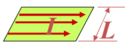
第四章主要内容

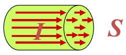
安培定律 $d\vec{F}_{21}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I_2 d\vec{l}_2\times\left(I_1 d\vec{l}_1\times\vec{e}_r\right)}{r_{12}^2}=I_2 d\vec{l}_2\times d\vec{B}_1$

闭合回路 $\vec{F}_{21}=-\vec{F}_{12}=\frac{\mu_0}{4\pi}\oint_{L_1}\oint_{L_2}\frac{I_2 d\vec{l}_2\times\left(I_1 d\vec{l}_1\times\vec{r}_{12}\right)}{r_{12}^3}$

$\vec{F}=\iint_S \vec{i}dS\times\vec{B}$　$i=\frac{I}{L}$



$\vec{F}=\iiint_V \vec{j}dV\times\vec{B}$　$j=\frac{I}{S}$



电荷在电磁场中的受力 $\vec{F}=q\vec{E}+q\vec{v}\times\vec{B}$

1

毕奥－萨伐尔定律

$\vec{R}=R\,\vec{e}_R$

$$d\vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}Id\vec{l}\times\frac{\vec{e}_R}{R^2}\qquad \vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\oint_L\frac{Id\vec{l}\times\vec{R}}{R^3}$$

$$d\vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\vec{i}dS\times\vec{e}_R}{R^2}\qquad \vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\iint\frac{\vec{i}dS\times\vec{R}}{R^3}$$

$$d\vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\vec{j}dV\times\vec{e}_R}{R^2}\qquad \vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\iiint\frac{\vec{j}dV\times\vec{R}}{R^3}$$

叠加原理

2

静磁场的基本定理和方程式

高斯定理 **(磁场无源)**

$\oiint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0$　积分形式

$\nabla\cdot\vec{B}=0$　微分形式

安培环路定理 **(磁场有旋)**

$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0\sum_i I_i=\mu_0\iint_S \vec{j}\cdot d\vec{S}$　积分形式

$\nabla\times\vec{B}=\mu_0\vec{j}$　微分形式

3

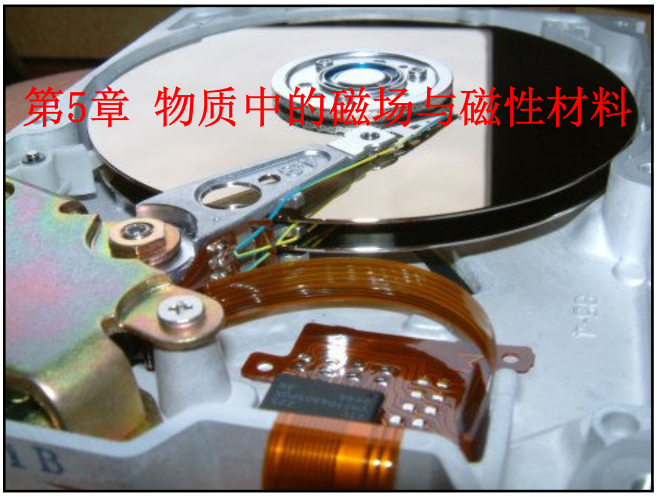
磁矢势 $\vec{B}=\nabla\times\vec{A}$　$\nabla\cdot\vec{A}\equiv 0$

$$\left\{\begin{array}{l}\vec{A}=\frac{\mu_0}{4\pi}\oint_L\frac{Id\vec{l}}{R}\\[2mm] \vec{A}=\frac{\mu_0}{4\pi}\iint_S\frac{id\vec{S}}{R}\\[2mm] \vec{A}=\frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_V\frac{\vec{j}dV}{R}\end{array}\right.$$

$\oint_L \vec{A}\cdot d\vec{l}=\iint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$

4

第5章　物质中的磁场与磁性材料



§ 5-1 磁介质及其磁化

请为我揭示磁石的奥秘，

那仅次于爱与恨的奥秘。

歌德(1749-1832)

德国著名思想家、作家、科学家

6

磁介质的研究和发展

- 寻求磁介质的本构方程及边值关系

$$\begin{cases}\nabla\cdot\vec{B}=0\\ \nabla\times\vec{B}=\mu_0\vec{j}\end{cases}$$

+ 本构方程

$$\begin{cases}\oiint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0\\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0\sum I\end{cases}$$

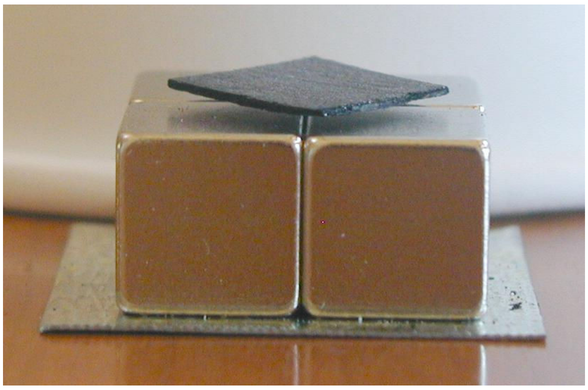
+ 边界条件

7

1. 法拉第的研究

- 早在1778年，丹麦人*S. J. Brugmans*在实验中发现铋Bi被磁极排斥，提出抗磁体的概念，但未引起人们的注意。
- 1827年，贝利夫再次报道铋和锑被磁极排斥。
- 1845年12月，法拉第在《论新磁作用兼论所有物质的磁状态》中分析了抗磁体的性质，对抗磁体和顺磁体进行了分类，发现绝大部分的物质都是抗磁体。之后，他用磁化率的概念解释了顺磁体和抗磁性。

8



在室温下热解碳因抗磁性产生的磁悬浮现象

9

2. 皮埃尔.居里（1859—1906）

- 1895年居里先生发现了关于抗磁性和顺磁性的两个定律，他的博士论文就是《物体在不同温度下的磁性》
- 同年与斯科若朵夫斯基结婚，测定了各种物质的磁化率随温度的变化规律。
- 居里点(居里温度Tc)：超过居里点温度，顺(铁)磁性消失。

因发现了钋和镭两种元素。1903年居里夫妇和贝克勒尔共同获得诺贝尔物理学奖。

10

3. *Weiss*的铁磁性理论(1865-1940)

- 外斯(*P. E. Weiss*)在1907年首先提出铁磁性的分子场理论和磁畴假说。
- 根据这个理论，在居里温度以下，铁磁物质内部分为若干饱和磁化区域——磁畴，每一磁畴内部由于强分子场作用，各原子磁矩排列成同一方向，即发生自发磁化。
- 无外磁场时，各磁畴的自发磁化强度、方向是杂乱的，互相抵消，总体不表现宏观磁化强度。
- 在较弱的外磁场作用下，就足以使各磁畴的自发磁化强度趋向一致，表现出一定的宏观磁化强度。
- 现代实验完全证明了磁畴是确实存在的，约为0.01～0.1 cm 的横向宽度。

11

4. 完整的磁学科学体系的形成(1865-1940)

1900 ～ 1930年

- 金属电子论
- 顺磁性理论
- 分子磁场
- 磁畴概念
- X射线衍射
- 原子磁矩
- 电子自旋
- 波动力学
- 铁磁性理论
- 金属电子量子论
- 电子显微镜

→ 完整的磁学科学体系

↓ 量子力学: 电子间的相互交换作用导致的磁有序

12

P.Zeeman：光谱线在磁场中分裂
H.A.Lorentz: 磁场对辐射的影响

1902年诺贝尔奖

*A.Fert*和*P.Grunberg*: 巨磁电阻

2007年诺贝尔奖

25次诺贝尔奖

磁学应用领域

- 电子技术
  电力技术
- 通信技术
  空间技术
- 计算技术
  生物技术
  家用电器

13

§ 5.1.1 磁化强度

1. 原子和分子磁矩

- 分子电流：安培提出了分子电流的假设，即每个分子都有一个等效的小分子环形电流。
- 分子磁矩：分子环形电流形成的磁矩。$\vec{\mu} = I\vec{S}$
- 一个由大量原子分子组成的体系，每一个分子或原子的磁矩都是它内部所有电子磁矩的叠加。

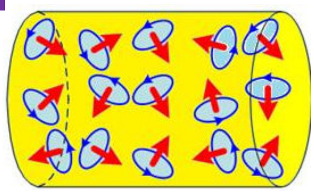
$$\vec{\mu}_m = \sum \vec{\mu}_e$$

- 分子或原子的磁矩取决于各个电子磁矩的大小和方向。

14

经典物理 电子磁矩的方向是完全任意的

量子力学 电子磁矩只能在空间取某些特定的方向

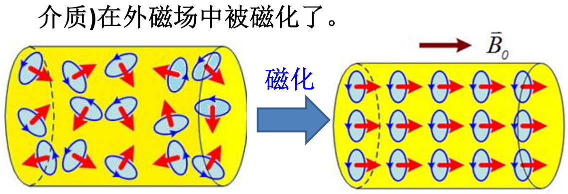


$\vec{B} = 0$ $\sum \vec{\mu} = 0$

- 不加外磁场时，由大量的原子和分子组成的物质体系的合磁矩为零，物质无磁性。

15

- 磁化：如果有外加磁场存在，各个分子磁矩在外磁场作用下将发生转动，分子的合磁矩将不为零，其和将指向外磁场方向，称该物质(磁介质)在外磁场中被磁化了。



$\vec{B} = 0, \sum \vec{\mu} = 0$

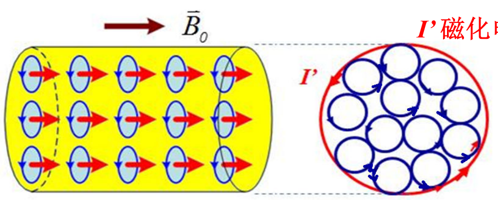
$\vec{B} \neq 0, \sum \vec{\mu} \neq 0$

- 磁介质
  - 能被外磁场磁化
  - 反过来影响磁场

$\sum \vec{\mu} // \vec{B}$

16

- 表面磁化电流 *I'*：磁介质在外场中被磁化，导致磁介质表面出现的宏观电流。



磁化电流不伴随带电粒子的宏观位移!

17

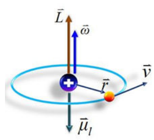
2. 电子的轨道磁矩和自旋磁矩

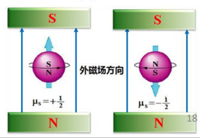
原子
- 原子核 ➡ 原子核磁矩
- \+
- 外层电子 ➡ 电子磁矩

$\frac{原子核磁矩}{电子磁矩}$ $\frac{1}{1000}$

原子磁矩≈电子磁矩

电子磁矩
- 轨道磁矩：电子绕原子核运动 (轨道运动)
- 自旋磁矩：电子绕自身的轴做自旋运动





经典物理中电子的轨道磁矩

- 电子受原子核的库仑力作圆周运动，以H原子为例

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}=\frac{mv^2}{r}\qquad v=\frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 mr}}$$

- 电子做圆周运动(轨道运动)相当于一个环形电流，电流强度为：

$$i=\frac{q}{T}=\frac{e}{2\pi r/v}=\frac{e^2}{4\pi r\sqrt{\pi\varepsilon_0 mr}}$$

- 电子的轨道磁矩

$$\vec{\mu}_i=i\vec{S}=i\pi r^2\vec{n}=-\frac{e^2}{4}\sqrt{\frac{r}{\pi\varepsilon_0 m}}\,\vec{n}$$

n是S的法线方向，与电流流动方向的右手系方向一致

电子运动方向与电流方向相反，取负号

19

量子力学中电子的轨道磁矩和自旋磁矩

- 电子的轨道磁矩 μ_l 与电子轨道运动角动量 L_l 的关系

$$\vec{\mu}_l=-\frac{e}{2m}\vec{L}_l\qquad L_l=\sqrt{l(l+1)}\hbar\qquad l=0,1,2,3\ldots$$

- 电子的自旋磁矩 μ_s 与自旋角动量 S 间的关系

$$\vec{\mu}_s=-\frac{e}{m}\vec{L}_s\qquad L_s=\frac{g}{2}S(S+1)\hbar$$

自旋量子数$S=\pm 1/2$

迴磁比 $g=-2.0023193$

实验得到电子的自旋磁矩为 $\mu_s=9.28485110^{-24}\,A\cdot m^2\approx 1.0011\mu_B$

$$\mu_B=\frac{\hbar e}{2m}=9.273410^{-24}\,A\cdot m^2$$

μ_B 称为波尔磁子

20

3. 磁化强度

- 磁化强度：单位体积内的各分子磁矩之和

$$\vec{M}=\frac{\sum\vec{\mu}_m}{\Delta V}$$

ΔV：远大于分子间的平均距离(微观足够大)，远小于 M 的非均匀尺度(宏观足够小)

无外场，未被磁化的磁介质 $\sum\vec{\mu}_m=0,\ \vec{M}=0$

被磁化的磁介质 $\sum\vec{\mu}_m\neq 0,\ \vec{M}\neq 0$

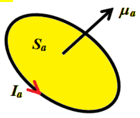
$$\left\{\begin{array}{ll}\dfrac{\partial\vec{M}}{\partial x}=\dfrac{\partial\vec{M}}{\partial y}=\dfrac{\partial\vec{M}}{\partial z}=0,\ \vec{M}=\vec{C} & \text{均匀磁化}\\ \vec{M}=\vec{M}(x,y,z) & \text{非均匀磁化}\end{array}\right.$$

21

- 分子的平均磁矩μ_a $\vec{\mu}_a=I_a\vec{S}_a=\dfrac{\sum\vec{\mu}_m}{n\Delta V}$

n为单位体积中的分子数

磁化强度 $\vec{M}=\dfrac{\sum\vec{\mu}_m}{\Delta V}=n\vec{\mu}_a=nI_a\vec{S}_a$



讨论：

① 磁化强度为矢量，方向代表磁化的方向，大小代表磁化的程度

② $M\neq 0$ 表示磁介质处于磁化状态，M 值越大，与外磁场的相互作用越强，相应物质的磁性越强。

③ $M=0$ 非磁化状态，可能原因：(a) 分子固有磁矩为0；(b) 分子磁矩的取向杂乱无章 $\sum\mu_m=0$。

22

【例15】一均匀磁化棒直径为 10 mm，长为 30mm，磁化强度为 1200 A/m，求它的磁矩 μ。

【解】 $\vec{M}=\dfrac{\sum\vec{\mu}_m}{\Delta V}$

$$\sum\mu_m=M\Delta V$$

$$=M\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2L$$

$$=1200\pi\left(5\times10^{-3}\right)^2\times0.03$$

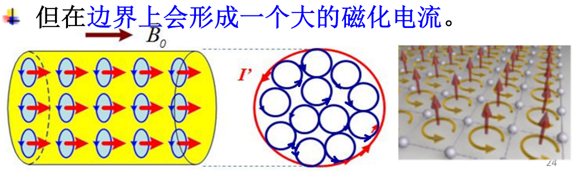
$$=2.827\times10^{-3}\left(Am^2\right)$$

23

§ 5.1.2 磁化电流

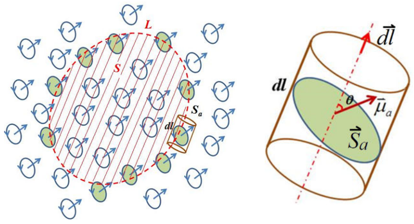
1. 磁化电流

- 材料被磁化后，内部每个原子或分子都形成一个个圆形的磁化电流。
- 材料内部有大量的原子或分子，这些原子或分子电流与周围的原子或分子电流正好方向相反、相互抵消。
- 但在边界上会形成一个大的磁化电流。



24

磁化电流 I'：通过以 L 为边界的、面积为 S 的总分子电流。



对 I' 有贡献的只是与边界相交的分子电流

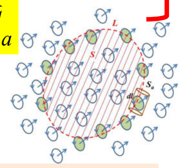
取 L 上一段圆弧 dl，分子磁矩 μ_a 与 dl 的夹角为 θ。则对 I' 有贡献的分子中心应位于以 dl 为轴，$S_a\cos\theta$ 为底的圆柱内，它们对 I' 的贡献为：

$$dI' = I_a ndV = nI_a\vec{S}_a\cdot d\vec{l}$$

25

$$I' = \oint_L dI' = \oint_L nI_a\vec{S}_a\cdot d\vec{l}$$

$$\vec{M} = nI_a\vec{S}_a$$



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

磁化电流 I' 与磁化强度 M 的积分表达式

$$I' = \oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} \overset{stocks}{=} \iint_S (\nabla\times\vec{M})\cdot d\vec{S}$$

$$I' = \iint_S \vec{j}'\cdot d\vec{S}$$

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

磁化电流密度 j' 与磁化强度 M 的微分表达式

26

在均匀磁化介质内部，通常 M 为常矢量，对任意的闭合回路，有

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

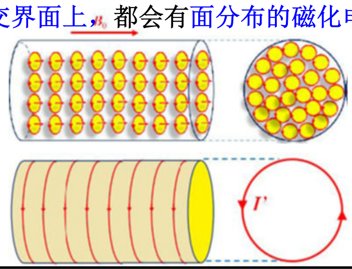
$$\vec{j}' = \nabla\times\vec{M} = 0$$

- 均匀磁介质内，磁化电流 I' 及磁化电流密度 j' 将为零；
- 非均匀磁化的磁介质，内部可能存在磁化电流。

27

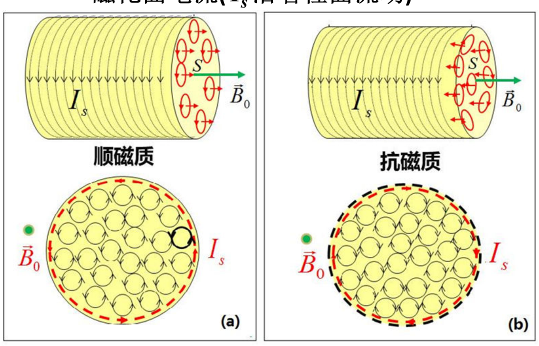
2. 磁化电流的面密度

- 均匀磁化时，所有的分子磁矩都沿同一方向排列，在介质内部没有磁化电流分布($I'=0, j'=0$)，只在介质的表面上才存在着面分布的磁化电流。
- 介质磁化后，在介质表面上和两种不同介质的交界面上，都会有面分布的磁化电流。



28

磁化面电流(I_s 沿着柱面流动)



顺磁质：磁化面电流 I_s 和螺线管导线中的电流 $I(\to B_0)$ 方向相同

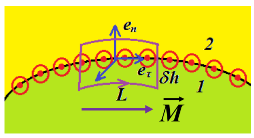
抗磁质：磁化面电流 I_s 和螺线管导线中的电流 $I(\to B_0)$ 方向相反

29

两种不同磁介质的交界

磁化面电流密度 i' $\quad i' = \dfrac{I'}{L}$

在界面处做一环路：



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

$$i'L = (M_{1\tau} - M_{2\tau})L + M\delta h$$

$$\delta h \to 0$$

$$i' = M_{1\tau} - M_{2\tau}$$

或

$$\vec{i}' = (\vec{M}_1 - \vec{M}_2)\times\vec{n}$$

磁化面电流密度 i'

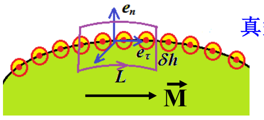
$$\sigma_P = (\vec{P}_1 - \vec{P}_2)\cdot\vec{n}$$

极化电荷面密度 σ_P

30

磁介质表面(与真空分界面)

同理，在界面处做一环路：



真空中 M_2=0

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

$$i'L=M_\tau L+M\delta h+0$$

$$\delta h\to 0$$

$$i'=M_\tau$$

或

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

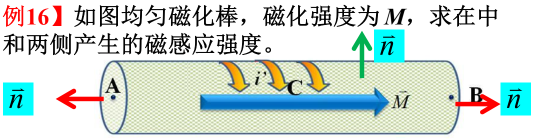
$$\sigma_P=\vec{P}\cdot\vec{n}$$

磁化面电流密度 i'　　极化电荷面密度 σ_P

3. 磁化电流和传导电流比较

- 共同点：
  - 磁化电流和传导电流均产生磁场；
  - 均受外磁场作用。
- 区别：
  - 传导电流有体电流也有面电流，磁化电流是约束电流，一般存在于介质交界面上；
  - 传导电流产生焦耳热；磁化电流不产生焦耳热。

【例16】如图均匀磁化棒，磁化强度为 M，求在中间和两侧产生的磁感应强度。



【解】两端 A 、B 侧面，$M//n$

$$\vec{i}'_A=\vec{i}'_B=\vec{M}\times\vec{n}=0\quad(\theta=0,\pi)$$ 无磁化电流

中间 C 侧面，$M\perp n$

$$\vec{i}'_C=\vec{M}\times\vec{n}=M\vec{e}_\tau\ (\theta=\pi/2)$$

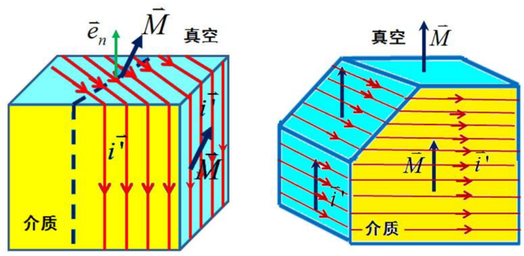
此磁化电流 i'_C 相当于螺线管的电流 nI

$$B_c=\mu_0 i'_c=\mu_0 M$$

$$B_A=B_B=\frac{1}{2}\mu_0 i'=\frac{1}{2}\mu_0 M$$

不同的磁介质界面上，磁化面电流分布与界面形状、磁化强度方向有直接关系

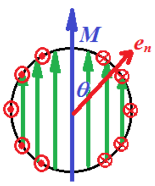
$$\vec{i}'=\vec{M}\times\vec{n}$$



不同侧面 i' 方向有明显差别

【例17】均匀磁化介质球，磁化强度为 M, 半径为 a, 求其磁化电流在轴线上产生的磁场。

【解】因均匀磁化，磁化强度 M 为恒矢量，只在球表面有面分布的磁化电流，以 M 方向为 z 方向，其电流面密度为：



$$\vec{i}'=\vec{M}\times\vec{e}_n=M\sin\theta\vec{e}_\varphi$$

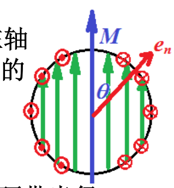
面电流密度与 θ 有关，赤道处 θ =90º，面电流密度最大；两极处 θ =0º，i'=0

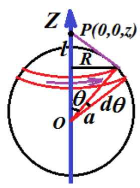
把整个球面分成许多环带，通过宽度为 $ad\theta$ 的环带上的电流 dI' 为：

俯视图

$$dI'=i'ad\theta=Ma\sin\theta d\theta$$

半径为 R 的电流环，在轴线上离圆心为 l 处产生的磁场为(4-1.pdf中例2)





$$B_z=\frac{\mu_0}{2}\frac{R^2 I}{(R^2+l^2)^{3/2}}$$

环带半径：$R=a\sin\theta$

电流：$dI'=Ma\sin\theta d\theta$

圆心距 P 点的距离：$l=z-a\cos\theta$

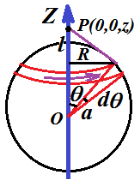
环带在 P 点产生的磁场：

$$dB(z)=\frac{\mu_0}{2}\frac{(a\sin\theta)^2 Ma\sin\theta d\theta}{\left[(a\sin\theta)^2+(z-a\cos\theta)^2\right]^{3/2}}=\frac{\mu_0 Ma^3}{2}\frac{\sin^3\theta d\theta}{(a^2+z^2-2az\cos\theta)^{3/2}}$$

则轴线上任一点 ***P*** 的磁场为：

$$B(z)=\int dB(z)=\frac{\mu_0 Ma^3}{2}\int_{\pi}^{0}\frac{\sin^3\theta d\theta}{(a^2+z^2-2az\cos\theta)^{3/2}}$$

令 $k=\cos\theta,\ dk=-\sin\theta d\theta$



$$B(z)=-\frac{\mu_0 Ma^3}{2}\int_{1}^{-1}\frac{(1-k^2)dk}{(a^2+z^2-2azk)^{3/2}}$$

$$=\frac{\mu_0 M}{3z^3}\{(a^2+z^2)[|z+a|-|z-a|]-za[|z+a|+|z-a|]\}$$

分两种情况讨论：

(1) *P*点在球外

$|z-a|=z-a$

$$B(z)=\frac{2\mu_0 Ma^3}{3|z|^3}=\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{m}{|z|^3}$$

式中 $m=MV=M\frac{4}{3}\pi a^3$ 是整个球内所有分子的分子磁矩总和

即一个均匀磁化的球在球外的磁场等效于一个磁矩为***m***的圆电流的磁场。

(2) *P*点在球内 $|z-a|=a-z$ $B(z)=\frac{2\mu_0 M}{3}$

B大小相等，与考察点在 *z* 轴上的位置无关，方向平行于磁化强度。

§ 5.1.3磁介质存在时的高斯定理和环路定理

1. 磁介质中磁场的高斯定理

- 传导电流 ***I*** → ***B*₀**
- 介质磁化 → 磁化强度***M*** → 磁化电流 ***I'*** → ***B'***

磁介质的作用：提供磁化电流 ***I'*** 作为附加场源。

总磁感应强度 ***B*** $\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'$

B'也遵循毕奥-萨伐尔定律

磁化电流和传导电流在产生磁场方面完全一样

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=\oint\!\!\!\oint_S \vec{B}_0\cdot d\vec{S}+\oint\!\!\!\oint_S \vec{B}'\cdot d\vec{S}=0$$

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0 \qquad \nabla\cdot\vec{B}=0$$

磁介质中磁场的高斯定理依然成立

2. 磁介质中磁场的环路定理

磁介质的作用：提供磁化电流 ***I'*** 作为附加场源

$$\oint_l \vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0\sum I \qquad I=I_0+I' \qquad \sum I'=\oint_l \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

$$\oint_l \vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0\left(\sum I_0+\sum I'\right)=\mu_0\sum I_0+\mu_0\oint_l \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

$$\oint_l\left(\frac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}\right)\cdot d\vec{l}=\sum I_0$$

令 $\vec{H}=\frac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$ ***H***：磁场强度

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

H 的环路积分仅与传导电流有关，与磁化电流无关

真空中 $\vec{M}=0,\ I'=0,\ I=I_0,\ \vec{B}=\vec{B}_0$

则 $\vec{H}=\frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$ $\oint_l \vec{B}_0\cdot d\vec{l}=\mu_0\sum I_0$ 回到真空中磁场环路定律

$$\oint_l \vec{H}\cdot d\vec{l}=\oint\!\!\!\oint_S(\nabla\times\vec{H})\cdot d\vec{S}=\sum I_0=\oint\!\!\!\oint_S \vec{j}_0\cdot d\vec{S}$$

$$\therefore\ \nabla\times\vec{H}=\vec{j}_0$$

介质中磁场的环路定理的微分形式

讨论：

$$\vec{H}=\frac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$$ 是两矢量的迭加

- 磁介质存在时，求 ***H*** 要比求 ***B*** 简便得多
- 磁场强度 ***H*** 与有电介质的静电场中引入的电位移矢量 ***D*** 相似，都是辅助物理量
- 按磁荷的观点，***H*** 反映磁场对单位磁荷的作用

磁介质存在时的静磁场

基本方程

$$\oiint \vec{B}\cdot d\vec{S}=0 \qquad \nabla\cdot\vec{B}=0$$

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=\sum I_0 \qquad \nabla\times\vec{H}=\vec{j}_0$$

本构方程

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

磁化电流

$$I'=\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} \qquad \vec{j}'=\nabla\times\vec{M}$$

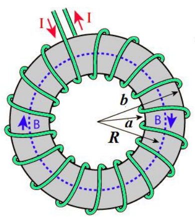
$$\vec{i}'=\left(\vec{M}_1-\vec{M}_2\right)\times\vec{n}$$

【例18】若螺绕环内充满磁介质，已知磁化场的磁感应强度为 B_0，磁化强度为 M。求磁感应强度 B.

【解】无介质时 $B_0=\mu_0 nI_0$　B_0为磁化场的磁感应强度

充满介质时，设螺绕环的平均半径为 R，总匝数为 N，根据介质中磁场的环路定理

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=\sum I_0 \qquad H2\pi R=NI_0$$



则 $H=\dfrac{N}{2\pi R}I_0=nI_0=B_0/\mu_0$

由 $\vec{H}=\dfrac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$ ⇒ $B=\mu_0\left(H+M\right)=B_0+\mu_0 M$

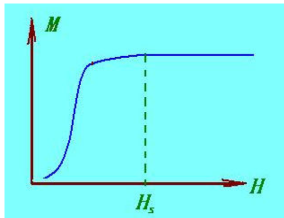
§ 5.1.4 磁化规律

1. B、H、M 间的关系

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

$$\vec{B}=\mu_0\left(\vec{H}+\vec{M}\right)$$

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



磁化曲线：***M-H*或*B-H*的关系曲线**

2. 磁 化 率

- 大多数磁介质是弱磁性的。
- 实验表明：如果磁介质是各向同性的，在外磁场不太强的情况下，磁化强度 ***M*** 与磁场强度 ***H*** 成线性关系： $\vec{M}=\chi_m\vec{H}$

χ_m :磁介质的磁化率或磁化系数

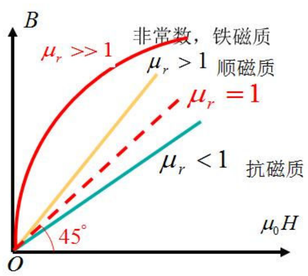
$$\vec{B}=\mu_0(\vec{H}+\vec{M})=\mu_0(1+\chi_m)\vec{H}=\mu_0\mu_r\vec{H}=\mu\vec{H}$$

μ_r　磁介质的相对磁导率　$\mu_r=1+\chi_m$

$\mu=\mu_0\mu_r$　μ: 磁介质的磁导率或绝对磁导率

相对磁导率　磁化率

$$\mu_r=1+\chi_m$$



弱磁性材料

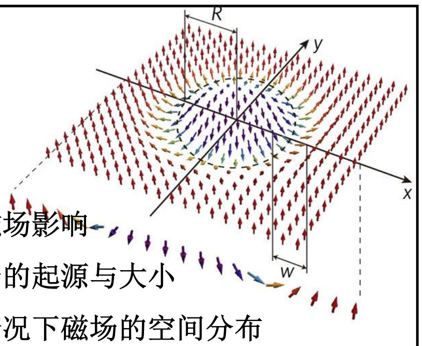
顺磁性材料：$\chi_m>0$，$\chi_m\sim 10^{-4}$-10^{-5}，　$\mu_r>1$

抗磁性材料：$\chi_m<0$，$\chi_m\sim -(10^{-5}$-$10^{-6})$，$\mu_r<1$

强磁性材料

铁磁性材料：$\chi_m>>0$，　$\mu_r>>1$

问 题



(1) 磁介质对磁场影响

(2) 各星球磁场的起源与大小

(3) 模拟各种情况下磁场的空间分布

作业：**5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8**

Thank you!

49