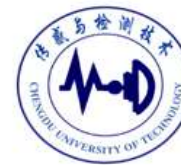


传感器原理与应用

第5章 电感式传感器

第5章 电感式传感器



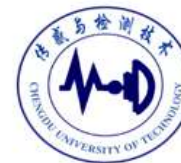
主要内容:

5.1 变磁阻式电感传感器

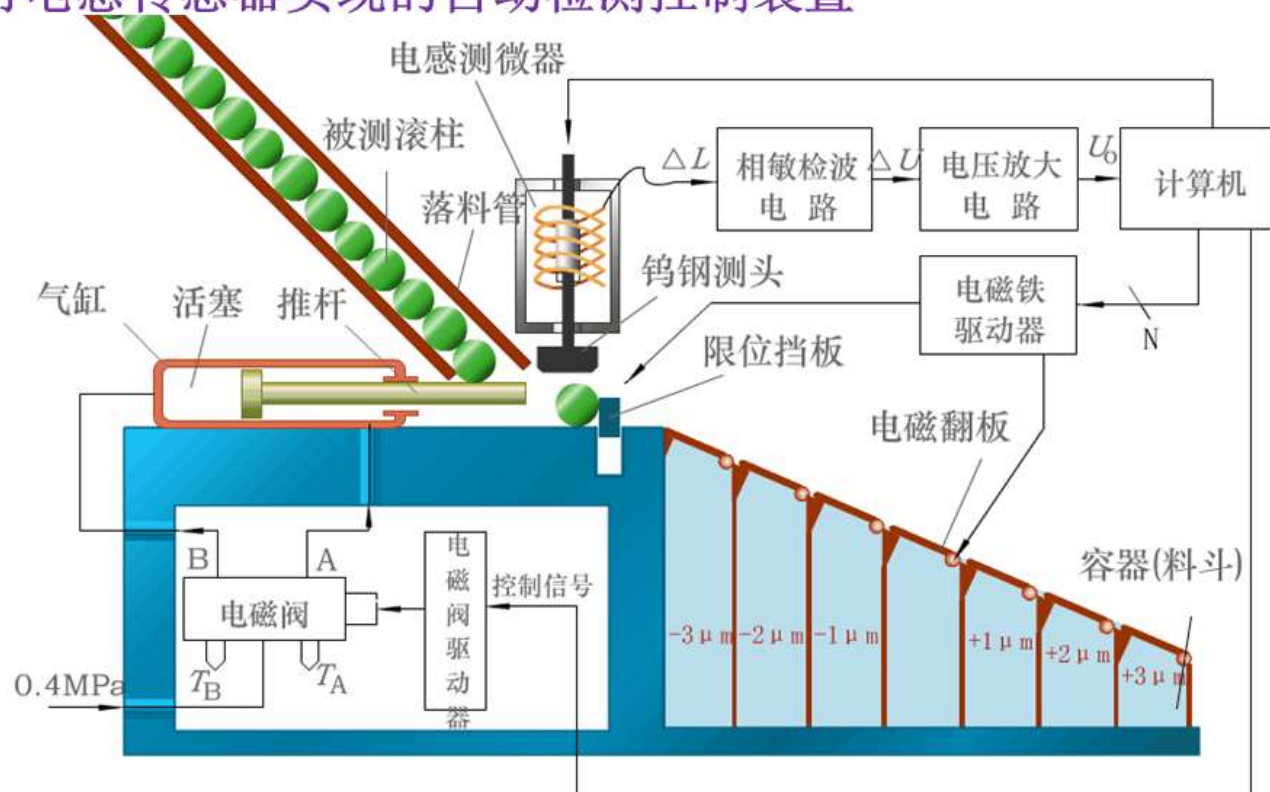
5.2 差动变压器式电感传感器

5.3 电涡流式传感器

第5章 电感式传感器

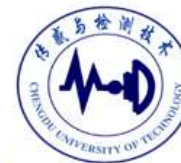


► 用电感传感器实现的自动检测控制装置



电感传感器测量滚珠直径，实现按误差分装塞选

第5章 电感式传感器



各种电感式传感器



电感粗糙度仪



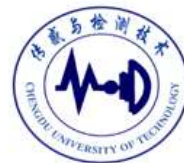
测厚传感器



接近式开关

非接触式位移传感器

第5章 电感式传感器



概述

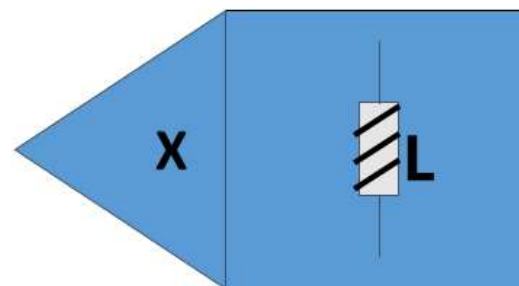
- 电感式传感器利用**电磁感应定律**将被测量（如位移、压力、振动）转换为电感的**自感**或**互感**的变化。
- 电感式传感器是一种机电转换装置，特点是体积大，灵敏度高，输出信号大（0.1-0.5V/mm），在自动控制设备中广泛应用。
- 电感式传感器可分为：

按原理分

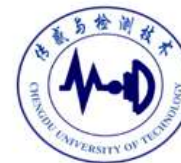
- 自感式电感传感器
- 互感式电感传感器

按结构分

- 变磁阻式电感传感器
- 变压器式电感传感器
- 电涡流式电感传感器



第5章 电感式传感器



5.1 （自感式）变磁阻式电感传感器

5.1.1 工作原理

- 传感器结构: 铁芯、线圈、衔铁三部分组成。铁芯和衔铁之间的气隙, 气隙厚度为 δ_0 ;
- 传感器运动部分与衔铁相连, 衔铁移动时 δ 发生变化引起磁路的磁阻 R_m 变化, 使电感线圈的电感值 L 变化。

➤ 由于磁路的气隙磁阻远大于铁心磁阻, 可近似为气隙磁阻:

$$R_m = R_F + R_0 \approx R_0 = \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}$$

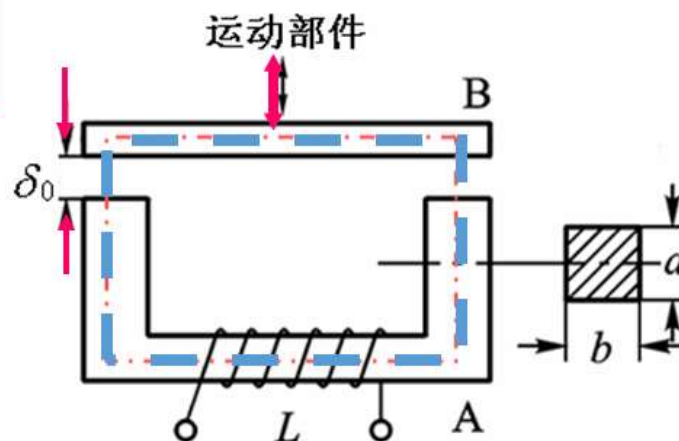
$$R_F = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2}$$

R_m : 磁路总磁阻;

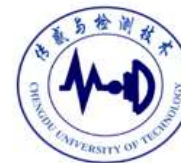
R_F : 铁芯磁阻;

R_0 : 气隙磁阻;

δ : 隙厚度; S_0 : 气隙的截面积; μ_0 : 真空导磁率。



第5章 电感式传感器



5.1.1 工作原理

- 磁路欧姆定律得到磁路的磁通 $\Phi = IN/R_m$
- 根据自感的定义式 $L = N\Phi/I$
- 线圈电感量：

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

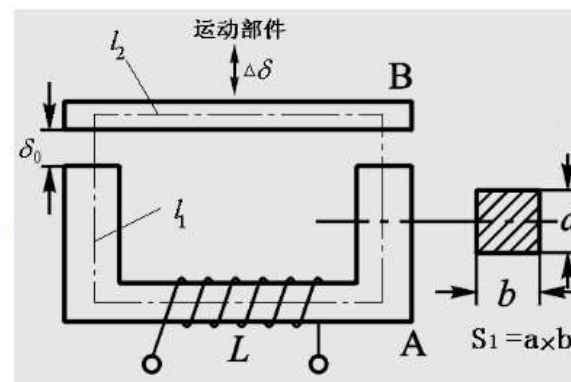
$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}$$

式中： N 为线圈匝数；

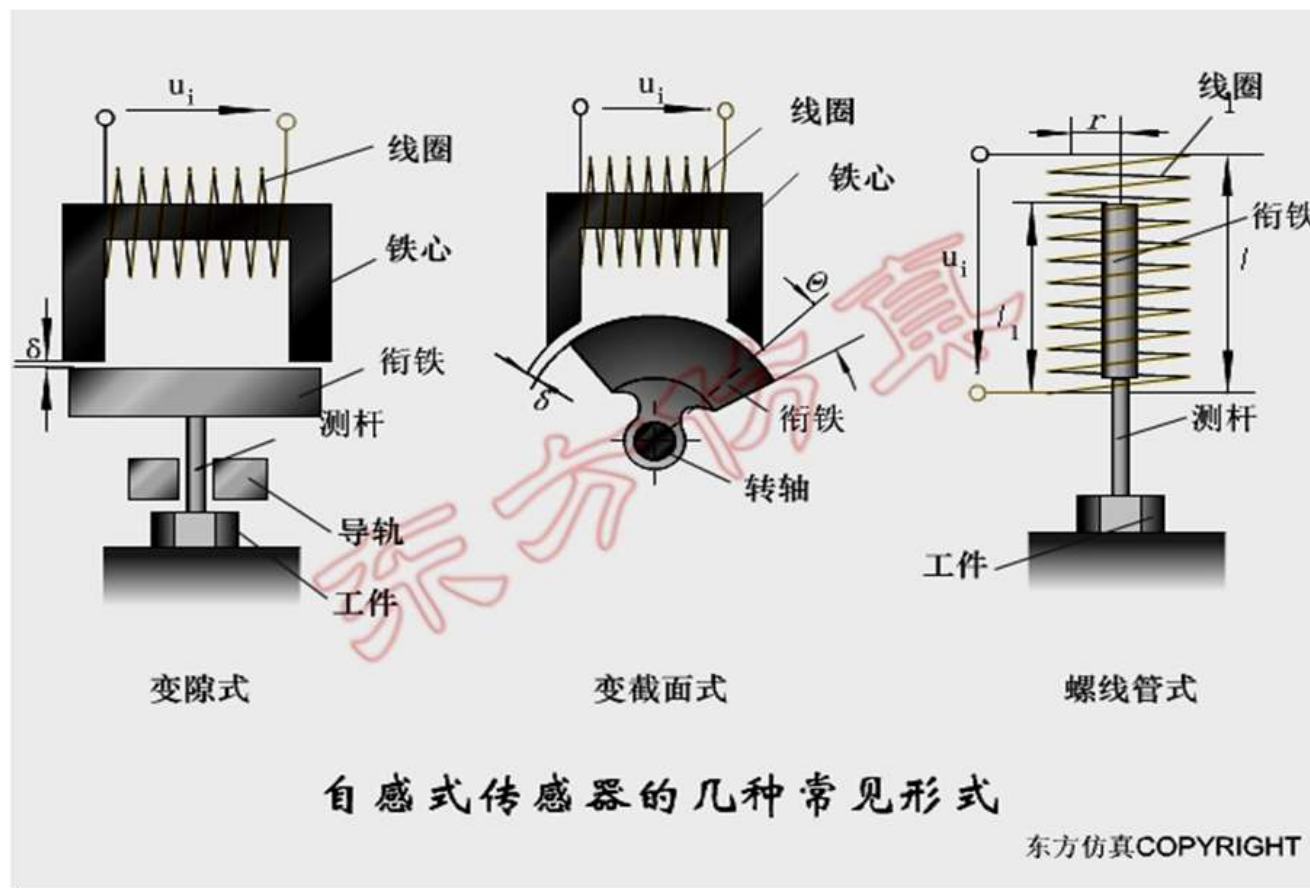
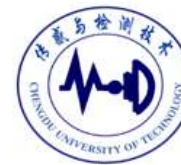
- 变磁阻式传感器又分为：

- ✓ 变气隙厚度型 (δ)
- ✓ 变气隙截面积型 (S_0)

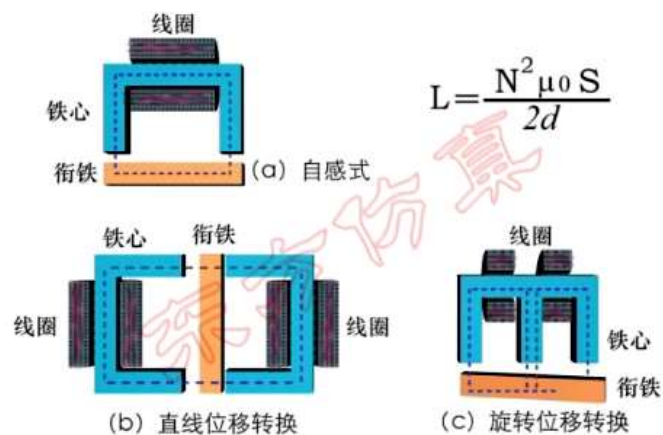
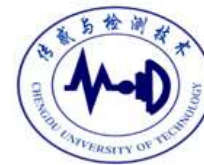
- 可见只要改变气隙厚度或气隙截面积就可以改变磁路的气隙磁阻。



第5章 电感式传感器



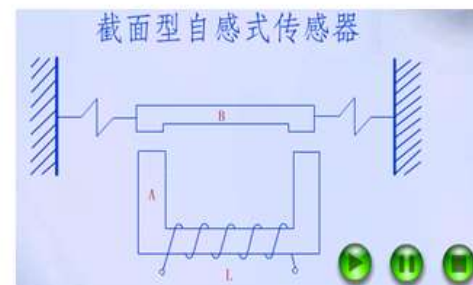
第5章 电感式传感器



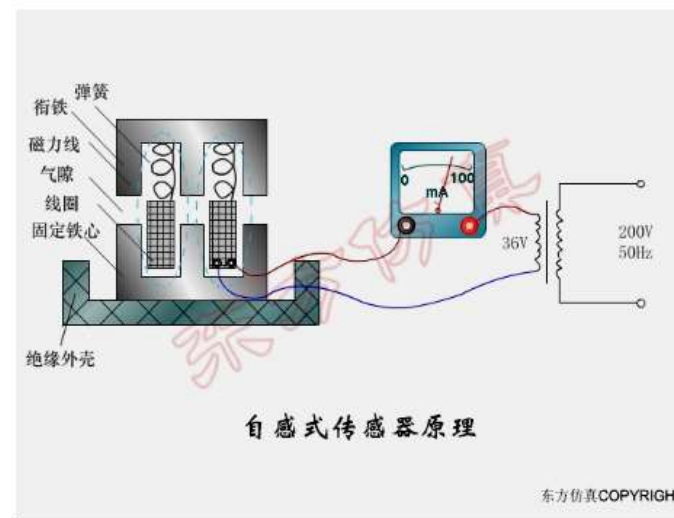
$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{2d}$$

电感式位移传感器

东方仿真COPYRIGHT

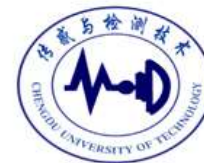


厚度
角度
截面积



- 下面以变气隙厚度型进行讨论

第5章 电感式传感器



5.1.2 输出特性（变气隙厚度）

- 气隙厚度变化时， L 与 δ 为反比关系

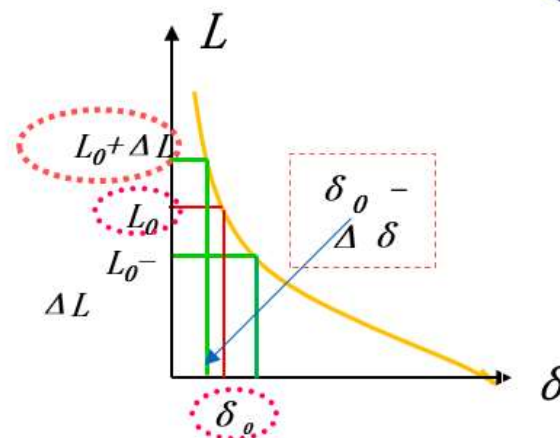
$$L = N^2 / R_m = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2\delta}$$

- 电感初始气隙 δ_0 处，初始电感量为

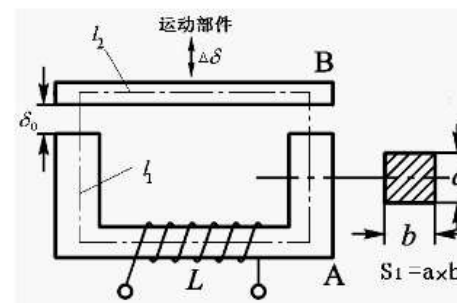
$$L_0 = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2\delta_0}$$

- 衔铁位移 $\Delta\delta$ 引起的电感变化为

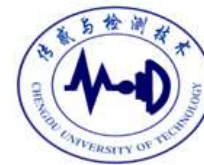
$$L = L_0 + \Delta L = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} = \frac{N^2 \mu_0 S_0 / 2 \delta_0}{(1 - \Delta\delta / \delta_0)} = \frac{L_0}{1 - \Delta\delta / \delta_0}$$



特性曲线非线性



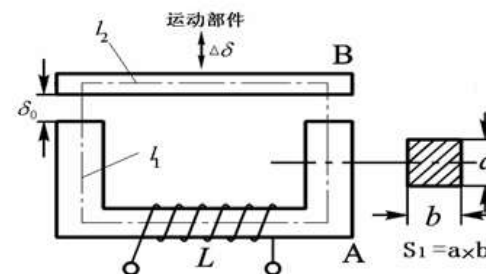
第5章 电感式传感器



5.1.2 输出特性

$\Delta \delta / \delta \ll 1$ 时, 可将前式用泰勒级数展开, 求出电感增量

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

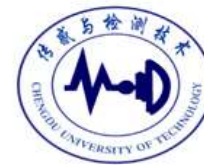


☞ 衔铁下移时电感的相对增量增大

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

☞ 衔铁上移时电感的相对增量减小

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



第5章 电感式传感器

5.1.2 输出特性

➤ 对上式作线性处理

■ 满足 $\Delta\delta/\delta \ll 1$ 时，忽略高次项（非线性项），
有：电感相对变化量与气隙变化成正比关系

$$\frac{\Delta L}{L_0} \approx \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

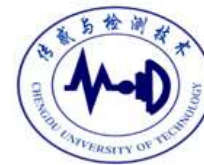
$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right]$$

➤ 定义变磁阻式传感器的灵敏度为：

$$k_0 = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta\delta} = \frac{1}{\delta_0}$$

即，衔铁的气隙变化
引起的电感相对变化量

第5章 电感式传感器



5.1.2 输出特性

☺ 讨论：

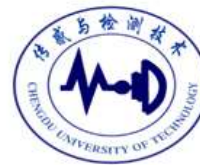
$$k_0 = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0}$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} \approx \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

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

1. 传感器测量范围 $\Delta \delta$ 与灵敏度 k_0 相矛盾；与线性度 $\Delta \delta/\delta_0$ 相矛盾；
2. $\Delta \delta/\delta_0$ 越小高次项迅速减小，非线性误差越小，但传感器量程变小；
3. 变间隙式电感传感器用于小位移比较精确，一般取 $\Delta \delta/\delta_0 = 0.1 \sim 0.2$ ，（1~2mm/10mm）；
4. 为减小非线性误差实际测量中多采用差动形式。

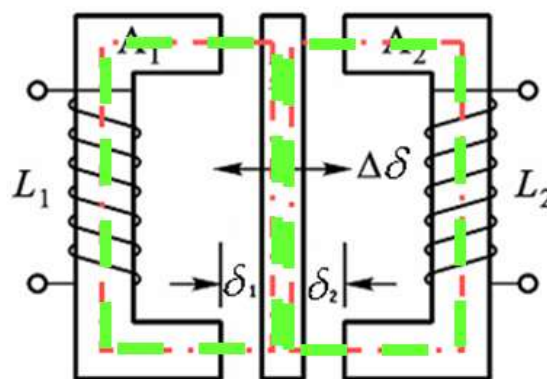
第5章 电感式传感器



5.1.2 输出特性

➤ 差动式原理

- 差动变隙式由两个相同的线圈 L_1 、 L_2 构成磁路。
- 当被测量通过导杆使衔铁（左右）位移时，两个回路中磁阻发生大小相等、方向相反的变化，形成差动形式。



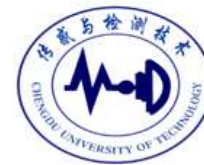
- 当衔铁移动时，两个电感一个增加另一个减小变化时

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

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

- 两个电感量产生相对变化为总的电感变化

第5章 电感式传感器



5.1.2 输出特性

➤ 差动变隙式总的电感变化为:

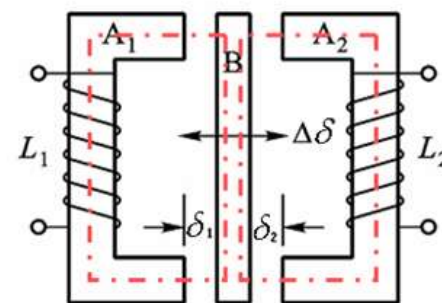
$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 2L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right]$$

➤ 对上式进行线性处理, 忽略高次项得到: 气隙相对变化引起的电感的相对变化为

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

➤ 差动形式的电感输出灵敏度为单线圈的两倍

$$k_0 = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta \delta} = \frac{2}{\delta_0}$$



第5章 电感式传感器

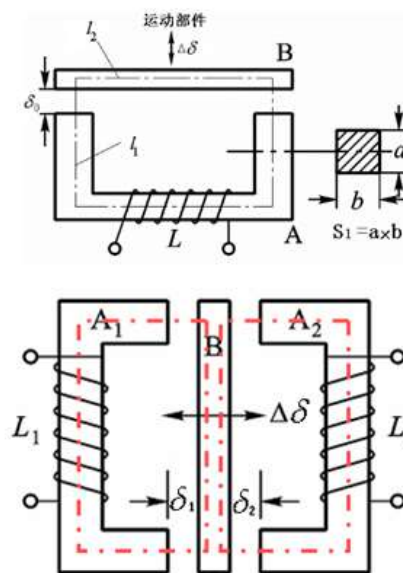
5.1.2 输出特性

😊 结论：差动形式与单线圈比较

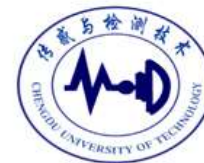
$$k_{0(\text{单})} = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0}$$

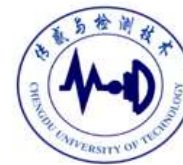
$$k_{0(\text{差})} = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta \delta} = \frac{2}{\delta_0}$$

- 1) 比较单线圈，差动式的灵敏度提高了一倍；
- 2) 差动式非线性项与单线圈相比，多乘了 $(\Delta \delta / \delta)$ 因子；不存在偶次项使 $\Delta \delta / \delta_0$ 进一步减小，线性度得到改善。
- 3) 差动式的两个电感结构可抵消部分温度、噪声干扰。



传感器线圈结构



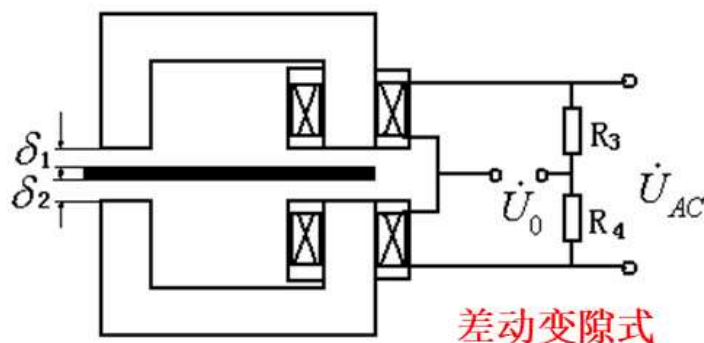


第5章 电感式传感器

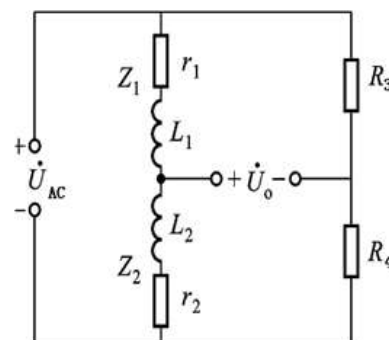
5.1.3 (L-U 转换) 测量电路

(1) 交流电桥式检测电路

- 两个桥臂由相同线圈组成差动形式，另外两个为平衡电阻



差动变隙式交流电桥结构示意图

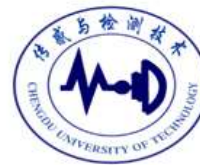


等效电路

$$\dot{U}_0 = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \dot{U}_{AC}$$

$$Z_1 = Z_0 + j\omega\Delta L_1, Z_2 = Z_0 - j\omega\Delta L_2$$
$$Z_0 = R_c + j\omega L_0 \quad (R_c \text{ 为线圈铜阻})$$

第5章 电感式传感器

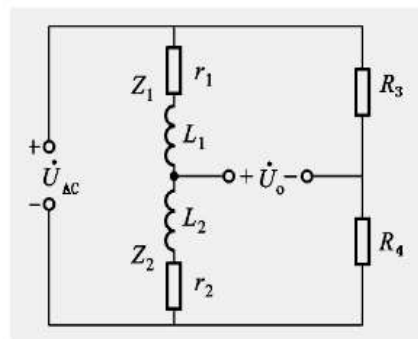


5.1.3 测量电路

- 交流电桥电压输出：线圈品质因素 Q 较高时可以消除正交分量（参见3章交流电桥，输出电压一个与电源同相的分量）
- 电桥输出为：

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{j\omega\Delta L}{R_c + j\omega L_0} \approx \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\text{由灵敏度 } \Delta L/L_0 = 2(\Delta\delta/\delta_0) \text{ 有 } \dot{U}_0 = U_{AC}(\Delta\delta/\delta_0)$$



😊 电桥输出电压 U_0 与气隙变量 $\Delta\delta$ 有正比关系，与输入桥压有关，桥压 U_{AC} 升高输出电压 U_0 增加；桥路输出电压与初始气隙 δ_0 有关， δ_0 越小输出越大。

第5章 电感式传感器

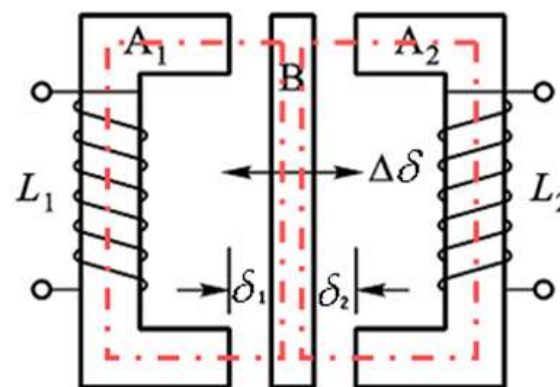
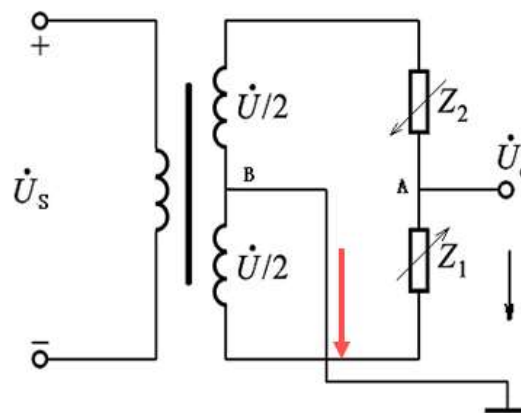
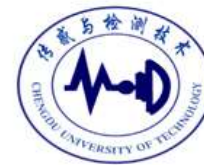
5.1.3 测量电路

(2) 变压器式交流电桥检测电路

- 电桥的两臂是传感器线圈阻抗臂、另外两个臂是交流变压器次级线圈各占1/2，交流供电。
- 桥路输出电压为：

$$U_0 = \frac{U}{Z_1 + Z_2} Z_1 - \frac{U}{2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{U}{2}$$

$$U_0 = \frac{U \Delta Z}{2 Z} \approx \frac{U \Delta L}{2 L}$$



第5章 电感式传感器

5.1.3 测量电路

$$U_0 = \frac{U}{Z_1 + Z_2} Z_1 - \frac{U}{2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{U}{2} = \frac{U \Delta Z}{2 Z} \approx \frac{U \Delta L}{2 L}$$

当衔铁在中间位置: $Z_1 = Z_2$, $U_0 = 0$

- 当衔铁偏移时,
 $Z_1 > Z_2$, 输出电压为正

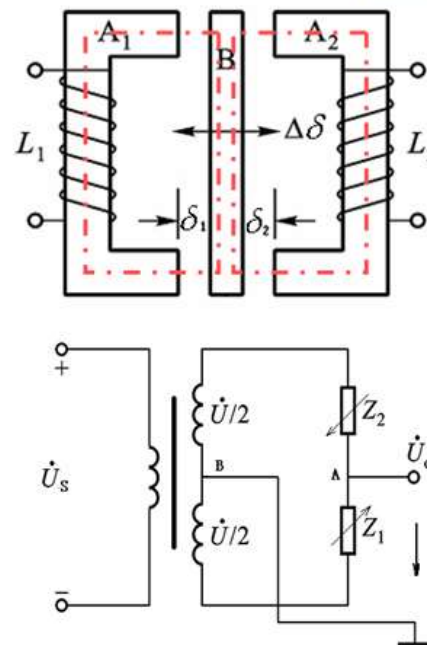
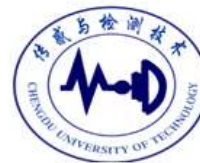
$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

- 当衔铁偏向另一方向
 $Z_1 < Z_2$, 输出电压为负

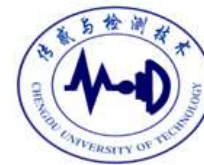
$$U_0 = -\frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

- 衔铁移动相同距离时, 输出电压大小相等方向相反, 相差 180° , **要判断衔铁方向就是判断信号相位**, 可采用相敏检波电路解决。该电路最大特点是输出阻抗较小, 其输出阻抗为

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



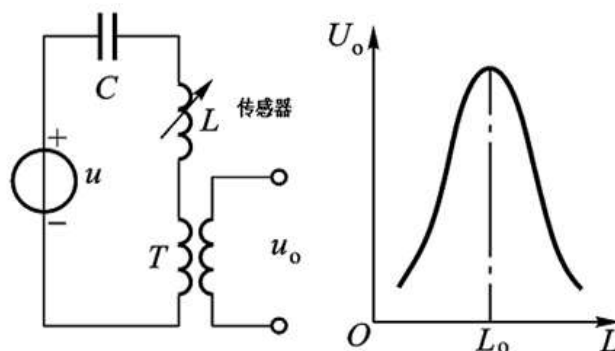
第5章 电感式传感器



5.1.3 测量电路

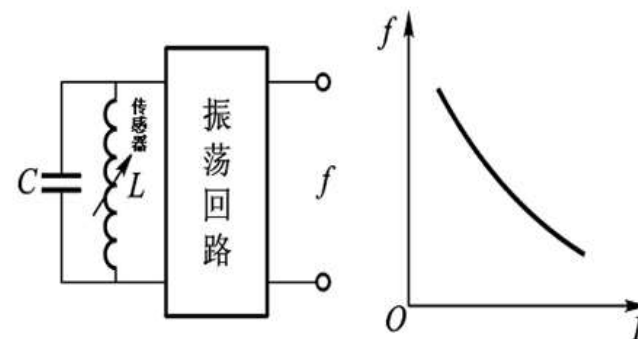
(3) 谐振式（调幅、调频、调相）

➤ 调幅式电路



输出幅值随电感 L 变化， L_0 为谐振点的电感值；

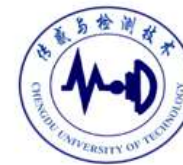
➤ 调频电路



电感 L 变化时谐振频率 f_0 变化，
$$f_0 = 1 / (2 \pi (LC)^{1/2})$$

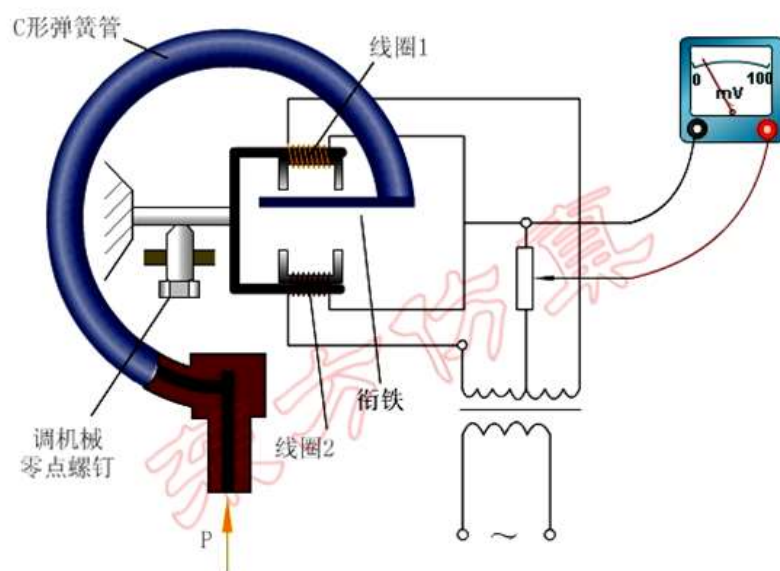
线性范围小

第5章 电感式传感器



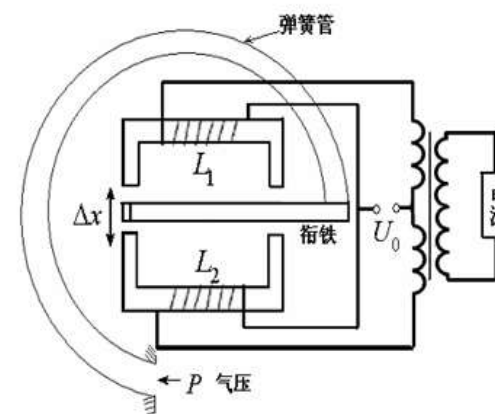
5.1.4 变磁阻式传感器的应用

差动变隙式电感传感器压力测量原理



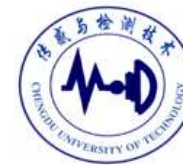
变隙式差动压力传感器的工作原理

东方仿真COPYRIGHT



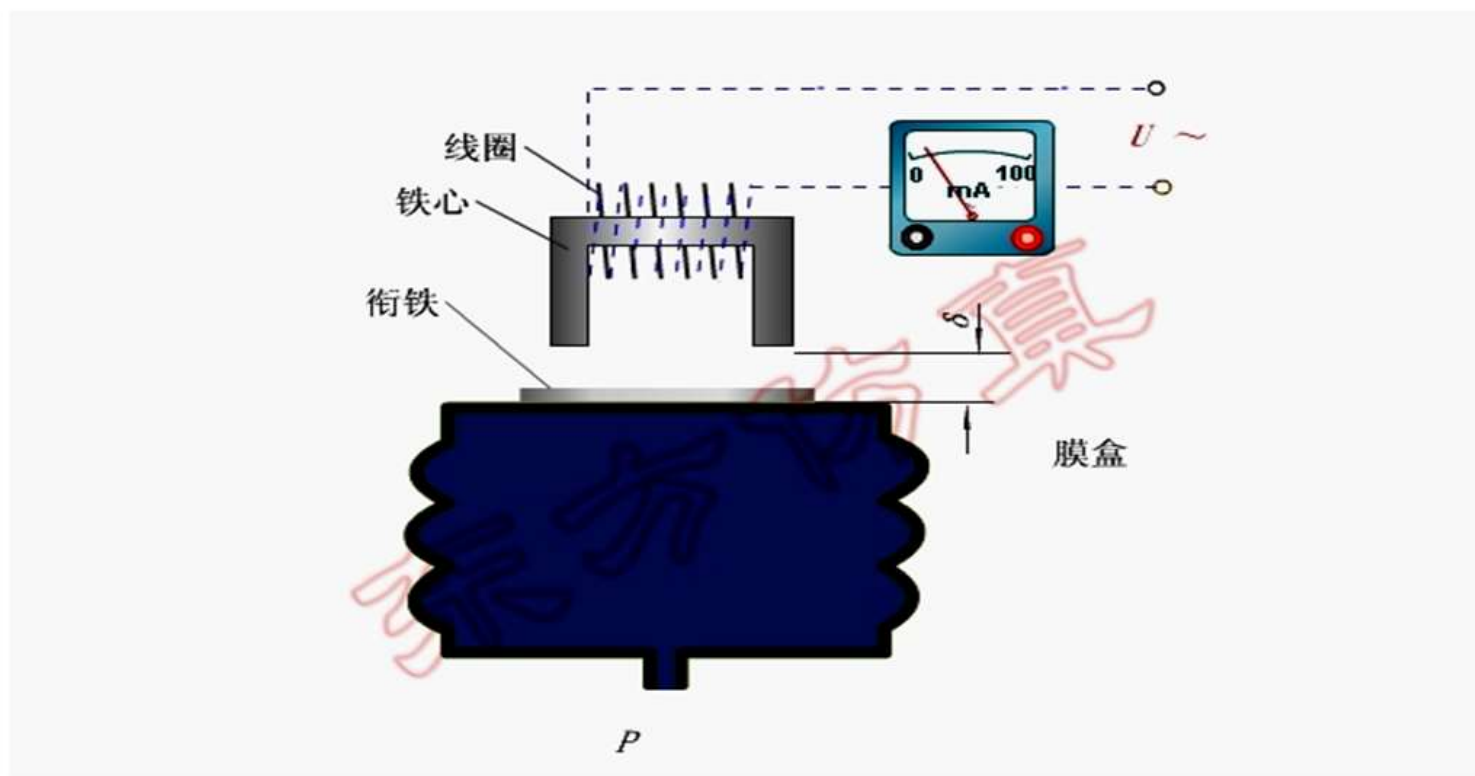
被测压力经过位移、
电压两次转换输出

第5章 电感式传感器

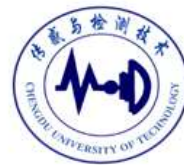


5.1.4 变磁阻式传感器的应用

变隙式压力测量原理

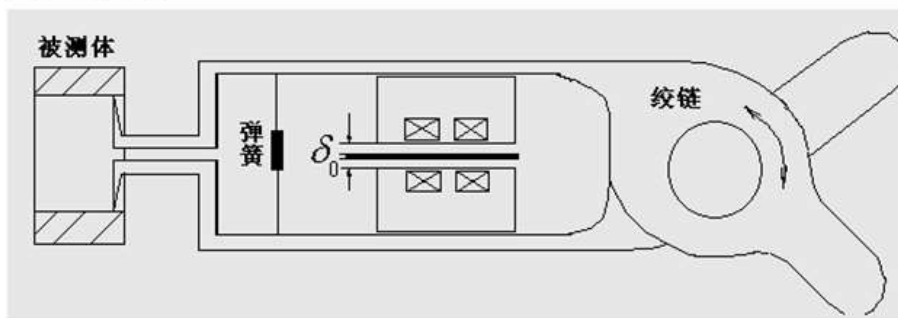


第5章 电感式传感器

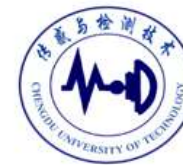


5.1.4 变磁阻式传感器的应用

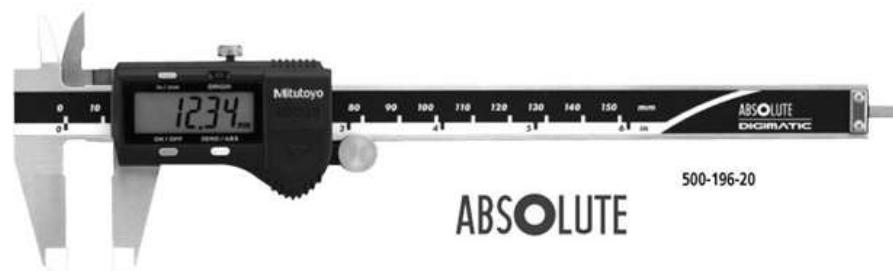
- 变隙式原始气隙 δ_0 可取得很小, $\delta_0 = 0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$,
当 $\Delta \delta = 1 \mu\text{m}$ 时, $\Delta L / L_0$ 可达 $1/100 \sim 1/500$ 。
 - 变隙式传感器灵敏度高;
 - 缺点是非线性严重, 自由行程小, 工艺制作难。
- 👉 游标卡尺分辨率为 0.02 mm ; 千分尺分辨率为 0.01 mm 。现代机械加工要求测量工具的分辨率高于公差的一个数量级 (μm), 传统工具无法实现, 电感传感器的分辨率可达 $0.01 \mu\text{m}$, 可优于要求公差。



第5章 电感式传感器



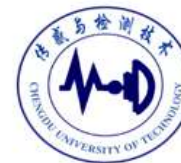
5.1.4 变磁阻式传感器的应用



测量工具结构示意图



第5章 电感式传感器



测量工具结构示意图



a) 数显卡尺



16 EX

b) 带表卡尺



16 U

c) 游标卡尺



16 DN

第5章 电感式传感器

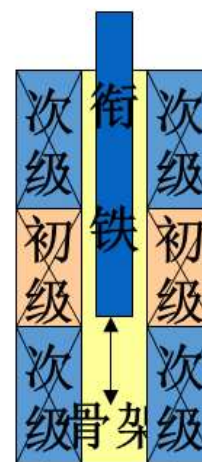
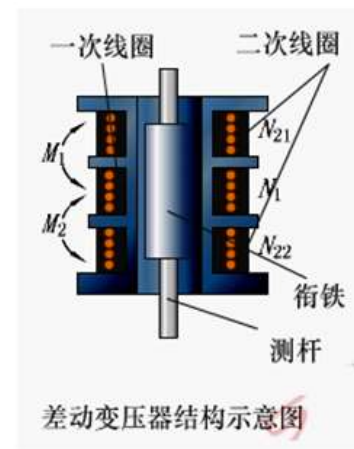
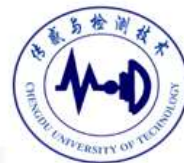
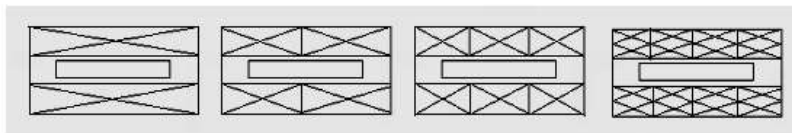
5.2 (互感式) 差动变压器式传感器

5.2.1 工作原理

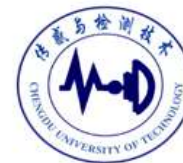
❖ 把被测的**非电量**变化转换为线圈**互感量**的变化的传感器称为互感式传感器。

➔ 结构

- 塑料骨架上绕制线圈, 中间初级, 两边次级, 铁芯在骨架中间可上下移动;
- 这种传感器根据**变压器**的基本原理制成, 并将次级线圈绕组用**差动形式**连接。
- 差动变压器的结构形式较多, 应用最多的是**螺线管式**差动变压器(介绍三节式), 可测量**1—100mm** 范围内机械位移。



第5章 电感式传感器



5.2.1 工作原理

→ 等效电路

- 初级线圈 L_1 ，次级线圈 L_{2a} 、 L_{2b} 须反相连接，保证差动形式
- 如果线圈完全对称，并且衔铁处于中间位置时两线圈互感系数相等

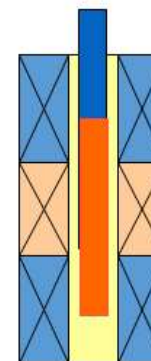
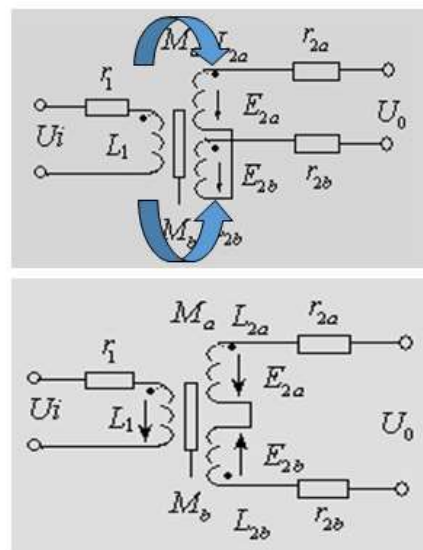
$$M_a = M_b$$

并且有两线圈电动势相等

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

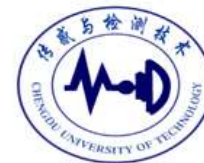
差动输出电压为零：

$$U_0 = E_{2a} - E_{2b} = 0$$



次级线圈同名端反向连接

第5章 电感式传感器



5.2.1 工作原理

- 当衔铁上下移动时，输出电压大小、极性随衔铁位移变化

若衔铁上移 $E_{2a} > E_{2b}, M_a > M_b$

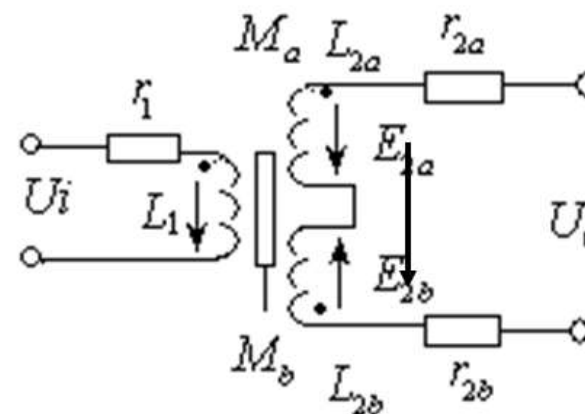
输出电压与输入同相位

若衔铁下移 $E_{2a} < E_{2b}, M_a < M_b$

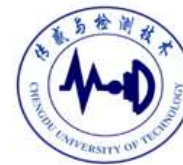
输出电压与输入反相

$$U_0 = \frac{\omega(M_a - M_b)}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_i$$

- 😊 差动变压器的输出电压大小和符号反映了铁心位移的大小和方向。



第5章 电感式传感器



5.2.2 基本特性

➤ 根据电磁感应定律，次级感应电动势与互感关系分别为：

$$E_{2a} = -j\omega M_a I_1$$

$$E_{2b} = -j\omega M_b I_1$$

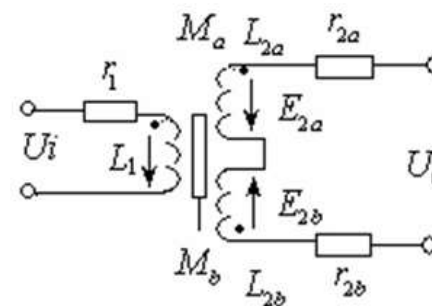
输出电压 $U_0 = E_{2a} - E_{2b} = -j\omega(M_a - M_b)I_1$

次级开路时，初级电流 $I_1 = U_i / (r_1 + j\omega L_1)$ 代入上式

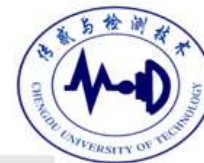
由此得到差动变压器输出电压有效值为：

$$U_0 = \frac{\omega(M_a - M_b)}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_i$$

😊 差动变压器输出电压与互感的差值成正比。



第5章 电感式传感器



5.2.2 基本特性

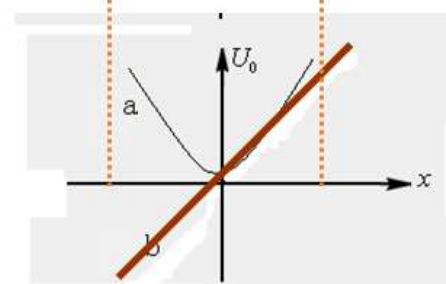
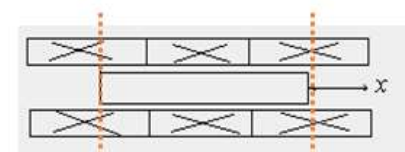
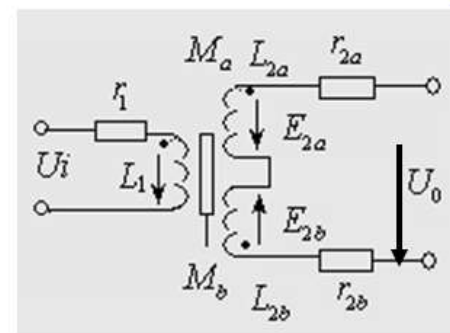
- 铁芯在中间位置时 $M_a = M_b, U_0 = 0$
- 铁芯向上移（右移）输出与 E_{2a} 同极性；

$$M_a > M_b, U_0 = \frac{2\omega U_i \Delta M}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

- 铁芯向下移（左移）输出与 E_{2b} 同极性；

$$M_a < M_b, U_0 = -\frac{2\omega U_i \Delta M}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

❖ 差动变压器输出是被互感大小调制的交流电压，存在相位问题，有正负变化。

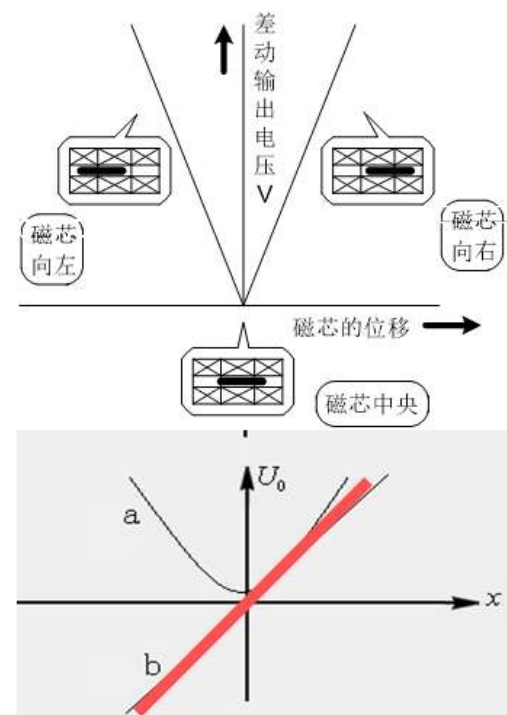


第5章 电感式传感器

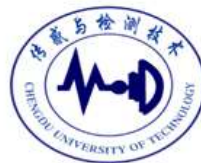
讨论

$$U_0 = \frac{\omega(M_a - M_b)}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_i$$

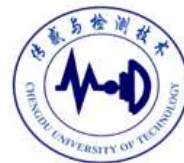
1. 差动变压器输出电压幅值取决于互感 ΔM ，即衔铁在线圈中移动的距离 x ，
 U_0 与 U_i 的相位决定衔铁的移动方向；
 2. 输出电压的正、负（反相）结果，经相敏检波后输出曲线反行程翻转为过零直线；
 3. 输出电压 U_0 与激励电压 U_i 有关，应尽可能大；
 U_0 与激励频率成正比，中频在 400~1000 Hz；
- 差动变压器灵敏度可达 0.1~5 V/mm；
- 性能包括三个内容：传感器类型、转换电路、电源。
 - 出厂标定灵敏度规定：电源电压 1V，衔铁位移 1 μm ，输出电压 U_0 的单位为 mV/ $\mu m \cdot V$



差动变压器输出电压和位移的关系



第5章 电感式传感器



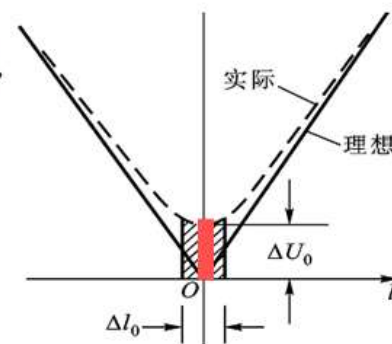
5.2.3 零点残余电压

☺ 理论上讲，铁芯处于中间位置时输出电压应为零，而实际输出 $U_0 \neq 0$ ，在零点上总有一个最小的输出电压，这个铁芯处于中间位置时最小不为零的电压称为**零点残余电压**。

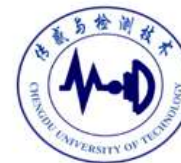
➤ 产生**零点残余电压**的原因是：

1. 由于两个次级线圈绕组电气参数（M互感；L电感；R内阻）不同，几何尺寸工艺上很难保证完全相同，
2. 电源中高次谐波，线圈寄生电容的存在等，使实际的特性曲线总有最小输出。

- **零点残余电压**主要成分是频率、幅度不同的**基波、谐波**。零点残余电压过大会使灵敏度下降，非线性误差增大，放大器末级饱和，因此是直接影响传感器质量的参数。
- 为减小零点残余电压的影响变压器工艺上采取措施，电路补偿等。



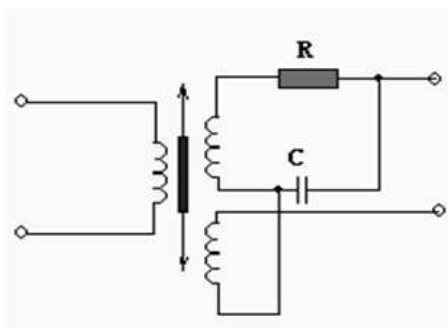
第5章 电感式传感器



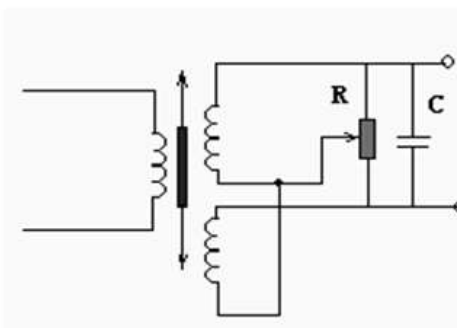
5.2.3 零点残余电压

- 为减小零点残余电压的影响，一般要用电路进行补偿，电路补偿的方法较多，可采用以下方法。
 - **串联**电阻：消除两次级绕组基波分量幅值上的差异；
 - **并联**电阻电容：消除基波分量相差，减小谐波分量；
 - **加反馈**支路：初、次级间反馈，减小谐波分量；
 - **相敏检波电路**对零点残余误差有很好的抑制作用。
- 这些电路可单个使用也可综合使用，需要通过实验证实效果

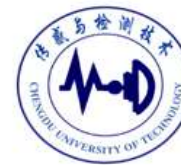
串联电阻



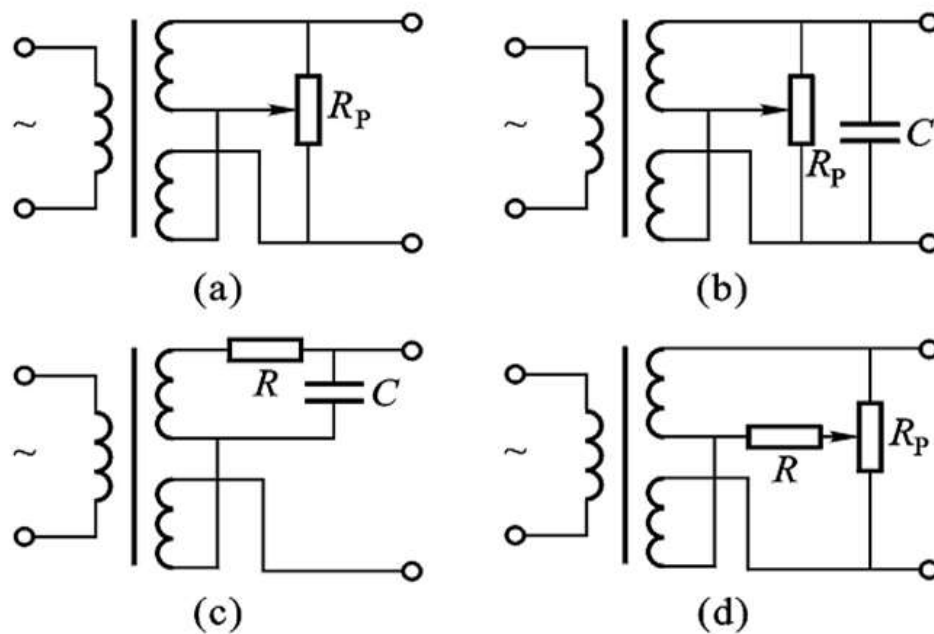
并联电阻



第5章 电感式传感器

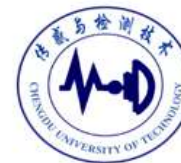


5.2.3 零点残余电压



不同形式的零点残余电压补偿电路

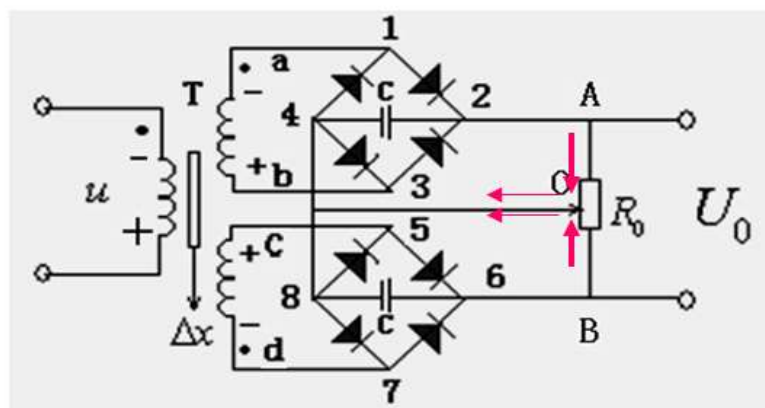
第5章 电感式传感器



5.2.4 测量电路

(1) 差动整流电路

- 哪个部分是传感器？
- 二极管组成的是什么电路？电阻 R_0 、电容 C 有什么作用？
- 已知初级信号为正弦波（上+下-），画出次级信号波形；
- 分析整流电路的输出电流电压的方向，（上半周下半周）；
- 如果铁芯上移，分析输出电压 $U_0 = U_{AO} - U_{BO}$ 的极性。



☺ 讨论差动整流电路（请同学回答问题）

第5章 电感式传感器

5.2.4 测量电路

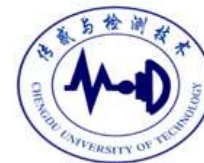
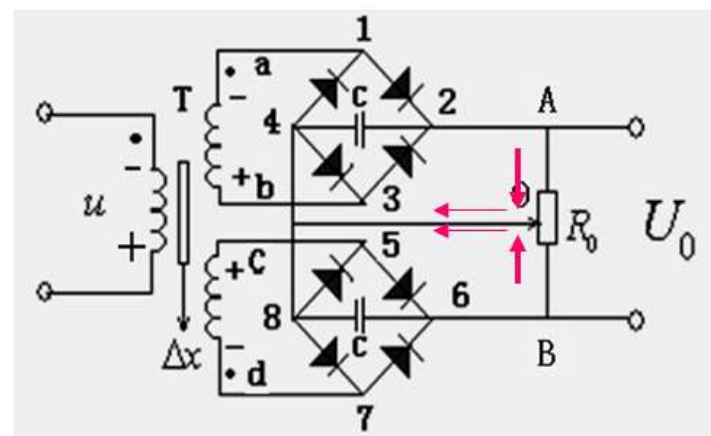
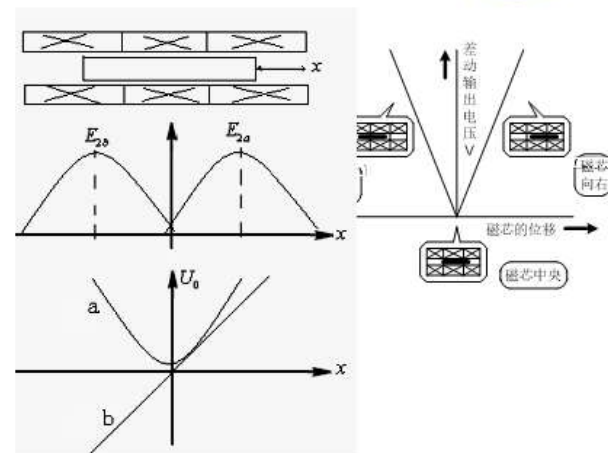
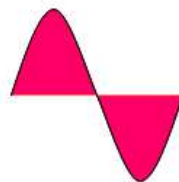
(1) 差动整流电路

- 差动变压器输出交流信号, 为正确反映位移大小和方向, 常采用**差动整流电路**和**相敏检波电路**。

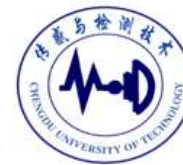
- 差动整流电路输入一交流
- 信号时, 无论极性如何, 整
- 流电路的输出电压始终为

$$U_o = U_{AO} - U_{BO}$$

- 上绕组输出始终为 U_{24}
- 下绕组输出始终为 U_{68}
- R_o 为调零电阻



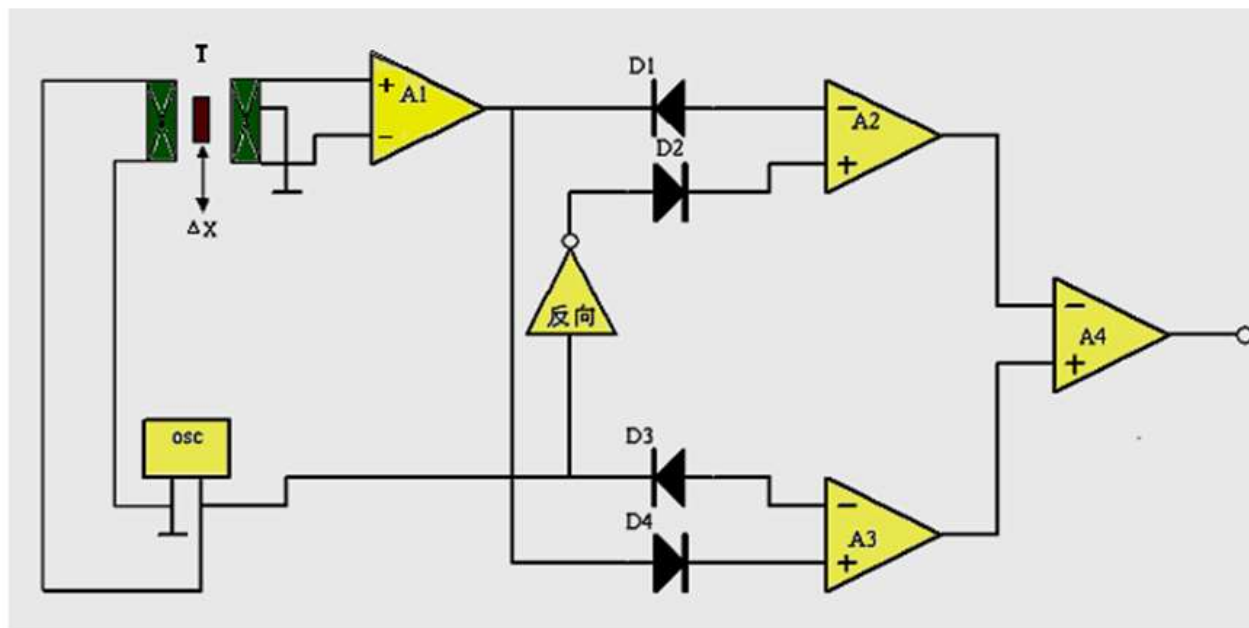
第5章 电感式传感器



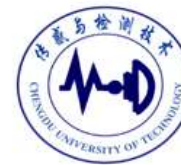
5.2.4 测量电路

(2) 集成相敏检波电路

差动变压器输出与差动放大器连接



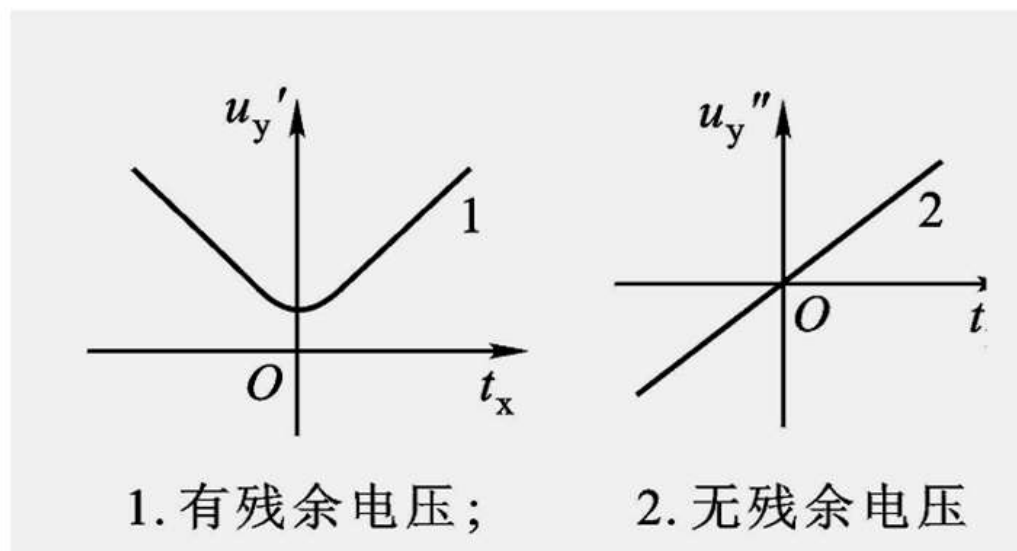
第5章 电感式传感器



5.2.4 测量电路

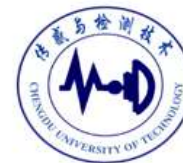
(2) 集成相敏检波电路

输出正负电压的结果由相敏检波后反行程旋转由①→②，工作曲线为过零点的直线。



相敏检波前后输出特性

第5章 电感式传感器



3. 电感测厚仪（二极管相敏检波电路）

➤ L_1 、 L_2 传感器作两个桥臂； C_1 、 C_2 为另外两个桥臂； D_1 — D_4 组成相敏整流器；磁饱和变压器T提供桥压。

- 被测厚度正常时， $L_1 = L_2$ ， $U_c = U_d$ ， $I_M = 0$ ；
- 设厚度变化， T 上移， $L_1 > L_2$ ， $Z_1 > Z_2$
- ✓ 正半周（a+，b-）时， D_1 、 D_4 导通， $I_1 < I_4$ ；
- ✓ 负半周（a-，b+）时， D_2 、 D_3 导通， $I_3 < I_2$ ；

- ✓ 无论极性如何始终有 $U_d > U_c$ ，
电流方向 ↑
- 若 T 下移， $L_1 < L_2$ ， $Z_1 < Z_2$ ，
 $U_d < U_c$ ， 电流方向 ↓。

