2026 年广东

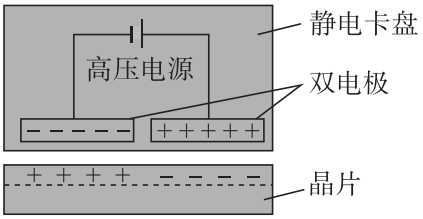
1. 核钟是基于原子核能级跃迁来建立高精度时间标准的装置，原子核可吸收光子发生类似原子的能级跃迁。现有一种激光能够激发某原子核从基态跃迁至激发态，其能级差约为 $1.3\times10^{-18}\,\mathrm{J}$，普朗克常量 $h=6.6\times10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$，真空中光速 $c=3.0\times10^{8}\,\mathrm{m/s}$。关于该激光，下列说法正确的是 (D)

A. 光强倍增，此能级跃迁不能发生　　B. 光强减半，此能级跃迁不能发生

C. 频率约为 $2.0\times10^{16}\,\mathrm{Hz}$　　D. 波长约为 $1.5\times10^{-7}\,\mathrm{m}$

> A．原子核能级跃迁的条件是入射光子能量等于能级差，与光强无关，光强倍增只要光子能量匹配仍可发生跃迁，故 A 错误；
>
> B．同理，光强减半不影响光子能量，只要能量匹配仍能发生跃迁，故 B 错误；
>
> C．根据光子能量公式 $\Delta E=h\nu$，可得频率 $\nu=\frac{\Delta E}{h}=\frac{1.3\times10^{-18}}{6.6\times10^{-34}}\,\mathrm{Hz}\approx2.0\times10^{15}\,\mathrm{Hz}$，与选项给出的 $2.0\times10^{16}\,\mathrm{Hz}$ 不符，故 C 错误；
>
> D．根据波长与频率关系 $\lambda=\frac{c}{\nu}=\frac{hc}{\Delta E}$，代入数值计算得 $\lambda=\frac{6.6\times10^{-34}\times3.0\times10^{8}}{1.3\times10^{-18}}\,\mathrm{m}\approx1.5\times10^{-7}\,\mathrm{m}$，故 D 正确。
>
> 故选 D。

2. 静电卡盘是芯片制造中的重要设备，如图为双极型静电卡盘吸附原理简图，双电极接高压电源后，晶片靠近卡盘的一侧带上与电极极性相反的电荷，在电场力作用下向卡盘运动并被吸附。在晶片运动过程中，下列说法正确的是 (B)



A. 电场力对晶片做负功

B. 晶片在电场中的电势能逐渐减少

C. 晶片与卡盘电极之间表现为斥力

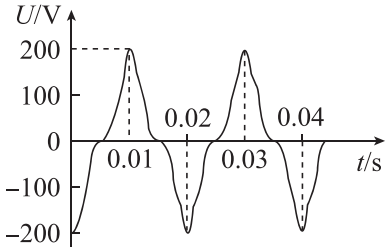
D. 晶片与卡盘电极之间电场强度处处相同

> AC．晶片在电场力作用下向卡盘运动并被吸附，则晶片与卡盘电极之间表现为引力，晶片所受电场力方向指向卡盘，与晶片向卡盘运动的位移方向同向，电场力对晶片做正功，AC 错误；
>
> B．电场力对晶片做正功，则晶片在电场中的电势能逐渐减少，故 B 正确；

D．不考虑边缘效应，晶片与卡盘电极之间电场可视为匀强电场，电场强度大小处处相等，但左右两侧电场强度方向相反（电场强度是矢量），故 D 错误。

故选 B。

3. 如图是某种自由式活塞内燃发电机输出电压 U 随时间 t 变化的图像。下列说法正确的是（C）



A．电压的有效值为 $200\sqrt{2}\,\mathrm{V}$　　B．电压的最大值为 $400\,\mathrm{V}$

C．电压的频率为 $50\,\mathrm{Hz}$　　D．电压的周期为 $0.01\,\mathrm{s}$

AB．由图像可知，电压的最大值为 $200\,\mathrm{V}$，且并不是一直维持 $200\,\mathrm{V}$，则有效值小于 $200\,\mathrm{V}$，故 AB 错误；

CD．从 $U-t$ 图像可以看出，电压完成一次周期性变化的时间（周期）$T=0.02\,\mathrm{s}$，则频率为 $f=\frac{1}{T}=50\,\mathrm{Hz}$，故 C 正确，D 错误。

故选 C。

4. 足球比赛中，某队员为接应传球，由静止开始沿直线跑动，先匀加速冲刺，后匀减速至接球点停止。全程用时 $5\,\mathrm{s}$，位移大小为 $20\,\mathrm{m}$，则该队员在某时刻的速度和加速度的大小可能是（A）

A．$6\,\mathrm{m/s}$，$2\,\mathrm{m/s^2}$　　B．$6\,\mathrm{m/s}$，$1\,\mathrm{m/s^2}$　　C．$9\,\mathrm{m/s}$，$2\,\mathrm{m/s^2}$　　D．$9\,\mathrm{m/s}$，$1\,\mathrm{m/s^2}$

根据题意，设运动过程中最大速度为 v_m，则有 $x=\frac{v_m}{2}t$，代入数据解得 $v_m=8\,\mathrm{m/s}$。根据题意可知，加速过程或减速过程的最大时间均小于总时间，则有 $v_m=at$。

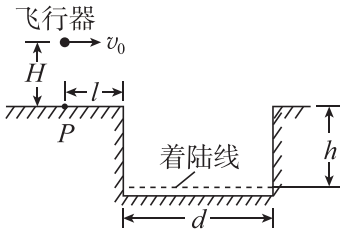
解得加速过程或减速过程的最小加速度 $a=\frac{v_m}{t}=1.6\,\mathrm{m/s^2}$。

综上所述，该队员某时刻的速度不可能为 $9\,\mathrm{m/s}$，加速度大小不可能为 $1\,\mathrm{m/s^2}$。所以根据题意和选项，速度和加速度大小可能是 $6\,\mathrm{m/s}$，$2\,\mathrm{m/s^2}$。

故选 A。

5. 如图是月球上一圆柱形阴影坑竖直截面图。假定某飞行器在月面上空 $H=1.28\,\mathrm{km}$ 向坑中心方向以速度 v_0 匀速水平飞行。在距坑边 $l=1.2\,\mathrm{km}$ 的 P 点正上方关闭动力，此后只受月球重力，直至抵达着陆线。已知坑直径 $d=3\,\mathrm{km}$，月面至着陆线深度 $h=1.6\,\mathrm{km}$，

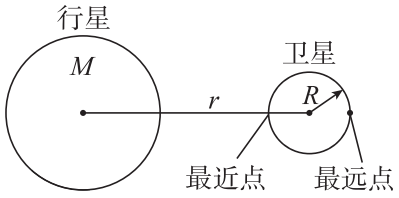
月面重力加速度取 $g_{月}=1.6\,\mathrm{m/s^2}$，飞行器可视为质点。飞行器安全到达着陆线，则 v_0 的大小可能是（B）



A. $20\,\mathrm{m/s}$　　B. $50\,\mathrm{m/s}$　　C. $110\,\mathrm{m/s}$　　D. $120\,\mathrm{m/s}$

> 根据题意可知飞行器安全到达着陆线，速度最小时会刚好通过月面坑边到达着陆线，
>
> 此时根据平抛运动规律在竖直方向有 $H=\frac{1}{2}g_{月}t_1^2$，代入数据解得 $t_1=40\,\mathrm{s}$；
>
> 在水平方向有 $l=v_0t_1$，代入数据可得 $v_0=30\,\mathrm{m/s}$；
>
> 飞行器安全到达着陆线，速度最大时会到达着陆线最右端的坑边缘，此时根据平抛运动规律在竖直方向有 $H+h=\frac{1}{2}g_{月}t_2^2$，代入数据解得 $t_2=60\,\mathrm{s}$；
>
> 在水平方向有 $l+d=v_0t_2$，代入数据可得 $v_0=70\,\mathrm{m/s}$。
>
> 所以飞行器安全到达着陆线需满足 $30\,\mathrm{m/s}\le v_0\le 70\,\mathrm{m/s}$。
>
> 故选 B。

6. 如图所示，某行星对单个卫星表面最远点与最近点的单位质量物体的“引力差值”可近似为 $F=k\frac{MR}{r^3}$，其中 k 为常量，M 为行星质量，R 为卫星球体半径，r 为行星中心到卫星中心的距离。两卫星 P 和 Q 的球体半径之比 $R_P:R_Q$ 为 $2:1$，它们绕该行星做匀速圆周运动的周期之比 $T_P:T_Q$ 为 $8:1$，该行星对卫星 P、Q 的“引力差值”分别为 F_P、F_Q，则 $F_P:F_Q$ 为（C）



A. $1:4$　　B. $1:16$　　C. $1:32$　　D. $1:64$

> 根据 $G\frac{Mm}{r^2}=m\frac{4\pi^2}{T^2}r$ 可得 $r^3=\frac{GMT^2}{4\pi^2}$。
>
> 又因为两卫星绕该行星做匀速圆周运动的周期之比 $T_P:T_Q$ 为 $8:1$，可得
>
> $\frac{r_P^3}{r_Q^3}=\frac{T_P^2}{T_Q^2}=\left(\frac{8}{1}\right)^2=64$。

根据“引力差值”公式 $F=k\frac{MR}{r^3}$，其中 M 和 k 相同，所以 $\frac{F_P}{F_Q}=\frac{R_P}{R_Q}\cdot\frac{r_Q^3}{r_P^3}=\frac{2}{1}\times\frac{1}{64}=\frac{1}{32}$。

故选 C。

7. 图 a 为某梳齿状可变电容器截面图，上端为固定极板，下端为可上下运动的动极板。将该电容器接入图 b 所示电路，探究其电荷量 Q、极板电压 U 和电容 C 的变化。过程为：①当动极板运动到最高处，开关 S 接 a 端，电源 E 向电容器充电；②充电结束后 S 接 b 端空置，动极板向下运动；③当动极板运动到最低处，S 接 c 端，电容器通过 R 放电。关于该过程，下列图像可能正确的是 (A)

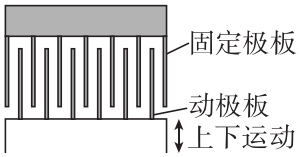


图 a

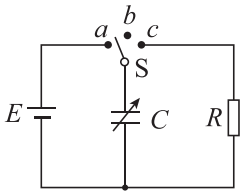
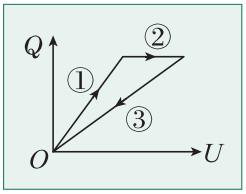
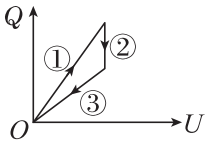


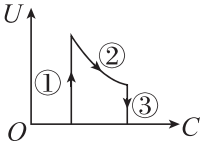
图 b



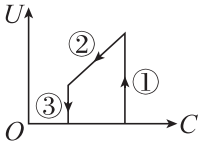
A.



B.



C.



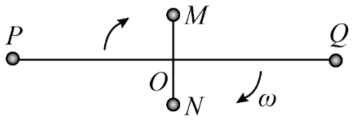
D.

AB.由题意可知①过程为电容器充电过程，电容器两端电势差逐渐增大，根据 $Q=CU$ 可知电容器电荷量逐渐增大；②过程 S 接 b 端，则电容器 Q 不变，动极板向下运动，d 增大，根据 $C=\frac{\varepsilon S}{4\pi kd}=\frac{Q}{U}$ 可知 U 增大，C 减小；③过程为放电过程，动极板在最低处电容为更小的恒定值，故对应 $Q-U$ 图线为过原点、斜率更小的直线，A 正确，B 错误；

CD．通过前面的分析可知①过程的电容 C 大于③过程的电容 C，②过程中 Q 不变，因为 $C=\frac{Q}{U}$，所以 U 与 C 成反比，图像为双曲线的一支，故 CD 均错误。

故选 A。

8. 如图所示，在光滑的水平地面上，P、Q、M、N 四个质量相等的小球通过两根不可伸长的轻绳相连，P、Q 间的绳长为 L_1，M、N 间的绳长为 L_2，两绳相交于各自的中点 O，四球以相同角速度 ω 绕固定的 O 点做匀速圆周运动，已知 $L_1=2\,\mathrm{m}$，P、Q 的向心加速度大小均为 $a_1=4\,\mathrm{m/s^2}$，M、N 的向心加速度大小均为 $a_2=1\,\mathrm{m/s^2}$，四球均可视为质点，忽略空气阻力，下列说法正确的有 (AB)



A. $\omega = 2\,\mathrm{rad/s}$

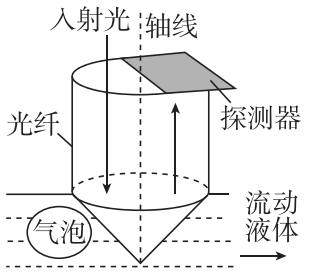
B. $L_2 = 0.5\,\mathrm{m}$

C. P 的线速度大小为 $0.5\,\mathrm{m/s}$

D. 轻绳对四球的拉力大小相等

> A．根据题意可知 P、Q 做圆周运动的半径 $r_1 = \frac{L_1}{2} = 1\,\mathrm{m}$。
>
> 对 P、Q 根据 $a_1 = \omega^2 r_1$ 可得 $\omega = \sqrt{\frac{a_1}{r_1}} = \sqrt{\frac{4}{1}}\,\mathrm{rad/s} = 2\,\mathrm{rad/s}$，故 A 正确；
>
> B．因为四个球角速度相同，对球 M、N 有 $r_2 = \frac{L_2}{2} = \frac{a_2}{\omega^2} = \frac{1}{4}\,\mathrm{m}$，
>
> 所以 $L_2 = 0.5\,\mathrm{m}$，故 B 正确；
>
> C．对于 P 有 $v_1 = \omega r_1 = 1 \times 2\,\mathrm{m/s} = 2\,\mathrm{m/s}$，故 C 错误；
>
> D．绳子拉力提供向心力，根据 $F = m\omega^2 r$ 可知由于四球质量相等，角速度相等，但半径不同，故拉力大小不相等，故 D 错误。
>
> 故选 AB。

9. 图中底端为锥形且顶角为 $90°$ 的直光纤，可用于检测流动液体中的空气泡，某单色光从光纤顶端左部入射，平行于轴线方向传播，探测器在光纤顶端右部探测锥面反射光的光强，已知锥面外为空气时，该单色光在锥面恰好发生全反射，空气折射率取 1，被测液体折射率大于此光纤折射率。下列说法正确的有（AD）



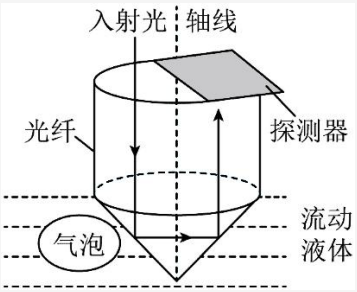
A. 此光纤对该单色光的折射率为 $\sqrt{2}$

B. 该单色光在此光纤中的传播速度是真空中光速的 $\frac{1}{2}$

C. 锥面浸入液体过程中，探测到的光强相对于浸入液体前变强

D. 锥面完全浸入液体后，若探测到的光强在变强，说明检测到气泡

> A．画出光路图如图所示。



根据几何关系可知，该单色光在锥面发生全反射的临界角 $C=45°$，

根据临界角公式 $\sin C=\frac{1}{n}$，

可得此光纤对该单色光的折射率为 $n=\sqrt{2}$，故 A 正确；

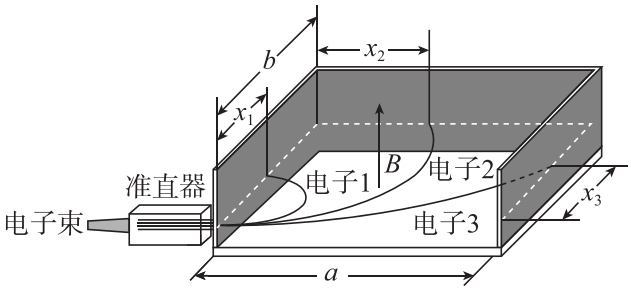
B．根据 $v=\frac{c}{n}$，可得该单色光在此光纤中的传播速度为 $v=\frac{\sqrt{2}}{2}c$，故 B 错误；

C．光从折射率大的介质到折射率小的介质中，才可能发生全反射，被测液体折射率大于此光纤折射率，则锥面浸入液体部分，光不会发生全反射，即锥面浸入液体过程中，探测到的光强相对于浸入液体前变弱，故 C 错误；

D．锥面完全浸入液体后，若探测到的光强在变强，说明光在某些地方发生了全反射，发生全反射的地方即有空气，说明检测到气泡，故 D 正确。

故选 AD。

10. 如图是一种长方体电子磁谱仪结构示意图，磁谱仪内存在磁感应强度大小为 B、方向垂直底面向上的匀强磁场，磁场区域长为 a、宽为 b。电子束中有三个电子通过准直器后垂直左侧面沿边缘进入磁场，偏转后分别到达磁谱仪三个侧面，与边缘的距离分别为 x_1、x_2 和 x_3，电子电荷量为 $-e$、质量为 m，不考虑相对论效应，下列说法正确的有 (BCD)



A．电子 1 的动能比电子 3 的大

B．电子 1 在磁场中的运动时间为 $\frac{\pi m}{eB}$

C．电子 2 的动能为 $\frac{e^2B^2(x_2^2+b^2)^2}{8mb^2}$

D．电子 3 的动量大小为 $\frac{eB(x_3^2+a^2)}{2x_3}$

A．电子在磁场中做匀速圆周运动，根据洛伦兹力提供向心力可得 $evB=m\frac{v^2}{r}$，

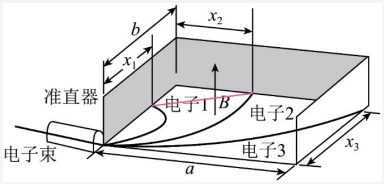
可得 $v=\frac{eBr}{m}$。

根据几何关系可知电子 1 的运动半径小于电子 3 的运动半径，则电子 1 的速度小于电子 3 的速度，根据 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 可知电子 1 的动能比电子 3 的小，故 A 错误；

B．电子在磁场中做匀速圆周运动的周期 $T=\frac{2\pi r}{v}$，结合 $v=\frac{eBr}{m}$，可得 $T=\frac{2\pi m}{eB}$。

根据题图可知电子 1 在磁场中运动的圆心角为 180°，则电子 1 在磁场中的运动时间为 $t=\frac{180^\circ}{360^\circ}\times T=\frac{\pi m}{eB}$，故 B 正确；

C．设电子 2 运动半径为 R_2，如图所示，



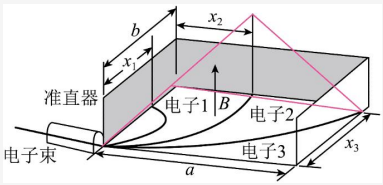
根据几何关系有 $(b-R_2)^2+x_2^2=R_2^2$，

可得 $R_2=\frac{b^2+x_2^2}{2b}$。

根据 $v_2=\frac{eBR_2}{m}$ 可得 $v_2=\frac{eB(x_2^2+b^2)}{2bm}$，

电子 2 的动能为 $E_k=\frac{1}{2}mv_2^2=\frac{e^2B^2(x_2^2+b^2)^2}{8mb^2}$，故 C 正确；

D．设电子 3 运动半径为 R_3，如图所示，



根据几何关系有 $(R_3-x_3)^2+a^2=R_3^2$，

可得 $R_3=\frac{x_3^2+a^2}{2x_3}$。

根据 $v_3=\frac{eBR_3}{m}$ 可得 $v_3=\frac{eB(x_3^2+a^2)}{2mx_3}$，

电子 3 的动量大小为 $p_3=mv_3=\frac{eB(x_3^2+a^2)}{2x_3}$，故 D 正确。

故选 BCD。

11. 某科技小组设计了测量薄膜压缩时间的实验，图 a 为装置示意图。

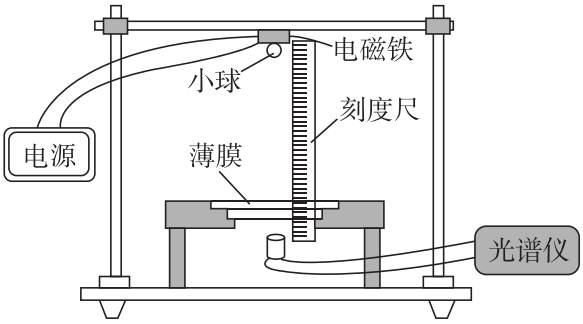


图 a

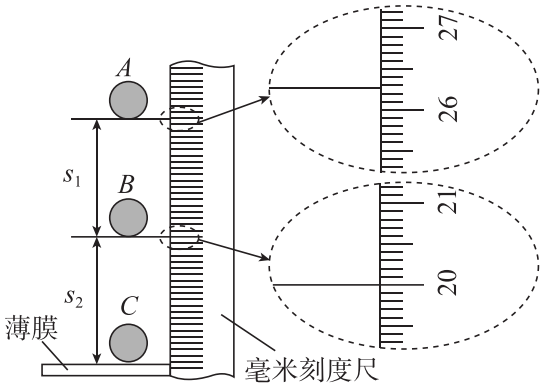


图 b

（1）实验原理。

某种薄膜受到小球冲击时会发光，通过测量发光光谱的相对光强峰值 I_p，可得最大冲击力 F，结合动量定理可估测薄膜压缩时间 t。

（2）实验操作及数据处理。

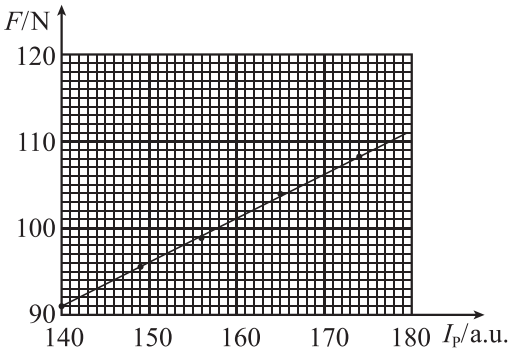
① 称量小球质量，记录质量 m。

② 断开电磁铁电源，使小球从薄膜正上方自由下落。拍摄小球下落过程的视频。

③ 图 b 为利用视频处理软件得到的小球接触薄膜瞬间前连续 3 个时刻的位置图。分别测量图中的距离 s_1 和 s_2，可得 s_1 为 6.26 cm，s_2 为 6.66 cm。相邻两个位置的时间间隔为 T，则小球在 B 位置处的速度 $v_1 = \frac{s_1+s_2}{2T}$（用 s_1、s_2 和 T 表示）；与薄膜接触前瞬间，小球在 C 位置处的速度 $v_2 = \frac{3s_2-s_1}{2T}$（用 s_1、s_2 和 T 表示）。

④ 用光谱仪测得薄膜受到冲击时发光光谱的 I_p 为 158 a.u.。图 c 为已知的 $F-I_p$ 关系图像，可读得 F 为 100 N。

⑤ $m = 30.0\,\mathrm{g}$，$T = 0.02\,\mathrm{s}$，由动量定理可估测薄膜压缩时间 $t = \frac{2mv_2}{F}$，将数据代入可得 $t = 2.06 \times 10^{-3}$ s（结果保留 3 位有效数字）。



①毫米刻度尺的分度值为 1 mm，需要估读到下一位，根据题图可得 $s_1 = 262.6\,\text{mm} - 200.0\,\text{mm} = 62.6\,\text{mm} = 6.26\,\text{cm}$；

②根据匀变速直线运动中间时刻瞬时速度等于该过程平均速度可得 $v_1 = \frac{s_1+s_2}{2T}$；

③根据速度时间关系有 $v_2 = v_1 + gT$，又 $s_2 - s_1 = gT^2$，联立可得 $v_2 = \frac{3s_2-s_1}{2T}$；

④根据题图可得 I_p 为 158 a.u. 时，F 为 100 N；

⑤ $m = 30.0\,\text{g}, T = 0.02\,\text{s}$，由动量定理可估测薄膜压缩时间 $t = \frac{2mv_2}{F}$，结合 $v_2 = \frac{3s_2-s_1}{2T}$，将数据代入可得 $t = 2.06 \times 10^{-3}\,\text{s}$。

12. 棉花的回潮率可通过测量一定压力下棉花的电阻得到。某科技小组制作了利用该方法测量棉花回潮率的简易装置，如图 a。旋转螺杆压缩弹簧对棉花施加压力。由图 b 所示电路测量棉花的电阻 R_c，所用器材有：电源 E；微安表 μA；定值电阻 R_0；电阻箱 R；开关 S_1 和 S_2；导线若干。

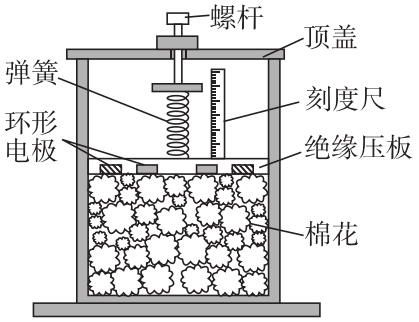


图 a

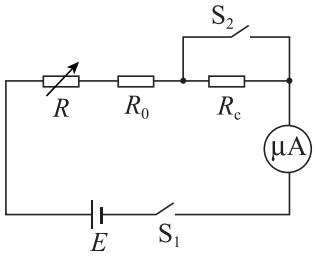


图 b

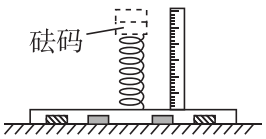


图 c

（1）弹簧劲度系数测量。

① 将装有弹簧的绝缘压板放到水平桌面上，如图 c。用刻度尺测量并记录弹簧原长。

② 在弹簧上端加一个砝码，待砝码 平衡稳定（或静止，表述合理即可） 后读数，记录弹簧长度。

③ 依次增加砝码，重复步骤②。

④ 根据实验数据，描绘压力 F 与弹簧压缩量 x 的 $F - x$ 图线，图线为直线，则图线的 斜率 表示弹簧劲度系数。

（2）棉花的电阻 R_c 测量。

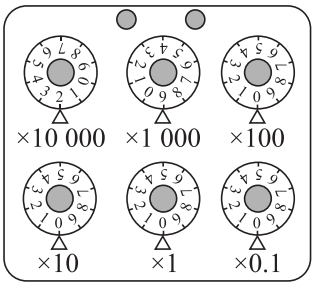
① 称量装有弹簧和刻度尺的绝缘压板质量，记录质量。

② 将某棉花样品装进装置中，装上绝缘压板，确保环形电极与棉花接触良好，固定顶盖，正确连接电路。

③ 闭合 S_1 和 S_2，调节 R，使 μA 指针偏转到某一合适位置。此时 R 的示数如图 d，读数为 29 000 Ω，记为 R_1。断开 S_1 和 S_2。

④ 缓慢旋进螺杆压紧棉花，确保压力达到回潮率测量的要求。S_2 保持断开，闭合 S_1，发现 μA 示数变小，将 R 的阻值调小，使 μA 指针偏转到与步骤③相同的位置。记录 R 的示数 R_2。断开 S_1，利用所测量的物理量，可得棉花的电阻表达式 $R_c = R_1 - R_2$。

（3）利用定标曲线确定棉花的回潮率。



（1）添加砝码后，需要等待砝码平衡稳定后再读数，才能保证弹簧弹力等于砝码重力，得到准确的弹簧长度。

根据胡克定律 $F = kx$，因此 $F - x$ 图线的斜率等于劲度系数 k。

（2）电阻箱读数为各转盘读数乘倍率之和：$R = 2 \times 10000 + 9 \times 1000\,\Omega = 29000.0\,\Omega$。

S_2 断开，R_c 串联接入电路，总电阻增大，因此电流减小，微安表示数变小。

要让电流回到原来的数值，需要总电阻和原来相等，因此需要调小电阻箱 R 的阻值，使总电阻回到原来大小。

等效后满足 $R_1 = R_2 + R_c$，整理得棉花电阻 $R_c = R_1 - R_2$。

13. 图 a 所示的空气垫是由多个相连的独立气室构成的包装材料，其简化模型如图 b。充气前气室内均没有气体，在室温 T_0 下，将压强 p_0、体积 V_0 的气体通过单向阀充入 10 个气室（忽略气道内气体），此时每个气室均为圆柱体，横截面半径为 r，长度为 h，当充气后的气室受到挤压变形时，其横截面变成图 c 所示的“跑道”形（两端是直径为 d 的半圆），且气室长度、横截面周长均保持不变，气室内气体可视为理想气体，充气及挤压变形过程中气体温度始终与室温相同。

(1) 求充气后未挤压变形时气室中的压强 p_1；

(2) 求挤压变形后气室中的压强 p_2；

(3) 已知气室中的压强超过 p_c 时气室会爆破，若气室经如图 c 所示的挤压变形后，体积不变、室温升高，求气室不爆破的最高室温 T_c。



图 a

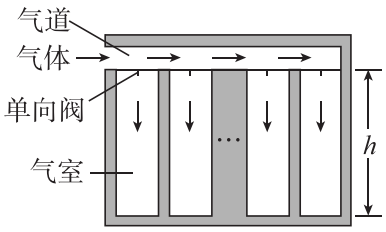


图 b

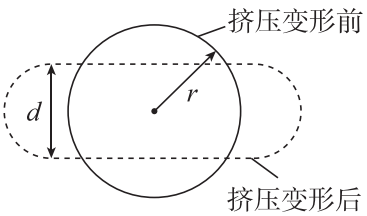


图 c

(1) $p_1 = \frac{p_0V_0}{10\pi hr^2}$　(2) $p_2 = \frac{2p_0V_0}{5\pi dh(4r-d)}$　(3) $T_c = \frac{5\pi dh(4r-d)p_cT_0}{2p_0V_0}$

（1）充气过程温度不变，对所有充入气室的气体，由玻意耳定律有 $p_0V_0 = p_1V_1$。

根据题意有 $V_1 = 10\pi r^2 \cdot h$。

解得充气后未挤压变形时气室中的压强 $p_1 = \frac{p_0V_0}{10\pi hr^2}$。

（2）变形前，气室的体积为 $V = \pi r^2 h$。

挤压过程温度不变，且横截面周长不变，原圆形横截面周长 $C = 2\pi r$。

变形后跑道形横截面两端半圆合为一个整圆，周长为 $C_1 = \pi d$。

剩余直边总长度为 $C_2 = C - C_1 = 2\pi r - \pi d$。

单根直边长 $x = \frac{C_2}{2} = \pi r - \frac{\pi d}{2}$。

变形后，气室的体积为 $V_2 = \left[\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 + xd\right] \cdot h$。

对气室气体，等温过程由玻意耳定律 $p_1V = p_2V_2$。

解得挤压变形后气室中的压强 $p_2 = \frac{2p_0V_0}{5\pi dh(4r-d)}$。

（3）体积不变，气体等容变化，有 $\frac{p_2}{T_0} = \frac{p_c}{T_c}$。

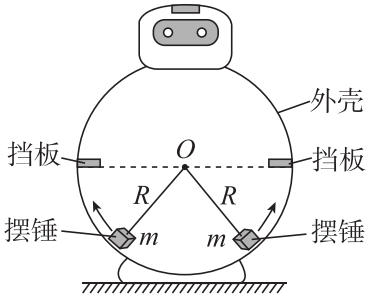
解得气室不爆破的最高室温 $T_c = \frac{5\pi dh(4r-d)p_cT_0}{2p_0V_0}$。

14. 如图是一种球形机器人跳跃原理的示意图，水平横轴过球心 O 点与外壳固定，外壳上的两挡板位于过 O 点的水平线上，两质量均为 m 的摆锤，由长均为 R 的不可伸长轻绳悬挂于轴上的 O 点，初始时刻，两摆锤同时以水平初速度 v_0 从最低点向相反方向摆动，直至与两挡板发生碰撞，碰撞时间极短，随后带动外壳以共同速度竖直向上运动，机器人到达最高点后落回地面瞬间，外壳立即静止，两摆锤速度不变，与挡板分离，继续向下运动，已知机器人（含摆锤）总质量为 $M = 4\,\mathrm{kg}$，$m = 1\,\mathrm{kg}$，$R = 0.4\,\mathrm{m}$，$v_0 = 4\,\mathrm{m/s}$。重力加速度取 $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$，忽略空气阻力，摆锤可视为质点，求：

(1) 摆锤与挡板碰撞后瞬间，机器人的动能 E_k；

(2) 机器人外壳上升的最大高度 h；

(3) 从摆锤开始运动到第一次外壳落地静止过程中的机械能损失 ΔE。



(1) $E_k = 4\,\mathrm{J}$ (2) $h = 0.1\,\mathrm{m}$ (3) $\Delta E = 6\,\mathrm{J}$

（1）两摆锤以初速度 $v_0 = 4\,\mathrm{m/s}$ 沿外壳向上运动，与挡板相碰前，摆锤机械能守恒。

设摆锤与挡板相碰前的速度为 v，根据机械能守恒定律有 $\frac{1}{2}mv_0^2 = mgR + \frac{1}{2}mv^2$，

解得 $v = 2\sqrt{2}\,\mathrm{m/s}$。

摆锤与挡板相碰后与机器人一起运动，根据动量守恒定律有 $2mv = Mv_{共}$，

解得 $v_{共} = \sqrt{2}\,\mathrm{m/s}$。

机器人起跳时的动能 $E_k = \frac{1}{2}Mv_{共}^2 = 4\,\mathrm{J}$。

（2）根据速度位移关系 $0 - v_{共}^2 = -2gh$，

可得机器人外壳上升的最大高度 $h = 0.1\,\mathrm{m}$。

（3）机器人外壳落到地面时，机器人外壳的速度立即变为 0，根据竖直上抛运动的对称性可知摆锤速度大小为 $\sqrt{2}\,\mathrm{m/s}$，从摆锤开始运动到第一次外壳落地静止过程中的机械能损失 $\Delta E = 2 \times \frac{1}{2}mv_0^2 - \left(2 \times \frac{1}{2}mv_{共}^2 + 2mgR\right)$，

解得 $\Delta E = 6\,\mathrm{J}$。

15. 图 a 所示，两竖直放置且足够大的平行金属板 M、N，两板间距为 d，在两板正中间竖直平面内固定有一水平绝缘横杆，一质量为 m、电荷量为 q 的小球通过两根等长且不可伸长的绝缘轻绳悬挂于横杆下方，小球与横杆的距离为 d，两绳的夹角为直角，如图 b，接通电源，使板间电压由 0 开始缓慢增大，小球缓慢向 N 靠近，在此过程中每个时刻小球都受力平衡，当小球接触 N 的瞬间，电荷量变为 $-q$，板间电压停止增大并在此后保持恒定，在此恒定电压下，小球每次与 M 或 N 接触后瞬间，速度均减为 0，带电荷量变化满足“电性反转、大小不变”，从而在两板间沿着圆弧往复运动，重力加速度为 g，小球可视为质点，每次与板碰撞均不影响两板间电压，忽略空气阻力和电场的边缘效应，忽略小球所带电荷对板间电场的影响。

(1) 求 M、N 间的恒定电压 U；

(2) 求小球第一次碰撞 M 前瞬间，单根轻绳的拉力大小 T；

(3) 若某次小球碰撞 M 时，M、N 间的电压突变为原恒定电压的 k 倍（$k>0$），其他条件不变，此后小球仍能沿着圆弧往复运动，求 k 的取值范围，并求出该范围内不同 k 值对应的小球最大动能 E_k。

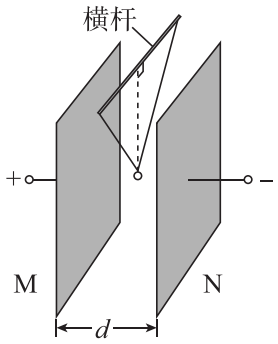


图 a

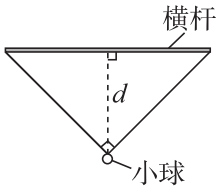
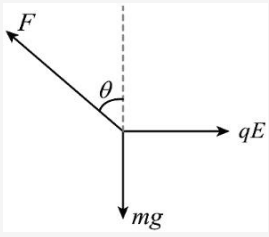


图 b

(1) $U=\frac{\sqrt{3}mgd}{3q}$ (2) $T=\frac{2\sqrt{6}}{3}mg$ (3) 当 $0<k\le 1$ 时，$E_k=\left(\frac{\sqrt{3}}{6}k+\sqrt{1+\frac{k^2}{3}}-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)mgd$；当 $1<k\le 3$ 时，$E_k=\frac{\sqrt{3}}{3}kmgd$。

（1）当小球刚好到金属板 N 时，受力分析如图所示。



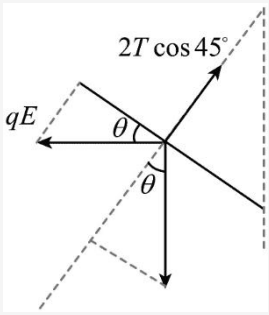
根据几何关系可得 $\sin\theta=\frac{\frac{d}{2}}{d}$，可得 $\theta=30°$。

根据平衡条件有 $qE=mg\tan\theta$，其中 $E=\frac{U}{d}$。

联立可得 $U=\frac{\sqrt{3}mgd}{3q}$。

（2）小球从金属板 N 到金属板 M 过程，根据动能定理 $qU=\frac{1}{2}mv^2-0$。

小球第一次碰撞 M 前瞬间，受力分析如图所示。

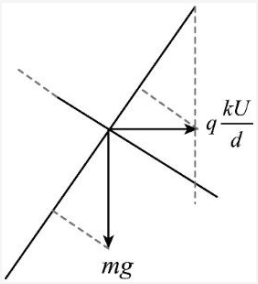


$2T\cos 45^\circ - mg\cos\theta - qE\sin\theta = m\frac{v^2}{d}$。

对小球根据牛顿第二定律，

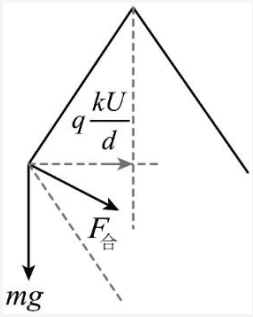
联立解得 $T = \frac{2\sqrt{6}}{3}mg$。

（3）如图所示，要使小球仍能沿着圆弧往复运动，即绳子拉力大于零，需要满足 $q\cdot\frac{kU}{d}\sin\theta < mg\cos\theta$，



解得 $k \leq 3$。

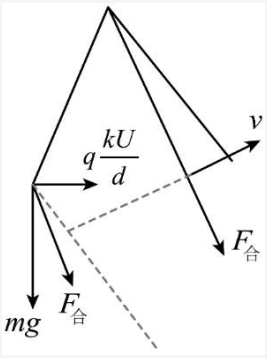
根据（2）分析可知当 $k = 1$ 时，小球到达金属板 N 时，电场力和重力的合力与绳子的合力方向相同，当 $1 < k \leq 3$ 时，小球所受的重力和电场力的合力相对于小球到达金属板 N 时绳子合力的方向偏上，如图所示。



绳子拉力对小球不做功，可知小球所受的重力和电场力的合力与小球位移的夹角一直为锐角，当小球到达金属板 N 时，动能最大，根据动能定理有 $kqU = E_k - 0$，

可得 $E_k = \frac{\sqrt{3}}{3}kmgd$。

当 $0 < k \leq 1$ 时，小球所受的重力和电场力的合力相对于小球到达金属板 N 时绳子合力的方向偏下，如图所示。



当小球速度与小球所受的重力和电场力的合力方向垂直时，速度最大，该点为等效最低点，设此时与竖直方向的夹角为 α，根据几何关系有

$\tan\alpha = \frac{\frac{kU}{d}\cdot q}{mg} = \frac{\sqrt{3}}{3}k$。

根据数学知识可得

$\sin\alpha = \frac{\frac{\sqrt{3}}{3}k}{\sqrt{1+\frac{1}{3}k^2}}$，$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{3}k^2}}$。

根据动能定理有

$mgd(\cos\alpha - \cos\theta) + \frac{kU}{d}\cdot qd(\sin\theta + \sin\alpha) = E_k - 0$。

解得 $E_k = \left(\frac{\sqrt{3}}{6}k + \sqrt{1+\frac{k^2}{3}} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)mgd$。