



第五章 电感式传感器

目录

5.1 螺管式电感传感器

5.2 电涡流电感传感器

5.3 电感传感器的应用

5.1 螺管式电感传感器

单线圈、差动式

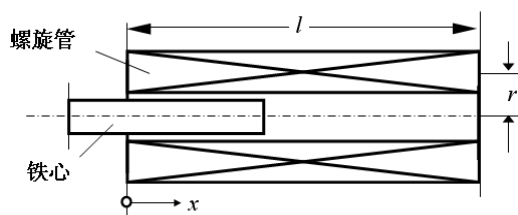


图4-6 单线圈螺管型传感器结构图

- 一个多层的细长线圈被放置在一个铁磁性的壳体中。
- 一个可动的铁芯，沿线圈的轴向移动，用于改变线圈的电感。
- 螺管的长径比足够大。

3

1 螺管型电感传感基本原理

螺管线圈在轴向产生的磁场，根据图4-7和毕奥—沙伐—拉普拉斯定律可得：

$$B_l = \frac{I\mu_0 n}{2} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

式中

n ——线圈单位长度的匝数

$$n = \frac{N}{l};$$

l ——螺管线圈长度；

N ——线圈总匝数；

θ_1, θ_2 ——螺线管中心任意点至两端点连线与中心线的夹角。

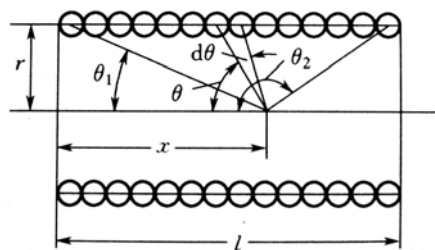


图4-7 螺管线圈轴向磁场分布计算图

4

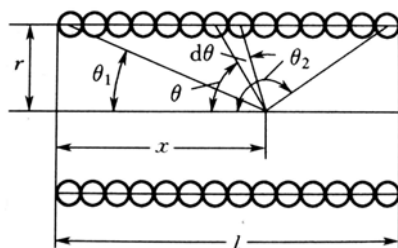
$$\cos \theta_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \quad \cos \theta_2 = -\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}}$$

↓

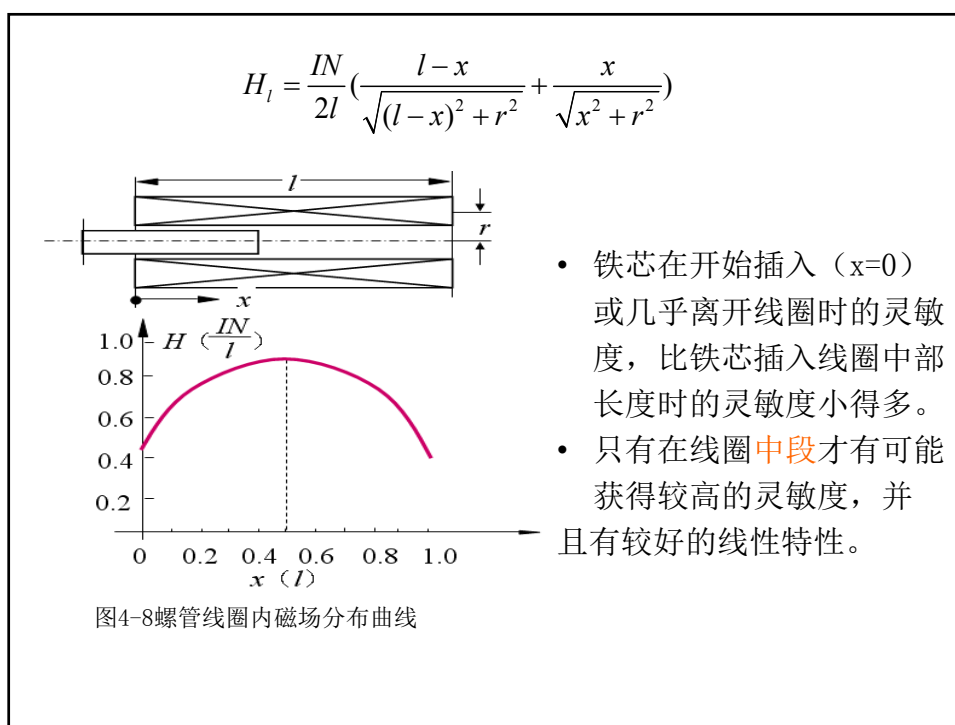
$$B_l = \frac{\mu_0 IN}{2} \left(\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \right)$$

$$= \frac{\mu_0 IN}{2l} \left(\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \right)$$

则

$$H_l = \frac{IN}{2l} \left(\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \right)$$


5



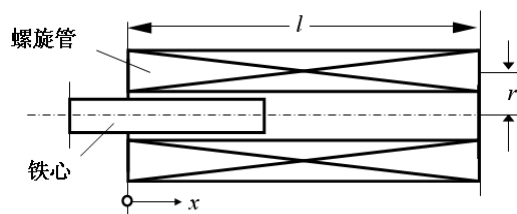


图4-6 单线圈螺管型传感器结构图

如果线圈长度 $l > r$ ，铁芯长度 l_c 小于 l ，则线圈电感的相对变化量为

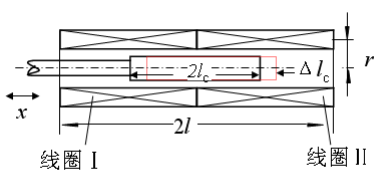
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta l_c}{l_c} \frac{1}{1 + \left(\frac{l}{l_c}\right) \left(\frac{r}{r_c}\right)^2 \left(\frac{1}{\mu_r - 1}\right)}$$

若被测量与 Δl_c 成正比，则与 ΔL 也成正比。实际上由于磁场强度分布不均匀，输入与输出间的关系是非线性的。

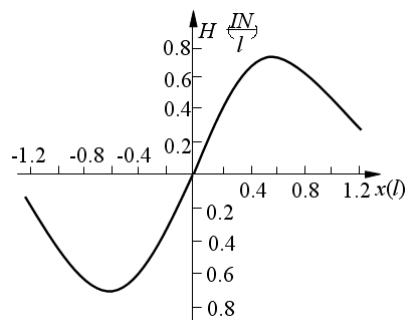
2 差动螺旋管式电感传感器

- 为提高灵敏度与线性度，常采用差动螺旋管式电感传感器(图4-9)；

- 轴向的磁场强度分布 $H = \frac{IN}{2l} \left[\frac{l-x}{\sqrt{r^2 + (l-x)^2}} - \frac{l+x}{\sqrt{r^2 + (l+x)^2}} + \frac{2x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right]$

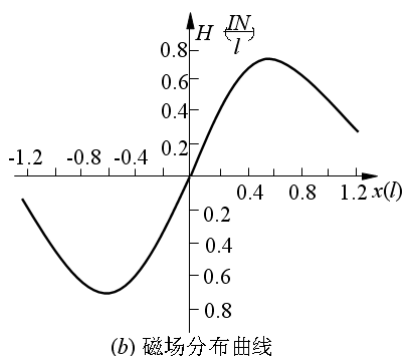


(a) 结构示意图



(b) 磁场分布曲线

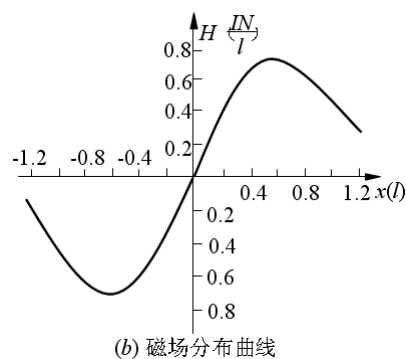
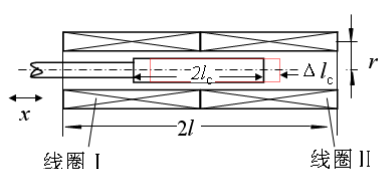
图4-9 差动螺旋管式电感传感器



- 为得到较好的线性，铁芯长度取 $0.6l$ 时，则特性工作在 H 曲线的拐弯处，此时 H 变化小。
- 铁芯长度为 $2lc$ ，小于线圈长度 $2l$ ；
- 当铁芯向线圈 II 移动 Δlc 时，线圈 II 电感增加 ΔL_2 ，线圈 I 电感变化 ΔL_1 与 ΔL_2 大小相等，符号相反；
- 差动输出

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{L} = 2 \frac{\Delta l_c}{l_c} \frac{1}{1 + \left(\frac{l}{l_c}\right) \left(\frac{r}{r_c}\right)^2 \left(\frac{1}{\mu_r - 1}\right)}$$

9

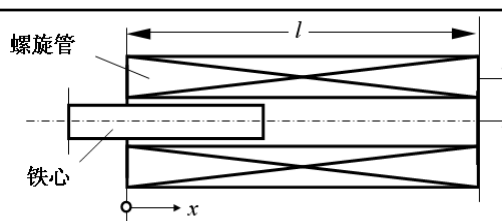


差动输出
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{L} = 2 \frac{\Delta l_c}{l_c} \frac{1}{1 + \left(\frac{l}{l_c}\right) \left(\frac{r}{r_c}\right)^2 \left(\frac{1}{\mu_r - 1}\right)}$$

- $\Delta L/L$ 与铁芯长度相对变化 $\Delta lc/lc$ 成正比，比单螺管式电感传感器灵敏度高一倍。
- 为使灵敏度增大，应使线圈与铁芯尺寸比值 r/r_c 趋于1，且选用铁芯磁导率 μ_r 大的材料。

10

螺管式自感传感器的特点：



- ①结构简单，制造装配容易；
- ②由于空气间隙大，磁路磁阻高，因此灵敏度低，但线性范围大；
- ③由于磁路大部分为空气，易受外部磁场干扰；
- ④由于磁阻高，为了达到某一自感量，需要的线圈匝数多，因而线圈分布电容大；
- ⑤要求线圈框架尺寸和形状必须稳定，否则影响线性和稳定性。

3 电感线圈的等效电路

- 假设电感线圈为一理想纯电感，但实际的传感器中，线圈不可能是纯电感；
- 线圈的铜损电阻 (R_c)、铁芯的涡流损耗电阻 (R_e) 和线圈的寄生电容 (C)。

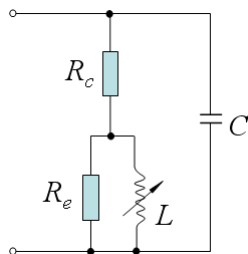


图4-10 电感传感器等效电路图

1) 铜损电阻 $R_c = \frac{4\rho_c N l_{cp}}{\pi d^2}$

2) 涡流损耗电阻

$$R_e = \frac{12\rho_i S N^2}{l t^2} (\Omega)$$

3) 并联寄生电容

主要由线圈的固有电容及电缆分布电容组成。

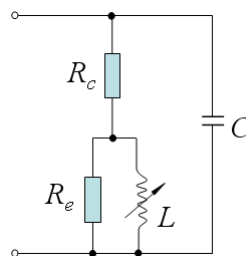


图4-10 电感传感器等效电路图

13

不考虑电容C时，串联等效阻抗

$$Z = R_s + j\omega L$$

考虑并联电容C时，等效阻抗 Z_p

$$Z_p = \frac{(R_s + j\omega L) \cdot 1/j\omega C}{(R_s + j\omega L) + 1/j\omega C}$$

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

式中 $Q = \omega L/R_s$ ，当 $Q \gg 1$ 时

$$Z_p = \frac{R_s}{(1 - \omega^2 LC)^2} + j \frac{\omega L}{(1 - \omega^2 LC)} = R_p + j\omega L_p$$

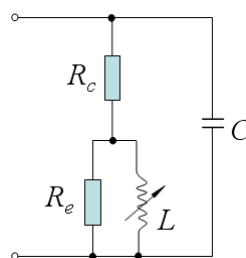
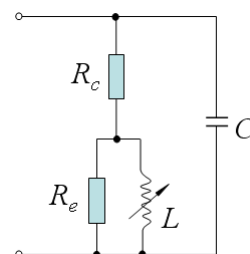


图4-10 电感传感器等效电路图

$$Z_p = \frac{R_s}{(1 - \omega^2 LC)^2} + j \frac{\omega L}{(1 - \omega^2 LC)} = R_p + j\omega L_p$$

- 并联电容 C 的存在，等效串联损耗电阻和等效电感增大；
- 等效 $Q_p = \frac{\omega L_p}{R_p} = (1 - \omega^2 LC)Q$ ， Q 值减少；
- 电感相对变化为 $\frac{dL_p}{L_p} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \cdot \frac{dL}{L}$



* 并联电容后，传感器的灵敏度提高了

* 在测量中若如要改变电缆长度时，则应对传感器的灵敏度重新校准。

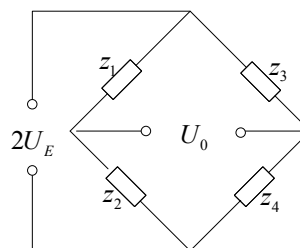
4 测量电路

① 交流电桥

为提高灵敏度，改善线性度，一般接成差动形式。

串联结构： $Z_1 = Z_2$ ， $Z_3 = Z_4$

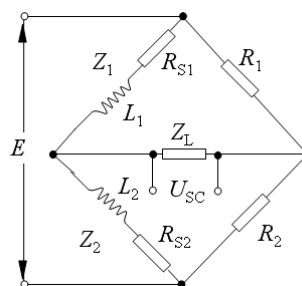
并联结构： $Z_1 = Z_3$ ， $Z_2 = Z_4$



① 交流电桥

采用串联对称时，设

$$\left. \begin{aligned} Z_1 = Z_2 = Z = R_s + j\omega L \\ R_{S1} = R_{S2} = R_s \\ L_1 = L_2 = L \\ R_1 = R_2 = R \end{aligned} \right\}$$



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

图4-11 交流电桥原理图

$$\text{假设 } Z_L \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad \dot{U}_{sc} = \dot{E} \frac{\Delta Z}{2Z} = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta R_s + j\omega \Delta L}{R_s + j\omega L}$$

17

假设 $Z_L \rightarrow \infty$ （不考虑带负载）

$$\dot{U}_{sc} = \dot{E} \frac{\Delta Z}{2Z} = \frac{\dot{E}}{2} \cdot \frac{\Delta R_s + j\omega \Delta L}{R_s + j\omega L}$$

输出电压幅值

$$U_{sc} = \frac{\sqrt{\omega^2 \Delta L^2 + \Delta R_s^2}}{2\sqrt{R_s^2 + (\omega L)^2}} E \approx \frac{\omega \Delta L}{2\sqrt{R_s^2 + (\omega L)^2}} E$$

$$\text{输出阻抗 } Z = \frac{\sqrt{(R + R_s)^2 + (\omega L)^2}}{2}$$

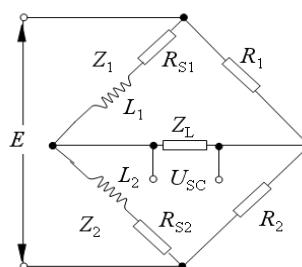


图4-11 交流电桥原理图

$$\text{开路输出 } \dot{U}_{sc} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)} \left[\left(\frac{1}{Q^2} \cdot \frac{\Delta R_s}{R_s} + \frac{\Delta L}{L} \right) + j \frac{1}{Q} \left(\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta R_s}{R_s} \right) \right]$$

$Q = \frac{\omega L}{R_s}$ 为电感线圈的品质因数

分析:

- 桥路输出电压 U_{sc} 包含与电源 E 同相和正交两个分量。
- 实际只希望有同相分量：使 $\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R_s}{R_s}$ 或 Q 值比较大。
- 但 $\Delta R_s/R_s$ 一般很小，所以要求线圈有高的品质因数。
- 当 Q 值很高时 $\dot{U}_{sc} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta L}{L}$

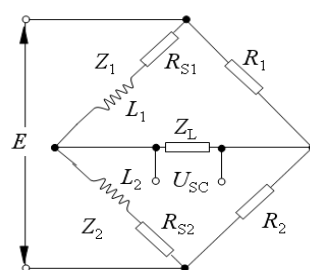


图4-11 交流电桥原理图

交流电桥

并联结构： $Z_1=Z_3$, $Z_2=Z_4=Z$

- 平衡电抗的配置决定了并联结构的灵敏度。

$$Z_1 = Z_{10} + \Delta Z, \quad Z_3 = Z_{10} - \Delta Z$$

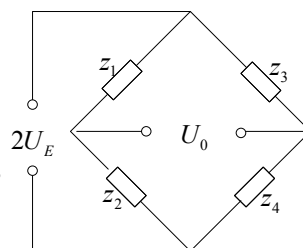
$$Z_2 = Z_4 = Z$$

$$U_{po} = U_E \frac{4Z \times \Delta Z}{(Z_{10} + Z)^2 - \Delta Z^2}$$

非线性输出特性

$$U_{po} \approx U_E \frac{4Z \times \Delta Z}{(Z_{10} + Z)^2} = U_{so} \frac{4Z_{10} \times Z}{(Z_{10} + Z)^2}$$

串联结构时的输出电压



交流电桥（并联结构）

问题：从灵敏度角度来选择 $Z_2=Z_4$ 的阻抗形式。

●相同电感：

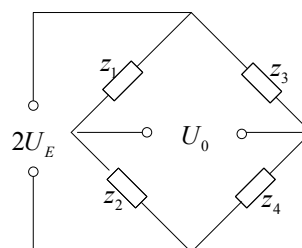
$$Z_2 = Z_4 = j\omega L_{10} = Z$$

$$\text{令 } n = Z/Z_{10}$$

$$\therefore U_{po} = U_{so} \frac{4Z_{10} \times Z}{(Z_{10} + Z)^2} = U_{so} \frac{4n}{(1+n)^2}$$

$$n = 1 \text{ 时, } U_{po} \rightarrow \text{Max}$$

$$U_{po \text{ Max}} = U_{so} \text{ (四个电感相同时取最大值)}$$



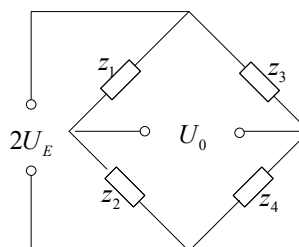
交流电桥（并联结构）

● Z_2 、 Z_4 由相同电阻构成：

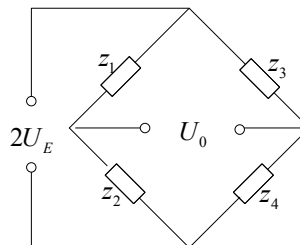
$$Z_2 = Z_4 = Z = R,$$

$$U_{po \text{ Max}} = U_{so} \frac{4Z_{10} \times Z}{(Z_{10} + Z)^2} = U_{so} \frac{4j\omega L_{10} R}{(j\omega L_{10} + R)^2}$$

$$\text{当 } \omega L_{10} = R, U_{po} \rightarrow \text{Max}, U_{po} = U_{so} \frac{4jR \times R}{(jR + R)^2} = U_{so} \frac{4jR^2}{2jR^2} = 2U_{so}$$



- Z_2 、 Z_4 为相同电容：即同一支路同时存在C和L
- 同一条串联支路存在电感和电容：若激励电源处于LC谐振频率，电路电流最大，大小取决于电路中直流电阻。



$$Z_{10} = R_c + j\omega L_{10}$$

$$Z_2 = Z_4 = \frac{1}{j\omega C} = Z, \text{ 当 } \omega L_{10} = \frac{1}{\omega C}, Q = \frac{1}{R_c \omega C} = \frac{\omega L}{R_c} = \frac{\sqrt{L/C}}{R_c}$$

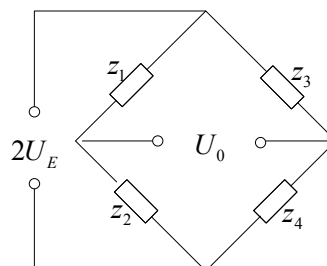
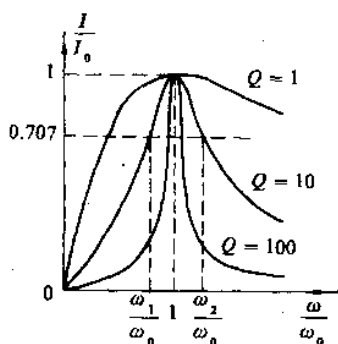
$$U_{p0} = U_{s0} \frac{4Z_{10} \times Z}{(Z_{10} + Z)^2} = U_{s0} \frac{4(j\omega L_{10} + R_c) \times \frac{1}{j\omega C}}{(j\omega L_{10} + R_c + \frac{1}{j\omega C})^2} \approx U_{s0} \frac{L_{10}}{R_c^2} \frac{1}{C}$$

$$= U_{s0} \times 4Q^2$$

交流电桥（并联结构）

并联结构时，串联支路由电容构成，且谐振时 $U_{p0} \approx U_{s0} \times 4Q^2$

其中： $U_{s0} = U_E \frac{2\Delta Z}{Z_{10} + Z_{20}} = U_E \frac{\Delta Z}{Z_{10}}$



交流电桥：并联结构（小结）

● Z_2 、 Z_4 由相同电感构成

当 $Z_1=Z_2=Z_3=Z_4=L$ 时, $U_{P0max}=U_{S0}$

● Z_2 、 Z_4 由相同电阻构成

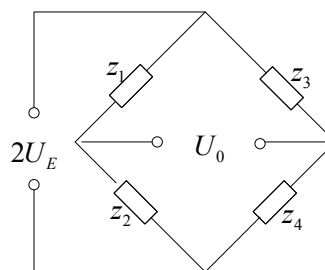
当 $\omega L_{10}=R$ 时, $U_{P0max}=2U_{S0}$

● Z_2 、 Z_4 由相同电容构成

当 $\omega L_{10}=1/j\omega C$ 时, $U_{P0max}=4Q^2U_{S0}$ （类似于谐振）

结论：

由电容构成的并联结构，其灵敏度最大。



② 变压器电桥

• 平衡臂为变压器的两个副边；

• 当负载阻抗为无穷大时，流入工作臂的电流 $\dot{I} = \frac{\dot{E}}{Z_1 + Z_2}$

输出电压

$$\dot{U}_{sc} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{E} - \frac{\dot{E}}{2} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

• 初始: $Z_1=Z_2=Z=R_S + j\omega L$ 。

• 工作: $Z_1=Z - \Delta Z$, $Z_2=Z + \Delta Z$,

则 $\dot{U}_{sc} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$

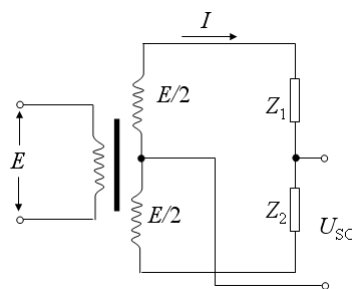


图4-12 变压器电桥原理图

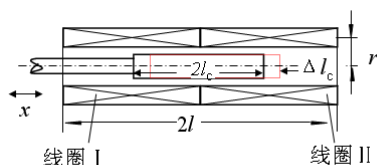
$$\dot{U}_{SC} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$$

衔铁向反方向移动: $Z_1 = Z + \Delta Z$, $Z_2 = Z - \Delta Z$

$$\dot{U}_{SC} = -\frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$$

- 当衔铁向不同方向移动时, 产生的输出电压 U_{SC} 大小相等、方向相反 (相位互差 180°), 反映衔铁移动的方向。
- 为判别交流信号的相位, 接入专门的相敏检波电路。

输出电压幅值为 $U_{SC} = \frac{\omega \Delta L}{2\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}} E$



(a) 结构示意图

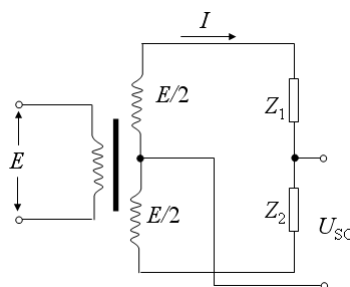
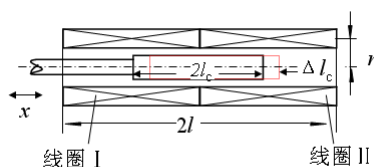


图4-12 变压器电桥原理图

变压器电桥

- 略去变压器副边的阻抗, 通常它远小于电感的阻抗;
- 输出阻抗 $Z = \frac{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}}{2}$
- 优点: 与电阻平衡电桥相比, 元件少, 输出阻抗小, 桥路开路时电路呈线性;
- 缺点: 变压器副边不接地, 容易引起来自原边的静电感应电压, 使高增益放大器不能工作。



(a) 结构示意图

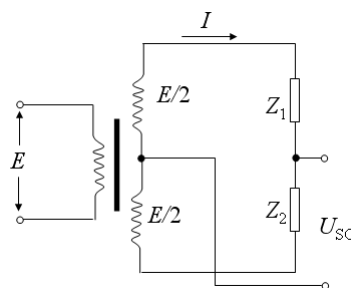
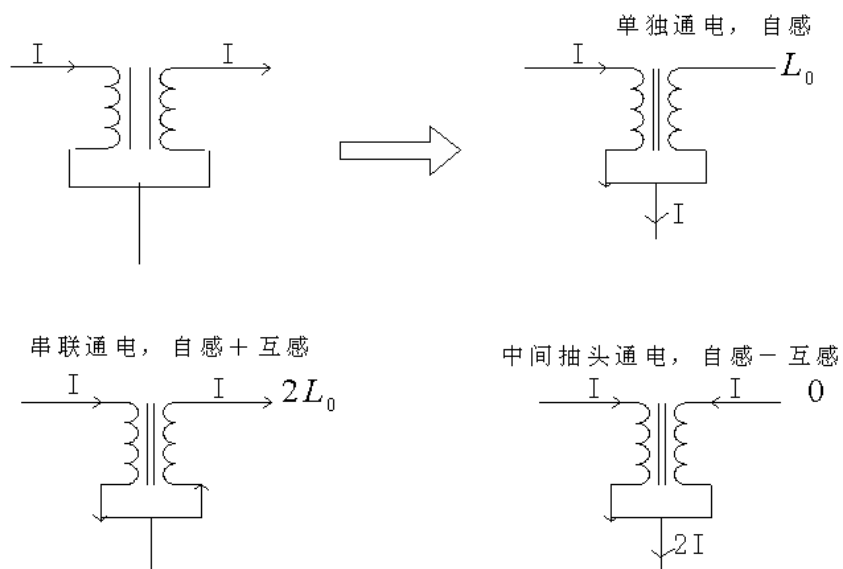


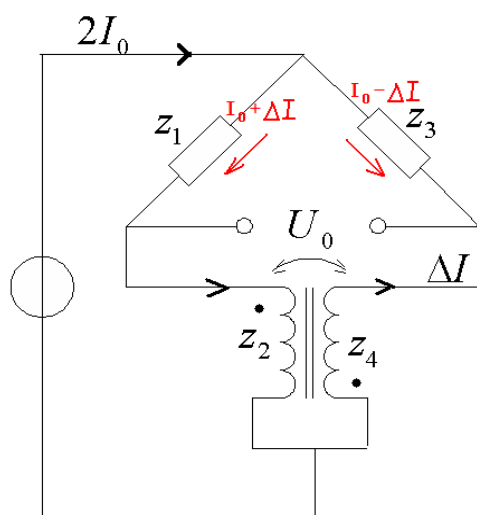
图4-12 变压器电桥原理图

③ 紧耦合电感电桥



③紧耦合电感电桥——有效提高桥路灵敏度的方法

桥路电源为恒流源，大小为 $2I_0$ 。



30

③紧耦合电感电桥——有效提高桥路灵敏度的方法

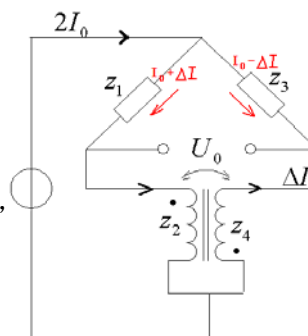
测量时: $Z_1 = Z_{10} - \Delta Z, Z_3 = Z_{10} + \Delta Z$

$$I_1 = I_0 + \Delta I, I_3 = I_0 - \Delta I$$

其中: I_0 对 Z_2, Z_4 无作用。中间抽头通电,
自感和互感相互抵消。

$$\therefore U_E = I_0(Z_{10} - \Delta Z) + \Delta I(Z_{10} - \Delta Z + Z_2)$$

$$= I_0(Z_{10} + \Delta Z) - \Delta I(Z_{10} + \Delta Z + Z_4)$$



③紧耦合电感电桥——有效提高桥路灵敏度的方法

注意: $Z_4 = Z_2, \Delta I = \frac{I_0 \Delta Z}{Z_2 + Z_{10}}$

$$U_0 = \Delta I(Z_2 + Z_4) = \frac{2I_0 Z_2}{Z_2 + Z_{10}} \Delta Z$$

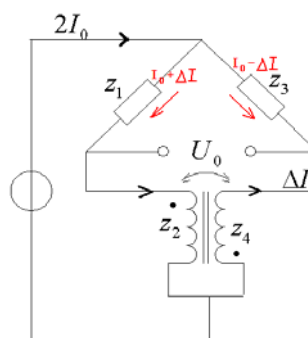
$$\text{令} \begin{cases} Z_{10} = j\omega L_{10} \\ Z_2 = j\omega(2L_0) \end{cases}$$

$$\text{则 } U_0 = I_0 \frac{4 \frac{L_0}{L_{10}}}{1 + (2 \frac{L_0}{L_{10}})} \times \Delta Z \approx 2I_0 \times \Delta Z$$

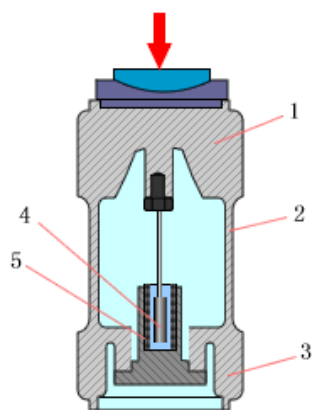
$$(L_0 \gg L_{10})$$

$$\text{灵敏度 } K_s = 2I_0$$

线性输出



5 差动变压器式力传感器



外力作用下，变形使差动变压器的铁芯微位移，变压器次级产生相应电信号。

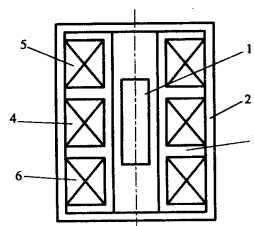
差动变压器式力传感器

1—上部 2—变形部 3—下部
4—铁心 5—差动变压器线圈

差动变压器式传感器工作原理

螺线管式差动变压器由初级线圈，两个次级线圈和插入线圈中央的圆柱形铁芯等组成。

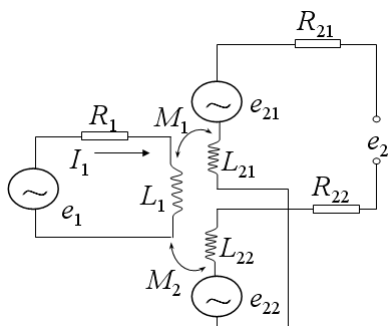
1-活动衔铁； 2-导磁外壳
3-骨架； 4-初级绕组w
5-次级绕组w_{2a}； 6-次级绕组w₂



螺线管式差动变压器按线圈绕组排列的方式不同可分为二节、三节、四节和五节式等类型。

差动变压器等效电路

- 两个次级线圈反相串联；
- 忽略铁损、导磁体磁阻和线圈分布电容



$$e_{21} = -j\omega M_1 I_1$$

$$e_{22} = -j\omega M_2 I_1$$

$$e_2 = e_{21} - e_{22} = -j\omega(M_1 - M_2) \frac{e_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

幅值为：

$$e_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)e_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

输出阻抗为：

$$Z = \sqrt{(R_{21} + R_{22})^2 + (\omega L_{21} + \omega L_{22})^2}$$

35

差动变压器输出电势 e_2 与衔铁位移 x 的关系

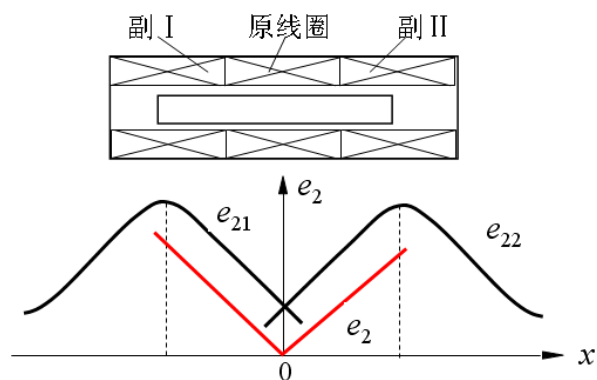


图4-16 差动变压器的输出特征
(I 、 II 为次级线圈)

36

差动变压器次级线圈输出有效值为

$$e_2 = \omega I (M_1 - M_2)$$

根据理论推算可得

$$e_2 = K_1 x (1 - K_2 x^2)$$

灵敏度

非线性误差度

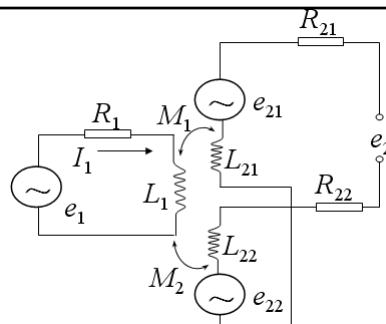
其中

$x = (l_1 - l_2)/2$, 表示铁芯位移量

$$K_1 = \frac{16\pi^3 f I_1 N_1 N_2 (b + 2d + x_0) x_0}{10^7 m l_A \ln(r_0/r_i)}$$

$$K_2 = \frac{1}{x_0(x_0 + 2d + b)}$$

$$x_0 = (l_1 + l_2)/2$$



$$e_2 = K_1 x (1 - K_2 x^2)$$

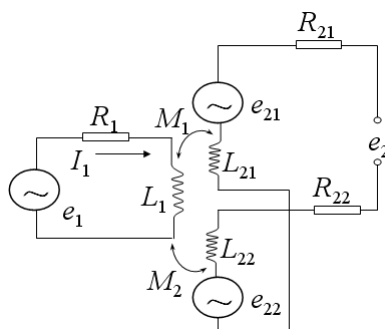
灵敏度 $K_1 = \frac{16\pi^3 f N_1 N_2 (b + 2d + x_0) x_0}{10^7 m l_A \ln(r_0/r_i)} \cdot \frac{e_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$

(1) 次级线圈匝数 N_2

当 $\omega L_1 \gg R_1$ 时

$$K_1 \approx \frac{N_2}{N_1} A \quad A - \text{系数}$$

$\frac{N_2}{N_1} \uparrow \quad K_1 \uparrow$, 但零点残余电压



$$e_2 = K_1 x (1 - K_2 x^2) \quad K_1 = \frac{16\pi^3 f N_1 N_2 (b + 2d + x_0) x_0}{10^7 m l_A \ln(r_0 / r_i)} \cdot \frac{e_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

(2) 初级线圈电压 e_1

电压 $e_1 \uparrow$, $K_1 \uparrow$, 但会引起变压器发热, 而使输出信号漂移。

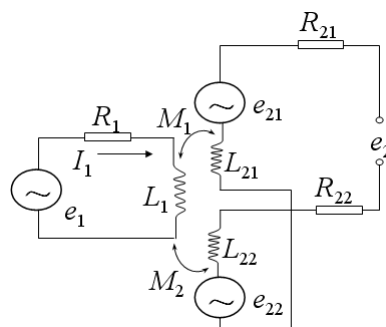
(3) 激励电压的频率 f

低频时, $\omega L_1 \ll R_1$

$$K_1 \approx B \cdot f \quad B - \text{系数}$$

高频时, $\omega L_1 \gg R_1$

$$K_1 \approx C \quad C - \text{常数}$$



39

误差因素分析

① 激励电压的幅值与频率的影响

◆ 幅值波动:

会使线圈激励磁场的磁通发生变化, 直接影响输出电势。

◆ 频率波动:

只要适当地选择较高频率, 频率的波动影响不大。

② 温度变化的影响

周围环境温度的变化, 引起线圈及导磁体磁导率的变化, 从而使线圈磁场发生变化产生温度漂移。

方法: 提高线圈品质因数、采用差动电桥、恒流源激励

误差因素分析

③ 零点残余电压

◆ 当差动变压器衔铁处于中间位置时，理想条件下其输出电压为零。但实际上仍有一微小的电压值(从零点几 mV 到数十 mV)存在，称为**零点残余电压**。

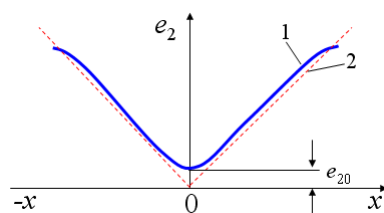


图4-21 差动变压器的零点残余电压

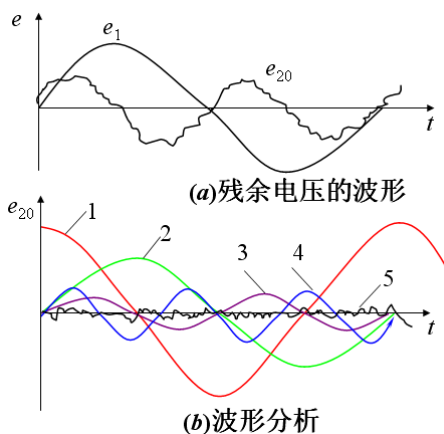
1——实际特性 2——理想特性

后果：零点残余电压的存在造成零点附近的不灵敏区；零点残余电压输入放大器内会使放大器末级趋向饱和，影响电路正常工作。

41

③ 零点残余电压

- 1——基波正交分量；
- 2——基波同相分量；
- 3——二次谐波；
- 4——三次谐波；
- 5——电磁干扰。



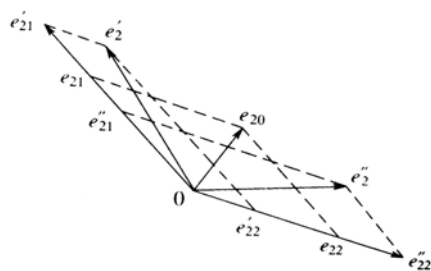
42

零点残余电压产生的原因：

① 基波分量

次级两个绕组不一致，导致输出电压幅值不等；

线圈的损耗以及分布电容的不同，导致输出电压相位不同。



43

② 高次谐波

主要由导磁材料磁化曲线的非线性引起。

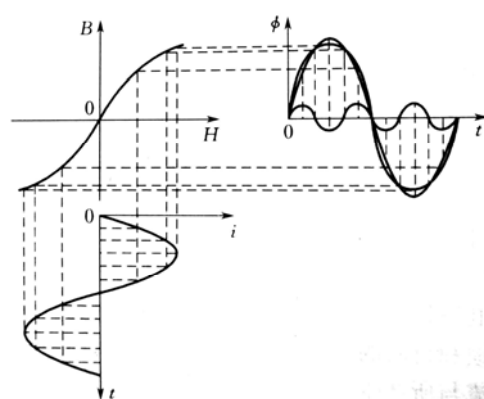


图4-24 磁化曲线非线性引起磁通波形失真

44

消除零点残余电压方法:

① 从设计和工艺上保证结构对称性

② 选用合适的测量电路

相敏检波电路

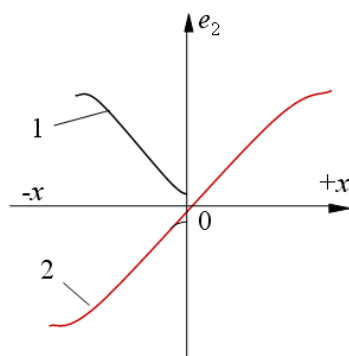


图4-25 采用相敏检波后的输出特性

45

③ 采用补偿线路

- 调整相位
- 调整磁化曲线的工作点

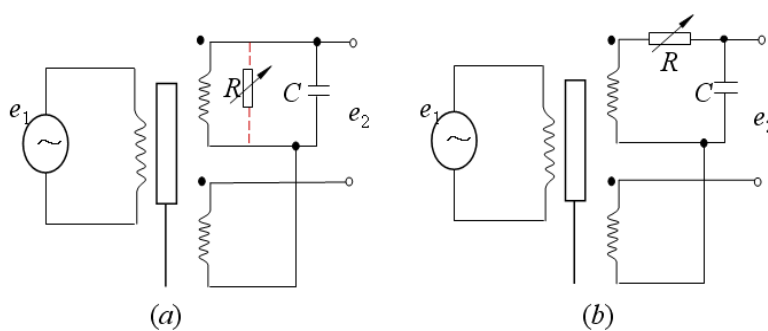


图4-26 调相位式残余电压补偿电路

46

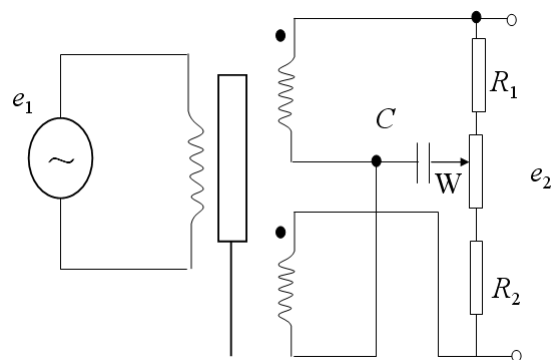
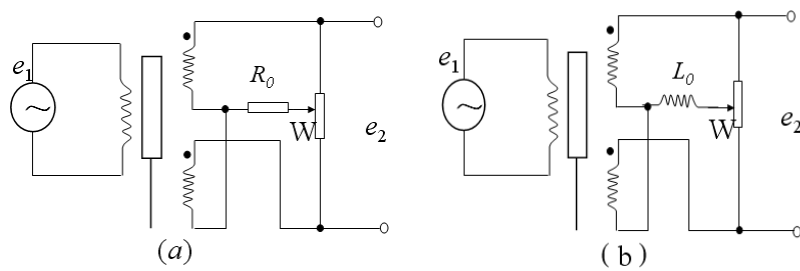


图4-27 电位器调零点残余电压补偿电路

47

图4-28 R 或 L 补偿电路

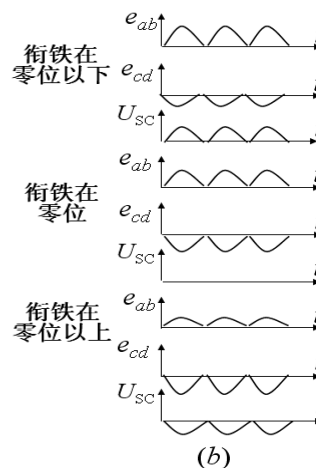
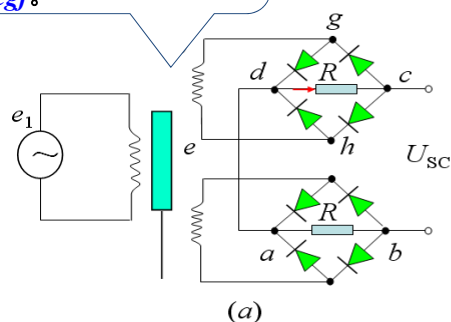
48

测量电路

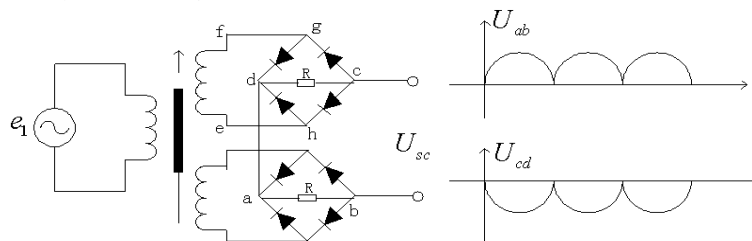
① 差动整流电路：将差动变压器两输出分别接至两整流电路

特点：根据二极管单向导通原理进行解调的。

在 f 点为“+”，则电流路径是 $fgdche$ 。反之，如 f 点为“-”，则电流路径是 $ehdcgf$ 。



① 差动整流电路



电流总是 $d \rightarrow c$, $a \rightarrow b$, 所以 U_{sc} 的符号表明了方向。

特点：包含以下三个环节

- 相位鉴别功能（通过二极管桥路判断电压的符号）；
- 同频率的参考输入；
- 输出接低通滤波器。

② 相敏检波电路

- 这种电路容易做到输出平衡，而且便于阻抗平衡。
- 调制电压 e_r 和 e 同频，经过移相器使 e_r 和 e 保持同相或反相，且满足 $e_r \gg e$ 。调节电位器 R 可调平衡，图中电阻 $R_1=R_2=R_0$ ，电容 $C_1=C_2=C_0$ ，输出电压为 U_{CD} 。

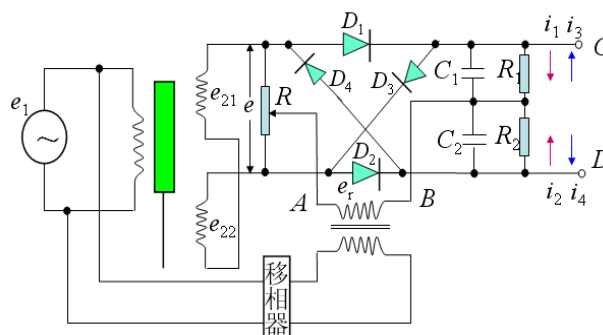
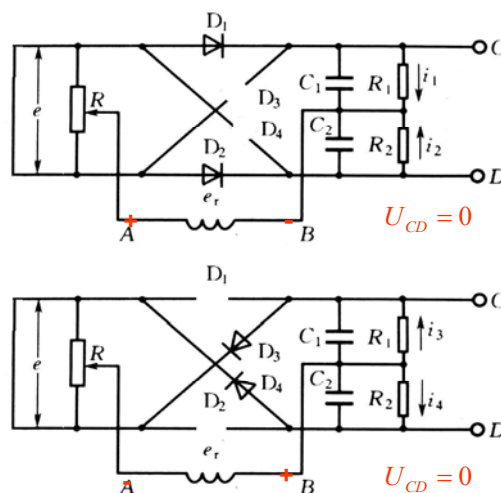


图4-30 二极管相敏检波电路图

51

② 相敏检波电路

- a. 若差动变压器铁芯在中间位置时， $e=0$

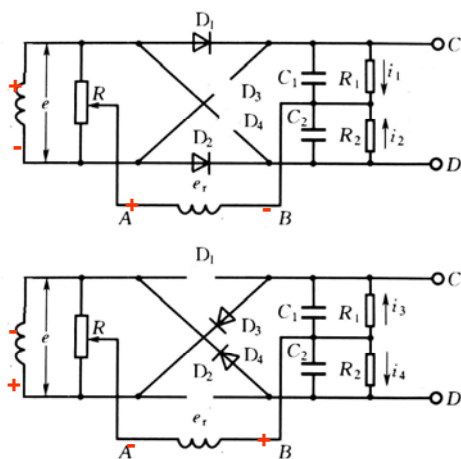


52

b. 若差动变压器铁芯上移, $e > 0$

设 e 和 e_r 同相位, 由于 $e_r \gg e$, e 不影响二极管的导通。

② 相敏检波电路



Positive half period

$$\rightarrow i_1 = \left(\frac{1}{2}e + e_r \right) / Z_{\text{回}}$$

$$\text{大于 } i_2 = \left(e_r - \frac{1}{2}e \right) / Z_{\text{回}}$$

$$\rightarrow U_{CD} = R_0 (i_1 - i_2) > 0$$

Negative half period

$$\rightarrow i_4 = \left(\frac{1}{2}e + e_r \right) / Z_{\text{回}}$$

$$\text{大于 } i_3 = \left(e_r - \frac{1}{2}e \right) / Z_{\text{回}}$$

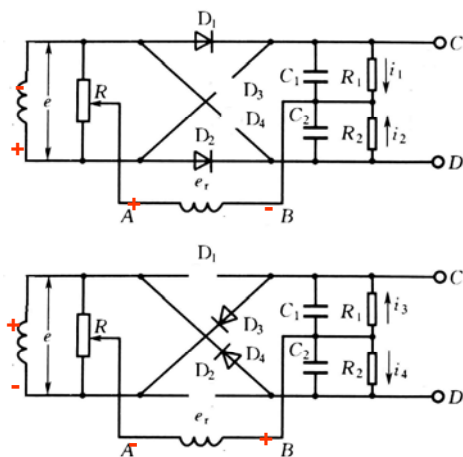
$$\rightarrow U_{CD} = R_0 (i_4 - i_3) > 0$$

53

c. 若差动变压器铁芯下移, $e < 0$

则 e 和 e_r 反相, 由于有 $e_r \gg e$, e 不影响二极管的导通。

② 相敏检波电路



Positive half period

$$\rightarrow i_1 = \left(\frac{1}{2}e + e_r \right) / Z_{\text{回}}$$

$$\text{大于 } i_2 = \left(e_r - \frac{1}{2}e \right) / Z_{\text{回}}$$

$$\rightarrow U_{CD} = R_0 (i_1 - i_2) < 0$$

Negative half period

$$\rightarrow i_4 = \left(\frac{1}{2}e + e_r \right) / Z_{\text{回}}$$

$$\text{大于 } i_3 = \left(e_r - \frac{1}{2}e \right) / Z_{\text{回}}$$

$$\rightarrow U_{CD} = R_0 (i_4 - i_3) < 0$$

由此可见, 该相敏检波电路能判别铁芯移动的方向。

54

5.2 电涡流电感传感器

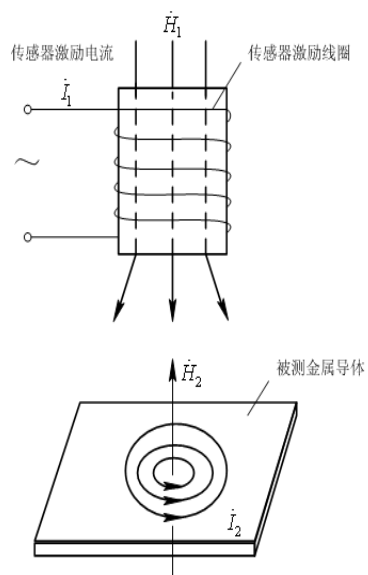


1 电涡流效应及电涡流的分布

- 涡流大小与导体电阻率 ρ 、磁导率 μ 以及产生交变磁场的线圈与被测体之间距离 d ，线圈激励电流的频率 f 有关。
- 涡流穿透深度

$$h = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \text{ cm}$$

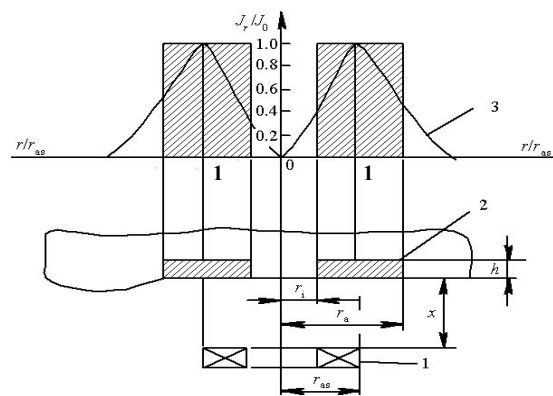
- 涡流穿透深度 h 和激励电流频率 f 有关。



1 电涡流效应及电涡流的分布

(2) 电涡流的分布

径向分布:

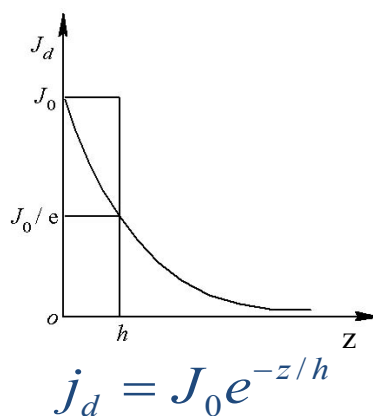


1—电涡流线圈; 2—等效短路环; 3—电涡流密度分布

电涡流密度 J 与半径 r 的关系曲线

57

电涡流的轴向分布:

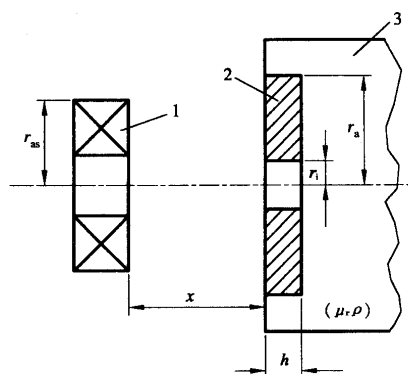


$$j_d = J_0 e^{-z/h}$$

h : 趋肤深度; z : 金属中某点与表面的距离

58

涡流的分布特性可以化为一个平均半径和厚度均一定的矩形截面圆环。此圆环相当于一匝短路环，其电阻等于 R_2 ，电感等于 L_2 ，互感为 M 。



1—传感器线圈；2—短路环；3—被测金属导体

图 4-19 电涡流传感器简化模型

59

2 等效电路

- 金属导体形象地看做一个短路线圈，与传感器线圈有磁耦合。

根据克希荷夫定律及所设电流正方向，写出方程

$$\left. \begin{aligned} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 &= \dot{E} \\ -j\omega M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

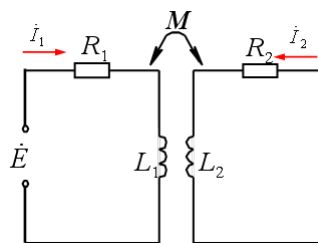


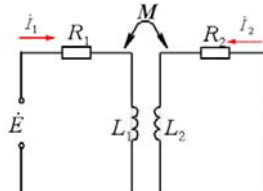
图4-35 电涡流传感器的等效电路

R_1 和 L_1 为传感器线圈的电阻和电感， R_2 和 L_2 为金属导体的电阻和电感， E 为激励电压。

60

2 等效电路（续）

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

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


线圈的等效阻抗

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

线圈的等效电感

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

61

2 等效电路（续）

线圈的等效Q值为

$$Q = Q_0 \frac{1 - \frac{L_2}{L_1} \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2}}{1 + \frac{R_2}{R_1} \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2}}$$

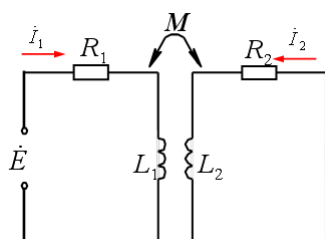
Q_0 ——无涡流影响下的线圈的Q值, $Q_0 = \frac{\omega L_1}{R_1}$

Z_2^2 ——金属导体中产生电涡流部分的阻抗, $Z_2^2 = R_2^2 + \omega^2 L_2^2$

- 线圈与金属导体系统的Z、L、Q都是互感系数M的平方的函数；
- 麦克斯韦互感函数的基本公式：互感系数是两个磁性相联线圈距离x的非线性函数。因此 $Z = F_1(x)$, $L = F_2(x)$, $Q = F_3(x)$ 均是非线性函数。
- 但在某一范围内，可将这些函数近似看作线性。

62

2 等效电路（续）

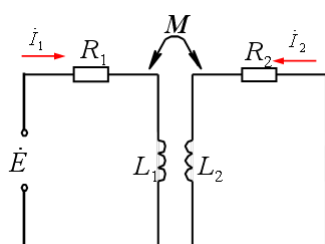


$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$$

- 等效电感 L : L_1 与 **静磁效应** 有关，线圈与金属导体构成一个磁路，其有效磁导率 μ_r 取决于此磁路的性质。
- 当导体为磁性材料时， μ_r 随导体与线圈距离 d 的减小而增大，于是 L_1 增大；若导体为非磁性材料，则 μ_r 和 d 无关，即 L_1 不变。

63

2 等效电路（续）



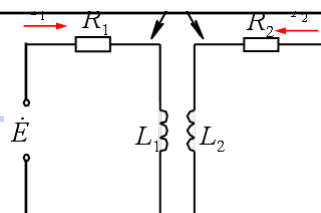
$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$$

- 电涡流回路的 **反射电感**：使传感器的等效电感减小。
- 当被测物体为非磁性材料或硬磁材料时，传感器线圈的等效电感 L 随导体与线圈距离 d 的减小而减小；
- 被测导体为软磁材料时，则由于 **静磁效应** 使传感器线圈的等效电感 L 反而增大。

64

2 等效电路（续）

- 为提高传感器灵敏度，常用一个电容与电涡流线圈并联，构成**并联谐振回路**。



在不接被测导体时，传感器调谐到某一谐振频率 f_0 。当有被测导体时，回路将**失谐**。被测体为**非铁磁材料或硬磁材料**时，因传感器线圈等效电感减小，谐振曲线**右移**；当被测体为**软磁材料**时，其电感量增大，谐振曲线**左移**，如图所示。当载流频率一定时，传感器LC回路的阻抗变化即反映了电感的变化，又反映了Q值变化。

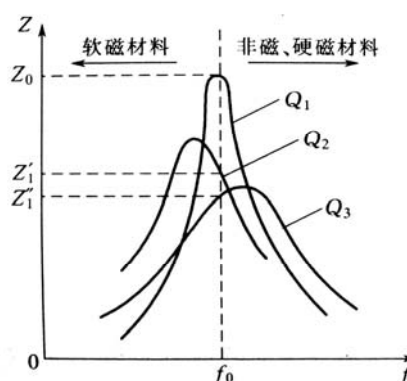
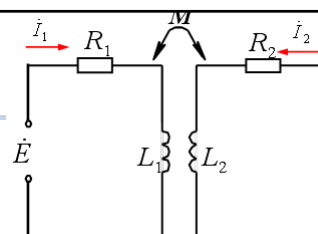


图4-36 固定频率调幅谐振曲线

讨论：

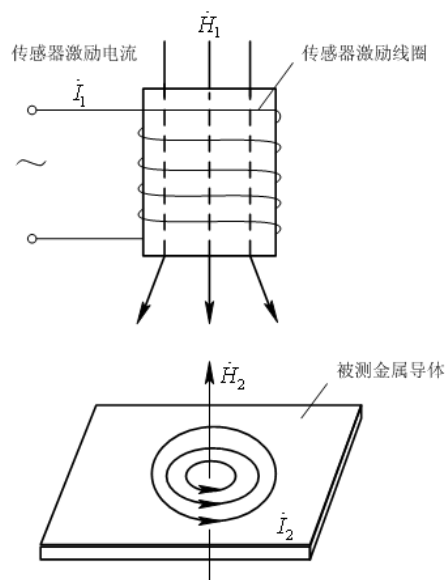
$$\dot{Z} = \left[R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right] + j \left[\omega L_1 - \omega L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right]$$



- 电涡流效应使得等效电阻增大、等效电感减小，品质因素减小。
- 电涡流效应必然消耗能量→等效电阻↑
- 等效电感、等效阻抗、品质因素与M平方有关，是距离x的非线性函数。
- 电涡流效应与距离的关系：
 $X \downarrow \rightarrow H_2 \uparrow \rightarrow \text{电涡流效应} \uparrow \rightarrow \Delta L \uparrow$
 $X \downarrow \rightarrow H_2 \uparrow \rightarrow \text{电涡流效应} \uparrow \rightarrow Q \downarrow$

3 电涡流传感器分类

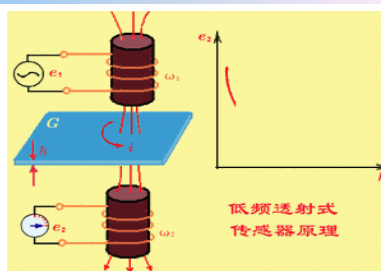
反射式:



67

3 电涡流传感器分类（续）

透射式:



- ✓发射线圈 ω_1 和接收线圈 ω_2 分别放在被测材料G的上下
- ✓低频(音频范围)电压 e_1 加到线圈 ω_1 的两端后, 在周围空间产生一交变磁场, 并在被测材料G中产生涡流, 此涡流损耗了部分能量, 使贯穿 ω_2 的磁力线减少, 从而使 ω_2 产生的感应电势 e_2 减小。
- ✓ e_2 的大小与G的厚度及材料性质有关, 实验与理论证明, e_2 随材料厚度h增加按负指数规律减小。

68

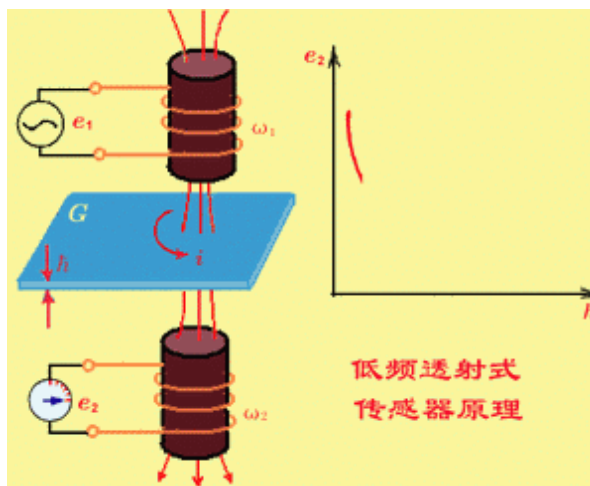
3 电涡流传感器分类（续）

透射式:

实验和理论证明:

$$e_2 \propto e^{-h/h'}$$

穿透深度: $h' = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}}$



69

4 灵敏度与线性度

反射式测距传感器：通常将传感器当作电感接入振荡器的振荡回路

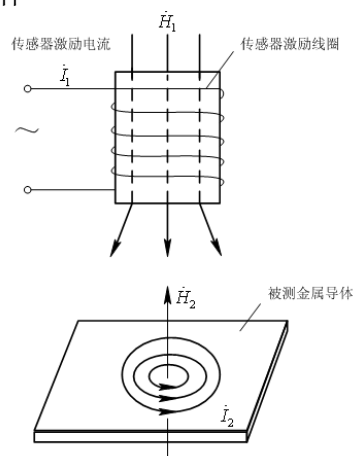
$$f_{\infty} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$

$$f = e^{-bx+a} + f_{\infty}$$

x: 传感器端面到被测物体的距离

a: 与线圈几何尺寸及被测金属材料有

b: 与线圈几何尺寸有关



70

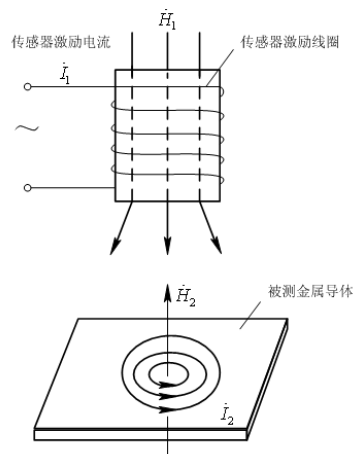
反射式测距传感器

灵敏度:

$$s = \frac{df}{dx} = -be^{-bx+a}$$

分析:

- (1) 灵敏度为非线性;
 - (2) 灵敏度决定于传感器的几何尺寸和被测对象材料;
- 系数a、b由实验确定



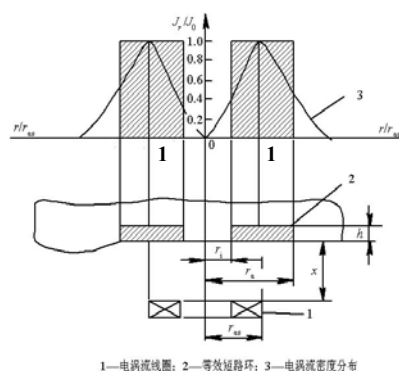
71

5 传感器及被测物体的几何尺寸对传感器灵敏度的影响

- 线圈内径对传感器参数影响较小
- 线圈外径对传感器参数影响较大。匝数一定时，减小外径可提高灵敏度，但敏感范围减小。
- 被测导体厚度大于2t时，可认为对灵敏度无影响。

对钢材: $f=50\text{ Hz}$, $t=1\sim 2\text{ mm}$

$f=5\text{ kHz}$, $t=0.1\sim 0.2\text{ mm}$

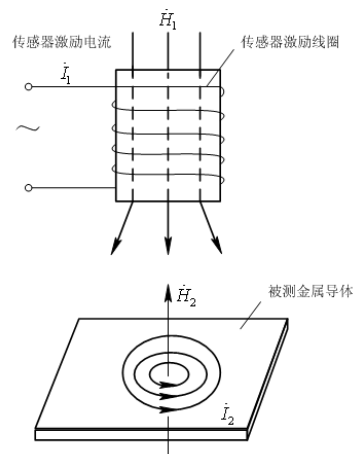


1—电涡流线圈; 2—等效短路环; 3—电涡流密度分布

72

被测体对电涡流测量的影响

- 被测体是传感器的组成部分
- 被测导体的电导率越高，灵敏度越高
- 磁性体的灵敏度比非磁性体降低
 - 对 L_1 （线圈电感）：电涡流效应使其减小
 - 被测物为导磁体，导磁体的作用使得 $L_1 \uparrow$ ，磁效应抵消电涡流效应。所以，被测物是磁性体，灵敏度较非磁性体低。
 - 一般采用较高的激励频率。
- 镀层对测量有影响。
- 对被测体的大小有要求。



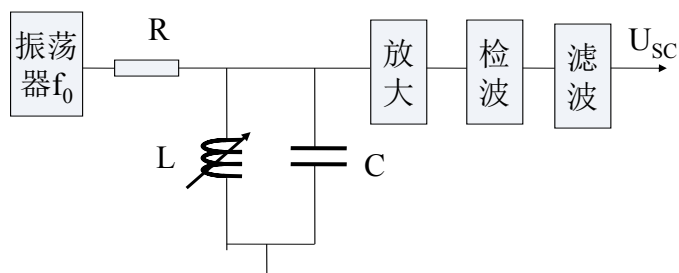
73

6 测量线路

- 根据电涡流传感器的原理，被测参量可以由传感器转换为传感器的Q值（电感与电阻的比值）、等效阻抗Z和等效电感L三个参数。
- 若是差动式结构，可采用电桥电路。
- 但是在测量导体物理性质时常不能采用差动形式，所以电涡流传感器常用以下测量电路：定频调幅电路和调频电路。

74

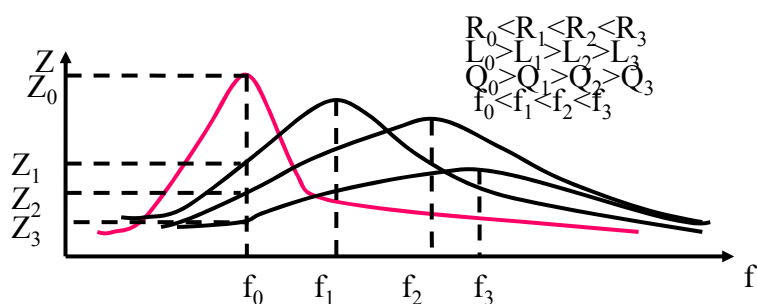
(1)调幅式测量线路



输出电压的频率 f 始终恒定，称为定频调幅式

75

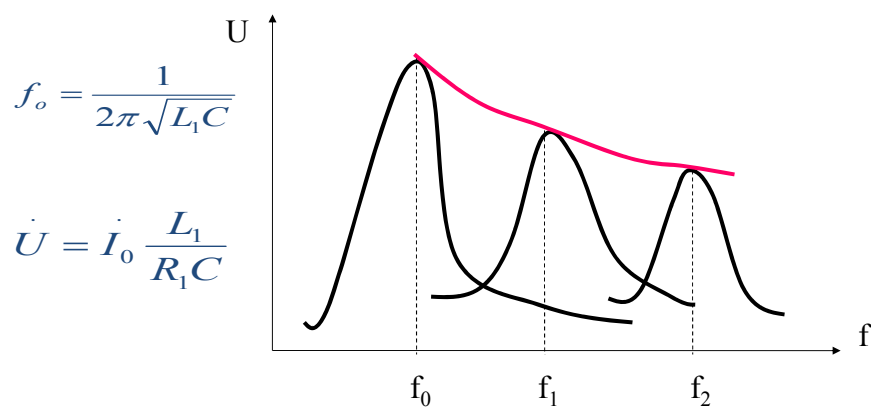
(1)调幅式测量线路（续）



- 当 $w=w_0$ 时，输出最大
- 对非导磁体，涡流增大使得 L_1 减小、 R_1 增大、 w_0 增高
 - 输出电压减小
 - 谐振频率、谐振曲线向高频方向移动
- 输出 U 与涡流参数之间呈单调非线性关系

76

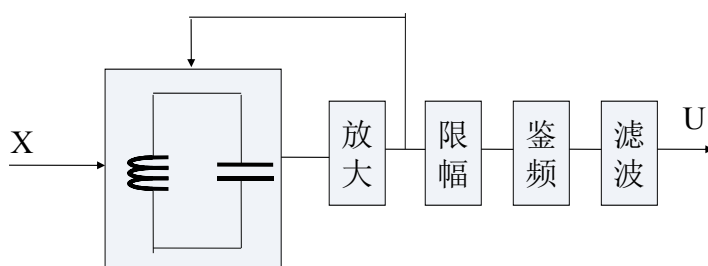
(2)调频测量电路-调频鉴幅式



频率始终等于谐振频率，幅值始终为谐振曲线峰值

77

(3)调频测量电路-直接频率输出

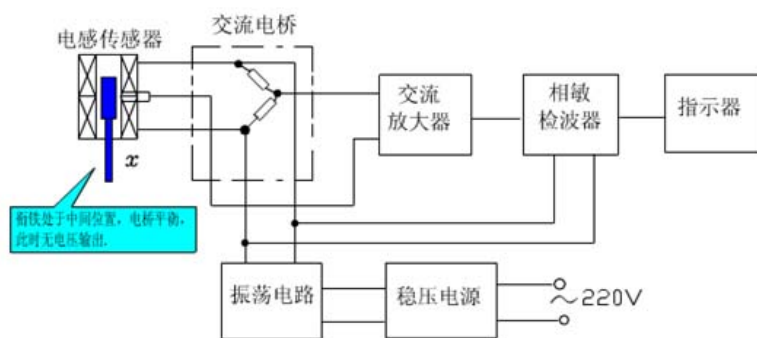


鉴频器将调频信号转换为电压输出。

78

5.3 电感传感器的应用

测量微位移：凡是能转换成位移量变化的参数，如压力、力、压差、加速度、振动、应变、流量、厚度、液位等都可以用电感式传感器来进行测量。

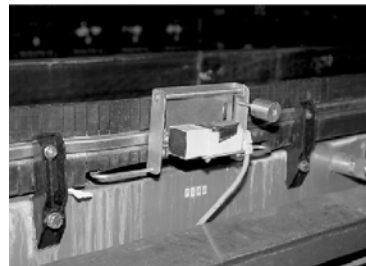


电感测微仪典型方框图

79

1 位移传感器

- 主要用于位移，振动，转速测量。
- 传感器的前置放大器被集成安装在传感器壳体里，其输出信号与测量位移成正比。
- 在传感器测量量程内线性精度优于 $\pm 2\%$ 。

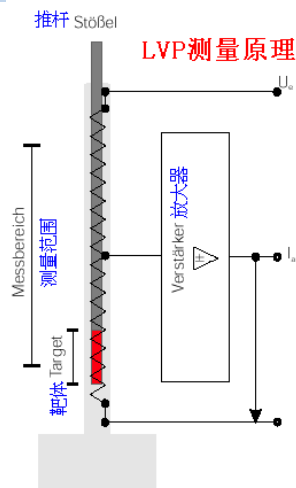


2 螺管式电感传感器测量位移

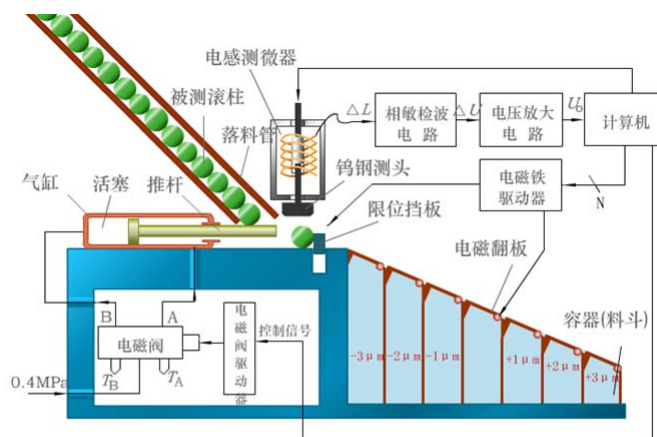


测量原理：

- 一根推杆插入测量传感器棒的内孔里的机械位移。
- 棒里有一个电桥线圈，线圈被交流激励。
- 推杆端部一段磁敏感材料位置变化引起中心抽头之间电桥线圈阻抗发生变化。
- 电桥电压变化被放大。
- 输出电压与推杆位置之间有一线性关系。由于是非接触测量，所以工作寿命长。而推杆与传感器棒内孔同心度没有要求。



81

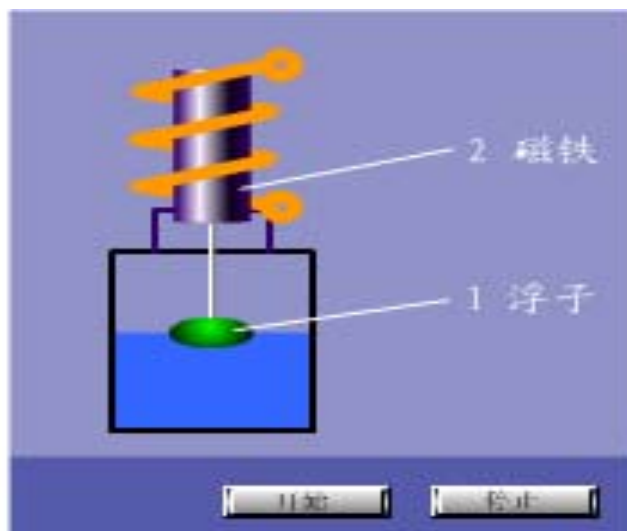


电感式滚柱直径分选装置

东方仿真COPYRIGHT

82

3 电感式传感器测液位



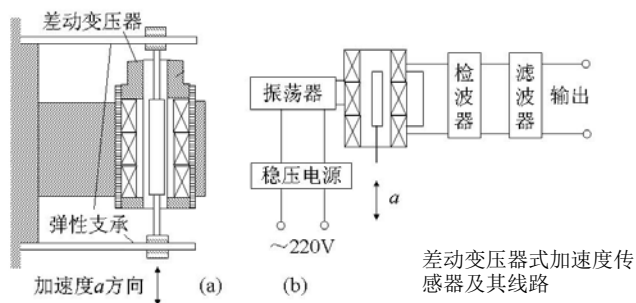
83

4 差动变压器应用

可以直接用于位移测量，也可以测量与位移有关的任何机械量，如振动、加速度、应变、比重、张力和厚度等。

(1) 差动变压器式加速度传感器

由悬臂梁和差动变压器构成

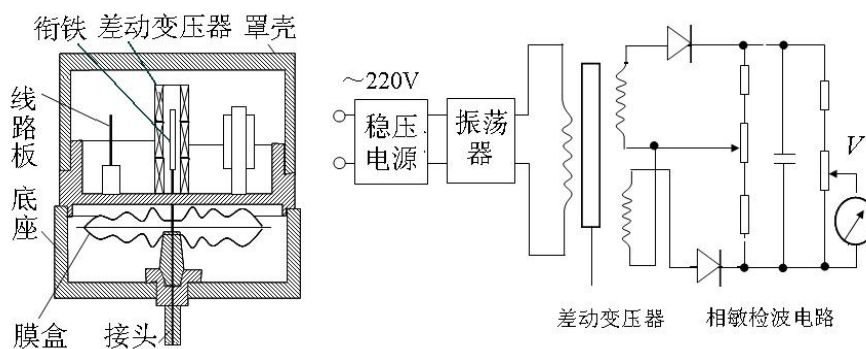


差动变压器式加速度传感器及其线路

- 用于测定振动物体的频率和振幅时其激励频率必须是振动频率的十倍以上，才能得到精确的测量结果。
- 可测量的振幅为0.1~5mm，振动频率为0~150Hz。

84

(2) 微压力变送器

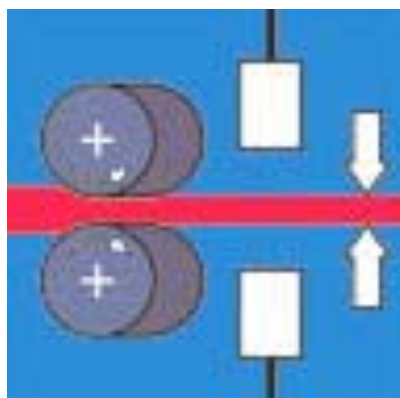


- 由差动变压器和弹性敏感元件（膜片、膜盒和弹簧管等）相结合
- 这种变送器可分档测量 $(-5 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^5) \text{ N/m}^2$ 压力，输出信号电压为 $(0 \sim 50) \text{ mV}$ ，精度为1.5级。

85

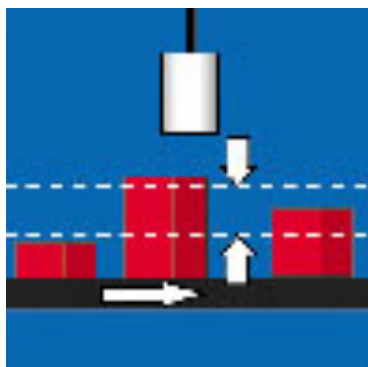
6 电涡流传感器的应用

测量冷轧板厚度

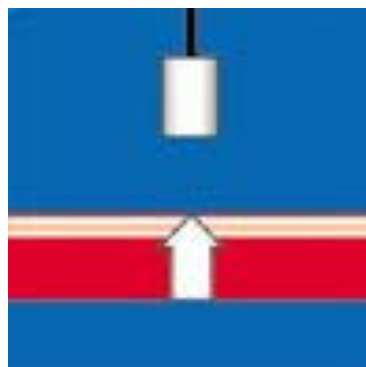


86

测量尺寸、公差及零件识别



零件尺寸识别

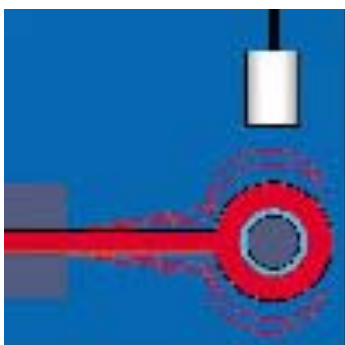


通过测量间隙来测定热膨胀引上下平移

87

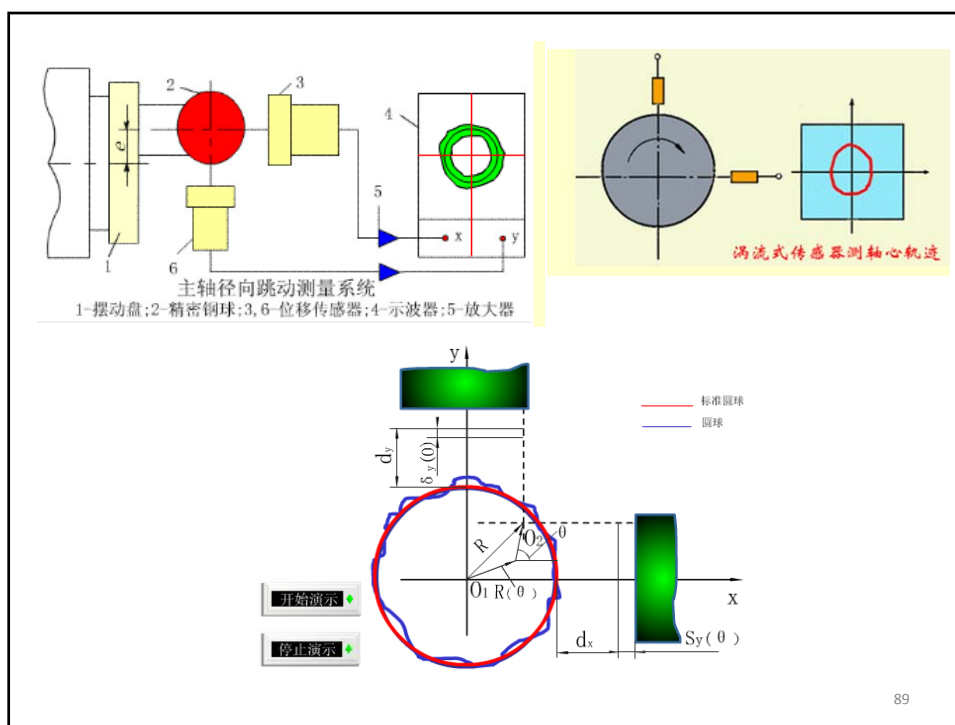
振动测量

测量悬臂梁的
振幅及频率



汽轮机叶片测试

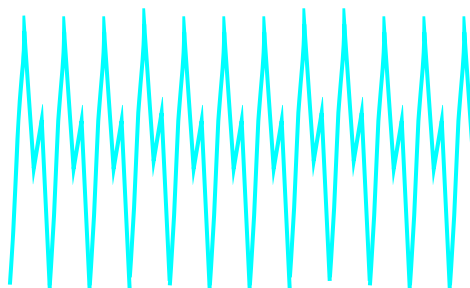
88



转速测量

若转轴上开 z 个槽(或齿), 频率计的读数为 f (单位为Hz), 则转轴的转速 n (单位为r/min) 的计算公式为

$$n = 60 \frac{f}{z}$$



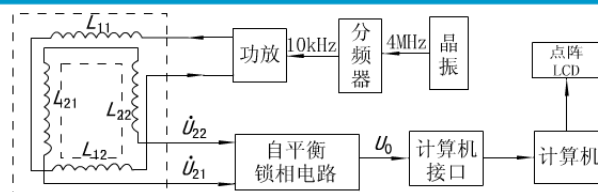
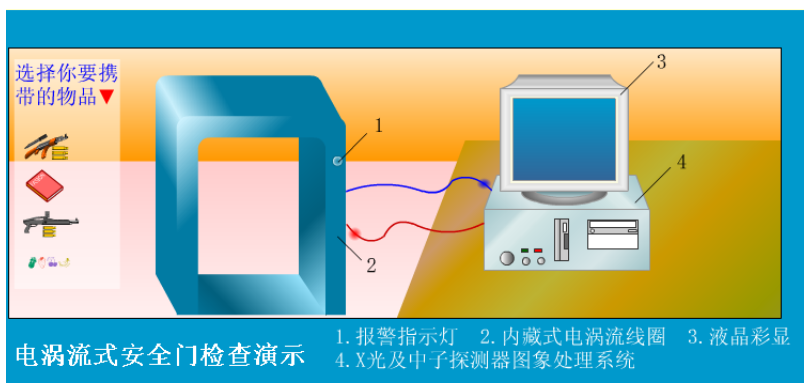
电涡流表面探伤

手持式裂纹测量仪



油管探伤

91



电涡流式通道安全检查门电原理

92

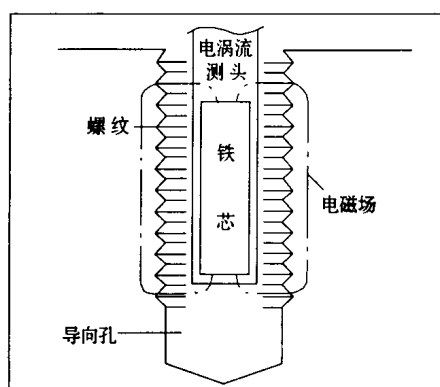
大直径电涡流探雷器



93

机械结构的几何参数检测

例如可以测出用手动螺纹量规可测的所有几何参数(如螺纹的大径、小径和中径等)，还可以检测螺纹表面粗糙度和螺纹深度。



94

作业

5-7 (1)电压频率 $f=400\text{Hz}$),
5-9, 5-10

Any Question?

95