

第5章 物质中的磁场与磁性材料

§ 5.1 磁介质与磁化

§ 5.2 磁性材料

~~§ 5.3 新型材料中的磁现象~~

§ 5.4 磁场的测量*

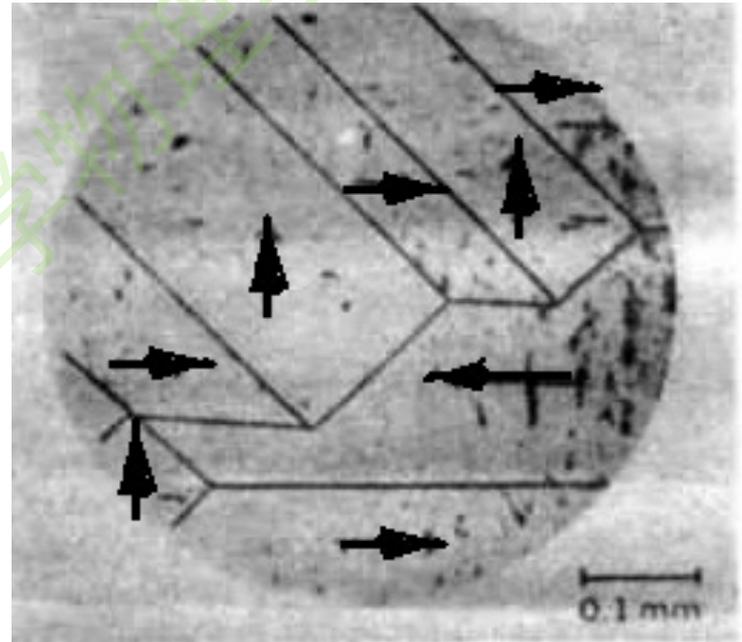
中国科学技术大学物理学院

3、铁磁性材料 (Ferromagnetism)

以铁、钴、镍和一些稀土元素
以及它们的合金及氧化物材料构成的介质

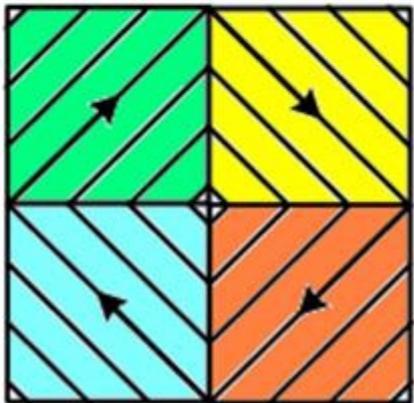
铁磁性介质中，原子之间的强烈
耦合会形成**分子磁矩有序排列**的
许多小区域，称为**“磁畴”**

这一特殊结构使得介质在磁场中
显示出非常强的顺磁性，称为
“铁磁性”



铁磁性材料的磁化过程

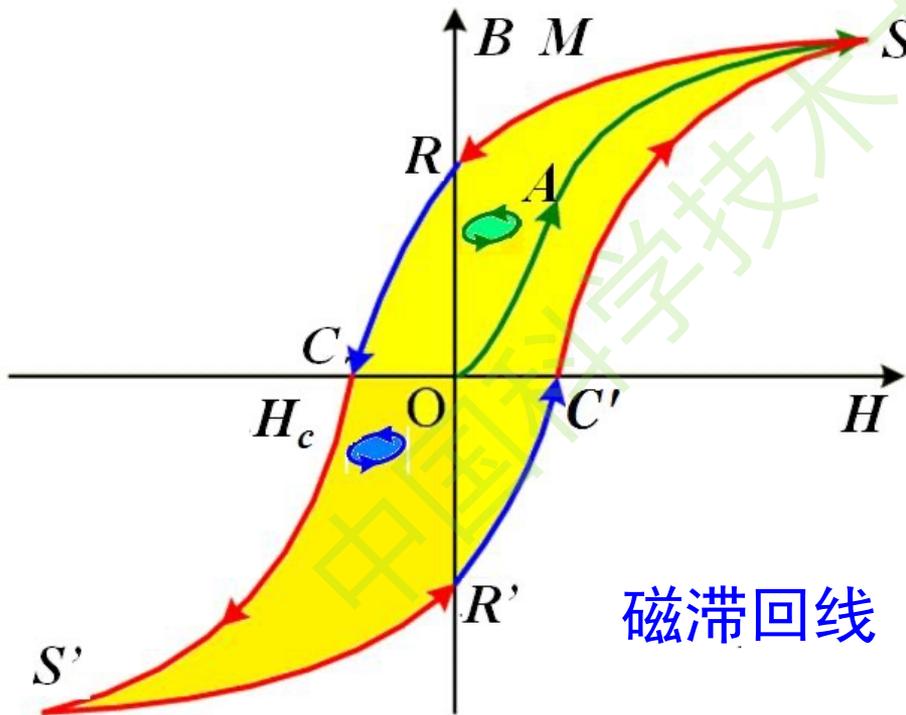
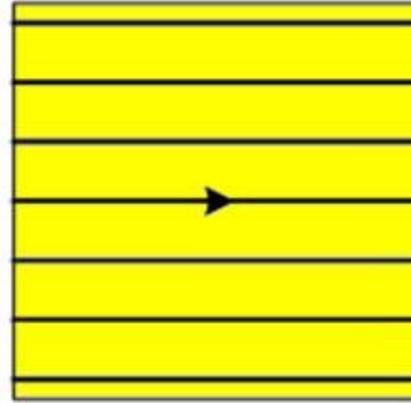
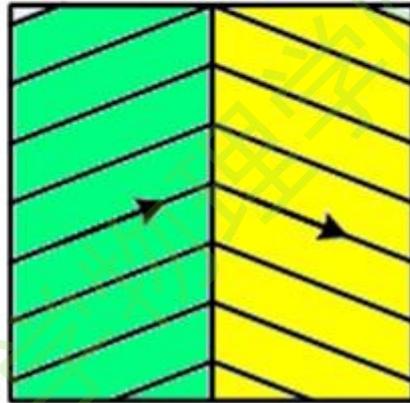
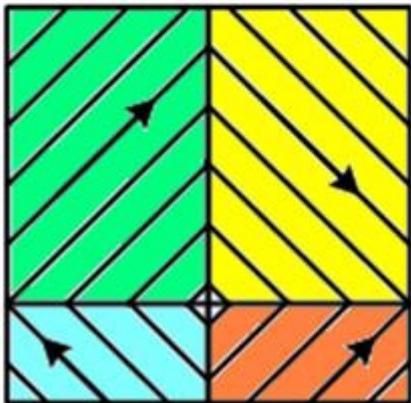
“壁移过程”



H 增加

“畴转过程”

饱和磁化



磁滞回线

磁化强度不是常数，而且与磁化的历史和过程有关

M_R : 剩余磁化强度

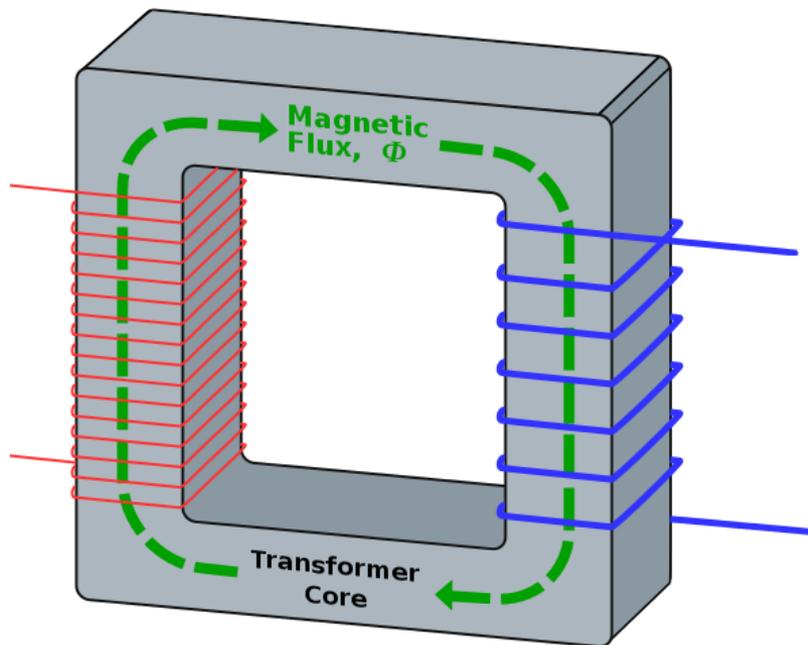
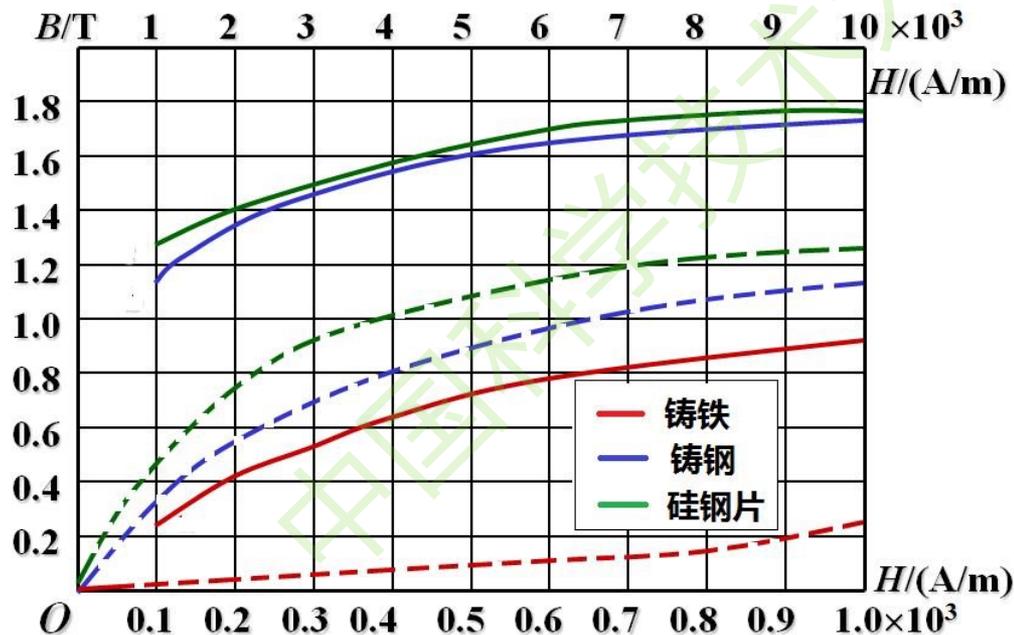
H_c : 矫顽力

§ 5.2.2 磁路定理和磁屏蔽

1、磁路定律

很多电工设备需要较强的磁场或较大的磁通量

由于铁磁性介质的磁导率非常高，经常使用铁磁性物质做成闭合或者近似闭合的环路，来增加磁感应强度、约束磁通等。

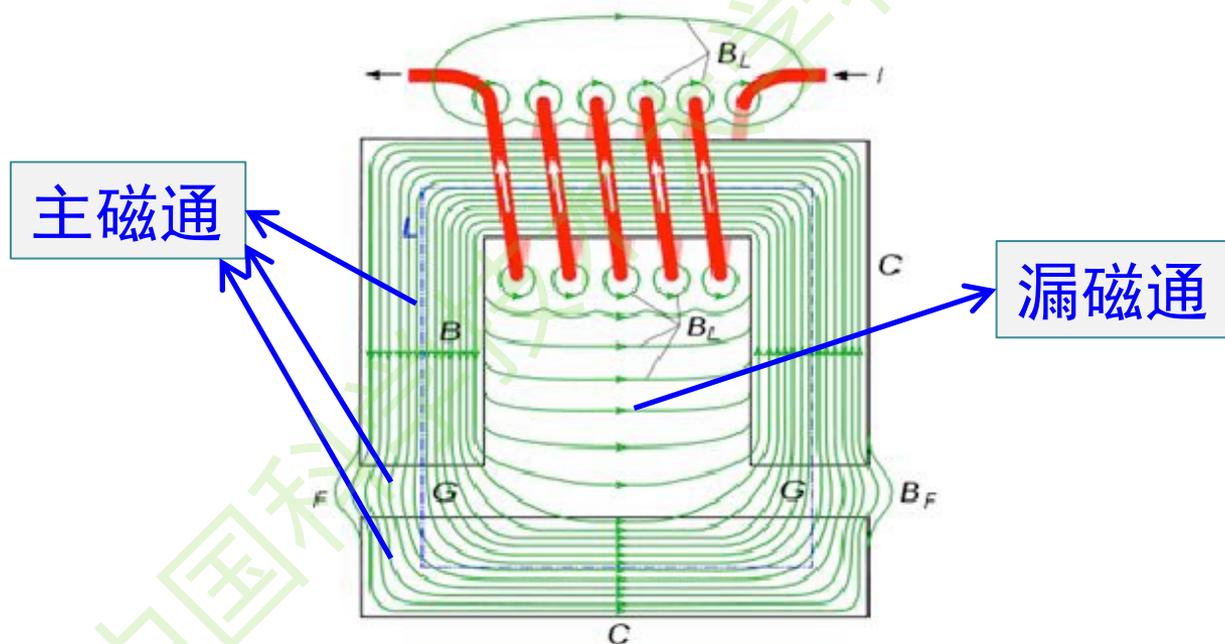


这种约束在铁芯范围内的磁场称为**磁路**

磁路的磁通可以分为两部分：**主磁通**和**漏磁通**

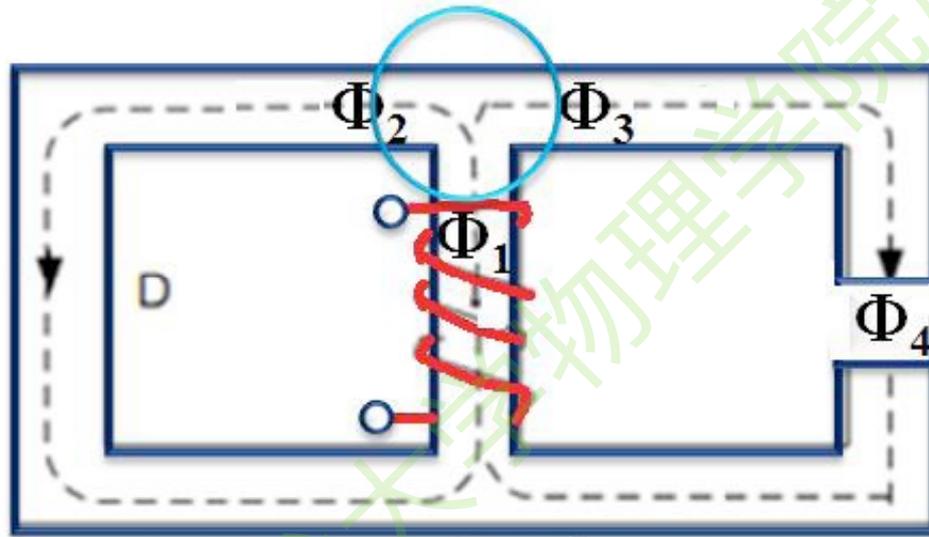
主磁通：和绝大部分是通过磁路（包括气隙）

漏磁通：和部分磁通穿出铁芯，经过磁路周围非铁磁性物质



漏磁通一般很小，磁路初步计算中常将漏磁通忽略不计

磁路的基尔霍夫定律



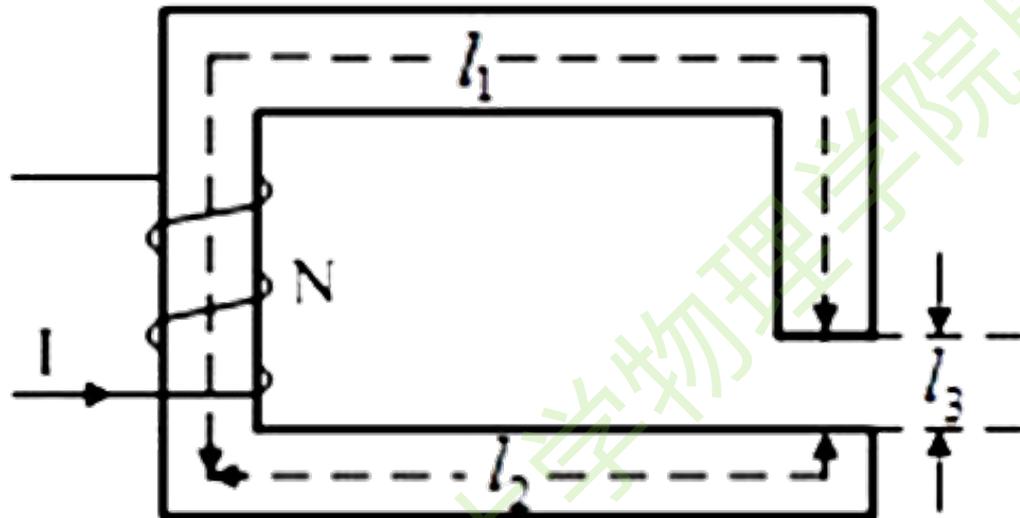
根据高斯定理，如果忽略漏磁通，则任意节点的总磁通为0

$$\sum_i \Phi_i = 0$$

磁路的基尔霍夫第一定律

磁通相当于电路中的电流

而磁感应强度B相当于电路中的电流密度



对于任意闭合磁路回路
根据安培环路定理，有

$$\sum_i H_i l_i = \sum_i N_i I_i$$

仿照电路，引入“磁动势”

$$\mathcal{E}_m = NI$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_i \int H_i dl_i$$

$$\Phi = BS = \mu HS$$

$$H = \frac{\Phi}{\mu S}$$

$$\int H_i dl_i = \int \frac{\Phi}{\mu_i S_i} dl_i = \Phi \int \frac{dl_i}{\mu_i S_i}$$

定义

$$R_m = \int \frac{dl}{\mu S}$$

磁阻

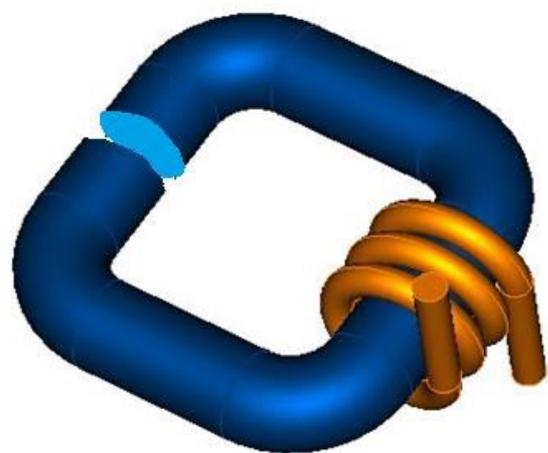
定义

$$U_m = \Phi R_m$$

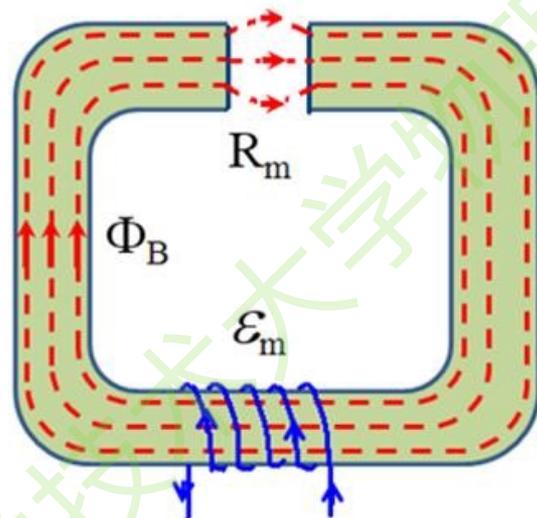
磁路欧姆定律

$$\mathcal{E}_m = NI = \sum_i U_{mi} = \Phi \sum_i R_{mi}$$

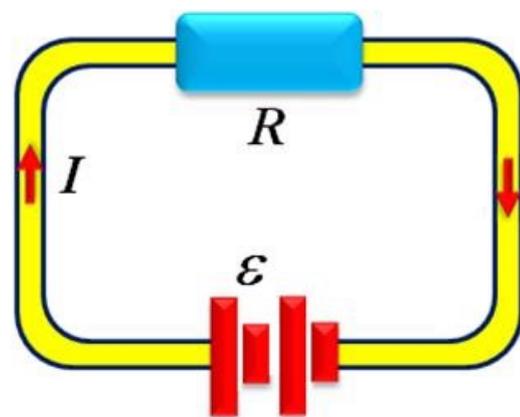
磁路的基尔霍夫第二定律



(a)



(b)



(c)

中国科学院大学物理学院唐

已知线圈有 N 匝，流过电流强度为 I ，铁芯总长为 l ，气隙长度为 l_0 ，求气隙中的磁感应强度 B 。

磁电动势：

$$\mathcal{E}_m = NI$$

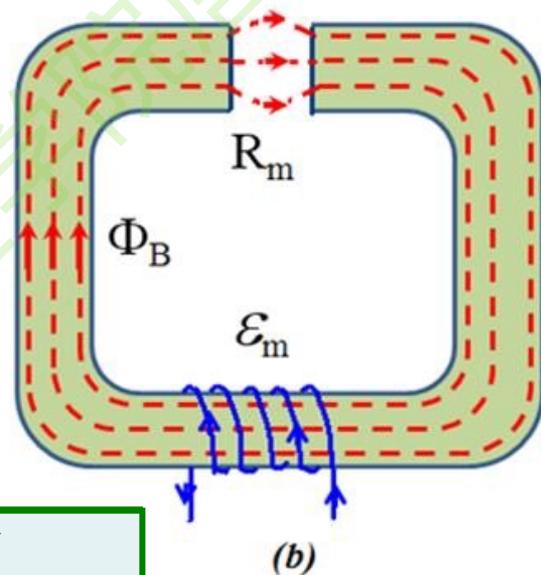
磁阻：

$$r_m = \int \frac{dl}{\mu S} = \frac{l}{\mu S}$$

$$R_m = \frac{l_0}{\mu_0 S}$$

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}_m}{R_m + r_m} = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S} + \frac{l_0}{\mu_0 S}}$$

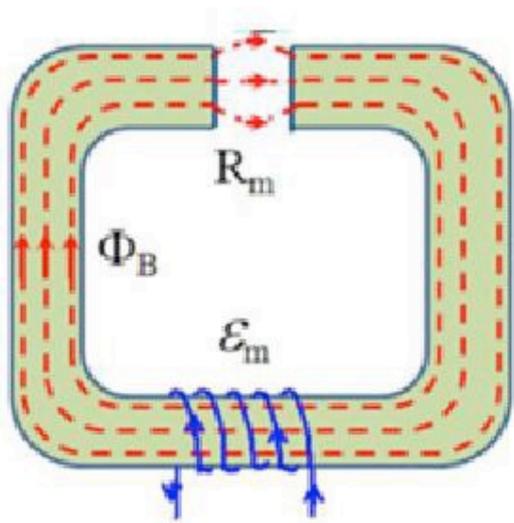
$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{NI}{\frac{l}{\mu} + \frac{l_0}{\mu_0}} = \frac{\mu NI}{l + \mu_r l_0}$$



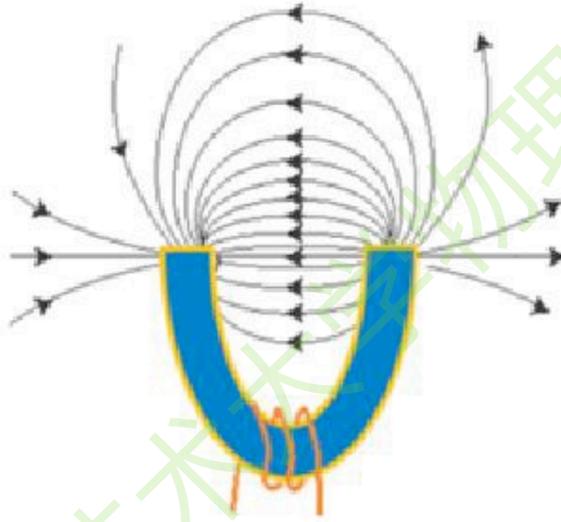
磁感应强度很大

很小的气隙变化可以很大程度
改变整个磁感应强度

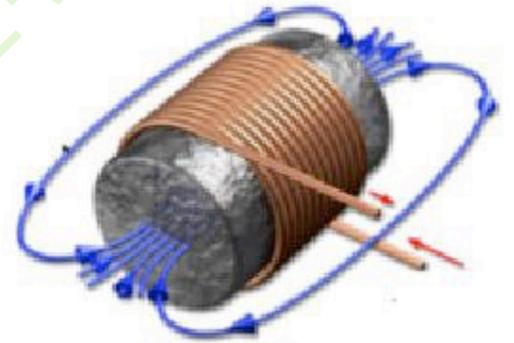
由于气隙中的磁导率要远小于铁芯中的磁导率，气隙的磁阻特别大，对磁通和磁感应强度影响特别大。



磁阻小



磁阻中



磁阻大

当电流和总匝数相同时，线圈的绕法无关

电路与磁路比较

 \mathcal{E}

$$\mathcal{E}_m = NI$$

 I Φ j B σ μ

$$j = \sigma E$$

$$B = \mu H$$

$$U = IR$$

$$U_m = \Phi R_m$$

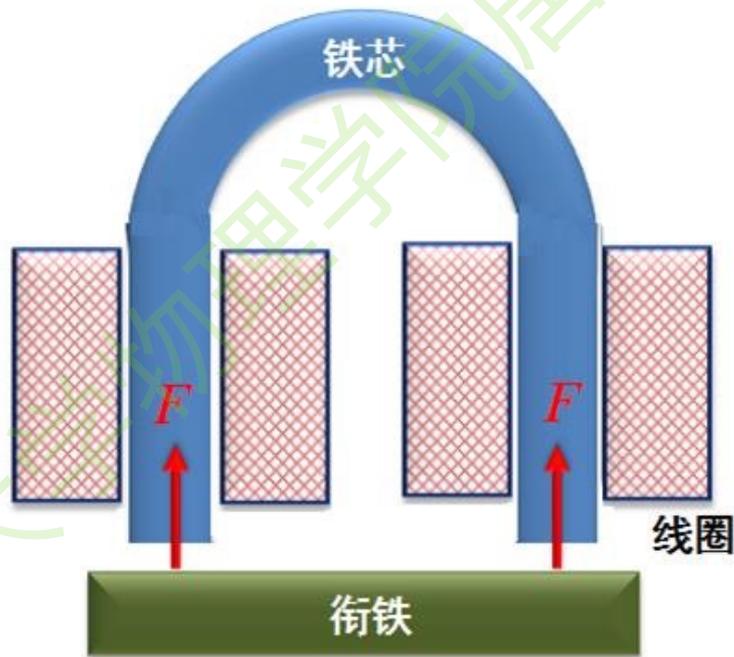
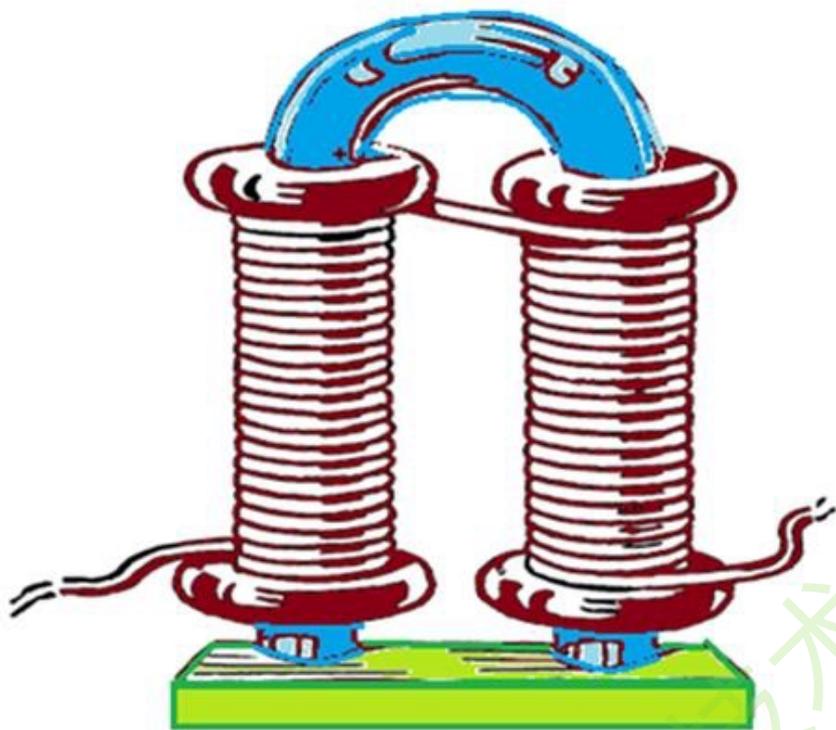
$$R = \int \rho \frac{dl}{S} = \int \frac{dl}{\sigma S}$$

$$R_m = \int \frac{dl}{\mu S}$$

$$\mathcal{E} = I(R + r)$$

$$\mathcal{E}_m = \Phi(R_m + r_m)$$

2、电磁铁



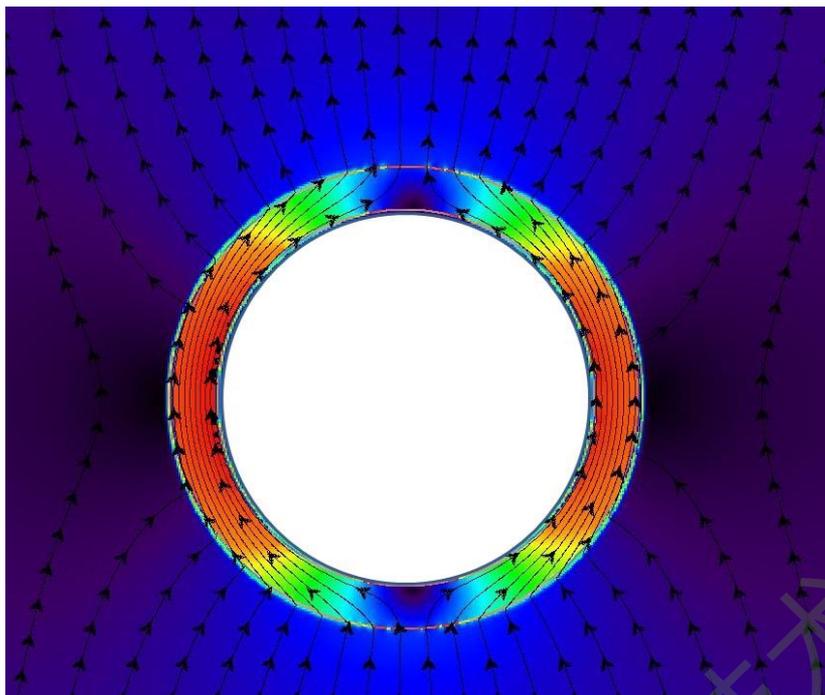
由虚功原理易得直流电磁铁吸力：

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

对于交流电，平均值为：

$$F = \frac{B_m^2}{4\mu_0} S$$

3、磁屏蔽

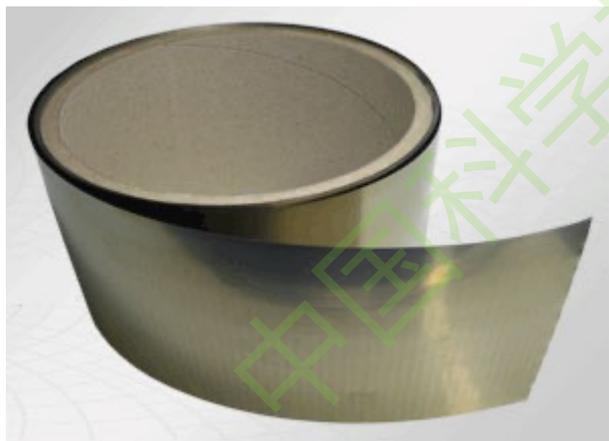


根据界面上的“折射定理”

磁感应线很难穿出高磁导率介质

可用高磁导率介质来屏蔽静磁场，如软铁、硅钢、坡莫合金等

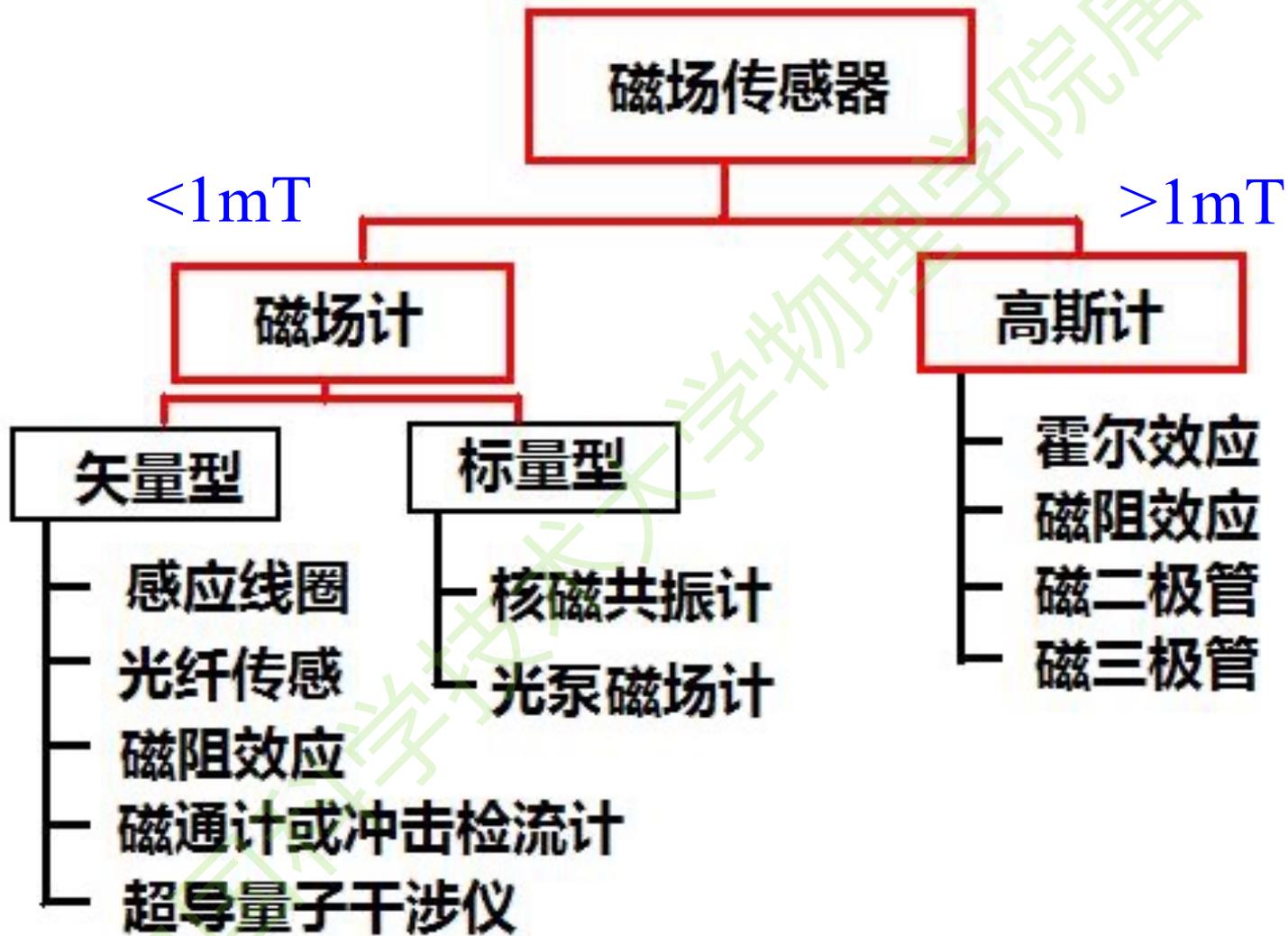
实际应用中，经常采用多层屏蔽。



坡莫合金



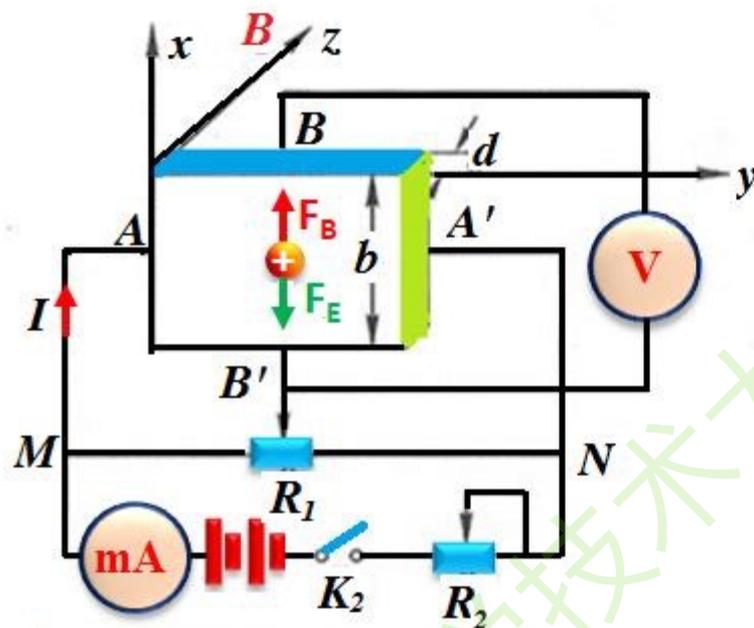
§ 5.4 磁场的测量



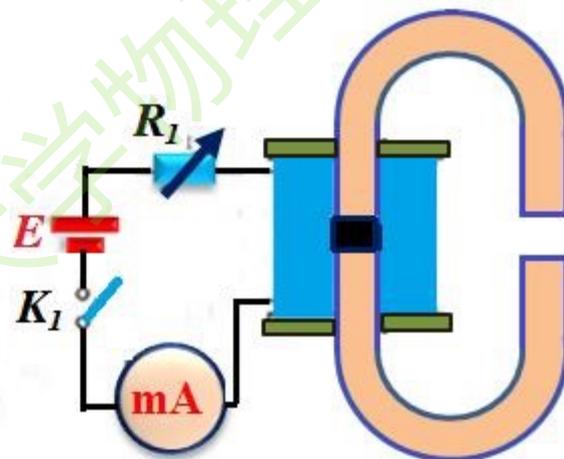
利用磁电效应、磁阻效应、核磁共振、磁光效应等测量磁场

高磁场测量

霍尔效应



实验装置图（霍尔元件部分）



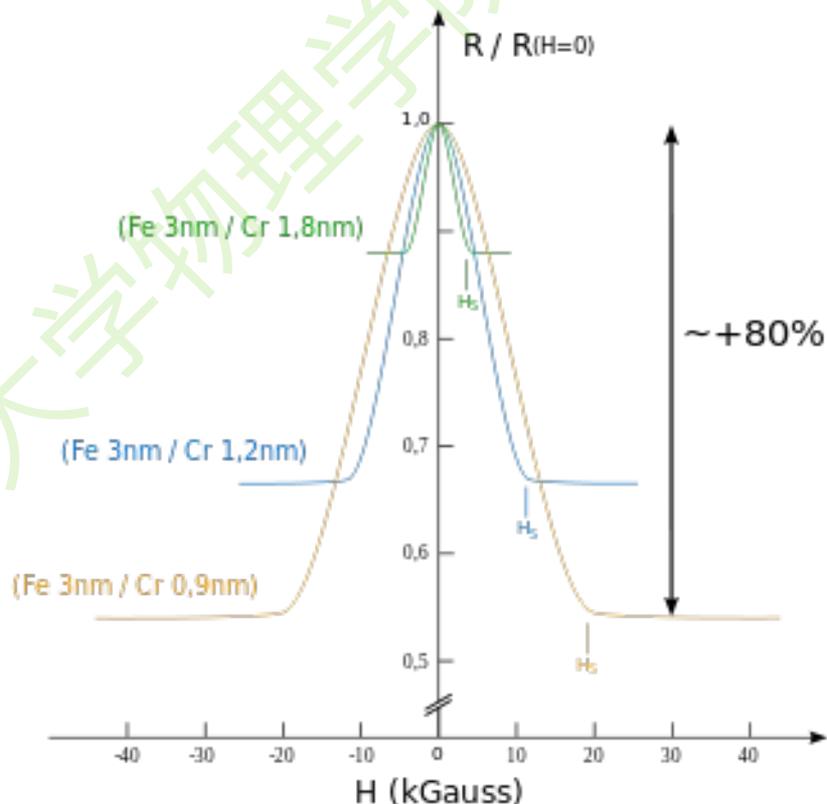
电磁铁气隙中的磁场

$$B = \frac{V_h d}{I R_h}$$

磁阻效应

物质在一定磁场下电阻改变的现象，称为“磁阻效应”

$$MR = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_H - \rho_0}{\rho_0}$$



应用：

1. 磁场测量
2. 磁电子学

如高密度读出磁头、磁存储元件等

巨磁阻效应

电磁感应

