

《基础物理实验》预习报告

实验名称 气轨上弹簧振子的简谐振动及瞬时速度的测定 指导教师 纪爱玲
姓名 孙奕飞 学号 2023k8009925001 分班分组及座号 2-06-01号
实验日期 2024 年 12 月 24 日 实验地点 教 716 调课/补课 否 成绩评定

1 实验目的及要求

- 观察简谐振动现象并测量其周期。
- 测定弹簧的倔强系数 k 和有效质量 m_0 。
- 研究简谐振动的运动学特征。
- 验证机械能守恒定律。
- 使用极限法测量瞬时速度。
- 探讨并深入理解平均速度与瞬时速度之间的关系。

2 实验仪器

气垫导轨、滑块、附加砝码、弹簧、U 型挡光片、平板挡光片、数字毫秒计、天平等。

3 实验原理

3.1. 弹簧振子的简谐振动

如图所示，在水平气垫导轨上，两个相同的弹簧中间连接一个滑块，滑块进行往返振动。由于气垫导轨能够有效地减少摩擦力，滑块可以近似看作在无阻力条件下做简谐振动。

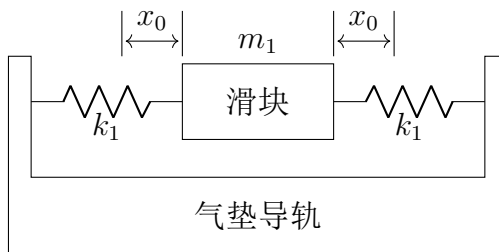


图 1: 简谐运动原理图

设滑块（以及其上附着的重物）的总质量为 m_1 ，平衡位置时，每个弹簧的伸长量为 x_0 。当滑块偏离平衡位置 x 时，滑块仅受到两个弹簧在水平方向上的弹性回复力。设每根弹簧的倔强系数为 k_1 ，则根据牛顿第二定律，滑块的运动方程为：

$$-kx = ma,$$

其中 $k = 2k_1$, $m = m_0 + m_1$, m 为振动系统的有效质量, m_0 为弹簧的有效质量, a 为滑块的加速度。

该运动方程的通解为:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

其中, A 为振幅, φ_0 为初相位, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为振动系统的固有角频率, 这一频率由振动系统的自身性质决定。

振动周期 T 可由以下公式计算:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0 + m_1}{k}},$$

将以上公式两边平方即可得:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{m_0 + m_1}{k}. \quad (2)$$

3.2. 简谐振动的运动学特征描述

对式 (1) 关于时间 t 求导, 得到速度表达式:

$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (3)$$

由上式可知, 速度 v 随时间变化呈简谐振动, 其角频率为 ω_0 , 振幅为 $A\omega_0$, 并且速度的相位比位移 x 超前 $\frac{\pi}{2}$ 。

结合式 (1) 和 (3), 消去时间 t 可得:

$$v^2 = \omega_0^2 (A^2 - x^2).$$

3.3. 简谐振动的机械能

在本次实验中, 系统在任意时刻的振动动能为:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(m_0 + m_1)v^2,$$

其中 v 为滑块的速度。

系统的弹性势能为:

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2.$$

因此, 系统的机械能可表示为:

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}kA^2, \quad (4)$$

其中 k 和 A 均为系统的常量, 不随时间发生变化。

通过测量滑块在不同位置 x 的速度 v , 可以分别计算系统的弹性势能和振动动能, 以此验证二者的相互转换关系, 并进一步证明机械能守恒定律。

3.4. 瞬时速度的测量

设变速运动的物体在 Δt 时间内经过路程为 Δs ，则其平均速度表达式为：

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

当 Δt 和 Δs 同时趋于 0 时，平均速度的极限即为物体的瞬时速度。

在实验中，在倾斜的气轨上，于 A 点放置一个光电门，并在滑块上依次安装不同挡光距离的 U 形挡光片。每次实验时，滑块从 P 点由静止开始下滑，挡光片的第一挡光边距 A 点的距离为 l 。通过测量对应的挡光时间 Δt 及挡光距离 Δs 数据，可以得出以下关系式（假设滑块从静止下滑距离 l 处的瞬时速度为 v_0 ，即第一挡光时的瞬时速度）：

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = v_0 + \frac{1}{2}a \cdot \Delta t, \quad (5)$$

其中， a 表示滑块在 A 点附近的加速度。

通过实验改变挡光距离 Δs ，可以分析平均速度与瞬时速度之间的关系。进一步，分别绘制 $v-t$ 图和 $v-x$ 图，并利用外推法求出滑块的瞬时速度。

4 实验内容

1. 学会使用光电门进行测速和测周期的方法。
2. 调节气垫导轨至水平状态，通过测量任意两点的速度变化，验证气垫导轨是否处于水平状态。
3. 测量弹簧振子的振动周期，并考察振动周期与振幅之间的关系。在滑块振幅 A 分别为 10.0 cm、20.0 cm、30.0 cm 和 40.0 cm 时，测量相应的振动周期。分析实验数据并讨论实验结果，从而得出相关结论。
4. 研究振动周期与振子质量之间的关系。在滑块上逐步增加骑码（铁片），测量不同质量下的振动周期。对取定振幅（例如 $A = 40.0$ cm），每增加一个骑码，测量一组 T 数据（注意，骑码数量不宜过多，以阻尼不明显为限）。绘制 $T^2 - m$ 图，若满足 T 与 m 的理论关系式，则 $T^2 - m$ 图为一 条直线，斜率为 $4\pi^2/k$ ，截距为 $4\pi^2 m_0/k$ 。使用最小二乘法对数据直线拟合，求出弹簧倔强系数 k 和有效质量 m_0 。
5. 研究速度和位移的关系。在滑块上安装 U 型挡光片，用光电门测量滑块的速度。绘制 $v^2 - x^2$ 图，观察该图是否为一 条直线，并进行直线拟合，验证斜率是否为 $-\omega_0^2$ ，截距是否为 $A^2\omega_0^2$ ，其中 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ ， T 可通过测量确定。
6. 研究振动系统的机械能是否守恒。在固定振幅（例如取 $A = 40.0$ cm）的情况下，测量滑块在不同位置 x 处的速度，计算该位置的动能和势能，并对各位置的机械能进行比较，从而得出机械能守恒性的结论。
7. 研究平均速度与瞬时速度的关系，并利用外推法求出瞬时速度。在气垫导轨的仅一个螺丝端，小心将导轨抬起，并在该螺丝下方垫入垫块。测量不同 Δs 的挡光片在距离 A 点

50 cm 处从静止开始自由下滑时的挡光时间 Δt ，计算平均速度 $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ ，绘制 $\bar{v} - \Delta t$ 图和 $\bar{v} - \Delta s$ 图。通过对线性图外推，求出瞬时速度 v_0 。

8. 改变气垫导轨的倾斜角度 θ （增加垫块数量），重复上述实验步骤，研究倾斜角度对实验的影响。
9. 改变 A 点到 P 点的距离 l （例如设置为 60 cm），重复上述实验，考察起点距离对测量的影响。