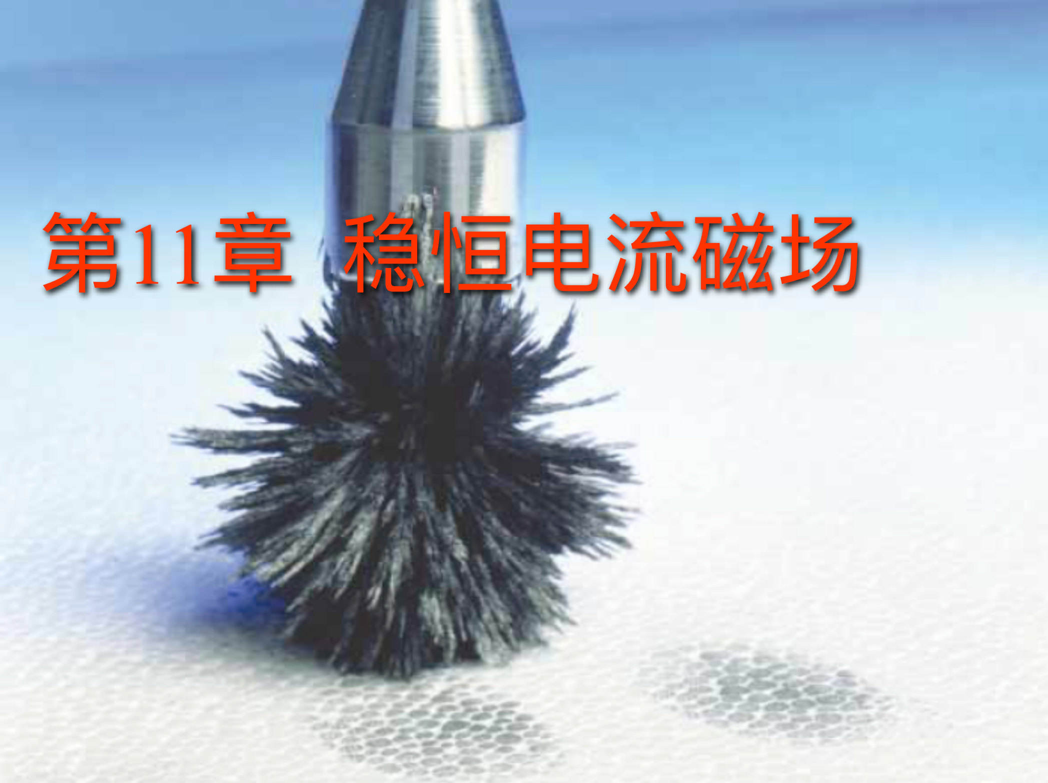
第11章 稳恒电流磁场



主要内容

11.1 稳恒电流和电动势

11.1.1.稳恒电流和电流密度

一.电流强度:

电流—电荷在导电材料内做的定向运动。

载流子：把起导电作用的电荷称为载流子—可以是电子、质子、离子或空穴。

电流强度：单位时间通过导体某一横截面的电　　量。

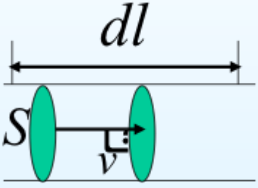
$$I = \frac{dq}{dt}$$

当电流强度不随时间变化的为稳恒电流，可以表示为：

$$I = \frac{q}{t}$$

电流的方向规定为正电荷的运动方向，如果是负电荷导电，则负电荷运动方向与电流方向相反。

左图为一段长度为d*l*的导线，设导线截面积为S，电荷体密度为n,每个电荷电量为q，导线中电荷的电量为



$$dQ = nqSdl$$

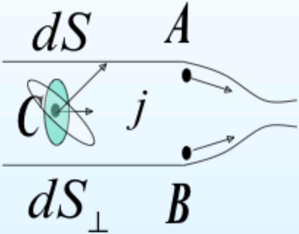
若电荷通过d*l* 所用的时间为dt，电流强度 I 等于单位时间通过截面积S的电荷量为：

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{nqsdl}{dt} = nqSv$$

d*l* /dt是电荷在导线中的漂移速度。

二.电流密度

如右图，电流在一粗细不均的导线中流动时，电流强度相同，但是导线中不同的位置，电流密度不同。



1.电流密度定义

垂直于电流方向单位面积的电流强度。

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$$

电流密度是矢量，则通过面积dS的电流强度为

$$dI = j dS_{\perp} = j ds \cos\theta$$

θ是ds与j之间的夹角

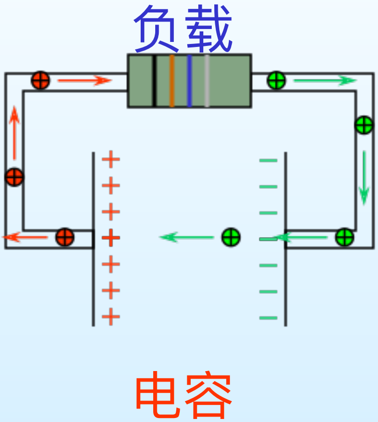
电流密度为矢量，方向为导体内该点电场强度方向。穿过导体横截面的电流强度为：

$$I = \iint_S dI = \iint_S \vec{\mathbf{j}} \cdot d\vec{\mathbf{S}}$$

电流强度是通过面积S的电流密度的通量。

11.1.2、电源、电动势概念

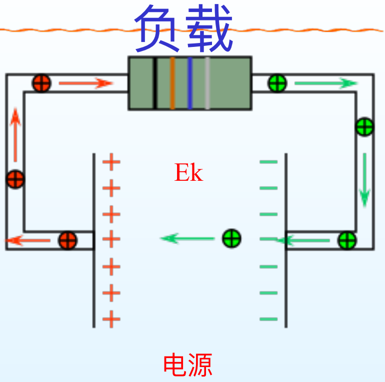
电容接通负载后，可以向外提供电流，但是电流逐步变小，直至消失。



要向外电路提供持续稳定的电流必须靠电源。电源通过非静电力将负极板上的正电荷再次移到正极板。

1.电源：能够将其它形式的能量转变为电能的装置。

在电源内部存在一非静电力，该非静电力将正电荷从电势低的电源负极移动到电势高的正极。因此在电源内部存在一非静电场 E_k 。



2.电动势描写电源将其它形式能量转变成电能的能力。

电源电动势定义

$$\varepsilon_i = \frac{A}{q_0} = \int_{-}^{+} \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{l}$$

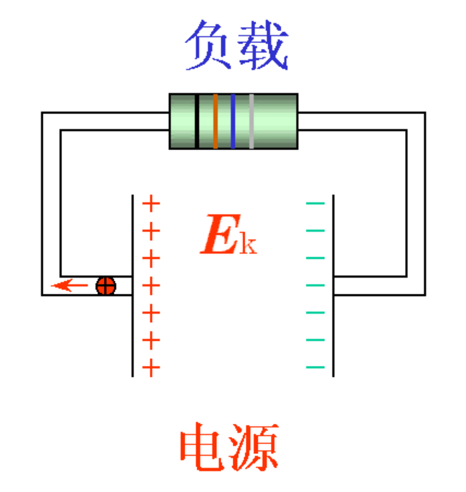
非静电场在电源内部从负极到正极移动单位正电荷所作的功。

电源的电动势大小等于电源两端的电势差。

移动电荷时要克服电场力作功，

$$A = q_0 U$$

$$\varepsilon_i = \frac{A}{q_0} = \frac{q_0 U}{q_0} = U$$



主要内容

11.2 稳恒电流的磁场

1.物质的磁性

磁铁具有吸引铁、钴、镍的性质。（古称慈石。）

2、磁极

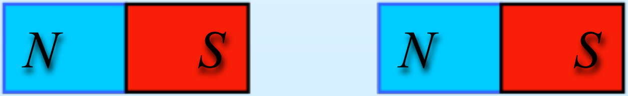
南极（*S*极）、北极（*N*极）

北极

南极

同性磁极相斥,异性磁极相吸。磁极间的力通过磁场传递。

3.在低能状态下磁极是成对出现的。



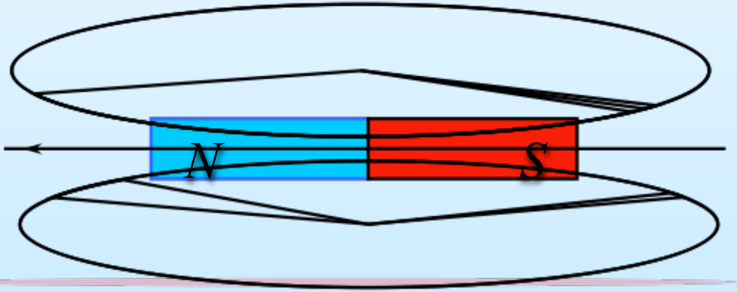
4.最新研究发现,在高能状态下会出现磁单极。

1819-1820年间，奥斯特发现通有电流的导线可以吸引附近的小磁针，结果说明电流可以产生磁场，把电与磁的现象联系起来。

5.磁感应（场）线

可形象地描绘磁场分布。（规定：小磁针的N极指向为磁场的方向。）

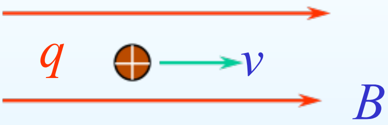
•永久磁铁的磁场线分布



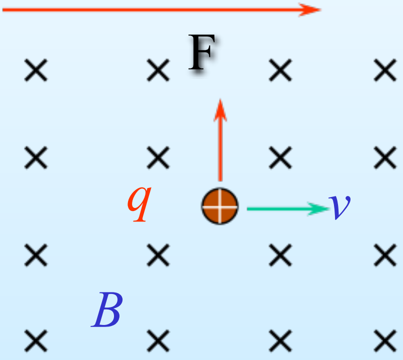
演示

磁感应强度B：用于描述磁场强度的物理量。

在磁场中放入一小磁针，小磁针N极的指向为*B*的 方向 。



当电荷运动速度与 *B* 方向平行时电荷受力为 0 。



当运动电荷速度与磁场方向垂直时受到洛伦兹力 F　最大。

一.磁感应强度的定义

$$B = \frac{\text{[illegible]} \qquad\qquad\qquad \text{力}}{\text{[illegible]} \qquad\qquad \times\text{[illegible]}}$$

$$B = \frac{F_{\max}}{qv}$$

单位:特斯拉 T

$$1\,\mathrm{T} = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{C}\cdot 1\,\mathrm{m/s}}$$

方向:为小磁针 N 极指向

地球两极磁场: $6\times 10^{-4}\,\mathrm{T}$

地球赤道磁场: $3\times 10^{-4}\,\mathrm{T}$

$$\vec{F} = q\vec{v}\times\vec{B}$$

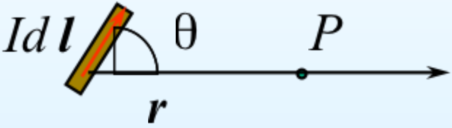
11.1.2. 毕奥-萨伐尔定律

一.毕-萨-拉定律

研究一段电流元产生磁感应强度的规律。

由实验发现一段长为 dl 通过的电流为 I 的电流元产生的磁感应强度：

$$dB = k\frac{Idl\sin\theta}{r^2}$$



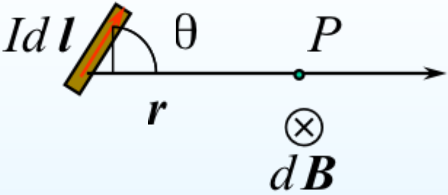
令 $\quad k = \dfrac{\mu_0}{4\pi} \qquad dB = \dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{Idl\ \sin\theta}{r^2}$

真空中的磁导率

$$\mu_0 = 4\pi k$$
$$= 4\pi\times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m\cdot A^{-1}}$$

由矢量乘积法则：

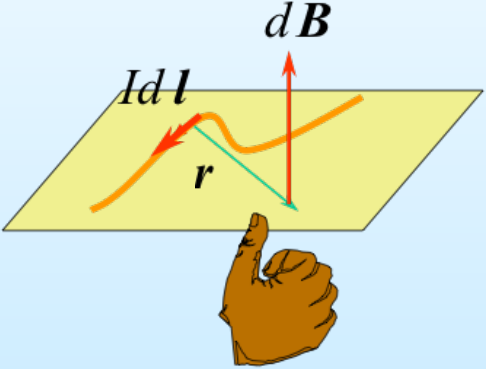
$$|\vec{A}\times\vec{B}| = |\vec{A}||\vec{B}|\sin\theta$$



毕萨定律

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\times\vec{r}}{r^3}$$

方向：从dl 右旋到 r ,大拇指指向。



顺序不能错。

dB 的方向垂直于 dl和 r 所形成的平面。

例1: 一段有限长载流直导线,通过的电流为 I（沿y轴正向），求与直导线相距为x处的 P 点磁感应强度。

解:分割电流元

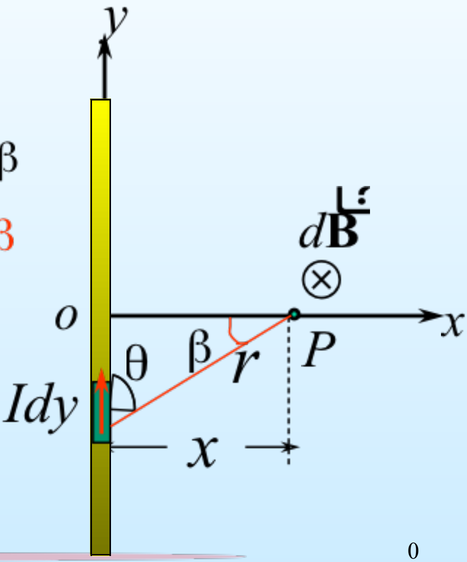
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\theta}{r^2}$$

$$\sin\theta = \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) = \cos\beta$$

$$y = x\mathrm{tg}(\beta) \qquad dy = \frac{x}{\cos^2\beta}d\beta$$

$$r = x/\cos\beta$$

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{(x/\cos^2\beta)\cos\beta}{(x/\cos\beta)^2}d\beta$$



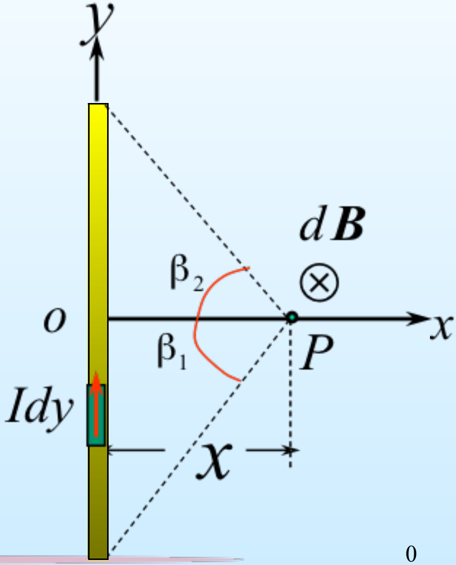
$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{(x/\cos^2\beta)\cos\beta}{(x/\cos\beta)^2}d\beta$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi x}\cos\beta d\beta$$

$$B = \int dB$$

$$= \int_{\beta_1}^{\beta_2}\frac{\mu_0 I}{4\pi x}\cos\beta d\beta$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi x}\left(\sin\beta_2 - \sin\beta_1\right)$$



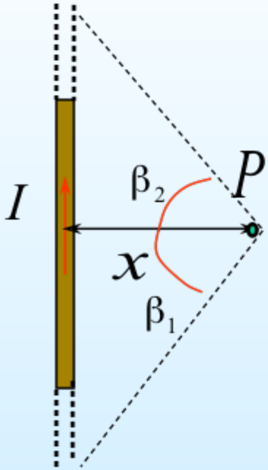
B的方向由右手定则确定。

$$B=\frac{\mu_0 I}{4\pi x}\left(\sin\beta_2-\sin\beta_1\right)$$

讨论 1.无限长载流直导线的磁场：

$$\beta_1=-\frac{\pi}{2};\qquad \beta_2=\frac{\pi}{2}$$

$$B=\frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$



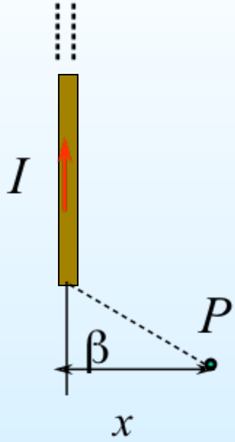
2.半无限长载流直导线的磁场：

$$\beta_1=0;\qquad \beta_2=\frac{\pi}{2}$$

$$B=\frac{\mu_0 I}{4\pi x}$$

3.半无限长载流直导线的磁场：

由 $$B=\frac{\mu_0 I}{4\pi x}\left(\sin\beta_2-\sin\beta_1\right)$$



$$\beta_1=\beta;\qquad \beta_2=\frac{\pi}{2}$$

$$B=\frac{\mu_0 I}{4\pi x}(1-\sin\beta)$$

二.应用毕萨定律解题的方法

计算一段载流导体的磁场

1.建立坐标系;

2. 分割电流元;

3.确定电流元的磁场

$$d\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{\mathbf{l}}\times\vec{\mathbf{r}}}{r^3}$$

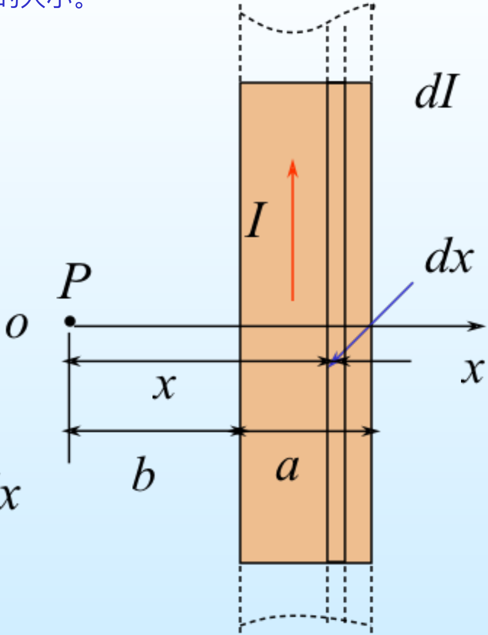
4.求 B 的分量 Bx 、By 、Bz;

5.由

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$ 或

$$\vec{B} = B_x\vec{i} + B_y\vec{j} + B_z\vec{k}$$ 求总场。

例2：一宽为 a 无限长带状载流导线，通有电流 I，求距平面左侧为 b 与电流共面的 P 点磁感应强度 B 的大小。



解：以 P 点为坐标原点，向右为坐标正向；

分割电流元为无限多宽为 dx的无限长载流直导线；

电流元电流

$$dI = \frac{I}{a}dx$$

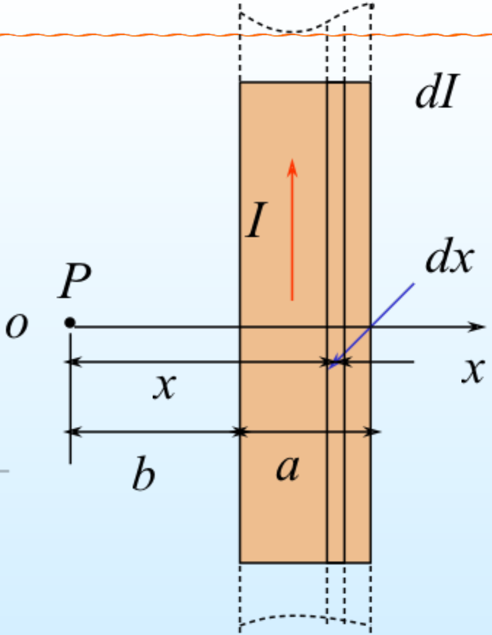
$$dI = \frac{I}{a}dx$$

$$dB = \frac{\mu_0 dI}{2\pi x}$$

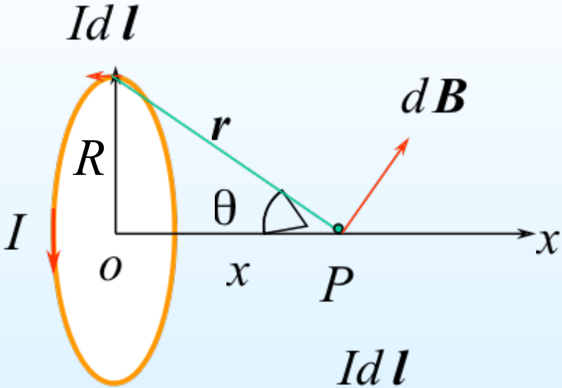
$$= \frac{\mu_0 I dx}{2\pi a x}$$

$$B = \int dB = \int_b^{a+b} \frac{\mu_0 I dx}{2\pi a x}$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \ln \frac{a+b}{b}$$



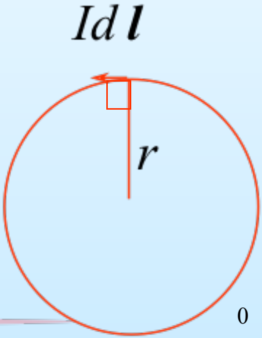
例3：一载流圆环半径为R 通过电流为 I，求圆环轴线上一点的磁感应强度 B。



解：将圆环分割为无限多个电流元；

建立坐标系，电流元在轴线上产生的磁感应强度 dB 为：

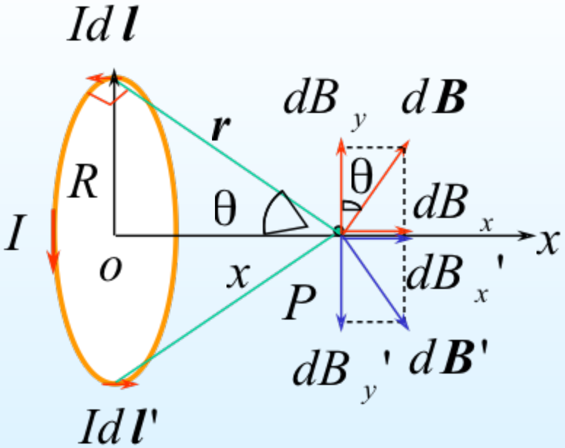
$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin\alpha}{4\pi r^2}$$



$$dB = \frac{\mu_0 Idl \sin\alpha}{4\pi r^2}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2}$$

在 x 轴下方找出 dl 关于 x 轴对称的一个电流元 Idl'



由对称性可知，dl 和 dl' 在 P 点产生的 dB 在 x 方向大小相等方向相同，y 方向大小相等方向相反，相互抵消。

$$\because B_y = 0$$

$$B = B_x$$

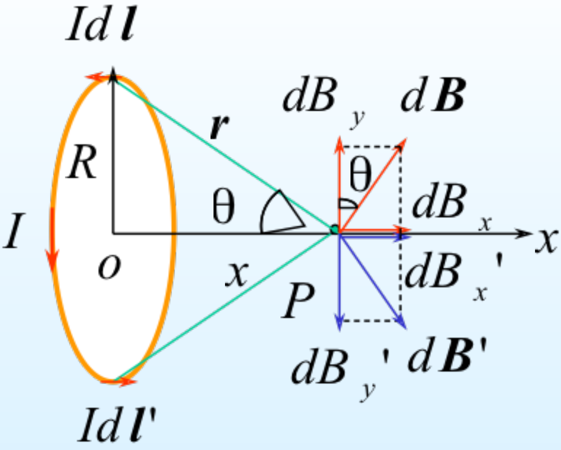
$$B = \int dB_x$$

$$= \int dB \sin\theta$$

$$\sin\theta = \frac{R}{r}$$

$$B = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \frac{R}{r} dl$$

$$= \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} \int_0^{2\pi R} dl$$

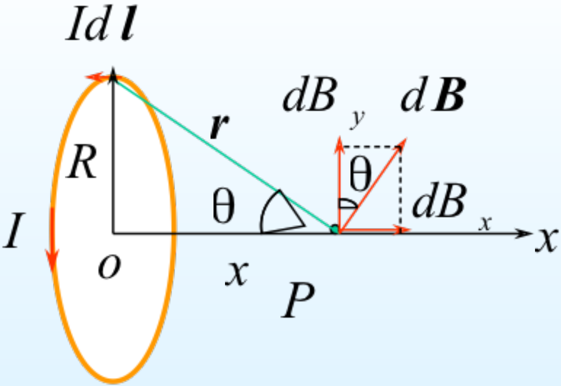


$$B=\frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3}\int_0^{2\pi R} dl$$

$$=\frac{\mu_0 IR}{4\cancel{\pi} r^3}2\cancel{\pi} R$$

$$=\frac{\mu_0 IR^2}{2r^3}$$

$$=\frac{\mu_0 IR^2}{2\left(x^2+R^2\right)^{3/2}}$$



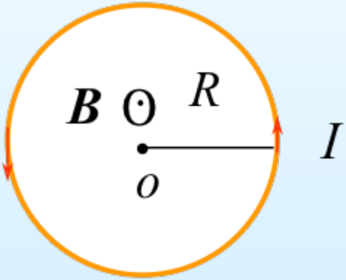
$$B=\frac{\mu_0 IR^2}{2\left(x^2+R^2\right)^{3/2}}$$

讨论

1.载流圆环环心处

$$x = 0;$$

由结论 $$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}}$$



有 $$B_o = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

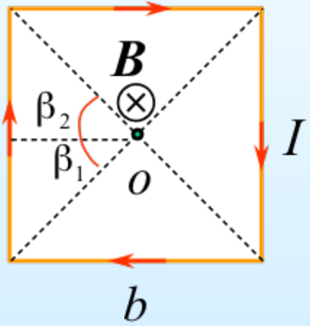
张角为α的圆弧圆心处 B 为多少?

例2：一正方形载流线圈边长为 b,通有电流为 I，求正方形中心的磁感应强度 B。

解：o点的 B 是由四条载流边分别产生的，由于它们大小方向相同，

$$B = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 = 4B_1$$

$$\beta_1 = -\frac{\pi}{4}, \qquad \beta_2 = \frac{\pi}{4}$$



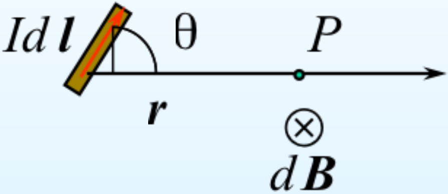
$$B = \cancel{4}\frac{\mu_0 I}{\cancel{4}\pi b/2}\left(\sin\frac{\pi}{4} - \sin-\frac{\pi}{4}\right)$$

$$= \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I}{\pi b}$$

1.运动电荷的磁场

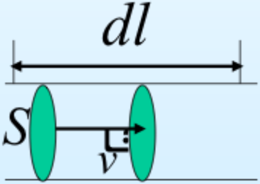
由磁场的叠加原理可以认为：一段电流元产生的磁场是由电流元内 做定向运动的电荷产生的。

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\, d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$



电流 I 等于单位时间通过导线截面积S的电荷量。

$$I = \frac{dQ}{dt} = nqSv$$



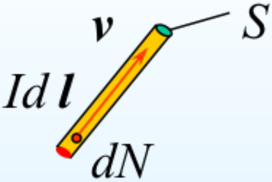
代入 $d\vec{B}$ 的表示式中

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{nqSv\, d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{nqSv\, d\vec{l}\times\vec{r}}{r^3}$$

由于 $dl \,//\, v$

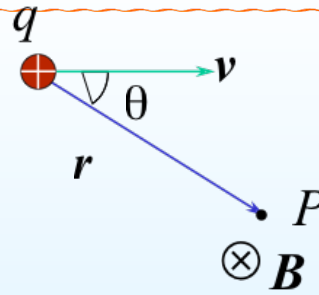
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{nqS\, dl\, \vec{v}\times\vec{r}}{r^3}$$

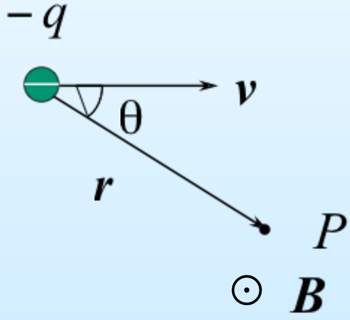


而电流元中 nsdl=dN 是带电粒子的总量。单个电荷对磁感应强度的贡献为：

$$\vec{B} = \frac{d\vec{B}}{dN} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{nqS\, dl\, \vec{v}\times\vec{r}}{nsdl\, r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\,\vec{v}\times\vec{r}}{r^3}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\,\mathbf{v}\times\mathbf{r}}{r^3}$$





方向

$q > 0, \quad B \,/\!/\, v \times r$

$q < 0, \quad B \,/\!/ -(v \times r)$

例4：氢原子中的电子以速率V=2.2×106m/s在半径r=0.53 ×10-10m的圆周轨道上匀速运动。求电子在轨道中心产生的磁感应强度。

解：

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\,\vec{v}\times\vec{r}}{r^3}$$

$$B = 1\times10^{-7}\frac{1.6\times10^{-19}\times2.2\times10^{6}}{(0.53\times10^{-10})^2} = 12.5T$$

解2：电子在轨道上运动，可以看成是圆形电流，电流强度为：

$$I = e\frac{v}{2\pi r}$$

园电流在圆心产生的磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{ev}{r^2}$$

主要内容

§11-3

磁场中的高斯定理

一、磁感

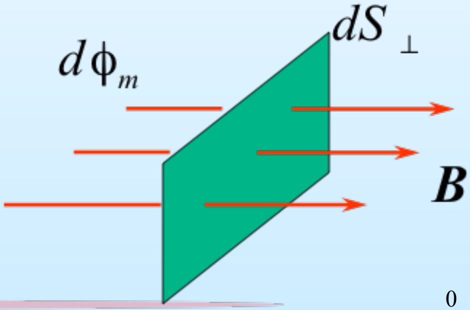
形象的描绘磁场分布的空间曲线。

二、规定：

1. B的方向：磁感线上任意点的切线方向为该点磁感应强度B的方向。

2. B的大小：穿过垂直于磁感应强度B方向的单位面积的磁感线根数。

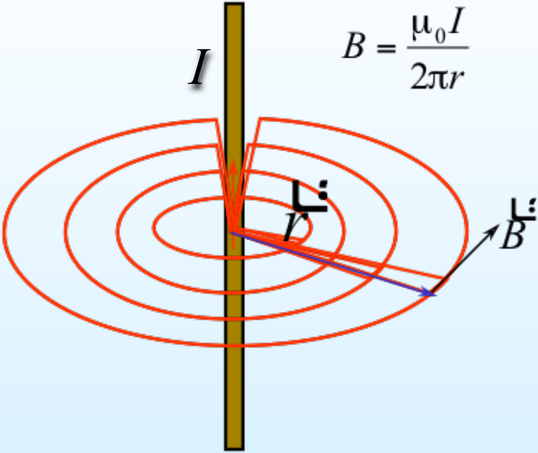
$$B = \frac{d\phi_m}{dS_\perp}$$



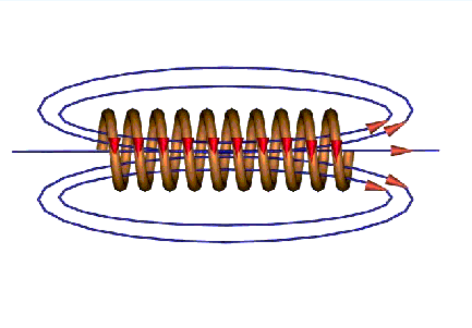
磁感应强度大小为磁感线的面密度。

•无限长直载流导线的磁感线分布

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



载流螺线管的磁感线分布



磁感应强度始终与r垂直。

半径为r处，磁感应强度大小相等。

三、磁感线性质

1、磁感线不相交。

2、磁感线为闭合曲线，没有起点，也没有终点。或始于无穷远，也终于无穷远处。

3、磁感线密处 B 大；磁感线疏处 B 小。

在稳恒磁场中，其基本定律也是高斯定律、与环路定律。

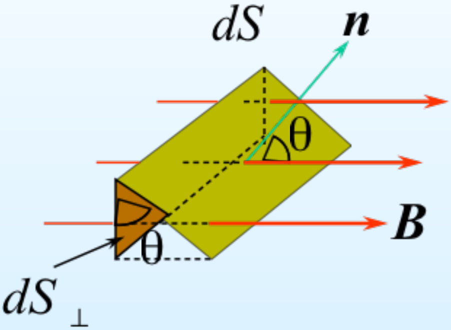
四、磁通量

1.穿过一面积元的磁通量定义为：

$$d\phi_m = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

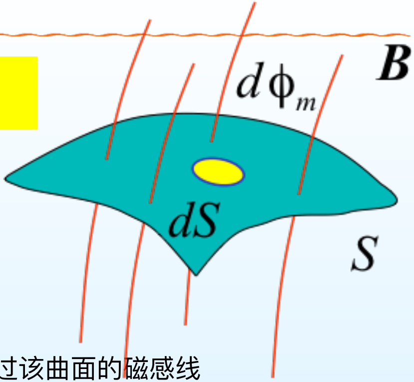
由 $$d\phi_m = BdS\cos\theta$$

$$= BdS_{\perp}$$



与磁感线的式子比较，磁通量的数值就等于磁感线的条数

2.穿过某一曲面的磁通量



$$\phi_m = \iint d\phi_m = \iint \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$= \iint B dS \cos\theta$$

单位：韦伯，Wb

ϕ_m 为标量，只有大小正负之分。其数值等于通过该曲面的磁感线的条数。

$$0 \le \theta < \frac{\pi}{2}, \quad \phi_m > 0$$ 为正通量。

$$\frac{\pi}{2} < \theta \le \pi, \quad \phi_m < 0$$ 为负通量。

例1、如图 矩形线圈与载流无限长直导线共面，直导线电流为I,求线圈的磁通量。

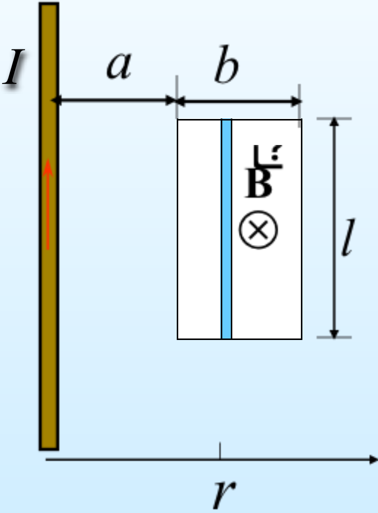
解：选宽度为dr ,平行于直导线的

面积元 ds=$l$dr

$$d\phi_m = Bldr = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} ldr$$

$$\phi_m = \int_a^{a+b} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} ldr$$

$$= \frac{\mu_0 Il}{2\pi} \ln(\frac{a+b}{a})$$



3.穿过闭合曲面的磁通量

$$\phi_m = \iint d\phi_m = \oint\!\!\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{S}}$$

规定闭合面的外法线方向为正

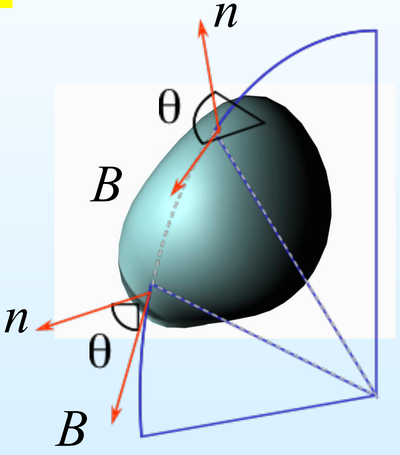
磁感线穿出闭合面时

$$0 \le \theta < \frac{\pi}{2},$$ 磁通量为正。

磁感线穿入闭合面时

$$\frac{\pi}{2} < \theta \le \pi,$$ 磁通量为负。

$\pi / 2 < \theta \le \pi$



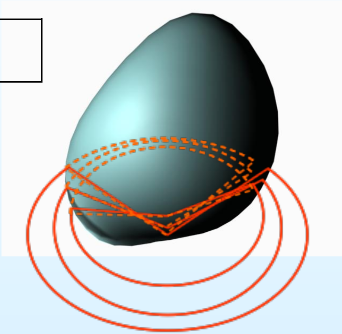
$0 \le \theta < \pi / 2$

五、磁场中的高斯定理

1.定理表述

穿过任意闭合面的磁通量等于 0。

$$\phi_m = \oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$



2.定理证明：

由于磁感线为闭合曲线，穿入穿出闭合面的磁感线根数相同，正负磁通量抵消。

磁场是无源场，磁感线为闭合曲线，磁场是涡旋场。

主要内容

11.1 稳恒电流和电动势

11.2 稳恒电流的磁场

11.3 磁场中的高斯定理

11.4 安培环路定理及其应用

11.6 磁场对运动电荷及电流的作用

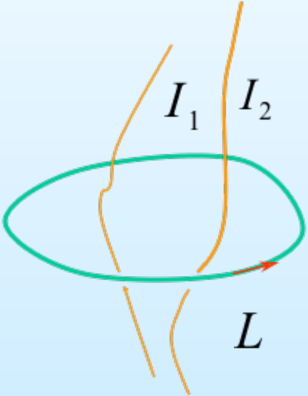
§11-4

安培环路定理及其应用

一、定理表述

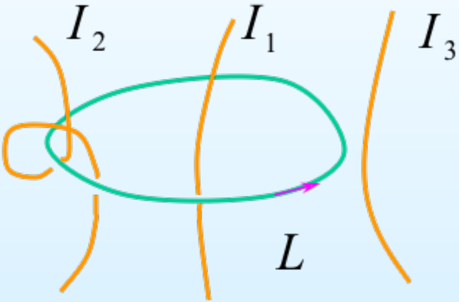
磁感应强度沿闭合回路的线积分，（B 的环流），等于环路所包围电流的代数和乘以 μ_0。

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$



注意：I是有符号的，四指沿环路的方向弯曲，电流与拇指方向相同的 I 取正值，电流与拇指方向相反的 I 取负值。

如图所示，求环路L的环流 $\oint \vec{B}\cdot d\vec{l}$。



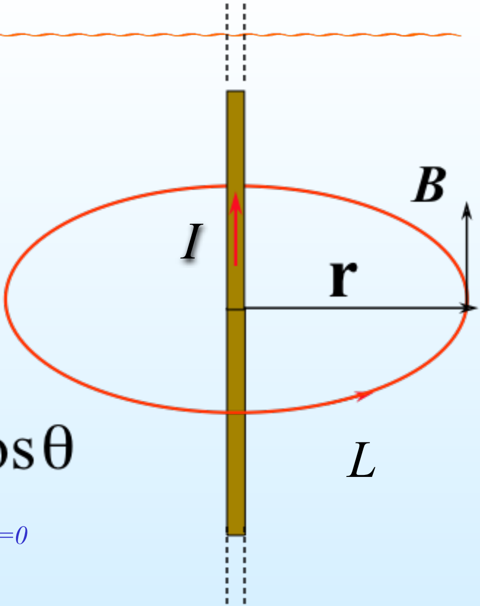
解： 由环路定理

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I \;\; = \mu_0 I_1$$

$$= \mu_0 (I_1 - 2I_2)$$

二、定理说明

特例：以无限长载流直导线为例。



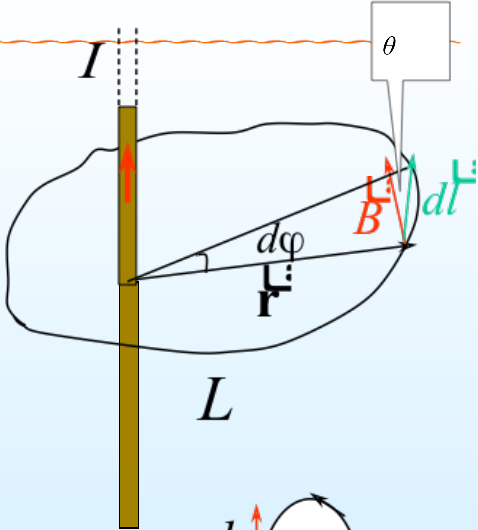
长直导线周围的B线为一系列的同心圆，选取路径方向与 B 线相同；

左边:
$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \oint_L B\,dl\,\cos\theta$$

由于环路上各点的 B 大小相等；且 $B\,//\,dl$； $\theta=0$

$$B\oint_L dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}2\pi r = \mu_0 I$$

I 向下时为负值。



$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$ 左边=右边定理成立。

当环路为任意形状时：

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \int_L Bdl\cos\theta$$

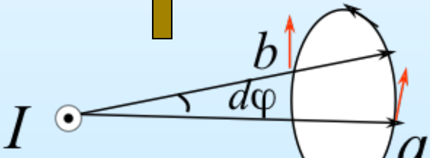
由于 $$Bdl\cos\theta = Brd\varphi$$

$$= \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} r d\varphi = \mu_0 I$$

当电流不在环路内时

a点 $$\vec{B}\cdot d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\varphi$$

b点 $$\vec{B}\cdot d\vec{l} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} d\varphi$$



$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = 0$$

由此当空间有多个无限长直电流时，

利用磁场的叠加原理：

$$\oint_L \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \int_L \left(\sum_j \vec{B}_j\right) \cdot d\vec{l}$$

将积分与求和号交换

$$= \sum_j \int_L \vec{B}_j \bullet d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

i是环路内的电流。

由此可得：

$$\oint_L \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 \sum I$$

1. $\sum I$ 为环路内的电流代数和。

2. 环流 $\oint \vec{\mathbf{B}}\cdot d\vec{\mathbf{l}}$ 只与环路内的电流有关，而与环路外电流无关。

3. B为环路上一点的磁感应强度，它与环路内外电流都有关。

若 $\oint \vec{\mathbf{B}}\cdot d\vec{\mathbf{l}} = 0$ 并不一定说明环路上各点的 B 都为 0。

若 $\oint \vec{\mathbf{B}}\cdot d\vec{\mathbf{l}} = 0$ 环路内并不一定无电流。

4. 环路定理只适用于闭合电流或无限电流。

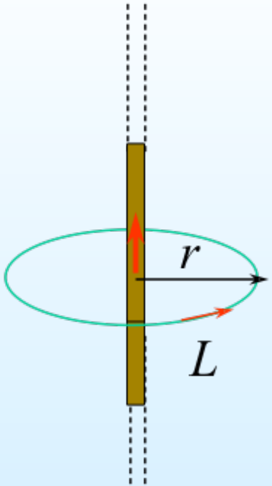
例2：利用安培环路定律计算载流无限长直导线外一点的磁感应强度。

解：以电流为轴，做半径为 r 的环路

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = B\oint dl = \mu_0 I$$

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

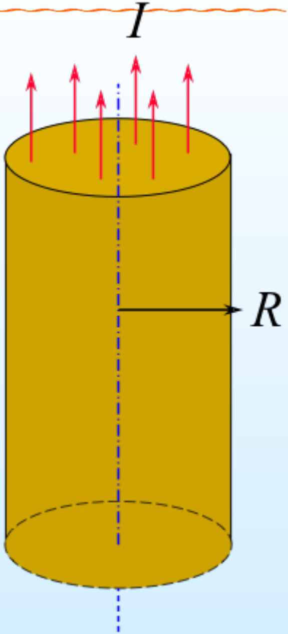
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



将上式用于有限长直导线则得出错误结果，算出B与无限长直电流磁感应强度相同，矛盾，故安培环路定律对有限电流不适用。

三、环路定理的应用

例2：圆柱形载流导体半径为 R，通过的电流为 I，电流在导体横截面上均匀分布，求圆柱体内、外的磁感应强度的分布。



解： 1.圆柱体内部

$r < R$ 区域

选取半径为 r 的环路,

$$\oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{l} = \oint B\,dl\cos\theta$$

由于环路上各点 B 大小相等，方向

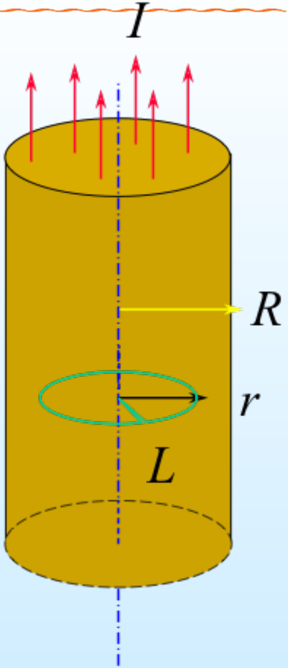
$$\mathbf{B} /\!/ d\mathbf{l} \qquad \theta = 0$$

$$B\oint dl = B\,2\pi r = \frac{\mu_0 r^2}{R^2} I$$

环路内电流代数和为:

$$\sum I = \frac{I}{\pi R^2}\pi r^2 = \frac{r^2}{R^2} I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r \propto r$$



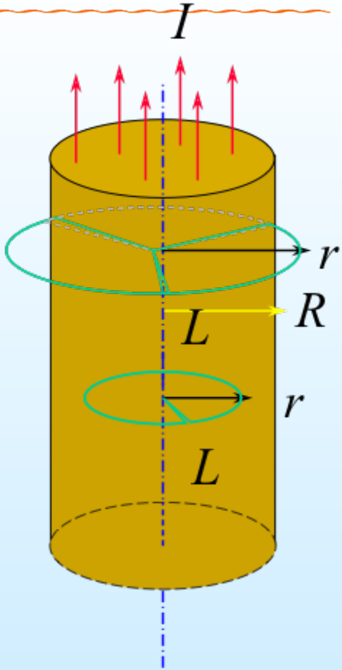
2.圆柱体外一点： $r > R$ 区域

在圆柱体外作一环路，

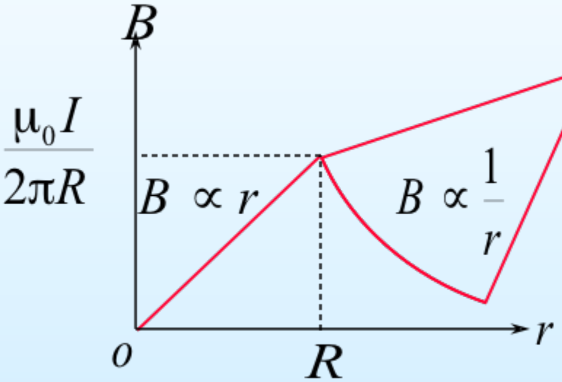
$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \oint B\,dl\cos\theta$$

$$B\oint dl = B\,2\pi r = \mu_0 I$$

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \propto \frac{1}{r}}$$



分布曲线



四、选取环路原则

利用安培环路定理计算磁场 B ,要求磁场具有高度的对称性；

目的是将: $\oint_L \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 \sum I$

写成 $\oint_L B dl \cos\theta = B\int dl = \mu_0 \sum I$

$$B = \frac{\mu_0 \sum I}{\int dl}$$

要求环路上各点 B 大小相等， B 的方向与环路方向一致， $\boldsymbol{B} // d\boldsymbol{l}$， $\cos\theta = 1$

或 $\boldsymbol{B} \perp d\boldsymbol{l}$ ， $\cos\theta = 0$

环路要经过所研究的场点。

五、解题方法

1.场对称性分析；

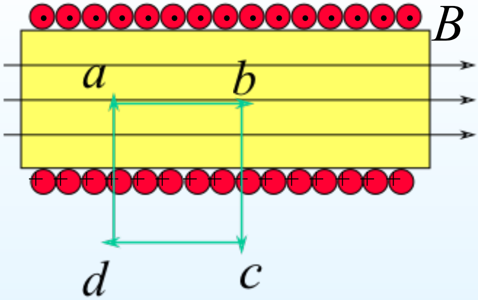
2.选取环路；

3.确定环路内电流的代数和 $\sum I$；

4.应用环路定理列方程求解。

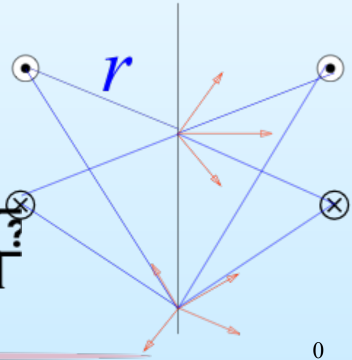
应用环路定理求 B 要比毕萨定律简单，但只适用于具有高度对称的场。

例3：密绕载流螺线管通有电流为 I，线圈密度为 n，求管内一点的 B 。(用无限长螺线管近似。)



解：理想密绕螺线管，管内的磁场是均匀的，管外的磁场为 0；由安培环路定律：

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$



选择如图所示的环路

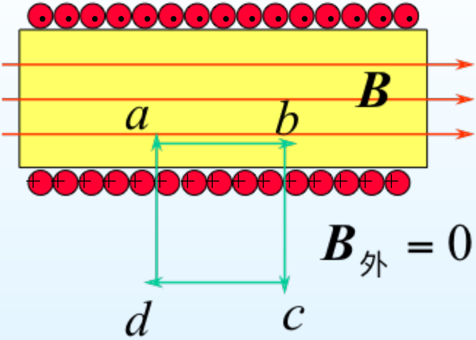
$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \left(\int_a^b + \int_b^c + \int_c^d + \int_d^a\right)\vec{B}\cdot d\vec{l}$$

其中 $\int_b^c \vec{B}\cdot d\vec{l} = \int_d^a \vec{B}\cdot d\vec{l} = 0,$

$\therefore \vec{B} \perp d\vec{l}, \quad \cos\theta = 0$

$$\int_c^d \vec{B}\cdot d\vec{l} = 0$$

l? 螺线管外B =0；



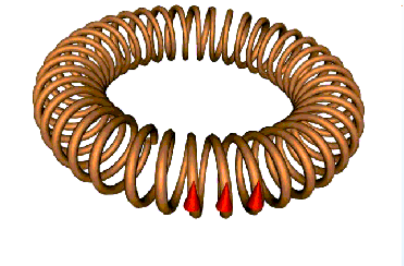
作闭合环路 *abcda*,环路内的电流代数和为：

$$\sum I = n\,\overline{ab}\,I$$

$$\therefore \oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \int_a^b \vec{B}\cdot d\vec{l}$$

$$= B\,\overline{\cancel{a}b} = \mu_0 \sum I = \mu_0 n\,\overline{\cancel{a}b}\,I \qquad B = \mu_0 n I$$

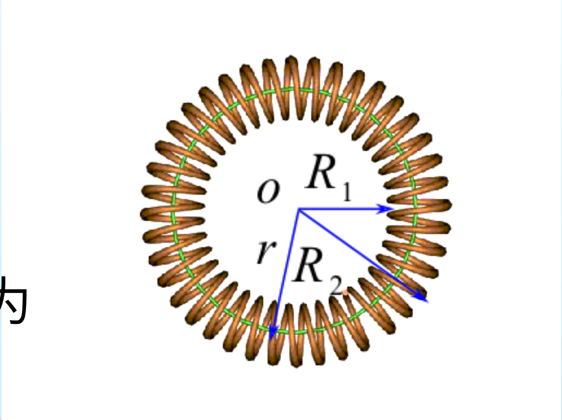
例3：一环形载流螺线管，匝数为 N，内径为 R_1，外径为 R_2，通有电流 I，求管内磁感应强度。



解：在管内作环路半径为 r，

环路内电流代数和为

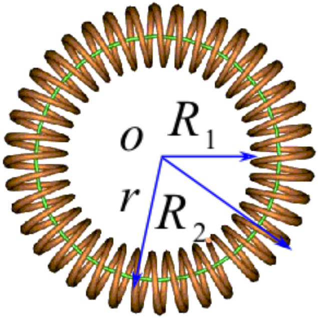
$$\sum I = NI$$



$$\oint_L \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 \sum I$$

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

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



当 $r >> (R2 - R1)$ 时

$$\frac{N}{2\pi r} = n$$ 为沿轴向线圈密度；

$$B = \mu_0 nI$$ 与直螺管的结论类似。

在电流附近有磁介质的情况下，应该使用介质的环路定律。

有磁介质时的安培环路定律：引入磁场强度H

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

H称为磁场强度，其安培环路定律。

$$\oint \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \sum I_c$$

H与B的关系：

$$\vec{\mathbf{H}} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

这里μr是相对磁导率，μ是介质的磁导率