第 四 周

第15章　电流和磁场

§15.3，　§15.5，　§15.6，　§15.7，
§15.9，　§15.10(一般了解)

作业：P285　15-3，15-5，15-8，
*　　　　　　15-10，15-11，15-14

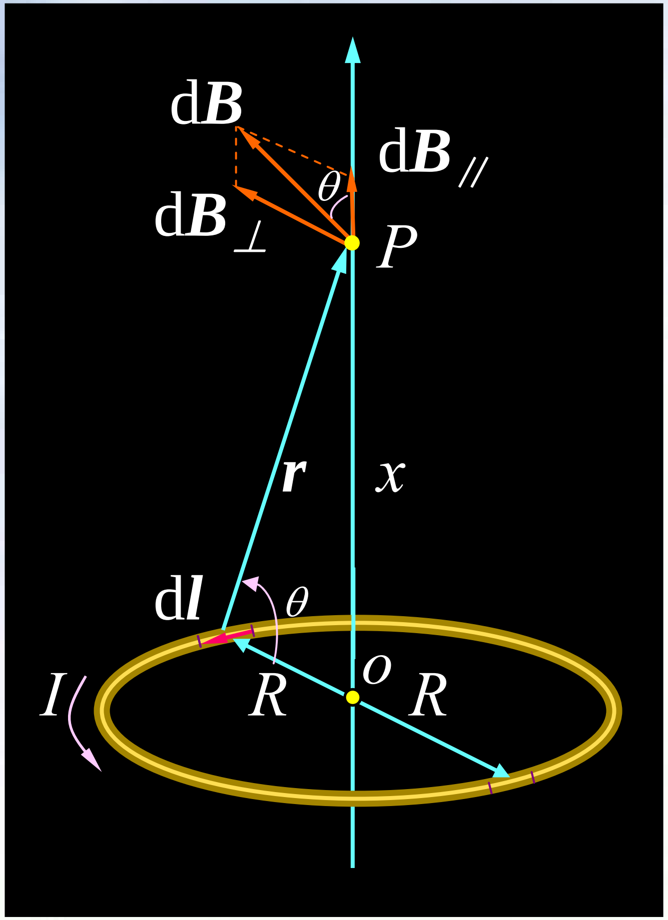
2. 载流圆线圈轴线上的磁场

设圆形线圈半径R，通电流I，计算轴线上P点处的磁感应强度。

电流源d$\boldsymbol{l}$，在P点产生的d$\boldsymbol{B}$为：

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

d$\boldsymbol{B}$可分解为d$\boldsymbol{B}_{//}$和 d$\boldsymbol{B}_{\perp}$



$d\boldsymbol{B}_{\perp}$ 分量相互抵消，$d\boldsymbol{B}_{//}$ 相互加强：

$$B = \int \mathrm{d}B_{//} = \int \mathrm{d}B\cos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$ 代入上式得：

$$B = \int \mathrm{d}B_{//} = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 IR}{4\pi(R^2 + x^2)^{3/2}} \mathrm{d}l = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

B的方向沿OP轴，与电流方向成右螺旋关系。

讨论两特殊点的情况：

①在圆心O处，x=0， 则： $B(0)=\dfrac{\mu_0 I}{2R}$

若圆线圈密绕N匝，则： $\boxed{B(0)=\dfrac{\mu_0 IN}{2R}}$

②在轴线上远离圆线圈（x>>R）：

$$\boxed{B=\frac{\mu_0 IR^2}{2x^3}=\frac{\mu_0 IS}{2\pi x^3}}$$

上式中$S=\pi R^2$为圆线圈的面积。

载流线圈的磁矩　磁偶极子

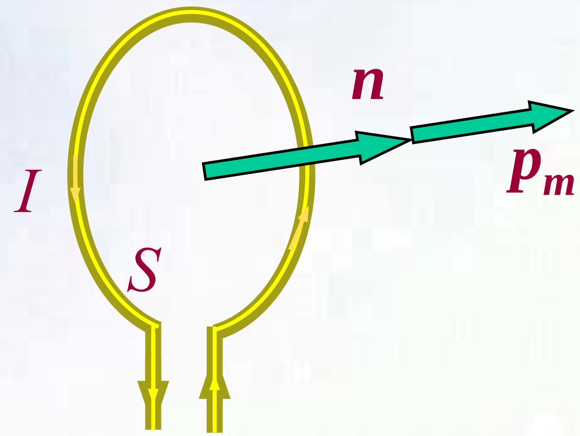
引入磁矩 $\boldsymbol{p}_m$来描述载流线圈的磁性质：

$$\boldsymbol{p}_m = NIS\boldsymbol{n}$$

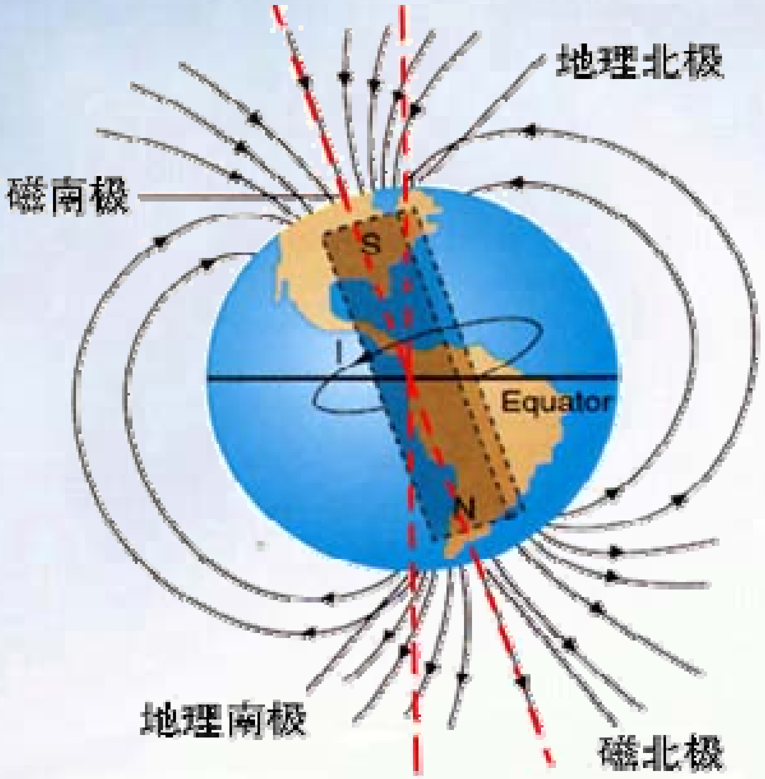
$\boldsymbol{n}$的方向与电流环绕方向呈右手螺旋关系。

引入磁矩概念后，在轴线上远离载流圆线圈的磁场为：

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \vec{p}_m}{2\pi x^3}$$



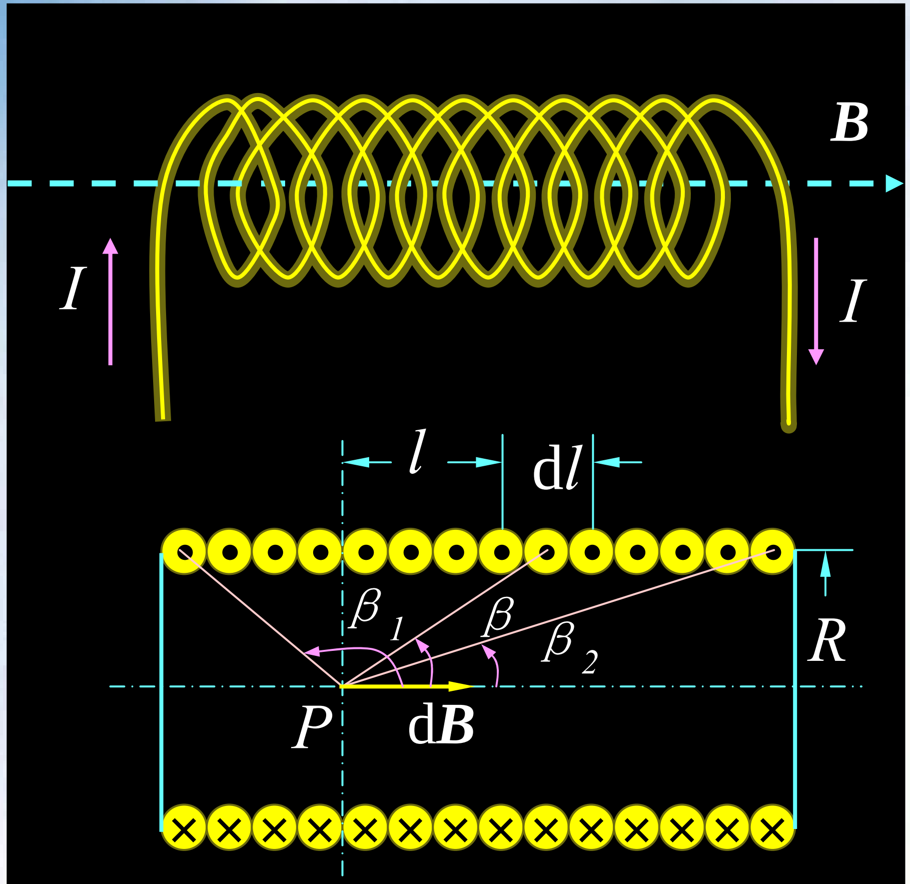
场点到场源的距离远大于线圈尺寸的载流线圈—磁偶极子。一般地说，转动的带电球体等效于一个圆形电流，在远处可看成磁偶极子的场，如地球的磁场。



3. 载流直螺线管内部的磁场

计算螺线管内轴线上P点的磁感应强度。在螺线管上取$\mathrm{d}l$，相当于电流强度$In\mathrm{d}l$的圆电流，它在P点产生的磁感应强度的大小为：

$$\mathrm{d}B = \frac{\mu_0 I R^2 n \mathrm{d}l}{2(R^2 + l^2)^{3/2}}$$

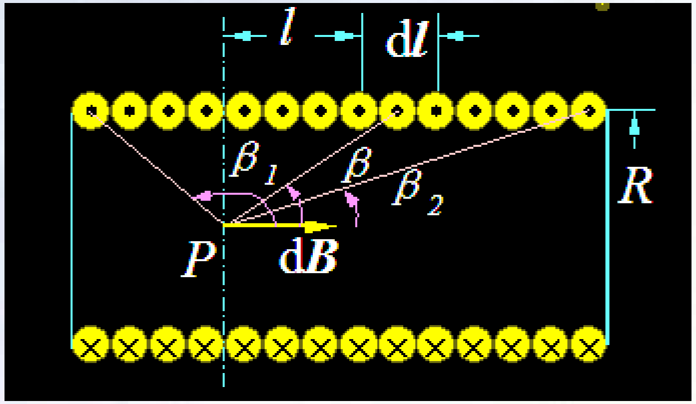


载流直螺线管

引入变量 β，它是P点到dl 所引矢量与轴线间的夹角，由图可知：

$$l = R\cot\beta \qquad \mathrm{d}l = -R\csc^2\beta\mathrm{d}\beta$$

$$R^2 + l^2 = R^2\csc^2\beta$$



代入上式得：

$$\mathrm{d}B = -\frac{\mu_0}{2}nI\sin\beta\mathrm{d}\beta$$

各圆电流在P点产生的**dB**方向相同。

整个螺线管在P点产生的磁感应强度为：

$$B=\int dB=-\frac{\mu_0}{2}nI\int_{\beta_1}^{\beta_2}\sin\beta\mathrm{d}\beta=\frac{\mu_0}{2}nI(\cos\beta_2-\cos\beta_1)$$

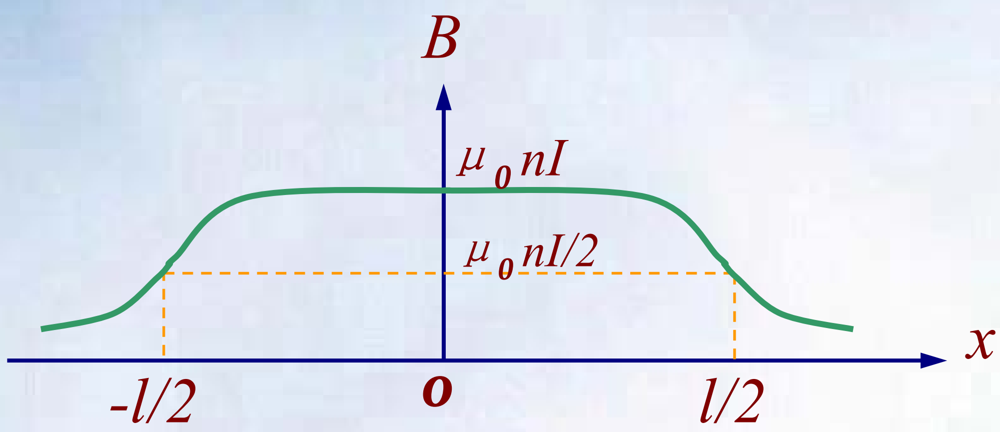
讨论两种特殊情况：

①L>>R，此时 $\beta_1\to\pi$， $\beta_2\to 0$， 于是有：

$$\boxed{B=\mu_0 nI}$$

②长直螺线管上的两端点， $\beta_1=\pi/2$， $\beta_2\to 0$
或 $\beta_2=\pi/2$， $\beta_1\to 0$，则：

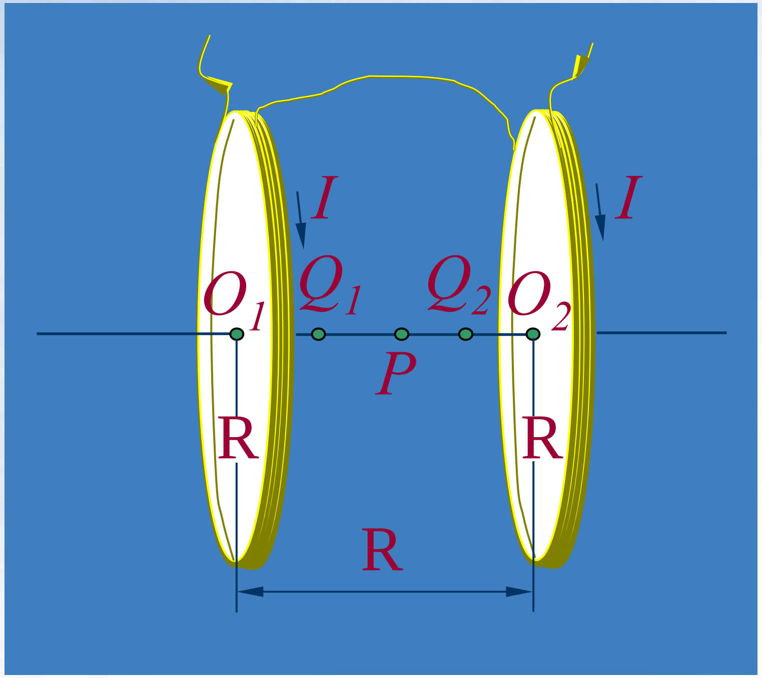
$$B = \frac{1}{2}\mu_0 nI$$



直螺线管轴线上的磁场分布

亥姆霍兹(Helmholtz 1838-1894)线圈。

设两线圈半径R，间距也为R，各有N匝，电流为I。两线圈沿轴线上各点的磁场方向均向右。在圆心O_1、O_2处磁感应强度相等，大小为：



$$B_O = \frac{\mu_0 NI}{2R} + \frac{\mu_0 NIR^2}{2(R^2 + R^2)^{3/2}} =$$

$$\frac{\mu_0 NI}{2R}\left(1 + \frac{1}{2\sqrt{2}}\right) = 0.677\frac{\mu_0 NI}{R}$$

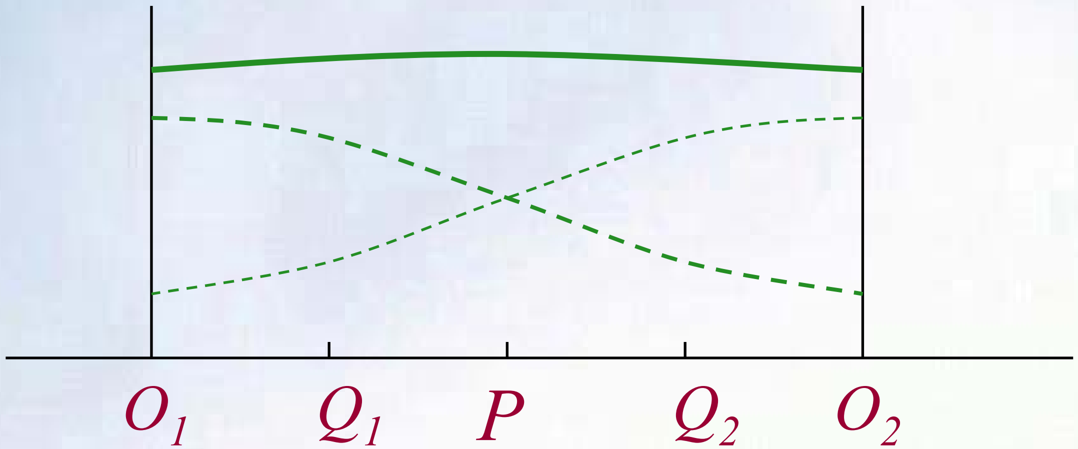
两线圈轴线上中点P处的磁感应强度：

$$B_P = 2\frac{\mu_0 NIR^2}{2[R^2 + (\frac{R}{2})^2]^{3/2}} = 0.716\frac{\mu_0 NI}{R}$$

在P点两侧的Q_1、Q_2两点，磁感应强度为：

$$B_Q = \frac{\mu_0 NIR^2}{2[R^2 + (\frac{R}{4})^2]^{3/2}} + \frac{\mu_0 NIR^2}{2[R^2 + (\frac{3R}{4})^2]^{3/2}} = 0.712\frac{\mu_0 NI}{R}$$

由此可见，轴线上的磁场基本均匀。

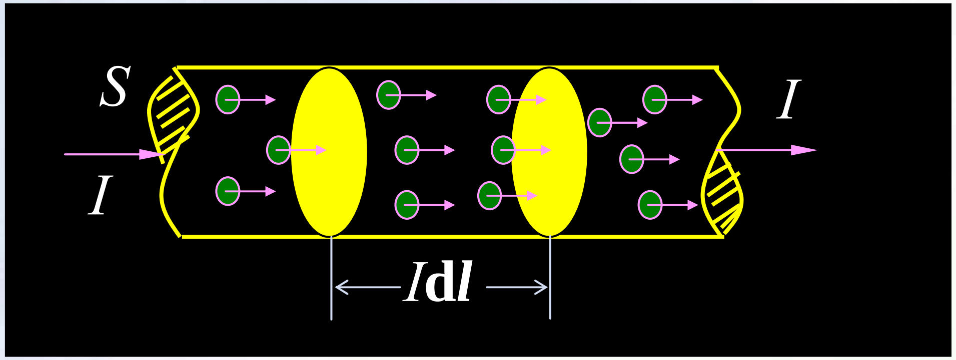


三、运动电荷的磁场 &

电荷的定向运动形成电流，可从毕奥—萨伐尔定律导出运动电荷的磁场表达式：

设带电粒子数密度n，每电荷的带电量q，漂移速度$\boldsymbol{v}$，电流元$I\mathbf{d}\mathbf{l}$，导体的截面S，则：

$$I = qnvS$$

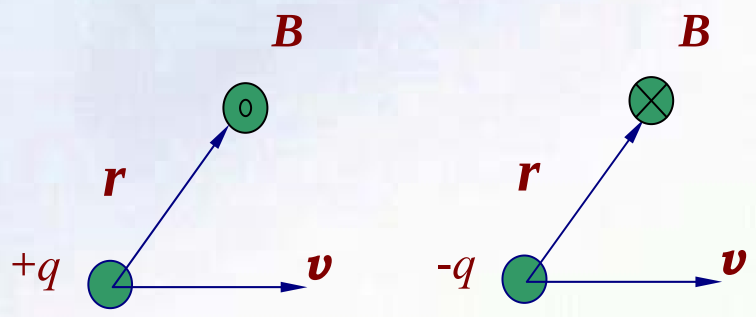


电流元***Idl***内有带电粒子数 $dN = nSdl$

设**d*B***为这些运动粒子所激发的磁场，则每个粒子所激发的磁场为***B*** (υ**d*l*** = ***υ***dl)：

$$\vec{B} = \frac{d\vec{B}}{dN} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\times\vec{r}}{r^3}\right)/dN = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\vec{\upsilon}\times\vec{r}}{r^3}$$

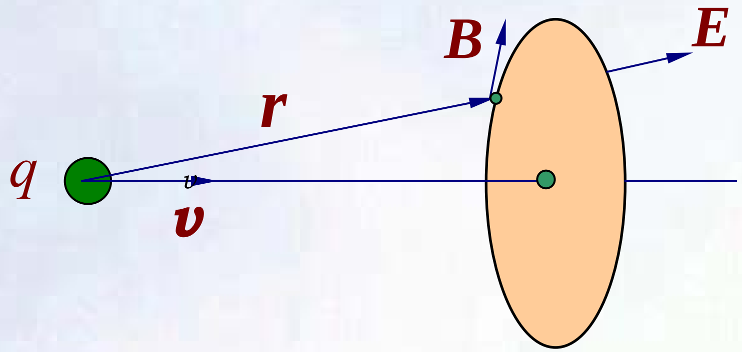
关于磁场的方向，见下图：



当运动电荷速率v接近光速时上式不成立。

运动电荷同时要激发电场，当速度v远小于光速时，电场强度仍表示为：

$$\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^3}\vec{r}$$



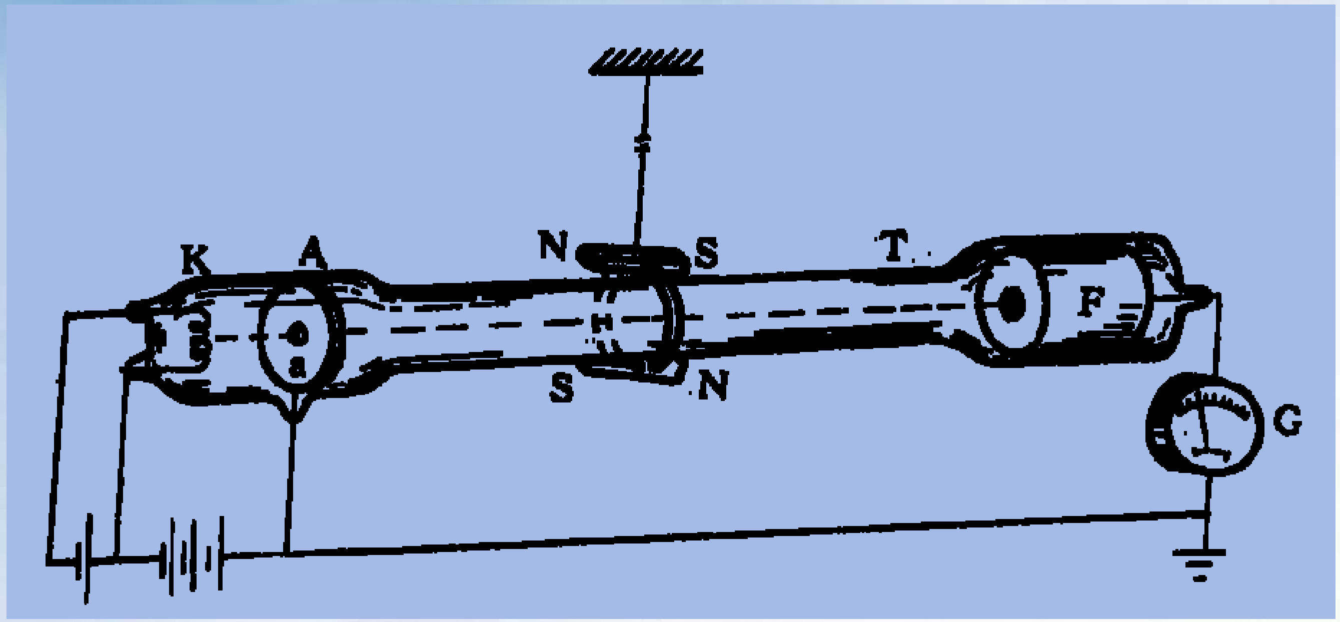
运动正电荷激发的电场和磁场

将此式代入上式：

$$\vec{B}=\mu_0\varepsilon_0\vec{v}\times\vec{E}$$

说明运动电荷激发的电场和磁场紧密相关。

运动电荷激发磁场的实验验证：



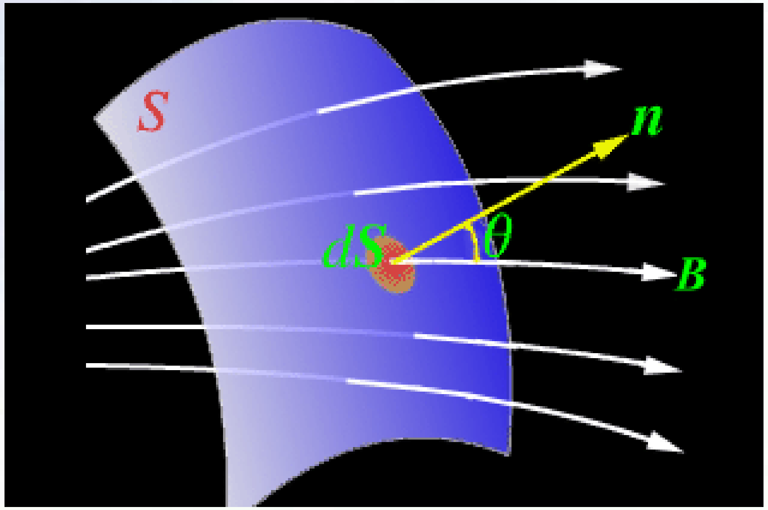
测定电子射线磁场的实验装置简图

§12-3 磁场的高斯定律 安培环路定律

一、磁通量

磁通量：通过一给定曲面的总磁感应线数，用 Φ 表示：

如图，dS与磁感应强度B的夹角为 θ，则通过dS的磁通量为：



$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$　或　$d\Phi = B\cos\theta dS$

通过有限曲面S的磁通量为：

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

磁 通 量 的 单 位 $T \cdot m^2$， 叫 做 韦 伯 Wb 。$1T=1Wb/m^2$。

二、磁场中的高斯定律

磁感应线是无始无终的闭合线，从一闭合面穿进的磁力线，必从另一处穿出。

对闭合曲面，取外法线方向为正，磁力线从闭合曲面穿出磁通量为正，穿入为负，则对闭合曲面：

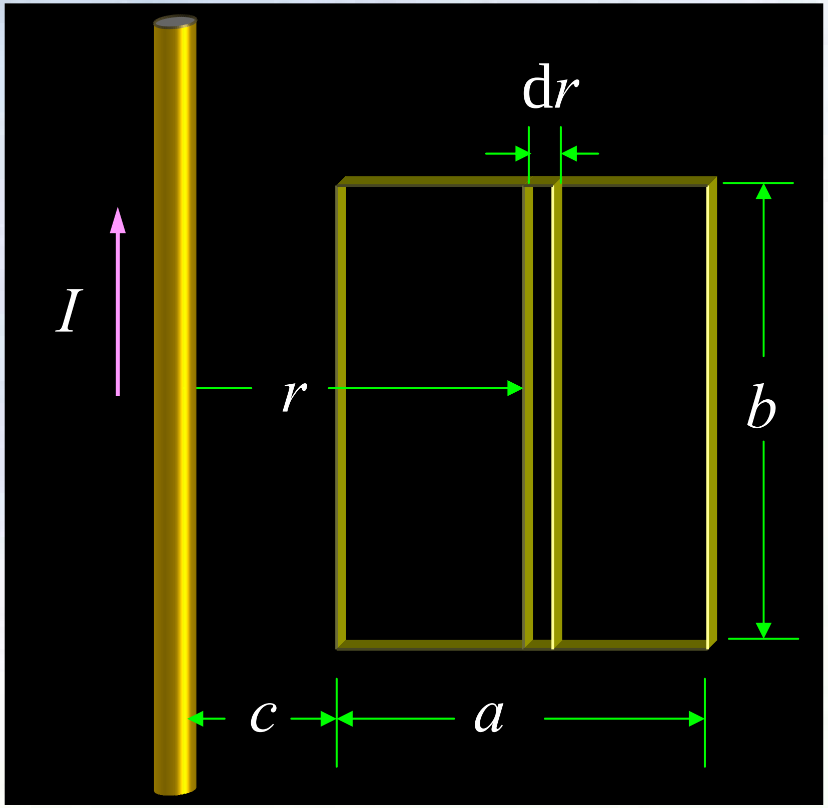
$$\oiint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0$$

此式称为磁场中的高斯定理，可从毕奥—萨伐尔定律出发严格证明。

磁场中的高斯定理反映了无源场的特性，电场中的高斯定理反映了有源场的特性。

例题 ：

一无限长直导线通有电流 I，其近旁平行放置一矩形线框，求穿过矩形线框的磁通量？



解： 无限长载流直导线磁感应强度为

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

在距导线r处取面元bdr，则通过此面元的磁通量为：

$$d\Phi_m = B dS = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} b dr$$

则通过整个矩形线框的总磁通量为：

$$\Phi_m = \int d\Phi_m = \int_c^{a+c} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} b dr = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln\left(\frac{a+c}{c}\right)$$

三、安培环路定律

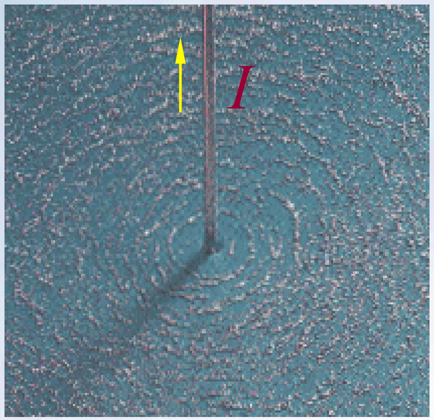
我们在研究静电场时，得到静电场的环流为零；但对磁场而言，由于磁感应线是闭合的，**B**的环流不为零。

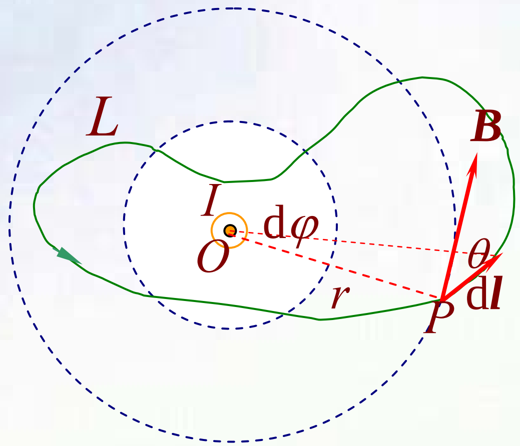
下面以无限长直导线为例来研究磁感应强度的环流问题：

在垂直于导线的平面内做一闭合曲线，线上任一点的磁感应强度：

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

I 为导线电流，见图：



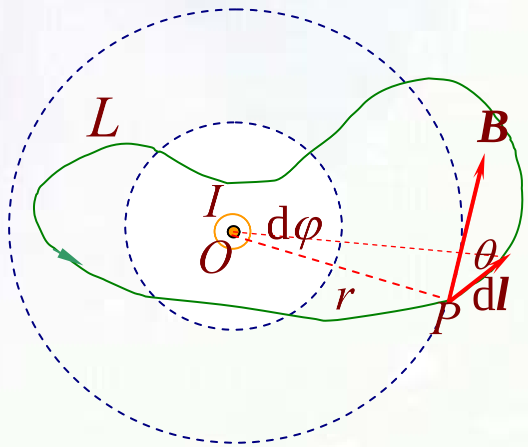


图中 $dl\cos\theta = rd\varphi$

按如图的绕行方向**B**矢量沿闭合曲线的环路积分为:

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \oint_L B\cos\theta dl = \oint_L Brd\varphi = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r} rd\varphi$$

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



当L不在垂直于导线的平面，将d**l**分解为d$\mathbf{l}_\perp$和d$\mathbf{l}_{//}$，所以:

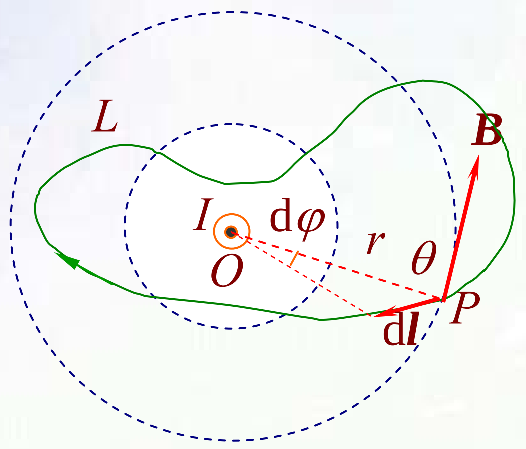
$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \oint_L \vec{B}\cdot(d\vec{l}_\perp + d\vec{l}_{//}) =$$

$$=\oint_L B\cos 90^0 dl_{\perp}+\oint_L B\cos\theta dl_{//}$$

$$=0+\oint_L Brd\varphi=\frac{\mu_0 I}{2\pi}\int_0^{2\pi}d\varphi=\mu_0 I$$

此结果与上式相同。

如果其他条件不变，只
改变绕行方向，则：



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_L B\cos\theta dl = \oint_L Brd\varphi$$

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

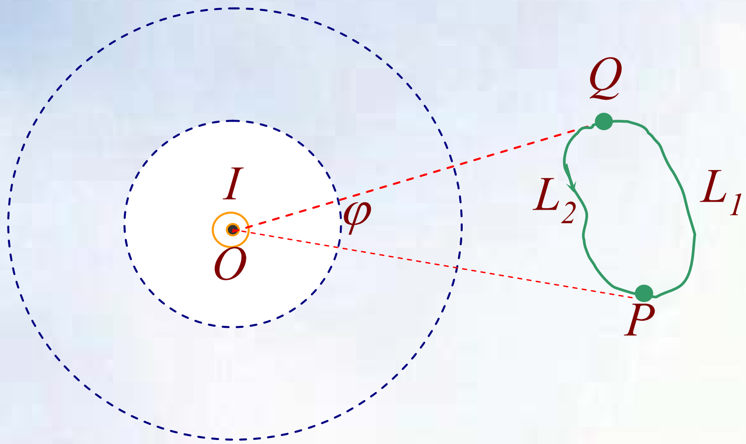
把上式的负号放入电流中，即 $-\mu_0 I = \mu_0(-I)$

可以认为对闭合曲线的绕行方向而言，电流取负值。

闭合曲线不包围电流时，**B**矢量的环流为:

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \int_{L_1} \vec{B}\cdot d\vec{l} + \int_{L_2} \vec{B}\cdot d\vec{l}$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\int_{L_1} d\varphi + \int_{L_2} d\varphi\right) = 0$$



闭合曲线不包围电流时，**B**矢量的环流为零。

在一般情况下：

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

上式称为安培环路定理。表述如下：

在磁场中，沿任何闭合曲线，***B***矢量的线积分（或***B***矢量的环流），等于真空的磁导率μ_0 乘以穿过这个闭合曲线为边界所张任意曲面的各恒定电流的代数和。

环路定律中电流的正负值由右手螺旋法则决定。

环路定律中电流I只包括穿过环路的电流，但定理中的磁场是环路内外的电流共同决定的。

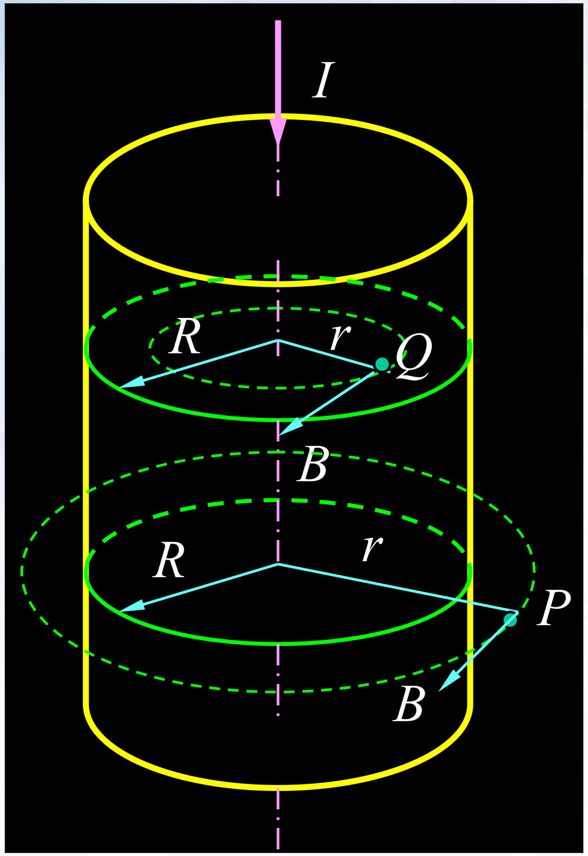
B矢量的环流不为零，表明磁场不是有势场。

四、安培环路定理的应用

1. 长直圆柱形载流导线内外的磁场

设：圆柱截面半径为R，电流 I 沿轴流动，过P点（或Q点）取半径为r的磁感应线为积分回路，则$\boldsymbol{B}$矢量的环流为：

$$\oint \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = B2\pi r$$



当$r>R$（图中P点），由环路定律得：

$$B2\pi r=\mu_0 I$$ 即：$$\boxed{B=\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r}}$$

当$r<R$（图中Q点），可考虑两种情形：

①电流分布在圆柱形导体表面：

$$B2\pi r=0$$ 即：$$B=0$$

②电流均匀分布在圆柱形导体的截面上时，穿过积分回路的电流应是：

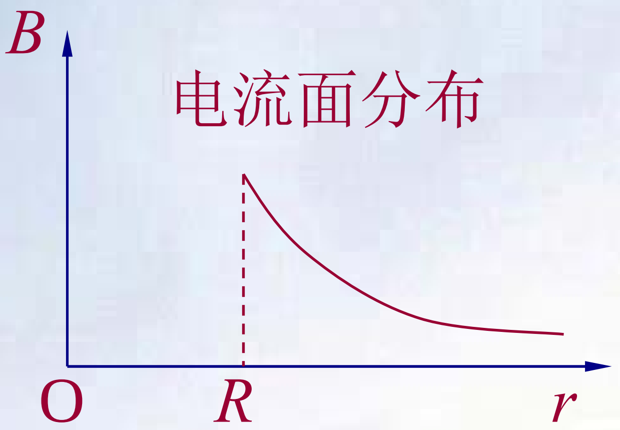
$$\frac{I}{\pi R^2}\pi r^2$$

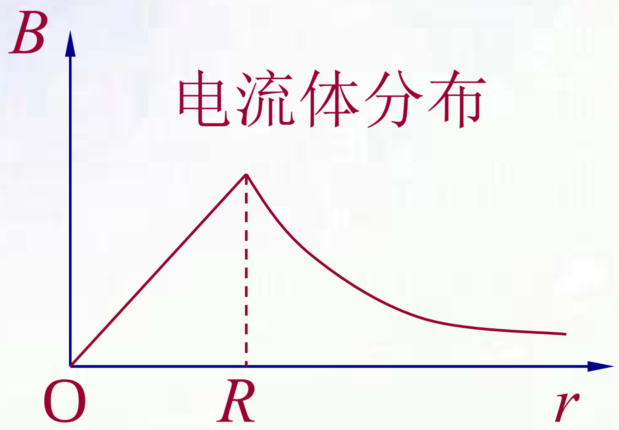
所以，应用安培环路定律得：

$$\oint \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = B2\pi r = \mu_0 \frac{I}{\pi R^2}\pi r^2$$

由此可得Q点的磁感应强度为：

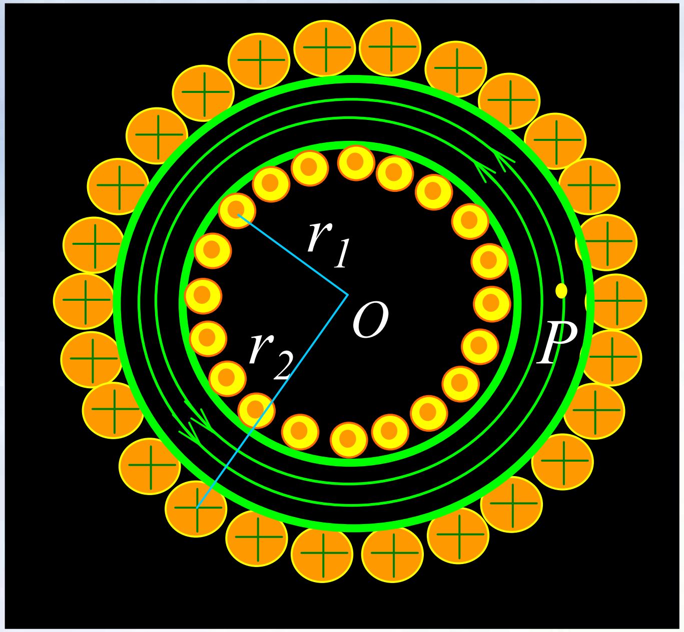
$$\boxed{B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{Ir}{R^2}}$$





2. 载流螺绕环内的磁场

考虑到对称性，环内磁场的磁感应线都是同心圆，选择通过管内某点P的磁感应线L作为积分环路，则**B**矢量的环流：



$$\oint_L \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = B\oint_L \mathrm{d}l = B2\pi r$$

设环上线圈的总匝数为N，电流为I，由环路定理：

$$B2\pi r = \mu_0 NI$$

计算得P点的磁感应强度为：

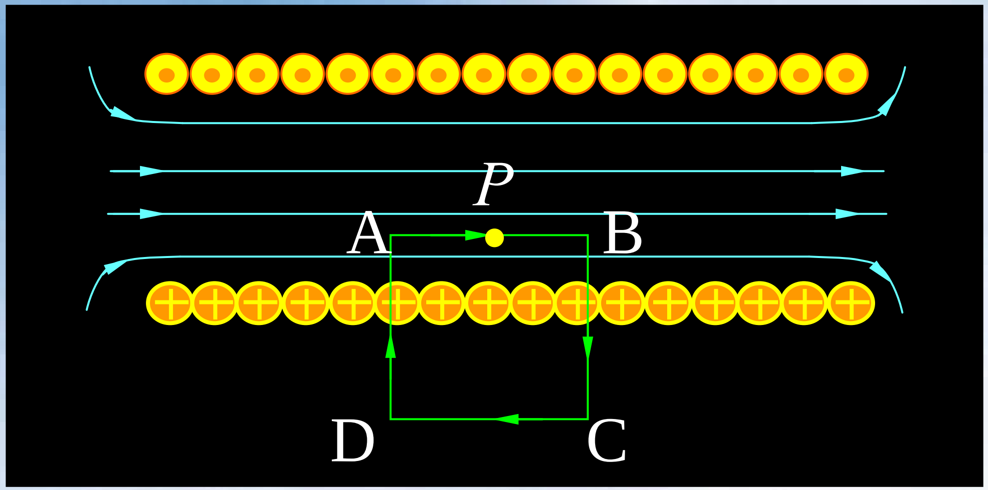
$$\boxed{B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}}$$

当r_2- r_1远小于环的平均半径r时，令l=2 π r，则：

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 NI}{l} = \mu_0 nI}$$

式中n为螺绕环单位长度上的匝数，**B**的方向与电流流向成右手螺旋关系。

3. 载流长直螺线管内的磁场



设密绕长螺线管，通电流I，计算管内任一点P处的磁感应强度。过*P*点做闭合回路ABCDA，CD段及BC和DA在管外部分 ***B***=0， BC和DA在管内部分，虽然***B***≠0，但d***l***与***B***垂直，**d*l*·*B***=0。所以***B***矢量沿ABCDA 的线积分为:

$$\oint_L \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AB} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{BC} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{CD} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

$$+\int_{DA} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AB} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = B\cdot AB$$

设螺线管长为l共有N匝，则单位长度上有$N/l=n$匝线圈。回路ABCDA包围的总电流为ABnI，由安培环路定律：

$$\oint_L \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = B\cdot AB = \mu_0 ABnI$$

所以：

$$\boxed{B = \mu_0 nI}$$

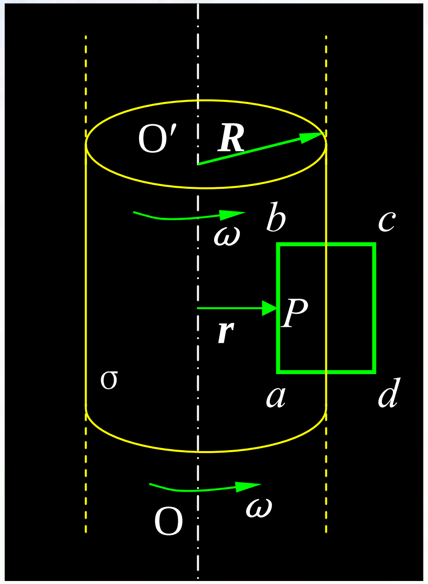
或：
$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

由于矩形回路是任取的，AB段在管内任何位置时上式均成立，故磁场在管内均匀分布。

例题2：

如图所示，一半径为R的无限长非导体圆筒均匀带电，电荷面密度为σ。若受到外力矩的作用，圆筒从静止开始以匀角加速度β绕OO′轴转动，试求t时刻圆筒内距转轴r处的磁感应强度$\boldsymbol{B}$的大小。

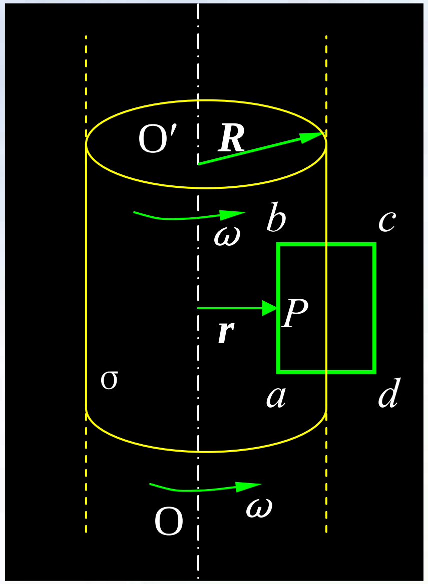
解：圆筒绕OO′轴转动相当于长直密绕螺线管，磁场分布具有轴对称性。对密绕螺线管，管内为均匀磁场，管外磁场强度为零。过管内场点P做一矩形积分回路$abcda$。



由安培环路定理，有：

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \int_a^b B\cos 0^0 dl + \int_b^c B\cos 90^0 dl + \int_c^d 0dl$$

$$+\int_d^a B\cos 90^0 dl = B\overline{ab} = \mu_0 \sum I_i$$



分析系统可知，积分回路所包围的电流代数和为：

$$\sum I_i = \sigma(\omega R\Delta t\cdot \overline{ab})/\Delta t$$

$$= \sigma(\omega R\cdot \overline{ab})$$

由题意可知

$$\omega = \omega_0 + \beta t,\quad t = 0\text{时},\quad \omega_0 = 0$$

则：$$\omega = \beta t$$

所以 $$\sum I_i = \sigma(\beta t R \cdot \overline{ab})$$

因此 $$B\overline{ab} = \mu_0 \sum I_i = \mu_0 \sigma(\beta t R \cdot \overline{ab})$$

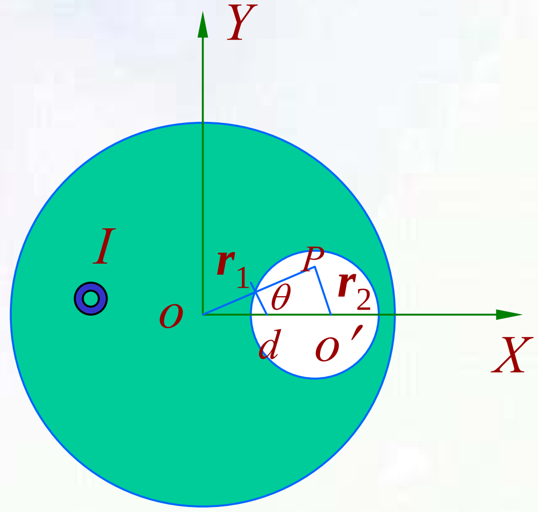
即得 $$\boxed{B = \mu_0 \sigma \beta t R}$$

B的方向根据 σ 的情况决定。由结果分析可知，圆筒内部的磁场**B**与r无关，磁场均匀分布。

例题3：

一半径为R的无限长圆柱形导体，在其中距其轴线为d 处挖去一半径为r ($2r<R$）、轴线与大圆柱形导体平行的小圆柱，形成圆柱形空腔，导体中沿轴均匀通有电流I，如图(a)所示。试求空腔内的磁感应强度$\mathbf{B}$。

解：取坐标系XOY，如图(a)所示。由于空腔的存在，不能直接用安培环路定理求解。小圆柱空腔表示其中通过的电流等于0，这可以等效成空腔中同时存在两个等值反向的电流，因此可采用补偿法求解。将空腔部分等效成同时存在着电流密度为j和($-j$)的电流，



图(a)

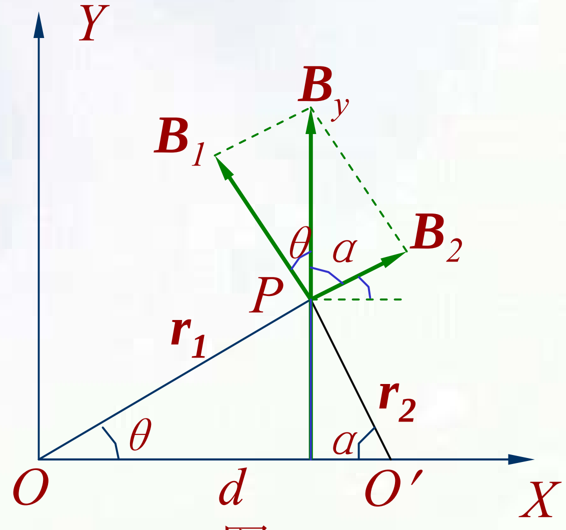
空腔中任意一点的磁场为通有电流密度 j 半径为R的大圆柱体，和通有反向电流密度$(-j)$半径为r的小圆柱体产生的磁场的矢量和，即

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

取空腔中任意一点P， $\overline{OP} = r_1$， $\overline{O'P} = r_2$

由于半径为R和半径为r的长圆柱体产生的磁场具有轴对称性，故可根据安培环路定理，有

$$B_1 = \frac{\mu_0 j \pi r_1^2}{2\pi r_1} = \frac{\mu_0 r_1}{2} j$$



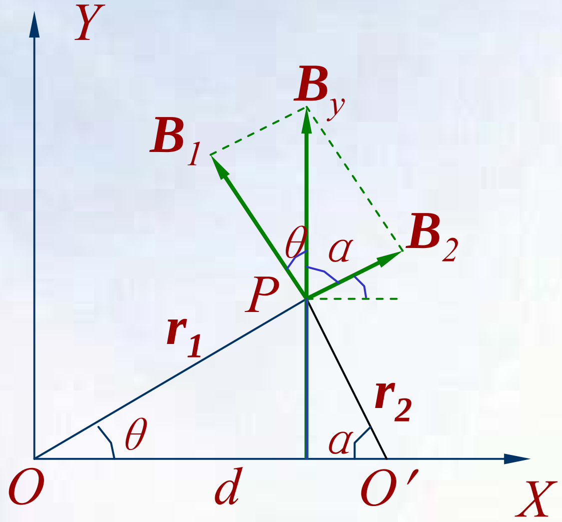
图(b)

上式中 $j=\dfrac{I}{\pi(R^2-r^2)}$ 所以

$$B_1=\frac{\mu_0 I r_1}{2\pi(R^2-r^2)}$$

同理可得

$$B_2=\frac{\mu_0 r_2}{2}j=\frac{\mu_0 I r_2}{2\pi(R^2-r^2)}$$



图(b)

$\boldsymbol{B}_1$和$\boldsymbol{B}_2$方向根据右手法则确定，如图(b)所示。

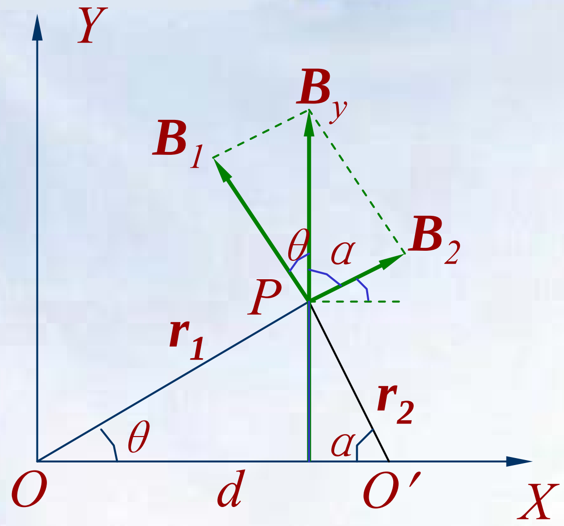
将$\boldsymbol{B}_1$， $\boldsymbol{B}_2$在X，Y轴上投影，其分量为：

$$B_{1x}=-B_1\sin\theta=-\frac{\mu_0}{2}jr_1\sin\theta$$

$$B_{1y}=B_1\cos\theta=\frac{\mu_0}{2}jr_1\cos\theta$$

$$B_{2x}=B_2\sin\alpha=\frac{\mu_0}{2}jr_2\sin\alpha$$

$$B_{2y}=B_2\cos\alpha=\frac{\mu_0}{2}jr_2\cos\alpha$$



图(b)

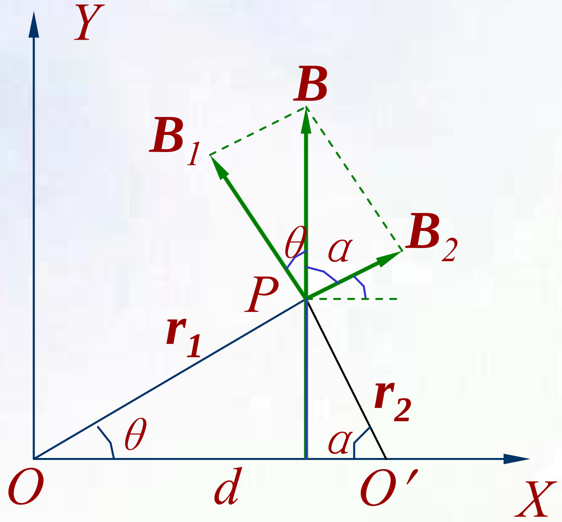
P点的磁感应强度**B**的两个正交分量为:

$$B_x=B_{1x}+B_{2x}=\frac{\mu_0 j}{2}(r_2\sin\alpha-r_1\sin\theta)=0$$

$$B_y = B_{1y} + B_{2y} = \frac{\mu_0 j}{2}(r_2\cos\alpha + r_1\cos\theta) = \frac{\mu_0 j}{2}d$$

结果表明，P点的磁感应强度$\mathbf{B}$的大小为一常量，方向垂直于OO′之间的连线d，即在Y轴正方向，所以空腔中的磁场为匀强磁场：

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I d}{2\pi(R^2 - r^2)}}$$

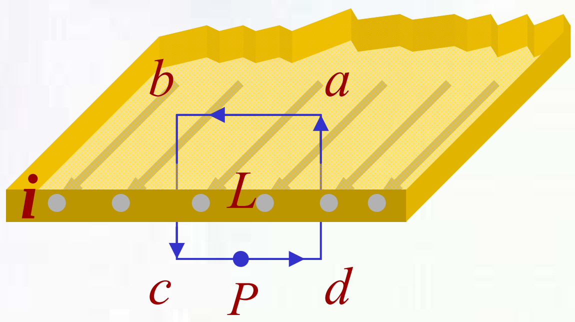


图(c)

例题4：

无穷大平行平面上有均匀分布的面电流，面电流密度为$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{i}$的方向为电流流动的方向（i为垂直于电流方向上单位长度的电流强度），求此平面外的磁感应强度B的大小。

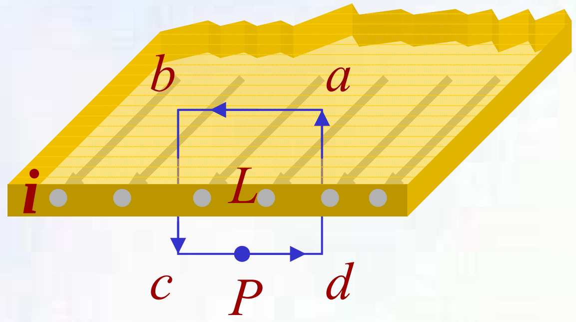
解：由于平板无穷大，所以平板外任一点的磁感应强度$\boldsymbol{B}$都与平板平行。在垂直于$\boldsymbol{i}$的一环路abcda，由安培环路定理：



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

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

$$= \int_a^b \vec{B}\cdot d\vec{l} + \int_c^d \vec{B}\cdot d\vec{l} = 2BL$$



又：

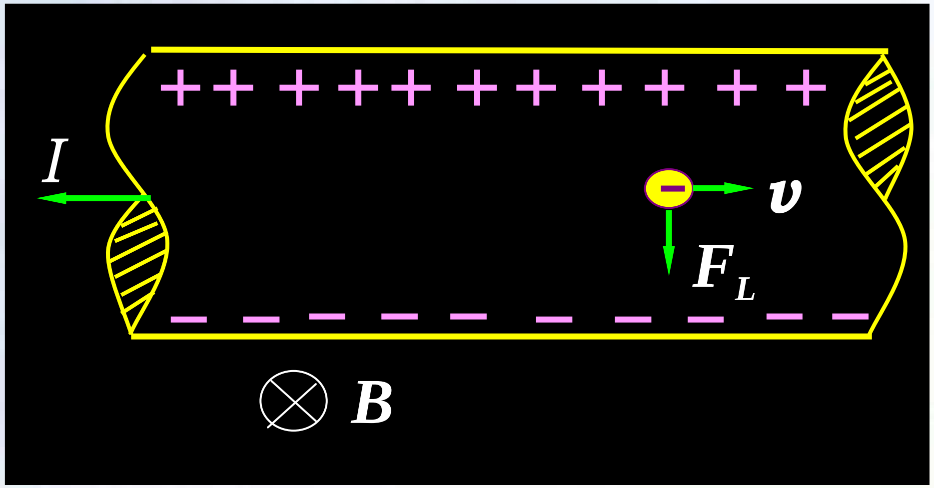
$$\mu_0 \sum I = \mu_0 iL，\text{所以} \quad B = \frac{\mu_0 i}{2}$$

§12-4 磁场对电流的作用

一、安培力

实验指出，载流导线在磁场中将受到力的作用，称这种力为安培力。

在载流导线上任取一电流元，所在处的磁感应强度为$\boldsymbol{B}$，方向垂直纸面向里。



电流元中的电子受洛伦兹力：

$$\vec{F}_L = -e\vec{\upsilon} \times \vec{B}$$

设电子数密度为n，电流元Id$\boldsymbol{l}$中的电子数为：dN=nSdl，则电流元所受的安培力：

$$d\vec{F} = dN\vec{F}_L = -dNe\vec{\upsilon} \times \vec{B}$$

$$= -nSdle\vec{\upsilon} \times \vec{B} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$

式中$I=enS\upsilon$，上式称为安培定律。对于任意形状的载流导线，安培定律可写成：

$$\vec{F} = \int d\vec{F} = \int_L I\mathrm{d}\vec{l} \times \vec{B}$$

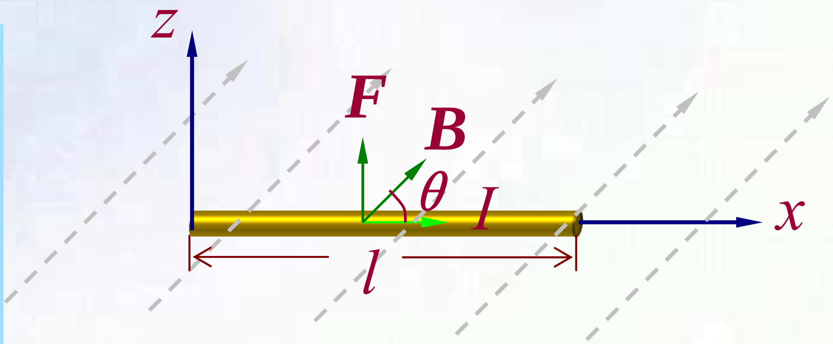
例题5：

求均匀磁场中一段长直导线所受的安培力？

设导线长l，电流I，置于磁感应强度$\boldsymbol{B}$中，导线与$\boldsymbol{B}$的夹角为 θ，见下图，长直导线各段受力都朝Z轴：

$$F=\int dF=\int_0^l I\mathrm{d}lB\sin\theta$$

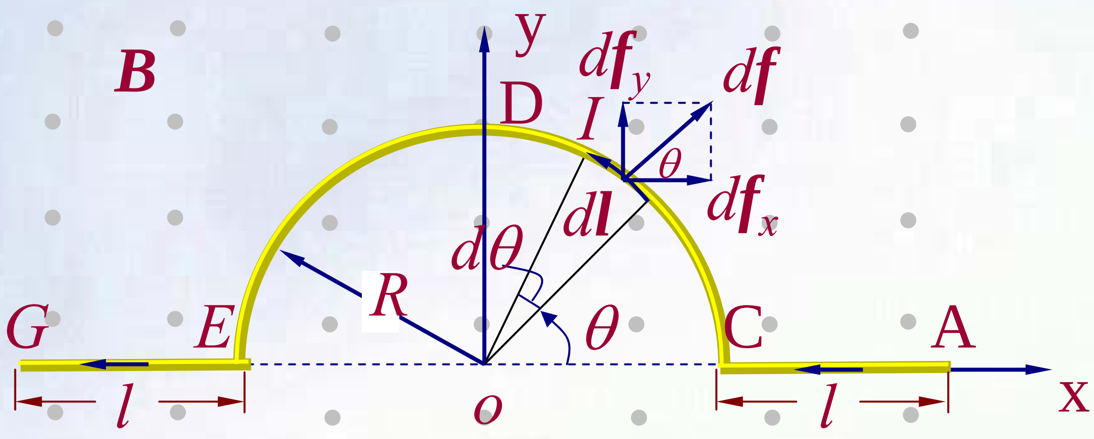
$$=IB\sin\theta\int_0^l \mathrm{d}l=IlB\sin\theta$$



例题6：

如图所示，一根弯曲导线通有电流I，弯曲部分是半径为R的半圆，两端直线部分的长度均为l，载流导线位于与匀强磁场垂直的平面内，求作用在导线上的安培力。

解：取坐标xoy，由安培定律，两端直线受力：



$$F_{AC} = F_{EG} = IlB\vec{j}$$

在圆弧形导线上取电流元：*Idl*，此电流元所受安培力为：$d\vec{f} = Id\vec{l} \times \vec{B}$ 此力可分解为 $d\boldsymbol{f}_x$ 和 $d\boldsymbol{f}_y$，由对称性可知，各电流元水平分量之和为零，而垂直分量为：

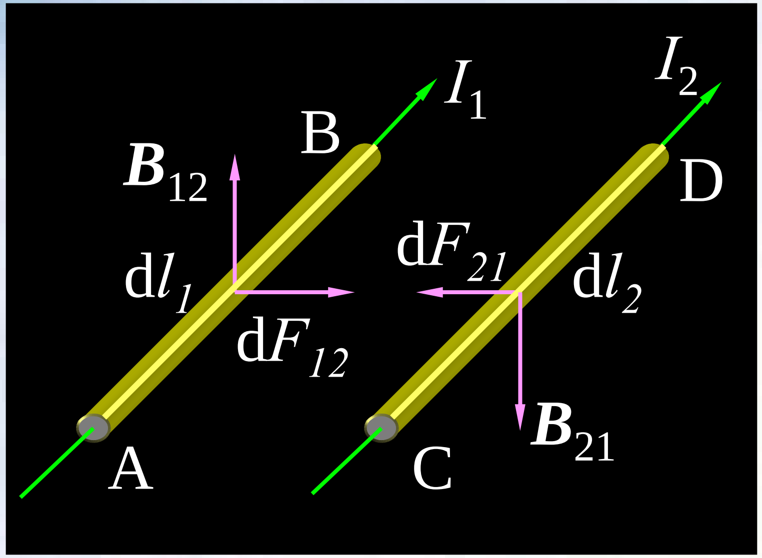
$$F_{CE} = \int df_y = \int_0^{\pi} (IBRd\theta)\sin\theta = 2IBR$$

作用在整个导线上的力：

$$\vec{F} = \vec{F}_{AC} + \vec{F}_{EG} + \vec{F}_{CE} = 2(l+R)IB\vec{j}$$

二、平行长直载流导线间的相互作用力

相距为d的无限长直导线，电流分别为I_1、I_2，导线2上的电流元受力为：



$$dF_{21} = B_{21} I_2 dl_2 \sin\theta$$

$$B_{21} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1}{d} \qquad \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$dF_{21} = B_{21} I_2 dl_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} dl_2$$

单位长度受力:

$$\frac{dF_{21}}{dl_2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} = \frac{dF_{12}}{dl_1}$$

安培定义：真空中相距为1m的无限长直细导线，载有相等的电流，若每米导线上受力正好为2×10^{-7}N，则导线内电流定义为1A。