

第四章主要内容

安培定律

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

闭合回路

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

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

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

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

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

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

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_L \frac{Id\vec{l} \times \vec{R}}{R^3}$$

叠加原理

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

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_S \frac{\vec{i} dS \times \vec{R}}{R^3}$$

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

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j} dV \times \vec{R}}{R^3}$$

2

静磁场的基本定理和方程式

高斯定理 (磁场无源)

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

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{微分形式}$$

安培环路定理 (磁场有旋)

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

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

3

磁矢势

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

$$\nabla \cdot \vec{A} \equiv 0$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_L \frac{Id\vec{l}}{R}$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_S \frac{id\vec{S}}{R}$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j} dV}{R}$$

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

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

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \end{cases} \quad + \quad \text{本构方程}$$

$$\begin{cases} \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \\ \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I \end{cases} \quad + \quad \text{边界条件}$$

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T_c)**：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

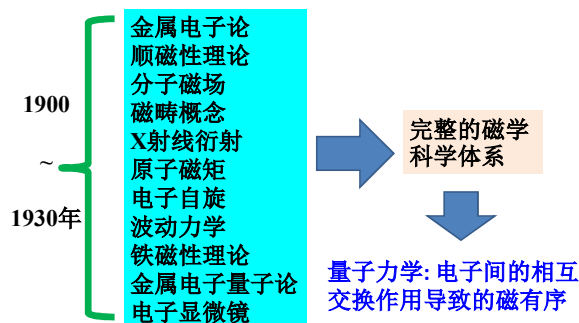
3. Weiss的铁磁性理论(1865-1940)



- 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)



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

磁学应用领域

25次诺贝尔奖

电子技术 通信技术 计算技术
 电力技术 空间技术 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。

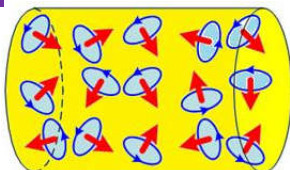
$$\vec{\mu}_m = \sum \vec{\mu}_e$$

- 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**

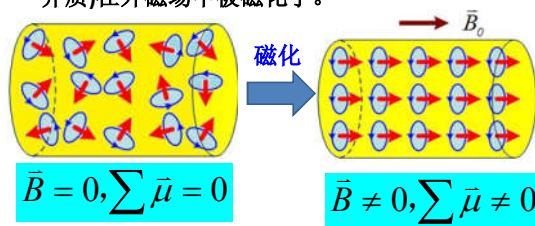


$$\vec{B} = 0 \quad \sum \vec{\mu} = 0$$

- 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。



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

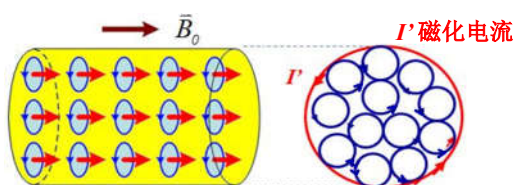
$$\vec{B} \neq 0, \sum \vec{\mu} \neq 0$$

- 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!

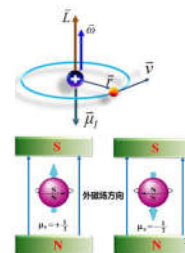
17

2. 电子的轨道磁矩和自旋磁矩

原子 { 原子核 → 原子核磁矩 $\frac{1}{1000}$
 + 外层电子 → 电子磁矩

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

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 mr}}$$

- ✦ 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：

$$i = \frac{q}{T} = \frac{e}{2\pi r / v} = \frac{ev}{2\pi r}$$

- ✦ 电子的轨道磁矩

$$\vec{\mu}_i = i\vec{S} = i\pi r^2 \vec{n} = -\frac{e^2}{4} \sqrt{\frac{r}{\pi\epsilon_0 m}} \vec{n}$$

\vec{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

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

- ✦ 电子的自旋磁矩 μ_s 与自旋角动量 S 间的关系

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{L}_s \quad L_s = \frac{g}{2} S(S+1)\hbar \quad \text{自旋量子数 } S = \pm 1/2$$

迴磁比 $g = -2.0023193$

实验得到电子的自旋磁矩为

$$\mu_s = 9.28485110 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \approx 1.0011 \mu_B$$

$$\mu_B = \frac{he}{2m} = 9.273410 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad \mu_B \text{ 称为波尔磁子}$$

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

$$\sum \vec{\mu}_m = 0, \quad \vec{M} = 0$$

被磁化的磁介质

$$\sum \vec{\mu}_m \neq 0, \quad \vec{M} \neq 0$$

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

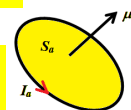
21

- ✦ 分子的平均磁矩 μ_a

$$\vec{\mu}_a = I_a \vec{S}_a = \frac{\sum \vec{\mu}_m}{n \Delta V} \quad n \text{ 为单位体积中的分子数}$$

磁化强度

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_m}{\Delta V} = n \vec{\mu}_a = n I_a \vec{S}_a$$



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】

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

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

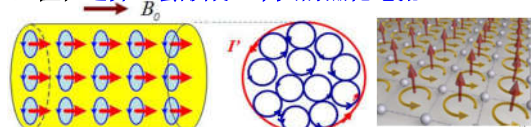
$$\begin{aligned} &= M \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 L \\ &= 1200 \pi (5 \times 10^{-3})^2 \times 0.03 \\ &= 2.827 \times 10^{-3} (\text{A} \cdot \text{m}^2) \end{aligned}$$

23

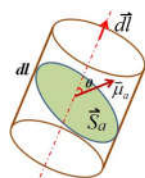
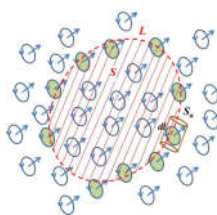
§ 5.1.2 磁化电流

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。



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:

$$dl' = I_a n dV = n I_a \bar{S}_a \cdot d\vec{l}$$

25

$$I' = \oint_L dI' = \oint_L n I_a \bar{S}_a \cdot d\vec{l}$$

$$\vec{M} = n I_a \bar{S}_a$$

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

磁化电流 I' 与磁化强度 M 的积分表达式

$$I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} \stackrel{\text{斯托克斯}}{=} \iint_S (\nabla \times \vec{M}) \cdot d\vec{S}$$

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

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

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

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

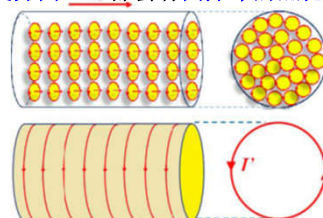
$$\vec{j}' = \nabla \times \vec{M} = 0$$

- 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

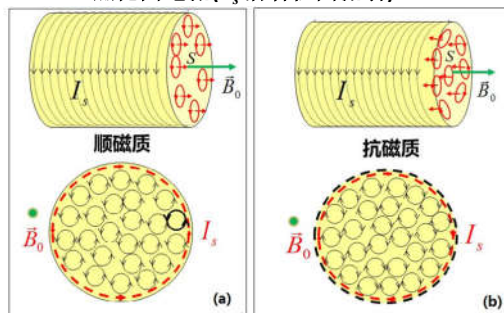
2. 磁化电流的面密度

- 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)

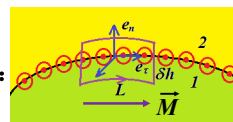


顺磁质: 磁化面电流 I_s 和螺线管导线中的电流 $I (\rightarrow B_0)$ 方向相同
抗磁质: 磁化面电流 I_s 和螺线管导线中的电流 $I (\rightarrow B_0)$ 方向相反

两种不同磁介质的交界

磁化面电流密度 i' 在界面处做一环路:

$$i' = \frac{I'}{L}$$



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

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

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

$$\delta h \rightarrow 0$$

或

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

磁化面电流密度 i'

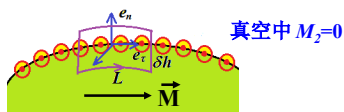
$$\sigma_p = (\vec{P}_1 - \vec{P}_2) \cdot \vec{n}$$

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：



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

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

或

$$i' = M_\tau$$

$$\delta h \rightarrow 0$$

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

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

磁化面电流密度 i'

极化电荷面密度 σ_p

31

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。

32

【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， $M \perp n$

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

中间 C 侧面， $M \perp n$

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

此磁化电流 i'_C 相当于螺线管的电流 nI

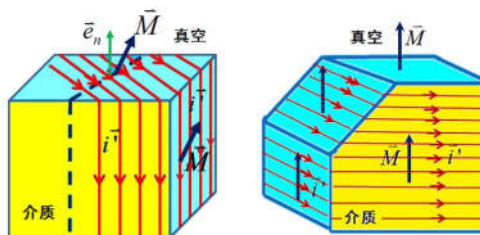
$$B_C = \mu_0 i'_C = \mu_0 M$$

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

33

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

34

【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。

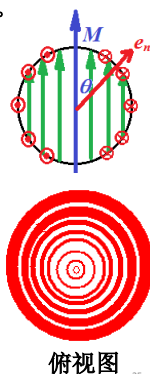
【解】因均匀磁化，磁化强度 M 为恒矢量，只在球表面有面分布的磁化电流，以 M 方向为 z 方向，其电流面密度为：

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

面电流密度与 θ 有关，赤道处 $\theta = 90^\circ$ ，面电流密度最大；两极处 $\theta = 0^\circ$ ， $i' = 0$

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

$$dI' = i' a d\theta = M a \sin \theta d\theta$$



俯视图

35

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)

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

环带在 P 点产生的磁场：

环带半径： $R = a \sin \theta$

电流： $dI' = M a \sin \theta d\theta$

圆心距 P 点的距离： $l = z - a \cos \theta$

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

$$= \frac{\mu_0 M a^3}{2} \frac{\sin^3 \theta d\theta}{(a^2 + z^2 - 2az \cos \theta)^{3/2}}$$

36

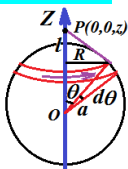
则轴线上任一点 P 的磁场为:

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

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

$$B(z) = -\frac{\mu_0 M a^3}{2} \int_1^{-1} \frac{(1-k^2) dk}{(a^2 + z^2 - 2azk)^{3/2}}$$

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



37

分两种情况讨论:

(1) P 点在球外

$$|z-a| = z-a$$

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

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。

38

§ 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 $I \rightarrow B_0$

介质磁化 \rightarrow 磁化强度 $M \rightarrow$ 磁化电流 $I' \rightarrow B'$

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

39

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

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

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

磁介质中磁场的高斯定理依然成立

40

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

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

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

$$\oint_l \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum I_0 \quad \text{令} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad H: \text{磁场强度}$$

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

H 的环路积分仅与传导电流有关, 与磁化电流无关

41

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

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

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

$$\therefore \nabla \times \vec{H} = \vec{j}_0 \quad \text{介质中磁场的环路定理的微分形式}$$

42

讨论:

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

- 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

43

磁介质存在时的静磁场

基本方程

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

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

本构方程

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

磁化电流

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

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

44

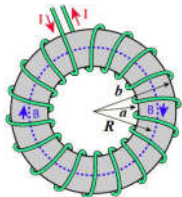
【例18】若螺绕环内充满磁介质, 已知磁化场的磁感应强度为 B_0 , 磁化强度为 M 。求磁感应强度 B 。

【解】无介质时 $B_0 = \mu_0 n I_0$ 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

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0 \quad H 2\pi R = N I_0$$

则 $H = \frac{N}{2\pi R} I_0 = n I_0 = B_0 / \mu_0$

由 $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \Rightarrow B = \mu_0 (H + M) = B_0 + \mu_0 M$



45

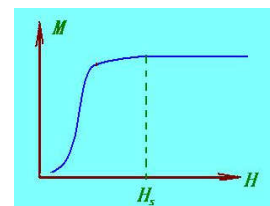
§ 5.1.4 磁化规律

1. B 、 H 、 M 间的关系

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

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

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



磁化曲线: M - H 或 B - H 的关系曲线

46

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: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

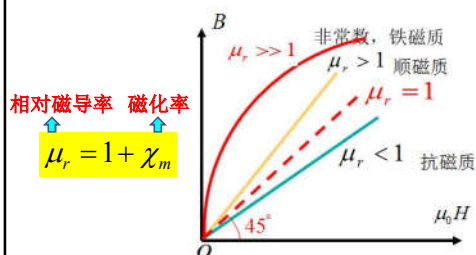
χ_m : 磁介质的磁化率或磁化系数

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

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

47



弱磁性材料

顺磁性材料: $\chi_m > 0$, $\chi_m \sim 10^{-4} \sim 10^{-5}$, $\mu_r > 1$
抗磁性材料: $\chi_m < 0$, $\chi_m \sim -(10^{-5} \sim 10^{-6})$, $\mu_r < 1$

强磁性材料

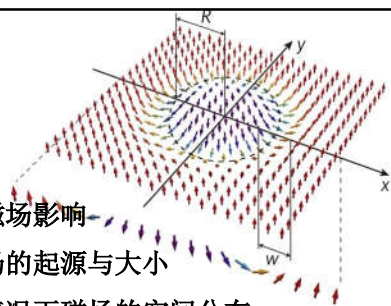
铁磁性材料: $\chi_m \gg 0$, $\mu_r \gg 1$

48

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