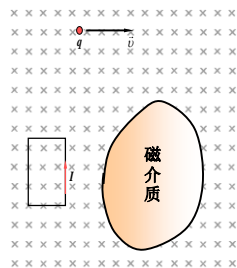


第19章 磁场中的磁介质



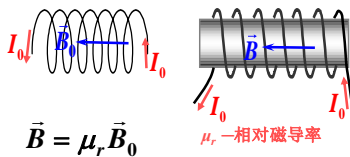
- § 19.1 磁场和磁介质之间的相互作用
- § 19.2 原子的磁矩
- § 19.3 磁介质的磁化
- § 19.4 磁化电流
- § 19.5 有磁介质时磁场的规律
- § 19.6 磁场的界面关系
- § 19.7 铁磁性材料

§ 19.1 磁场和磁介质之间的相互作用

磁介质
在磁场中受磁场的影响，同时影响磁场的物质。

磁介质 ↔ 磁场

磁介质对磁场的影响



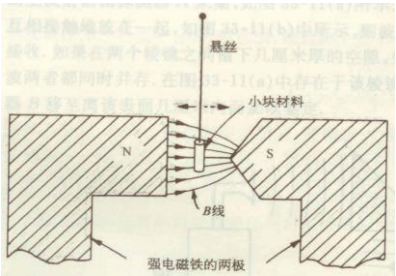
磁介质的种类

- $\mu_r < 1$
- 一般抗磁性 $\mu_r \approx 1$ 如: Cu, Ag, Cl₂, H₂...
 - 完全抗磁性 $\mu_r = 0$ 超导体处于超导态
 迈斯纳效应
- $\mu_r > 1$
- 顺磁性 $\mu_r \approx 1$ 如: Mn, Al, O₂, N₂...
 - 反铁磁性 $\mu_r \approx 1$ 如: FeO, CoO, MnO...
 - 铁磁性 $\mu_r \gg 1$ 如: Fe, Co, Ni...
 - 亚铁磁性 $\mu_r \gg 1$ 如: Fe₃O₄, Mn₃O₄ 等铁氧体

表一 几种磁介质的相对磁化率 $\chi_m = \mu_r - 1$

磁介质种类		相对磁导率
抗磁性 $\mu_r < 1$	铋(239K)	-1.7×10^{-4}
	汞(239K)	-2.9×10^{-5}
	铜(293K)	-1.0×10^{-5}
	氢(气体)	-4.0×10^{-5}
顺磁性 $\mu_r > 1$	氧(液体, 90K)	7.7×10^{-3}
	氧(气体, 293K)	3.4×10^{-3}
	铝(293K)	1.7×10^{-5}
	铂(293K)	2.6×10^{-4}
铁磁性 $\mu_r \gg 1$	纯铁	5000(与H有关)
	硅钢	700(与H有关)
	坡莫合金	1×10^5 (与H有关)

磁场对磁介质的影响

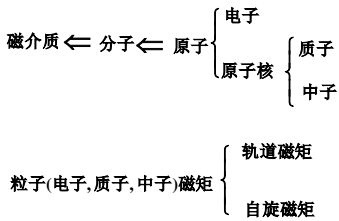


Bi $\mu_r < 1$ ← \vec{F}
Al $\mu_r > 1$ → \vec{F}

演示 顺抗铁磁性介质在非均匀磁场中的行为、磁矩磁鼠洞中穿行实验(趣味实验)。

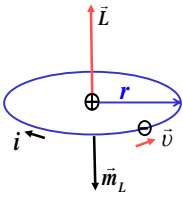
§ 19.2 原子的磁矩

物质的构成



7

单电子的轨道磁矩



电子的轨道运动周期 $T = \frac{2\pi r}{v}$

电子的轨道运动电流 $I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$

轨道磁矩 $m_L = IS = I\pi r^2 = \frac{rev}{2}$

电子轨道运动的角动量 $L = m_e v r$

电子轨道磁矩与轨道角动量的关系 $\vec{m}_L = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}$

8

$$\vec{m}_L = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}$$

$-\frac{e}{2m_e}$ 旋磁比 负值 与电子的负电荷有关

量子力学中, 轨道角动量是量子化的, 任何一个方向的投影也是量子化的

$$L_z = n\hbar \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

轨道磁矩也是量子化的

$$m_{Lz} = -\frac{e}{2m_e} L_z = -\frac{e}{2m_e} \times n\hbar = -n \frac{e\hbar}{2m_e}$$
$$n = 1 \quad m_{Lz} = -\frac{e\hbar}{2m_e} = -9.27 \times 10^{-24} (A \cdot m^2)$$

9

单电子的自旋磁矩

电子自旋磁矩和自旋角动量的关系

$$\vec{m}_s = -\frac{e}{m_e} \vec{S}$$

$-\frac{e}{m_e}$ 旋磁比 负值

电子自旋角动量及其投影都是量子化的

$$L_z = \pm \frac{\hbar}{2}$$
$$|m_{sz}| = \left| -\frac{e}{m_e} L_z \right| = \frac{e}{m_e} \times \frac{\hbar}{2} = 9.27 \times 10^{-24} (A \cdot m^2)$$

这一磁矩, 称为玻尔磁子

10

原子中电子的总磁矩

$$\vec{m}_e = -g \frac{e}{2m_e} \vec{J}_e$$

\vec{J}_e 总角动量 \vec{m}_e 总磁矩

g 朗德 g 因子 取决于电子的状态

11

原子核的磁矩

质子轨道磁矩 $\vec{m}_{Lp} = \frac{e}{2m_p} \vec{L}_p$ m_p 质子质量

中子无轨道磁矩

质子自旋磁矩 $\vec{m}_{Sp} = g \frac{e}{2m_p} \vec{S}_p$ $g = 5.5857$

中子自旋磁矩 $\vec{m}_{Sn} = g \frac{e}{2m_p} \vec{S}_n$ $g = -3.8261$

原子核的总磁矩 $\vec{m}_I = g \frac{e}{2m_p} \vec{J}_I$

\vec{J}_I 为核的总角动量 \vec{m}_I 为核的磁矩

g 核的朗德因子, 由核决定

核磁矩远小于电子磁矩

12

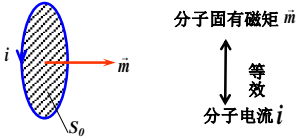
分子磁矩和分子电流

电子轨道磁矩
电子自旋磁矩
原子核磁矩

分子磁矩 \vec{m}

$\vec{m} \neq 0$ \vec{m} 分子的固有磁矩 $\mu_r > 1$

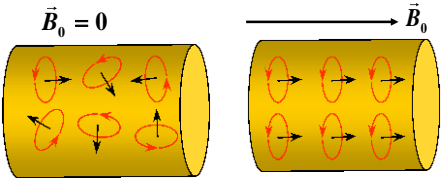
$\vec{m} = 0$ $\mu_r < 1$ 抗磁性



13

§ 19.3 磁介质的磁化

顺磁性物质的磁化

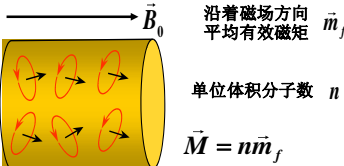


热运动使 \vec{m} 完全混乱, 宏观不显磁性
 \vec{B}_0 使 \vec{m} 排列趋于 \vec{B}_0 方向, 宏观显磁性

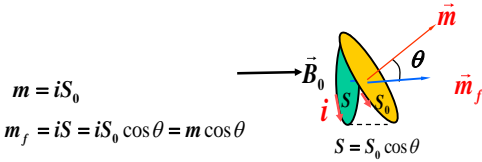
磁化强度 $\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{m}}{\Delta V}$

磁化前 $\vec{M} = 0$ 磁化后 $\vec{M} \neq 0$

14



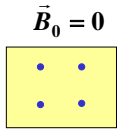
注意: 有效磁矩 \vec{m}_f 的大小并不等于固有磁矩 \vec{m}



15

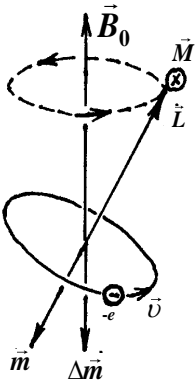
抗磁性物质的磁化

抗磁质的分子固有磁矩为0



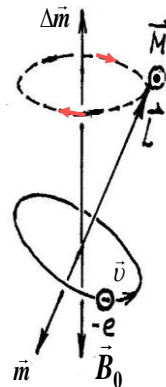
不显磁性

16



以电子的轨道运动为例
电子受的磁力矩
 $\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}_0$
电子轨道角动量增量
 $d\vec{L} = \vec{M} dt \perp \vec{L}$
电子轨道角动量进动引起的角动量增量平行于 \vec{B}_0
感生磁矩 $\Delta \vec{m}$ 反平行于 \vec{B}_0

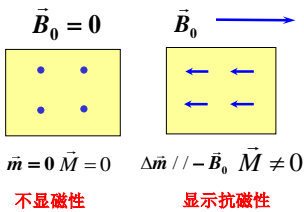
17



感生磁矩 $\Delta \vec{m}$ 反平行于 \vec{B}_0
抗磁性在顺磁质中也有
不过与分子固有磁矩的转向效应相比弱得多

18

抗磁质的分子固有磁矩为0



19

磁介质的磁化

●顺磁性物质分子的固有磁矩在磁场中的定向排列或抗磁性物质分子在磁场中产生了感生磁矩

●在磁场的作用下，产生宏观的磁化强度

实验表明，在一般的实验条件下，各向同性的顺磁性和抗磁性物质的磁化强度和外加磁场成正比

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

每个分子的平均有效磁矩 \vec{m}_f 分子数浓度 n

$$\vec{M} = n \vec{m}_f \begin{cases} \text{顺磁性 } \vec{M} > 0 & \vec{m}_f > 0 \\ \text{抗磁性 } \vec{M} < 0 & \vec{m}_f < 0 \end{cases}$$

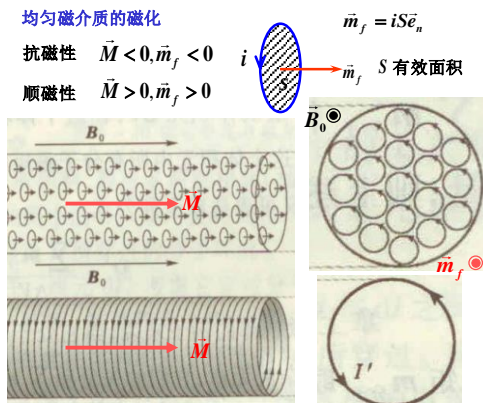
20

§ 19.4 磁化电流

均匀磁介质的磁化

抗磁性 $\vec{M} < 0, \vec{m}_f < 0$

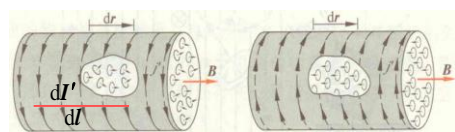
顺磁性 $\vec{M} > 0, \vec{m}_f > 0$



21

顺磁性

抗磁性



束缚电流 磁化电流 I'

由于介质磁化而出现的一些等效的附加电流分布

自由电流 传导电流

$$\text{磁化电流密度 } \vec{j}', \quad j' = \frac{dI'}{dl}$$

垂直于电流方向单位长度上的电流

方向为该处的电流方向

22

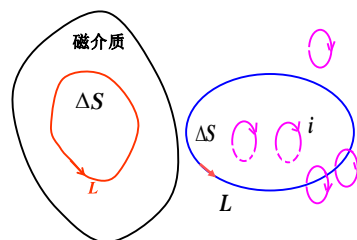
不均匀介质的磁化

如果介质不是均匀各向同性的，则磁化就可能不均匀，在介质内部的分子环流不能互相抵消，介质内部也可能出现磁化电流

磁介质磁化后，在磁介质体内和表面上都可出现磁化电流。

23

磁化强度和磁化电流



只有和 ΔS 的边界相套住的 i (只穿过 ΔS 一次) 对 I' 才有贡献

24

磁介质

$dI' = n \cdot i \cdot (S \cdot \cos \theta \cdot dL)$
 $= M \cdot dL \cdot \cos \theta = \vec{M} \cdot d\vec{l}$

穿过 L 所围曲面 ΔS 的总磁化电流 $I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$

电流的正方向与 L 成右手螺旋关系

25

磁介质内部

穿过 L 所围曲面 ΔS 总磁化电流 I'

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

如磁介质被均匀磁化

$I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \vec{M} \cdot \oint_L d\vec{l} = 0$

$I' = \int_{\Delta S} \vec{j}' \cdot d\vec{s} \quad \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \int_{\Delta S} \nabla \times \vec{M} \cdot d\vec{s}$

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

均匀磁化的磁介质内，体磁化电流密度等于零

26

磁介质表面

表面的磁感应强度 \vec{M}

沿表面的分量 M_t

在表面取一个矩形

$\overline{ab} // \overline{cd} \quad \overline{bc} // \overline{da}$
 $\overline{ab} // \vec{M}_t \quad \overline{bc} // \vec{n}$

穿过 \overline{abcd} 的磁化电流

$dI' = \oint_{abcd} \vec{M} \cdot d\vec{l} = M_t dl$

磁化面电流密度

$j' = \frac{dI'}{dl} = M_t$
 $\vec{j}' = \vec{M} \times \vec{n}$

表面法向的单位矢量 \vec{n}

27

$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$

Bi $\mu_r < 1$ $\leftarrow \vec{F}$
 Al $\mu_r > 1$ $\rightarrow \vec{F}$

$\vec{F} = -\nabla W = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$
 $= \nabla(m_x B_x + m_y B_y + m_z B_z)$
 $= m_x \nabla B_x + m_y \nabla B_y + m_z \nabla B_z$

28

超导磁悬浮

超导

磁铁

29

§ 19.5 有磁介质时磁场的规律

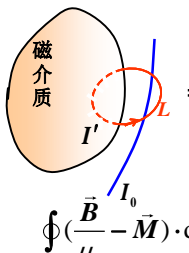
真空中的静磁场

$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_0 \quad (1)$
 $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2)$

考虑到磁化电流，(1) 式则需要修改。

30

1、 \vec{H} 的环路定理



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum (I_{0in} + I'_{in})$$

$$= \mu_0 \sum I_{0in} + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$I'_{in} = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum I_{0in}$$

引入磁场强度(定义)

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

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

\vec{H} 的环路定理

31

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{0in} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

\vec{H} 的环路定理 沿任一闭合路径磁场强度的环路积分等于该闭合路径所包围的自由电流的代数和

▲ H 的单位: A/m (SI);
奥斯特 Oe (CGSM), $1\text{Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{A/m}$ 。
(Oersted)

对于顺磁性和抗磁性物质 $\vec{M} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B}$

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

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

μ_0 真空中的磁导率 χ_m - 磁化率

μ_r μ 介质的相对磁导率和磁导率

32

注意 $\vec{B}, \vec{H}, \vec{M}$ 之间的关系

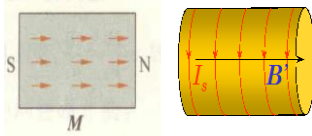
> 定义关系, 总是成立

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

> 各向同性顺磁性和抗磁性物质

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad \vec{M} = (\mu_r - 1) \vec{H} = \chi_m \vec{H}$$

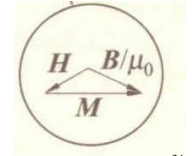
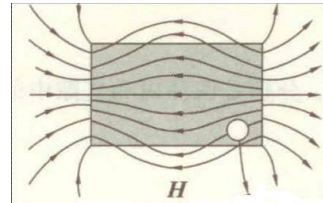
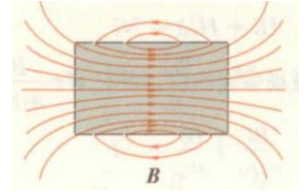
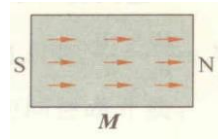
> 铁磁性物质中, 非线性, 甚至不共线



$$\vec{M} \Rightarrow I_s \Rightarrow \vec{B}' \Rightarrow \vec{H}$$

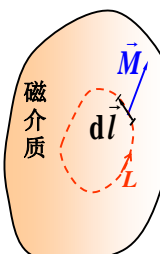
33

永磁体的 $\vec{B}, \vec{H}, \vec{M}$



34

【例题1】证明在各向同性均匀磁介质内, 如无传导电流处, 则也无磁化电流



$$I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \oint_L \chi_m \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

$$= \chi_m \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \chi_m \cdot \sum I_{0in}$$

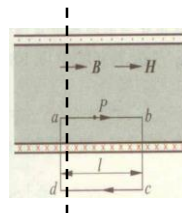
$$\because \sum I_{0in} = 0 \quad \therefore I' = 0$$

L 可任取, 且可无限缩小,
故 $I_0 = 0$ 处, $I' = 0$

35

【例题2】

一无限长直螺线管, 单位长度上的匝数为 n , 螺线管内充满相对磁导率为 μ_r 的均匀磁介质。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。



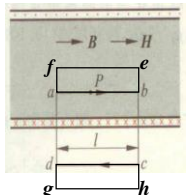
对称性分析

> 磁感应强度只有轴向分量

B_r 磁感应强度是轴矢量

B'_r 镜像反射对称性

36


 > 平行于轴线上各点的磁感应强度相等
 平移对称性

管内均匀场；管外均匀场，且为零

对 $abef$ 和 $cdgh$ 分别用环路定理

对 $abcd$ 用磁场的环路定理

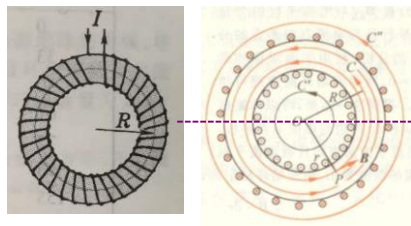
$$\oint_{abcd} \vec{H} \cdot d\vec{l} = HI = nI \quad H = nI$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r nI \quad M = (\mu_r - 1)H = (\mu_r - 1)nI$$

$$j' = M_t = M = (\mu_r - 1)nI$$

37

【例题3】 一环形铁芯，横截面积为 S ，环的平均半径为 R ，环上均匀密绕 N 匝线圈，线圈中通有电流 I_0 ，求线圈中电流的磁场分布。



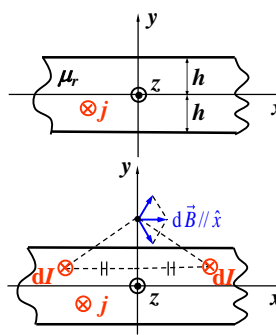
对称性分析：旋转对称性；镜像反射对称性

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad 2\pi r H = I$$

$$H = I / 2\pi r$$

38

【例4】 如图示，已知均匀载流无限大厚平板电流密度为 j （沿 z ），导体相对磁导率为 μ_r ，求： \vec{B} 和 \vec{j}'_s



解：分析 \vec{B} 的对称性，有 $\vec{B} = \vec{B}(y)$

且
$$\begin{cases} y > 0 : \vec{B} = B(y)\hat{x} \\ y < 0 : \vec{B} = -B(y)\hat{x} \end{cases}$$

39

板外： 对图示矩形回路 L ，有 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = j \cdot (\Delta l \cdot 2h)$

$2H_{\text{外}} \cdot \Delta l = 2jh \cdot \Delta l$
 $H_{\text{外}} = jh \rightarrow \vec{H}_{\text{外}} = jh \frac{y}{|y|} \hat{x}$
 $\vec{B}_{\text{外}} = \mu_0 \vec{H}_{\text{外}} = \mu_0 jh \frac{y}{|y|} \hat{x}$

板内： 对图示矩形回路 L' ，有 $\oint_{L'} \vec{H}_{\text{内}} \cdot d\vec{l} = j \cdot (\Delta l' \cdot 2y)$

$2H_{\text{内}} \cdot \Delta l' = 2jy \cdot \Delta l'$
 $\vec{B}_{\text{内}} = \mu_0 \mu_r \vec{H}_{\text{内}} = \mu_0 \mu_r jy \hat{x}$

求磁化面电流密度

$\vec{j}'_s = \vec{M}_s \times \vec{e}_n$
 $\vec{M}_s = \chi_m \vec{H}_{\text{内}S}$
 $= (\mu_r - 1) \vec{H}_{\text{内}S}$

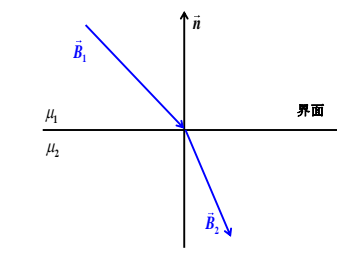
上表面： $\vec{e}_n = \hat{y}$ ， $\vec{M}_s = (\mu_r - 1)(jh\hat{x})$
 $\vec{j}'_s = (\mu_r - 1)jh\hat{z} = -(\mu_r - 1)h \cdot \vec{j}$

下表面： $\vec{e}_n = -\hat{y}$ ， $\vec{M}_s = (\mu_r - 1)(-jh\hat{x})$
 $\vec{j}'_s = -(\mu_r - 1)h \cdot \vec{j}$ （同上表面）

思考 沿 x 向单位长度的磁化面电流为何不为 0？

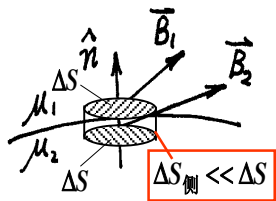
41

§ 19.6 磁场的界面关系



42

1、磁感应强度法向分量的界面关系



$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_{top} \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_{bottom} \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_{side} \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

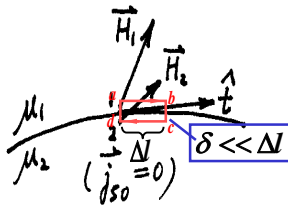
$$= B_{1n}\Delta S - B_{2n}\Delta S + 0 = 0$$

$$\text{所以 } B_{1n} = B_{2n}$$

界面两侧，磁感应强度的法向分量连续

43

2、磁场强度切向分量的界面关系



$$\text{设界面无传导电流 } \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$$

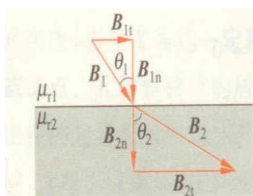
$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_{1t}ab - H_{2t}cd = 0$$

$$\therefore H_{1t} = H_{2t}$$

分界面两侧磁场强度的切向分量相等

44

3、磁感应强度的界面关系



设界面无传导电流

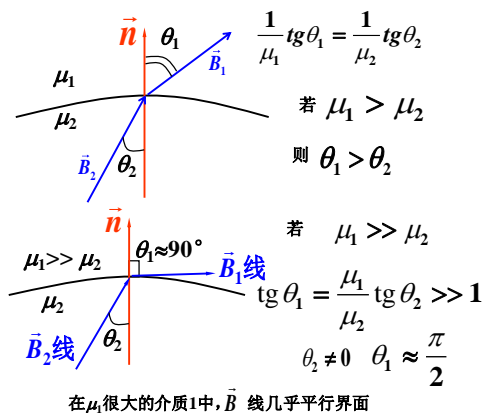
$$H_{1t} = H_{2t} \quad (1) \quad \frac{1}{\mu_1} \tan \theta_1 = \frac{1}{\mu_2} \tan \theta_2$$

$$\frac{B_{1t}}{\mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_2} \quad (1) \quad \text{比较: 光学中光线的折射定律}$$

$$\mu_1 \sin \theta_1 = \mu_2 \sin \theta_2$$

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (2) \quad \text{磁感应线的“折射定律”}$$

45



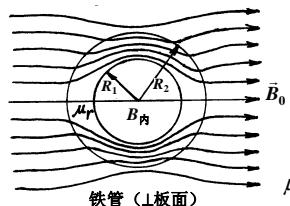
在 μ_1 很大的介质1中, \vec{B} 线几乎平行界面

46

4、静磁屏蔽

在 μ_1 很大的介质1中, \vec{B} 线几乎平行界面

铁磁物质中 \vec{B} 线沿铁芯“走”



铁管 (上板面)

$$t = 0.1\text{cm}, k = 5\%; \quad t = 1\text{cm}, k = 0.5\%$$

精密探头、显象管...都需要磁屏蔽

计算表明

$$B_m = k B_0$$

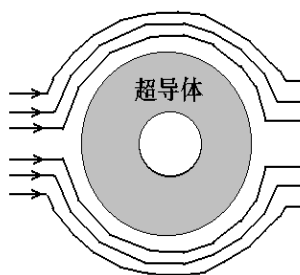
k 屏蔽系数

与相对磁导率、内外管半径和壁厚有关

$$\mu_r = 4000, R_2 = 10\text{cm}$$

47

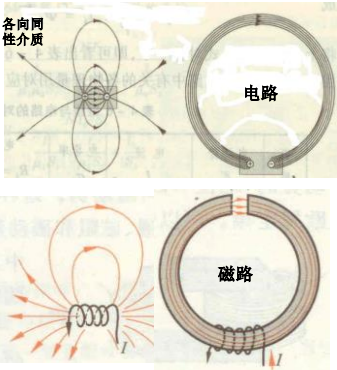
完全磁屏蔽



完全磁屏蔽
(Meissner效应)

48

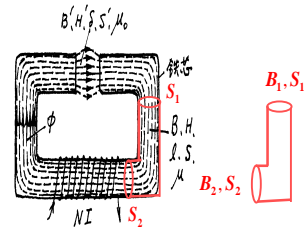
5、简单磁路



磁场基本集中在铁芯内部，漏磁可忽略

由铁芯(磁隙)构成的磁感应线集中的通路—磁路

49

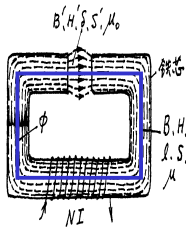


$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \iint_{S_1} \vec{B} \cdot d\vec{s} + \iint_{S_2} \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\text{同理} \quad \iint_{S_1} \vec{B} \cdot d\vec{s} + \iint_{S'} \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \left| \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \right| = \Phi$$

$$B_1 S_1 = B_2 S_2 = B' S' = \Phi \quad \text{磁通量}$$

50



$$\oint_{(l+\delta)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

$$Hl + H'\delta = NI$$

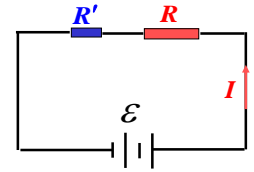
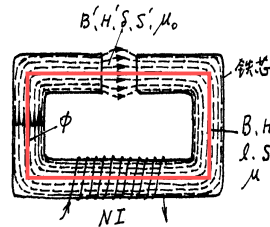
$$\frac{Bl}{\mu} + \frac{B'\delta}{\mu_0} = NI$$

$$BS = B'S' = \Phi$$

$$\frac{\Phi l}{S\mu} + \frac{\Phi \delta}{S'\mu_0} = NI$$

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{S\mu} + \frac{\delta}{S'\mu_0}}$$

51



$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{S\mu} + \frac{\delta}{S'\mu_0}} = \frac{\epsilon_m}{R_m + R'_m}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$I = \frac{\epsilon}{R + R'}$$

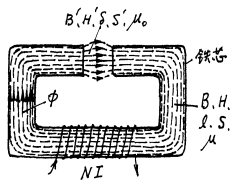
$$R = \frac{l}{\sigma S}$$

$$\epsilon_m = NI \quad \text{磁通势}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad \text{磁阻}$$

$$\epsilon, R, I, \sigma \Leftrightarrow \epsilon_m, R_m, \Phi, \mu \quad \text{“欧姆”定律}$$

52



$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{S\mu} + \frac{\delta}{S'\mu_0}} = \frac{\epsilon_m}{R_m + R'_m}$$

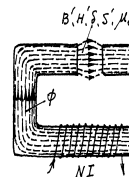
$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$\frac{R_m}{R'_m} = \frac{l \cdot S' \cdot \mu_0}{\delta \cdot S \cdot \mu_r \mu_0} \approx \frac{l}{\delta \mu_r}$$

若 $\mu_r = 10^3$ ，则 $\delta = 1\text{mm}$ 的气隙，其磁阻相当于 $l = 1\text{m}$ 的铁芯磁阻，所以气隙对磁路影响很大。

53

【例题】



$$l = 0.5\text{m}, S = 4 \times 10^{-4}\text{m}^2, N = 200,$$

$$I = 0.5\text{A}, \mu_r = 5000$$

求：当 $\delta = 0, 0.1, 0.5, 1.0\text{mm}$ 时，

铁芯中的磁感应强度为多少？

解 忽略漏磁 $S = S', B = B'$

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{S\mu} + \frac{\delta}{S'\mu_0}}$$

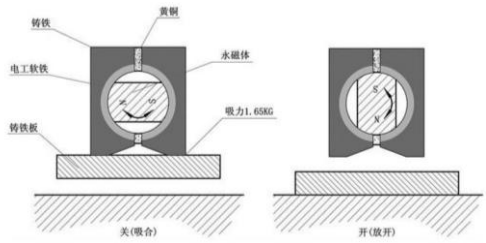
$$B = \frac{NI}{\frac{l}{\mu_r \mu_0} + \frac{\delta}{\mu_0}} = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l}{\mu_r} + \delta}$$

$$B = \begin{cases} 1.257\text{T} & \delta = 0.0\text{mm} \\ 0.628\text{T} & \delta = 0.1\text{mm} \\ 0.209\text{T} & \delta = 0.5\text{mm} \\ 0.114\text{T} & \delta = 1.0\text{mm} \end{cases}$$

气隙对磁路影响很大

54

磁性表座的原理

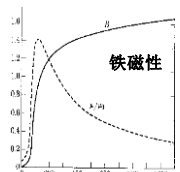
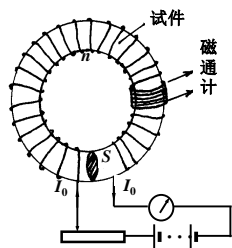
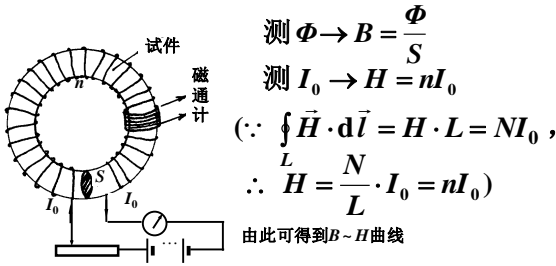
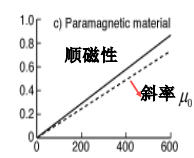
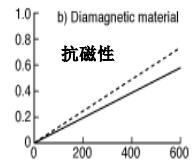
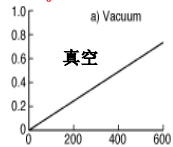
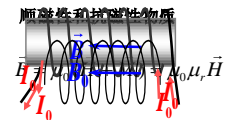


演示 磁性表座的原理

§ 19.7 铁磁性材料

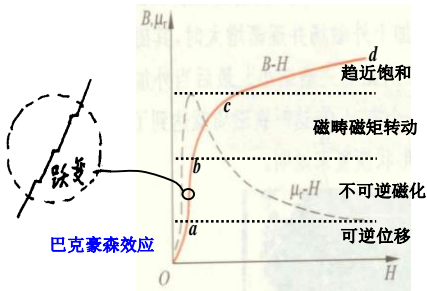
一、铁磁性材料的特点

1、起始磁化曲线



励磁电流 I
 $B \sim H$ 曲线

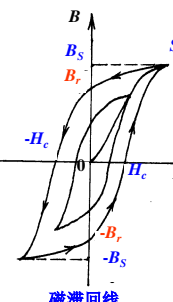
铁磁质 $\vec{B} \sim \vec{H}$ 关系非线性
形式上表示为 $\vec{B} = \mu \vec{H}$
 $\mu \neq \text{Const.}$ 也不唯一



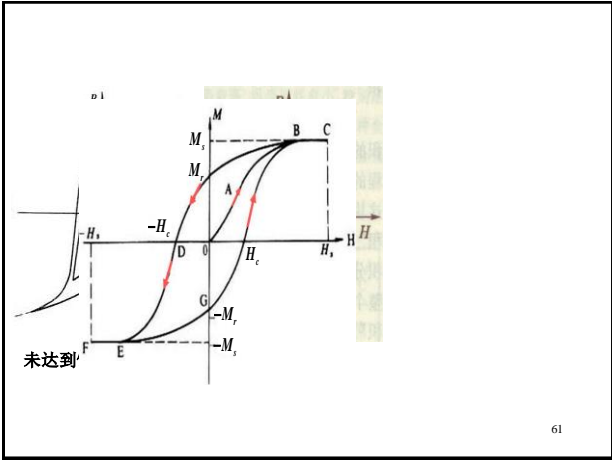
演示 巴克豪森效应（磁畴的磁化现象）

2.磁滞回线 (hysteresis loop)

B 落后于 H 的变化，称为磁滞现象。

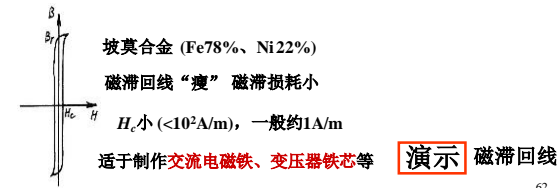
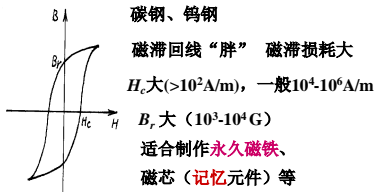


B_r — 剩余磁感强度
(remanent magnetic induction)
 H_c — 矫顽力 (coercive force)
磁滞是由于晶体缺陷和内应力、
以及磁畴在外磁场减退时，就近
沿易磁化方向排列而造成的。
“磁滞损耗” (hysteresis loss)
正比于 $B \sim H$ 回线所围的面积。



61

硬磁和软磁材料

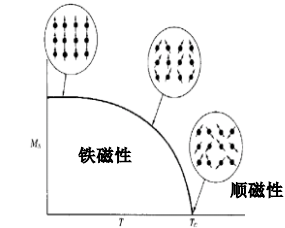


演示

磁滞回线

62

3、居里点



T_c 是失去铁磁性的临界温度, 称“居里点”。

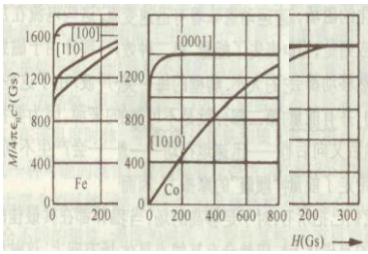
当温度低于居里点时, 又恢复铁磁性

Fe: $T_c = 767^\circ\text{C}$ Ni: $T_c = 357^\circ\text{C}$ Co: $T_c = 1117^\circ\text{C}$

演示 居里点

63

4、磁晶各向异性



64

5、磁致伸缩

外场 B_0 改变, 磁化强度 \vec{M} 的大小和方向改变, 会导致晶格间距改变, 从而改变铁磁体的长度和体积

长度相对改变约 10^{-5} 量级

某些材料在低温下可达 10^{-4}

磁致伸缩有一定固有频率, 当外磁场变化频率和固有频率一致时, 发生共振

可用于制作振荡器、超声波发生器等。

65

二、自发磁化与磁畴

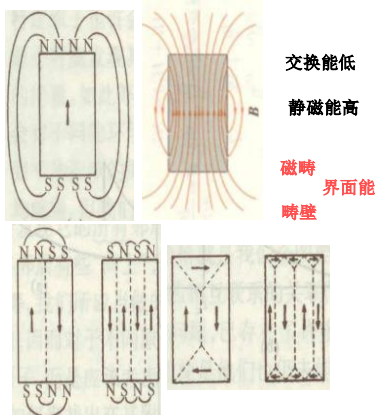
只有量子力学才能准确理解物质的磁性

铁磁性物质具有固有磁矩, 其中起主要作用的是电子的自旋磁矩。各电子的自旋磁矩靠**交换耦合作用**使方向一致, 从而形成**自发磁化**

磁矩平行排列, 能量低 **交换能**

66

1、交换能与静磁能



67

2、磁畴结构

交换能 磁晶各向异性能
静磁能 弹性能
界面能 形状各向异性能

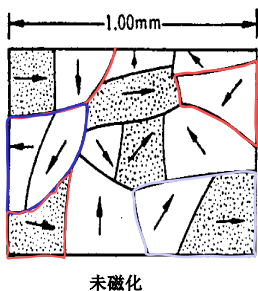
矛盾因素协调平衡, 才使铁磁体整体能量最低

各种材料磁畴线度相差较大 一般为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{m}$

易磁化方向 难磁化方向

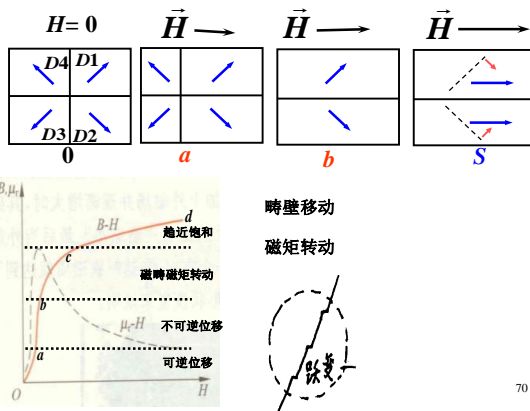
68

3、多晶铁磁材料



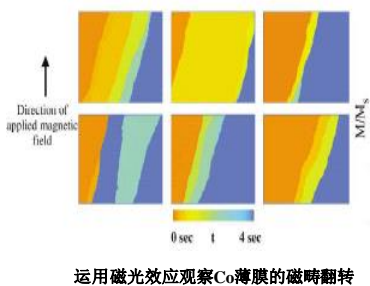
69

4、铁磁材料的磁化过程



70

5、巴克豪森效应的实验观察



Physical Review
Letters Vol.90
P 087203

71

三、磁畴的实验观察

- 磁光效应
- 扫描霍尔显微镜
- 自旋极化扫描隧道显微镜
- 扫描磁力显微镜
- 洛伦兹显微镜

时间分辨率和空间分辨率



第十九章结束

72