

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

030108

震能共舞-減震和隔震裝置與地震動能發電之研究

學校名稱：桃園市私立復旦高級中學(附設國中)

作者： 國二 陳禹喬 國二 吳威岑 國二 林庭毅	指導老師： 陳立芄
-----------------------------------------------	------------------

關鍵詞：減震、隔震、發電

摘要

本篇研究主要討論減震及隔震裝置是否能在減少地震災害的同時，還能有發電的潛力。我們分別設計了減速馬達隔震裝置、電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器進行實驗。前者透過加裝減速馬達以及不同齒輪齒數等因素，在能減震的同時提升發電效果，當外齒輪為 36 齒，且加裝復位彈簧時，在 448gal 加速度下，建物最大加速度能減少 13%，並且能達到 1.5mW 的發電效果。後者的實驗中，我們認為電磁線圈及磁鐵兩者間距以及擺長的組合，將對建物產生不同的減震效果。實驗中在 134gal 加速度下，12.5cm 擺長搭配與 1cm 的線圈間距，能夠降低 51% 的頂樓加速度，並達到 2.9 μ W 的發電能力。透過量化裝置發電能力後，也判斷整體來說減震效果與發電量關係不大，但與類雙彈簧系統上下板的間距有關。

壹、研究動機

台灣位於歐亞板塊及菲律賓海板塊的交界處，地震消息頻傳，近期台灣最嚴重的地震就屬 2024 年 4 月 3 日於花蓮外海發生的大地震，芮氏規模達到 7.2 級，造成許多傷亡及損失，為避免再發生憾事，如何抗震成為了台灣這個小海島所需克服的困難問題。

近年來發生能源危機，火力發電造成的空氣汙染不僅使空氣品質下降，更加劇全球暖化，所以開發可用的環保能源也成為了重大課題。有一次在生科課上組裝手搖發電機，我們注意到這項發電系統的發電方式是藉由轉動連接在馬達上的搖柄來產生電能。這使我們聯想到，或許可以使用地震帶來的動能帶動馬達發電，讓減震裝置在減少地震破壞力的同時也具有發電能力，可能具有成為新型態能源的潛力。於是我們嘗試設計出兩種可能同時具備抗震及儲能的系統，來探討減震效能及發電的可行性。

貳、研究目的

一、設計能抗震且能發電的減震或隔震裝置

(一)、設計安裝減速馬達在建物底板的隔震裝置。

(二)、基於調諧質量阻尼器的設計理念，將裝置改成類似雙彈簧擺盪系統的質量調諧阻尼器，並將內部結構更改為線圈發電模，希望在減震的同時能發電的系統。

二、探討減速馬達隔震裝置在有無復位彈簧、不同外齒輪對減震及發電效果的影響。

三、探討電磁類雙彈簧系統調諧質量阻尼器之擺長、線圈和磁鐵間距對減震及發電效果的影響。並比較單類雙彈簧系統阻尼、有無電磁減震裝置對於減震性能上的差異。

參、研究設備及器材

電磁類雙彈簧系統 調諧質量阻尼器		減速馬達隔震裝置	
強力磁鐵	塑膠瓦楞板	減速馬達模組 (mini motor multy-ratio gearbox)	
木板	漆包線	模數 0.5 齒輪：40 齒、36 齒、28 齒	
螺絲與螺母	L 型角鐵	木塊	長尾夾
熱熔膠	美術掛線	彈簧	木板
震動台			
示波器			
筆電、phyphox、Microsoft Excel			

研究設備及器材 (表一)



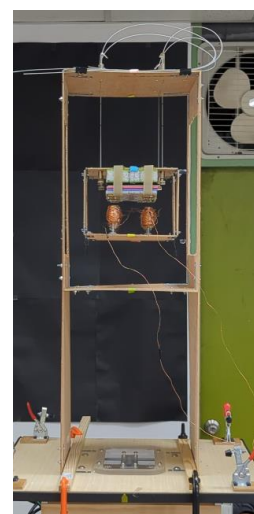
震動台

(圖一)



減速馬達隔震裝置

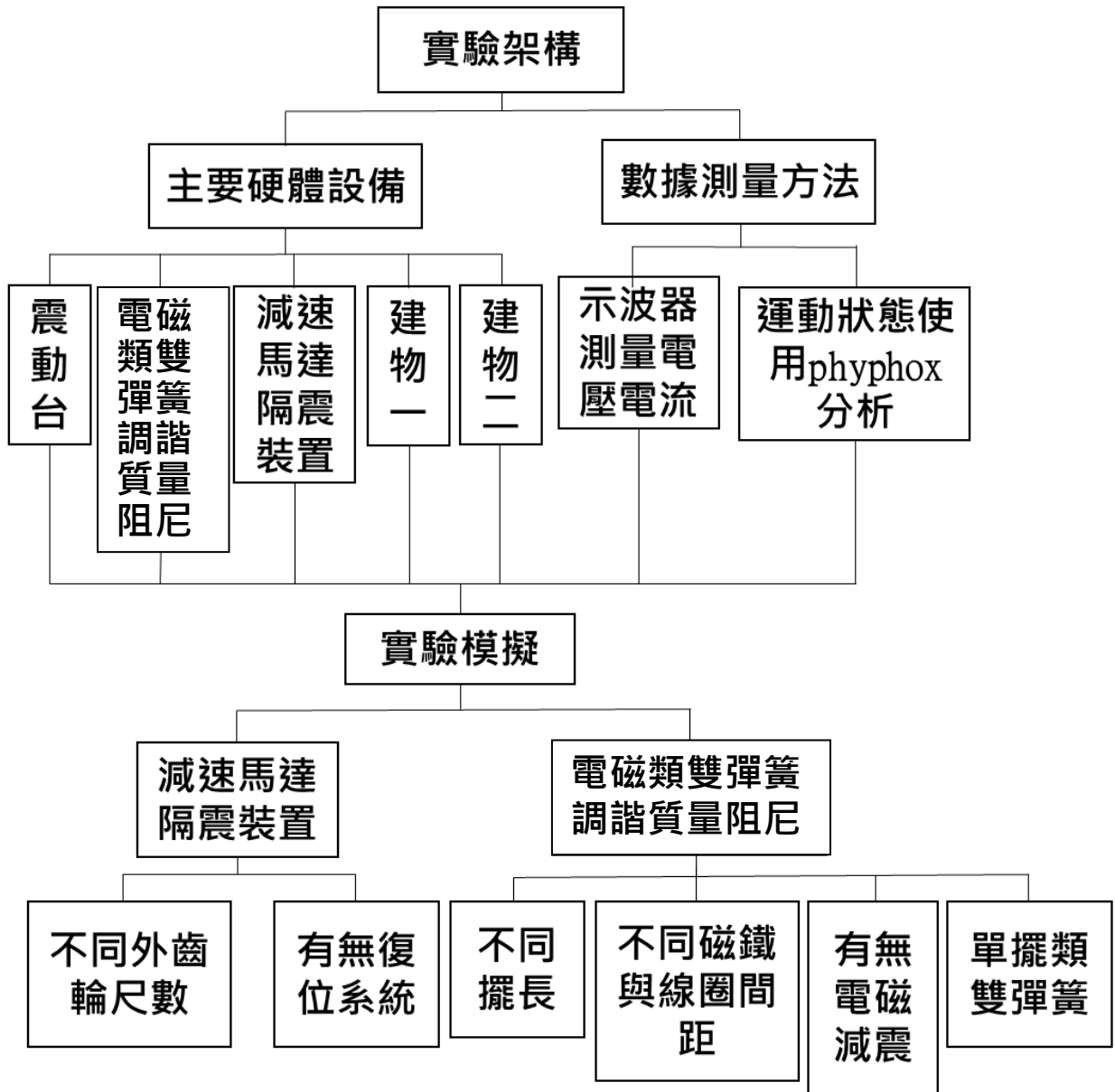
(圖二)



電磁類雙彈簧系統調諧質量阻尼器

(圖三)

肆、研究過程與方法



(表二)實驗規劃架構

一、實驗器材及裝置內容及示意圖

(一)、自製建物

減速馬達隔震裝置的建物有四層，每層皆為 30cm*20cm 之 A4 規格的木板，使用四條 90cm 之木條作為支柱，使用長尾夾連接。減速馬達隔震裝置建築如(圖四)



減速馬達隔震裝置上方建築 (圖四)



電磁類雙彈簧系統調諧質量阻尼器建築(圖五)

而電磁類雙彈簧系統調諧質量阻尼器的建築，我們使用 L 型鐵接合高度為 90 公分四塊木板型成建物主體，並在且在頂樓懸調諧質量阻尼器處，利用鋸子鋸出預留給阻尼器的擺盪空間，如(圖五)所示。

(二)、震動台及加速度

(表三)為現行台灣所使用的地震震度規範，我們分別針對減速馬達隔震系統、電磁類雙彈簧系統調諧質量阻尼系統選定了兩組不同外在震動條件，目的是使建物能產生明顯搖晃，以利後續減震效能的討論。

其中減速馬達隔震裝置實驗所使用的最大加速度為 448gal，按地震以加速度分級的舊制(以 PGA 分級)來說約為 6 強，約為 403 地震在花蓮最大震度。

電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗使用的最大加速度是 134gal，對應到的則是 403 地震在花蓮壽豐的最大震度，此加速度以 PGA 分級約為 5 弱。

震度階級	0 級	1 級	2 級	3 級	4 級	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7 級
PGA (cm/sec ²)	<0.8	0.8~ 2.5	2.5~ 8.0	8.0~ 25	25~ 80	80~ 140	140~ 250	250~ 440	440~ 800	>800

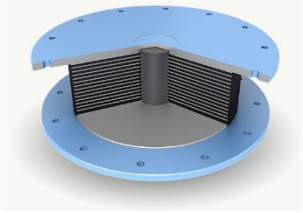
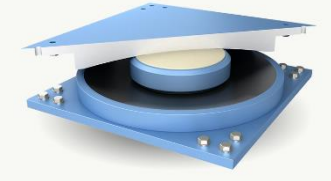
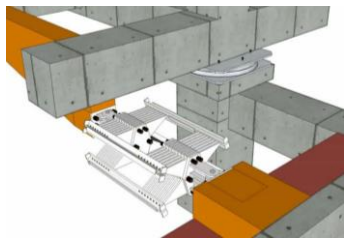
震度階級	0 級	1 級	2 級	3 級	4 級	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7 級
PGV (cm/sec)	<0.2	0.2~ 0.7	0.7~ 1.9	1.9~ 5.7	5.7~ 15	15~ 30	30~ 50	50~ 80	80~ 140	>140

(表三)現行台灣地震震度規範對照表

(三)、減速馬達隔震裝置設計

參考了全國中小學科展第 60 屆的得獎作品，在電磁感應運用於調諧減震裝置的基礎上，我們認為直接使用馬達模組作為發電單元，相較於線圈與磁鐵的調諧阻尼系統，應有更高的發電效率，同時也可以縮小整個減震系統的架構。在設計時，由於考量到發電機是運用旋轉電樞進行發電，因此可能更適合搭配建物與地基可錯動的隔震系統。使建物與地基兩層間的相對運動帶動發電機，實現發電及減震效果。

隔震系統是透過分隔建物與地基，使地震來時，建物不直接受到來自地面的力作用而減少能量傳入建物的裝置，常見型式(表四)。在查閱了現行常被使用隔震系統，如 LRB 鉛心橡膠系統、FPS 磨擦單擺系統、ASBD 低磨阻雙曲面單擺系統三個隔震系統、發現大致可將系統分為隔震層、消能元件、復位元件三個主要部分。

		
LRB 鉛心橡膠系統	FPS 磨擦單擺系統	ASBD 低磨阻曲面單擺系統

(表四)常見隔震系統對架構圖

與老師討論後了解到，國三理化功與能有提到透過簡單機械的不同設計可以達到省力費時和費力省時的不同作功方式。相較於上下板錯動過程直接帶動馬達進行轉動，進而產生發電效果，阻尼小對於地震消能、轉移、轉換能量的效果可能不明顯。我們認為透過錯動來帶動加裝了減速齒輪的馬達作為發電系統，將使減速馬達開始轉動發電，需要更大的力矩即消能性強，能量轉換效率可能會比較高。一但轉動後，發電效率也會比較高，或許有著可取代 FPS 及 ASBD 系統的隔震元件的潛力，相關比較如(表五)。我們認為此架構不僅可以省除額外的消能元件，同時具有以下特點：

1. 可藉由提升齒輪比來提升發電機抗力矩，或減少外齒輪半徑進而減少施力臂來達到費力省時的效果，提高系統減震阻尼的消能，產生不同程度的減震效果。
2. 減少齒輪比同時也提高了內部發電機的轉速比，可有機會能提升發電機轉速，進一步提升發電的效率。

$$\text{齒輪比} = \frac{1}{\text{轉速比}} = \frac{\text{從動齒輪齒數}T_i}{\text{主動齒輪齒數}T_0} = \frac{T_2}{T_1} \times \frac{T_4}{T_3} \times \dots \text{-----}(1)$$

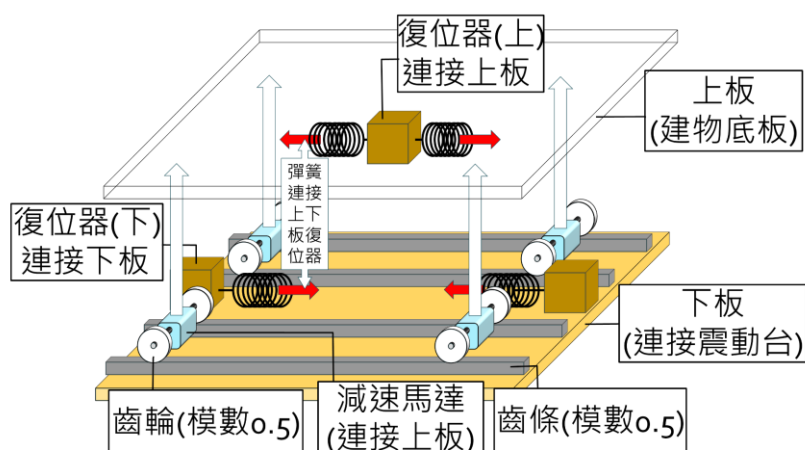
由齒輪比關係可知，若齒輪比小時、轉速比大，以我們使用的 1/4.6 可知，減速馬達內電樞的轉速將為為外部齒輪的 4.6 倍，因此可推論當隔震系統開始作動，上下板間有錯動時，些微的位移即可造成內部馬達的快速運轉，進而提升發電功率。同時在理想性假設下，由於輸入功=輸出功，馬達內轉動的抗力矩傳動至外齒輪時，啟動所需的力矩亦將提升至少 4.6 倍，將使外齒輪產生更大的抗力矩進而達到消能，轉換能量的目地。

	消能元件	隔震元件	復位元件
鉛心橡膠 LRB	橡膠片、鉛柱		
磨擦單擺 FPS	曲面間模擦	曲面結構+動子	
低磨阻曲面單擺 ASBD	阻尼器	曲面結構+動子	
自制減速馬達隔震系統	齒條+減速馬達齒輪		彈簧系統

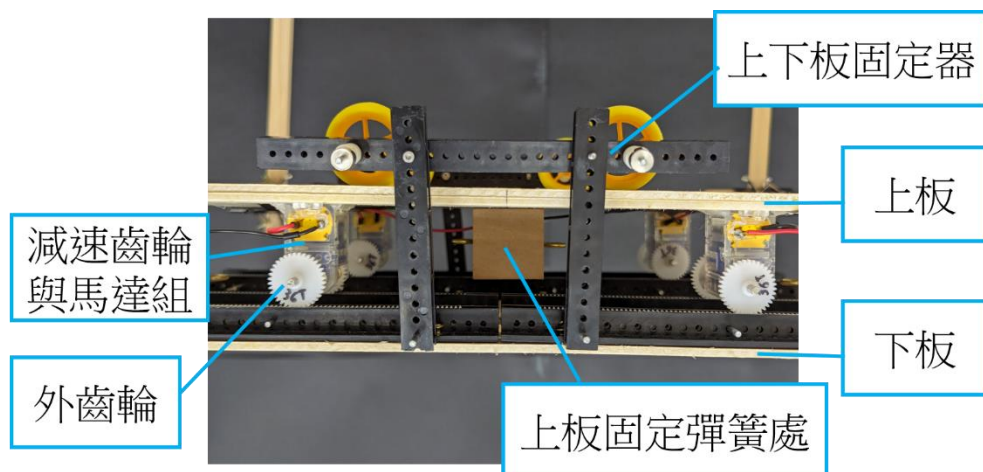
(表五)現行常見隔震裝置比較

因此我們以兩塊 20*30 公分的 A4 木板做為隔震裝置的上板跟下板，其中有關各元件詳細說明及示意圖如(圖六)，減速馬達的齒輪比固定採用 4.6:1，四個減速齒輪發電機組採串聯：

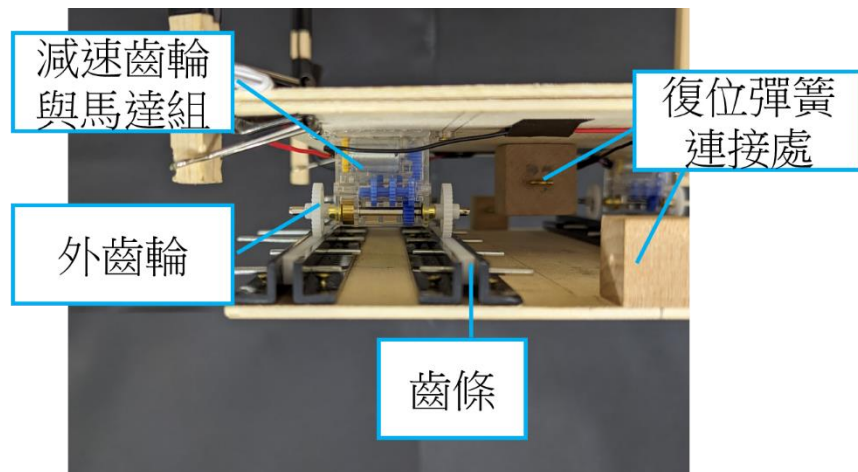
1. 復位元件：上下板各自以彈簧金屬鈎連接在一起作為復位裝置，使得上板的建物在地震過後不至於產生位移。
2. 隔震、消能元件：分別在下板裝上模數 0.5 的齒條軌道，並在上板加裝四組減速馬達(發電機)，其中馬達的兩端連接上模數 0.5 的齒輪，使上下板的齒條和齒輪能因建物重力自然咬合，在上下板滑動過程中能帶動發電機進行發電。



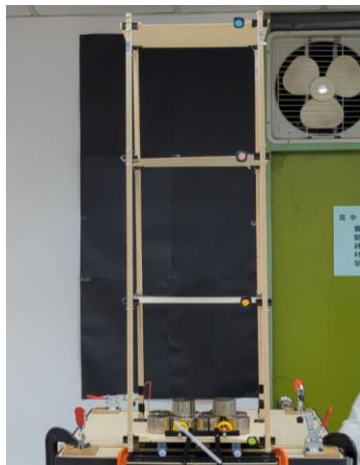
(圖六)減速馬達隔震裝置設計圖



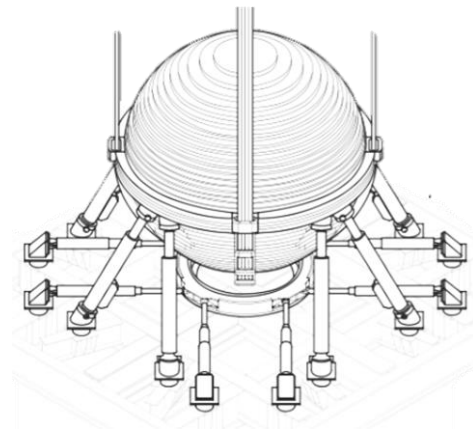
(圖七)減速馬達隔震裝置示意圖



(圖八)減速馬達隔震裝置側視圖



(圖九)減速馬達隔震裝置整體架構圖

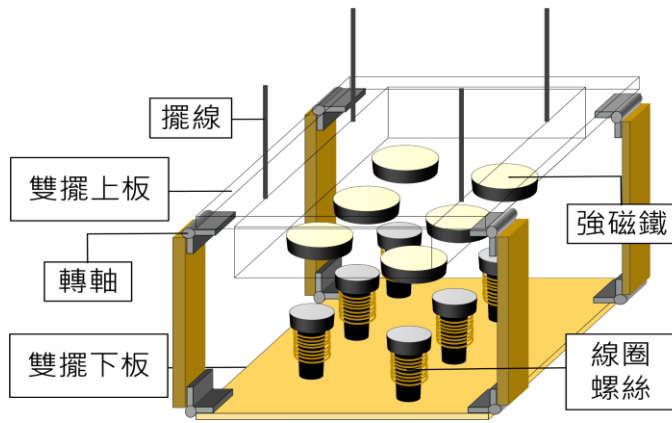


(圖十)台北 101 所使用的 TMD 系統

(四)、電磁類雙彈簧系統調諧質量阻尼器設計

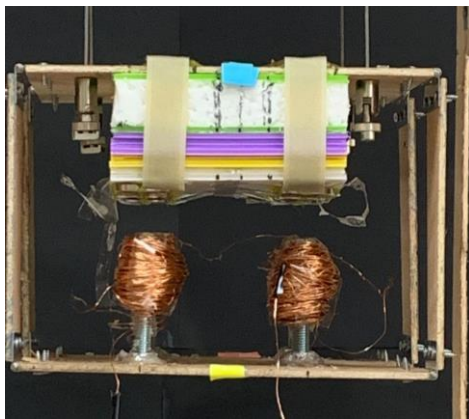
調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper 簡稱 TMD)系統是透過設計阻尼器結構，使其震盪頻率與建物自然頻率接近，使地震來時阻尼器產生反向的共振，來吸收建築物動能，進而達到消能功效，國內最有名的案例便是台北 101 的風阻尼球，如(圖十)。

我們一開始在查找資料時，發現類雙彈簧系統的震盪系統搖晃雖然較單擺雖不規律，但兩擺時常以極高的速度進行相對運動，若加上電磁線圈於兩擺間，震動時兩擺的高速相對運動若運用在電磁感應發電時，是否具有更高的消能潛力呢?因此我們將原本一體的單擺調諧質量阻尼器的阻尼塊改成上下兩層可錯動的平行木板，以可轉動的木條連接上下板，使上下板具平行擺盪的能力，可作為類雙彈簧震盪系統的調諧質量阻尼器，(以下稱類雙彈簧 TMD)，如(圖十一)。並在上下層板間裝上了六組強力磁鐵，與纏在螺絲上的 600 匝線圈上下相對，串聯作為消能及發電元件，佈置上刻意使他們交錯，以免在實驗時不同排的線圈組相互碰撞而影響實驗結果。

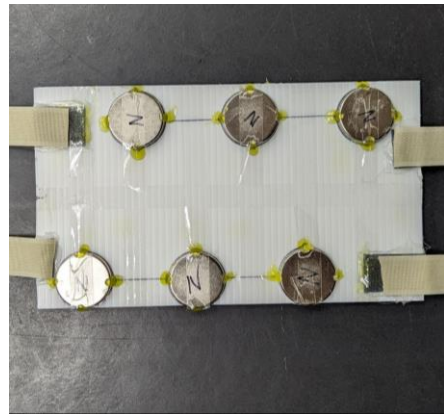


(圖十一) 電磁類雙彈簧 TMD 示意圖

實際上我們使用兩塊 20*20cm 的正方形木板以及四條 16* 5cm 的長條形木板來搭建電磁類雙彈簧 TMD，並使用可調式美術鋼索作為擺線連接於上板，以達到鋼索及木片都可擺動的類雙彈簧系統效果。最後將整個系統連接於建物頂部，使電磁類雙彈簧 TMD 懸吊於建物內。



(圖十二) 電磁類雙彈簧 TMD

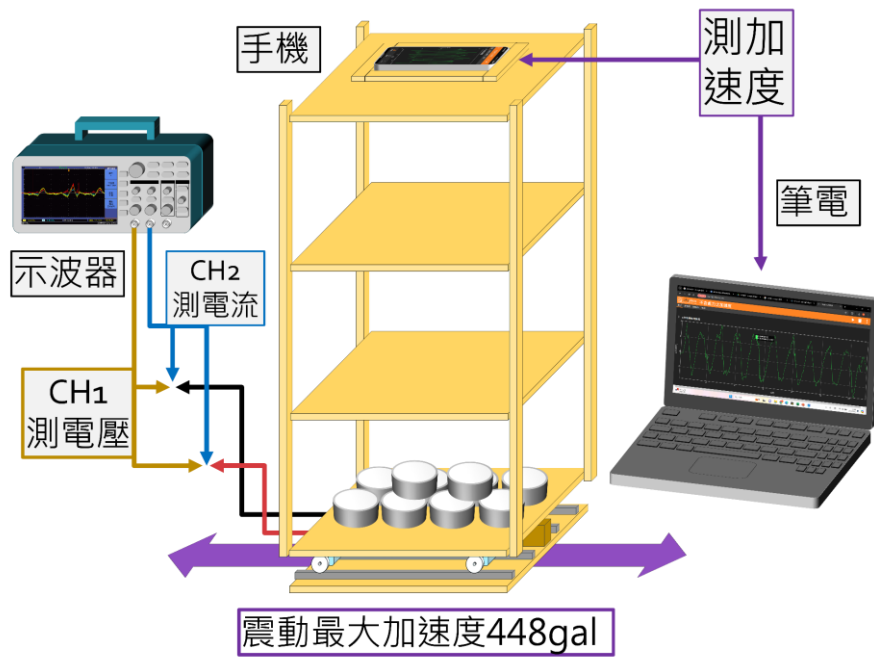


(圖十三) 強力磁鐵與線圈配置圖

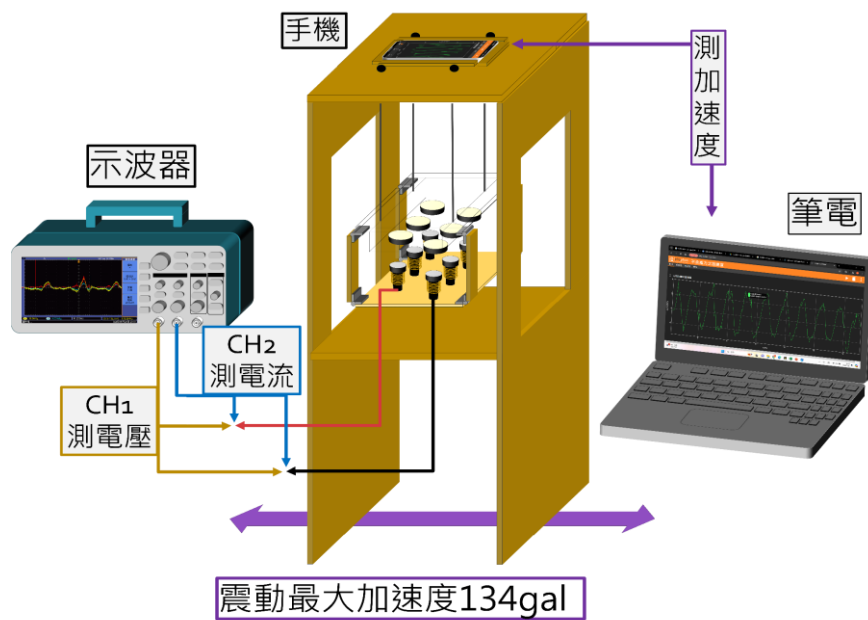
$$\text{感應電動勢 } \varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N \frac{\Delta BA}{\Delta t} \text{ -----(2)}$$

跟據電磁感應定律，我們預期當阻尼器在擺盪時，固定在上板的磁鐵會和下板的漆包線圈不斷的錯動，而漆包線所纏繞的螺絲作為軟鐵有吸引集中磁力線的功能，預計將使得線圈的磁通量時變率得以更加劇烈產生更強的感應電動勢。同時也能增加上下板間錯動時的磁力所產生的阻力，藉由作負功將動能轉為電能進而達到消能目的。

二、測量方法



減速馬達隔震裝置實驗

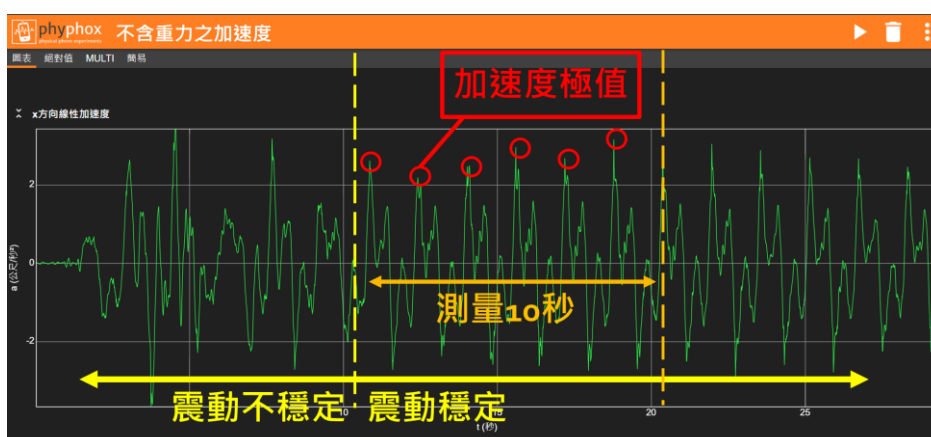


電磁類雙彈簧 TMD 實驗

(圖十四)實驗架構示意圖

(一)、建物加速度量測及減震效果評估

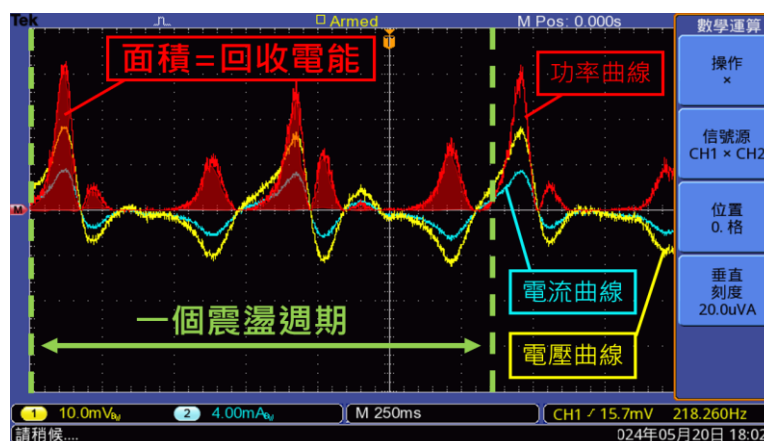
在加速度測量方面，我們使用物理量測軟體 phyphox 來測量建物頂部的加速度。並利用遠端連線功能以電腦即時蒐集加速度值。資料整理方法則是待建物出現穩定的規律性震動後，以電腦截取連續 10 秒的加速度分佈，如(圖十五)，取出這 10 秒內每次震動週期的加速度極值，並重複 5 次實驗，求得最佳估計值及不確定度，以評估地震對建物的作用力。



(圖十五) 以 phyphox 截取加速度極值示意圖

(二)、發電裝置功率量測及回收電能評估

在測量加速度的期間，我們同時以示波器的 CH1、CH2 檔位探針分別偵測從發電裝置所傳出的即時電壓(黃線)、電流(藍線)波型，如(圖十六)。接著利用示波器函數功能，讓 CH1、CH2 讀值相乘，即可得到瞬時電功率分佈曲線(紅線)。最後在五次實驗中，每次各截取 3 張不同時間的功率曲線圖，所紀錄的 15 次資料以 EXCEL 分析，即可求得紅線下方面積即回收電能大小。可算出發電機在地震期間的平均功率及不確定度，評估發電效能。



(圖十六) 示波器電能分析示意圖

三、實驗過程

(一)、減速馬達隔震裝置

【減速馬達隔震裝置實驗一】

討論建築物齒輪齒數多寡對減震及發電效果的影響

在設計實驗架構時，我們認為當增加減速馬達的外齒輪齒數(半徑)時，可讓震動台、建物相對運動時，上下板間所產生的慣性力有更大的力臂，也就是相同慣性力下對發電系統產生的施力矩將會有所提升，或許也能讓減速馬達隔震裝置的上板與下板之間作動更順暢，進而可能產生不同程度的隔震與消能效果。

因此設定每個隔震用減速馬達的齒輪比為 4.6:1，四個減速齒輪發電機組採串聯，並在建物底板上放置 5 公斤砝碼增加建物慣性，在加速度極值為 448gal 的震動條件下。在馬達上依序安裝 28 齒、32 齒、36 齒及 40 齒齒輪，測量建物加速度，輸出電功率分析。

【減速馬達隔震裝置實驗二】

討論有無加裝彈簧（復位裝置）對減震及發電效果的影響

在減速馬達隔震裝置上除了齒輪和馬達之外，我們使用了彈簧作為隔震裝置的復位器，在做實驗的過程中發現，減速馬達隔震裝置上板與下板之間的相對運動之所以不順暢，很有可能是因為受到了彈簧拉力的影響，由於上板與下板是透過彈簧連接在一起的，所以上下板在進行相對運動時，就有可能會受到彈簧的束縛，進而導致作動不順，隔震和發電效果都不佳，所以我們想試試看，如果拆掉彈簧，是否能讓隔震和發電效果更好一些。

因此，在外齒輪 36 齒，其它變因不變的條件下，進行有加裝彈簧(有復位元件)和無加裝彈簧(無復位元件)的加速度與電功率的分析比較。

（二）、電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗一】

討論擺長對減震和發電能力的影響

在單擺 TMD 的相關資料中，我們了解到由於擺長影響到的擺動頻率，將決定阻尼器是否能和建物共振進而達到消能功效。雖然架構已調整成類雙彈簧 TMD 型式，但在震動台與以及電磁線圈阻尼器的作用力下，整體擺盪仍具一定規律性，或許可產生減震效果。因此我們希望測量在不同擺長下的電磁類雙彈簧 TMD，對應到的減震及發電效能。在實際實驗中由於木板上切割的空間有限，最長擺長只能為 27cm，而最短擺長為 9cm 還要容納有厚度的阻尼塊的空間，因此在幾經討論後，決定使用 10、12.5、15、17.5、20cm 這五組擺長，在加速度極值為 134gal 下，分別量測建物頂部加速度、輸出電功率等資訊。

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗二】

討論上下板間距對減震和發電能力的影響

在電磁類雙彈簧 TMD 實驗中，當建築搖晃帶動阻尼塊擺盪時，磁鐵及線圈會行相對運動，根據法拉第電磁感應定律，強力磁鐵與線圈的距離，將會影響到線圈磁通量，晃動時也影響到所產生的感應電流，也進一步影響到線圈磁鐵間受到的阻力大小。因此我們決定透過改變兩者間距以檢測間距對減震及發電之影響。使用塑膠瓦楞板和魔鬼氈將上板的磁鐵往下墊，用來改變上板磁鐵與下板線圈的間距。這部分由於線圈在與磁鐵之間距少於 1cm 時會被磁鐵吸附而失去大部分晃動能力、而間距大於 2cm 時又會因相距太遠而使線圈所感受到的通量變化太微弱而無法產生明顯的減震及發電效能，因此設定的間距分別為 1cm、1.33cm、1.66cm、2cm。塑膠瓦楞板數量與線圈和磁鐵的距離之關係表格如（表六）。相同條件下測量其加速度、輸出電功率。

瓦楞板片數	6 片	7 片	8 片	9 片
間距	2cm	1.66cm	1.33cm	1cm



（表六）瓦楞板片數與磁鐵線圈間距關係

（圖十七）改變間距的系統示意圖

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗三】

討論單擺及雙彈簧系統對減震能力的影響

由於前兩個實驗皆以電磁類雙彈簧 TMD 之擺盪方式做為控制變因，因此我們想回頭評估這個系統與現行的其它消能系統的減震效益，因此選擇比較單擺 TMD 以及類雙彈簧 TMD，這兩種不同架構對於減震效果的優劣。針對單擺 TMD，透過將與磁鐵同質量的塑膠瓦楞板堆疊放入在阻尼器上下板中取代原本的磁鐵，同時使上下板間無法作動，此時可視為一個單擺系統。也因為如此，這組實驗並無發電能力，僅比較同震盪條件下的加速度，評估減震效果。

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗四】

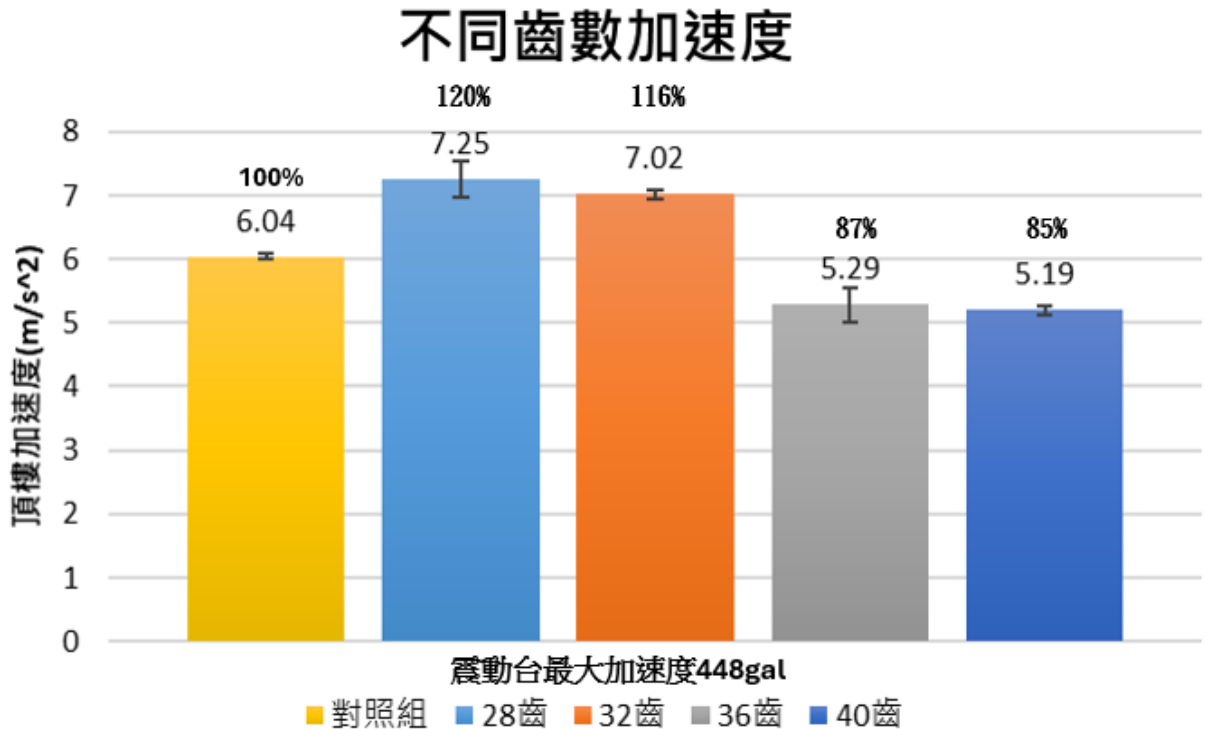
討論類雙彈簧 TMD 及電磁雙彈簧 TMD 對減震效果的影響

實驗一、實驗二兩組實驗皆使用類雙彈簧 TMD 作為減震裝置。我們預計上、下板裝了線圈以及磁鐵後會使兩板產生額外的吸引力抵抗錯動，或許有類似傳統斜撐式消能器的功用，因此我們想進一步探討阻尼器中的電磁感應線圈除了發電外，對於減震效果的實際影響如何。因此，在同震盪條件下進行完全無加裝線圈的類雙彈簧 TMD 和加裝了電磁線圈的電磁類雙彈簧 TMD 做加速度及減震效果的比較。

伍、研究結果及討論

【減速馬達隔震裝置實驗一數據探討】

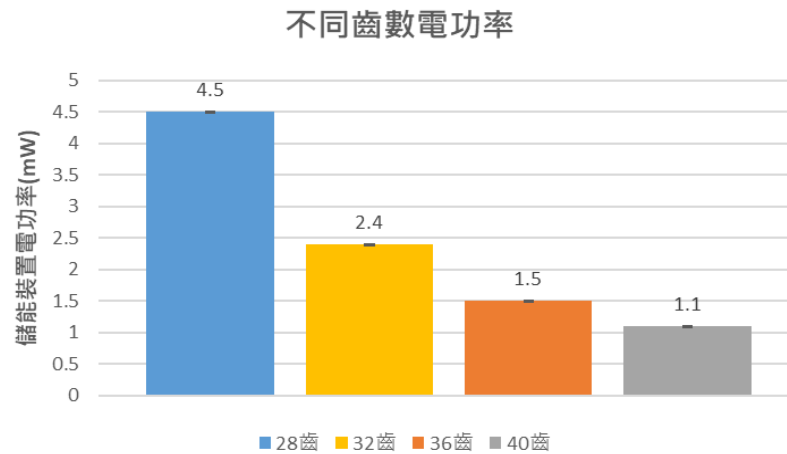
一、以頂樓最大加速度討論減震效果



(圖十八) 不同外齒輪下頂樓加速度對比圖

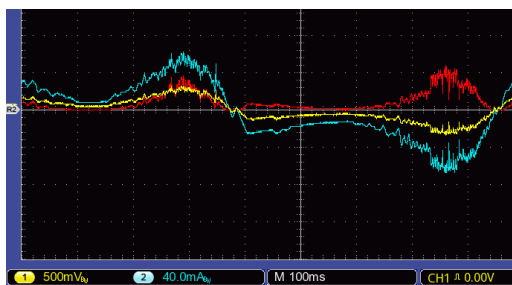
由(圖十八)我們可得知，使用的外齒輪之齒數與隔震效果的關係與先前的假設相符，當減速馬達隔震裝置的外齒輪齒數越大(即齒輪半徑越大)，慣性力的施力臂增加使得齒輪更容易滾動，將使得隔震裝置容易作動，減震效果較佳。實驗結果中，28齒、32齒的建物頂部的最大加速度相較於對照組增加了20%和16%，推測這兩組之所以沒有減震效果和隔震裝置的啟動時機有關，由於28齒、32齒的齒輪不易作動，以致於震動初期隔震裝置並沒有開始作動，建物は隨地面一起搖動，直至地面搖晃達端點建物方被甩出，造成了加速度反而增加的效應。而36齒、40齒，隔震裝置則較易作動，建物頂部加速度極值相較於對照組則分別下降了13%、15%，具一定程度的減震效果。

二、發電能力比較

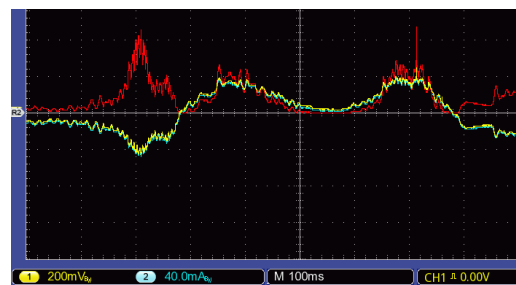


(圖十九) 不同齒數電能對比圖

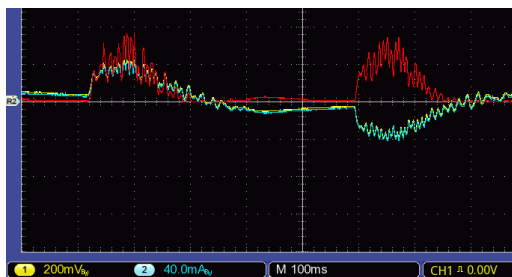
透過 (圖十九) 可知，28 齒的電功率為 4.5mW，32 齒的為 2.4mW，36 齒的為 1.5mW，40 齒的為 1.1mW，當減速馬達隔震裝置加裝的齒輪齒數越小，轉速比愈大，發電效果就越好，反之齒數越大，發電效果就越差。但考量到 28、32 齒隔震裝置作動不易，產生的減震效果不如預期，針對目前的建物而言，我們認為 36 齒的架構整體能讓加速度值下降 13%、對應到的電功率則為 1.5mW，是對於目前來說較好的選擇，當此架構轉移到實際建物規模時，或許能產生相當程度的電能，針對不同維度地震或許可以以球狀齒輪來解決，但設備老化及維護等問題或許是需要克服的重要原因。



28 齒



32 齒



36 齒

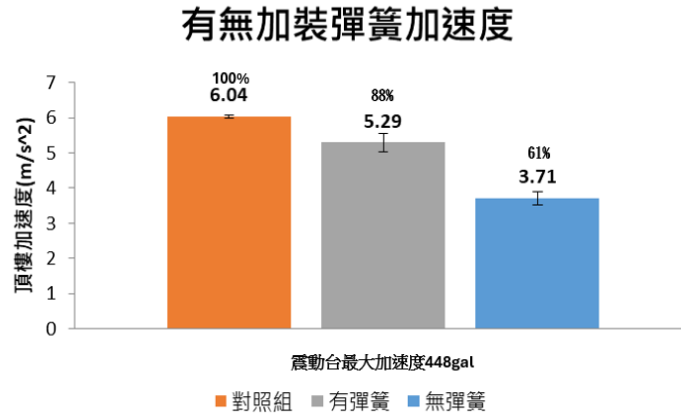


40 齒

(圖二十) 不同齒數電功率波型圖

【減速馬達隔震裝置實驗二數據探討】

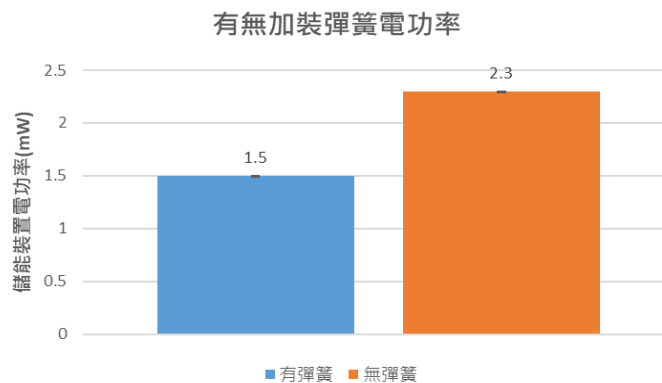
一、以頂樓最大加速度討論減震效果



(圖二十一) 有無加裝彈簧對隔震效果之影響

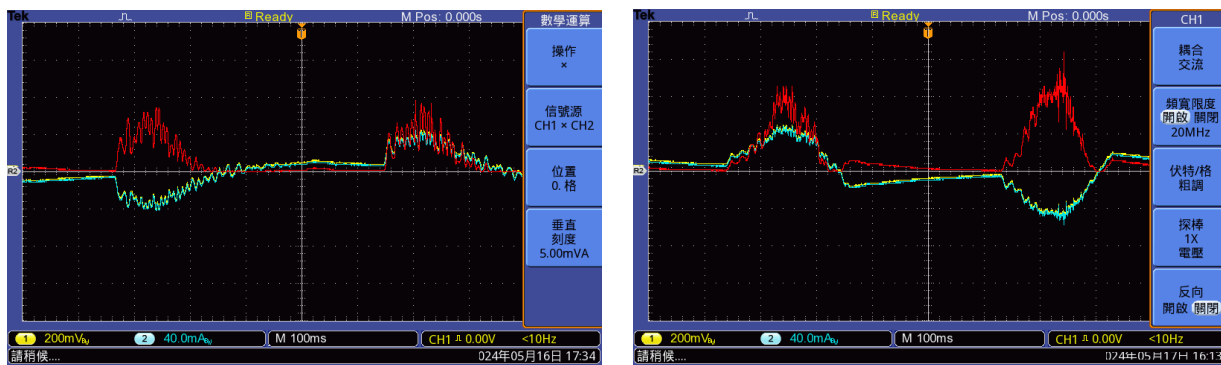
由(圖二十一)可以發現，不管有無加裝彈簧都能有減震效果，但無加裝彈簧的減震效果明顯是比較好的，相較於對照組加速度降了39%，而有加裝彈簧的建物加速度則只下降13%，這也證實了之前的猜測：「當上下板脫離彈簧的束縛之後，兩塊板子之間可以更輕易的產生相對運動，進而產生較佳的隔震效果。」但我們在進行不加裝彈簧的實驗時，由於拆掉彈簧等於拆掉了復位裝置，當地震停止時，建物無法回到原本的位置，在劇烈搖晃時，也因為缺少了彈簧的束縛，時不時有上板和建物跟著齒輪一起滑出軌道的狀況。因此我們認為復位裝置在此架構中仍有必要，但在拓展至真實建物時，以彈簧作為復位裝置在應用上仍需克服如何選用彈簧材料，以及彈性疲乏問題。或許以曲面齒輪會有更佳的應用性。

二、發電能力比較



(圖二十二) 有無加裝彈簧電壓對比

由(圖二十二)以及(圖二十三)我們皆可以發現，無加裝彈簧建物的輸出電功率是比較佳，達到了2.3mW，有加裝彈簧的建物電功率則為1.5mW，而這種現象便是因為當上下板脫離彈簧的束縛之後，兩塊板子之間可以更輕易的產生相對運動，進而產生較佳的發電效果。



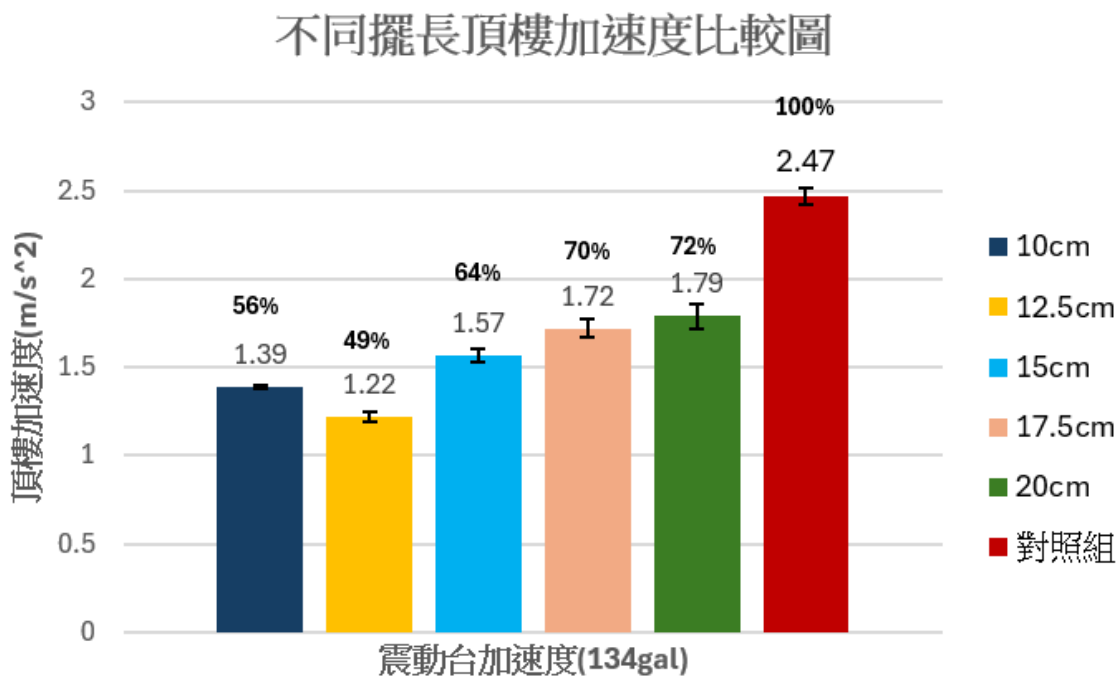
36 齒有彈簧

36 齒無彈簧

(圖二十三)有無彈簧的電功率波型圖

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗一數據探討】

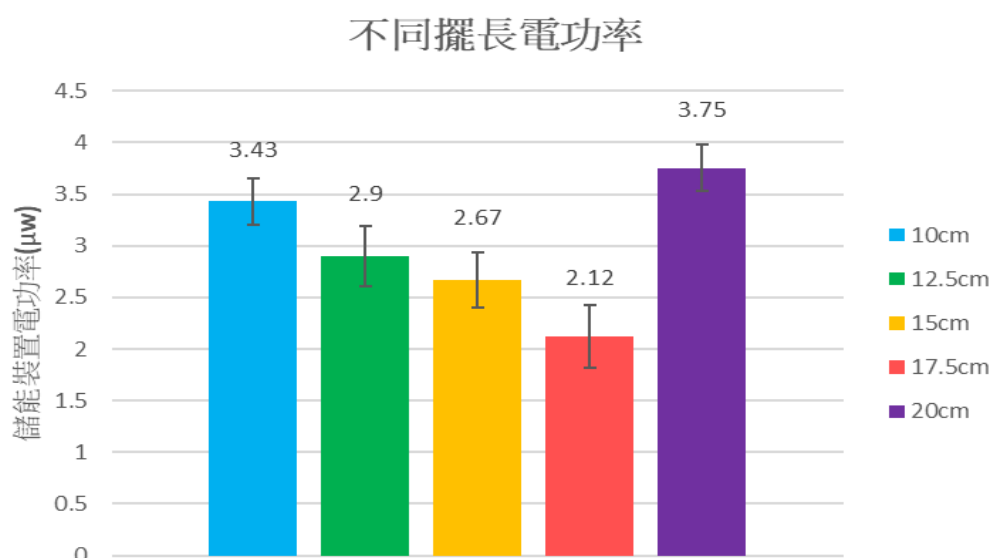
一、以頂樓最大加速度討論減震效果



(圖二十四) 不同擺長頂樓加速度分布對照圖

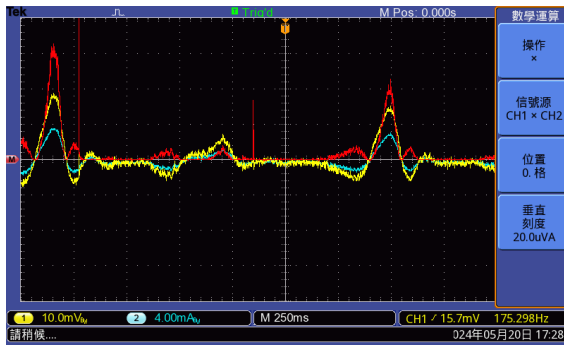
不同擺長下的電磁類雙彈簧 TMD，其減震效能的實驗結果如（圖二十四），數據分析後發現，12.5cm 擺長效果最好，最大加速度較對照組約下降了 51%。我們推論很可能是因為在擺長 12.5cm 時，整體頻率與建物的震動頻率較接近。10cm 的擺長減震效果比 12.5cm 擺長稍差，但仍能夠將頂樓加速度降低 44%。當擺長逐步增加為 15cm、17.5cm 和 20cm 時，可以發現雖然仍有減震效果，但是頂層最大加速度愈來愈大，推測也和未與建築之自然頻率相契合有關。

二、發電能力比較

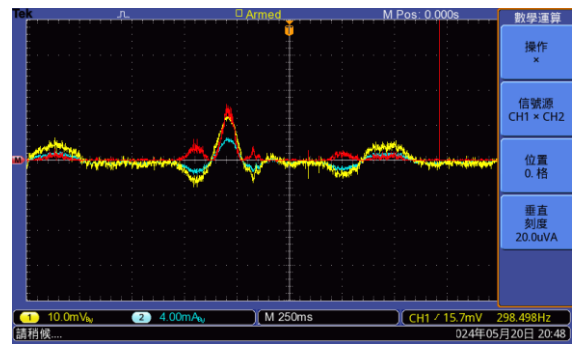


（圖二十五）不同擺長電能分布圖

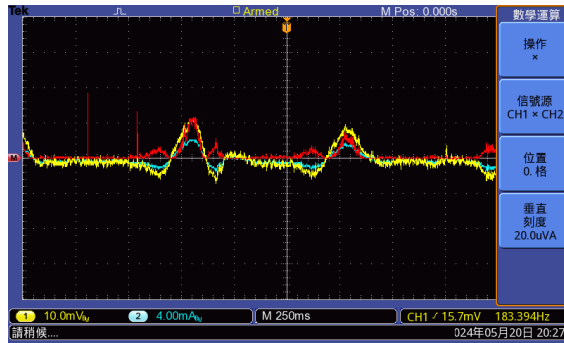
發電效能的部分從（圖二十五）中可看出在此實驗中，擺長 10~17.5cm 之阻尼塊在擺盪時產生的電能愈來愈小，但到了 20cm 時則又增加。我們進一步針對電能量測的原始波形進行分析。在（圖二十六）中，發現擺長為 10cm 時，阻尼器一次往返過程中，來與回的輸出電能並不一致。去程明顯電能較大，返程時則幾乎回收不到能量。這現象隨著擺長逐漸增加有了改變，去程電能雖稍有減少，但返程時的電能大幅上升，一增一減導致當擺長為 20cm 時，往返輸出的總電能較 10cm 更佳。至於為何去程回程的電能有所差異，造成這種結果的原因我們認為許多，首先，我們發現目前所使用的震盪波型並非完美的正弦波，這可能會影響到類雙彈簧系統系統中的下擺震盪規律。其次，自己製作的木製建築物很可能有不對稱的問題，這也可能導致這種不規律的結果。



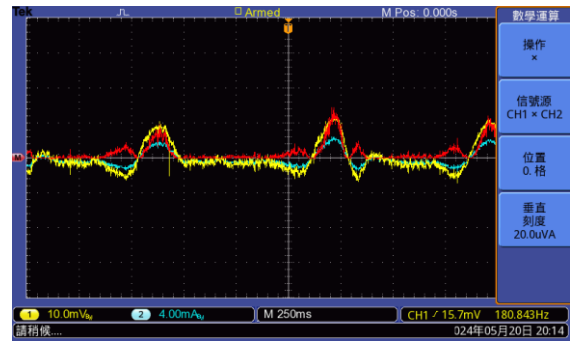
擺長 10cm



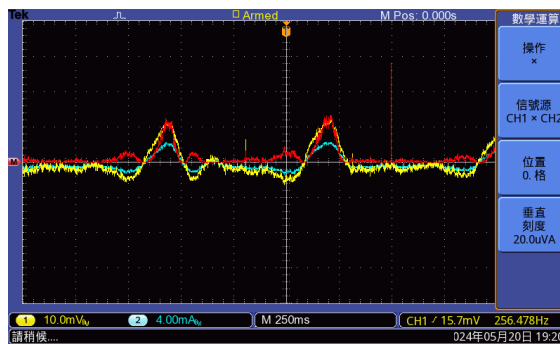
擺長 12.5cm



擺長 15cm



擺長 7.5cm



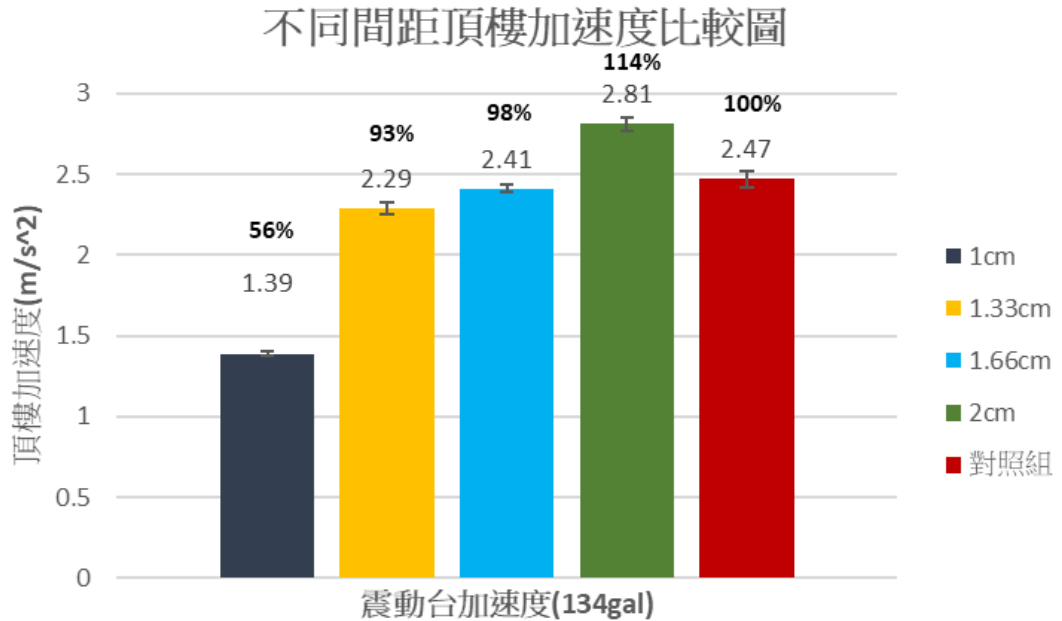
擺長 20cm

(圖二十六)不同擺長下電功率曲線圖

理論上擺長長度與電磁線圈兩者皆有減震消能效果。我們試圖分析究竟哪一個對於減震效果影響較顯著。在比較上圖後也注意到，擺長 20cm 的發電能力最好，所以理應要是產生最佳減震效果。但是無論在輸出功率大小或者實際減震效果上皆可印證線圈發電能力極小並非決定減震功效的關鍵。而實際減震效果推測仍應是和 TMD 的頻率是否和建物頻率相符有關。

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗二數據探討】

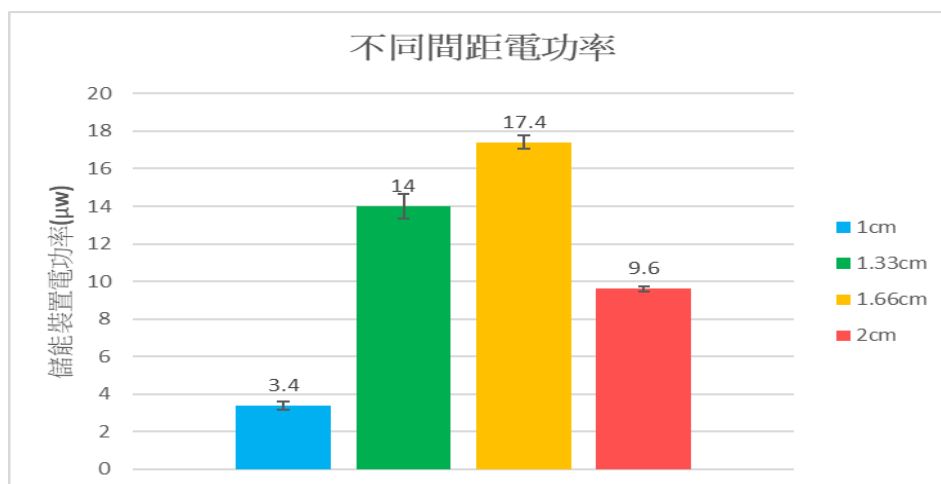
一、以頂樓最大加速度討論減震效果



(圖二十七) 不同間距頂樓加速度分布對照圖

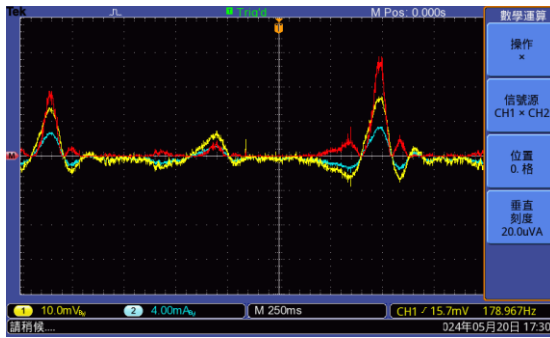
改變四組不同上下板間距，量測對建物加速度的影響實驗，其結果如（圖二十七）所示，在上下板的四個不同間距實驗結果呈現出，當上下板間距愈小時，減震效果愈佳。磁鐵與軟鐵芯線圈間距為 1cm 時，能夠降低 44% 的加速度。而當兩者的距離增加為 1.33cm 及 1.66cm 時，減震能力變弱，只能夠分別減少 7% 和 2%，而間距達 2cm 時甚至加速度被放大了 14%。我們推測是因為當線圈中鐵芯靠近磁鐵後會被磁化，進而能和上方磁鐵相吸。在建物震盪過程中，過程中也觀察到上下板這股吸引力的增加會減緩兩板的錯動，相當於上下板間加裝了斜撐式消能器，讓整體更加趨近單擺，減震效果就愈好。

二、發電能力比較

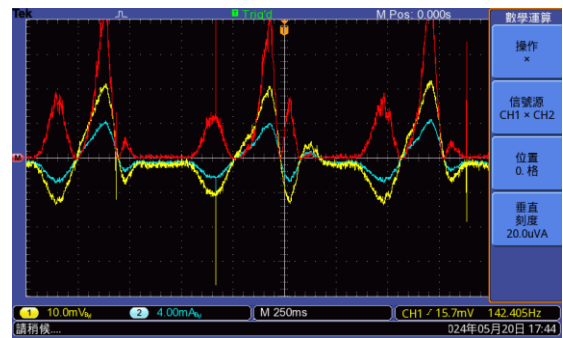


(圖二十八) 不同間距對發電效能之影響

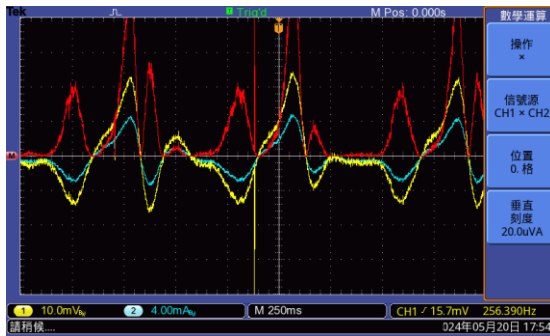
至於發電的部分，由(圖二十八)中可以看出，在磁鐵及線圈距離為1cm時，平均電功率未達 $4\mu\text{W}$ ，且也是四組間距中發電能力最弱的。我們認為當磁鐵及線圈間距離太近，吸引力太強導致上下板互相束縛，讓相對運動減小所導致，因此雖然間距1cm的減震效果最好，但無法產生較多電能。接著將磁鐵及線圈之間的距離增加為1.33cm及1.66cm時，可以發現發電能力逐漸變好，可達系列實驗最大值的 $17.4\mu\text{W}$ 。



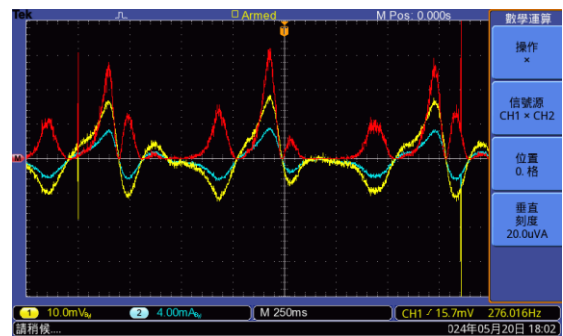
間距 1cm



間距 1.33cm



間距 1.33cm



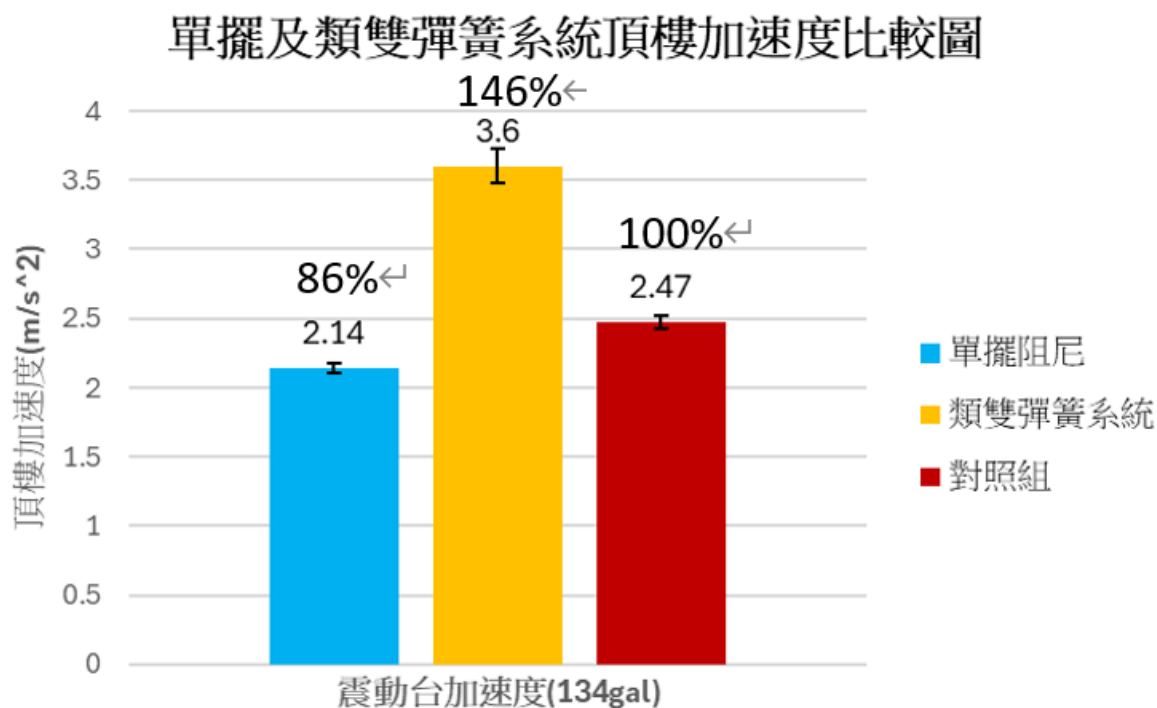
間距 2cm

(圖二十九)不同擺長下電功率曲線圖

接著在比較原始波型時，如(圖二十九)所示，四張圖功率整體明顯有先升後降分佈，推測這是因為上下板間的束縛變小了，能夠更大幅度地錯動，磁通量時變率變大，輸出電能有效增加。但當兩者之間的距離增加到 2cm 時，在圖中可以發現，電功率反而下降到 $10 \mu W$ 以下。我們認為，雖然線圈與磁鐵的間距為 2cm 的阻尼塊，觀察時其上下板的錯動是最劇烈的，但兩者之間的距離也是最遠的，距離也會影響到線圈所感受到的磁通量變化，使線圈所感受到的磁力線變化減弱，讓產生的電能減少。整體而言減震效果較佳時，發電效能較弱、而上下板間距在 1.66cm 時可達最佳發電效果。

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗三數據探討】

以頂樓最大加速度討論減震效果

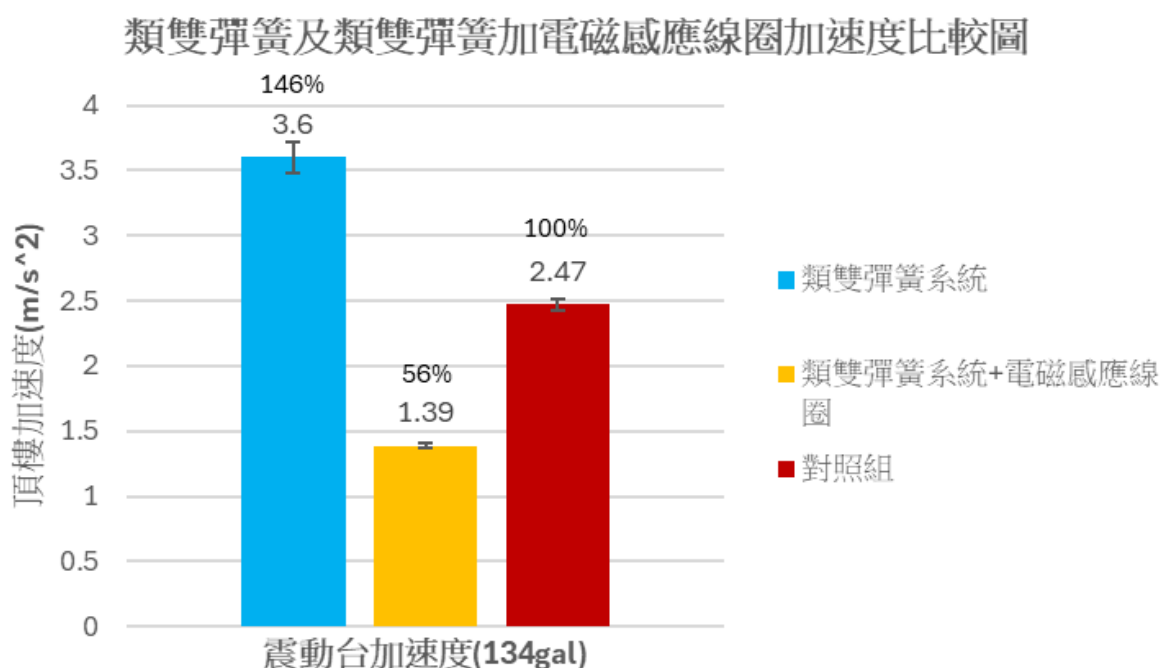


(圖三十)單類雙彈簧系統頂樓加速度分布對照圖

實驗中，我們比較類雙彈簧 TMD 與單擺 TMD 在相同條件下的減震效果，結果如 (圖三十)所示，可以發現搖晃穩定後，相同擺長的單擺 TMD 能使頂樓最大加速度下降 14%，但類雙彈簧 TMD 反而會使頂樓最大加速度增加 46%，也就是說目前單純以類雙彈簧 TMD 作為消能元件，本身減震效能是不良甚至有反效果的。在實驗觀察中，類雙彈簧系統在建物震盪達端點時，上擺同時達端點，但下擺才正要往端點甩出，或許進一步帶動建物繼續往端點方向甩，可能因此加劇了整體搖晃的加速度。

【電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器實驗四數據探討】

以頂樓最大加速度討論減震效果



(圖三十一)雙彈簧 TMD 及雙彈簧 TMD 加電磁感應線圈頂樓加速度分布對照圖

我們比較了類雙彈簧 TMD 在加了電磁感應線圈前後的減震效果，如(圖三十一)所示，雖然類雙彈簧 TMD 因其混沌性質導致減震效果不佳，頂樓最大加速度甚至較對照組增加了 46%，但在上下板中加入電磁感應的線圈的類雙彈簧 TMD，因上下板間的束縛力，使其在搖晃兩板錯動較小，頂樓最大加速度亦有非常明顯的下降趨勢，減震效果達 44%，這部分確實看得出將電磁線圈加入類雙彈簧 TMD 後，可大幅下降加速度，作為消能元件有著優於單擺 TMD 的功效。

陸、結論

一、減速馬達隔震裝置

(一)、實驗一的結論如下:

1. 當減速馬達隔震裝置加裝的齒數(半徑)越大，隔震效果就越顯著。
2. 齒數過低時會使得隔震裝置難以啟動，使建物最大加速度上升。
3. 當減速馬達隔震裝置加裝的齒輪齒數越小(發電)，發電效果就越好。
4. 當齒數 36 齒搭配減速馬達時，能使頂樓最大加速度減少 13%、同時產生 1.5mW 的電功率，高於一般電磁線圈所產生的功率。

(二)、實驗二的結論如下:

1. 當上下板不安裝彈簧作為復位元件時，兩塊板子之間可以更輕易的產生相對運動，而此時整個系統的隔震效果將使最大加速度下降 39%，電功率達 2.3mW，效能如同預期般是很顯著的。
2. 當減速馬達隔震裝置不加裝彈簧時，因為缺少了復位裝置，導致建物在震動台加速度較大時，時常發生偏移甚至脫軌的情形，並影響到建物安全性。

二、電磁類雙彈簧系統調諧質量阻尼器

(一)、實驗一結果:

1. 當懸吊阻尼塊之擺長為 12.5cm 時有最佳減震效果，可使頂樓最大加速度下降 51%；當擺長上升到 20cm 時，阻尼塊和建物的自然頻率相牴觸導致減震效果較不明顯。
2. 擺長在最短的 10cm、以及最長的 20cm 時分別展現了較佳的發電能力，分別為 3.43 μ W、3.75 μ W，發電能力分佈的不規則，應與類雙彈簧 TMD 擺盪時，上下板來回錯動有無對稱性有關。
3. 類雙彈簧 TMD 的發電能力極小，整體而言與減震效果沒有直接關聯。

(二)、實驗二結果:

1. 磁鐵與線圈之間距離愈短，減震效果愈好，間距 1cm 為最佳，10cm 擺長下能夠使頂層最大加速度下降 44%，因為磁鐵與線圈愈靠近，兩者引力愈明顯，減緩阻尼塊上下板的錯動，提升了減震效能。

2. 在電功率方面，間距過小或過大皆會降低輸出功率，太近上下板引力過強錯動不明顯；太遠則是磁通量太小導致功率降底，間距 1.66cm 時發電效能最好，平均能夠產生 $17.4 \mu\text{W}$ 的電功率。

(三)、實驗三結果:

10cm 擺長下，類雙彈簧 TMD 阻尼擺盪時，力的方向及大小不均勻之混沌性質導致減震效果不如單擺系統，甚至可能產生反效果，使頂樓加速度增加。

(四)、實驗四結果:

10cm 擺長下，有加裝電磁感應線圈的類雙彈簧 TMD 阻尼，減震效果明顯的比無加裝的類雙彈簧 TMD 好，證實雖然發電效能微弱，但加入電磁減震裝置可大幅提升減震能力，減少頂樓最大加速度達 44%。

柒、參考資料及其他

一、未來展望

1. 在減速馬達隔震裝置實驗中，其實有很多不成熟的地方，其一是復位裝置，我們目前使用的是彈簧，考量到真實建物不易以彈簧作為復位裝置，且長時間震盪可能導致彈性疲乏。建物亦無法完全歸位。這部分或許可以嘗試設計曲面齒輪裝置來改善這點。如何抵抗三維度的震波，或許可以改用球型齒輪作為發電機趨動裝置，但材料特性是否能長時間承受強大重量，也是這個裝置到底不可行的重要關鍵。
2. 在分析電磁類雙彈簧 TMD 實驗數據時，推測建物的加速度和阻尼器擺長及擺動頻率關聯較大。未來可以針對建物自然頻率作檢測，並使用更多組不同頻率阻尼器來反覆測試，確認我們的推測是否正確，同時並能夠製作出減震效果及發電效能更好的阻尼裝置。
3. 當懸吊阻尼上下板的相對運動愈激烈，其發電效果就會愈好。但上下板的運動對於建物加速度是否有所影響是我們還沒有深入研究的部分。因此在後續的實驗中，或許可以分析上下板阻尼器的相對運動時的動能分佈，來整體評估 TMD 作動時，建物的能量傳遞與耗散。

二、參考資料

- (一)、林宥禎、楊安鈞(2020)。「屋欲靜而電不止—探究冷次定律在建築物的減震運用」。中華民國第60屆中小學科學展覽會
- (二)、劉芊妤 歐東霖 吳奕廷(2021)。「地動山不搖—隔震裝置在建築物之應用與探究」。中華民國第61屆中小學科學展覽會
- (三)、陳郁煊 廖艾秀 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
- (四)、蘇錦江、莊國榮(2019)。「國產 ASBD 隔震系統的原理與應用」檢自建築師雜誌
https://www.twarchitect.org.tw/special/%E5%9C%8B%E7%94%A2asbd%E9%9A%94%E9%9C%87%E7%B3%BB%E7%B5%B1%E7%9A%84%E5%8E%9F%E7%90%86%E8%88%87%E6%87%89%E7%94%A8/http://gimi.tmu.edu.tw/files/archive/33_d83cf40f.pdf 建築師雜誌
- (五)、廖紫君、邱志雄(2022)。「擺盪在秩序與混沌的邊緣—流體阻尼球對建築物耐震度的探討」中華民國第62屆中小學科學展覽會
- (六)、「壓電調諧質量阻尼器之研究」。檢自：
https://www.youtube.com/watch?v=hqxJkXN_VzI (2024.01.25)

註：圖表引用

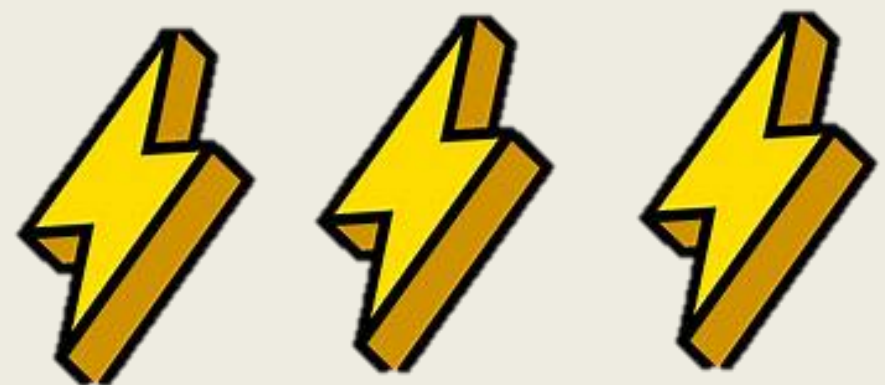
- (表三)引用來源：中央氣象局(2019)。「震度新分級 應變更實用」。檢自：交通部中央氣象局新聞稿
<https://www.cwa.gov.tw/Data/service/Newsbb/CH/1081218earthquakepress.pdf>(2024.01.25)
 - (圖十)引用來源：特點介紹「結構介紹」。檢自 Taipei 101：<https://www.taipei-101.com.tw/tw/observatory/feature/scenery> (2024.05.20)周維苓(2018)。
 - (表四)右圖。引用來源：英全結構(2018)「ASBD 隔震系統動畫」。檢自：
<https://www.youtube.com/watch?v=zjBI6s5NJrY> (2023.10.03)
 - (表四)左圖、中圖。引用來源：Oiles 隔震器介紹| 台灣松澤防震設備股份有限公司。
檢自：台灣松澤防震設備 <https://www.twmz.com.tw/product-olies>
(2024.05.20)
- 除上述圖片引自他處，其它照片及圖片均為作者自行製作

【評語】 030108

本作品探討減震和隔震裝置與地震動能發電的可行性，設計結構並進行系統化實驗，分析減速馬達隔震、單擺及電磁類雙彈簧的抑震與電能回收效能。雖未明確說明電磁阻尼優於傳統油壓黏滯性阻尼之處，但研究方法細緻，數據可靠。建議結合各種抑震方式與電能回收效能，考慮成本及實際可行性，提出最佳化方案。另建議更改數據圖呈現方式使其更具科學性且易於理解，並深入探討電磁類雙彈簧系統及相關物理概念。

作品簡報

震能共舞



“減震和隔震”裝置與地震動[☆]能發電^{!?}之研究

一、前言

(一)、研究動機

台灣位於板塊交界處，地震頻繁，如何抗震成為所需克服的困難問題。近年來發生能源危機，火力發電造成的空氣汙染不僅使空氣品質下降，更加劇全球暖化，開發可用的環保能源也成為了重大課題。有一次在生科課上組裝手搖發電機，注意到這項發電系統的發電方式是藉由轉動連接在馬達上的搖柄來產生電能。我們聯想到，或許可以使用地震帶來的動能帶動馬達發電，讓抗震裝置在減少地震破壞力的同時也具有發電能力，可能具有成為新型態能源的潛力。於是我們設計出兩種同時具備抗震及發電的系統，來探討抗震效能及發電的可行性。

(二)、研究目的

1. 設計能抗震且能發電的減震或隔震裝置

(1). 使用減速馬達作為隔震裝置，測量不同外齒輪半徑及有無彈簧對隔震及發電效果的影響。

(2). 使用安裝電磁線圈的類雙彈簧調諧阻尼器，作為消能元件，探討擺長、線圈和磁鐵間距、單擺及類雙彈簧系統、電磁線圈對減震及發電效果之影響。

二、研究方法及過程

(一)、研究設備及器材

電磁類雙彈簧調諧質量阻尼器(以下簡稱TMD)		減速馬達隔震裝置	
強力磁鐵	塑膠瓦楞板	減速馬達模組 (mini motor multi-ratio gearbox)	
木板	漆包線	模數0.5齒輪：40齒、36齒、32齒、28齒	
螺絲與螺母	L型角鐵	木塊	長尾夾
熱熔膠	美術掛線	彈簧	木板
震動台			
示波器			
筆電、phyphox、Microsoft Excel			

(表一) 研究設備及器材



(圖一) 震動台



(圖二) 減速馬達隔震裝置建築



(圖三) 電磁類雙彈簧TMD建築

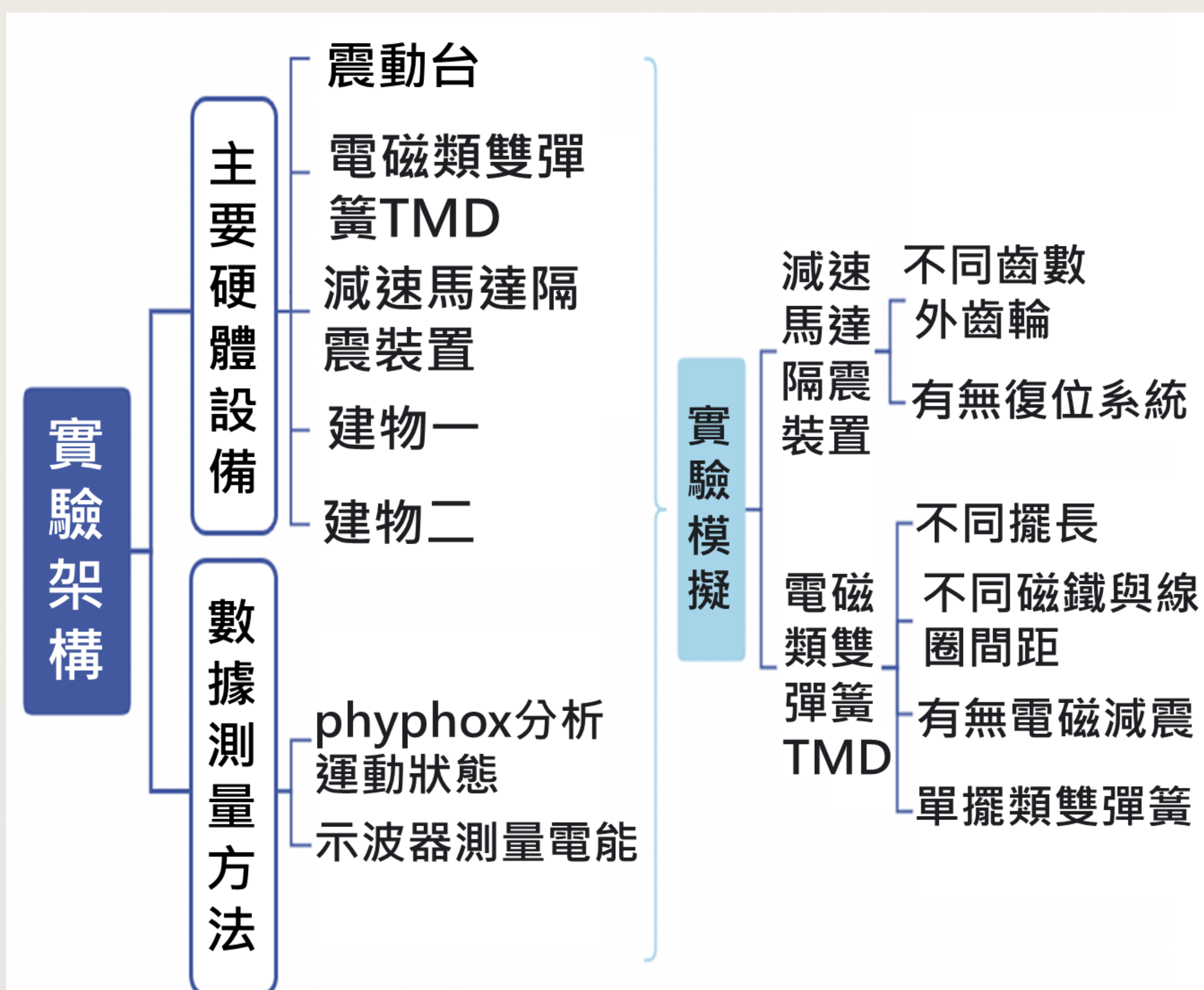
(二)、震動台與加速度

針對減速馬達隔震系統、電磁類雙彈簧TMD系統分別選定一組外在震動條件，目的是使建物能產生明顯搖晃，以利後續減震效能的討論。詳細內容如(表二)所示。

	減速馬達隔震器	電磁類雙彈簧TMD
震動台最大加速度	448cm/s ²	134cm/s ²
對應震度(PGA分級)	約為6強	約為5弱
對應實際案例	403 地震在花蓮最大震度	403 地震在花蓮壽豐的最大震度

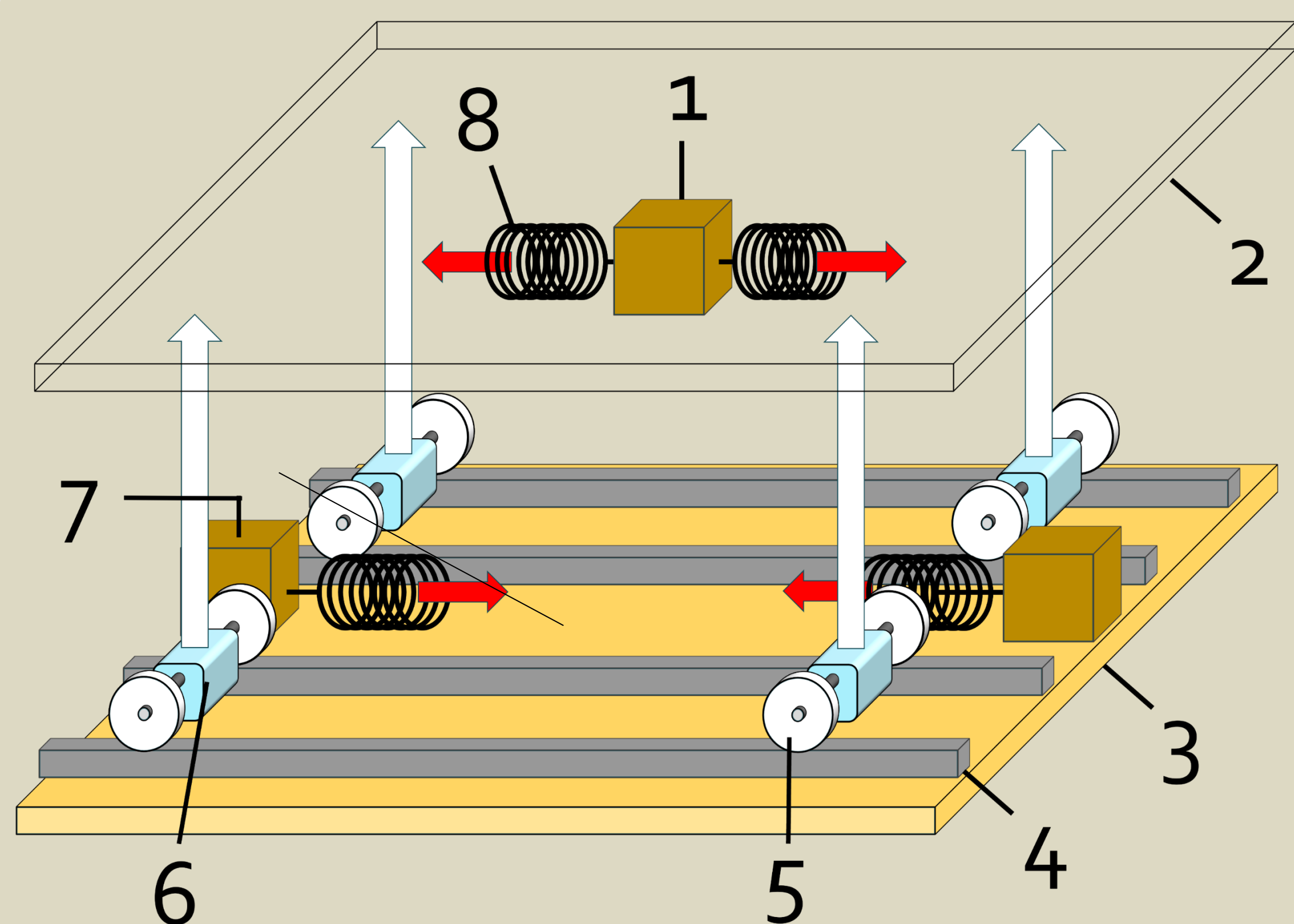
(表二) 震動台刻度及加速度與震度對照表

(三)、實驗流程



(圖四) 實驗規劃圖

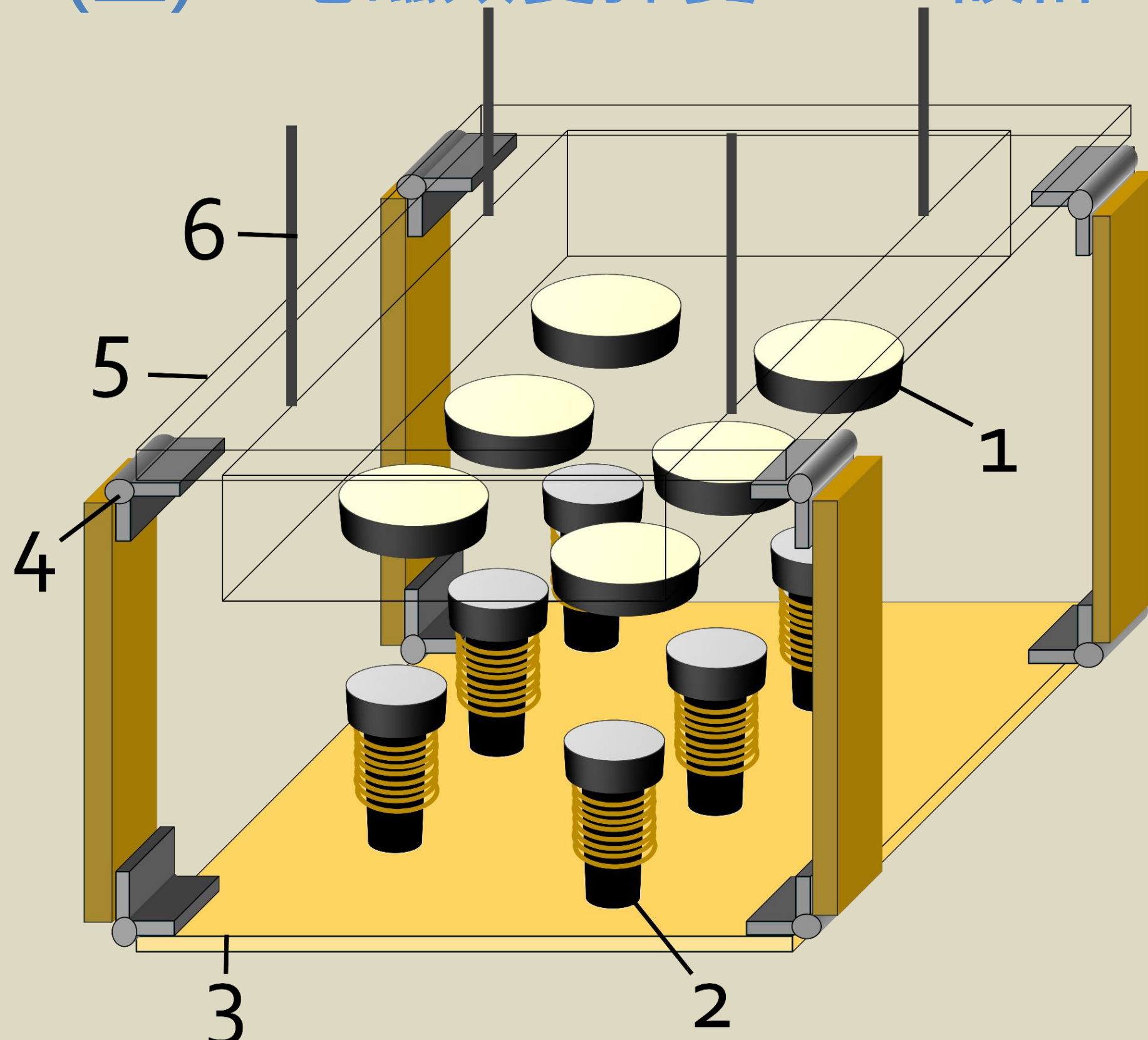
(四)、減速馬達隔震裝置設計



(圖五) 減速馬達隔震裝置設計圖

- 1. 上板復位器
- 2. 上板(建物底板)
- 3. 下板(連接震動台)
- 4. 齒條
- 5. 齒輪
- 6. 減速馬達
- 7. 下板復位器
- 8. 彈簧

(五)、電磁類雙彈簧TMD設計



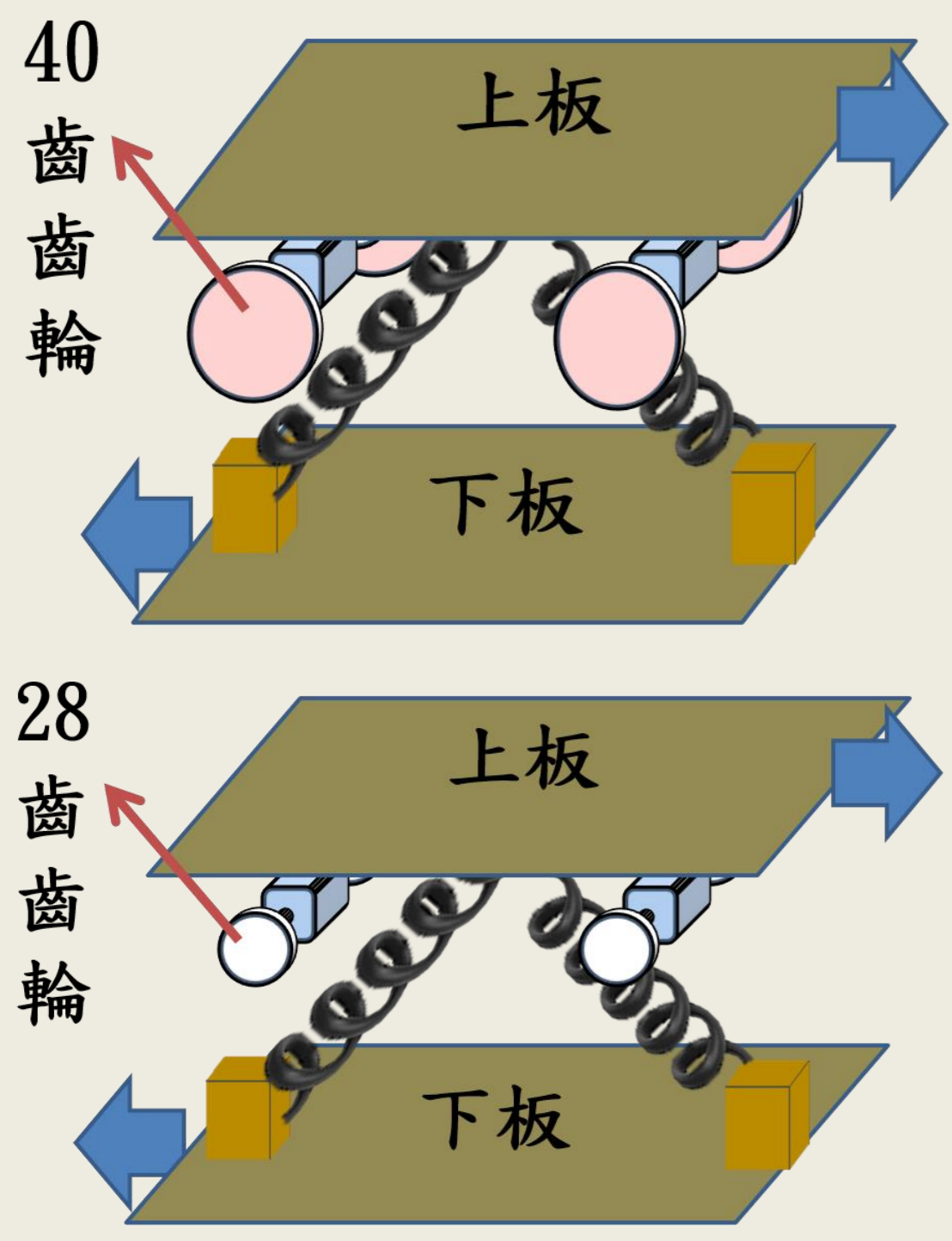
(圖六) 電磁類雙彈簧TMD裝置設計圖

- 1. 強磁鐵
- 2. 線圈軟鐵芯
- 3. 阻尼下板
- 4. 轉軸
- 5. 阻尼上板
- 6. 擺線

三、實驗結果與討論

減速馬達隔震裝置

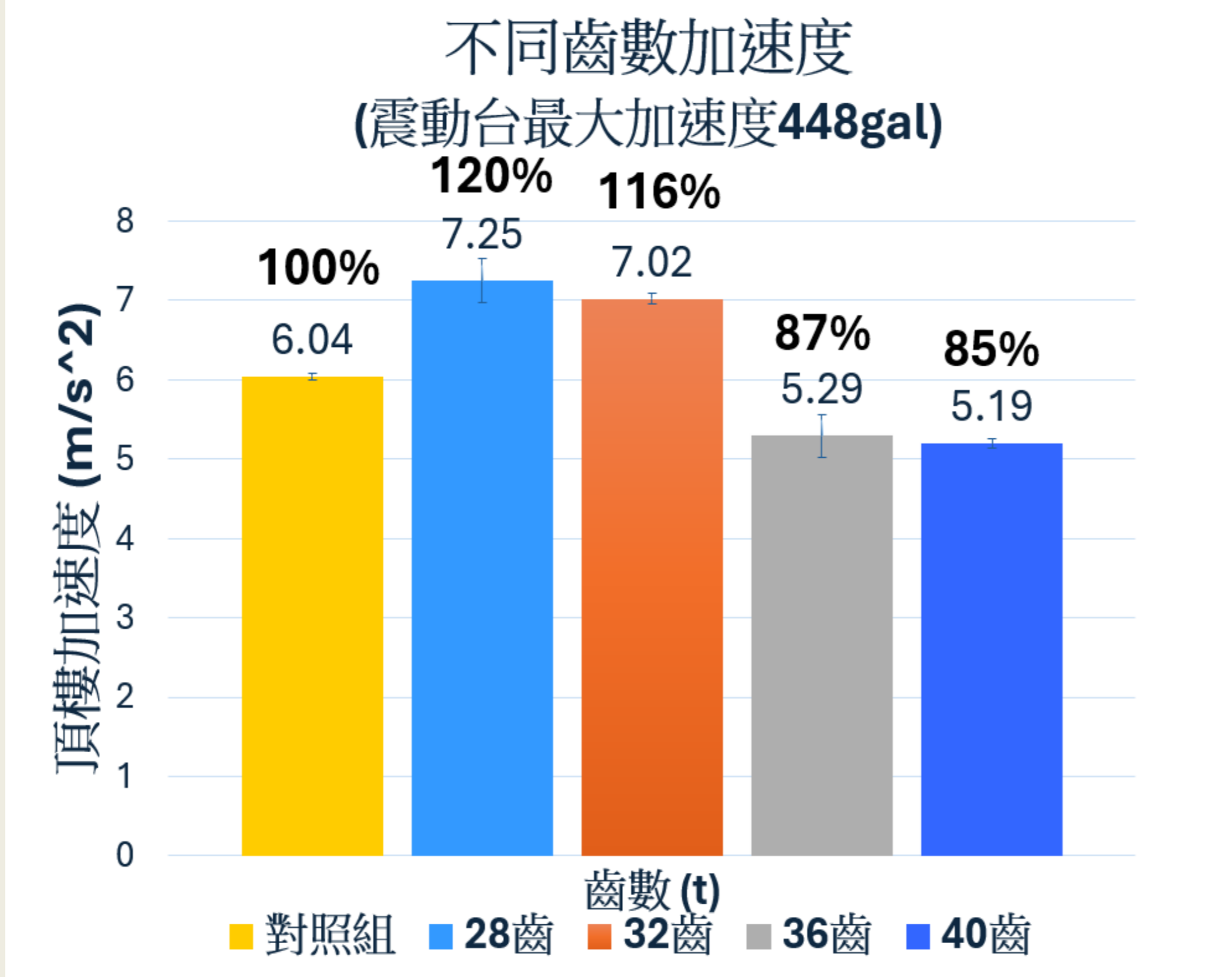
實驗一、改變齒數



(圖七)實驗一示意圖

實驗內容

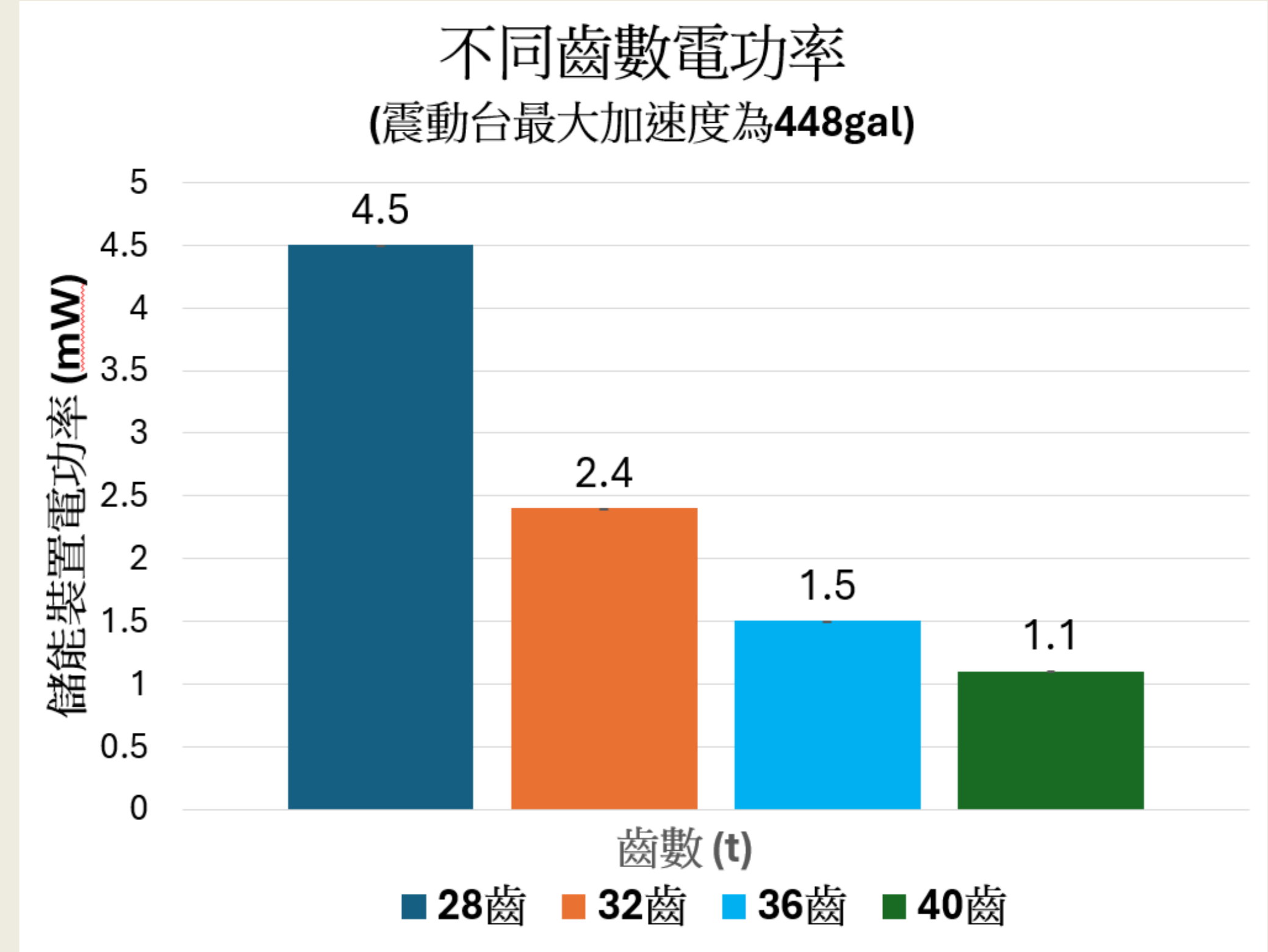
討論馬達齒輪齒數多寡對隔震及發電效果的影響。



(圖八)不同齒數對隔震效果的影響

實驗結果

1. 抗震:齒數(半徑)越大,隔震效果就越好
2. 電能:裝置加裝的齒數越小,發電效果就越好。

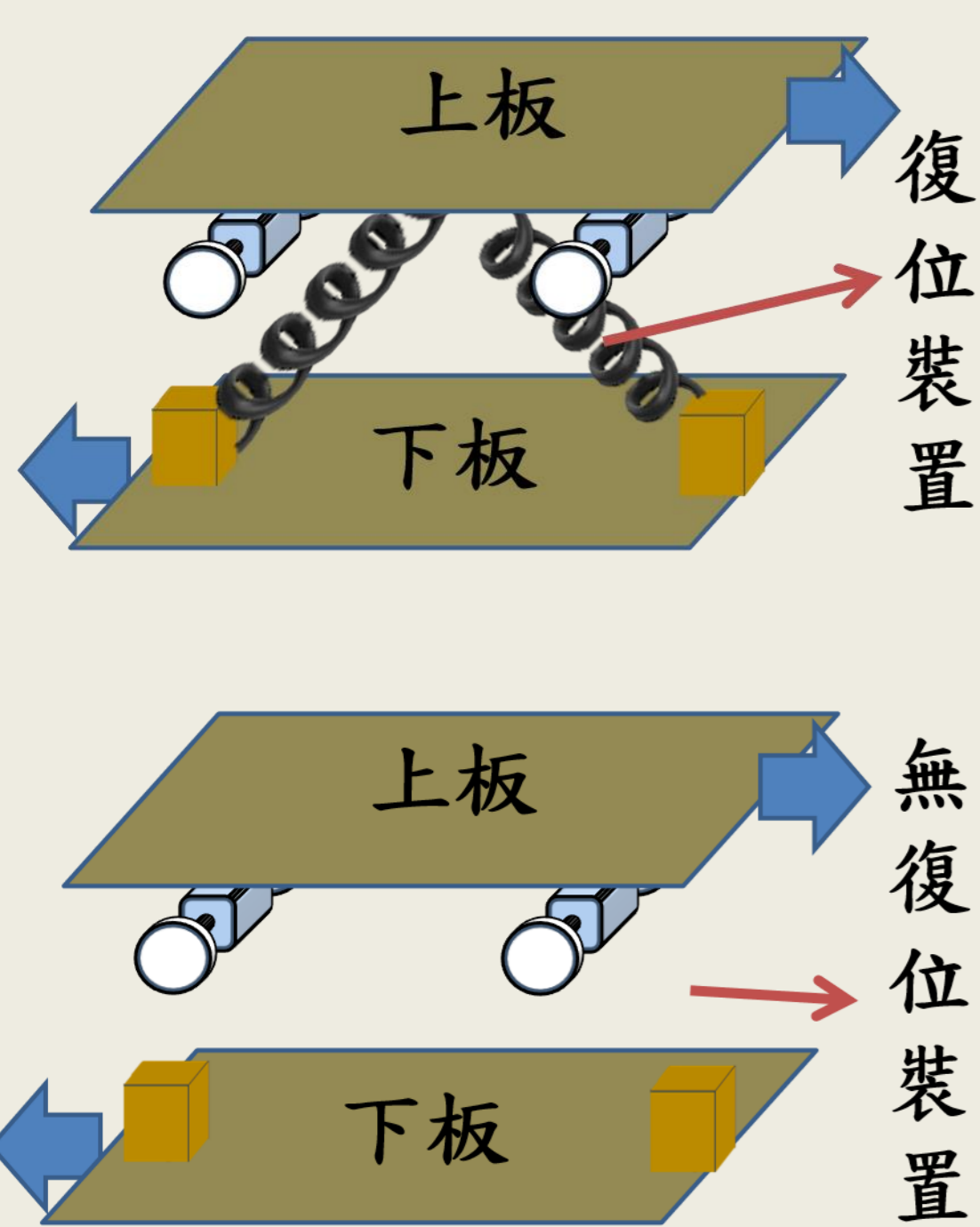


(圖九)不同齒數對發電效能的影響

討論

當增加裝置的齒數(半徑)時,可讓上下板在運動時所產生的慣性力有更大的力臂,使裝置作動更順暢,進而影響到隔震及發電效果。

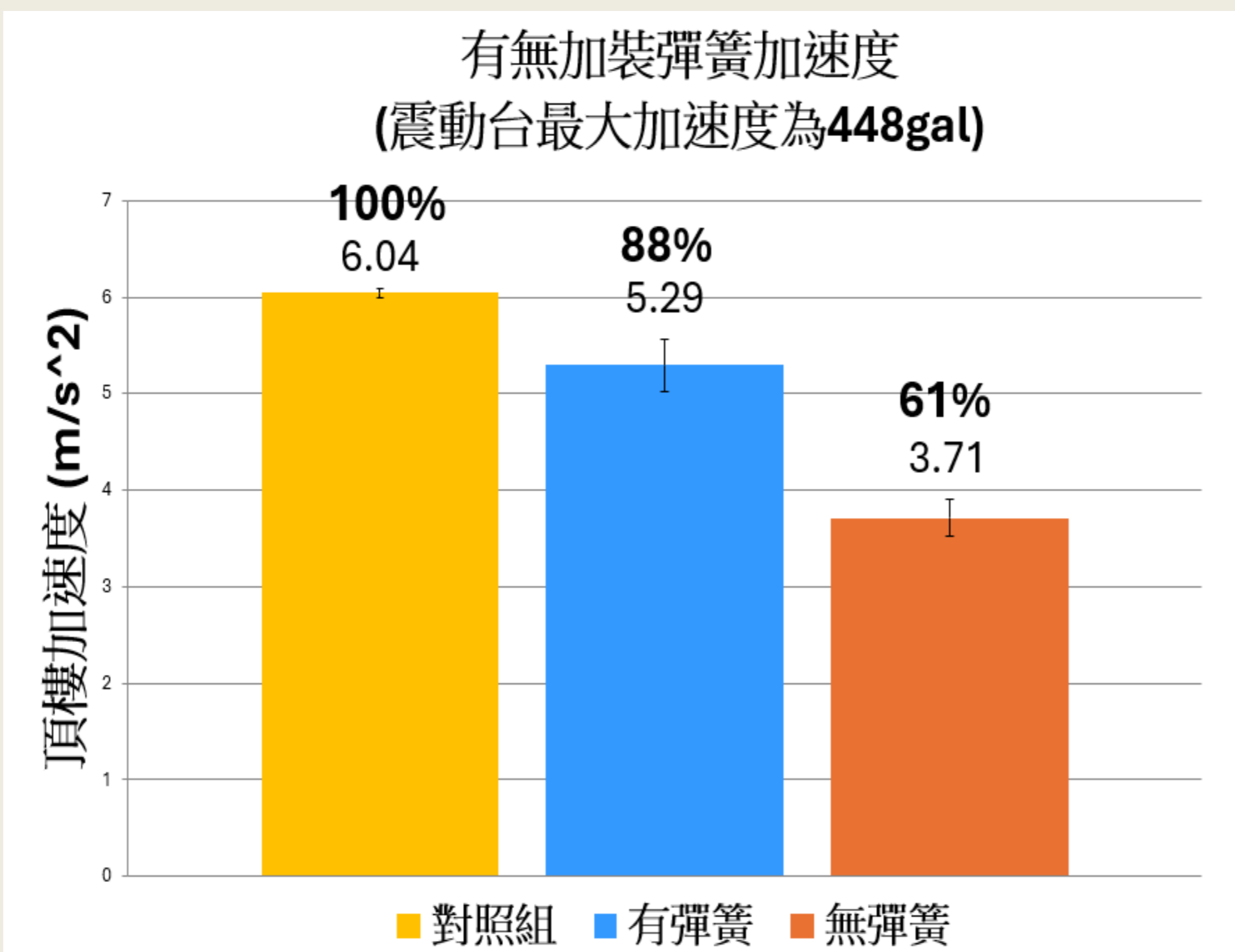
實驗二、有無彈簧



(圖十)實驗二示意圖

實驗內容

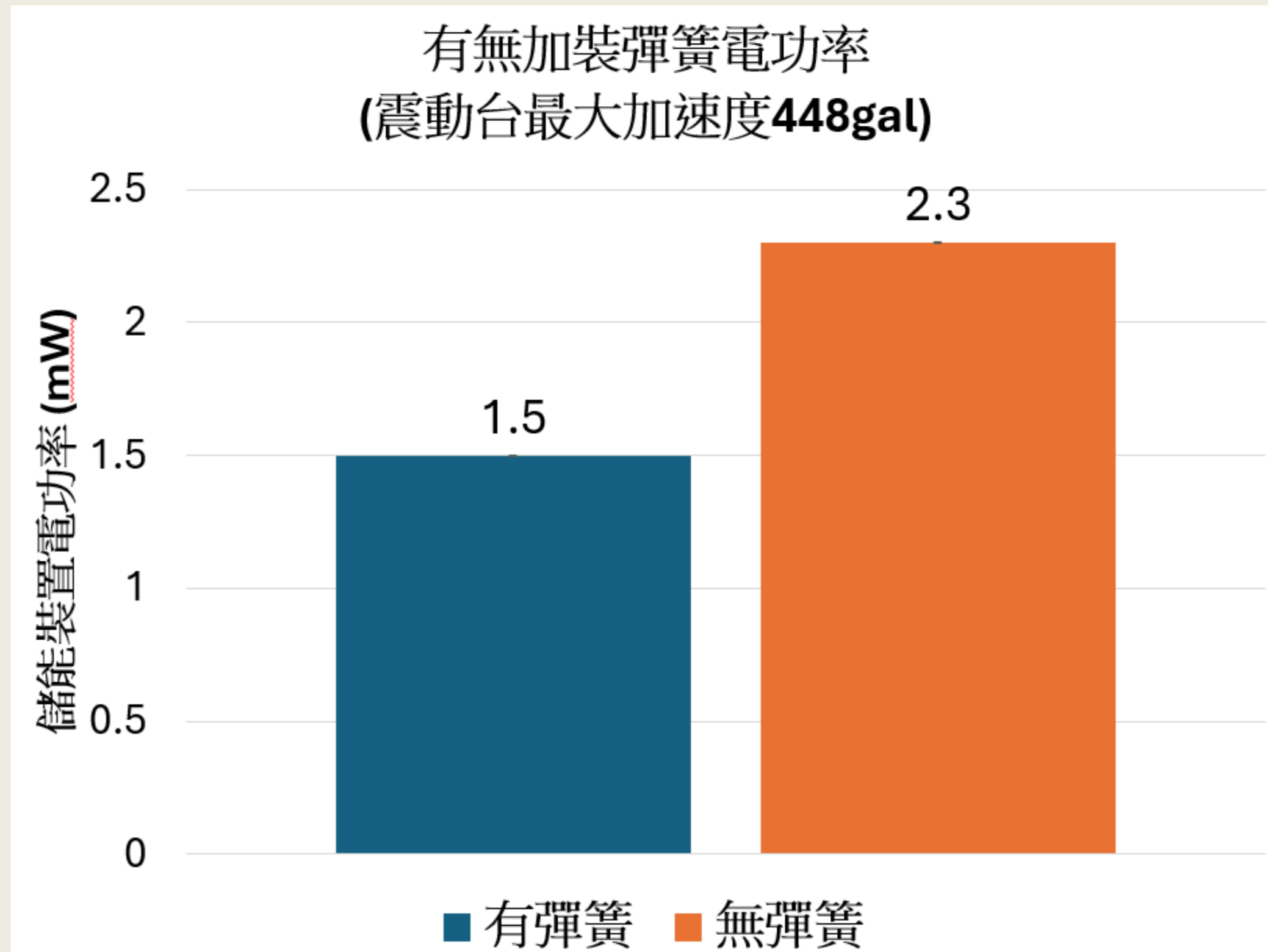
討論有無加裝彈簧(復位裝置)對隔震及發電效果的影響。



(圖十一)有無加裝彈簧對隔震效果的影響

實驗結果

1. 抗震及發電:不安裝彈簧復位器,隔震及發電效果較好。
2. 無復位器,易導致建物偏移或脫軌。



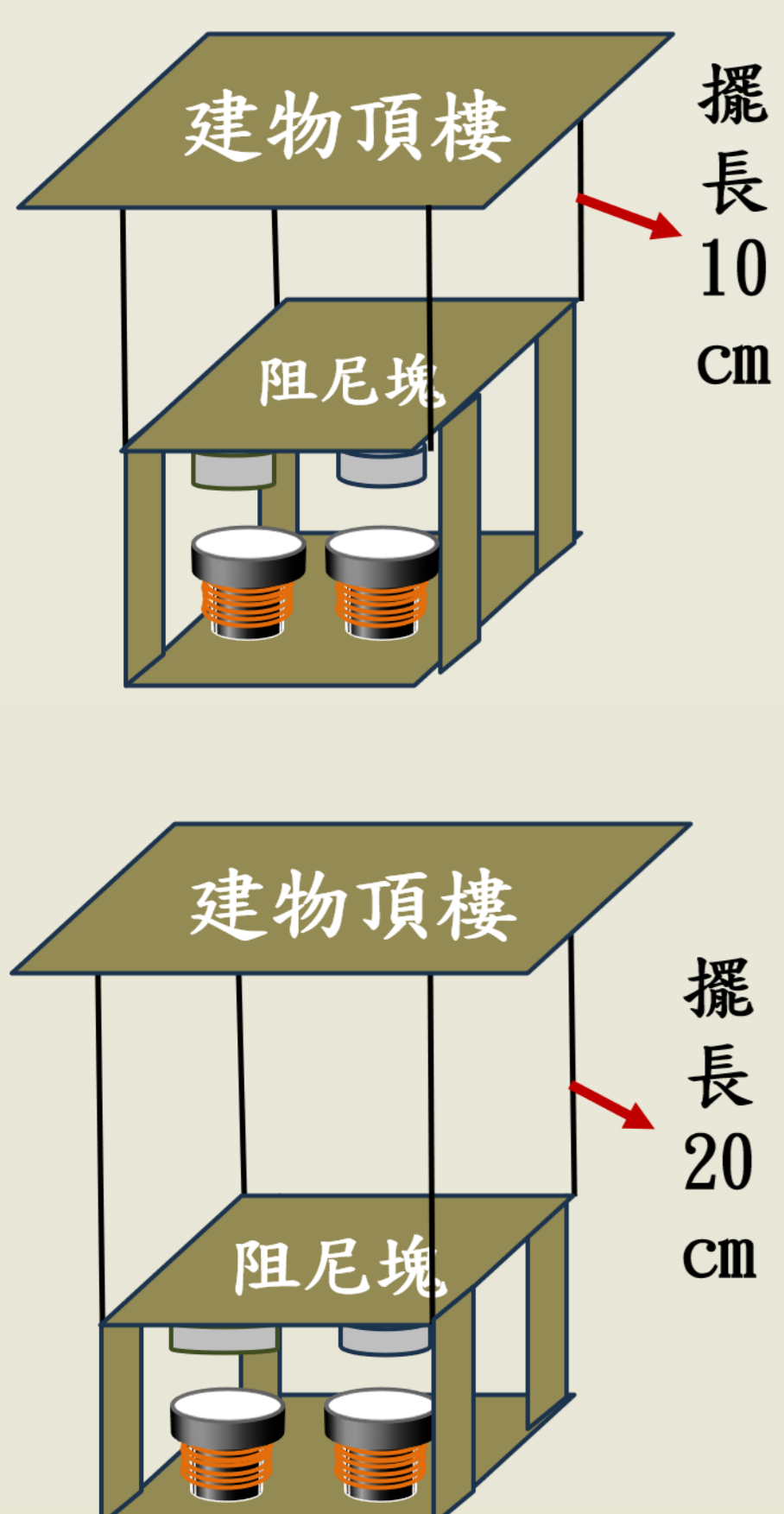
(圖十二)有無加裝彈簧對發電效能的影響

討論

復位裝置將上板與下版連在一起,其帶來的拉力導致上板與下板的相對運動不順。當上下板不安裝彈簧作為復位元件時,兩塊板子之間便可以更輕易的產生相對運動,進而影響到隔震及發電效果。

電磁類雙彈簧TMD

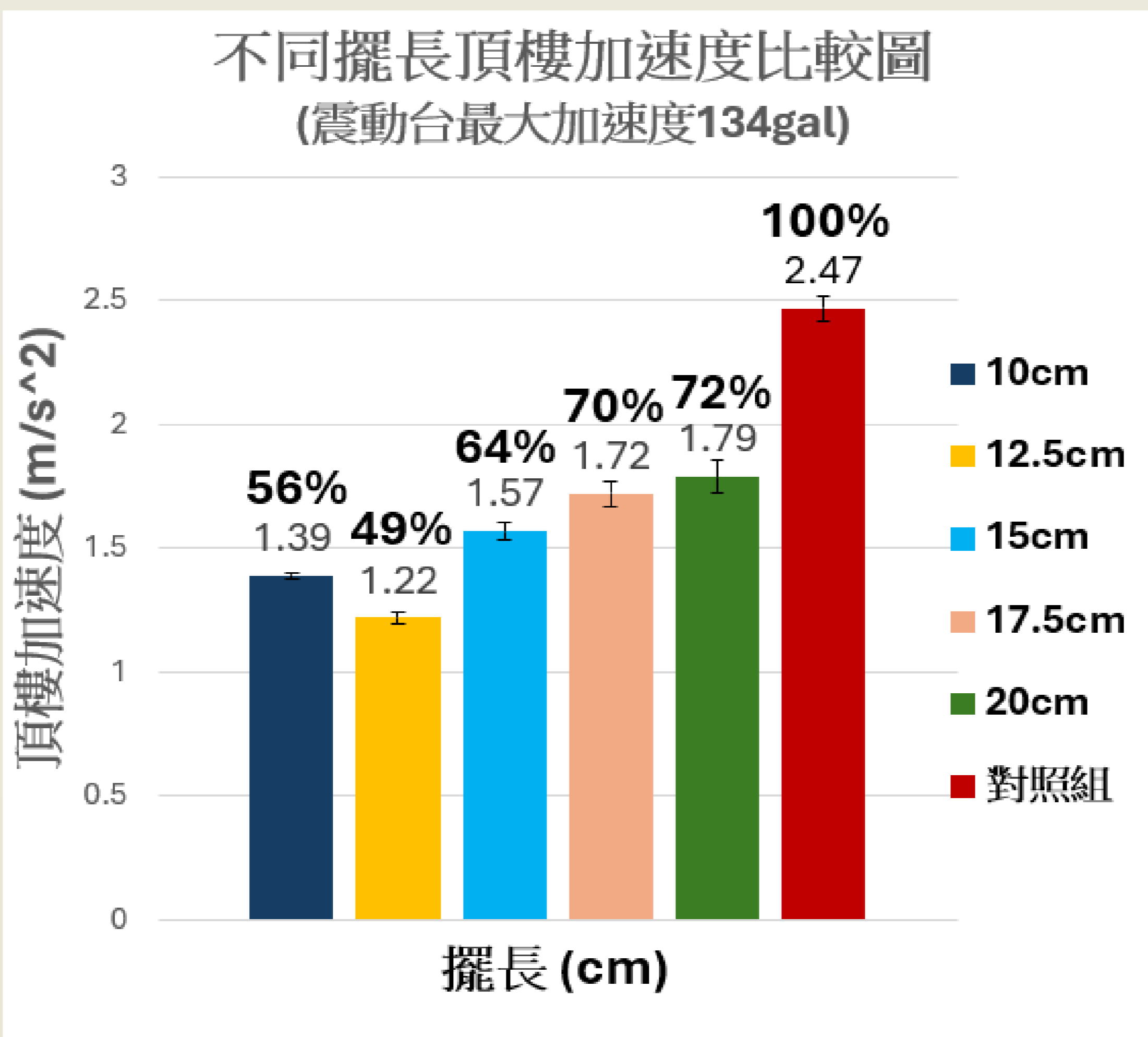
實驗一、改變擺長



(圖十三)實驗一示意圖

實驗內容

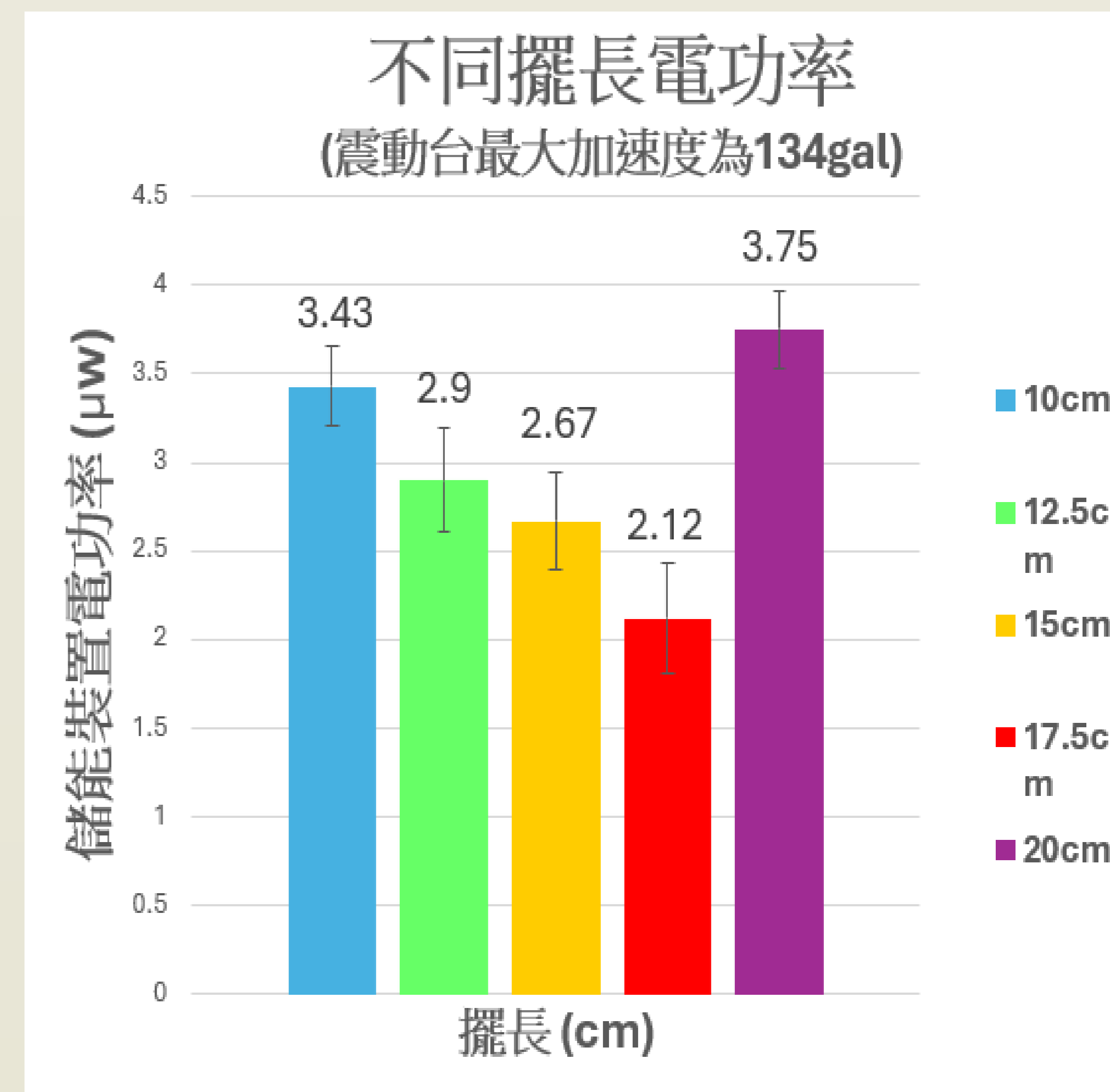
討論擺長對減震和發電效果的影響。



(圖十四)不同擺長對減震效果的影響

實驗結果

1. 當懸吊阻尼之擺長為12.5cm時減震效果最佳,最大加速度較對照組約下降了51%。
2. 擺長愈短則發電能力愈佳,擺長為20cm例外,這與擺盪有關。



(圖十五)不同擺長對發電效能的影響

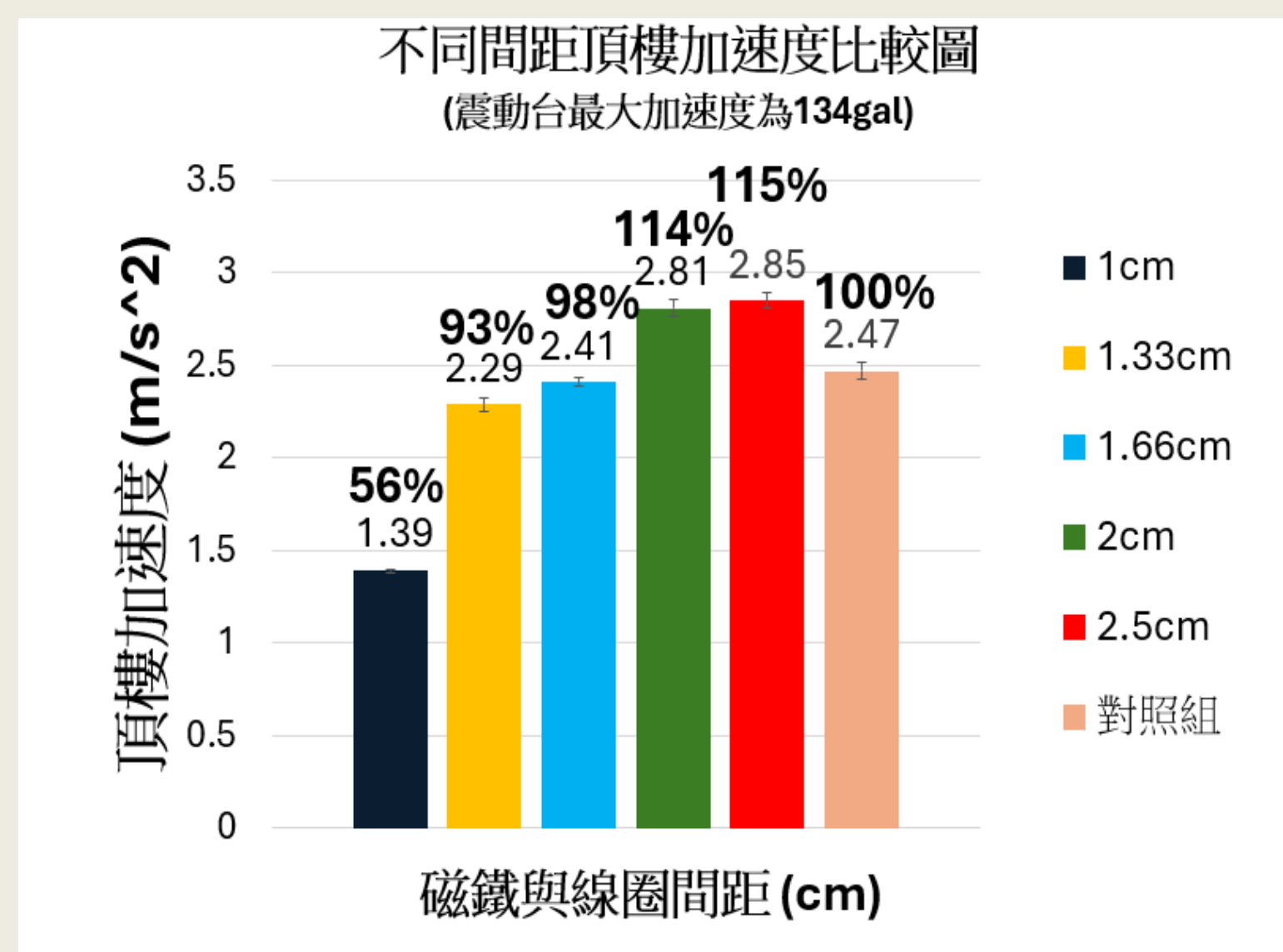
討論

擺長所影響的擺動頻率,將決定能否達到消能功效,且頻率的影響大於電磁線圈,因為發電能力較好的變因,其減震效果並非最佳。

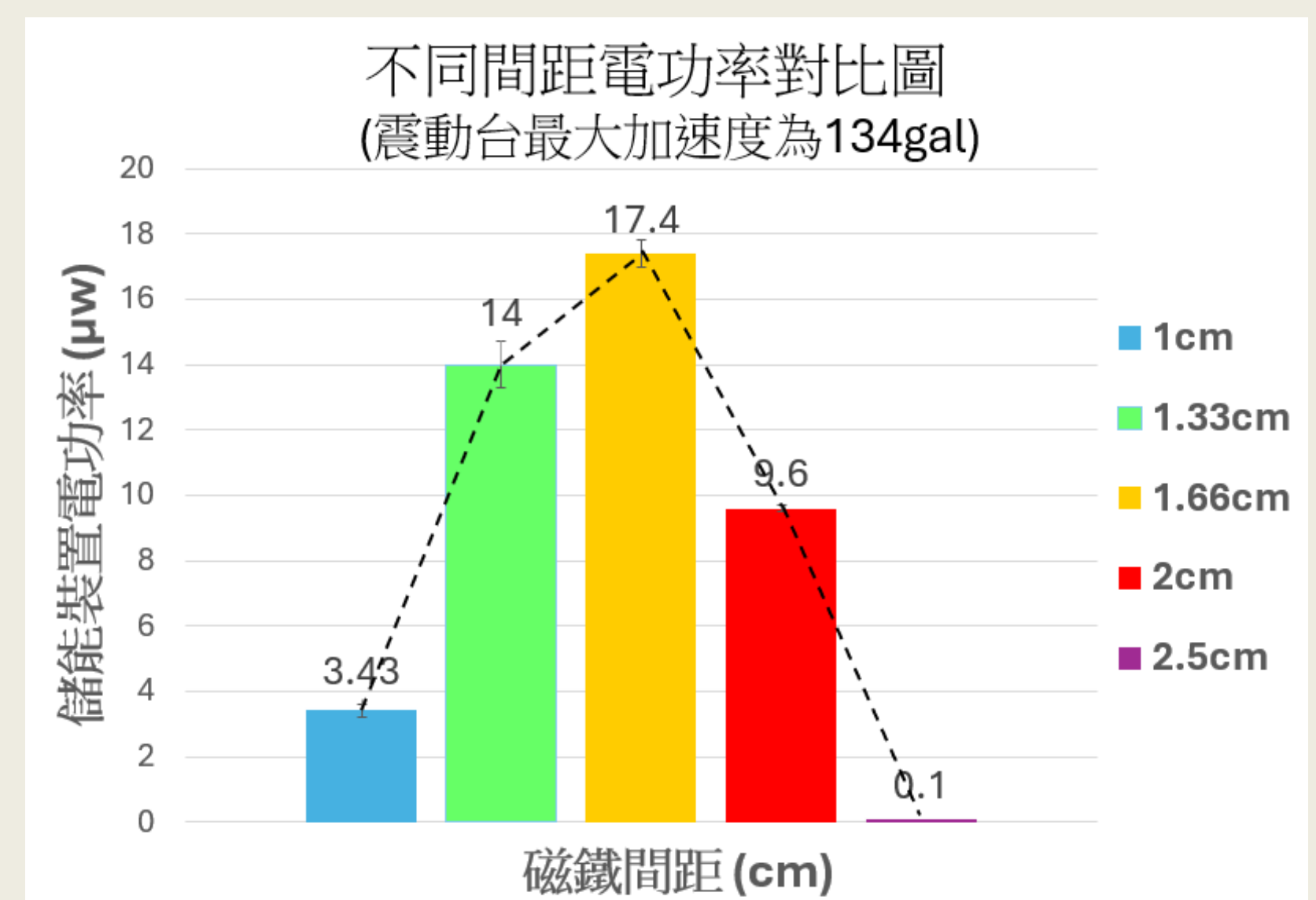
實驗二、改變間距



(圖十六) 改變間距用夾板



(圖十七) 不同間距對減震效果的影響



(圖十八) 不同間距對發電效能的影響

實驗內容

討論間距對減震和發電效果的影响。

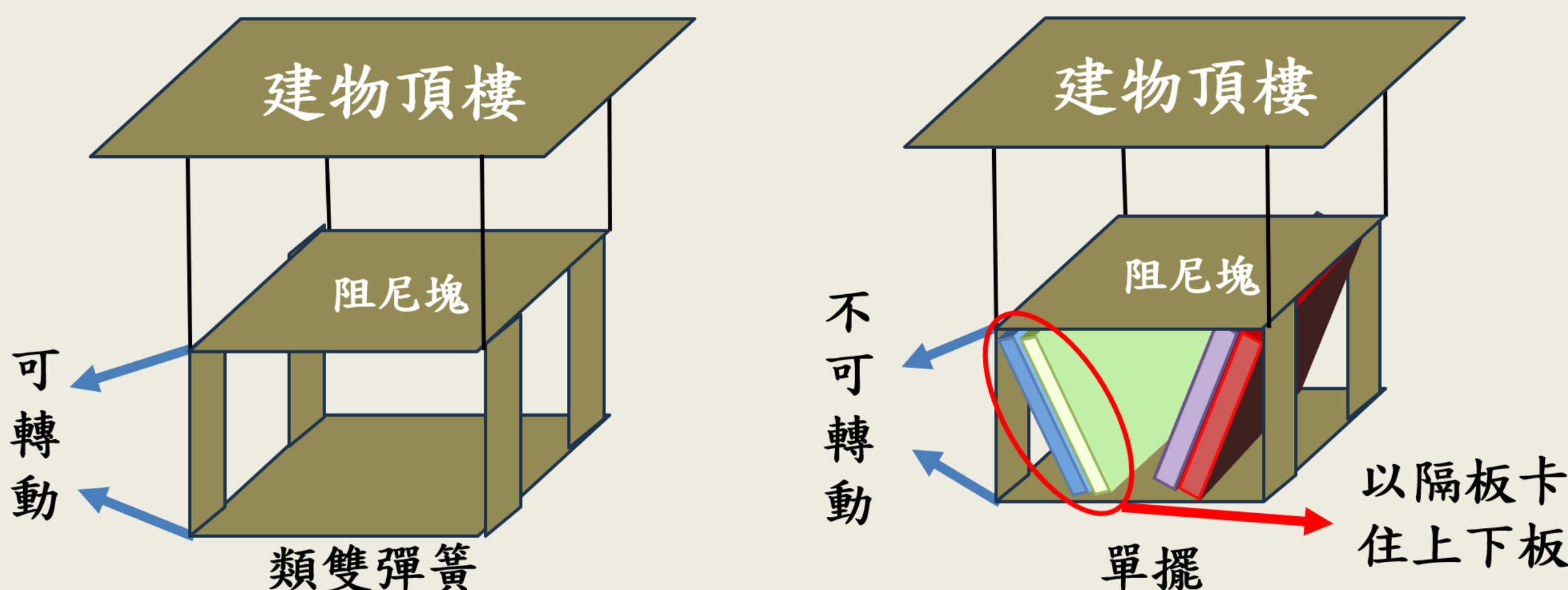
實驗結果

1. 上下板間距愈小時，減震效果愈佳。間距為1cm時，加速度能下降到對照組的56%。
2. 發電能力會隨著間距變動。最佳效果為間距1.66cm時，電功率可達17.4μW。

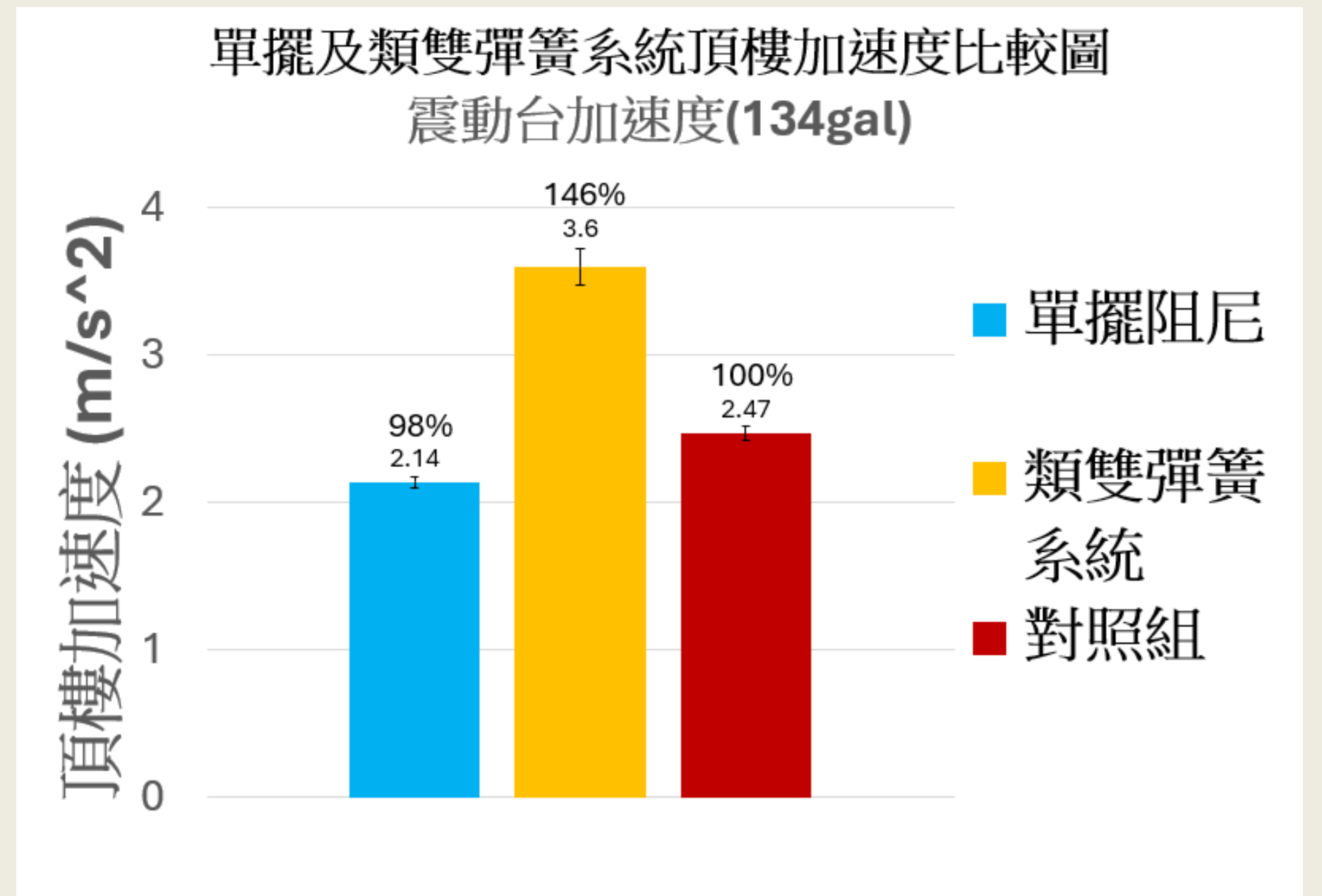
討論

在實驗中，間距愈小減震效果愈佳，主要是因為磁鐵與軟鐵芯之間的吸引力。發電能力主要受到阻尼擺盪情況影響。

實驗三、單擺、類雙彈簧比較



(圖十九) 實驗三示意圖



(圖二十) 單擺及類雙彈簧系統對減震效果的影响

實驗內容

討論單擺及類雙彈簧對減震效果的影响。

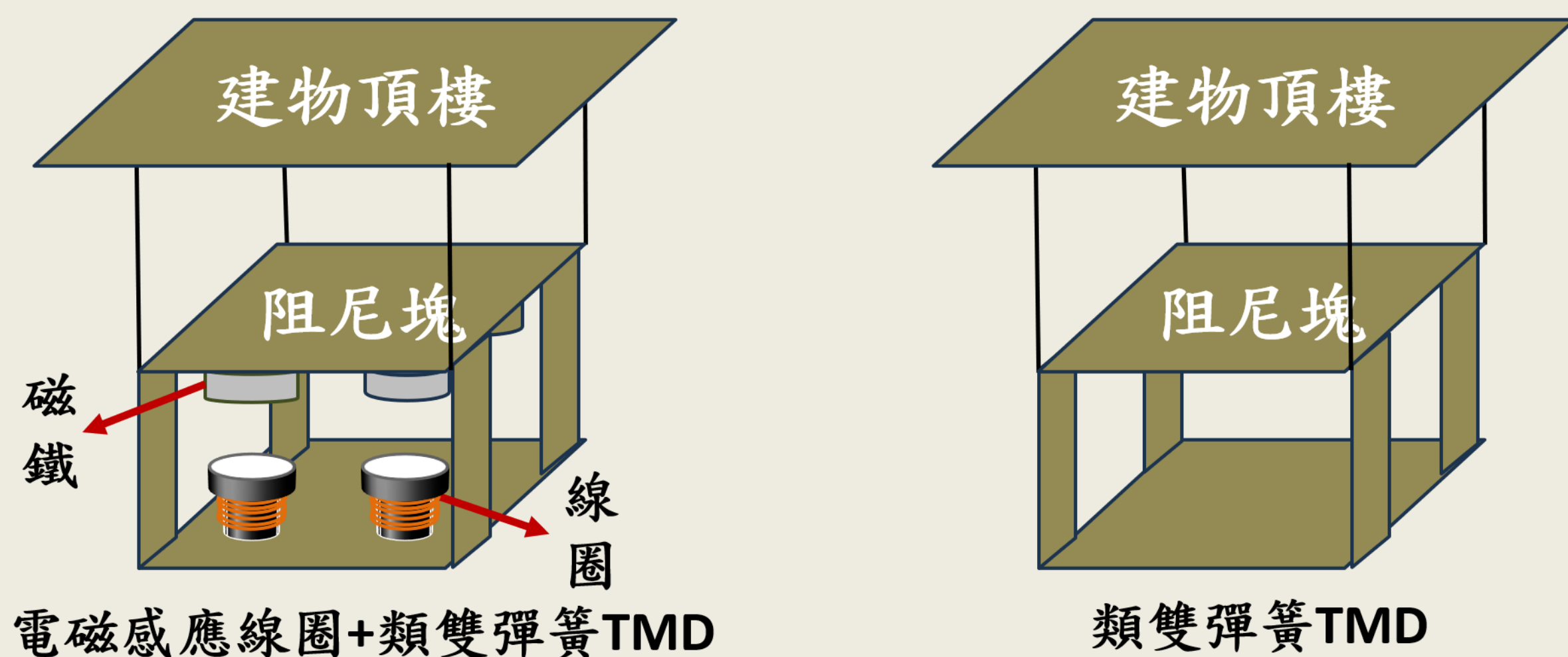
實驗結果

1. 類雙彈簧TMD阻尼減震效果不如單擺系統，甚至加劇頂樓最大加速度。

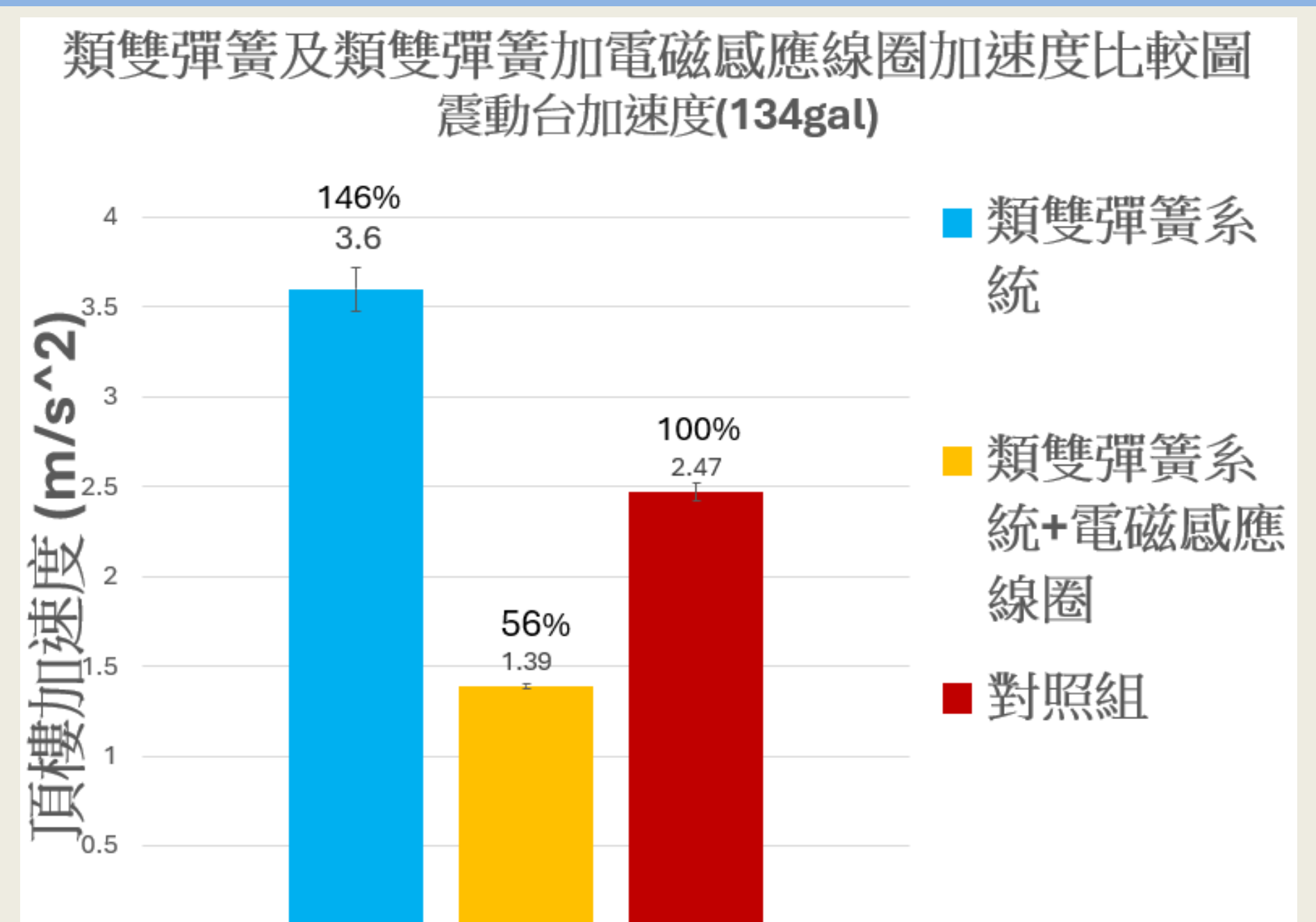
討論

力的方向及大小不均勻之混沌性質讓類雙彈簧產生反效果，使頂樓加速度增加。

實驗四、類雙彈簧有無電磁線圈比較



(圖二十一) 實驗四示意圖



(圖二十二)

類雙彈簧系統有無加裝電磁線圈對減震效果的影响

實驗內容

討論電磁線圈減震裝置對減震效果的影响。

實驗結果

1. 類雙彈簧TMD會使得頂樓最大加速度增加。
2. 加裝電磁線圈減震裝置後，減震效果變得很顯著。

討論

電磁線圈減震裝置透過頻率的改變、磁吸力的影响及將動能轉換為電能來達到減震效果。

四、結論

一、減速馬達隔震裝置:

1. 使用減速馬達及調整發電機外齒輪齒數，能產生不同的減震阻尼效果。
2. 以彈簧作為復位裝置的設計現階段會使這個架構整體的減震效能大打折扣。

二、電磁類雙彈簧TMD減震裝置:

1. 減震效果好的實驗組，電能並沒有明顯較大，所以懸吊阻尼能否有顯著的減震效果，主要還是與阻尼器和建物的自然頻率是否相近較為有關。
2. 磁鐵與線圈的間距會影響減震和發電效能，且影響發電效能比擺長影响力佳，磁鐵及鐵芯產生相吸引力的影响最大。
3. 類雙彈簧阻尼器現階段對於系統減震的影响力仍不及單擺阻尼系統，但加裝電磁線圈能夠有效提升減震功效並進行發電。

五、未來展望

1. 嘗試找出更適合減速馬達隔震裝置的復位器。
2. 量測建物的自然頻率以做出減震效果更好的阻尼器。
3. 測試電磁類雙彈簧TMD中磁鐵及線圈若以不同方式排列，能否有更好的減震效果。
4. 將裝置尺寸放大到接近現實並量測是否有相當效能。
5. 改良抗震裝置使之能夠應對不同維度、不規則的真實地震情況。