

# 第2章 阻抗式传感器



## 2.1 电阻式传感器

---



## 2.2 电感式传感器

---



## 2.3 电容式传感器

---





# 概述

基于元器件电阻变化的传感器十分常见，这是因为许多物理量（力、力矩、位移、形变、速度、加速度等）都会对材料的电阻产生影响。

- ◆电阻应变式传感器是利用电阻应变片将应变转换为电阻变化的传感器。
- ◆传感器由在弹性元件上粘贴电阻应变敏感元件构成。
- ◆应变式传感器的灵敏度较高，目前已应用于各种检测系统中。



## 2.1 电阻式传感器

### 2.1.1 应变片式传感器

电阻应变片的工作原理是基于应变效应的，即在导体产生机械变形时，它的电阻值相应发生变化。

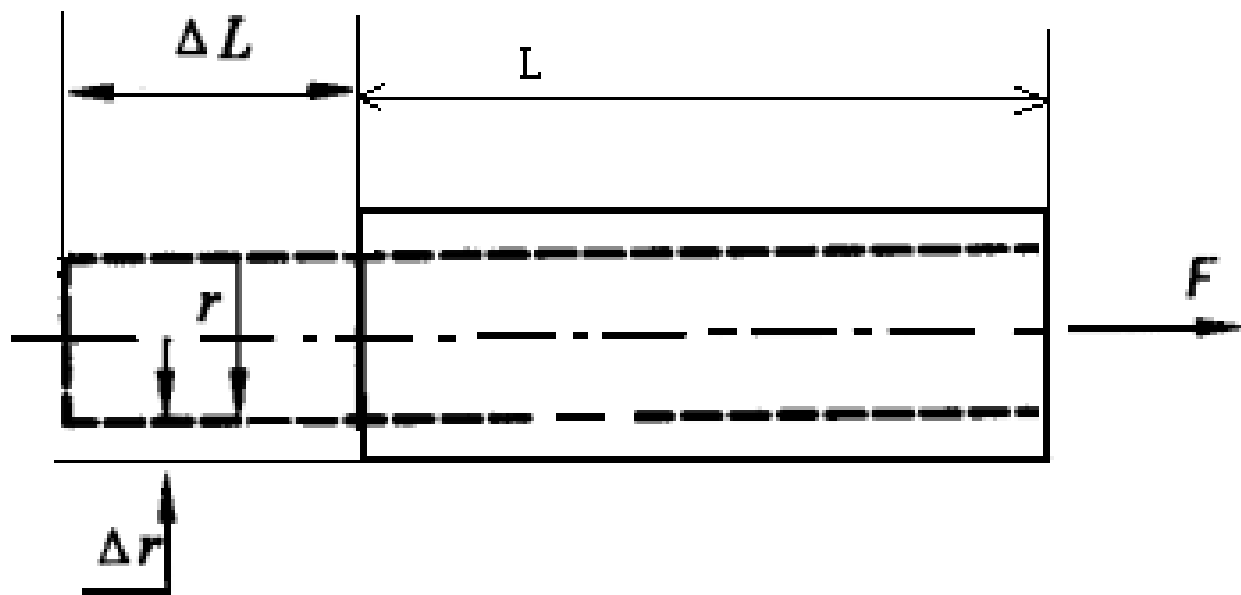


图2-1 金属电阻丝应变效应图



## 2.1 电阻式传感器

- ◆ 金属电阻丝，在其未受力时，原始电阻值为：

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (2-1)$$

$\rho$ ——电阻丝的电阻率；

$L$ ——电阻丝的长度；

$S$ ——电阻丝的截面积。

- ◆ 当电阻丝受到拉力 $F$ 作用时，将伸长 $\Delta L$ ，横截面积相应减小 $\Delta S$ ，电阻率将因晶格发生变形等因素而改变 $\Delta\rho$ ，故引起电阻值相对变化量为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-2)$$





## 2.1 电阻式传感器

- ◆ 式中 $\frac{\Delta L}{L}$ 是长度相对变化量，用金属电阻丝的轴向应变 $\varepsilon$ 表示， $\varepsilon$ 数值一般很小表达式为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2-3)$$

- ◆  $\Delta S/S$ 为圆形电阻丝的截面积相对变化量，即：

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r} \quad (2-4)$$





## 2.1 电阻式传感器

- ◆ 由材料力学可知，在弹性范围内，金属丝受拉力时，沿轴向伸长，沿径向缩短，那么轴向应变和径向应变的关系可表示为：

$$\frac{\Delta r}{r} = -\mu \frac{\Delta L}{L} = -\mu \varepsilon \quad (2-5)$$

- $\mu$ —电阻丝材料的泊松比；
  - 一般金属 $\mu=0.2-0.5$ ，负号表示应变方向相反。
- ◆ 将式(2-3)、(2-4)、(2-5)代入式(2-2)，可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-6)$$





## 2.1 电阻式传感器

◆ 又因为  $\Delta\rho/\rho = \lambda\sigma = \lambda E\varepsilon$  (2-7)

$\lambda$ -为压阻系数，与材质有关；

$\sigma$ 为试件的应力；

$E$ 为试件材料的弹性模量。

所以  $\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \lambda E) \cdot \varepsilon$  (2-8)

◆ 根据上述特点，测量应力或应变时，被测对象产生微小机械变形，应变片随着发生相同的变化，同时应变片电阻值也发生相应变化。

◆ 当测得应变片电阻值变化量 $\Delta R$ 时，便可得到被测对象的应变值。





## 2.1 电阻式传感器

◆由前述可知：

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

◆应力值 $\sigma$ 正比于应变 $\varepsilon$ ，而试件应变 $\varepsilon$ 正比于电阻值的变化，所以应力 $\sigma$ 正比于电阻值的变化，这就是利用应变片测量应变的基本原理。





## 2.1 电阻式传感器

### 2.2.1 电阻应变片的种类

常用的应变片可分为两类：金属电阻应变片和半导体电阻应变片。

- ◆ 金属应变片由敏感栅、基片、覆盖层和引线等部分组成，如图所示：

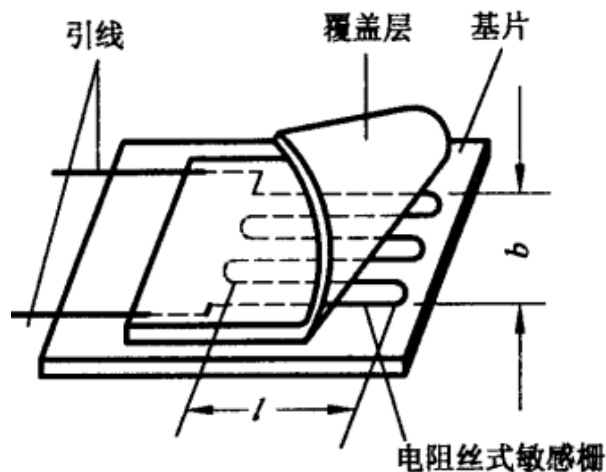


图2-2 金属电阻应变片的结构图



## 2.1 电阻式传感器

- ◆敏感栅是应变片的核心部分，它粘贴在绝缘的基片上，其上再粘贴起保护作用的覆盖层，两端焊接引出导线。
- ◆金属电阻应变片的敏感栅有丝式、箔式和薄膜式三种。
- ◆箔式应变片是利用光刻、腐蚀等工艺制成的一种很薄的金属箔栅，厚度一般在0.002-0.01mm。其优点是散热条件好，允许通过的电流较大，便于批量生产，可制成各种所需的形状，如下图所示：



## 2.1 电阻式传感器

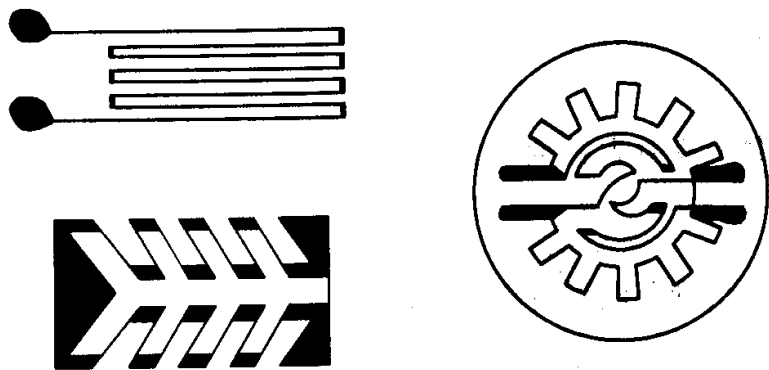


图2-3 各种形状的箔式应变片图

- ◆ 箔式应变片缺点是电阻分散性大。
- ◆ 薄膜式应变片是采用真空蒸发或真空沉淀等方法在薄的绝缘基片上形成 $0.1\mu\text{m}$ 以下的金属电阻薄膜的敏感栅，最后再加上保护层。它的优点是应变灵敏度系数大，允许电流密度大，工作范围广。



## 2.1 电阻式传感器

- ◆ 半导体应变片是用半导体材料制成的，其工作原理是基于半导体材料的压阻效应。
- ◆ 所谓压阻效应，是指半导体材料在某一轴向受外力作用时，其电阻率 $\rho$ 发生变化的现象。
- ◆ 半导体应变片受轴向力作用时，其电阻相对变化为式：

$$\begin{aligned}\frac{\Delta R}{R} &= (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \\ &= (1 + 2\mu + \lambda E)\varepsilon\end{aligned}$$





## 2.1 电阻式传感器

- ◆ 实验证明，半导体材料的  $\lambda E$  比  $(1+2\mu)$  大上百倍，所以  $(1+2\mu)$  可以忽略，因而半导体应变片的电阻相对变化为：

$$\frac{\Delta R}{R} = S E \quad S = (1 + \mu)$$

- ◆ 半导体应变片的突出优点是灵敏度高，比金属丝式应变片高50~80倍，尺寸小，横向效应小，动态响应好。但它有温度系数大，应变时非线性比较严重等缺点。





## 2.1 电阻式传感器

- ◆ 应变片是用粘合剂粘贴到被测件上的。
- ◆ 粘合剂形成的胶层必须准确迅速地将被测件的应变传进到敏感栅上。
- ◆ 粘合剂的性能及粘贴工艺的质量直接影响着应变片的工作特性，如零漂、蠕变、滞后、灵敏系数，线性度以及它们受温度变化影响的程度。





## 2.1 电阻式传感器

- 在实际测试中，选用金属电阻应变片应注意两点。
- 应变片电阻的选择
- 1、应变片的原电阻值一般有 $60\Omega$ ， $90\Omega$ ， $120\Omega$ ， $200\Omega$ ， $300\Omega$ ， $500\Omega$ ， $1000\Omega$ 等。当选配动态应变仪组成测试系统进行测试时，由于动态应变仪电桥的固定电阻为 $120\Omega$ ，因此为了避免对测量结果进行修正计算，以及在没有任何特殊要求的情况下，选择 $120\Omega$ 的应变片为宜。除此以外，可根据测量要求选择其他阻值的应变片。





## 2.1 电阻式传感器

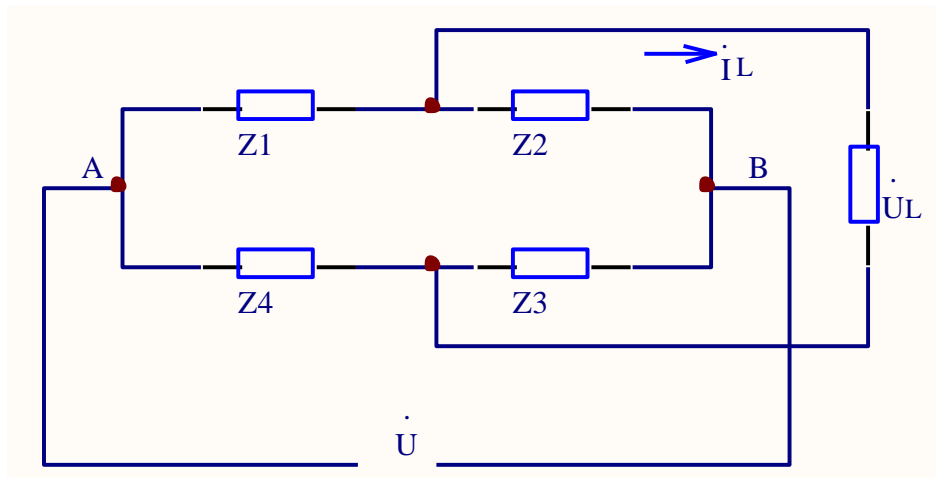
- 2、应变片灵敏的选择
- 当选配动态应变仪进行测量时，应选用 $S=2$ 的应变片。由于静态应变仪配有灵敏度的调节装置，故允许选用 $S \neq 2$ 的应变片。对于那些不配有应变仪的测试，应变片的 $S$ 值愈大，





## 2.1 电阻式传感器

- 二 测量电路



- 普通惠斯顿电桥

- 实际工作中，通常采用同型号的应变片，即四个应变片的阻值尺和灵敏系数 $k$ 都相同，分别接入惠斯顿电桥四臂。





## 2.1 电阻式传感器

- 在应变为0的初始状态下，电桥平衡，没有输出电压；在应变片承受，应变时，电桥失去平衡，产生输出电压。

$$Z_i = R_i + \Delta R_i, \quad R_i = R$$

$$\Delta R_i / R_i = k \varepsilon_i (i=1,2,3,4,\dots)$$

- 电桥开路时的输出电压为

- 
- 

$$\dot{U}_o = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \dot{U}$$





## 2.1 电阻式传感器

- 有上述两式电桥开路时的输出电压为：

$$U_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} U$$

- 因此可略去的二阶微量，将上式近似为

$$U_o \approx U_o' = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$





## 2.1 电阻式传感器

- 也就是得到下式：

$$U_o = \frac{kU}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$





## 2.2 电感式传感器

### 概述

电感式传感器是利用电磁感应原理将被测非电量如位移、压力、流量、重量、振动等转换成线圈自感量 $L$ 或互感量 $M$ 的变化，再由测量电路转换为电压或电流的变化量输出的装置。

- ◆ 优点:结构简单，工作可靠寿命长，测量精度高，零点稳定，输出功率较大等。
- ◆ 缺点:灵敏度、线性度和测量范围相互制约，传感器自身频率响应低，不适用于快速动态测量。





- 概述
- 电感式传感器种类很多，有利用自感原理的自感式传感器，利用互感原理做成的差动变压器式传感器，还有利用涡流原理的涡流式传感器、利用压磁原理的压磁式传感器等
- ◆ 本章主要介绍自感式、互感式二种传感器。



## 2.2 电感式传感器

### 2.2.1 自感型电感式传感器

#### 1、工作原理

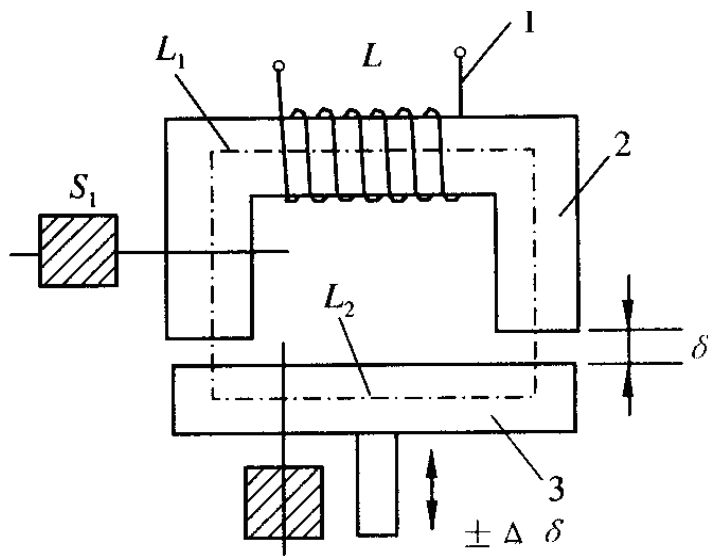


图2-2-1 变磁阻式传感器结构图

1-线圈；2-铁芯（定铁芯）；2-衔铁（动铁芯）



## 2.2 电感式传感器

- ◆ 铁芯和衔铁由导磁材料如硅钢片或坡莫合金制成，在铁芯和衔铁之间有气隙，气隙厚度为 $\delta$ ，传感器的运动部分与衔铁相连。
- ◆ 当衔铁移动时，气隙厚度 $\delta$ 发生改变，引起磁路中磁阻变化，从而导致电感线圈的电感值变化，只要能测出这种电感量的变化，就能确定衔铁位移量的大小和方向。
- ◆ 电路的磁阻指由于电流引起的链合磁通量。根据电感定义，线圈中电感量可由下式确定：

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I}$$







## 2.2 电感式传感器

### ◆ 上式中：

$\Psi$ ——线圈总磁链；

$I$ ——通过线圈的电流；

$N$ ——线圈的匝数；

$\Phi$ ——穿过线圈的磁通。

### ◆ 由磁路欧姆定律，得磁通表达式： $\Phi = \frac{IN}{R_m}$

$R_m$ ——磁路总磁阻。

### ◆ 对于变隙式传感器，因为气隙很小，所以可以认为气隙中的磁场是均匀的。





## 2.2 电感式传感器

◆ 若忽略磁路磁损，则磁路总磁阻为：

$$R_m = \frac{L_1}{\mu_1 S_1} + \frac{L_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}$$

式中：

$\mu_1$ ——铁芯材料的导磁率(H/m)；

$\mu_2$ ——衔铁材料的导磁率(H/m)；

$L_1$ ——磁通通过铁芯的长度(m)；

$L_2$ ——磁通通过衔铁的长度(m)；

$S_1$ ——铁芯的截面积( $m^2$ )；

$S_2$ ——衔铁的截面积( $m^2$ )；

$\mu_0$ ——空气的导磁率( $4\pi \times 10^{-7}$ H/m)；

$S_0$ ——气隙的截面积( $m^2$ )；

$\delta$ ——气隙的厚度(m)。



## 2.2 电感式传感器

◆ 通常气隙磁阻远大于铁芯和衔铁的磁阻，即：

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} &\gg \frac{L_1}{\mu_1 S_1} \\ \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} &\gg \frac{L_2}{\mu_2 S_2} \end{aligned} \right\}$$

◆ 则可近似认为：

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}$$

◆ 联立前几式，可得

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2\delta}$$





## 2.2 电感式传感器

- ◆ 上式表明，当线圈匝数为常数时，电感 $L$ 仅仅是磁路中磁阻 $R_m$ 的函数，只要改变 $\delta$ 或 $S_0$ 均可导致电感变化。
- ◆ 因此变磁阻式传感器又可分为变气隙厚度 $\delta$ 的传感器和变气隙面积 $S_0$ 的传感器。
- ◆ 使用最广泛的是变气隙厚度 $\delta$ 式电感传感器。



## 2.2 电感式传感器

### 二、等效电路

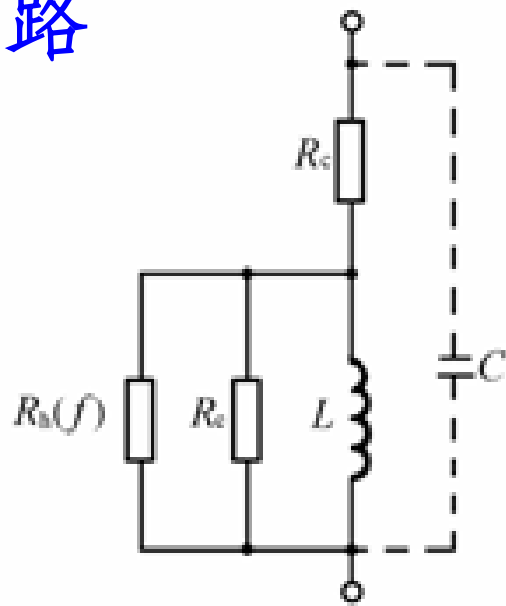


图2-2-2 传感器线圈的等效电路

$L$ -电感； $R_c$ -铜耗电阻； $R_e$ -铁心涡流损耗电阻；  
 $R_h$ -磁滞损耗电阻； $C$ -寄生电容



## 2.2 电感式传感器

◆ 变磁阻式传感器通常都具有铁心线圈或空心线圈。  
将传感器线圈等效成上图所示电路:

1. 铜损电阻  $R_c$ : 取决于导线材料及线圈几何尺寸。
2. 涡流损耗电阻  $R_e$ : 由频率为  $f$  的交变电流激励产生的交变磁场, 会在线圈铁心中造成涡流及磁滞损。
3. 磁滞损耗电阻  $R_h$ : 铁磁物质在交变磁化时, 磁分子来回翻转克服阻力, 类似摩擦生热的能量损耗。
4. 并联寄生电容  $C$  的影响: 并联寄生电容主要由线圈绕组的固有电容与电缆分布电容所构成。



## 2.2 电感式传感器

- ◆ 为便于分析，先不考虑寄生电容C，并将上图中的线圈电感与并联铁损电阻等效为串联铁损电阻 $R_e'$ 与串联电感 $L'$ 的等效电路，如下图所示。

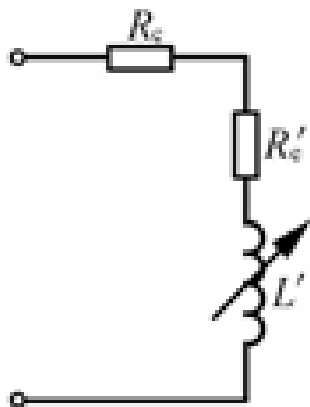


图2-2-3 线圈等效电路的变换形式

- ◆ 这时 $R_e'$ 和 $L'$ 的串联阻抗应该与 $R_e$ 和 $L$ 的并联阻抗相等，即：
$$R_e' + jL'\omega = \frac{R_e jL\omega}{R_e + jL\omega}$$

## 2.2 电感式传感器

其中：
$$R_e' = \frac{R_e}{1 + (R_e / L\omega)^2}$$

$$L' = \frac{L}{1 + \frac{1}{(R_e / L\omega)^2}}$$

- ◆ 可见，铁损的串联等效电阻  $R_e'$  与  $L$  有关。
- ◆ 当被测非电量的变化引起线圈电感量改变时，其电阻值亦发生不希望有的变化。
- ◆ 要减少这种附加电阻变化的影响，比值  $R_e / L\omega$  应尽量小，以使  $R_e' \ll \omega L$ ，从而减小了附加电阻变化的影响。可见，在设计传感器时应尽可能减少铁损。



## 2.2 电感式传感器

- ◆ 当考虑实际存在并联寄生电容C时，阻抗Z为：

$$Z = \frac{(R' + jL'\omega)/jC\omega}{R' + jL'\omega + 1/jC\omega}$$
$$= \frac{R'}{(1 - L'C\omega^2)^2 + (L'\omega^2/Q)^2} + j \frac{L'\omega \left[ (1 - L'C\omega^2) - L'C\omega^2/Q^2 \right]}{(1 - L'C\omega^2)^2 + (L'C\omega^2/Q)^2}$$

式中，总的损耗电阻  $R' = R_c + R_e$ ，品质因数  $Q = L'\omega / R'$

- ◆ 有效值Q为： $Q_s = L_s\omega / R_s = (1 - L'C\omega^2) Q$

- ◆ 电感的相对变化：

$$\frac{dL_s}{L_s} = \frac{1}{1 - L'C\omega^2} \frac{dL'}{L'}$$





## 2.2 电感式传感器

- ◆ 由上述三式知，并联电容C的存在，使有效串联损耗电阻与有效电感均增加，有效品质因素Q值下降并引起电感的相对变化增加，即灵敏度提高。
- ◆ 因此从原理而言，按规定电缆校正好的仪器，如更换了电缆，则应重新校正或采用并联电容加以调整。
- ◆ 实际使用中因大多数变磁阻式传感器工作在较低的激励频率下( $f \leq 10\text{KHz}$ )，上述影响常可忽略，但对于工作在较高激励频率下的传感器（如反射式涡流传感器），上述影响必需引起充分重视。



## 2.2 电感式传感器

### 三 输出特性

- ◆ 设电感传感器初始气隙为 $\delta_0$ ，初始电感量为 $L_0$ ，衔铁位移引起的气隙变化量为 $\Delta\delta$ ，可知 $L$ 与 $\delta$ 之间是非线性关系，特性曲线如图所示，初始电感量为：

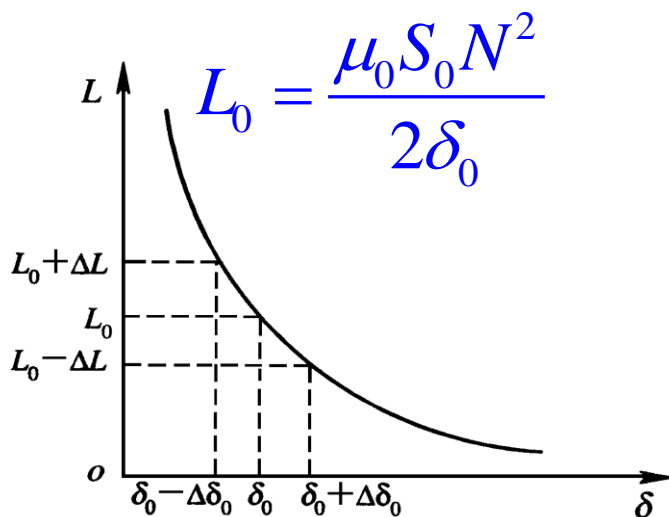


图2-2-4 变隙式电感传感器的 $L$ - $\delta$ 特性

## 2.2 电感式传感器

- ◆ 当衔铁上移 $\Delta\delta$ 时，传感器气隙减小 $\Delta\delta$ ，即 $\delta = \delta_0 - \Delta\delta$ ，则此时输出电感为 $L = L_0 + \Delta L$ ，代入上式整理得：

$$L = L_0 + \Delta L = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} = \frac{L_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

- ◆ 当 $\delta/\Delta\delta \in (0,1)$ 时，可将上式用泰勒级数展开成级数形式为

$$L = L_0 + \Delta L = L_0 \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right) + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right]$$

- ◆ 由上式可求得电感增量 $\Delta L$ 和相对增量 $\Delta L/L_0$ 的表达式，即： $\Delta L = L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right) + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right]$

## 2.2 电感式传感器

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \cdot [1 + (\frac{\Delta \delta}{\delta_0}) + (\frac{\Delta \delta}{\delta_0})^2 + \dots]$$

- ◆ 当衔铁下移 $\Delta\delta$ 时，传感器气隙增大 $\Delta\delta$ ，即 $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ ，则此时输出电感为 $L = L_0 - \Delta L$ 整理，得：

$$\Delta L = L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \cdot [1 - (\frac{\Delta \delta}{\delta_0}) + (\frac{\Delta \delta}{\delta_0})^2 - \dots]$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} [1 - (\frac{\Delta \delta}{\delta_0}) + (\frac{\Delta \delta}{\delta_0})^2 - \dots]$$

- ◆ 线性处理，忽略高次项，可得：

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$





## 2.2电感式传感器

### 2.2.2互感型电感式传感器

互感式传感器是把被测的非电量变化转换为线圈互感量变化的传感器。它根据变压器的基本原理制成，并且次级绕组都用差动形式连接，故又称为差动变压器式传感器。

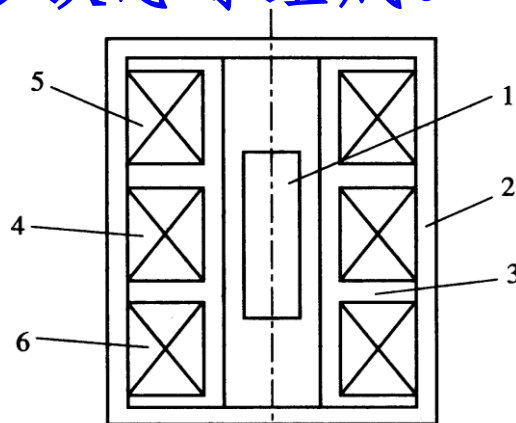
- ◆ 差动变压器结构形式较多，有变隙式、变面积式和螺线管式等，但其工作原理基本一样。
- ◆ 非电量测量中，应用最多的是螺线管式差动变压器，它可以测量1~100mm范围内的机械位移，并具有测量精度高，灵敏度高，结构简单，性能可靠等优点。



## 2.2 电感式传感器

### 一 工作原理

- ◆ 螺线管式差动变压器结构如下图所示。
- ◆ 它由一个初级线圈，两个次级线圈和插入线圈中央的圆柱形铁芯等组成。



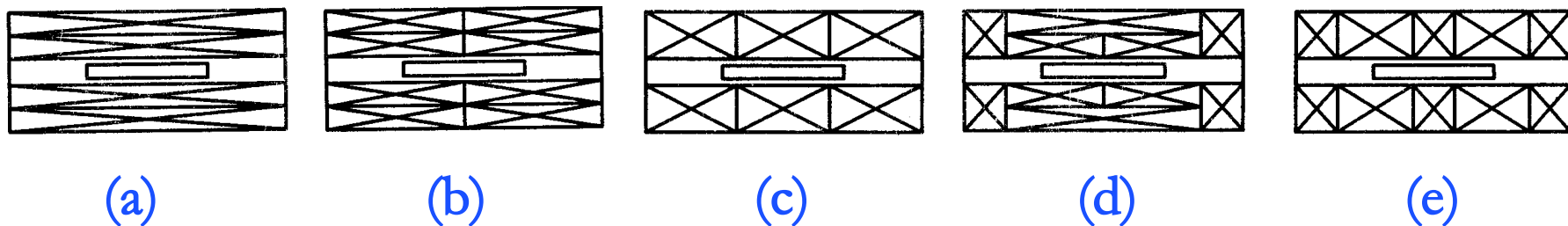
1 -活动衔铁； 2 -导磁外壳； 2-骨架； 3-匝数为  $W$ 的初级绕组；

5 -匝数为 $W_{2a}$ 的次级绕组； 6 -匝数为 $W_{2b}$ 的次级绕组

图2-2-11 螺线管式差动变压器结构图

## 2.2 电感式传感器

- ◆ 螺线管式差动变压器按线圈绕组排列的方式不同，可分为一节、二节、三节、四节和五节式等类型，如图所示。一节式灵敏度高，三节式零点残余电压较小，通常采用的是二节式和三节式两类。



线圈排列方式图

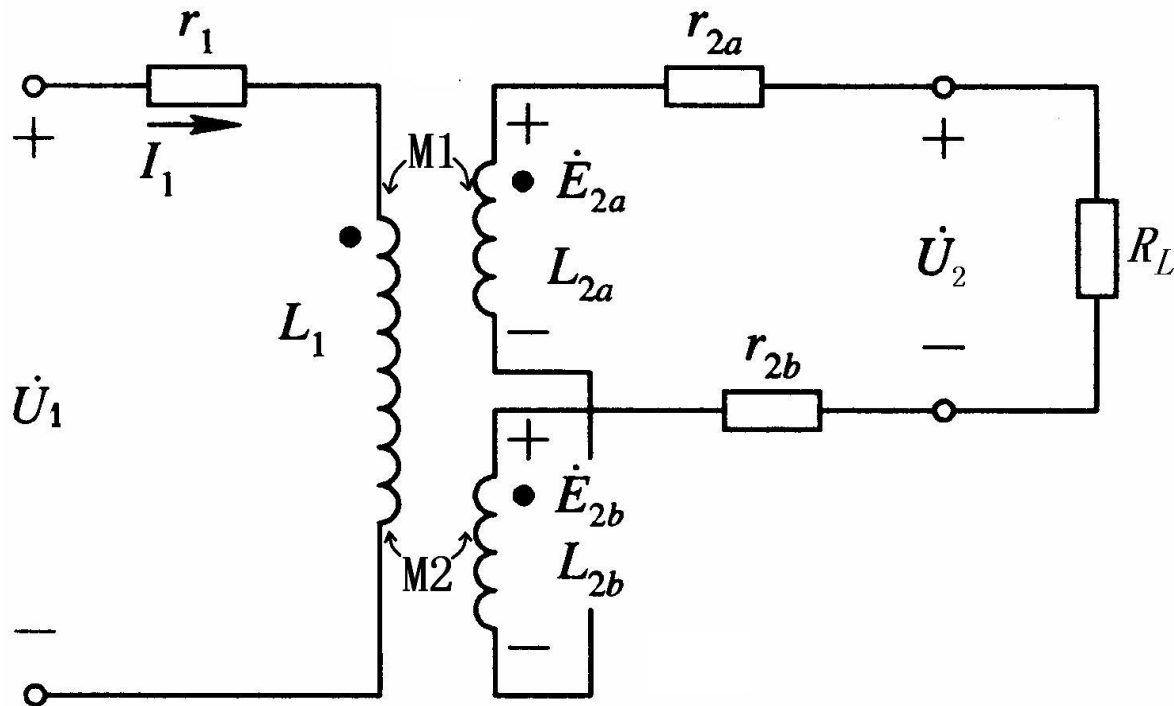
(a) 一节式； (b) 二节式 (c) 三节式； (d) 四节式； (e) 五节式

图2-2-12 线圈排列方式



## 2.2 电感式传感器

- ◆ 差动变压器式传感器中两个次级线圈反向串联，并且在忽略铁损、导磁体磁阻和线圈分布电容的理想条件下，其等效电路如下图所示。



2-2-13 差动变压器等效电路



## 2.2 电感式传感器

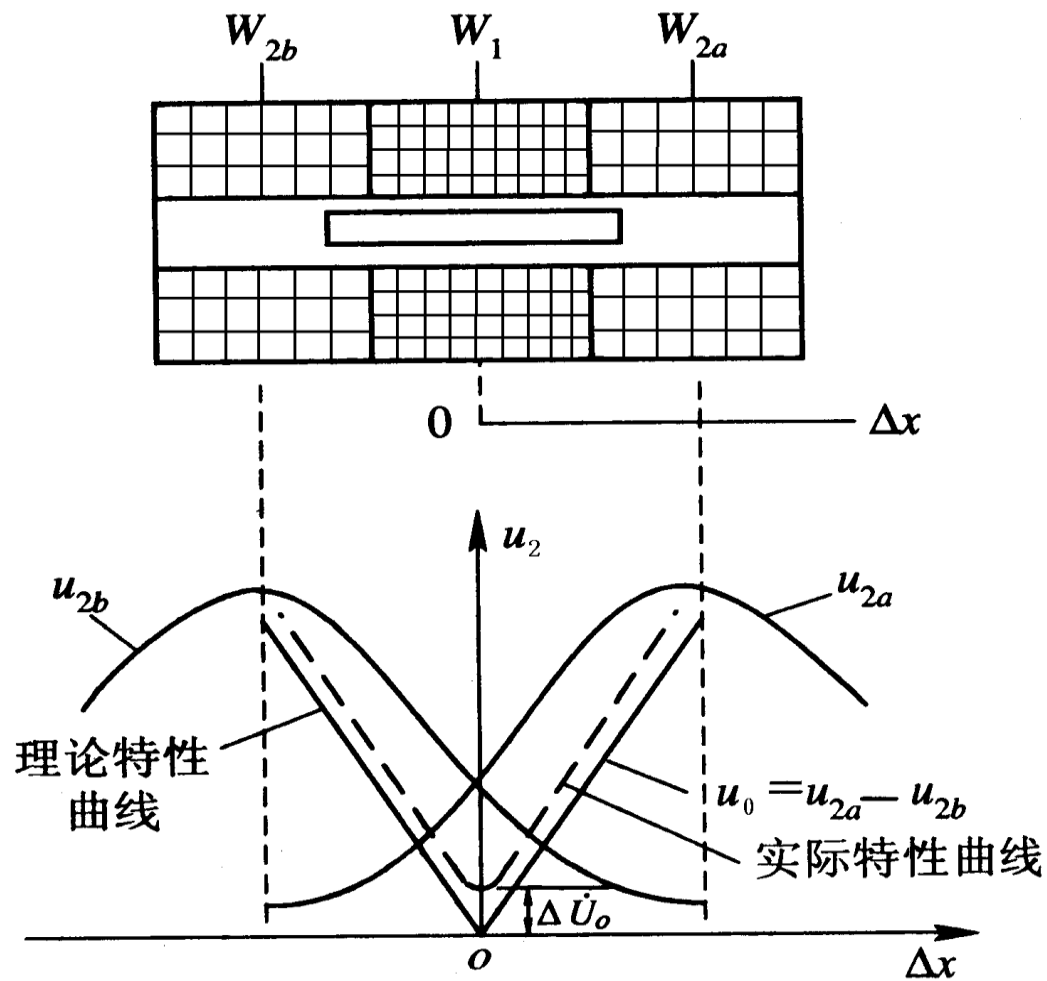
- ◆ 当初级绕组  $W_1$  加以激励电压  $\dot{U}_1$  时，根据变压器的工作原理，在两个次级绕组  $W_{2a}$  和  $W_{2b}$  中便会产生感应电势  $\dot{E}_{2a}$  和  $\dot{E}_{2b}$ 。
- ◆ 如果工艺上保证变压器结构完全对称，则当活动衔铁处于初始平衡位置时，必然会使两互感系数  $M_1 = M_2$ 。根据电磁感应原理，将有  $\dot{E}_{2a} = \dot{E}_{2b}$ 。
- ◆ 变压器两次级绕组反向串联，因而  $\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = 0$  即差动变压器输出电压为零。



## 2.2 电感式传感器

- ◆ 活动衔铁向上移动时，由于磁阻的影响， $W_{2a}$ 中磁通将大于 $W_{2b}$ ，使 $M_1 > M_2$ ，因而 $E_{2a}$ 增加，而 $E_{2b}$ 减小。反之， $E_{2b}$ 增加， $E_{2a}$ 减小。因为 $U_2 = E_{2a} - E_{2b}$ ，所以当 $E_{2a}$ 、 $E_{2b}$ 随着衔铁位移 $x$ 变化时，也必将随 $x$ 变化。下图给出了变压器输出电压 $U_2$ 与活动衔铁位移 $x$ 的关系曲线。
- ◆ 实际上，当衔铁位于中心位置时，差动变压器输出电压并不等于零，我们把差动变压器在零位移时的输出电压称为零点残余电压，记作 $\Delta U$ 。它的存在使传感器的输出特性不过零点，造成实际特性与理论特性不完全一致。

## 2.2 电感式传感器



2-2-14 差动变压器输出电压特性曲线



## 2.2 电感式传感器

- ◆ 零点残余电压主要是由传感器的两次级绕组的电气参数与几何尺寸不对称，以及磁性材料的非线性等问题引起的。
- ◆ 零点残余电压波形复杂，主要由基波和高次谐波组成。
- ◆ 基波产生的主要原因是：传感器的两次级绕组的电气参数和几何尺寸不对称，导致它们产生的感应电势的幅值不等、相位不同，因此不论怎样调整衔铁位置，两线圈中感应电势都不能完全抵消。





## 2.2 电感式传感器

- ◆ 高次谐波中起主要作用的是三次谐波，产生的原因是由于磁性材料磁化曲线的非线性(磁饱和、磁滞)。
- ◆ 零点残余电压一般在几十毫伏以下，在实际使用时，应设法减小，否则将会影响传感器的测量结果。





## 2.2 电感式传感器

### 二 等效电路与计算

- ◆ 差动变压器中，当次级开路时，初级线圈激励电流为：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1}$$

式中：

$\omega$  —— 激励电压 的角频率；

$\dot{U}_1$  —— 初级线圈激励电压；

$\dot{I}_1$  —— 初级线圈激励电流；

$r_1$ 、 $L_1$  —— 初级线圈直流电阻和电感。



## 2.2 电感式传感器

- ◆ 根据电磁感应定律，次级绕组中感应电势的表达式分别为： $\dot{E}_{2a} = -j\omega M_1 \dot{I}_1$

$$\dot{E}_{2b} = -j\omega M_2 \dot{I}_1$$

- ◆ 由于次级两绕组反向串联，且考虑到次级开路，则由以上关系可得：

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = -\frac{j\omega(M_1 - M_2)\dot{U}}{r_1 + j\omega L_1}$$

- ◆ 输出电压的有效值为：

$$U_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)U_1}{[r_1^2 + (\omega L_1)^2]^{1/2}}$$





## 2.2 电感式传感器

◆ 下面分三种情况进行分析：

(1) 活动衔铁处于中间位置时： $M_1 = M_2 = M$

故  $U_2 = 0$

(2) 活动衔铁向上移动时： $M_1 = M + \Delta M, M_2 = M - \Delta M$

故  $U_2 = \frac{2\omega\Delta MU_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$  与  $\dot{E}_{2a}$  同极性。

(3) 活动衔铁向下移动时： $M_1 = M - \Delta M, M_2 = M + \Delta M$

故  $U_2 = -\frac{2\omega\Delta MU_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$  与  $\dot{E}_{2b}$  同极性。





## 2.3 电容式传感器

### 概述

电容式传感器是实现非电量到电容量转化的一类传感器。

- ◆ 可以应用于位移、振动、角度、加速度等参数的测量中。
- ◆ 由于电容式传感器结构简单、体积小、分辨率高，且可非接触测量，因此很有应用前景。



## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的平板电容器，如果不考虑边缘效应，其电容量为：

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

式中：

$\varepsilon$ ——电容极板间介质的介电常数，其中 $\varepsilon_0$ 为真空介电常数， $\varepsilon_r$ 为极板间介质相对介电常数；

$A$ ——两平行板所覆盖的面积；

$d$ ——两平行板之间的距离。

- ◆保持其中两个参数不变，而仅改变其中一个参数，就可把该参数的变化转换为电容量的变化，通过测量电路就可转换为电量输出。



## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

- ◆ 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。
- ◆ 在实际使用时，电容式传感器常以改变改变平行板间距 $d$ 来进行测量，因为这样获得的测量灵敏度高于改变其他参数的电容传感器的灵敏度。
- ◆ 改变平行板间距 $d$ 的传感器可以测量微米数量级的位移，而改变面积 $A$ 的传感器只适用于测量厘米数量级的位移。



## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

### 一 变极距型电容传感器

- ◆ 下图为变极距型电容式传感器的原理图。当传感器的 $\epsilon_r$ 和 $A$ 为常数，初始极距为 $d_0$ 时，其初始电容量 $C_0$ 为：

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0}$$

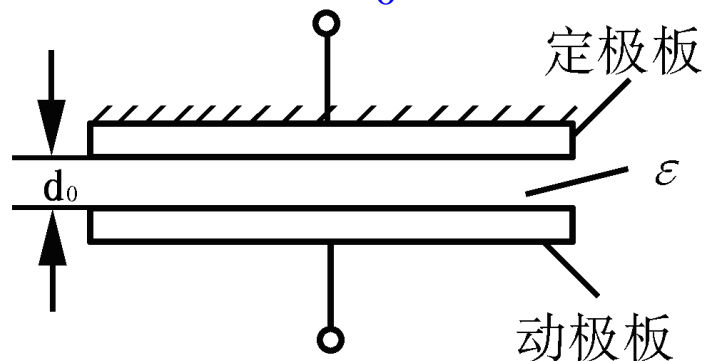


图2-3-1 变极距型电容传感器原理图

## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

- ◆ 若电容器极板间距离由初始值 $d_0$ 缩小 $\Delta d$ ，电容量增大 $\Delta C$ ，则有

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0 - \Delta d} = \frac{C_0 \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0}\right)}{1 - \frac{(\Delta d)^2}{d_0^2}} \quad (2-3-3)$$

- ◆ 由式(2-3-3)知传感器的输出特性 $C = f(d)$ 不是线性关系，而是如图2-3-2所示的曲线关系。

- ◆ 在式(2-3-3)中，当 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时， $1 - \frac{(\Delta d)^2}{d_0^2} \approx 1$ ，则上式可简化为：
$$C = C_0 + C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \quad (2-3-4)$$

- ◆ 此时 $C$ 与 $\Delta d$ 呈近似线性关系，所以变极距型电容式传感器只有在 $\Delta d/d_0$ 很小时，才有近似的线性输出。

## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

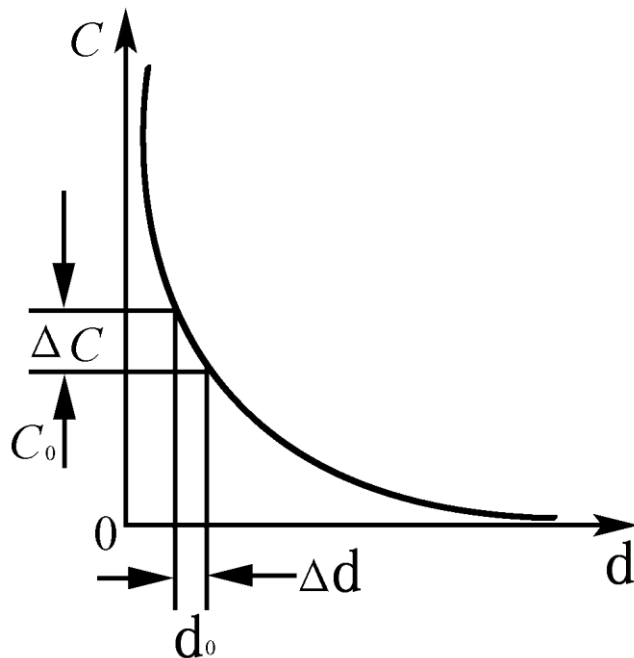


图2-3-2 电容量与极板间距离的关系

- ◆ 由式(2-3-4)还可以看出，在 $d_0$ 较小时，对于同样的  $\Delta d$  变化所引起的  $\Delta C$  可以增大，从而使传感器灵敏度提高。但 $d_0$ 过小，容易引起电容器击穿或短路。



## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

- ◆ 为防止击穿或短路，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，而空气的仅为3kV/mm。因此有了云母片，极板间起始距离可大大减小。同时传感器的输出特性的线性度得到改善。
- ◆ 一般变极距型电容式传感器的起始电容在20~30 pF之间，极板间距离在25~200 $\mu\text{m}$ 的范围内，最大位移应小于间距的1/10，故在微位移测量中应用最广。





## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

### 2.3.2 变面积型电容式传感器

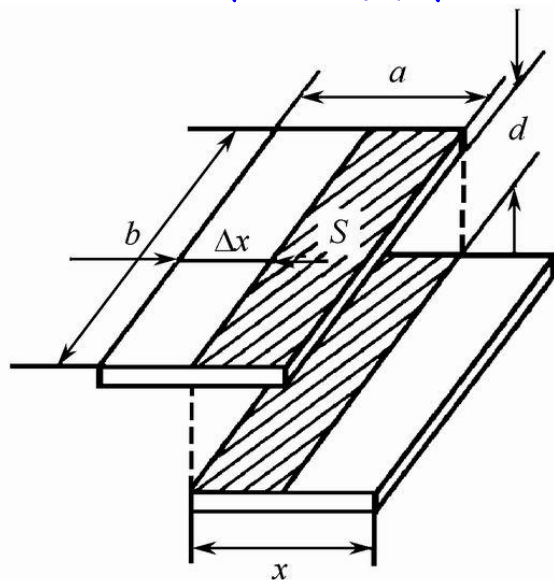


图2-3-3 变面积型电容传感器原理

- ◆ 上图是变面积型电容传感器原理结构示意图。被测量通过动极板移动引起两极板有效覆盖面积 $S$ 改变，从而改变电容量。

## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

- ◆ 当动极板相对于定极板延长度 $a$ 方向平移 $\Delta x$ 时，可得：

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

- ◆ 式中 $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r b a / d$  为初始电容。电容相对变化量为

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

- ◆ 很明显，这种形式的传感器其电容量 $C$ 与水平位移 $\Delta x$ 是线性关系，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：

$$s = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}{d}$$

## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

- ◆ 下图是电容式角位移传感器原理图。当动极板有一个角位移 $\theta$ 时，与定极板间的有效覆盖面积就改变，从而改变了两极板间的电容量。

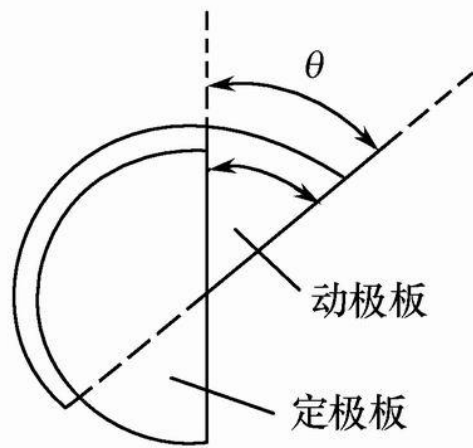


图2-3-4 电容式角位移传感器原理图

- ◆ 当 $\theta=0$ 时，则 
$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_0}{d_0}$$



## 4.1 电容式传感器的工作原理和结构

式中：

$\epsilon_r$  —— 介质相对介电常数；

$d_0$  —— 两极板间距离；

$A_0$  —— 两极板间初始覆盖面积。

◆ 当  $\theta \neq 0$  时，则

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_0 (1 - \frac{\theta}{\pi})}{d_0} = C_0 - C_0 \frac{\theta}{\pi}$$

◆ 从上式可以看出，传感器的电容量  $C$  与角位移  $\theta$  呈线性关系。

## 4.1 电容式传感器的工作原理和结构

### 二 变介质型电容式传感器

◆ 下图是一种变极板间介质的电容式传感器用于测量液位高低的结构原理图。

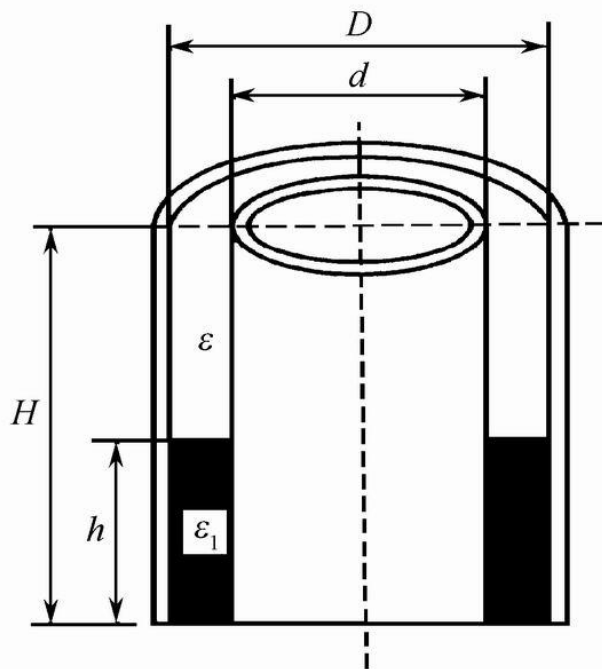


图2-3-5 电容式液位传感器结构原理图

## 4.1 电容式传感器的工作原理和结构

- ◆ 设被测介质的介电常数为 $\varepsilon_1$ ，液面高度为 $h$ ，变换器总高度为 $H$ ，内筒外径为 $d$ ，外筒内径为 $D$ ，则此时变换器电容值为：

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon(H-h)}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2\pi\varepsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h(\varepsilon_1 - \varepsilon)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon) \cdot h}{\ln \frac{D}{d}}$$

式中：

$\varepsilon$  —— 空气介电常数；

$C_0$  —— 由变换器的基本尺寸决定的初始电容值，即：

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon H}{\ln \frac{D}{d}}$$

- ◆ 可见此变换器的电容增量正比于被测液位高度 $h$ 。

## 4.1 电容式传感器的工作原理和结构

- ◆ 变介电型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介质的湿度。
- ◆ 下图是一种常用的结构型式。图中两平行电极固定不动，极距为 $d_0$ ，相对介电常数为 $\epsilon_{r2}$ 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。

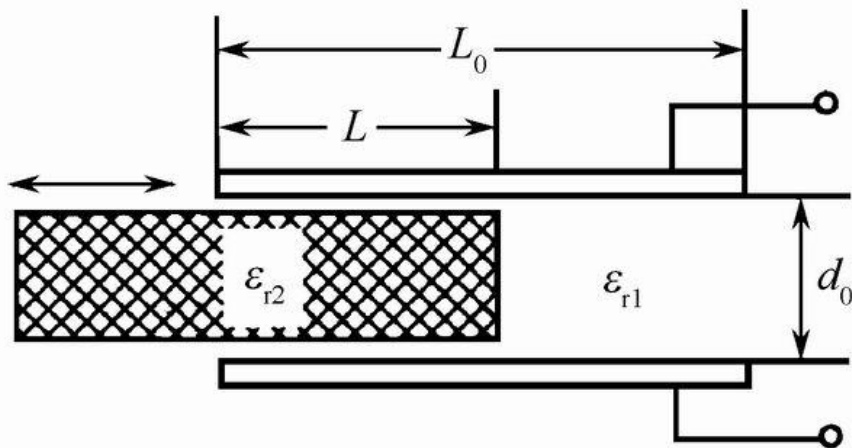


图2-3-6 变介电型电容式传感器

## 2.3.1 电容式传感器的工作原理和结构

◆ 传感器总电容量C为：

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 b_0 \frac{\varepsilon_{r1} (L_0 - L) + \varepsilon_{r2} L}{d_0}$$

式中：

$L_0, b_0$ ——极板长度和宽度；

$L$ ——第二种介质进入极板间的长度。

◆ 若电介质 $\varepsilon_{r1} = 1$ ，当 $L=0$ 时，传感器初始电容：

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} L_0 b_0}{d_0}$$

当介质 $\varepsilon_{r2}$ 进入极间 $L$ 后，引起电容的相对变化为：

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

◆ 可见电容的变化与电介质 $\varepsilon_{r2}$ 的移动量 $L$ 呈线性关系。





## 2.2.3 电容式传感器的测量电路

电容式传感器中电容值以及电容变化值都十分微小，这样微小的电容量还不能直接被目前的显示仪表显示，也很难被记录仪接受，不便于传输。

- ◆ 必须借助测量电路检出这一微小电容增量，并将其转换成与其成单值函数关系的电压、电流或者频率。
- ◆ 电容转换电路有调频电路、运算放大器式电路、二极管双T型交流电桥、脉冲宽度调制电路等。



## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

### 一 调频测量电路

- ◆ 调频测量电路把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。
- ◆ 虽然可将频率作为测量系统的输出量，用以判断被测非电量的大小，但此时系统是非线性的，不易校正，因此加入鉴频器，用此鉴频器可调整地非线性特性去补偿其他部分的非线性，并将频率的变化转换为振幅的变化，经过放大就可以用仪器指示或记录仪记录下来。
- ◆ 调频测量电路原理框图如下图所示， $C_x$ 为电容变换器。

## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

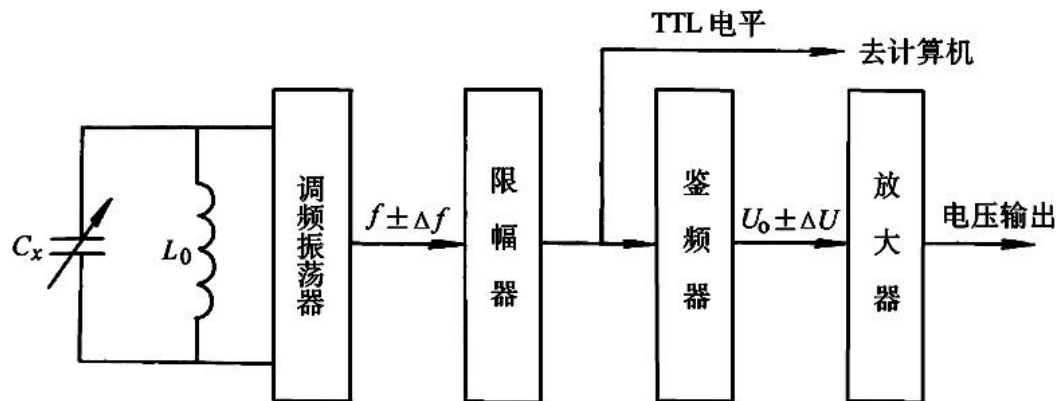


图2-3-12 调频式测量电路原理框图

◆ 图中调频振荡器的振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi(L_0 C)^{1/2}}$$

式中：

$L_0$ ——振荡回路的电感；

$C$ ——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；而  $C_x = C_0 + \Delta C$  为传感器的电容。

## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

- ◆ 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  $f_0$ ：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi[(C_1 + C_2 + C_0)L_0]^{1/2}}$$

- ◆ 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：

$$f = \frac{1}{2\pi[(C_1 + C_2 + C_0 \mp \Delta C)L_0]^{1/2}} = f_0 \pm \Delta f$$

- ◆ 调频电容传感器测量电路具有较高灵敏度，可以测至  $0.01 \mu\text{m}$  级位移变化量。信号输出易于用数字仪器测量和与计算机通讯，抗干扰能力强，可以发送、接收以实现遥测遥控。

## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

### 二 运算放大器式电路

- ◆ 运算放大器的放大倍数 $K$ 非常大，而且输入阻抗 $Z_i$ 很高。运算放大器的特点可以使其作为电容式传感器的比较理想的测量电路。下图是运算放大器式电路原理图。

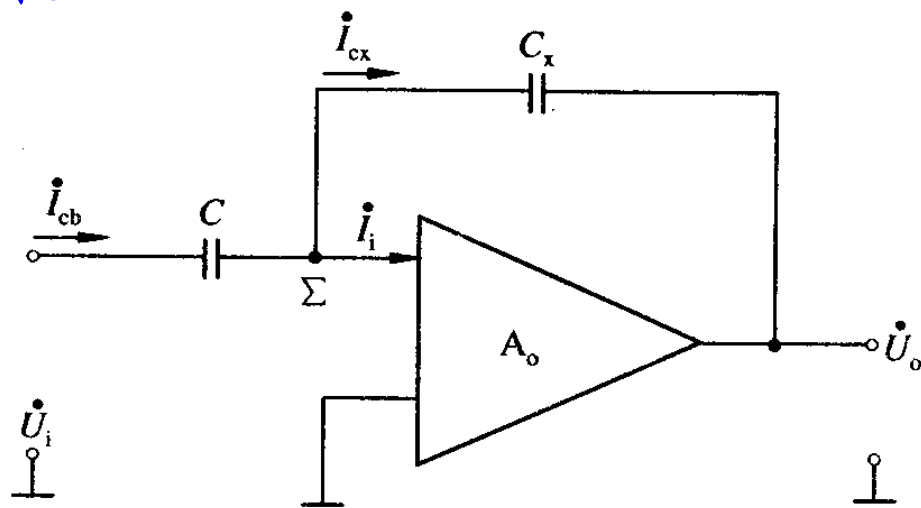


图2-3-13 运算放大器式电路原理图

## 4.4 电容式传感器的测量电路

- ◆ 图中 $C_x$ 为电容式传感器， $\dot{U}_i$ 是交流电源电压， $\dot{U}_o$ 是输出信号电压， $\Sigma$ 是虚地点。由运算放大器工作原理可得：

$$\dot{U}_o = -\frac{C}{C_x} \dot{U}_i$$

- ◆ 如果传感器是一只平板电容，则 $C_x = \epsilon A/d$ ，代入上式有：

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_i \frac{C}{\epsilon A} d$$

- ◆ 上式说明运算放大器的输出电压与极板间距离 $d$ 线性关系。运算放大器电路解决了单个变极板间距离式电容传感器的非线性问题。

## 4.4 电容式传感器的测量电路

### 三 脉冲宽度调制电路

- ◆ 下图为一种差动脉冲宽度调制电路。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 $IC_1$ 产生一个脉冲使触发器翻转，从而使Q端为低电平， $\bar{Q}$ 端为高电平( $U_1$ )。

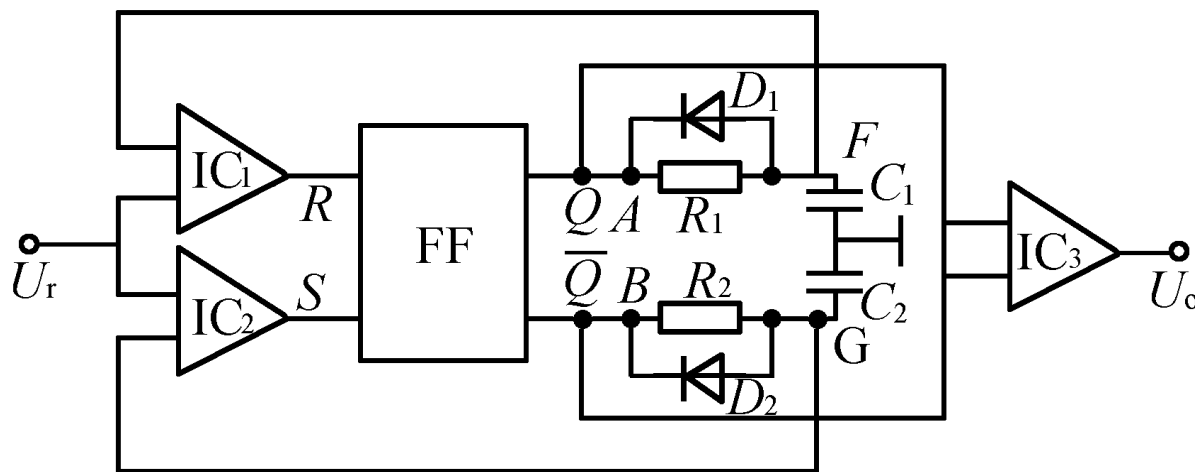


图2-3-15 差动脉冲调宽电路

## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

- ◆ 此时，电容 $C_1$ 通过二极管 $D_1$ 迅速放电至零，而触发器由 $Q$ 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 $IC_2$ 输出一个脉冲使触发器翻转，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 $C_1$ 、 $C_2$ 调制。当 $C_1=C_2$ 时，各点的电压波形如下图(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，各点的电压波形如下图(b)所示， $Q$ 、 $\bar{Q}$ 两端间的平均电压（经一个低通滤波器）为：

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



## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

上式中： $T_1$ 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。

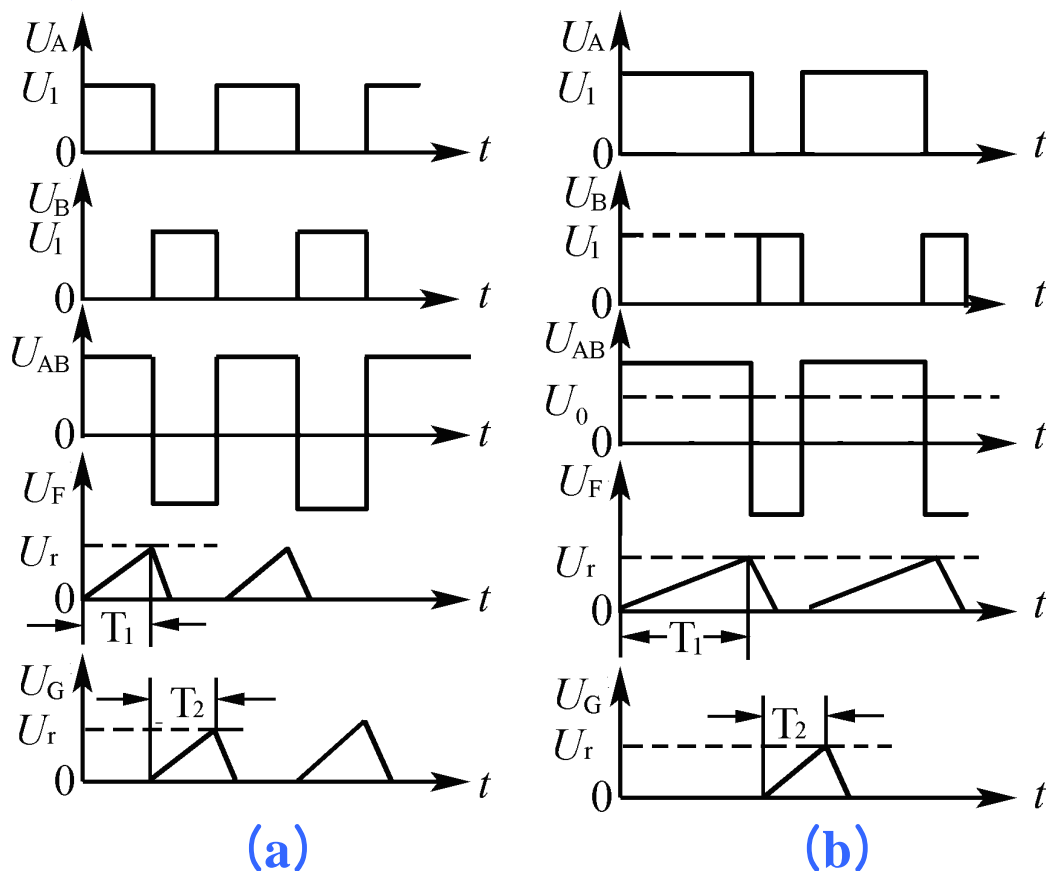


图2-3-16 各点电压波形图

## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

◆根据电路知识可求出

$$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$$

$$T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$$

◆将这两个式子代入上式，可得

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

◆当该电路用于差动式变极距型电容传感器时，由上式有：

$$U_0 = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$$

## 2.3.3 电容式传感器的测量电路

- ◆ 这种电路只采用直流电源，无需振荡器，要求直流电源的电压稳定度较高，但比高稳定度的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：

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

- ◆ 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<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>；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。