

第 7 章

磁电式传感器

一、磁电式传感器基本原理

- 磁电感应式传感器：又称**磁电式**传感器
- 原理：利用电磁感应效将被测量（如振动、位移、转速等）转换成电信号的一种传感器。
- 有源传感器：不需要辅助电源就能将被测对象的机械量转换成易于测量的电信号。
- 普遍应用：输出功率大、性能稳定、具有一定的工作带宽（10 ~ 1000 Hz）。

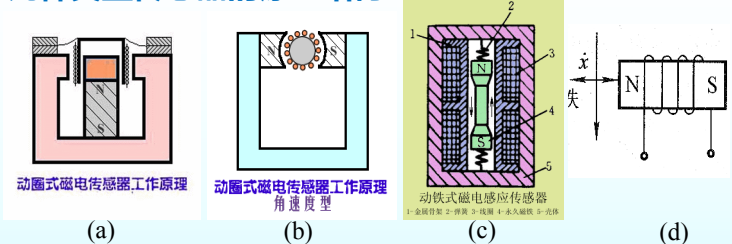
一、磁电式传感器基本原理

- 磁电式传感器：将被测机械量转化为感应电动势的传感器——**电动式**传感器
- 由电磁感应定律，匝数 N 的线圈在交变磁场中感生的电势 e 取决于穿过线圈的磁通 Φ 的变化率，即：

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-32)$$

- 磁通变化使线圈处于磁场中
 - 对磁场作切割磁力线相对运动
 - 或者使磁路中的磁阻发生变化
- 类型：动圈式、动磁铁式和变磁阻式等

几种类型传感器的原理结构



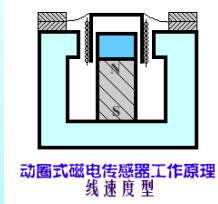
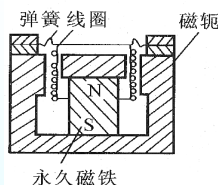
- 直线运动速度的动圈式传感器(a)
- 角速度的动圈式传感器(b)
- 直线速度的动磁铁式传感器(c)
- 被测平面(需导磁)运动直线速度的变磁阻式传感器(d)
- 重点：动圈式传感器，原理典型，工程应用广泛

测量直线运动速度的动圈式传感器

- 动圈式传感器的线圈处于永久磁铁形成的闭合磁路工作气隙中
- 当此线圈相对于磁场作直线运动时，线圈上所感生的电势为：

$$e = NBl \frac{dx}{dt} \sin \theta = NBlv \sin \theta$$

- 式中： N ——线圈匝数；
 B ——工作气隙中的磁感应强度；
 l ——线圈的单匝长度；
 v ——线圈相对于磁场的运动线速度；
 θ ——线圈运动方向相对于磁场方向的夹角。



$$e = NBl \frac{dx}{dt} \sin \theta = NBlv \sin \theta$$

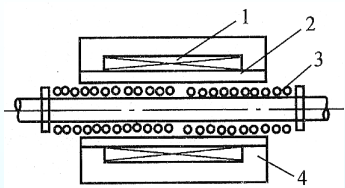
此处 $\theta=90^\circ$ ，故：

$$e = BlvN$$

- 结构参数 B 、 l 和 N 确定，感应电势 e 与速度 v 呈单值函数关系
- 用输出的电势值 e 测量线圈运动的速度——**速度传感器**
- 速度传感器的输出可通过积分或微分得到位移和加速度信号
- 利用该原理可制造出两种实用的速度传感器：
 - 长行程**直线速度**传感器
 - 振动速度**传感器

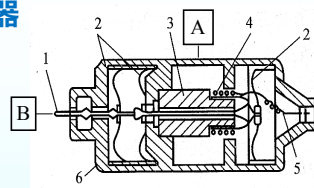
相对式振动速度传感器

- 有两层线圈，线圈1绕在薄层绝缘材料圆筒2上，与外壳4固结
- 线圈3绕在由铁磁材料制成内轴上，分两段绕制
- 外壳4由铁磁材料制成
- 工作时对线圈1加直流电流，产生的磁通沿内轴-气隙-外壳形成封闭回路
- 内轴与外壳作相对运动时，两边气隙中的线圈切割磁力线使线圈产生感应电势；两边气隙中磁通走向相反，左右两边线圈的感应电势方向相反
- 若反向串接，两边的感应电势相加，灵敏度提高
- 输出感应电势与内轴和外壳相对运动速度成正比
- 用输出电势测量相对运动速度
- 传感器输出功率大，可用于测量机床运动工作台的直线运动速度



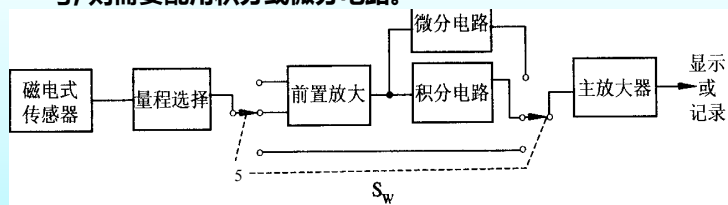
测量较长直线运动速度的传感器

- 中心细轴1和薄片状弹簧2支承在外壳6上，左右直线移动，轴上安装感应线圈4
- 永久磁铁3固定在外壳6上，与外壳形成封闭回路(留工作气隙，线圈4处于此工作气隙中)
- 壳体固定在构件A上，小轴1伸出的顶杆紧固在需测相对运动的构件B上
- 小轴相对于壳体(线圈相对于工作气隙中的磁通)作相对直线振动，线圈4中产生感应电势——反映了A、B构件间的相对运动速度
- 感应电势由导线5引出
- 顶杆需以弹性压力预紧在构件B上，以免在反向运动时因相对运动速度过大而脱开，使输出电势不能完全反映两构件间的相对运动速度
- 弹性力由薄片状弹簧2提供



磁电感应式传感器的测量电路

- 磁电式传感器直接输出感应电势，且传感器通常具有较高的灵敏度，所以一般不需要高增益放大器。
- 磁电式传感器是速度传感器，若要获取被测位移或加速度信号，则需要配用积分或微分电路。



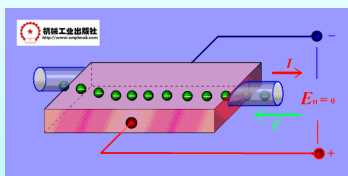
磁电传感器测量电路框图

二、霍尔传感器

- 既不是参量型，也不是发电型传感器
- 既不是能量控制型，也不是能量转换型传感器
- 在某些领域应用广泛

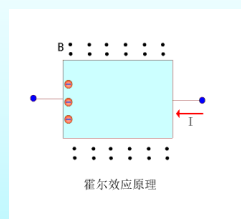
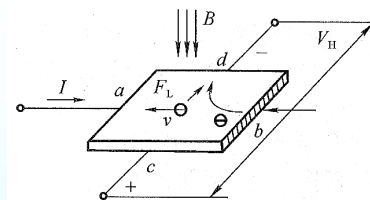
二、霍尔传感器

- 19世纪后期，发现在金属中存在霍尔效应
- 效应微弱，未被重视
- 20世纪中叶，半导体科技发展
- 制成实用型的元件
- 20世纪60年代后，受到重视



霍尔传感器基本原理

- 厚度为 d 的 N 型半导体薄片上垂直作用磁感应强度为 B 的磁场
- 在一个方向上通以电流 I
- N 型半导体中多数载流子为电子
沿与电流的相反方向运动
- 带电粒子在磁场中的运动受洛伦兹力 F_L 的作用
 F_L 作用方向：左手定则
 F_L 作用结果：带电粒子偏向 c, d 电极
- 在垂直于 B 和 I 的方向上产生感应电动势 V_H
现象——霍尔效应， V_H ——霍尔电势



霍尔电势

$$V_H = K_H IB \sin \alpha$$

式中： K_H ——霍尔常数，单位磁感应强度和单位控制电流作用下的开路霍尔电势，取决于材质、元件尺寸，并受温度变化影响；

B ——磁场的磁感应强度；

I ——某方向上的控制电流；

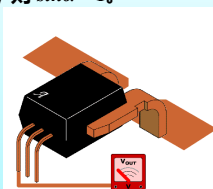
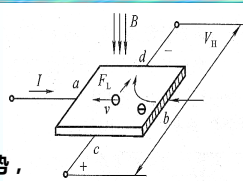
α ——电流方向与磁场方向夹角，如两者垂直，则 $\sin \alpha = 1$ 。

• 纯金属中自由电子浓度过高

霍尔效应微弱，无实用价值

• 半导体是霍尔元件的常用材料

• 材料的厚度 d 愈小，则 K_H 就愈大、灵敏度愈高



霍尔传感器应用

$$V_H = K_H IB \sin \alpha \quad (3-48)$$

• 式(3-48)可知，改变 I 或 B ，或两者同时改变均会引起 V_H 的变化

可以做成各种传感元件

霍尔传感器结构

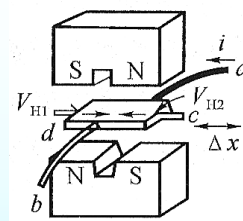
• 片芯是一块矩形半导体薄片

采用 N 形锗、锑化铟、砷化铟、砷化镓和磷砷化铟等

• 长边两侧面焊有两根控制电流极引线，短边两侧面的中点焊以两导线输出霍尔电势

• 霍尔芯片封装

采用非磁性金属、陶瓷或环氧树脂



霍尔元件的基本电路

$$V_H = K_H IB \sin \alpha \quad (3-48)$$

• R 为调节电阻，调节控制电流 I 的大小

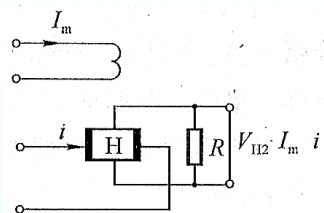
• V_H 两端为霍尔电势输出端

• 在磁场和控制电流的作用下，输出端有电压输出

• I 和 B 都可作为输入信号，输出信号正比于两者乘积

• 建立霍尔电势所需的时间极短 ($10^{-12} \sim 10^{-14}$ s)

• 可以测量较高频率的信号



霍尔元件位移传感器

• 霍尔元件置于两相反方向的磁场中

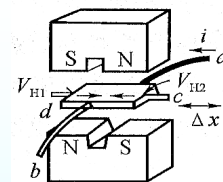
• 在 a 、 b 两端通入控制电流 i

• 左半产生的霍尔电势 V_{H1} 和右半产生的霍尔电势 V_{H2} 方向相反

• c 、 d 两端输出电压是 $V_{H1} - V_{H2}$ ，若使初始位置时 $V_{H1} = V_{H2}$ ，则输出电压为零

• 当霍尔元件相对于磁极作 x 方向位移时，可得到输出电压 $V_H = V_{H1} - V_{H2}$ ，且 ΔV_H 数值正比于位移量 Δx ，正负方向取决于位移 Δx 的方向

• 霍尔元件传感器既能测量位移的大小，又能鉴别位移的方向



霍尔元件特点

- 静止状态下具有感受磁场的能力
- 结构简单、可靠性高
- 体积小、噪声低
- 动态范围大(输出电压变化范围可达1000:1)
- 频率范围宽(从直流到微波频段)
- 寿命长、价格低

• 可以广泛应用于测量：

位移

可转化为位移的力和加速度

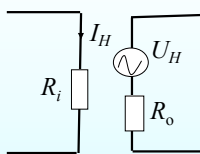
磁场变化

• 应用中不用永久磁铁产生的磁场，而是用可变电流作激磁的可变磁场，输出电压就决定于控制电流和激磁电流的乘积

——霍尔元件就成了一种两个模拟信号乘法器

霍尔元件基本特性

- 额定激励电流和最大允许激励电流
 - 霍尔元件自身温升 10°C 时流过的激励电流
 - 以元件最大温升为限制所对应的激励电流
- 输入电阻和输出电阻
 - 激励电极间的电阻
 - 电压源内阻
- 不等位电势和不等位电阻
 - 霍尔元件激励电流为 I 时，若元件所处位置磁感应强度为零，此时测得的空载霍尔电势。
 - 不等位电势就是激励电流经不等位电阻所产生的电压。
- 寄生直流电势
- 霍尔电势温度系数



霍尔元件误差及其补偿

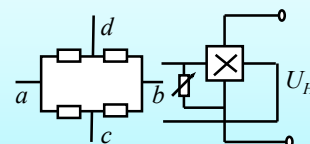
零点误差

不等位电势：①电极引出时偏斜，②半导体电阻特性（等势面倾斜）造成。③激励电极接触不良。

寄生直流电势：由于霍尔元件是半导体，外接金属导线时，易引起PN结效应，当电流为交流电时，整个霍尔元件形成整流效应，PN结压降构成寄生直流电势，带来输出误差。

补偿方法

制作工艺保证电极对称、欧姆接触
电路补偿



霍尔元件温度补偿

$$U_H \propto K_H IB$$

误差原因：温度变化时， K_H , R_i （输入电阻）变化

补偿办法：

- 对温度引起的 I 补偿。采用恒流源供电。但只能减小由于输入电阻随温度变化引起的激励电流变化的影响。
- 对 $K_H I$ 乘积项同时补偿。采用恒流源与输入回路并联电阻。

初始状态： K_{H0} , R_{i0} , $I_{H0} \propto \frac{R_p I}{R_{i0} R_p}$

温度变化后： $k_{Ht} \propto k_{H0} [1 + \alpha_s (t - t_0)]$

$R_{it} \propto R_{i0} [1 + \alpha_s (t - t_0)]$

$I_{Ht} \propto \frac{R_p I}{R_{i0} [1 + \alpha_s (t - t_0)] R_p}$

要使 $k_{H0} I_{H0} B \propto k_{Ht} I_{Ht} B$ 即 $R_p \propto \frac{1 + \alpha_s (t - t_0)}{1 + \alpha_s (t - t_0)} R_{i0}$

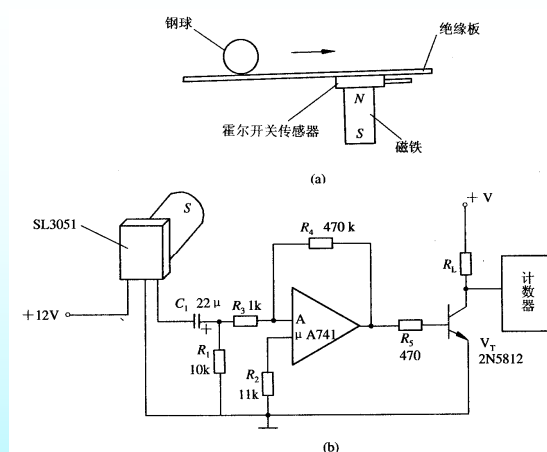
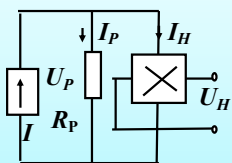


图 7-14 霍尔计数装置的工作示意图及电路图

The End