

第4章

电感式传感器

电感式传感器

•利用电磁感应原理将被测非电量转换成：

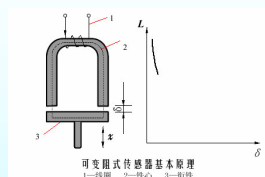
线圈自感量 L 或互感量 M 的变化

•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、涡流式和压磁式

•可测量位移、压力、流量、振动等非电量信号



主要特点

- 结构简单、工作可靠
- 灵敏度高，能分辨 $0.01\mu\text{m}$ 位移变化
- 测量精度高、零点稳定、输出功率大
- 可实现信息远距离传输、记录、显示和控制
- 工业自动控制系统广泛采用

主要缺点

- 灵敏度、线性度和测量范围相互制约
- 传感器频率响应低，不适用于快速动态测量

1.自感式传感器工作原理与结构

缠绕在铁芯上的线圈中通交变电流 i ，产生磁通 Φ_m ，形成磁通回路，磁通与电流之间存在下列关系：

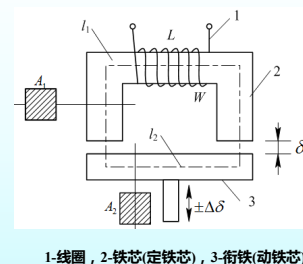
$$W\Phi_m \square Li \quad (4-1)$$

式中： W ——线圈匝数；
 L ——自感量，H。

磁路欧姆定律：
$$\Phi_m \square \frac{Wi}{R_m} \quad (4-2)$$

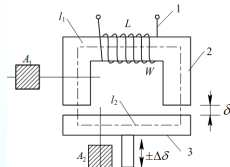
式中： Wi ——磁动势，A；
 R_m ——磁阻， H^{-1} 。

将式(4-2)代入式(4-1)得：
$$L \square \frac{W^2}{R_m} \quad (4-3)$$



磁阻 R_m 由三部分组成：铁芯、衔铁和气隙中的磁阻

$$R_m \square \frac{l_1}{\mu_1 A_1} \square \frac{l_2}{\mu_2 A_2} \square \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (4-4)$$



式中： l_1 、 l_2 ——铁芯与衔铁中的导磁长度，m；

μ_1 、 μ_2 ——铁芯与衔铁的导磁率，H/m；

A_1 、 A_2 ——铁芯与衔铁中的导磁面积， m^2 ；

δ ——气隙宽度，m；

μ_0 ——气隙中的空气导磁率，H/m；

A_0 ——气隙导磁横截面积， m^2 。

$$L \square \frac{W^2}{R_m} \quad (4-3)$$

将式(4-4)代入式(4-3)得：

$$L \square W^2 \frac{1}{\frac{l_1}{\mu_1 A_1} \square \frac{l_2}{\mu_2 A_2} \square \frac{2\delta}{\mu_0 A_0}}$$

$$L \square W^2 \frac{1}{\frac{l_1}{\mu_1 A_1} \square \frac{l_2}{\mu_2 A_2} \square \frac{2\delta}{\mu_0 A_0}}$$

•自感量 L 是各个参量的函数

•自感量 L 与其中任一参量呈单值函数关系

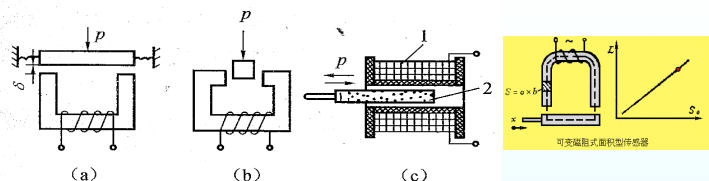
•可制成各种电感式传感器

磁路中铁芯和衔铁中的磁阻远小于空气隙中的磁阻，即：

$$\frac{l_1}{\mu_1 A_1} \square \frac{l_2}{\mu_2 A_2} \square \frac{2\delta}{\mu_0 A_0}$$

近似计算得：

$$L \square \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta}$$



根据右式可以形成 3 种自感式传感器

- (a)——改变气隙厚度 δ
- (b)——改变导磁面积 A_0
- (c)——利用铁芯在螺管线圈中的直线位移改变总的磁阻

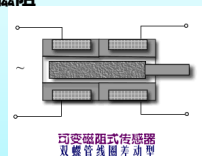
可认为是改变有效线圈匝数 W

- 用以测量直线位移

- L 与各参数的变化关系并不相同

如 L 与 δ 不是线性关系——与电容传感器类似

$$L \propto \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta}$$



可变磁阻式传感器
双磁管线圈固定型

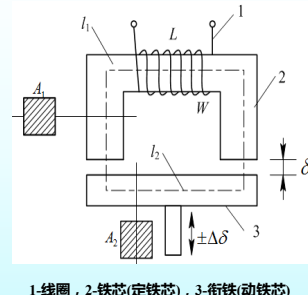
2. 变隙（磁阻）式自感传感器

衔铁移动

$$\delta \text{ 改变 } R_m \propto \frac{l_1}{\mu_1 S_1} \propto \frac{l_2}{\mu_2 S_2} \propto \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}$$

$$\text{磁阻变化 } (R_m \propto \frac{2\delta}{\mu_0 S_0})$$

$$\text{电感值变化 } L \propto \frac{W^2}{R_m} \propto \frac{W^2 \mu_0 S_0}{2\delta}$$



1—线圈，2—铁芯（定铁芯），3—衔铁（动铁芯）

3. 变隙式传感器输出特性

$$\text{初始电感量: } L_0 \propto \frac{\mu_0 S_0 W^2}{2\delta_0}$$

$$\text{衔铁上移 } \Delta\delta, \delta = \delta_0 - \Delta\delta$$

$$L \propto L_0 \propto \frac{W^2 \mu_0 S_0}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} \propto \frac{L_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

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

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

忽略高价项：

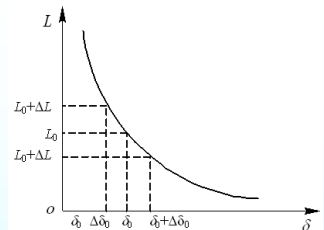
$$\frac{L}{L_0} \propto \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \left[1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right) + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right]$$

$$\text{同理: 衔铁下移 } \Delta\delta, \delta = \delta_0 + \Delta\delta$$

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

灵敏度为：

$$K_0 \propto \frac{L}{L_0} \propto \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \propto \frac{1}{\delta_0}$$



变阻式传感器 L-δ 特性

- 变隙式传感器的测量范围与灵敏度及线性度之间存在矛盾，
- 变隙式电感传感器用于测量微小位移量的场合。
- 为减小非线性误差，实际测量广泛采用差动变隙式传感器。

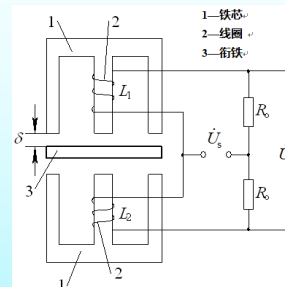
$$L \propto L_1 \propto L_2 \propto L_0 \left[1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right]$$

$$\frac{L}{L_0} \propto 1 + 2 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots$$

$$K_0 \propto \frac{L}{L_0} \propto \frac{2}{\delta_0}$$

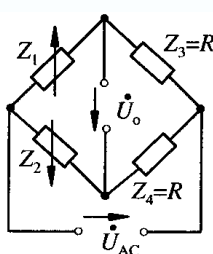
- 差动式变隙电感传感器的灵敏度是单线圈式的 2 倍。

- 差动式变隙电感传感器的非线性项次数高，线性度得到明显改善。



差动变隙式电感传感器

4. 交流电桥式测量电路



交流电桥测量电路

- 电桥平衡条件： $Z_1 = Z_2; Z_3 = Z_4 = R$

- 平衡状态下： $U_o = 0$

对于高 Q 值的差动自感传感器 ($Q \propto \frac{\omega L}{R}$)

$$Z \propto R \propto j\omega L \propto j\omega L \text{ 则 } \frac{Q}{Z} \propto \frac{\omega L}{L_0}$$

$$U_o \propto \frac{U_{AC}}{2} \frac{Q}{Z} \propto \frac{U_{AC}}{2} \frac{\omega L}{L_0} \quad (\text{半桥电路})$$

$$\text{因 } \frac{L}{L_0} \propto 2 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right) \text{ 则 } U_o \propto U_{AC} \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)$$

电桥输出电压与 $\Delta\delta$ 成正比，相位与移动方向有关

5. 交流电桥式测量电路灵敏度分析

灵敏度 K_0 为

$$\frac{L}{L_0} \propto 2 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)$$

$$K_0 \propto \frac{L}{L_0} \propto \frac{2}{\delta_0}$$

结论

- 差动式变隙电感传感器的灵敏度是单线圈式的 2 倍；
- 差动式变隙电感传感器的非线性项次数高，线性度明显改善。

6. 变压器式交流电桥

$$U_0 \approx \frac{Z_1 U}{Z_1 + Z_2} \approx \frac{U}{2} \approx \frac{Z_1 + Z_2}{2} \frac{U}{Z_1 + Z_2}$$

当传感器衔铁上移时，即：

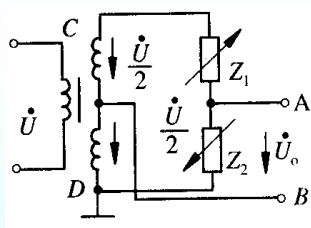
$Z_1 = Z + \Delta Z$, $Z_2 = Z - \Delta Z$, 此时

$$U_0 \approx \frac{Z + \Delta Z}{Z + \Delta Z + Z - \Delta Z} \frac{U}{2} \approx \frac{Z + \Delta Z}{2Z} \frac{U}{2}$$

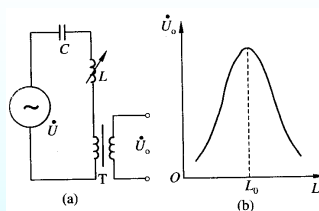
当传感器衔铁下移时，即： $Z_1 = Z - \Delta Z$, $Z_2 = Z + \Delta Z$,

$$U_0 \approx \frac{Z - \Delta Z}{Z - \Delta Z + Z + \Delta Z} \frac{U}{2} \approx \frac{Z - \Delta Z}{2Z} \frac{U}{2}$$

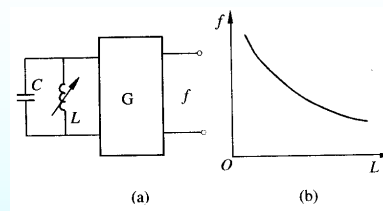
- 衔铁上、下移动时，输出电压大小相等，极性相反，
- 由于 U_0 是交流电压，输出指示无法判断位移方向，采用相敏检波器鉴别输出电压极性随位移方向而产生的变化



7. 谐振式测量电路



谐振式调幅电路

谐振式调频电路 $f \propto 1/\sqrt{LC}$

- 谐振式调幅电路： U 为交流供电电压，变压器副边输出电压 U_0 的频率不变， U_0 随 L 变化
- 谐振式调频电路：频率 f 随 L 变化（灵敏度高，线性度很差）

8. 差动变压器式传感器 (续)

• 互感式传感器

把被测非电量变化转换为线圈互感变化的传感器

• 差动变压器式传感器

次级绕组用差动形式

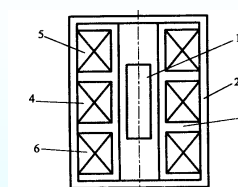
• 结构

变隙式、变面积式、螺线管式

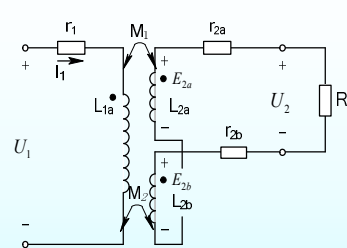
• 优点

测量精度高、灵敏度高、结构简单、性能可靠

9. 螺线管差动变压器工作原理



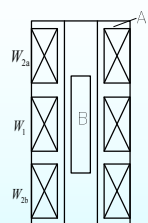
1—活动衔铁；2—导磁外壳；3—骨架；4—匝数为 w_1 的初级绕组；5—匝数为 w_{2a} 的次级绕组；6—匝数为 w_{2b} 的次级绕组



差动变压器等效电路

- 初级绕组加以激励电压 U_1 时，次级绕组 W_{2a} 和 W_{2b} 中会产生感应电势 E_{2a} 和 E_{2b} ；
- 若变压器结构完全对称，则：当活动衔铁处于初始平衡位置时，互感系数 $M_1 = M_2$ ；
- 根据电磁感应原理，则： $E_{2a} = E_{2b}$

9. 螺线管差动变压器工作原理(续)



差动变压器等效电路

• 衔铁在平衡位置时：

$$M_1 = M_2 \quad E_{2a} = E_{2b}$$

$$U_0 = E_{2a} - E_{2b}$$

• 活动衔铁向上移动时，

受磁阻影响， W_{2a} 中磁通将大于 W_{2b} ，使 $M_1 > M_2$ ，...

• 反之 ...

• 即：当衔铁发生位移变化时，输出电压会随之变化

- 两次级线圈反相串联；
- 忽略铁损、导磁体磁阻和线圈分布电容

9. 螺线管差动变压器工作原理(续)

基本特性

$$U_2 \approx E_{2a} - E_{2b} \approx \frac{j \omega (M_1 - M_2) U_1}{r_1 + j \omega L_1}$$

$$I_1 \approx \frac{U_1}{r_1 + j \omega L_1}$$

$$E_{2a} \approx j \omega M_1 I_1$$

$$E_{2b} \approx j \omega M_2 I_1$$

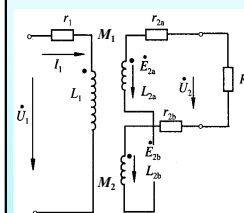
$$U_2 \approx \frac{\omega (M_1 - M_2) U_1}{[r_1^2 + (\omega L_1)^2]^{1/2}}$$

• 衔铁在中间位置时， $M_1 = M_2 = M$ ，故 $U_2 = 0$

• 活动衔铁向上移动时， $M_1 = M + \Delta M$ $M_2 = M - \Delta M$
 $U_2 \approx 2 \omega \Delta M U_1 / [r_1^2 + (\omega L_1)^2]^{1/2}$ 与 E_{2a} 同极性

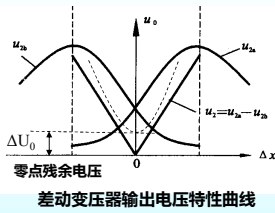
• 活动衔铁向下移动时， $M_1 = M - \Delta M$ $M_2 = M + \Delta M$
 $U_2 \approx -2 \omega \Delta M U_1 / [r_1^2 + (\omega L_1)^2]^{1/2}$ 与 E_{2b} 同极性

• 输出特点：输出（交流电压）幅值与衔铁偏移量成正比；衔铁过平衡点时，相位改变180度。



9.螺线管差动变压器工作原理(续)

零点残余电压及补偿



- **零点残余电压**：差动变压器在零位移时的输出电压并不等于零；
- **后果**：使传感器的输出特性不经过零点，使实际与理论特性不一致，应设法减小；
- **原因**：由传感器两次级绕组的电气参数和几何尺寸不对称，以及磁性材料的非线性等引起

- **波形**：由基波和高次谐波组成。**基波**是传感器两次级绕组的电气参数、几何尺寸不对称，导致感应电势幅值不等、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。**高次谐波**产生的原因是磁性材料**磁化曲线的非线性**。

9.螺线管差动变压器工作原理(续)

差动式变压器测量电路

- 两个目的：

辨别移动方向

消除零点残余电压

- 两种方法：

差动整流电路

相敏检波电路

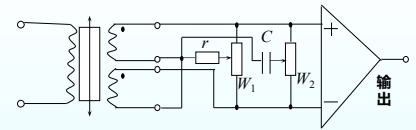


图1 零点残余电压直接补偿

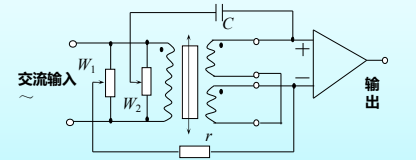


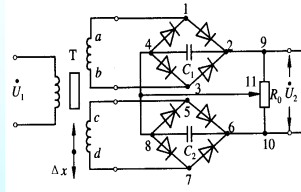
图2 零点残余电压间接补偿补偿

9.螺线管差动变压器工作原理(续)

- 差动变压器是交流电压输出，存在零点残余电压，为了判别铁心移动的大小和方向，必须进行**解调**和**滤波**；
- 为消除零点残余电压，差动变压器后接电路常采用**差动整流**和**相敏检波**电路。

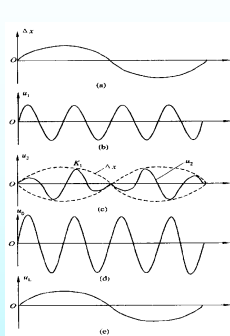
差动整流电路

- 不论两个次级线圈瞬时输出电压极性，流经电容 C_1 电流方向总是从2到4，流经电容 C_2 电流方向总是从6到8，故整流电路的输出电压为
- $$U_2 \propto U_{24} \propto U_{68}$$
- 当衔铁在**零位**时，因为 $U_{24} \propto U_{68}$ 所以 $U_2 \propto 0$
- 当衔铁在**零位以上**时，因为 $U_{24} \propto U_{68}$ 则 $U_2 \propto 0$
- 当衔铁在**零位以下**时，因为 $U_{24} \propto U_{68}$ 则 $U_2 \propto 0$
- U_2 的正负表示衔铁位移的方向

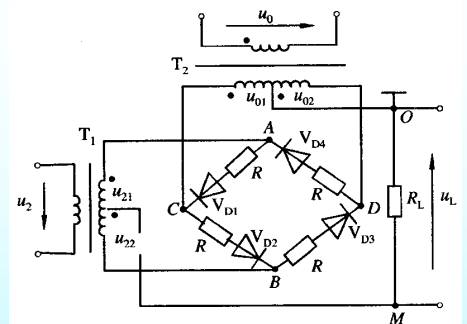


9.螺线管差动变压器工作原理(续)

相敏检波电路



波形图



- 已调制波 u_2 与载波 u_0 同相， R_L 上电流方向由上至下
- 已调制波 u_2 与载波 u_0 反相， R_L 上电流方向由下至上
- 根据 R_L 上的电流方向，判断衔铁位移方向

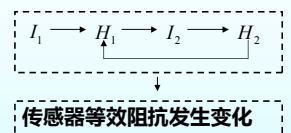
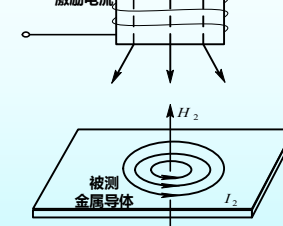
10.电涡流式传感器

工作原理

- 金属平面置于交变磁场中，会产生**感应电流**
- 在金属平面内闭合电流——**涡流**
- 涡流传感器工作对象：**表面光滑的金属导体**
- 为保证涡电流有回流余地，金属表面应大于传感器直径的**1.83倍**
- 涡流传感器种类
 - 高频反射式
 - 低频透射式
- 特点：灵敏度高、非接触式测量、工作条件要求低——**应用愈来愈广泛**

10.电涡流式传感器(续)

- 电涡流效应：块状金属导体置于交变电流 I_1 产生的交变磁场 H_1 中作切割磁力线运动，导体内将产生涡旋状感应电流 I_2 和磁场 H_2 。



- 可用于测量距离 x ，也可测量电阻率 ρ 和相对导磁率 μ

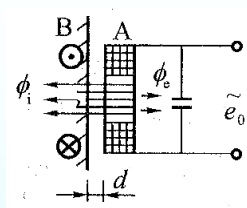
$$I_2 \propto F(\square, \square, r, \square, x)$$

- 电涡流大小与金属导体电阻率 ρ 、相对导磁率 μ_r 、几何形状与表面状况、线圈几何参数、线圈激励信号频率 ω 以及线圈与金属导体间的距离 x 等参数有关

10. 电涡流式传感器(续)

涡流传感器结构

A为传感头——扁平线圈；B是被测金属平面。



• 工作时在扁平线圈上施加**高频激励电流** i

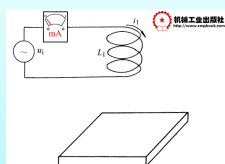
• 电流 i 通过线圈时产生**高频交变磁通** ϕ_i

• ϕ_i 在靠近传感头金属表面产生**感应电势**，形成回形电流——**涡电流**

• 涡电流又形成**涡流磁通** ϕ_e

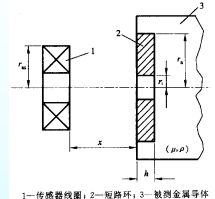
• 由楞次定律可知， ϕ_e 可阻止 ϕ_i 变化

影响原线圈磁通的数值——**改变线圈等效参数**

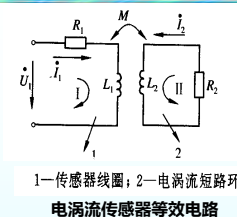


10. 电涡流式传感器(续)

电涡流传感器基本特性



1—传感器线圈；2—短路环；3—被测金属导体
电涡流传感器简化模型



1—传感器线圈；2—电涡流短路环
电涡流传感器等效电路

等效电路模型(电压平衡方程):

$$R_1 I_1 \square j \omega L_1 I_1 \square j \omega M I_2 \square U_1$$

$$R_2 I_2 \square j \omega L_2 I_2 \square j \omega M I_1 \square 0$$

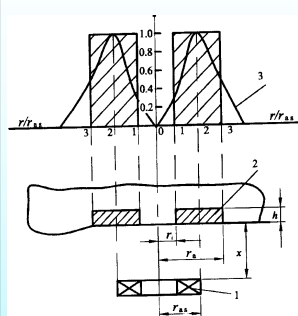
线圈等效阻抗:

$$Z \square \frac{U_1}{I_1} \square R_1 \square \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 \square (\omega L_2)^2} R_2 \square j \omega [L_1 \square \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 \square (\omega L_2)^2} L_2]$$

$$\square R_{eq} \square j \omega L_{eq}$$

10. 电涡流式传感器(续)

电涡流的径向形成范围



电涡流密度 J 与半径 r 的关系曲线

• 电涡流径向形成范围在传感器线圈外径

r_{as} 的1.8~2.5倍范围内, 且分布不均匀

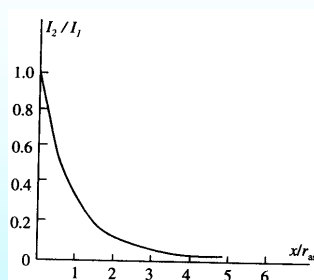
• 电涡流密度在短路环半径 $r=0$ 处为零

• 电涡流最大值在 $r=r_{as}$ 附近狭窄区域内

• 用平均半径 r_{as} ($r_{as} = (r_i + r_a) / 2$) 的短路环表示分散的电涡流(图中阴影部分)

10. 电涡流式传感器(续)

电涡流强度与距离的关系



电涡流强度与距离归一化曲线

• 电涡流强度与距离 x 呈非线性关系,

且随着 x/r_{as} 的增加而迅速减小。

• 当利用电涡流式传感器测量位移时,

只有在 $x/r_{as} \ll 1$ (一般取 0.05 ~

0.15) 的范围才具有较好的线性度和较高的灵敏度

10. 电涡流式传感器(续)

电涡流的纵向贯穿深度

• 因导体内涡流的趋肤效应, 磁场强度随距离表面深度 h 的增大按指数衰减;

• 涡流密度沿深度方向亦按指数下降, 可表示为

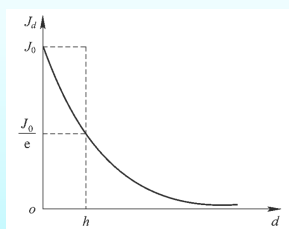
$$J_d \square J_0 e^{-d/h}$$

式中: d ——金属导体中某一点与表面距离;

J_d ——沿轴向 d 处的电涡流密度;

J_0 ——金属表面涡流密度最大值;

h ——电涡流轴向贯穿的**深度**(趋肤深度)。



10. 电涡流式传感器(续)

• 涡流传感器可用作两个方面参数的测量:

(1) 以位移为基本量的参数, 利用阻抗 Z 与初、次级线圈间的距离 δ 的函数关系, 测量位移、厚度、振幅、压力、转速等

(2) 与被测材料**导电**、**导磁**性能有关的参量, 如电导率、导磁率、温度、硬度、材质、裂纹缺陷等

• 可将被测物理量转化为**电阻抗**, 后续电路为电阻抗参量测量电路, 如:

调制电路、电桥电路、谐振电路等

The End