

传感器技术

主讲人： 吴琼水

武汉大学电子信息学院

第9章

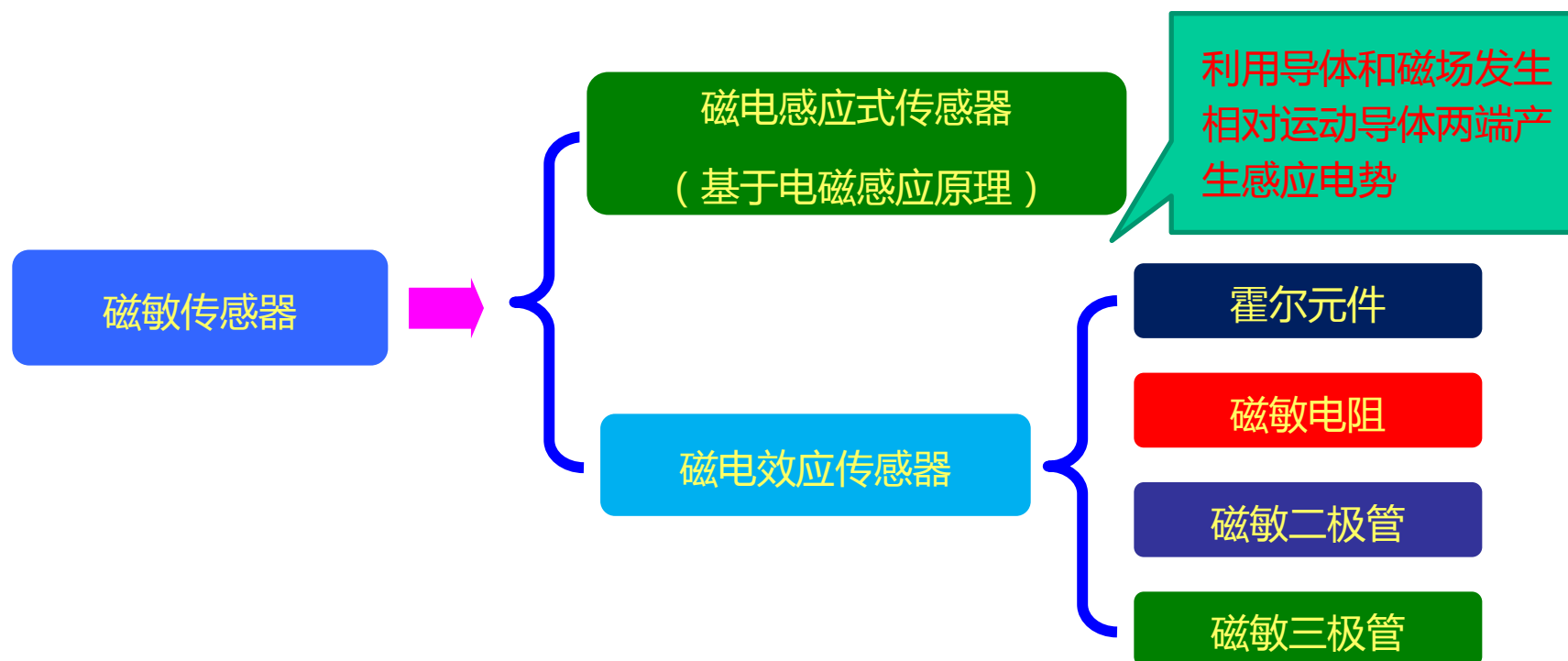
磁敏传感器

磁现象和电现象不同，它的特点之一是磁荷(Magnetic Charge)不能单独存在，必须是N、S成对存在(电荷则不然，正电荷和负电荷可以单独存在)。磁感应强度、电场强度、力三者的关系可由公式表示为

$$F=e(E+v\times B)=eE+evB$$

该式表示运动电荷 e 在电场 E 受到的力和磁场(磁感应强度 B)存在时电流 ev (v 为电荷速度)所受到的力，其中第二项称为洛伦兹力(**洛伦兹力是磁场对运动电荷的作用力**，它由荷兰物理学家H·A·洛伦兹首先提出)。

- ◆ 磁敏式传感器将磁场参量（磁感应强度、磁通）敏感，通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换为电信号的器件或装置。
- ◆ 磁敏式传感器是利用半导体材料中的自由电子或空穴随磁场改变其运动方向这一特性而制成。



按其结构可分为**体型和结型**两大类。

体型的有霍尔传感器，其主要材料InSb(锑化铟)、InAs（砷化铟）、Ge（锗）、Si、GaAs等和磁敏电阻InSb、InAs。

结型的有磁敏二极管(Ge、Si)，磁敏三极管(Si)。

磁敏器件是利用磁场工作的，因此可以通过非接触方式检验。非接触方式可以保证寿命长、可靠性高。

- 可用于测量磁场，特别是对弱磁场的测量、电流测量、位移等机械量的检测等。
- 在电流检测中，作为电流传感器、变送器的检测器件；
- 转动角度的测量，广泛应用于汽车制造业；
- 微弱磁场的检测，主要用于伪钞识别；
- 流量计领域用于电子水表、电子煤气表、流量计等。



霍尔式传感器

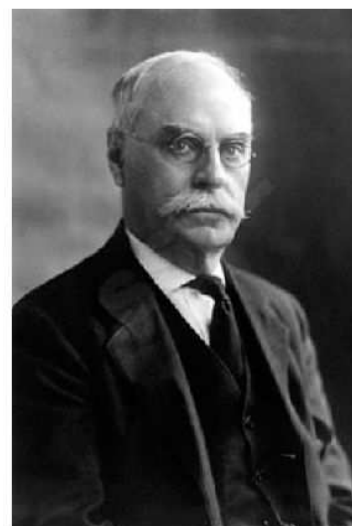


磁敏二极管和磁敏三极管

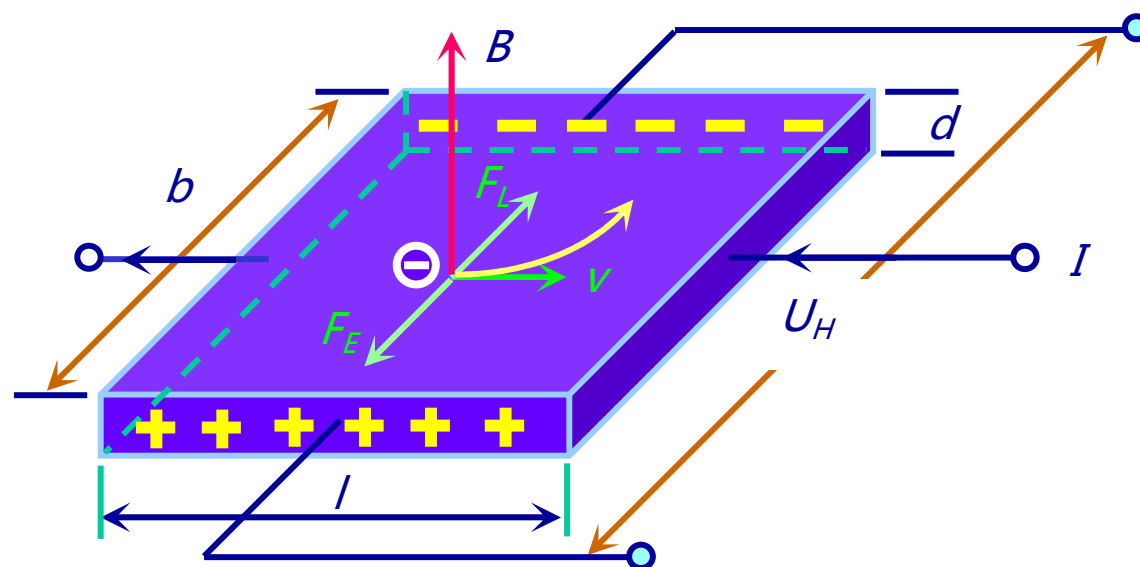
霍尔传感器为载流半导体在磁场中有电磁效应（霍尔效应）而输出电动势的一种传感器。

- 随着半导体技术的发展，开始用半导体材料制成霍尔元件，由于它的霍尔效应显著而得到应用和发展。
- 霍尔传感器广泛用于电磁测量电流、磁场、压力、加速度、振动等方面的测量。

霍尔效应是磁电效应的一种，这一现象是美国物理学家霍尔（A.H.Hall, 1855—1938）于1879年在研究金属的导电机构时发现的。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。



一、霍尔效应



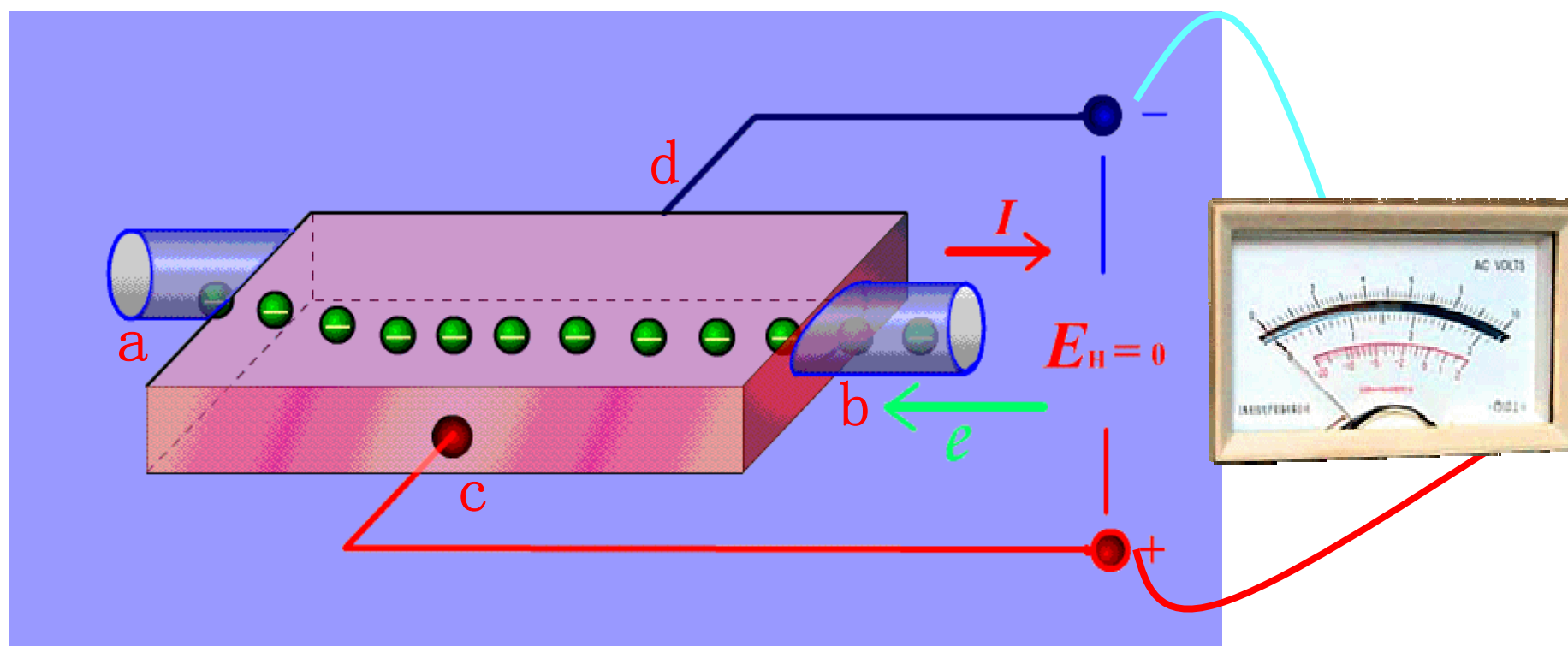
一个金属（导体）薄片或半导体薄片，当在它的两端通过控制电流 I 并且同时在薄片的垂直方向上加上磁感应强度为 B 的磁场时，在垂直于电流和磁场的方向上就会产生电动势 U_H ，这种现象叫做霍尔效应。 U_H 就叫做霍尔电动势或霍尔电压。

霍尔效应的产生是运动电荷在磁场中受到洛伦兹力作用的结果。

一、霍尔效应

霍尔元件

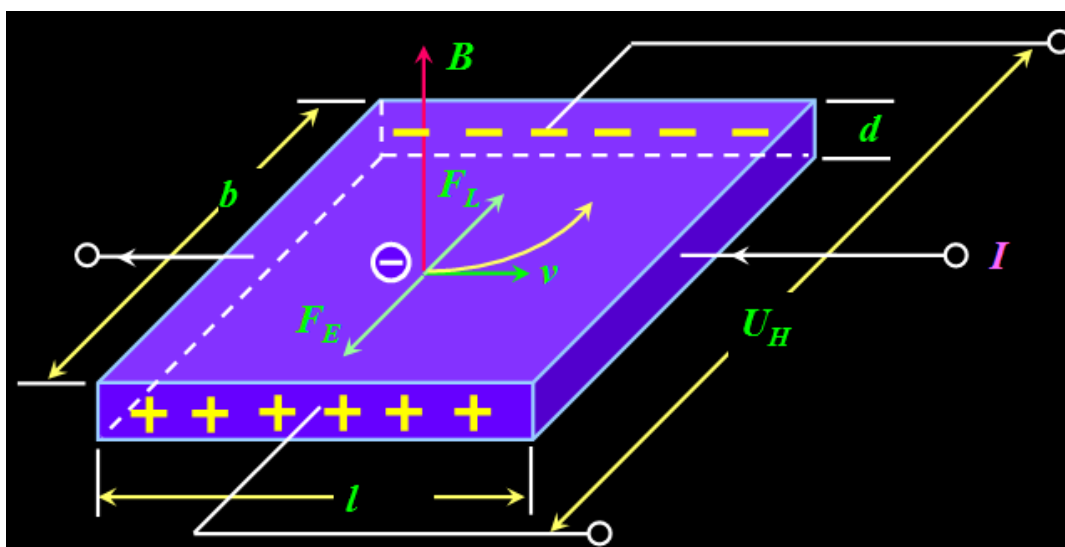
霍尔效应演示



当磁场垂直于薄片时，电子受到洛伦兹力的作用，向内侧偏移，在半导体薄片 c 、 d 方向的端面之间建立起霍尔电势。

一、霍尔效应

霍尔元件



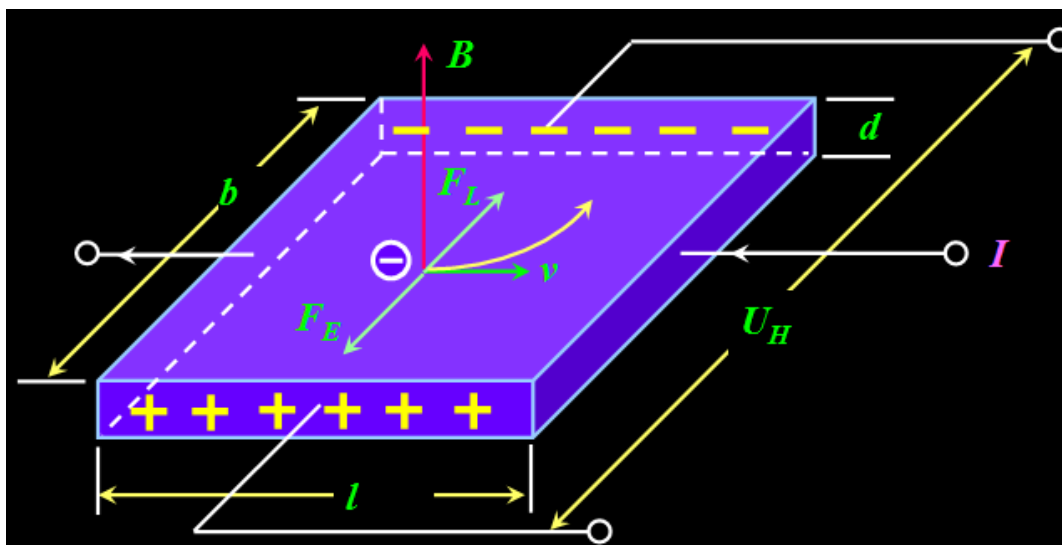
设霍尔元件为 N 型半导体

半导体中自由电子在磁场作用下产生定向运动，每个电子受洛伦兹力 F_L 的作用， F_L 的大小为： $F_L = qvB$

在 F_L 的作用下电子运动产生漂移，结果使金属导电板一面累积电子，而另一面累积正电荷，从而形成了附加内电场 E_H ，称霍尔电场。

一、霍尔效应

霍尔元件



设霍尔元件为 N
型半导体

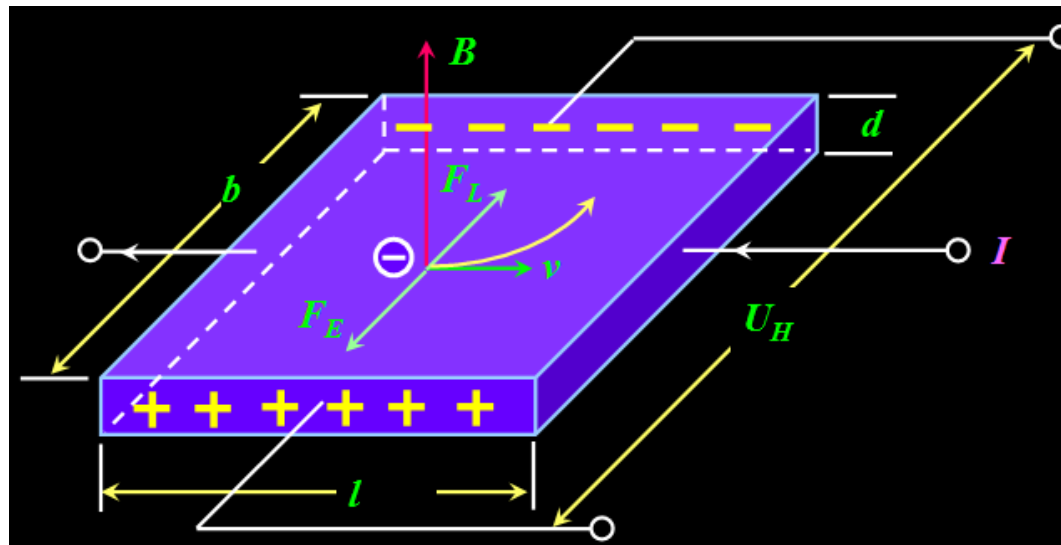
霍尔电场作用于电子的力为 $F_E = qE_H = QU_H/b$

当电场力与洛伦兹力相等时，达到动态平衡，这时 $qE_H = qvB$

霍尔电压 U_H 可表示为 $U_H = E_H b = vBb$

一、霍尔效应

霍尔元件



电流密度 $\mathbf{j} = -nq\mathbf{v}$, n 为单位体积内的电子数。

→ 单位时间 dt 内流过的电量为 $Q = jV = jbdvdt$

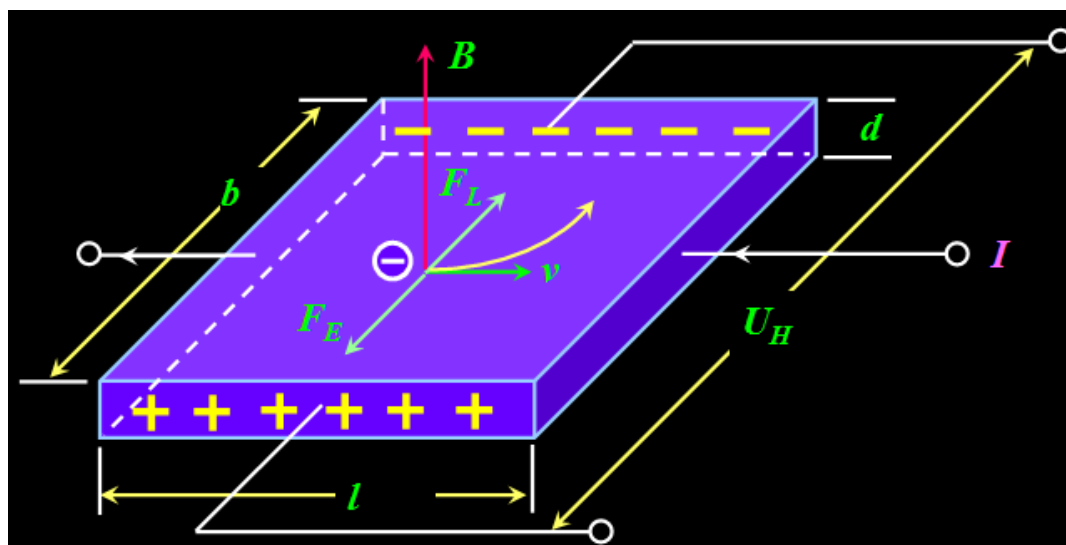


流过霍尔元件的电流为 $I = dQ / dt = -bdvnq$

→ $v = -I / nqbd$

一、霍尔效应

霍尔元件



$$U_H = vBb$$

$$v = -I / nqbd$$

↓ N型半导体

$$U_H = -BI / nqd$$

↓ P型半导体

$$U_H = BI / pqd$$

若取 $R_H = 1 / nq$ 则 $U_H = R_H \frac{IB}{d}$

R_H 被定义为霍尔元件的**霍尔系数**。显然，霍尔系数由**半导体材料的性质**决定，它反映材料霍尔效应的强弱。

材料的电阻率

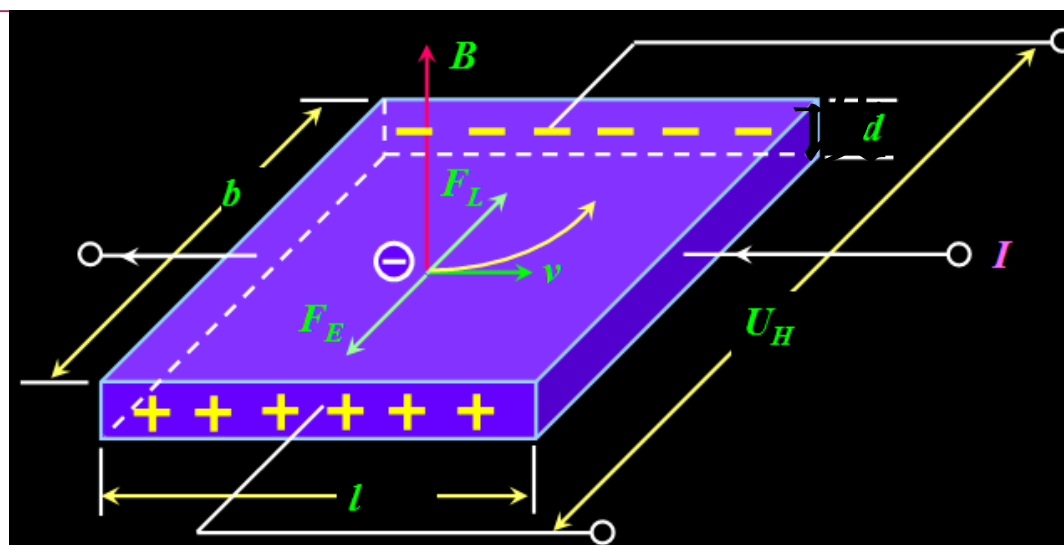
$$\rho = 1 / nq\mu$$



$$R_H = \rho \mu$$

一、霍尔效应

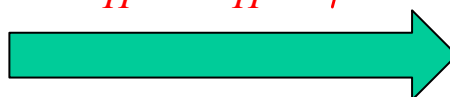
霍尔元件



若定义

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

$$U_H = R_H IB / d$$

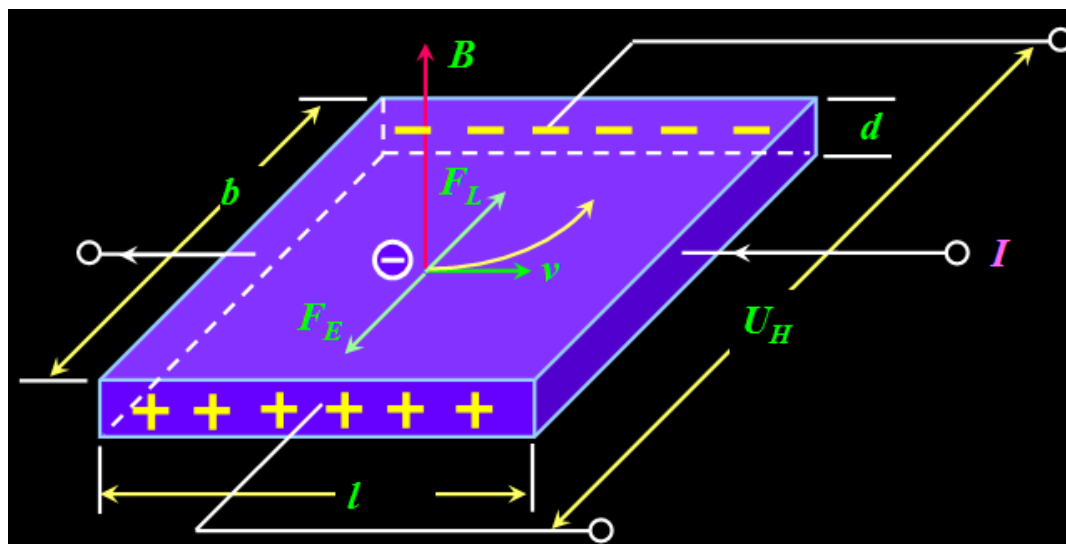


$$U_H = K_H IB$$

K_H 即为霍尔元件的灵敏度，它表示一个霍尔元件在单位控制电流和单位磁感应强度时产生的霍尔电压的大小，**与薄片尺寸有关。**

一、霍尔效应

霍尔元件



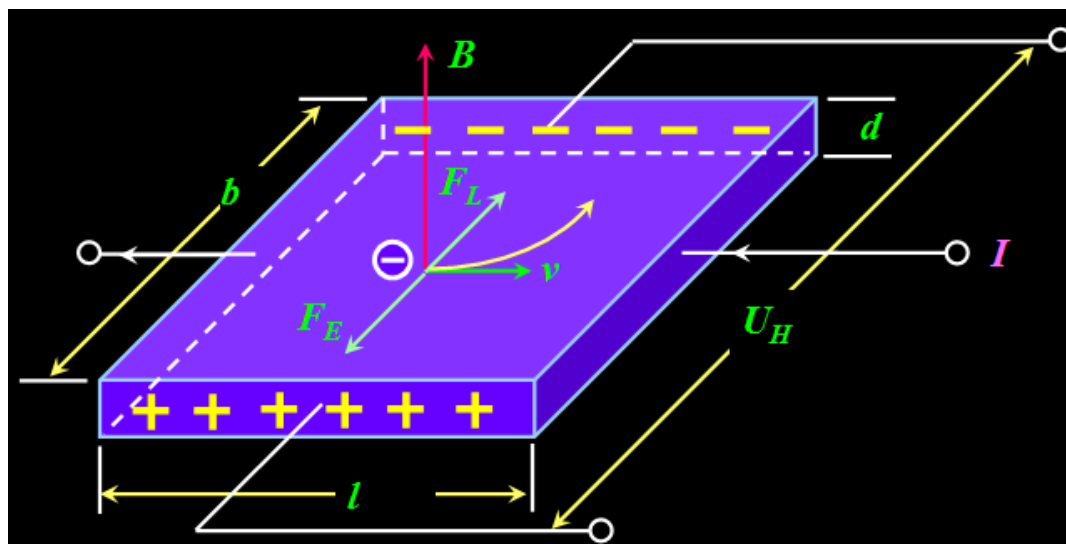
$$R_H = 1 / nq$$

$$K_H = \frac{1}{nqd}$$

灵敏度系数 K_H 与薄片的厚度 d 呈反比，因此为了提高灵敏度系数，霍尔元件通常都做成很薄的薄片。

一、霍尔效应

霍尔元件



材料的电阻 $R = \rho L / bd$

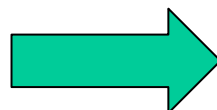
霍尔元件并不是越薄越好，太薄会导致输入输出电阻增加。

$$U_H = -BI / nqd$$

$$I = E / R$$

$$\rho = 1 / nq\mu$$

$$R = \rho L / bd$$



$$U_H = -b \mu EB / L$$

适当选择材料迁移率及霍尔元件的宽长比，可以改变霍尔电势值。

讨论： $R_H = 1 / nq$

任何材料在一定条件下都能产生霍尔电势，但不是都可以制造霍尔元件：

- **绝缘材料电阻率很大，电子迁移率很小，不适用；**
- **金属材料电子浓度很高， R_H 很小， U_H 很小。**
- **半导体电子迁移率一般大于空穴的迁移率，所以霍尔元件多采用N型半导体。**

讨论：

若磁感应强度 B 不垂直于霍尔元件，而是与其法线成某一角度 θ 时，实际上作用于霍尔元件上的有效磁感应强度是其法线方向（与薄片垂直的方向）的分量，即 $B\cos\theta$ ，这时的霍尔电势为

$$U_H = K_H I B \cos\theta$$

结论：霍尔电势与输入电流 I 、磁感应强度 B 成正比，
当控制电流的方向或磁场方向改变时，输出霍尔电势的方向也改变。

二、结构

霍尔元件



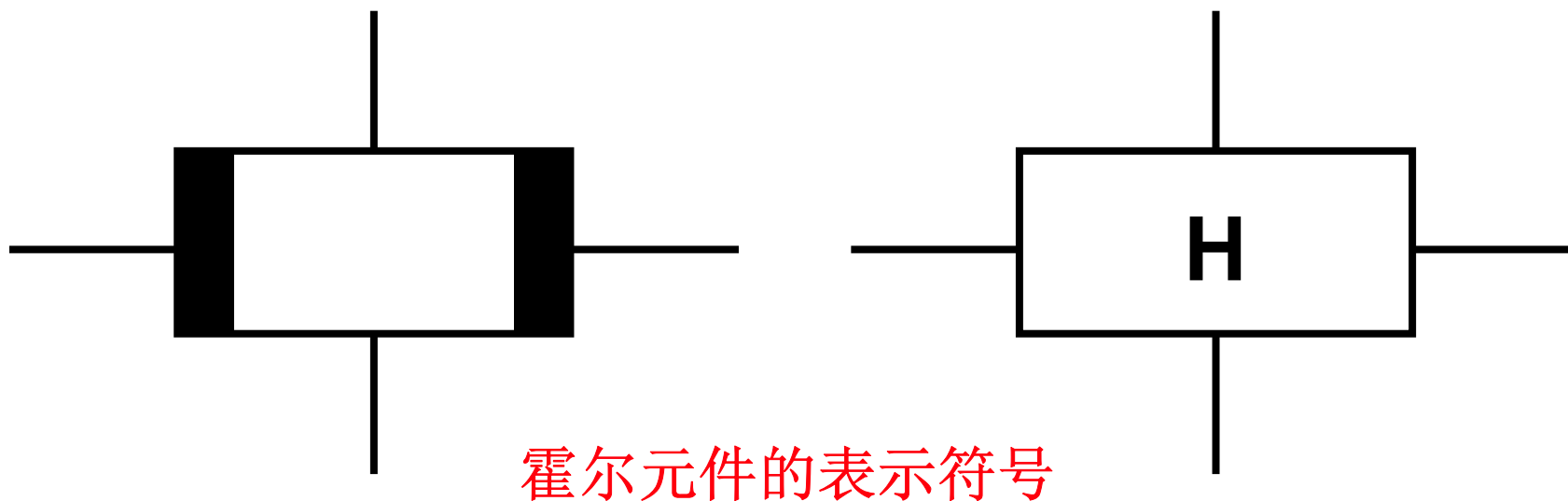
红色导线，为**控制电极**；绿色导线，为**霍尔电极**

二、结构

霍尔元件



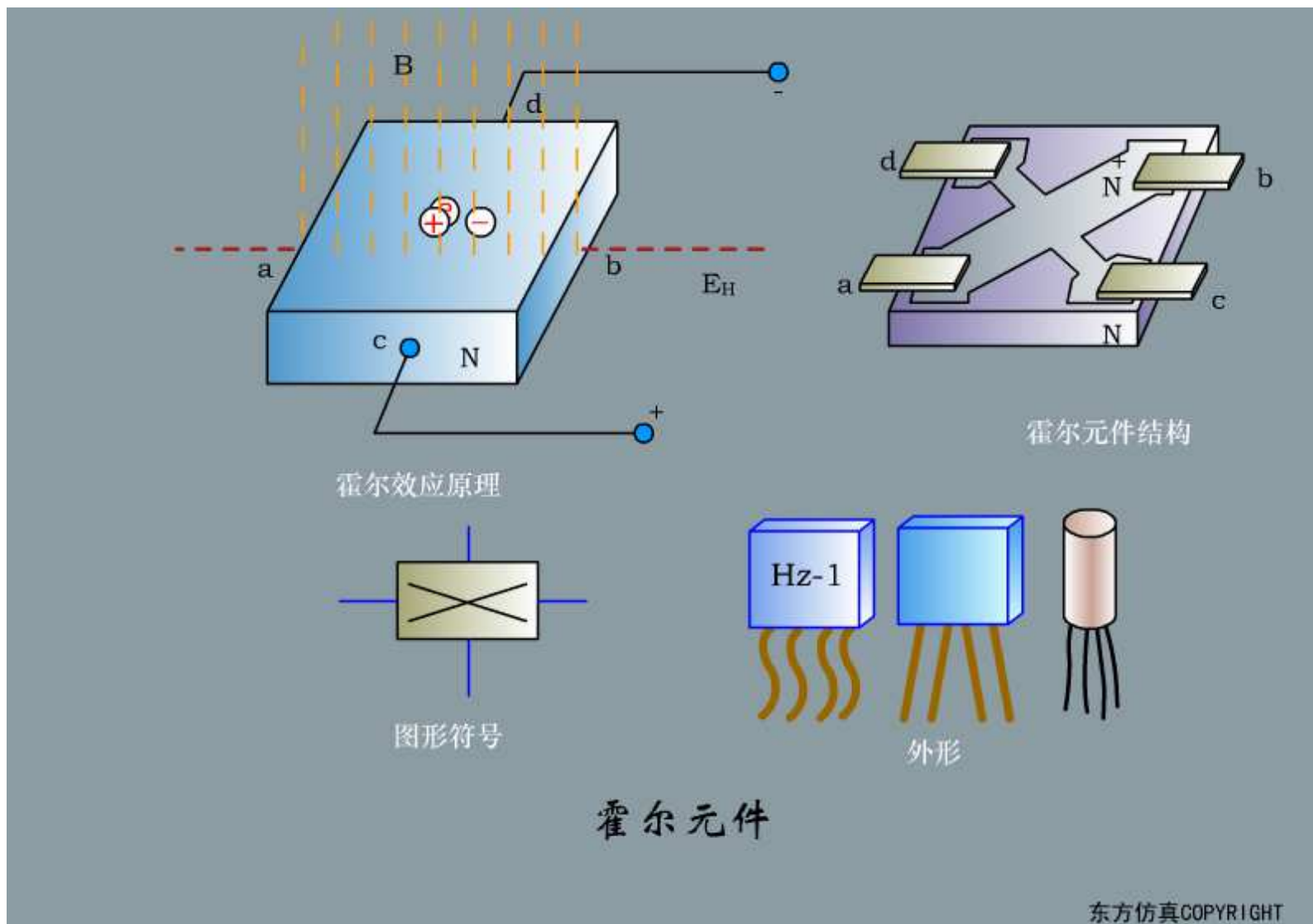
霍尔电势 U_H 的建立时间极短大约只有小于 10^{-12} 秒，因此当控制电流用交流时，频率可以达到数千MHz。



两个粗黑边或短边上的引线接控制电流；两个长边上的引线接输出霍尔电势。

二、结构

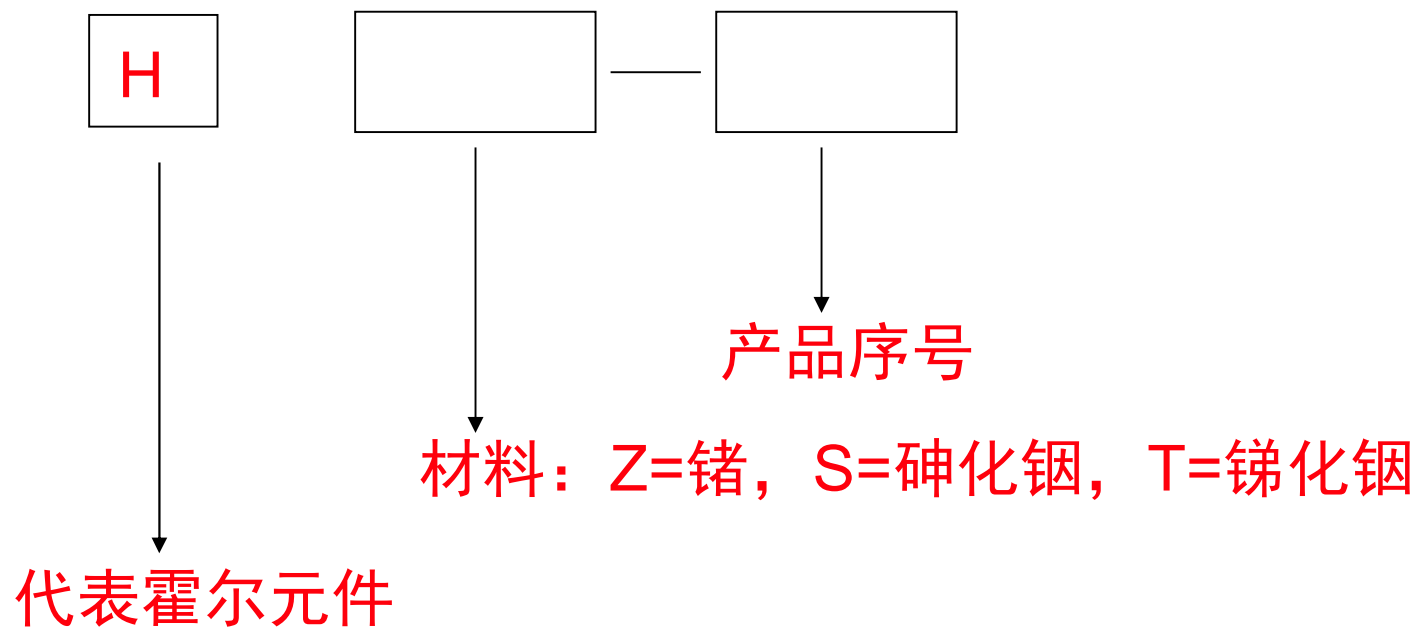
霍尔元件



二、结构

霍尔元件

霍尔元件的命名

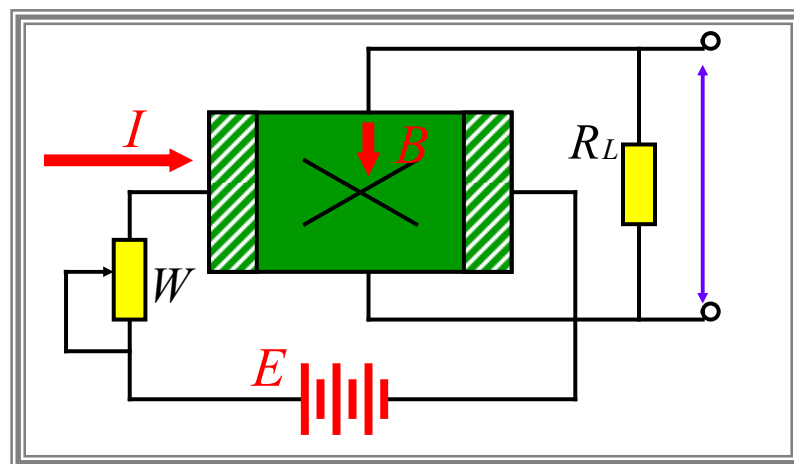


如: HZ-1, HZ-2等等。

二、结构

测量电路

基本测量电路

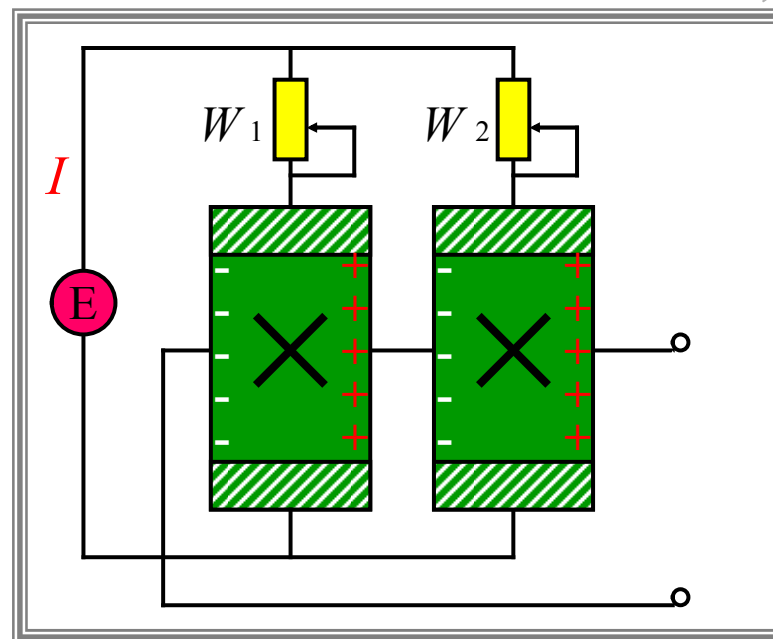
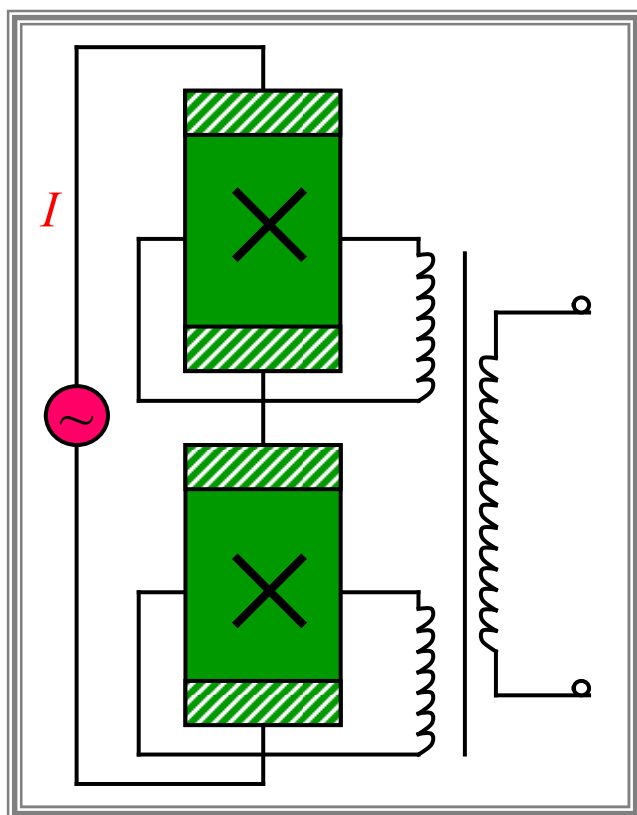


$$U_H = R_H \cdot \frac{IB}{d}$$
$$\propto IB \propto I \propto B$$

二、结构

直流供电方式

控制电流端并联
输出电势为：2倍



交流供电方式

控制电流端串联
次级绕组叠加输出

三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

1. 额定功耗 P_0

在环境温度 25°C 时，允许通过霍尔元件的电流和电压的乘积。分最小、典型、最大三档，单位为mW。当供给霍尔元件的电压确定后，根据额定功耗可以知道额定控制电流 I ，因此有些产品提供控制电流，则不给出额定功耗 P_0 。

2. 输入电阻 R_i

霍尔元件两控制电流端的直流电阻称为输入电阻 R_i 。它的数值从几十欧到几百欧，视不同型号的元件而定。温度升高，输入电阻变小，从而使输入控制电流 I 变大，最终引起霍尔电动势变大。为了减小这种影响，最好采用恒流源作为激励源。

三、霍尔元件的主要特性参数

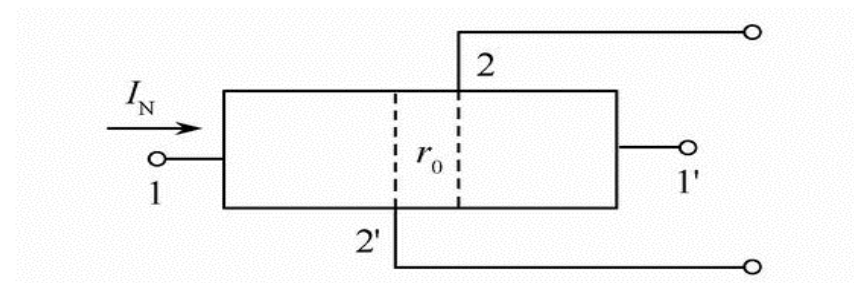
霍尔元件

3. 输出电阻 R_0

两个霍尔电势输出端之间的电阻称为输出电阻 R_0 ，它的数值与输入电阻为同一数量级。它也随温度改变而改变。选择适当的负载电阻 R_L 与之匹配，可以使由温度引起的霍尔电动势的漂移减至最小。

4. 不平衡电势 U_0

在额定控制电流下，当外加磁场为零时，霍尔元件输出端之间的开路电压称为不等位电动势 U_0 ，它是由霍尔电极2和2'之间的电阻决定的， r_0 称不等位电阻



三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

5. 霍尔温度系数 α

在一定的磁感应强度和控制电流下，温度变化1° C时，霍尔电势变化的百分率。

$$\alpha = \frac{(U_{Ht} - U_{Ho}) / U_{Ho}}{t} \longrightarrow U_{Ht} = U_{Ho} (1 + \alpha t)$$

6. 内阻温度系数 β

霍尔元件在无磁场及工作温度范围内，温度每变化1° C时，输入电阻与输出电阻变化的百分率。

$$\beta = \frac{(R_{it} - R_{io}) / R_{io}}{t} \longrightarrow R_{it} = R_{io} (1 + \beta t)$$

三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

7. 电磁特性

➤ U_H - I 特性

固定磁场 B ，在一定温度下，霍尔输出电势 U_H 与控制电流 I 之间呈线性关系。直线的斜率称为**控制电流灵敏度**，用 K_I 表示。

按照定义，控制电流灵敏度 K_I 为

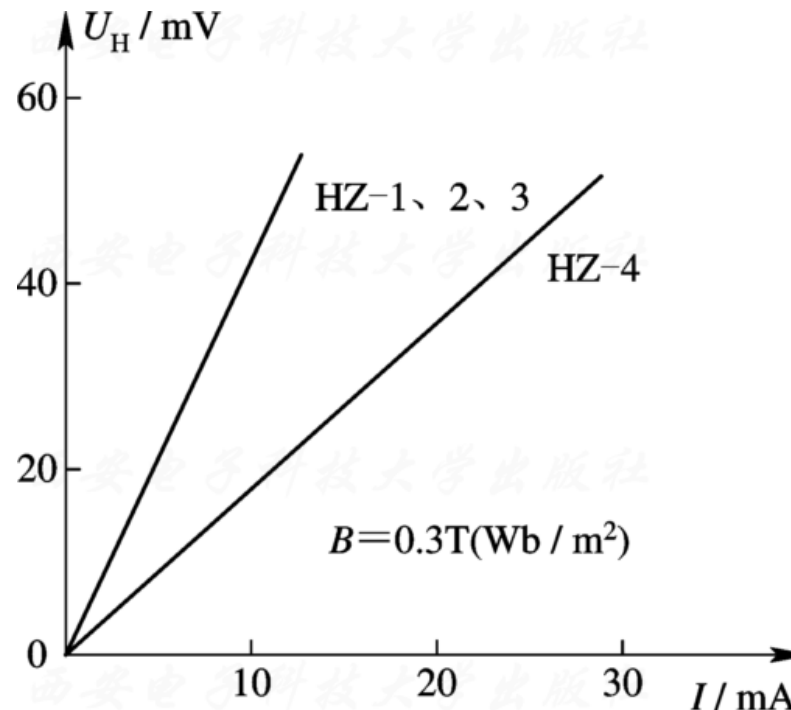
$$K_I = \left(\frac{U_H}{I} \right)_{B \text{ 恒定}}$$

由 $U_H = K_H IB$ ，可得到 **$K_I = K_H B$**

三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

➤ U_H - I 特性



霍尔元件的灵敏度 K_H 越大，控制电流灵敏度也就越大。但灵敏度大的元件，其霍尔电势输出并不一定大，这是由于霍尔电势值与控制电流成正比。

三、霍尔元件的主要特性参数

最大激励电流 I_M

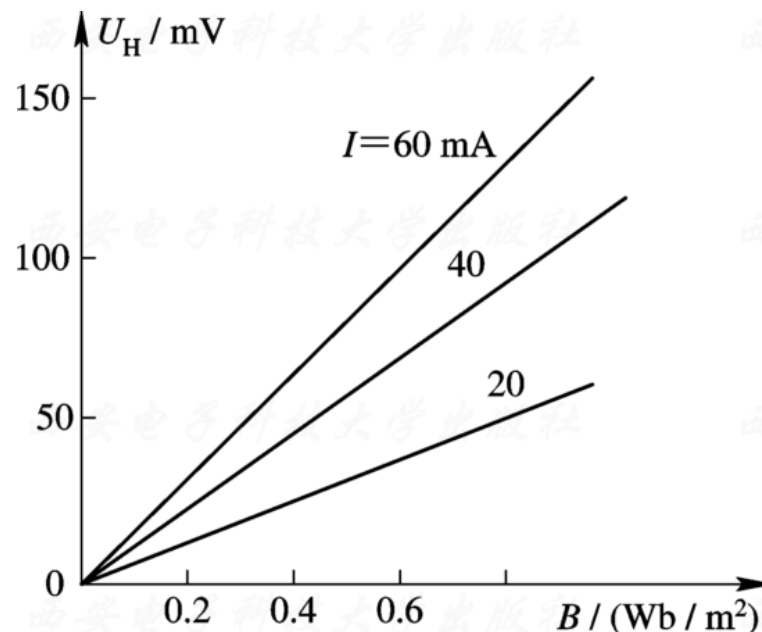
由于霍尔电势随激励电流增大而增大，故在应用中总希望选用较大的激励电流。但激励电流增大，霍尔元件的功耗增大，元件的温度升高，从而引起霍尔电势的温漂增大，因此每种型号的元件均规定了相应的最大激励电流，它的数值从几毫安至十几毫安。

三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

➤ U_H - B 特性

固定控制电流，元件的开路霍尔输出随磁场的增加并不完全呈线性关系，而是有所偏离。通常，霍尔元件工作在 $0.5 \text{ Wb} / \text{m}^2$ 以下时线性度较好，在使用中，若对线性度要求很高，则可采用HZ-4，它的线性偏离一般不大于0.2%。



三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

目前常用的霍尔元件材料有：**锗、硅、砷化镓、铟化镓**等半导体材料。其中N型锗容易加工制造，其霍尔系数、温度性能和线性度都较好。N型硅的线性度最好，其霍尔系数、温度性能同N型锗相近。铟化镓对温度最敏感，尤其在低温范围内温度系数大，但在室温时其霍尔系数较大。砷化镓的霍尔系数较小，温度系数也较小，输出特性线性度好。

三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

参数名称	符号	单位	HZ-1 型	HZ-2 型	HZ-3 型	HZ-4 型	HT-1 型	HT-2 型	HS-1 型
			材 料(N 型)						
			Ge(111)	Ge(111)	Ge(111)	Ge(100)	InSb	InSb	InAs
电阻率	ρ	$\Omega \cdot \text{cm}$	0.8~1.2	0.8~1.2	0.8~1.2	0.4~0.5	0.003~0.01	0.003~0.05	0.01
几何尺寸	$L \times b \times d$	mm	$8 \times 4 \times 0.2$	$8 \times 4 \times 0.2$	$4 \times 2 \times 0.2$	$8 \times 4 \times 0.2$	$6 \times 3 \times 0.2$	$8 \times 4 \times 0.2$	$8 \times 4 \times 0.2$
输入电阻	R_{sr}	Ω	$110 \pm 20\%$	$110 \pm 20\%$	$110 \pm 20\%$	$45 \pm 20\%$	$0.8 \pm 20\%$	$0.8 \pm 20\%$	$1.2 \pm 20\%$
输出电阻	R_{sc}	Ω	$100 \pm 20\%$	$100 \pm 20\%$	$100 \pm 20\%$	$40 \pm 20\%$	$0.5 \pm 20\%$	$0.5 \pm 20\%$	$1 \pm 20\%$
灵敏度	K_{H}	$\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$	>12	>12	>12	>4	$1.8 \pm 20\%$	$1.8 \pm 20\%$	$1 \pm 20\%$
不等位电阻	r_0	Ω	<0.07	<0.05	<0.07	<0.02	<0.005	<0.005	<0.003
寄生直流电势	v_{g}	μV	<150	<200	<150	<100			
额定控制电流	I_{c}	mA	20	15	25	50	250	300	200
霍尔电势温度系数	α	$1/^{\circ}\text{C}$	0.04%	0.04%	0.04%	0.03%	-1.5%	-1.5%	
内阻温度系数	β	$1/^{\circ}\text{C}$	0.5%	0.5%	0.5%	0.3%	-0.5%	-0.5%	
热阻	R_{Q}	$^{\circ}\text{C}/\text{mW}$	0.4	0.25	0.2	0.1			
工作温度	T	$^{\circ}\text{C}$	-40~45	-40~45	-40~45	-40~75	0~40	0~40	-40~60

三、霍尔元件的主要特性参数

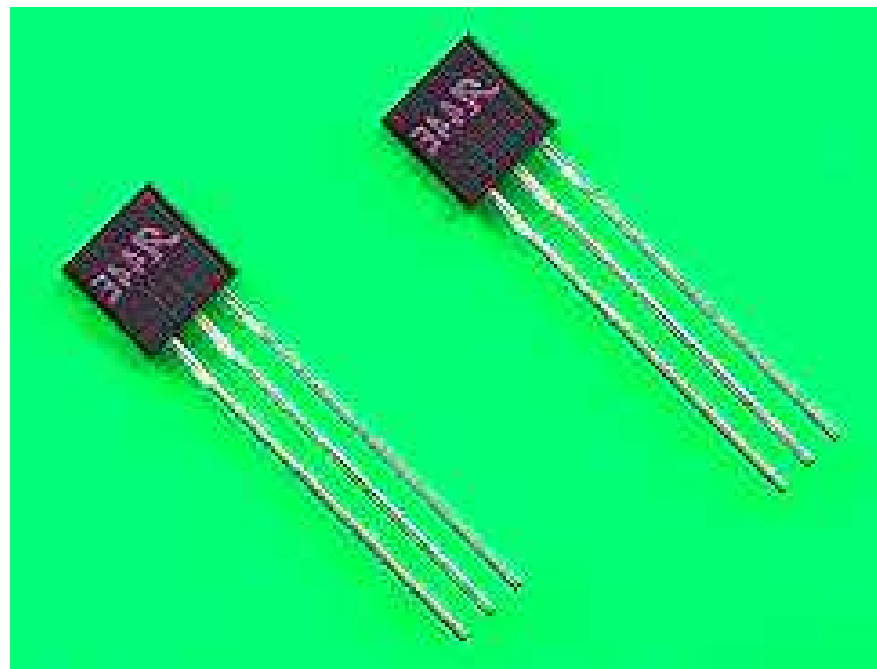
霍尔元件

霍尔集成电路

霍尔集成电路可分为**线性型**和**开关型**两大类。

线性型集成电路是将霍尔元件和恒流源、线性差动放大器等做在一个芯片上，输出电压为伏级，比直接使用霍尔元件方便得多。较典型的线性型霍尔器件如**UGN3501**等。

线性型三端
霍尔集成电路

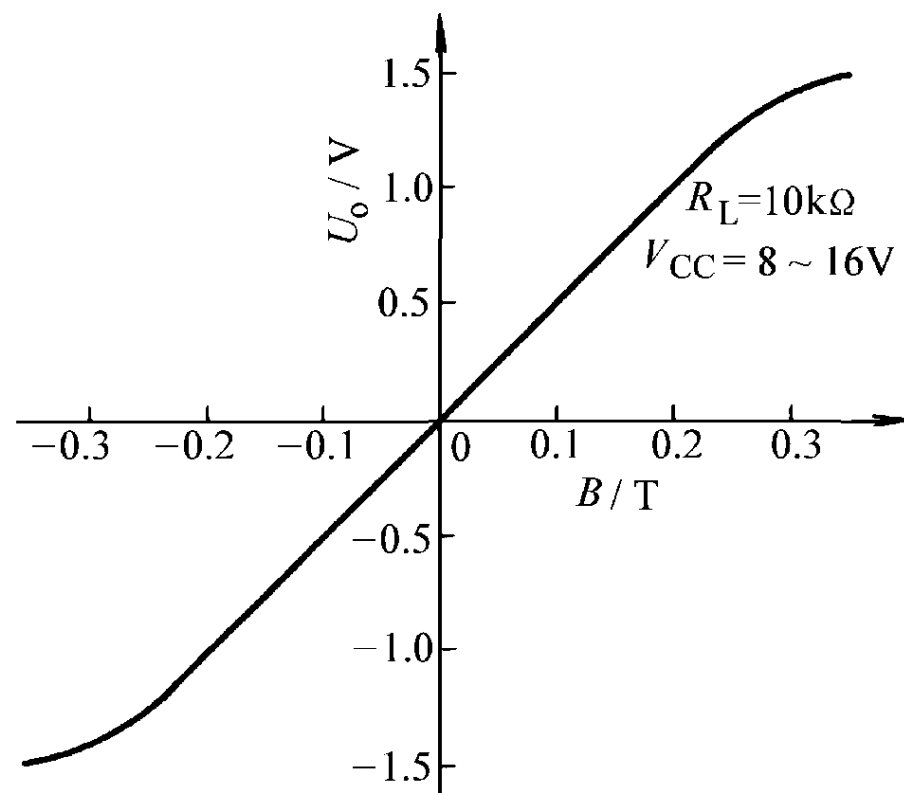


三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

线性型霍尔特性

右图示出了具有双端差动输出特性的线性霍尔器件的输出特性曲线。当磁场为零时，它的输出电压等于零；当感受的磁场为正向（磁钢的S极对准霍尔器件的正面）时，输出为正；磁场反向时，输出为负。



三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

开关型霍尔集成电路

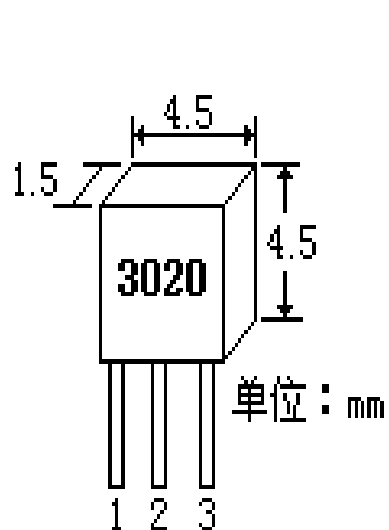
开关型霍尔集成电路是将霍尔元件、稳压电路、放大器、施密特触发器、**OC**门（集电极开路输出门）等电路做在同一个芯片上。当外加磁场强度超过规定的工作点时，**OC**门由高阻态变为导通状态，输出变为低电平；当外加磁场强度低于释放点时，**OC**门重新变为高阻态，输出高电平。较典型的开关型霍尔器件如**UGN3020**等。

三、霍尔元件的主要特性参数

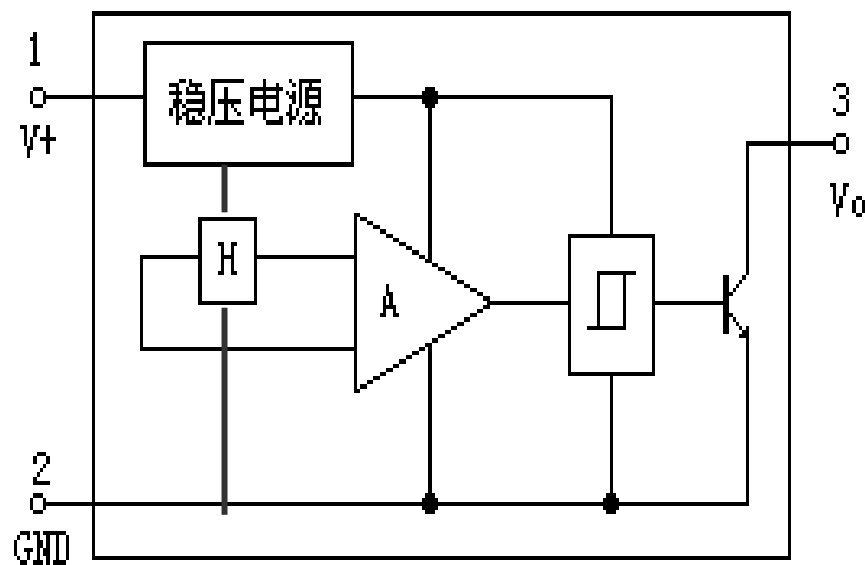
霍尔元件

开关型霍尔集成电路

开关型霍尔集成电路的 外形及内部电路



(a) 外形

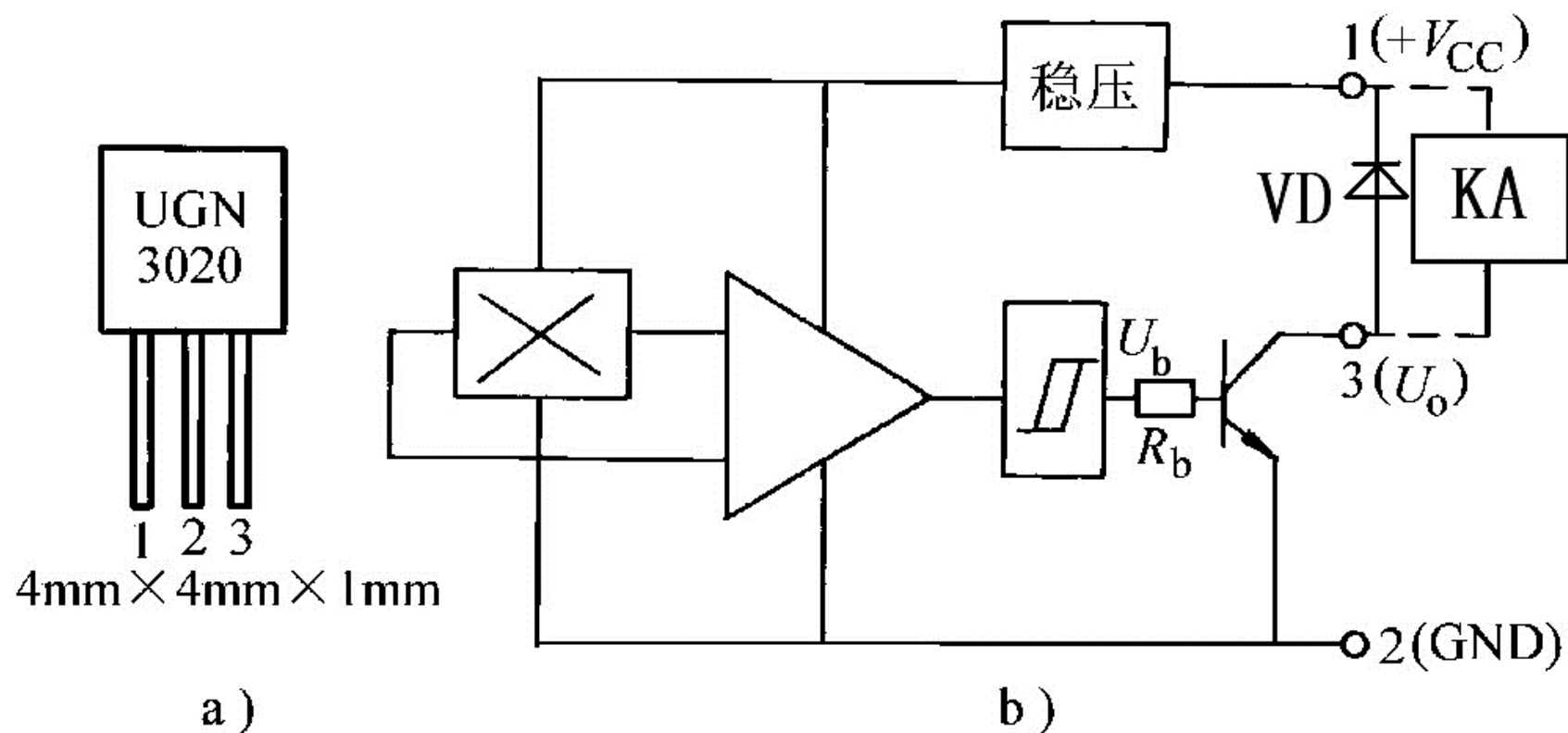


(b) 内部电路

三、霍尔元件的主要特性参数

霍尔元件

开关型霍尔集成电路



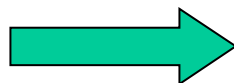
四、霍尔元件的测量误差和补偿

霍尔元件

1. 元件几何尺寸及电极焊点的大小对性能影响

当霍尔元件的宽度 b 加大，或 L/b 减小时，载流子在偏转过程中的损失将加大，使 U_H 下降。

$$U_H = K_H IB$$



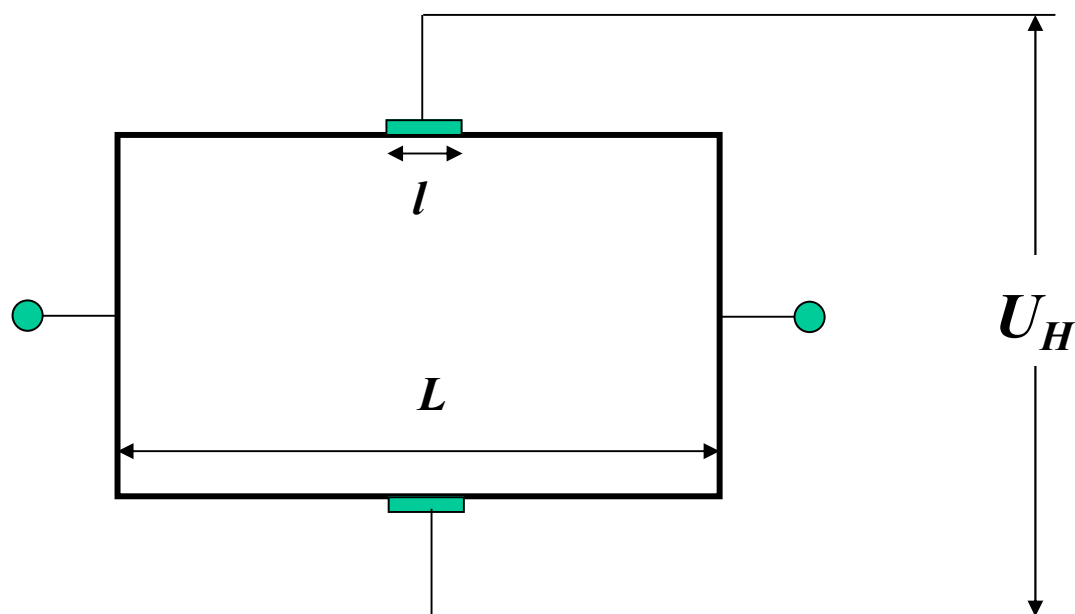
$$U_H = K_H IB f\left(\frac{L}{b}\right)$$

形状效应系数

L/b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
f(L/b)	0.370	0.675	0.841	0.923	0.967	0.984	0.996

四、霍尔元件的测量误差和补偿

按理想元件的要求，霍尔元件控制电流的电极应与霍尔元件有良好的面接触，而霍尔电极与霍尔元件为点接触。实际上霍尔电极有一定的宽度 l ，它对元件的灵敏度和线性度有较大影响。研究表明，当 $l/L < 0.1$ 时，电极宽度的影响可忽略不计。

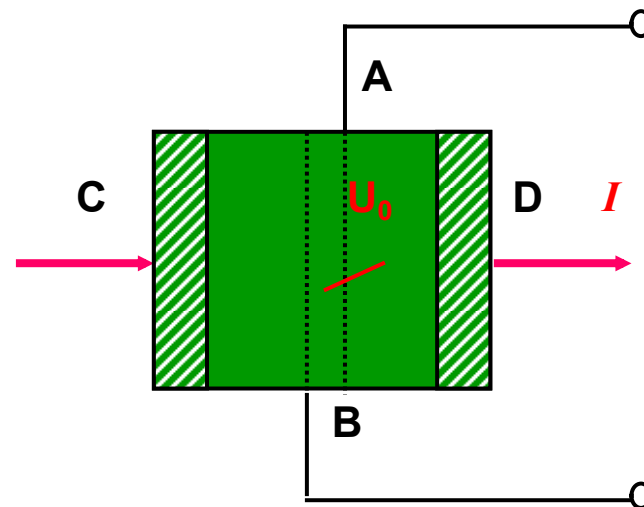


四、霍尔元件的测量误差和补偿

2. 零位误差及补偿方法

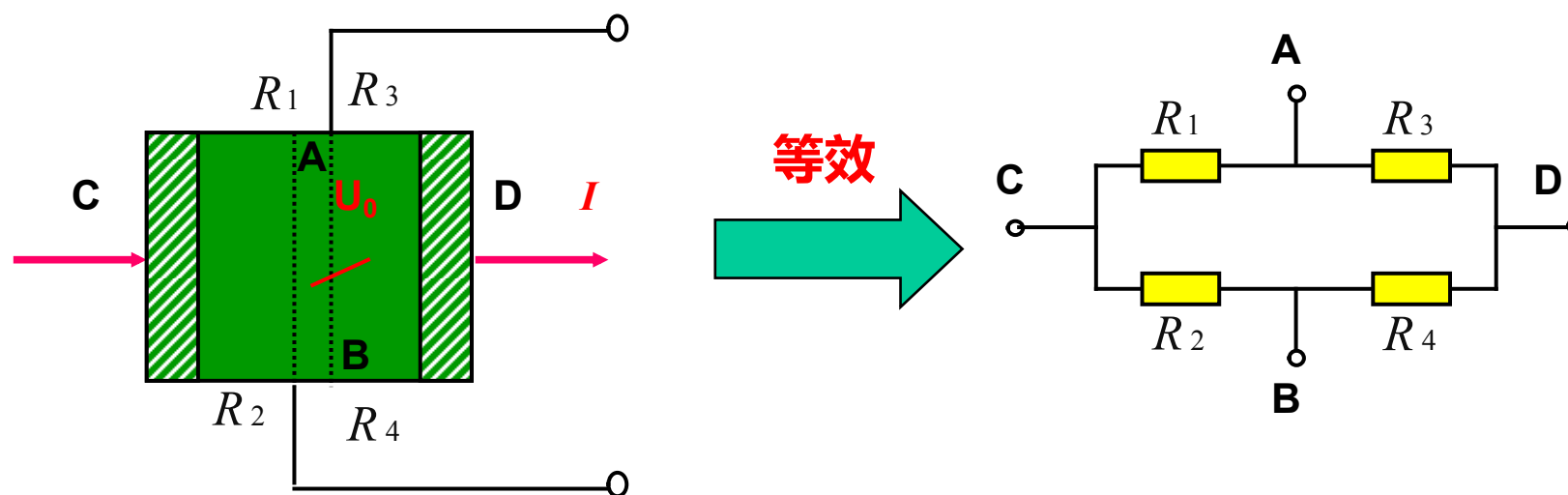
当控制电流 I 流过元件时，即使磁场强度 B 等于零，在霍尔电极上仍有电势存在，该电势就称为**不等位电势**。

不等位电压是由于元件输出极焊接不对称、厚薄不均匀以及两个输出极接触不良等原因造成的。



四、霍尔元件的测量误差和补偿

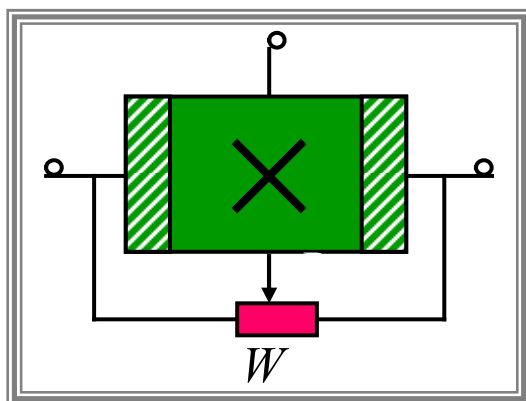
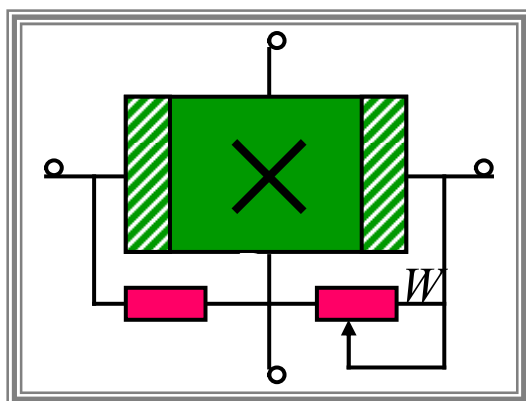
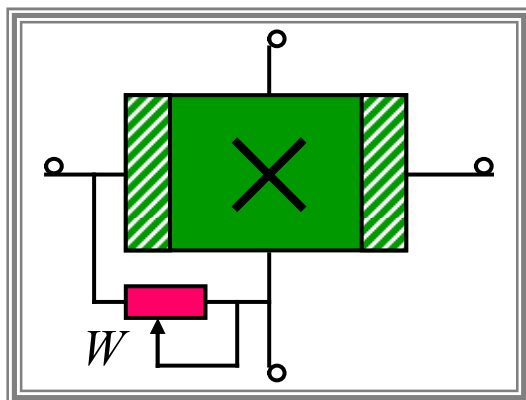
霍尔元件



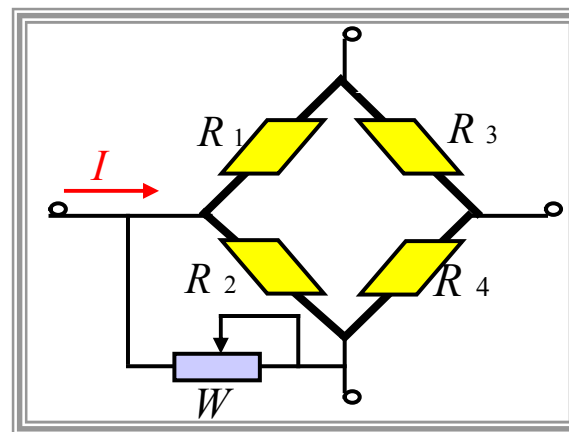
- A、B同一等位面： $U_0 = 0$ 、电桥平衡
- A、B非同一等位面： $U_0 \neq 0$ 、电桥不平衡

电桥补偿原理：在阻值较大的桥臂上并联电阻

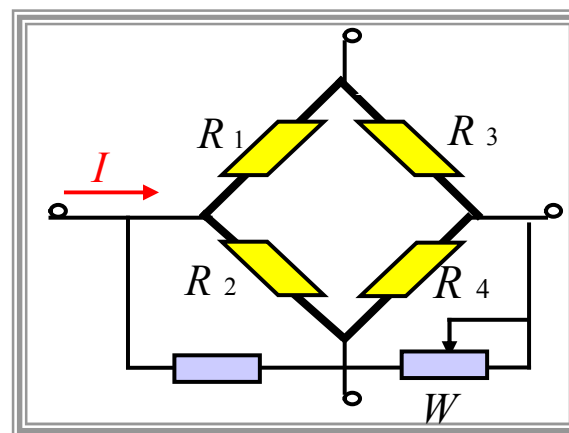
几种常用补偿方法



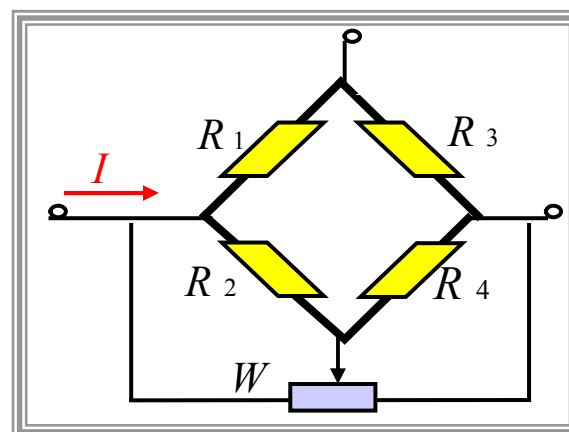
(a)



(b)



(c)



四、霍尔元件的测量误差和补偿

3. 温度误差及补偿

霍尔元件是采用半导体材料制成的，因此它们的许多参数都具有较大的温度系数。当温度变化时，霍尔元件的载流子浓度、迁移率、电阻率及霍尔系数都将发生变化，所以霍尔元件的内阻、输出电压等参数也将随温度而变化。

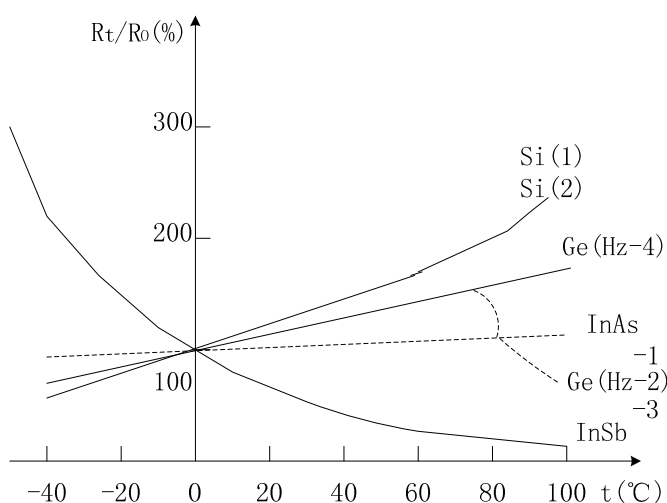


图6-2-2 霍尔内阻与温度的关系曲线

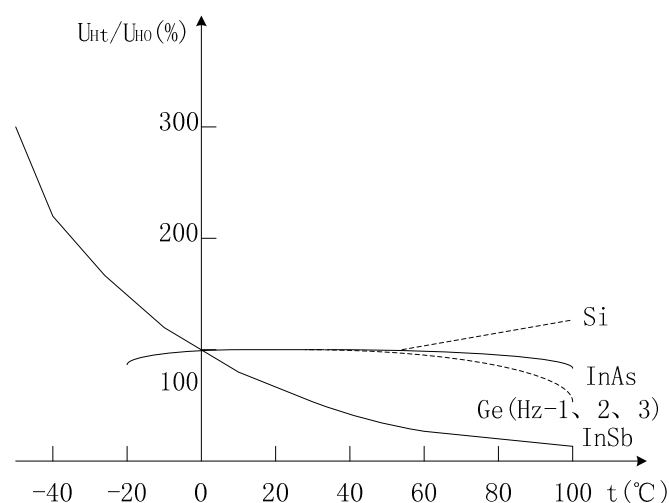


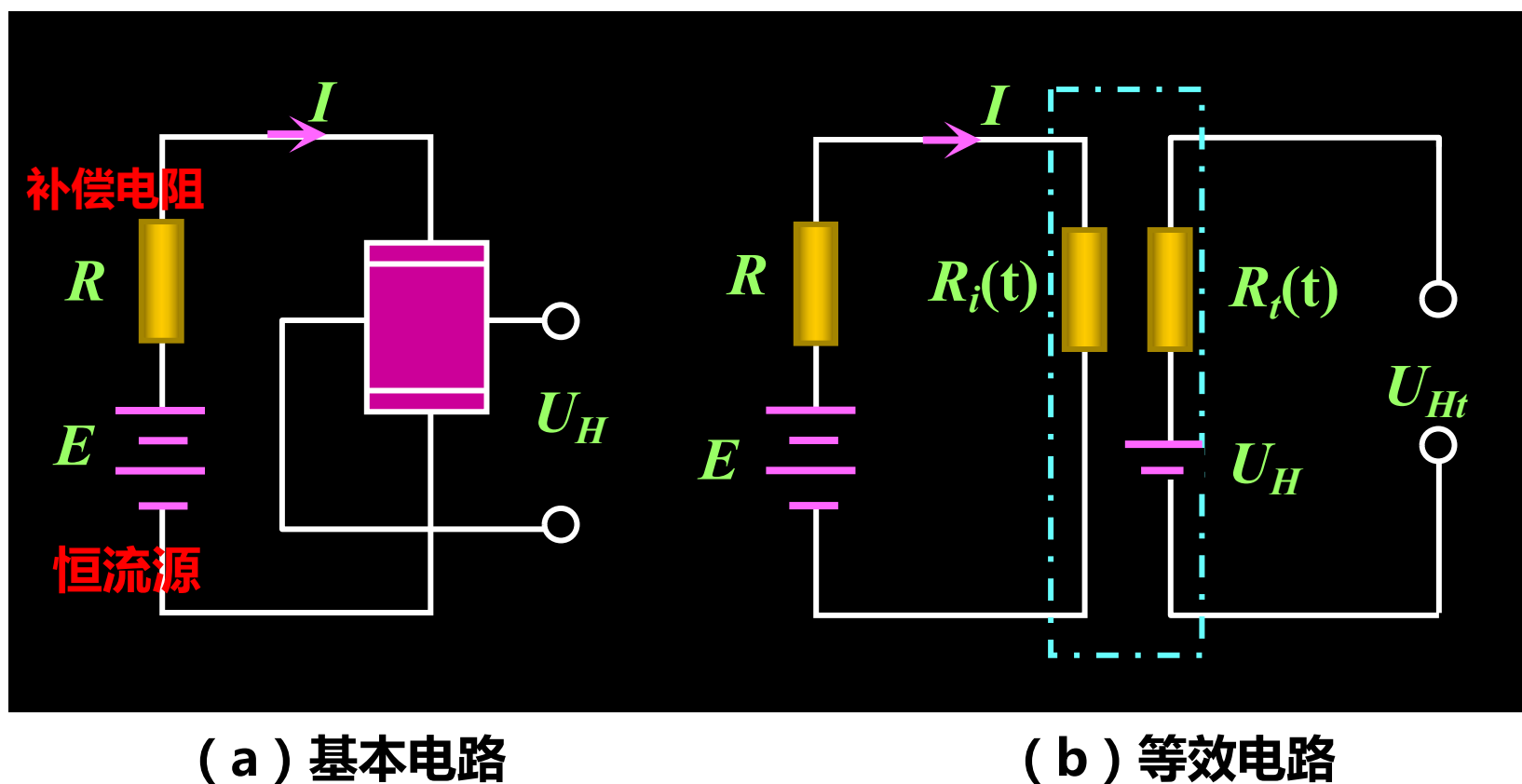
图6-2-3 霍尔电压与温度的关系曲线

四、霍尔元件的测量误差和补偿

霍尔元件

3. 温度误差及补偿

(1) 利用输入回路串联电阻进行补偿

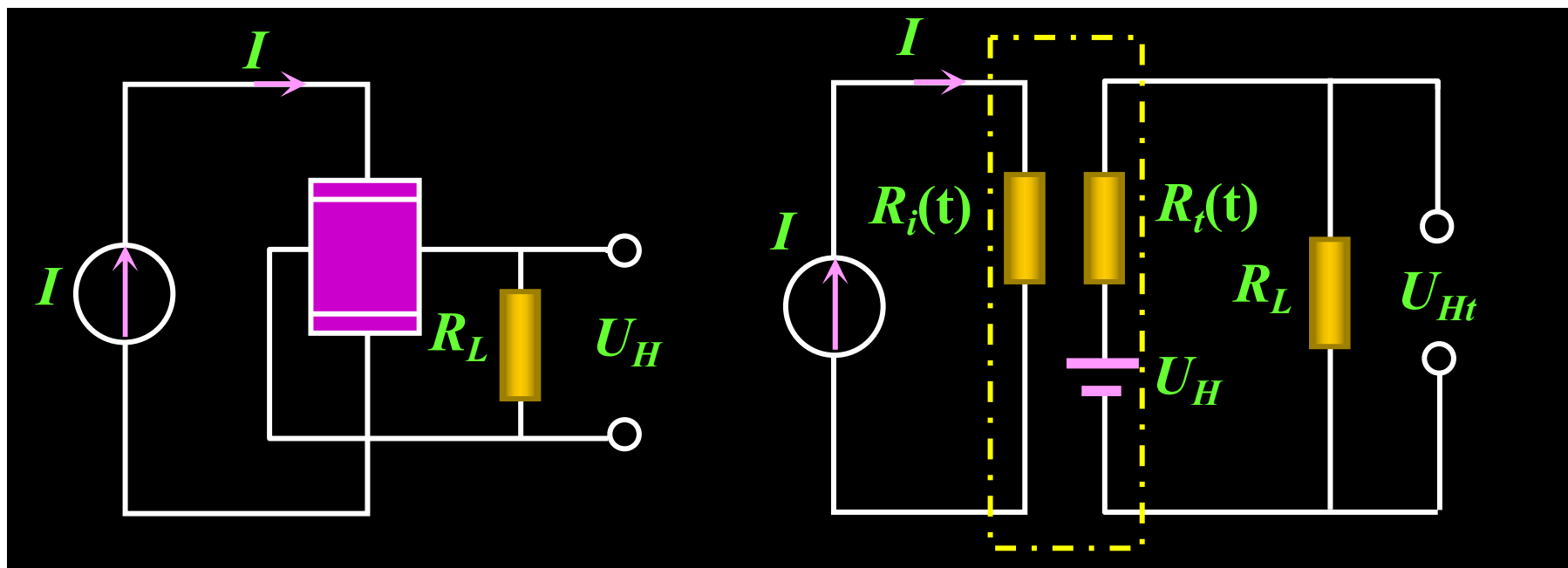


四、霍尔元件的测量误差和补偿

霍尔元件

3. 温度误差及补偿

(2) 利用输出回路的负载进行补偿



(a) 基本电路

(b) 等效电路

霍尔元件的输入采用**恒流源**，使控制电流 I 稳定不变。这样，**可以不考虑输入回路的温度影响。**

四、霍尔元件的测量误差和补偿

霍尔元件

3. 温度误差及补偿

(3) 利用恒流源进行补偿

当负载电阻比霍尔元件输出电阻大得多时，输出电阻变化对霍尔电压输出的影响很小。在这种情况下，只考虑在输入端进行补偿即可。

若采用恒流源，输入电阻随温度变化而引起的控制电流的变化极小，从而减少了输入端的温度影响。

四、霍尔元件的测量误差和补偿

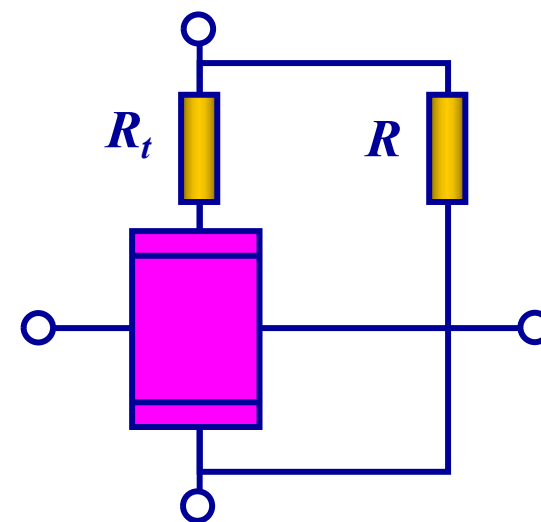
霍尔元件

3. 温度误差及补偿

(4) 利用热敏电阻进行补偿

对于温度系数大的半导体材料常使用。

霍尔输出随温度升高而下降，只要能使控制电流随温度升高而上升，就能进行补偿。例如在输入回路串入热敏电阻，当温度上升时其阻值下降，从而使控制电流上升。



(a) 输入回路补偿

四、霍尔元件的测量误差和补偿

霍尔元件

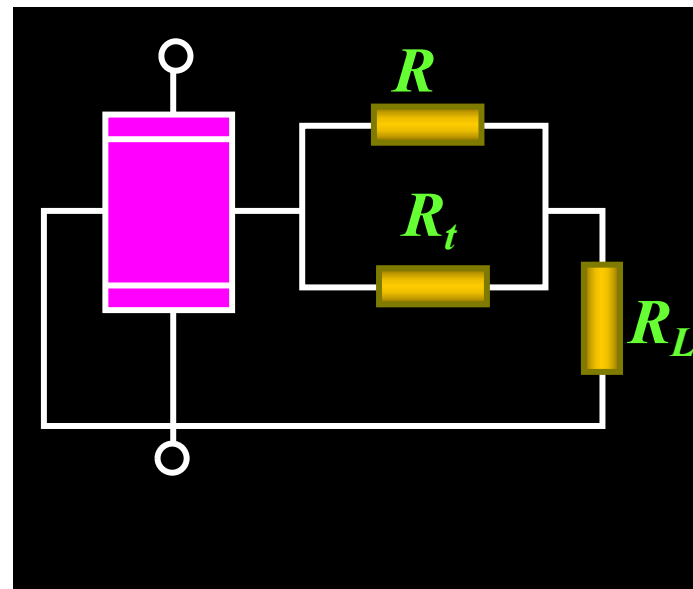
3. 温度误差及补偿

(4) 利用热敏电阻进行补偿

在输出回路进行补偿。负载 R_L 上的霍尔电势随温度上升而下降的量被热敏电阻阻值减小所补偿。

实际使用时，热敏电阻最好与霍尔元件封在一起或靠近，使它们温度变化一致。

(b) 输出回路补偿



四、霍尔元件的测量误差和补偿

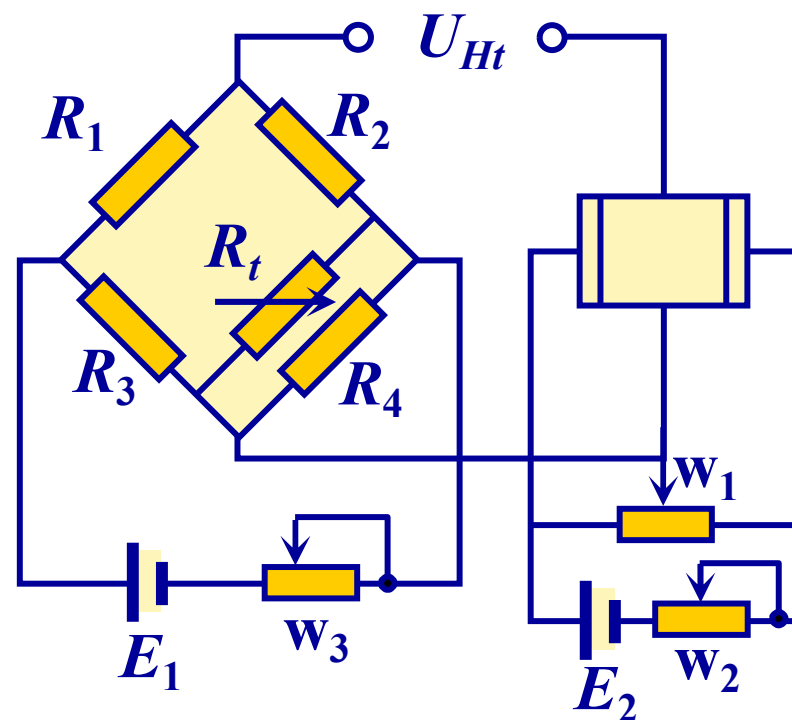
霍尔元件

3. 温度误差及补偿

(5) 利用补偿电桥进行补偿

调节电位器 W_1 可以消除不等位电势。

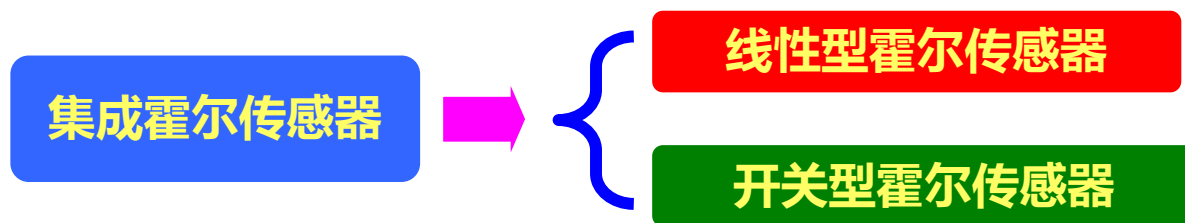
电桥由温度系数低的电阻构成，在某一桥臂电阻上并联一热敏电阻。当温度变化时，热敏电阻将随温度变化而变化，使电桥的输出电压相应变化，仔细调节，即可补偿霍尔电势的变化，使其输出电压与温度基本无关。



五、集成霍尔传感器

霍尔元件

集成霍尔传感器是利用硅集成电路工艺将霍尔元件和测量线路集成在一起的霍尔传感器。它取消了传感器和测量电路之间的界限，实现了材料、元件、电路三位一体。集成霍尔传感器由于减少了焊点，因此显著地提高了可靠性。此外，它具有体积小、重量轻、功耗低等优点。

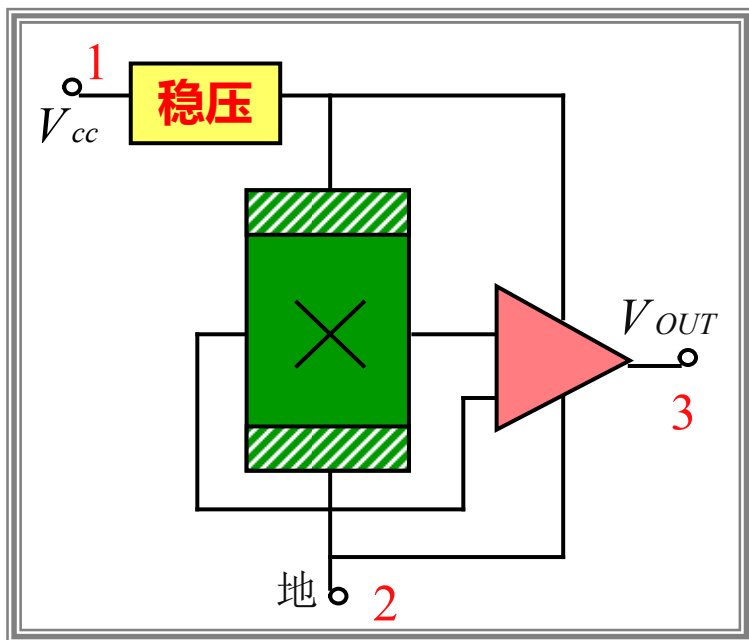


五、集成霍尔传感器

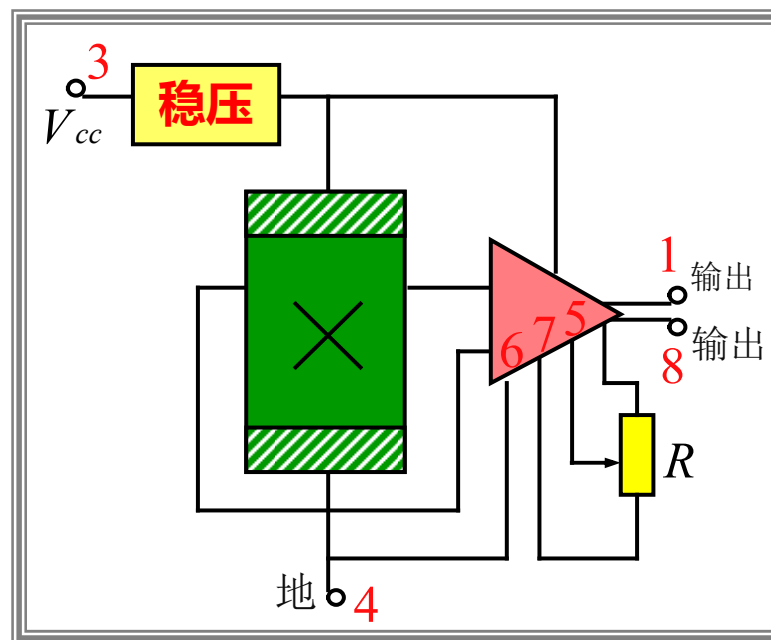
霍尔元件

线性集成霍尔传感器

线性集成霍尔传感器是把霍尔元件与放大线路集成在一起的传感器。其输出电压与外加磁场成线性比例关系。它主要由霍尔元件、放大器、稳压、电流放大输出级、失调调整、线性度调整组成。



单端输出：SL3501T

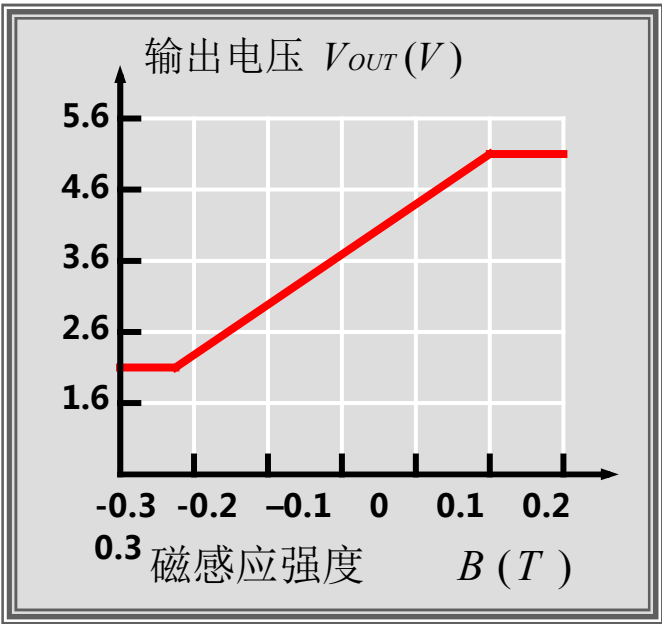


双端输出：SL3501M

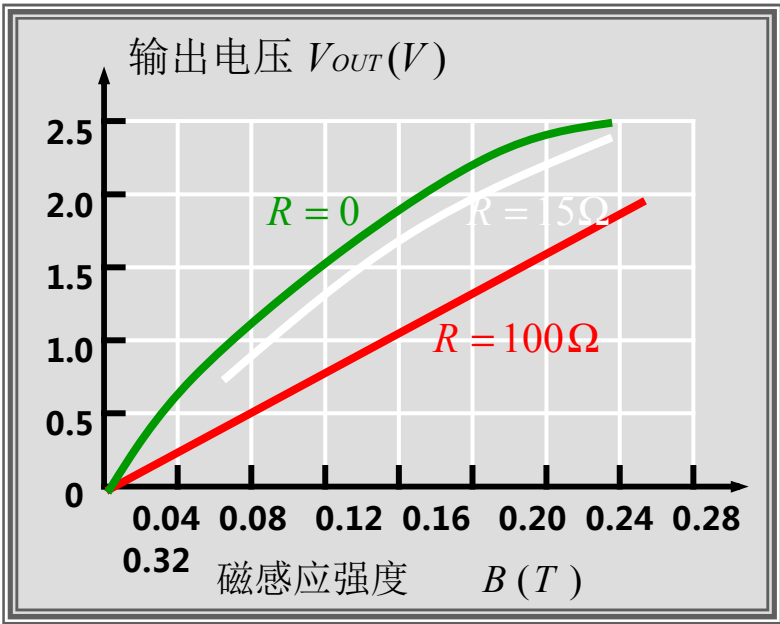
五、集成霍尔传感器

霍尔元件

线性集成霍尔传感器



SL3501T 输出特性曲线



SL3501M 输出特性曲线

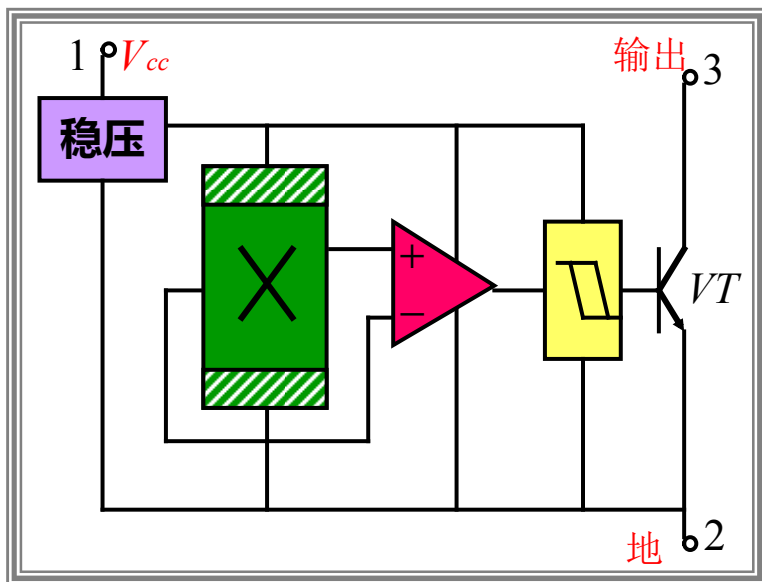
型号	电源电压(V)	输出电压(V)	灵敏度(mV/mA.T)	带宽(kHz)	工作温度(℃)
SL3501T	8 - 12	2.5 - 5	3500 - 7000	25	0 - 70
SL3501M	8 - 16	3.6	700 - 1400	25	0 - 70

五、集成霍尔传感器

霍尔元件

开关集成霍尔传感器

开关型霍尔集成电路是将霍尔元件、稳压电路、放大器、施密特触发器、OC门（集电极开路输出门）等电路做在同一个芯片上。开关型集成霍尔传感器是把霍尔元件的输出经过处理后输出一个高电平或低电平的数字信号。



有磁场： V_H ，放大，整形： $>$ 开启阈值，高电平，VT导通，——**开状态**

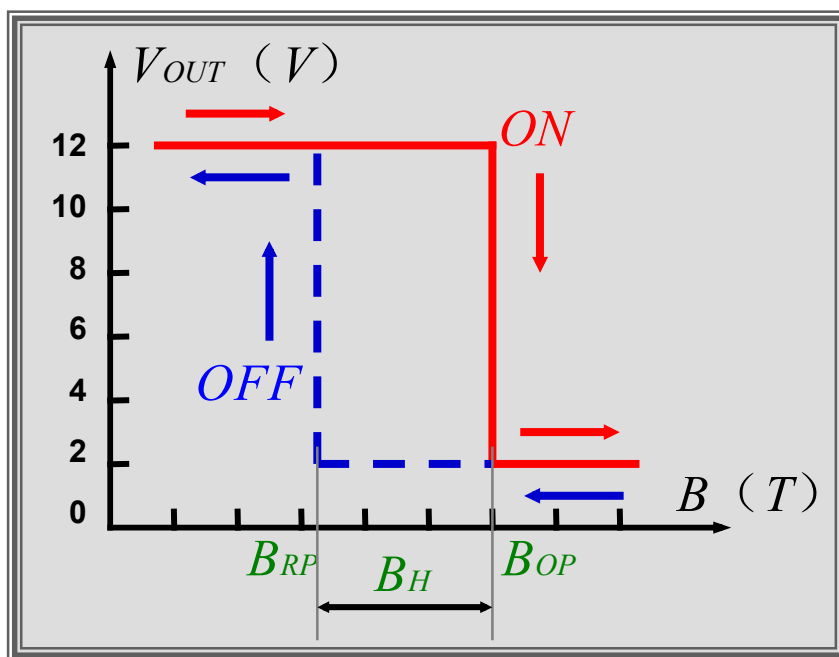
磁场减弱： V_H 减小，放大，整形： $<$ 关闭阈值，翻转，低电平，VT截止——**关状态**

五、集成霍尔传感器

霍尔元件

开关集成霍尔传感器

工作特性



$B > B_{OP}$ 高→低，开状态

$B < B_{RP}$ 低→高，关状态

B_{OP} —— 工作点 “开”

B_{RP} —— 释放点 “关”

B_H —— 磁滞

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔电势是关于 I 、 B 、 θ 三个变量的函数，即 $U_H = K_H IB \cos \theta$ 。利用这个关系可以使其中两个量不变，将第三个量作为变量，或者固定其中一个量，其余两个量都作为变量。这使得霍尔传感器有许多用途。

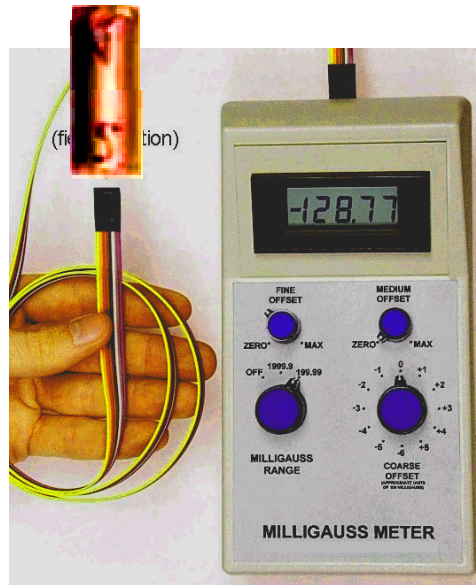
霍尔传感器主要用于测量能够转换为磁场变化的其它物理量。

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

磁感应强度测量仪

霍尔元件



霍尔元件

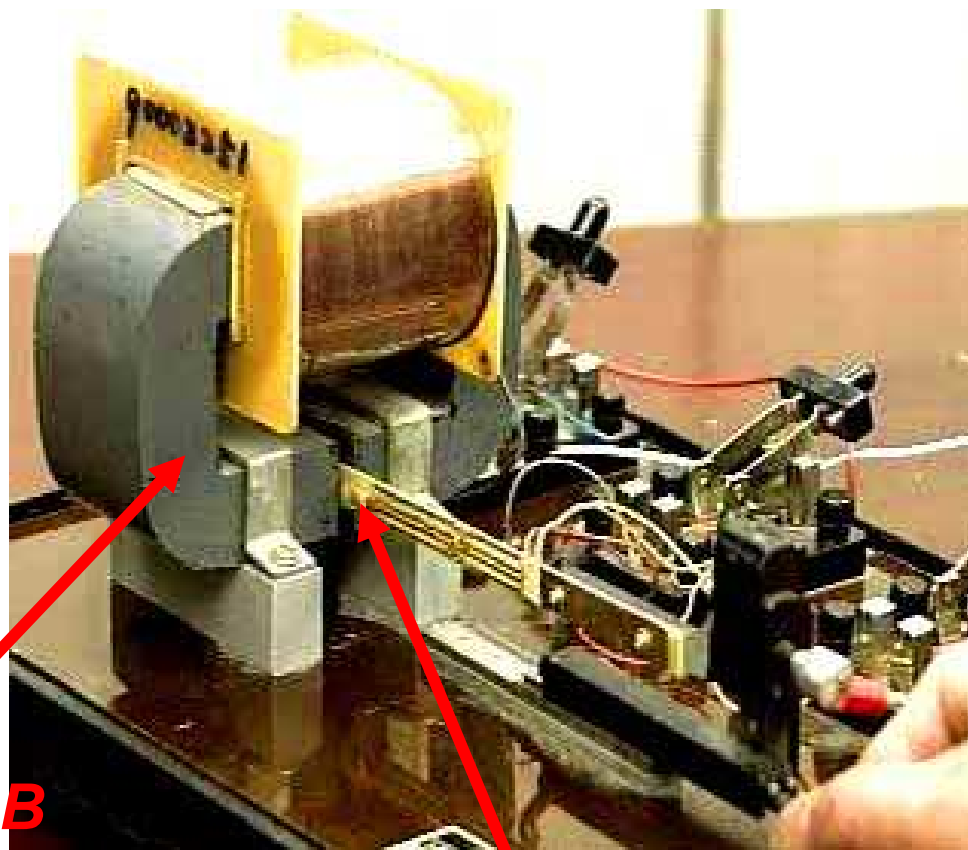


磁铁

霍尔特斯拉计（高斯计）

五、霍尔元件的应用

霍尔元件



测量铁心 气隙的 B
值

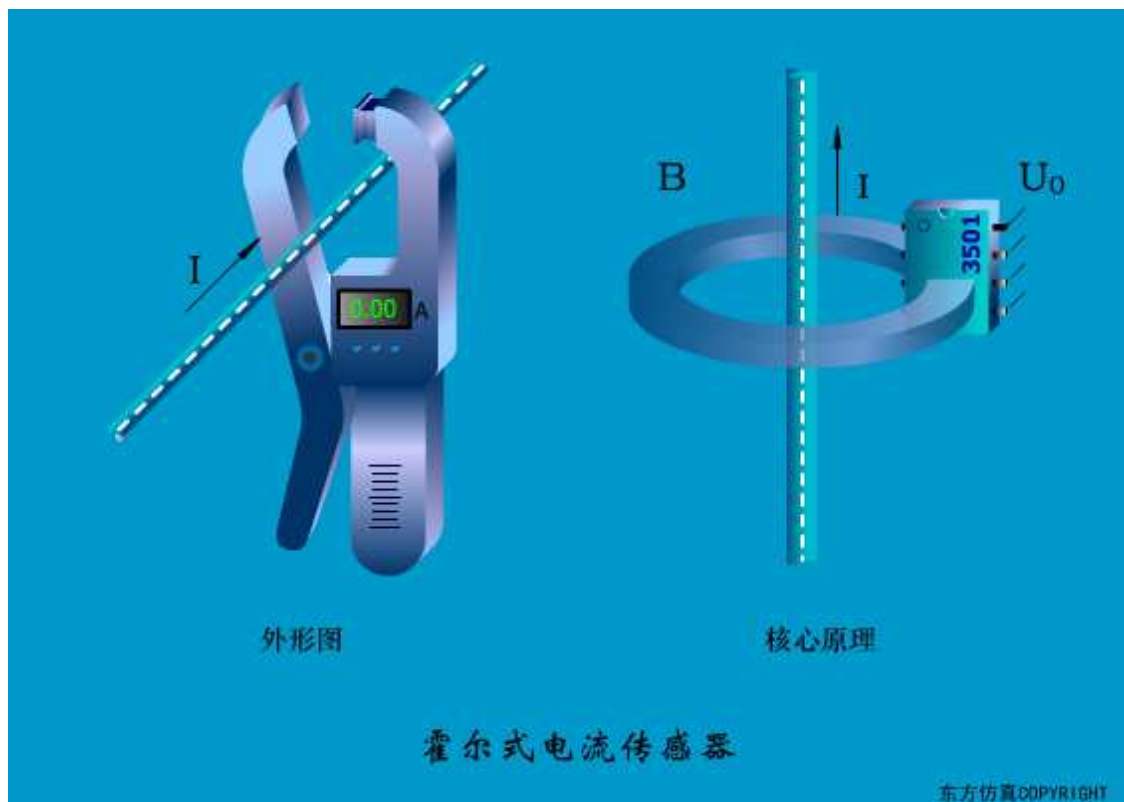
霍尔元件

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔电流传感器

由于通电螺线管内部存在磁场，其大小与导线中的电流成正比，故可以利用霍尔传感器测量出磁场，从而确定导线中电流的大小。利用这一原理可以设计制成霍尔电流传感器。



其优点是不与被测电路发生接触，不影响被测电路，不消耗被测电源的功率，特别适合于大电流传感。

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

将被测电流的导线穿过霍尔电流传感器的检测孔。当有电流通过导线时，在导线周围将产生磁场，磁力线集中在铁心内，并在铁心的缺口处穿过霍尔元件，从而产生与电流成正比的霍尔电压。

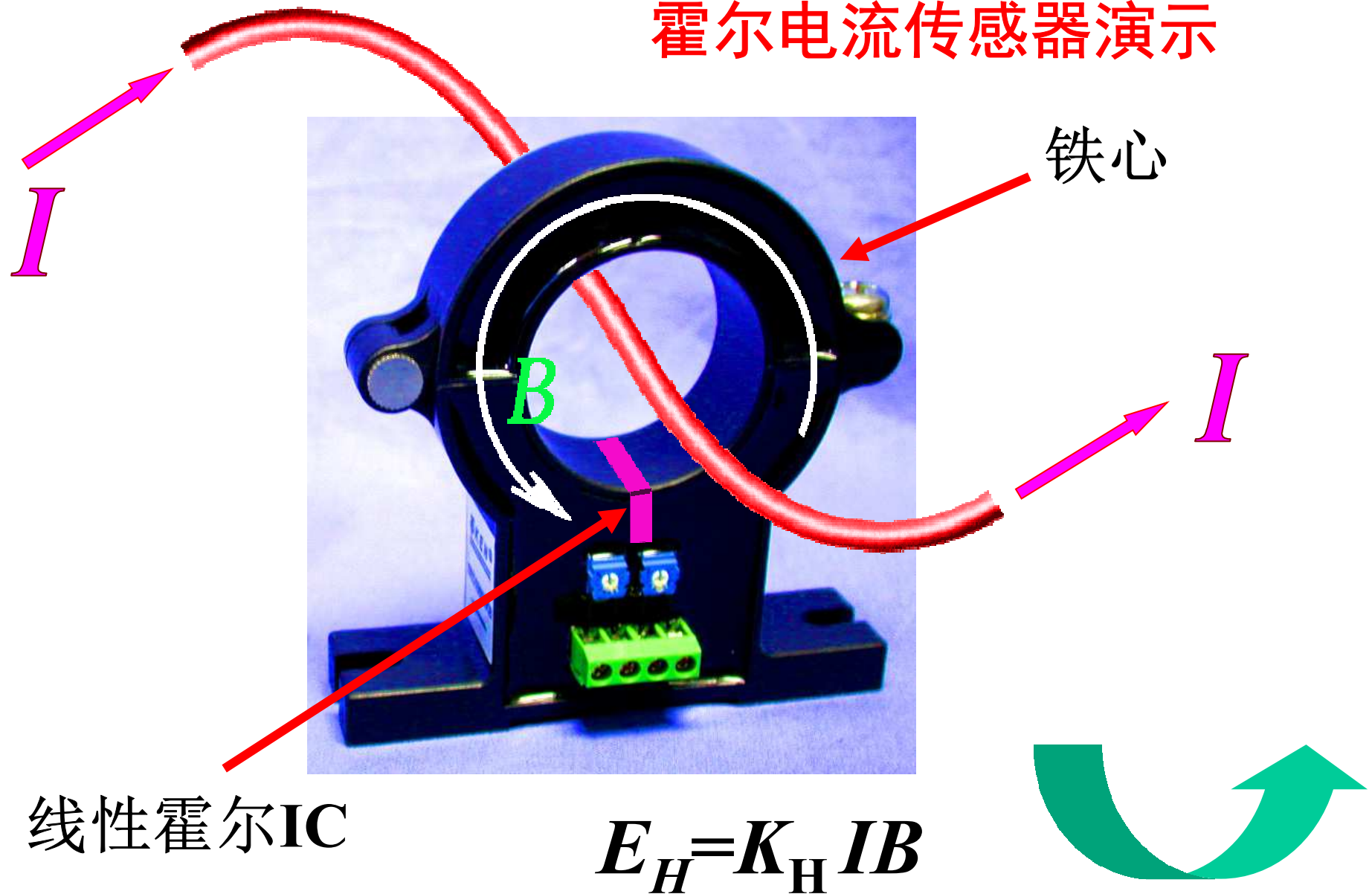
霍尔电流传感器



六、霍尔元件的应用

霍尔元件

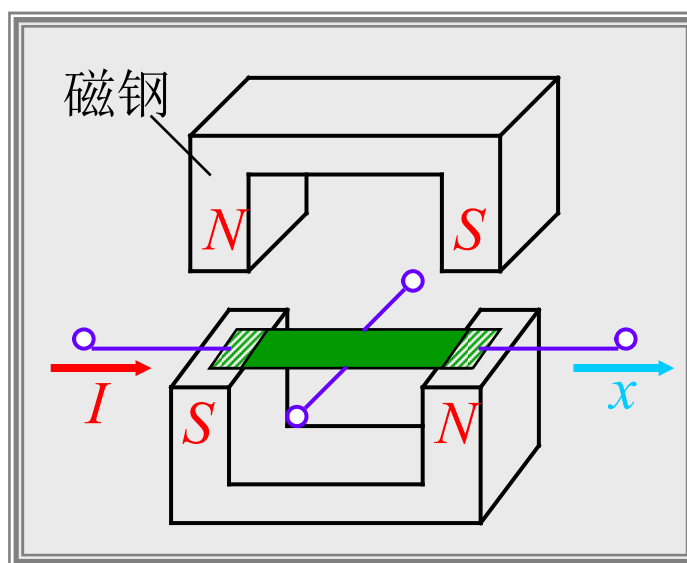
霍尔电流传感器演示



六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔位移传感器

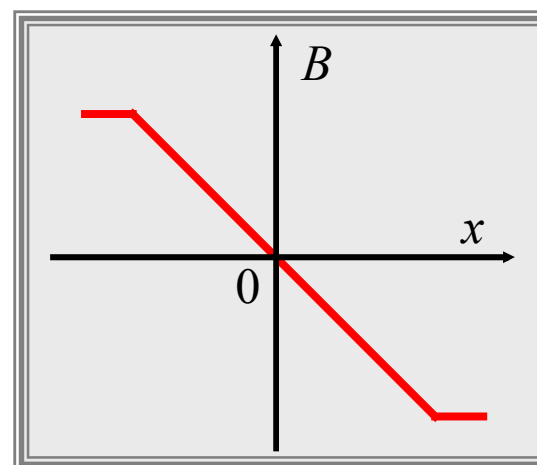
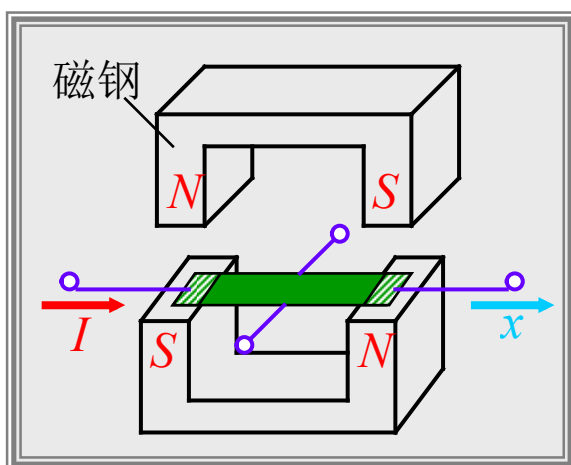


将霍尔元件置于磁场中，左半部磁场方向向上，右半部磁场方向向下，根据霍尔效应，左半部产生霍尔电势 V_{H1} ，右半部产生霍尔电势 V_{H2} ，其方向相反。因此，两端电势为 $V_{H1}-V_{H2}$ 。如果霍尔元件在初始位置时 $V_{H1}=V_{H2}$ ，则输出为零；当改变磁极系统与霍尔元件的相对位置时，即可得到输出电压，其大小正比于位移量。

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔位移传感器



$$U_H = R_H \cdot \frac{IB}{d} \quad \text{若} \quad \frac{dB}{dx} = \text{const.}$$

$$\text{则} \quad \frac{dU_H}{dx} = R_H \cdot \frac{I}{d} \cdot \frac{dB}{dx} = K = \text{const.}$$

$$U_H = Kx \propto x$$

测量范围：1 ~ 2 mm

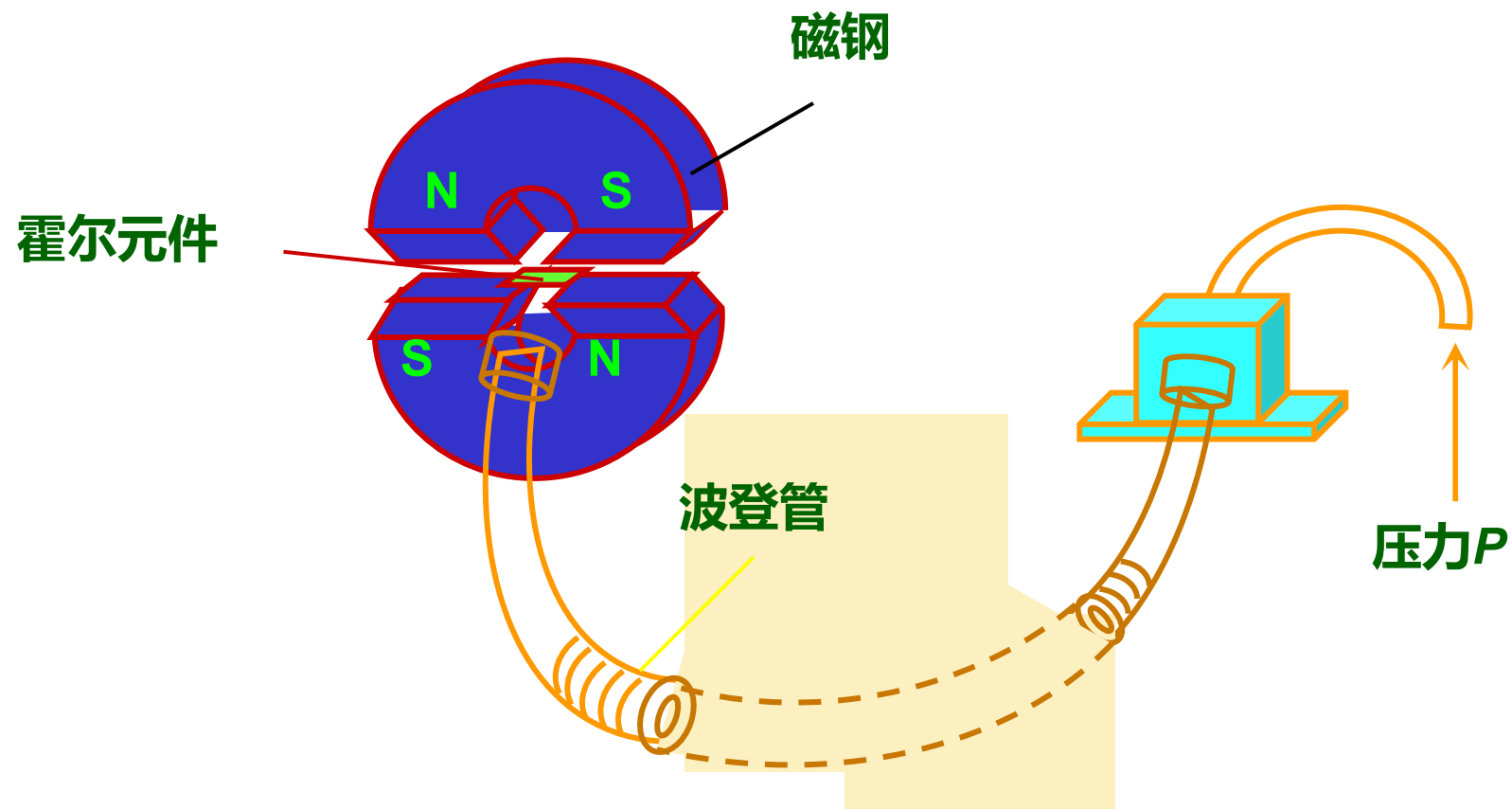
磁场梯度越大，灵敏度越高

磁场梯度越均匀，输出线性越好

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

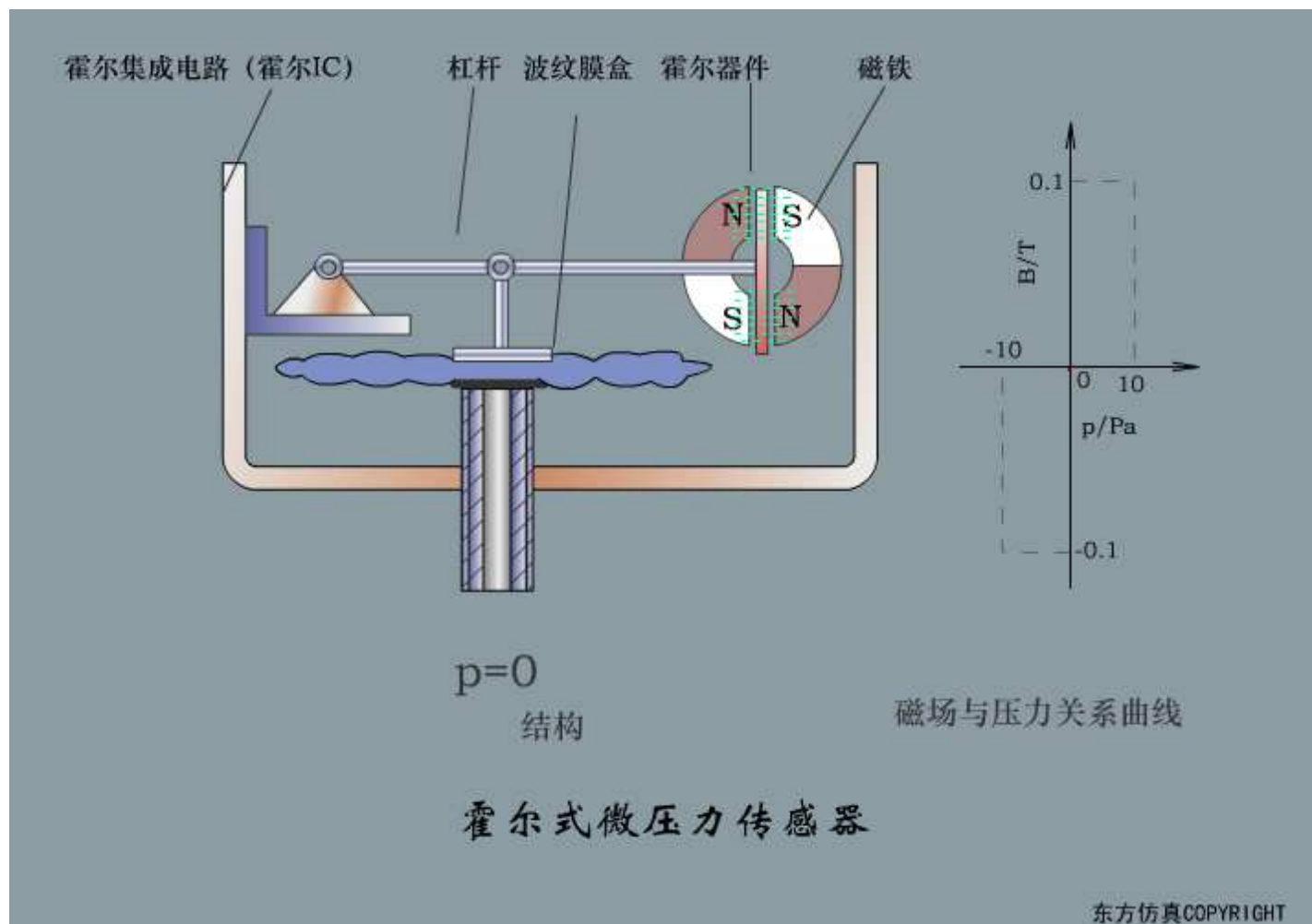
霍尔式压力传感器



霍尔压力传感器结构原理图

六、霍尔元件的应用

霍尔元件



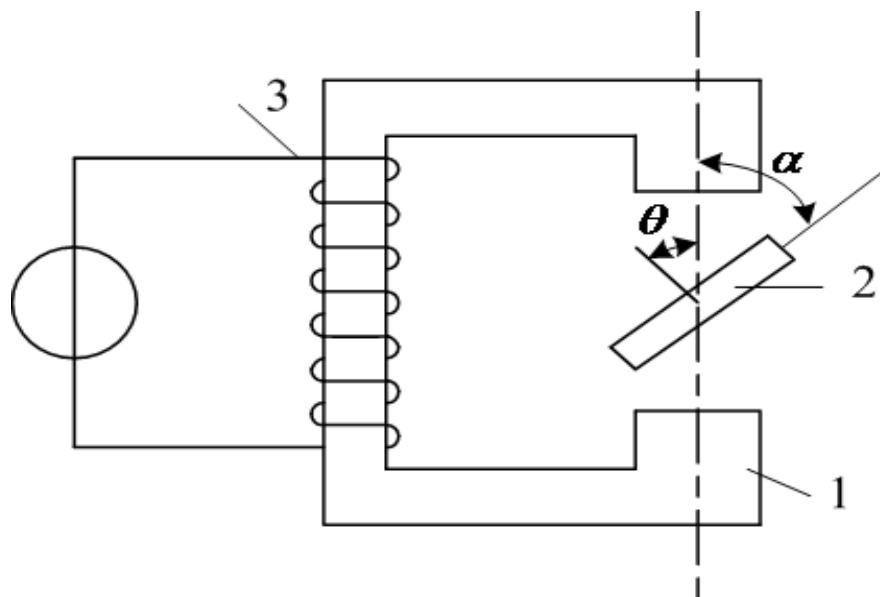
这类霍尔压力传感器是把压力先转换成位移后，再应用霍尔电势与位移关系测量压力。

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

角位移测量仪

角位移测量仪的结构如图所示。霍尔器件与被测物连动，而霍尔器件又在一个恒定的磁场中转动，于是霍尔电势 U_H 就反应了转角 θ 变化。

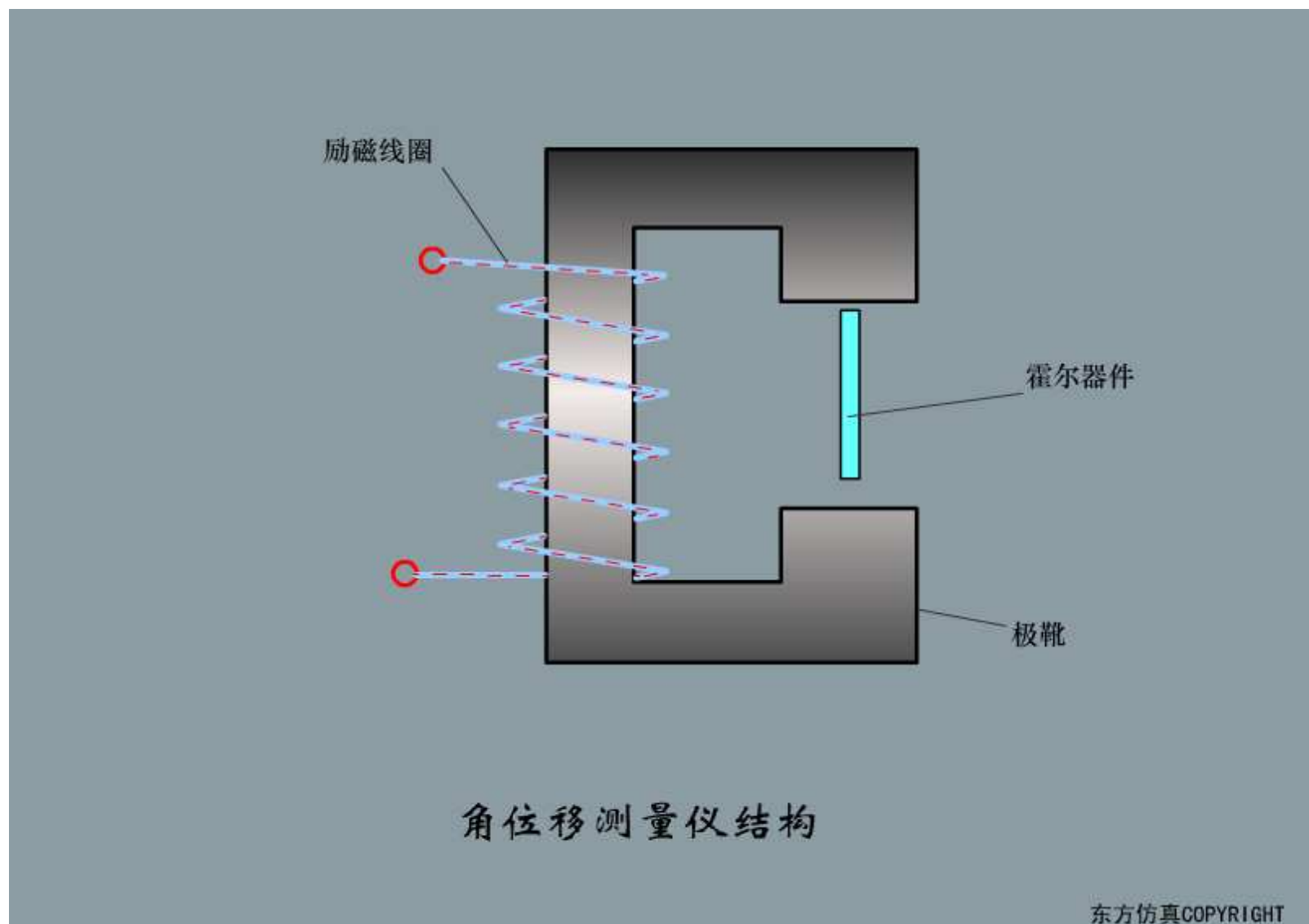


角位移测量仪结构示意图

1—极靴 2—霍尔器件 3—励磁线圈

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

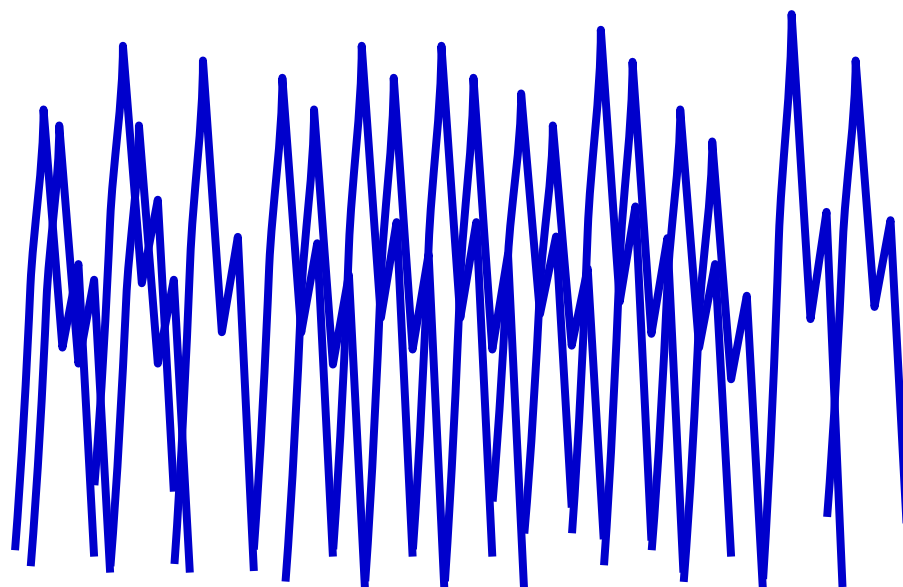
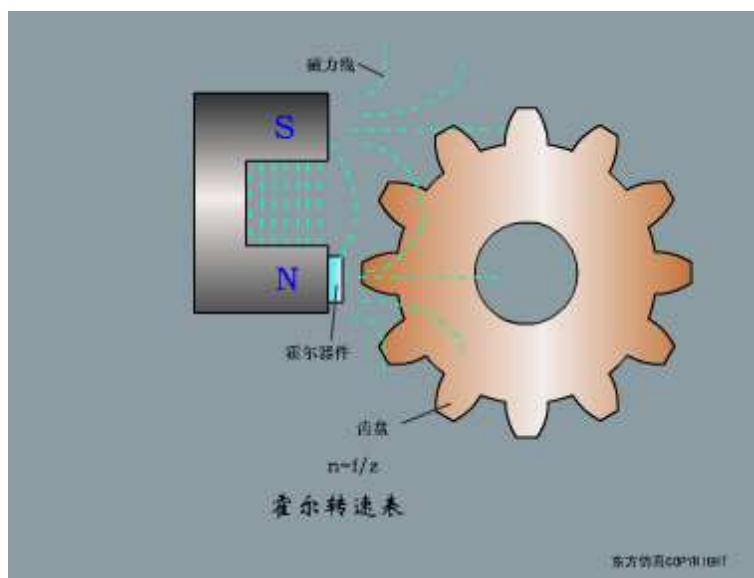


六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔转速传感器

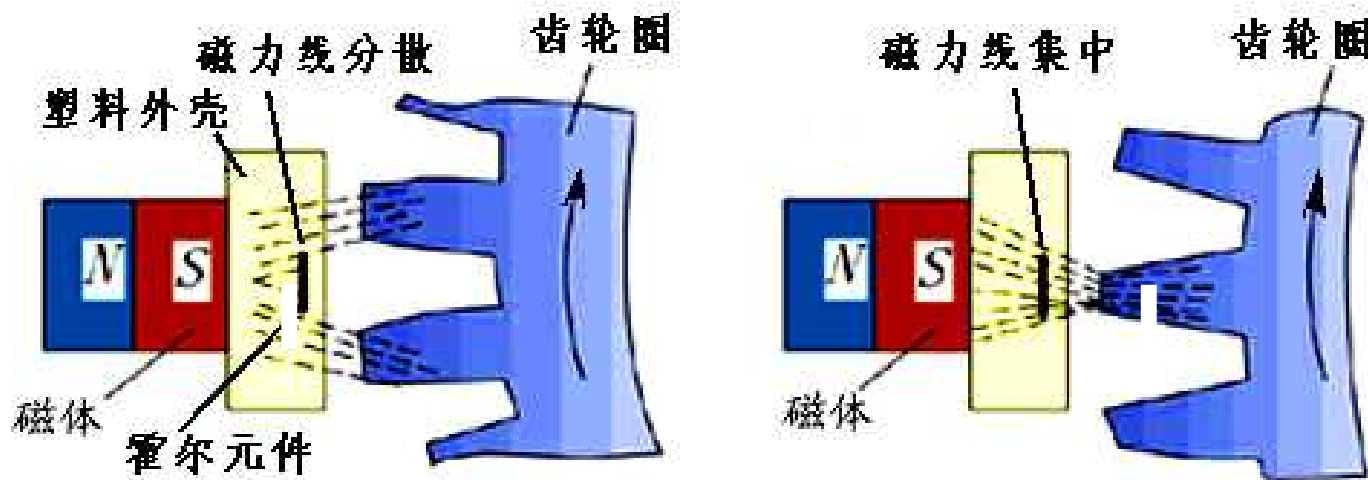
在被测转速的转轴上安装一个齿盘，也可选取机械系统中的一个齿轮，将线性型霍尔器件及磁路系统靠近齿盘。齿盘的转动使磁路的磁阻随气隙的改变而周期性地变化，霍尔器件输出的微小脉冲信号经隔直、放大、整形后可以确定被测物的转速。



六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔转速表原理

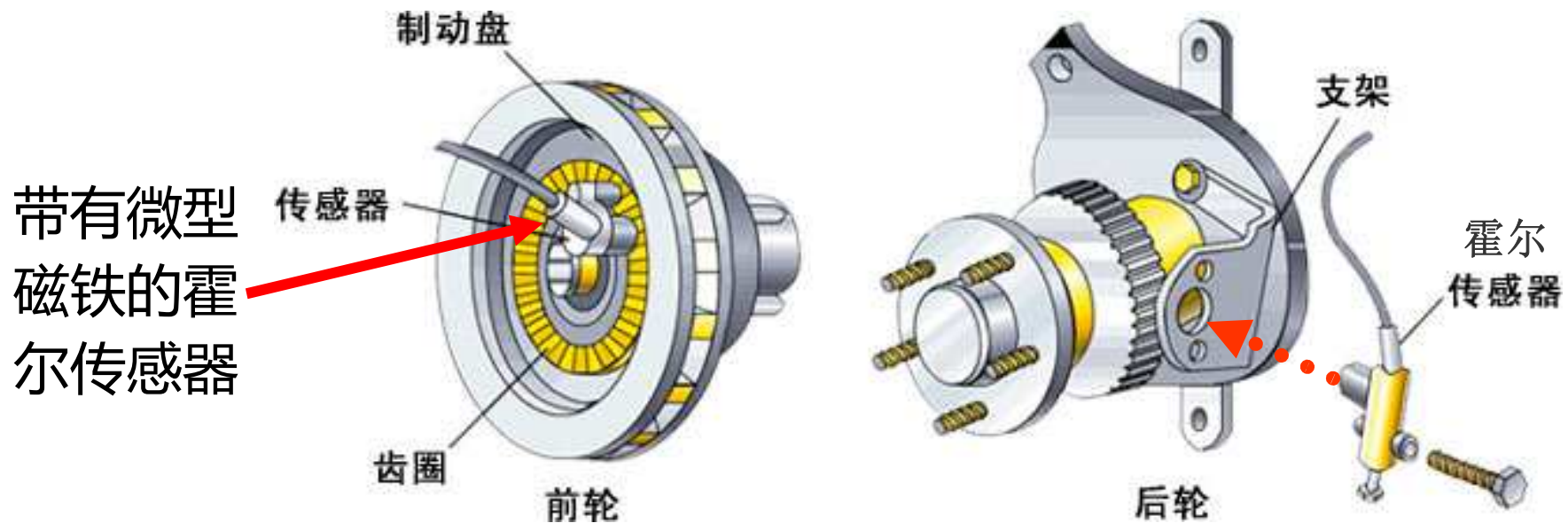


当齿对准霍尔元件时，磁力线集中穿过霍尔元件，可产生较大的霍尔电动势，放大、整形后输出高电平；反之，当齿轮的空挡对准霍尔元件时，输出为低电平。

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔转速传感器在汽车防抱死装置（ABS）中的应用

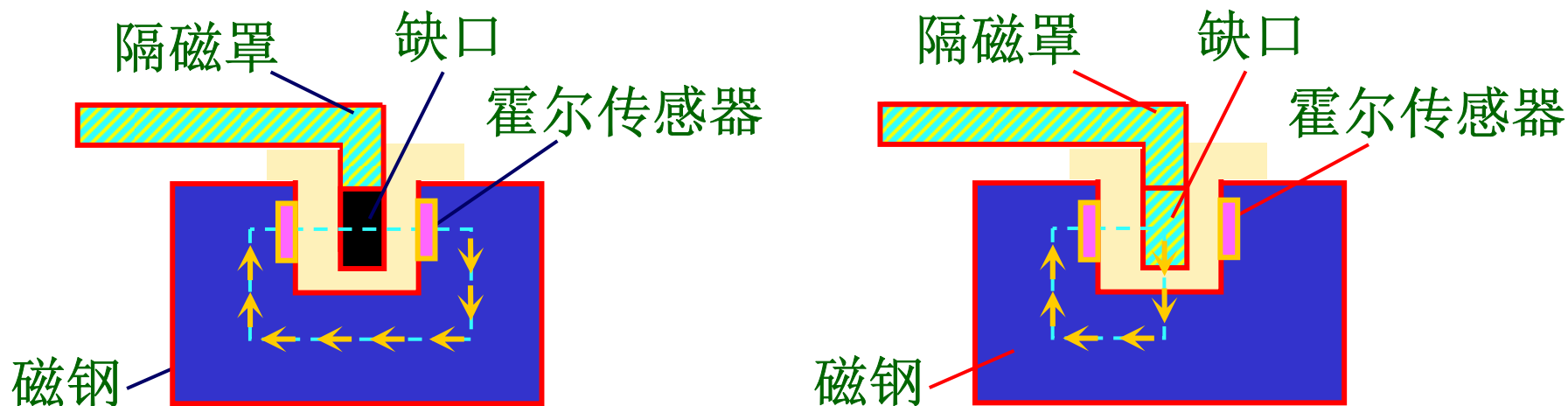


若汽车在刹车时车轮被抱死，将产生危险。用霍尔转速传感器来检测车轮的转动状态有助于控制刹车力的大小。

六、霍尔元件的应用

霍尔元件

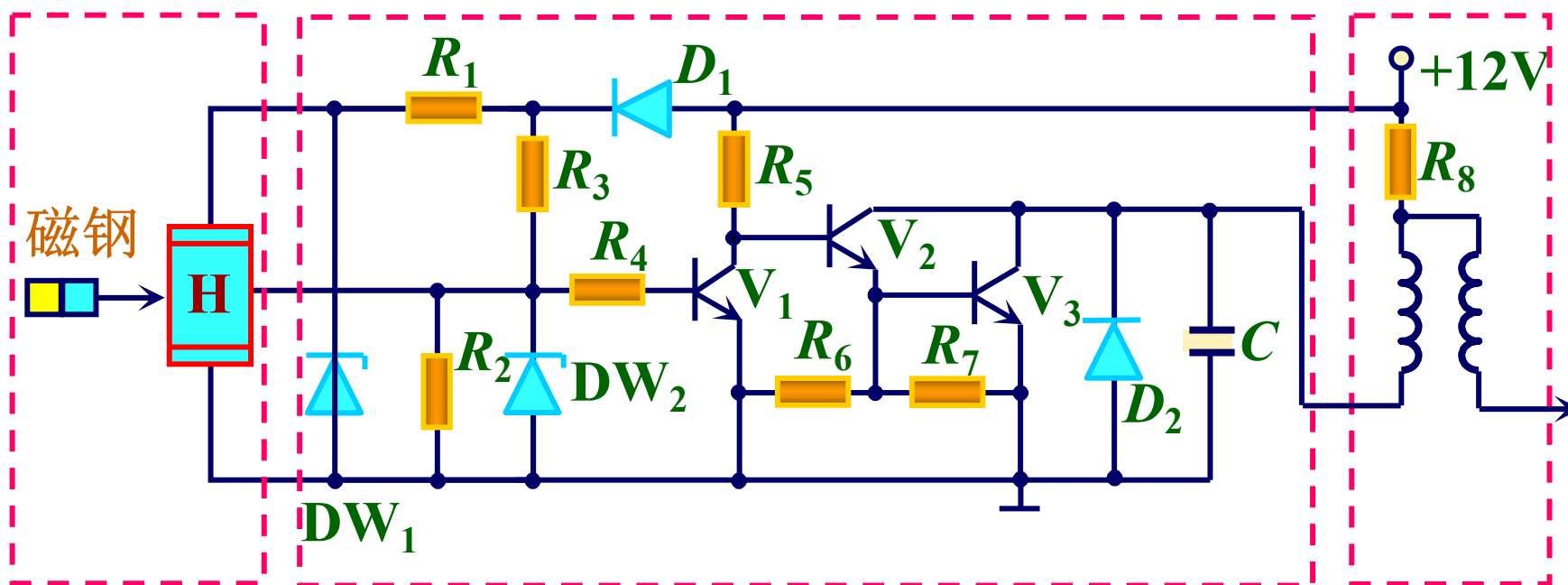
汽车霍尔电子点火器



当缺口对准霍尔元件时，磁通通过霍尔传感器形成闭合回路，电路导通，霍尔传感器输出低电平；当隔磁罩竖边的凸出部分挡在霍尔元件和磁体之间时，电路截止，霍尔传感器输出高电平

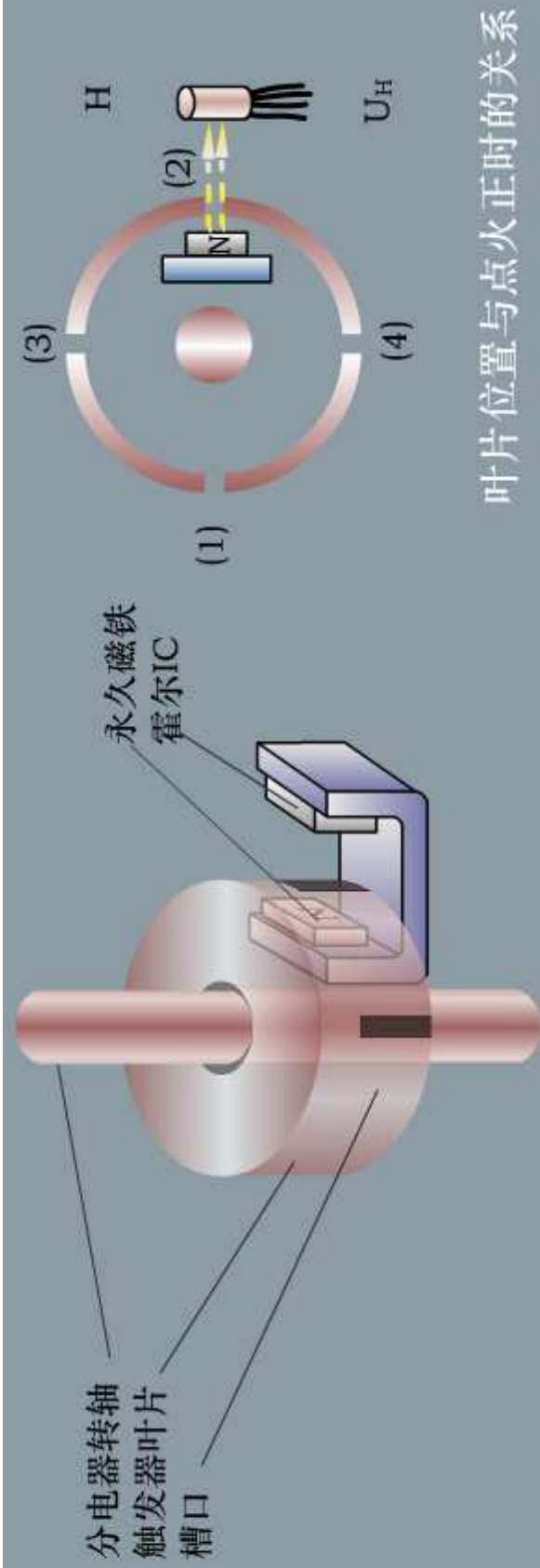
六、霍尔元件的应用

霍尔元件



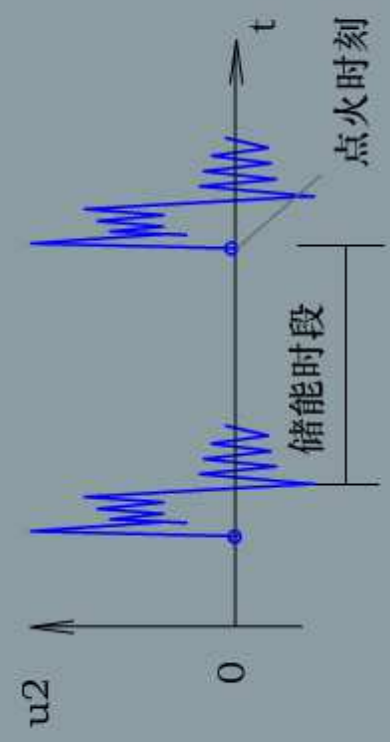
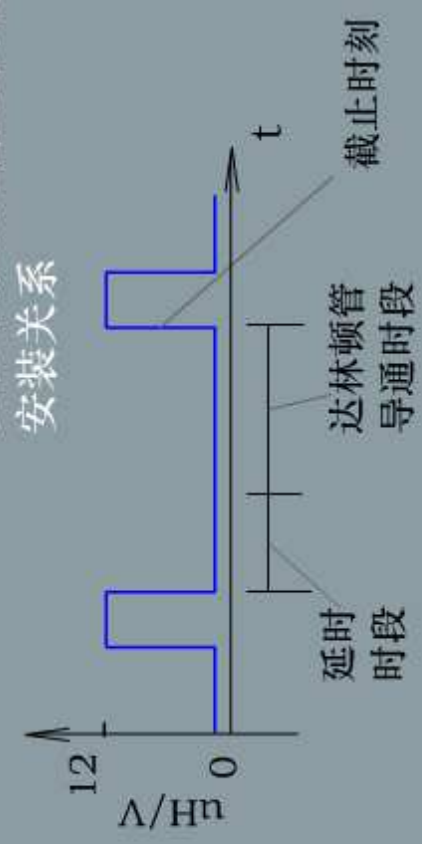
汽车霍尔电子点火器电路

当霍尔传感器输出低电平时， V_1 截止， V_2 、 V_3 导通，点火器的初级绕组有恒定的电流通过；当霍尔传感器输出高电平时， V_1 导通， V_2 、 V_3 截止，点火器的初级绕组电流截止，此时储存在点火线圈中的能量由初级绕组以高压放电的形式输出，即放电点火。



叶片位置与点火正时的关系

触发器叶片与永久磁铁及霍尔集成电路之间的安装关系



霍尔式无触点汽车电子点火装置

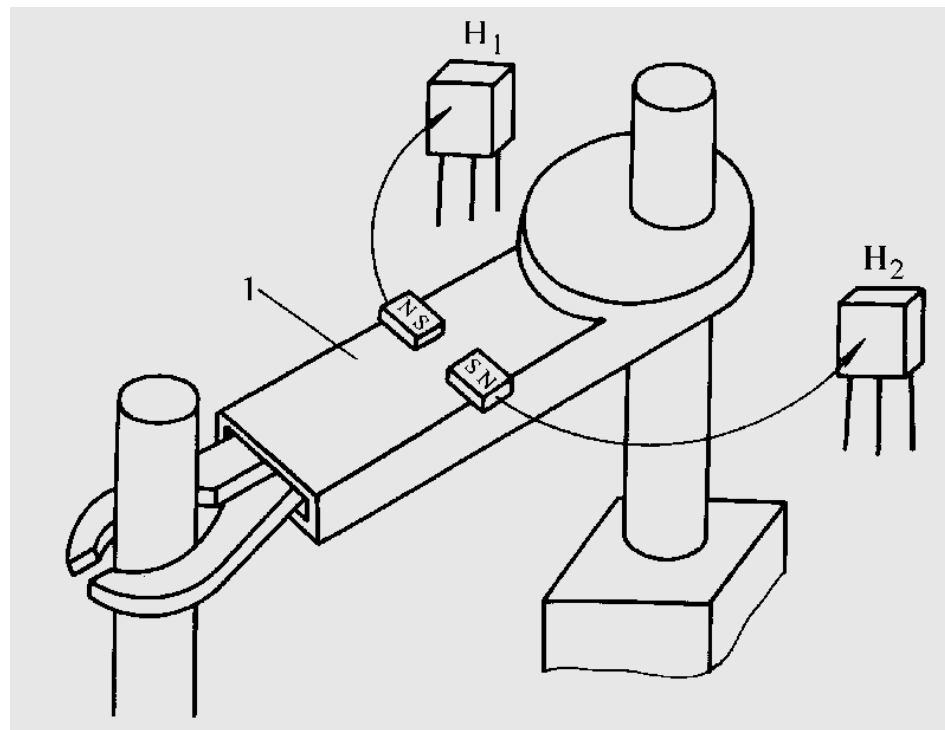
六、霍尔元件的应用

霍尔元件

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。

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（否则将撞坏霍尔IC）起到限位的作用。

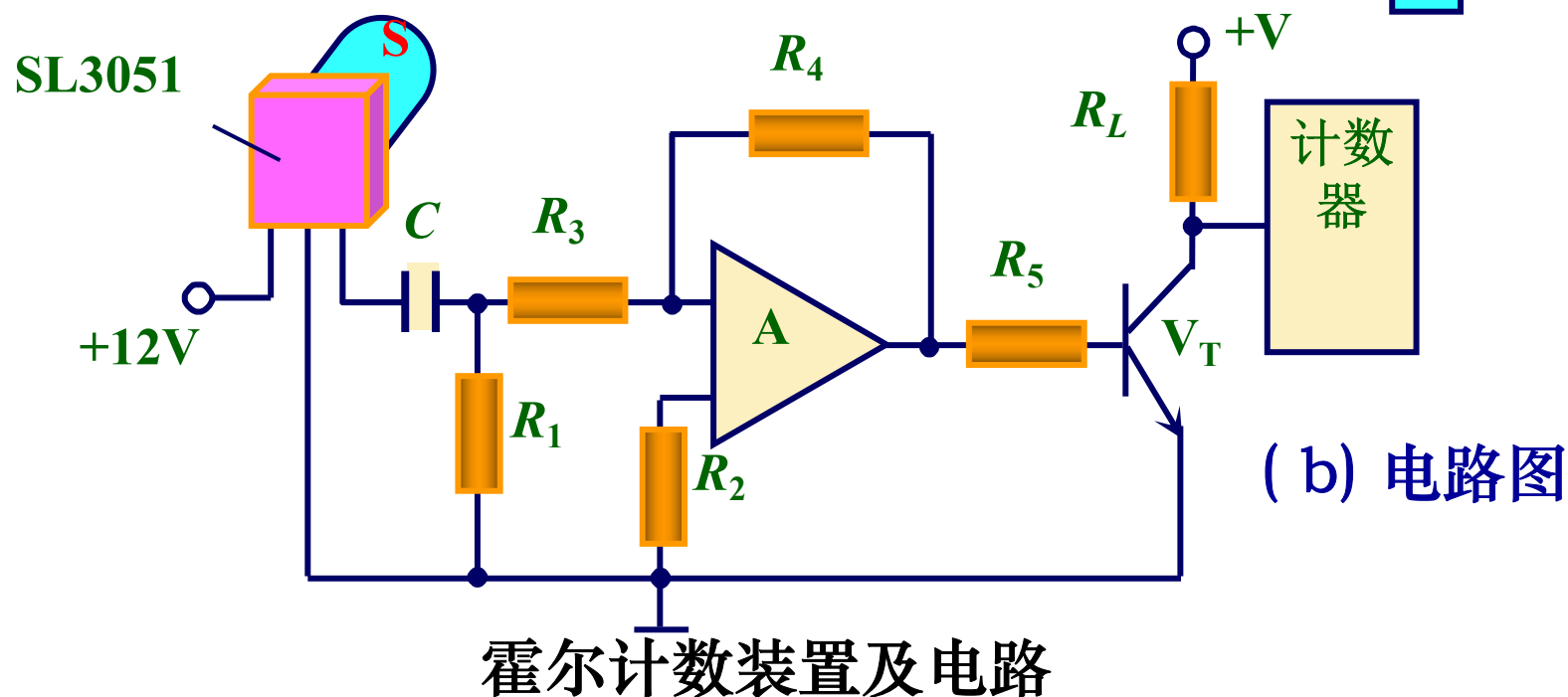
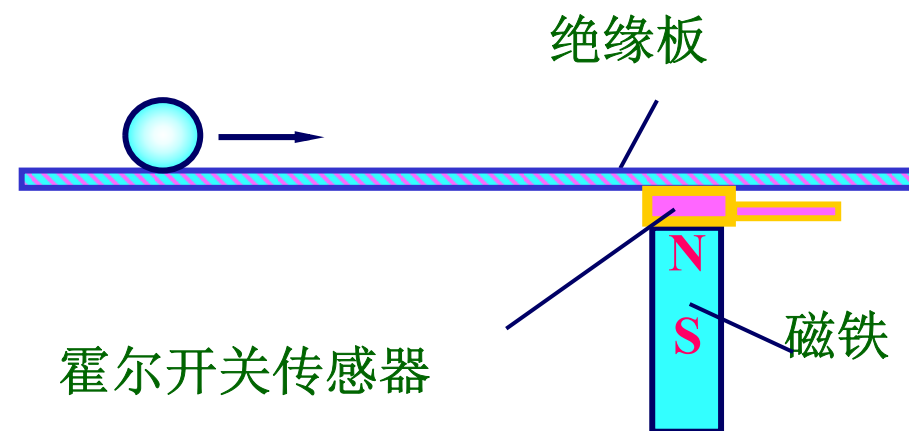


六、霍尔元件的应用

霍尔元件

霍尔计数装置

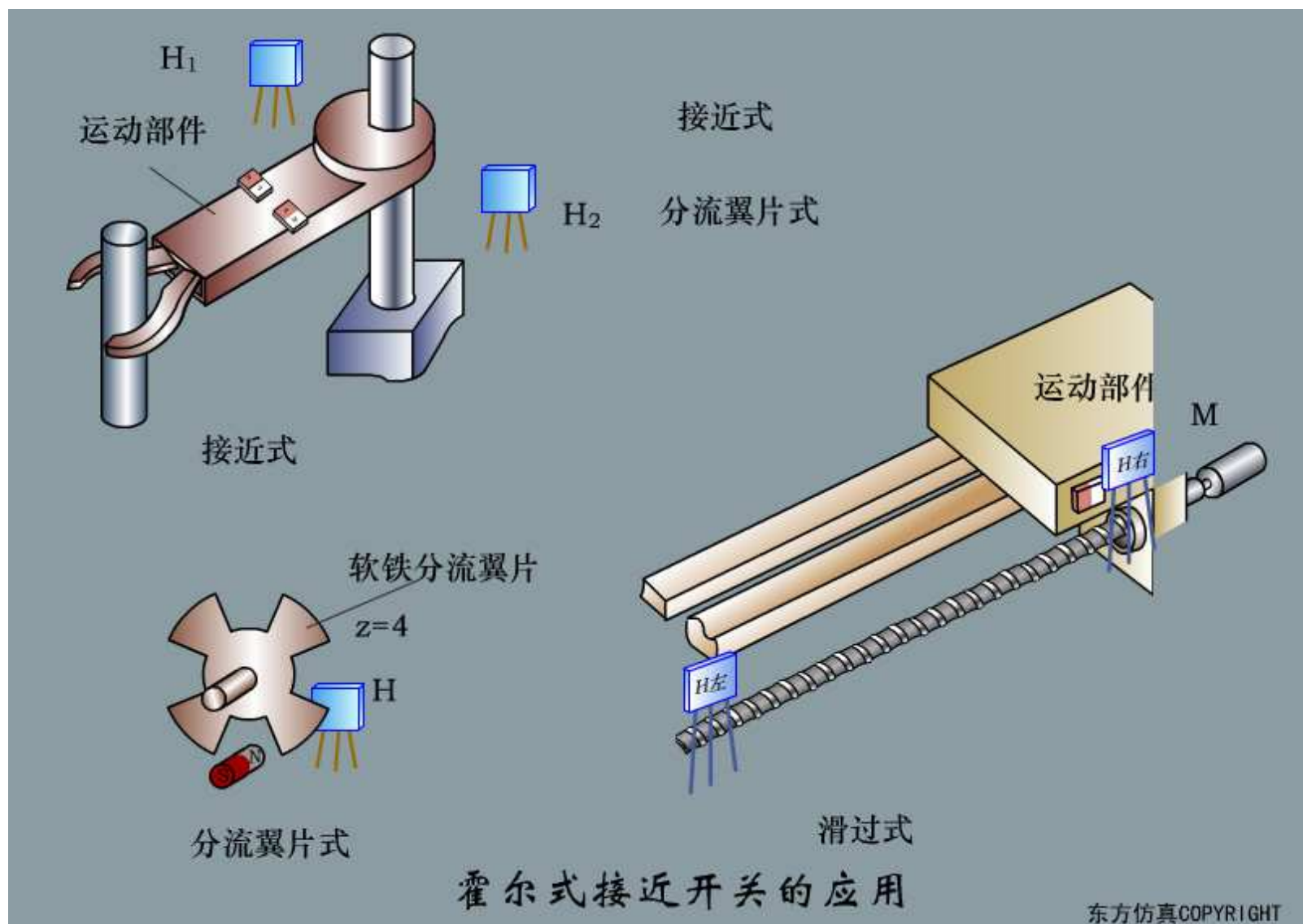
(a) 工作示意图



(b) 电路图

六、霍尔元件的应用

霍尔元件



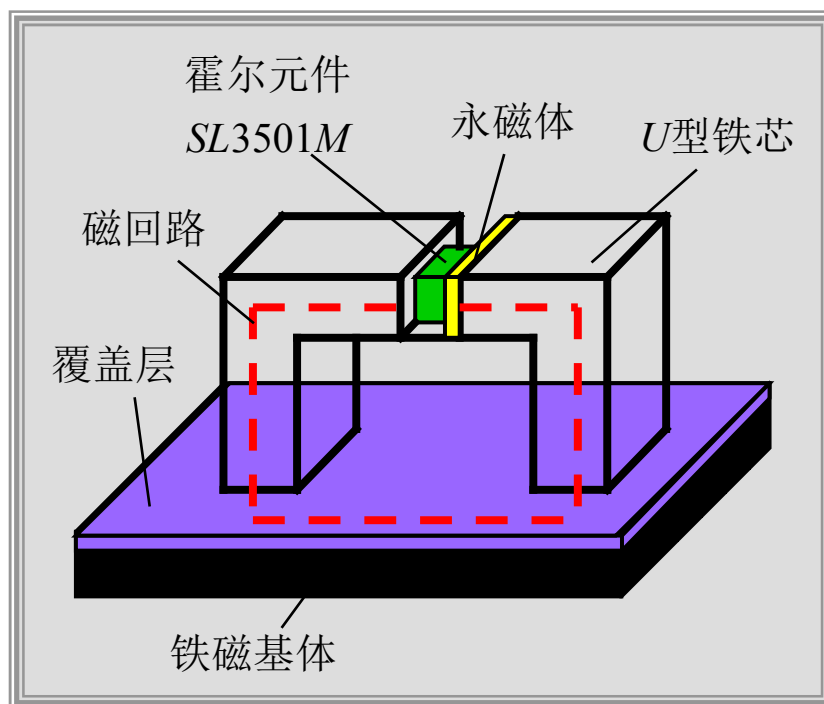
六、霍尔元件的应用

霍尔元件

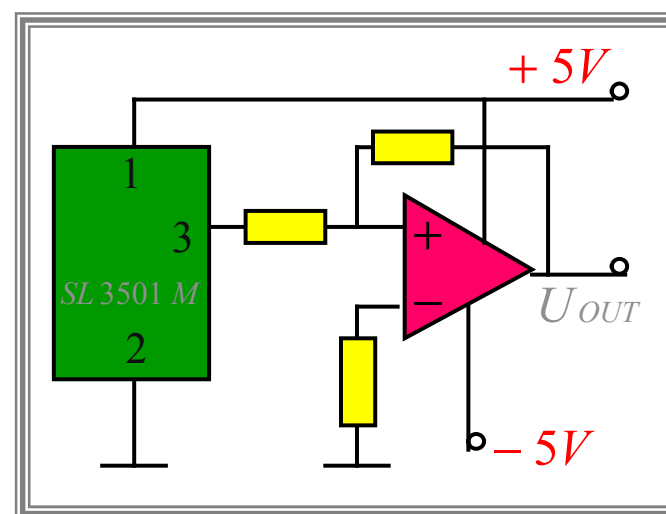
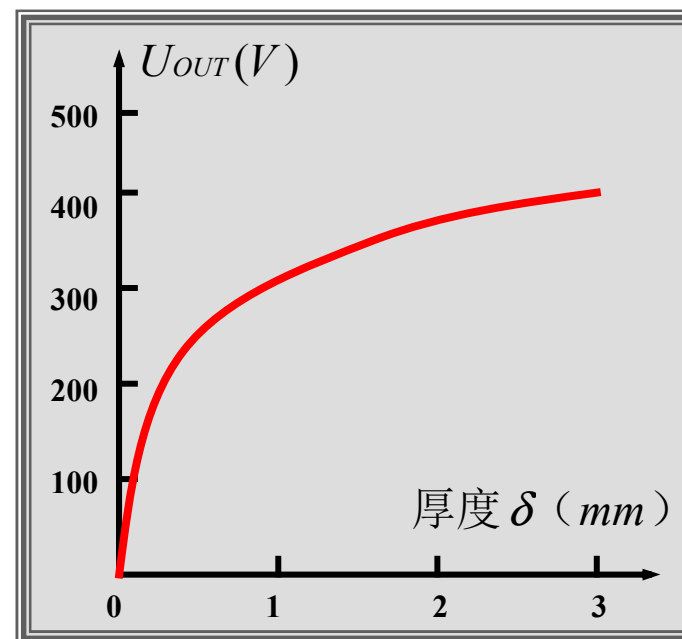
测量表面覆盖层厚度

铁磁性物质

非磁性涂层



$$U_H = \frac{R_H}{d} BI$$

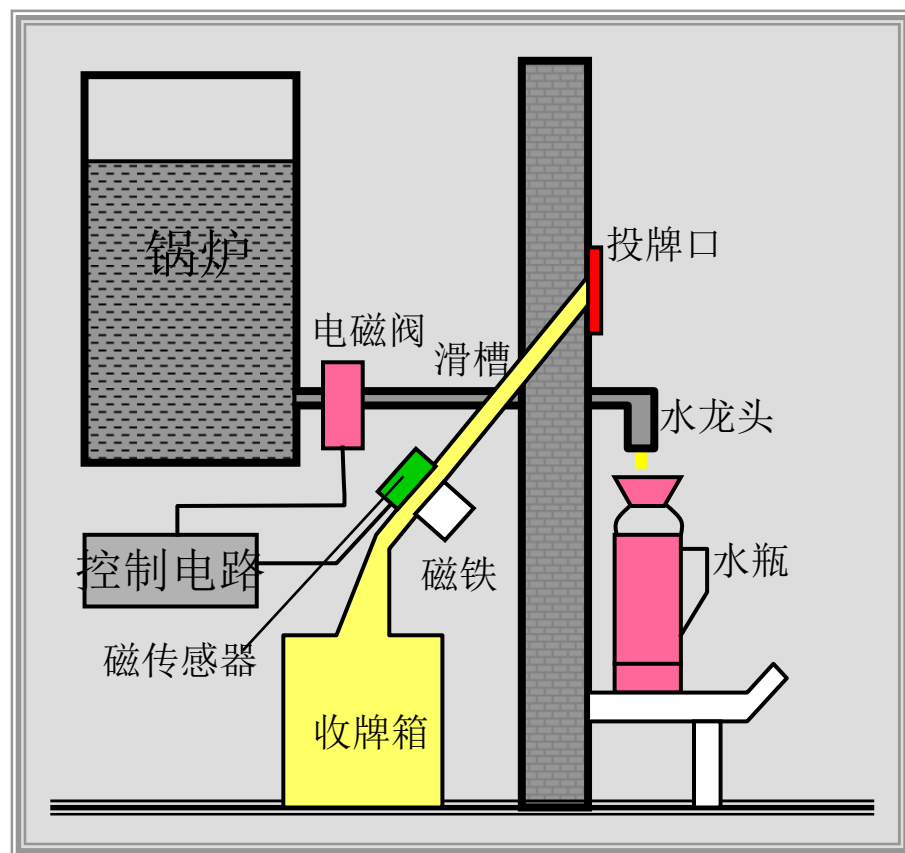


六、霍尔元件的应用

霍尔元件

自动凭票供水装置

锅炉中的水由电磁阀控制流出与关闭，电磁阀的打开与关闭，则受控于控制电路。



打水时，需将铁制的取水卡从投放口投入，取水卡沿非磁性物质制作的滑槽向下滑行，当滑行到磁传感器部位时，传感器输出信号经控制电路驱动电磁阀打开，让水从水龙头流出。

延迟一定时间后，控制电路使电磁阀关闭，水流停止。

1 霍尔式传感器

2 磁敏二极管和磁敏三极管

二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

磁敏二极管、三极管是继霍尔元件和磁敏电阻之后迅速发展起来的新型磁电转换元件。它们具有磁灵敏度高（磁灵敏度比霍尔元件高数百甚至数千倍）；能识别磁场的极性；体积小、电路简单等特点，因而正日益得到重视；并在检测、控制等方面得到普遍应用。

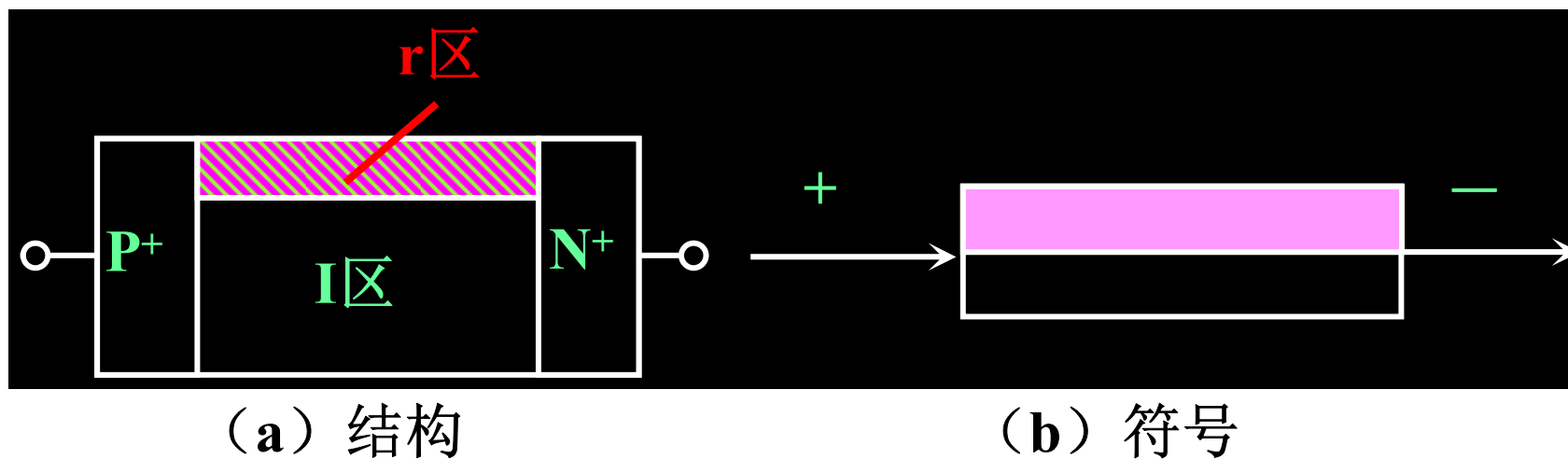
二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

磁敏二极管的工作原理和主要特性

1. 磁敏二极管的结构

磁敏二极管的P型和N型电极由高阻材料制成，在P、N之间有一个较长的本征区I。本征区I的一面磨成光滑的无复合表面（为l区），另一面打毛，设置成高复合区（为r区），因为电子—空穴对易于在粗糙表面复合而消失。



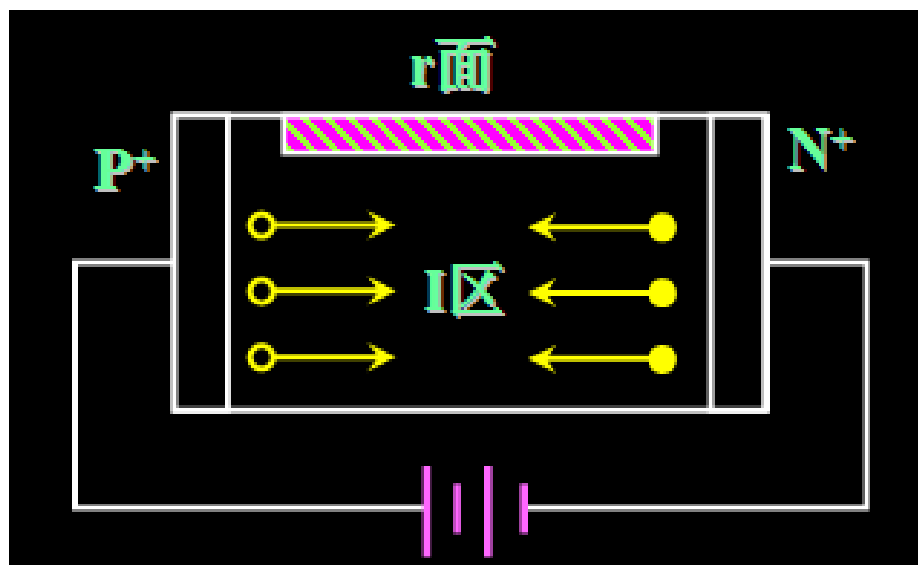
磁敏二极管结构示意图

二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

磁敏二极管的工作原理和主要特性

当磁敏二极管未受到外界磁场作用时，外加正向偏压后，则有大量的空穴从P区通过I区进入N区，同时也有大量电子注入P区，形成电流。只有少量电子和空穴在I区复合掉。

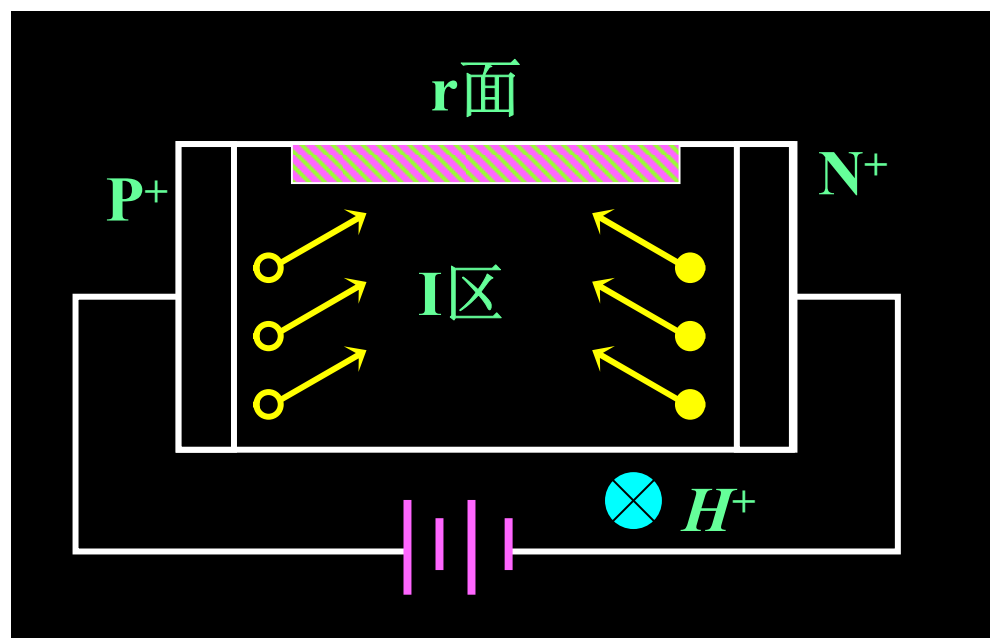


二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

磁敏二极管的工作原理和主要特性

当磁敏二极管受到外界正向磁场作用时，则电子和空穴受到洛仑兹力的作用而向r区偏转，由于r区的电子和空穴复合速度比光滑面I区快，因此，形成的电流因复合速度而减小，即I区电阻增加。

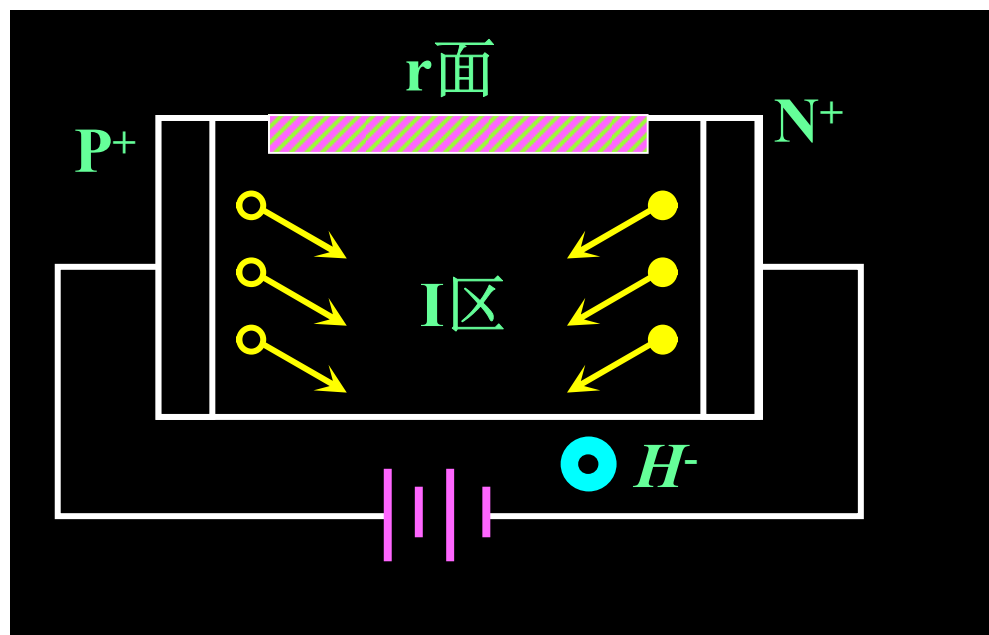


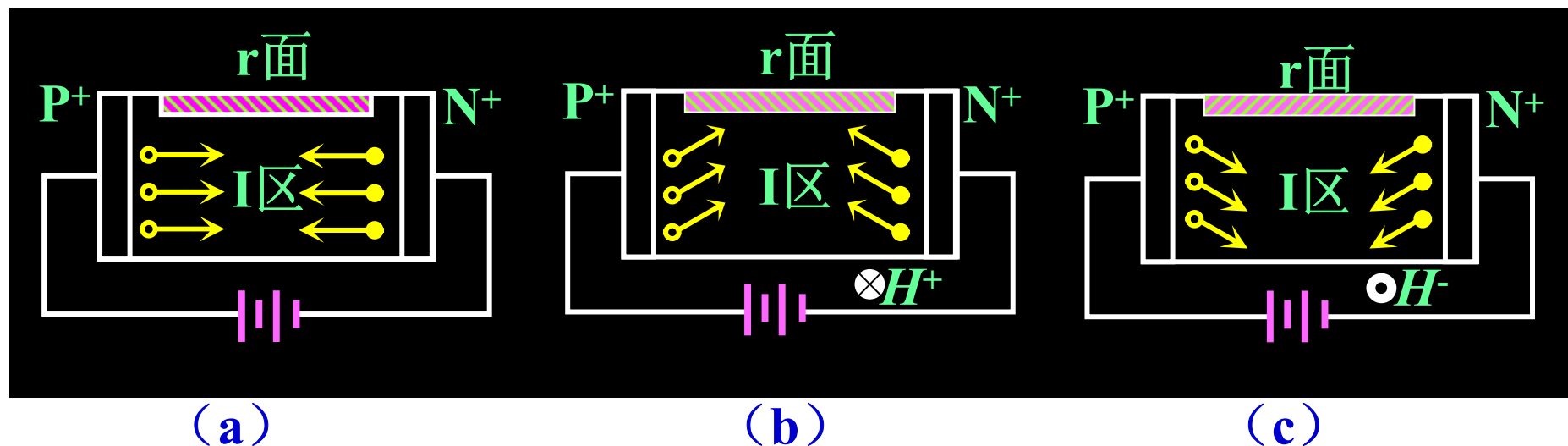
二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

磁敏二极管的工作原理和主要特性

当磁敏二极管受到外界反向磁场作用时，电子和空穴受到洛仑兹力的作用而向I区偏移，由于电子和空穴复合率明显变小，因此，**电流变大**，即I区**电阻减小**。





磁敏二极管工作原理示意图

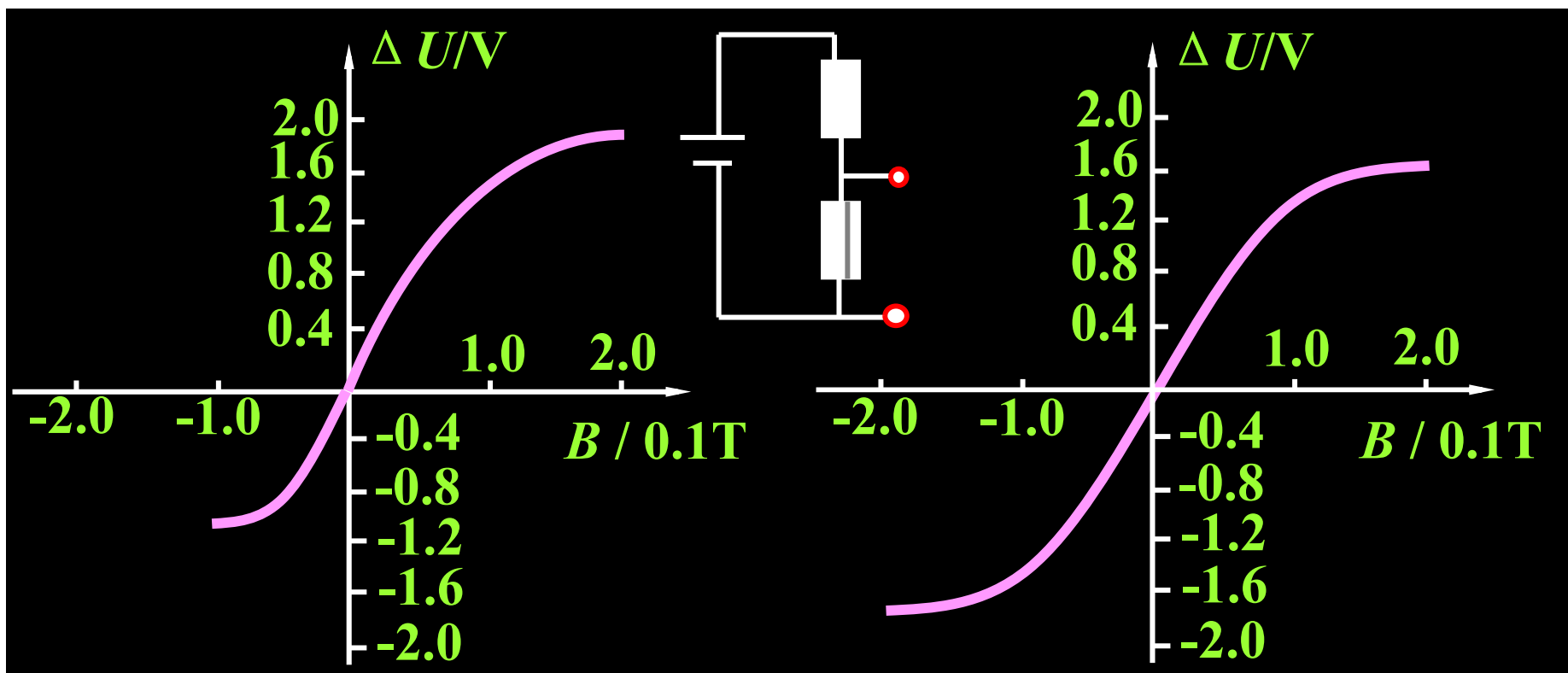
利用磁敏二极管在磁场强度的变化下，其电流发生变化，于是就实现磁电转换。

二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

磁敏二极管主要特性

1. **磁电特性**：在给定的条件下，磁敏二极管输出的电压**变化量**与外加磁场的关系，正向灵敏度大于反向灵敏度。



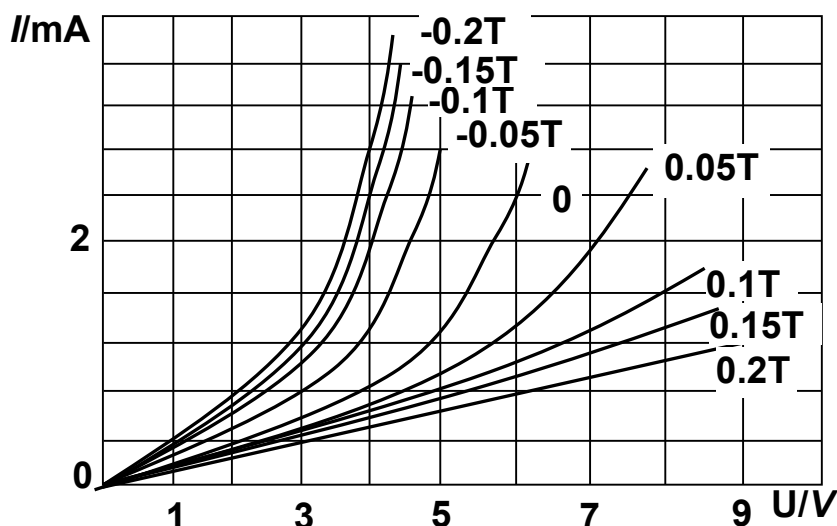
(a) 单只使用

(b) 互补使用

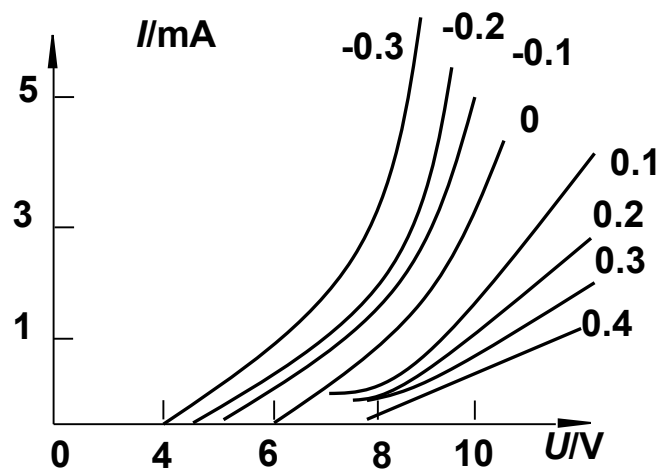
二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

2. 伏安特性：在给定磁场情况下，磁敏二极管正向偏压和通过其上电流的关系。



(a) 锗磁敏二极管



(b) 硅磁敏二极管

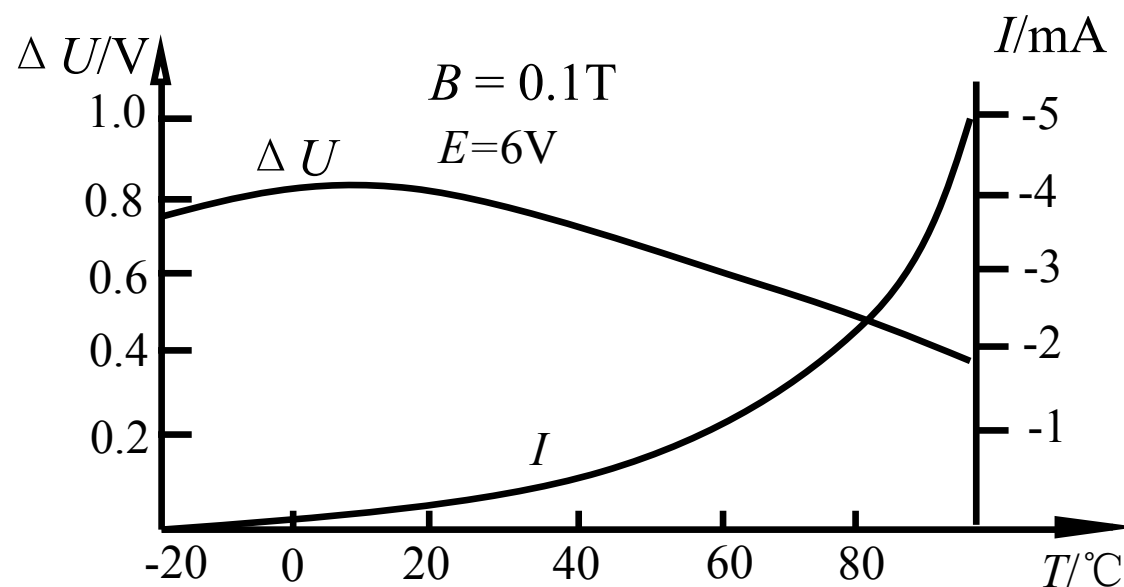
(1)输出电压一定，磁场为正时，随着磁场增加电流减小，表示磁阻增加；磁场为负时，随着磁场向负方向增加，电流增加，表示磁阻减小。

(2)硅磁敏二极管的伏安特性如图(b)所示，开始在较大偏压范围内，电流变化比较平坦，随外加偏压的增加，电流逐渐增加；此后，伏安特性曲线上升很快，表现出其动态电阻比较小。

二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

3.温度特性：在标准测试条件下，输出电压变化量随温度的变化规律。硅管的使用温度是 $-40^{\circ}\text{C}\sim\pm 85^{\circ}\text{C}$ ，锗管是 $-40\sim\pm 65^{\circ}\text{C}$ 。



磁敏二极管温度特性曲线
(单个使用时)

二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

温度特性的优劣可用 U_0 和 ΔU 温度系数来表示。

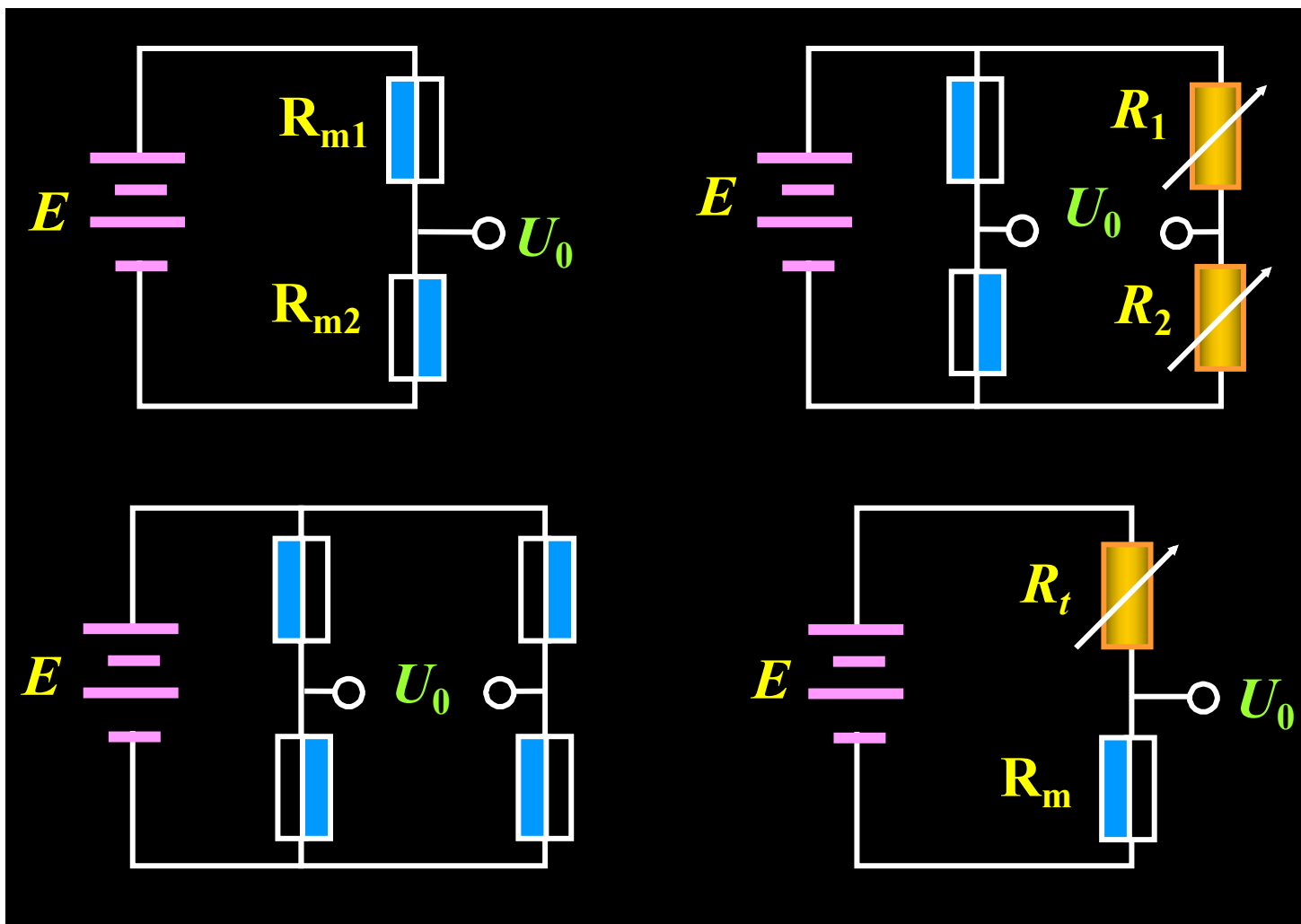
Ge、Si磁敏二极管的 U_0 及 ΔU 温度系数

二极管类型	U_0 温度系数	ΔU 温度系数	适用工作温度
Ge 磁敏二极管	$-60 \text{ mV}/^\circ\text{C}$	$1.5\%/^\circ\text{C}$	$-40\sim 65\text{ }^\circ\text{C}$
Si 磁敏二极管	$+20 \text{ mV}/^\circ\text{C}$	$0.6\%/^\circ\text{C}$	$-40\sim 85\text{ }^\circ\text{C}$

二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

实际使用**必须**进行温度补偿。



温度补偿电路

磁敏二极管 VS 霍尔元件

磁敏二极管的灵敏度，可比霍尔器件高上1000倍，但它的输入和输出是非线性的，且需注入比10mA大得多的电流。

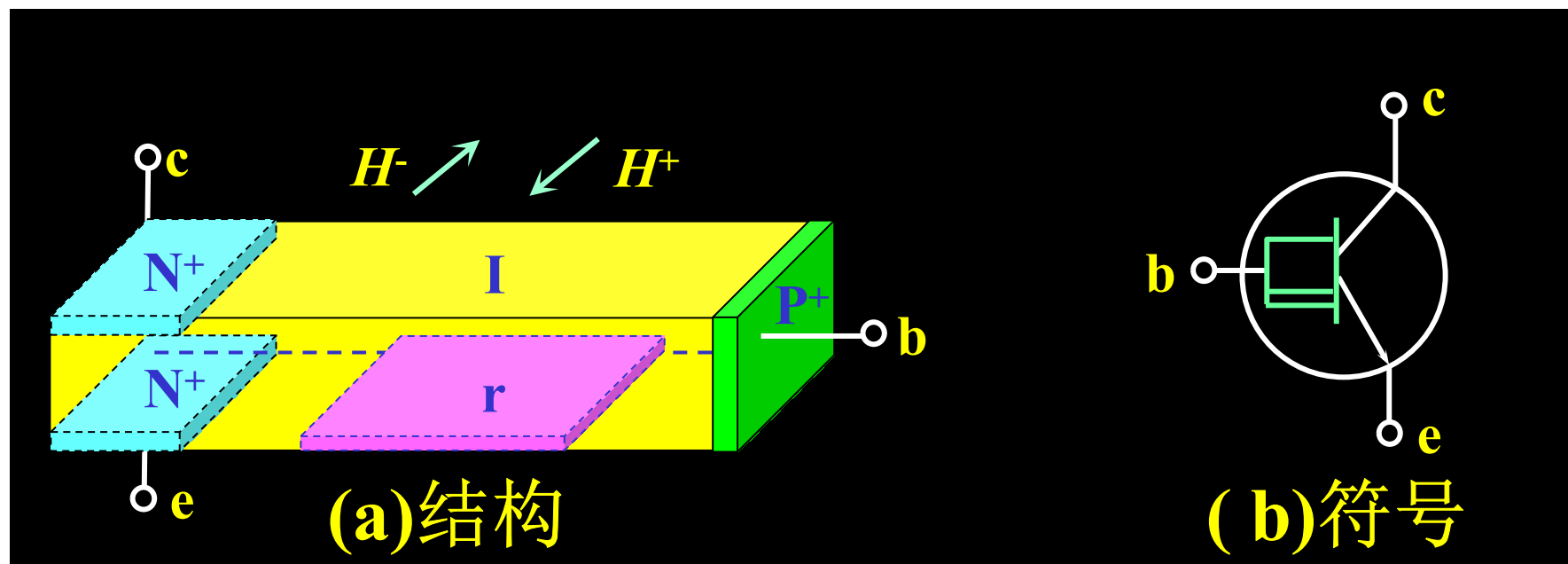
二、磁敏二极管和磁敏三极管

8.1 磁敏传感器

磁敏三极管的工作原理和主要特性

1. 磁敏三极管的结构与工作原理

在弱P型或弱N型本征半导体上用合金法或扩散法形成发射极、基极和集电极。基区较长。基区结构类似磁敏二极管，有高复合速率的r区和本征I区。长基区分为运输基区和复合基区。

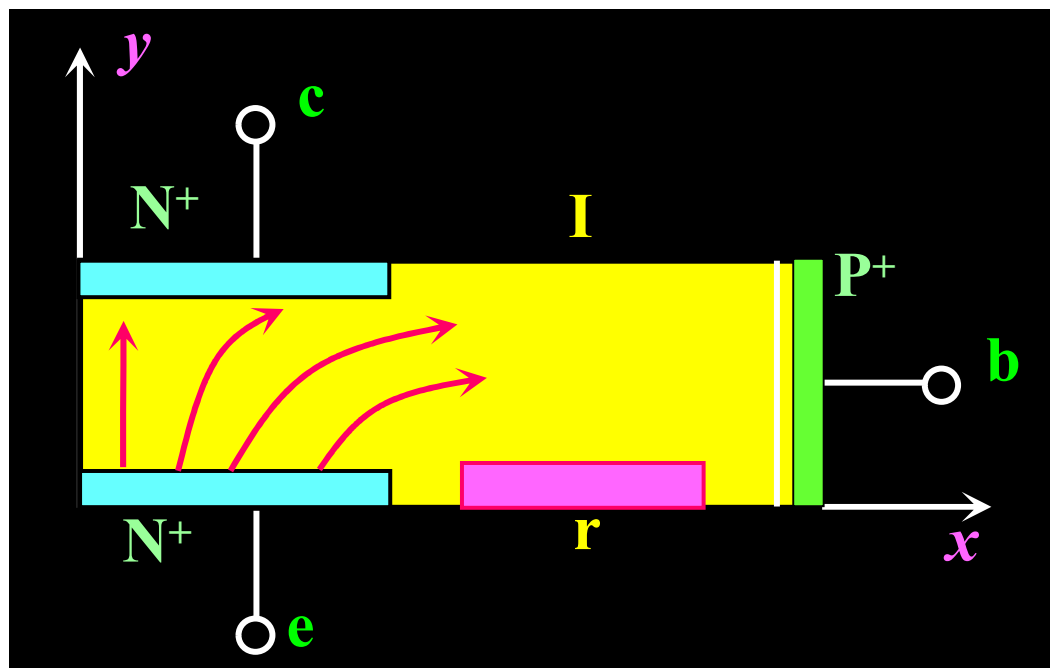


二、磁敏二极管和磁敏三极管

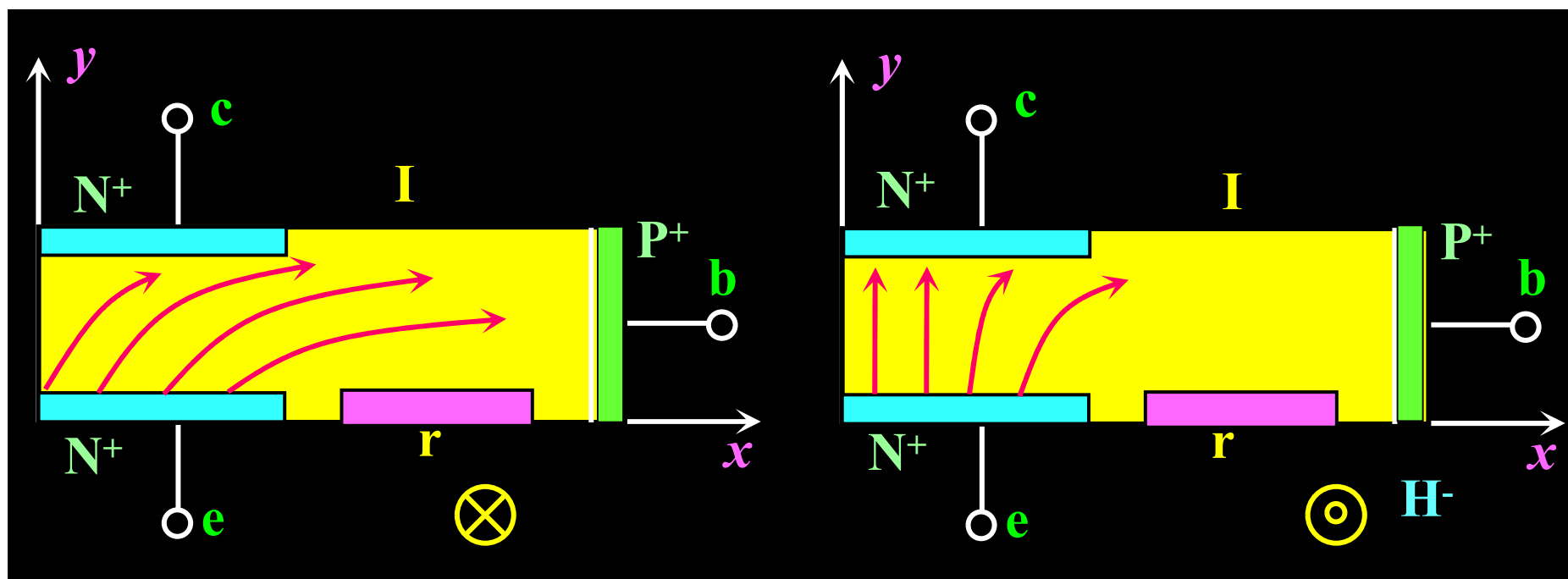
8.1 磁敏传感器

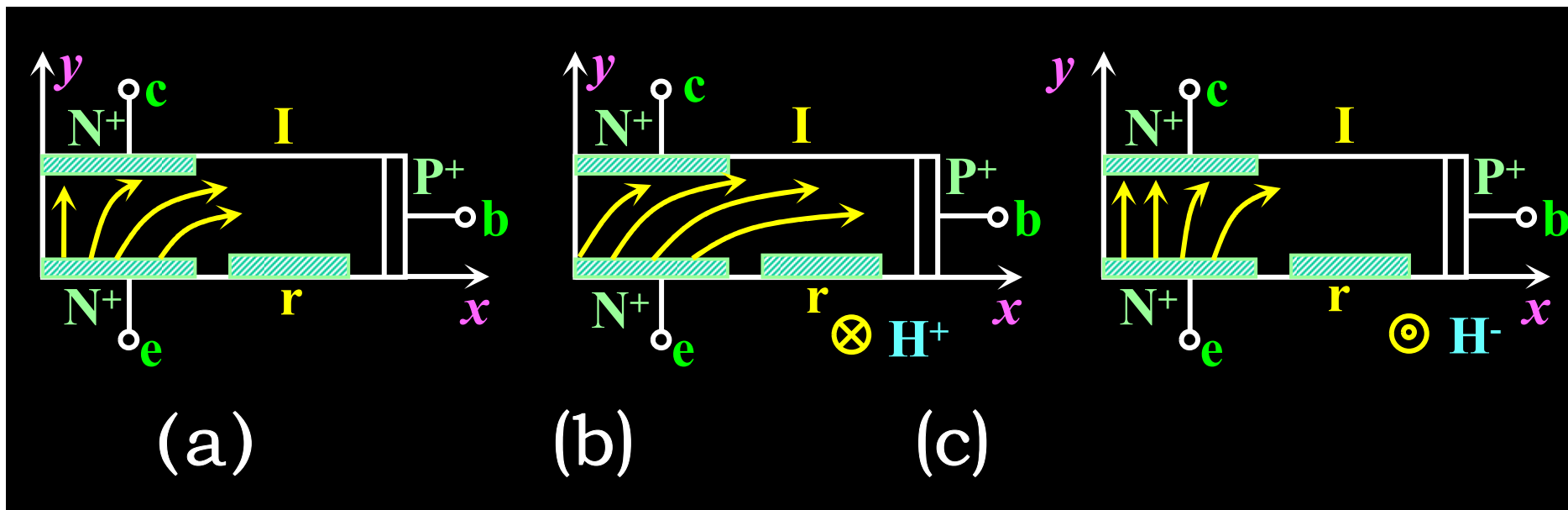
磁敏三极管的工作原理

当磁敏三极管未受磁场作用时，由于基区宽度大于载流子有效扩散长度，大部分载流子通过e-l-b形成基极电流，少数载流子输入到c极。因而形成基极电流大于集电极电流的情况，使 $\beta < 1$ 。



当受到正向磁场 (H^+) 作用时，由于磁场的作用，洛仑兹力使载流子偏向发射结的一侧，导致集电极电流显著下降，当反向磁场 (H^-) 作用时，在 H^- 的作用下，载流子向集电极一侧偏转，使集电极电流增大。





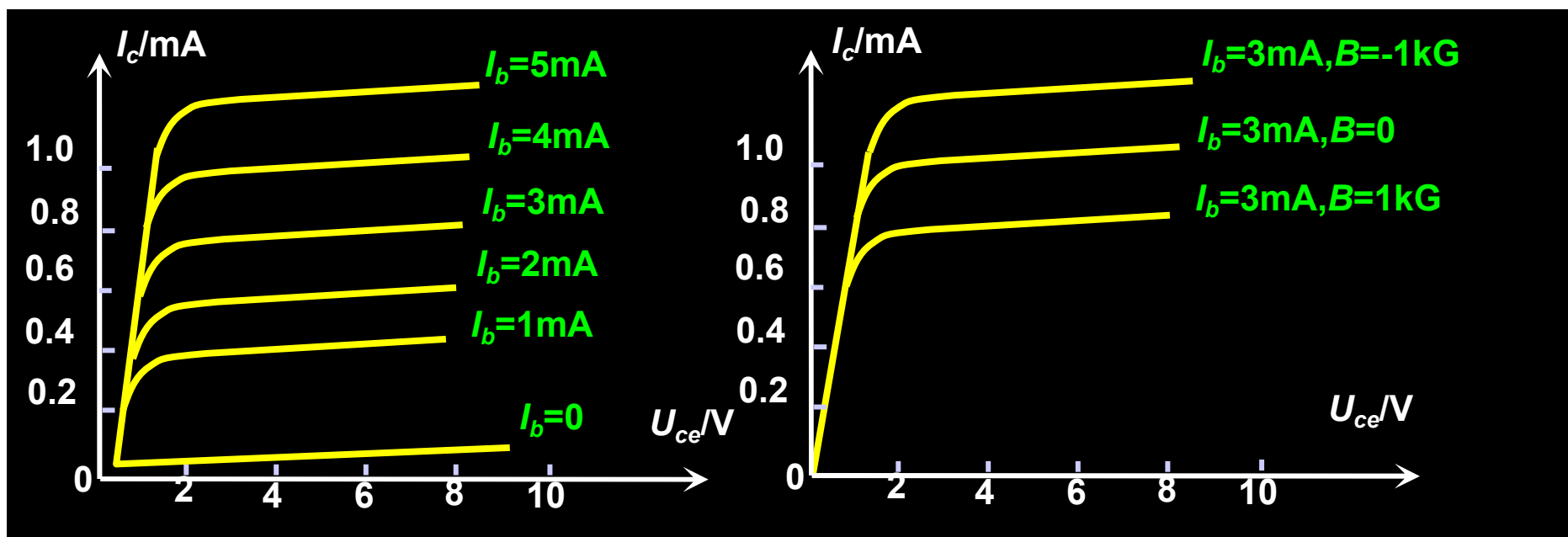
磁敏三极管工作原理

由此可知、磁敏三极管在正、反向磁场作用下，其集电极电流出现明显变化。这样就可以利用磁敏三极管来测量弱磁场、电流、转速、位移等物理量。

2. 磁敏三极管的主要特性

(1) 伏安特性

与普通晶体管的伏安特性曲线类似。



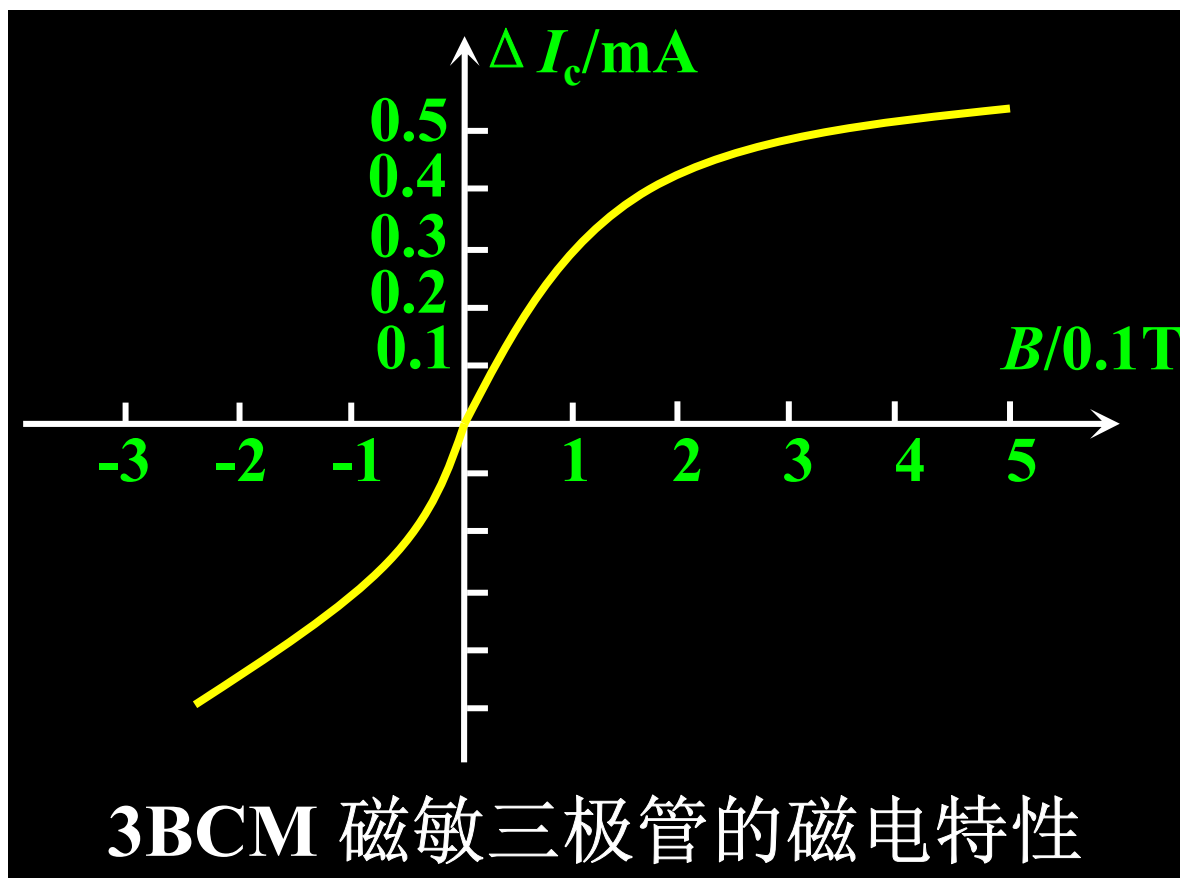
(1)为不受磁场作用时

(2)磁场为 $\pm 1\text{kGs}$ ，基极为 3mA

由图可知，磁敏三极管的电流放大倍数小于1。

(2) 磁电特性

磁敏三极管的磁电特性是应用的基础，右图
为国产NPN型3BCM（锗）磁敏三极管的磁电特性，
在弱磁场作用下，曲线接近
一条直线。

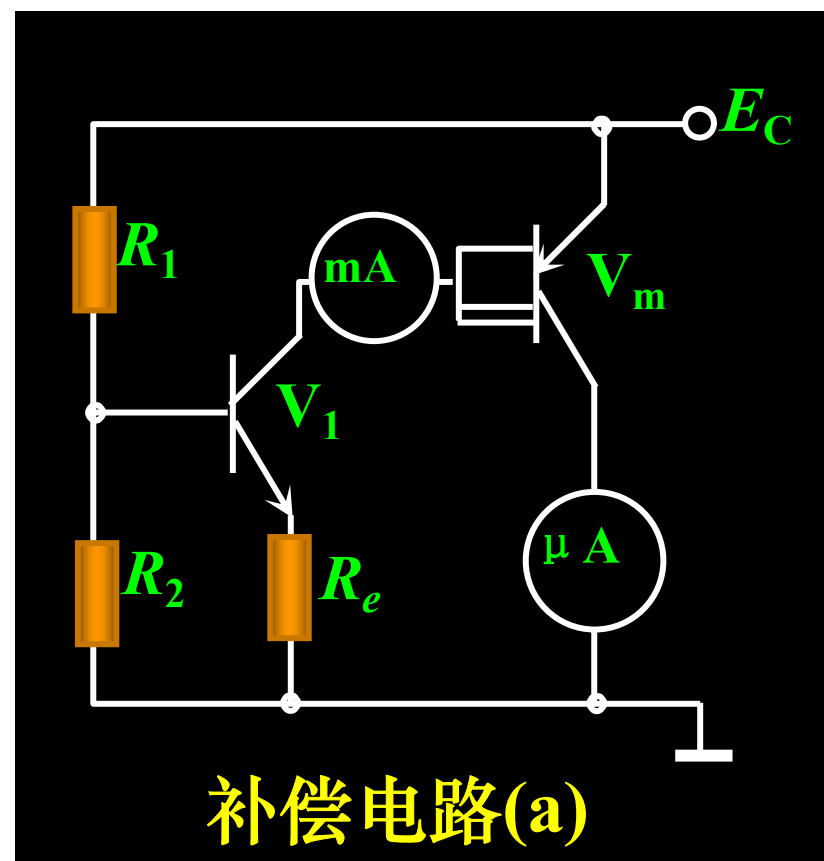


(3) 温度特性及其补偿

磁敏三极管对温度比较敏感，使用时必须进行温度补偿。对于锗磁敏三极管如3ACM、3BCM，其磁灵敏度的温度系数为 $0.8\%/^{\circ}\text{C}$ ；硅磁敏三极管(3CCM)磁灵敏度的温度系数为 $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$ 。因此，实际使用时必须对磁敏三极管进行温度补偿。

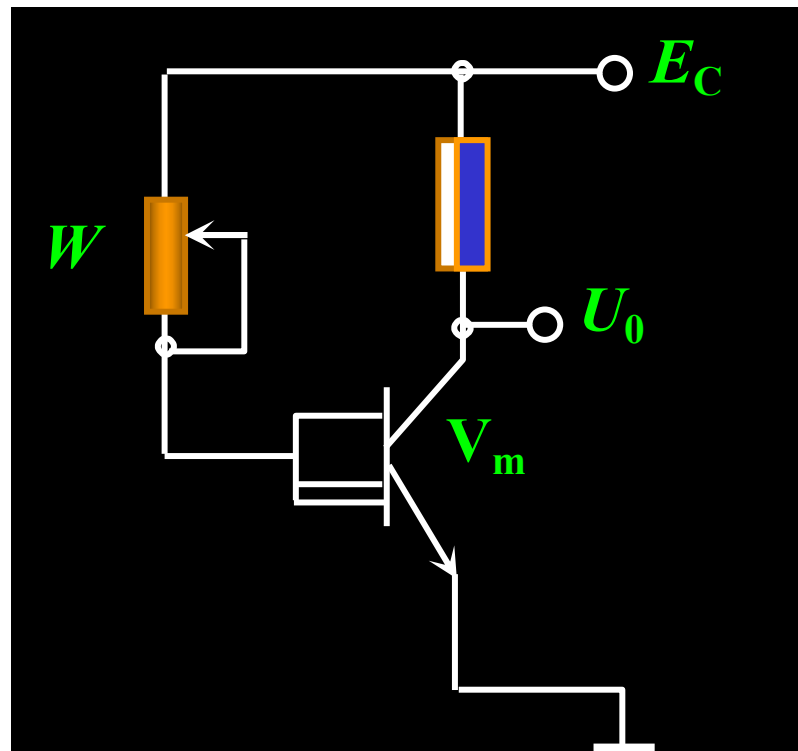
对于硅磁敏三极管因其具有负温度系数，可用正温度系数的普通硅三极管来补偿因温度而产生的集电极电流的漂移。

具体补偿电路如图所示。
当温度升高时， V_1 管集电极电流 I_C 增加，导致 V_m 管的集电极电流也增加，从而补偿了 V_m 管因温度升高而导致 I_C 的下降。



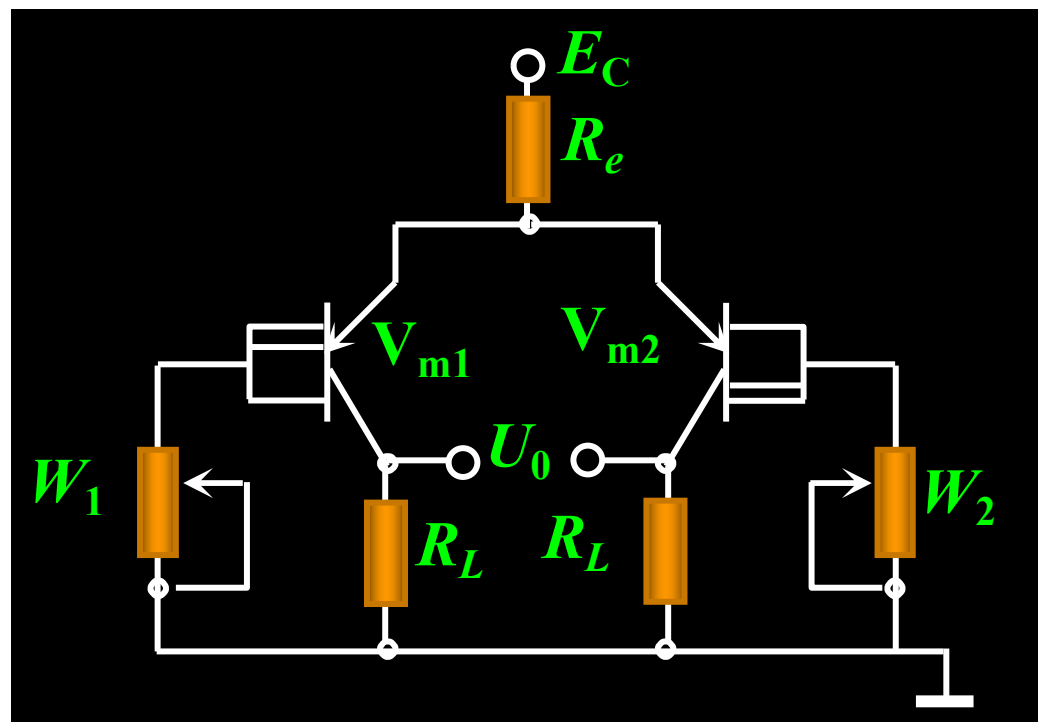
利用锗磁敏二极管电流随温度升高而增加的这一特性，使其作为硅磁敏三极管的负载，从而当温度升高时，可补偿硅磁敏三极管的负温度漂移系数所引起的电流下降。

补偿电路(b)



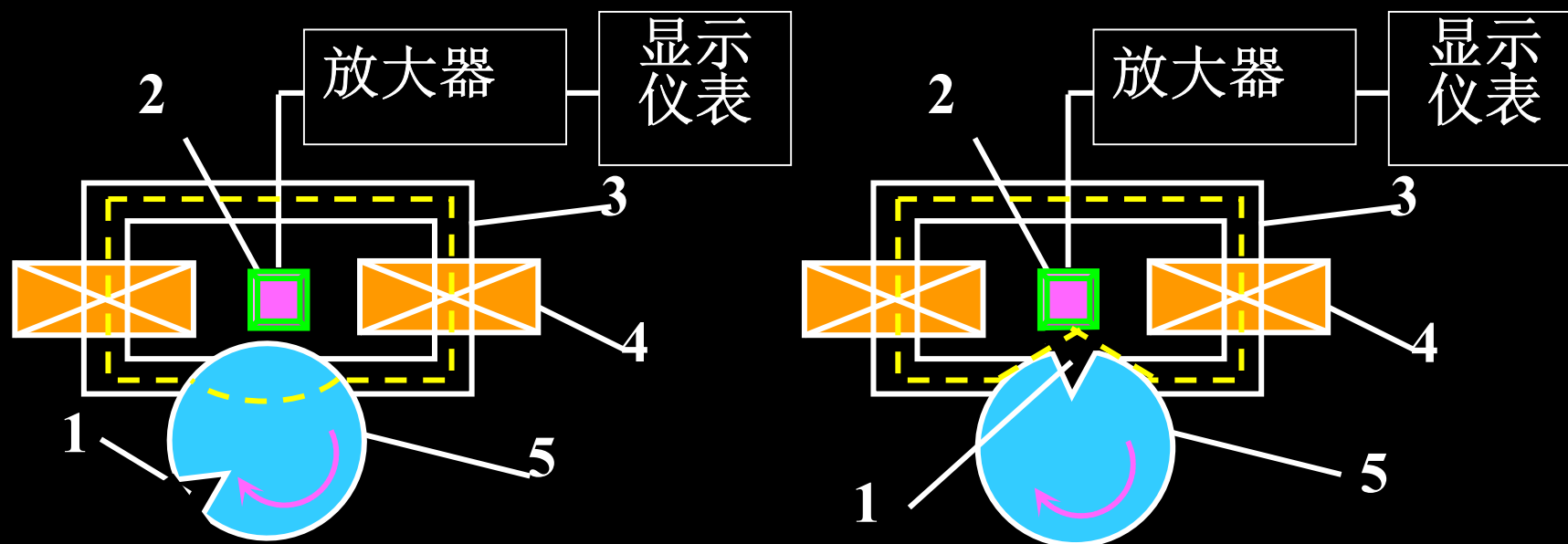
下图是采用两只特性一致、磁极相反的磁敏三极管组成的差动电路。这种电路既可以提高磁灵敏度，又能实现温度补偿，它是一种行之有效的温度补偿电路。

补偿电路 (c)



磁敏二极管、三极管的应用

例：漏磁探伤仪



漏磁探伤仪原理图

- 1 裂缝； 2 磁敏管探头； 3 铁芯；
4 激励线圈； 5 被测棒材

例：无触点电位器

磁敏三极管置于1kGs的磁场中，改变磁敏三极管的基极电流，该电路的输出电压在0.7V~15V之间连续变化。

这就等效于一个电位器，而且没有触点。该电路特别适合于变化频繁、调节迅速、噪声要求低的场合。

