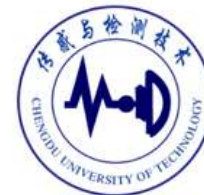


# 传感器原理与应用

## 第4章 电容式传感器

## 第4章 电容式传感器



### 主要内容:

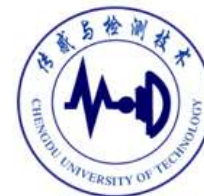
**4.1 电容传感器工作原理**

**4.2 电容传感器输出特性**

**4.3 电容传感器测量电路**

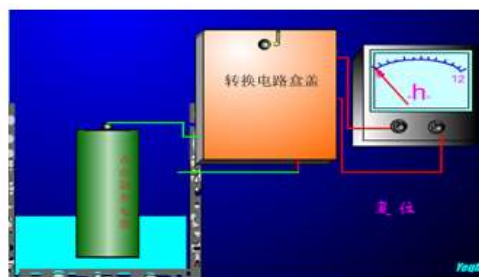
**4.4 电容式传感器的应用举例**

## 第4章 电容式传感器

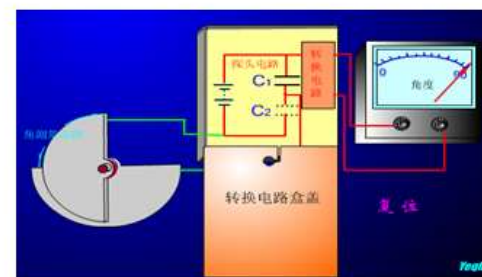


### 概述

- 传统电容式传感器主要用于**位移**、**角度**、**振动**、**加速度**等机械量精密测量。
- 现代电容式传感器逐渐应用于**压力**、**压差**、**液面**、**成份含量**等方面的测量。
- **应用实例** (电容测深度、角度)

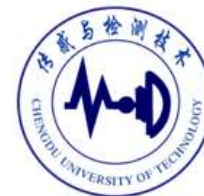


液位测量



角度测量

## 第4章 电容式传感器



### ➤ 电容式传感器的特点

- 电容量小(几十~几百微法), **输出阻抗高**;
- 极板静电引力小, 工作所需作用力很小;
- 可动质量小, 固有频率高, 动态响应特性好;
- 功率小, 本身发热影响小;
- 可以进行非接触测量。



电容式接近开关

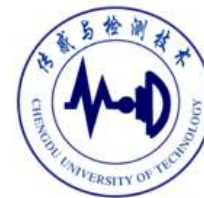


电容式差压传感器



电容式压力变送器

## 第4章 电容式传感器

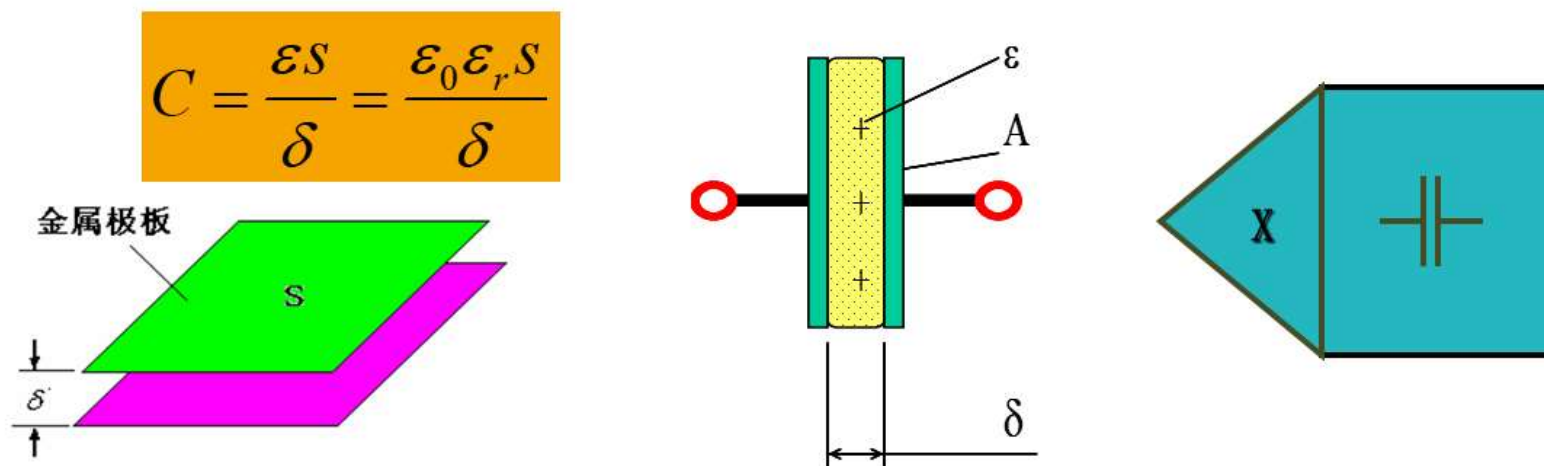


### 4.1 电容传感器工作原理

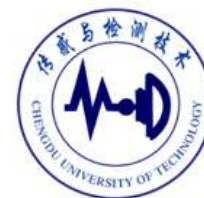
❖ 电容式传感器是将被测**非电量**变化成**电容量**的变化。

通常，电容传感器指以空气为介质的**两个平行金属板**组成的可变电容器。

电容传感器工作原理可以用平板电容说明：







## 第4章 电容式传感器

### 4.1 电容传感器工作原理和类型

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{\delta}$$

改变式中:

$S$  — 极板面积, 称**变面积型**电容传感器

$\delta$  — 极板距离, 称**变极距型**电容传感器

$\varepsilon$  — 介电常数, 称**变介质型**电容传感器

其中:

$\varepsilon_0$  — 真空介电常数

$\varepsilon_r$  — 空气介质的相对介电常数近似为

#### 电容式传感器

极距型

面积型

介质型

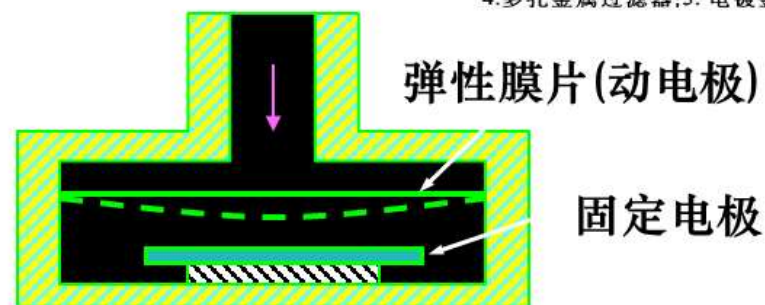
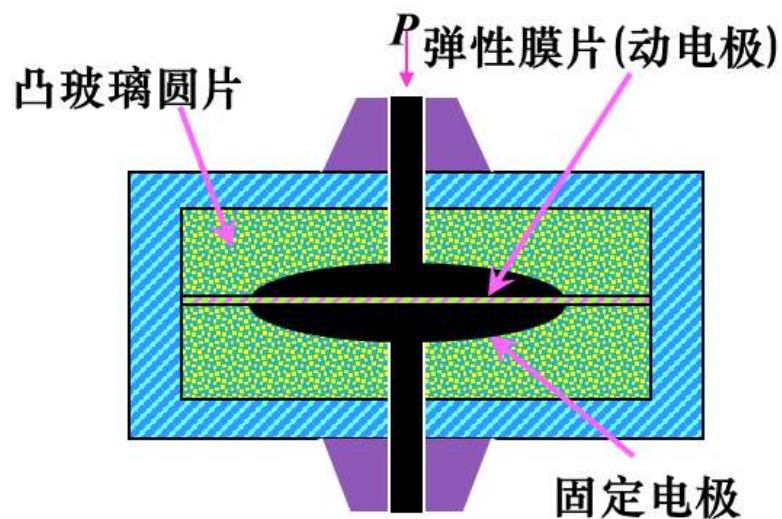
$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \approx 1$$

## 第4章 电容式传感器

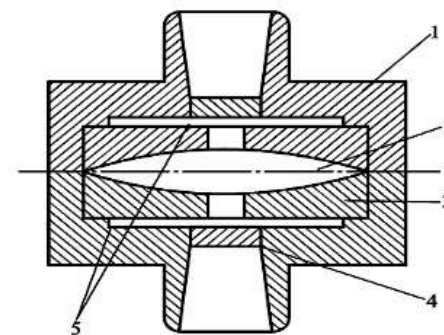
### 应用举例

#### 1) 电容式压力传感器

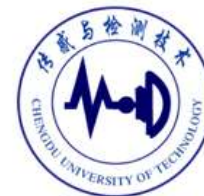
➤ 结构：球型、平面型差动电容传感器



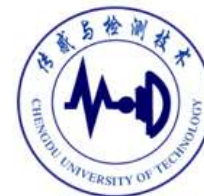
电容传感器盒膜片结构



1. 型垫圈; 2. 金属膜片; 3. 玻璃;  
4. 多孔金属过滤器; 5. 电镀金属表面



## 第4章 电容式传感器

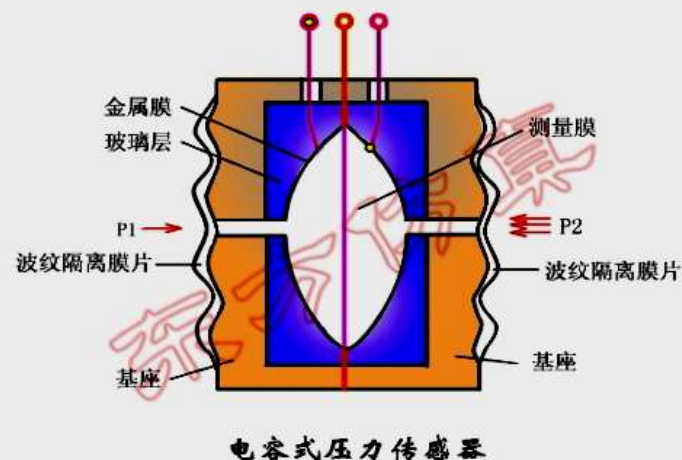


### • 1) 电容式压力传感器

➤ **球型结构：**  
金属弹性膜片—动片（测量膜）；两个玻璃球面上镀有金属—定片；膜片左右两侧充满硅油。

➤ **工作过程：**  
两室分别承受低压 $P_L$ 和高压 $P_H$ ，硅油能将压差传递到测量膜片。

$$\Delta P = P_H - P_L$$

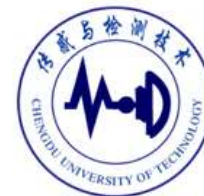


东方仿真COPYRIGHT

电容传感器盒膜片结构



## 第4章 电容式传感器



### • 1) 电容式压力传感器

$$\Delta P = P_H - P_L$$

$$\Delta C \propto \Delta P$$

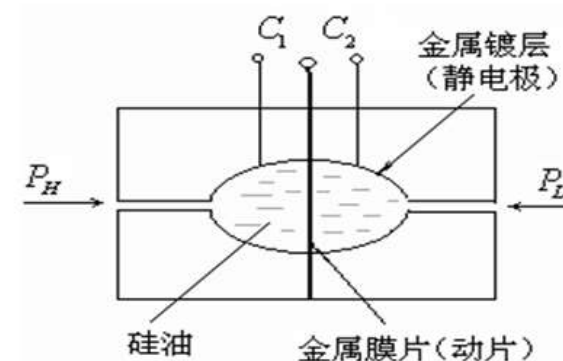
➤ 当 $P_H = P_L$ 时 $C_1 = C_2$ ; 膜片处于中间位置,

• 当有差压作用时, 测量膜片产生形变:

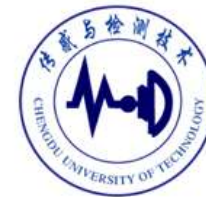
$P_H > P_L$ 时, 膜片向 $P_L$ 弯曲,  $C_1 < C_2$ ,

$P_H < P_L$ 时, 膜片向 $P_H$ 弯曲,  $C_1 > C_2$ ;

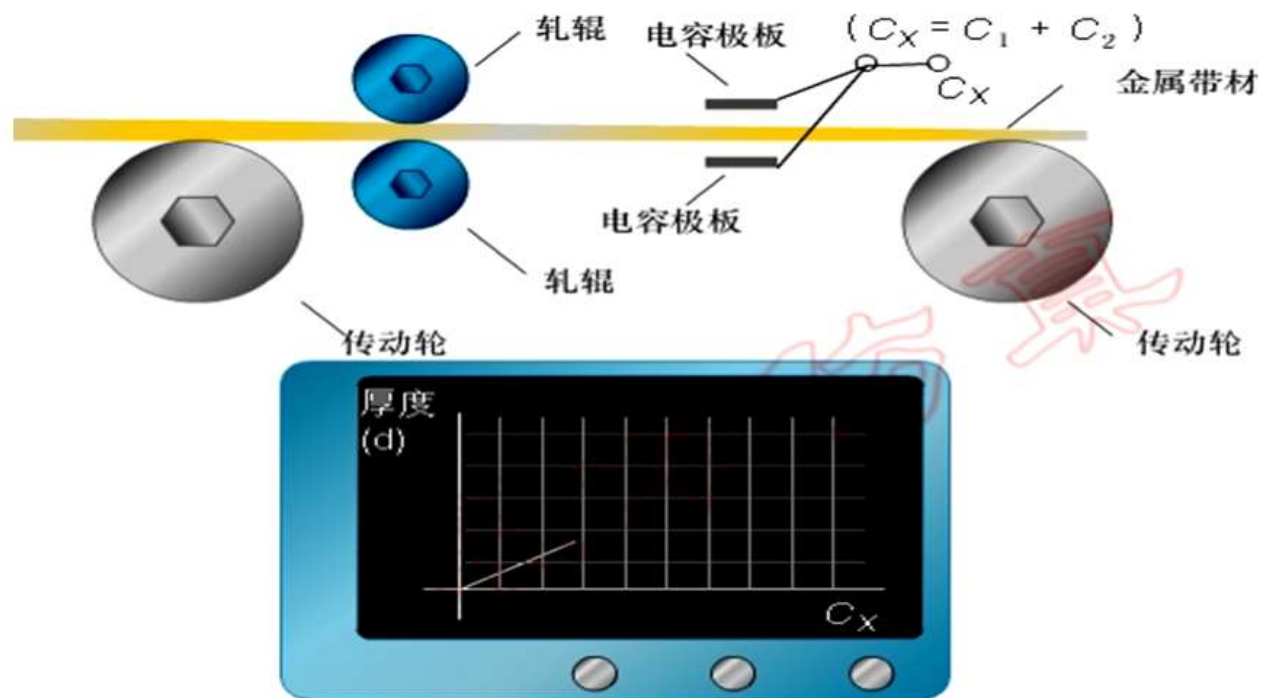
• 前极电路将这种电容变化通过电路转换, 变为电压或电流的变化



## 第4章 电容式传感器



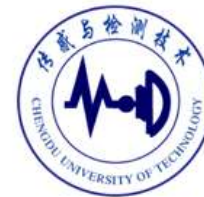
### • 2) 电容板材在线测厚仪



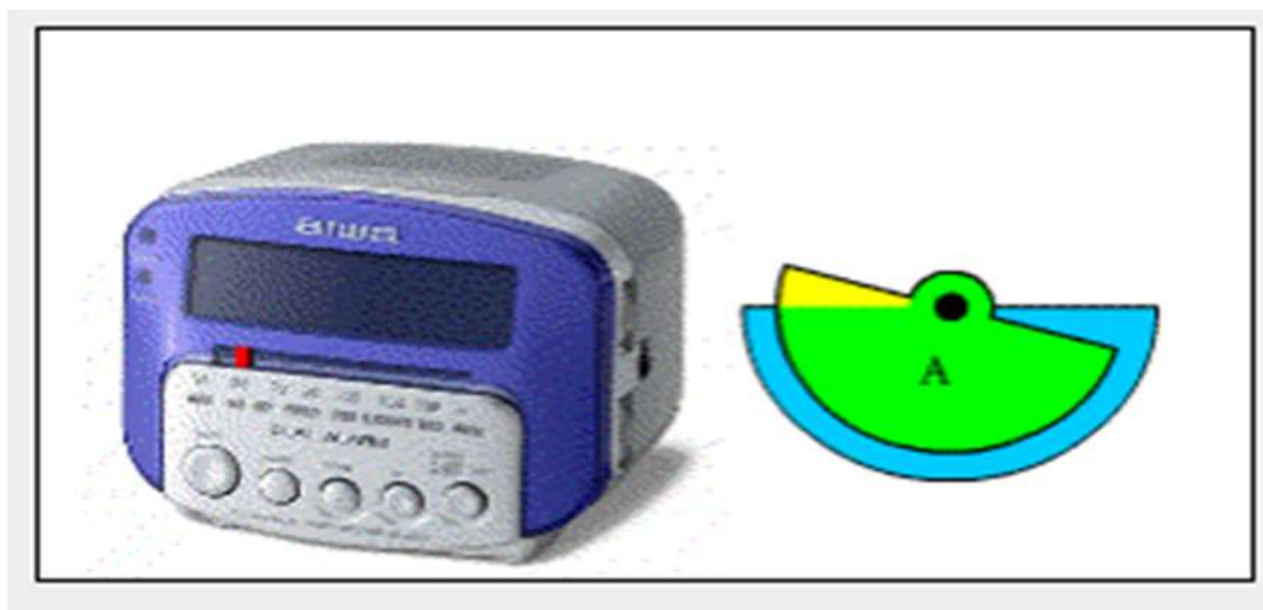
电容测厚仪

东方仿真COPYRIGHT

## 第4章 电容式传感器

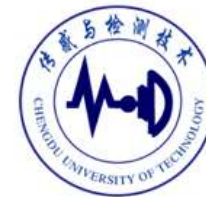


### • 3) 收音机调频

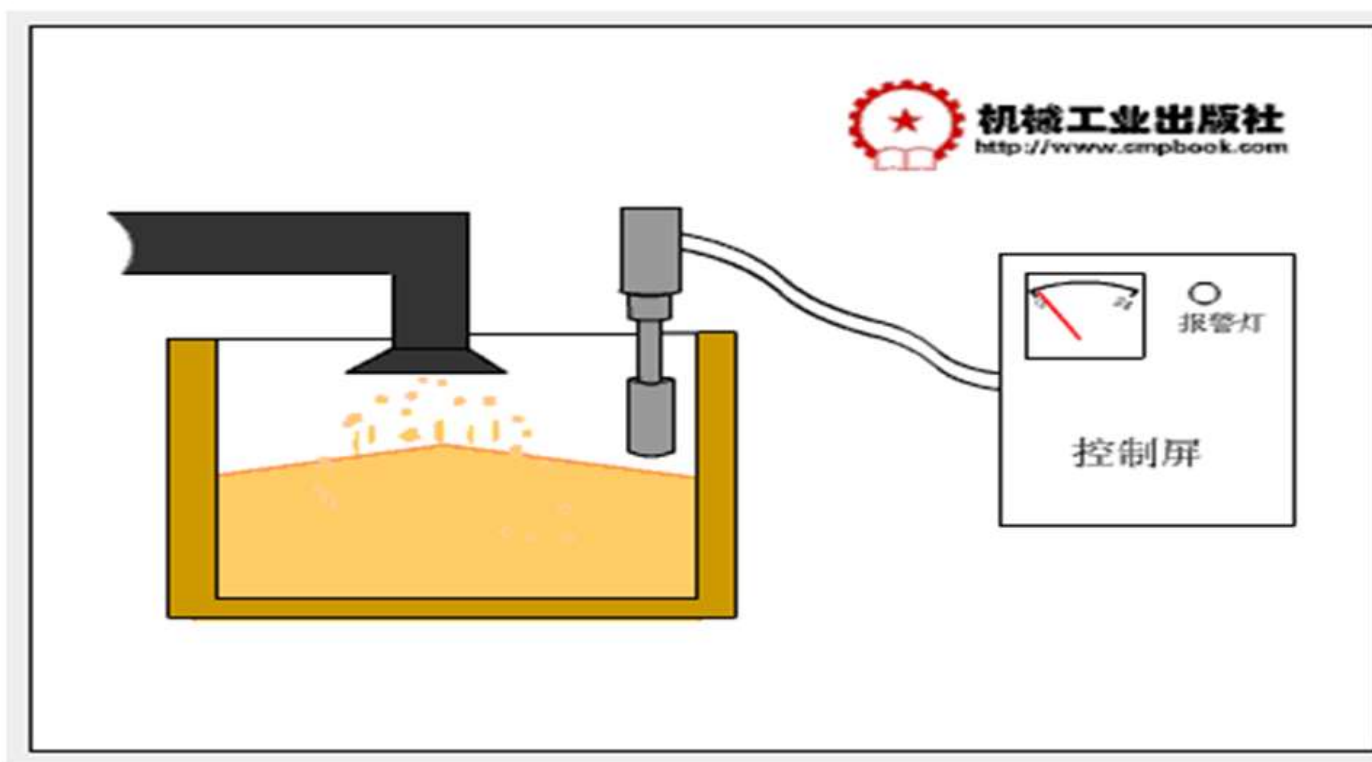


电容式传感器在收音机中，用于改变谐振频率，从而调整收听电台。

## 第4章 电容式传感器

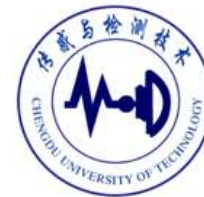


### • 4) 电容式物位计

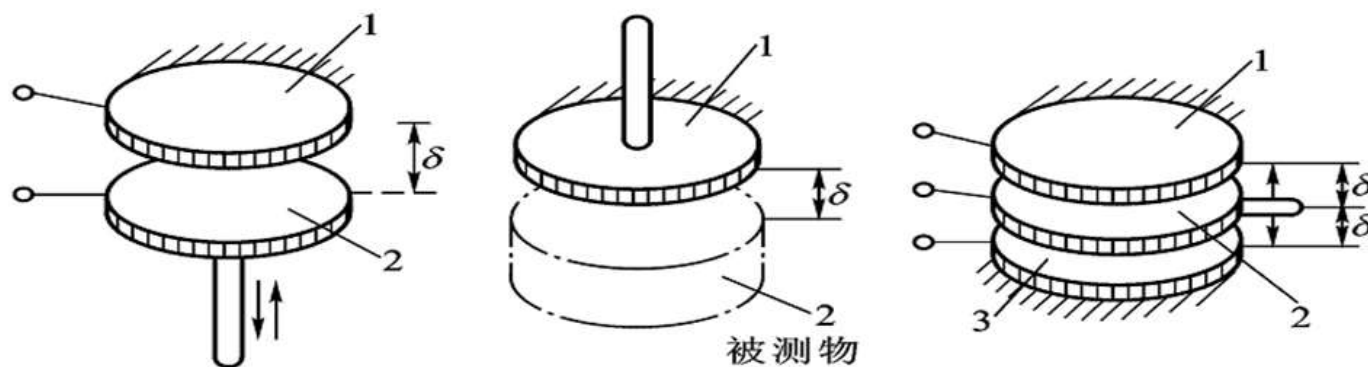




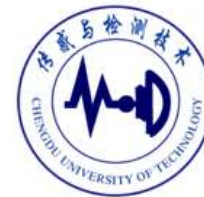
## 第4章 电容式传感器



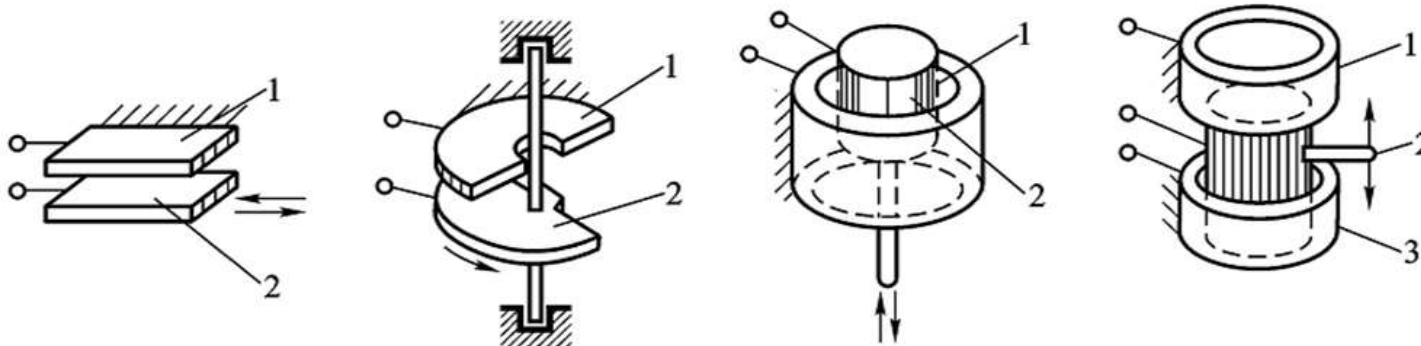
### 变极距型电容传感器



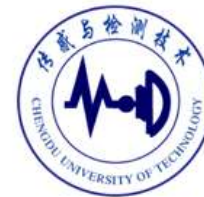
## 第4章 电容式传感器



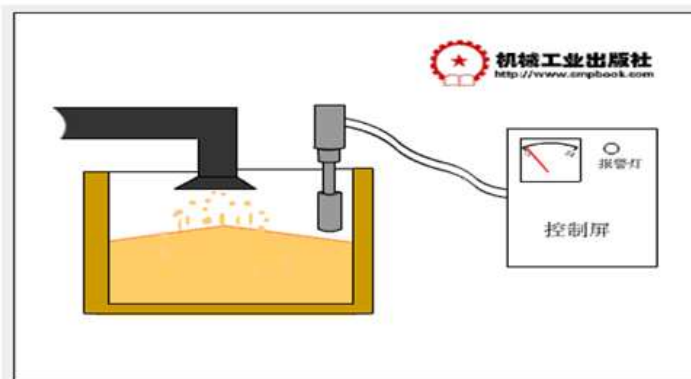
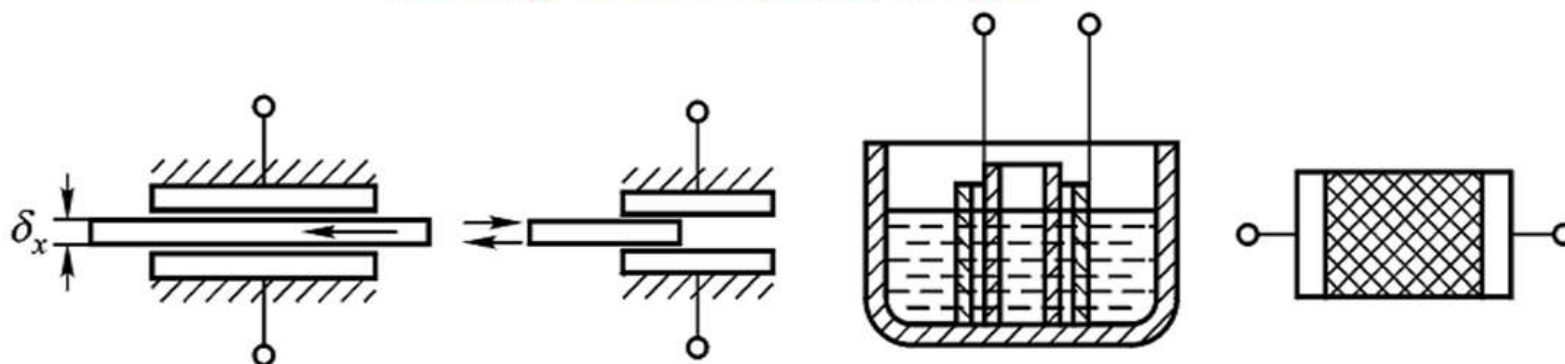
### 变面积型电容传感器



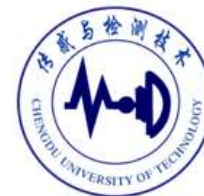
## 第4章 电容式传感器



### 变介质型电容传感器



## 第4章 电容式传感器



### 4.2 电容传感器输出特性

#### 1. 变极距型 ( $\delta$ )

初始电容  $C_0 = \epsilon s / \delta_0$  , 极距减小  $\Delta\delta$  时,

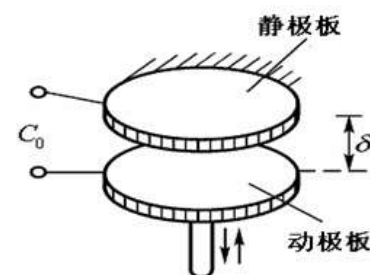
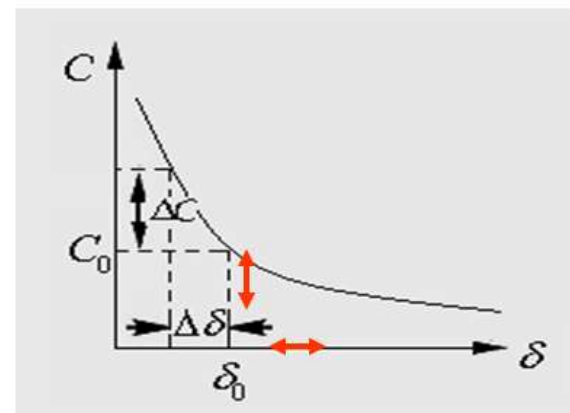
电容量增加  $\Delta C$   $C = C_0 + \Delta C$

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon s}{\delta_0 - \Delta\delta} - \frac{\epsilon s}{\delta_0}$$

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

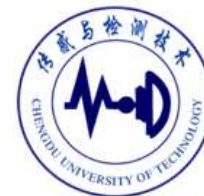
当分母  $\Delta\delta / \delta_0$  时, 用泰勒级数展开

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





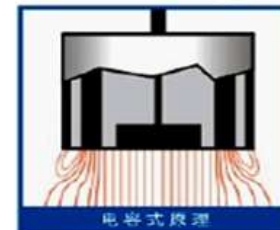
## 第4章 电容式传感器



### 1. 变极距型 ( $\delta$ )

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

实际



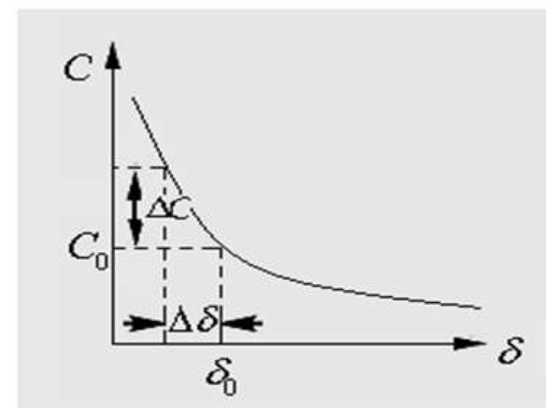
- 做线性处理(忽略高次项)后, 电容相对变化量与电容极板的极距变化成正比

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

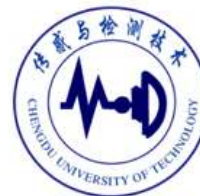
理想

- 定义电容传感器灵敏度为

$$k_0 = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0}$$



## 第4章 电容式传感器



### ☺ 讨论:

- 变极距型电容传感器灵敏度与初始极距有关
- 要提高传感器灵敏度  $k_0$  应减小初始极距  $\delta_0$  , 但初始极距受电容击穿电压限制;
- 另外, 初始极距  $\delta_0$  与灵敏度相矛盾, 变极距型电容传感器适合测小位移;
- 非线性误差随相对的位移  $\Delta\delta/\delta_0$  的增加而增加, 为保证线性度应限制相对位移, 限制了测量范围;
- 为提高灵敏度和改善非线性, 一般采用差动结构。

$$k_0 = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0}$$

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

## 第4章 电容式传感器

### 4.2 电容传感器输出特性

#### ❖ 差动结构的平板电容

设电容的动极板移动时  $C_1$  增加,  $C_2$  减小, 且  $\Delta C_1 = \Delta C_2$

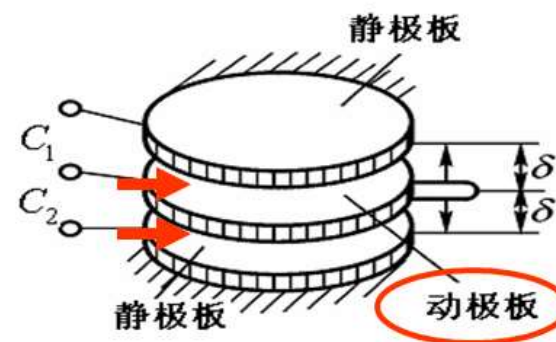
➤ 差动结构的电容特征方程式为:

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

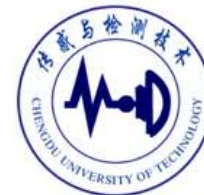
$$C_2 = C_0 \left[ 1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left( \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right]$$

电容的总的变化量

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



## 第4章 电容式传感器



### ❖ 差动结构的平板电容

电容相对变化量

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

忽略高次项，电容相对变化量为

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

• 传感器（差动式）灵敏度

$$k_0 = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta} = 2 \frac{1}{\delta_0}$$

• 相对非线性误差为

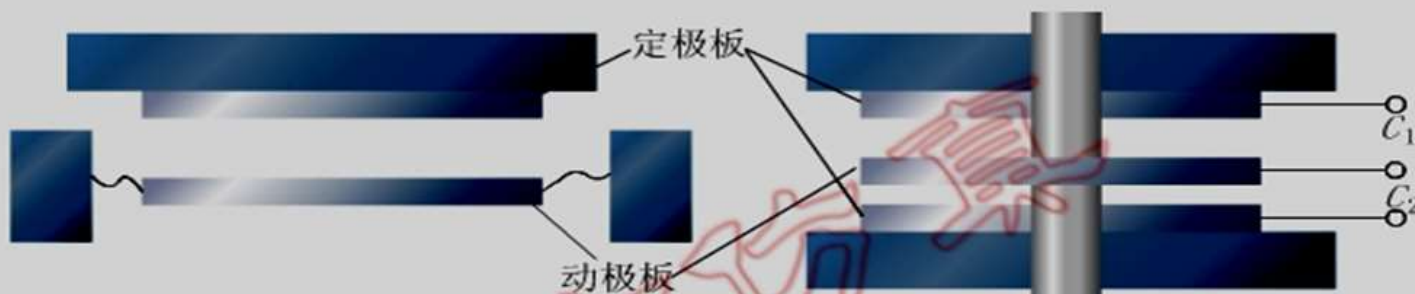
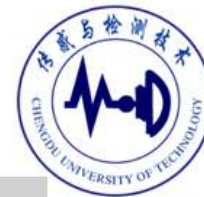
$$\gamma_L \approx \left( \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 \times 100\%$$

☺ 结论：

- 差动式电容传感器比单个电容灵敏度提高一倍；
- 非线性误差减小（多乘  $\Delta \delta$  因子）。



## 第4章 电容式传感器



基本的变间隙型电容传感器

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

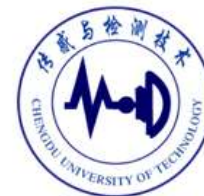
差动结构的变间隙型电容传感器

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

基本变间隙型电容传感器和差动变间隙型电容传感器的工作原理

东方仿真COPYRIGHT

## 第4章 电容式传感器



### 2. 变面积型 ( $S$ )

平板电容的初始电容值为

$$C_0 = \frac{\varepsilon ab}{\delta}$$

- 当动极板移动 $\Delta x$ 后, 两极板间电容量为

$$C = \frac{\varepsilon b(a - \Delta x)}{\delta} = C_0 - \frac{\varepsilon b}{\delta} \Delta x = C_0 - C_0 \frac{\Delta x}{a}$$

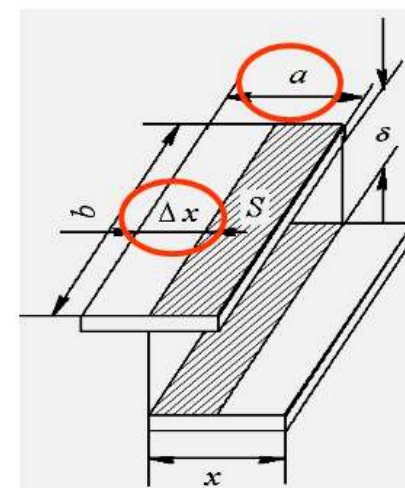
- 电容的相对变化量  
与位移成正比

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

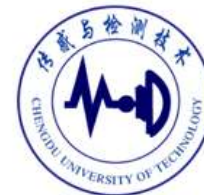
平板变面积型电容传感器灵敏度

$$k_0 = \frac{\Delta C}{\Delta x} = -\frac{\varepsilon b}{\delta}$$

注: 变面积型和变极距型灵敏度定义不同!



## 第4章 电容式传感器



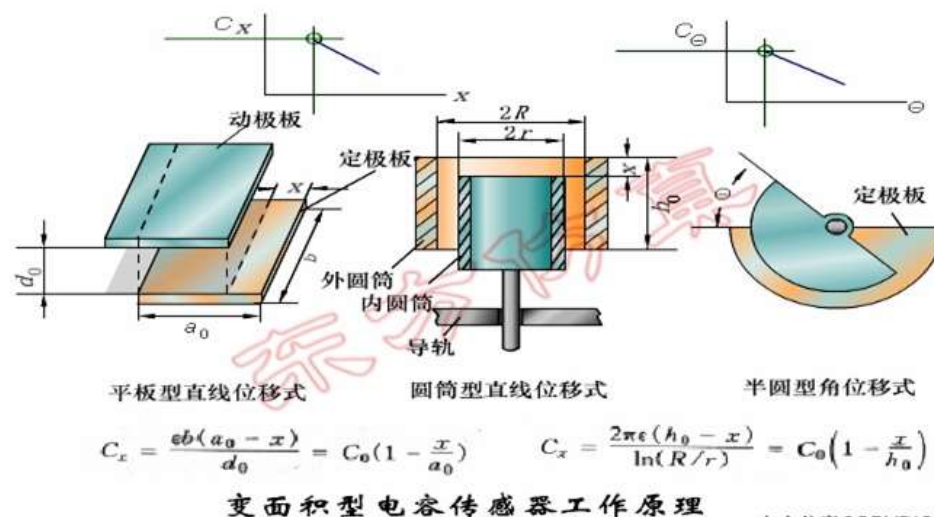
### 2. 变面积型 (S)

☉ 讨论:

(平板) 变面积式电容传感器灵敏度 $k_0$ 为**常数**;

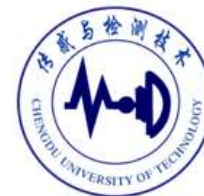
$$k_0 = \frac{\Delta C}{\Delta x} = -\frac{\epsilon b}{\delta}$$

- 输出特性为线性关系
- 适合大位移测量
- 可实现直线位移、
- 角位移测量。



东方仿真COPYRIGHT

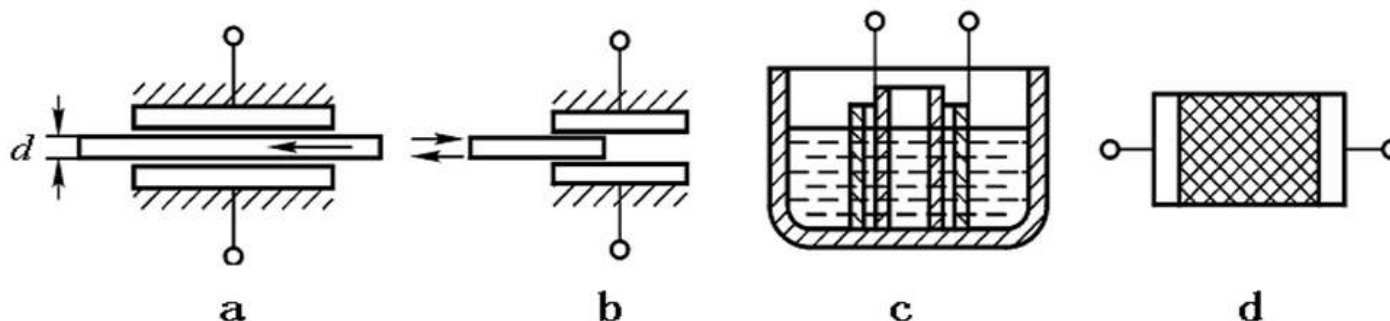
## 第4章 电容式传感器



### 3. 变介电常数式 ( $\epsilon$ )

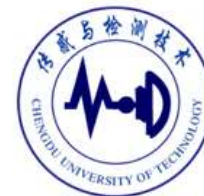
❖ 变介电常数式电容传感器与传感器结构有关，分以下几种情况：

- 测介质**厚度** (纸张、薄膜厚度) 图a
- 测介质**位移** (介质位置变化) 图b
- 测介质**材料** (介电常数，如介质材料、液位) 图c
- **测温、湿度、容量** (粮仓、木材湿度) 图d





## 第4章 电容式传感器

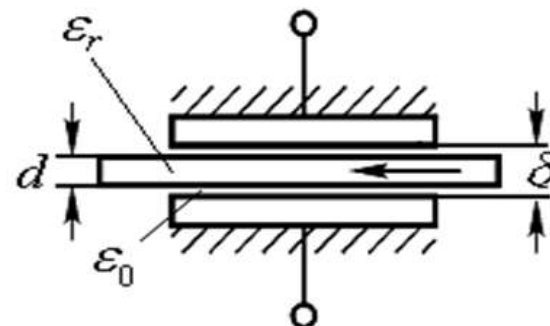


👉 测量介质 ( $\epsilon$ )，可设计为介电常数的测试仪器；

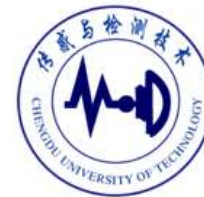
### ➤ 测厚度

- 介质不变，极板面积  $S$  和极距  $\delta$  一定，改变介质厚度  $d$ ，可设计为测厚仪器；
- 电容与介质参数之间关系与极距的几何尺寸有关：
- 介电常数包括被测介质和空气介质

$$C_a = \frac{S}{(\delta - d) / \epsilon_0 + d / \epsilon_r}$$

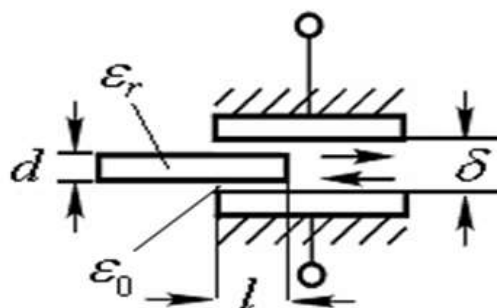


## 第4章 电容式传感器



### ➤ 测位移

- 介质的厚度和材料不变，电容与介质参数之间的关系与介质在极板中的位置有关：



$$C_b = \frac{bl}{(\delta - d) / \epsilon_0 + d / \epsilon_r} + \frac{b(a - l)}{\delta / \epsilon_0}$$

式中：a、b 分别为平板电容的边长

## 第4章 电容式传感器

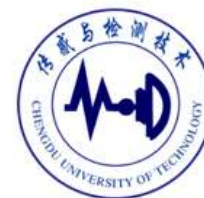
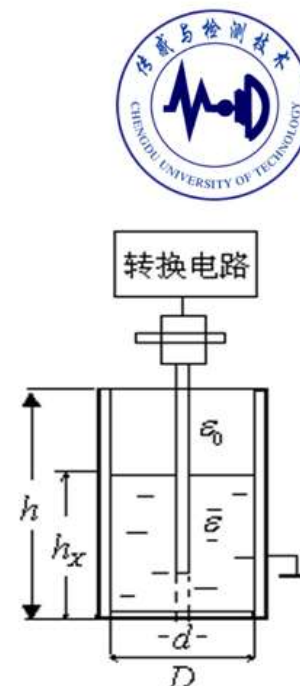
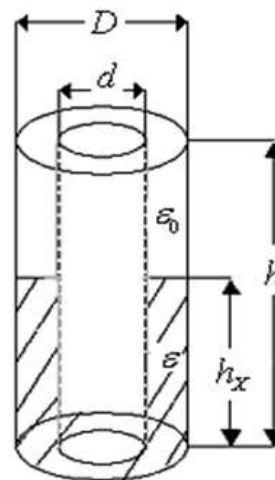
### ► 测介电常数 $\varepsilon$ （液位检测）

通常根据容器的形状计算

- 无介质时，容器 $C_0$ 为传感器静电容，
- 中心检测电极为电容器的一个极板，
- 外侧是电容器的另一个极板。

$$C = \frac{2\pi\varepsilon h_x}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\varepsilon_0(h-h_x)}{\ln(D/d)} = C_0 + \frac{2\pi h_x(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\ln(D/d)}$$

可见，传感器电容的增量是**正比于液位高度** $h_x$ 。

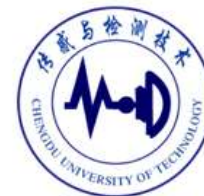
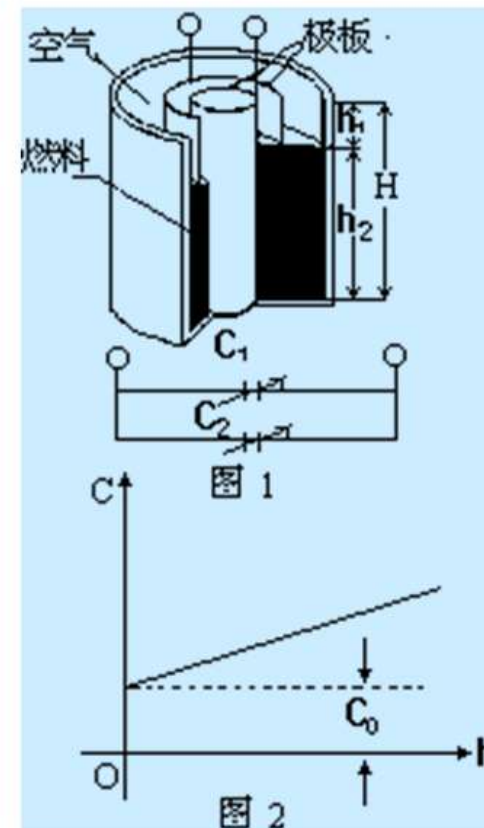
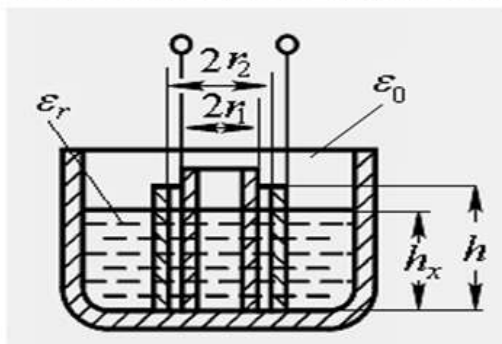


## 第4章 电容式传感器

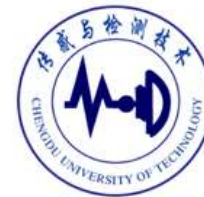
### ► 测液位——油量测量

$$C_C = C_0 + \Delta C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(r_2/r_1)}h + \frac{2\pi(\epsilon_r - \epsilon_0)}{\ln(r_2/r_1)}h_x$$

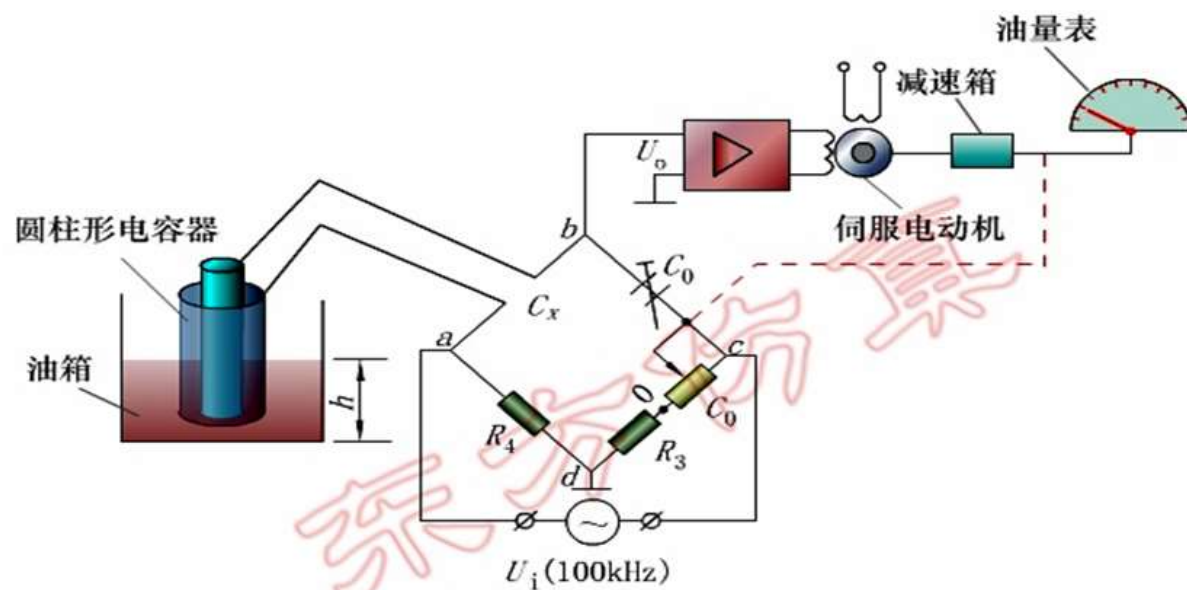
- 燃油增加,  $h_x$  增大,  $\Delta C$  也增大;
- 燃油减少,  $h_x$  减少,  $\Delta C$  也减小。
- 通过测量电容的大小就能知道油量的多少。



## 第4章 电容式传感器



### 测液位



电容式油量表原理

东方仿真COPYRIGHT