

# 物 理 实 验 （二）

## 在气垫导轨上研究简谐振动

时间：2023 年 9 月 26 日

创作人：陆知辰

学号：10225301478

目录	1
----	---

## 目录

<b>一、 实验摘要</b>	<b>2</b>
1.1 实验概要 . . . . .	2
1.2 实验目的 . . . . .	2
<b>二、 实验原理</b>	<b>2</b>
<b>三、 实验装置器材介绍</b>	<b>4</b>
<b>四、 实验内容及实验步骤</b>	<b>4</b>
4.1 系统调节 . . . . .	4
4.1.1 静态调节 . . . . .	4
4.1.2 动态调节 . . . . .	4
4.2 弹簧弹力系数测量 . . . . .	4
4.3 测量 $x-t$ 数据并验证位移方程 . . . . .	4
4.4 验证振动周期与初始状态无关 . . . . .	5
4.4.1 验证振动周期与初振幅无关 . . . . .	5
4.4.2 验证振动周期与初相位无关 . . . . .	6
4.5 验证周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ . . . . .	6
<b>五、 实验原始数据</b>	<b>7</b>
<b>六、 实验数据处理</b>	<b>10</b>
6.1 验证位移方程 . . . . .	10
6.2 验证振动周期与初始状态无关 . . . . .	10
6.3 验证周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ . . . . .	11
<b>七、 思考题</b>	<b>12</b>
7.1 如何开展实验探究弹簧质量对滑块振动周期的影响 . . . . .	12
7.2 测量滑块在作阻尼振动时的半衰期 . . . . .	12
<b>八、 实验中个人的思考与感想</b>	<b>13</b>
8.1 对于实验个人观点 . . . . .	13
8.2 实验中的总结 . . . . .	13

## 一、 实验摘要

### 1.1 实验概要

简谐振动是周期运动中最简单的运动方式。研究简谐振动是了解周期运动最简单最理想的模型。对于简谐振动而言，其动力学特征是受力情况满足  $F = -kx$ 。其中  $x$  为偏离平衡位置的位移大小。本实验就是在气垫导轨上研究简谐子在简谐振动的时候的主要特征及其运动形式。

### 1.2 实验目的

1. 了解简谐振动运动规律的验证方法及要求。
2. 了解简谐振动过程中的机械能守恒定律的验证方式。
3. 掌握对数据对结果图形的处理方式。

## 二、 实验原理

在如图 1 中所展示的那样，实验器材的原理可以抽象为如图的模型。装置为一个水平的气垫导轨，不同弹性系数的弹簧  $k_1$  和  $k_2$  各自的一端固定在两端的支架上，另一端固定在两弹簧中间的质量块上。在滑块静止后拉动滑块使得滑块偏离平衡位置使弹簧产生弹性形变对滑块有拉力作用。对滑块进行受力分析可得当滑块偏离平衡位置的位移为  $x$  的时候，所受到的回复力为

$$F = -(k_1 + k_2)x \quad (1)$$

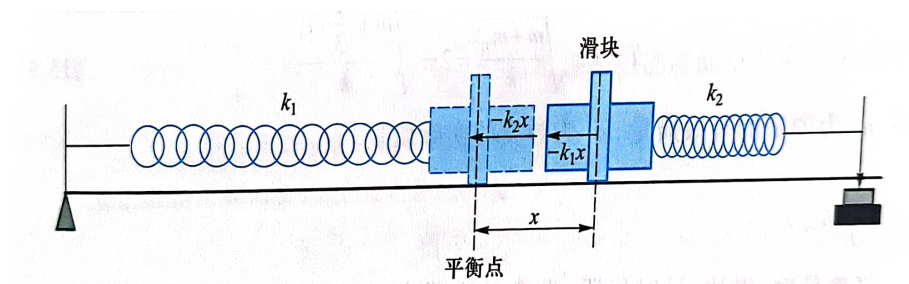


图 1: 实验原理辅助用图

具体可以将两个弹簧视为一个整体，整体弹簧的弹性系数等于两个分弹簧的弹性系数的和即  $k = k_1 + k_2$ 。根据上文对简谐运动特征的分析可以得出该滑块的运动是简谐运动。这样的近似忽略了空气阻力以及其他形式的能量的损耗。以此为假设就能得出滑块就可以看作一个简谐振子。

再根据牛顿第二定律  $\ddot{a} * m = F$  可以列出该滑块的动力学微分方程

$$m \frac{d^2 y}{dx^2} = -kx \quad (2)$$

将方程解出可以得到解为

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

对于方程 3 而言，式子中的  $A$  为振幅， $\varphi_0$  为初相位，这两个量只和初始状态有关，是常数。 $\omega$  为振动频率，和初始状态无关，和系统本身的特征有关。具体而言， $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，所以  $\omega$  只和  $m$  与  $k$  有关。并且两者都是常数。由此通过  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  可以得出振子的周期还可以表示为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4)$$

但是上述过程中没有讨论弹簧自身的质量的影响，重新考虑弹簧自身的质量后 4 式将改写为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m + m_0}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m + \frac{1}{3}m_s}{k}} \quad (5)$$

其中 5 式中的  $m_0$  为弹簧的等效质量， $m_s$  为弹簧的实际质量。

已知以上条件后就可以推导出下列的式子

根据 3 式可以得出速度的表达式为

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (6)$$

滑块的动能和振动势能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0) \quad (7)$$

$$E_P = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0) \quad (8)$$

最终可以得到总能量为

$$E = E_k + E_P = \frac{1}{2}kA^2 \quad (9)$$

### 三、 实验装置器材介绍

气垫导轨，滑块，计时仪器，弹簧数对，重物质量块，物理天平，米尺，若干挡光片。

### 四、 实验内容及实验步骤

#### 4.1 系统调节

安装完光电门传感器后测试光电门计时功能是否正常使用再进行导轨水平调整。导轨的水平调节通过导轨一端安装的调节螺丝，用于调节导轨横向与纵向的水平。在调节水平的时候通过结合静态调节和动态调节的方式进行调节。

##### 4.1.1 静态调节

打开气源开关，将滑块放于导轨任意位置，观察滑块是否会发生滑动。反复多次调节底部螺丝，直到滑块保持不动，或稍有移动但无一定方向性为止。应选择多个位置进行试验。

##### 4.1.2 动态调节

原理是如果滑块已经调平，则通过导轨任意位置的速度应该相同，滑块作匀速直线运动。所以在滑块通过两个光电门的时候的速度应该是相等的。所以以一定初速度释放滑块记录滑块通过两个光电门的速度大小并作出相应的调节，最终使得滑块通过两光电门的速度相差不超过 5%。

#### 4.2 弹簧弹力系数测量

测量弹簧原本长度，在悬挂质量块后再次测量长度，多次悬挂不同质量的重物测量弹簧的型变量，通过计算得到弹簧的弹性系数。导轨弹簧弹性系数等于两侧弹簧弹性系数的和，即  $k_{\text{总}} = k_1 + k_2$ 。

#### 4.3 测量 x-t 数据并验证位移方程

记录滑块开始运动为起点，挡光片前后按照运动方向规定，即向右运动则挡光片右侧边为前沿，反之亦然。让滑块在导轨自由振动直到停下，此时

挡光片前侧为平衡位置，也就是光电门 I 所在位置。

随后拉动滑块向挡光片后方运动，拉动的位置为  $A_0$ ，为初振幅，应该满足  $A_0 > 0.2m$ 。此处规定为实验中每次释放滑块的初始位置，标记记号以便之后查找。

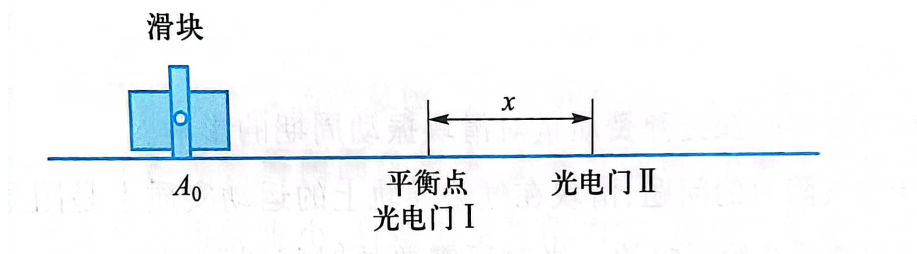


图 2: 光电门与滑块位置关系示意图

图 2展示的是实验中光电门 I、光电门 II 和滑块初始位置的关系。光电门 II 的位置为距离平衡位置  $x$  的地方。实验中需要记录滑块从  $A_0$  处释放后从平衡位置运动到  $x$  处所需要的时间  $t$ 。随后改变  $x$  的大小，也就是改变偏离平衡位置的距离，每次改变距离需要等间距并且改变次数不能少于 5 次。每次实验都需要记录  $x$  位置与所用的时间  $t$ 。

如果想测量从平衡位置运动到最大位移  $A_0$  处的时间，可以通过先测周期  $T$ ，再计算  $\frac{1}{4}T$  得出所需时间。

最后还需要对数据进行处理。利用实验中记录的  $x-t$  数据，在  $\frac{1}{4}$  个周期内绘制  $x - \sin \omega t$  的图像，将得到的斜率和原本的  $A_0$  进行比较，得出结论。

#### 4.4 验证振动周期与初始状态无关

初始状态包括两部分：初相位与初振幅。所以验证实验也需要控制变量从两个方面进行验证。

##### 4.4.1 验证振动周期与初振幅无关

将光电门固定在平衡位置，多次改变滑块释放的位置，也就使得初振幅不同，测量滑块的周期。

#### 4.4.2 验证振动周期与初相位无关

将滑块释放的位置固定，也就是固定初振幅，多次改变光电门所在位置，也就使得初相位不同，测量滑块周期。

#### 4.5 验证周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

将一个光电门放于平衡位置固定，固定初振幅，利用不同的弹簧和不同质量的滑块来改变  $\frac{m}{k}$  的值，并测量不同情况下的周期。

进行数据处理的时候希望能够得到线性的关系，对于  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  进行取对数的操作，最终获得式 10

$$\ln T = \ln 2\pi + \frac{1}{2} \ln \frac{m}{k} \quad (10)$$

从式中就能获得一组线性关系的变量  $\ln T$  和  $\ln \frac{m}{k}$ 。由此可以通过数据处理的方式求出两者线性关系的斜率  $b$  以及  $\ln T$  轴的截距，并和理论值进行比较。

## 五、 实验原始数据

8T		H 2309			
m	25.06	25.06±25.16	25.06±25.16	25.06±25.16+12.84	25.06±25.16+12.84
K	5.49749.888	5.49749.888	5.49749.888	5.49749.888	5.49749.888
T <sub>1</sub>	6.7281	7.0476	10.548	7.2102	9.6395
T <sub>2</sub>	6.7266	7.0467	10.549	7.2094	9.6397
T <sub>3</sub>	6.7276	7.0471	10.550	7.2088	9.6393
T <sub>4</sub>	6.7288	7.0478	10.552	7.2102	9.6388
T <sub>5</sub>	6.7283	7.0478	10.553	7.2090	9.6389
T <sub>ave</sub>					
A <sub>0</sub>	90.8cm	90.8	115.1	61.7cm	95.3
(cm)	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
m					
平衡位置					
A <sub>0</sub> 位置					
振动位置					
-v <sub>i</sub>					

图 3: 实验原理辅助用图



5/39977  
5/39977 S.  
T = 11/8.7943  
11/8.7945

$k = 5.477 + 8.828$

(ms)	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>
A <sub>0</sub> /I II位置			112cm	190.8cm		3.30g				
光由门II位置	80cm	79cm	78cm	77cm	76cm					
1	63.56	64.81	73.24	80.90	86.37					
2	63.40	64.65	73.75	80.70	86.06					
3	63.60	64.52	74.08	80.30	85.91					
4	63.33	64.82	73.44	80.29	85.65					
5	63.71	65.08	73.62	80.53	86.68					
6	63.12	64.66	72.96	80.76	85.58					
7	63.85	64.91	73.38	80.32	86.26					
8	63.21	64.77	73.25	80.37	86.01					
ave										
II位置	75cm	74cm								
1	92.37									
2	92.27									
3	91.82									
4	92.77									
5	91.87									
6	92.34									
7	92.42									
8	92.12									
ave										

图 4: 实验原理辅助用图

华东师范大学

## 物理实验报告

9.22

班级 \_\_\_\_\_ 同组者 \_\_\_\_\_ 姓名学号 \_\_\_\_\_

组别 \_\_\_\_\_ 日期 \_\_\_\_\_ 成绩 \_\_\_\_\_

实验题目: \_\_\_\_\_

砝码质量	弹性系数	截距
$k_1$	13.619	0.961
$k_2$	20.229	5.499 ✓
$k_3$	17.629	8.828 ✓
$k_4$	17.069	2.510
$k_5$		

释放位置	110cm	112cm	116cm	$I_3$ 9.8cm
$T_1$	6.760	6.723	6.760	
$T_2$	6.723	6.725	6.766	
$T_3$	6.726	6.761	6.776	
$T_4$	6.744	6.762	6.759	
$T_5$	6.750	6.762	6.763	
$T_{ave}$	9.8cm	7.5cm	8.0cm	116cm

释放位置	9.8cm	7.5cm	8.0cm	$g(5)$
$T_1$	6.760	6.748	6.7348	
$T_2$	6.723	6.7386	6.7341	
$T_3$	6.726	6.7394	6.7353	
$T_4$	6.740	6.7392	6.7350	
$T_5$	6.750	6.7390	6.7353	
$T_{ave}$				

图 5: 实验原理辅助用图

六、 实验数据处理

弹簧质量显示如表 1

表 1: 弹簧弹性系数及该系数弹簧的质量对应关系示意图

弹性系数的弹簧	弹簧质量 (克)
0.961	13.61
5.499	20.28
8.828	17.62
2.510	17.06

6.1 验证位移方程

实验数据处理如图 6，其中计算可得实验理论  $A_0 = 2.12dm$ ，而实验所得斜率，即实际测量的实际  $A_0 = 2.1459dm$ ，两者的相差程度，即百分差为 1.2217%。可以证明位移方程  $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$  在  $\varphi_0 = 0$  时成立。

实验中的误差可能来源于

- 1、每次释放位置不能保证完全相同
- 2、光电门传感器精度限制，以及挡光板的宽度
- 3、实验中气垫滑轨不能保证完全水平，出现倾斜

6.2 验证振动周期与初始状态无关

验证振动周期与初始状态无关实验的数据及数据处理如图 8所展示的那样。每个数据和该数据所在组平均值之间的相差不超过 0.01s，除以八个周期后近似可以为相等，标准差也小于 0.01。能验证振动周期与初始状态无关。

实验中的误差可能来源于

弹性系数	16.8217 A0位置(m)	112 质量块 3.70g
测量 10	1.224173 1)位置(m)	90.0
位移 1)位置(m)	0.00	79 79 77 79 75
位移 2)位置(m)	0.00	79 79 77 79 75
1	0.00	79 79 77 79 75
2	0.00	79 79 77 79 75
3	0.00	79 79 77 79 75
4	0.00	79 79 77 79 75
5	0.00	79 79 77 79 75
6	0.00	79 79 77 79 75
7	0.00	79 79 77 79 75
8	0.00	79 79 77 79 75
average	0.00	79 79 77 79 75
standard deviation	0.00	79 79 77 79 75
relative error	1.2217%	79 79 77 79 75

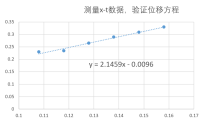


图 6: 验证位移方程数据

图 7: 验证位移方程作图法

记录时间为8个周期						
固定光电门于平衡位置 90.8cm						
释放位置	110cm	百分差	112cm	百分差	116cm	百分差
1	6.7260	-0.0001	6.7273	-0.0006	6.7260	0.0005
2	6.7283	-0.0024	6.7275	-0.0008	6.7266	-0.0001
3	6.7256	0.0003	6.7261	0.0006	6.7276	-0.0011
4	6.7244	0.0015	6.7262	0.0005	6.7259	0.0006
5	6.7250	0.0009	6.7262	0.0005	6.7263	0.0002
ave	6.7259		6.7267		6.7265	0.0000
标准差	0.001335		0.000609		0.000611	

图 8: 验证振动周期与初始状态无关数据处理

- 1、每次释放位置不能保证完全相同
- 2、光电门传感器精度限制，以及挡光板的宽度
- 3、实验中气垫滑轨不能保证完全水平，出现倾斜

6.3 验证周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

验证周期公式的实验数据如图 9所示，实验数据处理如图 10 所示那样。本实验误差较大，涉及不确定度较多。实验中理论图像的斜率等于  $\frac{1}{2}$ ，实验中理论截距为  $\ln 2\pi$ 。实际实验中图像的斜率等于 0.3122，实际截距为 1.7187。实验中理论和实际数据的百分差，斜率为 37.56%，截距为 6.48%

实验中的误差可能来源于

- 1、每次释放位置不能保证完全相同
- 2、光电门传感器精度限制，以及挡光板的宽度引入的误差。同时涉及质量称量，引入新的误差
- 3、实验中气垫滑轨不能保证完全水平，出现倾斜

实验中理论和实际的误差比较大，需要更多数据及更进一步的实验。其中斜率的误差较截距较大。



图 9: 验证周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  实验数据

图 10: 验证周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  数据处理

## 七、 思考题

### 7.1 如何开展实验探究弹簧质量对滑块振动周期的影响

控制滑块和载重片的质量恒定，准备若干弹簧，弹簧需要拥有相同的弹性系数但是质量不同。可以考虑使用不同材质做成的弹簧进行实验探究。

将光电门 I 放置在平衡位置，固定初振幅，利用不同质量的的弹簧，测量在

$$\frac{\text{滑块总质量}}{\text{弹簧弹性系数}} = \frac{m}{k} = a \quad (a \text{ 为常数}) \quad (11)$$

的条件下，不同质量的弹簧测得的周期。

之后通过式 5 所得公式两边取对数得到

$$\ln T = \ln 2\pi + \frac{1}{2} \ln \frac{m + \frac{1}{3}m_s}{k} \quad (12)$$

通过实验的到  $\ln \frac{m + \frac{1}{3}m_s}{k}$  和  $\ln T$  实验测得的值，通过作图法或者最小二乘法，求出斜率  $b$  和  $\ln T$  轴的截距，并与理论值对比，得到实验结论。

### 7.2 测量滑块在作阻尼振动时的半衰期

由于空气阻力的问题，滑块在气垫导轨上的运动是实际上时阻尼振动，定义阻尼振动的振幅减到初始振幅的一半时所需要的时间叫阻尼振动的半衰期，具体测量半衰期的实验设计如下：

将滑块放在气垫导轨上，使其初振幅恒定为  $A_0$ ，然后释放，让其作阻尼振动。确定初振幅  $A_0$  后在  $\frac{1}{2}A_0$  处标记，并在与刻度平行位置放置相机记录。打开相机，使得相机能够拍摄到  $\frac{1}{2}A_0$  处的图像。释放滑块的同时发出声音记录时间点，记作  $t_1$ ，使得相机能够接受到。直到滑块振幅小于  $\frac{1}{2}A_0$  后停止摄像，通过相机查找恰好通过  $\frac{1}{2}A_0$  处的时间点，记作  $t_2$ ，通过  $|t_1 - t_2|$  计算得到时间差  $\Delta t$ 。此处的  $\Delta t$  即为半衰期大小。

实验中注意控制变量的使用。在滑块及重物总质量、初振幅大小、弹簧弹性系数等条件中选择合适变量，控制其余变量不变，进行多次实验减小误差。

## 八、 实验中个人的思考与感想

### 8.1 对于实验个人观点

实验希望验证的内容是简谐振动的方程是否为简谐振动的方程。使用的方法是通过实验得到简谐振动的各种时间、振幅的数据，再代入方程中进行计算，是一种十分方便的验证方式。

实验中采用的气垫导轨的方式，通过气垫不断的喷气的设定，使滑块基本不与轨道摩擦，仅保留空气阻力作为阻碍。十分巧妙地避免了阻尼振动的问题。

实验中使用的计时工具是光电门，通过仪器和线路的搭建，使用两个光电门获得各种时间数值。

虽然实验的设计十分巧妙，避开了许多存在的问题，但是实验中依旧存在一些问题。在放置光电门的时候所在位置的读取存在误差，而且实验中通过光电门的速度虽然十分快，但是由于滑块上的挡光片的宽度难以消除，所以实验中还有些许多误差存在。实验中气垫导轨有时又由于气流不稳定等原因，存在在接往喷气机的一端风力较大，而另一端风力较小，存在空气坡面的存在导致误差进一步加大。

### 8.2 实验中的总结

虽然实验设计十分巧妙，但是实际在应用中仍存在诸多问题。几个实验中多数数据较为准确误差也较小，但是也存在误差较大的数据导致最终和目标相差甚远。

你的观点、感想、总结