

## 本章要点：

- ◇ 电容式传感器的工作原理及输出特性,灵敏度与非线性特性;
- ◇ 电容式传感器的分类:变极距型电容传感器、变面积型电容传感器和变介质型电容传感器;
- ◇ 电容式传感器的测量电路:二极管双 T 型电路工作原理及特点,差动脉冲调宽电路原理及特点;
- ◇ 电容式传感器的应用。

电容式传感器(capacitive sensor)具有结构简单、动态响应快、温度稳定性好、易于实现非接触测量等优点,可以测量位移、压力、厚度、加速度、转速、液位和成分含量等参量。随着集成技术的发展,电容式传感器易受干扰和存在分布电容影响等缺点已不断被克服。电容式传感器在工业自动化等很多领域应用广泛。

## 5.1 电容式传感器的工作原理及其特性

电容式传感器以各种类型的电容器作为传感元件,将被测物理量的变化转换为电容量的变化。传感器本身或者连同被测物体构成了一个可变电容器。以平板电容器为例,其电容值  $C$  为

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (5-1)$$

式中,介电常数  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ;  $\epsilon_r$  是极板间介质的相对介电常数;真空介电常数  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ;  $A$  为两极板相互覆盖的面积;  $d$  是两极板间距。

当极板间距、极板相对面积或相对介电常数中的任一参数发生变化,而其他参数不变时,电容式传感器的电容值都将发生变化。电容式传感器分为变极距型电容传感器、变面积型电容传感器和变介质型电容传感器三种类型。电容式传感器的常见结构示意图如图 5-1 所示。变面积型电容传感器如图 5-1(a)~图 5-1(e)所示。当被测量改变极板相对面积时,电容式传感器的电容值发生变化。变面积型电容传感器可以测量较大的线位移或角位移等。变介质型电容传感器如图 5-1(f)和图 5-1(g)所示。当被测量改变极板间的相对介电常数时,电容式传感器的电容值发生变化。变介质型电容传感器可以测量液位、湿度和密度

等。变极距型电容传感器如图 5-1(h)和图 5-1(i)所示。当被测量使极板间距发生变化时,电容式传感器的电容值变化。变极距型电容传感器适合测量微小的线位移。

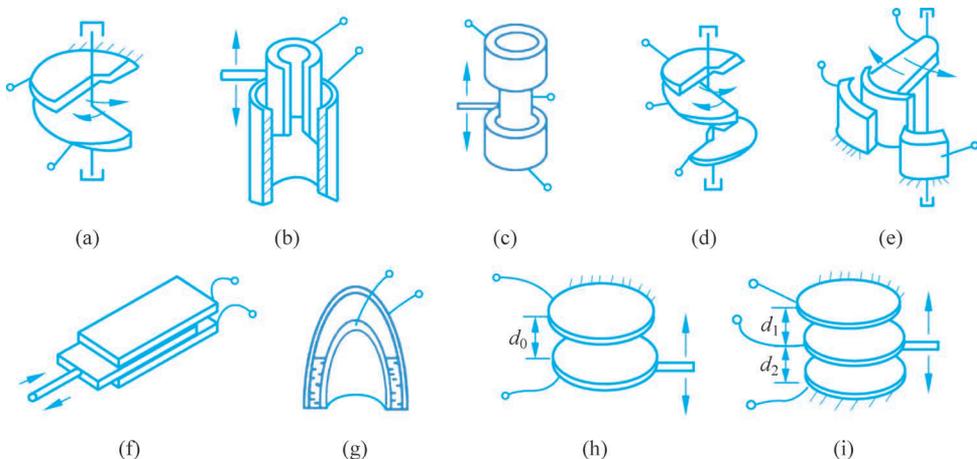


图 5-1 电容式传感器的常见结构示意图

### 5.1.1 变面积型电容传感器的特性

变面积型电容传感器通过改变电容器两个极板相互覆盖面积,使电容值发生变化。变面积型电容传感器分为测量线位移和角位移两种类型。

#### 1. 线位移

测量线位移的变面积型电容传感器的结构形式分为平面线位移型和圆筒线位移型两种。平面线位移型电容传感器示意图如图 5-2 所示,圆筒线位移型电容传感器示意图如图 5-3 所示。

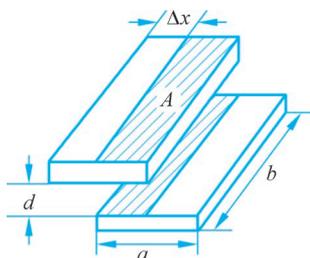


图 5-2 平面线位移型电容传感器示意图

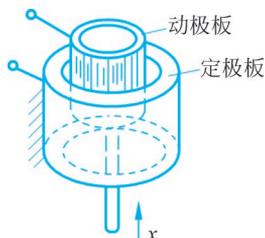


图 5-3 圆筒线位移型电容传感器示意图

(1) 平面线位移型。平面线位移型电容传感器的一个极板固定,而另一个极板可动,两个极板的间距保持不变。当可动极板移动时,两个极板相互覆盖的面积发生变化,导致电容值变化。

下面分析平面线位移型电容传感器的灵敏度和非线性特性。初始时刻,传感器的电容值  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{\epsilon ab}{d} \quad (5-2)$$

式中, $\epsilon$  为极板间介质的介电常数; $a$  和  $b$  分别为极板的长度和宽度; $d$  为极板间距。

当可动极板发生位移  $\Delta x$  时,两个极板相互覆盖的面积发生变化。若极板发生位移后的电容值为  $C$ ,则电容值的改变量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon b(a - \Delta x)}{d} - \frac{\epsilon ab}{d} = -\frac{\epsilon b \Delta x}{d} \quad (5-3)$$

灵敏度为输出的改变量与输入的改变量  $\Delta x$  的比值。所以,灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta x} = -\frac{\epsilon b}{d} \quad (5-4)$$

若考虑电容的相对改变量  $\Delta C/C$ ,得到灵敏度为

$$K = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\Delta x} = -\frac{1}{a} \quad (5-5)$$

可以看出,平面线位移型电容传感器的电容值的改变量与位移的变化  $\Delta x$  呈线性关系。灵敏度  $K$  为常数,增大极板宽度  $b$  及减小极板间距  $d$  均可提高灵敏度。

(2) 圆筒线位移型。如图 5-3 所示,电容传感器由两个长度为  $l$  的圆筒状极板构成,其外侧为固定极板,内侧为动极板。初始时刻,两个极板重叠,传感器的电容值  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(R/r)} \quad (5-6)$$

式中, $R$  是外极板的半径; $r$  是内极板的半径。

当两极板发生相对位移  $\Delta x$  时,电容值  $C$  变为

$$C = \frac{2\pi\epsilon(l - \Delta x)}{\ln(R/r)} = \frac{2\pi\epsilon l \left(1 - \frac{\Delta x}{l}\right)}{\ln(R/r)} \quad (5-7)$$

上式整理可得

$$C = C_0 \left(1 - \frac{\Delta x}{l}\right) \quad (5-8)$$

因此,可以得到电容值的改变量  $\Delta C$ 。所以,灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta x} = -\frac{2\pi\epsilon}{\ln(R/r)} \quad \text{或} \quad K = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\Delta x} = -\frac{1}{l} \quad (5-9)$$

可以看出,圆筒线位移型电容传感器的电容改变量与位移的变化呈线性关系。

## 2. 角位移

角位移型电容传感器的示意图如图 5-4 所示。传感器由定极板和动极板组成。当动极板转动角度  $\theta$  时,两极板相互覆盖的面积发生变化,导致电容值发生变化。初始时刻  $\theta=0$  时,电容值  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{2d} \quad (5-10)$$

当转动角度为  $\theta$  时,由扇形面积  $s = \frac{\theta r^2}{2}$ ,此时电容值  $C$  为

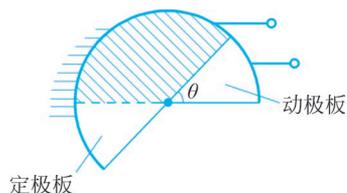


图 5-4 角位移型电容传感器的示意图

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 (\pi r^2 - \theta r^2)}{2d} \quad (5-11)$$

电容值改变量  $\Delta C$  为

$$\Delta C = -\frac{\theta}{\pi} C_0$$

角位移型电容传感器的灵敏度为电容值的改变量  $\Delta C$  与角度变化之比。所以,灵敏度为

$$K = -\frac{\Delta C}{\theta} = -\frac{C_0}{\pi} \quad (5-12)$$

可以看出,电容值的改变量与角位移  $\theta$  呈线性关系,灵敏度  $K$  为常数。

### 5.1.2 变介质型电容传感器的特性

变介质型电容传感器有三种结构形式,如图 5-5 所示。被测介质充满电容器极板的情况如图 5-5(a)所示,被测介质部分进入电容器极板的情况如图 5-5(b)所示,圆筒结构变介质型电容器如图 5-5(c)所示。

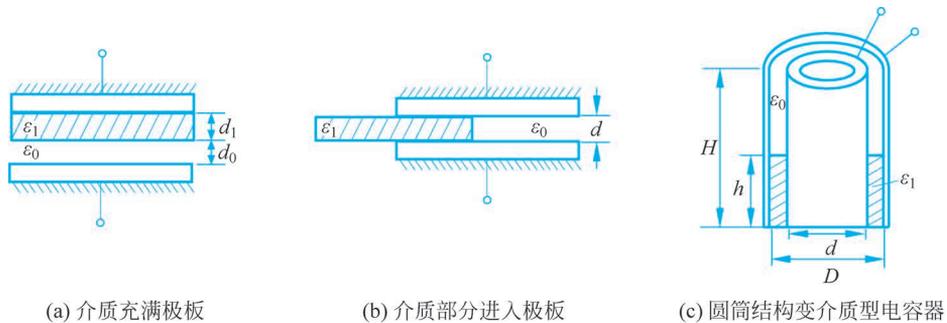


图 5-5 变介质型电容传感器示意图

对于图 5-5(a)的情况,传感器的电容值为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A}{\epsilon_1 d_0 + d_1} \quad (5-13)$$

式中,介质厚度是  $d_1$ ; 空气厚度是  $d_0$ ; 介质介电常数为  $\epsilon_1$ 。初始时刻,传感器的两极板间没有被测介质时,其电容值  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d_0 + d_1} \quad (5-14)$$

当被测介质置于两极板之间时,由式(5-13)和式(5-14)得到电容值的改变量  $\Delta C$  为

$$\Delta C = C_0 \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 \frac{d_0}{d_1} + 1} \quad (5-15)$$

可以看出,电容值的改变量  $\Delta C$  与介电常数  $\epsilon_1$  是非线性关系。

对于图 5-5(b)的情况,相当于两个电容器并联。其中一个电容器介质的介电常数是  $\epsilon_1$ ,而另一个电容器的介质是空气。因此,可得传感器的电容值为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A_1 + \epsilon_0 A_2}{d} \quad (5-16)$$

初始时刻,当没有介质进入两个极板之间时,电容值  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A_1 + \epsilon_0 A_2}{d} \quad (5-17)$$

测量时,被测介质进入两个极板之间,则电容值  $C$  为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A_1 + \epsilon_0 A_2}{d}$$

可以得到电容改变量  $\Delta C$  与被测介质的介电常数  $\epsilon_1$  之间的关系为

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 A_1 (\epsilon_1 - 1)}{d} \quad (5-18)$$

由于式(5-18)中  $A_1$  和  $d$  都是常数,所以电容改变量与被测介质的介电常数呈线性关系。

圆筒结构的变介质型电容传感器可以测量被测介质的液位高度,如图 5-5(c)所示。初始时刻,极板间没有液体时,电容值  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5-19)$$

测量时,被测液体高度为  $h$  时,总电容值  $C$  为空气介质部分的电容值  $C_1$  和液体介质部分的电容值  $C_2$  之和,如式(5-19)所示。

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0 (H - h)}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 h (\epsilon_1 - 1)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi h (\epsilon_1 - 1)}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5-20)$$

式中,液体的介电常数为  $\epsilon_1$ ; 圆筒上部分空气介质的高度为  $H - h$ ; 空气的介电常数为  $\epsilon_0$ ;  $D$  是外圆筒的直径;  $d$  是内圆筒的直径。

所以,电容变化量  $\Delta C$  为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{2\pi h (\epsilon_1 - 1)}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5-21)$$

在测量液位时,液体的介电常数  $\epsilon_1$  一般不变,而  $D$  和  $d$  都是常数。可以看出,电容值的改变量和液体的高度呈线性关系。

### 5.1.3 变极距型电容传感器的特性

下面分析变极距型电容传感器的灵敏度和非线性特性,以及采用差动结构时其灵敏度和非线性特性的变化。

#### 1. 灵敏度与非线性特性

变极距型电容传感器示意图如图 5-6 所示,电容器由一个定极板和一个动极板构成。当初始极板间距为  $d_0$  时,初始电容值  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0} \quad (5-22)$$

式中,  $A$  是极板相对覆盖面积;  $d_0$  是极板间初始距离;  $\epsilon_0$  是真空介电常数,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ;  $\epsilon_r$  是极板间介质的相对介电常数。对于变极距型电容传感器,  $\epsilon_r$  和  $A$  为常数。

当极板间距逐渐增大时, 电容值逐渐减小, 两者的关系曲线如图 5-7 所示。



图 5-6 变极距型电容传感器示意图

图 5-7 电容值与极板间距的关系

如果电容器的极板间距由初始值  $d_0$  减小了  $\Delta d$ , 则电容值  $C_0$  将增大  $\Delta C$ 。可以得到  $\Delta C$  为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d} - \frac{\epsilon A}{d_0} \quad (5-23)$$

经过整理可以写成

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \quad (5-24)$$

则电容的相对变化量  $\Delta C/C_0$  为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0}\right)^{-1} \quad (5-25)$$

由于极板间距的变化量很小, 有  $\Delta d/d_0 \ll 1$ 。将上式展开为泰勒级数形式, 得到

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right) + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \dots\right] \quad (5-26)$$

忽略上式中的高阶小项, 可以得到电容的改变量和极板间距的改变量之间的关系为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (5-27)$$

可见, 当极板间距的改变量较小时,  $\Delta C$  和  $\Delta d$  呈近似线性关系。间距  $d_0$  越小, 灵敏度越大。但是, 当极板间距过小时, 电容器容易被击穿。为避免电容器被击穿, 电容器的两个极板之间可以加入高介电常数的材料, 例如云母片、纸或薄膜等。此时, 电容值  $C$  变为

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d_0 + \frac{d_g}{\epsilon_g}} \quad (5-28)$$

式中,  $d_g$  是极板间加入介质的厚度;  $\epsilon_g$  是所加介质的介电常数。

此时, 随着  $d_g/d_0$  和  $\epsilon_g$  的增大, 传感器的灵敏度将增大。  $d_g/d_0$  较大时, 加入的介质几乎完全充满电容器的两个极板。从式(5-28)可以看出, 这种变极距型电容传感器的输出特性是非线性的。常用介质材料的相对介电常数如表 5-1 所示。

表 5-1 常用介质材料的相对介电常数

材 料	相对介电常数	材 料	相对介电常数
真空	1	硬橡胶	4.3
其他气体	1~1.2	软橡胶	2.5
水	80	石英	4.5
普通纸	2.3	玻璃	5.3~7.5
硬纸	4.5	大理石	8
油纸	4	陶瓷	5.5~7.0
石蜡	2.2	云母	6~8.5
盐	6	三氧化二铝	8.5
聚乙烯	2.3	钛酸钡	1000~10 000
聚丙烯	2.3	木材	2~7
甲醇	37	电木	3.6
乙醇	20~25	纤维素	3.9
乙二醇	35~40	米	3~5
丙三醇	47	硅油	2.7
环氧树脂	3.3	松节油	2.2
聚氯乙烯	4.0	变压器油	2.2

根据电容的改变量与极板间距的改变量之间的关系式(5-26),可以得到变极距型电容传感器的灵敏度和非线性误差。忽略式中的高阶项,得到灵敏度近似为

$$K = \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{1}{d_0} \quad (5-29)$$

若电容的改变量采用非近似值式(5-24),则实际灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{1}{d_0 - \Delta d} \quad (5-30)$$

忽略式(5-26)中的高阶小项,由第一项非线性项得到非线性误差为

$$\delta = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right| \times 100\% \quad (5-31)$$

由上述分析可得,要提高灵敏度  $K$ ,需减小传感器的极板间距。变极距型电容传感器的非线性误差将随极板位移的增大而增大。因此,变极距型电容传感器只适合测量微小的位移。

## 2. 差动结构

采用差动结构的差动变极距型电容传感器示意图如图 5-8 所示。传感器的上下两个极板是固定极板,而中间极板为可动极板。当中间极板向上移动时,上面电容器的电容值  $C_1$  将增大,而下面电容器的电容值  $C_2$  将减小,所以两个电容器构成差动结构。当可动极板在中间位置时,上下两个电容器的极板间距相等均为  $d_0$ 。此时,  $d_1 = d_2 = d_0$ ,  $C_1 = C_2 = C_0$ 。当可动极板向上移动  $\Delta d$  时,两个电容器的极板间距分别变为  $d_1 = d_0 - \Delta d$  和  $d_2 = d_0 + \Delta d$ 。总电容值改变量

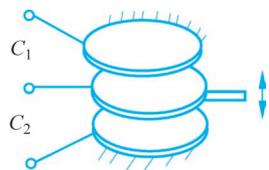


图 5-8 差动变极距型电容传感器示意图

$\Delta C$  为

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 2C_0 \left[ \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right) + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^5 + \dots \right] \quad (5-32)$$

由于  $\Delta d/d_0 \ll 1$ , 将上式展开为泰勒级数形式, 得到

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (5-33)$$

所以, 灵敏度  $K$  为

$$K = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\frac{\Delta d}{d_0}} = \frac{2}{d_0} \quad (5-34)$$

非线性误差为

$$\delta = \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \times 100\% \quad (5-35)$$

由上述分析可得, 和单个传感器相比, 差动结构的变极距型电容传感器的灵敏度提高了一倍, 线性度也得到改善。

## 5.2 电容式传感器的测量电路

电容式传感器通过将被测量的变化转换为传感器电容值的变化实现测量。受传感器的结构和尺寸的限制, 传感器的电容值较小, 导致电容值的改变量非常小。因此, 电容式传感器易受电磁干扰及电缆分布电容的影响, 需要采用相应测量电路对电容改变量进行放大等处理。电容式传感器常用的测量电路有调频电路、运算放大器电路、变压器电桥电路、二极管双 T 型交流电桥电路和差动脉冲调宽电路等。

### 5.2.1 调频电路

为了测量电容值的微小改变量, 可以采用谐振式调频电路, 如图 5-9 所示。

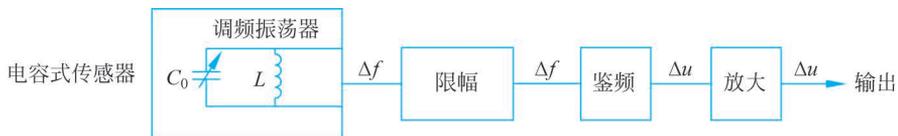


图 5-9 电容传感器调频电路

初始时刻, 电路的谐振频率  $f_0$  为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1 + C_2 + C_0)}} \quad (5-36)$$

式中,  $C_0$  是传感器初始电容值;  $L$  是振荡回路的电感;  $C_1$  是振荡回路的固有电容;  $C_2$  是传感器引线分布电容。

测量时, 传感器的电容值由  $C_0$  变为  $C_0 + \Delta C$ , 导致电路的谐振频率发生变化, 如式(5-37)所示。鉴频器可将频率变化转换为电压变化, 然后电压经放大后输出。最终通过测量输出电压的变化, 可以得到电容值的改变量, 从而实现被测量的测量。

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1 + C_2 + C_0 + \Delta C)}} = f_0 \mp \Delta f \quad (5-37)$$

调频电路的特点是灵敏度高,可以测量  $0.01\mu\text{m}$  甚至更小的位移变化量。抗干扰能力强,可以得到高电平的直流信号,缺点是受温度影响较大。

### 5.2.2 运算放大器

电容传感器运算放大器电路如图 5-10 所示。图中  $C_x$  是电容传感器;  $C_0$  是固定电容值的电容器,其连接的放大器的放大倍数为  $K$ 。运算放大器电路的输出电压  $u_0$  和输入电压  $u_i$  之间的关系为

$$u_0 = -\frac{C_0}{C_x} u_i \quad (5-38)$$

如果  $C_x$  为变极距型电容传感器,将电容值代入上式,可得

$$u_0 = -\frac{u_i C_0}{\epsilon A} d \quad (5-39)$$

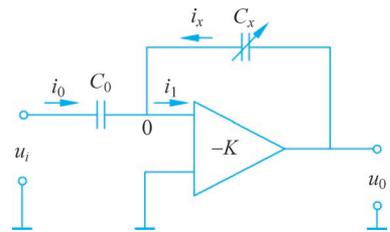


图 5-10 电容传感器运算放大器电路

式中,  $A$  是极板面积;  $d$  是极板间距。

可以看出,当变极距型电容传感器采用运算放大器电路测量时,传感器的输出电压与极板间距的位移之间为线性关系。由于运算放大器的放大倍数和输入阻抗足够大,该电路的非线性误差很小。

### 5.2.3 变压器式交流电桥

变压器式交流电桥电路如图 5-11 所示。变压器式交流电桥电路的输出电压  $\dot{U}_0$  如式(5-40)所示。

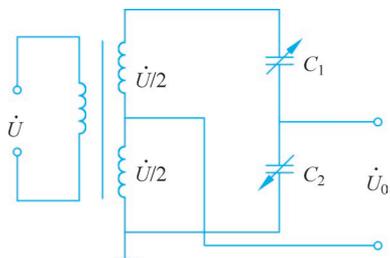


图 5-11 变压器式交流电桥电路

$$\dot{U}_0 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{U} - \frac{\dot{U}}{2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{\dot{U}}{2} \quad (5-40)$$

上式整理可得,输出电压为

$$\dot{U}_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{\dot{U}}{2} \quad (5-41)$$

如果传感器  $C_1$  和  $C_2$  是差动变极距型电容传感器,可得输出电压和极板位移之间的关系为

$$\dot{U}_0 = \pm \frac{\Delta d}{d_0} \cdot \frac{\dot{U}_i}{2} \quad (5-42)$$

可见,差动工作时传感器的输出电压与位移呈线性关系。变压器式交流电桥电路具有使用元件少和桥路内阻小的特点。

### 5.2.4 二极管双 T 型交流电桥

二极管双 T 型电桥电路由电源、两个二极管、两个固定电阻、两个电容式传感器和负载

电阻连接而成,构成类似两个字母“T”的形状,故称为双 T 型交流电桥电路。二极管双 T 型电桥电路如图 5-12 所示,图中电源  $e$  为对称方波高频电源,其电压为  $E$ ,频率为  $f$ ;  $C_1$  和  $C_2$  是差动电容式传感器;  $R_1$  和  $R_2$  是电阻值均为  $R$  的固定阻值电阻。

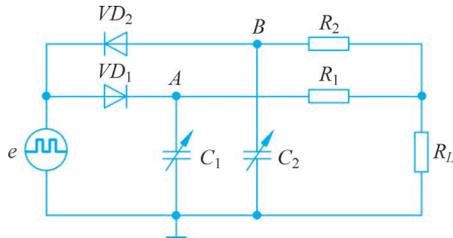


图 5-12 二极管双 T 型电桥电路

(1) 电路的测量原理。测量时,两个传感器的电容值将发生变化,导致流经负载电阻  $R_L$  的电流发生变化,从而使负载电阻两端的电压变化。电路的输出电压如式(5-43)所示。

$$U_0 = I_L R_L \approx \frac{R(R+2R_L)}{(R+R_L)^2} R_L E f (C_1 - C_2) \quad (5-43)$$

在方波的正半周和负半周时,流经负载  $R_L$  的电流分别是  $I_L$  和  $I'_L$ 。在一个时间周期  $T$  内对电流求积分,得到平均电流为

$$\bar{I}_L = \frac{1}{T} \int_0^T (I_L + I'_L) dt \quad (5-44)$$

经过电路分析,可得流经负载  $R_L$  的电流平均值近似为

$$\bar{I}_L \approx \frac{R(R+2R_L)}{(R+R_L)^2} E f (C_1 - C_2) \quad (5-45)$$

从式(5-45)可知,当初始时刻  $C_1 = C_2$  时,平均电流为零,因此负载电压  $U_0 = I_L R_L = 0$ 。当测量时  $C_1 \neq C_2$ ,导致平均电流变化。而输出电压与  $C_1 - C_2$  成正比,因此,二极管双 T 型电桥电路实现了对电容变化量的测量。

(2) 电路分析。下面通过电源正半周和负半周时的等效电路,分析流经负载  $R_L$  的电流  $I_L$  和负载电压  $U_L$ 。当电源为正半周时,二极管双 T 型电桥的等效电路如图 5-13(a) 所示。此时,  $VD_1$  导通,  $VD_2$  截止。电流经过  $VD_1$  对  $C_1$  进行充电。同时,电流经过  $VD_1$  以  $I_1$  流经  $R_1$  和负载电阻  $R_L$ 。此时,  $C_2$  处于放电状态,放电电流为  $I_2$ 。

正半周时,流经负载  $R_L$  的电流  $I_L$  为

$$I_L = I_1 - I_2 = \frac{E}{R+R_L} - \frac{E}{R+R_L} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5-46)$$

$$\tau_2 = \frac{R(R+2R_L)}{R+R_L} C_2 \quad (5-47)$$

当电源为负半周时,二极管双 T 型电桥的等效电路如图 5-13(b) 所示。此时,  $VD_2$  导通,  $VD_1$  截止。电流经过  $VD_2$  对  $C_2$  进行充电。同时,电流经过  $VD_2$  以  $I'_2$  流经  $R_L$  和  $R_2$ 。此时,  $C_1$  处于放电状态,放电电流为  $I'_1$ 。

负半周时,流经负载  $R_L$  的电流  $I'_L$  为

$$I'_L = I'_1 - I'_2 = \frac{E}{R+R_L} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{E}{R+R_L} \quad (5-48)$$

$$\tau_1 = \frac{R(R+2R_L)}{R+R_L}C_1 \quad (5-49)$$

所以,输出电流的平均值为

$$\bar{I}_L = \frac{1}{T} \int_0^T (I_L + I'_L) dt$$

式中,  $T$  是方波的时间周期。

经过整理可得,输出电流的平均值为

$$\bar{I}_L = \frac{R(R+2R_L)}{(R+R_L)^2} \frac{E}{T} (C_1 - C_2 - C_1 e^{-k_1} - C_1 e^{-k_2}) \quad (5-50)$$

$k_1$  和  $k_2$  是两个系数,分别为  $k_1 = \frac{(R+R_L)T}{2RC_1(R+2R_L)}$ ,  $k_2 = \frac{(R+R_L)T}{2RC_2(R+2R_L)}$ 。

由于式(5-50)中的指数项较小,可以忽略。最终,得到输出电压近似为

$$U_0 = \bar{I}_L R_L \approx \frac{R(R+2R_L)}{(R+R_L)^2} R_L E f (C_1 - C_2)$$

由于初始时刻  $C_1$  和  $C_2$  相等,输出电压为零。测量时,  $C_1$  和  $C_2$  不相等,从而产生相应输出电压。二极管双 T 型电桥电路的优点是结构较简单、灵敏度高和适合动态测量。其缺点是对电源要求较高,电路需要稳压稳频。二极管双 T 型电桥电路可以得到较大的直流输出电压。例如,当电源频率  $f=1.3\text{MHz}$ ,电源电压  $E=46\text{V}$  时,若电容变化为  $-7\sim+7\text{pF}$ ,则负载电阻值为  $1\text{M}\Omega$  时,可以得到  $-5\sim+5\text{V}$  的直流输出电压。

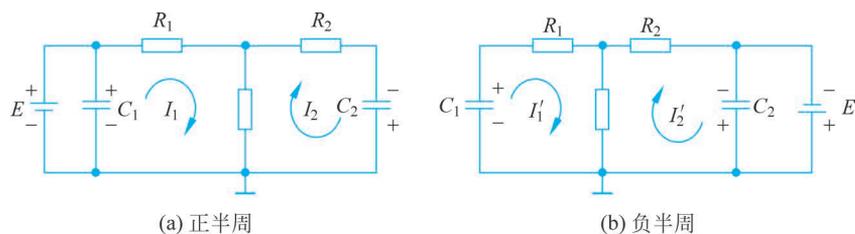


图 5-13 二极管双 T 型电桥等效电路

### 5.2.5 差动脉冲调宽电路

差动脉冲调宽电路如图 5-14 所示。图中  $U_r$  为参考电压;  $C_1$  和  $C_2$  是差动式电容传感器的两个电容传感元件;  $R_1$  和  $R_2$  是固定阻值的电阻;  $A_1$  和  $A_2$  是两个比较器,其输出端连接双稳态触发器。设接通电源时双稳态触发器的  $Q$  端为高电位,  $\bar{Q}$  端为低电位。则  $A$  点电压  $u_A$  通过  $R_1$  向  $C_1$  充电,直至  $M$  点电压等于  $U_r$ 。此时,比较器  $A_1$  产生一个脉冲,触发双稳态触发器翻转。因此,  $A$  点为低电位,  $B$  点为高电位。  $B$  点电压  $u_B$  经  $R_2$  向  $C_2$  充电,直至  $N$  点电压和  $U_r$  相等。此时,比较器  $A_2$  产生一个脉冲,触发双稳态触发器翻转。因此,  $A$  点又为高电位,  $B$  点为低电位,电容  $C_1$  开始充电,重复上述过程。

初始时刻,  $C_1$  和  $C_2$  大小相等,其充电时间  $T_1$  和  $T_2$  相等,  $T_1$  和  $T_2$  如式(5-51)和式(5-52)所示。所以,  $A$  点和  $B$  点保持高电位的时间相同,输出电压  $u_{AB}$  为等宽的矩形波,其直流输出电压  $U_0$  为零,如图 5-15(a)所示。

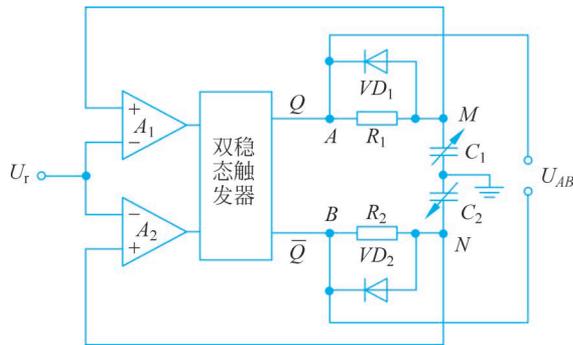


图 5-14 差动脉冲调宽电路

$$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_A}{U_A - U_r} \quad (5-51)$$

$$T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_B}{U_B - U_r} \quad (5-52)$$

测量时,  $C_1$  和  $C_2$  不相等, 其充电时间  $T_1$  和  $T_2$  不相等。因此, 输出电压  $u_{AB}$  为不等宽的矩形波。 $u_{AB}$  经过低通滤波后, 可以得到直流输出电压  $U_0$ , 如图 5-15 (b) 所示。当  $R_1 = R_2 = R$  时,  $U_0$  如式 (5-53) 所示。

$$U_0 = (u_{AB})_{DC} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_m \quad (5-53)$$

式中,  $U_m$  是  $A$  和  $B$  两点电位  $u_A$  和  $u_B$  的幅值, 并且  $u_A = u_B$ 。

当  $A$  点为低电位,  $B$  点为高电位时,  $M$  点电压通过二极管  $D_1$  迅速放电为零。同样, 当  $B$  点为低电位时,  $N$  点电位通过二极管  $D_2$  放电。即电容器  $C_1$  开始充电时,  $C_2$  放电。 $C_2$  开始充电时,  $C_1$  放电, 如图 5-15 所示。 $M$  点电压表示为

$$u_M = u_A (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (5-54)$$

式中,  $t$  为时间;  $\tau_1$  为电容器  $C_1$  的时间常数。

如果  $C_1$  和  $C_2$  是差动变极距型电容传感器中的两个电容值, 初始时刻  $C_1 = C_2 = C_0$ , 而初始极板间距  $d_1 = d_2 = d_0$ 。所以, 输出电压  $U_0 = 0$ 。测量时,  $C_1 \neq C_2$ , 若  $d_1 = d_0 - \Delta d$ ,  $d_2 = d_0 + \Delta d$ , 则输出电压为

$$U_0 = \pm \frac{\Delta d}{d} U_m \quad (5-55)$$

可见, 输出电压和极板间距的改变量  $\Delta d$  成正比。若  $C_1$  和  $C_2$  是差动变面积型电容传感器中的两个电容值, 则输出电压和面积改变量成正比, 有

$$U_0 = \pm \frac{\Delta A}{A} U_m \quad (5-56)$$

所以, 差动脉冲调宽电路适用于差动式电容传感器, 其输出电压为线性。差动脉冲调宽电路采用直流电源, 经低通滤波器后可得到较大的直流电压, 并且电压频率的变化对输出没有影响。

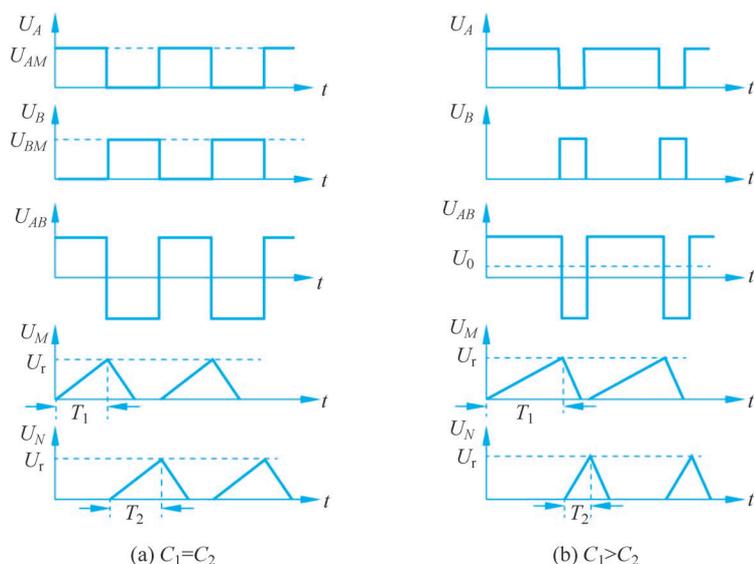


图 5-15 差动脉冲调宽电路的输出电压波形

### 5.3 电容式传感器的应用

电容式传感器常用于测量直线位移、角位移、压力、振动振幅和加速度等,尤其适合测量高频参量。变极距型电容传感器适用于微小位移的测量,其量程为  $0.01\mu\text{m}$  至数十毫米,精度可达  $0.002\mu\text{m}$ ,分辨率可达  $0.001\text{nm}$ 。变面积型电容传感器可以测量较大的位移,其量程为零点几毫米至数百毫米,线性优于  $0.2\%$ ,分辨率为  $0.01\sim 0.001\mu\text{m}$ 。电容式角位移传感器的动态范围为  $0.1''$  至几十度,分辨率约  $0.1''$ 。其零位稳定性可达角秒级,广泛用于高精度测角,例如高精度陀螺和摆式加速度计等。电容式振幅传感器测量振幅的峰值为  $0\sim 50\mu\text{m}$ ,振动频率为  $10\sim 20\text{kHz}$ ,灵敏度高于  $0.01\mu\text{m}$ ,非线性误差小于  $0.05\mu\text{m}$ 。下面举例介绍电容式传感器的应用。

#### 1. 电容式压力传感器

电容式压力传感器如图 5-16 所示。气体压力从两侧的通气孔传递到中间的薄不锈钢膜片,该膜片作为可动极板。左侧金属镀层和膜片是电容器的两个极板,而右侧镀层和膜片是另一个电容器的两个极板,从而构成差动变极距型电容传感器。当两侧气体压力不相等时,膜片发生弯曲变形,导致一个电容器的极板间距减小,而另外一个电容器的极板间距增大。将两个电容器接入测量电路,通过输出电压可以测得膜片的位移量,从而实现气体压力的测量。电容式差压变送器如图 5-17 所示。膜片位于中间位置,左侧是低压侧进气口,右侧为高压侧进气口。气体的压力差使膜片发生变形,导致电容值变化,从而实现压力的测量。

#### 2. 电容式位移传感器

电容式传感器可以测量振动位移、转轴的回转精度和轴心动态偏摆等,可实现动态非接触式测量。例如,振动位移的测量如图 5-18(a) 所示。当被测振动体靠近电容式传感器时,被测体极板和传感器极板的间距发生变化,导致电容值发生变化,从而实现了非接触的振动

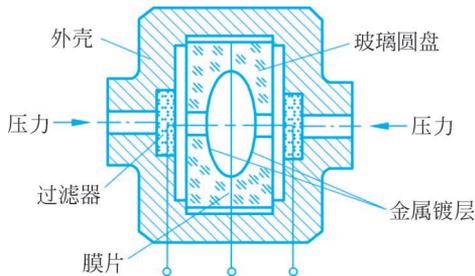


图 5-16 电容式压力传感器

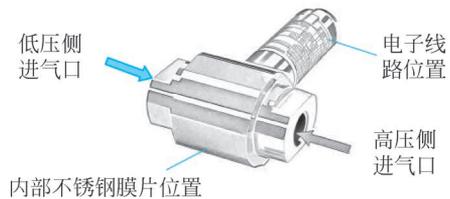


图 5-17 电容式差压变送器

位移测量。转轴的回转精度及轴心动态偏摆测量如图 5-18(b) 所示。当转轴在高速旋转时,轴心的偏离及径向的振动将导致被测体极板和电容传感器极板之间的极板间距变化,从而使电容值变化。

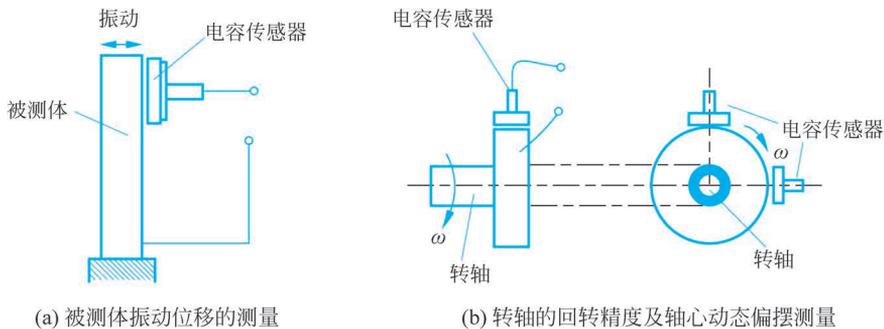
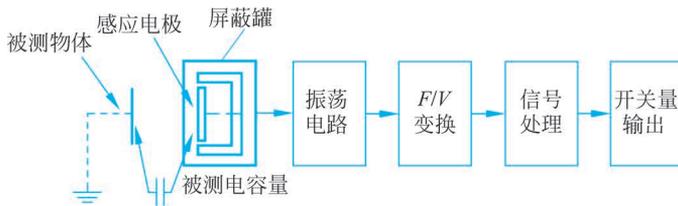


图 5-18 电容式位移传感器

### 3. 电容式接近开关

电容式接近开关的电路示意图和实物图分别如图 5-19(a) 和图 5-19(b) 所示。电容式接近开关可以用于物料位置测量,其被测物体并不限于金属导体,也可以是绝缘的液体或粉状物体。传感器的测量头内部有感应电极,构成电容器的一个极板,另一个极为被测物体。当被测物体靠近接近开关时,电容器的介电常数发生变化,导致电容值变化及电路输出改变。测量物料位置时,随着物料位置的升高,电容器极板间的介电常数发生变化。此时,可以设置合适的阈值,当物料位置超过一定高度时进行报警。



(a) 电路示意图



(b) 实物图

图 5-19 电容式接近开关的电路示意图和实物图

### 4. 电容式转速传感器

电容式转速传感器如图 5-20 所示。转轴上固定了一个不影响其转动的小齿轮。电容式传感器的测量端为一个极,齿轮作为电容器的另一个极板。当转轴带动齿轮旋转时,齿顶

和齿根到传感器的距离不同,导致电容器的极板间距发生变化。对传感器的输出电脉冲计数,可以得到转轴的转速  $n$  为

$$n = \frac{60f}{z} \quad (5-57)$$

式中,  $f$  是测得的信号频率,  $z$  是齿轮的齿数。转速  $n$  的单位为 r/min, 即每分钟的转数。

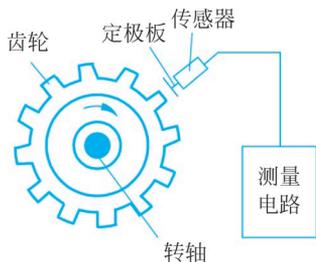


图 5-20 电容式转速传感器

### 5. 电容式液位计

电容式液位计可以用于油箱液位的测量,其示意图如图 5-21 所示。电容式液位计为变介电型电容传感器。当液位变化时,传感器的电容值变化,其电容值和液位成正比,如式(5-58)所示

$$C = \frac{k(\epsilon_1 - \epsilon_0)h}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5-58)$$

如图 5-21 所示,传感器连接到电桥电路,其输出电压反映了油箱的液位,从而实现了液位在刻度盘的显示及预警。对于非导电液体,传感器的探头暴露于液体中即可。对于导电液体,探头需与液体用绝缘体隔离。电容式液位计可以用于液体、颗粒或粉末状固体等物位测量场合。

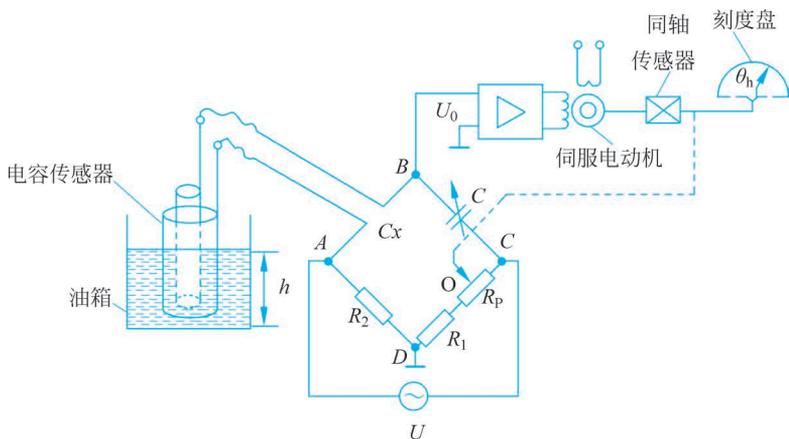


图 5-21 电容式液位计

### 6. 电容式加速度传感器

电容式加速度传感器如图 5-22 所示,其主要特点是频率响应快和量程范围大。电容式加速度传感器采用空气等作阻尼物质,在垂直方向有运动加速度时,两个固定极板与质量块在垂直方向上发生相对位移。位移的大小正比于被测加速度。此时,两个电容器的极板间距一个增加,而另一个减小,构成差动结构。电容  $C_1$  和  $C_2$  的改变量大小相等,符号相反。电容值的改变量正比于被测加速度。这种传感器的固有频率较大,因而频率范围较

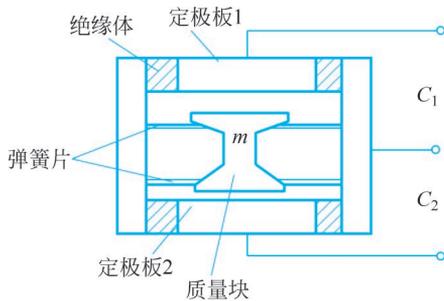


图 5-22 电容式加速度传感器

大。同时,传感器本身的动量小,频率响应较快。

## 5.4 例题解析

**例 5-1** 平板形变面积型电容传感器如图 5-2 所示。已知极板长度为  $a=2\text{mm}$ ; 两极板相对覆盖的宽度  $b=4\text{mm}$ ; 两极板的间距  $d=0.5\text{mm}$ ; 极板间介质为空气,真空介电常数  $\epsilon_0=8.85\times 10^{-12}\text{F/m}$ 。求:

- (1) 传感器的静态灵敏度;
- (2) 若两极板相对移动  $\Delta x=2\text{mm}$ ,求电容改变量  $\Delta C$  为多少?

**解:**

- (1) 由式(5-4),得到灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta x} = -\frac{\epsilon b}{d} = -\frac{8.85 \times 10^{-12} \times 4 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-3}} = -0.071(\text{pF/mm})$$

若考虑电容的相对改变量,则灵敏度为

$$K = \frac{\frac{\Delta C}{C}}{\Delta x} = -\frac{1}{a} = -\frac{1}{2 \times 10^{-3}} = -500(\text{m}^{-1})$$

其中,灵敏度为负数,表示随着极板的移动,电容值将减小。

- (2) 根据式(5-4),得到

$$\Delta C = K \Delta x = -0.071\text{pF/mm} \times 2\text{mm} = -0.142(\text{pF})$$

所以,当极板发生位移  $\Delta x=2\text{mm}$  时,电容值减小了  $0.142\text{pF}$ 。

**例 5-2** 一个电容测微仪的圆形极板半径  $r=4\text{mm}$ ,工作初始极板间距  $\delta=0.3\text{mm}$ 。

- (1) 当间距变化  $\Delta\delta=\pm 2\mu\text{m}$  时,电容改变量是多少?
- (2) 若测量电路的灵敏度  $S_1=100\text{mV/PF}$ ,读数仪表的灵敏度  $S_2=5$  格/ $\text{mV}$ ,则当  $\Delta\delta=\pm 2\mu\text{m}$  时,读数仪表的指示值变化多少格?

**解:**

- (1) 由于初始电容值  $C_0$ 、极距增大后的电容值  $C_1$  和极距减小后的电容值  $C_2$  分别为

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{d}, \quad C_1 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{d + \Delta d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{d - \Delta d}$$

因此,极板间距增大后的电容改变量  $\Delta C_1$  为

$$\Delta C_1 = C_1 - C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{d} \cdot \frac{-\Delta d}{d + \Delta d} = C_0 \cdot \frac{-\Delta d}{d + \Delta d}$$

极板间距减小后的电容改变量  $\Delta C_2$  为

$$\Delta C_2 = C_2 - C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{d} \cdot \frac{\Delta d}{d - \Delta d} = C_0 \cdot \frac{\Delta d}{d - \Delta d}$$

将各已知参量代入  $C_0$ ,得到初始电容值为

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1 \times 3.14 \times (4 \times 10^{-3})^2}{0.3 \times 10^{-3}} = 1.48 \times 10^{-12}(\text{F})$$

所以,极板间距增大  $2\mu\text{m}$  后,电容值的改变量为

$$\Delta C_1 = C_0 \cdot \frac{-\Delta d}{d + \Delta d} = 1.48 \times 10^{-12} \cdot \frac{-2 \times 10^{-6}}{0.3 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-6}} = -9.8 \times 10^{-15} \text{ (F)}$$

极板间距减小  $2\mu\text{m}$  后, 电容值的改变量为

$$\Delta C_2 = C_0 \cdot \frac{\Delta d}{d - \Delta d} = 1.48 \times 10^{-12} \cdot \frac{2 \times 10^{-6}}{0.3 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-6}} = 9.9 \times 10^{-15} \text{ (F)}$$

所以, 当间隙变化  $\pm 2\mu\text{m}$  时, 电容值的改变量  $\Delta C \approx 0.01 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.01 \text{ (pF)}$

(2) 由于系统的总灵敏度为串联各环节灵敏度的乘积, 所以当间隙变化  $\pm 2\mu\text{m}$  时, 仪表的指示值的变化为

$$\Delta C \times S_1 \times S_2 = 0.01 \text{ pF} \times 100 \text{ mV/pF} \times 5 = 5 \text{ (格)}$$

所以, 当间隙变化  $\pm 2\mu\text{m}$  时, 电容值的改变量是  $0.01 \text{ pF}$ , 读数仪表的指示值变化了 5 格。

## 5.5 本章小结

本章介绍了电容式传感器的工作原理、类型及转换电路。通过学习, 应该掌握以下内容: 电容式传感器的工作原理, 电容式传感器的分类及其性能, 电容式传感器的常用测量电路, 电容式传感器的应用。

### 习题 5

5-1 根据工作原理不同, 电容式传感器可分为哪几类? 试分析每种电容式传感器的输出特性。

5-2 简述电容式传感器的特点, 它可以测量哪些物理量?

5-3 一个电容测微仪, 其传感器圆形极板的半径  $r = 4 \text{ mm}$ , 工作初始间隙  $\delta = 0.3 \text{ mm}$ 。当间隙变化  $\Delta\delta = 1\mu\text{m}$  时, 推导并计算电容变化量  $\Delta C$  为多少? 静态灵敏度为多少? 非线性误差为多少?

5-4 简述二极管双 T 型电桥电路的原理及特点。

5-5 单组式变面积型圆柱形线位移电容传感器, 其可动极筒外径为  $9.8 \text{ mm}$ , 定极筒内径为  $10 \text{ mm}$ 。两极筒覆盖长度为  $1 \text{ mm}$ , 极筒间介质为空气, 试求其电容值。当供电频率为  $60 \text{ Hz}$  时, 求其容抗值。

5-6 举例说明电容式传感器可以测量哪些物理量, 并画出结构示意图。

5-7 简述变极距型电容传感器的极板间距对其灵敏度的影响, 以及减小极板间距后如何避免电容器击穿。

5-8 简述变极距型电容传感器的非线性特性及差动结构对其灵敏度和非线性的影响。

5-9 试推导变介质型电容传感器的特性方程  $C = f(x)$ , 其中,  $C$  为传感器的电容值;  $x$  为介电常数为  $\epsilon_1$  的介质的长度。设极板宽度为  $W$ , 介质的介电常数  $\epsilon_2 > \epsilon_1$ , 真空的介电常数为  $\epsilon_0$ 。传感器的其他参数如图 5-23 所示。

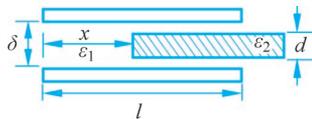


图 5-23 变介质型电容传感器示意图

5-10 简述电容式传感器的差动脉冲调宽电路的工作原理及特点。

5-11 现有一个直径为 2m, 高为 5m 的铁桶。当往铁桶内连续注水时, 注水量达到铁桶容量的 80% 时应停止注水。试分析用电容式传感器来解决该问题的途径和方法。

5-12 一个电容式传感器的两个极板均为边长为 10cm 的正方形, 极板间距为 1mm。两极板间气隙内恰好放置一个边长为 10cm, 厚度为 1mm, 相对介电常数为 4 的正方形介质。该介质可在气隙中自由滑动。若用该电容式传感器测量位移, 试计算当介质极板向某一方移出极板相互覆盖部分的距离分别为 1cm、2cm 和 3cm 时, 该传感器的输出电容值分别是多少?

5-13 有一个平面线位移型差动电容传感器, 其测量电路采用变压器交流电桥, 如图 5-24 所示。初始时刻, 电容式传感器极板  $b_1 = b_2 = b = 20\text{mm}$ ,  $a_1 = a_2 = a = 20\text{mm}$ , 极距  $d = 20\text{mm}$ , 极间介质为空气。测量电路中  $u_i = 3\sin\omega t\text{V}$ , 且  $u = u_i$ 。试求动极板上输入位移量  $\Delta x = 5\text{mm}$  时的电桥输出电压  $u_0$ 。

5-14 差动变极距型电容传感器连接变压器电桥电路。已知电桥电源  $E = 24\sin(2\pi 50t)$ , 电容极板的初始距离  $d = 0.1\text{mm}$ 。测得电桥的输出电压幅值为 1.2V, 则测量的位移为多大?

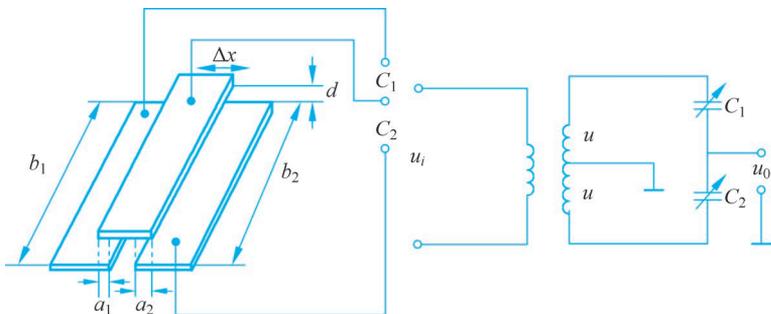


图 5-24 平面线位移型差动电容传感器及测量电路示意图