

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 物理科

第二名

030109

「危」風陣陣摧~探討微風對纜車的共振影響及  
改善方法

學校名稱：高雄市立明華國民中學

作者：  國二 畢家禎  國二 林盈均  國二 郭詠靖	指導老師：  吳德儀  趙爵煥
---	-----------------------------

關鍵詞：纜車、吊臂角度、共振

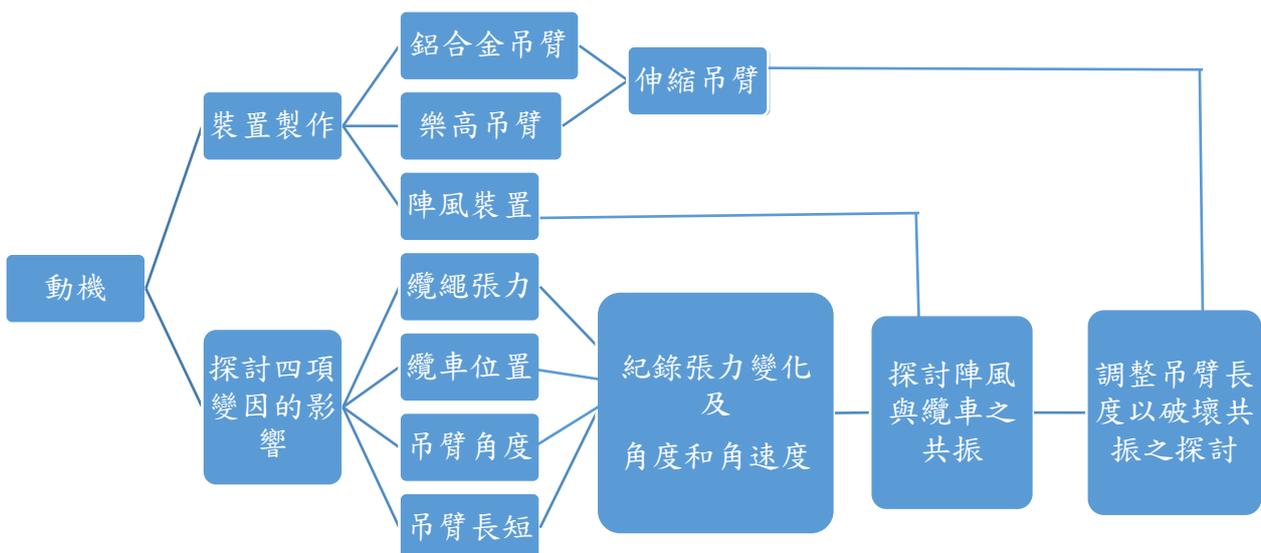
## 壹、摘要

遇到強烈陣風為纜車停駛的條件之一，然而我們更想知道未達停駛之陣風是否也會引起纜車共振，造成隱憂？首先，利用樂高積木製作長短、角度不同的六隻吊臂連結自製車廂，取得擺盪時的張力變化、角度及角速度，更定義了擺盪指數 = 角度最大差值 × 角速度最大差值來比較吊臂的安全程度。再來，透過穩定遮風製造出不同頻率的陣風，得到陣風雖未達停駛標準，但若頻率接近纜車擺盪頻率時，確實能夠引發共振，其中以 180 度直臂最危險，來回角度高達 80 度。然而角速度愈大，造成的纜繩張力變化也大，致使塔柱負擔增加。最後，我們將吊臂改良為伸縮吊臂，透過無線遙控改變長度，破壞陣風的共振，成功在 20 秒內有效改善擺盪情形，以期爭取時間讓乘客安全到站。

## 貳、動機

我們在乘坐纜車的時候發現纜車在陣風的吹拂下會晃動得很厲害，但是在相關的資料裡只有提到瞬間風速達到 7 級風且持續三秒以上，或瞬間風速達到 8 級風時，才會停駛纜車。但在資料中並沒有提及微風對纜車的影響，引起我們想一探究竟的好奇心，因此展開了一系列的研究。

## 參、研究流程圖



## 肆、研究目的

### 一、纜車及吊臂設計

#### (一)車廂設計

#### (二)吊臂設計

1. 鋁合金吊臂
2. 樂高吊臂
3. 伸縮吊臂設計

#### (三)陣風裝置設計

### 二、探討四項變因對纜車擺盪時間、角度、角速度、擺盪指數之影響

#### (一)鋼纜張力對擺盪之影響

#### (二)纜車位置對擺盪之影響

#### (三)吊臂角度對擺盪之影響

#### (四)吊臂長度對擺盪之影響

### 三、探討陣風頻率對纜車共振之影響

### 四、探討陣風強度對纜車共振之影響

### 五、探討改變吊臂長度對改善纜車共振之可能性

## 伍、實驗裝置

### 一、自製纜車吊臂、車廂及陣風裝置

#### (一)車廂製作

1. 裁切爆米花筒為底部直徑 12.64cm，高度 14.26cm，重量 211.43g 的大小作為纜車車廂，如圖所示。

#### (二)吊臂製作

1. 鋁合金吊臂：我們選用鋁合金作為吊臂材質，製作出三種角度的吊臂，依序為 180 度(直臂)、135 度及 90 度，搭配彈簧夾作為握索器，連結上車廂進行測試。
2. 樂高吊臂：
  - (1)考量吊臂輕量化且能夠伸縮以期改善擺盪情形，我們改用樂高零件組裝吊臂。
  - (2)運用重錘法找出六組纜車的質心位置，並標示出來。
3. 可調式吊臂：
  - (1)我們採用 2 組直線推杆搭配伺服馬達，並透過遙控器達到遠端調節吊臂長度之目的。

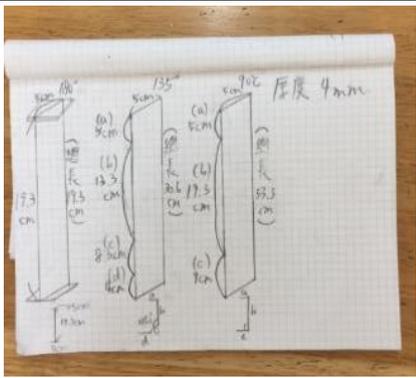


圖 1. 鋁合金吊臂設計手稿



圖 2. 利用爆米花筒製作出車廂，與鋁合金吊臂接合後，懸掛於纜繩上。



圖 3. 我們使用強力夾模擬握索器，將吊臂固定在纜繩上



圖 4. 180 度長臂正面照



圖 5. 90 度長臂正面照



圖 6. 135 度短臂正面照



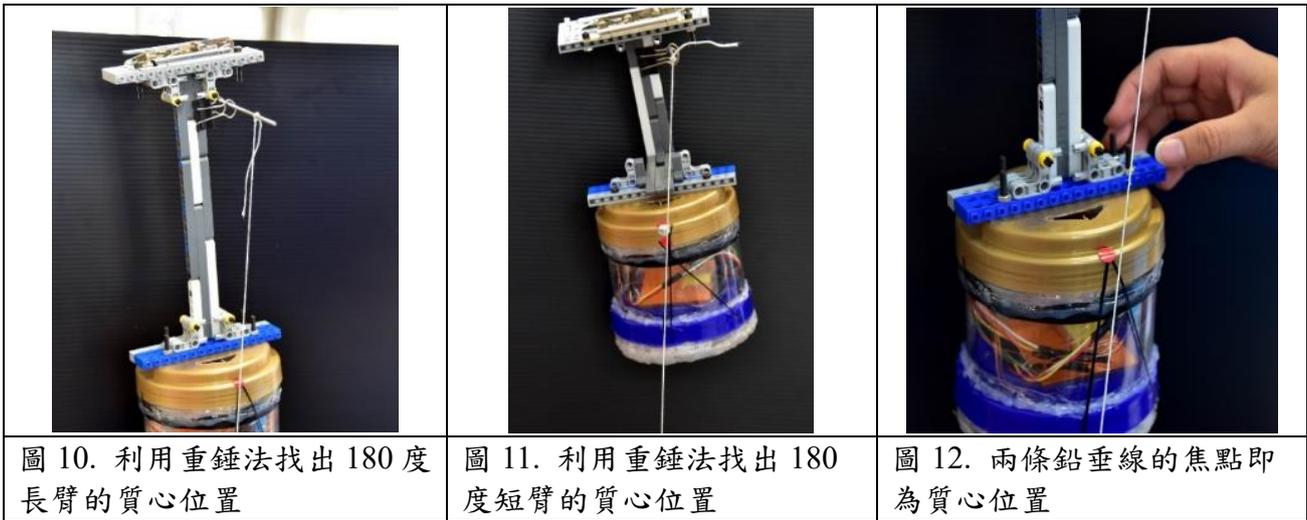
圖 7. 180 度長臂側面照



圖 8. 90 度長臂側面照



圖 9. 135 度短臂側面照



### (三) 陣風裝置

1. 利用吸管製作整流段附於風扇前端，並搭配風速計測量整流成效。
2. 第一代擋風板
  - (1)我們取下風扇葉片，敲擊葉片使之平整，於葉片上鑽孔鎖上瓦楞紙板，製成遮風裝置。
  - (2)將電扇接上調速器，調整到適當刻度後，測試運轉的穩定性。
3. 第二代擋風板
  - (1)考量電扇運轉的扭力不足導致轉速不穩定，我們改用減速馬達搭配調速器來進行遮風，製造出穩定陣風。
  - (2)修剪珍珠板配合整流扇形狀作為遮風板，並測量出調速器刻度對應的陣風頻率。



圖 13. 塑膠桶搭配吸管製作的整流段

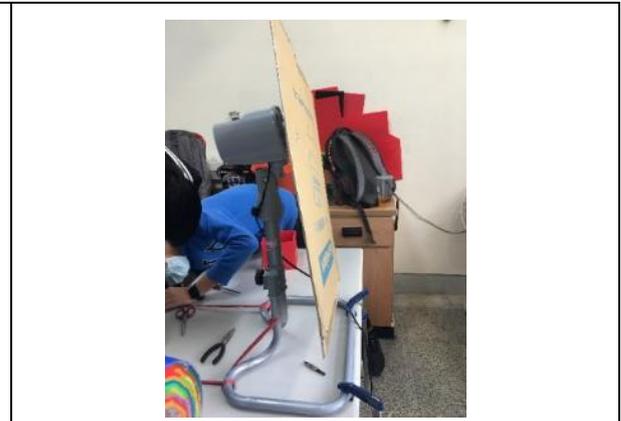


圖 14. 第一代擋風板

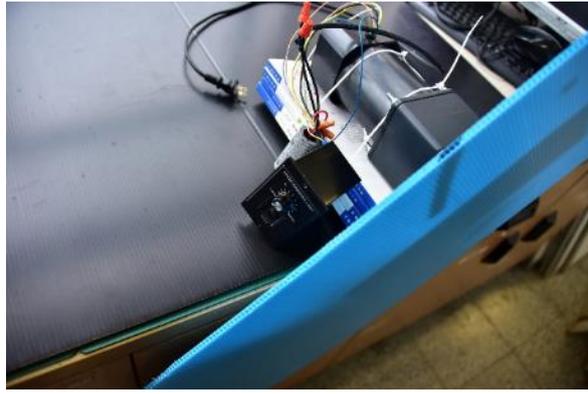


圖 15. 第二代遮風板，透過減速馬達達到穩定之效果

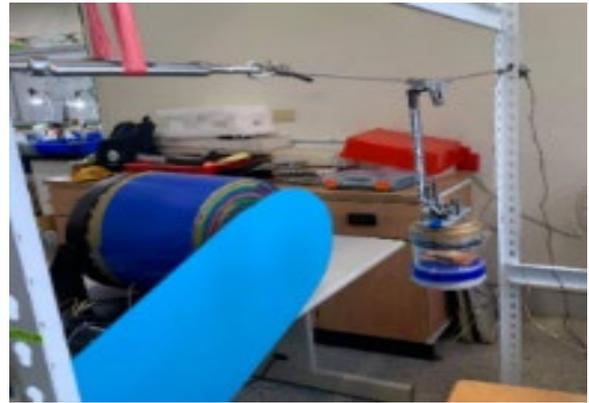
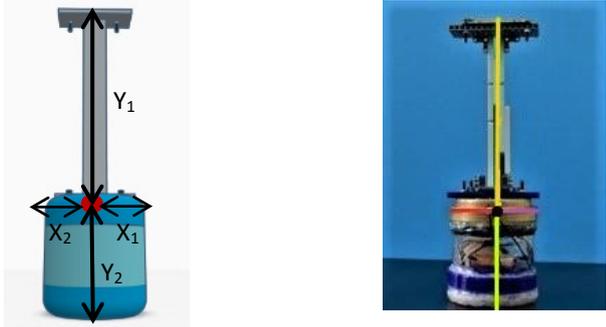


圖 16. 透過遮風方式製造所需頻率的陣風，以利實驗進行

#### (四) 研究數據與結果

##### 1. 六種吊臂組裝圖與基本資料一覽表

吊臂種類	180 度		135 度		90 度	
	長	短	長	短	長	短
含車廂 總質量(g)	334.03	322.30	353.10	335.60	357.00	324.37
吊臂長度 (cm)	25.68	15.50	26.50	15.50	26.82	15.55
裝置照片						
質心位置 說明						
質心位置 數據(mm)	X <sub>1</sub> =6.3 X <sub>2</sub> =6.3 Y <sub>1</sub> =26.8 Y <sub>2</sub> =13.1	X <sub>1</sub> =6.2 X <sub>2</sub> =6.4 Y <sub>1</sub> =18.5 Y <sub>2</sub> =11.3	X <sub>1</sub> =6.3 X <sub>2</sub> =6.3 Y <sub>1</sub> =27.6 Y <sub>2</sub> =14.3	X <sub>1</sub> =6.4 X <sub>2</sub> =6.2 Y <sub>1</sub> =18.9 Y <sub>2</sub> =10.9	X <sub>1</sub> =6.2 X <sub>2</sub> =6.4 Y <sub>1</sub> =28.7 Y <sub>2</sub> =12.4	X <sub>1</sub> =6.3 X <sub>2</sub> =6.3 Y <sub>1</sub> =19.2 Y <sub>2</sub> =10.6

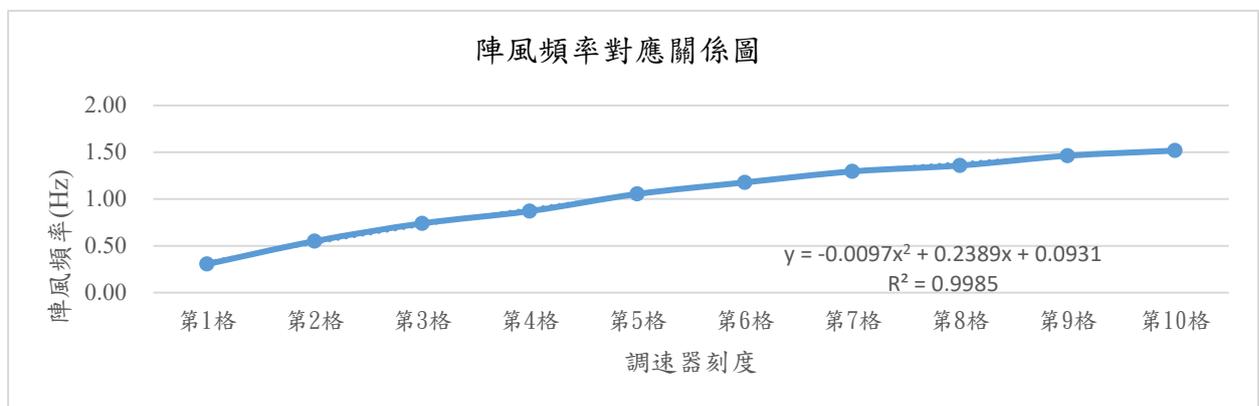
## 2. 遮風裝置頻率一覽表

旋轉 10 次的總時間 (s)	第一次 (s)	第二次 (s)	第三次 (s)	平均時間 (s)	遮蔽一次的時間(s)	對應的陣風頻率 (Hz)
第 1 格	65.01	66.24	65.53	65.59	3.28	0.30
第 2 格	36.12	36.77	36.21	36.37	1.82	0.55
第 3 格	26.43	27.47	27.20	27.03	1.35	0.74
第 4 格	23.91	22.48	22.49	22.96	1.15	0.87
第 5 格	18.54	19.31	19.07	18.97	0.95	1.05
第 6 格	17.04	16.86	17.04	16.98	0.85	1.18
第 7 格	15.37	15.49	15.46	15.44	0.77	1.30
第 8 格	14.71	14.85	14.61	14.72	0.74	1.36
第 9 格	13.73	13.64	13.64	13.67	0.68	1.46
第 10 格	13.27	13.18	13.08	13.18	0.66	1.52



圖 17. 馬達調速器

## 3. 陣風頻率與刻度對應關係圖



## 二、 探討架設裝置及測量物理量

### (一) 架設說明及儀器選用

1. 我們選用直徑 3.2mm 的纜繩，一端以纜繩調整器固定在角鋼架上，另一端連接至力度計，再將纜車固定在實驗的測試位置進行擺盪分析，如下圖所示。

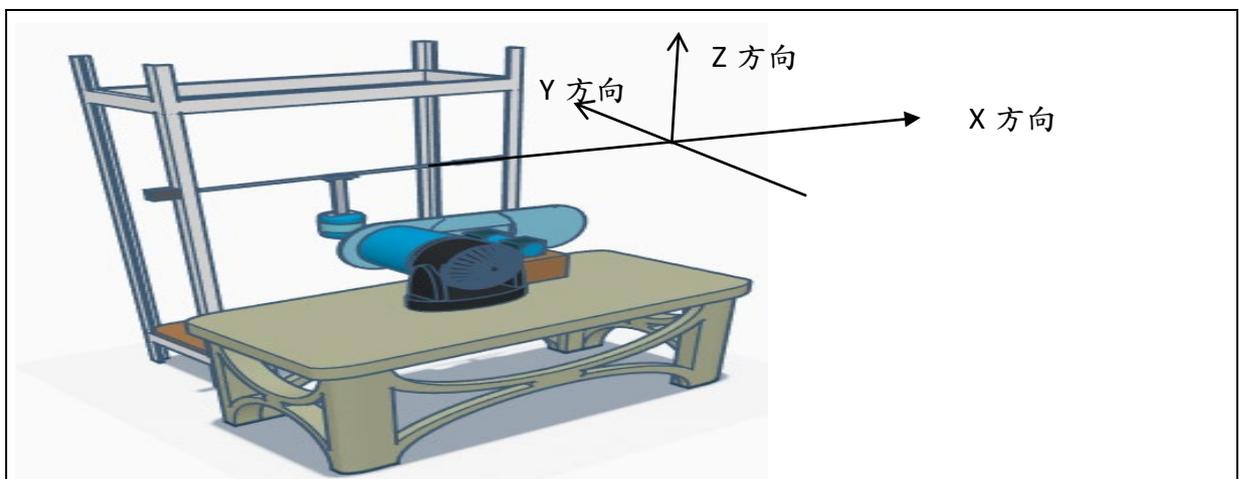
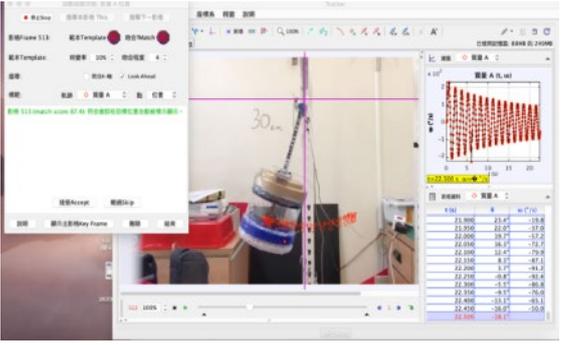
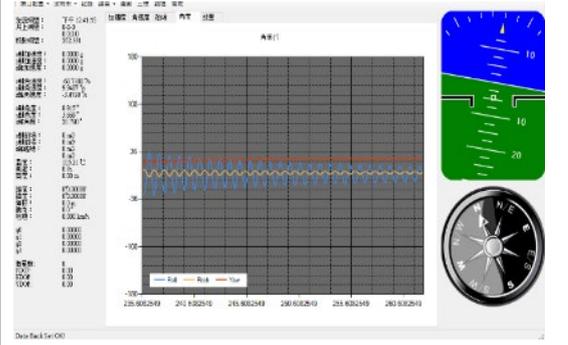
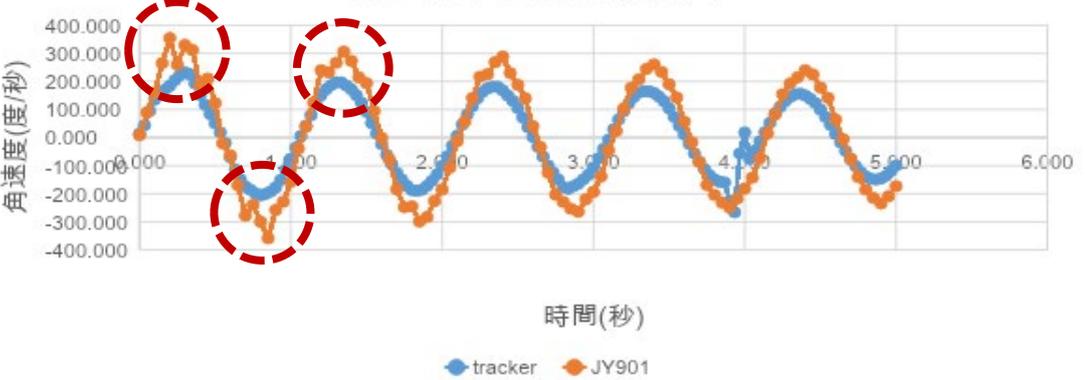


圖 18. 裝置及 X、Y、Z 三軸示意圖

2. 運動物理量的紀錄(角度、角速度以及纜繩張力變化)

- (1) 我們分別進行 tracker 及 JY901 姿態模組取得纜車在擺盪時的旋轉角度  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ 、以及角速度  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ ，比較後決定採用 JY901 姿態模組進行數據紀錄，既能同步取得三個軸向的角速度，更能提高取得數據的效能。
- (2) 我們再將纜繩連結力度計便能記錄下纜車擺盪時造成的張力變化進行分析。
- (3) tracker 及 JY901 姿態模組測量結果比較

	tracker	JY901 姿態模組
數據取得方法		
數據分析結果	<p style="text-align: center;"><b>角速度與時間關係圖</b></p>  <p style="text-align: center;">時間(秒)</p> <p style="text-align: center;">● tracker ● JY901</p>	
優劣分析	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處理平面移動時較為常見，若需處理三度空間的運動，需再於另一方向進行<u>同步</u>拍攝取得運動影片。但若不同步將造成更大誤差</li> <li>2. 拍攝影片容量太大，分析時間過久。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可同步取得三個軸向的運動物理量，效能較高。</li> <li>2. <u>取得的數據較為精細，可記錄下最初擺盪的晃動情形，如圖中的虛線圓圈處所示。</u></li> <li>3. 時間間隔較不平均。</li> </ol>
結果	<p><u>我們決定採用 JY901 姿態模組紀錄之後的運動狀態，取得纜車在每一時刻的旋轉角度 <math>\theta_x</math>、<math>\theta_y</math>、<math>\theta_z</math>、以及角速度 <math>\omega_x</math>、<math>\omega_y</math>、<math>\omega_z</math>，進行分析。</u></p>	

## 陸、實驗設計與名詞解釋

### 一、鋼纜張力

我們透過鋼索調整器調整纜繩的張力，透過力度計確認張力大小，並定義出三種張力範圍：

1. 張力為鬆：尚未掛上纜車時的纜繩張力值為 10N。
2. 張力為中：尚未掛上纜車時的纜繩張力值為 20N。
3. 張力為緊：尚未掛上纜車時的纜繩張力值為 40N。



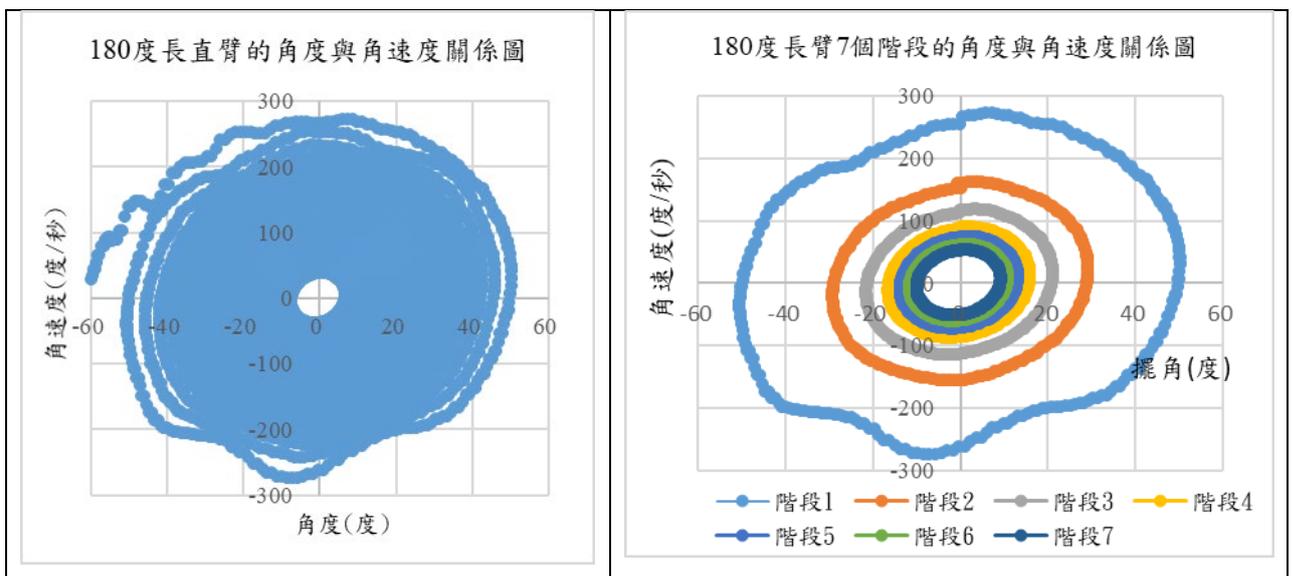
圖 19. 鋼繩張力調整器

### 二、擺盪指數

我們可以透過時間、角度、角速度、角加速度...等一些物理量來描述纜車擺盪的狀態與程度。就乘客感受而言，當纜車擺盪得愈快、愈高時，乘客感受到的不適與不安也愈大；而就我們的實驗數據而言，顯示當纜車的角速度愈大時，造成的纜繩張力變化也較大，導致塔柱負擔增加。

實驗中使用的 JY901 姿態模組可記錄下擺盪過程中的時間、角度、角速度、角加速度...等物理量，分析過程中，發現角速度與角度在連續時間下的關係圖呈現向內旋入的趨勢，就像毛線球一樣。又若以每 10 秒為間隔，進行該時刻下第 1 個週期內的角速度與角度關係圖，會得到一圈圈向內縮小的橢圓圖形，又圖形中的階段 1~ 階段 7 對應的時間說明如下：

階段 1	階段 2	階段 3	...	階段 7
第 0 秒的 第 1 個週期內	第 10 秒的 第 1 個週期內	第 20 秒的 第 1 個週期內	...	第 60 秒的 第 1 個週期內

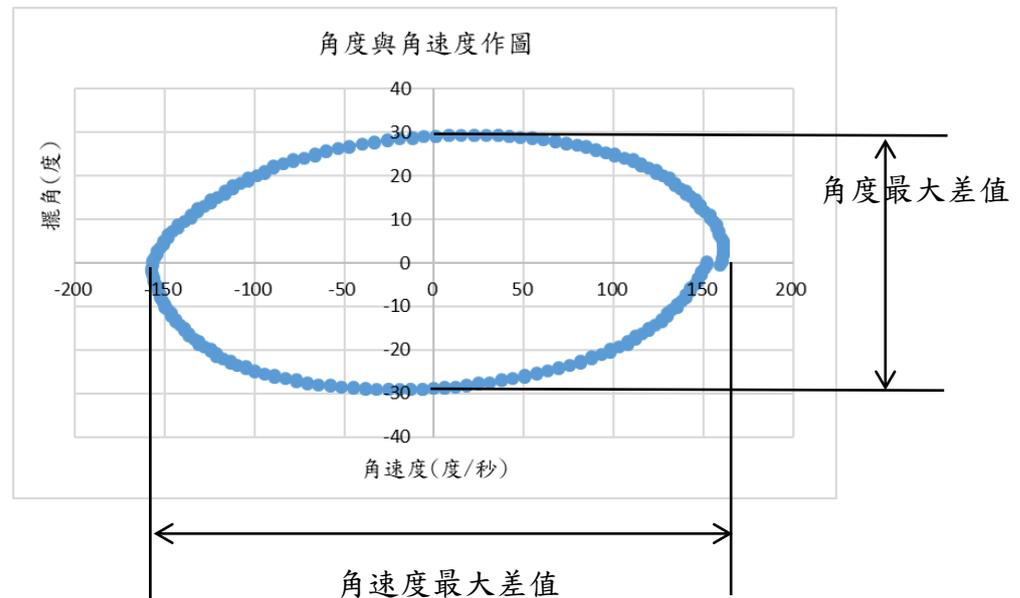


圖中的橢圓面積 =  $\pi ab = \pi \times \text{長軸} \times \text{短軸} \propto (\text{橫坐標變化量} \times \text{縱坐標變化量})$ ，讓我

們想到可以透過角度差值與角速度差值的乘積來描述纜車擺盪狀態，進而比較三支吊臂間的相對安全程度。

因此，我們定義出擺盪指數來表達擺盪程度，亦即

擺盪指數 = 角度最大差值 × 角速度最大差值，也就是當纜車擺盪角度愈大，角速度也愈快時，擺盪指數便愈大，也愈危險。



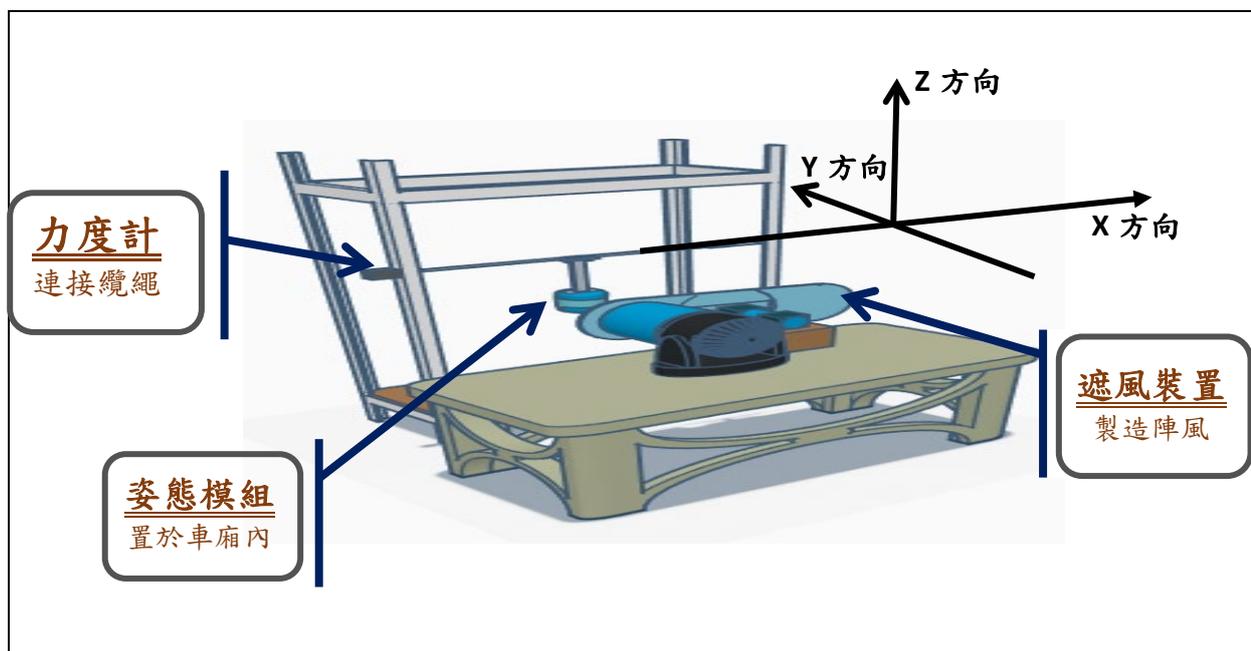
### 三、陣風

- (一) 在氣象學上，陣風指的是瞬間變化的風。一般而言，量測風速時會取 10 分鐘內的平均值，而陣風則是在 10 分鐘內發生 5m/s 以上的風速差時會出現的現象，而造成陣風的原因可能為溫度、地形、高度、氣壓變化...等因素，極為複雜。
- (二) 我們嘗試將複雜的自然風場進行簡化，在器材上，將風扇加裝整流段穩定吹風，再以塑膠瓦楞板搭配減速馬達進行遮風，便可製造出一陣又一陣的風，我們在此份報告中稱此種風為「陣風」，而非氣象學上的陣風，也探討此種「陣風」是否引起纜車的共振。

### 柒、實驗步驟

1. 調整姿態模組的 X 軸向與纜繩方向重合後固定於車箱內。
2. 調整纜繩張力值為 10N(鬆)，將 180 度長臂纜車掛於纜繩正中央後，進行擺角為 60 度的自由釋放，透過力度計紀錄下張力值的改變，以及姿態模組紀錄車廂在每一時刻  $t$  的角度  $\theta$  和角速度  $\omega$ 。

3. 依序調整纜車位置為 1/3 處及 1/4 處，重複步驟 2。
4. 纜繩張力值為 20N(中)、40N(緊)，重複步驟 1~3。
5. 依序更換吊臂為 135 度長臂、90 度長臂，重複步驟 1~4。



## 捌、探討與結果

### 一、變因探討

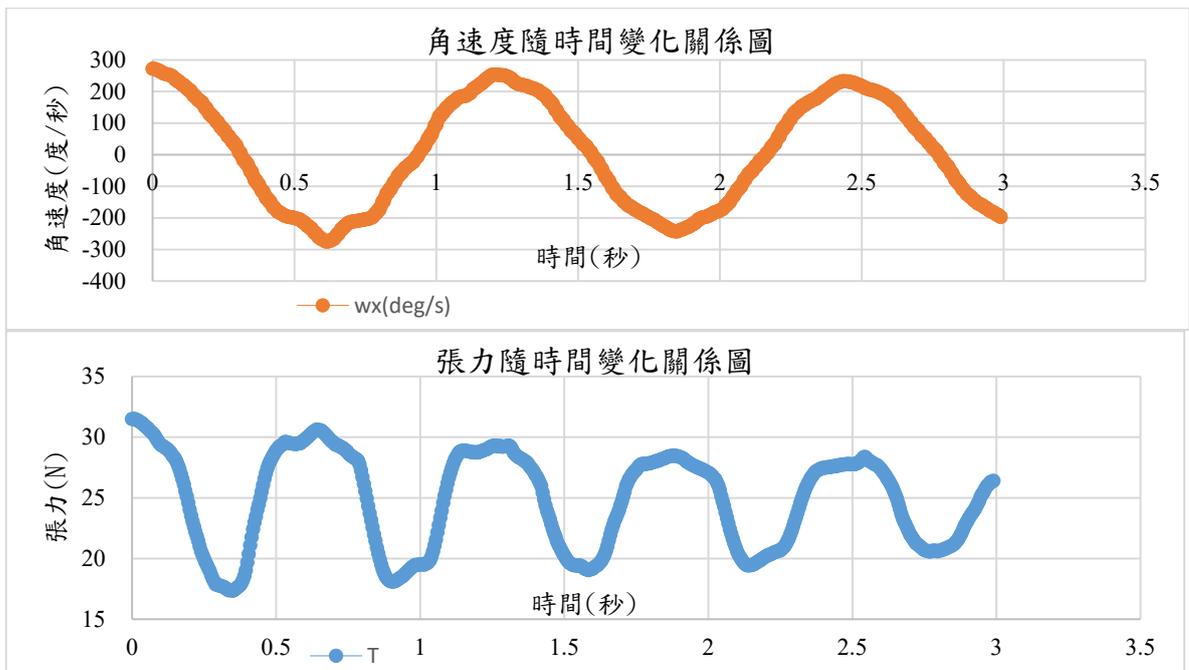
我們製作出長短、角度不同的六支吊臂連結上車廂，並確定了架設方式和分析儀器之後，進行纜繩張力、纜車位置、吊臂角度、吊臂長短四項因素對纜車擺盪影響之探討，以便比較纜車之安全程度。於實驗過程中，透過力度計紀錄纜繩的張力變化，也以姿態模組紀錄下車廂在每一時刻  $t$  的角度  $\theta$  和角速度  $\omega$ ，再從龐大的數據中針對每項變因進行角度變化、週期變化、張力變化，更由角速度與角度的關係圖形中定義出擺盪指數來比較各種纜車的相對安全程度，以了解背後的设计原理。

#### (一) 探討纜繩張力對纜車擺盪之影響

首先，我們想知道纜繩張力對纜車擺盪的影響，以期了解為何鋼纜要進行定期的修剪工程，於是進行此項分析。

##### 1. 張力與角速度之關係

(1)數據與作圖(以 180 度直臂，張力為鬆，纜車位於纜繩 1/2 處為例)



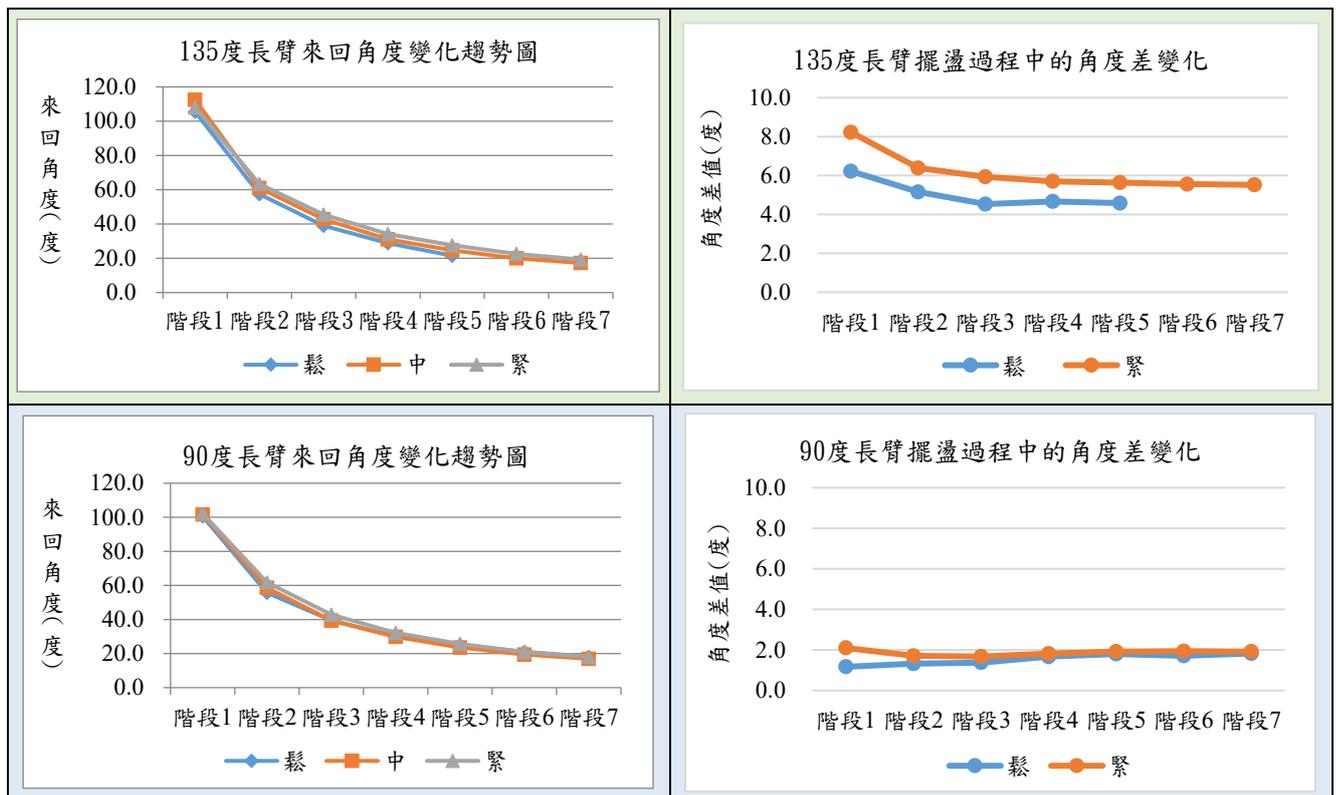
(2)結果

- ①與我們的預測相近，當纜車的角速度最大時，張力值同時達到最大；而擺盪角速度為 0 時，張力值也為最小值。
- ②車廂穩定時的張力約為 24N，而大角度的擺盪可造成±8N左右的變化量，增加的張力可能造成塔柱頂端負擔，進而增加纜車系統的危險。

2. 來回角度變化與擺盪對稱性

(1)數據與作圖

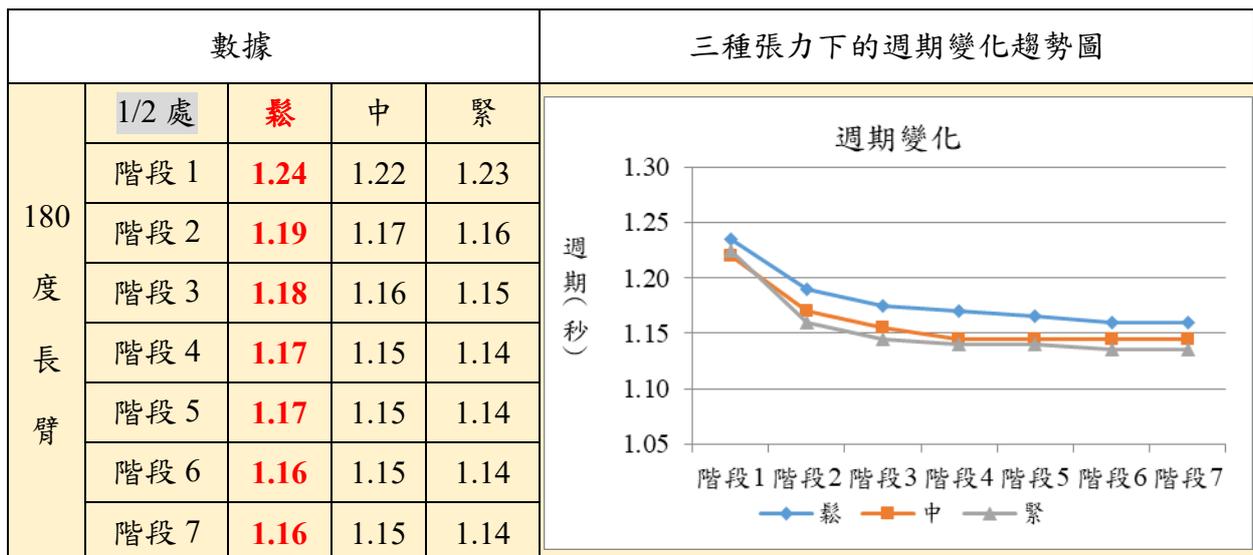
<p>甲、擺盪角度示意圖：</p> <p>圖中 <math>\theta_{右}</math> 為右側擺角，<math>\theta_{左}</math> 為左側擺角。左右兩側擺角的合為來回角度，左右兩側擺角的差為角度差值。</p> <p>乙、我們分析 7 個階段的來回角度及左右兩側的擺盪角度差值，比較三種吊臂擺盪幅度以及對稱性。</p>	
<p>180度長臂來回角度變化趨勢圖</p>	<p>180度長臂擺盪過程中的角度差變化</p>

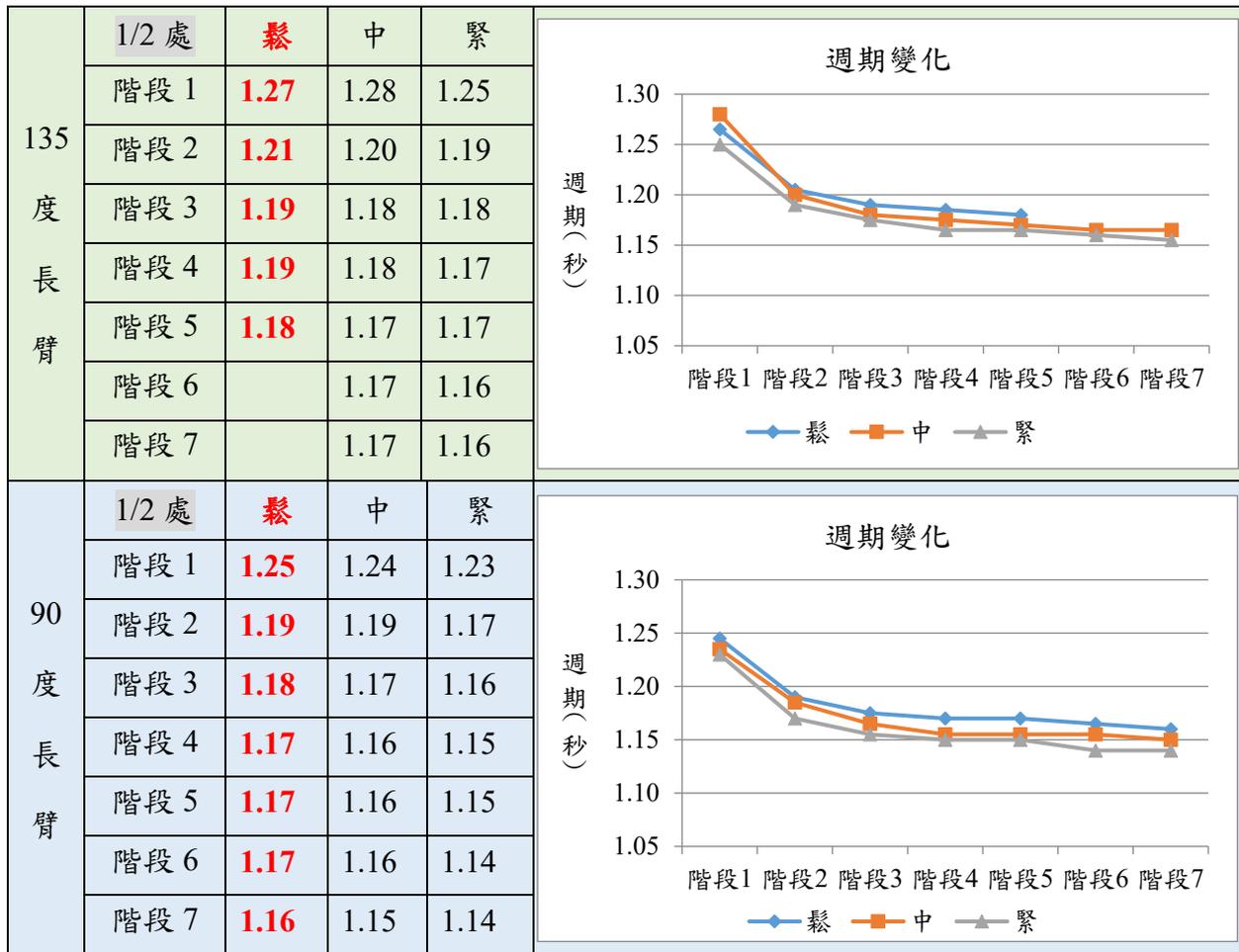


(2)結果：張力對於擺盪時的來回角度變化及擺盪對稱性影響不大。在來回角度變化上，纜繩張力為鬆時，角度衰減稍快一些。我們推論原因為纜繩張力較小時，易產生繞著Y、Z方向的角速度，能量分散至另外兩個方向的運動上，故繞X軸的角度較小。而在對稱性方面，135度長臂在纜繩張力為鬆時，兩側擺角差值較小。

### 3. 週期變化

(1)數據與作圖

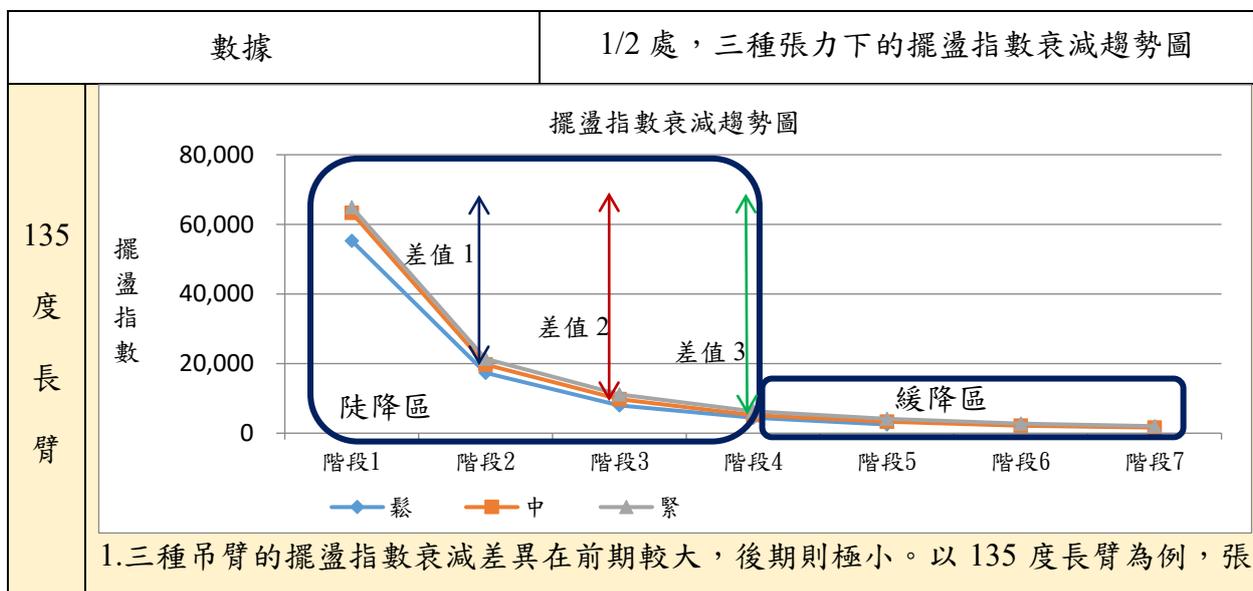




(2)結果：三種吊臂均呈現纜繩張力較緊時，週期隨著時間遞減較快，隨著纜繩鬆弛，週期衰減變慢，擺盪時間最久，安全性下降。對應到實際情形纜繩在長時間使用下會出現伸長的疲乏狀態，要由專業人員進行裁減鋼纜的作業以維持纜車系統的安全性。

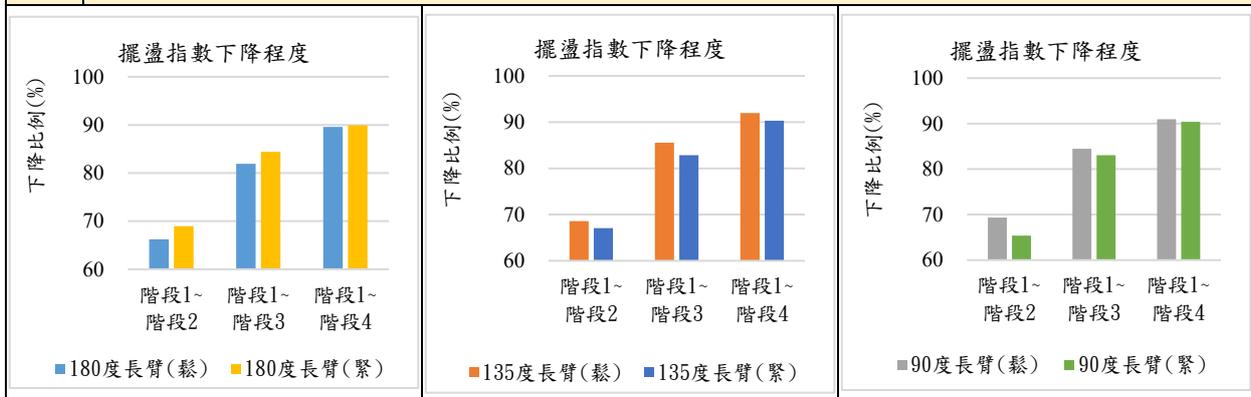
#### 4. 擺盪指數

##### (1)數據與作圖



力對擺盪指數的影響於階段 1~階段 4 出現較明顯的差異，階段 4 以後則相近。

2. 因此，我們計算出三種吊臂的擺盪指數於階段 1~階段 4 的下降比例進行分析，比較其相對安全程度。



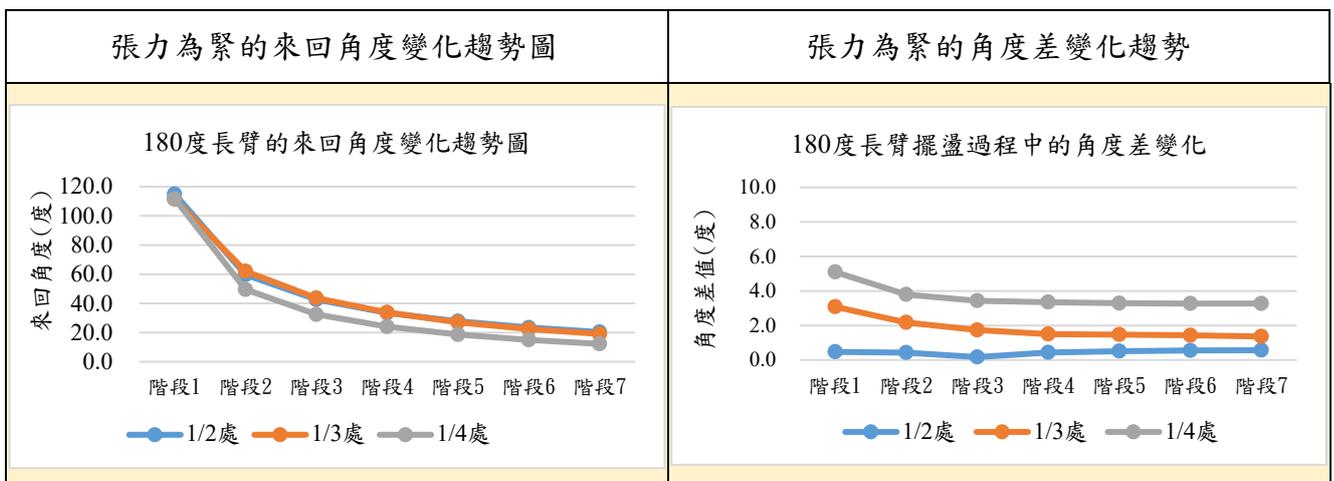
結果：

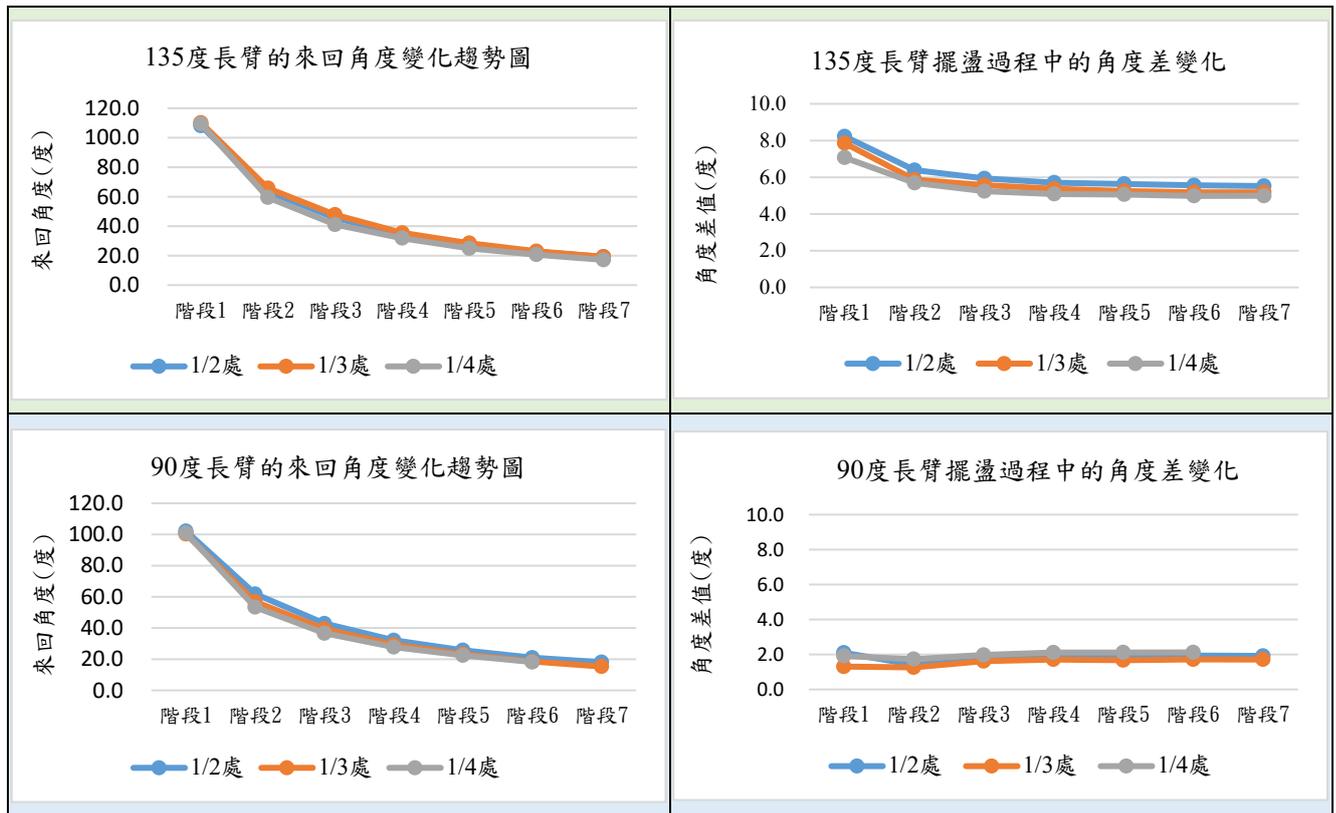
1. 不同張力下，三種吊臂的擺盪指數差異在階段 1~階段 4 較為明顯，之後便表現相近。
2. 張力為鬆時，初始擺盪指數略小，下降也較快。
3. 在下降比例上，180 度直臂在張力為緊時下降較快；而 90 度和 135 度曲臂則是張力為鬆時下降較快。
4. 前 10 秒(階段 1~階段 2)的擺盪指數減少最多，約 65%~70%，其中又以 90 度長臂在張力為鬆時的衰減程度最大。

## (二) 探討纜車位置對纜車擺盪之影響

### 1. 來回角度變化與擺盪對稱性

#### (1) 數據與作圖

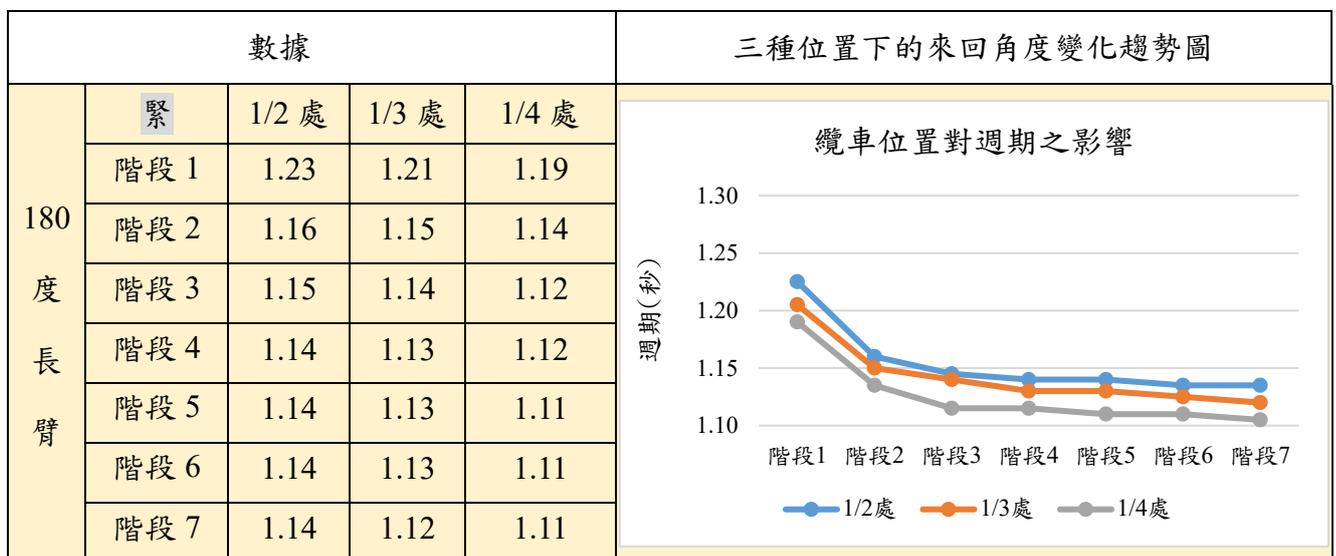


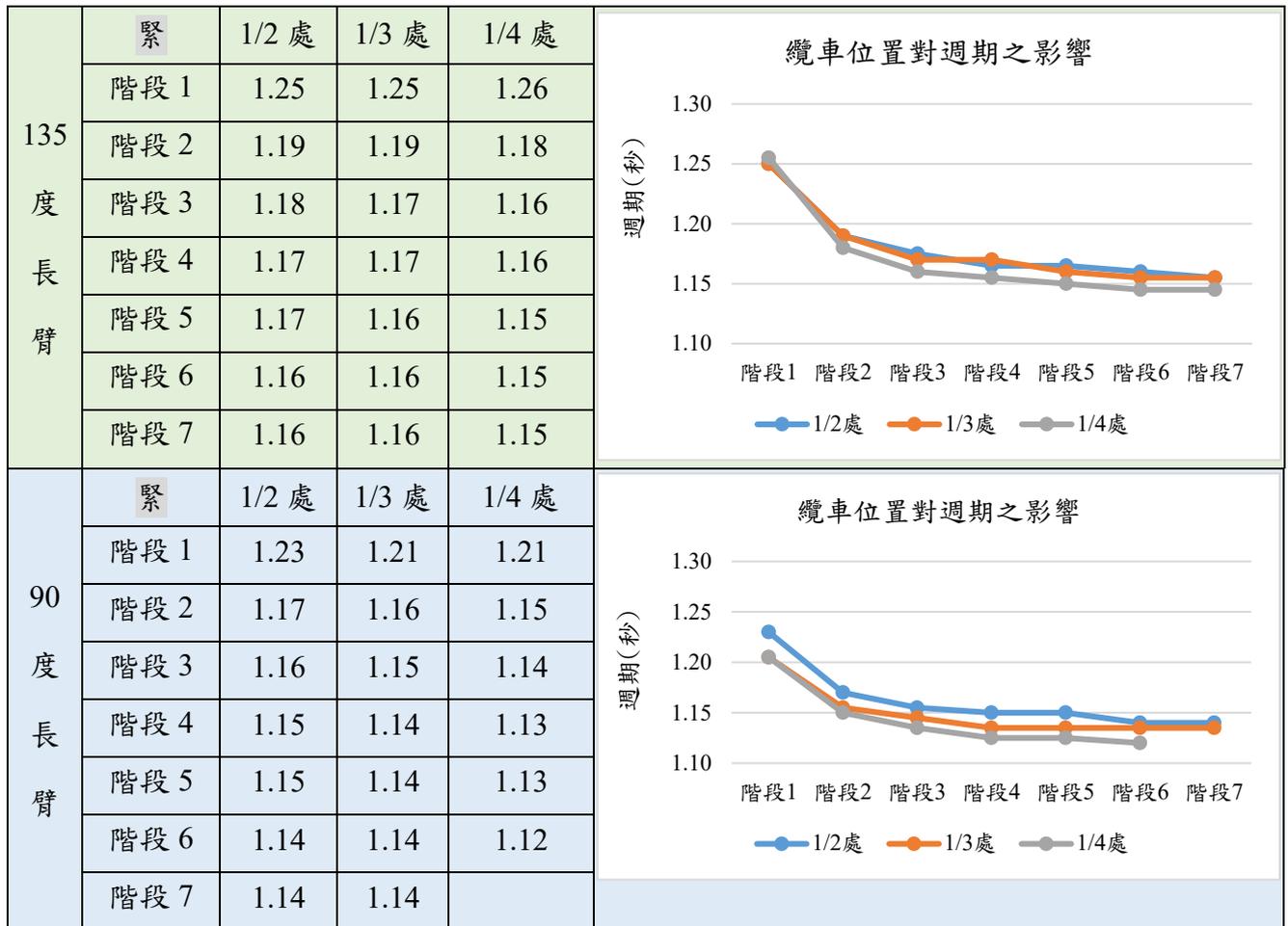


1. 當纜車位置逐漸接近塔柱時，三種吊臂的來回角度下降程度均增加了。以 180 度直臂為例，當纜車位於纜繩 1/4 處進行擺盪時，能最快回到安全角度。
2. 纜車位置對於 180 度長臂影響較大：180 度長臂在纜繩 1/2 處擺盪時具有最佳的對稱性，隨著位置來到塔柱兩側，擺動角度差增加，對稱性下降。
3. 纜車位置對於 90 度及 135 度長臂影響不大：在三種位置下，90 度長臂展現出很佳的對稱性；而 135 度長臂則展現最差的對稱性，角度差值在 8 度左右。

## 2. 週期變化

### (1)數據與作圖

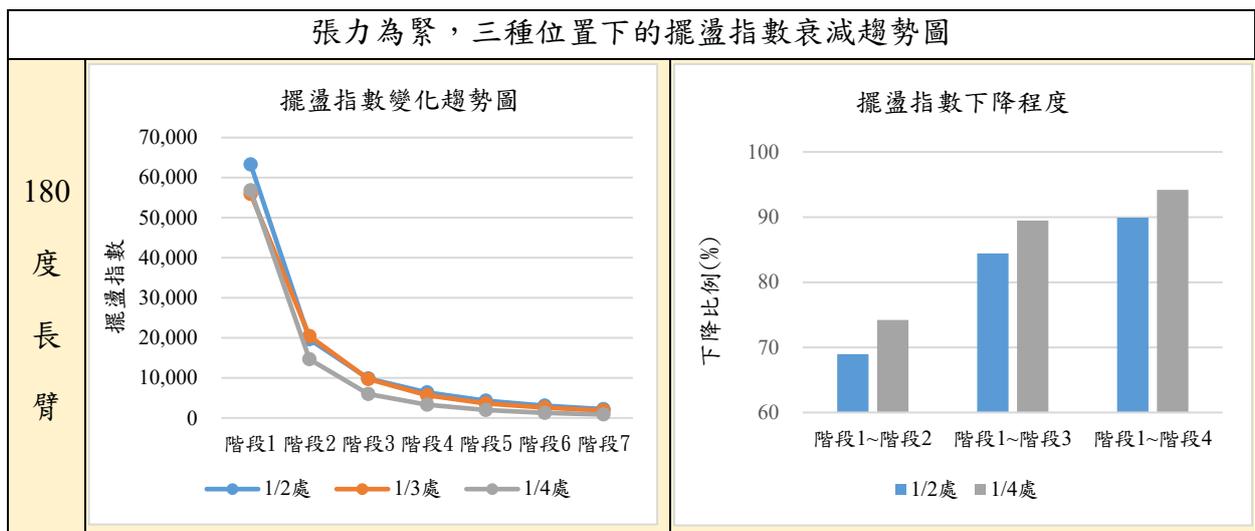


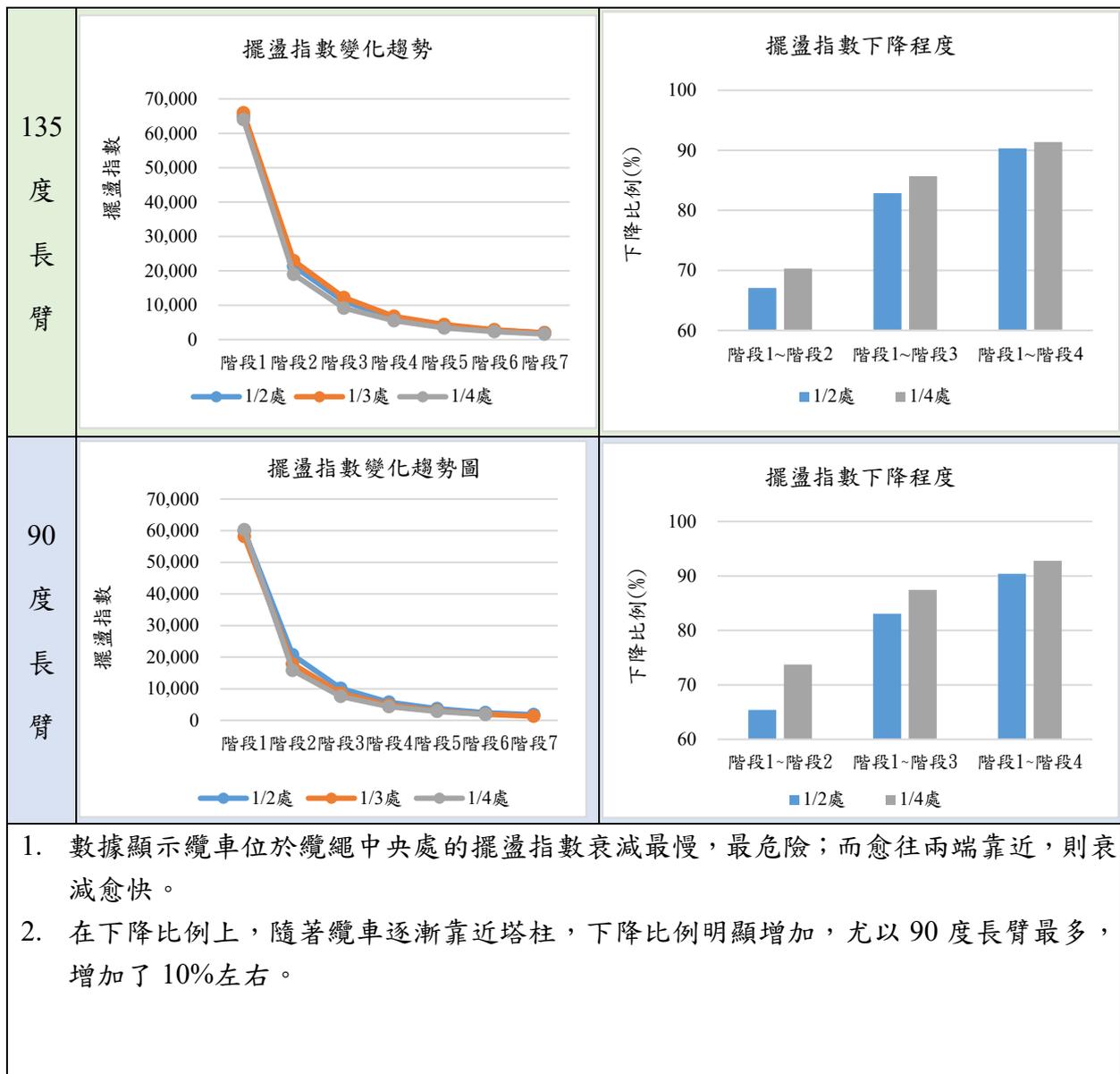


(2)結果：週期變化受位置影響也呈現一致的趨勢，位於纜繩中央處的擺盪時間最久，最危險。

### 3. 擺盪指數

(1)數據與作圖

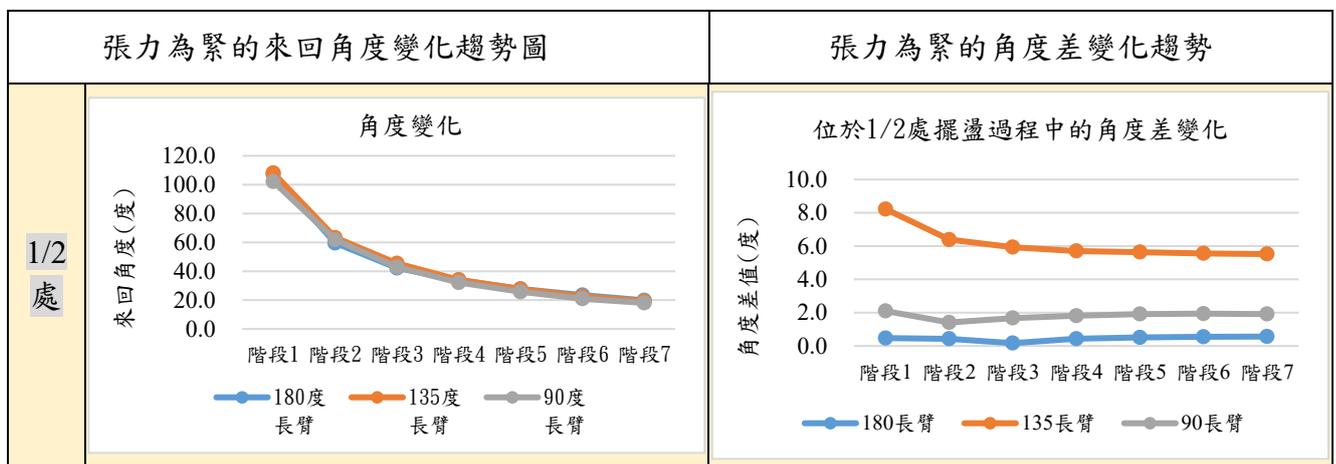


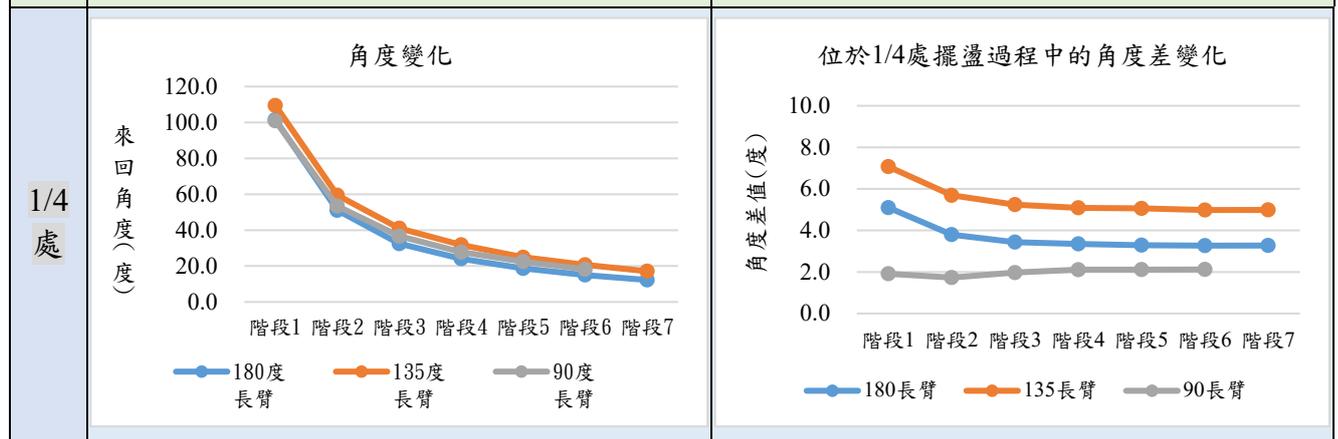
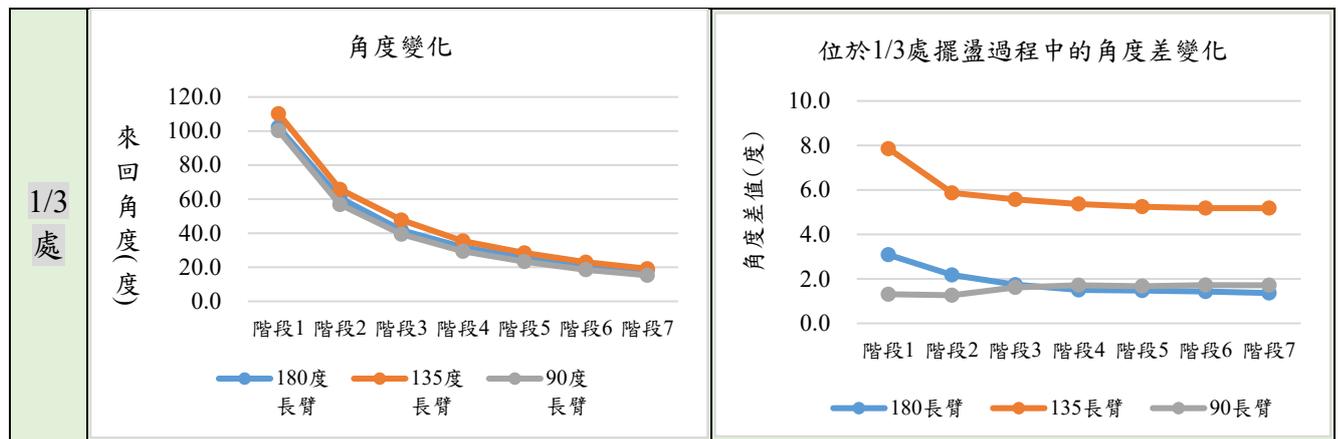


### (三) 探討吊臂角度對纜車擺盪之影響

#### 1. 來回角度變化與擺盪對稱性

##### (1)數據與作圖

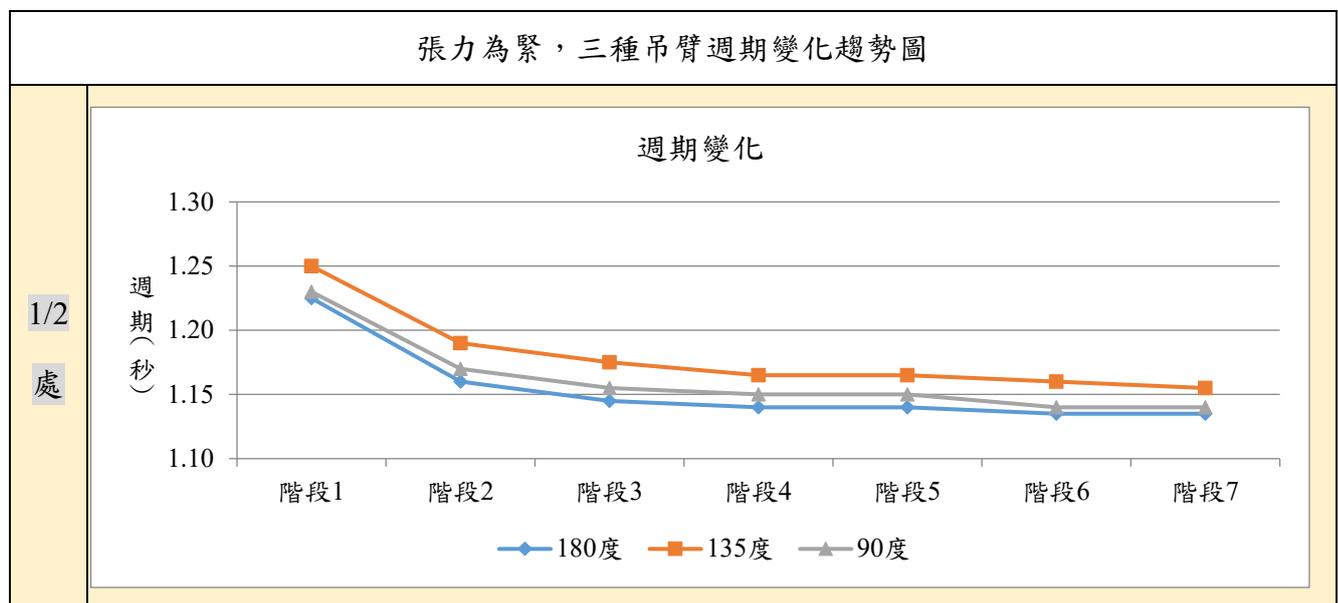


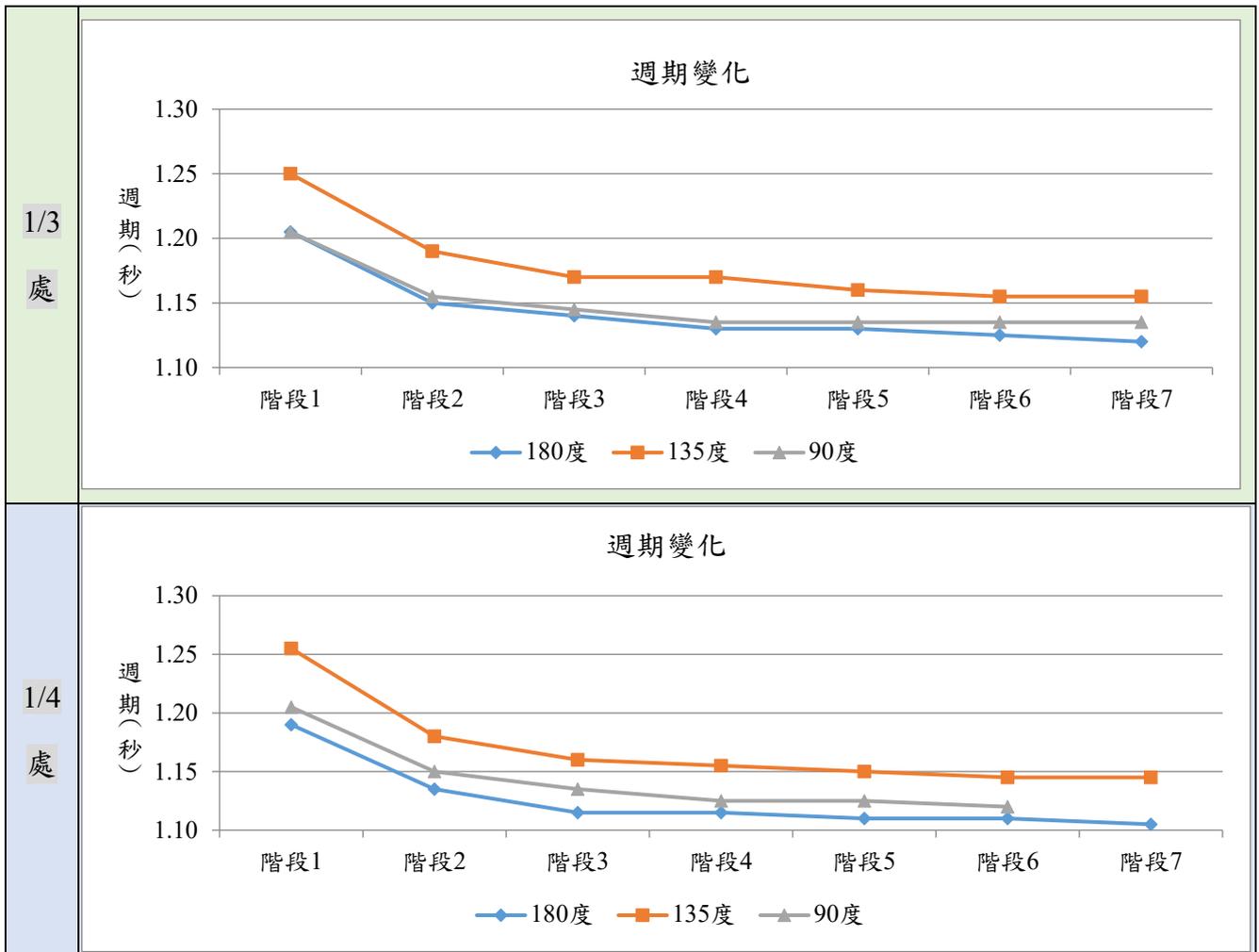


1. 結果顯示，吊臂角度對於擺盪的來回角度影響不大。
2. 纜繩中央處，三種吊臂的擺盪角度相近，隨著位置來到纜繩兩端，180 度和 90 度的吊臂擺角衰減加速，更快回到小角度擺盪。
3. 在擺盪對稱性上，180 度長臂受位置影響最大，角度差由 0 度增加至 5 度；90 度及 135 度長臂受位置影響則不大，90 度長臂均維持在 2 度左右，而 135 度長臂則為 8 度左右。

## 2. 週期變化

### (1)數據與作圖

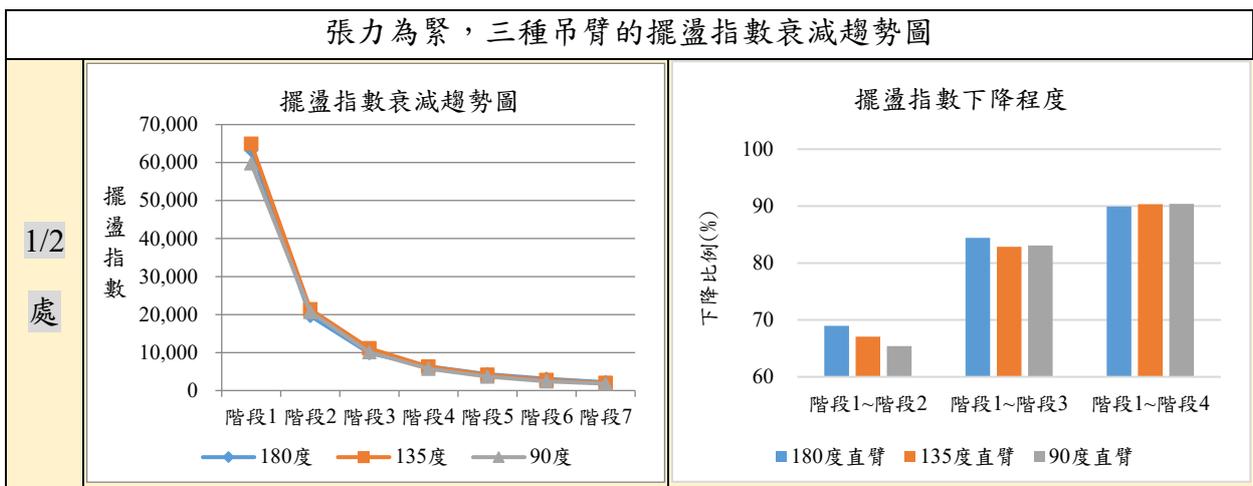


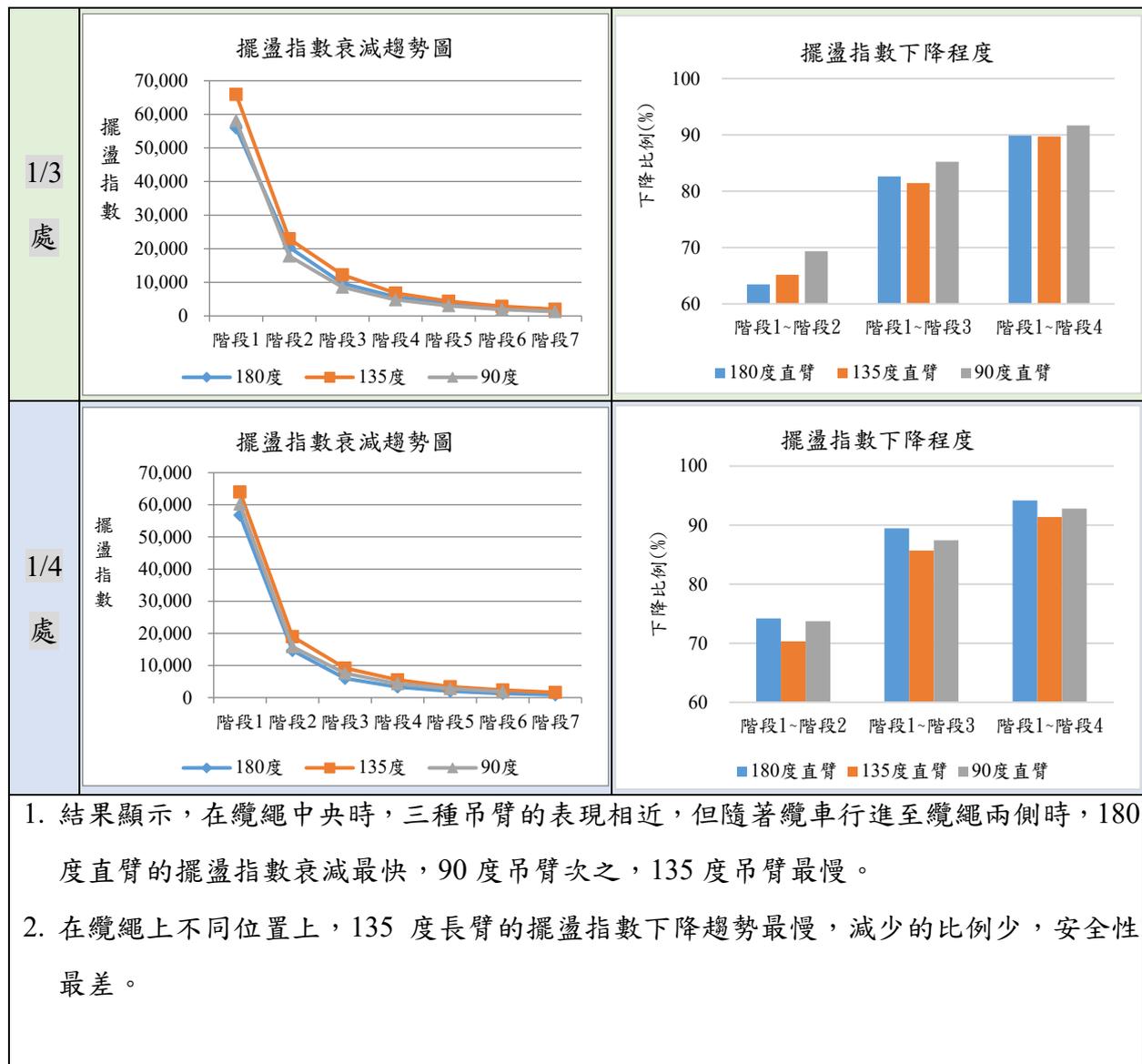


(2)結果：三種吊臂中以 180 度及 90 度的擺盪週期較小，135 度最大，而週期的衰減趨勢則是相近的。

### 3. 擺盪指數

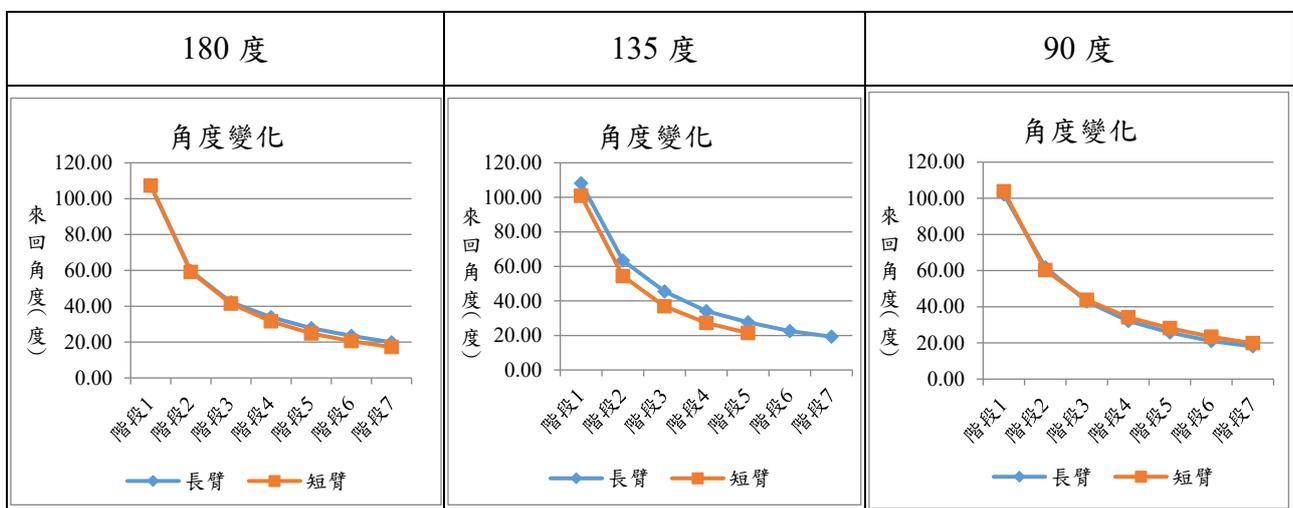
(1)數據與作圖



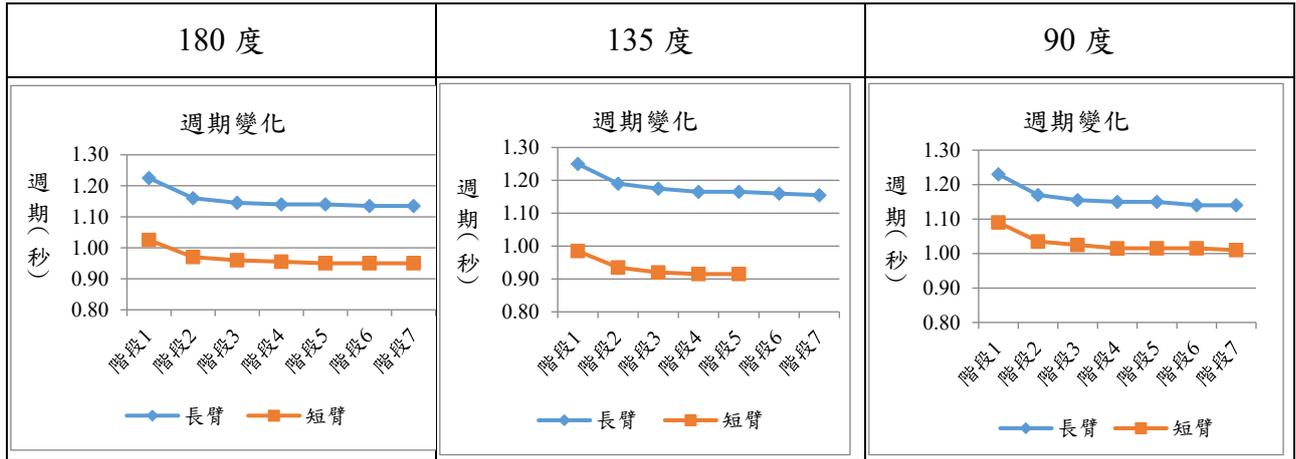


#### (四) 探討吊臂長短對纜車擺盪之影響

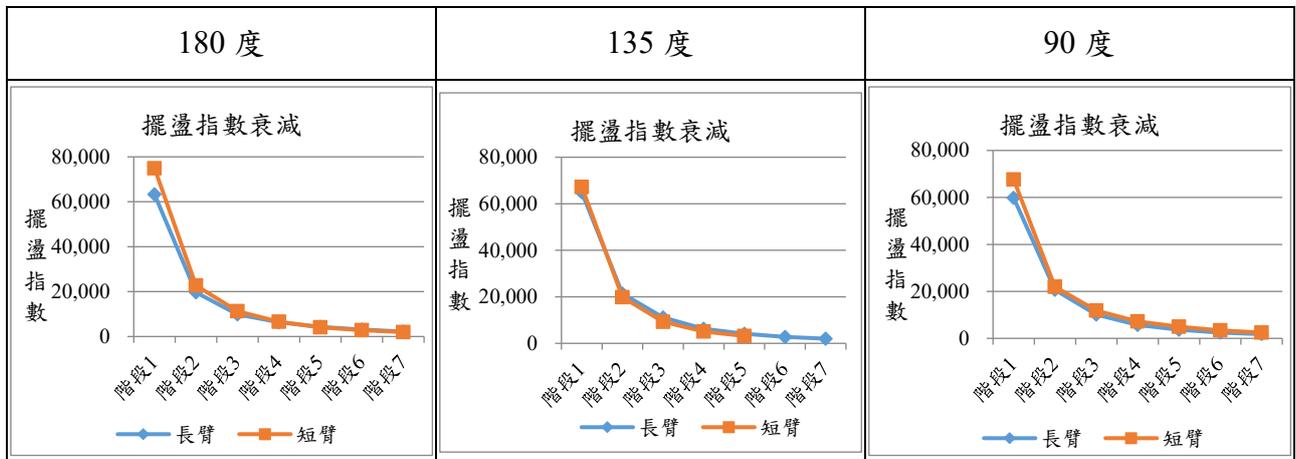
##### 1. 角度變化



## 2. 週期變化



## 3. 擺盪指數



結果：長臂因為質心位置較低故週期較大，而擺盪角度與短臂相近，而擺盪指數衰減則以短臂下降較快。

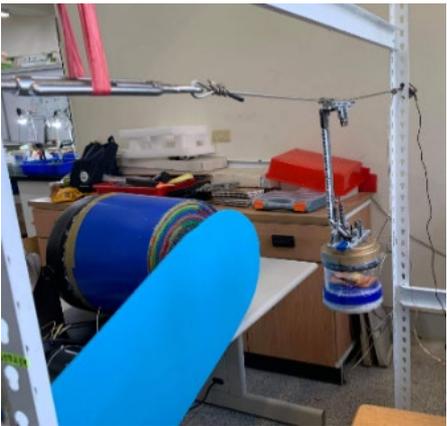
## 二、探討不同頻率陣風對纜車共振之影響

透過上面的實驗，我們取得了六支吊臂的擺盪頻率，而同時我們也查閱了貓空纜車的暫停營運條件為瞬間風速達 16m/s 且持續 3 秒以上，或瞬間風速 18m/s 以上。然而，我們想知道未達停駛條件的風，是否能引起纜車共振，造成危險？因此，我們針對陣風的頻率來探討陣風對纜車共振之影響。

### (一) 步驟與裝置

1. 調整纜繩張力為 20N(中)，掛上 180 度長臂纜車組，調整纜車車廂位於整流風扇前 80cm 處的穩流段內，如下圖所示。
2. 依序調整減速馬達刻度為 3~6 後開啟電源製造陣風，紀錄不同頻率的陣風下造成的纜車擺角變化，並找出對應的共振頻率，調速器刻度對應的陣風頻率如下所示。

3. 依序改變吊臂為 135 度長臂、90 度長臂，重複步驟 1~2。

		<table border="1"> <thead> <tr> <th>刻度</th> <th>遮風 頻率(Hz)</th> <th>風持續 時間(s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>第 1 格</td><td>0.30</td><td>3.33</td></tr> <tr><td>第 2 格</td><td>0.55</td><td>1.82</td></tr> <tr><td>第 3 格</td><td>0.74</td><td>1.35</td></tr> <tr><td>第 4 格</td><td><b>0.87</b></td><td><b>1.15</b></td></tr> <tr><td>第 5 格</td><td>1.05</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>第 6 格</td><td><b>1.18</b></td><td><b>0.85</b></td></tr> <tr><td>第 7 格</td><td>1.30</td><td>0.77</td></tr> <tr><td>第 8 格</td><td>1.36</td><td>0.74</td></tr> <tr><td>第 9 格</td><td>1.46</td><td>0.68</td></tr> <tr><td>第 10 格</td><td>1.52</td><td>0.66</td></tr> </tbody> </table>	刻度	遮風 頻率(Hz)	風持續 時間(s)	第 1 格	0.30	3.33	第 2 格	0.55	1.82	第 3 格	0.74	1.35	第 4 格	<b>0.87</b>	<b>1.15</b>	第 5 格	1.05	0.95	第 6 格	<b>1.18</b>	<b>0.85</b>	第 7 格	1.30	0.77	第 8 格	1.36	0.74	第 9 格	1.46	0.68	第 10 格	1.52	0.66
刻度	遮風 頻率(Hz)	風持續 時間(s)																																	
第 1 格	0.30	3.33																																	
第 2 格	0.55	1.82																																	
第 3 格	0.74	1.35																																	
第 4 格	<b>0.87</b>	<b>1.15</b>																																	
第 5 格	1.05	0.95																																	
第 6 格	<b>1.18</b>	<b>0.85</b>																																	
第 7 格	1.30	0.77																																	
第 8 格	1.36	0.74																																	
第 9 格	1.46	0.68																																	
第 10 格	1.52	0.66																																	
圖 20.以陣風裝置進行纜車共振	圖 21. 調速器刻度與陣風頻率對照																																		

## (二) 數據與結果

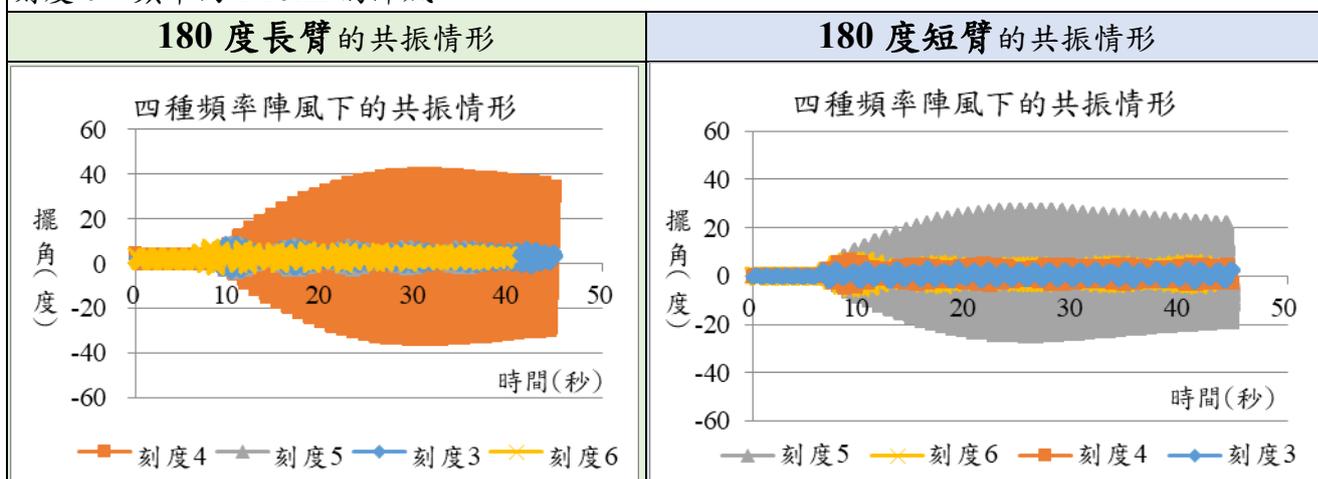
### 1. 吊臂擺盪頻率與陣風頻率

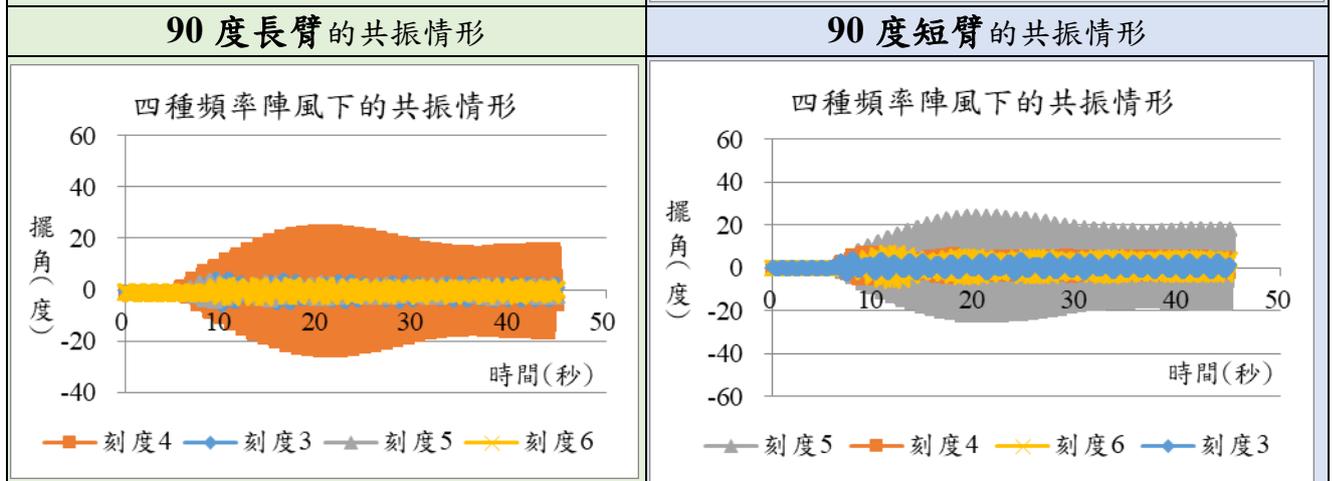
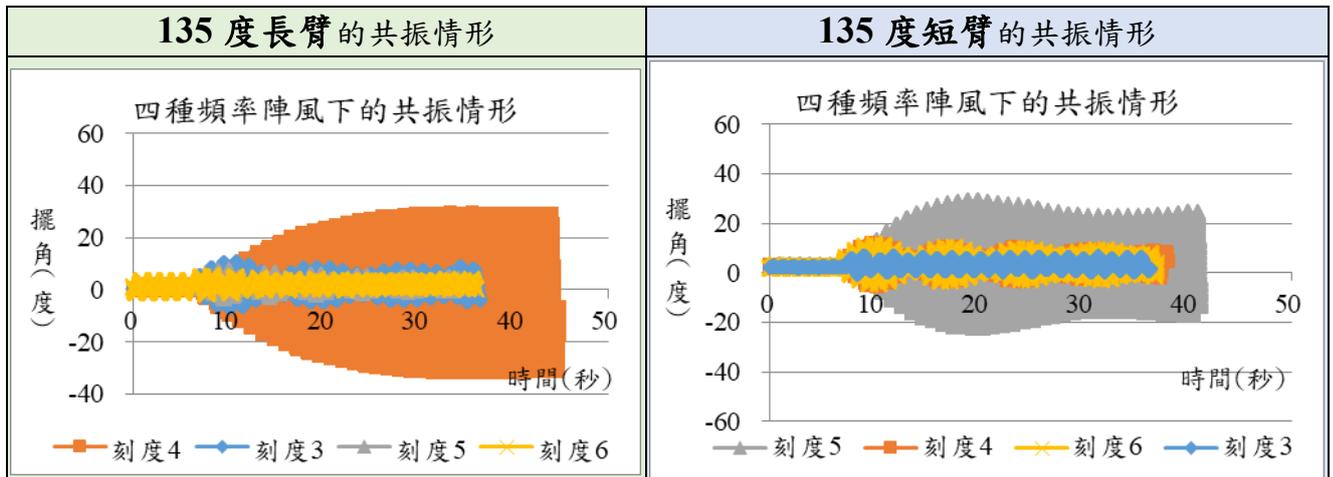
調速器刻度	陣風頻率	風持續時間(s)	長臂擺盪頻率	短臂擺盪頻率
刻度 3	0.74Hz	1.35		
刻度 4	<b>0.87Hz</b>	1.15	180 度：0.88 Hz 135 度：0.86 Hz 90 度：0.88 Hz	
刻度 5	<b>1.05Hz</b>	0.95		180 度：1.05 Hz 135 度：1.10 Hz 90 度：0.99 Hz
刻度 6	1.18Hz	0.85		

刻度 4 的陣風頻率與長臂擺盪頻率最相近；而刻度 5 的陣風頻率與短臂擺盪頻率最相近。

### 2. 六種吊臂在強風下的共振情形

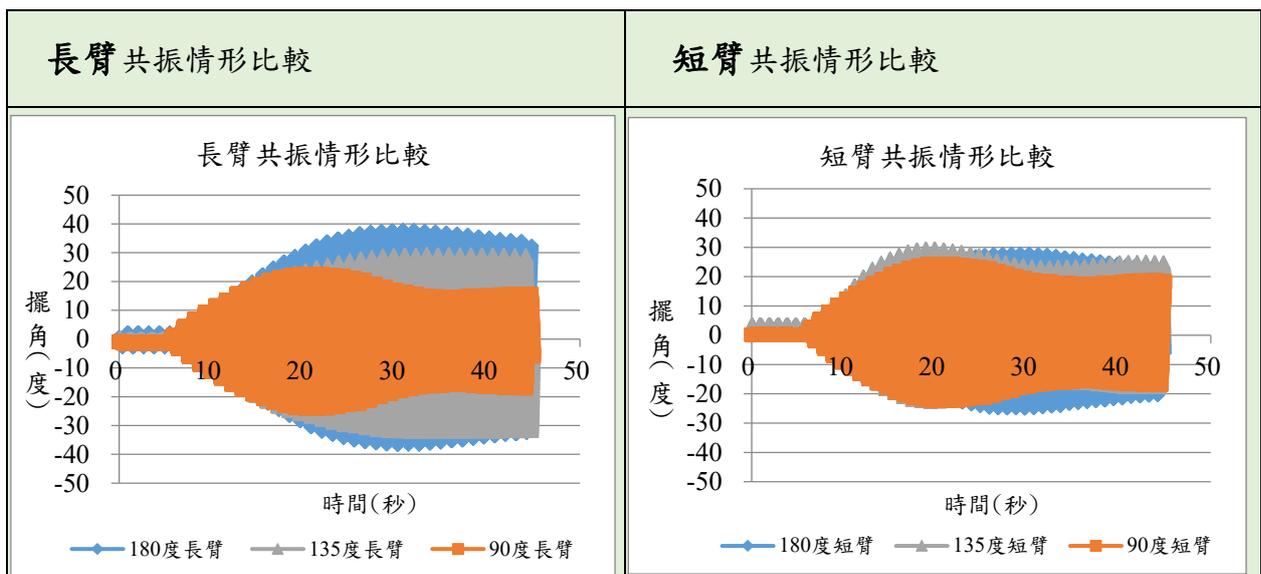
刻度 3：頻率約 0.74Hz 的陣風；  
 刻度 4：頻率約 **0.87Hz** 的陣風(長臂的共振頻率)  
 刻度 5：頻率約 **1.05Hz** 的陣風(短臂的共振頻率)；  
 刻度 6：頻率約 1.18Hz 的陣風





1. 圖中顯示，當陣風頻率接近吊臂擺盪頻率時，確實造成共振，引起纜車大角度擺盪。
2. 長臂都在 15 秒內與刻度 4，即頻率 0.87Hz 的陣風達到共振，且來回角度超過 50 度，尤以 180 度直臂為甚，來回角度將近 80 度。短臂也都在 15 秒內與刻度 5，即頻率約 1.05Hz 的陣風達到共振，造成來回角度約 50 度的共振，增加了纜車系統的危險。

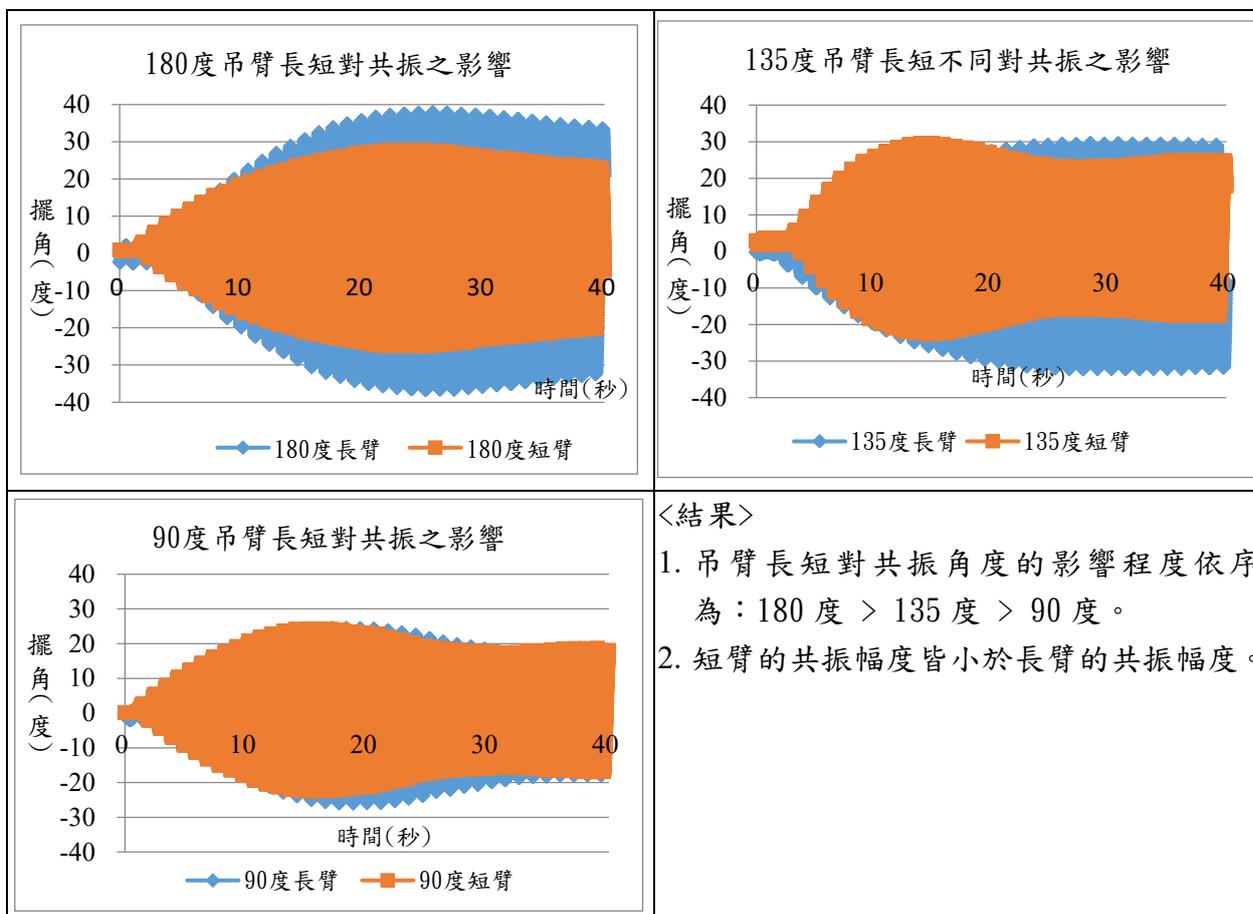
### 3. 不同角度之吊臂共振情形比較



<結果>

無論長臂或短臂，頻率相近的陣風造成的共振程度均以 180 直臂最危險，180 度長臂的來回角度可達 80 度，135 度次之，90 度雖最弱，但來回角度也達 50 度左右。

#### 4. 不同長度之吊臂共振情形比較



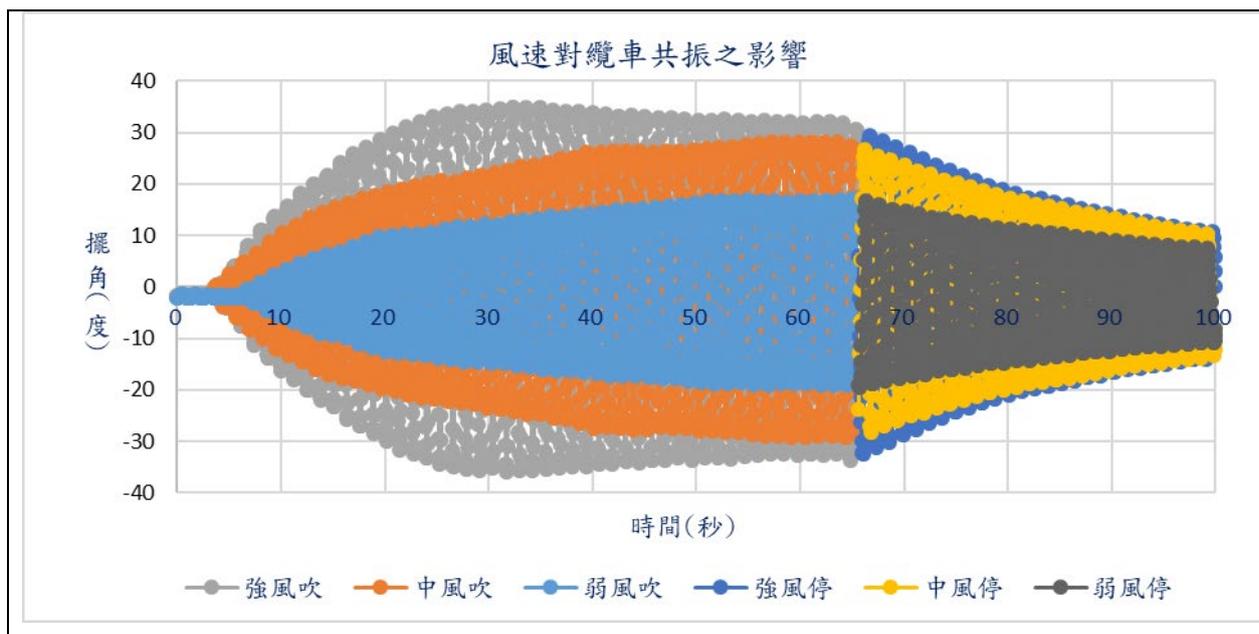
### 三、探討陣風強度對纜車共振的影響

除了共振頻率的不同對纜車擺盪的影響以外，我們也對風速是否會影響共振感到好奇。因此，我們設計實驗來探討同樣頻率但不同風速的陣風對纜車共振之影響。

#### (一) 實驗步驟

1. 設定纜繩張力為 20N(中)，將伸縮吊臂組的長度伸長至最長後掛在纜繩中央處，並調整纜車車廂於整流風扇前 80cm 處的穩流段內。
2. 調整減速馬達的調速器，找出伸縮吊臂的共振頻率後，固定此頻率進行實驗。
3. 依序調整風速為強、中、弱後開啟電源製造陣風，記錄纜車的擺盪變化。

## (二) 數據與分析



### <結果>

1. 我們將吊臂的擺盪過程分成兩個階段。首先，陣風持續吹拂 1 分鐘且出現最大擺幅之後，再關閉陣風並同時紀錄擺幅衰減情形。
2. 數據顯示，只要陣風頻率與吊臂頻率接近，皆能引起吊臂的共振。而風速愈強，能愈快引發吊臂共振，且共振後擺角也愈大，但關閉陣風後，擺角也歷時較長時間衰減至安全角度。

## 四、探討改變吊臂長度對改善纜車共振之可能性

我們透過了以上的實驗結果得知了微弱的陣風確實能引發纜車大角度共振，造成系統的危險。但是，我們猜想是否可能透過吊臂的伸長或縮短來破壞陣風的共振效應，使得纜車的共振角度縮小，期能降低纜車系統的危險性，於是進行了此項實驗。

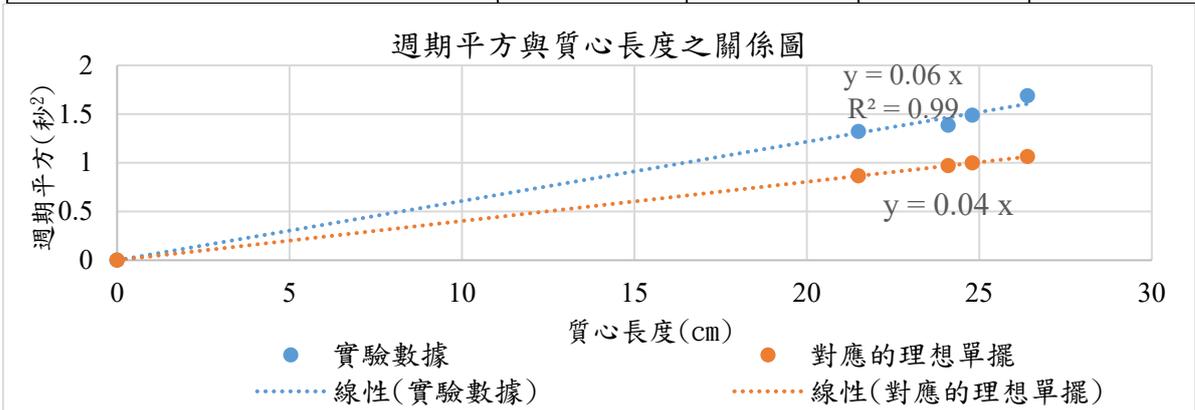
### (一) 實驗步驟

1. 設定風速為強，纜繩張力為 20N，於纜繩中央處掛上伸縮吊臂組，並調整纜車車廂於整流風扇前 80cm 處的穩流段內。
2. 將吊臂調整至最短，調整調速器刻度至對應的共振頻率，進行陣風對纜車的共振，當纜車共振達最大時，將吊臂依序伸長 3cm、5cm 以及 8cm，紀錄纜車的擺角變化。
3. 再將吊臂長度調整至最長，調整調速器刻度至對應的共振頻率，進行陣風對纜車的共振，當纜車共振達最大時，將吊臂依序縮短 5cm 以及 8cm，紀錄纜車的擺角變化。

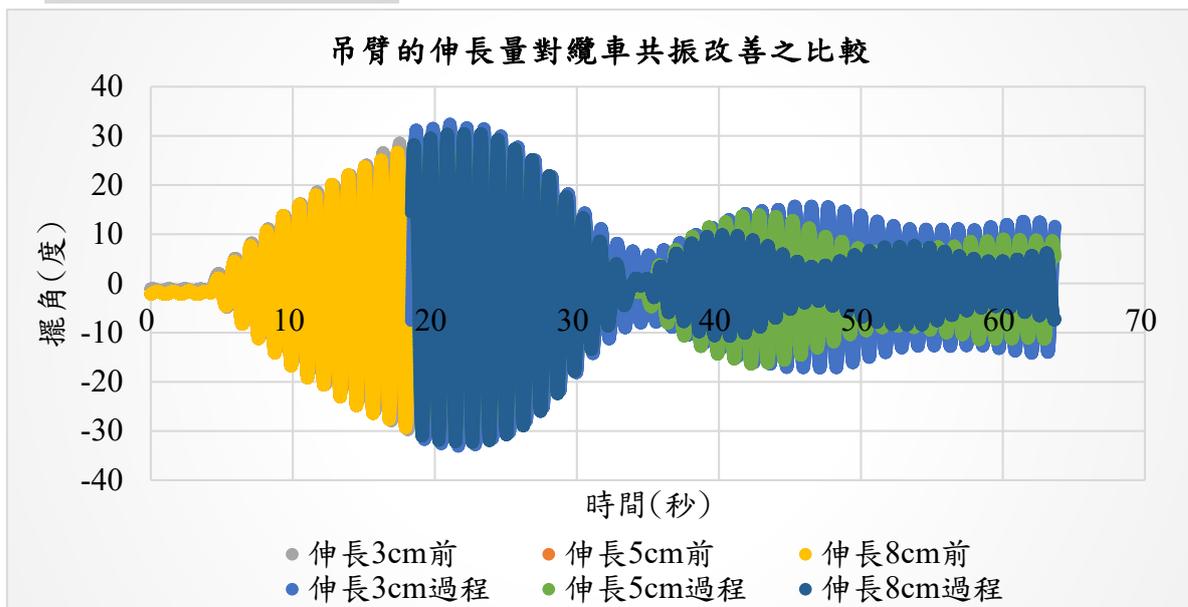
### (二) 數據與結果

1. 吊臂長度與對應的共振頻率

吊臂長度(cm)	28.6(最短)	31.6	33.6	36.6(最長)
伸長量(cm)	0	3.0	5.0	8.0
質心長度(cm)	21.5	24.1	24.8	26.4
對應的陣風頻率(Hz)	0.87	0.85	0.82	0.77
對應的陣風週期(s)	1.15	1.18	1.22	1.30
對應的陣風週期平方(s <sup>2</sup> )	1.32	1.38	1.49	1.69
理想單擺計算出的週期(s)	1.08	1.02	1.00	0.97
理想單擺計算出的週期平方(s <sup>2</sup> )	0.87	0.97	1.00	1.06



- 我們將可調式吊臂設定在 4 種長度，並用重錘法找出質心位置，得到質心長度後分別利用陣風裝置找出對應的共振陣風週期和帶入理想單擺公式計算出週期，作圖後進行比較。
  - 因為實驗用的吊臂並非理想單擺，且受限於減速馬達調速器也無法進行線性調整，只能藉由多次操作找出最接近的共振頻率，再計算出共振週期，因此和理想單擺有所差異。
2. **伸長量對改善共振之影響**



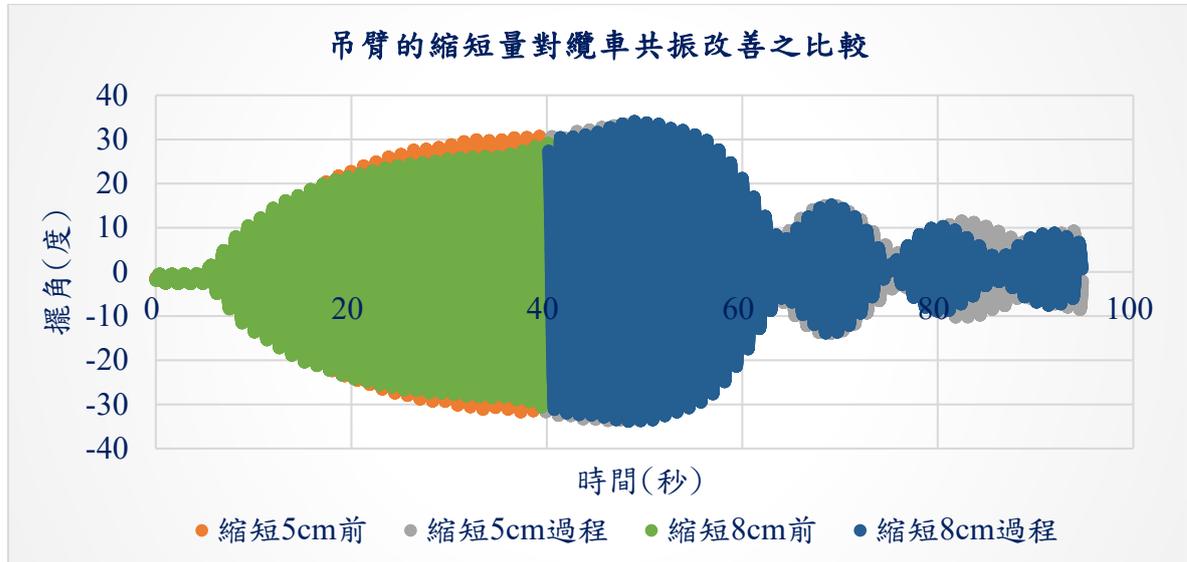
(1) **陣風持續吹拂 15 秒左右，纜車即可達最大共振角度**。此時，透過無線遙控將吊臂伸長，可發現：

- 一開始伸長時，擺幅些微增加後立即快速下降。

②伸長量只有 3cm 時，擺幅改善為原來的一半左右，效果較差；伸長量達 5cm(佔原長的 17.5%)時，改善效果提升；伸長量達 8cm 時，擺幅立即下降至原來的 1/3，效果最佳。

(2)數據顯示，當吊臂的伸長量達原長的 17.5% 以上時，纜車的共振即可獲得明顯改善。

### 3. 縮短量對改善共振之影響



(1) 陣風吹拂後，長臂較短臂需要更多時間才能達到最大共振角度。如圖中所示，陣風於第 5 秒開始吹拂，於第 40 秒達最大共振角度。

(2) 於第 40 秒，透過無線遙控進行吊臂縮短，發現：

①一開始縮短時，擺動幅度也是些微增加後立即快速下降。

②縮短 5cm(佔原長 13.7%)或 8cm，對於改善共振的效果相同。

(3) 數據顯示，當吊臂縮短量達原長的 13.7% 以上時，纜車的共振即可獲得明顯改善。

## 玖、結論

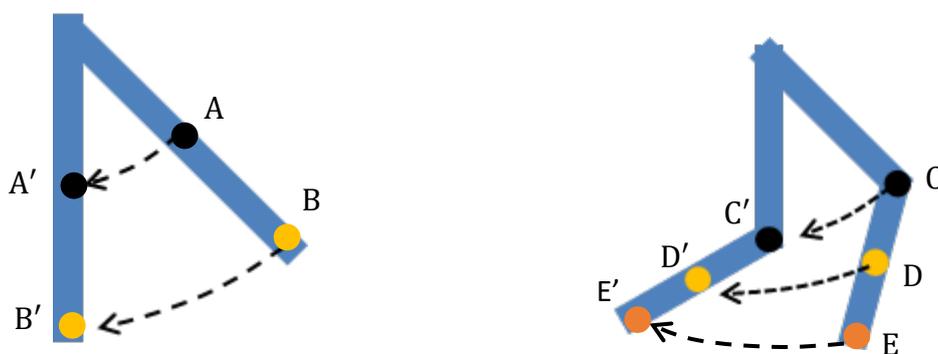
1. 我們嘗試製作吊臂進行纜車擺盪的相關實驗，最後採用樂高積木製作出 180 度、135 度及 90 度的長短吊臂，共 6 支，再結合纜車來進行實驗，更搭配伺服馬達，透過無線遙控製作出伸縮吊臂，不僅操作方便，也確認了想法的可行性。

2. 我們製作出長短、角度不同的六支吊臂連結上車廂，並確定了架設方式和分析儀器之後，進行纜繩張力、纜車位置、吊臂角度、吊臂長短四項因素對纜車擺盪影響之探討，以便比較纜車之安全程度。於實驗過程中，透過力度計紀錄纜繩的張力變化，也以姿態模組紀錄下車廂在每一時刻  $t$  的角度  $\theta$  和角速度  $\omega$ ，再從龐大的數據中針對每項變因進行角度變化、週期變化、張力變化，更由角速度與角度的關係圖形中定義出擺盪指數 = 角度最大差值  $\times$  角速度最大差值，來比較各種吊臂的相對安全程度。

### 3. 纜繩張力對纜車擺盪的影響為：

- (1) 當纜車擺盪角速度最大時，纜繩的張力也同步為最大值，對塔柱造成的負擔增加。
- (2) 在我們設定的張力值內，**纜繩張力大小對擺盪的來回角度衰減趨勢影響不大，但對於週期有明顯差異，纜繩由緊變鬆時造成擺盪週期增加。**對應到實際情形纜繩在長時間使用下會出現伸長的疲乏狀態，要由專業人員進行裁減鋼纜的作業以維持纜車系統的安全性。
- (3) 就吊臂的形狀而言，直臂最具對稱性，左右擺盪的對稱性最好。我們從力學能的轉換進行解釋。

① 以直臂為例，由右邊釋放時，臂上所有質點都下降了，如圖中的 A 點下降至 A' 點，B 點下降至 B' 點，都將位能轉換成動能。



② 以彎曲吊臂為例，由右邊釋放時，臂上的質點有的下降，有的則位置接近，有的甚至上升了，如圖中的 C 點下降至 C' 點，D 點些微下降至 D' 點，但是 E 點卻上升至 E' 點，導致力學能轉換與直臂不同，因而有左右擺盪不對稱的情形。

- (4) 纜繩張力較緊時，三種吊臂的擺盪對稱性較佳，但隨著張力變鬆，擺盪對稱性變差。
- (5) 三種吊臂擺盪指數衰減趨勢相似，張力較鬆時，初始擺盪指數較小，下降也較快。

### 4. 纜車位置對纜車擺盪的影響為：

- (1) 纜車位在纜繩中央處因處於波腹位置，故擺盪角度大，週期也大，最是危險，隨著位置來到纜繩兩側附近，擺盪角度和週期都獲得改善。
- (2) 纜車左右擺盪的對稱性於纜繩中央處最佳，來到纜繩兩端的擺盪的不對稱大幅增加，推論為兩端處的擺盪受到了塔柱的交互作用所致。
- (3) 擺盪指數的下降以纜繩中央處最慢，最危險；在下降比例上，隨著纜車逐漸靠近塔柱，下降比例明顯增加，尤以 90 度長臂最多，增加了 10% 左右。

### 5. 吊臂角度對纜車擺盪的影響為：

- (1) 在擺盪對稱性上，180 度長臂受位置影響最大，角度差由 0 度增加至 5 度；90 度及 135 度長臂受位置影響則不大，90 度長臂均維持在 2 度左右，而 135 度長臂則為 8 度左右。

(2)在纜繩中央的擺盪角度上，三種吊臂的表現相近，隨著位置來到纜繩兩端，180 度和 90 度的吊臂下降趨勢增加，較快回到小角度擺盪。

(3)在擺盪週期上，180 度及 90 度的擺盪週期較小，135 度最大。

(4)在擺盪指數上，三種吊臂在纜繩中央處的表現將近，但隨著纜車行進至纜繩兩側時，**180 度直臂的擺盪指數衰減最快，90 度吊臂次之，135 度吊臂最慢。**

6.吊臂長短對纜車擺盪的影響為：長臂因為質心位置較低故週期大，擺盪角度與短臂相近，而擺盪指數衰減則以短臂下降較快

7.得到 6 支吊臂的擺盪週期後，我們又製作出遮風裝置，搭配調速器得到不同頻率的陣風進行纜車的共振實驗，得到以下幾點：

(1)**當陣風頻率接近吊臂擺盪頻率時，無論風速大小，都能引起纜車的共振，造成危險。**

刻度	陣風頻率	長臂擺盪頻率	短臂擺盪頻率
刻度 3	0.74Hz		
刻度 4	<b>0.87Hz</b>	180 度：0.88 Hz 135 度：0.86 Hz 90 度：0.88 Hz	
刻度 5	<b>1.05Hz</b>		180 度：1.05 Hz 135 度：1.10 Hz 90 度：0.99 Hz
刻度 6	1.18Hz		

(2)陣風吹拂後，長臂較短臂需要更多時間才能達到最大共振角度，其中以 180 度長臂最危險，來回角度將近 80 度，135 度次之，90 度雖最弱，但來回角度也達 50 度。

(3)短臂的共振幅度皆略小於長臂的共振幅度。

8.最後，我們嘗試透過調整吊臂長度以破壞陣風的共振，減緩擺盪：

(1)**無論吊臂由長變短或是由短變長，當纜車產生共振時，透過吊臂的調整均能在 20 秒左右達到明顯改善擺盪程度。**

(2)當吊臂的伸長量達原長的 17.5%以上時或縮短量達原長的 13.7%以上時，纜車的共振可獲得明顯改善。

(3)當擺盪獲得改善，便能爭取時間讓乘客安全到站，降低搭乘的風險。

9.總結以上結論得知，**90 度及 135 度的吊臂受陣風引發的共振效果小於 180 度直臂，為較好的選擇。而已被陣風引發大角度共振之纜車，可透過吊臂的伸縮破壞陣風的共振而減輕擺盪，降低風險，讓乘客安全到站。**

## 壹拾、未來展望

我們曾嘗試編寫程式回傳共振角度，於危險角度時發出警報，朝著自動調整吊臂的長度達到破壞當下陣風共振危機的方向努力，可惜未能完成，期許未來能研制出重量合適的自動調整吊臂，並運用在實際纜車中，使纜車成為更安全交通工具。

## 壹拾壹、參考資料

1. 陳品睿、余奐錚、鄭聿翔、黃彥朗(2019)。「尾曲」求「安全」-探討直臂與曲臂對於擺盪值的影響。2019 全國科學探究競賽-這樣教我就懂。2019.11.10
2. 謝馥伊、黃奕馨、陳韻如(2014)。纜纜升起 震震有辭—地震與纜車的邂逅。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會作品。2019.11.10。
3. 黃冠樺、黃炳華、胡雨勛、歐沛慈(2010)。曲直分明--為何纜車的握臂是彎的？中華民國第 50 屆中小學科學展覽會作品。2019.11.10。
4. 貓空纜車網站資訊。2020.1.5。from <https://www.gondola.taipei/Default.aspx>

## 【評語】 030109

本件作品探討纜車遇到陣風擺盪行為，實驗使用樂高積木製作長短和角度不同的吊臂連結車廂，研究者能設計系統化變因，測量擺盪時張力變化、角度及角速度等，並歸結出以改變纜車懸掛長短。

建議本作品應可參考實際纜車結構，以等比例縮小模型，探討此實驗研究結果與真實應用參考適宜性。

另，本作品中以角度及角速度圖分析擺盪指數，建議應可比對阻尼擺盪系數，並探討角度及角速度相圖分析今接物理意義。且應留意實驗數據誤差分析及有效數字等科學表示方法。

# 摘要

遇到強烈陣風為纜車停駛的條件之一，然而我們更想知道未達停駛之陣風是否也會引起纜車共振，造成隱憂？首先，利用樂高積木製作長短、角度不同的六隻吊臂連結自製車廂，取得擺盪時的張力變化、角度及角速度，更定義了擺盪指數 = 角度最大差值 × 角速度最大差值來比較吊臂的安全程度。再來，透過穩定遮風製造出不同頻率的陣風，得到陣風雖未達停駛標準，但若頻率接近纜車擺盪頻率時，確實能夠引發共振，其中以180度直臂最危險，來回角度高達80度。然而角速度愈大，造成的纜繩張力變化也大，致使塔柱負擔增加。最後，我們將吊臂改良為伸縮吊臂，透過無線遙控改變長度，破壞陣風的共振，成功在20秒內有效改善擺盪情形，以期爭取時間讓乘客安全到站。

## 壹、研究動機

我們在網路上看到段影片，影片中的纜車在強風的吹拂下劇烈搖晃，令我們印象深刻。之後，我們瀏覽了貓空纜車的網站，查詢到當風速達七級風且持續3秒或達8級風時便達到停駛條件。但我們更想知道未達停駛條件的陣風是否會引起纜車的共振，造成危險？又該如何改善呢？因此，展開了一系列的研究。

## 貳、研究流程圖與目的

探討四項變因對  
纜車擺盪之影響

- ◎ 纜繩張力
- ◎ 纜車位置
- ◎ 吊臂角度
- ◎ 吊臂長短

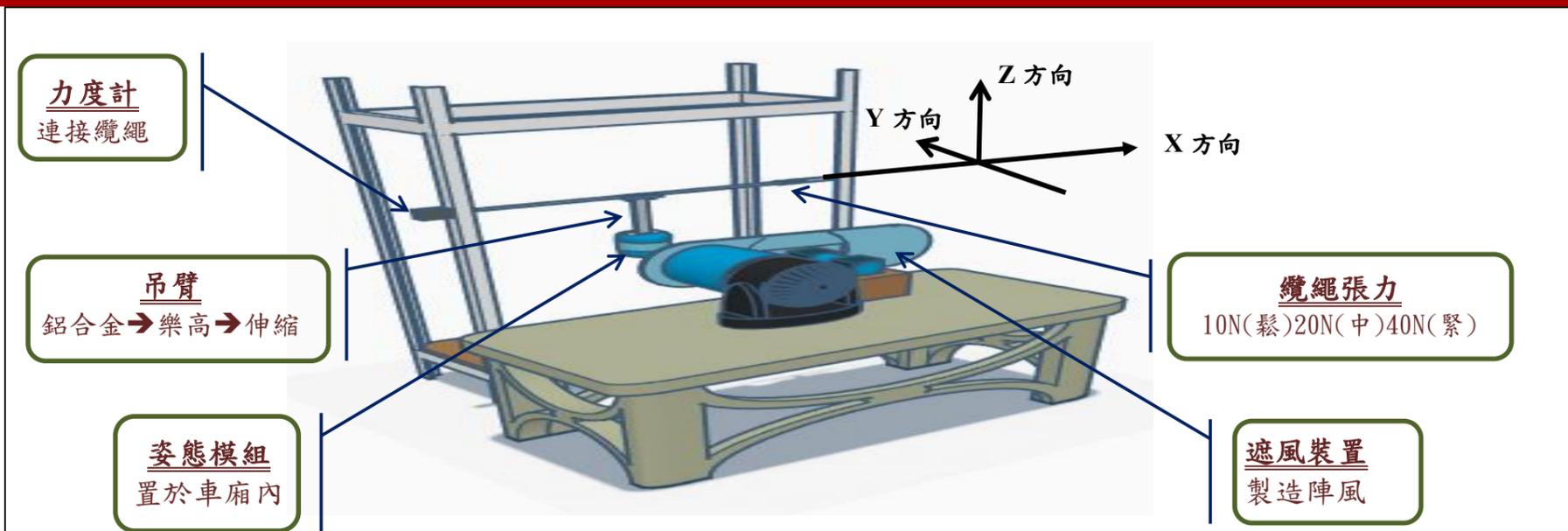
探討陣風對  
纜車共振之影響

- ◎ 不同頻率 VS. 吊臂長度
- ◎ 不同陣風強度對共振的影響

探討改善  
纜車共振之可能性

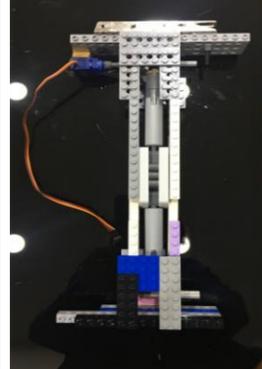
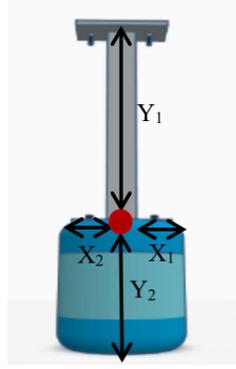
- ◎ 吊臂由長縮短
- ◎ 吊臂由短伸長

## 參、實驗裝置與名詞解釋



### ● 陣風

- 我們將風扇加裝整流段穩定吹風，再以塑膠瓦楞板搭配減速馬達進行遮風，便可製造出一陣又一陣的風。
- 我們在此份報告中稱此種風為「陣風」，而非氣象學上的陣風。

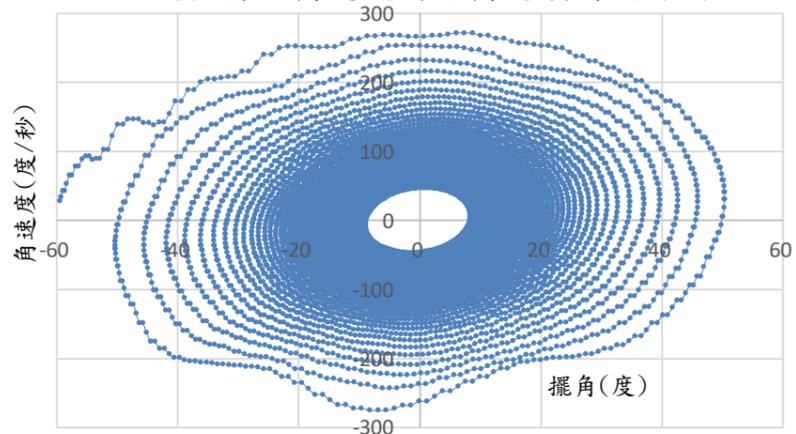


### ● 擺盪指數

- 我們認為纜車的擺盪程度可以透過擺盪角度以及擺盪角速度來描述。
- 擺盪指數 = 角度最大差值 × 角速度最大差值。
- 圖形中的階段1 ~ 階段7 對應的時間說明如下：

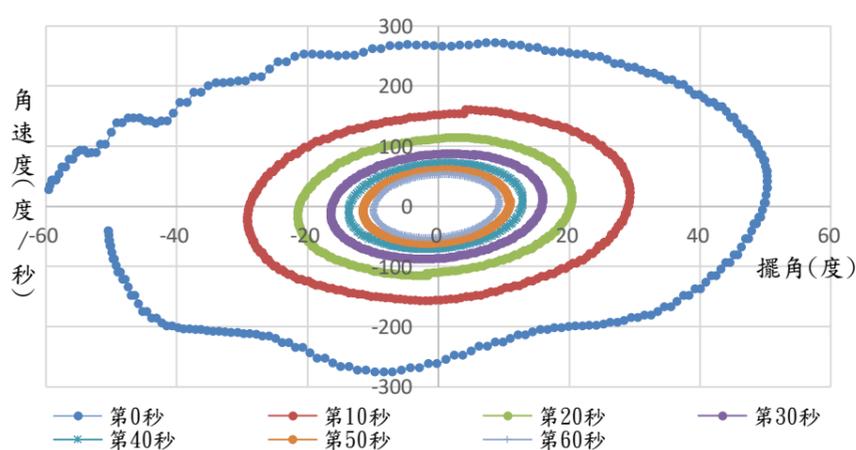
階段1	階段2	階段3	階段4	階段5	階段6	階段7
第0秒的 第1個週期內	第10秒的 第1個週期內	第20秒的 第1個週期內	第30秒的 第1個週期內	第40秒的 第1個週期內	第50秒的 第1個週期內	第60秒的 第1個週期內

180度直臂之角速度對擺角連續時間作圖



角速度與角度在連續時間下的關係圖呈現向內旋入的趨勢，就像毛線球一樣，不易分析。

180度直臂之角速度對擺角階段作圖

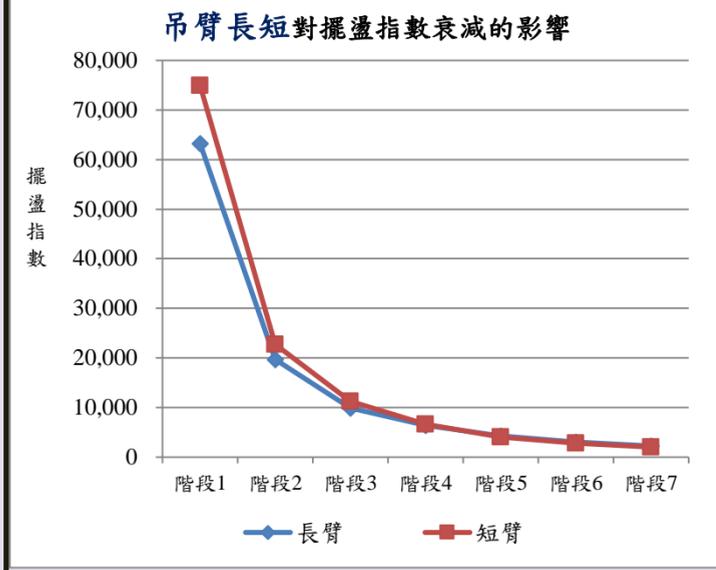
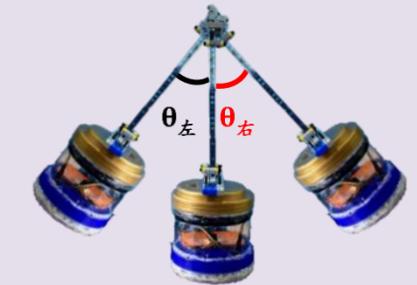
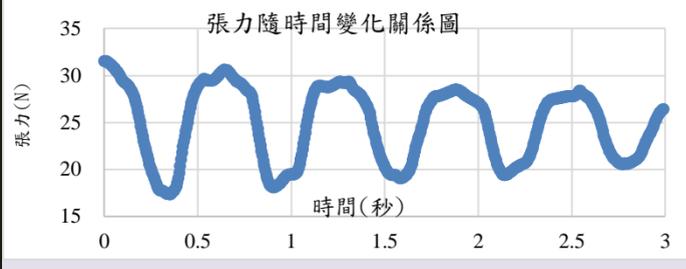


又若以每10秒為間隔，進行該時刻下第1個週期內的角速度與角度關係圖，會得到一圈圈向內縮小的橢圓圖形。

# 肆、結果與討論

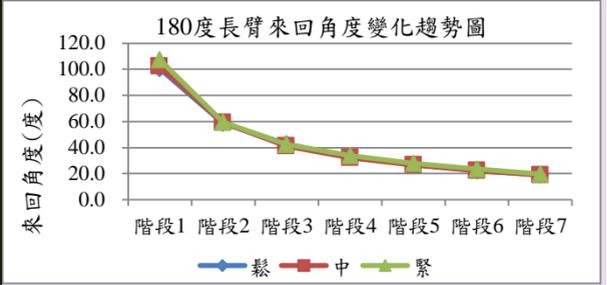
## 實驗一：變因探討

以 180 度長臂，張力為鬆，纜車位於纜繩 1/2 處為例

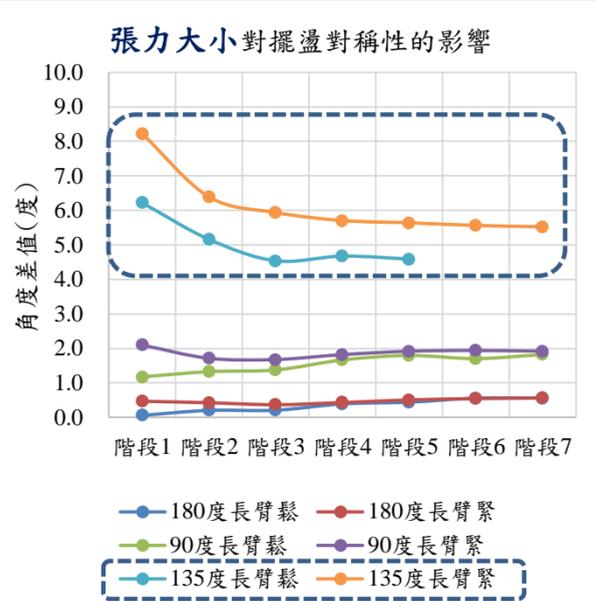


→得知，角速率愈大，張力也愈大。

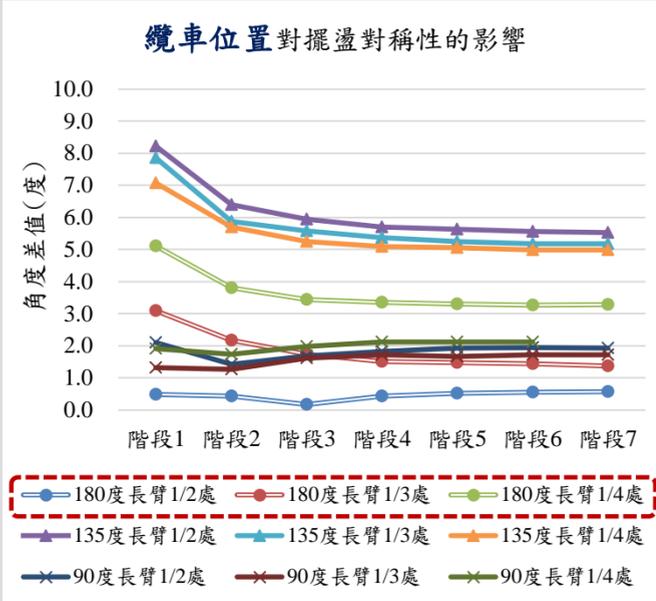
→得知，短吊臂的擺盪指數下降較快。



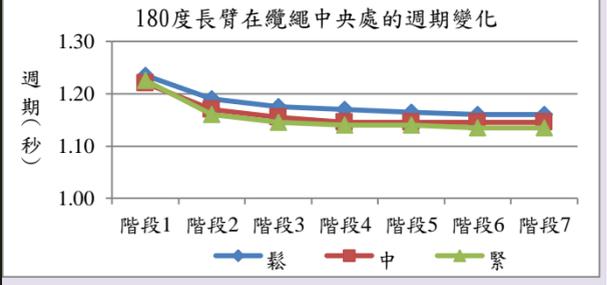
→得知，張力大小對於擺幅影響不大。



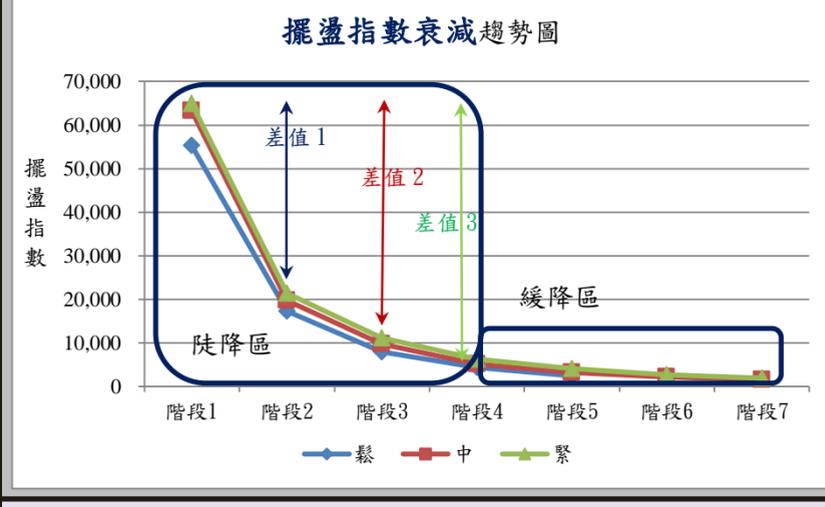
→得知，張力大小對於 135 度長臂影響較大。



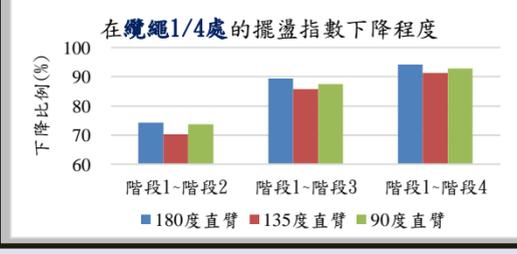
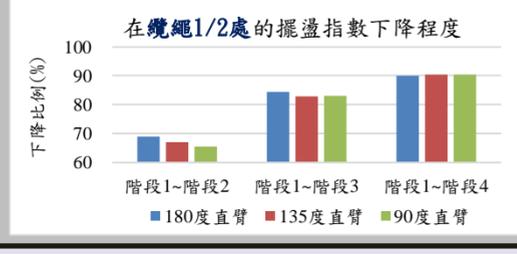
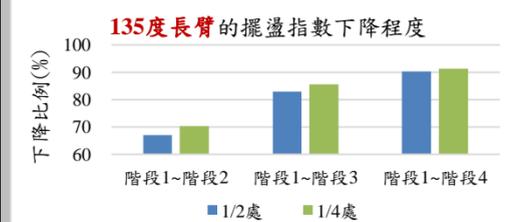
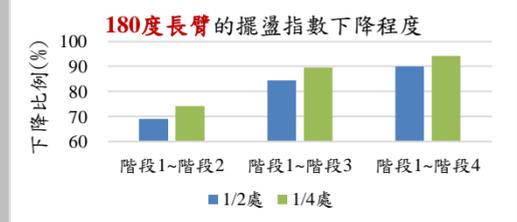
→得知，纜車位置對於 180 度長臂影響較大。



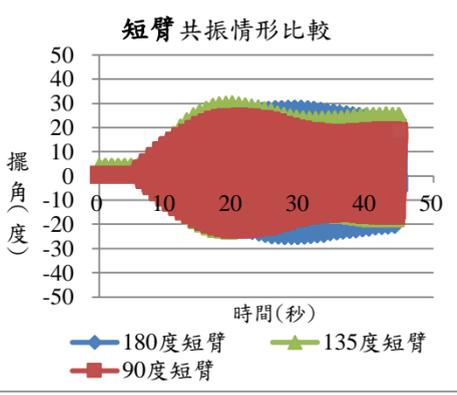
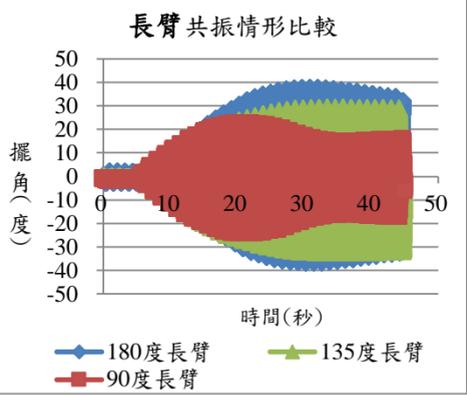
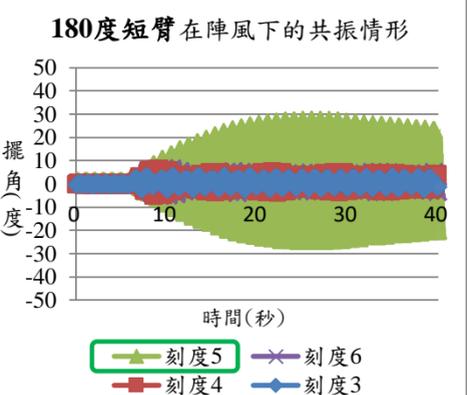
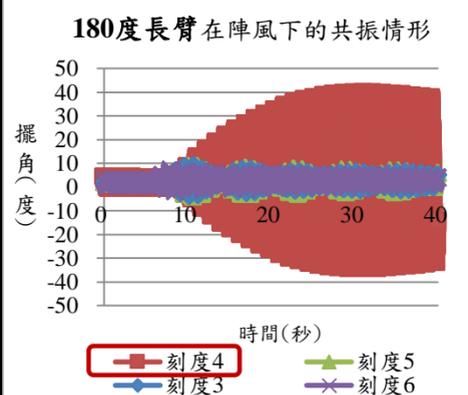
→得知，張力變小造成週期增加。



得知，大角度擺盪時，135 度的長臂在張力為鬆、位置於中央處的擺盪指數於擺動後最不易改善。



## 實驗二：探討不同頻率陣風對纜車共振之影響

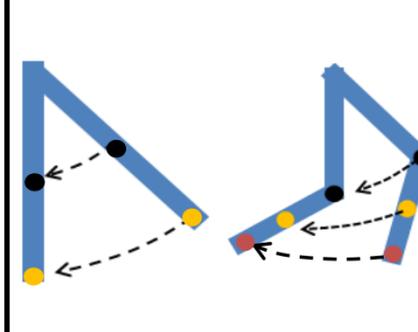


結果：

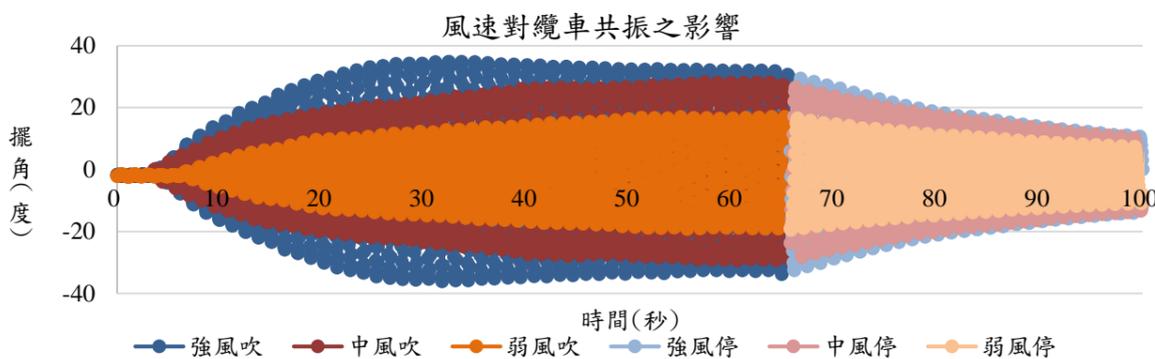
1. 圖中顯示，當陣風頻率接近吊臂擺盪頻率時，確實造成共振，引起纜車大角度擺盪。
2. 長臂都在 15 秒內與刻度 4，即頻率 0.87Hz 的陣風達到共振，且來回角度超過 50 度，尤以 180 度直臂為甚，來回角度將近 80 度。
3. 短臂也都在 15 秒內與刻度 5，即頻率約 1.05Hz 的陣風達到共振，造成來回角度約 50 度的共振，增加了纜車系統的危險。

結果：

1. 無論吊臂長短，頻率相近的陣風造成的共振程度均以 180 直臂最危險，應該是直臂的結構對稱性最佳所致。
2. 短臂的共振幅度皆小於長臂的共振幅度。



## 實驗三：探討陣風強度對纜車共振的影響



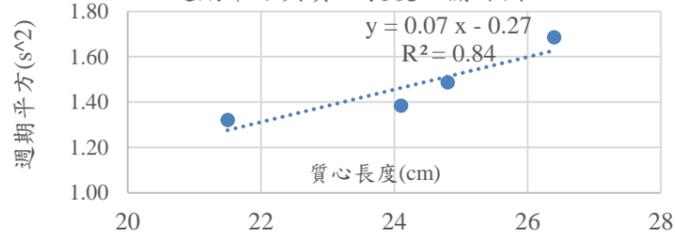
- 我們將纜車的擺盪過程分成兩個階段。首先，陣風持續吹拂1分鐘且出現最大擺幅之後，再停止陣風並同時紀錄擺幅衰減情形。
- 數據顯示，只要陣風頻率與吊臂頻率接近，皆能引起纜車的共振。且風速愈強，愈快引發纜車共振，共振後擺角也愈大。而陣風停止後，擺角也歷時較長時間衰減至安全角度。

## 實驗四：探討改變吊臂長度對改善纜車共振之可能性

### (一) 吊臂長度設定與對應的共振頻率

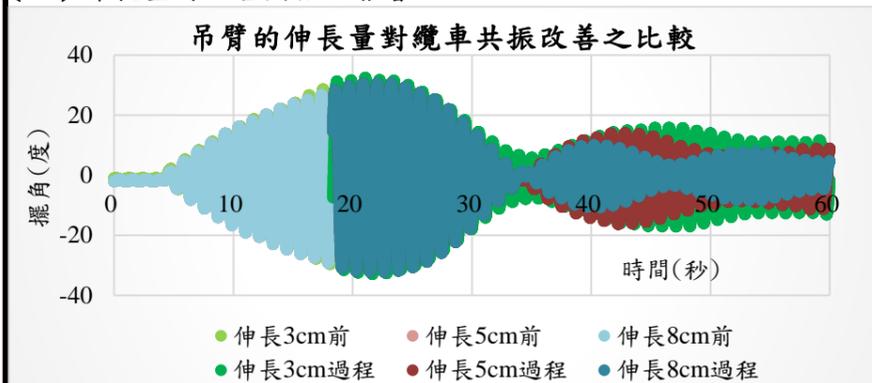
吊臂長度(cm)	28.6(最短)	31.6	33.6	36.6(最長)
伸長量(cm)	0	3.0	5.0	8.0
質心長度(cm)	21.5	24.1	24.8	26.4
對應的陣風頻率(Hz)	0.87	0.85	0.82	0.77
對應的陣風週期(s)	1.15	1.18	1.22	1.30
對應的陣風週期平方(s <sup>2</sup> )	1.32	1.38	1.49	1.69

週期平方與質心長度之關係圖

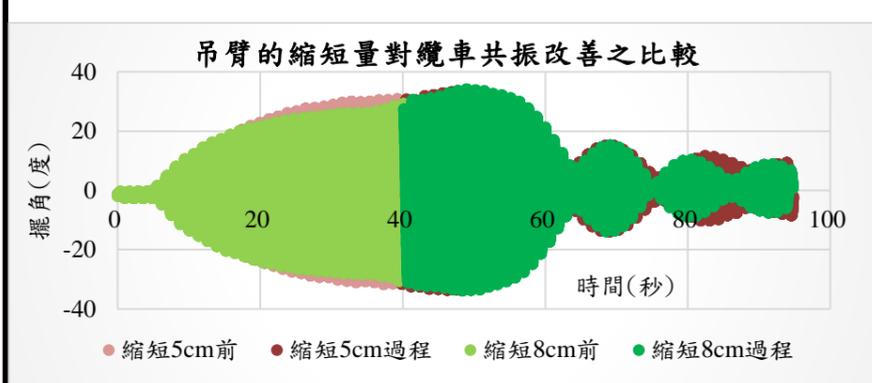


→透過此關係圖，可讓我們得知此伸縮吊臂在伸縮過程中的週期平方值變化，進而預測可引發共振的陣風頻率。

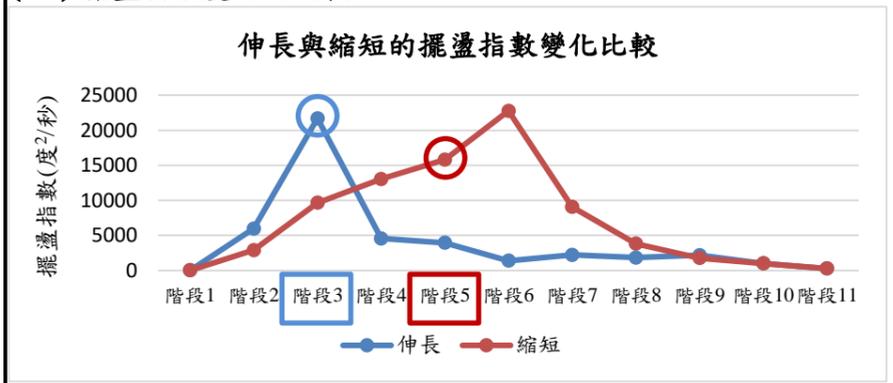
### (二) 伸長量對改善共振之影響



### (三) 縮短量對改善共振之影響



### (四) 擺盪指數變化之比較



<結果>

- 陣風吹拂後，短臂於15秒(約為階段3)後達到最大共振角度，而長臂則需35秒左右(約為階段5)才能到達。
- 吊臂進行伸長時，擺幅立刻獲得改善，而進行縮短時，則因頻率更為接近陣風頻率而呈現先上升後下降的情形。
- 吊臂伸長量達原長的17.5%以上，或縮短量達原長的13.7%以上時纜車的共振即可獲得明顯改善。
- 考量短臂被共振後的擺盪較小，若被引發共振後再透過伸長吊臂來破壞共振後可以更為安全，故建議採伸長的方式為較安全的方法。

## 伍、結論

- 我們製作出長短、角度不同的六支吊臂連結上車廂，並確定了架設方式和分析儀器之後，進行纜繩張力、纜車位置、吊臂角度、吊臂長短四項因素對纜車擺盪影響之探討，以便比較纜車之安全程度。
- 於實驗過程中，透過力度計紀錄纜繩的張力變化，也以姿態模組紀錄下車廂在每一時刻t的角度 $\theta$ 和角速度 $\omega$ ，再從龐大的數據中針對每項變因進行擺幅變化、擺盪對稱變化、週期變化的比較，更由角速度與角度的關係圖形中定義出擺盪指數 = 角度最大差值 × 角速度最大差值，來比較各種吊臂的相對安全程度。
- (1) 在纜繩張力上，當纜車擺盪角速率最大時，纜繩的張力也同步為最大值，對塔柱造成的負擔增加。且纜繩張力大小對擺盪的來回角度衰減趨勢影響不大，但對於週期有明顯差異，纜繩由緊變鬆時造成擺盪週期增加。
- (2) 在纜車位置上，纜繩中央因處於波腹位置，故擺盪角度大，週期也大，最是危險，隨著位置來到纜繩兩側附近，擺盪角度和擺盪指數衰減都獲得改善。
- (3) 在吊臂角度上，三種吊臂在纜繩中央處的擺盪指數表現將近，但隨著纜車行進至纜繩兩側時，180度直臂的擺盪指數衰減最快，90度吊臂次之，135度吊臂最慢。
- (4) 在吊臂長短上，長臂因為質心位置較低故週期大，擺盪角度與短臂相近，而擺盪指數衰減則以短臂下降較快。
3. 在大角度擺盪實驗中，得知135度的長臂在張力為鬆、位置於中央處的擺盪指數下降最慢，為最危險的組合。
- 在纜車的共振實驗結果顯示：當陣風頻率接近吊臂擺盪頻率時，無論風速大小，都能引起纜車的共振，造成危險，又長臂較短臂需要更多時間才能達到最大共振角度，其中以180度長臂最危險，來回角度將近80度。
- 最後，我們透過調整吊臂長度來破壞共振，得到：無論吊臂伸長或縮短，當纜車產生共振時，透過吊臂的調整均能在20秒左右降低擺盪程度，且當吊臂的伸長量達原長的17.5%以上時或縮短量達原長的13.7%以上時，纜車的共振可獲得明顯改善。
- 90度及135度的吊臂受陣風引發的共振效果小於180度直臂，為較好的選擇。而已被陣風引發大角度共振之纜車，可透過吊臂的伸縮破壞陣風的共振而減輕擺盪，降低風險，讓乘客安全到站。
- 實驗結果確認纜車確實會被未達停駛標準的陣風引發共振，造成危險，建議纜車的停駛標準可以加入角度的因素，以提升安全性。

## 陸、未來展望

我們曾嘗試編寫程式回傳共振角度，於危險角度時發出警報，朝著自動調整吊臂的長度來改善共振的方向努力，可惜未能完成。期許未來能研制出重量合適的自動調整吊臂，並運用在實際纜車中，使纜車成為更安全交通工具。

## 柒、參考文獻

- 陳品睿、余奐錚、鄭聿翔、黃彥朗(2019)。「尾曲」求「安全」-探討直臂與曲臂對於擺盪值的影響。2019全國科學探究競賽-這樣教我就懂。2019.11.10
- 謝馥伊、黃奕馨、陳韻如(2014)。纜纜升起 震震有辭—地震與纜車的邂逅。中華民國第54屆中小學科學展覽會作品。2019.11.10。