

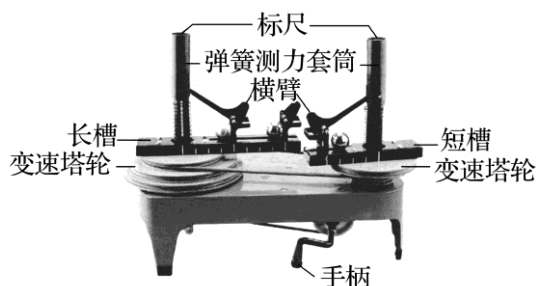
实验六 探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系

【目标要求】 1.会用控制变量法探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系.2.体会用作图法处理数据及化曲为直的思想.

实验技能储备

1. 实验思路

本实验探究了向心力与多个物理量之间的关系,因而实验方法采用了控制变量法,如图所示,匀速转动手柄,可以使塔轮、长槽和短槽匀速转动,槽内的小球也就随之做匀速圆周运动,此时小球向外挤压挡板,挡板对小球有一个向内的(指向圆周运动圆心)的弹力作为小球做匀速圆周运动的向心力,可以通过标尺上露出的红白相间等分标记,粗略计算出两球所需向心力的比值.



在实验过程中可以通过两个小球同时做圆周运动对照,分别分析下列情形:

- (1)在质量、半径一定的情况下,探究向心力大小与角速度的关系.
- (2)在质量、角速度一定的情况下,探究向心力大小与半径的关系.
- (3)在半径、角速度一定的情况下,探究向心力大小与质量的关系.

2. 实验器材

向心力演示器、质量不等的小球.

3. 实验过程

- (1)分别将两个质量相等的小球放在实验仪器的两个小槽中,且小球到转轴(即圆心)距离相同即圆周运动半径相同.将皮带放置在适当位置使两转盘转动,记录不同角速度下的向心力大小(格数).
- (2)分别将两个质量相等的小球放在实验仪器的长槽和短槽两个小槽中,将皮带放置在适当位置使两转盘转动角速度相等、小球到转轴(即圆心)距离不同即圆周运动半径不等,记录不同半径的向心力大小(格数).
- (3)分别将两个质量不相等的小球放在实验仪器的两个小槽中,且小球到转轴(即圆心)距离相同即圆周运动半径相等,将皮带放置在适当位置使两转盘转动角速度相等,记录不同质量下

的向心力大小(格数).

4. 数据处理

分别作出 $F_n-\omega^2$ 、 F_n-r 、 F_n-m 的图像, 分析向心力大小与角速度、半径、质量之间的关系, 并得出结论.

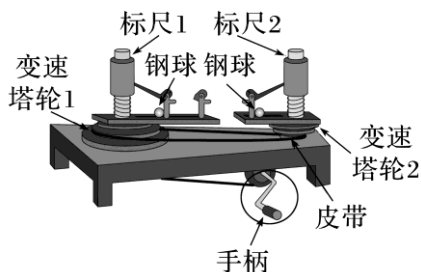
5. 注意事项

摇动手柄时应力求缓慢加速, 注意观察其中一个标尺的格数. 达到预定格数时, 即保持转速恒定, 观察并记录其余读数.

考点一 教材原型实验

考向 1 实验原理与操作

【例 1】 向心力演示器如图所示, 用来探究小球做圆周运动所需向心力的大小 F 与质量 m 、角速度 ω 和半径 r 之间的关系. 两个变速塔轮通过皮带连接, 匀速转动手柄使长槽和短槽分别随变速塔轮 1 和变速塔轮 2 匀速转动, 槽内的钢球就做匀速圆周运动. 横臂的挡板对钢球的压力提供向心力, 钢球对挡板的反作用力通过横臂的杠杆作用使弹簧测力套筒下降, 从而露出标尺, 标尺上的红白相间的等分格显示出两个钢球所受向心力的比值. 如图是探究过程中某次实验时装置的状态.



(1)在研究向心力的大小 F 与质量 m 、角速度 ω 和半径 r 之间的关系时主要用到了物理学中的_____.

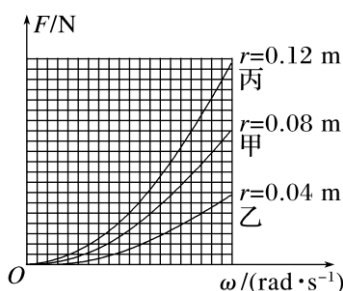
- A. 理想实验法
- B. 等效替代法
- C. 控制变量法
- D. 演绎法

(2)若两个钢球质量和运动半径相等, 则是在研究向心力的大小 F 与_____的关系;

- A. 钢球质量 m
- B. 运动半径 r
- C. 角速度 ω

(3)若两个钢球质量和运动半径相等, 标尺上红白相间的等分格显示出钢球 1 和钢球 2 所受向心力的比值为 $1:9$, 则与皮带连接的变速塔轮 1 和变速塔轮 2 的半径之比为_____.

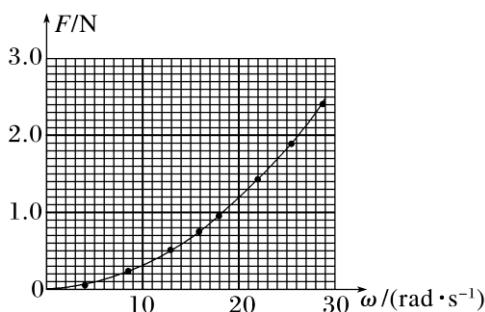
三条图线的比较、分析、讨论,他们得出 $F \propto r$ 的结论,你认为他们的依据是_____.



(4)通过上述实验,他们得出:做圆周运动的物体受到的向心力大小 F 与角速度 ω 、半径 r 的数学关系式是 $F=k\omega^2r$, 其中比例系数 k 的大小为_____, 单位是_____.

答案 (1)见解析图 (2) F 与 ω^2 (3)作一条平行于纵轴的辅助线, 观察和图像的交点中, 力的数值之比是否为 $1:2:3$ (4) 0.0375 kg

解析 (1)描点绘图时尽量让所描的点落到同一条曲线上, 不能落到曲线上的点应均匀分布在曲线两侧, 如图所示:



(2)通过对图像的观察, 兴趣小组的同学猜测 F 与 ω^2 成正比. 可以通过进一步的转换, 通过绘出 F 与 ω^2 关系图像来确定他们的猜测是否正确, 如果猜测正确, 作出的 F 与 ω^2 的关系图像应当为一条倾斜直线.

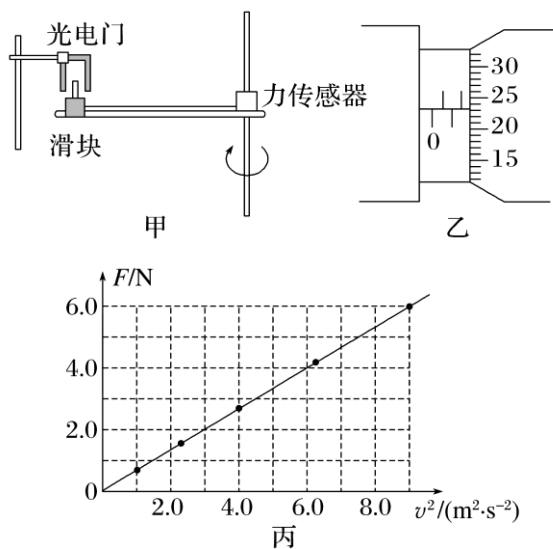
(3)他们的依据是: 作一条平行于纵轴的辅助线, 观察和图线的交点中, 力的数值之比是否为 $1:2:3$, 如果比例成立则说明向心力与物体做圆周运动的半径成正比.

(4)做圆周运动的物体受到的向心力大小 F 与角速度 ω 、半径 r 的数学关系式是 $F=k\omega^2r$, 代入(1)题中 $F-\omega$ 的关系图像中任意一点的坐标数值, 比如: $(20,1.2)$, 此时半径为 0.08 m , 可得: $1.2 \text{ N} = k \times 20^2(\text{rad/s})^2 \times 0.08 \text{ m}$, 解得: $k = 0.0375 \text{ kg}$.

考点二 探索创新实验

考向 1 实验器材的创新

【例 3】 一同学通过图甲所示的装置探究物体做圆周运动的向心力与质量、轨道半径及线速度的关系。滑块套在光滑水平杆上，随杆一起绕竖直杆做匀速圆周运动，力传感器通过一细绳连接滑块，用来测量向心力的大小 F 。滑块上固定一遮光片，与固定在铁架台上的光电门可测量滑块的线速度 v 。该同学先保持滑块质量和半径不变，来探究向心力大小与线速度大小的关系。



(1) 该同学采用的实验方法主要是_____；(填正确答案标号)

- A. 理想模型法
- B. 控制变量法
- C. 等效替代法

(2) 用螺旋测微器测量遮光片的宽度 d ，示数如图乙所示，则 $d =$ _____ mm；

(3) 该同学通过改变转速测量多组数据，记录力传感器示数 F ，算出对应的线速度 v 及 v^2 的数值，以 v^2 为横轴， F 为纵轴，作出 $F-v^2$ 图线，如图丙所示，若滑块运动半径 $r = 0.2$ m，由图线可得滑块的质量 $m =$ _____ kg(保留 2 位有效数字)。

答案 (1)B (2)1.732(1.731~1.733) (3)0.13(0.12~0.14)

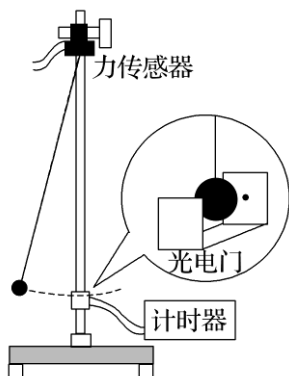
解析 (1) 一个物理量与多个物理量有关，研究这个物理量与每一个量的关系，要使用控制变量法，故选 B；

(2) 螺旋测微器的最小分度是 0.01 mm，由固定刻度和可动刻度分别读数，所以 $d = 1.5$ mm + 23.2×0.01 mm = 1.732 mm；

(3) 根据题图丙可知图像的斜率 $k = \frac{\Delta F}{\Delta v^2} = \frac{6.0}{9.0} = \frac{2}{3}$ ，据向心力公式 $F = m \frac{v^2}{r}$ 可得 $\frac{m}{r} = k$ ，解得 $m = kr = \frac{2}{3} \times 0.2$ kg ≈ 0.13 kg。

考向 2 实验原理的创新

【例 4】 某同学做验证向心力与线速度关系的实验. 装置如图所示, 一轻质细线上端固定在力传感器上, 下端悬挂一小钢球. 钢球静止时刚好位于光电门中央. 主要实验步骤如下:



- ①用游标卡尺测出钢球直径 d ;
- ②将钢球悬挂静止不动, 此时力传感器示数为 F_1 , 用米尺量出线长 L ;
- ③将钢球拉到适当的高度处由静止释放, 光电门计时器测出钢球的遮光时间为 t , 力传感器示数的最大值为 F_2 ;

已知当地的重力加速度大小为 g , 请用上述测得的物理量表示:

(1)钢球经过光电门时的线速度表达式 $v = \underline{\hspace{2cm}}$, 向心力表达式 $F_{\text{向}} = m \frac{v^2}{R} = \underline{\hspace{2cm}}$;

(2)钢球经过光电门时所受合力的表达式 $F_{\text{合}} = \underline{\hspace{2cm}}$;

(3)若在实验误差允许的范围内 $F_{\text{向}} = F_{\text{合}}$, 则验证了向心力与线速度的关系. 该实验可能的误差有: 摆线的长度测量有误差. (写出一条即可)

答案 (1) $\frac{d}{t}$ $\frac{F_1 d^2}{g^2(L + \frac{d}{2})}$ (2) $F_2 - F_1$ (3) 摆线的长度测量有误差

解析 (1)钢球的直径为 d , 遮光时间为 t , 所以钢球通过光电门的速度: $v = \frac{d}{t}$, 根据题意知,

钢球做圆周运动的半径为: $R = L + \frac{d}{2}$, 钢球质量: $m = \frac{F_1}{g}$, 则向心力表达式:

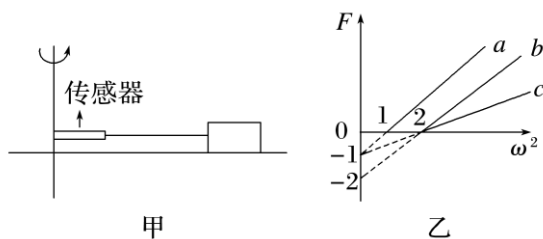
$$F_{\text{向}} = m \frac{v^2}{R} = \frac{F_1 d^2}{g^2(L + \frac{d}{2})}$$

(2)钢球经过光电门时只受重力和细线的拉力, 由分析可知, 钢球通过光电门时, 细线的拉力最大, 大小为 F_2 , 故所受合力为 $F_{\text{合}} = F_2 - F_1$.

(3)根据向心力表达式知, 可能在测量摆线长度时存在误差.

考向3 实验目的的创新

【例5】如图甲所示，某同学为了比较不同物体与转盘间动摩擦因数的大小设计了该装置。已知固定于转轴上的角速度传感器和力传感器与电脑连接，通过一不可伸长的细绳连接物块，细绳刚好拉直，物块随转盘缓慢加速。在电脑上记录如图乙所示图像。换用形状和大小相同但材料不同的物块重复实验，得到物块 a 、 b 、 c 分别对应的三条直线，发现 a 与 c 的纵截距相同， b 与 c 的横截距相同，且符合一定的数量关系。回答下列问题：



- (1)物块没有看作质点对实验是否有影响？_____ (选填“是”或“否”).
 (2)物块 a 、 b 、 c 的密度之比为_____。
 (3)物块 a 、 b 、 c 与转盘之间的动摩擦因数之比为_____。

答案 (1)否 (2)2 : 2 : 1 (3)1 : 2 : 2

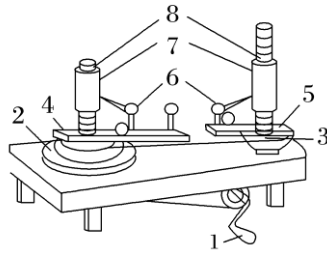
解析 (1)物块的形状和大小相同，做圆周运动的半径相同，所以物块没有看作质点对实验没有影响；

(2)当物块随转盘缓慢加速过程中，物块所需的向心力先由静摩擦力提供，当达到最大静摩擦力后则由绳子的拉力和最大静摩擦力提供，即： $F_{\text{向}} = F + \mu mg = mr\omega^2$ ，所以有 $F = mr\omega^2 - \mu mg$ ，图像的斜率为 mr ，与纵轴的截距为 $-\mu mg$ ，根据图像知 a 的斜率 $k_a = m_a r = 1$ ， b 的斜率 $k_b = m_b r = 1$ ， c 的斜率 $k_c = m_c r = \frac{1}{2}$ ，所以 a 、 b 、 c 的质量之比为 2 : 2 : 1，因为体积相同，所以物块 a 、 b 、 c 的密度之比为 2 : 2 : 1。

(3)由图像知 a 的纵截距 $-\mu_a m_a g = -1$ ， b 的纵截距 $-\mu_b m_b g = -2$ ， c 的纵截距 $-\mu_c m_c g = -1$ ，结合质量之比得到物块 a 、 b 、 c 与转盘之间的动摩擦因数之比为 1 : 2 : 2。

课时精练

1. 某同学利用如图所示的向心力演示器定量探究匀速圆周运动所需向心力大小 F 跟小球质量 m 、转速 n 和运动半径 r 之间的关系。



- (1)为了单独探究向心力大小跟小球质量的关系，必须用_____法；
- (2)转动手柄可以使长槽和短槽分别随变速塔轮匀速转动，槽内的球随之做匀速圆周运动。这时我们可以看到弹簧测力套筒上露出标尺，通过标尺上红白相间等分格数，即可求得两个球所需的_____；
- (3)该同学通过实验得到如下表的数据：

次数	球的质量 m/g	转动半径 r/cm	转速 $n/r \cdot s^{-1}$	向心力大小 $F/\text{红格数}$
1	14.0	15.00	1	2
2	28.0	15.00	1	4
3	14.0	15.00	2	8
4	14.0	30.00	1	4

根据以上数据，可归纳概括出向心力大小 F 跟小球质量 m 、转速 n 和运动半径 r 之间的关系是：_____ (文字表述)；

(4)实验中遇到的问题有：_____ (写出一点即可)。

答案 (1)控制变量 (2)向心力大小之比 (3)向心力大小 F 跟小球质量 m 成正比，跟转速 n 的平方成正比，跟运动半径 r 成正比(或向心力大小 F 跟小球质量 m 、转速 n 的平方、运动半径 r 的乘积成正比) (4)难以保证小球做匀速圆周运动，转速难按比例调节或露出格子数(或力的读数)不稳定，难量化

解析 (1)为了单独探究向心力大小跟小球质量的关系，需要控制转速 n 和运动半径 r 不变，所以需要采用控制变量法；

(2)标尺上红白相间等分格子的多少可以显示小球所受向心力的大小，所以通过标尺上红白相间等分格数，即可求得两个球所需的向心力大小之比；

(3)根据表格中数据可知向心力大小 F 跟小球质量 m 成正比，跟转速 n 的平方成正比，跟运动半径 r 成正比(或向心力大小 F 跟小球质量 m 、转速 n 的平方、运动半径 r 的乘积成正比)；

(4)实验中可能遇到的问题是难以保证小球做匀速圆周运动，转速难按比例调节或露出格子数(或力的读数)不稳定，难量化。

2. 一物理兴趣小组利用学校实验室的数字实验系统探究物体做圆周运动时向心力大小与角速

度、半径的关系. 在保证重物的质量 m 和做圆周运动的角速度 ω 不变的情况下, 改变重物做圆周运动的半径 r , 得到几组向心力大小 F_n 与半径 r 的数据, 记录到表 1 中.

表 1 向心力大小 F_n 与半径 r 的测量数据

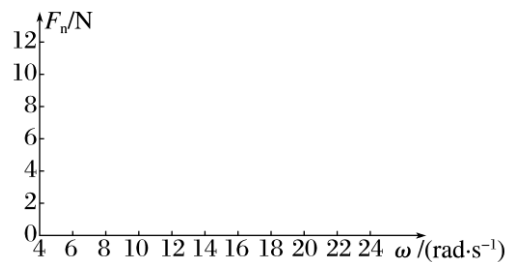
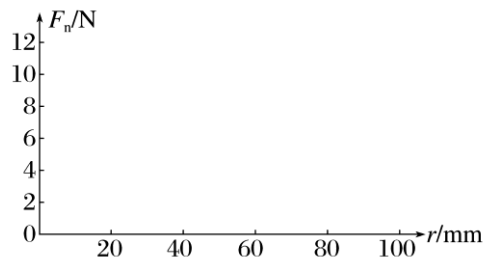
次数	1	2	3	4	5
半径 r/mm	50	60	70	80	90
向心力大小 F_n/N	5.46	6.55	7.64	8.74	9.83

在保证重物的质量 m 和做圆周运动的半径 r 不变的情况下, 改变重物的角速度 ω , 得到几组向心力大小 F_n 和角速度 ω 的数据, 记录到表 2 中.

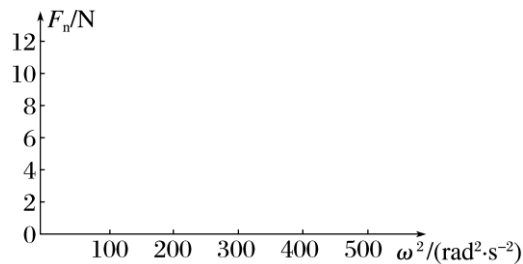
表 2 向心力大小 F_n 与角速度 ω 的测量数据

次数	1	2	3	4	5
角速度 $\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	6.8	9.3	11.0	14.4	21.8
向心力大小 F_n/N	0.98	2.27	2.82	4.58	10.81

(1)根据上面的测量结果, 分别在图中作出 F_n-r 图线和 $F_n-\omega$ 图线.



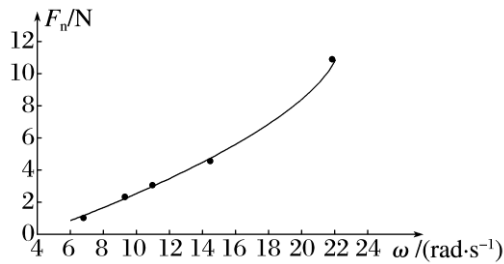
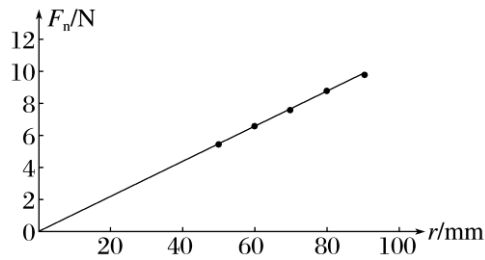
(2)若作出的 $F_n-\omega$ 图线不是直线, 可以尝试作 $F_n-\omega^2$ 图线, 试在图中作出 $F_n-\omega^2$ 图线.



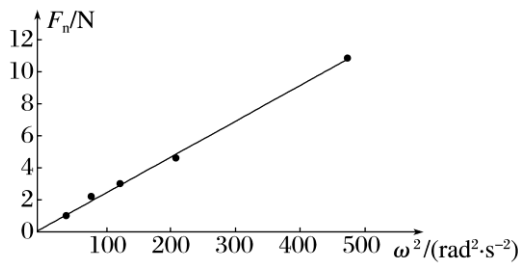
(3)通过以上实验探究可知, 向心力大小与转动半径成_____, 与角速度的平方成_____.

答案 (1)(2)见解析图 (3)正比 正比

解析 (1)根据描点作图, 两图像如下:

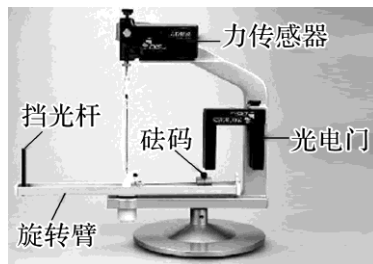


(2)通过换算, 可得 $F_n - \omega^2$ 图线



(3)通过以上图像可知, 向心力大小与转动半径成正比, 与角速度的平方成正比.

3. 如图所示是“DIS 向心力实验器”, 当质量为 m 的砝码随旋转臂一起在水平面内做半径为 r 的圆周运动时, 所需的向心力可通过牵引杆由力传感器测得, 旋转臂另一端的挡光杆(挡光杆的挡光宽度为 Δs , 旋转半径为 R)每经过光电门一次, 通过力传感器和光电门就同时获得一组向心力大小 F 和角速度 ω 的数据.



(1)某次旋转过程中挡光杆经过光电门时的遮光时间为 Δt , 则角速度 $\omega =$ _____.

(2)以 F 为纵坐标, 以 _____ (选填 “ Δt ” “ $\frac{1}{\Delta t}$ ” “ Δt^2 ” 或 “ $\frac{1}{\Delta t^2}$ ”) 为横坐标, 可在坐标纸中描出数据点作一条直线, 该直线的斜率为 $k =$ _____.(用上述已知量的字母表示)

答案 (1) $\frac{\Delta s}{R\Delta t}$ (2) $\frac{1}{\Delta t^2}$ $m\frac{\Delta s^2}{R^2}r$

解析 (1)挡光杆通过光电门时的线速度 $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

由 $\omega = \frac{v}{R}$

解得 $\omega = \frac{\Delta s}{R\Delta t}$

(2)根据向心力公式有 $F = m\omega^2 r$

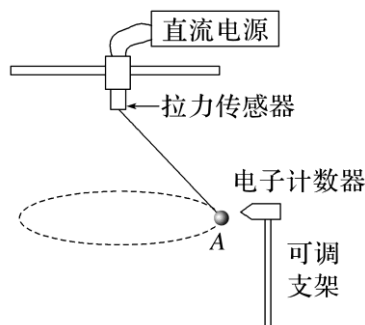
将 $\omega = \frac{\Delta s}{R\Delta t}$

代入上式解得 $F = m \frac{\Delta s^2}{R^2 \Delta t^2} r$

可以看出, 以 $\frac{1}{\Delta t^2}$ 为横坐标, 以 F 为纵坐标,

可在坐标纸中描出数据点作一条直线, 该直线的斜率为 $k = m \frac{\Delta s^2}{R^2} r$.

4. (2022·山东滨州市模拟)某同学为探究圆周运动的基本规律设计如图所示的实验装置, 在支架上固定一个直流电动机, 电动机转轴上固定一拉力传感器, 传感器正下方用细线连接一个小球. 在装置侧面连接一位置可以调节的电子计数器, 实验操作如下:



- ①电动机不转动时, 记录拉力传感器的示数为 F ;
- ②闭合电源开关, 稳定后, 小球在水平面做匀速圆周运动, 记录此时拉力传感器的示数为 $2F$;
- ③稳定后, 调节计数器的位置, 当小球第一次经过离计数器最近的 A 点时开始计数, 并记录为 1 次, 记录小球 n 次到达 A 点的时间 t ;
- ④切断电源, 整理器材.

请回答下列问题:

- (1)小球运动的周期为_____;
- (2)小球运动的向心力大小为_____;
- (3)小球做匀速圆周运动的轨道半径为_____ (用 F 、 t 、 n 、重力加速度 g 表示).

答案 (1) $\frac{t}{n-1}$ (2) $\sqrt{3}F$ (3) $\frac{\sqrt{3}t^2 g}{4\pi^2(n-1)^2}$

解析 (1)小球运动的周期为 $T = \frac{t}{n-1}$

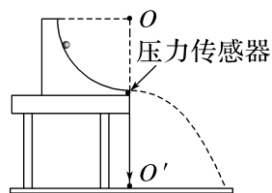
(2)小球的重力 $G = F = mg$

小球运动的向心力大小为 $F_{\text{向}} = \sqrt{F_T^2 - G^2} = \sqrt{(2F)^2 - F^2} = \sqrt{3}F$

(3)小球做匀速圆周运动, 则 $F_{\text{向}} = m \frac{4\pi^2}{T^2} r$

轨道半径为 $r = \frac{\sqrt{3}F^2 g}{4\pi^2(n-1)^2}$

5.利用如图所示装置验证向心加速度大小 a_n 与线速度大小 v 的关系. 四分之一圆弧轨道固定在水平桌面上, 末端与上表面很小的压力传感器表面相切, 水平地面上依次铺放好木板、白纸、复写纸. 将小球从圆弧轨道某一点由静止释放, 经轨道末端飞出, 落到铺着复写纸和白纸的木板上, 在白纸上留下点迹, 由同一位置重复释放几次, 记录每次压力传感器的示数; 改变小球在圆弧轨道上的释放位置, 重复上述实验步骤. (当地的重力加速度为 g)



(1)为了完成实验, 下列操作正确的是_____.

- A. 必须选择光滑的圆弧轨道
- B. 固定圆弧轨道时, 末端必须水平
- C. 实验中应选择密度小的小球
- D. 确定小球在白纸上的落点时, 用尽可能小的圆把所有落点圈住, 圆心即为平均落点

(2)某次实验时记录的压力传感器示数为 F , 并测出小球的质量为 m , 小球的向心加速度大小 $a_n =$ _____.

(3)实验除了记录压力传感器示数 F , 测量小球的质量 m 外, 还需要测量轨道末端距地面的高度 h 、水平位移 x 、圆弧轨道半径 R , 则要验证向心加速度大小 a_n 与线速度大小 v 的关系, 只需要验证_____表达式即可(用测量的数据表示).

答案 (1)BD (2) $\frac{F}{m} - g$ (3) $\frac{F}{m} - g = \frac{x^2 g}{2hR}$

解析 (1)这个实验验证向心加速度大小 a_n 与线速度大小 v 的关系, 而线速度大小 v 由平抛运动来进行测量, 不用考虑圆弧轨道是否光滑, 故 A 错误; 线速度大小 v 由平抛运动来进行测量, 平抛运动要求初速度沿水平方向, 所以固定圆弧轨道时, 末端必须水平, 故 B 正确; 实验中应选择密度大的小球, 可以减小空气阻力的影响, 故 C 错误; 确定小球在白纸上的落点

时，用尽可能小的圆把所有落点圈住，圆心即为平均落点，这样可以减小实验的偶然误差，故 D 正确。

(2) 小球滚到圆弧轨道最低点，由牛顿第二定律有 $F - mg = ma_n$ 得 $a_n = \frac{F}{m} - g$

(3) 小球做平抛运动，由平抛运动规律得 $h = \frac{1}{2}gt^2$ ， $x = vt$

$$\text{解得 } v = x\sqrt{\frac{g}{2h}}$$

这个实验验证向心加速度大小 a_n 与线速度大小 v 的关系，

$$\text{而 } a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{(x\sqrt{\frac{g}{2h}})^2}{R} = \frac{x^2g}{2hR}$$

$$\text{即需要验证 } \frac{F}{m} - g = \frac{x^2g}{2hR}$$