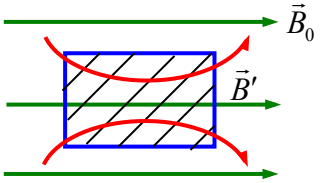
11—7 磁介质

第1节　磁介质的分类



$\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'$

令 $\dfrac{B}{B_0}=\mu_r$：相对磁导率

$\mu_r<1$：抗磁质，$\mu_r>1$：顺磁质，

$\mu_r>>1$，$10^2\sim10^3$ 甚至 10^6：铁磁质，真空：$\mu_r=1$

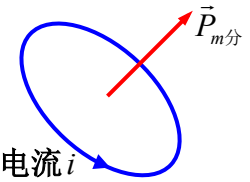
第 2 节　磁介质的磁化机理

一、分子固有磁矩

$\vec{P}_{m分}=\sum\vec{P}_{m电轨}+\sum\vec{P}_{m电自}+\sum\vec{P}_{m核}$

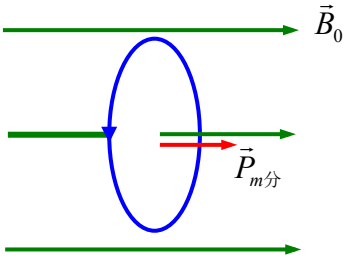
$\vec{P}_{m分}=0$：抗磁性，$\vec{P}_{m分}\neq0$：顺磁性

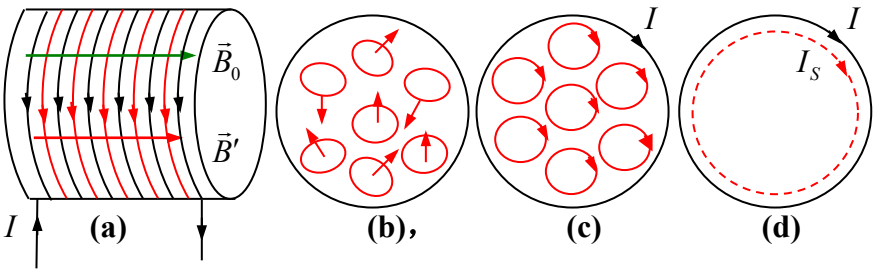
二、顺磁性　　$\vec{P}_{m分}\neq0$



分子电流 i

$\Rightarrow$





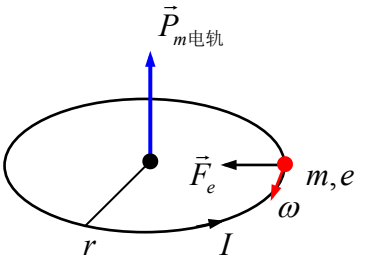
磁化电流（束缚电流），$\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'$，$B>B_0$，$\mu_r>1$

$\vec{P}_{m分}$ 在外磁场中取向变化 $\Rightarrow$ 顺磁效应

三、电子在外磁场中的附加磁矩

$F_e=m\omega^2r$，$I=\dfrac{\omega}{2\pi}e$

$P_{m电轨}=I\pi r^2=\dfrac{\omega}{2\pi}e\pi r^2=\dfrac{1}{2}\omega e r^2$



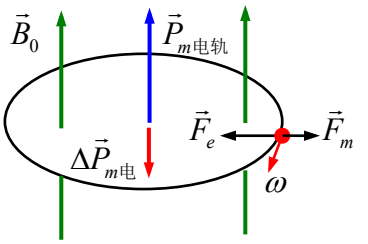
1、$\vec{B}_0//\vec{P}_{m电轨}$

$F_e-F_m=m\omega^2r$，（r 不变）

$\omega\downarrow$

$P_{m电轨}\downarrow$

附加磁矩 $\Delta\vec{P}_{m电}//(-\vec{B}_0)$



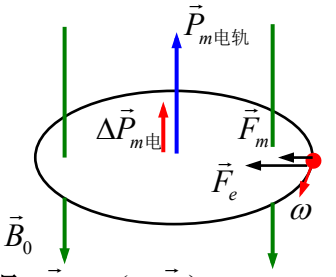
2、$(-\vec{B}_0)//\vec{P}_{m电轨}$

$F_e+F_m=m\omega^2 r$

$\omega\uparrow$

$P_{m电轨}\uparrow$

附加磁矩 $\Delta\vec{P}_{m电}//(-\vec{B}_0)$

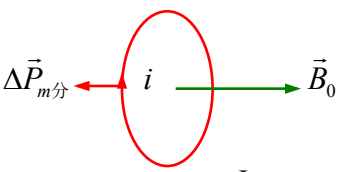


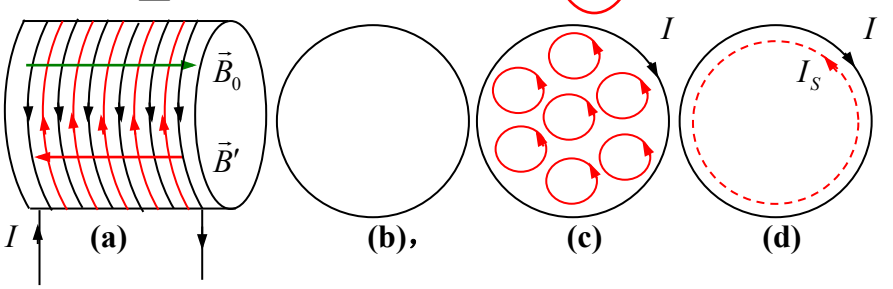
结论：电子在外磁场中，附加磁矩 $\Delta\vec{P}_{m电}//(-\vec{B}_0)$

四、抗磁性　　$\vec{P}_{m分}=0$

$\Delta\vec{P}_{m电}//(-\vec{B}_0)$，

$\Delta\vec{P}_{m分}=\sum\Delta\vec{P}_{m电}//(-\vec{B}_0)$





$$\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'，\quad B<B_0，\quad \mu_r<1$$

分子附加磁矩：抗磁效应

顺磁质：$\Delta\vec{P}_{m分}<<\vec{P}_{m分}$，抗磁效应被顺磁效应所掩盖

总结：$\vec{P}_{m分}$ 在外磁场中取向变化 $\Rightarrow$ 顺磁效应

分子附加磁矩 $\Delta\vec{P}_{m分}\Rightarrow$ 抗磁效应

$\vec{P}_{m分}\neq 0$ 的磁介质，$\Delta\vec{P}_{m分}<<\vec{P}_{m分}$，顺磁性

$\vec{P}_{m分}=0$ 的磁介质，$\Delta\vec{P}_{m分}$，抗磁性

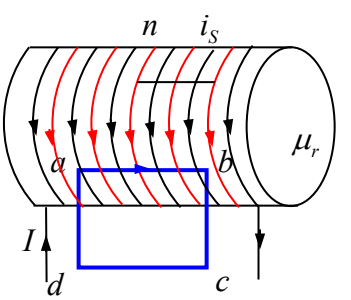
第 3 节　$\vec{H}$ 的安培环路定律

$B_0=\mu_0 nI$，

$\oint_L\vec{B}\cdot d\vec{l}=B\overline{ab}$

$=\mu_0(n\overline{ab}I+i_S\overline{ab})$，

$=\mu_0(nI+i_S)\overline{ab}$，



$B=\mu_0(nI+i_S)$

$$\frac{B}{B_0}=\frac{\mu_0(nI+i_S)}{\mu_0 nI}=\mu_r$$

$\mu_0(nI+i_S)=\mu_0\mu_r nI$，$\oint_L\vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0\mu_r nI\overline{ab}$

$nI\overline{ab}=\sum_L I_{传}$，$\mu_0\mu_r=\mu$：磁导率

$\oint_L\vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu\sum_L I_{传}$，　$\oint_L(\vec{B}/\mu)\cdot d\vec{l}=\sum_L I_{传}$

定义：磁场强度 $\vec{H}=\dfrac{\vec{B}}{\mu}=\dfrac{\vec{B}}{\mu_0\mu_r}$，真空：$\vec{H}=\dfrac{\vec{B}}{\mu_0}$

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=\sum_L I_{传}}$$ —— $\vec{H}$ 的安培环路定律

说明：（1）$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}$ 仅与回路所围传导电流代数和有关

与磁化电流无关

但 $\vec{H}$ 及 $\vec{B}$ 与所有电流及其分布有关

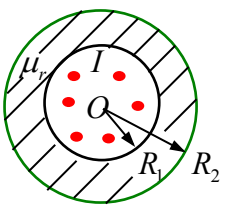
（2）$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0\sum_L I \Leftrightarrow \oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=\sum_L I_{传}$

有磁介质时，后者应用更方便

例：铜导线 R_1，I，外包一层

磁介质 R_2，μ_r

已知：$\mu_{铜}\approx\mu_0$



求：$\vec{H}$、$\vec{B}$

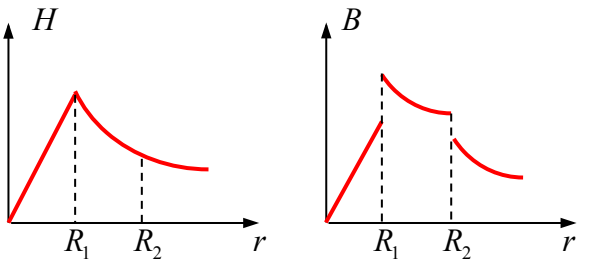
解：$r<R_1$，$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=H2\pi r=\dfrac{I}{\pi R_1^2}\pi r^2$

$$H=\frac{Ir}{2\pi R_1^2}，\quad B\approx\mu_0 H=\frac{\mu_0 Ir}{2\pi R_1^2}$$

$R_1<r<R_2$，$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=H2\pi r=I$

$$H=\frac{I}{2\pi r}，\quad B=\mu_0\mu_r H=\frac{\mu_0\mu_r I}{2\pi r}$$

$r>R_2$，$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=H2\pi r=I$，$H=\dfrac{I}{2\pi r}$，$B=\mu_0 H=\dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}$



SI：$\vec{H}$ 的单位：A/m

有磁介质时，磁高斯定理：$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0$，$\oint_S \vec{H}\cdot d\vec{S}=0$ ✕

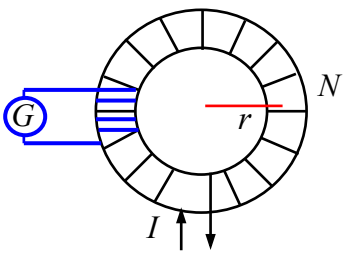
$\vec{B}=\mu\vec{H}=\mu_0\mu_r\vec{H}$：各向同性均匀磁介质

第 4 节　铁磁质

一、磁化曲线

$$H=\frac{NI}{2\pi r}\approx\frac{NI}{2\pi\overline{R}}=nI$$

（B、H）



起始磁化曲线

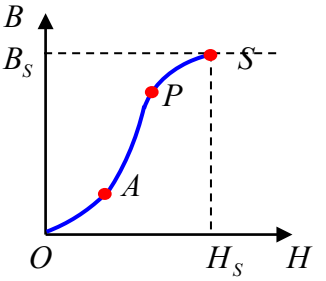
$I=0$， $H=0$， $B=0$

$I\uparrow$， $H\uparrow$， $B\uparrow$

S：磁饱和状态

$B=\mu H=\mu_0\mu_r H$

$\mu_r=\dfrac{B}{\mu_0 H}$：不是常数



$I\downarrow$， $H\downarrow$， $B\downarrow$

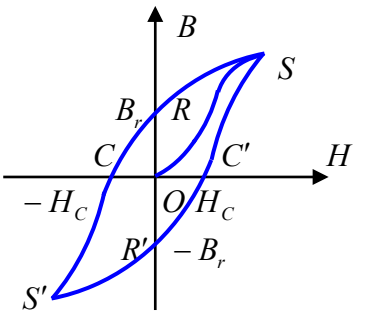
$I=0$， $H=0$

$B\neq 0$， $B=B_r$

B_r：剩磁

$H=-H_C$， $B=0$

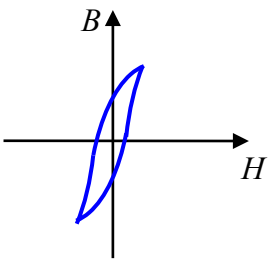
H_C：矫顽力



磁滞现象

磁滞回线， B 与 H 不是线性的，也不是单值的

磁滞损耗（铁损）$\propto$ 磁滞回线面积



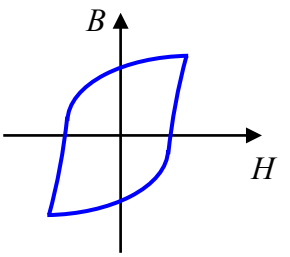
瘦长形

软磁材料

损耗小， B_r 、 H_C 小

变压器、电机的铁芯

硅钢片，纯铁



粗胖形

硬磁材料

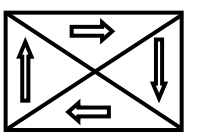
损耗大， B_r 、 H_C 大

永久磁铁、记录磁带

Cr-Co-Ni 合金

二、磁畴

线度约为 $10^{-4}m$ 的小区域，小区域中所有电子的自旋磁矩“自发地”朝着同一个方向排列：磁畴



无外磁场时，磁畴的取向是无规则的

在外磁场中，磁畴的体积及取向将发生变化

磁矩与外磁场方向相近的磁畴体积↑

磁矩与外磁场方向偏离较大的磁畴体积↓

磁畴尽可能转向外磁场方向排列

搀杂、内应力等因素，磁畴之间存在“摩擦”

磁畴体积变化及转动是不可逆的 $\rightarrow$ 剩磁、磁滞现象

$H>H_S$，所有磁畴都朝着外磁场方向排列（磁饱和）

特征温度 T_C， $T>T_C$，铁磁性消失 $\rightarrow$ 普通的顺磁质

T_C：居里点