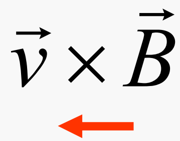
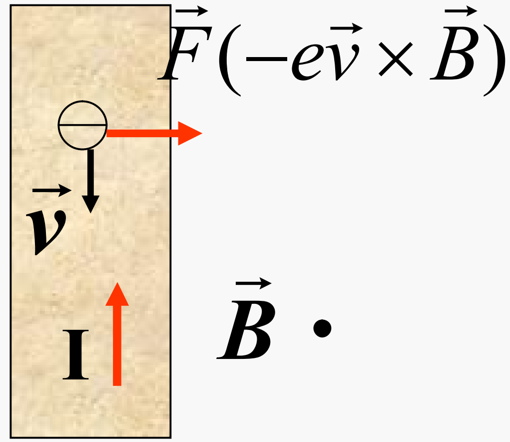
8.5 磁场对电流 (运动电荷）的作用

本节研究的是磁场对载流导线、载流线圈的作用。

无外磁场时，在外加电场的作用下，
自由电子以匀速运动，形成电流。





有外磁场时，定向运动的自由电子受洛仑兹力的作用，使电子的动量发生变化，大量电子与金属晶格点阵的不断碰撞，在宏观上就表现为导线的受力，这种力被称为**安培力**。

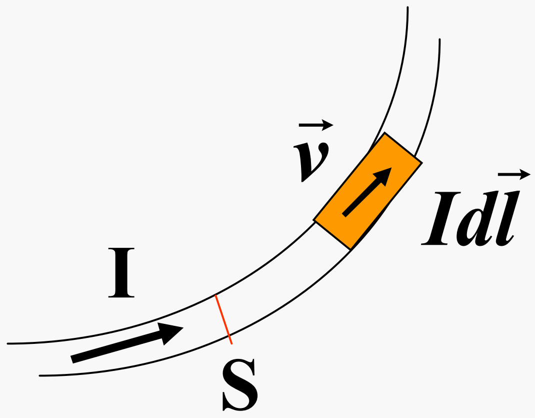
一、磁场作用在一段载流导线上的安培力

以导线中的载流子：即沿 I 方向运动的粒子为例。

设：载流子密度为$\boldsymbol{n}$

每个电量为 $\boldsymbol{q}$

且都以同一速度 $\vec{v}$ 运动



如图电流元所受的洛仑兹力为：

$$d\vec{F} = (n\,s\,dl\,)q\vec{v} \times \vec{B} \qquad d\vec{F} = n\,q\,s\,v\,d\vec{l} \times \vec{B}$$

而：$I = n \cdot q \cdot sv$

$$\boxed{\therefore d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}}$$

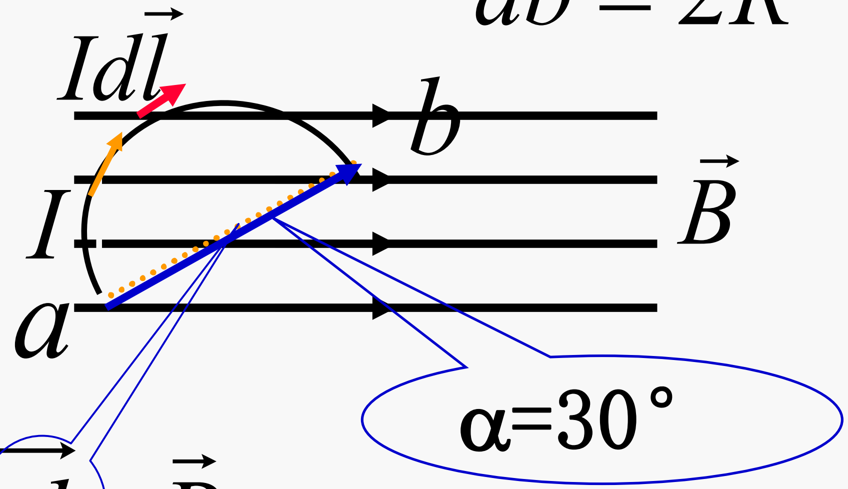
一段载流导线受的安培力：

$$\boxed{\vec{F} = \int_L d\vec{F} = \int_L (Id\vec{l} \times \vec{B})}$$

例1 在均匀磁场中放置一半径为R的半圆形导线，电流强度为I，导线两端连线与磁感强度方向夹角α=30°，求此段圆弧电流受的磁力。

$$\overline{ab} = 2R$$

解：在电流上任取电流元 $I d\vec{l}$



$$\vec{F} = \int_{(a)}^{(b)} I d\vec{l} \times \vec{B}$$

场均匀

$$= I\left[\int_{(a)}^{(b)} d\vec{l}\right] \times \vec{B} = I\overrightarrow{ab} \times \vec{B}$$

$$\left|\vec{F}\right| = I\left|\overrightarrow{ab}\right| B \sin\alpha = IBR$$

方向 $\otimes$ $\vec{F}$

在均匀磁场中，任意形状的一段载流导线所受的安培力，都可以写成：

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

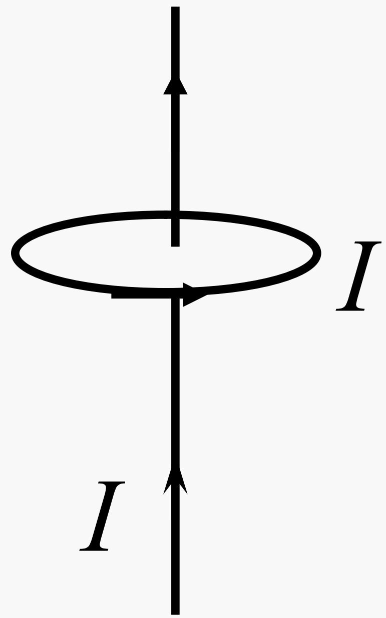
这安培力除与 $I, \vec{B}$有关外，只和导线的两个端点位置有关，而与导线的长度和形状无关。

例2 如图　长直导线过圆电流的中心且垂直圆电流平面　电流强度均为I

求：相互作用力

解：在电流上任取电流元

(在哪个电流上取？)



$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \qquad \left| d\vec{F} \right| = 0$$

$$\left| \int_{(l)} Id\vec{l} \times \vec{B} \right| = 0$$

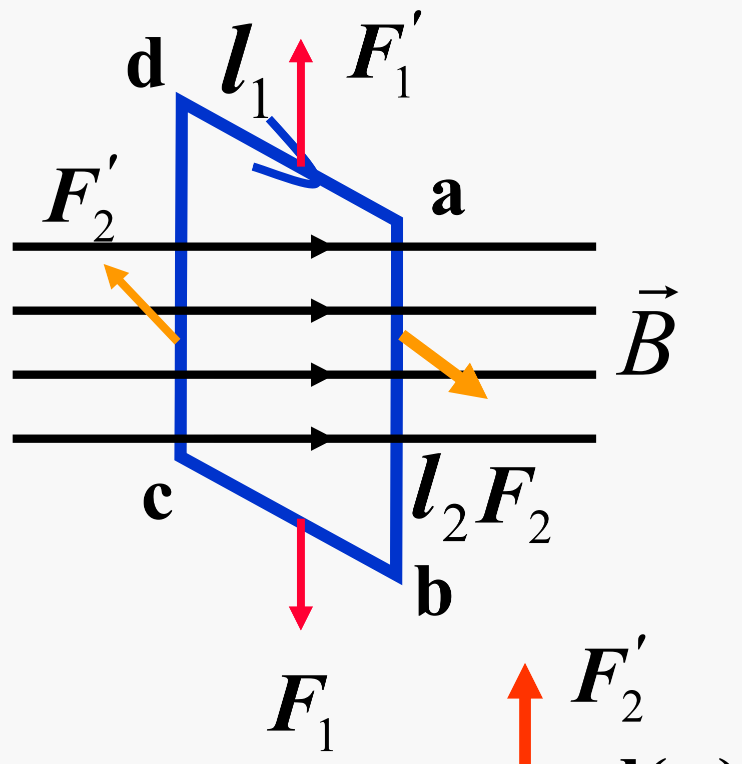
二、磁场作用在载流线圈上的磁力矩

线圈平面与$\vec{B}$方向成任意角θ

$F_1 = F_1'$ 作用在一条直线上

$$F_2 = F_2' = I l_2 B$$

二者大小相等，方向相反，但不在一条直线上，它们形成一力偶，则这一力偶所形成的力矩：

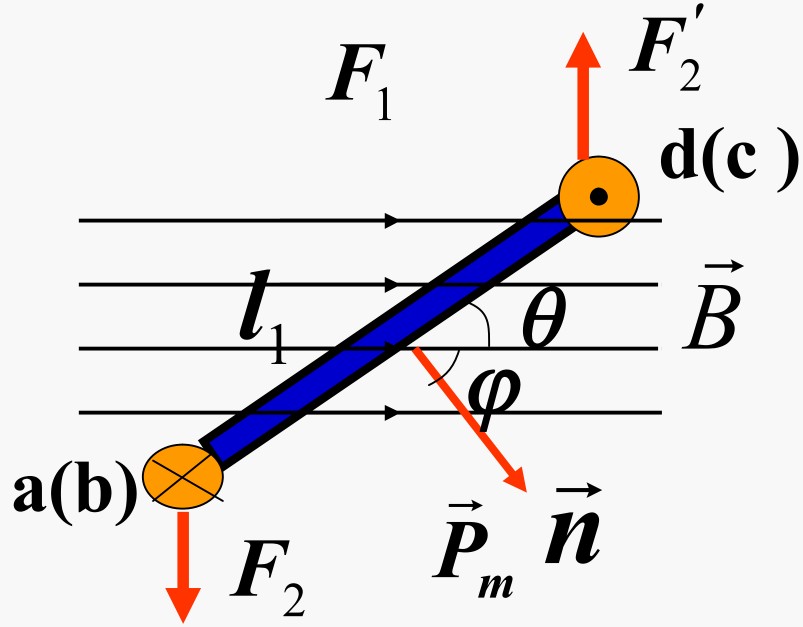


$$M = F_2 l_1 \cos\theta = I l_1 l_2 B \cos\theta$$

$$= ISB\cos\theta = p_m B \sin\varphi$$

$$\boxed{\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}}$$

$$\theta + \varphi = \frac{\pi}{2}$$



$$\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$$

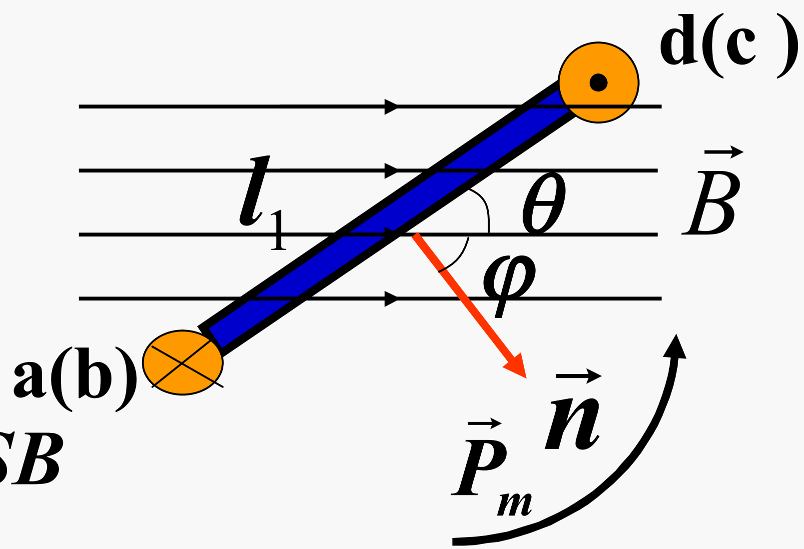
闭合平面线圈在均匀磁场中所受的**磁力矩**

磁力矩总是力图使线圈平面转向与磁场垂直方向；
或：P_m 转向与 B 一致方向。

分析：

1） $\varphi = 0, \pi \quad \vec{M} = 0$

平衡状态, 无力矩作用



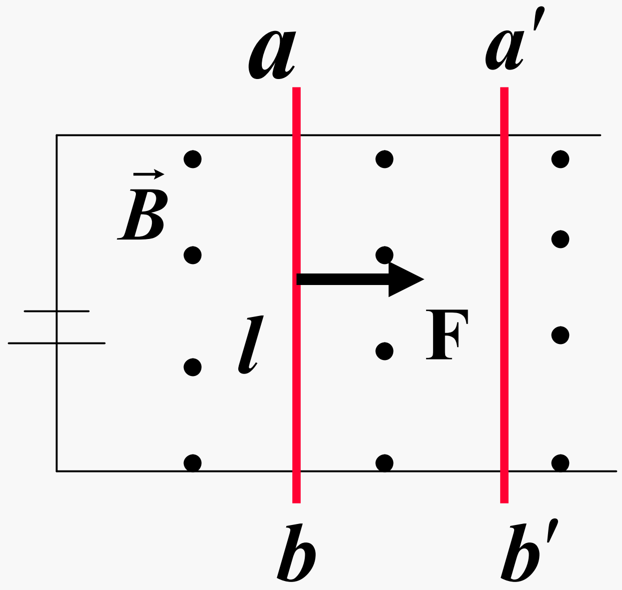
2） $\varphi = \dfrac{\pi}{2} \quad M = P_m B = ISB$

此时 M 最大　　任意形状线圈，结果具有普遍性

三、稳恒磁场中磁力、磁力矩的功

1、载流导线在稳恒磁场中运动时磁力所做的功：

$$\boxed{A = I\Delta\Phi}$$



推导：　$F = IlB$

$$A = F \cdot \overline{aa'} = IlB \cdot \overline{aa'}$$

磁通量增量为：　$\Delta\Phi = Bl\overline{aa'}$

$$A = I\Delta\Phi$$

当载流导线在磁场中运动时，I 保持不变，则磁力作功等于电流乘以回路磁通量增量。

2、载流线圈在恒定磁场转动时磁力矩所做的功

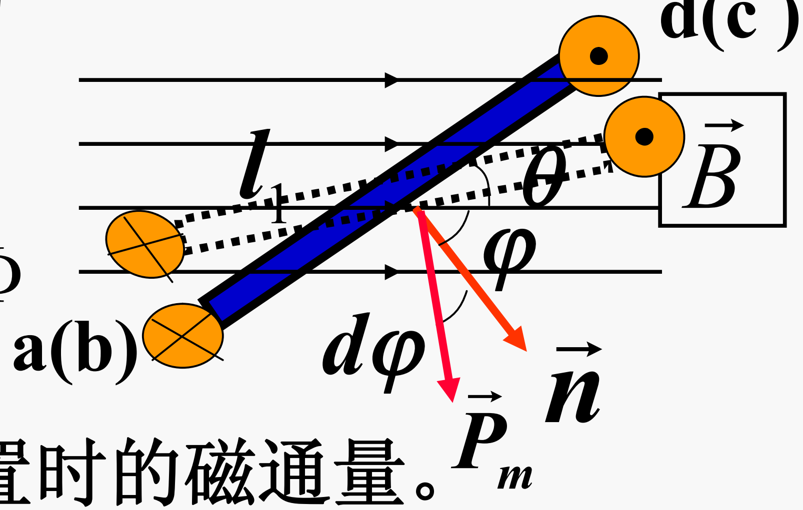
载流线圈在均匀磁场中从 φ 转到 $\varphi + d\varphi$

$$dA = \vec{M} \cdot d\vec{\varphi} = -Md\varphi = -BIS\sin\varphi\, d\varphi$$

$$= IBSd(\cos\varphi) = Id(BS\cos\varphi) \quad = Id\Phi$$

当线圈从 φ_1 转到 φ_2 时，磁力矩所做的功为：

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} Id\Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I\Delta\Phi$$



Φ_1 、Φ_2 表示线圈在 φ_1、φ_2 位置时的磁通量。

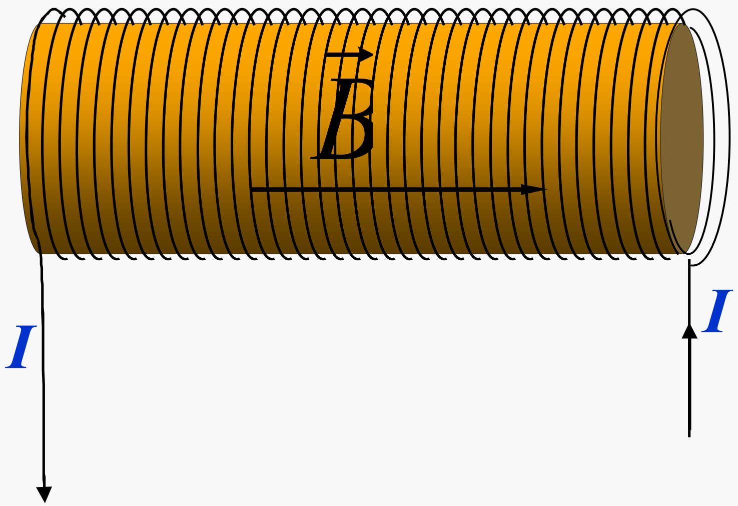
$$\boxed{A = I\Delta\Phi}$$

一个任意的闭合回路在磁场中改变位置或形状时，磁力或磁力 矩所做的功

8.6 磁场中的磁介质

一、介质对磁场的影响

实验



结果，$\vec{B}$ 与 $\vec{B}_0$ 有差别

$\vec{B}_0$ 无磁介质

当电流周围有物质存在时，磁场会使物质磁化，这样磁化了的物质形成一附加磁场，影响原来的磁场。

把影响磁场的物质称之为**磁介质**。

一． 磁介质的分类

类比电介质中的电场

介质对场有影响 总场是

传导电流产生

$$\boxed{\vec{B} = \vec{B}_o + \vec{B}'}$$

与介质有关的电流产生

在介质均匀充满磁场的情况下

定义

$$\boxed{\mu_r = \frac{B}{B_0}}$$

μ_r 介质的相对磁导率

$$\boxed{\mu_r = \frac{B}{B_0}}$$

μ_r 介质的相对磁导率

介质中的磁导率为：$\boxed{\mu = \mu_0 \mu_r}$

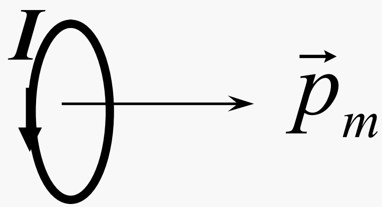
$\mu_r \geq 1$ 顺磁质，使磁场增强；氧，铝

$\mu_r \leq 1$ 抗磁质，使磁场减弱；汞，铜

$\mu_r >> 1$ 铁磁质，使磁场剧增。铁

二. 磁介质的磁化

1、 分子电流　　分子磁矩（磁偶极子）



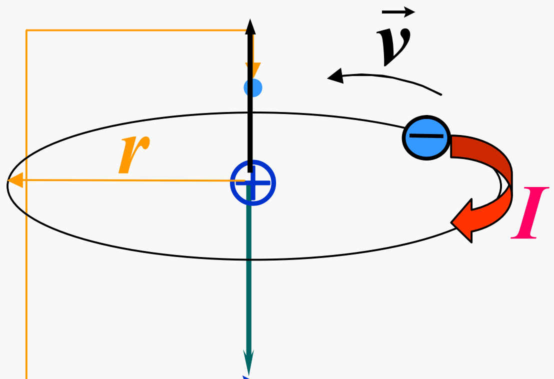
分子中所有电子的轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和称为分子的磁矩，用 $\vec{P}_m$ 表示。

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

与 $\vec{P}_m$ 对应的等效圆电流称为分子电流。

(1) 电子的轨道磁矩

$$\vec{L}=\vec{r}\times m\vec{v}$$



电子以速率 v 运动 → 载流线圈

电流强度 $I=\dfrac{ev}{2\pi r}$

磁矩 $\vec{p}_m=IS\vec{n}$

$$\left|\vec{p}_m\right|=\frac{ev}{2\pi r}\cdot\pi r^2=\frac{evr\,m_e}{2\,m_e}=\frac{e}{2m_e}L$$

$$\boxed{\vec{P}=-\frac{e}{2m}\vec{L}}$$

与量子力学结果相同.

(2) 电子的自旋磁矩

$$p_{自}=\frac{e}{m_e}\cdot\frac{\hbar}{2}$$

$$\hbar=1.05\times10^{-34}\ \mathrm{Js}$$

电子自旋

$$p_{自}=9.27\times10^{-24}\ \mathrm{JT^{-1}}$$

玻尔磁子

2、“分子电流” 模型

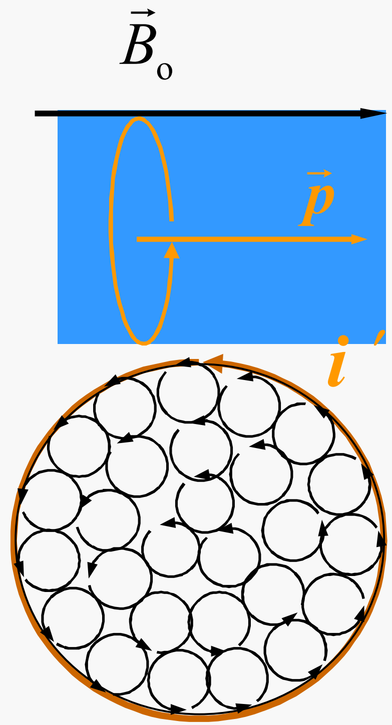
原子分子磁矩 $\vec{p}_{总} = \sum \vec{p}_i$ $\begin{cases} \text{电子轨道磁矩} \\ \text{电子自旋磁矩} \\ \text{核自旋磁矩} \end{cases}$ 小3个数量级（常略去）

讨论磁介质时，将原子分子等效于一个具有固有磁矩 的电流圈。 $\vec{p} = IS\vec{n}$

分子电流

原子	$\sum \vec{p}_i$	特点
He	0	满壳层
Ne	0	满壳层
H	9.27×10^{-24}	最外层1个电子
Na	9.27×10^{-24}	最外层1个电子
Fe 、Co、Ni	20.4×10^{-24}	最外层2个电子

3、介质的磁化机理



(1)顺磁质 $\sum \vec{p}_i \neq 0$

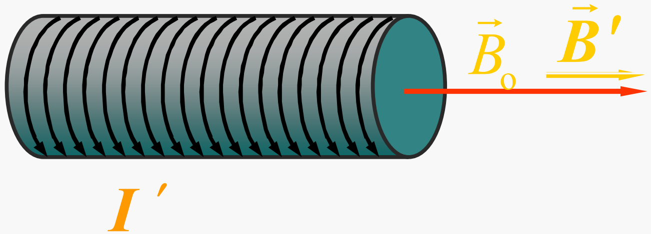
在外磁场中，磁力矩使分子转向。

分子电流的总体效应，等效于介质表面的宏观电流I'。

——**磁化电流**——**束缚电流**。

顺磁质的磁化电流 I' 产生的磁场，与外磁场同方向 $\vec{B}_0 \uparrow\uparrow \vec{B}'$

总磁感应强度 $\boxed{B = B_0 + B'}$



说明：分子转向，穿过电流圈的正向磁通量增加，会产生反向感应电流，引起反向磁场，但，这种影响只是B′的万分之一。

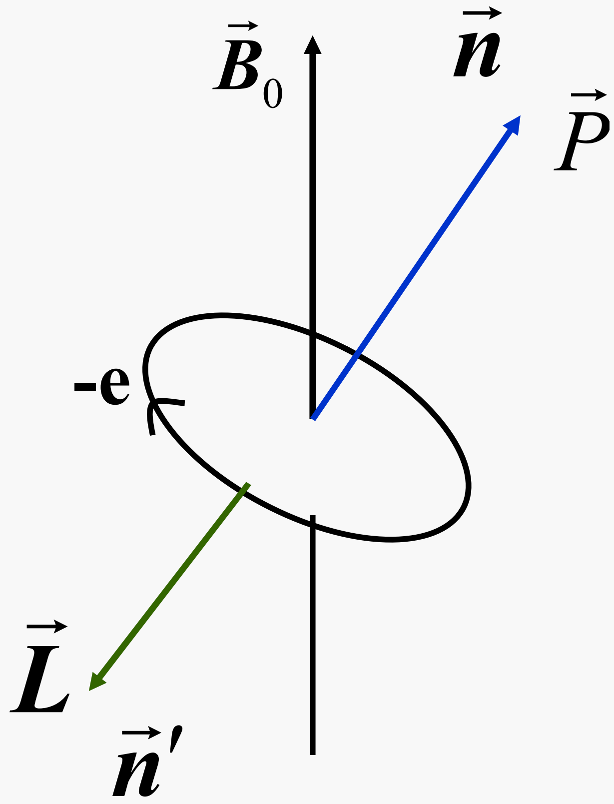
(2)抗磁质　　原来每个分子$\sum \vec{p}_i = 0$

电子的拉摩进动 ——动量矩进动

以电子的轨道运动为例

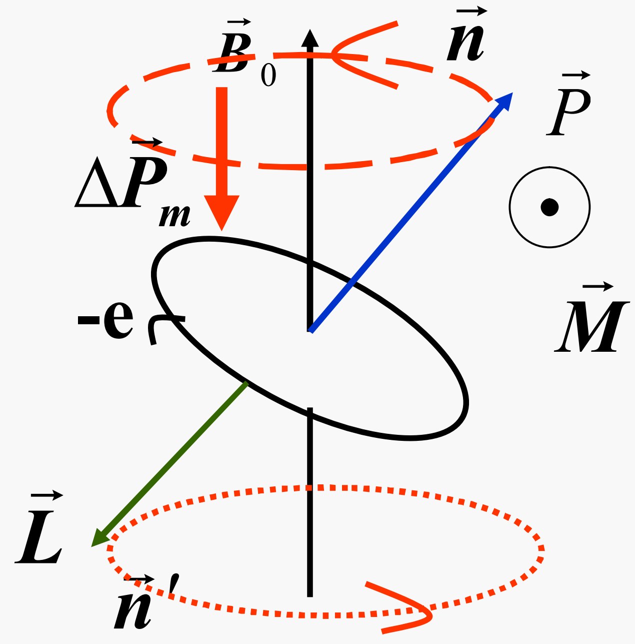
$$\vec{P} = -\frac{e}{2m}\vec{L}$$

加外磁场　$\vec{B}_0$



电子磁矩受到外磁场的作用，
力矩为：

$$\vec{M} = \vec{P} \times \vec{B}_0$$



具有角动量的物体在力矩的作用下就要发生进动。这一进动也等效为一种圆电流，这种圆电流的磁矩方向总是与外磁场方向相反。

所以电子在做轨道运动的同时又绕外磁场做进动，这称作拉摩进动。拉摩进动产生一附加磁矩 $\Delta\vec{P}_m$，与外磁场 $\vec{B}_0$ 方向相反。

总结

顺磁质分子是有矩分子，具有固有磁矩 $\vec{P}_m$

外加磁场时： $\vec{P}_m >> \Delta\vec{P}_m$

分子的固有磁矩是产生顺磁效应的主要因素。

$$\mu_r \geq 1$$

抗磁质分子是无矩分子 $\vec{P}_m = 0$

外加磁场时： 由于分子中各电子的拉摩进动，使每个分子具有与外磁场方向相反的附加磁矩 $\Delta\vec{P}_m$

抗磁质分子附加磁矩的出现是产生磁效应的原因。

$$\mu_r \leq 1$$

三. 磁化强度

1. 磁化强度

$$\vec{M} = \lim_{\Delta v \to 0} \frac{\sum_i \vec{p}_{mi}}{\Delta V}$$

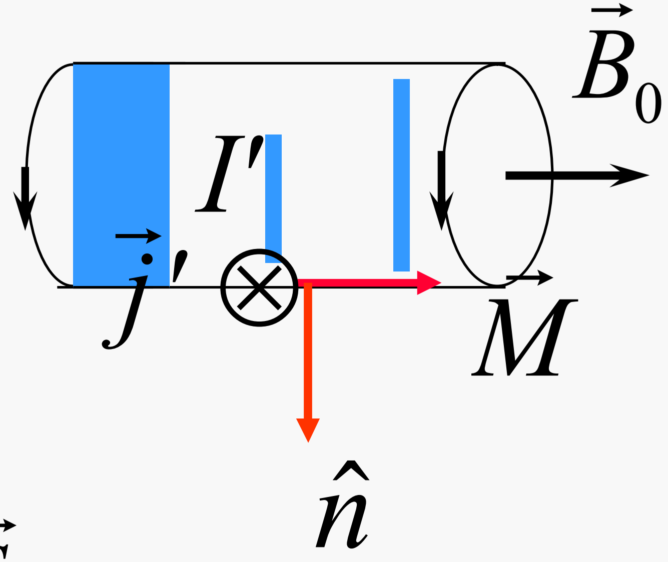
单位 Am^{-1}

2. 磁化强度与磁化电流的关系

以长直螺线管内的各向同性磁介质磁化为例

可以证明

$$\vec{j}' = \vec{M} \times \hat{n} \qquad I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$



类比电介质

$$\sigma' = \vec{p} \cdot \hat{n} \qquad q' = -\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{s}$$

四、有磁介质存在时的磁场

1、磁场强度

合磁场：

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

传导电流产生

与介质有关的电流产生

此磁场仍然是涡旋场，并遵守稳恒磁场的基本规律。

即：

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

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

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\left(\sum I + \sum I'\right)$$

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

得： $$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}\right)\cdot d\vec{l} = \sum I$$

令： $$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_o} - \vec{M}$$

称为**磁场强度**

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum_i I_{i\text{传导}}}$$

有磁介质时的安培环路定理。它表明磁场强度沿闭合环路L的环流等于正向通过以L为边界的曲面的传导电流。

2、$\vec{B}$ $\vec{M}$ $\vec{H}$ 三者的关系

普遍

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

代入

特殊

各向同性

$$\vec{M}=(\mu_r-1)\vec{H}$$

$$\boxed{\vec{B}=\mu_o\mu_r\vec{H}}$$

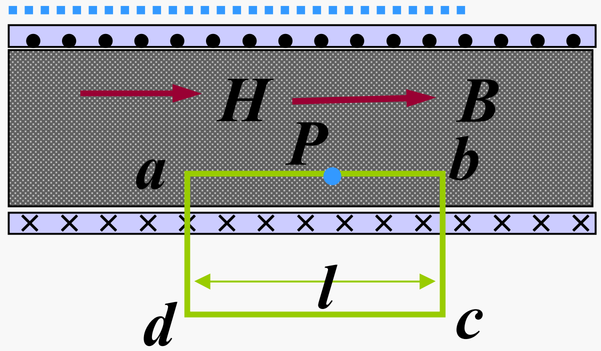
也可：

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

$$\chi_m=\mu_r-1$$

例题 一无限长直螺线管，单位长度上的匝数为n，螺线管内充满相对磁导率为μ_r的均匀介质。导线内通电流I，求管内磁感应强度和磁介质表面的束缚电流密度。

解



$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{\ell} = \int_{ab} H dl = Hl$$

环路定理

$$= nlI$$

$$\boxed{H = nI}$$

$$B = \mu_0\mu_r nI$$

$$\vec{j}' = \vec{M}\times\hat{n} \qquad j' = M$$

$$M = (\mu_r - 1)H$$

$$j' = (\mu_r - 1)nI$$

或

$$j' = \frac{dI'}{d\ell} = \frac{d}{d\ell}\oint \vec{M}\cdot d\vec{\ell} = M$$

铁磁质

一、基本特点

1、$\dfrac{B}{B_0} = \mu_r >> 1 \quad 10^2 \sim 10^4$

2、 $\boldsymbol{\mu_r \sim B}$ 有关

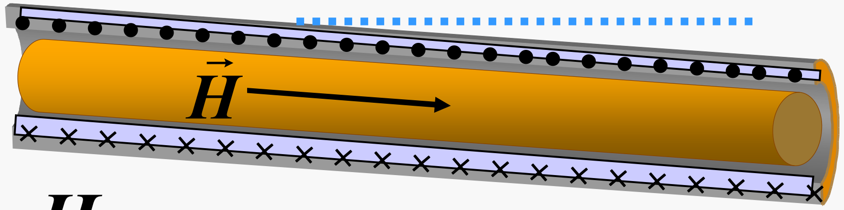
3、磁滞效应

4、超过居里温度变为顺磁质

5、有饱和状态

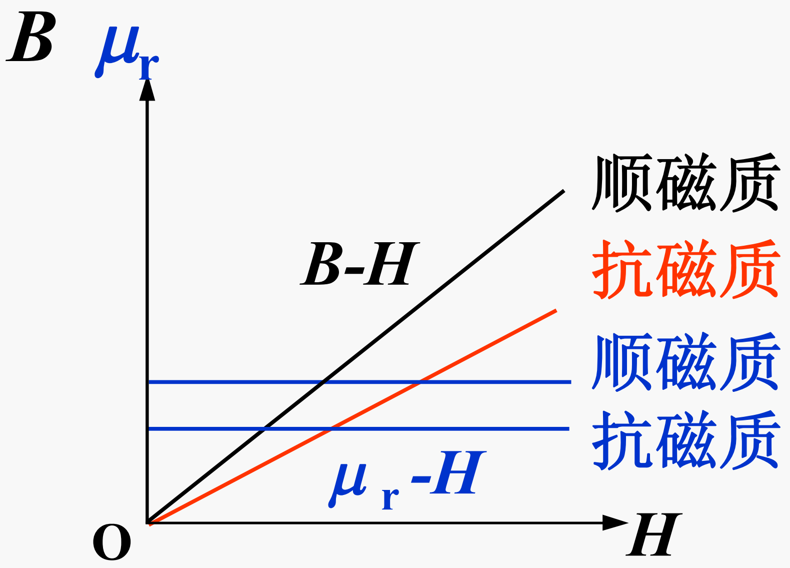
二、磁化曲线与磁滞回线

1、磁化曲线

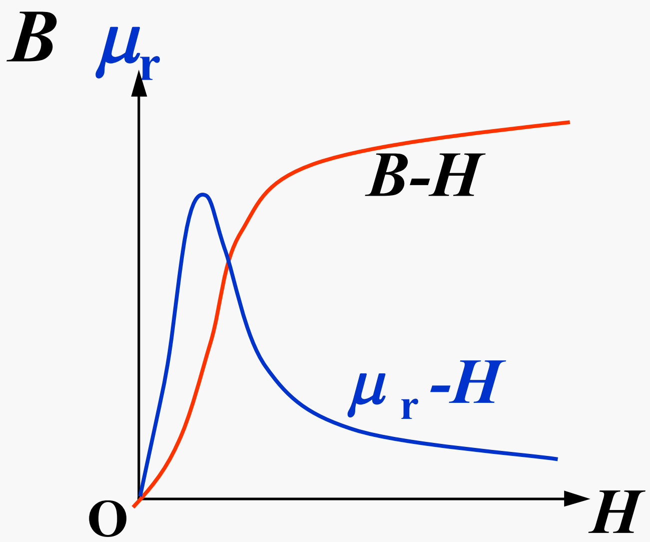


$H = nI$ $\quad\quad I \rightarrow H$

由实验测量B和I，得$B-H$曲线。

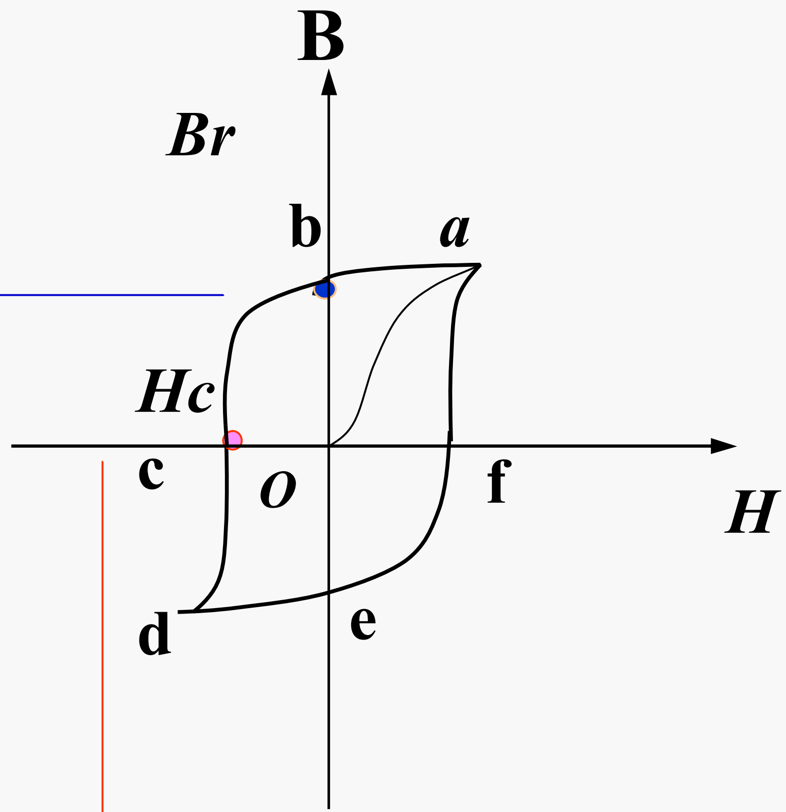


顺、抗磁质 $\quad \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$



铁磁质

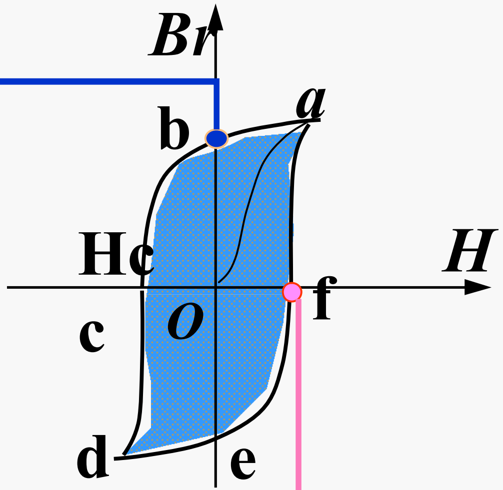
2、磁滞回线



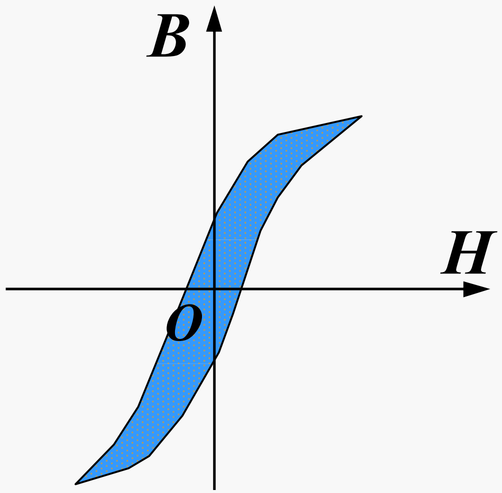
B_r——剩磁

H_c——矫顽力

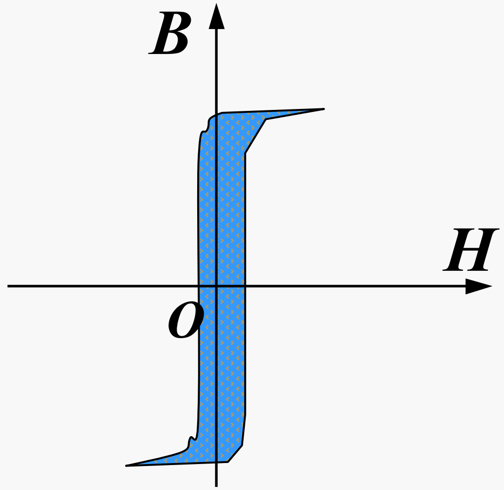
3、磁滞回线和材料的磁性



硬磁材料



软磁材料



矩磁材料

B_r——剩磁

H_c——矫顽力

磁滞回线所围的面积与磁化能量成正比。

磁　比　较　电

磁	电
无磁荷　基本场量 $\vec{B}$	有电荷　基本场量 $\vec{E}$
铁磁质　顺磁质　抗磁质	导　体　半导体　绝缘体
磁介质：磁化	电介质：极化
一般无磁屏蔽	有静电屏蔽
辅助量 $\vec{H}=\dfrac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$	辅助量 $\vec{D}=\varepsilon_0\vec{E}+\vec{P}$
$I_0 \Rightarrow \vec{H}$	$Q_0 \Rightarrow \vec{D}$