

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

最佳團隊合作獎

030103

咻咻～ 轉吧！風火輪

學校名稱：嘉義縣立六嘉國民中學

作者：	指導老師：
國二 侯美萍	劉淑惠
國二 侯雅馨	黃淑貞
國二 陳錦珠	

關鍵詞：共振、自然頻率、轉動頻率

作品名稱：咻咻~轉吧！風火輪

壹、摘要

「風火輪」是 1980 年代以前兒童的童玩，將酒瓶蓋打扁穿線的風火輪，是小朋友們很喜歡玩的玩具，在玩的過程中容易發生危險幾乎已被遺忘。

本實驗是利用簡單便宜的扳手與節拍器取代昂貴的馬達，釐清隱藏在風火輪中的物理。實驗結果得知『扳手往後、繩子被拉緊』時所產生的“波”，原來是繩子「自然頻率」和風火輪「轉動頻率」相同或接近時，所產生的共振現象。

因繩子「自然頻率」和所受張力及繩長有關，故左右繩的共振振幅不一定一樣。轉動風火輪圈數為 50 圈時，繩子發生共振的時間維持較長、共振時的振幅較大。而繩長 40cm 時，繩子則不易發生共振現象。

因風火輪在實驗過程中其位置會改變，在適當條件下，繩兩端都會產生一個完整的共振波。



圖 1：在適當的條件下，當繩子的自然頻率和風火輪的轉動頻率一樣時，所產生的共振現象。

貳、研究動機

在一次的科學營，我們做了幾個會發出聲音的玩具，其中一個是用紙杯做成的，叫「紙杯風火輪」(如圖 2)。

我回去和父母分享，原來它和他們小時候用瓶蓋做的童玩-[瓶蓋風火輪](#)(如圖 3)很像。但是為甚麼「紙杯風火輪」的聲音比較大呢？影響它聲音大小的因素有哪些？

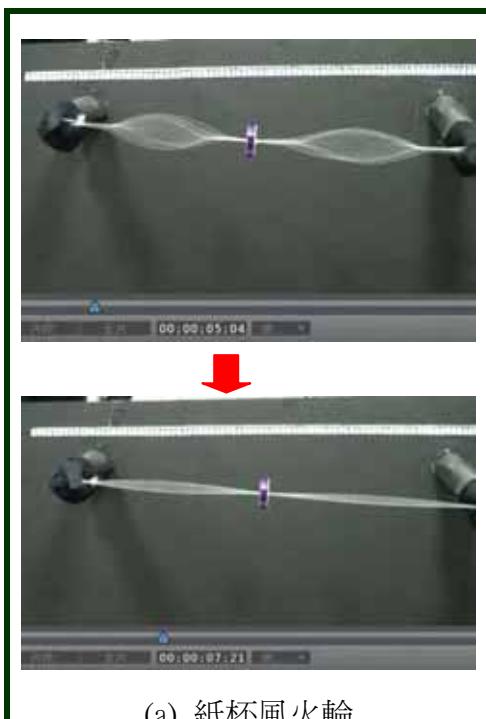
在實驗過程中，意外發現繩子產生“波”的現象(如圖 4)，令我們感到很好奇，想做實驗探討它。



圖 2:紙杯風火輪



圖 3:瓶蓋風火輪



(a) 紙杯風火輪



(b) 瓶蓋風火輪

參、研究目的

- 一、探討風火輪的『能量轉換』與觀察繩子『在不同時間點的狀態』。
- 二、探討『扳手拉放頻率』、『轉動風火輪圈數』及『繩子長度』對繩子共振現象的影響。
- 三、探討『風火輪位置』對繩子共振現象的影響。

肆、研究設備與器材

哨子風火輪	扳手	節拍器	錄影機
棉線	萬力夾	分貝計	電腦

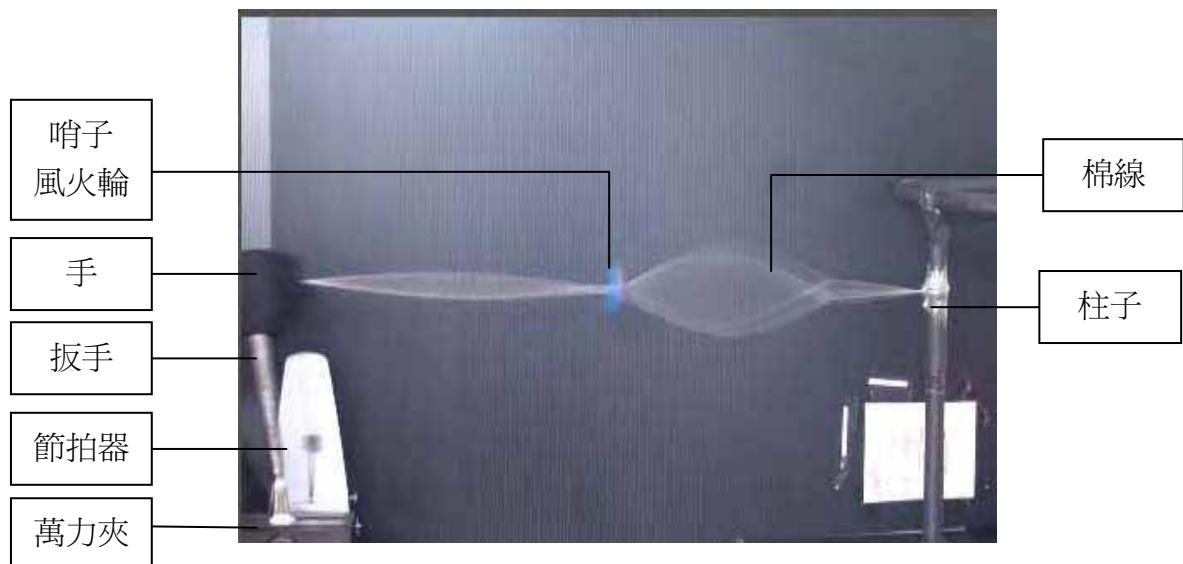


圖 5：實驗裝置圖



圖 6：為了更嚴格控制變因，利用市售的哨子風火輪來做實驗。



圖 7：利用墊片，使萬力夾前後拉放固定在一個範圍內

伍、研究過程

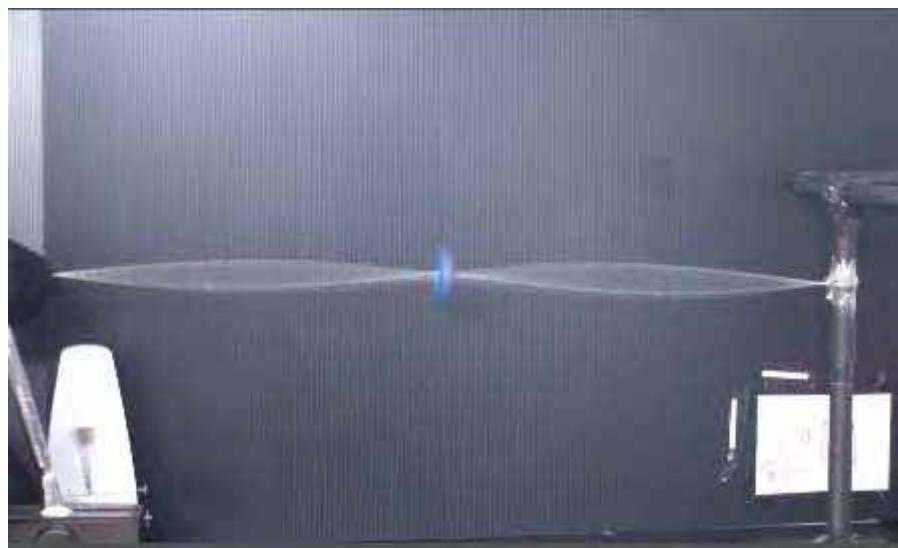
一、為了控制變因，在經費有限的情形下，試過各種方法：



【方法一】 將棉繩一端綁在柱子上
優點：只剩一隻手的影響
缺點：還是不能嚴格控制變因



【方法二】 用兩個樂高馬達來轉動
優點：能嚴格控制變因
缺點：結構不穩



【方法三】：目前的實驗方法
棉線一端綁在柱子上，另一端綁在扳手上；利用節拍器控制
扳手前後『拉→放→拉→放…』的頻率。
優點：更能嚴格控制變因且價格便宜。
缺點：『拉→放→拉→放…』的頻率與力道還是不易掌握!

圖 8：本實驗曾使用過的方法

陸、研究方法與結果討論

研究一：探討風火輪的『能量轉換』與觀察『在不同時間點的狀態』

步驟：

	1. 將棉線穿過『哨子風火輪』。		2. 棉線對折，一端固定於柱子。
	3. 確認棉線是在水平無纏繞的狀態。		4. 確認對折後的繩長為 70.0cm，將另一端固定於扳手上。
	5. 打開節拍器，調到適合的節奏；攝影機準備攝影。		6. 將風火輪置於繩子中間後，用手轉 50 圈。
	7. 利用扳手前後『拉→放→拉→放…』繩子，使風火輪可以不斷的轉動。		8. 利用「威力導演」軟體觀察與分析在不同時間點的繩子狀態。

圖 9：實驗步驟說明圖

結果：

(一) 探討『風火輪的能量轉換』與『繩子扭轉情形』：

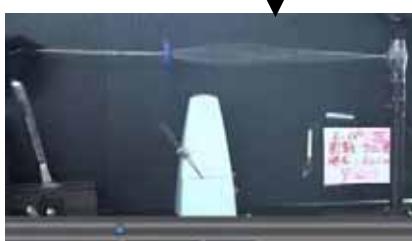
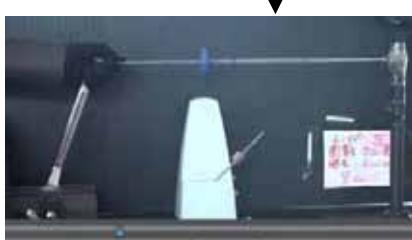
扳手動作	繩子扭轉狀態與能量轉換情形
1.將轉動風火輪數十圈	<p>1.扭轉繩子。</p> <p>2.儲存繩子的彈性位能。</p> 
2.扳手往後拉	<p>1.被扭緊的繩子鬆開。</p> <p>2.將儲存的彈性位能轉換為動能；並補充動能。</p> 
3.扳手拉到最後時	<p>1.繩子被拉直。</p> <p>2.風火輪的轉速最快。</p> 
4.扳手往前拉	<p>1.開始扭轉繩子。</p> <p>2.風火輪開始減速，將動能轉換為彈性位能，並補充彈性位能。</p> 
5.扳手拉到最前時	<p>1.繩子被扭到最緊。</p> <p>2.風火輪的轉速最慢。</p> 

圖 10：扳手前後『拉→放→拉→放…』繩子過程中的能量轉換說明圖
(二) 觀察繩子的狀態：

實驗結果發現，扳手前後『拉→放→拉→放…』繩子過程中，繩子在不同時間點的狀態很複雜，但可歸納成下列幾種：

1. **變形**狀態：此時繩子兩端與風火輪的圓心，三點不在同一直線上。

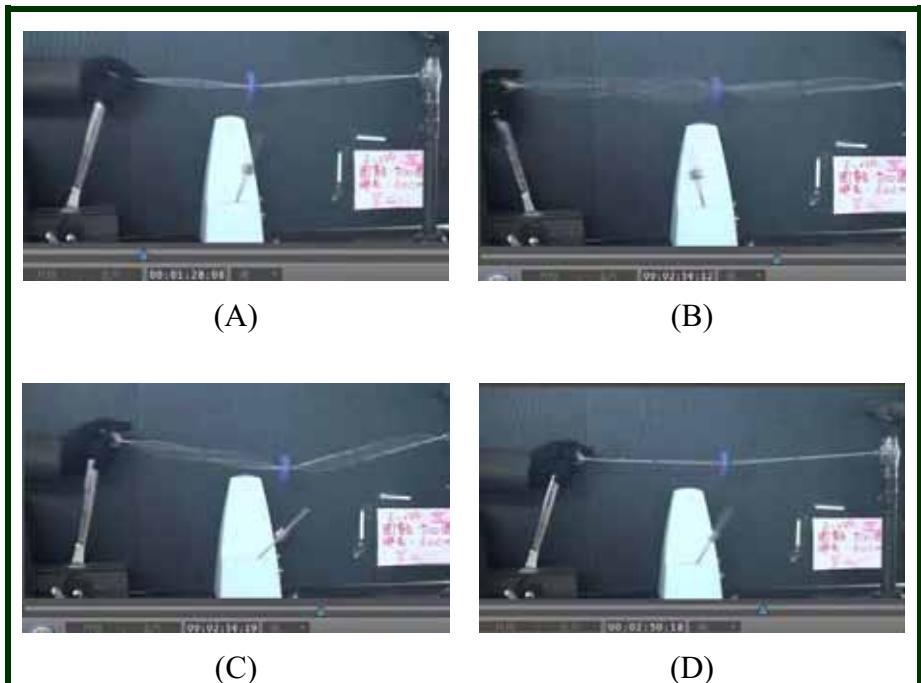


圖 11：繩子呈現變形的狀態

2. **中間較厚**：



圖 12：繩子呈現中間較厚的狀態

3. **平整**狀態：



圖 13：繩子呈現平整狀態

4.本實驗的研究對象：可分成三種

(1)只**左邊繩子**產生“波”



圖 14：只左邊繩子產生“波”

(2)只**右邊繩子**產生“波”



圖 15：只右邊繩子產生“波”

(3)**兩邊繩子都**產生“波”



圖 16：兩邊繩子都產生“波”

分析：

1.多數人以為繩子產生“波”的現象(如圖 11、圖 14~16)，是在『扳手往前、繩子較鬆弛』時偶而出現的現象；但實驗結果卻發現在『扳手往後、繩子被拉緊』時，在適當條件下竟也會產生“波”(如圖 17)(如附錄二)。



圖 17：當『扳手往後、繩子被拉緊』時，
(A)並沒有產生”波” (B)在適當條件下才會產生”波”。

2. 為何會出現”波”？初步認為這是繩子的「自然頻率」和風火輪的「轉動頻率」相同或接近時所產生的”共振”現象。為了確認我們的假設，進行以下的實驗。

研究二：探討『扳手拉放頻率』、『轉動風火輪圈數』及『繩子長度』對繩子共振現象的影響。

(實驗一) 探討『扳手拉放頻率』對繩子共振現象的影響。



(實驗二) 探討『轉動風火輪圈數』對繩子共振現象的影響。



(實驗三) 探討『繩子長度』對繩子共振現象的影響。

(實驗一)探討『扳手拉放頻率』對繩子共振現象的影響：

步驟：1.如研究一的步驟，節拍器的節奏分別為 104、112、132 及 144，各重複 3 次實驗。

2.用「威力導演」找出扳手拉放較穩定(附錄三)的範圍，再觀察此時間點內繩子的狀態。

結果：

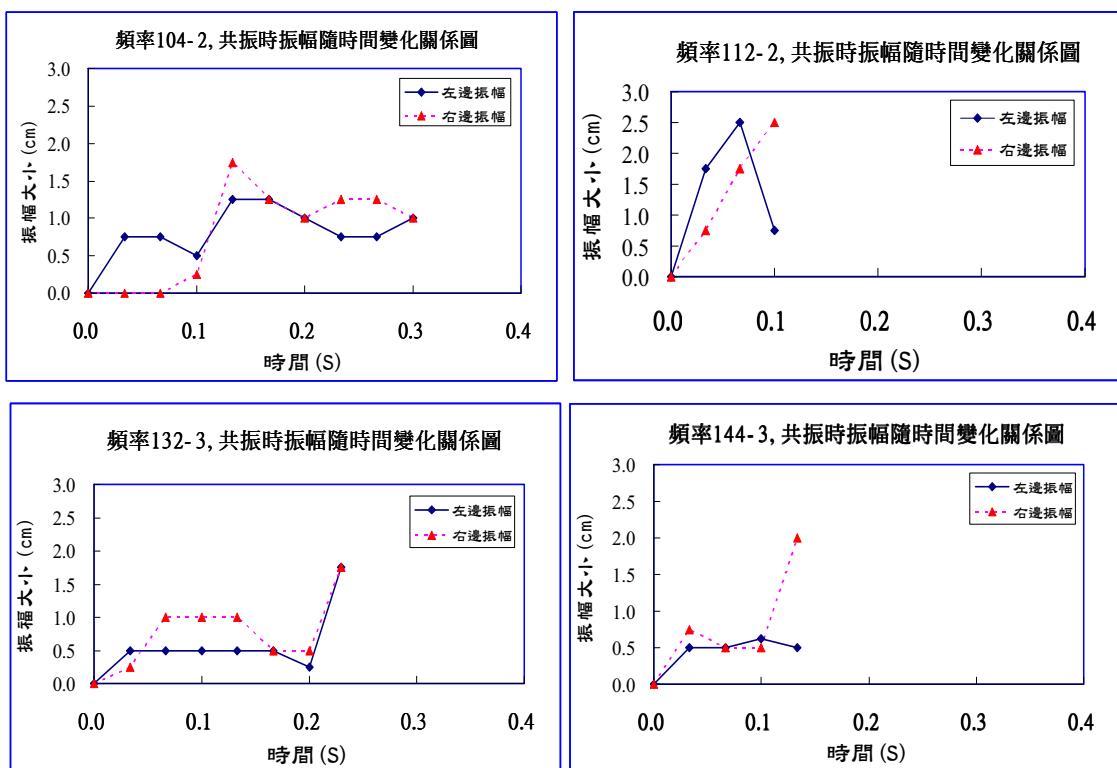


圖 18：扳手拉放頻率不同時，繩子共振時振幅隨時間變化關係圖
(原始數據請參考附錄四)

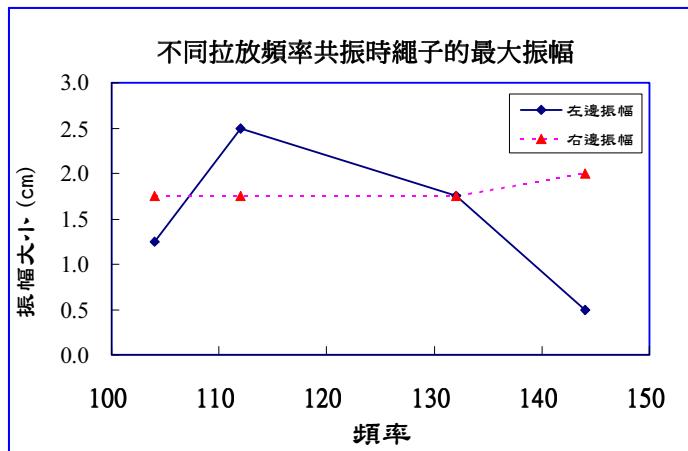


圖 19：扳手拉放頻率不同時，最大的共振振幅比較圖

分析：由圖 18、19 可看出，

- 1.繩子發生共振時的振幅，有時左邊較大，有時右邊較大，有時是兩邊一樣大。
- 2.扳手拉放頻率為 112 時，繩子發生共振的時間維持較短，但共振時的振幅較大。

(實驗二)探討『扳手拉放頻率』對繩子共振現象的影響：

- 步驟：**1.如研究一的步驟，但將風火輪各轉 50 圈、100 圈、150 圈及 200 圈，各重複 3 次實驗。
2.如研究二中實驗一的步驟 2。

結果：

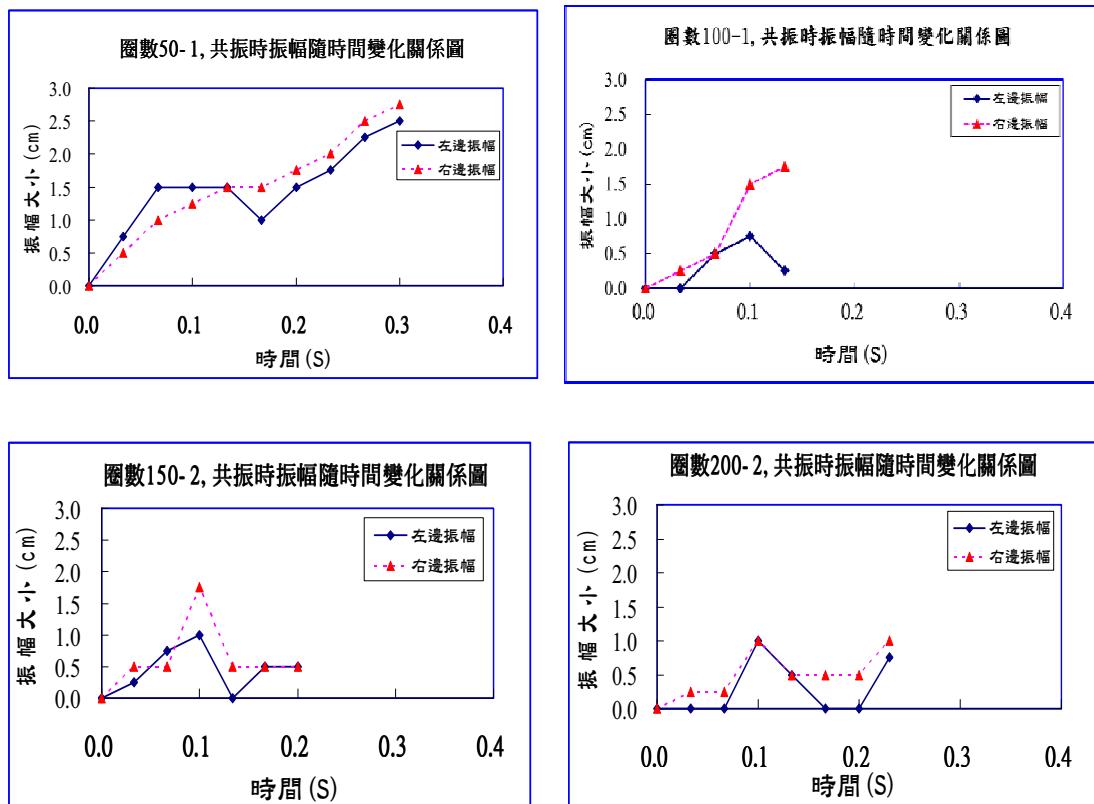


圖 20：轉動風火輪的圈數不同，繩子共振時振幅隨時間變化關係圖
(原始數據請參考附錄五)

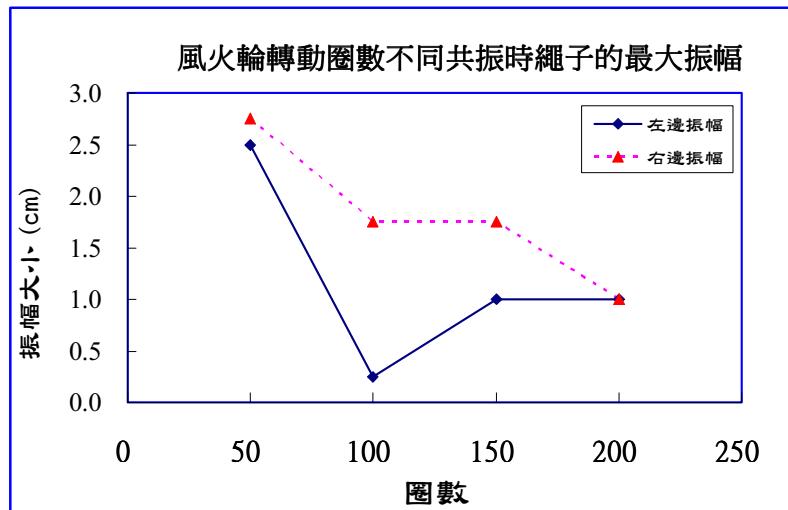


圖 21：轉動風火輪的圈數不同時，最大的共振振幅比較圖

分析：由圖 20、21 也可看出，

- 繩子發生共振時的振幅，有時左邊較大，有時右邊較大，有時是兩邊一樣大
- 轉動風火輪圈數為 50 圈時，繩子發生共振的時間維持較長、共振時的振幅較大。

(實驗三)探討『繩長』對繩子共振現象的影響：

- 步驟：**1.如研究一的步驟，但繩子的長度分別為 40cm、50cm、60cm 及 70cm，各重複 3 次實驗。
2.如研究二中實驗一的步驟 2。

結果：

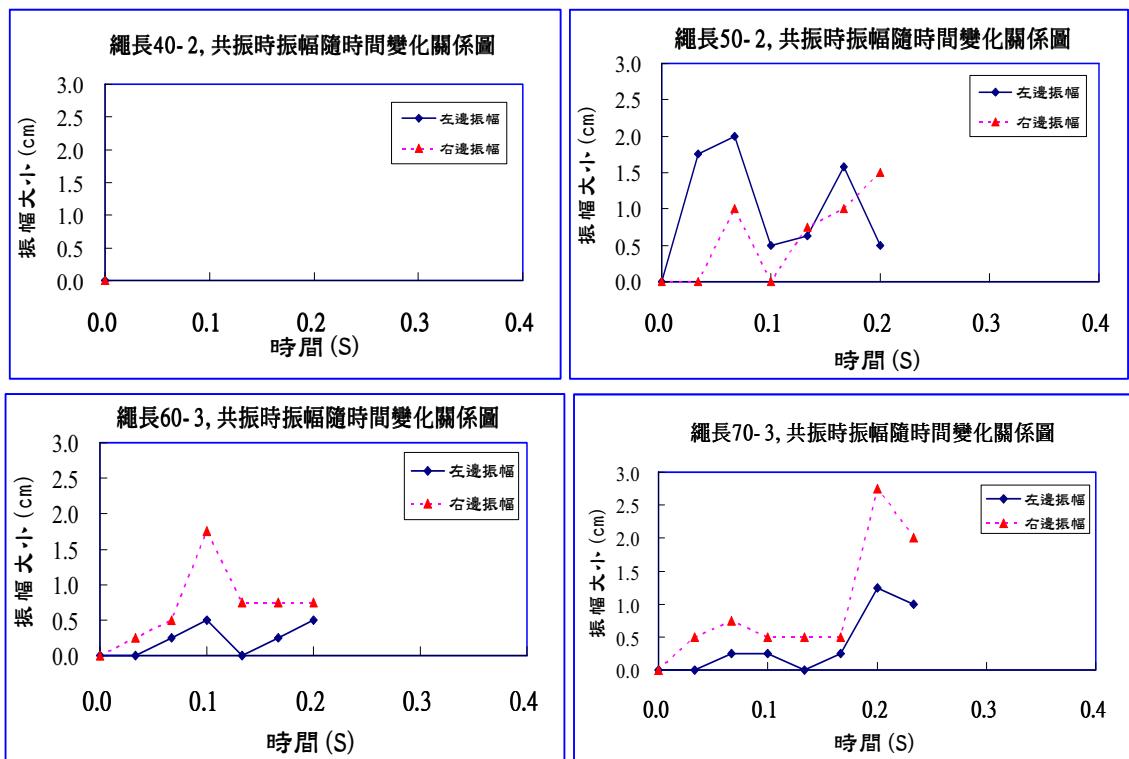


圖 22：繩長不同時，繩子產生共振時的振幅隨時間關係圖
(原始數據請參考附錄六)

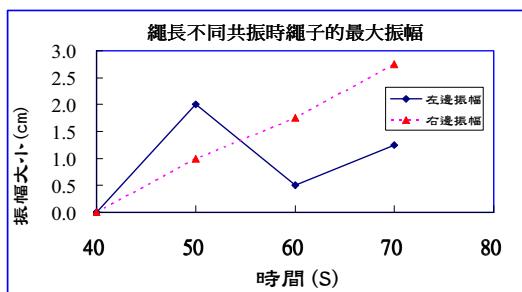


圖 23：繩長不同時，最大的共振振幅比較圖

分析：由圖 22、23 也可看出，

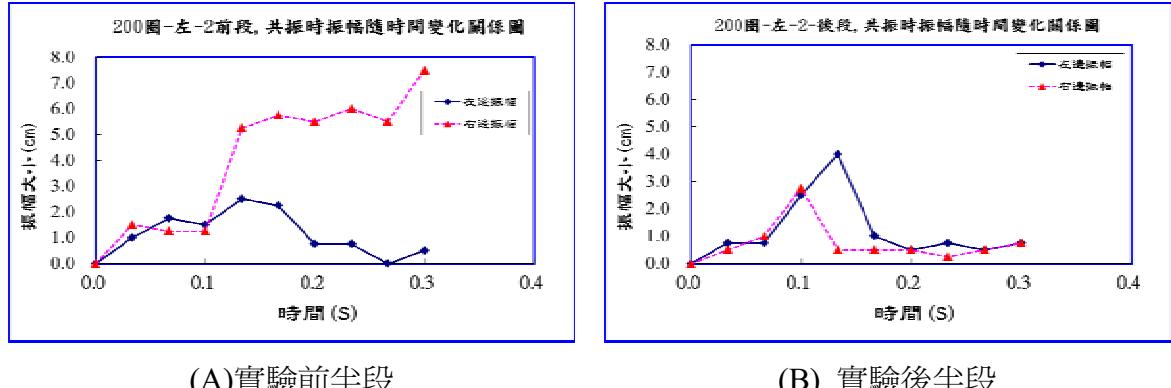
- 繩子發生共振時的振幅，有時左邊較大，有時右邊較大，有時是兩邊一樣大
- 繩長 40cm 時，繩子不易發生共振現象。
- 繩長為 70cm 時，繩子產生共振時的振幅較大。

爲何繩子發生共振時的振幅，有時左邊較大，有時右邊較大，有時兩邊一樣大？於是進行以下的實驗。

研究三：探討『風火輪位置』對繩子共振現象的影響。

- 步驟：**1.如研究一的步驟，但繩長為 60cm(用簽字筆做記號，將繩子分成 4 等分)；扳手拉放頻率為 120；且風火輪放在左右及中間不同位置，各重複 3 次實驗。
 2.如研究二中實驗一的步驟 2。(原始數據請參考附錄七)

結果：



(A) 實驗前半段

(B) 實驗後半段

圖 24：風火輪位置在左邊時，(A)實驗前半段多數時間右邊繩子共振振幅較大
 (B) 實驗後半段多數時間兩邊繩子共振振幅一樣大

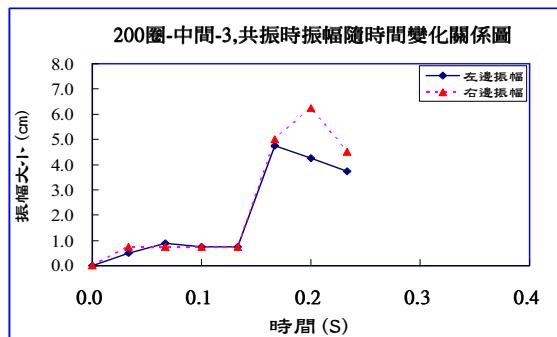
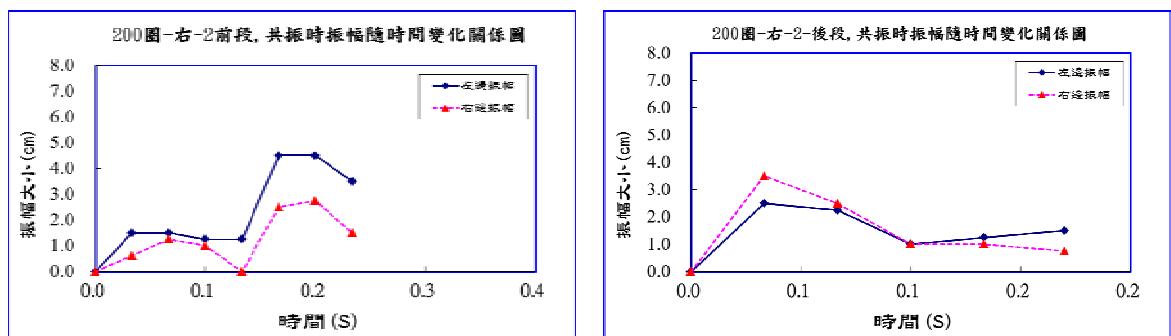


圖 25：風火輪位置在中間時，多數時間兩邊繩子共振振幅一樣大



(A) 實驗前半段

(B) 實驗後半段

圖 26：風火輪位置在右邊時，(A) 實驗前半段多數時間左邊繩子共振振幅較大
 (B) 實驗後半段多數時間兩邊繩子共振振幅一樣大

分析：

1.由圖 24~26 可看出：

當風火輪位置在**左邊**時，多數時間**右邊繩子**共振振幅較大；(如圖 27)

當風火輪位置在**右邊**時，多數時間**左邊繩子**共振振幅較大；(如圖 28)

當風火輪位置在**中間**時，多數時間**兩邊繩子**共振振幅一樣大。(如圖 29)

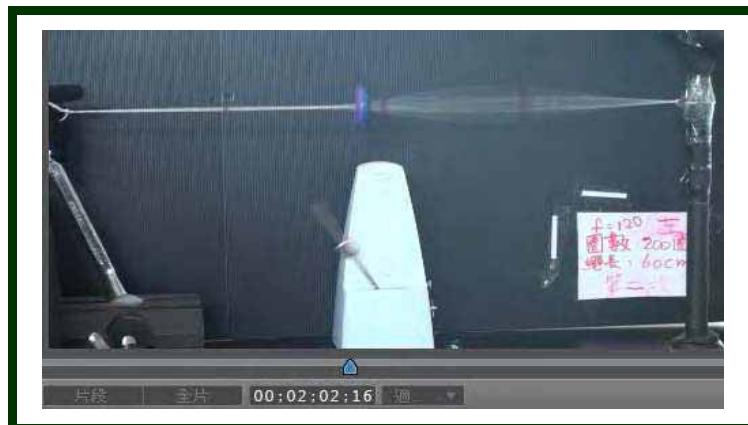


圖 27：風火輪位置在**左邊**，多數時間**右邊繩子**共振時振幅較大



圖 28：風火輪位置在**右邊**，多數時間**左邊繩子**共振時振幅較大



圖 29：風火輪位置在**中間**，多數時間**兩邊繩子**共振振幅一樣大。

2.由圖 27~29 可看出繩長是影響繩子『自然頻率』的因素；但由圖 30 可看出並不是唯一因素。

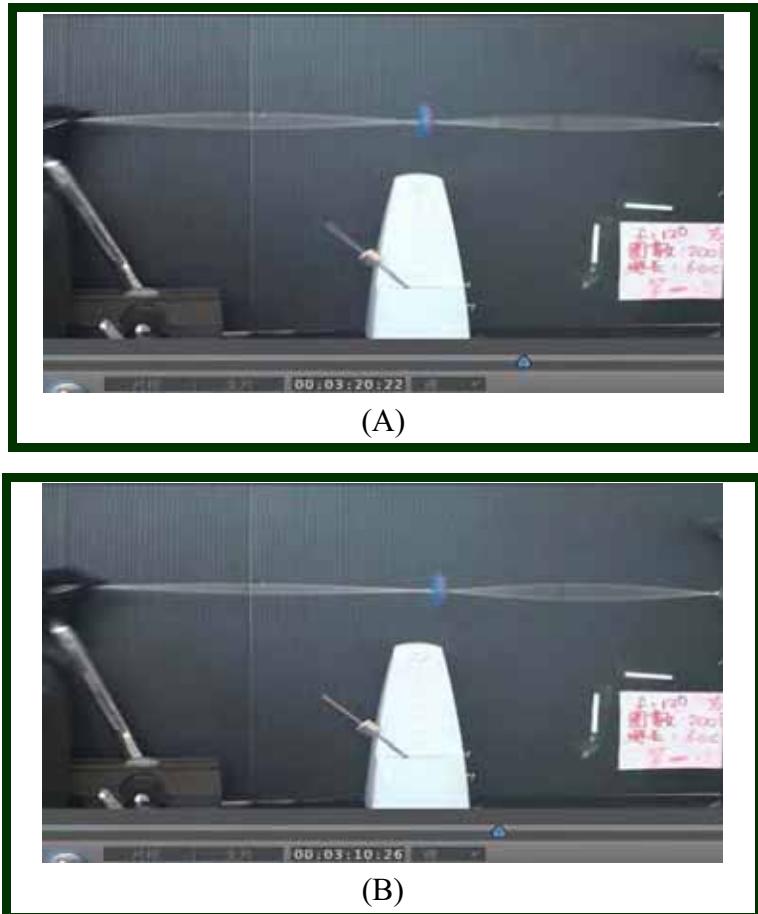


圖 30：當風火輪位置在**不在中間**，左右兩端繩長不同
偶而兩邊繩子共振時振幅一樣大(如圖 A)、有時短繩端的共振振幅較大(如圖 B)

3.由圖 31 可看出**繩子所受張力**是影響繩子『自然頻率』因素之一。

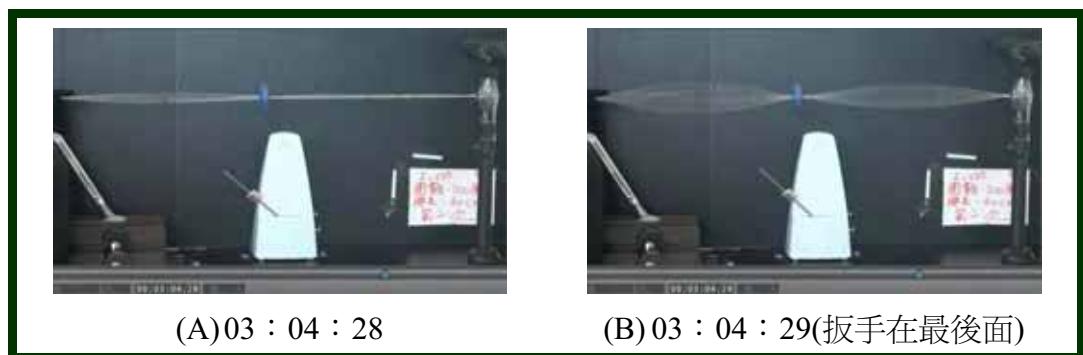


圖 31：由 A、B 兩圖可看出，雖時間只差一影格 (1/30 秒)，但是兩邊繩子共振時的振幅大小差很多。

4.因實驗過程中，風火輪的位置會移動，故產生一些特別的共振現象：



圖 32：為了簡化問題，這樣的狀態不是目前實驗的觀察對象。



圖 33：原因不明，仍待我們進一步實驗觀察。

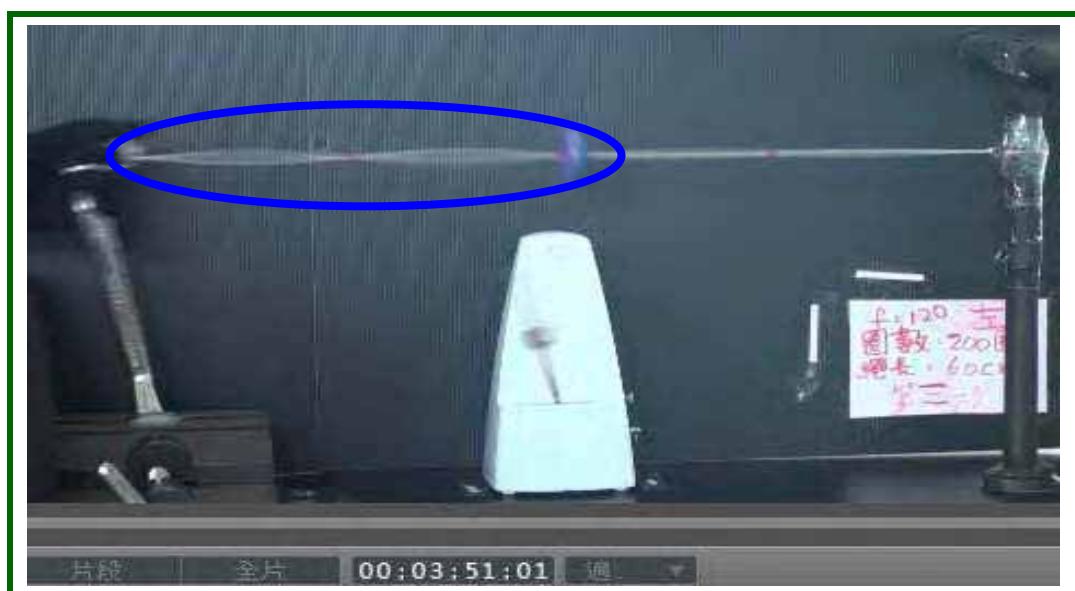


圖 34：在適當條件下，只有左繩產生 1 個完整的共振波。



圖 35：在適當條件下，繩子兩端竟然都產生 1 個完整的共振波。

柒、討論

一、在本實驗中有多項物理量同時隨時間改變：

1. 風火輪的轉動頻率(fw)與方向：

在扳手前後拉放過程中，風火輪『轉動頻率 f_w 』有時大，有時小；其方向有時順時鐘，有時逆時鐘，可用圖 36 說明。

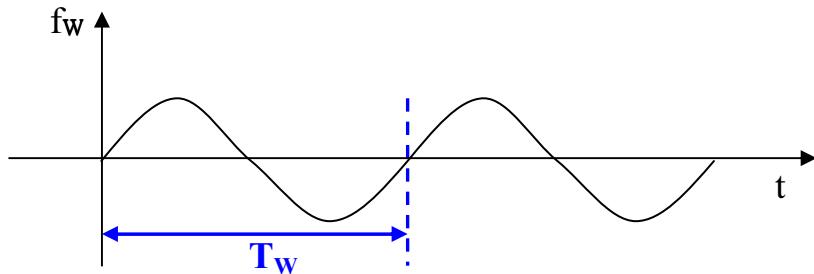


圖 36：風火輪『轉動頻率 f_w 』與『轉動方向』隨時間變化簡單示意圖

T_w ：順時鐘加速後減速至零，再逆時鐘加速後減速至零所需的時間

2. 繩子的自然振動頻率(f_n)：

根據單弦振動理論，繩子的「自然頻率」 $f_n = \frac{n\pi}{\sqrt{m}} \sqrt{\frac{F}{\ell}}$ (1)

m ：繩子質量 (Kg) F ：繩子張力 (N) ℓ ：繩長 (m)

和繩子的質量、所受張力及繩長有關。

3. 繩子所受的張力 F：

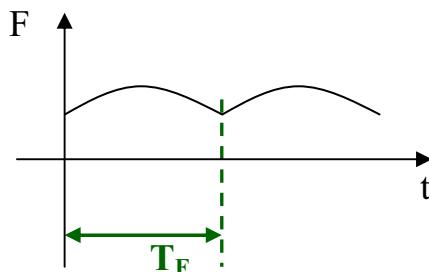


圖 37：繩子所受張力 F 隨時間變化簡單示意圖

T_F ：扳手由最前面拉到最後面，再回到最前面所需的時間

二、爲何繩子會發生共振現象，可由圖 38 說明。

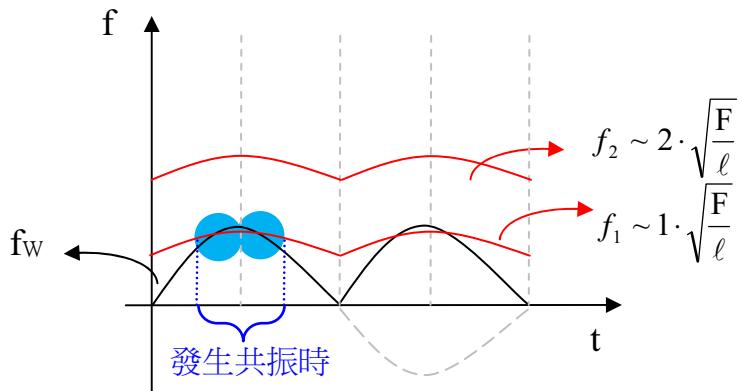


圖 38：繩子發生共振時的示意圖

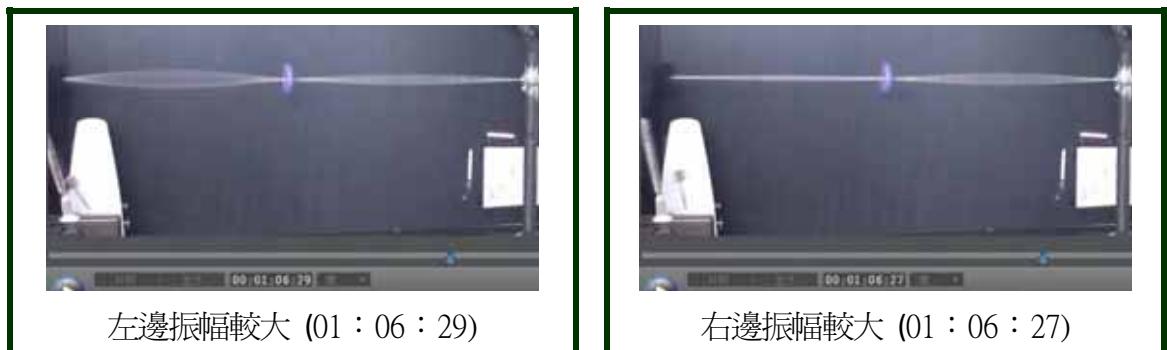
當風火輪的轉動頻率 f_w ，與繩子的自然頻率 f_1 、 f_2 ...相同或接近時，繩子就會產生共振現象。

- 1.由圖 38 可說明當繩子「自然頻率 f_1 」和風火輪「轉動頻率 f_w 」稍為接近時，繩子開始產生共振現象，但此時振幅不是很大；但是當兩者的頻率最接近時，振幅會最大(如圖 39)。



圖：39 繩子在不同時間點的共振行爲

- 2.圖 38 也可說明爲何有時左繩的振幅較大，有時右繩的振幅較大。這是因爲有時左繩自然頻率較接近風火輪轉動頻率，有時是右繩自然頻率較接近風火輪轉動頻率。(如圖 40)



圖：40 繩子有時左邊振幅較大，有時右邊振幅較大

3. 圖 41 可解釋在研究三中，多數時間是長繩端的共振振幅較大(如圖 42)；也可說明在研究二的實驗三中，繩長 40 公分為何不易產生共振現象。(如圖 43)

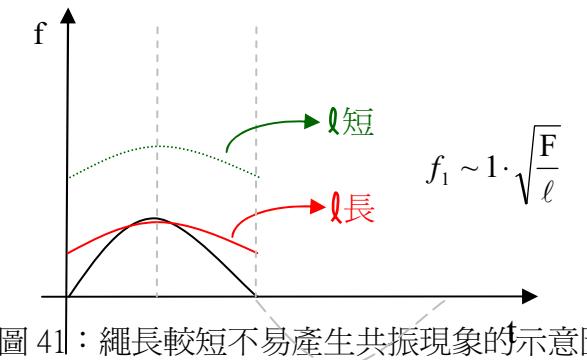


圖 42：只有右端繩子(繩長較長)
產生共振現象。



圖 43：繩長 40 公分，在繩子被拉緊時，
並沒有產生共振現象。

4. 轉動風火輪的圈數，影響的是風火輪的轉動頻率 fw，圖 44 可說明在研究三中，因風火輪位置會改變，在適當條件下，繩子竟可產生第二諧音 f2 的共振行為(如圖 35)。

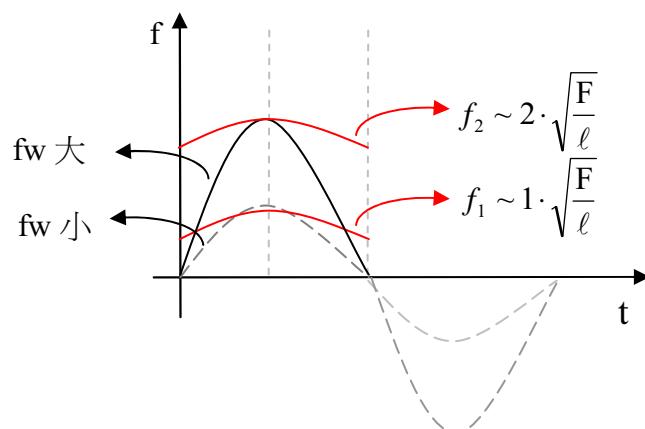
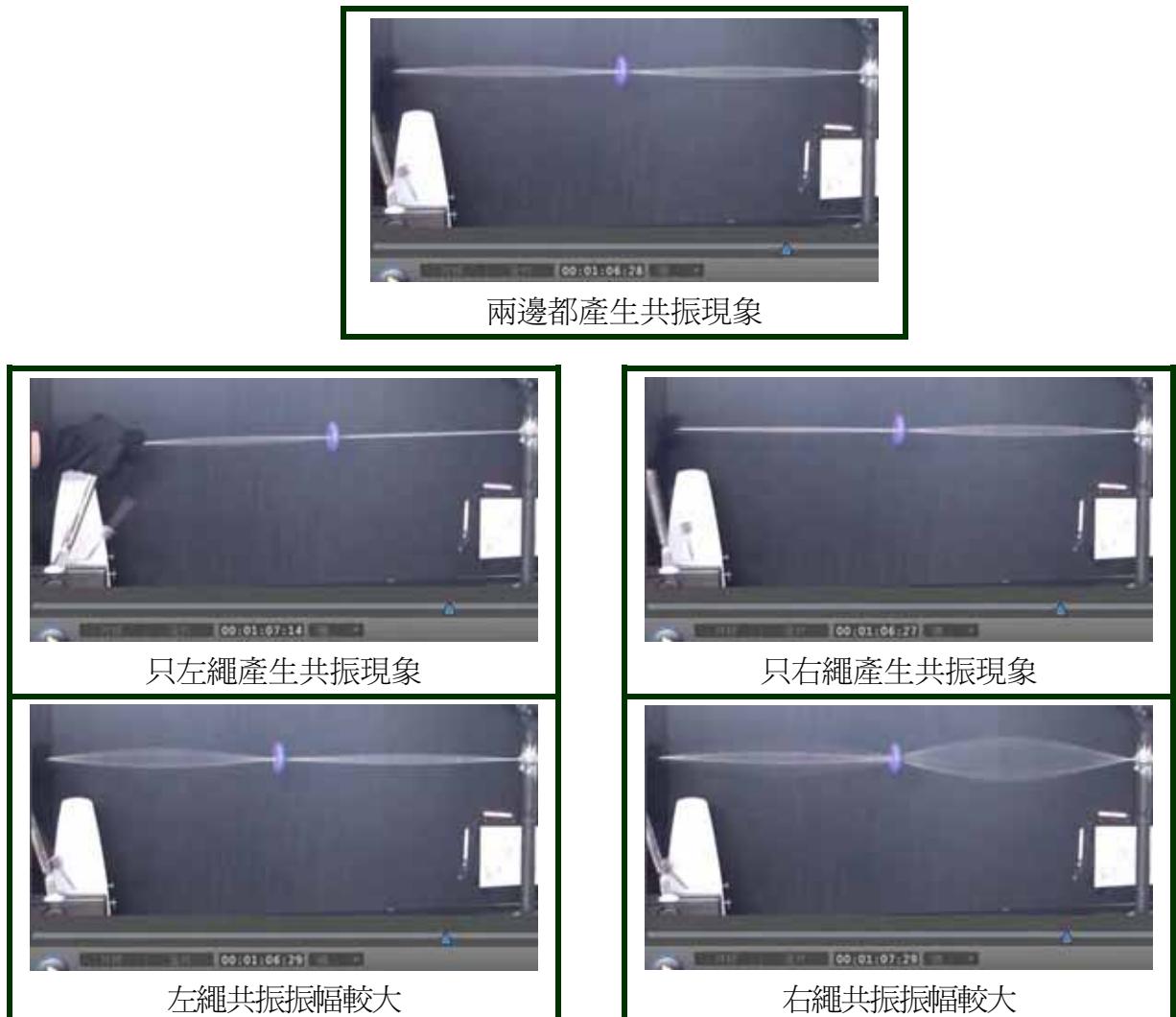


圖 44：轉動風火輪圈數，對繩子共振現象影響的示意圖

捌、結論

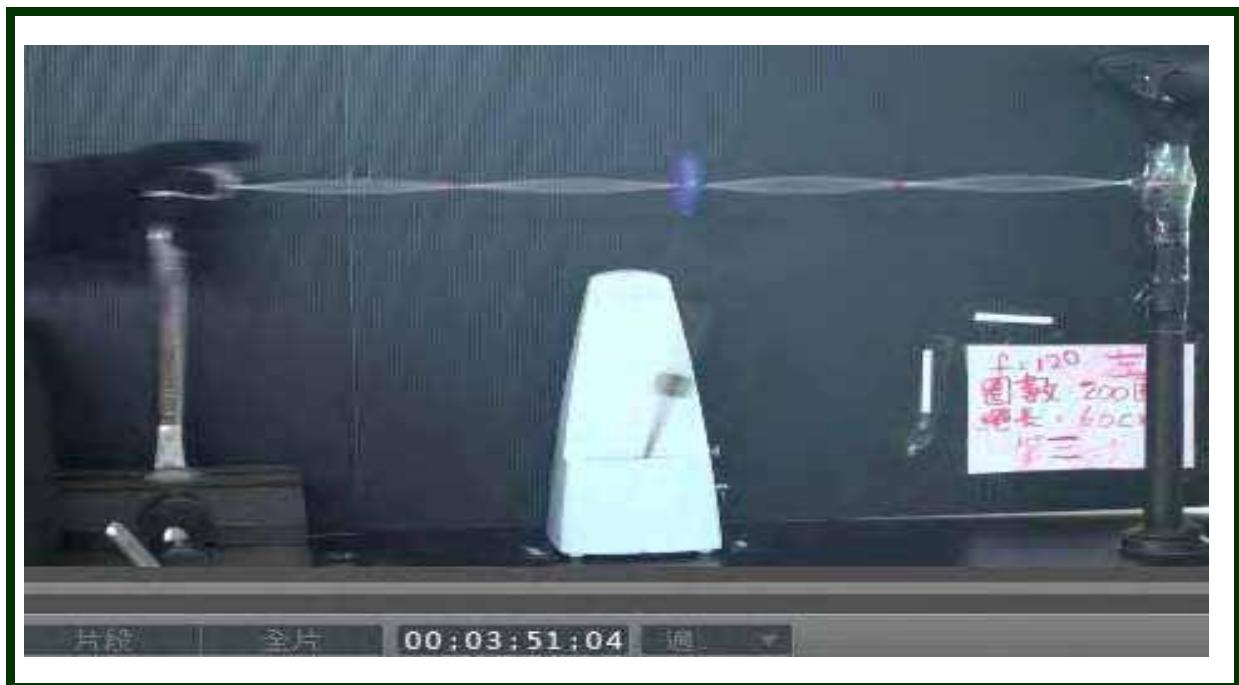
- 『扳手往後、繩子被拉緊』時所產生的“波”，原來是繩子「自然頻率」和風火輪「轉動頻率」相同或接近時，所產生的共振現象。
- 因繩子的「自然頻率」和所受張力及繩長有關，故可看出左右繩的共振振幅不一定一樣（如圖 45）。



圖：45 繩子在不同時間的共振行為(50 圈第三次)

- 扳手拉放頻率為 112 時，繩子發生共振時間維持較短，但共振時振幅較大。轉動風火輪圈數為 50 圈時，繩子發生共振的時間維持較長、共振時的振幅較大。而繩長 40cm 時，繩子則不易發生共振現象。

4.因風火輪的位置不在中間時，實驗過程中其位置會改變，在適當條件下繩兩端都產生一個完整的共振波。



圖：46 兩端繩子都產生一個完整的共振波

5.這個實驗設備的架設困難度很高，原本老師勸我們放棄，但在我們堅持之下試過各種方法，最後用簡單便宜的扳手與節拍器取代昂貴的馬達，終於設計出所需的設備，終於釐清隱藏在差點被遺忘的童玩-風火輪中的物理(因傳統是用瓶蓋做的)，令我們感到很有成就感!

玖、展望

1. 本實驗的變因有很多，拉放扳手的頻率快一點或慢一點、轉動風火輪的圈數少一點、火輪的大小與重量、繩子材質…等對繩子的共振現象有何影響？值得進一步做實驗探討它。
2. 為了嚴格控制變因，希望以後有充足的經費，完成實驗設備的架設，繼續進行對風火輪的探討。

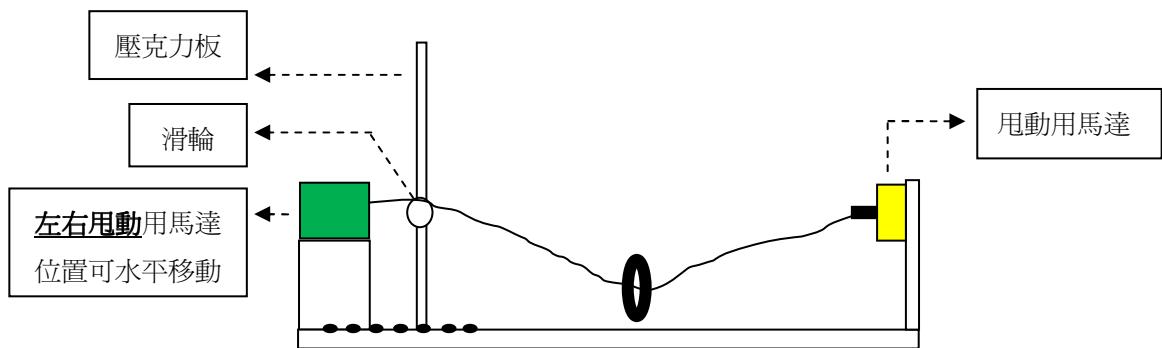


圖 47：原先的實驗設計圖

3. 發現一些有趣的現象，目前原因不明，值得進一步實驗探討它。



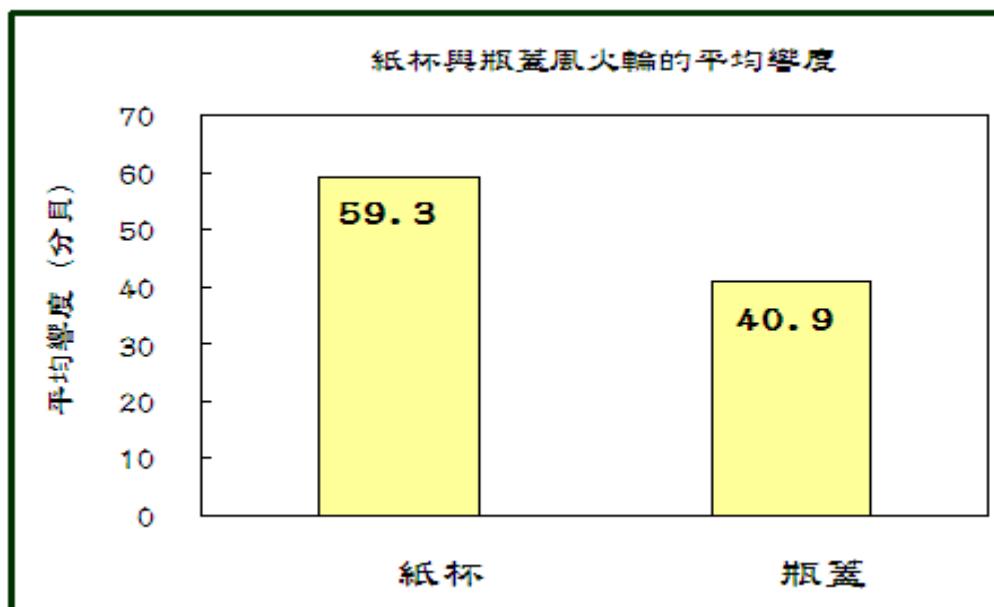
圖 48：原因不明，仍待進一步實驗觀察。

拾、參考資料

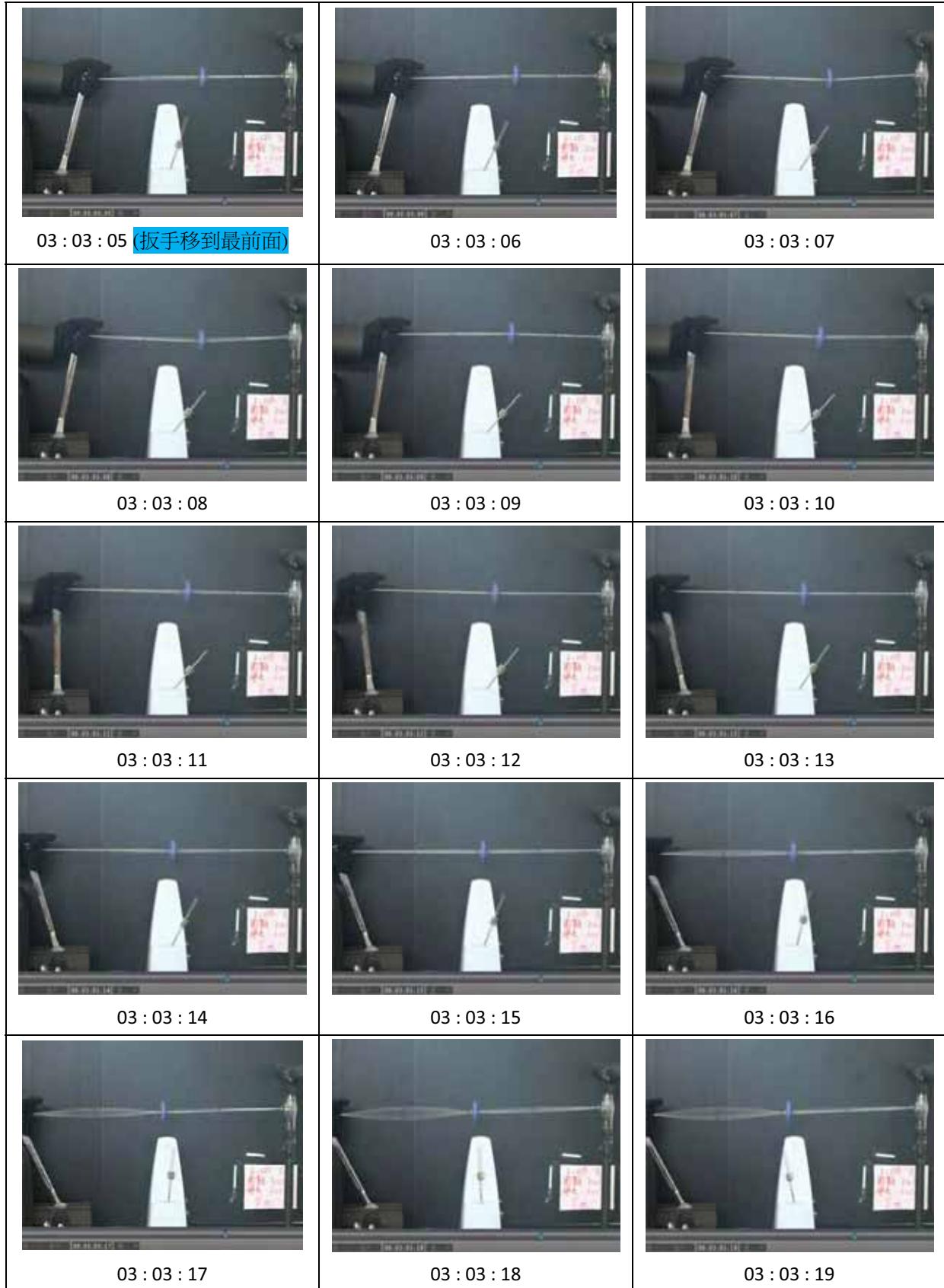
- 1.台北縣立埔墘國民小學：物理科第三名，作品名稱：怒吼風火輪。台灣網路科教館。民 88 年-39 屆。
- 2.郭重吉(民 94)國中自然與生活科技第三冊(修訂版)。(52-55 頁)。臺南市：南一。
- 3.劉世德，國中自然與生活科技第五冊。(63-70 頁)。臺南市：康軒。
- 4.Slengresu, S.Rad.Taiwan Adapted Version MECHANICAL VIBRATIONS 振動學。MA : Prentice Hall.

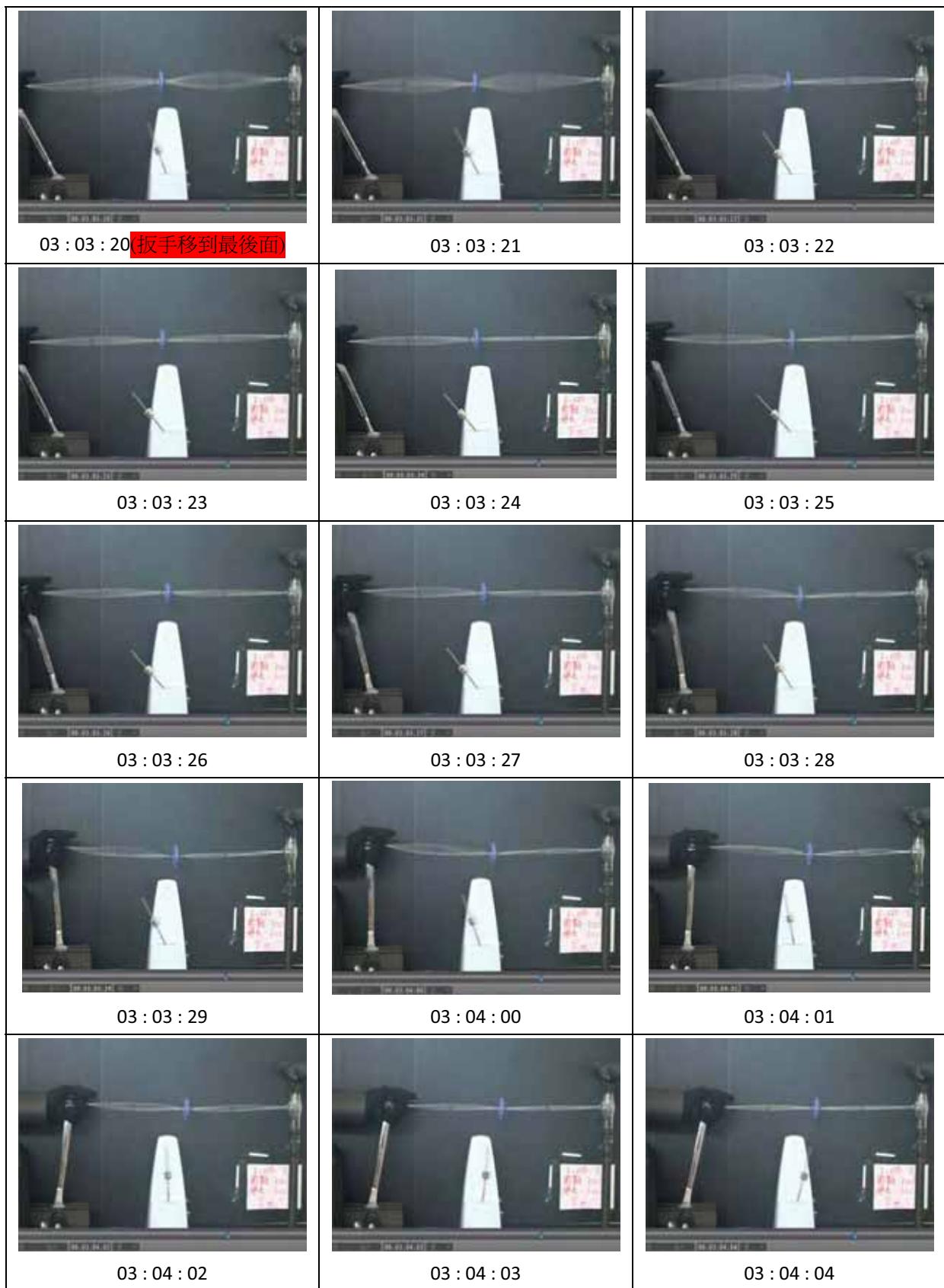
壹拾、附錄

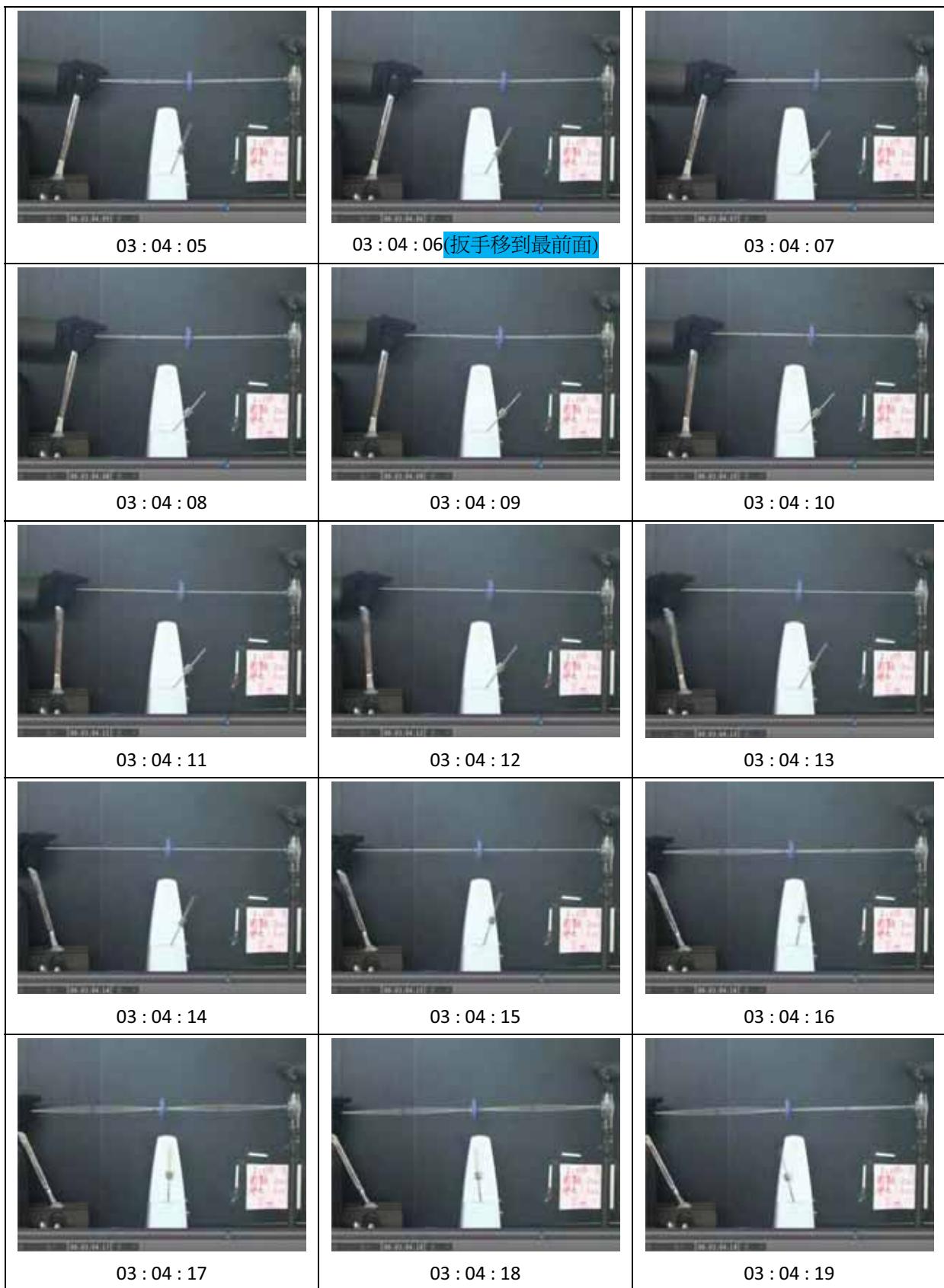
【附錄一】紙杯與瓶蓋風火輪的平均響度



【附錄二】條件：節拍器節奏 120 (繩長 60.0 cm、圈數 200 圈-右-2)



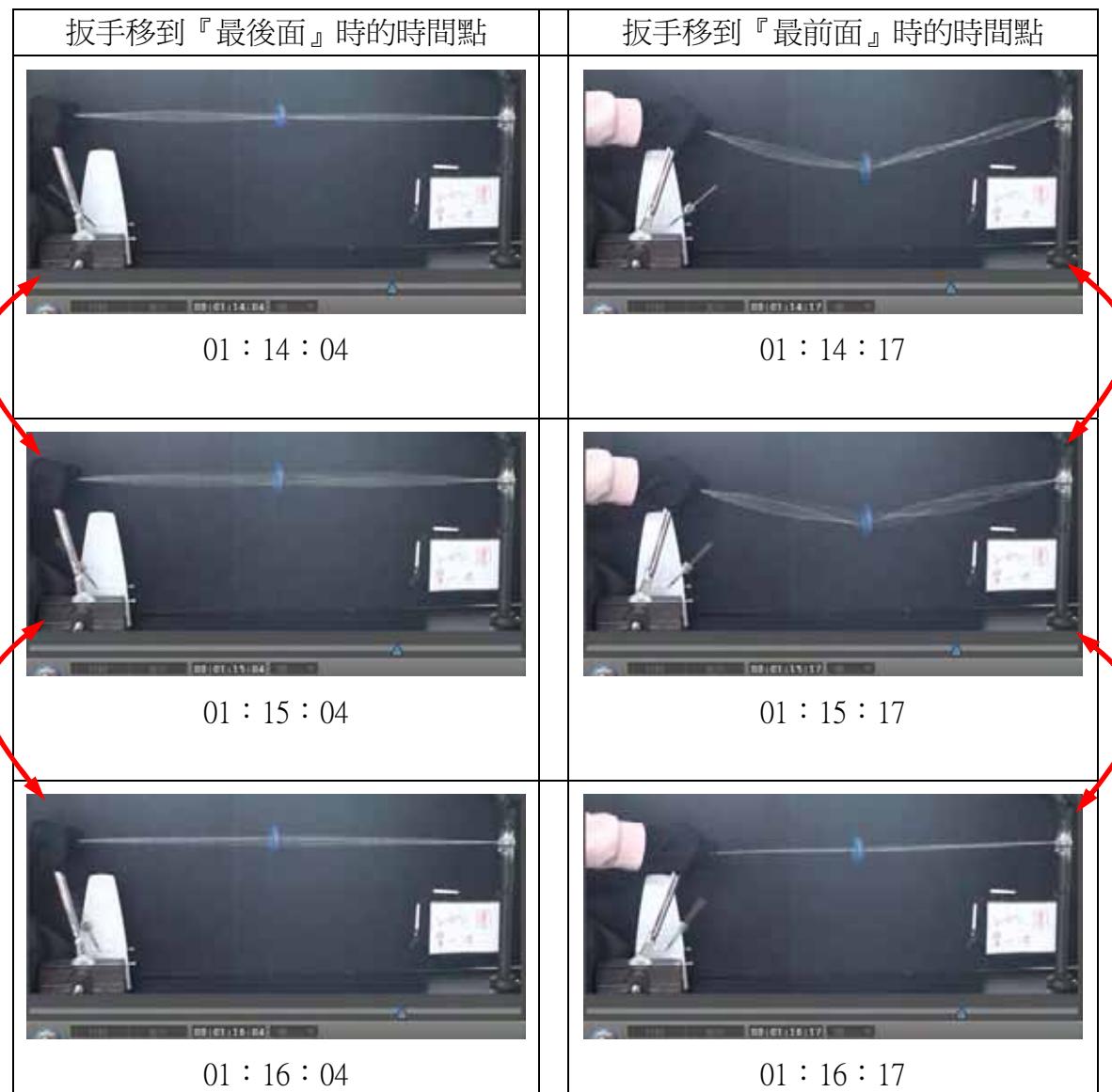






【附錄三】判斷扳手『拉→放→拉→放』頻率是穩定的方法

因剛開始扳手『拉→放→拉→放』的頻率較不穩定，所以分析較後面的影像。所使用的方法如下：先尋找扳手移到『最前面』或『最前面』的每個相鄰影像，紀錄該時刻的時間。



由上圖可知當時間在 01:14:17 ~ 01:16:17 時，扳手在相鄰『最前面』或『最前面』的時間差都是 30 影格，剛好跟所使用的節拍器節奏(120，即前後擺動一次所需的時間為 1 秒)是一樣的；故利用簡單便宜的『扳手及節拍器』取代昂貴的馬達來穩定的拉放繩子是可行的！

【評語】030103

1. 本研究能從生活中的有趣事物中發掘研究議題，並從中解決實驗中發現的問題。解決問題是不容易的，期盼再接再厲讓量化的數據幫助我們更了解解決生活中問題能力的培養。