

微机非电量测量仪器的实用设计

张德有 主编

水利电力出版社

目 录

前 言

第一章 导论	1
1.1 传感器的选用	1
1.2 接口技术	3
1.3 软件处理技术	6
1.4 非电量测量仪器的研究方向	6
第二章 长度测量	8
2.1 概述	8
2.2 方案选择	8
2.3 相位法光波测距	9
2.4 调制频率的选择	15
2.5 测距精度分析	16
2.6 DCS-1激光测距仪	23
2.7 微机型测距仪	48
2.8 长度测量	49
2.9 HP-5505C接口电路设计	52
2.10 数据采集程序	56
第三章 厚度测量	63
3.1 概述	63
3.2 基本原理	63
3.3 硬件设计	67
3.4 软件编制方法	72
第四章 压力测量	79
4.1 概述	79
4.2 固态压力传感器	79
4.3 数字压力计	84
4.4 校准曲线的拟合与非线性修正	91
4.5 运算方法的选择	93
4.6 压力计的性能指标测定	97
第五章 重量测量	100

5.1	概述.....	100
5.2	皮带秤中非电量—电量的转换.....	101
5.3	微机皮带秤计量仪表的工作原理及分析.....	104
5.4	软件设计.....	114
5.5	系统误差分析.....	122
第六章	硬度测量.....	126
6.1	概述.....	126
6.2	硬度试验.....	126
6.3	微机式硬度测试原理.....	128
6.4	自动标准洛氏硬度计测控系统设计.....	131
第七章	流量测量.....	145
7.1	概述.....	145
7.2	工作原理.....	145
7.3	流量计的设计原理、方法及步骤.....	147
7.4	仪表的误差分析及其它.....	160
第八章	地层储油量测量.....	161
8.1	概述.....	161
8.2	地球物理测井的基本概念.....	161
8.3	岩电法测井的基本原理.....	162
8.4	岩芯电阻率自动测量仪.....	166
8.5	自动测试系统的实现.....	173
8.6	测井实例.....	178
第九章	温度测量.....	184
9.1	概述.....	184
9.2	温度测量原理.....	184
9.3	温度采集系统的实用设计.....	188
9.4	小结.....	200
第十章	流速测量.....	202
10.1	概述.....	202
10.2	压力法流速测量的基本原理.....	202
10.3	流速测量系统简介.....	204
10.4	流速测量探头的设计要求和方法.....	205
10.5	流速测量系统中其它部件的基本原理和选择原则.....	213
10.6	流速测量系统的校测.....	219
10.7	流速测量的应用程序简介.....	221
第十一章	应力测量.....	225
11.1	概述.....	225

11.2	应力分析的电测方法.....	225
11.3	小结.....	246
第十二章	多功能多参数自动测试系统.....	247
12.1	概述.....	247
12.2	设计方法.....	251
12.3	测量/控制处理机的系统开发.....	279

第一章 导 论

微电子学的发展和微处理器的出现,给80年代出现的智能化仪器带来坚实的基础。于是,由传感器、接口电路、微机及外围设备所组成的非电量测量仪器相继问世。图1-1是非电量测量仪器组成框图。

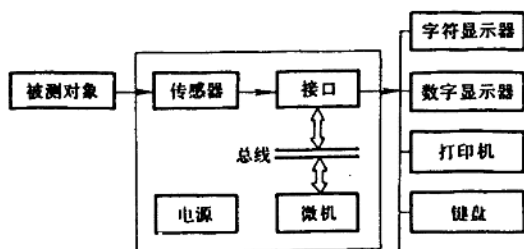


图 1-1 非电量测量仪器组成框图

1.1 传感器的选用

进行非电量测量,传感器是信息的检测源,它的功能决定原测量结果的质量,故选择传感器是设计测量仪器的首要步骤。

1.1.1 传感器的特征

1. 对检测量的模/数转换

将非电量的物理量转换为电量的信息(多为模拟量),这种被测量大多为连续变化的,将这个随时间而变化的测定值记录下来,易于作状态变化判断,但不能使数据表示为数字。显然,不可能把诸如电压这样的量直接送到计算机运算,为将模拟量转换为数字量,采用了模/数(A/D)转换技术。

2. 对比测定

一般测定是指对被测量的绝对值进行测定,直接测定绝对值的精度是困难的。通常采用对比测定法,以标准值对比被测量的大小,以该值作为测量值。由于标准值常受到温度、湿度、电源等环境变化的影响,使测定的可靠度及精度受到影响,因此在设计仪器时必须十分注意此点。

3. 接触方式

(1) 接触式 接触式是指直接接触被测物的测量方式。由于检测端直接接触被测物,

故对被测物有一些影响，但是所测得量值是被测物的实在值，而不受空间影响，这在现场进行测定时较为方便。

(2) 非接触式 非接触式是指检测器不直接接触被测物，而且对被测物越远影响越小，适宜远距离测量。这样检测器可利用流体及光学等方法。但是，由于流体及光、磁场等易受到环境影响，并且被测物的物理特性及形状将使检测量的特性改变，因而在现场进行测定时要求仪器具有调整及补偿功能。由于近年来光学及电子技术的发展，非接触式的仪器逐渐增加了品种。

作为一般考虑，接触式使用在要求精度和可靠性高的测量，非接触式用于要求不太严格的场合。

1.1.2 传感器的主要性能指标

以下几项指标在选择传感器时应给予重视。

1. 灵敏度

灵敏度是传感器的主要指标，因此，人们都希望选用器件的灵敏度越高越好。实际上并非如此，灵敏度越高对抑制噪声愈不利。故对灵敏度的选择应以满足测量仪器的性能要求为准则。

2. 响应特性

响应特性是指对被测对象的速度变化能够迅速响应。选择传感器时，其响应特性应符合仪器的要求。

3. 线性

线性一般是指输出量与输入量具有正比关系。传感器完全是线性的几乎没有，一般为近似直线。但是，在选择传感器时要尽量选用线性范围大的，以利于对它修正和扩大整机测量范围。

4. 稳定性

传感器作为系统的检测器，在长期使用中其检测特性不应变化。因此，在选用传感器时一定要注意它的稳定性。这包括两个内容：一是传感器本身的重复性，即在不变的工作条件下，重复地给予某个相同输入值时其输出值的一致性；二是在环境条件改变时（如温度变化），传感器的性能变化不应超出整机对它的要求范围。

5. 精度

精度（精确度）是评价测量仪器的重要指标，而传感器的精度是决定测量仪器精度的重要因素。精度又分为准确度和精密度，准确度是反映系统误差的大小，精密度是反映测量随机误差的大小。在选用传感器时对其精度选择要适度，若传感器的精度低于整机要求两个数量级，要进行全部修正是非常困难的。

6. 迟滞

迟滞是反映传感器在输入值增减过程中（正反行程），对于同一输入量的输出值差别。这是由传感器的物理性质所致，当弹性材料受应力而变形时，就不可能消除所加应力产生的影响。所以在选择传感器时不可忽略此点。

以上几点对选用变换器时同样适用。

1.2 接口技术

当微机与传感器连接时就必须有各种功能的外围电路,即接口电路,这已比原来微机范围内的中央处理器(CPU)与外围设备之间的结合部分(标准接口)扩大了含义。因为,一般传感器或变送器的输出信号为模拟量,而微机不能直接处理模拟量,为此就必须在传感器与微机之间设有接口电路,在进行A/D转换之前还必须进行前置处理。为使A/D转换器高效地工作,应设有多路转换器,若想准确地变换高速的信号,又要有采样、保持电路,当A/D转换器输出的数据通过总线与微机连接时还需要输入输出接口。上述这些处理技术统称为接口技术。图1-2是传感器与微机的接口组成框图。

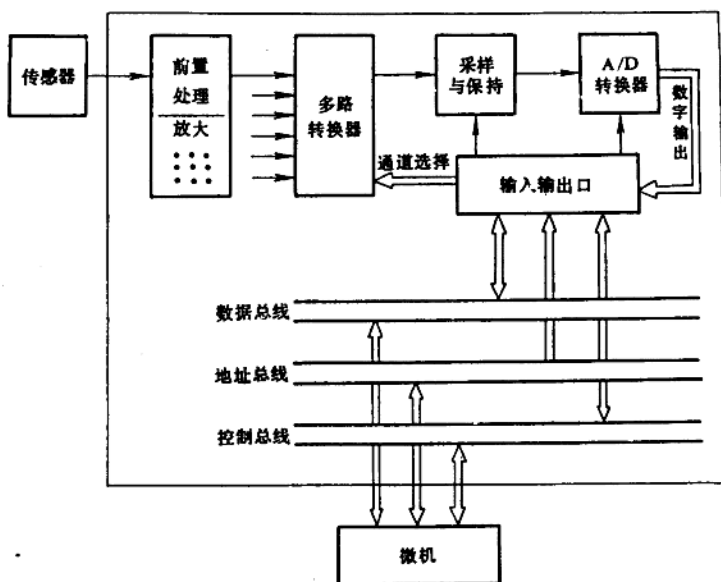


图 1-2 传感器与微机的接口组成框图

1.2.1 前置处理技术

由于传感器的种类繁多,因而不同类型的传感器其前置处理电路亦不相同,前置处理电路有:

- 1) 放大电路。放大传感器输出的微弱信号。
- 2) 阻抗变换电路。传感器输出为高阻抗时变为低阻抗。
- 3) 有效值变换电路。传感器为交流输出时,将有效值变为直流。
- 4) 电流-电压变换电路。传感器输出为电流时变为电压。
- 5) 对数压缩电路。传感器的输出动态范围大时,用对数电路压缩。

6) 滤波电路。用低通滤波器或高通滤波器消除噪声。

7) 线性化电路。当传感器的传输特性为非线性时用以进行补偿线性。

8) 增益控制电路。为了得到最佳的检测精度而进行增益转换时用此电路。

以上这些电路并非所有传感器均须配齐, 可视传感器的类型而设置。

1. 开关型传感器

开关型传感器按其工作原理分为有点接触型和无点接触型。前者为机械接点, 接点动作易产生振荡, 须设计振荡消除电路或用软件来解决。后者无接点(如光继电器), 可通过比较器根据比较电压值判断开关状态。但由于传感器的输出在比较电平附近, 噪声会影响其工作的稳定性, 这就需要噪声消除电路, 同时要考虑比较器的输出电平能否与数字相配合的问题。由于开关型传感器以检测出 2 个值为目的, 故不需要 A/D 转换器, 经前置电路处理后可直接与微机的输入端连接。

2. 模拟量输出型传感器

它用在检测对象的输出量为连续变化量的传感器, 一般有电压、电流及阻抗变换型。无论采用哪种变换形式, 首先要解决电平转换, 使传感器的输出适合 A/D 转换器输入的规定, 当模拟量变为数字量后以便微机进行处理。前置处理中的放大电路是不可缺少的。为了消除噪声而不损失信号, 选用合适的运算放大器又是解决放大电路中的关键问题。

当传感器与微机有段距离时, 宜采用 V/F 转换器, 转换器将模拟电压变为频率变化作为数字传输, 可提高抗噪声能力, 但要设计外部计数器电路。用计数器计频率的方法, 可借用硬件做软件处理, 因为用软件处理将增加微机的负担, 处理时间也长。

3. 其它

多普勒式可检测频率变化; 超声波反射型可测时间变化, 这种传感器取得的信号不必进行 A/D 转换即可数字化, 但要经放大及整形等前置处理。稍特殊的有旋转编码器, 它是一种极少有的数字输出型传感器。

1.2.2 A/D 转换技术

随着数字信号处理的普及, A/D 转换器从低速到高速、从低分辨率到高分辨力, 种类很多。而选择 A/D 转换器的着眼点是转换时间、精度、价格等。最常用的有积分型及逐次比较型两种。在一般 8bit 的转换, 积分型的转换时间为 1~20ms, 转换方式有单、双及三重积为型, 其基本原理相同, 而应用最广泛的是双积分型。其特点是线性及抗干扰能力高、造价低, 但转换时间长; 理论上, 积分电容及时钟脉冲发生器在积分期间是稳定的, 但是基准电压的精度与稳定性对转换精度有影响。逐次比较型的转换时间为 10~30 μ s, 转换速度快、精度高。它的内部设有 D/A 转换器, 使输入电压和 D/A 转换器的模拟输出值比较, 从存储器的最高位比特顺序进行比较, 以决定位数的比特值。当 D/A 转换器的输出小于输入电压时, 比特为逻辑“1”, 大于输入电压时, 比特为逻辑“0”, 以下的比特的处理按此移动。这种逐次比较型的转换时间固定, 与模拟量输入无关; 再者, 数值输出为串行取出。由于 D/A 转换器、基准电压、比较器等误差因素较多且造价大, 故其精度价格比高, 适用于中高速转换场合。

A/D 转换器的性能用电性能来表示, 有以下几点:

(1) 分辨力 指识别最小模拟值的能力。n 比特 A/D 转换器的分辨力, 是把全量程

电压值除以 2^n 所得的商；也有对全量程值以百分率作规定的。提高A/D转换器的分辨力而不改基本精度可采用标定法和抵消法。

(2) 精度 A/D转换器在量子化时由于四舍五入了中间值，即在 $0 \pm 1/2 \text{ LSB}$ （最低有效位）的范围内产生本身的量子化误差。实际上，还有以下误差会影响其精度。

1) 非线性误差。对整体曲线由线性误差和部分弯曲的微分线性误差组成。直线误差不包括转换范围的两端，是直线传输函数的最大部分，表示为全量程值的百分率或LSB的分数。微分线性误差是指转换范围任意点上的理论数位的位置。当微分误差比 $\pm \text{LSB}$ 大的场合则产生误码，数字输出则跳跃。

2) 偏移误差。以“0”为数字输出码的输入电压值。

3) 增益误差。输入输出理想线性与实际输入输出的斜率差。

4) 温度特性。是指非线性误差、偏移误差、增益误差等所具有的总的温度特性。

(3) 转换速度 转换速度是A/D转换器的重要指标。为了保证正确进行转换要有转换时间，而输入原信号的速度与分辨力有着重要的关系。

1.2.3 A/D转换器的外围电路

1. 采样、保持电路

制造高速、高分辨力的A/D转换器是困难的，而且价格高。为了保证转换器的模拟输入信号必须在足够的时间内保持稳定，以便转换器完成转换动作，通常在转换器之前设有采样、保持电路，此电路对模拟输入信号进行采样，并使之保持稳定，直到进行下次采样为止。为了尽可能的再现原输入信号，采样频率至少应当是输入信号的最高频率2倍以上。由于原输入信号容易混入高频杂音，这样就会产生区域误差，为此，在前置处理电路前必须设计低通滤波器。

2. 模拟多路转换器

如果需要多模拟输入通道，而每个通道都要有一个A/D转换器则不够经济，若通道的模拟信号用一个A/D转换为数字化，则可用模拟多路转换器，不言而喻，使用这种电路可以减少微机的输入输出接口。

在数个模拟开关的输入端，连接各个输入信号源，而输出端则为共同的场合，其模拟开关所处的状态，是根据二进制码地址指定选择特定的通道，为此，末级电路要具有适合的输入阻抗便于直接连接。

1.2.4 A/D转换器与微机的连接

模拟量由A/D转换器变成数字量，最后必须由微机取得，A/D转换器与微机的接口除要有缓冲器外，其它的要求与一般外围使用的LSI的情况相同，但是，要考虑A/D转换器的分辨力能力（数据宽度）及取样速度等，若微机端的数据宽度比A/D转换器的分辨力大时，必须用复数回行变换数据的输入，其电路变为复杂。一般情况，由微机或时钟给A/D转换以状态信号，选择A/D转换器，给予起动命令，转换终了再从微机存取转换数据的基本方法。

由于A/D转换器及微机的体系结构有各种各样，最一般的连接方法有以下几种：

1) 地址选择法。此法又称存储变换型I/O或变换型I/O地址选择法，前者的场合，

是把A/D转换器的地址在存储空间微调,使用各种存储参考命令,但在6800系统的微处理器不设I/O空间。后者的场合,在Z80系统的微处理器设有I/O空间。

2) 数据取入法。在给予A/D转换器转换开始启动命令后在转换终止的同时微机取入转换数据的方法,有询问方式、中断方式、直接存储方式等。

1.3 软件处理技术

模拟技术是不可能对数据进行高速运算及离散量处理,而带有软件功能的微机有着十分强的处理能力,它可从传感器取得信息后用软件施行处理,可提高传感器的综合性能,其实现的方法有各种各样,所呈现的功能各异,例如:

1) 特性变换功能。传感器的输出是依输入的物理量而变化,其关系并不是单一的比例关系,如热敏电阻对温度其电阻变化是指数函数,若知从传感器测出的温度,则必须进行反变换。从前,对此种场合采取相应的模拟电路,但不能满足性能要求,采用微机之后在没有完全硬件的支持下,软件可以实现这个变换功能。

2) 多参数数据处理功能。被测量为复数时,可求相互关系的数值,如用2个温度传感器,测干球温度和湿球温度,采用变化表法可求出相对湿度。同样道理,用微机组合起复数传感器,用表格法可进行变换处理,完全可以求出其它物理量。

3) 统计处理功能。取自传感器几次输入的结果求其平均值,这样,可减少瞬时的杂音影响,或者,当超出标准偏差允许值时可多次输入以提高可靠性。这种处理功能用软件很容易实现。

4) 运算功能。被测对象的量值可以是多项时间函数关系,可做微分积分处理,尤其对空间分布特性曲线处理更为方便。

5) 自校功能。传感器在长期使用时其特性有可能变化,用软件技术可以保证得到连续的正确信息。

自动量程转换、自动补偿等以及微机固有的各种功能和软件设计技巧等,请阅读本书有关章节,这里不再赘述。

1.4 非电量测量仪器的研究方向

提高非电量测量精度与灵敏度,除作数字处理的A/D转换等的技术之外,起决定因素的是传感器。期望作为一种高精度高灵敏度的非电量测量仪器的出现,从20世纪70年代中期某些国家在宇宙卫星研制过程中,就把灵敏传感器作为智能化传感器技术进行了研究,其设想是由于从宇宙卫星送来的各种庞大的观测数据,能进行实时处理及遥控飞行器,则必须使用超大型计算机,而所组成的庞大系统其价格也昂贵。为此有人提出,把低成本的 μP 和灵敏传感器组成一体化,使其智能化的系统的功能由集中处理型向分散处理型转变,

以图降低系统的综合成本，同时由于分散了功能，容易向多元测量扩展，亦可增大信息量的处理。因此，由 μP 和传感器组成一体化的灵敏传感器的特性应具有：把规则的信号变成数据，尽可能地以简单的方式进行各种运算，能进行分析和统计计算，能作数据采集和过程情况处理，能做出判断，能与别的传感器相互配合，能自动调整处于不同环境条件下的工作状态等。显然，这种灵敏传感器已不仅仅是一个普通的传感器，而是一个结构小巧的测试系统了。

虽说如此，要完成这个设想并非容易，它有待于新材料、新工艺、新的设计原理不断地发展，而构成这个系统的个别关键技术不成熟就难以实现，特别是关于测量仪器的研究方面，就其 μP 本身的能力来说，仅限于信息处理而未超出二次仪表的概念范围。因此，今后的非电量测量的主要研究方向应是：检测器的研究、模拟信号处理器件的高集成化、高精度高速A/D转换器的LSI化、测量用的计算方法的研究、测量应用技术的研究等。

第二章 长 度 测 量

2.1 概 述

本章分长度与距离的测量。从物理意义上讲，二者是同一量纲，但是长度又通常指高精度测量长度的相对值，而距离通常指属测量领域内的距离或长度的绝对值。因此，后者又可称粗精度测量，前者又称精密测量。

距离测量是以1977年冬研制成功的我国第一台DCS-1型中短程数量激光测距仪为例进行讲解。该仪器经野外作业及基线比试性能良好。白天测程在良好的大气条件下，可达10km，精度为 $\pm(10\text{mm} + 1\text{mm/km})$ ，达国际水平，它可用于三、四等三角边测量及工程测量。长度测量是利用HP-5526型激光干涉仪，配上接口电路，其精度达 10^{-11} 以上，灵敏度为 $5\text{\AA}$ （近年来已有灵敏度为 $1\text{\AA}$ 的仪器）。它除用于长度地面变形，还可作角度/平面度、准直度等的测定。

2.2 方 案 选 择

激光测距原理是测定光波在被测距离 D 上往返传播的时间 t_D 来间接测定距离，据光波在空间传播的速度 c 是已知的，由公式：

$$D = \frac{1}{2} c t_D \quad (2-1)$$

可求出待测的距离 D 。

根据测定时间 t_D 方法的不同，测距方案可分为两大类：一类是直接测定时间 t_D ；另一类是间接测定时间 t_D 。前者通常叫做脉冲法，后者则有相位法，反馈法，脉冲-相位法及干涉法等等。DCS-1型是采用相位法，HP-5526型是采用干涉法。

相位法是用测定调制光的相位来间接测定 t_D ，其特点是要求采用一定功率的连续发光光源，并要有反射镜作合作目标，线路结构较复杂，精度可达 $5\text{mm} \sim 1\text{cm}$ 。这种方法在大地测量和工程测量以及地震预报中得到了广泛应用。

干涉法测距实际上也是相位法测量距离的一种，但它不是通过测量调制光信号的相位值来测定距离，而是通过光波本身的相位叠加关系（即光的干涉原理）测定距离。由于光的波长极短（微米量级），而激光的单色性又使其波长值很准确，所以用干涉法测距的分辨率至少可达到 $\lambda/2$ ，精度可达 10^{-9} 以上。这是任何测距方法都不能相比拟的。但是，这种方法只能用于测量相对距离，而不能测量绝对距离，在精密测量中常用来测量长度、位移、变形。

2.3 相位法光波测距

2.3.1 测距原理

相位法测距是测量连续光信号的高频调制信号在被测距离 D 上往返传播所形成的相移 φ_D ，间接测量时间 t_D 。但相移 φ_D 与 t_D 之间关系可用下式表示：

$$t_D = \frac{\varphi_D}{\omega} = \frac{\varphi_D}{2\pi f} \quad (2-2)$$

式中， ω 为调制信号的角频率，代入公式 (2-1) 得：

$$D = \frac{1}{2} c t_D = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi_D}{2\pi} \quad (2-3)$$

将式 (2-3) 对 φ_D 进行微分得：

$$dD = \frac{c}{2f} \cdot \frac{d\varphi_D}{2\pi} \quad (2-4)$$

若现假定连续的调制光的调制频率 f 选用 15 MHz，要求测距精度 $\Delta D \leq 1 \text{ cm}$ ，则要求测定相位 $\Delta \varphi_D$ 的精度为 0.36° 。达到这个测相精度的要求是不困难的。因此，目前国内外高精度的激光测距仪多采用此法，其原理图如图 2-1 所示。

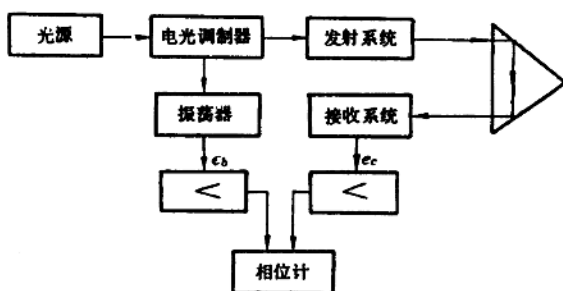


图 2-1 相位测距原理框图

发射光束通过电光调制器而变成连续的调幅光波，仪器所测出的相移也就是该调制频率 f_D 信号在测线上所形成的相移 φ_D 。

当调制光束经发射系统射入被测距离处的反射镜而返回接收系统时，经光电转换成电信号 e_c ，将放大后所获得的相位差 φ_D 代入公式 (2-3) 即可求出被测距离之值。

实际上调制光在待测距离 D 上往返传播所形成的相移 φ_D 可展开成图 2-2 所示的图形。

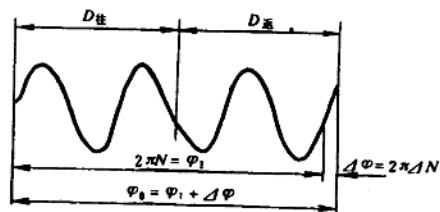


图 2-2 调制光波在传播过程所形成的相移

由图可知:

$$\varphi_D = \varphi_1 + \Delta\varphi = 2\pi(N + \Delta N)$$

代入公式 (2-3) 得

$$D = \frac{c}{2f}(N + \Delta N) \quad (2-5)$$

式中, N 为正整数 (相位变化周期的倍数); ΔN 为小于 1 的数 (不足整周期的尾数)。

如果 c 与 f 是已知的, ΔN 可由仪器测得 (实际上仪器也只能测得 ΔN 值), 则式 (2-5) 中仍有二个未知数 D 和 N , 这便产生了一个多值的解。为解决这一问题, 就必须采用几个频率 (合成一组) 来测定同一距离, 或用连续可变式频率调制方式, 这是相位法测距的重要特点之一。

2.3.2 差频测相

从相位法的光波测距原理可知, 欲获被测距离值, 首先将距离信息换成相位信息, 最后测定相位值, 再换算成距离。相位测量方法有平衡测相与自动数字测相二种, 但无论采用哪种方法, 为考虑系统的稳定性 (电路分布参数的变化, 高频电路的杂散耦合等), 制作工艺和批量生产中的仪器校正工序等实际问题, 均采用差频测相。差频测相法是将高频调制光信号变换成一个低频信号, 然后再对这个低频信号进行测相。由于改变成低频测相, 就提高了测相的分辨率, 从而使测相精度大大提高。与此同时, 各调制频率转换成同一低频信号测相后, 可降低接收放大器的频响要求, 便于放大器获得高增益与高选择性。再则, 其差频信号仍能保持原信号的初相位。因此, 测量高频的相位差完全可转移到用低频的比相法进行。

差频测相的原理如图 2-3 所示, 光源发出的光束, 通过调制器时, 被频率选择器选择的一个主振频率 f_s 所调制, 调制的光束经光学发射系统到达被测目标点并被反射回来, 通过光学接收系统为光电转换器接收并转换成电信号, 经放大后与调制频率相对应的本振频率 f_s ,

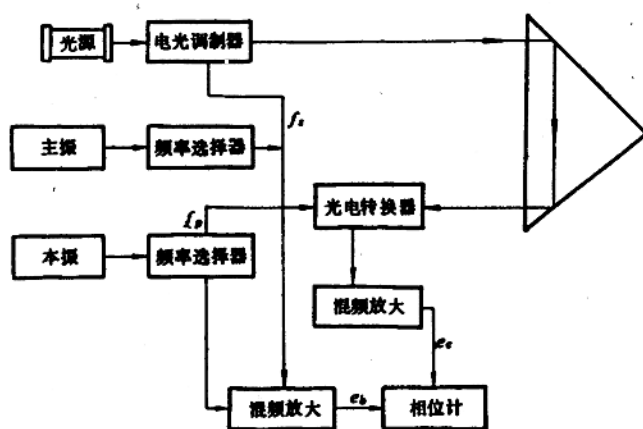


图 2-3 差频测相原理框图

信号进行混频（图2-3所示为混频在光电转换器中进行），获得差频为 f_d 的低频信号， f_d 即是所需的测距信号，用符号 e_c 表示。 e_c 必定保留了调制光速在被测线上往返传播所形成的相移尾数 $\Delta\varphi$ 。与此同时，主振信号与本振信号还在另一个混频器中进行混频，取出差频信号 f_d' ，称之为参考信号（基准信号），用符号 e_b 表示。 e_b 与 e_c 之间的相位差即为被测距离所对应的相位尾数 $\Delta\varphi$ ，将这二信号输入相位计进行相位测量，测出相位 $\Delta\varphi$ ，再经换算便可得出被测距离。

差频频率的选择，一般选择在 $1 \sim 10\text{kHz}$ 之间，如频率过低，不仅对提高测相精度无显著作用，反而给电路带来了不稳定及测量时间过长而引起相位漂移；而当频率过高，将不容易保证要求一定的高精度测相。

2.3.3 电光调制器

相位法测距中的光源仅是作为载波发射，而被测定的相位，则是调制光波的高频电信号在被测距离上往返传播所形成的相移的尾数 $\Delta\varphi$ 。因此，电光调制器便成为相位测距仪的“心脏”，电光调制器实质上是用某一电频率信号的大小来控制光强输出，以达到光强调制。要实现电光调制必须将光源射出的光束转变成相干偏振光，通常采用双折射来产生。所谓双折射现象，即光在某些加有外加电压的晶体中（如方解石、石英晶体），会出现两条折射光。实验表明，这二条折射光是相互垂直的线偏振光，且分别以不同速度透过晶体，其中一条光线遵守折射定律，称寻常光，通常叫 o 光；另一条光线不遵守折射定律，叫非常光又称 e 光。这里需指出，由偏振光引起双折射所产生的 o 光和 e 光是相干的。

1. 电光调制基本原理

如果让光照射两个相互垂直放置的偏振片上（一般前一个叫起偏振片，后一个叫检偏振片），光不能通过，看到的现象是暗的。但如果在两偏振片之间放置一个具有双折射现象的晶体，又会重新看到光通过。这是为什么？由图2-4可见，当光透过起偏振片后，成为偏振光，由于其方向与检偏振片方向不一致，因此，光不能通过，但经过晶体时，产生了双折射现象，光线分成 o 光与 e 光，由于它们振动方向相互垂直，且具有一定的相位差。因此，经过检偏振片输出的恰是各自平行于偏振方向的光振动。这样，又重新看到光通过。



图 2-4 偏振光的干涉

我们可以设想，若在两个相互垂直的偏振片之间，把晶体时而放入，时而移去。那末，由上述理由，我们将会看到一闪一闪的间断闪光，这便实现了光波的调制。很明显地看出，如果晶体的移动不是人工移动，而是用电的方法自动地移动，而移动的频率就是按我们需要调制的电信号频率，则就实现了电光调制效果。

2. KD*P 调制器

测距仪中采用的电光调制器都是人工制成，具有双折射性质的品种很多。目前国内外使用最多的是晶体KD*P调制器（半导体激光器因具有内调制的功能，故不属此范围），它具有高调制度、高稳定性、高透过率、频带宽、功耗低、半波电压值小、结构简单、相位

漂移小且均匀性好等优点, 具体性能如表2-1所示。

表 2-1 串联式纵向KD*P调制器的性能

项 目	指 标	项 目	指 标
串联块数	6 块	透过率	90% (不包括偏振)
半波电压	620 V	消光比	0.01 ~ 0.001
最大调制电压	约170 V	机械共振带	500 ~ 600 kHz
等效电容	<10pF	相位漂移	<2°
带宽	0 ~ 100 MHz	相位均匀性	<1.8°

应该指出, 如果沿KD*P晶体的 z 轴方向加上某一电压 u 时, 所产生双折射现象的二条光束, (见图2-5), 通过实验与理论分析证实, 不是 o 光和 e 光, 而是两个 e 光—— e_x' 与 e_y' , 二者的偏振面互相垂直, 又与晶体的原光轴 $ox(oy)$ 成 45° 角, 如图2-6所示。

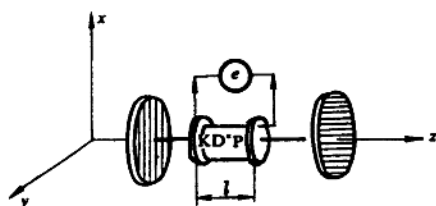


图 2-5 KD*P 调制器

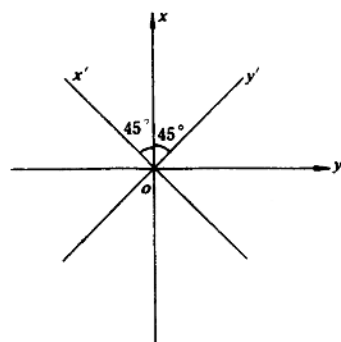


图 2-6 KD*P 轴线条件

两个 e 光在KD*P晶体中传播的折射率是不相等的, 因此这两个光波在KD*P晶体中传播的速度是不同的, 通过晶体之后, 二者之间就产生了相位差 φ_K' 。如果令 $\varphi_K' = \pi$ 时所需的电压, 叫做半波电压 (用 e_m 符号表示), 则 φ_K 与外加电压的关系为:

$$\varphi_K' = \pi \cdot \frac{e}{e_m} \quad (2-6)$$

经KD*P调制器后, 在检偏振片输出的光强 Φ 与相位差 φ_K 及信号 e 的关系经实验可得:

$$\Phi = \Phi_m \sin^2 \left(\frac{\varphi_K'}{2} \right) \quad (2-7)$$

将式 (2-6) 代入式 (2-7) 得

$$\Phi = \Phi_m \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{e}{e_m} \right) \quad (2-8)$$

按式 (2-8) 画出输出调制光强 Φ 与信号 e 的关系曲线, 如图 2-7 所示。该曲线称电光调制特性曲线, 为使输出光强与调制电压成线性关系, 必须加一个直流偏压 $e_m/2$ 。但由于晶体受温度影响较大, 当温度变化时, 半波电压随之变化, 从而影响调制质量。因此, 通常不是采用加直流偏压的方法, 而是采用加 “1/4 波长片” 的方法。从光源来的线偏振光在进入调制器之前, 先产生 1/4 波长的延迟, 即产生 90° 的固定相位差。1/4 波长片受温度影响极小, 因而工作点很稳定, 所以用这种方法能保证调制质量, 又免去 $e_m/2 > 1800\text{V}$ 的直流偏压。

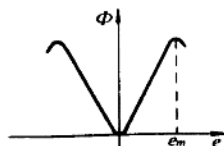


图 2-7 KD*P 电光调制特性曲线

为获得最大不失真调制光强信号时, 对调制电压的要求根据图 2-7 可按式 (2-9) 计算:

$$e_{\text{有效}} = \frac{0.76}{2\sqrt{2}} e_m = 0.28 e_m \quad (2-9)$$

式中, 0.76 系数是为了将调制信号限制在线性区域内。

由于单块 KD*P 晶体的 $e_m = 3600\text{V}$ 左右, 按式 (2-9) 要求加到 KD*P 上的调制电压达 1000V 左右 (有效值)。显然, 要产生这样大的高频信号电压, 将使电子线路复杂, 为此, 必须设法降低 KD*P 调制器的半波电压 e_m 值。

实际上, e_m 是指在 KD*P 晶体中产生 180° 相位差所需的外加电压值, 可见 e_m 是一种手段, 目的是要得到 180° 的相位差。因此, 若将 N 块 KD*P 晶体串联起来, 采用所谓 “光学上串联, 电学上并联” 方法 (如图 2-8 所示), 那末其半波电压 e_m 值必降低 N 倍, 这就获得了实用的 KD*P 调制器。本仪器中采用 6 块 KD*P 予以串接而成, $u_m \approx 600\text{V}$ 左右。

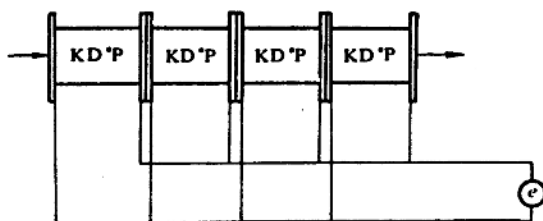


图 2-8 串联式纵向 KD*P 调制器

2.3.4 数字式相位计

自动数字测相具有自动化、速度快、直观、精确以及信息处理方便等优点, 其工作原理如图 2-9 所示, 两个信号在比相之前, 各自先进行过零整形形成对称方波, 然后将这两个信号分别加到检相触发器 CY (实际为 RS 触发器) 的 “R” 与 “S” 输入端, 基准信号 e_b 使 CY 复位, 即 $\overline{Q}$ 输出为高电平 “1”, 而被测信号 e_c 使 CY 置位, 即 $\overline{Q}$ 输出变为低电平 “0”。于是在 $\overline{Q}$ 输出端上获得一个方波 $e_{\Delta\varphi}$, 其脉宽即为两个信号的相位差 $\Delta\varphi$ (与 t_{Δ} 相对应),