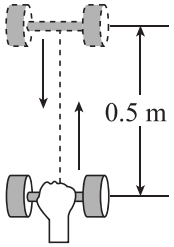
2026 年河北

1. 某同学健身时，哑铃被举高 0.5 m 后再回到原位置，如图所示。如此重复 10 次，哑铃的位移大小为 (A)



A. 0　　B. 5 m　　C. 10 m　　D. 11 m

> 位移是描述物体位置变化的物理量，位移的大小等于初位置到末位置的有向线段长度，和运动过程的路径无关。
>
> 本题中，哑铃每次运动都从原位置出发，举高后回到原位置，重复 10 次后，哑铃的末位置与初始位置重合，初末位置的距离为 0，因此位移大小为 0。
>
> 故选 A。

2. 河北雄安新区融合静电探测技术构建起“天空之网”，实现了对低空飞行器的全天候实时监测。当飞行器靠近时，固定在地面上的静电探测器探头感应出了正电荷。在感应电荷产生的静电场中，电场线 (B)

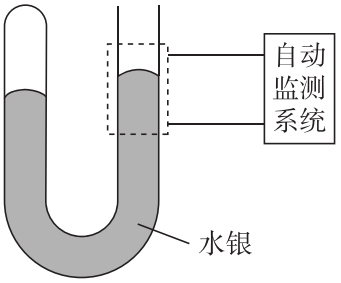
A. 是闭合曲线　　B. 从感应正电荷出发

C. 在无电荷区域相交　　D. 终止于感应正电荷

> 本题考查静电场电场线的基本性质，结合性质逐一判断选项：
>
> A．感应电荷产生的静电场的电场线为非闭合曲线，故 A 错误；
>
> B．静电场电场线起始于正电荷或无穷远，探测器探头感应出正电荷，因此电场线从感应正电荷出发，故 B 正确；
>
> C．电场中某点的场强方向唯一，因此无电荷区域电场线不可能相交，故 C 错误；
>
> D．静电场电场线终止于负电荷或无穷远，正电荷是电场线的起点而非终点，故 D 错误。
>
> 故选 B。

3. 一款自动监测环境气压的装置由粗细均匀、导热良好的 U 形管和自动监测系统组成。如图所示，竖直放置的 U 形管右端开口，左侧管内用水银封闭了一定质量、可视为理想气体的空气。监测系统通过监测右侧液面的变化。结合温度即可得到环境气压。若外界

温度下降的同时环境气压也发生了变化，导致 U 形管右侧液面上升，忽略水银体积变化，则封闭气体的 (C)



A. 内能增加　　B. 压强增大

C. 分子的数密度减少　　D. 分子热运动的平均动能不变

A．U 形管导热良好，外界温度下降，因此封闭气体的温度也会下降。理想气体的内能仅由温度决定，温度降低，内能减小，A 错误；

C．U 形管水银总体积不变，右侧液面上升，说明左侧封闭气体的体积 V 增大，封闭气体分子总数不变，因此单位体积的分子数（分子数密度）减少，C 正确；

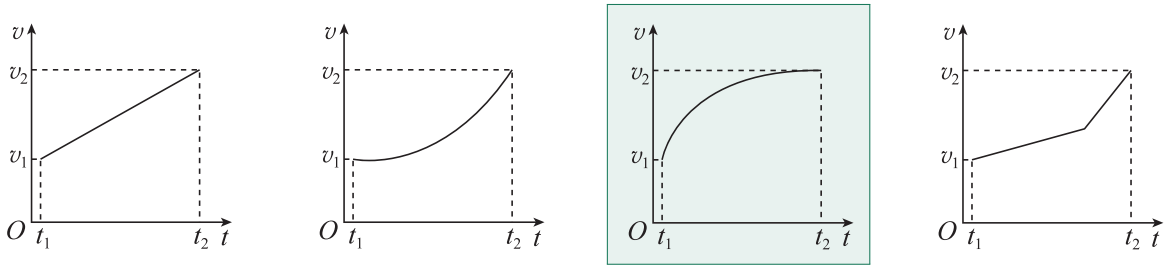
根据理想气体状态方程 $\frac{pV}{T}=C$，变形得 $p=C\frac{T}{V}$。

已知温度 T 减小、体积 V 增大，则封闭气体压强减小，B 错误；

D．温度降低，则分子热运动的平均动能减小，D 错误。

故选 C。

4. 我国科技爱好者复原了春秋战国时期带有刃车軎（wéi）的马车；并对其性能进行了测试。在 t_1-t_2 时间内，若马车以恒定功率在水平路面上沿直线运动，速度从 v_1 加速到 v_2，假定马车所受阻力不变，则马车运动的 $v-t$ 图像可能是 (C)



A.　　B.　　C.　　D.

马车以恒定功率运动，阻力 f 不变，由功率公式 $P=Fv$

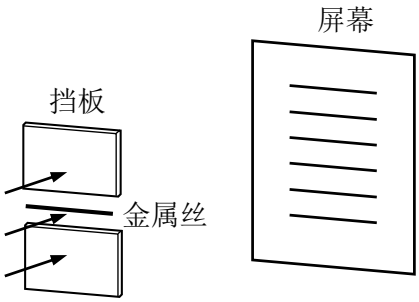
结合牛顿第二定律 $F-f=ma$

整理得加速度 $a=\frac{P}{mv}-\frac{f}{m}$

随着速度 v 增大，恒定功率 P 不变，因此加速度 a 逐渐减小。

> $v-t$ 图像的斜率表示加速度，因此 $v-t$ 图的斜率应逐渐减小，图像越来越平缓。
>
> 故选 C。

5. 如图所示，一根粗细均匀的细金属丝置于两挡板之间的水平狭缝中央。其中心轴与狭缝平行，直径小于狭缝宽度。一束平行单色光垂直挡板入射，在屏幕上形成了稳定的双缝干涉图样，相邻两条亮条纹中心间距为 Δx。若金属丝经加热均匀膨胀，则 (A)

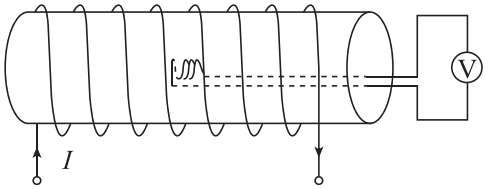


A. Δx 变小　　B. Δx 变大

C. 双缝间的距离减小　　D. 双缝间的距离不变

> CD．金属丝加热均匀膨胀，其直径 D 变大。该装置利用金属丝两侧的空隙形成双缝干涉，设两挡板间狭缝总宽度为 W（不变），则双缝间距（即两透光狭缝中心间的距离）为 $d=\frac{W+D}{2}$
>
> 当 D 变大时，双缝间距 d 变大，故 CD 错误；
>
> AB．根据双缝干涉条纹间距公式 $\Delta x=\frac{L}{d}\lambda$（其中 L 为缝到屏的距离，λ 为光波长），当 d 变大时，Δx 变小，故 A 正确，B 错误。
>
> 故选 A。

6. 如图所示，在长直螺线管中间区域放置一个匝数为 n、面积为 S 的同轴小线圈。已知长直螺线管通电后其内部磁场处处相同，磁感应强度的大小 B 与螺线管中的电流 I 成正比，即 $B=\alpha I$。在一段时间内，若电流 I 随时间 t 的变化关系满足 $I=\beta t$（β 为常量），由理想电压表测出小线圈的感应电动势为 E，则 α 可以表示为 (D)



A. $\frac{\sqrt{2}E}{\beta S}$　　B. $\frac{\sqrt{2}E}{n\beta S}$　　C. $\frac{E}{\beta S}$　　D. $\frac{E}{n\beta S}$

根据法拉第电磁感应定律有 $E = nS \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$

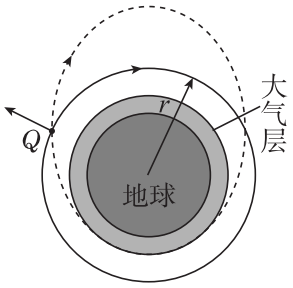
根据题意有 $B = \alpha I$，$I = \beta t$

联立可得 $E = nS\alpha\beta$

解得 $\alpha = \frac{E}{n\beta S}$

故选 D。

7. 为清除太空碎片对航天器的潜在威胁，某兴趣小组提出一种设想。如图所示，一质量为 m 的太空碎片绕地球做半径为 r 的匀速圆周运动，在 Q 点受到一个与其速度方向垂直且背离地心向外的瞬时冲量 I 作用、变轨到图中的椭圆轨道，最终进入大气层而烧毁，设地球质量为 M，引力常量为 G，则该太空碎片受到冲量作用后瞬间的动能为 (B)



A. $\frac{GMm}{r} + \frac{I^2}{2m}$　　B. $\frac{GMm}{2r} + \frac{I^2}{2m}$

C. $\frac{GMm}{r} + \frac{I^2}{2m} + I\sqrt{\frac{GM}{r}}$　　D. $\frac{GMm}{2r} + \frac{I^2}{2m} + I\sqrt{\frac{GM}{r}}$

设太空碎片做匀速圆周运动的速度为 v_0，根据万有引力提供向心力有 $G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{v_0^2}{r}$

解得 $v_0^2 = \frac{GM}{r}$

则碎片受到冲量前的初始动能为 $E_{k0} = \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{GMm}{2r}$

碎片在 Q 点受到瞬时冲量 I 作用，获得一个垂直于原速度方向的分速度，根据动量定理 $I = m\Delta v$

可得其大小为 $\Delta v = \frac{I}{m}$

由于冲量方向（背离地心向外，即径向）与原速度方向垂直，根据矢量合成法则（勾股定理），

作用后的合速度 v 的平方为 $v^2 = v_0^2 + (\Delta v)^2 = \frac{GM}{r} + \left(\frac{I}{m}\right)^2$

则该太空碎片受到冲量作用后瞬间的动能为 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left[\frac{GM}{r} + \frac{I^2}{m^2}\right] = \frac{GMm}{2r} + \frac{I^2}{2m}$

故选 B。

8. 图 1 为一种等离子体工作电路，理想变压器原线圈两端接电压为 U 的正弦交流电源，

原、副线圈的匝数分别为 n_1、n_2，R 为保护电阻。稳定工作时交流电流表的读数为 I，若等离子体可等效为定值电阻，其两端的正弦交流电压波形如图 2 所示，U_m 为电压峰值，T 为周期，则下列说法正确的是（AD）

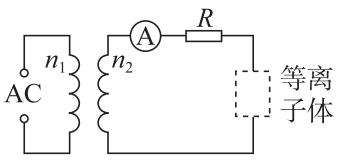


图 1

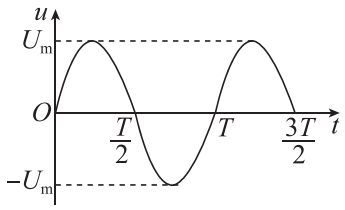


图 2

A. 副线圈电压为 $\frac{n_2}{n_1}U$

B. 原线圈中电流为 $\frac{n_1}{n_2}I$

C. 电源电压周期为 $\frac{n_2}{n_1}T$

D. 等离子体的等效电阻为 $\frac{\sqrt{2}U_m}{2I}$

A．根据理想变压器原副线圈的电压比等于匝数比有 $\frac{n_1}{n_2}=\frac{U}{U'}$

可得副线圈电压为 $U'=\frac{n_2}{n_1}U$，故 A 正确；

B．根据理想变压器原副线圈的电流比等于匝数反比有 $\frac{n_1}{n_2}=\frac{I'}{I}$

可得原线圈中电流为 $I'=\frac{n_2}{n_1}I$，故 B 错误；

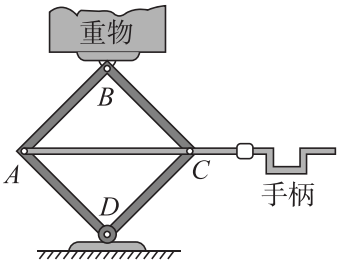
C．由题意可知，副线圈中电压周期为 T，变压器不改变交流电的周期，即电源电压周期为 T，故 C 错误；

D．等离子体两端电压的有效值为 $U_{有}=\frac{U_m}{\sqrt{2}}=\frac{\sqrt{2}U_m}{2}$

等离子体的等效电阻为 $R_{等}=\frac{U_{有}}{I}=\frac{\sqrt{2}U_m}{2I}$，故 D 正确。

故选 AD。

9. 某千斤顶的结构如图所示，四根等长杆由铰链相连。摇动手柄竖直抬升重物过程中，A、C 两点的间距每秒均匀缩短 2 mm，当 $\angle CAB=45°$ 时，下列说法正确的是（BD）



A. A 与 C 两点速度大小相等，方向相反

B. B 点速度方向竖直向上，大小为 2 mm/s

C. C 点速度方向沿 CB 向上，大小为 1 mm/s

D. A 点相对 C 点的速度沿水平方向，大小为 2 mm/s

ABC．由题意可知，四边形 $ABCD$ 是菱形，摇动手柄竖直抬升重物过程中，B 点的速度方向竖直向上，A、C 两点的速度方向分别垂直 AD、CD 方向，大小相等，A、C 两点的间距每秒均匀缩短 $2\,\mathrm{mm}$，可知 A、C 两点速度的水平分量大小相等为 $v_{Ax}=v_{Cx}=\frac{1}{2}\times 2\,\mathrm{mm/s}=1\,\mathrm{mm/s}$

当 $\angle CAB=45^\circ$ 时，B 点和 C 点沿 BC 方向的分速度大小相等，即 $v_B\sin 45^\circ=v_C$

又 $v_{Cx}=v_C\cos 45^\circ$

可得 $v_C=\sqrt{2}\,\mathrm{mm/s}$，$v_B=2\,\mathrm{mm/s}$

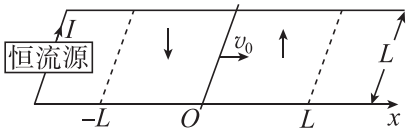
A、C 两点的速度大小相等，方向相互垂直，故 A、C 错误，B 正确；

D．A、C 两点竖直方向的速度大小相等，方向相同，水平方向速度大小相等，方向相反，

所以 A 点相对 C 点的速度沿水平方向，大小为 $v_{Ax}+v_{Cx}=2\,\mathrm{mm/s}$，故 D 正确。

故选 BD。

10. 如图所示，两平行光滑金属导轨固定在绝缘水平面上，间距为 L，电阻不计。左端接有输出电流大小恒为 I 的恒流源，电流方向如图。导轨间分布着两个紧邻的正方形磁场区域、宽度均为 L，左侧磁场方向竖直向下，右侧磁场方向竖直向上，以导轨上两磁场交界处的 O 点为坐标原点，沿导轨方向建立 x 坐标轴，两磁场的磁感强度大小 B 仅随坐标 x 变化，且满足 $B=\begin{cases}2B_0\frac{|x|}{L}, & 0\le|x|\le\frac{L}{2}\\ 2B_0\left(1-\frac{|x|}{L}\right), & \frac{L}{2}<|x|\le L\end{cases}$ 式中 B_0 为已知常量。$t=0$ 时，一根质量为 m，导轨间电阻为 R 的导体棒以初速度 v_0 从 $x=0$ 处向右运动；$t=t_0$ 时，导体棒第一次到达 $x=\frac{L}{2}$ 处，且速度为 0，运动过程中导体棒始终与导轨接触良好且垂直，不计空气阻力，忽略磁场的边界效应及电流对磁场的影响，下列说法正确的是 (AB)



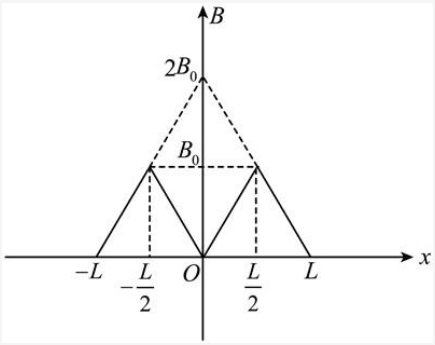
A. 导体棒做简谐运动

B. 初速度 $v_0=\sqrt{\frac{B_0IL^2}{2m}}$

C. 若初速度变为 $0.5v_0$，则导体棒的速度第一次变为 0 所需时间为 $\frac{\sqrt{2}}{2}t_0$

D. 若初速度变为 $1.5v_0$，则导体棒将以两磁场交界线为中心做往复运动

A．作出 $B-x$ 图像如图所示



根据题意知，在 $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ 区域，导体棒所受安培力

大小 $F_{安} = BIL = 2B_0Ix$

根据左手定则可知安培力方向始终指向 $x = 0$ 处，令 $2B_0I = k$，故导体棒所受外力满足 $F = -kx$。

同理，导体棒在 $-\frac{L}{2} \leq x \leq 0$ 区域也满足 $F = -kx$

则导体棒在 $-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}$ 区域做简谐运动，故 A 正确；

B．导体棒 $x = 0$ 到 $x = \frac{L}{2}$ 过程，根据动能定理 $-\overline{F_{安}} \cdot \frac{L}{2} = 0 - \frac{1}{2}mv_0^2$

其中 $\overline{F_{安}} = \frac{0+2B_0IL}{2} = \frac{B_0IL}{2}$

联立可得 $v_0 = \sqrt{\frac{B_0IL^2}{2m}}$，故 B 正确；

C．对于简谐运动，从平衡位置运动到最大位移处所用时间为 $t = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2\omega}$

根据简谐运动圆频率 $\omega = \sqrt{\frac{|k|}{m}}$

结合上述分析可得 $\omega = \sqrt{\frac{2B_0I}{m}}$

ω 与速度无关，初速度变为 $0.5v_0$ 后，根据动能定理可知导体棒向右运动的最大距离小于 $x = \frac{L}{2}$，导体棒仍做简谐运动，根据上述分析可知速度变为 $0.5v_0$ 对导体棒的速度第一次变为 0 所需的时间没有影响，仍为 t_0，故 C 错误；

D．若初速度变为 $1.5v_0$，由动能定理 $-\overline{F_{安}} \cdot \frac{L}{2} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}m(1.5v_0)^2$

可得导体棒运动到 $x = \frac{L}{2}$ 处速度为 $v = \frac{\sqrt{5}}{2}v_0 > v_0$

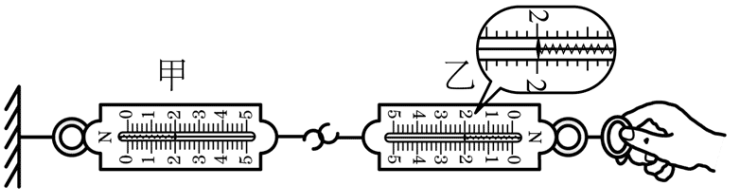
根据对称性知导体棒从 $x = \frac{L}{2}$ 处运动到 $x = L$ 处克服安培力做功为 $W = \overline{F_{安}} \cdot \frac{L}{2} = \frac{2B_0I\frac{L}{2}+0}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{1}{2}mv_0^2 < \frac{1}{2}mv^2$

即导体棒运动到 $x = L$ 处速度不为零，导体棒将继续向右运动离开磁场，故导体棒不会以两磁场交界线为中心做往复运动，故 D 错误。

故选 AB。

11. (1) 某同学用弹簧测力计探究作用力和反作用力的关系。将甲、乙两测力计水平连接

在一起，测力计甲左侧固定，用手向右缓慢拉测力计乙。拉至某位置时两测力计示数如图所示。



① 测力计乙的读数是 1.98 N。

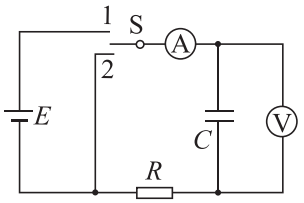
② 实验中发现两测力计示数总是明显不同、原因可能是 C。（单选）

A. 两测力计的量程不同

B. 两测力计弹簧的材质不同

C. 使用测力计前未正确调零

(2) 如图为探究电容器充、放电实验的电路图，实验选用内阻为几千欧姆的电压表和内阻很小且零刻度的电流表。



① 实验时将开关 S 接 1 端，可观察到电流表指针 B（填字母，“A. 迅速偏转到某位置后稳定不动”或“B. 迅速偏转到某位置后往回偏转”），同时电压表指针偏转到某位置后稳定不动。

② 现将 S 与 1 端断开，但尚未与 2 端连接，此时发现电压表的指针逐渐向零刻度偏转。经检查器材完好，线路连接正确，出现此现象的原因可能是开关断开时电容器相当于和电压表形成了闭合回路，电压表内阻较大，放电电流较小，电容器放电过程中两端电压逐渐减小直至放电结束。

(1) 1.98（1.96 ～ 2.00 均可），C　(2) B，开关断开时电容器相当于和电压表形成了闭合回路，电容器通过电压表缓慢放电

（1）①由图可知弹簧测力计的分度值为 0.1 N，需要往后估读一位，因此读数为 1.98 N。

②探究作用力和反作用力的关系实验中，根据牛顿第三定律可知作用力和反作用力总是大小相等，量程和弹簧测力计弹簧的材质都不影响其示数的准确性，两个测力计示数总是明显不同原因可能是测力计未正确调零。故选 C。

（2）①电容器充电过程中，开关闭合时充电电流瞬间达到较大的值，然后又逐渐减小，充电完成时，电流为 0，因此观察到的现象是电流表指针迅速偏转到某位置后往回偏

转。故选 B。

②观察题图可以发现，开关断开时电容器相当于和电压表形成了闭合回路，电压表内阻为几千欧姆，比较大，因此放电电流比较小，电容器放电的过程中其两端电压逐渐减小，直至最终放电结束，电容器带电荷量变为 0，电压表示数减为 0。

12. 问题探究

某学生兴趣小组通过查阅资料了解到，利用电磁阀控制压缩空气驱动活塞运动可实现公交车门开合，遂以“电控气动技术的原理探索与应用”为主题开展探究式学习。

(1) 分析电控气动门工作原理。

图 1 是电控气动系统开门过程的简化图。电磁阀中的固定铁芯与线圈组成电磁铁，当开关 S_1 闭合时，衔铁在电磁铁的吸引下带动三个阀芯一起向左运动，复位弹簧被压缩，储气罐内压缩空气经气孔 B 进入汽缸右侧气室。推动汽缸内活塞向 左（填“左”或“右”）运动，车门打开。同时，汽缸左侧气室中的气体从气孔 R（填“S”或“R”）排出。当 S_1 断开时，复位弹簧推动衔铁和阀芯向右运动，压缩空气推动活塞，车门关闭。

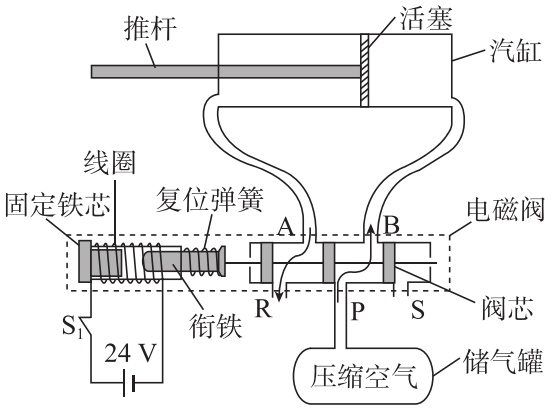


图 1

(2) 探究复位弹簧的受力情况。

同学们测量了复位弹簧在弹性限度内受到的作用力 F 与形变量 x 的数据，并标在了坐标纸上，如图 2 所示，请在答题卡上绘制出该弹簧的 $F-x$ 图像；根据绘制的 $F-x$ 图像，得到该弹簧的劲度系数 $k=0.22$ N/mm（保留两位有效数字）。

同学们据此估算出电磁阀中电磁铁对阀芯的作用力仅有几牛顿，而资料显示，公交车实现车门开合所需的作用力高达上千牛顿。系统利用电控气动技术实现了“四两拨千斤”的效果。

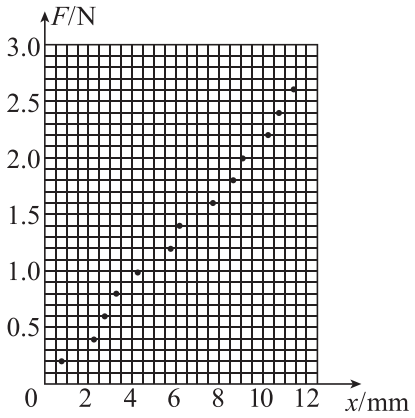


图 2

(3) 电控气动技术的应用设计。

受此启发，同学们设计了一款温室自动开窗器，电路如图 3 所示。控制电路板的程序能够实现温度高于 35 °C 时自动闭合开关 S_2，温度低于 25 °C 时自动断开 S_2。电磁阀线圈工作电压为 24 V，而控制电路板的工作电压（5 V）和电流较小，需配置电磁继电器作为控制开关。请在答题卡相应图上连线、完成电路、实现如下效果：S_2 闭合时，电磁阀中的电磁铁吸引衔铁左移，窗户打开；S_2 断开时，电磁阀中的衔铁右移，窗户关闭。

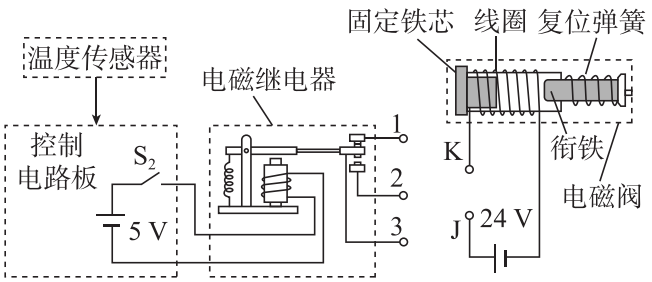
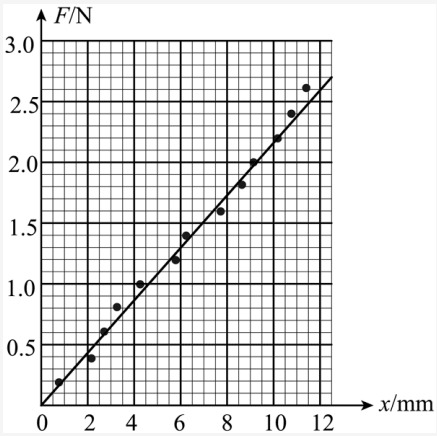


图 3

(1) 左，R (2) 0.22 N/mm (3) 连线如解析图所示

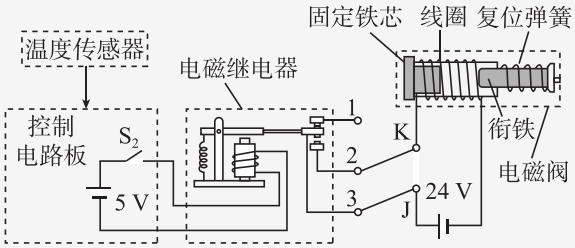
（1）结合题意可知，右侧气室充入气体，若体积不变，气体压强将会增大，推动活塞向左运动；由题图可知，左侧气室出气孔与 R 相连，则气体从 R 排出。

（2）作图时要注意到图线要通过尽可能多的点画出直线，不在直线上的点应该均匀分布在直线的两侧，$F-x$ 图像如图所示



根据 $F=kx$ 可知 $F-x$ 图像的斜率即为劲度系数，得 $k=\frac{2.5}{11.5}\,\mathrm{N/mm}\approx 0.22\,\mathrm{N/mm}$。

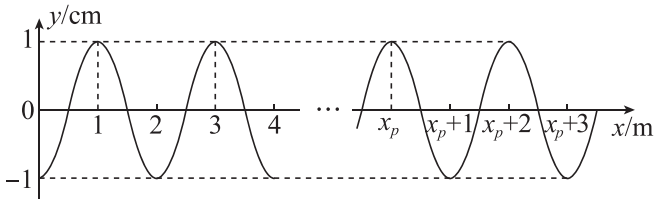
（3）S_2 闭合时，电磁继电器的线圈内有了电流，会使与 3 和 2 相连的两个触点接触，并使 K、J 连通，右侧电磁阀电路形成闭合回路，衔铁左移，窗户打开；S_2 断开时，电磁继电器的线圈内失去电流，与 3 和 2 相连的两个触点分开，导致 K、J 部分是断路状态，电磁阀部分的衔铁在复位弹簧作用下右移、窗户关闭，连线情况如图所示



13. 下图为一列沿 x 轴正方向传播的简谐横波在 $t=0$ 时的波形（中间部分未画出），此时平衡位置在 $x=x_P$ 的质点处于波峰。

(1) 写出该波的波长，以及 x_P 在 $10\sim 14\,\mathrm{m}$ 范围内的所有可能值。

(2) 若平衡位置位于原点处的质点在 $0\sim 1\,\mathrm{s}$ 内通过的路程为 $5\,\mathrm{cm}$，求该波的周期和波速。



(1) $2\,\mathrm{m}$，$11\,\mathrm{m}$ 和 $13\,\mathrm{m}$　(2) $0.8\,\mathrm{s}$，$2.5\,\mathrm{m/s}$

（1）相邻波峰（或波谷）间距等于波长，根据 $t=0$ 时的波形图可知该波的波长为 $\lambda=2\,\mathrm{m}$。

由图可知，平衡位置处于波峰的质点 $x=x_P$ 满足 $x_P=\left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda(n=2,3,4,\cdots)$

又 $10\,\mathrm{m}<x_P<14\,\mathrm{m}$

x_P 在 $10\sim14\,\mathrm{m}$ 范围内的可能值有：$n=5$ 时，$x_P=11\,\mathrm{m}$；

$n=6$ 时，$x_P=13\,\mathrm{m}$。

x_P 在 $10\sim14\,\mathrm{m}$ 范围内的所有可能值有 $11\,\mathrm{m}$ 和 $13\,\mathrm{m}$。

（2）由题意可知，振幅 $A=1\,\mathrm{cm}$，$s=5A=5\,\mathrm{cm}$

则有 $1\,\mathrm{s}=T+\frac{1}{4}T$

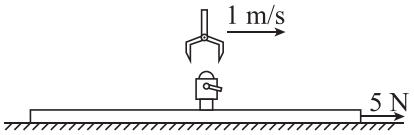
由波速公式有 $v=\frac{\lambda}{T}$

解得 $T=0.8\,\mathrm{s}$，$v=2.5\,\mathrm{m/s}$。

14. 如图所示，质量为 $4\,\mathrm{kg}$ 的木板上放有一个质量为 $1\,\mathrm{kg}$ 的机器人，木板始终受到水平向右、大小为 $5\,\mathrm{N}$ 的恒力作用。初始时木板与机器人一起以 $1\,\mathrm{m/s}$ 的速度沿水平地面向右匀速运动。机器人正上方有一个沿竖直方向可以伸缩、水平向右速度恒为 $1\,\mathrm{m/s}$ 的机械夹爪。某时刻夹爪将机器人向上提起，$2\,\mathrm{s}$ 后放回木板，同时夹爪缩回，机器人在摩擦力的作用下最终与木板相对静止。g 取 $10\,\mathrm{m/s^2}$，机器人可视为质点，机器人被提起和放下瞬间竖直方向速度均为零。求

(1) 机器人被提起的 $2\,\mathrm{s}$ 内，木板位移的大小。

(2) 从机器人被放回木板到与木板相对静止的过程中，摩擦力对机器人所做的功。



(1) $2.5\,\mathrm{m}$　(2) $0.48\,\mathrm{J}$

（1）根据题意，设木板与地面间的摩擦因数为 μ，则有 $F=\mu\left(m_{木}+m_{机}\right)g$

解得 $\mu=0.1$

机器人被提起时，对木板有 $F-\mu m_{木}g=m_{木}a_1$

解得 $a_1=0.25\,\mathrm{m/s^2}$

机器人被提起的 $2\,\mathrm{s}$ 内，木板位移的大小 $x=v_0t+\frac{1}{2}a_1t^2=\left(1\times2+\frac{1}{2}\times0.25\times2^2\right)\,\mathrm{m}=2.5\,\mathrm{m}$

（2）机器人被放回木板时，木板的速度为 $v_2=v_0+a_1t=(1+0.25\times2)\,\mathrm{m/s}=1.5\,\mathrm{m/s}$

机器人被放回木板后，恒力与地面对木板的摩擦力平衡，机器人和木板组成的系统所受合力为零，则由动量守恒定律有 $m_{机}v_0 + m_{木}v_2 = (m_{机} + m_{木})\,v$

解得 $v = 1.4\,\mathrm{m/s}$

对机器人，由动能定理可得，摩擦力对机器人所做的功 $W = \frac{1}{2}m_{机}v^2 - \frac{1}{2}m_{机}v_0^2 = 0.48\,\mathrm{J}$。

15. 图 1 为某质谱仪工作原理示意图。电离室中的气体分子被激光照射后发生电离，其中带正电的粒子静止经平行于纸面的加速电场加速后，垂直于 CD 边进入梯形匀强磁场区域（磁场方向垂直纸面向外），并且 CG 边中点 O 平行于 CD 边射出，经无场区从边界 PQ 进入平行于纸面的匀强偏转电场，最终打到接收器与纸面交线 MN 上并被吸收，接收器可视为接地良好的金属板。MN 延长线经过 O 点，与 CD 所在直线夹角为 α，α 可通过 MN 绕 O 点在纸面内的转动进行调整，调整前后 PQ 与 MN 始终平行且间距为 $0.3\,\mathrm{m}$ 不变。CG 边长 $0.2\,\mathrm{m}$，与底边 HG 夹角为 $60°$，磁感应强度大小为 $0.4\,\mathrm{T}$，偏转电场的电场强度大小为 $1.8\times10^4\,\mathrm{V/m}$，方向始终垂直于 PQ。整个过程只考虑一种粒子，加速电场的电压恒定，MN 与 PQ 足够长，装置处于真空环境，忽略粒子间的相互作用，不计重力。

(1) 已知激光波长为 $442\,\mathrm{nm}$，求该激光一个光子的能量 ε。（普朗克常量 $h = 6.63\times10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$，真空中光速 $c = 3\times10^8\,\mathrm{m/s}$）

(2) 调整 α，得到从粒子离开加速电场到到达接收器所经历的时间 t 与 α 的关系如图 2 所示，求加速电场的电压 U 以及粒子比荷 k。

(3) 质谱仪稳定工作时，测得接收器每秒接收的粒子数为 n，若再测一个除电荷量和质量以外的物理量，便可在（2）问的基础上得到粒子的质量。请写出该物理量，并推导粒子质量表达式（所有物理量均用字母表示）。

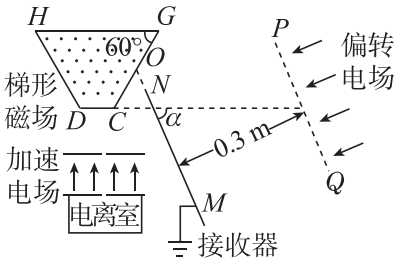


图 1

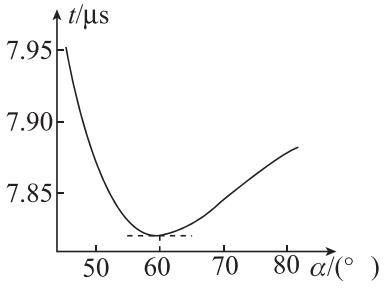


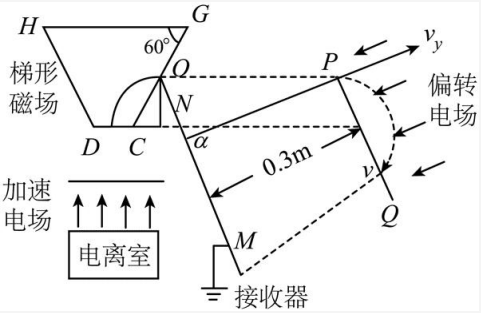
图 2

(1) $\varepsilon = 4.5\times10^{-19}\,\mathrm{J}$　(2) $k = 6\times10^6\,\mathrm{C/kg}$，$U = 3600\,\mathrm{V}$　(3) 测接收器受到粒子的平均作用力大小 F，质量表达式为 $m = \frac{F}{n\sqrt{2kU}\sin\alpha}$；测流过地线上的平均电流 I，质量表达式为 $m = \frac{I}{nk}$

（1）根据光子能量公式 $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

代入数据解得 $\varepsilon = 4.5 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$。

（2）根据题意画出粒子运动轨迹图如下



根据几何关系可知粒子在磁场半径 $R = 0.05\sqrt{3}\,\mathrm{m}$

且粒子在磁场中洛伦兹力提供向心力，有 $qvB = m\frac{v^2}{R}$

其中比荷 $k = \frac{q}{m}$。可得 $v = kBR = 0.02\sqrt{3}k$

由题知粒子在无场区 O 到 PQ 的距离为 $\frac{d}{\sin\alpha}$，在无场区运动时间 $t_2 = \frac{2d}{v\sin\alpha}$

粒子进入电场时的法向初速度与电场方向相反，大小为 $v_y = v\sin\alpha$

则在法线方向有 $t_3 = \frac{2v_y}{a}$，$a = \frac{qE}{m} = kE$

解得 $t_3 = \frac{2v\sin\alpha}{kE}$

总时间 $t = t_0 + t_1 + t_2 + t_3$

其中 t_0 为加速电场末端到 CD 无场区的时间与 α 无关，$t_1 = \frac{\pi m}{2qB} = \frac{\pi}{2kB}$ 与 α 无关，根据图 2 可知

$\alpha = 60°$ 时 t 最小，即 $t' = \frac{2d}{v\sin\alpha} + \frac{2v\sin\alpha}{kE}$

t' 在 $\alpha = 60°$ 有最小值，根据均值不等式可求出 $v^2 = \frac{2}{3}kEd$

联立 $v = kBR$

代入数据得 $k = 6 \times 10^6\,\mathrm{C/kg}$

在加速电场中有 $\frac{1}{2}mv^2 = qU$

得 $U = \frac{v^2}{2k} = 3600\,\mathrm{V}$

（3）方法一：测量接收器受到粒子的平均作用力大小 F，在 Δt 时间内，有 $N = n\Delta t$

根据动量定理和牛顿第三定律可知接收器受到的平均作用力大小 F 等于粒子动量的变化率大小，即 $F = \frac{N\Delta p}{\Delta t} = n\Delta p$

对单个粒子，设粒子打在接收器上时垂直接收器速度为 v_y，则有 $\Delta p = mv_y$

可得 $m=\frac{F}{nv_y}$

根据（2）问可知 $v_y=v\sin\alpha$

联立可得粒子质量 $m=\frac{F}{n\sqrt{2kU}\sin\alpha}$

方法二：已知每秒接收粒子数 n，每个粒子电荷量为 q，则电流 $I=nq$

故粒子质量 $m=\frac{q}{k}=\frac{I}{nk}$

将 k 代入即可。