第五章　磁介质

§ 5-1 磁介质及其磁化

§ 5-2 有磁介质时的恒定磁场

§ 5-3 磁场的边界条件

§5-1 磁介质及其磁化

- **磁性:**
  - 物质的基本属性之一，即物质的磁学特性
  - 吸铁石——天然磁体 —— 具有强磁性
  - 多数物质一般情况下没有明显的磁性
- **磁介质（magnetic medium）：**
  - 对磁场有一定响应,并能反过来影响磁场的物质
  - 一般物质在较强磁场的作用下都显示出一定程度的磁性，即都能对磁场的作用有所响应，所以都是磁介质
- **磁化（magnetization）：**
  - 在外磁场的作用下，原来没有磁性的物质，变得具有磁性，简称磁化。磁介质被磁化后，会产生附加磁场，从而改变原来空间磁场的分布

§5-1 磁介质及其磁化

一、磁本质

1. 磁荷模型

- 磁荷有正、负，同号相斥，异号相吸
- 磁荷遵循磁的库仑定律（类似于电库仑定律）
- 定义磁场强度H为单位点磁荷所受的磁场力
- 把磁介质分子看作磁偶极子
- 认为磁化是大量分子磁偶极子规则取向使正、负磁荷聚集两端的过程，磁体间的作用源于其中的磁荷
- 但没有单独的磁极存在——?

§ 5-1 磁介质及其磁化

2. “分子电流”模型

安培的大胆假设

- 磁介质的“分子”相当于一个环形电流，是电荷的某种运动形成的，它没有像导体中电流所受的阻力，分子的环形电流具有磁矩——分子磁矩，在外磁场的作用下可以自由地改变方向

3. 现代的观点

分子电流 —— 卢瑟福行星模型

近代物理：量子化轨道 (n, l, m, m_s)

$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m}\vec{L} \qquad \mu_s = -\frac{e}{m}S_z$$

§ 5-1 磁介质及其磁化

- 分子磁矩 $\vec{p}_{m分子}=\vec{m}_l+\vec{m}_s$ （矢量和）
  - 轨道磁矩$\vec{m}_l$：由原子内各电子绕原子核的轨道运动决定
  - 自旋磁矩$\vec{m}_s$：由电子自旋与核自旋决定
- 所谓磁化：
  - 就是在外磁场$\vec{B}_0$作用下，大量分子电流混乱分布（无序）→ 整齐排列（有序）
  - 每一个分子电流提供一个分子磁矩$\vec{p}_{m分子}$
  - 磁化了的介质内分子磁矩矢量和 $\sum \vec{p}_{m分子}\neq 0$
  - 分子磁矩的整齐排列贡献宏观上的磁化电流I'，进而产生附加磁场$\vec{B}'$， **总磁场** $\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'$

§5-1 磁介质及其磁化

二、磁介质及其磁化

电介质 $\xrightarrow{\text{极化后}}$ 产生极化电荷 q'

$\Rightarrow$ 介质中总场 $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

电介质中$\vec{E}'$总是与$\vec{E}_0$反向，即恒有：$E < E_0$

磁介质 $\xrightarrow{\text{磁化后}}$ 产生磁化电流 I'

$\Rightarrow$ 介质中总场 $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

磁介质中$\vec{B}'$与$\vec{B}_0$可能同向,也可能反向，即磁介质中可能有$B > B_0$，也可能是$B < B_0$。

$\boxed{\mu_r = B/B_0}$ ——**磁介质的相对磁导率**

$\boxed{\mu = \mu_r \mu_0}$ ——**磁介质的磁导率**

§ 5-1 磁介质及其磁化

二、磁介质及其磁化

(1)无外磁场时，物质在宏观上对外都不显磁性。在外磁场中，它们会表现出不同磁性。

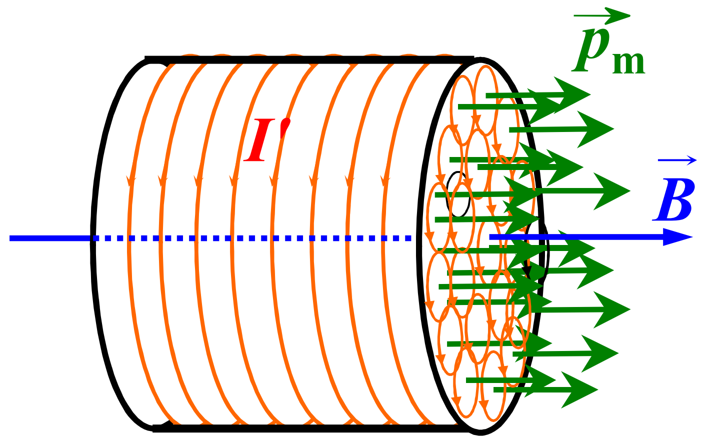
(2) 在外磁场$\vec{B}_0$作用下，

- 分子磁距受外磁场$\vec{B}_0$的磁力矩的作用,使分子磁距转向外磁场方向排列,则沿外磁场产生一**附加磁场**$\vec{B}'$。

$$\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B}_0$$

$$\vec{B}' \uparrow\uparrow \vec{B}_0$$

$$B = B_0 + B' > B_0$$



§ 5-1 磁介质及其磁化

- 外磁场 $\vec{B}_0$ 使分子磁矩 $\vec{P}_m$ 产生一个**附加磁矩** $\Delta\vec{p}_m$ ，且 $\Delta\vec{p}_m$ 的方向与外磁场 $\vec{B}_0$ 方向相反。

$\vec{p}_m$ 受到力矩作用

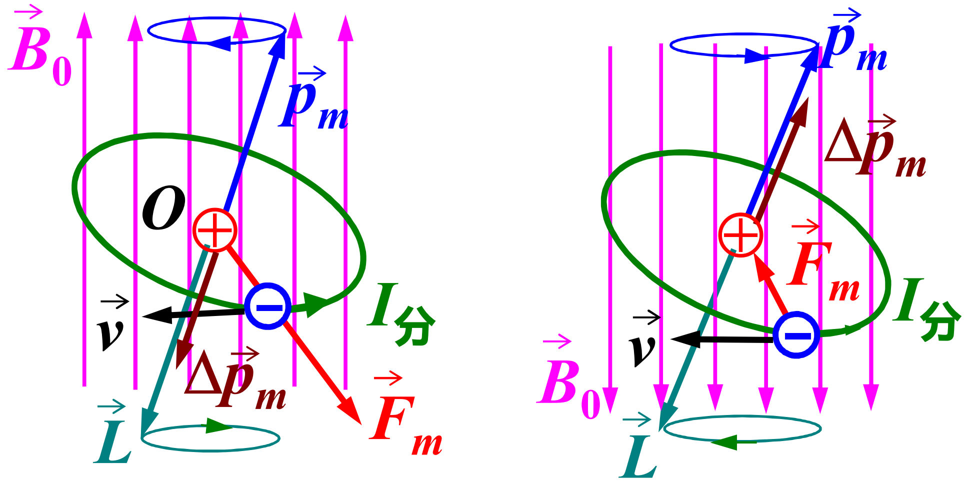
$$\vec{M}_o = \frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \vec{p}_m \times \vec{B}_0$$

$\Rightarrow e$ 进动 $\Rightarrow$ 圆电流

$\Rightarrow \vec{B}' \uparrow\downarrow \vec{B}_0$

$\Rightarrow$ **附加磁矩** Δp_m （恒与 $\vec{B}_0$ 反向）

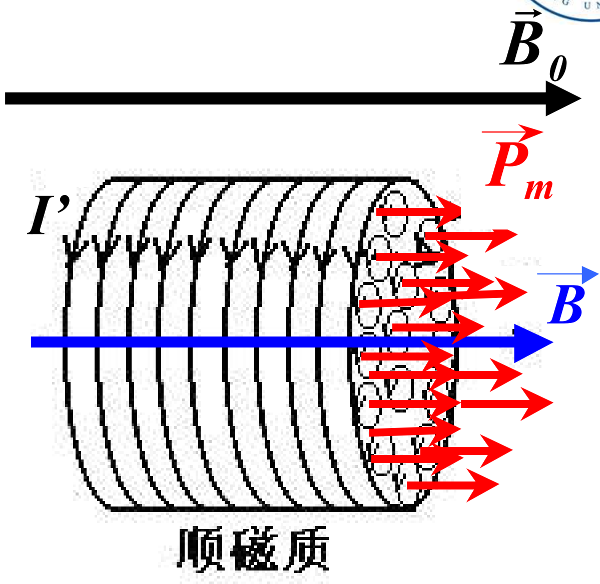
$$B = B_0 - B' < B_0$$



§5-1 磁介质及其磁化

1. 顺磁质：如锰，铬，氧等

对每个顺磁质分子：$\vec{p}_m \neq 0$,



外磁场中，每个分子磁矩都受到磁力矩作用：

$$\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$$

有序排列的分子磁矩就产生一个附加磁场 $\vec{B}'$。$\vec{B}'$与外场$\vec{B}_0$同向.

故有： $B = B_0 + B', B > B_0$, $\mu_r = \dfrac{B}{B_0} > 1$

对顺磁质，附加磁矩<<分子磁矩；

故分子磁矩产生附加磁场是顺磁质显示磁性的主要原因。

2. 抗磁质 如水银，铜，氢等

在抗磁质中，每个分子的： $\vec{P}_m = 0$

只有在外磁场作用下产生的附加磁矩： $\Delta\vec{P}_m \neq 0$

电子进动产生的附加磁矩是抗磁质产生磁性的唯一原因。

另外，由于附加磁矩$\Delta\vec{P}_m$的方向(即由于磁化而产生的附加磁感应强度 $\vec{B}'$ 的方向)恒与外磁场的方向相反，所以抗磁质内部的$B < B_0$ 。

即抗磁质的： $\mu_r = \dfrac{B}{B_0} < 1$

但在上述两类磁介质中，都有： $B \approx B_0$ 即 $\mu_r \approx 1$

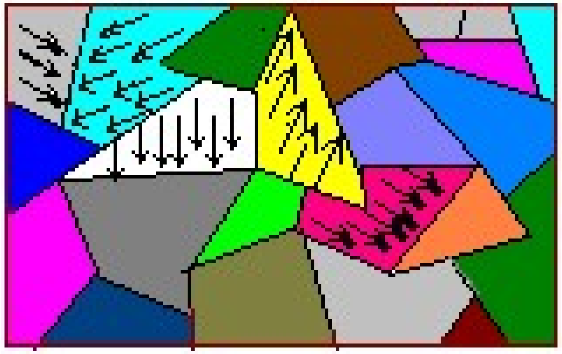
且$\mu_r = const$(常量)，它们统称为**弱磁质**。

§ 5-1 磁介质及其磁化

3.铁磁质：固有磁矩为零　如铁，钴，镍等

磁畴:自发饱和磁化微区,

线度：μm ~ mm,



$\vec{B}_0 = 0$ 时，取向不同，

$\vec{B}_0 \neq 0$ 时，$\sum \vec{p}_m = 0$

磁畴变化时存在阻力 $\Rightarrow$ 磁化不可逆，磁滞，剩磁

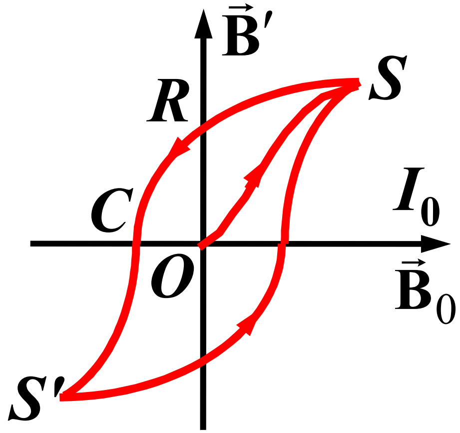
$T\uparrow \Rightarrow$ 磁畴内规则排列$\downarrow$ $\Rightarrow T > T_c$ 时顺磁

居里温度

§ 5-1 磁介质及其磁化

- $\vec{B}$变化滞后于I_0或 $\vec{B}_0$ ⇒ **磁滞回线**

如图. $O \xrightarrow[I_0\uparrow]{} S \xrightarrow[I_0\downarrow]{} R \xrightarrow[I_0<0]{} C \xrightarrow[I_0\downarrow]{} S' \to \cdots \to S$



OS: **起始磁化曲线**,

BR: **剩磁**:人造磁铁, 磁带, 磁盘等

磁滞回线的面积 ∝ 功耗

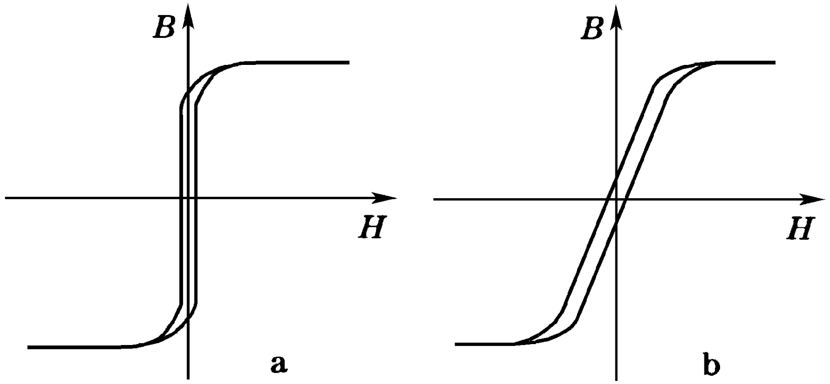
按磁滞回线的形状，铁磁质可分为

$\begin{cases} \text{软磁质：磁头、交流电器铁芯等} \\ \text{硬磁质：永久磁铁（天然 / 人造）} \end{cases}$

铁磁材料的分类及其应用

- 软磁材料
  - B_R小，H_C小，磁滞回线瘦，磁滞损耗小；
  - 通电后立即磁化获得强磁场，断电立即退磁。

磁头、交流电器铁芯等



- 硬磁材料
  - B_R大，H_C大，
  - H_C：$10^4 \sim 10^6$A/m；
  - 磁滞回线胖,磁滞损耗大；
  - 撤去外场后仍能保持强磁性

永久磁铁（天然 / 人造）

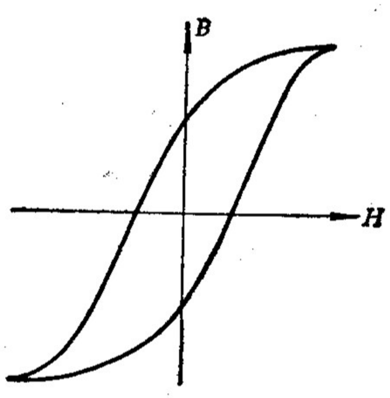
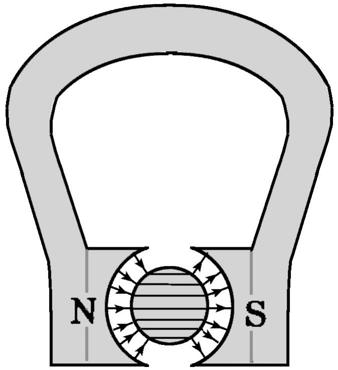


图 5-15 硬磁材料的磁滞回线



磁性材料在信息技术中的应用

- 随着信息时代的到来，多种磁性材料在信息高新技术中获得广泛而重要的应用
- 磁记录：主要有(用永磁材料制成的)存储装置和写入、读出设备。存储装置包括磁头和磁记录介质

■磁头：

■写入过程中：磁头将电信号——磁场

■读出过程中：将磁记录介质的磁场——转变为电信号

■磁记录介质：内存、外存、磁盘和磁带等

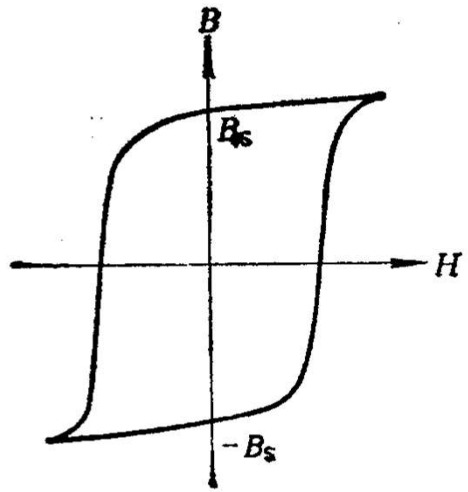


图 5-16 矩磁材料的磁滞回线

§ 5-1 磁介质及其磁化

三、介质磁化的宏观规律

类比电极化的讨论，定义磁化强度：

$$\vec{M}=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\sum_{\Delta V}\vec{p}_m}{\Delta V}\quad 或\quad \vec{M}=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\sum_{\Delta V}\Delta\vec{p}_m}{\Delta V}$$

抗磁质

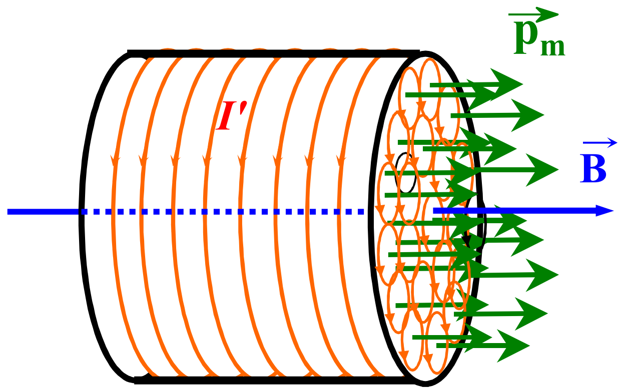
SI: A/m

$\vec{M}-I'$关系：

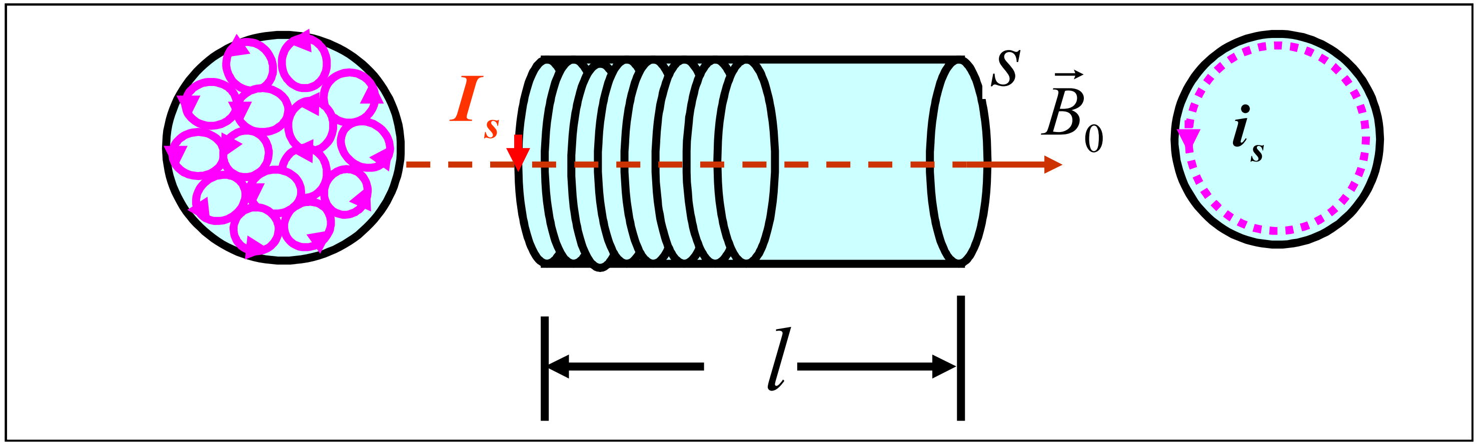
I'为所有未抵消的分子电流代数和，与载流子无关，称为磁化电流或束缚电流。

均匀磁介质：

内部各处小分子电流相互抵消；表面未被抵消→磁化面电流。



§ 5-1 磁介质及其磁化



§ 5-1 磁介质及其磁化

可证：对任意闭合回路L有：

积分形式

$$\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \sum_{L内} I'$$

通过以L为界S面内全部分子电流的代数和

$$\iint_S (\nabla \times \vec{M})\cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{j}_m \cdot d\vec{S}$$

微分形式

$$\nabla \times \vec{M} = \vec{j}_m$$

磁化电流密度

定义磁化面电流密度i'：垂直磁化面电流方向单位长度上的磁化面电流

可证 $\boxed{\vec{i}' = \vec{M}\times\vec{n}^0}$ 或 $\boxed{i' = M_t}$

$\vec{n}^0$ — 介质外法线单位矢量

M_t — $\vec{M}$在介质表面的切向分量

磁化面电流： $\boxed{I' = i'l}$

磁化电流与传导电流:

- **传导电流**
  - 载流子的定向流动，是电荷迁移的结果，产生焦耳热，产生磁场，遵从电流产生磁场规律
- **磁化电流**
  - 磁介质受到磁场作用后被磁化的后果，是大量分子电流叠加形成的在宏观范围内流动的电流，是大量分子电流统计平均的宏观效果
- **相同之处**：同样可以产生磁场，
  遵从电流产生磁确场规律
- **不同之处**：电子都被限制在分子范围内运动，与因电荷的宏观迁移引起的传导电流不同；分子电流无热效应

§ 5-1 磁介质及其磁化

求解时有类似电场的循环:

$$
\begin{tikzcd}
 & & i' \arrow[dr] & \\
\vec{B} \arrow[r] & \vec{M} \arrow[ur] \arrow[dr] & & \vec{B}' \arrow[lll, bend left] \\
 & & I' \arrow[ur] &
\end{tikzcd}
$$

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

§5-2 有介质时的恒定磁场

$$I_0 \xrightarrow{\text{产生}} \vec{B}_0 \xrightarrow{\text{使介质磁化}} \vec{M}$$

$$+ \qquad\qquad\qquad \downarrow$$

$$\vec{B}\,' \xleftarrow[\text{产生附加场}]{} I\,'$$

$$\|$$

$$\vec{B}$$

- **传导电流产生　　+　　磁化电流产生**

$$\begin{cases} \oiint_S B_0 \cdot dS = 0 \\ \oint_L B_0 \cdot dl = \mu_0 \sum_{L内} I_0 \end{cases} + \begin{cases} \oiint_S B' \cdot dS = 0 \\ \oint_L B' \cdot dl = \mu_0 \sum_{L内} I' \end{cases} \Rightarrow$$

§5-2 有介质时的恒定磁场

一. 总磁场遵从的规律

$$\begin{cases} \oiint_S B \cdot dS = 0 \\ \oint_L B \cdot dl = \mu_0 \sum_{L内} I_0 + \mu_0 \sum_{L内} I' \end{cases}$$

——磁介质中Gauss定理

- 用上述公式计算磁场遇到麻烦
  - I' 和B 互相牵扯，难于测量和控制，通常未知
  - B-S定律和安培环路定理以已知电流分布为前提
- 解决办法——需补充有关磁介质磁化性质的已知条件

§5-2 有介质时的恒定磁场

总场

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{L内} I + \mu_0 \sum_{L内} I'$$

$$\sum I' = \oint \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{L内} I_0 + \mu_0 \oint \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}\right)\cdot d\vec{l} = \sum_{L内} I_0$$

传导电流

引入辅助量：$\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

磁场强度

有介质时的Ampère环路定理(H-ACL)：

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

归入所有磁化效应, 不必再求 $\vec{M}$或I'.

§5-2 有介质时的恒定磁场

二. 磁场强度

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$ (对任何磁质均适用)

弱磁质: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

$\chi_m = \mu_r - 1$ 为磁化率, $\Rightarrow \quad \vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0(1+\chi_m)}$

各向同性介质: χ_m 为标量, 有

$$\boxed{\vec{B} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\,\vec{H}}$$ 其中 $\mu = \mu_0\mu_r$

$\mu_r = 1 + \chi_m$ 是一般定义,

而 $\vec{B} = \mu_r\vec{B}_0$ 仅适用于磁介质充满整个磁场时.

真空中, $M=0$, $\chi_m = 0, \mu_r = 1$, $B = \mu_0 H$ 无磁化现象

三. H−环路定理的应用

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_0}$$

$$\boxed{\vec{B} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\,\vec{H}}$$

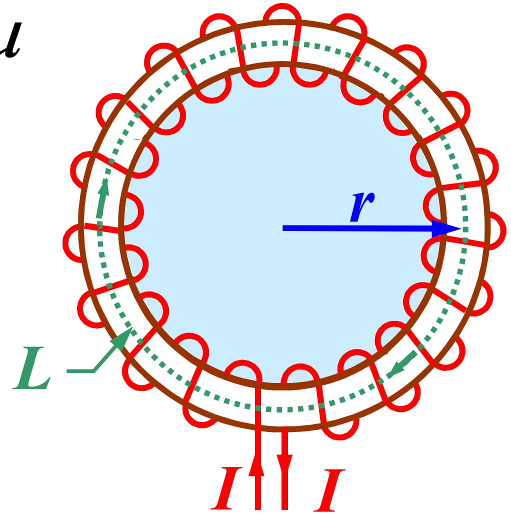
I_0和均匀磁介质分布具有特定对称性时，可用H-ACL求 $\vec{H}$ 进而求 $\vec{B}$, $\vec{M}$, $\vec{i}'$ 等量

即:

$$\boxed{\left.\begin{matrix} I_0 \\ \mu_r \end{matrix}\right\}\text{对称性} \rightarrow \vec{H} \rightarrow \left\{\begin{matrix} \vec{B} = \mu\vec{H} \rightarrow \Phi_m = \oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} \\ \vec{M} = \chi_m\vec{H} \rightarrow \vec{i}' = \vec{M}\times\vec{n}^0 \end{matrix}\right.}$$

§5-2 有介质时的恒定磁场

例: 充磁介质密绕螺线环. 已知I, n, μ
求$\vec{H}$, $\vec{B}$, $\vec{M}$和磁化分子电流I'.



解: H与磁芯物质无关

$$\oint \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = n2\pi r I$$

$$H = nI; B = \mu n I$$ 方向:

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H = \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1\right) nI,$$ 方向:

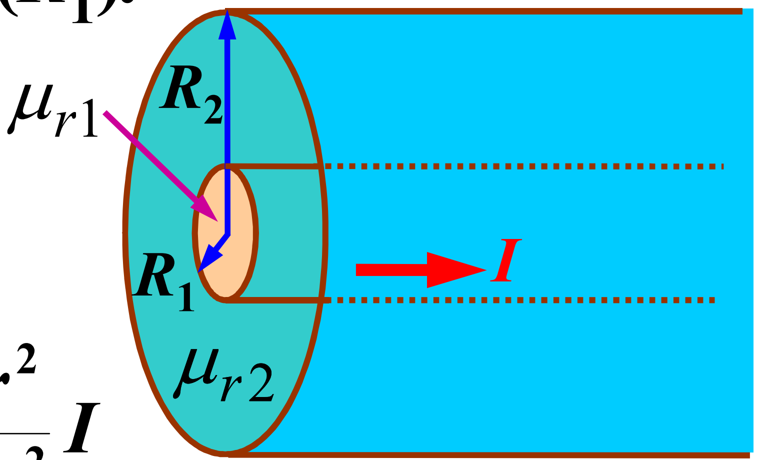
$$i' = M \quad \Rightarrow \quad I'_{\text{等效}} = i'/n = \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1\right) I$$

$\mu_r > 1$, 顺磁, $I_{\text{等效}}$ 与I 同向. <1时$I_{\text{等效}}$ 与I 反向.

§5-2 有介质时的恒定磁场

例: 如图,已知R_1, μ_{r1}, R_2, μ_{r2}, $I(R_1)$.

求: ①$\vec{H},\vec{B}$, ② $\vec{M},\vec{i}'_{R_1},\vec{i}'_{R_2}$



解: 半径r的同心圆上各点,

$|\vec{H}|,|\vec{B}|$相同, 方向与I成右旋

① $r < R_1$: $\oint \vec{H}\cdot d\vec{l} = H2\pi r = \dfrac{\pi r^2}{\pi R_1^2} I$

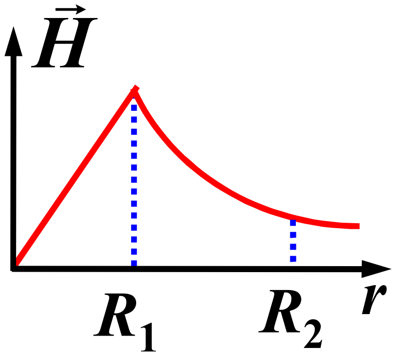
$$H = \frac{rI}{2\pi R_1^2};\ B = \mu_0\mu_{r1}H = \frac{\mu_0\mu_{r1}rI}{2\pi R_1^2},$$ 与I右旋

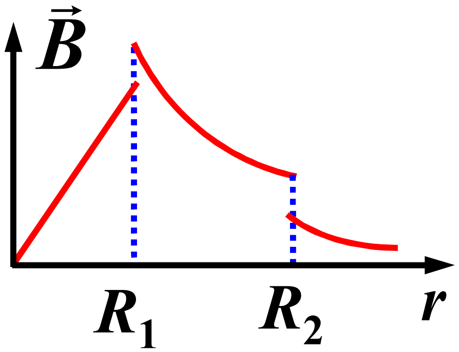
$R_1 < r < R_2$: $\oint \vec{H}\cdot d\vec{l} = H2\pi r = I$

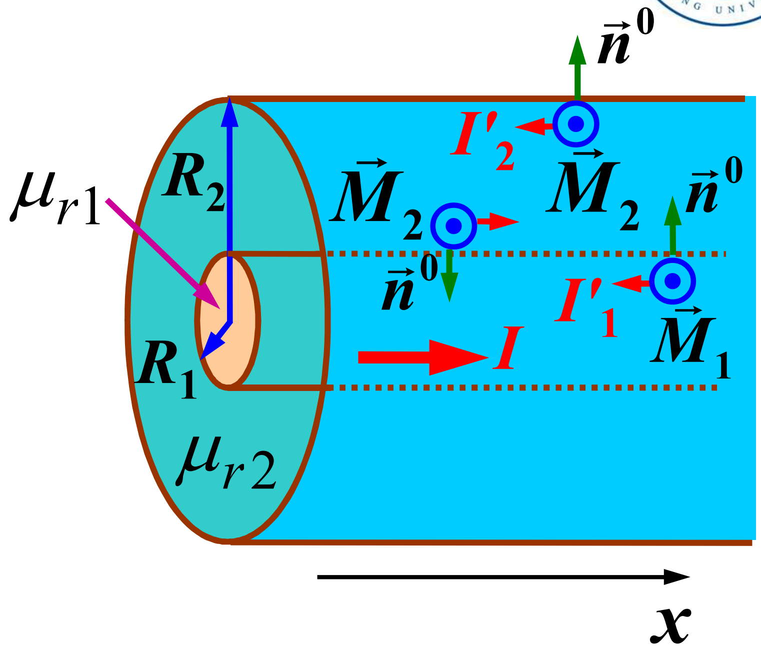
$H = I/2\pi r$; $B = \mu_0\mu_{r2}I/2\pi r$ 方向同上

$r > R_2$: $H = I/2\pi r$; $B = \mu_0 I/2\pi r$ 方向同上

§ 5-2 有介质时的恒定磁场







② $\vec{M}_1 = (\mu_{r1} - 1)\vec{H}_1$

$$= (\mu_{r1} - 1)\frac{rI}{2\pi R_1^2}\vec{\theta}$$

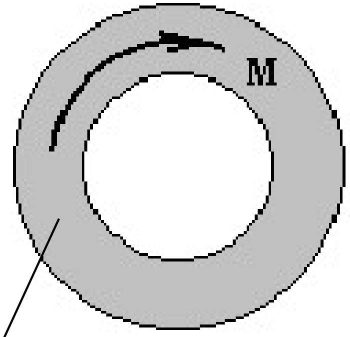
$$\vec{M}_2 = (\mu_{r2} - 1)\vec{H}_2 = (\mu_{r2} - 1)\frac{I}{2\pi r}\vec{\theta}$$

$$\vec{i}'_{R_1} = (\vec{M}_2 - \vec{M}_1)\big|_{R_1} \times \vec{n}^0 = \vec{i}\,(\mu_{r2} - \mu_{r1})I / 2\pi R_1$$

$$\vec{i}'_{R_2} = -\vec{M}_2\big|_{R_2} \times \vec{n}^0 = -\vec{i}\,(\mu_{r2} - 1)I / 2\pi R_2$$

§ 5-2 有介质时的恒定磁场

- 例：有一磁介质细铁环，在外磁场撤消后，仍处于磁化状态，磁化强度矢量M 的大小处处相同，M的方向如图所示。求环内的磁场强度H和磁感应强度B



$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_0 = 0$$

- 问：公式B=$\mu_0\mu$ H 是否适用?
- 答：不适用，因为铁环属于铁磁质
- 可以用B= μ_0(H+M)来讨论

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\vec{M}$$

$$\vec{B} = \mu_0\vec{M}$$

- 方法一：用H的安培环路定理

  求H—M—B

$$\vec{i}' = \vec{M}\times\vec{n} \qquad i' = nI$$

与螺绕环类比

B和M方向一致为

- 方法二：M——I'——B——H

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = 0 \Leftarrow \vec{B} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\vec{M} \Leftarrow \vec{B} = \mu_0\vec{i}' = \mu_0\vec{M}$$

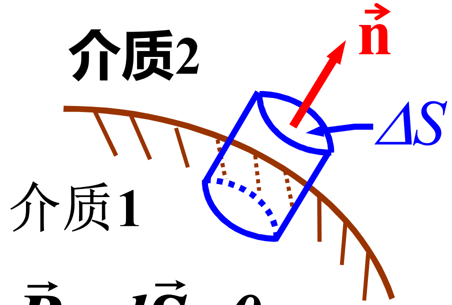
§5-3 磁场的边界条件

- 要点：
  - 界面上介质的性质有一突变，这将导致磁场也会有突变
  - 必须考虑用新的形式来给出边界上各物理量的关系，亦即给出边界条件
  - 磁场的高斯定理、环路定理的积分形式在边界上依然成立，可以把不同介质的场量用积分方程联系起来
  - 实际上边界条件就是把积分方程放到边界突变处得到的结果

§ 5-3 磁场的边界条件

在两种磁介质分界面上

- **由磁高斯定理可得：B法向连续**



$$\oint\!\!\!\!\iint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = \iint_{底1} \vec{B}\cdot d\vec{S} + \iint_{底2} \vec{B}\cdot d\vec{S} + \iint_{侧面} \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$$

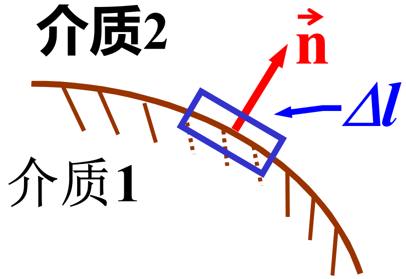
$$-B_{1n}\Delta S \qquad B_{2n}\Delta S$$

侧面积→0

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1)\cdot\vec{n} = 0 \quad 或 \quad B_{2n} = B_{1n}$$

设界面上无传导电流，则

- **由环路定理可得：H切向连续**



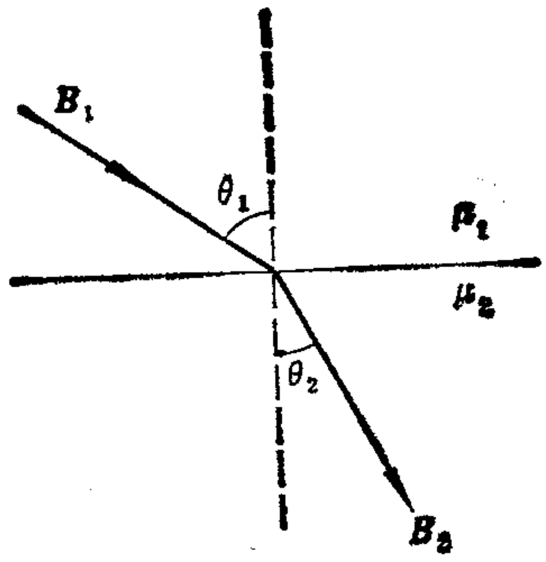
$$\vec{n}\times(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = 0$$

磁感应线在边界上的“折射”

B法向分量连续，切向分量不连续，在两种界面发生折射

B线折射

$$\frac{tg\theta_1}{tg\theta_2}=\frac{B_{1t}}{B_{2t}}=\frac{\mu_1 H_{1t}}{\mu_2 H_{2t}}=\frac{\mu_1}{\mu_2}$$



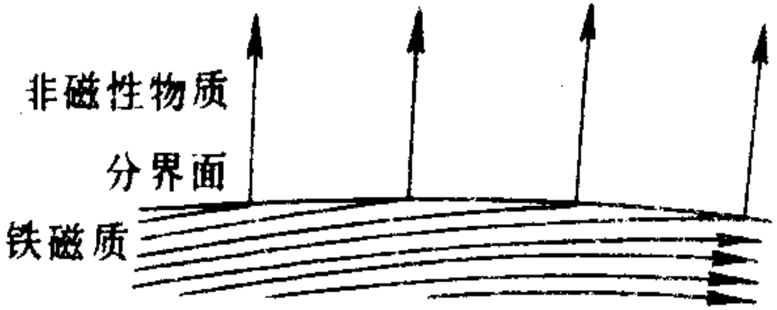
若 $\mu_2=\mu_0$ (真空或非铁磁材料），

$\mu_1>>\mu_0$(铁磁质），则

$$\theta_1\approx 90^\circ,\quad \theta_2\approx 0$$

即铁磁质B线几乎与分界面平行——磁屏蔽

§5-3 磁场的边界条件



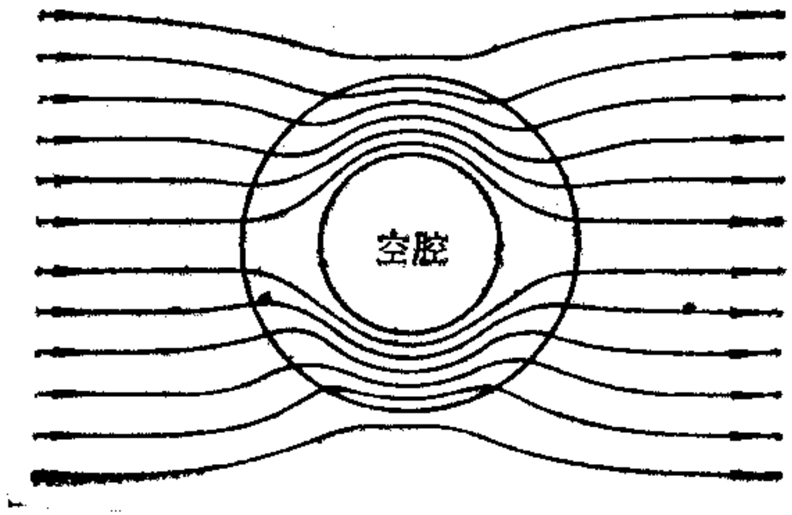


图 5-21 磁屏蔽

磁屏蔽效果没有静电屏蔽好

课后作业

课后习题：

5.1，5.3，5.5，5.6

截止日期：2025-06-10 24:00

谢 谢！