**《基础物理实验》实验报告**

实验名称 气轨实验 指导教师 纪爱玲

姓名 王传皓 学号 2023K8009922008 专业 计算机科学与技术 班级 2306 分组序号 4 - 05 -09

实验日期 2024 年 12 月 26 日 实验地点 教 716 是否调课/补课 成绩

气轨上弹簧振子的简谐振动及瞬时速度的测定

**一、【实验目的】**

1. 观察简谐振动现象，测定简谐振动的周期。

2. 求弹簧的倔强系数和有效质量

3. 观察简谐振动的运动学特征。

4. 验证机械能守恒定律。

5. 用极限法测定瞬时速度。

6. 深入了解平均速度和瞬时速度的关系。

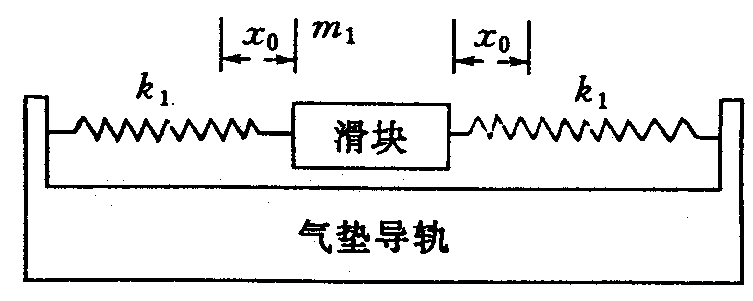
**二、【仪器用具】**

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。

**三、【实验原理】**

**1. 弹簧振子的简谐运动**

在水平的气垫导轨上，两个相同的弹簧中间系一个滑块，滑块做往返振动，如下图所示：



若不考虑滑块运动的阻力，可以认为滑块的振动是理想的简谐振动。

其简谐振动方程为：

，

令，得到标准方程：

对应该方程的解为：

，式中角频率，为振幅，为初相位

而振动周期T与有关系：

将该式两边同时平方，得：

**2. 简谐运动的运动学特征描述**

运动方程两边同时对时间求导，即可得到：

联立方程与方程，消去时间，即可得到：

得到 x 与 v 的周期变化规律及其相位关系。

**3. 简谐振动的机械能**

弹性势能为：

所以系统的机械能为：

**4. 瞬时速度的测定**

在实验中我们无法直接测量瞬时速度，一般用极短时间或极短距离的平均速度𝑣 ̅= ∆𝑠/∆t代替。可以采用极限外推的方法测量：我们利用挡光片与光电门可以测得 ∆s, ∆t，减少前者使其趋于 0，做出相关曲线并使其延伸到 ∆t = 0 处，即可得到瞬时速度的近似值。

**四、【实验内容】**

1.打开并安装滑块，光电门，对气垫导轨进行调平。具体步骤为：

粗调：调整气垫导轨直到滑块位于中间时保持静止或轻微的左右来回移动。

精调：装好光电门和计数器，小滑块上安装条形挡光片，将小滑块从左到右或从右到左以一定初速度推动，记录两光电门速度的读数，当两速度误差小于0.5% 时视为调平。

2. 测量数据：根据数据表的要求，分别调节滑块振幅，质量等等，测量振动周期。

3. 在滑块上装上 U 型挡光片，根据数据表测量速度与位移的关系。

4. 测定瞬时速度：垫高气垫导轨，测量瞬时速度。

**五、【数据处理】**

**1、实验仪器调试**

粗调至滑块大致不大幅度运动时，进入微调环节，下表即为调整后的误差情况：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 方向 |  |  | 误差% |
| → | 62.27 | 62.34 | 0.11% |
| ← | 26.33 | 26.38 | 0.18% |
| → | 88.26 | 88.26 | 0.00% |

从表中可以发现，无论从哪个方向来看，滑块的速度改变量都控制在了0.5%以内，在实验误差允许的范围内，基本上可以认为气垫导轨处于水平的状态。

**2、测量弹簧振子的振动周期和振幅的关系**

测得数据如下表所示：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 10cm | 20cm | 30cm | 40cm |
|  | 1168.52 | 1168.53 | 1168.55 | 1168.18 |
|  | 1168.3 | 1169.03 | 1168.75 | 1168.3 |
|  | 1168.87 | 1169.16 | 1168.63 | 1168.41 |
|  | 1169.43 | 1169.22 | 1168.48 | 1168.63 |
|  | 1169.64 | 1168.9 | 1168.68 | 1168.47 |
|  | 1168.952 | 1168.968 | 1168.618 | 1168.398 |

由该实验数据表，绘图如下：

由图像可知，改变振幅后周期无明显变化。因此，基本上可以认为，在实验误差允许的范围内，验证了理论推导部分所认为的“简谐运动周期与振幅无关”这一结论。

在实际测量时，由于很难控制光电门严格地摆放在平衡位置，再考虑到振幅的衰减，测量的周期应当会有误差。但当振幅不断增大时，通过纵向分析数据变化的趋势就可以非常明显地发现，光电门稍稍偏离平衡位置其实并没有影响。

**3、测量弹簧振子的振动周期和振子质量的关系**

用电子秤测量“含有两个挡光片的滑块”质量m=118.48g，保持A=40cm不变，并逐渐在滑块上添加骑码，测量骑码的质量和相应的运动周期。

数据：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  | 118.48g | 143.49g | 168.48g | 183.43g | 195.89g |
|  | 1168.21 | 1282.57 | 1386.75 | 1445.58 | 1492.95 |
|  | 1168.23 | 1282.67 | 1386.75 | 1445.78 | 1493.25 |
|  | 1168.47 | 1282.75 | 1386.97 | 1445.91 | 1493.12 |
|  | 1168.53 | 1282.57 | 1387.01 | 1445.82 | 1493.05 |
|  | 1168.36 | 1282.58 | 1387.01 | 1445.69 | 1493.11 |
|  | 1168.21 | 1282.63 | 1387.14 | 1445.89 | 1493 |
|  | 1168.21 | 1282.7 | 1387.13 | 1445.95 | 1493.34 |
|  | 1168.46 | 1282.67 | 1386.98 | 1445.8 | 1493.42 |
|  | 1168.65 | 1282.61 | 1387.21 | 1445.99 | 1493.65 |
|  | 1168.45 | 1282.7 | 1387.31 | 1445.97 | 1493.62 |
|  | 1168.378 | 1282.645 | 1387.026 | 1445.838 | 1493.251 |
|  | 1365107 | 1645178 | 1923841 | 2090448 | 2229799 |

为利用公式：

需先将相关数据转换为国际单位制，列表如下：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.11848 | 0.14349 | 0.16848 | 0.18343 | 0.19589 |
|  | 1.365107 | 1.645178 | 1.923841 | 2.090448 | 2.229799 |

采用最小二乘法拟合，绘出图如下：

值得注意的是，这里其实是把最小二乘法和作图法合二为一了，因为Excel的线性拟合本来就是用最小二乘法来完成的。从图像不难看出，线性拟合的情况非常好，实际图像与线性拟合的曲线几乎重合。

由图像可知：斜率，截距

即，有效质量

【实验小结】

本实验得到的结果相对准确，因为即使是阻尼振动，振动周期理论值也是不变的。根据实验数据也可以看出。事实上，采用逐差法来得到周期的值可能更好，因为简单地取平均值会造成数据的极大浪费。

**4、研究速度和位移的关系**

在滑块上装上U型挡光片以测量速度，保持振幅A=40cm不变，改变光电门位置，测量滑块运动到距平衡位置分别为10cm，15cm，20cm，25cm，30cm时的速度。测量数据如下表所示：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm | 30cm |
|  | 200 | 192.31 | 179.21 | 161.81 | 137.17 |
|  | 196.85 | 189.39 | 176.37 | 158.48 | 133.16 |
|  | 195.36 | 187.62 | 174.52 | 156.25 | 130.55 |
|  | 197.4033 | 189.7733 | 176.7 | 158.8467 | 133.6267 |

考虑公式，先将相关数据化为国际单位制：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 |
|  | 0.0100 | 0.0225 | 0.0400 | 0.0625 | 0.0900 |
|  | 1.9740 | 1.8977 | 1.7670 | 1.5885 | 1.3363 |
|  | 3.896808 | 3.601392 | 3.122289 | 2.523226 | 1.785609 |

因此作图：

由图像知：，

即，，A

A与实测值的相对误差：，这在实验误差允许范围内已相当精确

【实验小结】

总体而言，该实验所采用的方法还是有着较高的精度，无论从图像还是计算的结果来看，结果都与预期的误差极小。实验误差可能来源于滑块振幅是人为读数拉动的，与40cm可能有差距，另外在实验过程中其实能明显看到，振幅的衰减还是比较明显的，在不同的周期，不同的方向，同一组数据中，速度v的数值也会有所不同，所以实验的结果离完美还有一定的距离。如果在实验过程中能够考虑到这些，得到的结果应该会有更加小的误差。

**5、研究振动系统机械能是否守恒**

用天平测量此时滑块和U形挡光片的质量和，为m=127.63。

考虑公式 ，，

根据此前实验结果，，有效质量，即

数据整理得到表格如下：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 偏移距离x | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm | 30cm |
| v (cm/s) | 197.4033 | 189.7733 | 176.7 | 158.8467 | 133.6267 |

将相关数据化为国际单位制，得到表格如下：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 偏移距离x(m) | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 |
| V (m/s) | 1.9740 | 1.8977 | 1.7670 | 1.5885 | 1.3363 |
|  | 0.01768 | 0.03978 | 0.07072 | 0.1105 | 0.15912 |
|  | 0.256073 | 0.23666 | 0.205177 | 0.16581 | 0.117339 |
| E（J） | 0.273753 | 0.27644 | 0.275897 | 0.27631 | 0.276459 |

绘出曲线图如下：

由图像可知，虽然动能和势能在该区间内有较大的变化，但二者之和，即机械能则几乎不变，在误差允许范围内可以认为该实验的结论支持机械能守恒定律的正确性。

【实验小结】

本实验在实际操作过程中其实依然存在着肉眼可见的振幅衰减，但所需记录的数据只是前三次经过光电门时的速度的平均值，因此即便多个来回后，会有很大的机械能损耗，但仅仅对前三次而言，这几乎可以忽略不计，对应的实验结果也证实了这一点

**6、改变振幅，测量相应的，由关系求k**

因为平衡位置处速度最大，所以我们将光电门固定在平衡位置，并不断改变振幅大小，分别测得相应的最大速度值。

由实验数据整理得到如下表格：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 振幅A | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm | 30cm |
|  | 51.60 | 77.76 | 104.28 | 130.04 | 154.08 |
|  | 50.53 | 76.51 | 102.99 | 128.20 | 151.98 |
|  | 50.33 | 76.04 | 102.35 | 127.55 | 151.06 |
|  | 50.82 | 76.77 | 103.21 | 128.60 | 152.37 |

为利用公式 ，将相关数据化为国际单位制，制表如下：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 振幅A(m) | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 |
|  | 0.0100 | 0.0225 | 0.0400 | 0.0625 | 0.0900 |
|  | 0.5082 | 0.7677 | 1.032067 | 1.285967 | 1.523733 |
|  | 0.258267 | 0.589363 | 1.065162 | 1.65371 | 2.321763 |

由此可作图：

由图可得：，取(g)，则

这与此前算得的，相对误差为：，这在实验误差范围内已经相当精确。

【实验小结】

虽然误差很小，不过这一点差别足以说明问题：这里所测k的结果比之前所测结果小，主要原因有二，其一是由于阻尼的存在，弹簧振子的振幅逐渐减小，这对本身就不利于用最大速度取测量k；其二是平衡位置本身很难精确确定，即使此前已经把气垫导轨调平，还有两端的弹簧拴着滑块，但滑块还是有着微小的摆动，可以对确定平衡位置产生干扰。同时光电门固定时也不能保证完全固定在平衡位置，导致测得最大速度偏小。

**8.测定瞬时速度，AP=50cm：**

在气垫导轨一侧垫了一个垫片，实验数据如下表：

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 挡光片宽度（cm） | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | **(ms)** |
| 1 (cm) | 29.61 | 29.72 | 29.44 | 29.59 | 29.68 | 29.61 |
| 3 (cm) | 88.60 | 88.85 | 89.12 | 88.89 | 89.00 | 88.89 |
| 5 (cm) | 146.89 | 146.40 | 146.65 | 146.95 | 146.83 | 146.74 |
| 10 (cm) | 286.48 | 287.96 | 287.42 | 286.98 | 288.35 | 287.44 |

将相关数据化为国际单位制，制表如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.0296 | 0.0889 | 0.1467 | 0.2874 |
|  | 0.0100 | 0.0300 | 0.0500 | 0.1000 |
|  | 0.3377 | 0.3375 | 0.3407 | 0.3479 |

将所得数据绘制成图像，可得：

由公式：

由v-Δt图可知当时，同时。

**9.改变倾斜角度，测定瞬时速度：**

在本实验中在气垫导轨一侧多垫了一个垫片。

实验数据如下表：

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 挡光片宽度（cm） | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | **(ms)** |
| 1 (cm) | 21.20 | 21.20 | 21.24 | 21.11 | 21.20 | 21.19 |
| 3 (cm) | 63.25 | 63.27 | 63.21 | 63.24 | 63.26 | 63.25 |
| 5 (cm) | 104.49 | 104.36 | 104.24 | 104.36 | 104.32 | 104.35 |
| 10 (cm) | 205.31 | 205.26 | 205.48 | 205.40 | 205.51 | 205.39 |

将相关数据化为国际单位制，制表如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.0212 | 0.0632 | 0.1044 | 0.2054 |
|  | 0.0100 | 0.0300 | 0.0500 | 0.1000 |
|  | 0.4719 | 0.4743 | 0.4791 | 0.4869 |

将所得数据绘制成图像，可得：

实验原理同实验1，由图可知，。

**10.改变加速长度，使得AP=60cm，测定瞬时速度：**

在本实验中在气垫导轨一侧垫了两个垫片。

实验数据如下表：

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 挡光片宽度（cm） | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | **(ms)** |
| 1 (cm) | 19.64 | 19.1 | 19.05 | 19.09 | 19.11 | 19.198 |
| 3 (cm) | 57.37 | 57.45 | 57.36 | 57.25 | 57.36 | 57.358 |
| 5 (cm) | 95.21 | 95.38 | 95.5 | 95.33 | 95.35 | 95.354 |
| 10 (cm) | 188.43 | 188.76 | 188.88 | 188.5 | 188.63 | 188.64 |

将相关数据化为国际单位制，制表如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.01920 | 0.05736 | 0.09535 | 0.18864 |
|  | 0.0100 | 0.0300 | 0.0500 | 0.1000 |
|  | 0.5209 | 0.5230 | 0.5244 | 0.5301 |

将所得数据绘制成图像，可得：

实验原理同实验1，由图可知，。

实验小结：

第一个图像的绘制中明显感受到了3cm的挡光片处的数据点偏离了曲线，由于我的四组数据都是用同一种方法测量的，因此不太可能是人为误差， 但是后面的数据中3cm处的偏差又减小了，这可能是因为测量第一组数据时，由于角度较小，导致阻尼影响比较大，导致该数据出现异常。如果重复实验，可以考虑改变光电门的位置或者增大滑块滑动角度降低这个扰动的影响。

**六、【思考题】**

1. 仔细观察，可以发现滑块的振幅是不断减小的，那么为什么还可以认为滑块是做简谐振动？实验中应如何尽量保证滑块做简谐振动？

滑块振幅的减小是由于存在阻尼（如空气阻力和导轨的微小摩擦）。尽管实际运动是欠阻尼振动，但由于气垫导轨的摩擦力很小，阻尼对运动的影响较弱，滑块的振动频率几乎与理想简谐振动的自然频率相同，其位移在短时间内仍可近似为正弦函数。因此，可以认为滑块的运动是简谐振动的近似。

为了保证滑块做简谐振动，可采取以下措施：

①先打开气垫导轨的气泵，使其产生气垫后再放置滑块，以避免滑块与导轨表面的直接接触。

② 使用气垫导轨，可以尽量消除滑动摩擦。

③ 调整导轨的水平状态，避免由于重力分量产生额外的力。

④ 避免实验环境中存在较强的气流干扰。

2. 试说明弹簧的等效质量的物理意义，如不考虑弹簧的等效质量，则对实验结果有什么影响？

弹簧的等效质量是一个用来描述弹簧质量对振动系统影响的简化模型。由于弹簧本身具有质量，振动时其不同部分会以不同的速度运动，因此弹簧的质量不能简单地看作一个集中质量，而需要通过等效质量的概念将其对系统动力学的影响等效地集中到一个点。在理想条件下，假设弹簧质量分布均匀，且质量远小于滑块质量，其等效质量约为弹簧总质量的三分之一。

如果忽略弹簧的等效质量，会对实验结果造成误差，例如会造成系统总质量低估，影响振动周期的理论值，使实验6测得的弹簧倔强系数𝑘偏小。同时如果忽略弹簧的等效质量，会低估系统的动能和总机械能，导致实验5结果会偏小。

3. 测量周期时，光电门是否必须在平衡位置上？如不在平衡位置会产生什么不同的效果？

理论上来说，光电门不需要必须放置在平衡位置上，因为振动周期只与振动系统的总质量和弹簧倔强系数𝑘有关，与光电门的位置无关。只要光电门可以捕捉到滑块的运动状态即可。

而实际实验中，如果光电门离平衡位置太远，随着振幅逐渐减小，滑块可能无法触发光电门，从而中断周期的测量。同时，由于阻尼的影响，滑块经过光电门的速度会因振幅变化而不同。如果光电门不在平衡位置，滑块连续三次通过光电门时，其位置未必是严格对称的，导致周期测量的起点和终点偏离标准周期位置，可能引入小的误差。

4. 气垫导轨如果不水平，是否能进行该实验？

如果只是为观察简谐运动的性质，理论上不需要调节水平，但此时公式更加复杂，导致分析不便。且由于该实验不能测量倾斜角，无法直接测量高度的变化量，也无法得出重力的倾斜方向分量，不能验证机械能守恒定律。

5. 使用平板形挡光片和两个光电门，如何测量滑块通过倾斜气轨上某一点的瞬时速度？

可以使用平板形挡光片通过两个光电门，分别测量挡光片前后两条边通过光电门的时间差并记录两个光电门的距离，计算出平均速度。逐渐减小，由于平均速度的极限值就等于物体A点的瞬时速度。我们可以测量多组数据，使用外推法得到瞬时速度。

6. 气垫导轨如果不水平，对瞬时速度的测定有什么影响？

没有影响。该实验会将气垫导轨垫高以给一个加速度，此时气垫导轨要求必须有一定角度。

7. 每次测量滑块和 U 型挡光片总质量不同是否对瞬时速度测定有影响？

理论上，滑块下滑的加速度恒为，与滑块质量无关。但是由图表得出的结果可知，由于阻尼的影响，导致不同长度测得的加速度不一样。由于阻尼和滑块总质量也有关，总质量增加时，滑块与导轨间的气垫厚度减小，可能导致摩擦力增大，影响瞬时速度的测量。如果每次测量时滑块和 U型挡光片的总质量不同，但未同步调整其他实验条件（如气垫流量），则测量误差可能增大。特别是外推法要求在同一实验条件下进行多组测量，条件变化会导致外推法的有效性降低。

**七、【感想体悟】**

这次实验是我这学期的最后一个大物实验，整整十八周的磨练让我从一个实验小白到现在能够敏锐的发现实验数据中的亮点和错误，能够对误差做出分析等等，我的实验技能得到了极大提升。非常感谢大物实验的各位老师，您们的谆谆教导和一丝不苟的教学让我们受益匪浅。

说回本实验，首先，实验的过程让我对简谐振动有了更直观的认识。通过观察滑块的运动轨迹，我清楚的看到了系统在受到阻尼时的能量损失，但是周期并没有改变，这很好的验证了实验假设。在测量瞬时速度时，通过光电门与挡光片配合，我们用外推法巧妙地将平均速度逼近瞬时速度。这种利用数学方法解决实验难题的过程，让我深刻体会到物理学的严密性与逻辑性。

其次，这次实验也让我意识到实验条件对结果精度的影响。例如，气垫导轨的水平调节直接决定了实验的成功与否。稍有倾斜，便会引入重力的影响，使测量结果偏离理论值。此外，滑块和挡光片总质量的变化虽然理论上对速度无影响，但实际中可能引发摩擦力和阻力的变化，从而导致误差。这让我明白了实验过程中控制变量的重要性，也让我对“理想实验”与“实际实验”的差距有了更清晰的认知。

最后，我深刻体会到团队合作的重要性。在实验中，我和旁边的同学不时因为一个实验操作的具体细节而进行讨论，遇到实在有疑惑的问题再去找老师讨论，这不仅加快了我的实验进度，也让我在理论上收获颇多。

再次感谢本次实验的授课老师以及全体大学物理实验的老师，谢谢你们的辛勤付出，为我们带来了如此生动宝贵的一门课程。

**附：原始数据记录表（见下页）**

