

第 33 讲 磁力的功 磁场对运动电荷的作用 磁介质

教学要求:

了解运动电荷的磁场、回旋加速器、速度选择器、霍尔效应;了解磁电式电流计;了解磁介质、顺磁质、抗磁质、铁磁质、顺磁质的磁化、抗磁质的磁化;分子电流、分子磁矩,磁化强度、磁化电流;了解铁磁质的特征及其特殊磁性的现代理论。

理解洛伦兹力、带电粒子在磁场中的运动;载流导线在磁场中运动时磁力所作的功、载流线圈在磁场中转动时磁力所作的功;有磁介质时的安培环路定理、磁场强度、 $\mathbf{B}$ 与 $\mathbf{H}$ 关系。

重点与难点:

重点: 磁力所作的功。

难点: 有磁介质时的安培环路定理。

10.3.3 磁力的功

载流导线或载流线圈在磁场中运动时,其所受的磁力或磁力矩将对它们做功。

1 载流导线在磁场中运动时磁力所做的功

设磁感应强度为 $\vec{B}$ 的均匀磁场中,有一载流的闭合回路 $abcd$, 电流强度 I 保持不变,

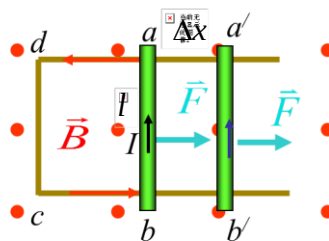


图 10-33 磁力所做的功

电路中 ab 长为 l , ab 可沿 da 和 cb 滑动,如图 10-33 所示,按安培定律, ab 所受的磁力 $\vec{F}$ 的大小为

$$F = BIl$$

$\vec{F}$ 的方向如图 10-33 所示。在 ab 从初始位置向右位移 Δx 距离过程中,磁力 $\vec{F}$ 所做的功为

$$W = F\Delta x = BIl\Delta x = BI\Delta S = I\Delta\Phi \quad (10-21)$$

上式说明,当载流导线在匀强磁场中运动时,如果电流保持不变,磁力的功等于电流强度乘以回路所环绕面积内磁通量的增量。

2 载流线圈在磁场中转动时磁力矩所做的功

设一面积为 S , 通有电流强度 I 的线圈,处于磁感应强度为 $\vec{B}$ 的均匀磁场中,现在我们

来计算线圈转动时，磁力矩所做的功。

如图 10-34 所示，设线圈在磁场中转动微小角度 $d\varphi$ 时，使线圈法线 $\vec{n}$ 与 $\vec{B}$ 之间的夹角从 φ 变为 $\varphi+d\varphi$ ，在此过程中，磁力矩做负功，因此

$$\begin{aligned} dW &= -Md\varphi = -BIS \sin \varphi d\varphi \\ &= BIS d(\cos \varphi) = Id(BS \cos \varphi) = Id\Phi \end{aligned} \quad (10-22)$$

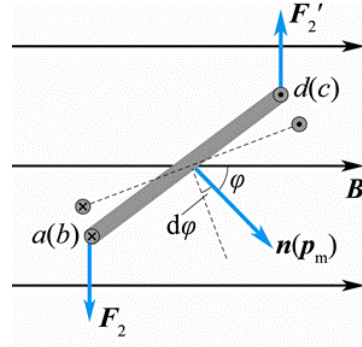


图 10-34 磁力矩所做的功

当上述线圈从 φ_1 转到 φ_2 的过程中，维持线圈内电流不变，则磁力矩所做的总功为

$$W = \int_{\Phi_{m1}}^{\Phi_{m2}} Id\Phi = I(\Phi_{m2} - \Phi_{m1}) = I\Delta\Phi_m \quad (10-23)$$

式中 Φ_{m1} 和 Φ_{m2} 分别表示线圈在 φ_1 和 φ_2 时，通过线圈的磁通量。

可以证明，一个任意的闭合回路在磁场中改变位置或改变形状时，如果维持线圈上电流不变，则磁力或磁力矩所做的功都可按 $W = I\Delta\Phi_m$ 计算，亦即磁力或磁力矩所做的功等于电流强度乘于通过载流线圈的磁通量的增量。

例 10-7 载有电流 I 的半圆形闭合线圈，半径为 R ，放在均匀的外磁场 B 中， B 的方向与线圈平面平行，如图 10-35 所示。(1) 求此时线圈所受的力矩大小和方向；(2) 求在这力矩作用下，当线圈平面转到与磁场 B 垂直的位置时，磁力矩所做的功。

解：(1) 线圈的磁矩

$$\vec{m} = IS\vec{n} = I \frac{\pi}{2} R^2 \vec{n}$$

在图示位置时，线圈磁矩 $\vec{m}$ 的方向与 $\vec{B}$ 垂直。

线圈所受磁力矩大小为

$$M = mB \sin \frac{\pi}{2} = \frac{1}{2} \pi IB R^2$$

磁力矩 $\vec{M}$ 的方向由 $\vec{m} \times \vec{B}$ 确定，垂直于 $\vec{B}$ 的方向向上。

(2) 计算磁力矩做功。

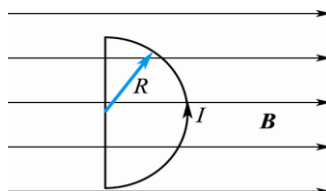


图 10-35 例 10-7 图

$$W = I \Delta \Phi_m = I(\Phi_{m2} - \Phi_{m1}) = I(B \frac{1}{2} \pi R^2 - 0) = \frac{1}{2} IB \pi R^2$$

用积分计算：

$$W = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 -M d\theta = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 -P_m B \sin \theta d\theta = P_m B \cos \theta \Big|_{\frac{\pi}{2}}^0 = \frac{1}{2} IB \pi R^2$$

10.4 磁场对运动电荷的作用

本节将研究磁场对运动电荷的磁力作用和带电粒子在磁场中的运动规律，以及霍尔效应等实际应用例子。

10.4.1 洛伦兹力

从安培定律可以推算出每一个运动着的带电粒子在磁场中所受到的力。由安培定律得，任一电流元 $I d\vec{l}$ 在磁感应强度为 $\vec{B}$ 的磁场中， $d\vec{F}$ 的大小为

$$dF = B I dl \sin(\vec{Id\vec{l}}, \vec{B})$$

因为电流强度可写成

$$I = nSq\upsilon$$

式中 S 为电流元的截面积， υ 为带电粒子的定向运动速率， q 为带电粒子的电量， n 为导体内带电粒子数密度，则上式可写成

$$dF = q\upsilon n S B dl \sin(\vec{\upsilon}, \vec{B})$$

由于电流元 $I d\vec{l}$ 的方向与带电粒子 q 定向运动方向一致，故上式中的 $\sin(\vec{\upsilon}, \vec{B}) = \sin(\vec{Id\vec{l}}, \vec{B})$ 。

而在线元 $d\vec{l}$ 内，有 $dN = n S dl$ 个带电粒子，每一个带电粒子受到的磁场作用力，通过粒子与电流元导线的碰撞产生磁场对载流导线的作用力 $d\vec{F}$ ，因此每一个定向运动的带电粒子所

受到的磁力 $\vec{F}_m$ 的大小为

$$F_m = \frac{dF}{dN} = qvB \sin(\vec{v}, \vec{B}) \quad (10-24)$$

磁场对运动电荷作用的力 $\vec{F}_m$ 称为洛伦兹力。如果带电粒子带正电荷，则它所受的洛伦兹力 $\vec{F}_m$ 的方向与 $\vec{v} \times \vec{B}$ 的方向一致。如果粒子带负电荷，洛伦兹力的方向与正电荷的情形相反，如图 10-36 所示。

洛伦兹力的矢量表达式

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (10-25)$$

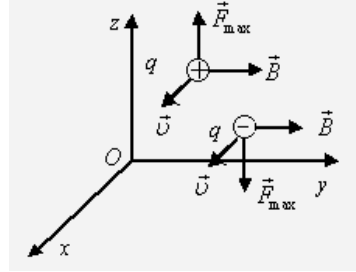


图 10-36 洛伦兹力的方向

式中 q 的正负决定于粒子所带电荷的正负。由式 (10-25) 可以看出，洛伦兹力 $\vec{F}_m$ 总是与带电粒子运动速度 $\vec{v}$ 的方向垂直，即有 $\vec{F}_m \cdot \vec{v} = 0$ ，因此洛伦兹力不能改变运动电荷速度的大小，只能改变速度的方向，使带电粒子的运动路径弯曲。

带电粒子若在既有电场又有磁场的区域里运动，作用在带电粒子上的力

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (10-26)$$

式 (10-26) 通常叫做洛伦兹关系式。

10.4.2 带电粒子在均匀磁场中的运动

设有一均匀磁场，磁感应强度为 $\vec{B}$ ，一电荷量为 q (设 $q > 0$)、质量为 m 的粒子，以初速 $\vec{v}_0$ 进入磁场中运动。在磁场中粒子受到洛伦兹力，其运动方程为

$$F_m = q\vec{v}_0 \times \vec{B} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (10-27)$$

下面分三种情况进行讨论：

(1) $\vec{v}_0$ 与 $\vec{B}$ 相互平行

当带电粒子的速度 $\vec{v}_0$ 与 $\vec{B}$ 相互平行时，作用于带电粒子的洛伦兹力等于零，由式 (10-27) 可知， $\vec{v} = \vec{v}_0$ ，带电粒子不受磁场的影响，进入磁场后作匀速直线运动。

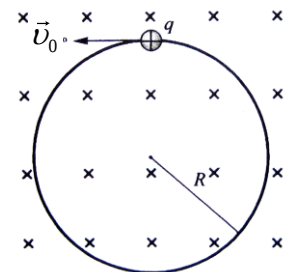


图 10-38 带电粒子的初速垂直于匀强磁场

(2) $\vec{v}_0$ 与 $\vec{B}$ 垂直

当带电粒子以速度 $\vec{v}_0$ 沿垂直于磁场的方向进入一匀强磁场 $\vec{B}$ 中，如图 10-38 所示，此时洛伦兹力 $\vec{F}_m$ 的方向始终与速度 $\vec{v}_0$ 垂直，故带电粒子将在 $\vec{F}_m$ 与 $\vec{v}_0$ 所组成平面内作匀速圆周运动，洛伦兹力即为向心力。其运动方程为

$$qv_0B = m \frac{v_0^2}{R}$$

得圆周运动的半径为
$$R = \frac{mv_0}{qB} \quad (10-28)$$

由式 (10-28) 可知，对于一定的带电粒子（即 $\frac{q}{m}$ 一定），当它在均匀磁场中运动时，其圆周运动的半径与速度成正比。

由式 (10-28) 还可求得粒子在圆周轨道上绕行一周所需的时间（即周期）为

$$T = \frac{2\pi R}{v_0} = 2\pi \frac{m}{qB} \quad (10-29)$$

T 的倒数即粒子在单位时间内绕圆周轨道转过的圈数，称为带电粒子的回旋频率，用 ν 表示为

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (10-30)$$

式 (10-29) 和式 (10-30) 表明，带电粒子在垂直于磁场方向的平面内作圆周运动时，其周期 T 和回旋频率 ν 只与磁感应强度 $\vec{B}$ 及粒子本身的质量 m 和所带的电量 q 有关，而与粒子的速度及回旋半径无关。

(3) 如果 $\vec{v}_0$ 与 $\vec{B}$ 成任意角 θ

可将速度 $\vec{v}_0$ 分解为垂直于磁场方向的分量 $v_{\perp} = v_0 \sin \theta$ 与平行于磁场方向的分量 $v_{\parallel} = v_0 \cos \theta$ ，前者使粒子产生垂直于磁场方向的圆周运动（如图 10-39 所示），其圆周半径为

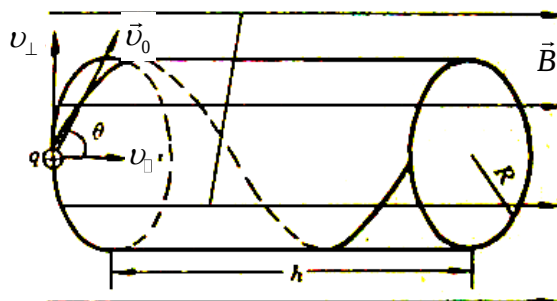


图 10-39 带电粒子的初速与匀强磁场不垂直

$$R = \frac{m v_{\perp}}{qB} = \frac{m v_0 \sin \theta}{qB}$$

其周期仍由式 (10-29) 给出。而平行于磁场方向的速度分量使粒子具有沿磁场方向的匀速分运动。上述两种分运动的合运动是一个以磁场方向为轴线的螺旋运动，其螺距为

$$h = v_0 \cos \theta \cdot T = \frac{2\pi m}{qB} v_0 \cos \theta \quad (10-31)$$

运动电荷在磁场中的螺旋运动，被应用于磁聚焦技术。从电子枪出来的电子都有相同速率 v_0 ，但 $\vec{v}_0$ 与 $\vec{B}$ 所成的发散角 θ 很小，这就使得 $v_{\parallel} = v_0 \cos \theta \approx v_0$ 。这样它们经过同一周期，在相同地方 $h = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{qB}$ 相遇。这就是均匀磁场对带电粒子流的磁聚焦原理。它广泛应用于电真空器件，特别是电子显微镜。实际应用中是用短线圈产生的非均匀磁场来完成对带电粒子流的磁聚焦作用，通常称这种短线圈为**磁透镜**。

例 10-8 测定离子荷质比的仪器称为质谱仪。倍恩勃立奇质谱仪原理如图 10-40 所示。离子源所产生的带电量为 q 的离子，经狭缝 S_1 和 S_2 之间的加速电场加速，进入由 P_1, P_2 组成的速度选择器。在速度选择器中，电场强度为 E ，磁感应强度为 B' 。 E, B' 方向如图 10-40 (b) 所示。从 S_0 射出的离子垂直射入一磁感应强度为 B 的均匀磁场中。离子进入这一磁场后因受洛伦兹力而作匀速圆周运动。不同质量的离子打在底片的不同位置上，形成按离子质量排列的线系。若底片上线系有三条，该元素有几种同位素？设 d_1, d_2, d_3 是底片上 1, 2, 3 三个位置与速度选择器轴线间的距离，该元素的三种同位素的质量 m_1, m_2, m_3 各为多少？

解 如图 (b) 所示，在速度选择器中，带电量为 q 的离子受电场力 $f_e = qE$ ，同时受磁场力 $f_m = qvB'$ ，两力方向相反。离子从 S_0 射出速度需满足

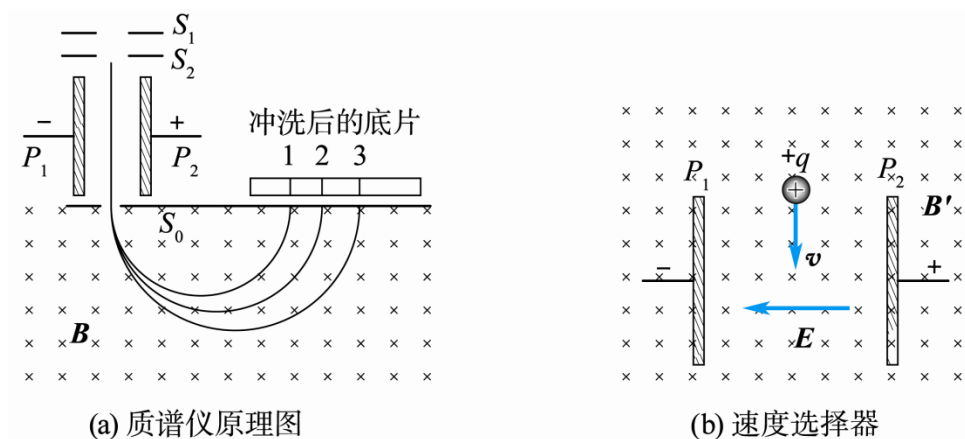
$$qE = qvB' \quad \text{或} \quad v = \frac{E}{B'}$$

离子自 S_0 进入匀强磁场 B 后，作匀速圆周运动。设半径为 R ，则

$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$

式中 B, q, v 是一定的，则质量 m 不同的离子对应不同的圆周运动半径 R ，故该元素有三种同位素。

又因为 $v = \frac{E}{B'}$ ，代入上式得 $m = \frac{qBB'}{E} R$



将 $R = \frac{d}{2}$ 分别代入

图 10-40 例 10-8 图

$$m_1 = \frac{qBB'}{2E} d_1$$

$$m_2 = \frac{qBB'}{2E} d_2$$

$$m_3 = \frac{qBB'}{2E} d_3$$

10.4.3 霍尔效应

把已知尺寸的导电片放入均匀磁场中，使磁场方向与导电片表面垂直，如图 10-41 所示，当通以图示方向的电流时，发现在导电片上下表面之间出现电势差，这种现象是美国青年物理学家霍尔在 1879 年首先发现的，称为**霍尔效应**。电势差称为**霍尔电势差**。实验表明：霍尔电势差与电流 I 、磁感应强度大小 B 成正比，与板的厚度 d 成反比，即

$$U_H = V_1 - V_2 = k \frac{IB}{d} \quad (10-32)$$

式中 k 是仅取决于导电板材料的性质的常数，称为**霍尔系数**。

霍尔效应可以用导体或半导体中的载流子（作定向运动的带电粒子）在磁场中受到洛伦兹力的作用来说明。当导电板处于垂直于纸面向内的磁场 $\vec{B}$ 中并通有电流时，若其中的载流子带正电（ $q > 0$ ），则载流子定向漂移运动的平均速度 $\vec{v}$ 的方向与电流方向相同，载流子将受到向上的磁场力，从而使导体上表面带正电，下表面带负电[如图 10-42(a)]。若载流子带负电（ $q < 0$ ），则载流子平均速度 $\vec{v}$ 的方向与电流方向相反，但载流子受的磁场力也向

上，故使导电板上表面带负电，下表面带正电[如图 10-42(b)]。当载流子受的磁场力与上下表面的异号电荷所产生的静电场力平衡时，有

$$qvB = qE$$

此时，在上下表面形成的稳定电势差即霍尔电势差为

$$V_1 - V_2 = vBb$$

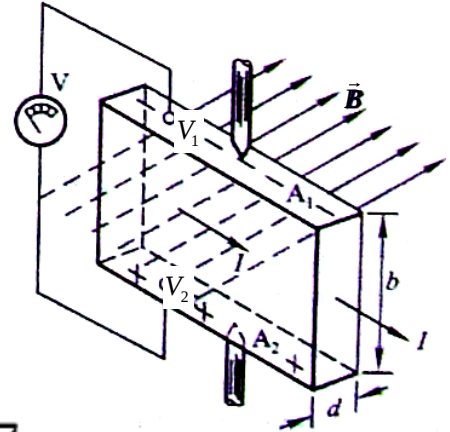
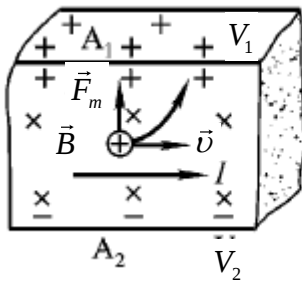
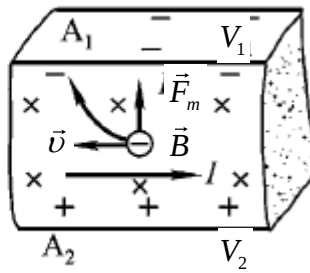


图 10-41 霍尔效应



(a) 带正电的载流子



(b) 带负电的载流子

图 10-42 霍尔效应原理图

而导电板中的电流强度 $I = nqvS = nqvbd$ ，由此可得 $v = I/(nqbd)$ ，并将之代入上式可得

$$V_1 - V_2 = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} \quad (10-33)$$

将上式与式 (10-32) 相比较，可得霍尔系数为

$$k = \frac{1}{nq} \quad (10-34)$$

即霍尔系数与载流子所带的电量及载流子数密度成反比。金属的载流子数密度大，故霍尔系数小；半导体的载流子数密度远小于金属，故半导体的霍尔系数大。因此，霍尔器件多用半导体材料制成。

利用霍尔效应，可制成测量电流、磁感应强度的仪表；可用于确定载流子荷电的正负，测定载流子的漂移速度 $\vec{v}$ 及载流子数密度。利用霍尔效应制成的霍尔器件在自控、仪表行业有着广泛的应用。

10.6 磁介质

10.6.1 磁介质的分类

设在真空中传导电流所产生的磁感应强度为 $\vec{B}_0$ ；在磁场中放进某种磁介质后，因介质磁化产生的附加磁感应强度为 $\vec{B}'$ 。根据场的叠加原理，任一点的合磁场的磁感应强度为

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (10-35)$$

式(10-35)是介质中的磁场的普适关系式。式中 $\vec{B}'$ 的大小和方向因磁介质性质而异。实验指出，无限大均匀磁介质中的磁感应强度 $\vec{B}$ 与真空中磁感应强度 $\vec{B}_0$ 的关系为

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0 \quad (10-36)$$

式(10-36)中 μ_r 叫磁介质的**相对磁导率**，它随磁介质的种类或状态变化。

表 10-1 几种磁介质的相对磁导率

磁介质种类		相对磁导率
抗磁质 $\mu_r < 1$	铋 (293K)	$1 - 16.6 \times 10^{-5}$
	汞 (293K)	$1 - 2.9 \times 10^{-5}$
	铜 (293K)	$1 - 1.0 \times 10^{-5}$
	氢 (气体)	$1 - 3.98 \times 10^{-5}$
顺磁质 $\mu_r > 1$	氧 (液体, 90K)	$1 + 769.9 \times 10^{-5}$
	氧 (气体, 293K)	$1 + 344.9 \times 10^{-5}$
	铝 (293K)	$1 + 1.65 \times 10^{-5}$
	铂 (293K)	$1 + 26 \times 10^{-5}$
铁磁质 $\mu_r \gg 1$	纯铁	5×10^3 (最大值)
	硅钢	7×10^2 (最大值)
	坡莫合金	1×10^5 (最大值)

表 10-1 中，有的磁介质的 μ_r 是略大于 1 的常数，这种磁介质叫**顺磁质**，此种介质中， $\vec{B}'$ 的方向与 $\vec{B}_0$ 的方向相同。有的磁介质的 μ_r 是略小于 1 的常数，这种磁介质叫**抗磁质**，此

种介质中， $\vec{B}'$ 的方向与 $\vec{B}_0$ 的方向相反。还有一种磁介质，它的 μ_r 比1大得多，而且还随 $\vec{B}_0$ 的大小发生变化，这种磁介质叫**铁磁质**，例如铁、镍、钴、以及它们的合金等就是铁磁质。

总之在抗磁质和顺磁质中， $B \approx B_0$ ，它们对原磁场影响甚微，是**弱磁质**。而铁磁质使原磁场显著增强， $B' \gg B_0$ 。

10.6.2 磁介质的磁化

在实际的磁场中，一般都存在这样或那样的物质，这些物质对磁场有一定的影响。这是由于磁场对处于磁场中的物质会产生作用，使其磁化；磁化了的磁介质将产生附加磁场，影响原磁场的分布。

安培认为由于电子的运动，每个磁介质分子(或原子)相当于一个环形电流，叫做**分子电流**。分子电流的磁矩叫做**分子磁矩**。在没有外磁场时，磁介质中各分子磁矩的方向是杂乱的，大量分子的磁矩相互抵消，所以宏观上磁介质不显磁性。当外磁场存在时，各分子磁矩受磁场力矩的作用，或多或少地转向磁场方向，这就是磁介质的磁化。例如，在长直螺线管中充有某种均匀磁介质[图 10-48(a)]，当线圈通有电流时，电流的磁场对分子磁矩发生取向作用。假定每个分子磁矩转到与外磁场相同的方向，螺线管截面上的分子电流规则排列如图 10-48(b)所示。从宏观来看。在磁介质表面相当于有一层电流 I' 流过，如图 10-48(c)所示，

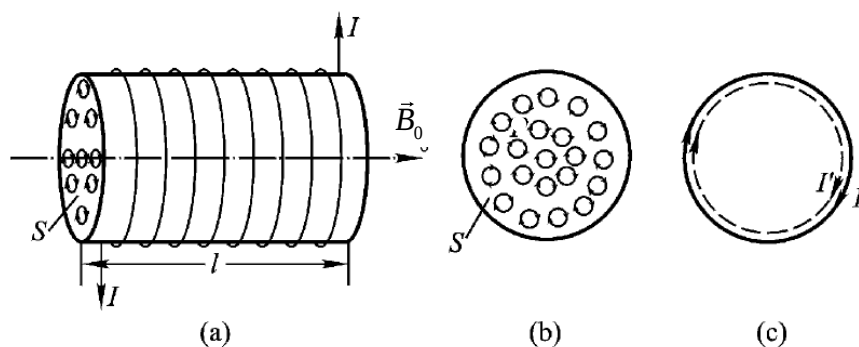


图 10-48 分子电流的规则排列和磁化电流

这是分子电流规则排列的宏观效果。这种因磁化而出现的宏观电流叫做**磁化电流**（也称**束缚电流**）。磁介质磁化后产生的附加磁场，就是磁化电流的磁场。

注意 **磁化电流**是分子内的电荷运动一段段接合而成的，不同于与金属中自由电子定向运动形成的**传导电流**。对比之下，金属中的传导电流（以及其他由电荷的宏观移动形成的电流）可称为**自由电流**。磁化电流一般说来是无法直接测量的，而传导电流是可以直接测量的。

10.6.3 磁场强度 $\vec{H}$ 及其环路定理

前面指出, 无限大均匀磁介质中的磁感应强度 $\vec{B}$ 与真空中磁感应强度 $\vec{B}_0$ 的关系为

$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$ 。将此式写成 $\vec{B} / \mu_0 \mu_r = \vec{B}_0 / \mu_0$, 并将两侧分别对任意闭合路径 L 积分, 可得

$$\oint_L \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\mu_0} \oint_L \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \sum_i I_i$$

右侧的是传导电流的代数和。由于传导电流可以由人们主动控制, 上式也就有了实际上的重要性。定义**磁场强度** $\vec{H}$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (10-37)$$

式 (10-37) 中 $\mu = \mu_0 \mu_r$ 叫做**介质的磁导率**。在国际单位制中, 磁场强度的单位是安培/米

(A/m)。利用磁场强度 $\vec{H}$ 的定义得

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_i I_i \quad (10-38)$$

此式的意义是: 在有介质的磁场中, 磁场强度沿任意闭合路径的线积分等于该闭合路径所包围的传导电流的代数和。此即 $\vec{H}$ 的**环路定理**。

讨论 1. 式 (10-38) 虽然是就无限大均匀磁介质的特殊情况导出的, 但可以说明对于磁介质的一般分布情形, 仍是普遍成立的。

2. 引入 $\vec{H}$ 实用上的意义在于其环流只与传导电流有关, 帮助避开无法测量的磁化电流, 而传导电流是可以测量的, 这样在磁场具有高度对称性时, 可以先由 $\vec{H}$ 环路定理求出 $\vec{H}$, 然后再由 $\vec{B}$ 和 $\vec{H}$ 的关系式 (10-37) 求出 $\vec{B}$ 。

3. 磁场强度 $\vec{H}$ 是描述磁场性质的辅助物理量, 磁感应强度 $\vec{B}$ 是描述磁场性质的基本物理量。

4. $\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$ 仅对电流与磁介质具有特殊对称性情况 (如无限大均匀磁介质分布、无限长柱对称分布、长直密绕螺线管内部、密绕螺绕环内部等) 才成立, 而 $\vec{B}$ 和 $\vec{H}$ 的关系 [式 (10-37)] 是普遍成立的。

例 10-9 如图 10-49 所示, 一磁导率为 μ_1 的无限长圆柱形直导线, 半径为 R_1 , 其中均匀地通有电流 I , 在导线外包一层磁导率为 μ_2 的圆柱形不导电磁介质, 其外半径为 R_2 , 求磁场强度和磁感应强度的分

布。

解 由于电流分布的轴对称性，磁场强度 $\vec{H}$ 的大小只与场点到轴线的垂直距离有关。考察在与轴垂直的一截面内且以轴线与截面交点为圆心、 r 为半径的圆周上各点的 $\vec{H}$ 。各点的 $\vec{H}$ 大小相等，而方向沿圆周的切线并与电流成右手螺旋关系。

对所选的闭合圆周 L ，由 $\vec{H}$ 安培环路定理得

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2\pi r H = I'$$

I' 表示穿过环路 L 的电流，则

$$H = \frac{I'}{2\pi r}$$

导线内 ($r < R_1$) 的磁感应强度的分布 (取圆形回路 1)。

$$I' = \frac{I}{\pi R_1^2} \cdot \pi r^2$$

得
$$H = \frac{Ir}{2\pi R_1^2}, \quad B = \mu_1 H = \frac{\mu_1 Ir}{2\pi R_1^2} \quad (r < R_1)$$

不导电磁介质内 ($R_1 < r < R_2$) 的磁感应强度的分布 (取圆形回路 2), $I' = I$

得
$$H = \frac{I}{2\pi r}, \quad B = \mu_2 H = \frac{\mu_2 I}{2\pi r} \quad (R_1 < r < R_2)$$

圆柱形外部 ($r > R_2$) 的磁感应强度的分布 (取圆形回路 3), $I' = I$

得
$$H = \frac{I}{2\pi r}, \quad B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (r > R_2)。$$

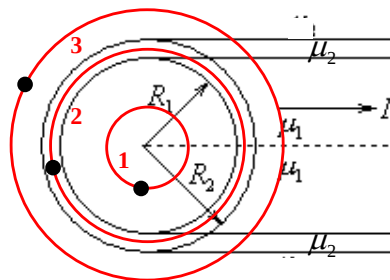


图 10-49 例 10-9 图

10.6.4 铁磁质

铁磁质常用于电机、电器设备、电子器件，它有如下特性：

1. 铁磁质在外磁场作用下，能产生很大的与外磁场同向的附加磁感应强度。即铁磁质具有很大的磁导率 μ 。高 μ 值铁磁质有广泛的用途。在产生强磁场的装置中，几乎都采用这种铁磁材料。

2. 铁磁质中的磁感应强度 $\vec{B}$ 和磁场强度 $\vec{H}$ 不是简单的正比关系。或者说，铁磁质的磁导率 μ 不是常数，而是随铁磁质中的 $\vec{H}$ 的不同而变化。当 $\vec{H}$ 的值不很大时，磁感应强度 $\vec{B}$ 的大小随 $\vec{H}$ 的增大而迅速增大；当 $\vec{H}$ 增大到一定程度时， $\vec{B}$ 的增大趋势明显地变缓以至于不再增大。这种现象称为**磁饱和**。

3. 在外磁场消失后。铁磁质内部仍将保留部分磁性，这称为铁磁质的**剩磁**现象。欲消除铁磁质中的剩磁，可以给铁磁质加反向磁场。随着反向磁场强度的增大，剩磁开始减小。当反向磁场强度达到某个数值时，剩磁全部消失，把这时的反向磁场强度称为**矫顽力**。反向磁场强度继续增大时，铁磁质将开始反向磁化。

4. 每种铁磁质各有一临界温度，称为**居里点**。当温度超过居里点时，铁磁质的铁磁性立即消失而变为普通的顺磁质。

作业：16、17、18