

电容式传感器

第十一章

电容式传感器是将被测非电量的变化转化为电容量的一种传感器。结构简单、高分辨力、可非接触测量，并能在高温、辐射和强烈震动等恶劣条件下工作，这是它独特优点。随着集成电路技术和计算机技术的发展，促使它扬长避短，成为一种很有发展前途的传感器

11.1 工作原理、结构及特性

由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的平板电容器，当忽略边缘效应影响时，其电容量与真空介电常数 ε_0 ($8.854 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$)、极板间介质的相对介电常数 ε_r 、极板的有效面积 A 以及两极板间的距离 δ 有关：

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{\delta}$$

若被测量的变化使式中 δ 、 A 、 ε_r 三个参量中任意一个发生变化时，都会引起电容量的变化，

再通过测量电路就可转换为电量输出。因此，电容式传感器可分为变极距型、变面积型和变介质型三种类型。

11.1.1 变极距型电容传感器

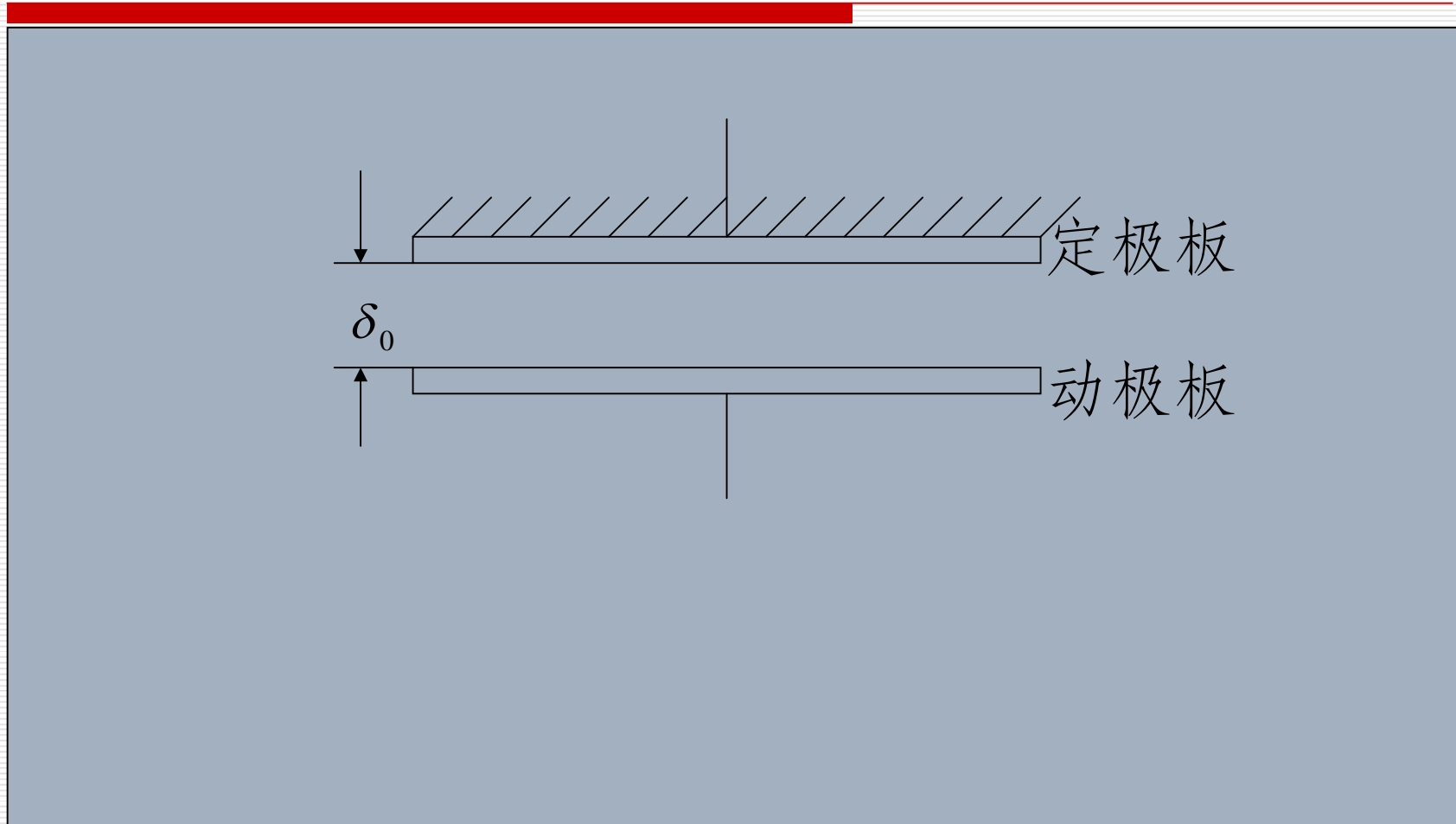
- 图11-1 为这种传感器的原理图。当传感器的 ε_r 和 A 为常数，初始极距为 δ_0 ，可知其初始电容量 C_0 为

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{\delta_0}$$

- 当动极端板因被测量变化而向上移动使 δ_0 减小 $\Delta\delta_0$ 时，电容量增大 ΔC 则有

$$C_0 + \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{\delta_0 - \Delta\delta_0} = C_0 \frac{1}{(1 - \Delta\delta / \delta_0)}$$

图11-1



-
- 可见，传感器输出特性 $C = f(\delta)$ 是非线性的，电容相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(1 - \frac{\Delta \delta}{\delta}\right)^{-1}$$

如果满足条件 $(\Delta \delta / \delta_0) \ll 1$ ，可按级数展开成

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

- 略去高次（非线性）项，可得近似的线性关系和灵敏度 S 分别为

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)$$

如果考虑式中的线性项及二次项，则

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \delta} = \frac{C_0}{\delta_0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{\delta_0^2}$$

其相对非线性误差为

$$e_f = \frac{\left|(\Delta \delta / \delta_0)^2\right|}{\left|\Delta \delta / \delta_0\right|} \times 100\% = \left|\Delta \delta / \delta_0\right| \times 100\%$$

□ 由上讨论可知：

- (1) 变极距型电容传感器只有在 $|\Delta\delta / \delta|$ 很小 (小测量范围) 时, 才有近似的线性输出;
 - (2) 灵敏度 S 与 δ 初始极距的平方成反比, 故可用减少 δ_0 的办法来提高灵敏度。
-

-
- 可见, δ_0 的减小会导致非线性误差增大; 过小还可能引起电容器击穿或短路。为此, 极板间可采用高介电常数的材料(云母、塑料膜等)作 介质。设两种介质的相对介电质常数为 (空气: $\varepsilon_{r1} = 1$), $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$ 相应的介质厚度为 δ_1, δ_2 则有

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{\delta_1 + \delta_2 / \varepsilon_{r2}}$$

- 差动结构, 动极板置于两定极板之间。初始位置时, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$, 两边初始电容相等。当动极板向上有位移时, 两边极距为 $\delta_1 = \delta_0 - \Delta \delta$, $\delta_2 = \delta_0 + \Delta \delta$; 两组电容一增一减。由同样的分析方法得电容总得相对变化量为 $\Delta \delta$
-

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{C_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right]$$

□ 略去高次项，可得近似得线性关系

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

□ 相对非线性误差 e_f' 为

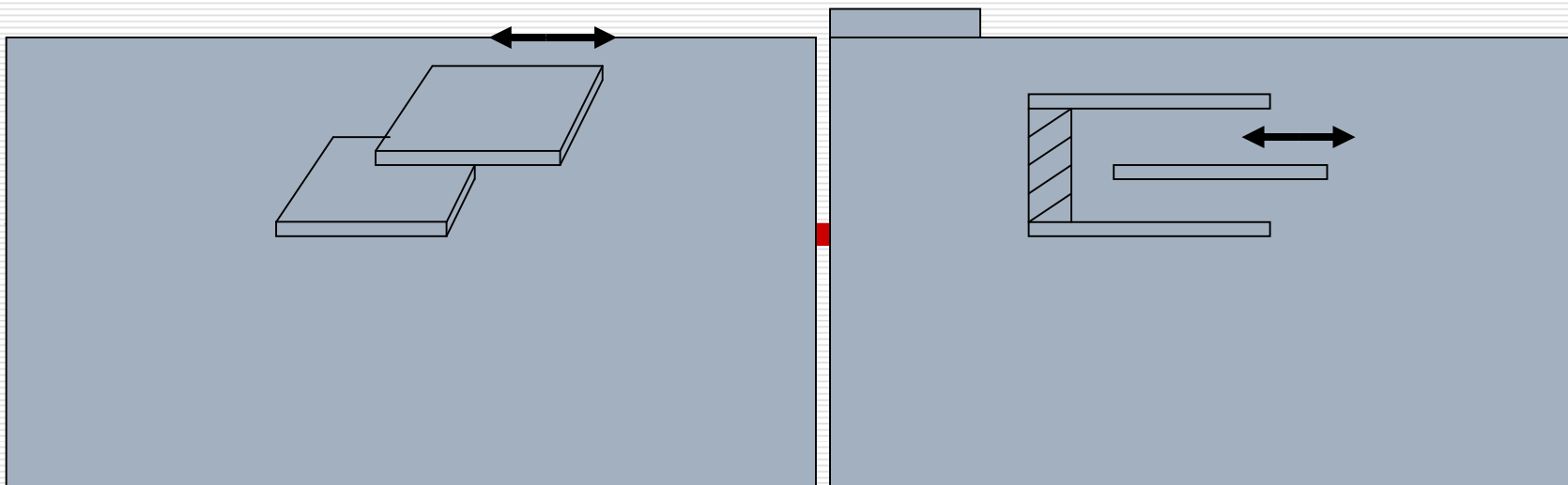
$$e_f' = \frac{|2(\Delta \delta / \delta_0)^3|}{|2(\Delta \delta / \delta_0)|} \times 100 \% = (\Delta \delta / \delta_0)^2 \times 100 \%$$

□ 上式与前几式比较可知，差动式比单级式灵敏度提高一倍，且误差大大减小。

11.1.2 变面积型电容传感器

- 原理结构如图所示。它与变极距型不同的是，被测量通过动极板移动，引起两极板
- 有效覆盖面积 A 改变，从而得到电容的变化。设动极板相对定极板沿长度 l_0 方向平移 Δl 时，则电容为

$$C = C_0 - \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (l_0 - \Delta l) b_0}{d_0}$$



- 式中 $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r l_0 b_0 / \delta_0$ 为初始电容。电容得相对变化量为

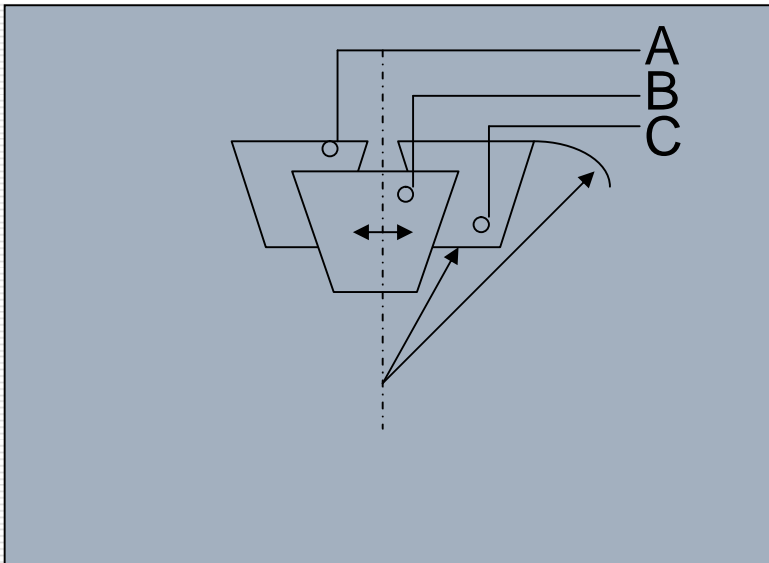
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

- 输出特性呈线性。因而其量程不受线性范围限制，适合测量较大得直线位移和角位移。它的灵敏度为

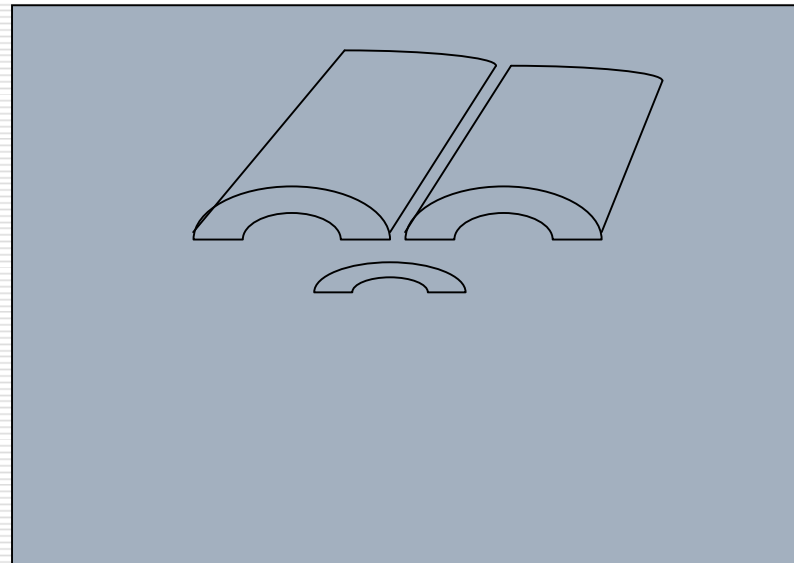
$$S = \frac{\Delta C}{\Delta L} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b_0}{\delta_0}$$

变面积型电容传感器与变极距型相比，其灵敏度较低。因此，在实际应用中，也采用差动式结构，以提高灵敏度。角位移测量用的差动式典型结构如图所示。图中：A、B为同一平(柱)面而形状和尺寸均相同且互相绝缘的定极板。动极板C平行于A、B，并在自身平(柱)面内绕O点摆动。从而改变极板间覆盖的有效面积，传感器电容随之改变。C的初始位置必须保证与A、B的初始电容值相同。

$$C_{AC_0} = C_{BC_0} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (R^2 - r^2) a}{\delta_0}$$



$$C_{AC_0} = C_{BC_0} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l r a}{R - r}$$

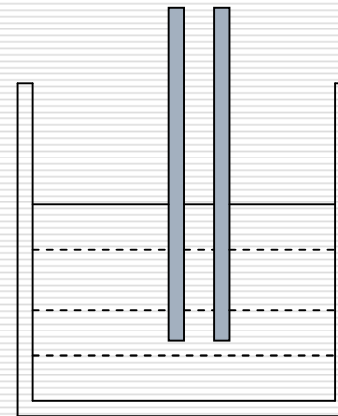
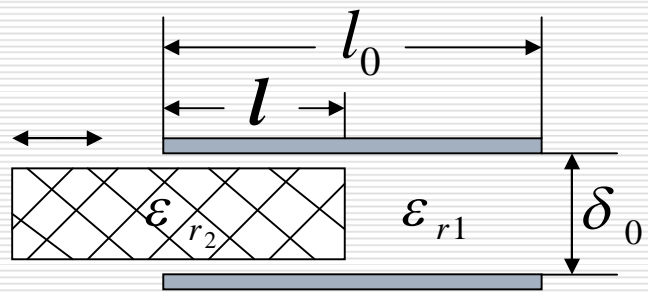


11.1.3 变介质型电容传感器

- 这种电容传感器有较多的结构型式，可以用来测量纸张、绝缘薄膜等的厚度，也可用来测量粮食、纺织品、木材或煤等非导电固体物质的湿度。
- 图中两平行极板固定不动，极距为 δ_0 ，相对介电常数为 ϵ_{r_2} 的电介质以不同深度插入电容器中，从而改变两种介质的极板覆盖面积。传感器的总电容量 C 为两个电容 C_1 和 C_2 的并联结果。

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 b_0}{\delta_0} [\epsilon_{r_1} (l_0 - l) + \epsilon_{r_2} l]$$

- 式中 l_0 、 b_0 为极板长度和宽度
-



-
- l 为第二种电介质进入极间的长度。
 - 若电介质1为空气($\varepsilon_{r_1} = 1$), 当 $l = 0$ 时传感器的初始电容 $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r l_0 b_0 / \delta_0$; 当介质2进入极间 l 后引起电容的相对变化为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{\varepsilon_{r_2} - 1}{l_0} l$$

- 可见, 电容的变化与电介质2的移动量 l 成线型关系。
 - 上述原理可用于非导电流散材物料的物位测量。如图所示, 将电容器极板插入被监测的介质中, 随着灌装量的增加, 极板覆盖面增大。可测出的电容量即反映灌装高度L。
-

11.2 应用中存在的问题及其改进措施

上节对各种电容传感器的特性分析，都是在纯电容的条件下进行的。这在可忽略传感器附加损耗的一般情况下也是可行的。若考虑电容传感器在高温、高湿及高频激励的条件下工作而不可忽视其附加损耗和电效应影响时，其等效电路如图所示。

•图中C为传感器电容， R_p 为低频损耗并联电阻，它包含极板间漏电和介质损耗； R_s 为高频、高温、高频激励工作时的串联损耗电阻，它包含导线、极板间和金属支座等损耗电阻；L为电容器及引线电感

-
- C_p 为寄生电容，克服其影响，是提高电容传感器实用性能的关键之一，下面专门讨论。可见，在实际应用中，特别在高频激励时，尤需考虑L的存在，会使传感器有效电容

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

- 变化，从而引起传感器有效灵敏度的变化

$$S_e = \frac{C}{(1 - \omega^2 LC)^2}$$

- 在这种情况下，每当改变激励频率或者更换传输电缆时都必须对测量系统重新进行标定。
-

11.2.2 边缘效应

- 以上分析各种电容式传感器时还忽略了边缘效应的影响。实际上当极板厚度 h 与极距 δ 之比相对较大时，边缘效应的影响就不能忽略。这时，对极板半径为 r 的变极距型电容传感器，其电容值应按下式计算

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left\{ \frac{\pi r^2}{\delta} + r \left[\ln \frac{16 \pi r}{\delta} + 1 + f \left(\frac{h}{\delta} \right) \right] \right\}$$

- 函数 $f \left(\frac{h}{\delta} \right)$ 的数值列于表4-1
-

边缘效应不仅使电容传感器的灵敏度降低，而且产生非线性。为了消除边缘效应的影响，可以采用带有保护环的结构，如图4—10所示。保护环与定极板同心、电气上绝缘且间隙越小越好，同时始终保持等电位，以保证中间工作区得到均匀的场强分布，从而克服边缘效应的影响。为减小极板厚度，往往不用整块金属板做极板，而用石英或陶瓷等非金属材料，蒸涂一薄层金属作为极板。

微位移电容传感器，可用来测量偏心、不平行度、振动振幅等。只要被测对象在所用频率下是导电的，气隙中介质的介电常数不随时间、温度和机械应力而变化，均可获得较高的测量精度。设计上如作些改变，还能作介电材料的测厚传感器。

11.2.3 静电引力

- 电容式传感器两极板间因存在静电场，而作用有静电引力或力矩。静电引力的大小与极板间的工作电压、介电常数、极间距离有关。通常这种静电引力很小，但在采用推动力很小的弹性敏感元件情况下，须考虑因静电引力造成的测量误差。表4—2列出了几种电容传感器静电引力的计算公式。
 - (表见课本101页)
-

11.2.4 寄生电容

电容式传感器由于受结构与尺寸的限制，其电容量都很小（pF到几十pF），属于小功率、高阻抗器件，因此极易受外界干扰，尤其是受大于它几倍、几十倍的、且具有随机性的电缆寄生电容的干扰，它与传感器电容相并联，严重影响传感器的输出特性，甚至会淹没有用信号而不能使用。消灭寄生电容影响，是电容式传感器实用的关键。下面介绍几种常用方法。

1 驱动电缆法

它实际上是一种等电位屏蔽法。即：在电容传感器与测量电路的前置级之间采用双层屏蔽电缆，并接入增益为1的驱动放大器，（接线如图示）。这种接线法使内屏蔽与芯线等电位，消除了芯线对内屏蔽的容性漏电，克服了寄生电容的影响；而内、外层屏蔽之间的电容变成了驱动放大器的负载。因此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。该方法的难处是，要在很宽的频带上严格实现放大倍数等于1，且输出与输入的相移为零。为此有人提出，用运算放大器驱动法取代上述方法

2 整体屏蔽法

以差动电容传感器, R_3 、 R_4 , 配用电桥测量电路为例, U 为电源电压, K 为不平衡电桥的指示放大器。所谓整体屏蔽是将整个电桥(包括电源、电缆等)统一屏蔽起来; 其关键在于正确选取接地点。本例中接地点选在两平衡电阻 C_1 、 C_{X_2} 桥臂中间, 与整体屏蔽共地。这样传感器公用极板与屏蔽之间的寄生电容 C_1 同测量放大器的输入阻抗相并联, 从而可将 C_1 归算到放大器的输入电容中

□ 由于测量放大器的输入阻抗应具有极大的值， C_1 的并联也是不希望的，但它只是影响灵敏度而已。另两个寄生电容 C_3 及 C_4 是并在桥臂 R_3 及 R_4 上，这影响电桥的初始平衡及总体灵敏度，但并不妨碍电桥的正确工作。因此寄生参数对传感器电容的影响基本上被消除。整体屏蔽法是一种较好的方法；但将使总体结构复杂化。

□ 3 采用组合式与集成技术

□ 一种方法是将测量电路的前置级或全部装在紧靠传感器处，缩短电缆；另一种方法是采用超小型大规模集成电路，将全部测量电路组合在传感器壳体内；更进一步就是利用集成工艺，将传感器与调理等电路集成于同一芯片，构成集成电容式传感器（见11.7节）。▪

11. 2. 5 温度影响

- 环境温度的变化将改变电容传感器的输出相对被测输入量的单值函数关系，从而引入温度干扰误差。这种影响主要有以下两个方面：
- 1 温度对结构尺寸的影响
- 电容传感器由于极间隙很小而对结构尺寸的变化特别敏感。在传感器各零件材料线胀系数不匹配的情况下，温度变化将导致极间隙较大的相对变化，从而产生很大的温度误差。
- g_0 现以图4—14所示变极距型为例，设定极板厚度为 a_0 ，绝缘件厚度 b_0 ，动极板至绝缘底部的壳体长为 δ_0 ，各零件材料的线膨胀系数分别为 α_a 、 α_b 、 α_g 。当温度由 t_0 变化 Δt 后，极间隙将由 $\delta_0 = a_0 - b_0 - g_0$ 变为 δ_t 由此一起的温度误差为

$$e_t = \frac{\delta_0 - \delta_t}{\delta_t} = \frac{(a_0 a_a - b_0 a_b - g_0 a_g) \Delta t}{\delta_0 + (a_0 a_a - b_0 a_b - g_0 a_g) \Delta t}$$

由此可见，消除温度误差的条件为： $a_0 a_a - b_0 a_b - g_0 a_g = 0$

或者满足条件 $b_0(a_a - a_b) + g_0(a_a - a_g) + \delta_0 a_a = 0$

2 温度对介质的影响

- 温度对介电常数的影响随介质不同而异，空气及云母的介电常数温度系数近似为零；而某些液体介质，如硅油、蓖麻油、煤油等，其介电常数的温度系数较大。例如煤油的介电常数温度系数可达 $0.07\%/^{\circ}\text{C}$ ；若环境温度变化 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ，则将带来7%的温度误差，故采用此类介质时必须注意温度变化造成的误差。

11.3 测量电路

电容式传感器将被测非电量变换为电容变化后, 必须采用测量电路将其转换为电压、电流或频率信号。本节简要讨论电容式传感器常用的几种测量电路。

11.3.1 偶合式电感电桥

- 1紧耦合电感电桥 (Blumlein电桥)
- 图4-15为用电容传感器测量的紧耦合电感臂电桥。电桥输出电压的一般表达式为

$$\dot{U}_0 = \frac{\Delta Z}{Z} \cdot \frac{\left(1 + \frac{Z_{12}(1-K)}{Z}\right) / \left(1 + \frac{Z_{12}(1+K)}{Z}\right)}{1 + \frac{1}{2} \left[\frac{Z_{12}(1-K)}{Z} + \frac{Z}{Z_{12}(1-K)} \right] + \frac{Z + Z_{12}(1-K)}{Z_L}} \dot{U}$$

当电桥带高阻抗负载 ($Z_L = \infty$) 时, 将如下诸式代入

$$Z = 1 / j\omega C, \Delta Z = 1 / j\omega C^2, \Delta Z / Z = \Delta C / C, Z_{12} = j\omega L$$

偶合系数 $K=-1$ 有

$$\dot{U}_0 = \frac{\Delta C}{C} \dot{U} \frac{4\omega^2 LC}{2\omega^2 LC - 1}$$

□ 电桥的灵敏度为

$$S=4\omega^2LC/(2\omega^2LC-1)$$

□ 特性曲线如图4-16所示，谐振点在 $\omega^2LC = \frac{1}{2}$
即

$\omega L = 1/2\omega C$ 处。在谐振点左侧 $\omega^2LC \ll 1$ 时，灵敏度与 ω^2LC 成正比；在谐振点右侧 $\omega^2LC \gg 1$ 时，灵敏度趋向于2，程水平特性。为了有高的稳定性，应使 ω^2LC 增大；当 ω^2LC 的值大于2时，电源频率或电感的变化将不会引起灵敏度变化。电感L为一桥臂无偶

□ 合时的“有效电感”。如果考虑电缆电容C的旁路影响，此时电感应为

$$L' = \frac{L}{1 - \omega^2 LC}$$

□ 在传感器的电容值较小和电源频率较低时，不能满足 $\omega^2 LC \gg 1$ 的条件。由上式可见，电缆电容C'大，稳定性高。因而可以用一大的固定电容与电感桥臂相并联，以牺牲灵敏度来换取高稳定性。

为便于比较，给出无耦合时（即K=0），桥臂电感为固定值）的桥路输出电压为

其特性曲线见图4-16.

$$\dot{U}_0 = \frac{\Delta C}{C} \dot{U} \cdot \frac{-2\omega^2 LC}{(\omega^2 LC - 1)^2}$$

-
- 紧耦合电感电桥抗干扰性好、稳定性高，目前已广泛用于电容式传感器中，同时它也很适合较高载波频率的电感式和电阻式传感器使用。

2 变压器电桥

- 如由4—17所示， C_1 、 C_2 ：为传感器的两个差动电容。电桥的空载输出电压为

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

对变极距型 $C_1 = \varepsilon_0 A / (\delta_0 - \Delta \delta)$; $C_2 = \varepsilon_0 A / (\delta_0 + \Delta \delta)$

代入上式得

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

可见，对变极距型的变压器电桥负载阻抗极大时，其输出特性呈线性

11.3.2 双T二极管交流电桥

U是高频电源，提供幅值为U的对称方波（正弦波也适用）；D1、D2为特性完全相同的两个二极管， $R_1=R_2=R$ ；C1、C2为传感器的两个差动电容。当传感器没有位移输入时， $C_1=C_2$ ，RL在一个周期内流过的平均电流为零，无电压输出。当C1或C2变化时，RL上产生的平均电流将不

□ 再为零, 因而有信号输出. 其输出电压的平均值为

$$\overline{U}_L = \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L U_f (C_1 - C_2)$$

□ 式中: f 为电源频率. 当 R_L 已知时, 上式中 $K = R(R + 2R_L)R_L / (R + R_L)^2$ 为常数, 则 $\overline{U}_L \approx KUf (C_1 - C_2)$

□ 该电路适用于各种电容式传感器。它的应用特点和要求: (1) 电源、传感器电容、负载均可同时在一点接地; (2) 二极管 D_1 、 D_2 工作于高电平下, 因而非线性失真小; (3) 其灵敏度与电源频率有关, 因此电源频率需要稳定; (4) 将 D_1 、 D_2 、 R_1 、 R_2 安装在 C_1 、 C_2 附近能消除电缆寄生电容影响; 线路简单; (5) 输出电压较高。当使用频率为 1.3MHz 、有效电压为 46V 的高频电源, 传感器电容从 -7 到 $+7\text{pF}$ 变化时, 在 $1\text{M}\Omega$ 的负载上可产生 -5 到 $+5\text{V}$ 的直流输出; (6) 输出阻抗与 R_1 或 R_2 同数量级, 可从 1 到 $100\text{k}\Omega$, 与电容 C_1 和 C_2 无关; (7) 输出信号的上升前沿时间由 R_L 决定, 如 $R_L = 1\text{k}\Omega$, 则上升时间为 20ns , 因此可用于动态测量; (8) 传感器的频率响应取决于振荡器的频率; $f = 1.3\text{MHz}$ 时, 频响可达 50kHz 。

11. 3. 3 脉冲调宽电路

图4—19为一种差动脉冲宽度调制电路。图中C1和C2为传感器的两个差动电容。线路由两个电压比较器IC1和IC2，一个双稳态触发器FF和两个充放电回路 R1C1和R2C2 ($R1=R2$) 所组成； U_r 为参考直流电压；双稳态触发器的两输出端电平由两比较器控制。

当接通电源后，若触发器Q端为高电 (U_1) Q端为低电平 (0)，则触发器通过R1对C1充电；当F点电位 U_F 升到与参考电压 U_r 相等时，比较器IC1

-
- 产生一脉冲使触发器翻转，从而使Q端为低电平， \bar{Q} 端为高电平 (U_1)。此时，由电容C1通过二极管D1迅速放电至零，而触发器由百端经R2向C2充电；当G点电位 U_G 与参考电压 U_r 相等时，比较器IC2输出一脉冲使触发器翻转，从而循环上述过程。
 - 可以看出，电路充放电的时间，即触发器输出方波脉冲的宽度受电容C1、C2调制。
 - 当 $C_1=C_2$ 时，各点的电压波形如图4—20(a)所示，Q和 \bar{Q} 两端电平的脉冲宽度相等，两端间的平均电压为零。当 $C_1>C_2$ 时，各点的电压波形如图4—20(b)所示，Q、 \bar{Q} 两端间的平均电压(经一低通滤波器)为
-

$$U_0 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$$

式中：T1和T2分别为Q端和 \bar{Q} 端输出方波脉冲的宽度，亦即C1和C2的充电时间。

□ 当该电路用于差动式变极距型电容传感器时有

$$U_0 = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} U_1$$

□ 用于差动式变面积型电容传感器时有

$$U_0 = \frac{\Delta A}{A} U_1$$

□ 这种线路不需要载频和附加解调线路，无波形和相移失真；输出信号只需要通过低通滤波器引出；直流信号的极性取决于C1和C2；对变极距和变面积的电容传感器均可获得线性输出。这种脉宽调制线路也便于与传感器做在一起，从而使传输误差和干扰大大减小。

11.3.4 运算放大器电路

- 图4—21为其电原理图。 C_1 为传感器电容，它跨接在高增益运算放大器的输入端和输出端之间。放大器的输入阻抗很高（ $Z_i \rightarrow \infty$ ），因此可视作理想运算放大器。其输出端输出—与 C_1 ，成反比的电压 U_0 ，即

$$U_0 = -U_i C_0 / C_1$$

式中 U_i 为信号源电压， C_0 为固定电容，要求它们都很稳定。对变极距型电容传感器 $C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / \delta$ 上式可写为
可见配用运算放大器测量电路的最大特点是克服了变极距型电容传感器的非线性。

$$U_0 = U_i \frac{C_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} \delta$$

11.4 电容式传感器及其应用

随着电容式传感器应用问题的完善解决，它的应用优点十分明显：。(1)分辨力极高，能测量低达 10^{-15} 的电容值或 0.01 pF 的绝对变化量和高达 $(\Delta C/C)=100\%--200\%$ 的相对变化量，因此尤其适合微信息检测；(2)动极质量小，可无接触测量；自身的功耗、发热和迟滞极小，可获得高的静态精度和好的动态特性 (3) 结构简单！不含有机材料或磁性材料，对环境（除高湿外）的适应性较强；(4)过载能力强。下面介绍它的几种典型结构及其应用

11. 4. 1 电容式位移传感器

面积型电容式位移传感器采用差动式结构、圆柱形电极，与测杆相连的动电极随被测位移而轴向移动，从而改变活动电极与两个固定电极之间的覆盖面积，使电容发生变化。它用于接触式测量，电容与位移呈线性关系。

-
- 差动式梳齿形容栅传感器的极板制有多个栅状电极。定极板(又称长栅)上等间隔交叉配置两组极栅;动、定极板以一定间隙(δ)上下配置,构成差动结构,它实际是多个差动式变面积型电容传感器的并联;为测量大位移,长栅制成更多的栅状电极。设计这种传感器时,一般使动、定极板有相同的极距 p 和栅宽($a=b$),且 $a=b=(0.3\text{---}0.6)p$ 时,传感器有较好的线性度和灵敏度;还要注意选择动、定极板基体绝缘材料,它对线性度和灵敏度有影响;电极表面应覆盖保护性涂层,电极厚度应做得尽量薄。
 - 多极片型容栅传感器两极板(动尺和定尺)相对、平行安装,动尺上有一列多组尺寸相同、宽度为 l_0 的小发射电极片1、2、3...8,定尺上设有一列尺寸相同、宽度和间隔均为 $4l_0$ 的接收电极片。电极片间互相电绝缘。当动尺沿设定方向移动时,发射极片与接收极片间电容变化。当在发射极片1、2、...8加激励电压时,通过电容耦合,在接收电极上产出与相对位置有关的电荷输出。采用不同的激励电压及相应的测量电路,则可得到幅值或相位与被测位移成比例关系的调幅信号或调相信号。
-

□ 容栅传感器动尺上发射电极片每八片一组，分别加上V1—V8八个等幅、同频、相位依次相差 $\pi/4$ 的方波激励电压。根据谐波分析理论可知方波由其基波与奇次谐波之和组成，因此仍可用正弦波进行分析。设动尺相对定尺的初始位置及各小发射电极片施加不同相位的激励电压如图4-25所示，且各发射电极片与接收电极片全遮盖时的电容均为 C_0 ，当位移 $x \leq l_0$ （小发射电极片宽度）时，在接收电极片只上的感生电荷为

$$\begin{aligned}
 Q_R &= -C_0 \frac{x}{l_0} U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - C_0 U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) - \\
 &C_0 U_m \sin \omega t - C_0 U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) - C_0 \frac{l_0 - x}{l_0} U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\
 &= C_0 U_m \left[\left(1 - \frac{2x}{l_0}\right) \cos \omega t + 2.4142 \sin \omega t \right]
 \end{aligned}$$

□ 因此感生电压 U_R 为

$$u_R = K_0 \sin(\omega t + \theta)$$

$$\theta = \arctan \frac{1 - 2x/l_0}{2.4142}$$

- 式中 $K_0 = U_m \sqrt{(1 - 2x/l_0)^2 + 2.4142^2}$ 为感生电压幅值，近似为一常数， ω 为激励电压角频率。通常采用相位跟踪测量法测出相位角 θ ，便可测出位移 x 值。该法具有很强的抗干扰能力，但存在理论非线性误差(约为0.0110)和高次谐波，影响测量精确度。
- 容栅与光栅一样具有误差平均效应，因此测量精度很高。目前已制成的电子数字显示卡尺，就是一例，它配用细分电路后，可检测 $10 \mu\text{m}$ 的微位移，测量范围为0—150mm
-

11. 4. 2 电容式加速度传感器

- **电容式传感器及其构成的力平衡式挠性加速度计。敏感加速度的质量组件由石英动极板及力发生器线圈石英；并由石英挠性梁弹性支承，其稳定性极高。固定于壳体的两个石英定极板与动极板构成差动结构；两极面均镀金属膜形成电极。由两组对称E形磁路与线圈构成的永磁动圈式力发生器，互为推挽结构，这大大提高了磁路的利用率和抗干扰性。**
-

-
- 工作时，质量组件敏感被测加速度，使电容传感器产生相应输出，经测量(伺服)电路转换成比例电流输入力发生器，使其产生一电磁力与质量组件的惯性力精确平衡，迫使质量组件随被加速的载体而运动；此时，流过力发生器的电流，即精确反映了被测加速度值。
 - 在这种加速度传感器中，传感器和力发生器的工作面均采用微气隙“压膜阻尼”，使它比通常的油阻尼具有更好的动态特性。典型的石英电容式挠性加速度传感器的量程为 $0 \sim 150 \text{ m/s}^2$ ，分辨力为 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，非线性误差和不重复性误差均不大于0.03%F. S. 有关力平衡式加速度传感器的分析详见13.2节。
-

11. 4. 3 电容式力和压力传感器

- 大吨位电子吊秤用电容式称重传感器的扁环形弹性元件内腔上下平面上分别固连电容传感器的定极板和动极板。称重时，弹性元件受力变形，使动极板位移，导致传感器电容量变化，从而引起由该电容组成的振荡频率变化。频率信号经计数、编码，传输到显示部分。
-

-
- 典型的小型差动电容式压差传感器结构加有预张力的不锈钢膜片作为感压敏感元件，同时作为可变电容的活动极板。电容的两个固定极板是在玻璃基片上镀有金属层的球面极片。在压差作用下，膜片凹向压力小的一面，导致电容量发生变化。球面极片(图中被夸大)可以在压力过载时保护膜片，并改善性能。其灵敏度取决于初始间隙 δ_0 ， δ_0 越小，灵敏度越高。其动态响应主要取决于膜片的固有频率。这种传感器可与图4—19所示差动脉冲调宽电路相联构成测量系统。
-

11. 4. 4 电容式物位传感器

- 电容式物位传感器是利用被测介质面的变化引起电容变化的一种变介质型电容传感器。检测非导电液体介质的电容传感器，当被测液面高度发生变化时，两同轴电极间的介电常数将随之发生变化从而引起电容量的变化。假设被测介质的介电常数为 ε_1 ，而液面以上部分介质的介电常数为 ε_2 ，则其电容量为

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_1 H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon_2 (L - H)}{\ln \frac{D}{d}}$$

- 式中 H---传感器插入液面的深度；
- L---两电极板相互覆盖部分的长度；
- D, d---分别为外电极的内径和内电极的外径
-

-
- 由上式可见，两种介质介电常数差别 (ε_1 — ε_2) 越大、极径D与d相差 (即极距) 愈小，传感器灵敏度就愈高。
 - 上述原理也可用于导电介质液位的测量。这时，传感器极板必须与被测介质绝缘。
 - 电容式料位传感器，用来测量非导电固体散料的料位。由于固体摩擦力较大，容易“滞留”，故一般不用双层电极，而用电极棒与容器壁组成电容传感器两极。设D与d分别为容器的内径和电极棒外径； ε_0 、 ε 分别为空气和物料的介电常数，则电容变化与物位升降关系为

$$C=2\pi(\varepsilon-\varepsilon_0)H/\ln(D/d)$$

除上述应用外，电容式传感器还可用于转速测量与金属零件计数等，这里不再赘述。
