【核心问题】专题5---带电粒子在电磁场中运动

福建省普育教学通教研究室物理学科编写组

【**材料导读**】

据考纲要求库仑定律、电场强度、点电荷的场强、电势差、匀强磁场中的安培力、洛伦兹力公式、带电粒子在匀强电场中运动、带电粒子在匀强磁场中运动属于Ⅱ级要求，其余知识点属于Ⅰ级要求。

近几年高考主要考查：电场强度、电场线、电势、电势能、电势差、电场力做功等概念的理解，场强的叠加、电势能大小的判断、电势高低的判断、匀强电场中电势差与电场强度的关系的应用。要求考生能清晰、系统地理解磁感应强度（磁通密度）、安培力、洛伦兹力等概念和规律；会解决带电粒子在电场中的运动等问题，能综合应用所学的物理知识灵活解决有关电磁场问题；能将有关电磁场的实际问题中的对象和过程转换成物理模型，能在新的情境中对综合性问题进行分析和推理，要求考生具备较强的应用数学处理物理问题的能力。

使用说明：标有【A】的属于基础问题，所有学生必须掌握，标有【B】的属于能力提升层次，大部分学生需要掌握，标有【C】的属于较难问题，提供给学校自行选用。

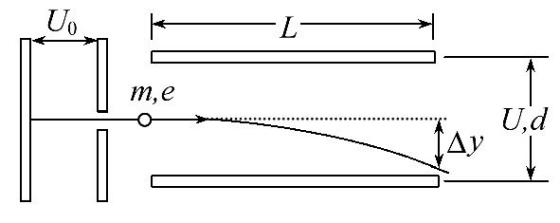
【**典例分析**】

**例1.**（2016年北京高考改编）如图，电子由静止开始经加速电场加速后，沿平行于板面的方向射入偏转电场，并从另一侧射出。已知电子质量为*m*，电荷量为*e*，加速电场电压为*U*0，偏转电场可看作匀强电场，极板间电压为*U*，极板长度为*L*，板间距为*d*。

【A】（1）忽略电子所受重力，求电子射入偏转电场时的初速度*v*0

【B】（2）忽略电子所受重力，求从电场射出时沿垂直板面方向的偏转距离Δ*y*；

【B】（3）分析物理量的数量级是解决物理问题的常用方法。在解决（1）（2）问时忽略了电子所受重力，请利用下列数据分析说明其原因。已知*U* ＝ 2.0×102 V，*d* ＝ 4.0×10－2 m，

*m* ＝ 9.1×10－31 kg，*e* ＝ 1.6×10－19 C，*g*取10 m/s2。

【**解析**】

1. 根据动能定理得  ①

由①式得  ②

1. 在偏转电场中，电子的运动时间  ③

由牛顿第二定律有  ④

偏转距离  ⑤

联立 ②③④⑤式得  ⑥

（3）考虑电子所受重力和电场力的数量级，

有重力*G*＝*mg*≈10－29N，电场力*F*＝≈10－15N

由于*F*≫*G*，因此不需要考虑电子所受的重力

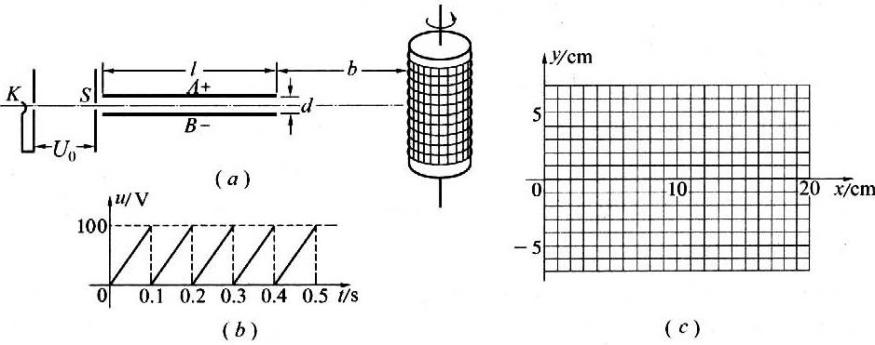
**变式1：**(1996年高考全国卷改编）如图(*a*)所示，真空室中电极K发出的电子(初速不计)经过*U*0 = 1000 V的加速电场后，由小孔*S*沿两水平金属板*A*、*B*间的中心线射入，*A*、*B*板长*l* = 0.20 m，板间距离*d* = 0.02 m.加在*A*、*B*两板间的电压随时间变化的*u*-*t*图线如图(*b*)所示。设*A*、*B*间的电场可看作是均匀的，且两板外无电场，在每个电子通过电场区域的极短时间内，电场可视作恒定的。两板右侧放一记录圆筒，筒的左侧边缘与极板右端距离*b* = 0.15 m，筒绕其竖直轴匀速转动，周期*T* = 0.20 s，筒的周长*s* = 0.20 m，筒能接收到通过*A*、*B*板的全部电子(已知电子比荷为*e/m* = 1.50× 1011 C/kg，不计电子重力作用)。求：

【A】(1)电子射出加速电场的速度大小；

【B】(2)若电子恰能穿过*A*、*B*板，则它通过时加在两板间的电压大小；

【C】(3)以*t* = 0时(见图(*b*)，此时*u* = 0)电子打到圆筒记录纸上的点作为*xOy*坐标系的原点，并取*y*轴竖直向上，试计算电子打到记录纸上的最高点的*y*坐标和*x*坐标；

【C】(4)在给出的坐标纸(图(*c*))上定量地画出电子打到记录纸上的点形成的图线。



**【解析】**

（1）设电子射出加速电场的速度大小为*v*0，由动能定理得

　　 ①

由①式代入数据得  ②

（2）设电子穿过*A*、*B*板的时间为*t*0，则

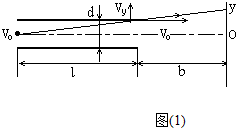
　　 ③

电子恰能穿过*A*、*B*板，加在两板间的电压*u*c应满足

 ④

联立①③④式代入数据得 = 20 V ⑤

1. 恰能穿过*A*、*B*板的电子，从*A*、*B*板射出时沿*y*方向的分速度

 ⑥

电子从板射出做匀速直线运动，设其纵坐标为*y*，

由图（1）可得

 ⑦

联立②③⑤⑥⑦式代入数据得

 ⑧

从*u*-*t*图线可知，加在两板电压*u*的周期*T*0 = 0.10 s，*u*的最大值*u*m = 100 V，因为*uC* ＜ *um*，在一个周期*T*0内，只有开始的一段时间间隔△*t*内有电子通过*A*、*B*板，则  ⑨

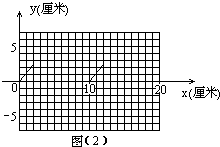
因为电子打在记录纸上的最高点不止一个，据题中坐标原点与起始记录时刻的规定，第一个最高点的*x*坐标  = 2 cm ⑩

第二个最高点的*x*坐标 = 12 cm ⑪

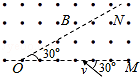
第三个最高点的*x*坐标 = 22 cm⑫

由于记录筒的周长为20 cm，所以第三个最高点已与第一个最高点重合，即电子打到记录纸上的最高点只有两个，它们*y*坐标为2.5 cm，*x*坐标分别2 cm和12 cm。

（4）电子打到记录纸上所形成的图线，如图（2）所示。

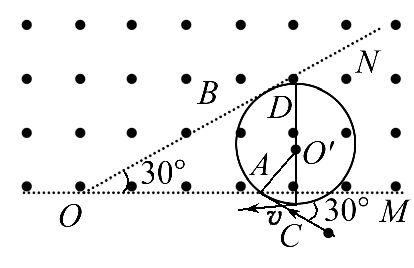


【B】**例2.** (2016·全国卷III)平面*OM*和平面*ON*之间的夹角为30°,其横截面(纸面)如图所示,平面*OM*上方存在匀强磁场,磁感应强度大小为*B*,方向垂直于纸面向外。一带电粒子的质量为*m*,电荷量为*q*(*q*>0)。粒子沿纸面以大小为*v*的速度从*OM*的某点向左上方射入磁场,速度与*OM*成30°角。已知该粒子在磁场中的运动轨迹与*ON*只有一个交点,并从*OM*上另一点射出磁场。不计重力。粒子离开磁场的出射点到两平面交点*O*的距离为

A.　　 B.

C.　　 D.



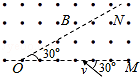
**【解析】**选D。

此题本质上是粒子入射速度方向恒定的“缩放圆”问题，只有速度等于缩放到某一值，才满足题給条件：“该粒子在磁场中的运动轨迹与*ON*只有一个交点”。

如图，由题意知运动轨迹与*ON*相切。设切点为*D*，入射点为*A*，出射点为*C*，圆心为*O*′，由入射角为30°可得△*A O*′*C*为等边三角形,则∠*AC O*′=60°，而

∠*MON*=30°，∠*ODC*=90°，故*D*、*O*′、*C*在同一直线上，故出射点到*O*点的距离 又*r* =，故距离为。

变式1：平面*OM*和平面*ON*之间的夹角为30°，其横截面(纸面)如图所示，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 )。粒子沿纸面以速度大小为*v*，从*A*点沿各个方向方射入磁场。已知*OA* =。不计重力。求



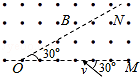
*A*

【A】（1）粒子的运动轨迹与直线*ON*相交点离*O*点的最小距离；

【B】（2）粒子的运动轨迹与直线*ON*相交点，在*ON*上分布的长度。

**【解析】**此题本质上是粒子入射速度大小恒定，方向不断变化的“旋转圆”问题。

（1）如图，由几何关系知：当速度方向沿*AO*方向射入磁场时，粒子的运动轨迹与直线*ON*相交点*P*，离*O*点的距离最小，则



*A*

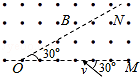
*P*

O′

 ，又*OA* = 

所以，*A O*′= *r ， P O* = 2*r-r* = *r* =

（2）如图，由几何关系可知：粒子的运动轨迹与直线*ON*相交点*Q*，离*O*点的距离最大，且*AQ*= 2*r，*过*A*点作*OQ*的垂线*AE*，有



*A*

*P*

O′

*Q*

*E*

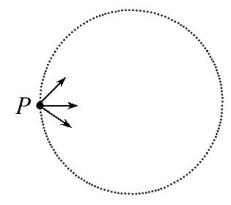
*OE* = *OA*cos300

*AE* = *OA*sin300

*QE*2 = *AQ*2-*AE*2

解得 

**

**【C】变式2：**(2017·全国甲卷)如图,虚线所示的圆形区域内存在一垂直于纸面的匀强磁场,P为磁场边界上的一点,大量相同的带电粒子以相同的速率经过P点,在纸面内沿不同方向射入磁场,若粒子射入速率为*v*1,这些粒子在磁场边界的出射点分布在六分之一圆周上;若粒子射入速率为*v*2,相应的出射点分布在三分之一圆周上,不计重力及带电粒子之间的相互作用,则*v*2∶*v*1为

A.  B.

C. D.

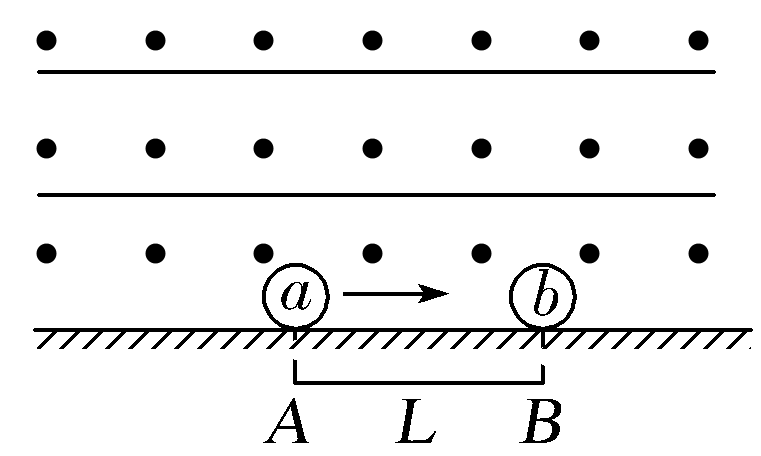
**【解析】**选C。

本题实则是轨迹圆与磁场区域圆的相交，求极值的问题。

设圆形区域磁场半径为*R*，根据题意,当粒子出射点分布在六分之一圆周上时，根据几何关系可知轨道半径*r*1 = *R*sin30°，由洛伦兹力提供向心力，得到 ，当粒子相应的出射点分布在三分之一圆周上时，根据几何关系*r*2 = *R*sin60°，又因为，则*v*2∶*v*1为∶1，故选C。

**【点拨提炼】**

带电粒子在有界磁场中运动，其本质是粒子运动的轨迹与直线或曲线（中学阶段都是圆形边界）之间的相交或相切的关系。动态圆的问题，分为“缩放圆”“旋转圆”“平动圆”等，实际上是由静到动的变化。建议在带电粒子在有界磁场中运动问题解决中，具有整体法的思想，不要仅仅看到粒子在有磁场的空间中的一段圆弧，而是要想象出，假设磁场没有边界时，整个圆形轨迹是如何的，就是要做到“眼前有圆弧，心中有整圆”。

**例3**.质量为*m*、电荷量为＋*q*的绝缘小球*a*，以某一初速度沿水平放置的绝缘板进入正交的匀强磁场和匀强电场区域，磁场方向如图所示。若小球*a*与绝缘地板间的动摩擦因数为*μ*，已知小球*a*自*A*点沿绝缘板做匀速直线运动，在*B*点与质量为*M =* 2*m*的不带电绝缘小球*b*发生弹性正碰，此时原电场立即消失(不计电场变化对磁场的影响)，磁场仍然不变，若碰撞时，小球*a*无电荷量损失，碰撞后，小球*a*做匀速直线运动返回*A*点，往返总时间为*t*，*AB*间距为*L*，已知重力加速度为*g*。求：

【B】(1)碰前*a*球速度大小；

【A】(2)磁感应强度大小；

【A】(3)匀强电场场强*E*；

【B】(4)全过程摩擦力做的功。

**【解析】**

1. 设碰前*a*球速度大小为*v*0，碰后*a*球、*b*球速度大小分别为*va*、*vb*，取向右为正方

向，由动量守恒定律和机械能守恒定律有

*mv*0 ＝ －*mva*＋*Mvb* ①

*mv* ＝  *mv*＋ *Mv* ②

联立①②式代入*M* ＝ 2*m*得

  ③

往返总时间 *t* ＝ ＋④

联立③④式得 *v*0 ＝ ⑤

1. *a*球碰后匀速返回，*a*球受到的支持力*F*N＝0，摩擦力*Ff*＝0，则有

*qvaB* ＝ *mg* ⑥

联立③⑤⑥式得 *B* ＝ ⑦

1. *a*球碰前匀速运动，则有

竖直方向 *F*N ＝ *mg*＋*qv*0*B* ⑧

水平方向 *qE* ＝ *μF*N ⑨

联立⑤⑦⑧⑨式得 *E* ＝ ⑩　方向水平向右

1. 碰前摩擦力对*a*球做的功*W*1 ＝－*Ff* *L*＝－*qEL* ⑪

碰后摩擦力对*b*球做的功*W*2 ＝－*Mv* ⑫

故摩擦力对系统做的功为*W* ＝*W*1＋*W*2 ⑬

*W =*－⑭

变式1：在例3中，若绝缘地板光滑，撤去小球*b*，保持电场方向不变，磁场反向，场强大小为*E*，磁感应强度大小为*B*，小球*a*由静止释放。求：

【A】(1)小球*a*在绝缘板上运动的时间；

【A】(2)小球*a*在绝缘板上运动的距离。

【解析】

（1）小球*a*刚要离开绝缘地板时，则有*qvB* ＝ *mg* ①

小球*a*在绝缘地板上运动过程，由动量定理得*qEt* ＝ *mv*－0 ②

联立①②式得 *t* ＝ ③

（2）小球*a*在绝缘地板上运动过程，由动能定理得*qEx* ＝ *mv*2－0 ④

联立①④式得 *x*＝ ⑤

变式2： 在例3中，若小球*a*、*b*碰撞后，立即改变电场强度的大小和方向，使小球*a*做圆周运动。其他条件保持不变。求：

【A】(1)电场强度的大小和方向；

【B】(2)小球*a*离开绝缘地板的最大距离。

【解析】

1. 小球*a*做圆周运动，则有*qE* ＝ *mg* ①

由①式得 *E* ＝ ② 方向竖直向上

1. 对小球*a，*由牛顿第二定律得*qvaB* ＝ *m* ③

其中*va*＝*v*0，*v*0＝，*B*＝④

设小球*a*离开绝缘地板的最大距离为*x*m，则

*x*m ＝ 2*R* ⑤

联立③④⑤式得 *x*m ＝ ⑥

【**方法提炼**】

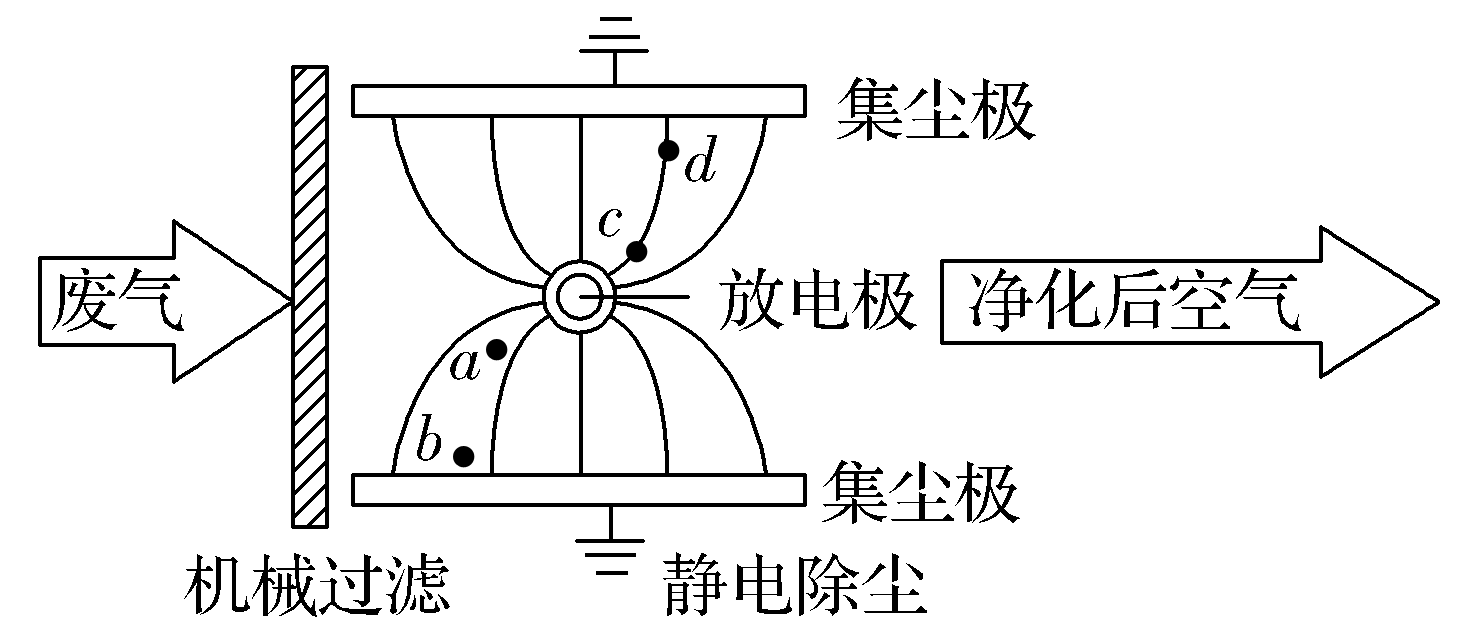
**1. 问题解决的关键线索**

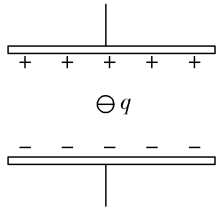
**2.注意点**

一是注意带电粒子的重力是否考虑；二是多过程一般要分段处理，根据不同运动形式的特点，确定衔接点处的速度大小、方向是解决问题的关键。三是精准画出运动轨迹，注意轨迹的对称性、周期性等。

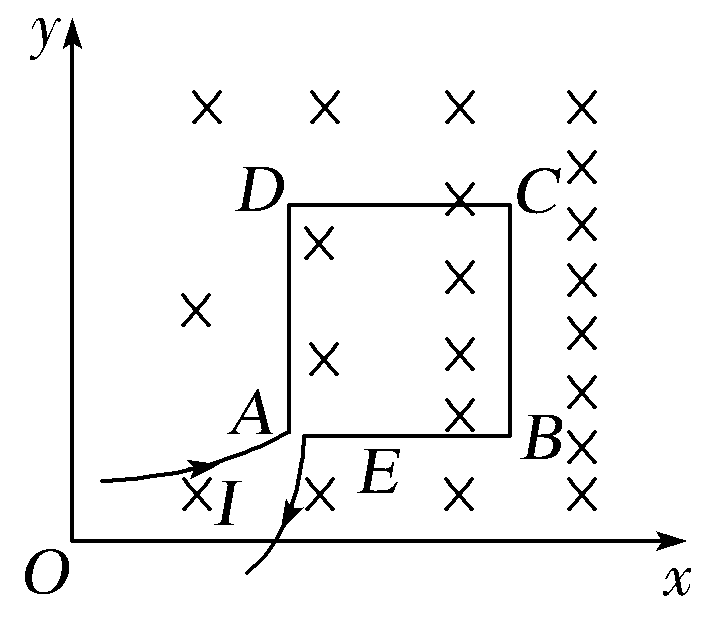
【**针对训练**】

【A】1.如图所示为静电除尘机理图，废气先经过一个机械过滤装置，再进入静电除尘区，放电极(位于中央)和集尘极分别接到高压直流电源的两极上，其间电场线如图。带负电的尘埃在电场力的作用下向集尘极运动并沉积，达到除尘目的。不考虑尘埃间的相互作用及其他作用，下列说法正确的是(　　)

1. 电场线方向由放电极指向集尘极
2. 图中*a*点电场强度小于*b*点电场强度
3. 尘埃会沿电场线从*c*向*d*运动
4. 尘埃在运动过程中动能增大

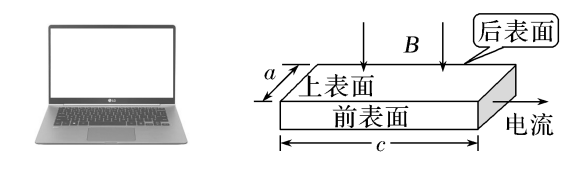
【A】2.(多选)如图所示，在水平放置的已经充电的平行板电容器之间，有一带负电的油滴处于静止状态。若某时刻油滴的电荷量开始减小(质量不变)，为维持该油滴原来的静止状态应(　　)

1. 给平行板电容器继续充电，补充电荷量
2. 让平行板电容器放电，减少电荷量
3. 使两极板相互靠近些
4. 将上极板水平右移一些

【B】3.如图，在平面直角坐标系的第一象限分布着非匀强磁场，磁场方向垂直于纸面向里，沿*y*轴方向磁场分布是均匀的，沿*x*轴方向磁感应强度*B*与*x*满足关系*B*＝*kx*，其中*k*是一恒定的正数。由粗细均匀的同种规格导线制成的正方形线框*ADCBE*边长为*a*，*A*处有一极小开口*AE*，整个线框放在磁场中，且*AD*边与*y*轴平行，*AD*边与*y*轴间距离为*a*，线框*A*、*E*两点与一电源相连，稳定时流入线框的电流为*I*。关于线框受到的安培力情况，下列说法正确的是(　　)

1. 整个线框受到的合力方向与*BD*连线垂直
2. 整个线框沿*y*轴方向所受合力为0
3. 整个线框在*x*轴方向所受合力为*ka*2*I*，沿*x*轴正向
4. 整个线框在*x*轴方向所受合力为*ka*2*I*，沿*x*轴正向

【C】4. (多选)笔记本电脑机身和显示屏对应部位分别有磁体和霍尔元件。当显示屏开启时磁体远离霍尔元件，电脑正常工作；当显示屏闭合时磁体靠近霍尔元件，屏幕熄灭，电脑进入休眠状态。如图所示，一块宽为*a*、厚为*b*、长为*c*的矩形半导体霍尔元件，元件内的导电粒子是电荷量为*e*的自由电子，通入方向向右、电流强度为*I*的电流。当显示屏闭合时元件处于垂直于上表面、方向向下的匀强磁场中，于是元件的前、后表面间出现电压*U*，以此控制屏幕的熄灭。则元件的(　　)



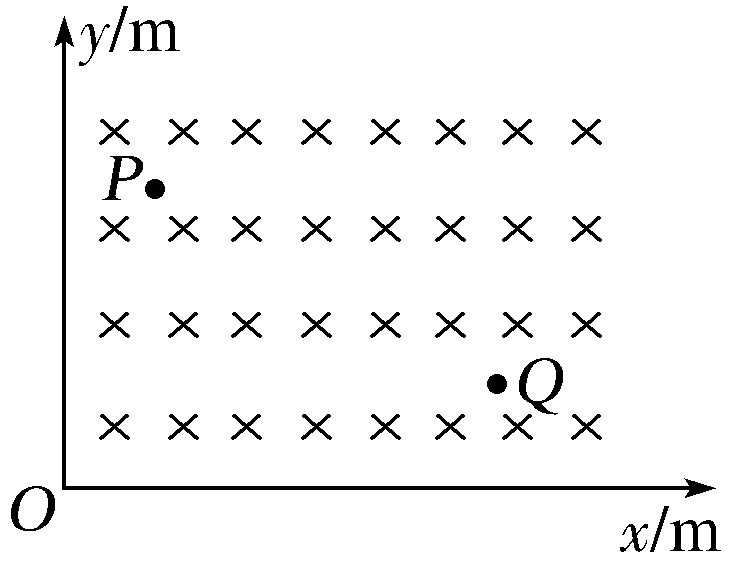
*b*

1. 前表面的电势比后表面的高
2. 自由电子受到的洛伦兹力大小为

C. 前、后表面间的电压*U*与*I*无关

D. 前、后表面间的电压*U*与*b*成反比

5.如图，直角坐标系*xOy*区域内存在垂直纸面向里的匀强磁场，磁感应强度*B*＝ T。现有一带负电的粒子，电荷量*q*＝－1×10－6 C，质量*m*＝5×10－12 kg，以*v*＝1×106 m/s的速度先后经过*P*(1，5)、*Q*(5，2)两点，粒子重力不计，求：（计算结果保留一位有效数字）

【A】(1)粒子做圆周运动的半径*R*；

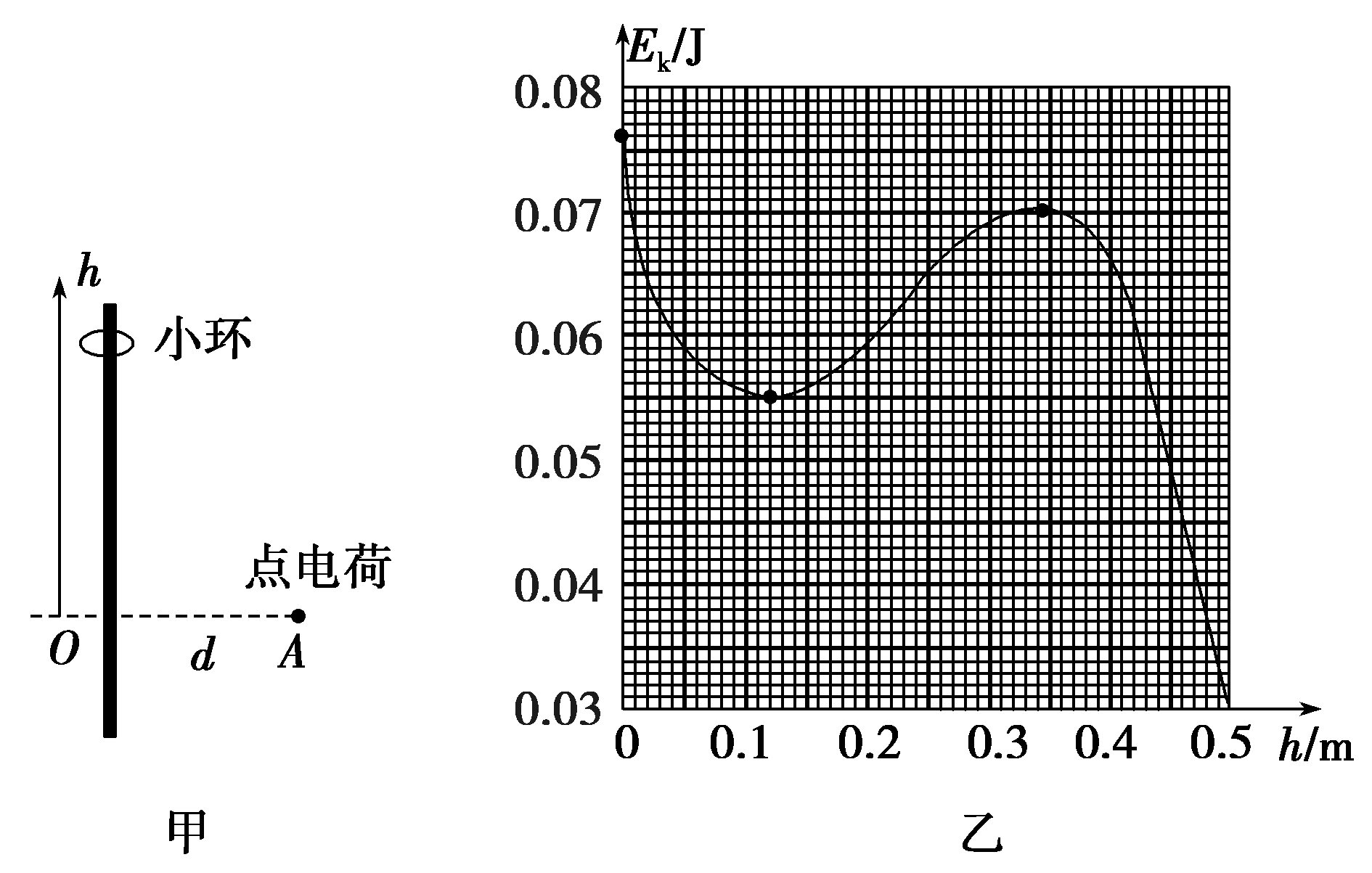
【B】(2)粒子从*P*运动到*Q*所用的时间*t*。

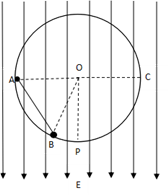
6.如图甲所示，一光滑绝缘细杆竖直放置，在细杆右侧*d*＝0.30 m的*A*点处有一固定的点电荷。细杆上套有一带电荷量*q*＝1×10－6 C、质量*m*＝0.05 kg的小环。设小环与点电荷的竖直高度差为*h*，将小环由静止释放后，其动能*E*k随*h*的变化曲线如图乙所示。已知静电力常量*k* ＝ 9.0×109 N·m2/C2，重力加速度*g* ＝10 m/s2。(计算结果保留两位有效数字)

【A】(1)试估算点电荷所带电荷量*Q*的大小；

【B】(2)求小环位于*h*1＝0.40 m处时的加速度*a*；

【C】(3)求小环从*h*2＝0.36 m处下落到*h*3＝0.06 m处的过程中，其电势能的改变量。



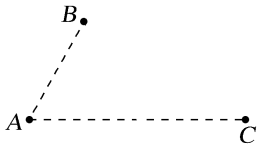
7.如图，在竖直平面内半径为*R*的光滑圆形绝缘轨道的内壁，有质量分别为*m*和2*m*的A、B两个小球用长为*R*的绝缘细杆连接在一起，A球不带电，B球所带的电荷量为-*q*（*q*>0）。整个装置处在竖直向下的匀强电场中。开始时A球处在与圆心等高的位置，现由静止释放，B球刚好能到达轨道右侧与圆心等高的位置C。求：

【A】(1)匀强电场电场强度的大小*E*；

【B】(2)当B小球运动到最低点*P*时，两小球的动能分别是多少；

【C】(3)两小球在运动过程中最大速度的大小。

8.如图，*A*、*B*、*C*为同一平面内的三个点，在垂直于平面方向加一匀强磁场，将一质量为*m*、带电荷量为*q*(*q*＞0)的粒子以初动能*E*k自*A*点垂直于直线*AC*射入磁场，粒子依次通过磁场中*B*、*C*两点所用时间之比为1∶3。若在该平面内同时加匀强电场，从*A*点以同样的初动能沿某一方向射入同样的带电粒子，该粒子到达*B*点时的动能是初动能的3倍，到达*C*点时的动能为初动能的5倍。已知*AB*的长度为*l*，不计带电粒子的重力，求：

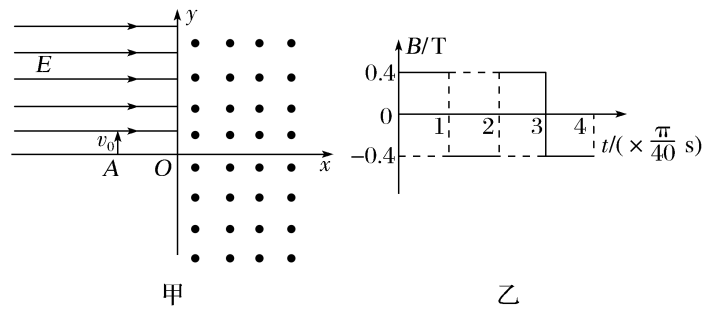
【B】(1)磁感应强度的大小和方向；

【C】(2)电场强度的大小和方向。

9.如图甲所示，直角坐标系*xOy*中，第二象限内有沿*x*轴正方向的匀强电场，第一、四象限内有垂直坐标平面的匀强交变磁场，磁场方向垂直纸面向外为正方向。第三象限内有一发射装置(没有画出)沿*y*轴正方向射出一个比荷＝100 C/kg的带正电的粒子(可视为质点且不计重力)，该粒子以*v*0＝20 m/s的速度从*x*轴上的点*A*(－2 m，0)进入第二象限，从*y*轴上的点*C*(0，4 m)进入第一象限。取粒子刚进入第一象限的时刻为0时刻，第一、四象限内磁场的磁感应强度按图乙所示规律变化，*g*＝10 m/s2。

【B】(1)求第二象限内电场的电场强度大小；

【C】(2)求粒子第一次经过*x*正半轴时的位置坐标。



**【核心问题】专题5---带电粒子在电磁场中运动**

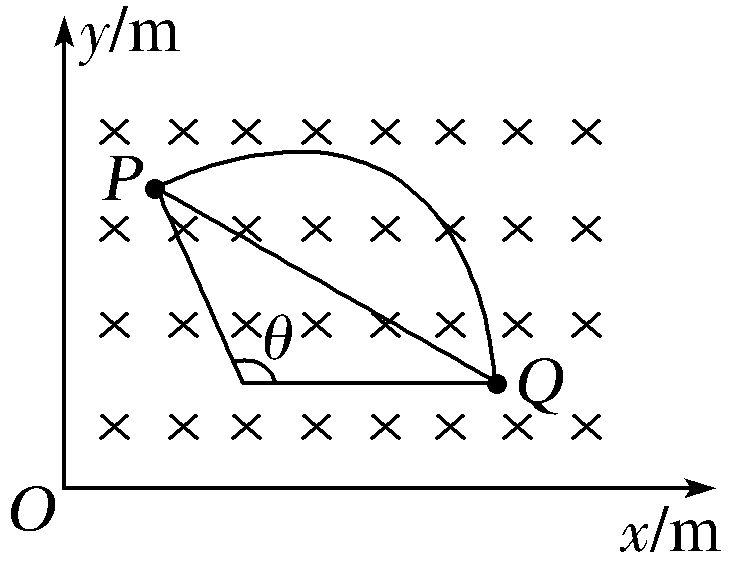
**参考答案**

【**针对训练**】

1.D 2. AD 3.B 4.AD

5.(1)由于粒子做匀速圆周运动，*qvB* ＝ ，代入数据得*R* ＝ = 3 m

(2)由题意，粒子的运动轨迹如图所示

由几何关系可知*xPQ*＝5 m sin ＝ ＝

故粒子转过的圆心角为*θ* ＝ π 则

运动时间*t* ＝ ×*，*代入数据得*t* ≈ 6×10－6 s

6.（1）由题图乙可知，当*h*′＝0.36 m(或*h*′＝0.12 m)时，小环所受合力为零，则有*k*×＝*mg*　　 ①

代入已知数据得 *Q*＝＝1.6×10－5 C

（2）小环加速度沿杆方向，则 *mg*－*F*1＝*ma* ②

又 *F*1＝*k*　　　 ③

代入数据得*a*＝0.78 m/s2，方向竖直向下

（3）设小环从*h*2＝0.36 m处下落到*h*3＝0.06 m处的过程中，电场力对小环做功为*W*E

由动能定理有*mg*(*h*2－*h*3)＋*W*E＝Δ*E*k　　 ④

代入数据得*W*E＝Δ*E*k－*mg*Δ*h* ≈－0.16J

所以小环的电势能增加了0.16 J

7.（1）B刚好到达C过程中，系统转过的角度为120°，与水平方向的夹角为60°

由动能定理有  ①

由①式得 

1. AB在运动的过程中，速度大小始终相等，则

 ②

在运动到p点的过程中，由动能定理得

 ③

联立②③式得 

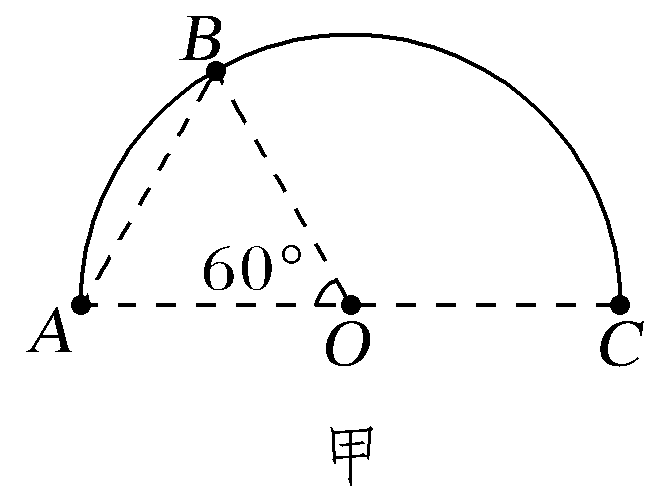
（3）设ＯＡ转过的角度为*θ*时，两球有最大速度，则由动能定理可得



整理得 

可知，当时，有最大速度 

8.(1)设*AC*中点为*O*，由题意可知*AC*长度为粒子在磁场中做匀速圆周运动的直径，连接*OB*。因为粒子在运动过程中依次通过*B*、*C*两点所用时间之比为1∶3，所以∠*AOB*＝60°，圆周运动的半径*r*＝*l*

由牛顿第二定律和洛伦兹力公式得 *qvB*＝*m*

初动能 *E*k＝*mv*2

解得*B*＝

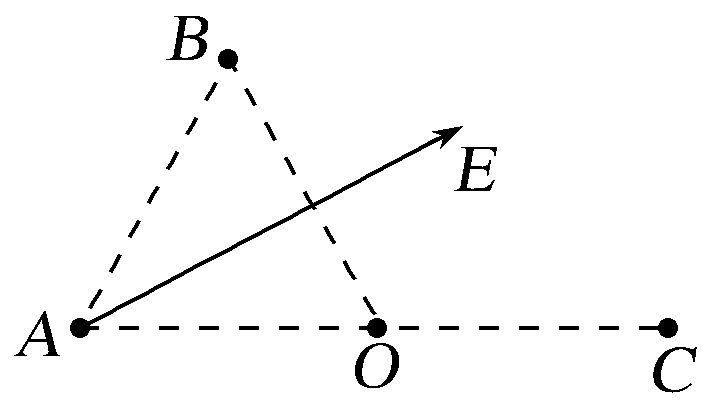
因为粒子带正电，根据洛伦兹力受力方向可以判断，磁感应强度*B*的方向为垂直

纸面向外。

（2）加上电场后，只有电场力做功，从*A*到*B qUAB*＝3*E*k－*E*k 从*A*经*B*到*C*

*qUAC*＝5*E*k－*E*k *UAC*＝2*UAB* 在匀强电场中，沿任意一条直线电势的降落是均匀的，

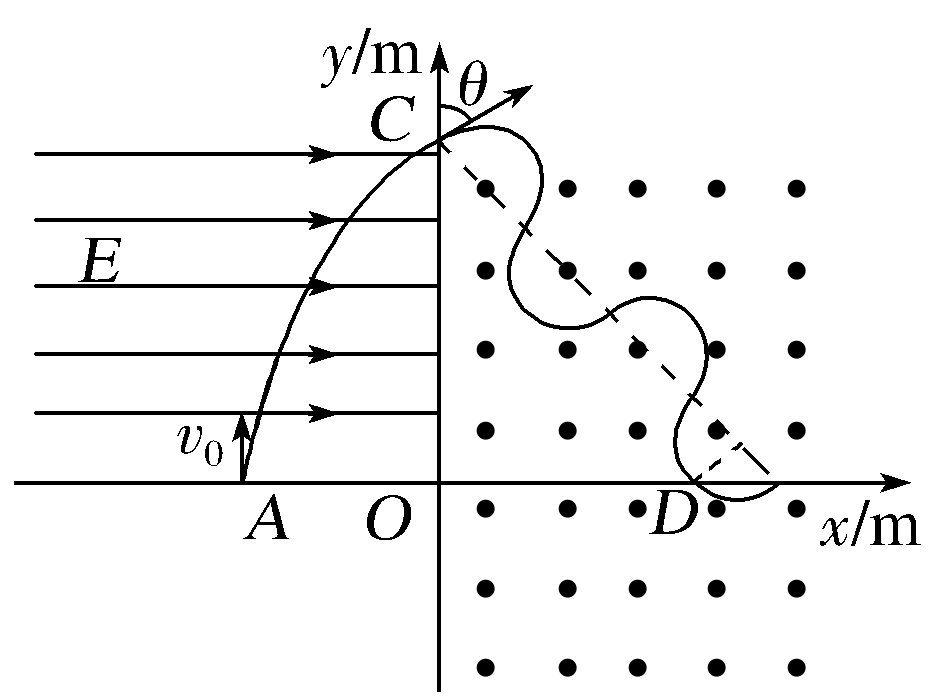
可以判断*O*点与*B*点是等电势的，所以，电场强度*E*与*OB*垂直；因为由*A*到*B*电

场力做正功，所以电场强度的方向与*AC*成30°夹角斜向上

方。设电场强度的大小为*E*，有*UAB*＝*El*cos 30°

联立解得*E*＝。

9.(1)带电粒子在第二象限的匀强电场中做类平抛运动，设粒子从*A*点到*C，*则

*qE*|*xA*| ＝ *m*(*v*－*v*) |*xA*| ＝ *t*，|*yC*| ＝ *v*0*t v* ＝ *v*＋*v*

解得*E* ＝ 1.0 N/C，*vC* ＝ 20 m/s。

(2)设粒子在*C*点的运动方向与*y*轴正方向成*θ*角，

则cos *θ* ＝ ＝ ，即*θ* ＝ 45°

粒子在第一象限的磁场中运动时有*qvCB* ＝ *m*

解得*r* ＝ m

粒子做圆周运动的周期*T* ＝ ＝ s

所以粒子在磁场中的运动轨迹如图所示，粒子运动第四个半圆的过程中第一次经过*x*正半轴，设粒子第一次经过*x*正半轴的点为*D*点，在*x*正半轴上对应的弦长为

*r* ＝ 1 m，所以*OD* ＝3 m

粒子第一次经过*x*正半轴时的位置坐标为(3 m，0)。