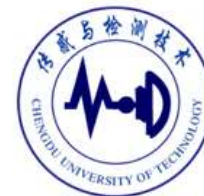


## 第4章 电容式传感器



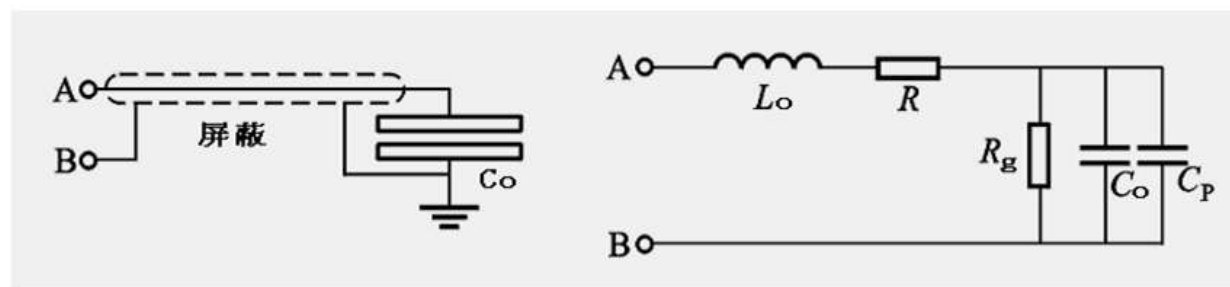
### 4.3 测量电路

#### 1) 电容传感器的等效电路

- 电容传感器的等效电路包括:

传感器电容  $C_0$ ; A、B两端导线分布电容  $C_p$ ,  $C_p > C_0$ 。  
传输线的电感  $L_0$ 、电阻  $R$  (小); 极板等效漏电阻  $R_g$ ;

- 低频时  $X_c$  大,  $L$ 、 $R$  可忽略; 高频时  $X_c$  小,  $L$ 、 $R$  不可忽略, 工作频率  $10\text{MHz}$  以上要考虑电缆电感  $L$  的影响, 这时相当有一  $LC$  串联电路, 有一个谐振频率  $f_0$ , 当  $f = f_0$  时串联谐振阻抗最小, 系统无法工作。



## 第4章 电容式传感器



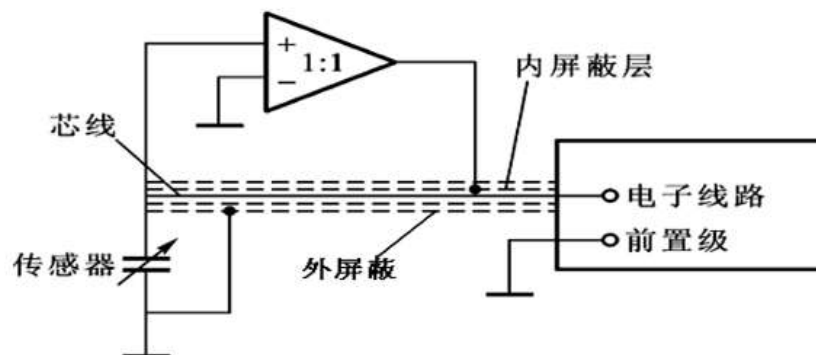
### ➤ 解决的方法:

- ❖ 屏蔽电容转换元件，消除静电场和交变磁场；
- ❖ 前级紧靠转换元件装在同一壳体内避免信号长距离传输；

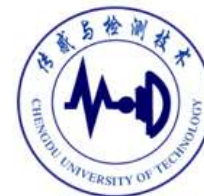


- ❖ 驱动电缆技术，连接电缆采用双层屏蔽，内屏蔽与被屏蔽的导线的电位相同，（跟随器）使传输电缆与内屏蔽层等电位，屏蔽线上有随传感器信号变化的电压（所以称驱动电缆），从而消除芯线对内层屏蔽层的容性漏电减小寄生电容的影响。内外屏蔽之间的电容是放大器负载。

➡ 驱动电缆技术是一种等电位屏蔽方法。这一方法可在10m距离不影响传感器性能，保证电容1pF时也能正常工作。提高电容传感器稳定性。



## 第4章 电容式传感器



### 4.3 测量电路

- 电容传感器中电容值变化都很微小，必须通过测量电路将电容变化转换为电流、电压、频率的变化。

#### 2) 电桥电路

- 变压器式交流电桥测量系统  
电容传感器为  $C_1$  两个桥臂为差动形式  
交流电桥的输出电压为

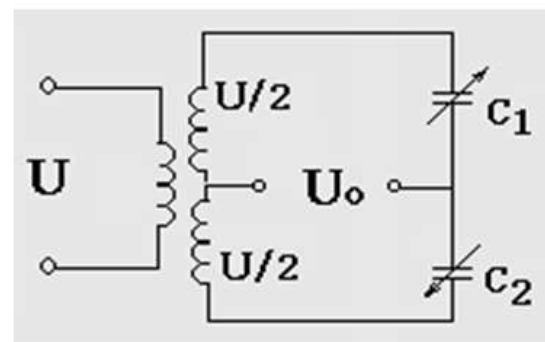
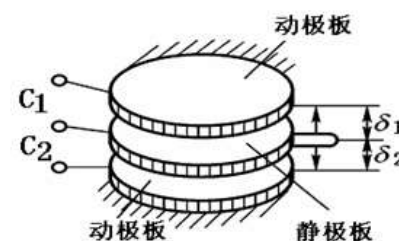
$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 + C_1}$$

代入：

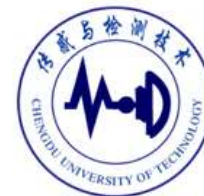
$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$$





## 第4章 电容式传感器

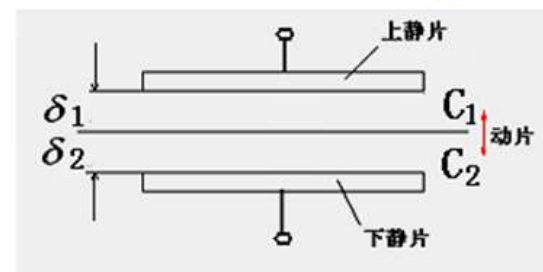


### • 2) 电桥电路

极板在中间位置时

$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 + C_1}$$

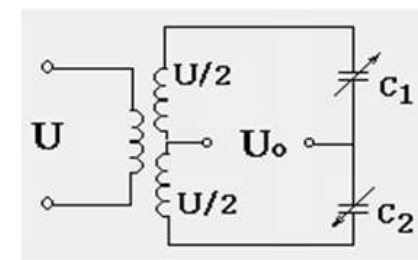
$$C_1 = C_2, U_0 = 0$$



动片上移时两电容分别变化为

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{\delta_0 - \Delta \delta}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon S}{\delta_0 + \Delta \delta}$$

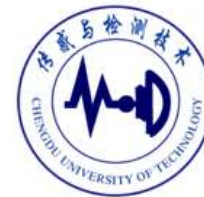


❖ 将上式带入后，输出电压与位移变化成理想线性关系

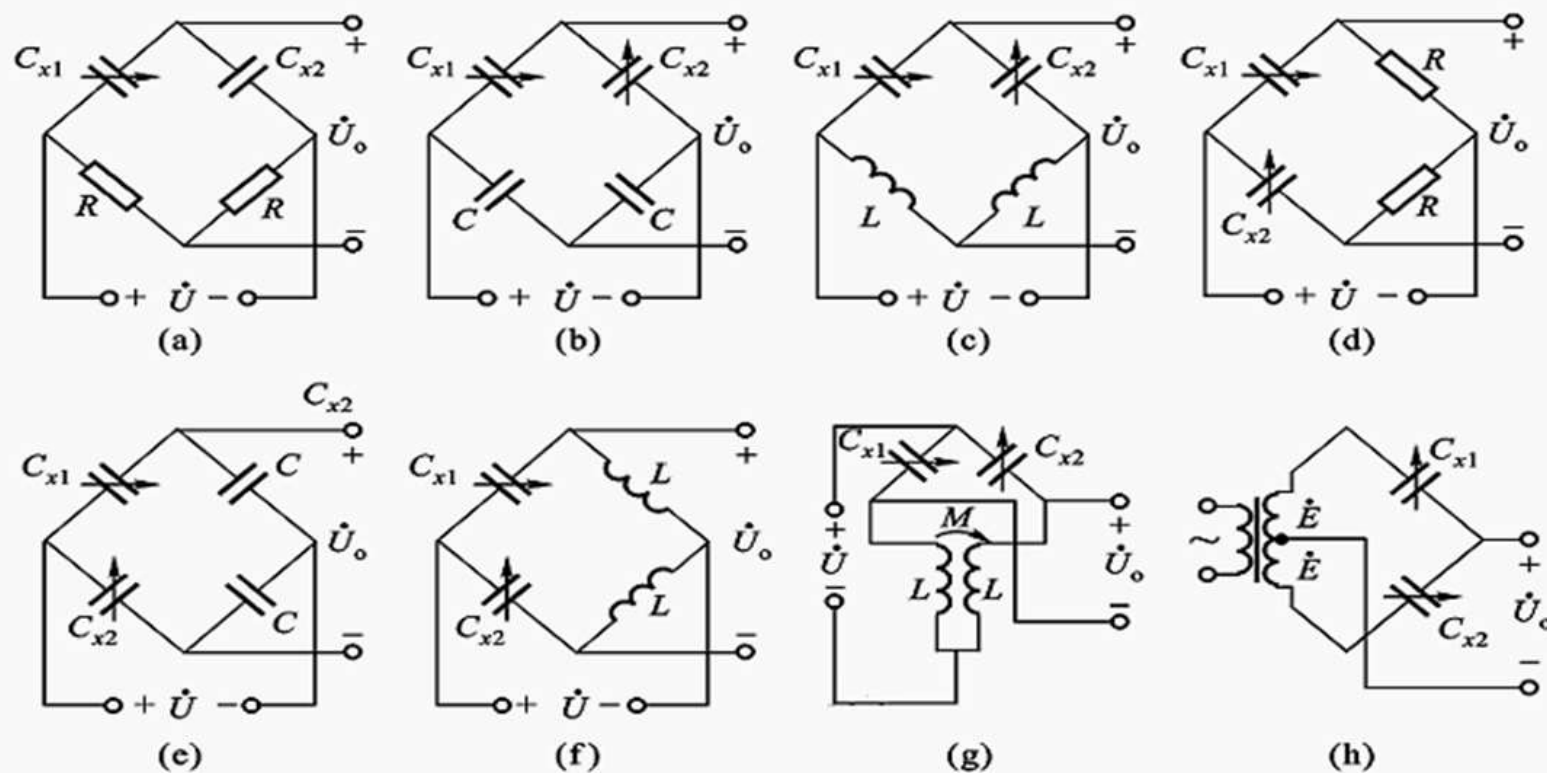
$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 + C_1}$$

$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

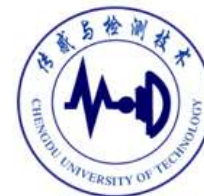
## 第4章 电容式传感器



### 交流电桥的多种形式



## 第4章 电容式传感器



### • 3) 二极管双T型电路

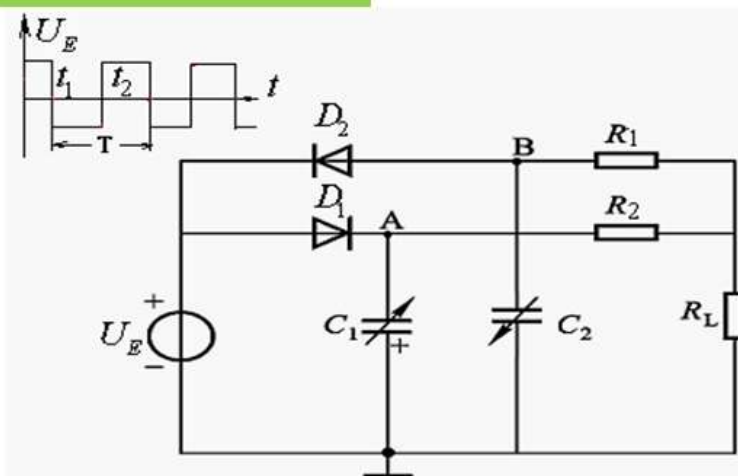
- $U_E$  高频对称方波电源,  $D_1$ 、 $D_2$  二极管, 特性相同;
- $C_1$ 、 $C_2$  传感器差动电容;  $R_1$ 、 $R_2$  为固定电阻,  $R_L$  负载。
- 一个周期内  $R_L$  上的平值电压为

$$\bar{U}_{RL} = \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L U_E f (c_1 - c_2) = M U_E f (c_1 - c_2)$$

式中:  $M$  为常数;

$U_E$ 、 $f$  为电源电压幅值和频率。

😊 一个周期内负载  $R_L$  上输出电压  $U_{RL}$  与电容的差值 ( $C_1 - C_2$ ) 成正比。



## 第4章 电容式传感器

### • 3) 二极管双T型电路

#### ➤ 工作原理分析

- $t > 0$  电路接通,  $C_1$  充电至  $U_{C1} = U_E$ ;
- $t = t_1$ ,  $U_E$  负半周,  $D_1$  截止,  $D_2$  导通

负载上电流:  $I_L' = I_1'$  (放电) +  $I_2'$  (电源)

- $t = t_2$ ,  $U_E$  正半周,  $D_1$  导通,  $D_2$  截止

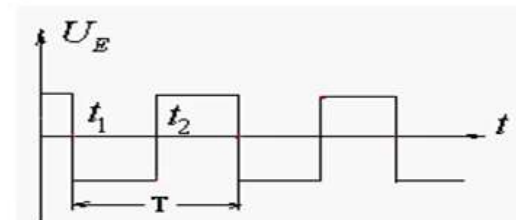
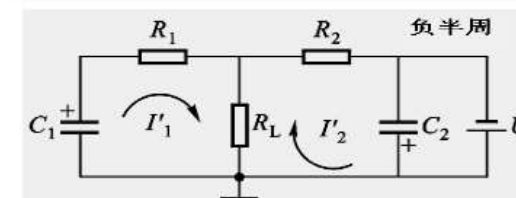
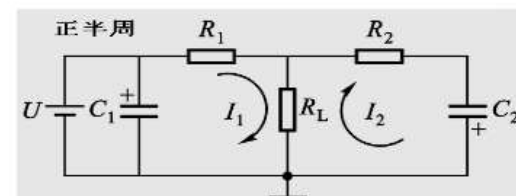
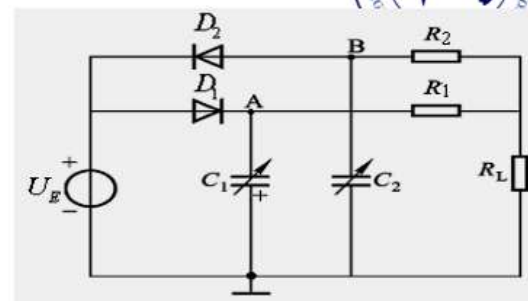
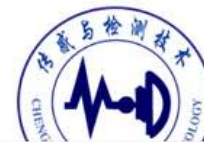
负载上电流:  $I_L = I_1$  (电源) +  $I_2$  (放电)

- $C_1 = C_2$  时  $I_L = I_L'$  大小相等方向相反  
一个周期内负载电阻上电压平均值为

$$\overline{U_{RL}} = MU_E f(c_1 - c_2) = 0$$

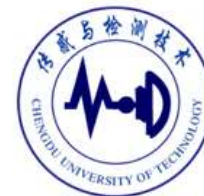
$$c_1 > c_2, \overline{U_{RL}} > 0; c_1 < c_2, \overline{U_{RL}} < 0$$

双T型电路动画





## 第4章 电容式传感器

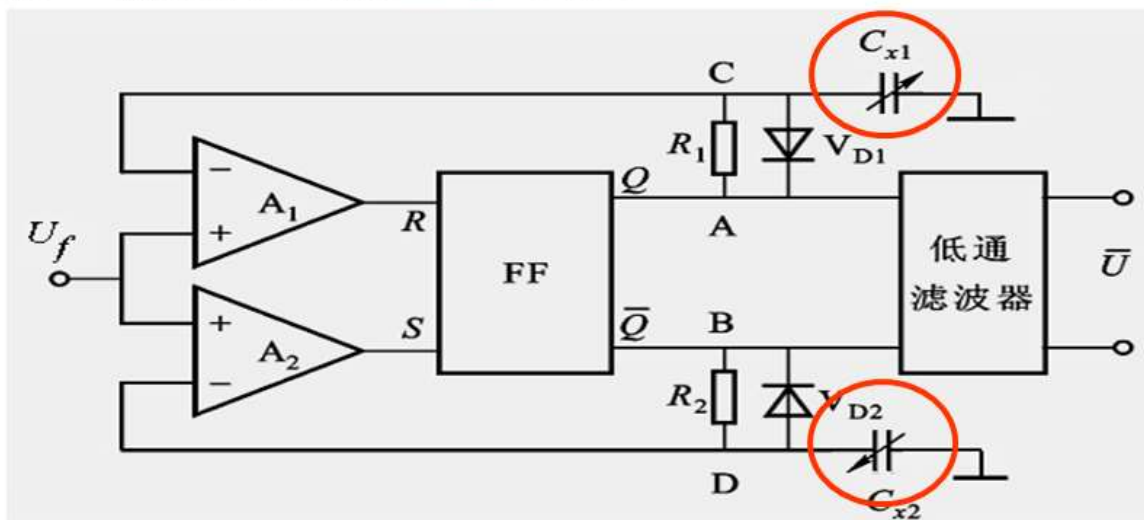


### • 4) 差动脉冲调宽电路

#### ➤ 电路组成

- $A_1$ 、 $A_2$ 比较器； $FF$  双稳态触发器作输出；
- $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$ 与电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 组成充放电回路；
- $U_f$  参考直流电压，与 $C$ 、 $D$ 电压比较；
- 电容 $C_{x1}$ 、 $C_{x2}$ 为传感器差动电容。

电路原理框图





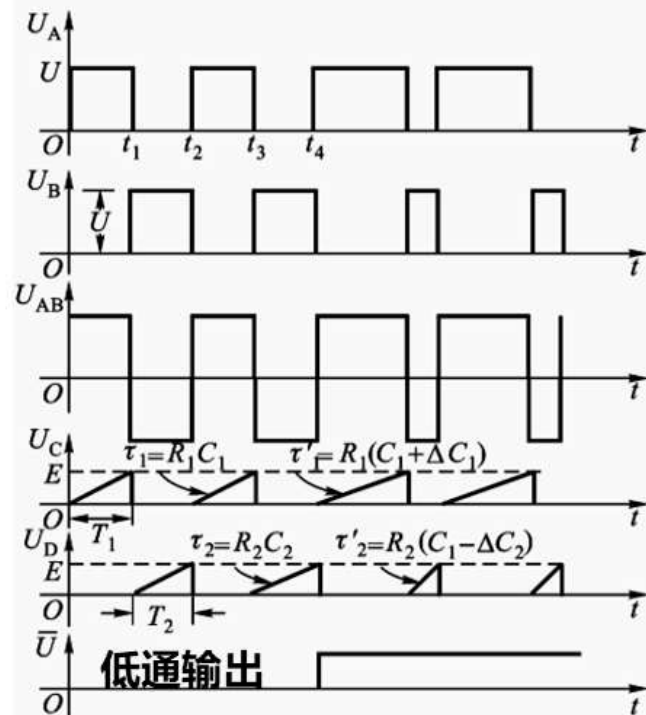
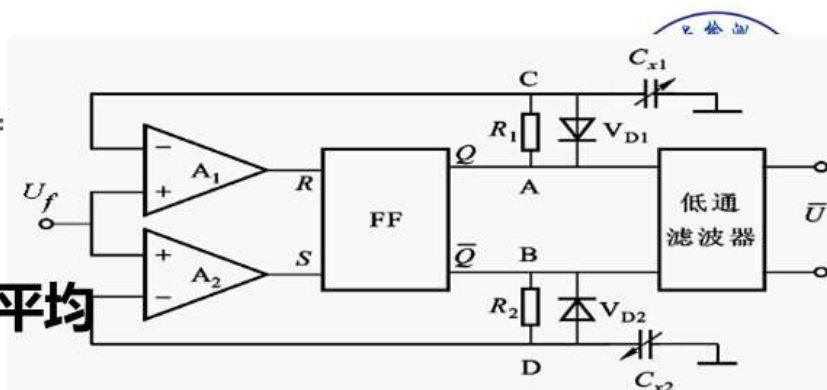
## 第4章 电容式传感器

### • 4. 差动脉冲调宽电路

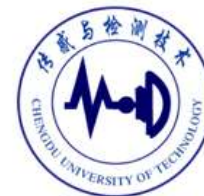
- $C_1 = C_2$ ,  $U_C$ 、 $U_D$  放电时间相同, 输出平均电压  $U_0 = 0$ ;
- $C_1 \neq C_2$ , 输出平均电压  $U_0 \neq 0$ , 若  $C_1 > C_2$ , 输出A、B两点的平均值等于  $U_A$ 、 $U_B$  之差。
- 双稳态的两个输出端各产生一调制脉冲, 脉冲宽度受  $C_1$ 、 $C_2$  调制。输出为两端之差:

$$U_0 = U_A - U_B = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_1 - \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1$$

式中:  $U_1$  为触发器输出高电平值



## 第4章 电容式传感器



### • 4. 差动脉冲调宽电路

➤ 输出电压与两个充放电回路时间常数的差成正比

$$U_0 = U_A - U_B = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_1 - \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1$$

•  $T = RC$  若  $R_1 = R_2$  输出电压与两个传感器电容的差值成正比

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

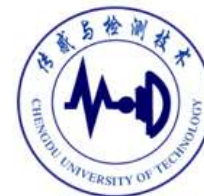
• **变面积型**，输出与两电容的面积差值成正比

$$U_0 = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} U_1$$

• **变极距型**，输出与两电容的极距差值成正比

$$U_0 = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} U_1$$

## 第4章 电容式传感器



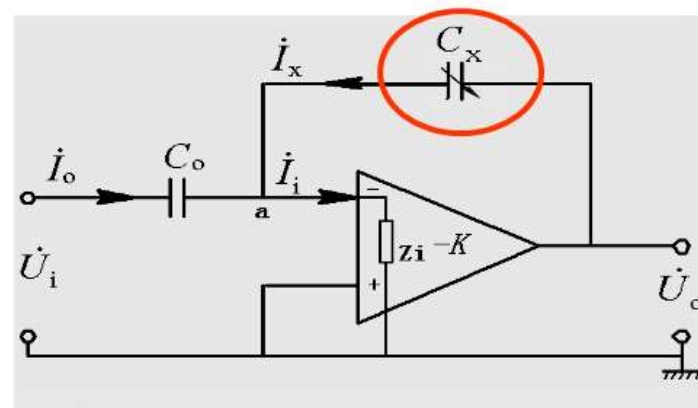
### • 5. 运算放大器式电路

- $C_0$  固定电容,  $C_x$  传感器电容,
- 设  $K$  为理想运放,  $a$  为虚地; 设开环放大器有高的输入阻抗

$$k \rightarrow \infty, I_i = 0, I_o = -I_x$$

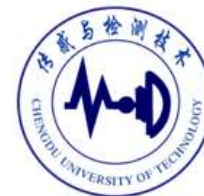
$$\text{输入 } U_i = \frac{I_o}{j\omega C_0} \quad \text{输出 } U_o = \frac{I_x}{j\omega C_x}$$

$$\text{输出 } U_o = -U_i \frac{C_0}{C_x} \quad U_o = -U_i \frac{C_0}{\epsilon_0 S} \delta$$



- ☺ 对于单极板平板电容器传感器, 输出电压  $U_o$  与机械位移  $\delta$  成线性关系, 解决了单电容的非线性关系问题。

## 第4章 电容式传感器

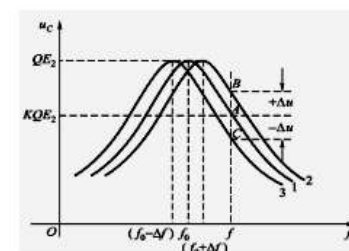
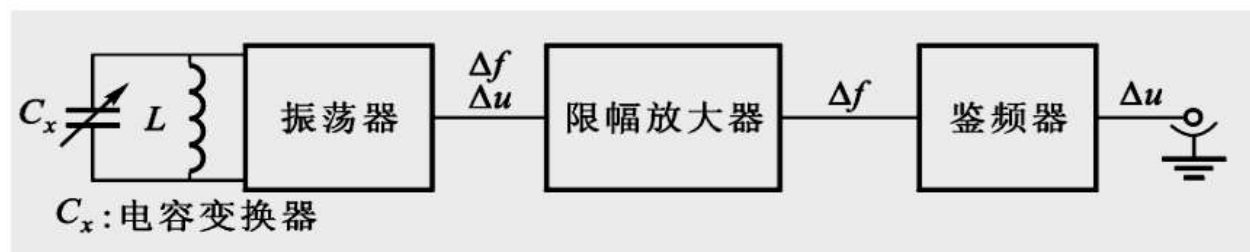


### • 6. 调频电路

- 调频测量电路把电容传感器作为振荡器谐振回路的一部分，当输入被测信号使电容发生变化时，振荡器的**振荡频率发生变化**。

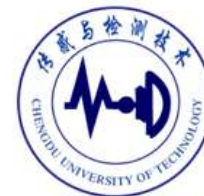
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- 由于系统是非线性的，必须加入**鉴频器**将频率变化转换为电压的变化。



谐振曲线





## 第4章 电容式传感器

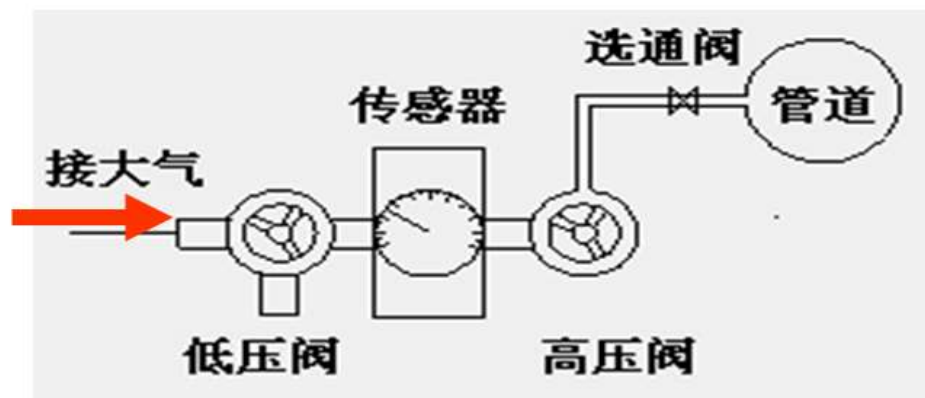
### 4.4 电容式传感器的应用举例

#### • 1) 电容式压力传感器

- 工业生产自动控制系统中，膜片式压力计是最常用的一种，电容膜片压力传感器分为：

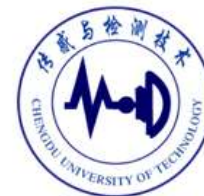
计示压力计（表压），绝对压力计，压差计。

- 计示压力计（表压），以大气为基准，测管道、箱内、罐中压力



计  
示  
压  
力  
计  
(表压)

## 第4章 电容式传感器



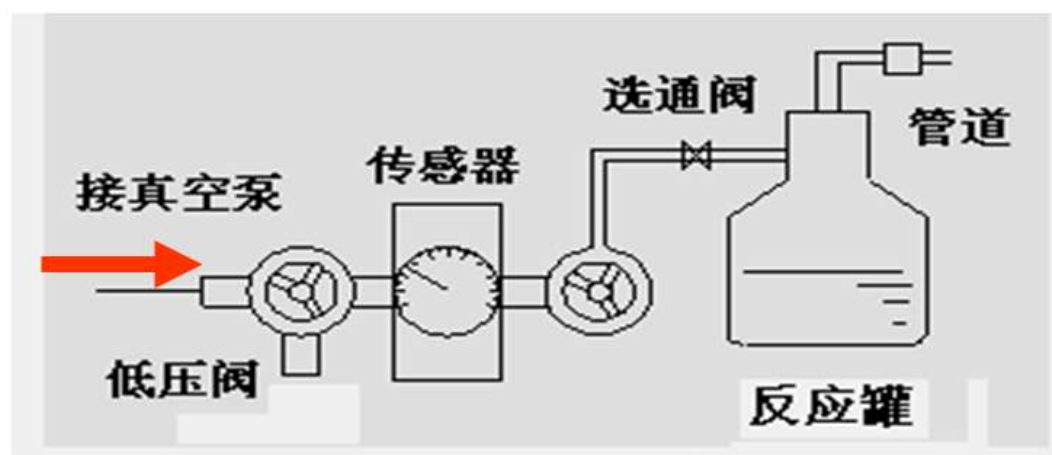
### • 1) 电容式压力传感器

#### ➤ 绝对压力计

以**绝对真空**为基准，测量蒸发罐、反应罐中的压力；

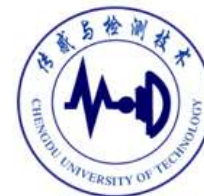
#### ➤ 压差计

测两个压力的差值



绝对压力计

## 第4章 电容式传感器



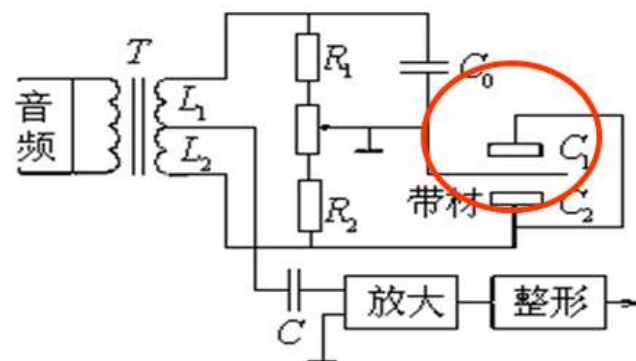
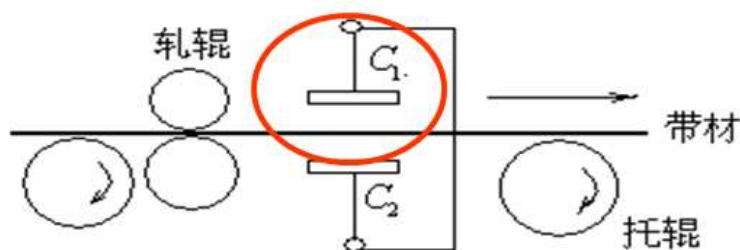
### • 2) 电容板材在线测厚仪

➤ 电容测厚仪用于测量金属带材在轧制过程中的厚度变化

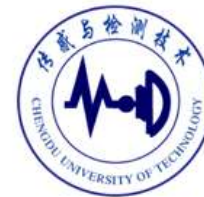
带材是电容的动极板，总电容  $C_1 + C_2$  作为桥臂。

- 带材只是上下波动时  $C_x = C_1 + C_2$  总的电容量不变；带材的厚度变化使电容  $C_x$  变化。
- 采用变压器式输出电桥电路。
- 或用集成运放电路输出与带材厚度关系为：

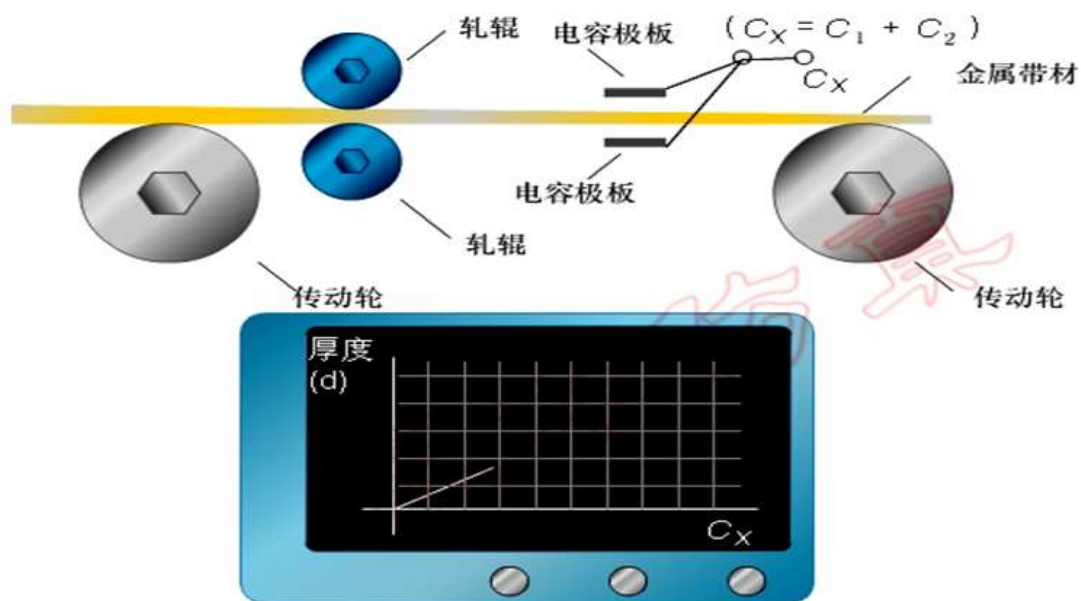
$$U_0 = -U_s \frac{C_0}{\varepsilon_0 s} h$$



## 第4章 电容式传感器



### • 2) 电容板材在线测厚仪

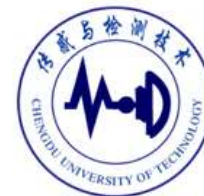


电容测厚仪

东方仿真COPYRIGHT



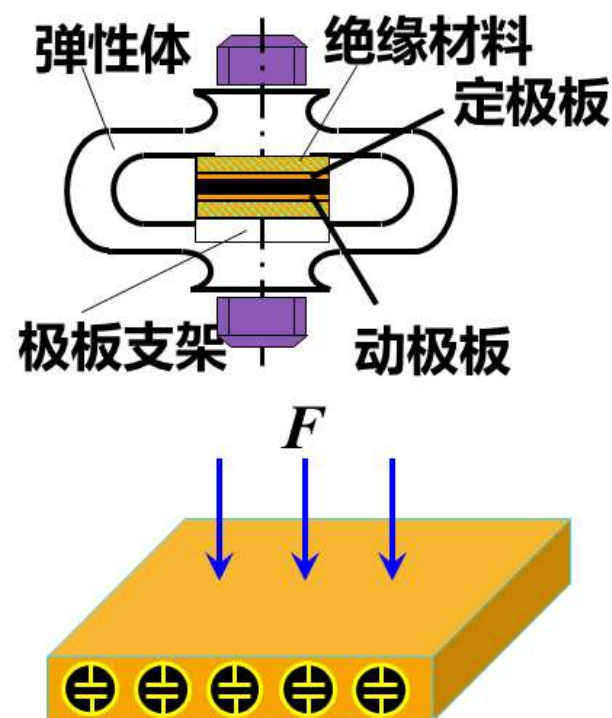
## 第4章 电容式传感器



### • 3) 电容传感器称重、测振动位移、加速度

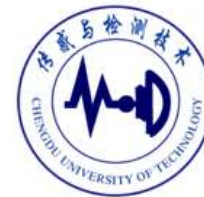
#### ➤ 称重

- 在弹性钢体上，高度相同处打一排孔，在孔内形成一排平行的平板电容，当称重时，钢体上端面受力，圆孔变形，每个孔中的电容极板间隙变小，其电容相应增大。
- 由于在电路上各电容是并联的，因而输出反映的结果是平均作用力的变化，测量误差大大减小。
- 配接调频式电路，就会引起振荡器的振荡频率变化，频率信号经计数、编码，传输到显示部分。



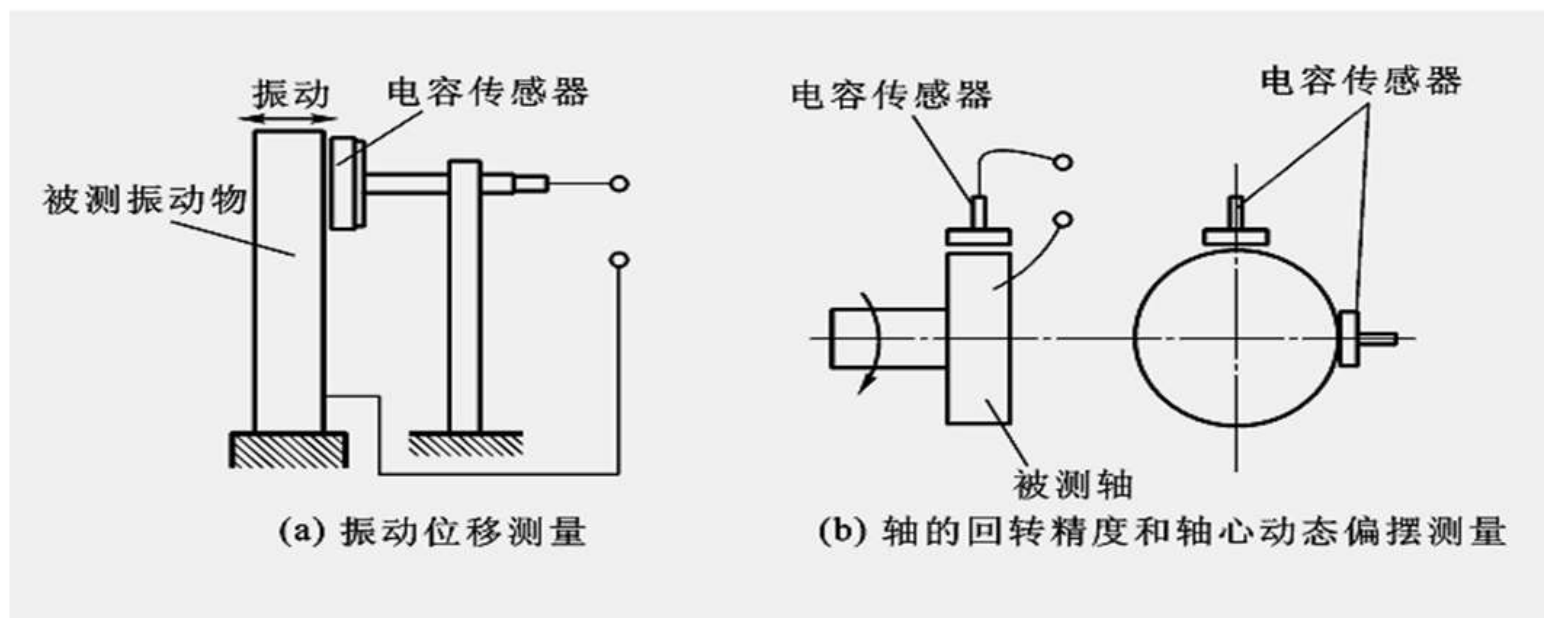
电容式称重传感器

## 第4章 电容式传感器

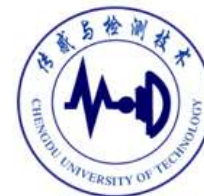


### • 3) 电容传感器称重、测振动位移、加速度

#### ➤ 测振动位移



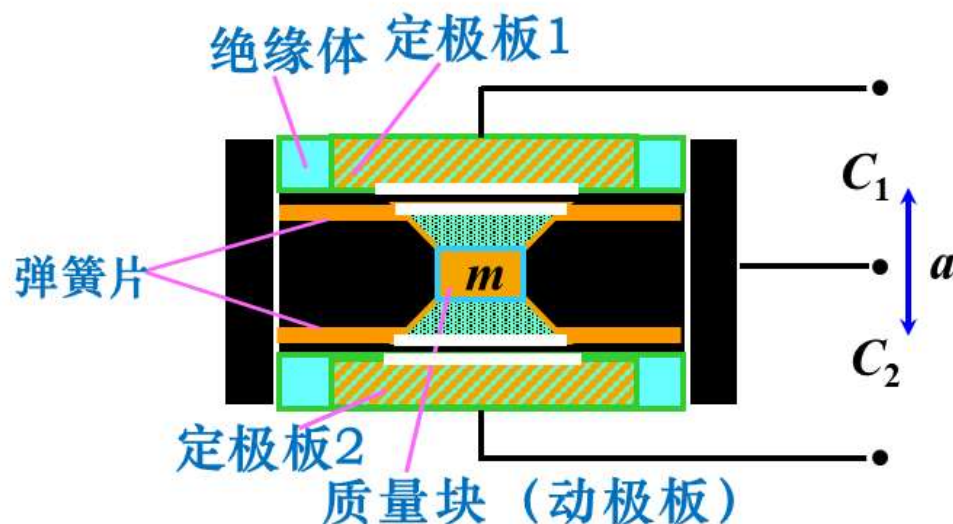
## 第4章 电容式传感器



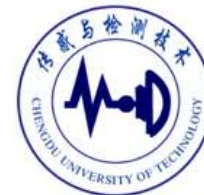
### • 3) 电容传感器称重、测振动位移、加速度

#### ➤ 测加速度

- 两个**固定极板**间有一个用弹簧片支撑的质量块 $m$ ，质量块的两端面经抛光后作为**动极板**；
- 当传感器测量**竖直方向**的振动时，由于 $m$ 的惯性作用，使其相对固定电极产生位移；
- 两个差动电容器 $C_1$ 和 $C_2$ 的电容发生相应的变化，其中一个变大，另一个变小。

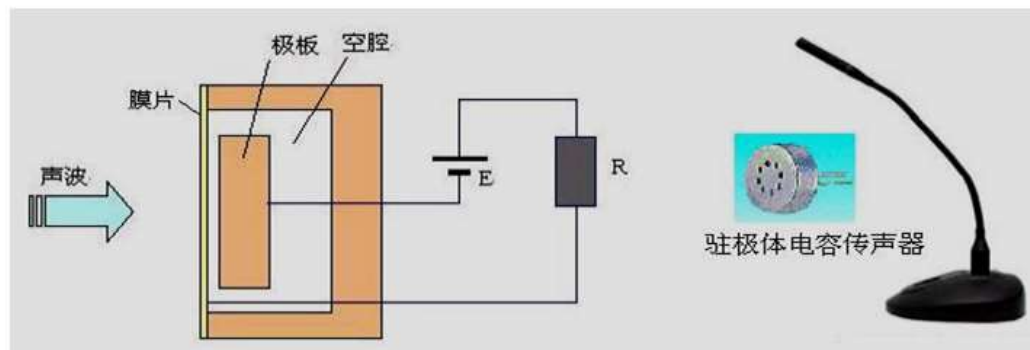


## 第4章 电容式传感器



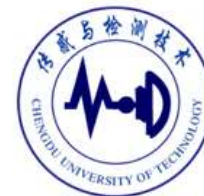
### • 4) 电容传声器原理

- PC机上的麦克风是一个电容传声器 (Microphone) 即话筒, 音译作麦克风, 由振动膜片、刚性极板、电源和负载组成。
- 当膜片受到声波的压力, 并**随着压力的大小和频率的不同而振动**时, 膜片极板之间的电容量就发生变化。
- 与此同时极板上的电荷随之变化, 从而使电路中的电流也相应变化, 负载电阻上也就有相应的电压输出, 完成声电转换。





## 第4章 电容式传感器



### • 4) 电容传声器原理

- 传声器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量变化通过前置放大器变换为输出电压。
- 计算机中一般使用的是驻极体电容传声器，工作原理和电容传声器相同，它采用一种**聚四氟乙烯材料作为振动膜片**。这种材料经特殊电处理后表面被永久地驻有**极化电荷**，从而**取代了电容传声器的极板**，故名为驻极体电容传声器。

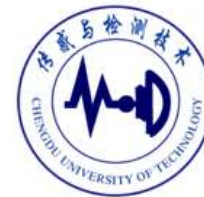


大膜片电容传声器



驻极体  
电容传声器

## 第4章 电容式传感器



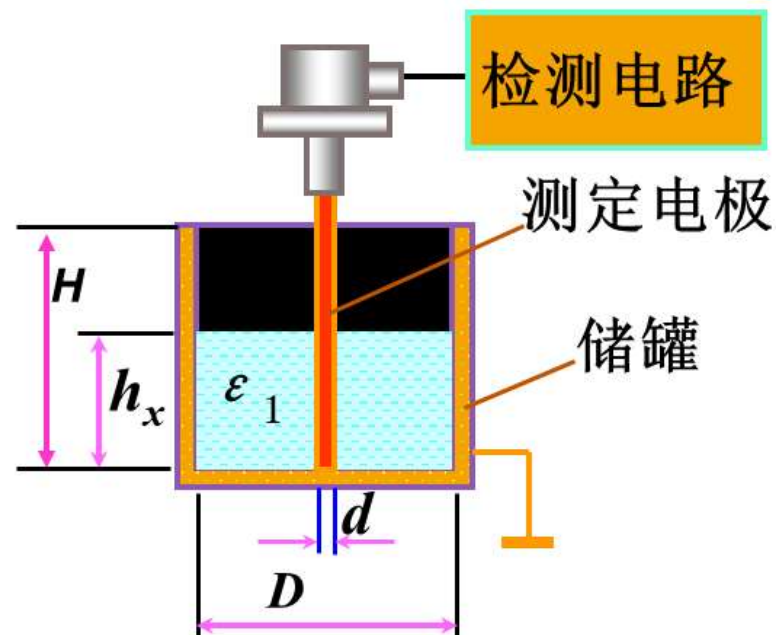
### • 5) 电容式料位计

➤ 可用于水泥、化工、罐装等

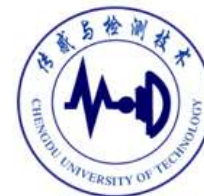
$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln D/d} + \frac{2\pi(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{\ln D/d} h_x$$

第一项为传感器静电容为 $C_0$

检测电极为电容的一个极板，罐子外壳为电容的另一个极。



## 第4章 电容式传感器

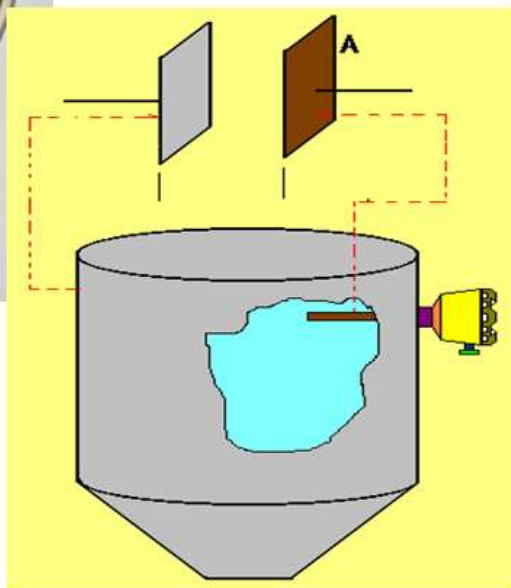


### • 工业用电容式料位计



### • SDK射频电容式物位开关

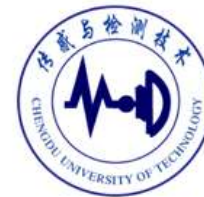
➤ 由仪表和探极两部分组成。



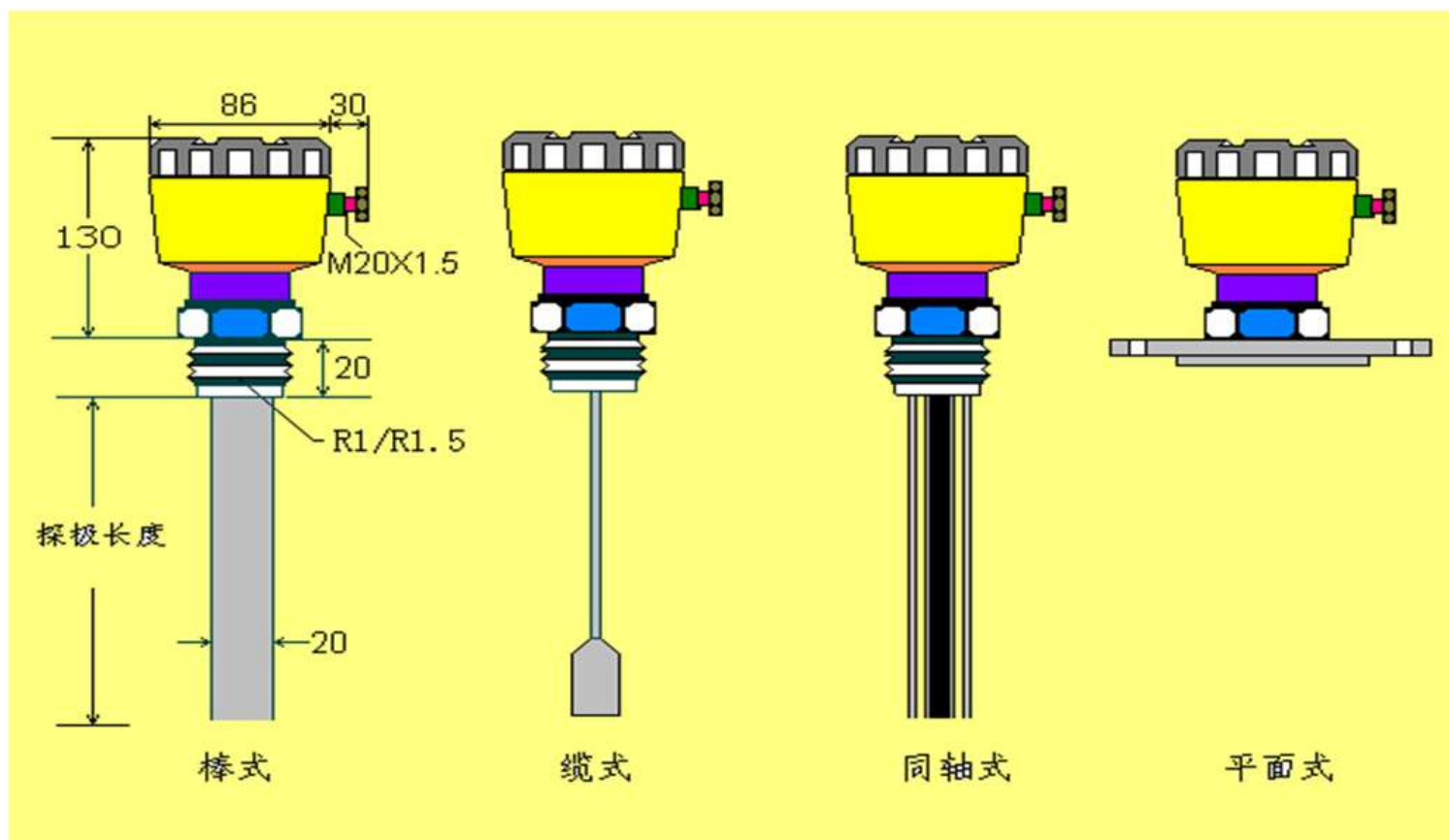
射频电容式物位限位开关

- 利用被测物料的介电常数与空气不同，当仓内物位发生变化时引起探极对仓壁间的电容量变化；
- 且变化值超过设定值时，限位开关内的继电器动作，输出一个开关量达到控制 / 报警的目的。

## 第4章 电容式传感器

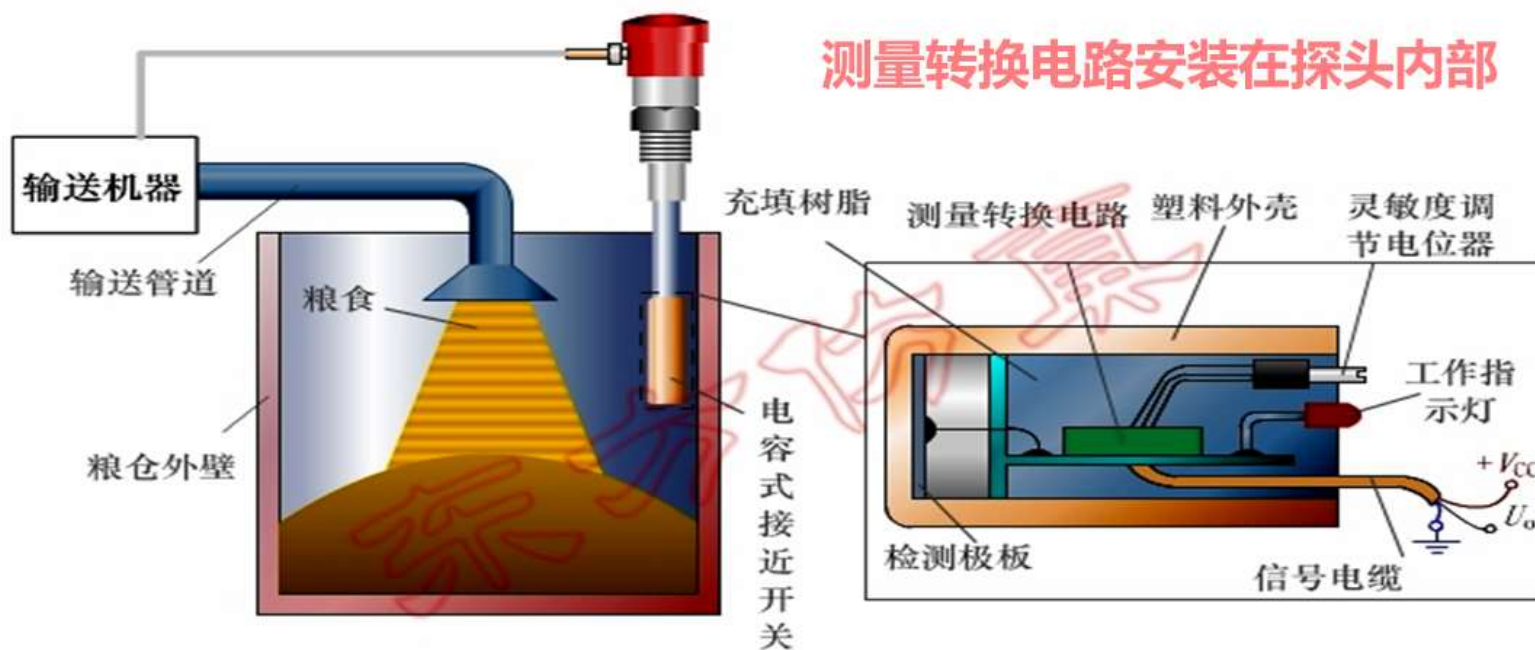
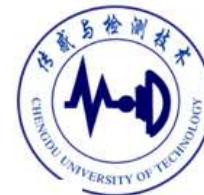


### • 几种不同探极形式的限位开关





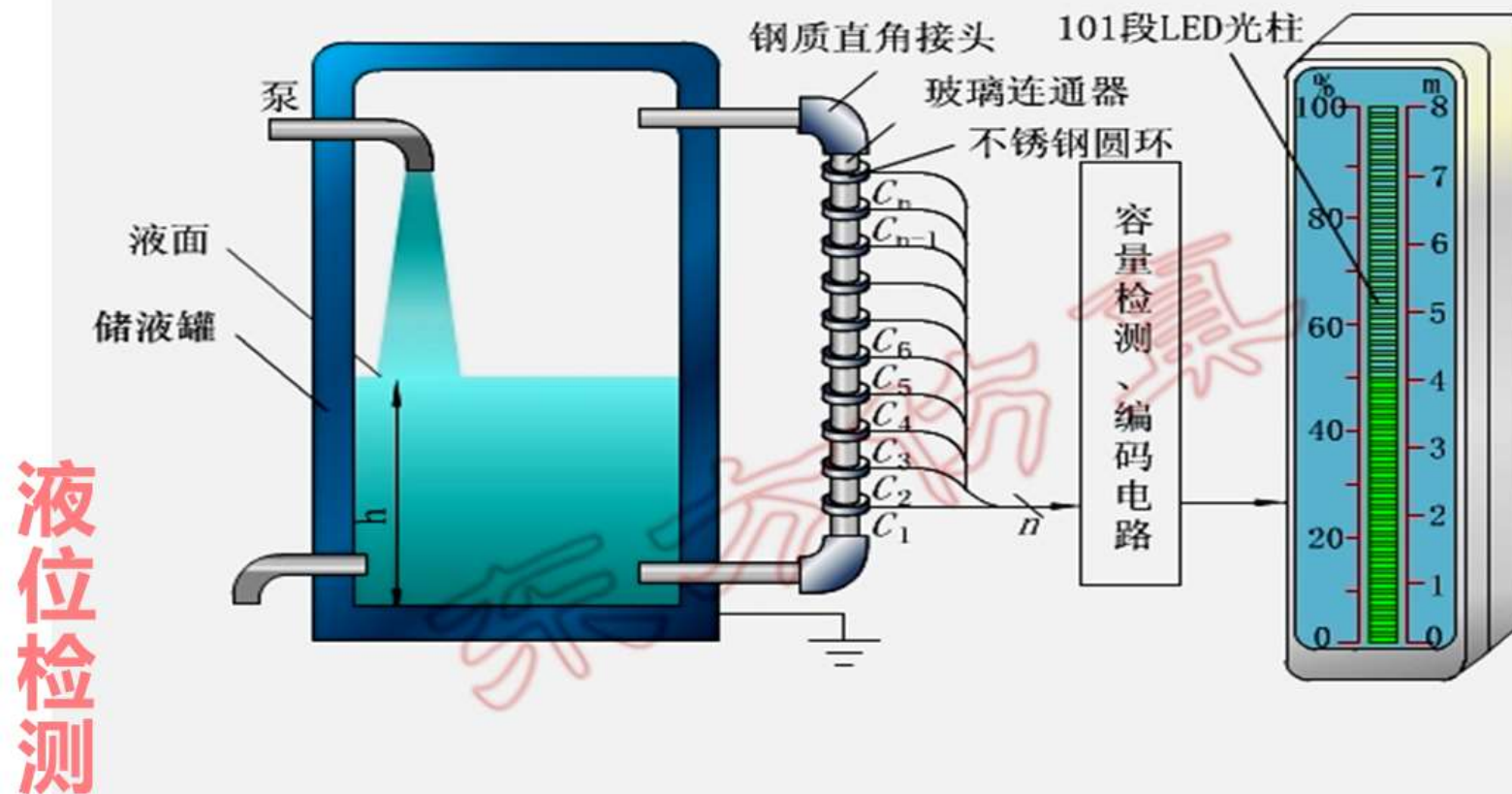
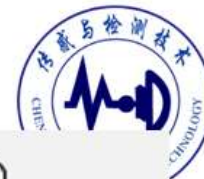
## 第4章 电容式传感器



利用接近开关进行物体位检测的原理

东方仿真COPYRIGHT

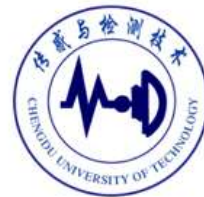
## 第4章 电容式传感器



光柱显示编码式液位计原理

东方仿真COPYRIGHT

## 第4章 电容式传感器



### 本章要点

1. 如何改善单极式变极距型电容传感器的非线性?
2. 说明变介电常数型电容式传感器测量液位的结构原理和测量方法。
3. 差动式电容传感器测厚系统的工作原理。
4. 硅电容式集成传感器结构特征与工作原理。
5. 何谓“驱动电缆技术”? 采用的目的是什么?
6. 差动脉冲宽度调制电路用于电容传感器测量电路具有什么特点?
7. 电容板材在线测厚系统中, 如何通过检测电容大小实现只对厚度变化响应, 并保证板材的上下波动时不影响厚度测量?