碰撞实验报告

专业：工科试验班（信息科学与技术）姓名：张一萌 组别：L 实验时间：周二上午

一、实验原理简述

1、验证动量守恒定律

动量守恒定律指出：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上的分量为零，则此物体系的总动量在该方向的分量守恒。

设在平直轨道上，两个滑块作对心碰撞，若忽略空气阻力，则在水平方向上就满足动量守恒定律成立的条件，即碰撞前后的总动量保持不变。

$$m_1u_1 + m_2u_2 = m_1v_1 + m_2v_2 \qquad ①式$$

其中，u_1、u_2和v_1、v_2分别为滑块m_1、m_2在碰撞前后的速度。若分别测出式中各量，且等式左右两边相等，则动量守恒定律得以验证。

2、碰撞后的动能损失

只要满足动量守恒定律成立的条件，不论弹性碰撞还是非弹性碰撞，总动量都将守恒。

但动能在碰撞过程中是否守恒，还与碰撞的性质有关。

碰撞的性质通常用恢复系数 e 来表达：

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

$v_2 - v_1$为两物体碰撞后相互分离的相对速度，$u_1 - u_2$则为碰撞前彼此接近的相对速度。

（1） 若相互碰撞的物体为弹性材料，碰撞后物体的形变得以完全恢复，则物体系的总动能保持不变，碰撞后两物体的相对速度等于碰撞前两物体的相对速度，即$v_2 - v_1 = u_1 - u_2$,于是，$e = 1$，这类碰撞称为完全弹性碰撞。

（2） 若碰撞物体具有一定的塑性，碰撞后尚有部分形变残留，则物体系的总动能有所损耗，转变为其他形式的能量，碰撞后两物体的相对速度小于碰撞前的相对速度，即$0 < v_2 - v_1 < u_1 - u_2$，于是，$0 < e < 1$，这类碰撞称为非弹性碰撞。

（3） 碰撞后两物体的相对速度为 0，即$v_2 - v_1 = 0$或$v_2 = v_1 \equiv v$，两物体粘在一起以后以相同的速度继续运动，此时，$e = 0$ ，物体系的总动能损失最大，这类碰撞称为完全非弹性碰撞，它是非弹性碰撞的一种特殊情况。

三类碰撞过程中总动量均守恒，但总动能却有不同情况。由①式和②式可求碰撞后的动能损失

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}\frac{m_1m_2(1-e^2)(u_1-u_2)^2}{m_1+m_2}$$

①对于完全弹性碰撞，因$e = 1$故$\Delta E_k = 0$，即无动能损失，或称为动能守恒

②对于完全非弹性碰撞，因$e = 0$，故$\Delta E_k \equiv \Delta E_{kM}$，即动能损失最大。

③对于非完全弹性碰撞，因$0 < e < 1$，故动能损失介于二者之间，即$0 < \Delta E_k <$

ΔE_{kM}。

3、$m_1 = m_2 = m$, 且$u_2 = 0$的特定条件下，两滑块对心碰撞

在本次实验中，为使实验简化，同时减少需要测量的数据，以减小误差，我们使实验中所用两滑块质量近似相等，使u_2=0，在此特定条件下，让两滑块进行对心碰撞。

（1） 对完全弹性碰撞，$e = 1$

①式和②式的解为

$$\left.\begin{array}{r} v_1 = 0 \\ v_2 = u_1 \end{array}\right\} \qquad ③式$$

由③式可知，当两滑块质量相等，且第二滑块处于静止时，发生完全弹性碰撞的结果，使第一滑块静止下来，而第二滑块完全具有第一滑块碰撞前的速度。若③式得到验证，则说明完全弹性碰撞过程中动量守恒，且$e = 1$，$\Delta E_k = 0$，即动能也守恒。

但以上讨论仅是理想化的模型。若两滑块质量不严格相等、两挡光物的有效遮光宽度Δs_1即Δs_2也不严格相等，则碰撞前后的动量百分差E_1为

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

动能百分差E_2为

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

若E_1及E_2在实验误差范围之内，则说明上述结论成立。

（2） 对完全非弹性碰撞，①式和②式的解为

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

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%。

考虑到完全非弹性碰撞时可采用统一挡光物遮光，即有$\Delta s'_2 \equiv \Delta s'_1$。同样可求得其动量和动能百分差$E'_1$及$E'_2$分别为

$$E'_1 = \frac{|p'_2 - p'_1|}{p'_1} = |(1 + \frac{m_2}{m_1})\frac{\Delta t'_1}{\Delta t'_2} - 1|$$

$$E'_2 = \frac{|E'_{k2} - E'_{k1}|}{E'_{k1}} = |(1 + \frac{m_2}{m_1})(\frac{\Delta t'_1}{\Delta t'_2})^2 - 1|$$

显然，其动能损失得百分误差则为

$$E_\Delta = |2(1 + \frac{m_2}{m_1})(\frac{\Delta t'_1}{\Delta t'_2})^2 - 1|$$

若E'_1及E_Δ在其实验误差范围内，则说明上述结论成立。

二、注意事项

1、注意气垫导轨的使用:

(1) 使用时，先接通气泵，再放滑块；使用结束后，先拿下滑块，再关闭气泵。

(2) 使用前，先对气垫导轨纵向调平，使其倾角正好能够抵消空气阻力，使滑块所受合外力为 0。调节导轨水平的方法是调节底脚螺丝。

(3) 注意，尽量不要调节双脚螺丝（右方），因为调节双脚螺丝很容易导致气垫导轨横向倾斜，使滑块所受合外力不为 0。尽量调节单脚螺丝（左方），若必须调节双脚螺丝，则可先让双脚螺丝的两个螺丝都拧到最高点后，同时拧两个螺丝进行调节，以在调节的同时，保证气垫导轨的横向水平。

(4) 动态法：滑块运行过程中，其挡光物通过两个光电门的遮光时间相同，说明滑块在导轨上做匀速直线运动，则可认为气垫导轨已被调平。

(5) 在该实验中，注意使用动态法调平气垫导轨。动态法调平适用于滑块只作单方向运动的实验中。在调节过程中，消除了空气阻力的影响，所以，调节时应注意，在何种速度下做实验，就应该在该速度附近调平，而且调平时滑块的运动方向亦应与实验时所选滑块的运动方向一致。

(6) 注意滑块速度的选择，一般以$30 \sim 60\mathrm{cm/s}$为宜。滑块滑行时所受阻力与滑行速度成正比，速度大则阻力亦大。加之，速度太大时滑块与导轨端面磕碰加剧，若不小心，则可导致滑块跌落变形，故滑行速度不能太大。此外，滑行速度过小时由于气流不稳、压力不均或外界空气对流等因素，又会使测量误差增加。所以，滑块的滑行速度也不能选得太小。

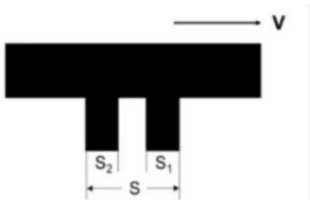
(7) 实验中应保证$u_2 = 0$的条件，为此，在第一块滑块未到达之前，先用手轻扶滑块 2（具体方法是用手指轻放在滑块 2 前端贴近导轨处，以阻止其滑动），待滑块 1 即将与 2 碰撞之前再松手，且松手时不应给滑块以初始速度（具体方法是把手指快速向前移动，以保证不给滑块 2 以初始速度）

(8) 给滑块 1 速度时要平稳，不应使滑块产生摆动（具体方法是给滑块 1 反向速度，使其触到导轨一端的弹簧，弹簧使其运动反向，由此滑块 1 得到一速度）

(9) 挡光框平面应与滑块运动方向一致，且其遮光边缘应与滑块运动方向垂直

(10) 注意用电子天平调整两滑块质量相同。

(11) 注意测量挡光框有效遮光面积时，应用如图方法测量，测得$\Delta s = S - s_2$。



(12) 两滑块的挡光框的有效遮光长度并不一定完全相等，应分别测量。

(13) 挡光框与滑块之间应固定牢固，防止碰撞时相对位置改变，影响测量精度。

(14) 进行完全弹性碰撞的实验时，注意将滑块 2 放在光电门 1 和光电门 2 的中间靠近光电门 2 处，以便测得碰撞后滑块 2 通过光电门的时间。

(15) 进行完全非弹性碰撞的实验时，注意将滑块 2 的挡光框调换位置但不取下，是光电门仅记录滑块 1 上挡光框通过两个光电门的时间。

(16) 进行完全非弹性碰撞的实验时，注意将滑块 2 放在光电门 2 的前端并保证光电门 2 测到的时间是滑块 1 和滑块 2 碰撞之后的速度，因为滑块 1 和滑

块 2 碰撞过后的速度与气垫导轨调平时的滑块速度相差较大，为减少空气阻力等外力的影响，应在滑块 1 和滑块 2 在碰撞后尽快测量滑块通过光电门 2 的时间，以减小实验误差。

三、实验数据处理及分析

质量　　滑块 1 m_1

$m_{1_1} = 130.68g$ $m_{1_2} = 130.69g$ $m_{1_3} = 130.70g$

滑块 2 m_2

$m_{2_1} = 130.69g$ $m_{2_2} = 130.70g$ $m_{2_3} = 130.68g$

A 类不确定度$u_{Am1} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(m_{1_i}-\overline{m_1})^2}{n(n-1)}} =$

$1.32\sqrt{\frac{(130.68-130.69)^2+(130.69-130.69)^2+(130.70-130.69)^2}{3*2}} = 1.32 * 0.00577g = 0.008g$

B 类不确定度$u_{Bm1} = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.006g$

合成不确定度$u_{m1} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} u_{Aj}{}^2 + \sum_{j=1}^{m} u_{Bj}{}^2} = \sqrt{0.008^2 + 0.006^2} = 0.010g$

A 类不确定度$u_{Am2} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(m_{1_i}-\overline{m_1})^2}{n(n-1)}} =$

$1.32\sqrt{\frac{(130.68-130.69)^2+(130.69-130.69)^2+(130.70-130.69)^2}{3*2}} = 1.32 * 0.00577g = 0.008g$

B 类不确定度$u_{Bm2} = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.006g$

合成不确定度$u_{m2} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} u_{Aj}{}^2 + \sum_{j=1}^{m} u_{Bj}{}^2} = \sqrt{0.008^2 + 0.006^2} = 0.010g$

$$m_1 = \overline{m_1} \pm u_{m1} = 130.690 \pm 0.010g$$
$$m_2 = \overline{m_2} \pm u_{m2} = 130.690 \pm 0.010g$$

有效遮光长度

滑块 1

S_1 /cm	s_{2_1}/cm
6.002	1.038
5.998	1.040
6.000	1.042

S_1

$\overline{S_1} = \frac{\sum_{i=1}^{3} S_{1_i}}{3} = \frac{6.002+5.998+6.000}{3} = \frac{18.000}{3} = 6.0000cm$

A 类不确定度$u_{AS1} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(S_{1_i}-\overline{S_1})^2}{n(n-1)}} =$

$1.32\sqrt{\frac{(6.002-6.0000)^2+(5.998-6.0000)^2+(6.000-6.0000)^2}{3*2}} = 1.32 * 0.00115cm = 0.0015cm$

B 类不确定度$u_{BS1} = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012cm$

合成不确定度$u_{S1}=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}{u_{Aj}}^2+\sum_{j=1}^{m}{u_{Bj}}^2}=\sqrt{0.0015^2+0.0012^2}=0.00192cm=0.0019cm$

$$S_1=\bar{x}\pm u_x=\bar{S_1}\pm u_{S1}=6.0000\pm0.0019cm$$

s_{2_1}

$\overline{s_{2_1}}=\frac{\sum_{i=1}^{3}s_{2_{1i}}}{3}=\frac{1.038+1.040+1.042}{3}=\frac{3.120}{3}=1.0400cm$

A 类不确定度$u_{As_{2_1}}=t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}}=t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(s_{2_{1i}}-\overline{s_{2_1}})^2}{n(n-1)}}=1.32\sqrt{\frac{(1.038-1.0400)^2+(1.040-1.0400)^2+(1.042-1.0400)^2}{3*2}}=1.32*0.00115=0.0015cm$

B 类不确定度$u_{Bs_{2_1}}=\frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}}=\frac{0.002}{\sqrt{3}}=0.0012cm$

合成不确定度$u_{s_{2_1}}=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}{u_{Aj}}^2+\sum_{j=1}^{m}{u_{Bj}}^2}=\sqrt{0.0015^2+0.0012^2}=0.00192cm=0.0019cm$

$$s_{2_1}=\bar{x}\pm u_x=\overline{s_{2_1}}\pm u_{s_{2_1}}=1.0400\pm0.0019cm$$

$u_{\Delta s_1}=\sqrt{{u_x}^2+{u_y}^2}=\sqrt{{u_{S1}}^2+{u_{s_{2_1}}}^2}=\sqrt{0.0019^2+0.0019^2}=0.00268=0.0027cm$

$\Delta s_1=S_1-s_{2_1}=\bar{S_1}-\overline{s_{2_1}}\pm u_{\Delta s_1}=4.9600\pm0.0027cm$

滑块 2

S_2 /cm	s_{2_2}/cm
6.000	1.038
5.998	1.040
6.002	1.042

S_2

$\bar{S_2}=\frac{\sum_{i=1}^{3}S_{2i}}{3}=\frac{6.000+5.998+6.002}{3}=\frac{18.000}{3}=6.0000cm$

A 类不确定度$u_{AS2}=t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}}=t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(S_{2i}-\bar{S_2})^2}{n(n-1)}}=1.32\sqrt{\frac{(6.000-6.0000)^2+(5.998-6.0000)^2+(6.002-6.0000)^2}{3*2}}=1.32*0.00115cm=0.0015cm$

B 类不确定度$u_{BS2}=\frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}}=\frac{0.002}{\sqrt{3}}=0.0012cm$

合成不确定度$u_{S2}=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}{u_{Aj}}^2+\sum_{j=1}^{m}{u_{Bj}}^2}=\sqrt{0.0015^2+0.0012^2}=0.00192cm=0.0019cm$

$$S_2=\bar{x}\pm u_x=\bar{S_2}\pm u_{S2}=6.0000\pm0.0019cm$$

s_{2_2}

$\overline{s_{2_2}}=\frac{\sum_{i=1}^{3}s_{2_{2i}}}{3}=\frac{1.038+1.040+1.042}{3}=\frac{3.120}{3}=1.0400cm$

A 类不确定度$u_{As_{2_2}} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}} = t_{(0.683,k)}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(s_{2_{2i}}-\overline{s_{2_2}})^2}{n(n-1)}} =$

$1.32\sqrt{\frac{(1.038-1.0400)^2+(1.040-1.0400)^2+(1.042-1.0400)^2}{3*2}} = 1.32 * 0.00115cm = 0.0015cm$

B 类不确定度$u_{Bs_{2_2}} = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012cm$

合成不确定度$u_{s_{2_2}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} u_{Aj}{}^2 + \sum_{j=1}^{m} u_{Bj}{}^2} = \sqrt{0.0015^2 + 0.0012^2} = 0.00192 =$

$0.0019cm$

$$s_{2_2} = \bar{x} \pm u_x = \overline{s_{2_2}} \pm u_{s_{2_2}} = 1.0400 \pm 0.0019cm$$

$u_{\Delta s_2} = \sqrt{u_x{}^2 + u_y{}^2} = \sqrt{u_{S2}{}^2 + u_{s_{2_2}}{}^2} = \sqrt{0.0019^2 + 0.0019^2} = 0.00268cm = 0.0027cm$

$\Delta s_2 = S_2 - s_{2_2} = \overline{S_2} - \overline{s_{2_2}} \pm u_{\Delta s_2} = 4.9600 \pm 0.0027cm$

调平速度　　$v \approx 50cm/s$

1、 完全弹性碰撞实验

数字毫秒计的 A 类不确定度$u_x = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}} = \frac{0.00001s}{\sqrt{3}} = 0.000006s$

次数	碰前		碰后		动量百分差	动能百分差	恢复系数
	$\Delta t_1/s$	$u/(m\cdot s^{-1})$	$\Delta t_2/s$	$v/(m\cdot s^{-1})$	E_1	E_2	e
1	0.10048	$u = \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{0.04960m}{0.10048s} = 0.49363\ m/s$	0.10209	$v = \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{0.04960m}{0.10209s} = 0.48584\ m/s$	$E_1 = \frac{\lvert p_2-p_1\rvert}{p_1} = \left\lvert\frac{m_2\Delta s_2\Delta t_1}{m_1\Delta s_1\Delta t_2} - 1\right\rvert = \left\lvert\frac{130.69\times0.049600\times0.10048}{130.69\times0.049600\times0.10209} - 1\right\rvert = 0.0157704$	$E_2 = \frac{\lvert E_{k2}-E_{k1}\rvert}{E_{k1}} = \left\lvert\frac{m_2\Delta s_2{}^2\Delta t_1{}^2}{m_1\Delta s_1{}^2\Delta t_2{}^2} - 1\right\rvert = \left\lvert\frac{130.69\times0.049600^2\times0.10048^2}{130.69\times0.049600^2\times0.10209^2} - 1\right\rvert = 0.0312920$	$e = \frac{v_2-v_1}{u_1-u_2} = \frac{0.48584}{0.49363} = 0.984219$
2	0.09868	$u = \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{0.04960m}{0.09868s} = 0.50263\ m/s$	0.09996	$v = \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{0.04960m}{0.09996s} = 0.49620\ m/s$	$E_1 = \frac{\lvert p_2-p_1\rvert}{p_1} = \left\lvert\frac{m_2\Delta s_2\Delta t_1}{m_1\Delta s_1\Delta t_2} - 1\right\rvert = \left\lvert\frac{130.69\times0.049600\times0.09668}{130.69\times0.049600\times0.09996} - 1\right\rvert = 0.00280112$	$E_2 = \frac{\lvert E_{k2}-E_{k1}\rvert}{E_{k1}} = \left\lvert\frac{m_2\Delta s_2{}^2\Delta t_1{}^2}{m_1\Delta s_1{}^2\Delta t_2{}^2} - 1\right\rvert = \left\lvert\frac{130.69\times0.049600^2\times0.09868^2}{130.69\times0.049600^2\times0.09996^2} - 1\right\rvert = 0.0254463$	$e = \frac{v_2-v_1}{u_1-u_2} = \frac{0.49620}{0.50263} = 0.987207$
3	0.10315	$u = \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{0.04960m}{0.10315s} = 0.48085\ m/s$	0.10478	$v = \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{0.04960m}{0.10478s} = 0.47473\ m/s$	$E_1 = \frac{\lvert p_2-p_1\rvert}{p_1} = \left\lvert\frac{m_2\Delta s_2\Delta t_1}{m_1\Delta s_1\Delta t_2} - 1\right\rvert = \left\lvert\frac{130.69\times0.049600\times0.10315}{130.69\times0.049600\times0.10478} - 1\right\rvert = 0.0155564$	$E_2 = \frac{\lvert E_{k2}-E_{k1}\rvert}{E_{k1}} = \left\lvert\frac{m_2\Delta s_2{}^2\Delta t_1{}^2}{m_1\Delta s_1{}^2\Delta t_2{}^2} - 1\right\rvert = \left\lvert\frac{130.69\times0.049600^2\times0.10315^2}{130.69\times0.049600^2\times0.10478^2} - 1\right\rvert = 0.0307768$	$e = \frac{v_2-v_1}{u_1-u_2} = \frac{0.47473}{0.48085} = 0.987273$

2、 完全非弹性碰撞试验

次	碰前	碰后	动量百分差	动能百分差	恢复系数	动能损失的百分误差

数	$\Delta t_1/s$	$u/(m\cdot s^{-1})$	$\Delta t_2/s$	$v/(m\cdot s^{-1})$	E_1	E_2	e	E_Δ
1	0.10073	$u=\frac{\Delta s_1}{\Delta t_1}=\frac{0.04960m}{0.10073s}=0.49264\ m/s$	0.20163	$v=\frac{\Delta s_1}{\Delta t_1}=\frac{0.04960m}{0.20163s}=0.24560\ m/s$	$E_1=\frac{\lvert p_2-p_1\rvert}{p_1}=\left\lvert(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}-1\right\rvert=\left\lvert(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.10073}{0.20163}-1\right\rvert=0.000843128$	$E_2=\frac{\lvert E_{k2}-E_{k1}\rvert}{E_{k1}}=\left\lvert(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{{\Delta t_1}^2}{{\Delta t_2}^2}-1\right\rvert=\left\lvert(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.10073^2}{0.20163^2}-1\right\rvert=0.500843$	$e=\frac{v_2-v_1}{u_1-u_2}=\frac{0.24560}{0.49264}=0.498538$	$E_\Delta=\left\lvert 2(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{{\Delta t_1}^2}{{\Delta t_2}^2}-1\right\rvert=\left\lvert 2(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.10073^2}{0.20163^2}-1\right\rvert=0.0017$
2	0.10283	$u=\frac{\Delta s_1}{\Delta t_1}=\frac{0.04960m}{0.10283s}=0.48235\ m/s$	0.20693	$v=\frac{\Delta s_1}{\Delta t_1}=\frac{0.04960m}{0.20693s}=0.23969\ m/s$	$E_1=\frac{\lvert p_2-p_1\rvert}{p_1}=\left\lvert(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}-1\right\rvert=\left\lvert(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.10283}{0.20693}-1\right\rvert=0.00613734$	$E_2=\frac{\lvert E_{k2}-E_{k1}\rvert}{E_{k1}}=\left\lvert(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{{\Delta t_1}^2}{{\Delta t_2}^2}-1\right\rvert=\left\lvert(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.10283^2}{0.20693^2}-1\right\rvert=0.506118$	$e=\frac{v_2-v_1}{u_1-u_2}=\frac{0.23969}{0.48235}=0.496921$	$E_\Delta=\left\lvert 2(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{{\Delta t_1}^2}{{\Delta t_2}^2}-1\right\rvert=\left\lvert 2(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.10283^2}{0.20693^2}-1\right\rvert=0.012$
3	0.09986	$u=\frac{\Delta s_1}{\Delta t_1}=\frac{0.04960m}{0.09986s}=0.49670\ m/s$	0.20095	$v=\frac{\Delta s_1}{\Delta t_1}=\frac{0.04960m}{0.20095s}=0.24683\ m/s$	$E_1=\frac{\lvert p_2-p_1\rvert}{p_1}=\left\lvert(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}-1\right\rvert=\left\lvert(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.09986}{0.20095}-1\right\rvert=0.00612092$	$E_2=\frac{\lvert E_{k2}-E_{k1}\rvert}{E_{k1}}=\left\lvert(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{{\Delta t_1}^2}{{\Delta t_2}^2}-1\right\rvert=\left\lvert(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.09986^2}{0.20095^2}-1\right\rvert=0.506102$	$e=\frac{v_2-v_1}{u_1-u_2}=\frac{0.24683}{0.49670}=0.496940$	$E_\Delta=\left\lvert 2(1+\frac{m_2}{m_1})\frac{{\Delta t_1}^2}{{\Delta t_2}^2}-1\right\rvert=\left\lvert 2(1+\frac{130.69}{130.69})\times\frac{0.09986^2}{0.20095^2}-1\right\rvert=0.012$