



第4章 电容式传感器



自动化学院测量科学与仪器系

1

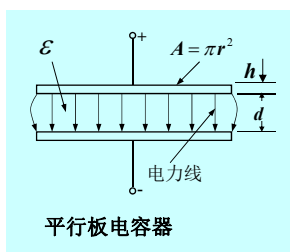
本章目录

- 4.1 电容式传感器的工作原理和结构
- 4.2 电容式传感器的灵敏度及非线性
- 4.3 电容式传感器的误差分析
- 4.4 电容式传感器的测量电路
- 4.5 电容式传感器的应用

自动化学院测量科学与仪器系

2

1 电容传感器的工作原理和结构



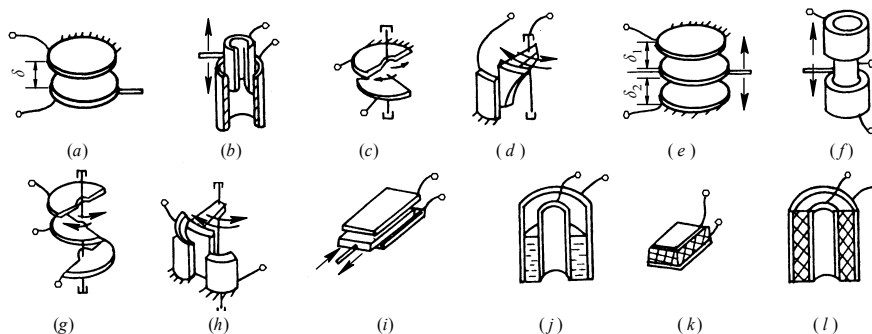
- 平板电容器：由绝缘介质分开的两个平行金属板
- 不考虑边缘效应, 其电容量

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

- ①变极距型：用于测量机械位移。
- ②变面积型：改变覆盖面积(覆盖长度或宽度)，用于测量位移。
- ③变介电常数型：覆盖面积及极距均不变，被测量为 ϵ 。

3

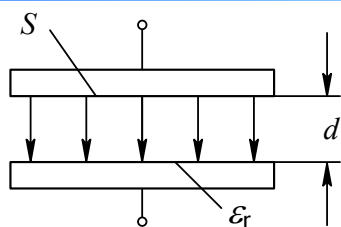
电容式传感元件的各种结构形式



自动化学院测量科学与仪器系

4

1 变极距型电容传感器



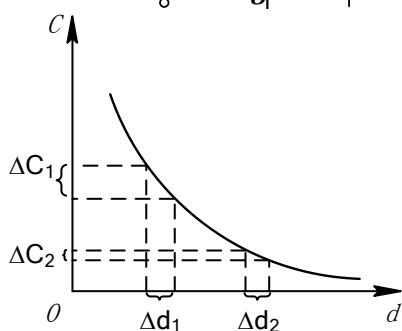
初始电容量

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0}$$

极板间距离由初始值 d_0 缩小了 Δd ,
电容量增大了 ΔC

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0 - \Delta d} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}}$$

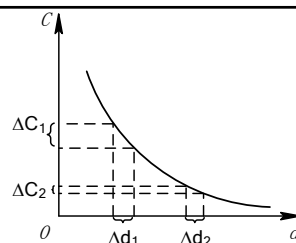
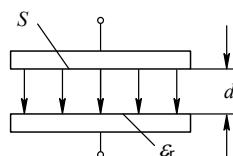
• 具有原理上的非线性 **How?**



自动化学院测量科学与仪器系

5

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}}$$



若 $\Delta d/d_0 < 1$, 则展成级数:

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

• 变极距型电容式传感器 ($\Delta d/d_0$ 很小) 有近似的线性关系。

✓ d_0 较小, Δd 对应的 ΔC 增大, 提高传感器的灵敏度;

× d_0 过小, 容易引起电容器击穿或短路 → 极板间可采用高介电常数的材料 (云母、塑料膜等) 作介质。

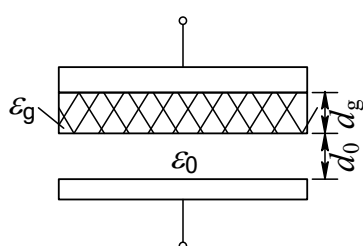
自动化学院测量科学与仪器系

6

关于灵敏度的说明

- 通常变极板间距离电容式传感器的起始电容在 20 ~ 100pF 之间, 极板间距离在 25 ~ 200 μm 的范围内 ;

- 最大位移小于间距的 1/10 \rightarrow 在微位移测量中应用最广。

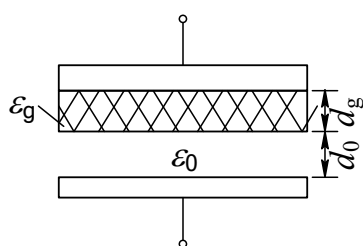


放置云母片的电容器

- 小的间距可提高传感器灵敏度。但间距过小, 容易引起电容器击穿或短路。
- 极板间可采用高介电常数的材料 (云母、塑料膜等) 作介质。
- 云母片的相对介电常数是空气的 7 倍, 其击穿电压不小于 1000 kV/mm, 而空气仅为 3kV/mm。

放置云母片的电容器

电容C变为:



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

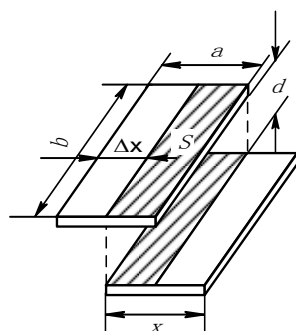
式中: ϵ_g ——云母的相对介电常数, $\epsilon_g=7$;

ϵ_0 ——空气的介电常数, $\epsilon_0=1$;

d_0 ——空气隙厚度;

d_g ——云母片的厚度。

2 变面积型电容式传感器



当动极板相对于定极板沿长度方向平移 Δx 时，则电容变化量

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta x \cdot b}{d}$$

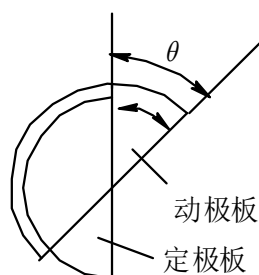
电容相对变化量为 $\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta x}{a}$

- 传感器电容变化量 ΔC 与水平位移 Δx 呈线性关系。

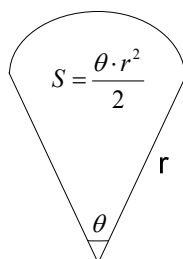
自动化学院测量科学与仪器系

9

电容式角位移传感器的工作原理



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

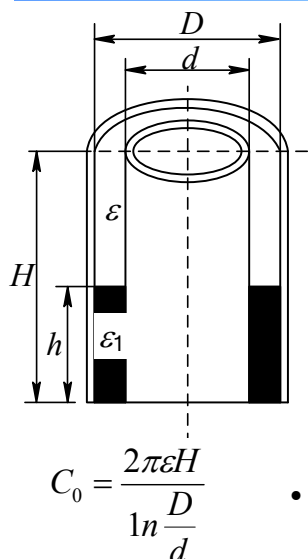


- 传感器的电容量 C 与角位移 θ 呈线性关系。

自动化学院测量科学与仪器系

10

3 变介质型电容式传感器（液位）



忽略边缘效应

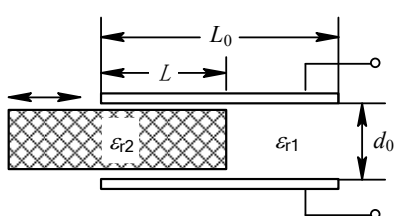
$$\begin{aligned} C &= \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon(H-h)}{\ln \frac{D}{d}} \\ &= \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} \\ &= C_0 + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} \end{aligned}$$

- 电容增量正比于被测液位高度 h 。

自动化学院测量科学与仪器系

11

变介质型电容式传感器



- 初始电容 $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_1 L_0 b_0 / d_0$ ($L=0$)

- 被测介质 ϵ_{r2} 进入极板间 L 深度

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 \\ &= \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1}(L_0 - L) + \epsilon_{r2}L}{d_0} \end{aligned}$$

- 电容相对变化量

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

可见，电容量的变化与电介质 ϵ_{r2} 的移动量 L 成线性关系。

自动化学院测量科学与仪器系

12

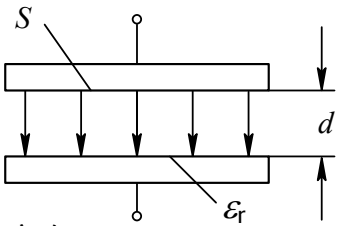
表5-1 电介质材料的相对介电常数

| 材 料 | 相对介电常数 ϵ_r | 材 料 | 相对介电常数 ϵ_r |
|-------|---------------------|-------|---------------------|
| 真 空 | 1.000 00 | 硬橡胶 | 4.3 |
| 其它气体 | 1~1.2 | 石英 | 4.5 |
| 纸 | 2.0 | 玻璃 | 5.3~7.5 |
| 聚四氟乙烯 | 2.1 | 陶瓷 | 5.5~7.0 |
| 石油 | 2.2 | 盐 | 6 |
| 聚乙烯 | 2.3 | 云母 | 6~8.5 |
| 硅油 | 2.7 | 三氧化二铝 | 8.5 |
| 米及谷类 | 3~5 | 乙醇 | 20~25 |
| 环氧树脂 | 3.3 | 乙二醇 | 35~40 |
| 石英玻璃 | 3.5 | 甲醇 | 37 |
| 二氧化硅 | 3.8 | 丙三醇 | 47 |
| 纤维素 | 3.9 | 水 | 80 |
| 聚氯乙烯 | 4.0 | 钛酸钡 | 1 000~10 000 |

4.2 电容式传感器的灵敏度及非线性

变极距电容的相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}}$$



当 $|\Delta d/d_0| \ll 1$ 时，按级数展开，略去高次项

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

➡ $\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0}$ (近似的线性关系)

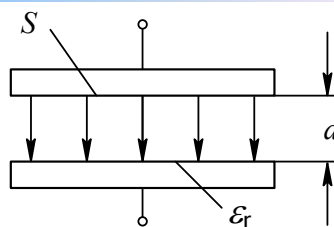
电容式传感器的灵敏度及非线性

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

灵敏度 $K = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta d} = \frac{1}{d_0}$

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

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

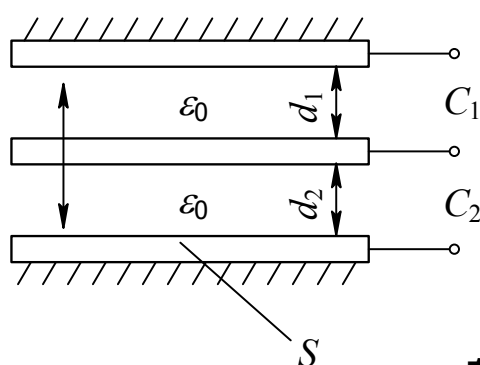


提高灵敏度，应减小起始间隙 d_0 ，但非线性误差却随着 d_0 的减小而增大。How?

自动化学院测量科学与仪器系

15

差动结构（提高灵敏度，减小非线性误差）



动极板位移 Δd :

$d_1 = d_0 - \Delta d$, $d_2 = d_0 + \Delta d$, 则

$$C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \Delta d / d_0}$$

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \Delta d / d_0}$$

在 $\Delta d / d_0 < 1$ 时，按级数展开，

电容值变化量 $\Delta C = C_1 - C_2 = 2C_0 \left[\frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^5 + \dots \right]$

自动化学院测量科学与仪器系

16

差动结构（提高灵敏度，减小非线性误差）

总电容值相对变化量

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

略去高次项，

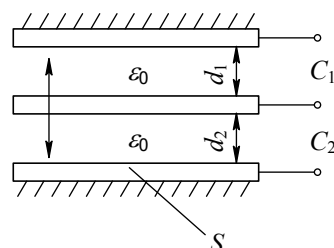
$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0} \rightarrow \text{近似线性关系}$$

只考虑线性项和三次项, 则传感器的相对非线性误差

$$\delta = \frac{2 |(\Delta d / d_0)^3|}{2 |\Delta d / d_0|} \times 100\% = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \times 100\% \quad (5-26)$$

自动化学院测量科学与仪器系

17



差动结构的优点（比较）

- 灵敏度得到一倍的改善

$$\frac{\Delta C}{C_0} / \Delta d \approx \frac{2}{d_0} \qquad \frac{\Delta C}{C_0} / \Delta d \approx \frac{1}{d_0}$$

- 线性度得到改善

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

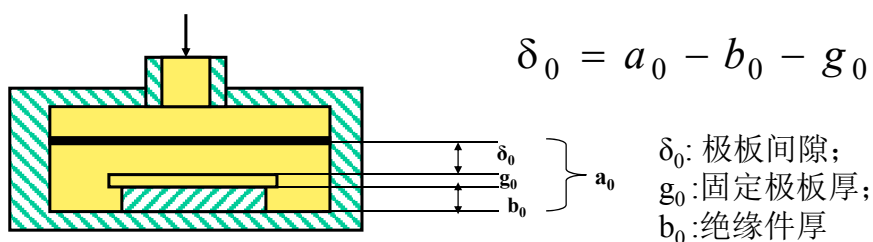
自动化学院测量科学与仪器系

18

4.3 电容传感器的误差分析

温度对电容传感器的影响

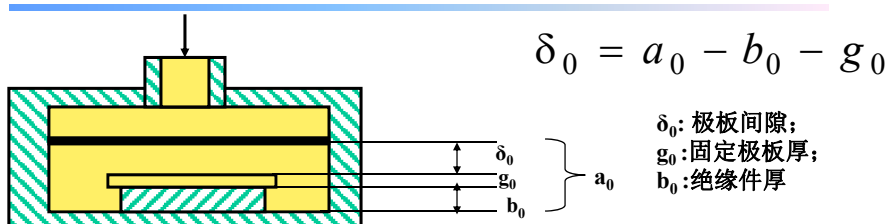
- 电容器的原始极距一般很小($25 \sim 200 \mu\text{m}$);
- 若极板因温度变化而厚度变化, 且其量级接近电容器的原始极距 \rightarrow 温度影响不容忽视。



自动化学院测量科学与仪器系

19

温度对电容传感器的影响



$$\delta_t = a_0(1 + \alpha_a \Delta t) - b_0(1 + \alpha_b \Delta t) - g_0(1 + \alpha_g \Delta t)$$

$$\therefore \Delta \delta_t = (a_0 \alpha_a - b_0 \alpha_b - g_0 \alpha_g) \cdot \Delta t$$

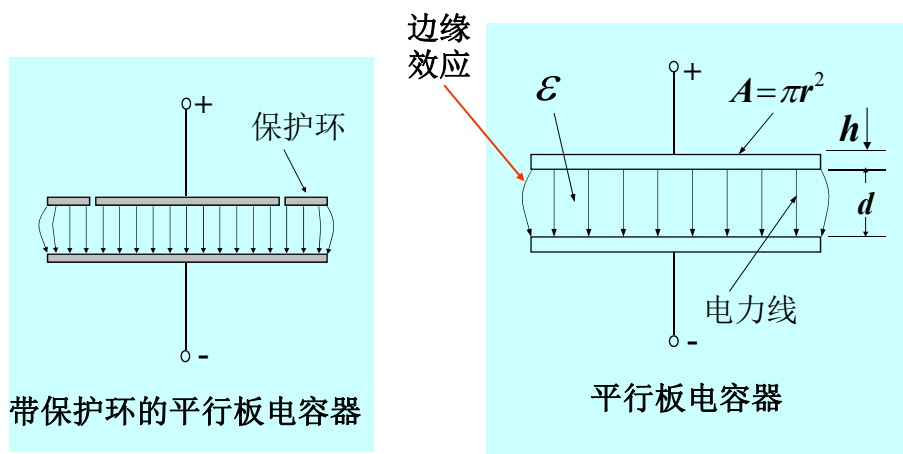
消除影响? $\rightarrow (a_0 \alpha_a - b_0 \alpha_b - g_0 \alpha_g) = 0$

- 温度误差与零件的尺寸、热膨胀系数有关
- 应减少尺寸链的组成环节
- 选用热膨胀系数小、几何尺寸稳定的材料。

20

电容电场的边缘效应

- 使用保护环减小边缘效应。

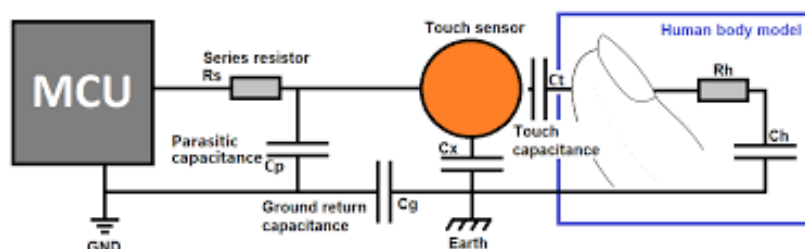


自动化学院测量科学与仪器系

21

寄生电容与分布电容的影响

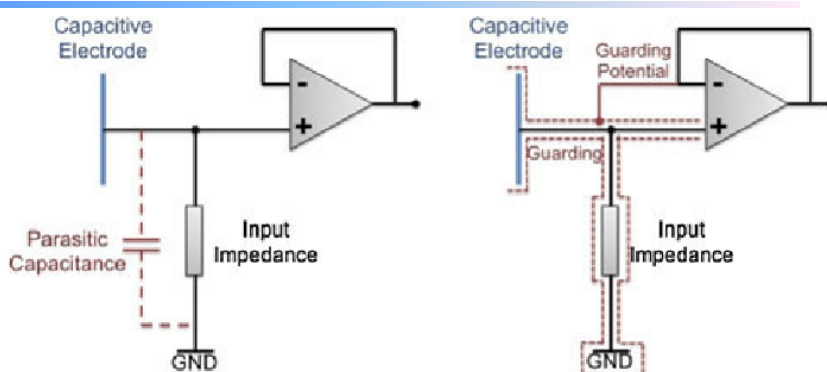
- 电极引线之间以及导线的杂散电容，其数值约100pF/m；
- 电子开关（用于选择不同测量电极）：输入电容值约8pF；
- 普通线路板：两段间隔1mm、长1cm的导线之间的分布电容约1pF。
- 测量电容最多数十pF，远小于影响电容测量的杂散电容值，
➡ 抗杂散电容的能力是小电容电路必须具备的重要性能。



自动化学院测量科学与仪器系

22

抗杂散电容的方法

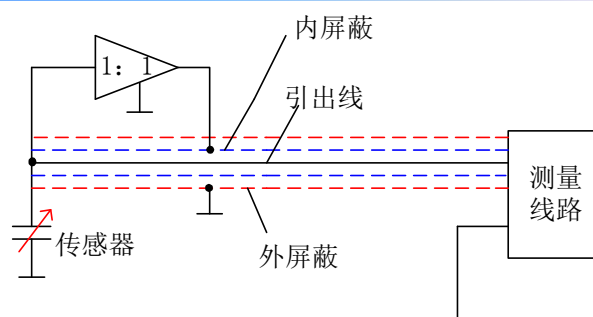


- ① 减小变换器至测量线路距离
- ② 整体屏蔽
- ③ 驱动电缆技术

自动化学院测量科学与仪器系

23

驱动电缆技术—设法让杂散电容两端保持同电位



原理：杂散电容既不会从激励信号中获得能量，又不会释放能量到测量电路中去，因此对测量电路而言，杂散电容几乎不产生影响。。

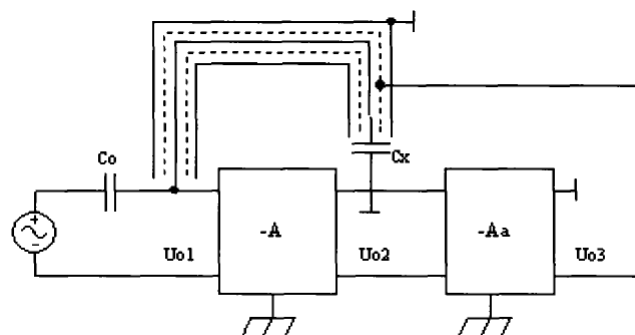
难点：在很宽的频带上实现放大倍数等于1，且输入输出的相移为零。

自动化学院测量科学与仪器系

24

驱动电缆技术—运算放大器驱动法 (自学)

传感器原理及其应用 王化祥 天津大学出版社

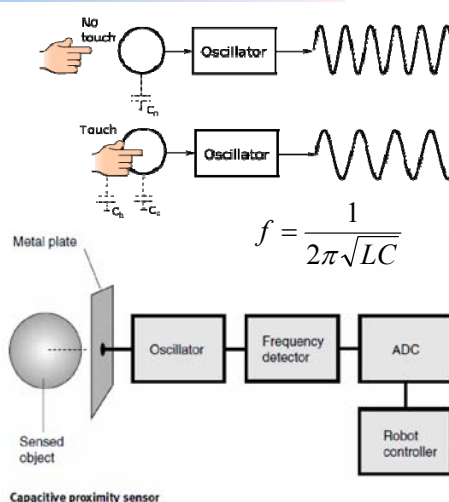


自动化学院测量科学与仪器系

25

4.4 电容式传感器的测量电路—调频电路

- 电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分；
- 当输入量导致电容量发生变化时，振荡器的振荡频率就发生变化；
- × 若将频率作为输出量，系统是非线性的，不易校正；
- 鉴频器：将频率的变化转换为电压振幅的变化，经过放大就可以用仪器指示或记录仪记录下来。



自动化学院测量科学与仪器系

26

式中： C —振荡回路的总电容， $C=C_1+C_2+C_x$ ，其中 C_1 为振荡回路固有电容， C_2 为传感器引线分布电容， $C_x=C_0\pm\Delta C$ 为传感器的电容。

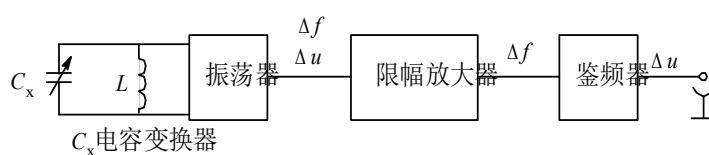


图5-11 调频式测量电路原理框图

自动化学院测量科学与仪器系

27

当被测信号为0时， $\Delta C=0$ ，则 $C=C_1+C_2+C_0$ ，所以振荡器有一个固有频率 f_0 ，其表示式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_1 + C_2 + C_0)L}} \quad (5-30)$$

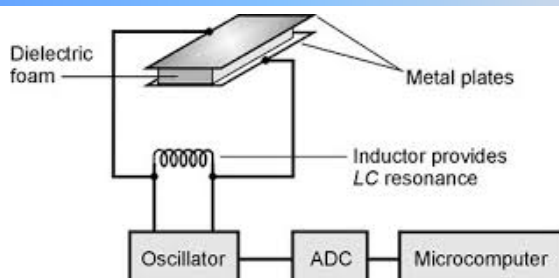
当被测信号不为0时， $\Delta C \neq 0$ ，振荡器频率有相应变化，此时频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_1 + C_2 + C_0 \mp \Delta C)L}} = f_0 \pm \Delta f \quad (5-31)$$

自动化学院测量科学与仪器系

28

电容式传感器的测量电路—调频电路

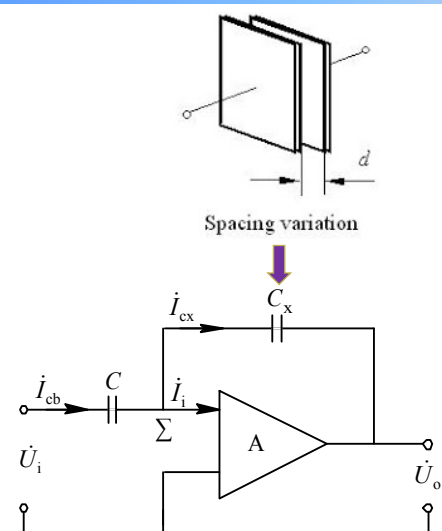


- 具有较高的灵敏度，可以测量高至 $0.01\mu\text{m}$ 级位移变化量。
- 信号的输出频率易于用数字仪器测量，并与计算机通讯，抗干扰能力强，可以发送、接收，以达到遥测遥控的目的。

自动化学院测量科学与仪器系

29

2 运算放大器式电路



- 较理想的测量电路：运算放大器的放大倍数非常大，输入阻抗 Z_i 很高

- 电源电压 U_i 的幅值和固定电容 C 值稳定

$$\dot{U}_o = -\frac{C}{C_x} \dot{U}_i \rightarrow \dot{U}_o = -\dot{U}_i \frac{C}{\epsilon S} d$$

- 运算放大器的输出电压与极板间距离 d 成线性关系

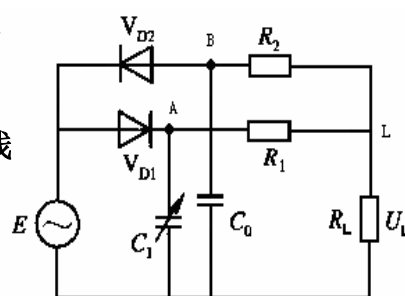
自动化学院测量科学与仪器系

30

3 二极管双T形交流电桥

U_E 为方波电压信号，占空比50%； $R_1=R_2=R$ ； C_1 、 C_0 为差动电容传感器的电容，或者一个为固定电容，另一个为电容传感器的电容， R_L 为负载电阻。

- ✓ 交流电桥测量电路→相敏解调→电路的复杂化。
- ✓ 美国MIT教授K.S.LION发明非线性双T网络。
- ✓ 该线路非常简单，不需要附加相敏解调器，就能获得高电平的直流输出，而且灵敏度较高。

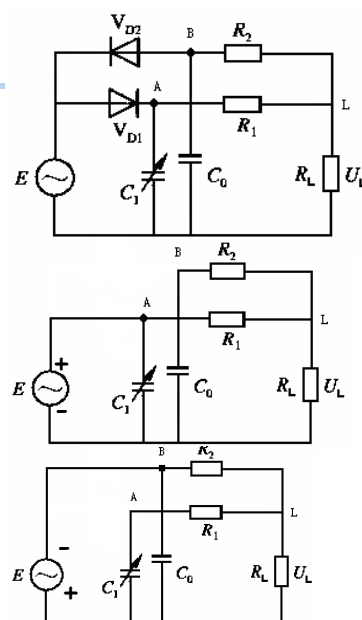


自动化学院测量科学与仪器系

31

二极管双T形交流电桥的工作原理

- ① U_E 正半周： D_1 导通， D_2 截止， C_1 立即充电至电源电压： $U_A=+U_E$
 C_0 放电：放电电流服从指数变化规律。
- ② U_E 负半周： D_2 导通， D_1 截止， C_0 立即充电至电源电压： $U_B=-U_E$
 C_1 放电：放电电流服从指数变化规律。



32

二极管双T形电桥

U_E 负半周(C_1 放电):

$$R_1 = R_2 = R$$

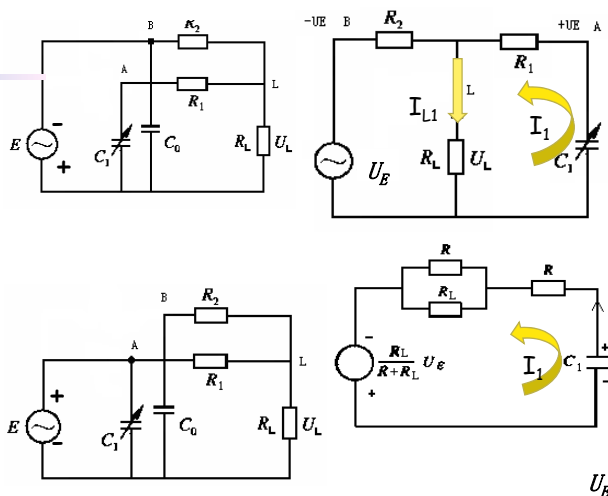
$$I_{L1} R_L = (I_1 - I_{L1}) R - U_E$$

$$I_{L1} = \frac{I_1 R - U_E}{R + R_L}$$

U_E 负半周(C_0 放电):

$$I_{L2} = \frac{I_2 R - U_E}{R + R_L}$$

$$U_L = (I_{L1} - I_{L2}) R_L = \frac{R_L R}{R_L + R} (I_1 - I_2)$$



33

U_E 负半周(C_1 指数放电):

$$i_1 = \frac{[U_E + \frac{R_L}{R + R_L} U_E]}{R + (R // R_L)} e^{-\frac{t}{[R + R // R_L] C_1}}$$

$$I_1 = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 dt$$

U_E 负半周(C_0 指数放电):

$$i_2 = \frac{[U_E + \frac{R_L}{R + R_L} U_E]}{R + (R // R_L)} e^{-\frac{t}{[R + R // R_L] C_0}}$$

$$I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_2 dt$$

$$U_L = \frac{R R_L}{R + R_L} (I_1 - I_2) = \frac{R R_L (R + 2 R_L)}{(R + R_L)^2 T} U_E (C_1 - C_0 - C_1 e^{-k_1} + C_0 e^{-k_0})$$

$$k_0 = \frac{R + R_L}{2 R_L C_0 (R + 2 R_L)} T, \quad k_1 = \frac{R + R_L}{2 R_L C_1 (R + 2 R_L)} T$$

当 $k_0, k_1 > 5$ 时, $U_L \approx \frac{R R_L (R + 2 R_L)}{(R + R_L)^2 T} U_E (C_1 - C_0)$ 的非线性误差 $< 1\%$

34

5 脉冲宽度调制电路

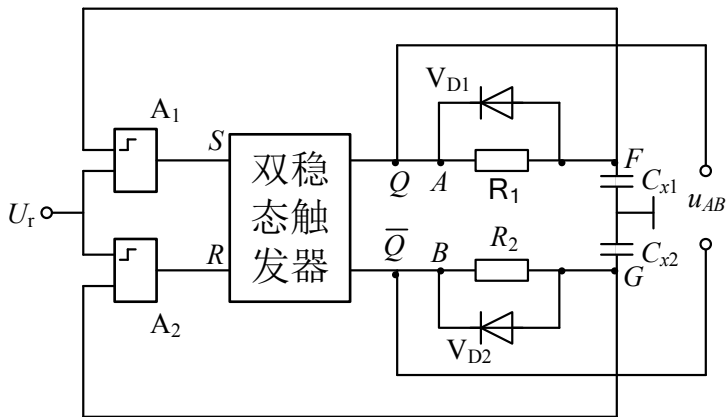
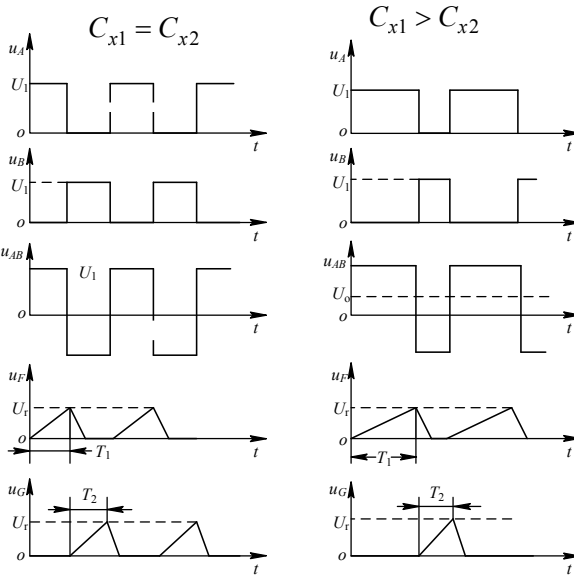
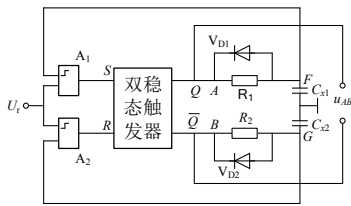


图4-2-6 脉冲宽度调制电路图

自动化学院测量科学与仪器系

35

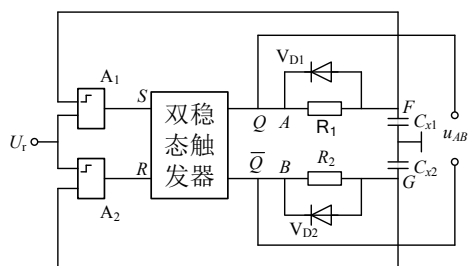
PWM电路



自动化学院测量科学与仪器系

36

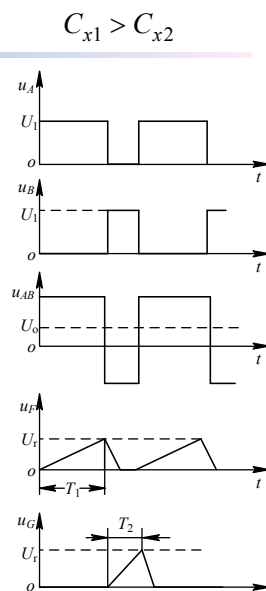
PWM电路



- u_A 、 u_B 脉冲宽度不相等，一个周期 (T_1+T_2) 时间内的平均电压值不为零；
- u_{AB} 电压经低通滤波器滤波后输出

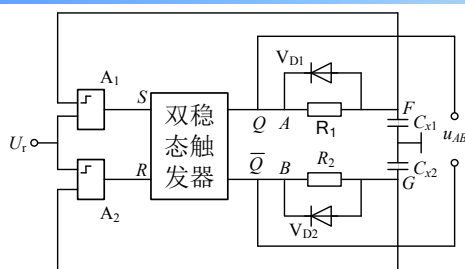
$$U_o = U_A - U_B = U_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2}$$

自动化学院测量科学与仪器系



37

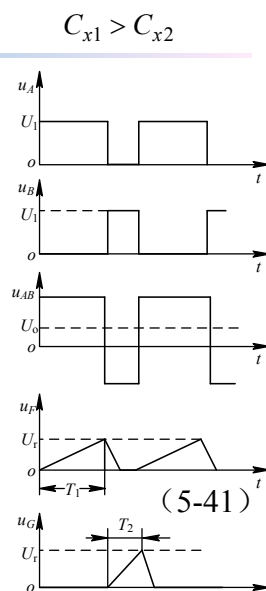
PWM电路



u_{AB} 经低通滤波后输出

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= R_1 C_{x1} \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r} \\ T_2 &= R_2 C_{x2} \ln \frac{U_2}{U_2 - U_r} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U_o &= U_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \\ &= \frac{C_{x1} - C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} U_1 \end{aligned} \quad (5-41)$$

自动化学院测量科学与仪器系



38

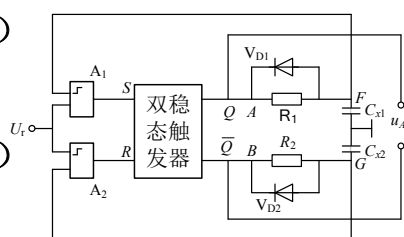
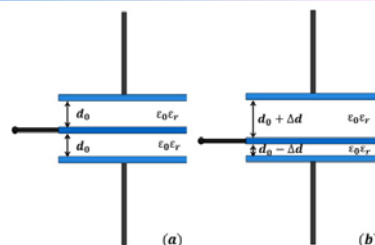
PWM电路——变极板距离的平行板电容器

u_{AB} 经低通滤波后输出

$$U_o = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} U_1$$

d_1 、 d_2 分别为 C_{x1} 、 C_{x2} 极板间距离。

- 差动电容 $C_{x1}=C_{x2}=C_0$ ($d_1=d_2=d_0$) 时, $U_o=0$;
- 当 $C_{x1}>C_{x2}$ ($d_1=d_0-\Delta d$, $d_2=d_0+\Delta d$) 时, $U_o = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$



自动化学院测量科学与仪器系

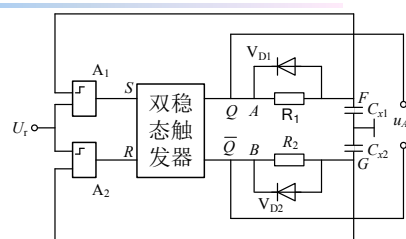
39

PWM电路——变面积的平行板电容器

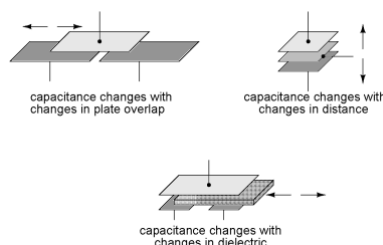
u_{AB} 经低通滤波后输出

$$U_o = \frac{\Delta S}{S} U_1$$

- ① 差动脉宽调制电路适用于变极板距离以及变面积差动式电容传感器, 具有线性特性;
- ② 转换效率高, 经过低通放大器就有较大的直流输出;
- ③ 调宽频率的变化对输出没有影响。



Differential capacitive transducers

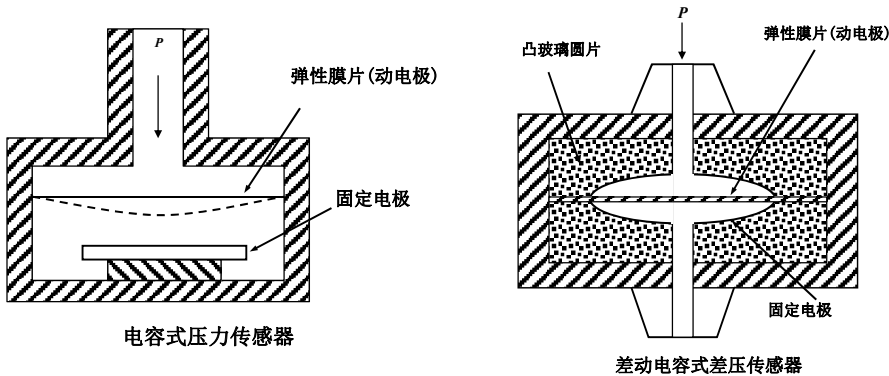


自动化学院测量科学与仪器系

40

4.5 电容式传感器的应用

1 电容式压力传感器



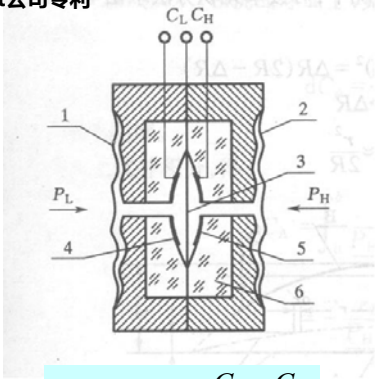
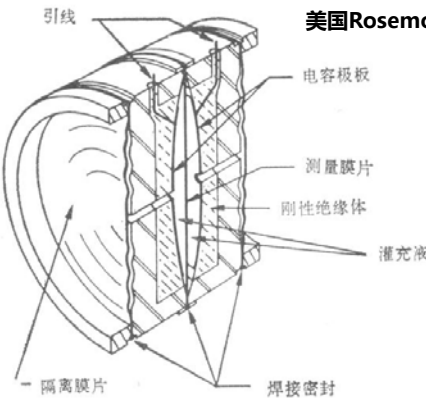
自动化学院测量科学与仪器系

41

实例:电容式压力传感器

差动电容式差压传感器结构图

美国Rosemount公司专利

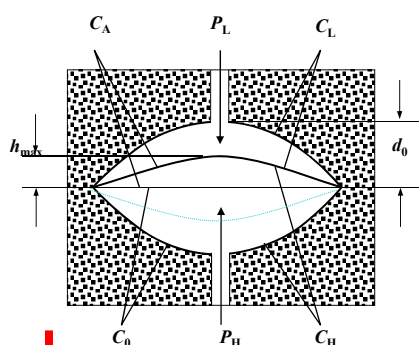


特点：温度稳定性好、耐腐蚀、抗震性好
可用于工业过程的各种压力测量

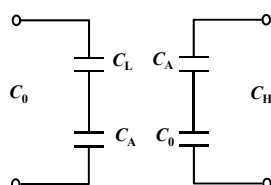
$$P_H - P_L = K \cdot \frac{C_L - C_H}{C_L + C_H}$$

42

实例:电容式压力传感器(续)



等效电路



- $P_H = P_L$ 时，膜片两侧电容均为 C_0 ；
- $P_H > P_L$ 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 又可以看成是膜片上部电容 C_L 与的 C_A 串联。

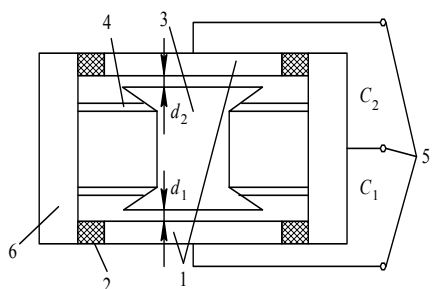
$$C_0 = \frac{C_A C_L}{C_A + C_L} \Rightarrow C_L = \frac{C_A C_0}{C_A - C_0};$$

$$C_H = \frac{C_A C_0}{C_A + C_0}$$

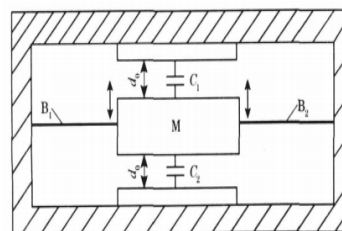
$$\frac{C_L - C_H}{C_L + C_H} = \frac{C_0}{C_A}$$

43

2 电容式加速度传感器



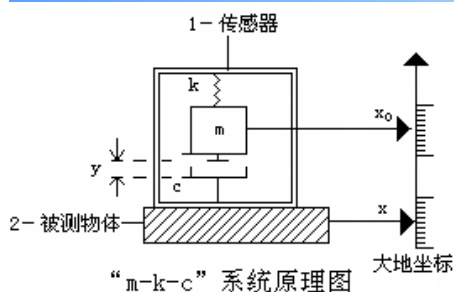
- 1—固定电极；
- 2—绝缘垫；
- 3—质量块；
- 4—弹簧；
- 5—输出端；
- 6—壳体



- 传感器壳体随被测对象沿垂直方向作直线加速运动；
- 质量块在惯性空间中相对静止，两个固定电极将相对于质量块在垂直方向产生大小正比于被测加速度的位移；
- 两电容间隙发生变化（一个增加、一个减小），从而使 C_1 、 C_2 产生大小相等、符号相反的增量，此增量正比于被测加速度。
- 频率响应快和量程范围大，大多采用空气或其它气体作阻尼物质。

44

电容加速度传感器动态特性



- 建立相对运动和绝对运动的联系。
- 将被测参数x（加速度）的大小，变为电容动极板相对位移y的转换。

根据牛顿第二定律，物体（动极板）受到惯性力 F_R ，阻尼力 F_p ，弹簧力 F

$$F_R + F_p + F = m \frac{d^2 x_0}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = 0$$

动极板和定极板之间的相对位移 $y = x_0 - x$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = -m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

45

电容加速度传感器动态特性

当输入为 $x = X_m \sin \omega t$

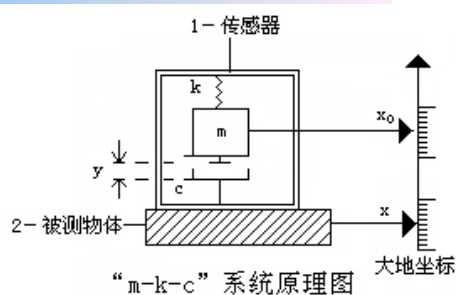
输出为 $y = Y_m \sin(\omega t - \varphi)$

$$Y_m = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \cdot X_m$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\xi = \frac{\eta}{2\sqrt{km}}$$



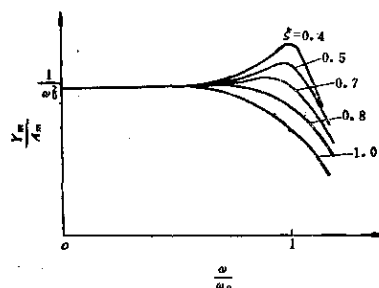
- 当被测刚体作正弦运动时，电容器的动极板亦相对于定极板作正弦运动，其振幅和相位则与传感器的结构参数 $\xi\omega_0$ 有关。
- 动极板质量轻，固有频率非常高。

46

电容加速度传感器动态特性

$$A_m = \omega^2 X_m$$

$$Y_m = \frac{1}{\omega_0^2} \frac{A_m}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}}$$



当 $\frac{\omega}{\omega_0} \ll 1$ 时, 传感器的振幅将反映被测量的加速度,

$$\text{即 } Y_m \approx \frac{1}{\omega_0^2} A_m$$

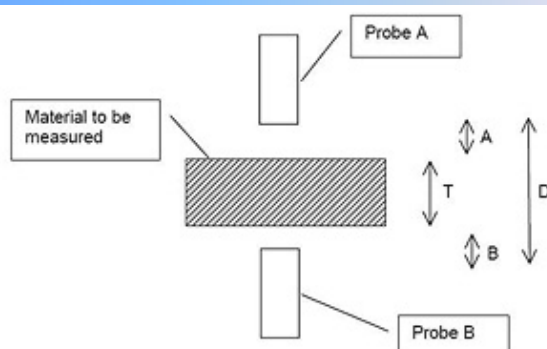
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\xi = \frac{\eta}{2\sqrt{km}}$$

结论: 可以提高固有频率, 增大频区, 但灵敏度降低。

47

3 差动式电容测厚传感器

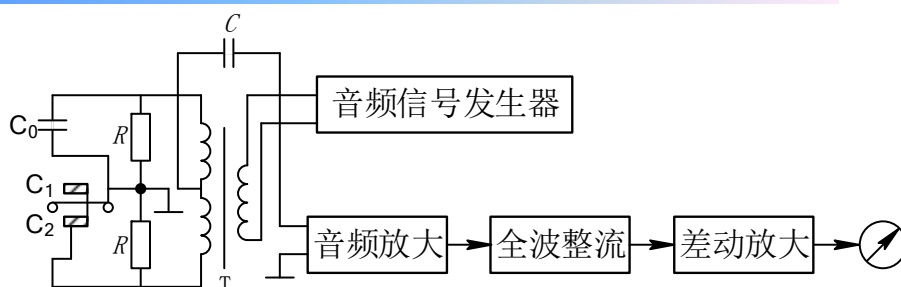


- ✓ 用于金属带材在轧制过程中厚度的检测
- ✓ 在被测带材的上下两侧各置放一块面积相等, 与带材距离相等的极板, 构成两个电容器 C_1 、 C_2 。

自动化学院测量科学与仪器系

48

3 差动式电容测厚传感器

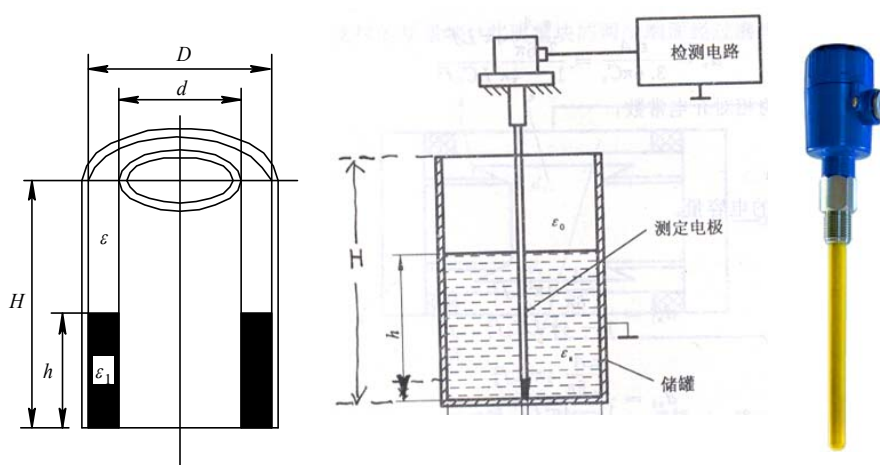


- 把两块极板用导线连接起来成为一个极，而带材就是电容的另一个极，其总电容为 $C_1 + C_2$ ；
- 如果带材的厚度发生变化，将引起电容量的变化；
- 用交流电桥将电容的变化测出来，经过放大即可由电表指示测量结果。

自动化学院测量科学与仪器系

49

4 电容液位传感器

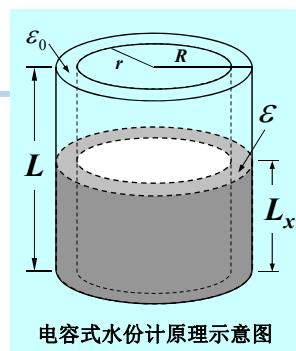


自动化学院测量科学与仪器系

50

5 应用—电容法测量含水量

- 测量原理：水的相对介电常数是空气的**80**倍，故以空气为介质的电容器对水的变化非常敏感；
- 测量时相当于三个电容并联：空气、水份和固体。



$$C = C_1 + C_2 + C_3 = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(R/r)} [(1-k) + \epsilon_r k(1-\omega_H) + \epsilon_{rH} k\omega_H]$$

ϵ_r 被测物自身介电常数

ϵ_{rH} 水的相对介电常数

ω_H 物体的含水量

当 $k=L_x/L$ 不变时，电容的变化正比于 ω_H 的大小。

自动化学院测量科学与仪器系

51

5.6 应用—电容法测量气固两相流

什么是气固两相流？

- 气固两相流是同时存在气相和固相的物质流动。
- ✓ 化学工业中，洗衣粉、奶粉的气流干燥；
- ✓ 在冶金、电力行业中煤粉的气力输送；
- ✓ 食品、建筑行业中的谷物、食盐、水泥等物料的气力输送。

气固两相流参数测量的要求

- 描述气固两相流流动状态的参数。
- ✓ 固相颗粒浓度、速度、分布以及分相流量等。

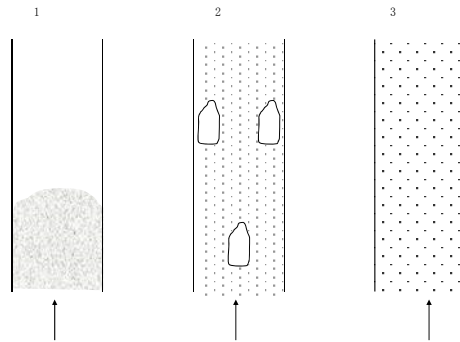
气固两相流参数检测的难点

- 必须采用非接触式测量方法，不破坏被测过程的流场；且气固两相流流动过程太复杂。

自动化学院测量科学与仪器系

52

垂直上升气固两相流的流动结构

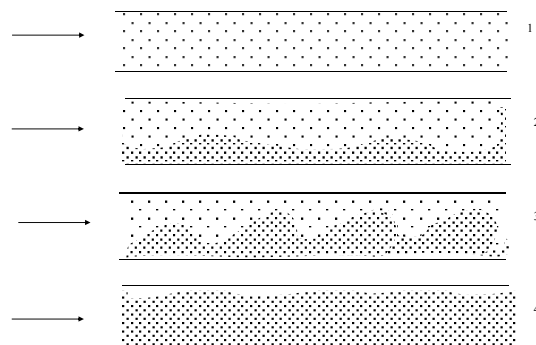


1. 流动床结构 2. 弹状流动结构 3. 散布状流动结构

自动化学院测量科学与仪器系

53

水平管道气固两相流的流动结构



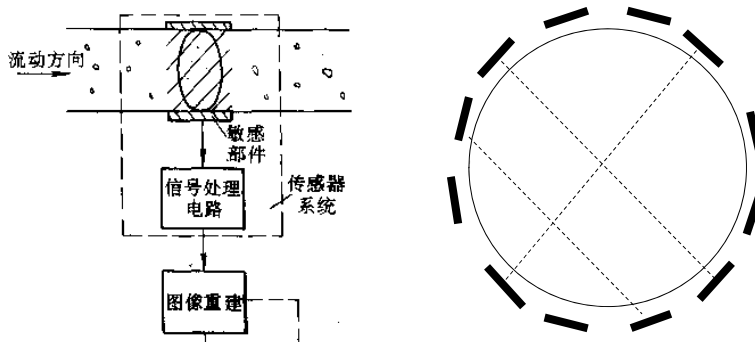
1. 均匀流动结构 2. 退化均匀流动结构
3. 沙丘流动结构 4. 柱状流动结构

自动化学院测量科学与仪器系

54

应用于气固两相流的电容层析成像测量方法

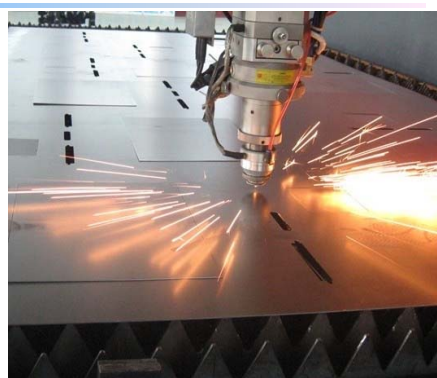
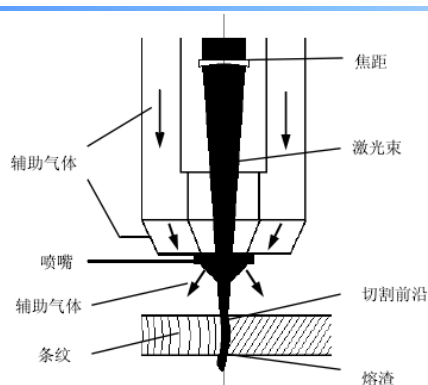
- ① 一个电容传感器可以测量均匀分布的两相流。
- ② 将复杂的两相流划分为若干个均匀的两相流，使用数量多于划分网格数的电容传感器来获得反映两相流分布的电介质分布。



自动化学院测量科学与仪器系

55

7 应用-电容式激光焦点测量

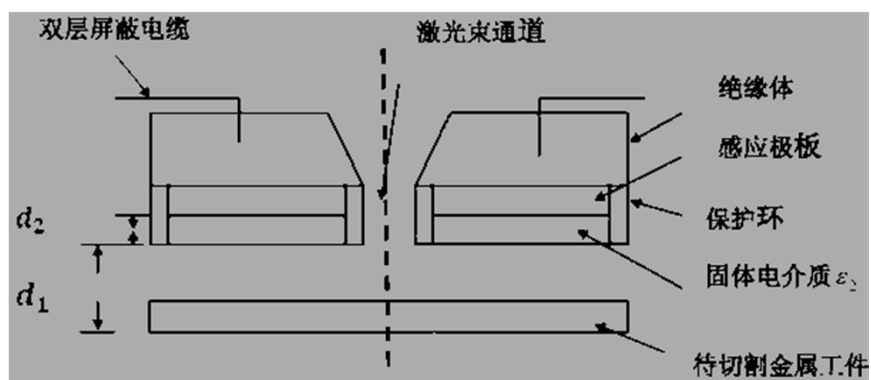


- ☆ 激光切割是非接触式加工技术，激光头与加工工件表面留有间距；
- ☆ 在激光切割过程中，为保证切割质量，需使切口处的功率密度最大
➡要求切割头的喷嘴与被加工工件表面的间隙恒定
- ☆ 实际生产加工中，待切割加工的工件表面位置高度通常会发生变化，使用激光焦点位置测量系统获得实际距离，再通过控制系统调节激光切割头的焦距。

56

7 应用-电容式激光焦点测量

传感器结构：



自动化学院测量科学与仪器系

57

作业

4-2、4-7、4-12、4-14、4-16

Any Question?

自动化学院测量科学与仪器系

58