

# 大学物理(1)



雲南大學

## 第 14 章

### 磁场中的磁介质



## 14.1 磁介质对磁场的影响

» 与电场中的**电介质**类似，磁场中的**磁介质**也会改变磁场：

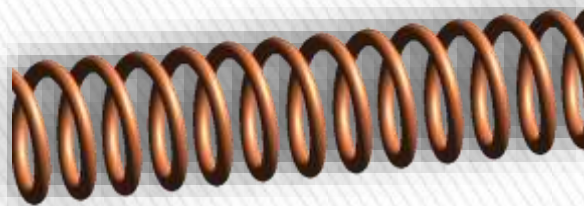
- > 真空中的长直载流螺线管内部的磁场为：

$$B_0 = \mu_0 n I$$

- > 保持电流不变，往螺线管中插入一根介质棒，则管内磁场变为：

$$B = \mu_r B_0 = \mu_0 \mu_r n I$$

- > 其中， $\mu_r$  称之为磁介质的**相对磁导率**。
- > 不同材料的相对磁导率差别很大( **P 393**， **表 14.1** )。

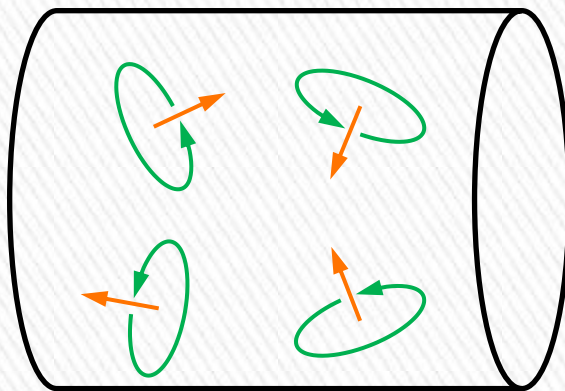


## 14.1 磁介质对磁场的影响

- » **抗磁质**， $\mu_r < 1$ ，水、氮、氢、汞、铜、铅、铋、银等。
- » **顺磁质**， $\mu_r > 1$ ，空气、氧、一氧化氮、钠、铝、锰、铬、铂、钕、硫酸铜等。
- » **铁磁质**， $\mu_r \gg 1$ ，铁、钴、镍等金属，及它们与**稀土元素**的合金和它们的氧化物。
  - > 铁磁质对磁场的影响很大，在电工技术中有广泛的应用。
  - > 铁磁质的磁化强度与外磁场之间具有特殊而复杂的关系，它们的 $\mu_r$ 不是常数，而是外加磁场的函数。

## 14.2 原子的磁矩

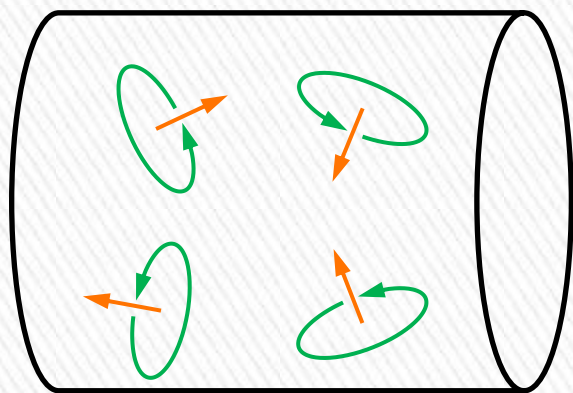
- » 在经典理论中，**电子绕核运动**、核自旋和电子自旋都会产生“环形”电流，这些电流产生的磁矩的矢量和就是整个原子的磁矩。
- » 不同的原子有不同的磁矩( **P 394 表 14.2** )。



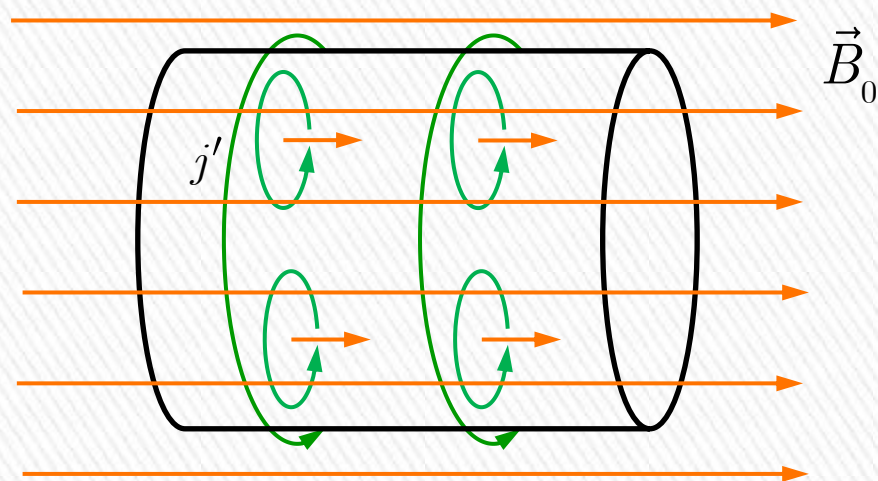


## 14.3 磁介质的磁化

- » 磁介质的磁化比电介质的极化要复杂一些，但**顺磁质**的磁化还是比较简单的。
- » 在之后的叙述中，如不专门指出时，“磁介质”一词就单指**顺磁质**。
- » 没有外部磁场时，磁介质内部的分子磁矩无序排列，合磁矩为 0。
- » 有外部磁场时，磁介质内部的分子磁矩按外磁场方向有序排列。



没有外加磁场时

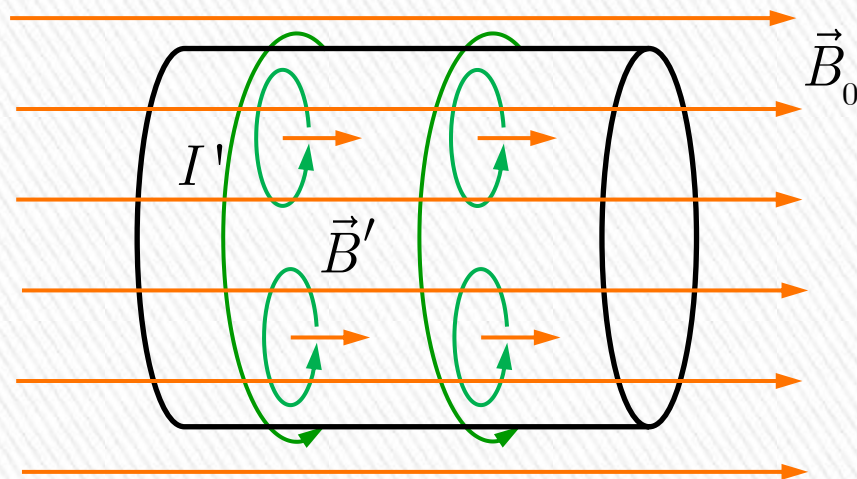


有外加磁场时

## 14.3 磁介质的磁化

- » 有外部磁场时，整齐排列的分子磁矩在磁介质表面形成宏观的面电流，这种电流称为**束缚电流**  $I'$ ，也叫**磁化电流**，对应的是产生外磁场的**自由电流**。
- » **束缚电流**也会产生一个磁场  $\vec{B}'$ ，与外加磁场  $\vec{B}_0$  一起组成合磁场  $\vec{B}$ 。
- » 描述磁介质的磁化程度的物理量为**磁化强度**  $\vec{M}$ ，矢量，其方向和**磁感应强度**的方向一致。
- » 对于顺磁质和抗磁质，**磁化强度**和**磁感应强度**的关系为：

$$\vec{M} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B}$$



## 14.3 磁介质的磁化

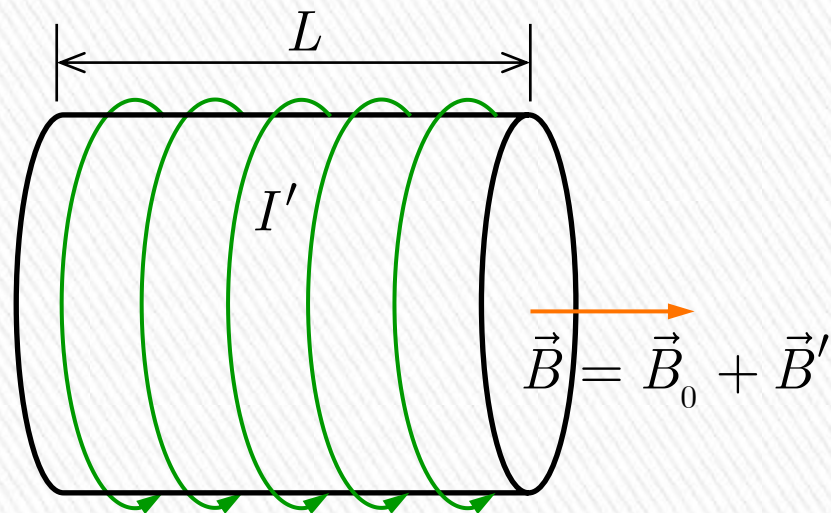
- » 跟电介质在电场中极化时有束缚电荷密度类似，磁介质在磁场中也有束缚电流密度  $j'$ ，其定义为：沿着外磁场方向上单位长度上的束缚电流：

$$j' = \frac{dI'}{dL}$$

- » 其方向与磁化强度  $\vec{M}$  垂直，因此，考虑方向，可写为：

$$\vec{j}' = \vec{M} \times \vec{e}_n$$

$\vec{e}_n$  是磁介质表面的外正法线的方向矢量。



## 14.4 磁场强度 $H$ 的环路定理

» 类似于静电场的高斯定理引入中间量电位移  $D$ ，磁场的安培环路定理引入中间量磁场强度  $H$ 。

» 磁场强度  $H$  和磁感应强度  $B$  的关系为：

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r}, \text{ 单位 A/m。}$$

» 引入磁场强度的安培环路定理为：沿任一闭合路径的磁场强度  $H$  的积分等于该路径包围的自由电流的代数和，

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{r} = \sum I_{0,\text{in}}$$

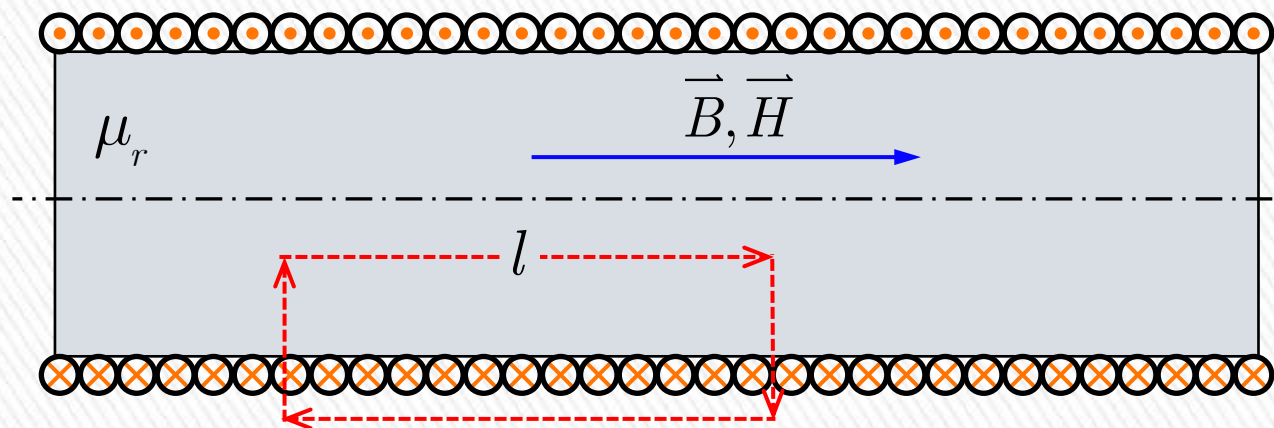
» 磁化强度  $M$  和 磁场强度  $H$  的关系为：

$$\vec{M} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B} = (\mu_r - 1) \vec{H}$$



**P399 例 14.1:** 一无限长直螺线管，单位长度上的匝数为  $n$ ，管内充满相对磁导率为  $\mu_r$  的磁介质。今在导线圈内通以电流  $I$ ，求管内磁感应强度，和磁介质表面的面束缚电流密度。

**解:** 作如图红色虚线框所示的安培环路，其宽度为  $l$ 。



$H$  的安培环路定理：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{r} = \int_{\text{内}} \vec{H} \cdot d\vec{r} + \int_{\text{外, 左, 右}} \vec{H} \cdot d\vec{r} = \int_{\text{内}} \vec{H} \cdot d\vec{r} = H \cdot l$$

$$= \sum I_{0,\text{in}} = l \cdot nI$$

解得：  $H = nI$

因此  $B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r nI$

**P399 例 14.1:** 一无限长直螺线管，单位长度上的匝数为  $n$ ，管内充满相对磁导率为  $\mu_r$  的磁介质。今在导线圈内通以电流  $I$ ，求管内磁感应强度，和磁介质表面的面束缚电流密度。

**解(续):**

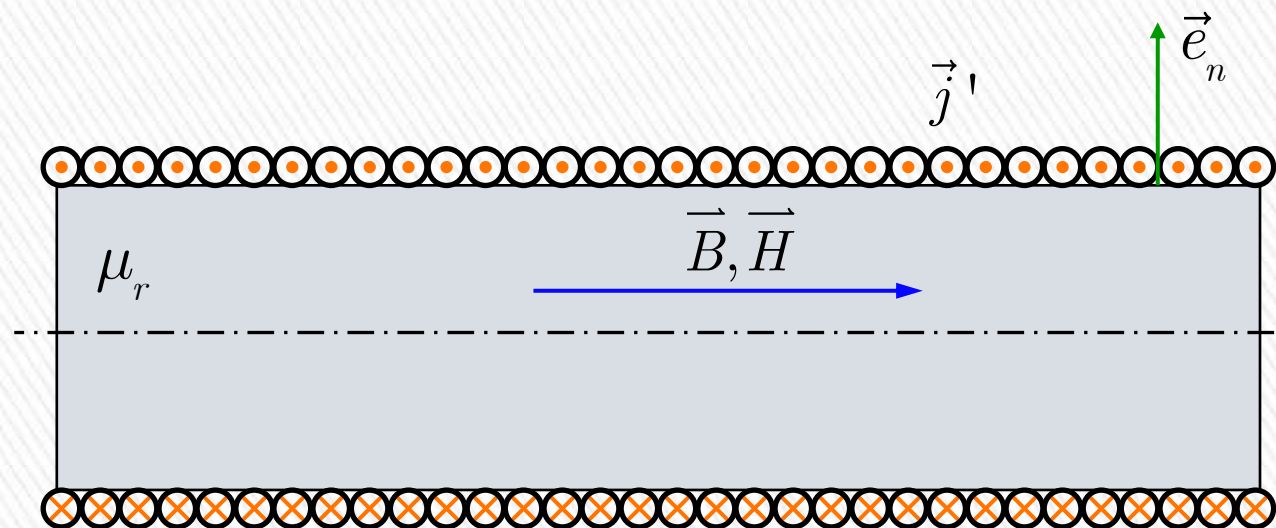
磁化强度为：

$$\vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H}$$

束缚电流密度为：

$$\vec{j} = \vec{M} \times \vec{e}_n$$

其大小为： $j = M = (\mu_r - 1)nI$ ，方向和自由电流方向一致。



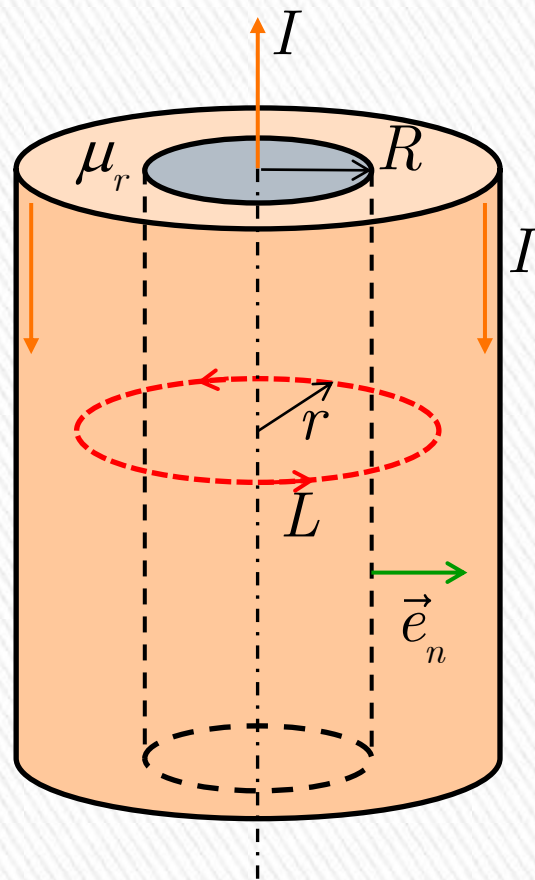
**P399 例 14.2:** 一根长直单芯电缆的芯是一根半径为  $R$  的金属导体，它和导电外壁之间充满相对磁导率  $\mu_r$  的磁介质。今有电流  $I$  均匀地流过芯的横截面，并沿外壁流回，求磁介质中的磁感应强度，和紧贴导体芯的磁介质表面上的束缚电流总量。

**解:** 作如图红色虚线框所示的、半径为  $r$  的安培环路，则  $H$  的环路定理为：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{r} = H \cdot 2\pi r$$
$$= \sum I_{0,\text{in}} = I$$

解得：  $H = \frac{I}{2\pi r}$

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



**P399 例 14.2:** 一根长直单芯电缆的芯是一根半径为  $R$  的金属导体，它和导电外壁之间充满相对磁导率  $\mu_r$  的磁介质。今有电流  $I$  均匀地流过芯的横截面，并沿外壁流回，求磁介质中的磁感应强度，和紧贴导体芯的磁介质表面上的束缚电流总量。

**解(续):** 紧贴导体芯处，磁场强度为

$$H = \frac{I}{2\pi R}$$

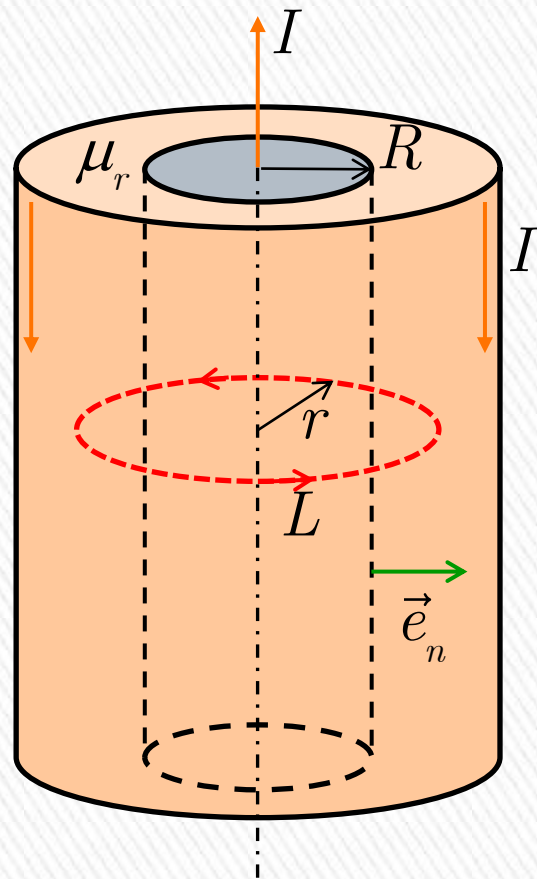
磁化强度为  $\vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H}$

磁介质内表面的束缚电流密度大小为：

$$j = \left| \vec{M} \times \vec{e}_n \right| = M = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R}$$

束缚电流总量为：

$$I' = j' \cdot 2\pi R = (\mu_r - 1)I$$





## \* 静电场和恒定磁场基本公式类比

### 静电场：

基本量  $\vec{E}$ ：

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0 \quad (\text{对任一闭合曲线}),$$

辅助量  $\vec{D}$ ：

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q_0 \quad (\text{对任一闭合曲面}),$$

两者关系：

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\varepsilon},$$

导出量：

$$\text{极化强度 } \vec{P} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\vec{E} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r}\right)\vec{D}$$

$$\text{极化电荷面密度 } \sigma' = \vec{P} \cdot \vec{e}_n$$

### 恒定磁场：

基本量  $\vec{B}$ ：

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (\text{对任一闭合曲面}),$$

辅助量  $\vec{H}$ ：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{r} = I_0 \quad (\text{对任一闭合曲线}),$$

两者关系：

$$\vec{B} = \mu\vec{H},$$

导出量：

$$\text{磁化强度 } \vec{M} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0\mu_r} \vec{B} = (\mu_r - 1)\vec{H}$$

$$\text{束缚电流面密度 } j' = \vec{M} \times \vec{e}_n$$