

# 第 108 學年度清華大學普通物理實驗(一)

☐預報 或 ☒結報 課程編號： 10810PHYS101010

實驗名稱： 碰撞實驗

系 級：電機資訊學院學士班 1 年級 組 別： 13

學 號： 108060018 姓 名： 葉承泓

組 員： 陳竑廷

實驗日期： 108 年 11 月 27 日 補作日期： 年 月 日

◎ 以下為助教記錄區

預報繳交日期	報告成績	助教簽名欄
結報繳交日期		
報告缺失紀錄		

## 六、實驗結果與分析

### (一)彈性碰撞—以同極磁鐵互斥力作為作用力

1.質量相等的滑車彈性碰撞：滑車 1 質量 $m_1$ ≐滑車 2 質量 $m_2$

表 1 以磁力當作作用力做彈性碰撞( $m_1 \doteq m_2$ )

滑車 1 質量 $m_1$ (含其上所掛之磁鐵) ≐ 0.41208 kg

滑車 2 質量 $m_2$ (含其上所掛之磁鐵) ≐ 0.41044 kg

兩滑車質量差距百分比  $m\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \doteq 0.40\%$

2 種情況	滑車 1 初速測量值 $v_{1i}(\text{cm/s})$	滑車 2 初速測量值 $v_{2i}(\text{cm/s})$	滑車 1 末速測量值 $v_{1f}(\text{cm/s})$	滑車 2 末速測量值 $v_{2f}(\text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	29.94	0	0	27.75
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	14.14	24.12	18.85	7.95

2 種情況	滑車 1 初動量實驗值 $P_{1i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 初動量實驗值 $P_{2i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 1 末動量實驗值 $P_{1f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 末動量實驗值 $P_{2f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	12.34	0	0	11.39
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	5.83	9.90	7.77	3.26

2 種情況	總系統末動量理論值 $P_{f\text{理論}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	總系統末動量實驗值 $P_{f\text{實驗}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	P 誤差百分比 (%)	恢復係數 $C_r(\%)$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	12.34	11.39	10.60	92.69
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	-4.07	-4.50		

數據分析：

情況(1)—

1. 先架設好一維滑車運動軌道—軌道水平校正：將水平儀放置於滑車軌道方向，利用調整軌道底部可調高度的三支點調整軌道的水平，使氣泡位於管中央，此時軌道即呈現水平狀態。
2. 用電子天平分別測量 2 輛裝上磁鐵的滑車之質量，即分別為 $m_1$ 、 $m_2$ (測量值(理論值))，將測量結果記錄在表 1 中

3. 如表 1 所示，計算兩滑車質量差距百分比(m%)，可發現其差距很小，故可視為相同質量的滑車
4. 將光電閘裝在一維滑車運動軌道上，1 號光電閘置於左側，而 2 號光電閘置於右側
5. 將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 1 號光電閘與 2 號光電閘之間的位置
6. 將 1 號滑車向右方推，使其與 2 號滑車互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 1(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2f}$ ；而 $v_{2i}$ 與 $v_{1f}$ 由觀察結果發現其並不運動，故記錄為 0)
7. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 1 中
8. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0(兩滑車之重力與軌道所給予之正向力相互抵銷，而且我們假設軌道與各滑車之間的摩擦力小到可以忽略不計)，故由 $\overrightarrow{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恒)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即 $\overrightarrow{P_{1i}} + \overrightarrow{P_{2i}}$ (觀察其碰撞前(後)運動方向，若定朝右方為正向，則若向量方向朝右，計算時用正的其量值帶入純量式作計算；而若向量方向朝左，則計算時用負的其量值帶入純量式作計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
9. 計算 $\overrightarrow{P_{1f}} + \overrightarrow{P_{2f}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )
10. 恢復係數 $C_r = \left| \frac{u_f \cdot \hat{n}}{u_i \cdot \hat{n}} \right|$ 。其中 $u_i$ 是碰撞前的接近速度， $u_f$ 為碰撞後的分離速度， $\hat{n}$ 是與衝擊線(兩個物體接觸時連結其各自質心的直線)同線、任意設定的單位向量，在此處只需計算 $\left| \frac{P_{2f}}{P_{1i}} \right|$ 即為恢復係數( $C_r$ )

情況(2)—

1. 改成將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 2 號光電閘右方
2. 同時將 1 號滑車向右方推、2 號滑車向左方推，使其互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 1(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P1.2 記錄為 $v_{1f}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2i}$ ；P2.2 記錄為 $v_{2f}$ )
3. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 1 中
4. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由 $\overrightarrow{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恒)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即 $\overrightarrow{P_{1i}} + \overrightarrow{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )

5. 計算  $\overline{P_{1f}} + \overline{P_{2f}}$  (計算方式亦為定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值 ( $P_{f\text{實驗}}$ )

6. 如表 1，P 誤差 =  $\frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$

## 2. 質量不相等的滑車彈性碰撞：滑車 1 質量 $m_1 >$ 滑車 2 質量 $m_2$

表 2 以磁力當作作用力做彈性碰撞 ( $m_1 > m_2$ )

滑車 1 質量  $m_1$  (含其上所掛之磁鐵及砝碼)  $\doteq 0.5192 \text{ kg}$

滑車 2 質量  $m_2$  (含其上所掛之磁鐵)  $\doteq 0.41044 \text{ kg}$

1 種情況	滑車 1 初速測量值 $v_{1i}(\text{cm/s})$	滑車 2 初速測量值 $v_{2i}(\text{cm/s})$	滑車 1 末速測量值 $v_{1f}(\text{cm/s})$	滑車 2 末速測量值 $v_{2f}(\text{cm/s})$
$v_{1i} \neq 0$ $v_{2i} \neq 0$	27.82	29.87	16.07	25.61

1 種情況	滑車 1 初動量實驗值 $P_{1i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 初動量實驗值 $P_{2i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 1 末動量實驗值 $P_{1f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 末動量實驗值 $P_{2f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$
$v_{1i} \neq 0$ $v_{2i} \neq 0$	14.44	12.26	8.34	10.51

1 種情況	總系統末動量理論值 $P_{f\text{理論}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	總系統末動量實驗值 $P_{f\text{實驗}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	P 誤差百分比(%)
$v_{1i} \neq 0$ $v_{2i} \neq 0$	2.18	2.17	-0.75

數據分析：

1. 先架設好一維滑車運動軌道—軌道水平校正
2. 用電子天平分別測量 2 輛裝上磁鐵的滑車之質量 (但 1 號滑車上還要加上砝碼，使其值量明顯大於 2 號滑車的質量)，即分別為  $m_1$ 、 $m_2$  (測量值 (理論值))，將測量結果記錄在表 2 中，可發現  $m_1 > m_2$
3. 將光電閘裝在一維滑車運動軌道上，1 號光電閘置於左側，而 2 號光電閘置於右側
4. 將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 2 號光電閘右方
5. 同時將 1 號滑車向右方推、2 號滑車向左方推，使其互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 2 ( $P_{1.1}$  記錄為  $v_{1i}$ ； $P_{1.2}$  記錄為  $v_{1f}$ ； $P_{2.1}$  記錄為  $v_{2i}$ ； $P_{2.2}$  記錄為  $v_{2f}$ )
6. 由  $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$  可求出碰撞前後各滑車的動量值 (實驗值)，記錄在表 2 中

7. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由  $\overline{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$  可得知  $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恆)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即  $\overline{P_{1i}} + \overline{P_{2i}}$  (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
8. 計算  $\overline{P_{1f}} + \overline{P_{2f}}$  (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )
9. 如表 2，P 誤差 =  $\frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$

## (二) 彈性碰撞—以橡皮筋的反彈力作為作用力

1. 質量相等的滑車彈性碰撞：滑車 1 質量  $m_1 \doteq$  滑車 2 質量  $m_2$

表 3 以橡皮筋的反彈力當作作用力做彈性碰撞( $m_1 \doteq m_2$ )

滑車 1 質量  $m_1$  (含其上所掛之橡皮筋)  $\doteq$  0.393 kg

滑車 2 質量  $m_2$  (含其上所掛之碰撞插頭)  $\doteq$  0.38978 kg

兩滑車質量差距百分比  $m\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \doteq$  0.82%

2 種情況	滑車 1 初速測量值 $v_{1i}(\text{cm/s})$	滑車 2 初速測量值 $v_{2i}(\text{cm/s})$	滑車 1 末速測量值 $v_{1f}(\text{cm/s})$	滑車 2 末速測量值 $v_{2f}(\text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	25.66	0	0	23.89
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	33.54	40.13	36.46	30.48

2 種情況	滑車 1 初動量實驗值 $P_{1i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 初動量實驗值 $P_{2i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 1 末動量實驗值 $P_{1f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 末動量實驗值 $P_{2f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	10.08	0	0	9.31
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	13.18	15.64	14.33	11.88

2 種情況	總系統末動量理論值 $P_{f\text{理論}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	總系統末動量實驗值 $P_{f\text{實驗}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	P 誤差百分比(%)	恢復係數 $C_r(\%)$
(1) $v_{1i} \neq 0$	10.08	9.31	-7.66	93.10

且 $v_{2i} = 0$				
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	-2.46	-2.45	-0.50	

數據分析：

情況(1)—

1. 先架設好一維滑車運動軌道—軌道水平校正
2. 用電子天平分別測量 2 輛滑車之質量(其中滑車 1 上掛上橡皮筋秤重，而滑車 2 上掛上碰撞插頭秤重)，即分別為  $m_1$ 、 $m_2$ (測量值(理論值))，將測量結果記錄在表 3 中
3. 如表 3 所示，計算兩滑車質量差距百分比(m%)，可發現其差距很小，故可視為相同質量的滑車
4. 將光電閘裝在一維滑車運動軌道上，1 號光電閘置於左側，而 2 號光電閘置於右側
5. 將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 1 號光電閘與 2 號光電閘之間的位置
6. 將 1 號滑車向右方推，使其與 2 號滑車互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 3(P1.1 記錄為  $v_{1i}$ ；P2.1 記錄為  $v_{2f}$ ；而  $v_{2i}$  與  $v_{1f}$  由觀察結果發現其並不運動，故記錄為 0)
7. 由  $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$  可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 3 中
8. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由  $\overline{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$  可得知  $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恒)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即  $\overline{P_{1i}} + \overline{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
9. 計算  $\overline{P_{1f}} + \overline{P_{2f}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )

$$10. \text{如表 3, } P \text{ 誤差} = \frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$$

$$11. \text{計算恢復係數 } C_r = \left| \frac{P_{2f}}{P_{1i}} \right|$$

情況(2)—

1. 改成將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 2 號光電閘右方
2. 同時將 1 號滑車向右方推、2 號滑車向左方推，使其互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 3(P1.1 記錄為  $v_{1i}$ ；P1.2 記錄為  $v_{1f}$ ；P2.1 記錄為  $v_{2i}$ ；P2.2 記錄為  $v_{2f}$ )
3. 由  $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$  可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 3 中

4. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由  $\overline{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$  可得知  $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恆)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即  $\overline{P_{1i}} + \overline{P_{2i}}$  (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
5. 計算  $\overline{P_{1f}} + \overline{P_{2f}}$  (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )
6. 如表 3，P 誤差 =  $\frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$

## 2. 質量不相等的滑車彈性碰撞：滑車 1 質量 $m_1 >$ 滑車 2 質量 $m_2$

表 4 以橡皮筋的反彈力當作作用力做彈性碰撞( $m_1 > m_2$ )

滑車 1 質量  $m_1$  (含其上所掛之橡皮筋及砝碼)  $\doteq 0.50012 \text{ kg}$

滑車 2 質量  $m_2$  (含其上所掛之碰撞插頭)  $\doteq 0.38978 \text{ kg}$

2 種情況	滑車 1 初速測量值 $v_{1i}(\text{cm/s})$	滑車 2 初速測量值 $v_{2i}(\text{cm/s})$	滑車 1 末速測量值 $v_{1f}(\text{cm/s})$	滑車 2 末速測量值 $v_{2f}(\text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	116.69	0	24.52	112.74
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	17.62	25.73	17.05	19.23

2 種情況	滑車 1 初動量實驗值 $P_{1i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 初動量實驗值 $P_{2i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 1 末動量實驗值 $P_{1f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 末動量實驗值 $P_{2f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	58.36	0	12.26	43.94
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	8.81	8.53	10.03	7.50

2 種情況	總系統末動量理論值 $P_{f\text{理論}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	總系統末動量實驗值 $P_{f\text{實驗}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	P 誤差百分比(%)
-------	---	---	------------

(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	58.36	56.21	-3.69
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	-1.22	-1.03	-15.23

數據分析：

情況(1)——

1. 先架設好一維滑車運動軌道—軌道水平校正
2. 用電子天平分別測量 2 輛滑車之質量(其中滑車 1 上掛上橡皮筋以及砝碼(使其質量明顯大於 2 號滑車的質量)秤重，而滑車 2 上掛上碰撞插頭秤重)，即分別為 $m_1$ 、 $m_2$ (測量值(理論值))，將測量結果記錄在表 4 中，可發現 $m_1 > m_2$
3. 將光電閘裝在一維滑車運動軌道上，1 號光電閘置於左側，而 2 號光電閘置於右側
4. 將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 1 號光電閘與 2 號光電閘之間的位置
5. 將 1 號滑車向右方推，使其與 2 號滑車互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 4(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2f}$ ；P2.2 記錄為 $v_{1f}$ ；而 $v_{2i}$ 由觀察發現其並不運動，故記錄為 0)
6. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 4 中
7. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由 $\overline{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恆)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即 $\overline{P_{1i}} + \overline{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
8. 計算 $\overline{P_{1f}} + \overline{P_{2f}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )

9. 如表 4，P 誤差 $= \frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$

情況(2)——

1. 改成將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 2 號光電閘右方
2. 同時將 1 號滑車向右方推、2 號滑車向左方推，使其互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 4(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P1.2 記錄為 $v_{1f}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2i}$ ；P2.2 記錄為 $v_{2f}$ )
3. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 4 中
4. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由 $\overline{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恆)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為



碰撞前之系統總動量，即 $\overline{P_{1i}} + \overline{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f_{理論}}$ )

5. 計算 $\overline{P_{1f}} + \overline{P_{2f}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f_{實驗}}$ )

6. 如表 4，P 誤差 $=\frac{P_{f_{實驗}} - P_{f_{理論}}}{P_{f_{理論}}} \times 100\%$

### (三) 完全非彈性碰撞—以針刺入黏土使兩滑車黏在一起運動

1. 質量相等的滑車完全非彈性碰撞：滑車 1 質量 $m_1 \doteq$  滑車 2 質量 $m_2$

表 5 完全非彈性碰撞( $m_1 \doteq m_2$ )

滑車 1 質量 $m_1$ (含其上所掛之針)  $\doteq$  0.39092 kg

滑車 2 質量 $m_2$ (含其上所掛之黏土團)  $\doteq$  0.3896 kg

兩滑車質量差距百分比  $m\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \doteq$  0.33%

2 種情況	滑車 1 初速測量值 $v_{1i}(\text{cm/s})$	滑車 2 初速測量值 $v_{2i}(\text{cm/s})$	滑車 1 末速測量值 $v_{1f}(\text{cm/s})$	滑車 2 末速測量值 $v_{2f}(\text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	57.76	0	27.63	27.63
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	87.06	41.41	21.89	21.89

2 種情況	滑車 1 初動量實驗值 $P_{1i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 初動量實驗值 $P_{2i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 1 末動量實驗值 $P_{1f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 末動量實驗值 $P_{2f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	22.58	0	10.80	10.76
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	34.03	16.13	8.56	8.53

2 種情況	總系統末動量理論值 $P_{f_{理論}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	總系統末動量實驗值 $P_{f_{實驗}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	P 誤差百分比(%)
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	22.58	21.57	-4.49
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	17.90	17.09	-4.55

數據分析：

情況(1)——

1. 先架設好一維滑車運動軌道——軌道水平校正
2. 用電子天平分別測量 2 輛滑車之質量(其中滑車 1 上掛上針秤重，而滑車 2 上掛上黏土團秤重)，即分別為 $m_1$ 、 $m_2$ (測量值(理論值))，將測量結果記錄在表 5 中
3. 如表 5 所示，計算兩滑車質量差距百分比(m%)，可發現其差距很小，故可視為相同質量的滑車
4. 將光電閘裝在一維滑車運動軌道上，1 號光電閘置於左側，而 2 號光電閘置於右側
5. 將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 1 號光電閘與 2 號光電閘之間的位置
6. 將 1 號滑車向右方推，使其與 2 號滑車互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 5(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2f}$ ；而因為碰撞後兩滑車相黏，故其速度相同，因此 $v_{1f} = v_{2f}$ ；另外， $v_{2i}$ 由觀察發現其並不運動，故記錄為 0)
7. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 5 中
8. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由 $\overrightarrow{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恒)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即 $\overrightarrow{P_{1i}} + \overrightarrow{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
9. 計算 $\overrightarrow{P_{1f}} + \overrightarrow{P_{2f}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )

10. 如表 5，P 誤差 =  $\frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$

情況(2)——

1. 改成將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 2 號光電閘右方
2. 同時將 1 號滑車向右方推、2 號滑車向左方推，使其互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 5(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2i}$ ；P2.2 記錄為 $v_{2f}$ ；而因為碰撞後兩滑車相黏，故其速度相同，因此 $v_{1f} = v_{2f}$ )
3. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 5 中
4. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由 $\overrightarrow{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恒)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即 $\overrightarrow{P_{1i}} + \overrightarrow{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )

5. 計算  $\overline{P_{1f}} + \overline{P_{2f}}$  (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值 ( $P_{f_{\text{實驗}}}$ )

6. 如表 5，P 誤差 =  $\frac{P_{f_{\text{實驗}}} - P_{f_{\text{理論}}}}{P_{f_{\text{理論}}}} \times 100\%$

## 2. 質量不相等的滑車完全非彈性碰撞：滑車 1 質量 $m_1 >$ 滑車 2 質量 $m_2$

表 6 完全非彈性碰撞 ( $m_1 > m_2$ )

滑車 1 質量  $m_1$  (含其上所掛之針及砝碼)  $\doteq 0.49804 \text{ kg}$

滑車 2 質量  $m_2$  (含其上所掛之黏土團)  $\doteq 0.3896 \text{ kg}$

2 種情況	滑車 1 初速測量值 $v_{1i}(\text{cm/s})$	滑車 2 初速測量值 $v_{2i}(\text{cm/s})$	滑車 1 末速測量值 $v_{1f}(\text{cm/s})$	滑車 2 末速測量值 $v_{2f}(\text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	55.52	0	29.98	29.98
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	95.6	38.19	36.54	36.54

2 種情況	滑車 1 初動量實驗值 $P_{1i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 初動量實驗值 $P_{2i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 1 末動量實驗值 $P_{1f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 末動量實驗值 $P_{2f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	27.65	0	14.93	11.68
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	47.61	14.88	18.20	14.24

2 種情況	總系統末動量理論值 $P_{f_{\text{理論}}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	總系統末動量實驗值 $P_{f_{\text{實驗}}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	P 誤差百分比(%)
(1) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	27.65	26.61	-3.76
(2) $v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} \neq 0$	32.73	32.43	-0.91

數據分析：

情況(1)—

1. 先架設好一維滑車運動軌道—軌道水平校正
2. 用電子天平分別測量 2 輛滑車之質量(其中滑車 1 上掛上針以及砝碼(使其質量明顯大於 2 號滑車的質量)秤重，而滑車 2 上掛上黏土團秤重)，即分別為  $m_1$ 、 $m_2$ (測量值

(理論值))，將測量結果記錄在表 6 中，可發現 $m_1 > m_2$

3. 將光電閘裝在一維滑車運動軌道上，1 號光電閘置於左側，而 2 號光電閘置於右側
4. 將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 1 號光電閘與 2 號光電閘之間的位置
5. 將 1 號滑車向右方推，使其與 2 號滑車互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 6(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2f}$ ；而因為碰撞後兩滑車相黏，故其速度相同，因此 $v_{1f} = v_{2f}$ ；另外， $v_{2i}$ 由觀察發現其並不運動，故記錄為 0)
6. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 6 中
7. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由 $\overrightarrow{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恆)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即 $\overrightarrow{P_{1i}} + \overrightarrow{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
8. 計算 $\overrightarrow{P_{1f}} + \overrightarrow{P_{2f}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )

9. 如表 6，P 誤差 $= \frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$

情況(2)——

1. 改成將 1 號滑車放置於 1 號光電閘左方，而 2 號滑車放置於 2 號光電閘右方
2. 同時將 1 號滑車向右方推、2 號滑車向左方推，使其互相碰撞，記錄下光電閘螢幕上所顯示的數值於表 6(P1.1 記錄為 $v_{1i}$ ；P2.1 記錄為 $v_{2i}$ ；P2.2 記錄為 $v_{2f}$ ；而因為碰撞後兩滑車相黏，故其速度相同，因此 $v_{1f} = v_{2f}$ )
3. 由 $P_{1i} = m_1 v_{1i}$ 、 $P_{2i} = m_2 v_{2i}$ 、 $P_{1f} = m_1 v_{1f}$ 、 $P_{2f} = m_2 v_{2f}$ 可求出碰撞前後各滑車的動量量值(實驗值)，記錄在表 6 中
4. 理論上因為此系統所受之淨外力(合力)量值為 0，故由 $\overrightarrow{F_{\text{合力}}} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{0}$ 可得知 $\Delta \vec{P} = \vec{0}$ ，所以碰撞前後系統總動量不變(動量守恆)，因此我們可以計算碰撞後之系統總動量為碰撞前之系統總動量，即 $\overrightarrow{P_{1i}} + \overrightarrow{P_{2i}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量理論值( $P_{f\text{理論}}$ )
5. 計算 $\overrightarrow{P_{1f}} + \overrightarrow{P_{2f}}$ (計算方式亦為觀察其碰撞前(後)運動方向，定朝右為正向、朝左方為負向，將值帶入純量式中做計算)，此為總系統末動量實驗值( $P_{f\text{實驗}}$ )

如表 6，P 誤差 $= \frac{P_{f\text{實驗}} - P_{f\text{理論}}}{P_{f\text{理論}}} \times 100\%$

(四) 以手機攝影功能錄下整個運動過程，再匯入到 Tracker 軟體進行運動分析

表 7 以 Tracker 軟體分析實驗(一) 1. 表 1 (1)的運動數據

(此表格由表 1 擷取情況(1)而來)

滑車 1 質量 $m_1$ (含其上所掛之磁鐵)  $\doteq$  0.41208 kg

滑車 2 質量 $m_2$ (含其上所掛之磁鐵)  $\doteq$  0.41044 kg

兩滑車質量差距百分比  $m\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \doteq$  0.40%

情況	滑車 1 初速測量值 $v_{1i}(\text{cm/s})$	滑車 2 初速測量值 $v_{2i}(\text{cm/s})$	滑車 1 末速測量值 $v_{1f}(\text{cm/s})$	滑車 2 末速測量值 $v_{2f}(\text{cm/s})$
$v_{1i} \neq 0$ 且 $v_{2i} = 0$	29.94	0	0	27.75

滑車 1 初動量實驗值 $P_{1i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 初動量實驗值 $P_{2i}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 1 末動量實驗值 $P_{1f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	滑車 2 末動量實驗值 $P_{2f}(\text{kg} \times \text{cm/s})$
12.34	0	0	11.39

總系統末動量理論值 $P_{f\text{理論}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	總系統末動量實驗值 $P_{f\text{實驗}}(\text{kg} \times \text{cm/s})$	恢復係數 $C_r(\%)$
12.34	11.39	92.69

圖 1 Tracker 軟體分析之滑車 1 之 x-t 圖

圖 2 滑車 1 之 x-t 圖擷取斜直線部分

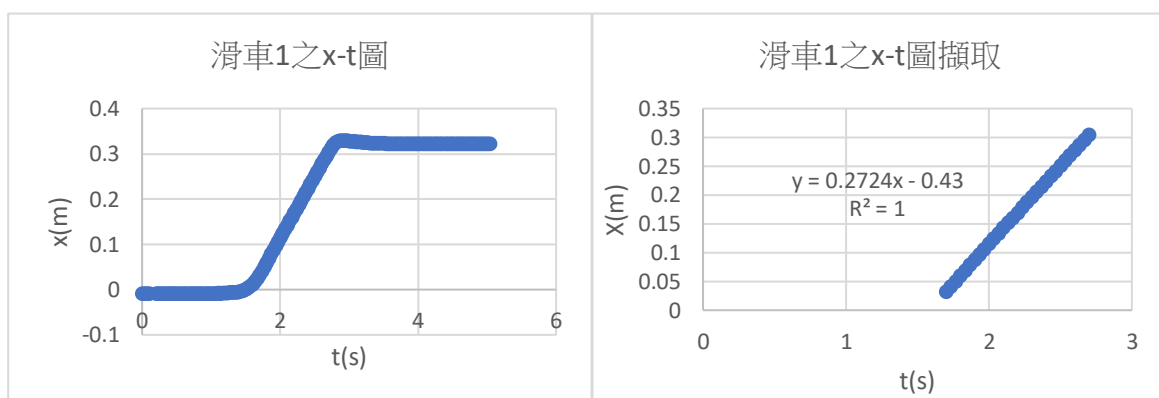


圖 3 Tracker 軟體分析之滑車 2 之 x-t 圖

圖 4 滑車 2 之 x-t 圖擷取斜直線部分

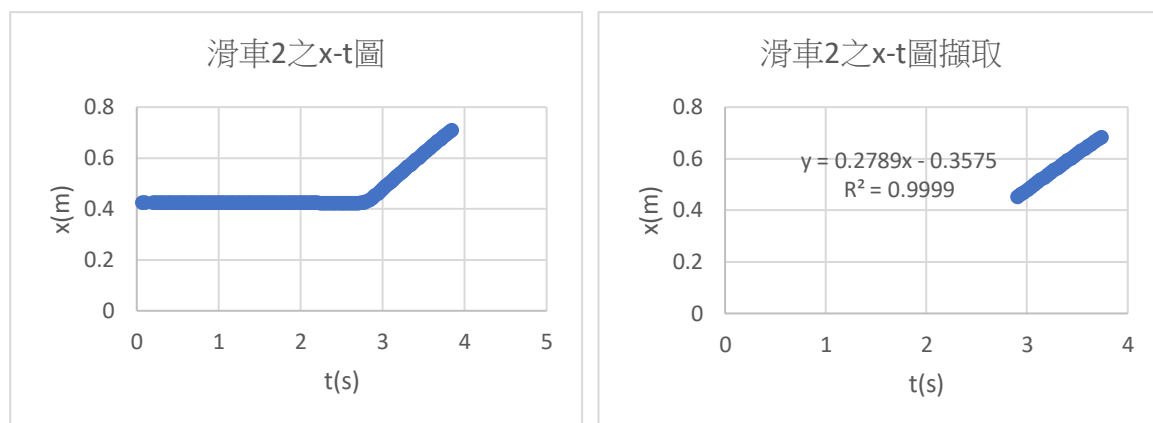


圖 5 兩滑車碰撞過程之 x-t 圖

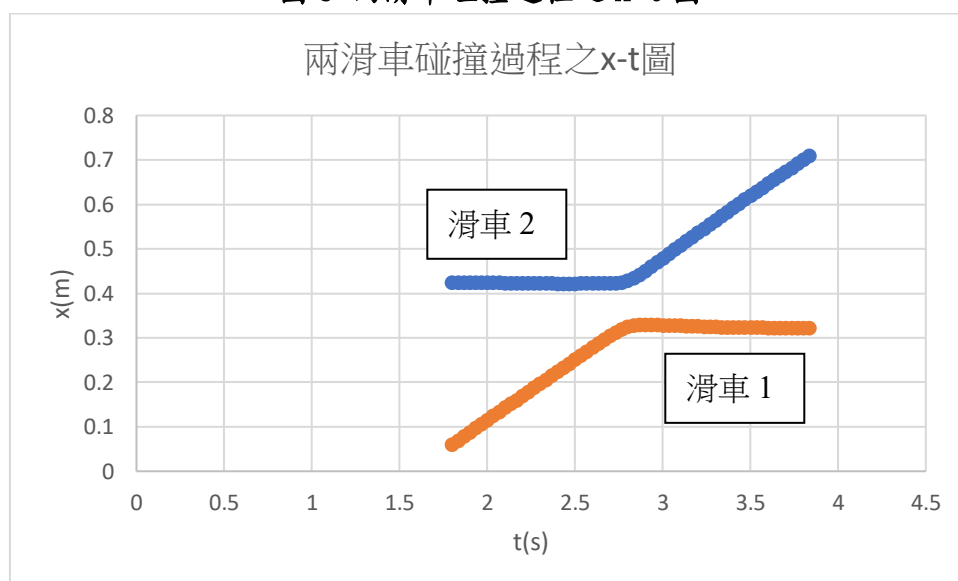


表 8 由光電閘與軟體(Tracker、Excel)分析同一碰撞運動所得到的末速度差異比較

光電閘所測得之 $v_{1f}(\text{m/s})$	軟體分析所計算回歸直 線斜率得到之 $v_{1f}(\text{m/s})$	$v_{1f}$ 差異百分比
0.2994	0.2724	9.02%

光電閘所測得之 $v_{2f}(\text{m/s})$	軟體分析所計算回歸直 線斜率得到之 $v_{2f}(\text{m/s})$	$v_{2f}$ 差異百分比
0.2775	0.2789	0.50%

數據分析：

1. 在此我們選取實驗(一)第 1. 個實驗中表 1 的情況(1)的實驗初始值(原數據單位是 cm/s，在此轉換成 m/s)，同時用光電閘以及用手機錄影整個運動過程後匯入 Tracker 軟體進行分析(相同一次的碰撞運動)
2. 利用 Tracker 軟體的「自動追蹤」功能，可迅速又方便地追蹤滑車上某特定點的運動軌跡，分別追蹤兩滑車在影片中的運動軌跡
3. 在坐標軸(x 軸平行軌道方向)與長度校正後，我們有各個影格處滑車所在的位置，將時間及位置資料匯入 Excel 後進行分析及畫圖，其位置與時間的關係可得知(即  $x(t)$ )，如上圖 1 至圖 5 所示
4. 理論上順時速度  $v = \frac{dx}{dt}$ ，故  $x-t$  圖的回歸直線斜率即為滑車的速度，故可求得  $v_{1f}$  與  $v_{2f}$  的軟體分析實驗值

5. 如表 8 所示， $v_{1f}$  差異  $= \frac{v_{1f}(\text{斜率}) - v_{1f}(\text{光電閘})}{v_{1f}(\text{光電閘})} \times 100\%$

6. 如表 8 所示， $v_{2f}$  差異  $= \frac{v_{2f}(\text{斜率}) - v_{2f}(\text{光電閘})}{v_{2f}(\text{光電閘})} \times 100\%$

## 七、問題與討論

**Q1：此實驗中可能引起誤差的因素有哪些？**

**A1：1. 儀器測量精確度：**

- (1) 在以電子天平測量  $m_1$  及  $m_2$  時，儀器精確度只到 0.1 公克(小數點後 4 位)的程度，但是實際數值可能超過小數點後 4 位，因此也會導致誤差
- (2) 以光電閘連接多功能光電計時(紀錄)器測量  $v$  時，實際上的數值可能超過小數點後 4 位，但儀器卻只精確到 0.1mm/s(小數點後 4 位)的層級，因此小數點後第 4 位為估計值，更後面的位數也就是造成誤差的原因之一
- (3) 用手機錄影後匯入軟體分析時，自動追蹤功能可能無法定位到滑車上某點的精確(確切)位置，而手機拍攝角度也造成螢幕上依比例測量出來的長度與實際不符(有差異)

**2. 觀測記錄者觀測之精確度(人為判斷誤差)：**

- (1) 軌道不水平：架設器材時，用氣泡式水平儀調整軌道的水平(為了使滑車在鉛直方向所受外力和為 0 而不向特定某側滑動)時，氣泡可能不是恰位於水平儀正中心，但我們卻認為已達水平，這使得測量值與理論值之間有差異(詳細討論在 Q6)
- (2) 儀器裝置並沒有安裝得很精確，例如光電閘的遮光片開口方向應與軌道保持垂直，但因為是手動調整，可能會因為偏轉(不正)一個角度使光電閘被遮光的時間縮短，導致測量不準確

3. 理想狀態下，滑車的輪子是以純滾動的方式行進在軌道上，此時輪子所受到之軌道給予的摩擦力為靜摩擦力，因為輪子上與地面接觸的那一點，與地面之間並沒有

相對運動(可視為位移為 0)，因此靜摩擦力做功為 0，滑車所具有的能量不變。但實際上，滑車的輪子與軌道之間有動摩擦力作用(假設軌道與輪子之間的動摩擦係數為 $\mu_k$ ，則動摩擦力為 $f_k = N\mu_k = mg\mu_k$ )，這個摩擦力作用在滑車上會消耗掉滑車的能量(動

能)，使得移動速率變慢(因為 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ，又滑車質量  $m$  保持固定不變，故當 $E_k$ 下降

時， $v$  值也跟著下降)，而滑車動量  $P=mv$ ，又滑車質量  $m$  保持固定不變，故  $P$  值下降，這會使得實際上所測得之系統總動量在碰撞前後不守恆(雖然在碰撞前一瞬間與後一瞬間，摩擦力所造成的影響(其所作的負功)幾乎為 0，但因為我們所測量到的數據是在碰撞前與碰撞後一段時間，等滑車經過光電閘所能偵測到的區域時才測量其速度，故在測量時的總動量已並非恰好為碰撞時的系統總動量了)。

**Q<sub>2</sub>：在碰撞過程中，空氣層的黏滯摩擦對動量守恆的結論有何影響？**

**A<sub>2</sub>：**在碰撞前一瞬間與後一瞬間，空氣阻力(包含空氣對滑車所施予的黏滯力或摩擦力)所造成的影響(其所作的負功)幾乎為 0(因為時間實在是太短了，而且其力量又不大，必須在較長時間作用下才会有較顯著的影響)，但因為我們所測量到的數據是在碰撞前與碰撞後一段時間，等滑車經過光電閘所能偵測到的區域時才測量其速率，故在測量時的總動量已並非恰好為碰撞時的系統總動量了。故在兩滑車碰撞的前後一瞬間的動量是守恆的，但實際上我們所測得的動量數據除了有實驗誤差的影響外，也因為滑車在到達光電閘途中所受到的阻力影響其能量，使得動量下降，故我們會發現碰撞前後的動量不同，而可能認為動量在碰撞瞬間並不守恆。

**Q<sub>3</sub>：以橡皮繩或磁鐵做彈性碰撞，兩者的結果是否相同？那一種較準確？請說明原因。**

**A<sub>3</sub>：**

- (1) 理論上若我們假設此運動為「彈性碰撞」時，就代表我們忽略掉所有可能導致動量偏差的原因，而讓理論而言動量與動能守恆，因此不管以何種方式在兩滑車之間施予作用力產生碰撞現象，其結果(兩滑車所測得之末速度、兩滑車是否在碰撞前後動量守恆等等)皆相同(因為動量及能量守恆時，初速度及滑車質量又固定的情況下，兩滑車的末速度只會有一個解，且此解與兩滑車之間作用力無關)
- (2) 若我們不先假設其為「彈性碰撞」運動時，則因為磁鐵是超距力，其作用在滑車上時不需透過滑車之間的接觸，因此若滑車速度不會太快時(若滑車互相靠近的速度太快，詳細討論內容在 Q<sub>7</sub>)，滑車之間的「碰撞」事實上根本就沒有接觸到(因此為廣義的碰撞)，所以並不會有因為碰撞(狹義的接觸式碰撞)而產生之能量散失(以熱的形式)；而以橡皮筋的反彈力作為兩滑車之間的作用力時，因為碰撞插頭會接觸到橡皮筋，因此會產生出碰撞(狹義的接觸式碰撞)的能量損耗。另外，橡皮筋在伸縮時也會有熱能耗損，也是造成系統能量下降的原因之一。綜合上述可知，利用磁鐵做碰撞實驗所散失(消耗)的能量較使用橡皮筋時還要少，故實驗結果理應較接近「彈性碰撞」的理論結果(也因此較準確)。
- (3) 實際上的數據顯示出利用橡皮筋所做的「 $m_1 \cong m_2$  且  $v_{1i} \neq 0$ 、 $v_{2i} = 0$ 」所得到的恢復係數( $C_r$ )值利用磁鐵做的較接近 1，與上述理論並不相符，我認為是因為我們只測了一組數據就來比較，其中可能因為實驗誤差而導致大小關係改變。因此若要真



正比較何者較準確(恢復係數較接近 1)，我們應該要重複多做幾次相同實驗再取平均值，才能得到較正確的答案。

**Q4：假定我們可以放置少許火藥在滑車緩衝彈簧前檔上，並且使它在碰撞的瞬間爆炸而將兩個滑車推離開，那麼動量仍能守恆嗎？動能是否守恆？請說明原因。**

**A4：**因為我們所考慮的系統是由兩個滑車所組成的系統，必須當此系統所受之淨外力(合力)量值為 0 時，其才會滿足動量守恆的條件，也才會發生碰撞前後動量相等的情形。而在此處的火藥並不在系統中，因此其爆炸威力對兩個滑車所施予的力算是系統的外力，故此時系統所受淨外力(合力)不為 0，動量在碰撞前後並不守恆(因為爆炸與碰撞在同一時間發生)。而因為其爆炸的威力「將兩個滑車推離開」，因此兩滑車的運動速率皆增加，又滑車質量不變(為固定值)，所以動能會增加而不守恆。

**Q5：時間間隔之準確性對「牛頓運動定律」的實驗是非常重要的，本實驗卻未強調要先作時間校正，為什麼？**

**A5：**因為光電計時系統在測量時，光電閘會測量遮光擋板的 3cm 孔隙經過某固定點所花費的時間間隔 $\Delta t$ ，進而推算出滑車經過光電閘時的速率為 $\frac{3}{\Delta t}\text{cm}$ 。因為其在測量時就已經測量了「時間間隔」，因此不論這段時間間隔的起始時間點為何，其所求得之速率皆相同(因為速率為 $v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$ ，與 $\Delta t$ 起始時間點無關，而是時間間隔才有關)，所以並不需要做時間校正即可。

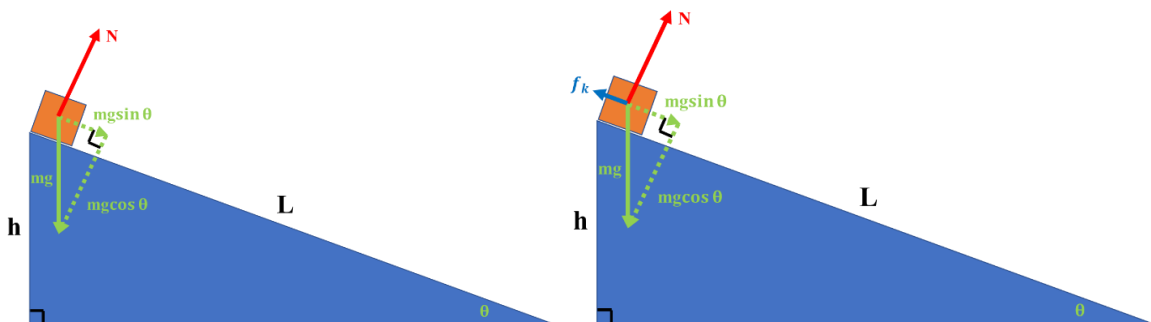
**Q6：假使軌道不水平，則會導致實驗誤差：L 長的軌道，在軌道兩端高度差 h，且無其他人為的外力作用下，使質量為 M 的物體從軌道較高的一端放手，請問物體如何運動？加速度為何？當運動體到達軌道較低的一端會獲得的速度為何？**

**A6：**1. 若軌道光滑無摩擦力，如下左圖所示，則 $\sin \theta = \frac{h}{L}$ ， $N=mg\cos \theta$ ，因此

(1) 合力為  $mg\sin \theta$  為定值，故物體作等加速度運動

(2) 由  $F=ma=mg\sin \theta \Rightarrow a = g \sin \theta$

(3) 由  $v^2 = v_0^2 + 2aS \Rightarrow v = \sqrt{0 + 2gL\sin \theta} \Rightarrow v = \sqrt{2gL\sin \theta}$



2. 若軌道與物體之間的摩擦力較大不可忽略時，如上右圖所示。若兩者之間的動摩擦係數為 $\mu_k$ ，此時 $\sin \theta = \frac{h}{L}$ ， $N=mg\cos \theta$ ， $f_k = mg\mu_k \cos \theta$ ，因此

(1) 合力為  $mg\sin \theta - mg\mu_k \cos \theta$  為定值，故物體作等加速度運動

(2) 由  $F=ma=mg\sin \theta - mg\mu_k \cos \theta \Rightarrow a = g \sin \theta - g\mu_k \cos \theta$

$$(3) \text{ 由 } v^2 = v_0^2 + 2aS \Rightarrow v = \sqrt{0 + 2L(mg \sin \theta - mg\mu_k \cos \theta)} \Rightarrow v =$$

$$\sqrt{2mgL \sin \theta - 2mg\mu_k L \cos \theta}$$

**Q7：用磁鐵作碰撞時，為什麼應特別注意速度不可太大？**

**A7：** 因為若兩車互相接近的相對速度太大時，磁鐵的磁力(排斥力)作用來不及將速率減少到 0(加速度值不夠大)，會使兩車接觸而碰撞，而會有因碰撞而損失的熱能散失

掉，讓系統能量(動能)下降，又因為  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ，滑車質量  $m$  保持固定不變，當  $E_k$  下降時， $v$  值也跟著下降，而滑車動量  $P=mv$ ，又滑車質量  $m$  保持固定不變，故  $P$  值也隨之下降，這會導致動量不守恆，也導致實驗值與理論值之間的誤差。也可能因為快速碰撞而使滑車脫離軌道，讓實驗得重新來過。

**Q8：請舉出日常生活中、生物與化學的碰撞例子各一個。**

**A8：**

1. 日常生活中—撞球運動：典型的例子是「撞球運動」，當我們用母球去打 8 號球時，兩球質量可視為相等(因為其差異不大)，而母球一開始有速度去撞靜止的 8 號球，此即為「六、實驗結果與分析」中的「(一)彈性碰撞」中的「1.」「表 1」「(1)」所描述的情形—最後兩球的速度會交換(母球變為幾乎靜止，而 8 號球

2. 化學—

(1)布朗運動：水分子在運動過程中相互碰撞而導致路徑成折線偏移的情形

八、心得及建議

(2) 中子減速劑：因為質量最小的原子核(質子)和中子的質量十分接近，故碰撞後可幾乎完全交換速度，而成功使得中子減速

3. 生物—當質量小的人撞到質量大的人(靜止)時，質量大的人幾乎無動於衷，而質量小的人卻被反彈回來；但是當質量大的人撞到質量小的人(靜止)時，質量大的人的速度幾乎沒有改變，而質量小的人卻會飛出去

八、心得及建議

**1.有關「【Fun 科學】碰撞  $\pi$  解答(最佑屬性的解法喔~)」的心得：**

雖然利用 2 個質量差異很大的物體作理想彈性碰撞可以得出圓周率並不是嚴謹的數學推理過程(如同影片裡所說的)，但這真的好酷喔~~到底是誰想到可以用這種方式直觀又有趣地得出  $\pi$  啊？裡面所用到的簡諧運動公式以及碰撞公式最近正好有接觸到，所以竟然(似懂非)懂得他所闡述的內容，一開始感覺很複雜、不知從何下手的物理間數學問題，在看完清楚明瞭又淺顯易懂(而且我覺得做得還滿精美的一至少很多細節有畫出來)的動畫後，配合解說，在短短 5 分鐘內，我竟然能夠大概了解(也發現)物理比數學有趣之處—與日常生活的緊密連結，以及直覺真的很奇妙，怎麼這麼準，剛好猜到~~

(PS：我看到影片剛開頭被畫得密密麻麻的那個平板電腦，還想說又是一個枯燥乏味的數學課，被包裝成看似有趣、令人想點進去看，到最後卻浪費時間的影片，結果……最後我發現我最大的收穫除了這個歷史上的大發現(對我來說)之外，就是—我還認識了一個物理教學頻道，而且講的是我聽得懂又覺得有趣的生活物理~~而且看他的影片

並不會佔去我太多的時間(一部大概只有 5 分鐘~)，正好當作休閒時間，看來……該來訂閱一下囉~~！)

## 2. 實驗心得：

這次的實驗講義內容比上次轉動慣量的少，可是實驗要做的事情還是好多啊！不過還好這次的實驗器材(滑車軌道、光電計時器、光電閘等等)在滑車實驗實已經用過了，所以比較熟悉它們的操作方法，實驗當天用起來也比較得心應手~~(果然有親手操作過有差~這次實驗能提早結束我想一大原因就是已經熟悉儀器操作了吧，不然每次光弄懂儀器的操作就花了好一大段時間呢)。我們這次仍然照著上次發現的新模式—運用「雲端硬碟共用」的方式增加分析數據的效率，果然又成功了！但其實我們一開始有點驚慌失措，因為我們實驗的誤差非常大(我記得有到 70%以上的樣子)，經過多次嘗試，最後終於找到一些讓誤差比率減少的方式：當速度變大時，動量也跟著變大，因此同樣的誤差換算成比率時誤差比率就會變小，但是這並不適用於以同極磁鐵排斥立維兩滑車之間作用力時，因為如果滑車相對速率太快，會使得磁鐵來不及使其減速，而讓滑車高速碰撞，就翻車了！我們也因此重來了好幾次~不過在我們累積了幾次經驗後，後面做起來越來越順，有些實驗誤差甚至小於 1%，這真是令我們感到驚喜！最後在非預期時間—4:15 左右完成了這次實驗~~又是個令我開心的下午(沒想到可以這麼快做完~)!!!

## 九、參考資料

1. 國立清華大學普通物理實驗室網站—實驗 6.碰撞實驗 (Collision) • 網址：

<http://www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/exp006.html>

2. 實驗 6：碰撞講義 • 網址：

<http://www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/file/06%20Collision/Exp%2006%20Collision.pdf>

3. 磁力碰撞實驗 • 周鑑恆 • 網址：

[http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/107\(406-415\)/410-PDF/3-P25-30-107013-%E7%A7%91%E5%AD%B8%E6%95%99%E5%AE%A4-%E5%91%A8%E9%91%91%E6%81%86-%E7%A3%81%E5%8A%9B%E7%A2%B0%E6%92%9E%E5%AF%A6%E9%A9%97-.pdf](http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/107(406-415)/410-PDF/3-P25-30-107013-%E7%A7%91%E5%AD%B8%E6%95%99%E5%AE%A4-%E5%91%A8%E9%91%91%E6%81%86-%E7%A3%81%E5%8A%9B%E7%A2%B0%E6%92%9E%E5%AF%A6%E9%A9%97-.pdf)

4. 也是其中因素而  $m_1m_2$  • 網址：

<https://www.coursehero.com/file/pla2es4/%E4%B9%9F%E6%98%AF%E5%85%B6%E4%B8%AD%E5%9B%A0%E7%B4%A0%E8%80%8C-m1m2-%E6%99%82%E6%89%80%E7%AE%97%E5%BE%97%E7%9A%84%E6%A5%B5%E5%A4%A7%E8%AA%A4%E5%B7%AE%E4%B9%9F%E6%87%89%E4%BE%86%E8%87%AA%E6%96%BC%E9%87%8D%E9%87%8F%E5%A2%9E%E5%8A%A0%E6%91%A9%E6%93%A6%E5%8A%9B%E7%9B%8A%E5%A2%9E%E5%8A%A0%E6%89%80-%E8%87%B4-%E6%9C%80%E5%BE%8C%E4%B8%80%E9%A0%85%E5%AE%8C%E5%85%A8%E9%9D%9E%E5%BD%88%E6%80%A7%E7%A2%B0%E6%92%9E%E6%B8%AC%E9%A9%97%E5%9B%A0%E5%8F%AA%E6%9C%89-m1-%E6%BB%91%E8%BB%8A%E6%9C%89%E9%80%9F%E5%BA%A6%E8%80%8C%E4%B8%94%E4%B8%80%E7%B5%84%E6%95%B8%E6%93%9A%E5%AF%A6%E9%A9%97%E6%99%82%E9%96%93%E7%B4%84%E5%9B%A0/>

5. 【Fun 科學】碰撞  $\pi$  解答(最佑屬性的解法喔~) • 佑來了 • 網址：

<https://www.youtube.com/watch?v=bNBT5w6zRYc>

6. 彈性碰撞 • 維基百科，自由的百科全書 • 網址：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BD%88%E6%80%A7%E7%A2%B0%E6%92%9E>