

第3章

电容式传感器



本章阐述电容式传感器的原理、检测方法、选型及应用实例,主要包括电容式传感器工作原理、等效电路、测量电路,以及电容式传感器在工业检测中的应用等,每种传感器都用到电容基本元件,具有电容基本特性等特点。采用不同的电容式传感器,可以测量加速度、位移、转速、液位、厚度等物理量,是一种适用范围广的基本传感器。应用中应注意区别每种测量电路的特点,确保能根据需要进行相应的测量电路。

3.1 电容式传感器的工作原理和特性

电容式传感器是以电容器为敏感元件,将被测非电量转换为电容量变化的传感器。以两个平行金属板组成的平板电容器为例,不考虑边缘效应时,电容量为

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (3-1)$$

式中, ϵ 为电容极板间介质的介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$; ϵ_r 为极板间介质的相对介电常数; S 为两平行板所覆盖的面积(m^2); d 为两平行板之间的距离(m)。

当被测参数变化 S 、 d 或 ϵ 发生变化时,电容量 C 也随之变化。根据这一特性,可以制作出变面积型、变极距型和变介电常数型三种类型的传感器。各种类型的电容式传感器结构如图 3-1 所示。

3.1.1 工作原理

1. 变极距型电容式传感器

变极距型电容式传感器的结构如图 3-2 所示,1 是定极板固定不动;2 是动极板,随被测物体上下移动;两块极板间的间距是 d ;假设初始间距是 d_0 。

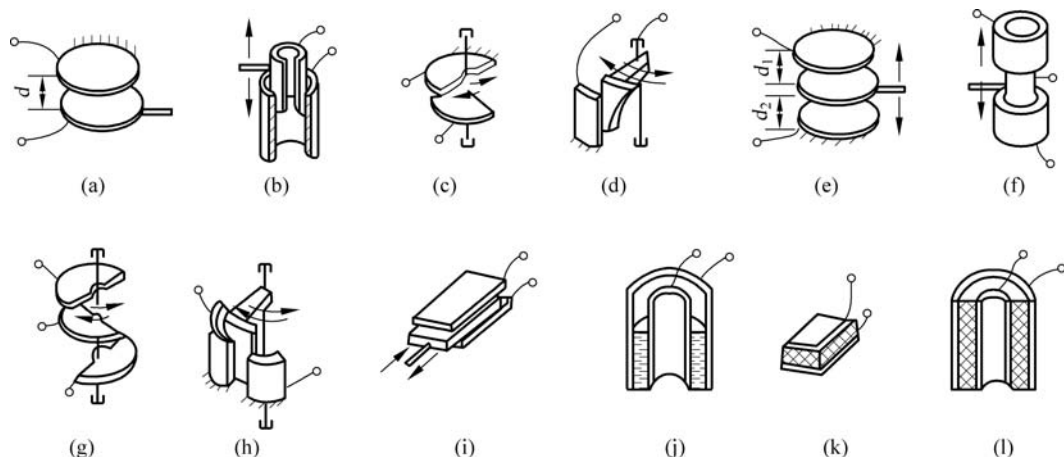


图 3-1 各种类型电容式传感器结构

若电容器极板间距离由初始值 d_0 缩小了 Δd , 电容量增大了 ΔC , 则有

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d - \Delta d} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d}} = \frac{C_0 \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right)}{1 - \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2} \quad (3-2)$$

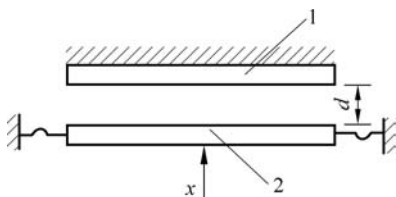


图 3-2 变极距型电容式传感器结构

可知电容与间距为非线性关系。若 $\Delta d/d \ll 1$ 时, 则式(3-2)可简化为

$$C = C_0 + C_0 \frac{\Delta d}{d} \quad (3-3)$$

可见, 在极板间距变化很小时, 电容量与极距的相对变化量近似呈正比关系。这就是变极距型电容传感器的工作原理。

【例】 有一台变极距非接触式电容测微仪, 其传感器的圆形极板半径 $r = 4\text{mm}$, 假设与被测工件的初始间隙 $d_0 = 0.3\text{mm}$, 极板间介质为空气 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\text{F/m}$ 。如果间隙减少 $\Delta d = 20\mu\text{m}$, 电容的变化量 ΔC 是多少?

解: $C = \frac{\epsilon S}{d_0}$

初始电容为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d_0} = \frac{\epsilon_0 \pi r^2}{d_0} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 3.14 \times (4 \times 10^{-3})^2}{0.3 \times 10^{-3}} (\text{F}) = 1.48 \times 10^{-12} (\text{F}) = 1.48 (\text{pF})$$

$$\text{当间隙减少 } \Delta d = 20\mu\text{m}, \text{ 则 } \Delta C = C_0 \frac{\Delta d}{d_0} = 1.48 \times \frac{20 \times 10^{-3}}{0.3} (\text{pF}) = 0.099 (\text{pF})$$

2. 变面积型电容式传感器

1) 测量线位移的变面积型电容式传感器

这种类型电容式传感器的结构仍然是由一块定极板和一块动极板组成, 如图 3-3 所示。当动极板相对于定极板沿着长度方向平移时, 其电容量变化为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (a - \Delta x) b}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r a b}{d} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \Delta x b}{d}$$

$$= C_0 - \Delta C$$

可见, 电容变化量 ΔC 与 Δx 呈线性关系。

2) 测量角位移的变面积型电容式传感器

电容式传感器中还有一类是可以测量角位移的传感器, 其结构如图 3-4 所示。

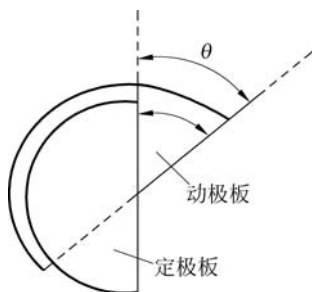
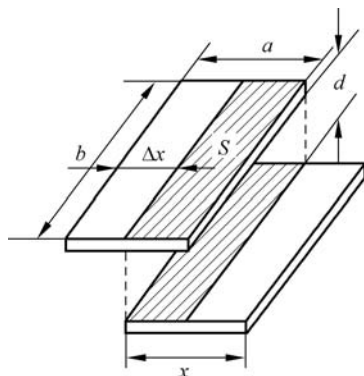


图 3-3 测量线位移的变面积型电容式传感器结构 图 3-4 测量角位移的变面积型电容式传感器结构

当 $\theta=0$ 时, 定极板与动极板重合, 则有

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_0}{d_0}$$

式中, S_0 为极板间初始覆盖面积; d_0 为极板间距。

当 $\theta \neq 0$ 时, 即定极板和动极板错开 θ 角, 则

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)}{d_0} = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)$$

可见, 传感器电容量 C 与角位移 θ 呈线性关系。

3. 变介电常数型电容式传感器

1) 测量液位的变介电常数型电容式传感器

这类电容传感器常用来测量液位、物位、料位等参数, 其典型结构如图 3-5 所示。

传感器分为外筒和内筒, 由金属材料做成, 构成圆筒状的电容器。当液位为 0 时, 该传感器的初始电容为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}}$$

式中, H 为电容器圆柱高度(m); D 为外电极的内直径(m); d 为内电极的外直径(m)。

当液位高度为 h 时, 电容量为

$$C = \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon (H - h)}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h (\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi h (\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}}$$

可见, 电容量与液位高度 h 呈线性关系。

2) 测量介电常数的变介电常数型电容式传感器

这类传感器常用于测量通过电容极板间的物质的介电常数,从而判断生产流水线上的产品质量是否合格。其结构如图 3-6 所示。

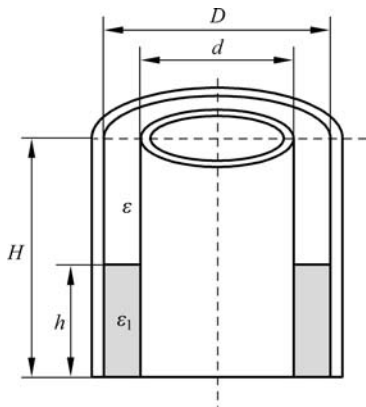


图 3-5 电容式液位传感器结构

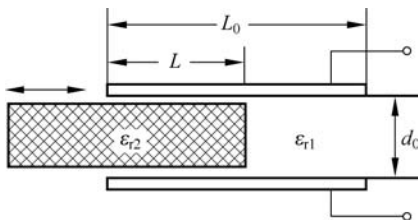


图 3-6 测量介电常数的电容式传感器结构

图 3-6 中, b_0 为极板宽度; d_0 为极板间距; L_0 为极板长度; ϵ_{r1} 为空气的相对介电常数; ϵ_{r2} 为被测物体的相对介电常数。

初始状态时,传感器的初始电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} L_0 b_0}{d_0}$$

当相对介电常数为 ϵ_{r2} 的被测物体进入电容器 L 长度时,电容量变为

$$C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1} (L_0 - L) + \epsilon_{r2} L}{d_0}$$

若 $\epsilon_{r1} = 1$, 则引起电容相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\epsilon_{r2} - 1)L}{L_0}$$

可见,该传感器测量的电容相对变化量与 ϵ_{r2} 呈正比关系,因此可以用来测量物体的相对介电常数。

3.1.2 电容式传感器的特性

1. 静态灵敏度

电容式传感器的静态灵敏度定义为被测量缓慢变化时传感器电容变化量与引起其变化的被测量变化之比,是衡量电容式传感器灵敏度的一个重要指标。以图 3-7 所示平板式变面积型电容式传感器为例。

其初始电容值为

$$C_0 = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon \frac{ab}{d}$$

动极板移动 Δa 后,电容的变化量为

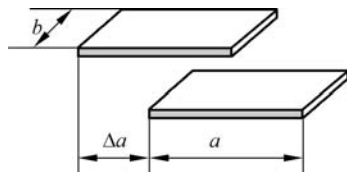


图 3-7 平板式变面积型电容式传感器

$$\Delta C = \epsilon \frac{ab}{d} - \epsilon \frac{(a - \Delta a)b}{d} = \epsilon \frac{\Delta ab}{d} = C_0 \frac{\Delta a}{a}$$

则静态灵敏度 k_g 为

$$k_g = \frac{\Delta C}{\Delta a} = \frac{C_0}{a} = \epsilon \frac{b}{d}$$

可见,静态灵敏度由电容式传感器本身的结构参数决定,与变化量 Δa 无关。可以通过增加极板宽度 b 或者降低极板间距 d 提高静态灵敏度。

同理,变极距型电容式传感器的静态灵敏度为

$$k_g = \frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{C_0}{d} \left(\frac{1}{1 - \Delta d/d} \right)$$

当 $\Delta d/d \ll 1$ 时,将上式展开成泰勒级数得

$$k_g = \frac{C_0}{d} \left[1 + \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \dots \right]$$

可见,减小极板间距可以提高电容式传感器的静态灵敏度。但 d 过小,易导致电容器击穿(空气的击穿电压为 3kV/mm),解决的办法是在极间加一层云母片(击穿电压 $> 10^3\text{kV/mm}$)或塑料膜改善电容器的耐压性能,从而通过减小极板间距提高灵敏度。

2. 非线性

在变极距型电容式传感器中,由式(3-2)可以得到

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d} = C_0 \frac{\Delta d}{d} \left(\frac{1}{1 \pm \Delta d/d} \right)$$

当 $\Delta d/d \ll 1$ 时,将上式展开成泰勒级数得

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta d}{d} \left[1 \mp \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \mp \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^3 + \dots \right]$$

可见电容变化量与间距变化量呈非线性关系。为了减小其非线性,并且提高灵敏度,在实际应用中,电容式传感器大多采用差动式结构,如图 3-8 所示。

在差动式平板电容器中,当动极板上移 Δd 时,电容器 C_1 的间隙 d_1 变为 $d_0 - \Delta d$,电容器 C_2 的间隙 d_2 变为 $d_0 + \Delta d$,则

$$C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \Delta d/d_0}$$

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \Delta d/d_0}$$

在 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时,按泰勒级数展开得

$$C_1 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right]$$

$$C_2 = C_0 \left[1 - \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right]$$

电容值总的变化量为

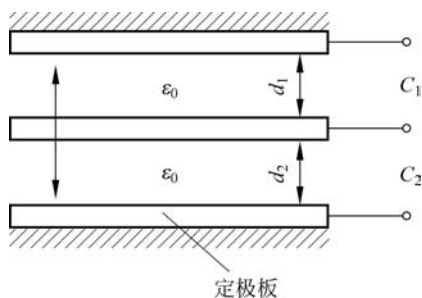


图 3-8 差动平板式电容式传感器结构

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 2C_0 \left[\frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^5 + \dots \right]$$

电容值相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^4 + \dots \right]$$

略去高次项,可以得到

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0}$$

可见,电容的变化量 $\Delta C/C_0$ 与 $\Delta d/d_0$ 近似呈线性关系,同时灵敏度也提高了一倍。

3.2 电容式传感器的等效电路

一个实际的电容式传感器包含以下参数: L 为包括引线电缆的电感和电容式传感器本身的电感; r 由引线电阻、极板电阻和金属支架电阻组成; C_0 为传感器本身的电容; C_p 为引线电缆、所接测量电路及极板与外界所形成的总寄生电容; R_g 为极间等效漏电阻,包含极板间的漏电损耗和介质损耗、极板与外界间的漏电损耗和介质损耗。如图 3-9 所示。

在不同的使用环境下,可以只考虑主要影响因素,略去次要因素。如在低频环境下,传感器电容的阻抗非常大, L 和 r 的影响可忽略,等效电容 $C = C_0 + C_p$,等效电阻 $r_e \approx R_g$,等效电路可以近似为图 3-10 所示的电路。

在高频环境下,电容的阻抗变小, L 和 r 的影响不可忽略,漏电的影响可忽略,其中 $C = C_0 + C_p$,而 $r_e \approx r$,则电容式传感器可以等效为图 3-11 所示电路。

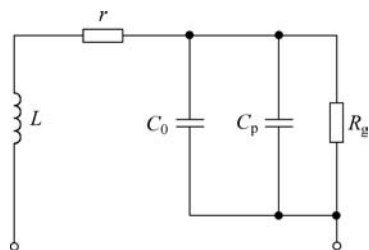


图 3-9 电容式传感器的等效电路

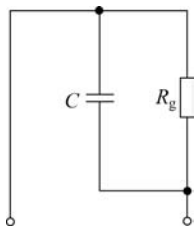


图 3-10 电容式传感器的低频等效电路

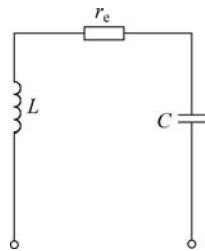


图 3-11 电容式传感器的高频等效电路

$$\frac{1}{j\omega C_e} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + r_e$$

由于电容传感器电容量一般都很小,电源频率即使采用几兆赫兹,容抗仍很大,而 r_e 很小可以忽略,因此

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 LC}$$

此时电容传感器的等效灵敏度为

$$k_e = \frac{\Delta C_e}{\Delta d} = \frac{\Delta C / (1 - \omega^2 LC)^2}{\Delta d} = \frac{k_g}{(1 - \omega^2 LC)^2}$$

可见,当电容式传感器的供电电源频率较高时,传感器的灵敏度由 k_g 变为 k_e , k_e 与传感器的固有电感(包括电缆电感)有关,且随 ω 变化而变化。因此,在实际应用前必须进行标定,否则将会引入测量误差。

3.3 电容式传感器的测量电路

电容式传感器输出的电容量以及电容变化量都非常小,不能直接驱动显示记录仪器,也不便于传输,必须借助于信号调理电路检出这一微小电容增量,并将其转换成与其成单值函数关系的电压、电流或者频率信号。电容式传感器的信号调理电路种类很多,常用的有运算放大器电路、电桥电路、调频电路、双 T 形电路、脉宽调制电路等。

3.3.1 运算放大器电路

运算放大器电路的输入阻抗和开环放大倍数都非常大,是电容式传感器比较理想的信号调理电路,如图 3-12 所示。图中 C_x 是变极距式电容传感器, C 是固定电容, U_i 为交流电源电压, U_o 是输出信号电压。

根据运放“虚短”和“虚断”可得

$$U_o = -\frac{C}{C_x} U_i \quad (3-4)$$

将 $C_x = \epsilon A / d$ 代入式(3-4),得

$$U_o = -U_i \frac{C}{\epsilon A} d \quad (3-5)$$

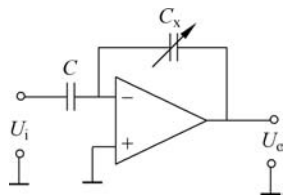


图 3-12 运算放大器电路

运放输出 U_o 与极板间距 d 呈线性关系,解决了变极距型电容式传感器的非线性问题。若将 C_x 和 C 的位置调换,则适合于变面积型和变介质型电容式传感器。

3.3.2 交流电桥电路

交流电桥是测量各种交流阻抗(如测量电容,电感等)的基本电路。此外,还可利用交流电桥平衡条件与频率的相关性测量与电容、电感有关的其他物理量,如互感、磁性材料的磁导率、电容的介质损耗、介电常数和电源频率等,其测量准确度和灵敏度都很高,在电磁测量中应用极为广泛。

交流电桥与直流电桥的不同在于桥臂组成元件和信号种类(直流量、交流量),在交流电桥中供电电源为交流电源,桥臂中有电容(或电感、电阻),不会是纯电阻桥臂,交流电桥的平衡条件与直流电桥相似,都是对臂乘积要相等。

电容式传感器常接成差动结构,接入交流电桥的两个相邻桥臂,另外两个桥臂可以是固定电阻、电容或电感,也可以是变压器的两个次级线圈,如图 3-13 所示。

从电桥灵敏度考虑,图 3-13(a)~(c)形式的灵敏度高,图 3-13(d)~(f)形式的灵敏度相对较低。在设计和选择电桥形式时,除了考虑电桥灵敏度外,还应考虑电桥输出电压是否稳定(即受外界干扰影响大小)、输出电压与电源电压之间的相移大小、电源与元件所允许的功

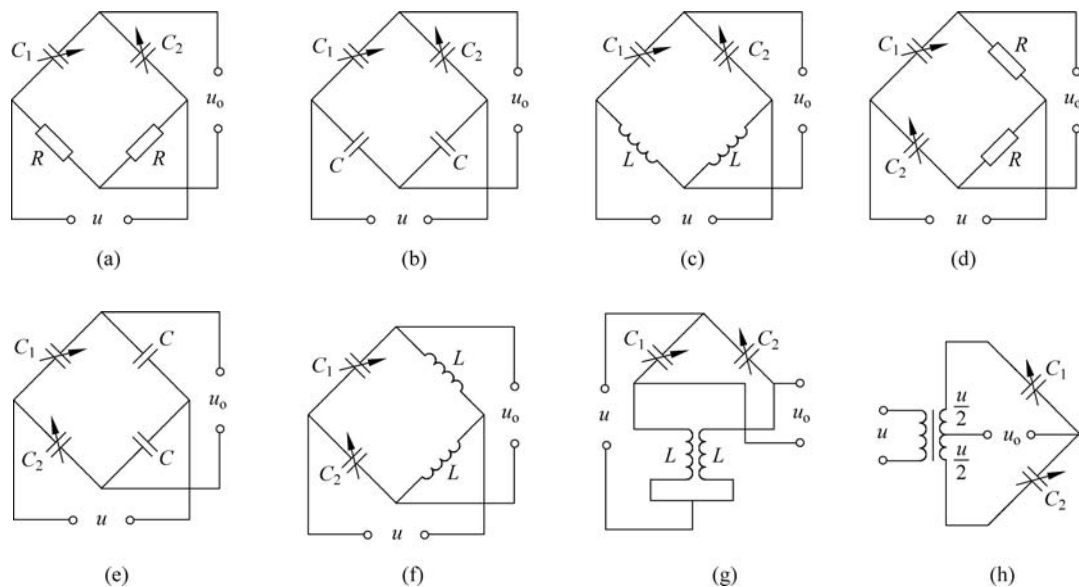


图 3-13 电桥电路

率以及结构上是否容易实现等。在实际电桥电路中,还要设置零点平衡调节、灵敏度调节等环节。

图 3-13(g)为紧耦合电感臂电桥,具有较高的灵敏度和稳定性,且寄生电容影响极小,大大简化了电桥的屏蔽和接地,非常适合于高频工作。

图 3-13(h)为变压器电桥,使用元件最少,电桥内阻最小,因此目前较多采用这种形式。设变压器次级线圈的感应电势为 $u/2$,电桥后接放大器的输入阻抗 $R_L \rightarrow \infty$,则电桥输出电压为

$$u_o = \frac{u}{2} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (3-6)$$

对于变极距型电容式传感器, $C_1 = \frac{\epsilon S}{d_0 - \Delta d}$, $C_2 = \frac{\epsilon S}{d_0 + \Delta d}$, 则

$$u_o = \frac{u}{2} \frac{\Delta d}{d} \quad (3-7)$$

对于变面积型电容式传感器, $C_1 = \frac{\epsilon(S_0 + \Delta S)}{d}$, $C_2 = \frac{\epsilon(S_0 - \Delta S)}{d}$, 则

$$u_o = \frac{u}{2} \frac{\Delta S}{S_0} \quad (3-8)$$

电桥输出电压 u_o 与极距变化量 Δd 、面积变化量 ΔS 都呈线性关系。由于输出电压与电源电压成正比,需要采用稳幅、稳频等措施稳定电源电压;传感器必须工作在平衡位置附近,在要求精度很高的场合(如飞机用油量表),可采用自动平衡电桥;交流电桥的输出阻抗很高(几兆至几十兆欧),输出电压幅值又小,必须后接高输入阻抗的放大器,将电桥输出电压放大后再进行测量。

3.3.3 调频电路

调频电路是将电容式传感器与电容、电感元件构成振荡器的谐振回路,如图 3-14 所示。图中电容式传感器的传感元件 C_x 接入 LC 振荡回路,或作为晶体振荡器中石英晶体的负载电容。当传感器的电容值变化 ΔC 时,其振荡频率亦改变,从而实现了由电容到频率的转换。

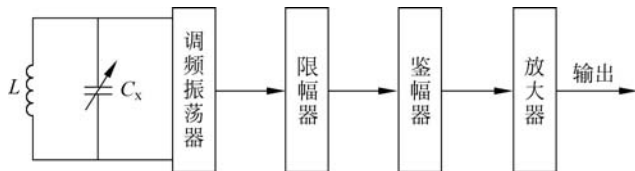


图 3-14 调频电路

初始时刻($\Delta C=0$),振荡器的频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \quad (3-9)$$

当传感器工作时, $C_x = C_0 \pm \Delta C$,振荡器的振荡频率为

$$f = f_0 + \Delta f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 \pm \Delta C)}} \quad (3-10)$$

振荡器输出是一个受被测信号调制的频率波,中心频率 f_0 一般选在 1MHz 以上。调频电路的灵敏度较高,可以测量 $0.01\mu\text{m}$ 级甚至更小的位移变化量。输出调频波易于用数字仪器测量,便于与计算机通信,抗干扰能力强,可以发送、接收以实现遥控测量。

3.3.4 脉宽调制电路

脉宽调制电路也称脉冲调制电路,如图 3-15 所示。

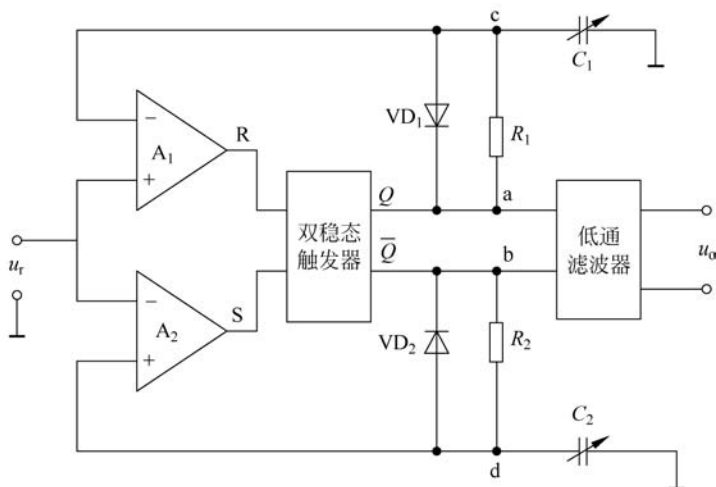


图 3-15 脉宽调制电路

A_1 、 A_2 为电压比较器, U_r 为参考电压; C_1 、 C_2 为差动式电容传感器, 与固定电阻 R_1 、 R_2 构成两个充放电回路; 双稳态触发器采用负电平输入, 输出由电压比较器控制, 触发器功能表如表 3-1 所示; 电压经低通滤波器后, 输出电压平均值。

表 3-1 双稳态 RS 触发器功能表

S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	保持原态	
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	不允许出现	

工作过程如下:

(1) 若接通电源后, 触发器 Q 端(a 点)为高电平($U_a=U$), $\bar{Q}$ 端(b 点)为低电平($U_b=0$), 则 Q 端通过 R_1 对电容 C_1 充电, 时间常数 $\tau_1=R_1C_1$ 。

(2) 当 C_1 充电至 $U_c \geq U_r$ 时, 比较器 A_1 翻转, $U_a=0$, $U_b=U$, 此时, C_1 上已充电电荷通过二极管 VD_1 迅速放电至零($U_c=0$), 而 $\bar{Q}$ 端通过 R_2 对电容 C_2 充电, 时间常数 $\tau_2=R_2C_2$ 。

(3) 当 C_2 充电至 $U_d \geq U_r$ 时, 比较器 A_2 翻转, $U_a=U$, $U_b=0$, 此时, C_2 上已充电电荷通过二极管 VD_2 迅速放电至零($U_d=0$), Q 端又通过 R_1 对电容 C_1 充电, 周而复始重复过程(2)(3), 在 a、b 两点分别输出宽度受 C_1 、 C_2 调制的矩形脉冲。

当 $C_1=C_2=C_0$, $R_1=R_2=R$ 时, 各点输出波形如图 3-16(a)所示。由于 $\tau_1=\tau_2=RC_0$, U_a 和 U_b 脉冲宽度相等, 即 U_{ab} 为对称方波, 经低通滤波器输出的平均电压 $U_o=0$ 。

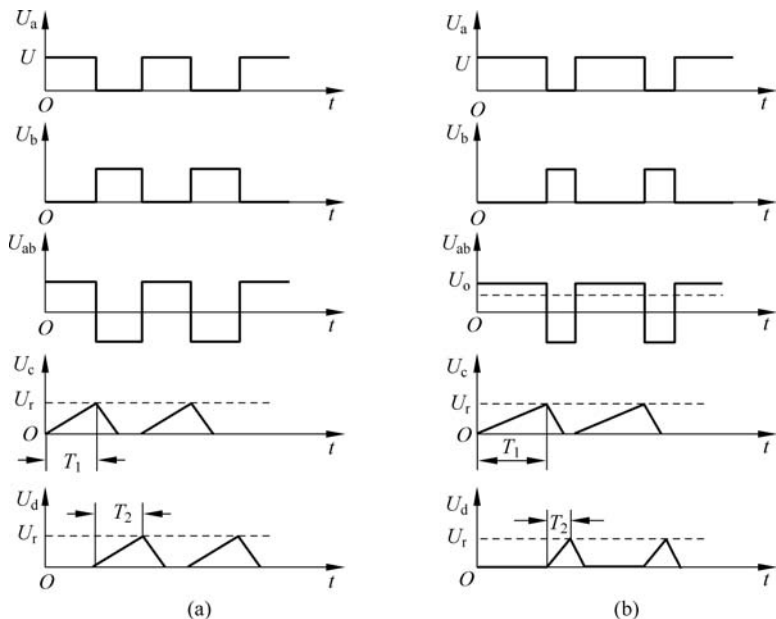


图 3-16 脉宽调制电路各点电压波形

当 $C_1 \neq C_2$ 时, 设 $C_1=C_0+\Delta C$, $C_2=C_0-\Delta C$, 则 $\tau_1=R(C_0+\Delta C)$, $\tau_2=R(C_0-\Delta C)$, 各点输出波形如图 3-16(b)所示。 U_a 和 U_b 脉冲宽度不相等, 此时低通滤波器的输出电压为

$$U_o = U_a - U_b = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U \quad (3-11)$$

式中, T_1 、 T_2 分别为 C_1 、 C_2 充电至 U_r 时所需时间, $T_1 = RC_1 \ln \frac{U}{U - U_r}$, $T_2 = RC_2 \ln \frac{U}{U - U_r}$ 。

脉宽调制电路适用于任何类型的差动式电容传感器,理论上都是线性的,转换效率高,经过低通滤波器就可得到较大的直流输出电压,调宽频率的变化对输出没有影响。

3.3.5 典型应用和特点

电容式传感器测位移(如电缆芯的偏心检测)电路如图 3-17 所示,它是一种脉宽调制电路。

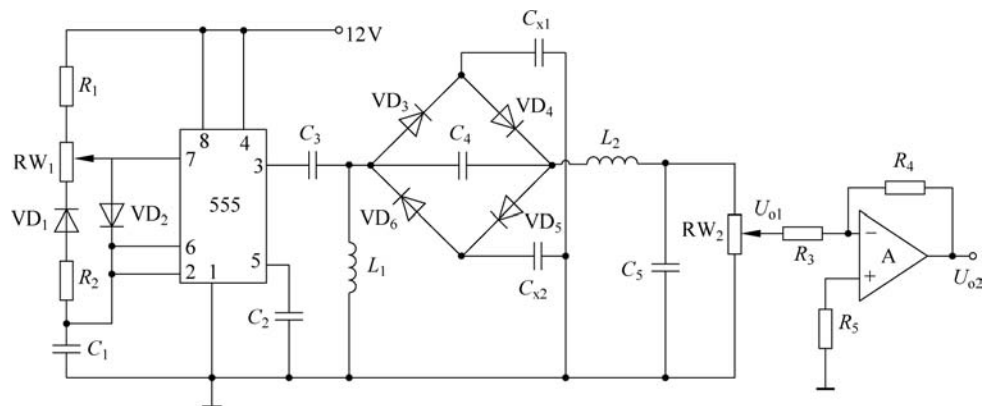


图 3-17 电容式位移传感器的测量电路

图 3-17 中,左侧 555 电路为占空比可调的脉冲发生器(脉冲周期 T 恒定); C_{x1} 、 C_{x2} 为差动式电容传感器的两个传感元件(假设 $C_{x1} = C_x + \Delta C$, $C_{x2} = C_x - \Delta C$, ΔC 为差动电容变化量),与四个二极管 VD_3 、 VD_4 、 VD_5 、 VD_6 组成脉宽调制部分电路; L_2 和 C_5 组成一个简单的低通滤波器;右侧放大器对直流输出信号进行放大。

当 555 电路定时器的输出 3 脚产生上升沿($0 \rightarrow U_H$)时,通过 VD_3 对 C_{x1} 充电,同时通过 C_4 、 VD_5 对 C_{x2} 充电,则 $Q_{Cx1} = C_{x1} \cdot U_H$, $Q_{Cx2} = C_{x2} \cdot U_H$ 。

当 555 电路的 3 脚产生下降沿($U_H \rightarrow 0$)时, C_{x1} 上电荷经 VD_4 、 C_4 放电, C_{x1} 上电荷经 VD_6 放电。

在一个周期 T 内经过 C_4 的电荷量 $\Delta Q = (C_{x2} - C_{x1}) \cdot U_H = 2\Delta C \cdot U_H$ (以向右为参考方向),则

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{2\Delta C \cdot U_H}{T}$$

电流经滤波器后变成直流量,由 RW_2 转换成直流电压 U_{o1} ,再由放大器放大至 U_{o2} ,可计算得

$$U_{o1} = i \cdot RW_2 = \frac{2U_H \cdot RW_2}{T} \cdot \Delta C$$

由上式可知 $U_{o1} \propto \Delta C$,输出电压与差动电容变化量呈正比。555 电路产生的脉冲周期 $T > 10\tau$,且脉冲占空比应调至 50%,以保证两电容能够完全充/放电。

3.4 电容式传感器的应用

3.4.1 电容式加速度传感器

电容式加速度传感器(Capacitive Acceleration Sensor)是基于极距变化型电容式传感器的原理,再配接“m-k-c”系统构成的一类加速度传感器。其工作原理是质量块的表面作为电容器的活动极板,在加速度的作用下,活动极板与固定极板间的间隙发生改变,从而引起可变电容值的变化测定加速度,如图 3-18 所示。

注:“m-k-c”是传统的质量-弹簧系统与电容器结合的一种元件,电容极板的可动极板为质量块的上、下表面。

在图 3-18 所示电容式加速度传感器结构中,包含了固定极板、质量块、弹簧片等主要部分,弹簧片与质量块相连,质量块的 A 面与 B 面与固定极板间形成可变电容 C_{x1} 和 C_{x2} ,在外力加速度的作用下,质量块发生位移,使上、下两个电容量发生差动式变化,一个增大,另一个减小,最后由测量电路输出对应于加速度大小的电压或电流信号。

这种传感器一般用于测量气流(或液流)的振动加速度,还可以进一步测出压力。由牛顿第二定律 $F=ma$,弹簧片受到作用力 F 后,产生弹簧变形使质量块发生位移 x ,根据胡克弹性定律,有

$$x = F/k \quad (3-12)$$

式中, k 为弹簧系统的倔强系数(N/m)。

胡克弹性定律:弹簧在发生弹性形变时,弹簧的弹力 F 与弹簧的伸长量(或压缩量) x 呈正比,即 $F=kx$ 。 k 是物质的弹性系数,又称倔强系数,它只由材料的性质决定,与其他因素无关。

质量块的位移反映到电容量的变化上,根据电容量计算公式

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

假设质量块向下移动,则电容 C_1 为

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{d + x} \quad (3-13)$$

电容 C_2 为

$$C_2 = \frac{\epsilon S}{d - x} \quad (3-14)$$

式中, S 为电容器的有效面积(m^2); ϵ 为电容的介电常数(F/m); d 为电容的初始间距(m)。

将传感器测得的两个电容连在相应的测量电路中,其输出信号可以反映加速度的大小。典型的电容式加速度传感器测量电路如图 3-19 所示。

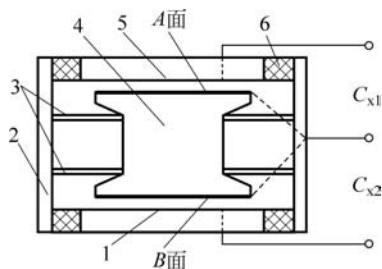


图 3-18 电容式加速度传感器结构原理

1,5—固定极板; 2—壳体; 3—簧片;
4—质量块; 6—绝缘体

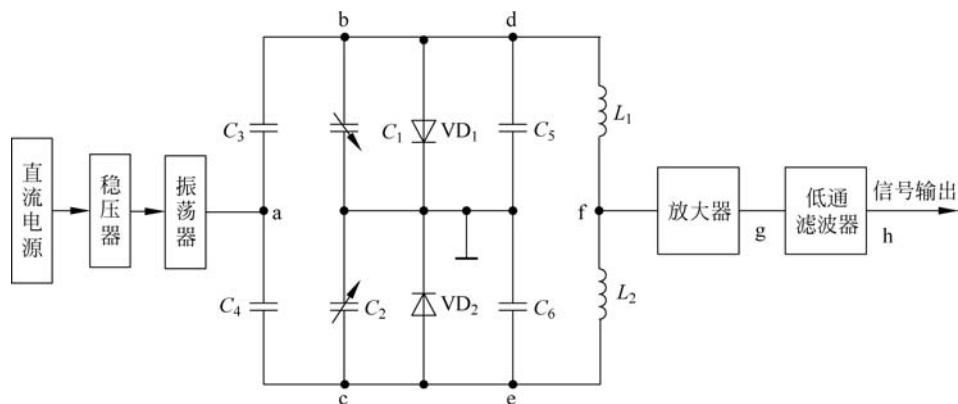


图 3-19 典型的电容式加速度传感器测量电路

图 3-19 中的加速度测量电路为交流电桥电路,直流电源作为电路的供电电源,需要通过稳压器稳压,保证电源不受外界波动影响,稳压后的直流信号通过振荡器产生幅值不变、频率大于 1MHz 的交流电压,作为电容电桥的载波信号引入 a 点,传感器输出的电容 C_1 和 C_2 随着测量信号发生变化,叠加在载波上面于 b、c 点形成调幅信号,该信号经过解调,送至 d 点和 e 点处得到信号的峰值电压,然后在 f 点处输出至标准放大器,对传感器的输出信号进行放大,使输出落在公差范围内,然后利用低通滤波器消除高频干扰或载波频率的残余影响,最后在 h 点处的输出信号,该信号就是正比于电容极板电容变化量的电压信号。

电容式传感器测量的电容值和电容变化量都非常小,传感器周围环境中的杂散电容尤其是连接导线与周围介质存在的电容,对传感器的测量影响较大,因此大多数电容式加速度传感器与测量电路组合成集成电路,将传感器信号进行调理并输出,这样就可以最大限度降低杂散电容的影响。电容式加速度传感器如图 3-20 所示。

电容式加速度传感器具有精度较高、频率响应范围宽、量程大、温度漂移小等优点,可以承受较高的冲击,也可以测量低频振动的加速度,因此应用比较广泛;其缺点是高频测量特性不佳,与压电式加速度传感器相比,具有较大的相移和较高的背景噪声。

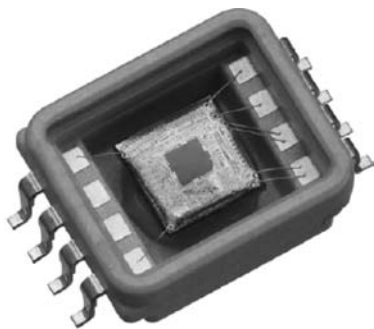


图 3-20 电容式加速度传感器外形

3.4.2 电容式接近开关

1. 工作原理

电容式接近开关的核心是以单个极板作为检测端的电容器,检测极板设置在接近开关的最前端,靠近开关的被测物体表面作为电容器的另一个极板。当物体与开关之间的距离发生变化时,电容随之改变,经过安装在接近开关壳体内部的调理电路,就可以输出开关量信号,如图 3-21 所示。

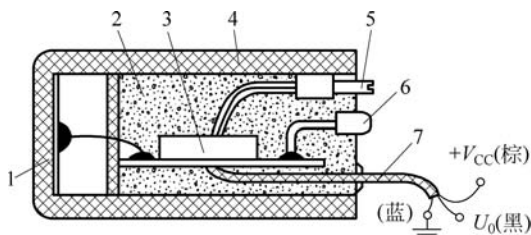


图 3-21 电容式接近开关结构

1—检测极板；2—充填树脂；3—测量转换电路；4—塑料外壳；5—灵敏度调节按钮；6—工作指示灯；7—信号电缆

当没有物体靠近电容式接近开关的检测极板时,检测极板与大地之间的电容量 C 非常小,它与电感 L 构成高品质因数的 LC 振荡电路,电容式传感器作为 LC 振荡器谐振回路的一部分,系统结构如图 3-22 所示。

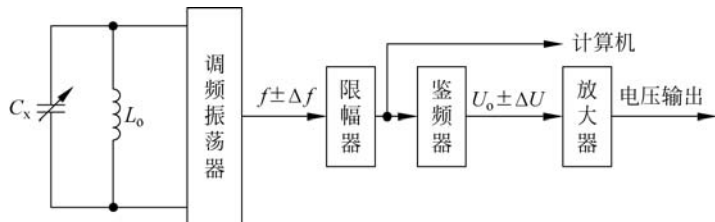


图 3-22 电容式接近开关电路原理

当电容式传感器电容量 C_x 发生变化时,振荡器的振荡频率发生相应的改变,这样就实现了电容—频率的变换。振荡器的频率由下式决定:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_x}} \quad (3-15)$$

式中, f 为振荡电路频率(Hz); L 为线圈的品质因数,无量纲; C_x 为电容式接近开关电容(F)。

图 3-22 中,当被检测物体是一端为地电位的导体(例如人体),该导体靠近电容式接近开关时,检测极板对地电容 C_x 增大,这时振荡器输出的频率降低,频率的变化通过鉴频器转换为电压的变化,经过放大器输出电压,就可以知道传感器与被测物体形成的电容量的大小,从而转换成物体与电容式接近开关距离的大小。

2. 电容式接近开关使用注意事项

(1) 电容式接近开关的接通时间约为 50ms,所以在产品设计中,当负载和接近开关采用不同电源时,应先接通接近开关的电源。

(2) 当使用感性负载(如灯、发动机等)时,瞬态冲击电流较大,容易造成电容击穿,在这些应用场合一般要使用交流继电器作为中间转换元件。

(3) 由于电容器受潮湿、灰尘等因素的影响比较大,为保证长期稳定工作,需要定期检测电容式接近开关的接线和连接部位是否接触良好,是否有粉尘黏附等情况。

3. 电容式接近开关的应用

在用封闭式粮仓储存粮食的过程中,为了保证粮食的品质,必须经常倒库。在向粮仓中装入粮食时,需要安装物位检测系统控制装入粮食的上限,这里干燥的粮食是绝缘介质,因此可以选用电容式接近开关测量谷物的高度,如图 3-23 所示。

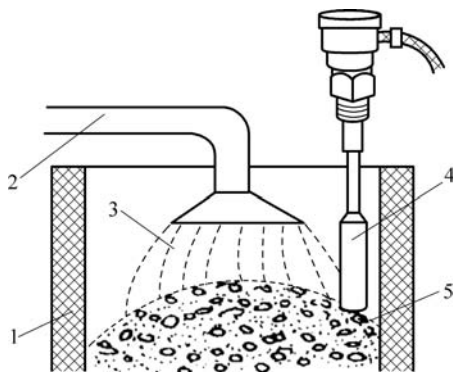


图 3-23 电容式接近开关测量物位示意

1—粮仓外壁；2—输送管道；3—粮食；4—电容式接近开关；5—粮食界面

在粮食上升过程中,电容式接近开关检测到的电容量逐渐变大,达到一定电容量时调理电路动作,输出报警信号,提示操作人员停止倒入粮食;或者将电容式接近开关的输出信号传递给自动控制系统,起到自动停机的目的。

3.4.3 电容式液位传感器

电容式液位变送器基于如下物理原理:将探测器与容器壁分别作为电容器的两极,容器中的液体就是两者之间的电介质——绝缘物。由于一般液体的介电常数都比空气的大,因此流体液位的变化将带来电容量的变化,如图 3-24 所示。

注:介质在外加电场时会产生感应电荷而削弱电场,原外加电场(真空中)与介质中电场的比值即为相对介电常数(permittivity),又称诱电率,与频率相关。

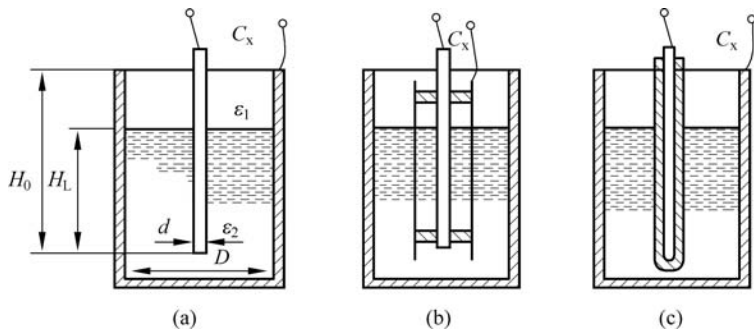


图 3-24 电容式液位计的电极

图 3-24(a)适用于导电容器,液体为不导电的介质。容器为立式圆筒形,器壁为一极,沿轴线插入的金属棒为另一极,其间构成的电容 C_x 与液位成比例。也可悬挂带重锤的软导线作为电极。

图 3-24(b)适用于非金属容器,或虽为金属容器但非立式圆筒形,液体为绝缘材料。这时在棒状电极周围用绝缘支架套装一个金属筒,筒上下开口,或桶壁整体上均匀分布多个孔,使内外液位相同。中央圆棒及与之同轴的金属套筒构成两个电极。其间电容量与容器形状无关,只取决于液位。这种电极只能用于液位测量,粉粒状则容易滞留极间。

图 3-24(c)中,容器和电极的形状、位置与图 3-24(a)一样,被测液体是导电性材料。中央圆棒电极周围包有绝缘材料,电容量 C_x 由绝缘材料的介电常数和液位决定,与液体的介电常数无关,导电液体使金属筒壁与中央电极间的距离缩短为绝缘层的厚度,液位升降相当于电极的有效面积改变。

以图 3-24(a)为例,设导电容器直径为 D ,中央电极直径为 d ,上部空气的介电常数为 ϵ_1 ,下部液体的介电常数为 ϵ_2 ,电极有效总长为 H_0 ,浸没在液体中的长度为 H_L ,则根据同心圆筒状电容器的电容量计算公式,可写出气体部分的电容为

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1(H_0 - H_L)}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (3-16)$$

液体部分的电容为

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2 H_L}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (3-17)$$

忽略杂散电容及端部边界效应后,由式(3-16)、式(3-17)可得两电极间总电容量为

$$C_x = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_1 H_0}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} + \frac{2\pi(\epsilon_2 - \epsilon_1)H_L}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} = C_0 + \frac{2\pi(\epsilon_2 - \epsilon_1)H_L}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (3-18)$$

式中, $C_0 = \frac{2\pi\epsilon_1 H_0}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}$ 为初始电容量,可在空仓时测出。因此,有液体时电容量 C_x 的增量与液位 H_L 呈线性关系。

电容式物位传感器早在 20 世纪 60 年代就已进入应用阶段,但由于电容式传感器的局限性未得到推广,直到 20 世纪后期射频导纳电容物位计的出现,才使其成为物位传感器中应用广泛的一种。

导纳的含义为电学中阻抗的倒数,它由传感器的电阻性成分、电容性成分、电感性成分综合而成。而射频指高频交变信号,所以射频导纳可以理解为用高频信号测量导纳。高频正弦振荡器输出一个稳定的测量信号,利用电桥原理,精确测量安装在待测容器中传感器上的导纳,在直接作用模式下,仪表的输出随物位的升高而增加。射频导纳测量技术与传统电容测量技术的区别在于测量参量的多样性、驱动三端屏蔽技术和增加了两个重要的电路,这些是根据实践中的宝贵经验改进而成的。上述技术不但解决了连接电缆屏蔽和温漂问题,也解决了垂直安装的传感器根部挂料问题。所增加的两个电路是高精度振荡驱动器和交流鉴相采样器。

射频导纳电容物位计是最通用的连续物位传感器之一。它可对多种物质进行测量,包括水、有机液体、泥浆及生石灰等液态化学物质。还有一种双探测器的电容液位传感器,可用于测量介电常数有显著差别的两种液体的分界面。此类传感器耐用、使用方便,不包含任何运动部件,容易进行清洁,可以设计成在高温和高压下工作。

3.4.4 电容式测厚仪

带材的厚度尺寸是带材加工中重要的质量指标之一,厚度尺寸公差的大小直接影响产

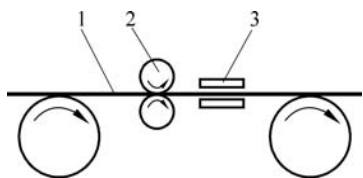


图 3-25 电容式测厚仪结构

1—带材；2—轧辊；3—工作电极

品质量的好坏,因此厚度在线测量仪器是现代带材轧制过程中不可缺少的重要组成部分。电容式传感器可以用于带材的厚度测量,下面介绍电容式测厚仪的工作原理及特点,如图 3-25 所示。

电容式测厚传感器用来对金属带材在轧制过程中厚度的检测,其工作原理是在被测带材的上、下两侧各置放一块面积相等、与带材距离相等的极板,这样极板与带材就构成了两个电容器 C_1 、 C_2 。把两块极板用导线连接起来成为一个极,而带材就是电容的另一个极,其总电容为 $C_1 + C_2$,如果带材的厚度发生变化,将引起电容量的变化,用交流电桥将电容的变化测出来,经过放大即可由电表指示测量结果。系统结构如图 3-26 所示。

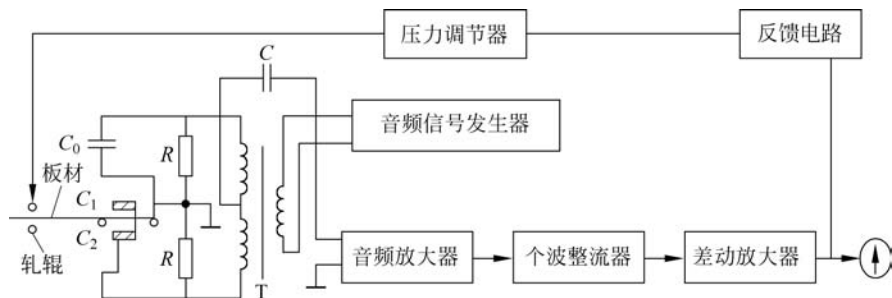


图 3-26 电容式测厚仪系统结构

该系统结构图中,信号发生器产生的交流音频信号,接入变压器 T 的原边线圈,变压器副边的两个线圈作为测量电桥的两臂,电桥的另外两桥臂由标准电容 C_0 和带材与极板形成的被测电容 C_x ($C_x = C_1 + C_2$) 组成。电桥的输出电压经放大器放大后整流为直流,再经差动放大,即可用指示仪表指示出带材厚度的变化。

3.4.5 电容式转速传感器

在工程测量中,转速测量是一种常见的测量,在测量电机转速、汽车发电机转速等应用中常用电容式转速传感器测量,其测量原理如图 3-27 所示。

当被测的旋转体转动时,电容式传感器将周期性地改变输出信号,此信号通过测量电路进行放大、整形,再用频率计指示出频率数值,此值与转轮的齿数和被测转速有关。

设齿数为 Z ,由计数器得到的频率为 f ,则转速 n 为

$$n = \frac{60f}{Z} (\text{r/min})$$

从而通过电容的变化得到转速信号。

3.4.6 电容式位移传感器

前面讲的电容式传感器分为三种类型,即改变极板面积的变面积型、改变极板距离的变间隙型和改变介电常数的变介电常数型,可以用来测量线位移、角位移等参数。变间隙型电

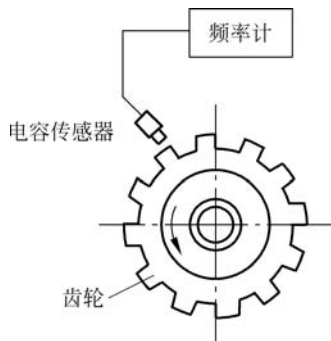


图 3-27 电容式转速传感器原理

容式传感器一般用来测量微小的线位移($0.1\mu\text{m}$ 至零点几毫米)或由于力、压力、振动等引起的极距变化;变面积型电容式传感器一般用来测量角位移(1° 至几十度)或较大的线位移;变介电常数型电容式传感器用来测量物位或液位以及各种介质的湿度、密度的测定。

在工程测量中,振动信号可以看成是一种特殊的位移量,一般采用变间隙型电容式传感器测量,如电容式位移传感器在测振幅和测轴回转精度及轴心偏摆的应用,其结构及原理如图 3-28 所示。

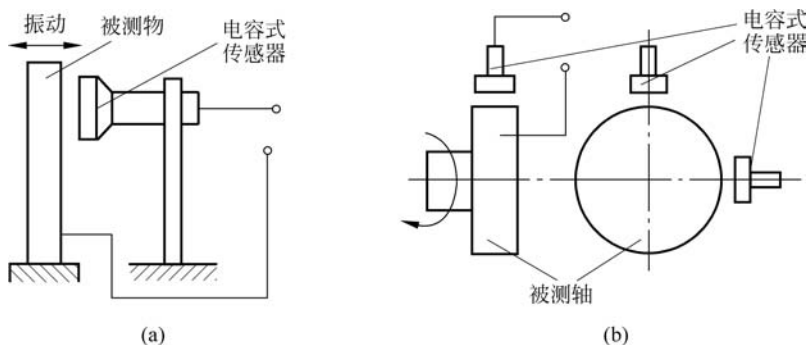


图 3-28 电容式传感器测量位移原理

图 3-28(a)中电容传感器固定作为电容的固定极,被测物体(金属导体)作为电容的活动极,当被测物体在平衡位置上发生位移时,电容值改变,经过测量电路处理可以得到物体振幅变化信号;图 3-28(b)是测量被测转轴在固定位置上的偏心情况,用两个电容式传感器分别测量被测轴上下、左右的偏移情况。