

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100021

參展科別 工程學

作品名稱 提升纜車遭遇陣風之安全性－利用自製調諧質量
阻尼器與可調式吊臂

得獎獎項

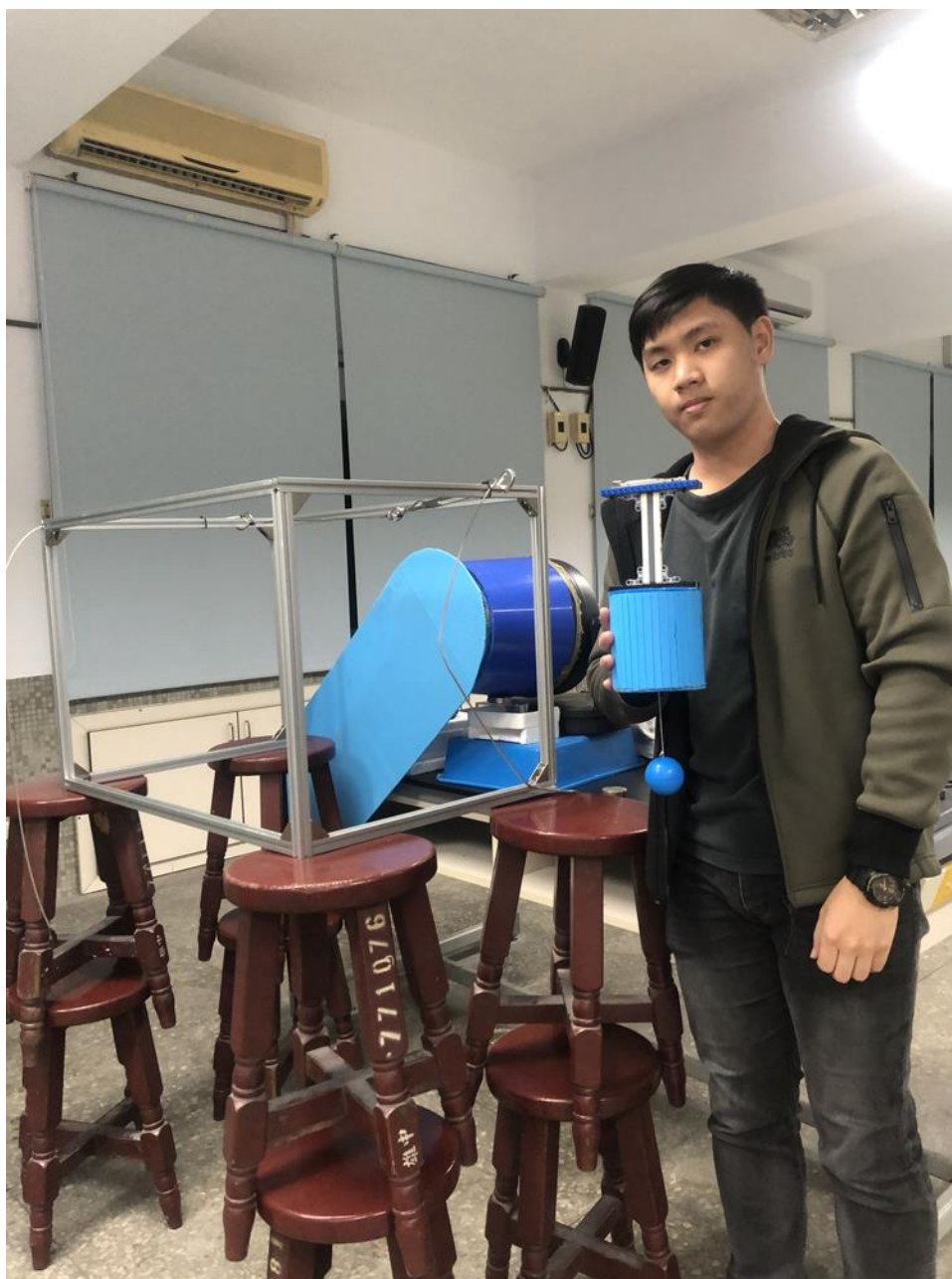
就讀學校 高雄市立高雄高級中學

指導教師 盧政良、黃繹綦

作者姓名 郭詠靖

關鍵詞 纜車、陣風共振、調諧質量阻尼器 (TMD)

作者簡介



大家好，我是來自高雄中學二年級的郭詠靖。國中時因為社團的緣故接觸到了科展，從此對研究有了很大的興趣。在進行研究的過程中能不斷精進自己的研究、口語表達的能力。感謝老師、及家人的指導與支持，使我能有幸參與這次的國際科展分享研究成果。

摘要

遭遇強風是纜車停駛的條件之一，然而我們認為當低於停駛標準的陣風與纜車產生共振時，更會使纜車產生擺動造成危險。因此我們參考真實纜車的比例，製作出模型探討不同頻率及速度陣風對纜車造成的影響。我們發現即使風速未達停駛標準，但當其頻率與纜車接近時，即會發生共振並產生將近 30 度的擺角、強度相較持續風吹拂增加 60 分貝。

為了減低振動，我們首先製作可調式吊臂。但因為其在實際製作上具有困難，且可能造成乘客的不適。為此我們製作了調諧質量阻尼器，當共振發生時，將砝碼透過伺服馬達放下，使纜車的振動傳導至垂下的擺減緩振動。結果顯示阻尼器能將振動減低 10 分貝，最佳的組別甚至有 16 分貝的減振效果，能將擺角減低至小於 2 度。期望將來能將系統自動化，在纜車遭遇陣風時自動調變阻尼器，抑制振動。

Abstract

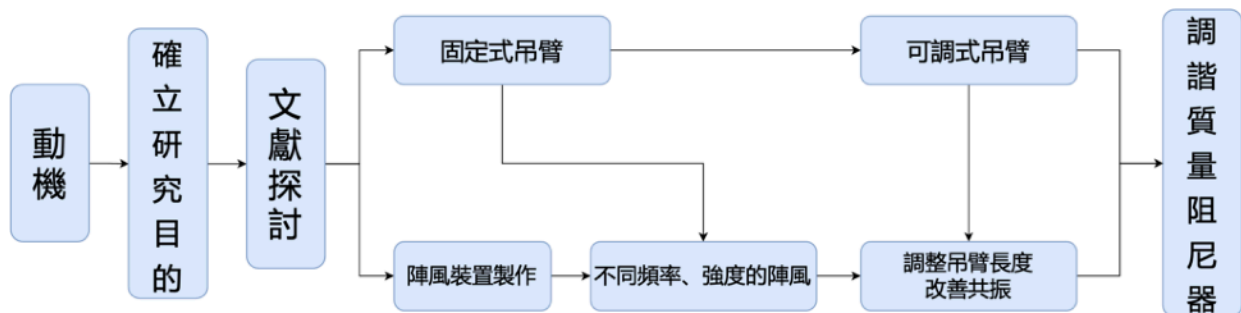
Encountering strong wind is among the conditions for the suspension of the gondola. However, we believe that when a gust of wind not reaching the suspension threshold resonates with the gondola, it will cause the gondola to sway at a large angle and cause greater danger. Therefore, we consulted the measurements of existing cable cars and created a model to explore the impact of wind gusts of different frequencies and speeds on the cable car. We found that even when the wind speed did not reach the suspension threshold, when its frequency was close to that of the cable car, it would cause resonance and induce swings of almost 30 degrees and compare to sustained wind will increase nearly 60 decibels in intensity.

To ameliorate the vibration of the gondola, we designed an adjustable crane boom. However, an adjustable boom has difficulty building and might cause discomfort. Thus, we made a tuned mass damper (TMD) with a weight hanging from the bottom of the gondola. When resonance occurs, we lowered weights using a servo motor, so that the vibration of the gondola is transmitted to the pendulum, effectively slowing it down. The experimental results show that the damper can reduce vibrations by 10dB, and the best sample even shows a vibration reduction of 16dB, reduced swing angle to under 2 degree. We hope to make the system fully automatic in the future so that the gondola may automatically adjust the pendulum length of the damper to suppress potentially dangerous vibrations when the gondola encounters gust.

壹、研究動機

台灣是高山密度非常高的國家，三千公尺以上的高山更是遍佈整個島嶼。而纜車能夠克服複雜地形、對自然環境的破壞也較小的特性十分適合作為高山間運輸、觀光的交通工具。不過纜車容易受到風的影響，常常因此造成危險而停駛。因此我們決定探討陣風對纜車的影響，並嘗試研發裝置抑制振動。

貳、研究流程圖



參、研究目的

本實驗透過自製的纜車及陣風裝置探討纜車在遭遇陣風時可能遭遇到的危險，並嘗試設計出能減緩共振之吊臂及阻尼裝置，探討改善纜車共振之可能性。

實驗分為不同階段進行研究：

一、裝置製作

(一) 車廂設計

(二) 固定式吊臂設計

(三) 伸縮吊臂設計

(四) 滑塊吊臂設計

二、探討陣風頻率對纜車共振之影響

三、探討陣風強度對纜車共振之影響

四、探討改變吊臂長度對改善纜車共振之可行性

五、探討調諧質量阻尼器改善纜車共振之可行性

肆、實驗裝置

一、實驗器材

(一) 纜車車廂

實驗中利用塑膠瓦楞板輕薄、好塑形的特點製作車廂。在纜車形狀上，選擇圓柱體避免方形纜車造成的渦流影響實驗。最終經過若干次的調整，最終版本為直徑 12 公分、高度 12 公分之圓柱體。

(二) 固定式吊臂

固定式吊臂參考真實纜車 (Gondola) 之比例，利用樂高積木製作高度與車廂等高之吊臂探討纜車遭遇陣風時的情形。

(三) 可調式吊臂

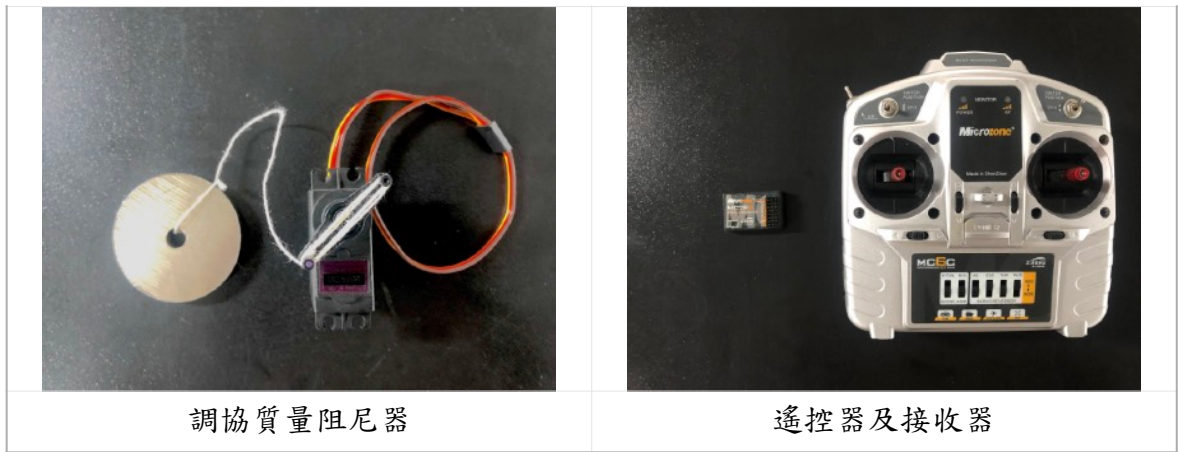
為了探討是否能透過改變吊臂長度改善共振情形，在吊臂上裝上兩組直線推桿及伺服馬達，並連接遙控器。在纜車與陣風共振時，遠端遙控調變吊臂長度破壞共振。

(四) 調諧質量阻尼器

調諧質量阻尼器 (Tuned Mass Damper ; TMD) 是藉由調節質量塊的振動頻率，使結構物將受外力產生的振動傳至質量塊，進而消滅振動。此種阻尼器的好處是價格較為低廉且不需大幅的改變現存結構即可安裝。現已大量被利用在高樓結構中抑制結構振動，例如國內的 101 大樓中的阻尼器即為被動單擺式調諧質量阻尼器。

實驗中的調諧質量阻尼器安裝於纜車車廂底部，由伺服馬達、棉繩及法碼組成，伺服馬達連接至遙控器。當纜車與陣風共振時可利用遙控器遠端遙控伺服馬達將法碼降下將振動傳至法碼，進而抑制纜車振動。

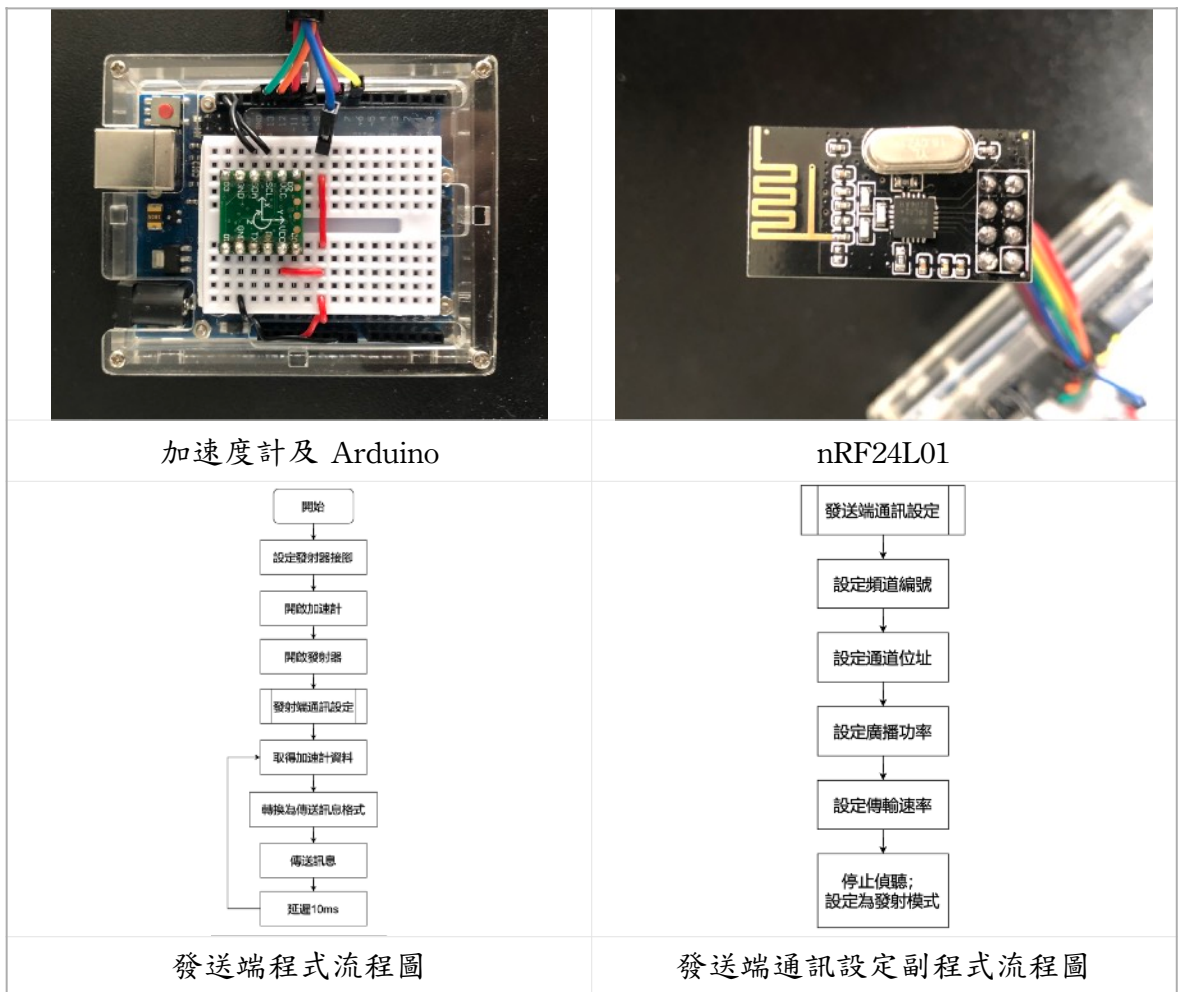




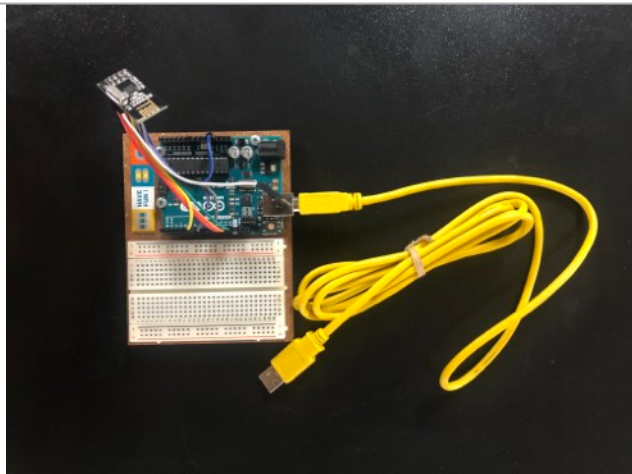
(五) 數據採集裝置

數據採集裝置分為發送端及接收端，利用無線傳輸避免傳輸線影響纜車擺盪。

發送端包含：JY901 加速度計（取得纜車轉動角度）、Arduino及 nRF24L01 無線收發器模組，利用加速度計及 Arduino 記錄纜車擺盪之動態後利用 nRF24L01 無線收發器模組將數據無限傳送至接收端（如下圖）。



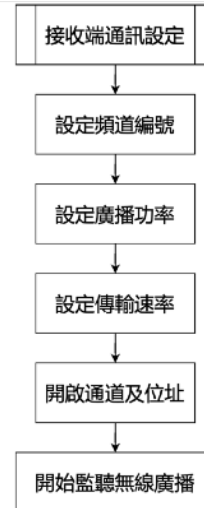
接收端包含：Arduino及 nRF24L01 無線收發器模組（如下圖），在 nRF24L01 接收到由發送端發送的数据後，透過序列通訊傳送至電腦中。



接收端



接收端程式流程圖



接收端通訊設定副程式流程圖

二、實驗架設

實驗利用鋁擠型製作框架，在中間拉上鋼纜，並利用纜繩張力調節器固定纜繩張力（如下圖）。

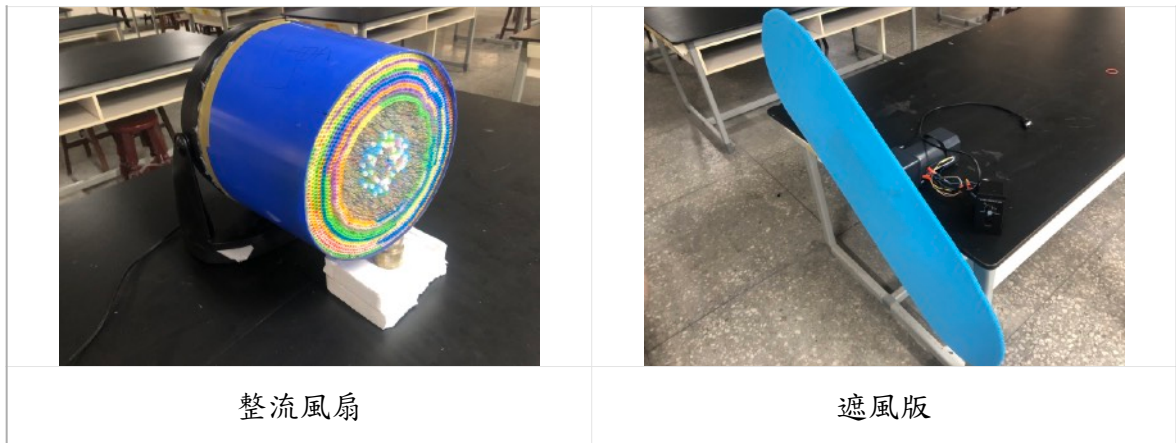


裝置圖

另外，我們在距離纜車 80 公分處利用電風扇吹出不同風速的風，風扇前端利用吸管製作整流段使氣流穩定。在風扇旁，利用減速馬達及塑膠瓦楞板製作陣風裝置，陣風頻率可由減速馬達之調速器進行調控（如下圖）。



陣風裝置



三、數據分析

(一) 擺盪角度

將加速計紀錄的轉度角度隨時間的變化製成圖表。

(二) 快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT)

傅立葉轉換是一種將訊號（函數或數據）由時域轉換至頻域的積分轉換。透過傅立葉轉換，我們能夠清楚地看到訊號中不同頻率的強度。在我們的實驗中，我們能清楚地透過傅立葉轉換後的圖表判斷纜車的震盪頻率及震盪強度。

(三) 短時距傅立葉轉換 (Short-Time Fourier Transform, STFT)

短時距傅立葉轉換是將時域訊號分為非常多較短的時距後進行傅立葉轉換。經過短時距傅立葉轉換後，能同時呈現時域與頻域，即能得知個頻率強度隨時間的變化。

伍、理論公式推導

一、單擺的阻尼

假設有一質量連接一質量可忽略的線，組成單擺。其週期 T 可被描述為：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

其中， L 是擺長、 g 是重力加速度 (9.8 m/s^2)。若忽略能量的損失，此單擺將永遠的擺下去。

不過，在真實世界中，能量會因摩擦損失，因此我們將阻力加入考慮。阻力主要來自擺垂的空氣阻力，而作用於線上的阻力則可忽略。考慮擺垂為剛體且於流體中運動，則所受阻力可表示為：

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (2)$$

C_D 為阻力係數、 ρ 為流體密度、 A 為擺垂截面積、 v 則為擺垂速度。阻力係數與擺垂形狀及雷諾數 Re 有關：

$$Re = \frac{\rho d |v|}{\mu} \quad (3)$$

其中 d 為擺錘的直徑而 μ 為流體黏滯係數。

當雷諾數較小時，阻尼係數可以簡化為與雷諾數呈反比關係，即為阻力和速度成正比。

而在物體以小角度擺動時，雷諾數是較小的，因此我們可以得到擺錘受到的阻力 F_b 正比於速度：

$$F_b = -c v \quad (4)$$

其中 c 為常數，與擺垂的形狀及截面積有關。

接著我們計算作用於線上的阻力。考慮線上一點 dr ，位置距離支點 r ，以速度 v 運動，則作用於此點的阻力 dF_s 正比於此點的截面積及運動方向 Ddr ，其中 D 為線的直徑。而當此點以小速度移動時，阻力與移動速度成正比。因此，我們可以得到：

$$dF_s = k(Ddr)v \quad (5)$$

其中 k 為常數。

但因為 $v = r\dot{\theta}$ ，其中 $\dot{\theta}$ 是 θ 的時間導數，因此我們可以獲得：

$$dF_s = kD\dot{\theta}rdr \quad (6)$$

由於該阻力垂直於弦，因此它關於支撐點的扭矩為：

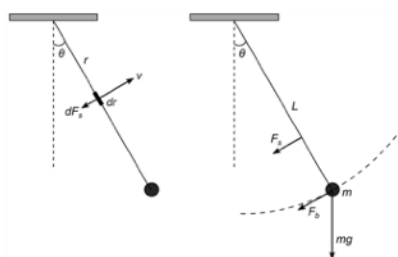
$$d\tau_s = r dF_s = kD\dot{\theta}r^2 dr \quad (7)$$

可得該方程在弦長 L 上的積分得到弦上的總扭矩為：

$$\tau_s = kD\dot{\theta} \int_0^L r^2 dr = \frac{kL^3 D}{3} \dot{\theta} \quad (8)$$

經過上述對於阻尼的計算，我們將其用於下是方程式中解得運動方程式：

下圖顯示有一擺錘質量 m 、擺長 L 的單擺，弦上總阻力為 F_s 、擺垂上的總阻力則表示為 F_b 。



其總力矩可以寫為：

$$\sum \tau = I\alpha \quad (9)$$

其中所有點的力矩都是根據支點計算， α 為單擺關於此點的角加速度， $I = mL^2$ 則是系統轉動慣量（弦的質量可忽略）。因此我們可將方程式化為：

$$mL^2\ddot{\theta} = -mgL\sin\theta - \tau_s - F_bL \quad (10)$$

其中 F_bL 為空氣阻力作用在擺錘上的力矩，由第4式我們可以得到：

$$F_b = cv = cL\dot{\theta} \quad (11)$$

因此，我們可以將第10式化為：

$$\ddot{\theta} + \kappa\dot{\theta} + \frac{g}{L}\sin\theta = 0 \quad (12)$$

其中，阻尼常數定義為 κ ：

$$\kappa = \frac{kLD}{3m} + \frac{c}{m} \quad (13)$$

其中右式第一項為作用在弦上的阻尼，而第二項則為作用在擺錘上的能量。最後，當擺幅不大時， $\sin\theta \approx \theta$ ，可將12式化為：

$$\ddot{\theta} + \kappa\dot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0 \quad (14)$$

上式為齊次線性二階微分方程，我們首先建構出輔助方程：

$$q^2 + \kappa q + \frac{g}{L} = 0 \quad (15)$$

而在空氣阻力極小時可以解得 q 為：

$$q = \frac{-\kappa \pm i\sqrt{\frac{4g}{L} - \kappa^2}}{2} \quad (16)$$

因此，第14式的通解為：

$$\theta = e^{-\kappa t/2}[A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t)] \quad (17)$$

其中，常數 A 與 B 是由初始狀況決定。

而角頻率 ω 可由第15式求得：

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L} - \frac{\kappa^2}{4}} \quad (18)$$

帶入初始條件 θ 在 $t=0$ 時為 θ_0 ，且 $\dot{\theta} = 0$

$$\theta = \theta_0 e^{-\kappa t/2} [\cos(\omega t) + \frac{\kappa}{2\omega} \sin(\omega t)] \quad (19)$$

因此，振幅會對時間呈指數下降，我們可以用第20式表達：

$$\theta = \theta_0 e^{-\kappa t/2} \quad (20)$$

由上述的公式可得到當單擺振盪時，會受空氣阻力而振幅呈指數下降。實驗中我們調整纜車吊臂及阻尼器使纜車擺盪頻率改變後，纜車的振幅即會以指數下降的形式漸漸回歸平穩。

陸、研究成果

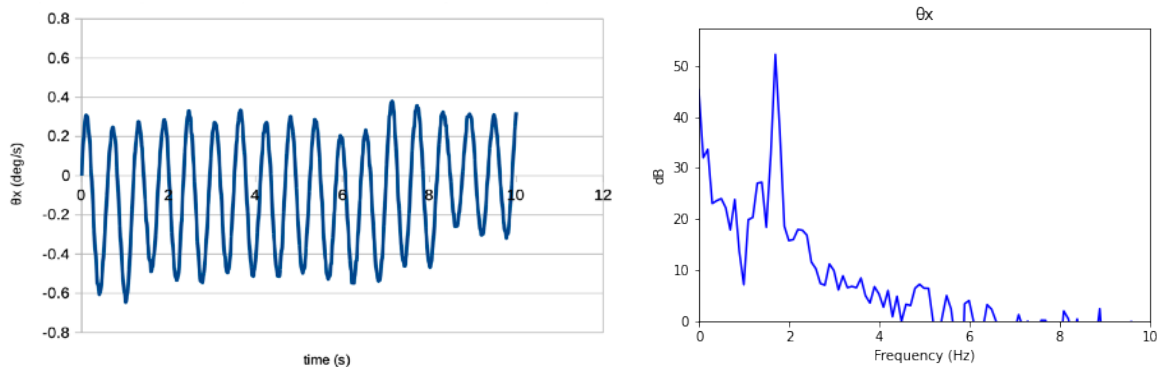
實驗一、不同陣風頻率對纜車之影響

經過資料查詢，我們發現大多的營運公司將纜車以「風速」設定遭遇陣風時的停駛條件。以國內的貓空纜車為例，其停駛標準為：瞬間風速達 16 公尺/秒（約為 7 級風）持續三秒，或瞬間風速達 18 公尺/秒。其設定的標準是依據實驗得出當纜車受到達停駛條件的陣風時會造成纜車傾斜，而這個傾斜可能造成乘客不適甚至造成兩台纜車互相碰撞。

不過，上述實驗是以「持續風」進行，也就是風速沒有變化。但在自然環境中，陣風並不是以不變的風似吹拂的，相反的，風速會隨時間變化。因此我們設計了以下幾個實驗探討陣風的頻率對纜車的影響。

（一）持續風

首先，我們利用風扇吹出風速 4公尺 / 秒 的持續風，探討持續風對纜車的影響。



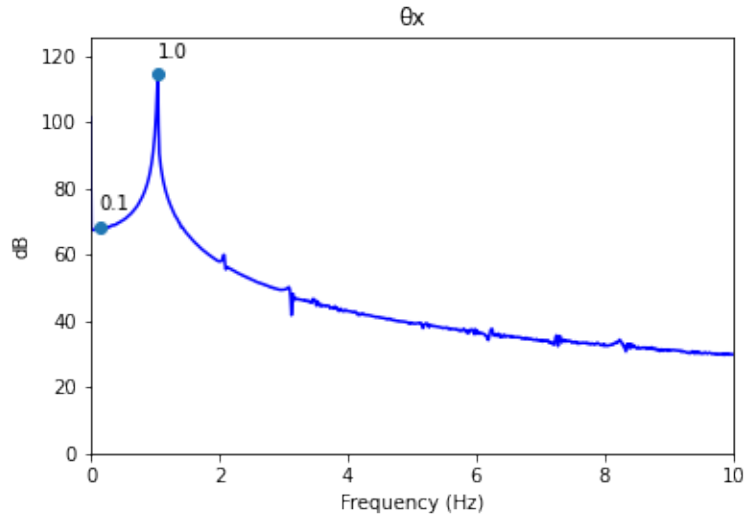
實驗結果：纜車只有非常微小的晃動，擺角不到 1 度。

接著，我們嘗試利用不同頻率的陣風吹拂纜車，探討纜車所受到的影響。

（二）不同頻率之陣風

1. 纜車擺盪頻率

為了得知纜車的振動頻率，我們將纜車拉至 30 度釋放，使其自由擺盪。實驗後將數據進行傅立葉轉換後得知纜車振動頻率（如下圖）。

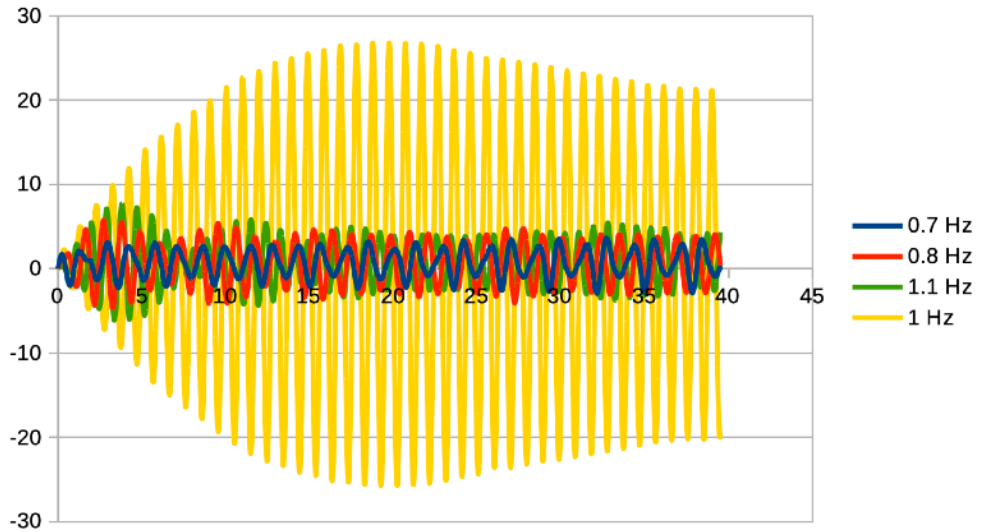


實驗結果得知纜車振動頻率為 1Hz。

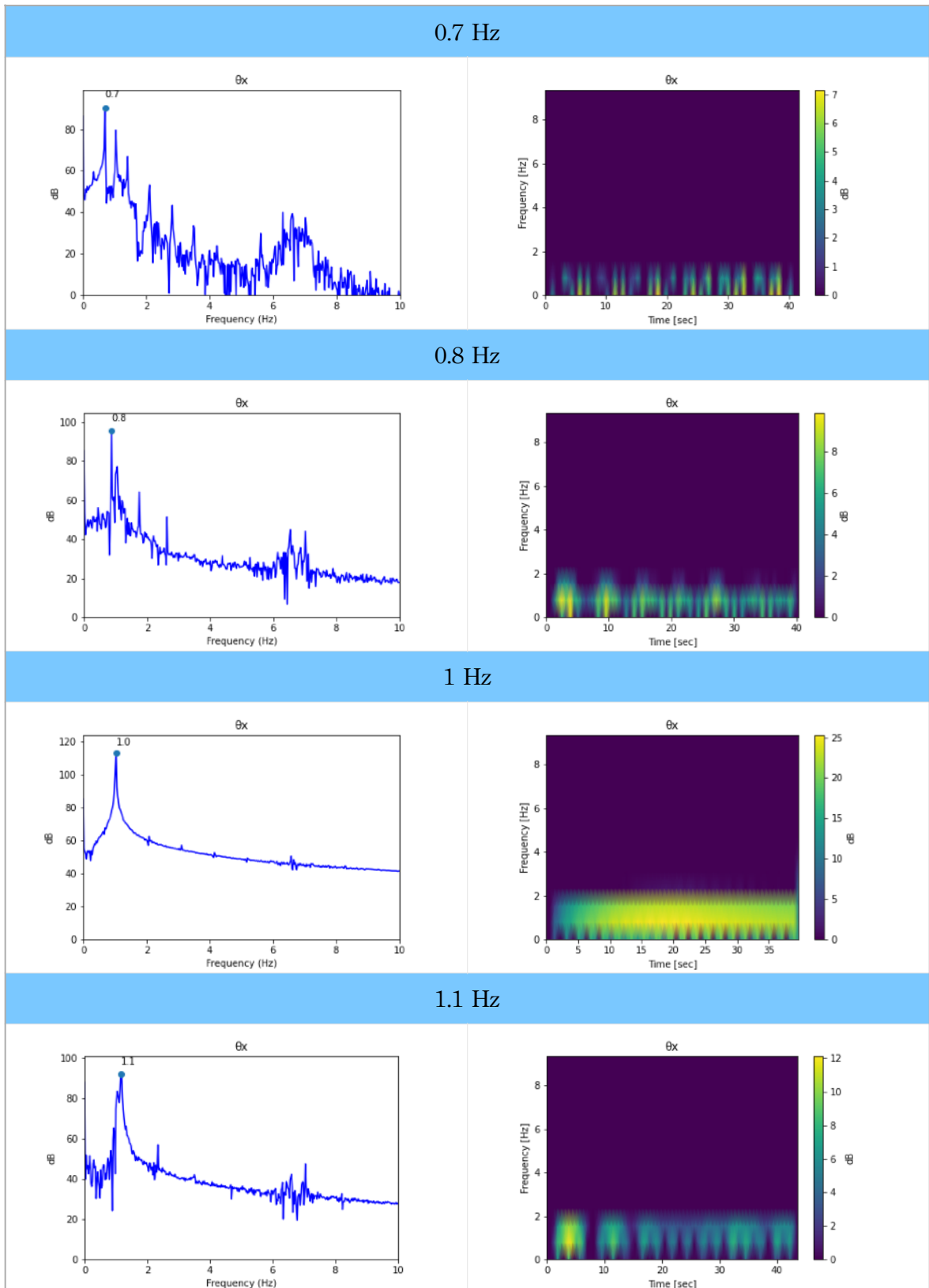
2. 改變陣風頻率

接著我們利用減速馬達及以塑膠瓦楞板製作的遮風板製造固定頻率的陣風，並在減速馬達上安裝轉速控制器使其穩定帶動遮風板，分別製造頻率為 0.7Hz、0.8Hz、1Hz、1.1Hz 的陣風（風速 4公尺 / 秒），探討不同頻率的陣風造成的影響。

(1) 擺盪角度圖表



(2) 快速傅立葉轉換及短時距傅立葉轉換圖表



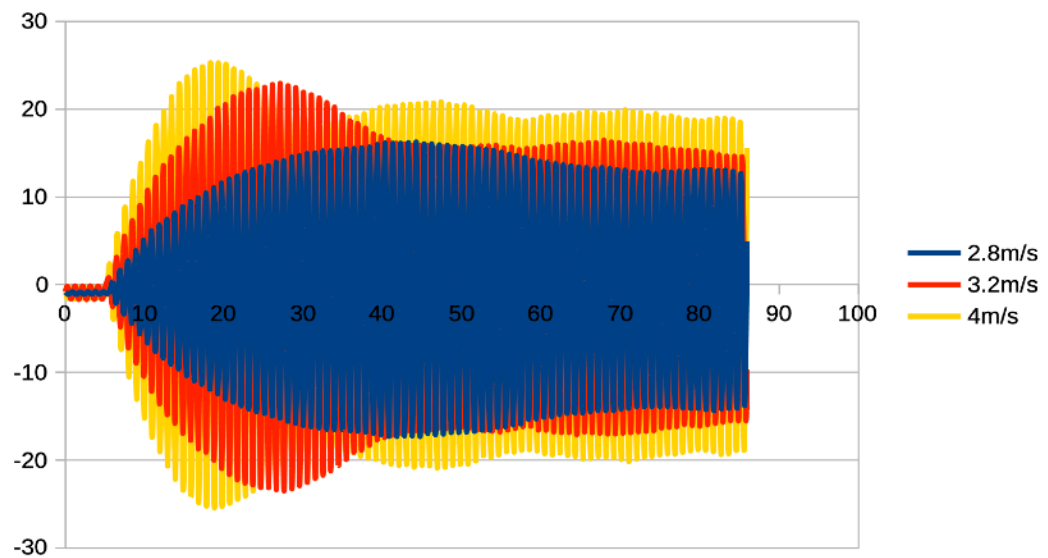
實驗結果：當陣風頻率與纜車振動頻率接近時會造成較大的擺動角度。而當纜車與陣風頻率相同時兩者會產生共振，造成接近 30 度的擺角。經過傅立葉轉換後，我們也能發現發生共振時相較只有受持續風吹拂會增加 60 分貝的強度。相較於同風

速的持續風造成的微幅晃動，共振造成的晃動角度及強度十分危險，除了乘客的不適外，非常有可能發生車廂與其他車廂甚至與支柱互相碰撞。

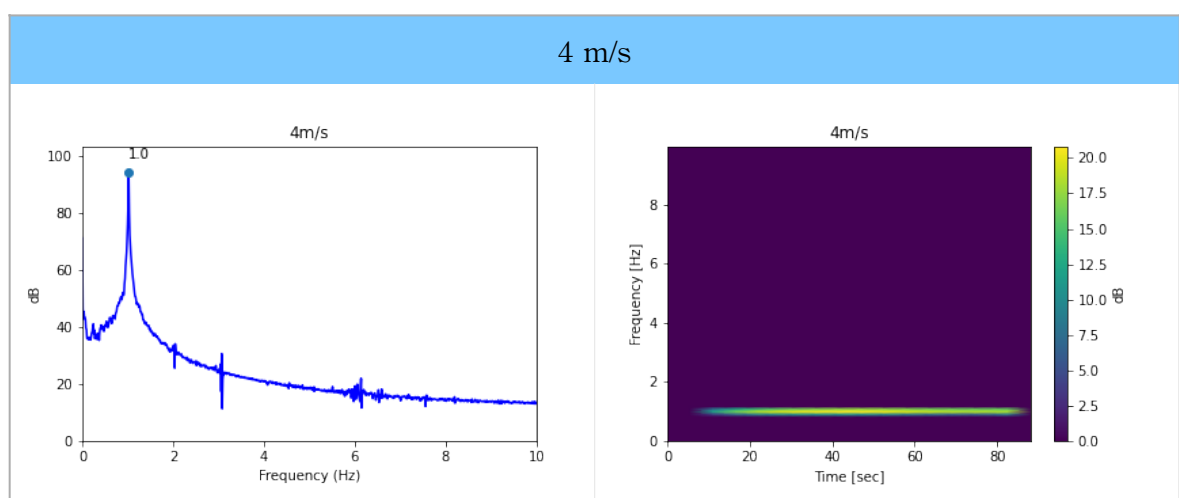
(三) 不同強度之陣風

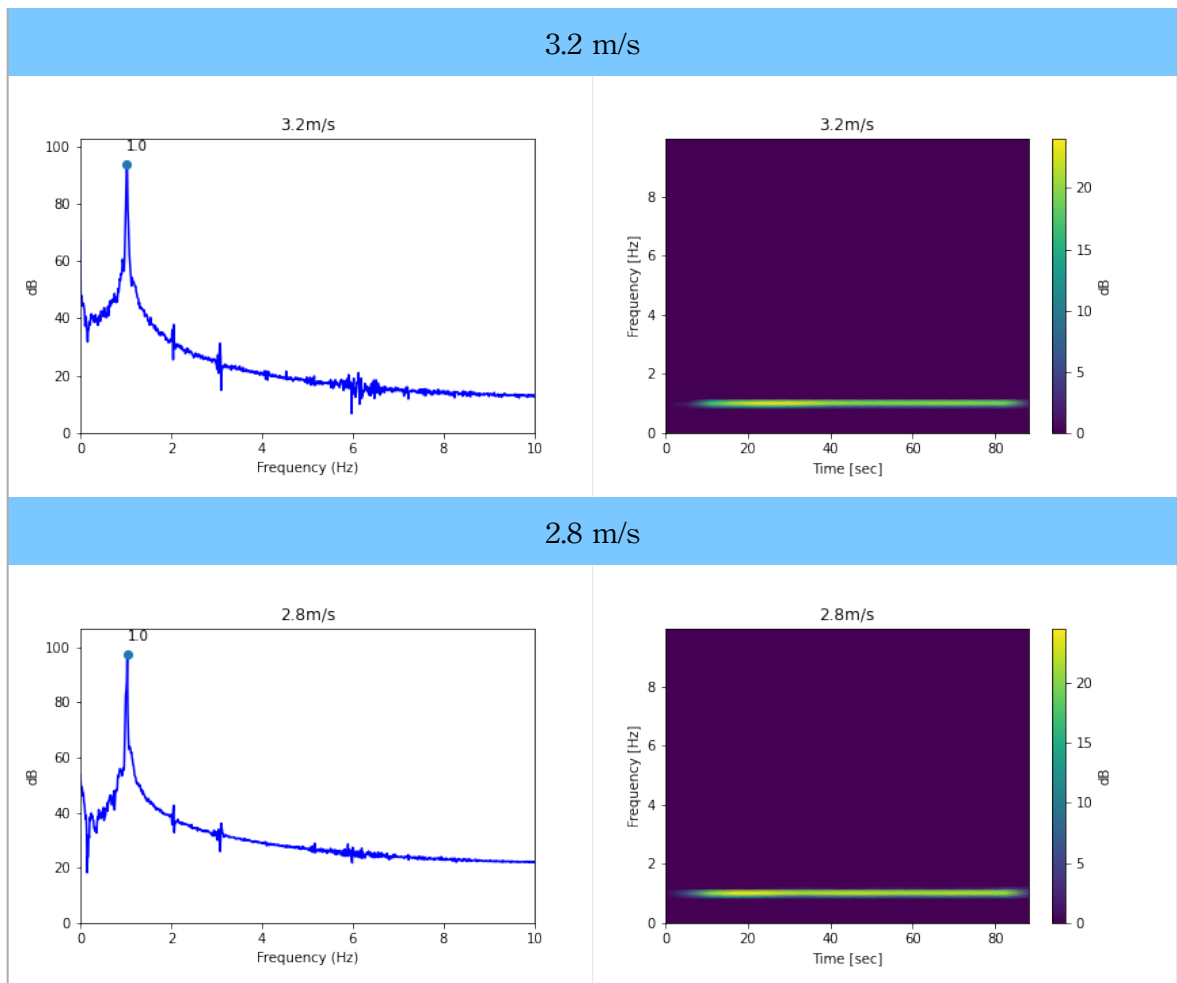
從上面的實驗我們可以得知若陣風頻率接近，纜車會產生共振並產生大幅度地擺動。我們接著嘗試改變陣風強度，探討同一頻率下對纜車造成的影響。實驗利用風扇吹出三種不同強度的陣風，分別是 4 公尺 / 秒、3.2 公尺 / 秒、2.8 公尺 / 秒，三種陣風皆以頻率 1Hz 之陣風吹拂，探討不同強度下的陣風對纜車的影響。

(1) 擺盪角度圖表



(2) 快速傅立葉轉換及短時距傅立葉轉換圖表





由圖表我們可以看到不同的風速下，當發生共振時皆會造成大角度的擺動。風速為 2.8公尺 / 秒的組別也有超過 15度的擺動角度，相較只受持續風吹拂的組別差異明顯造成了大角度的擺動。

實驗二、改變吊臂長度對改善纜車共振

從以上的實驗中我們得知就算是微弱的陣風，一但纜車與陣風共振，就會造成大幅度的振動，進而造成危險。因此我們設計出可調式吊臂，在纜車達到共振時透過改變吊臂的長度減緩振動。

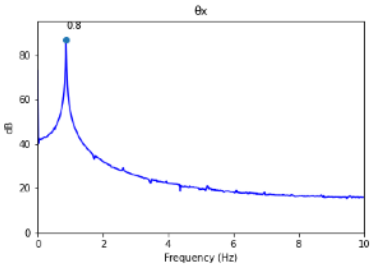
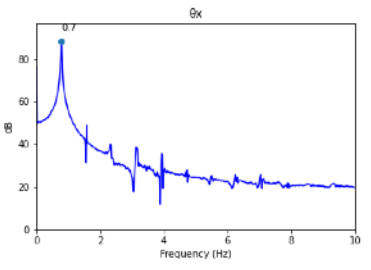
1. 實驗器材

我們將伺服馬達連接直線推桿，並將伺服馬達連接無線遙控器，當纜車與陣風發生共振時，透過遙控改變吊臂長度，抑制纜車擺盪。

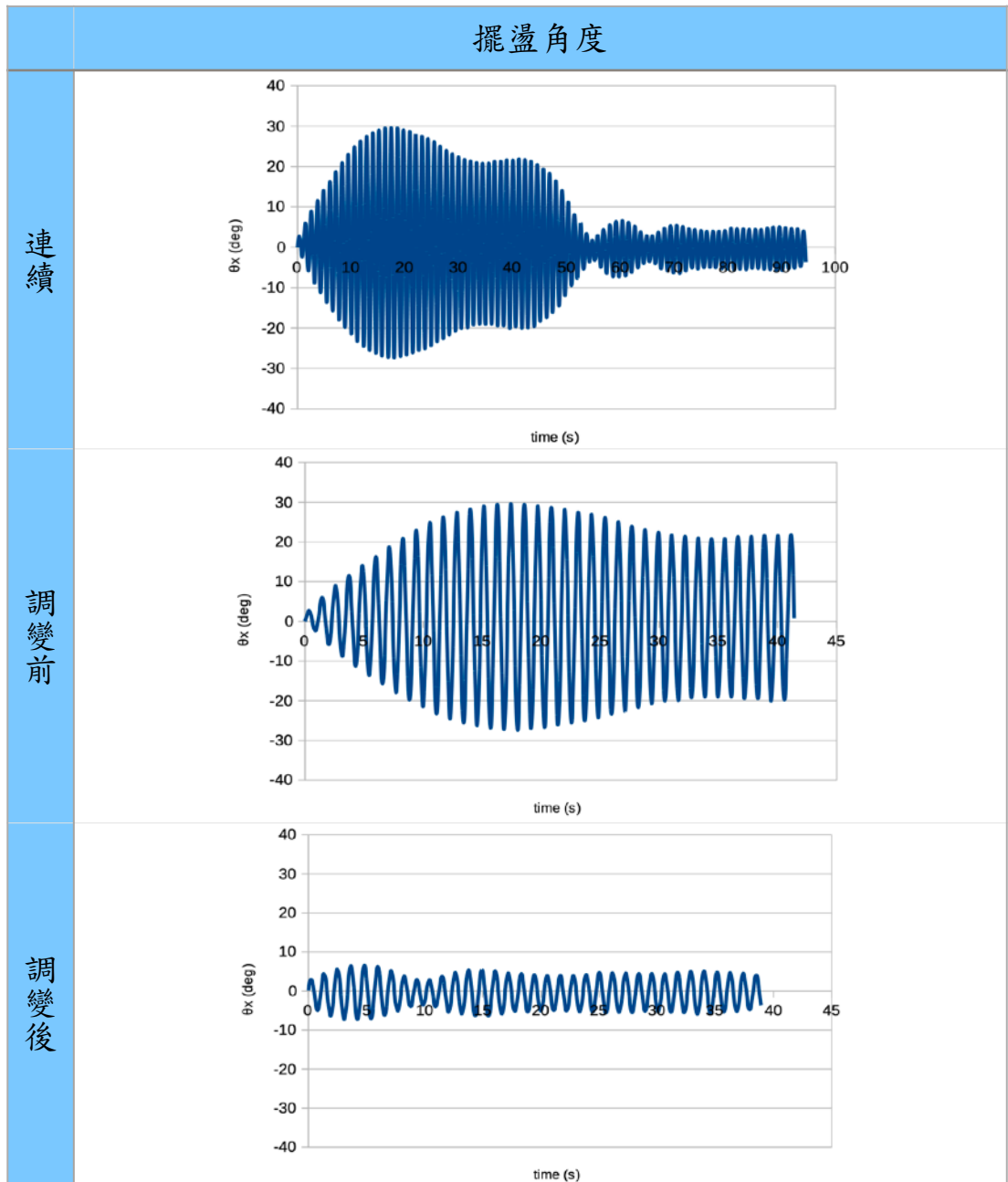


2. 實驗結果

(1) 不同長度之吊臂共振頻率測試

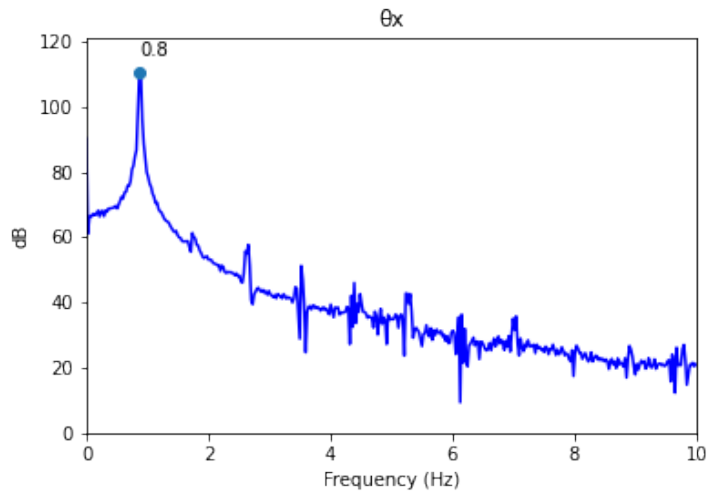
吊臂長度 (Hz)	28.6	36.6
擺長 (cm) (質心到懸吊點的長度)	21.5	26.4
靜止釋放頻譜圖		
擺盪頻率 (Hz)	0.8	0.7

(2) 將吊臂伸長改善擺盪

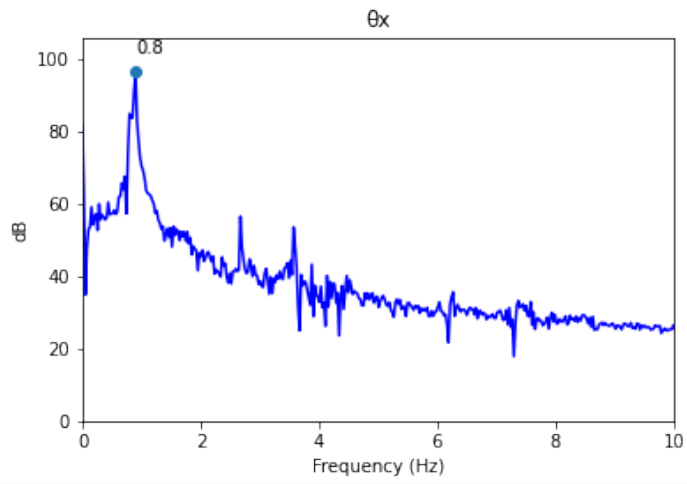


快速傅立葉轉換圖表

調變前

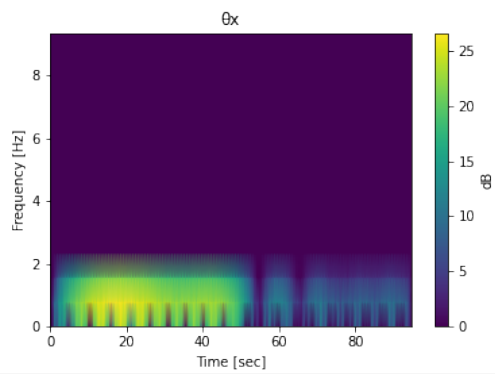


調變後



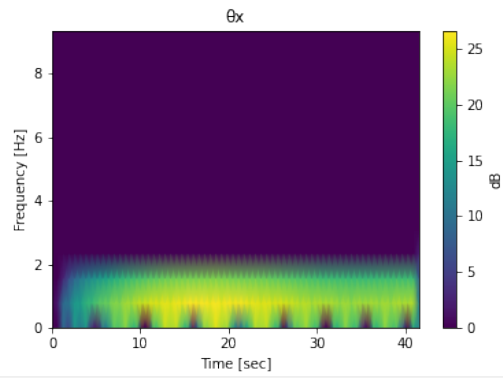
短時距傅立葉轉換圖表

連續

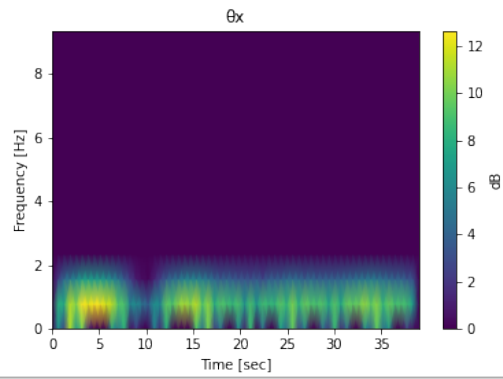


短時距傅立葉轉換圖表

調變前



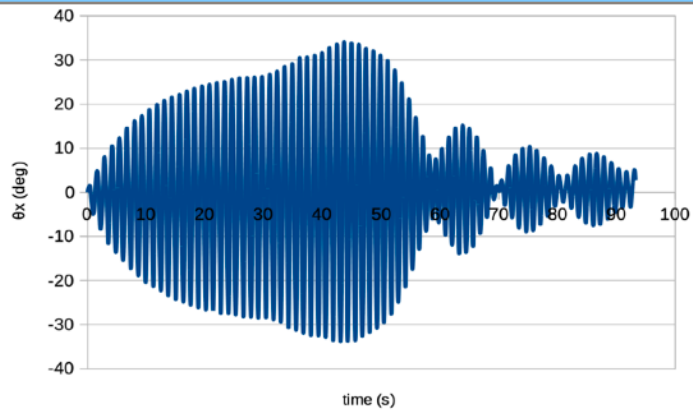
調變後



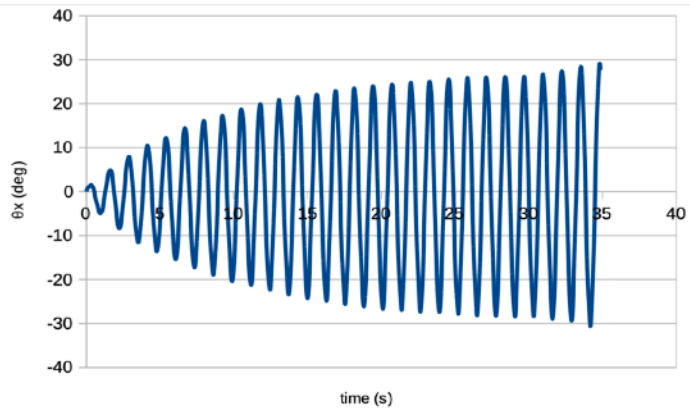
(3) 將吊臂縮短改善擺盪

擺盪角度

連續

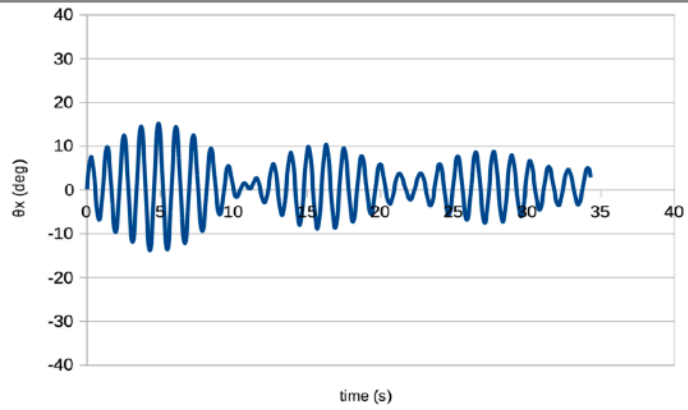


調變前



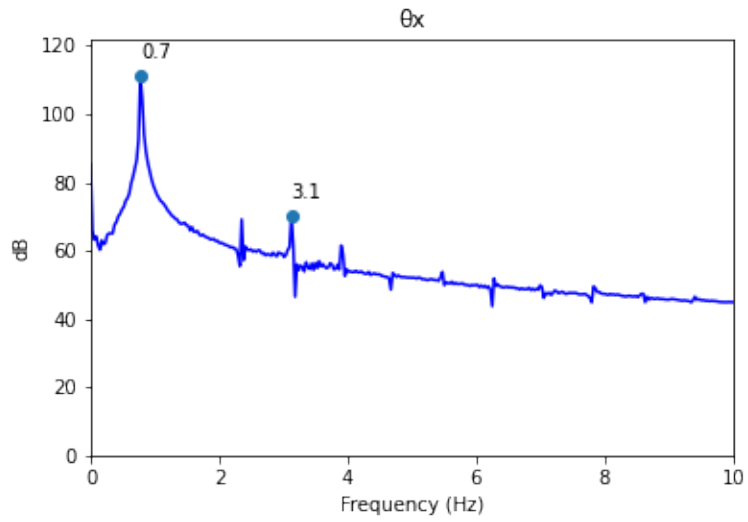
擺盪角度

調變後

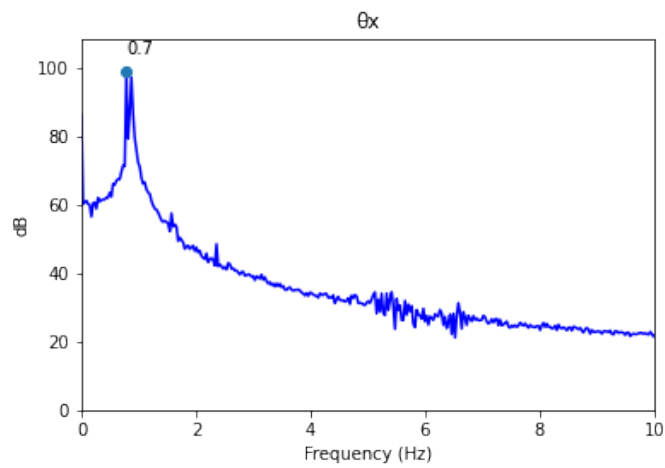


快速傅立葉轉換圖表

調變前

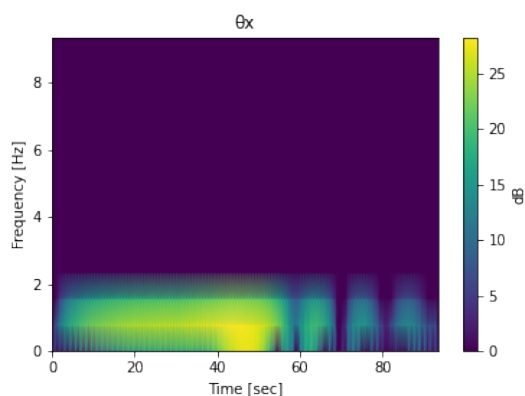


調變後

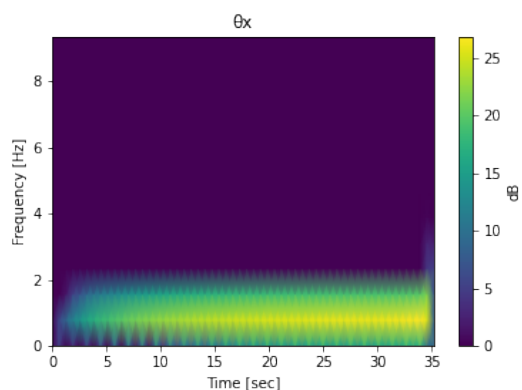


短時距傅立葉轉換圖表

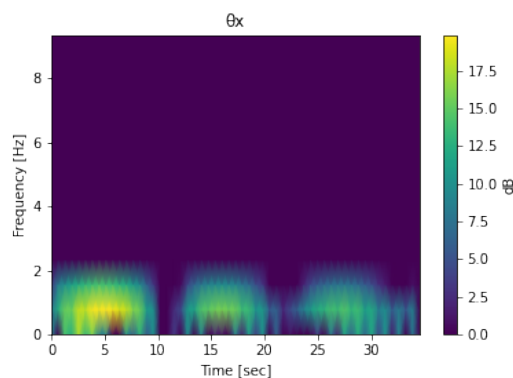
連續



調變前



調變後



實驗結果：

從實驗中我們發現伸長及縮短吊臂都能有效的抑制纜車的振動，且抑制效果皆超過 30度。經過傅立葉轉換後也能看到抑制的效果超過了 10dB。我們認為抑制是由於質心位置的改變，造成纜車振動頻率改變，使纜車不與當下陣風共振，進而達到減震的效果。

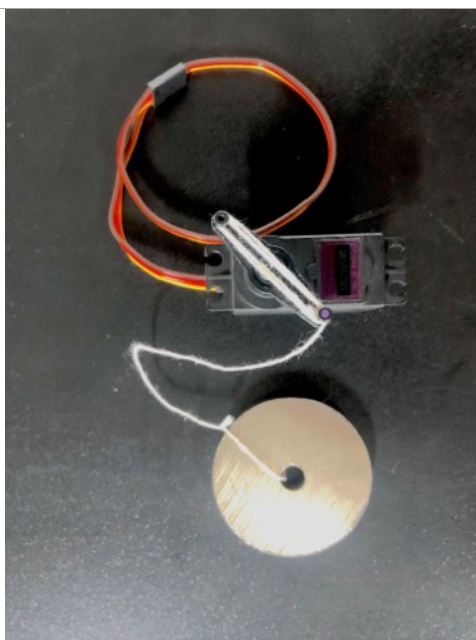
不過，可調式吊臂是藉由伸長吊臂抑制共振，在應用上可能造成乘客不適及纜車結構上的不穩定，且需大幅的調整現有纜車的結構。因此，我們嘗試製作調諧質量阻尼器進行振盪的抑制。

實驗三、透過調諧質量阻尼器改善纜車共振

接續上一實驗，我們在纜車底部懸吊一個質量大約為纜車質量二分之一之法碼（100 公克），法碼透過棉繩連接至裝置於車廂中的伺服馬達中。將伺服馬達連接至遙控器後，在纜車與陣風發生共振產生大角度擺盪時將法碼放下，抑制纜車振動。



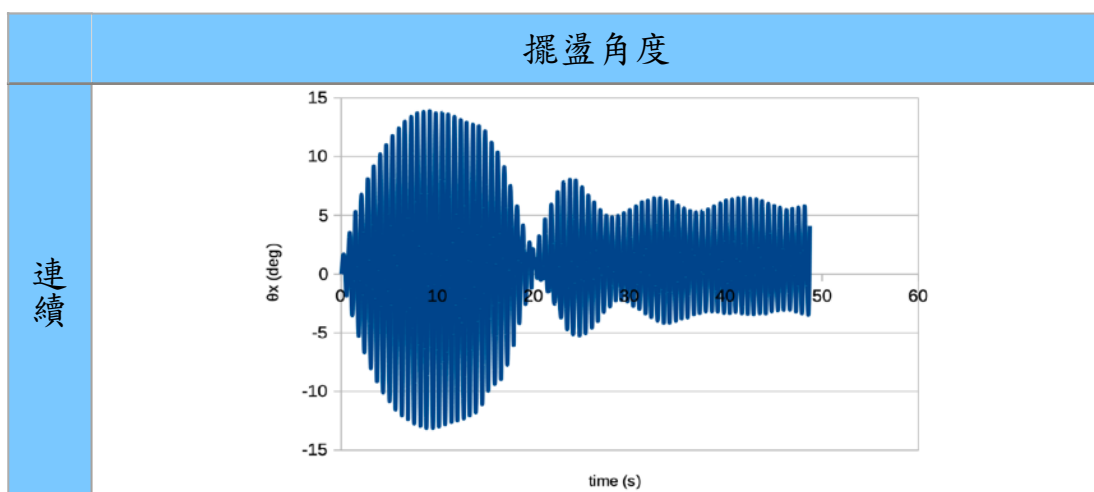
裝有阻尼器的纜車



伺服馬達及法碼

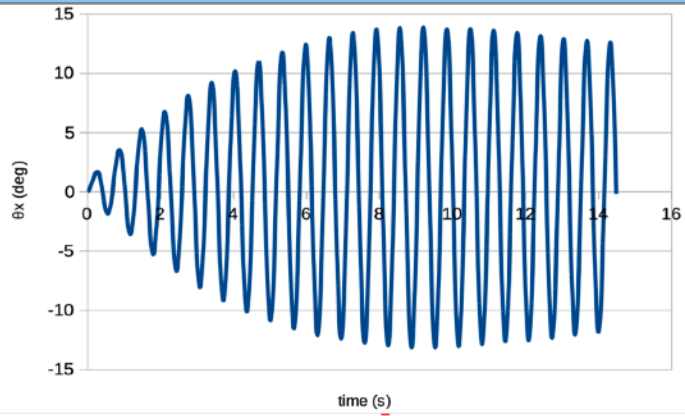
實驗中，我們將伸長量分為三個長度進行實驗。分別是纜車車廂高度的 0.5 倍、1 倍、2 倍（6 公分、12 公分、24 公分）進行實驗。

1. 伸長量為 0.5 倍 車廂高度

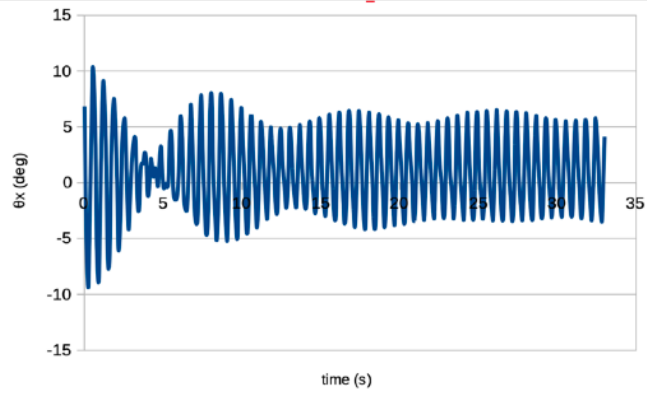


擺盪角度

調變前

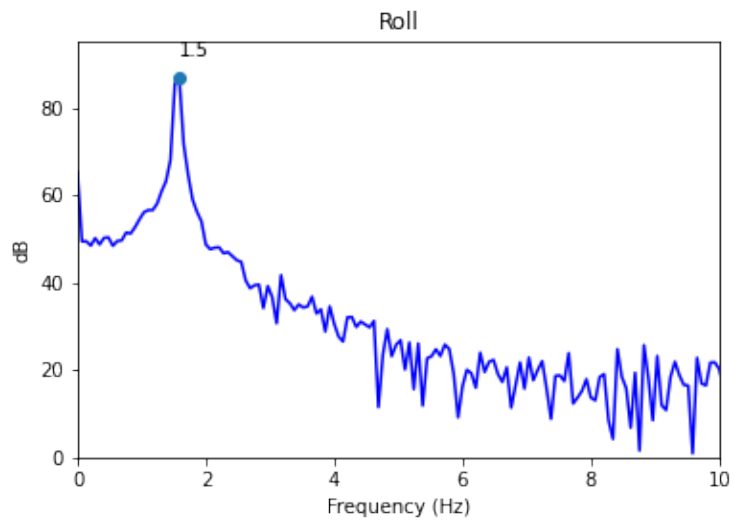


調變後



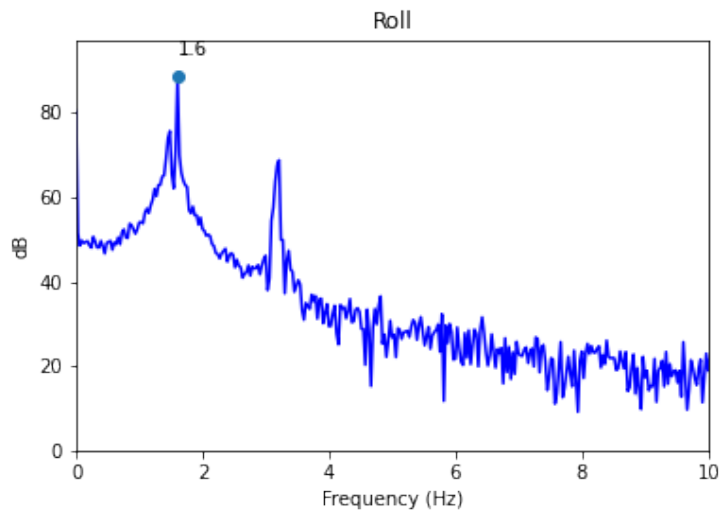
快速傅立葉轉換圖表

調變前



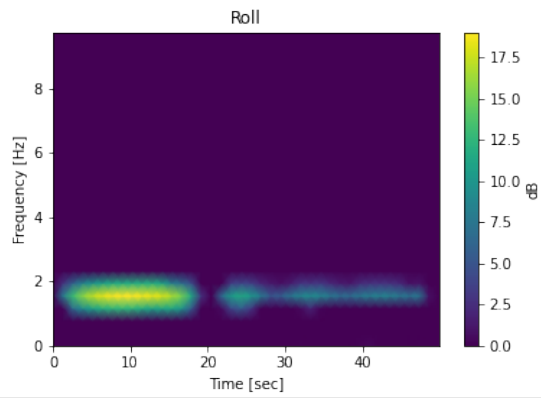
快速傅立葉轉換圖表

調變後

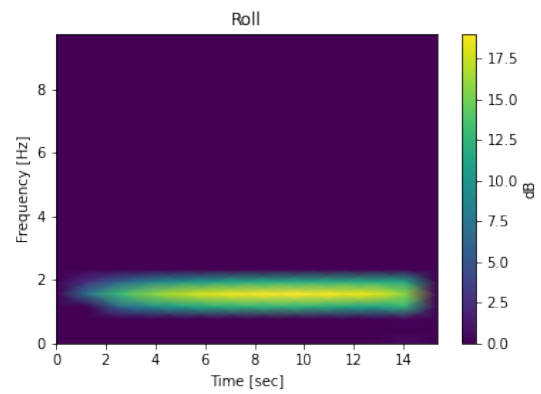


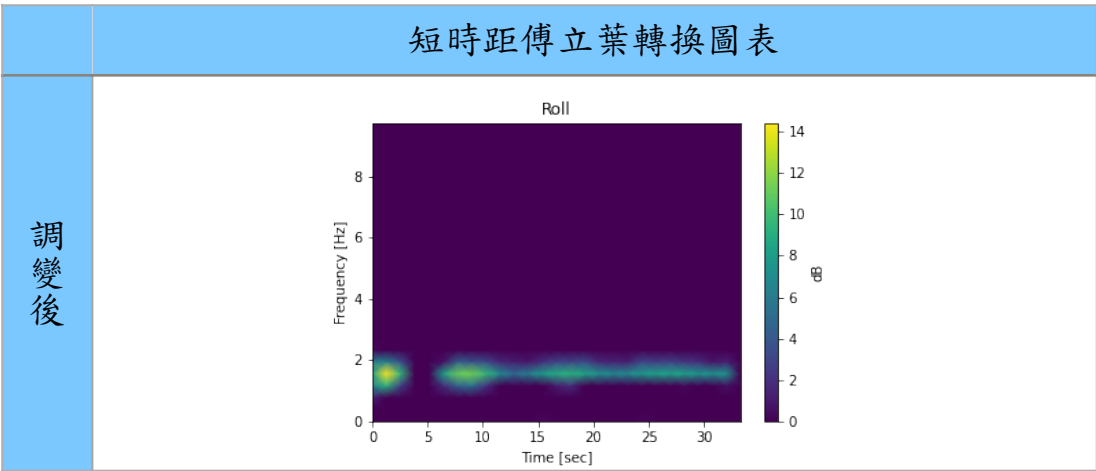
短時距傅立葉轉換圖表

連續

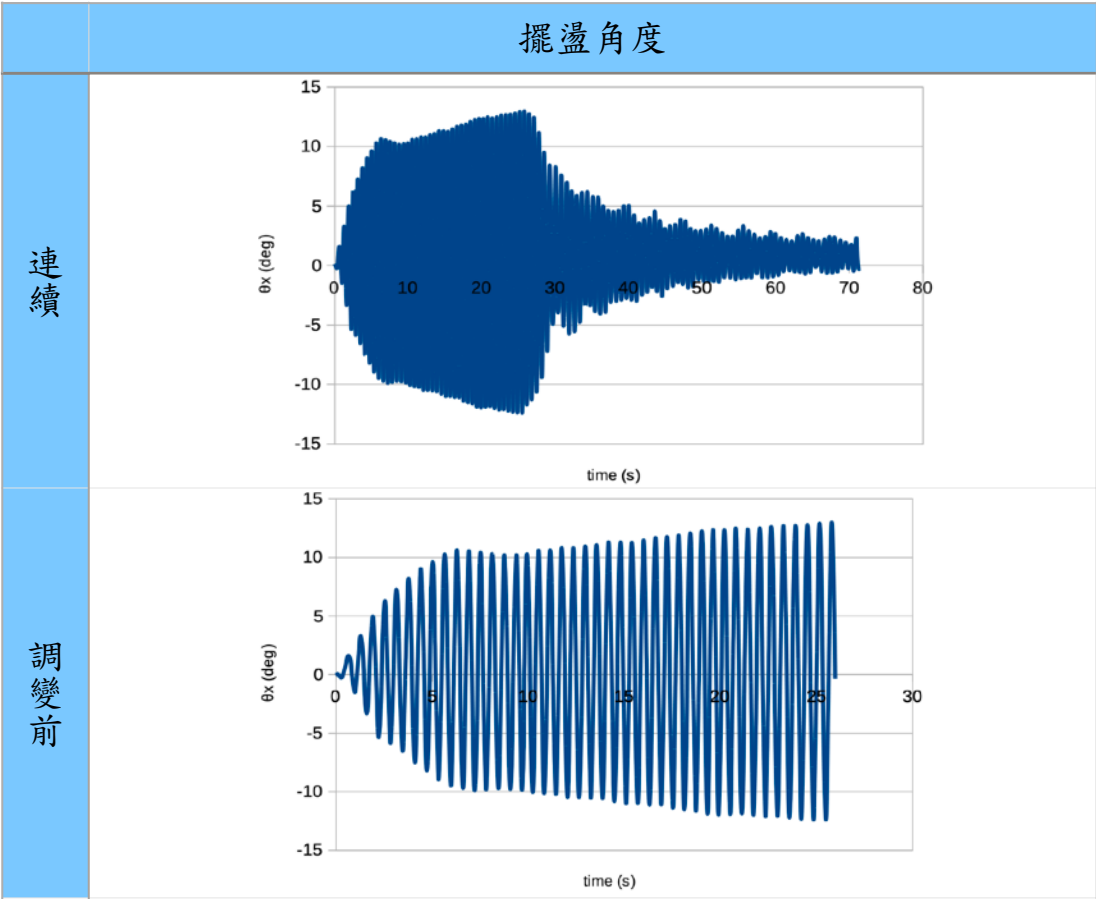


調變前



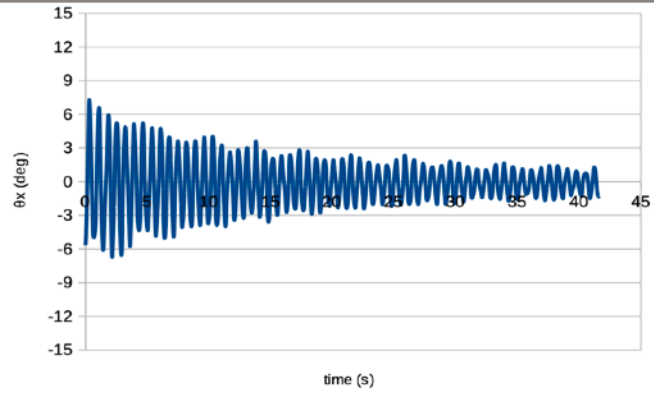


2. 伸長量為 1倍 車廂高度



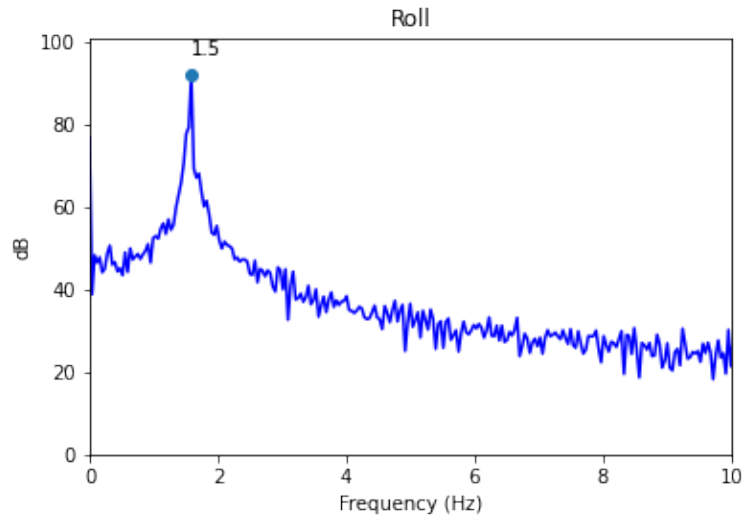
擺盪角度

調變後

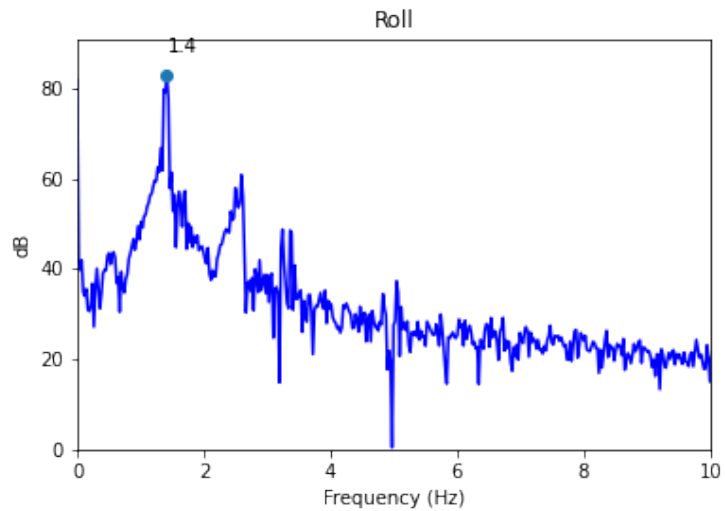


快速傅立葉轉換圖表

調變前

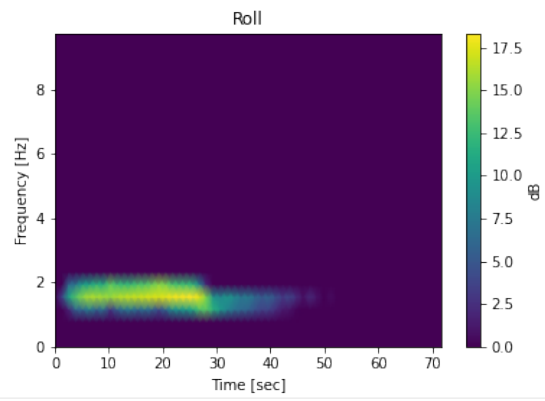


調變後

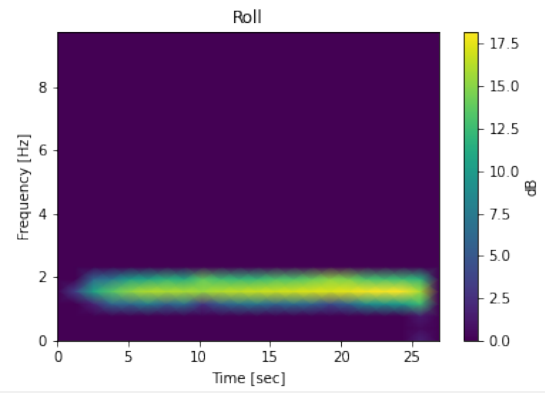


短時距傅立葉轉換圖表

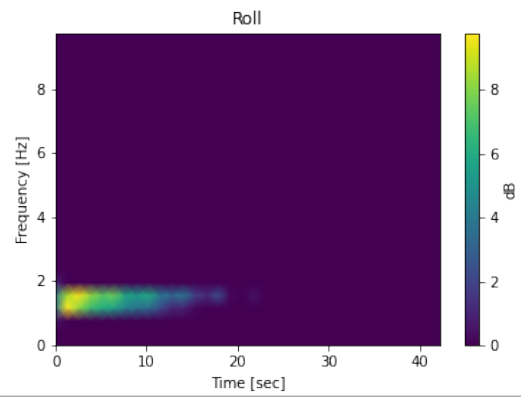
連續



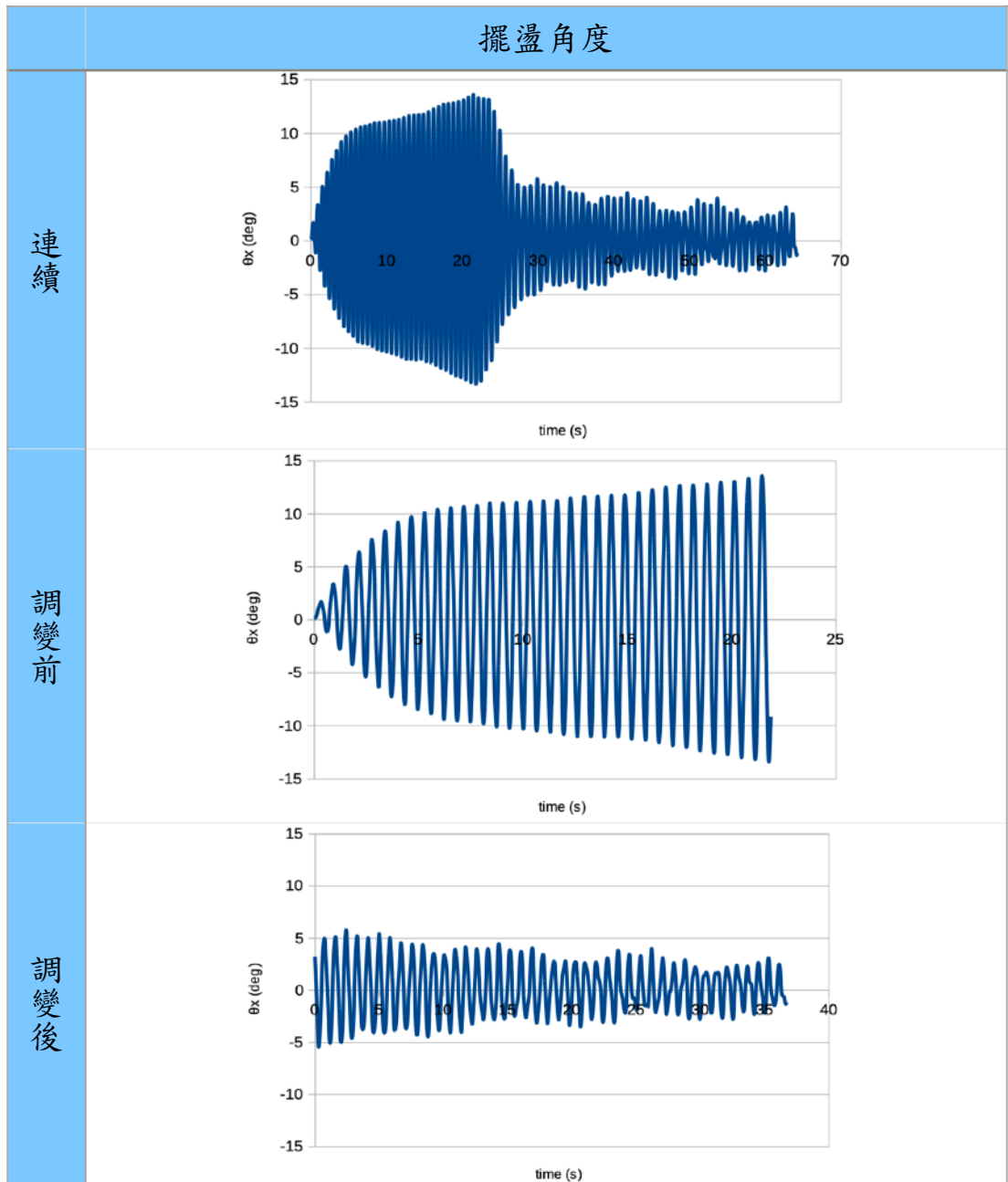
調變前



調變後

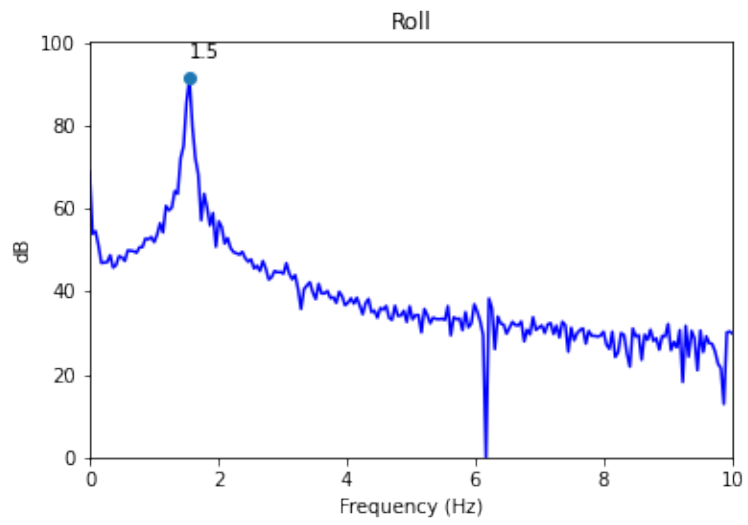


3. 伸長量為 2倍 車廂高度

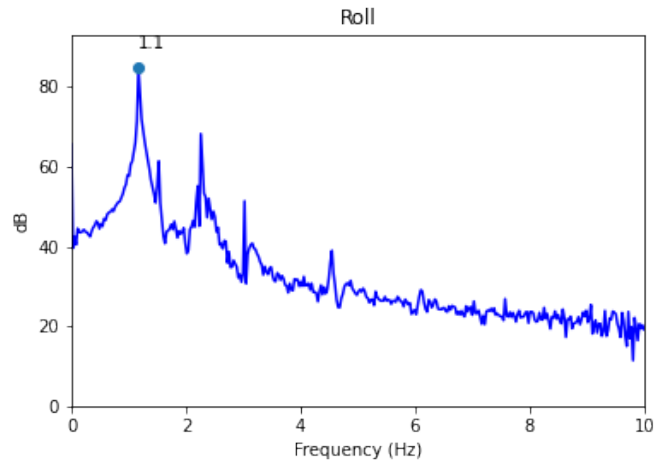


快速傅立葉轉換圖表

調變前

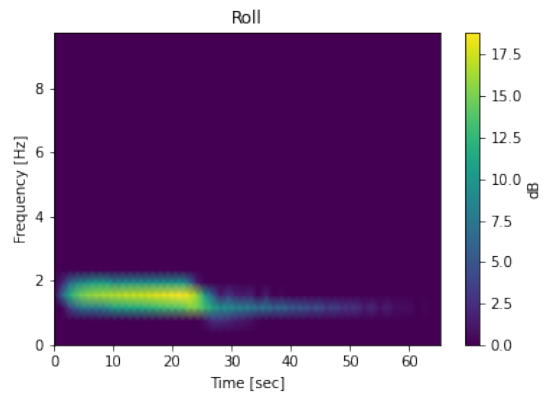


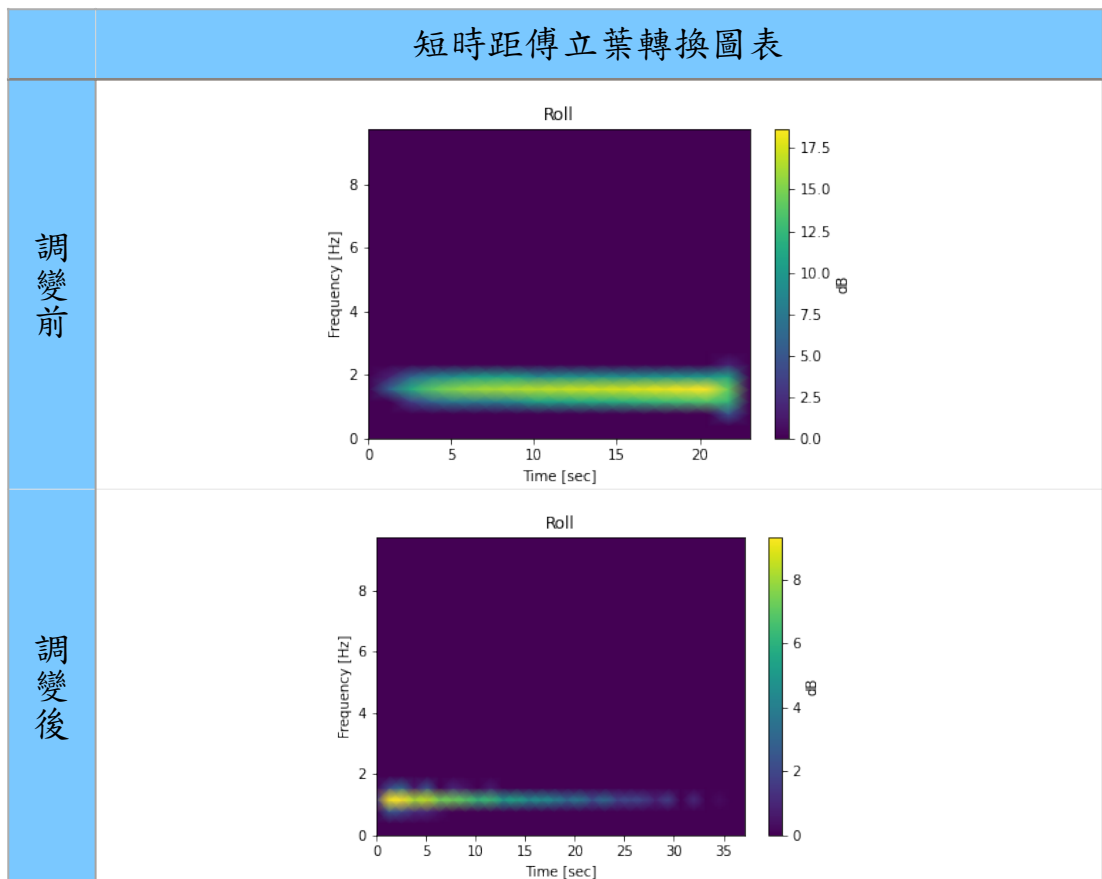
調變後



短時距傅立葉轉換圖表

連續





由實驗我們能發現三組抑制纜車振動的效果都相當明顯，其中又以伸長量為一倍車廂高度的組別效果最為顯著，在放下法碼後只有大約 3 度的微小晃動，由短時距傅立葉轉換後能看到原本約為 17dB 的振動強度在調變後只剩非常微小的強度。

另外，我們觀察到在調變後會造成不同頻率產生振動，我們認為這是在調變後纜車將能量分散為不同頻率的振動，進而使振動強度下降

柒、討論

根據參考文獻^[7]，我們可以計算出調諧質量阻尼去需要如何調整。

我們首先考慮一具有阻尼的單自由度振動系統（其中質量為 m ，勁度為 k 及由正弦力 $f(t) = \bar{f} \cos \omega t$ 提供的阻尼 c ）連接另一無阻尼且未受力的單自由度振動系統（其質量為 m_a ，勁度為 k_a ）。這個運動的耦合方程式可表示為：

$$m\ddot{r}(t) + c\dot{r}(t) + kr(t) - k_a(r_a(t) - r(t)) = \bar{f} \cos \omega t \quad (1)$$

$$m_a\ddot{r}_a(t) + k_a(r_a(t) - r(t)) = 0 \quad (2)$$

利用複指數記號並保留正指數部分，由外力 $f(t) = \bar{f}e^{i\omega t}$ 引發的響應 $r(t) = \bar{r}e^{i\omega t}$ 及 $r_a(t) = \bar{r}_a e^{i\omega t}$ 可被帶入運動方程式，得到：

$$(-\omega^2 m + i\omega c + k + k_a)\bar{r} - k_a\bar{r}_a = \bar{f} \quad (3)$$

$$-k_a\bar{r} + (-\omega^2 m_a + k_a)\bar{r}_a = 0 \quad (4)$$

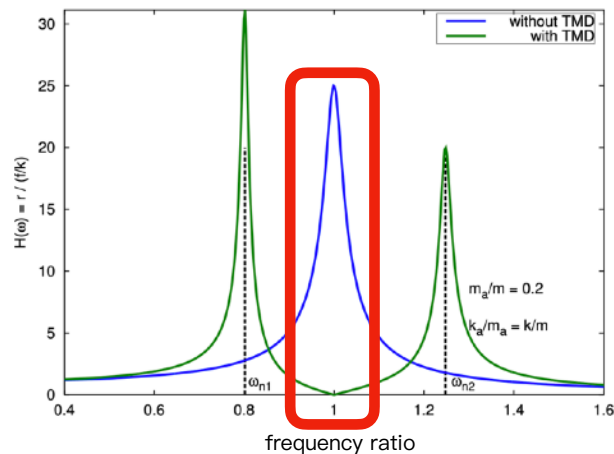
初始系統質量 m 由受力引發的位移響應之頻率響應為：

$$H(\omega) = \frac{\bar{r}}{\bar{f}/k} = \frac{-\omega^2 m_a + k_a}{\left(\frac{1}{k}\right)(-\omega^2 m + i\omega c + k + k_a)(-\omega^2 m_a + k_a) - k_a^2} \quad (5)$$

當 $-\omega^2 m_a + k_a = 0$ 時，頻率響應為零。因此，我們可以得到調諧質量阻尼器的調整方程式：

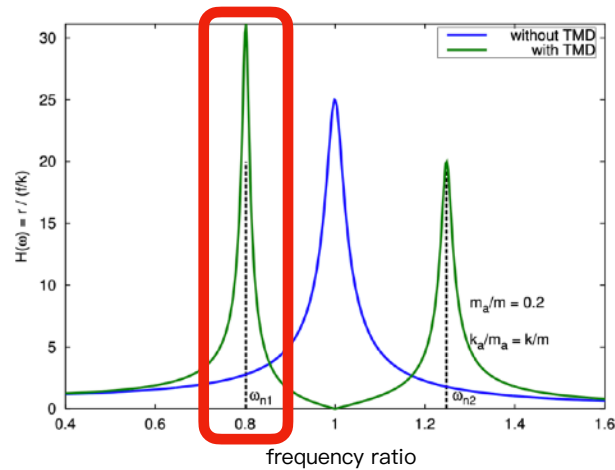
$$\omega^2 = \frac{k_a}{m_a} = \omega_{na}^2 \quad (6)$$

當將阻尼器的振動頻率調整至與受力頻率相同時，阻尼器的振幅會與外力抵銷，使的纜車本體完全不振動，即 $\bar{r}_a = -\bar{f}/k_a$ 。



由圖中我們可以看到當兩者頻率相同（圖中表示為比例為 1）時，能將振動完全抵銷。實驗中我們也能發現，繩長為一倍纜車車廂高度的組別（經單擺公式計算頻率約為1.48Hz）能有非常有效的抑制擺盪頻率為1.5Hz的陣風引發的共振。

不過，調諧質量阻尼器對未被完善調整得狀況十分敏感。若阻尼器未被調整為與外力頻率相同時，阻尼器的擺盪會傳回車廂中，除了無法達到減震的效果，也很有可能造成更大的振動（下圖紅框處）。

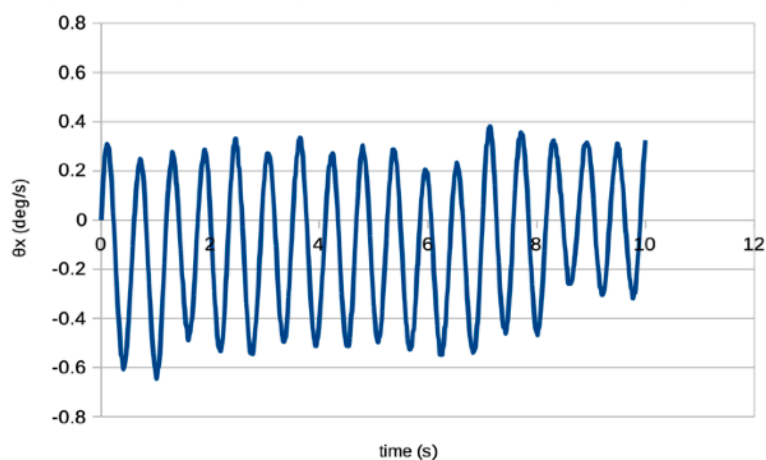


實驗中，另外兩個擺長的組別因為較不靠近（經計算比例分別約為1.35及0.65）因此抑制效果不明顯，當纜車的振動透過棉繩傳至阻尼器時，阻尼器會將一部分的能量回傳至纜車上，使纜車再次振動。

捌、結論

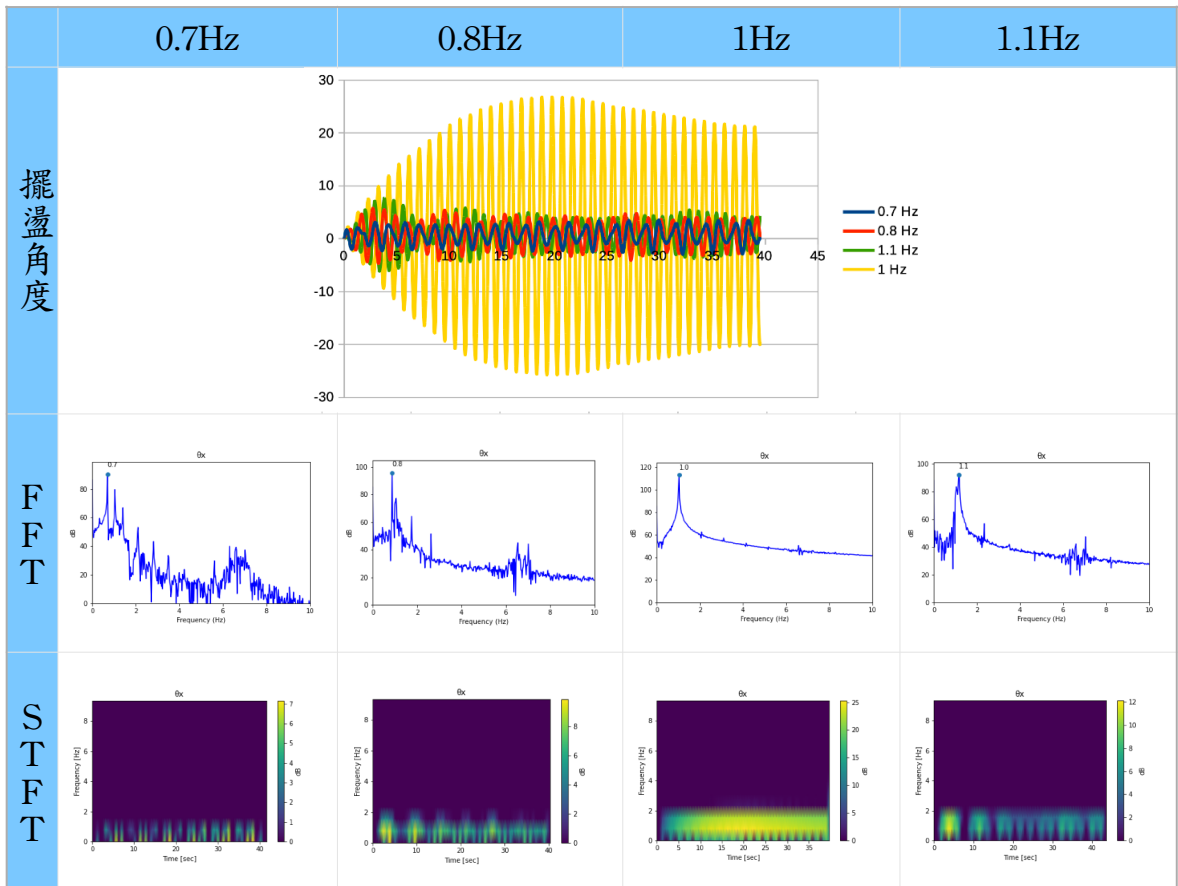
一、陣風對纜車的影響

（一）持續風：對纜車沒有太大的影響，只有不到 1 度的微幅晃動。



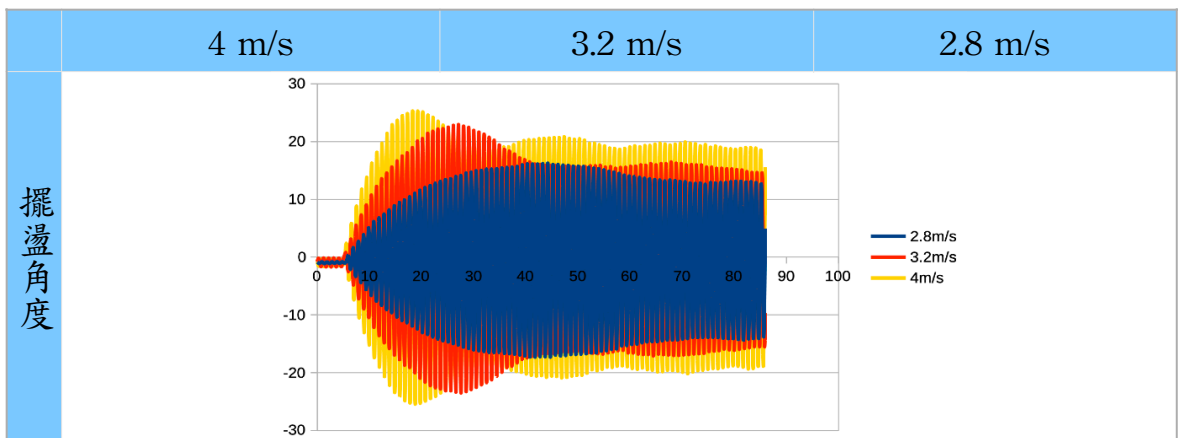
(二) 不同頻率的陣風：

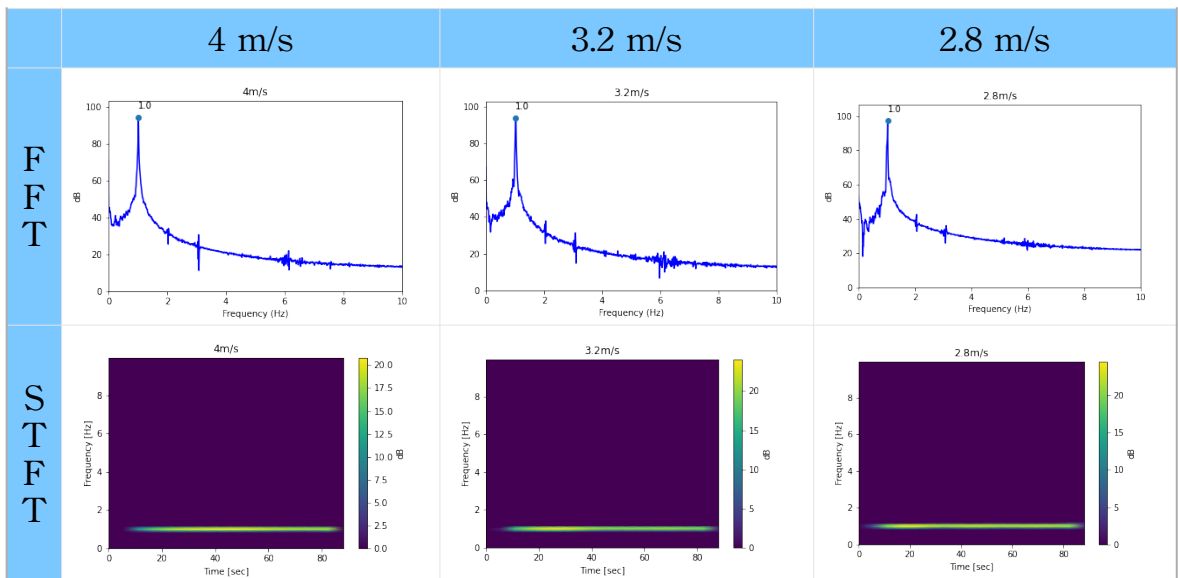
當陣風頻率與纜車擺盪頻率時，會發生共振並造成大角度的擺盪，造成危險。且相較同風速的持續風造成不到 1 度的擺盪，當纜車與陣風發生共振時能造成將近 30 度的劇烈擺盪，擺盪強度相較只受持續風增加了 60 分貝。



(三) 不同強度的陣風：

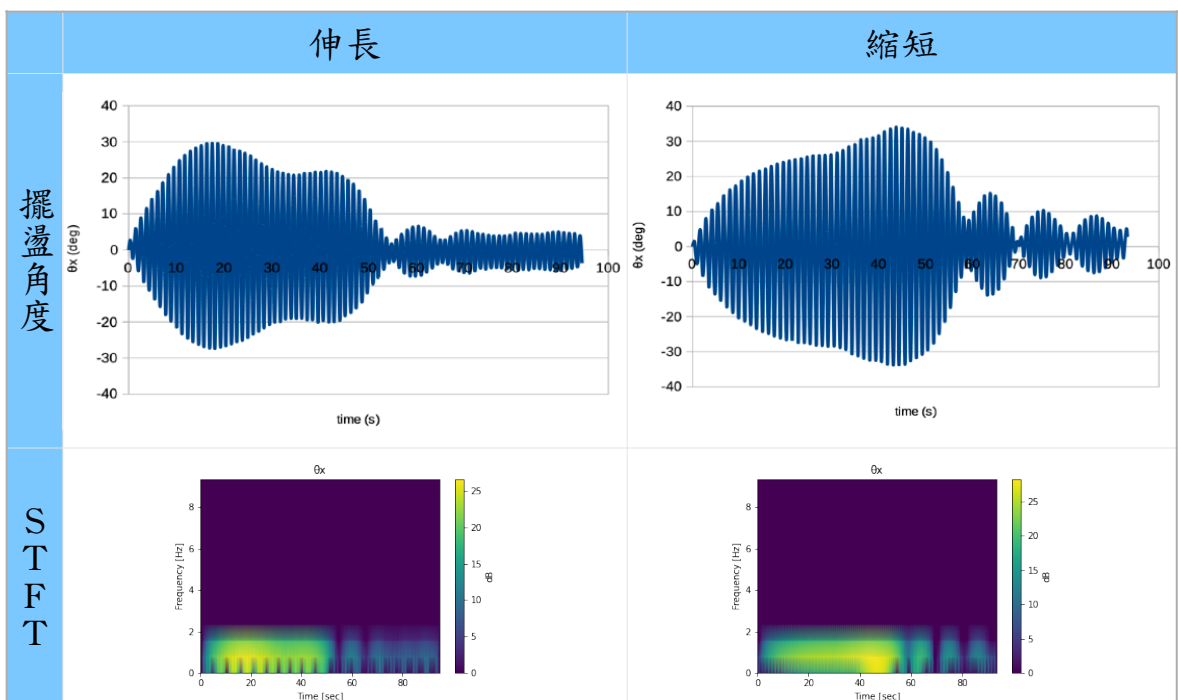
不同的風速下，陣風仍能與纜車發生的共振，且相較風速較大的持續風有更大的振動的角度。





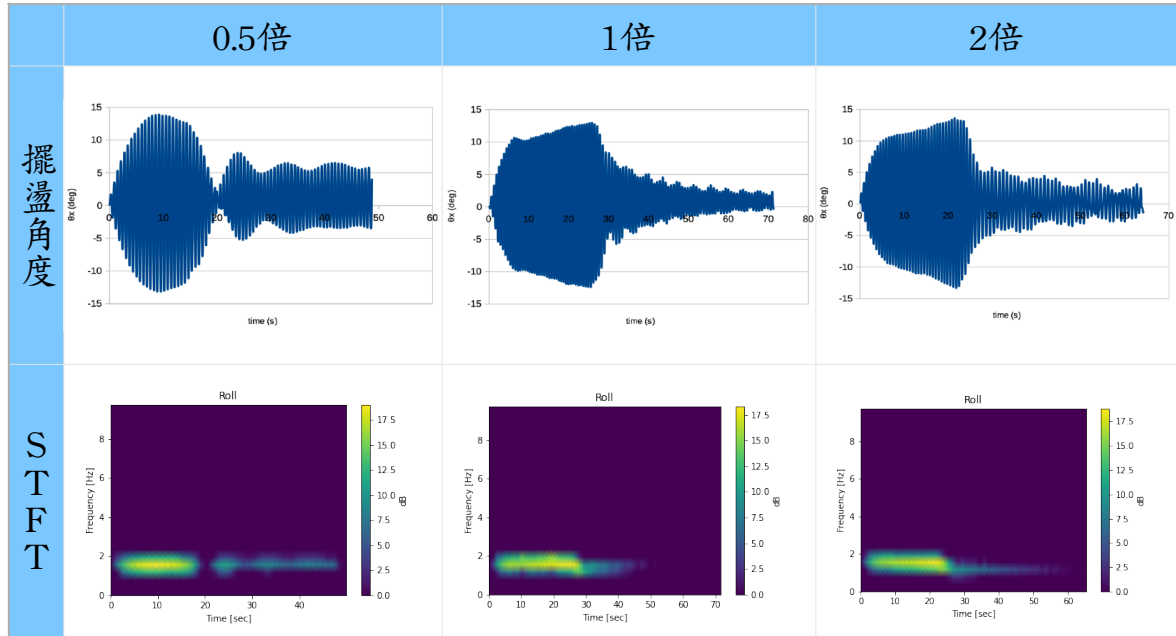
二、以可調式吊臂改善纜車振動

我們設計出可調式吊臂在纜車與陣風發生共振時調變吊臂長度，改變纜車的擺盪頻率，藉此達到減震的效果。實驗結果顯示能成功減少 20 度的擺盪，也能將振動強度減低超過 10 分貝。



三、以調諧質量阻尼器抑制振動

透過外掛的質量塊，我們設計出調諧質量阻尼器減緩振盪，分別將連接法碼的棉繩降下車廂高度 0.5倍、1倍、2倍。實驗結果顯示抑制的效果十分顯著，最佳的組別將原本將近 15度的擺盪角度減至 2度內，減少了將近 15分貝的振動。



玖、未來展望

一、陣風頻率對纜車共振的影響

由實驗中可知當陣風頻率接近纜車的擺盪，會引發共振並造成大角度的擺盪。期許未來能編寫程式即時計算陣風頻率，並於頻率靠近時發出警示。

二、調諧質量阻尼器

實驗成果顯示調諧質量阻尼器能有效抑制纜車的振動。不過手動調整難以精準的調整至與外力頻率相同達到完全抑制振動的效果。期許未來能將阻尼器自動化，再偵測到可能引發危險的陣風吹拂時，調整阻尼器使纜車不會發生振動。

拾、參考資料

1. 畢家禎、林盈均、郭詠靖（2020）。「危」風陣陣摧~探討微風對纜車的共振影響及改善方法。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會作品。
2. 謝馥伊（2015）。地震與纜車的邂逅 Monitoring the Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car。2015 年臺灣國際科學展覽會作品。

3. 蕭順發 (2008) 。纜車採用主動與被動調諧質量阻尼器之最佳與模糊振動控制。國立高雄應用科技大學碩士論文。
4. 貓空纜車網站。 <https://www.gondola.taipei/>
5. Tatiana Pais, Dario Boote (2017) . Developments of Tuned Mass Damper for yacht structures. *Ocean Engineering*, 141, 249-264.
6. Mohazzabi, P. and Shankar, S.P. (2017) Damping of a Simple Pendulum Due to Drag on Its String. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 5, 122-130.
7. Gavin, H. P. (2016). Tuned Mass Dampers.

【評語】 100021

1. 本文參考真實纜車比例，製作模型探討不同頻率及速度陣風對纜車造成的影響。為了減低振動，製作可調式吊臂。且避免造成乘客不適，而製作調諧質量阻尼器，當共振發生時，將砝碼透過伺服馬達放下，使纜車的振動傳導至垂下的擺減緩振動。期望能將系統自動化，在纜車遭遇陣風時自動調變阻尼器，抑制振動。
2. 由實驗中可知當陣風頻率接近纜車的擺盪，會引發共振並造成大角度的擺盪。期許未來能編寫程式即時計算陣風頻率，並於頻率靠近時發出警示。實驗成果顯示調諧質量阻尼器能有效抑制纜車的振動。期許未來能將阻尼器自動化。
3. 本文宜確認模擬與實驗之一致性。其實，共振破壞宜事先設計避免。未加考量而加入設計，一旦共振破壞發生，校正通常是來不及改變的。擺動雖然不舒服，但扭轉(torsional vibration)破壞，則更可怕。