第 04 讲 带电粒子在电场中的运动（复习篇）

模块导航

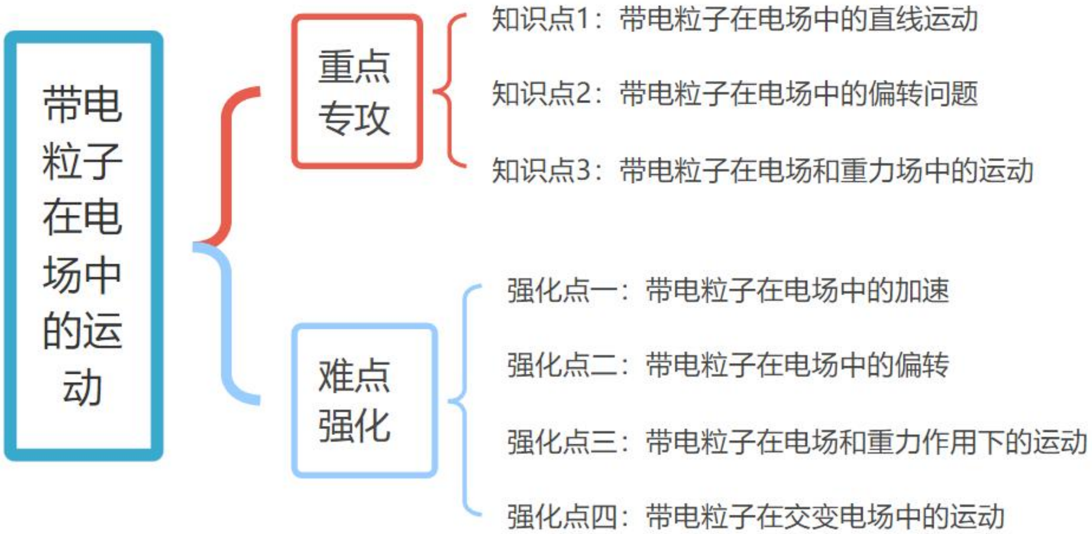
考点聚焦：复习要点+知识网络，有的放矢

重点专攻：知识点和关键点梳理，查漏补缺

难点强化：难点内容标注与讲解，能力提升

提升专练：真题感知+提升专练，全面突破

考点聚焦



重点专攻

知识点 1：带电粒子在电场中的直线运动

1. 带电粒子在电场中运动时重力处理

（1）基本粒子：如电子、质子、α粒子、离子等，除了有说明或明确的暗示以外，一般都不考虑重力（但不能忽略质量）.

（2）带电粒子：如液滴、油滴、尘埃、小球等，除有说明或明确的暗示以外，一般都要考虑重力；

2．做直线运动的条件

（1）粒子所受合力 $F_{合}=0$，粒子或静止，或做匀速直线运动。

（2）粒子所受合力 $F_{合}\neq0$，且与初速度方向在同一条直线上，带电粒子将做匀加速直线运动或匀减速直线运动。

3．用动力学观点分析

$$a=\frac{qE}{m}，E=\frac{U}{d}，v^2-v_0^2=2ad。$$

4．用功能观点分析

（1）匀强电场中：$W=qEd=qU=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$

（2）非匀强电场中：$W=qU=E_{k2}-E_{k1}$

知识点 2：带电粒子在电场中的偏转问题

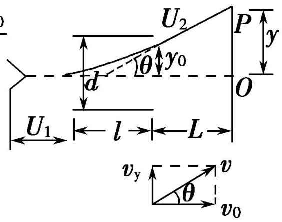
1．带电粒子在电场中的偏转规律

偏转 $\xrightarrow{v\perp E}$ 类平抛运动 $\xrightarrow{\text{只受电场力}}$

偏转角：$\tan\theta=\frac{v_y}{v_0}=\frac{qU_2l}{mdv_0^2}=\frac{U_2l}{2U_1d}=\frac{2y_0}{l}$

侧移距离：$y_0=\frac{qU_2l^2}{2mdv_0^2}=\frac{U_2l^2}{4dU_1}$

$y=y_0+L\tan\theta=(\frac{l}{2}+L)\tan\theta$



温馨提示 重要推论

（1）粒子从偏转电场中射出时，其速度方向的反向延长线与初速度方向的延长线交于一点，此点为粒子水平位移的中点。

（2）不同的带电粒子经同一电场加速后，又进入同一偏转电场，在偏转电场中的偏移量和偏转角都相同。若电性相同，则所有粒子的轨迹必定重合。

2. 计算粒子打到屏上的位置离屏中心的距离的方法

（1）$y=y_0+L\tan\theta$（L 为屏到偏转电场的水平距离）；

（2）$y=(\frac{l}{2}+L)\tan\theta$（$l$ 为电场宽度）；

（3）$y=y_0+v_y\cdot\frac{L}{v_0}$；

（4）根据三角形相似 $\frac{y}{y_0}=\frac{\frac{l}{2}+L}{\frac{l}{2}}$.

温馨提示 处理带电粒子的偏转问题的方法

（1）运动的分解法

一般用分解的思想来处理，即将带电粒子的运动分解为沿电场力方向上的匀加速直线运动和垂直电场力方向上的匀速直线运动.

（2）功能关系

当讨论带电粒子的末速度 v 时也可以从能量的角度进行求解：$qU_y=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$，其中 $U_y=\frac{U}{d}y$，指初、末位置间的电势差.

知识点3：带电粒子在电场和重力场中的运动

1．带电体在电场和重力场的叠加场中运动的一般分析方法

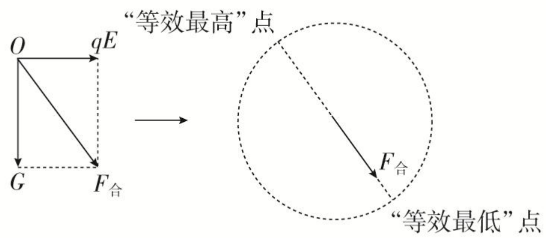
(1)对带电体的受力情况和运动情况进行分析，综合运用牛顿运动定律和匀变速直线运动的规律解决问题。

(2)根据功能关系或能量守恒的观点，分析带电体的运动时，往往涉及重力势能、电势能以及动能的相互转化，总的能量保持不变。

2．带电体在电场和重力场的叠加场中的圆周运动

(1)“等效重力”法

将重力与静电力进行合成，如图所示，则$F_{合}$为等效重力场中的“等效重力”，$g'=\frac{F_{合}}{m}$为等效重力场中的“等效重力加速度”，$F_{合}$的方向为“等效重力”的方向。



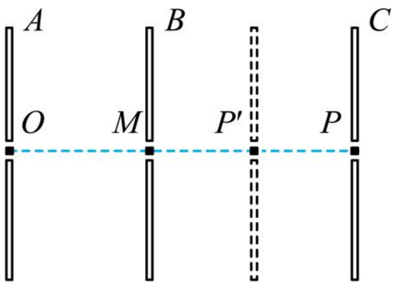
(2)“等效最高”点和“等效最低”点：在“等效重力场”中做圆周运动的小球，过圆心作合力的平行线，交于圆周上的两点即为“等效最高”点和“等效最低”点。

难点强化

强化点一　带电粒子在电场中的加速

带电粒子在匀强电场中所受的电场力方向与运动方向在同一条直线上时，可应用牛顿第二定律结合运动学公式求解，也可应用动能定理求解：带电粒子在非匀强电场中运动时，只能应用动能定理求解。

【典例1】（23-24高一下·江苏南京·期末）如图所示，三块平行放置的带电金属薄板A、B、C中央各有一小孔，小孔分别位于O、M、P点，由O点静止释放的电子恰好能运动到P点，现将C板向左平移到P'点，则由O点静止释放的电子（　　）



A．运动到P点返回　　B．运动到P和P'点之间返回

C．运动到P'点返回　　D．穿过P'点后继续运动

【答案】D

【详解】由 O 点静止释放的电子恰好能运动到 P 点，表明电子在薄板 A、B 之间做加速运动，电场力做正功，电场方向向左，在薄板 B、C 之间做减速运动，电场力做负功，电场方向向右，到达 P 点时速度恰好为 0，之后，电子向左加速至 M 点，再向左减速至 O 点速度为 0，之后重复先前的运动，根据动能定理有

$$-eU_{OM}-eU_{MP}=0$$

解得

$$U_{MP}=-U_{OM}=U_{MO}$$

根据

$$C=\frac{Q}{U}=\frac{\varepsilon S}{4\pi kd}$$

当 C 板向左平移到 P' 点，B、C 间距减小，B、C 之间电压减小，则有

$$U_{MP}=U_{MO}>U_{MP'}$$

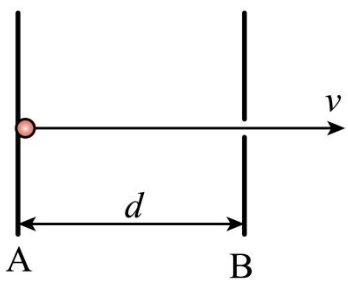
结合上述有

$$-eU_{OM}-eU_{MP'}>0$$

可知，电子减速运动到 P' 的速度不等于 0，即电子穿过 P' 点后继续向右运动。

故选 D。

【变式 1-1】（23-24 高二上·江西九江·期末）平行金属板 A、B 竖直放置，间距为 d，充电后与电源分离，将一带正电粒子从 A 板附近由静止释放，仅在静电力的作用下从 B 板上小孔射出。现将极板间距变为 $2d$，再将同一粒子从 A 板附近由静止释放，则（　　）



A．粒子射出时的速度增加为原来两倍　　B．粒子运动的加速度大小不变

C．系统电势能的减少量不变　　D．静电力的冲量大小不变

【答案】B

【详解】B．根据

$$C=\frac{Q}{U}$$

$$C=\frac{\varepsilon_r S}{4\pi kd}$$

$$E=\frac{U}{d}$$

解得

$$E=\frac{4\pi kQ}{\varepsilon_r S}$$

由电容器充电后与电源分离可得 Q 不变，所以 E 不变，则粒子所受静电力不变，由牛顿第二定律得粒子加速度不变，故 B 正确；

A．根据公式

$$v^2=2ad$$

若将极板间距变为 2d，可得粒子射出时速度变为 $\sqrt{2}v$，故 A 错误；

C．静电力做功为

$$W=Eqd=\left|\Delta E_{\mathrm{p}}\right|$$

d 变为 2 倍，则电势能的减少量变为 2 倍，故 C 错误；

D．静电力的冲量为

$$I=Eqt=\Delta p=mv-0$$

速度变为 $\sqrt{2}v$，则静电力的冲量变为 $\sqrt{2}$ 倍，故 D 错误。

故选 B。

【变式 1-2】（23-24 高二上·四川绵阳·期末）粒子加速器是基础科学研究的重要设备，可以使带电粒子获得很高的能量。图甲为某加速装置的示意图，它由很多个横截面积相同的金属圆筒依次排列组成，其轴线在同一直线上，序号为奇数的圆筒与序号为偶数的圆筒分别与两极间电势差的变化规律如图乙所示的交变电源的两极相连。在 t=0 时刻，奇数圆筒相对偶数圆筒的电势差为正值，此时刻与偶数圆筒相连的金属圆板（序号为 0）的中央有一电子，在圆板和圆筒 1 之间的电场中由静止开始加速，沿中心轴线进入圆筒 1。为使电子在圆筒之间的间隙都能被加速，圆筒长度的设计必须遵照一定的规律。

若电子的质量为 m，电荷量为 $-e$，交变电源的电压为 U，周期为 T，两圆筒间隙的电场可视为匀强电场，圆筒内场强均为零。不计电子的重力，电子运动过程中质量不变。

（1）求电子进入圆筒 1 时的动量大小；

（2）若忽略电子通过圆筒间隙的时间，第 3 个金属圆筒的长度 L_3 应该为多大？

（3）若电子通过圆筒间隙的时间不可忽略，且圆筒间隙的距离均为 d，仍然保持交变电源两极间电势差的变化规律如图乙所示，各圆筒长度与在忽略电子通过圆筒间隙时间条件下设计的长度相同的情况下，求该装置能够让电子获得的最大速度。

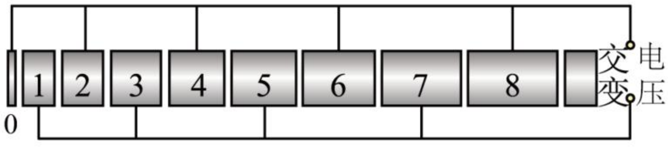


图1

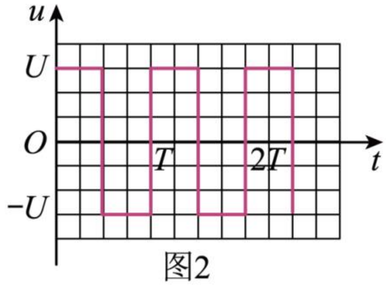


图2

【答案】（1）$\sqrt{2meU}$；（2）$\sqrt{\frac{3eU}{2m}}T$；（3）$\frac{eUT}{2md}$

【详解】（1）电子由金属圆板经电场加速进入圆筒 1，根据动能定理得

$eU=\frac{1}{2}mv_1^2$ 电子进入圆筒 1 时的动量大小为

$$p=mv_1$$

联立解得

$$p=\sqrt{2meU}$$

（2）电子进入第 3 个圆筒时，经过 3 次加速，根据动能定理得

$$3eU=\frac{1}{2}mv_3^2$$

由于不计电子通过圆筒间隙的时间，则电子在圆筒内做匀速直线运动的时间恰好是半个周期，则

$$L_3=\frac{v_3T}{2}$$

联立解得

$$L_3=\sqrt{\frac{3eU}{2m}}T$$

（3）由题意，若电子通过圆筒间隙的时间不可忽略，则电子进入每级圆筒的时间都要比忽略电子通过圆筒间隙中对应时间延后一些，当延后时间累计为$\frac{T}{2}$，则电子再次进入电场时将开始做减速运动，此时的速度就是装置能够加速的最大速度，则有

$$Nd=\frac{v_{\mathrm{m}}}{2}\frac{T}{2}$$

根据动能定理得

$$NeU=\frac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2$$

联立解得

$$v_{\mathrm{m}}=\frac{eUT}{2md}$$

强化点二　带电粒子在电场中的偏转

带电粒子在电场中的偏转是类平抛运动，故需从两个方向分析:垂直电场方向的匀速运动和沿电场方向的匀加速运动。

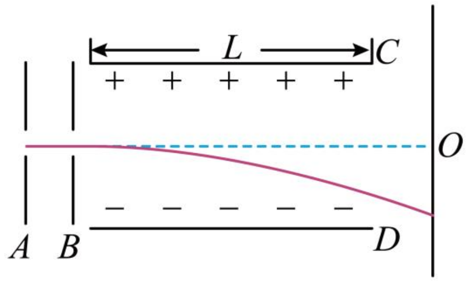
【典例 2】（23-24 高二下·湖南益阳·期末）如图，竖直放置的 A、B 与水平放置的 C、D 为两对正对的平行金属板，A、B 两板间电势差为U_1，C、D 两板分别带正电和负电，两板间电势差为U_2，两板间距离为 d，C、D 两极板长均为 L。一质量为 m，电荷量为$+q$ 的带电粒子（不计重力）由静止从 A 板开始经 A、B 间电

压加速后穿过 C、D 并发生偏转（CD 右侧没有电场），最后打在荧光屏上。求：

（1）粒子离开 B 板时速度大小 v；

（2）粒子刚穿过 C、D 时的竖直偏转位移 y；

（3）粒子打在荧光屏上时的动能。



【答案】（1）$v=\sqrt{\dfrac{2qU_1}{m}}$；（2）$y=\dfrac{U_2L^2}{4U_1d}$；（3）$E_k=qU_1+\dfrac{qU_2^2L^2}{4U_1d^2}$

【详解】（1）粒子在加速电场中加速过程，由动能定理可得

$$qU_1=\frac{1}{2}mv^2$$

得

$$v=\sqrt{\frac{2qU_1}{m}}$$

（2）粒子在偏转电场中做类平抛运动，由动力学知识可得

$$a=\frac{qE}{m}$$

$$E=\frac{U_2}{d}$$

$$L=vt$$

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

联立得

$$y=\frac{U_2L^2}{4U_1d}$$

（3）粒子从开始运动到打在荧光屏上整个过程根据动能定理可知

$$qU_1+qEy=E_k-0$$

$$E=\frac{U_2}{d}$$

联立得

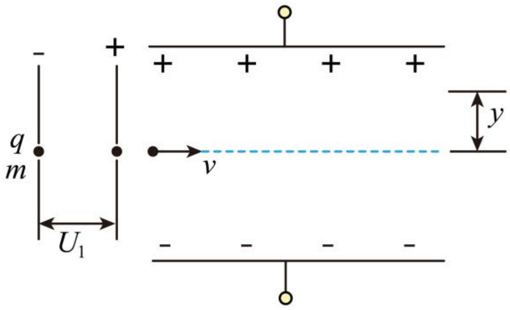
$$E_k=qU_1+\frac{qU_2^2L^2}{4U_1d^2}$$

【变式 2-1】（23-24 高二上·安徽六安·期末）如图所示，质量 $m=1\times10^{-8}\text{kg}$、电荷量 $q=-1\times10^{-6}\text{C}$ 的带电粒

子，由静止经电压$U_1=200\text{V}$加速电场加速后，从金属小孔穿出并从正中央垂直射入电压$U_2=400\text{V}$的偏转电场，偏转电场极板长度$L=4\text{cm}$，两极板间的距离$d=8\text{cm}$。不计带电粒子的重力。求：

（1）粒子离开加速电场时的速度 v 的大小；

（2）粒子在偏转电场中运动的加速度 a 的大小。



【答案】（1）$v=200\,\text{m/s}$；（2）$a=5\times10^5\ \text{m/s}^2$

【详解】偏转电场极板长度

$$L=4\text{cm}=0.04\text{m}$$

两极板间的距离

$$d=8\text{cm}=0.08\text{m}$$

（1）粒子在加速电场加速的过程，根据动能定理得

$$qU_1=\frac{1}{2}mv^2$$

解得

$$v=200\,\text{m/s}$$

（2）带电粒子在偏转电场中的加速度

$$a=\frac{U_2q}{dm}$$

解得

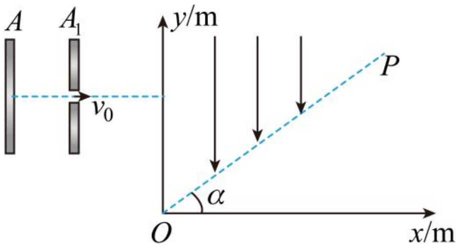
$$a=5\times10^5\ \text{m/s}^2$$

【变式 2-2】（23-24 高二上·福建福州·期末）如图所示，质量为 m、电荷量为 q 的质子从极板 A 处由静止加速，通过极板 A_1 间的小孔以$v_0=1\times10^7\text{m/s}$射出，然后从坐标系 xoy 中的 B 点（0，d）平行于 x 坐标轴进入 yOP 区域，该区域充满沿 y 轴负方向的匀强电场，OP 与 x 轴夹角$\alpha=45°$。已知质子比荷为$\frac{q}{m}=1\times10^8\text{C/kg}$，$d$=0.5m，不计质子的重力。求：

（1）极板 AA_1 间的加速电压 U；

（2）质子在电场中偏转并击中边界 OP 上的 C 点（x_1，y_1），已知 x_1=0.1m，求电场强度 E 的大小；

（3）改变电场强度的大小，场强方向不变，使质子在电场中偏转并垂直击中边界 OP 上的 D 点（x_2，y_2）（图中未标出），求 D 点的坐标。



【答案】（1）$5\times10^5\,\text{V}$；（2）$8\times10^7\,\text{N/C}$；（3）$(\frac{1}{3}\text{m},\frac{1}{3}\text{m})$

【详解】（1）根据动能定理可知

$$qU=\frac{1}{2}mv_0^2$$

解得

$$U=5\times10^5\,\text{V}$$

（2）粒子在电场中做类平抛运动，则水平方向有

$$x_1=v_0t_1$$

竖直方向有

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

其中

$$y_1=x_1，\quad a=\frac{qE}{m}$$

解得

$$E=8\times10^7\,\text{N/C}$$

（3）质子在电场中垂直击中边界 OP 上的 D 点，则

$$v_y=v_0\tan45^\circ$$

$$x_2=v_0t_2$$

$$y_2=v_0t_2$$

$$\frac{d-y_2}{x_2}=\frac{\tan45^\circ}{2}$$

联立解得

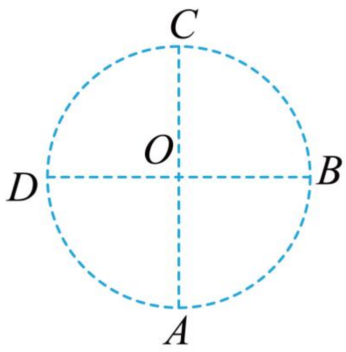
$$x_2=\frac{1}{3}\text{m}，\ y_2=\frac{1}{3}\text{m}$$

强化点三　带电粒子在电场力和重力作用下的运动

此类问题的研究对象往往是带电小球、带电液滴或带电微粒等，运动轨迹可能是直线，也可能是曲线。

可用动力学规律或功能关系分析。

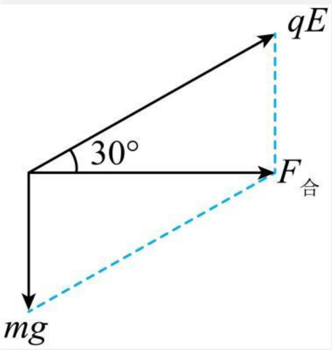
【典例3】（23-24高二下·河南信阳·期末）如图所示，半径为R的虚线圆位于竖直面内，AC和BD为相互垂直的两条直径，其中BD位于水平方向。竖直平面内有足够大的匀强电场，场强大小为$\frac{2mg}{q}$，方向与圆周平面平行。在圆周平面内将质量为m、带电荷量为$+q$的小球（可视为质点），从A点以相同的速率在圆周平面向各个方向抛出，小球会经过圆周上不同的点。在这些点中，到达B点时小球的动能最大。若将小球从A点垂直电场方向抛出，小球恰好能经过C点，则小球初速度为（重力加速度为g）（　　）



A．$\sqrt{gR}$　　B．$\sqrt{2gR}$　　C．$\sqrt{3gR}$　　D．$2\sqrt{gR}$

【答案】D

【详解】小球受到电场力和重力的合力，当到达等效最低点时动能最大，故B点为等效最低点，则小球受到的合力沿DB方向。受力如图



由平行四边形定则可知：电场方向与DB方向成$30°$

$$F_{合}=\frac{mg}{\tan 30°}=ma$$

则

$$a=\sqrt{3}g$$

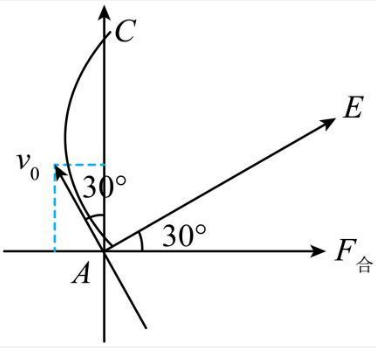
小球垂直电场抛出，做类斜上抛运动，如图，运动到C点过程

$$t=\frac{2v_0\sin 30°}{\sqrt{3}g}=\frac{\sqrt{3}v_0}{3g}$$

$$2R=v_0\cos 30°t$$

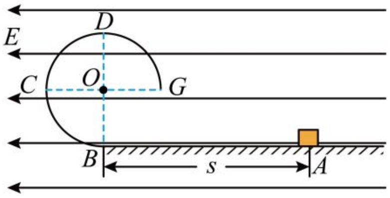
得

$$v_0 = 2\sqrt{gR}$$



故选 D。

【变式 3-1】（22-23 高二上·福建泉州·期中）如图所示，$BCDG$ 是光滑绝缘的 $\frac{3}{4}$ 圆形轨道，位于竖直平面内，轨道半径为 R，下端与水平绝缘轨道在 B 点平滑连接，整个轨道处在水平向左的匀强电场中，现有一质量为 m、带正电的小滑块（可视为质点）置于水平轨道上，滑块受到的电场力大小为 $\frac{3}{4}mg$，滑块与水平轨道间的动摩擦因数为 0.5，重力加速度为 g。



(1)若滑块从水平轨道上距离 B 点 s=3R 的 A 点由静止释放，从释放到滑块到达与圆心 O 等高的 C 点这一过程的电势能变化量；

(2)若滑块从水平轨道上距离 B 点 s=10R 的 A 点由静止释放，求滑块到达 D 点时对轨道的作用力大小；

(3)改变 s 的大小仍使滑块由静止释放，且滑块始终沿轨道滑行，并从 G 点飞出轨道，求 s 的最小值。

【答案】(1) $-3mgR$

(2)0

(3) $11.5R$

【详解】（1）若滑块从水平轨道上距离 B 点 s=3R 的 A 点由静止释放，从释放到滑块到达与圆心 O 等高的 C 点这一过程的电场力做功为

$$W_电 = F_电(s+R) = 3mgR$$

电场力做正功，电势能减小，故电势能变化量为

$$\Delta E_p = -W_电 = -3mgR$$

（2）若滑块从水平轨道上距离 B 点 s=10R 的 A 点由静止释放，设滑块到达 D 点时的速度为 v_D，从 A 点到 D 点过程运用动能定理，可得

$$F_电 s - \mu mgs - mg\cdot 2R = \frac{1}{2}mv_D^2 - 0$$

解得

$$v_D=\sqrt{gR}$$

在 D 点，根据牛顿第二定律

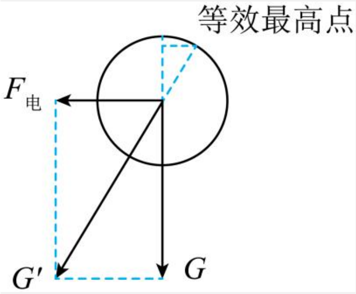
$$F_{\rm N}+mg=m\frac{v_D^2}{R}$$

解得

$$F_{\rm N}=0$$

滑块到达 D 点时受到轨道的作用力大小为 0。

（3）等效竖直平面圆周运动，要使滑块从 G 点飞出，则必须可以通过等效最高点，当恰好通过等效最高点时，满足题意的 s 最小。



等效重力由重力和电场力的合力提供

$$G'=\sqrt{(mg)^2+F_电^2}=\frac{5}{4}mg$$

等效重力与重力的夹角

$$\tan\theta=\frac{F_电}{G}=\frac{3}{4}$$

解得

$$\theta=37^\circ$$

当恰好通过等效最高点时的速度设为 v，则此时满足

$$G'=m\frac{v^2}{R}$$

从 A 点由静止释放到达等效最高点过程，由动能定理可得

$$F_电\left(s-R\sin37^\circ\right)-\mu mgs-mgR\left(1+\cos37^\circ\right)=\frac{1}{2}mv^2-0$$

解得

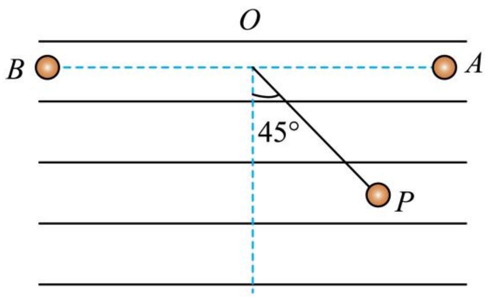
$$s=11.5R$$

【变式 3-2】（23-24 高二上·上海黄浦·期末）如图所示，一质量为 m 带正电的小球，用长为 L 的绝缘细线悬挂于 O 点，处于一水平方向的匀强电场中，静止时细线右偏与竖直方向成 45°角，位于图中的 P 点。重力加速度为 g，求：

（1）静止在 P 点时线的拉力是多大？

（2）如将小球向右拉紧至与 O 点等高的 A 点由静止释放，则当小球摆至 P 点时，其电势能如何变？变化了多少？

（3）如将小球向左拉紧至与 O 点等高的 B 点由静止释放，则小球到达 P 点时的速度大小？



【答案】（1）$\sqrt{2}mg$；（2）电势能增加；$\frac{2-\sqrt{2}}{2}mgL$；（3）$\sqrt{2\sqrt{2}gL}$

【详解】（1）由平衡可知

$$qE = mg\tan 45^\circ$$

细线的拉力

$$T = \frac{mg}{\cos 45^\circ} = \sqrt{2}mg$$

（2）如将小球向右拉紧至与 O 点等高的 A 点由静止释放，则当小球摆至 P 点时，电场力做负功，则电势能增加，增加量为

$$\Delta E_{\mathrm{p}} = W = EqL\left(1-\cos 45^\circ\right)$$

解得

$$\Delta E_{\mathrm{p}} = \frac{2-\sqrt{2}}{2}mgL$$

（3）小球先做匀加速直线运动到达最低点 C，根据动能定理得

$$\frac{1}{2}mv_C^2 = mgR + qER$$

解得

$$v_C = 2\sqrt{gL}$$

到达 C 点后细绳绷紧，小球沿细绳方向的速度变为零，则垂直绳方向的速度

$$v_C' = v_C\sin 45^\circ = \sqrt{2gL}$$

从 C 到 P 做圆周运动，由动能定理得

$$\frac{1}{2}mv_P^2 - \frac{1}{2}mv_C'^2 = EqL\sin 45^\circ - mgL(1-\cos 45^\circ)$$

解得

$$v_P = \sqrt{2\sqrt{2}gL}$$

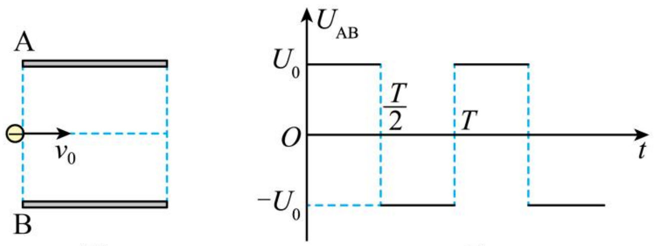
强化点四　带电粒子在交变电场中的运动

从带电粒子在板间运动的时间不同，划分为两种情形:

(1)类似于示波管的情况，速度很大的粒子在板间运动的时间 t 远小于交变电压的周期 T，此时需采用近似方法处理，认为粒子通过极板间的时间内电压不变，且认为此时的电压等于粒子入射时的瞬时电压。

(2)粒子在板间的运动时间 t 与交变电压变化周期 T 相差不大甚至 t>T，此类问题常用动力学知识分段求解，重点分析各段时间内的加速度、运动性质，每段运动时间与交变电场的周期 T 间的关系等。有时也可借助图像来描述带电粒子在电场中的运动情况。

【典例 4】（23-24 高二下·四川·期末）如图甲所示，两平行金属板 A、B 的板长和板间距均为 d，两板之间的电压随时间周期性变化规律如图乙所示。一不计重力的带电粒子束先后以速度 v_0 从 O 点沿板间中线射入极板之间，若 $t=0$ 时刻进入电场的带电粒子在 $t=T$ 时刻刚好沿 A 板右边缘射出电场，则（　　）



甲　　　　乙

A．$t=0$ 时刻进入电场的粒子离开电场时速度大小为 $\sqrt{2}v_0$

B．$t=\frac{T}{2}$ 时刻进入电场的粒子离开电场时速度大小为 v_0

C．$t=\frac{T}{4}$ 时刻进入电场的粒子在两板间运动过程中的最大速度为 $\frac{3}{2}v_0$

D．$t=\frac{T}{4}$ 时刻进入电场的粒子在两板间运动过程中离 A 板的最小距离为 0

【答案】B

【详解】A．依题意可知粒子带负电，由受力分析可知，$t=0$ 时刻进入电场的粒子，沿电场方向在 $0\sim\frac{T}{2}$ 内向上做匀加速运动，在 $\frac{T}{2}\sim T$ 内向上做匀减速运动，根据对称性可知，在 $t=T$ 时刻，沿电场方向的速度刚好减为 0，则粒子离开电场时速度大小为 v_0，故 A 错误；

B．$t=\frac{T}{2}$ 时刻进入电场的粒子，沿电场方向在 $\frac{T}{2}\sim T$ 内向下做匀加速运动，在 $T\sim\frac{3T}{2}$ 内向下做匀减速运动，根据对称性可知，在 $t=\frac{3T}{2}$ 时刻，沿电场方向的速度刚好减为 0，则粒子离开电场时速度大小为 v_0，故 B 正确；

CD．$t=\frac{T}{4}$ 时刻进入电场的粒子，沿电场方向在 $\frac{T}{4}\sim\frac{T}{2}$ 内向上做匀加速运动，在 $\frac{T}{2}\sim\frac{3T}{4}$ 内向上做匀减速运动，

在$\frac{3T}{4}\sim T$内向下做匀加速运动，在$T\sim\frac{5T}{4}$内向下做匀减速运动；可知粒子在$t=\frac{T}{2}$时刻的速度最大，在$t=\frac{3T}{4}$时刻与 A 板的距离最小；设粒子在电场中的加速度大小为a，对于$t=0$时刻进入电场的粒子，在$t=T$时刻刚好沿 A 板右边缘射出电场，则有

$$d=v_0T,\quad \frac{1}{2}d=2\times\frac{1}{2}a(\frac{T}{2})^2$$

可得

$$a=\frac{2d}{T^2}=\frac{2v_0}{T}$$

对于$t=\frac{T}{4}$时刻进入电场的粒子，在$t=\frac{T}{2}$时刻沿电场方向的分速度为

$$v_y=a\frac{T}{4}=\frac{v_0}{2}$$

则$t=\frac{T}{4}$时刻进入电场的粒子在两板间运动过程中的最大速度为

$$v_m=\sqrt{v_0^2+(\frac{1}{2}v_0)^2}=\frac{\sqrt{5}}{2}v_0$$

在$\frac{T}{4}\sim\frac{3T}{4}$内粒子向上运动的位移大小为

$$y=2\times\frac{1}{2}a(\frac{T}{4})^2=\frac{d}{8}$$

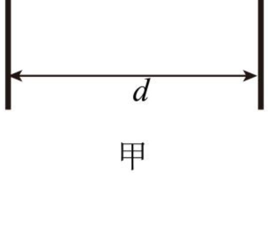
则$t=\frac{T}{4}$时刻进入电场的粒子在两板间运动过程中离 A 板的最小距离为

$$\Delta x_{min}=\frac{1}{2}d-\frac{1}{8}d=\frac{3}{8}d$$

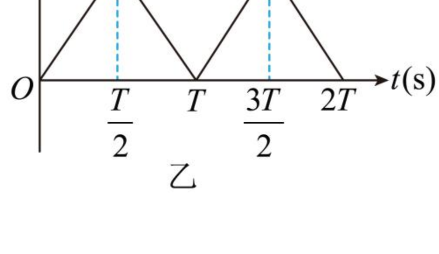
故 CD 错误。

故选 B。

【变式 4-1】（23-24 高二上·安徽黄山·期中）如图甲所示，在两平行金属板间加有一交变电场，两极板间可以认为是匀强电场，当$t=0$时，一带电粒子从左侧极板附近开始运动，其速度随时间变化关系如图乙图所示。带电粒子经过$4T$时间恰好到达右侧极板，（带电粒子的质量m、电量q、速度最大值v_m、时间T为已知量）则下列说法正确的是（　　）



甲



乙

A．带电粒子在两板间做往复运动，周期为 T

B．两板间距离 $d=2v_{\mathrm{m}}T$

C．两板间所加交变电场的周期为 T，所加电压 $U=\dfrac{2mv_{\mathrm{m}}^{2}}{q}$

D．若其他条件不变，该带电粒子从 $t=\dfrac{T}{8}$ 开始进入电场，该粒子能到达右侧板

【答案】BD

【详解】

A．由图像可知，运动过程中粒子速度方向未发生改变，带电粒子在两板间做单向直线运动，A 错误；

B．速度—时间图像与坐标轴围成的面积表示位移，由图像可知两板间距离为

$$d=4\times\frac{v_{\mathrm{m}}T}{2}=2v_{\mathrm{m}}T$$

B 正确；

C．设板间电压为 U，则粒子加速度为

$$a=\frac{qU}{md}=\frac{qU}{2mv_{\mathrm{m}}T}$$

则

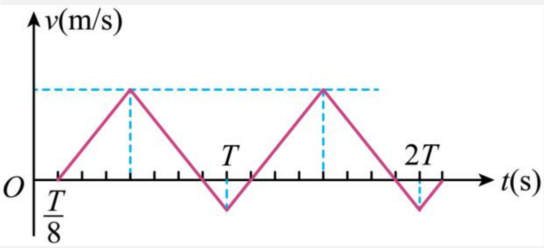
$$v_{\mathrm{m}}=a\cdot\frac{T}{2}=\frac{qU}{4mv_{\mathrm{m}}}$$

解得

$$U=\frac{4mv_{\mathrm{m}}^{2}}{q}$$

C 错误；

D．$t=\dfrac{T}{8}$ 开始进入电场的粒子，速度—时间图像如图，由图像可知，粒子正向位移大于负向，故运动方向时而向右，时而向左，最终打在右板上，D 正确。

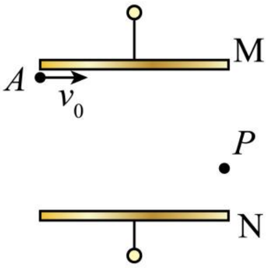


故选 BD。

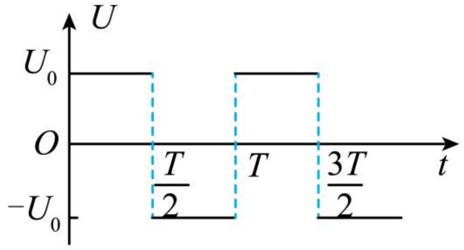
【变式 4-2】（23-24 高二上·福建泉州·期末）如图甲，水平放置的平行板电容器的两极板 M、N 的长度为 L、间距为 d，两板间加一恒定电压。一个质量为 m、电荷量为 q 的带正电粒子从上极板边缘 A 点以水平速度 v_0 射入电容器后，从 P 点飞出，P 点与下极板的距离为 $\dfrac{d}{3}$。不计粒子受到的重力和空气阻力。

（1）求两板间的电压U_0；

（2）若两极板M、N间的电势差U随时间t变化的关系图像如图乙所示，其$T=\frac{L}{v_0}$。$t=0$中时刻，粒子从上极板边缘A点以水平速度$\frac{v_0}{2}$射入电容器，求粒子射出电容器的位置与下极板间的距离（用d表示）。



甲



乙

【答案】（1）$\frac{4md^2v_0^2}{3qL^2}$；（2）$\frac{d}{3}$

【详解】（1）带电粒子在电场中做类平抛，在水平和竖直方向分别有

$$L=v_0t\text{，}\quad \frac{2d}{3}=\frac{1}{2}at^2$$

又根据

$$a=\frac{qE}{m}\text{，}\quad E=\frac{U_0}{d}$$

方程联立解得

$$U_0=\frac{4md^2v_0^2}{3qL^2}$$

（2）带电粒子在电场中水平方向上做匀速直线运动，设粒子在电场中运动的时间为t_0，则

$$L=\frac{1}{2}v_0t_0$$

由已知条件

$$T=\frac{L}{v_0}$$

解得

$$t_0=2T$$

因为粒子$t=0$时刻从上极板边缘A点射入电容器，所以$0\sim\frac{T}{2}$内，粒子在竖直方向上做初速度为0的匀加速直线运动，$\frac{T}{2}\sim T$内粒子做匀减速直线运动，并减速到0，设$0\sim\frac{T}{2}$内粒子在竖直方向上的位移为y_1，则

$y_1=\frac{1}{2}a(\frac{T}{2})^2$ $T\sim 2T$内粒子的运动情况与$0\sim T$内的运动情况相同，则

$$y_{总}=4y_1$$

解得

$$y_{总}=\frac{2d}{3}$$

故粒子射出电容器的位置与下极板的距离为

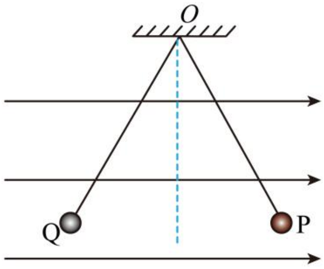
$$d-\frac{2d}{3}=\frac{d}{3}$$

提升专练

（要求：分两个板块，2024 年真题和优选最新模拟题）

真题感知

1．（2024·新疆河南·高考真题）如图，两根不可伸长的等长绝缘细绳的上端均系在天花板的 O 点上，下端分别系有均带正电荷的小球 P、Q；小球处在某一方向水平向右的匀强电场中，平衡时两细绳与竖直方向的夹角大小相等。则（　　）



A．两绳中的张力大小一定相等　　B．P 的质量一定大于 Q 的质量

C．P 的电荷量一定小于 Q 的电荷量　　D．P 的电荷量一定大于 Q 的电荷量

【答案】B

【详解】由题意可知设 Q 和 P 两球之间的库仑力为 F，绳子的拉力分别为 T_1，T_2，质量分别为 m_1，m_2；与竖直方向夹角为θ，对于小球 Q 有

$$q_1E+T_1\sin\theta=F$$

$$T_1\cos\theta=m_1g$$

对于小球 P 有

$$q_2E+F=T_2\sin\theta$$

$$T_2\cos\theta=m_2g$$

联立有

$$q_1E=F-T_1\sin\theta>0$$

$$q_2E=T_2\sin\theta-F>0$$

所以可得

$$T_2 > T_1$$

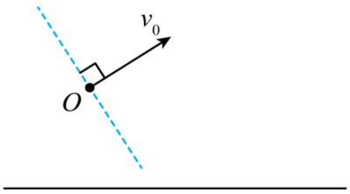
又因为

$$\frac{T_1}{T_2}=\frac{m_1}{m_2}$$

可知 $m_2 > m_1$，即 P 的质量一定大于 Q 的质量；两小球的电荷量则无法判断。

故选 B。

2．（2024·辽宁·高考真题）在水平方向的匀强电场中，一带电小球仅在重力和电场力作用下于竖直面（纸面）内运动。如图，若小球的初速度方向沿虚线，则其运动轨迹为直线，若小球的初速度方向垂直于虚线，则其从 O 点出发运动到 O 点等高处的过程中（　　）



A．动能减小，电势能增大　　　B．动能增大，电势能增大

C．动能减小，电势能减小　　　D．动能增大，电势能减小

【答案】D

【详解】根据题意若小球的初速度方向沿虚线，则其运动轨迹为直线，可知电场力和重力的合力沿着虚线方向，又电场强度方向为水平方向，根据力的合成可知电场强度方向水平向右，若小球的初速度方向垂直于虚线，则其从 O 点出发运动到 O 点等高处的过程中重力对小球做功为零，电场力的方向与小球的运动方向相同，则电场力对小球正功，小球的动能增大，电势能减小。

故选 D。

3．（2024·江西·高考真题）如图所示，垂直于水平桌面固定一根轻质绝缘细直杆，质量均为 m、带同种电荷的绝缘小球甲和乙穿过直杆，两小球均可视为点电荷，带电荷量分别为 q 和 Q。在图示的坐标系中，小球乙静止在坐标原点，初始时刻小球甲从 $x = x_0$ 处由静止释放，开始向下运动。甲和乙两点电荷的电势能 $E_p = k\frac{Qq}{r}$（r 为两点电荷之间的距离，k 为静电力常量）。最大静摩擦力等于滑动摩擦力 f，重力加速度为 g。关于小球甲，下列说法正确的是（　　）