

The background of the slide is a composite image. The top half features a close-up of a fountain pen's nib, which is dark and metallic, resting on a piece of paper with faint, illegible text. The bottom half shows a close-up of a metal watch chain or bracelet, also with a metallic sheen, set against a similar background of faint text. A solid dark blue horizontal band runs across the middle of the image, serving as a backdrop for the chapter title.

第5章 磁电式传感器

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

5.1

基本原理和结构型式

5.2

磁电式传感器动态特性

5.3

磁电式传感器的误差及补偿

5.4

磁电式传感器应用

第一节 基本原理和结构型式

磁电式传感器是利用电磁感应原理，将输入**运动速度**变换成**感应电势**输出的传感器。它不需要辅助电源，就能把被测对象的机械能转换成易于测量的电信号，是一种有源传感器。

磁电式传感器有时也称作电动式或感应式传感器，它只适合进行动态测量。由于它有较大的输出功率，故配用电路较简单；零位及性能稳定；工作频带一般为 $10\sim 1000\text{Hz}$ 。

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

磁电式传感器具有双向转换特性，利用其逆转换效应可构成力(矩)发生器和电磁激振器等。根据电磁感应定律，当 W 匝线圈在均恒磁场内运动时，设穿过线圈的磁通为 Φ ，则线圈内的感应电势 e 与磁通变化率 $d\Phi/dt$ 有如下关系：

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (5-1)$$

根据这一原理，可以设计成变磁通式和恒磁通式两种结构型式，构成测量线速度或角速度的磁电式传感器。图5.1所示为分别用于旋转角速度及振动速度测量的变磁通式结构。

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

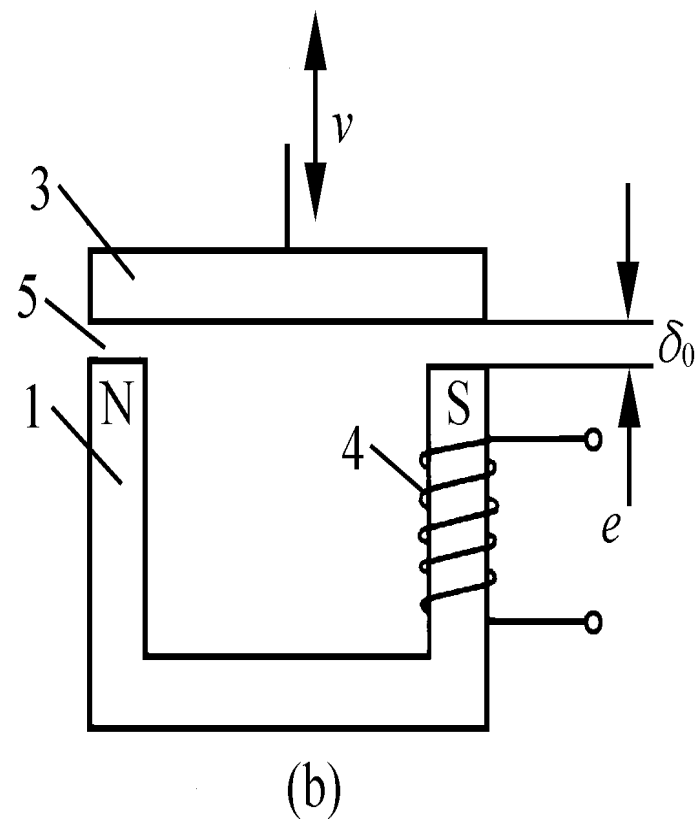
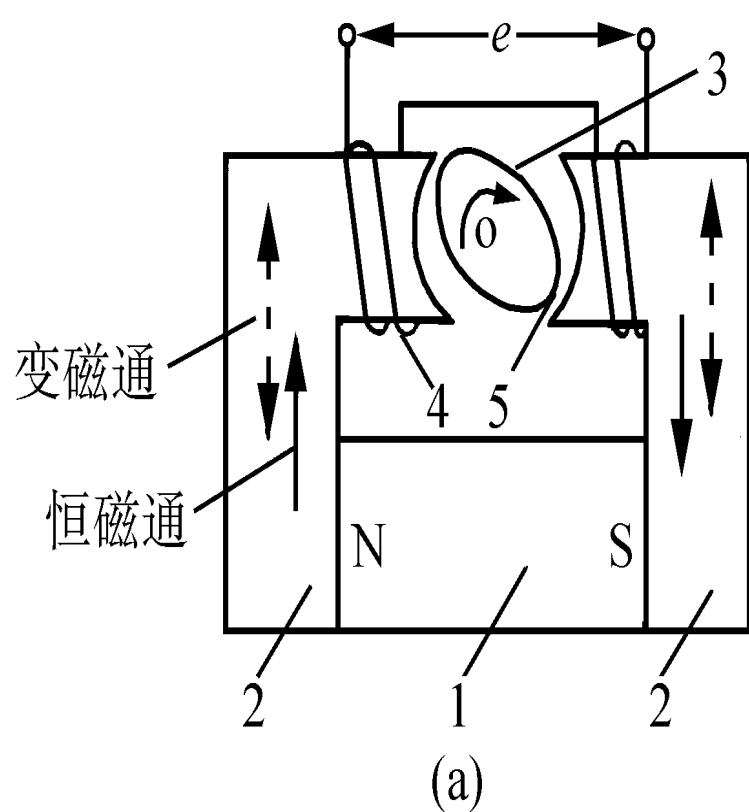


图5.1 变磁通式结构
(a) 旋转型 (变磁)) ; (b) 平移型 (变气隙)

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

其中永久磁铁1(俗称“磁钢”)与线圈4均固定,动铁心3(衔铁)的运动使气隙5和磁路磁阻变化,引起磁通变化而在线圈中产生感应电势,因此又称**变磁通式结构**。

在恒磁通式结构中,工作气隙中的磁通恒定,感应电势是由于永久磁铁与线圈之间有相对运动——线圈切割磁力线而产生。这类结构有两种,如图5-2所示。

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

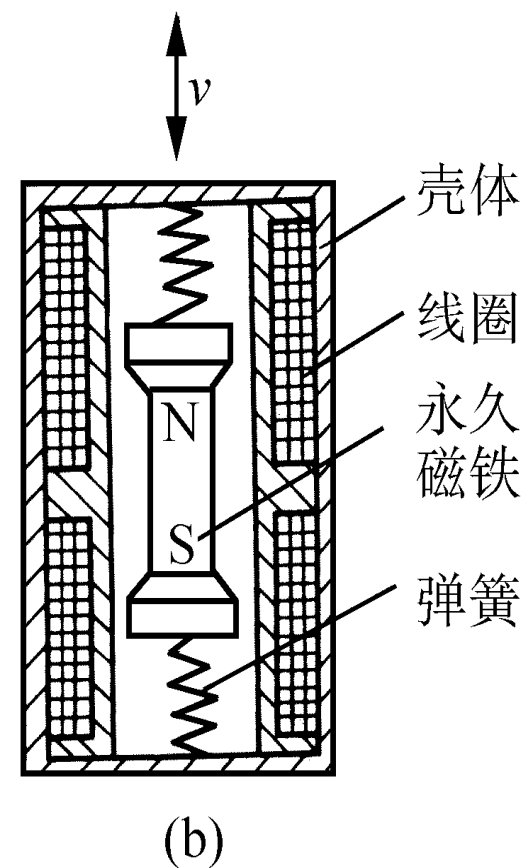
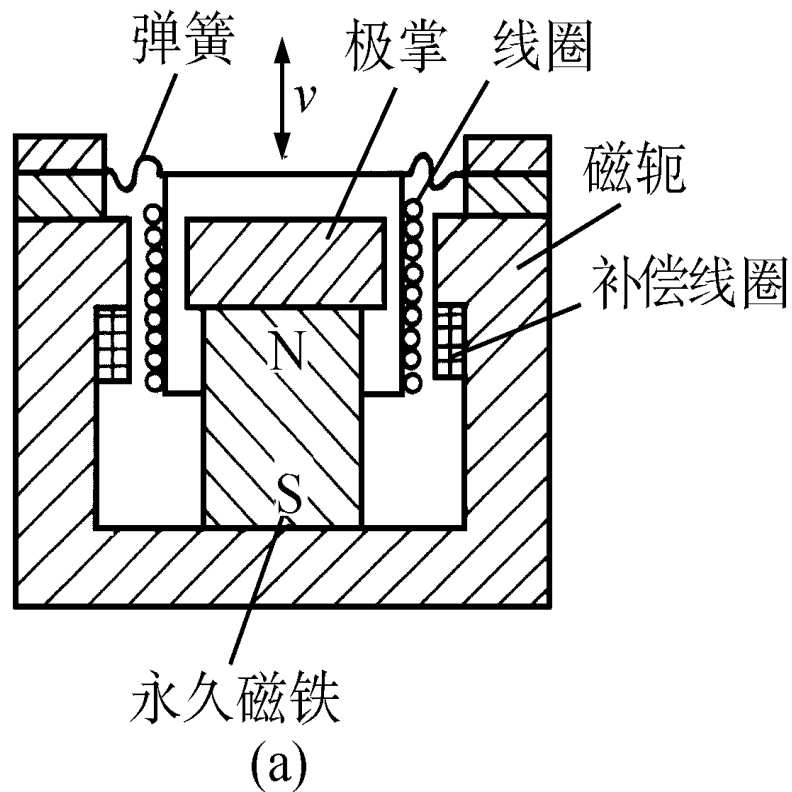


图5.2 恒磁通式结构 (a) 动圈式; (b) 动铁式

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

图中的磁路系统由圆柱形永久磁铁和极掌、圆筒形磁轭及空气隙组成。气隙中的磁场均匀分布，测量线圈绕在筒形骨架上，经膜片弹簧悬挂于气隙磁场中。

当线圈与磁铁间有相对运动时，线圈中产生的感应电势 e 为

$$e = Blv \quad (5-2)$$

式中 B ——气隙磁通密度(T)；

l ——气隙磁场中有效匝数为 W 的线圈总长度(m)
为 $l = l_a W$ (l_a 为每匝线圈的平均长度)

v ——线圈与磁铁沿轴线方向的相对运动速度(ms^{-1})。

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

当传感器的结构确定后，式(5-2)中 B 、 l_a 、 W 都为常数，感应电势 e 仅与相对速度 v 有关。传感器的灵敏度为

$$S = \frac{e}{v} = Bl \quad (5-3)$$

为提高灵敏度，应选用具有磁能积较大的永久磁铁和尽量小的气隙长度，以提高气隙磁通密度 B ；增加 l_a 和 W 也能提高灵敏度，但它们受到体积和重量、内电阻及工作频率等因素的限制。

为了保证传感器输出的线性度，要保证线圈始终在均匀磁场内运动。设计者的任务是选择合适的结构形式、材料和结构尺寸，以满足传感器基本性能要求。

第二节 磁电式传感器的传递矩阵和动态特性

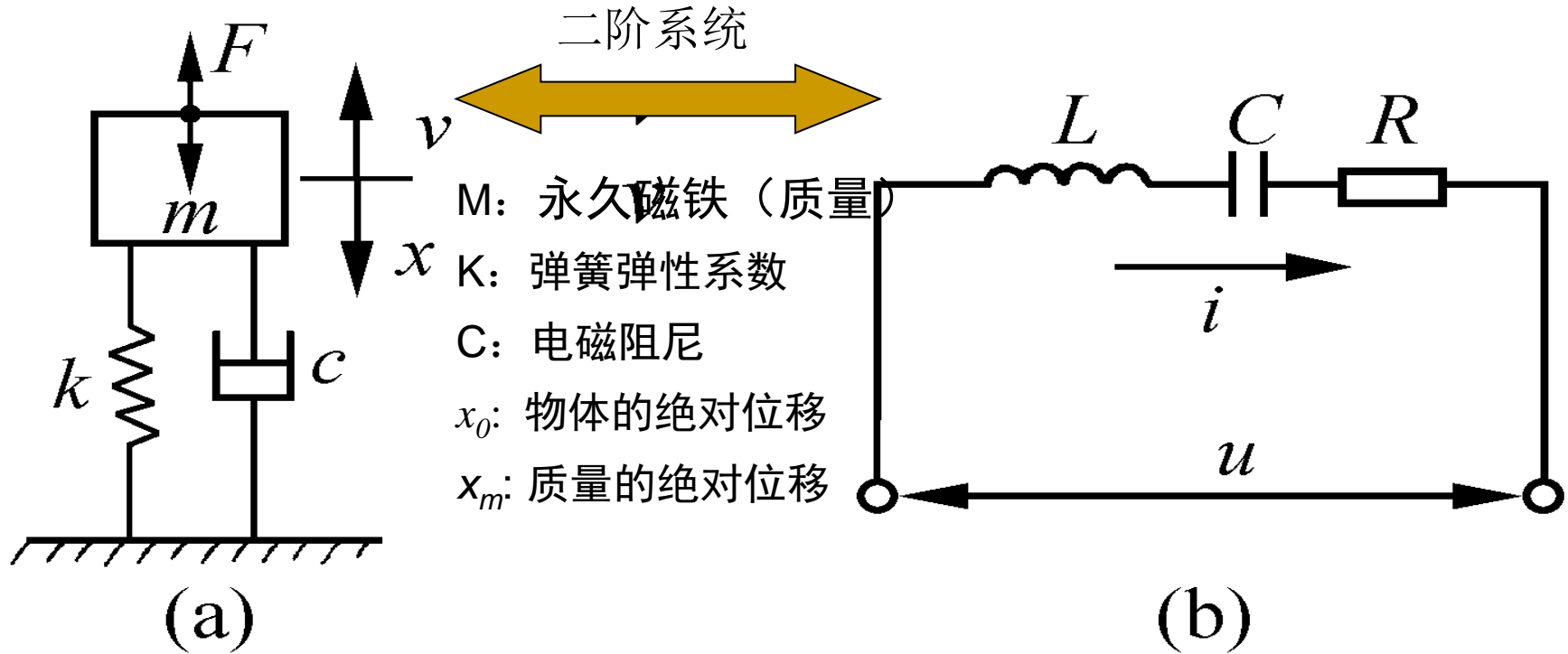
一. 传递矩阵

(一). 机械阻抗图5. 3 (a) 所示的质量为 m 、弹簧刚度为 k 、阻尼系数为 c 的单自由度机械振动系统。设在力 F 作用下产生的振动速度和位移分别为 v (图中即 \dot{x}) 和 x ，由此可列出力平衡方程

$$F = m \frac{dv}{dt} + cv + k \left[\int_0^t v dt + x(0) \right] \quad (5-4)$$

第5章 磁电式传感器

www.seu.edu.cn



质量块与振动物体之间的相对位移: $x_t = x_m - x_0$

质量块的运动方程:

受力

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} + C \frac{dx_m}{dt} + Kx_m = c \frac{dx_0}{dt} + kx_0$$

施加力

惯性力 阻尼力 弹性力 阻尼力 弹性力

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

图5.3(b)所示的由电阻 R 、电感 L 和电容 C 组成的串联电路，设电源电压为 u ，回路电流为 i 、电荷为 q 。由此可列出电压平衡方程

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \left[\int_0^t i dt + q(0) \right] \quad (5-5)$$

这两个微分方程式虽然机电内容不同，但形式相同。因此，这两个系统为一对相似系统。一个系统可以根据求解它的微分方程来讨论其动态特性，故上述两相似系统的动态特性必然一致，可以实现机电模拟。

把 $x_m = x_t + x_0$ 代入:

$$m \frac{d^2(x_t + x_0)}{dt^2} + C \frac{d(x_t + x_0)}{dt} + K(x_t + x_0) = c \frac{dx_0}{dt} + kx_0$$

$$m \frac{d^2 x_t}{dt^2} + C \frac{dx_t}{dt} + Kx(t) = -m \frac{d^2 x_0}{dt^2}$$

拉普拉斯变换:

$$(ms^2 + Cs + K)x_t(s) = -ms^2 x_0(s)$$

可得相对位移的传输函数:

$$\frac{x_t}{x_0}(s) = \frac{-ms^2}{ms^2 + Cs + K}$$

$$\text{令: } \xi = \frac{C}{2\sqrt{mK}} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

$$\text{则: } \frac{x_t}{x_0}(s) = \frac{-s^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$$

当输入信号为正弦波时 ($x_0(t) = x_0 \sin \omega t$)

$$\frac{x_t}{x_0}(j\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)j}$$

幅频特性

$$A(\omega)_x = \left| \frac{x_t}{x_0} \right| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - (\omega / \omega_0)^2\right]^2 + \left[2\xi(\omega / \omega_0)\right]^2}}$$

相频特性

$$\varphi(\omega)_x = -\arctan \frac{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

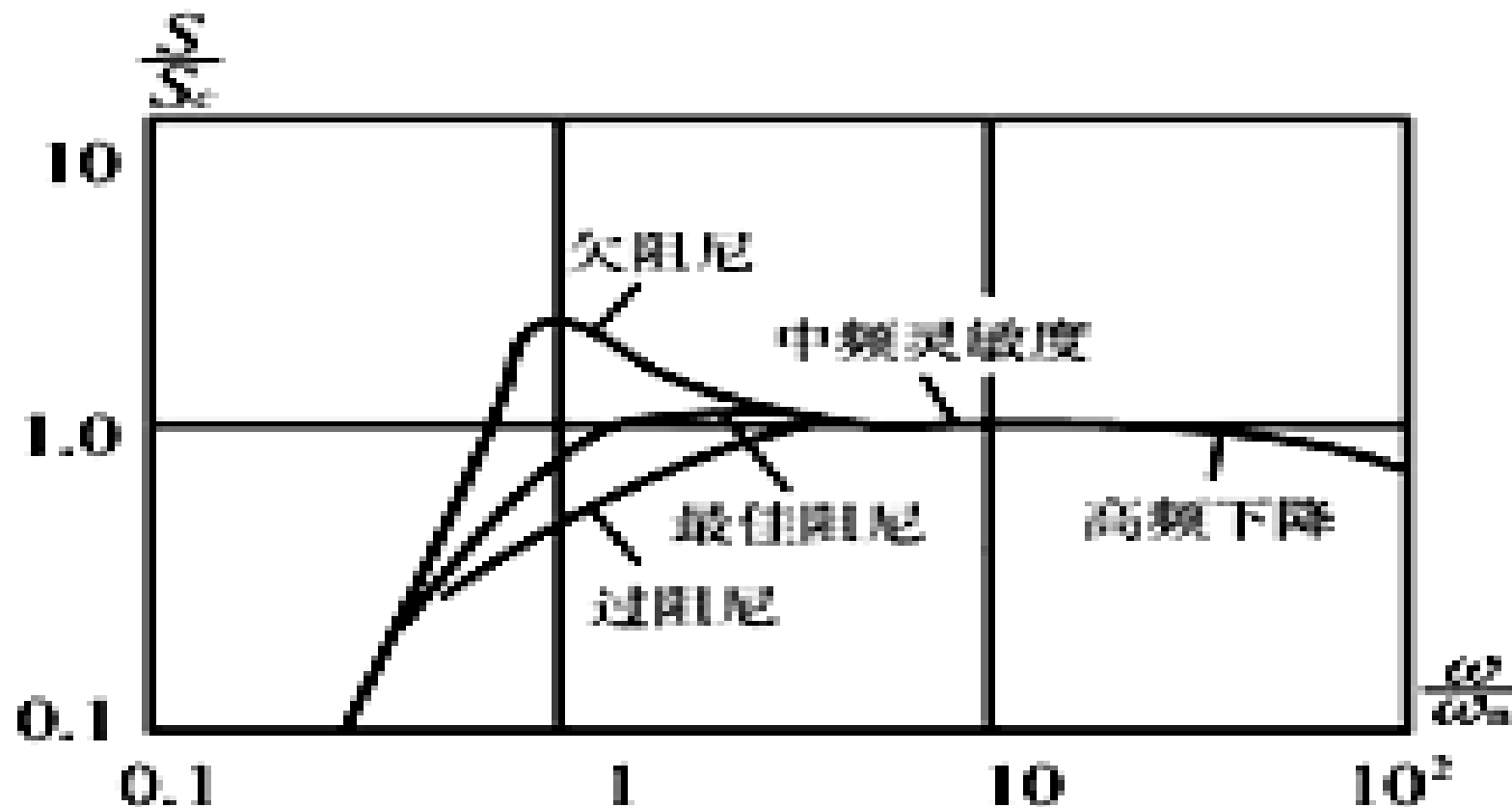


图5.4 磁电式传感器的频响特性

第5章 磁电式传感器



www.seu.edu.cn

由式(5-14)和图5.4可以看出：

- (1). 当被测振动体的振动频率 ω 低于传感器的固有频率 ω_0 ，即 $(\omega / \omega_0) < 1$ 时，传感器的灵敏度随频率变化而明显地变化。
- (2). 当被测体振动频率 ω 远高于传感器的固有频率 ω_0 时，灵敏度接近为一常数，它基本上不随频率变化。在这一频率范围内，传感器的输出电压与振动速度成正比。这一频段即传感器的工作频段，或称作频响范围。这时传感器可看作是一个理想的速度传感器。
- (3). 当频率更高时，由于线圈阻抗的增加，灵敏度也将随着频率的增加而下降。



5.3 磁电式传感器误差及补偿

www.seu.edu.cn

当测量电路接入磁电传感器电路时，设测量电路输入电阻为 R_L ，则磁电传感器：

输出电流：

$$i_o = \frac{e}{R + R_L} = \frac{Bl_a W v}{R + R_L}$$

输出电压：

$$e_o = i_o R_L = \frac{Bl_a W v R_L}{R + R_L}$$

电流灵敏度：

$$S_i = \frac{i_o}{v} = \frac{Bl_a W}{R + R_L}$$

电压灵敏度：

$$S_U = \frac{e_o}{v} = \frac{Bl_a W R_L}{R + R_L}$$

当传感器的工作温度发生变化或受到外界磁场干扰、受到机械振动或冲击时，其灵敏度将发生变化，从而产生测量误差，其**相对误差**为

$$\gamma = \frac{dS_I}{S_I} = \frac{dB}{B} + \frac{dl}{l} - \frac{dR}{R}$$

5.3.1 非线性误差

产生原因

- ✚ 传感器线圈输出电流变化产生的附加磁通，叠加于磁铁产生的气隙磁通上，使恒定的气隙磁通变化
- ✚ 气隙磁场不均匀

补偿方法

- ↗ 加入补偿线圈，使其产生的磁通抵消传感器线圈产生的磁通
- ↗ 减少轴向漏磁，提高磁钢的利用系数

5.3.2 温度误差

$$\gamma = \frac{dS_I}{S_I} = \frac{dB}{B} + \frac{dl}{l} - \frac{dR}{R}$$

当温度变化时，公式中右边三项都不为零，对铜线而言每摄氏度变化量为 $dl/l \approx 0.167 \times 10^{-4}$ ， $dR/R \approx 0.43 \times 10^{-2}$ ， dB/B 每摄氏度的变化量决定于永久磁铁的磁性材料。对铝镍钴永久磁合金， $dB/B \approx -0.02 \times 10^{-2}$ ，这样由上式可得近似值如下：

$$\gamma_t \approx \frac{-4.5\%}{10^\circ\text{C}}$$

补偿方法：

通常采用热磁分流器。热磁分流器由具有很大的负温度系数的特殊磁性材料做成。它在正常工作温度下已将空气隙磁通分路掉一小部分。当温度升高时，热磁分流器的磁导率显著下降，经它分流掉的磁通占总磁通的比例较正常工作温度下显著降低，从而保持空气隙的工作磁通不随温度变化，维持传感器灵敏度为常数。

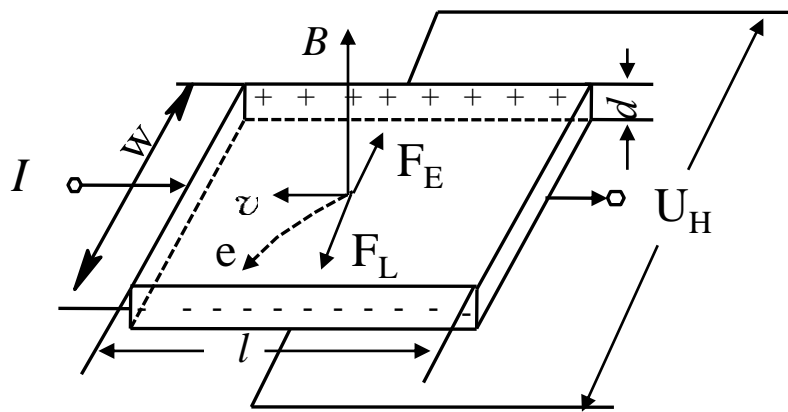
5.3.3 永久磁铁的稳定性

- ✿ 时间稳定性
- ✿ 稳定稳定性
- ✿ 外磁场作用下的稳定性
- ✿ 机械振动下的稳定性

5.4 霍尔传感器

www.seu.edu.cn

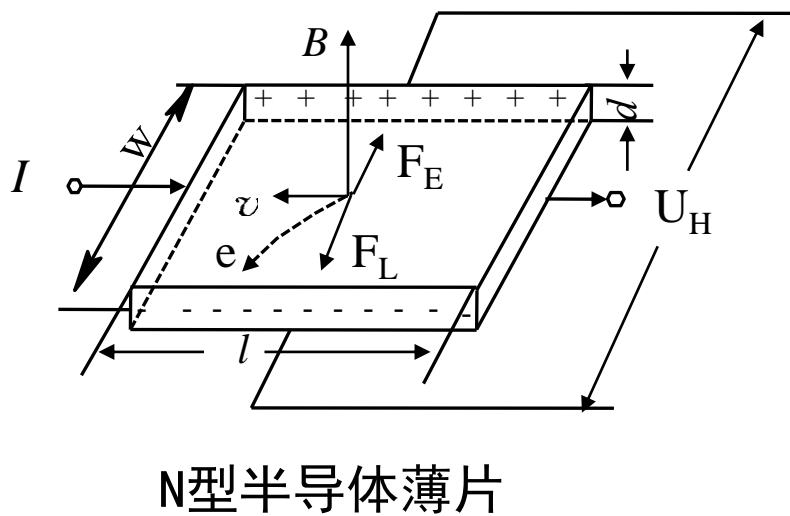
5.4 霍尔传感器



N型半导体薄片

- ✿ 长度 l 、宽度 w 、厚度 d
- ✿ 在 l 的两端制有面接触型输入电流极（控制电极）
- ✿ 在 w 的两端制有点接触型输出电压极（霍尔电极），构成霍尔元件

将它置于磁感应强度为 B 的磁场中， B 垂直于 l - w 平面，当沿 l 向通以电流 I 时候，N型半导体中的载流子受到磁场 B 产生的洛伦兹力的作用而向一侧面偏转



将它置于磁感应强度为 B 的磁场中， B 垂直于 l - w 平面，当沿 l 向通以电流 I 时候，N型半导体中的载流子受到磁场 B 产生的洛伦兹力的作用而向一侧偏转，使得该侧面上形成电子积累，而相对的另一侧面上则因缺少电子而出现等量的正电荷，从而在这两个侧面间形成霍尔电场和电位差。

霍尔电势

$$U_H = \frac{1}{en} \cdot \frac{IB}{d} = R_H \cdot \frac{IB}{d}$$

$$R_H = 1/en \quad \text{霍尔系数}$$

由导电材料（金属导体或半导体）中电流与外磁场相互作用而产生的电动势的物理现象称为霍尔效应，上式也可以改写为

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$$

$$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{U_H}{IB}$$

霍尔元件的灵敏度

5.5.2 霍尔元件主要特性参数

- 乘积灵敏度：即单位磁感应强度和单位控制电流下所得到的开路霍尔电势。
- 额定控制电流：指空气中的霍尔元件产生允许温升 10°C 时的控制电流。
- 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ： R_i 为霍尔元件两电流电极之间的电阻， R_o 为两个霍尔电极之间的电阻。
- 不等位电势 U_0 和不等位电阻 r_0 ：无外磁场时，霍尔元件在额定控制电流下，两个霍尔电极之间的开路电势称为不等位电势 U_0 。

- 寄生直流电势 U_{0D} : 当不外加磁场, 元件通以交流控制电流时, 霍尔元件除了出现交流不等位电势以外, 如果还有直流电势, 则称之为寄生直流电势。
- 霍尔电势温度系数 α : 即在一定的磁感应强度和控制电流下, 温度每变化 1°C 时的霍尔电势相对变化率。
- 工作温度范围: 由于在霍尔电势公式中含有电子浓度 n , 当元件温度过高或过低时, n 将随之大幅度变大或变小, 使元件不能正常工作。

5.5.3 不等位电势和误差的补偿

1. 不等位电势的补偿

工艺制备产生 \Rightarrow 电路补偿

2. 温度误差及其补偿

- ➡ 采用温度系数小的元件, 根据精度进行补偿
- ➡ 电路补偿

第四节 磁电式传感器的应用

一. 测振传感器

磁电式传感器主要用于振动测量。其中惯性式传感器不需要静止的基座作为参考基准，它直接安装在振动体上进行测量，因而在地面振动测量及机载振动监视系统中获得了广泛的应用。

常用地测振传感器有动铁式振动传感器、圈式振动速度传感器等。

(一). 测振传感器的应用

航空发动机、各种大型电机、空气压缩机、机床、车辆、轨枕振动台、化工设备、各种水、气管道、桥梁、高层建筑等，其振动监测与研究都可使用磁电式传感器。

(二). 测振传感器的工作特性

由图5.3可知，振动传感器是典型的集中参数 m 、 k 、 c 二阶系统。作为惯性(绝对)式测振传感器，要求选择较大的质量块 m 和较小的弹簧常数 k 。

这样，在较高振动频率下，由于质量块大惯性而近似相对大地静止。这时，振动体(同传感器壳体)相对质量块的位移 y (输出)就可真实地反映振动体相对大地的振幅 x (输入)。

二. 磁电式力发生器与激振器

前已指出磁电式传感器具有双向转换特性，其逆向功能同样可以利用。如果给速度传感器的线圈输入电量，那么其输出量即为机械量。

在惯性仪器——陀螺仪与加速度计中广泛应用的动圈式或动铁式直流力矩器就是上述速度传感器的逆向应用。它在机械结构的动态实验中是非常重要的设备，用以获取机械结构的动态参数，如共振频率、刚度、阻尼、振动部件的振型等。

除上述应用外，磁电式传感器还常用于扭矩、转速等测量。

本章结束，谢谢