§10-5 磁介质的磁化

一、物质磁性的概述

磁介质(*magnetic medium*)是能够对磁场发生影响的物质。由原子分子构成的物质都属于磁介质。

从电结构中解释磁性。原子中每个电子同时参与绕核轨道运动和自旋两种运动，对应轨道磁矩和自旋磁矩。整个原子的磁矩是它所包含的所有电子轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和。

分子磁矩不为零物质，其分子磁矩可看作由一个等效圆电流所提供，这个圆电流称为分子电流。分子运动磁矩取向混乱，矢量和为零，宏观无磁性。

撤除外磁场分子磁矩回到无序状态的磁性称为顺磁性，具有顺磁性的物质称为顺磁质，如锰、铬、铂、氮和氧等都属于此类。

一种具有强烈磁性的物质称为铁磁质，如铁、钴、镍和它们的合金，稀土钴合金，钕-铁-硼以及各种铁氧体等都属于此类。

铁磁晶体原子间存在交换作用，使相邻原子磁矩自发彼此平行排列，抵御分子热运动破坏作用。

分子磁矩为零时，电子在外磁场作用下所产生一种附加磁性。磁化强度方总与外磁场方向相反，为抗磁性。具有这种磁性的物质称为抗磁质，如汞、铜、铋、氢、氯、银、锌和铅等。

磁介质在一定温度和一定外磁场下，都将表现出一定的宏观磁性，这就是磁化*(magnetization)*。

磁化强度矢量表征宏观磁性,定义为单位体积内分子磁矩的矢量和

$$\vec{M}=\frac{\sum\vec{m}}{\Delta\tau}$$

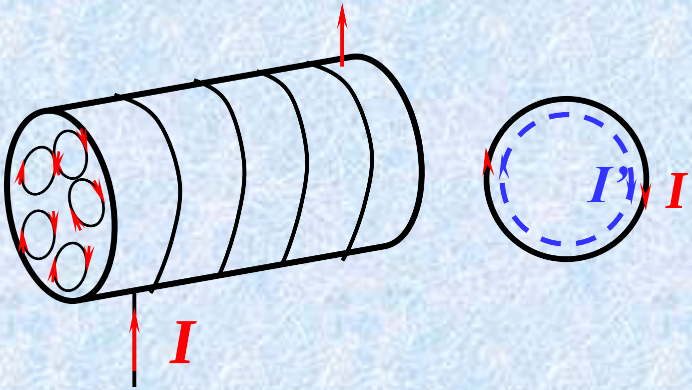
式中 $\sum\vec{m}$ 是体积$\Delta\tau$内的分子磁矩或分子感生磁矩的矢量和。

如果磁介质中各处的磁化强度的大小和方向都一致就称均匀磁化。在国际单位制中,磁场强度和磁化强度的单位都是$A\cdot m^{-1}$。

二、磁化的磁介质内的磁感应强度

在磁介质内任意一点上总有成对个方向相反的分子电流通过，效果上互相抵消，但在磁介质边缘表面形成大的环形电流，称磁化电流。

顺磁质磁化电流的方向与螺线管中的传导电流的方向相同，抗磁质相反。



在磁化的磁介质内任意点$B=B_0+B'$，对于顺磁质B'与B_0方向相同，因而$B>B_0$；对于抗磁质，B'与B_0方向相反，因而$B<B_0$。

长直圆柱状磁介质长度为l，横截面积为S，磁化后表面单位长度的磁化电流为i'(表面的总磁化电流为$I'=i'l$)，总磁矩 $\left|\sum \vec{m}\right| = I'S = i'lS$

磁介质磁化强度大小 $M = \dfrac{\left|\sum \vec{m}\right|}{lS} = \dfrac{i'lS}{lS} = i'$

把附加磁场看作单位长度上电流为i'的长直螺线管在其内部产生的磁场，$B'=\mu_0 i'=\mu_0 M$

对于任何磁介质，B'的方向总与M方向一致，写为矢量形式 $\vec{B}'=\mu_0\vec{M}$

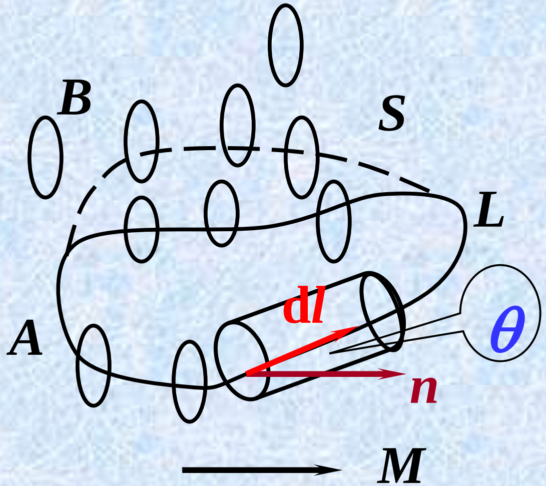
螺线管内部磁介质任一点 $\vec{\boldsymbol{B}} = \vec{\boldsymbol{B}}_0 + \mu_0\vec{\boldsymbol{M}}$，

B_0可由传导电流I_0和螺线管的绕组密度n求得。

三、磁化强度与磁化电流的关系

介质磁化后M不再等于零，同时介质表面出现磁化电流 I'，二者是同一物理现象的不同表现。

设磁介质内每个分子具有相同分子电流 i ,分子电流所包围的面积都是a，每个分子磁矩$m=ia$都平行排列，介质$M=nm=nia$.



取线元dl为轴a为底作一柱体，底面与dl夹角θ,柱体积$\mathrm{d}\tau=a\cos\theta \mathrm{d}l=a\cdot\mathrm{d}l$,

分子电流数目 $n\mathrm{d}\tau=na\cdot\mathrm{d}l$,

贡献电流 $ni\mathrm{d}\tau=nia\cdot\mathrm{d}l=M\cdot\mathrm{d}l$

$$\oint_L \vec{M}\cdot\mathrm{d}\vec{l}=\sum_{(L内)} I'$$

磁化强度与磁化电流的普遍关系。

四、有磁介质存在时的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \mu_0(\sum_i I_{0i} + \sum_i I_i') \Rightarrow \oint_L (\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M})\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_i I_{0i}$$

磁场强度矢量 $\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

$$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum_i I_{0i} \Leftrightarrow \oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \iint_S \vec{j}_0 \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$\boldsymbol{j}_0$为传导电流密度，$\boldsymbol{S}$以$\boldsymbol{L}$边界曲面。上式是有磁介质存在时的安培环路定理，安培环路定理的普遍形式。

引入磁场强度$\boldsymbol{H}$与在静电场中存在电介质时引入辅助量电感应强度$\boldsymbol{D}$的情形是很相似。

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

各向同性的顺磁质和抗磁质，存在$M=\chi_m H$，表示对于各向同性的顺磁质和抗磁质，磁化强度与磁场强度成正比。式中χ_m称为磁介质的磁化率。

$B=\mu_0(1+\chi_m)H$，$\mu_r=1+\chi_m$是磁介质的相对磁导率

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

$\mu=\mu_0\mu_r$称为磁介质的绝对磁导率

顺磁质$\chi_m>0$，$\mu_r>1$；抗磁质$\chi_m<0$，$\mu_r<1$；铁磁质，χ_m和μ_r都很大，都是H的非单值函数，$\mu_r>>1$。

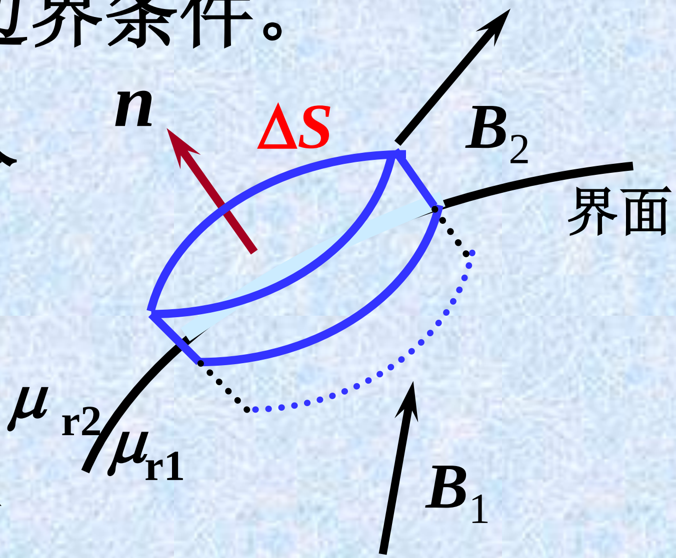
真空中$\chi_m=0$，$\mu_r=1$，$\mu=\mu_0$，于是$B=\mu_0 H$

磁场强度和磁化强度的单位都是$A\cdot m^{-1}$。

五、边界条件(boundary condition)

在两种不同的磁介质分界面两侧**B**和**H**一般要发生突变，但必须遵循一定的边界条件。

在磁导率分别为μ_{r1}和μ_{r2}的分界面处作一扁平的柱状高斯面，



对此高斯面运用磁场高斯定理

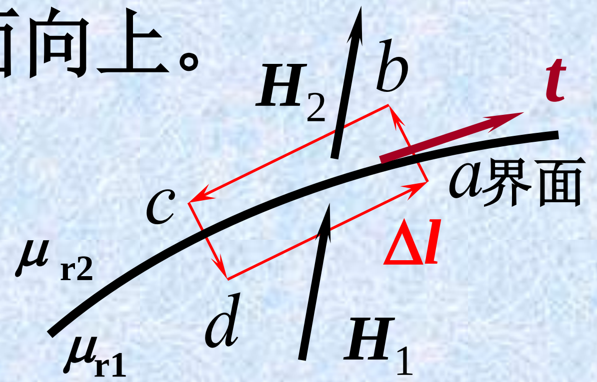
$$\oint_S \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \boldsymbol{B}_1\cdot(-\boldsymbol{n}\Delta S) + \boldsymbol{B}_2\cdot(\boldsymbol{n}\Delta S) = 0$$

即$\boldsymbol{n}\cdot(\boldsymbol{B}_2-\boldsymbol{B}_1)=0$或$B_{1n}=B_{2n}$，表示从一种介质过渡到另一种介质，磁感应强度的法向分量不变。

在介质分界面处作一矩形的回路***abcda***，使两长边分别处于两种介质中与界面平行，短边很小

取切向单位矢量***t*** 的方向沿界面向上。

假设在界面上不存在传导电流，根据安培环路定理有

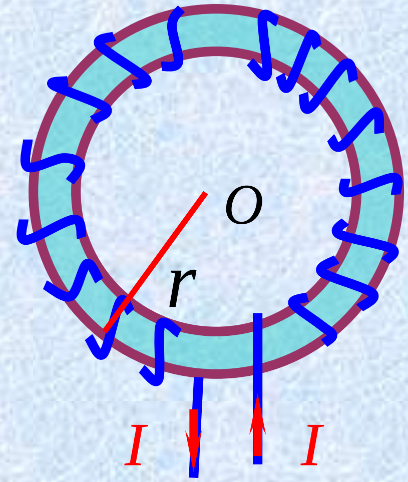


$$\oint_{abcda} \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \vec{H}_2 \cdot (-\vec{t}\Delta l) + \vec{H}_1 \cdot (\vec{t}\Delta l) = 0$$

即$H_{1t}=H_{2t}$，表示从一种介质过渡到另一种介质，磁场强度的切向分量不变。

例1：在相对磁导率μ_r=1000的磁介质环上均匀绕着线圈，单位长度上的匝数为n=500m^{-1}，通电流I=2.0A。求磁介质环内的磁场强度H、磁感应强度B和磁化强度M。

解：利用安培环路定理可求得磁介质内的磁场强度H

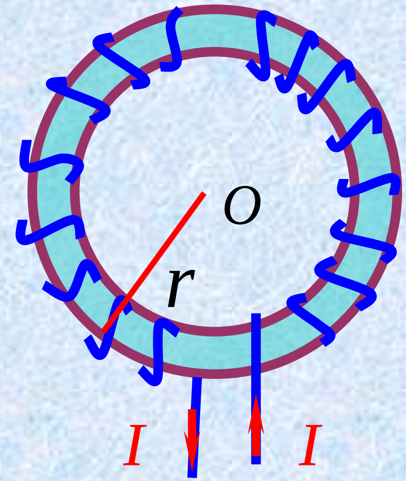


$$\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I$$

取介质环的平均周长(半径为r)为积分路径，得 $2\pi rH = 2\pi rnI$

环内的磁场强度：

$H=nI=500\times2.0\ \mathrm{A\cdot m^{-1}}=1.0\times10^{3}\mathrm{A\cdot m^{-1}}$，



根据 $\vec{B}=\mu_0\mu_r\vec{H}=\mu\vec{H}$

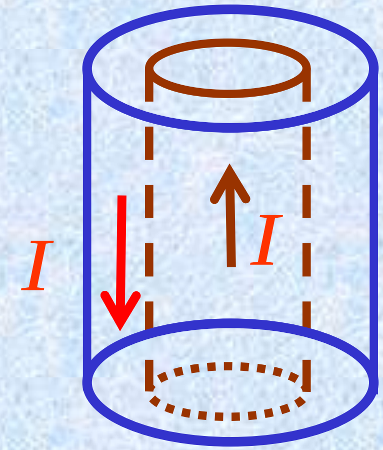
$B=\mu_0\mu_r H=4\pi\times10^{-7}\times10^{3}\times1.0\times10^{3}\ \mathrm{T}=1.2\ \mathrm{T}$

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

$$=\frac{4\pi\times10^{-1}-4\pi\times10^{-7}\times10^{3}}{4\pi\times10^{-7}}\ \mathrm{A\cdot m^{-1}}$$

$$=1.0\times10^{6}\ \mathrm{A\cdot m^{-1}}$$

长直单芯电缆的芯是一根半径为***R*** 的金属导体，它与外壁之间充满均匀磁介质， 电流从芯流过再沿外壁流回。求介质中磁场分布及与导体相邻的介质表面的束缚电流。

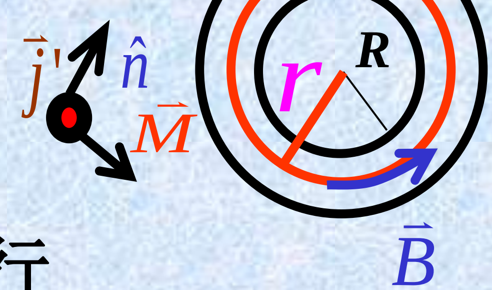


$$\because \oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_L I \qquad \therefore H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$\therefore B = \mu_0\mu_r H = \mu_0\mu_r \frac{I}{2\pi r}$$

（$R_1<r<R_2$）

沿圆切线方向



$$\because \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \qquad \because \vec{j}' = \vec{M}\times\hat{n}$$

$$\therefore j' = (\mu_r - 1)\frac{I}{2\pi R}$$

方向与轴平行

磁介质内表面的总束缚电流

$$\therefore I' = 2\pi R j' = (\mu_r - 1) I$$