

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

080105

甜蜜交織的共振擺

學校名稱：新北市板橋區板橋國民小學

作者： 小六 張綺軒	指導老師： 吳俐璇 彭琪莉
---------------	---------------------

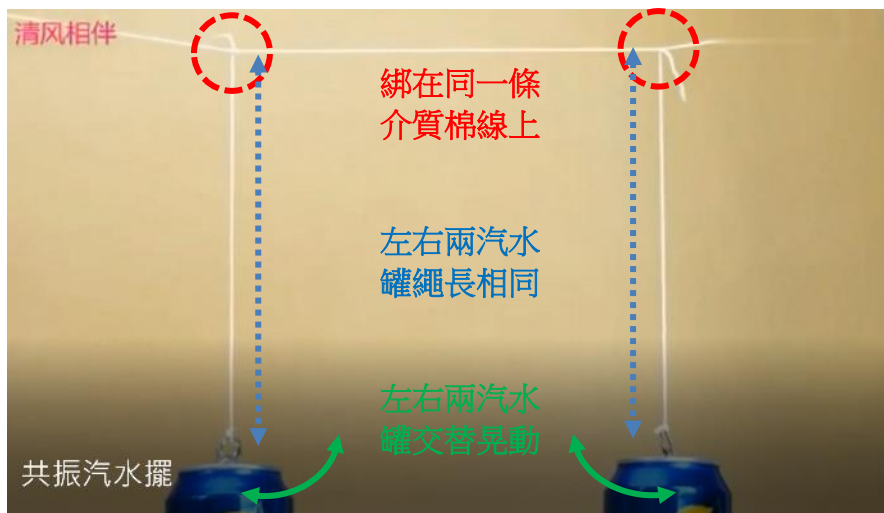
關鍵詞：甜蜜點、非同步共振、能量轉換與衰退

摘要

本研究探討「共振擺中『介質』和『交替晃動』的關係」。實驗方法採多次試驗、實際操作與影像紀錄等方式進行。研究結果發現：(一)文獻影片中交替晃動的情況並不是最佳效果；(二)以棉線當介質時，綁點間有一個最佳距離，可以讓交替晃動情況更明顯；(三)介質張力的大小，是交替晃動效果好壞的關鍵；(四)橡皮筋介質的「交替晃動次數」最少，效果最明顯；釣魚線介質的「交替晃動次數」最多，效果最差；(五)最佳的交替晃動共振擺裝置為橡皮筋介質，最大能量轉換率是 95.4%，衰退率則是 12.6%。總之，要用易拉罐盪鞦韆看到明顯交替晃動的現象並不容易，在裝置設計上有其妙方；歷經了上百次的實驗後，才順利找到許多關鍵的要素，結果令人振奮不已。

壹、研究動機

身為科學愛好者的我，疫情期間在網路上看到名叫「易拉罐盪鞦韆」的實驗，這可激起我的好奇心便點開網址觀看影片(如圖一)。我在影片中看到兩個汽水瓶居然像兩個正在嬉戲的小孩，不斷你追我趕，這讓我感覺到超紓壓的！影片中的實驗現象在我心裡產生多到數不清的疑惑：為什麼兩個汽水瓶會有交替晃動的現象？如果要讓交替晃動的現象更明顯，應該使用哪種共振的介質？除了介質的材質以外，介質的鬆緊程度是不是也會影響交替晃動的效果？在這個裝置中的綁點距離、懸掛擺繩長短、罐中水量多寡.....等其他的變因，又會如何影響此交替晃動的現象？為了解除心中的疑惑，我便發揮小小科學家的精神，動手來做做看，揭開這個實驗研究的序幕。



圖一、趣味小實驗影片(引自騰訊視頻)

貳、研究目的

一、研究目的：探討共振擺中的「介質」與「交替晃動次數、能量轉換衰退」之間的關係。

二、研究問題：

(一)複製易拉罐盪鞦韆的實驗，使用「棉線材質」探討啟動/跟動擺的「交替晃動次數」。

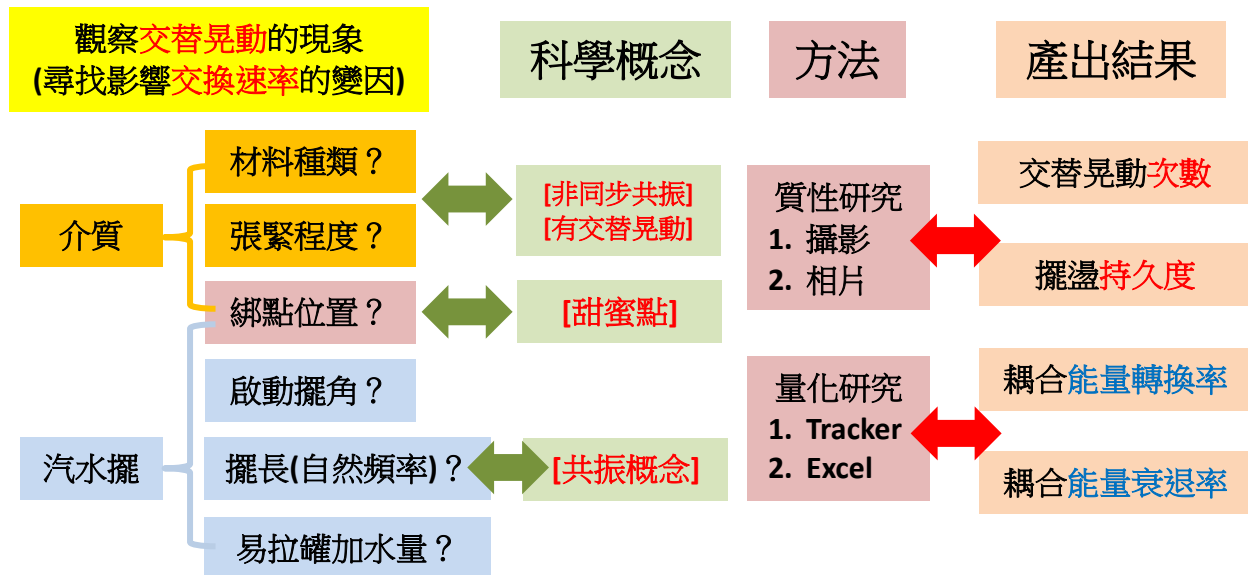
(二)探討「綁點距離(甜蜜點)」所在位置，對「交替晃動次數、擺盪持久度」之影響。

(三)探討「不同張緊程度的棉線」，對「交替晃動次數、擺盪持久度」之影響。

(四)探討「不同共振介質(棉線、橡皮筋、釣魚線)」，對「交替晃動次數」之影響。

(五)找出「最佳的交替晃動共振擺」裝置，分析其「耦合能量轉換率與衰退率」。

三、研究架構：



參、研究設備及器材

一、研究器材：

橡皮筋(粗)	釣魚線	棉線	易拉罐	量杯+水	皮尺
					
1 條	1 條	1 條	2 個	1 組	1 條
量角器	固定攝影機	雷射筆	Tracker	投影地墊	測力計
					
1 只	1 台	2 只	1 套	1 片	1 台

二、研究設備與條件定義

(一)量測設備與使用條件

1.量測設備：易拉罐盪鞦韆(非同步共振擺)的居家簡便架設裝置，如圖二所示。



圖二、實驗儀器架設裝置

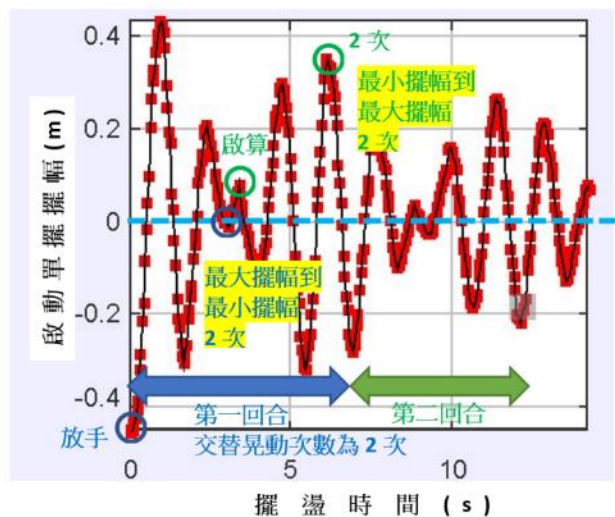
2.使用條件：

- (1)連結兩擺的「介質」在和鐵架與擺繩接點處都必須「綁緊並做好拉撐」。
- (2)啟動單擺(首先用手施力帶動的汽水擺)拉起一定高度時，須確定跟動單擺(無施力的汽水擺)無搖晃，且啟動單擺的搖晃方向必須與介質垂直，過程中要避免易拉罐發生旋轉的現象，若發生易拉罐旋轉的現象，此實驗操作為無效，重新操作。

(二)條件定義

1.交替晃動次數：定義概念如圖三。

- (1)「啟動單擺從最大擺幅變到最小擺幅時晃動的次數」定義為交替晃動次數。
- (2)將交替晃動次數值除以 2 時，可以觀察到跟動單擺的晃動速度與啟動單擺相似。
- (3)「跟動單擺從最小擺幅到最大擺幅時晃動的次數」，定義為交替晃動次數。



圖三、交替晃動次數的定義概念

2.擺盪的持久度：

- (1)啟動單擺從「放手開始到兩擺同步共振時所歷經的時間」定義為擺盪持久度。
- (2)因為同步共振的晃動狀況不易觀察，所以搭配 Tracker 影像輔助計算持久度。

3.綁點距離(甜蜜點)：

- (1)啟動單擺與跟動單擺「綁在介質上兩點之間的距離」定義為綁點距離(甜蜜點)。
- (2)示範影片將兩個汽水擺的位置擺放在整條棉線介質中央對稱處，所以我也把 2 個汽水擺擺放在介質中點左右對稱處，並讓綁點間的介質保持水平。

4.不同張緊程度：

- (1)將共振介質左端固定綁在架上、右端接上測力計，拉緊介質固定綁在架上時，「測力計的讀數就是介質的張緊程度」。
- (2)因為共振介質的張緊程度可能會因為汽水擺交替晃動而有變化，所以我的研究變因只記錄完成架設時，一開始的測力計讀數。

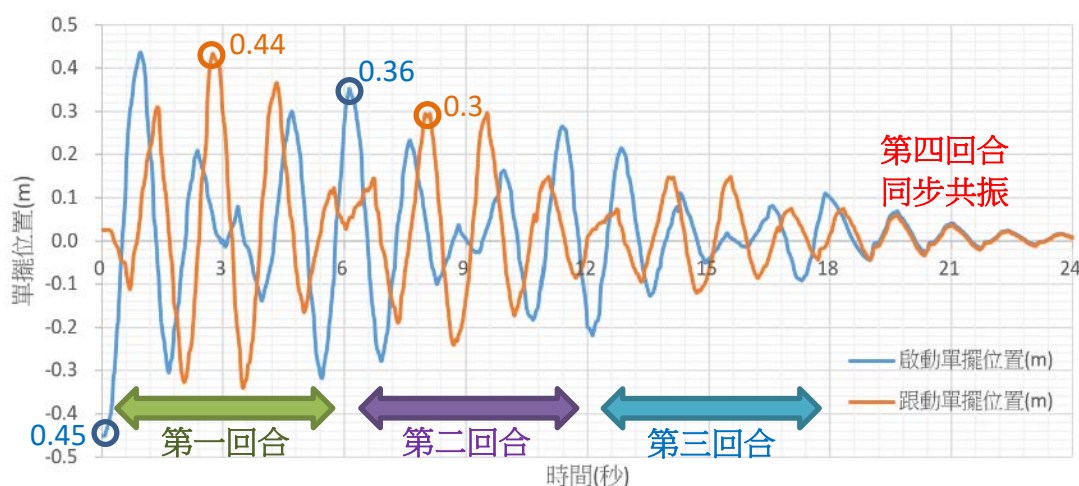
5.不同共振介質：

- (1)從研究資料得知，不同共振介質會影響能量轉移的效果，所以本研究中，選用三種材質進行實驗：硬且具韌性的釣魚線、軟且具韌性的棉線、兼具彈性與韌性的粗橡皮筋。
- (2)進行實驗時，全程用攝影機記錄不同共振介質在交替晃動時的情形。

6.耦合能量轉換率與衰退率：

- (1)耦合能量轉換率：共振擺在每回合的能量轉換率會自然衰弱，因此每回合的能量轉換率都不相同。以圖四為例：第一回合啟動單擺給跟動單擺轉換率為 $\frac{(0.44)^2}{(0.45)^2} \times 100\% = 95.6\%$ ；跟動單擺還給啟動單擺能量轉換率為 $\frac{(0.36)^2}{(0.44)^2} \times 100\% = 66.9\%$ 。

$$\text{啟擺給跟擺能量轉換率} = \frac{\text{跟動單擺在第}n\text{回晃動時最大振幅的平方值}}{\text{啟動單擺在第}n\text{回晃動時最大振幅的平方值}} \times 100\%$$



圖四、啟動/跟動單擺擺幅對時間的關係圖(解釋能量轉換衰退率用)

- (2)耦合能量衰退率：共振擺的擺盪週期雖為定值，但在每回合的能量變化量也都

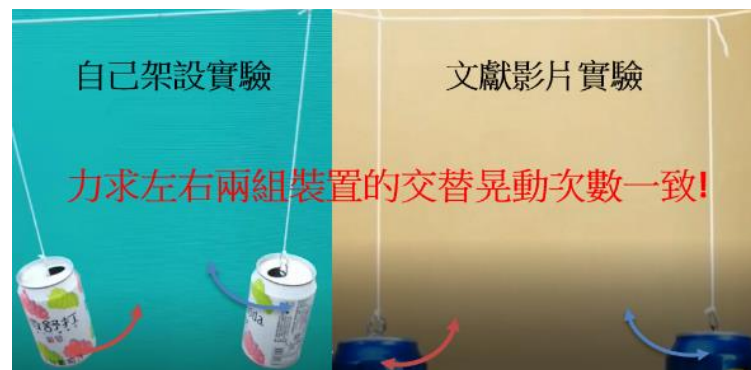
不盡相同，所以每回合的能量衰退率也都不相同。以圖四為例，第 1 回合的能量衰退率為 $\frac{95.6\% - 66.9\%}{3} = 9.57\%(1/s)$ 。

$$\text{第 } n \text{ 回能量衰退率} = \frac{\text{啟擺給跟擺能量轉換率} - \text{跟擺給啟擺能量轉換率}}{\text{共振擺之擺盪半週期(最大幅} \rightarrow \text{最小幅)}} \times 100\%$$

肆、研究過程或方法

一、實驗一：複製易拉罐盪鞦韆實驗，使用「棉線材質」探討啟動/跟動擺的「交替晃動次數」

(一)實驗方法：使用「比例尺」的方式找出擺長與綁點距離，以「試誤法(Try and Error)」找出與影片擺盪效果相仿的交替晃動次數(如圖四所示)。



圖四、實驗一的方法與目標

(二)實驗步驟：

- 1.使用皮尺量測易拉罐口的直徑，量測五次，..取平均值紀錄下來。
- 2.擷取影像後拉校正桿，量測單擺擺長與易拉口的比值，五次後取平均值紀錄下來。
- 3.將步驟 1 與步驟 2 的平均值相乘，得到擺長與綁點距離的確切數值。
- 4.將仿效的實驗裝置架設完畢，改變易拉罐的裝水量，紀錄不同裝水量下的交替晃動次數。從實驗數據中找出與影片一樣交替晃動次數時的裝水量。
- 5.同步驟 4，改變易拉罐的啟動擺角，紀錄不同擺角下的交替晃動次數，力求與影片中的交替晃動次數一致，以確定易拉罐的啟動擺角。
- 6.找出與影片中交替晃動次數一致的實驗裝置後，將此裝置的各項變因(擺長、綁點距離、擺角、裝水量)記錄下來。

二、實驗二：探討綁點距離(甜蜜點)所在位置，對交替晃動次數、擺盪持久度之影響

(一)實驗方法：使用「實驗分析法」改變不同的綁點距離，紀錄次數與持久度的平均值。

(二)實驗步驟：

- 1.使用實驗一中與影片交替晃動次數一致的實驗裝置(固定棉線介質、擺長、擺角、

裝水量)當控制組，改變不同綁點距離做實驗。

- 2.將綁點距離(甜蜜點)調整設在左右兩只鐵架的中央，紀錄第一與第二回合啟動/跟動單擺的交替晃動次數與擺盪持久度，並以 Excel 進行數據分析，做量化研究。
- 3.每次的實驗過程都用攝影機全程記錄，以影像擷取的方式，觀察棉線介質上甜蜜點的振動現象，做質性研究。

三、實驗三：探討不同張緊程度的棉線，對交替晃動次數、擺盪持久度之影響

(一)實驗方法：使用「實驗分析法」改變不同的張緊程度，紀錄次數與持久度的平均值；使用「影像分析法」拍攝棉線介質的振動現象，觀察棉線上不同位置的晃動。

(二)實驗步驟：

- 1.使用實驗一中與影片交替晃動次數一致的實驗裝置(固定棉線介質、擺長、擺角、裝水量)當控制組，改變不同張緊程度做實驗。
- 2.將左邊的棉線介質與左端的架子綁緊固定不動，右邊的棉線接上測力計並以施力拉緊的方式操控張力值後，再與右端的架子綁緊不動，進行之後的實驗。
- 3.將改變好的張緊程度架設完成後，紀錄第一與第二回合啟動/跟動單擺的交替晃動次數與擺盪持久度，並以 Excel 進行數據分析，做量化研究。
- 4.每次的實驗過程都用攝影機全程記錄，以影像擷取的方式，觀察棉線介質上各點的振動現象，做質性研究。



四、實驗四：探討不同共振介質(棉線、橡皮筋、釣魚線)，對交替晃動次數之影響

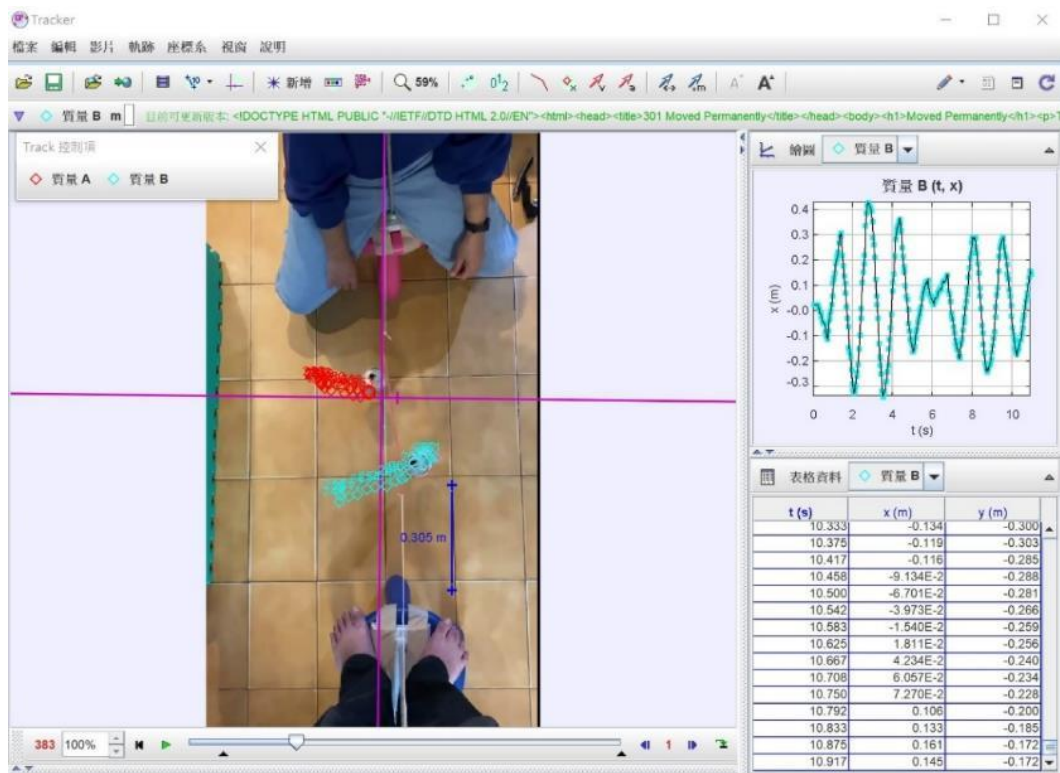
(一)實驗方法：使用「實驗分析法」改變不同的共振介質，紀錄交替晃動次數的平均值；使用「影像分析法」拍攝不同介質的振動現象，觀察介質上不同位置的晃動。

(二)實驗步驟：

- 1.使用實驗一中與影片交替晃動次數一致的實驗裝置當控制組，改變(1)不同的共振介質、(2)不同的擺角、(3)不同的擺長、(4)不同的裝水量、(5)不同的綁點距離、(6)不同的張緊程度做實驗，紀錄啟動/跟動單擺的交替晃動次數，並以 Excel 進行數據分析，做量化研究。
- 2.每次實驗都只能改變一個操縱變因(如介質)，其餘為控制變因保持不變。
- 3.每次的實驗過程都用攝影機全程記錄，以影像擷取的方式，觀察各種介質的振動狀況，做質性研究，找出最佳設計共振擺裝置的各項變因，比對後，記錄下來。

五、實驗五：找出最佳的交替晃動共振擺裝置，分析其耦合能量轉換率與衰退率。

(一)實驗方法：使用「Excel 對實驗四進行數據分析」，找出最佳的交替晃動共振擺裝置；再運用「Tracker」紀錄啟動/跟動單擺的擺幅與擺盪時間的關係，如圖五所示，分析耦合能量轉換率與各回合能量衰退率；搭配「影像分析法」拍攝共振擺的振動現象，觀察交替擺盪的結果是否明顯。



圖五、運用 Tracker 手動紀錄汽水罐質點的方式，紀錄擺幅與時間的關係

(二)實驗步驟：

- 1.使用「Excel 進行數據趨勢分析」，找出最佳的交替晃動共振擺裝置，確定最佳共振擺裝置的材質、張緊程度、綁點距離、擺長、擺角、擺錘裝水量。
- 2.分別將兩鉛罐下方以十字開口做出空間，將紅光雷射筆固定(如圖六)。
- 3.承步驟 1，進行五次有效實驗，紀錄各回合單擺擺幅與擺盪時間的關係，搭配 Tracker 軟體，計算耦合能量轉換率與衰退率，再以量化分析方式檢視此裝置交替擺盪效果。



圖六、綁上兩隻紅光雷射筆的共振擺裝置

- 4.承步驟 3，將共振擺晃動的過程影像作紀錄，做質性研究的分析與討論。

伍、研究結果

一、實驗一：複製易拉罐盪鞦韆的實驗，使用棉線材質探討啟動/跟動擺的交替晃動次數

(一)複製易拉罐盪鞦韆的實驗(依影片中的綁設裝置，確定各項參數變因)

1.易拉罐繩長：罐口實際直徑= 55 mm

變因		次數					平均
		1	2	3	4	5	
左繩	影片中的比例 繩長/罐口直徑	5.1/1.3	5.1/1.3	5.1/1.28	5.1/1.28	5.1/1.3	3.95
右繩	影片中的比例 繩長/罐口直徑	5.08/1.3	5.1/1.3	5.08/1.3	5.1/1.3	5.1/1.28	3.93
確定繩長(mm)		[(左繩比例+右繩比例)/2]*55 = <u>216.7</u>					

2.綁點距離(甜蜜點)：已知易拉罐繩長= 216.7 mm

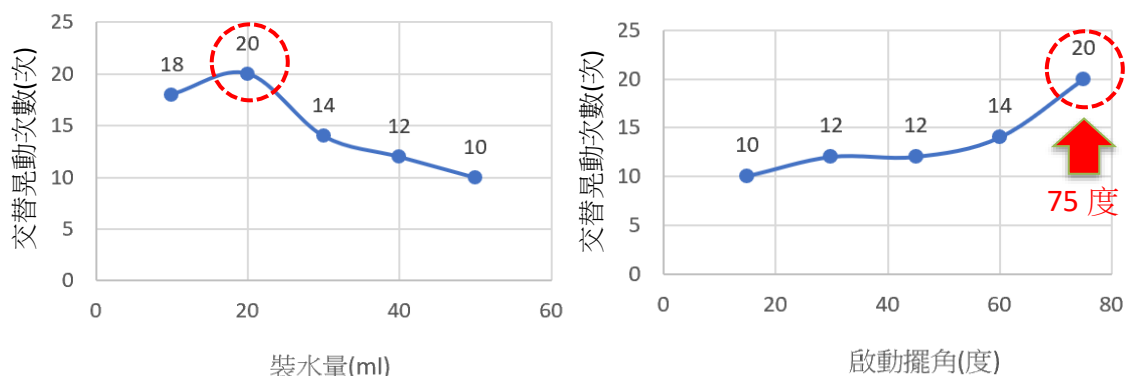
變因		次數					平均
		1	2	3	4	5	
左邊繩長 L(mm)		5.03	5.05	5.05	5.03	5.05	5.04
綁點距離 X(mm)		5.65	5.65	5.65	5.65	5.65	5.65
影片中的比值 L/X		0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
確定綁點距離(mm)		L 值÷(L/X)= <u>243.5</u>					

3.易拉罐裝水量：影片得到的交替晃動次數為 20 次，分析如圖七所示

裝水量(ml)	10	20	30	40	50
實驗得到的交替晃動次數(次)	18	20	14	12	10
確定裝水量(ml)	20				

4.易拉罐的擺角：影片得到的交替晃動次數為 20 次，分析如圖七所示

啟動擺角(度)	75	60	45	30	15
實驗得到的交替晃動次數(次)	20	14	12	12	10
確定擺角(度)	75				



圖七、裝水量與啟動擺角對交替晃動次數的關係

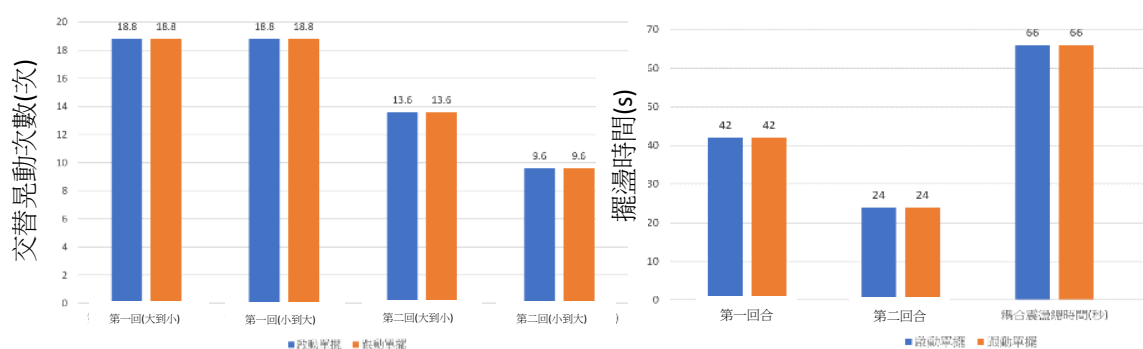
(二)使用棉線材質探討交替晃動的次數與持久度

1.交替晃動的次數：分析如圖八。

交晃次數 (次) 實驗 次數	啟動單擺				跟動單擺			
	第一回 擺幅從 大→小	第一回 擺幅從 小→大	第二回 擺幅從 大→小	第二回 擺幅從 小→大	第一回 擺幅從 小→大	第一回 擺幅從 大→小	第二回 擺幅從 小→大	第二回 擺幅從 大→小
1	20	20	14	10	20	20	14	10
2	18	18	12	8	18	18	12	8
3	20	20	16	12	20	20	16	12
4	20	20	14	10	20	20	14	10
5	16	16	12	8	16	16	12	8
平均	18.8	18.8	13.6	9.6	18.8	18.8	13.6	9.6

2.耦合震盪持久度：分析如圖八。

變因(秒)		有效次數					平均
		1	2	3	4	5	
啟動	第一回合時間(s)	42	38	42	42	34	39.6
	第二回合時間(s)	24	20	28	24	20	23.2
	總時間(s)	66	58	70	66	54	62.8
跟動	第一回合時間(s)	42	38	42	42	34	39.6
	第二回合時間(s)	24	20	28	24	20	23.2
	總時間(s)	66	58	70	66	54	62.8
耦合震盪的持久度		左右邊交替晃動的總時間= <u>62.8</u> (秒)					



圖八、啟動與跟動單擺在前二回合平均交替晃動次數與耦合震盪時間之關係圖

由上述實驗結果可知：(一)各回合啟動/跟動單擺的擺幅，無論是由大到小或由小到到，交替晃動次數都一樣，而且隨著回合數的增加，交替晃動次數也有逐漸下降的趨勢。(二)在擺盪時間方面，隨著回合數的增加，擺盪時間也有逐漸下降的趨勢，耦合震盪總時間可達到 62.8 秒之久。(三)為了使自製實驗的交替晃動次數與文獻影片一致，採用裝水量 20mL，擺角 75 度，擺長 216.7mm，綁點距離 243.5mm 的搭配裝置。

二、實驗二：探討綁點距離(甜蜜點)所在位置，對交替晃動次數、擺盪持久度之影響

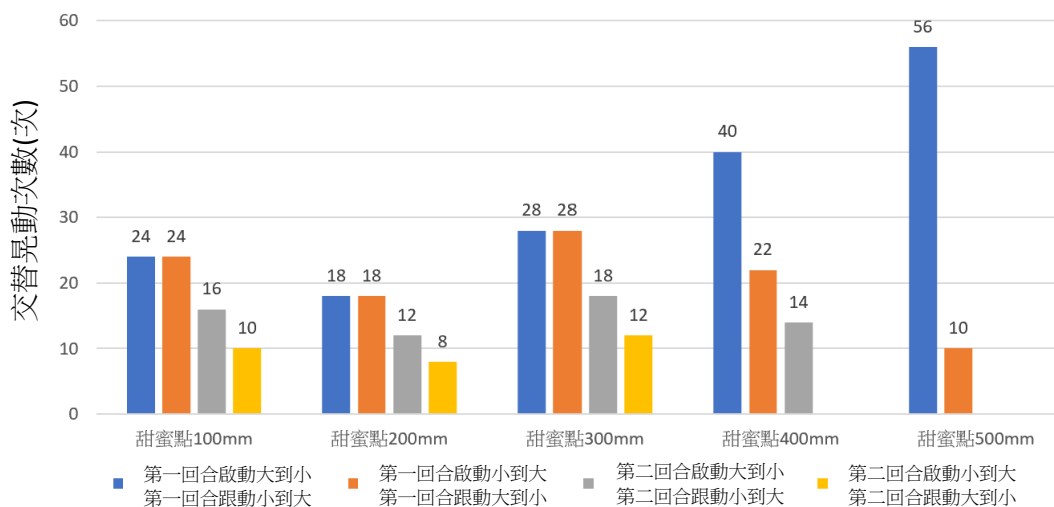
(一)不同綁點距離(甜蜜點)，對交替晃動次數、擺盪持久度之影響

1.交替晃動的次數：分析如圖九。

交晃次數 (次) 綁距 (mm)	啟動單擺				跟動單擺			
	第一回 擺幅從 大→小	第一回 擺幅從 小→大	第二回 擺幅從 大→小	第二回 擺幅從 小→大	第一回 擺幅從 大→小	第一回 擺幅從 小→大	第二回 擺幅從 大→小	第二回 擺幅從 小→大
100	24	24	16	10	24	24	16	10
200	18	18	12	8	18	18	12	8
300	28	28	18	12	28	28	18	12
400	40	22	14	同步共振	40	22	14	同步共振
500	56	10	同步共振	同步共振	56	10	同步共振	同步共振

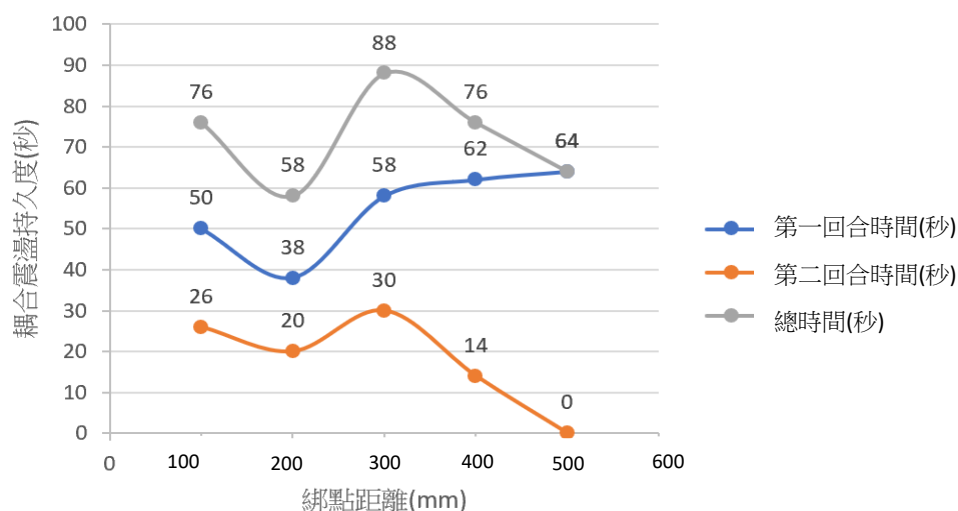
2.耦合震盪的持久度：分析如圖十。

變因		綁點距離(mm)					
		100	200	300	400	500	平均
啟動	第一回合時間(s)	50	38	58	62	64	54.4
	第二回合時間(s)	26	20	30	14	0	18
	總時間(s)	76	58	88	76	64	72.4
跟動	第一回合時間(s)	50	38	58	62	64	54.4
	第二回合時間(s)	26	20	30	14	0	18
	總時間(s)	76	58	88	76	64	72.4
耦合震盪的持久度		左右邊交替晃動的總時間= 72.4 (秒)					



圖九、不同綁點距離(甜蜜點)對交替晃動頻率之影響

由圖九的實驗結果可知：(一)當綁點距離(甜蜜點)為 200mm 時，交替晃動次數有一極小值，無論綁點距離調小或調大，交替晃動次數都會隨之變大。(二)在擺盪回合數方面，隨著回合數的增加，交替晃動次數也有逐漸下降的趨勢。(三)當綁點距離(甜蜜點)為 400mm、500mm 時，啟動/跟動單擺擺盪到第二回合時便發生了同步共振。



圖十、不同綁點距離(甜蜜點)對擺盪持久度之影響

由圖十的實驗結果可知：(一)當綁點距離(甜蜜點)為 300mm 時，震盪持久度有一極大值(88 秒)，而綁點距離(甜蜜點)為 400mm、500mm 時，交替晃動只有第一回合。(二)當綁點距離(甜蜜點)為 200mm 時，交替晃動次數雖然最少，但持久度不好(僅 58 秒)，反而是綁點距離(甜蜜點)為 300mm 時的震盪持久度最佳(88 秒)。(三)實驗得知，交替晃動次數越少的共振擺，持久度低；持久度越高的共振擺，交替晃動次數不會太少。因此，要找到交晃效果較好的共振擺，可以用綁點距離(甜蜜點)為 200mm 的設計，會很明顯。

(二)影像質性分析

1.不同綁點距離(甜蜜點)對介質晃動情況之影響

甜蜜點	影像 (介質晃動無明顯差異)
100 mm	
200 mm	
300 mm	
400 mm	
500 mm	

2.不同綁點距離(甜蜜點)對汽水瓶之擺幅(雷射光點)之影響

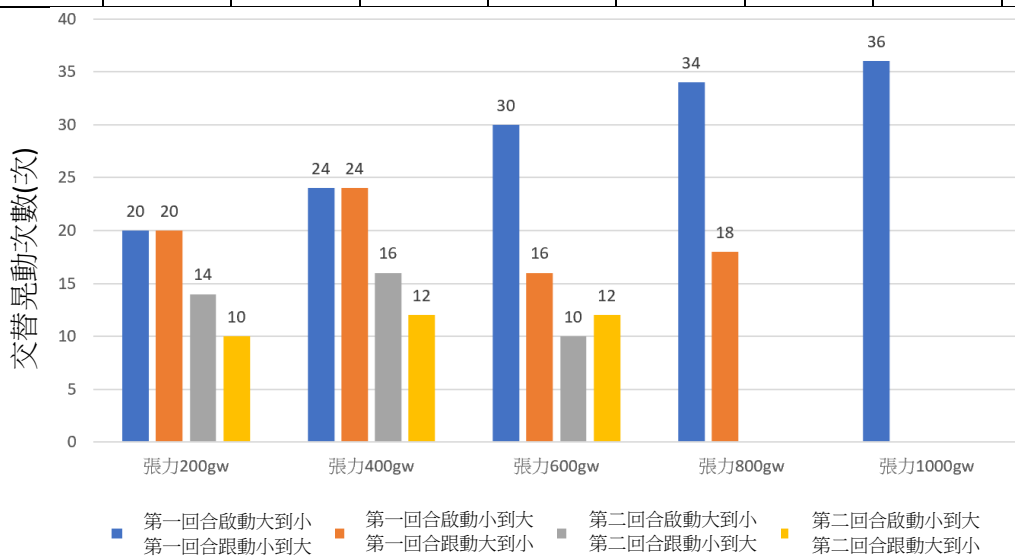
甜蜜點	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
介質位置 (綠線)					
跟動單擺 最大擺幅 (藍箭)					

三、實驗三：探討不同張緊程度的棉線，對交替晃動次數、擺盪持久度之影響

(一)不同張緊程度的棉線，對交替晃動次數、擺盪持久度之影響

1.交替晃動的次數：分析如圖十一。

交晃 次數 (次) 張力 (gw)	啟動單擺				跟動單擺			
	第一回 擺幅從 大→小	第一回 擺幅從 小→大	第二回 擺幅從 大→小	第二回 擺幅從 小→大	第一回 擺幅從 大→小	第一回 擺幅從 小→大	第二回 擺幅從 大→小	第二回 擺幅從 小→大
200	20	20	14	10	20	20	14	10
400	24	24	16	12	24	24	16	12
600	30	16	10	同步共振	30	16	10	同步共振
800	34	18	同步共振	同步共振	34	18	同步共振	同步共振
1000	36	同步共振	同步共振	同步共振	36	同步共振	同步共振	同步共振

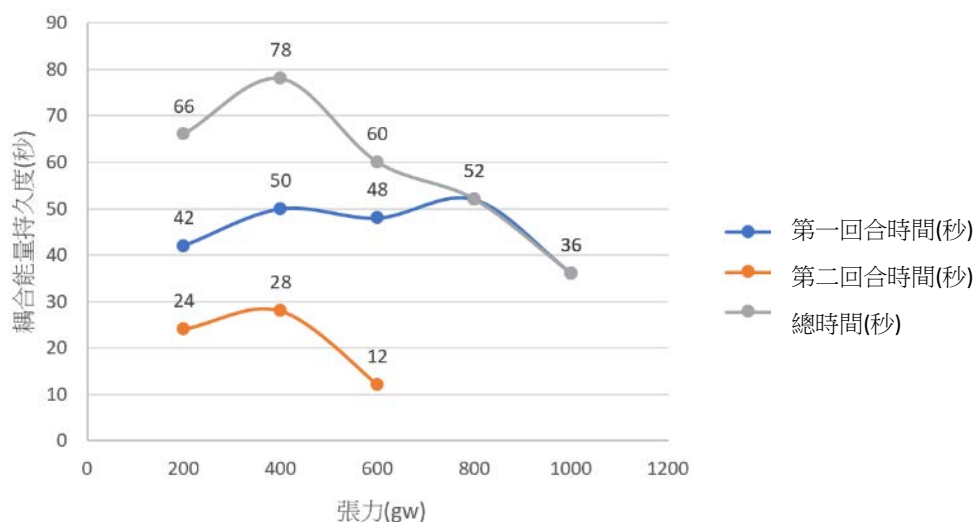


圖十一、不同張緊程度(張力)對交替晃動次數之影響

由圖十一的實驗結果得知：(一)當張力為 200gw 時，交替晃動次數最小，隨著張力的增加，交替晃動次數有隨之變大的趨勢。(二)在擺盪回合數方面，隨著回合數的增加，交替晃動次數有逐漸下降的趨勢(但張力 600gw 時有例外)。(三)當張力為 600gw、800gw 時，啟動/跟動單擺擺盪到第二回合時，發生同步共振；張力達 1000gw 時，啟動/跟動單擺擺盪到第一回合的最後，發生同步共振。想要共振擺有比較好的交替晃動效果，介質的張緊程度不應該太大，張力要越小越好。

2. 耦合震盪的持久度：分析如圖十二。

變因		張力(gw)					
		200	400	600	800	1000	平均
啟動	第一回合時間(s)	42	50	48	52	36	45.6
	第二回合時間(s)	24	28	12	0	0	12.8
	總時間(s)	66	78	60	52	36	58.4
跟動	第一回合時間(s)	42	50	48	52	36	45.6
	第二回合時間(s)	24	28	12	0	0	12.8
	總時間(s)	66	78	60	52	36	58.4
耦合震盪的持久度		左右邊交替晃動的總時間= <u>58.4</u> (秒)					



圖十二、不同張緊程度(張力)對耦合震盪持久度之影響



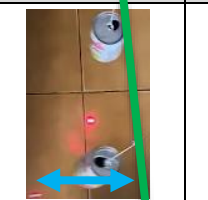
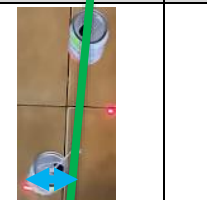

由圖十二的實驗結果可知：(一)當張力為 400gw 時，震盪持久度有一極大值(78 秒)，而張力為 800gw、1000gw 時，交替晃動只有第一回合。(二)當張力為 200gw 時，交替晃動次數雖然最少，但震盪持久度不太好(僅 66 秒)，反而是張力為 400gw 時的震盪持久度最佳(78 秒)。(三)想要找到交替晃動次數越少的共振擺，震盪持久度無法如願越長；如果找到震盪持久度越長的共振擺時，交替晃動次數不可能太少。因此，要找到交晃效果較好的共振擺，要使用張力越小的設計(即 200gw)越好。

(二)影像質性分析：

1.不同張緊程度的棉線對介質晃動情況之影響：

張力	影像 (介質晃動無明顯差異)
200 gw	
400 gw	
600 gw	
800 gw	
1000 gw	

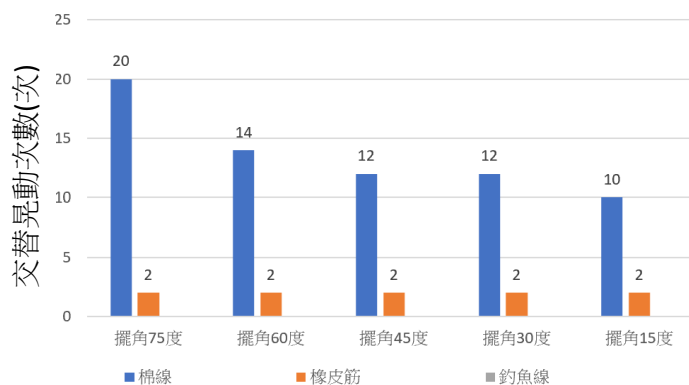
2.不同張緊程度的棉線對汽水瓶之擺幅(雷射光點)之影響

張力	200 gw	400 gw	600 gw	800 gw	1000 gw
跟動 單擺 最大 擺幅					

四、實驗四：探討不同共振介質(棉線、橡皮筋、釣魚線)，對交替晃動次數之影響

(一)探討不同共振擺之擺角(啟動單擺之角度)，對交替晃動次數之影響：分析如圖十三

介質 擺角(度)	棉線	橡皮筋	釣魚線
	交晃平均次數(次)	交晃平均次數(次)	交晃平均次數(次)
75	20 (穩定度佳)	2	無交晃僅同步共振
60	14	2	無交晃僅同步共振
45	12	2	無交晃僅同步共振
30	12	2	無交晃僅同步共振
15	10 (穩定度差)	2	無交晃僅同步共振

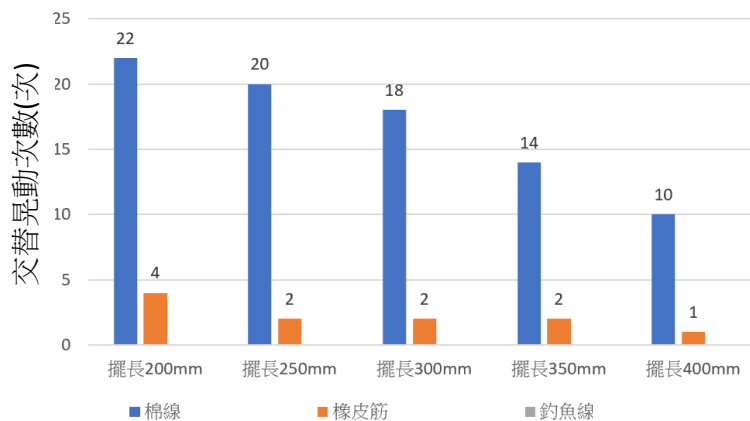


圖十三、不同介質、不同共振擺之擺角，對交替晃動次數之影響

由圖十三的實驗結果可知：(一)對棉線介質而言，擺角越大，交替晃動次數越多，交晃情況越穩定。(二)對橡皮筋介質而言，無論擺角為何，交替晃動次數均為 2(次)。(三)對釣魚線介質而言，無論擺角為何，都沒有交替晃動現象。(四)如果想要共振擺有比較好的交替晃動效果，擺角選用 75 度，介質選橡皮筋，效果最好。

(二)探討不同共振擺之擺長(自然頻率)，對交替晃動次數之影響：分析如圖十四。

介質 擺長(mm)	棉線		橡皮筋		釣魚線
	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均次數(次)
200	22	64	4	62	無交晃僅同步共振
250	20	66	2	68	無交晃僅同步共振
300	18	62	2	64	無交晃僅同步共振
350	14	60	2	60	無交晃僅同步共振
400	10	58	1	52	無交晃僅同步共振

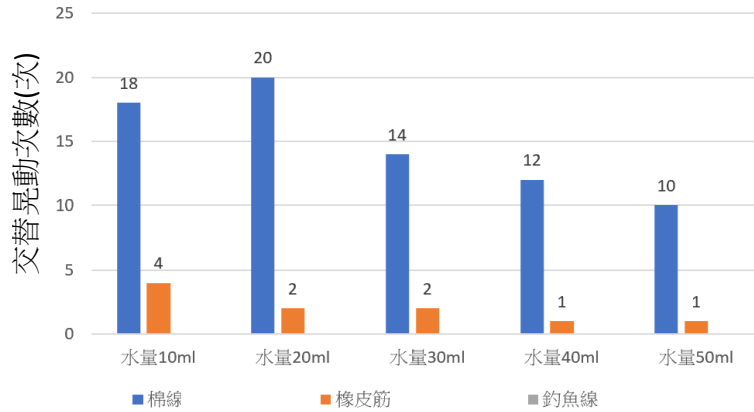


圖十四、不同介質，不同共振擺之擺長，對交替晃動次數之影響

由圖十四的實驗結果可知：(一)對棉線與橡皮筋介質而言，擺長越長，交替晃動次數越少，交晃情況越穩定。(二)對釣魚線介質而言，無論擺長為何，都沒有交替晃動現象。(三)當擺長為 250mm 時，共振擺的持久度最好；雖然擺長越長，交晃次數會變少，但持久度也會隨之變少。(四)如果想要共振擺有較佳的交替晃動效果，擺長要用 250mm，介質應選橡皮筋，效果最好。

(三)探討不同共振擺的擺錘重量(易拉罐水量)，對交替晃動次數之影響：分析如圖十五

介質 水量(ml)	棉線		橡皮筋		釣魚線
	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均次數(次)
10	18	58	4	62	無交晃僅同步共振
20	20	66	2	68	無交晃僅同步共振
30	14	62	2	64	無交晃僅同步共振
40	12	60	1	60	無交晃僅同步共振
50	10	58	1	60	無交晃僅同步共振

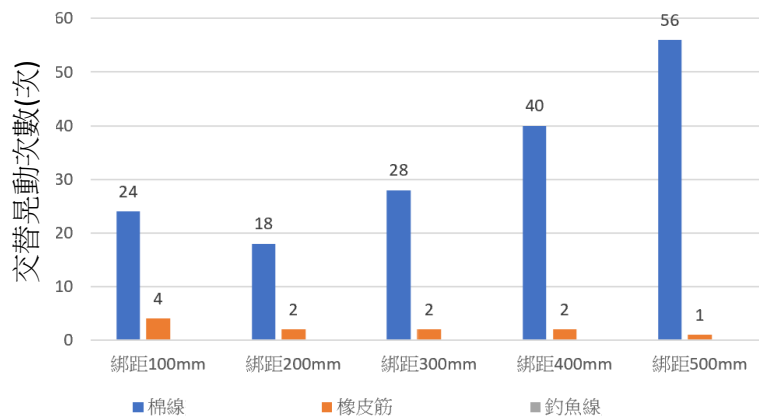


圖十五、不同介質、不同易拉罐之加水量，對交替晃動次數的影響

由圖十五的實驗結果可知：(一)對棉線介質而言，水量 20ml 的交替晃動次數有最大值，無論水量調多或調少，交替晃動次數都有變小的趨勢。(二)對橡皮筋介質而言，水量越多，交替晃動次數有越少的趨勢。(三)對釣魚線介質而言，無論水量多少，都沒有交替晃動現象。(四)當水量為 20ml 時，共振擺的持久度最好，雖然水量越多或越少，交晃次數會變少，但持久度也會隨之變少。(五)如果想要共振擺有較好的交替晃動效果，水量應用 20ml，介質要選橡皮筋，效果最好。

(四)探討不同共振介質的綁點距離，對交替晃動次數之影響：分析如圖十六

介質 綁距(mm)	棉線		橡皮筋		釣魚線
	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均次數(次)
100	24	76	4	62	無交晃僅同步共振
200	18	58	2	68	無交晃僅同步共振
300	28	88	2	60	無交晃僅同步共振
400	40	76	2	56	無交晃僅同步共振
500	56	64	1	50	無交晃僅同步共振

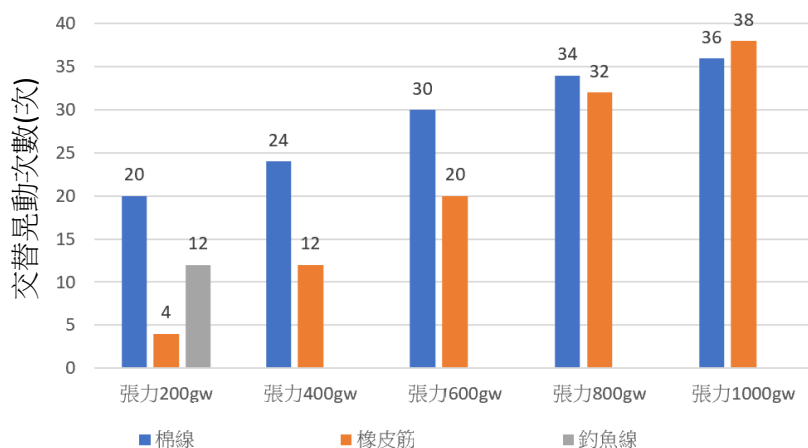


圖十六、不同介質，不同共振擺之綁點距離，對交替晃動次數之影響

由圖十六的實驗結果可知：(一)對棉線介質而言，綁點距離 200mm 的交替晃動次數有最小值，無論甜蜜點調多或調少，交替晃動次數均有變大的趨勢。(二)對橡皮筋介質而言，綁點距離越遠，交替晃動次數有越少的趨勢。(三)對釣魚線介質而言，無論綁點距離是多少，都沒有交替晃動的現象。(四)當綁點距離為 200mm 時，共振擺的交替晃動次數與持久度對棉線或橡皮筋介質來說都是最好的甜蜜點。(五)想要共振擺有比較好的交替晃動效果，綁點距離要是 200mm，介質選橡皮筋，效果最好。

(五)探討不同共振介質的張緊程度，對交替晃動次數的影響：分析如圖十七。

介質 張力(gw)	棉線		橡皮筋		釣魚線	
	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)	交晃平均 次數(次)	持久度 (秒)
200	20	66	4	58	12	38
400	24	78	12	52	無交晃	同步共振
600	30	60	20	46	無交晃	同步共振
800	34	52	32	40	無交晃	同步共振
1000	36	36	38	38	無交晃	同步共振



圖十七、不同介質，不同張緊程度(張力)，對交替晃動次數之影響

由圖十七的實驗結果可知：(一)對三種介質而言，張力越大，交替晃動次數也跟著變大。(二)對橡皮筋介質而言，張力為 200gw 時，交替晃動次數有最佳的表現。(三)對釣魚線介質而言，當張力調整為 200gw 時，首度發生交替晃動的現象；在其他張力下，仍舊只有同步共振。(四)如果想要共振擺有較好的交替晃動效果，張力要用 200gw，介質應選橡皮筋，效果最好。

(五)比較在不同共振介質下，交替晃動效果最佳之變因組合：分析結果如下表

	共振介質		介質+擺	汽水擺		
組合變因	材質	張緊程度	綁點距離	啟動擺角	擺長	加水重量
最佳條件	橡皮筋	200 gw	200 mm	75 度	250 mm	20 ml

五、實驗五：找出最佳的交替晃動共振擺裝置，分析其耦合能量轉換率與能量衰退率

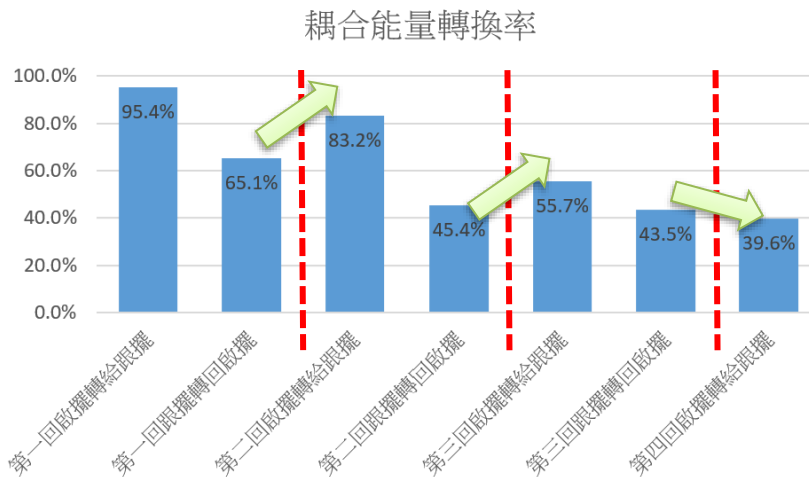
(一)找出最佳交替晃動共振擺裝置

組合變因	共振介質		介質+擺	汽水擺		
	材質	張緊程度	綁點距離	啟動擺角	擺長	加水重量
最佳條件	橡皮筋	200 gw	200 mm	75 度	250 mm	20 ml

(二)使用最佳交替搖擺的組合裝置，探討其耦合能量轉換率與能量衰退率

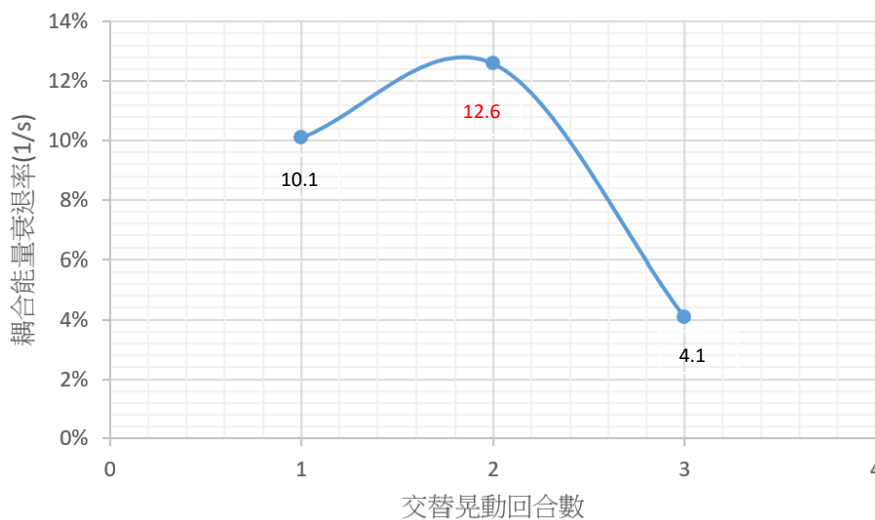
1. 量化分析：分析如圖十八、圖十九

交晃現象 實驗次數	啟動單擺		跟動單擺		啟動單擺		跟動單擺		
	第一回 最大擺 幅距離	第一回 晃動的 半週期	第一回 最大擺 幅距離	第一回 晃動的 半週期	第二回 最大擺 幅距離	第二回 晃動的 半週期	第二回 最大擺 幅距離	第二回 晃動的 半週期	
1	53cm	3 秒	51cm	3 秒	42cm	3 秒	39cm	3 秒	
2	45cm	2.8 秒	44cm	2.8 秒	36cm	2.8 秒	30cm	2.8 秒	
3	58cm	3.2 秒	56cm	3.2 秒	44cm	3.2 秒	41cm	3.2 秒	
4	51cm	3 秒	51cm	3 秒	41cm	3 秒	38cm	3 秒	
5	53cm	3 秒	52cm	3 秒	42cm	3 秒	39cm	3 秒	
平均	52cm	3 秒	50.8cm	3 秒	41cm	3 秒	37.4cm	3 秒	
交晃現象 實驗次數	啟動單擺		跟動單擺		啟動單擺		跟動單擺		
	第三回 最大擺 幅距離	第三回 晃動的 半週期	第三回 最大擺 幅距離	第三回 晃動的 半週期	第四回 最大擺 幅距離	第四回 晃動的 半週期	第四回 最大擺 幅距離	第四回 晃動的 半週期	
1	27cm	3 秒	20cm	3 秒	14cm	3 秒	9cm	3 秒	
2	24cm	2.8 秒	18cm	2.8 秒	12cm	2.8 秒	7cm	2.8 秒	
3	27cm	3.2 秒	20cm	3.2 秒	15cm	3.2 秒	9cm	3.2 秒	
4	24cm	3 秒	18cm	3 秒	10cm	3 秒	7cm	3 秒	
5	24cm	3 秒	18cm	3 秒	11cm	3 秒	7cm	3 秒	
平均	25.2cm	3 秒	18.8cm	3 秒	12.4cm	3 秒	7.8cm	3 秒	
第一回合				第二回合					
交替晃動次數		2 次	啟擺轉 給跟擺	跟擺轉 回啟擺	交晃次		2 次	啟擺轉 給跟擺	跟擺轉 回啟擺
耦合能量轉換率			95.4%	65.1%	能量轉換率		83.2%	45.4%	
耦合能量衰退率			第一回	10.1%	半週期	3 秒	第二回	12.6%	
第三回合				第四回合					
交替晃動次數		2 次	啟擺轉 給跟擺	跟擺轉 回啟擺	交晃次		2 次	啟擺轉 給跟擺	跟擺轉 回啟擺
耦合能量轉換率			55.7%	43.5%	能量轉換率		39.6%	略	
耦合能量衰退率			第三回	4.1%	半週期	3 秒	第四回	略	



圖十八、最佳交替晃動共振擺裝置的前四回合耦合能量轉換率


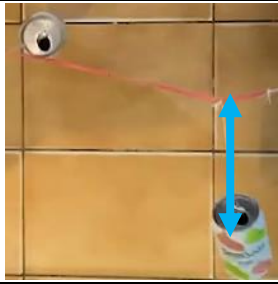
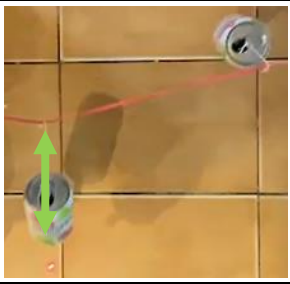
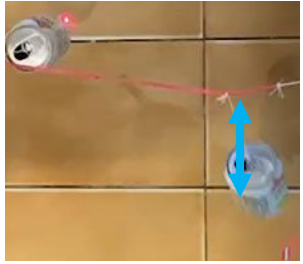
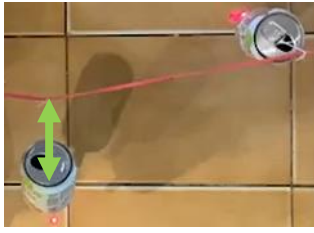

由圖十八的實驗結果可知：(一)每回合的啟擺轉給跟擺的能量轉換率都有下降的傾向，每轉換一次，能量流失就會變多。(二)第一到第二、第二到第三回合的轉換率，數值都有突然上升的傾向；第三到第四回合的能量轉換率發生下降的趨勢，代表此共振擺即將變成同步共振。(三)隨著回合數的增加，耦合能量轉換率由 95.4% 下上下上下降到 39.6%。



圖十九、最佳交替晃動共振擺裝置的前三回合耦合能量衰退率

由圖十九的實驗結果可知：(一)各回合的能量衰退率都不同，第一回合 10.1%(1/s)、第二回合 12.6%(1/s)、第三回合 4.1%(1/s)。(二)在第二回合時的能量衰退率竟出現了一個最大值(高峰)，表示第二回合的能量衰退情形最大。(三)到了第四回合時，共振擺已達成同步共振，因此無法計算能量衰退率。第二回合能量衰退率突然增加的可能原因，推測是第一回合能量轉換到第二回合時，第二回合的能量無法有效續留，多數的能量都被空氣阻力削弱了，導致耦合能量衰退率發生此結果。

2.質性分析：甜蜜交替晃動超紓壓。

	第一回第一次	第一回第二次	第二回第一次
擺幅 交晃 2次 (影像)			
半週期	3 秒	3 秒	3 秒
	第二回第二次	第三回第一次	第三回第二次
擺幅 交晃 2次 (影像)			
半週期	3 秒	3 秒	3 秒

(三)不同介質、不同擺盪條件下，交替晃動次數、持久度、耦合能量轉換率與衰退率比較

介質	最佳擺盪條件		交晃次數	持久度	能轉換率	能衰退率
棉線	擺角	75 度	18 次 (不穩) (次之)	66 秒 (最佳)	18.2% 25% 6.3% 14.1% (次之)	第一回 0.32%(1/s) 第二回 0.65%(1/s) (次之)
	擺長	250 mm				
	加水量	20 ml				
	甜蜜點	200 mm				
	張力	400 gw				
橡皮筋	擺角	75 度	2 次 (穩定) (最佳)	19 秒 (次之)	95.4% 65.1% 83.2% 45.4% 55.7% 43.5%	第一回 10.1%(1/s) 第二回 12.6%(1/s) 第三回 4.1%(1/s)
	擺長	250 mm				
	加水量	20 ml				
	甜蜜點	200 mm				
	張力	200 gw				
釣魚線	擺角	均無效無差	0 次 (最差)	0 秒 (最差)	0% (最差)	0% (最差)
	擺長	均無效無差				
	加水量	均無效無差				
	甜蜜點	均無效無差				
	張力	200 gw				

陸、討論

一、由實驗一的結果得知：

- (一)使用「棉線材質」複製易拉罐盪鞦韆的實驗時，我們找到一些規律。**如果符合以下幾點條件：(1)擺繩長度為 216.7 mm，(2)綁點距離(甜蜜點)為 243.5 mm，(3)罐內加水量為 20 ml，(4)啟動擺角為 75 度，就可以重現和影片最相似的交替晃動效果。**
- (二)罐內加水量改變時，不是水量越少，交替晃動次數就越大，而是在水量 20 ml 時，效果最符合預期。啟動擺角則是角度越大時，交替晃動次數較多。
- (三)以棉線當成介質時，交替晃動次數在各回合的表現並不穩定(18.8、18.8、13.6、9.6 次)，交晃次數會隨著回合數的增加而減少；在擺盪持久度方面，擺盪週期會隨著回合數的增加而減少(第一回合 39.2 秒、第二回合 23.6 秒)。

二、由實驗二的結果得知：

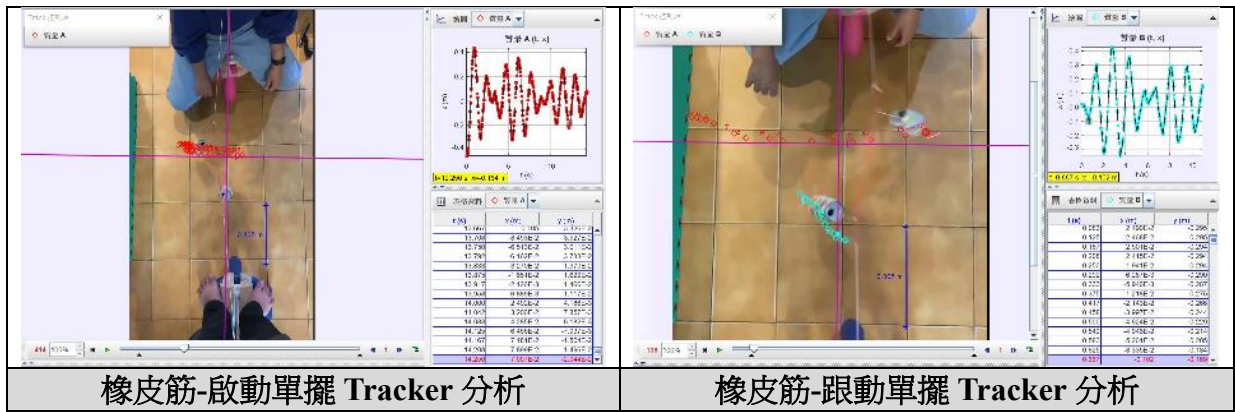
- (一)以棉線當成介質時，綁點距離(甜蜜點)對交替晃動次數與擺盪持久度是有影響的。
- (二)**綁點距離(甜蜜點)在 200 mm 時，交替晃動次數最少，交晃現象最明顯。**
- (三)從質性分析的影片中觀察介質的影像時，介質的晃動並沒有看到顯著的差異。

三、由實驗三的結果得知：

- (一)以棉線當成介質時，張緊程度(張力)對交替晃動次數與擺盪持久度是有影響的。
- (二)**張緊程度(張力)在 200 gw 時，交替晃動次數最小，交晃現象最明顯。**
- (三)從質性分析的影片中觀察介質的影像時，介質的晃動沒有顯著的差異。

四、由實驗四的結果得知：

- (一)以「不同共振介質(棉線、橡皮筋、釣魚線)」當成介質時，擺角、綁點距離、加水量、張力與繩長對「交替晃動次數與持久度」都是有影響的。
- (二)以釣魚線當介質時，只有張緊程度 200 gw 時可以看到交替晃動的情況，其餘條件下只看到兩個汽水擺發生同步共振的結果。
- (三)以橡皮筋當介質時，它產生交替晃動的次數比棉線來得小且明顯，由此可知，選用彈性較大的橡皮筋介質，得到的交晃效果比無彈性的介質來得好。
- (四)**最佳交替晃動共振擺裝置確定為橡皮筋介質，綁點距離(甜蜜點)200 mm，擺長 250 mm，擺角 75 度，加水量 20 ml，張緊程度(張力)200 gw 時，可得最佳交替晃動效果。**



五、由實驗五的結果得知：

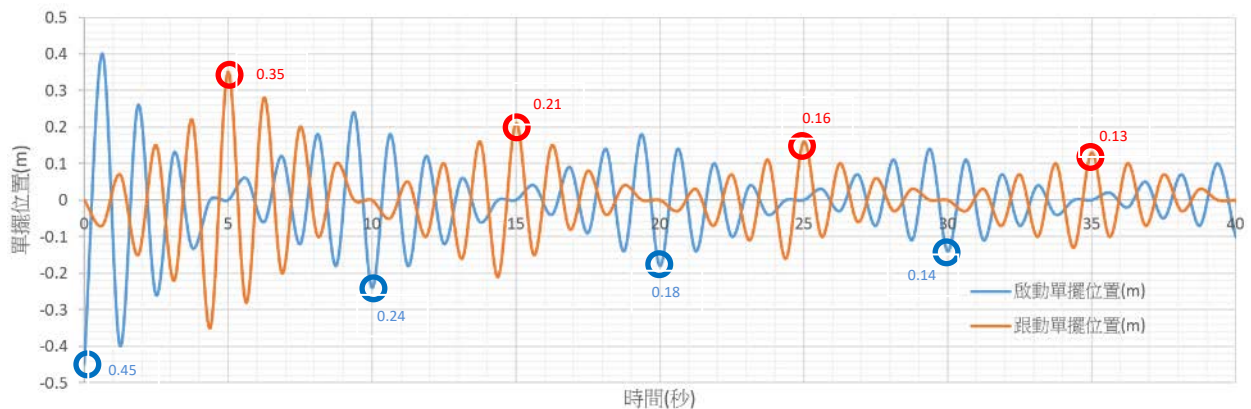
(一)最佳交替晃動共振擺裝置的耦合能量轉換率分別為：95%、65%、83%、45%、56%、44%，轉換率在交替晃動次數 2 次過後的當下有變高的現象；推測是各回合結束時積蓄的能量會整個帶給下一回合，但整體能量仍以向下階梯狀的趨勢衰退著。

(二)最佳交替晃動共振擺裝置的耦合能量衰退率分別為：10.1%、12.6%、4.1%，而交替晃動的半週期都固定為 3 秒，能量衰退的狀況到了第 4 回合已無法分析。**值得一提的是**：在第 2 回合時的能量衰退率竟然比第 1 回合與第 3 回合大，而且「第『2』回合的衰退率有極大值」跟「交替晃動次數『2』次」中『2 這個數』似乎有某種程度的關聯！為了解開這個神祕的關聯性，需要再檢視橡皮筋介質的共振擺中「第『n』回合的衰退率極大值」跟「交替晃動次數『m』次」之中，『n 與 m』之關係。

1.檢視橡皮筋介質共振擺中交替晃動次數 4 次的條件(取交晃 4 次裝置作分析)。

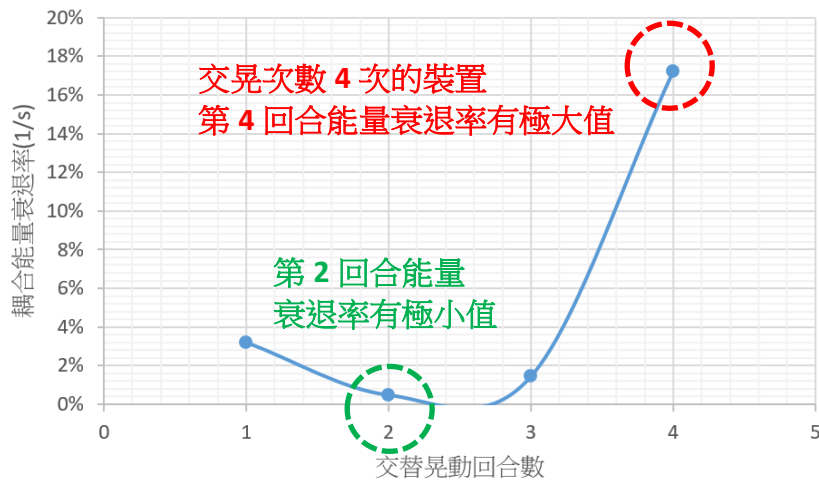
- (1)擺長 200 mm 的橡皮筋介質共振擺(水量 20ml、綁距 200mm、張力 200gw)
- (2)水量 10 ml 的橡皮筋介質共振擺(擺長 250mm、綁距 200mm、張力 200gw)
- (3)甜蜜點(綁距)100 mm 的橡皮筋介質共振擺(擺長 250mm、水量 20ml、張力 200gw)
- (4)張力 200 gw 的橡皮筋介質共振擺(擺長 250mm、水量 20ml、綁距 200mm)

2.使用 Tracker 和 Excel 分析前述裝置(搭配圖十四擺長 200mm)中各回合的衰退率值。



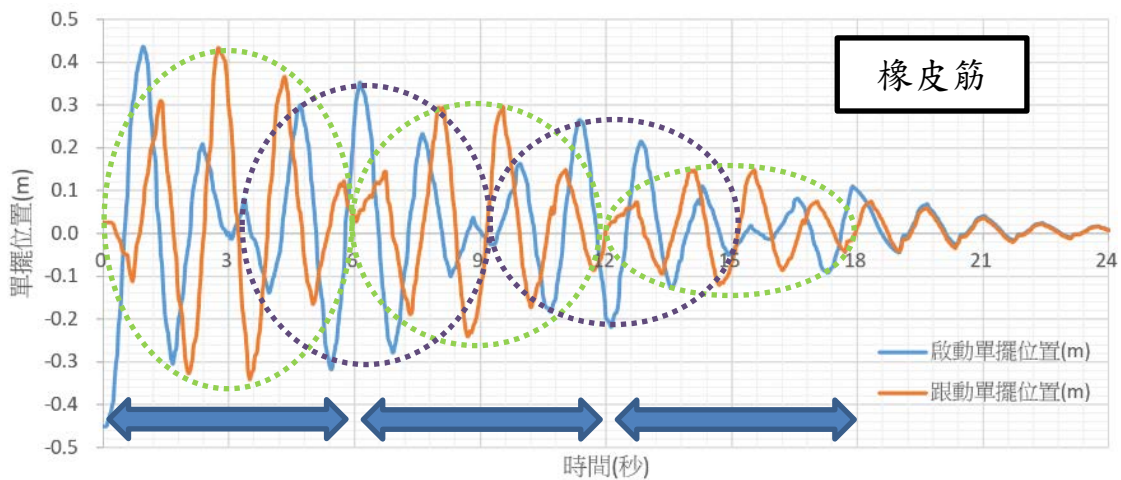
圖二十、擺長 200 mm 橡皮筋介質共振擺的時間對啟動/跟動單擺位置關係圖

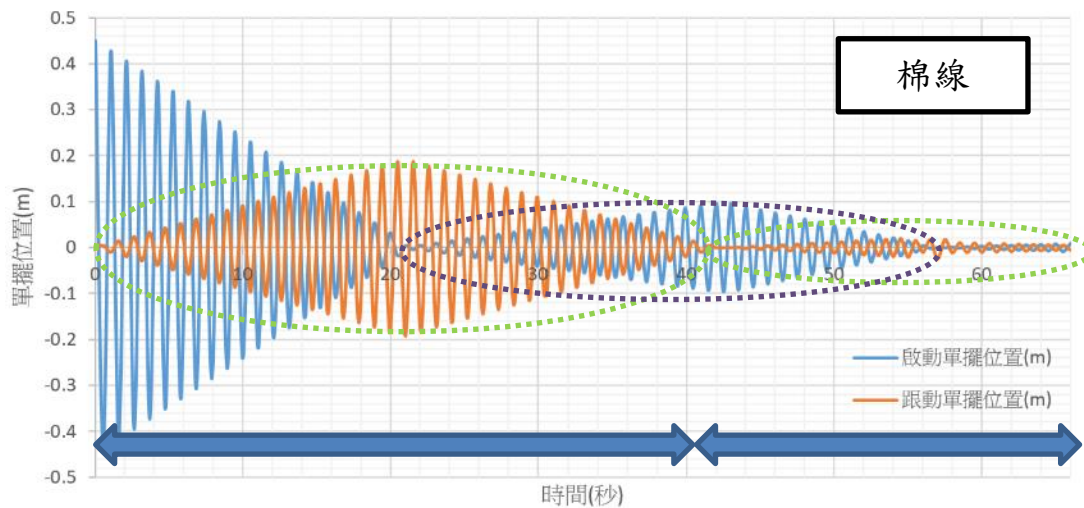
由圖二十的實驗結果可知：(一)第一回合的(啟動單擺最大振幅，跟動單擺最大振幅)為(0.45，0.35)、第二回合為(0.24，0.21)、第三回合(0.18，0.16)、第四回合(0.14，0.13)。(二)各回合的能量轉換率分別是：60.5%、76.6%、79.0%、86.2%(第5回合視為0%)。(三)各回合的耦合能量衰退率值分別是：3.21%(1/s)、0.49%(1/s)、1.44%(1/s)、17.20%(1/s)，繪製成 Excel 分析圖，如下頁圖二十一所示(第4回合有極大值)。



圖二十一、擺長 200 mm 橡皮筋介質共振擺裝置的前四回合耦合能量衰退率

六、探討不同介質的擺動位移對時間的關係圖：





- (一)橡皮筋的交替晃動週期是穩定的 6 秒，棉線的週期會因回合數的增加而減少。
- (二)橡皮筋介質(振幅緩慢降)的能量轉換率與衰退率，都明顯比棉線介質好。
- (三)橡皮筋的啟動單擺晃動兩次以後就會暫時停止，緊接著跟動單擺增幅晃兩次，並可以持續三回合對稱交換；棉線的交替晃動次數高達 20 多次，只二回合便停止對稱交換。

柒、結論

本研究探討「共振擺中的『介質』和『交替晃動』的關係」。實驗方法採多次試驗、實際操作與影像紀錄的方式進行。研究結果發現：(一)介質材質、擺角、加水量、綁點距離(甜蜜點)、張緊程度(張力)、擺長，都會影響交替晃動的效果；(二)以橡皮筋當介質時，交替晃動的情況比棉線與釣魚線來得明顯，釣魚線材質較易產生同步共振，不易發生交替晃動；(三)交替晃動次數越少的共振擺，持久度不一定會越高，但能量轉換率一定比較好；(四)在分析最佳交替晃動共振擺裝置的耦合能量轉換率與衰退率時，歸納發現「第 $n=2$ 和 4 回合，衰退率有極值」，也和「交替晃動次數 $n=2$ 、4 次」這個值有關；(五)使用 Excel 與 Tracker 進行數據分析與統計時，可以幫助我們更容易釐清科學現象的發展趨勢與變化。總之，要用易拉罐盪鞦韆看到明顯交替晃動的現象其實並不容易，實驗器材雖然好架設且易取得，但在裝置設計上仍有其妙方；在歷經了上百次的實驗後，才和師長共同找出每一個關鍵要素，這結果讓人振奮不已！

參考文獻與其他

一、參考資料

- (一)耦合共振：<https://v.qq.com/x/page/i0837fhopiy.html>
- (二)共振彈簧：<https://youtu.be/RSiiJ9O0pwc>
- (三)交替盪鞦韆：<http://scigame.ntcu.edu.tw/power/power-026.html>
- (四)韋伯福斯擺：<https://www.bilibili.com/s/video/BV1hp4y1h7Nq>

二、其他：科展大事紀

日期	週次	事件	發生問題	解決方法
2021.09.12	2	完成訂定主題並確立問題	颱風天	發現問題提假說
2021.09.26	1	實驗裝置第一次仿做(一人)	效果不彰	再找爸爸協作
2021.09.30	2	完成說明書架構	僅定表格無實驗	計畫實驗進度
2021.10.11	2	實驗一開始製作 (含實驗及數據分析)	實驗找不出與影片相仿的數據	重新設計實驗
2021.10.30	2	調整實驗變因(張緊度) 重新製作實驗找到與影片相仿結果	影片中介質的張緊度不好掌握	Try error 直到找到相仿狀況為止
2021.11.07	1	重做實驗一實驗及數據	完成實驗一但數據結果不夠理想	本周連續花三天重做實驗以解決此問題
2021.11.14	1	操作實驗二並完成數據分析	實驗二影片內容不夠完整	需要補拍影片修正實驗數據並用Excel輸出
2021.11.21	1	操作實驗三並完成數據分析	實驗三的張力難以控制且實驗數據不夠理想	為了獲得有效數據務必多做
2021.11.28	1	操作實驗四並完成數據分析	實驗四的有效實驗次數較少	增加實驗次數獲得更多數據
2021.12.05	1	操作實驗五並完成數據分析	實驗五需要花費較多的時間	最佳共振擺裝置的操作力求完美每日做一小時持續做了一週
2021.12.10	1	完成科展作品說明書	文字潤飾需請師長協助	調整文字論述
2022.1	2	校內科展名次確定	文字及編排需要修正	找時間將說明書修改及統整
2022.2	3	市賽說明書與海報準備及輸出	專有名詞定義及圖文排版時遇到困難	尋求師長及爸爸的協助與指導
2022.3	3	科展說明書圖表修改	些許圖文不符需盡快修改	圖表及文字修改
2022.4	3	新北市市賽準備及參賽	還不熟悉如何介紹實驗及未擬定問答	請老師及爸爸幫忙練習和熟悉簡報及說明書與問答
2022.5	3	利用 Tracker 繪製數據圖	較不熟悉系統操作及軟體使用方式	尋求爸爸協助並且在旁觀摩他的操作過程
2022.6	3	市賽指導老師及教授提點	未將文字重點標記出來	更改說明書文字重點及實驗修改

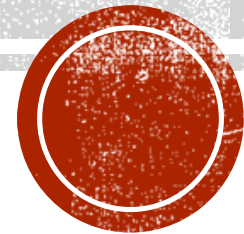
【評語】 080105

本作品運用 Tracker 觀測共振擺，並探討共振擺的耦合與能量轉移的現象。但是共振擺是一個古老常見的主題，而 Tracker 觀測也是近來科展或其他探究活動探究的工具，兩者的結合也已屢見不鮮。雖然就擺的變因與兩擺的耦合都有控制與探究，然而創新性、嚴謹性與完整性，相較於其他作品仍有需多進步空間。

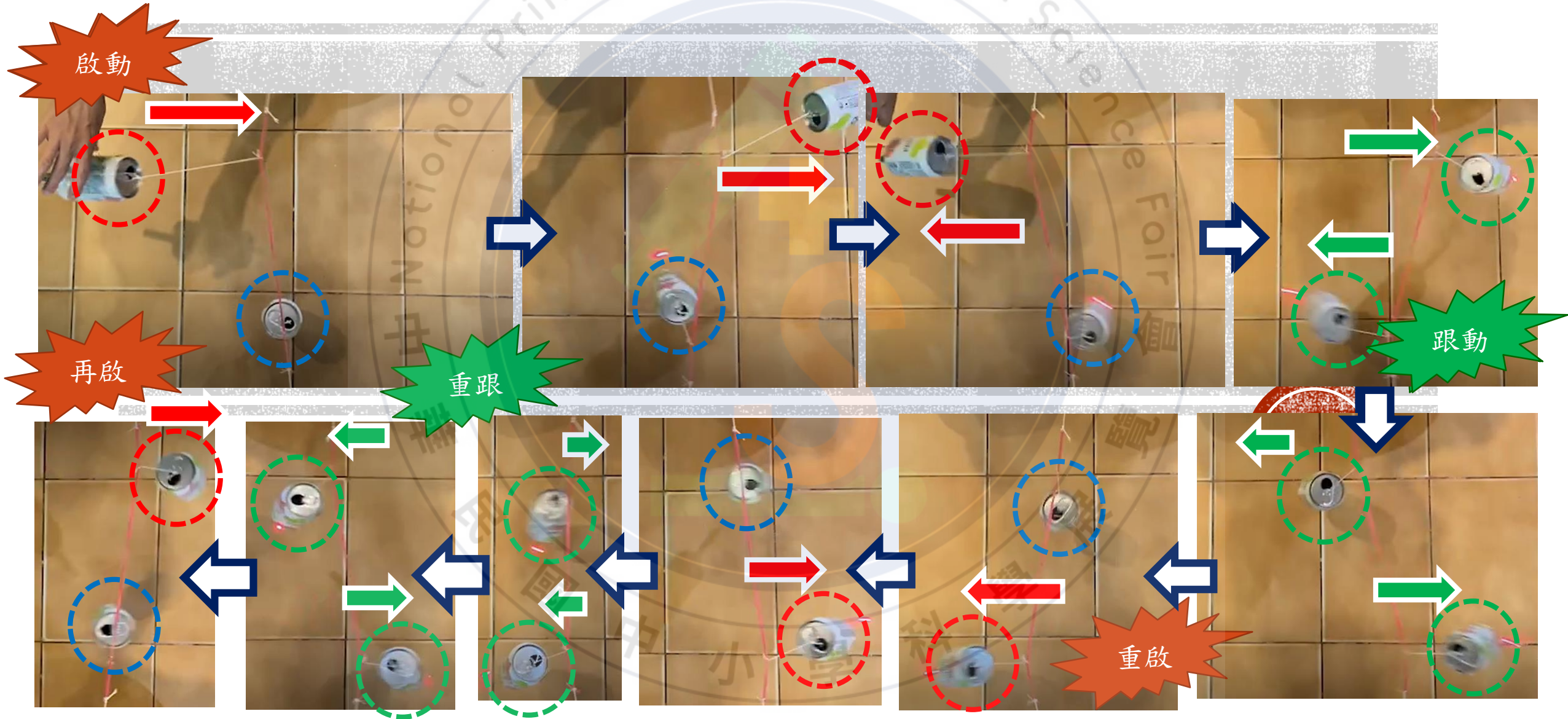
作品簡報

甜蜜交織的共振擺

國小組物理科
編號:



共振擺裝置晃動情形



研究目的與研究問題

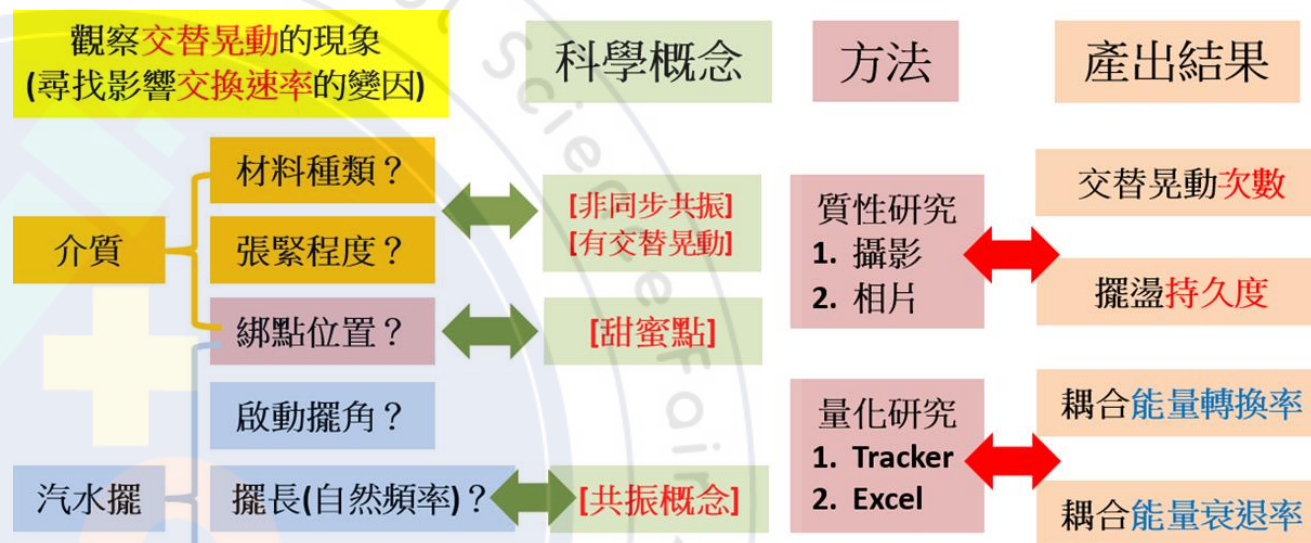
研究架構與變因定義

◆一、研究目的：

探討共振擺中「介質」與「交替晃動次數、能量轉換衰退」之間的關係。

◆二、研究問題：

1. 複製文獻實驗探討棉線交晃次數
2. 不同綁距對交晃次數和持久度的影響
3. 不同張力對交晃次數和持久度的影響
4. 不同共振介質對交晃次數的影響
5. 分析最佳裝置能量轉換率及衰變率



◆交替晃動次數：

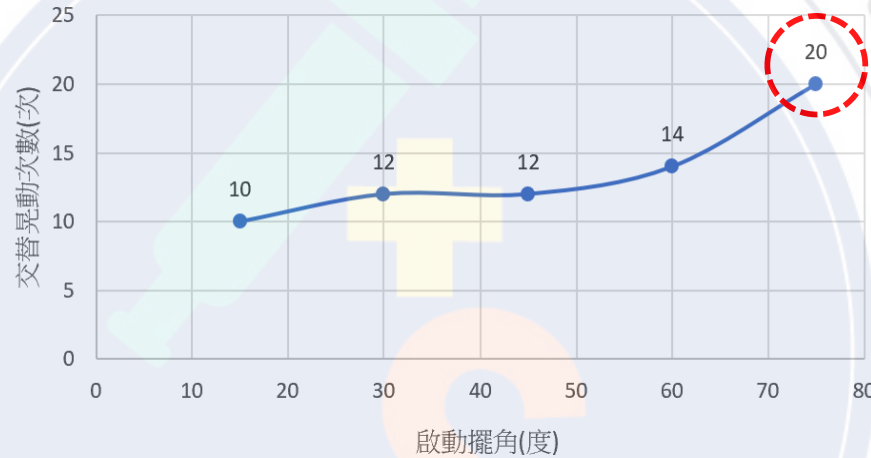
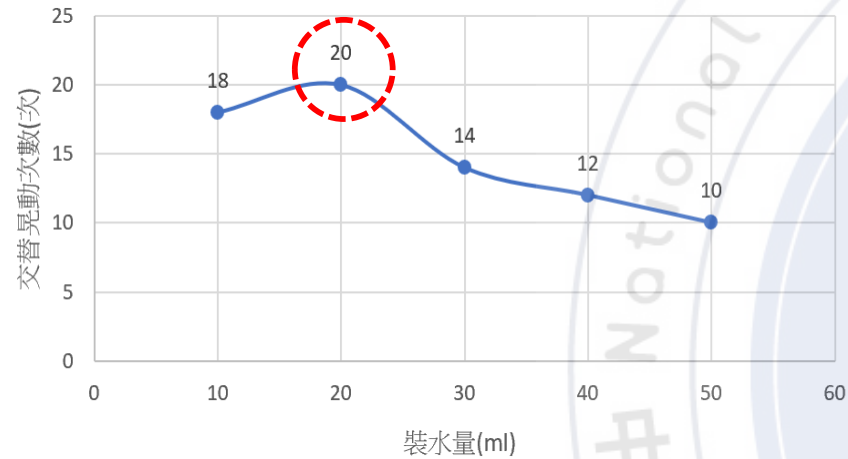
啟動單擺從「最大擺幅變到最小擺幅時晃動的次數」

◆擺盪持久度：

啟動單擺從「放手開始到兩擺同步共振時所歷經的時間」

實驗一：複製文獻實驗探討棉線交晃次數

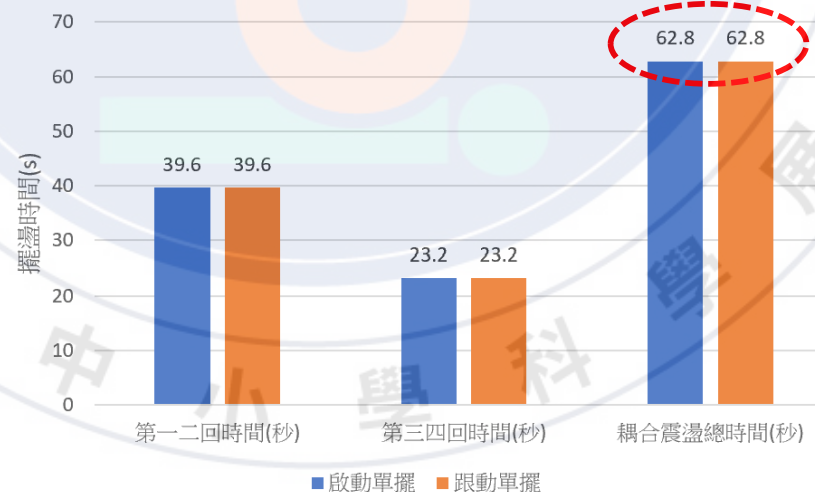
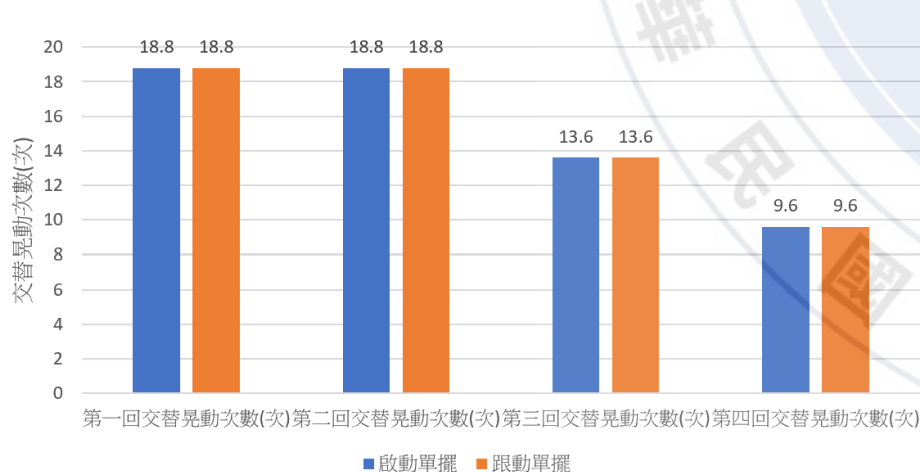
一、裝水量與啟動擺角對交替晃動次數的關係



1. 隨著回合數的增加交替晃動次數**逐漸下降**。

2. 隨著回合數的增加擺盪時間也有**逐漸下降的趨勢**，總時間有**62.8秒**。

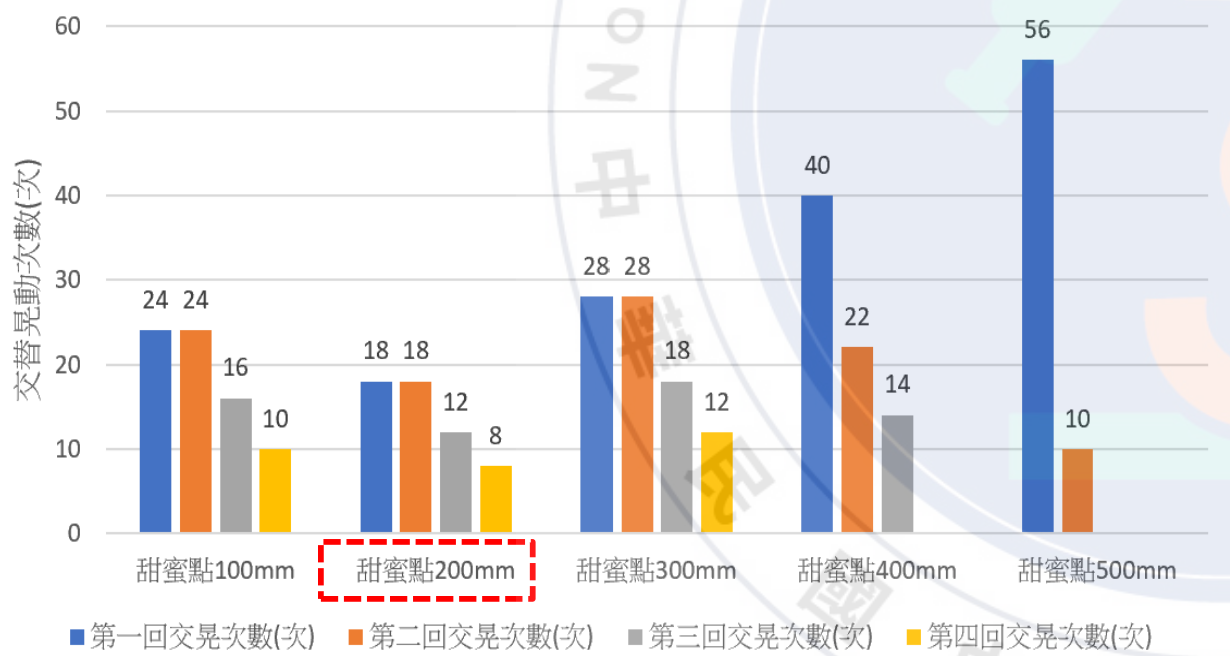
二、棉線介質的交替晃動次數與持久度



3. 裝水量**20ml**，擺角**75度**，擺長**216.7mm**綁點距離**243.5mm**的搭配裝置與文獻影片一致。

實驗二：不同綁距對交晃次數和持久度的影響

一、不同綁點距離(甜蜜點)對交替晃動次數的影響

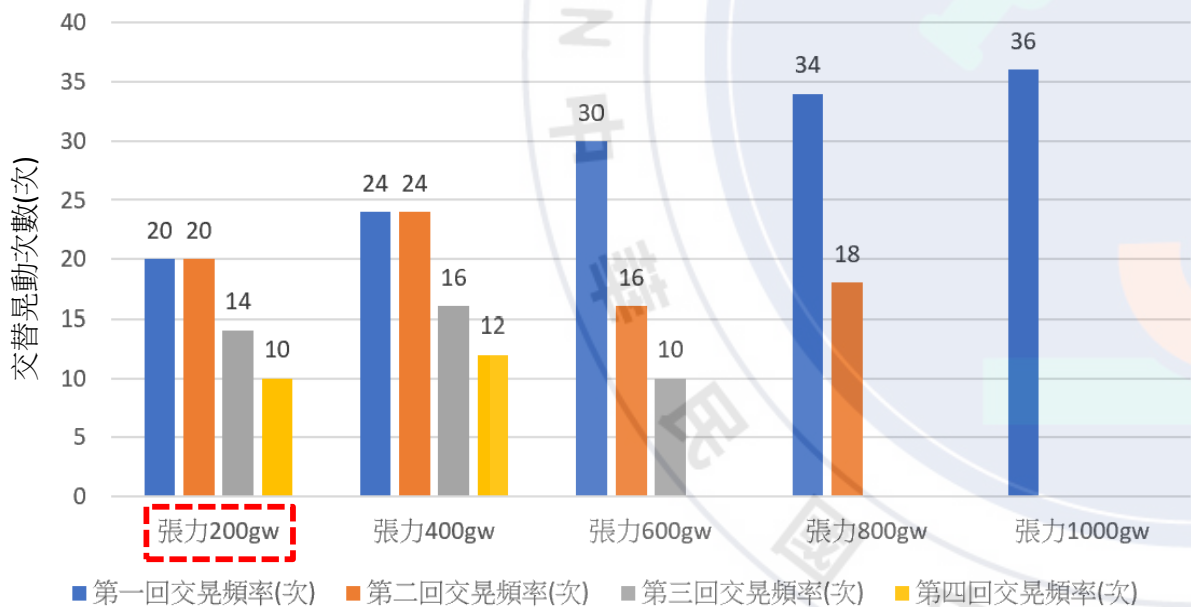


二、不同綁點距離(甜蜜點)對持久度的影響

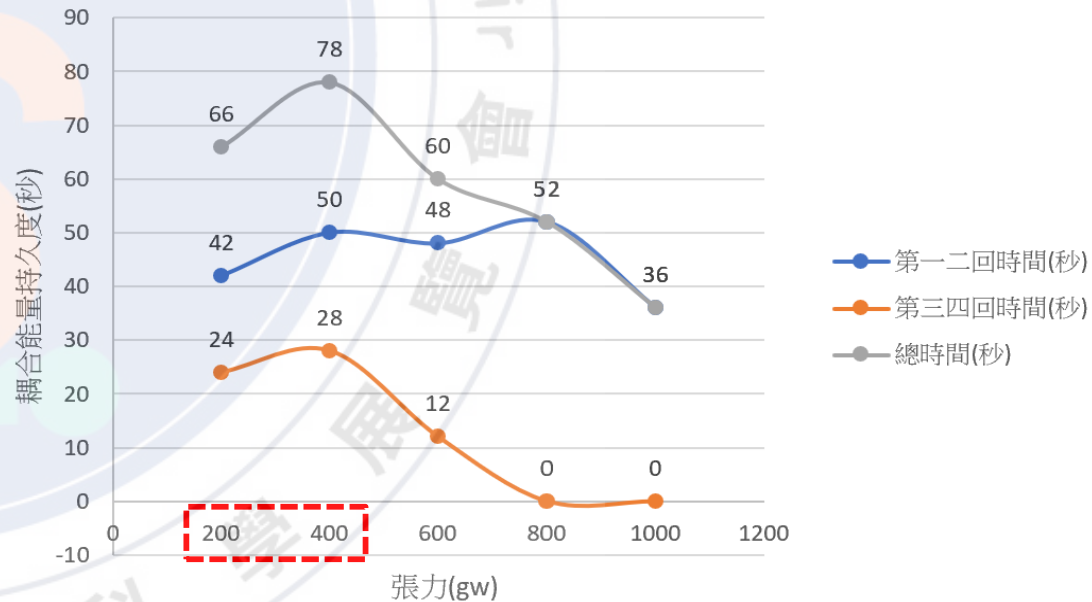


實驗三：不同張力對交晃次數和持久度的影響

一、不同張緊程度(張力)對交替晃動次數的影響

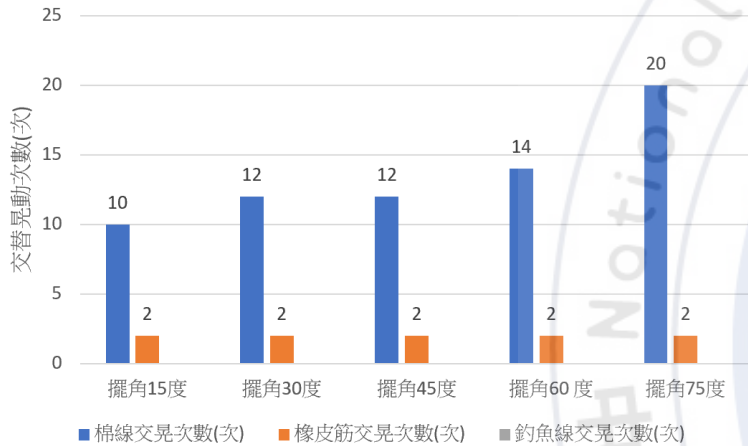


二、不同張緊程度(張力)對持久度的影響

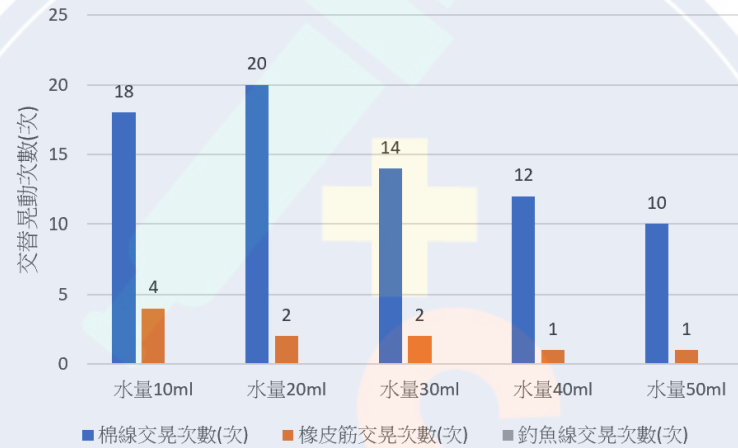


實驗四：不同共振介質對交晃次數的影響

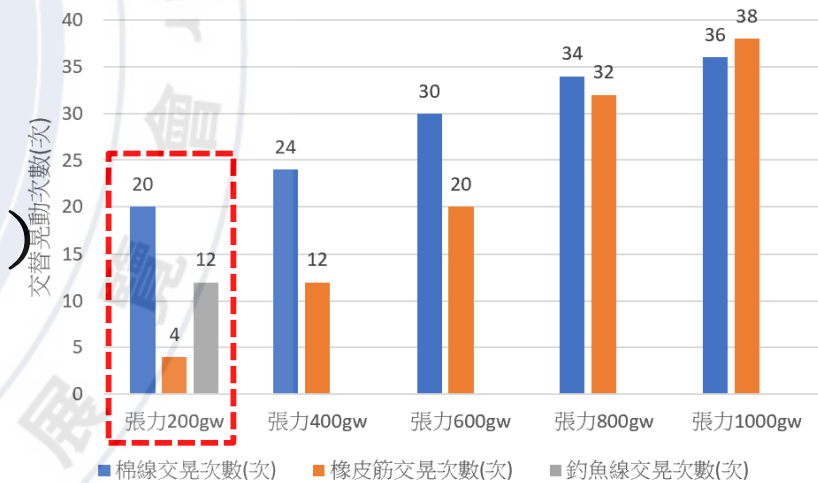
不同共振擺的擺角



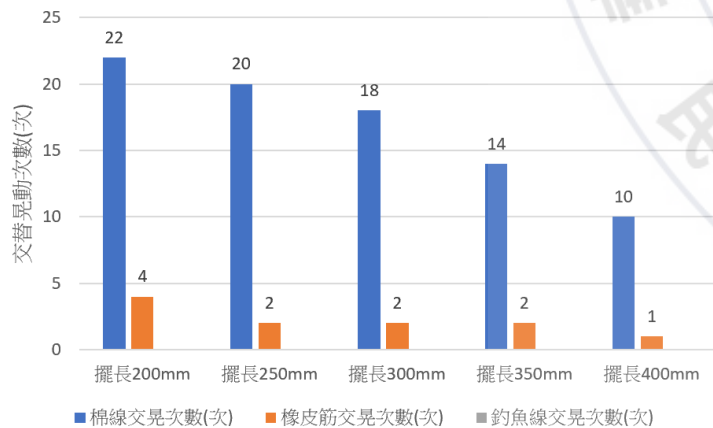
不同共振擺的加水量



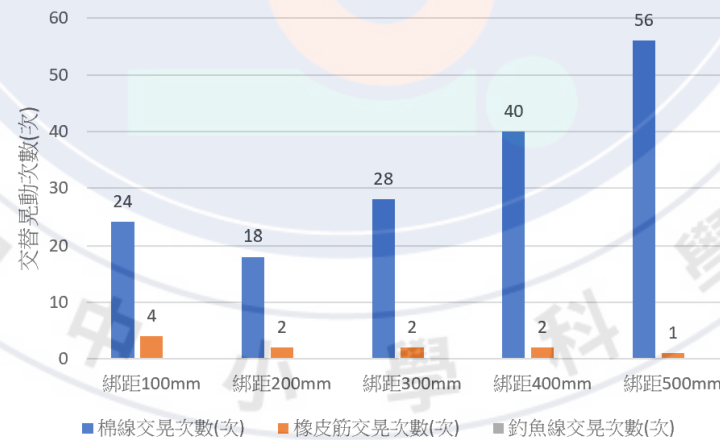
不同共振擺的張緊程度



不同共振擺的擺長



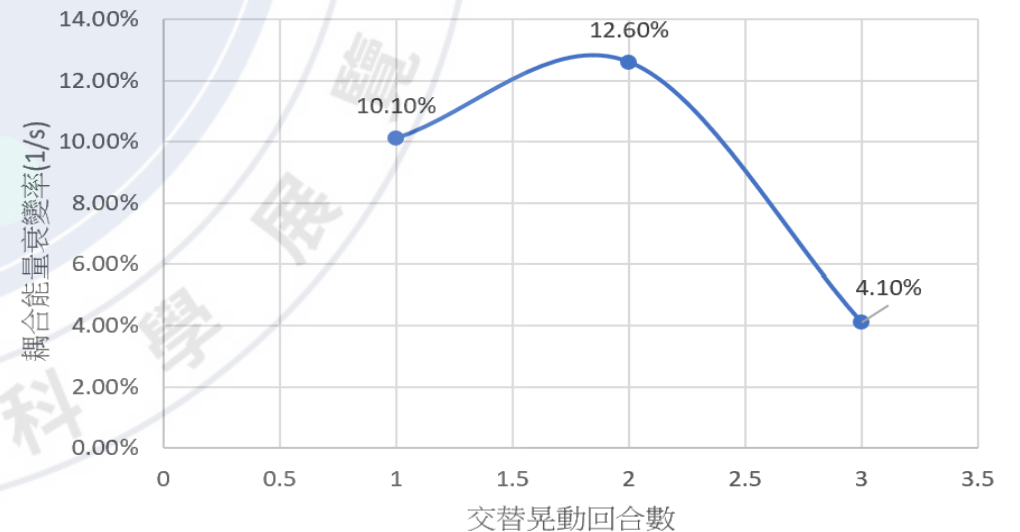
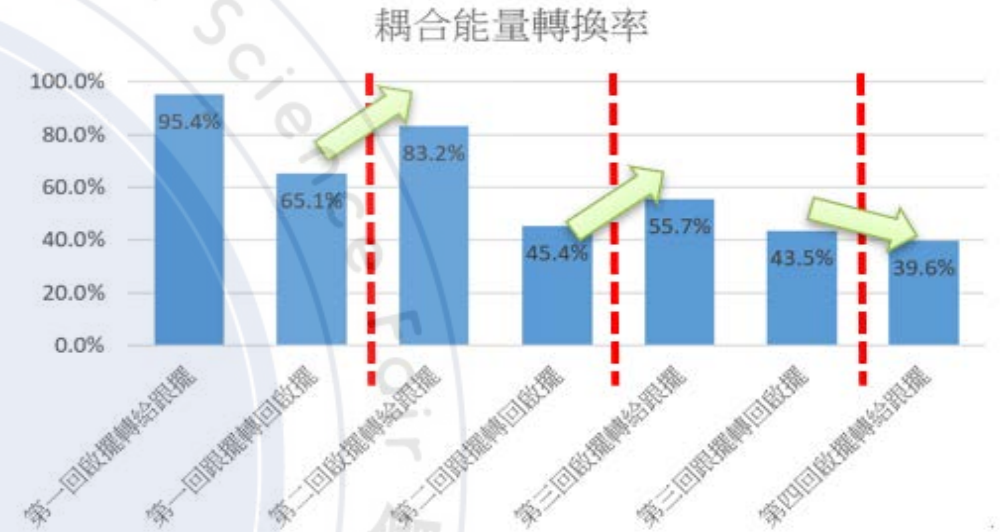
不同共振擺的綁點距離(甜蜜點)



實驗五：分析最佳裝置能量轉換率及衰變率

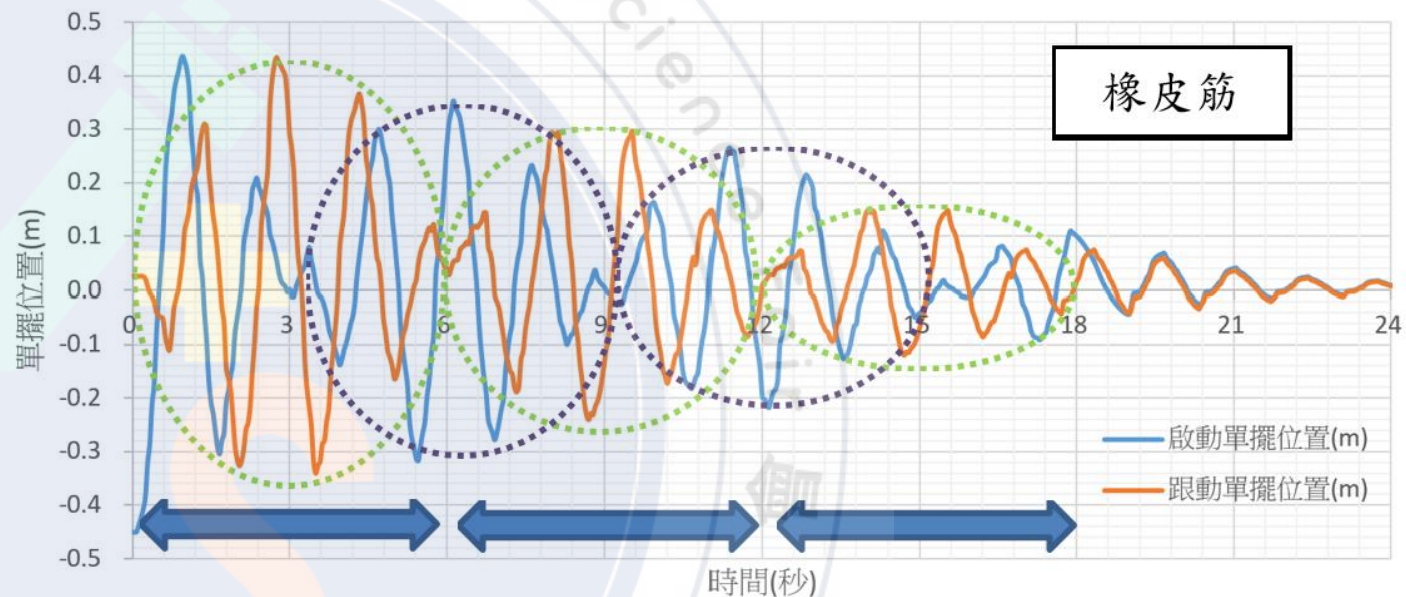
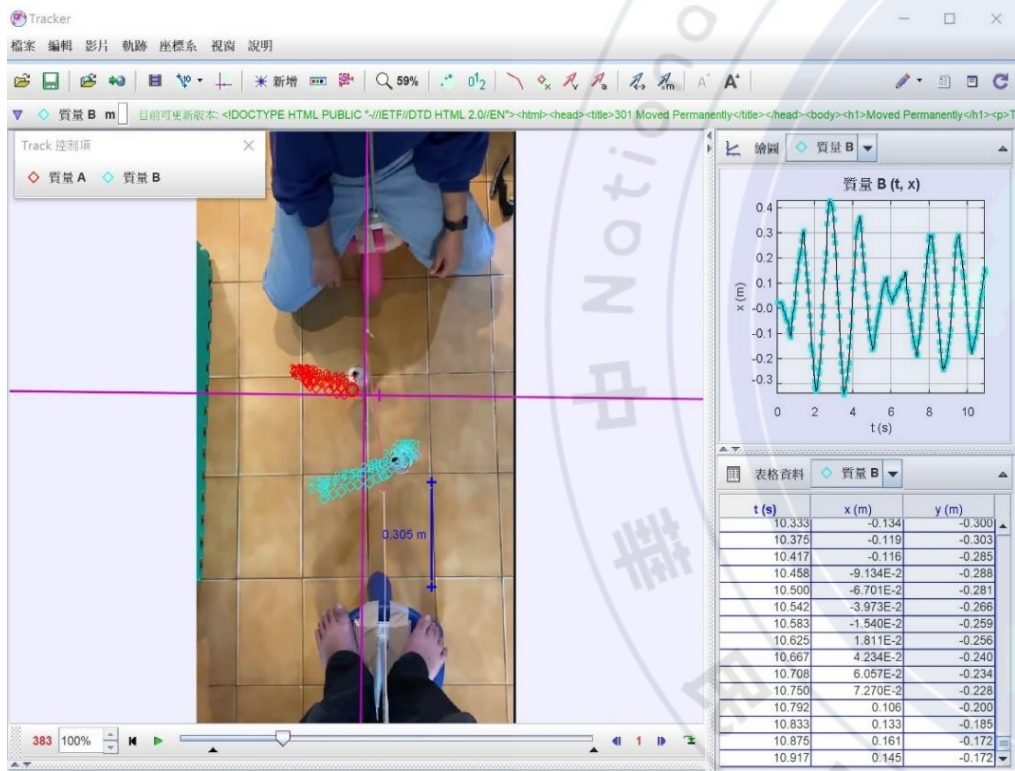
一、最佳共振擺裝置交替晃動次數、持久度、耦合能量轉換率與衰退率比較

介質	最佳擺盪條件		交晃次數	持久度	能轉換率	能衰退率
橡皮筋	擺角	75度	2次	19秒	95.4%	第一回 10.1%
	擺長	250 mm			65.1%	(1/s)
	加水量	20 ml			83.2%	第二回 12.6%
	甜蜜點	200 mm			45.4%	(1/s)
	張力	200 gw			55.7%	第三回 4.1%
					43.5%	(1/s)



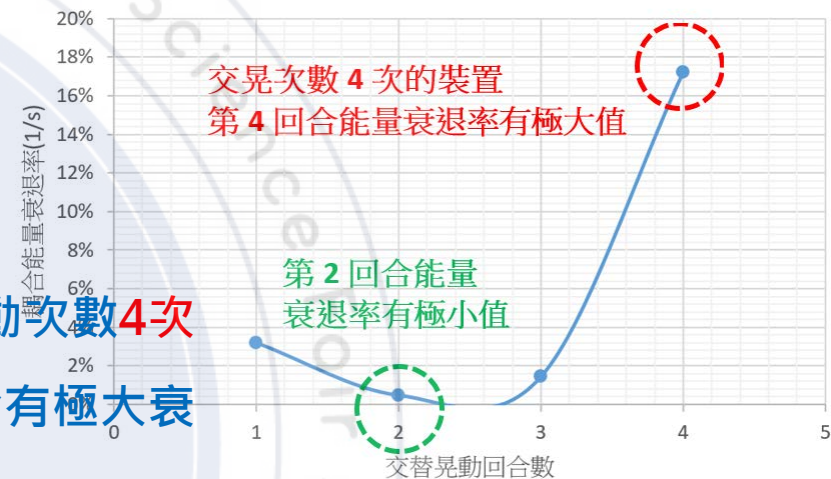
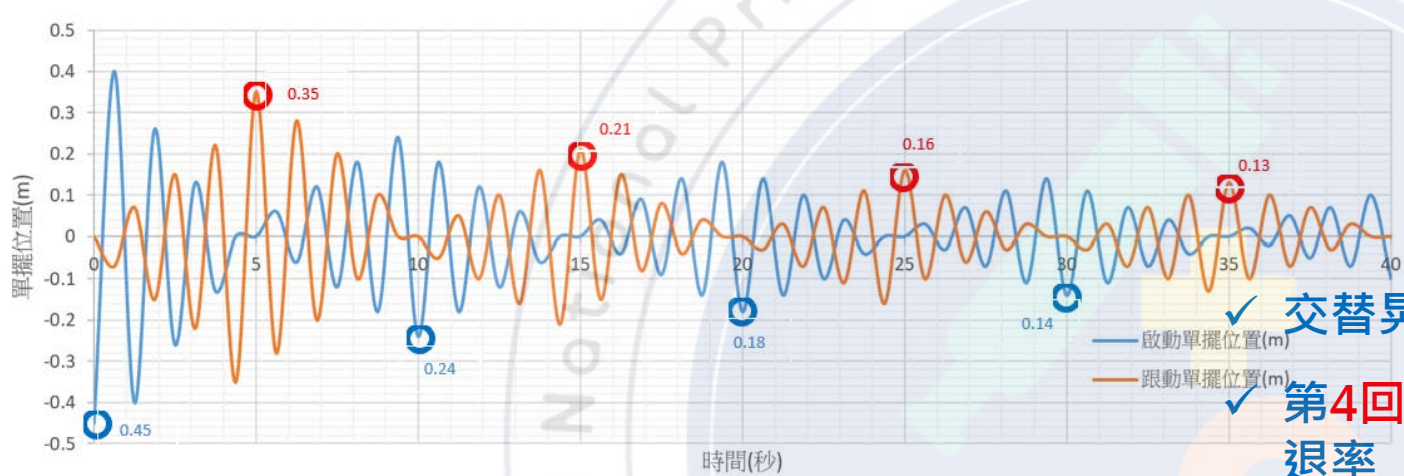
二、最佳交替晃動共振擺裝置的前四回合耦合能量轉換率與前三回合衰退率

TRACKER分析單擺各回合擺盪位置

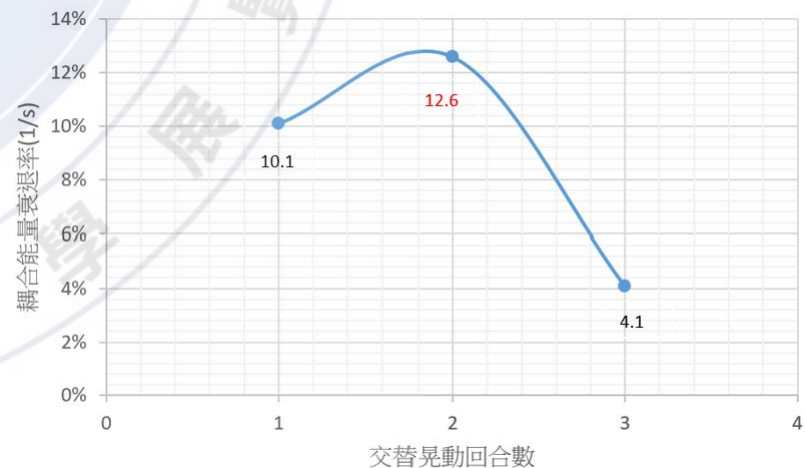
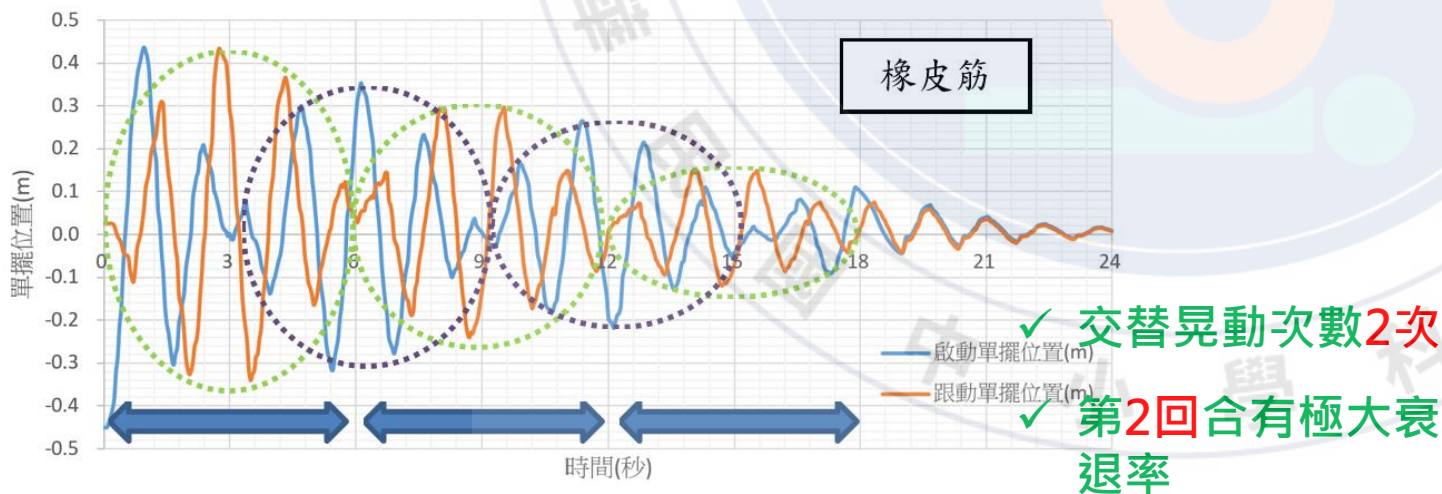


- ◆ **週期**：啟動/跟動單擺均約**6秒**（晃四次）。
- ◆ **三個回合內**均可看出明顯交替晃動。
- ◆ **第四回合時**啟動/跟動單擺達**同步共振**。

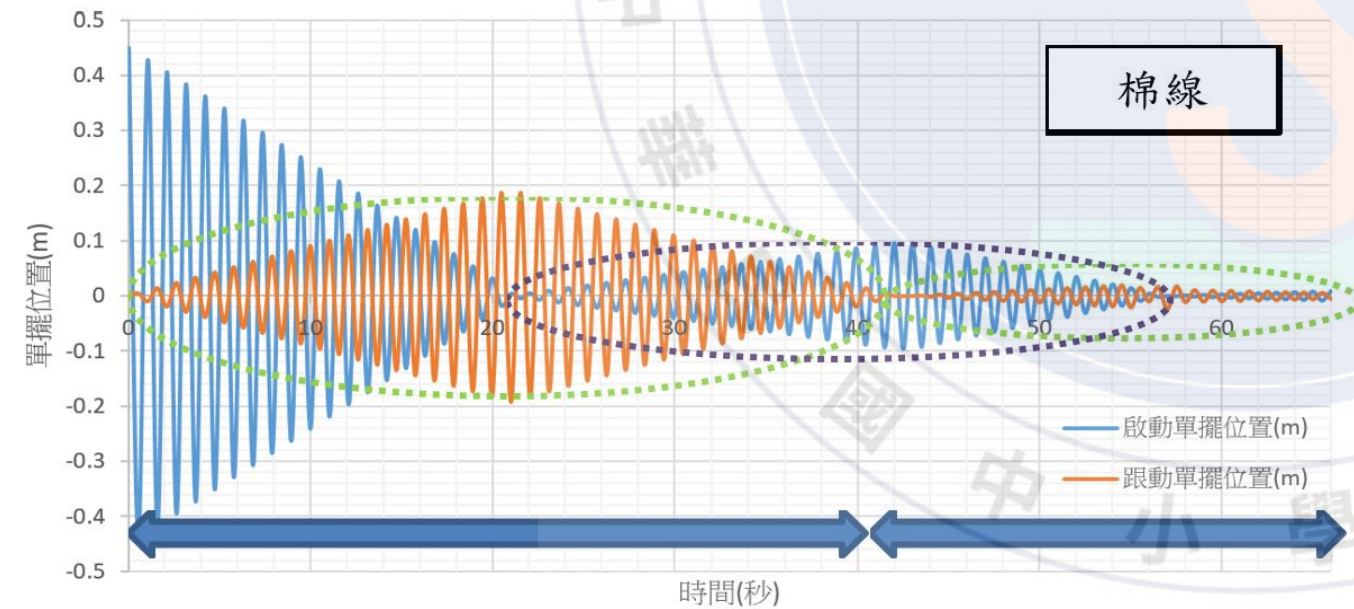
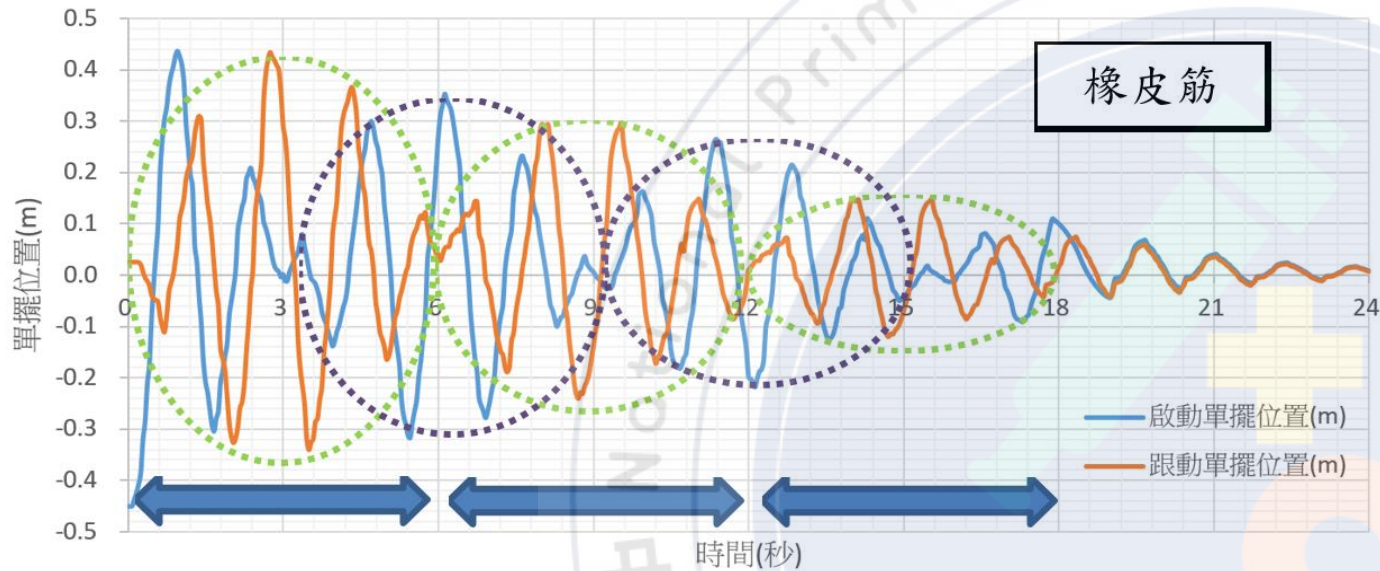
EXCEL分析橡皮筋共振擺轉換率與衰退率



◆ 交替晃動次數不同的兩組共振擺之擺動位置對時間關係圖 ◆ 橡皮筋共振擺裝置前四回合耦合能量衰退率



不同介質擺動位移對時間的關係



- ◆ 橡皮筋的交替晃動週期是穩定的6秒，棉線的週期會因回合數的增加而減少。
- ◆ 橡皮筋介質的能量轉換率與衰退率，明顯比棉線介質好。
- ◆ 橡皮筋的啟動單擺晃動兩次以後就轉換能量給跟動單擺，並持續三回合對稱交換；棉線的交替晃動次數高達20多次，只二回合便停止對稱交換。

結論

- ◆ 介質材質、擺角、加水量、綁點距離(甜蜜點)、張緊程度(張力)、擺長，都會影響交替晃動的效果。
- ◆ 以橡皮筋當介質時，交替晃動的情況較棉線與釣魚線來得明顯，釣魚線材質較易產生同步共振，不易發生交替晃動。
- ◆ 交替晃動次數越少的共振擺，持久度不一定會越高，但能量轉換率一定比較好。
- ◆ 在分析最佳交替晃動共振擺裝置的耦合能量轉換率與衰退率時，發現「第 $n=2$ 、4回合的衰退率有極大值」，也和「交替晃動次數 $n=2$ 、4次」這個值恰巧有關。
- ◆ 使用Excel與Tracker進行數據分析與統計時，可以幫助我們更容易釐清科學現象的發展趨勢與變化。