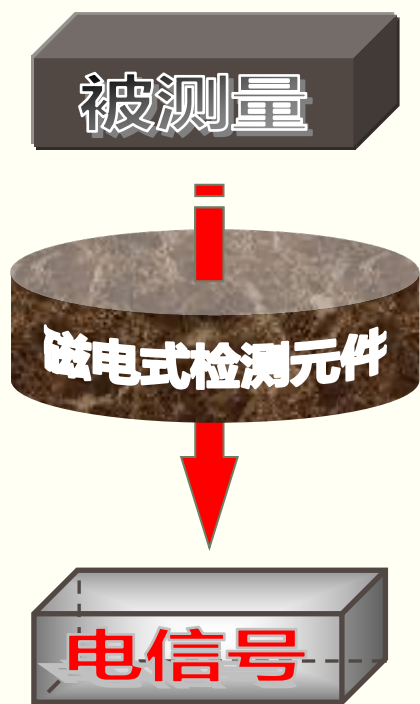




2.8 磁电式检测元件

定义



利用电磁感应原理，将运动速度、转速等物理量变换成感应电势

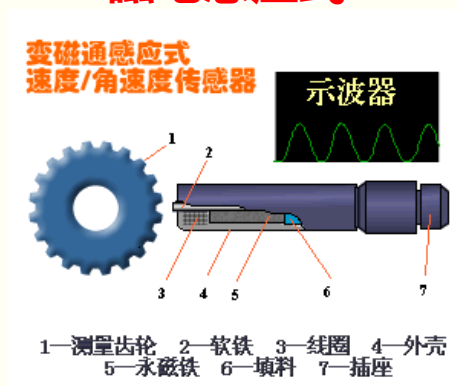
振动
转速

扭矩

磁场
电流

位移
压力

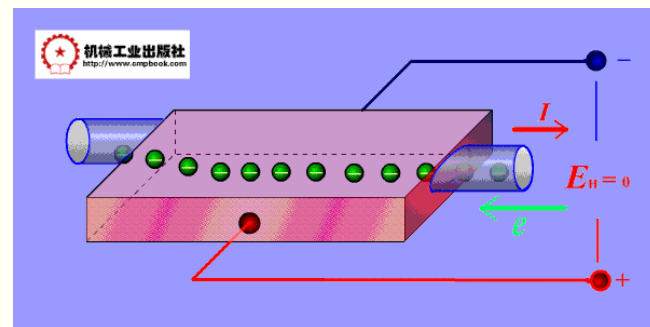
磁电感应式



电流

感应电动势

霍尔元件



霍尔电压

知识要点

磁电式检测元件

磁电感应式元件

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

原理：电磁感应定律

种类

恒磁阻式元件

变磁阻式元件

开磁路式

闭磁路式

误差及补偿

温度误差

永磁铁不稳定

非线性误差

霍尔元件

原理：霍尔效应

特性

应用

磁场测量/微位移

乘法器/功率计

回转器/隔离器

集成器件

线性集成器件

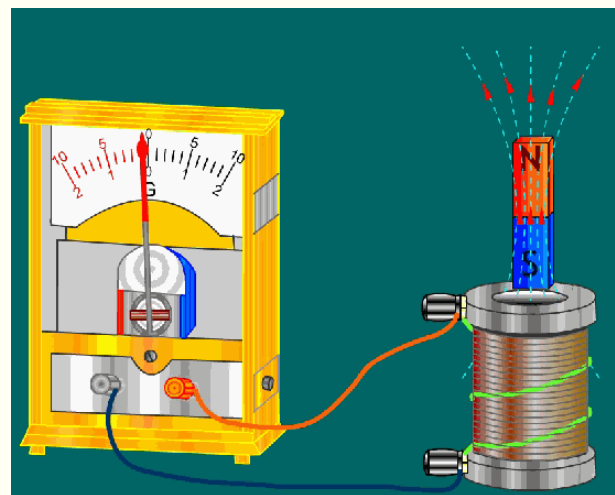
霍尔开关器件

1、磁电感应式敏感元件

磁电感应式敏感元件是利用导体和磁场发生相对运动而在导体两端输出感应电动势进行工作的，因此也被称为**感应式**或者**电动式敏感元件**。

电磁感应定律

- 导体在磁场中运动切割磁力线，或者通过闭合线圈的磁通发生变化时，在导体两端或者线圈内将产生感应电动势
- 感应电动势的大小正比于磁通变化率



$$E = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

有源器件，电路简单、输出功率大、性能稳定、适用于运动测量

工作原理

磁通变化率：由磁场强度、磁路电阻、线圈运动速度决定

磁通量 ϕ 的变化实现办法：

磁铁与线圈之间做相对运动；

磁路中磁阻的变化；

恒定磁场中线圈面积的变化。

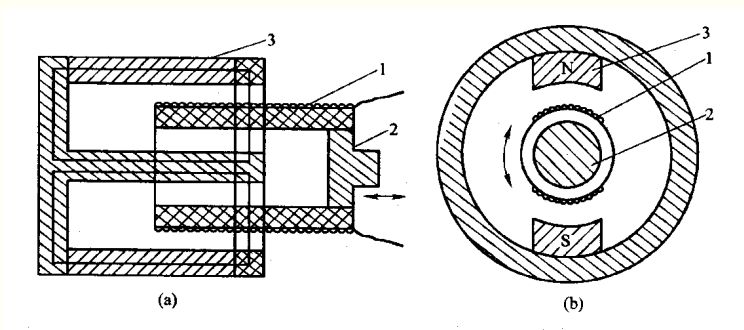
直接应用：测定速度

在信号调节电路中接积分电路，或微分电路，磁电式传感器就可以用来测量位移或加速度。

1) 恒磁阻式检测元件

磁路系统产生恒定的直流磁场，磁路中的工作气隙固定不变，因而磁路中的磁阻也是恒定不变的，测量线圈中产生感应电动势是由于**线圈与永久磁铁间的相对运动切割磁力线**导致磁通量发生变化。

- 线速度型
$$e = N B l v$$
- 角速度型
$$e = N B A \omega \sin \omega t$$



(a)线速度型

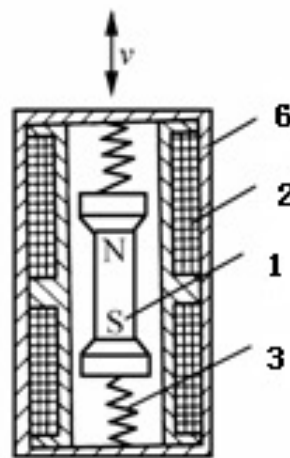
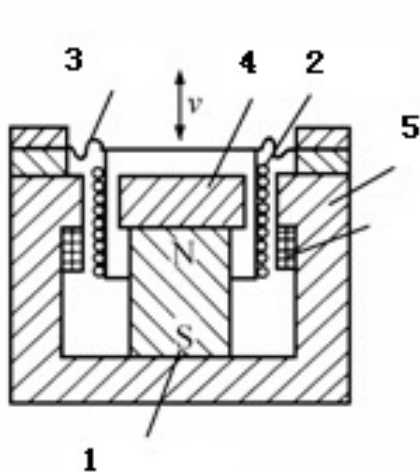
(b)角速度型

1--线圈;

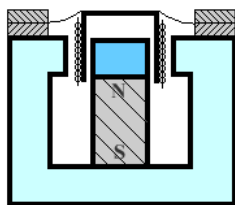
2--运动部件;

3--永久磁铁

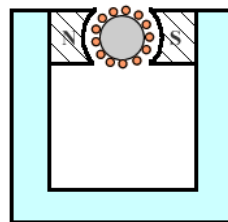
动圈式与动铁式



1—永久磁铁；2—感应线圈；3—弹簧；4—极掌；
5—磁轭；6—壳体



动圈式磁电传感器工作原理
线速度型



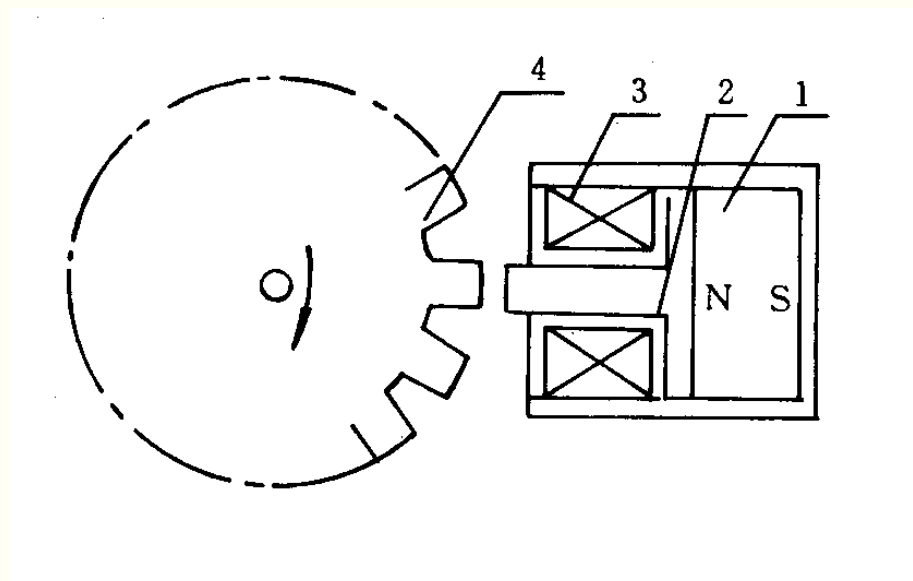
动圈式磁电传感器工作原理
角速度型

2) 变磁阻式检测元件

- 线圈和磁铁部分都是静止的，线圈中的感应电动势是通过改变磁路中的气隙大小来改变磁路的磁阻，从而导致磁通发生变化，在线圈中产生感应电动势。
- 用来测量转速，线圈中产生感应电动势的频率作为输出，而感应电动势的频率取决于磁通变化的频率。

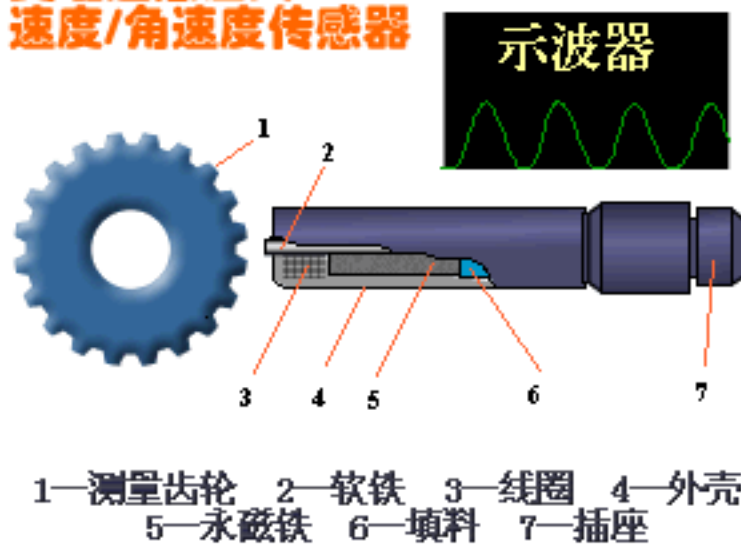
结构：开磁路、闭磁路

开磁路式



- 1--永久磁铁;
- 2--衔铁;
- 3--感应线圈;
- 4--齿轮

变磁通感应式 速度/角速度传感器

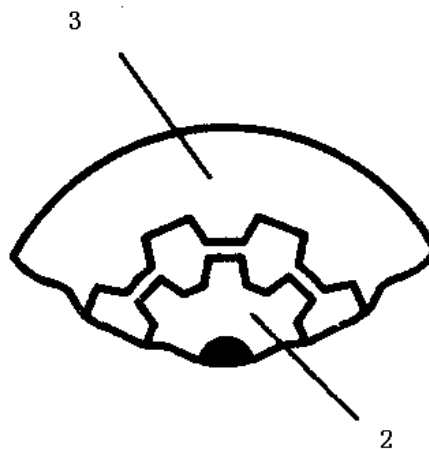
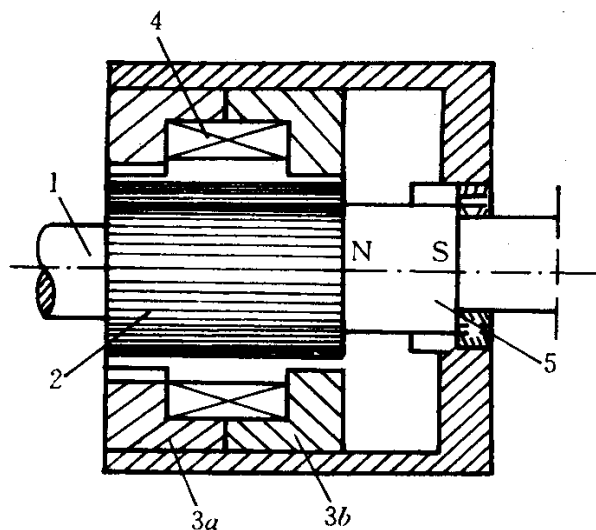


- 1—测量齿轮 2—软铁 3—线圈 4—外壳
- 5—永磁铁 6—填料 7—插座

$$f = zn = \frac{N}{t}$$

$$n = \frac{f}{z} = \frac{N}{tz}$$

闭磁路式

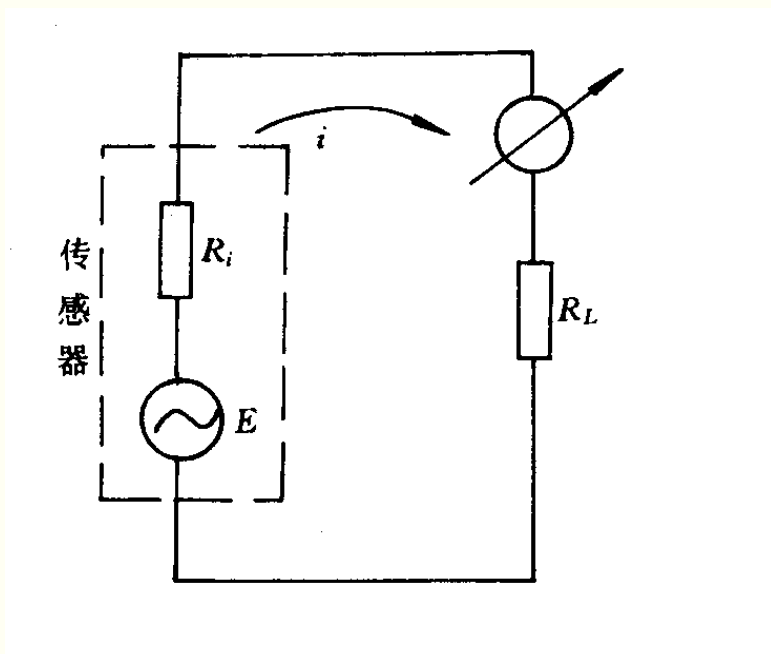


- 1--转轴;
- 2--内齿轮;
- 3a、3b--外齿轮;
- 4--线圈;
- 5--永久磁铁

- 在振动信号或转速高的场合，其测量精度高于开磁路式的。
- 变磁通式敏感元件的输出电势取决于线圈中磁通的变化速度，当转速过低时，输出电势太小，因此该类敏感检测元件通常有一个下限工作频率，一般为50Hz。

3) 等效电路

磁电感应式检测元件相当于一个电源



$$i_O = \frac{e}{R_i + R_L}$$

$$u_O = \frac{eR_L}{R_i + R_L}$$

R_i ——为内阻,
 R_L ——为负载电阻

灵敏度

以线速度型恒磁阻式检测元件为例

$$e = N B l v$$

$$S_i = \frac{\Delta i_o}{\Delta v} = \frac{N B l}{R_i + R_L}$$

$$S_v = \frac{\Delta u_o}{\Delta v} = \frac{N B l R_L}{R_i + R_L}$$

4) 误差及补偿

$$\delta_r = \frac{dS}{S} = \frac{dB}{B} + \frac{dl}{l} - \frac{dR_i}{R_i}$$

- 工作温度发生变化
- 受到外磁场干扰
- 受到机械振动或冲击



灵敏度都将发生变化
而产生测量误差

① 温度误差

$$\delta_r = \frac{dS}{S} = \frac{dB}{B} + \frac{dl}{l} - \frac{dR_i}{R_i + R_L}$$

最主要的影响因素

- 磁感应强度的温度系数为负；
 - 线圈长度的温度系数是正；
 - 负载电阻的温度系数为正；
- 对于铜线，温度每变化1°C：
 - $dl/l \approx 0.167 \times 10^{-4}$ ；
 - $dR/R \approx 0.43 \times 10^{-2}$ ；
 - $dB/B \approx -0.02 \times 10^{-2}$ (取决于材料性质)。

补偿方法——热磁分流器

- 具有负温度系数的热磁合金材料加在磁路系统的两个极靴上；
- 在正常温度下，热磁分流器将空气隙磁通分流一部分
- 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温度下显著降低，从而保持空气隙中的工作磁通不随温度变化。

基本理论

$$\alpha_h \Phi_h \Delta T = \alpha_T \Phi \Delta T$$

Φ ——正常工作温度下永久磁铁的总磁通

Φ_h ——正常工作温度下热磁分流器的分流磁通

α_T ——永久磁铁的磁导温度系数

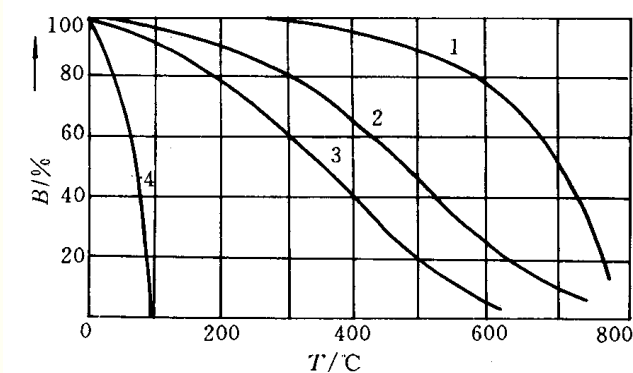
α_h ——热磁分流器的磁导温度系数

考虑到磁通分流比

$$\Phi_h : \Phi = (A_h) : (A_h + A_0)$$

$$\alpha_h = \left(1 + \frac{A_0}{A_h} \right) \alpha_T$$

A_h 正常工作温度下热磁分流器的磁导； A_0 为包括漏磁导在内的气隙磁导



磁性材料磁感应强度B与温度T的关系曲线
1.镍铝合金；2.钴钢；3.钨钢；4.热磁合金

② 永久磁铁不稳定误差

- 当测量电路满足 $R \ll R_L$ 时，电磁感应式检测元件的电压灵敏度可近似为

$$S_U = NBl$$

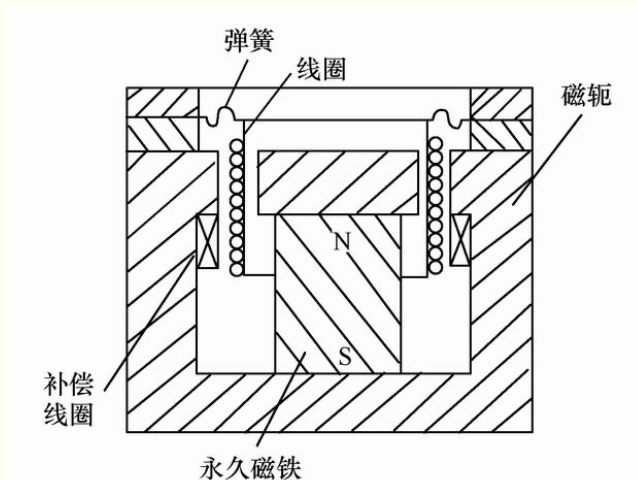
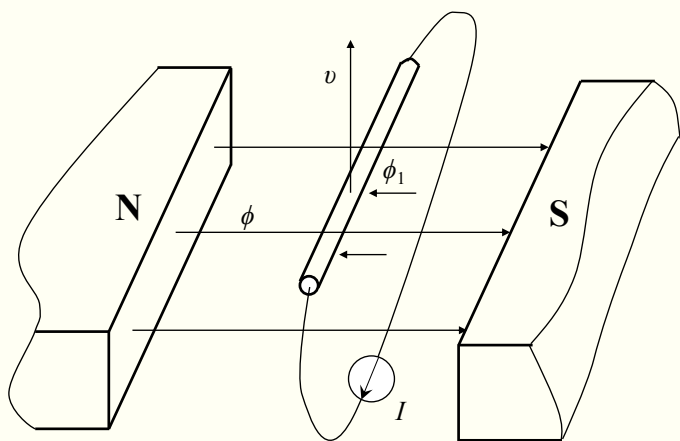
则灵敏度的相对误差为

$$\delta_r = \frac{dS_v}{S_v} = \frac{dB}{B} + \frac{dl}{l}$$

- 一般线圈长度具有较好的时间稳定性，而经磁化的永久磁铁的磁性一般会随时间而发生变化
- 解决办法：永磁材料在充磁前先进行退火处理，以消除内应力。充磁后再进行老化处理。

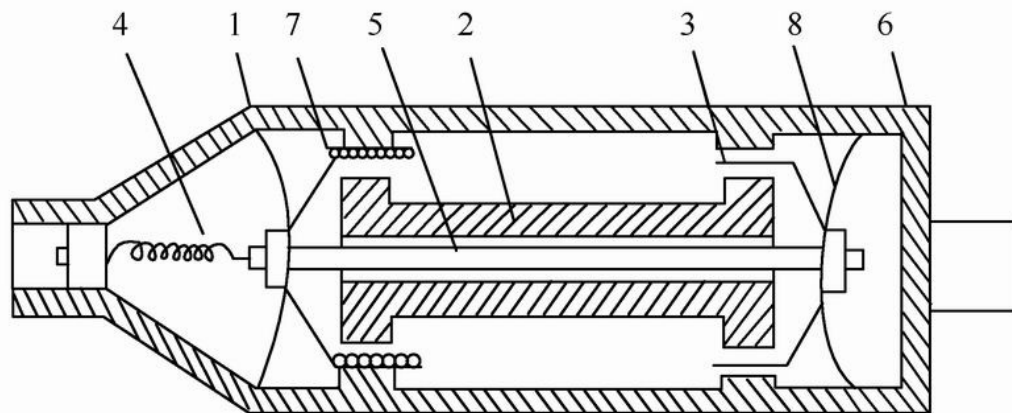
③ 非线性误差

- 感应电流会产生磁场，该磁场会削弱/增强永久磁铁所产生的磁场，从而使磁电式检测元件的**实际磁通量变化**，引起严重的**非线性**；
- 解决办法：**补偿线圈**，补偿线圈的反馈电流为



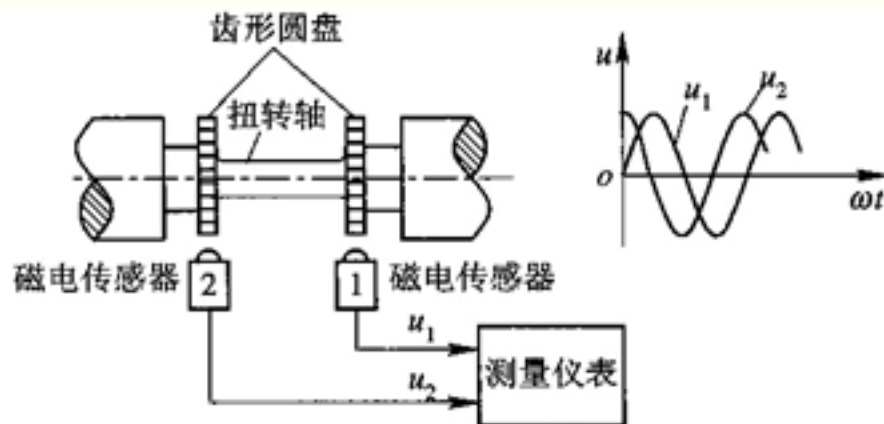
$$i_k = Ai$$

5) 应用

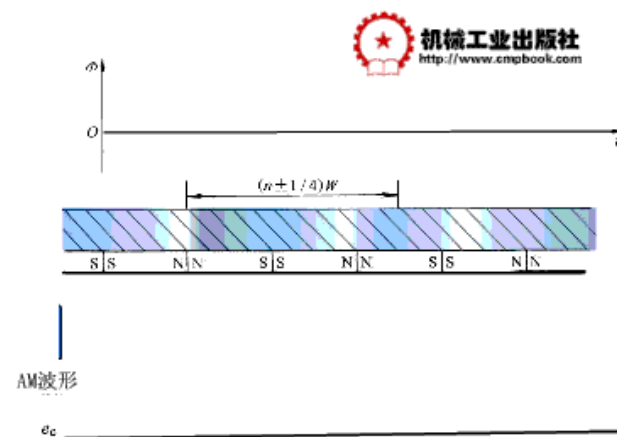


振动传感器

- 1-弹簧片 2-永久磁铁
3-阻尼器 4-引线
5-芯杆 6-外壳 7-线圈
8-弹簧片



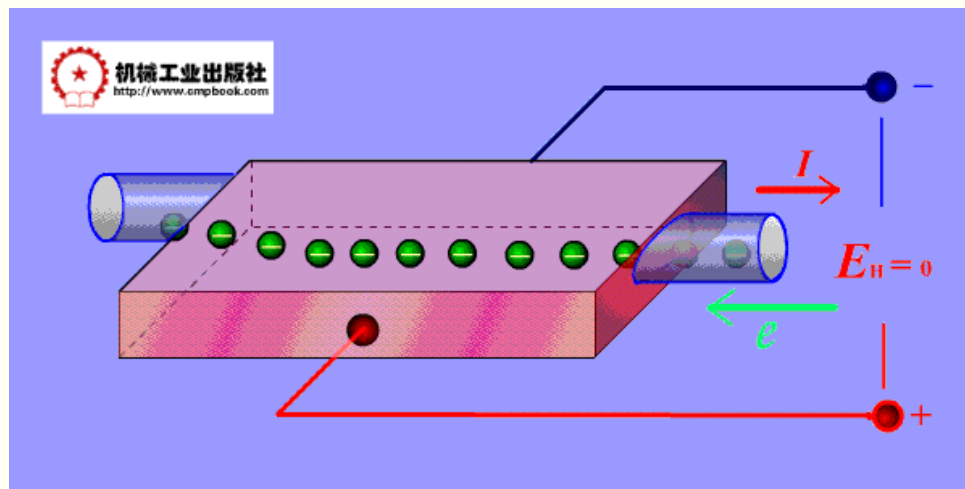
扭矩传感器



磁栅传感器

2、霍尔传感器

- **霍尔效应**：美国物理学家霍尔(Edwin Herbert Hall, 1855-1938)于1879年在实验中发现，当电流垂直于外磁场通过导体时，在导体的**垂直于磁场和电流方向的两个端面之间会出现电势差**，这一现象便是霍尔效应。这个电势差也被叫做霍尔电势差。



1) 基本原理

霍尔效应

$$evB = eE_H = e \frac{U_H}{w}$$

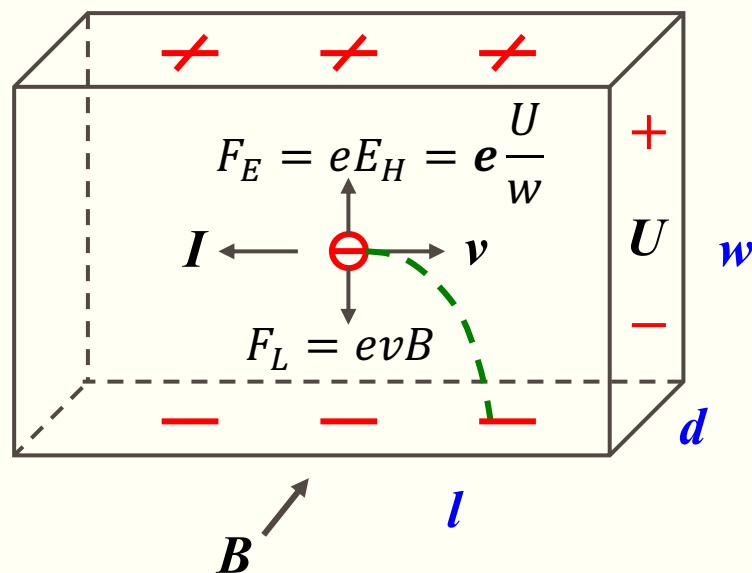
$$U_H = vBw$$

$$I = -nevwd$$

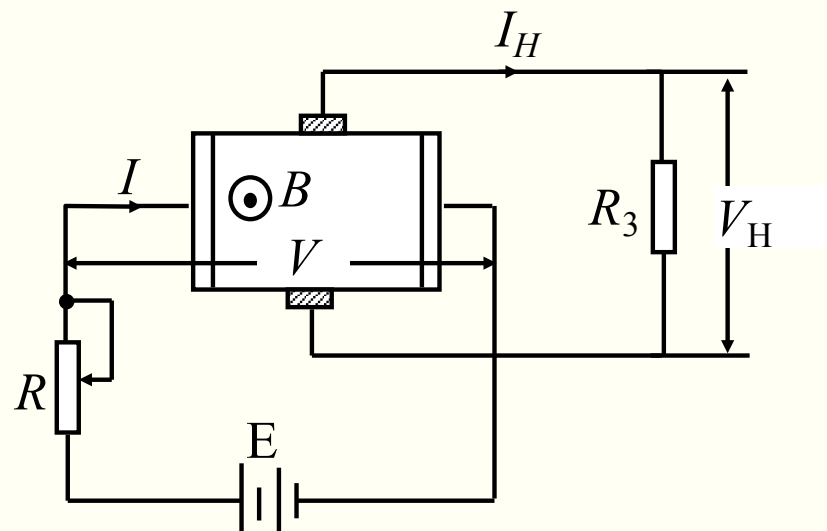
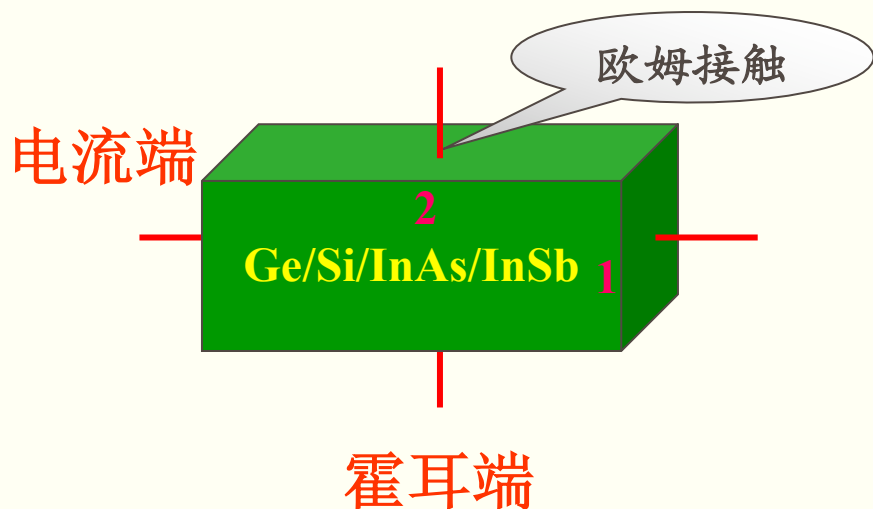
$$U_H = \frac{IB}{ned} = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$$

霍尔系数

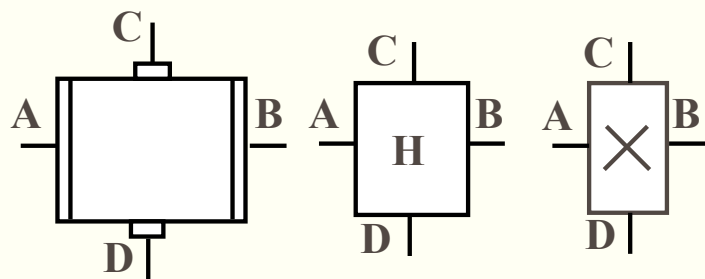
霍尔元件的灵敏度



2) 霍尔元件



霍尔元件的基本电路



霍尔器件符号

控制电流 I ;
霍尔电势 V_H ;
控制电压 V ;
霍尔负载电阻 R_3 ;
霍尔电流 I_H 。

3) 霍尔元件的性质

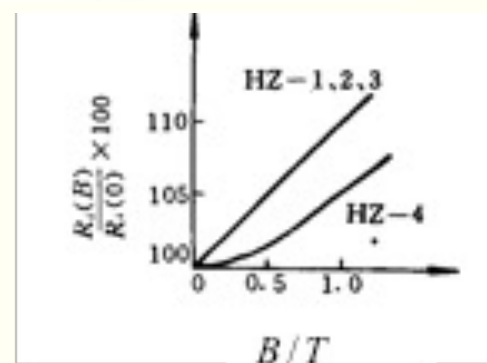
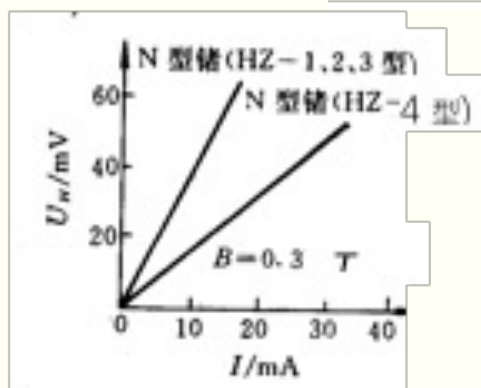
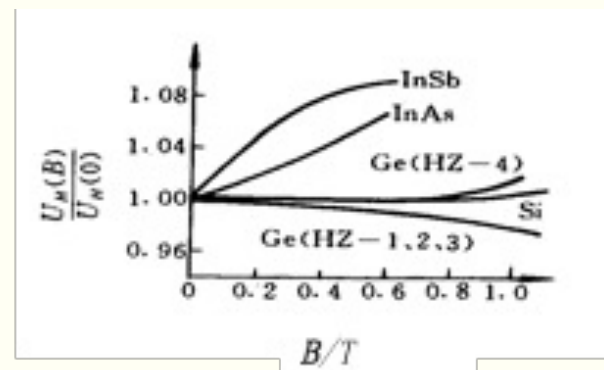
$$U_H = \frac{IB}{ned} = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$$

I 恒定 $\Rightarrow U \sim B$ 在一定范围内呈线性

B 交变 $\Rightarrow U$ 交变

**B 恒定 $\Rightarrow U \sim I$
呈线性**

$|B| \uparrow \Rightarrow$ 霍尔元件内阻 \uparrow



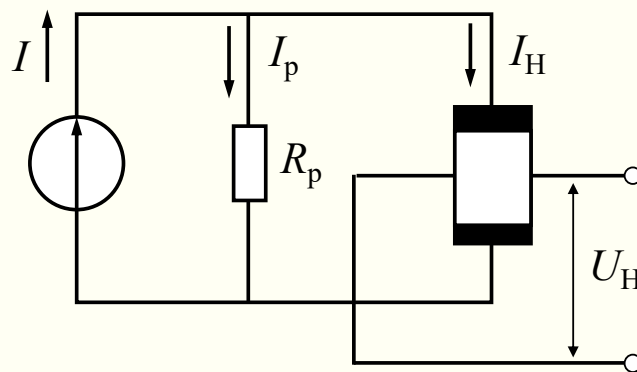
霍尔元件的误差补偿

温度补偿

半导体材料的载流子浓度、迁移率和电阻率都会发生变化，从而造成霍尔元件的霍尔系数、灵敏度、输入电阻及输出电阻变化

补偿措施

- 温度系数小的半导体材料
- 采用恒流源供电使 U_H 保持稳定
- 输入回路中并联一个电阻 R_p ，起到分流的作用，使 $K_H I$ 保持恒定

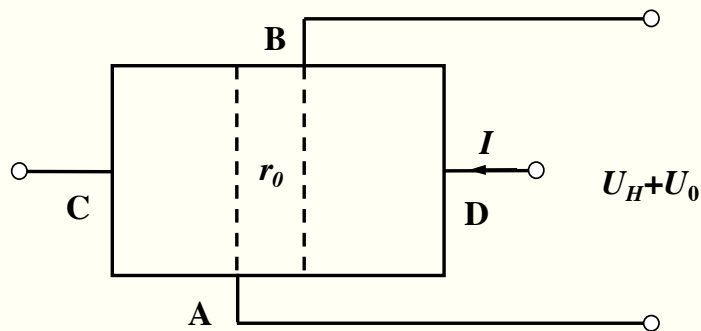


霍尔元件的误差补偿

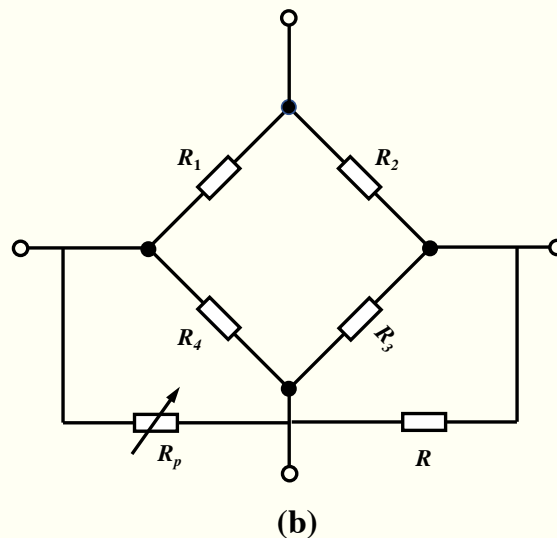
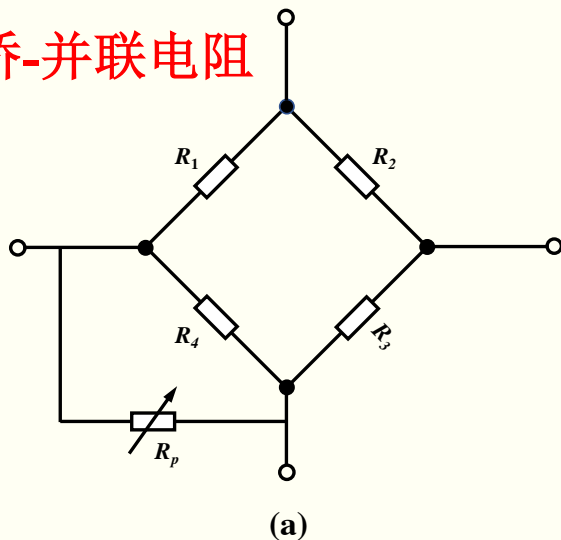
不等位电势

激励电流 I 流经不等位电阻 r_0 所产生的电压 U_0

- 霍尔电极安装不对称
- 半导体材料不均匀造成电阻率不均匀
- 元件几何尺寸不对称
- 激励电极接触不良导致电流不均匀



等效电桥-并联电阻

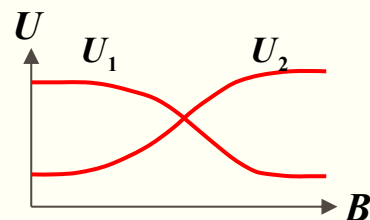
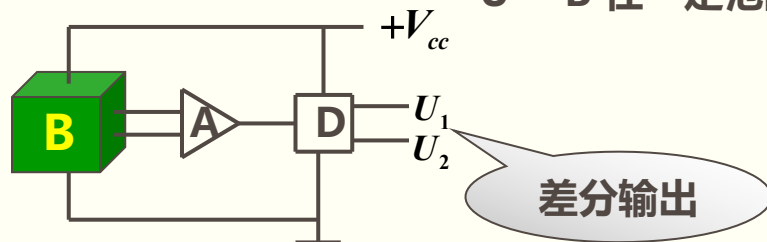


4) 霍尔集成器件

将霍尔元件、放大器、施密特触发器及输出电路通过集成化制作工艺构成独立元件

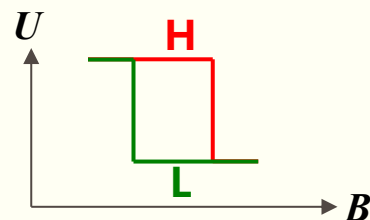
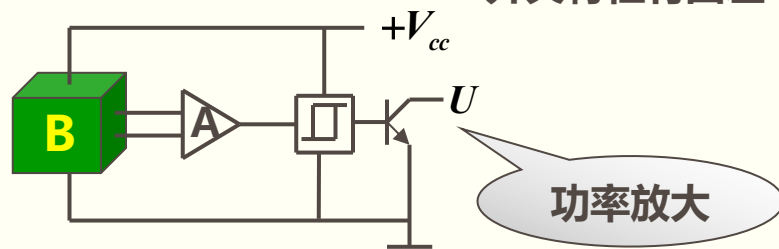
➤ 线性集成器件

$U \sim B$ 在一定范围内呈线性



➤ 开关集成器件

开关特性有回差



5) 霍尔元件的应用

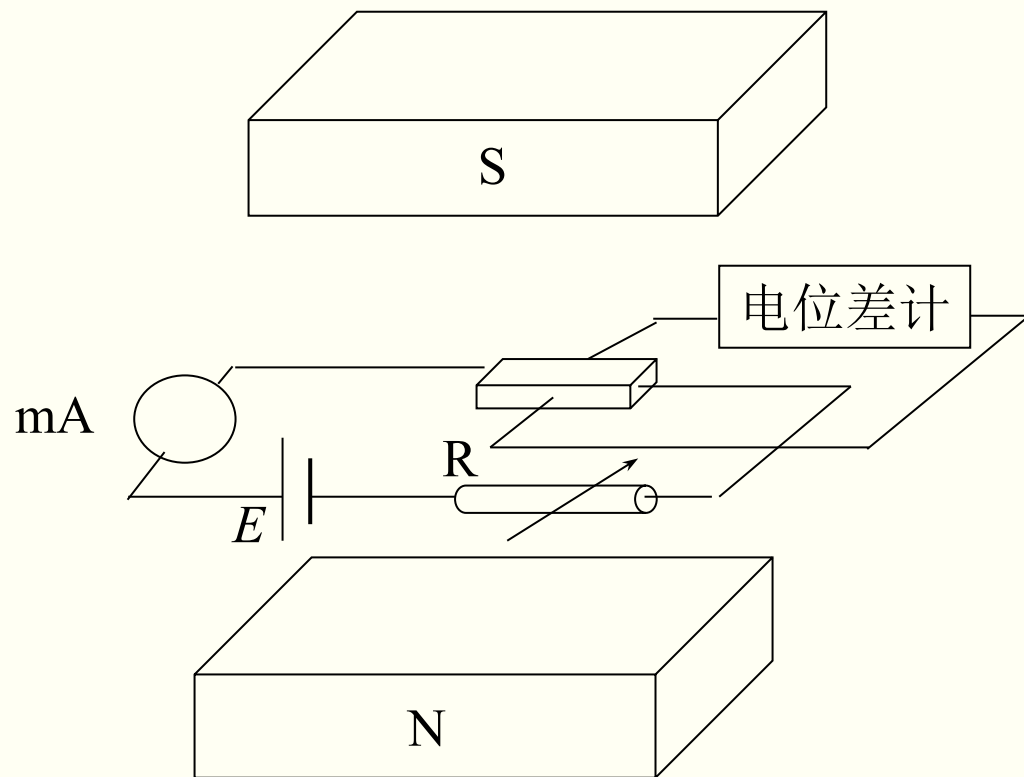
□ 当激励电流一定时，霍尔电势与磁感应强度成正比。

- 霍尔式罗盘（或称磁力计）来测量磁场的大小。
- 非均匀磁场中，霍尔电势的大小还可以反映出位置、角度等变化量，间接地实现位移、角度、转速、压力等物理量的测量。
- 开关特性，转速测量、磁电编码器、无触点开关、导磁产品计数等应用。霍尔键盘也是基于这一特性工作的。

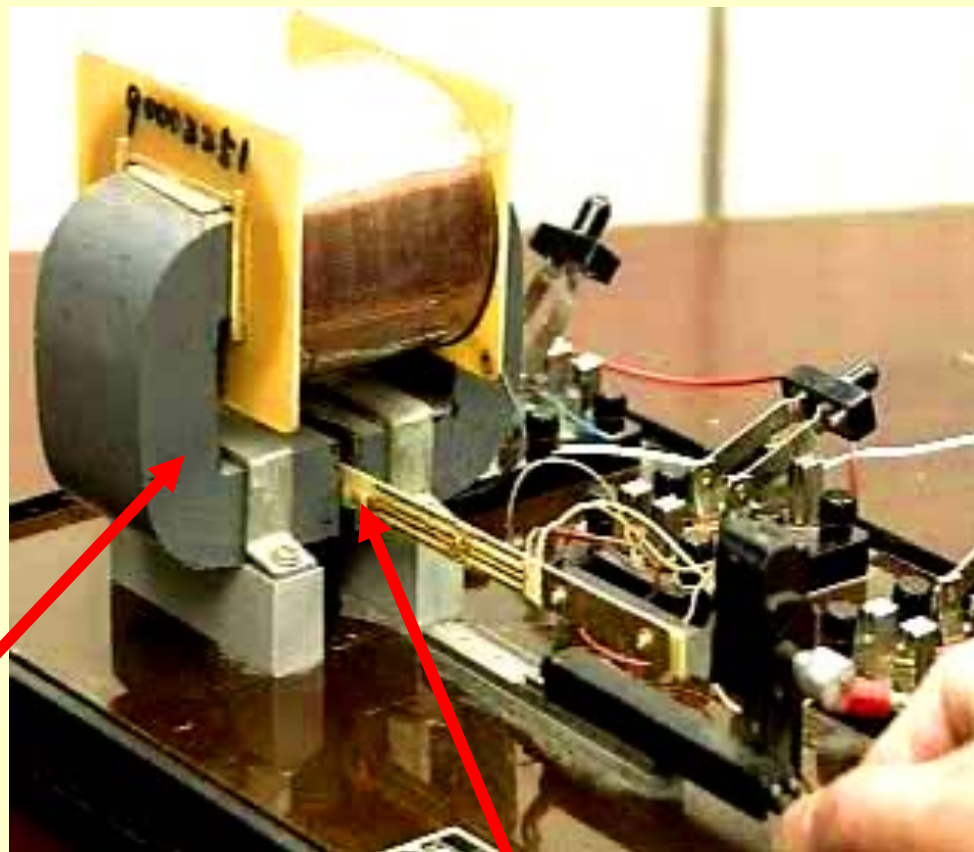
□ 当磁场强度一定时，霍尔电势与激励电流成正比。利用这一特性，可以直接测量电流的大小以及与电流有关的物理量。

□ 当磁感应强度与激励电流都为变量时，霍尔电势与两者的乘积成正比。利用这一特性，可以测量具有乘法运算关系的物理量，典型的应用包括乘法器、功率计等。

测量磁场的大小和方向



霍尔传感器用于测量磁场强度



测量铁心气隙的 B 值

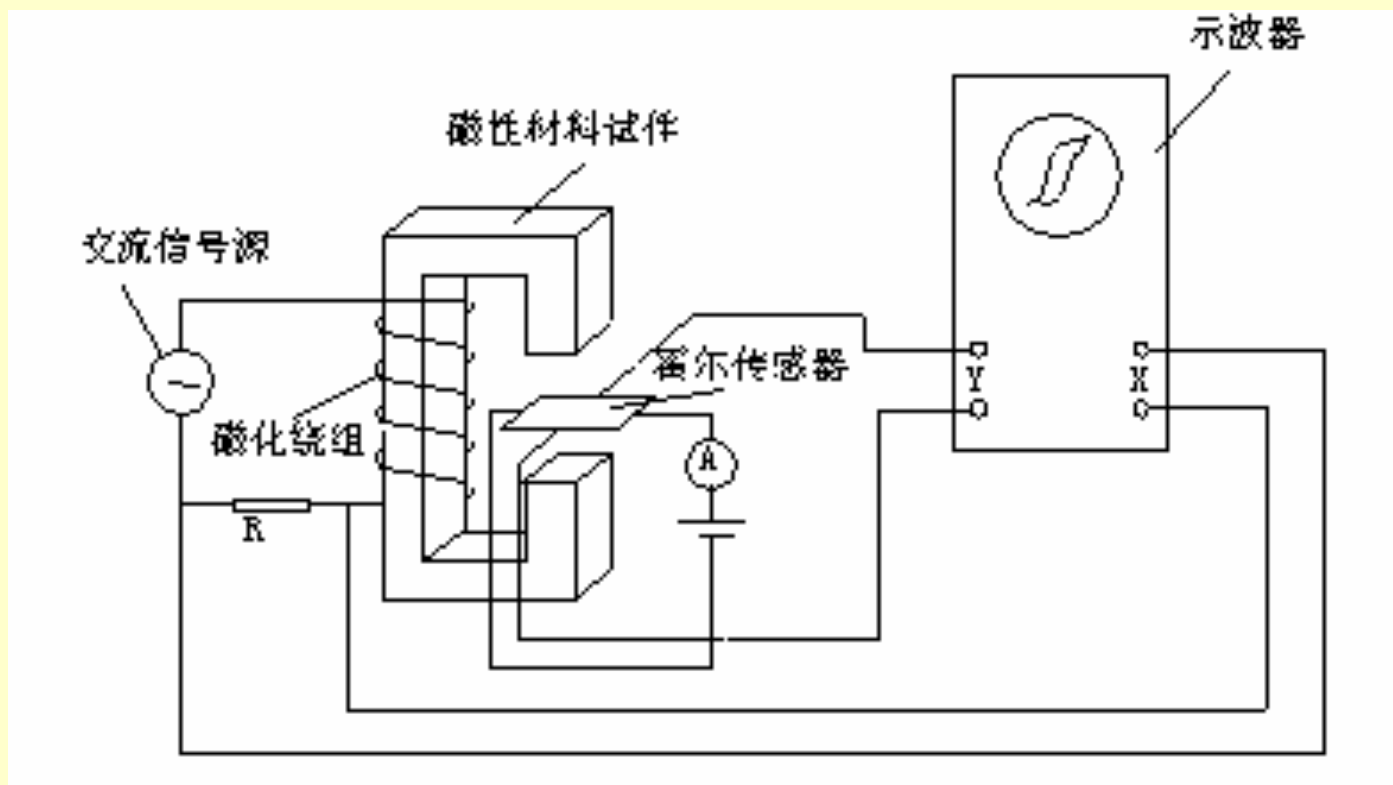
霍尔元件

霍尔特斯拉计（高斯计）

霍尔元件

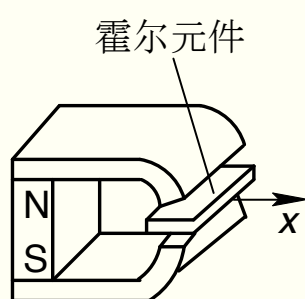


霍尔元件在磁性材料研究中的应用

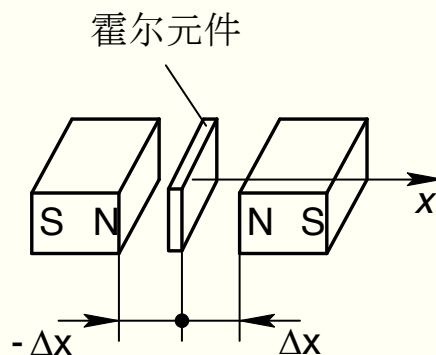


研究闭合材料试样磁特性的线路框图

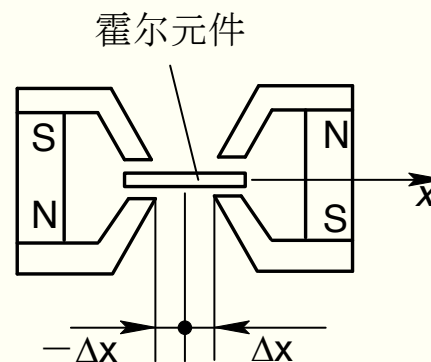
位移传感器



(a)



(b)

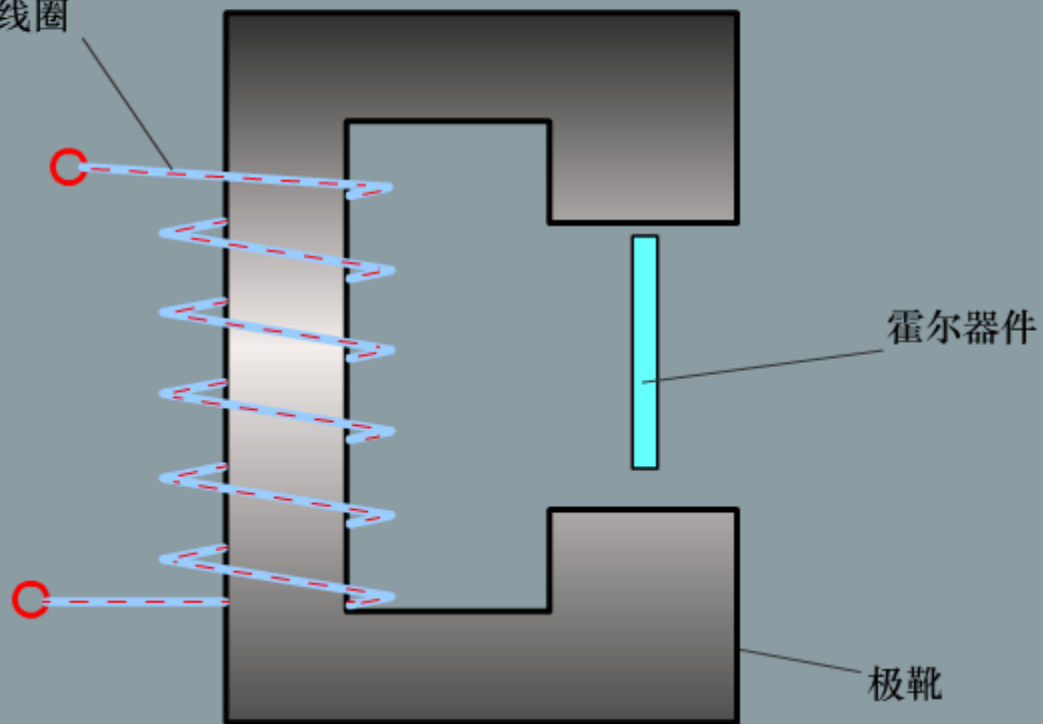


(c)

动态范围可达 **5 mm**,
分辨率为 **0.001mm**

灵敏度很高, 但位移量
较小, 适合于微位移量
及振动的测量

励磁线圈

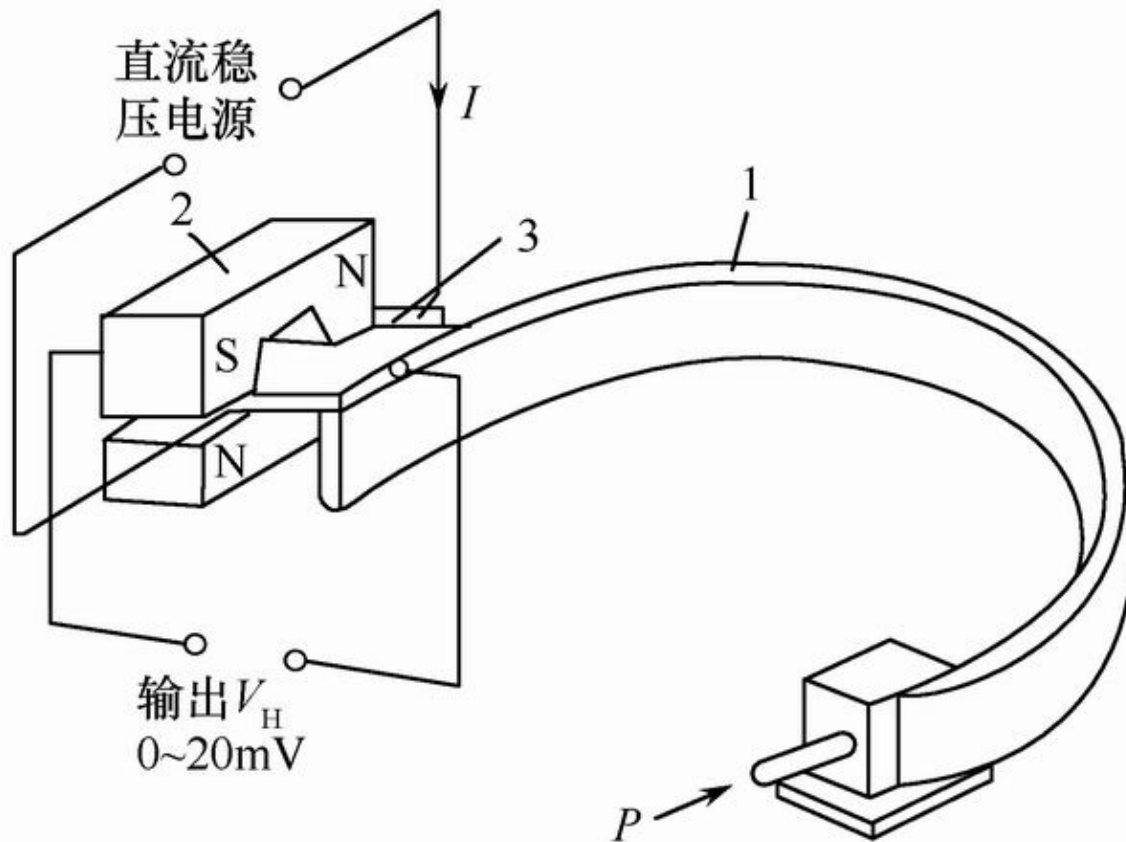


霍尔器件

极靴

角位移测量仪结构

压力传感器



- 1. 弹簧管
- 2. 磁铁
- 3. 霍尔片

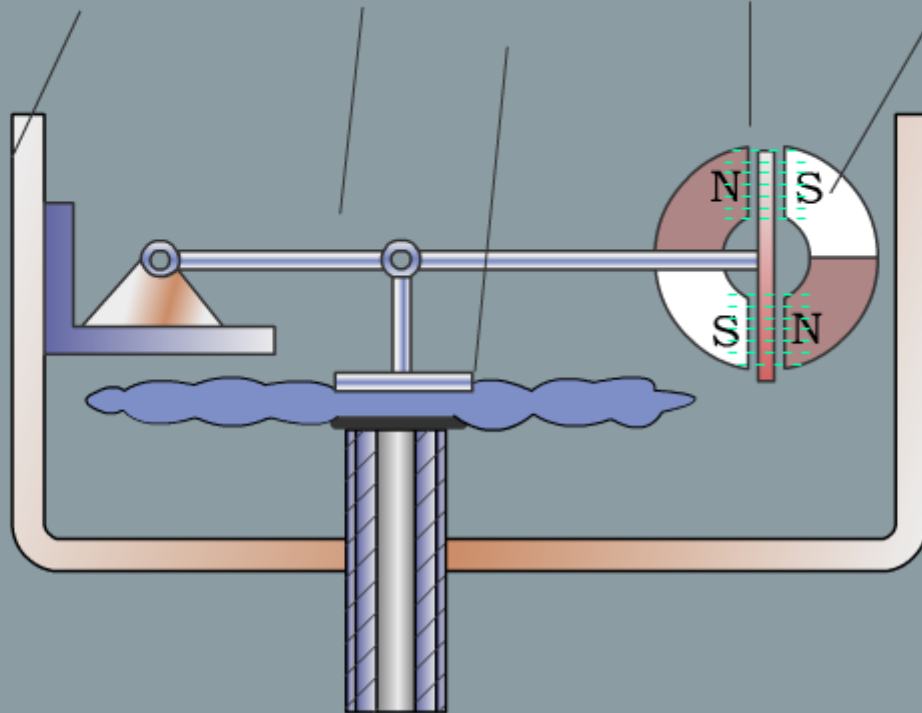
霍尔集成电路 (霍尔IC)

杠杆

波纹膜盒

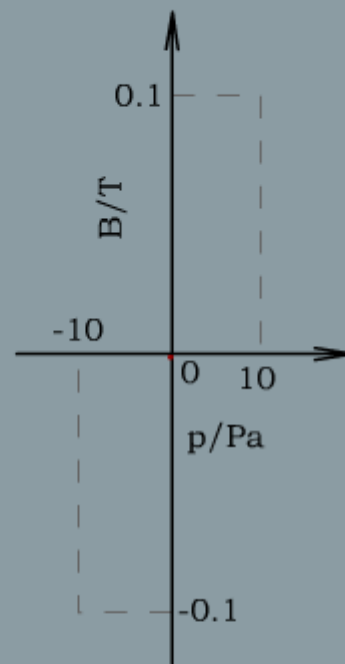
霍尔器件

磁铁



$p=0$

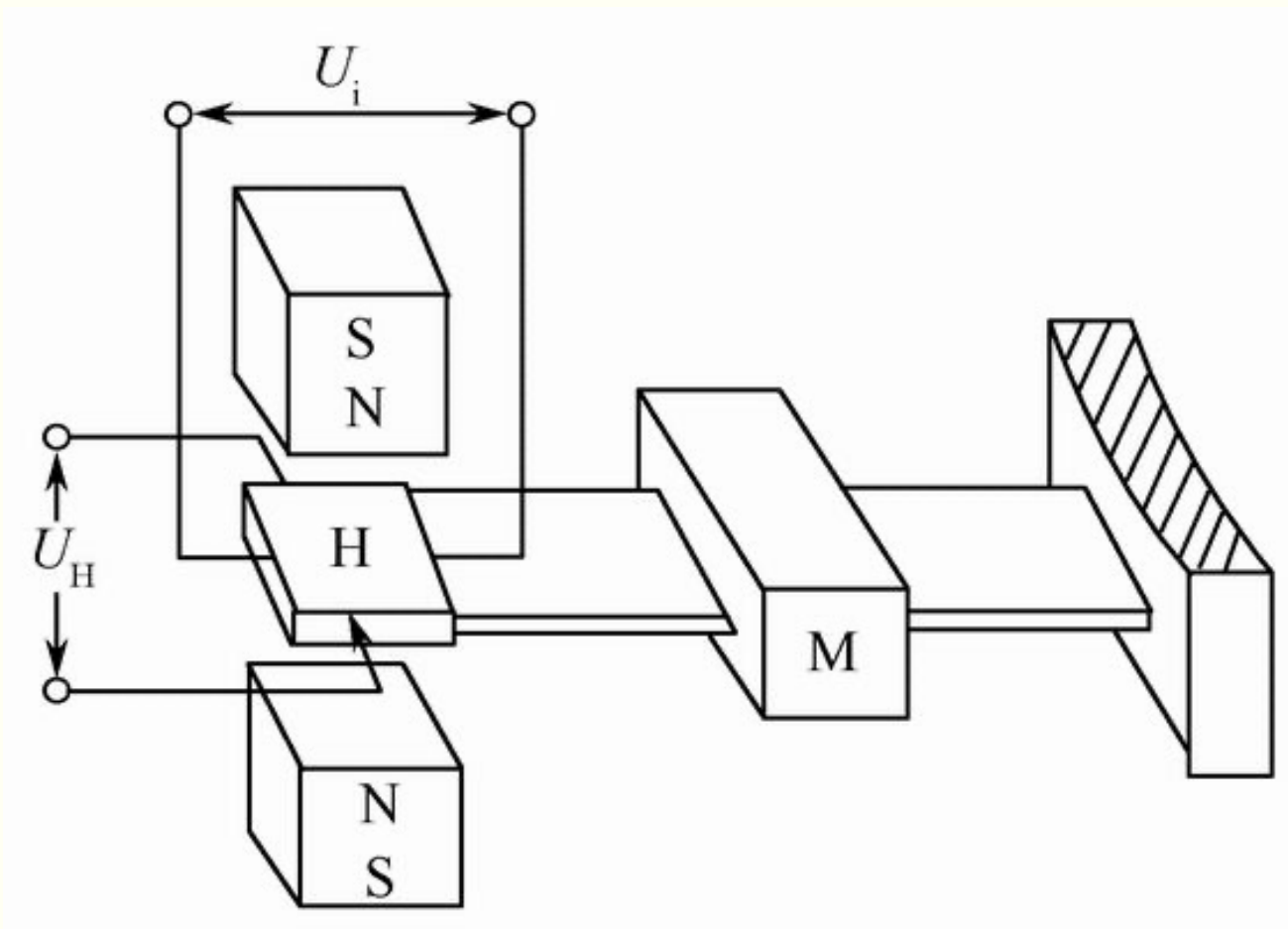
结构



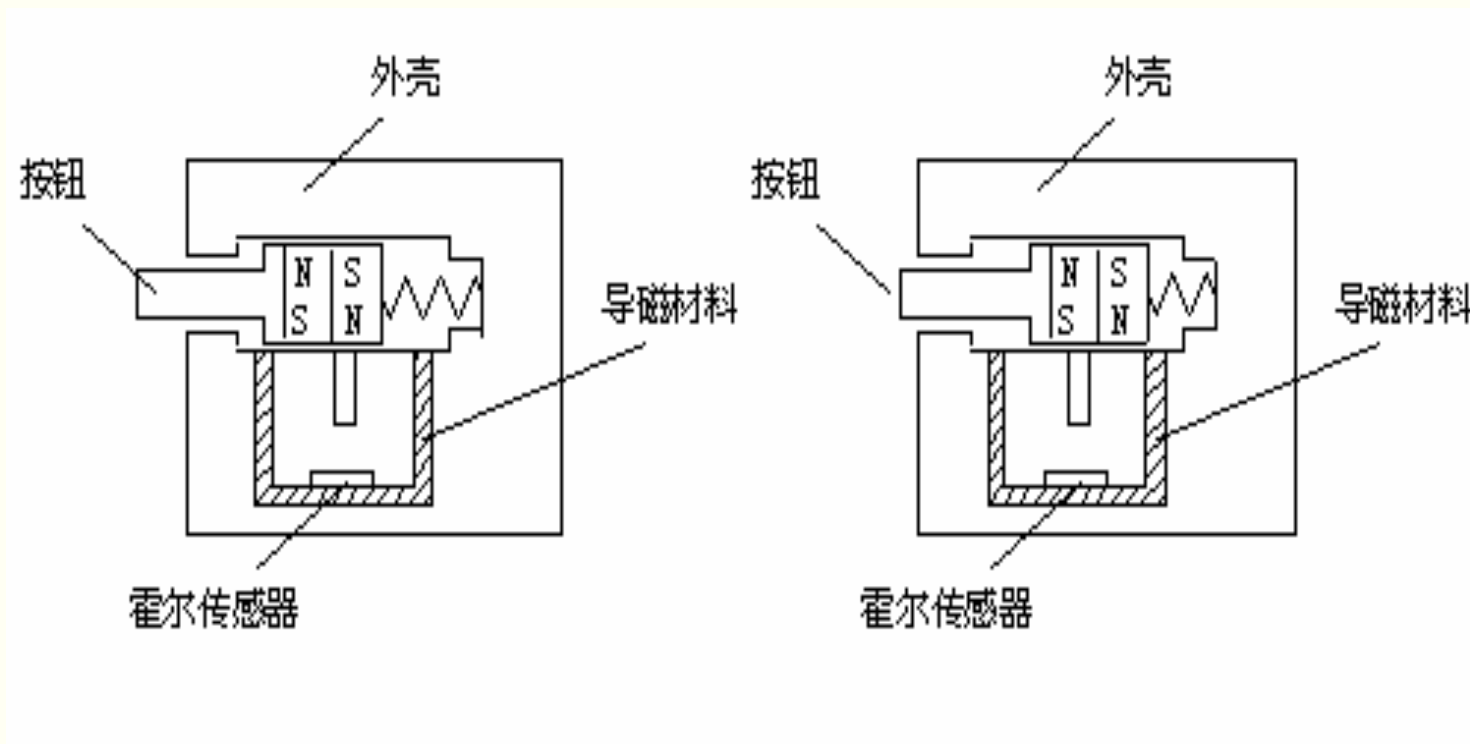
磁场与压力关系曲线

霍尔式微压力传感器

加速度传感器



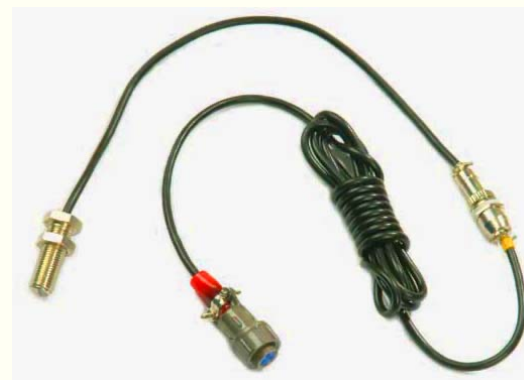
霍尔开关



用霍尔开关集成传感器构成的按钮

霍尔式接近开关

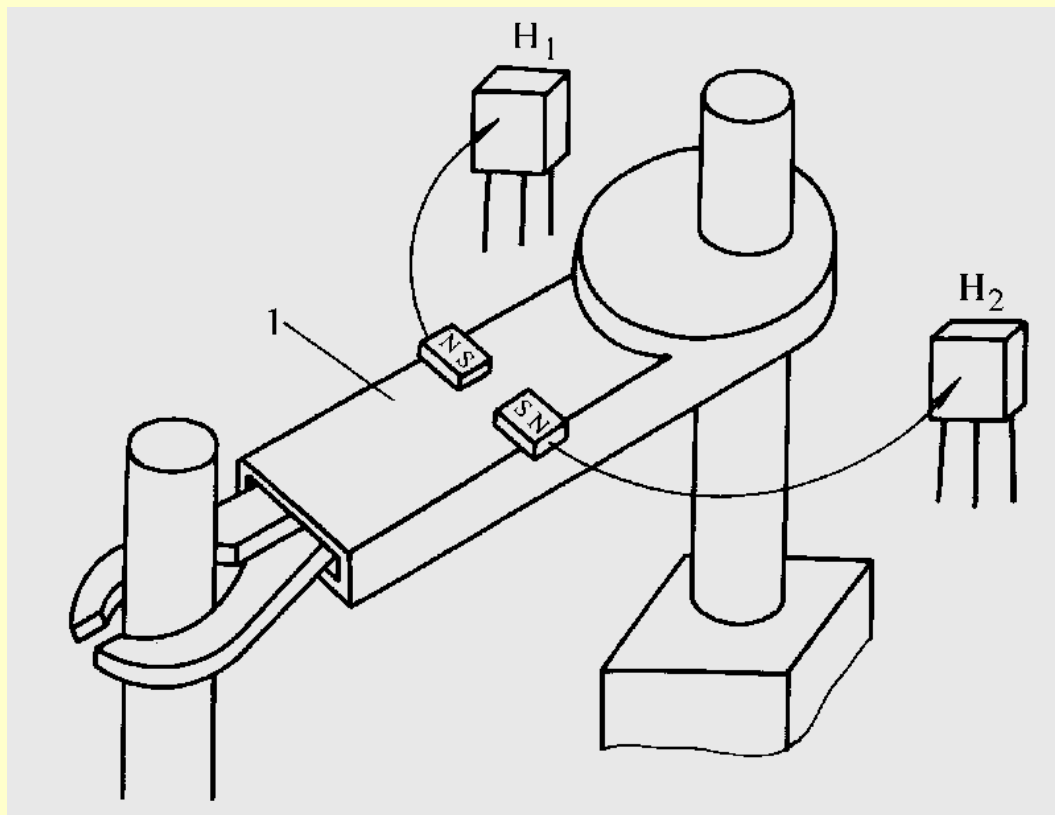
当磁铁的有效磁极接近、并达到动作距离时，霍尔式接近开关动作。



霍尔式接近开关

用霍尔IC也能完成接近开关的功能，但是它只能用于铁磁材料的检测，并且还需要建立一个较强的闭合磁场。

在右图中，当磁铁随运动部件移动到距霍尔接近开关几毫米时，霍尔IC的输出由高电平变为低电平，经驱动电路使继电器吸合或释放，控制运动部件停止移动起到限位的作用。

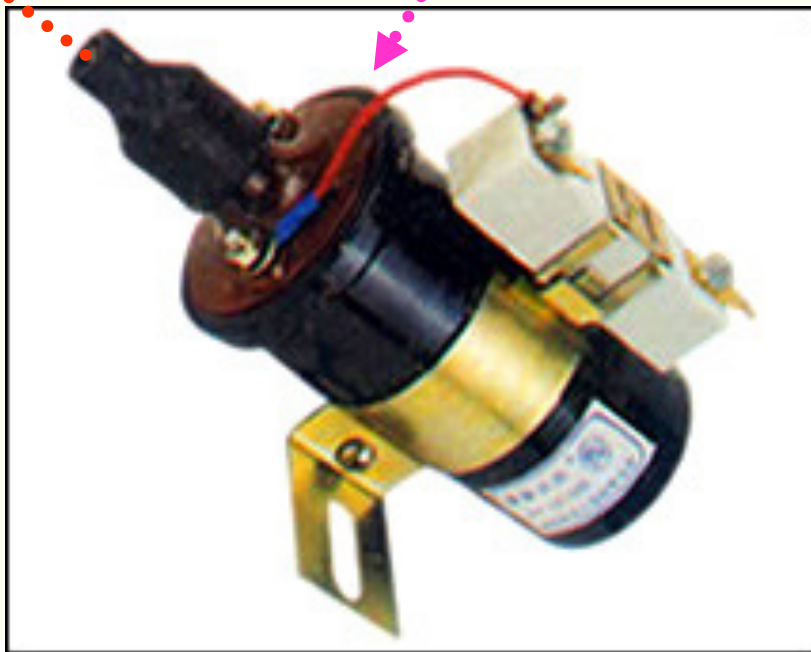


霍尔点火器

汽车点火线圈

高压输出接头

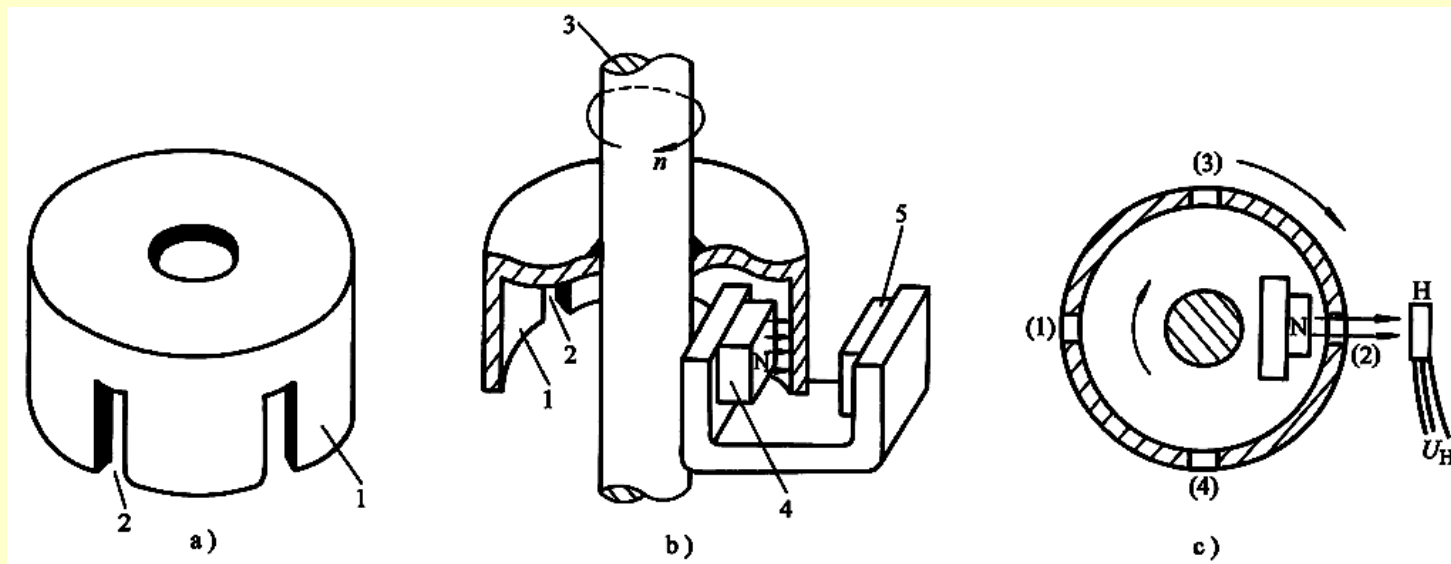
12V低压电源输入接头



采用霍尔式无触点电子
点火装置能较好地克服
汽车合金触点点火时间
不准确、触点易烧坏、
高速时动力不足等缺点

霍尔式无触点汽车电子点火装置工作原理

采用霍尔式无触点电子点火装置无磨损、点火时间准确、高速时动力足。



桑塔纳汽车霍尔式分电器示意图

- a) 带缺口的触发器叶片
- b) 触发器叶片与永久磁铁及霍尔集成电路之间的安装关系
- c) 叶片位置与点火正时的关系

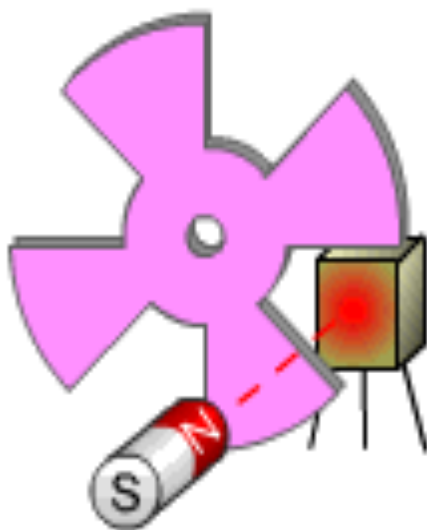
1-触发器叶片 2-槽口 3-分电器转轴 4-永久磁铁
5-霍尔集成电路 (PNP型霍尔IC)

转速传感器

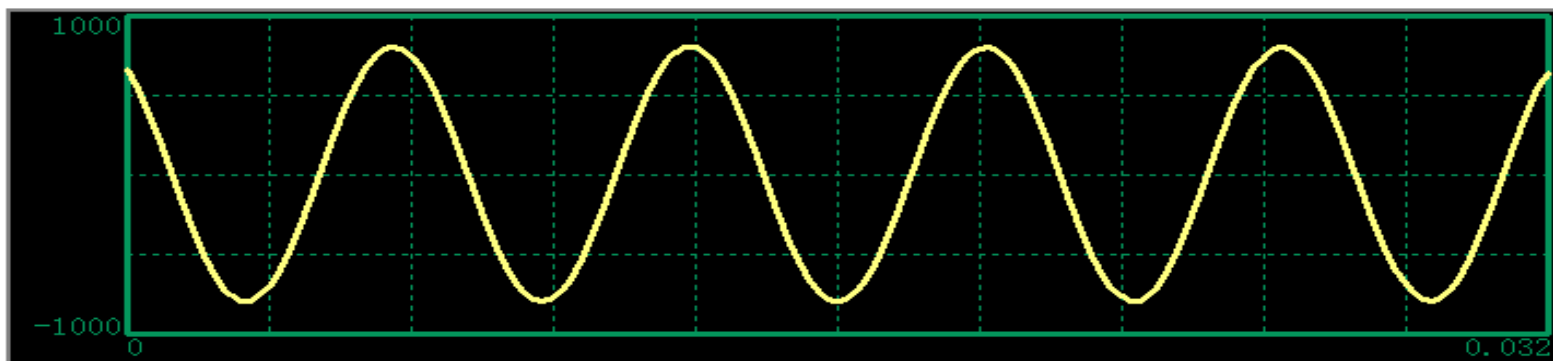
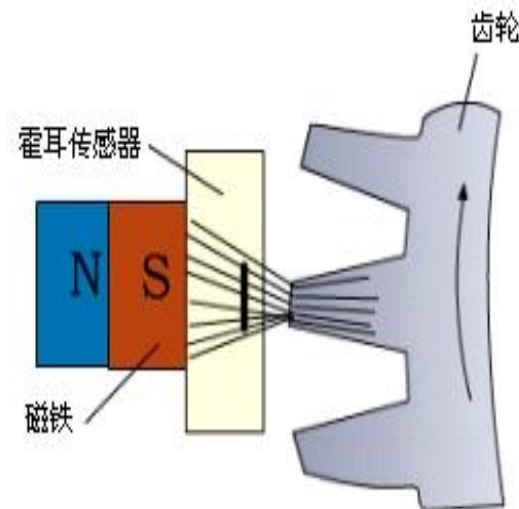
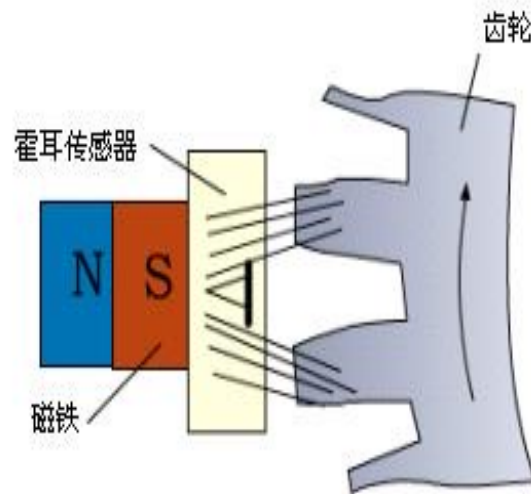
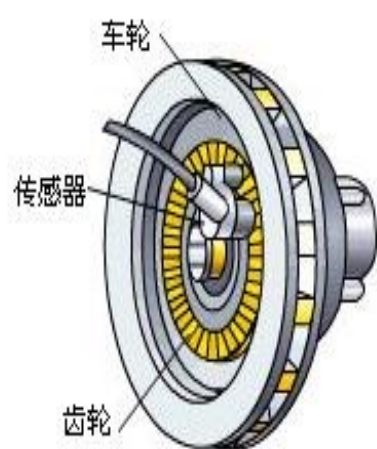


机械工业出版社

<http://www.cmpbook.com>



转速传感器



霍尔转速表

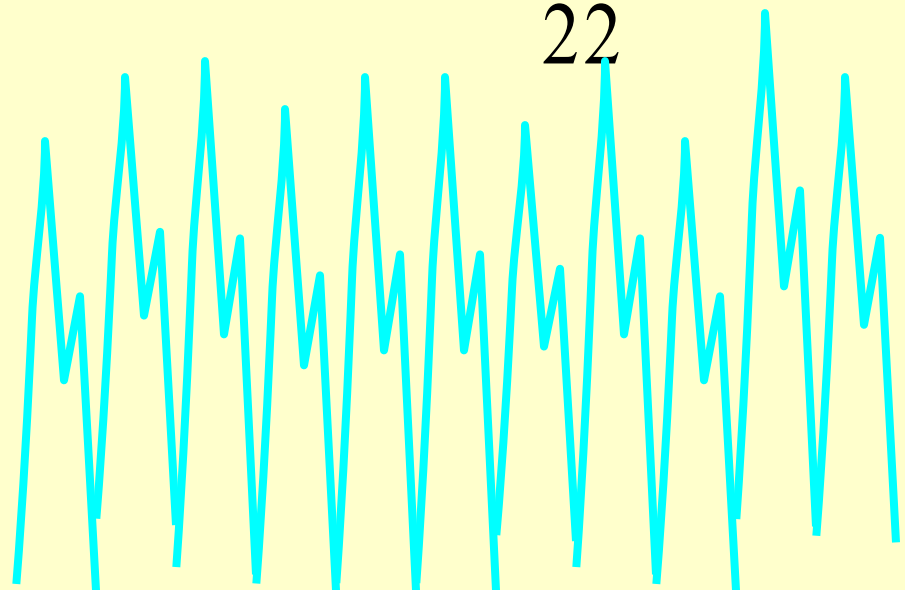


线性霍尔

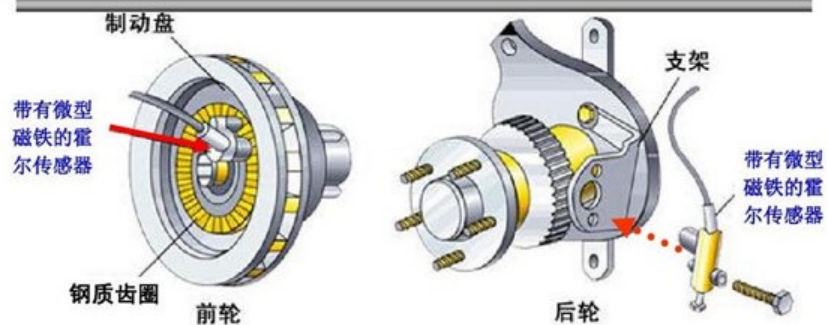


磁铁

$$n = 60 \frac{f}{22}$$



霍尔转速传感器在汽车防抱死装置（ABS）中的应用

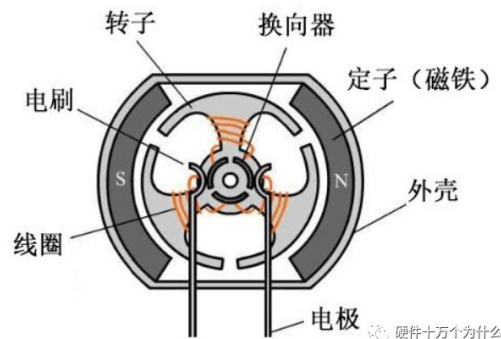
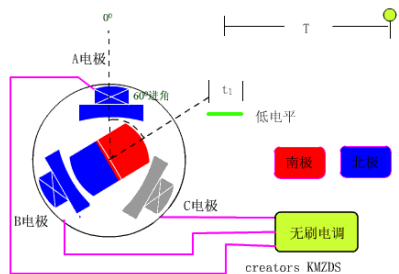
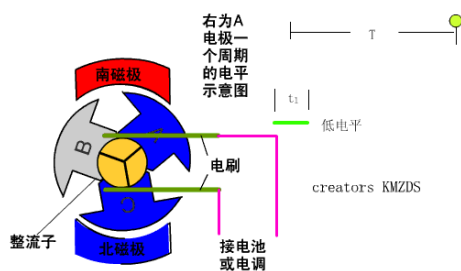


若汽车在刹车时车轮被抱死，将产生危险。用霍尔转速传感器来检测车轮的转动状态有助于控制刹车力的大小。



无刷电动机

霍尔式无刷电动机取消了换向器和电刷，而采用霍尔元件来检测转子和定子之间的相对位置，其输出信号经放大、整形后触发电子线路，从而控制电枢电流的换向，维持电动机的正常运转。由于无刷电动机不产生电火花及电刷磨损等问题，所以它在录像机、CD唱机、光驱等家用电器中得到越来越广泛的应用。





电动自行车

光驱用的无刷电动机内部结构



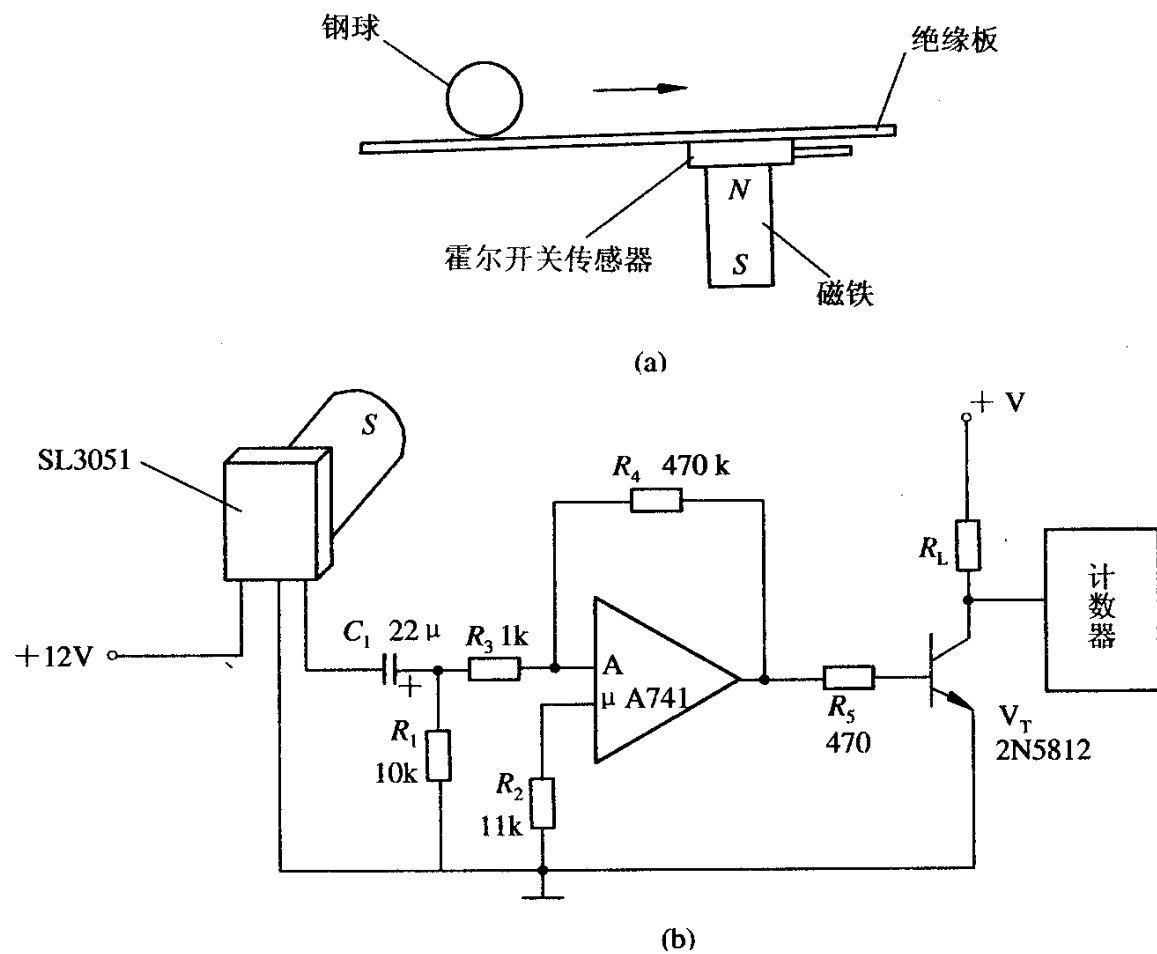
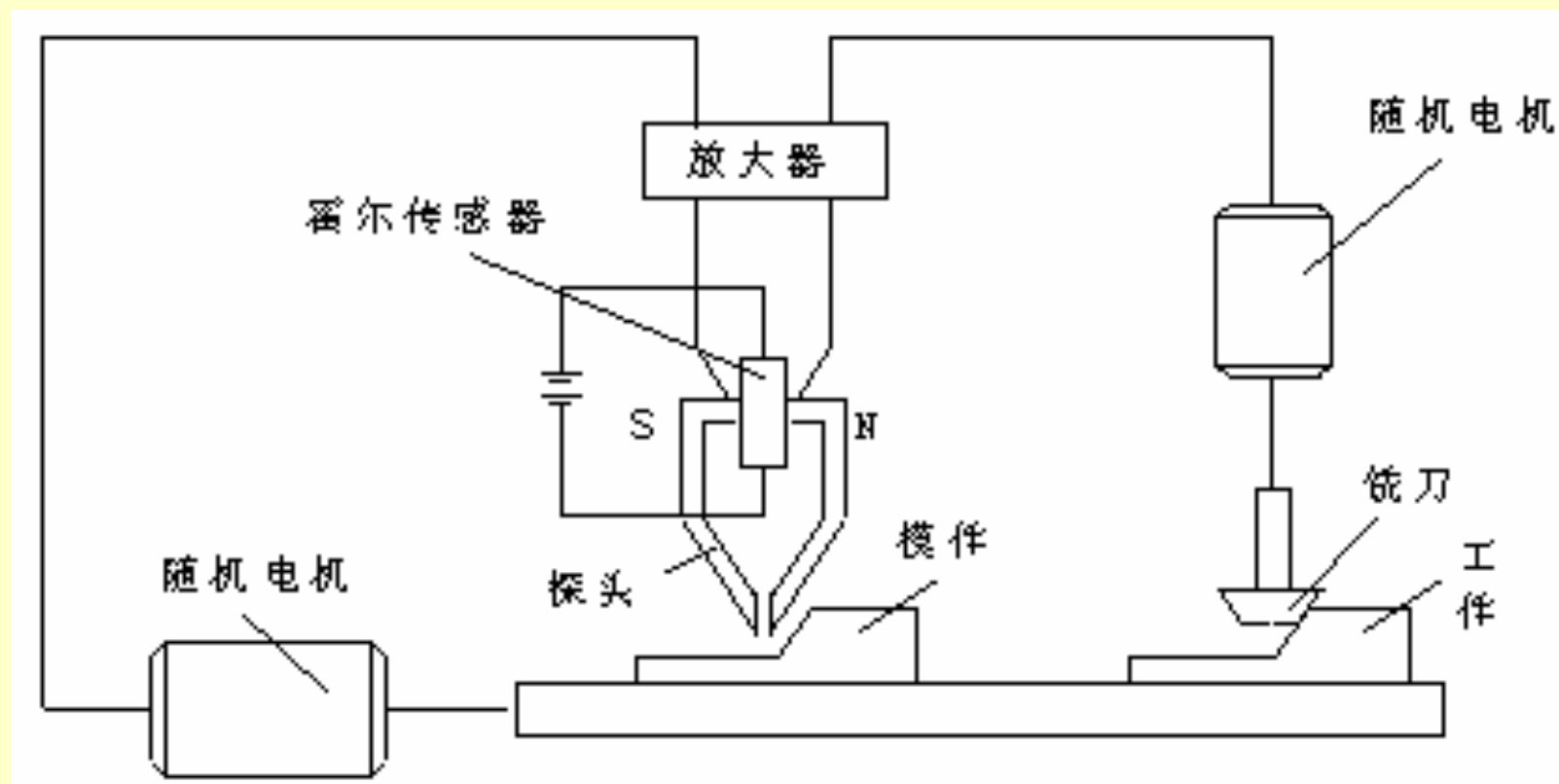
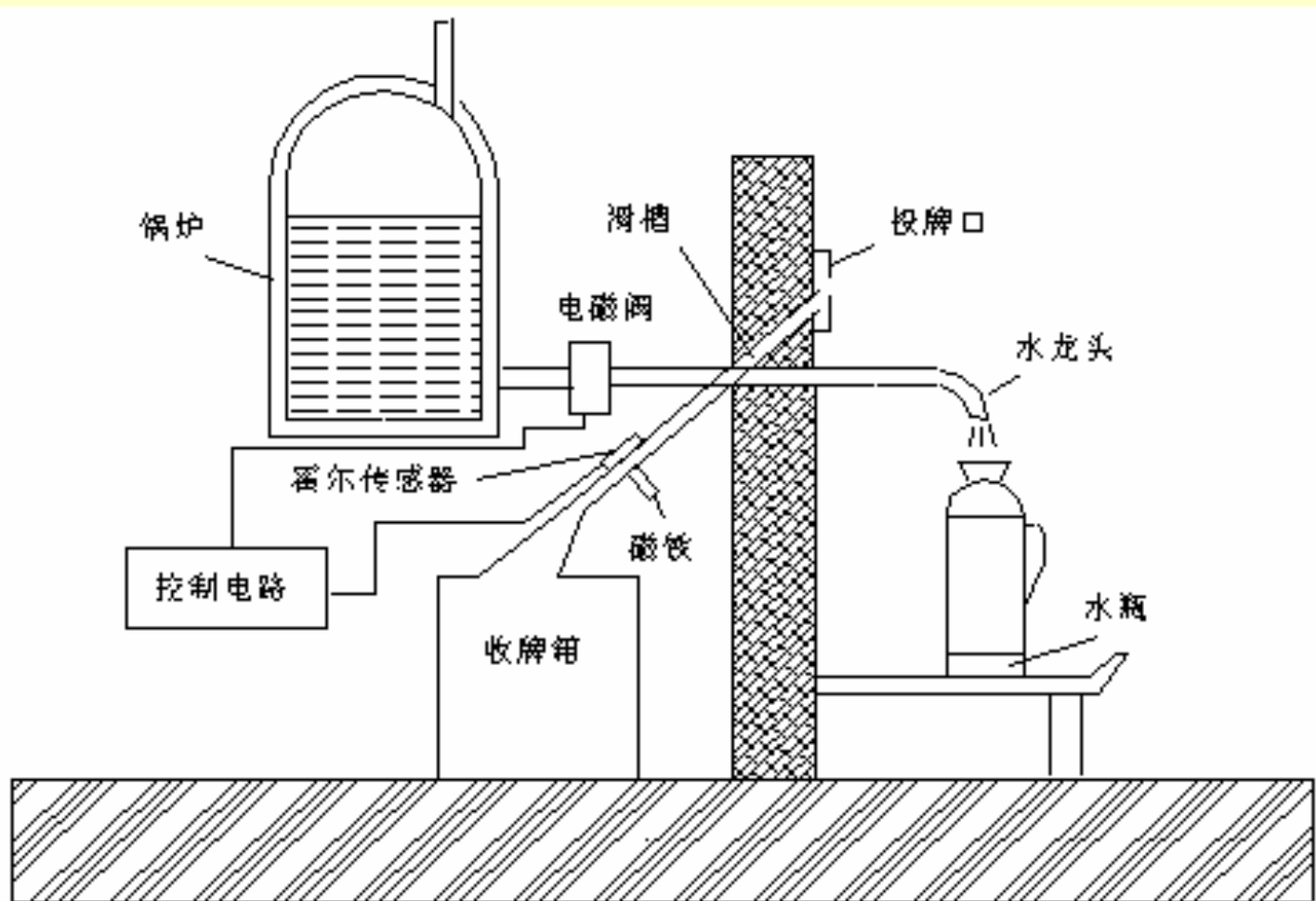


图 7 - 14 霍尔计数装置的工作示意图及电路图

钢球计数器

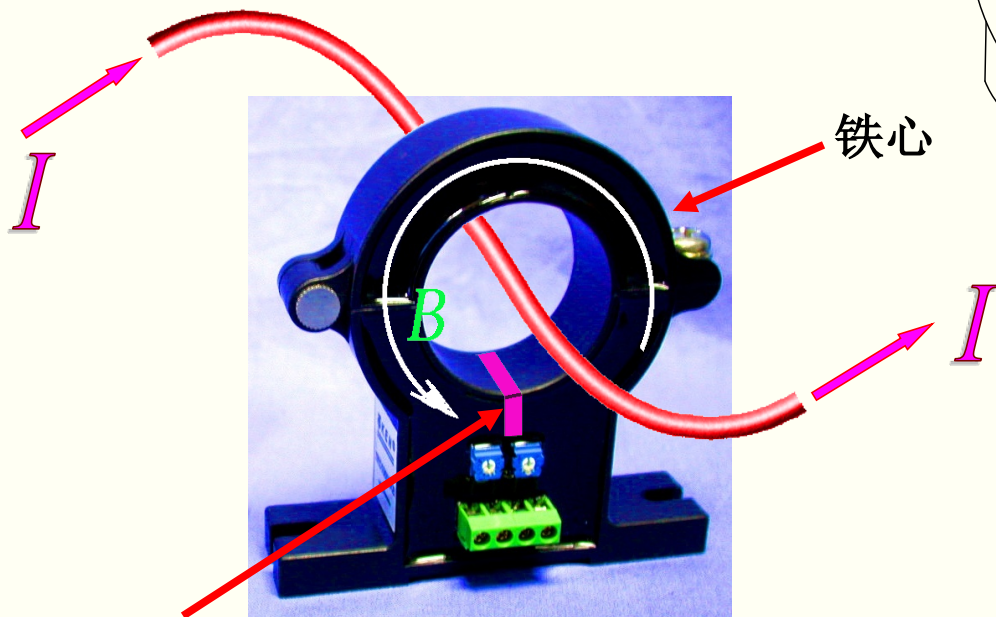


无接触式仿型加工原理示意图



自动供水装置

电流传感器



线性霍尔IC

$$E_H = K_H IB$$

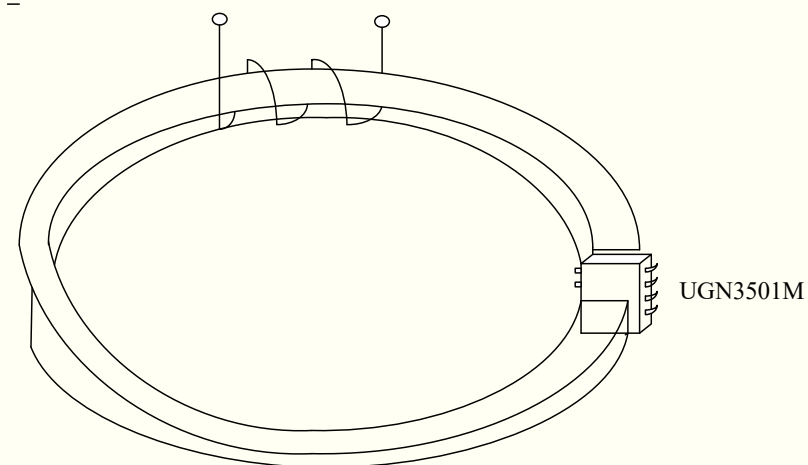
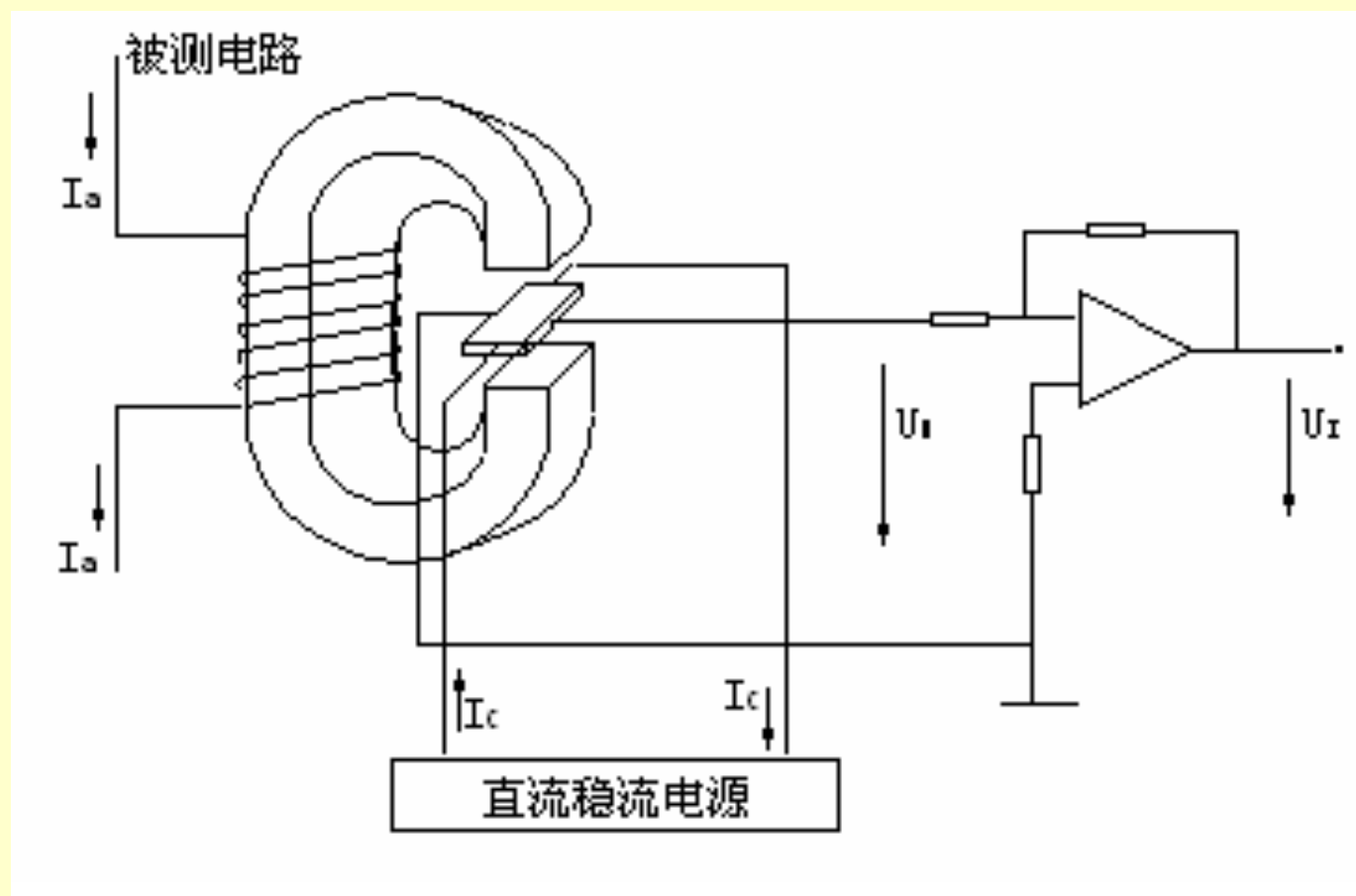


图7—12 电流测量原理



霍尔传感器电流变换器

思考题

1. 简述霍尔元件测量电流、磁感应强度、微位移的原理？
2. 如何用集成开关式霍尔器件实现电机转向和转速的测量？
3. 恒磁阻式检测元件和变磁阻式检测元件的测量原理有何不同

作业

- 1、恒磁阻式检测元件和变磁阻式检测元件的测量原理有何不同？