

电容式传感器将非电物理量的变化转换为电容量的变化,从而实现对非电物理量的测量。电容式传感器常用于测量位移、速度、加速度、角位移、角速度、角加速度、振动、压力、差压、液面高度、物质成分等非电物理量。电容式传感器结构简单、体积小、分辨率高,可实现非接触式测量,动态响应好,能在高温、辐射和强振动等恶劣条件下工作。但是,电容式传感器的电容量小、功率小、输出阻抗高、负载能力差,易受外界干扰。

## 3.1 电容式传感器的工作原理

### 3.1.1 电容式传感器简介

常见的电容有平板形状和圆筒形状,相应的电容式传感器分别称为平板电容式传感器和圆筒电容式传感器。

#### 1. 平板电容式传感器

平板电容式传感器的结构如图 3.1 所示。

如果不考虑边缘效应,那么,平板电容的电容量  $C$  为

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (3.1)$$

其中,  $\epsilon$  是电容极板间介质的介电常数;  $\epsilon_r$  是介质的相对介电常数;  $\epsilon_0$  是真空的介电常数,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $A$  是两块极板覆盖的面积;  $d$  是两块极板之间的距离。

从式(3.1)可见,电容  $C$  随着参数  $A$ 、 $d$  和  $\epsilon_r$  的变化而变化。在实际使用中,通常使其两个参数保持不变,只改变其中一个参数,将该参数的变化转换为电容量的变化,通过测量电路转换为电量输出。

平板电容式传感器可分为三种:改变极板覆盖面积的变面积型、改变极板间距离的变极距型和改变介质介电常数的变介电型。

#### 2. 圆筒电容式传感器

圆筒电容式传感器的结构如图 3.2 所示。如果不考虑边缘效应,那么,圆筒电容的电容

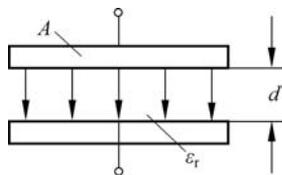


图 3.1 平板电容式传感器的结构

量  $C$  为

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(R/r)} \quad (3.2)$$

其中,  $\epsilon_r$ 、 $\epsilon_0$  的意义与平板电容式传感器相同;  $l$  是内外极板覆盖的高度;  $R$  是外极板的半径;  $r$  是内极板的半径。

从式(3.2)可见, 电容  $C$  随着参数  $l$ 、 $\epsilon_r$  的变化而变化。在实际使用中, 通常使其中一个参数保持不变, 只改变另一个参数, 将该参数的变化转换为电容量的变化, 通过测量电路转换为电量输出。

圆筒电容式传感器可分为两种: 改变极板间覆盖高度的变面积型和改变介质介电常数的变介质型。

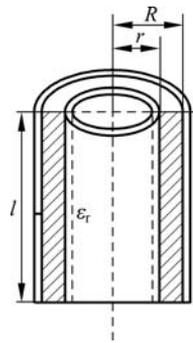


图 3.2 圆筒电容式传感器的结构

### 3.1.2 变面积型电容式传感器

#### 1. 平板电容式线位移传感器

平板电容式线位移传感器如图 3.3 所示。下面的极板保持固定, 称为定极板。上面的极板与被测量绑定在一起, 称为动极板。极板的长为  $a$ , 宽为  $b$ , 两极板之间的距离为  $d$ 。

当两个极板上下对齐时, 初始电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0\epsilon_r ab}{d} \quad (3.3)$$

当被测量移动时, 带动动极板移动, 两块极板覆盖的面积发生变化, 导致电容发生变化。设动极板相对定极板平移距离为  $\Delta x$ , 则电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_r (a - \Delta x)b}{d} \quad (3.4)$$

电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = -\frac{\epsilon_0\epsilon_r \Delta x b}{d} \quad (3.5)$$

电容的相对增量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta x}{a} \quad (3.6)$$

从式(3.6)可见, 电容的相对增量与位移  $\Delta x$  呈线性关系。如果测量出了电容的相对增量, 那么, 就得到了位移的值。这就是平板电容式线位移传感器的工作原理。

#### 2. 圆筒电容式线位移传感器

圆筒电容式线位移传感器如图 3.4 所示。外面的极板是定极板, 里面的极板是动极板, 被测量与动极板绑定在一起,  $l$  是内外极板的高度,  $R$  是外极板的半径,  $r$  是内极板的半径。

当两个极板对齐时, 初始电容量为

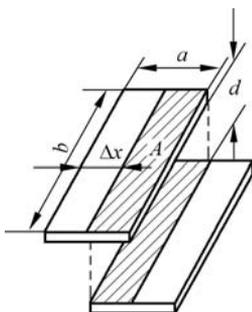


图 3.3 平板电容式线位移传感器

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(R/r)} \quad (3.7)$$

当被测量移动时,带动动极板移动,两块极板覆盖的面积发生变化,导致电容发生变化。设动极板相对定极板平移距离为  $\Delta x$ ,则电容量为

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r(l - \Delta x)}{\ln(R/r)} \quad (3.8)$$

电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = -\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \Delta x}{\ln(R/r)} \quad (3.9)$$

电容的相对增量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta x}{l} \quad (3.10)$$

从式(3.10)可见,电容的相对增量与位移  $\Delta x$  呈线性关系。如果测量出了电容的相对增量,那么就得到了位移的值。这就是圆筒电容式线位移传感器的工作原理。

### 3. 平板电容式角位移传感器

平板电容式角位移传感器如图 3.5 所示。下面的极板是定极板,上面的极板是动极板,被测量与动极板绑定在一起,极板的面积为  $A_0$ ,上下两块极板的距离为  $d$ 。

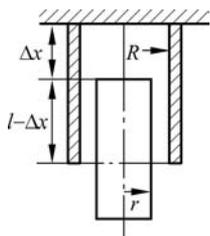


图 3.4 圆筒电容式线位移传感器

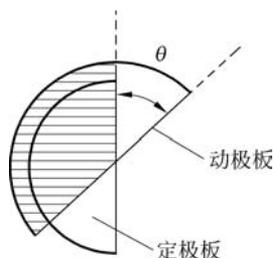


图 3.5 平板电容式角位移传感器

当两个极板对齐时,初始电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0\epsilon_r A_0}{d} \quad (3.11)$$

当被测量转动时,带动动极板转动,两块极板覆盖的面积发生变化,导致电容发生变化。设动极板相对定极板转动的角度为  $\theta$ ,则上下两块极板相互覆盖的面积为

$$A = A_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (3.12)$$

此时,电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_r A}{d} = \frac{\epsilon_0\epsilon_r A_0}{d} \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) = C_0 - C_0 \cdot \frac{\theta}{\pi} \quad (3.13)$$

电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = -C_0 \cdot \frac{\theta}{\pi} \quad (3.14)$$

电容的相对增量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\theta}{\pi} \quad (3.15)$$

从式(3.15)可见,电容的相对增量与角位移  $\theta$  呈线性关系。如果测量出了电容的相对增量,那么就得到了角位移的值。这就是平板电容式角位移传感器的工作原理。

### 3.1.3 变极距型电容式传感器

#### 1. 变极距型电容式传感器的工作原理

参考图 3.1,对于平板电容式传感器,设介质的介电常数、极板的面积  $A$  都为常数,上下两块极板的初始距离为  $d_0$ ,则初始电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0} \quad (3.16)$$

在测量时,把一个极板作为定极板,另一个极板作为动极板,与被测量绑定在一起,随被测量的移动而移动。设因动极板的移动而导致电容器极板间距产生增量  $\Delta d$ ,则此时的电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 + \Delta d} \quad (3.17)$$

电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 + \Delta d} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0} = -C_0 \frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} \quad (3.18)$$

电容的相对增量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} \quad (3.19)$$

在式(3.19)中,负号表示电容增量与极板间距增量成反向关系。当极板间距增加时,电容量减小;当极板间距减小时,电容量增加。

如果极板间距增量很小,即  $\Delta d/d_0 \ll 1$ ,那么,式(3.19)可以近似表达为

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx -\frac{\Delta d}{d_0} \quad (3.20)$$

从式(3.20)可见,电容的相对增量与极板间距增量  $\Delta d$  近似呈线性关系。如果测量出了电容的相对增量,那么就得到了极板间距的增量。这就是变极距型电容式传感器的工作原理。

#### 2. 变极距型电容式传感器的灵敏度

极板间距的单位变化所引起的电容量相对变化的绝对值,称为变极距型电容传感器的灵敏度,记为  $K$ ,即

$$K = \left| \frac{\Delta C/C_0}{\Delta d} \right| = \frac{1}{d_0 + \Delta d} \quad (3.21)$$

当  $\Delta d/d_0 \ll 1$  时,灵敏度的近似值为

$$K \approx \frac{1}{d_0} \quad (3.22)$$

从式(3.22)可见,变极距型电容传感器的灵敏度与 $d_0$ 成反比。

### 3. 变极距型电容式传感器的击穿问题

上面的分析表明,当 $d_0$ 较小时,传感器的灵敏度高。但是, $d_0$ 过小时,电容很大,容易引起电容器击穿。因此,通常在极板之间加入云母等高介电常数的材料,如图3.6所示。

该传感器相当于两个电容式传感器的串联,其中一个传感器的介质是云母,另一个传感器的介质是空气。两个电容的电容量分别为

$$C_g = \frac{\epsilon_0 \epsilon_g A}{d_g} \quad (3.23)$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0} \quad (3.24)$$

其中,云母的相对介电常数 $\epsilon_g$ 约为6~8.5,空气的相对介电常数 $\epsilon_r$ 约为1。

它们串联的总电容为

$$C = \frac{C_g C_0}{C_g + C_0} = \frac{\epsilon_g \epsilon_r}{d_g \epsilon_r + d_0 \epsilon_g} \epsilon_0 A \quad (3.25)$$

由于云母的介电常数比空气的介电常数大很多,因此,该电容式传感器的总电容量比单纯空气介质电容式传感器增加了很多,其击穿电压也提高了很多,从而使得极板间距可以做得很小。一般极板间距在25~200 $\mu\text{m}$ 范围内,而最大位移应小于极板间距的1/10,因此,这种电容式传感器主要用于测量微位移。

### 4. 变极距型电容式传感器的线性度

在式(3.19)中,当 $|\Delta d|/d_0 < 1$ 时,根据几何级数理论,得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C_0} &= -\frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} = -\frac{\Delta d}{d_0} \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d_0}} \\ &= -\frac{\Delta d}{d_0} \left[ 1 - \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right) + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \dots \right] \\ &= -\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right) + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \dots \end{aligned} \quad (3.26)$$

从式(3.26)可见,电容的相对增量与 $\Delta d$ 呈非线性关系。对式(3.25)进行线性化处理,即只保留线性项,就是式(3.19)。如果在式(3.26)中只保留线性项和二次项,去掉高次项,则得

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx -\frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 \quad (3.27)$$

式(3.27)中的二次项可以看成是对式(3.26)进行线性化处理时所产生的误差,因此,传感器的相对非线性误差为

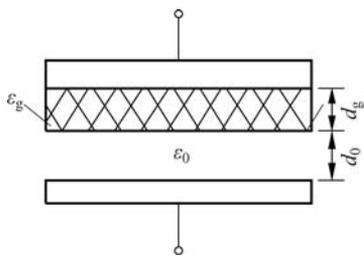


图3.6 加入云母的平板电容式传感器

$$\delta = \frac{(\Delta d/d_0)^2}{|\Delta d/d_0|} \times 100\% = \frac{|\Delta d|}{d_0} \times 100\% \quad (3.28)$$

从式(3.22)知,要提高灵敏度,应该减小极板间距  $d_0$ ,但是,从式(3.28)可见,这将使非线性误差增大。即灵敏度与非线性误差对极板间距的要求是矛盾的。为了解决这个问题,

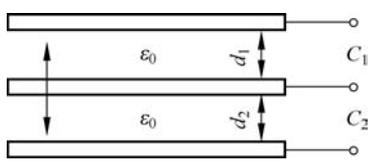


图 3.7 差动结构的电容式传感器

通常采用差动结构的电容式传感器。

如图 3.7 所示,上下两个极板是定极板,中间的极板是动极板,三块极板构成两个电容器  $C_1$  和  $C_2$ ,把  $C_1$  和  $C_2$  的差作为测量的输出。这就是“差动”的含义。

初始时,动极板处在中间位置,两个电容器  $C_1$  和  $C_2$  的初始容量都是  $C_0$ 。当动极板向上移动  $\Delta d$  时,电容器  $C_1$  的极板间距产生增量  $-\Delta d$ ,根据式(3.19),得电容  $C_1$  的相对增量为

$$\frac{\Delta C_1}{C_0} = -\frac{-\Delta d}{d_0 + (-\Delta d)} = \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \quad (3.29)$$

电容器  $C_2$  的极板间距产生增量  $\Delta d$ ,根据式(3.19),得电容  $C_2$  的相对增量为

$$\frac{\Delta C_2}{C_0} = -\frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} \quad (3.30)$$

从而,测量输出的总相对增量为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C_0} &= \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{C_0} = \frac{\Delta C_1}{C_0} - \frac{\Delta C_2}{C_0} \\ &= \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} + \frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} \frac{1}{1 - (\Delta d/d_0)^2} \\ &= 2 \frac{\Delta d}{d_0} \left[ 1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^4 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^6 + \dots \right] \\ &= 2 \left[ \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^5 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^7 + \dots \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

当  $\Delta d/d_0 \ll 1$  时,略去高次项,得

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0} \quad (3.32)$$

比较式(3.32)与式(3.20)可见,电容的相对增量提高了一倍。

此时,灵敏度的近似值为

$$K = \left| \frac{\Delta C/C_0}{\Delta d} \right| \approx \frac{2}{d_0} \quad (3.33)$$

比较式(3.33)与式(3.22)可见,传感器的灵敏度提高了一倍。

如果在式(3.31)中只保留线性项和三次项,去掉高次项,则得

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \left[ \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 \right] \quad (3.34)$$

因此,传感器的相对非线性误差为

$$\delta = \frac{|2(\Delta d/d_0)^3|}{|2\Delta d/d_0|} \times 100\% = \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 \times 100\% \quad (3.35)$$

比较式(3.35)与式(3.28)可见,传感器的线性度也得到了改善。

综合以上分析可知,把变极距型电容式传感器做成差动结构,对于相同的  $d_0$  和  $\Delta d$ ,电容的相对增量和传感器的灵敏度提高了一倍,传感器的线性度也得到了改善。而且,把变极距型电容式传感器做成差动结构,设计难度也没有增加多少,所以,在实际测量时,常常采用差动结构。

### 3.1.4 变介质型电容式传感器

从式(3.1)可知,电容器的电容量与电容极板间介质的介电常数密切相关,当电容极板间介质变化时,电容器的电容量也随之改变。设真空的介电常数  $\epsilon_0 = 1$ ,那么,在 106Hz 频率下,一些典型介质的相对介电常数如表 3.1 所示。

表 3.1 一些典型介质的相对介电常数

介质名称	空气	聚乙烯	硅油	金刚石	氧化铝	云母	TiO <sub>2</sub>
相对介电常数	≈1	2.26	2.7	5.5	4.5~8.4	6~8.5	14~110

变介质型电容式传感器就是利用不同介质介电常数的不同,通过介质的改变实现对被测量的检测,并通过电容量的变化反映出来。

#### 1. 平板结构变介质型电容式传感器

根据在两个极板之间所加介质位置的不同,可以把平板结构变介质型电容式传感器分为串联型和并联型。

图 3.8 所示的平板结构变介质型电容式传感器,可以看成两个电容传感器的串联。

在没有加新介质之前,电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d_0 + d_1} \quad (3.36)$$

在介质改变之后,两个电容传感器的电容量分别为

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A}{d_1}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 A}{d_0} \quad (3.37)$$

电容器的总电容为

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A}{\epsilon_1 d_0 + d_1} \quad (3.38)$$

电容器电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = C_0 \cdot \frac{(\epsilon_1 - 1)d_1}{\epsilon_1 d_0 + d_1} \quad (3.39)$$

从式(3.39)可见,介质改变后的电容增量与所加介质的相对介电常数  $\epsilon_1$  呈非线性关系。

图 3.9 所示的平板结构变介质型电容式传感器,可以看成两个电容传感器的并联。

在没有加新介质之前,电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 (A_1 + A_2)}{d} \quad (3.40)$$

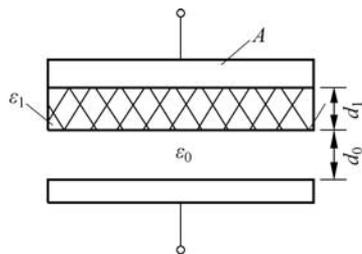


图 3.8 串联型平板结构变介质型电容式传感器

在介质改变之后,两个电容传感器的电容量分别为

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A_1}{d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 A_2}{d} \quad (3.41)$$

电容器的总电容为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A_1 + \epsilon_0 A_2}{d} \quad (3.42)$$

电容器电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon_0 A_1 (\epsilon_1 - 1)}{d} \quad (3.43)$$

从式(3.43)可见,介质改变后的电容增量与所加介质的相对介电常数  $\epsilon_1$  呈线性关系。

## 2. 圆筒结构变介质型电容式传感器

圆筒结构变介质型电容式传感器如图 3.10 所示,该传感器用于测量液位的高度。设被测液体介质的相对介电常数为  $\epsilon_1$ ,传感器测量部分总高度为  $H$ ,液面高度为  $h$ ,外筒内径为  $D$ ,内筒外径为  $d$ 。此时,整个电容式传感器可以看成两个电容传感器的并联。

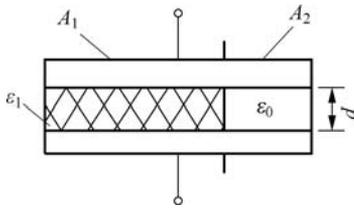


图 3.9 并联型平板结构变介质型电容式传感器

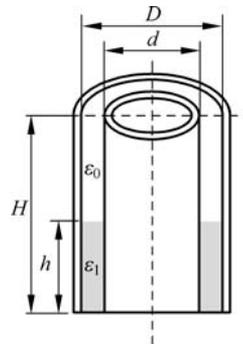


图 3.10 圆筒结构变介质型电容式传感器

在未注入液体前,初始电容为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln(D/d)} \quad (3.44)$$

注入液体后,两个电容传感器的电容分别为

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0(H-h)}{\ln(D/d)}, \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 h}{\ln(D/d)} \quad (3.45)$$

电容器的总电容为

$$\begin{aligned} C = C_1 + C_2 &= \frac{2\pi\epsilon_0(H-h)}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 h}{\ln(D/d)} \\ &= \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0 h(\epsilon_1 - 1)}{\ln(D/d)} = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0 h(\epsilon_1 - 1)}{\ln(D/d)} \end{aligned} \quad (3.46)$$

电容器电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 h(\epsilon_1 - 1)}{\ln(D/d)} \quad (3.47)$$

从式(3.47)可见,注入液体后的电容增量与液面高度  $h$  呈线性关系。

## 3.2 电容式传感器的测量电路

电容式传感器的电容值及其变化值都很微小,必须借助信号调节电路才能将微小的电容变化值转换为与其成正比的电压、电流或频率,从而实现测量结果的显示、记录和传输,最终达到测量的目的。单个电容的测量电路,可以使用运算放大器和调频电路;差动电容的测量电路,可以使用变压器式交流电桥、二极管双 T 型交流电桥和脉冲宽度调制电路。

### 3.2.1 运算放大器

基于运算放大器的电容式传感器的测量电路如图 3.11 所示。电容式传感器  $C_x$  跨接在高增益运算放大器的输入端与输出端之间, $C_0$  是固定电容器。

运算放大器的输入阻抗很高,可以看成是一个理想运算放大器,其输出电压

$$\dot{U}_o = -\frac{C_0}{C_x} \dot{U}_i \quad (3.48)$$

式(3.48)中的负号表明输出电压与输入电压反相。

如果传感器是变极距型平板电容式传感器,则

$$C_x = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3.49)$$

代入式(3.48),则有

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_i \frac{C_0}{\epsilon A} d \quad (3.50)$$

从式(3.50)可见,输出电压与极板间距呈线性关系,克服了变极距型平板电容式传感器的非线性。因此,这种测量电路具有明显的优点。

### 3.2.2 调频电路

调频电路的工作原理如图 3.12 所示,电容式传感器作为调频振荡器振荡回路的一部分。

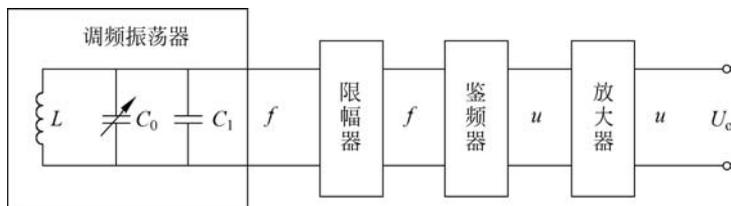


图 3.12 调频电路的工作原理

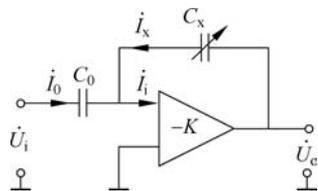


图 3.11 基于运算放大器的电容式传感器的测量电路

设  $L$  为振荡回路的电感,  $C$  为振荡回路的总电容。振荡回路的总电容一般包括传感器电容  $C_0 \pm \Delta C$ 、振荡回路中的固定电容  $C_1$  和传感器引线的分布电容  $C_c$ , 即  $C = C_0 \pm \Delta C + C_1 + C_c$ 。

以变极距型电容式传感器为例, 当没有被测信号时,  $\Delta d = 0$ , 则  $\Delta C = 0$ , 振荡器的固有频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_1 + C_c)}} \quad (3.51)$$

当有被测信号时,  $\Delta d \neq 0$ , 则  $\Delta C \neq 0$ , 振荡器的频率为

$$f_0 \mp \Delta f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 \pm \Delta C + C_1 + C_c)}} \quad (3.52)$$

从式(3.52)可见, 当被测量导致传感器的电容量发生变化时, 振荡器的振荡频率发生变化。此时, 虽然频率可以作为测量结果, 但是, 由于系统是非线性的, 不容易对传感器进行标定, 因此, 需要对测得的频率进行转换。转换的方法是, 在振荡回路后加上限幅器、鉴频器和放大器, 将频率的变化转换为电压振幅的变化, 经过放大后, 就可以用仪表指示或用记录仪进行记录了。

### 3.2.3 变压器式交流电桥

变压器式交流电桥的工作原理如图 3.13 所示, 用于差动电容式传感器的测量。电桥的两臂  $C_1$ 、 $C_2$  为差动电容式传感器, 另外两臂为交流变压器二次绕组阻抗的一半。

两个电容的容抗分别为

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1}, \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2} \quad (3.53)$$

当负载为放大器时, 阻抗为无穷大, 电桥的输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{Z_2 \dot{U}_i}{Z_1 + Z_2} - \frac{\dot{U}_i}{2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{\dot{U}_i}{2} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{\dot{U}_i}{2} \quad (3.54)$$

对于变极距型电容式传感器, 则有

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon A}{d_0 + \Delta d} \quad (3.55)$$

此时, 式(3.54)即为

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i}{2} \cdot \frac{\Delta d}{d_0} \quad (3.56)$$

从式(3.56)可见, 在放大器输入阻抗为无穷大时, 输出电压与极板位移呈线性关系。

### 3.2.4 二极管双 T 型交流电桥

二极管双 T 型交流电桥电路原理图如图 3.14(a)所示, 用于差动电容式传感器的测量。高频电源  $E$  提供幅值为  $E$  的方波, 电源频率为  $f$ , 周期为  $T$ , 如图 3.14(b)所示。  $D_1$ 、 $D_2$  为

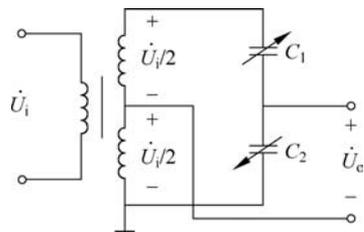
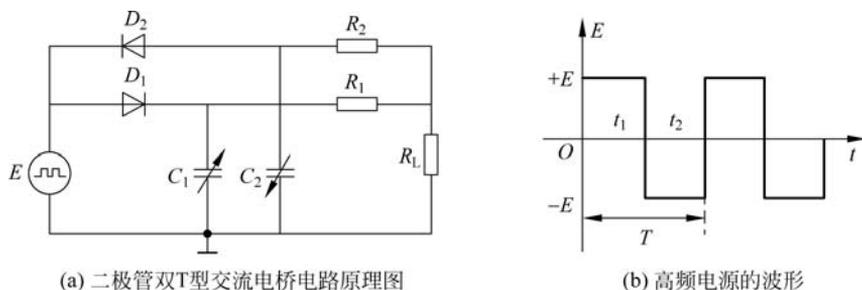


图 3.13 变压器式交流电桥的工作原理

两个特性相同的理想二极管,  $C_1$ 、 $C_2$  为差动电容式传感器,  $R_1$ 、 $R_2$  为两个固定电阻, 阻值为  $R$ ,  $R_L$  为负载电阻。



(a) 二极管双T型交流电桥原理图

(b) 高频电源的波形

图 3.14 二极管双 T 型交流电桥

当传感器没有输入时,  $C_1 = C_2$ 。

在电源的正半周,  $D_1$  导通,  $D_2$  截止, 即对电容器  $C_1$  充电。在随后的电源负半周,  $C_1$  通过电阻  $R_1$ 、负载电阻  $R_L$  放电, 流过负载的电流为  $I_1$ , 等效电路如图 3.15(a) 所示。

在电源的负半周,  $D_2$  导通,  $D_1$  截止, 即对电容器  $C_2$  充电, 在随后的电源正半周,  $C_2$  通过电阻  $R_2$ 、负载电阻  $R_L$  放电, 流过负载的电流为  $I_2$ , 等效电路如图 3.15(b) 所示。

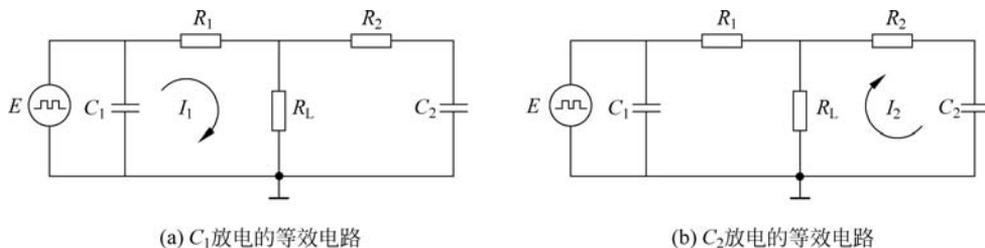
(a)  $C_1$  放电的等效电路(b)  $C_2$  放电的等效电路

图 3.15 传感器没有输入时的二极管双 T 型交流电桥

根据交流电路的条件, 有  $I_1 = I_2$ , 且方向相反, 因此, 在一个周期内流过负载电阻  $R_L$  的平均电流为 0。

当传感器有输入时,  $C_1 \neq C_2$ , 负载  $R_L$  上有信号输出, 其输出在一个周期内的平均值为

$$U_0 \approx \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L E f (C_1 - C_2) \quad (3.57)$$

从式(3.57)可见, 在负载和电源确定的情况下, 输出电压是两个电容  $C_1$ 、 $C_2$  的差值  $C_1 - C_2$  的线性函数。

从上面的分析可以看出, 二极管双 T 型交流电桥的电路简单, 无须相敏检波和整流电路便可得到较高的直流输出电压。输出信号的上升时间取决于负载电阻。对于  $1\text{k}\Omega$  的负载电阻, 上升时间为  $20\mu\text{s}$  左右, 因此, 该测量电路可用于测量高速的机械运动。

### 3.3 电容式传感器应用举例

电容式传感器具有结构简单、分辨率高、动态响应特性好、耐高温、耐辐射等优点, 广泛应用于位移、振动、速度、加速度、压力、差压、金属板材厚度、液位等测量中。

### 3.3.1 电容式位移传感器

电容式位移传感器的一个应用实例如图 3.16 所示,被测物体的表面作为电容的一个极板,传感器的平面测端作为电容的另一个极板。

在测量时,把传感器夹持在固定的台架上。当被测物因振动而产生位移时,将使电容器的两个极板间距发生变化,从而引起电容器电容量的改变,最终达到测量的目的。它能够测量  $0.05\mu\text{m}$  的位移,可以用于测量物体的微小振动。

### 3.3.2 电容式加速度传感器

图 3.17 为差动电容式加速度传感器的结构示意图。

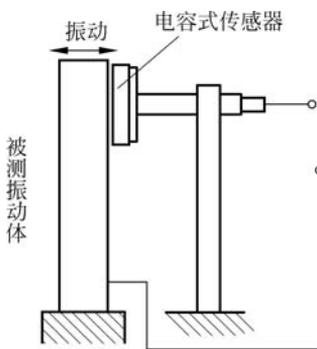


图 3.16 电容式位移传感器的一个应用实例

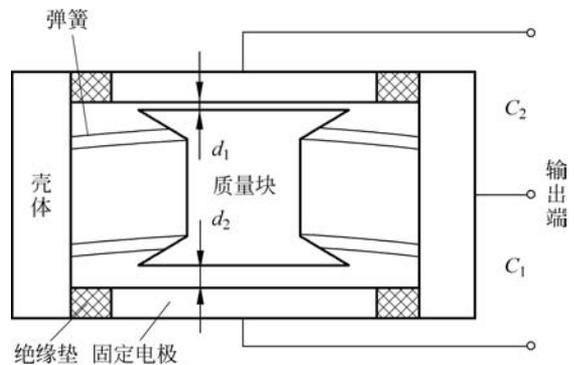


图 3.17 差动电容式加速度传感器的结构示意图

它的上下两面是定极板,中间质量块的两个端面是动极板。传感器被粘贴在被测物体上。当被测物体在垂直方向保持静止或匀速直线运动时,定极板与动极板之间的距离保持不变,为  $d_0$ ,电容为  $C_0$ 。

当被测物体在垂直方向作直线加速运动时,传感器随着被测物体加速运动,而质量块因惯性保持相对静止,这样就导致动极板与定极板之间的距离发生变化,其中一个距离增加,另一个距离减小。根据 3.1.3 节关于差动结构电容式传感器的分析,有

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0} \quad (3.58)$$

根据牛顿第二运动定律,位移  $s$  与加速度  $a$  之间的关系为

$$s = \Delta d = \frac{1}{2} at^2 \quad (3.59)$$

把式(3.59)代入式(3.58),得

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{at^2}{d_0} \quad (3.60)$$

从式(3.59)可见,对于固定的观测时间  $t$ ,被测物体的加速度  $a$  与电容的增量  $\Delta C$  成正比。换句话说,只要测出了电容的增量  $\Delta C$ ,就可以计算出物体的加速度  $a$ 。

进一步,对于固定的观测时间  $t$ ,如果物体的初速度为  $u_0$ ,那么,根据式

$$u = u_0 + at \quad (3.61)$$

可以计算出物体的速度  $u$ 。

差动电容式加速度传感器具有结构简单、机械性能好、频率响应快、量程范围大等优点,因此得到了广泛的应用。

### 3.3.3 电容式差压传感器

图 3.18 为电容式差压传感器的结构示意图。在两个凹形玻璃上的电镀层作为定极板,中间的膜片作为动极板,构成差动结构。定极板与动极板的初始极距为  $d$ 。该传感器用于测量两个气门的差压。在膜片的左右两室中充满硅油,用于传递压力。当左右两室分别承受压力  $p_L$ 、 $p_R$  时,由于硅油具有不可压缩性和流动性,它能够传递压力到膜片上。

当左右两室的压力  $p_L$ 、 $p_R$  作用于膜片时,使膜片向左或向右鼓出,从而使两个电容  $C_L$ 、 $C_R$  一个增加,另一个减小,把电容的变化经测量电路转换为电压或电流输出,就能够得到气压  $p_L$ 、 $p_R$  的差压。

当左右两室的压力  $p_L$ 、 $p_R$  相等时,即差压  $\Delta p = p_L - p_R = 0$ ,膜片处于中间位置, $C_L = C_R$ ,输出的电压或电流为 0。

当左右两室的压力  $p_L$ 、 $p_R$  不相等时,如图 3.18 所示, $p_L > p_R$ , $\Delta p = p_L - p_R > 0$ ,膜片向右鼓出,动极板由初始位置向右偏移  $\delta$ ,结果使  $C_L$  减小, $C_R$  增大,即  $C_L < C_R$ ,它们的电容分别为

$$C_L = \frac{\epsilon A}{d + \delta}, \quad C_R = \frac{\epsilon A}{d - \delta} \quad (3.62)$$

由此可得

$$\frac{\delta}{d} = \frac{C_R - C_L}{C_R + C_L} \quad (3.63)$$

由材料力学知识可知

$$\frac{\delta}{d} = K \Delta p \quad (3.64)$$

其中, $K$  是与传感器结构有关的常数。

结合式(3.63)和式(3.64)可得

$$\frac{C_R - C_L}{C_R + C_L} = K \Delta P \quad (3.65)$$

根据式(3.63),可以实现差压-电容的转换。

电容式差压传感器具有如下优点:结构简单,灵敏度高,响应速度快(100ms),能测量

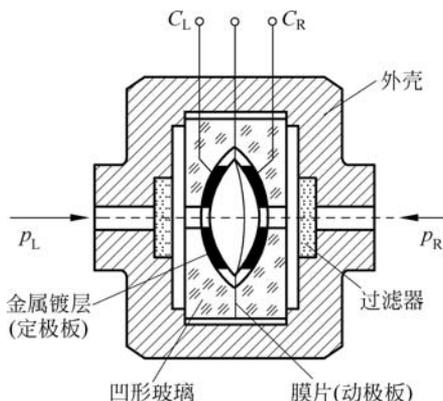


图 3.18 电容式差压传感器的结构示意图

微小的差压(0~0.75Pa)。

### 3.3.4 电容式材料厚度传感器

电容式材料厚度传感器用于检测金属板材在轧制过程中的厚度,其工作原理如图 3.19 所示。在被测金属板材的上下方放置两块面积相等的极板,把板材也作为一个极板,这样就构成了两个电容器  $C_1$ 、 $C_2$ 。用导线把上下两个极板连接在一起作为电容的一极,把板材作为电容的另一极,此时,相当于两个电容  $C_1$ 、 $C_2$  的并联,总电容为  $C = C_1 + C_2$ 。

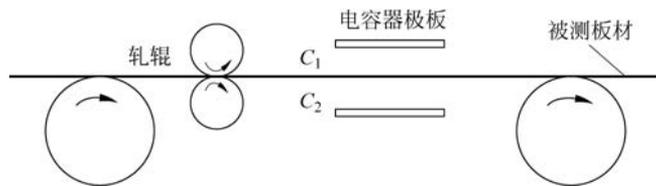


图 3.19 电容式材料厚度传感器的工作原理

在轧制金属板材的过程中,板材不断前行。如果板材厚度有变化,那么,上下两个电容器的极板间距离将发生改变,从而引起电容量的变化。将电容器接入测量电桥时,就会产生不平衡输出,从而实现板材厚度的检测。

电容式材料厚度传感器结构简单,布置容易,能够实时、连续地检测出金属板材厚度的变化,方便监控,具有突出的优点。

## 习题 3

### 1. 填空。

(1) 平板电容式传感器可分为三种:改变极板覆盖面积的\_\_\_\_\_、改变极板间距离的\_\_\_\_\_和改变介质介电常数的\_\_\_\_\_。

(2) 圆筒电容式传感器可分为两种:改变极板间覆盖高度的\_\_\_\_\_和改变介质介电常数的\_\_\_\_\_。

(3) 对于变极距型电容式传感器来说,当  $d_0$  较小时,传感器的灵敏度高。但是,  $d_0$  过小时,电容很大,容易引起\_\_\_\_\_。因此,通常在极板之间加入云母等\_\_\_\_\_的材料。

(4) 对于变极距型电容式传感器来说,要提高灵敏度,应该\_\_\_\_\_极板间距  $d_0$ ,但是,这将使非线性误差\_\_\_\_\_。即灵敏度与非线性误差对极板间距的要求是矛盾的。为了解决这个问题,通常采用\_\_\_\_\_结构的电容式传感器。

(5) 把变极距型电容式传感器做成差动结构,对于相同的  $d_0$  和  $\Delta d$ ,电容的相对增量和传感器的\_\_\_\_\_提高了一倍,传感器的\_\_\_\_\_也得到了改善。

(6) 单个电容的测量电路,可以使用\_\_\_\_\_和调频电路;差动电容的测量电路,可以使用\_\_\_\_\_、二极管双 T 型交流电桥和\_\_\_\_\_。

## 2. 名词解释。

- (1) 电容式传感器
- (2) 圆筒电容式线位移传感器
- (3) 平板电容式角位移传感器
- (4) 圆筒结构变介质型电容式传感器

3. 根据电容式传感器工作时参数变化的不同,可以将其分为哪几种类型?各有什么特点?

4. 如图 3.3 所示,一个平板电容式传感器以空气为介质。 $a=10\text{mm}$ , $b=16\text{mm}$ ,两极板之间的距离  $d_0=1\text{mm}$ 。在测量时,动极板在原始位置向左平移了  $2\text{mm}$ 。已知真空的介电常数  $\epsilon_0=8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$ ,空气的相对介电常数  $\epsilon_r=1$ 。求该传感器的电容增量、电容相对增量和位移灵敏度  $K$ 。

5. 讨论变极距型电容式传感器的非线性误差,说明改善变极距型电容式传感器线性度的方法。

6. 如图 3.11 所示,变极距型平板电容式传感器的测量电路为运算放大器,运算放大器为一个理想运算放大器。传感器的初始电容  $C_{x0}=20\text{pF}$ , $C_0=200\text{pF}$ ,两个极板的初始极距为  $d_0=1.5\text{mm}$ ,输入电压  $U_i=5\sin\omega t(\text{V})$ 。当动极板产生位移  $\Delta d=0.15\text{mm}$  使  $d_0$  减小时,求测量电路的输出电压  $U_o$ 。

7. 某电容测微仪,其传感器的圆形极板半径  $r=4\text{mm}$ ,工作初始间隙  $d=0.3\text{mm}$ 。

(1) 在测量时,若传感器与工件的间隙增量  $\Delta d=2\mu\text{m}$ ,求电容的增量。

(2) 假设测量电路的灵敏度  $S_1=100\text{mV/pF}$ ,测量仪表的灵敏度  $S_2=5$  格/ $\text{mV}$ ,那么,在  $\Delta d=2\mu\text{m}$  时,仪表的示值变化多少格?

8. 对照图 3.17,说明差动电容式加速度传感器的工作原理。

9. 对照图 3.18,说明电容式差压传感器的工作原理。

10. 有一个直径为  $2\text{m}$ 、高  $5\text{m}$  的铁桶,往桶内连续注水,当注水量达到桶容量的  $80\%$  时就停止注水,试分析用电容式传感器达到该操作要求的方法。