

第 3 章 电容式传感器

电容式传感器是将被测量（如尺寸、压力等）的变化转换成电容变化量的一种传感器。实际上，电容传感器本身（或和被测物）就是一个可变电容器。电容式传感器具有一系列突出的优点，如结构简单，体积小，适应性强，温度稳定性好，动态响应好，可以实现非接触测量，具有平均效应等。

电容式传感器不但广泛应用于位移、振动、角度、加速度等机械量的精密测量，而且还逐步扩大应用于压力、差压、液面、料面、成分含量等方面的测量。电容式传感器的缺点主要是寄生电容影响较大，用变极距型电容式传感器进行测量时具有非线性。

寄生电容是指连接电容极板的导线电容和传感器本身的泄漏电容。它不但降低了测量灵敏度，而且引起非线性输出，有时可使传感器处于不稳定的工作状态。

随着材料、工艺、测量电路及集成电路技术的提高，电容式传感器的缺点将不断得到克服，使其优点得以充分发挥。

3.1 电容式传感器的工作原理及特性

3.1.1 基本工作原理

两平行极板组成的电容器，如果不考虑边缘效应，其电容量为

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

式中： S 为极板的遮盖面积，单位为 m^2 ；

ϵ 为极板间介质的介电常数；

δ 为两平行极板间的距离，单位为 m ；

ϵ_0 为真空的介电常数， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ；

ϵ_r 为极板间介质的相对介电常数， $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ ，对于空气介质， $\epsilon_r \approx 1$ 。

(3-1) 式表明，当被测量 δ 、 S 或 ϵ 发生变化时，都会引起电容的变化，这就是电容式传感器的工作原理。如果保持其中的两个参数不变，而仅改变另一个参数，就可把该参数的变化转换为单一电容量的变化，再通过配套的测量电路，将电容的变化转换为电信号输出。

3.1.2 电容式传感器的类型和特性

根据电容器参数变化的特性, 电容式传感器可分为变极距型 (或称变间隙型)、变面积型和变介质型 (或称变介电常数型) 三种, 其中变极距型和变面积型应用较广。

电容式传感器的电极形状又有平板形、圆柱形和球平面形 (较少采用) 三种。

1. 变极距型电容传感器

图 3-1 所示是变极距型电容传感器的结构原理图。图中极板 1 固定不动, 极板 2 为可动电极, 即动片。当动片随被测量变化而移动时, 两极板间距 δ 随之发生变化, 从而使电容量 C 发生变化。由 (3-1) 式可知, C 与 δ 不是线性关系, 而是如图 3-2 所示的双曲线关系。

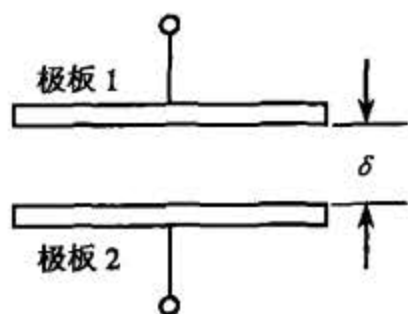


图 3-1 变极距型电容传感器

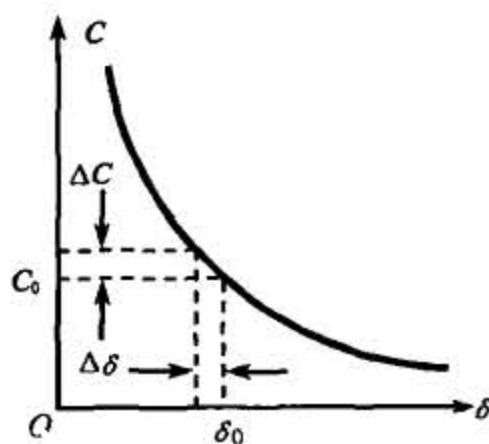


图 3-2 $C-\delta$ 特性曲线

设动片未移动时极板间距为 δ_0 , 对应的初始电容量为 C_0 , 即

$$C_0 = \frac{\epsilon S}{\delta_0}$$

当动片移动, 极板间距 δ_0 减小 $\Delta\delta$ 时, 电容量的增量为

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{\delta_0 - \Delta\delta} - \frac{\epsilon S}{\delta_0} = \frac{\epsilon S}{\delta_0} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta} = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta} \quad (3-2)$$

电容量的相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta} = \frac{\frac{\Delta\delta}{\delta_0}}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \quad (3-3)$$

当 $\Delta\delta \ll \delta_0$ 时, (3-3) 式可以展开为级数形式, 即

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^3 + \dots \right] \quad (3-4)$$

忽略 (3-4) 式中的高次项, 得

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (3-5)$$

这时 ΔC 与 $\Delta\delta$ 近似为线性关系。所以变极距型电容传感器在设计时要考虑满足 $\Delta\delta \ll \delta_0$ 的条件, 且一般 $\Delta\delta$ 只能在极小的范围内变化。

显然, 非线性误差与 $\Delta\delta/\delta_0$ 的大小有关。其表达式为

$$r = \frac{\left| \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 \right|}{\left| \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right|} = \left| \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right| \times 100\% \quad (3-6)$$

若 $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} = 0.1$, 则 $r = 10\%$, 可见这种结构的电容传感器非线性误差比较大, 仅适用于微小位移的测量。

传感器的灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta\delta} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{\delta_0^2} \quad (3-7)$$

该式表明灵敏度 K 是极板间隙 δ_0 的函数, δ_0 越小, 灵敏度 K 越高。但 δ_0 过小时, 容易引起电容器击穿, 而且会使非线性误差增大, 为此常采用差动式结构, 其结构原理如图 3-3 所示。当动极板向上(或向下)移动后, C_1 和 C_2 为差动变化, 即其中一个电容量增加, 另一个电容量减小。

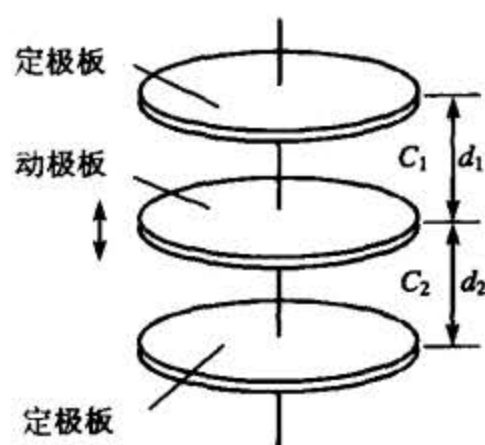


图 3-3 差动式电容传感器的结构原理图

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{\delta_0 - \Delta\delta} = \frac{\epsilon S}{\delta_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} = C_0 \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \right)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon S}{\delta_0 + \Delta\delta} = \frac{\epsilon S}{\delta_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} = C_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \right)$$

若位移量 $\Delta\delta$ 很小, 且 $\Delta\delta \ll \delta_0$, 上面两式可按级数展开, 得

$$C_1 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right]$$

$$C_2 = C_0 \left[1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right]$$

差动式电容传感器的输出为

$$\Delta C = C_1 - C_2 = C_0 \left[2 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + 2 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + 2 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^5 + \dots \right] \quad (3-8)$$

电容量的相对变化为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (3-9)$$

忽略高次项, 则

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (3-10)$$

其非线性误差为

$$r = \frac{\left| \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 \right|}{\left| \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right|} = \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 \times 100\% \quad (3-11)$$

灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta\delta} = 2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{\delta_0^2} \quad (3-12)$$

比较 (3-6) 式、(3-11) 式和 (3-7) 式、(3-12) 式可以看出, 差动式电容传感器不仅灵敏度提高一倍, 而且非线性误差也大大减小了。

2. 变面积型电容传感器

变面积型电容传感器的结构原理如图 3-4 (a)、(b) 所示。与变极距型相比, 变面积型电容传感器的测量范围大, 可测较大的线位移或角位移 (1' 至几十度)。

图 3-4 (a) 所示为角位移式电容传感器结构原理图。当被测量变化使动片有一角位移 θ 时, 就改变了两极板间的遮盖面积 S , 电容量 C 也就随之变化。

当 $\theta=0$ 时

$$C_0 = \frac{\epsilon S}{\delta}$$

当 $\theta \neq 0$ 时

$$C_\theta = \frac{\epsilon S \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)}{\delta} = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (3-13)$$

由上式可知, 电容量 C_θ 与角位移 θ 为线性关系。

图 3-4 (b) 所示为平板直线位移式电容传感器, 当其中一个极板发生 x 位移后, 改变了两极板间的遮盖面积 S , 电容量 C 同样随之变化。

当 $x=0$ 时, 若忽略边缘效应

$$C_0 = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon b a}{\delta}$$

当 $x \neq 0$ 时, 若忽略边缘效应

$$C_x = \frac{\epsilon b (a - x)}{\delta} = C_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right) \quad (3-14)$$

由 (3-14) 式可知, 电容量 C_x 与位移 x 为线性关系。

3. 变介电常数型电容传感器

变介电常数型电容传感器的结构原理如图 3-5 所示。这种传感器大多用来测量电介质的厚度、位移和液位、液量, 还可根据极间介质的介电常数随温度、湿度、容量的改变而变化的规律来测量介质材料的温度、湿度、容量等。

其中, 图 3-5 (a) 所示为单组式平板形厚度传感器, 其等效电路如图 3-6 所示。设固定板长度为 a 、宽度为 b 、两极板间的距离为 δ , 被测物的厚度和它的介电常数分别为 δ_x 和 ϵ , 空气的介电常数为 ϵ_0 。若忽略边缘效应, 该传感器的电容量与被测厚度的关系为

$$C = \frac{ab}{\frac{\delta - \delta_x}{\epsilon_0} + \frac{\delta_x}{\epsilon}} \quad (3-15)$$

图 3-5 (b) 所示为单组式平板形线位移传感器, 其等效电路如图 3-7 所示。设极板宽度为 b , 其他各参量见图, 则在极板间无介质 ϵ_2 时, 传感器的电容量为

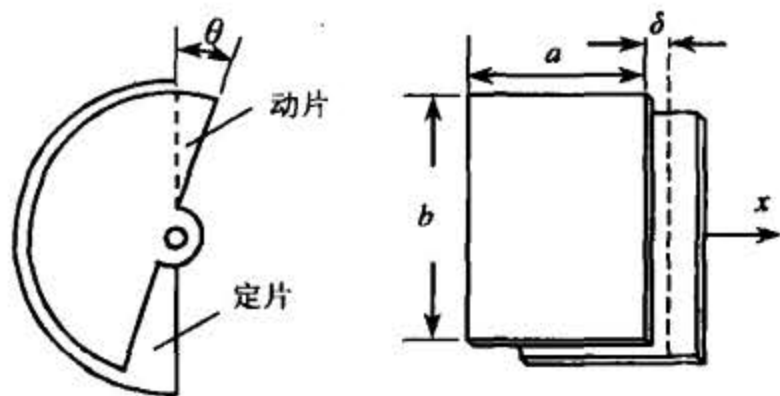


图 3-4 变面积型电容传感器的结构原理图

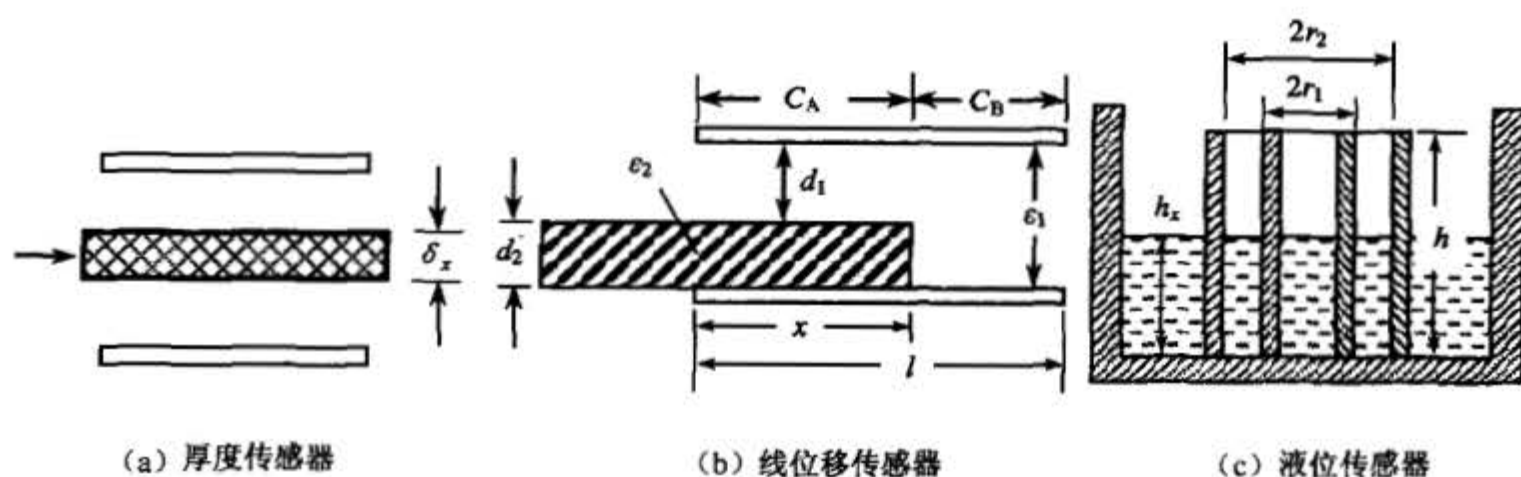


图 3-5 变介电型电容传感器的结构原理图

$$C_0 = \epsilon_1 \frac{bl}{d_1 + d_2} \quad (3-16)$$

插入介质 ϵ_2 后的电容量为

$$C = C_A + C_B = bx \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} + b(l-x) \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} \quad (3-17)$$

整理 (3-17) 式, 并将 (3-16) 式代入得

$$C = C_0 + C_0 \frac{x}{l} \cdot \frac{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}{\frac{d_1}{d_2} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \quad (3-18)$$

(3-18) 式表明, 电容量 C 与位移 x 为线性关系。

图 3-5 (c) 所示为圆筒式液位传感器, 其等效电路如图 3-8 所示。设被测液体与空气的介电常数分别为 ϵ 和 ϵ_0 , 其他各参量见图 3-5 (c)。若忽略边缘效应, 圆筒式液位传感器的电容量与被测液位的关系为

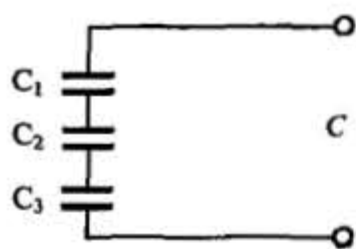


图 3-6 厚度传感器的等效电路

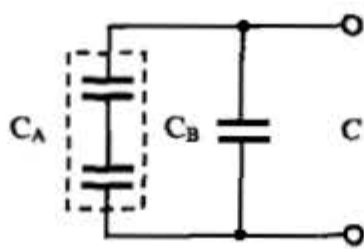


图 3-7 线位移传感器的等效电路

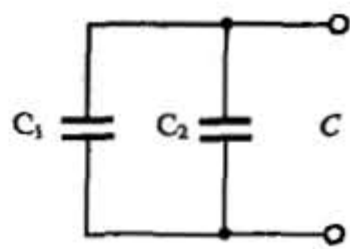


图 3-8 液位传感器的等效电路

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0) h_x}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = A + Kh_x \quad (3-19)$$

式中: $K = \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$, $A = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$ 。

可见, 圆筒式液位传感器的电容量 C 与被测液位高度 h_x 为线性关系。

例 3-1 某电容式液位传感器由直径为 40mm 和 8mm 的两个同心圆柱体组成。储存罐也是圆柱形, 直径为 50cm, 高为 1.2m。被储存液体的 $\epsilon_r = 2.1$ 。计算传感器的最小电容和最大电容以及当传感器用在该储存罐内时的灵敏度。

解: 由 (3-19) 式可知, 传感器的电容量 C 与被测液位高度 h_x 成正比, 当 $h_x=0$ 时传感器的电容量最小, 即

$$C_{\min} = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \times (8.85\text{pF/m}) \times 1.2\text{m}}{\ln \frac{40}{8}} = 41.46\text{pF}$$

同理, 当被测液位高度最大, 即 $h_x=h=1.2\text{m}$ 时, 传感器的电容量最大。将 $h_x=h$ 代入 (3-19) 式得

$$\begin{aligned} C_{\max} &= \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0)h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \\ &= \frac{2\pi\epsilon_r h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \\ &= 87.07\text{pF} \end{aligned}$$

储存罐的容积为

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h = \frac{\pi(0.5\text{m})^2}{4} \times 1.2\text{m} = 235.6\text{L}$$

故传感器的灵敏度为

$$K = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{V} = \frac{87.07\text{pF} - 41.46\text{pF}}{235.6\text{L}} = 0.19\text{pF/L}$$