



阻抗式传感器

Impedance Sensors





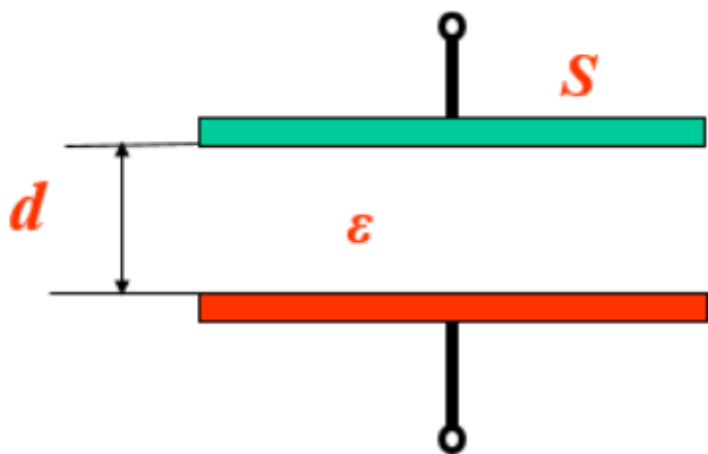
3.2 电容式传感器





3.2.1 电容式传感器的工作原理及结构形式

用两块金属平板作电极可构成电容器，当忽略边缘效应时，其电容C为



$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$$

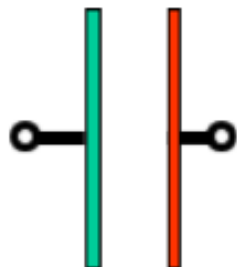
式中： ϵ —电容极板间介质的介电常数， $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 。其中 ϵ_0 为真空介电常数 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ； ϵ_r 为极板间介质的相对介电常数；
 S —两平行板所覆盖的面积；
 d —两平行板之间的距离。



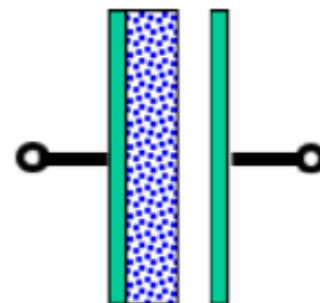
3.2.1 电容式传感器的工作原理及结构形式

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = f(d, S, \epsilon)$$

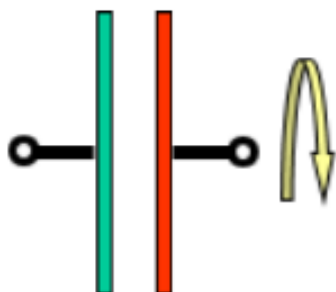
变间隙型：



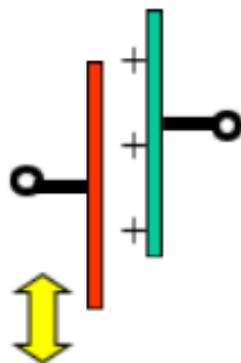
变介电常数型：



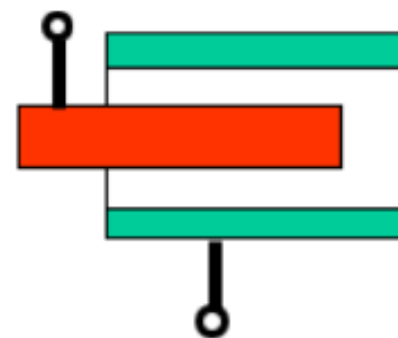
变面积型



角位移型



平面线位移型

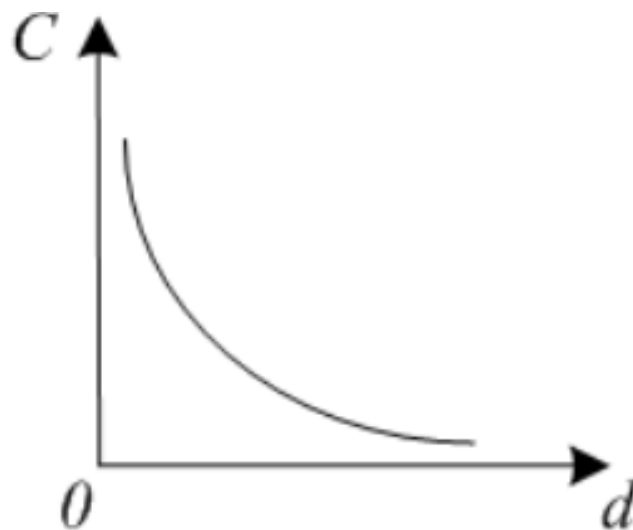
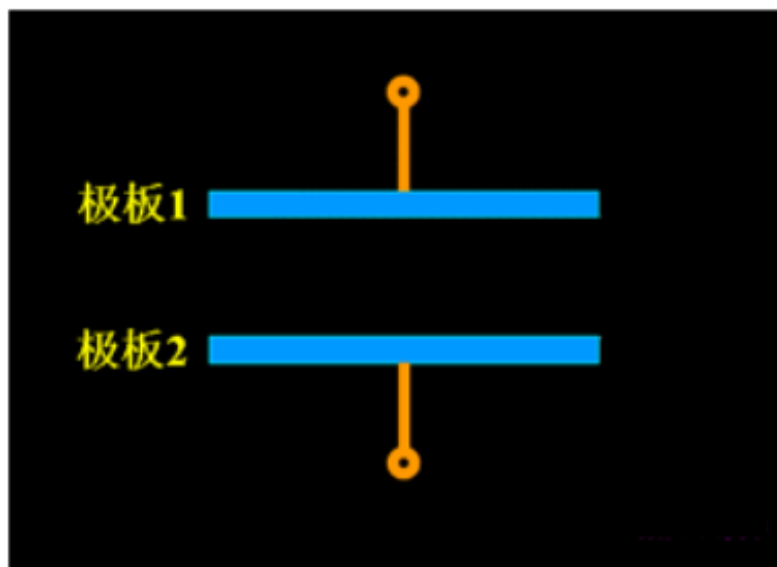


柱面线位移型



1. 变间隙的电容式传感器

1) 空气介质的变间隙电容式传感器

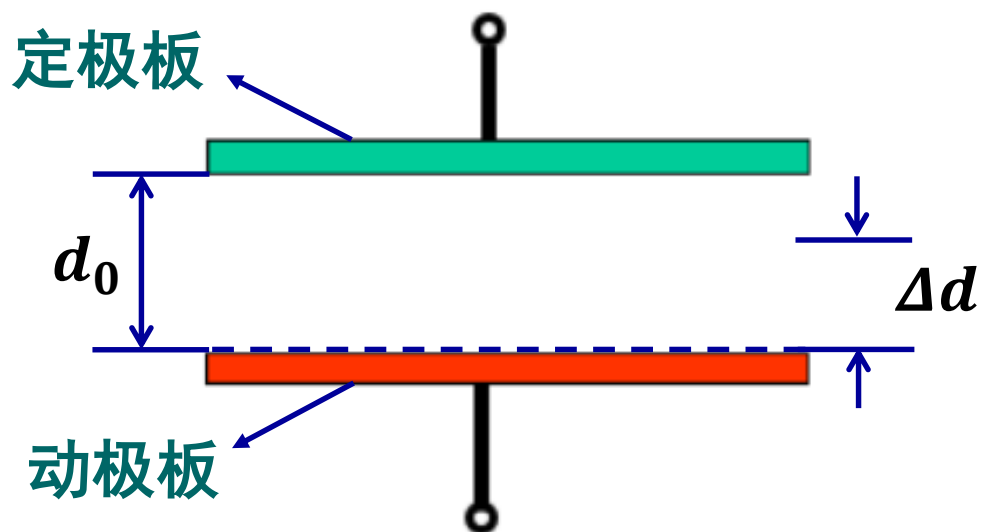


$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

变间隙 d



1. 变间隙的电容式传感器



设动极板未移动时极板间距为 d_0 : $C_0 = \frac{\epsilon S}{d_0}$

↓ 动极板上移

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{d_0 - \Delta d} - \frac{\epsilon S}{d_0}$$



1. 变间隙的电容式传感器

当: $\Delta d/d_0 \ll 1$,
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right]$$

$$\boxed{\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0}} \quad \rightarrow \quad \boxed{S_n = \frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{C_0}{d_0}} \quad \text{灵敏度}$$

考虑2阶:
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0} \right)$$

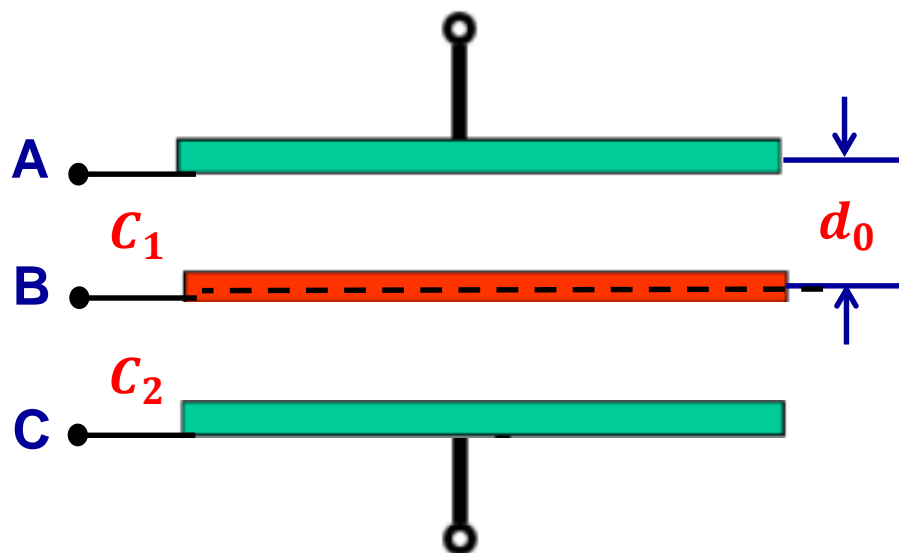
非线性误差:
$$\delta = \frac{(\Delta d/d_0)^2}{|\Delta d/d_0|} \times 100\% = |\Delta d/d_0| \times 100\%$$

所以变间隙型电容传感器在设计时要考虑满足 $\Delta d \ll d_0$ 的条件, 且一般 Δd 只能在极小的范围内变化。



1. 变间隙的电容式传感器

差动式结构



$$C_0 = \frac{\epsilon S}{d_0}$$

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{d_0 - \Delta d} \quad C_2 = \frac{\epsilon S}{d_0 + \Delta d}$$

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

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

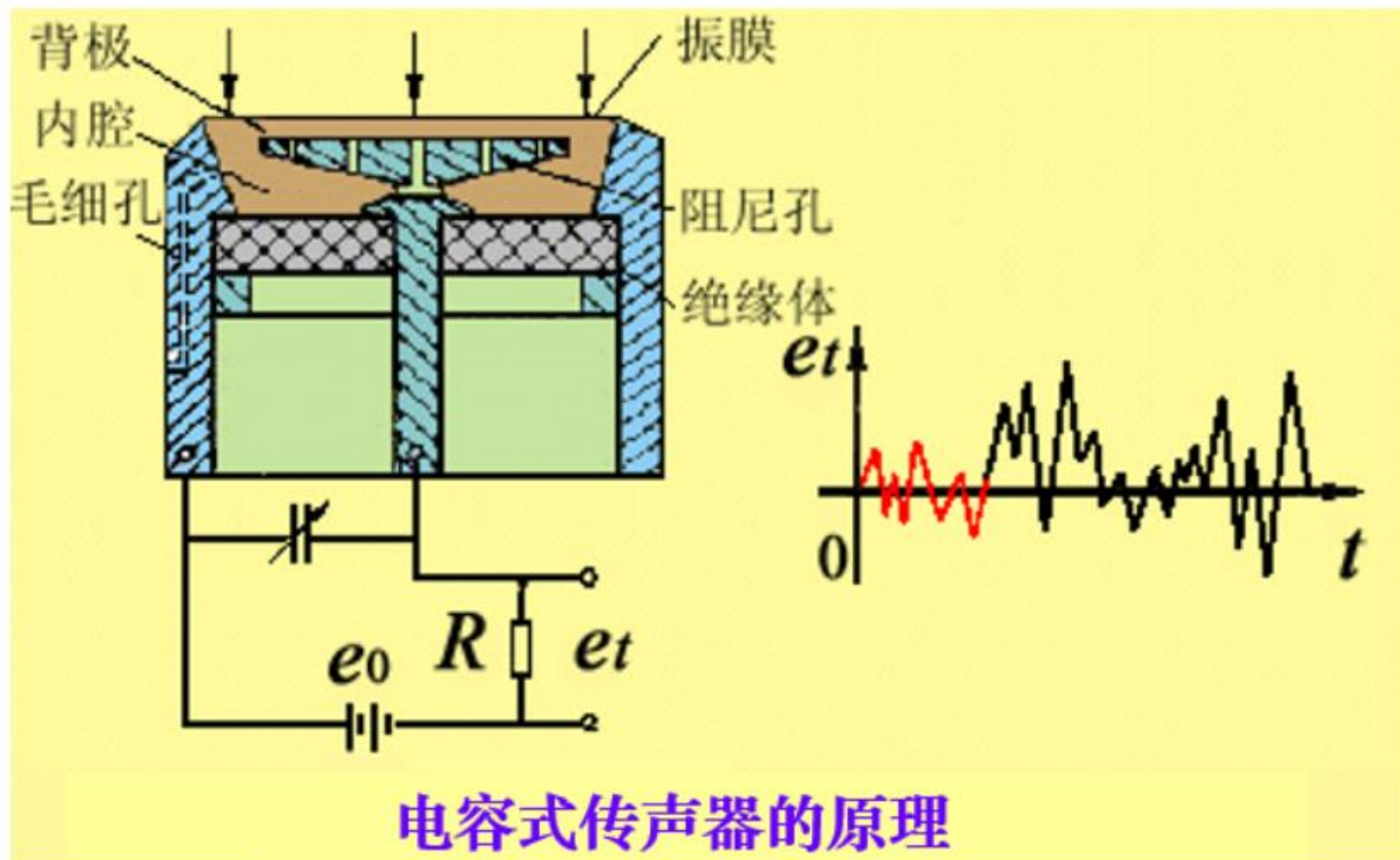
灵敏度为

$$S_n = \frac{\Delta C}{\Delta d} = 2 \frac{C_0}{d_0}$$

非线性误差为：

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

1. 变间隙的电容式传感器

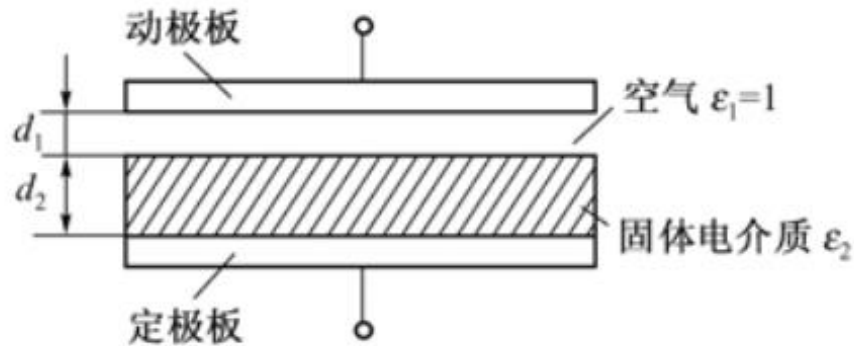




1. 变间隙的电容式传感器

2) 固体介质的变间隙电容式传感器

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d_1 + d_2 / \epsilon_2}$$

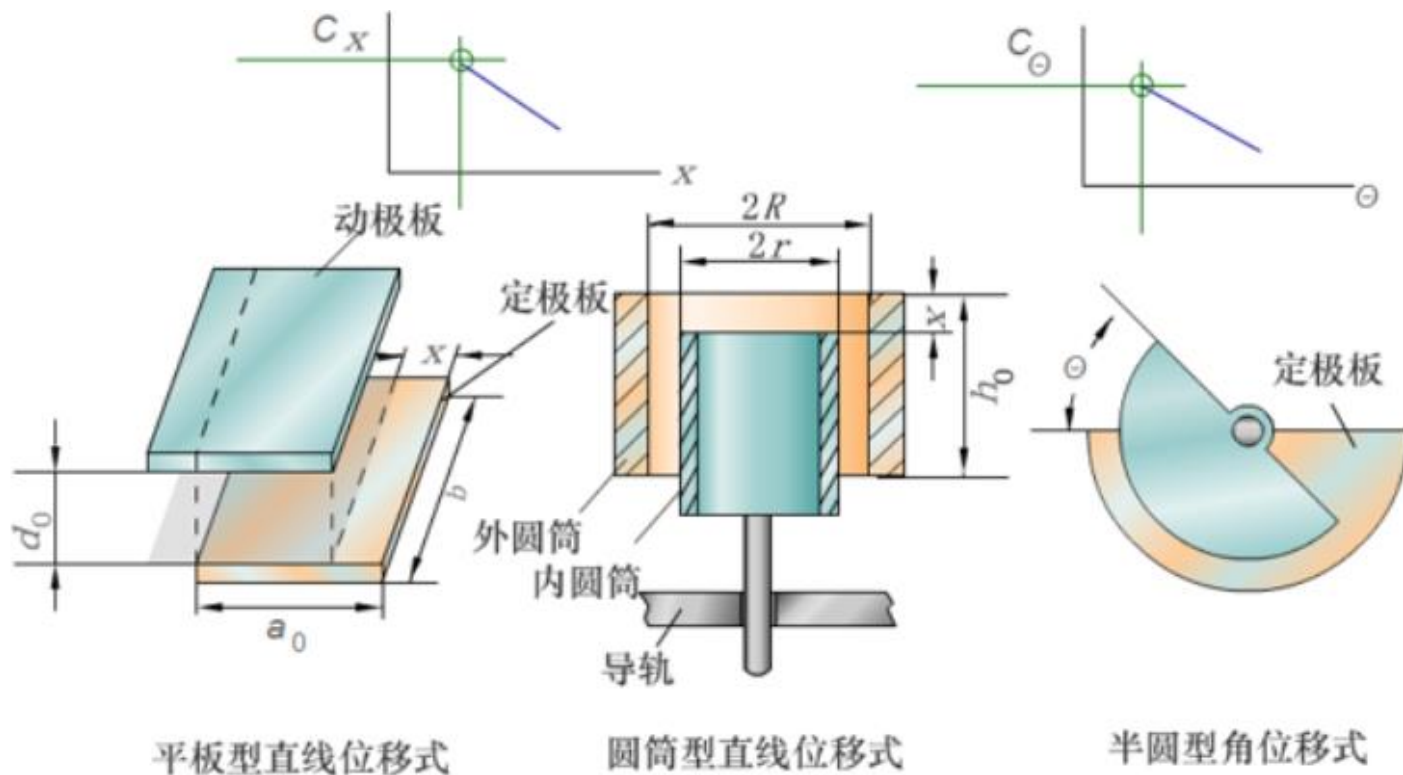


$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2} N_1 \frac{1}{1 - N_1 \Delta d_1 / (d_1 + d_2)}$$

$$N_1 = \frac{d_1 + d_2}{d_1 + d_2 / \epsilon_2} = \frac{1 + d_2 / d_1}{1 + d_2 / d_1 \epsilon_2}$$

N_1 称为灵敏度因子，又称为非线性因子。

2. 变面积的电容式传感器



$$C_x = \frac{\epsilon b(a_0 - x)}{d_0} = C_0 \left(1 - \frac{x}{a_0}\right)$$

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon(h_0 - x)}{\ln(R/r)} = C_0 \left(1 - \frac{x}{h_0}\right)$$

变面积型电容传感器工作原理



2. 变面积的电容式传感器

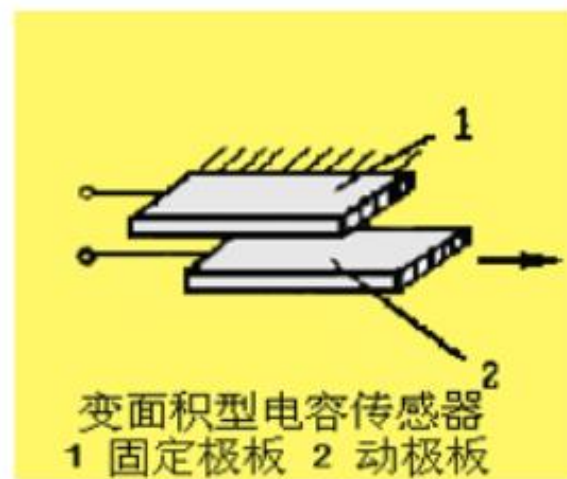
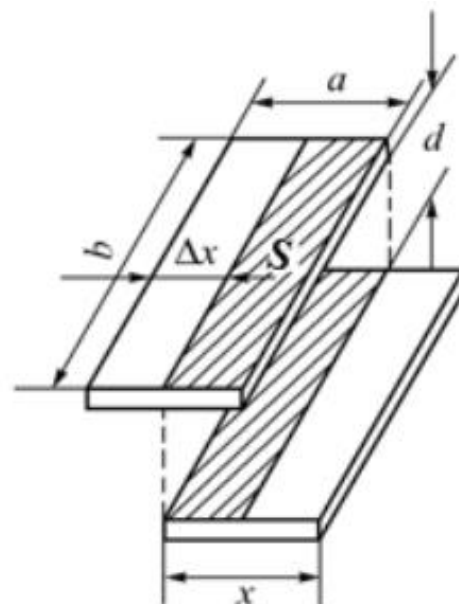
1) 直线位移型

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

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

$$\Delta C = C - C_0 = -\frac{\epsilon b}{d} \Delta x$$

$$S_n = \left| \frac{\Delta C}{\Delta x} \right| = \frac{\epsilon b}{d} = \text{const}$$



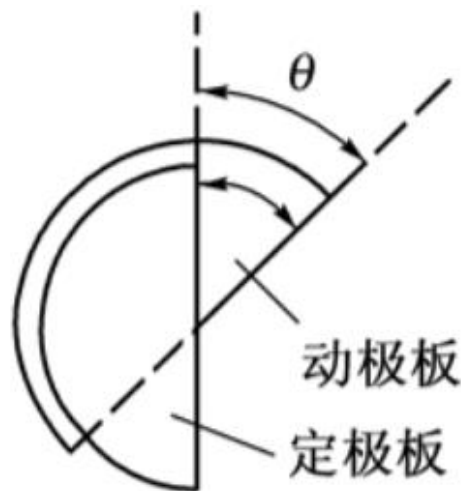


2. 变面积的电容式传感器

2) 角位移型

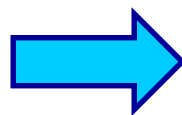
$$\theta = 0,$$

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



$$\theta \neq 0,$$

$$\begin{aligned} C_{\theta} &= C_0 - \Delta C = \frac{\epsilon S(1 - \frac{\theta}{\pi})}{d} \\ &= C_0(1 - \frac{\theta}{\pi}) \end{aligned}$$



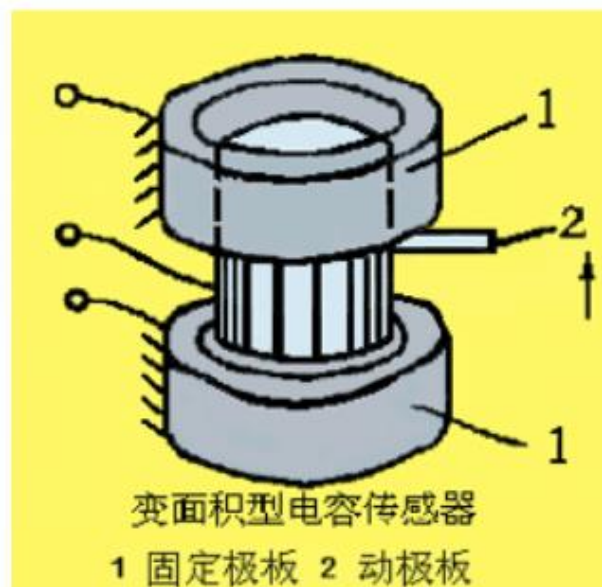
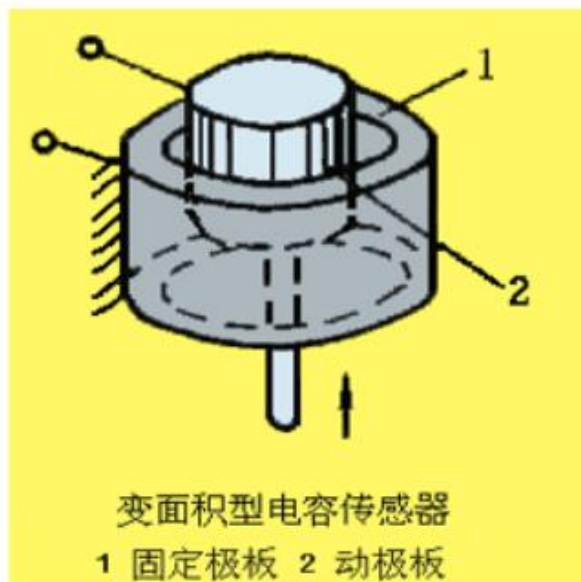
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\theta}{\pi}$$



2. 变面积的电容式传感器

3) 圆柱型

由于平板型传感器的可动极板稍有**极距方向**移动会影响测量精度，因此，一般情况下，变面积型电容式传感器常做成圆柱形。





2. 变面积的电容式传感器

初始电容 C_0 为：

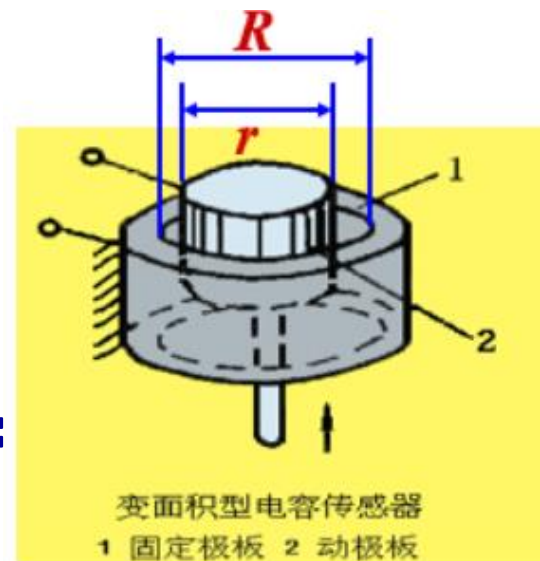
$$C = \frac{2\pi\varepsilon \cdot l}{\ln(R/r)}$$

当内筒上移 Δl 时，内外筒间的电容变化为：

$$\begin{aligned}\Delta C &= \frac{2\pi\varepsilon \cdot l}{\ln(R/r)} - \frac{2\pi\varepsilon(1 - \Delta l)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \\ &= \frac{2\pi\varepsilon\Delta l}{\ln(R/r)} = C_0 \frac{\Delta l}{l}\end{aligned}$$

灵敏度：

$$S_n = \left| \frac{\Delta C}{\Delta l} \right| = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(R/r)} = \text{const}$$



这类传感器具有良好的线性，多用来检测位移等参数。



3. 变介电常数的电容式传感器

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，电容器的电容量也就不同。

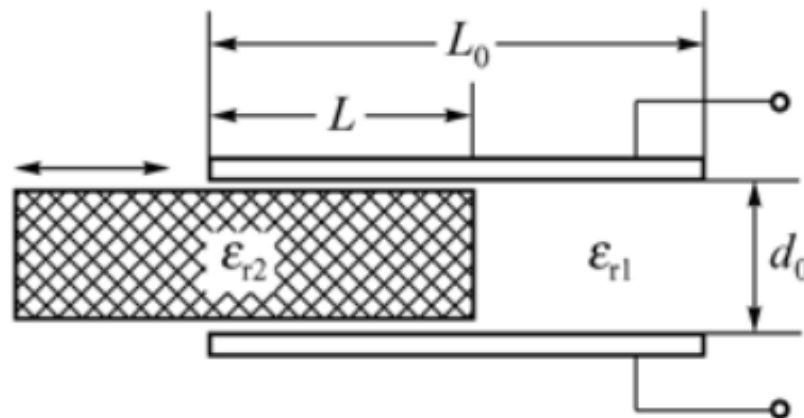
几种介质的相对介电常数

介质名称	相对介电常数 ϵ_r	介质名称	相对介电常数 ϵ_r
真空	1	玻璃釉	3~5
空气	略大于1	SiO ₂	38
其他气体	1~1.2①	云母	5~8
变压器油	2~4	干的纸	2~4
硅油	2~3.5	干的谷物	3~5
聚丙烯	2~2.2	环氧树脂	3~10
聚苯乙烯	2.4~2.6	高频陶瓷	10~160
聚四氟乙烯	2.0	低频陶瓷、压电陶瓷	1000~10000
聚偏二氟乙烯	3~5	纯净的水	80



3. 变介电常数的电容式传感器

1) 线位移



设极板宽度为 **b** ,
长度为 **l** , 间距 **d_0** 。

板间无介质 **ϵ_{r2}** 时: $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} L_0 b_0 / d_0$

插入介质 **ϵ_{r2}** 后: $C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1}(L_0 - L) + \epsilon_{r2}L}{d_0}$

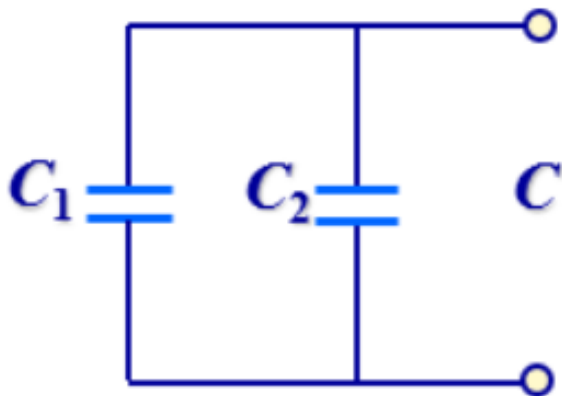
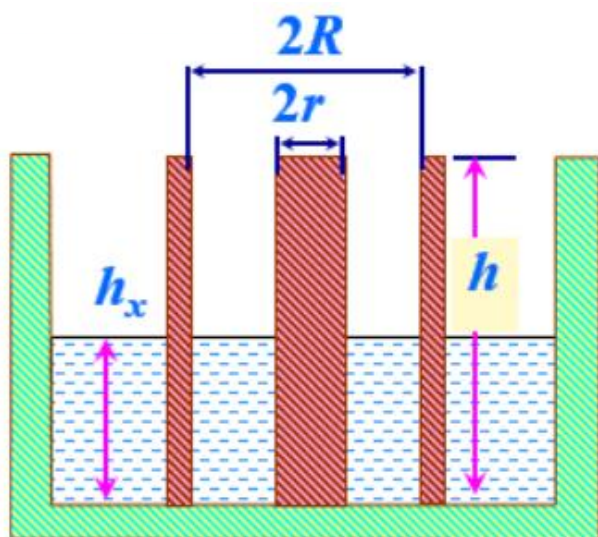
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\epsilon_{r2} - 1)L}{L_0}$$

线性关系



3. 变介电常数的电容式传感器

2) 液位



$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln(R/r)}$$

$$C = C_1 + C_2$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_1(h - h_x) + 2\pi\epsilon_2 h_x}{\ln(R/r)}$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_1} \frac{h_x}{h}$$

线性关系



3. 变介电常数的电容式传感器

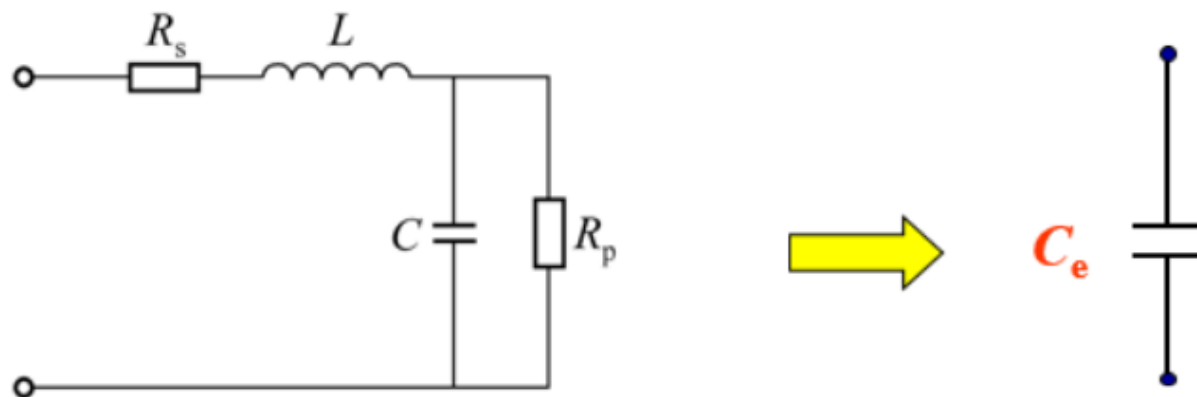
液位限位传感器

设定按钮





3.2.2 电容式传感器的等效电路



- R_p 并联损耗电阻，代表极板间的泄漏电阻和介质损耗。
- R_s 串联损耗电阻，代表引线电阻、电容器支架和极板电阻的损耗。
- 电感 L 由电容器本身的电感和外部引线电感组成。



3.2.2 电容式传感器的等效电路

电容式传感器的工作频率一般较高，此时可以忽略 R_S 、 R_P 的影响，则

$$j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega C_e} \quad \text{传感器有效电容 } C_e \quad \boxed{C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 LC}}$$

工作频率等于或接近谐振频率（通常为几十兆赫兹）时，谐振频率破坏了电容的正常作用。因此，工作频率应该选择**低于谐振频率**。

电容式传感器的等效电容值与传感器的固有电感 L 及角频率 ω 有关，因此，在**实际使用时必须与标定的条件相同**。