

# 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

第三名

030115

屋欲靜而電不止—探究冷次定律在建築物的減  
震運用

學校名稱：新北市立安溪國民中學

作者：  國二 林宥禎  國二 楊安鈞	指導老師：  解宗翰  劉明元
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：單擺式調諧質量阻尼器、發電式消能元件、  
冷次定律

# 摘要

本研究以自製倒置平台、阻尼裝置與外力調頻器以進行實驗，為方便觀察阻尼質塊與平台交互情形，故將建物改為懸吊式平台，外力調頻器以馬達為動力來源，由電源供應器改變電壓大小控制轉速。實驗分彈射觀察衰減係數與外力調頻模擬 4 級震度觀測最大加速度。由彈射平台試驗可知擺長 15cm 時阻尼器與平台產生反向共振，可有效吸收大樓晃動能量；擺錘越重吸收效果越佳；加裝消能元件可有效提升減振效益。由彈射試驗較佳之消能元件組合以進行模擬地震試驗，發現結果與彈射平台實驗一致。發現阻尼晃動頻率與大樓頻率接近的情況下且在一定的阻尼範圍內可有效達到吸振減振的效果。電生磁之阻尼元件能減振並發電，也許將來可作為消能形式，能利用產生之電能。

## 壹、 研究動機

台灣位於環太平洋地震帶上，地震發生頻率高，可能造成房屋損毀或倒塌。我們觀察並查資料得知台北著名地標 101 大樓的單擺式質量阻尼器，其質量阻尼球重達 660 公噸，可以防風以及抗震，並且裝設油壓消能裝置，將阻尼器吸收的動能轉換成熱能並將其消耗掉。我們希望對阻尼器的原理進行一系列的探究並進一步思考：除了藉由油壓阻尼器將動能轉換成熱能，可不可以將能量由晃動動能轉換成電能進而加以儲蓄利用。

## 貳、 研究目的

1. 探討單擺式質量阻尼器之擺長長度、擺錘質量、擺放位置對減振效能之影響
2. 探討加裝液體消能元件、磁鐵同性相斥消能元件對減振效能之影響
3. 探討加裝磁生電之消能元件對減振效能之影響

## 參、 研究設備及器材

1. 使用軟體：Tinkercad、Vibrometer、Phyphox、Excel
2. 實驗材料

器材		耗材	
延長線	調光器	鋁管	橡皮軟管
電扇馬達	培林	木板	螺絲
砝碼	L型角鐵	螺帽	墊片
洋眼	鐵尺	棉線	釣魚線
角鋼	轉速計	鐵線	熱熔膠條
腳架	10 歐姆電阻	砂紙	漆包線
筆電	示波器	紙杯	紙筒
電烙鐵	電源供應器	竹筷	
熱熔膠槍	麵包版		
手機	鱧魚線		
銅片、鋁片	強力磁鐵		
八字扣			

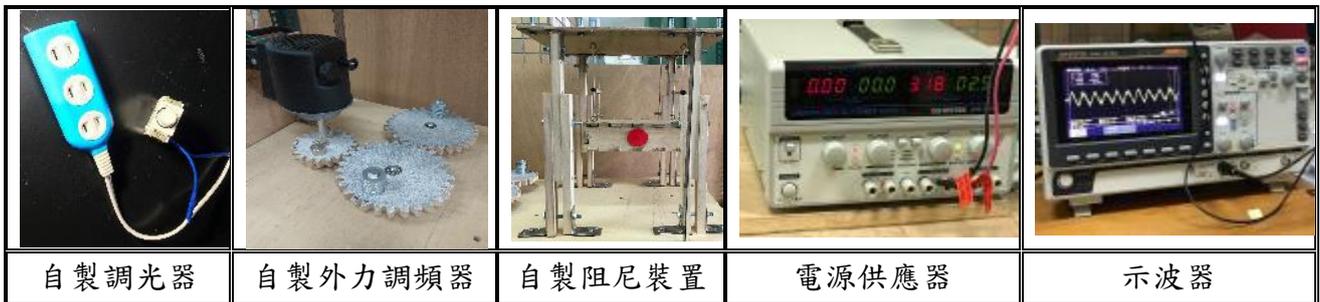
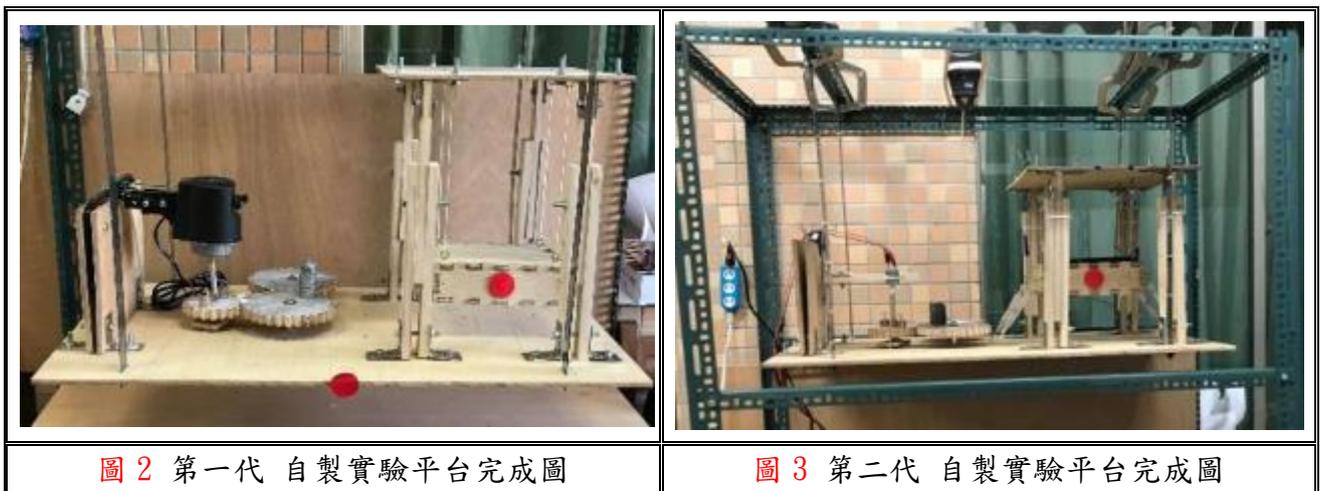


圖 1 本實驗所需之重點器材



# 肆、研究過程或方法

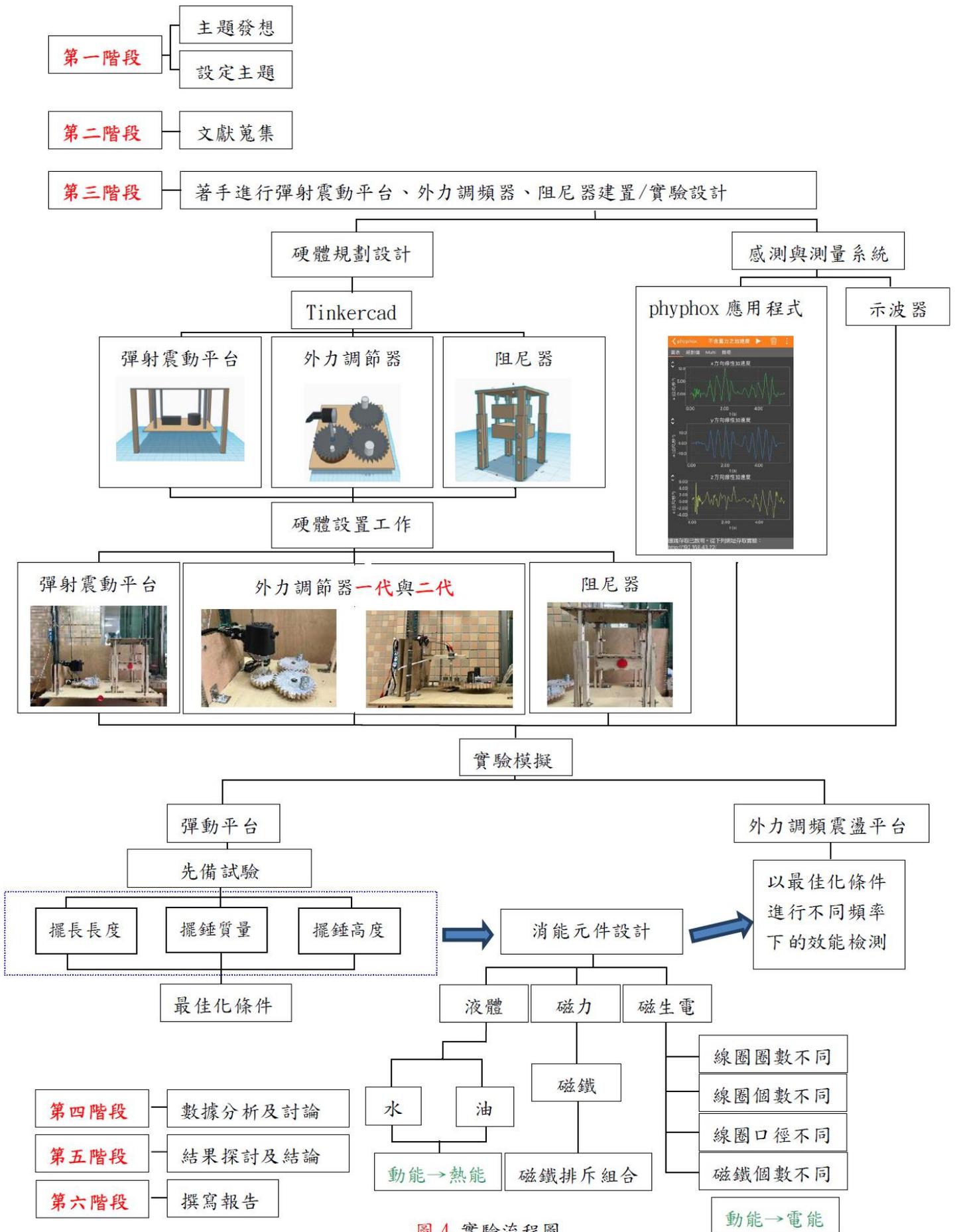


圖 4 實驗流程圖

## 實驗器材設計概念及裝置示意圖

為了進行阻尼消能的實驗，我們製作了震盪平台，設計圖如圖 5。實驗裝置完成圖如圖 6，以下說明實驗器材各部分的設計及製作流程。

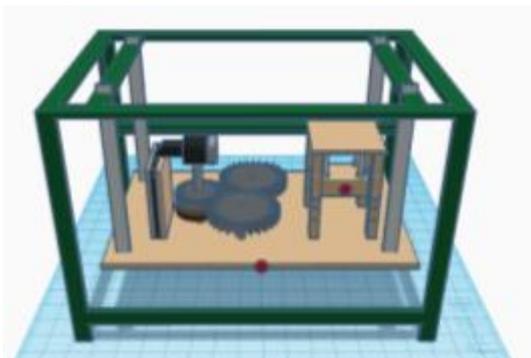


圖 5 實驗裝置設計圖

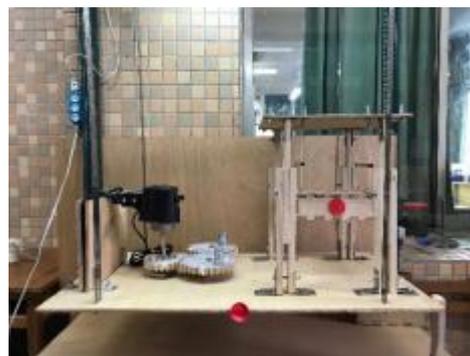


圖 6 實驗裝置完成圖

### 一、自製平台

#### 設計概念：

由於建築物受到地震而晃動時，頂樓會因為放大效應的影響而有較大的搖晃情形，因此將質量阻尼器以懸吊的方式裝在樓頂部分，示意圖如圖 7。

為了方便觀察晃動情形，故我們將外力調頻器裝置於大樓頂部並以倒置懸吊的方式進行實驗觀察，並且同時將減振阻尼器放置於平台上檢測其產生的減振效能，示意圖如圖 8。

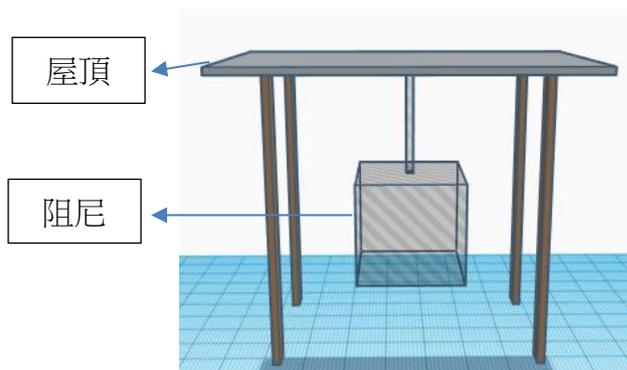


圖 7 一般建物模型

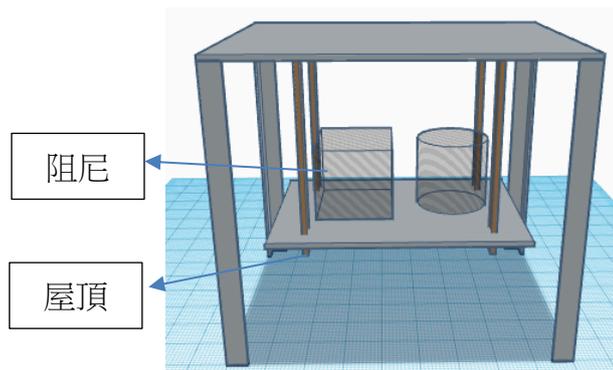


圖 8 倒置建築物的模型

#### 建物建構：

建築物設計利用螺絲螺帽將四支兩端打洞的一公尺鐵尺其中一端與平台木板連結，並將另外一端懸吊在角鋼架下方製作模擬建築物，設計圖如圖 9，完成圖如圖 10。

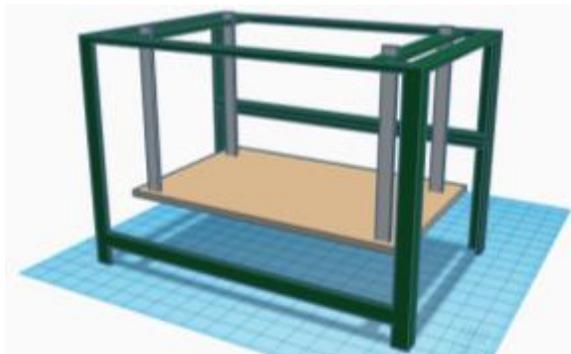


圖 9 平台設計圖



圖 10 平台完成圖

## 二、自製阻尼器

### 設計概念：

為了觀察阻尼裝置對於大樓減震的影響，我們模仿 101 大樓的風阻尼器，利用可活動式的阻尼支架懸吊尼龍線連結的阻尼質量塊，設計圖如圖 11。阻尼裝置完成圖如圖 12。

### 器材建構：

1. 阻尼質塊：用 15cm×20cm、20cm×7cm 及 15cm×7cm 的木板各兩塊，利用電動線鋸機裁出卡榫後，以熱熔膠黏貼在一起製成阻尼質塊，並留一開口以便進行配重。
2. 阻尼支架：用 30cm×3.2cm×1.5cm 木條三個一組，製作四支可以改變高度的支架，再利用角鋼分別固定在阻尼裝置頂板的四邊。
3. 阻尼器：在阻尼架上的頂板及阻尼質塊的頂板四角鑽孔並鑽上洋眼，用等長的線懸吊阻尼質塊。

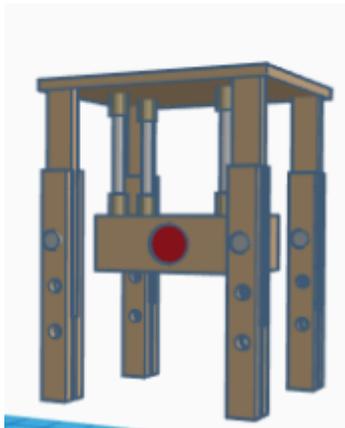


圖 11 阻尼裝置設計圖



圖 12 阻尼裝置完成圖

## 三、自製外力調頻器

### 第一代

我們拆除電風扇扇葉部分留下馬達及底座，用兩片木板固定馬達底座，再用橡皮軟管連接馬達軸心與鋁管。鋁管另一端以橡皮軟管連接小齒輪軸心螺絲。利用馬達提供動力使小齒輪旋轉，並帶動兩個大齒輪以速度相同、方向相反的形式旋轉。而在大齒輪上方安裝位置對稱的等重重物，使旋轉時當兩重物同邊使重心往兩旁偏移，而帶動平台晃動。另加裝調光器控制馬達轉速進而控制震盪頻率，設計圖如圖 13。

### 器材建構：

利用螺絲螺帽連結齒輪及平台，並藉由培林使齒輪可在空中旋轉，降低與平台木板接觸所造成的摩擦力。運用木板將馬達底座固定使其位置不變，藉由鋁管及橡皮管將提供的旋轉動能傳到小齒輪軸心。另連接調光器使得裝置搖晃頻率快慢可調控，完成圖如圖 14。

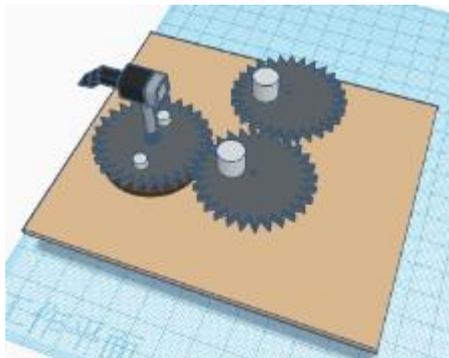


圖 13 外力調頻器設計圖



圖 14 外力調頻器完成圖

## 第二代

第一代外力調頻器因連接學校插座，而學校插座的電壓不太穩定，電壓忽大忽小導致齒輪轉動時頻率不穩定，難以進行實驗。另一問題則是風扇的馬達其質量過重，易壓迫到鋁管下方橡皮軟管與齒輪連結轉動的部位，使得運轉不順暢。

因此，我們將風扇馬達改成小型直流電馬達，解決重量過重的運轉問題，再加裝一個電源供應器，改變其電壓來控制齒輪轉速。藉由修正而將我們的外力調頻器優化，藉以方便控制轉速而進行測量，設計圖如圖 15，完成圖如圖 16。

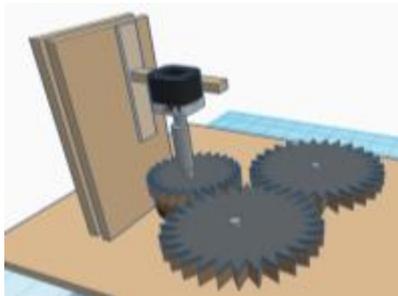


圖 15 外力調頻器設計圖



圖 16 直流電馬達示意圖

## 數據分析方法

### 一、彈射震盪實驗的設計與分析方法

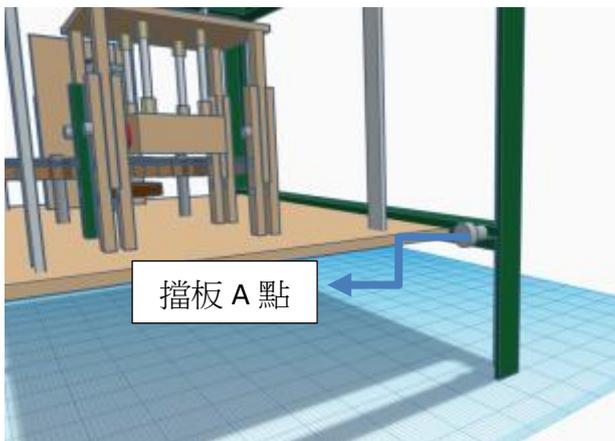


圖 17-1 擋板 A 點示意圖



圖 17-2 擋板 A 點完成圖

自製彈射震動平台進行阻尼器減振效能檢測得實驗步驟：

- (1) 裝設阻尼器於平台建築物上
- (2) 將建築物拉開到定位擋板 A 點(如圖 17)固定最大震幅並釋放
- (3) 以手機 APP 程式 Phyphox 做測量，測量時間與水平方向晃動加速度之關係圖
- (4) 將加速度對時間作圖之波峰值匯入 Excel 分析加速度之振幅衰減情形

自製阻尼器檢測減振效能的實驗原理說明：

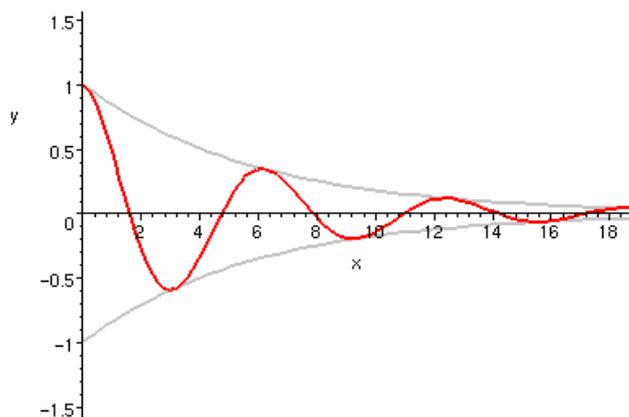


圖 18 低阻尼震盪之時間對位移作圖

彈簧木塊系統受阻力作用會使得振幅漸漸降低，而從實驗中觀察可知，我們的系統是屬於欠阻尼的震盪情況，因為阻尼小、耗散的慢，所以回復力把系統拉回至平衡位置後仍然會因為慣性的關係而繼續運動，當來回經過多次週期性振盪，使得振幅越來越小。

位移對時間作圖之震盪方程式可以(1)式表示之

$$x(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega t) \text{ -----(1)}$$

將(1)式做兩次微分可得

$$a(t) = [(\alpha^2 A - A\omega)\cos(\omega t) + (\omega\alpha A + \alpha A)\sin(\omega t)] e^{-\alpha t} \text{ -----(2)}$$

由於(2)式加速度對時間作圖其波峰衰減情形亦為指數衰減狀況，故我們實驗時採用 phyphox 測量加速度對時間作圖，觀察加速度的衰減係數並以此係數定義減振之好壞。

將阻尼器架設於晃動平台上後，在阻尼質塊及晃動平台上各放一支手機，讓手機軟體(phyphox)與電腦連接並將建築物平拉至離平衡位置 2cm 振幅處，即擋板 A 點處，等到阻尼質塊平穩不動後放手，同時按下兩台電腦螢幕的開始鍵進行分析。繪出水平方向加速度( $a_y$ )對時間(t)曲線圖，觀察到波峰(加速度之振幅)會隨時間而遞減，即震盪過程中的彈力位能會因為阻尼摩擦的作用而逐漸下降，如圖 19。由此圖形我們推論系統受到阻尼力的作用而使得震盪能量衰減。為了量化衰減情形，我們紀錄位置水平方向加速度( $a_y$ )對時間(t)圖當中的波峰值與相對應的時間，擷取前面 20 個衰減的波峰值與時間數據點至 excel 繪製波峰衰減的衰減曲線，分析結果如圖 20。

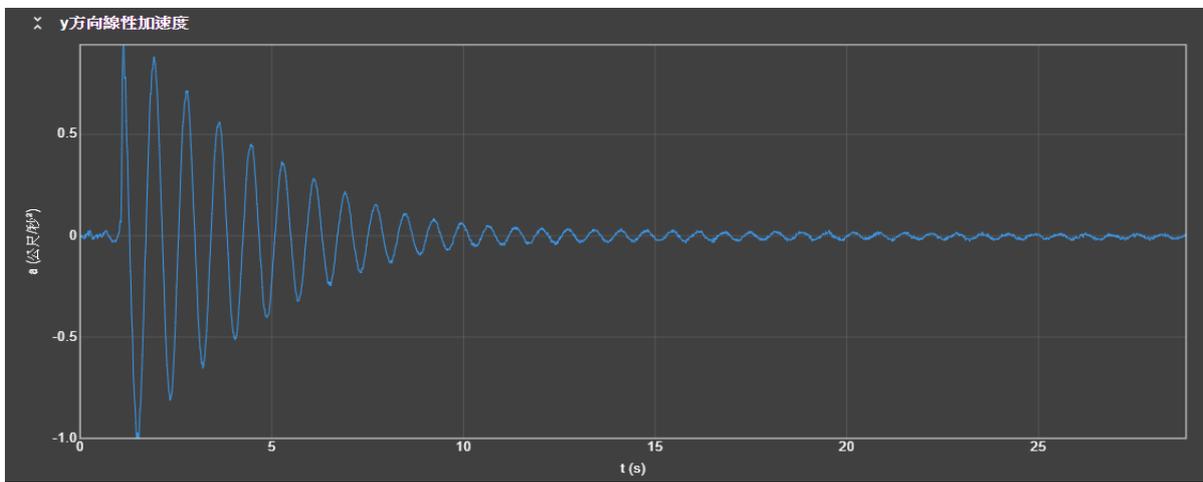


圖 19 水平方向加速度對時間曲線圖

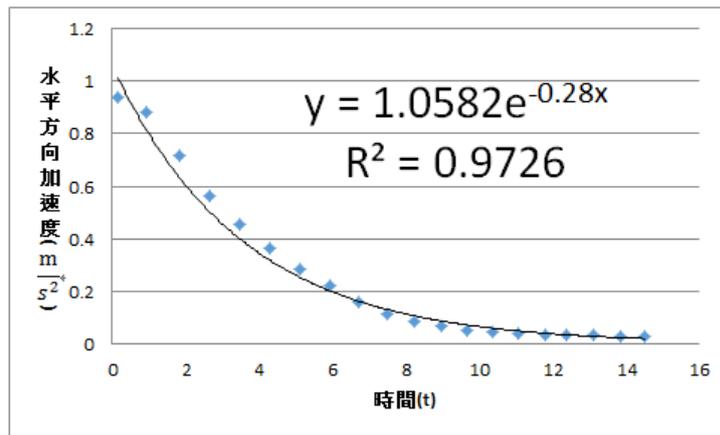


圖 20 水平方向加速度對時間圖

圖 20 中的振幅遞減曲線，其衰減情形滿足指數衰減的關係，可用(3)式來描述

$$a_y(t) = a_0 e^{-\alpha t} \text{ -----(3)}$$

(3)式中 $a_y$ 為波峰位置， $a_0$ 為初始之加速度， $t$ 為震盪所經過時間， $\alpha$ 定義為衰減係數( $\alpha > 0$ )。在不同的實驗設計中我們改變不同的操作變因，如不同擺長、不同擺錘質量、不同增加高度、不同種類消能元件等，並同時觀察應變變因 $\alpha$ 值的大小並比較不同條件下的減震效能。量化數據中衰減係數 $\alpha$ 值越大即表示能量衰減的越快，也就是建築物在越短的時間內可以回復到靜止狀態，即減震效果越佳。數據處理上我們重複 3 次實驗，再取平均值。我們取的數據其 $R^2$ 值均為 0.9 以上(註 決定係數 $R^2$ 值為 0 到 1 之間，越接近 1 表示實驗的數據點越接近擬合後的結果，也就是可相信的程度越高)。

## 二、自製地震晃動平台設計與分析方法



圖 21 地震晃動平台之實驗裝置器材示意圖

我們將兩支手機置於平台與阻尼質塊上，開啟 phyphox 程式連接到電腦控制開始與結束，我們以電源供應器連接 12V 直流馬達，再由鋁管連接到外力調頻器，從轉速計得知齒輪轉盤的旋轉頻率，調整電源供應器輸出電壓並由轉速計觀察齒輪轉盤旋轉轉速直至實驗之工作轉速時，從電腦上按下 phyphox 之偵測開始鍵，紀錄水平加速度隨時間之變化值，並擷取各振盪波之波峰數值匯入 excel 算出最大加速度的平均值、週期及頻率等參數，並藉由改變並加裝不同消能元件後觀測其減振效果。而示波器用在消能元件為磁生電的消能系統時，我們藉由示波器觀察發電的效能效果。

### 數據分析方法

自製晃動平台模擬不同震度情形的實驗步驟：

- (1) 架設阻尼器並將手機置於平台與阻尼質塊上
- (2) 開啟直流電馬達並搭配轉速計，藉由電源供應器調整至相對應震度下的頻率進行實驗。
- (3) 開啟 Phyphox 做測量
- (4) 紀錄平台與阻尼器晃動的最大加速度，並計算平台與阻尼器兩者的頻率差

我們以齒輪轉盤轉速 60 與 90r. p. m. 進行對照組之試驗，發現其平台震盪加速度對照圖 22 之地震震度分級表，為四級地震。故我們模擬四級中震以進行地震模擬，以電源供應器調整轉速快慢，當調整至實驗晃動頻率時，我們藉由 phyphox 軟體測量震動平台即阻尼器的加速度值，最後把匯出 excel 繪出加速度(a)對時間(t)的關係圖。

表 1 震度 4 級所對應之轉速計的頻率大小

四級中震 (54.6gal)	對應之轉速計為 60 r. p. m【對照組(等質量條件無阻尼器情況下之平均最大加速度值為 54.6gal)】
四級中震 (59.7gal)	對應之轉速計為 90 r. p. m【對照組(等質量條件無阻尼器情況下之平均最大加速度值為 59.7gal)】

震度分級	地動加速度 (cm/s <sup>2</sup> ,gal)	人的感受	屋內情形	屋外情形
0  無感	0.8 以下	人無感覺		
1  微震	0.8~2.5	人靜止時可感覺 微小搖晃		
2  輕震	2.5~8.0	大多數的人可感到 搖晃，睡眠中的人 有部份會醒來	電燈等懸掛物有小 搖晃	靜止的汽車輕輕搖 晃，類似卡車經過， 但歷時很短
3  弱震	8~25	幾乎所有的人都感 覺搖晃，有的人會 恐懼感	房屋震動，碗盤門 窗發出聲音，懸掛 物搖擺	靜止的汽車明顯搖 動，電線略有搖晃
4  中震	25~80	有相當程度的恐 懼感，部分的人會 尋求躲避的地方， 睡眠中的人幾乎都 會驚醒	房屋搖棟甚烈，底 坐不穩物品傾倒， 較重傢俱移動，可 能有輕微災害	棄車駕駛人略微有 感，電線明顯搖晃， 步行中的人也感到 搖晃
5  強震	80~250	大多數人會感到 驚嚇恐慌	部分牆壁產生裂 痕，重家具可能翻 倒	汽車駕駛人明顯感 覺地震，有些牌坊 煙囪傾倒
6  烈震	250~400	搖晃劇烈以致站 立困難	部分建築物受損， 重傢俱翻倒，門窗 扭曲變形	汽車駕駛人開車困 難，出現噴沙噴泥 現象
7  劇震	400以上	搖晃劇烈以致無 法依意志行動	部分建築物受損 嚴重或倒塌，幾乎 所有傢俱都大幅移 位或掉落地面	山崩地裂，鐵軌彎 曲，地下管線破壞

圖 22 交通部中央氣象局之地震震度分級表圖

## 伍、 研究結果及討論

### 實驗一 探討擺線長短不同對建物之減振效能的影響

101 大樓的調諧質量阻尼器的構造中，有一段長達 12 公尺的纜線，負責懸吊擺錘。但是我們有一個疑問：為什麼 101 風阻尼器的擺長是 12 公尺呢？如果換成其他長度的擺長(示意圖如圖 23)，會對風阻尼器的消能效果產生影響嗎？為了解開這個疑問，我們製作不同長度的擺線作為實驗組，並以未加裝阻尼裝置的平台為對照組，嘗試探討阻尼裝置中的擺線長度對大樓的減振效能產生何種影響。



圖 23 單擺式阻尼示意圖

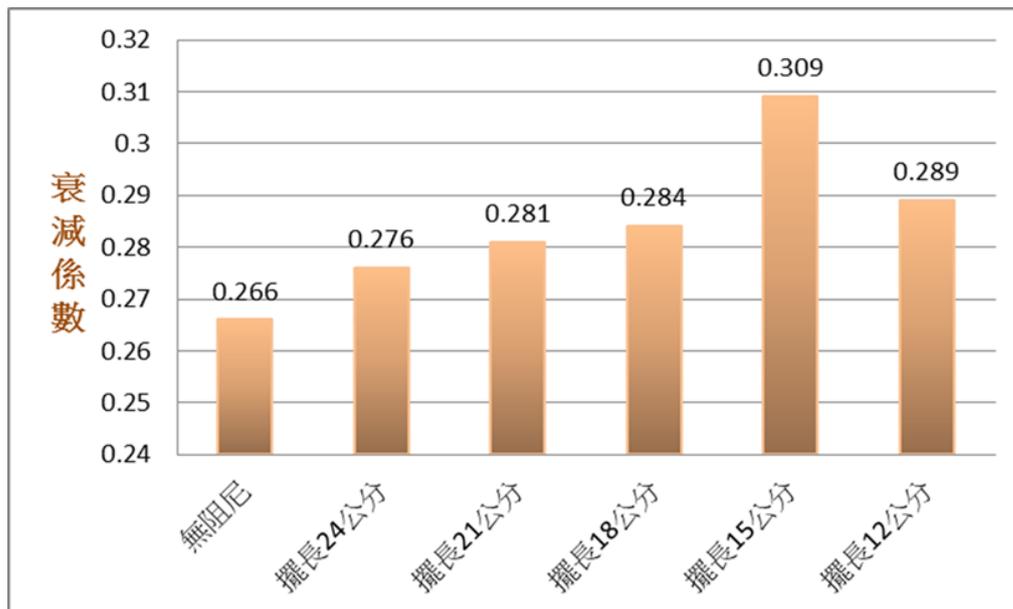


圖 24 不同高度擺長對衰減係數的關係圖

### 實驗一 數據探討

由圖 24 可以發現

擺長 15cm 有一最佳的衰減係數，也就是說其減振效果最佳。從八年級的課程「波動與聲音」的單元裡面知道共振的概念。而我們改變阻尼裝置的擺長進行實驗操作時，改變了阻尼器的晃動頻率，阻尼裝置的擺長越長，搖晃的週期也越長，而其頻率就越短，因此我們覺得擺長 15cm 下之晃動頻率與平台的自然頻率應該非常的接近，所以兩者之間產生共振，而使單擺減震裝置可以有效吸收大樓晃動能量。

### 實驗二 探討擺錘質量對建物之減振效能的影響

由實驗一我們可以推論，阻尼系統與大樓之間的頻率差越小，有越好的減振效能，由文獻得知，台北 101 的鐵球質量約 600 公噸重。因此我們猜想：是否阻尼質塊的質量越重，就能吸收越多大樓晃動之能量，進而使得減震效果提升？因此，我們將配置不同重量的阻尼質塊作為實驗組，未加裝砝碼配重的空心阻尼質塊為對照組，以阻尼質塊重量越重消能效果越好的假設為基礎，進一步實驗觀察擺錘之重量多寡對阻尼裝置減振效能之間的關係。

為了避免實驗結果受影響，我們需要控制平台總重量。因此製作黏土質塊進行配重。為了不使重

心高度有所偏差，我們利用束帶將黏土綁在與阻尼質塊同一水平線的支架上進行配重，示意圖如圖 25 使得不論阻尼器內重量多少，阻尼器內外配重重量相加皆為 800 克重。



圖 25 阻尼器黏土配重示意圖

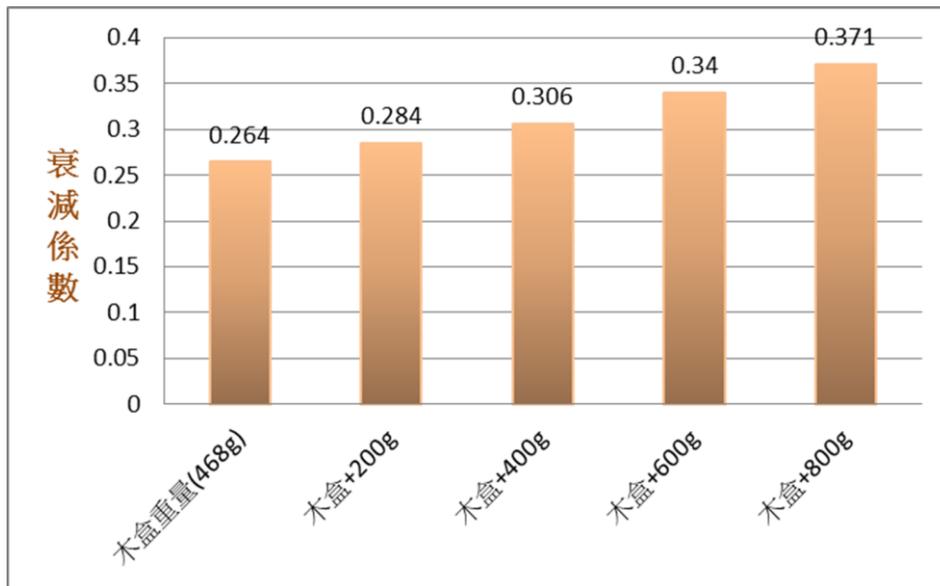


圖 26 不同質量對衰減係數的關係圖

## 實驗二 數據探討

由圖 26 可以發現

當阻尼質塊擺長維持在 15 公分時，整體大樓重心不變的情況下，阻尼質量塊越重，其衰減係數值越大，亦即減振效果較佳。而雖然擺錘質量越大理論上可以吸收越多的能量，但是我們覺得若是過重則將會超過房屋的最大負載進而導致房屋損壞或是人員傷亡，故建置單擺式質量阻尼器時應考量到整體建築物之結構安全性。

## 實驗三 探討擺放高度對建物之減振效能的影響

根據資料，我們發現 101 的質量阻尼器並沒有建造在最頂層，而是安裝在 87~92 層之間的位置。但是在跟老師討論過後，我們得知當地震時，相較於低樓層而言，高的樓層會因為建築物的「放大效應」使得頂樓晃動的更為劇烈，因此我們推論：當阻尼系統安裝在高樓層時，會因為樓頂搖晃劇烈進而造成阻尼器搖晃程度較大而有較佳的減振效果。但是為何 101 大樓的風阻尼器不是安裝在最高的樓層呢？為了解開這個疑惑，我們以阻尼質塊安裝位置高度不同為變因，進行阻尼質塊高度對於阻尼系統消能效果影響的實驗。

阻尼質塊距平台木板高度

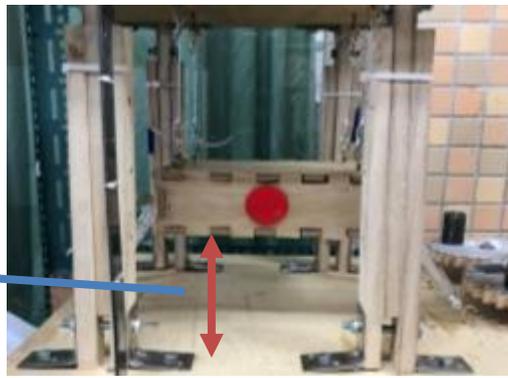


圖 27 阻尼質塊與平台木板示意圖

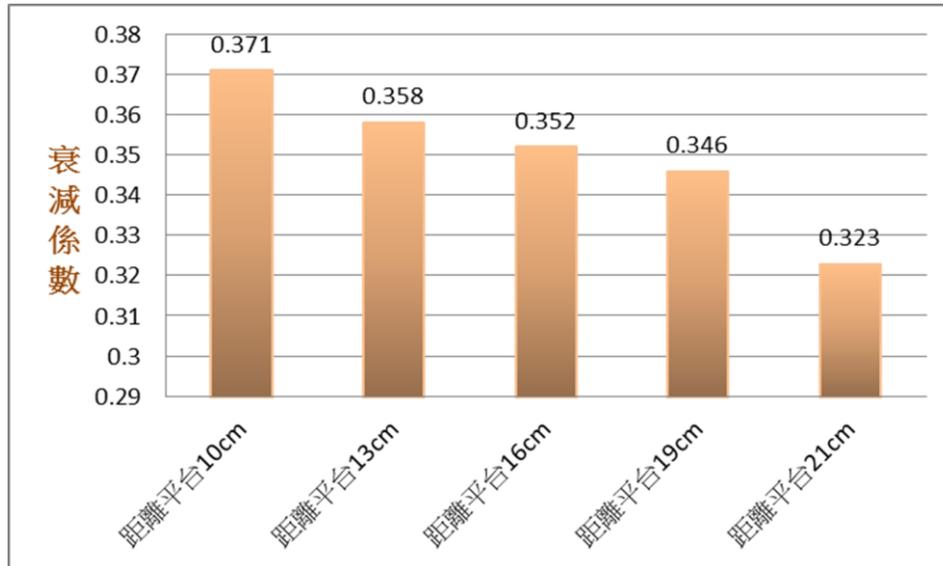


圖 28 不同增加高度對衰減係數的關係圖

### 實驗三 數據探討

由圖 28 可以發現

當阻尼系統距離平台木板越來越遠，即一般大樓的阻尼器越來越靠近地面時，其衰減係數越來越小(即減振效果越差)。

推論阻尼器在高樓搖晃劇烈，是因受到「放大效應」的影響，使得相較於擺置於較低樓層時，搖晃的振幅增加，衰減係數的值也變較大。符合之前假設：阻尼裝置在控制擺長的情況下，越接近頂樓，消能效果越好。

確認阻尼質塊消能效果在接近頂樓的條件下消能效果較遠離頂樓的阻尼裝置較佳後，我們推測 101 大樓裝設其風阻尼器時不建造在頂樓，而是建造在 87~92 層，可能是因結構上之穩固性和安全性等條件之考量，故將阻尼器安至於 87~92 樓間。

### 實驗四 探討有無消能元件與消能元件種類對建物之減振效能的影響

台北 101 大樓的阻尼裝置除了吸收地震動能的擺錘以外，還包括油壓消能系統，那麼有無加裝油壓系統會對阻尼消能產生何種影響？油壓系統的形式不同，又有何種差別呢？我們藉由模仿 101 大樓風阻尼器的結構，在阻尼質塊下方加裝不同類型的消能元件作為實驗組，無加裝消能元件的阻尼質塊作為對照組進行實驗，觀察有無安裝油壓系統以及不同類型的油壓系統在阻尼質塊減振時對減振效能之影響。



圖 29 消能元件裝置與設計圖

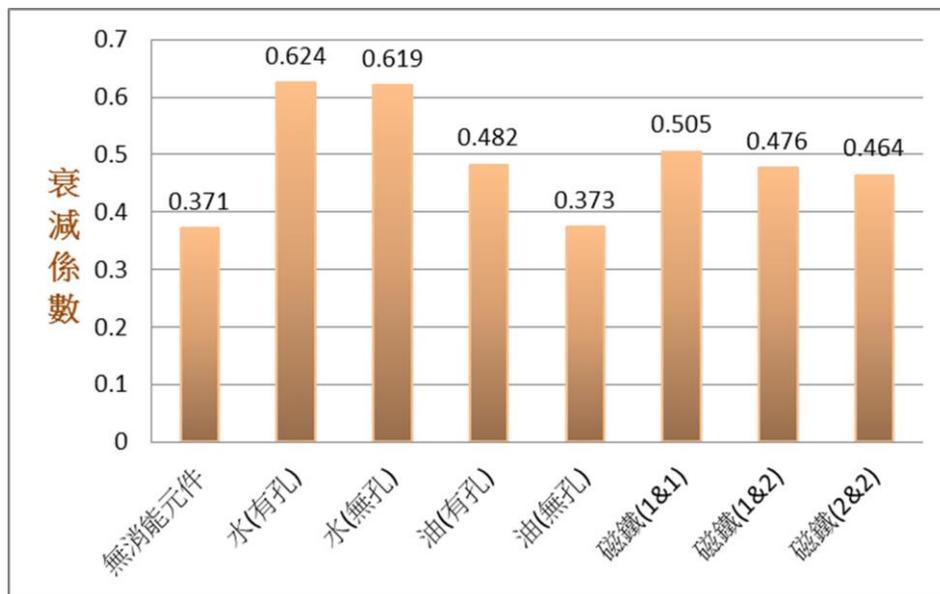


圖 30 不同類型的消能元件對衰減係數的關係圖

#### 實驗四 數據探討

由圖 30 可以發現

##### 1. 各數值總比較

阻尼裝置在加裝消能元件的條件之下，消能效果都比未加裝消能元件時，單純擺長 15 公分的阻尼裝置來的好，證明加裝消能元件有助於阻尼器吸收地震動能，增加消能效果。

##### 2. 各類型消能元件比較

###### 1. 水阻尼器無孔有孔

實驗結果

阻尼質塊下方加裝水阻尼器後，當阻尼質塊吸收動能搖晃時，兩側的塑膠針筒因受到推擠或拉扯，迫使其內的水穿過活塞的隙孔時遇孔隙產生磨擦，製造出阻力的同時釋放出熱能，使消耗掉動能的阻尼質塊能更有效率的消耗掉大樓的動能，因此其衰減係數高。

而針筒的活塞穿孔之後，水的流動性變高，而磨擦面積加大，轉換能量的速度及數量皆增加，

使得消能效果更優良，衰減係數值更高。

## 2. 油阻尼器無孔有孔

### 實驗結果

因為油的黏滯係數比水大，所以產生的阻力相對較大，但是因為阻尼質塊搖晃時的振幅及力道皆不夠強，導致阻尼太強的情況下，阻尼器無法以較大擺幅搖晃，因此未產生較好的消能效果。但是當活塞鑽四個孔洞後，油能夠進出的通道增加，使得阻尼器能夠較為順暢的搖晃，產生較大的擺幅，因此衰減係數大幅提升。

3. 從數據可知水阻尼的效果來的比油阻尼效果好一些，我們判斷阻尼質並非越大越好，而應該是有了一個最佳範圍。
4. 而利用磁鐵之同極相斥之阻尼器，能造成適度的緩衝效果，進而達到減振效果之提升。

## 實驗五 探討磁鐵與銅板相對運動時，由磁生電而對建物之減振效能的影響

在製作了以磁鐵同極相斥形式情況下的針筒式元件後，我們思考是否還有其他磁鐵的消能方式可利用？因此嘗試磁鐵的另一個特性：「冷次定律」來安裝另一種形式的磁鐵消能元件。將強力磁鐵以兩種形式安裝在阻尼質塊的底部，如圖 31、32。再用固定在平台上的紙杯支撐金屬銅片，裝置圖如圖 33。改變紙杯高度控制銅片與磁鐵之間的距離，進而探討距離與磁生電效能的關係。



圖 31 磁鐵八個均勻分布形式

圖 32 磁鐵兩個為一組分布於四個角落

圖 33 磁生電裝置示意圖

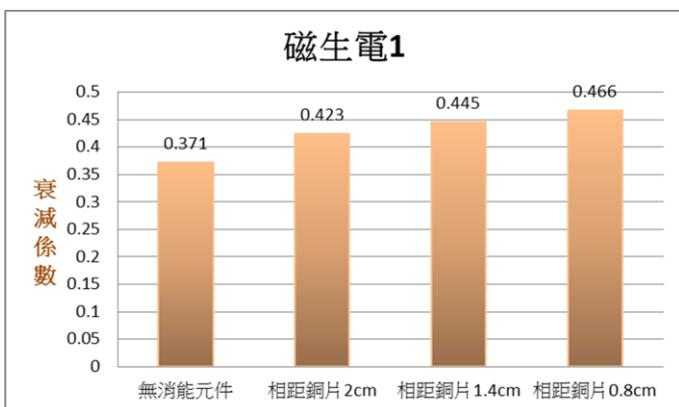


圖 34 八個磁鐵分布於兩邊對衰減係數的關係圖

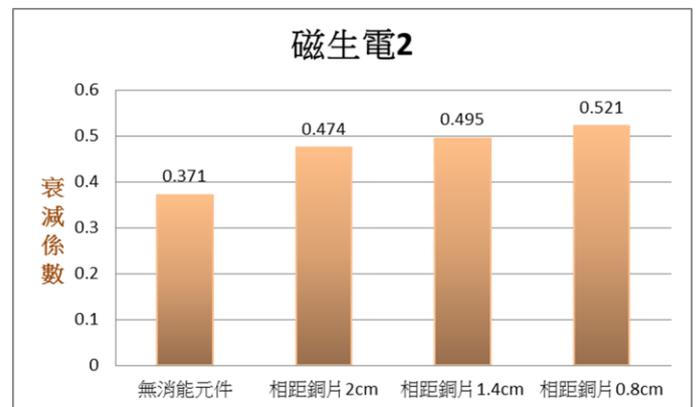


圖 35 磁鐵兩個為一組分布於四個角落對衰減係數的關係圖

## 實驗五 數據探討

由圖 34、35 可以發現

### 1. 總比較

阻尼裝置中，銅片和磁鐵的距離越近阻力越大，由冷次定律可知磁鐵搖晃時磁通量改變越大，產生之感應電流越強，造成之阻抗效果就越強，產生較佳的消能效果。

### 2. 兩類比較

比較圖 34、35 可知，磁鐵兩兩一組分散在四角的條件比八個分散優。磁鐵兩個為一組重疊時可使磁力線集中，並且在晃動時造成單位時間內磁通量變化較為明顯，故產生較大之阻尼效果。

## 實驗六 探討四級震度下不同阻尼裝置對減振效能的影響

我們接續先前實驗，將各實驗條件中消能效果較佳者，進行四級中震的地震模擬(以轉速 60r. p. m. 與 90r. p. m. 進行測試)，測試各元件在實際模擬中是否與彈射衰減時之結果相符。由地震晃動平台之 phyphox 可測得平台與阻尼器的頻率差如表 2-1 與表 2-2，最大加速度如圖 36。

表 2-1 四級震度下(加速度 54.6gal)平台與阻尼器的頻率差(單位 Hz)

水(有孔)	磁生電 2	磁鐵(1&1)	油(有孔)	磁生電 1	無消能元件
0.0014	0.0012	0.0020	0.0038	0.0043	0.0016

表 2-2 四級震度下(加速度 59.7gal)平台與阻尼器的頻率差(單位 Hz)

水(有孔)	磁生電 2	磁鐵(1&1)	油(有孔)	磁生電 1	無消能元件
0.0043	0.0821	0.0047	0.0155	0.0845	0.0042

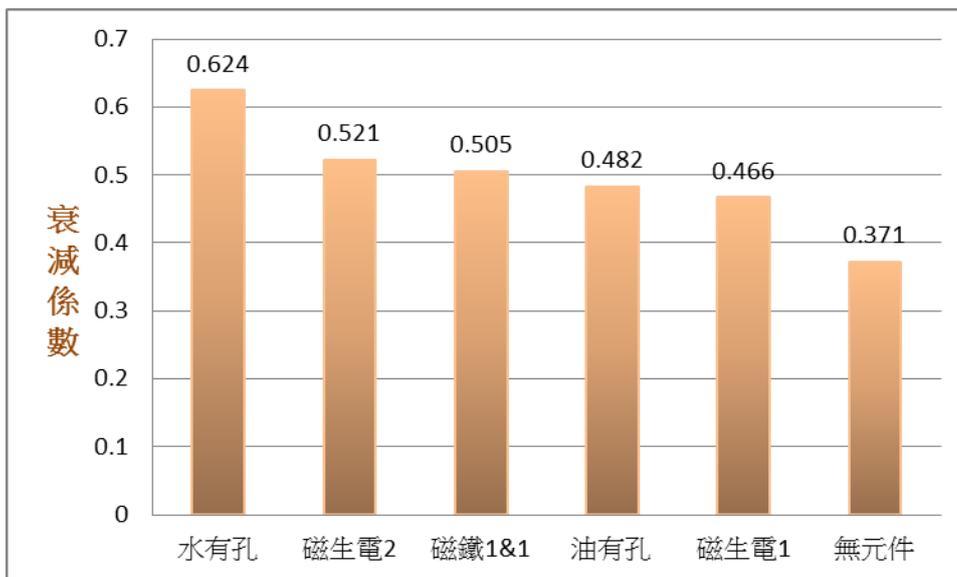


圖 36 震盪衰減各條件下消能效果最佳者之比較

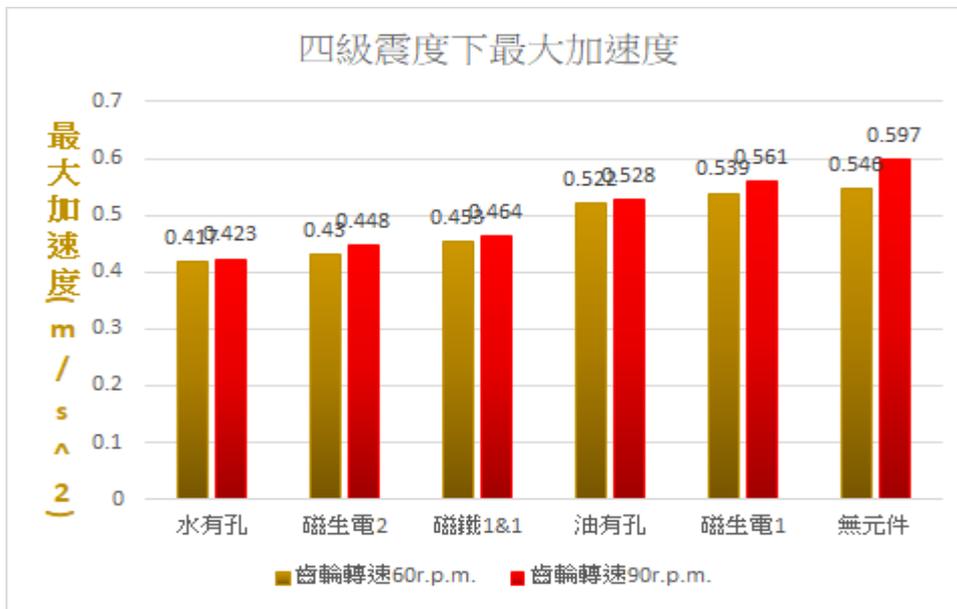


圖 37 四級震度之最大加速度值

### 實驗六討論

比較圖 36 與圖 37 與表 2-1、表 2-2 可知道模擬不同兩種四級中震都與彈射的結果相符合，水阻尼有孔之減振效果最佳。而 15cm 擺長可以達到共振，其頻率差為 0.0042 赫茲，而安裝其他消能元件之情況均與比擺長 15 公分的頻率差小或者是差不多，我們判斷以上條件均有達到共振，而提升阻尼之大小在一定範圍內可以有效的增加減振效益。

### 實驗七 探討不同線圈形式與磁鐵列陣排列下和減振效果之關係

由實驗六發現藉由冷次定律可以產生阻尼進而使得減振效能提升，我們試圖藉由示波器偵測是否有電流產生，進行測試時我們發現並無法經由銅板與磁鐵之相對運動測得感應電流。於是我們思考是否能夠透過漆包線之線圈與磁鐵之相對運動產生感應電流並測量其大小，測量時我們以一 10 歐姆電阻與線圈串聯，並以示波器之偵測棒以並聯方式跨接在電阻兩端量測其電壓對時間關係圖。藉由改變金屬線圈的圈數(150 圈與 300 圈)、磁鐵個數(2 個與 3 個)、線圈口徑(直徑 3.7cm 與 3.0cm)等不同條件，觀察示波器電壓與時間關係圖，分析其發電效能。圖 38-1 為實驗之對照組，無阻尼情況下之晃動；圖 38-2 與 38-3 為改變不同線圈數與磁鐵樹以及發電組數之示意圖。本實驗以等質量並以地震晃動平台四級震度(60r. p. m.) 為控制變因，觀測其發電效能



圖 38-1 對照組



圖 38-2 六個 150 圈之發電裝置

2 顆、3 顆



150 圈、300 圈

線圈口徑(直徑 3cm、3.8m)

圖 38-3 單擺式質量阻尼發電線圈裝置圖

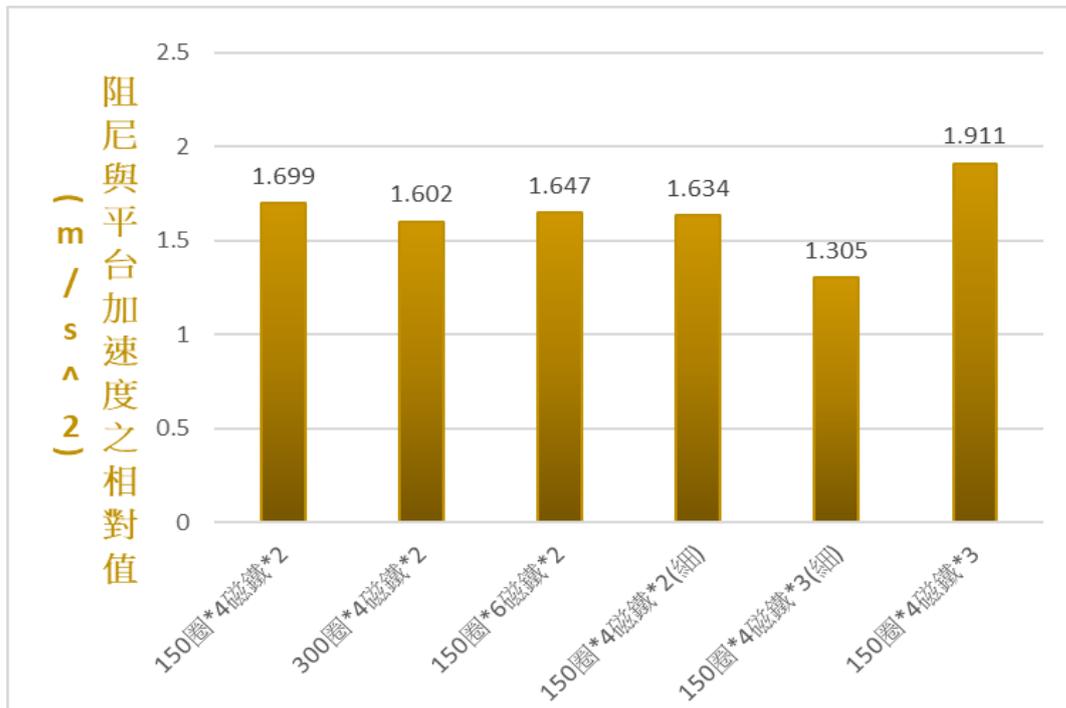


圖 39 金屬線圈於不同變因下阻尼與平台加速度之相對值的關係圖

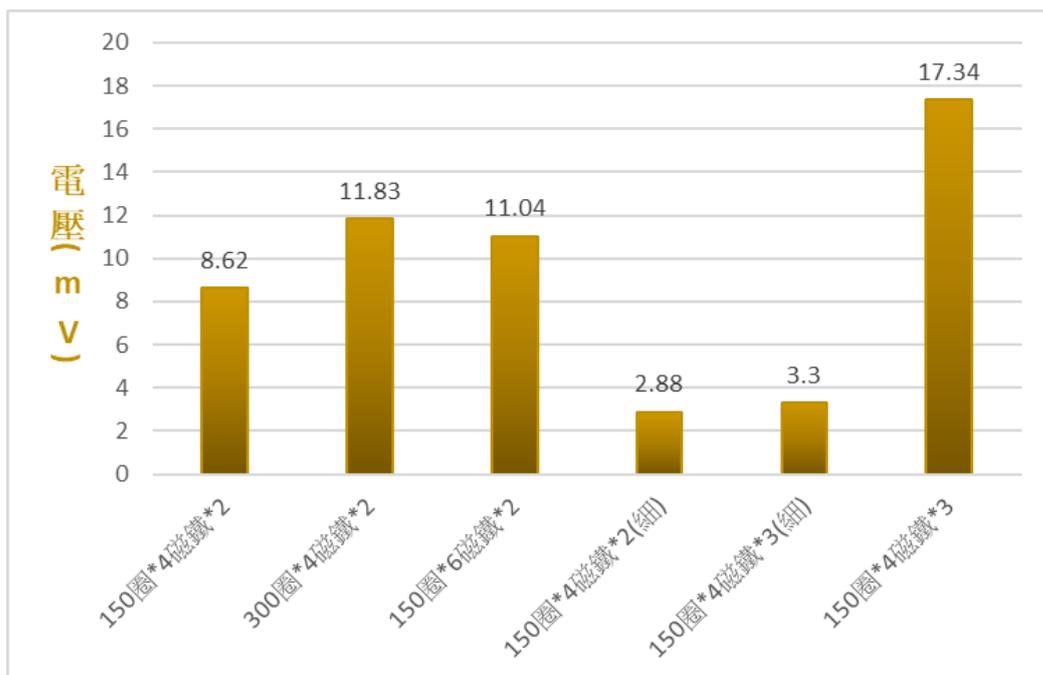


圖 40 金屬線圈不同變因對電壓的關係圖

表 3 平台與阻尼器之頻率差

	頻率差
150 圈*4 磁鐵*2	0.005
300 圈*4 磁鐵*2	0.011
150 圈*6 磁鐵*2	0.009
150 圈*4 磁鐵*2(細)	0.004
150 圈*4 磁鐵*3(細)	0.001
電磁爐線圈 磁鐵分散	0.018
電磁爐線圈 磁鐵集中	0.002
150 圈*4 磁鐵*3	0.012

### 實驗七 數據探討

由表 3、圖 39、圖 40 可以發現

線圈裝置中，平台與阻尼之相對加速度較大之情況下，其發電之電壓會較高一點。我們由表 3 可知，阻尼器與平台之頻率差均非常小，即在實驗條件中有產生反向共振的情形，以單擺系統而言加速度會於端點處有最大加速度值，兩者在反向共振的情況下，阻尼器晃至右端端點則平台剛好會晃至左端端點，進而使得相對之加速度值會較大，在往返的過程中線圈與磁鐵之相對運動會比較劇烈，進而使得單位時間內線圈內之磁通量改變會較大，而使得產生較大的感應電流，故我們所測得之電壓值會較大。而在比較平台加速度值發現對照組之平台加速度均比其他有加裝電磁消能元件的情況下略大，顯示加裝阻尼器會有減振效果，而我們也由實驗發現不同電磁消能裝置實驗條件下之平台最大加速度值相差之差異不大，故我們在此以發電之電壓大小來討論減振效能。

在反向共振之條件內，對照線圈 150 圈與 300 圈各四組發電系統可發現，在晃動之相對加速度差異不大的情境下，圈數越多其發電效能越好。而磁鐵數越多磁力線密集，產生晃動時磁力線變化越顯著其發電效能也越好。比較不同口徑大小可以發現，當磁鐵之大小與線圈之口徑大小較為接近時，發電效能是有較顯著的情況，我們認為是因為兩者在較接近時，當磁鐵輕微晃動時即可造成磁力線的改變，故發電效能較優，阻尼會較大。

### 實驗八 拆解電磁爐中之感應線圈改變磁鐵陣列探討其發電效能

我們拆解電磁爐中之感應線圈，以此線圈為我們的發電線圈，並且探討磁鐵集中與分散對發電效能之影響。裝置圖與磁鐵分布示意圖如圖 41-1、圖 41-2、圖 41-3。本實驗質量固定並且以地震模擬平台模擬四級震度(60r. p. m.)為控制變因，利用示波器觀測磁鐵集中與分散之發電效能。



圖 41-1 電磁爐發電線圈裝置圖



圖 41-2 磁鐵分散

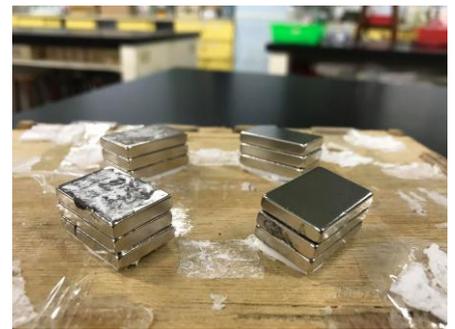


圖 41-3 磁鐵集中

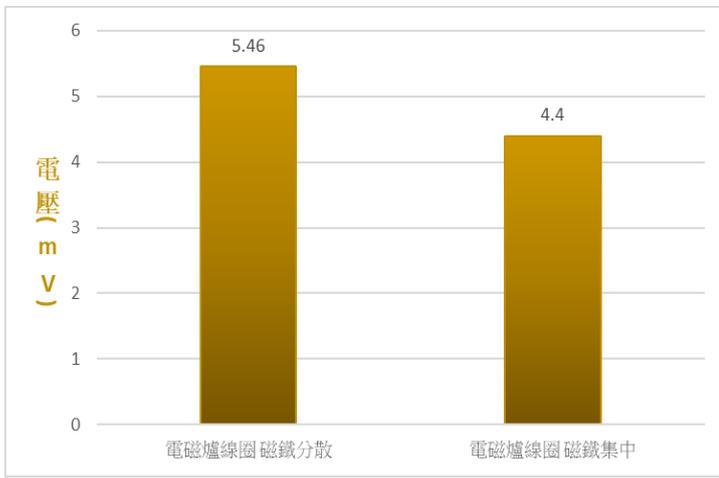


圖 42 磁鐵分佈不同之發電電壓

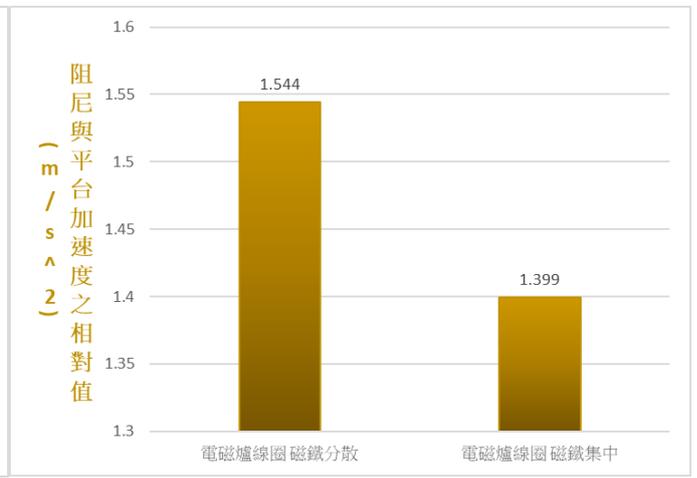


圖 43 磁鐵分佈不同之阻尼與平台相對加速度

表 4 磁鐵分散與集中之阻尼與平台的頻率差值 單位(Hz)

	頻率差
電磁爐線圈 磁鐵分散	0.018
電磁爐線圈 磁鐵集中	0.002

#### 實驗八數據討論

由表 4 可知平台與阻尼之頻率差值極小，阻尼器與平台能產生反向共振，比較圖 42 與圖 43 可知磁鐵分散安置於線圈邊緣處之發電效能略為較佳。我們認為將線圈放置線圈外圍邊為處能造成較大之磁力線改變，進而有略為較好之發電效能。

## 陸、 結論

- 當阻尼器之晃動頻率與大樓之晃動頻率接近時，能產生反向共振的情況，進而有效吸收大樓晃動之能量，造成大樓晃動幅度降低、晃動之最大加速度下降。擺錘質量較大的情況下，阻尼能吸收較多大樓晃動之能量，在安置阻尼器於大樓時不只需考量阻尼器之質量大小，同時也應該考量大樓結構能夠承受之重量負載。從實驗發現阻尼器安置於大樓高樓層處能夠有較佳的減震效果，因為大樓在晃動時，較高樓層會因為加速度放大而搖晃較劇烈，故將阻尼器安置高樓層能夠吸收較多大樓晃動之能量，進而降低大樓晃動。
- 由震盪平台分析衰減係數與模擬地震平台模擬四級地震(60r. p. m. 與 90r. p. m.)之實驗對照中，我們發現不論是液體阻尼元件還是磁鐵同性相斥阻尼元件，只要在平台與阻尼器之頻率差夠小的情況下，即可產生反向共振下，加裝消能元件均能提升減震之效果。而我們認為阻尼應該有一最佳範圍，阻尼的提升會因為摩擦力的關係而使得阻尼器的頻率改變，若是阻尼器的頻率改變太大，則阻尼器將無法與大樓產生反向共振，進而導致減振效能變差。
- 由磁生電消能元件系統可知道，藉由冷次定律我們可以知道若磁鐵與線圈產生相對運動時能產生一阻尼力，安置於阻尼器上能夠產生電能，當線圈內單位時間改變之磁力線數目越多，則產生之電能會越大。而 101 單擺式質量阻尼器除了防震更重要的目的是在防風，若能裝置磁鐵線圈之發電系統回收電能，也許能夠有效利用能源，當然實際安置磁鐵線圈系統於 101 大樓上進行發電是否可以符合經濟效益，可能需要經由工程師與科學家進行進一步的研究探討後進行評估。

## 柒、參考資料及其他

### 壹、中文部分

- 一、陳郁煊、廖芑秀、陳俊融(2019)。「震震有池-水塔阻尼器設計及減震效能探討」。中華民國第 59 屆中小學科學展覽會。
- 二、柯閔耀(2011 第三期)。「生活中的共振」。物理專刊。
- 三、鄭光泰、林佳渝、黎芷君(20170331)。「阻尼器面面觀」。
- 四、王哲夫(館訊第 323 期)。「摩天大樓的制震「護身符」-調諧質量阻尼器」。國立自然科學博物館-學習資源。
- 五、葉祥海、黃德琳、曾一平、楊森翔、吳志強(2003)。「建築物格制震設計規範與務實之研究比較」。內政部建築研究所研究報告
- 六、陳啓中、許金土(1978)。「奇妙的地熱」。中華民國第 18 屆中小學科學展覽會。
- 七、蘇泓誠、鄭子洋、廖唯均、鄔曉寧(2011)。「台灣高鐵會變身雲霄飛車嗎？以雲林縣地層下陷為例」。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會。
- 八、張祐嘉、范哲維、蘇郁恩(2016)。「黏」綿不絕—液體黏滯性對物質沉降影響探討」。中華民國第 56 屆中小學科學展覽會。
- 九、戴立嘉、徐家齊(2007)。「十震九穩—建築物抗震之研究」。中華民國第 47 屆中小學科學展覽會。
- 十、丁舜臣、唐啟釗(2006)。「隔間水槽阻尼器活塞式蓋板對工程結構物振動之效應研究」。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
- 十一、黃凱彬、莊永宗、林揚鈞(1992)。「地牛翻身」簡易地震模擬器與感應器的製作及操作」。中華民國第 32 屆中小學科學展覽會。
- 十二、廖日昇(2000)。「岩土力學與地震」。台北市：樹林。

## 【評語】 030115

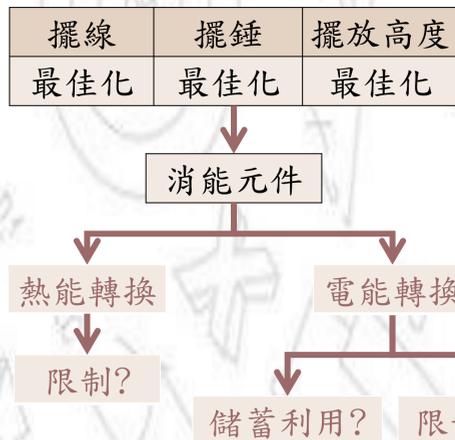
研究主題是一個有趣的想法，或許可以電磁的方式來增加阻尼減震，並可以真的回收能量。若果能探究透過阻尼器回收能量的可能性，會是一個不錯的方向。

# 壹、研究動機

台灣位於環太平洋地震帶上，地震發生頻率高，可能造成房屋損毀或倒塌。我們觀察並查資料得知台北著名地標101大樓的單擺式質量阻尼器，其質量阻尼球重達660公噸，可以防風以及抗震，並且裝設油壓消能裝置，將阻尼器吸收的動能轉換成熱能並將其消耗掉。我們希望對阻尼器的原理進行一系列的探究並進一步思考：除了藉由油壓阻尼器將動能轉換成熱能，可不可以將能量由晃動動能轉換成電能進而加以儲蓄利用。

# 貳、研究目的

1. 探討單擺式質量阻尼器之擺長長度、擺錘質量、擺放位置對減震效能之影響
2. 探討加裝液體消能元件、磁鐵同性相斥消能元件對減震效能之影響
3. 探討加裝磁生電之消能元件對減震效能之影響



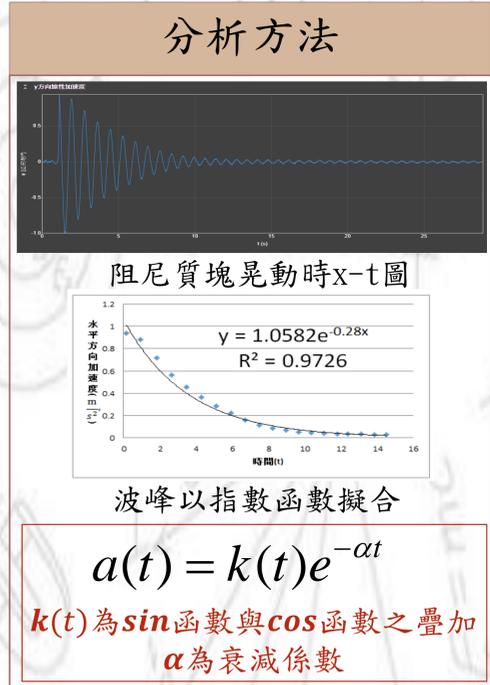
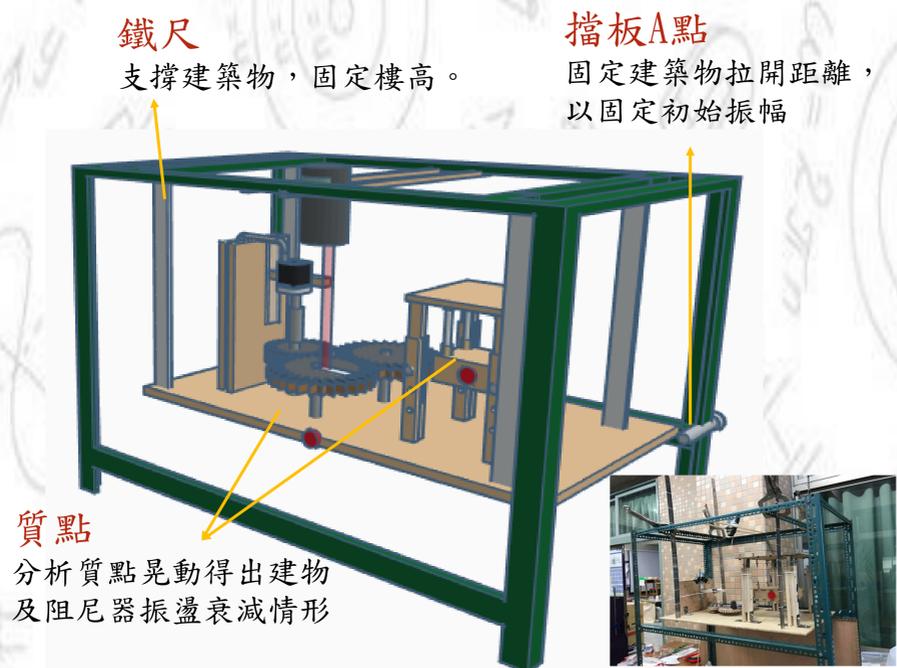
# 參、研究方法

## 實驗模擬



# 肆、彈射振動平台設置、分析方法與研究結果

- ## 實驗步驟
1. 將建物拉至擋板A點，固定最大振幅 $x_0$ 釋放
  2. 以Phyphox做測量分析。
  3. 分析頂樓質點振幅的衰減情形。

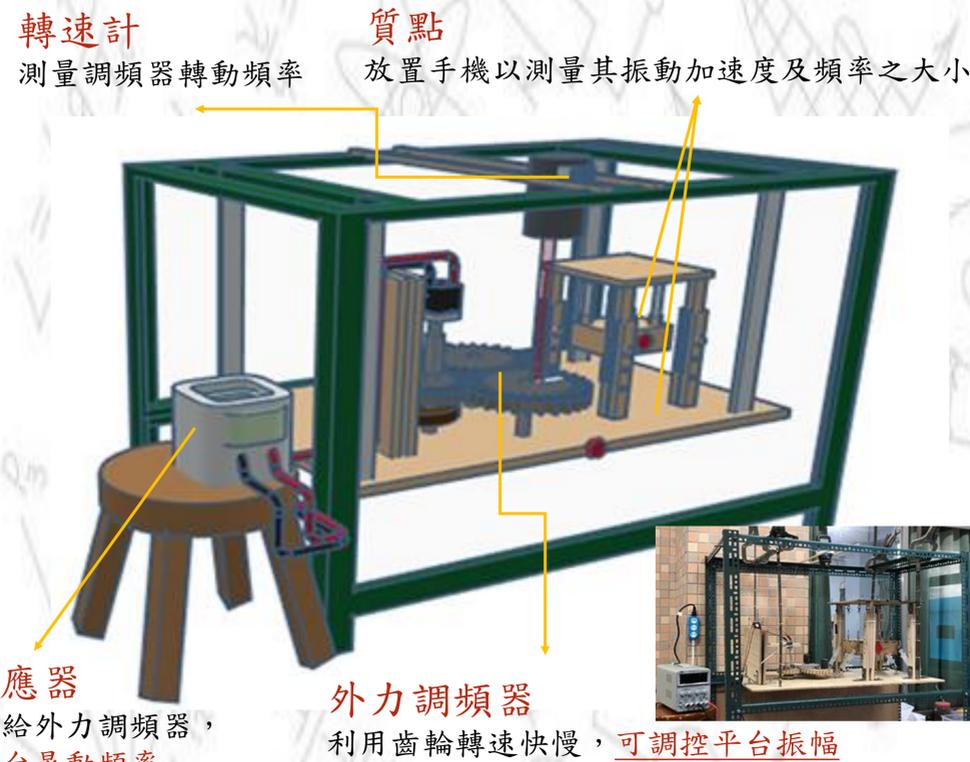


# 伍、地震晃動平台設置、分析方法與研究結果

## 震盪換算

四級中震對應之轉速計為60 r.p.m【對照組(等質量條件無阻尼器情況下之平均最大加速度值為54.6gal)】

	加速度 gal	頻率 rpm
4級	54.6	60
4級	59.7	90



- ## 實驗步驟
1. 由電源供應器調整電流強度，控制平台晃動頻率(轉速計測量)。
  2. 以Phyphox繪出質點運動情形，分析其a-t圖
- 
- 阻尼質塊晃動時a-t圖

## 研究結果

◎實驗結果1 擺線長度在12cm到18cm之間減震效能有顯著提升

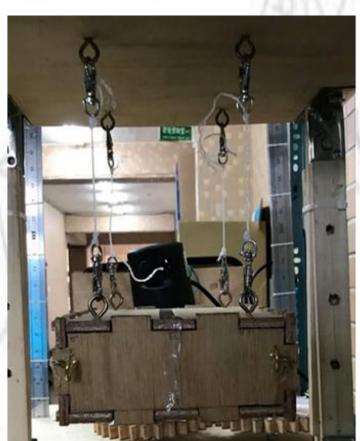


圖1 單擺質量阻尼器示意圖

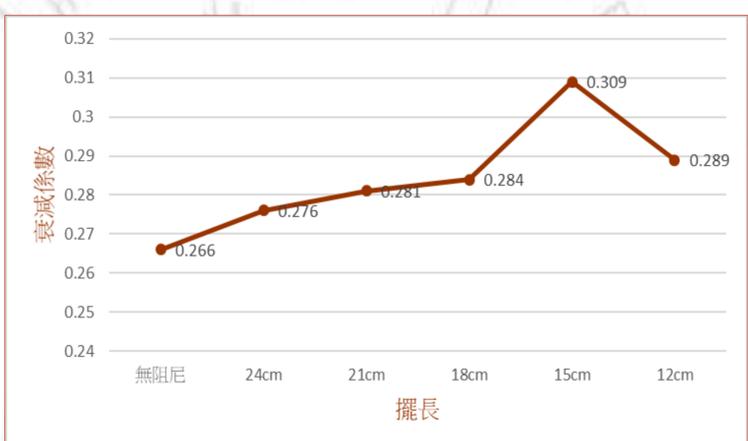


圖2 不同擺長與衰減係數的關係圖

- ## 附圖說明：
1. 條件:質塊加重砝碼400克，距離平台10cm
  2. 由圖2知擺長15cm減震效果最佳
  3. 觀察中發現擺長15cm時，單擺與平台呈規則反向擺動
  4. 擺長長度不同單擺越長頻率越小
  5. 從八年級共振概念推論，當大樓與阻尼器的頻率一致，阻尼器與大樓產生反向共振，有效吸收大樓動能

## ◎實驗結果2 擺錘質量較重(木盒+800克)，減震效能有顯著提升



圖3 阻尼器黏土配重示意圖

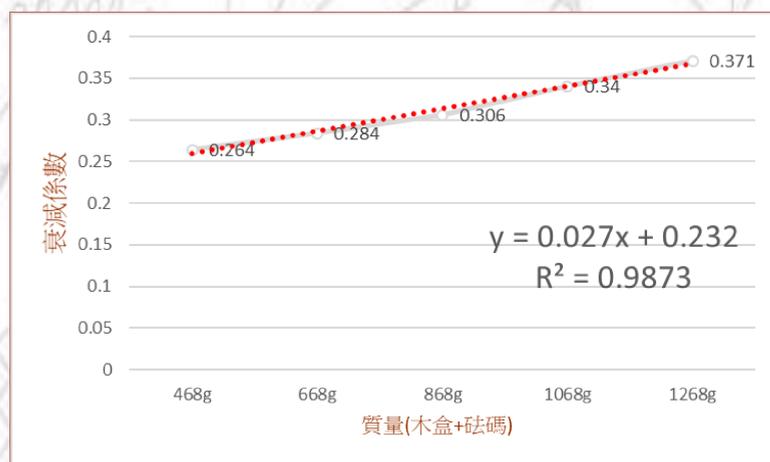


圖4 不同擺錘質量對衰減係數的關係圖

附圖說明：

1. 為避免裝置質量不同導致數據偏差，因此改變質塊內部重量時，利用束帶將黏土綁在跟阻尼器同一水平高度位置，使裝置增加的重量統一為800公克
2. 從圖4可知大樓重心不變下，**阻尼質塊越重，衰減係數越大，即減震效果較佳。**
3. 雖擺錘質量越大理論上可吸收越多能量，但若是過重可能會超過房屋最大負載，導致房屋損壞或人員傷亡。

## ◎實驗結果3 擺放高度距平台越近(距離平台10cm)，減震效能有顯著提升

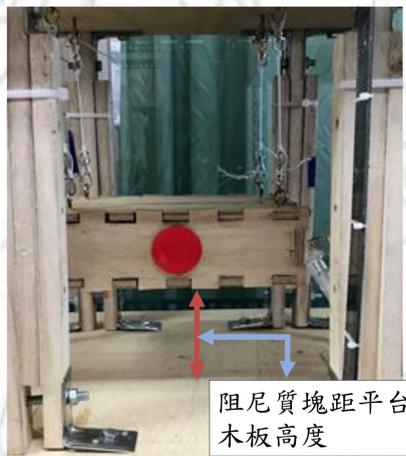


圖5 阻尼質塊與平台木板示意圖

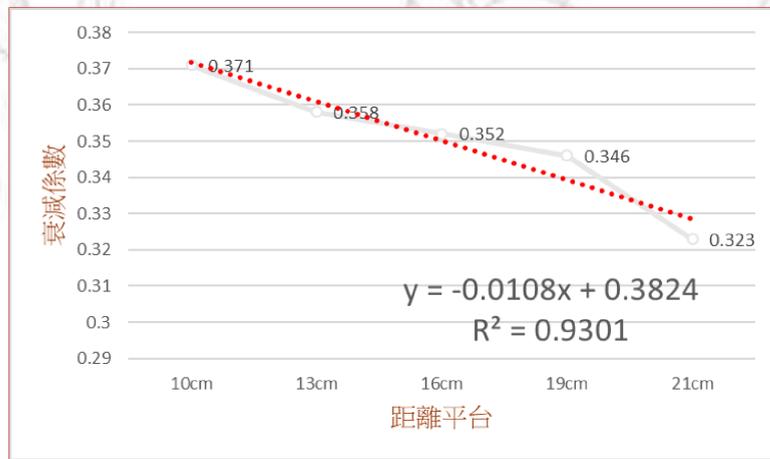


圖6 不同擺放高度對衰減係數的關係圖

附圖說明：

1. 當阻尼系統距離平台木板越遠，即一般大樓的阻尼系統越靠近地面
2. 從圖6可知，遠離平台木板其衰減係數小即減震效果差
3. 地震時高樓層相較於低樓層搖晃較劇烈，振幅與搖晃加速度均較大，故將阻尼器擺放至高樓層可吸收較多大樓晃動之能量

## ◎實驗結果4 加裝消能元件，除了油阻尼減震效能不明顯，其他條件均提升

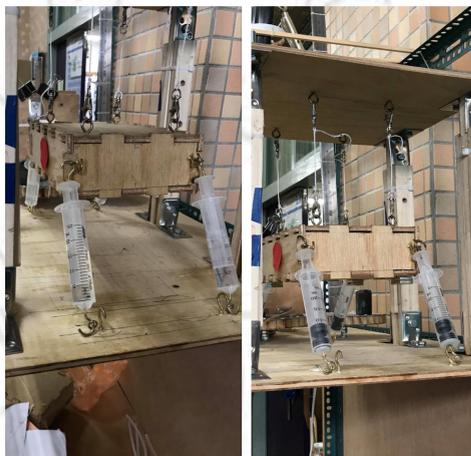


圖7 不同消能元件安裝示意圖

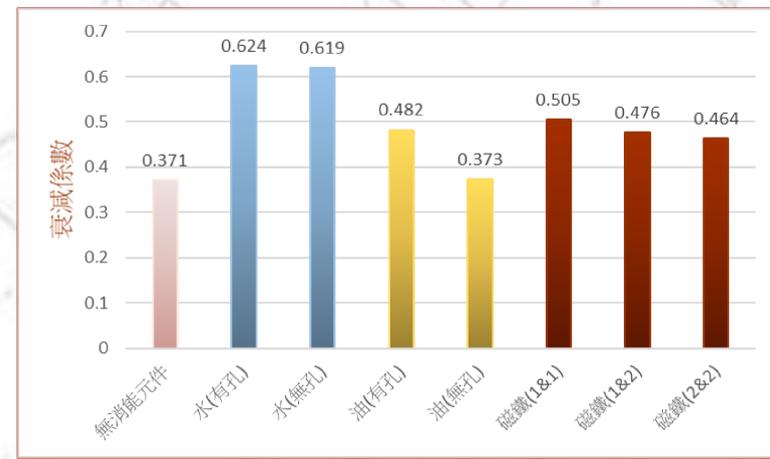


圖8 不同類型的消能元件對衰減係數的關係圖

附圖說明：

1. 由圖8發現阻尼裝置加裝消能元件的條件下，消能效果除了油(無孔)與無元件衰減係數相近外，其餘加裝消能元件均提升減震效能
2. 推論阻尼的大小並非越大越好，阻尼系統在可達**反向共振**(系統吸收能量較多)下，加入適當阻尼的消能元件能有效進行轉換消能;若阻尼過大可能導致系統**自然頻率**改變，無法與大樓產生共振。

## ◎實驗結果5-1 單層磁鐵電磁感應距平台越近減震效能較佳



圖9-1 金屬板消能示意圖



圖9-2 單層磁鐵分布圖

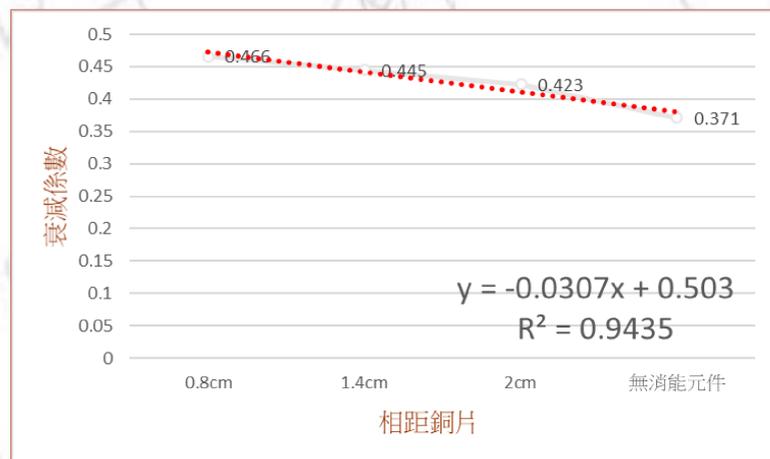


圖10 電磁感應對衰減係數的關係圖

附圖說明：

1. 將強力磁鐵安裝在阻尼質塊底部，並利用紙杯支撐金屬銅片，藉由改變紙杯高度進而調控金屬片和強力磁鐵之間的距離，以探討距離與磁阻尼之相關性
2. 從圖10發現磁鐵與銅片越靠近阻尼效果越大，衰減係數越大減震效能越好

## ◎實驗結果5-2 雙層磁鐵電磁感應距平台越近減震效能較佳



圖11 雙層磁鐵於阻尼質塊下之擺放位置

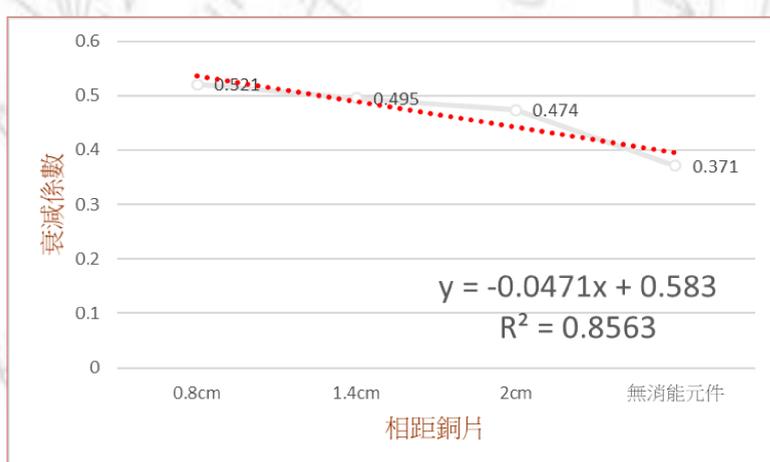


圖12 電磁感應對衰減係數的關係圖

附圖說明：

1. 由圖12可以發現，在磁體兩個相吸、四角各一組的情況下，銅片越接近強力磁鐵，消能效果越佳
2. 比較圖10與圖12可發現，兩兩一組磁鐵的減震效能比一個一個四散分布的磁鐵消能效果佳
3. 因此推論當磁鐵兩兩一組時，可和金屬片產生較強的感應力，使得阻尼裝置消能減震效果提升

# ◎實驗結果6 四級震度下不同阻尼裝置對減震效能的影響

表1 平台與阻尼器的頻率差 60r. p. m

水(有孔)	磁生電2	磁鐵1&1	油(有孔)	磁生電1	無元件
0.0014Hz	0.0012Hz	0.0020Hz	0.0038Hz	0.0043Hz	0.0016Hz

表2 平台與阻尼器的頻率差 90r. p. m

水(有孔)	磁生電2	磁鐵1&1	油(有孔)	磁生電1	無元件
0.0043Hz	0.0821Hz	0.0047Hz	0.0155Hz	0.0845Hz	0.0042Hz

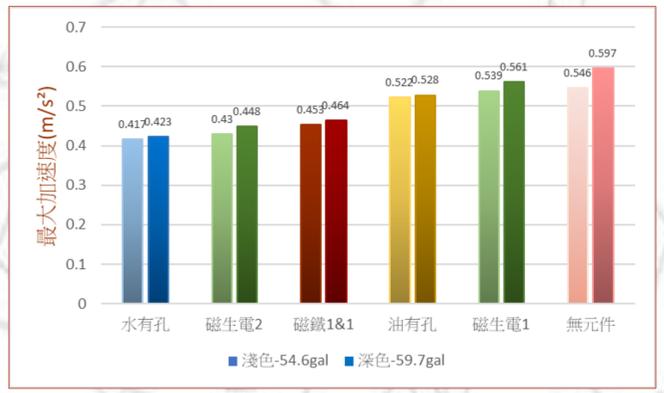
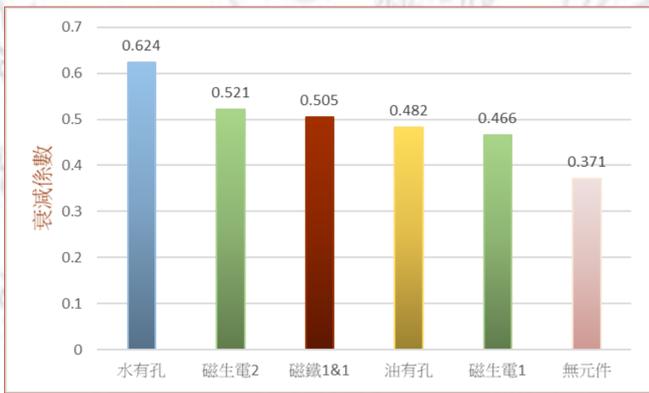


圖13 振盪衰減各條件下消能效果最佳者之比較

圖14 四級震度最大加速度值

附圖說明：

模擬齒輪轉速60和90r. p. m都與彈射結果相符合，水阻尼有孔之減震效果最佳。擺長15cm的條件下可達**反向共振**，其阻尼質塊與平台頻率差為0.0042，安裝其他消能元件之情況均有較好減震效能，因此認為上述實驗中不同消能元件均有達到**反向共振**，而提升阻尼應在**一定範圍內**可有效的增加減震效益。

# ◎實驗結果7 不同線圈形式與磁鐵列陣排列對減震效能的影響



圖15 六個150圈之發電裝置

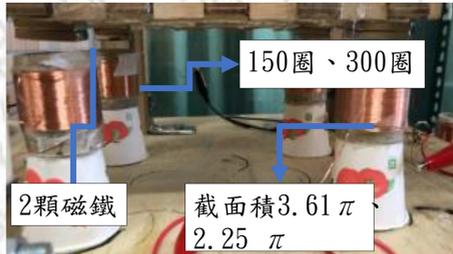


圖16 單擺式質量阻尼發電線圈裝置圖

	頻率差
150圈*4磁鐵*2	0.005
300圈*4磁鐵*2	0.011
150圈*6磁鐵*2	0.009
150圈*4磁鐵*2(細)	0.004
電磁爐線圈 磁鐵分散	0.018
電磁爐線圈 磁鐵集中	0.002

表3 平台與阻尼器之頻率差

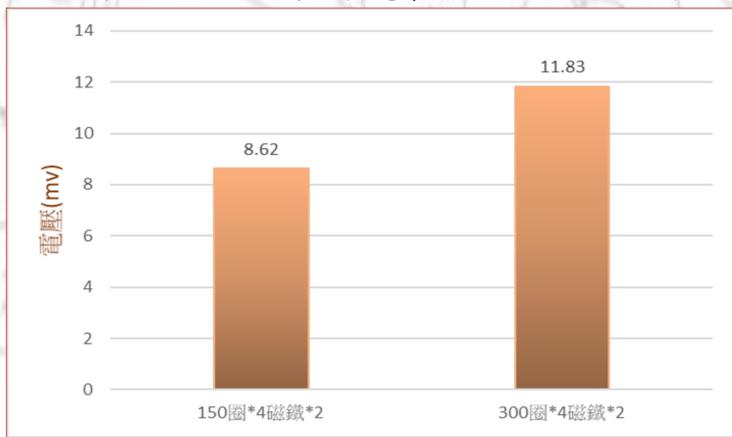


圖17 相同晃動加速度下線紮數不同之發電效能

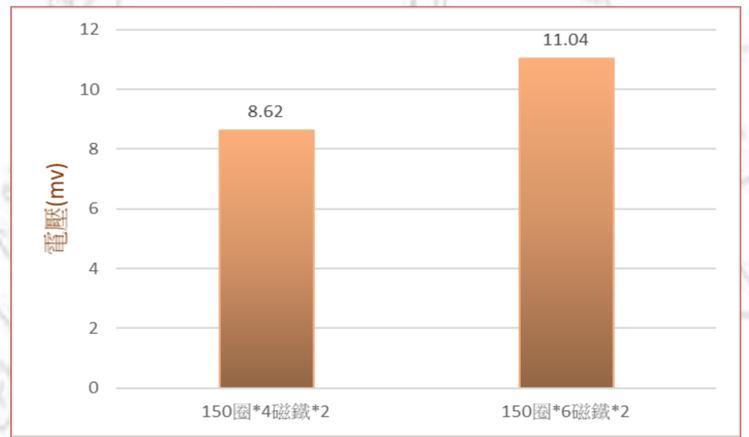


圖18 相同晃動加速度下線圈組數不同之發電效能

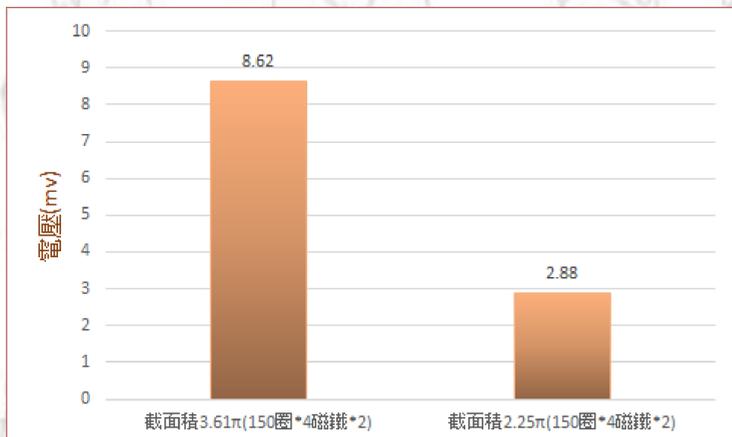


圖19 相同晃動加速度下線圈截面積不同之發電效能

原理1:單擺質量阻尼器擺動之位置與速度、加速度分別為  
 $x = R \cos(\omega t)$ ;  $v = -R\omega \sin(\omega t)$ ;  $a = -R\omega^2 \cos(\omega t)$   
 原理2:感應電動勢  $\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} = -NBA\omega \sin(\omega t)$

附圖說明：

- (1)從圖17可發現線圈紮數越多產生感應電壓越高，與感應電動勢之原理我們可知感應電動勢與線圈數N成正比
- (2)從圖18可知線圈組數越多發電效能越高
- (3)從圖19可知截面積越大產生之感應電壓越高，與感應電動勢之原理相比較我們可知感應電動勢與線圈截面積成正比關係

# ◎實驗結果8 磁鐵分散安置於線圈邊緣處發電效能佳



圖20 電磁爐發電線圈裝置圖



圖21 磁鐵分散



圖22 磁鐵集中

	頻率差
電磁爐線圈 磁鐵分散	0.018Hz
電磁爐線圈 磁鐵集中	0.002Hz

表4 磁鐵分散集中之頻率差值

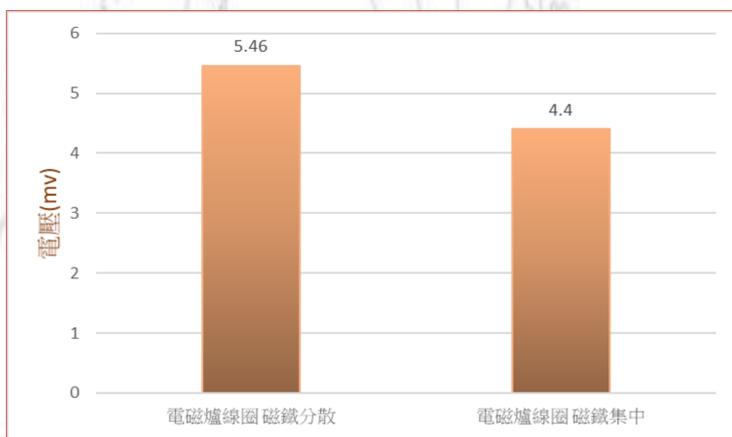


圖23 相同晃動加速度下磁鐵集中與分散之發電效能

附圖說明：

平台與阻尼之頻率差值極小，阻尼器與平台能產生**反向共振**，比較可知磁鐵分散安置於線圈邊緣處之發電效能略為較佳。我們認為將線圈放置線圈外圍邊為處能造成較大之**磁力線改變**，進而而略為較好之發電效能。

## 六、結論

- 一. 調整擺長長度影響單擺阻尼器自然頻率，當其頻率接近平台固有頻率時，可藉**反向共振**吸收較多平台動能。
- 二. 擺錘質量越大理論上可吸收越多大樓動能，但因考量建物結構之最大乘載量，故在設計上有其質量上限值。
- 三. 地震時高樓層較低樓層較易晃動，故單擺式質量阻尼器安裝於較高樓處能吸收較多大樓晃動的能量。
- 四. 嘗試不同消能元件減震效能，認為**阻尼的大小非越大越好**，系統可達**反向共振**，吸收能量較多情況下，加入適當阻尼消能元件可有效轉換系統吸收之能量；若阻尼過大可能導致系統自然頻率改變，無法產生共振。
- 五. 發電裝置線圈多磁鐵數多磁力線密集，磁鐵與線圈口徑大小接近磁鐵輕晃即可使**磁力線改變**，發電效能較佳。
- 六. 發電裝置圓盤磁鐵分散時產生較大**磁通量變化**，有較好的電能轉換效益。