# 第 3 讲　带电粒子在组合场、复合场中的运动

| | |
|---|---|
| 了解带电粒子在匀强磁场中的偏转及其应用。 | 物理观念：知道带电粒子在组合场、复合场中的运动观点、能量观点。<br>科学思维：利用分段法解决带电粒子在组合场、复合场中的运动。<br>科学态度与责任：认识到回旋加速器和质谱仪等对人类探索未知领域的重要性。 |

知识梳理·思维激活

一、带电粒子在组合场、复合场中的运动

1．复合场与组合场

(1)复合场：电场、磁场、重力场共存，或其中某两场共存。

(2)组合场：电场与磁场各位于一定的区域内，并不重叠，或在同一区域，电场、磁场分时间段或分区域交替出现。

2．带电粒子在组合场、复合场中的运动分类

(1)静止或匀速直线运动

当带电粒子所受合外力为零时，将处于静止状态或做匀速直线运动。

(2)匀速圆周运动

当带电粒子所受的重力与电场力大小相等、方向相反时，带电粒子在洛伦兹力的作用下，在垂直于匀强磁场的平面内做匀速圆周运动。

(3)较复杂的曲线运动

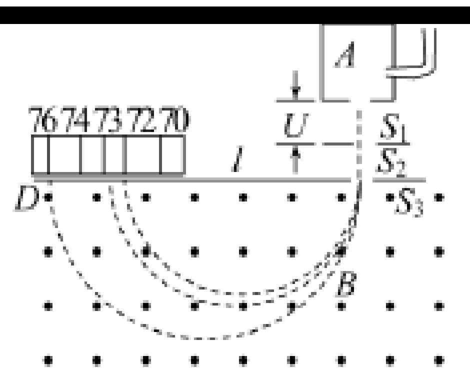
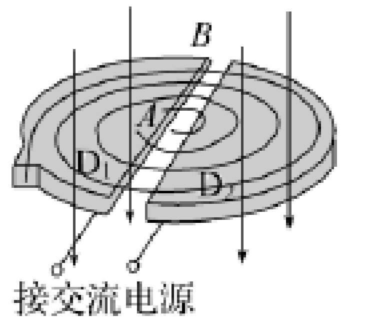
当带电粒子所受合外力的大小和方向均变化，且与初速度方向不在同一条直线上时，粒子做非匀变速曲线运动，这时粒子运动轨迹既不是圆弧，也不是抛物线。

(4)分阶段运动

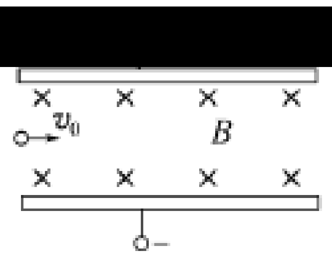
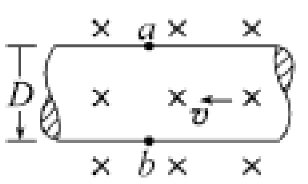
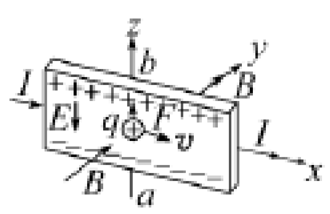
带电粒子可能依次通过几个情况不同的复合场区域，其运动情况随区域发生变化，其运动过程由几种不同的运动阶段组成。

二、电场与磁场的组合应用实例

| 装置 | 原理图 | 规律 |
|---|---|---|

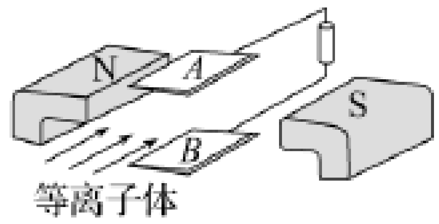
| | | |
|---|---|---|
| 质谱仪 |  | 带电粒子由静止被加速电场加速 $qU=\frac{1}{2}mv^2$，在磁场中做匀速圆周运动 $qvB=m\frac{v^2}{r}$，则比荷 $\frac{q}{m}=\frac{2U}{B^2r^2}$ |
| 回旋加速器 |  | 交变电流的周期和带电粒子做圆周运动的周期相同，带电粒子在圆周运动过程中每次经过 D 形盒缝隙都会被加速。由 $qvB=m\frac{v^2}{r}$ 得 $E_{km}=\frac{q^2B^2r^2}{2m}$ |

三、电场与磁场的叠加应用实例

| 装置 | 原理图 | 规律 |
|---|---|---|
| [redacted] | | |
| 速度选择器 |  | 若 $qv_0B=Eq$，即 $v_0=\frac{E}{B}$，带电粒子做匀速直线运动 |
| 电磁流量计 |  | $\frac{U}{D}q=qvB$，$v=\frac{U}{DB}$，所以 $Q=vS=\frac{U}{DB}\cdot\pi(\frac{D}{2})^2=\frac{\pi UD}{4B}$ |
| 霍尔元件 |  | 当磁场方向与电流方向垂直时，导体在与磁场、电流方向都垂直的方向上出现电势差 |

▸命题·科技情境

磁流体发电是一项新兴技术，如图是它的示意图。平行金属板 A、B 之间有一个很强的磁场，磁感应强度为 B。将一束等离子体(即高温下电离的气体，含有大量正、负带电粒子)喷入磁场，A、B 两板间便产生电压。如果把 A、B 和用电器连接，A、B 就是一个直流电源的两个电极。A、B 两板间距为 d，等离子体以速度 v 沿垂直于磁场方向射入 A、B 两板之间，所带电荷量为 q。




(1)电源的正极是哪个极板？

提示：B 板是电源的正极。

(2)电源的电动势为多大？

提示：电源的电动势为 Bdv。

**微点辨析**

角度 1　带电粒子在复合场中的运动

(1)带电粒子在复合场中做匀速圆周运动，必有 mg=Eq，洛伦兹力做向心力。(　√　)

(2)带电粒子在重力、电场力(恒力)、洛伦兹力三个力作用下可以做变速直线运动。(　×　)

(3)有的时候，题目中没明确说明时，带电粒子是否考虑重力，要结合运动状态进行判定。(　√　)

角度 2　电场与磁场的组合

(4)回旋加速器中粒子获得的最大动能与加速电压有关。(　×　)

(5)质谱仪可以测带电粒子比荷。(　√　)

角度 3　电场与磁场的叠加

(6)粒子速度选择器只选择速度大小，不选择速度方向。(　×　)

(7)霍尔效应中，电流方向一定，极板的正负极确定。(　×　)

## 考点探究·悟法培优

### 考点一　带电粒子在组合场中的运动

**核心要点**

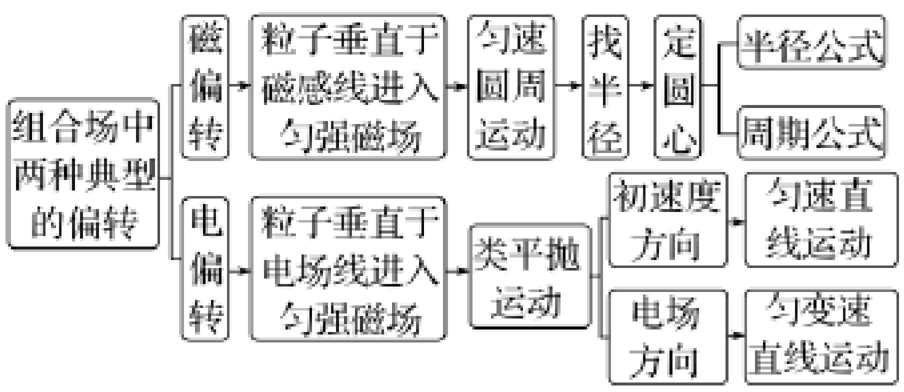
1．组合场：电场与磁场各位于一定的区域内，并不重叠，或在同一区域，电场、磁场交替出现。

2．带电粒子在组合场中运动的分析思路

第 1 步：粒子按照时间顺序进入不同的区域可分成几个不同的阶段。

第 2 步：受力分析和运动分析，主要涉及两种典型运动。

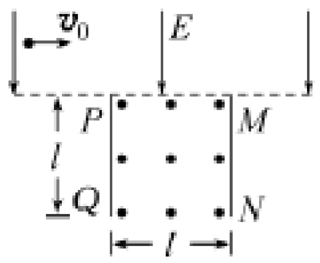
第 3 步：用规律。




**典题剖析**

角度 1 电场＋磁场

【典例 1】 (2021·全国甲卷)如图，长度均为 l 的两块挡板竖直相对放置，间距也为 l，两挡板上边缘 P 和 M 处于同一水平线上，在该水平线的上方区域有方向竖直向下的匀强电场，电场强度大小为 E；两挡板间有垂直纸面向外、磁感应强度大小可调节的匀强磁场。一质量为 m，电荷量为 q(q＞0)的粒子自电场中某处以大小为 $v_0$ 的速度水平向右发射，恰好从 P 点处射入磁场，从两挡板下边缘 Q 和 N 之间射出磁场，运动过程中粒子未与挡板碰撞。已知粒子射入磁场时的速度方向与 PQ 的夹角为 60°，不计重力。




(1)求粒子发射位置到 P 点的距离；

(2)求磁感应强度大小的取值范围；

(3)若粒子正好从 QN 的中点射出磁场，求粒子在磁场中的轨迹与挡板 MN 的最近距离。

【考场思维·精准拆解】——拆过程

拆解 1：过程 1，带电粒子在匀强电场中做类平抛运动，求出带电粒子在电场中的时间是解决问题的关键。

拆解 2：过程 2，带电粒子在磁场中做不完整的圆周运动，挖掘粒子刚好从左边界和右边界两个临界条件射出时的半径，是解决问题的关键。

拆解 3：过程 3，粒子正好从 QN 的中点射出磁场，挖掘出“粒子的速度方向和 MN 平行时，粒子的运动轨迹与挡板 MN 的距离最近”是解决问题的难点。

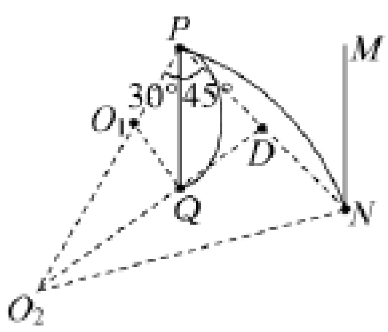
【解析】(1)带电粒子在匀强电场中做类平抛运动，由类平抛运动规律可知 $x=v_0t$ ①

$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{qEt^2}{2m}$ ②

粒子射入磁场时的速度方向与 PQ 的夹角为 60°，有 $\tan 30°=\frac{v_y}{v_x}=\frac{at}{v_0}$ ③

粒子发射位置到 P 点的距离 $s=\sqrt{x^2+y^2}$ ④

由①②③④式得 $s=\frac{\sqrt{13}mv_0^2}{6qE}$ ⑤；



(2)带电粒子在磁场运动的速度 $v=\frac{v_0}{\cos30^\circ}=\frac{2\sqrt{3}v_0}{3}$ ⑥

带电粒子在磁场中运动的两个临界轨迹(分别从 Q、N 点射出)如图所示

由几何关系可知，最小半径 $r_{min}=\frac{\frac{l}{2}}{\cos30^\circ}=\frac{\sqrt{3}}{3}l$ ⑦

最大半径 $r_{max}=\frac{\frac{\sqrt{2}}{2}l}{\cos75^\circ}=(\sqrt{3}+1)l$ ⑧

带电粒子在磁场中做圆周运动的向心力由洛伦兹力提供，由向心力公式可知 $qvB=\frac{mv^2}{r}$ ⑨

由⑥⑦⑧⑨解得，磁感应强度大小的取值范围为 $\frac{2mv_0}{(3+\sqrt{3})ql}<B<\frac{2mv_0}{ql}$；

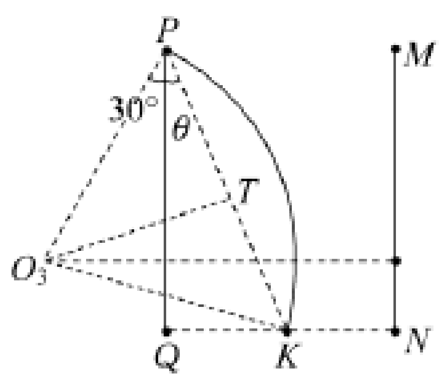
(3)若粒子正好从 QN 的中点射出磁场时，带电粒子运动轨迹如图所示。

由几何关系可知 $\sin\theta=\frac{\frac{l}{2}}{\frac{\sqrt{5}}{2}l}=\frac{\sqrt{5}}{5}$ ⑩

带电粒子的运动半径为 $r_3=\frac{\frac{\sqrt{5}}{4}l}{\cos(30^\circ+\theta)}$ ⑪

粒子在磁场中的轨迹与挡板 MN 的最近距离 $d_{min}=r_3\sin30^\circ+l-r_3$ ⑫

由⑩⑪⑫式解得 $d=\frac{39-10\sqrt{3}}{44}l$ ⑬

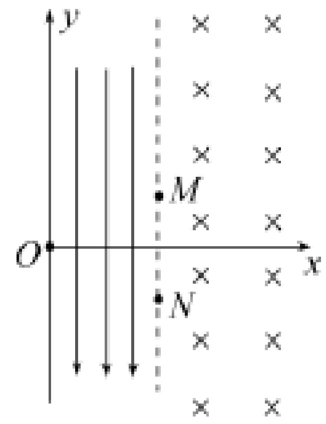



答案：(1) $\frac{\sqrt{13}mv_0^2}{6qE}$ (2) $\frac{2mv_0}{(3+\sqrt{3})ql}<B<\frac{2mv_0}{ql}$

(3) $\frac{39-10\sqrt{3}}{44}l$

【变式训练 1】(2022·南昌模拟)如图所示，y 轴右侧 0<x<L 范围内存在竖直向下的匀强电场，电场强度大小为 E，在 x≥L 处存在垂直纸面向里的匀强磁场，带电粒子从原点处以某一初速度沿 x 轴方向射入电场。不计粒子重力，从 M 点 $(L,\frac{L}{2})$ 进入磁场，从 N 点 $(L,-\frac{L}{2})$ 再次返回电场。粒子电荷量

为－q(q>0)、质量为 m，求：




(1)粒子初速度的大小；

(2)粒子在电磁场区域运动的总时间。

【解析】(1)带电粒子从原点到 M 点的运动为类平抛运动，令运动时间为 $t_1$，水平方向有 $L=v_0\cdot t_1$

竖直方向有 $\frac{L}{2}=\frac{1}{2}a\cdot t_1^2$

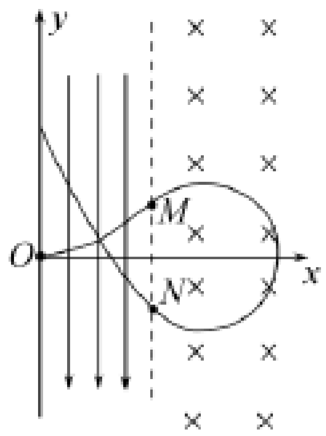
且 $Eq=ma$

解得 $v_0=\sqrt{\frac{EqL}{m}}$

(2)粒子返回在电场区域时，水平方向仍然做速度为 $v_0$ 的匀速运动，故在电场运动的时间为

$2t_1=2\times\frac{L}{v_0}=2\sqrt{\frac{mL}{Eq}}$

粒子在 M 点进入磁场时，速度与 y 轴的夹角为 45°，由轨迹图可知




粒子在磁场中运动了四分之三周，即 $t_2=\frac{3}{4}T$

又 $v_M=\sqrt{2}v_0$

$L=\sqrt{2}R$

根据 $T=\frac{2\pi R}{v_M}$ 得 $T=\pi\sqrt{\frac{mL}{Eq}}$

可知粒子在电磁场区域运动的总时间：$t=2t_1+\frac{3}{4}T=(\frac{3\pi}{4}+2)\sqrt{\frac{mL}{Eq}}$

答案：(1)$\sqrt{\frac{EqL}{m}}$　(2)$(\frac{3\pi}{4}+2)\sqrt{\frac{mL}{Eq}}$

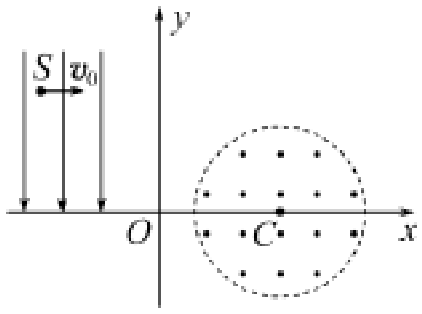
教师专用【加固训练】

如图所示，平面直角坐标系第二象限充满电场强度大小为 E、方向沿 y 轴负方向的匀强电场，在 y 轴右侧以 C($\sqrt{3}$ R，0)点为圆心、R 为半径的圆形区域内有垂直于纸面向外的匀强磁场。现将带正电的粒子，从第二象限的 S 点($-\sqrt{3}$ R，$\frac{3}{2}$ R)以速度 $v_0$ 沿 x 轴正方向射入匀强电场，经电场偏转后恰好沿磁场区域半径方向射入匀强磁场，粒子离开磁场时，在磁场中的出射点和入射点关于 x 轴对称。带电粒子重力不计，求：

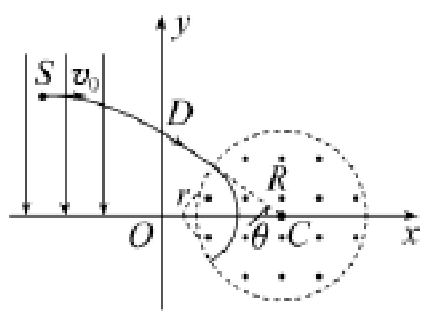
(1)带电粒子的比荷；

(2)磁感应强度的大小；

(3)粒子从进入电场到离开磁场所用的时间。




【解析】粒子运动轨迹如图所示。




(1)粒子在电场中，设运动时间为 $t_1$，有

$qE=ma$

$\sqrt{3}R=v_0t_1$

$y_1=\frac{1}{2}at_1^2$

$v_y=at_1$

设 DC 连线跟 x 轴负方向的夹角为 θ，由几何关系得

$\tan\theta=\frac{v_y}{v_x}=\frac{at_1}{v_0}$

$\frac{3}{2}R-y_1=\sqrt{3}R\tan\theta$

解得$\frac{q}{m}=\frac{v_0^2}{3ER}$

$\theta=30°$；

(2)粒子在磁场中，设轨迹半径为 r，则由几何关系可得 $r=R\tan\theta$

解得 $r=\frac{\sqrt{3}}{3}R$

设粒子离开电场时的速度为 v，有

$v=\frac{v_0}{\cos\theta}$

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

解得 $B=\frac{6E}{v_0}$

(3)设在无场区域、磁场中运动时间分别为 $t_2$、$t_3$，总时间为 t，有 $CD-R=vt_2$

$2\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)r=vt_3$

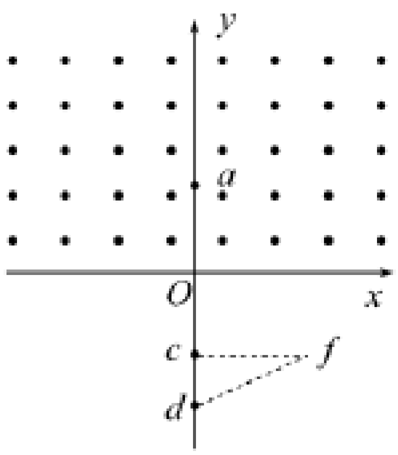
$t=t_1+t_2+t_3$

解得 $t=\left(\frac{3\sqrt{3}}{2}+\frac{\pi}{3}\right)\frac{R}{v_0}$

答案：(1) $\frac{v_0^2}{3ER}$ (2) $\frac{6E}{v_0}$ (3) $\left(\frac{3\sqrt{3}}{2}+\frac{\pi}{3}\right)\frac{R}{v_0}$

角度 2 磁场＋电场

【典例 2】(2022·八省 T8 联考题)如图所示，在 x 轴上方有垂直于 xOy 平面向外的匀强磁场。在 y 轴正半轴上距原点 L 处的 a 点有一个离子源，可以向各方向发射质量为 m、带电量为 q 的负离子，所以离子初速度大小均为 $v_0$。在这些离子穿过 x 轴的位置中，b 点(未画出)离 O 点最远，已知磁感应强度大小为 $B=\frac{\sqrt{2}mv_0}{qL}$。




(1)求 b 点的坐标；

(2)x 轴下方的 c、d、f 三个点构成一个直角三角形，且 c、d 在 y 轴上，cd 与 cf 长度之比为 1∶2。在 x 轴下方加上平行于 xOy 平面的匀强电场后，从磁场中穿过 x 轴进入电场的离子中，有一个离子经过 c、f 点的动能分别为 $E_k$ 和 $3E_k$，另一个离子经过 d、f 点的动能分别为 $1.5E_k$ 和 $4.5E_k$($E_k$ 未知)，求匀强电场的方向。

【解析】(1)带电粒子在磁场中做圆周运动，洛伦兹力提供向心力：$Bv_0q=m\frac{v_0^2}{r}$

由于 $B=\frac{\sqrt{2}mv_0}{Lq}$

得：$r=\frac{\sqrt{2}L}{2}$

由几何关系可得，ab 为圆的直径时，b 距离 O 最远，

由 $Ob=\sqrt{(2r)^2-L^2}$

得 $Ob=L$

由于 b 在 O 的左侧，故 b 点坐标为(－L，0)

(2)设场强沿 x、y 正方向的分量分别为 $E_x$、$E_y$。

对于先后经过 c、f 点的离子，由动能定理可得：

$-qE_x|cf|=3E_k-E_k$

对于先后经过 d、f 点的离子，由动能定理可得：

$-qE_x|cf|-qE_y|cd|=4.5E_k-1.5E_k$

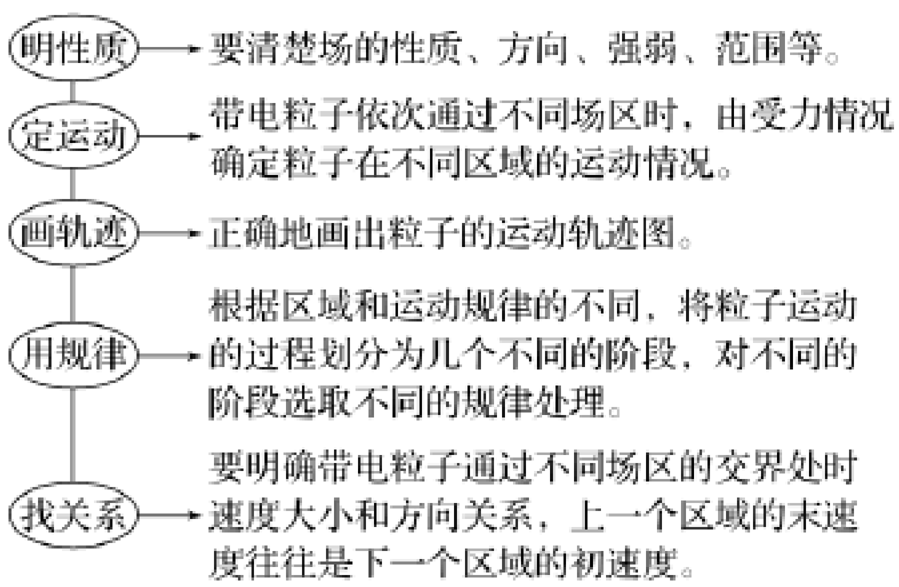
由于$|cd|:|cf|=1:2$

可得：$E_y:E_x=1:1$，且 $E_x<0$

故电场强度方向与 x 轴夹角为 45°，指向左下方。

答案：(1)(－L，0)　(2)与 x 轴夹角为 45°，指向左下方

**技法归纳** 突破带电粒子在组合场中的运动问题遵循的步骤



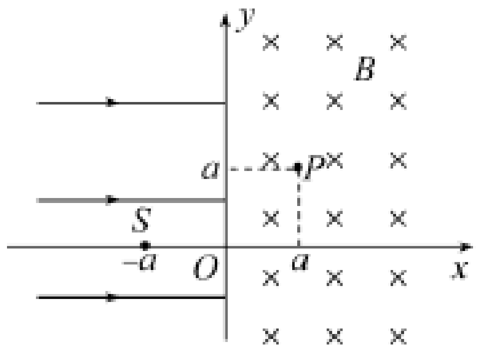

【变式训练 2】(2021·辽宁选择考)如图所示，在 $x>0$ 区域内存在垂直纸面向里、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场；在 $x<0$ 区域内存在沿 x 轴正方向的匀强电场。质量为 m、电荷量为 $q(q>0)$的粒子甲从点 S(－a，0)由静止释放，进入磁场区域后，与静止在点 P(a，a)、质量为$\frac{m}{3}$ 的中性粒子乙发生弹性正碰，且有一半电量转移给粒子乙。(不计粒子重力及碰撞后粒子间的相互作用，忽略电场、磁场变

化引起的效应)

(1)求电场强度的大小 E;

(2)若两粒子碰撞后，立即撤去电场，同时在 $x\leqslant 0$ 区域内加上与 $x>0$ 区域内相同的磁场，求从两粒子碰撞到下次相遇的时间 $\Delta t$;

(3)若两粒子碰撞后，粒子乙首次离开第一象限时，撤去电场和磁场，经一段时间后，在全部区域内加上与原 $x>0$ 区域相同的磁场，此后两粒子的轨迹恰好不相交，求这段时间内粒子甲运动的距离 L。




【解析】(1)粒子甲做匀速圆周运动过 P 点，则在磁场中运动轨迹半径 $R=a$

则 $qBv=\frac{mv^2}{R}$

则 $v=\frac{qBa}{m}$

粒子从 S 到 O，有动能定理可得 $qEa=\frac{1}{2}mv^2$

可得 $E=\frac{qB^2a}{2m}$

(2)甲乙粒子在 P 点发生弹性碰撞，设碰后速度为 $v_1$、$v_2$，取向上为正，则有

$mv=mv_1+\frac{1}{3}mv_2$

$\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}mv_1^2+\frac{1}{2}\times\frac{1}{3}mv_2^2$

计算可得 $v_1=\frac{1}{2}v=\frac{qBa}{2m}$　　$v_2=\frac{3}{2}v=\frac{3qBa}{2m}$

两粒子碰后在磁场中运动　$\frac{1}{2}qBv_1=\frac{mv_1^2}{R_1}$　　$\frac{1}{2}qBv_2=\frac{mv_2^2}{3R_2}$

解得 $R_1=a$　$R_2=a$

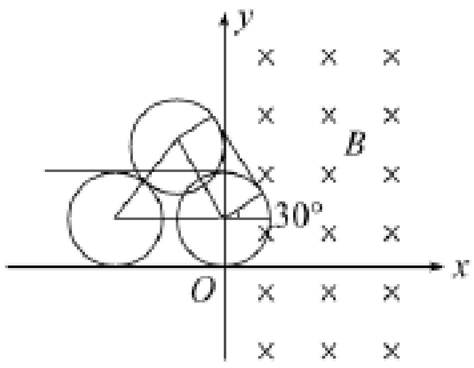
两粒子在磁场中一直做轨迹相同的匀速圆周运动，周期分别为 $T_1=\frac{2\pi R_1}{v_1}=\frac{4\pi m}{qB}$　　$T_2=\frac{2\pi R_2}{v_2}=\frac{4\pi m}{3qB}$

则两粒子碰后再次相遇 $\frac{2\pi}{T_2}\Delta t=\frac{2\pi}{T_1}\Delta t+2\pi$

解得再次相遇时间$\Delta t=\frac{2\pi m}{qB}$

(3)乙出第一象限时甲在磁场中偏转角度为$\theta=\frac{2\pi}{T_1}\cdot\frac{T_2}{4}=\frac{\pi}{6}$

撤去电场磁场后，两粒子做匀速直线运动，乙粒子运动一段时间后，再整个区域加上相同的磁场，粒子在磁场中仍做半径为a的匀速圆周运动，要求轨迹恰好不相切，则如图所示




设撤销电场、磁场到加磁场乙运动了t′，由余弦定理可得

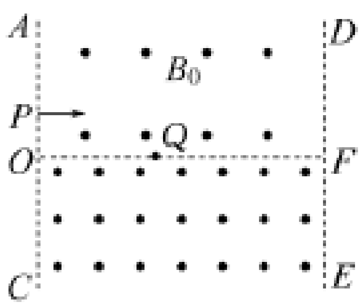
$\cos 60°=\frac{(v_1t')^2+(v_2t')^2-(2a)^2}{2\times v_1t'\times v_2t'}$　　$v_1t'=\frac{1}{3}v_2t'$

则从撤销电场、磁场到加磁场乙运动的位移$L=v_1t'=\frac{2a}{\sqrt{7}}$

答案：(1)$\frac{qB^2a}{2m}$　(2)$\frac{2\pi m}{qB}$　(3)$\frac{2a}{\sqrt{7}}$

角度3 磁场+磁场

【典例3】如图所示，在无限长的竖直边界AC和DE间，上、下部分分别充满方向垂直于平面ADEC向外的匀强磁场，上部分区域的磁感应强度大小为$B_0$，OF为上、下磁场的水平分界线。质量为m、带电荷量为+q的粒子从AC边界上与O点相距为a的P点垂直于AC边界射入上方磁场区域，经OF上的Q点第一次进入下方磁场区域，Q点与O点的距离为3a。不考虑粒子重力。

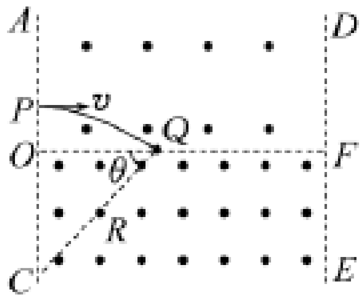



(1)求粒子射入时的速度大小；

(2)要使粒子不从AC边界飞出，求下方磁场区域的磁感应强度大小$B_1$应满足的条件；

(3)若下方区域的磁感应强度$B=3B_0$，粒子最终垂直DE边界飞出，求边界DE与AC间距离的可能值。

【解析】(1)粒子在OF上方的运动轨迹如图所示，

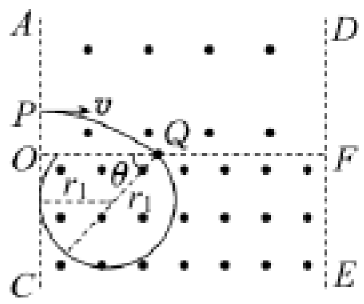



设粒子做圆周运动的半径为 R，由几何关系可知 $R^2-(R-a)^2=(3a)^2$，则 $R=5a$，

由牛顿第二定律可知 $qvB_0=m\frac{v^2}{R}$，

解得 $v=\frac{5aqB_0}{m}$。

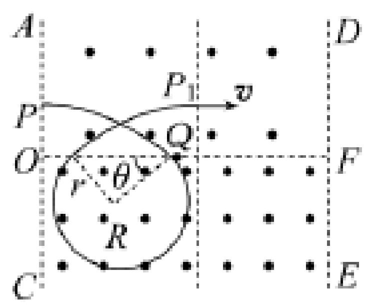
(2)当粒子恰好不从 AC 边界飞出时，其运动轨迹如图所示，设粒子在 OF 下方做圆周运动的半径为 $r_1$。




由几何关系得 $r_1+r_1\cos\theta=3a$，由(1)可知 $\cos\theta=\frac{OQ}{R}=\frac{3}{5}$，所以 $r_1=\frac{15a}{8}$，根据 $qvB_1=\frac{mv^2}{r_1}$，解得 $B_1=\frac{8B_0}{3}$。

故 $B_1\geqslant\frac{8B_0}{3}$ 时，粒子不会从 AC 边界飞出。

(3)当 $B=3B_0$ 时，粒子的运动轨迹如图所示，粒子在 OF 下方的运动半径为 $r=\frac{5}{3}a$，设粒子的速度方向再次与射入磁场时的速度方向一致时，粒子的位置为 $P_1$ 点，则 P 点与 $P_1$ 点的连线一定与 OF 平行，根据几何关系知 $PP_1=4a$，所以若粒子最终垂直 DE 边界飞出，边界 DE 与 AC 间的距离为 $L=nPP_1=4na$（$n=1, 2, 3, \cdots$）。



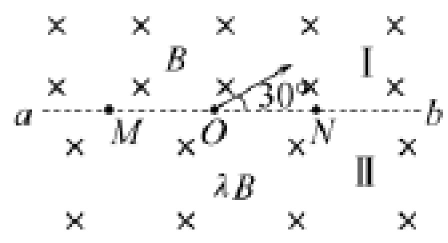

答案：(1) $\frac{5aqB_0}{m}$　(2) $B_1\geqslant\frac{8B_0}{3}$　(3) $4na$（$n=1, 2, 3, \cdots$）

【变式训练 3】如图所示，虚线 ab 上方存在方向垂直纸面向里、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场Ⅰ，下方存在方向相同、磁感应强度大小为 λB 的匀强磁场Ⅱ，虚线 ab 为两磁场的分界线。M、O、N 位于分界线上，点 O 为 MN 的中点。一电子从 O 点射入磁场Ⅰ，速度方向与分界线 ab 的夹角为 30°，电子

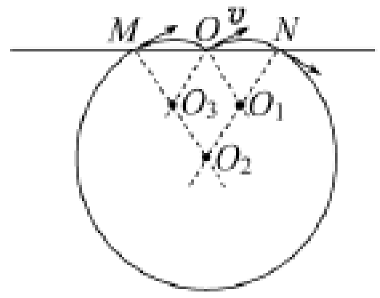
离开 O 点后依次经 N、M 两点回到 O 点。已知电子的质量为 m，电荷量为 e，重力不计，求：

(1) λ 的值；

(2) 电子从射入磁场到第一次回到 O 点所用的时间。




【解析】(1) 电子在磁场中的运动轨迹如图所示




设电子在匀强磁场Ⅰ、Ⅱ中做匀速圆周运动的半径分别为 $R_1$、$R_2$，电子在磁场中做匀速圆周运动有

$evB=\frac{mv^2}{R_1}$ …①

$ev\lambda B=\frac{mv^2}{R_2}$ …②

由于最终能回到 O 点，由几何关系，可得

$R_2=2R_1$ …③

联立①②③，解得 $\lambda=\frac{1}{2}$

(2) 电子在磁场Ⅰ中的运动周期 $T_1=\frac{2\pi m}{eB}$

电子在磁场Ⅱ中的运动周期 $T_2=\frac{2\pi m}{e\lambda B}$

设电子经过三段轨迹的时间分别为 $t_1$、$t_2$、$t_3$，由几何关系可得 O 到 N 的圆心角为 60°，则 $t_1=\frac{1}{6}T_1$

N 到 M 的圆心角为 300°，则 $t_2=\frac{5}{6}T_2$

M 到 O 的圆心角为 60°，则 $t_3=\frac{1}{6}T_1$

电子从射入磁场到第一次回到 O 点所用的时间为 t

$t=t_1+t_2+t_3$

联立以上式子，解得 $t=\frac{4\pi m}{eB}$

答案：(1)$\frac{1}{2}$　(2)$\frac{4\pi m}{eB}$

## 考点二　带电粒子在复合场中的运动

### 核心要点

1．研究对象：带电粒子。带电粒子在电场或磁场中是否考虑重力要视具体情况而定。一般情况下，如电子、质子、氢核、α粒子等基本粒子可不计重力，而对带电颗粒、尘埃、液滴、油滴、小球等则应考虑重力。当然，在具体题目中，除明确不计重力外，常需要将重力与电场力、洛伦兹力的大小进行比较后才能确定。

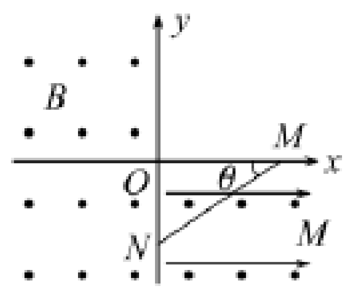
2．组合形式：(1)电场与磁场的复合。(2)磁场与重力场的复合。(3)电场与重力场的复合。(4)电场、磁场与重力场的复合。

3．运动形式：(1)处于静止或匀速直线运动。(2)匀速圆周运动。(3)匀变速直线。(4)类平抛。(5)一般曲线。

### 典题剖析

角度1 无约束条件

【典例4】如图所示，坐标系xOy在竖直平面内，y轴沿竖直方向，第二、三和四象限有沿水平方向，垂直纸面向外的匀强磁场，磁感应强度为B。第四象限的空间内有沿x轴正方向的匀强电场，场强为E，一个带正电荷的小球从图中x轴上的M点，沿着与水平方向成θ＝30°角斜向下的直线匀速运动。经过y轴上的N点进入x<0的区域内，在x<0区域内另加一匀强电场$E_1$(图中未画出)，小球进入x<0区域后能在竖直面内做匀速圆周运动。(已知重力加速度为g)




(1)求匀强电场$E_1$的大小和方向；

(2)若带电小球做圆周运动通过y轴上的P点(P点未标出)，求小球从N点运动到P点所用的时间t；

(3)若要使小球从第二象限穿过y轴后能够沿直线运动到M点，可在第一象限加一匀强电场，求此电场强度的最小值$E_2$，并求出这种情况下小球到达M点的速度大小$v_M$。

【解析】(1)设小球质量为m，电荷量为q，速度大小为v，小球在MN段受力如图甲所示，因为在MN段小球做匀速直线运动，所以小球受力平衡