

The background of the slide is a composite image. The top half features a close-up of a fountain pen's nib, which is dark and metallic, resting on a piece of paper with faint, illegible text. The bottom half shows a close-up of a watch's metal bracelet, which has a polished, reflective surface. The overall color palette is muted, with blues, greys, and metallic tones.

# 第4章 电容式传感器

# 第4章 电容式传感器



[www.seu.edu.cn](http://www.seu.edu.cn)

4.1

工作原理、结构和特性

4.2

应用中存在的问题及其改进措施

4.3

测量电路

4.4

电容式传感器及其应用

## 第4章 电容式传感器



[www.seu.edu.cn](http://www.seu.edu.cn)

- 电容式传感器是将被测非电量的变化转换为电容量变化的一种传感器。结构简单、高分辨力、可非接触测量，并能在高温、辐射和强烈振动等恶劣条件下工作，这是它的独特优点。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。

### 第一节 工作原理、结构和特性

- 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  $\varepsilon_0$  ( $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ )、极板间介质的相对介电常数  $\varepsilon_r$ 、极板的有效面积  $A$  以及两极板间的距离  $\delta$  有关：

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / \delta \quad (4-1)$$

- 若被测量的变化使式中  $\delta$ 、 $A$ 、 $\varepsilon_r$  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。

## 4.1.1 变极距型电容传感器

图4.1为这种传感器的原理图。当传感器的  $\varepsilon_r$  和  $A$  为常数，初始极距为  $\delta_0$ ，由式(4-1)可知其初始电容量  $C_0$  为

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / \delta_0 \quad (4-2)$$

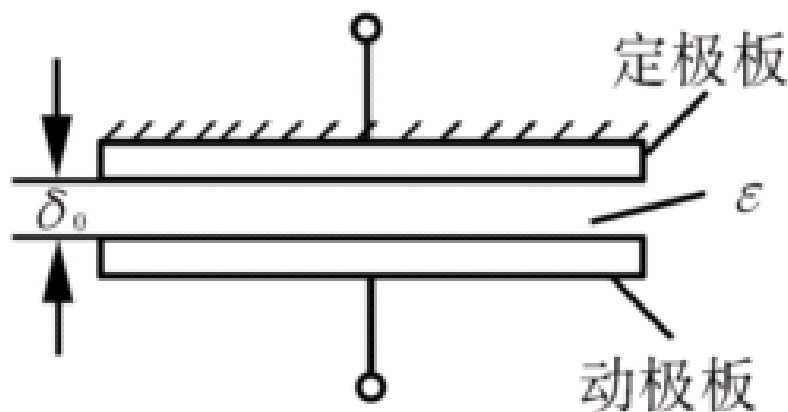


图4.1 变极距型电容传感器原理图



## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

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

$$C_0 + \Delta C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / (\delta_0 - \Delta \delta_0) = C_0 / (1 - \Delta \delta_0 / \delta_0) \quad (4-3)$$

可见，传感器输出特性  $C = f(\delta)$  是非线性的，如图4-2所示。电容相对变化量为

$$\Delta C / C_0 = \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \left( 1 - \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \right)^{-1} \quad (4-4)$$

如果满足条件  $(\Delta \delta_0 / \delta_0) \ll 1$ ，式(4-4)可按级数展开成

$$\Delta C / C_0 = \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \left( 1 + \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} + \left( \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right) \quad (4-5)$$

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

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

$$\Delta C / C_0 \approx \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \quad (4-6)$$

和

$$S = \Delta C / \Delta \delta_0 = C_0 / \delta_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / \delta_0^2 \quad (4-7)$$

如果考虑式(4-5)中的线性项及二次项, 则

$$\Delta C / C_0 = \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \left( 1 + \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \right) \quad (4-8)$$

# 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

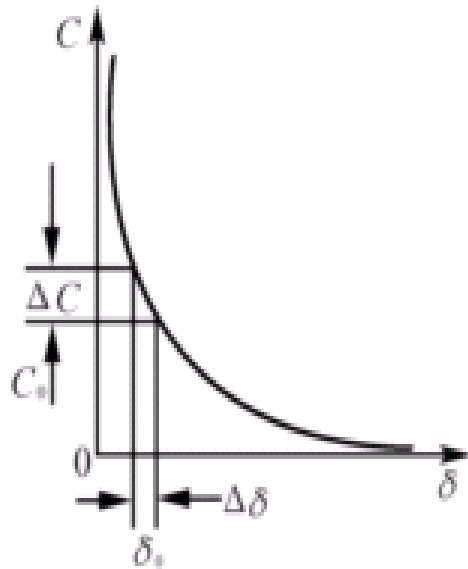


图4.2  $C=f(\delta)$  特性曲线

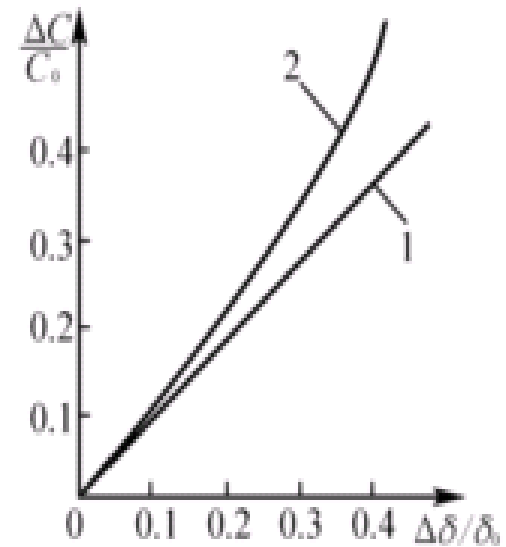


图4.3 变极距型电容传感器的非线性特性

式(4-6)的特性如图4.3中的直线1，而式(4-8)的特性如曲线2。因此，以式4-6作为传感器的特性使用时，其相对非线性误差 $e_f$ 为





## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

$$e_f = \left| \left( \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \right)^2 \right| / \left| \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \right| \times 100\% = \left| \frac{\Delta \delta_0}{\delta_0} \right| \times 100\% \quad (4-9)$$

由上讨论可知：

- (1) 变极距型电容传感器只有在  $|\Delta \delta_0 / \delta_0|$  很小(小测量范围)时，才有近似的线性输出；
- (2) 灵敏度  $S$  与初始极距  $\delta_0$  的平方成反比，故可用减少  $\delta_0$  的办法来提高灵敏度。例如在电容式压力传感器中，常取  $\delta_0 = 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ ， $C_0$  在  $20 \sim 100 \text{ pF}$  之间。由于变极距型的分辨力极高，可测小至  $0.01 \mu\text{m}$  的线位移，故在微位移检测中应用最广。

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

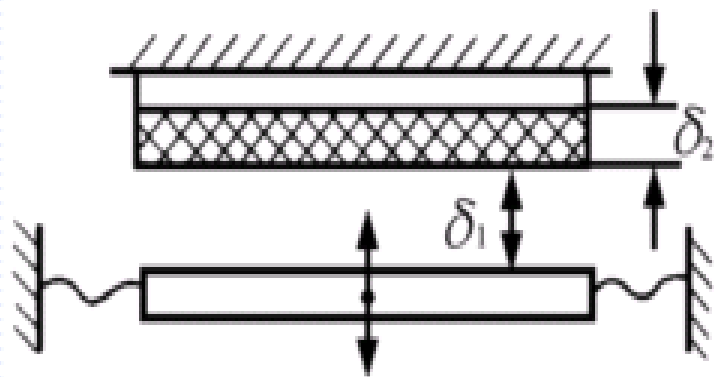


图4.4 具有固体介质的变极距型电容传感器

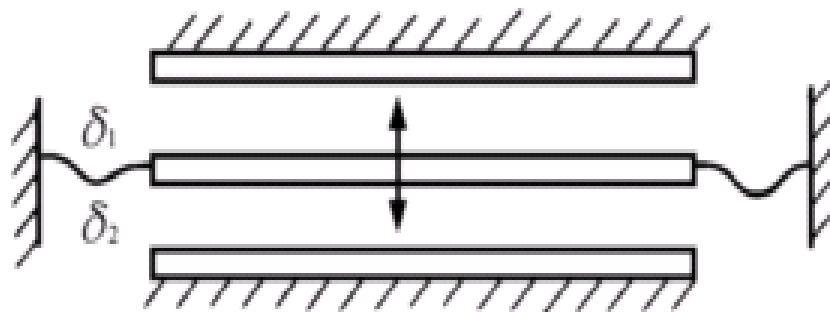


图4.5 变极距型差动式结构

由式(4-9)可见,  $\delta_0$  的减小会导致非线性误差增大;  $\delta_0$  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, 如图4.4所示。设两种介质的相对介电质常数为  $\varepsilon_{r1}$  (空气:  $\varepsilon_{r1}=1$ )、 $\varepsilon_{r2}$ , 相应的介质厚度为  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ , 则有



## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{\delta_1 + \delta_2 / \varepsilon_{r2}} \quad (4-10)$$

图4.5所示为差动结构，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 $\Delta \delta$ 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。同差动式自感传感器式(3-41)的同样分析方法，由式(4-4)和式(4-5)可得电容总的相对变化量为

$$\Delta C / C_0 = \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{C_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (4-11)$$

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

略去高次项，可得近似的线性关系

$$\Delta C / C_0 = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (4-12)$$

相对非线性误差 $e_f'$  为

$$e_f' = \frac{\left| 2(\Delta \delta / \delta_0)^3 \right|}{\left| 2(\Delta \delta / \delta_0) \right|} = (\Delta \delta / \delta_0)^2 \times 100\% \quad (4-13)$$

上式与式(4-6)及式(4-9)相比可知，差动式比单极式灵敏度提高一倍，且非线性误差大为减小。由于结构上的对称性，它还能有效地补偿温度变化所造成的误差。

### 4.1.2. 变面积型电容传感器

原理结构如图4.6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  $\Delta l$  时，则电容为

$$C = C_0 - \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (l_0 - \Delta l) b_0}{d_0} \quad (4-14)$$

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

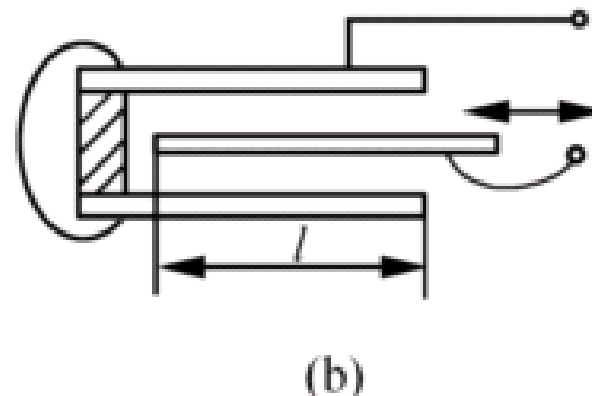
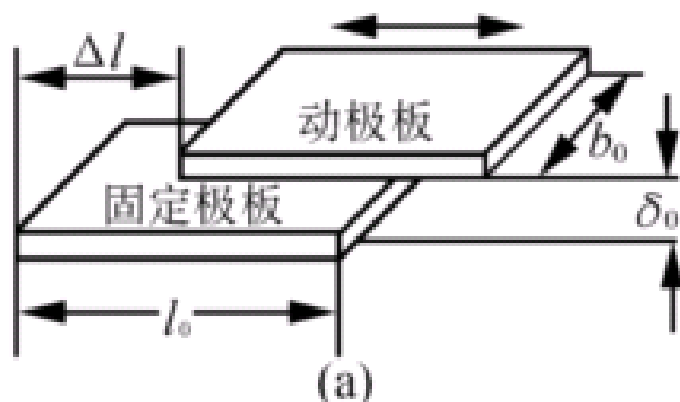


图4.6 变面积型电容传感器原理图 (a)单片式; (b)中间极移动式

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

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

(4-15)



## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

很明显，这种传感器的输出特性呈线性。因而其量程不受线性范围的限制，适合于测量较大的直线位移和角位移。它的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta l} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b_0}{\delta_0} \quad (4-16)$$

必须指出，上述讨论只在初始极距  $\delta_0$  精确保持不变时成立，否则将导致测量误差。为减小这种影响，可以使用图4-6 (b) 所示中间极移动的结构。

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

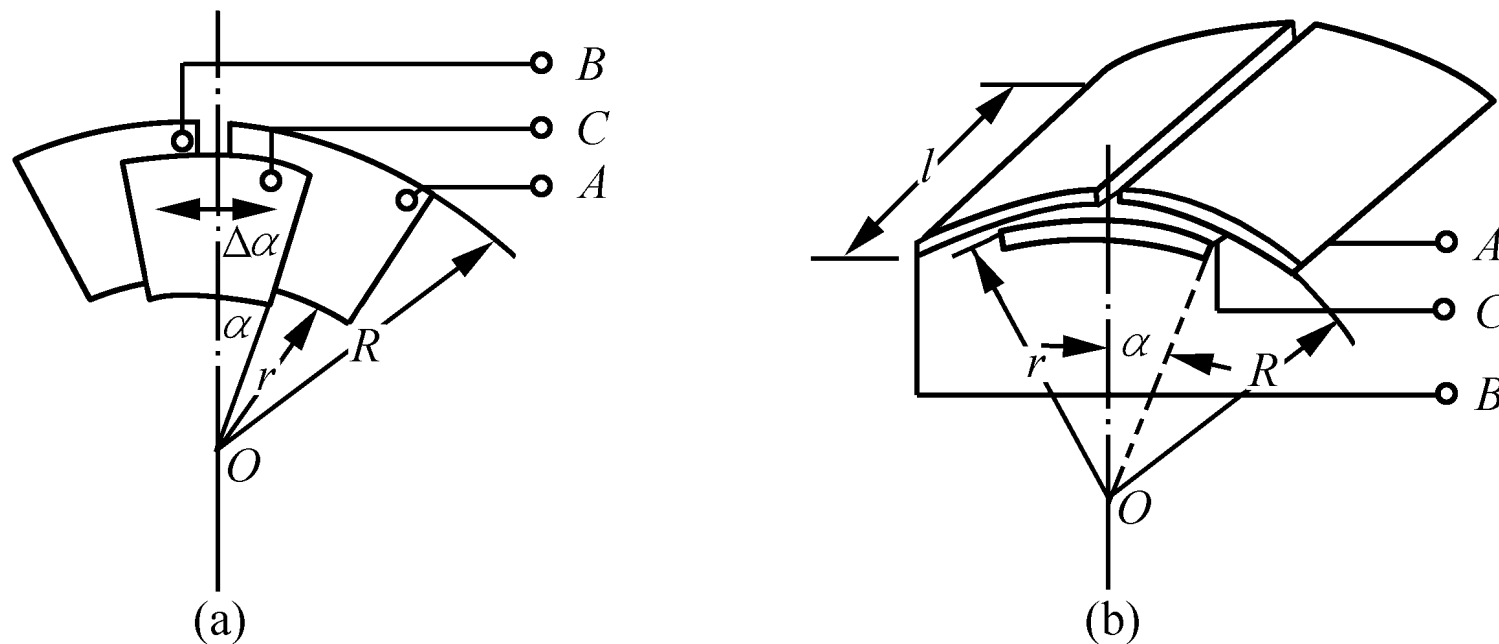


图4.7 变面积型差动式结构 (a) 扇形平板结构; (b) 柱面板结构



## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

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4-7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。对图(a)有

$$C_{AC0} = C_{BC0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (R^2 - r^2) \alpha}{\delta_0} \quad (4-17)$$

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

对图(b)有

$$C_{AC0} = C_{BC0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l r \alpha}{\delta_0} \quad (4-18)$$

上两式中  $\alpha$  ——初始位置时一组极板相互覆盖有效面积所包的角度(或所对的圆心角);  $\delta_0$ 、 $\varepsilon_r$ 同前。

当动极板C随角位移( $\Delta \alpha$ )输入而摆动时两组电容值一增一减, 差动输出。

### 4.1.3 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4.8为原理结构。图(a)中两平行极板固定不动，极距为  $\delta_0$ ，相对介电常数为  $\varepsilon_{r2}$  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。由式(4-1)

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0 b_0}{\delta_0} [\varepsilon_{r1} (l_0 - l) + \varepsilon_{r2} l] \quad (4-19)$$

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

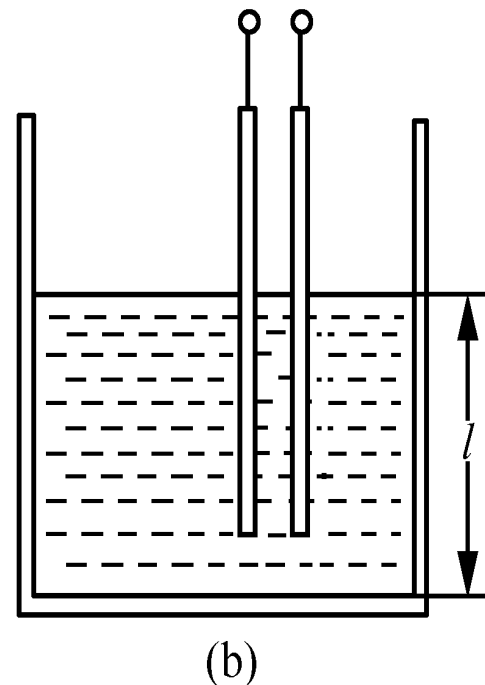
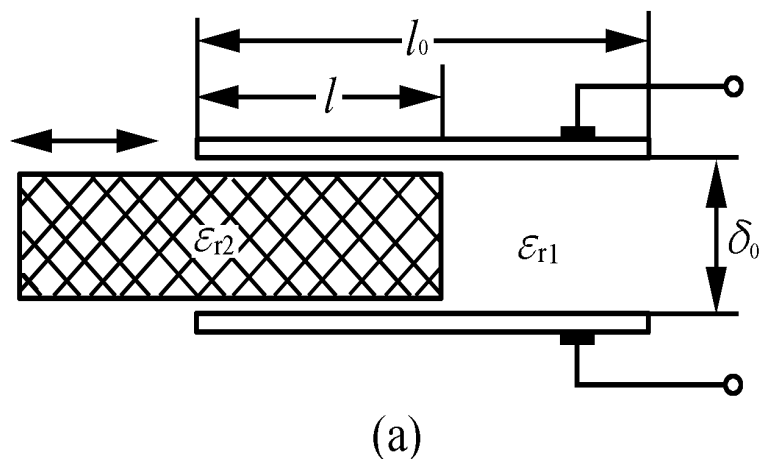


图4.8 变介质型电容传感器

(a) 电介质插入式；(b) 非导电流散材料物位的电容测量  
式中  $l_0$ 、 $b_0$ ——极板长度和宽度；  
 $l$ ——第二种电介质进入极间的长度。



## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

若电介质1为空气( $\varepsilon_{r1}=1$ ), 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1后引起电容的相对变化为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{\varepsilon_{r2} - 1}{l_0} l \quad (4-20)$$

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散材物料的物位测量。如图(b)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。由式(4-20)可知, 测出的电容量即反映灌装高度 $l$ 。

## 第二节 应用中存在的问题及其改进措施

### 4.2.1 特点

#### 1. 优点:

##### I. 温度稳定性好

电容式传感器的电容值一般与电极材料无关，有利于选择温度系数低的材料，又因本身发热极小，影响稳定性甚微。而电阻传感器有铜损等，易发热产生零漂。



## II. 结构简单

电容式传感器结构简单，易于制造，易于保证高的精度，可以做得非常小巧，以实现某些特殊的测量；能工作在高温，强辐射及强磁场等恶劣的环境中，可以承受很大的温度变化，承受高压，高冲击，过载等；能测量超高温和低压差，也能对带磁工作进行测量。



### III. 动态响应好

电容式传感器由于带电极板间的静电引力很小（约几个 $10^{-5}\text{N}$ ），需要的作用能量极小，又由于它的可动部分可以做得很小很薄，即质量很轻，因此其固有频率很高，动态响应时间短，能在几兆Hz的频率下工作，特别适用于动态测量。又由于其介质损耗小可以用较高频率供电，因此系统工作频率高。它可用于测量高速变化的参数。



### IV. 可以非接触测量，具有平均效应

例如 非接触测量回转轴的振动或偏心率、小型滚珠轴承的径向间隙等。当采用非接触测量时，电容式传感器具有平均效应，可以减小工件表面粗糙度等对测量的影响。

电容式传感器除了上述的优点外，还因其带电极板间的静电引力很小，所需输入力和输入能量极小，因而可测极低的压力、力和很小的加速度、位移等，可以做得很灵敏，分辨力高，能敏感 $0.01\text{ }\mu\text{m}$  甚至更小的位移；由于其空气等介质损耗小，采用差动结构并接成电桥式时产生的零残极小，因此允许电路进行高倍率放大，使仪器具有很高的灵敏度。

## 2.缺点

### I.输出阻抗高，负载能力差

电容式传感器的容量受其电极的几何尺寸等限制，一般微几十至几百皮法，其值只有几个皮法，使传感器的输出阻抗很高，尤其当采用音频范围内的交流电源时，输出阻抗高达 $10^8 \sim 10^6 \Omega$ 。因此传感器的负载能力很差，易受外界干扰影响而产生不稳定现象，严重时甚至无法工作，必须采取屏蔽措施，从而给设计和使用带来极大的不便。容抗大还要求传感器绝缘部分的电阻值极高（几十兆欧以上），否则绝缘部分将作为旁路电阻而影响仪器的性能（如灵敏度降低），为此还要特别注意周围的环境如湿度、清洁度等。

# 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

若采用高频供电，可降低传感器输出阻抗，但高频放大、传输远比低频的复杂，且寄生电容影响大，不易保证工作十分稳定。

## II. 寄生电容影响大

电容式传感器的初始电容量小，而连接传感器和电子线路的引线电缆电容（1~2m导线可达800pF）、电子线路的杂散电容以及传感器内极板于其周围导体构成的电容等所谓“寄生电容”却较大，不仅降低了传感器的灵敏度，而且这些电容（如电缆电容）常常是随机变化的，将使仪器工作很不稳定，影响测量精度。因此对电缆的选择、安装、接法都有要求。



## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

随着材料、工艺、电子技术，特别是集成技术的发展，使电容式传感器的优点得到发扬而缺点不断地得到克服。电容式传感器正逐渐成为一种高灵敏度、高精度，在动态、低压及一些特殊测量方面大有发展前途地传感器。

### 4.2.2 应用中存在的问题

#### 1. 等效电路

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4.9所示。

## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

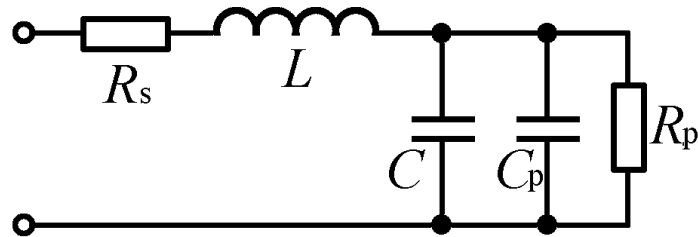


图4.9电容传感器的等效电路

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； $R_s$ 为高湿、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

# 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 LC} \quad (4-21)$$

变化，从而引起传感器有效灵敏度的改变

$$S_e = \frac{S}{(1 - \omega^2 LC)^2} \quad (4-22)$$

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。

## 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 $\delta$ 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：

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left\{ \frac{\pi r^2}{\delta} + r \left[ \ln \frac{16\pi r}{\delta} + 1 + f\left(\frac{h}{\delta}\right) \right] \right\} \quad (4-23)$$

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。

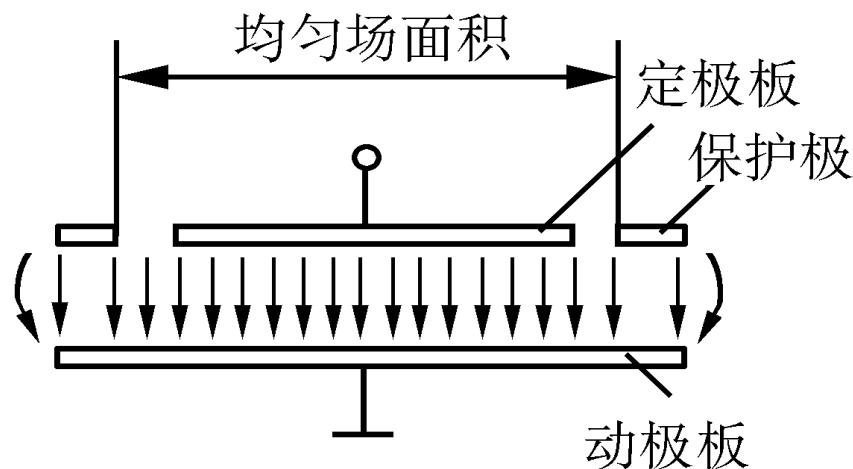


图4.10 带有保护环的电容传感器原理结构

### 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。





### 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（几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（见图4.9），严重影响感器的输出特性，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。

#### (1). 驱动电缆法

它实际上是一种等电位屏蔽法。如图4.11所示：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）。

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

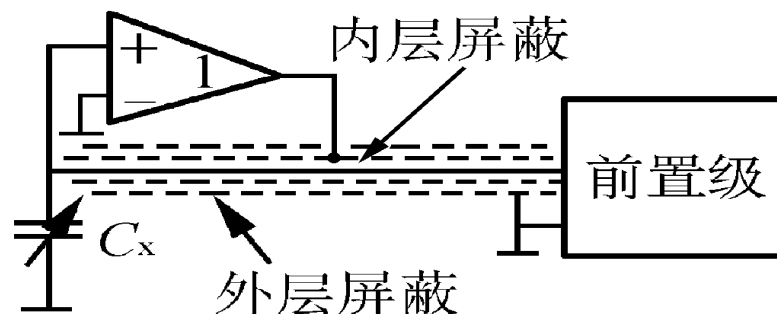


图4.11 驱动电缆法原理图

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 $C_{x1}$ 、 $C_{x2}$ 配用电桥测量电路为例，如图4.12所示； $U$ 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 $R_2$ 、 $R_4$ 桥臂中间，与整体屏蔽共地。

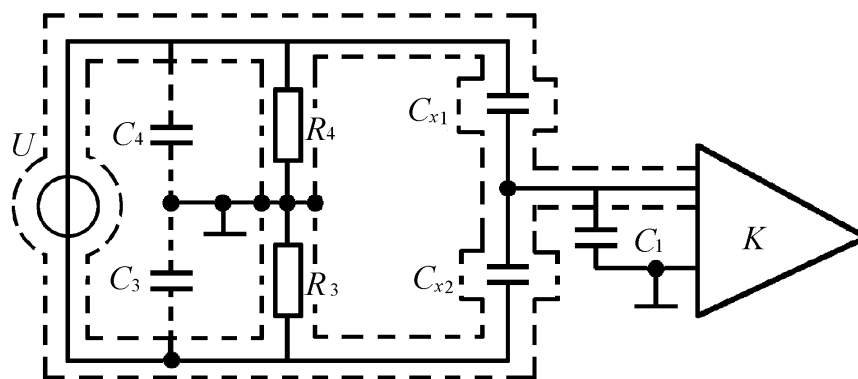


图4.12 整体屏蔽法原理图

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

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去。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，这会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。

### 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。

在设计电容式传感器时，适当选择材料及有关结构参数，可以满足温度误差补偿要求。

### (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的温度系数可达 $0.07\%/^{\circ}\text{C}$ ；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。

### 第三节 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。

#### 4.3.1. 变压器电桥

如图4.13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

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (4-24)$$

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

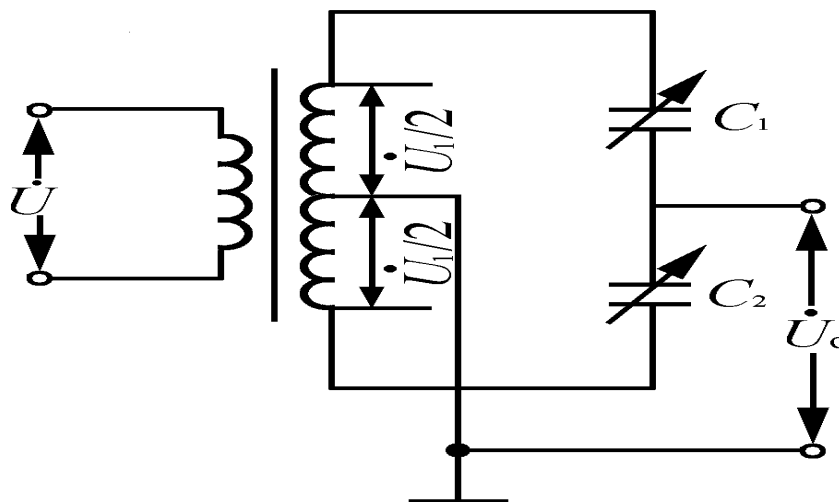


图4.13 变压器电桥

对变极距型电容传感器，代入上式得

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

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



## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

可见，对变极距型差动电容传感器的变压器电桥，在负载阻抗极大时，其输出特性呈线性。

### 4.3.2. 双T二极管交流电桥

如图4.14所示： $\dot{U}$ 是高频电源，提供幅值为 $U$ 的对称方波（正弦波也适用）；

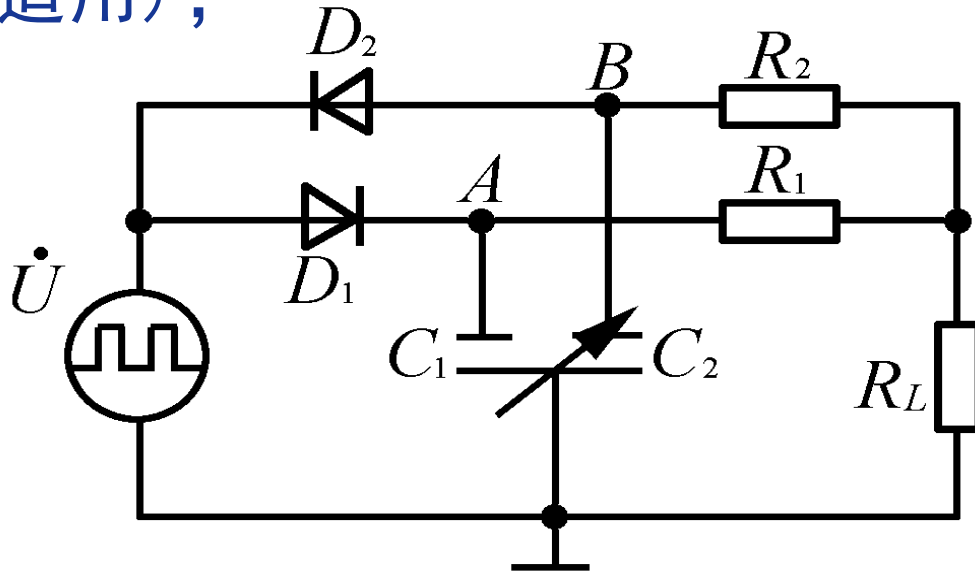


图4.14 双T二极管交流电桥



## 第4章 电容式传感器

www.seu.edu.cn

- 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， $C_1 = C_2$ ， $R_L$ 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， $R_L$ 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

$$\bar{U}_L = \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L U f (C_1 - C_2) \quad (4-25)$$

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

式中： $f$ 为电源频率。当 $R_L$ 已知时，上式中

$$K = \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L$$

为常数，则

$$\bar{U}_L \approx KUf(C_1 - C_2) \quad (4-26)$$

## 第4章 电容式传感器



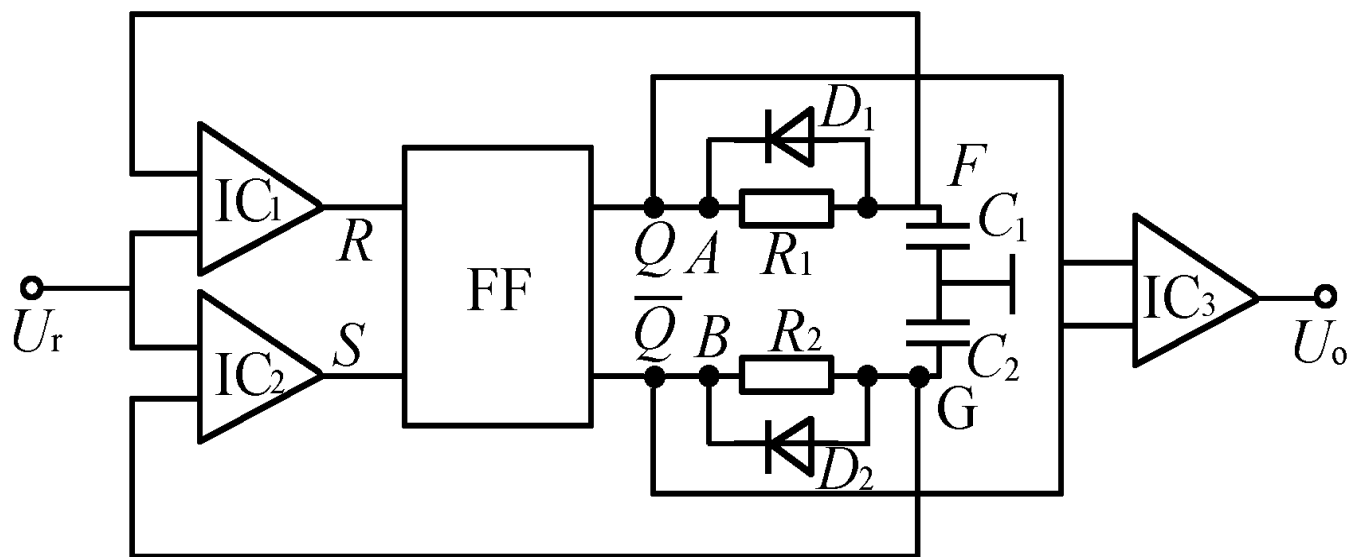
www.seu.edu.cn

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。

## 4.3.3. 脉冲调宽电路

下图为一种差动脉冲宽度调制电路。



## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

当接通电源后，若触发器Q端为高电平( $U_1$ )， $\bar{Q}$ 端为低电平(0)，则触发器通过 $R_1$ 对 $C_1$ 充电；当F点电位 $U_F$ 升到与参考电压 $U_r$ 相等时，比较器 $IC_1$ 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 $C_1$ 通过二极管 $D_1$ 迅速放电至零，而触发器由端经 $R_2$ 向 $C_2$ 充电；当G点电位 $U_G$ 与参考电压 $U_r$ 相等时，比较器 $IC_2$ 输出一脉冲使触发器翻转，从而循环上述过程。

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

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 $C_1$ 、 $C_2$ 调制。

当 $C_1=C_2$ 时，各点的电压波形如图4.16(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4.16(b)所示， $\bar{Q}$ 、 $Q$ 、两端间的平均电压(经一低通滤波器)为

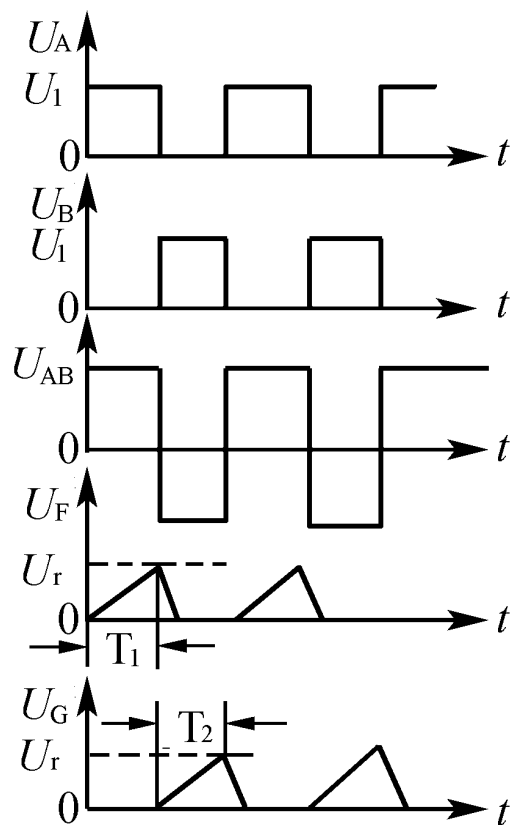
$$U_0 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1 \quad (4-27)$$

式中： $T_1$ 和 $T_2$ 分别为 $Q$ 端和 $\bar{Q}$ 端输出方波脉冲的宽度，亦即 $C_1$ 和 $C_2$ 的充电时间。

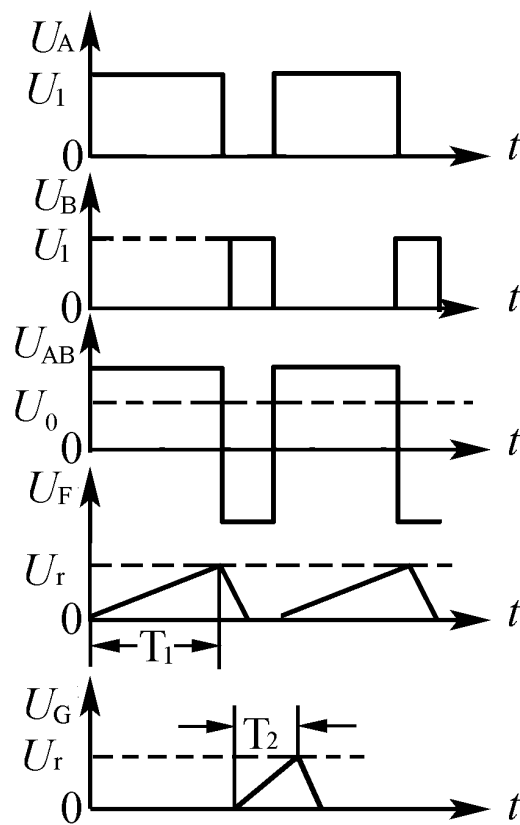
# 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn



(a)



(b)

图4.16 各点电压波形图



## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

当该电路用于差动式变极距型电容传感器时，式(4-27)有

$$U_0 = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} U_1 \quad (4-28)$$

这种电路只采用直流电源，无需振荡器，要求直流电源地电压稳定度较高，但比高稳定度地稳频稳幅交流电源易于做到。

用于差动式变面积型电容传感器时有

$$U_0 = \frac{\Delta A}{A} U_1 \quad (4-29)$$

## 第4章 电容式传感器



[www.seu.edu.cn](http://www.seu.edu.cn)

这种电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 $C_1$ 和 $C_2$ ；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。

### 4.3.4. 运算放大器电路

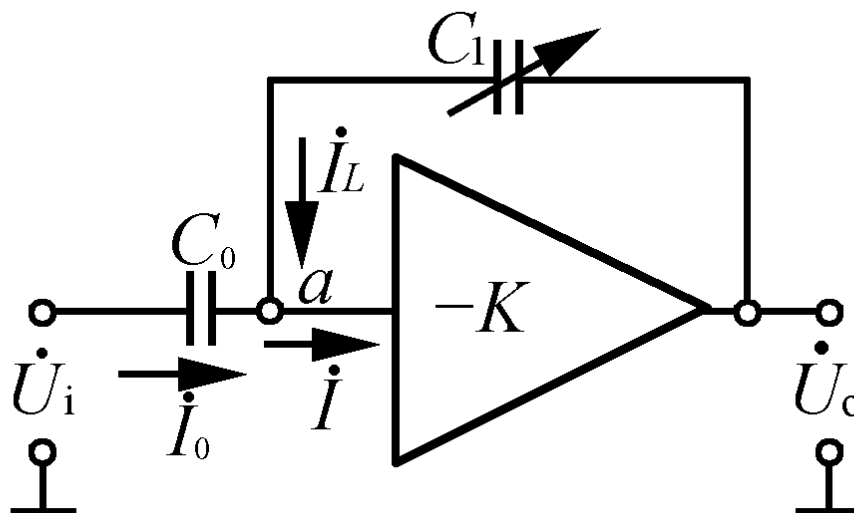


图4.17 运算放大器电路

图4.17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。

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

其输出端输出一与 $C_1$ 成反比的电压 $U_0$ ，即

$$U_o = -U_i \frac{C_0}{C_1}$$

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 ( $C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / \delta$ )，式(4-30)可写为

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

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

对变极距型电容传感器 ( $C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / \delta$ ), 式(4-30)可写为

$$U_o = U_i \frac{C_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} \delta \quad (4-31)$$

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。

### 第四节 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 $10^{-7}$ 的电容值 $0.01 \mu\text{m}$ 的绝对变化量和高达 $(\Delta C/C=100\%\sim 200\%)$ 的相对变化量，因此尤适合微信息检测；
- (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。

### 4.4.1 电容式位移传感器

图4.18所示为一种变面积型电容式位移传感器。它采用差动式结构、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。

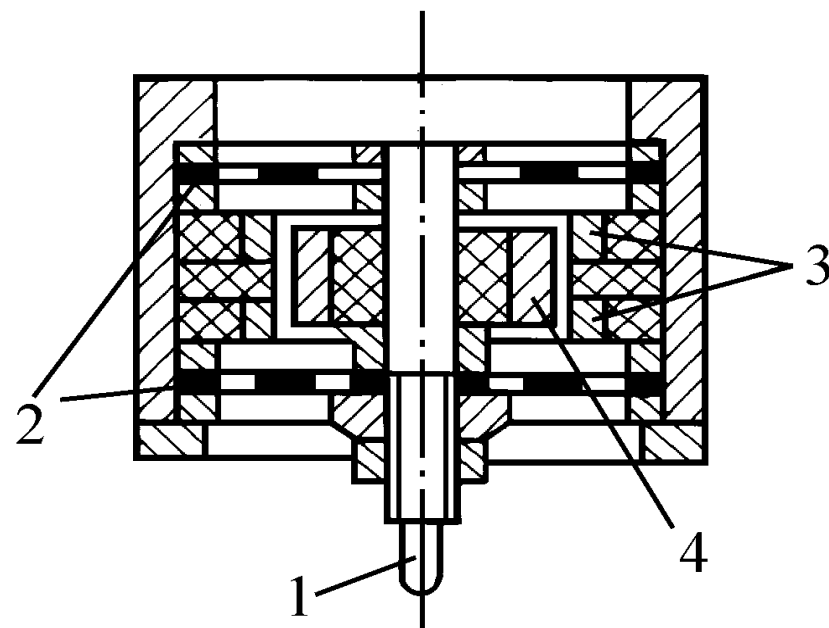


图4.18 电容式位移传感器  
1-测杆；2-开槽簧片；3-固定电极；4-活动电极

## 4.4.2 电容式加速度传感器

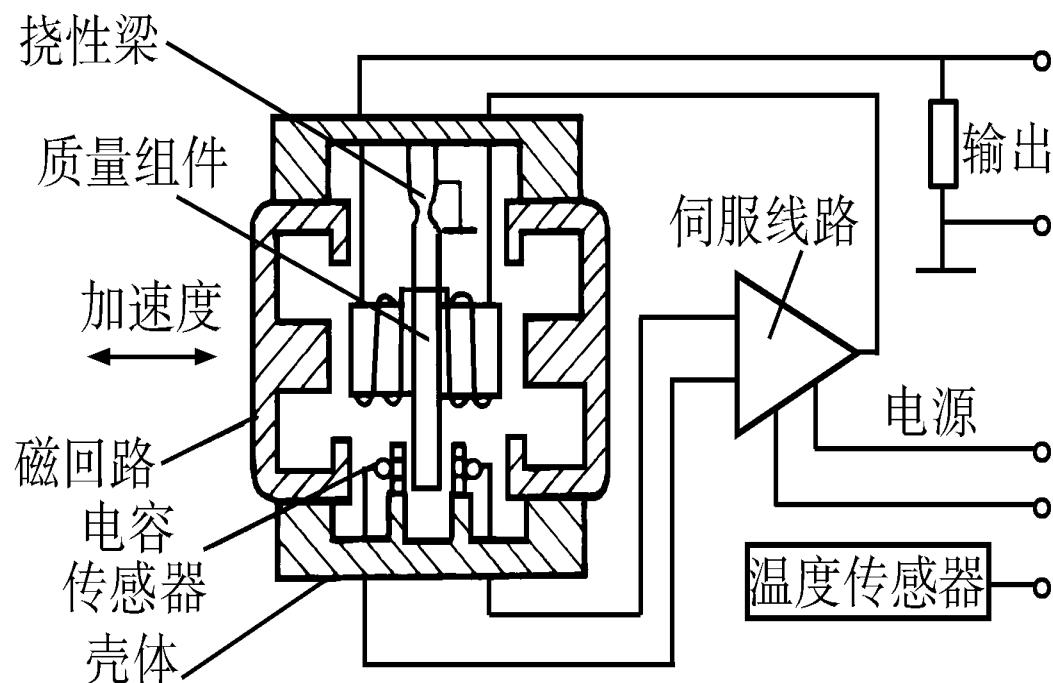


图4.19 电容式挠性加速度传感器



## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

图4.19所示为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组成；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 $1\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ ，非线性误差和不重复性误差均不大于 $0.03\%\text{F.S.}$ 。

### 4.4.3 电容式力和压力传感器

图4.20所示为大吨位电子吊秤用电容式称重传感器。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。

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

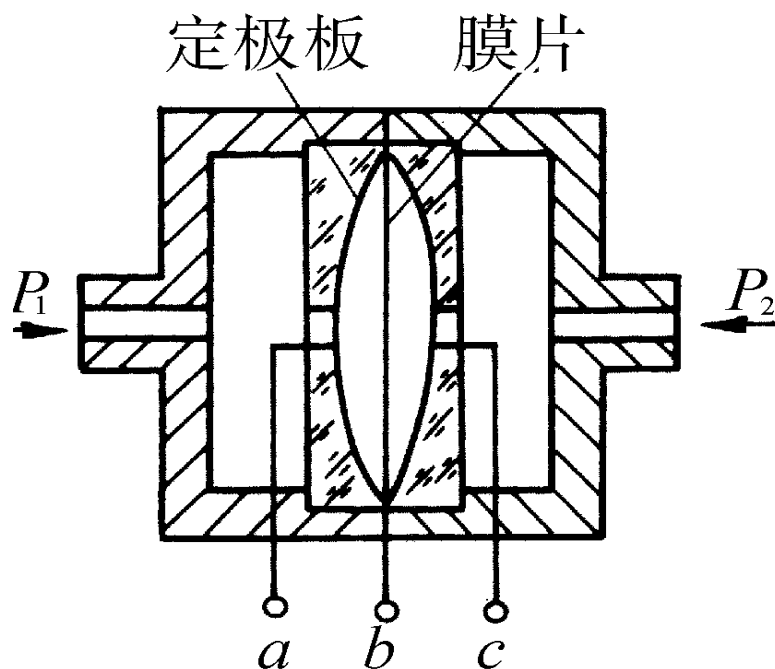


图4.20 电容式称重传感器

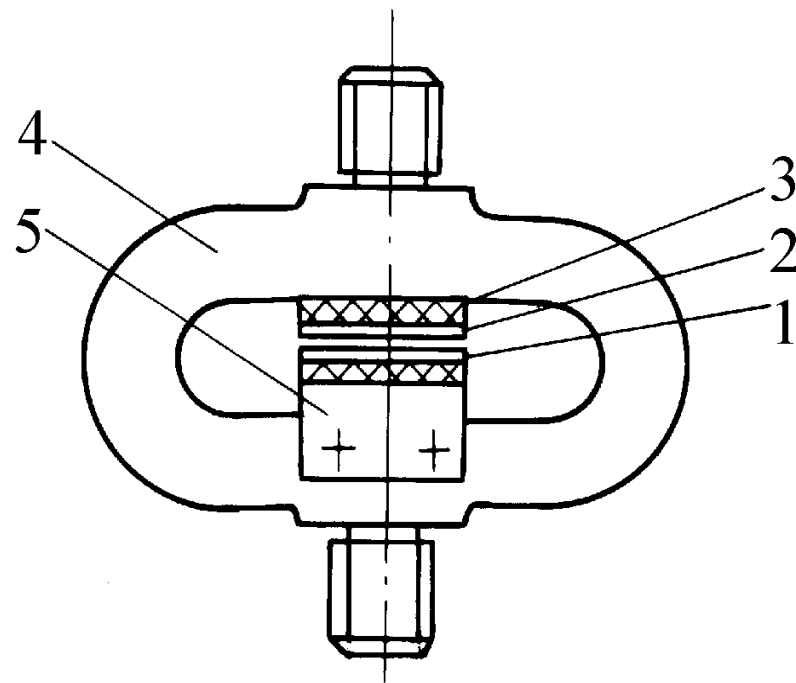


图4.21 电容式传感器

1-动极板；2-定极板；  
3-绝缘材料；4-弹性  
体；5-极板支架

## 第4章 电容式传感器



www.seu.edu.cn

图4. 21为一种典型的小型差动电容式压差动传感器结构。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 $\delta$ ， $\delta$ 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. 15所示差动脉冲调宽电路相联构成测量系统。



### 4.4.4 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。

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。

本章结束，谢谢