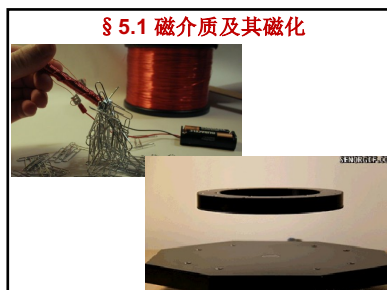


第5章 物质中的磁场与磁性材料

- § 5.1 磁介质与磁化
- § 5.2 磁性材料
- § 5.3 新型材料中的磁现象
- § 5.4 磁场的测量

1



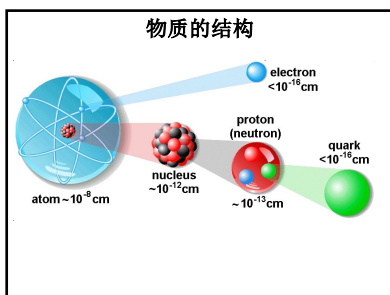
2

闭合线圈在磁场中的受力和力矩

$$\vec{F} = (\vec{\mu} \cdot \nabla) \vec{B}$$

$$\vec{M} \approx \vec{\mu} \times \vec{B}$$

3



4

§ 5.1.1 磁化强度

电子轨道磁矩

电子绕原子核做匀速圆周运动，产生**轨道磁矩**

周期: $T = \frac{2\pi r}{v}$

电流: $i = -\frac{e}{T} = -\frac{ev}{2\pi r}$

轨道磁矩: $\vec{\mu} = i\vec{S} = -\frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 \vec{n} = -\frac{evr}{2} \vec{n}$

轨道角动量: $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v} = mvr\vec{n}$ $\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m} \vec{L}$

5

根据量子力学的概念，**轨道角动量**只能取分立的值

$$L^2 = l(l+1)\hbar^2, \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$L_z = l\hbar$$

对应地，电子**轨道磁矩**也只能取分立的值，最小单位为：

$$\mu_{lz} = \mu_B = \frac{e}{2m} \hbar = 9.2734 \times 10^{-24} A \cdot m^2$$

人称**玻尔磁子**

6

电子自旋磁矩

研究表明，所有带电粒子都具有**内禀角动量**，**自旋角动量**

$$S^2 = s(s+1)\hbar^2$$

$$S_z = m_s \hbar$$

因而必定有**自旋磁矩** $\vec{\mu}_s = -g \frac{e}{2m} \vec{S}$

对于电子 $g = 2.0023193$ $m_s = \pm \frac{1}{2}$

$$\mu_{sz} \approx \mu_B = \frac{e}{2m} \hbar = 9.2734 \times 10^{-24} A \cdot m^2 > 0$$

7

原子和分子磁矩

每一个原子或分子的磁矩由所有电子磁矩叠加，原子核的磁矩小三个数量级，可以忽略。

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

磁介质：

- 具有固有磁矩的介质
- 没有固有磁矩的介质
- 铁磁性材料

8

对于一个由许多原子或分子组成的系统，各个原子分子的磁矩方向任意，总磁矩为0

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

但是当有外场存在的时候，各原子或分子的磁矩受到力矩作用，指向外磁场，形成**净磁矩**

$$\vec{\mu} = \sum \vec{\mu}_m = c\vec{B}_0 \neq 0$$

定义分子平均磁矩 $\vec{\mu}_a$ 为

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

9

磁化强度

磁化强度：单位体积的宏观磁矩

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

将分子平均磁矩 $\vec{\mu}_a$ 等效为以分子环形电流

$$\vec{\mu}_a = I_a S_a$$

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

物质与磁场的相互作用越大，则磁化强度越大。

10

§ 5.1.2 磁化电流

系统的宏观磁矩表明磁化电流的存在

介质内部，分子环形电流相互抵消。
但在介质表面，会形成宏观的电流，称为**表面磁化电流**。
表面磁化电流会反过来影响外磁场的分布。最后达到某种平衡。

11

对任意曲面 S ，只有套住其边界 L 的分子圆形电流才会贡献穿过该曲面的磁化电流

换句话说，只有其边界附近的小的圆柱体内的分子圆形电流才会贡献磁化电流

$d\vec{l}$ 为该圆柱体的中轴线
底面与 $d\vec{l}$ 垂直，面积为 $S_a \cos \theta$

该圆柱体贡献的磁化电流为

$$dI' = I_a \cdot ndV = I_a n dS_a \cos \theta$$

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

12

穿过曲面 S 的总的磁化电流

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

对于均匀磁化介质，磁化强度 \vec{M} 与位置无关
其内部磁化体电流密度为0

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

均匀磁化介质表面或者不同介质分界面上会有面分布的磁化电流
非均匀磁化介质内部还会出现磁化体电流

13

表面磁化电流大小

以螺线管中放入磁介质为例

顺磁质 \vec{B}_0 I_s \vec{B}

抗磁质 \vec{B}_0 I_s \vec{B}

14

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

取如图所示矩形面

$$I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = (M_{1t} - M_{2t})l$$

$I' = M_{1t} - M_{2t}$ 若外界为真空 $I' = M_{1t}$

方向向左 $I' = \vec{M}_1 \times \vec{n}$

$I' = (\vec{M}_1 - \vec{M}_2) \times \vec{n}$ 右手螺旋定则

15

均匀磁化棒的磁化电流分布

磁化电流面密度 $i' = M_{1t} - M_{2t}$ 磁化电流产生的磁感应强度 $\vec{B}' = \frac{\mu_0 \vec{M}}{2}$

A点: $i' = M_{1t} = 0$ $\vec{B}' = \frac{\mu_0 \vec{M}}{2}$

B点: $i' = M_{1t} = 0$ $\vec{B}' = \frac{\mu_0 \vec{M}}{2}$

C点: $i' = M_{1t} = M$ $\vec{B}' = \mu_0 M$ $\vec{B}' = \mu_0 \vec{M}$

方向可根据右手螺旋定则确定 在磁介质中：顺磁体增加外磁场
抗磁体减弱外磁场

16

先将磁化强度矢量 \vec{M} 在介质表面切线方向投影 \vec{M}_t
根据 \vec{M}_t 大小，确定磁化电流大小
根据 \vec{M}_t 方向，依据右手定则确定磁化电流方向

17

§ 5.1.3 磁介质中的静磁场基本定理

高斯定理

磁介质中的磁场由传导电流 I_0 产生的磁场 \vec{B}_0 和磁化电流 I' 产生的磁场 \vec{B}' 叠加而成

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

两种电流产生的磁场并无本质区别，都是“无源有旋”场

$$\Phi = \oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

18

安培环路定理
 磁介质中的磁场由传导电流 I_0 产生的磁场 \vec{B}_0
 和磁化电流 I' 产生的磁场 \vec{B}' 叠加而成

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad I = (I_0 + I')$$

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

$$\frac{1}{\mu_0} \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} - \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = I_0 \quad \oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = I_0$$

19

引入辅助矢量

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \text{磁场强度}$$

得 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_0$ 磁介质中的安培环路定理

微分形式 $\nabla \times \vec{H} = \vec{j}_0$

20

磁感应强度 \vec{B} 与磁场强度 \vec{H}

从物理意义上来说, 磁感应强度 \vec{B} 与电场强度 \vec{E} 类似, 他们均指向场的来源, 即总电流与总电荷。

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad \iiint_V \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_V \rho dV$$

磁场强度 \vec{H} 与电位移矢量 \vec{D} 类似, 都是辅助矢量, 都指向传导电流或自由电荷

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_0 \quad \iiint_V \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \rho_0 dV$$

21

§ 5.1.4 磁化规律
 各向同性均匀磁介质中, 当外磁场不太强时

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad \chi_m \text{ 为磁介质的磁化率}$$

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

$$\mu_r = (1 + \chi_m) \quad \text{磁介质的相对磁导率}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \text{磁介质的(绝对)磁导率}$$

22

对于抗磁性介质 $\chi_m \approx -(10^{-5} \sim 10^{-6}) < 0$

$$\mu_r = 1 + \chi_m \approx 1 - (10^{-5} \sim 10^{-6}) \leq 1$$

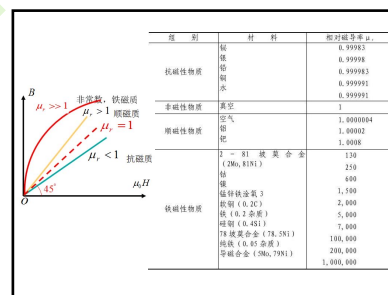
$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} < \mu_0 \vec{H} \quad \text{抗磁性磁介质减弱了内部的总磁场}$$

对于顺磁性介质 $\chi_m \approx 10^{-4} \sim 10^{-5} > 0$

$$\mu_r = 1 + \chi_m \approx 1 + (10^{-4} \sim 10^{-5}) \geq 1$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} > \mu_0 \vec{H} \quad \text{顺磁性磁介质加强了内部的总磁场}$$

23



24

【例】求环形螺线管内的磁感应强度。

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

当环比较细时, $a \approx b = R$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi R} = \mu_0 nI$$

与无限长直螺线管结果一致

25

若螺线管里充满相对磁导率为 μ_r 的磁介质

$$H \cdot 2\pi r = NI \quad H = \frac{NI}{2\pi r}$$

当环比较细时, $a \approx b = R$

$$H = \frac{NI}{2\pi R} = nI$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 \mu_r nI = \mu_r \vec{B}_0$$

铁磁性介质能显著增加内部的磁感应强度。
 通过电磁感应可以测量通过环形螺线管的磁通量 Φ , 从而测得磁感应强度 B , 进而得到磁介质的相对磁导率 μ_r 。

26

§ 5.1.5 磁介质的边值关系
 磁感应强度 B 的法向分量连续

根据高斯定理

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

易得: $B_{2n} = B_{1n}$

$$\frac{H_{2n}}{H_{1n}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}$$

27

磁场强度H的切向分量连续

根据环路定理

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

易得: $H_{1t} - H_{2t} = I_0$

当界面没有传导电流, 即 $I_0=0$ 时

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

$$\frac{B_{2t}}{B_{1t}} = \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}$$

“折射定理”

$$\tan \theta_1 = \frac{B_{1t}}{B_{1n}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{B_{2t}}{B_{2n}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \tan \theta_2$$

$$\tan \theta_1 = \frac{\mu_1}{\mu_2} \tan \theta_2$$

28

若两种材料的相对磁导率相差很大, 如 $\mu_{r1} \approx 1$ (弱磁性介质), $\mu_{r2} \gg 1$ (铁磁性介质), 则

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

磁感应线几乎都被束缚在铁磁性介质中, 漏出外面的磁通量很少。

29

介质界面与磁感应线重合的磁介质问题求解

一般介质表面没有传导电流

根据边值关系 $H_{2t} = H_{1t}$

由于磁感应线与介质表面平行

$$H_2 = H_1$$

不同介质中的磁场强度H一样, 不受磁介质影响

$$H_t = H_0$$

不同介质中的磁感应强度B不一样

$$B_t = \mu_1 H_t = \mu_1 H_0 = \frac{\mu_1}{\mu_0} B_0 = \mu_{r1} B_0$$

30

【例】一圆环状磁介质与一无限长直导线共轴。设磁介质相对磁导率为 μ_r , 直导线电流强度为 I , 求:

- 介质内外空间的磁感应强度 B 和磁场强度 H 分布;
- 介质表面的磁化电流面密度 i' ;
- 磁化电流在介质内外空间产生的磁感应强度分布 B' 。

31

【解】 (1) 根据安培环路定理, 介质环内外均有

$$H \cdot 2\pi r = I \quad H = \frac{I}{2\pi r}$$

根据磁介质本构方程, 磁介质环内外的磁感应强度分别为:

$$\begin{cases} B_i = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi r} & \text{方向沿电流方向的右手螺旋方向} \\ B_e = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \end{cases}$$

无介质环时 $B_{i0} = B_{e0} = B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

32

(2) 由于磁介质外面是真空

$$i' = M_{1t} = \chi_m H = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi r}$$

$$\vec{i}' = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi r} \vec{e}_\theta \quad \text{该面电流密度随r变化!}$$

(3) 求磁化电流 i' 产生的磁场 B'

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

$$\begin{cases} B_i = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi r} \\ B_e = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \end{cases} \quad \begin{cases} B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \\ B_e' = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} B_i' = \frac{(\mu_r - 1)\mu_0 I}{2\pi r} \\ B_e' = 0 \end{cases}$$

方向沿电流方向的右手螺旋方向

33

介质界面与磁感应线垂直的磁介质问题求解

根据边值关系 $B_{2n} = B_{1n}$

由于磁感应线与介质表面法向平行

$$B_2 = B_1$$

不同介质中的磁感应强度一样,

$$B_t = B \neq B_0$$

但磁场强度不一样, 有

$$H_t = \frac{B}{\mu_1}$$

将此关系代入安培环路定理可解得 B , 进而得到 H_t

34

【例】一同轴电缆, 内外导体半径分别为 r_1 和 r_2 。导体间填满磁导率分别为 μ_1 和 μ_2 的磁介质, 各占一半空间。设内外导体表面流入与流出电流强度为 I 的传导电流, 求:

- 介质中的磁感应强度 B 和磁场强度 H 分布;
- 介质表面的磁化电流面密度 i' 。

35

【解】 (1) 磁感应线与介质交界面垂直, 有

$$B_1 = B_2 = B$$

根据本构方程, 有

$$H_1 = \frac{B}{\mu_1} \quad H_2 = \frac{B}{\mu_2}$$

根据安培环路定理, 有

$$H_1 \pi r + H_2 \pi r = I$$

$$\frac{B}{\mu_1} \pi r + \frac{B}{\mu_2} \pi r = I \quad B = \frac{I}{\pi r} \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2}$$

方向为内导体电流方向的右手螺旋方向

36

$$H_1 = \frac{B}{\mu_1} = \frac{I}{\pi r} \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2}$$

$$H_2 = \frac{B}{\mu_2} = \frac{I}{\pi r} \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}$$

方向为内导体电流方向的右手螺旋方向

(2) 欲求磁化电流, 先求磁化强度

$$M_1 = (\mu_{r1} - 1)H_1 = \frac{I}{\pi r} \frac{\mu_2(\mu_{r1} - 1)}{\mu_1 + \mu_2}$$

$$M_2 = (\mu_{r2} - 1)H_2 = \frac{I}{\pi r} \frac{\mu_1(\mu_{r2} - 1)}{\mu_1 + \mu_2}$$

37

内导体表面磁化电流

$$i'_i = \begin{cases} M_1 = \frac{I}{\pi r_1} \frac{\mu_2(\mu_{r1} - 1)}{\mu_1 + \mu_2} \\ M_2 = \frac{I}{\pi r_1} \frac{\mu_1(\mu_{r2} - 1)}{\mu_1 + \mu_2} \end{cases}$$

方向与内导体传导电流一致

外导体表面磁化电流

$$i'_e = \begin{cases} M_1 = \frac{I}{\pi r_2} \frac{\mu_2(\mu_{r1} - 1)}{\mu_1 + \mu_2} \\ M_2 = \frac{I}{\pi r_2} \frac{\mu_1(\mu_{r2} - 1)}{\mu_1 + \mu_2} \end{cases}$$

方向与外导体传导电流一致

不同介质表面磁化电流不同

38

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

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

$$I' = M_{1L} - M_{2L}$$

$$I_0 = H_{1L} - H_{2L}$$

内导体表面传导电流

$$i_{0i} = \begin{cases} H_1 = \frac{I}{\pi r_1} \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \\ H_2 = \frac{I}{\pi r_1} \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \end{cases}$$

方向与内导体传导电流一致

外导体表面传导电流

$$i_{0e} = \begin{cases} H_1 = \frac{I}{\pi r_2} \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \\ H_2 = \frac{I}{\pi r_2} \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \end{cases}$$

方向与外导体传导电流一致

不同介质表面传导电流不同

39

总电流 $i = i_0 + i'$

内导体表面总电流

$$i_i = \begin{cases} \frac{I}{\pi r_1} \frac{\mu_1 \mu_2 / \mu_0}{\mu_1 + \mu_2} \\ \frac{I}{\pi r_1} \frac{\mu_1 \mu_2 / \mu_0}{\mu_1 + \mu_2} \end{cases}$$

方向与内导体传导电流一致

外导体表面总电流

$$i_e = \begin{cases} \frac{I}{\pi r_2} \frac{\mu_1 \mu_2 / \mu_0}{\mu_1 + \mu_2} \\ \frac{I}{\pi r_2} \frac{\mu_1 \mu_2 / \mu_0}{\mu_1 + \mu_2} \end{cases}$$

方向与外导体传导电流一致

不同介质表面总电流相同

导体根据介质的磁导率自动调整传导电流, 使得总电流相同, 磁感应强度相同

与电场线和电介质界面平行的平行板电容器相似

40

§ 5.2 磁性材料

41

磁性材料的分类

物质的磁性通过物质在磁场中的受力来定义

$$\vec{F} = (\vec{j} \cdot \nabla) \vec{B} = \left(\mu_x \frac{\partial}{\partial x} + \mu_y \frac{\partial}{\partial y} + \mu_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \vec{B}$$

$$F_z = \mu_x \frac{\partial B_z}{\partial z} = \mu V \frac{\partial B_z}{\partial z} = \chi_m H_z V \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

若小球向S偏转 $F_z > 0$ 则 $\chi_m > 0$ 顺磁性

若小球向N偏转 $F_z < 0$ 则 $\chi_m < 0$ 抗磁性

42

热解石墨磁悬浮与光牵引

43

§ 5.2.1 抗磁性、顺磁性和铁磁性

1、抗磁性材料 (Diamagnetism)

$$\chi_m \approx -(10^{-5} \sim 10^{-6}) < 0$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m \approx 1 - (10^{-5} \sim 10^{-6}) \leq 1$$

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

抗磁性磁介质减弱了内部的总磁场

(a) 抗磁性磁介质的总磁矩为0, 没有固有磁矩。

(b) 磁化强度M与磁场强度H的方向相反。

(c) 抗磁性磁介质的磁化系数一般不随温度变化, 一般也不随物质的状态变化。

44

抗磁性的微观解释

陀螺的进动

45

抗磁性的微观解释

陀螺在重力场中的进动
进动产生新的角动量

磁矩在磁场中的进动
进动产生新的角动量
造成与磁场方向相反的磁矩

46

两个电子的自旋磁矩大小相等，方向相反，正好抵消
但它们在磁场中进动造成的附加磁矩均与磁场方向相反
 M 与 H 方向相反 \rightarrow 抗磁性
进动与温度无关，因此抗磁性介质的磁化率一般与温度无关

47

2、顺磁性材料 (Paramagnetism)

$\chi_m \approx 10^{-4} \sim 10^{-5} > 0$
 $\mu_r = 1 + \chi_m \approx 1 + (10^{-4} \sim 10^{-5}) \approx 1$
 $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} > \mu_0 \vec{H}$ 顺磁性磁介质加强了内部的总磁场

顺磁性磁介质是具磁化强度 M 与磁场强度 H 的方向相同。
有固有磁矩的分子形成的物质。

居里定律：
 $\chi_m = C/T$

48

顺磁性的微观解释

无外磁场时，热运动使得分子固有磁矩无规取向
有外磁场时，磁矩受到力矩作用，倾向于指向磁场方向

力矩： $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$
 能量： $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

49

磁矩在磁场中倾向于指向磁场方向，使得能量最低，分布变得更有序。
热运动使得分子变得更无序，阻止磁矩定向排列。
固有磁矩与外磁场夹角为 θ 的分子个数为：
 $dn(\theta) = Ae^{-\frac{-\vec{\mu} \cdot \vec{B}}{kT}} \sin \theta d\theta$
 每个分子在磁场方向的磁矩分量为： $\mu_z = \mu \cos \theta$
 磁化强度： $M = \int \mu_z dn(\theta) \approx \frac{n_0 \mu_0 \mu^2}{3kT} H$
 磁化率： $\chi_m = \frac{n_0 \mu_0 \mu^2}{3kT} = \frac{C}{T}$ 温度降低，磁化率急剧增加

50

3、铁磁性材料 (Ferromagnetism)

以铁、钴、镍和一些稀土元素以及它们的合金及氧化物材料构成的介质

铁磁性介质中，原子之间的强烈耦合会形成分子磁矩有序排列的许多小区域，称为“磁畴”

这一特殊结构使得介质在磁场中显示出非常强的顺磁性，称为“铁磁性”

51

铁磁性材料的磁化过程

“壁移过程” “畴转过程” 饱和磁化

磁化强度不是常数，而且与磁化的历史和过程有关
 M_r : 剩余磁化强度
 H_c : 矫顽力
 磁滞回线

52

退磁

反复变化外磁场的方向，并同时减小幅值，逐渐降到0，使物质退磁

加热法：超过居里温度后转变为普通顺磁介质

敲击法：通过振动提供磁畴转动能量，使介质失去磁性

$\chi_m = \begin{cases} \text{铁磁, 极大} & T < T_c \\ \text{顺磁, } \frac{C}{T - T_c} & T > T_c \end{cases}$

53

铁磁材料分类及应用

软磁性材料 矫顽力小，适合用在交变磁场
硬磁性材料 矫顽力大，不退磁，适合做永久磁铁
矩磁性材料 适合制作磁性记忆元件

变压器、继电器、电动机等 磁电式电表、永磁扬声器、耳机等 硬盘、磁带、信用卡等

54

§ 5.2.2 磁路定理和磁屏蔽

1、磁路定律

很多电工设备需要较强的磁场或较大的磁通量

由于铁磁性介质的磁导率非常高，经常使用铁磁性物质做成闭合或者近似闭合的环路，来增加磁感应强度、约束磁通等。

55

这种约束在铁芯范围内的磁场称为**磁路**

磁路的磁通可以分为两部分：**主磁通**和**漏磁通**

主磁通：和绝大部分是通过磁路（包括气隙）

漏磁通：和部分磁通穿出铁芯，经过磁路周围非铁磁性物质

漏磁通一般很小，磁路初步计算中常将漏磁通忽略不计

56

磁路的基尔霍夫定律

根据高斯定理，如果忽略漏磁通，则任意节点的总磁通为0

$\sum_i \Phi_i = 0$

磁路的基尔霍夫第一定律
磁通相当于电路中的**电流**
而磁感应强度B相当于电路中的**电流密度**

57

对于任意闭合磁路回路
根据安培环路定理，有 $\sum_i H_i l_i = \sum_i N_i I_i$

仿照电路，引入“磁动势” $\mathcal{E}_m = NI$

58

$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_i \int H_i dl_i$ $\Phi = BS = \mu HS$
 $H = \frac{\Phi}{\mu S}$

$\int H_i dl_i = \int \frac{\Phi}{\mu_i S_i} dl_i = \Phi \int \frac{dl_i}{\mu_i S_i}$

定义 $R_m = \int \frac{dl}{\mu S}$ 磁阻

定义 $U_m = \Phi R_m$ 磁路欧姆定律

$\mathcal{E}_m = NI = \sum U_{mi} = \Phi \sum R_{mi}$ 磁路的基尔霍夫第二定律

59

60

已知线圈有N匝，流过电流强度为I，铁芯总长为l，气隙长度为l₀，求气隙中的磁感应强度B。

磁电势： $\mathcal{E}_m = NI$

磁阻： $r_m = \int \frac{dl}{\mu S} = \frac{l}{\mu S}$

$R_m = \frac{l_0}{\mu_0 S}$ $\Phi = \frac{\mathcal{E}_m}{R_m + r_m} = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S} + \frac{l_0}{\mu_0 S}}$

$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{l}{l + \frac{l_0}{\mu_r}} \frac{NI}{l + \mu_r l_0}$ 磁感应强度很大
 很小的气隙变化可以很大程度改变整个磁感应强度

61

由于气隙中的磁导率要远小于铁芯中的磁导率，气隙的磁阻特别大，对磁通和磁感应强度影响特别大。

当电流和总匝数相同时，线圈的绕法无关

62

电路与磁路比较

\mathcal{E}	$\mathcal{E}_m = NI$
I	Φ
j	B
σ	μ
$j = \sigma E$	$B = \mu H$
$U = IR$	$U_m = \Phi R_m$
$R = \int \rho \frac{dl}{S} = \int \frac{dl}{\sigma S}$	$R_m = \int \frac{dl}{\mu S}$
$\mathcal{E} = I(R + r)$	$\mathcal{E}_m = \Phi(R_m + r_m)$

63

2、申磁铁

由虚功原理得直流电磁铁吸力: $F = \frac{B^2}{2\mu_0} S$

对于交流电, 平均值为: $F = \frac{B_m^2}{4\mu_0} S$

64

3、磁屏蔽

根据界面上的“折射定理”
磁感应线很难穿出高磁导率介质
可用高磁导率介质来屏蔽静磁场, 如
软铁、硅钢、坡莫合金等
实际应用中, 经常采用多层屏蔽。

坡莫合金

65

§ 5.4 磁场的测量

磁场传感器

- <1mT
 - 磁通计
 - 矢量型
 - 感应线圈
 - 光纤传感
 - 磁阻效应
 - 磁通计或冲击检流计
 - 超导量子干涉仪
 - 标量型
 - 核磁共振计
 - 光泵磁通计
 - >1mT
 - 高斯计
 - 霍尔效应
 - 磁阻效应
 - 磁二极管
 - 磁三极管

利用磁电效应、磁阻效应、核磁共振、磁光效应等测量磁场

66

高磁场测量

霍尔效应

实验装置图 (霍尔元件部分) 电磁铁气隙中的磁场

$$B = \frac{V_h d}{I R_h}$$

67

磁阻效应

物质在一定磁场下电阻改变的现象, 称为“磁阻效应”

$$MR = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_H - \rho_0}{\rho_0}$$

应用:

1. 磁场测量
2. 磁电子学
如高密度读出磁头、磁存储元件等

巨磁阻效应

68

电磁感应

69

磁场传感器类型	测量范围 (Gauss)			
	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
超导量子干涉传感器	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
光纤传感器	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
光泵磁通计	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
核磁共振传感器	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
探测线圈	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
坡莫合金磁传感器	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
磁通量门计	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
双核磁晶晶体管	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
磁敏二极管	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
磁光传感器	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
巨磁阻传感器	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³
霍尔效应传感器	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³

70