《大学基础物理实验》课程实验报告

姓名：柯云超　学号: 2413575
学院：计算机学院　时间：2025 年 3 月 11 日　组别: L 组 11 号

碰撞

[实验目的要求]

1. 用对心碰撞特例检验动量守恒定律。
2. 了解动量守恒和能量守恒的条件。
3. 熟练的使用气垫导轨及数字毫秒计。

[实验仪器用具]

气垫导轨 (包括滑块和挡光框一对); 数字毫秒计; 物理天平及游标卡尺

[实验原理简述]

动量守恒定理

动量守恒定理指出: 若一个物体系所受合外力为零，则物体的总动量保持不变；若物体系所受合外力在某个方向的分量为零。则此物体系的总动量在该方向上的分量守恒。本实验在平直导轨上，两个滑块作对心碰撞。忽略空气阻力，则在水平方向上满足没有外力的条件，即满足动量守恒定律。

$$m_1u_1 + m_2u_2 = m_1v_1 + m_2v_2 \tag{1}$$

分别测出 (1) 式中各量，若等式两边相等，则动量守恒定律得到验证。

碰撞后的动能损失

碰撞过程中的动能是否守恒，与碰撞的性质有关，用恢复系数 e 来表达:

$$e = \frac{v_2 - v_1}{u_1 - u_2} \tag{2}$$

在 (2) 式中，分母和分子分别为碰撞前后两者的相对速度。

(1) 完全弹性碰撞: 若相互碰撞的物体材料为弹性材料，碰撞后形变完全恢复，则物体的总动能不变，此时 $e = 1$, 没有能量损失。

(2) 非弹性碰撞: 若相互碰撞的物体材料有一定弹性，碰撞后有部分形变残留，则物体的总动能有所损耗，此时 $0 < e < 1$, 有部分能量损失。

(3) 完全非弹性碰撞：若相互碰撞的物体完全没有弹性，在碰撞之后粘在一起继续运动，此时 $v_1 = v_2$，故 $e = 0$，物体系的能量损失达到最大。

实验的假设和误差分析

本实验使用的物体质量 $m_1 = m_2 \equiv m$ 且 $u_2 = 0$, 当发生的是完全弹性碰撞是 (本实验通过使用弹簧来模拟这一点)，式 (1) 和式 (2) 的解为:

$$\begin{cases} v_1 = 0 \\ v_2 = u_1 \end{cases} \tag{3}$$

这表明，当两块滑块质量相等，且第二块滑块处于静止时发生完全弹性碰撞，第二块滑块会“继承”第一块滑块的速度,“接力式”地向前运动。只需 (3) 式子得到验证，则说明完全弹性碰撞中动量守恒，动能也守恒。

以上时理想化的模型。若两块滑块的质量不严格相等，两挡光物的有效遮光宽度 Δs_1 和 Δs_2 也不严格相等，则碰撞后的动量百分差为 E_1 为

$$E_1 = \frac{|p_2 - p_1|}{p_1} = |\frac{m_2 \Delta s_2 \Delta t_1}{m_1 \Delta s_1 \Delta t_2} - 1| \tag{4}$$

动能的百分差 E_2 为

$$E_2 = \frac{|E_{k2} - E_{k1}|}{E_{k1}} = |\frac{m_2 \Delta s_2^2 \Delta t_1^2}{m_1 \Delta s_1^2 \Delta t_2^2} - 1| \tag{5}$$

若 E_1 和 E_2 都在误差范围之内，则说明上述结论成立。

对于完全非弹性碰撞，式 (1) 和式 (2) 的解为

$$v_1 = v_2 \equiv v = \frac{u_1}{2} \tag{6}$$

若 (6) 式得证，则说明完全非弹性碰撞动量守恒，且 $e = 0$，其动能损失最大，约为 50%.

考虑到两次速度测量使用的都是第一块滑块的挡光物，故 $\Delta s_1' \equiv \Delta s_2'$，同样求得动量和动能百分差 E_1' 和 E_2' 分别为

$$E_1' = \frac{|p_2' - p_1'|}{p_1'} = \left| \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \frac{\Delta t_1'}{\Delta t_2'} - 1 \right| \tag{7}$$

$$E_2' = \frac{|E_{k2}' - E_{k1}'|}{E_{k1}'} = \left| \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \left(\frac{\Delta t_1'}{\Delta t_2'}\right)^2 - 1 \right| \tag{8}$$

其动能损失的百分误差为

$$E_\Delta = \left| 2 \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \left(\frac{\Delta t_1'}{\Delta t_2'}\right)^2 - 1 \right| \tag{9}$$

若 E_1' 和 E_Δ 都在其实验误差范围之内，则说明上述结论成立。

[实验步骤]

动态调零和调重

取两个滑块分别放在电子天平上，测得两滑块的质量分别为 $m_1 = 131.82g$,$m_2 = 131.85g$, 误差 $\Delta m = 0.03g < 0.1g$。打开气泵和数字毫秒计，等待一段时间后将滑块 1 放在导轨上并给予初速度，观察数字毫秒计上显示的滑块通过两次光电门的时间，若两次的时间差大于 $0.1ms$, 则保持旋钮 Q 不动，调节旋钮 P，重复试验直到两者差值小于 $0.1ms$ 为止。本次试验动态调平时时间分别为 $78.06ms$,$78.14ms$。

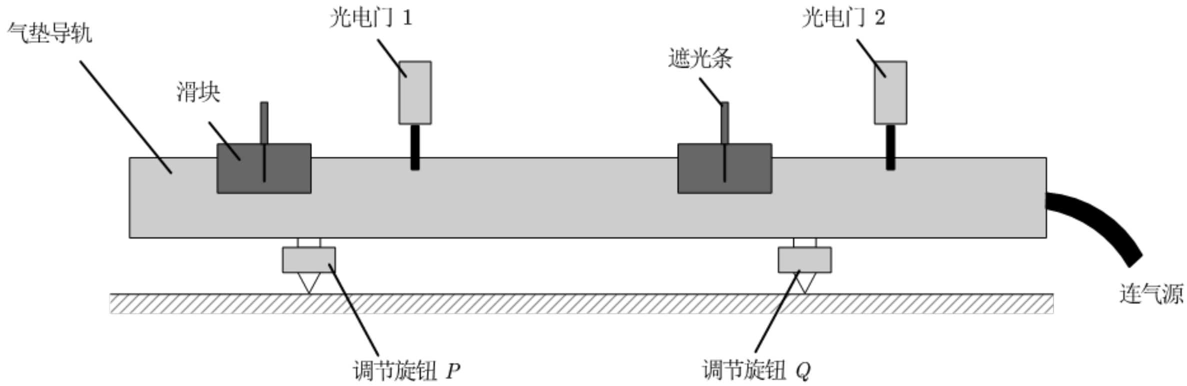

图 1: 气垫导轨示意图

动量定理的验证

调节两个滑块的方向，使得滑块上的弹簧同时向内，同时调节遮光条的方向使得其能被光电门检测到。将两个滑块和光电门按照图 1 的位置关系摆放。用手保持右边的滑块不动，给予左侧的滑块初速度，记录下左侧滑块第一次通过左侧光电门和碰撞后右边滑块第一次通过右边光电门的时间，重复六次，结果记录在数据处理中。

动能损失量的测定

和动量定理步骤大致一样，不同点在于将两个滑块调换位置，使得两滑块尾部的魔术贴向内，碰撞后两个滑块会一起运动，且记录的是左侧滑块两次通过光电门的时间 (即数字毫秒计第一次和第三次的记录)，重复六次，结果记录在数据处理中。

Δs 的测量

本实验中采用了 S_2 计时法：测量光电门两次挡光的间隔时间。故测量值应为图 2 中标注的 Δs, 由于不方便直接测量，使用了 $\Delta s = \Delta L - \Delta d$ 间接测量。由于是同样的

一块滑块，故第二次测量只测量了一次。最后根据公式 $v=\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 求出速度并计算恢复系数 e，动量百分差 E_1 及能量百分差 E_2.

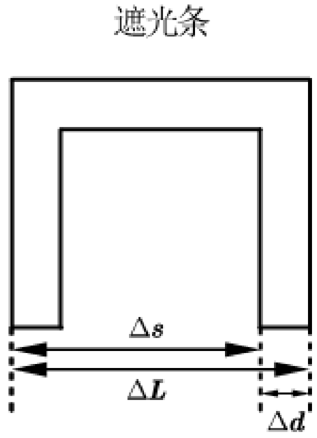

图 2: 遮光条示意图

[数据处理]

$$\Delta s_1 = 0.04970m \quad \Delta s_2 = 0.04970m \quad \Delta s_1^{'} = 0.04970m$$

为慎重起见，我们规定：乘除运算的结果应比参与运算分量中有效数字位数最少的测得值多取一位，简记为“多取一位”的法则。故速度、恢复系数、动量百分差、动能百分差取五位有效数字。根据 $v=\dfrac{s}{t}$ 可得

次数 i	完全弹性碰撞				完全非弹性碰撞			
	碰前		碰后		碰前		碰后	
	$\Delta t_1/s$	$u/(m\cdot s^{-1})$	$\Delta t_2/s$	$v/(m\cdot s^{-1})$	$\Delta t_1^{'}/s$	$u^{'}/(m\cdot s^{-1})$	$\Delta t_2^{'}/s$	$u^{'}/(m\cdot s^{-1})$
1	0.10992	0.45215	0.11325	0.43885	0.08822	0.56336	0.18827	0.26398
2	0.10960	0.45347	0.11258	0.44146	0.08831	0.56279	0.18574	0.26758
3	0.10932	0.45463	0.11242	0.44209	0.09098	0.54627	0.19811	0.25087

为更清晰地表达数值之间的差异程度，提供恢复系数、动量百分差、动能百分差保留两位有效数字版本

完全弹性碰撞：

恢复系数 $e=\left|\frac{v_1-v_2}{u_1-u_2}\right| = 0.97351 \approx 0.97$

动量百分差 $E_1=\left|\frac{p_2-p_1}{p_1}\right| = \left|\frac{m_2\Delta s_2\Delta t_1}{m_1\Delta s_1\Delta t_2}-1\right| = 0.027190 \approx 0.027$

动能百分差 $E_2=\left|\frac{E_{k2}-E_{k1}}{E_{k1}}\right| = \left|\frac{m_2\Delta s_2^2\Delta t_1^2}{m_1\Delta s_1^2\Delta t_2^2}-1\right| = 0.055118 \approx 0.055$

完全非弹性碰撞：

恢复系数 $e=\left|\frac{v_1-v_2}{u_1-u_2}\right| = 0$

动量百分差 $E_1' = \left|\frac{p_1'-p_2'}{p_1'}\right| = \left|\left(1+\frac{m_2}{m_1}\right)\frac{\Delta t_1'}{\Delta t_2'}-1\right| = 0.058120 \approx 0.058$

动能百分差 $E_2' = \left|\frac{E_{k2}'-E_{k1}'}{E_{k1}'}\right| = \left|\left(1+\frac{m_2}{m_1}\right)\left(\frac{\Delta t_1'}{\Delta t_2'}\right)^2-1\right| = 0.55648 \approx 0.56$

动能损失百分误差 $E_\Delta = \left|2\left(1+\frac{m_2}{m_1}\right)\left(\frac{\Delta t_1'}{\Delta t_2'}\right)^2-1\right| = 11\%$ (保留两位有效数字)

[误差分析]

1. 测量工具的精度：使用的数字毫秒计、游标卡尺、电子天平本身的精度限制是误差的一个来源。

2. 碰撞并非理想情况：理论计算假设碰撞要么是完全弹性的，要么是完全非弹性的。然而在现实中，碰撞后两个滑块的弹簧会缠绕在一起。这是因为两个滑块未发生对心碰撞，即便经过调整，也难以保证两个滑块的质心始终处于运动路径的直线上，从而导致实验误差。

3. 人为操作误差：释放滑块时可能带有初速度，或者动态调平不够充分。

4. 系统误差：尽管气垫导轨能减小摩擦力，但摩擦力和空气阻力的影响依然存在。

[思考题]

1. 完全弹性碰撞后，物体的形变完全恢复，恢复系数为 1，且动能没有损失。

$$\begin{cases} m_1u_1 + m_2u_2 = m_1v_1 + m_2v_2 \\ \dfrac{1}{2}m_1u_1^2 + \dfrac{1}{2}m_2u_2^2 = \dfrac{1}{2}m_1v_1^2 + \dfrac{1}{2}m_2v_2^2 \end{cases}$$

变形为

$$\begin{cases} m_1(u_1 - v_1) = m_2(v_2 - u_2) \\ m_1(u_1 - v_1)(u_1 + v_1) = m_1(v_2 - u_1)(v_2 + u_1) \end{cases}$$

相除即得

$$v_2 - v_1 = u_2 - u_1$$

2. 由于 $m >> m_1$ 由动量定理，导轨的速度变化量可以忽略不计，故

$$e = \frac{0-(-v)}{v-0} = 1$$

3. 因为本实验应做到尽量只考虑水平方向上的动量，若不是对心碰撞，会产生竖直方向上的误差。在本次实验中，通过观察和确定滑块上的弹簧圈牢固且没有变形来尽量保证这一点。

4. 由对称性可知，若发生完全非弹性碰撞，则两个滑块将会停在原地，若发生弹性碰撞，则两个滑块将以大小相同方向相反的速度分离。

5. 尽量使实验速度靠近调平速度；尽量使滑块对心碰撞；实验前一定要保证两滑块质量相等；保证滑块运动稳定不摇晃。