



第五章 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如位移、压力、流量、振动等转换成线圈自感系数 L 、互感系数 M 或线圈阻抗的变化，再由测量电路转换为电压或电流的变化量的输出。
 - 变磁阻式传感器——*自感式*
 - 差动变压器式传感器——*互感式*
 - 电涡流式传感器——*电涡流式*



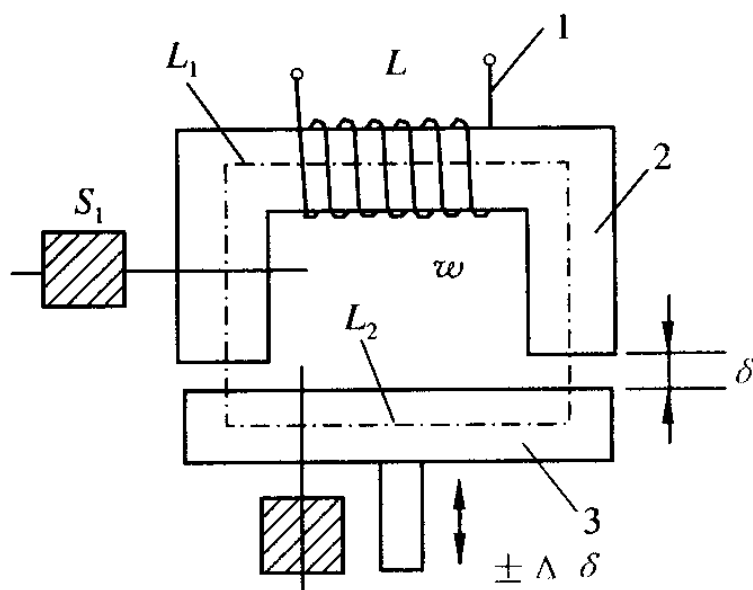
主要特点

- 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

- 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

变磁阻式传感器工作原理（定性）



—线圈；2—铁芯（定铁芯）；3—衔铁（动铁芯）

图 4-1 变磁阻式传感器

衔铁移动

↓
δ改变

↓
磁阻变化

↓
电感值变化

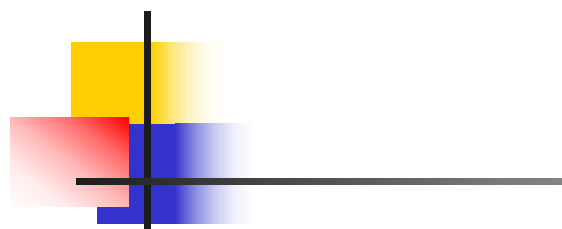
$$L = \frac{W^2}{R_m}$$

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

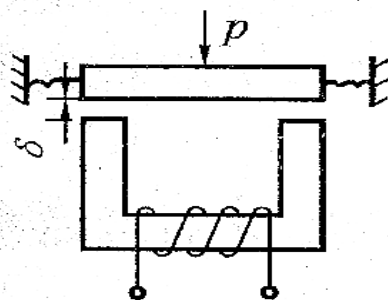
$$(R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S_0})$$

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

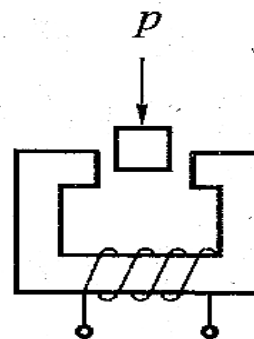
第5章 电感式传感器



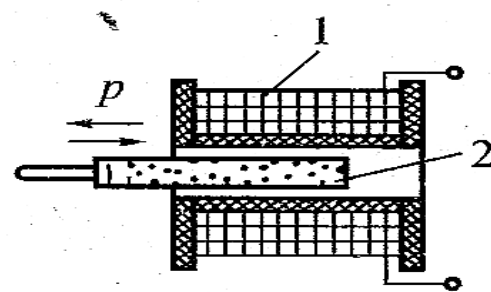
$$L = \frac{W^2}{R_m} = \frac{W^2 \mu_0 S_0}{2\delta} \quad (5-5)$$



(a)



(b)



(c)

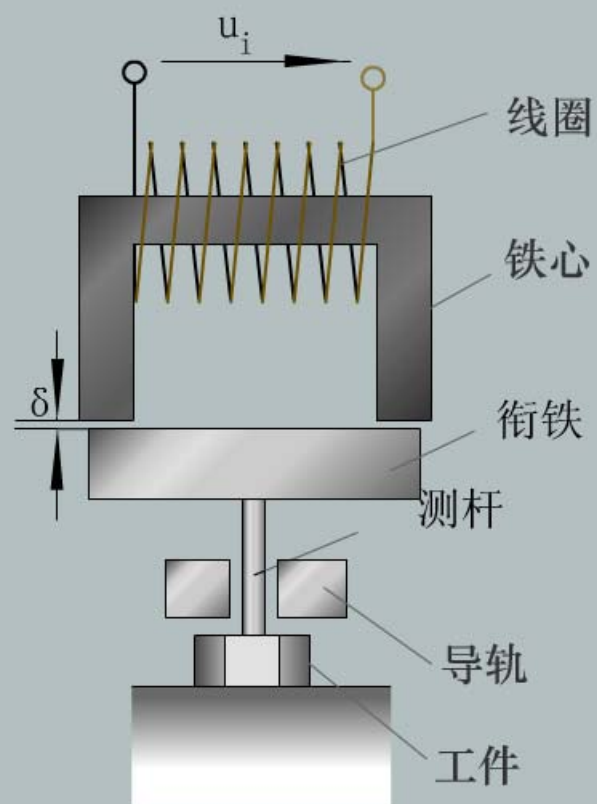
根据式(3-19)可以形成三种类型的自感式传感器

- 改变气隙厚度 δ (a)
- 改变导磁面积 S_0 (b)
- 利用铁芯在螺管线圈中的直线位移改变总的磁阻(c)

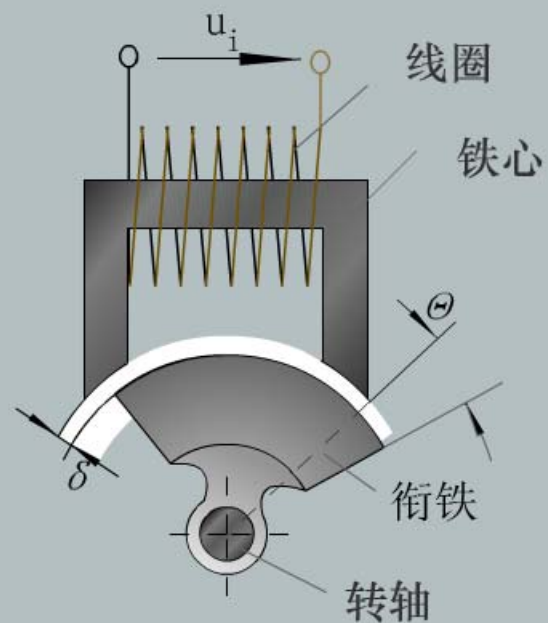
也可认为是改变有效线圈匝数 N

- 三种传感器均可用以测量变换为直线位移的物理参量
- 由公式(5-5)可见, L 与各参数的变化关系并不相同

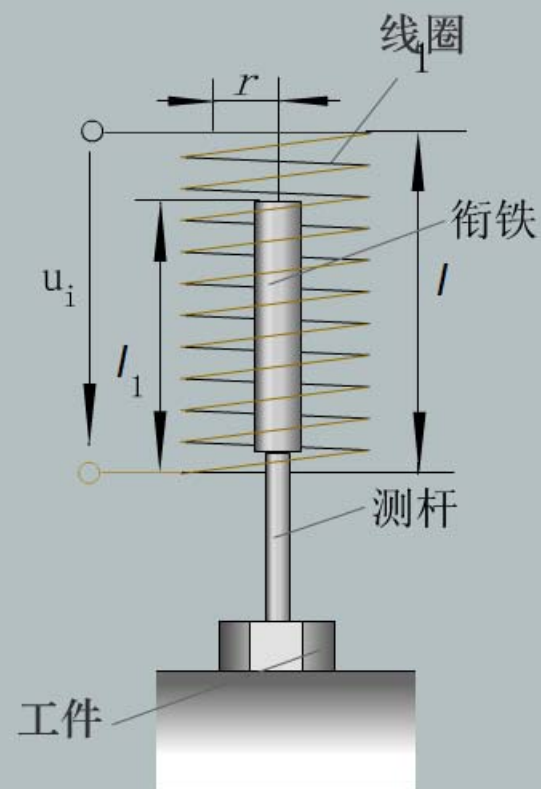
如改变气隙类型, L 与 δ 不是线性关系——与电容传感器类似



变隙式



变截面式



螺线管式

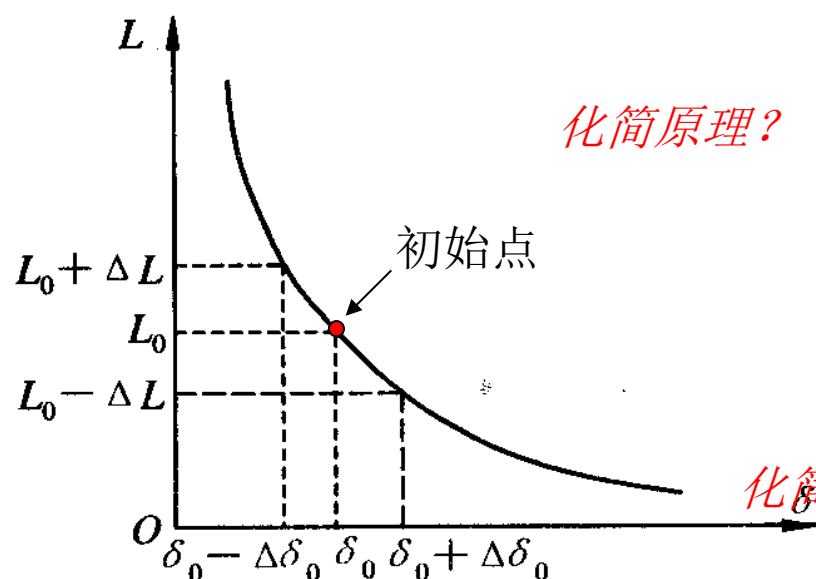
自感式传感器的几种常见形式

变隙式自感传感器输出特性（定量）

初始电感量: $L_0 = \frac{\mu_0 s_0 w^2}{2\delta_0}$

衔铁上移 $\Delta \delta$, $\delta = \delta_0 - \Delta \delta$

$$L = L_0 + \Delta L = \frac{w^2 \mu_0 s_0}{2(\delta_0 - \Delta \delta)} = \frac{L_0}{1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0}}$$



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

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

同理, 衔铁下移 $\Delta \delta$, $\delta = \delta_0 + \Delta \delta$

化简原理?

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

忽略高价项: $\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$

非线性项?

图 4-2 变隙式电感传感器的 $L-\delta$ 特性

*灵敏度定义 灵敏度为: $K_0 = \frac{L_0}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0}$ (表明?)

第5章 电感式传感器

由此可见，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，因此，变隙式电感传感器用于测量微小位移量的场合。

为减小非线性误差且提高灵敏度，实际测量中广泛采用差动变隙式自感传感器。

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

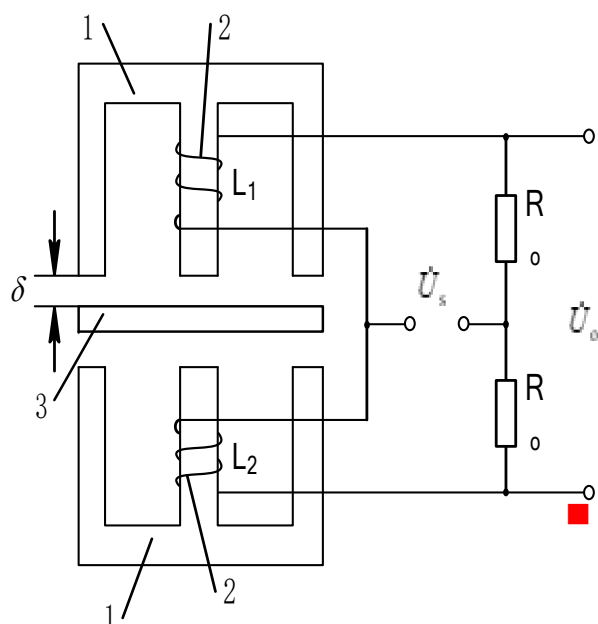


图5-2 差动变隙式电感传感器（课本中图有误）

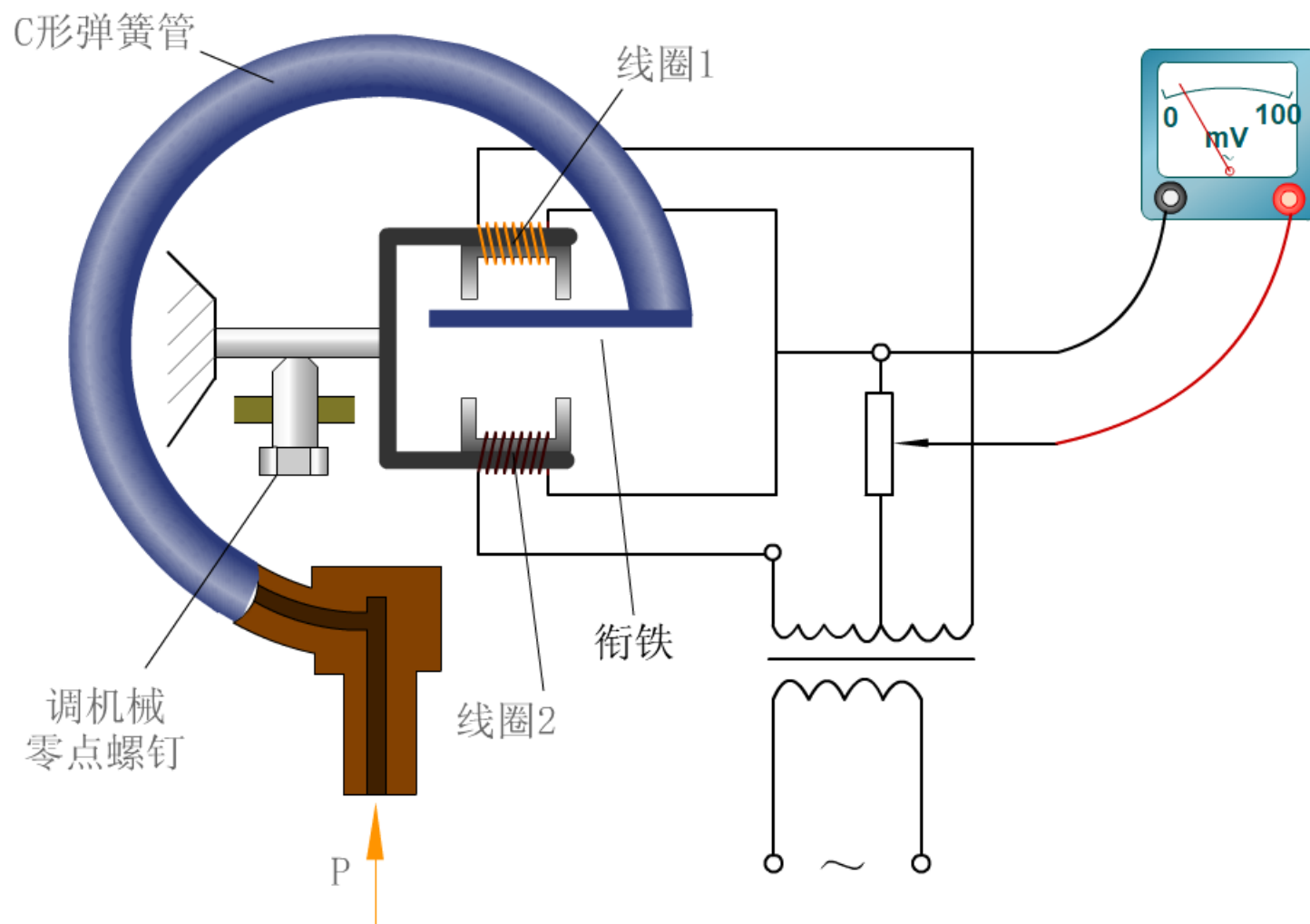
上下两个完全一样的单自感传感器合用一个动衔铁

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

非线性项？

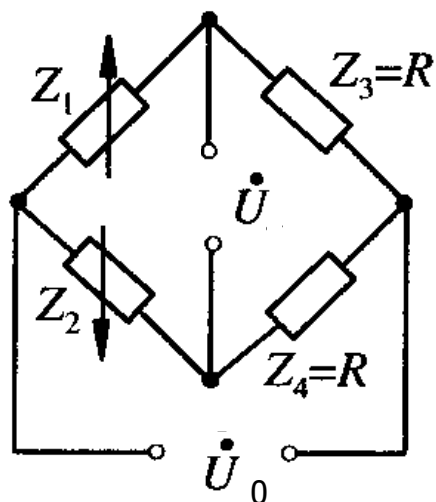
$$K_0 = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\frac{\Delta \delta}{\delta_0}} = \frac{2}{\delta_0}$$

- 差动式变间隙电感传感器的灵敏度是单线圈式的两倍。
- 差动式变间隙电感传感器的非线性项次数高，线性度得到明显改善。



变隙式差动压力传感器的工作原理

交流电桥式测量电路



■ 电桥平衡条件： $Z_1 = Z_2$ ；

$$Z_3 = Z_4$$

■ 平衡状态下： $U_0 = 0$

■ 衔铁偏离中心位置后：

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$$

假设传感器线圈具有高品质因数，即 $Q = \frac{\omega L}{R}$

很大，则 $Z_1 = Z_2 = R + j\omega L \approx j\omega L$

图 4 - 5 交流电桥测量电路

(注：课本中图有误)

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx \frac{\Delta L}{L_0} \rightarrow \dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta Z}{Z} \approx \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta L}{L_0} \approx \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

电桥输出电压与 $\Delta \delta$ 成正比，相位与移动方向有关。

变压器式交流电桥

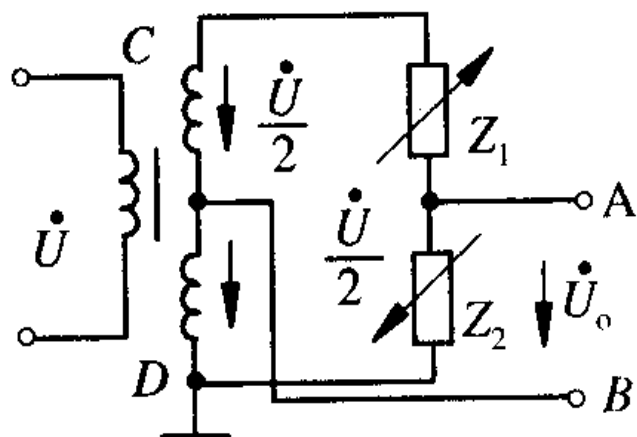


图 4 - 6 变压器式交流电桥

$$\dot{U}_0 = \frac{Z_2 \dot{U}}{Z_1 + Z_2} - \frac{\dot{U}}{2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \frac{\dot{U}}{2}$$

当传感器衔铁上移时，即 $Z_1 = Z + \Delta Z$,
 $Z_2 = Z - \Delta Z$ ，此时

$$\dot{U}_0 = -\frac{\Delta Z}{Z} \frac{\dot{U}}{2} \approx -\frac{\Delta L}{L} \frac{\dot{U}}{2} \quad \text{书中应为约等号}$$

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

$$\dot{U}_0 = \frac{\Delta Z}{Z} \frac{\dot{U}}{2} = \frac{\Delta L}{L} \frac{\dot{U}}{2}$$

相敏检波电路：判断交流电压输出相位与衔铁移动方向的关系

谐振式测量电路

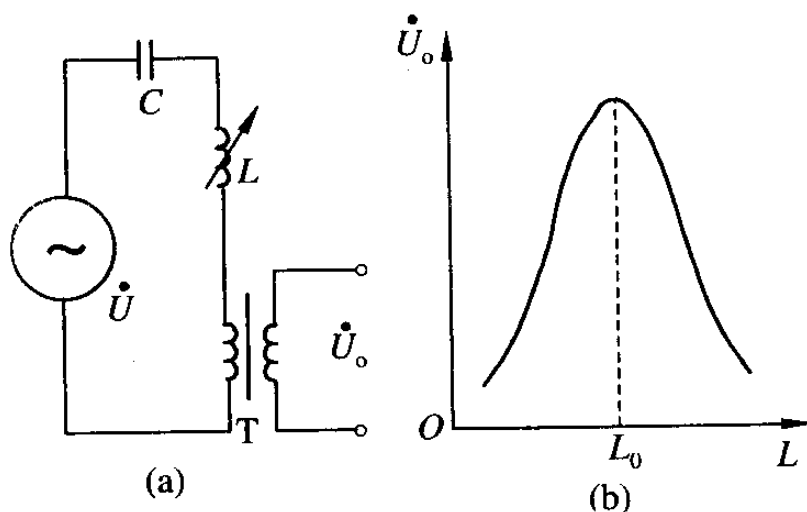


图 4 - 7 谐振式调幅电路

基本原理：电感 L 的变化引起输出电压幅度的变化

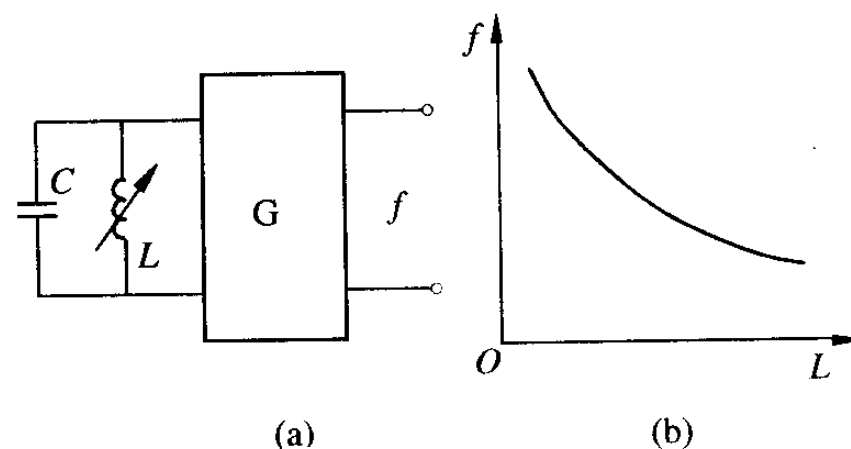


图 4 - 8 谐振式调频电路

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

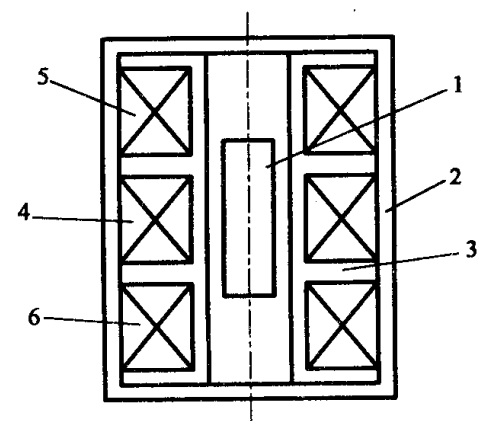
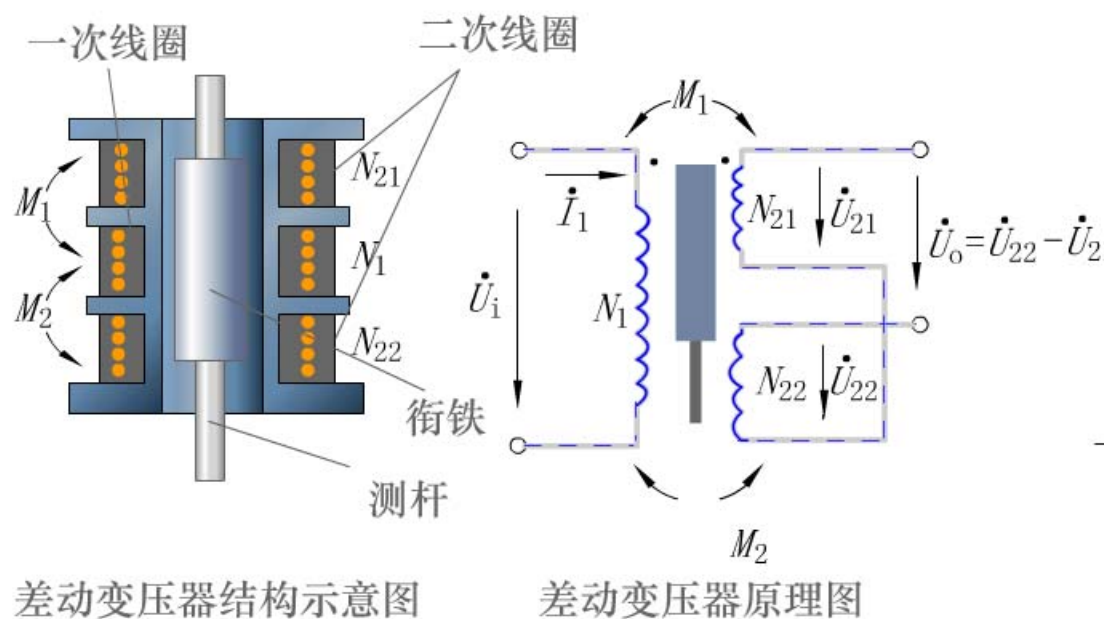
基本原理：电感 L 的变化引起输出电压频率的变化



差动变压器式传感器

- 互感式传感器——把被测的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

螺线管式差动变压器



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

图 4-10 螺线管式差动变压器结构

差动变压器式传感器

螺线管式差动变压器工作原理（定性）

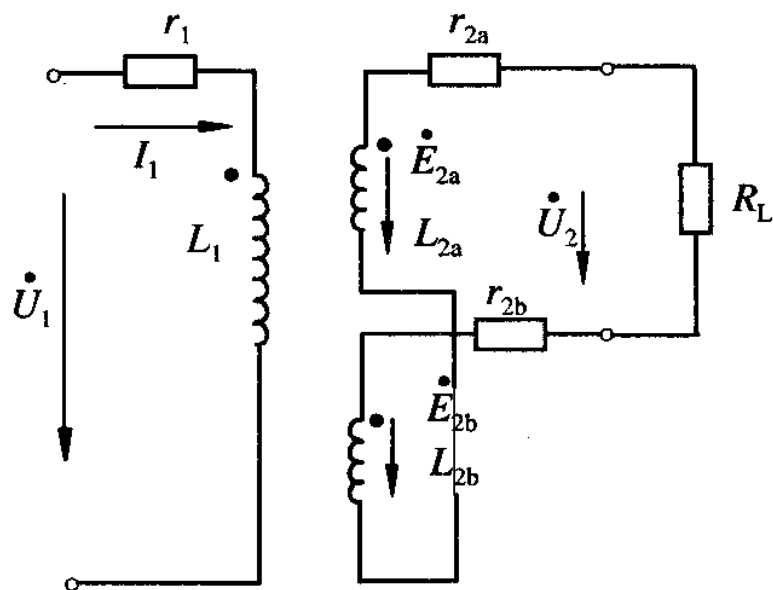


图 4-16 差动变压器等效电路

（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）

$$\dot{U}_0 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b}$$

- 衔铁在平衡位置时.....
- 活动衔铁向上移动时,由于磁阻的影响, w_{2a} 中磁通将大于 w_{2b} , 使 $M_1 > M_2$,
- 反之.....
- 即：当衔铁位移发生变化时，输出电压会随之发生变化

螺线管式差动变压器基本特性（定量）

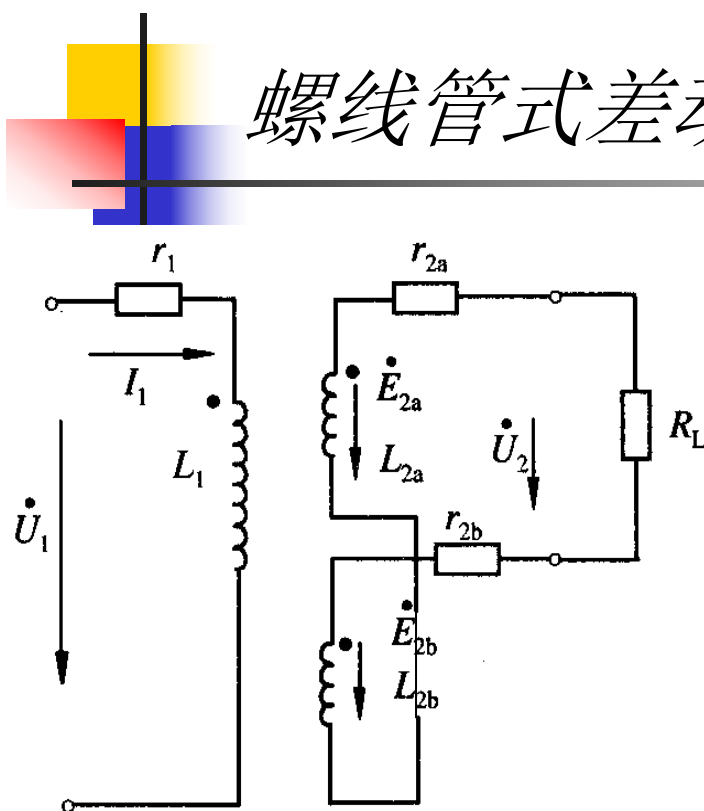


图 4-16 差动变压器等效电路

（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）

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

$$\dot{E}_{2a} = -j\omega M_1 \dot{I}_1 \quad \dot{E}_{2b} = -j\omega M_2 \dot{I}_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = -\frac{j\omega(M_1 - M_2)\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1}$$

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

■ 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， $M_1 = M + \Delta M$ $M_2 = M - \Delta M$

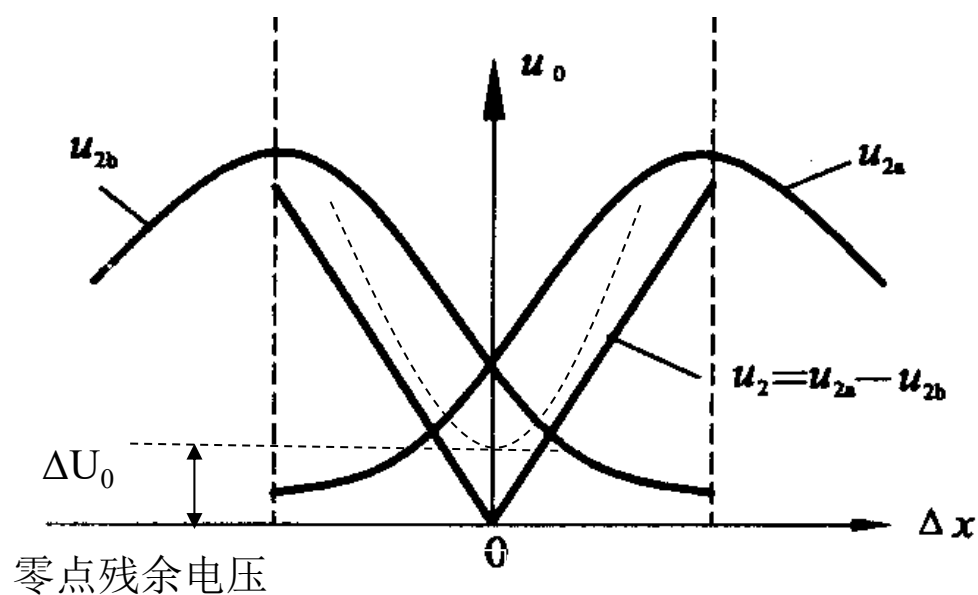
$$U_2 = 2\omega\Delta MU_1 / [r_1^2 + (\omega L_1)^2]^{1/2} \text{ 与 } \dot{E}_{2a} \text{ 同极性}$$

■ 活动衔铁向下移动时， $M_1 = M - \Delta M$ $M_2 = M + \Delta M$

$$U_2 = -2\omega\Delta MU_1 / [r_1^2 + (\omega L_1)^2]^{1/2} \text{ 与 } \dot{E}_{2b} \text{ 同极性}$$

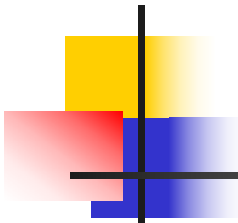
■ 输出特点：输出（交流电压）幅值与衔铁偏移量成正比；衔铁过平衡点时，相位改变180度。

零点残余电压



零点残余电压主要是由传感器的两次级绕组的电气参数与几何尺寸不对称，以及磁性材料的非线性等问题引起的。（基波、高次谐波）

图 4 - 17 差动变压器的输出电压特性曲线



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**：可判断位移方向，但无法判断位移大小
 - **相敏检波电路**：无失真输出，输出与输入完全一致，可获得位移大小和方向

差动整流电路

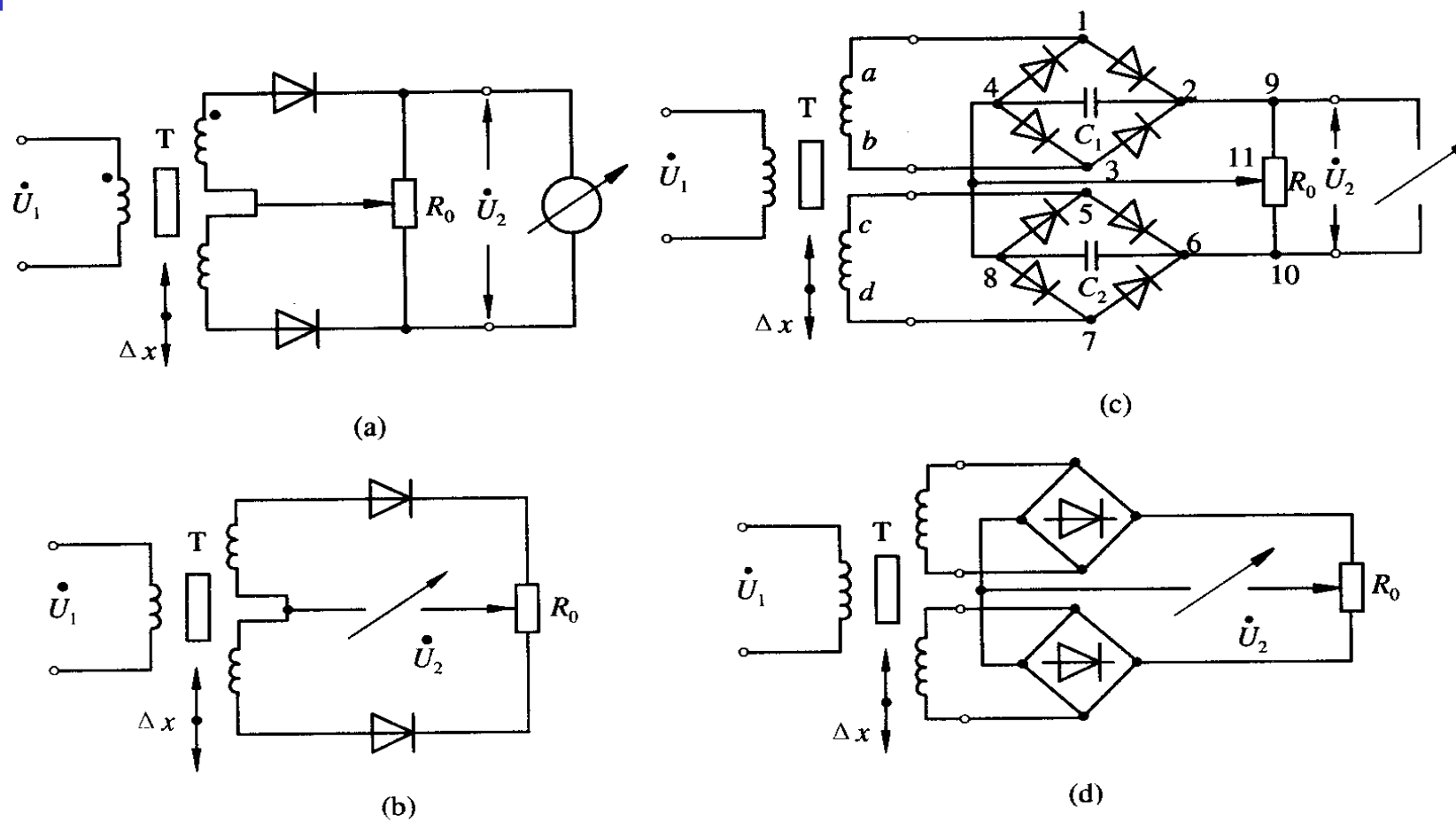


图 4 - 18 差动整流电路

相敏检波电路

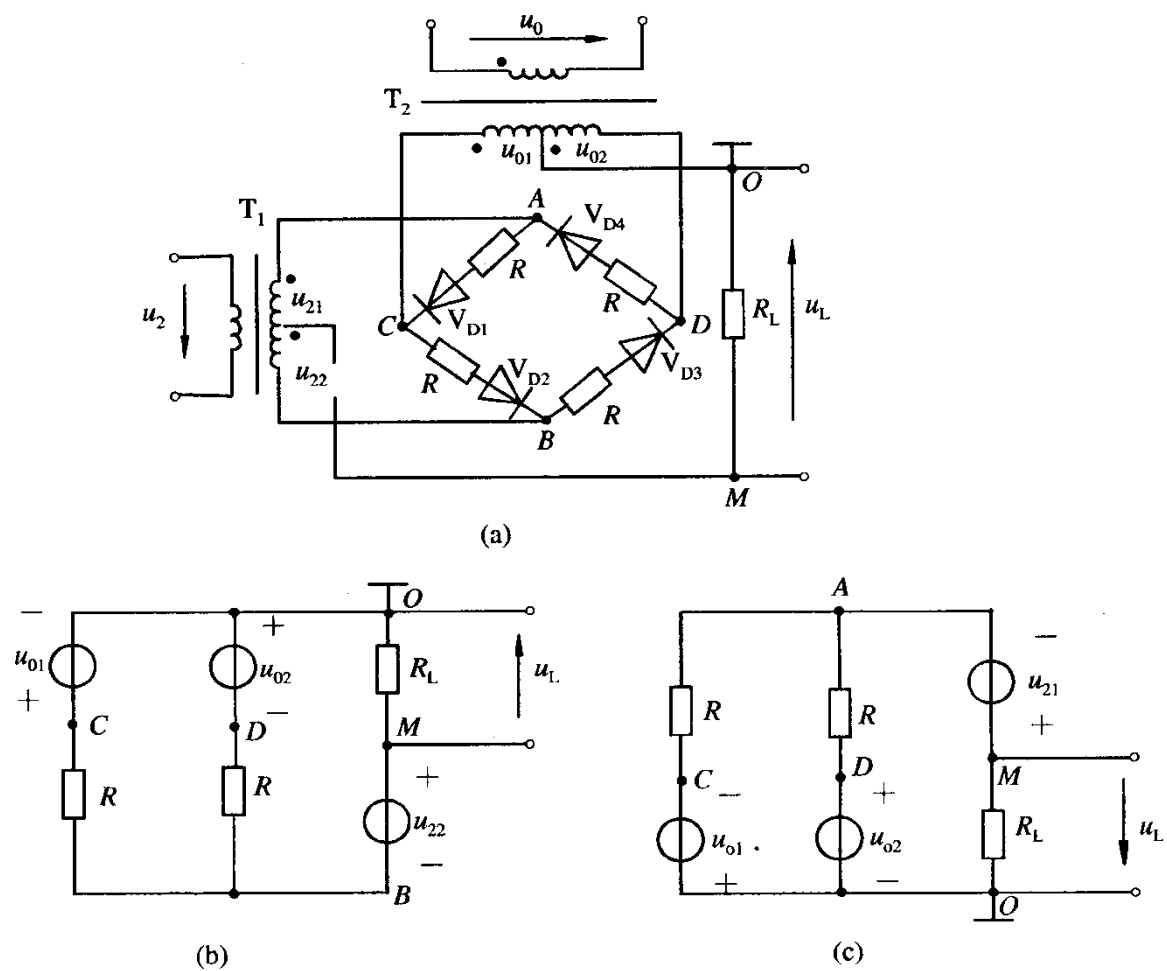


图 4-19 相敏检波电路

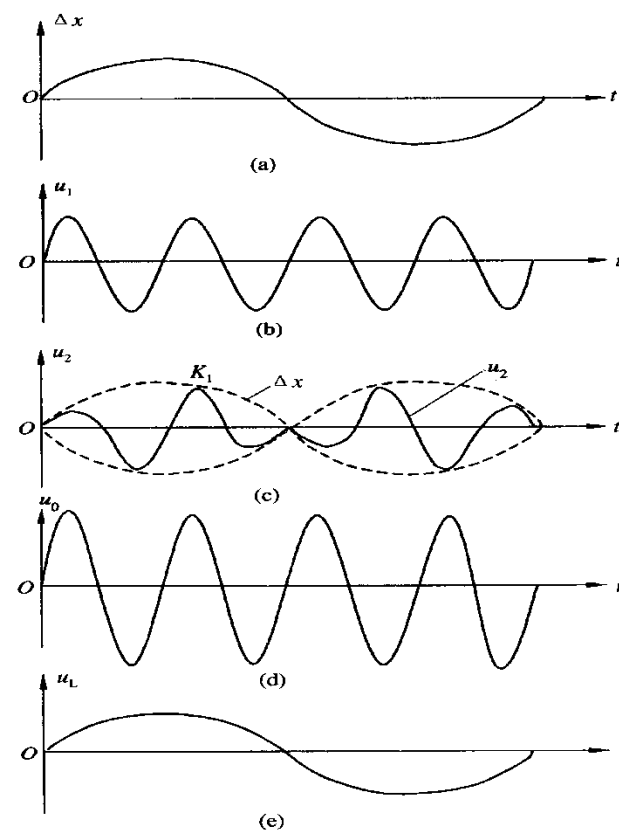
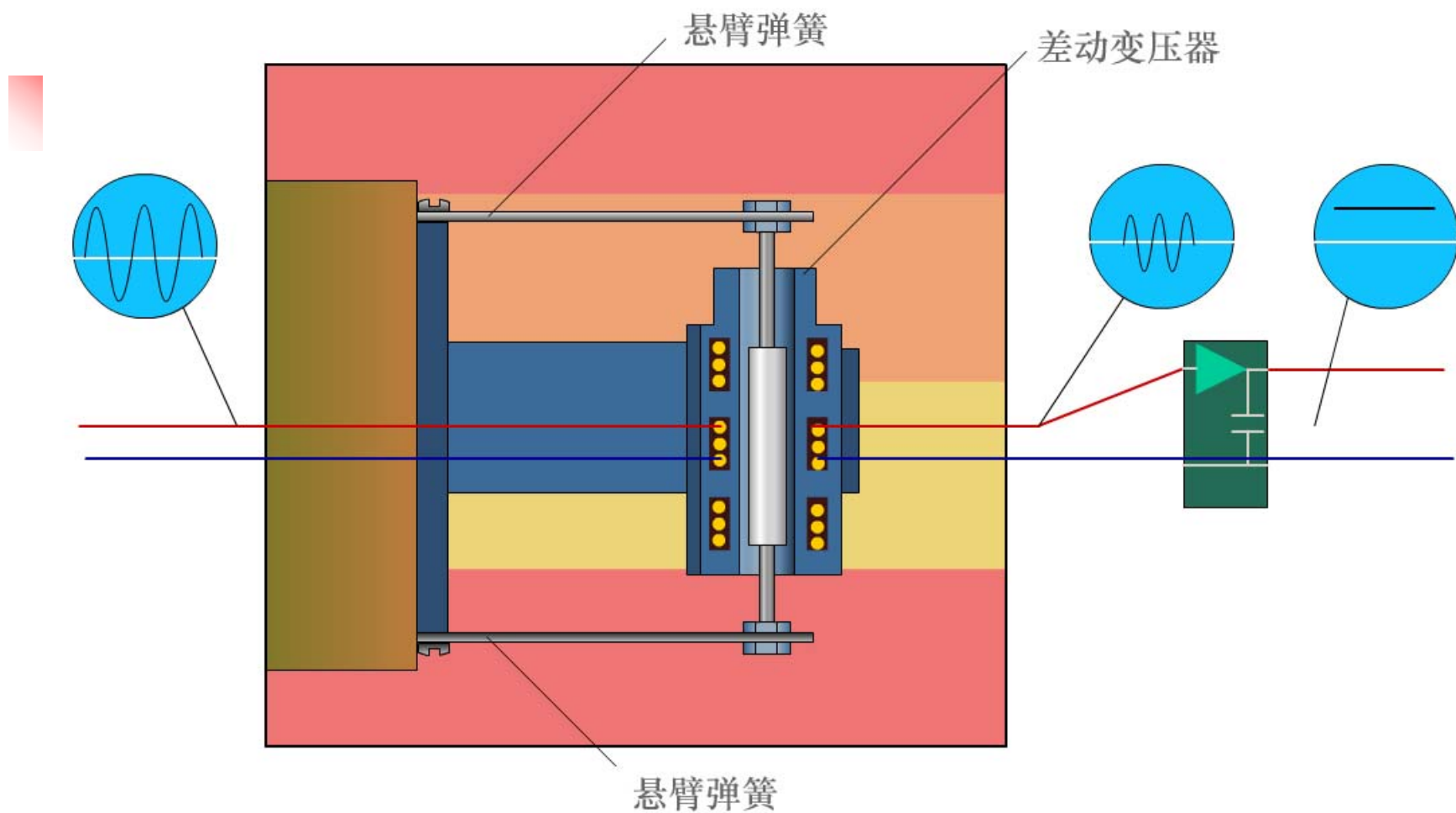
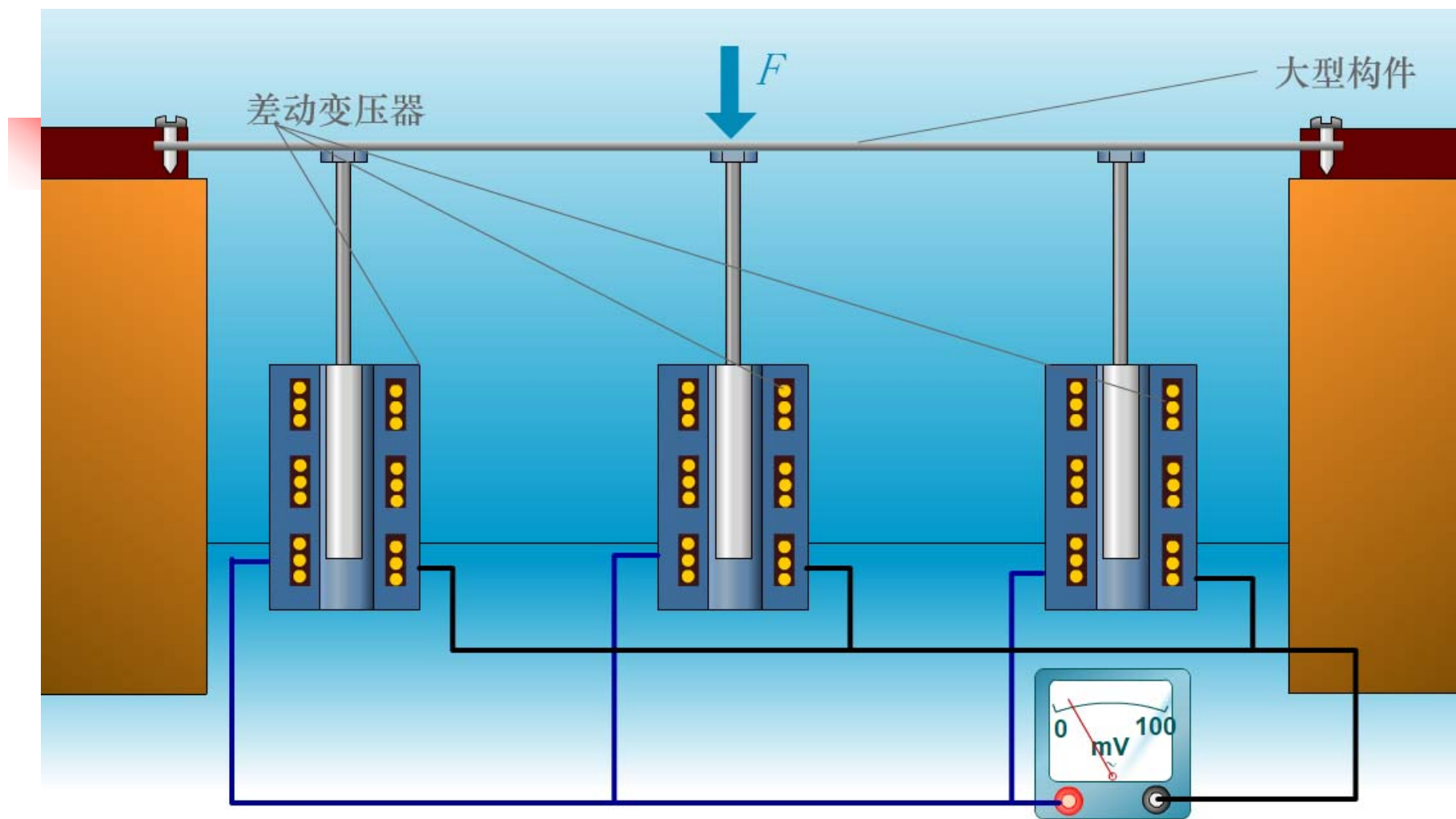


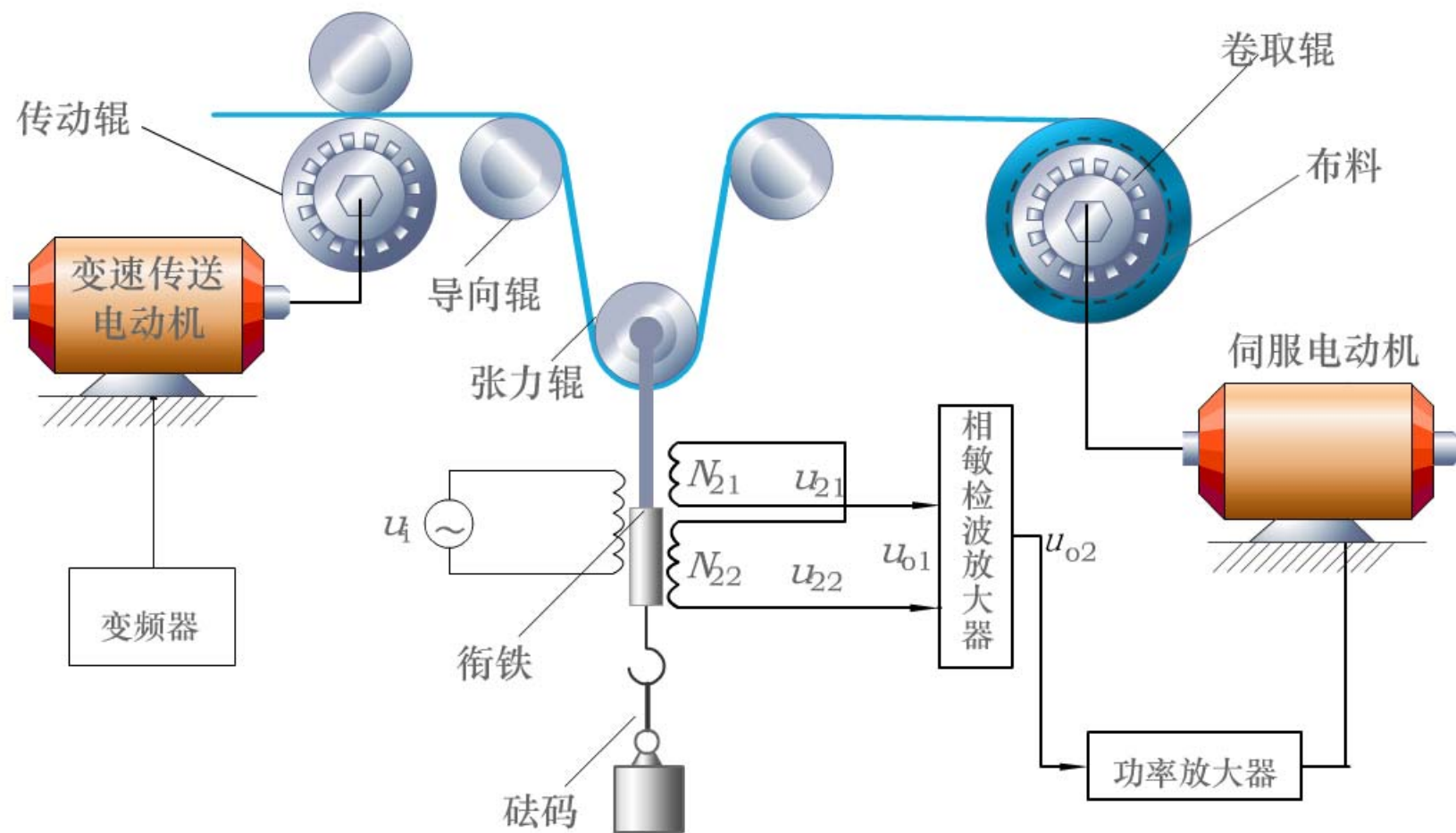
图 4-16 波形图



差动变压器式加速度传感器



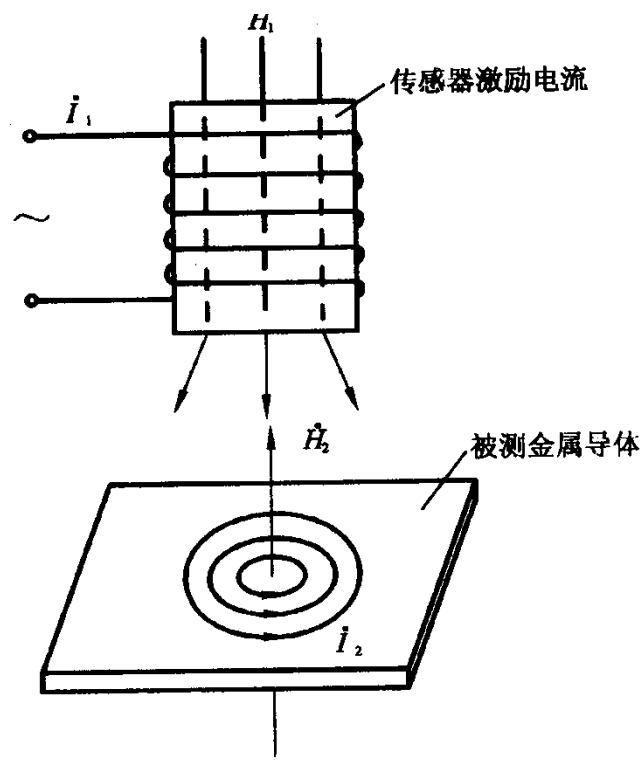
差动传感器测量大型构件的应力和位移



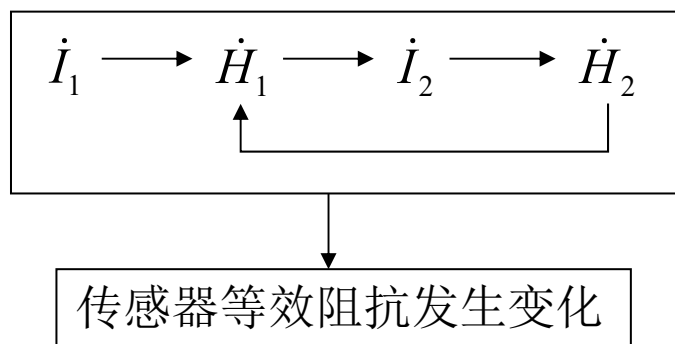
差动变压器式张力测量控制系统

电涡流式传感器

■ 工作原理



电涡流效应——块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中作切割磁力线运动时，导体内将产生呈涡旋状的感应电流。



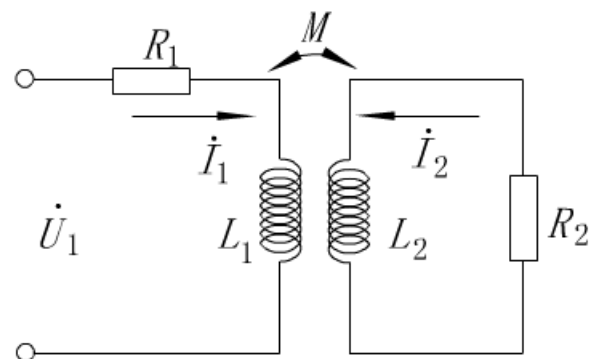
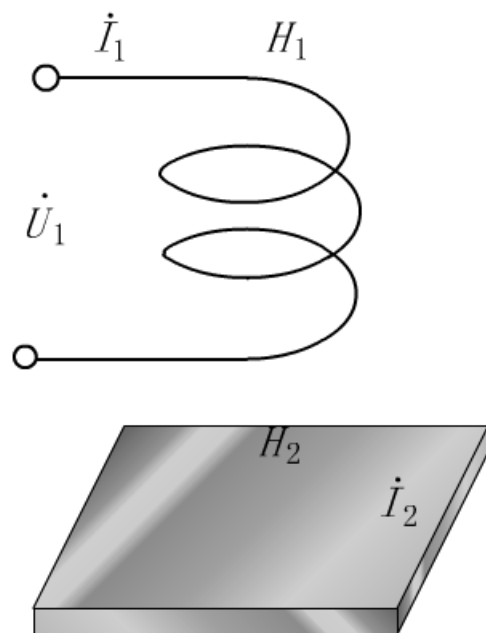
$$Z = F(\rho, \mu, r, f, x)$$

一般用于测量 x ，也有用于测量 ρ 、 μ

图 4 - 22 电涡流传感器原理图

$$Z = F(\rho, \mu, r, f, x)$$

第5章 电感式传感器

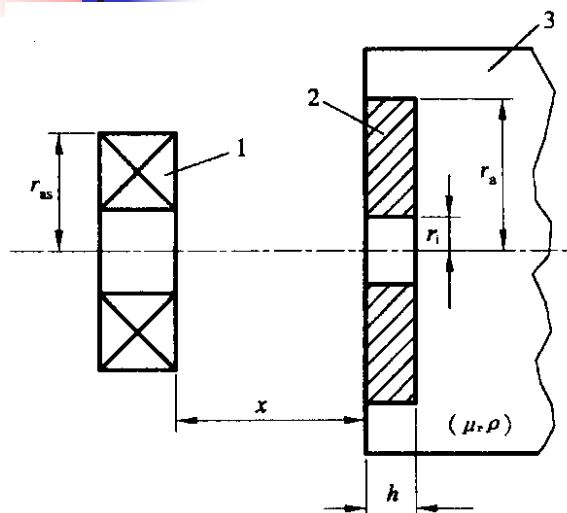


等效电路

高频反射式电涡流传感器原理

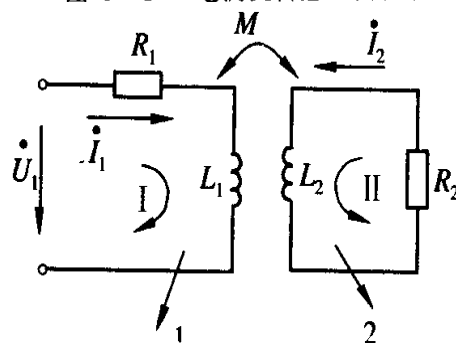
电涡流式传感器

电涡流传感器基本特性（定量）



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



1—传感器线圈；2—电涡流短路环

图 4-20 电涡流传感器等效电路

等效电路模型：基尔霍夫电压定律：沿着闭合回路中所有元件两端的电压代数和为0

$$R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1$$

$$R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0$$

线圈的等效阻抗：

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

$$= R_{eq} + j\omega L_{eq}$$

线圈等效阻抗与导体、线圈、激励信号、互感系数有关

互感系数是距离的函数

电涡流的径向形成范围

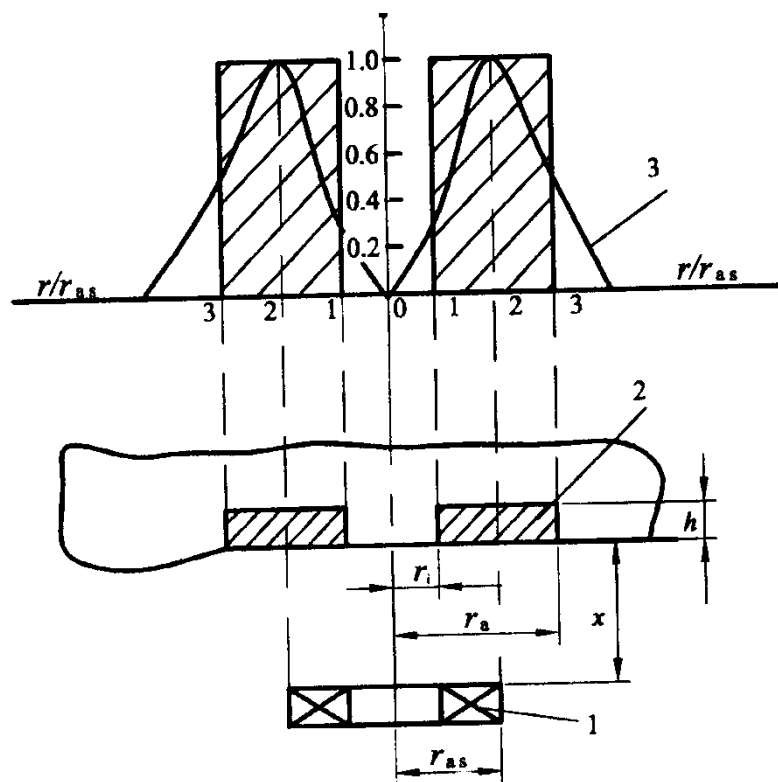


图 4-25 电涡流密度 J 与半径 r 的关系曲线

- 电涡流密度在短路环半径 $r=0$ 处为零
- 电涡流的最大值在 $r=r_{as}$ 附近的一个狭窄区域内
- 电涡流径向形成的范围大约在传感器线圈外径 r_{as} 的 $0 \sim 2.0$ 倍范围内，且分布不均匀
- 被测导体的平面尺寸不应小于传感器线圈外径的2倍，否则灵敏度下降

电涡流强度与距离、轴向贯穿深度的关系

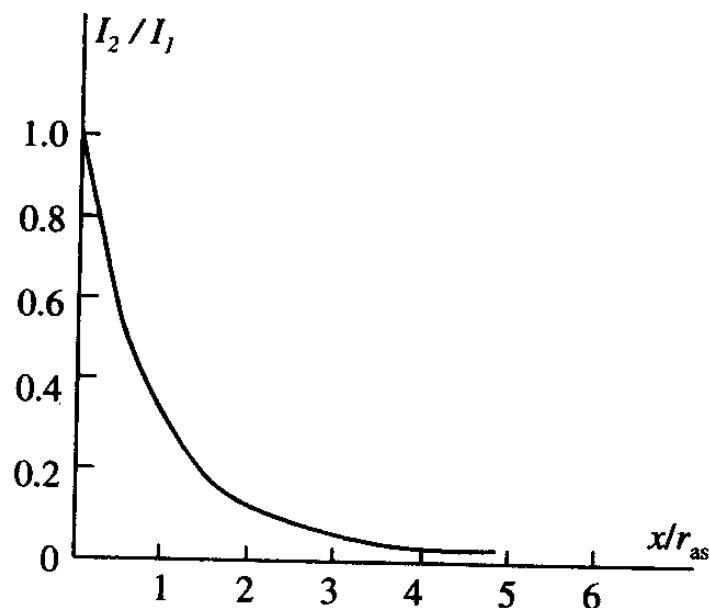


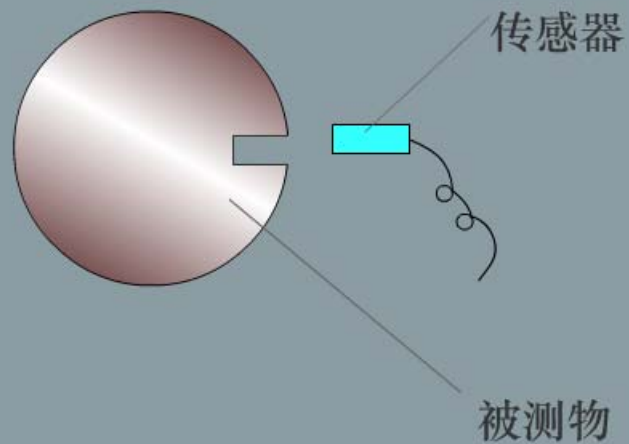
图 4 - 26 电涡流强度与距离归一化曲线

- 电涡强度与距离 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 $0.05 \sim 0.15$) 的范围才能得到较好的线性和较高的灵敏度
- 电涡强度沿金属导体深度方向呈指数规律下降。
- 趋肤效应

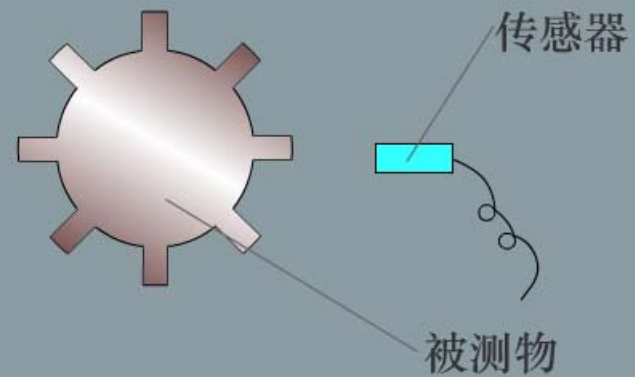


电涡流传感器应用

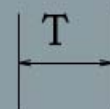
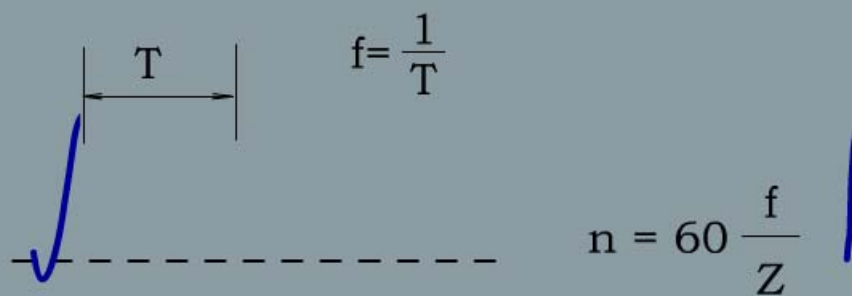
- 特点：测量范围大、灵敏度高、结构简单、抗干扰能力强、非接触式测量
- 被测材料对测量结果的影响，如导电率
- 被测体形状对测量结果的影响，如尺寸



(a)带有凹槽的转轴及输出波型

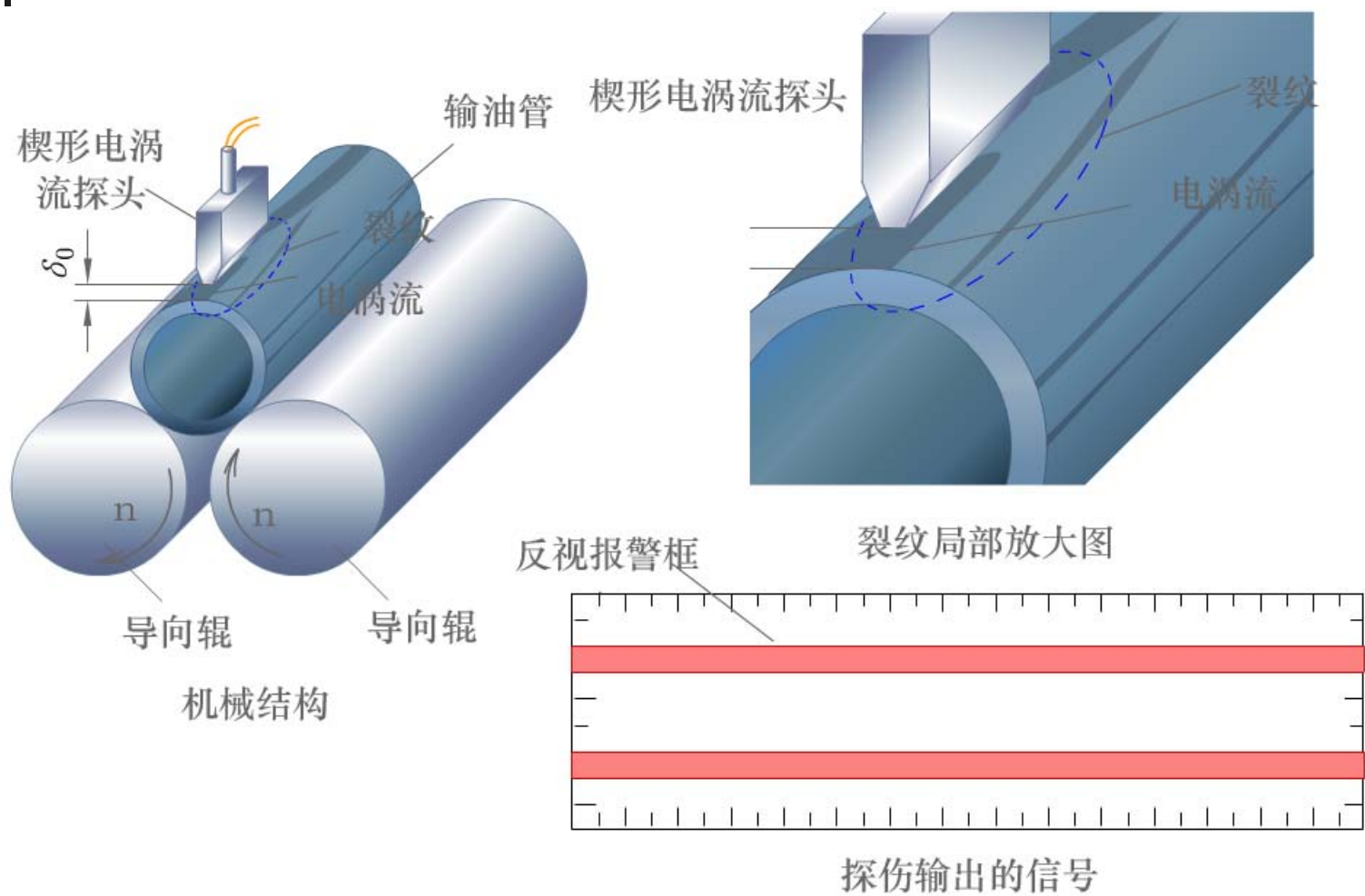


(b)带有凸槽的转轴及输出波型



转速的测量

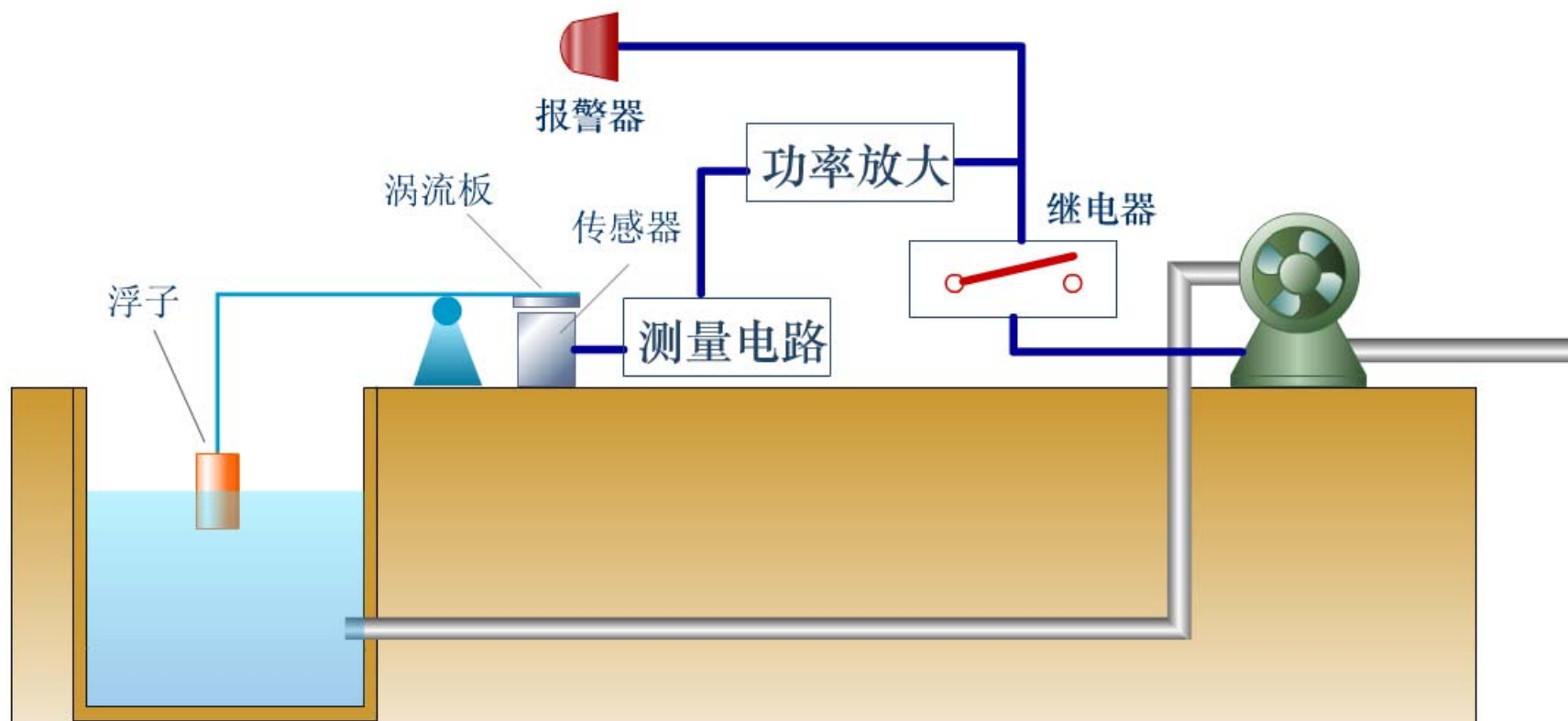
第5章 电感式传感器



电涡流表面的探伤

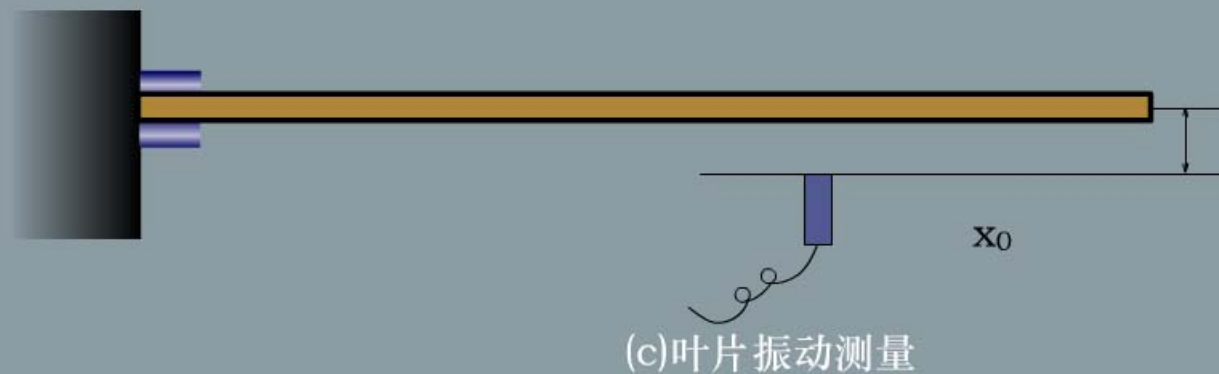
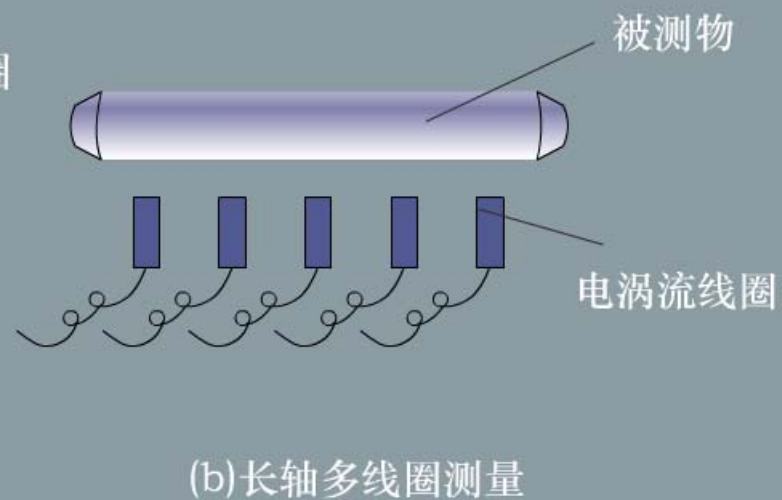
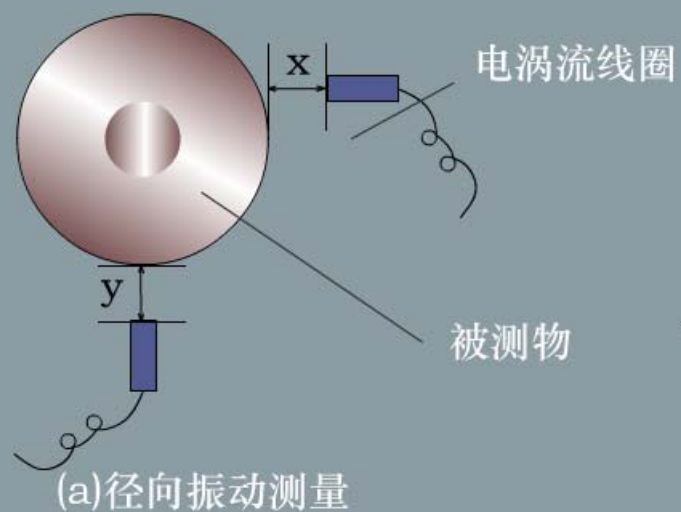
东方仿真COPYRIGHT

第5章 电感式传感器



电涡流式传感器测量位移

第5章 电感式传感器



振幅测量的原理