控制正向计数时间等于负向计数时间,以避免引起附加的漂移,在脉冲通路上加了一个门电路.门电路的开启也与参考信号同步.脉冲的计数值直接送入存储器内保存.微处理机的作用是设定系统参数,使计数器清

零,作正向计数值和负向计数值的相减,以及控制扫描等。

显然,门电路加上换向开关起相敏检波的作用,而计数器则相当于低通滤波器。

由于采用了微处理机技术,微弱信号的提取和模数转换同时完成。而且,数字式的低通滤波器不受系统内部噪声源的影响,其积分时间实际上没有限制。因此,我们可以用长的积分时间来得到高的信号噪声比。另外,数字式低通滤波器的恢复时间很短,这就使得在相同的积分时间下,它所能达到的扫描速率要比模拟式低通滤波器的大得多。如果我们采用适当的积分时间,进行较快的扫描,就可以使此系统兼有高的信号噪声比和强的漂移抑制能力。

数字锁相技术的另一个优点是,系统本身不引入附加的噪声和漂移,而这正是模拟技术中不可避免的缺点。

3. 数据处理

按照实际需要,数据处理可以是以软件为主,也可以是以硬件为主。当采集的实验数据已经保存在存储器内,而且不要求立即处理时,通常采用以软件为主的方法,即利用事先编好的处理程序对采入的数据进行加工,以获得有用的数据。这种方法在小型计算机控制的系统中常被采用,微处理机系统虽然也可以应用这种方法,但在此表现不出其特色。在要求实时处理的场合,由于处理速度较高,一般采用以硬件为主的方法。此时多用运算速度高的双极型位片式微处理机,加上硬件乘法器,用微程序控制的方式进行处理。这种方法充分体现了微处理机系统的优越性。

有的数据处理比较简单,如零点漂移扣除、系统误差补偿、平滑处理和一些简单的换算等,在此就不一一介绍了。

比较复杂的数据处理有各种数字滤波、傅里叶变换和相关处理等。

下面是一个应用双极型微处理机作实时处理数字滤波器的例子,目的在于介绍微处理机数据处理技术的一般方法。

一个通用的 N 阶数字滤波器可以表示为下

物理

列差分方程:

$$y_n = \sum_{i=0}^N A_i \cdot x_{n-i} + \sum_{i=1}^N B_i \cdot y_{n-i}$$

式中 x_n 和 y_n 分别是 nT 时的输入数字量和输出数字量, T 是采样周期。而 A_i 和 B_i 是滤波器的系数,其值由传输函数决定。此差分方程的图解形式见图10。

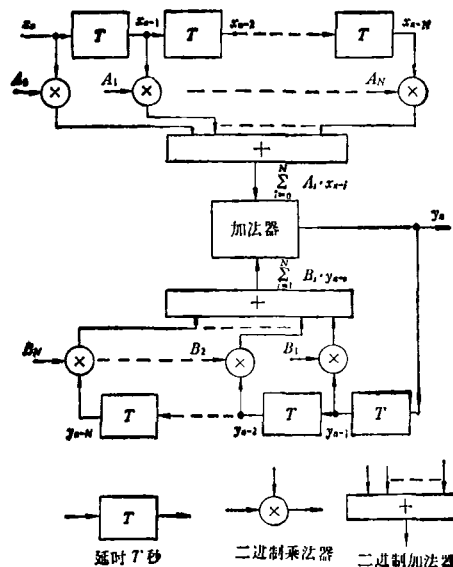


图10 通用 N 阶数字滤波器的差分方程图解

实现 N 阶数字滤波器的微处理机系统的框图见图11,位片式微处理机在此主要起加法器

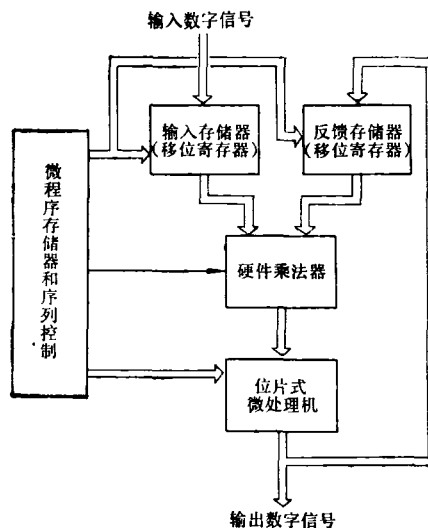


图11 微处理机控制的数字滤波器

的作用。此数字滤波器的设计具有很大的灵活性，如配以辅助存储器和专门作管理的微处理机，则可以方便地随时设定其系数。而且，如其输入端和输出端分别加上模数转换器和数模转换器，它还可以用于对模拟信号进行滤波，这在许多物理实验中十分有用。

对于四阶的非递归型数字滤波器，处理一个数据约需要 11 条微指令。如执行一条微指令平均需时 80 毫微秒，则系统的最小采样周期为 $11 \times 80 \approx 900$ 毫微秒。因此，该数字滤波器可处理的模拟信号的上限频率大于 500 千赫。

二、实验过程的控制

在物理实验室中，常需要对测量环境或制备过程的一些条件(例如温度、压力、流量和机械运动等)进行控制。以微处理机为基础设计的数字式控制系统与传统的模拟控制方法比较，具有一系列的优点，如操作灵活、可靠性高和容易实现各种先进的控制模型等等。

下面介绍温度控制和精密位移控制两个例子，用以说明设计微处理机数字控制系统的一般方法。

1. 温度控制^[3]

图 12 示出了一般数字式温度控制系统的框图。图中的函数发生器是一个数字式发生器，可给出所要求的温度随时间变化关系的数字信号，此关系可以随时根据需要加以设定。用热电偶测量被控环境的温度，数字式温度计将热电偶的温差电动势转变为所测温度的数字信号。用热电偶测温有两个必需考虑的问题，一个是冷结点的补偿，另一个是对温度与电动势

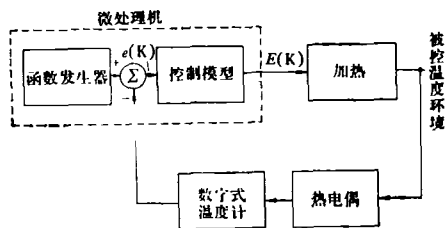


图 12 数字式的温度控制系统

的关系作线性校正。这两个问题在微处理机系统中都较容易得到解决。冷结点补偿可以用电阻温度计直接测量冷结点的温度，然后经微处理机进行计算扣除。至于线性校正问题，只需使函数发生器的数字输出是与所要求的温度变化相对应的数字电压信号即可。

由于设定温度值和实测温度值皆为数字信号，误差信号可以由微处理机直接作减法运算得到。此数字误差信号 $e(K)$ 按一定的控制模型处理后，成为控制数字信号 $E(K)$ ，用来控制加热执行部件的工作。

为说明方便起见，采用大家熟悉的比例-积分-微分(PID)控制模型。PID 控制的连续量方程如下：

$$E(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right],$$

式中 K_p , T_i 和 T_d 分别是比例、积分和微分常数。

如以数字技术实现 PID 控制，需要将上式改写为差分方程：

$$E(K) = E(K-1) + A_0 e(K) + A_1 e(K-1) + A_2 e(K-2),$$

式中

$$A_0 = K_p(1 + T/T_i + T_d/T),$$

$$A_1 = -K_p(1 + 2T_d/T),$$

$$A_2 = K_p(T_d/T).$$

实现上述控制模型的框图见图 13。

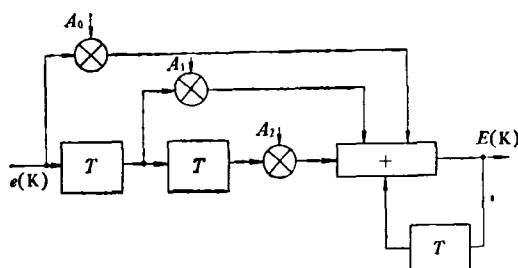


图 13 实现 PID 控制模型的框图

由上述可知，在数字式控制装置中，许多复杂的功能都可以由微处理机在程序控制下得到实现。因此，硬件大为简化，可靠性大大提高，没有零点漂移等不稳定因素，而且可以根据需要随时设定所要求的温度变化关系，使用十分

方便灵活。控制模型中的系数也易于调整。显然，在数字式系统中较容易实现各种先进的控制模型，使温度得到最佳控制。

2. 精密位移控制

在激光退火或激光切割等装置中，常需要控制被加工件相对于激光束作精密位移。采用微处理机控制，用步进电机带动机械装置位移是一种先进的方法。用此方法可以方便地使装置相对于激光束投射的光斑在整个范围或者任意一个小区域进行定时扫描。采用合适的步进电机和传动机械，可以使位移的控制精度达到1微米。

利用一简单的单片式微型机即能实现上述功能，其框图见图14。

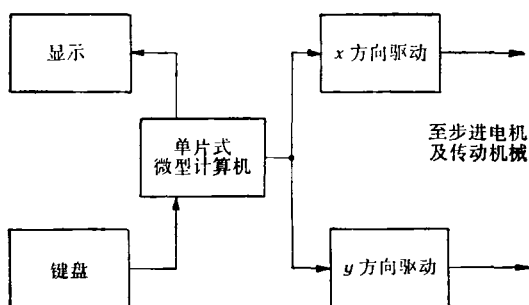


图14 用单片式微型计算机控制精密位移的框图

应当指出，当步进电机作快速走步时，常容易产生失步。如采用反馈环控制，将会大大增

加硬件的复杂性。通常是对控制脉冲序列作一些特殊的调整，如启动时使控制脉冲的速率逐步升高，停止时使控制脉冲的速率逐步降低等。由于在微处理机系统中，控制脉冲序列是在程序控制下产生的，这些时间关系的特殊调整十分容易得到实现。

三、自动化仪器系统

在物理实验中，特别是对于一些复杂的实验，常常需要若干台仪器和设备同时工作。为了实现实验的全盘自动化，必须将这些仪器设备置于统一控制管理之下。这样，就需要对这些配套使用的仪器和设备以及它们的联接方式提出特殊的要求。而且，为了使不同厂家生产的仪器设备能够方便地进行换接，需要规定统一的标准。换句话说，就是要规定通用的仪器标准接口。当然，接入系统的自制专用设备也应当按照这个标准设计。

目前，国际上最通用的仪器标准接口是IEEE-488^[4]。现简单介绍如下：

全部接入系统中的仪器设备只需用一组总线(bus)进行联接。总线包含16条线，其定义和功能见图15。因此，仪器设备间的外部联接是非常简单的，换接也十分方便。

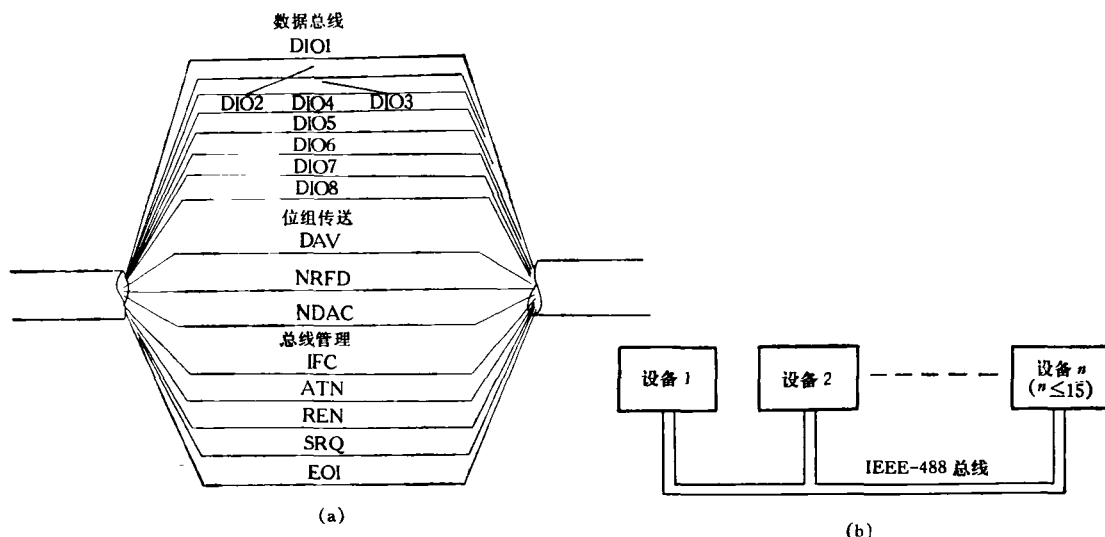


图15 IEEE-488的总线结构(a)和系统中仪器设备间的联接方式(b)

系统中最多可以接入 15 台仪器设备,总的传输距离可达 20 米,设备之间数据传送最高速率为 1 兆位组/秒。

接入系统的设备分三类,即控制设备、发送设备和接收设备。控制设备在整个系统中一般只有一台,它对仪器系统进行控制和管理。我们通常用微型计算机作为控制设备。发送设备(如数字电压表、数字式锁相放大器、光子计数器等)从外界测量数据,然后送到系统中的其它设备。接收设备(如数字式绘图仪、打印机、显示装置等)从系统中其它设备接收数据,然后向外界输出或作出记录。当然,有的仪器设备可以兼有两种功能,甚至三种功能兼备。例如,一台程序控制式示波器可以兼作发送设备和接收设备。

凡接入系统中的仪器设备都必须包括两部分,一部分具有特定仪器的功能,另一部分就是标准接口(见图 16)。

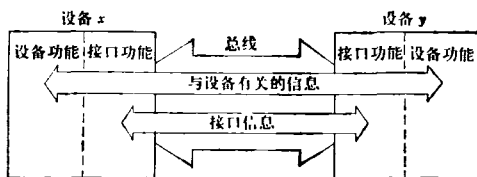


图 16 仪器功能的区分

由于不同仪器设备的功能可能有相当大的

差异,数据总线上传送的数据也可以是各式各样的(如选定设备的地址、设定参数、测量数据、控制命令或设备状态等)。因此,接口的设计是比较复杂的。现在已经有 IEEE-488 接口片子,专供组装仪器标准接口用。对于功能强的接口,一般多采用微处理机控制,主要由软件进行识别控制。

除了上述仪器标准接口外,还有 RS-232C, RS-423 和 RS-422 等串行标准接口。如加上调制解调器(MODEM),还能够进行数据通信,与远处的仪器设备协同工作。

以上介绍了微处理机技术在物理实验中可能应用的一些方面。由这些应用可以看到,微处理机系统的设计是十分灵活的,能够设计出各种高性能的系统,以满足物理实验提出的不同要求。在有些应用中,甚至可以采用多微处理机结构,这些微处理机协同工作,使系统性能更加完善。

参 考 文 献

- [1] 高宗仁,物理, 9(1980), 34.
- [2] S. Cova, A. Longoni, *Rev. Sci. Instrum.*, **50**(1979), 296.
- [3] C. L. Pomernacki, *Rev. Sci. Instrum.*, **48** (1977) 1420.
- [4] D. C. Loughry, M. S. Allen, *Proc. IEEE*, **66**(1978) 162.

光 抽 运 技 术

——一种原子物理学的实验方法

陈扬鬯 龚顺生

(中国科学院武汉物理研究所)

利用物质和电磁波的相互作用是研究物质微观结构的一种主要手段。多年来光谱学的研究提供了大量有关原子和分子结构的数据,大大地推动了原子和分子物理学的进展。但是如果了解原子、分子等微观粒子内部更加细微

的结构和变化,光谱方法由于受到仪器分辨率和谱线线宽的限制,往往得不到满意的结果。为此发展了波谱学的研究方法,即直接观测原子精细、超精细或塞曼子能级间的微波或射频共振(常称为磁共振)。和光频共振相比,微波或