

2014 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160008

參展科別 物理與天文學

作品名稱 神隱風火輪-「雙股」弦波之駐波探討

得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 嘉義縣立六嘉國民中學

指導教師 劉淑惠

作者姓名 杜伯庸

關鍵字 風火輪、駐波、振幅

作者簡介



國二時因某些因素以致舉家遷至嘉義就學。到了嘉義我的生活有了極大的轉變，相較於之前，現在的生活過得更充實了，或許是因為要升學的關係，雖然從城市搬到鄉下生活，極其不同。

在做這個作品的過程中，嘗盡各種酸甜苦辣，從某個角度來看，如孟子所云：「天將降大任於斯人也，必先苦其心志，餓其體膚，勞其筋骨，空乏其身。」這般的磨練，更能使我展現出生命的硬度及韌性。

作品名稱：神隱風火輪-『雙股』弦波之駐波探討

摘要

傳統的「風火輪」是將酒瓶蓋打扁後穿線所製成的童玩，因容易發生危險幾乎已被遺忘。

利用學姊設計的實驗裝置-『扳手』、『節拍器』及『人的聽力』，補做『轉動風火輪初始圈數』10 圈 ~ 50 圈的實驗。重新看實驗影片，找新方法量上萬筆數據。

實驗結果得知：

所看到的駐波幾乎是繩子捲成『單股』後的波動，偶而會看到繩子鬆開成『雙股』後的波動。

因繩子所受張力大小前後不對稱，故在一個週期內，駐波多數時間發生在扳手由最後面往前移時、會出現 2 次最大值、最大振幅發生在扳手轉到最後面附近，呈週期性變化。

繩長 40 公分、轉動初始圈數只有 10 圈時，適當條件下也會產生駐波。

沒想到看似很簡單的童玩，竟隱藏非常深奧的物理現象！

Abstract

Traditional "Fire-wheel" is the toy which is made by the flat bottle cap and thread. The one almost been forgotten because it prone to danger.

We redesigned the experimental setup which composed of wrenches and metronomes fabricated by senior colleagues to further perform the fire-wheel experiment with the initial rotating number of 10 to 50. In order to obtain the actual data, we acquired thousands of pictures from many experimental video and more than ten thousands data via analyzing these pictures.

Almost observed standing waves are formed while two ropes nearby the fire-wheel are rolled (single branch). However, standing waves seldom exist while two ropes nearby the fire-wheel are separated (two branches).

As the pulling force of the rope is anti-symmetrical on the two sides, standing waves almost occur while the wrench at the end position moves forward. The maximum amplitude of standing waves take place twice in the same period and they happen cyclically.

Under the suitable condition, standing waves still happen at the initial rotating number of 10 for the rope of 40 centimeter.

It is amazing the abundant physical phenomena are hidden in the simple kid toys.

壹、研究動機

傳統的「風火輪」是將酒瓶蓋打扁後穿線所製成的童玩，因容易發生危險幾乎已被遺忘。

二年級時我是學校科學社的一員，聽了學姐有關風火輪 (如圖 1) 的科展報告後，引起我很大的興趣。

沒想到穿過風火輪的兩條繩子纏繞在一起後，在適當的條件下竟會產生駐波，且其振幅會隨時間變化 (如圖 2)。



圖 1：傳統風火輪

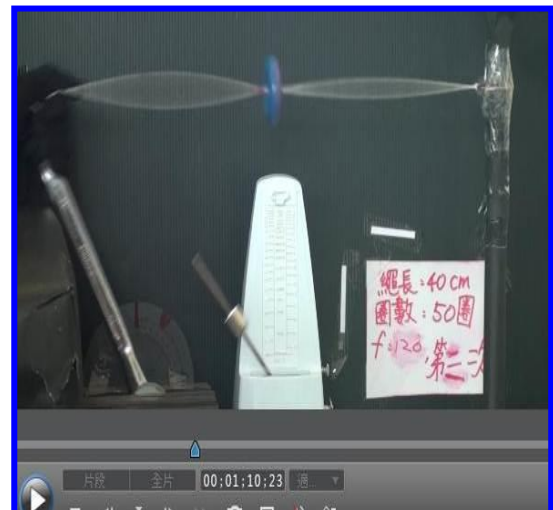
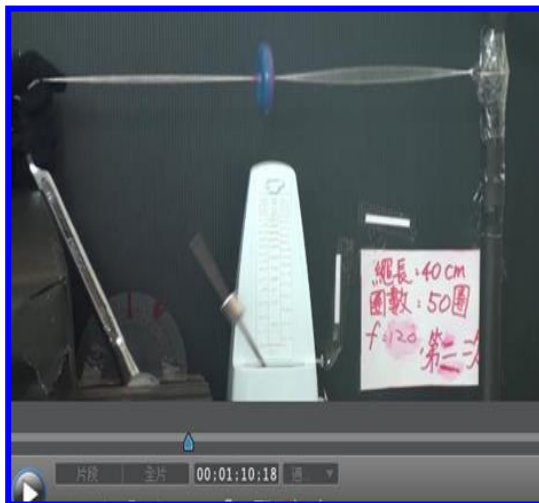


圖 2：穿過風火輪的兩條繩子，在適當條件下會產生駐波，其振幅會隨時間變化。

但是我有幾點疑惑：

第一點：我覺得學姐們所測量的數據 (如圖 3) 不夠。因為利用扳手『拉放繩子』前後來回一次所需時間為 1 秒 (如圖 4)。但是從圖 3 或從參考資料 1 皆可看出，學姊們所分析的影像時間，都不到 1 秒。

所以無法看出：

- (1) 一個完整週期內駐波振幅隨時間變化情形。
- (2) 駐波振幅隨時間的變化是否有規律性。
- (3) 駐波的產生是出現在一個週期內的哪個時段。

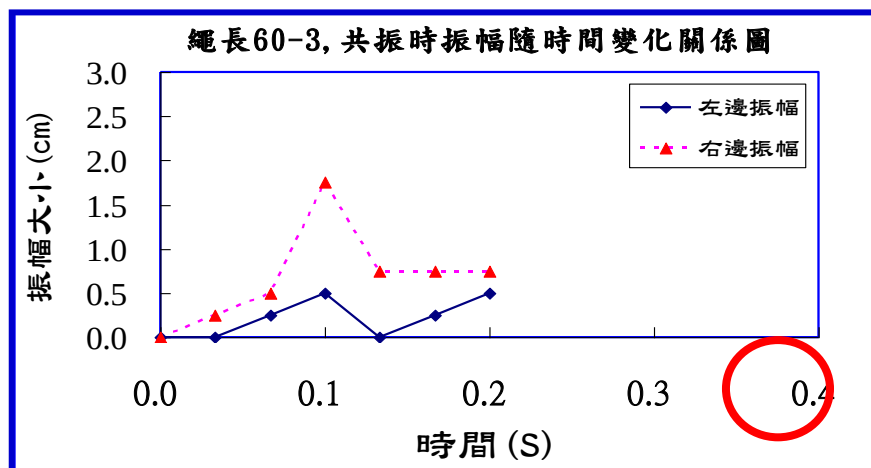


圖 3：學姊們所觀察的影像時間不到 1 秒鐘 (即一個週期)。



(a) 扳手轉到最後面

(b) 扳手轉到最前面

圖 4：扳手『拉放繩子』前後來回一次所需時間約為 1 秒。

第二點：學姊是先用『手』轉動風火輪(如圖 5) 分別為 50 圈、100 圈、150 圈及 200 圈後，再利用『扳手及節拍器』前後穩定的拉放繩子。但是我的疑問是：一定要轉到 50 圈嗎？轉動風火輪的初始圈數只有轉 10 圈時，繩子可以產生駐波嗎？

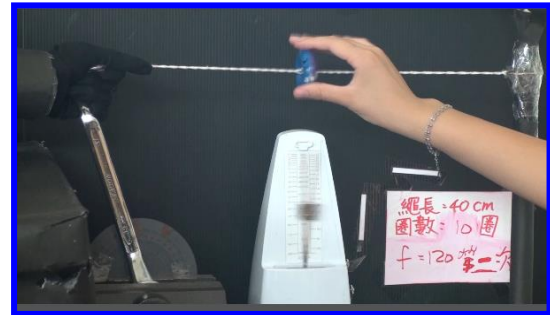


圖 5：先用『手』轉動風火輪

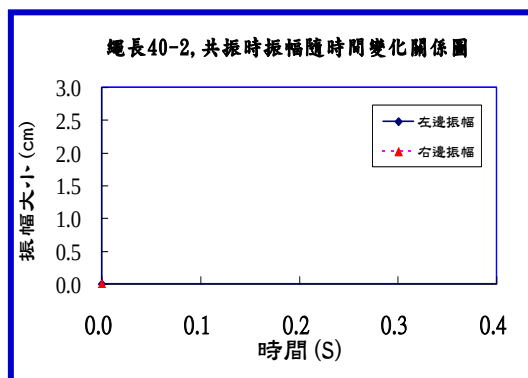


圖 6：繩長 40 公分不會產生駐波

第三點：由學姊的實驗結果得知繩長 40 公分不會產生駐波 (如圖 6)。我的疑問是：真的不會產生駐波嗎？

基於以上這三大疑問，我打算更深入、更廣的研究風火輪。

貳、研究目的：

- 一、探討繩長為 40 公分時，『轉動風火輪的初始圈數』
- 二、為 10 圈、20 圈、30 圈、40 圈及 50 圈，駐波振幅隨時間變化情形。
- 三、找新方法，更深入分析『繩長不同』及『風火輪初始位置不對稱』時，駐波振幅隨時間變化情形。
- 四、分析與歸納繩子的纏繞狀態。

參、研究方法或過程

本實驗得分兩階段進行：

第一階段：利用『適合的設備』拉放風火輪，並將影像錄下來。本階段所用的設備和學姊們的一樣（如附錄一）。

說明：因為那是去年學姊們和多位教授討論後，為了節省經費，自己設計出的方法；我找不到比它更便宜的方法了！就在學姊們技術支援下(如附錄二)，完成研究目的(1)第一階段的實驗。

第二階段：分析所錄製下來的影像，測量不同時間點的駐波振幅；所使用的方
法和去年完全不同。

說明：

- 一、去年的方法：



圖 7：去年學姊們用尺在螢幕上量駐波的振幅。

去年學姊們是用尺在螢幕上量左右兩邊的駐波振幅 (如圖 7)；此方法很傷眼睛，且不易量得準確！

二、今年的方法：

1. 找出轉動風火輪數十圈後，手放開時間 (如圖 8)。



圖 8：找出轉動風火輪 10 圈後，手放開的時間點

2. 紀錄在此時間後 40 秒 ~ 70 秒內，扳手轉到『最前面』與『最後面』連續 10 次的時間(如附錄 3)。
3. 找出這段時間內，扳手較穩定拉放繩子的連續 3 個週期 (即 3 秒鐘)(如附錄 3)。
4. 擷取這 3 個週期的影像，每 1/30 秒擷取 1 張，共擷取 90 張。
5. 利用『JRuler 軟體』測量並記錄每張影像的駐波振幅 (如圖 9)，左右兩邊各量 3 次，取其平均值。

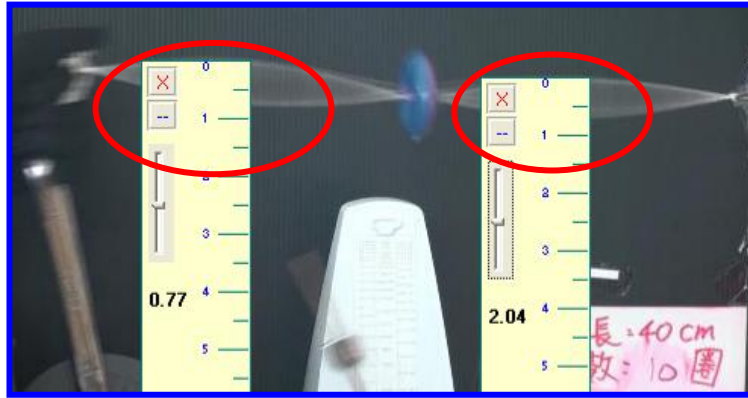


圖 9：利用『JRuler 軟體』測量駐波振幅。

6. 6.將所擷取的第一個影像時間定為時間軸的原點，利用「Excel」做振幅隨時間變化關係圖。

肆、研究結果與討論

一、研究結果：

1.『繩長』為 40cm、50cm、60cm 及 70cm 時，駐波振幅隨時間變化的情形

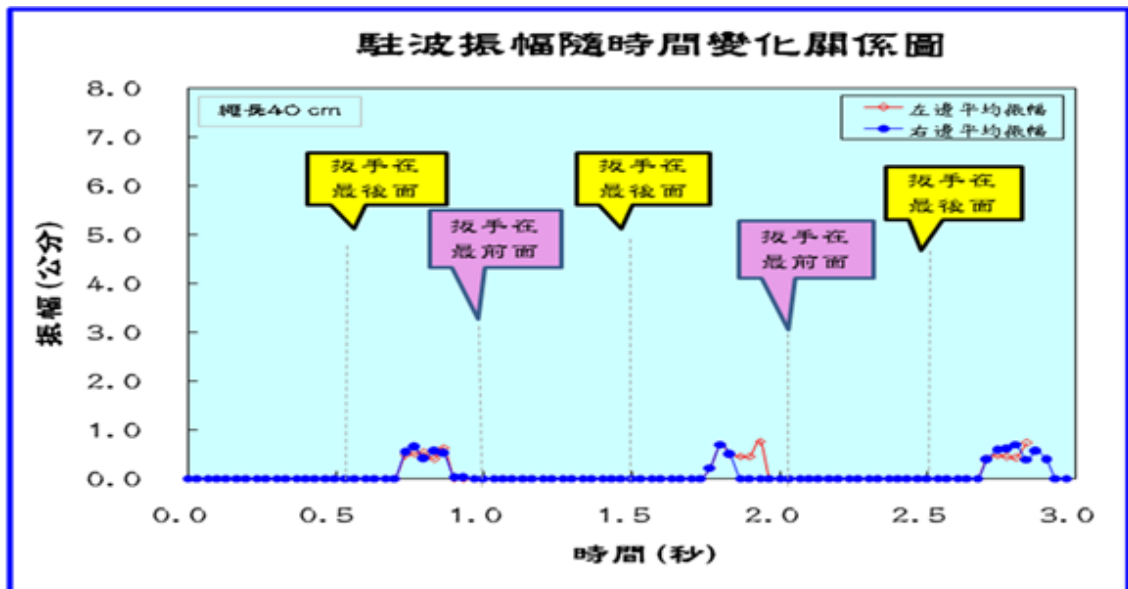


圖 10：繩長 40 cm (初始圈數 50 圈、拉放頻率 1Hz) 時，駐波振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)可看出繩長為 40cm 時，**不易產生駐波**。

(2)**駐波的產生**，幾乎都發生在**扳手由最後面移到接近最前面**時。

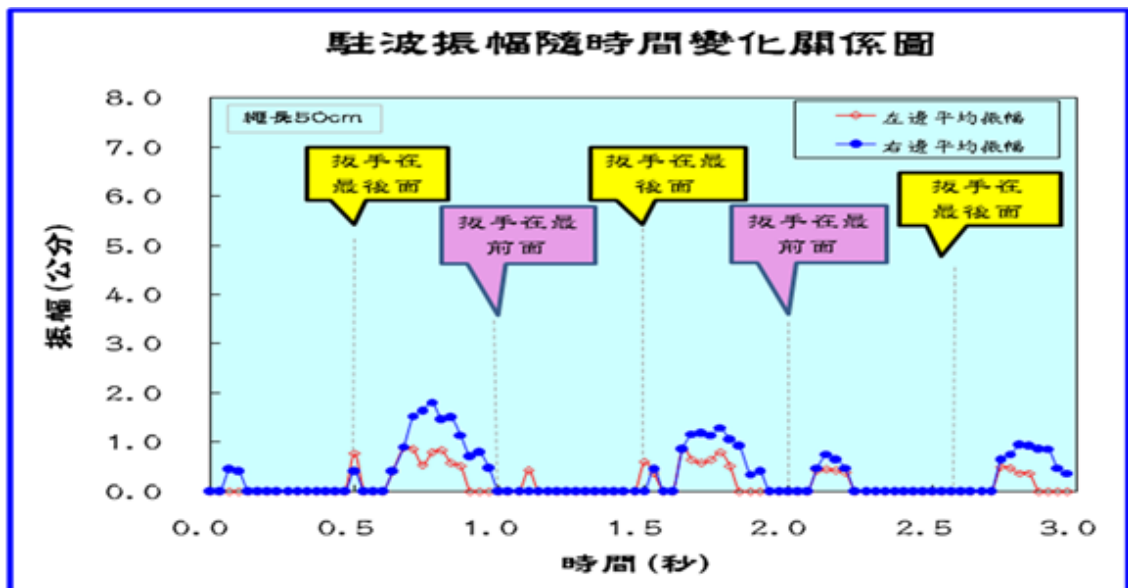


圖 11：繩長 50 cm (初始圈數 50 圈、拉放頻率 1Hz) 時，駐波振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)**駐波的產生**，多數時間是發生在**扳手由最後面向前移**時。

(2)**在一個週期內** (即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面)，**駐波的振幅**多數時間會出現**2~3 個最大值**，似乎有週期性變化。

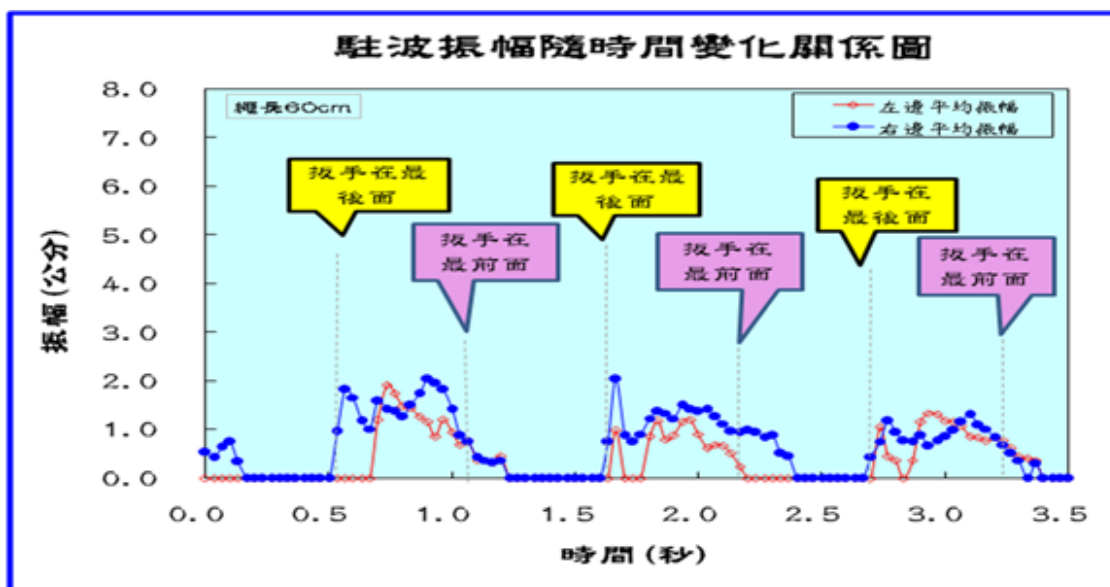


圖 12：繩長 60 cm (初始圈數 50 圈、拉放頻率 1Hz) 時，駐波振幅隨時間變化關係
 說明：駐波的產生，多數時間是發生在扳手由最後面往前移時。
 此過程中駐波的振幅有時會出現 2 個最大值，似乎有週期性變化。

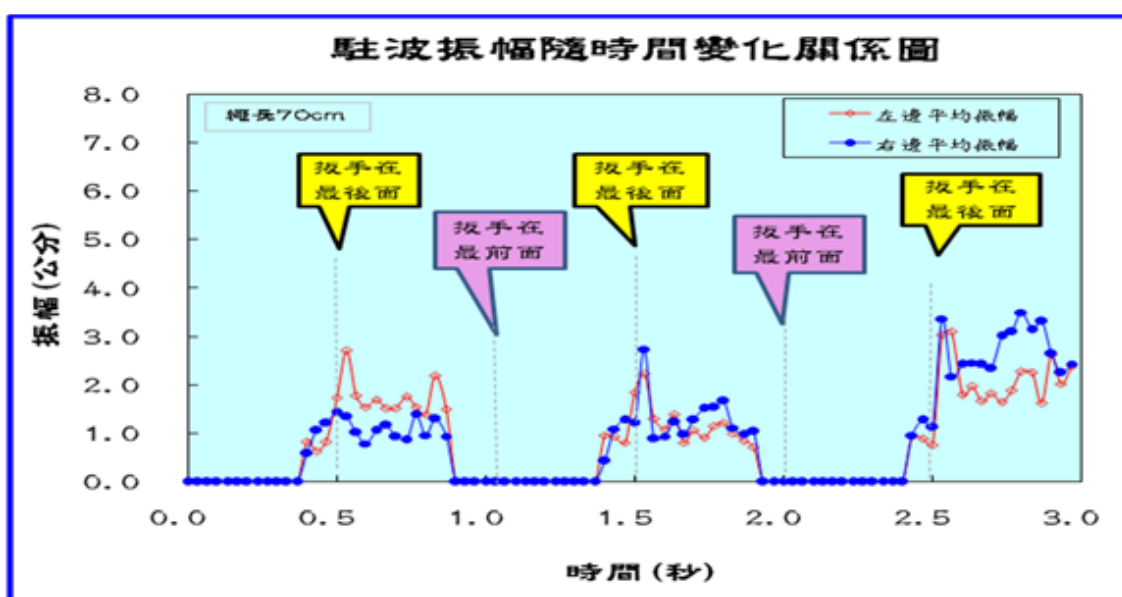


圖 13：繩長 70 cm (初始圈數 50 圈、拉放頻率 1Hz) 時，駐波振幅隨時間變化關係
 說明：駐波的產生，多數時間是發生在扳手由最後面往前移時。

分析：

A.由圖 10 ~圖 13 中可看出：駐波的產生，多數時間是發生在扳手由最後面往前移時；而在這段過程中，繩子所受拉力較小且持續減小。

B.在一個週期內 (即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面) 駐波的振幅有時會出現 2 個最大值，似乎有週期性變化。

C.由圖 10 可看出：繩長較短不易產生駐波。

D.若將圖 10 ~圖 13 中每個週期內「駐波的最大振幅」平均與「繩長」作圖 (如圖 14) ，可看出繩長較短所產生的駐波，其最大振幅較小；由此可知「繩長」是影響駐波最大振幅的因素之一。

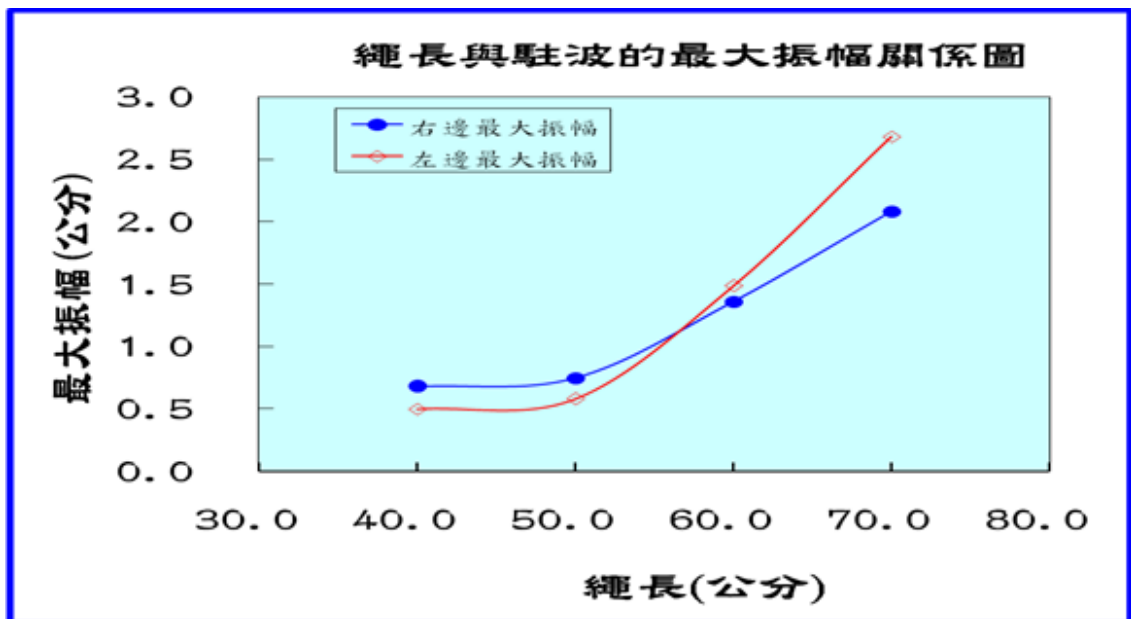


圖 14：駐波的最大振幅與繩長的關係圖

說明：當繩長為 40 公分、50 公分、60 公分及 70 公分時，繩長較短所產生的駐波，其最大振幅較小。

2.『轉動風火輪的初始圈數』為 10 圈 ~ 50 圈時，駐波振幅隨時間變化的情形

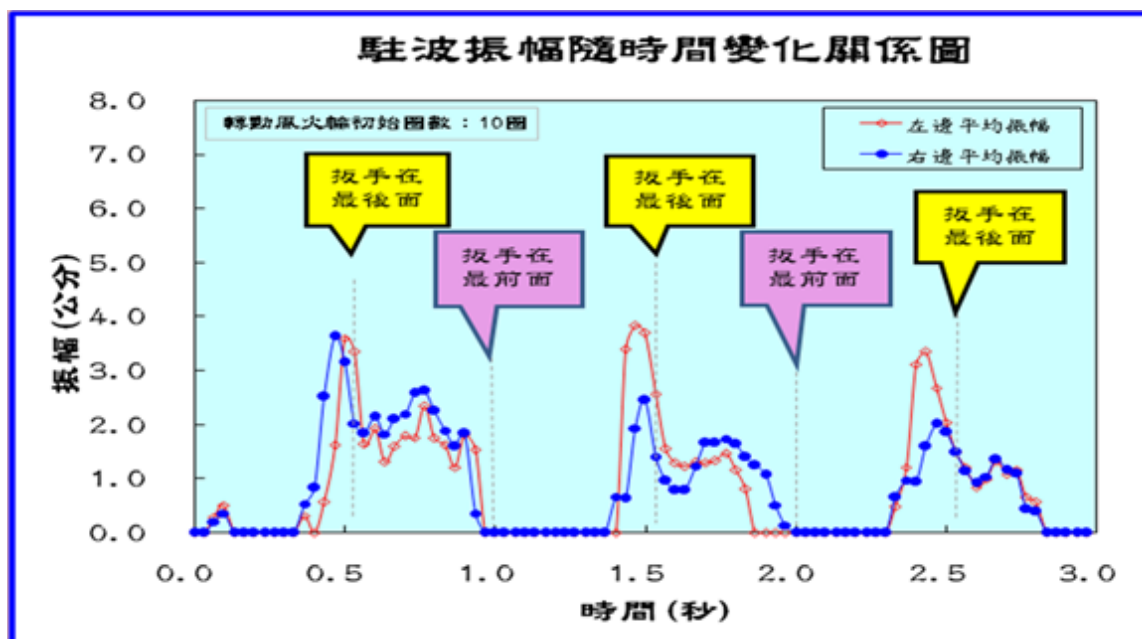


圖 15：「轉動風火輪的初始圈數」為 10 圈（繩長 40cm、拉放頻率 1Hz）時，駐波振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)當**扳手由前面轉到接近最後面**時，駐波的**振幅較大**。

(2)在一個週期內（即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面），駐波的振幅多數時間會出現**2 個最大值**；且**最大振幅**多數時間是發生在**扳手轉到最後面附近**，似乎有週期性變化。（如附件）

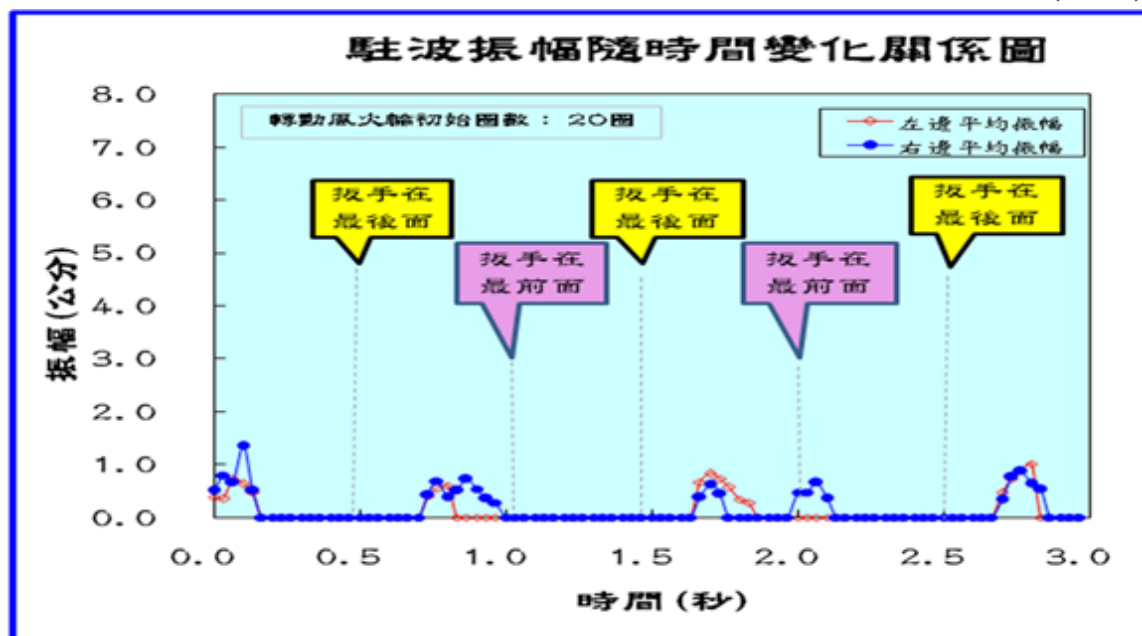


圖 16：「轉動風火輪的初始圈數」為 20 圈（繩長 40cm、拉放頻率 1Hz）時，駐波振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)**不易產生駐波**，且駐波的振幅較小。

(2)駐波的產生，多數時間是發生在**扳手由最後面往前移**時。

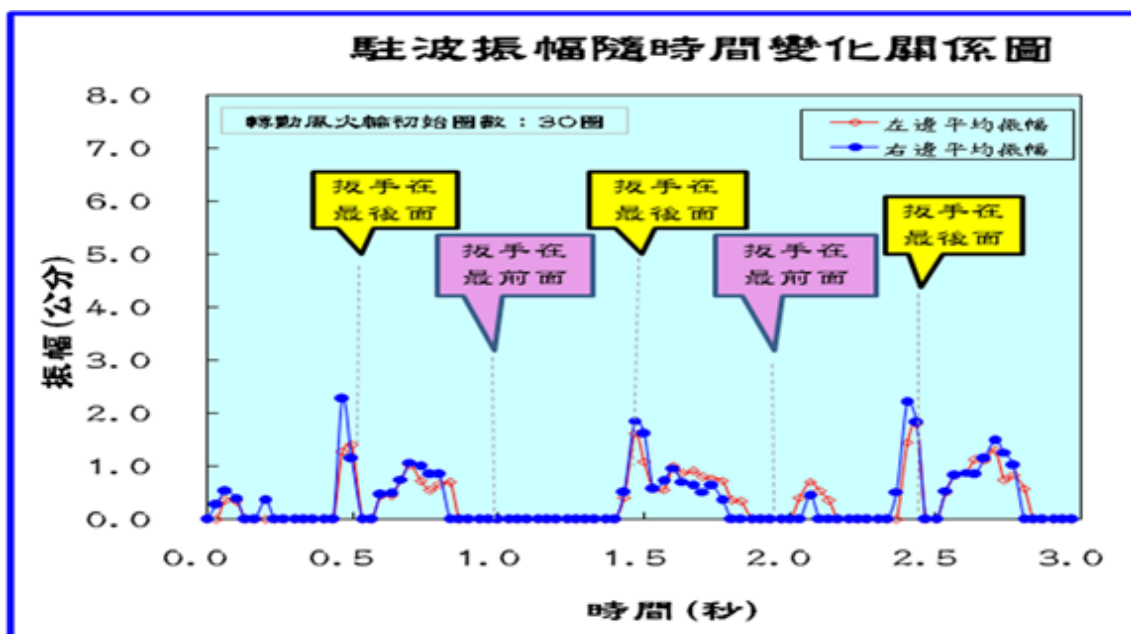


圖 17：「轉動風火輪的初始圈數」為 30 圈（繩長 40cm、風火輪拉放頻率 1Hz）時，駐波振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)駐波的產生，多數時間是發生在**扳手由最後面往前移**時。

(2)當**扳手轉到最後面附近**時，駐波的**振幅較大**；當扳手再轉回最前面過程中，**駐波的振幅**，多數時間會出現**2 個最大值**；且**最大振幅**多數時間是發生在**扳手轉到最後面附近**，似乎有週期性變化。

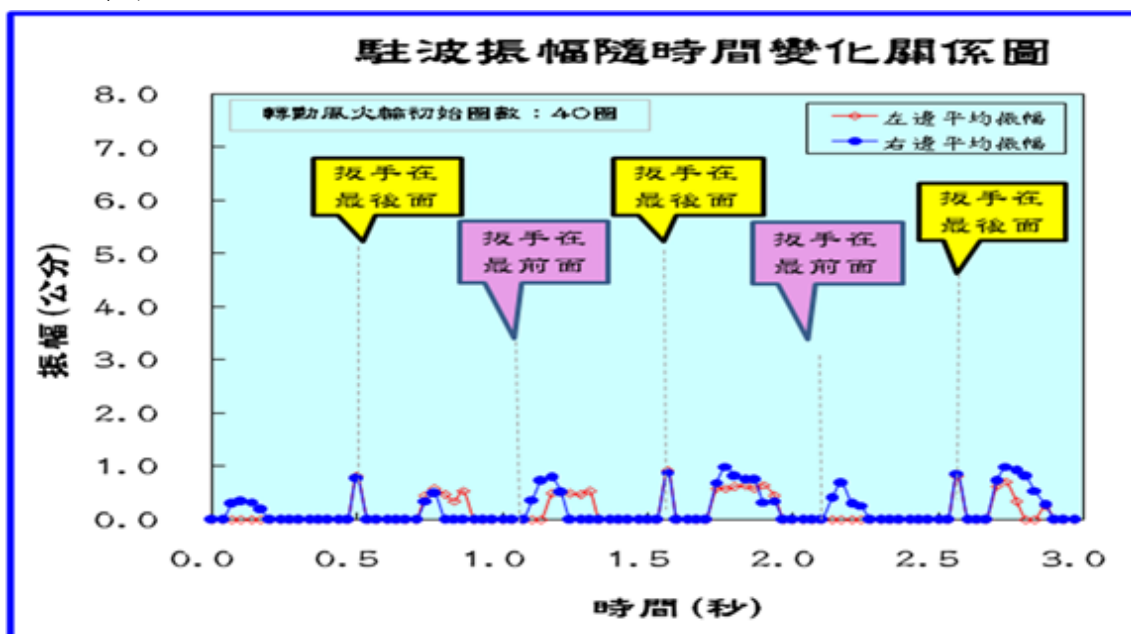


圖 18：「轉動風火輪的初始圈數」為 40 圈（繩長 40cm、風火輪拉放頻率 1Hz）時，駐波振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)駐波的**振幅較小**。

(2)駐波的產生，多數時間是發生在**扳手由最後面往前移**時；在這期間駐波的**振幅**，多數時間會出現**2 個最大值**，似乎有週期性變化。

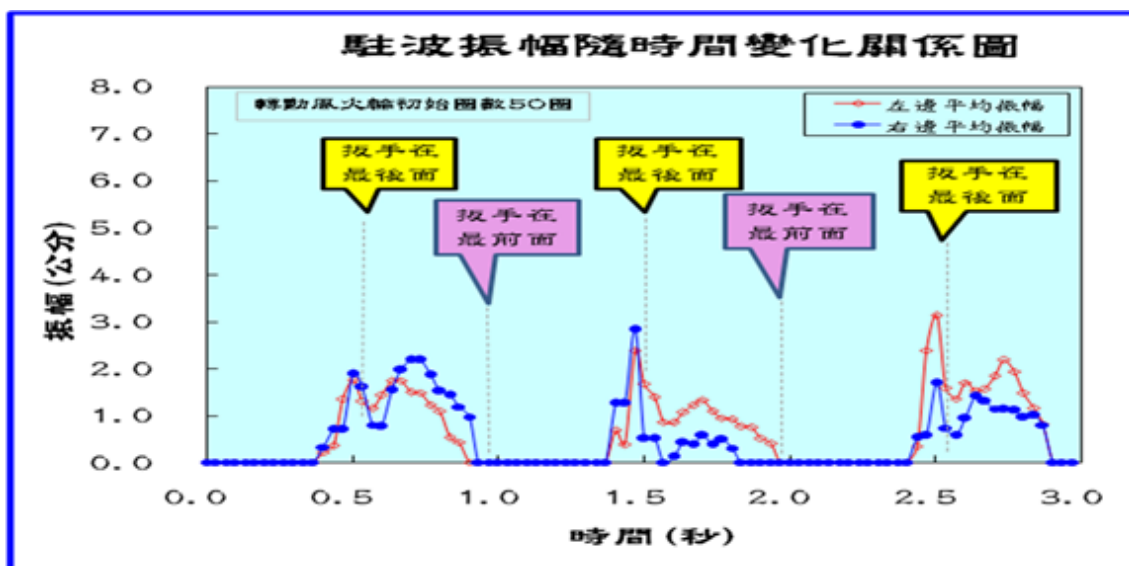


圖 19：「轉動風火輪的初始圈數」為 50 圈（繩長 40cm、風火輪拉放頻率 1Hz）時，駐波振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)駐波的產生，多數時間是發生在**扳手由最後面往前移**時；
 (2)在一個週期內（即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面），**駐波的振幅**多數時間會出現**2 個最大值**；且**最大振幅**多數時間是發生在**扳手轉到最後面附近**，似乎有週期性變化。

分析：由圖 15 ~ 圖 19 可看出

- A. **駐波的產生**，多數時間是發生在**扳手由最後面往前移**時。
- B. 在同一週期內（即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面），**駐波的振幅**多數時間會出現**2 個最大值**；且**最大振幅**多數時間是發生在**扳手轉到最後面附近**，似乎有週期性變化。
- C. 若將圖 15 ~ 圖 19 中每個週期內「駐波的最大振幅」平均與『轉動風火輪的初始圈數』作圖（如圖 20），可看出 20 圈及 40 圈時，駐波的最大振幅較小。

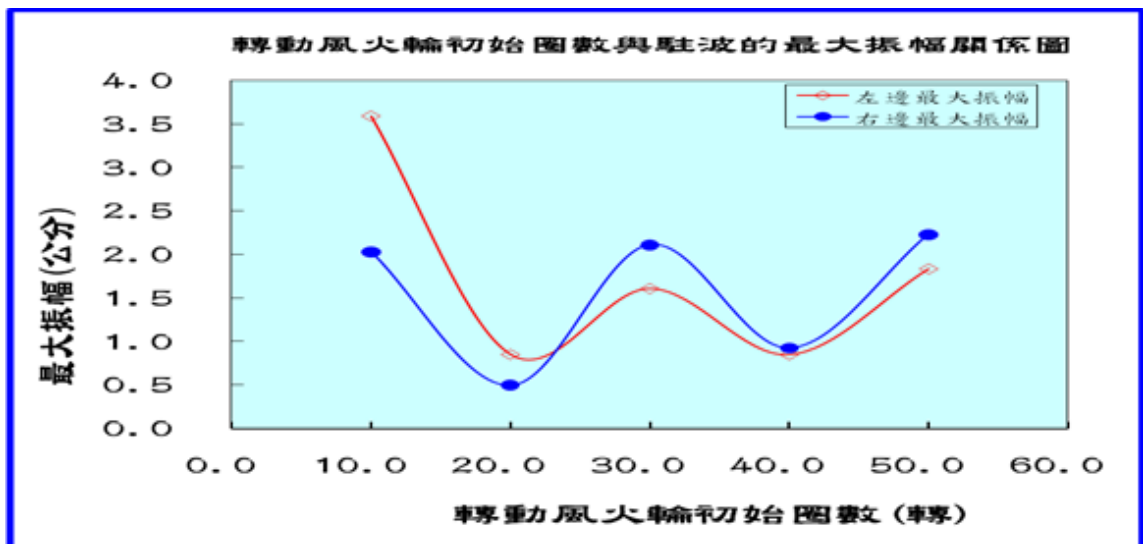


圖 20：駐波的最大振幅與轉動風火輪初始圈數的關係圖

說明：當轉動風火輪的初始圈數為 20 圈及 40 圈時，駐波的最大振幅較小。

3.探討『風火輪初始位置』不對稱時，駐波振幅隨時間變化的情形

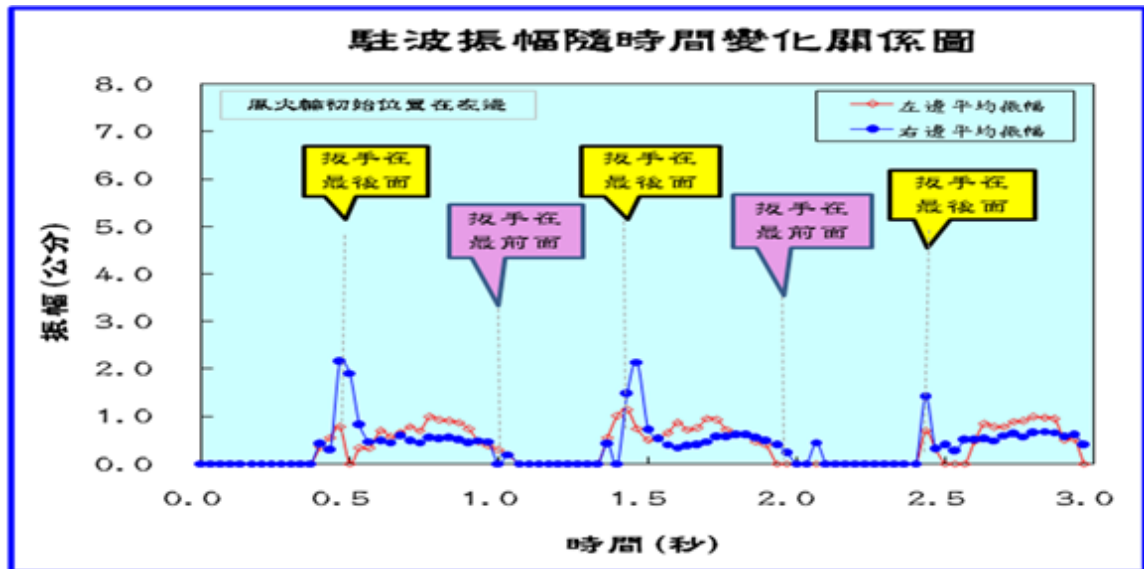


圖 21：「風火輪初始位置」在左邊 (即右繩較長)時，振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)駐波的產生，多數時間是發生在扳手由最後面往前移時。

(2)最大振幅多數時間是發生在扳手轉到最後面附近，且右繩的最大振幅較大，似乎有週期性變化。

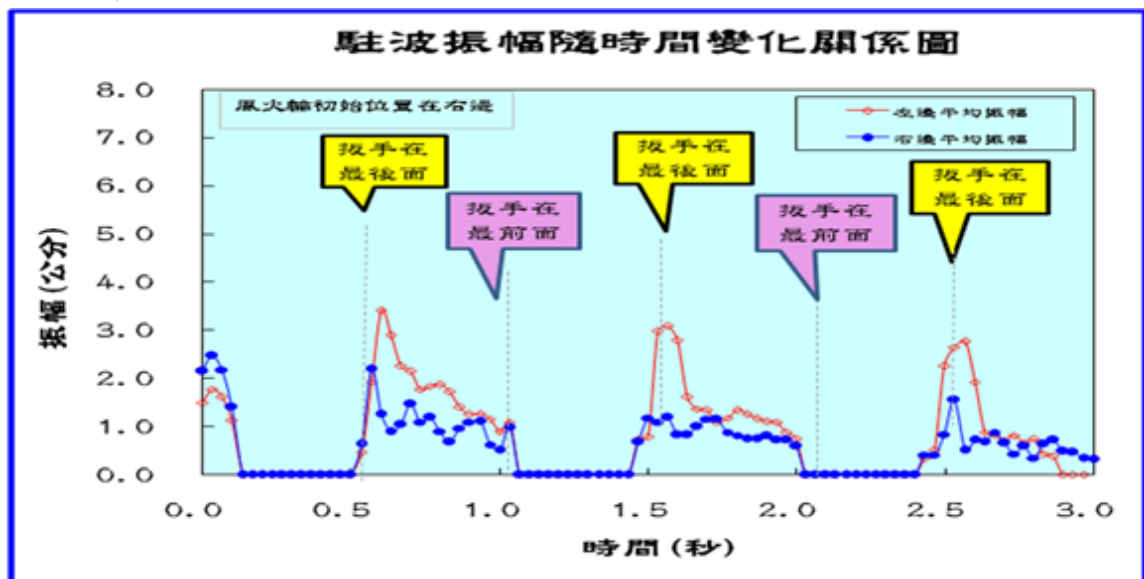


圖 22：「風火輪初始位置」在右邊 (即左繩較長)時，振幅隨時間變化關係圖

說明：(1)駐波多數時間是發生在扳手由最後面往前移時。

(2)最大振幅多數時間是發生在扳手轉到最後面附近，且左繩的最大振幅較大，似乎有週期性變化。

分析：由圖 21～ 圖 22 可看出，

A.駐波的產生，大多數時間是發生在扳手由最後面往前移時。

B.最大振幅多數時間是發生在扳手轉到最後面附近。

C.『繩長』是影響駐波振幅的因素之一。

4.分析與歸納繩子的纏繞狀態

圖 23 是繩子穿過風火輪後的影像；可看出繩子初始狀態是『雙股』的。

圖 24 是轉動風火輪數十圈後，手開始放開時的影像；可看出轉動數十圈後，繩子已被纏繞成『單股』狀態。



圖 23：開始做實驗時的第一個影像。
說明：可看出繩子初始狀態是『雙股』的。



圖 24：轉動風火輪數十圈後，手開始放開時的影像。
說明：繩子已被纏繞成『單股』狀態。

在扳手前後拉放繩子過程中，依『扳手移動方向』與『繩長』，可分為四個階段(以 $L(t)$ 表示隨時間變化的繩長， L' 為轉動風火輪數圈後的繩長)



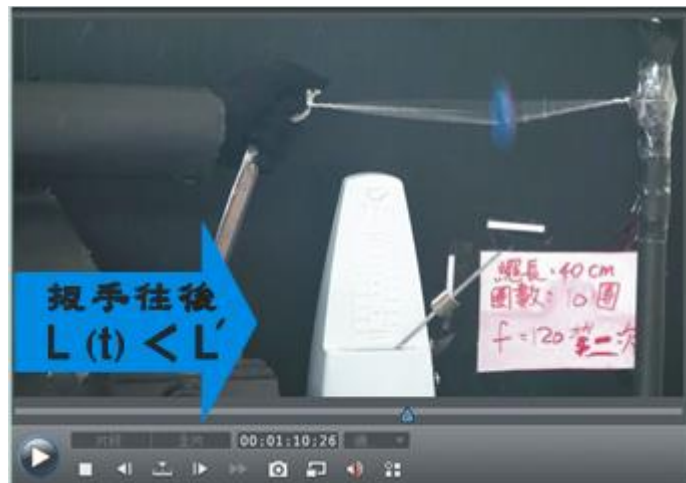
第一階段：纏繞成『單股』的繩子漸鬆開成『雙股』。



第二階段：已鬆開成『雙股』的繩子將再捲成『單股』。

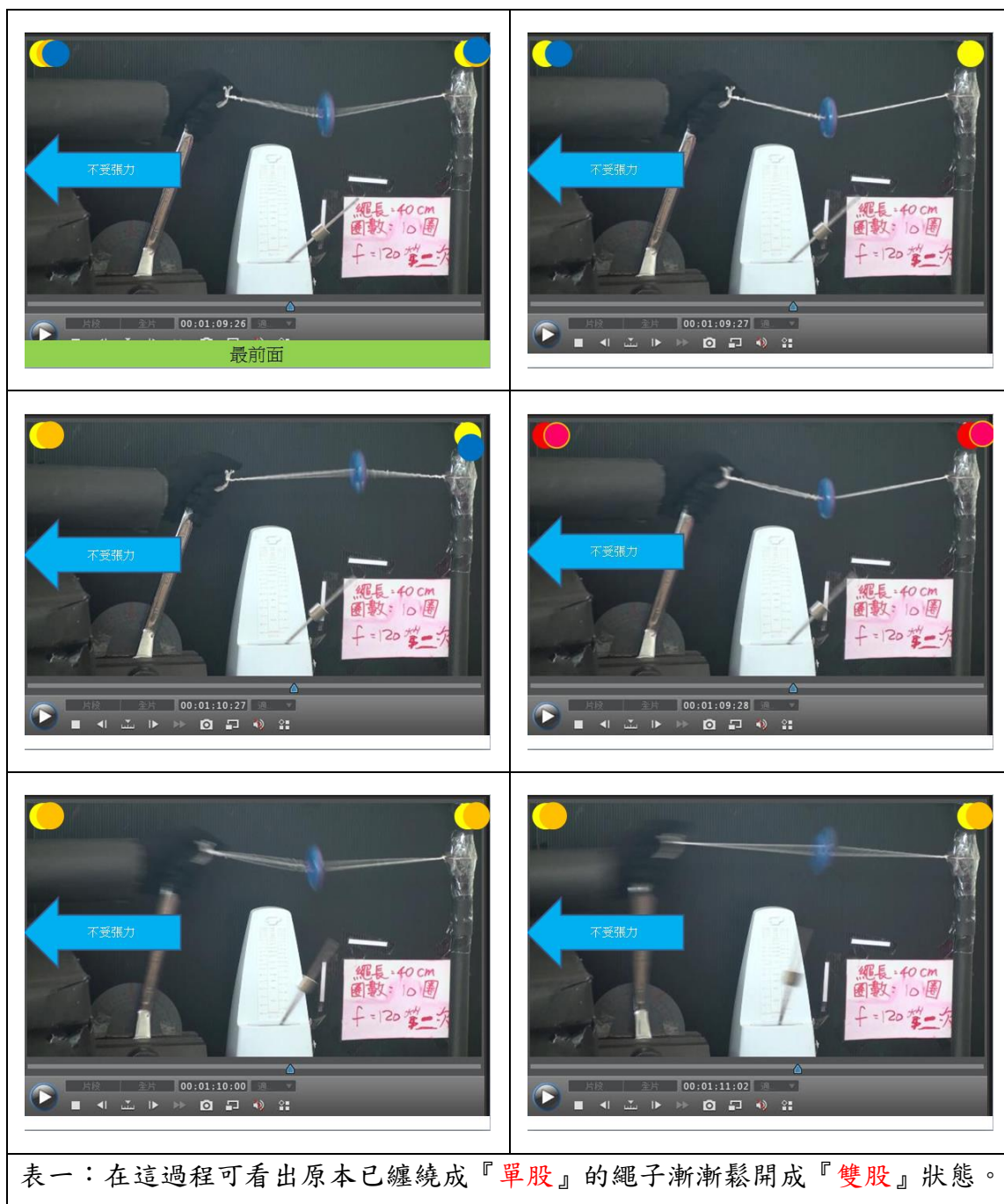


第三階段：可看到繩子漸鬆開成『雙股』。

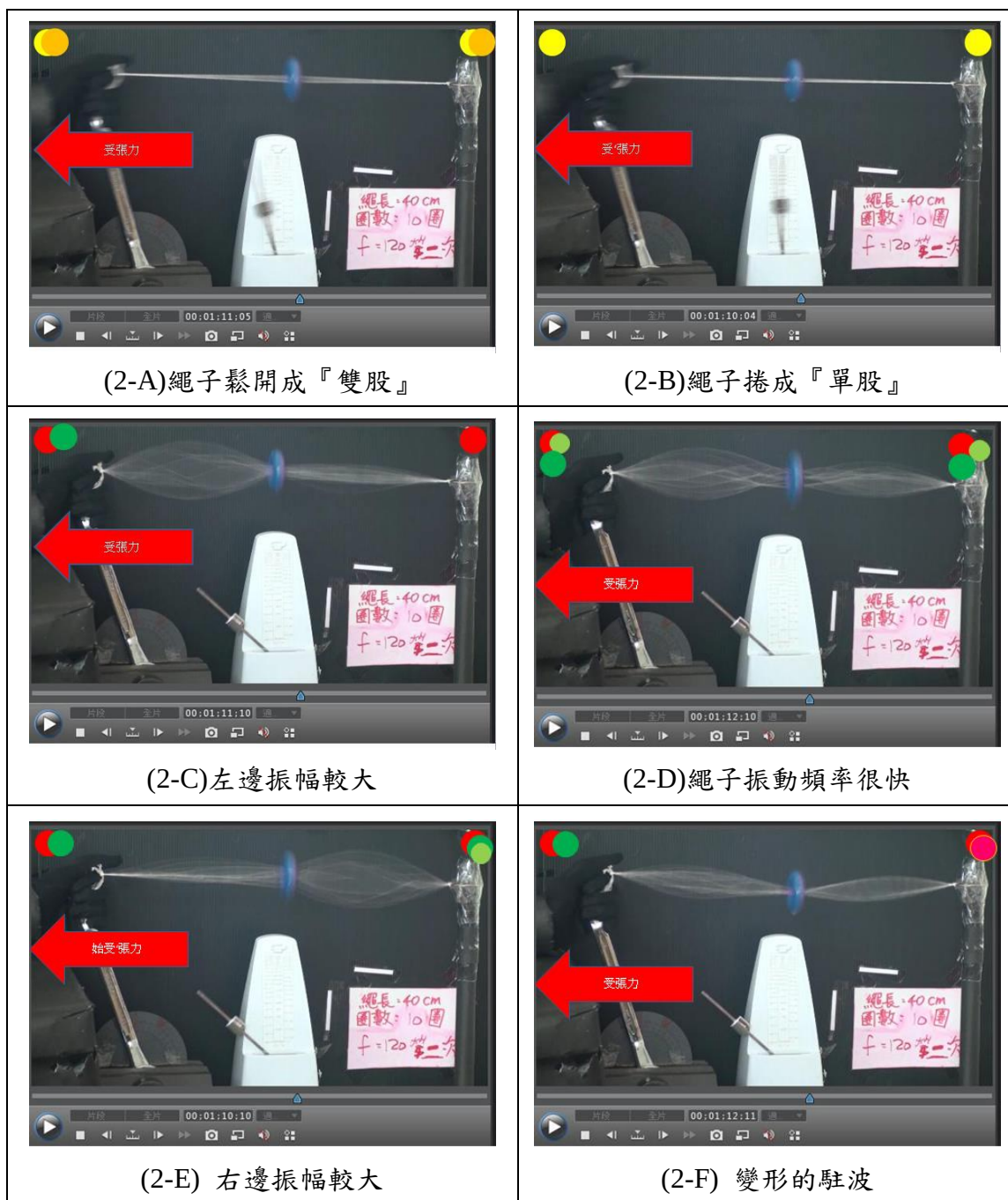


第四階段：繩子將再捲成『單股』。

第一階段：扳手『由最前面往後』拉繩子，但是『繩長 $L(t) < \text{轉動數拾圈後的長度}$ 』時，此階段所受張力較小；繩子的狀態可分為下列幾種情形（如表一）。



第二階段：扳手『繼續往後拉』繩子，但是『繩長 $L(t) >$ 轉動數拾圈後的長度』時，此階段所受張力較大；繩子的狀態可為下列幾種情形（如表二）。

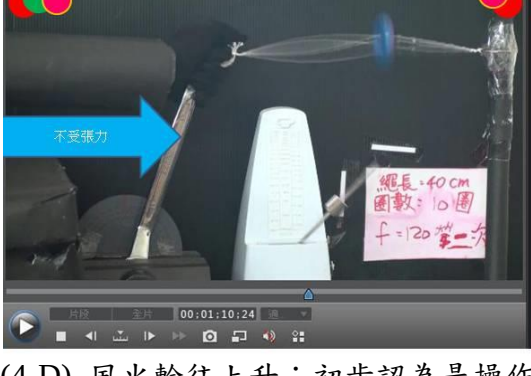
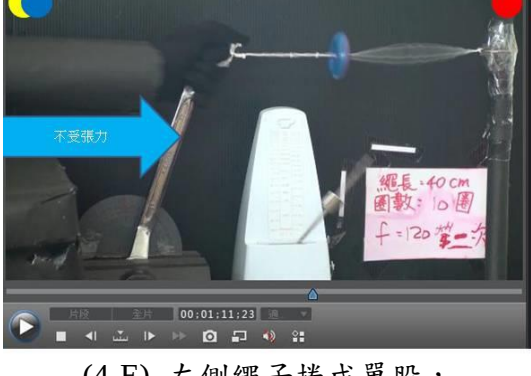


表二：在此階段，已鬆開成『雙股』狀態的繩子將再捲成『單股』狀態，在適當條件下就會產生駐波。因繩子振動很快，但是我們的攝影機每秒只能拍攝 30 張，故會看到 C、D、E 的影像！

第三階段：『扳手開始往前轉動』，但繩子繩長 $L(t) >$ 轉動數拾圈後的長度』時，此階段所受張力較大；繩子的狀態可為下列幾種情形 (如表三)。

 (3-A) 變形的駐波	 (3-B) 『雙股』的繩子開始鬆開
 (3-C) 變形的駐波	 (3-D) 變形的駐波
 (3-E) 變形的駐波	表三：在此階段，多數時間所看到的是變形的駐波！也可看到繩子慢慢鬆開成『雙股』狀態。

第四階段：『扳手開始往前轉動』，但繩子繩長 $L(t) <$ 轉動數拾圈後的長度』時，此階段所受張力較大時；繩子的狀態可為下列幾種情形（如表四）。

 (4-A) 變形的駐波	 (4-B) 變形的駐波
 (4-C) 因左邊駐波的節點不在固定端，初步認為這是繩子鬆開成『雙股』所產生的駐波。	 (4-D) 風火輪往上升：初步認為是操作不穩定所造成的！
 (4-E) 左側繩子捲成單股，右側繩子產生駐波	 (4-F) 兩側繩子都捲成單股！
表四：在此階段，繩子最後會捲成單股（如圖 4-F）。在這過程，偶而會看到繩子鬆開成『雙股』所產生的駐波（如圖 4-C），也可看到繩子所受張力較小時所產生的駐波！（如圖 4-E）	

2. 討論：

(1)為何會產生駐波？為何駐波的產生，多數時間是發生在扳手由最後面往前移時？為何在同一週期內（即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面），駐波的振幅多數時間會出現2個最大值、最大振幅幾乎出現在扳手轉到最後面附近時，似乎有週期性變化？

在本實驗過程中，有多項物理量不得不隨時間改變：

A. 繩子所受的張力與繩長：

為了讓風火輪可以不斷轉動，實驗過程中必須不斷地拉放繩子，故繩子所受張力與繩長會隨時間改變。

B. 風火輪的轉動角速率與方向：

在扳手前後拉放繩子過程中，風火輪的『轉動角速度 ω 』有時快有時慢；其方向有時順時鐘，有時逆時鐘。而『轉動角頻率 f_w 』和『轉動角速率 ω 』的關係如下：

$$f_w = \frac{\omega}{2\pi} \dots\dots\dots(1)$$

C. 繩子的自然振動頻率：

根據單弦振動理論，繩長為 ℓ 兩端固定時，繩子的『自然頻率 f_n 』為

$$f_n = \frac{n}{2\sqrt{m}} \sqrt{\frac{F}{\ell}} \dots\dots\dots(2)$$

F ：繩子所受張力 (N) m ：繩子質量 (Kg) ℓ ：繩長 (m)

和繩子所受張力、繩子質量及繩長有關。

為何會產生駐波？初步認為這是風火輪的『轉動角頻率 f_w 』和繩子的『自然頻率 f_n 』相同或接近時所產生的共振現象；可用圖 26～圖 27 來說明。

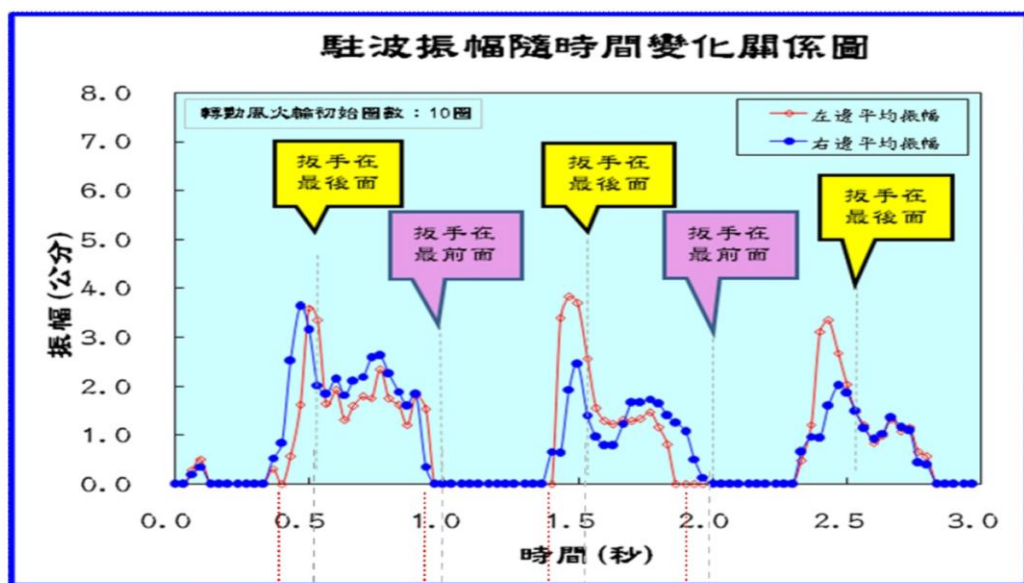


圖 15：

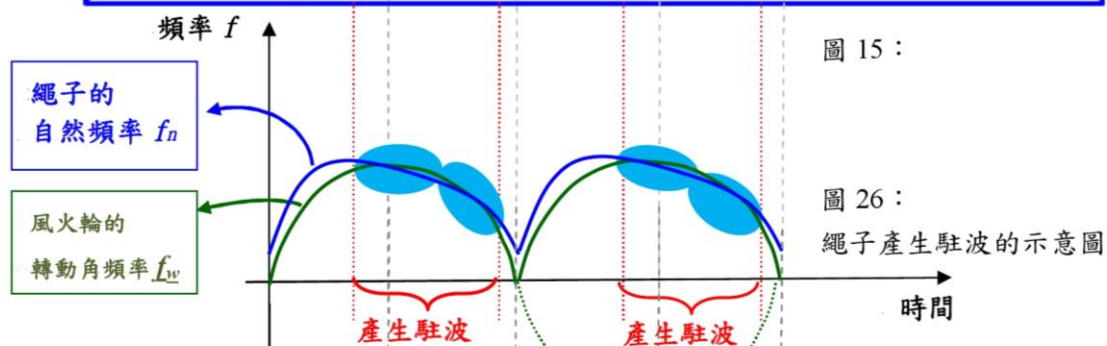


圖 26：
繩子產生駐波的示意圖

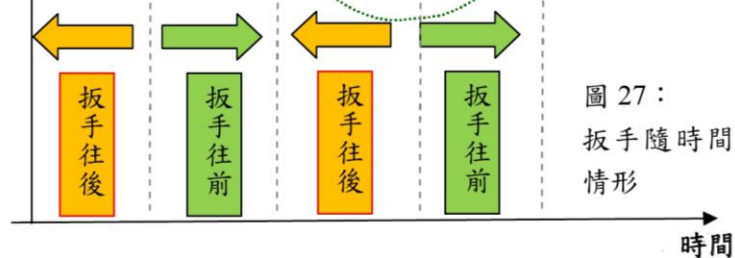


圖 27：
扳手隨時間前後轉動的情形

說明：在圖 26 中

- (A) 理論上風火輪的『轉動角頻率 f_w 』在扳手移到最前面時最小，移到最後面時最大，有週期性變化 (如綠色線)。
- (B) 我們發現『扳手由最前面轉到最後面』的過程中，繩子所受張力較大且增加；而『扳手由最後面轉到最前面』的過程中，繩子所受張力較小且持續減小，前後是不對稱的！由單弦振動理論可知影響繩子的『自然頻率 f_n 』最主要因素為所受張力大小，故理論上可用藍色線表示。
- (C) 當風火輪的『轉動角頻率 f_w 』與繩子的『自然頻率 f_n 』相同或接近時，就會產生駐波。

故由圖 26 ~ 圖 27 可說明：

A. 駐波的產生，多數時間是發生在扳手由最後面轉到最前面時。

B. 在同一週期內 (即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面)，駐波的振幅多數時間會出現 2 個最大值；可能因繩子內部摩擦係數不同，最大振幅幾乎出現在扳手轉到最後面附近時，似乎有週期性變化！

(2) 為何繩長較短 (如圖 10) 不易產生駐波？若有產生駐波，都是發生在扳手轉到接近最前面時？

根據單弦振動理論公式，繩子的自然頻率

$$f_n = \frac{n}{2\sqrt{m}} \sqrt{\frac{F}{\ell}}$$

在相同條件下，繩長愈短，其自然頻率愈大。

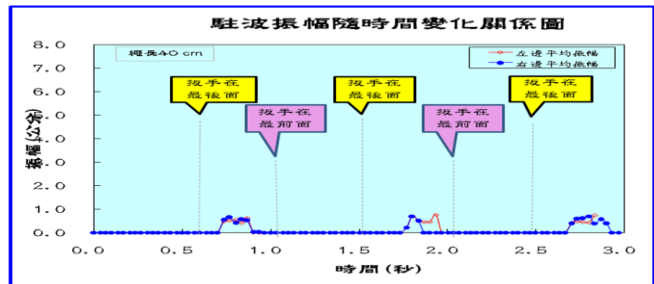


圖 10

故當風火輪的『轉動角頻率 f_w 』一樣時，繩長較短的繩子相對之下則不易產生駐波 (如圖 28)；由此圖也可說明，繩子較短所產生的駐波，幾乎發生在扳手由後面往前移到接近最前面時，此時繩子所受到的拉力最小。

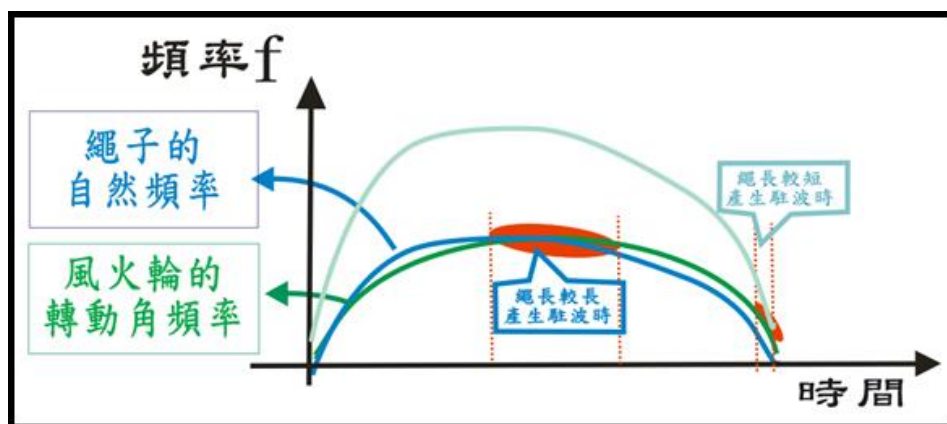


圖 28：繩長較短時，不易產生駐波的示意圖

說明：可看出繩長較短時，繩子的自然頻率較大，故不易產生駐波；若有產生駐波，幾乎是發生在扳手由後面往前轉到接近最前面時。

(3)為何在同一個週期內 (即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面)，駐波的振幅有時會出現3 個最大值 (如圖 11)? 為何這 3 個最大值的振幅不一樣?

由單弦振動理論可知：
實驗過程中，影響繩子的『自然頻率 f_n 』最主要因素為受張力大小。

故若扳手轉到最前面時，只要拉力稍微變化，風火輪的『轉動角頻率 f_w 』

與繩子的『自然頻率 f_n 』接近時，就會產生駐波(如圖 29)。

故有時在同一週期內，駐波的振幅會出現 3 個最大值；因為繩子內部摩擦係數不同，這 3 個最大值的振幅不一樣(如圖 11)。

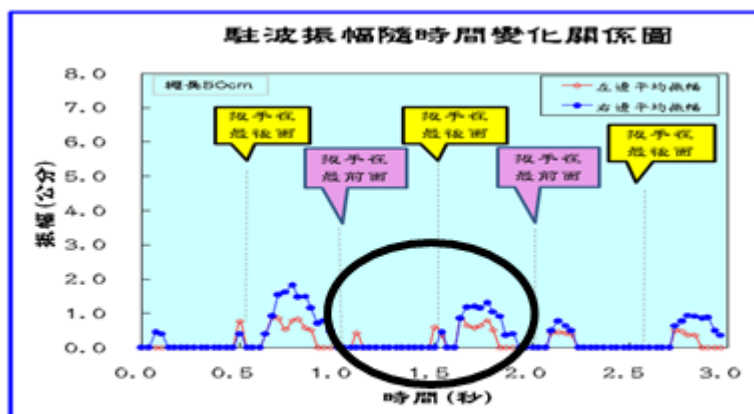


圖 11

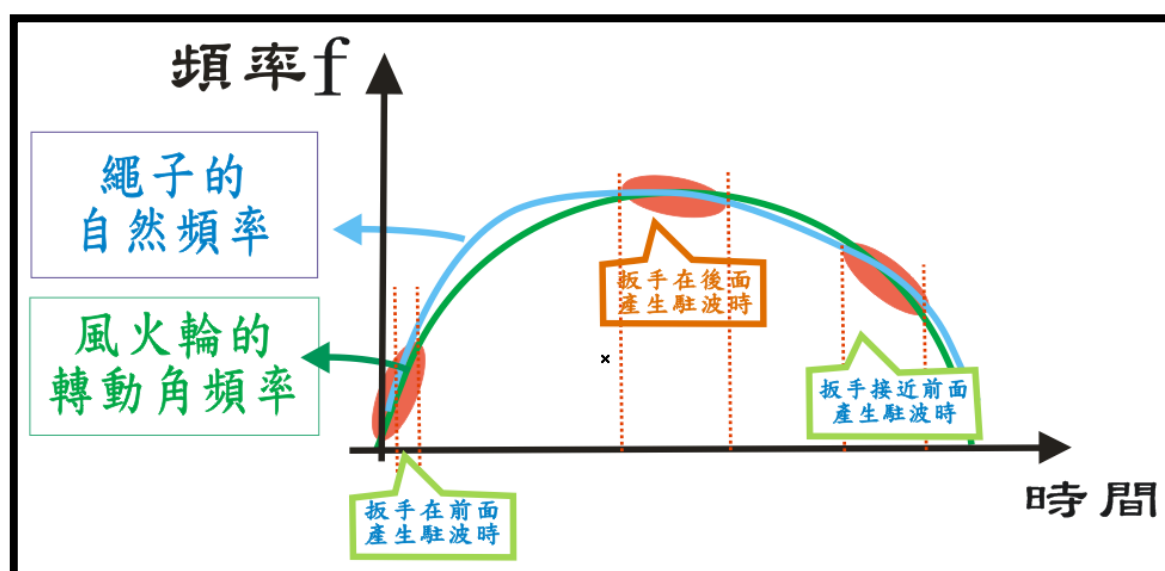


圖 29：在同一週期內，駐波的振幅產生 3 個最大值的示意圖

說明：當扳手轉到最前面時，只要拉力稍微變化，風火輪的『轉動角頻率 f_w 』與繩子的『自然頻率 f_n 』接近時，就會產生駐波；故有時在同一週期內，駐波的振幅會出現 3 個最大值。

(4)為何當轉動風火輪的初始圈數分別為 10 圈、20 圈、30 圈、40 圈及 50 圈時；

初始圈數為 20 圈及 40 圈時駐波的最大振幅較小?(如圖 20)

詳細原因我們不是很清楚，初步判斷是因為此時繩子內部的摩擦係數較大吧！

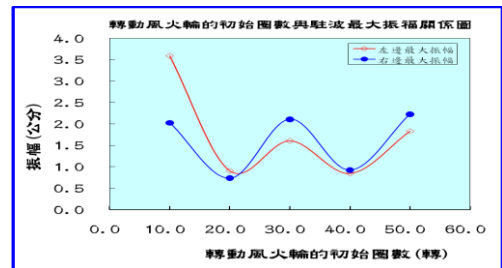


圖 20

(5)「風火輪初始位置在繩兩側時，對駐波的產生有何影響?...

由圖 21 ~ 圖 22 可看出，繩長較長的一端 (如圖 30)，駐波的振幅多數時間較長。

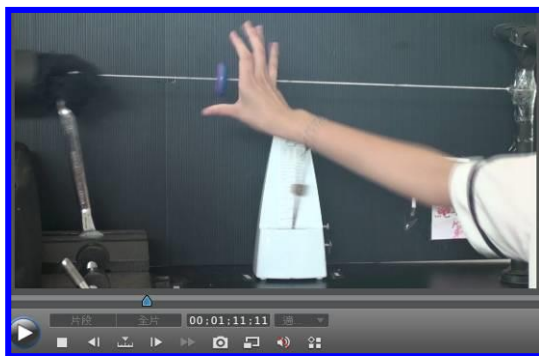


圖 30: 風火輪的初始位置在左邊時，右繩較長。

由圖 14 也可看出這樣的結果；由此可知『繩長』是影響駐波振幅的因素之一。

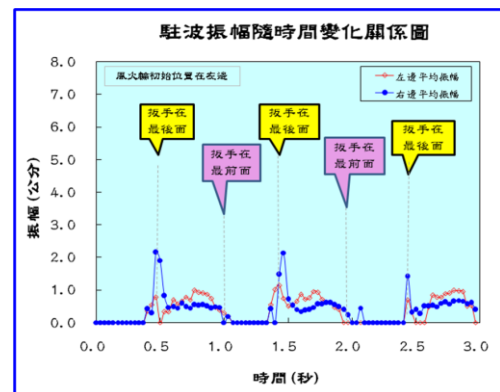


圖 21

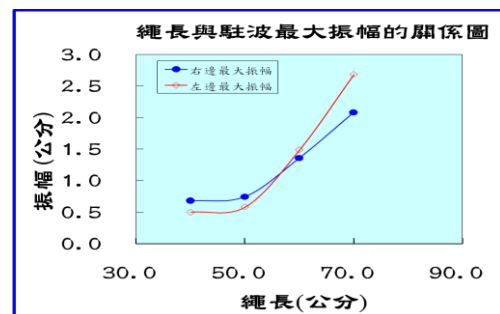
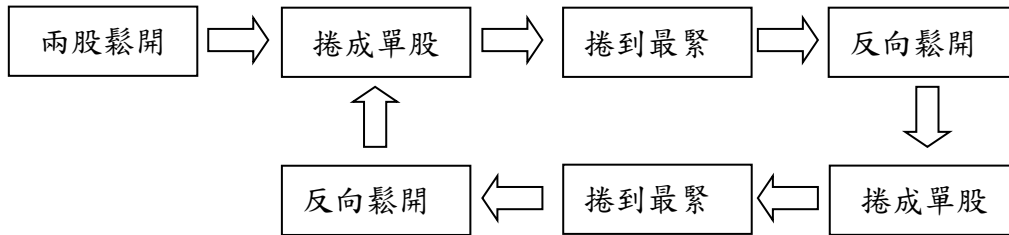


圖 14

(6)為何在本實驗中，繩子的狀態有那麼多種？

這是因為在本實驗過程中，繩子的狀態是：



在扳手前後拉放繩子的過程中，依『繩子受張力』的情形與『扳手移動方向』，可分為四個階段(若繩重與風火輪重量不計)：

第一階段：扳手『由最前面往後拉』繩子，但是繩子『尚未受張力』。

第二階段：扳手『繼續往後拉』繩子，但是繩子『受張力』。

第三階段：『扳手開始往前轉動』，但繩子『仍受張力』。

第四階段：『扳手開始往前轉動』，但繩子『不受張力』。

在第一階段，原本已纏繞成『單股』的繩子 (如圖 31)，漸漸鬆開成『雙股』狀態(如圖 32)。



(圖 31) 纏繞成『單股』的繩子



(圖 32) 繩子鬆開成『雙股』狀態

在第二階段，已鬆開成『雙股』狀態的繩子將再捲成『單股』狀態 (如圖 33)，在適當條件下就會產生駐波 (如圖 34)。



(圖 33) 再纏繞成『單股』狀態



(圖 34) 產生駐波

在第三階段，多數時間所看到的是變形的駐波 (如圖 35)；也可看到繩子慢慢鬆開成『雙股』狀態 (如圖 36)。



(圖 35) 再纏繞成『單股』狀態



(圖 36) 產生駐波

在第四階段，繩子最後會捲成單股，有時可看到繩子鬆開成『雙股』所產生的駐波 (如圖 37)，也可看到繩子所受張力較小時所產生的駐波 (如圖 38)。



(圖 37) 繩子鬆開成『雙股』所產生的駐波



(圖 38) 左繩捲成單股，但是右繩產生駐波

伍、結論與應用

所謂的「風火輪」是將酒瓶蓋打扁後穿線所製成的童玩，是 1980 年代以前小朋友們很喜歡的玩具，但是因容易發生危險幾乎已被遺忘。傳統上的玩法是手握繩的兩端，將風火輪上下甩數十圈後，再拉放→拉放→拉放...繩子，使風火輪可以不斷來回轉動。

在本實驗中我們利用學姊所設計的實驗裝置-『扳手』、『節拍器』及『人的聽力』來模擬這樣的操作過程（因為我找不到比它更便宜的方法），補做了『轉動風火輪初始圈數』為 10 圈 ~ 50 圈第一階段的實驗。

這樣的實驗裝置看似不是很穩定，但是看了無數次的實驗影片，努力找出扳手前後拉放繩子較穩定的連續 3 個週期後，擷取了數千張照片，量了上萬筆數據，完成實驗目的(1)及(2)第二階段的實驗。

努力抽絲剝繭後，我得到以下幾點結論：

1. 因繩子所受張力大小前後不對稱，故駐波的產生大多數時間是發生在扳手由最後面往前移時。(如圖 15)
2. 在一個週期內 (即扳手由最前面轉到最後面，再回到最前面)，駐波的振幅多數時間會出現 2 個最大值；且最大振幅多數時間是發生在扳手轉到最後面附近，似乎有週期性變化。

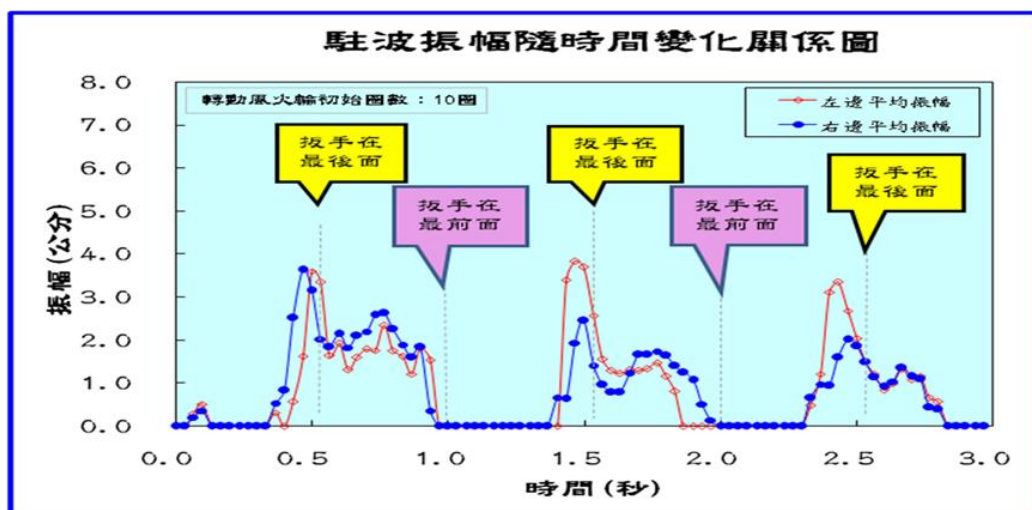


圖 15

3. 繩長較短時，在適當條件下也會產生駐波；只是駐波的最大振幅較小。
4. 當轉動風火輪的初始圈數只有 10 圈時，在適當條件下也會產生駐波；轉動風火輪的初始圈數不同，會影響駐波的最大振幅。
5. 雖然本實驗的駐波幾乎是原為『雙股』的繩子捲成『單股』後的波動，但是利用『單弦振動理論』仍可做定性上的解釋：原來是當風火輪的『轉動角頻率 f_w 』與繩子的『自然頻率 f_n 』相同或接近時，就會產生駐波。
6. 本實驗所看到的駐波幾乎都是繩子『捲成單股』後的波動(如圖 39 的左繩)，但是偶而我們也會看到繩子『鬆開成雙股』後的波動 (如圖 39 的右繩)。

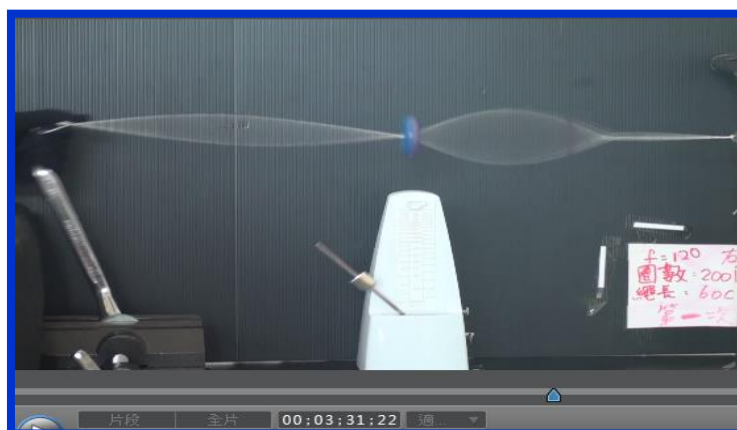


圖 39：左側是繩子『捲成單股』所產生的駐波
右側是繩子『鬆開成雙股』所產生的駐波

- 7.這個實驗的完成，考驗著我的耐性，因為得擷取數千張圖，測量上萬筆數據；一路走來很謝謝學姊們在技術上的支援；終於能體會牛頓為何會說他的成就是站在巨人肩膀上了！
- 8.本實驗的價值為：讓我體會到看似很簡單的童玩，沒想到隱藏非常深奧的物理現象！這樣的研究結果或許對架設纜車線等工程有所助益：原來『纜線的長度』與『纏繞程度』及『纜線的張緊程度』都得考慮，才能將風、地震等外力干擾時所產生的破壞性共振的影響降到最低。
- 9.未來展望：在圖 26 中有關『繩子的自然頻率』與『風火輪的轉動角頻率』是理論上的示意圖；期待未來可以利用力度計、高速攝影機等相關設備，可以量得它們的實驗值，讓本實驗的研究結果更有參考價值。

陸、參考文獻

1. 咻咻~轉吧風火輪。台灣網路科教館。民 101 年-52 屆。
2. 怒吼風火輪。台灣網路科教館。民 88 年-39 屆。
3. 郭重吉(民 94)國中自然與生活科技第三冊(修訂版)。(52-55 頁)。台南市：南一。
4. 劉世德，國中自然與生活科技第五冊。(63-70 頁)。台南市：康軒。
5. 吳大猷，(民 87)高級中學物理第三冊。(56-59 頁)。台北市：正中書局。
6. <http://www.doc88.com/p-858246752541.html>
7. 簡諧激勵力作用下懸垂纜線的弦波共振

柒、附錄

附錄一：本實驗的研究設備

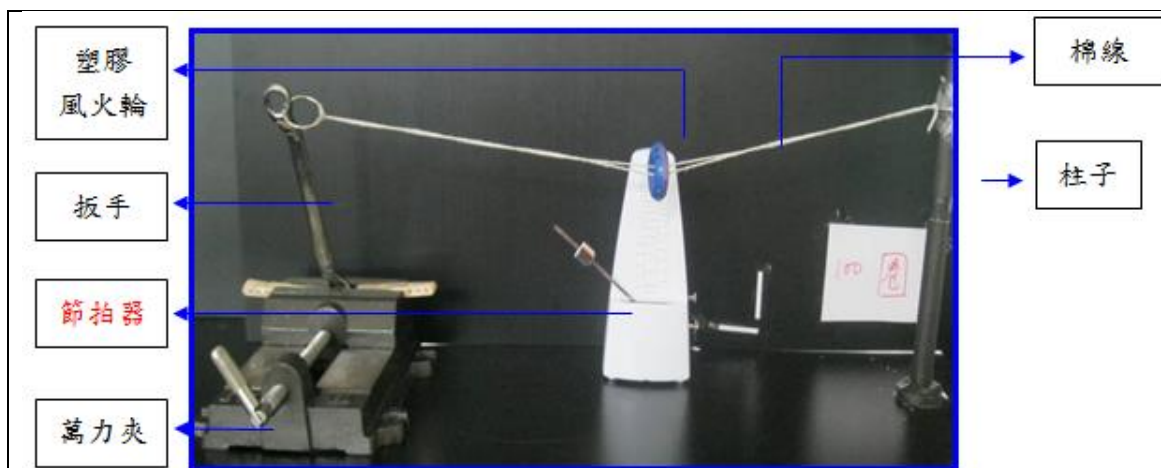


圖 40：本實驗第一階段的實驗裝置圖

說明：

塑膠風火輪：直徑為 5.00 cm、質量 4.0g。其優點為多次實驗後仍不易變形。

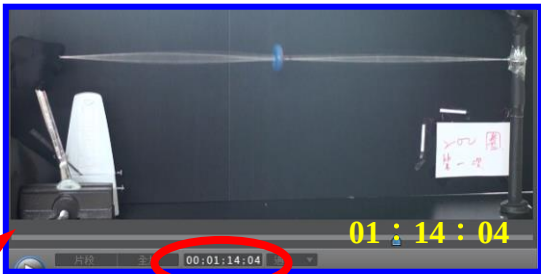
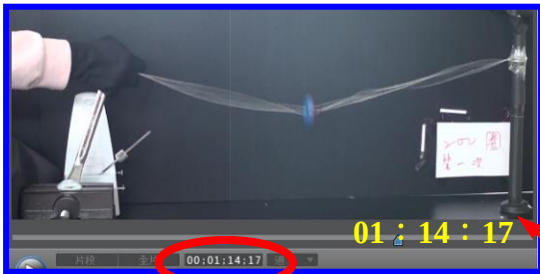
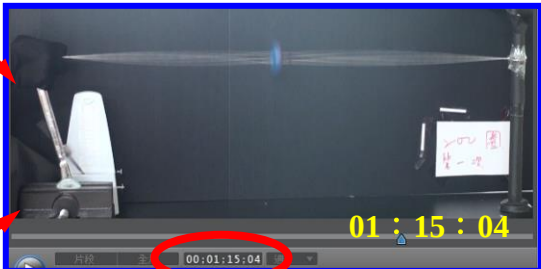
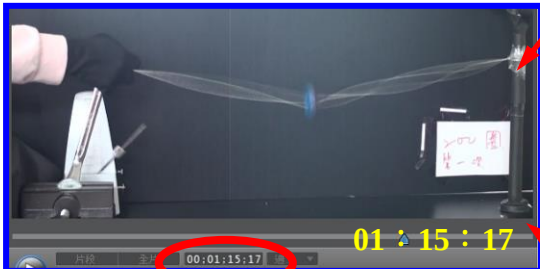
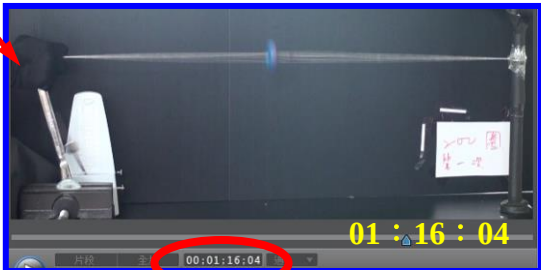
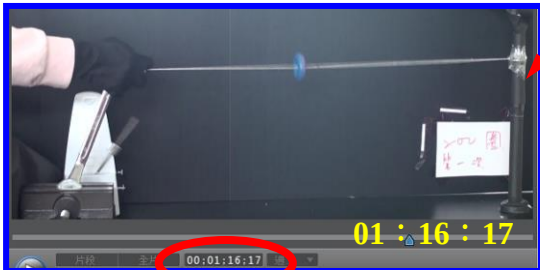
棉線：為綁粽子用的棉線。

扳手：可控制「前後拉放繩子的範圍」。

萬力夾：做為扳手支點，控制「扳手前後拉放繩子的範圍」。

節拍器：借助節拍器的「滴答聲」，幫助我們可「前後穩定」拉放繩子。

由表五可看出：利用簡單、便宜的『扳手及節拍器』來穩定拉放風火輪是可行的！

扳手移到『最後面』時的時間點	扳手移到『最前面』時的時間點
 01 : 14 : 04 00:01:14:04	 01 : 14 : 17 00:01:14:17
$\Delta t = 1$ 秒  01 : 15 : 04 00:01:15:04	$\Delta t = 1$ 秒  01 : 15 : 17 00:01:15:17
$\Delta t = 1$ 秒  01 : 16 : 04 00:01:16:04	$\Delta t = 1$ 秒  01 : 16 : 17 00:01:16:17

表五：分析扳手移到『最後面』或『最前面』相鄰影像的「時間差」

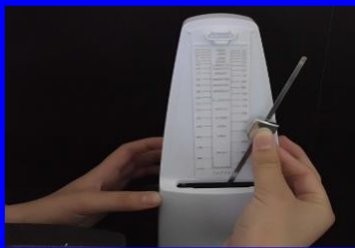
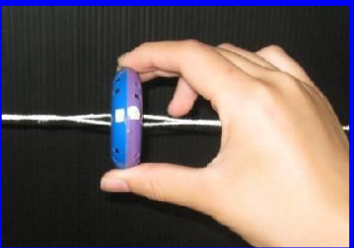
說明：可看出扳手移到『最前面』或『最後面』相鄰影像的「時間差」為 1 秒；

這與節拍器節奏為 120 (意義為 1 分鐘滴答 120 聲，即 1 分鐘擺動 60 次，故節拍器擺動 1 次所需時間為 1 秒) 是一樣的。故利用簡單、便宜的『扳手及節拍器』來穩定拉放風火輪是可行的！

附錄二：研究目的(1)第一階段的實驗方法

研究目的(1)：探討繩長為 40 公分時，『轉動風火輪的初始圈數』

為 10 圈、20 圈、30 圈、40 圈及 50 圈對駐波現象的影響。

 1. 棉線穿過『塑膠風火輪』。	 2. 棉線對折後，一端固定於柱子。	 3. 確認棉線是在水平無纏繞的狀態。
 4. 確認對折後繩長為 40cm 後，將另一端固定於扳手上。	 5. 打開節拍器，調節 120 (即 1 秒擺動 1 次)；攝影機開始攝影。	 6. 將風火輪置於繩子中間後，用手將它轉動 10 圈。
		7. 手放開的同時，利用扳手前後『拉→放→拉→放...』繩子，使風火輪可以不斷的順時鐘、逆時鐘、順時鐘、逆時鐘...來回轉動。
8. 換新的繩子，重複步驟 1~7 至少 3 次。 9. 將『轉動風火輪的初始圈數』依序換為 20 圈、30 圈、40 圈及 50 圈，重複步驟 1~8。		

附錄三：紀錄『手轉動風火輪數十圈』後的 40 秒 ~ 70 秒內，扳手轉到『最前面』與『最後面』連續 10 次的時間，試著找出較穩定的連續 3 個週期。

放開: 00.06.06

◎條件: $f=100$ 長 40 圈 10-2. (OK)

前	後
010826	010912
010926	011012
011026	011112
011126	011212
011225	011312
011325	011411
011425	011510
011524	011610
011624	011709
011722	011808
011822	011907

較穩定的連續 3 個週期

評語

本件作品探討童玩風火輪之繩線類似發生駐波現象，研究上能設計以扳手、節拍器及攝影分析，以簡易實驗設計，系統化從事實驗變因與應變之分析討論。

建議本件作品宜對所觀察到現象探究分析物理原由機制及作數理模型分析。