

第5章

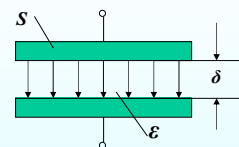
电容式传感器

(一) 电容式传感器原理与结构

• 原理：将被测物理量转换成电容量变化的传感器

两平行平面导体之间的电容量为：

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\delta} \quad [\text{F}] \quad (3-13)$$



式中： ϵ ——极板间介质的相对介电常数；

ϵ_0 ——真空中的介电常数， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$ ；

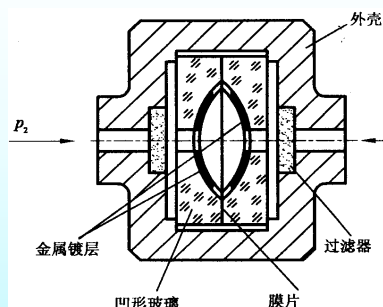
S ——两极板间相互覆盖面积， m^2 ；

δ ——两极板之间的距离， m 。

• 除 ϵ_0 外， ϵ 、 S 和 δ 三个参数都影响电容大小

• 任意两者恒定，第三个参量与电容呈单值函数关系

1. 变极距型电容器的传感器(续)



差动式电容式压力传感器结构图

1. 变极距型电容器的传感器(续)

• 由机械支撑和壳体装配而成，由电容量变化测量位移量

• 最基本的变极距型电容传感器：

定极板固定，动极板随被测位移移动，改变两极板之间的电容量

• 若电容器极板间距离由初始值 δ_0 缩小为 $\Delta\delta$ ，电容量增大 ΔC ，则：

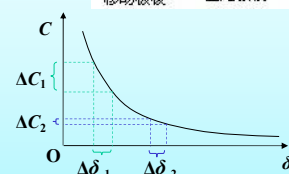
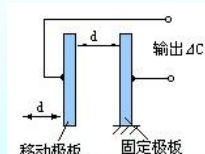
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\delta} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} = \frac{C_0 (1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0})}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

传感器输出特性 $C = f(\delta)$ 不是线性关系，若：

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 1$$

$$\text{则：} \quad C \approx C_0 \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right) \quad (3-a)$$

传感器通常在极小的测量范围内工作，此时， ΔC 与 $\Delta\delta$ 近似呈线性关系。



1. 变极距型电容器的传感器(续)

(2) 双介质层变极距型传感器

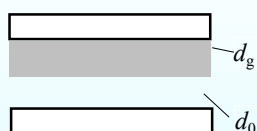


图5-4 放置云母片的电容器

$$C = \frac{A}{\frac{d_g}{\epsilon_g} + \frac{d_0}{\epsilon_0}}$$

对于云母， $\epsilon_g \approx 6 \sim 8.5$

结论

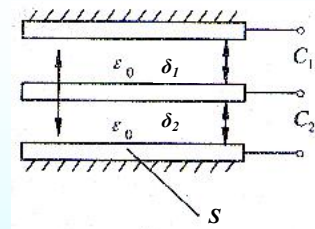
变极板间距离电容式传感器起始电容在 $20 \sim 100 \text{pF}$ 之间，极板间距离在 $25 \sim 200 \mu\text{m}$ 范围内，最大位移应小于间距的 $1/10$ ，可用于微位移测量。

1. 变极距型电容器的传感器(续)

(3) 差动变极距电容传感器

• 特点：提高灵敏度和线性度，克服电压、环境温度等外界条件影响

• 结构：上下两极板固定，中间极板活动



差动平板式电容传感器结构

• 使用：未测量时，活动极板先调整在中间位置——两边电容相等

测量时，中间极板向上或下平移——电容量上增下减变化

当动极板向上位移 $\Delta\delta$ 时：

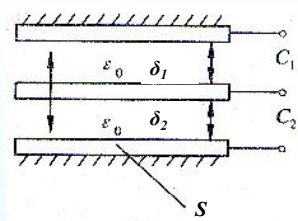
电容器 C_1 的间隙 δ_1 变为 $\delta_0 - \Delta\delta$ ；

电容器 C_2 的间隙 δ_2 变为 $\delta_0 + \Delta\delta$ ；

则：

$$C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$



在 $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ 时，按泰勒级数展开：

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

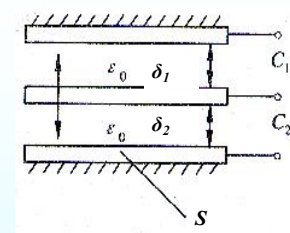
$$C_2 = C_0 \left[1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^3 + \dots \right]$$

电容值总变化量：

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

电容值相对变化量：

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



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

当 $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \ll 1$ 时，略去高次项，得到近似的线性：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2\frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

电容传感器的灵敏度为：

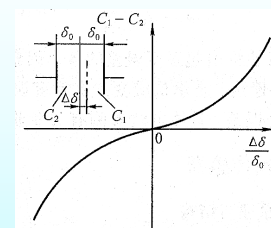
$$K = \frac{\Delta C}{\Delta\delta} = \frac{2}{\delta_0}$$

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

只保留上式中的线性项和三次项，

电容式传感器相对非线性误差 θ 为：

$$\theta = \frac{2\left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^3}{2\left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)} \times 100\% = \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 \times 100\%$$

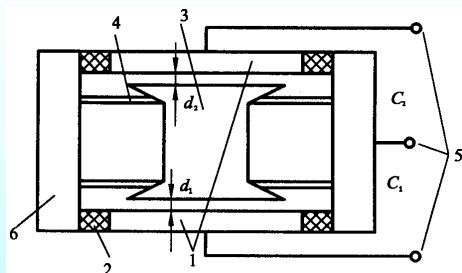


差动式电容传感器特性

差动式电容传感器灵敏度可提高1倍，零点附近的非线性误差大大降低

变极距型电容式传感器应用

加速度传感器

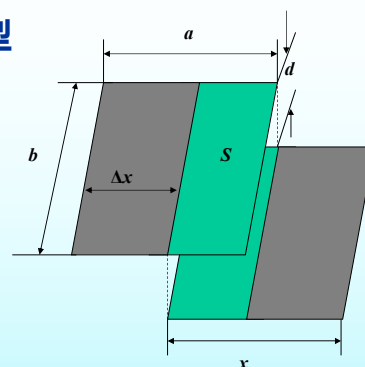


—固定电极；2—绝缘垫；3—质量块；4—弹簧；5—输出端；6—壳体

差动式电容加速度传感器结构图

2.变面积型电容式传感器

(1)线位移型



线位移型电容传感器原理图

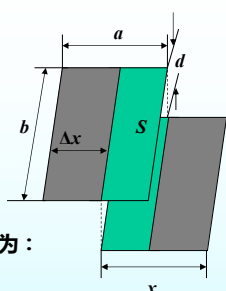
动极板沿定极板移动 Δx ，则电容量变化为：

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r [a - x] b}{d} - C_0$$

式中： $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r b a / d$ 为初始电容，电容相对变化量为：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{x}{a}$$

ΔC 与动极板位移 Δx 呈线性关系



电容器式传感器的灵敏度及非线性

灵敏度（变面积型）

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{1}{d_0} \quad (\text{忽略了线性及以上高次项})$$

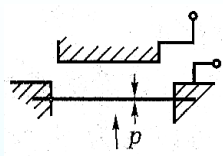
非线性

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

泰勒展开

非线性误差：

$$\text{非线性误差} = \frac{\left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^4 + \dots}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \dots} \approx 100\% \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \approx 100\%$$

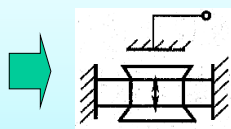


• 压力敏感弹性元件——“膜片”作为电容器的活动极板

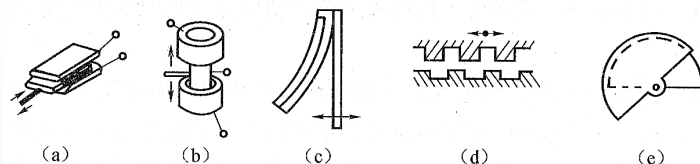
压力变化使弹性膜片上下变形引起电容变化。广泛应用于微压、声压测量。

• 电容式加速度传感器

质量块(敏感元件)用两个弹簧片固定，上平面为电容器的活动极板。质量块感受加速度而有位移时电容随之变化。



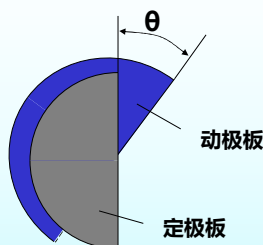
变面积型电容传感元件



$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (3-14)$$

- 上图是测量线位移(a, b, c, d)以及角位移(e)的电容传感元件
 - 将位移变为电容器相互覆盖面积的变化
 - 为了提高灵敏度，可采用差动式(b)、多片式(a)(e)或多齿式(d)
 - 电容的变化与两极板相互覆盖的面积成线性关系
- 与变极距型相比，此方面有可取之处

(2)角位移型



电容式角位移传感器原理图

当动极板产生角位移 θ 时，与定极板间的有效覆盖面积改变，两极板间的电容量改变。

$$\text{当 } \theta=0 \text{ 时, } C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S_0}{d_0}$$

式中： ε_r ——介质相对介电常数；

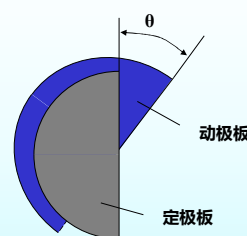
d_0 ——两极板间的距离；

S_0 ——两极板间初始覆盖面积。

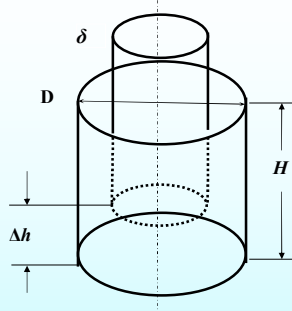
当 $\theta \neq 0$ 时，则：

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right)}{d_0} = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right)$$

电容量 $\Delta C = C_0(\theta/\pi)$ 与角位移 θ 呈线性关系



(3)圆柱位移型



圆柱位移型电容传感器原理结构示意图

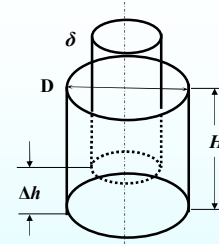
当 $\Delta h = 0$ 时,

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r H}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$C = C_0 = C_0 \frac{h}{H}$$

于是:

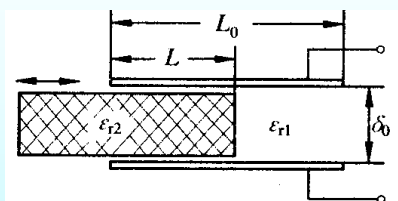
$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 \frac{h}{H} = \frac{C}{C_0} = \frac{h}{H}$$

电容量的变化 ΔC 与高度的变化 Δh 呈线性关系

3. 变介质型电容式传感器

(1)变介质型传感器

常用变介质型电容传感器的结构



用途

- 测量纸张、绝缘薄膜等的厚度
- 测量粮食、纺织品、木材或煤等非金属固体介质的湿度

- 两平行电极固定不动，极距为 d_0
- 将相对介电常数为 ϵ_r2 的电介质插入电容器
- 改变两种介质的极板覆盖面积
- 传感器总电容量 C 为:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0\epsilon_r1(L_0 - L)b_0}{d_0} + \frac{\epsilon_0\epsilon_r2Lb_0}{d_0}$$

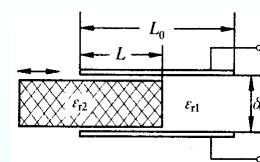
式中: L_0, b_0 —— 极板长度和宽度;
 L —— 第二种介质进入极板间的长度。

若电介质 $\epsilon_r1=1$, 当 $L=0$ 时, 传感器初始电容:

$$C_0 = \epsilon_0\epsilon_r1L_0b_0/d_0$$

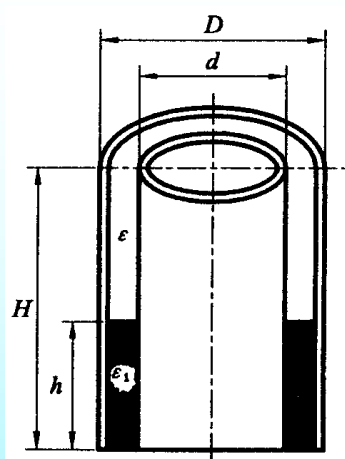
当介质 ϵ_r2 进入极间 L 后, 引起电容的相对变化为:

$$\frac{C - C_0}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\epsilon_r2 - 1)L}{L_0}$$

电容的变化 ΔC 与电介质 ϵ_r2 的移动量 L 呈线性关系

(2)典型应用: 液位传感器

变极板间介质的电容式传感器的应用,
 用于测量液位高低

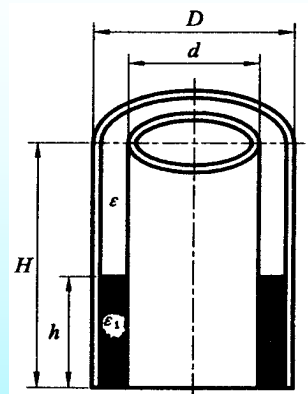


- 被测介质的介电常数为 ϵ_1
- 液面高度为 h , 变换器总高度为 H , 内筒外径为 d , 外筒内径为 D
- 变换器电容值为:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2\pi\epsilon_1 (H - h)}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_1 H}{\ln \frac{D}{d}} - \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}}$$

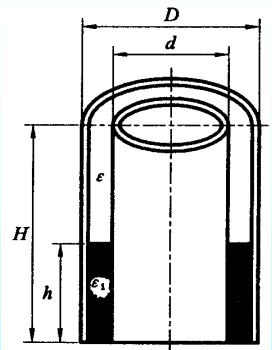
$$= C_0 - \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}}$$



式中： ε ——空气介电常数；

C_0 ——由变换器的基本尺寸决定的初始电容值：

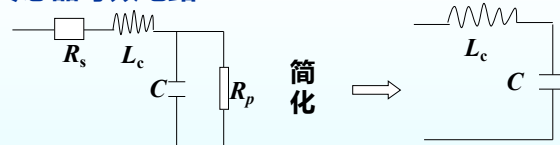
$$C_0 \approx \frac{2\pi H}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$\Delta C \approx \frac{2\pi \varepsilon_1 \Delta h}{\ln \frac{D}{d}}$$


变换器的电容增量 ΔC 正比于被测液位高度 h 。

(二) 电容传感器电路

电容传感器等效电路



计算有效电容 C_e :

$$\frac{1}{j\omega C_e} = \frac{1}{j\omega C} = j\omega L_c$$

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 L_c C}$$

注意：

- 工作频率等于或接近谐振频率时，电容无法正常工作——工作频率应低于谐振频率。
- 电容式传感器的有效电容除与位移有关外，还与角频率有关——实际应用时必须与标定的条件（ ω ）相同。

(二) 电容传感器电路 (续)

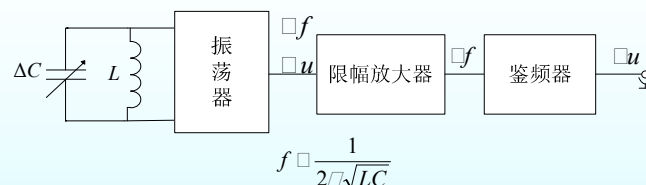
电容式传感器测量电路

电容传感器特点：电容小，变化更小（PF级）。理论上，交流电桥可作为测量电路，因电容变化太小，不易实现。

- 调频电路
- 运算放大器式电路
- 二极管双T形交流电桥
- 脉冲宽度调制电路

(二) 电容传感器电路 (续)

1. 调频电路

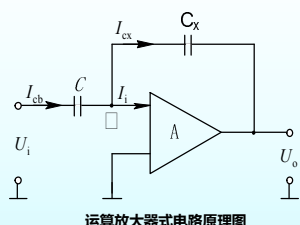


特点：

- 转换电路生成频率信号，可远距离传输不受干扰。
- 灵敏度较高，可以测量高至 0.01μm 级位移变化量。
- 非线性较差，可通过鉴频器（频压转换）转化为电压信号后补偿。

(二) 电容传感器电路 (续)

2. 运算放大器式电路



运算放大器式电路原理图

运算放大器要求：输入阻抗高（避免泄漏）、放大倍数大（接近理想放大器）

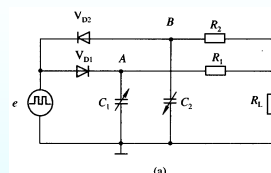
$$\left. \begin{aligned} U_o &\approx \frac{CU_i}{\Delta} \Delta \\ C_x &\approx \frac{\Delta A}{d} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_o \approx \frac{C}{C_x} U_i$$

特点：

- 解决了单个变极距式电容传感器非线性问题，要求 Z_i 及放大倍数足够大
- 为保证仪器精度，要求电源电压的幅值和固定电容稳定，由于 C_x 变化小，所以该电路难以实现

(二) 电容传感器电路 (续)

3. 二极管双T形交流电桥

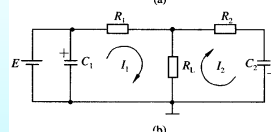


正负半周分析：

正半周： C_1 充电，电流顺时针； C_2 放电，电流逆时针

负半周： C_2 充电，电流逆时针； C_1 放电，电流顺时针

若 $C_1 = C_2$ ，则电流抵消，若 $C_1 \neq C_2$ ，则 R_L 有信号输出

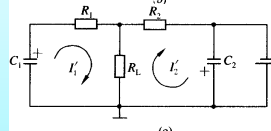


$$U_o \approx I_L R_L \approx \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T [I_1(t) - I_2(t)] dt \right\} R_L$$

$$\approx \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L U_i f [(C_1 - C_2)] \approx U_i f M [(C_1 - C_2)]$$

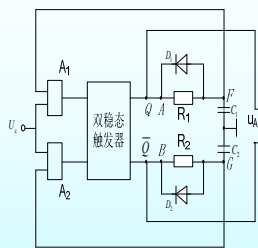
说明：

- 该电路电源频率 MHz 级，电源电压几十伏，电源稳定性对输出直接产生影响。
- 当电容以 PF 级变化时，输出以 V 级变化。



(二)电容传感器电路 (续)

4. 脉冲宽度调制电路



C_1 充电, V_F 。当 $V_F > V_{ref}$ 时, $D_- = 0$ $Q = 0$, 信号反转, $Q = 1$ 。 C_1 经 D_1 放电。

C_2 充电, V_G 。当 $V_G > V_{ref}$ 时, $D_- = 0$ $Q = 0$, $Q = 1$, 再次反转。 C_2 经 D_2 放电。

设双稳态触发器输出高电平 U_1 , 低电平 0

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_{ref}} \\ T_2 &= R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_{ref}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_{AB} = \frac{C_1 C_2}{C_1 C_2} U_1 \frac{d_2 d_1}{d_1 d_2} U_1$$

当 $d_1 = d_0 - \Delta d$, $d_2 = d_0 + \Delta d$ 时, 有 $u_{AB} = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$

(二)电容传感器电路 (续)

4. 脉冲宽度调制电路 (续)

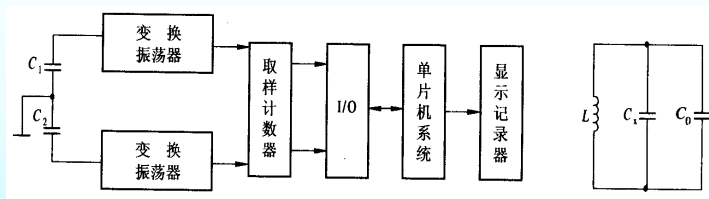
小结:

- 不论是极距变化型或面积变化型, 其输入与输出变化量都呈线性关系, 且脉冲宽度调制电路对传感元件的线性要求不高;
- 不需要解调电路, 只要经过低通滤波器就可以得到直流输出;
- 调宽脉冲频率的变化对输出无影响;
- 由于采用直流稳压电源供电, 不存在对其波形及频率的要求。

以上特点其他电容测量电路无法比拟。

(二)电容传感器电路 (续)

差动式电容测厚传感器



频率差动式电容测厚传感器原理框图

(三)电容传感器误差分析

1. 温度误差

- 环境温度变化会引起电容式传感器内部零件形状、尺寸、大小及零件材料线膨胀系数的变化, 从而产生测量误差。
- 应选用温度系数小、几何尺寸稳定、绝缘性高以及低吸潮性的材料制作电极支架。
- 若温度不太高, 也可用聚四氟乙烯。
- 应选择介电常数的温度系数接近零的材料。
- 传感器尽量采用差动对称结构。

(三)电容传感器误差分析

1. 温度误差 (续)

设初始温度为 t_0 时, 电容传感器工作极片与固定极片的间隙 d_0 为

$$d_0 = L - h_1 - h_2$$

式中 L 、 h_1 、 h_2 分别为初始温度为时的总间隙、绝缘材料的厚度和固定极片的厚度。因为传感器各零件材料不同, 温度膨胀系数不同, 因此当温度变化后, 间隙 d_t 为

$$d_t = L(1 + \alpha_L \Delta t) - h_1(1 + \alpha_{h1} \Delta t) - h_2(1 + \alpha_{h2} \Delta t)$$

式中 α_L 、 α_{h1} 、 α_{h2} 分别为传感器各零件所用材料的温度线膨胀系数。由于温度变化而引起的电容量相对误差为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C_t - C_0}{C_0} = \frac{d_0 - d_t}{d_t} \frac{C_t}{C_0}$$

式中 C_0 为传感器在温度 t_0 时的电容; C_t 为传感器在温度 t 时的电容。

(三)电容传感器误差分析

1. 温度误差 (续)

将式(6-31)和式(6-32)代入式(6-33)后得

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{(L \alpha_L - h_1 \alpha_{h1} - h_2 \alpha_{h2}) \Delta t}{d_0 (L \alpha_L - h_1 \alpha_{h1} - h_2 \alpha_{h2}) \Delta t} \quad (6-34)$$

使 $\Delta C = 0$ 可以消除温度误差, 即

$$h_1 \alpha_{h1} - h_2 \alpha_{h2} = L \alpha_L \quad (6-35)$$

传感器尺寸 L 、 h_1 、 h_2 、 d_0 代入式(6-35), 得

$$h_1 \alpha_{h1} - h_2 \alpha_{h2} = (h_1 h_2 d_0 \alpha_L) \quad (6-36)$$

整理可得

$$h_1 \alpha_{h1} - h_2 \alpha_{h2} = 1 - \frac{h_2}{h_1} \alpha_{h2} = 1 - \frac{h_2}{h_1} \alpha_{h2} \quad (6-37)$$

设计电容传感器时适当选择初始间隙 d_0 , 线膨胀系数 α_{h1} 、 α_{h2} 、 α_L , 以及 h_1 和 h_2 满足式(6-37)即可满足温度补偿条件。

(三)电容传感器误差分析(续)

2.静电击穿问题

$$C \propto \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (3-15)$$

- 测量电容变化, 需对两极板施以电压, 形成电位差
- 减小两极板间的距离可以提高灵敏度
- 电位差存在时, 极间距离过小会引起击穿
- 方法: 两极板间附加一层云母或塑料薄片

极板间起始距离可大大减小

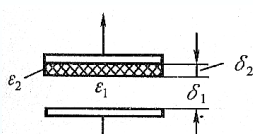
云母片的相对介电常数是空气的7倍

云母片的击穿电压不小于1000 kV/mm, 而空气仅为3kV/mm

从而大大提高抗击穿性能

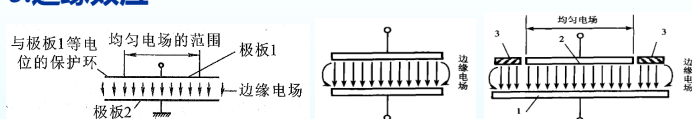
式(3-15) 变为:

$$C \propto \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}$$



(三)电容传感器误差分析(续)

3.边缘效应



- 两极板间的电场在中心附近分布均匀, 边缘部分的分布不均匀
- 如不采取措施, 需将圆极板直径增加

圆极板直径增加极距的 3/8倍, 才能达到名义尺寸要求的电容量

- 方法: 可以在需要工作的极板面积周围加**保护环**, 消除边缘效应

使工作极板全部面积皆处于均匀电场的范围

(三)电容传感器误差分析(续)

4.寄生电容

- 电容器两极板要接后续电路, 传输导线存在电容
- 该电容值与导线的长度、形状等有关
- 过渡、连续及附近结构会形成极间耦合而造成杂散电容
- 寄生电容在测量中数值不稳定
- 导致附加电容的数值漂移
- 将后续的前置放大器集成后, 置于电容传感元件的极板附近
- 可基本消除因引出电容的导线结构而产生的寄生电容影响

(三)电容传感器误差分析(续)

5.静电引力

- 对某些**薄膜片**或**超轻型金属构件**作电容测量, 并作为极板时
- 两极板间的静电引力会引起被测构件位置变化而影响测量结果
- 采用**差动式电容器**结构可以缓解静电引力影响

The End