




## 第3章

# 电感式传感器及其应用

# 电感式传感器及其应用

- 3.1 自感式传感器
- 3.2 差动变压器式电感式传感器
- 3.3 电涡流式电感传感器
- 3.4 电感式传感器的应用

- 
- **电感传感器 (Inductance sensor)**  
利用电磁感应原理将被测非电量转换成线圈自感量或互感量的变化，进而由测量电路转换为电压或电流的变化量。电感式传感器种类很多，主要有自感式、互感式和电涡流式三种。可用来测量位移、压力、流量、振动等非电量信号

## 主要特点有：

- ◆ 结构简单、工作可靠；
- ◆ 灵敏度高，能分辨 $0.01\ \mu\text{m}$ 的位移变化；
- ◆ 测量精度高、零点稳定、输出功率较大；
- ◆ 可实现信息的远距离传输、记录、显示和控制，在工业自动

控制系统中被广泛采用；

## 主要缺点有：

- ◆ 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。



## 3.1 自感式传感器

3.1.1 传感器线圈的电气参数分析

3.1.2 自感式传感器

3.1.3 自感式传感器的误差



## 3.1.1

### ■ 一. 传感器线圈的电气参数分析

如图，其作为一种简单的自感式传感器，当衔铁随被测量变化而上、下移动时，其与铁心间的气隙发生变化，磁路磁阻随之变化，从而引起线圈电感量的变化，然后通过测量电路转换成与位移成比例的电量，实现了非量到电量的变换。可见，这种传感器实质上是一个具有可变气隙的铁心线圈。

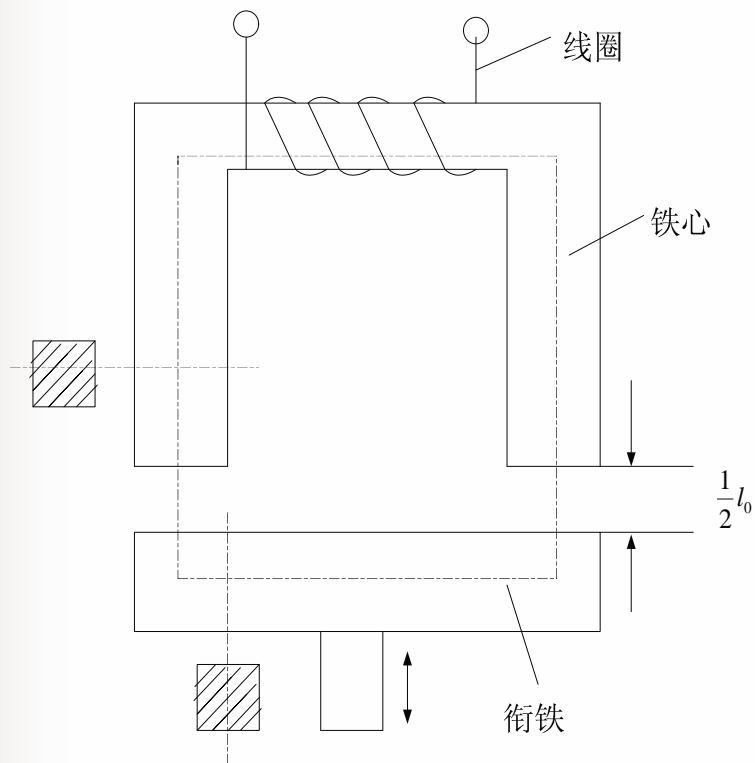


图3.1变气隙式自感传感器

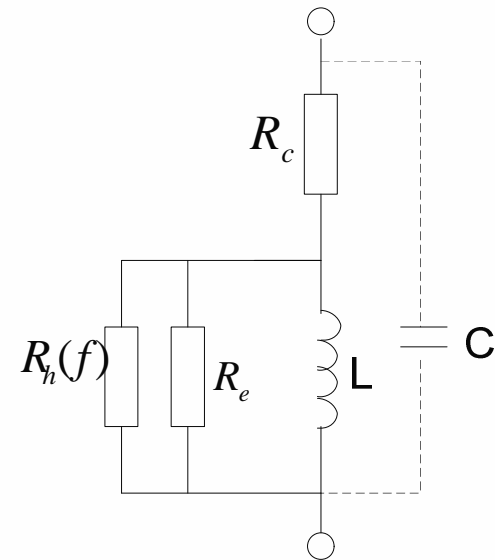


图3.2传感式线圈的等效电路

$L$ —线圈电感； $R_c$ —线圈铜耗电阻；

$R_h(f)$ —铁心涡流损耗电阻； $R_e$ —磁滞损耗电阻；

$C$ —线圈的寄生电容

类似于上述自感式传感器，变磁阻式传感器通常都具有铁心线圈或空心线圈（后者可视作前者特例）。电路参数及其影响：

## ■ 1. 线圈电感L

由磁路基本知识可知，匝数为W的线圈电感为

$$L = W^2 / R_m$$

式中  $R_m$  —— 磁路总磁阻



**当线圈具有闭合磁路时**

$$L = W^2 / R_F$$

$R_F$  — 导磁体总磁阻

**当线圈磁路具有小气隙时**

$$L = W^2 / R_\delta$$

**式中  $R_\delta$  —— 气隙总磁阻**

**等效磁导率**：即将线圈等效成一封闭铁心线圈，其磁路等效磁导率为  $\mu_e$ ，磁通截面积为  $S$ ，磁路长度为  $l$

$$L = W^2 / R_m = W^2 \cdot \mu_0 \mu_e S / l$$

**式中**  $\mu_0$  ——真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$

- **2. 铜损电阻**      取决于导线材料及线圈的几何尺寸
- **3. 涡流损耗电阻**      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耗。
- **4. 磁滞损耗电阻**      铁磁物质在交变磁化时，磁分子来回翻转而要克服阻力，类似摩擦生热的能量损耗。

## ■ 5. 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。先不考虑寄生电容C，并将图3.2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**

如图3.3所示。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

$$R_e' + jL'w = \frac{R_e jLw}{R_e + jLw}$$

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

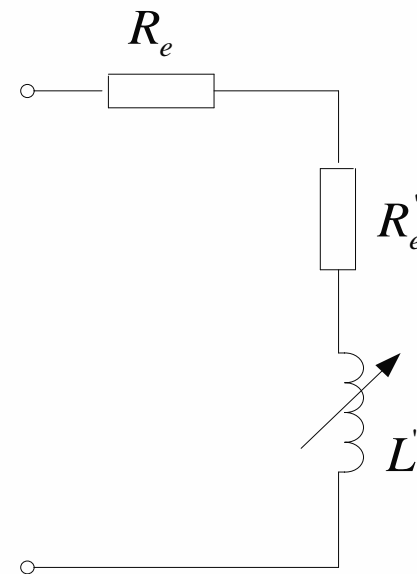


图3.3 线圈等效电路的变换形式

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

式(3-5)表明, 铁损的串联等效电阻 $R_e'$ 与 $L$ 有关。因此, 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变化。要减少这种附加电阻变化的影响, 比值  $R_e / \omega L$  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。可在设计传感器时应尽可能减少铁损。当考虑实际存在并联寄生电容时, 阻抗 为  $Z_s$



$$Z_5 = \frac{(R' + jL'\omega) / jC\omega}{R' + jL'\omega + 1 / jC\omega} =$$

$$\frac{R'}{(1 - LC\omega^2)^2 + (L'\omega^2 / Q)^2} + j \frac{L'\omega [1 - LC\omega^2 - L'C\omega^2 / Q^2]}{(1 - LC\omega^2)^2 + (L'C\omega^2 / Q^2)}$$

■ 式中，总的损耗电阻

$$R' = R_c + R_e$$

品质因数

$$Q = L'\omega / R'$$

- 当 $Q \gg 1$ 时,  $1/Q^2$  可以忽略, 式(3-7)可简化为


$$Z_5 = \frac{R'}{(1-L'C\omega^2)^2} + j \frac{L'\omega[(1-L'C\omega^2) - L'C\omega^2/Q^2]}{(1-L'C\omega^2)^2 + (L'C\omega^2/Q)^2}$$

- 有效值  $Q_s$  为

$$Q_5 = L_5\omega / R_5 = (1 - L'C\omega^2)Q$$

- 电感的相对变化

$$\frac{dL_5}{L_5} = \frac{1}{1 - L'C\omega^2} \bullet \frac{dl'}{L'}$$



**式(3-8)、(3-9)、(3-10)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Q值下降并引起电感的相对变化增加，即敏度提高。**

## ■ 二. 自感式传感器

### ■ 1. 工作原理与输出特性

**自感式传感器实质上是一个带气隙的铁心线圈。按磁路几何参数变化:自感式传感器有变气隙式、变面积式与螺管式三种;按磁路的结构型:Π型、E型或罐型等等;按组成方式:单一式与差动式两种。**

#### ■ a) 变气隙式自感传感器

**变气隙式自感传感器的结构原理见图3.1。气隙磁场均匀,忽略磁路铁损,传感器的磁路总磁阻为:**

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 S}$$

式中,  $l_1, l_2$  ——铁心和衔铁的磁路长度 (m);  
 $S_1, S_2$  ——铁心和衔铁的截面积 ( $m^2$ );  
 $\mu_1, \mu_2$  ——铁心和衔铁的磁导率 (H/m);  
 $S, l_\delta$  ——气隙磁通截面积 ( $m^2$ ) 和气隙总长 (m)。

将式 (3-11) 代入式 (3-1), 可得

$$L = W^2 / \left( \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 S} \right)$$



- 由式(3-12)可知，变气隙式传感器的工作原理：  
当铁心、衔铁的材料和结构与线圈匝数确定后，若保持S不变，则L即为  $l_\delta$  的单值函数，利用等效磁导率  $\mu_e$  的概念，由式(3-4)可得

$$R_m = l / (\mu_0 \mu_e S)$$

- 同时，由式(3-11)

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 S} \left( \frac{l - l_\delta}{\mu_\gamma} + l_\delta \right) = \frac{1}{\mu_0 S} \frac{l + l_\delta (\mu_\gamma - 1)}{\mu_\gamma}$$

式中  $\mu$  ——铁心和衔铁的相对磁导率，通常  $\mu \gg 1$ 。

■ 所以

$$\mu_e = \frac{\mu_\gamma}{1 + \mu_\gamma l_\delta / l} = \frac{1}{l_\delta + l / \mu_\gamma}$$

■ 代入式(3-4)可得带气隙铁心线圈的电感为

$$L = \frac{W^2 \mu_0 \mu_e S}{l} = K \frac{1}{l_\delta + l / \mu_\gamma}$$

式中， $K = \mu_0 W^2 S$  为一常数。

■ 对式(3-16)进行微分可得传感器的灵敏度为

$$K_\delta = \frac{dL}{dl_\delta} = -L \frac{1}{l_\delta + l / \mu_\gamma}$$

- 由上式可知，变气隙式传感器的输出特性是非线性的，式中负号表示灵敏度随气隙增加而减小，欲增大灵敏度，应减小  $l_\delta$ ，但受到工艺和结构的限制。为保证一定的测量范围与线性度，对变气隙式传感器，常取  $\delta = l_\delta / 2 = 0.1 \sim 0.5 \text{ m}$ ， $\Delta \delta = (1/5 \sim 1/10) \delta$ 。

## b) 变面积式自感传感器

如图，传感器的气隙长度保持不变，令磁通截面积随被测非电量而变（衔铁水平方向移动），即构成变面积式自感传感器。由式(3-16)

$$L = \frac{W^2 \mu_0}{l_\delta + l / \mu_\gamma} \cdot S = K' S$$

式中： $K' = \frac{W^2 \mu_0}{l_\delta + l / \mu_\gamma}$  为一常数。

- 对式(3-18)微分得灵敏度为

$$K_s = \frac{dL}{dS} = K'$$

- 可见，变面积式传感器在忽略气隙磁通边缘效应的条件下，输出特性呈线性，因此可望得到较大的线性围。与变气隙式相比较，其灵敏度较低。欲提高灵敏度，需减小  $l_0$ ，但同样受到工艺和结构的限制。 $l_0$  值的选取与变气隙式相同。



### c) 螺管式自感传感器

螺管式自感传感器由平均半径为 $r$ 的螺管线圈、衔铁和磁性套筒等组成。随着衔铁插入深度的不同将引起线圈泄漏路径中磁阻变化，从而使线圈的电感发生变化。

## d) 差动式自感传感器

**绝大多数自感式传感器都运用与电阻差动式类似的技术来改善性能：由两单一式结构对称组合，构成差动式自感传感器。采用差动式结构，除了可以改善非线性、提高灵敏度外，对电源电压与频率的波动及温度变化等外界影响也有补偿作用，从而提高了传感器的稳定性。图3.5表示传感器非线性改善的情况。**

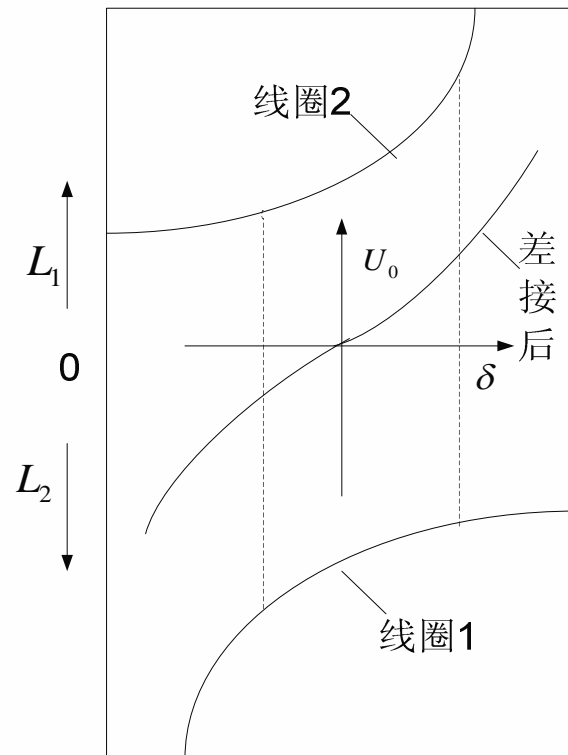


图3.5差动式自感传感器的输出特性

## ■ 2. 测量电路

### 1) 电桥电路

自感式传感器常用的交流电桥有以下几种。

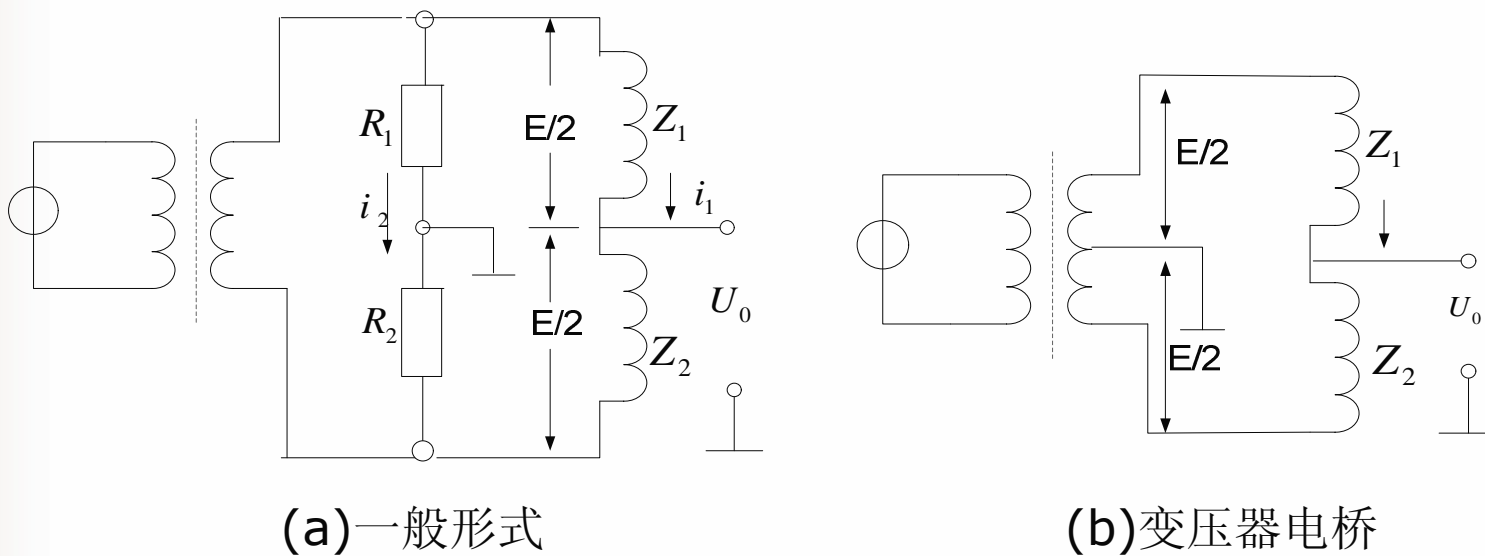


图3.6输出端对称电桥

- ① 输出端对称电桥 图3.6(a)为输出端对称电桥的一般形式。图中Z1、Z2为传感器两线圈阻抗，R1、R2为外接电阻，设工作时电源电势为E，于是

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta r + j\omega\Delta L}{r_0 + j\omega L_0} \approx \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\omega\Delta L}{r_0 + j\omega L_0} \cdot E$$

输出电压幅值和阻抗分别为

$$U_0 = \frac{\sqrt{\omega^2 \Delta L^2 + \Delta r^2}}{2\sqrt{(R+r_0)^2 + (\omega L_0)^2}} \cdot E \approx \frac{\omega\Delta L}{2\sqrt{r_0^2 + (\omega L_0)^2}} \cdot E$$



$$Z = \sqrt{(R + r_0)^2 + (\omega L_0)^2} / 2$$

- 式(3-20)经变换和整理后可写成

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}}{2} \left[ \frac{1}{1+Q^2} \cdot \frac{\Delta r}{r_0} + \frac{Q^2}{1+Q^2} \cdot \frac{\Delta L}{L} + j \frac{Q}{1+Q^2} \left( \frac{\Delta L}{L_0} - \frac{\Delta r}{r_0} \right) \right]$$

式中  $Q$ ——电感线圈的品质因数  $Q = L_0 \omega / r_0$  ,

由式(3-23)可见, 电桥输出电压包含着与电源同相和正交的两个分量; 而在实际使用时, 希望只存在同相分量。通常由于  $\Delta L_0 / L_0 \neq \Delta r / r_0$  , 因此要求线圈有较高的 $Q$ 值

■ 这时

$$U_0 = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (3-24)$$

- 图(b)是图(a)的变型，称为变压器电桥。它以变压器两个次级作为电桥平衡臂。显然，其输出特性同(a)。于是输出阻抗式(3-22)变为

$$Z = \sqrt{r_0^2 + L_0^2 \omega^2} / 2 \quad (3-25)$$

- (b)与图(a)相比，使用元件少，输出阻抗小，电桥开路时电路呈线性，因此应用较广。

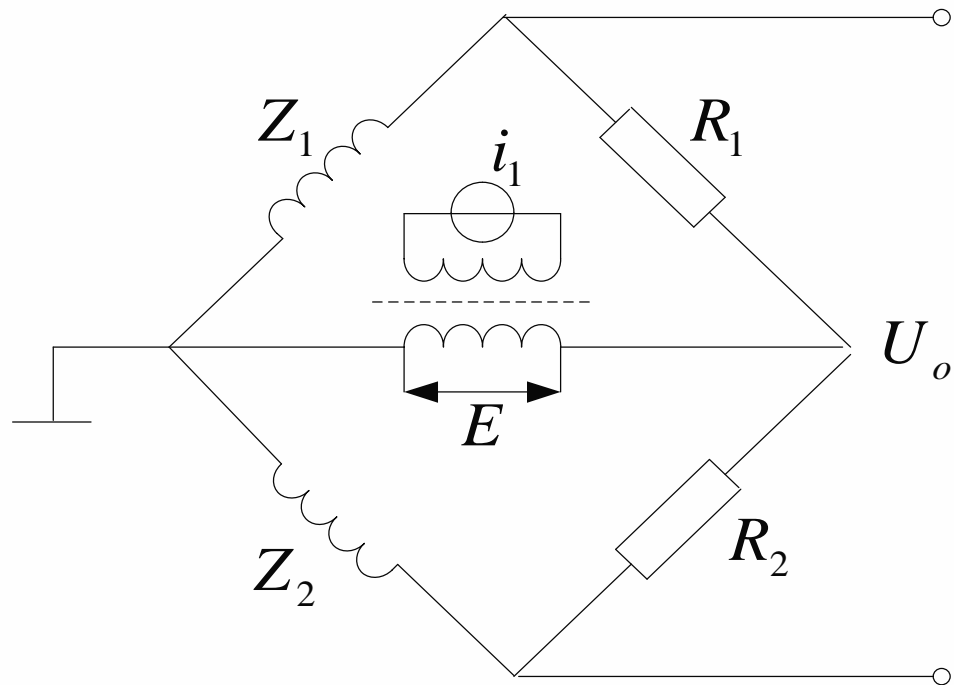


图3.7 电源端对称电桥

## ② 电源端对称电桥

如图3.7所示，电桥输出电压为

$$\dot{U}_o = \dot{E} R \left( \frac{1}{Z_1 + Z} - \frac{1}{Z_2 + Z} \right) = \dot{E} R \frac{Z_2 - Z_1}{(Z_1 + Z)(Z_2 + Z)}$$

设工作时  $Z_1 = Z - \Delta Z, Z_2 = Z + \Delta Z$ ，则有

$$\dot{U}_o = \dot{E} R \frac{2\Delta Z}{(Z + R)^2 - \Delta Z^2} \approx \dot{E} R \frac{2(\Delta r + \omega j\Delta L)}{(R + r_0 + \omega lL_0)^2}$$

■ 输出电压幅值和阻抗分别为

$$\dot{U}_0 = 2ER \frac{\sqrt{\Delta r^2 + (\omega \Delta L)^2}}{(R + r_0)^2 + (\omega j L_0)^2} \approx \frac{2R\omega \Delta L}{(r_0 + R)^2 + (\omega L_0)^2} \cdot E \quad (3-27)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{2R\sqrt{r_0^2 + (\omega L_0)^2}}{\sqrt{(R + r_0)^2 + (\omega L_0)^2}} \quad (3-28)$$

- 这种电桥由于变压器次级接地，可避免静电感应干扰，但由于开路时电桥本身存在非线性，故只适用于示值范围较小的测量。



## 2) 谐振电路

谐振电路如图3.8(a)所示。图中 $Z$ 为传感器线圈， $E$ 为激励电源。设图(b)中曲线1为图(a)回路的谐振曲线。若激励源的频率为 $f$ ，则可确定其工作在A点。当传感器圈电感量变化时，谐振曲线将左右移动，工作点就在一频率的纵坐标直线上移动(例如移至B点)，于是输出电压的幅值就发生相应变化。

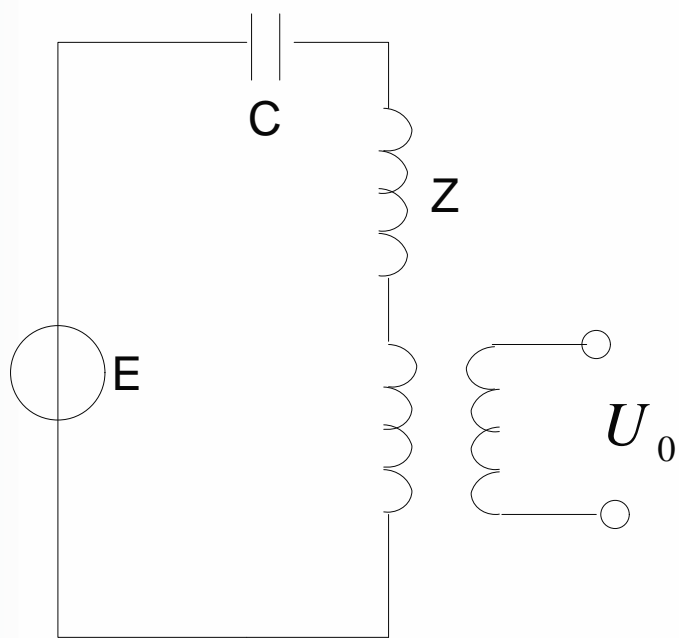
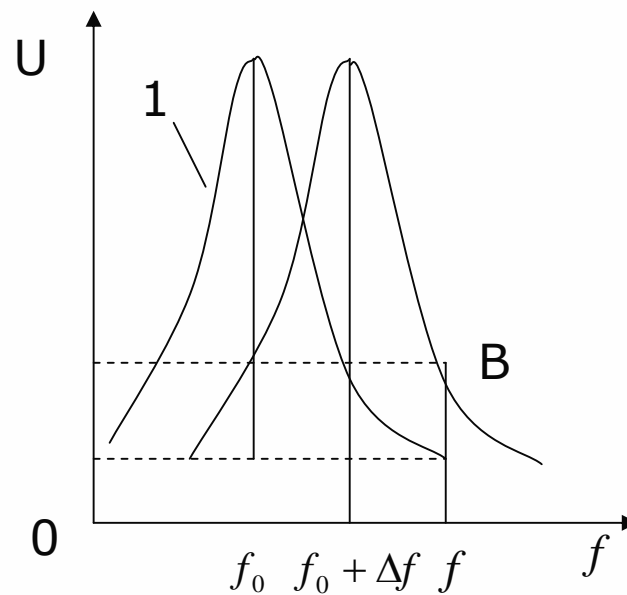


图3.8(a)谐振电路



(b)谐振曲线

### 3) 恒流源电路

这种电路与大位移(螺管式)自感传感器配合, 传感器线圈用恒流源激励,  $\mu_1$  是衔铁在螺管线圈内移动时线圈两端的电压,  $\mu_2$  是与反相、幅值恒定的电压,  $\mu_0$  为电路输出电压。于是,  $\mu_0 = \mu_1 - \mu_2$ 。  $\mu_2$  的作用是抵消电压的非线性部分, 使输出电压呈线性。当衔铁刚进入传感器线圈时, 其电压灵敏度  $dU / dl_a$  较低, 线性也较差。当  $l_a > l'$  后, 灵敏度提高, 线性改善, 进入工作区域。

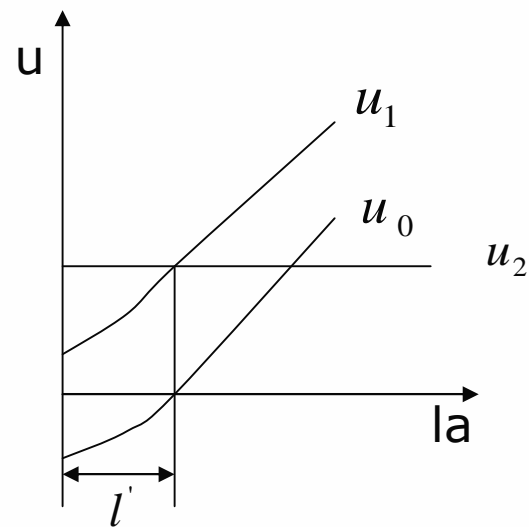
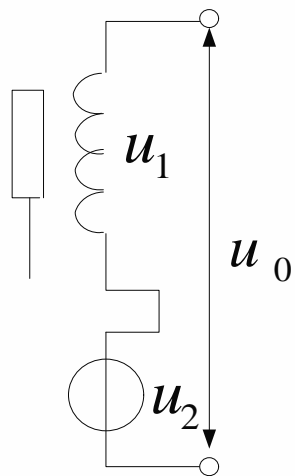


图3.9 大位移自感式传感器工组原理

(a) 电路原理图

(b) 输出特性

#### 4) 调频电路

**当传感器线圈电感 $L$ 发生变化时，调频振荡器的输出频率相应变化。传感器的结构见图3.10。**

**由输出为频率信号，这种电路的抗干扰能力很强，电缆长度可达1km，特别适合于野外现场使用。**

#### 5) 相敏检波电路

**相敏检波电路是常用的判别电路。**



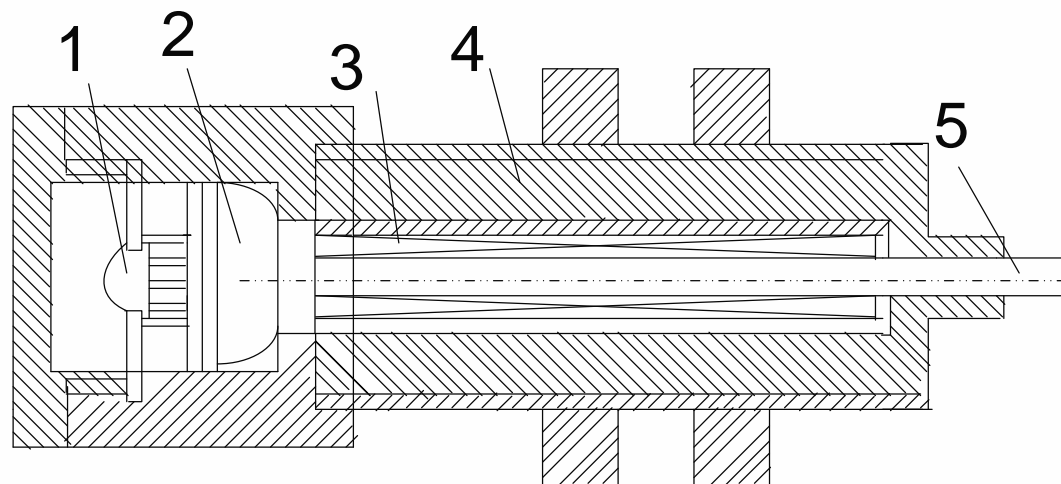


图3.10电感调频式位移传感器结构图

**1**—谐振电容；**2**—调频振荡器；**3**—电感线圈；**4**—磁性套筒；**5**—刀杆（衔铁）

## ■ 三. 自感式传感器的误差

### ■ 1. 输出特性的非线性

**测量电路也往往存在非线性。为了减小非线性，常用的方法是采用差动结构和限制测量范围。对于螺管式自感传感器，增加线圈的长度有利于扩大线性范围或提高线性度。在工艺上应注意导磁体和线圈骨架的加工精度、导磁体材料与线圈绕制的均匀性，对于差动式则应保证其对称性，合理选择衔铁长度和线圈匝数。另一种有效的方法是采用阶梯形线圈，如图3.12所示。**

## ■ 2. 零位误差

**差动自感式传感器当衔铁位于中间位置时，电桥输出理论上应为零，但实际上总存在零位不平衡电压输出（零位电压），造成零位误差，如图3.13(a)所示。**

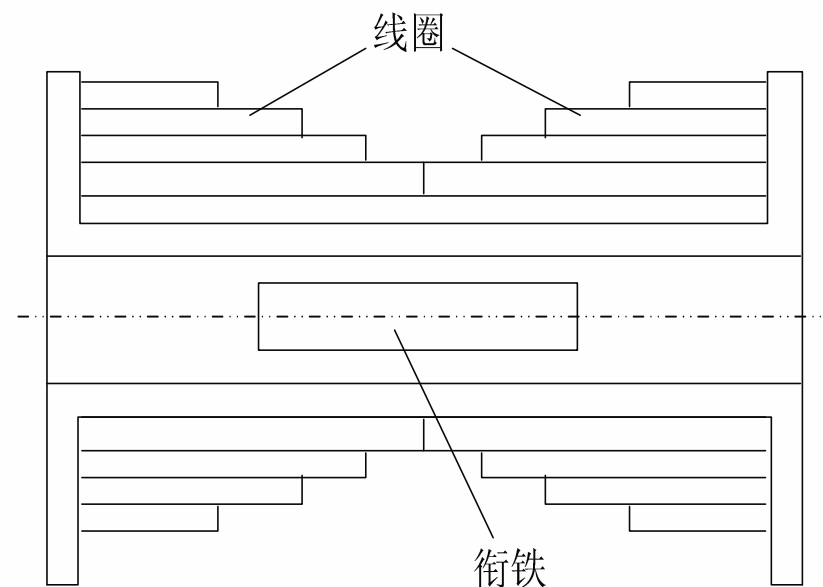

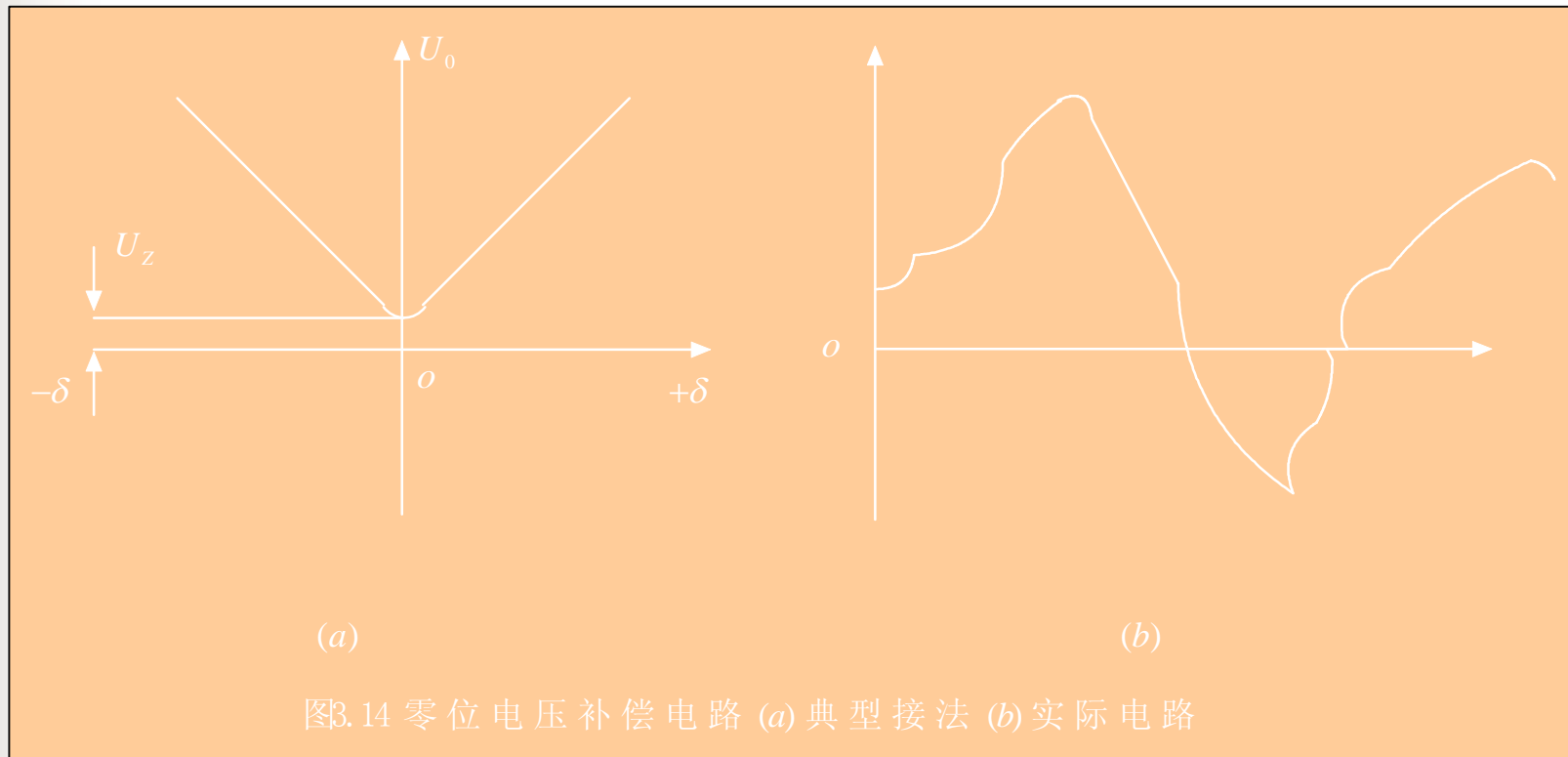


图3.12阶梯形线圈

- 
- **零位电压的组成十分复杂，如图3.13(b)所示。它包含有基波和高次谐波。产生基波分量的主要原因是传感器两线圈的电气参数和几何尺寸的不对称，以及构成电桥另外两臂的电气参数不一致。通过调整衔铁的位置（偏离机械零位）来消除，通常注重的是基波正交分量。造成高次谐波分量的主要原因是磁性材料磁化曲线的非线性，同时由于磁滞损耗和两线圈磁路的不对称，此外，激励信号中包含的高次谐波及外界电磁场的干扰，也会产生高次谐波。**





一种常用的方法是采用补偿电路，其原理为：

- (1) **串联电阻消除基波零位电压；**
- (2) **并联电阻消除高次谐波零位电压；**
- (3) **加并联电容消除基波正交分量或高次谐波分量。**

图3.14(a)示出了上述原理的典型接法。图中R用来减小基波正交分量，作用是使线圈的有效电阻值趋于相等，大小约为 $0.1\sim 0.5\ \Omega$ ，可用康铜丝绕制。

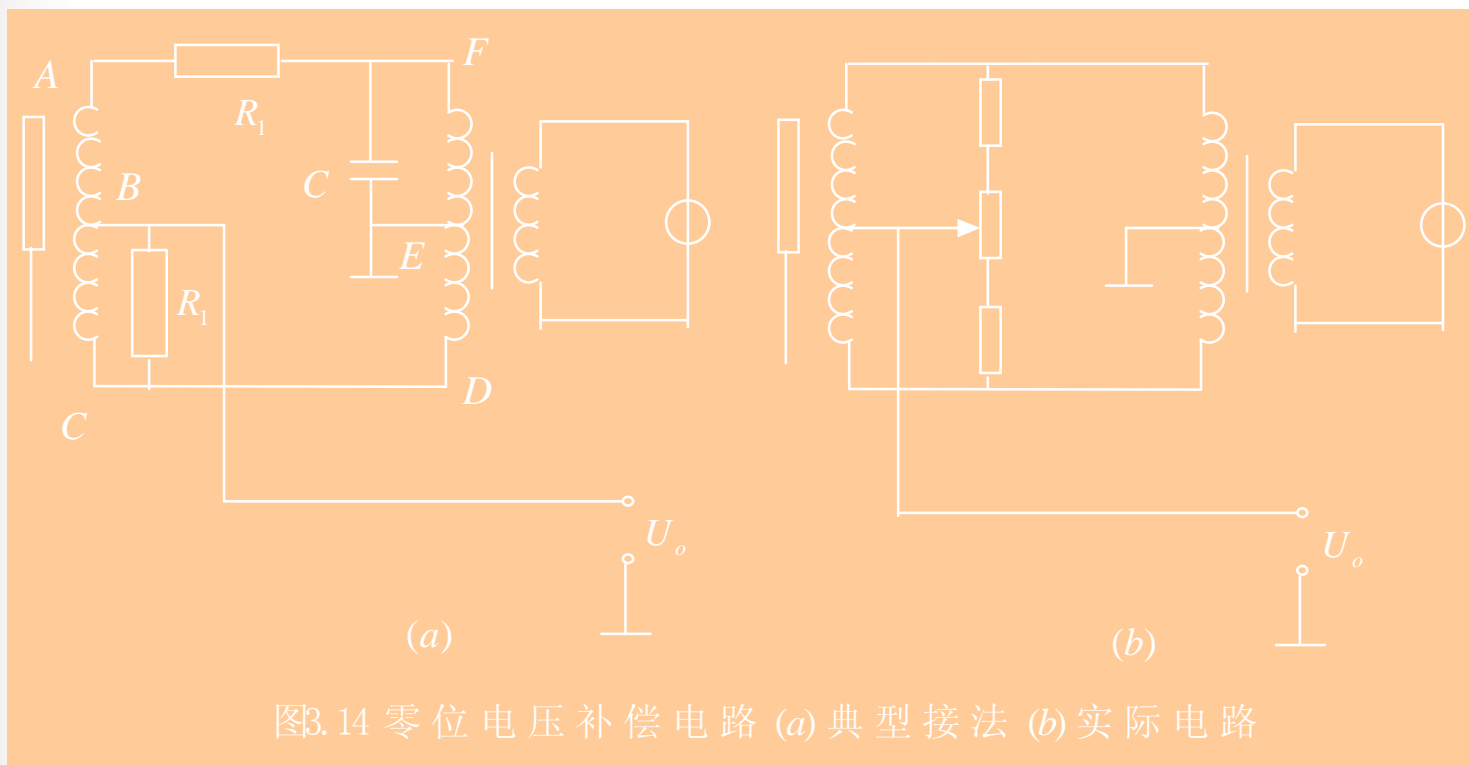


图3.14 零位电压补偿电路 (a) 典型接法 (b) 实际电路



图(b)示出了一种传感器的实际补偿电路。

另一种有效的方法是采用外接测量电路来减小零位电压。如前述的相敏检波电路，它能有效地消除基波正交分量与偶次谐波分量，减小奇次谐波分量，使传感器零位电压减至极小。

### 3. 温度误差

环境温度的变化会引起自感传感器的零点温度漂移、灵敏度温度漂移以及线性度和相位的变化，造成温度误差。



■ 环境温度对自感传感器的影响主要通过:

- (1) 材料的线膨胀系数引起零件尺寸的变化
- (2) 材料的电阻率温度系数引起线圈铜阻的变化
- (3) 磁性材料磁导率温度系数、绕组绝缘材料的质温度系数和线圈几何尺寸变化引起线圈电感量及寄生电容的改变等造成。

## ■ 4. 激励电源的影响

**大多数自感式传感器采用交流电桥作测量电路，电源电压的波动将直接导致输出信号的波动。采用差动工作方式，其影响将能得到补偿。但需注意，频率的高低应与铁心材料相匹配。**

**对于谐振式与恒流源式测量电路，电源频率与电流的稳定度将直接引起测量误差。对于调频式测量电路，则应保证直流电源的稳定度**



## § 3.2 差动变压器式电感式传感器

- **差动变压式电传感器器是互感式传感器，是一种线圈互感随衔铁位移变化的变磁阻式传感器。其原理类似于变压器。不同的是：后者为闭合磁路，前者为开磁路；后者初、次级间的互感为常数，前者初、次级间的互感随衔铁移动而变，且两个次级绕组按差动方式工作，因此又称为差动变压器。它与自感式传感器统称为电感式传感器。**

## ■ 1. 工作原理与类型

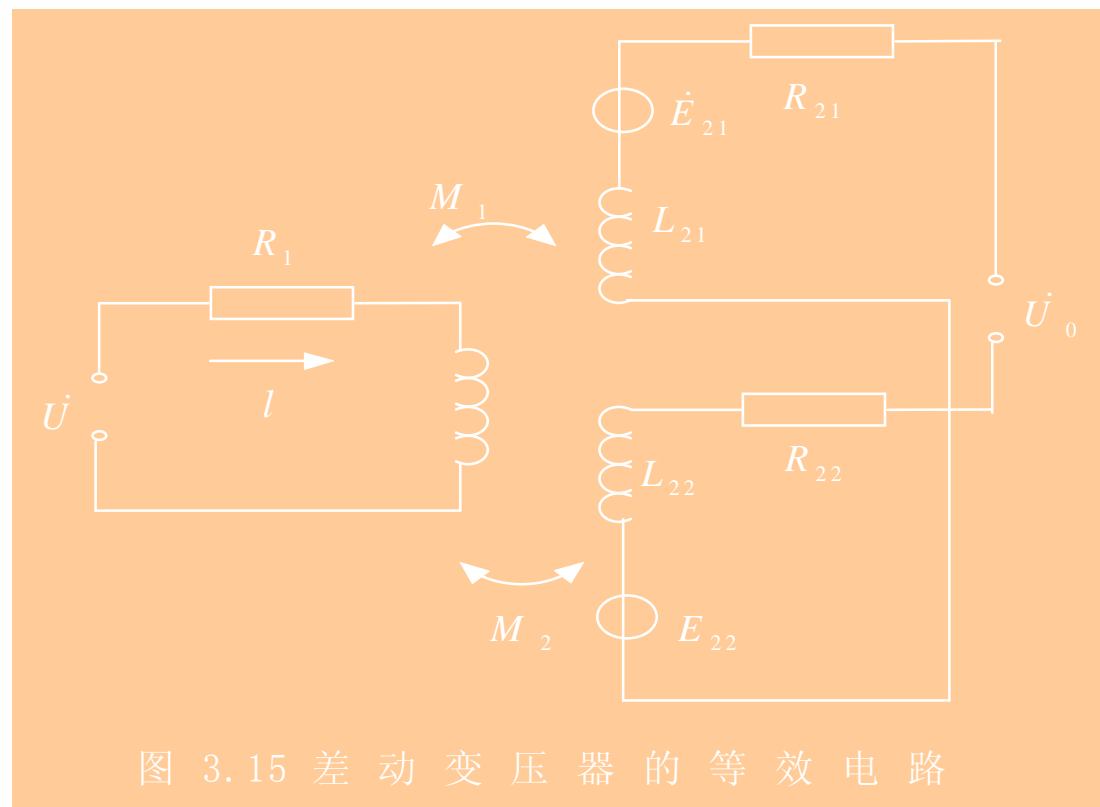


图 3.15 差动变压器的等效电路

- 传感器开路输出电压为两次级线圈感应电势之差：

$$\dot{U}_0 = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = -j\omega(M_1 - M_2)\dot{i}$$

- 在负载开路情况下，输出电压及其有效值分别为：

$$\dot{U}_0 = -j\omega(M_1 - M_2)\dot{i} = -j\omega \frac{2\dot{U}}{R_1 + j\omega L_1} \Delta M$$

- 式中  $E_{s0}$  ——衔铁在中间位置时，单个次级线圈的感应电势输出阻抗

$$Z=R_{21}+R_{22}+j\omega L_{21}+j\omega L_{22}$$

- 差动变压器也有变气隙式、变面积式与螺管式三种类型。图3.16所示为变气隙式，灵敏度较高，但测量范围小，一般用于测量几  $\mu\text{m}$  到几百  $\mu\text{m}$  的位移。由式(3-29)可知，差动变压器的输出特性与初级线圈对两个次级线圈的互感之差有关。II型差动变压器的输出特性为：

$$\dot{U}_0 = -\dot{U} \frac{W_1}{W_2} \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

- 图3.16 变气隙式 式中  $\delta$  为初始气隙； $W_1$  为初级线圈匝数； $W_2$  为次级线圈匝数； $\Delta \delta$  为衔铁上移量  $U_0$  上式表明，输出电压与衔铁位移  $\Delta \delta$  成比例，输出特性曲线如图3.17所示。式中负号表明  $\Delta \delta$  向上为正时，输出电压与电源电压  $U$  反相； $\Delta \delta$  向下为负时，两者同相。



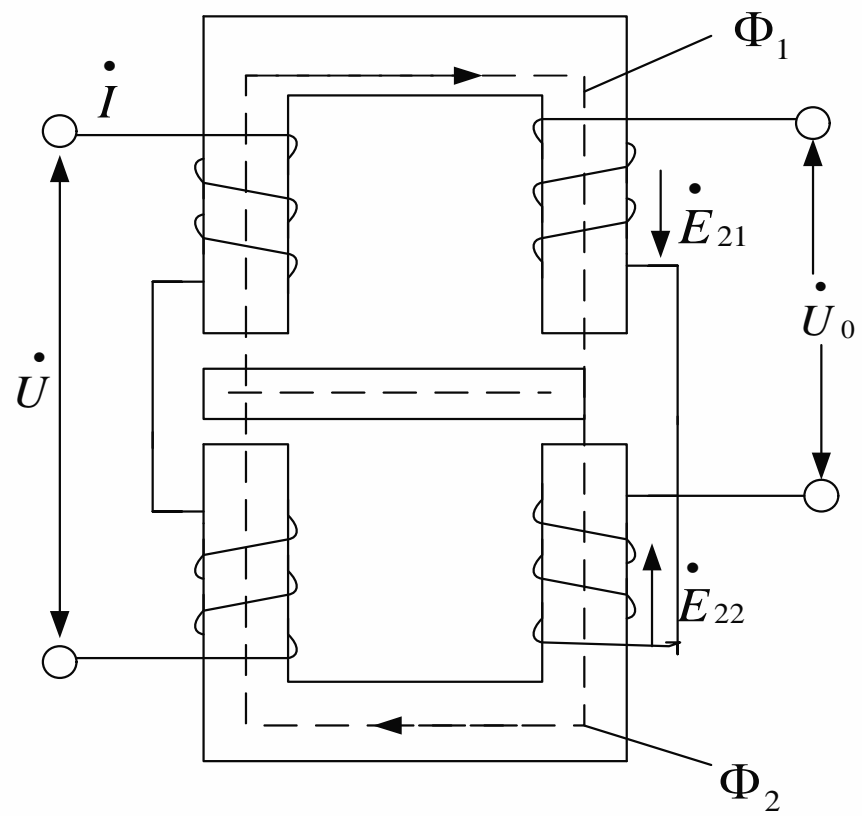


图3.16变气隙式

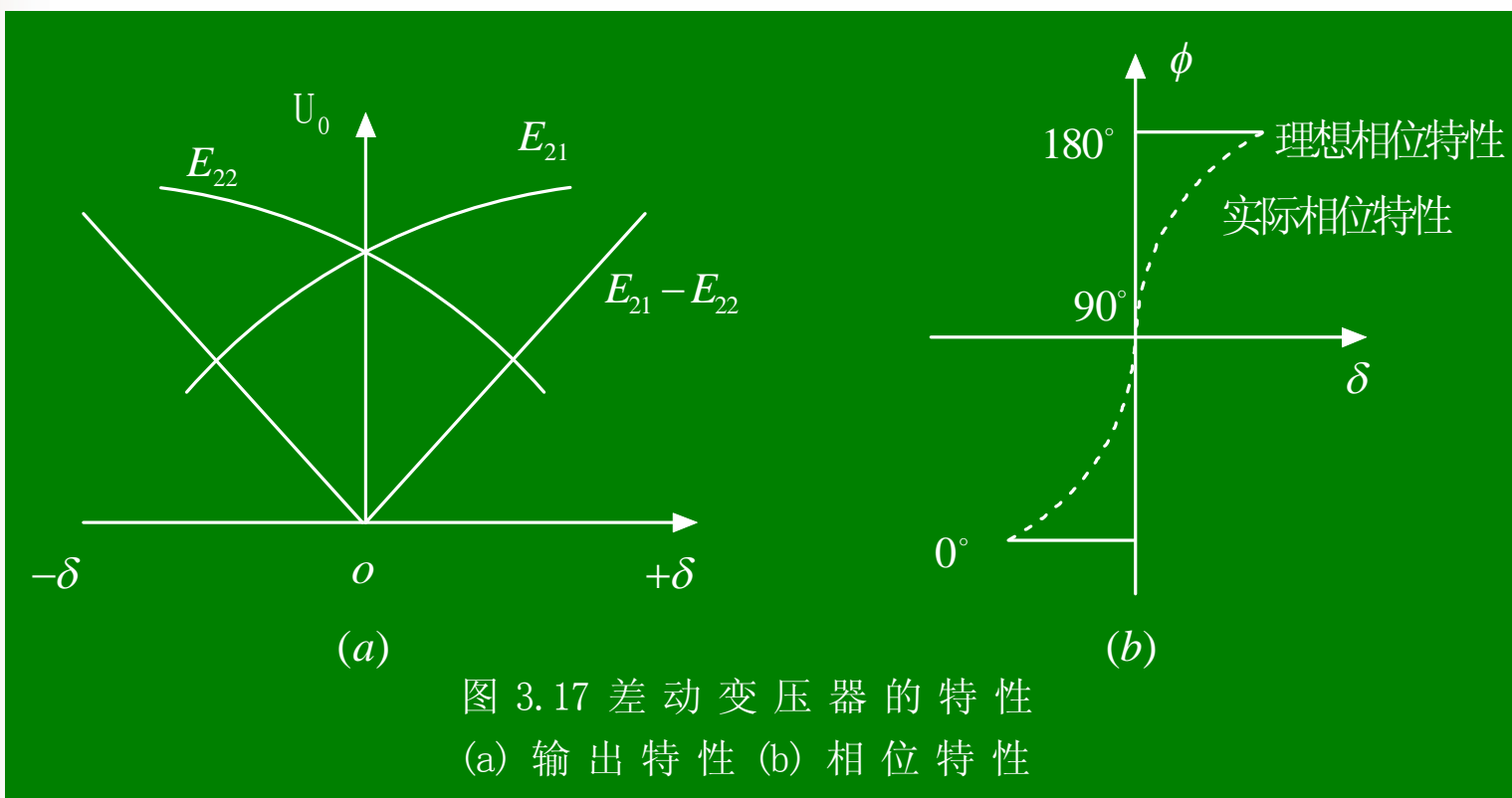


图 3.17 差动变压器的特性  
(a) 输出特性 (b) 相位特性

## § 3.2

- 由式(3-33)可得Π形差动变压器的灵敏度表达式

$$K = \frac{U_0}{\Delta\delta} = \frac{U}{\delta_0} \frac{W_2}{W_1}$$

- 由式(3-30)可知，当激励频率过低时， $\omega L_1 \ll R_1$ ，式(3-30)变成

$$\dot{U}_0 = -j\omega \frac{2\Delta M}{R_1} \dot{U}$$

- 这时，差动变压器的灵敏度随频率 $\omega$ 而增加。当 $\omega$ 增加使  $\omega L_1 \ll R_1$ ，式(3-30)变为

$$\dot{U}_0 = -\frac{2\Delta M}{L_1} \dot{U}$$

此时，灵敏度与频率无关，为一常数。当 $\omega$ 继续增加超过某一数值时（该值视铁心材料而异），由于导线趋肤效应和铁损等影响而使灵敏度下降（见图3.18）。通常应按所用铁心材料，选取合适的较高激励频率，以保持灵敏度不变。这样，既可放宽对激励源频率的稳定度要求，又可在一定激励电压条件下减少磁通或匝数，从而减小尺寸。

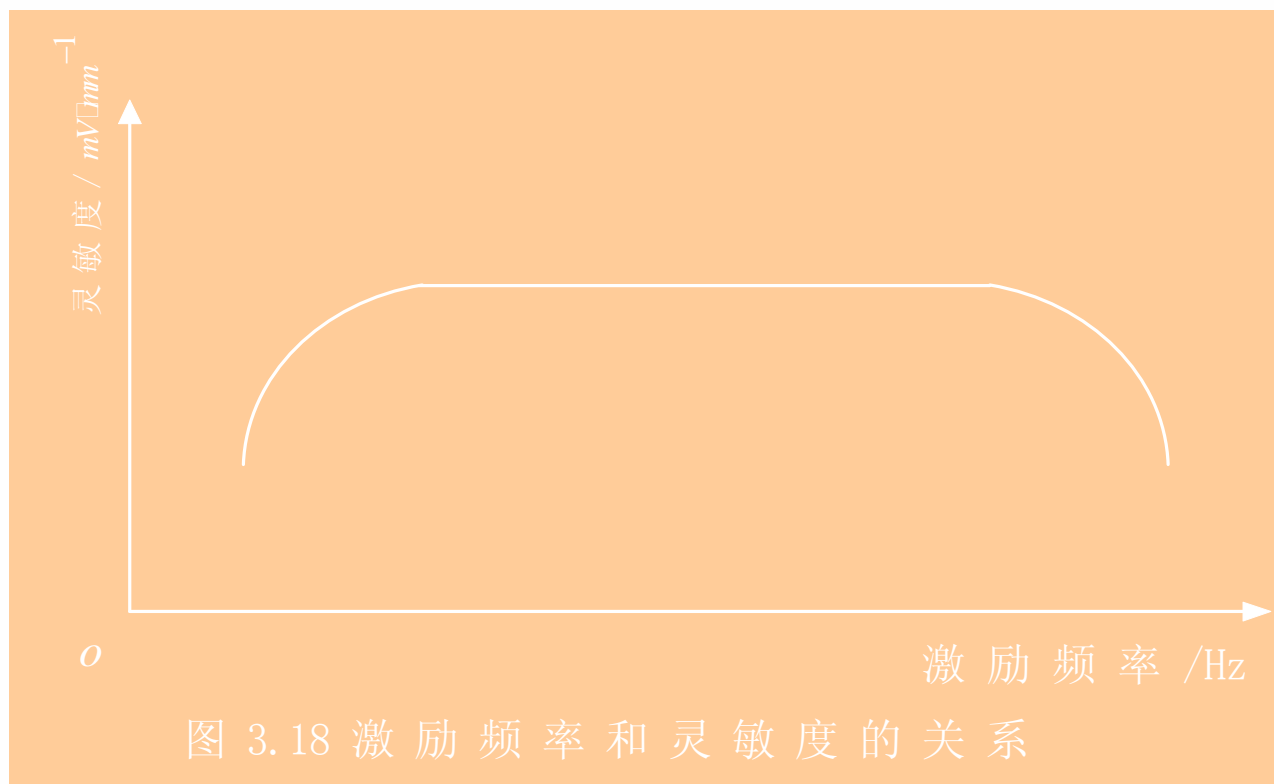


图 3.18 激励频率和灵敏度的关系



- **变面积式（如微动同步器）**：差动式变压器也可做成改变导磁面积的变面积式，但用于测量直线的极少，常用来量角位移，如图3.19。电路图如3.20。这样输出电压

$$\dot{U}_0 = e_{22} + e_{24} - (e_{21} + e_{23}) = k\alpha$$

—微动同步器的灵敏度，

$k$  —转子的转角

$\alpha$

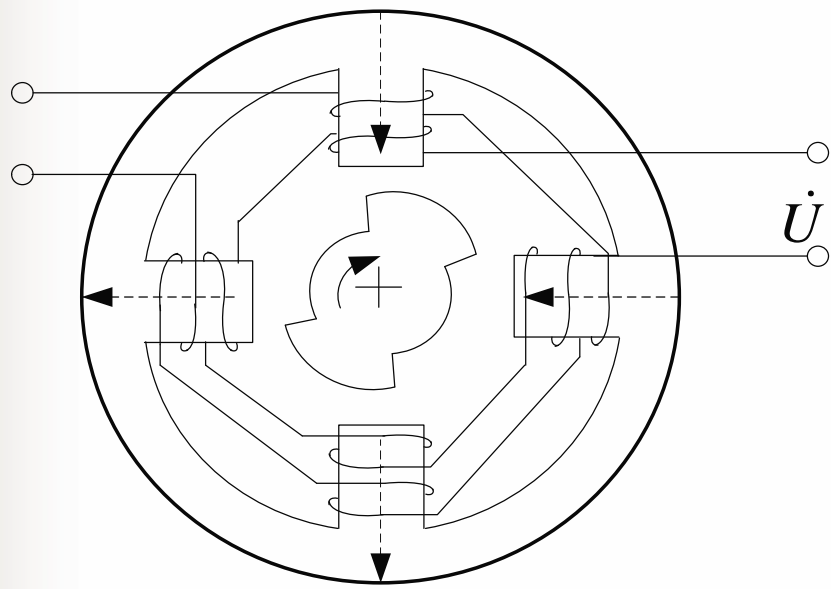


图3.19 微动同步器

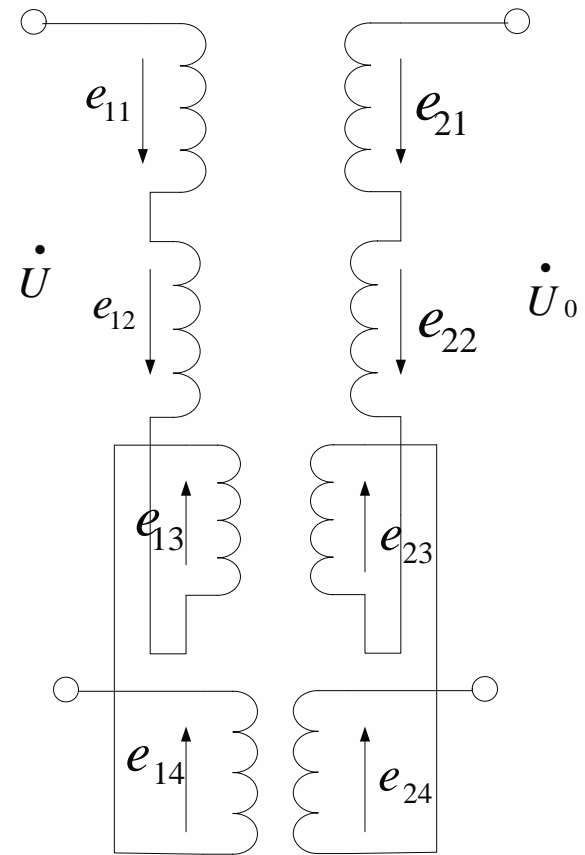


图3.20内电路图

## ■ 2. 测量电路

一般采用反串电路和桥路两种。反串电路是直接  
把两个二次线圈反向串接（如图3.21）。这  
种情况下空载输出电压等于二次侧线圈感应电  
动势之差，即：

$$\dot{U} = E_{21} - E_{22}$$

- 桥路如图3.22所示：其中  $R_1, R_2$  是桥臂电阻， $R_w$  是供调零用的电位器。设  $R_1 = R_2$ ，则输出电压

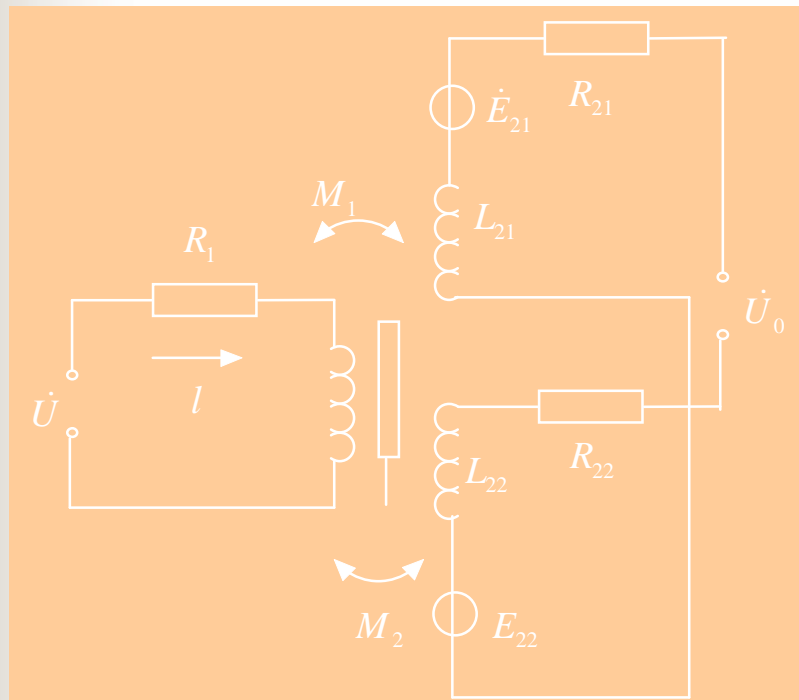


图 3.21 二次线圈反串电路

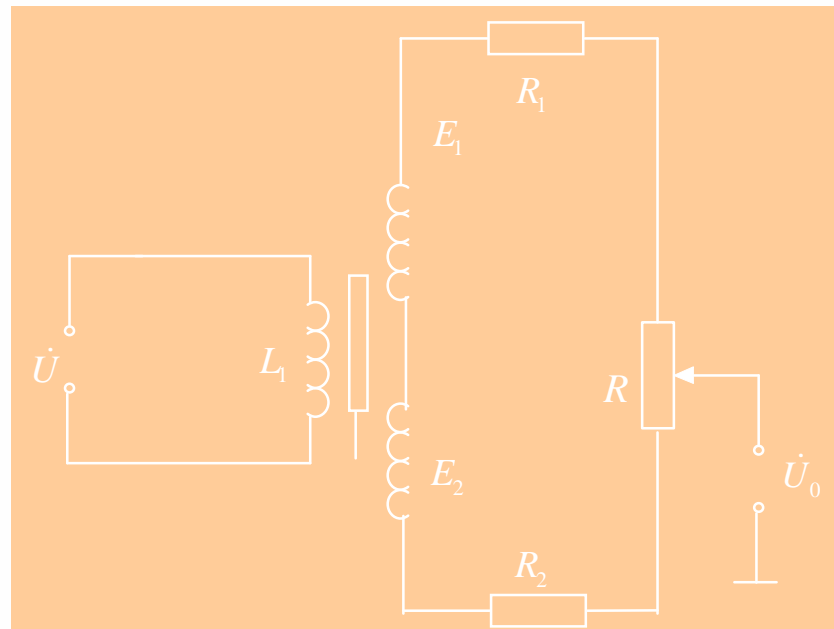


图 3.22 差动变压器使用的桥路

- 可见桥路的灵敏度为前面的0.5，但其优点是利用  $R_w$  进行调零，不再需要另外配置调零电路。

### 3. 互感式传感器的误差

自感式传感器的误差分析均适用于差动变压器。所不同的是差动变压器多了一个初级线圈。当温度变化时，初级线圈的参数尤其铜阻的变化影响较大。设温度变化  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )，初级线圈铜阻  $R$  增加  $\Delta R$ ，铜线电阻温度系数为  $+0.4\% / ^{\circ}\text{C}$ ，由此引起的次级输出电压的相对变化为

$$\frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{\Delta R_1 / R_1}{1 + \omega L_1 / R_1} = -\frac{0.004}{1 + \omega L_1 / R_1} \Delta t$$



- 由上式可知，低频激励时线圈的品质因数 ( $Q = \omega / R$ ) 低，温度误差大。为此应提高初级线圈的品质因数。

为减小温度误差，还可采取稳定激励电流的方法，如图3.23所示。

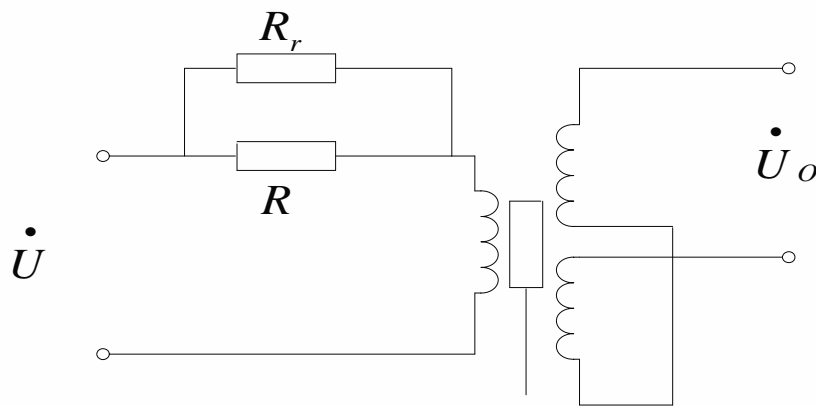


图3.23 温度补偿电路

## ■4. 电感式传感器的应用

■电感式传感器主要用于测量位移与尺寸，也可测量能转换成位移变化的其他参数，如力、张力、压力、压差、振动、应变、转矩、流量、比重等。

(1)位移与尺寸测量

(2)压力测量

(3)力和力矩测量

(4)振动测量

## § 3.3 电涡流式电感传感器

- **电涡流式传感器是利用电涡流效应进行工作的。由于结构简单、灵敏度高、频响范围宽、不受油污等介质的影响，并能进行非接触测量，适用范围广。用来测量位移动、厚度、转速、温度、硬度等参数，以及用于无损探伤领域。通常把电涡流传感器按激磁电源频率高低分为两大类：高频反射式电涡流传感器和低频透射式电涡流传感器，前者用于非接触式位移变量得检测，后者仅用于金属板厚度的测量。**

## ■ 一. 高频反射式电涡流传感

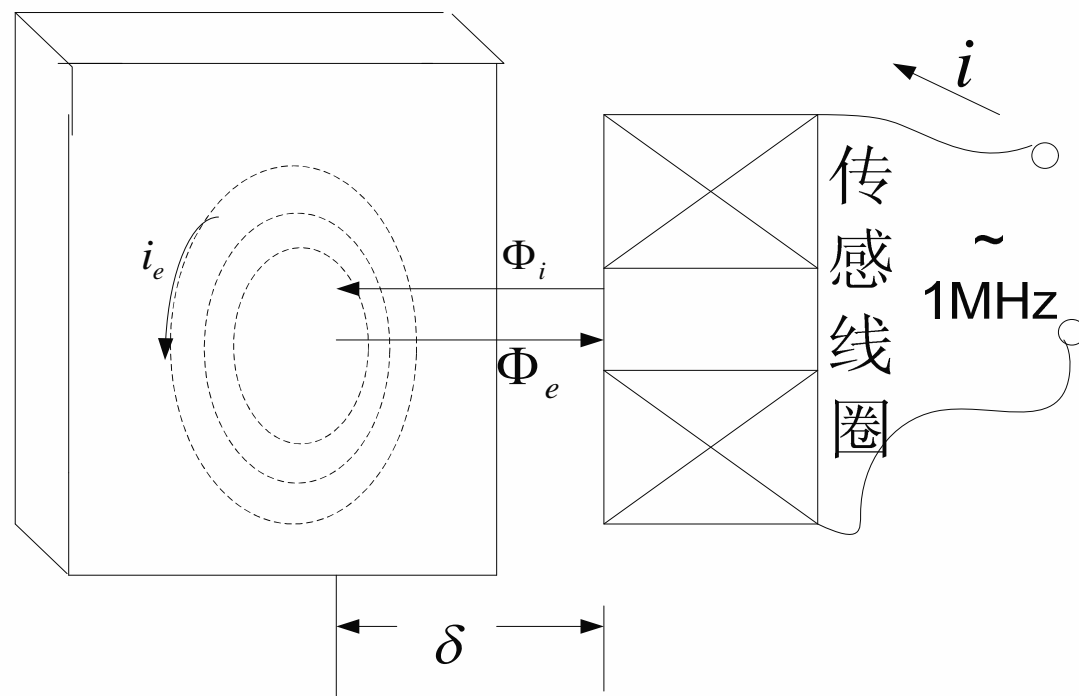


图3.25高频反射式电涡流传感器原理图

## ■ (1) 工作原理

高频反射式电涡流传感器结构简单，主要由安置于骨架上得扁平圆形线圈构成，如图3-25所示。传感线圈由高频电流 $i$ 激磁，产生高频交变磁场 $\phi_i$ ， $\phi_i$ 此在被测体平面上产生电涡流 $i_e$ 。根据电磁感应定律，电涡流 $i_e$ 对 $\phi_i$ 起去磁作用，以阻止 $\phi_i$ 的变化。图中 $\phi_e$ 表示由电涡流 $i_e$ 产生的磁场，因而 $\phi_i$ 与 $\phi_e$ 反向。显然传感器线圈与被测体之间的距离 $\delta$ 越小，电涡流效应越强，从而把非电量 $\delta$ 转换为电量，以实现位移量的测量。



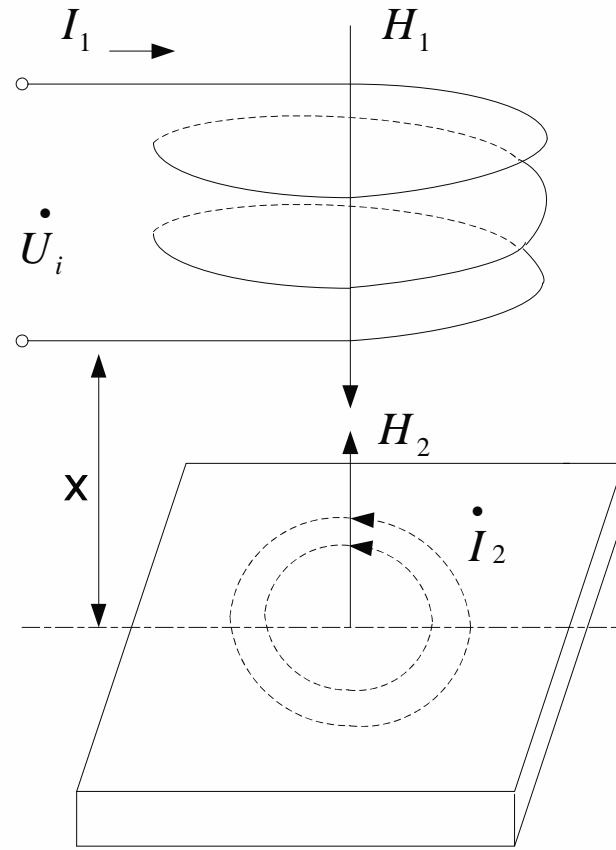


图3.25 电涡流式传感器的基本原理

## ■ (2) 等效电路

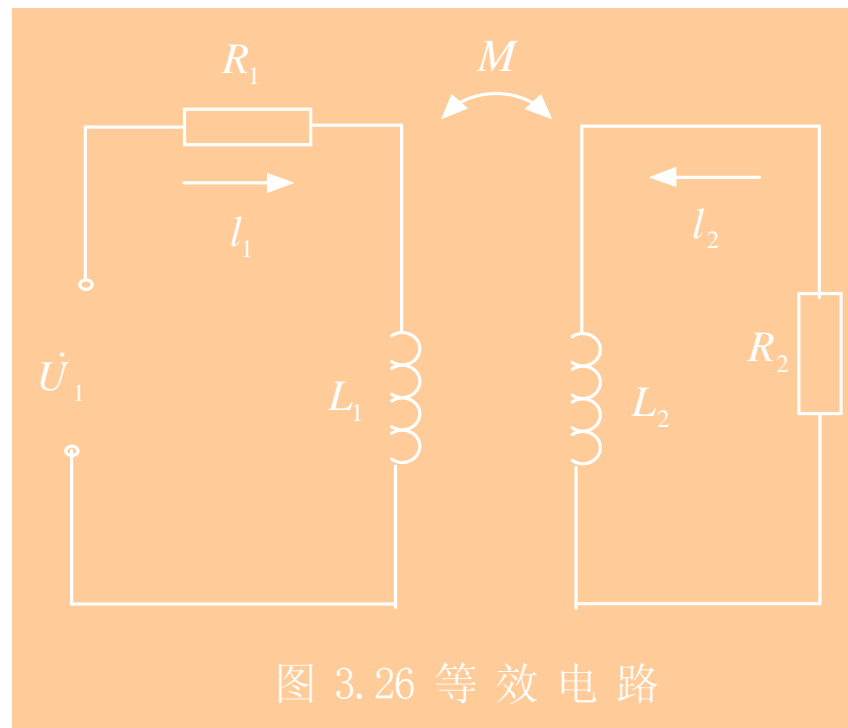


图 3.26 等效电路

- 根据基尔霍夫定律，可列出电压平衡方程组

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ -j\omega M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 = 0 \end{cases}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j\omega \left[ L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \right]}$$

解得:

$$\dot{I}_2 = j\omega \frac{M \dot{I}_1}{R_2 + (\omega L_2)^2} = \frac{M \omega^2 L_2 \dot{I}_1 + j\omega M R_2 \dot{I}_1}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$$

- 由此可求得线圈受金属导体涡流影响后的等效阻抗为

$$Z = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega \left[ L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right]$$

- 线圈的等效电感为

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$$

- 由式(3-39)可见, 由于涡流的影响, 线圈阻抗的实数部分增大, 虚数部分减小, 因此线圈的品质因数 $Q$ 下降。阻抗由  $Z_1$  变为 $Z$ , 常称其变化部分为“反射阻抗”。
- 由式(3-39)可得

$$Q = Q_0 \left( 1 - \frac{L_2 \omega^2 M^2}{L_1 Z_2^2} \right) / \left( 1 + \frac{R_2 \omega^2 M_2}{R_1 Z_2^2} \right)$$

式中  $Q_0 = \omega L_1 / R_1$  一无涡流影响时线圈的 $Q$ 值

$Z_2^2 = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$  一短路环的阻抗



■即  $Z = F(\delta, \rho, f, \mu_r)$

■高频反射式电涡流传感器可以实现位移量的测量

### (3) 工作特性

#### ① 电涡流的径向密度

电涡流的径向密度与传感线圈外径有一定的比例关系。

电涡流的径向密度与传感线圈对被测体间距  $\delta$  成反比。

#### ② 电涡流的贯穿深度

电涡流的贯穿深度  $h$  与被测体涡流回路电阻率  $\rho$  成正比，与其相对导磁率及电源频率  $f$  成反比，其算关系如下：

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r \pi f}}$$

### ③ 电涡流效应的灵敏度

被测体材料物理性能的影响

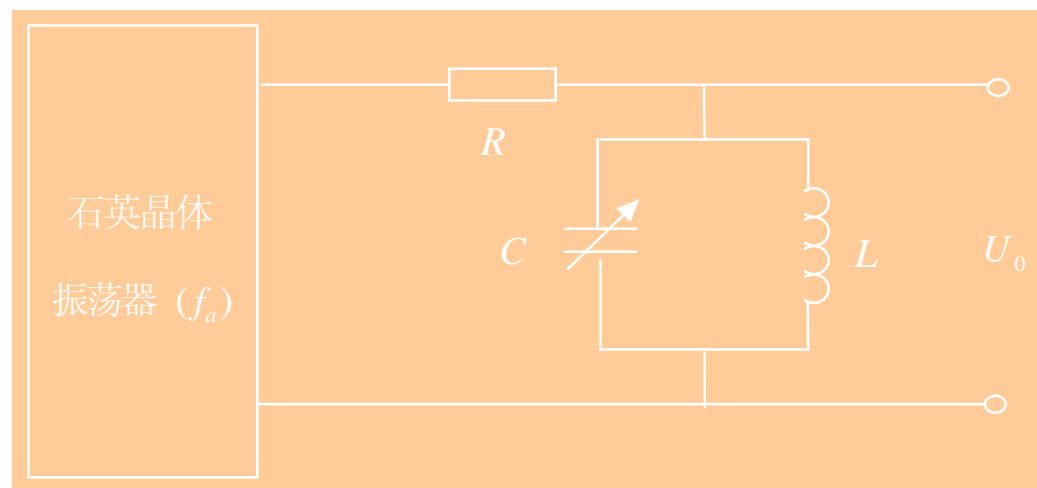
被测体几何尺寸的影响

非线性

## ■ (4) 测量电路

**根据电涡流效应原理和等效电路, 电涡流传感器输出的测量电路有下述三种形式。**

### ① 谐振式



- **谐振法是依据电路谐振原理,实现对电涡流传感器输出信号测量的方法。根据LC谐振电路的幅值及频率特性(Frequency response),又分为调幅法和调频法。**

- **a) 调幅法**

**是以传感线圈与调谐电容组成并联LC谐振回路,有石英振荡器提供高频激磁电流,测量电路的输出电压正比于LC谐振电路的阻抗Z,激磁电流和谐振阻抗Z越大,输出电压越高。初态时,传感器远离被测体,调整LC回路谐振频率等于石英晶体振荡器即**

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- 此时LC并联谐振回路的等效阻抗Z最大，即

$$Z = Z_0 = \frac{1}{R'C}$$

- 式中R' 是谐振回路的等效电阻，式中的L即为传感线圈自感L1. 在谐振频率以外，LC回路的等效阻抗将显著减少，如图3-28所示。



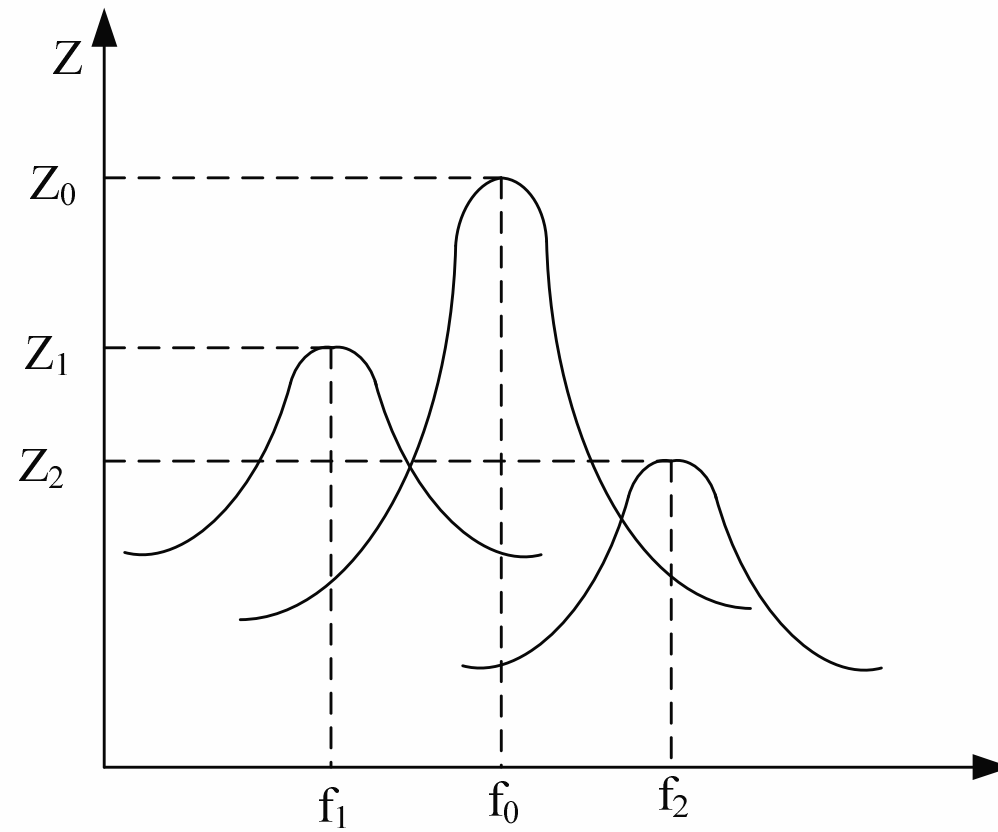


图3.28调谐曲线

- 当被测体为软磁材料时，由于导磁率 $\mu$ 增加，谐振回路的等效电感 $L$ 增加，LC回路谐振频率减小，谐振曲线左移，谐振阻抗由初态最大值 $Z_0$ 降至 $Z_1$ ，对应的谐振频率为 $f_1$ 。当被测体为硬磁或非硬磁材料时，由于导磁率 $\mu$ 减小，等效电感 $L$ 减小，LC回路谐振频率增大，谐振曲线右移，谐振阻抗由初态最大值 $Z_0$ 降至 $Z_2$ 。对应的谐振频率为 $f_2$ 。由于并联谐振电路输出电压 $u_0 = i_0 Z$ ，因而传感线圈与被测体之间距离 $\delta$ 的变化，引起 $Z$ 的变化，使输出电压跟随变化，从而实现位移量的测量，故称调幅法。

## ■ b) 调频法

**调频法是以LC谐振回路的频率作为输出量，直接用频率计测量；或通过测量LC回路等效电感L，间接测量频率变化量。**

## ■ ② 正反馈电路法

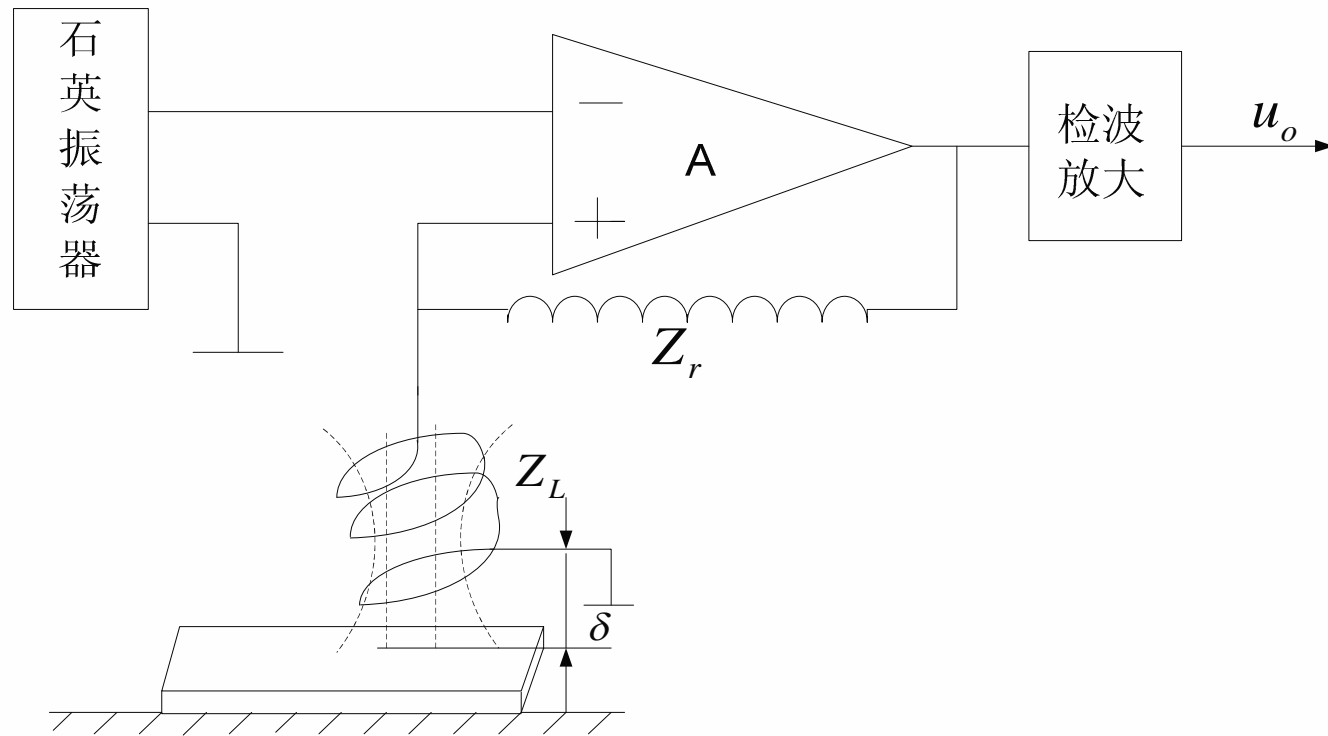
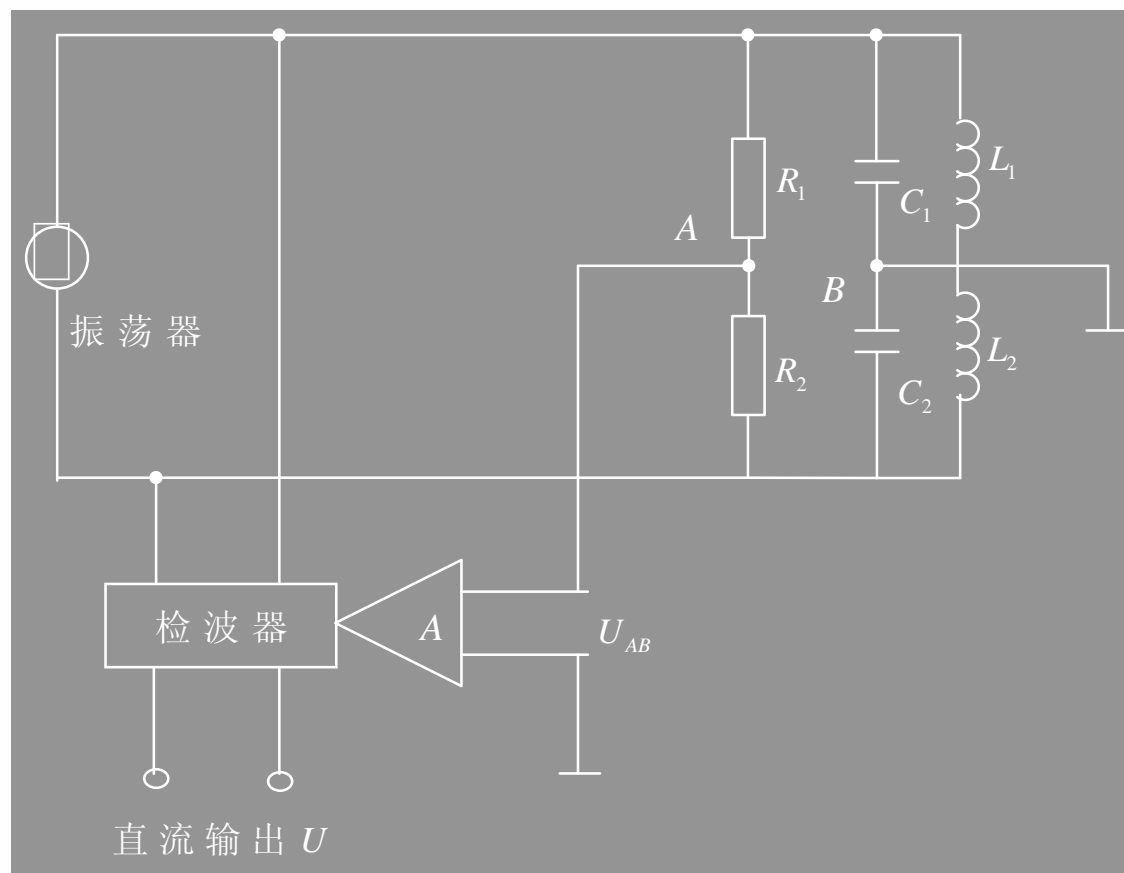


图3.29反馈法测量电路

### ■ ③ 电桥法





- 图中  $L_1$  和  $L_2$  为传感器两线圈电感，分别与选频电容  $C_1$  和  $C_2$  并联组成两桥臂，电阻  $R_1$  和  $R_2$  组成另外两桥臂。静态时，电桥平衡，桥路输出  $U_{AB} = 0$ 。工作时，传感器接近被测体，电涡流效应等效电感  $L$  发生变化，测量电桥失去平衡，即  $U_{AB} \neq 0$ ，经线性放大后送检波器检波后输出直流电压  $U$  显然此输出电压  $U$  的大小正比于传感器线圈的移动量，以实现位移量的测量。

- 2、低频透射式电涡流传感器

前图为低频透射式电涡流，后图为曲线传感器原理图

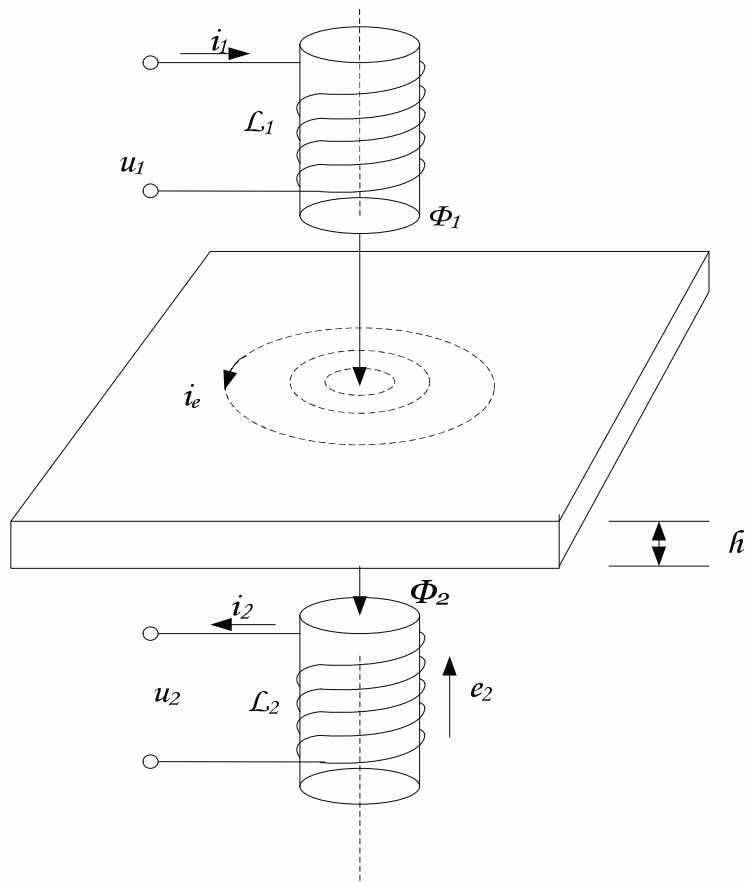


图3.31低频透射式电涡流传感器原理图

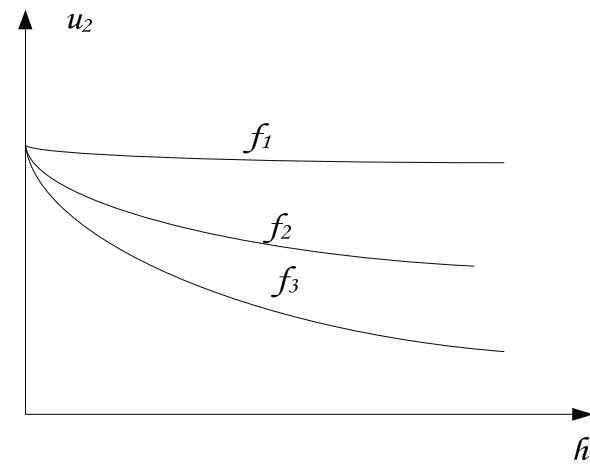


图3.32  $u_2 = f(h)$  曲线

- 当传感线圈激磁频率在1KHz一些时，电涡流的趋肤效应大大减弱，穿透能力大大加强，由式 (3-25) 可知，此时可以用来检测金属板厚度，故称之为低频透射式电涡流传感器，如图3-31所示。图中  $L_1$  是发射线圈电感， $L_2$  是接收线圈电感， $i_1$  为激磁电流， $\Phi_1$  为激磁磁通， $i_e$  为涡流， $u_2$  为  $L_2$  上电磁感应电压。显然，在一定的激磁电流  $i_1$  作用下，金属板厚度尺寸  $h$  越大，穿过金属板到底接收线圈的磁通  $\Phi_2$  越小，感应电压  $u_2$  也相应减小，即  $u_2$  与  $h$  之间有着对应的函数联系， $u_2 = f(h)$  曲线如图3-32所示。由图可知，频率越低， $f_3 > f_2 > f_1$ ，磁通穿透能力越强，在接收线圈上产生的感应电压也越高。这种传感器一般可用来测100mm以下的金属板厚度，分辨率可达  $0.1 \mu\text{m}$ 。

## § 3. 4

- 前面介绍的三种不同工作原理的电感传感器，都可以用来直接用来测量位移量，亦可以测量能转换为位移量 (Displacement amount) 的变化量，但各自应用的领域有所不同，下面介绍几个应用实例。



## ■ 1、感测微仪

**电感测微仪是一个差动式自感传感器测量微位移装置，其测量电路如图3-33所示图中量传感线圈和电阻组成交流测量电桥，电桥输出交流电压经放大后送相敏检波器，检波输出直流电压由直流电压表或显示其输出。**



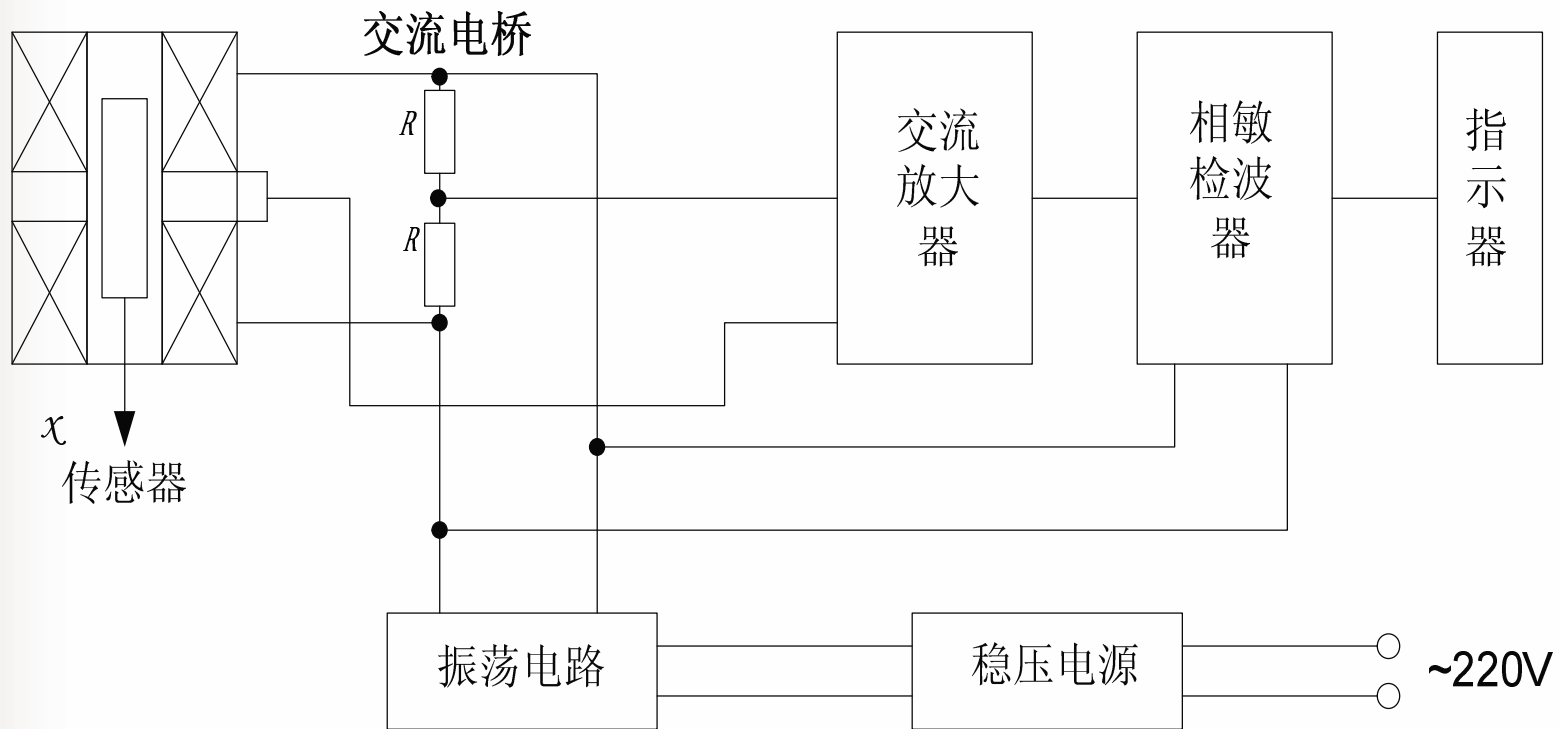


图3.33电感测微仪原理图

## ■ 2、平衡式差压计

力平衡式差压计是一个差动变压器测量电路，如图3-34所示。图中  $N_1$ 、 $N_{22}$ 、 $N_{21}$  分别为差动变压器初级线圈和两级线圈， $V_1$ 、 $V_2$  和C为半波整流电容波电路。当动铁处于中间位置是，膜盒亦在正中位置时，此时膜盒的上下压力相同，即  $p_1 = p_2$ ，差动变压器输出电压  $U = 0$ 。当

$p_1$  和  $p_2$  大小不同时，膜盒产生位移，带动差动变压器输出电压  $U \neq 0$ ，其大小盒极性即表示动铁位移的大小和方向，从而可测出  $p_1$  与  $p_2$  的压力差。

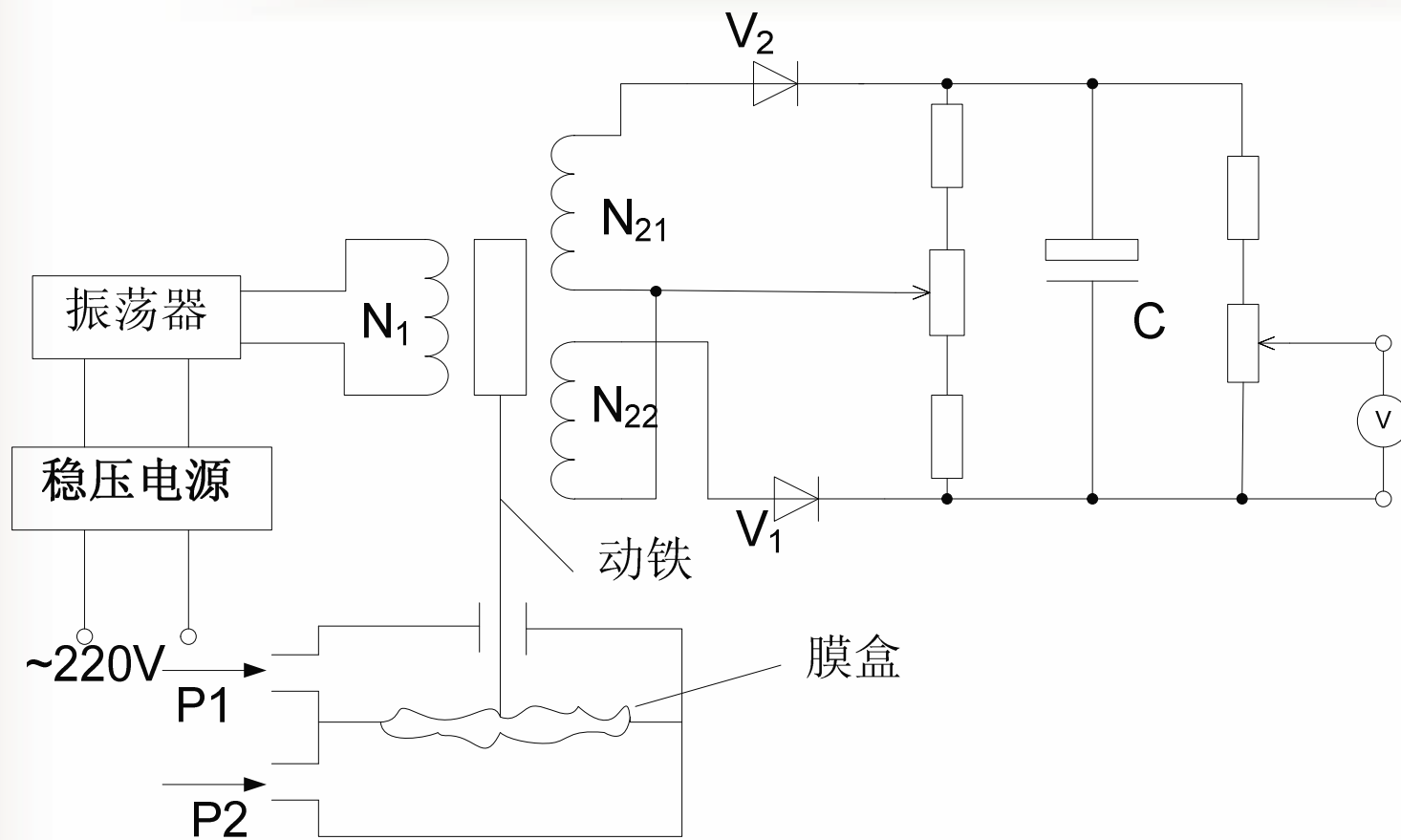
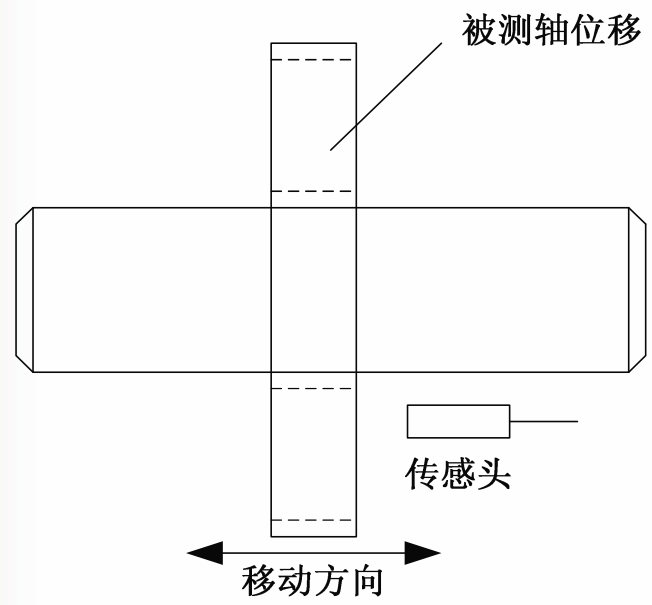


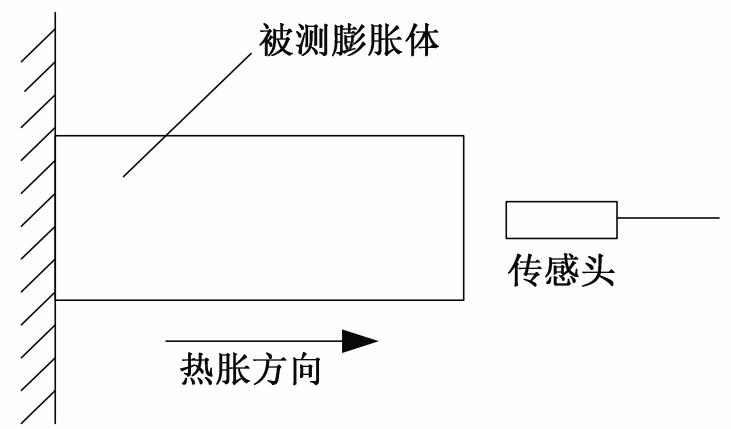
图3.34力平衡式测压计

### ■ 3、位移计

**电涡流传感器的基本应用时组成位移计，如3-35所示。其中图3-35 (a) 直接检测传动轮的轴向位移量，图 (b) 是间接检测膨胀体轴向膨胀量。**



(a)



(b)

图3.35位移计





## ■ 4、振动计

**利用涡流传感器还可以实现对振动的测量，如图3-36所示**

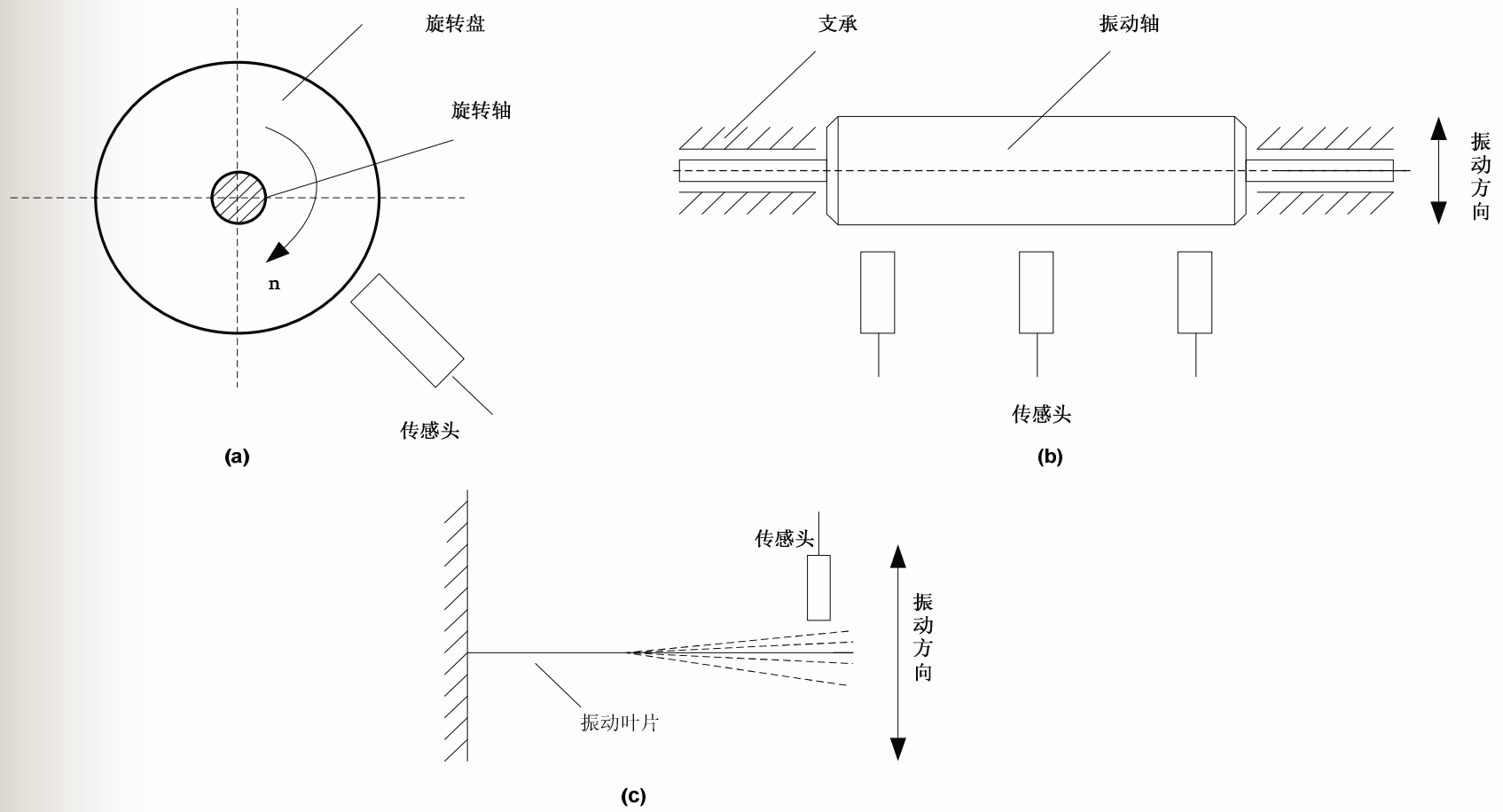


图3.36 振动计