

磁介质

Lai Wei

2025 年 9 月 28 日

1 磁介质的磁化

1.1 磁介质的磁化 相对磁导率

被磁化后的磁介质会激发附加磁场 \mathbf{B}' ，从而影响介质内外的磁场分布。磁介质内的磁感应强度为

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}' \quad (1)$$

相对磁导率

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (2)$$

相对磁导率 μ_r 的大小只与磁介质的性质有关，根据 μ_r 的大小将磁介质分成顺磁质、抗磁质和铁磁质三类。

1. 顺磁质 μ_r 略大于 1，即 $\mu_r \approx 1 + 10^{-4} > 1$
2. 抗磁质 μ_r 略小于 1，即 $\mu_r \approx 1 - 10^{-5} < 1$
3. 铁磁质 $\mu_r \gg 1$ ，磁化后产生的磁场 \mathbf{B}' 的方向与原磁场 \mathbf{B}_0 的方向相同，且 $\mathbf{B}' \gg \mathbf{B}_0$

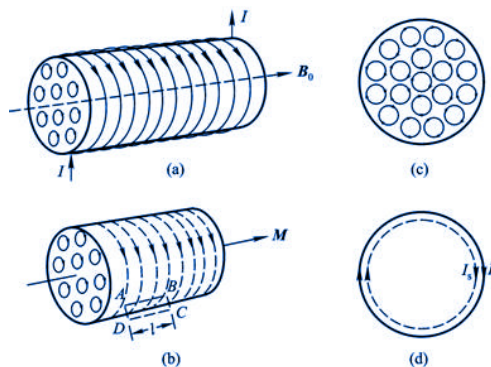
1.2 磁化强度和磁化电流

将磁介质中单位体积内分子磁矩的矢量和称为磁化强度，并用 \mathbf{M} 来表示，即

$$\mathbf{M} = \frac{\sum \mathbf{m}_{\text{分子}}}{\Delta V} = \frac{\sum \mathbf{m} + \sum \Delta \mathbf{m}}{\Delta V} \quad (3)$$

在国际单位制中， \mathbf{M} 的单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

设有一“无限长”的载流直螺线管，管内充满均匀磁介质，电流在螺线管内激发匀强磁场。在此磁场中磁介质被均匀磁化，这时磁介质中各个分子电流平面将转到与磁场的方向相垂直。对磁介质的整体来说，未被抵消的分子电流是沿着柱面流动的，称为安培表面电流（或叫磁化面电流），用 I_s 表示。沿轴线单位长度上的磁化电流称为磁化电流密度，用 j_s 表示。于是，沿棒的轴线方向长为 L 的表面上，磁化电流的大小为 $I_s = j_s L$ 。介质被磁化的程度越大，介质表面的磁化电流越大。



对顺磁性物质，安培表面电流和螺线管上导线中的电流方向相同；对抗磁性物质，则两者方向相反。

即当磁化强度的方向与介质表面平行时，磁介质表面磁化电流密度的大小等于该处磁化强度的大小，即

$$M = \frac{\sum \mathbf{m}_{\text{分子}}}{\Delta V} = \frac{j_s L S}{L S} = j_s \quad (4)$$

如果磁化强度的方向与介质表面不平行，可以证明

$$\mathbf{j}_s = \mathbf{M} \times \mathbf{e}_n \quad (5)$$

式中 \mathbf{e}_n 为磁介质表面的外法线单位矢量。该式表明，磁化强度 \mathbf{M} 沿磁介质表面的切向分量等于介质表面的磁化电流密度。

可以证明：磁化强度 \mathbf{M} 与磁化电流 I_s 之间的普遍关系为

$$\oint_L \mathbf{M} \cdot d\mathbf{L} = \sum I_s \quad (6)$$

2 有磁介质存在时的安培环路定理和高斯定理

2.1 有磁介质存在时的安培环路定理 磁场强度

有磁介质存在时，空间任意一点的磁感应强度 \mathbf{B} 应由导线中的传导电流 I_0 和磁介质表面的磁环电流 I_s 共同产生，因此有磁介质存在时，磁场的安培环路定理应写成

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{L} = \mu_0 \left(\sum I_0 + \sum I_s \right) \quad (7)$$

式中， $\sum I_0$ 是穿过闭合回路 L 所围面积的传导电流的代数和， $\sum I_s$ 是磁化电流的代数和。

如果将磁化强度 \mathbf{M} 与磁化电流 I_s 的普遍关系式6代入上式，则有

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{L} = \mu_0 \left(\sum I_0 + \oint_L \mathbf{M} \cdot d\mathbf{L} \right) \quad (8)$$

或写为

$$\oint_L \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) \cdot d\mathbf{L} = \sum I_0 \quad (9)$$

引入一个新的辅助物理量，称为磁场强度，用 \mathbf{H} 表示，并定义

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \quad (10)$$

则式9可写为

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \sum I_0 \quad (11)$$

式11称为有磁介质时的安培环路定理，它表明磁场强度 \mathbf{H} 沿任一闭合回路 L 的线积分（或环流）等于通过该回路 L 所围成面积的传导电流的代数和。

2.2 磁介质的磁化特性

在各向同性的磁介质内部，任意一点的磁化强度 \mathbf{M} 和磁场强度 \mathbf{H} 成正比，即

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (12)$$

式中 χ_m 为比例系数，称为介质的磁化率，对于顺磁质， $\chi_m > 0$ ，表明顺磁质中 \mathbf{M} 和 \mathbf{H} 的方向相同；对于抗磁质， $\chi_m < 0$ ，表明抗磁质中 \mathbf{M} 和 \mathbf{H} 的方向相反。

于是

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} = \mu\mathbf{H} \quad (13)$$

式中

$$\mu_r = 1 + \chi_m, \quad \mu = \mu_0\mu_r \quad (14)$$

μ_r 和 μ_0 分别称为磁介质的相对磁导率和绝对磁导率（有时也简称为磁导率）。

对于真空中的磁场，由于 $\mathbf{M} = 0$ ，则 $\chi_m = 0$ ， $\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}$ ，这表明真空的相对磁导率 $\mu_r = 1$ 。

2.3 有磁介质存在时的高斯定理

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (15)$$