

第三章

位移的测量

通过本章的学习,你将能够:

1. 了解常用的测量位移方法;
2. 掌握电感式、涡流式、电容式传感器的工作原理及特点;
3. 懂得相敏整流、相敏检波、差动脉宽调制等电路的应用;
4. 正确选用相应的传感器对位移进行测量。

3.1 概述

位移测量是线位移和角位移测量的统称。实际上就是长度和角度的测量。位移是矢量。它表示物体上某一点在两个不同瞬间的位置变化。因而对位移的度量,应使测量方向与位移方向重合,这样才能真实地测量出位移量的大小。

位移测量在工程中应用很广。这不仅因为机械工程中经常要求精确地测量零部件的位移、位置和尺寸,而且许多机械量的测量往往可以先通过适当的转换成为位移的测试,然后再换算成相应的被测物理量。例如,在对力、扭矩、速度、加速度、温度、流量等参数的测量中,常常采用这种方法。

位移测量包括长度、厚度、高度、距离、物位、镀层厚度、表面粗糙度、角度等的测量。下面针对几种常用的位移传感器及其测量电路作较详细的介绍。

位移是指物体或其某一部分的位置对参考点产生了偏移量。位移方式可以是直线位移或角位移。位移的量值范围差异很大(微米至毫米以下,或几十至几百mm;秒、分、度以下或几度至几十度)。检测可以是接触式或非接触式,加之对检测准确度、分辨率、使用条件等要求不同,因此会有多种多样的检测方法。

检测方式可以是非电或是非电转换成电,转换结果可以是模拟量或是数字量。在检测原理上差别也是很大的,下面介绍一些检测方法。

- 1) 直接用非电检测。利用喷嘴—挡板,通过流量的变化测位移;
- 2) 将位移量转换成模拟电量:

① 位移使传感器结构发生变化,使位移变换成电量,如:电位器式传感器(位移使滑动触头移动)、电容传感器(变 d 、变 S 型)、差动电感、差动变压器(位移使可动铁芯移动)、电涡流传感器、霍尔传感器、强度调制型光电传感器等都能实现位移测量。

② 利用某些功能材料的效应,如压电传感器、金属应变片和半导应变电阻,通过将小的位移变换成压力,使压电传感器的晶体片表面荷电或应变电阻阻值变化等实现位移测量。

③ 将位移量转换成数字量。这样的方法所使用的传感器有:

光电式:光栅(直线、圆盘)和光电编码器(绝对式和增量式);磁电式的:磁栅(直线圆盘)和感应同步器(直线、圆盘)。

3.2 位移—数字式传感器

这是将位移转换成电的数字量,检测直线和角位移的传感器,它主要有光栅、码盘、磁栅和感应同步器。

3.2.1 光栅式位移传感器工作原理

计量光栅有测量直线位移的长光栅和测量角位移的圆光栅。光栅是在透明的玻璃上均匀地刻画线条(透射式),或在不透明具有强反射能力的基体上均匀地刻画间距、宽度相等的条纹(反射式)。

对透射式,其线纹宽为 a ,线纹间空为 b , $a:b=(1:1)\sim(1.1:0.9)$,称 $a+b=P$ 为光栅节距(或光栅常数),它有如图 3-1(b)所示随测量位移(或长度)移动的滑尺(主光栅)和不动的定尺(指示光栅)组成,在有如图所示的光源和透镜组成光学系统照射下,因定、滑尺的线纹间有微小的夹角 θ ,当栅距较光波长大得多的情况下,由于线纹的遮挡作用产生明暗相间的条纹—莫尔条纹,如图 3-1(b)所示,它分布在大致垂直于线纹长度方向。

3.2.2 光栅式位移传感器计算公式

设 P 为栅距,则当主动光栅移动一个栅距时,莫尔条纹移动的距离 B 为 $B=\frac{P/2}{\sin\theta/2}$,因 θ 较小, $\sin\frac{\theta}{2}\approx\frac{\theta}{2}$,则 $B\approx\frac{P}{\theta}P=KP$,式中 K 为莫尔条纹的放大系数。

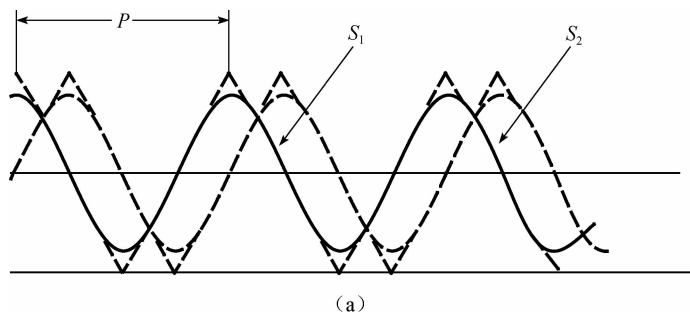


图 3-1 透射式直线光栅

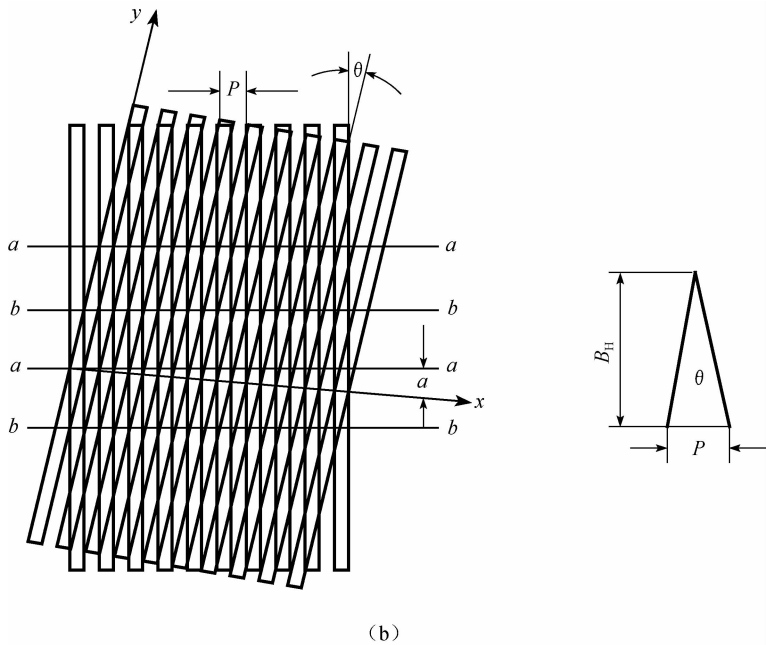


图 3-1 透射式直线光栅(续)
(a) 输出信号;(b) 莫尔条纹

例如, $P=0.02\text{ mm}$, $\theta=0.1^\circ$,则 $B=11.4592\text{ mm}$,其 $K=573$,表明莫尔条纹的放大倍数相当大。这样,就可以把难以观察到的光栅位移清晰可见的移动,从而实现高灵敏度的位移测量。

3.3 常用位移传感器测量电路

3.3.1 电感式传感器

电感式传感器是利用被测量的变化引起线圈自感或互感量的改变这一物理现象来实现测量的。根据转换原理不同,电感式传感器可分为自感式和互感式两大类。人们习惯上讲的电感式传感器通常是指自感式传感器。而互感式传感器由于它是利用变压器原理,又往往做成差动式,故常称为差动变压器传感器。

1. 自感式传感器

(1) 自感式传感器原理

由电工学磁路知识可知,线圈的自感量为:

$$L = \frac{N^2}{R_m} \tag{3-1}$$

式中, N ——线圈匝数;

R_m ——磁路总磁阻(H^{-1})。

由于自感式电感传感器中铁芯和衔铁的磁阻比空气隙磁阻小得多,因此铁芯和衔铁的磁阻可忽略不计,磁路总磁阻 R_m 近似为空气隙磁阻,即:

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A} \quad (3-2)$$

式中, δ ——空气隙厚度;

A ——空气隙的有效截面积;

μ_0 ——真空磁导率,与空气的磁导率相近。

因此电感线圈的电感量为:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta} \quad (3-3)$$

此式表明,当被测量使 δ 、 A 或 μ_0 发生变化时,都会引起电感 L 的变化,如果保持其中的两个参数不变,而仅改变另一个参数,电感量即为该参数的单一函数。由此,电感传感器可分为变隙型、变面积型和螺管型三种类型,如图 3-2 所示。

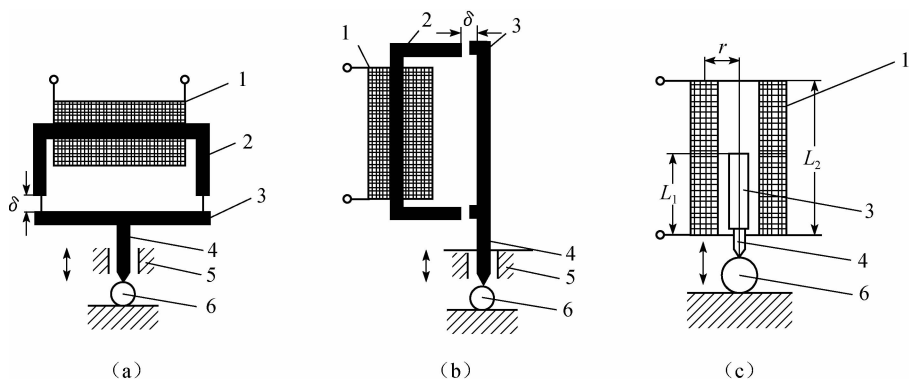


图 3-2 自感式电感传感器示意图

(a) 变隙型; (b) 变面积型; (c) 螺管型

1—线圈; 2—铁芯; 3—衔铁; 4—测杆; 5—导轨; 6—工件

1) 变隙型电感传感器 其结构示意图如图 3-2(a)所示。灵敏度为:

$$S_1 = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta^2} = -\frac{L_0}{\delta} \quad (3-4)$$

灵敏度 S_1 与空气隙厚度 δ 的平方成反比, δ 越小,灵敏度越高。为了保证一定的线性度,变隙型电感传感器只能在较小间隙范围内工作,因而只能用于微小位移的测量,一般为 $0.001 \sim 1 \text{ mm}$ 。

2) 变面积型电感传感器 其结构示意图如图 3-2(b)所示。灵敏度为一常数。

$$S_2 = \frac{dL}{dA} = -\frac{N^2 \mu_0}{2\delta^2} \quad (3-5)$$

由于漏感等原因,变面积型电感传感器在 $A=0$ 时,仍有一定的电感,所以其线性区较小,而且灵敏度较低。

3) 螺管型电感传感器 螺管型电感传感器的结构如图 3-2(c)所示。线圈电感量的大小与衔铁插入线圈的深度有关。

这种传感器结构简单,制作容易,但灵敏度稍低,且衔铁在螺管中部工作时,才有希望获得较好的线性关系。螺管型电感传感器适用于测量比较大的位移。

4) 差动式电感传感器 以上三种电感传感器使用时,由于线圈中通有交流励磁电流,因而衔铁始终承受电磁吸力,会引起振动及附加误差,而且非线性误差较大;另外,外界的干扰如电源电压频率的变化,温度的变化都使输出产生误差。所以,在实际工作中常采用两个相同的传感器线圈共用一个衔铁,构成差动式电感传感器,这样可以提高传感器的灵敏度,减少测量误差。

差动式电感传感器的结构如图 3-3 所示。两个完全相同的单线圈电感传感器共用一个活动衔铁就构成了差动式电感传感器。在变隙型差动电感传感器中,当衔铁随被测量移动而偏离中间位置时,两个线圈的电感量一个增加,一个减小,形成差动形式。在图 3-3(a)中,假设衔铁向上移动 $\Delta\delta$,当满足 $\delta \gg \Delta\delta$ 时,则总的电感变化量为:

$$\Delta L \approx 2 \times \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta^2} \Delta\delta \quad (3-6)$$

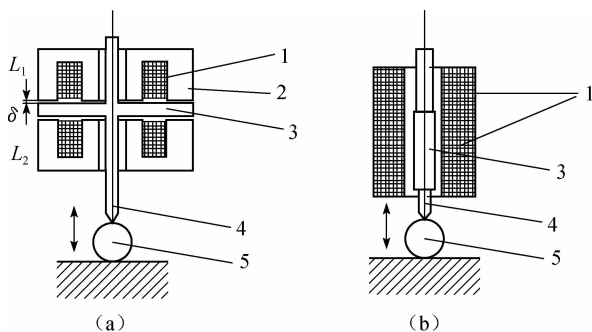


图 3-3 差动式电感传感器

(a) 变隙型; (b) 螺管型

1—差动线圈; 2—铁芯; 3—衔铁; 4—测杆; 5—工件

灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta\delta} = 2 \times \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta^2} = 2 \frac{L_0}{\delta} \quad (3-7)$$

式中, L_0 ——衔铁处于差动线圈中间位置时的初始电感量。

比较式(3-4)和式(3-7)可以看出,差动式电感传感器灵敏度约为非差动式电感传感器的两倍。从图 3-4 也可以看出,差动式电感传感器的线性较好,且输出曲

线较陡,灵敏度较高。

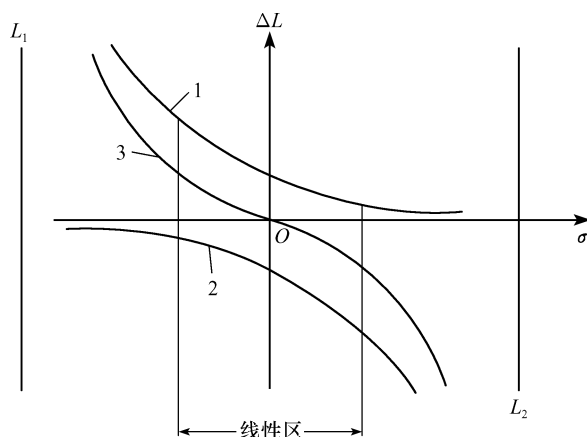


图 3-4 差动式与单线圈式电感传感器非线性比较

1—上线圈特性;2—下线圈特性;3—差接后的特性

采用差动式结构除了可以改善线性、提高灵敏度外,对外界影响,如温度的变化、电源频率的变化等也基本上可以互相抵消,衔铁承受的电磁吸力也较小,从而减小了测量误差。所以,实用的电感传感器几乎全是差动的。

(2) 电感传感器的测量电路

电感传感器可以通过交流电桥将线圈电感的变化转换成电压或电流信号输出。但是,为了判别衔铁位移的方向,测量电路一般采用带相敏整流的交流电桥,如图 3-5 所示。

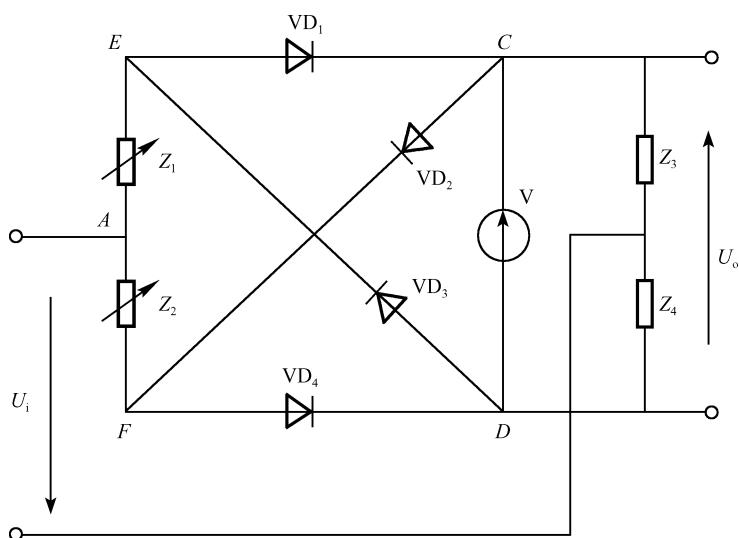


图 3-5 带相敏整流的交流电桥

图中,电桥的两个臂 Z_1 、 Z_2 分别为差动式传感器中的电感线圈,另两个臂为平衡阻抗 Z_3 、 Z_4 ($Z_3 = Z_4 = Z_0$), VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 四只二极管组成相敏整流器,激励交流电压加在 A 、 B 两点之间,输出直流电压 U 。由 C 、 D 两点输出,测量仪表可以是零刻度居中的直流电压表或数字电压表。

当衔铁处于中间位置时,传感器两个差动线圈的阻抗 $Z_1 = Z_2 = Z_3$,电桥处于平衡状态, C 点电位等于 D 点电位,电表指示为零。

当衔铁向一边移动时,传感器两个差动线圈的阻抗发生变化,当衔铁上移时,上部线圈阻抗增大, $Z_1 = Z_0 + \Delta Z$,下部线圈阻抗减少, $Z_2 = Z_0 - \Delta Z$ 。如果输入交流电压为正半周,则 A 点电位为正, B 点电位为负,二极管 VD_1 、 VD_4 导通, VD_2 、 VD_3 截止。在 $A-E-C-B$ 支路中, C 点电位由于 Z_1 增大而比平衡时的 C 点电位降低;而在 $A-F-D-B$ 支路中, D 点电位由于 Z_2 减少而比平衡时的 D 点电位增高,所以 D 点电位高于 C 点电位,直流电压表正向偏转。

如果输入交流电压为负半周,则 A 点电位为负, B 点电位为正,二极管 VD_2 、 VD_3 导通, VD_1 、 VD_4 截止。在 $A-E-C-B$ 支路中, C 点电位由于 Z_2 减少而比平衡时的 C 点电位降低;而在 $A-F-D-B$ 支路中, D 点电位由于 Z_1 增大而比平衡时的 D 点电位增高,所以仍然是 D 点电位高于 C 点电位,直流电压表正向偏转。

同样可以得出结论:当衔铁下移时,电压表总是反向偏转,输出为负。

由此可见,采用带相敏整流的交流电桥,输出电压既能反映位移量的大小,又能反映位移的方向,所以应用较为广泛。

2. 差动变压器式传感器

(1) 差动变压器式传感器原理

差动变压器式传感器是互感式传感器。其工作原理是把被测量的变化转换成线圈间的互感变化。传感器本身相当于一个互感系数可变的变压器。当一次线圈接入激励电源后,二次线圈就将产生感应电动势。当互感变化时,感应电动势也相应变化。由于在使用时采用两个二次线圈反向串联,以差动方式输出,故称为差动变压器式传感器,通常简称为差动变压器。

差动变压器式传感器也有变气隙式和变面积式,但最多采用的是螺管式。图 3-6 为螺管式差动变压器的结构示意图。

差动变压器工作在理想情况下(忽略涡流损耗、磁滞损耗和分布电容等的影响),它的等效电路如图 3-7 所示。图中 u_1 为一次线圈激励电压; M_1 、 M_2 分别为一次线圈与两

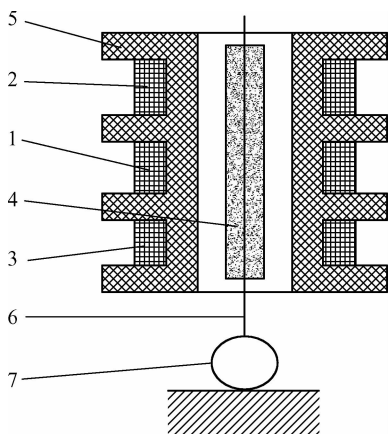


图 3-6 差动变压器的结构示意图

- 1—一次线圈;2,3—二次线圈;4—衔铁;
5—线圈架;6—测杆;7—工件

个二次线圈间的互感; L_1 、 R_1 分别为一次线圈的电感和有效电阻; L_{21} 、 L_{22} 分别为两个二次线圈的电感; R_{21} 、 R_{22} 分别为两个二次线圈的有效电阻。

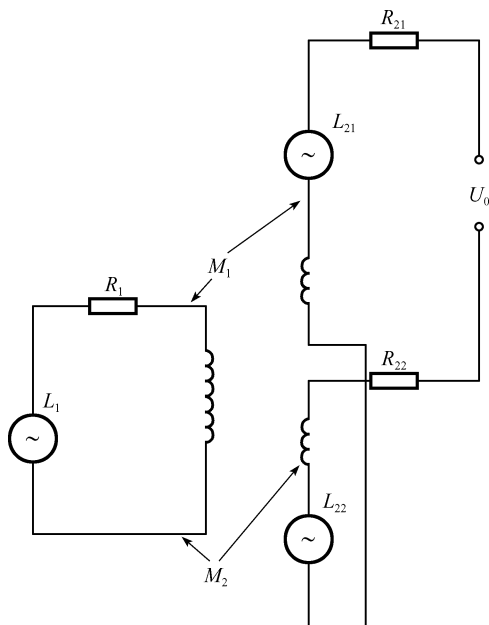


图 3-7 差动变压器的等效电路

对于差动变压器,当衔铁处于中间位置时,两个二次线圈互感相同,因而由一次线圈激励引起的感应电动势相同。由于两个二次线圈反向串接,所以差动输出电压 U_0 为零。

当衔铁移向二次线圈 L_{21} 一边,这时互感 M_1 大, M_2 小,因而二次线圈 L_{21} 内感应电动势大于二次线圈 L_{22} 内感应电动势,这时输出电压 U_0 不为零。在传感器的量程内,衔铁移动越大,差动输出电压 U_0 就越大。

同样道理,当衔铁向二次线圈 L_{22} 一边移动时,差动输出电压 U_0 也不为零,但由于移动方向改变,所以输出电压 U_0 反相。

因此,差动变压器输出电压 U_0 的大小和相位可以反应衔铁位移量的大小和方向。输出电压的有效值为:

$$U_0 = \frac{2\omega \Delta M}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 \quad (3-8)$$

上式表明,当激励电压的幅值 U_1 和角频率 ω 、一次线圈的有效电阻 R_1 及电感 L_1 为定值时,差动变压器输出电压的幅值 U_0 与互感的变化量 ΔM 成正比。而且在衔铁上移或下移量相等时,输出电压幅值相同,但相位相差 180° 。

差动变压器的输出特性曲线如图 3-8(a) 所示。图中, U_0 为差动输出电压, x 表示衔铁偏离中心位置的距离。 U_r 为零点残余电压,这是由于差动变压器制作上的不对称以及铁芯位置等因素所造成的。

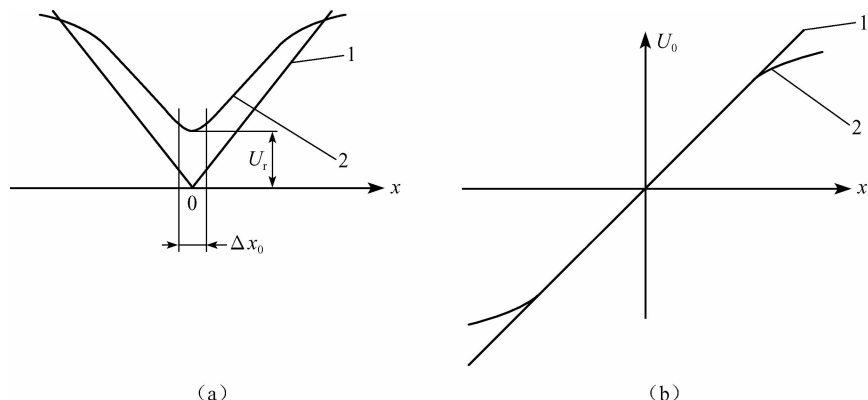


图 3-8 差动变压器输出特性

(a) 非相敏检波; (b) 相敏检波

1—理想特性曲线; 2—实际特性曲线

(2) 差动变压器式传感器的测量电路

差动变压器的输出电压是交流分量, 它与衔铁位移成正比, 其输出电压如用交流电压表来测量时存在下述问题:

① 总有残余电压输出, 因而零点附近的小位移测量困难。

② 无法判断衔铁移动的方向。为此, 常采用相敏检波电路和差动整流电路来处理。

相敏检波电路的形式较多, 图 3-9 是其中的一个例子。相敏检波电路由变压器 T_1 和 T_2 以及接成环形的四个半导体二极管组成。差动变压器输出电压 U_o 。经交流放大器放大后变为 U_o' , 从 1、2 端输入; 参考电压 U_s' 由振荡器供给, 通过 3、4 端输入; 检波后的信号从 5、6 端输出。 U_s' 与 U_o 频率相同, 相位相同或相反, 用它作为辨别极性的标准。一般情况下, U_s 的幅值应为 U_o 幅值的 3~5 倍。

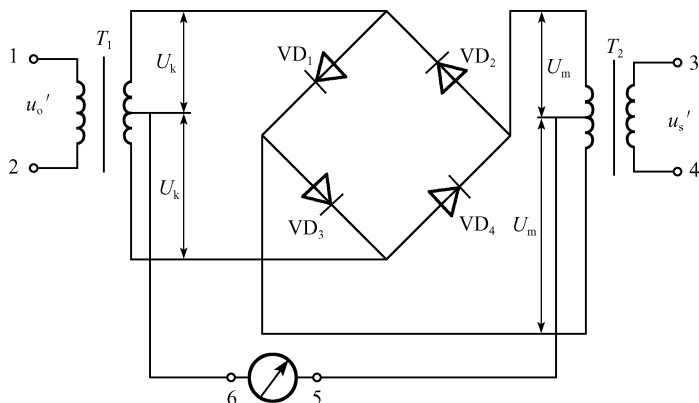


图 3-9 相敏检波电路原理图

假设衔铁上移,放大器的输出 U_o 与 U_s 同相。在正半周,如图 3-10(a) 所示, VD_1 、 VD_2 导通,其内阻 r_i 很小,变压器 T_1 二次线圈上半个绕组等于直接接在电表的 5、6 端,流过电表的电流方向为从 5 到 6;在负半周, VD_3 、 VD_4 导通,变压器 T_1 二次线圈下半个绕组直接接在电表的 5、6 端,流过电表的电流方向仍然为从 5 到 6(图 3-10(b))。

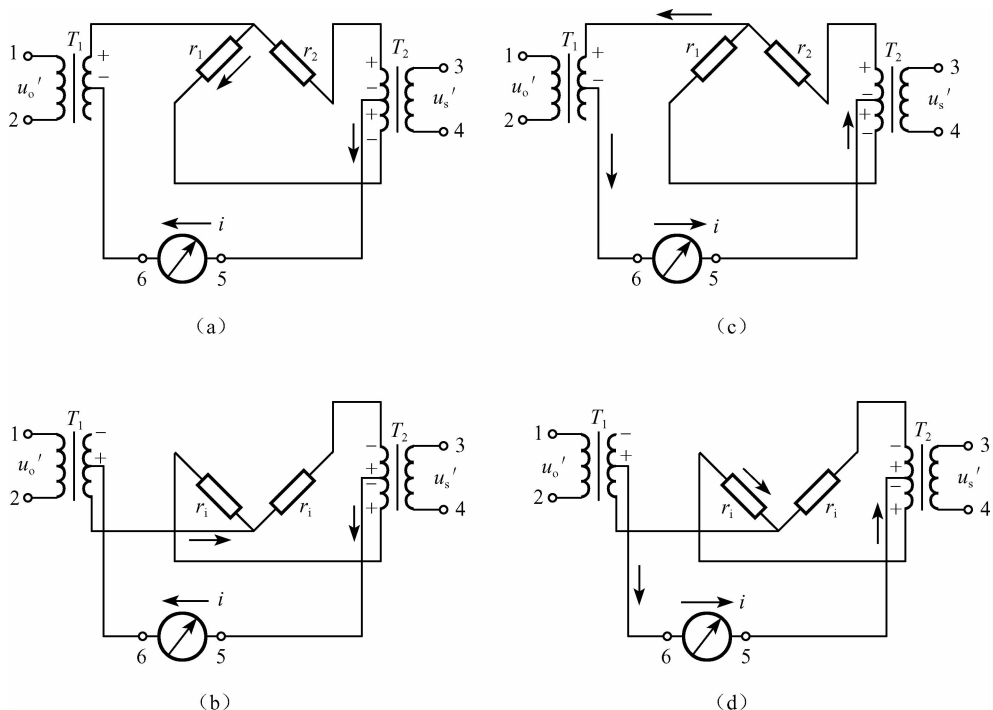


图 3-10 相敏检波电路工作原理

衔铁下移时,变压器输出电压相位与上移时相差 180° 。放大器的输出 U'_o 与 U'_s 反相。在正半周,如图 3-10(c) 所示, VD_1 、 VD_2 导通,流过电表的电流方向为从 6 到 5;在负半周, VD_3 、 VD_4 导通,流过电表的电流方向仍然为从 6 到 5(图 3-10(d))。

由以上分析可知,相敏检波电路输出电压的变化规律,既反映了位移量的大小,又反映了位移的方向,其输出特性曲线如图 3-8(b) 所示。各点电压的波形如图 3-11 所示。

3. 实用仪器举例

电感测微仪是目前应用较多的一种微小位移测量仪。测量范围一般为几毫米。分辨

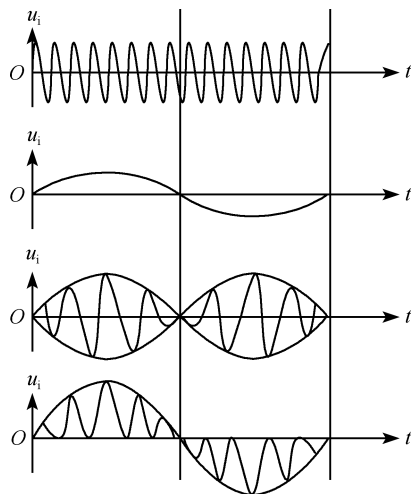


图 3-11 波形图

率可达 $0.1\sim0.5\ \mu\text{m}$ ，配以一定的卡具后，可以进行工件厚度、椭圆度、不平度、不垂直度、不同轴度等参数的测量。

图 3-12(a)为电感测微仪测试原理图，图 3-12(b)是轴向式电感测微仪的结构图，测端 6 接触被测体，被测体的微小位移使衔铁 3 在差动线圈中移动，造成线圈电感值的变化。电感测微仪通常以相对比较的方式进行测量。测量前，用量块等标准件将测微仪初值置零，即差动变压器或差动螺管中的衔铁或铁芯处于中间位置，测量电路处于平衡状态，没有信号电压输出。测量时再拿掉标准件，将被测零件置于测头下，此时测量数值即为被测零件与标准零件比较出来的差值。

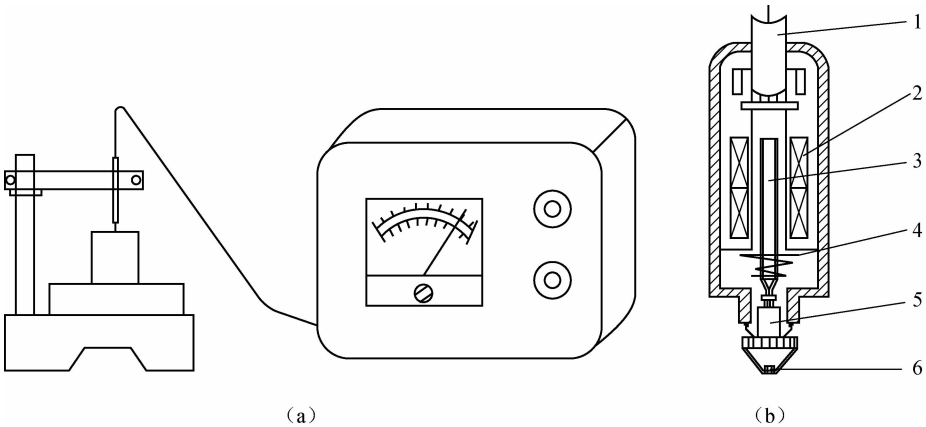


图 3-12 电感测微仪

(a) 测试原理图；(b) 轴向式测头

1—引线；2—线圈；3—衔铁；4—测力弹簧；5—测杆；6—测端

目前，指针式显示的电感测微仪已基本上被数字显示的替代。以单片机装备的具有智能的测微仪可进行量程的自动转换、非线性校正、测量曲线拟合、温度漂移补偿等，使测量精度进一步提高，并使操作更为方便。

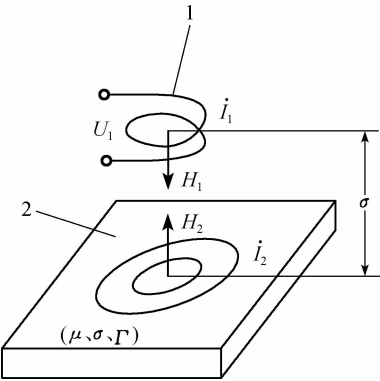


图 3-13 涡流传感器工作原理

1—传感器线圈；2—金属导体

3.3.2 涡流式传感器

涡流式传感器的变换原理是利用金属体在交变磁场中的涡流效应。当金属导体置于变化的磁场中或是在磁场中运动时，金属表面将产生感应电流，这种电流在金属导体内是自己闭合的，称为电涡流或涡流。

1. 涡流式传感器原理

涡流式传感器完整地看，是由一个传感器线圈加上被测金属导体组成的。其工作原理如图 3-13 所示。一个传感器线圈置于金属导体

附近,当线圈中通有交变电流 I_1 时,线圈周围就产生一个交变磁场 H_1 。置于该磁场中的金属导体就产生涡流 I_2 ,涡流也将产生一个新磁场 H_2 , H_2 与 H_1 方向相反,因而抵消部分原磁场,使通电线圈的有效阻抗发生变化。

线圈的阻抗变化与金属导体的电导率 σ 、磁导率 μ 、厚度 t 以及线圈与金属导体的距离 δ 、线圈的几何参数 r 、线圈激磁电流的角频率 ω 等参数有关。涡流式传感器工作时的总等效阻抗是以上各参数的函数,即

$$Z = f(\mu, \sigma, t, \delta, r, I_1, \omega)$$

涡流式位移传感器可用来测量两类参数:一类是位移、厚度、振幅、压力和转速等参数;另一类是与被测对象材料导电、导磁性能有关的参量,如电导率、磁导率、温度、硬度、材质、裂纹和缺陷等。

涡流式传感器的工作对象必须是金属导体,且表面应光滑,为充分利用涡流效应,对于平板形的被测物体,如图 3-14(a)所示,要求 $D > 1.8d$;当被测物体为曲面型的圆柱体时,如图 3-14(b)所示,则要求 $D > 3.5d$,否则将导致灵敏度降低。

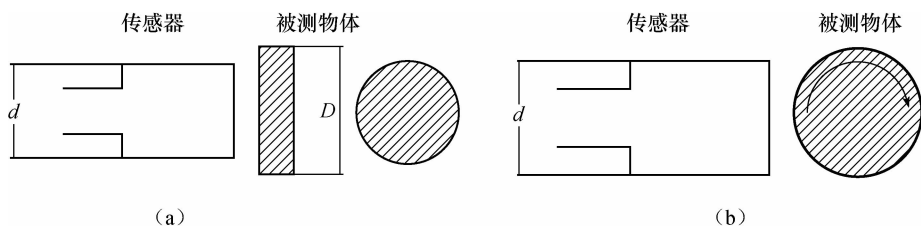


图 3-14 被测物体尺寸与传感器直径的关系

2. 涡流式传感器的测量电路

涡流传感器的测量转换电路有电桥法和谐振法。

谐振法是利用谐振回路,将传感器线圈的等效电感的变化转换为电压或电流的变化。传感器线圈与电容并联组成 LC 并联谐振回路,其谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3-9)$$

且谐振时回路的等效阻抗最大,即:

$$Z_0 = \frac{L}{R'C} \quad (3-10)$$

式中, R' ——回路的等效损耗电阻。

当电感 L 发生变化时,回路的等效阻抗和谐振频率都将随 L 的变化而变化,因此可以利用测量回路阻抗的方法或测量回路谐振频率的方法间接测出传感器的被测值。

谐振法主要有调幅式电路和调频式电路两种基本形式。调幅式由于采用了石英

晶体振荡器,因此稳定性较高,而调频式结构简单,便于遥测和数字显示。图 3-15 为调幅式测量电路原理图。

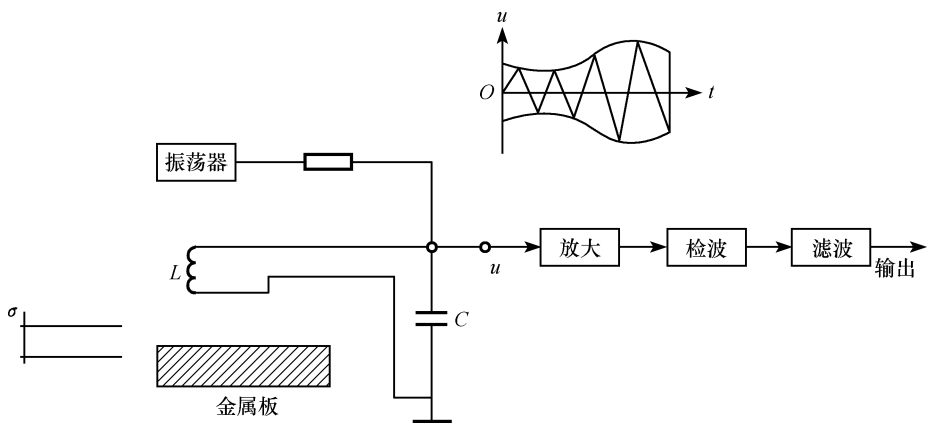


图 3-15 调幅式测量电路原理图

由图中可以看出,LC 谐振回路由一个频率及幅值稳定的晶体振荡器提供一个高频信号激励谐振回路。LC 回路的输出电压为:

$$u = u_o \frac{Z}{R + Z} \tag{3-11}$$

式中, u_o ——石英晶体振荡器输出电压;
 Z ——L、C 组成的并联谐振回路阻抗。

因为 $Z = f(\delta)$, 将它代入上式, 则有:

$$u = u_o \frac{f(\delta)}{R + f(\delta)} = G(\delta) \tag{3-12}$$

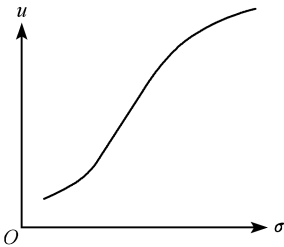


图 3-16 调幅电路输出特性曲线

试验证明,此电路有如图 3-16 所示的特性曲线,它在相当宽的范围内近似于一条直线,可看做是传感器的工作线段。涡流式位移传感器的输出 $u(t)$ 的频率虽然仍是振荡器的工作频率,但其幅值却随线圈与被测金属材料的距离 δ 的改变而变化,相当于一个调幅波。此调幅波经放大、检波和滤波后,即可得到位移量 δ 的动态变化信息。

3. 实用仪器举例

涡流传感器的结构很简单,其核心是一个固定在框架上的扁平线圈,又称涡流探头。线圈用多股漆包线或银线绕制而成,可以粘贴在框架的端部,也可以绕在框架端部的槽内。框架一般选用聚四氟乙烯、高频陶瓷、环氧玻璃纤维等材料制成。图 3-17 所示为 CZF-1 型涡流传感器的结构图,其性能如表 3-1 所示。由表 3-1 可知,涡流式传感器的线圈外径越大,线性范围也越大,但灵敏度也越低。理论推

导和实践都证明,细而长的线圈灵敏度高,线性范围小;扁平线圈则相反。

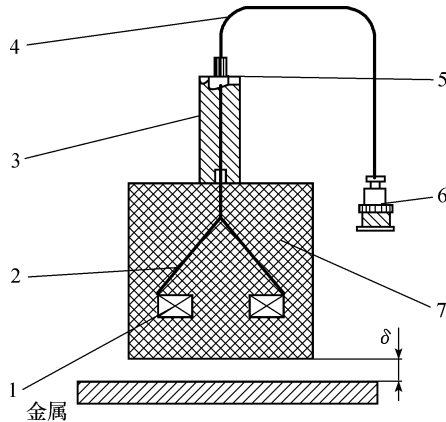


图 3-17 CZF-1 型涡流传感器结构图

1—线圈;2—框架;3—框架套罩;4—电缆;5—固定用螺纹;6—插接件;7—瓷罩

表 3-1 CZF-1 系列涡流传感器的性能

型 号	线性范围/ μm	线圈外径/mm	分辨率/ μm	线性误差/%	使用温度/ $^{\circ}\text{C}$
CZF1-1000	1 000	7	1	<3	$-15\sim+80$
CZF1-3000	3 000	15	3	<3	$-15\sim+80$
CZF1-5000	5 000	28	5	<3	$-15\sim+80$

涡流式传感器和电容式传感器相比较,其共同之处是均可作非接触测量,而涡流式的线性好,工作范围宽,分辨率小(可达 0.1%),受温度、湿度的影响小,调整也比较方便,但是它的灵敏度稍低于电容式。

安装涡流传感器时,应注意以下问题:

① 被测对象的表面与传感器敏感部分表面安装时应平行。用涡流传感器测量位移量,是对被测对象表面到传感器敏感部分表面之间距离的平均值进行测量,所以两个表面之间即使有 15° 的倾斜也问题不大。由于涡流传感器是面测量而不是点测量,所以在测量凹凸不平的对象时,传感器输出的位移值,是传感器敏感部分直径范围内的平均值。

② 当两个以上的涡流传感器并列使用时,它们之间的距离不能小于传感器的直径 d ,否则要互相影响。

③ 当涡流传感器必须安装到金属内进行测量时,最好能车一个如图 3-18(a)所示的圆槽,至少也要按图 3-18(b)所示的要求去做。

3.3.3 电容式传感器

1. 电容式传感器原理

电容式传感器的工作原理可以用图 3-19 所示的两平行板电容器来说明。在

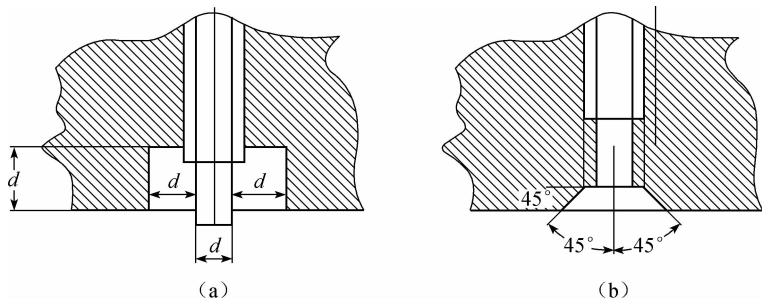


图 3-18 涡流传感器安装方法

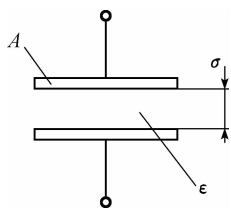


图 3-19 平板电容器

不考虑边缘效应时,它的电容量 C 为

$$C = \frac{\epsilon A}{\delta} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{\delta} \quad (3-13)$$

式中, A 为两平行极板相互覆盖的有效面积; δ 为两平行极板间的距离,即极距; ϵ 为极板间介质的介电常数; ϵ_r 为极板间介质的相对介电常数,在空气中, $\epsilon_r = 1$; ϵ_0 为真空中的介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

上式表明,在 δ 、 A 、 ϵ 三个参数中,被测对象使其中任一个参数发生变化时,都将引起电容 C 的变化,并且两者间有确定的函数关系。因而电容式传感器有三种基本形式,即变极距型、变面积型和变介电常数型。前两种应用较为广泛,均可用作位移传感器。

(1) 变极距型电容传感器

电容传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{dC}{d\delta} = -\frac{\epsilon A}{\delta^2} \quad (3-14)$$

灵敏度与 δ^2 成反比,极距越小,灵敏度越高,但输出特性非线性严重且容易击穿,同时加工精度要求也高。为了减小非线性的影响,这种传感器只能工作在极小的测量范围内,一般取测量范围为 $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \approx 0.1$, δ_0 为初始间隙。为防止击穿,一般在极板间放置云母、塑料膜等介电常数较高的材料来加以改善。如云母的相对介电常数为空气的 7 倍,其击穿电压不小于 10^3 kV/mm ,而空气的击穿电压仅为 3 kV/mm 。一般电容式传感器的启示电容为 $20 \sim 30 \text{ pF}$,极板距离为 $25 \sim 200 \mu\text{m}$ 。

实际应用中为了提高电容传感器的灵敏度,常采用差动式结构,如图 3-20 所示。

差动式电容传感器的中间极板可以移动,

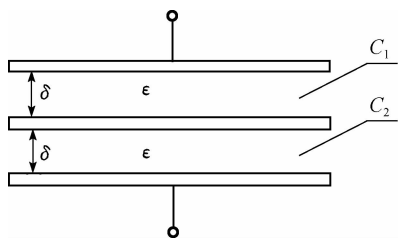


图 3-20 差动式平板电容器

并与两边固定极板形成两个电容器 C_1 和 C_2 , 平衡时极板间的距离 $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ 。当中间极板向上或向下某一方向移动一个距离 $\Delta\delta$ 时, 其中一个电容器 C_1 因间隙增大而减小; 另一个电容器 C_2 因间隙减小而增大, 由式(3-13)可得电容总的变化量为:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = -\frac{2\varepsilon A}{\delta^2} \Delta\delta \quad (3-15)$$

灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta\delta} = -\frac{2\varepsilon A}{\delta^2} \quad (3-16)$$

由此可见, 采用差动的形式可以提高测量的灵敏度, 还可以消除外界干扰所造成的测量误差。

(2) 变面积型电容传感器

各种类型的变面积型电容传感器如图 3-21 所示。同变极距型比较, 其灵敏度为常数, 线性好, 测量范围大, 可用于测量较大的线位移或角位移。图中给出了单边、差动和齿形极板等多种形式。差动结构比单边结构的灵敏度提高约一倍, 而齿形极板结构灵敏度高, 但受齿的大小限制, 只能测量较小的位移。

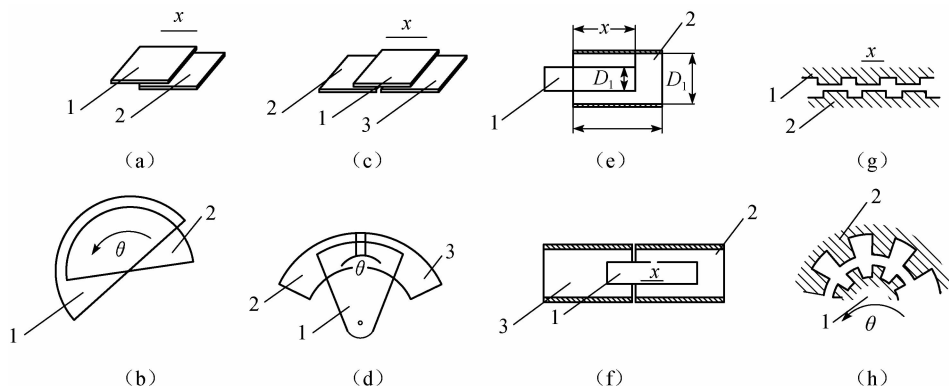


图 3-21 变面积型电容传感器

(a) 单边平板线位移型; (b) 单边角位移型; (c) 差动平板线位移型; (d) 差动角位移型;

(e) 单边圆柱线位移型; (f) 差动圆柱线位移型; (g) 齿型极板线位移型; (h) 齿型极板角位移型

1—动极板; 2, 3—定极板

如图 3-21(a) 是一直线位移型变面积式位移传感器的示意图, 设极板长为 a , 宽为 b , 极距为 δ , 一个极板固定; 另一个极板可以沿长度 a 方向移动, 当移动极板沿长度 a 方向移动一个距离 Δx 后, 覆盖面积就发生变化, 此时电容极板面积为 $A = (a - \Delta x)b$, 电容值为:

$$C = \frac{\varepsilon A}{\delta} = \frac{\varepsilon b(a - \Delta x)}{\delta} = \frac{\varepsilon ab}{\delta} - \frac{\varepsilon \Delta x b}{\delta} = C_0 - \frac{\varepsilon b}{\delta} \Delta x \quad (3-17)$$

其灵敏度为：

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C - C_0}{\Delta x} = -\frac{\epsilon b}{\delta} \quad (3-18)$$

若对图 3-21(e)进行研究也可以得出类似的结果。

若做成图 3-21(c)和(f)的差动式则灵敏度可提高一倍。

若做成图 3-21(g)的锯齿形电容假若有 n 个齿,则灵敏度为式(3-18)的 n 倍。

如图 3-21(b)是一角位移型变面积式位移传感器的示意图,设电容面积为 A ,介电常数为 ϵ ,间隙为 δ ,当动片有一角位移 $\Delta\theta$ 时,两极板覆盖面积发生变化,从而导致电容的变化,此时电容值为:

$$C = \frac{\epsilon A \left(1 - \frac{\Delta\theta}{\pi}\right)}{\delta} = C_0 - C_0 \frac{\Delta\theta}{\pi} \quad (3-19)$$

其灵敏度为：

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta\theta} = \frac{C - C_0}{\Delta\theta} = -\frac{C_0}{\pi} \quad (3-20)$$

若做成图 3-21(b)的差动式则灵敏度可提高一倍。

若做成图 3-21(h)齿形极板角位移的锯齿形电容假若有 n 个齿,则灵敏度为式(3-20)的 n 倍。

(3) 变介电常数型电容传感器

因为各种介质的相对介电常数不同,所以在电容器两极板间插入不同介质时,电容器电容量也就不同,利用这种原理制作的电容传感器称为变介电常数型电容传感器,它们常用来检测某些材料的厚度、温度、湿度以及测量物位或液位等。

图 3-22 为变介质性传感器的两种形式。如图 3-22(a)所示,该电容器具有两种不同的电介质,其相对介电常数为 ϵ_{r1} 和 ϵ_{r2} ,介质厚度分别为 a_1 和 a_2 ,且 $a_1 + a_2 = a_0$,即两者之和等于两极板间距 a_0 ,设极板面积为 A ,整个装置可视为两个电容器串联

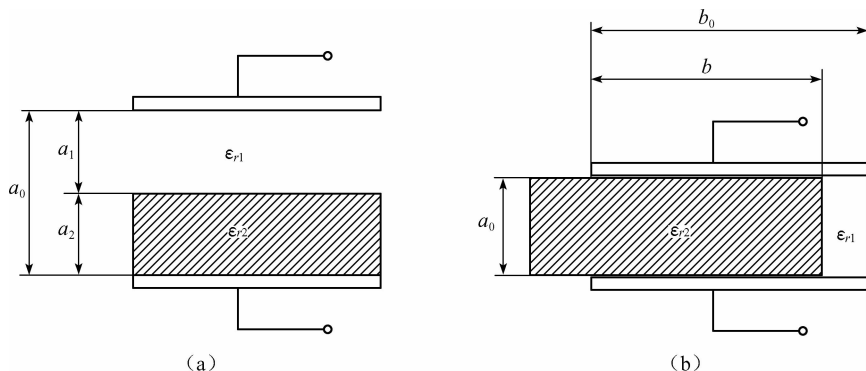


图 3-22 变介型电容传感器

(a) 极板上覆盖有介质; (b) 介质可移动

而成,其总电容量 C 可由两个电容器的电容 C_1 和所确定,即:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \left(\frac{a_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{a_2}{\epsilon_{r2}} \right) \quad (3-21)$$

一般取介质 1 为空气,其相对介电常数为 1,则式(3-21)变为:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{a_1 + \frac{a_2}{\epsilon_{r2}}} = \frac{\epsilon_0 A}{a_0 - a_2 + \frac{a_2}{\epsilon_{r2}}} \quad (3-22)$$

由式(3-22)可知,总电容 C 取决于相对介电常数 ϵ_{r2} 及介质厚度 a_2 。

因此。只要这两个参数中的一个为已知时,总电容将随令一个参数变化而变化。这种传感器常用于测定如纸张、塑料薄膜、合成纤维等的厚度,测量时让材料通过电容器极板之间,常常是已知材料的相对介电常数,从而可从被测量的电容值来确定材料的厚度。

在图 3-22(b)中,介质 2 插入电感器一定深度 b ,这种结构相当于两个电容器并联。设极板长为 b_0 ,宽为 d_0 ,极板间距为 a_0 ,此时总电容为:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} d_0 (b_0 - b)}{a_0} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} d_0 b}{a_0} = \frac{\epsilon_0 d_0}{a_0} [\epsilon_{r1} (b_0 - b) + \epsilon_{r2} b] \quad (3-23)$$

同样,一般介质 1 为空气,其相对介电常数为 1,并设电容介质全部为空气时电容器的电容为 C_0 ,则 $C_0 = \frac{\epsilon_0 d_0 b_0}{a_0}$,由介质 2 的插入深度 b 所引起的电容值的相对变化率为:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{b_0 - b}{b_0} + \frac{\epsilon_{r2}}{b_0} - 1 = \frac{b}{b_0} (\epsilon_{r2} - 1) \quad (3-24)$$

由此可见,由介质 2 的插入所引起的电容相对变化率正比于插入深度。常利用这一原理对非导电液体的液位和松散的物料的填充高度进行测量,也可用于测定各种介质的温度、密度等状态参数。

电容式传感器的优点是结构简单,适应性强;输入能量小,灵敏度高,动态特性好,温度补偿性好,可实现非接触测量。变间隙式电容传感器的灵敏度为变量。只有被测量远小于极板间距离时才可近似视为常数。其测量精度可达 $0.01 \mu\text{m}$,因而应用较为普遍。

2. 电容式传感器的测量电路

电容式传感器虽然有上述一些优点,但也有明显不足之处。电容传感器的初始电容量很小,一般为 $20 \sim 300 \text{ pF}$,甚至小于 20 pF ,测量时电容量的变化更小,常在 1 pF 以下。这样小的电容量,其输出阻抗很高,尤其在低频范围,输出阻抗达几十甚至上百兆欧($\text{M}\Omega$)。因此,传感器负载能力差,易受外界干扰,必须采取屏蔽和绝缘措施。与传感器电容量相比,连接传感器的引线“电缆电容”,极板与周围导体构

成的电容以及电子线路间的杂散电容却比较大,如 1~2 m 的电缆电容可达 800 pF。这些所谓的“寄生电容”不仅降低了传感器的灵敏度,而且因其随机变化又影响传感器的工作稳定性。

因此在设计测量电路时,必须考虑:①将微小电容变化量转换为容易测量的其他电量。②电路中必须尽量减少杂散电容,特别是电缆对地电容的影响。

电容式传感器有多种转换输出电路,如交流电桥、脉宽调制电路、调频电路、运算放大器电路等。

脉宽调制电路是利用传感器电容充放电时电容量的变化,使电路输出脉冲的占空比随之变化,通过低通滤波器得到对应于被测量变化的直流信号。脉宽调制电路如图 3-23 所示。它由比较器 A_1 与 A_2 、双稳态触发器及电容充放电回路所组成。 C_1 与 C_2 为电容传感器的输出,构成差动形式, U_R 为参考电压。当双稳态触发器的 Q 端输出高电平时, A 点通过 R_1 对 C_1 充电,直到 F 点的电位等于参考电压 U_R ,比较器 A_1 产生一个置零脉冲,使双稳态触发器翻转, Q 端变为低电平, $\bar{Q}$ 端变为高电平。这时 C_1 经二极管 VD_1 迅速放电使 F 点的电位至零;同时 B 点通过 R_2 对 C_2 充电,直到 G 点的电位等于参考电压 U_R ,比较器 A_2 产生一个置位脉冲,使双稳态触发器再次翻转, Q 端又变为高电平, $\bar{Q}$ 端变为低电平。周而复始,在双稳态触发器的两个输出端各产生一个宽度受 C_1 、 C_2 调制的脉冲方波。当 $C_1 = C_2$ 时,两个电容充电时间常数相等, A 与 B 两点输出的脉冲宽度相等,输出电压 U_{AB} 的平均值为零。各点波形如图 3-24(a)所示。但当 $C_1 \neq C_2$ 时,如 $C_1 > C_2$,则 C_1 的充电时间大于 C_2 的充电时间,使 A 点输出的脉冲宽度大于 B 点,输出电压 U_{AB} 的平均值不为零。如图 3-24(b)所示。输出电压为:

$$U_o = U_A - U_B = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_1 - \frac{t_2}{t_1 + t_2} U_1 = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} U_1 \quad (3-25)$$

式中, U_1 ——触发器输出的高电平值;

t_1 ——电容 C_1 的充电时间;

t_2 ——电容 C_2 的充电时间。

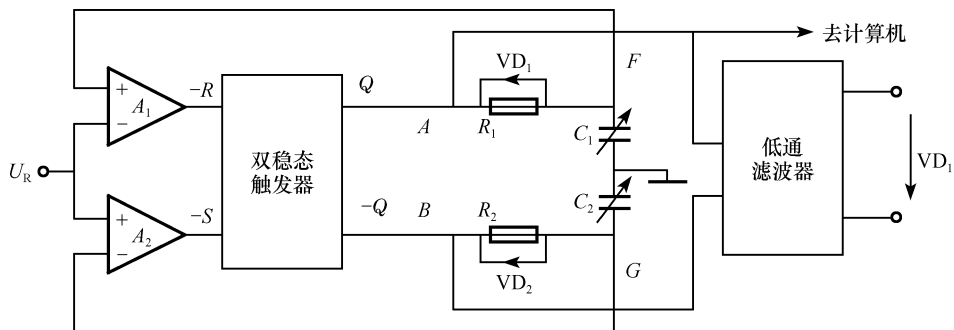


图 3-23 差动脉宽调制电路

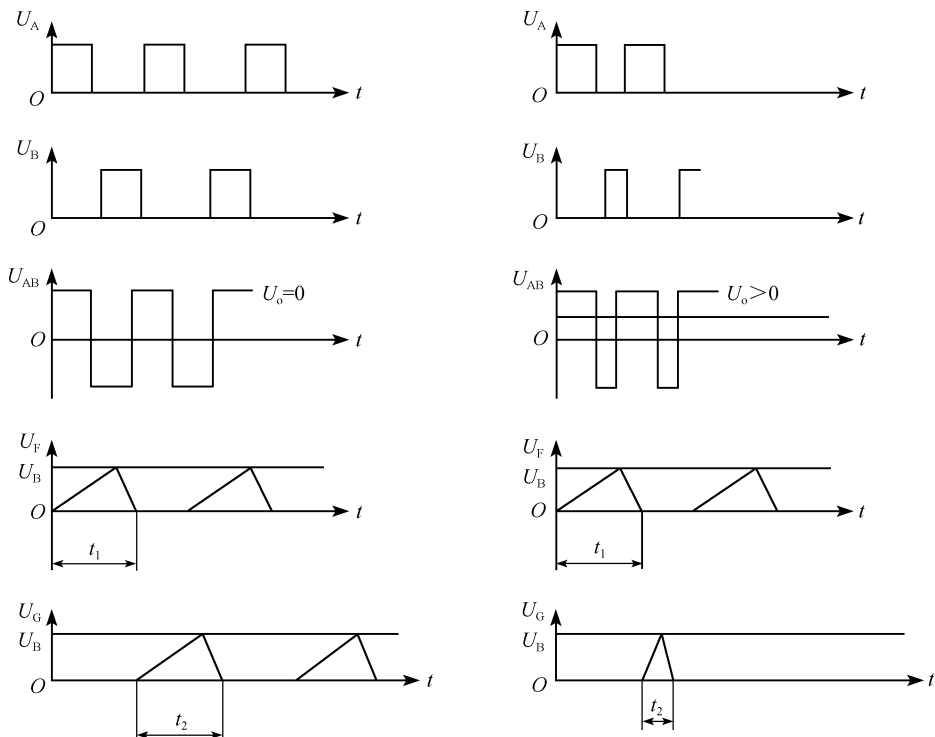


图 3-24 各点电压波形

 (a) $C_1 = C_2$ 时的波形; (b) $C_1 > C_2$ 时的波形

$$t_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_R}; \quad t_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_R}$$

设电阻 $R_1 = R_2 = R$, 则有:

$$U_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1 \quad (3-26)$$

可见, 输出电压与传感器电容的变化量成正比。输出电压信号一般为 100 kHz~1 MHz 的矩形波。

脉宽调制电路的特点是: 能获得线性输出; 直流输出只需经低通滤波器简单地引出, 不需要解调器即能获得直流输出; 电路只采用直流电源, 虽然要求直流电源的电压稳定性较高, 但与其他测量电路中要求较高的稳频、稳幅交流电源相比易于做到; 输出的脉冲信号可直接送计算机进行处理。

3. 实用仪器举例

电容测微仪是常用的测量微小位移的仪器, 图 3-25 是变面积型电容测微仪的结构图。这种传感器采用了差动式结构。当测杆随被测位移运动而带动活动电极移动时, 导致了活动电极与两个固定电极间的覆盖面积发生变化, 其电容量也相应产生变化。这种传感器有良好的线性。

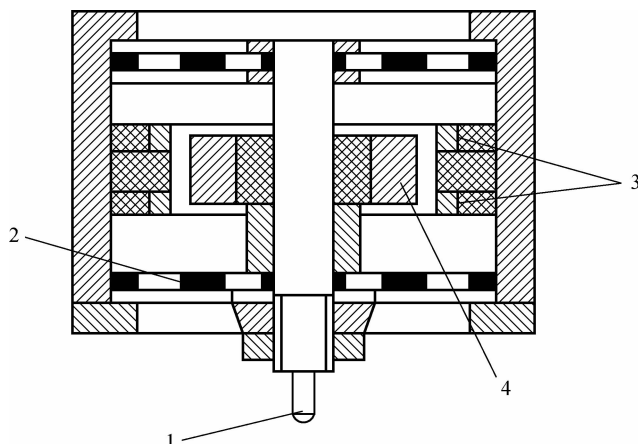


图 3-25 电容式位移传感器

1—测杆；2—开槽片簧；3—固定电极；4—活动电极

3.4 数字式位移传感器

在用普通机床进行零件加工时，操作人员要控制进给量以保证零件的加工尺寸，如长度、高度、直径、角度及孔距等，一般通过读取操作手柄上的刻度盘数值或机床上的标尺来获取加工尺寸。在加工高精度的零件时，零件的加工质量与机床本身的精度和操作者的经验有直接的联系。在用刻度盘读数时，往往还要将机床停下来，反复调整，这样就会影响加工效率及精度。如果有一种检测装置能自动地测量出直线位移或角位移，并用数字形式显示出来，那么就可实时地读取位移数值，从而提高加工效率及加工精度。本章所讲述的数字式位置传感器就能完成上述任务。

几十年来，世界各国都在致力于发展数字位置测量技术，寻找最理想的测量元件和信息处理技术。早在 1874 年，物理学家瑞利就发现了构成计量光栅基础的莫尔条纹，但直到 20 世纪 50 年代初，英国 FERRANTI 公司才成功地将计量光栅用于数控铣床。与此同时，美国 FARRAND 公司发明了感应同步器，20 世纪 60 年代末，日本 SONY 公司发明了磁栅数显系统，20 世纪 90 年代初，瑞士 SYLVA 公司又推出了容栅数显系统。目前，数字位置测量的直线位移分辨力可达 $0.1\ \mu\text{m}$ ，角位移分辨力可达 $0.1''$ ，并正朝着大量程、自动补偿、测量数据处理高速化的方向发展。

数字式位置传感器一方面应用于测量工具中，使传统的游标卡尺、千分尺、高度尺等实现了数显化，使读数过程变得既方便、又准确；另一方面数字式位置传感器还广泛应用于数控机床中，通过测量机床工作台、刀架等运动部件的位移，进行位置伺服控制。与此同时，数字式位置传感器在机床数显改造上得到了越来越多的应用，这是提高我国机床水平的一条途径。

本章将从结构、原理、应用等方面介绍几种常用的数字式位置传感器,如角编码器、光栅传感器、磁栅传感器、容栅传感器等,它们均能直接给出数字脉冲信号,所以称为数字式位置传感器。他们既具有很高的精度,又可测量很大的位移量,这是前几章介绍过的其他位置传感器,如电感、电容等无法比拟的。

位置测量主要是指直线位移和角位移的精密测量。机械、设备的工作过程多与长度和角度发生关系,存在着位置或位移测量问题。随着科学技术和生产的不断发展,对位置检测提出了高精度、大量程、数字化和高可靠性等一系列要求。数字式位置传感器正好能满足这种要求,目前得到广泛应用的有角编码器、光栅、磁栅和容栅等测量技术。

数字式位置测量就是将被测的位置量以数字的形式来表示,它具有以下特点:

- ① 将被测的位置量直接转变为脉冲个数或编码,便于显示和处理;
- ② 测量精度取决于分辨力,和量程基本无关;
- ③ 输出脉冲信号的抗干扰能力强。

数字式位置传感器可以单独组成数字显示装置(简称数显),专门用于位置测量和测量结果显示,也可以和数控系统(一种专门用于机床控制的计算机系统)组成位置控制系统。

3.4.1 直接测量和间接测量

位置传感器有直线式和旋转式两大类。若位置传感器所测量的对象就是被测量本身,即直线式传感器测直线位移,旋转式传感器测角位移,则该测量方式为直接测量。例如直接用于直线位移测量的直线光栅和长磁栅等;直接用于角度测量的角编码器、圆光栅、圆磁栅等。

若旋转式位置传感器测量的回转运动只是中间值,由它再推算出与之关联的移动部件的直线位移,则该测量方式为间接测量,图 3-26 所示为直接测量和间接测量示意图。

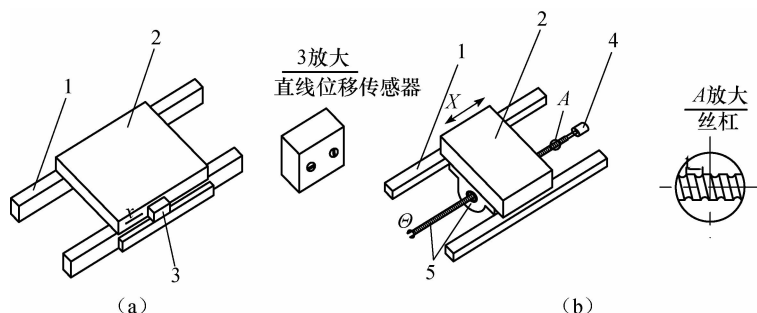


图 3-26 直接测量与间接测量示意图

(a) 直接测量; (b) 间接测量

1—导轨; 2—运动部件; 3—直线式位移传感器; 4—旋转式位移传感器; 5—丝杠螺旋副

图 3-26 中,丝杠的正、反向旋转通过螺母带动运动部件作正、反向直线运动。若测量对象为运动部件的直线位移,则安装在移动部件上的直线式位置传感器即为直接测量,如图 3-26(a)所示;而安装在丝杠上的旋转式位置传感器通过测量丝杠旋转的角度可间接获得移动部件的直线位移,即为间接测量如图 3-26(b)所示。

例 3-1 设丝杠螺距 $t = 6.0 \text{ mm}$ (当丝杠转一圈 360° 时,螺母移动的直线距离),旋转式位置传感器测得丝杠旋转角度为 $7\ 290^\circ$,求螺母的直线位移 x 。

解 螺母的直线位移

$$x = (6 \text{ mm}/360^\circ) \times 7\ 290^\circ = 121.50 \text{ mm}$$

用直线式位置传感器进行直线位移的直接测量时,传感器必须与直线行程等长,测量范围受传感器长度的限制,但测量精度高;而用旋转式进行间接测量时则无长度限制,但由于存在着直线与旋转运动的中间传递误差,如机械传动链中的间隙等,故测量精度不及直接测量。能够将旋转运动转换成直线运动的机械传动装置除了丝杠—螺母外,还有齿轮—齿条等传动装置。

3.4.2 增量式和绝对式测量

增量式测量的特点是只能获得位移增量。在图 3-26 中,移动部件每移动一个基本长度单位,位置传感器便发出一个测量信号,此信号通常是脉冲形式。这样,一个脉冲所代表的基本长度单位就是分辨力,对脉冲计数,便可得到位移量。例如,增量式测量系统的分辨力为 0.01 mm ,则移动部件每移动 0.01 mm ,位置传感器便发出一个脉冲,计数器加 1 或减 1。当计数值为 200 时,表示工作台移动了 $0.01 \text{ mm} \times 200 = 2.00 \text{ mm}$ 。

增量式位置传感器必须有一个零位标志,作为测量起点的标志。即使如此,如果中途断电,增量式位置传感器仍然无法获知移动部件的绝对位置。典型的增量式位置传感器有增量式光电编码器、光栅等。

绝对式测量的特点是,每一被测点都有一个对应的编码,常以二进制数据形式来表示。绝对式测量即使断电之后再重新上电,也能读出当前位置的数据。典型的绝对式位置传感器有绝对式角编码器。在这种装置中,编码器所对应的每个角度都有一组二进制数据与之对应。能分辨的角度值越小,所要求的二进制位数就越多,结构就越复杂。

3.5 物位的检测

物位是液位、料位和界位的统称,液位是指容器、河道、水库中液体表面的位置;料位是指容器、堆场和仓库中储存的固体颗粒或粉料的堆积高度,也就是堆积顶面的位置;界位是指两种密度不同的且互不相溶的液体间或液体与固体之间的

分界面(相界面),因此物位的检测就是测量此特征面的位置。

3.5.1 物位的检测方法

常用的物位检测方法有:

- 1) 直接观察。由容器上的窗位观察料位;用与容器相连通的玻璃管(板)来显露出液体的液面;
- 2) 利用物位面到预定位置时使检测状态发生突变,如遮断光线;使射线被吸收;使设置在预定位置的翻板翻转;音叉振动频率、幅度变化甚至停振;使设定在预定位置的触点开闭,由它来改变电气参数等;
- 3) 测量物位面与固定参考点之间的距离,如浮球(对液位)或重锤(对料位)式、超声式、核辐射式物位计;
- 4) 物位的高低是表示被测物量的多少,由此变换成可检测其质量,一定截面容器中,称量介质的总重即可反映物位高度;或利用被测介质对容量底部产生的压力(或与物位面间的压差)与介质高度成正比,用压力或压差测物位;
- 5) 利用被测介质的特性变换成相应的电量,被测物是导电液体,在其中插入电阻体棒,液位越高,电阻体被短路部分越多,阻值变得越小;被测物是不导电介质、介电常数为 ϵ ,可利用变 ϵ 型(或变S型)电容传感器原理将液位变换成电容(详见第三章3.2,3.4)。

根据这些构成的物位检测仪表有直读式、浮力式、重锤探测式、称重式、压力(或压差)、超声式(遮断式、反射式、声阻尼式)、光学式(遮断式、反射式)、核辐射式(吸收式)及电气式(电阻式、电容式、电感式)等。

3.5.2 利用液体的浮力检测

任何液体都具有一定的浮力,用密度低于液体的球或筒置于液体中,随着液位高度的变化,球(浮子)或筒(浮筒)的位置也跟着变化,采用相应的指示方式,就可把液位的高度显示出来。浮子式液位计如图3-27所示。

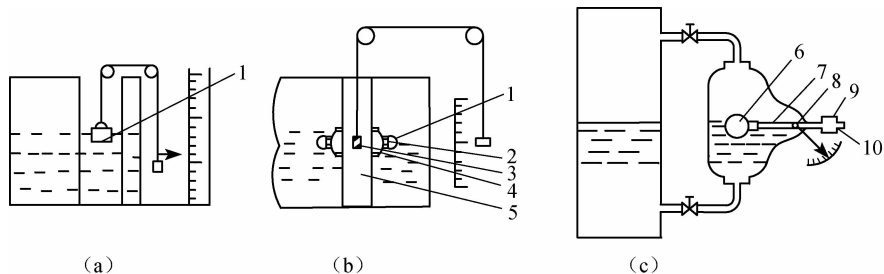


图 3-27 浮子式液位计简图

1—浮标;2—磁铁;3—铁芯;4—导轮;5—非导磁管子;

6—浮球;7—连杆;8—转动轴;9—称锤;10—杠杆

图(a)为在敞口容器中,液面上的浮标用绳索连接并悬挂在滑轮上。绳索的另一端有一个平衡重物和指针,液位上升或下降,浮标带动指针上下移动,在标尺上指示出液位的高度。

图(b)为在密闭容器中设置一个测量液位的通道。在通道外侧装有浮标 1 和磁铁 2;通道内侧装有铁芯 3。当浮子随液位上下移动时,铁芯被磁铁吸引而同步移动,通过绳索带动指针指示液位的变化。

图(c)为适用于高温、黏度大的液体的液位计。浮球 6 是不锈钢的空心球,通过连杆 7 和转动轴 8 连接;称锤 9 用来调节液位计的灵敏度,使浮球刚好一半浸没在液体中。浮球随液位升降而带动转轴旋转,指针就在标尺上指出液位值。

3.5.3 利用液位引起的压力(压差)检测

对于敞口或密闭容器中的液位,可以通过检测被测液面与最低液位(基准液位)之间的压力差来测定。它是根据液柱静压与液柱高度成正比的原理来实现的,故称为静压法。

1) 敞口容器液位检测,如图 3-28 所示,敞口容器液位变化范围为 H ,差压变送器的高压室比容器下部最低液面($H=0$)还低 h_1 ,并低于容器底 h_2 。这时差压变送器的高低压室的压力 p_1 、 p_2 为:

$$p_1 = H\rho g + (h_1 + h_2)\rho g$$

$$p_2 = 0(\text{表压力})$$

则压差为:

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_1 - p_2 = H\rho g + (h_1 + h_2)\rho g \\ &= H\rho g + Z_0\end{aligned}\quad (3-27)$$

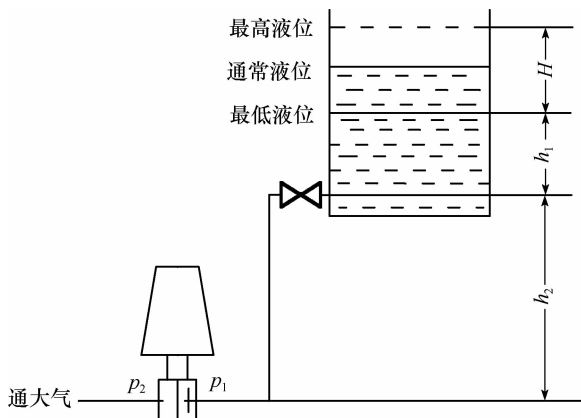


图 3-28 敞口容器液位测量

(a) 测量原理;(b) 零点迁移坐标图

式中, ρ ——液体的密度;

g ——重力加速度;

Z_0 ——称为零点迁移量, $Z_0 = (h_1 + h_2)\rho g$ 。

差压变送器测得的 Δp 包含 Z_0 , 实际测量的液位变化只是液位从最低位 $H=0$ 处为起始值, 即输出为标准信号 4~20 mA 时, 起始值为 4 mA, 这就需要扣除 Z_0 的影响, 通过调整差压变送器的零点迁移来实现。这时只要测得面 Δp 就可实现对液位变化 H 的测量。

2) 密闭容器液位的检测。如图 3-29 所示, 差压变送器的高压室仍与容器的下部取压点相接, 低压室则与容器的密闭空间气相连通。假设容器内外的温差较大, 气相容易凝结成液体时, 则会使低压室所受的液位高度发生变化而引起测量误差。为此通常是将低压侧的气相连通管内充以隔离液, 充满高度 h_3 保持恒定, 隔离液密度为 ρ_2 , 被测液体密度为 ρ_1 , 一般取 $\rho_2 > \rho_1$ 。这样压差变送器两侧的压力分别为:

$$p_1 = (H + h_1 + h_2)\rho_1 g$$

$$p_2 = h_3\rho_2 g$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = H\rho_1 g - Z_0 \quad (3-28)$$

式中, Z_0 ——迁移量, $Z_0 = -[h_3\rho_2 - (h_1 + h_2)\rho_1]g$ 。

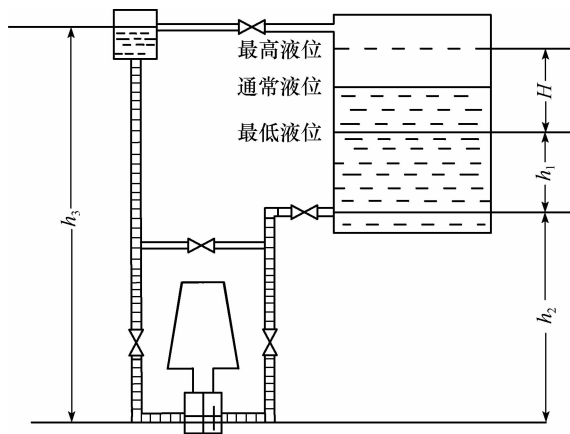


图 3-29 密闭容器液位测量

这时, 在实际测量中, 差压变送器的零点迁移为负值。经过迁移, 差压变送器的输出值的变化就可实现对液位的测量。

3.5.4 利用超声波反射检测

超声式液位计是利用超声波在液面处反射原理进行液位高度检测的。

超声式液位计适用于有毒、腐蚀性强、高黏度等介质的液位测量与报警。在应用时要考虑温度、压力的影响。

3.5.5 利用射线被物体的吸收检测

利用放射性同位素例如钴($\text{Co}60$)或铯($\text{Cs}137$)等放射的 γ 射线穿过被测介质(液体或固体)而被吸收的特性。用于液(料)位高度检测,这种仪表称为同位素物位计或放射性物位计,其构成框图如图 3-30 所示。

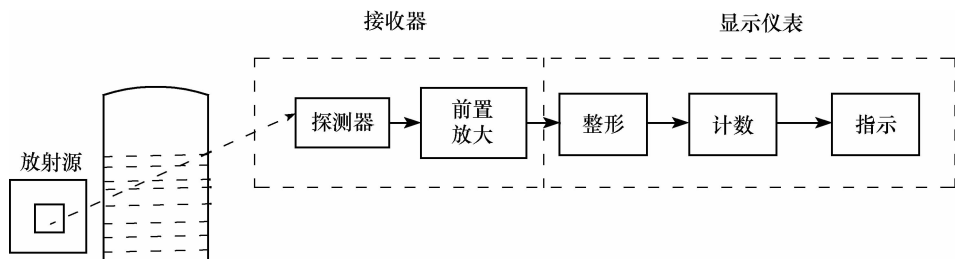


图 3-30 放射性物位计构成框图

放射性物位计由放射源、探测器和信号处理、显示装置组成。按放射源的安装方式不同,物位计分为定点检测法和跟踪法。

(1) 定点检测法 放射源和探测器固定安装在容器的一定位置上,如图 3-31 所示:图(a)放射源装于容器底部,探测器装于容器的顶部,射线穿过液柱,可连续检测液位。图(b)放射源和探测器安装于容器两侧同一平面上,当液位超过或低于此平面时,射线就穿过液位或空间气体。由于液位吸收射线能力比气体强,致使探测器接收到的射线强度发生明显的变化,显示仪表就可显示液位值或发出上下限报警信号。图(c)放射源安装在容器底部适当的位置,探测器安装在容器外侧一定高度上,它只能接收到一定射角范围的射线,这种方式适用于检测大容器内液位(料位)的变化或作超限报警器。

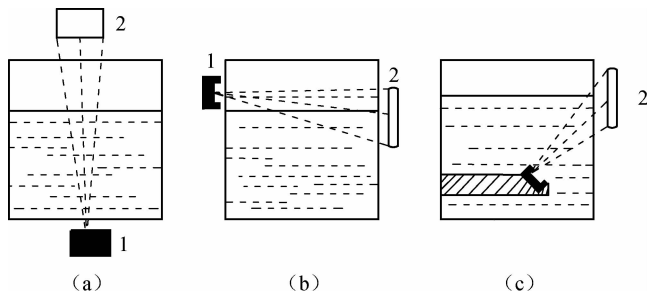


图 3-31 定点检测法射线源的安装方式

1—放射源;2—探测器

(2) 跟踪法 放射性物位计的放射源和探测器分别装在容器两侧的导轨上。当它们处于同一平面上时,系统处于平衡状态。当液面发生波动时,透过液面的射线强度相应改变,探测器接收到的射线强度与平衡状态时不同。此信号经放大处理后,输出一个不平衡电压信号,使自整角机带动放射源和探测器沿导轨向平衡位置运动,并使显示仪表指示出液位的变化值,如图 3-32 所示。

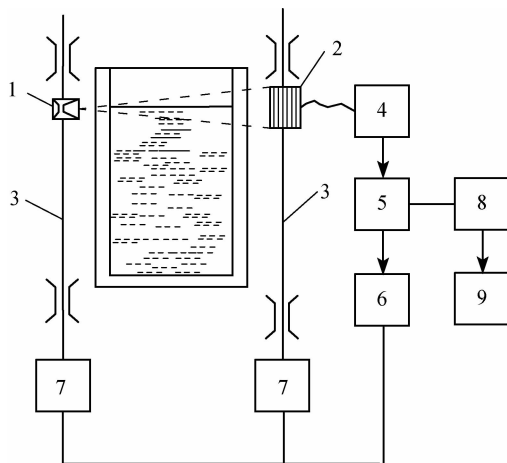


图 3-32 跟踪式放射性物位计原理

1—放射源;2—探测器;3—导轨;4—放大器;5—执行器;
6,7—自整角机发送器和接收器;8—显示仪表;9—远传指示仪表

3.5.6 利用振动频率变化检测

利用振动频率变化检测料位的变化,通常使用音叉料位计,如图 3-33 所示。在料面上安装一个音叉(振动片),用电磁铁(或压电元件)控制转换电路供电激励,使它作音频振动。音叉通常用不锈钢制成。当它未触及物料时,以一音频率振动。当料面升高触及振动片时,其振动频率及振幅减小或停振,通过控制电路发出料位变化和报警信号。

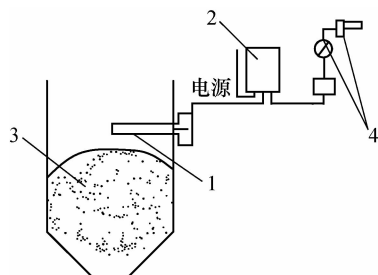


图 3-33 音叉式物位计

1—音叉;2—控制及转换电路;
3—被测料位;4—信号装置

3.5.7 利用重力平衡检测料位

重锤式料位计是利用重力平衡原理检测料位高度的,如图 3-34 所示。重锤通过钢丝绳连接于转轮上,重锤依靠重力下垂至料面。当料面高度变化时,依靠伺服机构使重锤跟踪料面,同时发出与重锤升

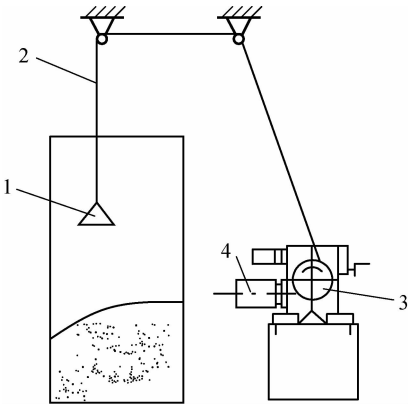


图 3-34 重锤式料位计

1—重锤；2—钢丝绳；3—转轮；4—伺服电机

降高度成正比的电信号，显示出料位高度的变化。

3.5.8 物位测量仪表的选用

物位测量仪表在参数检测及过程控制方面应用甚为广泛，正确选择仪表需考虑介质条件、工作状况和仪表的特性。

(1) 量程选择 最高物位或上限报警点为量程的 90%左右；正常物位为量程的 50%左右；最低物位或下限报警点为量程的 10%左右。

(2) 常用物位测量仪表的选用 在选用物位测量仪表时，根据仪表的技术性能与适用场合、介质条件与功能要求推荐如下。

① 液位测量仪表的选用，如表 3-2 所示。

表 3-2 常用液位测量仪表选用推荐表

仪表名称	使用要求							
	位式测量		就地指示		就地调节		远传变送	
	清洁流体	泡沫	计量	一般指示	清洁流体	难处理流体	清洁流体	难处理流体
差压式仪表	好	—	差/可	好	好	差/可	优/好	优/好
浮筒式仪表	可	—	差/可	好/可	优/好	差/可	可	差/可
浮子液面开关	好	—	—	—	—	—	—	—
浮子液位指示表	—	—	差/可	可	—	—	差/可	差/可
翻板液面计	可	—	可	优	—	—	—	—
浮子式钢带液位表	好	—	优	好	—	—	好	差/可
电容式仪表	好	好/可	差/可	可	—	—	可	—
电阻式仪表	可	差	—	—	—	—	—	—
超声式仪表	好	差/可	差/可	可	—	—	好	差/可
核辐射仪表	好	好	优	好	—	—	好	优
吹气式测量	差/可	—	差/可	差/可	差/可	差/可	差/可	差/可

② 料位测量仪表的选用，如表 3-3 所示。

表 3-3 常用料位测量仪表选用推荐表

分类	方 式	功 能	特 点	注 意 点	适用对象
电 气 式 料 位 表	电容式	位式测量 连续测量	无可动部件、耐腐蚀,易于应付高温、高压、体积小	电磁干扰,含水率的变化,电极被介质黏附,多个电容式仪表在同一场所相互干扰	导电性和绝缘性物料、煤、塑料单体、肥料、沙、水泥等
	电阻式	位式测量	价廉,无可动部件,易于应付高温、高压、体积小	导电率变化,电极被介质附着	导电性物料、焦炭、煤、金属粉、含水的沙等
	音叉式	位式测量	不受物性变化的影响,灵敏度高,气密性、耐压性良好、无可动部件,可靠性高	容器振动,音叉被介质附着、荷重	粒度 10 mm 以下的粉粒体
	超声波 (声阻 断式)	位式测量	不受物性变化的影响,无可动部件,可靠性高	杂音、乱反射、附着	粒度 5 mm 以下的粉粒体
	核辐射式	位式测量 连续测量	非接触测量,不必插入容器,可靠性高	需有使用许可证,核放射源的寿命	高温、高压、黏附性大、腐蚀性强、毒性大的粉状、颗粒状,大块状物料
机 械 式 料 位 表	阻旋式	位式测量	价廉、受物性变化影响	由于物料流动引起误动作、粉尘浸入荷重、寿命	比重 0.2 以上的小粒度物料
	重锤探 测式	位式测量 连续测量	大量程,精度高	索带的寿命、重锤的埋没,测定周期	随着性不大的粉粒体、煤、焦炭、塑料、肥料,量程可达 70 m

③ 液—液相界面的测量。不同比重互不相溶的液—液相界面的测量可选浮球法、量筒法、差压法、电极法及相应的仪表。

(3) 特殊物位的测量

① 低温液位的测量。在空气分离出液氧温度为 -183°C ,液氢温度为 -254°C ,冷冻中液氮蒸温度为 -33.3°C ,用于这些介质的液位测量,其专用仪表有现场指示时直读式的低沸点液位计、连续测定用电容式的低温液面计等。

② 高压容器内的液位测量。常采用的有浮筒式液位计和 γ 射线液位计。前者的测量结果受内部压力的影响,后者的测量结果与内部压力无关。

③ 悬浮液及结焦介质液位的测量。在被测液位的液体内有悬浮物或易在容器壁上结焦时,可采用核辐射液位计或吹气式液位计等。

思考题与习题

- 3.1 电感式传感器有几大类? 各有何特点?
- 3.2 把图 2-4(a)改造成差动电感式传感器的桥式测量电路,电阻 R_1, R_4 换

成电感传感器 L_1 、 L_2 , L_1 、 L_2 为传感器的两个其初始值均为 L_0 。 R_1 、 R_2 为标准电阻, u 为电源电压。试写出输出电压 u_o 与传感器电感变化量 ΔL 间的关系。

3.3 何为回转轴误差电动,它的测定有何实际意义?

3.4 涡流式传感器的工作原理是什么?使用时应注意哪些问题?

3.5 一电容传感器,其圆形极板 $r=5\text{ mm}$,工作初始间隙 $\delta_0=0.3\text{ mm}$,问:

1) 工作时如果传感器的工作间隙变化 $\Delta\delta=\pm 2\text{ }\mu\text{m}$,则电容变化量是多少?

2) 如果测量电路灵敏度 $S_1=100\text{ mV/pF}$,读数仪表灵敏度 $S_2=5\text{ 格/mV}$,在 $\Delta\delta=\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 时,读数仪表的指示值变化多少格($\epsilon_0=8.85\times 10^{-12}\text{ F/m}$)?

3.6 为什么说变间隙型电容传感器特性是非线性的?采取什么措施可改善其非线性特性?