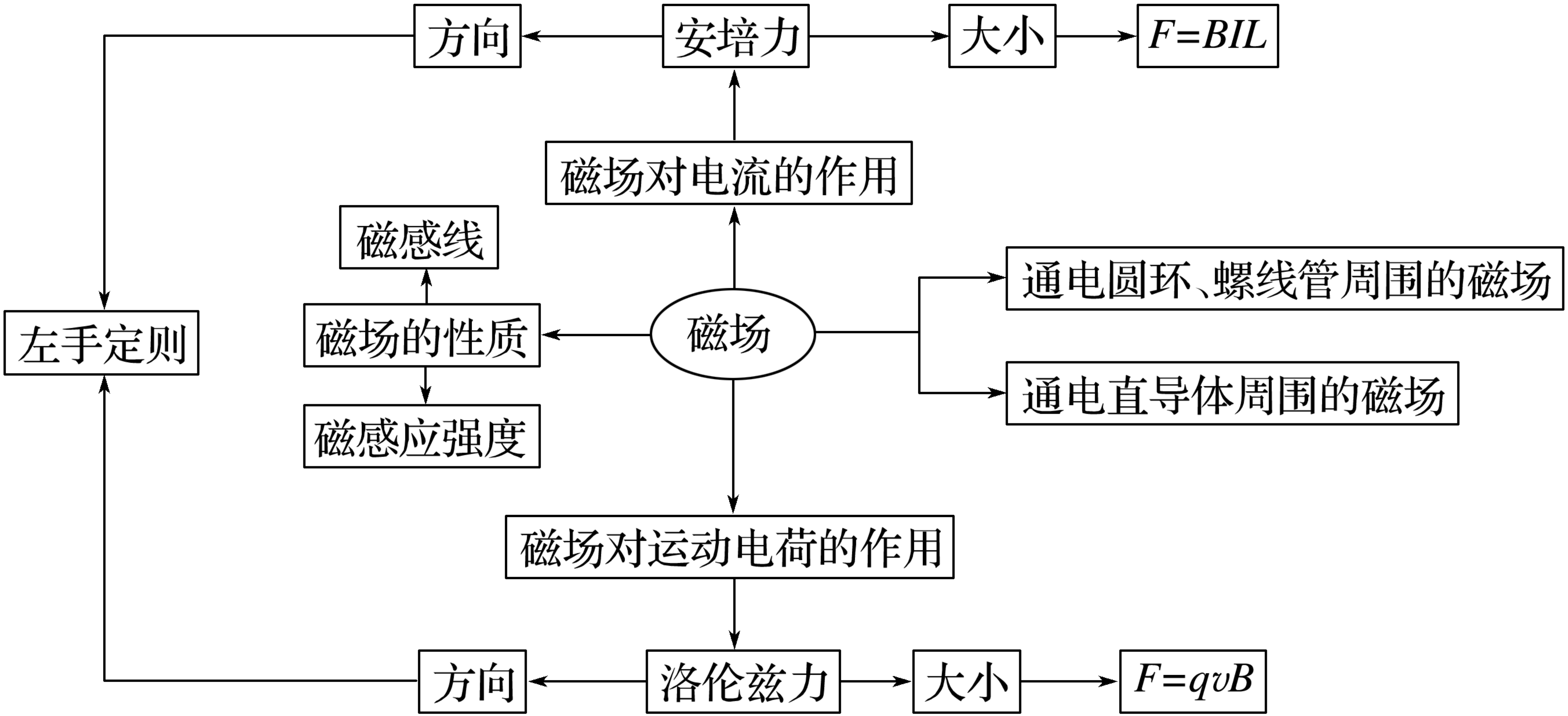
知识专题

专题8　磁场对电流和运动电荷的作用

网络构建


方向
安培力
大小
$F=BIL$
磁场对电流的作用
磁感线
通电圆环、螺线管周围的磁场
左手定则
磁场的性质
磁场
通电直导体周围的磁场
磁感应强度
磁场对运动电荷的作用
方向
洛伦兹力
大小
$F=qvB$

考题一　磁场对通电导体的作用力

考题二　带电粒子在磁场中的运动

考题三　带电粒子在相邻多个磁场中的运动

知识精讲

1. 安培力大小的计算公式：$F=BIL\sin\theta$(其中 θ 为 B 与 I 之间的夹角).

(1) 若磁场方向和电流方向垂直：$F=BIL$.

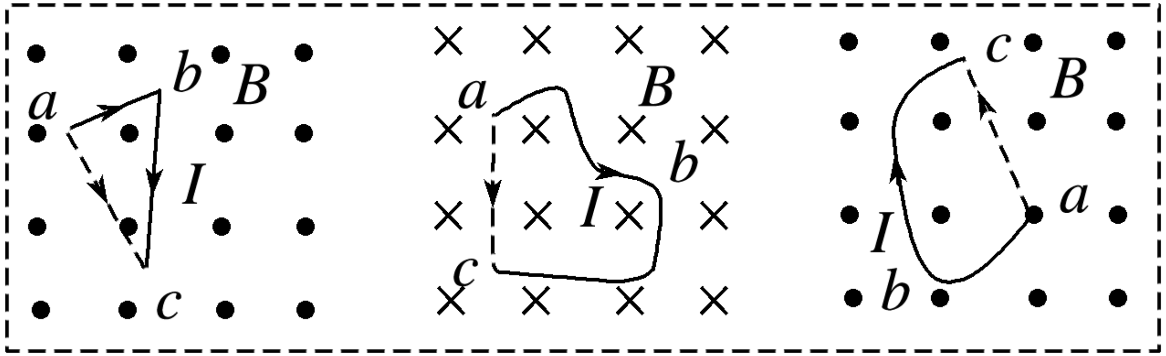
(2) 若磁场方向和电流方向平行：$F=0$.

2. 安培力方向的判断：左手定则.

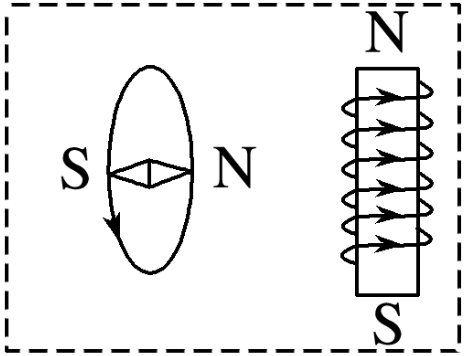
方向特点：垂直于磁感线和通电导线确定的平面.

3. 两个常用的等效模型

(1) 变曲为直：图 1 甲所示通电导线，在计算安培力的大小和判断方向时均可等效为 ac 直线电流 .



甲



乙

图 1

(2) 化电为磁：环形电流可等效为小磁针，通电螺线管可等效为条形磁铁，如图乙 .

4. 求解磁场中导体棒运动问题的方法

(1) 分析：正确地对导体棒进行受力分析，应特别注意通电导体棒受到的安培力的方向，安培力与导体棒和磁感应强度组成的平面垂直 .

(2) 作图：必要时将立体图的受力分析图转化为平面受力分析图，即画出与导体棒垂直的平面内的受力分析图 .

(3) 求解：根据平衡条件或牛顿第二定律或动能定理列式分析求解 .

例 1　如图 2 所示，某同学用玻璃皿在中心放一个圆柱形电极接电源的负极，沿边缘放一个圆环形电极接电源的正极做“旋转的液体的实验”，若蹄形磁铁两极间正对部分的磁场视为匀强磁场，磁感应强度为 $B = 0.1\ \mathrm{T}$，玻璃皿的横截面的半径为 $a = 0.05\ \mathrm{m}$，电源的电动势为 $E = 3\ \mathrm{V}$，内阻 $r = 0.1\ \Omega$，限流电阻 $R_0 = 4.9\ \Omega$，玻璃皿中两电极间液体的等效电阻为 $R = 0.9\ \Omega$，闭合开关后当液体旋转时电压表的示数?为 1.5

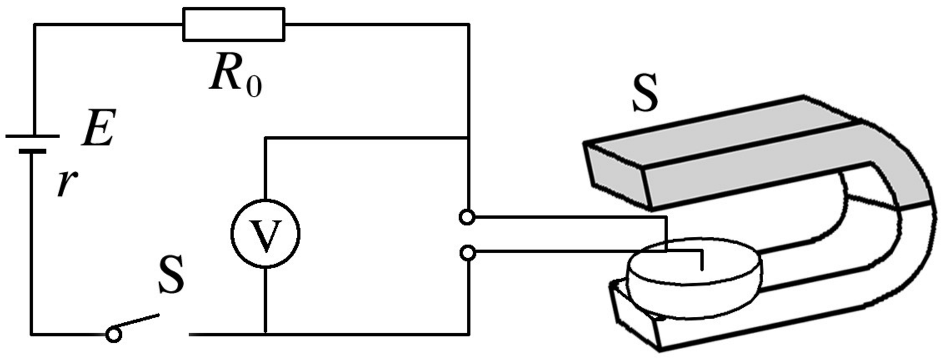


图 2

A. 由上往下看，液体做顺时针旋转

B. 液体所受的安培力大小为 1.5×10^{-4} N

C. 闭合开关 10 s，液体具有的动能是 4.5 J

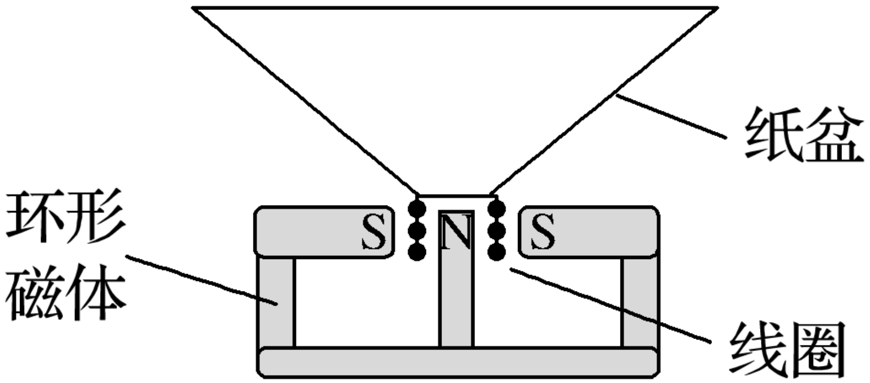
√D. 闭合开关后，液体电热功率为 0.081 W

[变式训练]

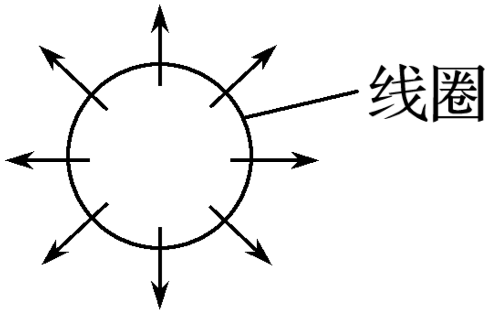
1.(2016·海南单科·8) 如图 3(a) 所示，扬声器中有一线圈处于磁场中，当音频电流信号通过线圈时，线圈带动纸盆振动，发出声音．俯视图 (b) 表示处于辐射状磁场中的线圈 (线圈平面即纸面) 磁场方向如图中箭头所示，在图 (b) 中

?

(　　)



(a)



(b)

图 3

A. 当电流沿顺时针方向时，线圈所受安培力的方向垂直于纸面向里

√B. 当电流沿顺时针方向时，线圈所受安培力的方向垂直于纸面向外

√C. 当电流沿逆时针方向时，线圈所受安培力的方向垂直于纸面向里

D. 当电流沿逆时针方向时，线圈所受安培力的方向垂直于纸面向外

解析　将环形导线分割成无限个小段，每一小段看成直导线，则根据左手定则，当电流顺时针时，导线的安培力垂直纸面向外，故选项 A 错误，选项 B 正确；

当电流逆时针时，根据左手定则可以知道安培力垂直纸面向里，故选项 C 正确，选项 D 错误.

2. 如图 4 所示，某区域内有垂直纸面向里的匀强磁场，磁感应强度大小为 B. 一正方形刚性线圈，边长为 L ，匝数为 n ，线圈平面与磁场方向垂直，线圈一半在磁场内 . 某时刻，线圈中通过大小为 I 的电流，则此线圈所受安培力的大小为（ ? ）

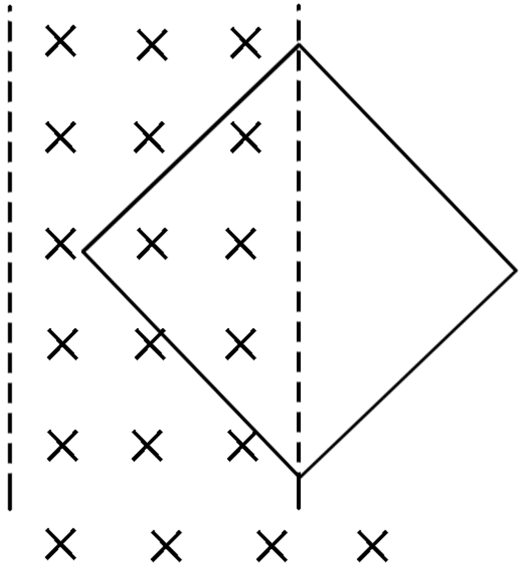


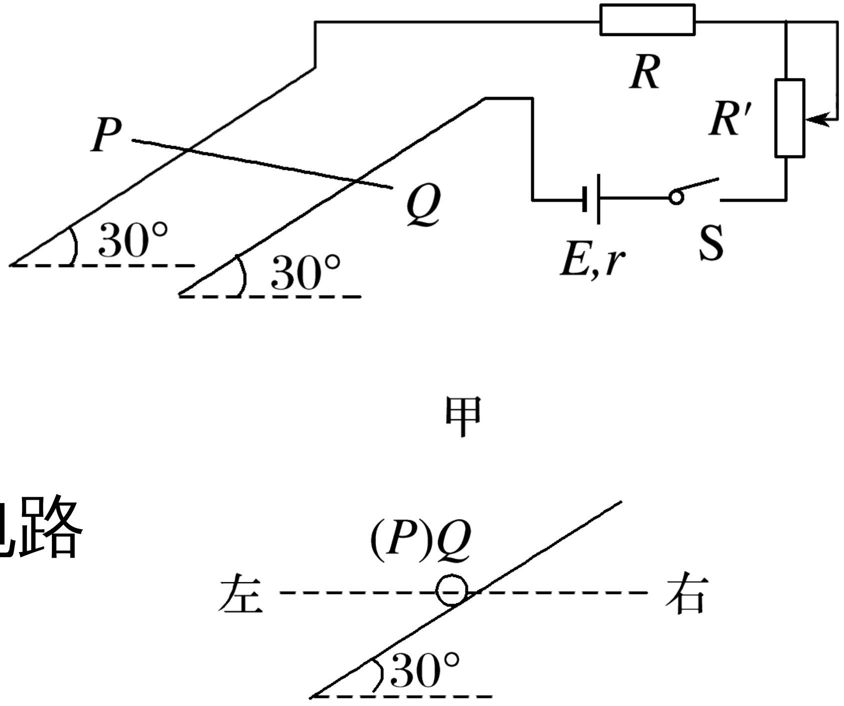
图 4

A. $\sqrt{2}BIL$ B. $\frac{1}{2}nBIL$

C. $nBIL$ D. $\sqrt{2}nBIL$ √

解析 线框的有效长度为 $L' = \sqrt{2}L$，故线圈受到的安培力为 $F = nBIL' = \sqrt{2}nBIL$，D 正确.

3. 如图 5 甲所示，两平行光滑导轨倾角为 30°，相距 10 cm，质量为 10 g 的直导线 PQ 水平放置在导轨上，从 Q 向 P 看到的侧视图如图乙所示．导轨上端与电路相连，电路中电源电动势为 12.5 V，内阻为 0.5 Ω，$R = 5\ \Omega$，R' 为滑动变阻器，其余电阻均不计．在
直导线的空间中充满磁感应强度大小为 1 T 的匀强磁场(图中未画出)，磁场方向可以改变，但始终保
垂直于直导线．若要保持直导线静止在导轨上，则电路中滑动变阻器连入电路电阻的极值取值情况及与之相对应的磁场方向是(?)



乙

图 5

A. 电阻的最小值为 12 Ω ，磁场方向水平向右

B. 电阻的最大值为 25 Ω ，磁场方向垂直斜面向左上方

C. 电阻的最小值为 7 Ω ，磁场方向水平向左

√D. 电阻的最大值为 19.5 Ω ，磁场方向垂直斜面向右下方

考题二　带电粒子在磁场中的运动

方法指导

1. 必须掌握的几个公式

常用公式

$$qvB=m\frac{v^2}{r}$$

$$E_k=\frac{1}{2}mv^2=\frac{q^2B^2r^2}{2m}$$

$$I=\frac{q}{T}=\frac{q^2B}{2\pi m}$$

$$r=\frac{mv}{qB}=\frac{\sqrt{2mE_k}}{qB}$$

$$T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{2\pi m}{qB}$$

$$f=\frac{1}{T}=\frac{qB}{2\pi m}$$

2. 轨迹、圆心和半径是根本，数学知识是保障

(1) 画轨迹：根据题意，画出带电粒子在匀强磁场中的运动轨迹 .

(2) 圆心的确定：轨迹圆心 O 总是位于入射点 A 和出射点 B 所受洛伦兹力 $F_{洛}$作用线的交点上或 AB 弦的中垂线 OO' 与任一个 $F_{洛}$作用线的交点上，如图 6 所示 .

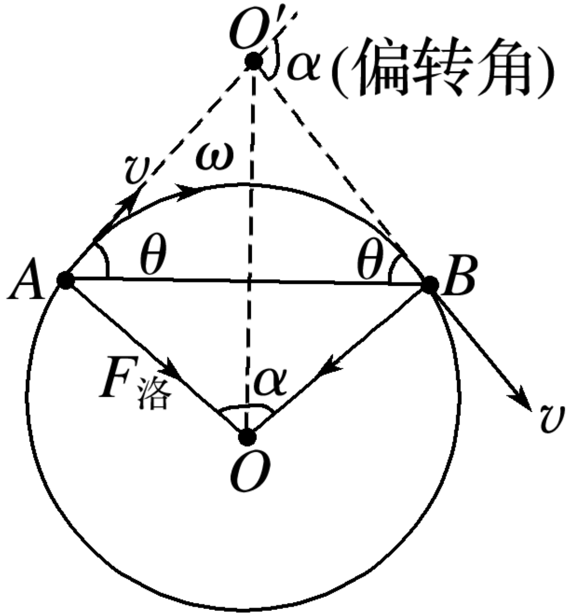


图 6

(3)半径的确定 :利用平面几何关系 ,求出轨迹圆的半径 ,如 $r=\frac{AB}{2\sin\frac{\alpha}{2}}=\frac{AB}{2\sin\theta}$;

然后再与半径公式 $r=\frac{mv}{qB}$联系起来求解.

(4)时间的确定 : $t=\frac{\alpha}{2\pi}\cdot T=\frac{\alpha m}{qB}$或 $t=\frac{s}{v}=\frac{\alpha R}{v}$.

(5) 注意圆周运动中的对称规律：如从同一边界射入的粒子，从同一边界射出时，速度方向与边界的夹角相等；在圆形磁场区域内，沿径向射入的粒子，必沿径向射出 .

典例剖析

例 2 (2016·海南单科·14) 如图 7，A、C 两点分别位于 x 轴和 y 轴上，$\angle OCA=30°$，OA 的长度为 L. 在$\triangle OCA$ 区域内有垂直于 xOy 平面向里的匀强磁场. 质量为 m、电荷量为 q 的带正电粒子，以平行于 y 轴的方向从 OA 边射入磁场. 已知粒子从某点射入时，恰好垂直于磁场，且粒子

在磁场中运动的时间为 t_0. 不计重力.

(1) 求磁场的磁感应强度的大小；

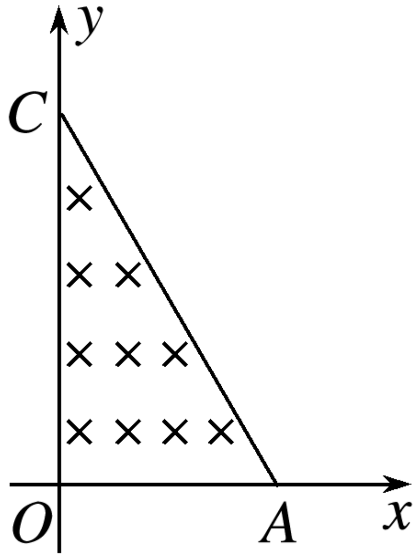


图 7

(2) 若粒子先后从两不同点以相同的速度射入磁场，恰好从 OC 边上的同一点射出磁场，求该粒子这两次在磁场中运动的时间之和；

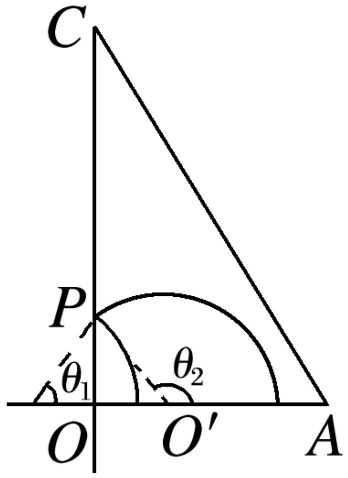
解析 设粒子从 OA 边两个不同位置射入磁场，能从 OC 边上的同一点 P 射出磁场，粒子在磁场中运动的轨迹如图 (a) 所示.

设两轨迹所对应的圆心角分别为 θ_1 和 θ_2.

由几何关系有：$\theta_1 = 180° - \theta_2$ ⑤

粒子两次在磁场中运动的时间分别为 t_1 与 t_2，

则 $t_1 + t_2 = \frac{T}{2} = 2t_0$ ⑥



(a)

答 案

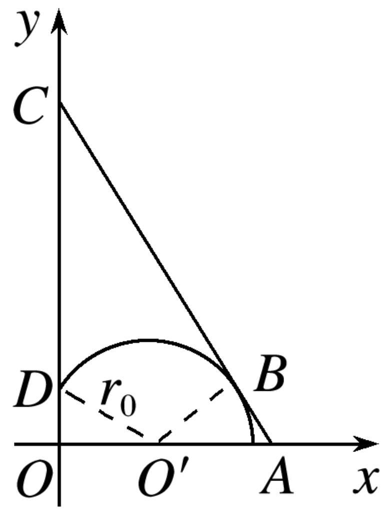
(3) 若粒子从某点射入磁场后，其运动轨迹与 AC 边相切，且在磁场内运动的时间为 $\frac{5}{3}t_0$，求粒子此次入射速度的大小.

解析 如图 (b)，由题给条件可知，该粒子在磁场区域中的轨迹圆弧对应的圆心角为为 150°. 设 O' 为圆弧的圆心，圆弧的半径为 r_0，圆弧与 AC 相切于 B 点，从 D 点射出磁场，由几何关系和题给条件可知，

此时有 $\angle OO'D = \angle BO'A = 30°$ ⑦

$$r_0\cos\angle OO'D + \frac{r_0}{\cos\angle BO'A} = L \quad ⑧$$

设粒子此次入射速度的大小为 v_0，由圆周运动规律 $v_0 = \frac{2\pi r_0}{T}$ ⑨



(b)

联立①⑦⑧⑨式得 $v_0 = \frac{\sqrt{3}\pi L}{7t_0}$.

答案 $\frac{\sqrt{3}\pi L}{7t_0}$

[变式训练]

4.(2016·全国甲卷·18) 一圆筒处于磁感应强度大小为 B 的匀强磁场中，磁场方向与筒的轴平行，筒的横截面如图 8 所示．图中直径 MN 的两端分别开有小孔，筒绕其中心轴以角速度 ω 顺时针转动．在该截面内，一带电粒子从小孔 M 射入筒内，射入时的运动方向与 MN 成 30° 角．当筒转过 90° 时，该粒子恰好从小孔 N 飞出圆筒．不计重力．若粒子在筒内未与筒壁发生碰撞，则带电粒子的比荷为(?)

A. $\dfrac{\omega}{3B}$ √

B. $\dfrac{\omega}{2B}$

C. $\dfrac{\omega}{B}$

D. $\dfrac{2\omega}{B}$

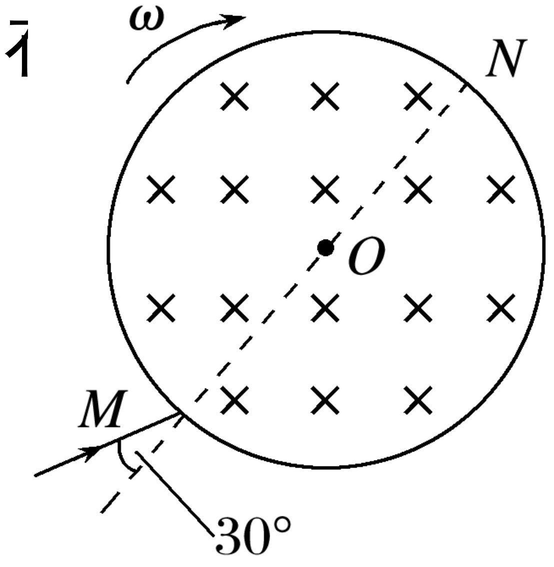


图 8

5.(2016· 四川理综 ·4) 如图 9 所示，正六边形 $abcdef$ 区域内有垂直于纸面的匀强磁场 . 一带正电的粒子从 f 点沿 fd 方向射入磁场区域，当速度大小为 v_b 时，从 b 点离开磁场，在磁场中运动的时间为 t_b ，当速度大小为 v_c 时，从 c 点离开磁场，在磁场中运动的时间为 t_c ，不计粒子重力，则(　　)

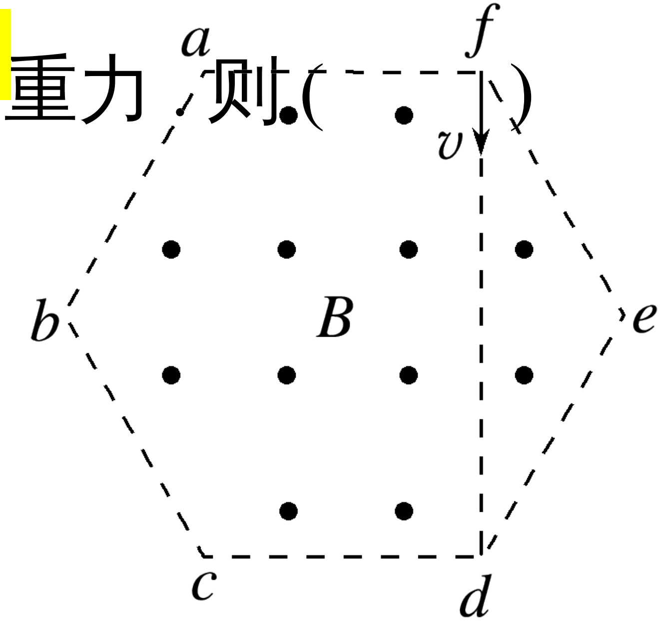


图 9

A. $v_b:v_c = 1:2$ ，$t_b:t_c = 2:1$

B. $v_b:v_c = 2:1$ ，$t_b:t_c = 1:2$

C. $v_b:v_c = 2:1$ ，$t_b:t_c = 2:1$

D. $v_b:v_c = 1:2$ ，$t_b:t_c = 1:2$

6.(2016· 全国丙卷 ·18) 平面 OM 和平面 ON 之间的夹角为 30°，其横截面 (纸面) 如图 10 所示，平面 OM 上方存在匀强磁场，磁感应强度大小为 B，方向垂直于纸面向外．一带电粒子的质量为 m，电荷量为 $q(q>0)$. 粒子沿纸面以大小为 v 的速度从 OM 的某点向左上方射入磁场，速度与 OM 成 30° 角．已知该粒子在磁场中的运动轨迹与 ON 只有一个交点，并从 OM 上另一点射出磁场．不计重力．粒子离开磁场的出射点到两平面交线 O 的距离为 ? (　　)

A. $\dfrac{mv}{2qB}$　　B. $\dfrac{\sqrt{3}mv}{qB}$　　C. $\dfrac{2mv}{qB}$　　√D. $\dfrac{4mv}{qB}$

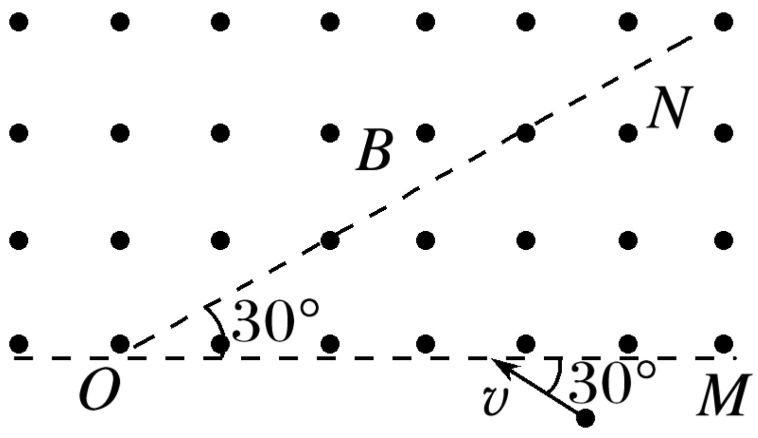


图 10

方法指导

找到半径是关键，边界分析是突破点

带电粒子在多磁场中的运动，一般是指带电粒子在两个相邻匀强磁场中的运动，解决此类问题的一般思路：

(1) 根据题中所给的条件，画出粒子在两磁场中做匀速圆周运动的轨迹；

(2) 根据画出的轨迹，找出粒子在两磁场中做圆周运动的圆心和半径；

(3) 适当添加辅助线，运用数学方法计算出粒子在两磁场中运动的轨迹半径(有时候还要找出圆心角)；

(4)结合粒子运动的半径公式 $r=\frac{mv}{Bq}$(或周期公式 $T=\frac{2\pi m}{qB}$)即可得出所求的物理量.

考生需要特别注意的是，分析出带电粒子在两磁场分界处的运动情况是解决此类问题的突破点.

典例剖析

例 3 如图 11 所示，为一磁约束装置的原理图．同心圆内存在有垂直圆平面的匀强磁场，同心圆圆心 O 与 xOy 平面坐标系原点重合．半径为 R_0 的圆形区域Ⅰ内有方向垂直 xOy 平面向里的匀强磁场 B_1．一束质量为 m 、电荷量为 q 、动能为 E_0 的带正电粒子从坐标为 $(0$ 、 $R_0)$ 的 A 点沿 y 轴负方向射入磁场区域Ⅰ，粒子全部经过 x 轴上的 P 点，方向沿 x 轴正方向．当在环形区域Ⅱ加上方向垂直于 xOy 平面的匀强磁场 B_2 时，上述粒子仍从 A 点沿 y 轴负方向射入区域Ⅰ，粒子恰好能够约束在环形区域内，且经过环形区域Ⅱ后能够从 Q 点沿半径方向射入区域Ⅰ，已知 OQ 与 x 轴正方向成 60° 角．不计重力和粒子间的相互作用．求：

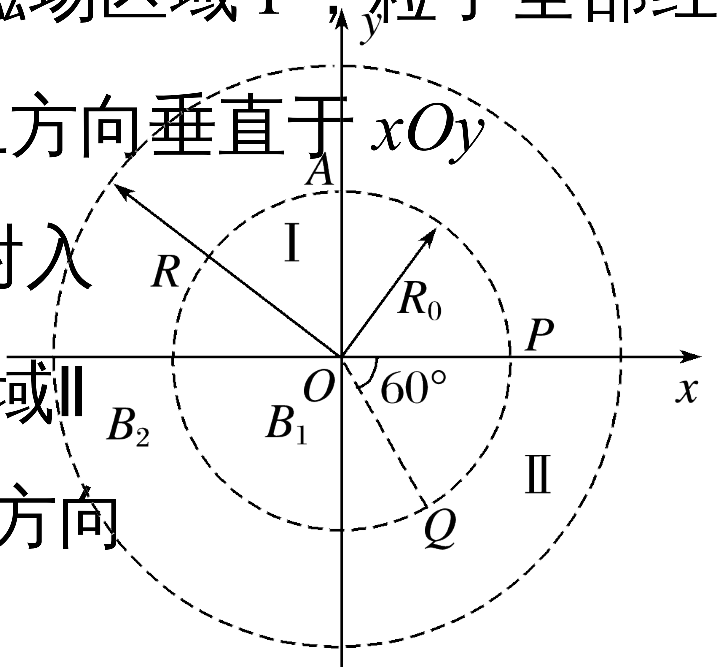


图 11

(1) 区域 I 中磁感应强度 B_1 的大小；

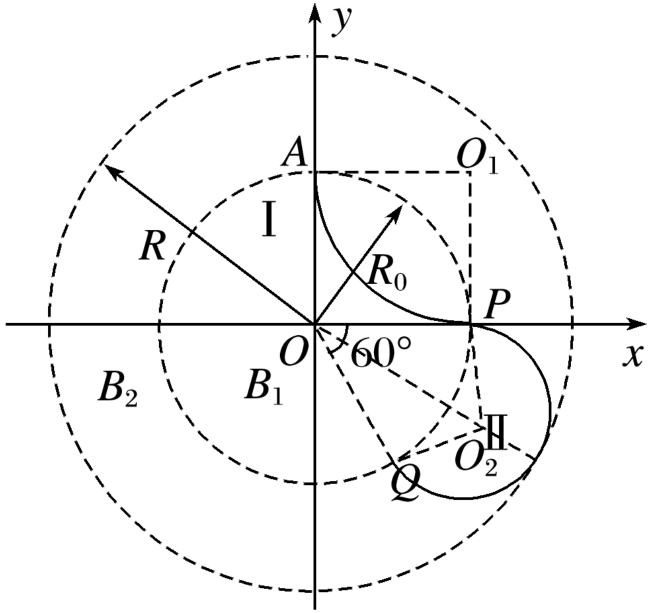
(2) 环形区域 II中 B_2 的大小、方向及环形外圆半径 R 的大小；

(3) 粒子从 A 点沿 y 轴负方向射入后至第一次到 Q 点的运动时间 .

[思维规范流程]

步骤1：在区域Ⅰ：画出轨迹，定圆心，由几何关系得出 r_1：

列 $F_{洛} = F_n$ 方程



(1) 在区域Ⅰ：$r_1 = R_0$ ①

$qvB_1 = \frac{mv^2}{r_1}$ ②

$E_0 = \frac{1}{2}mv^2$ ③

得 $B_1 = \frac{\sqrt{2mE_0}}{qR_0}$ ④

步骤 2 ：在区域 II: 画出轨迹定圆心，由几何关系得出 r_2 ：列 $F_洛 = F_n$ 方程： 由左手定则判断 B_2 方向． 由几何关系得出外圆半径 R.	(2) 在区域 II: $r_2 = \underline{\frac{\sqrt{3}}{3}r_1} = \underline{\frac{\sqrt{3}}{3}R_0}$ ⑤ $\underline{qvB_2} = \underline{\frac{mv^2}{r_2}}$ ⑥ 得 $B_2 = \underline{\frac{\sqrt{6mE_0}}{qR_0}}$ ⑦ 方向：垂直 xOy 平面<u>向外</u> ⑧ $R = \underline{\frac{r_2}{\sin 30^\circ} + r_2} = \underline{3r_2}$ ⑨ 即：$R = \underline{\sqrt{3}R_0}$ ⑩

答案

步骤3：由轨迹图得：

$t=\frac{T_1}{4}+\frac{2}{3}T_2$ ⑪

根据 $T=\frac{2\pi m}{qB}$ 得

$T_1=\frac{2\pi m}{qB_1}$，$T_2=\frac{2\pi m}{qB_2}$ ⑫

$t=\left(\frac{2\sqrt{6}}{9}+\frac{\sqrt{2}}{4}\right)\cdot\frac{\pi R_0\sqrt{mE_0}}{E_0}$ ⑬

④⑦⑨⑪⑫⑬每式各2分，其余各式1分

[变式训练]

7. 如图 12 所示，分界线 MN 上下两侧有垂直纸面的匀强磁场，磁感应强度分别为 B_1 和 B_2，一质量为 m，电荷为 q 的带电粒子(不计重力)从 O 点出发以一定的初速度 v_0 沿纸面垂直 MN 向上射出，经时间 t 又回到出发点 O，形成了图示心形图案，则(　　)

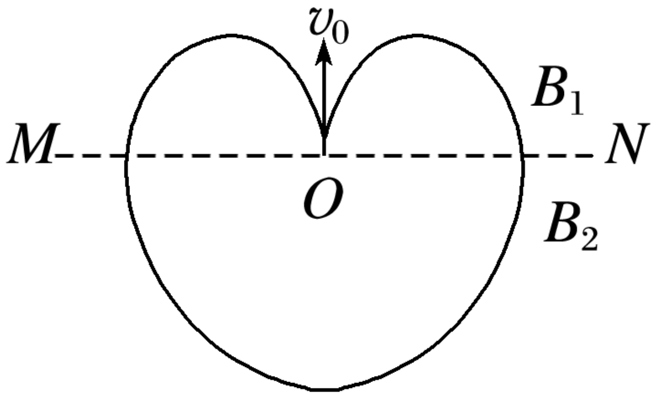


图 12

A. 粒子一定带正电荷

√ B. MN 上下两侧的磁场方向相同

C. MN 上下两侧的磁感应强度的大小 $B_1:B_2 = 1:2$

√ D. 时间 $t = \dfrac{2\pi m}{qB_2}$

解析

8. 如图 13 所示的坐标平面内，y 轴左侧存在方向垂直纸面向外、磁感应强
度大小 $B_1 = 0.20$ T 的匀强磁场，在 y 轴的右侧存在方向垂直纸面向里、宽
度 $d = 12.5$ cm 的匀强磁场 B_2，某时刻一质量 $m =$
$=$
$+4.0\times10^{-4}$ C 的带电微粒（重力可忽略不计），从
坐标为 $(-0.25$ m,0) 的 P 点以速度 $v = 2.0\times10^{3}$ m/
y 轴正方向运动．试求：

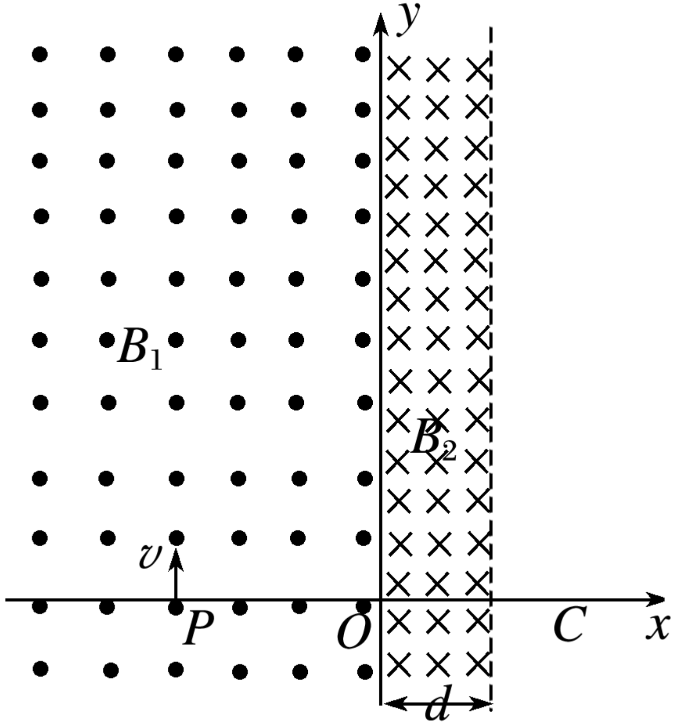


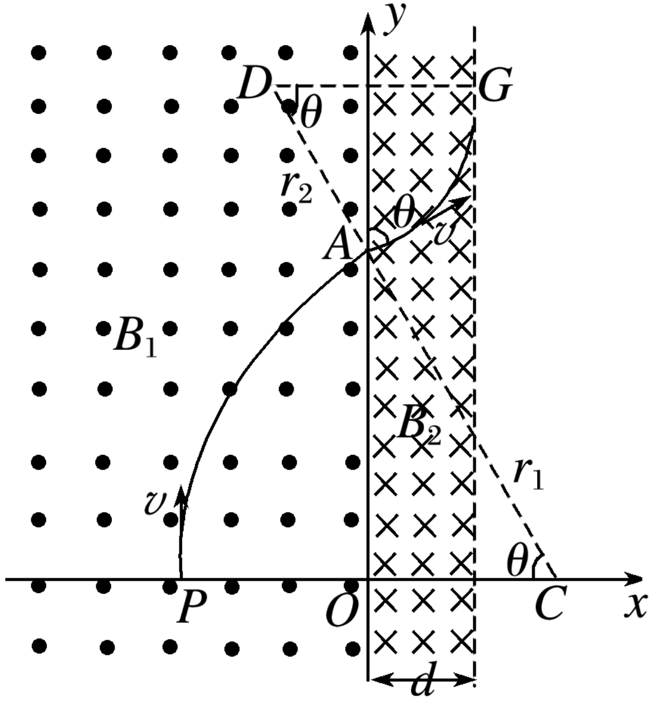
图 13

解析答案

(2) 微粒第一次经过 y 轴时，速度方向与 y 轴正方向的夹角；

解析　粒子在磁场中运动轨迹如图所示，由几何关系得：

$\cos\theta=\dfrac{r_1-0.25}{r_1}=\dfrac{1}{2}$，则 $\theta=60°$



答 案

60°

(3) 要使微粒不能从右侧磁场边界飞出，B_2 应满足的条件．

解析 设粒子恰好不飞出右侧磁场时运动半径为 r_2 ，其运动轨迹如图所示

由几何关系得 $r_2\cos\theta = r_2 - d$，$r_2 = \dfrac{d}{1-\cos\theta} = \dfrac{0.125\ \text{m}}{1-\cos 60°} = 0.25\ \text{m}$

由洛伦兹力充当向心力，且粒子运动半径不大于 r_2 ，

得：$qvB_2 \geq m\dfrac{v^2}{r_2}$

解得：$B_2 \geq \dfrac{mv}{qr_2} = \dfrac{2.0\times 10^{-8}\times 2.0\times 10^{3}}{4.0\times 10^{-4}\times 0.25}\ \text{T} = 0.4\ \text{T}$

即磁感应强度 B_2 应满足： $B_2 \geq 0.4$ T.