

$3, \dots$ ) 倍, 即  $6 \text{ m} = k\lambda (k=1, 2, 3, \dots)$ , 则有  $3k=2n+1$ , 当  $n=1$  时,  $k=1$ , 即  $\lambda=6 \text{ m}$ , **B 正确**;  $t=39 \text{ s}=6\frac{1}{2}T$ , 根据振动的对称性可知, 此时质点  $b$  在  $y=-3 \text{ cm}$  处, **C 错误**; 该波传播速度为  $v=\frac{\lambda}{T}=\frac{3}{2n+1} \text{ m/s} (n=0, 1, 2, \dots)$ , 若  $v=2 \text{ m/s}$ , 解得  $n=\frac{1}{4}$ , **D 错误**.

**8. C** 【解析】因为题中没有说明  $t_1$  时刻是哪个时刻, 假设  $t_1=0$ , 根据题图乙可知, 质点  $Q$  在  $t_1$  时刻正在沿  $y$  轴正方向振动, 则波沿  $x$  轴正方向传播, 可得  $t_2-t_1=nT+\frac{T}{4} (n=0, 1, 2, 3, \dots)$ , 假设  $t_1=0.1 \text{ s}$ , 根据题图乙可知, 质点  $Q$  在  $t_1$  时刻正在沿  $y$  轴负方向振动, 则波沿  $x$  轴负方向传播, 同理可得  $t_2-t_1=nT+\frac{3T}{4} (n=0, 1, 2, 3, \dots)$ , 由题图乙知  $T=0.2 \text{ s}$ , 故 **A 错误**; 由 A 项分析可知, 无论是哪种情况,  $t_2$  时刻质点  $Q$  都在波峰, 速度等于零, 最小, 故 **B 错误**; 由题图甲知波长为  $\lambda=8 \text{ m}$ , 则波速为  $v=\frac{\lambda}{T}=40 \text{ m/s}$ , 故 **C 正确**;  $t_1$  到  $t_2$  时间内,  $Q$  运动的路程可能是  $s=4nA+A (n=0, 1, 2, \dots)$  或  $s=4nA+3A (n=0, 1, 2, \dots)$ , 如果  $t_1=0$ , 在第一个  $\frac{T}{4}$  时间内,  $P$  沿  $y$  轴负方向运动, 该段时间内的路程  $y_1$  大于振幅  $A$ , 则  $t_1$  到  $t_2$  内的路程  $s'=4nA+y_1$ , 同理, 如果  $t_1=0.1 \text{ s}$ , 在第一个  $\frac{T}{4}$  时

间内,  $P$  沿  $y$  轴正方向运动到波峰, 又沿  $y$  轴负方向向平衡位置移动, 该段时间内的路程  $y_2$  小于振幅  $A$ , 则  $t_1$  到  $t_2$  内的路程  $s'=4nA+2A+y_2$ , 可知  $P, Q$  运动的路程不相等, 故 **D 错误**.

9. (1)  $v=\frac{10}{4n+1} \text{ m/s} (n=0, 1, 2, \dots)$  (2)  $40 \text{ s}$

【解析】(1) 由题图可知,  $C$  点振动比  $A$  点晚  $(n+\frac{1}{4})T (n=0, 1, 2, \dots)$ , 即  $x_{BC}-x_{AB}=(n+\frac{1}{4})\lambda (n=0, 1, 2, \dots)$ ,

由题图可知, 其振动周期  $T=8 \text{ s}$ ,

故波速  $v=\frac{\lambda}{T}=\frac{4(x_{BC}-x_{AB})}{(4n+1)T}=\frac{10}{4n+1} \text{ m/s} (n=0, 1, 2, \dots)$ .

(2) 根据上述分析可知  $\lambda=\frac{4(x_{BC}-x_{AB})}{4n+1}=\frac{80}{4n+1} \text{ m} (n=0, 1, 2, \dots)$ ,

由于  $10 \text{ m} < \lambda < 20 \text{ m}$ , 解得  $n=1$ .

$\lambda=16 \text{ m}$ , 则波速  $v=\frac{\lambda}{T}=2 \text{ m/s}$ ,

故振动传到  $A$  点所用时间  $t_1=\frac{x_{AB}}{v}=30 \text{ s}$ ,

$A$  点从起振到第二次到达波峰的时间  $t_2=\frac{5}{4}T=10 \text{ s}$ ,

从振源起振开始计时, 到  $A$  处的质点第二次到达波峰时间  $t=t_1+t_2=40 \text{ s}$ .

## 专题 9 静电场

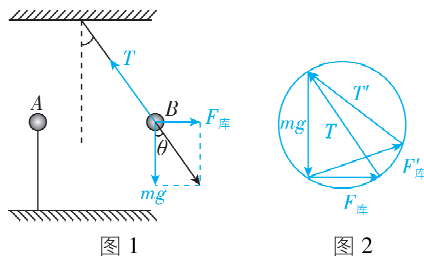
### 考向 30 点电荷与库仑定律

**1. AD** 【解析】若两小球带的是同种电荷, 当电荷量各减少一半时, 根据库仑定律  $F=\frac{kq_1q_2}{x^2}$  知, 若两个球之间的距离保持不变, 库仑力将减小为原来的  $\frac{1}{4}$ , 因为库仑力减小, 则弹簧的弹力减小, 弹簧的伸长量减小, 两球间的距离减小, 所以两小球之间的库仑力会大于原来的  $\frac{1}{4}$ , 即  $F_2 > \frac{1}{4}F_1$ , **A 正确, B 错误**; 若两小球带的是异种电荷, 当电荷量各减少一半时, 根据库仑定律  $F=\frac{kq_1q_2}{x^2}$  知,

若两个球之间的距离保持不变, 库仑力减小为原来的  $\frac{1}{4}$ , 因为库仑力减小, 则弹簧的弹力减小, 弹簧的压缩量减小, 两球间的距离增大, 所以两小球之间的库仑力会小于原来的  $\frac{1}{4}$ , 即  $F_2 < \frac{1}{4}F_1$ , **C 错误, D 正确**.

**2. BD** 【解析】由于两个小球相排斥, 所以两个小球带同种电荷, **A 错误**; 对  $B$  球进行受力分析, 如图 1 所示,  $B$  受到重力、拉力和库仑力, 有  $F_{\text{库}}=mgtan \theta$ , **B 正确**;  $A$  对  $B$  的库仑力与  $B$  对  $A$  的库仑力是一对作用力与反作用力, 大小相等、方向相反, **C 错误**; 若  $A$  球靠近  $B$  球, 二者之间的库仑力增大, 用辅助圆法分析, 如图 2

所示, 可知细绳对  $B$  球的拉力变小, **D 正确**.



**3. AC** 【解析】根据库仑定律有  $F=k\frac{q \cdot 9q}{(\frac{2L}{\cos 60^\circ})^2}=\frac{9kq^2}{16L^2}$ , **A 正确**;

对  $A$  进行分析, 根据平衡条件有  $m_1g=Ftan 60^\circ$ , 对  $B$  进行分析, 根据平衡条件有  $m_2g=Ftan 30^\circ$ , 解得  $m_1:m_2=3:1$ , **B 错误**; 根据点电荷场强的表达式, 在  $C$  点有  $E_A=k\frac{q}{(2L\cos 60^\circ)^2}=\frac{kq}{L^2}$ ,  $E_B=k\frac{9q}{(\frac{2L}{\cos 60^\circ}-2L\cos 60^\circ)^2}=\frac{kq}{L^2}$ , 由于两点电荷在  $C$  点的电场强度

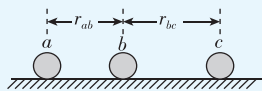
方向相反, 则  $C$  点的电场强度为零, **C 正确**; 若仅互换  $A, B$  两球的带电荷量, 两点电荷之间的库仑力不变, 即两小球的受力情况不变, 则  $A, B$  两球位置将仍然处于同一水平线上, **D 错误**.

**4. AC** 【解析】设  $A, B$  之间的距离为  $r_1$ ,  $B, C$  之间的距离为  $r_2$ , 三个点电荷保持静止, 则对于  $A$  有  $k\frac{q_1q_2}{r_1^2}=k\frac{q_1q_3}{(r_1+r_2)^2}$ , 对于  $C$  有

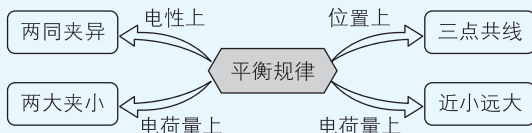
$k\frac{q_1q_3}{(r_1+r_2)^2}=k\frac{q_2q_3}{r_2^2}$ , 整理后得  $\frac{1}{\sqrt{q_3}}=\frac{r_1}{r_2+r_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{q_2}}, \frac{1}{\sqrt{q_1}}=\frac{r_2}{r_2+r_1}$ .

$\frac{1}{\sqrt{q_2}}$ , 故  $q_1 > q_2, q_3 > q_2, \frac{1}{\sqrt{q_1}} + \frac{1}{\sqrt{q_3}} = \frac{1}{\sqrt{q_2}}$ , **A、C 正确, B、D 错误**.

### 关键点拨 三点电荷共线平衡问题



如图,光滑绝缘水平面上有三个带电小球  $a, b, c$ , 均可视为点电荷,三球沿一条直线摆放,水平方向小球仅在静电力作用下处于静止状态,且  $r_{ab} < r_{bc}$ , 则  $Q_a, Q_c$  电性相同,并与  $Q_b$  电性相异,且电荷量大小的关系为  $Q_c > Q_a > Q_b$ . 可以简记为“两同夹一异,两大夹一小,近小远大”.



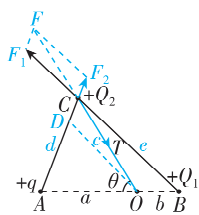
**5. C 【解析】**根据力的平衡可知,三个小球受到的库仑力大小相等,因此三个小球所带电荷量一定相同,故 **A 错误**;根据对称性可知,三个小球一定带同种电荷,故 **B 错误**;设每根绝缘细线长为  $L$ ,则正四面体的高为  $\frac{\sqrt{6}}{3}L$ ,设细线与水平方向的夹角为  $\theta$ ,则  $\sin \theta = \frac{\sqrt{6}}{3}$ ,设任两个球间的库仑力为  $F$ ,细线的拉力为  $T$ ,则有  $T \cos \theta = 2F \cos 30^\circ$ ,解得  $T = 3F$ ,故 **C 正确**;根据  $T \sin \theta = mg$ ,解得  $T = \frac{\sqrt{6}}{2}mg$ ,故 **D 错误**.

**6. A 【解析】**将  $A, B$  位置的两个点电荷看为一个整体,根据等量同种正点电荷的电场分布规律可知,  $O$  点位于其连线的中垂线上,则电场强度方向由  $O$  指向  $C$ ,即对  $O$  点的  $-2q$  的点电荷的电场力方向由  $C$  指向  $O$ ,  $C$  位置的  $-2q$  的点电荷对  $O$  点的电荷是斥力作用,可知,  $O$  点处固定的  $-2q$  的点电荷所受电场力方向由  $C$  指向  $O$ ,根据几何关系,三个点电荷到中心  $O$  的距离为  $r = \frac{a}{\cos 30^\circ} = \frac{\sqrt{3}a}{3}$ ,  $A, B$  位置的两个点电荷对  $O$  点的  $-2q$  的点电荷的电场力大小为  $F_1 = 2 \frac{kq \cdot 2q}{r^2} \cos 60^\circ = \frac{6kq^2}{a^2}$ ,  $C$  位置的点电荷对  $O$  点的  $-2q$  的点电荷的电场力大小为  $F_2 = \frac{k \cdot 2q \cdot 2q}{r^2} = \frac{12kq^2}{a^2}$ ,则该电荷受到的电场力大小为  $F = F_1 + F_2 = \frac{18kq^2}{a^2}$ ,方向由  $C$  指向  $O$ ,故 **A 正确**.

**7. A 【解析】**一个不带电的相同导体球  $D$  分别跟  $A, B, C$  处的导体球接触后再拿走,则最终  $A, B, C$  处的导体球的电荷量分别为  $q_A = q_D = \frac{2q}{2} = q, q_B = q_D' = \frac{5q+q}{2} = 3q, q_C = q_D'' = \frac{-11q+3q}{2} = -4q$ ,  $B$  处导体球对  $A$  处导体球的库仑斥力方向沿  $y$  轴负方向,大小为  $F_1 = k \frac{q \cdot 3q}{L^2}$ ,  $C$  处导体球对  $A$  处导体球的库仑引力方向沿  $x$  轴正方向,大小为  $F_2 = k \frac{q \cdot 4q}{L^2}$ ,则  $A$  处导体球受到的电场力方向沿第四

象限,大小为  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \frac{5kq^2}{L^2}$ ,故 **A 正确**.

**8. BC 【解析】**令  $A, C$  间的距离为  $d, B, C$  间的距离为  $e, OD \parallel BC$ , 如图所示,根据库仑定律有  $F_1 = \frac{kQ_1Q_2}{e^2}, F_2 = \frac{kQ_2Q_2}{d^2}$ , 由  $\triangle FF_2C \sim \triangle ODC$  可知  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{OD}{DC}$ , 由几何关系可知  $\frac{OD}{e} = \frac{a}{a+b}$ ,  $\frac{d-DC}{d} = \frac{a}{a+b}$ , 根据余弦定理可知  $e = \sqrt{b^2 + c^2 + 2bccos \theta}, d =$

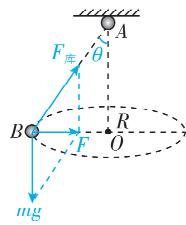


$\sqrt{a^2 + c^2 - 2accos \theta}$ , 联立解得  $q = \frac{b}{a} \left( \frac{c^2 + a^2 - 2accos \theta}{c^2 + b^2 + 2bccos \theta} \right)^{\frac{3}{2}} Q_1$ , 因此

该实验装置只需要知道  $+Q_1$  就可以算出  $q$ , 故 **B、C 正确**.

**9. BC 【解析】**小球运动到最低点  $B$  时受重力、支持力、库仑力三个力的作用, **A 错误**; 设小球通过轨道最低点  $B$  时的速度大小为  $v$ , 以轨道最低点  $B$  所在的水平面为参考平面, 小球从  $A$  到  $B$  的过程中只有重力做功, 根据动能定理得  $mgR = \frac{1}{2}mv^2$ , 解得  $v = \sqrt{2gR}$ , **B 正确**; 以小球为研究对象, 在  $B$  点, 重力、支持力与库仑力的合力提供向心力, 根据牛顿第二定律得  $N - mg - k \frac{q_1q_2}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$ , 解得  $N = 3mg + k \frac{q_1q_2}{R^2}$ , 根据牛顿第三定律可知, 小球在  $B$  点对轨道的压力大小为  $3mg + k \frac{q_1q_2}{R^2}$ , **C 正确, D 错误**.

**10. C 【解析】**带电小球  $B$  在空中水平面内绕  $O$  点做半径为  $R$  的匀速圆周运动,  $B$  球受到重力和库仑力作用, 合力提供向心力, 合力始终指向  $O$  点, **A、B 错误**; 对小球  $B$  受力分析, 如图所示, 根据几何知识可得  $\sin \theta = \frac{R}{2R}$ , 则  $\theta = 30^\circ$ , 在水平方向, 由牛顿第二定律得  $mg \tan \theta = mR\omega^2$ , 解得  $\omega = \sqrt{\frac{\sqrt{3}g}{3R}}$ , **C 正确**; 以  $A, B$  整体为研究对象, 则整体在竖直方向上受大小为  $2mg$  的重力, 天花板对整体在竖直方向上提供向上的力  $F_1 = 2mg$ , 天花板对整体在水平方向上提供指向圆心的力  $F_2 = m\omega^2 R = mg \tan \theta = \frac{\sqrt{3}}{3}mg$ , 所以天花板对整体的作用力大小为  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \frac{\sqrt{39}}{3}mg$ , **D 错误**.



## 考向 31 电场能的性质

**1. B 【解析】**由等量异种点电荷电场线与等势线分布特点可知  $a, b$  两点电势相等, 电场强度相同, **A 错误**; 由对称性可知  $e, f$  两点

→ **关键点:** 牢记等量异种点电荷的电场线和等势线分布

电场强度相同, 沿电场线方向电势降低, 可知这两点的电势不同, **B 正确**; 在等量异种点电荷电场中, 有  $E_c > E_o, E_o > E_d$ , 则  $E_c > E_d$ , 又  $F = qE$ , 可知一个正检验电荷在  $c$  点受到的静电力大于在  $d$  点受到的静电力, 根据  $\varphi_c > \varphi_d, E_p = q\varphi$ , 可知正检验电荷在  $c$  点的

电势能大于在  $d$  点的电势能, **C 错误**; 因为  $a$  点和  $O$  点处在同一等势面上, 所以将一个负检验电荷从  $a$  点沿直线移动到  $O$  点, 其电势能不变, 因为  $O$  点电势低于  $c$  点电势, 所以将负检验电荷从  $O$  点沿直线移动到  $c$  点, 其电势能减小, **D 错误**.

- 2. AD** 【解析】由题图可知,  $Q_1$  为正电荷,  $Q_2$  为负电荷, 且由电场线的疏密程度得  $|q_1| > |q_2|$ , 故 **A 正确**; 由题图和对称性可知,  $M$ 、 $N$  两点的电场强度大小相等, 方向不同,  $R$ 、 $S$  两点的电势一定相同, 故 **B 错误**; 若只有点电荷  $Q_1$ , 正检验电荷的运动轨迹为等势面, 现由于点电荷  $Q_2$  的影响, 题图中半圆虚线上,  $M$ 、 $N$  两点电势最低, 因此正检验电荷从  $M$  点沿半圆轨迹运动到  $N$  点, 电势能先增大后减小, 故 **D 正确**; 由于半圆轨迹不是等势线, 正检验电荷不可能只受电场力作用做匀速圆周运动, 故 **C 错误**.

→ **关键点:** 电势能会发生变化, 使动能发生变化

- 3. AC** 【解析】 $M$ 、 $N$  在一条电场线上, 沿电场线方向电势降低, 故  $\varphi_M < \varphi_N$ , **A 正确**; 电场线疏密程度反映电场强度大小, 电场线密的地方电场强度大, 故  $E_N < E_P$ , **B 错误**; 污泥絮体带负电, 由  $M$  点到  $N$  点电势升高, 电场力做正功, **C 正确**;  $P$  点电势等于  $M$  点电势, 则  $N$  点电势高于  $P$  点电势, 污泥絮体带负电, 则污泥絮体在  $N$  点的电势能比其在  $P$  点的小, **D 错误**.

- 4. BD** 【解析】根据电场的叠加可知,  $A$ 、 $C$  处的点电荷为等量异种电荷, 所以在  $M$  点、 $N$  点处的合场强方向相同, 沿  $CA$  方向且与  $MN$  垂直,  $B$  处的点电荷在  $M$  点、 $N$  点处的电场强度方向分别沿  $BM$  方向和沿  $BN$  方向, 故叠加后  $M$  点和  $N$  点的电场强度方向不同, 故 **A 错误**;  $A$ 、 $C$  处的点电荷为等量异种电荷, 等量异种电荷

→ **关键点:**  $M$ 、 $N$  两点的电场强度大小相等、方向不同

连线中垂面为等势面, 而  $O$  点和  $N$  点均在该等势面上, 所以对于  $A$ 、 $C$  处的点电荷,  $O$  点和  $N$  点电势相等,  $B$  处的点电荷离  $O$  点较近, 所以对于  $B$  处的点电荷,  $O$  点的电势大于  $N$  点的电势, 所以对于  $A$ 、 $B$ 、 $C$  处的三个点电荷,  $O$  点的电势高于  $N$  点的电势, 故 **B 正确**;  $O$  点和  $AC$  的中点均在  $AC$  连线的中垂面上, 且  $O$  点离  $B$  处的点电荷更近, 所以  $O$  点的电势大于  $AC$  中点的电势, 把电子从  $O$  点移到  $AC$  的中点, 电势降低, 电场力做负功, 故 **C 错误**;  $M$  点和  $N$  点均在  $AC$  连线的中垂面上, 且  $B$  处的点电荷到  $M$ 、 $N$  点的距离相等, 所以  $M$  点的电势等于  $N$  点的电势, 故电子在  $M$  点的电势能等于它在  $N$  点的电势能, 故 **D 正确**.

- 5. CD** 【解析】如图所示, 延长  $CB$  到  $D$ ,

使  $\frac{DB}{BC} = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{\varphi_B - \varphi_C}$ , 则  $A$ 、 $D$  两点的电势均为

$2\text{ V}$ ; 以  $BC$  为直径的圆过  $A$  点, 过  $C$  点作  $AD$  的垂线  $CP$ , 可得电场强度大小

$E = \frac{\varphi_C - \varphi_A}{CP}$ , 当  $AD$  与圆相切时  $CP$  最长,

对应的电场强度最小, 由几何关系可知此时  $CP = 1.5\text{ AO} = 1.5\text{ m}$ , 解得  $E \geq 6\text{ V/m}$ , 故 **C、D 正确**, **A、B 错误**.

#### 一题多解

由图可知,  $a^2 + b^2 = 4$ ,  $E_{CA} = \frac{9}{a}\text{ V/m}$ ,  $E_{BA} =$

$$\frac{3}{b}\text{ V/m}, E^2 = E_{CA}^2 + E_{BA}^2 = \frac{81}{a^2}\text{ V}^2/\text{m}^2 + \frac{9}{b^2}\text{ V}^2/\text{m}^2.$$

方法一: 柯西不等式法

由柯西不等式, 得  $4E^2 = \left(\frac{81}{a^2} + \frac{9}{b^2}\right)(a^2 + b^2) \geq \left(\frac{9}{a} \cdot a + \frac{3}{b} \cdot b\right)^2 \text{ V}^2/\text{m}^2 = 144 \text{ V}^2/\text{m}^2$ , 可得  $E \geq 6\text{ V/m}$ . 故 **C、D 正确**.

方法二: 基本不等式法

由基本不等式得  $E^2 = \left(\frac{81}{a^2} + \frac{9}{b^2}\right) \cdot \frac{a^2 + b^2}{4} \text{ V}^2/\text{m}^2 = \frac{1}{4} \left(81 + 9 + \frac{9a^2}{b^2} + \frac{81b^2}{a^2}\right) \text{ V}^2/\text{m}^2 \geq \frac{1}{4} (90 + 2\sqrt{9 \times 81}) \text{ V}^2/\text{m}^2 = 36 \text{ V}^2/\text{m}^2$ , 可得  $E \geq 6\text{ V/m}$ . 故 **C、D 正确**.

- 6. C** 【解析】两板间电场强度大小为  $E = \frac{U}{d} = \frac{2}{0.05}\text{ V/m} = 40\text{ V/m}$ ,

由于  $ab$  与  $ac$  沿场强方向的距离相等, 所以  $ac$  间电势差等于  $ab$  间电势差, 大小为  $U_{ac} = U_{ab} = EL_1 = 40 \times 0.03\text{ V} = 1.2\text{ V}$ , 故 **A、B 错误**;  $a$  与  $B$  板间的电势差为  $U_{ab} = E(d - L_2) = 40 \times 0.04\text{ V} = 1.6\text{ V}$ , 根据  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_B = \varphi_a - 0\text{ V}$ , 可得  $a$  点的电势为  $\varphi_a = 1.6\text{ V}$ , 则粒子在  $a$  点具有的电势能为  $E_{pa} = q\varphi_a = 3.2 \times 10^{-18}\text{ J}$ , 故 **C 正确**; 若将该粒子沿  $bc$  移动, 由于电场力与速度方向垂直, 所以电场力不做功, 故 **D 错误**.

**易错警示** 涉及电场的能量问题时, 注意公式中物理量的正负号问题!

- 7. D** 【解析】由等量同种点电荷的电场特点可知,  $F$ 、 $H$  处放置的负电荷在长方体的几何中心处的场强方向平行于  $AE$  方向向下, 大小不为零, 故 **A 错误**; 根据点电荷的场强方向及电场强度的叠加原理可知,  $B$ 、 $D$  两点的场强大小相等, 方向不同, 故 **B 错误**; 根据等量同种点电荷的电场特点可知, 沿竖直方向从  $O_1$  到  $O_2$ , 电势一直降低, 故 **C 错误**;  $E$  点比  $B$  点离  $F$ 、 $H$  处的两个点电荷更近, 则  $E$  点的电势比  $B$  点的低, 电子在  $E$  点的电势能比在  $B$  点的大, 所以将电子从  $B$  点移到  $E$  点, 电场力做负功, 故 **D 正确**.

- 8. D** 【解析】 $\varphi-x$  图像的斜率表示电场强度, 由题图可知, 在  $0 < x < d$  区域内, 沿  $x$  轴正方向电势越来越低, 由于图像斜率不变, 故场强不变, 故 **A 正确**; 电荷量为  $-q$  的带电粒子从  $x = 0.5d$  处由静止释放, 此时动能为  $0$ , 电势能为  $E_p = -q \cdot 0.5\varphi_0 = -0.5q\varphi_0$ , 粒子只在电场力作用下运动, 则粒子的动能与电势能之和不变, 则运动过程中该粒子的动能与电势能之和为  $-0.5q\varphi_0$ , 故 **B 正确**; 电荷量为  $-q$  的带电粒子从  $x = 0.5d$  处由静止释放后, 粒子从  $x = 0.5d$  到  $O$  点过程中做匀加速运动, 从  $O$  点到  $x = -0.5d$  过程中做匀减速运动, 在  $x = -0.5d$  处速度刚好减为  $0$ , 接着反向做匀加速运动到  $O$  点, 再做匀减速运动到  $x = 0.5d$  处, 此时速度减为  $0$ , 之后做周期性运动, 由此可知粒子在  $O$  点的速度最大, 根据功能关系可得

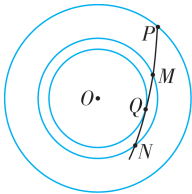
$\frac{1}{2}mv_m^2 - q\varphi_0 = -0.5q\varphi_0$ , 解得最大速率为  $v_m = \sqrt{\frac{q\varphi_0}{m}}$ , 故 **C 正确**;

粒子从  $x = 0.5d$  到  $O$  点的过程中做匀加速运动, 设所用时间为  $t_1$ , 根据运动学公式可得  $0.5d = \frac{0+v_m}{2}t_1$ , 解得  $t_1 = d\sqrt{\frac{m}{q\varphi_0}}$ , 则粒子

在电场中做周期性运动的周期为  $T=4t_1=4d\sqrt{\frac{m}{q\varphi_0}}$ , 故 **D 错误**.  
故 **D** 符合题意.

### 考向 32 带电粒子运动轨迹的判断 图像问题

- 1. BC** 【解析】以  $O$  点为圆心、 $OM$  为半径作圆, 如图所示, 则圆经过  $N$  点, 且该圆是一条等势线, 并作出另外两个同心圆表示等势线, 其中一个同心圆过  $P$  点, 另一个同心圆与轨迹  $MN$  相切于  $Q$  点, 距离正点电荷越远, 电势



越低, 结合题意可知,  $\varphi_P < \varphi_M = \varphi_N < \varphi_O$ , 小球带负电, 所以电势能  $E_{pP} > E_{pM} = E_{pN} > E_{pO}$ , 可知小球在运动过程中, 电势能先减少再增加, **A 错误, B 正确**; 小球从  $M$  到  $N$ , 电势能先减少后增加, 电场力先做正功后做负功, 由于小球在  $M$ 、 $N$  两位置电势能相等, 根

→ **关键点:** 电势能发生变化, 电场力一定做功

据能量守恒定律可知, 小球在  $M$ 、 $N$  两位置的机械能相等, **C 正确, D 错误**.

**方法总结** 带电粒子沿等势面运动, 电场力对带电粒子不做功.

- 2. B** 【解析】带负电的试探电荷在  $x_2$  处动能为  $1.5 \text{ eV}$ , 且试探电荷速度沿  $x$  轴正方向, 在  $x_2 \sim x_3$  区域试探电荷受到沿  $x$  轴正方向的静电力, 做加速运动, 在  $x_3$  处速度最大, 试探电荷继续运动到  $x_3$  右侧, 做减速运动, 运动到电势为  $-0.5 \text{ V}$  处减速到零, 开始向  $x$  轴负方向运动, 后反向回到  $x_2$  处动能仍为  $1.5 \text{ eV}$ , 继续向左运动, 在电势为  $-0.5 \text{ V}$  处减速到零又反向, 不会运动到  $x_0$ 、 $x_1$  处, 即试探电荷在  $x_3$  点两侧往复运动, **B 正确, A、C、D 错误**.

- 3. ACD** 【解析】圆环带负电, 则在  $Ox$  轴上的各点中,  $O$  点的电势最低, 故 **A 正确**; 根据对称性可知在  $Ox$  轴上的各点中,  $B$ 、 $B'$  两点的电场强度大小相等且最大, 小球在  $B$ 、 $B'$  两点受到的电场力最大, 加速度最大, 则小球从  $A$  点运动到  $O$  点的过程中加速度先增大后减小, 故 **B 错误**; 因为  $E-x$  图像中图线与  $x$  轴所包围的面积表示电势差, 而  $O \sim B'$  的“面积”小于  $B' \sim A'$  的“面积”, 即  $U_{A'B'} > U_{B'O}$ , 根据对称性可知  $U_{AB} > U_{BO}$ , 故 **C 正确**; 根据动能定理, 对小球从  $A$  点运动到  $B$  点的过程有  $qU_{AB} = \frac{1}{2}mv^2 - 0$ , 对小球从  $B$  点运动到  $O$  点的过程有  $qU_{BO} = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv^2$ , 解得  $v_0 < \sqrt{2}v$ , 故 **D 正确**.

- 4. BD** 【解析】 $E_p-x$  图像斜率的绝对值表示滑块所受电场力的大小, 滑块在  $x=3 \text{ m}$  处所受电场力为  $0$ , 所受合外力  $f=\mu mg=0.5 \text{ N}$ , **A 错误**; 在  $x=3 \text{ m}$  处电场力为  $0$ , 电场强度为  $0$ , 则  $k\frac{Q_1}{r_1^2}=k\frac{Q_2}{r_2^2}$ , 由于  $r_1 > r_2$ , 所以  $|Q_1| > |Q_2|$ , 滑块在  $x=3 \text{ m}$  处电势能最低, 因为滑块带负电, 所以  $x=3 \text{ m}$  处的电势最高且小于零, 两场源电荷均带负电, **B 正确**; 滑块在  $x=1 \text{ m}$  处所受电场力大小为  $F=$

$\frac{\Delta E_p}{\Delta x} = \frac{3-1}{2} \text{ N} = 1 \text{ N}$ , 所以在  $x=1 \text{ m}$  处, 滑块所受电场力与滑动摩擦力方向相反, 电场力大于摩擦力, 则滑块加速运动, **C 错误**; 滑块在  $x=1 \text{ m}$  处的电势能与在  $x=4 \text{ m}$  处的电势能相等, 根据能量守恒定律, 若滑块能够经过  $x=4 \text{ m}$  处, 则应满足  $\frac{1}{2}mv_0^2 \geq f\Delta x$ , 由  $\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 2^2 \text{ J} = 2 \text{ J}$ ,  $f\Delta x = 0.5 \times (4-1) \text{ J} = 1.5 \text{ J}$ , 根据题中数据可知实际情况满足上式, 所以滑块一定可以经过  $x=4 \text{ m}$  处的位置, **D 正确**.

### 考向 33 电容器

- 1. A** 【解析】实验中, 只将电容器  $b$  板向上平移, 正对面积  $S$  减小, 由  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$  可知  $C$  减小, 在  $Q$  不变的情况下由  $C = \frac{Q}{U}$  知  $U$  增大, 静电计的张角增大, **A 错误**; 实验中, 只减小两板间距离, 由  $E = \frac{U}{d} = \frac{4\pi kQ}{\epsilon_r S}$  可知  $E$  不变, **B 正确**; 实验中, 只在极板间插入有机玻璃板,  $\epsilon_r$  增大,  $C$  增大,  $Q$  不变, 则  $U$  减小, 静电计指针的张角减小, **C 正确**; 实验时, 静电计的指针偏转角度大小反映两平行板电容器间的电势差大小, **D 正确**. 故选 **A**.

- 2. B** 【解析】根据  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$ , 风力越大, 两板间的距离  $d$  越小, 电容器电容  $C$  越大, 故 **A 错误**; 极板上电荷量保持不变, 电容越大, 根据  $C = \frac{Q}{U}$ , 可知两板之间的电势差越小, 静电计指针张角越小, 故 **B 正确**; 根据  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$ ,  $E = \frac{U}{d}$ , 可得  $E = \frac{4\pi kQ}{\epsilon_r S}$ , 即极板间电场强度与距离  $d$  无关, 故 **C 错误**; 两极板之间的电势差  $U = \varphi_{\text{固}} - \varphi_{\text{动}} = \varphi_{\text{固}} - 0 = \varphi_{\text{固}}$ , 由于风力越大, 两极板之间的电势差越小, 则固定电极的电势越低, 故 **D 错误**.

- 3. D** 【解析】保持开关闭合, 将  $A$  板下移少许, 板间距  $d$  减小, 由  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$  可知,  $C$  增大, 由  $C = \frac{Q}{U}$  且  $U$  不变, 可知  $Q$  增大, 有电流从下到上通过电源, 由  $E = \frac{U}{d}$  可知,  $E$  增大, **A 错误**; 保持开关闭合, 将  $B$  板下移少许, 板间距  $d$  增大, 由  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$  可知,  $C$  减小, 由  $C = \frac{Q}{U}$  可知,  $U$  不变,  $Q$  减小, 有电流从上到下通过电源, 由  $E = \frac{U}{d}$  可知,  $E$  减小, **B 错误**; 若断开开关, 将  $B$  板下移少许, 由  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$  可知,  $d$  增大,  $C$  减小,  $E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{Cd} = \frac{4\pi kQ}{\epsilon_r S}$ , 又  $Q$  不变, 则  $E$  不变,  $P$  点距  $A$  板的距离不变,  $A$  板与  $P$  点间的电势差不变,  $\varphi_P$  不变, 所以  $E_P$  不变, **C 错误**; 将  $A$  板下移少许, 由  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$  可知,  $d$  减小,  $C$  增大,  $E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{Cd} = \frac{4\pi kQ}{\epsilon_r S}$ , 板间场强  $E$  不变,  $P$  点距  $A$  板的距离减小,  $A$  板接地, 则  $\varphi_A = 0$ ,  $A$  板与  $P$  点间的电势差减小,  $\varphi_P$  升高, 负电荷在电势高的地方电势能小, 所以  $E_P$  减小, **D 正确**.



- 4. AC** 【解析】断开开关 S, 电容器所带电荷量保持不变, 根据电容决定式  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ ,  $M$  板稍微上移,  $d$  变大, 电容减小, 根据电容定义式  $C = \frac{Q}{U}$ , 可知板间电压  $U$  变大, 所以静电计指针偏角变大, 故 **A 正确**; 根据电容决定式  $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ , 电容定义式  $C = \frac{Q}{U}$ , 板间场强为  $E = \frac{U}{d}$ , 联立可得  $E = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}$ , 断开开关 S, 电荷量保持不变, 所以板间场强不变, 下极板与  $P$  间电势差为  $U = Ed_{PN}$ , 可知下极板与  $P$  间电势差变大, 而  $N$  板的电势始终为零, 所以  $P$  点电势降低, 且为负值. 由题图可知  $N$  板为正极板, 油滴处于静止状态, 根据平衡条件可知油滴带正电, 根据  $E_p = q\varphi$ , 可知  $N$  板稍微下移, 带电油滴的电势能降低, 故 **B 错误**; 保持开关 S 闭合, 电容器两板间电压等于电阻  $R_0$  两端的电压, 增大  $R_1$  的阻值, 则  $R_0$  两端的电压减小, 电容器两板间电压降低, 根据  $C = \frac{Q}{U}$ , 可知电容器将会放电, 因为二极管的单向导电性, 电容器的电荷量不能减少, 所以保持电荷量不变, 根据  $E = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}$ , 可知板间场强不变, 所以油滴仍然静止不动, 故 **C 正确**; 保持开关 S 闭合, 电容器两板间电压等于电阻  $R_0$  两端的电压, 增大  $R_2$  的阻值, 电容器两板间电压与  $R_2$  的阻值无关, 根据  $C = \frac{Q}{U}$ , 可知平行板电容器的带电荷量保持不变, 故 **D 错误**.

**易错警示** 电容器在电荷量不变的情况下, 仅仅改变两板之间的距离, 不能改变电场强度!

### 考向 34 带电粒子(体)在电场中的运动

- 1. D** 【解析】根据牛顿第二定律可知, 粒子在电场中的加速度大小为  $a = \frac{qE}{m} \propto \frac{q}{m}$ , 可知三种粒子在电场中的加速度大小之比为  $a_1 : a_2 : a_3 = 2 : 1 : 1$ , 故 **A 错误**; 粒子经过加速电场过程, 根据动能定理可得  $qU_1 = \frac{1}{2}mv_0^2$ , 解得  $v_0 = \sqrt{\frac{2qU_1}{m}} \propto \sqrt{\frac{q}{m}}$ , 则三种粒子进入偏转电场时的速度大小之比为  $v_1 : v_2 : v_3 = \sqrt{2} : 1 : 1$ , 故 **C 错误**; 粒子在偏转电场中做类平抛运动, 设板长为  $L$ , 板间距离为  $d$ , 有  $L = v_0 t$ ,  $y = \frac{1}{2}at^2$ ,  $a = \frac{qU_2}{md}$ , 联立可得  $y = \frac{U_2 L^2}{4U_1 d}$ , 可知粒子在偏转电场中的偏移量与粒子的电荷量和质量均无关, 即三种粒子在偏转电场中的偏移量相同, 则三种粒子在电场中的运动轨迹一定是重合的, 故 **B 错误**; 全过程, 根据动能定理有  $\frac{1}{2}mv^2 = qU_1 + q \frac{U_2}{d} y \propto q$ , 可知三种粒子从偏转电场出来时动能之比为  $E_{k1} : E_{k2} : E_{k3} = 1 : 1 : 2$ , 故 **D 正确**.

**突破点:** 通过对比找出影响动能差别的物理量, 无需计算动能

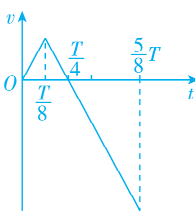
- 2. BD** 【解析】电场线分布的密集程度表示电场强弱,  $M$  处电场线

比  $N$  处电场线稀疏一些, 则  $M$  处电场强度小于  $N$  处电场强度, **A 错误**; 根据牛顿第二定律有  $qE = ma$ , 解得  $a = \frac{qE}{m}$ , 由于茶叶、茶梗带正电, 则电场力产生的加速度方向整体向右, 由于茶叶的比荷  $\frac{q}{m}$  小于茶梗的比荷, 可知茶叶所受电场力产生的加速度小于茶梗所受电场力产生的加速度, 即在相等时间内, 茶叶的水平分位移小于茶梗的水平分位移, 故茶叶落入左桶, 茶梗落入右桶, **B 正确**; 对茶梗进行分析, 根据动能定理有  $mgh + qU = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ , 代入数据解得  $v_1 = 2\sqrt{5} \text{ m/s}$ , **C 错误, D 正确**.

- 3. C** 【解析】若小球带负电, 则从  $A$  点到  $B$  点电场力做负功, 电势能增加, 若小球带正电, 则从  $A$  点到  $B$  点电场力做正功, 电势能减小, **C 正确**; 小球由  $A$  点运动至  $B$  点, 由动能定理得  $mgh + W_{\text{电}} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$ , 因为重力做功和电场力做功的大小以及电场力做功的正负无法确定, 则不能比较  $v_1$  和  $v_2$  的大小, **A 错误**; 因电场力做功为  $W_{\text{电}} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 - mgh$ , 由电场力做功  $W_{\text{电}} = qU$ , 解得  $A, B$  两点间的电势差为  $U = \frac{W_{\text{电}}}{q} = \frac{1}{q} \left( \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 - mgh \right)$ , 故 **B 错误**; 小球运动到  $B$  点时所受重力的瞬时功率  $P = mgv_2 \sin \alpha$ , 故 **D 错误**.

- 4. D** 【解析】电子在电场中的运动时间为  $t = \frac{L}{v_0}$ , 又有  $v_0 = \frac{L}{T}$ , 解得  $t = T$ , 电子与极板的最大距离为  $h = 2 \times \frac{1}{2} a \left( \frac{T}{2} \right)^2$ ,  $a = \frac{eU_0}{md}$ ,  $h < \frac{d}{2}$ , 解得  $d > \frac{T}{2} \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$ , **A 错误**; 由  $A$  项可知, 电子在  $t=0$  时刻从  $O$  点射入时, 离开电场时偏离中心线距离最大, **B 错误**; 电子在  $t = \frac{3}{8}T$  时刻从  $O$  点射入时, 电子的运动分三个阶段, 第一阶段竖直方向向  $A$  板匀加速运动  $t_1 = \frac{1}{8}T$ , 第二阶段竖直方向先向  $A$  板匀减速运动  $t_1 = \frac{1}{8}T$ , 再向  $B$  板匀加速运动  $t_2 = \frac{3}{8}T$ , 第三阶段竖直方向向  $B$  板匀减速运动  $t_2 = \frac{3}{8}T$ , 以指向  $A$  板为正方向 ( $v-t$  图像如图所示), 离开电场时偏离中心线的距离为  $y = 2 \times \frac{1}{2} at_1^2 - 2 \times \frac{1}{2} at_2^2 = -\frac{1}{8} a T^2 \neq 0$ , **C 错误**; 依题意, 电子在电场中的运动时间为  $T$ , 无论在哪一时刻从  $O$  点射入电场, 指向  $A$  板的电场力的作用时间与指向  $B$  板的电场力的作用时间都是  $\frac{T}{2}$ , 根据动量定理有  $qE \cdot \frac{T}{2} - qE \cdot \frac{T}{2} = m\Delta v_y$ , 解得  $\Delta v_y = 0$ , **D 正确**.

- 5. B** 【解析】由于匀强电场由  $A$  指向  $B$ , 可知  $AD$  为等势线, 设圆的半径为  $R$ , 小球  $P$  经过  $D$  点时的动能是小球在  $A$  点时的动能的 4 倍, 根据动能定理可得  $mg \cdot \frac{3}{2}R = 4E_{k0} - E_{k0}$ , 整理得  $E_{k0} =$



$\frac{1}{2}mgR$ , 小球  $Q$  从  $A$  点抛出到  $B$  点的过程中, 根据动能定理可得  $mgR\cos 60^\circ + qER = E_{kB} - E_{k0}$ , 又  $E = \frac{mg}{q}$ , 联立解得  $E_{kB} = 4E_{k0}$ , 则小球  $Q$  经过  $B$  点时的动能是小球在  $A$  点时的动能的 4 倍, **B 正确**.

**6. AD** 【解析】由题图可知粒子的轨迹向上弯曲, 则所受的电场力方向向上, 与电场方向相同, 所以该粒子带正电, 故 **B 错误**; 粒子从  $P$  点运动到  $Q$  点, 电场力做了  $W = qU$  的正功, 则粒子的电势能减少了  $qU$ , 由于  $Q$  点的电势为零, 即粒子在  $Q$  点的电势能为零, 则带电粒子在  $P$  点的电势能为  $qU$ , 故 **A 正确**; 带电粒子在电场中做类平抛运动, 设带电粒子沿电场方向运动的位移为  $y$ , 根据类平抛运动规律可得  $\tan 30^\circ = \frac{d}{2y}$ , 解得  $y = \frac{\sqrt{3}d}{2}$ , 根据  $E = \frac{U}{y}$  可得  $E = \frac{2\sqrt{3}U}{3d}$ , 故 **C 错误, D 正确**.

**7. (1)**  $\sqrt{2kU_0}$  **(2)**  $\frac{2U_0}{R}$  **(3)**  $\frac{U_1 l^2}{U_0 d}$

【解析】(1) 设粒子的电荷量为  $q$ , 质量为  $m$ , 由动能定理得  $qU_0 = \frac{1}{2}mv_1^2$ , 其中  $\frac{q}{m} = k$ , 解得  $v_1 = \sqrt{2kU_0}$ .

(2) 在辐向电场中粒子做匀速圆周运动, 有  $qE = m\frac{v_1^2}{R}$ , 解得  $E = \frac{2U_0}{R}$ .

(3) 在第一个偏转电场中, 设粒子的运动时间为  $t$ , 加速度的大小为  $a = \frac{qU_1}{md}$ , 在离开电场时, 竖直分速度为  $v_y = at$ , 竖直位移为  $y_1 = \frac{1}{2}at^2$ , 水平位移为  $l = v_1 t$ , 联立解得  $y_1 = \frac{U_1 l^2}{4dU_0}$ , 由于两偏转电场的电压大小相等、方向相反, 故粒子在第二个偏转电场中运动的竖直位移也为  $y_1$ , 且沿水平方向离开第二个偏转电场, 做匀速直线运动打在荧光屏上的  $A$  点; 粒子在两偏转电场间做匀速直线运动, 经历时间也为  $t$ , 竖直位移为  $y_2 = v_y t = \frac{U_1 l^2}{2dU_0}$ , 综上所述, 粒子在

竖直方向上的总位移  $y = 2y_1 + y_2$ , 解得  $y = \frac{U_1 l^2}{U_0 d}$ .

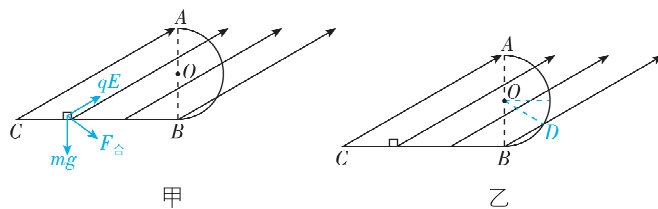
### 重难专项 10 带电粒子在等效场中的运动

**1. C** 【解析】小球在竖直面内做圆周运动, 只有电场力和重力做功, 则小球的电势能、动能和重力势能之和守恒, 根据沿着电场线方向电势降低, 可知  $d$  点的电势最低, 根据  $E_p = q\varphi$  可知, 小球在  $d$  点时的电势能最小, 则在  $d$  点时的机械能最大, **B 错误**; 小球所受电场力方向水平向右, 重力方向竖直向下, 重力和电场力的合力方向为斜向右下方, 在  $b$ 、 $d$  之间, 重力和电场力的合力方向与圆弧的交点为小球做圆周运动的等效最低点, 当小球经过该等效最低点时的速度最大, 动能最大, **A 错误**; 小球从  $a$  点运动到  $d$  点过程中电场力做功  $W = EqL$ , **C 正确**; 由题图可知  $a$ 、 $b$  为等势点, 小球从  $a$  点运动到  $b$  点的过程中, 电场力做的总功为零, **D 错误**.

**方法总结** 体会等效的思想, 把带电体受到的重力和匀强电场对它的电场力看作一个恒力.

**2. C** 【解析】对小滑块受力分析, 如图甲所示, 合外力与水平方向夹角为  $30^\circ$ , 则小滑块运动到  $A$  点时小滑块加速度的竖直分量向下, 故在  $A$  点时小滑块处于失重状态, 故 **B 错误**; 假设小滑块刚好可以到达  $A$  点, 合外力的竖直分量提供向心力, 根据牛顿第二定律有  $mg - qE\sin 30^\circ = F_n$ , 解得  $F_n = \frac{1}{2}mg$ , 设此时小滑块在  $A$  点的速度为  $v_A$ , 则  $F_n = m\frac{v_A^2}{R}$ , 根据动能定理有  $qEL\cos \theta + qE \times 2R\sin \theta - mg \times 2R = \frac{1}{2}mv_A^2 - 0$ , 解得  $L = \frac{5\sqrt{3}}{6}R$ , 故 **A 错误**; 合外力与水平方向夹角为  $30^\circ$ ,  $OD$  与水平方向夹角为  $30^\circ$ ,  $D$  点为等效最低点, 如图乙所示, 滑块在  $D$  点时, 轨道对滑块的弹力最大, 若 **关键点: 求最值时, 一般先找等效最高点或最低点**

$L = \frac{2\sqrt{3}R}{3}$ , 根据动能定理有  $F_{\text{合}} \left( L\cos 30^\circ + \frac{R}{2} \right) = \frac{1}{2}mv_1^2$ , 此时轨道对小滑块的支持力大小为  $N = F_{\text{合}} + m\frac{v_1^2}{R}$ , 又  $F_{\text{合}} = 2mg\cos 60^\circ = mg$ , 解得  $N = 4mg$ , 故 **C 正确, D 错误**.

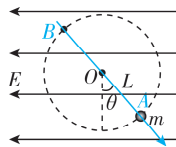


**3. (1)** 小球带负电  $2mg$ , 与竖直方向夹角为  $60^\circ$  斜向右下

**(2)**  $2g$  见解析 **(3)**  $\sqrt{2gL}$   $12mg$

【解析】(1) 根据平衡条件可知小球所受的电场力方向向右, 与电场方向相反, 故小球带负电, 有  $qE = mg\tan \theta$ , 小球所受到的等效重力等于电场力和重力的合力, 大小为  $F_{\text{等}} = \sqrt{(qE)^2 + (mg)^2} = 2mg$ , 设小球所受到的等效重力与竖直方向的夹角为  $\alpha$ , 有  $\tan \alpha = \frac{qE}{mg} = \sqrt{3}$ , 可得  $\alpha = \theta = 60^\circ$ .

(2) 等效重力场的重力加速度  $g' = \frac{F_{\text{等}}}{m} = 2g$ , 等效重力场线、字母  $A$ 、 $B$  位置如图所示.



(3) 在等效重力场的最高点有  $F_{\text{等}} = m\frac{v_B^2}{L}$ , 小球做圆周运动过程中速度的最小值为  $v_B = \sqrt{2gL}$ , 在等效重力场的最低点有  $F_T - F_{\text{等}} = m\frac{v_A^2}{L}$ , 从  $A$  到  $B$  由动能定理得  $-F_{\text{等}} \cdot 2L = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2$ , 解得  $F_T = 12mg$ .