

概述



与电阻式、电感式传感器相比的优点：

1. 测量范围大：相对变化量可达100%。
2. 灵敏度高：可达 10^{-7} 。
3. 动态响应时间短：可动部件质量小，固有频率高，适合于动态信号的测量。
4. 机械损失小：电极间引力小，无摩擦，热效应小，因此，精度高。
5. 结构简单，适应性强：金属做电极，无机材料绝缘支撑，能承受大的温度变化和强辐射，适合于恶劣环境工作。

概述



与电阻式、电感式传感器相比的不足之处：

1. 寄生电容影响大：导线电容、泄露电容。降低了灵敏度，非线性输出，甚至不稳定。
2. 当用变间隙原理进行测量时，具有非线性输出特性。

由于材料、工艺，特别是测量电路及半导体集成技术等方面已达到了相当高的水平，因此寄生电容的影响得到较好地解决，使电容式传感器的优点得以充分发挥。

应用：

压力、位移、厚度、加速度、液位、物位、湿度和成分含量等测量之中。

电容式传感器



3.1 电容式传感器的工作原理

3.2 电容式传感器的测量电路

3.3 电容式传感器的误差分析

3.4 电容式传感器的应用示例

3.1 工作原理



两个平行极板组成一个电容器，若忽略边缘效应，它的电容量C应为：

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}$$

ε ——极板间介质的介电系数；

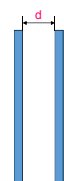
ε_0 ——真空的介电常数， $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ；

ε_r ——极板间介质的相对介电常数。

对于空气介质， $\varepsilon_r \approx 1$ 。

S ——极板间相互覆盖面积 (m^2)；

d ——极板间距离 (m)；



3.1 工作原理



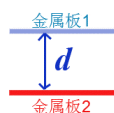
$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}$$

等式右边的三个参数改变任何一个都可以使电容值C发生变化。这就是电容传感器的基本工作原理。

电容式传感器

变面积型 变介电常数型 变极板间距型

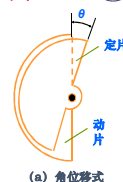
角位移式变面积型电容传感器



$$\theta = 0, C_0 = \frac{\varepsilon S}{d}$$

$$\theta \neq 0, C_\theta = C_0(1 - \theta/\pi)$$

角位移式变面积型电容传感器



(a) 角位移式

C_θ 与角位移 θ 呈线性关系。



武汉大学

传感器技术课程组qswu制作

2016

直线位移式变面积型电容传感器

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 C 同样随之变化。

$$x = 0, \quad C_0 = \frac{\varepsilon ab}{d}$$

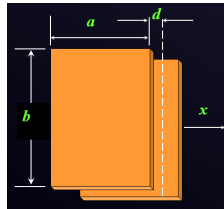
$$x \neq 0, \quad C_x = \frac{\varepsilon b(a-x)}{d} = C_0 - \frac{\varepsilon b}{d} x$$

$$C_x = \frac{\varepsilon b(a-x)}{d} = C_0 - \frac{\varepsilon b}{d} x$$

$$= C_0 \left(1 - \frac{x}{a} \right)$$

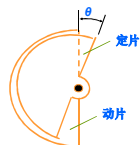
因此, C_x 与位移 x 呈线性关系。

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}$$



b) 直线位移式

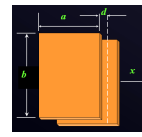
变面积型电容传感器



(a) 角位移式

$$C_\theta = C_0 (1 - \theta / \pi)$$

$$\text{灵敏度系数 } K = -\frac{C_0}{\pi}$$



b) 直线位移式

$$C_x = C_0 \left(1 - \frac{x}{a} \right)$$

$$\text{灵敏度系数 } K = -\frac{C_0}{a}$$

变面积型电容传感器不论是角位移式还是直线式, 传感器的电容值都与引起遮盖面积变化的因素 (转角 θ 或直线位移 x) 呈线性关系。且灵敏度系数 K 与初始电容 C_0 成正比。

圆筒形变面积型电容传感器

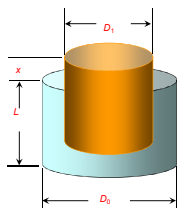
$$\text{初始电容 } C_0 \text{ 为: } C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln \frac{D_0}{D_1}}$$

当内筒上移 x 时, 内外筒间的电容 C_x 为:

$$C_x = \frac{2\pi\varepsilon_0 (L-x)}{\ln \frac{D_0}{D_1}} = C_0 \left(1 - \frac{x}{L} \right)$$

与 x 成线性关系。

这类传感器具有良好的线性, 大多用来检测位移等参数。



3.1 工作原理

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}$$

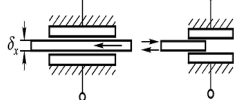
等式右边的三个参数改变任何一个都可以使电容值 C 发生变化。这就是电容传感器的基本工作原理。

电容式传感器

变面积型 变介电常数型 变极板间距型

变介质型电容传感器

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



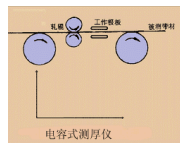
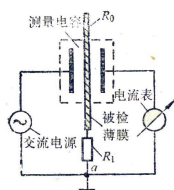
变介质型传感器

变介电常数型电容式传感器大多用来测量电介质的厚度、液位, 还可根据极间介质的介电常数随温度、湿度改变而改变来测量介质材料的温度、湿度等。

变介质型电容传感器

物质名称	相对介电常数 ε_r	物质名称	相对介电常数 ε_r
水	80	玻璃	3.7
丙三醇	47	硫磺	3.4
甲醇	37	沥青	2.7
乙二醇	35~40	苯	2.3
乙醇	20~25	松节油	3.2
白云石	8	聚四氟乙烯塑料	1.8~2.2
盐	6	液氮	2
醋酸纤维素	3.7~7.5	纸	2
瓷器	5~7	液态二氧化碳	1.59
米及谷类	3~5	液态空气	1.5
纤维素	3.9	空气及其他气体	1~1.2
砂	3~5	真空	1
砂糖	3	云母	6~8

电容式非金属材料厚度测量



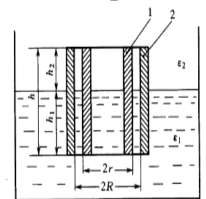
原理：变等效介电常数
特点：非接触式测量
应用：纸张、绝缘薄膜等

变介质型电容传感器

电容液位计原理图

右图相当于两个电容器的并联，1、2为筒状极板。

上面的电容器以 ϵ_2 为介质，下面的电容器以 ϵ_1 为介质。



$$C_1 = \frac{2\pi \cdot h_2 \cdot \epsilon_2}{\ln(R/r)} = \frac{2\pi (h - h_1) \cdot \epsilon_2}{\ln(R/r)}$$

$$C_2 = \frac{2\pi \cdot h_1 \cdot \epsilon_1}{\ln(R/r)} \because h = h_1 + h_2, r, R \text{ 是同心圆的半径}$$

$$C = C_1 + C_2$$

变介质型电容传感器

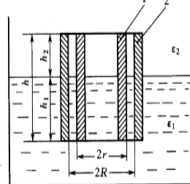
$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi (h - h_1) \epsilon_2}{\ln(R/r)} + \frac{2\pi \cdot h_1 \cdot \epsilon_1}{\ln(R/r)}$$

$$= \frac{2\pi \cdot h \cdot \epsilon_2}{\ln(R/r)} + \frac{2\pi (\epsilon_1 - \epsilon_2) h_1}{\ln(R/r)}$$

$$\text{令 } A = \frac{2\pi \cdot h \cdot \epsilon_2}{\ln(R/r)}, K = \frac{2\pi (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\ln(R/r)}$$

则 $C = A + K h_1$ 其中, A 为常数, K 为灵敏度系数

电容C与液位 h_1 之间呈线性关系。



例 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用在储存罐内传感器的灵敏度(pF/L)。

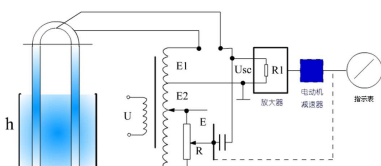
$$\text{解: } C_{\min} = \frac{2\pi \epsilon_0 H}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \times (8.85 \text{ pF/m}) \times 1.2 \text{ m}}{\ln 5} = 41.46 \text{ pF}$$

$$C_{\max} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r H}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 41.46 \text{ pF} \times 2.1 = 87.07 \text{ pF}$$

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

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

自动平衡电桥测量油箱液位



某油量表工作原理



变介质型电容传感器

右图相当于两个电容串联，这两个电容只有面积S相同：

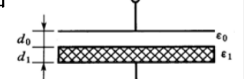
$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d_0}; C_1 = \epsilon_1 \frac{S}{d_1}$$

$$C = \frac{C_0 \cdot C_1}{C_0 + C_1} = \frac{S}{3.6\pi \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_0}{\epsilon_0} \right)}$$

电容C与极板距离d或介电常数之间都不是线性关系。

当 d_0 、 d_1 不变时，可用来测量介质的介电常数 ϵ_1 ；即介电常数测量仪。

当 ϵ_0 、 ϵ_1 不变时，可用来测量 d_1 距离，即作为测厚仪。



3.1 工作原理

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

等式右边的三个参数改变任何一个都可以使电容值C发生变化。这就是电容传感器的基本工作原理。

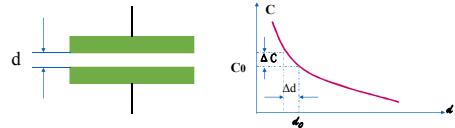
电容式传感器

变面积型 变介电常数型 变极板间距型

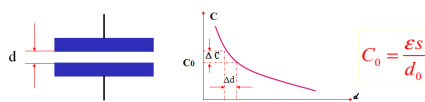
变极板间距型电容传感器

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad \text{初始电容} \quad C_0 = \frac{\epsilon S}{d_0}$$

当 d_0 减小 Δd 时 $d = d_0 - \Delta d$
电容 C 增加 ΔC $C = C_0 + \Delta C$



变极板间距型电容传感器



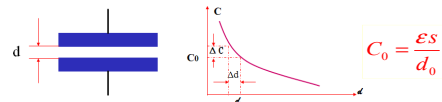
电容相对变化

$$C = \frac{\epsilon S}{d_0 - \Delta d} = \frac{C_0}{1 - \Delta d / d_0} \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d / d_0}{1 - \Delta d / d_0}$$

当 $\Delta d / d_0 \ll 1$ 时, 用泰勒级数展开

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

变极板间距型电容传感器



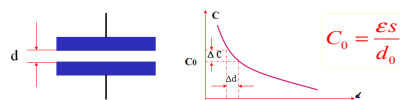
忽略高次项 $\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0}$

即当 $\frac{\Delta d}{d_0} \ll 1.0$ (一般取 0.02-0.1) 时, 电容的相对变化量 ΔC 与极板间距离变化量近似呈线性关系。

❖ 传感器灵敏度 $K = \frac{\Delta C}{\Delta d} \approx \frac{C_0}{d_0} = \frac{\epsilon S}{d_0^2}$

❖ 非线性误差 $\delta = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right| * 100\%$

变极板间距型电容传感器



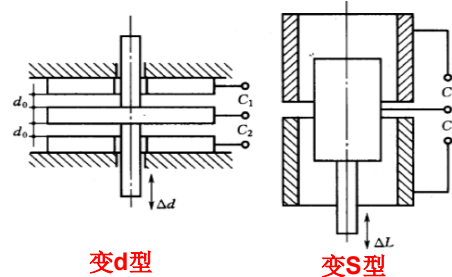
❖ 传感器灵敏度 $K = \frac{\Delta C}{\Delta d} \approx \frac{C_0}{d_0} = \frac{\epsilon S}{d_0^2}$

❖ 非线性误差 $\delta = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right| * 100\%$

d_0 越小, 灵敏度系数 K 越高; 而 d_0 减小又使非线性误差 δ 增大。

差动式电容传感器

为提高灵敏度和改善非线性, 一般采用差动结构。



差动式电容传感器

上下两部分的初始电容: $C_0 = \frac{\varepsilon S}{d_0}$

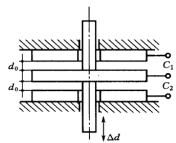
上移 Δd 后: $C_1 = \frac{\varepsilon S}{d_0 - \Delta d}$;

$$C_2 = \frac{\varepsilon S}{d_0 + \Delta d}$$

展开:

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

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



差动式电容传感器

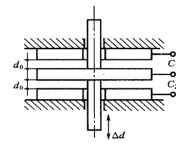
差动式电容传感器的输出为:

$$\Delta C = C_1 - C_2$$

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

略去高阶无穷小: $\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0}$

$$\text{非线性误差为: } \delta = \frac{\left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3}{\left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)} = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \times 100\%$$



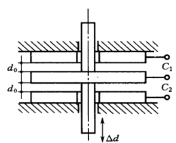
差动式电容传感器

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

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

结论:

- 差动式电容传感器比单个电容灵敏度提高一倍
- 非线性误差可以减小一个数量级。



电容式传感器

3.1 电容式传感器的工作原理

3.2 电容式传感器的测量电路

3.3 电容式传感器的误差分析

3.4 电容式传感器的应用示例

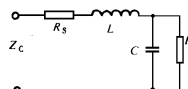
3.2 电容式传感器的测量电路

电容传感器中电容值变化都很微小, 不能直接显示记录, 必须将电容变化转换为电流、电压的变化。

由于作为传感器在功能和结构上的要求, 电容式传感器不是理想电容。电容式传感器中除了有电容之外, 还存在着串、并联电阻, 以及串联电感等。

一、等效电路

电容式传感器的等效电路



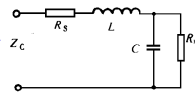
R_p 为并联损耗电阻, 它代表极板间的泄漏电阻和介质损耗。这些损耗在低频时影响较大, 随着工作频率增高, 容抗减小, 其影响就减弱。

R_s 代表串联损耗, 即代表引线电阻、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。

一、等效电路

电容式传感器的等效电路



电容式传感器的等效阻抗为：

$$Z_c = \left(R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C^2} \right) - j \left(\frac{\omega \cdot R_p^2 \cdot C}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C^2} - \omega \cdot L \right)$$

激励电源角频率

由等效电路可知，它有一个谐振频率，通常为几十兆赫。当工作频率等于或接近谐振频率时，谐振频率破坏了电容的正常工作。因此，工作频率应该选择低于谐振频率，否则电容传感器不能正常工作。

一、等效电路

$$Z_c = \left(R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C^2} \right) - j \left(\frac{\omega \cdot R_p^2 \cdot C}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C^2} - \omega \cdot L \right)$$

在前页式中， R_s 很小， R_p 很大，均可忽略。电路的等效容抗为：

$$\frac{1}{j\omega C_E} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = \frac{j^2 \omega^2 LC + 1}{j\omega C} = \frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C}$$

$$\therefore C_E = \frac{C}{1 - \omega^2 LC} = \frac{C}{1 - (f/f_0)^2}$$

激励电源频率

$$\text{式中：} \omega = 2\pi f; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

电路谐振频率

电容的相对变化量为：

$$\frac{\Delta C_E}{C_E} = \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 LC} = \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{1}{1 - (f/f_0)^2}$$

$$\text{一般情况下，} \frac{f}{f_0} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \therefore \frac{\Delta C_E}{C_E} > \frac{\Delta C}{C}$$

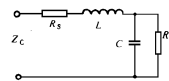
一、等效电路

电容的相对变化量为：

$$\frac{\Delta C_E}{C_E} = \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 LC} = \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{1}{1 - (f/f_0)^2}$$

$$\text{一般情况下，} \frac{f}{f_0} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \therefore \frac{\Delta C_E}{C_E} > \frac{\Delta C}{C}$$

由上式可见，电容传感器的等效电容与激励电源的频率有关，还与电路自身的谐振频率有关，而影响谐振频率的重要因素是电感L，它与电容传感器的连接导线等因素有关，所以电容传感器在实际使用时必须保持与标定时状态是完全一致的。



二、测量电路

电容式传感器的电容非常小（pF）级的，需要用专门的电路进行转换，成比例地把它变成电压、电流或频率信号供给或远传给后续装置显示、记录及运算等。

(一)交流不平衡电桥

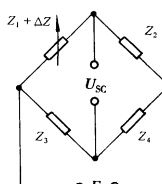
(二)变压器电桥

(三)二极管环形检波电路

(四)差动脉宽调制电路

(五)运算法测量电路

(一)交流不平衡电桥



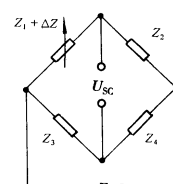
初始阻抗设计成： $Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$

$$U_{sc} = \left(\frac{Z_1 + \Delta Z}{Z_1 + \Delta Z + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) E$$

要找到输出电压 U_{sc} 与桥臂阻抗相对变化量 $\frac{\Delta Z}{Z_1}$ 以及桥臂阻抗比 $\frac{Z_1}{Z_2}$ 的关系：

$$U_{sc} = \frac{\left(\frac{\Delta Z}{Z_1} \right) \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \left(1 + \frac{Z_3}{Z_4} \right)} E = \frac{\left(\frac{\Delta Z}{Z_1} \right) \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2} E$$

(一)交流不平衡电桥



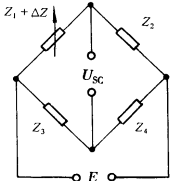
令： $\beta = \frac{\Delta Z}{Z_1}$ ，为传感器阻抗相对变化量

$A = \frac{Z_1}{Z_2}$ ，为测量电桥的桥臂比；

$K = \frac{\frac{Z_1}{Z_2}}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2} = \frac{A}{(1+A)^2}$ 为桥臂系数；

$$U_{sc} = \frac{\left(\frac{\Delta Z}{Z_1} \right) \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2} E = \frac{\beta A}{(1+A)^2} E = \beta K E$$

(一) 交流不平衡电桥



阻抗、电容及位移等的相对变化量之间有：

$$\beta = \frac{\Delta Z}{Z_1} = \frac{\Delta C}{C_1} \approx \frac{\Delta d}{d_1}$$

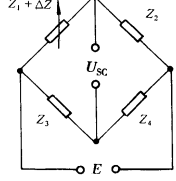
∴ 可认为β为实数。

桥臂比A、桥臂系数K以及交流激励电源都是复数：

$$A = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{|Z_1|e^{j\Phi_1}}{|Z_2|e^{j\Phi_2}} = ae^{j\theta} \quad \text{其中：} \quad a = \frac{|Z_1|}{|Z_2|}$$

$$\theta = \Phi_1 - \Phi_2$$

(一) 交流不平衡电桥

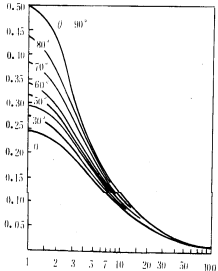


其中：k和γ 分别是桥臂系数的模和相角：

$$k = |K| = \frac{a}{1 + 2a \cos \theta + a^2} = f_1(a, \theta)$$

$$\gamma = \arctan^{-1} \frac{(1 - a^2) \sin \theta}{2a + (1 + a^2) \cos \theta} = f_2(a, \theta)$$

(一) 交流不平衡电桥

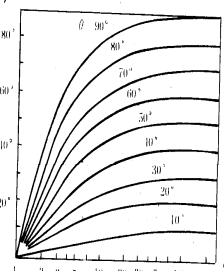


在 β 和E一定的情况下，要提高桥的灵敏度，就要保证：

$$a = 1$$

即 $|Z_1| = |Z_2|$ ，同时尽可能使 θ 大。

(一) 交流不平衡电桥

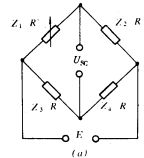


可以看出 $a = 1$ 时， $\gamma = 0$

此时，输出电压 U_{sc} 与电源E同相位。

(一) 交流不平衡电桥

电容交流电桥常用形式： $U_{sc} = \beta K E \quad \theta = \Phi_1 - \Phi_2$



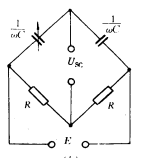
可见： $a = 1, \theta = 0$

∴ $k = 0.25, \gamma = 0$

$$U_{sc} = 0.25 \beta E$$

(一) 交流不平衡电桥

电容交流电桥常用形式： $U_{sc} = \beta K E \quad \theta = \Phi_1 - \Phi_2$



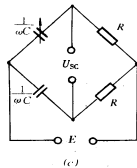
可见： $a = 1, \theta = 0$

∴ $k = 0.25, \gamma = 0$

$$U_{sc} = 0.25 \beta E$$

(一) 交流不平衡电桥

电容交流电桥常用形式: $U_{sc} = \beta K E \quad \theta = \Phi_1 - \Phi_1$



$$K = ke^{j\gamma} \quad a = \frac{|Z_1|}{|Z_2|}$$

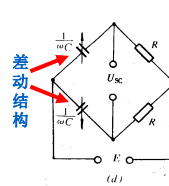
$$k = |K| = \frac{a}{1 + 2a \cos \theta + a^2}$$

$$\gamma = \arctan^{-1} \frac{(1 - a^2) \sin \theta}{2a + (1 + a^2) \cos \theta}$$

可见: $a = 1, \theta = 90^\circ$
 $\therefore k = 0.5, \gamma = 0$
 $U_{sc} = 0.5 \beta E$

(一) 交流不平衡电桥

电容交流电桥常用形式: $U_{sc} = \beta K E \quad \theta = \Phi_1 - \Phi_1$



$$K = ke^{j\gamma} \quad a = \frac{|Z_1|}{|Z_2|}$$

$$k = |K| = \frac{a}{1 + 2a \cos \theta + a^2}$$

$$\gamma = \arctan^{-1} \frac{(1 - a^2) \sin \theta}{2a + (1 + a^2) \cos \theta}$$

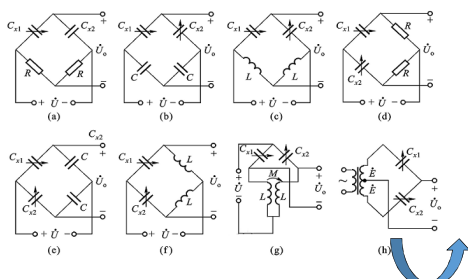
可见: $a = 1, \theta = 90^\circ$
 $\therefore k = 0.5, \gamma = 0$

输出电压提高1倍

差动结构: $U_{sc} = 2 * 0.5 \beta E = \beta E$

(一) 交流不平衡电桥

交流电桥的多种形式

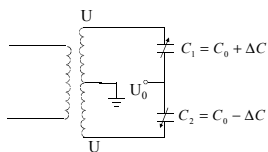


二、测量电路

- (一) 交流不平衡电桥
- (二) 变压器电桥
- (三) 二极管环形检波电路
- (四) 差动脉宽调制电路
- (五) 运算法测量电路

(二) 变压器电桥

图中C1、C2为差动电容传感器的电容。变压器次级的中点接地作为输出电压 U_0 的零点。当负载阻抗无穷大时, 电桥的输出电压为:



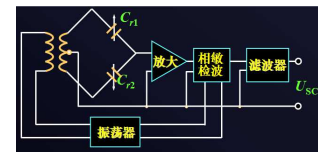
$$U_0 = 2U \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - U = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U$$

$$= \frac{(1/j \cdot \omega \cdot C_2) - (1/j \cdot \omega \cdot C_1)}{(1/j \cdot \omega \cdot C_1) + (1/j \cdot \omega \cdot C_2)} U = \frac{\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} U = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U$$

变压器电桥使用元件最少, 桥路内阻最小, 因此目前较多采用。

(二) 变压器电桥

由于电桥输出电压与电源电压成比例, 因此要求电源电压波动极小, 需采用稳幅、稳频等措施。



电桥测量电路

在要求精度很高的场合, 可采用自动平衡电桥; 传感器必须工作在平衡位置附近, 否则电桥非线性增大; 接有电容传感器的交流电桥输出阻抗很高, 输出电压幅值又小, 所以必须接高输入阻抗放大器将信号放大后才能测量。

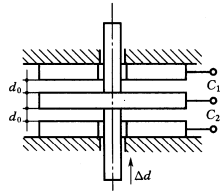
(二) 变压器电桥

对于变间隙型差动电容传感器：

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d_0 - \Delta d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d_0 + \Delta d}$$

$$U_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U = \frac{\Delta d}{d_0} U = \frac{U}{d_0} \Delta d$$

由上式可见，变间隙型差动电容传感器采用变压器电桥测量电路时，输出电压 U_0 与被测位移 Δd 之间呈良好的线性特性。



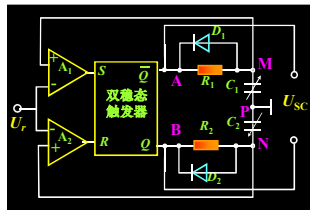
二、测量电路

- (一) 交流不平衡电桥
- (二) 变压器电桥
- (三) 二极管环形检波电路
- (四) 差动脉宽调制电路
- (五) 运算法测量电路

(四) 差动脉宽调制电路

利用对传感器电容的充放电使电路输出脉冲的宽度随传感器电容量变化而变化。通过低通滤波器得到对应被测量变化的直流信号。

C_1 、 C_2 为差动式传感器的两个电容，若用单组式，则其中一个为固定电容，其电容值与传感器电容初始值相等； A_1 、 A_2 是两个比较器， U_r 为其参考电压。



差动脉冲调宽电路

(四) 差动脉宽调制电路

C_1 、 C_2 为差动式传感器

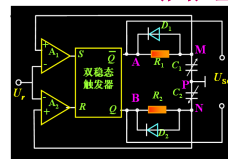
A_1 、 A_2 是两个比较器， U_r 为其参考电压。

A 高 \Rightarrow 通过 R_1 向 C_1 充电

B 低 $\Rightarrow U_M$ 电位上升

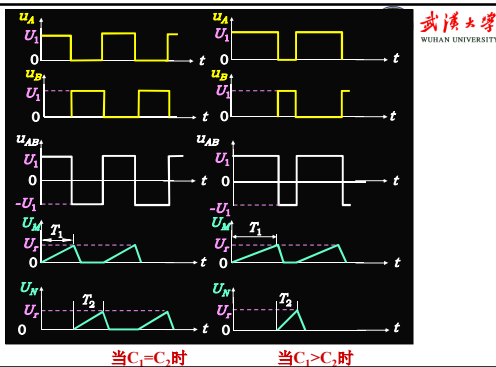
\Rightarrow 当 $U_M > U_r$ 时， U_S 为高
 $\because U_N < U_r, \therefore U_R$ 为低 $\Rightarrow \begin{cases} A \text{ 低} \\ B \text{ 高} \end{cases}$

如此循环反复， AB 将输出方波

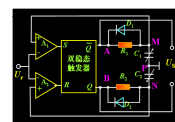


RS 触发器真值表		
R	S	Q
0	1	1
1	0	0
0	0	不变
1	1	不定

差动脉冲调宽电路各点电压波形图



(四) 差动脉宽调制电路



$$U_{SC} = U_A - U_B$$

当 $C_1 = C_2$ 时

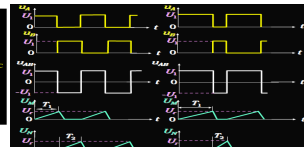
当 $C_1 > C_2$ 时

$$U_{AP} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_1$$

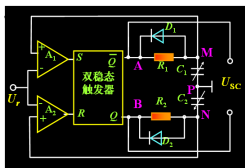
$$U_{BP} = \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_1$$

U_{AP} 、 U_{BP} —A点和B点的矩形脉冲的直流分量；
 T_1 、 T_2 —分别为 C_1 和 C_2 的充电时间；
 U_1 —触发器输出的高电位。

$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$; $T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$
 设 $R_1 = R_2 = R$ ，则：



(四) 差动脉宽调制电路

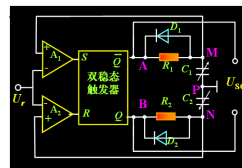


U_1 —触发器输出的高电位。

$$\overline{U_{sc}} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$$

说明差动脉冲调制电路输出的直流电压与传感器两电容差值成正比。

(四) 差动脉宽调制电路



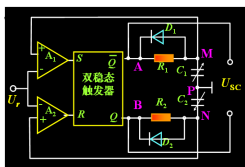
U_1 —触发器输出的高电位。

$$\overline{U_{sc}} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$$

对于差动式变极距型电容传感器：

$$\overline{U_{sc}} = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$$

(四) 差动脉宽调制电路



U_1 —触发器输出的高电位。

$$\overline{U_{sc}} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$$

差动脉冲调制电路能适用于任何差动式电容传感器，并具有理论上的线性特性。该电路采用直流电源，电压稳定度高，不存在稳频、波形纯度的要求，也不需要相敏检波与解调等；对元件非线性要求；经低通滤波器可输出较大的直流电压，对输出矩形波的纯度要求也不高。

二、测量电路



- (一) 交流不平衡电桥
- (二) 变压器电桥
- (三) 二极管环形检波电路
- (四) 差动脉宽调制电路
- (五) 运算法测量电路

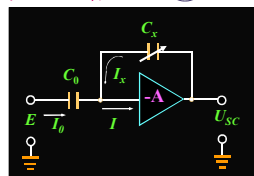
(五) 运算法测量电路



C_x 为传感器， C_0 为固定电容。

当运算放大器输入阻抗很高、增益很大时，可认为运算放大器输入电流为零，根据克希霍夫定律，有：

$$\begin{cases} E = -\frac{I_0}{j\omega C_0} \\ U_{sc} = \frac{I_x}{j\omega C_x} \\ I_0 = -I_x \end{cases} \Rightarrow U_{sc} = -\frac{C_0}{C_x} E$$



运算放大器测量电路

(五) 运算法测量电路

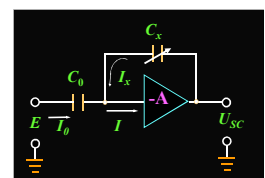


如果传感器是一只平行板电容，则：

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

$$U_{sc} = -\frac{C_0 d}{\epsilon S} E$$

上式是在运算放大器的放大倍数和输入阻抗无限大的条件下得出的，实际上该测量电路仍然存在一定的非线性。



运算放大器测量电路

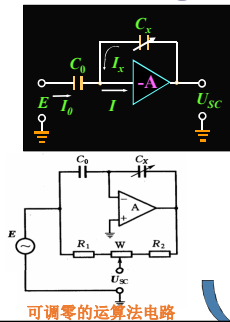
(五) 运算法测量电路

$$U_{sc} = -\frac{C_0 d}{\epsilon S} E$$

由于d的初始值不为零，因此 U_{sc} 的零点输出也不为零，需调零。

设 $C_{X0} = C_0$ ，则：

$$U_{sc} = -\frac{1}{2} E \left(\frac{C_0 d}{\epsilon \cdot S} - 1 \right)$$



可调零的运算法电路

电容式传感器

3.1 电容式传感器的工作原理

3.2 电容式传感器的测量电路

3.3 电容式传感器的误差分析

3.4 电容式传感器的应用示例

3.3 电容式传感器的误差分析

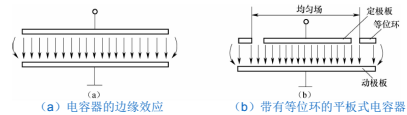
电容式传感器的误差分析

- 温度对结构尺寸的影响
- 电容电场的边缘效应
- 寄生与分布电容的影响

思考题：电容式传感器测量误差产生的主要原因及相应的解决办法。

电容式传感器的设计改善措施

- 1) 消除和减小边缘效应：边缘效应不仅使电容式传感器的灵敏度降低，而且在测量中会产生非线性误差，应尽量减小或消除。
 - 适当减小电容式传感器的极板间距，可以减小边缘效应的影响，但电容易被击穿且测量范围受到限制。
 - 一方面，可采取将电极做得很薄，使之远小于极板间距的措施来减小边缘效应的影响。另一方面，可在结构上增加等位保护环的方法来消除边缘效应，如图4-14所示。



电容式传感器的设计改善措施

2) 保证绝缘材料的绝缘性能

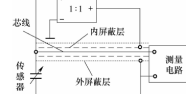
- ① 温度、湿度等环境的变化是影响传感器中绝缘材料性能的主要因素。
- ② 传感器的电极表面不便清洗，应加以密封，可防尘、防潮。
- ③ 尽量采用空气、云母等介电常数的温度系数几乎为零的电介质作为电容式传感器的电介质。
- ④ 传感器内所有的零件应先进行清洗、烘干后再装配。传感器要密封以防止水分侵入内部而引起电容值变化和绝缘性能下降。壳体的刚性要好，以免安装时变形。
- ⑤ 传感器电极的支架要有一定的机械强度和稳定的性能。应选用温度系数小、稳定性好，并具有高绝缘性能的材料，例如石英、云母、人造宝石及各种陶瓷等做支架。虽然这些材料较难加工，但性能远高于塑料、有机玻璃等。

电容式传感器的设计改善措施

3) 减小或消除寄生电容的影响

- 寄生电容可能比传感器的电容大几倍甚至几十倍，影响了传感器的灵敏度和输出特性，严重时会使传感器的有用信号，使传感器无法正常工作。因此，减小或消除寄生电容的影响是设计电容传感器的关键。通常可采用如下方法：

- ① 增加电容初始值：增加电容初始值可以减小寄生电容的影响。采用减小电容式传感器极板之间的距离，增大有效覆盖面积来增加初始电容值。
- ② 采用驱动电缆技术：驱动电缆技术又叫双层屏蔽等位传输技术，它实际上是一种等电位屏蔽法。如图4-15所示，在电容传感器与测量电路前置级间的引线采用双层屏蔽电缆，其内屏蔽层与信号传输线（即电缆芯线）通过增益为1的驱动放大器成为等电位，从而消除了芯线对内屏蔽层的容性漏电，克服了寄生电容的影响，而内外屏蔽层之间的电容是1:1放大器的负载。



驱动放大器是一个输入阻抗很高，具有容性负载，放大倍数为1的同相放大器。该方法的难点在于要在很宽的频带上实现放大倍数等于1，且输入输出的相移为零。

由于屏蔽层上有寄生电容使芯线电位发生变化可变化的电压，因此称为“驱动电缆”。外屏蔽层直接接地或接电源，用来防止外屏蔽层的干扰。

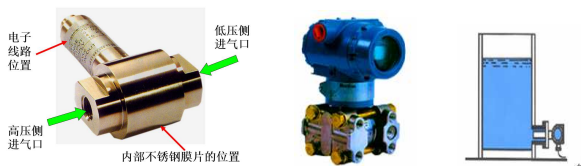
电容式传感器

- 3.1 电容式传感器的工作原理
- 3.2 电容式传感器的测量电路
- 3.3 电容式传感器的误差分析
- 3.4 电容式传感器的应用示例

3.4 电容式传感器的应用

电子技术的发展，解决了电容式传感器存在的许多技术问题，使电容式传感器不但广泛应用于精确测量位移、厚度、角度、振动等物理量，还应用于测量力、压力、差压、流量、成分、液位等参数，在自动检测与控制系统中也常常用来作为位置信号发生器。

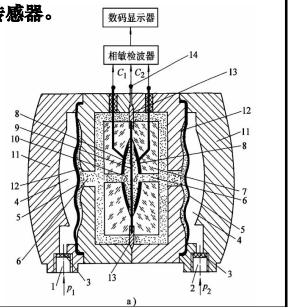
1. 电容式差压变送器



1. 电容式差压变送器

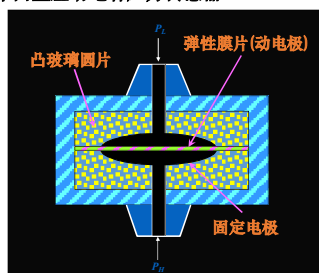
主要讨论球、平面型差动电容压力传感器。

- 1—高压侧进气口
- 2—低压侧进气口
- 3—过滤片
- 4—空腔
- 5—柔性不锈钢波纹隔离膜片(测量膜片)
- 6—导压硅油
- 7—凹形玻璃圆片
- 8—镀金凹形电极
- 9—弹性平膜片(感压膜片)
- 10—8腔

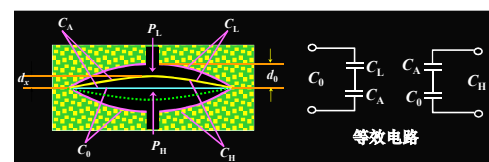


1. 电容式差压变送器

主要讨论球、平面型差动电容压力传感器。



1. 电容式差压变送器

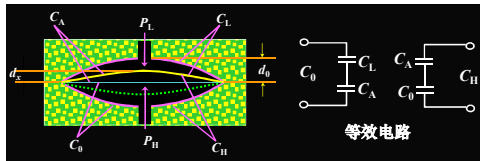


当 $P_H = P_L$ 时，中心膜片处于平直状态，膜片两侧电容均为 C_0 ；

当 $P_H > P_L$ 时，中心膜片上凸，上部电容为 C_L ，下部电容为 C_H 。

C_H 相当于当前膜片位置与平直位置间的电容 C_A 和 C_0 的串联；而 C_0 又可看成是膜片上部电容 C_L 与的 C_A 串联。

1. 电容式差压变送器



即: $C_0 = \frac{C_A C_L}{C_A + C_L} \Rightarrow C_L = \frac{C_A C_0}{C_A - C_0}$; $C_H = \frac{C_A C_0}{C_A + C_0}$

需要解决的问题是: 中心膜片处于平直状态时, $C_0 = C(d_0) = ?$; 当 $P_H > P_L$ 膜片上凸 d_x 时, $C_A = C(d_x) = ?$ 。

1. 电容式差压变送器

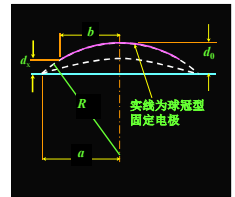
设膜片半径为 a , 球冠形固定电极的半径为 R , 固定电极的实际拱底半径为 b , 拱底距膜片的距离为 d_x , 当 $d_0 \ll R$ 时:

$$C_0 = 2\pi\epsilon R \ln \frac{d_0}{d_x}$$

在 $P_H - P_L$ 作用下,

$$C_A = \frac{4\pi\epsilon T}{P_H - P_L} \ln \frac{a^2}{a^2 - b^2} = \left(4\pi\epsilon T \ln \frac{a^2}{a^2 - b^2} \right) \frac{1}{P_H - P_L} = k \frac{1}{P_H - P_L}$$

其中 k 是一个与传感器结构有关的系数。



1. 电容式差压变送器

$$C_L = \frac{C_A C_0}{C_A - C_0}; C_H = \frac{C_A C_0}{C_A + C_0} \quad C_0 = 2\pi\epsilon R \ln \frac{d_0}{d_x} \quad C_A = k \frac{1}{P_H - P_L}$$

利用脉宽调制电路, 将中心膜片接地, 其输出 U_0 :

$$\overline{U_{SC}} = U_1 \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = U_1 \frac{C_L - C_H}{C_L + C_H}$$

而 $C_L - C_H = \frac{C_A C_0}{C_A - C_0} - \frac{C_A C_0}{C_A + C_0} = \frac{C_A C_0^2}{C_A^2 - C_0^2}$

$$C_L + C_H = \frac{C_0 C_A^2}{C_A^2 - C_0^2} \Rightarrow \frac{C_L - C_H}{C_L + C_H} = \frac{C_0}{C_A}$$

所以 $\overline{U_{SC}} = U_1 \frac{C_0}{C_A} = U_1 \frac{C_0}{k} (P_H - P_L)$

输出 U_{SC} 与差压 $P_H - P_L$ 成正比。

1. 电容式差压变送器

各种电容式
差压变送器外形

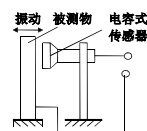


1. 电容式差压变送器

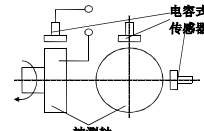


2. 电容式测微仪

非接触式精确测量位移和振动幅度。在最大量程为 $(100 \pm 5) \mu\text{m}$ 时, 最小检测量可达 $0.01 \mu\text{m}$ 。



a) 测振幅

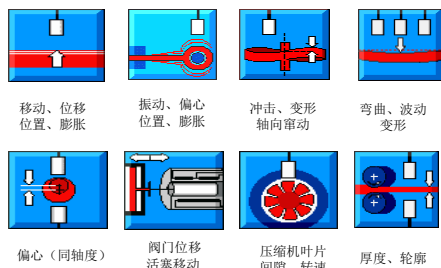


b) 测轴回转精度和轴心偏摆

假设采用运算法测量电路, $U_{SC} = -\frac{C_0 d}{\epsilon S} E$

则输出电压和位移成线性关系。

电容式位移测量



3. 电容式液位计

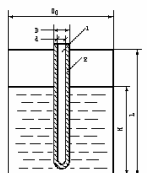
电容式液位计利用液位高低变化影响电容器电容量大小的原理进行测量。依此原理还可进行其它形式的物位测量。对**导电介质**和**非导电介质**都能测量，此外还能测量有倾斜晃动及高速运动的容器的液位。不仅可作液位控制器，还能用于连续测量。

3. 电容式液位计

(1) 安装形式

电容式液位计的安装形式因被测介质性质不同而有差别。

右图为用来测量**导电介质**的单电极电容液位计，它只用一根电极作为电容器的内电极，一般用紫铜或不锈钢，外套聚四氟乙烯塑料管或涂搪瓷作为绝缘层，而**导电液体**和**容器壁**构成电容器的外电极。

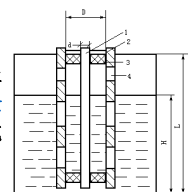


1-内电极；2-绝缘套

3. 电容式液位计

安装形式

右图为用于测量**非导电介质**的同轴双层电极电容式液位计。**内电极**和**与之绝缘的同轴金属套**组成电容的两极，外电极上开有很多流通孔使液体流入极板间。



1、2-内、外电极；
3-绝缘套；4-流通孔

3. 电容式液位计

以上介绍的两种是最一般的安装方法，在有些特殊场合还有其它特殊安装形式，如**大直径容器**或**介电系数较小的介质**，为增大测量灵敏度，通常也只用一根电极，将其靠近容器壁安装，使它**与容器壁构成电容器的两极**；在测大型容器或非导电容器内装非导电介质时，可用两根不同轴的圆筒电极平行安装构成电容；

在测**极低温**下的液态气体时，一个电容灵敏度太低。可取**同轴多层电极结构**，把**奇数层**和**偶数层**的圆筒分别连接在一起成为两组电极，变成相当于多个电容**并联**，以增加灵敏度。

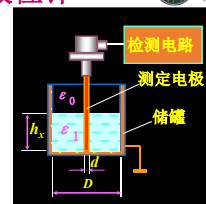
3. 电容式液位计

电容式料位和液位传感器

测定电极安装在金属储罐的顶部，储罐的罐壁和测定电极之间形成了一个电容器。

图中电容随料位高度 h_x 变化的关系为：

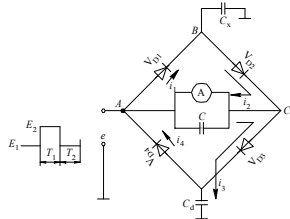
$$C_x = \frac{k(\epsilon_1 - \epsilon_0) h_x}{\ln \frac{D}{d}}$$



式中 k ——比例常数；
 D ——储罐的内径；
 d ——测定电极的直径；
 h_x ——被测物料的高度；
 ϵ_0 ——空气的相对介电常数；
 ϵ_1 ——被测物料的相对介电常数；

3. 电容式液位计

被测电容 C_x 可以配置一个环形二极管电路进行检测。

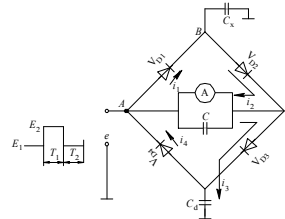


基本工作原理：

用**环形二极管充放电法**测量电容的基本原理是以一高频方波为信号源，通过一环形二极管电桥，对被测电容进行充放电，环形二极管电桥输出一个**与被测电容成正比**的微安级电流。

3. 电容式液位计

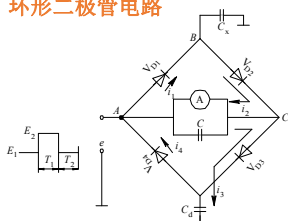
环形二极管电路



输入方波加在电桥的A点和地之间。
 C_x 为被测电容， C_d 为平衡电容
传感器初始电容的调零电容；
 C 为滤波电容；
 A 为直流电流表。

3. 电容式液位计

环形二极管电路

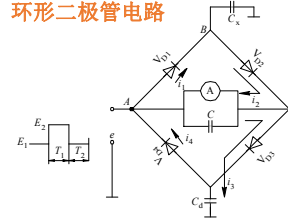


当输入的方波由 E_1 跃变到 E_2 时，电容 C_x 和 C_d 两端的电压皆由 E_1 充电到 E_2 。
对电容 C_x 充电的电流 i_1 所示的方向；
对 C_d 充电的电流如 i_3 所示方向。
在充电过程中(T_1 这段时间)， VD_2 、 VD_4 一直处于截止状态。

在 T_1 这段时间内由A点向C点流动的电荷量为：
 $q_1 = C_d(E_2 - E_1)$

3. 电容式液位计

环形二极管电路



当输入的方波由 E_2 跃变到 E_1 时，电容 C_x 和 C_d 放电；电压皆由 E_2 放电到 E_1 。
对电容 C_x 放电的电流 i_2 所示的方向；
对 C_d 放电的电流如 i_4 所示方向。
在放电过程中(T_2 这段时间)， VD_1 、 VD_3 一直处于截止状态。

在 T_2 这段时间内由C点向A点流动的电荷量为：
 $q_2 = C_x(E_2 - E_1)$

3. 电容式液位计

环形二极管电路

设方波的频率 $f=1/T_0$ (即每秒钟要发生的充放电过程的次数)，则由C点流向A点的平均电流为 $I_2=C_d f(E_2 - E_1)$ ，而从A点流向C点的平均电流为 $I_3=C_x f(E_2 - E_1)$ ，流过此支路的瞬时电流的平均值为

$$I = C_x f(E_2 - E_1) - C_d f(E_2 - E_1) = f \Delta E (C_x - C_d)$$

式中， ΔE 为方波的幅值， $\Delta E = E_2 - E_1$ 。

令 C_d 的初始值为 C_0 ， ΔC_x 为 C_x 的增量，则 $C_x = C_0 + \Delta C_x$ ，调节 $C_d = C_0$ 则

$$I = f \Delta E (C_x - C_d) = f \Delta E \Delta C_x$$

由上式可以看出， I 正比于 ΔC_x 。

3. 电容式液位计

环形二极管电路

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon h_x}{\ln \frac{D}{d}}$$

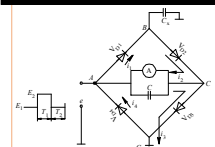
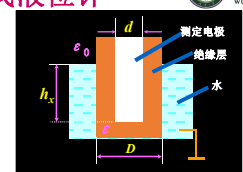
$$I = f \Delta E (C_x - C_d)$$

$$= f \Delta E \Delta C_x$$

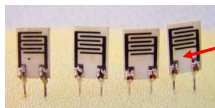
$$\Delta E = E_2 - E_1;$$

$$f = 1/T_0, \text{ 为方波的频率;}$$

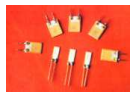
在方波频率和幅值一定的情况下，输出电流的变化与液位成正比。



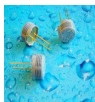
湿敏电容



吸水高分子薄膜



利用具有很大吸湿性的绝缘材料作为电容传感器的介质，在其两侧面镀上多孔性电极。当相对湿度增大时，吸湿性介质吸收空气中的水蒸气，使两块电极之间的介质相对介电常数大为增加（水的相对介电常数为80），所以电容量增大。



多孔氧化铝湿敏电容模块及传感器外形

5. 电容式键盘

利用变极距型电容传感器实现信息转换。



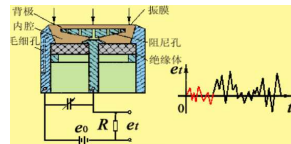
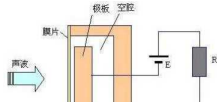
常规的键盘有**机械按键**和**电容按键**两种。

电容式键盘是基于电容式开关的键盘，**原理**是通过按键改变电极间的距离产生电容量的变化，暂时形成震荡脉冲允许通过的条件。这种开关是无触点非接触式的，磨损率极小。

6. 电容式传声器

传声器（Microphone）即话筒，音译作**麦克风**，目前使用的话筒大多是**动圈式**和**电容式**。

电容传声器以**振膜**与**后极板**间的**电容**变化通过前置放大器变换为输出电压。



驻极体电容传声器 大膜片电容传声器



7. 电容式指纹传感器

目前的指纹采集技术主要有**光学采集**、**半导体采集**、**超声波采集**。

(1) **半导体压感式传感器**

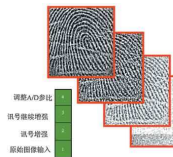
其表面的顶层是具有弹性的压感介质材料，它们依照指纹的外表地形（凹凸）转化为相应的电子信号，并进一步产生具有灰度值的指纹图像。

(2) **半导体温度感应传感器**

它通过感应压在设备上的脊和远离设备的谷温度的不同就可以获得指纹图像。

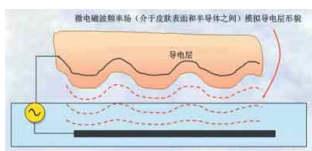
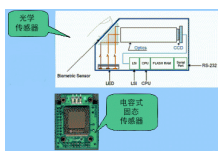
(3) **硅电容指纹图像传感器**

通过电子度量来捕捉指纹。在半导体金属阵列上能结合大约100,000个电容传感器，其外面是绝缘的表面。



指纹识别目前最常用的是**电容式传感器**，也被称为**第二代指纹识别系统**。它的优点是体积小、成本低，成像精度高，而且耗电量很小，因此非常适合在消费类电子产品中使用。

7. 电容式指纹传感器



传感器阵列的**每一点是一个金属电极**，充当电容器的一极，按在传感面上的手指头的对应点则作为另一极，传感面形成两板之间的**介电层**。由于指纹的脊和谷相对于另一极之间的距离不同（纹路深线的存在），导致硅表面电容阵列的各个电容值不同，测量并记录各点的电容值，就可以获得具有灰度值的指纹图像。

指纹识别系统的电容传感器发出电子信号，电子信号将穿过手指的表面和死性皮肤层，直达手指皮肤的**活体层（真皮层）**，直接读取指纹图案。由于深入真皮层，传感器能够捕获更多真实数据，不易受手指表面尘污的影响，提高辨识准确率，有效防止辨识错误。

7. 电容式指纹传感器



西门子推出的“ID Mouse”鼠标。这个鼠标在**0.25平方英寸**的触摸芯片上有**65000个**传感系统，可捕捉指纹的细节。

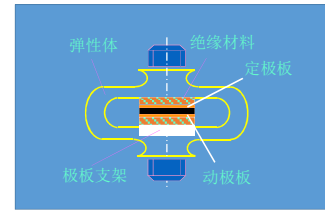


最早的指纹识别手机是98年西门子推出的SL10指纹手机。

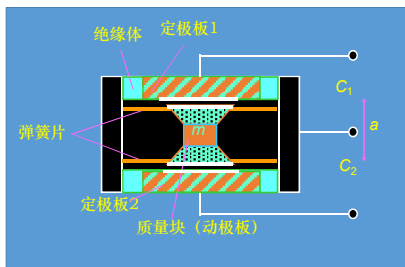
7. 电容式指纹传感器



电容式称重传感器

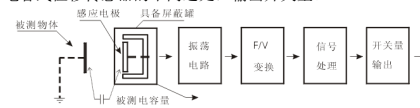


电容式加速度传感器



电容式接近开关

测量头通常是构成电容器的一个极板，而另一个极板是物体本身。与电容式位移传感器的不同之处：输出开关量。



被测物体可以是导体、介质损耗较大的绝缘体、含水的物体（例如饲料、人体等）；可以是接地的，也可以是不接地的。调节接近开关尾部的灵敏度调节电位器，可以根据被测物不同来改变动作距离。



普通式

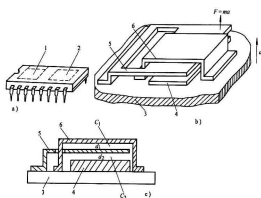


远距离式



全密封防水式

硅微加工加速度传感器



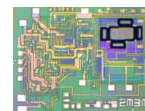
- 1—加速度测试单元
- 2—信号处理电路
- 3—衬底
- 4—底层多晶硅(下电极)
- 5—多晶硅悬臂梁
- 6—顶层多晶硅(上电极)

由于硅的弹性滞后很小，且悬臂梁的质量很轻，所以频率响应可达1kHz以上，允许加速度范围可达10g以上

硅微加工加速度传感器

技术指标：

- 灵敏度：500mV/g；
- 量程：10g；
- 频率范围：0.5-2000Hz；
- 安装谐振点：8kHz；
- 分辨力：0.00004g；
- 重量：200g；
- 安装螺纹：M5；
- 线性误差：≤1%



电容式接近开关在物位测量控制

机械工业出版社
<http://www.cmpbook.com>

