

A close-up, artistic photograph of a fountain pen nib resting on a newspaper. The pen is positioned diagonally across the upper half of the frame. The newspaper text is blurred, creating a bokeh effect. A dark blue horizontal band spans the middle of the image, containing the chapter title in white text. The bottom of the image is a solid red band.

第3章 变磁阻式传感器

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

3.1

传感器线圈的电器参数分析

3.2

自感式传感器

3.3

互感式传感器

3.4

电涡流式传感器

3.5

压感式传感器

第一节 传感器线圈的电器参数分析

- 图3.1为一种简单的自感式传感器，它由线圈、铁心和衔铁等组成。当衔铁随被测量变化而上、下移动时，铁心气隙、磁路磁阻随之变化，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，实现了非电量到电量的变换。可见，这种传感器实质上是一个具有可变气隙的铁心线圈。

第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

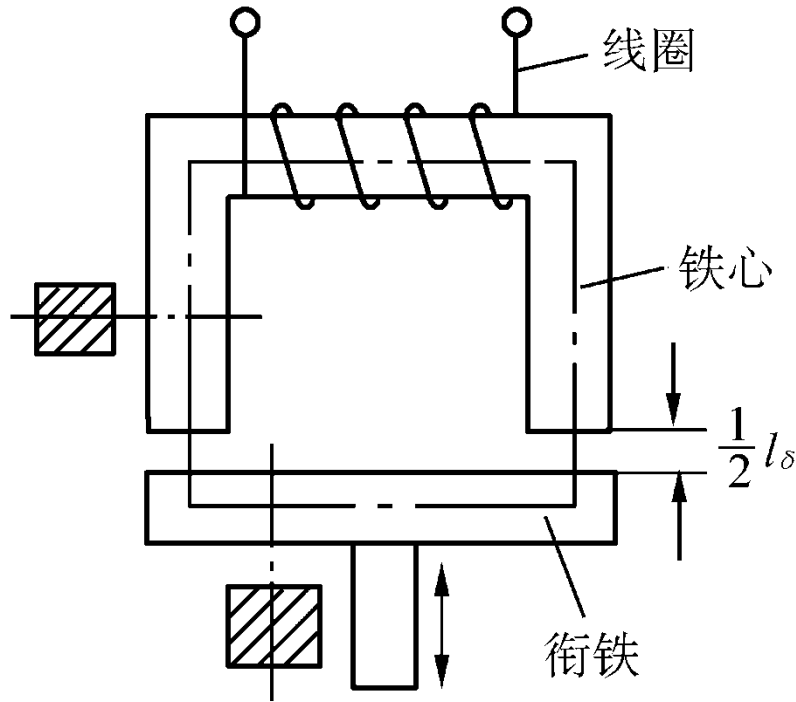


图3.1 变气隙式自感传感器

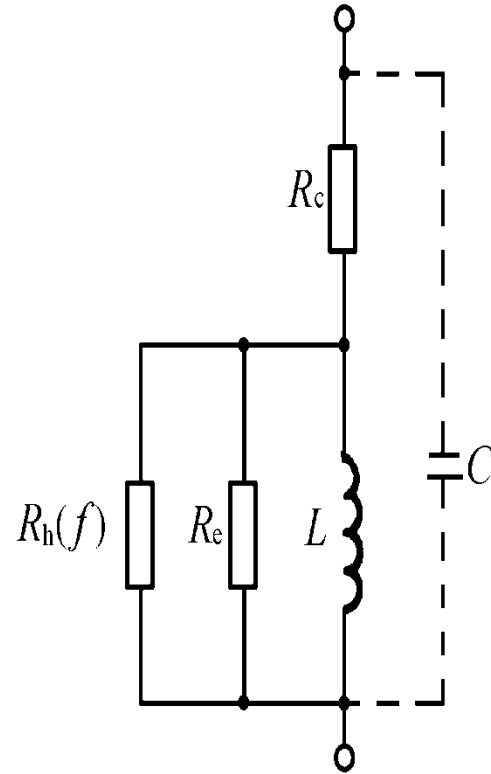


图3.2 传感器线圈的等效电路

L -线圈电感； R_c -线圈铜耗电阻； R_e -铁心涡流损耗电阻； R_h 磁滞损耗电阻； C -线圈的寄生电容



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 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（后者可视作前者的特例）。因此，分析铁心线圈的电气参数与它们对线圈特性的影响，对了解与分析变磁阻式传感器以及选择传感器参数有帮助。为此，我们将传感器线圈等效成图3.2所示的等效电路，并对电路参数及其影响一一进行讨论。
- 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

$$L = W^2 / R_m \quad (3-1)$$

式中 R_m ——磁路总磁阻。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 当线圈具有闭合磁路时

$$L = W^2 / R_F \quad (3-2)$$

式中 R_F ——导磁体总磁阻。

➤ 当线圈磁路具有小气隙时

$$L \approx W^2 / R_\delta \quad (3-3)$$

式中 R_δ ——气隙总磁阻。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 为了分析方便，需要将各种形式的线圈的电感 L 用统一的式子表达。为此，引入等效磁导率概念，即将线圈等效成一封闭铁心线圈，其磁路等效磁导率为 μ_e ，磁通截面积为 S ，磁路长度为 l ，于是式(3-1)变为

$$L = W_2^2 / R_m = W_2^2 \cdot \mu_0 \mu_e S / l$$

式中 μ_0 ——真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 2. 铜损电阻 R_c 取决于导线材料及线圈的几何尺寸
- 3. 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耗。根据经典的涡流损耗计算公式知，为降低涡流损耗，叠片式铁心的片厚应薄；高电阻率有利于损耗的下降，而高磁导率却会使涡流损耗增加。
- 4. 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。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

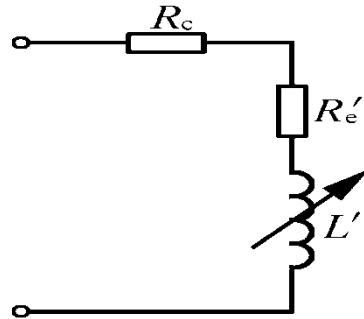


图3.3 线圈等效电路的变换形式

- 为便于分析，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

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

$$R_e' + jL'\omega = \frac{R_e jL\omega}{R_e + jL\omega}$$

$$R_e' = \frac{R_e}{1 + (R_e / L\omega)^2} \quad (3-5)$$

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

(3-6)

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 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的变化。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。可见，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 C 时，阻抗 Z 为

$$Z_s = \frac{(R' + jL'\omega) / jC\omega}{R' + jL'\omega + 1 / jC\omega} = \frac{R'}{(1 - L'C\omega^2)^2 + (L'\omega^2 / Q)^2} + j \frac{L'\omega[(1 - L'C\omega^2) - L'C\omega^2 / Q^2]}{(1 - L'C\omega^2)^2 + (L'C\omega^2 / Q)^2} \quad (3-7)$$



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 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

$$Z_s = \frac{R'}{(1 - L'C\omega^2)^2 + (L'\omega^2 / Q)^2} + j \frac{L'\omega[(1 - L'C\omega^2) - L'C\omega^2 / Q^2]}{(1 - L'C\omega^2)^2 + (L'C\omega^2 / Q)^2} \quad (3-8)$$

有效值Q为

$$Q_s = L_s \omega / R_s = (1 - L'C\omega^2)Q \quad (3-9)$$

电感的相对变化

$$\frac{dL_s}{L_s} = \frac{1}{1 - L'C\omega^2} \cdot \frac{dL'}{L'} \quad (3-10)$$



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 由式(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。

第二节 自感式传感器

一. 工作原理与输出特性

如前所述，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形式的不同，目前常用的自感式传感器有变气隙式、变面积式与螺管式三种；按磁路的结构型式又有 Π 型、E型或罐型等等；按组成方式分，有单一式与差动式两种。

1.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。由于变气隙式传感器的气隙通常较小，可以认为气隙磁场是均匀的，若忽略磁路铁损，则图3.1传感器的磁路总磁阻为

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 S} \quad (3-11)$$

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(m²)；

μ_1, μ_2 ——铁心和衔铁的磁导率(H/m)；

S, l_δ ——气隙磁通截面积(m²)和气隙总长(m)。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

将式(3-11)代入式(3-1)，可得

$$L = W^2 / \left(\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 S} \right) \quad (3-12)$$

由式(3-12)可知，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 $1/\delta$ 的单值函数，这就是变气隙式传感器的工作原理。

为了精确分析传感器的特性，利用前述等效磁导率 μ_e 的概念，由式(3-4)可得

$$R_m = l / (\mu_0 \mu_e S) \quad (3-13)$$

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

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

同时，由式(3-11)

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 S} \left(\frac{l - l_\delta}{\mu_r} + l_\delta \right) = \frac{1}{\mu_0 S} \frac{l + l_\delta (\mu_r - 1)}{\mu_r} \quad (3-14)$$

式中 μ ——铁心和衔铁的相对磁导率，通常 $\mu \gg 1$ 。

所以

$$\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \mu_r l_\delta / l} = \frac{1}{l_\delta + l / \mu_r} \quad (3-15)$$

代入式(3-4)可得带气隙铁心线圈的电感为



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

$$L = \frac{W^2 \mu_0 \mu_e S}{l} = K \frac{1}{l_\delta + l / \mu_r} \quad (3-16)$$

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

$$K_\delta = \frac{dL}{dl_\delta} = -L \frac{1}{l_\delta + l / \mu_r} \quad (3-17)$$

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_δ ，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 $\delta = l_\delta / 2 = 0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ ， $\Delta \delta = (1/5 \sim 1/10) \delta$ 。

2.变面积式自感传感器

若图3.1所示传感器的气隙长度 l_δ 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。此时由式(3-16)

$$L = \frac{W^2 \mu_0}{l_\delta + l / \mu_r} \cdot S = K' S \quad (3-18)$$

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

对式(3-33)微分得灵敏度为

$$KS = \frac{dL}{dS} = K' \quad (3-19)$$

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范围。与变气隙式相比较，其灵敏度较低。欲提高灵敏度，需减小 l_{δ} ，但同样受到工艺和结构的限制。 l_{δ} 值的选取与变气隙式相同。

3. 螺管式自感传感器

图3.4为螺管式自感传感器结构原理图。它由平均半径为 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。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

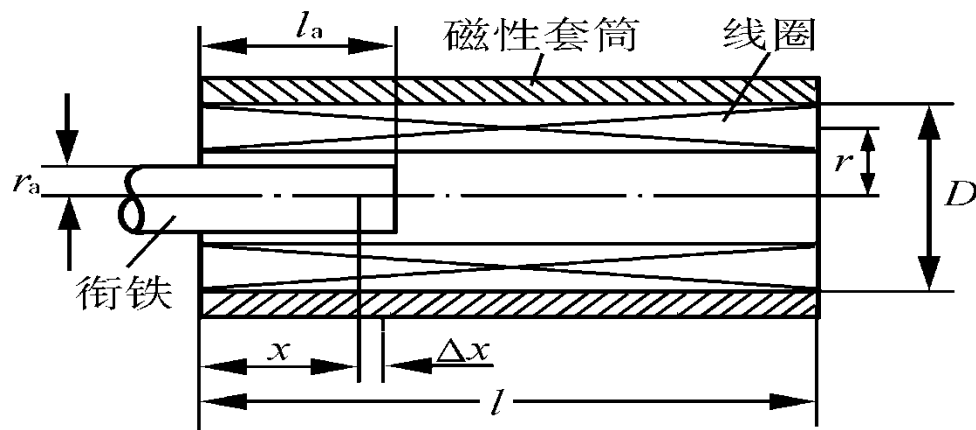


图3.4 螺管式自感传感器原理图

4. 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。

第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

➤ 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。

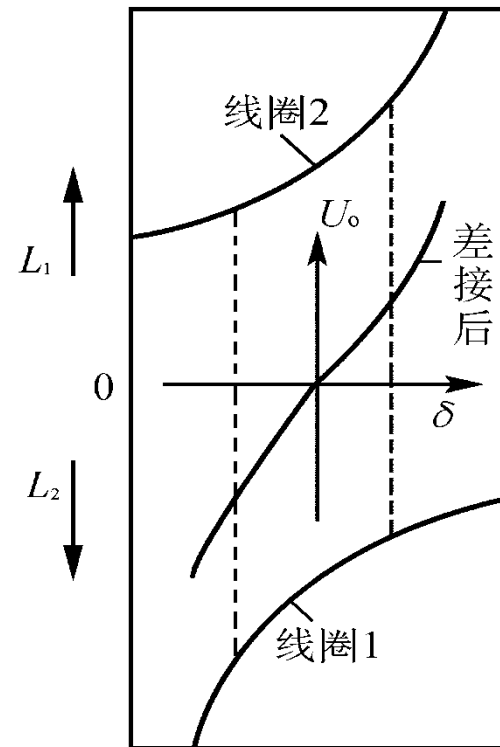


图3.5 差动式自感传感器的输出特性

二. 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。

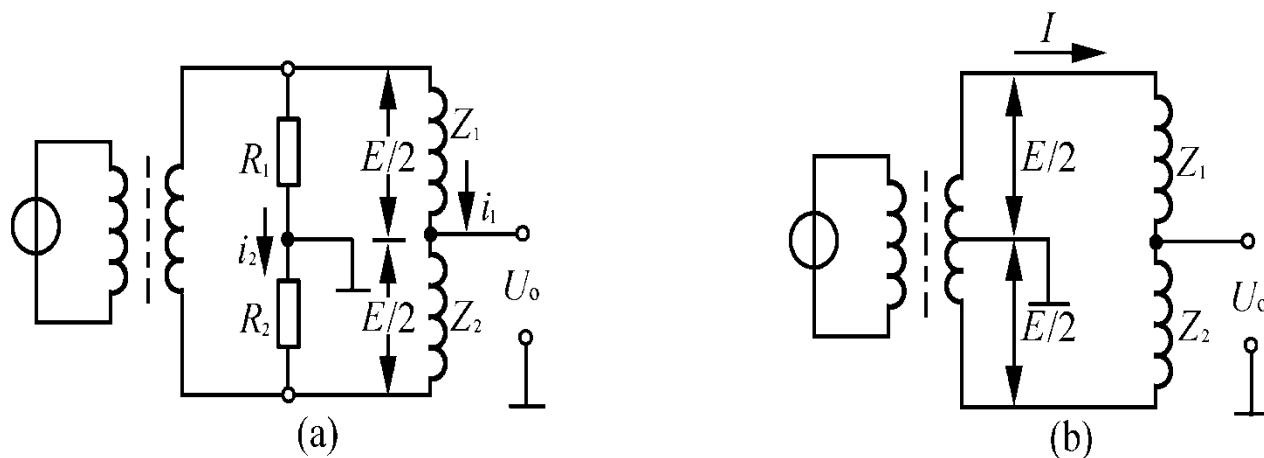


图3.6 输出端对称电桥 (a)一般形式; (b)变压器电桥

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

(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 Z_1 、 Z_2 为传感器两线圈阻抗，

$$Z_1 = r_1 + jL_1\omega, Z_2 = r_2 + jL_2\omega, r_{10} = r_{20} = r_0, L_{10} = L_{20} = L_0, R_1, R_2$$

为外接电阻，通常 $R_1 = R_2 = R$ 。设工作时，

$Z_1 = Z + \Delta Z$ ， $Z_2 = Z + \Delta Z$ 电源电势为 E ，于是

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta r + j\omega\Delta L}{r_0 + j\omega L_0} \approx \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\omega\Delta L}{r_0 + j\omega L_0} \cdot E \quad (3-20)$$

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

输出电压幅值和阻抗分别为

$$U_0 = \frac{\sqrt{\omega^2 \Delta L^2 + \Delta r^2}}{2\sqrt{r_0^2 + (\omega L_0)^2}} \cdot E \approx \frac{\omega \Delta L}{2\sqrt{r_0^2 + (\omega L_0)^2}} \cdot E \quad (3-21)$$

$$Z = \sqrt{(R + r_0)^2 + (\omega L_0)^2} / 2 \quad (3-22)$$

式(3-20)经变换和整理后可写成

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}}{2} \left[\frac{1}{1 + Q^2} \cdot \frac{\Delta r}{r_0} + \frac{Q^2}{1 + Q^2} \cdot \frac{\Delta L}{L} + j \frac{Q}{1 + Q^2} \left(\frac{\Delta L}{L_0} - \frac{\Delta r}{r_0} \right) \right] \quad (3-23)$$

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



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 由式(3-23)可见，电桥输出电压 \dot{U}_0 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 $\Delta L / L_0 \neq \Delta r / r_0$ ，因此要求线圈有较高的Q值，这时

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (3-24)$$

- 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)。由于变压器次级的阻抗通常远小于电感线圈的阻抗，常可忽略，于是输出阻抗式(3-22)变为

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

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

➤ 图(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。

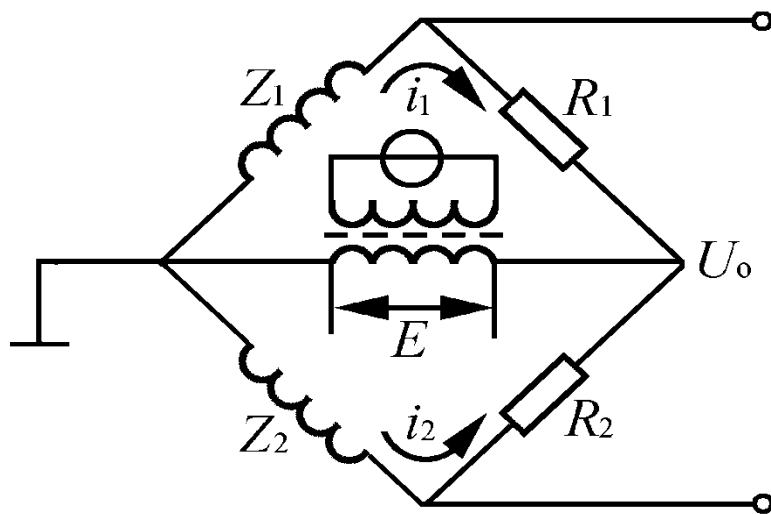


图3.7 电源端对称电桥



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

(2) 电源端对称电桥 如图3.7所示, 电桥输出电压为

$$\dot{U}_0 = \dot{E} R \left(\frac{1}{Z_1 + Z} - \frac{1}{Z_2 + Z} \right) = \dot{E} R \frac{Z_2 - Z_1}{(Z_1 + R)(Z_2 + Z)}$$

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

$$\dot{U}_0 = \dot{E} R \frac{2\Delta Z}{(Z + R)^2 - \Delta Z^2} \approx \dot{E} R \frac{2(\Delta r + \omega j \Delta L)}{(R + r_0 + \omega j L_0)^2} \quad (3-26)$$

输出电压幅值和阻抗分别为

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

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

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

- 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。
- 当采用交流电桥作测量电路时，输出电压的极性反映了传感器衔铁运动的方向。

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。当传感器线圈电感量变化时，谐振曲线将左右移动，工作点就在同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。这种电路灵敏度很高，但非线性严重，常与单线圈自感式传感器配合，用于测量范围小或线性度要求不高的场合。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

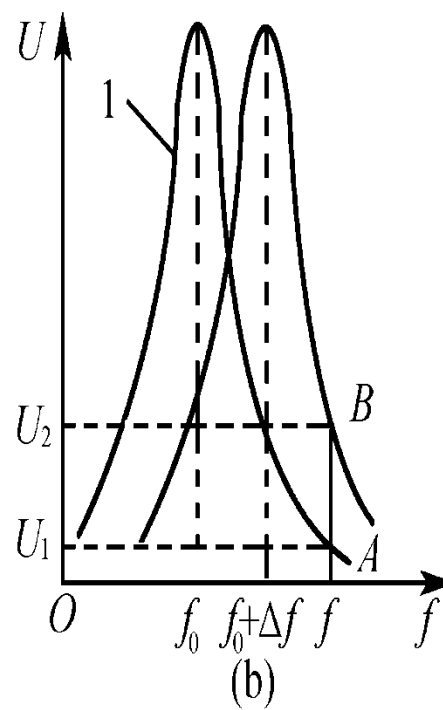
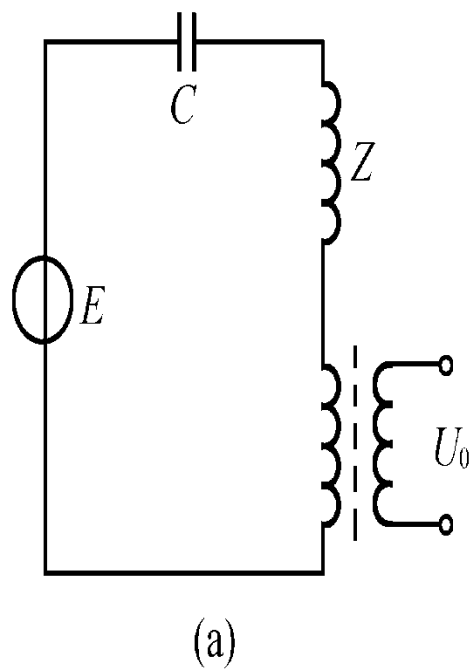


图3.8 (a) 谐振电路 (b) 谐振曲线

3. 恒流源电路 ■

这种电路与大位移(螺管式)自感传感器配用, 见图3.9。传感器线圈用恒流源激励, u_1 是衔铁在螺管线圈内移动时线圈两端的电压, u_2 是与 u_1 反相、幅值恒定的电压, u_0 为电路输出电压。于是, $u_0 = u_1 - u_2$ 。 u_2 的作用是抵消电压的非线性部分, 使输出电压呈线性。由图可见, 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。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

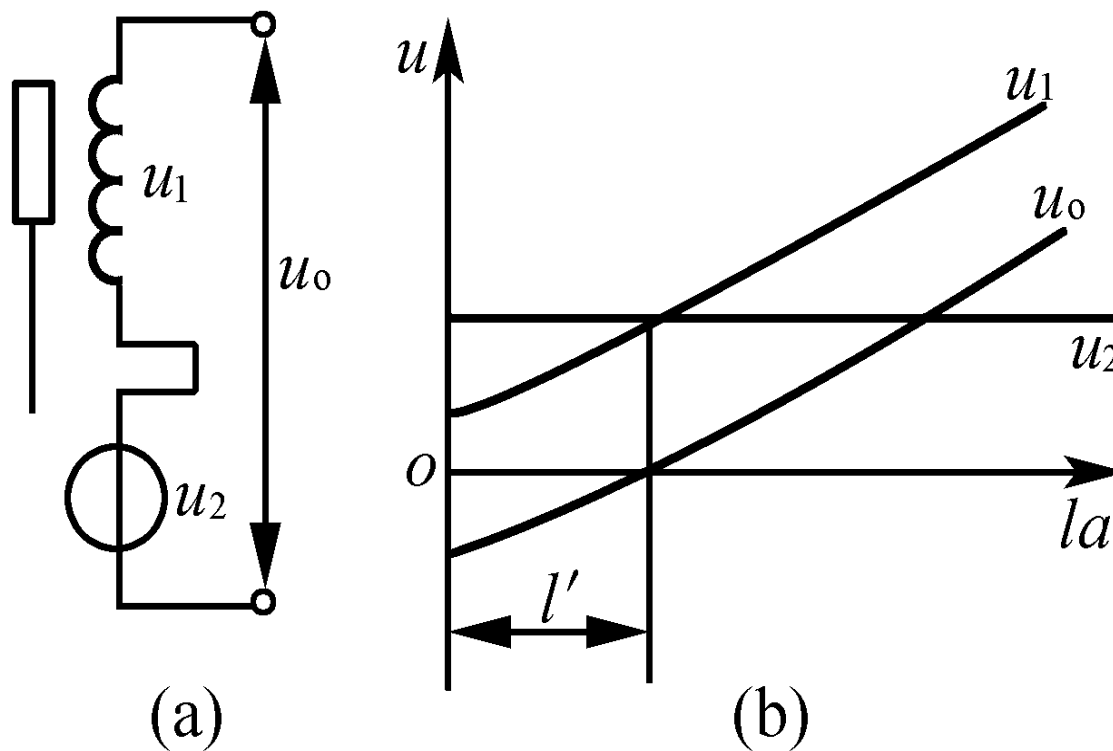


图3.9 大位移自感式传感器工作原理
(a)电原理图；(b)输出特性

4.调频电路

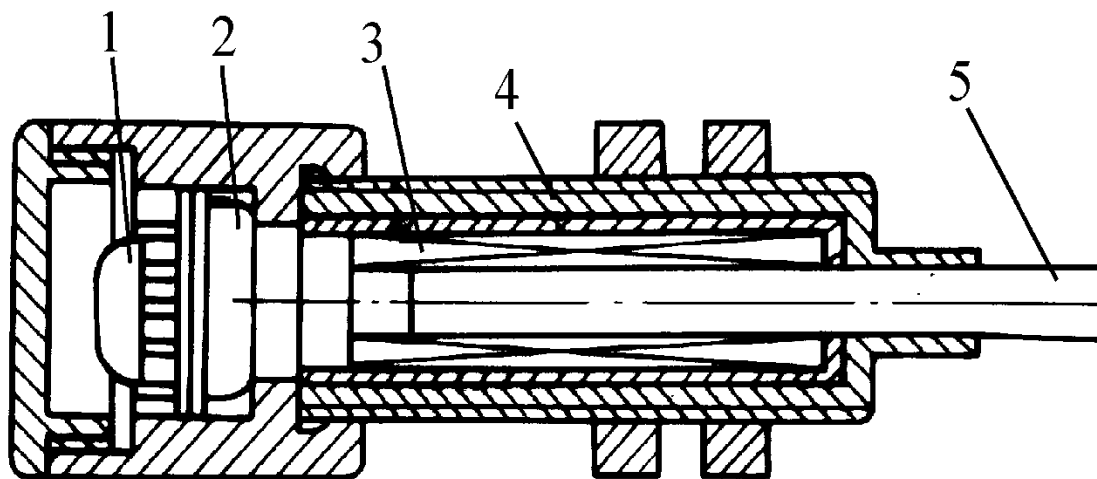


图3.10 电感调频式位移传感器结构图

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

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 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。利用阶梯形无骨架线圈，可使衔铁的位移变化与输出频差变化呈线性关系。传感器的结构见图3.10。
- 由于输出为频率信号，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。下面以带二极管式环形相敏检波的交流电桥为例介绍该电路的作用。

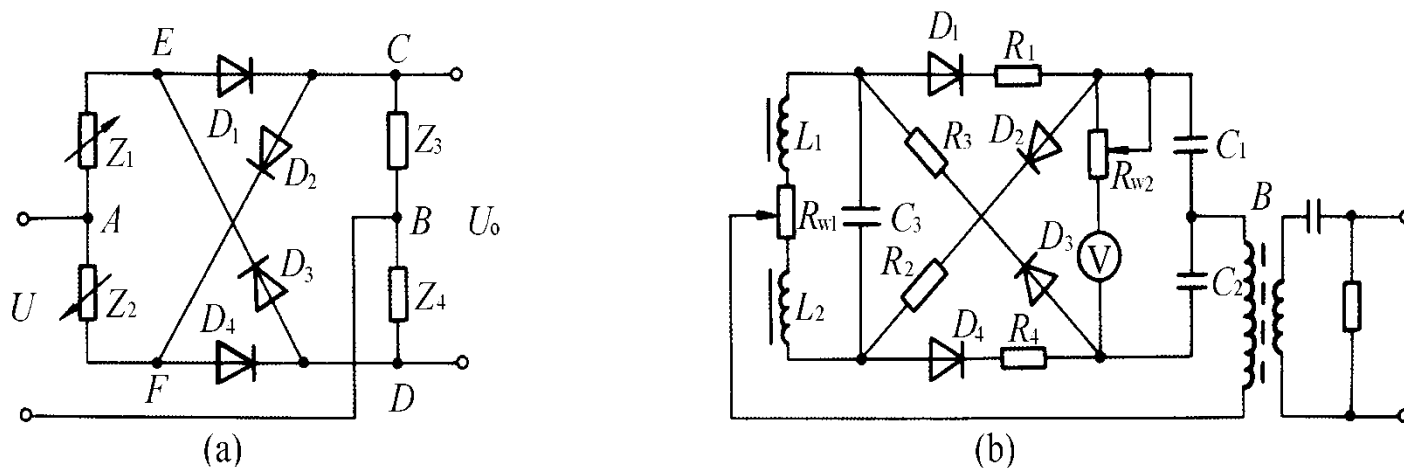


图3.11 相敏检波电路

(a) 带相敏检波的交流电桥；(b) 实用电路

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 如图3.11(a)所示, Z_1 、 Z_2 为传感器两线圈的阻抗, $Z_3=Z_4$ 构成另两个桥臂, U 为供桥电压, U 为输出。当衔铁处于中间位置时, $Z_1=Z_2=Z$, 电桥平衡, $U=0$ 。若衔铁上移, Z_1 增大, Z_2 减小。如供桥电压为正半周, 即A点电位高于B点, 二极管 D_1 、 D_4 导通, D_2 、 D_3 截止。在A—E—C—B支路中, C点电位由于 Z_1 增大而降低; 在A—F—D—B支路中, D点电位由于 Z_2 减小而增高。因此D点电位高于C点, 输出信号为正



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 如供桥电压为负半周，B点电位高于A点，二极管 D_2 、 D_3 导通， D_1 、 D_4 截止。在B—C—F—A支路中，C点电位由于 Z_2 减小而比平衡时降低；在B—D—E—A支路中，D点电位则因 Z_1 增大而比平衡时增高。因此D点电位仍高于C点，输出信号仍为正。同理可以证明，衔铁下移时输出信号总为负。于是，输出信号的正负代表了衔铁位移的方向。
- 实际采用的电路如图3.11(b)所示。 L_1 、 L_2 为传感器的两个线圈， C_1 、 C_2 为另两个桥臂。电桥供桥电压由变压器B的次级提供。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为四个线绕电阻，用于减小温度误差。 C_3 为滤波电容， R_{w1} 为调零电位器， R_{w2} 为调倍率电位器，输出信号由电压表V指示。

三. 自感式传感器的误差

1. 输出特性的非线性

- 各种自感式传感器，都在原理上或实际上存在非线性误差。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。

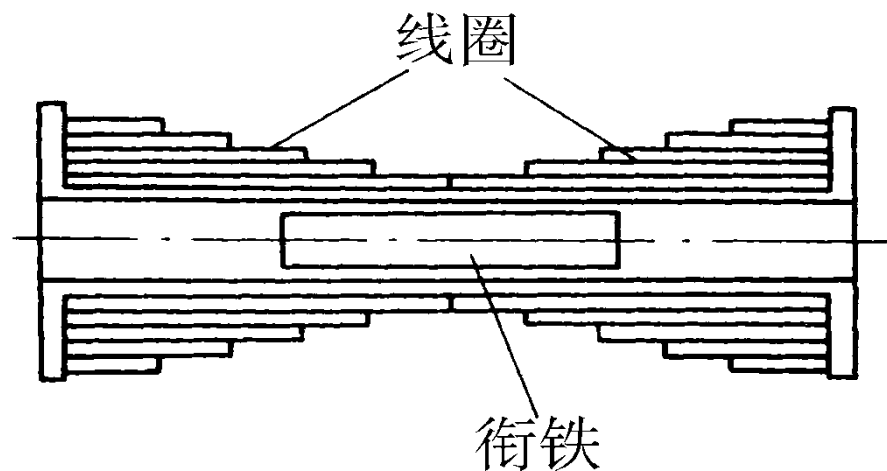


图3.12 阶梯形线圈

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 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。

过大的零位电压会使放大器提前饱和，若传感器输出作为伺服系统的控制信号，零位电压还会使伺服电机发热，甚至产生零位误动作。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 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

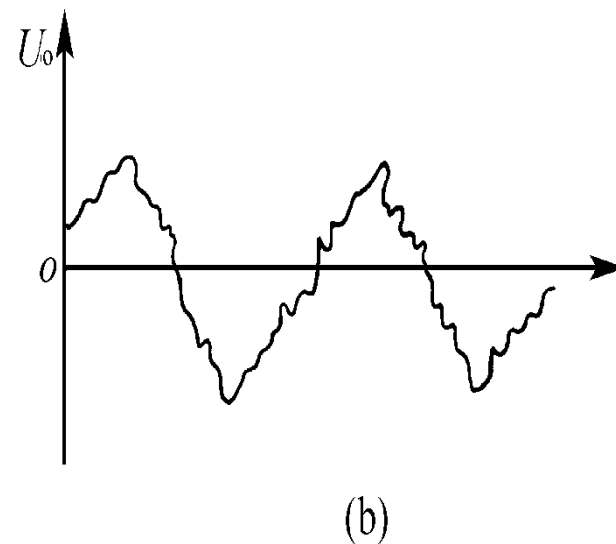
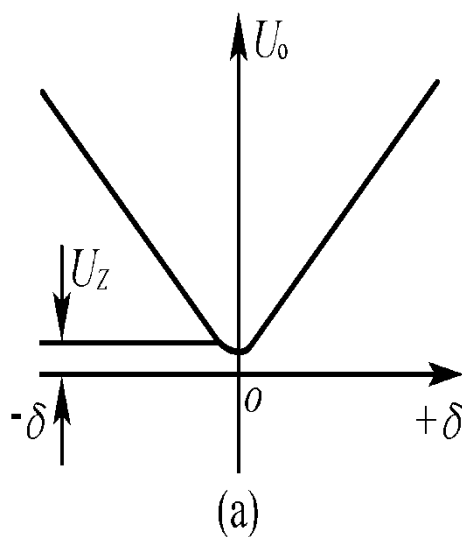


图3.13 零位误差

(a) 零位电压；(b) 相应波形

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 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。
- 由于基波同相分量可以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。

第3章 变磁阻式传感器



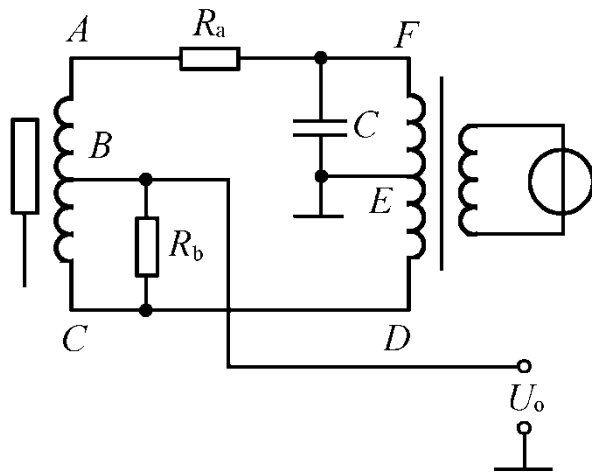
www.seu.edu.cn

- 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，造成两线圈中某些高次谐波成分不一样，不能对消，于是产生了零位电压的高次谐波。
- 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。应合理选择磁性材料与激励电流，使传感器工作在磁化曲线的线性区。减少激励电流的谐波成分与利用外壳进行电磁屏蔽也能有效地减小高次谐波。

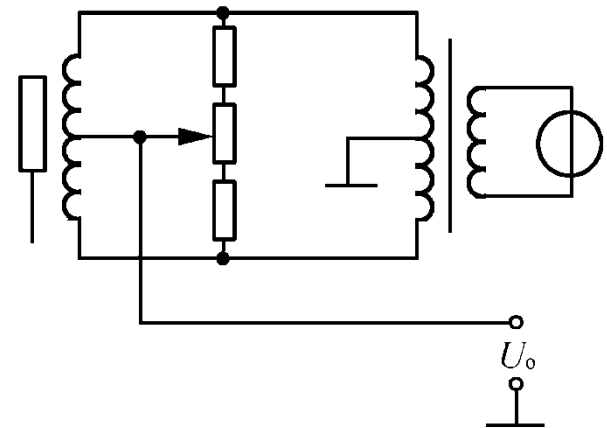
第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 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。



(a)



(b)

图3.14 零位电压补偿电路

(a) 典型接法；(b) 实际电路

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 图3.14(a)示出了上述原理的典型接法。

(1) R_a 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。

(2) R_b 用来减小二、三次谐波，其作用是对某一线圈(接于A、B间或B、C间)进行分流，以改变磁化曲线的工作点，阻值通常为几百~几十 $k\Omega$ 。

(3) 电容 C 用来补偿变压器次级线圈的不对称，其值通常为 $100 \sim 500 \text{ pF}$ 。有时为了制造与调节方便，可在C、D间加接一电位器 R_w ，利用 R_w 与 R_a 的差值对基波正交分量进行补偿。

图(b)示出了一种传感器的实际补偿电路。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 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。
- 此外还可采用磁路调节机构(如可调端盖)保证磁路的对称性，来减小零位电压。

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。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 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、绕组绝缘材料的介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。

上述因素对单电感传感器影响较大，特别对小气隙式与螺管式影响更大，而第(2)项对低频激励的传感器影响较大。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 对于高精度传感器，特别是小量程传感器，如果结构设计不合理，即使是差动式，温度影响也不容忽视。
- 对于高精度传感器及其测量装置，其材料除满足磁性能要求外，**还应注意线膨胀系数的大小与匹配**。为此，有些传感器采用了陶瓷、聚矾、夹布胶木、弱磁不锈钢等材料作线圈骨架，或采用脱胎线圈。



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。

第三节 互感式传感器

- 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。本节在叙述差动变压器工作原理的基础上，将着重介绍它与自感式传感器的不同

一. 工作原理与类型

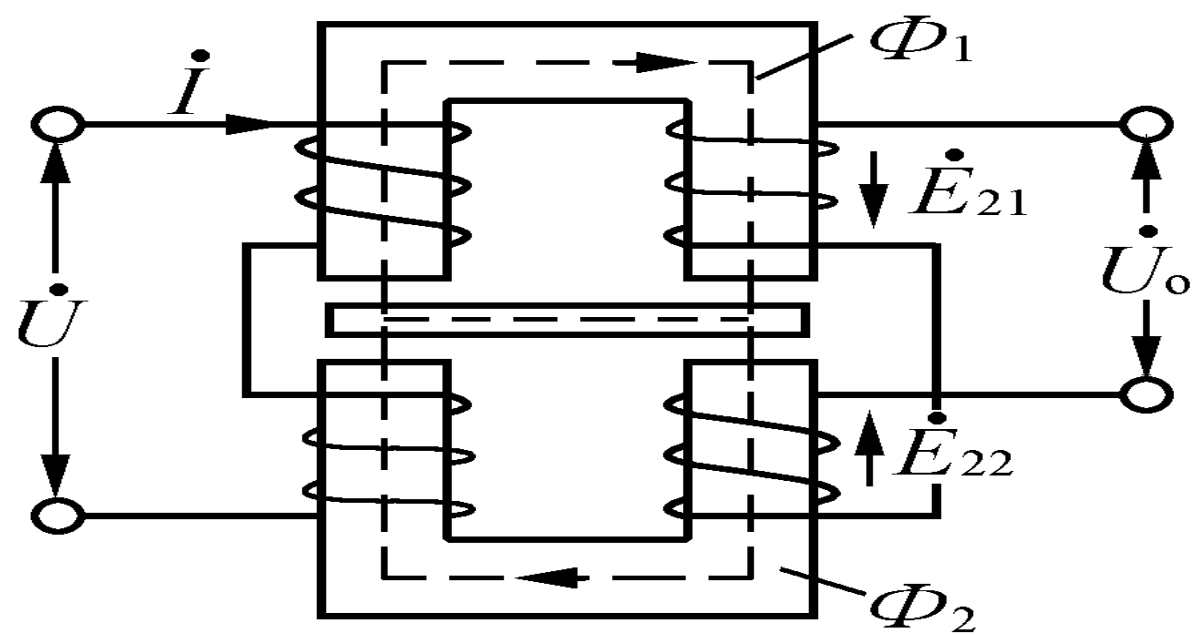


图3. 16 变气隙式

一. 工作原理与类型

- 在忽略线圈寄生电容与铁心损耗的情况下，差动变压器的等效电路如图3-15所示。

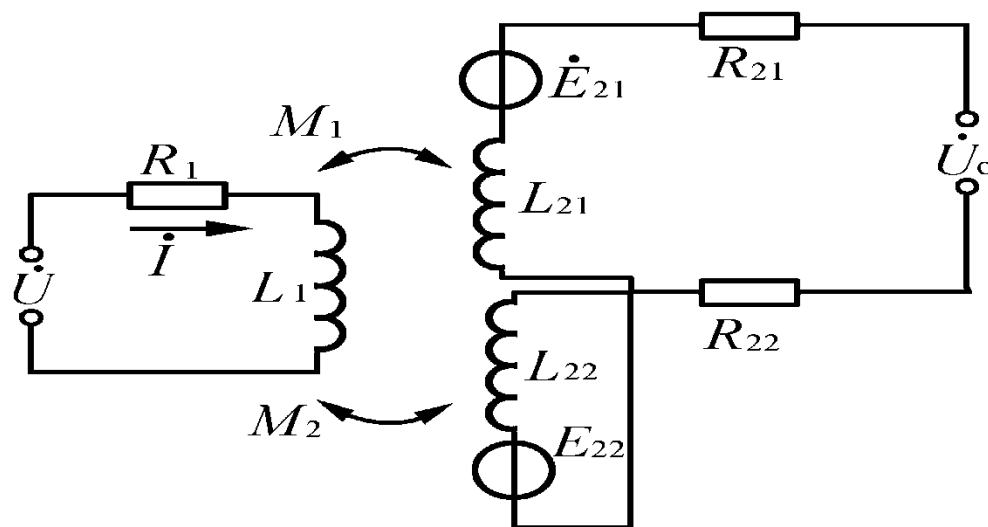


图3.15 差动变压器的等效电路

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

图中U, I——初级线圈激励电压与电流(频率为 ω);
 L_1 , R_1 ——初级线圈电感与电阻; \square
 M_1 , M_2 ——分别为初级与次级线圈1, 2间的互感;
 L_{21} , L_{22} 和 R_{21} , R_{22} ——分别为两个次级线圈的
电感和电阻。

根据变压器原理, 传感器开路输出电压为两次级线圈感应电势之差:

$$\dot{U}_o = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = -j\omega(M_1 - M_2)\dot{I} \quad (3-29)$$



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 当衔铁在中间位置时，若两次级线圈参数与磁路尺寸相等，则 $M_1=M_2=M$ ， $U_0=0$ 。当衔铁偏离中间位置时， $M_1 \neq M_2$ ，由于差动工作，有 $M_1=M+\Delta M_1$ ， $M_2=M-\Delta M_2$ 。在一定范围内， $\Delta M_1=\Delta M_2=\Delta M$ ，差值 (M_1-M_2) 与衔铁位移成比例。于是，在负载开路情况下，输出电压及其有效值分别为

$$\dot{U}_0 = -j\omega(M_1 - M_2)\dot{I} = -j\omega \frac{2\dot{U}}{R_1 + j\omega L_1} \Delta M \quad (3-30)$$

$$U_0 = \frac{2\omega\Delta M U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} = 2E_{so} \frac{\Delta M}{M} \quad (3-31)$$

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

式中 E_{s0} ——衔铁在中间位置时，单个次级线圈的感应电势

$$E_{s0} = \omega M U / \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}$$

输出阻抗

$$Z = R_{21} + R_{22} + j\omega L_{21} + j\omega L_{22} \quad (2-32)$$

- 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 μm 到几百 μm 的位移.

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

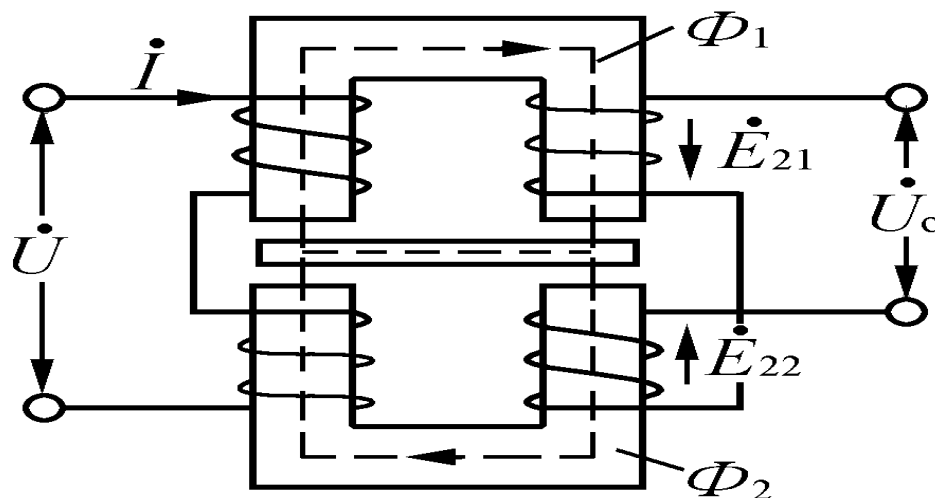


图3.16 变气隙式

- 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。结构型式不同，互感的计算方法也不同。Π型差动变压器的输出特性为：

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

$$\dot{U}_0 = -\dot{U} \frac{W_1}{W_2} \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (3-33)$$

式中 δ 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

- 上式表明，输出电压 U_0 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 U_0 与电源电压 U 反相； $\Delta \delta$ 向下为负时，两者同相。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

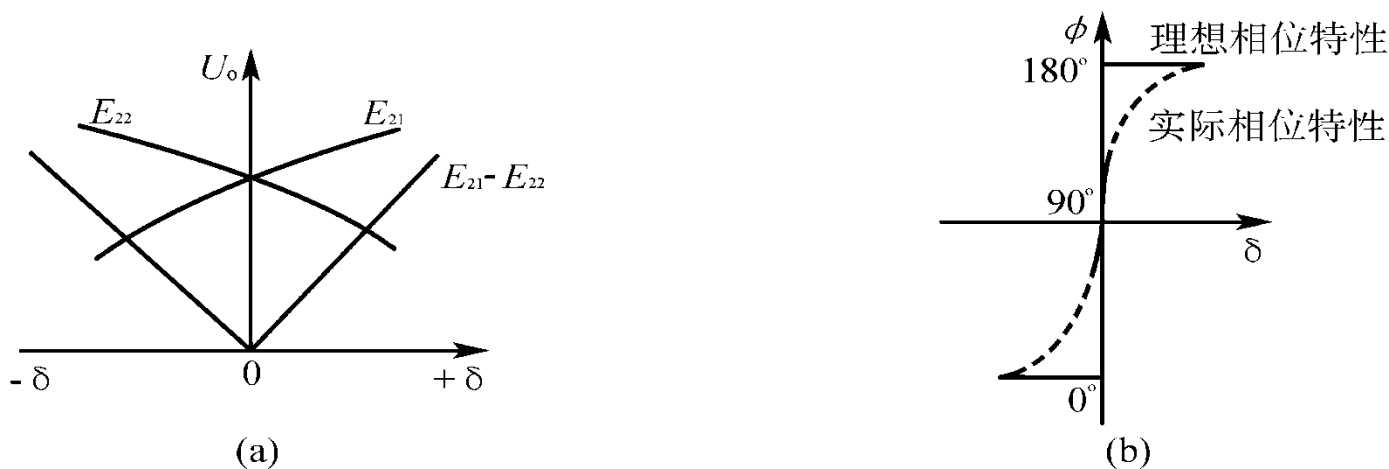


图3.17 差动变压器的特性

(a) 输出特性; (b) 相位特性

➤ 由式 (3-33) 可得 Π 形差动变压器的灵敏度表达式

$$K = \frac{U_0}{\Delta\delta} = \frac{U}{\delta_0} \frac{W_2}{W_1} \quad (3-34)$$

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 可见传感器的灵敏度随电源电压 U 和变压比 W_2W_1 的增大而提高，随初始气隙增大而降低。增加次级匝数 W_2 与增大激励电压 U 将提高灵敏度。但 W_2 过大，会使传感器体积变大，且使零位电压增大； U 过大，易造成发热而影响稳定性，还可能出现磁饱和，因此常取 $0.5\sim 8V$ ，并使功率限制在 $1VA$ 以下。
- 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

$$\dot{U}_0 = -j\omega \frac{2\Delta M}{R_1} \dot{U} \quad (3-35)$$



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

这时，差动变压器的灵敏度随频率 ω 而增加。

➤ 当 ω 增加使 $\omega L_1 \gg R_1$ 时，式(3-30)变为

$$\dot{U}_0 = -\frac{2\Delta M}{L_1} \dot{U} \quad (3-36)$$

此时，灵敏度与频率无关，为一常数。

➤ 当 ω 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。

第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

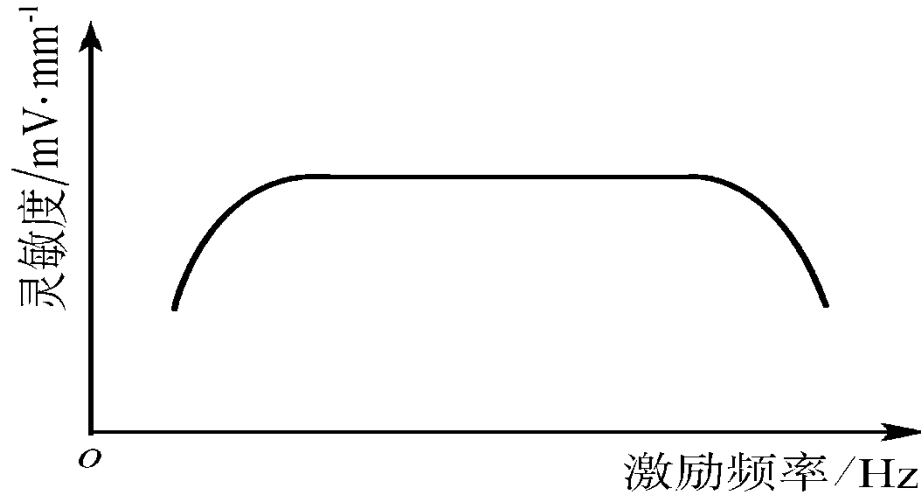


图3.18 激励频率与灵敏度的关系

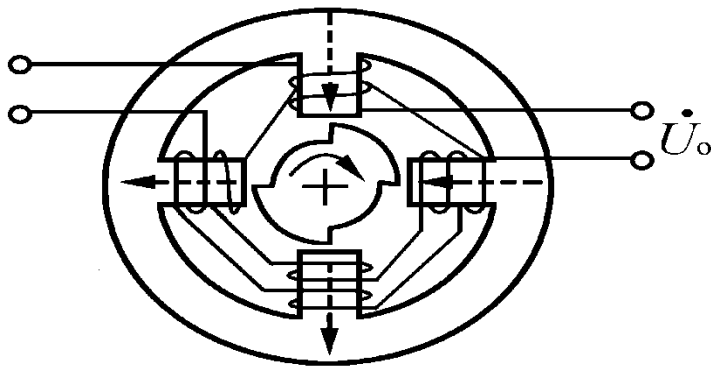


图3.19 微动同步器

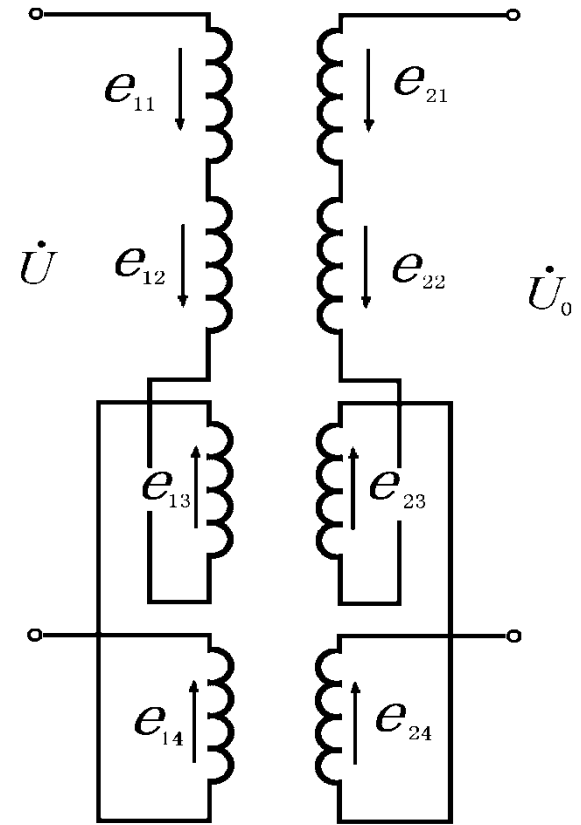


图3.20 内电路图

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 下面介绍变面积式（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，图3.18 激励频率与灵敏度的关系

但用于测量直线的极少，常用来测量角位移，如图3.19。电路图如3.20。这样输出电压为：

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

k——微动同步器的灵敏度，

α ——转子的转角

二. 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： $\dot{U}_0 = E_{21} - E_{22}$

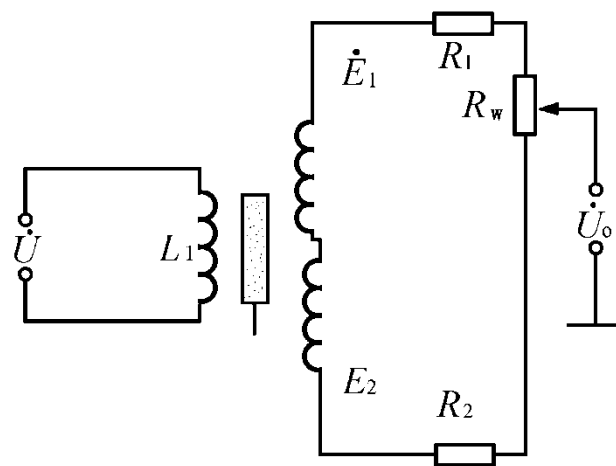
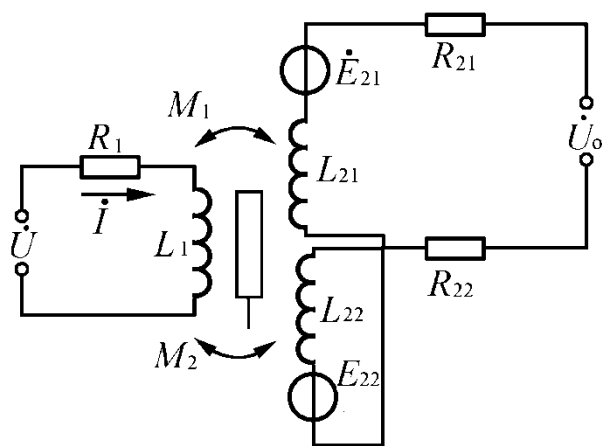


图3.21 二次线圈反串电路 图3.22 差动变压器使用桥路



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 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

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{E_{21} - (-E_{22})R_2}{R_1 + R_2} - E_{22} \\ &= \frac{E_{21} - E_{22}}{2} \end{aligned} \quad (3-37)$$

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

三. 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 Δt ($^{\circ}\text{C}$)，初级线圈铜阻 R 增加 ΔR ，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

$$\frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{\Delta R_1 / R_1}{1 + \omega L_1 / R_1} = - \frac{0.004}{1 + \omega L_1 / R_1} \Delta t \quad (3-38)$$

- 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。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

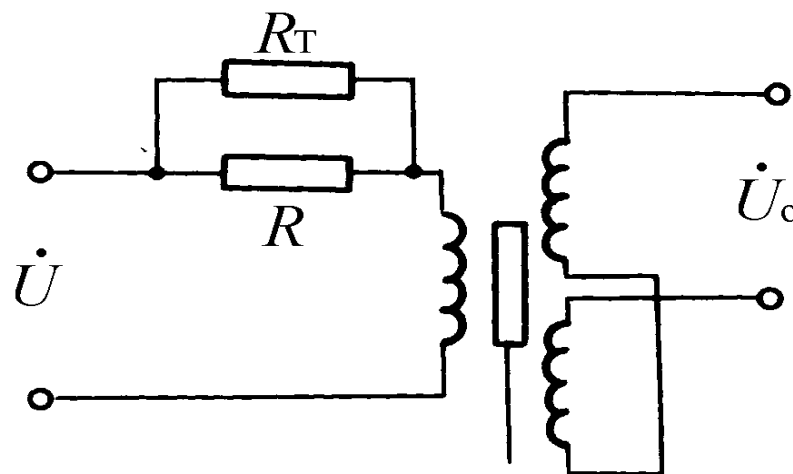


图3.23 温度补偿电路

- 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。在初级串入一高阻值降压电阻 R ，或同时串入热敏电阻 R_T 进行补偿。适当选择 R_T ，可使温度变化时原边总电阻近似不变，从而使激励电流保持恒定。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 差动变压器由于采用反串电路，其零位电压的补偿电路形式与自感式传感器不尽相同，基本原则是：串联电阻用以减小零位电压的基波分量；并联电阻、电容用以减小谐波分量；加反馈支路用以减小基波和谐波分量。
- 图3. 24列出了一些典型的补偿电路。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

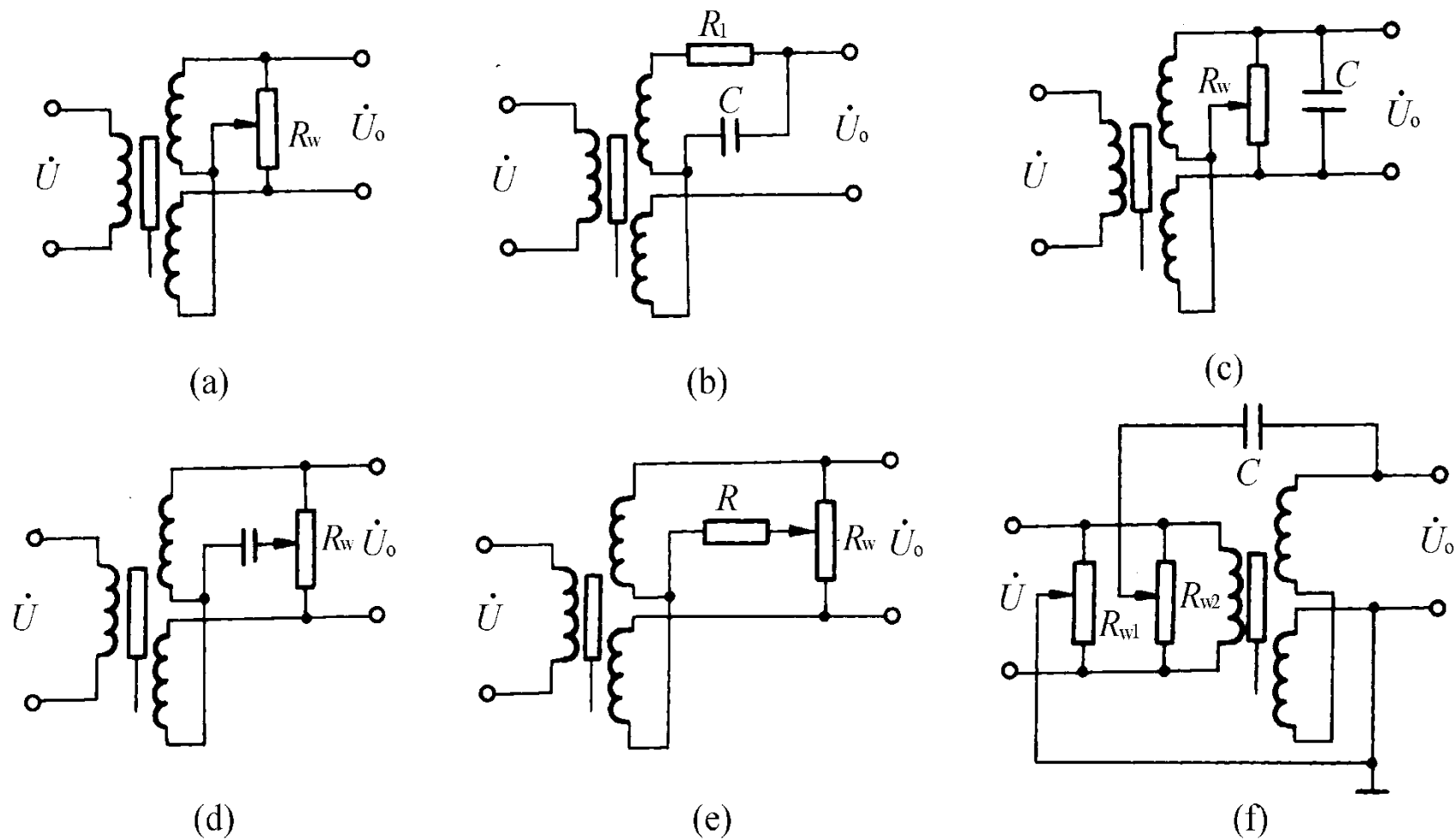


图3.24 差动变压器零位电压补偿电路

四. 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

第四节 电涡流式传感器

- 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，它一问世就受到各国的重视。目前，这种传感器已广泛用来测量位移、振动、厚度、转速、温度、硬度等参数，以及用于无损探伤领域。

一. 工作原理

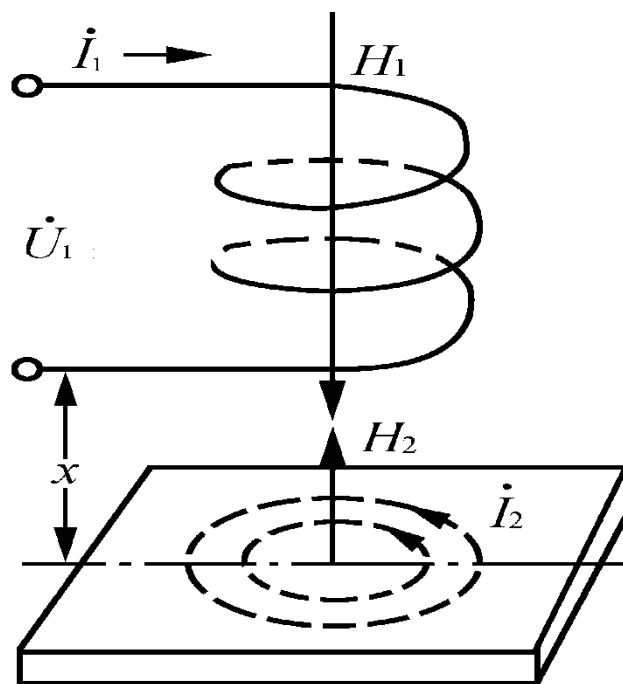


图3.25 电涡流式传感器的基本原理

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 如图3.25所示，有一通以交变电流的传感器线圈。由于电流的存在，线圈周围就产生一个交变磁场 H_1 。若被测导体置于该磁场范围内，导体内便产生电涡流，也将产生一个新磁场 H_2 ， H_2 与 H_1 方向相反，力图削弱原磁场 H_1 ，从而导致线圈的电感、阻抗和品质因数发生变化。这些参数变化与导体的几何形状、电导率、磁导率、线圈的几何参数、电流的频率以及线圈到被测导体间的距离有关。如果控制上述参数中一个参数改变，余者皆不变，就能构成测量该参数的传感器。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

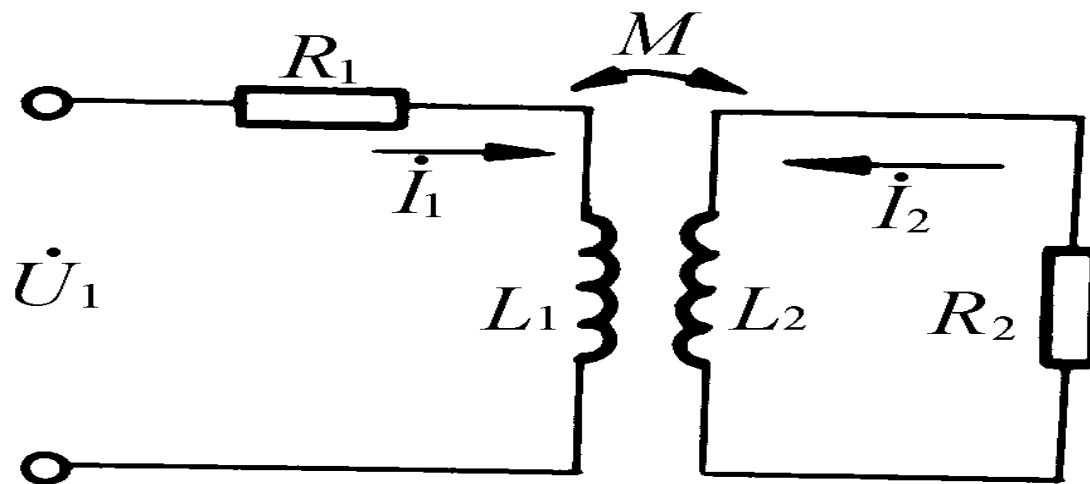


图3.26 等效电路

➤ 为分析方便，我们将被测导体上形成的电涡流等效为一个短路环中的电流。这样，线圈与被测导体便等效为相互耦合的两个线圈，如图3.26所示。设线圈的电阻为 R_1 ，电感为 L_1 ，阻抗为 $Z_1=R_1+j\omega L_1$ ；短路环的电阻为 R_2 ，电感为 L_2 ；线圈与短路环之间的互感系数为 M 。



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

➤ M随它们之间的距离x减小而增大。加在线圈两端的激励电压为。根据基尔霍夫定律，可列出电压平衡方程组

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

解之得

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

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

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 由此可求得线圈受金属导体涡流影响后的等效阻抗为

$$Z = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega \left[L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right] \quad (3-39)$$

➤ 线圈的等效电感为

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (3-40)$$



第3章 变磁阻式传感器

www.seu.edu.cn

- 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

$$Q = Q_0 \left(1 - \frac{L_2}{L_1} \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} \right) / \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} \right) \quad (3-41)$$

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

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

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- Q值的下降是由于涡流损耗所引起，并与金属材料的导电性和距离 x 直接有关。当金属导体是磁性材料时，影响Q值的还有磁滞损耗与磁性材料对等效电感的作用。在这种情况下，线圈与磁性材料所构成磁路的等效磁导率 μ_e 的变化将影响 L 。当距离 x 减小时，由于 μ_e 增大而使式(3-40)中之 L_1 变大。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 由式(3-39)～(3-41)可知，线圈-金属导体系统的阻抗、电感和品质因数都是该系统互感系数平方的函数。而互感系数又是距离 x 的非线性函数，因此当构成电涡流式位移传感器时， $Z=f_1(x)$ 、 $L=f_2(x)$ 、 $Q=f_3(x)$ 都是非线性函数。但在一定范围内，可以将这些函数近似地用一线性函数来表示，于是在该范围内通过测量 Z 、 L 或 Q 的变化就可以线性地获得位移的变化。

二. 测量电路

- 根据电涡流式传感器的工作原理，其测量电路有三种：谐振电路、电桥电路与Q值测试电路。这里主要介绍谐振电路。目前电涡流式传感器所用的谐振电路有三种类型：定频调幅式、变频调幅式与调频式。

1. 定频调幅电路

图3. 27为这种电路的原理框图。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

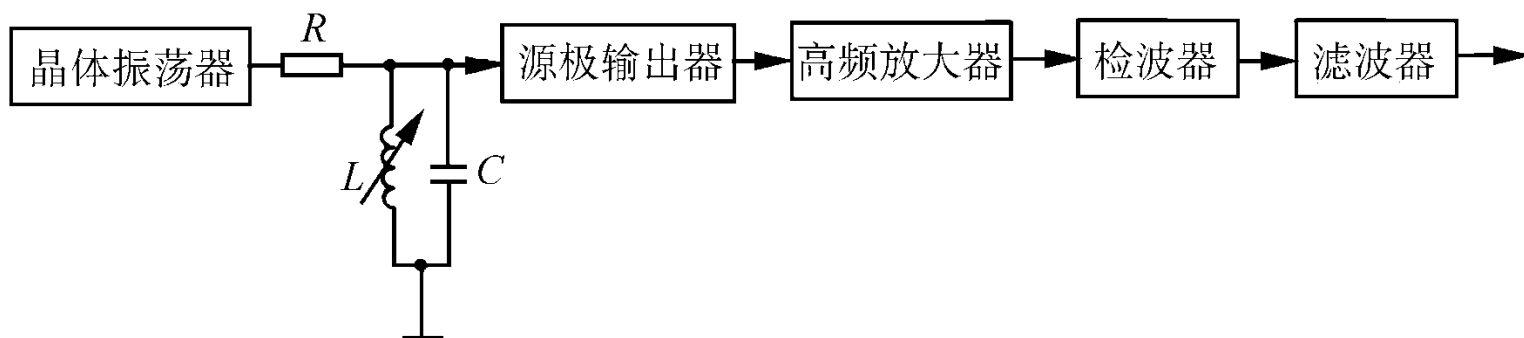


图3.27 定频调幅电路框图

- 图中 L 为传感器线圈电感，与电容 C 组成并联谐振回路，晶体振荡器提供高频激励信号。在无被测导体时，LC并联谐振回路调谐在与晶体振荡器频率一致的谐振状态，这时回路阻抗最大，回路压降最大(图3.28中之 U_0)。

第3章 变磁阻式传感器

➤ 当传感器接近被测导体时，损耗功率增大，回路失谐，输出电压相应变小。这样，在一定范围内，输出电压幅值与间隙(位移)成近似线性关系。由于输出电压的频率 f_0 始终恒定，因此称定频调幅式。

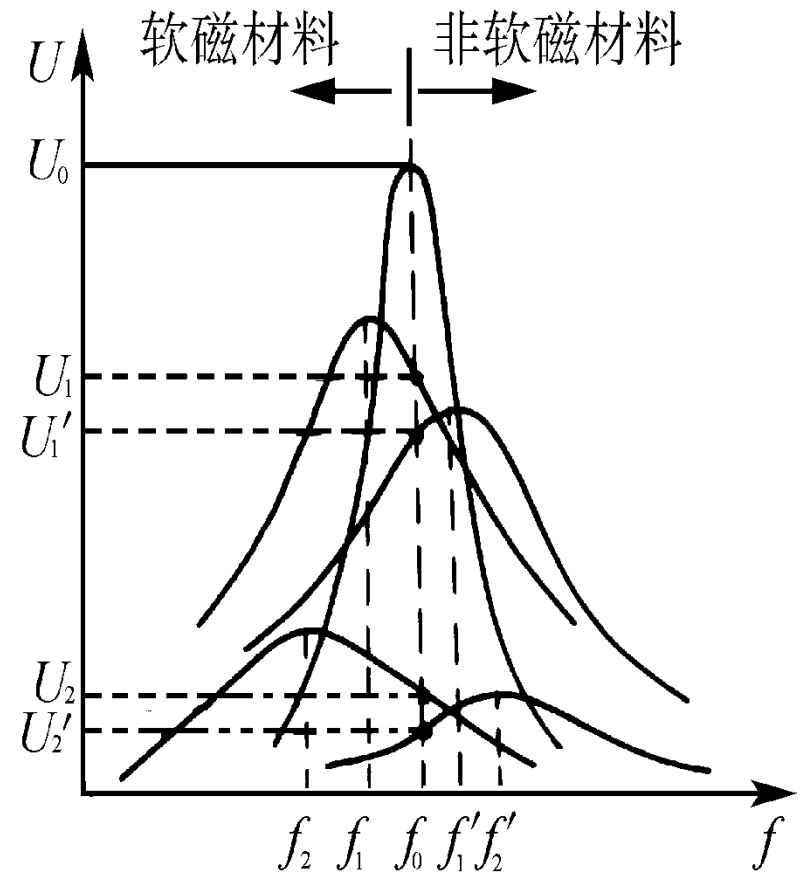


图3.28 定频调幅谐振曲线

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- LC回路谐振频率的偏移如图3. 28所示。当被测导体为软磁材料时，由于L增大而使谐振频率下降（向左偏移）。当被测导体为非软磁材料时则反之（向右偏移）。这种电路采用石英晶体振荡器，旨在获得高稳定度频率的高频激励信号，以保证稳定的输出。因为振荡频率若变化1%，一般将引起输出电压10%的漂移。
- 图3. 27中R为耦合电阻，用来减小传感器对振荡器的影响，并作为恒流源的内阻。R的大小直接影响灵敏度：**R大灵敏度低，R小则灵敏度高；但R过小时，由于对振荡器起旁路作用，也会使灵敏度降低。**

- 谐振回路的输出电压为高频载波信号，信号较小，因此设有高频放大、检波和滤波等环节，使输出信号便于传输与测量。图中源极输出器是为减小振荡器的负载而加。

2.变频调幅电路

- 定频调幅电路虽然有很多优点，并获得广泛应用，但线路较复杂，装调较困难，线性范围也不够宽。因此，人们又研究了一种**变频调幅电路**，这种电路的**基本原理**是将传感器线圈直接接入电容三点式振荡回路。当导体接近传感器线圈时，由于涡流效应的作用，振荡器输出电压的幅度和频率都发生变化，利用**振荡幅度**的变化来检测线圈与导体间的位移变化，而对频率变化不予理会。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 变频调幅电路的谐振曲线如图3. 29所示。

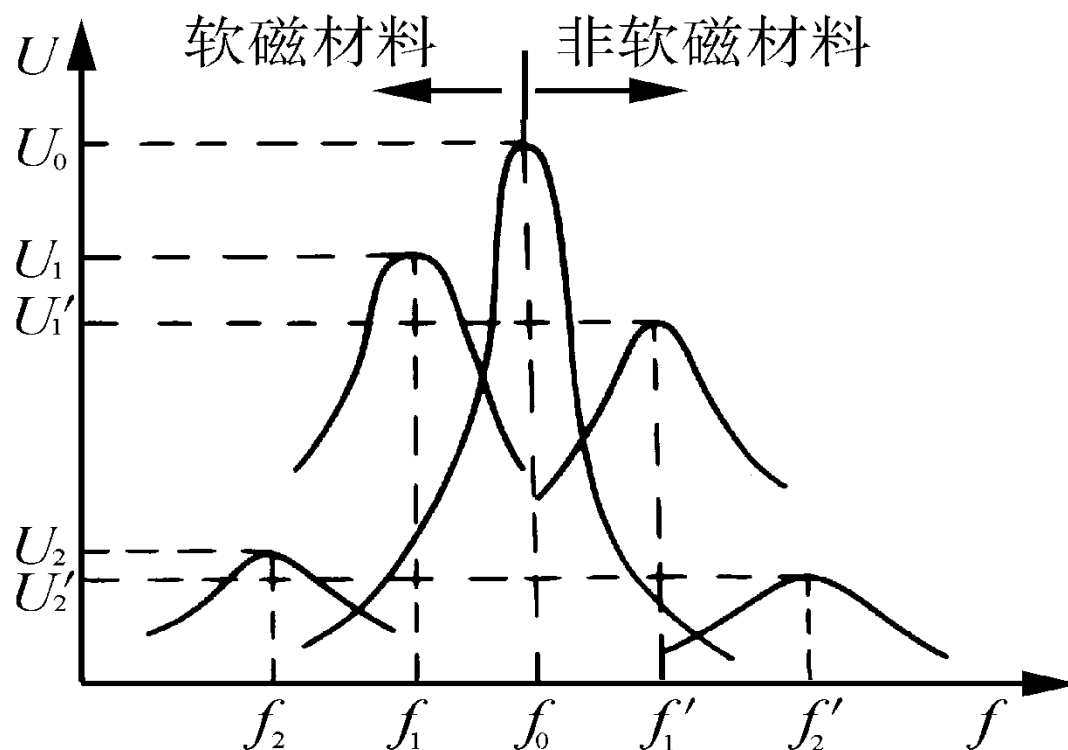


图3. 29 变频调幅谐振曲线

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 无被测导体时，振荡回路的Q值最高，振荡电压幅值最大，振荡频率为 f_0 。当有金属导体接近线圈时，涡流效应使回路Q值降低，谐振曲线变钝，振荡幅度降低，振荡频率也发生变化。当被测导体为软磁材料时，由于磁效应的作用，谐振频率降低，曲线左移；被测导体为非软磁材料时，谐振频率升高，曲线右移。所不同的是，振荡器输出电压不是各谐振曲线与 f_0 的交点，而是各谐振曲线峰点的连线。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 这种电路除结构简单、成本较低外，还具有灵敏度高、线性范围宽等优点，因此监控等场合常采用它。必须指出，该电路用于被测导体为软磁材料时，虽由于磁效应的作用使灵敏度有所下降，但磁效应时对涡流效应的作用相当于在振荡器中加入负反馈，因而能获得很宽的线性范围。所以如果配用涡流板进行测量，应选用软磁材料。

3.调频电路 ■

- 调频电路与变频调幅电路一样，将传感器线圈接入电容三点式振荡回路，所不同的是，以振荡频率的变化作为输出信号。如欲以电压作为输出信号，则应后接鉴频器。
- 这种电路的关键是提高振荡器的频率稳定度。通常可以从环境温度变化、电缆电容变化及负载影响三方面考虑。
- 提高谐振回路元件本身的稳定性也是提高频率稳定度的一个措施。为此，传感器线圈 L 可采用热绕工艺绕制在低膨胀系数材料的骨架上，并配以高稳定的云母电容或具有适当负温度系数的电容(进行温度补偿)作为谐振电容 C 。此外，提高传感器探头的灵敏度也能提高仪器的相对稳定性。

三. 电涡流式传感器的应用

1. 测位移 ■

- 电涡流式传感器的主要用途之一是可用来测量金属件的静态或动态位移，最大量程达数百毫米，分辨率为0.1%。目前电涡流位移传感器的分辨力最高已做到 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ (量程 $0\sim 15\text{ }\mu\text{m}$)。凡是可转换为位移量的参数，都可用电涡流式传感器测量，如机器转轴的轴向窜动、金属材料的热膨胀系数、钢水液位、纱线张力、流体压力等。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

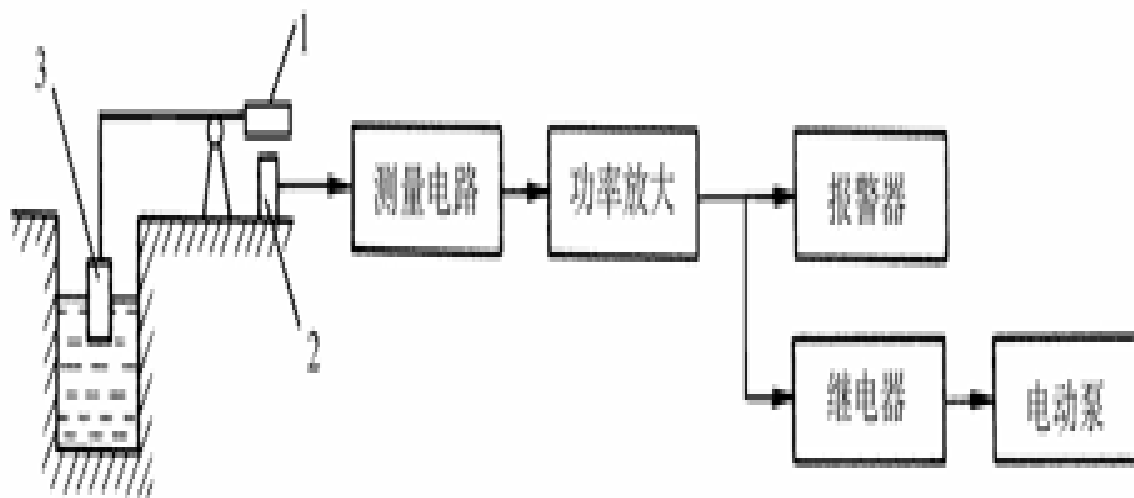


图3.30 液位监控系统

- 图3.30为用电涡流式传感器构成的液位监控系统。如图所示，通过浮子3与杠杆带动涡流板1上下位移，由电涡流式传感器2发出信号控制电动泵的开启而使液位保持一定。

2.测厚度

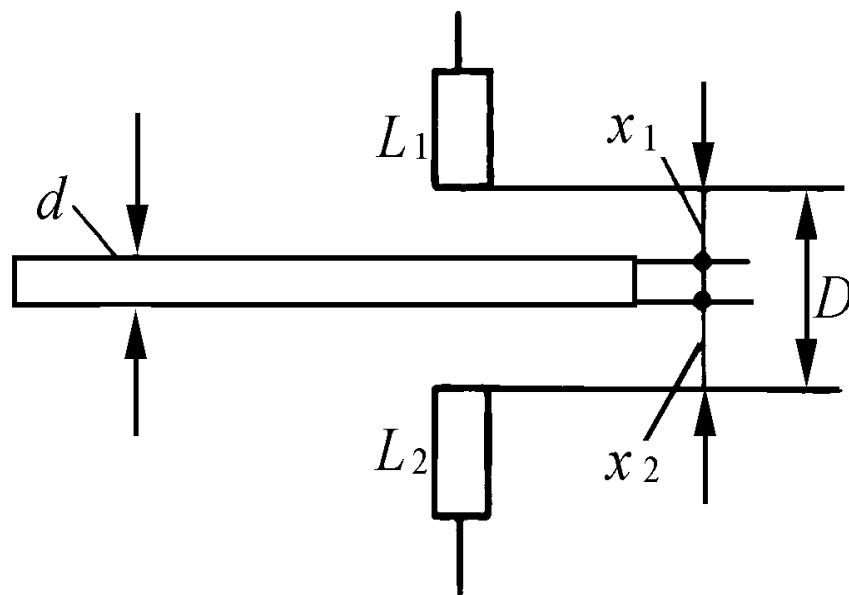


图3.31 测金属板厚度示意图

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- ❖ 除前已介绍的低频透射式电涡流传感器外，高频反射式电涡流传感器也可用于厚度测量。后者测板厚时，金属板材厚度的变化相当于线圈与金属表面间距离的改变，根据输出电压的变化即可知线圈与金属表面间距离的变化，即板厚的变化。图3.31所示为此应用一例。为克服金属板移动过程中上下波动及带材不够平整的影响，常在板材上下两侧对称放置两个特性相同的传感器 L_1 与 L_2 。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 由图可知，板厚 $d = D - (x + x_2)$ 。工作时，两个传感器分别测得 x 和 x_2 。板厚不变时， $(x + x_2)$ 为常值；板厚改变时，代表板厚偏差的 $(x + x_2)$ 所反映的输出电压发生变化。测量不同厚度的板材时，可通过调节距离 D 来改变板厚设定值，并使偏差指示为零。这时，被测板厚即板厚设定值与偏差指示值的代数和。
- 除上述非接触式测板厚外，利用电涡流式传感器还可制成金属镀层厚度测量仪、接触式金属或非金属材料厚度测量仪。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 除此以外：

- (1) 利用多个传感器沿转轴轴向排布，可测得各测点转轴的瞬时振幅值，从而作出转轴振型图；
- (2) 利用两个传感器沿转轴径向垂直安装，可测得转轴轴心轨迹；
- (3) 在被测金属旋转体上开槽或作成齿轮状，利用电涡流传感器可测出该旋转体的旋转频率或转速
- (4) 电涡流传感器还可用作接近开关，金属零件计数，尺寸或表面粗糙度检测，等等。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 电涡流传感器测位移，由于测量范围宽、反应速度快、可实现非接触测量，常用于在线检测。

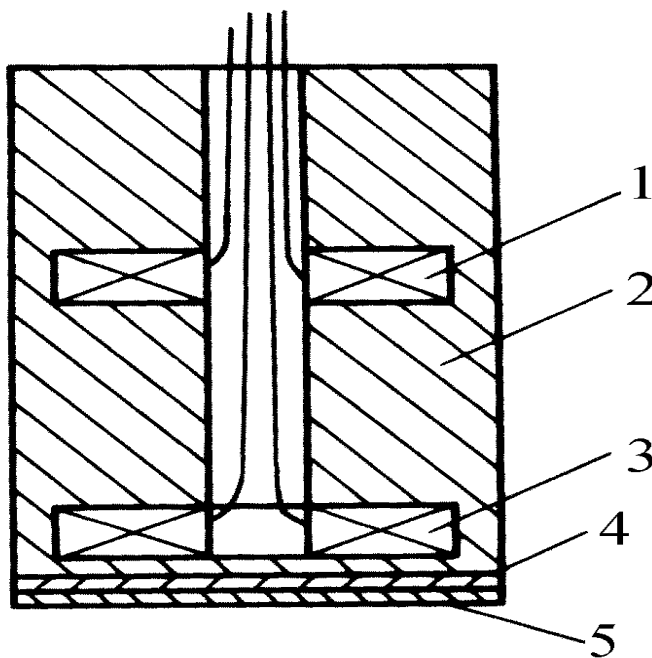


图3.32 测温用涡流式传感器

1-补偿线圈；2-管架；3-测量线圈；4-隔热衬垫；
5-温度敏感元件

3.测温度

在较小的温度范围内，导体的电阻率与温度的关系为

$$\rho_1 = \rho_0 [1 + a (t_1 - t_0)] \quad (3-42)$$

式中 ρ_1 、 ρ_0 ——分别为温度 t_1 与 t_0 时的电阻率；

a ——在给定温度范围内的电阻温度系数

- 若保持电涡流式传感器的机、电、磁各参数不变，使传感器的输出只随被测导体电阻率而变，就可测得温度的变化。上述原理可用来测量液体、气体介质温度或金属材料的表面温度，适合于低温到常温的测量。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 图3. 32为一种测量液体或气体介质温度的电涡流式传感器。它的优点是：

- (1) 不受金属表面涂料、油、水等介质的影响；
- (2) 可实现非接触测量；
- (3) 反应快。

目前已制成热惯性时间常数仅1ms的电涡流温度计。

➤ 除上述应用外，电涡流式传感器还可利用磁导率与硬度有关的特性实现非接触式硬度连续测量；利用裂纹引起导体电阻率、磁导率等变化的综合影响，进行金属表面裂纹及焊缝的无损探伤等。

第五节 压磁式传感器

一、压磁效应

- 铁磁材料在磁场中磁化时，在磁场方向会伸长或缩短，这种现象称为**磁致伸缩效应**。材料随磁场强度的增加而伸长或缩短不是无限制的，最终会达到饱和。
- 各种材料的饱和伸缩比是定值，称为**磁致伸缩系数**，用 λ_s 表示，即

$$\lambda_s = (\Delta l / l)_s \quad (3-43)$$

式中 $\Delta l / l$ ——伸缩比。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 在一定的磁场范围内，一些材料(如Fe)的 λ_s 为正值，称为正磁致伸缩；反之，一些材料(如Ni)的 λ_s 为负值，称为负磁致伸缩。测试表明，物体磁化时，不但磁化方向上会伸长(或缩短)，在偏离磁化方向的其他方向上也同时伸长(或缩短)，只是随着偏离角度的增大其伸长(或缩短)比逐渐减小，直到接近垂直于磁化方向反而要缩短(或伸长)。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 铁磁材料的这种磁致伸缩，是由于自发磁化时导致物质的晶格结构改变，使原子间距发生变化而产生的现象。铁磁物体被磁化时如果受到限制而不能伸缩，内部会产生应力。如果在它外部施力，也会产生应力。当铁磁物体因磁化而引起伸缩(且不管何种原因)产生应力 σ 时，其内部必然存在磁弹性能 E 。分析表明， E 与 $\lambda_s \sigma$ 成正比，且同磁化方向与应力方向之间的夹角有关。由于 E 的存在，将使铁磁材料的磁化方向发生变化。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 对于正磁致伸缩材料，如果存在拉应力，将使磁化方向转向拉应力方向，加强拉应力方向的磁化，从而使拉应力方向的磁导率增大。反之，压应力将使磁化方向转向垂直于压应力的方向，削弱应力方向的磁化，从而使压应力方向的磁导率减小。对于负磁致伸缩材料，情况正好相反。
- 这种被磁化的铁磁材料在应力影响下形成磁弹性能，使磁化强度矢量重新取向从而改变应力方向的磁导率的现象，称为磁弹性效应，或称压磁效应。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 铁磁材料的相对导磁率变化与应力 σ 之间的关系为

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2\lambda_s}{B_s^2} \sigma \mu \quad (3-44)$$

式中 μ ——铁磁材料的磁导率； \square
 B_s ——饱和磁感应强度。

- 从式(3-44)可知，用于磁弹性式传感器的铁磁材料要求能承受大的应力、磁导率高、饱和磁感应强度小。常用的材料是硅钢片与铁镍软磁合金，由于后者价贵且性能不够稳定，目前大都采用硅钢片。

二. 压磁式传感器的工作原理

- 压磁式测力传感器的压磁元件由具有正磁致伸缩特性的硅钢片粘叠而成。如图3.33所示，硅钢片上冲有四个对称的孔，孔1、2的连线与孔3、4相互垂直〔图(a)〕。孔1、2间绕有激磁绕组 W_{12} ，孔3、4间绕有测量绕组 W_{34} ，外力 F 与绕组 W_{12} 、 W_{34} 所在平面成 45° 角。当激磁绕组 W_{12} 通过一定的交变电流时，铁心中就产生磁场 H ，方向如图(b)所示。设将孔间区域分成A、B、C、D四部分。无外力作用时，A、B、C、D四部分的磁导率相同，磁力线呈轴对称分布，合成磁场强度 H 平行于测量绕组 W_{34} 的平面。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

在磁场作用下，导磁体沿H方向磁化，磁通密度B与H取向相同。由于测量绕组无磁通通过，故不产生感应电势。

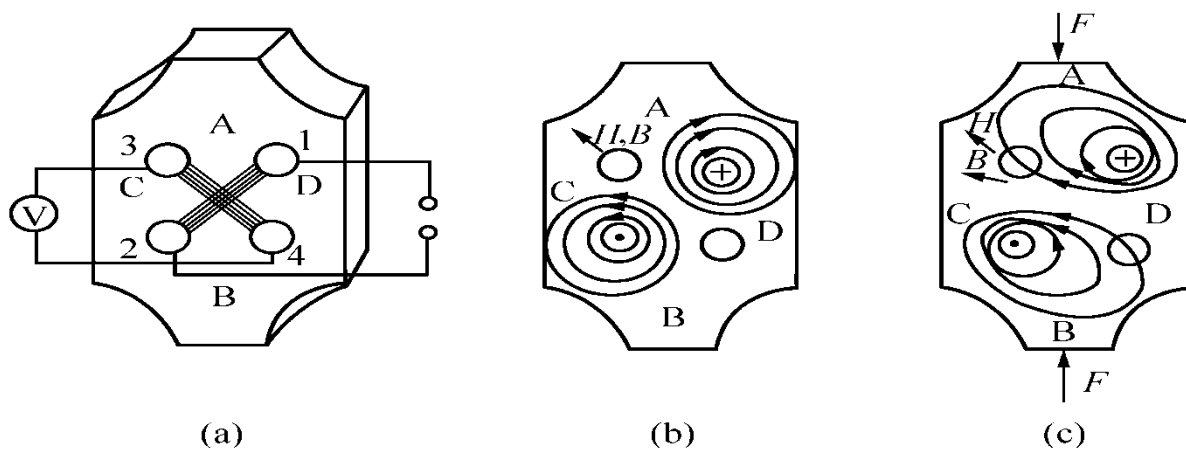


图3.33 压磁式测力传感器的工作原理

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

- 若对压磁元件施加压力 F ，如图(c)所示，A、B区域将产生很大的压应力 σ ，而C、D区域基本上仍处于自由状态。对于正磁致伸缩材料，压应力 σ 使其磁化方向转向垂直于压力的方向。因此，A、B区的磁导率 μ 下降，磁阻增大，而与应力垂直方向的 μ 上升，磁阻减小。磁通密度 B 偏向水平方向，与测量绕组 W_{34} 交链， W_{34} 中将产生感应电势 e 。 F 值越大， W_{34} 交链的磁通越多， e 值就越大。经变换处理后，即能用电流或电压来表示被测力 F 的大小。

三. 压磁式测力传感器的结构

- 压磁式测力传感器的核心部件是压磁元件。组成压磁元件的铁心有四孔圆弧形、六孔圆弧形、“中”字形和“田”字形等多种，图3.34为一种典型的测力传感器。可按测力大小、输出特性的要求和灵敏度等选用。为扩大测力范围，可以将几个冲片联成多联冲片。
- 此外，还有“||”字形与横“曰”字形冲片，常用于测定或控制拉力或压力，以及无损检测残余应力。所有铁心都由冲片叠合而成，以减小涡流损耗。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

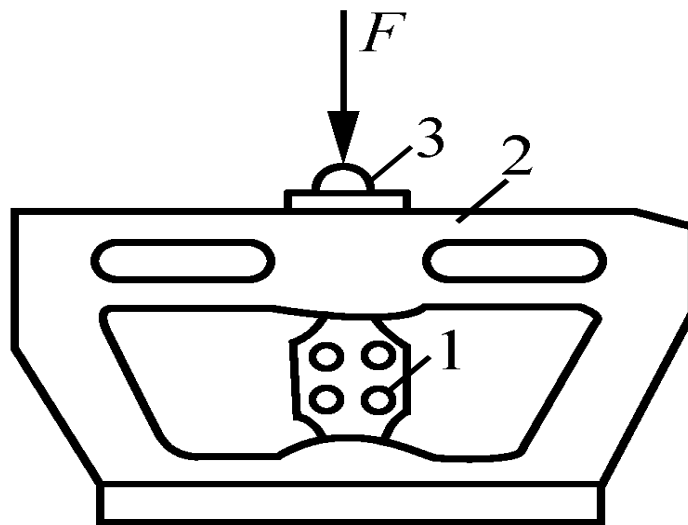


图3.34 压磁式测力传感器的结构

四. 测量电路

- 压磁式传感器的输出信号较大，一般不需要放大。所以测量电路主要由**激磁电源**、**滤波电路**、**相敏整流**和**显示器**等组成，基本电路如图3.35所示。
- 由于铁磁材料的磁化特性随温度而变，压磁式传感器通常要进行温度补偿。最常用的方法是将工作传感器与不受载体作用的补偿传感器构成差动回路。

第3章 变磁阻式传感器



www.seu.edu.cn

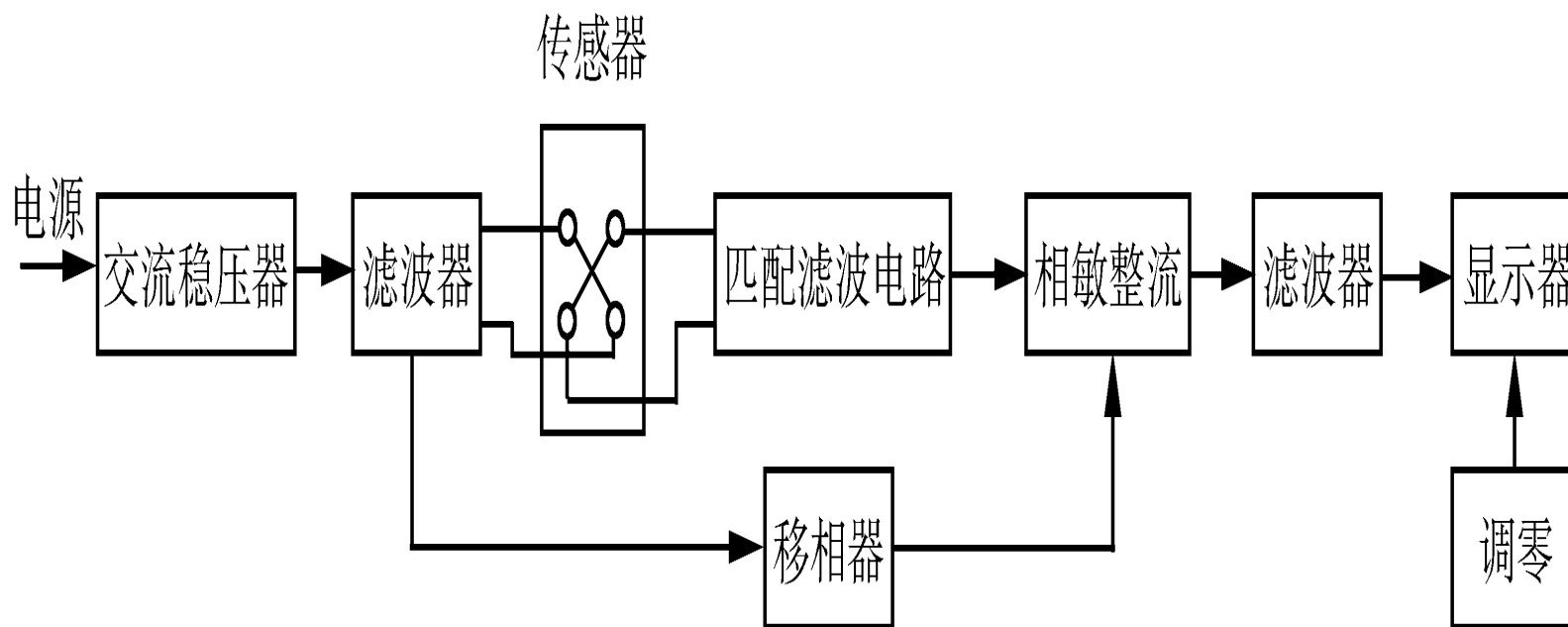


图3.35 压磁式传感器的电路原理框图

本章结束， 谢谢