

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組物理科

080107

臺北市內湖區南湖國民小學

指導老師姓名

黃于玲

鍾秀芬

作者姓名

張登翔

鄭婕

施尚辰

蔡念潔

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會  
作品說明書封面

科 別：物理科

組 別：國小組

作品名稱：小球大功用

關 鍵 詞：阻尼器、防風制震、台北 101 金融大樓

編 號：

# 研究題目：小球大功用

## 壹、摘要：

全世界最高的大樓--台北 101 金融大樓--熱鬧開幕了，大樓中有顆重達 680 公噸的大鋼球，堪稱目前全世界最重的調質阻尼器（Tuned Mass Damper），這顆大球，引發我們極大的好奇心，因此我們透過一連串模型演練實驗，來粗略了解這個大重球掛在高樓上的功用，以及大樓擺動頻率和鋼球懸掛位置高度之間的關係。

從實驗結果中，我們發現了同樣重量的鋼球，受到相同的擺動幅度下，球掛的越高（懸掛長度越短），影響大樓震幅的現象就越顯著，亦即能較有效減緩大樓的擺動。而在同樣的懸掛高度，及相同的外力擺動幅度下，鋼球的重量越重，對大樓擺動振幅的影響也越顯著。重量及懸掛高度相同的鋼球，在受外力擺動頻率越低時，對於大樓的減震效果會越佳。

此外，在大樓上層懸掛重球，確實也能有效減緩大樓受強風影響所產生的搖晃程度。

實驗結果證明了阻尼器對大樓確有其抗震防風的功用。

## 貳、研究動機：

最近「台北 101 金融大樓」剛開幕，據報導指出，在 92 樓的地方掛著一個重達 680 公噸的大球（抗風制震重球－風阻尼器），能自行調整移動方向及振幅，遇風力較強或地震時，可有效降低大樓搖晃程度，達到抗風制震的功能，以維持超高樓的穩定度。這個現象引發了我們的高度好奇心：「這球真的有效嗎？」於是我們想透過一些相關實驗來探究其中的奧妙。

## 參、研究目的：

我們想知道這個大球掛在大樓上如何發揮作用，又為什麼一定要掛在 92 樓，以及大樓擺動頻率和鋼球懸掛位置高度的關係。



(上圖為大樓 92 樓所掛重達 680 噸的大球(抗風制震重球—風阻尼器))

(上圖為台北 101 金融大樓)

#### 肆、研究器材：

- 一、研究材料：大小木板兩塊、小鐵釘、木條、棉線、彈珠、鋼球（模擬阻尼器）、S 型勾、透明投影片、粗橡皮筋、鐵絲、空心筆管、石頭、強力膠。
- 二、研究工具：鋸子、鐵鎚、白紙、筆記版、尺、節拍器、簽字筆、大同 35cm 立地電風扇（TF-S14A）、碼表。

#### 伍、研究過程：

- 一、模型製作：製作 101 大樓模擬縮小版（高度大約縮小 400 倍）模型及可滑動基座。
  - (一) 利用木條及棉繩編製出一具長度比例約 101 大樓真實建築的 1/400 的長方體結構。



(二) 在木板邊緣適當的距離釘上鐵釘，作為可滑動基座的固定栓。



(三) 將木條鋸成適當長短，用強力膠黏在兩塊木板適當位置，作成可供滑動的基座滑槽。並在大木板的滑槽之間放入彈珠，再放上小木板，使小木板能藉彈珠在槽內自由滾動而模擬地表移動或風力震動。



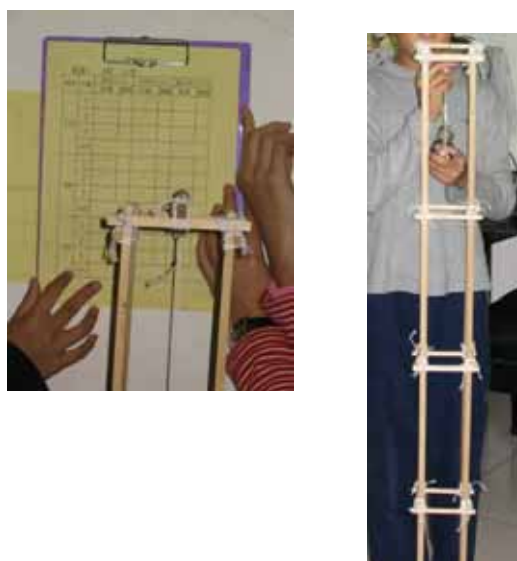
(四) 用粗橡皮筋固定木板和 101 大樓的模型。



(五) 將鋼球懸掛於樓頂處。



(六) 用鐵絲將簽字筆固定在頂端並用空心筆管、橡皮筋做出有伸縮的效果的紀錄筆，將尺卡在大木板和小木板之間的空隙，作為度量頂樓及基座搖擺的振幅之用。



(七) 球重取 800、600、400、200 公克四種。

(八) 紀錄紙如下：

重量： 800 公克

頻率	次數	高(0公分)		中(50公分)		低(100公分)	
		紀錄	震幅	紀錄	震幅	紀錄	震幅
132	1						
	2						
	3						
	平均						
160	1						
	2						
	3						
	平均						
192	1						
	2						
	3						
	平均						

## 二、操作過程：

### (一) 抗震實驗:

1. 把鋼球掛上模型頂端，調整適當長度。
2. 將模型移往牆面前適當位置。
3. 把紀錄紙夾在筆記板上，將筆記板用手固定在垂直牆面上適當位置。
4. 打開節拍器，設定節拍頻率。
5. 隨著節拍器頻率以手動方式讓基座搖動。基座搖動時，配合不同頻率節拍，往返移動幅度約 5mm。
6. 使簽字筆在紀錄紙上畫下搖晃的軌跡，紀錄樓頂晃動的幅度。
7. 運用節拍器調整搖動的頻率，以改變節拍並配合懸掛不同高度、不同重量鋼球，然後重複 1~6 步驟實驗，再將得到的結果平均。

### (二) 防風實驗:

1. 將模型靠牆擺置好，再打開電風扇的強風開關，吹向模型大樓的三層半至四層半高度，持續約 15 秒。
2. 為取得穩定的風速，這次實驗我們將電風扇擺在距離模型大樓 30cm 的地方。
3. 使簽字筆在紀錄紙上畫下搖晃的軌跡，紀錄樓頂晃動的幅度。
4. 配合懸掛不同高度及不同重量之鋼球，重複上述步驟 1~3，再將所得結果平均。



## 陸、研究結果

### 一、第一次抗震實驗紀錄表：

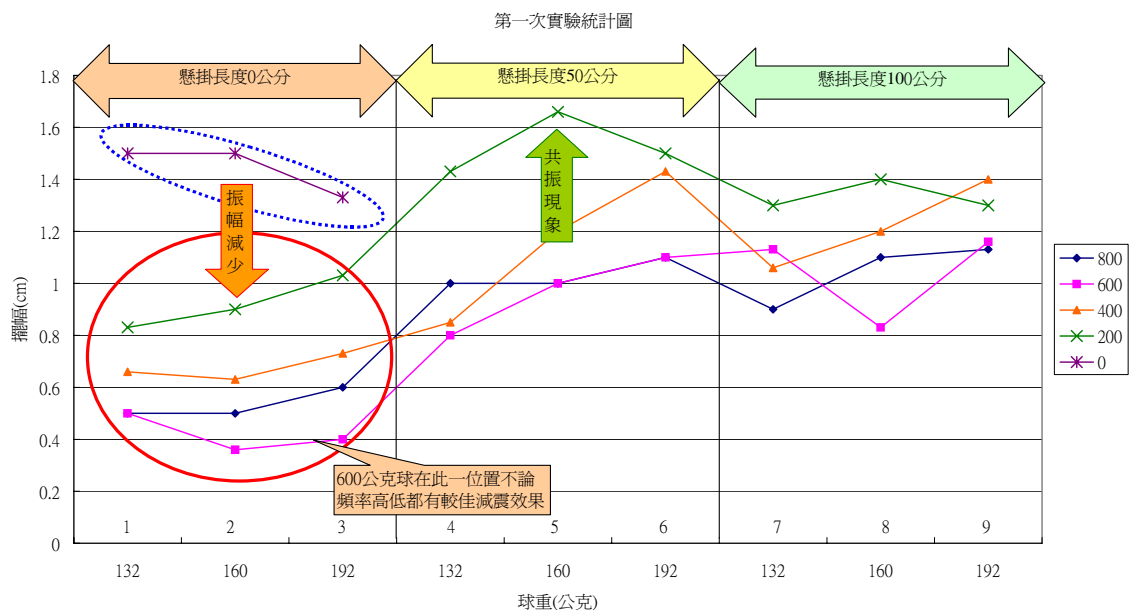
【小球大功用第一次實驗紀錄彙整表】

懸掛長度	編號	球重					
		頻率	800	600	400	200	0
0	1	132	0.5	0.5	0.66	0.83	1.5
	2	160	0.5	0.36	0.63	0.9	1.5
	3	192	0.6	0.4	0.73	1.03	1.33
50	4	132	1	0.8	0.85	1.43	
	5	160	1	1	1.2	1.66	
	6	192	1.1	1.1	1.43	1.5	
100	7	132	0.9	1.13	1.06	1.3	
	8	160	1.1	0.83	1.2	1.4	
	9	192	1.13	1.16	1.4	1.3	

單位：懸掛長度：公分  
 球重：公克  
 頻率：次／分鐘  
 擺動幅度：公分

- 註：1.每一種狀況作三次，再將三次紀錄平均  
 2.懸掛位置0公分即距地115公分  
 懸掛位置50公分即距地65公分  
 懸掛位置100公分即距地15公分

### 二、第一次抗震實驗統計圖：





三、第二次抗震實驗紀錄表：

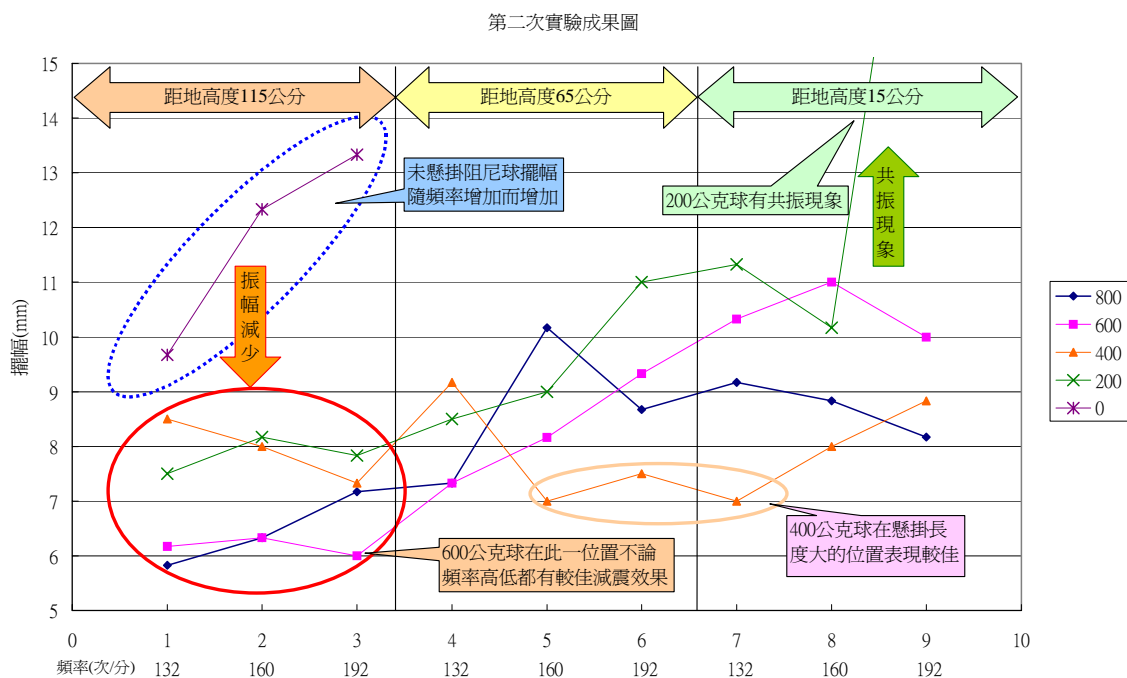
【小球大功用第二次實驗紀錄彙整表】

懸掛長度	編號	球重		800	600	400	200	0
		頻率						
0	1	132		5.83	6.17	8.5	7.5	9.67
	2	160		6.33	6.33	8	8.17	12.33
	3	192		7.17	6	7.33	7.83	13.33
50	4	132		7.33	7.33	9.17	8.5	
	5	160		10.17	8.16	7	9	
	6	192		8.67	9.33	7.5	11	
100	7	132		9.17	10.33	7	11.33	
	8	160		8.83	11	8	10.17	
	9	192		8.17	10	8.83	21.33	

單位：懸掛長度：公分  
 球重：公克  
 頻率：次／分鐘  
 平均擺動幅度：公厘

註：1. 每一種狀況作三次，再將三次紀錄平均  
 2. 懸掛位置0公分即距地115公分  
 懸掛位置50公分即距地65公分  
 懸掛位置100公分即距地15公分

四、第二次抗震實驗統計圖：



五、第三次抗震實驗紀錄表：

【 小球大功用 第三次實驗紀錄彙整表 】

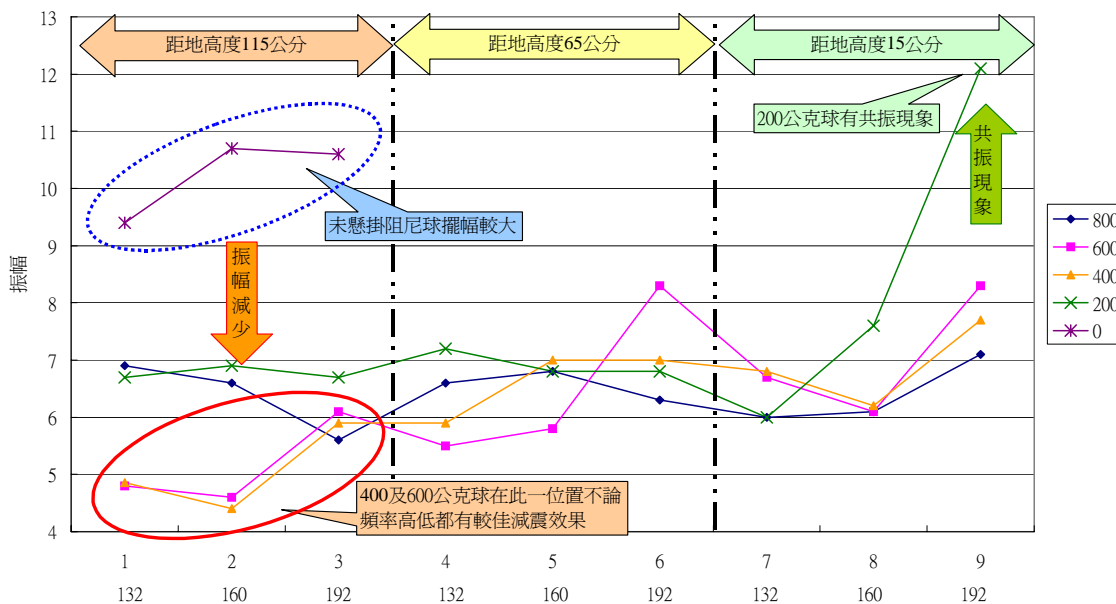
距地高度	編號	球重	800	600	400	200	0
		頻率					
115	1	132	6.9	4.8	4.86	6.7	9.4
	2	160	6.6	4.6	4.4	6.9	10.7
	3	192	5.6	6.1	5.9	6.7	10.6
65	4	132	6.6	5.5	5.9	7.2	
	5	160	6.8	5.8	7	6.8	
	6	192	6.3	8.3	7	6.8	
15	7	132	6	6.7	6.8	6	
	8	160	6.1	6.1	6.2	7.6	
	9	192	7.1	8.3	7.7	12.1	

單位：懸掛長度：公分  
 球重：公克  
 頻率：次／分鐘  
 平均擺動幅度：公厘

註：1.每一種狀況作七次，將七次紀錄刪除最長與最短兩次後平均值  
 2.距地115公分即懸掛位置0公分  
 距地65公分即懸掛位置50公分  
 距地15公分即懸掛位置100公分

六、第三次抗震實驗統計圖：

第三次實驗結果統計圖



七、防風實驗記錄表：

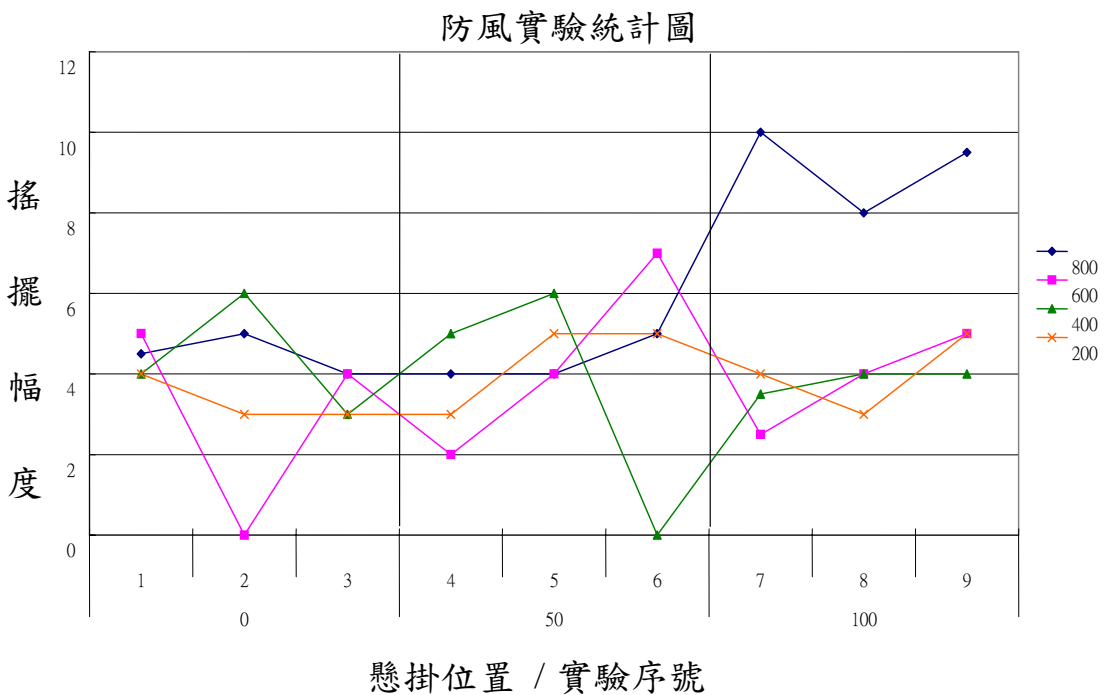
【小球大功用防風實驗紀錄彙整表】

懸掛位置	球重					
	序號	800	600	400	200	0
0	1	4.5	5	4	4	62
	2	5	--	6	3	75
	3	4	4	3	3	10
50	4	4	2	5	3	
	5	4	4	6	5	
	6	5	7	--	5	
100	7	10	2.5	3.5	4	
	8	8	4	4	3	
	9	9.5	5	4	5	

單位：懸掛長度：公分  
球重：公克

- 註：1.每一種狀況作三次，再將三次紀錄平均  
2.懸掛位置 0 公分即距地 115 公分  
懸掛位置 50 公分即距地 65 公分  
懸掛位置 100 公分即距地 15 公分

八、防風實驗統計圖：



## 陸、討論與結論

### 一、觀察紀錄值統計結果:

- (一) 掛阻尼器的振幅不論在哪一個位置或搖擺頻率，都有減低振幅的功效，尤其以掛在較高的樓層效果最佳。
- (二) 從第一次到第三次實驗，不論實驗精度如何，都證明 600g 的阻尼器在本實驗中的效果最佳與穩定。
- (三) 三次實驗結果均顯示懸掛的位置越低，減震的效果越不顯著。
- (四) 搖擺頻率越快，可能造成誤差的機率也增加，而使得效果越不穩定。
- (五) 從三次實驗紀錄顯示，大樓掛同一重量的阻尼器，擺幅隨頻率的增加而有增加的趨勢。
- (六) 由於掛上重球後，能有效減緩模型大樓的搖晃程度，因此將紀錄單位改用 mm 使紀錄數值會較為便利與精確。
- (七) 由第三次實驗觀察，掛在中間位置時，不論是哪一種球的重量及搖擺頻率，減震效果都相當接近。
- (八) 400g 阻尼器在第三次較精確的實驗中，證實在距地高度 115cm 的效果也是很好的。效果並不遜於 600g 的阻尼器。
- (九) 800g 重量阻尼器，減震效果似乎不受懸掛位置及搖擺頻率影響，效果都差不多，雖沒有特別好，但都很平均。
- (十) 200g 重量阻尼器，減震效果亦似乎不受懸掛位置及搖擺頻率影響，但在本實驗中，卻在低位置高頻率時發生共振現象。

### 二、從抗震實驗的觀察紀錄結果中，我們可以發現以下幾件事：

- (一) 同樣重量的鋼球，受到相同的擺動幅度下，球掛的越高（懸掛長度越短），影響大樓震幅的現象就越顯著，亦即能較有效減緩大樓的擺動。
  1. 雖然本實驗結果發現鋼球在模型中的位置越高，制震效果越顯著，但從實際台北 101 金融大樓卻也發現，其中的阻尼器並非在大樓的最高處，因此判斷球的位置仍需依據大樓本身的重量及高度，加以計算後得出最適制震位置。
- (二) 在同樣的懸掛高度，及相同的外力擺動幅度下，鋼球的重量越重，對大樓擺動振幅的影響也越顯著。
  1. 從實驗結果中亦可發現，800 公克重的鋼球相對於總重才 300 公克的模型大樓，稍顯太重，因此制震效果反而不佳。所以，阻尼器的重量也不能太重，必須要配合大樓本身的高度、重量與材質）。

2. 200 公克球懸掛於長度 100 公分時發現有共振現象，對於制震反而造成反效果，所以建築物中的制震阻尼器重量不宜太輕。
  3. 不同重量的阻尼器，會在某一特定狀況下獲得較佳的減震效果。重量輕的阻尼器，有可能形成共振，而得到反效果。如以較重的阻尼器，則在任何狀況下都能獲得相近的效果，似乎比較能夠應付複雜的狀況，或較不易掌握的大樓固定頻率。
- (三) 重量及懸掛高度相同的鋼球，在受外力擺動頻率越低時，減震效果會越佳，表示掛了阻尼器的超高大樓，在平常遇到較弱的地震或風所造成的大樓搖晃現象，大致上都能具有穩定效用。
- (四) 由實驗結果可以看出鉛球的懸掛線之長度及擺動頻率的配合與震幅有關，但精確的相關因素必須進一步求證。
- (五) 第二次實驗時，因有第一次的經驗，動作比較熟練，而且集中在一個時間內並由固定一人操作完成全部實驗，又提高精度以公厘為單位，所以實驗結果應比第一次要具有參考性。
- (六) 吸取前二次經驗，第三次實驗時，每一種狀態從三次增加到七次，希望能以增加次數來消除人為手動之誤差。並於選取紀錄值時，刪除最大與最小二次，將剩餘的五次予以平均。結果可信度更高。
- (七) 如果有較精密的儀器，或許可以更清楚的觀察出來以下狀況：
1. 樓頂擺動幅度與震動頻率的關係。
  2. 球重對大樓震幅的影響。
  3. 球懸掛高度對大樓影響的程度。
  4. 球重與懸掛高度在何種頻率下有較顯著的效果。
  5. 真實的 101 大樓結構系統採用是的鋼骨構造，而且有複雜的構架與造型。為了模擬鋼骨在大樓結構上的柔性，因此這次實驗 101 大樓模型的骨架選擇用在小尺度時有相似結構行為的木條。

### 三、抗風實驗討論：

- (一) 在未掛重球之前，強風造成 101 大樓模型的傾倒，在大樓高處的強風，會使大樓產生前後左右的晃動與扭動。但掛上重球之後，強風吹襲下，模型大樓仍相當穩固，並可見模型內部的重球明顯地微微晃動，證明了重球能吸收部份搖晃的能量，有效降低大樓的搖晃程度。
- (二) 我們吹風的位置在模型的上端，因模型本身重量較輕的關係，所以 200g 的阻尼

器在這組實驗中防風效果較顯著，而太重的阻尼器反而會使建築物上端重量太重，加速風所造成的搖晃，因此阻尼器的重量仍須配合該棟建築物的高度及重量，並非越重越好。

#### 四、本實驗有幾項主要誤差來源：

- (一) 因為機械搖擺裝置製作困難，不得不以手動取代，造成擺動上無法避免的誤差，需再尋求更準確的機械搖擺裝置，力求實驗準確。
- (二) 以手動方式，快慢及震幅大小受到生理上限制，實際搖動頻率及震幅模擬亦有困難，僅能控制在每分鐘 132、160、192 次（節拍器上的固定頻率）及震幅約 5mm 範圍內，若能解決此問題，將使實驗結果更廣泛。
- (三) 將紀錄筆固定於樓頂紀錄模型大樓擺幅時，因受限於裝置的簡單，及紀錄筆接觸紀錄紙時會有摩擦力，所紀錄之軌跡亦容易造成誤差。量取紀錄痕跡時，去除前後刻痕輕微部分量取重複次數多的部分，以消除手動時無意間過度用力現象。

五、本實驗中的重球擺置方式，模擬台北 101 金融大樓中的阻尼器，採懸掛式垂吊在不同的高度，而實驗結果也證實了強風出現時，重球會擺動，表示該重球會吸收大樓的振動，有效解決大樓搖晃問題，並可證明懸浮阻尼球確實有其防風功效。

六、綜合以上實驗結果發現，實驗中所使用的重球確實對模型大樓有顯著或輕微的抗震及防風效果，而實際上台北 101 金融大樓在結構設計上可承受約 2500 年一遇的大地震，在抗風設計上則可以承受興當於 17 級每秒 60 公尺以上的強烈颱風，因此證明只要阻尼器與建築結構彼此達到最適平衡，將對高樓有很大的保護作用，這也是目前世界高樓常用的抗震防風的好方法。

#### 柒、資料來源：

一、 網站：<http://www.tfc101.com.tw>

<http://www.pfts.com.tw>

<http://www.phys.tku.edu.tw/S5/0608.html>

<http://www.w3.org/TR/REC-html40>

[http://pei.cjjh.tc.edu.tw/chem\\_37\\_2.htm](http://pei.cjjh.tc.edu.tw/chem_37_2.htm)

二、 書籍：高級中學物質科學物理篇上冊 出版社：南一書局

## 捌、參考資料：

### 一、Taipei 101-TMD 阻尼器說明：

- (一) **TMD**: 調質阻尼器TMD(Tuned Mass Damper)為一針對本大樓需求量身定做的的被動阻尼系統,其位置設置於 87F~91F的核心位置,其主要目的為調諧及減低大樓受風力吹襲時之擺動,以確保大樓人員工作時的舒適度而設置。而有別於一般傳統隱藏式阻尼系統,Taipei 101-TMD結合了建築機能與結構功能之考量,在 88FL及 89FL將可一窺阻尼系統的整體運作。
- (二) **質量塊(Mass Block)**:一直徑 5.5 公尺,由 41 層 12.5 公分厚之實心鋼板堆疊焊接而成的金色球體質量塊,其重量達 680 公噸。
- (三) **鋼索(Cable)**:球體質量塊由 8 支直徑 9 公分、長度 42 公尺的鋼索串聯並懸吊於 92 樓。為確保其柔性與延長使用年限,每支鋼索均由超過 2000 條獨立小鋼線所組成,而其自重下之安全係數約達 9,亦即每一支鋼索均足以支撐TMD全部重量。
- (四) **Tuning Frame (調整構架)**:調整構架位於 91 樓,經由串聯束制所有懸吊鋼索,並於後續量測實際大樓擺動週期頻率,並調整鋼索擺動長度以使大樓及TMD之擺動週期相同,以確保TMD被動反向作用及達到最大的消能功效。
- (五) **阻尼與功效**:TMD可減少大樓受風力時的 40%擺動量,而TMD平均在一年內將會有幾次來回擺動約 35 公分。因TMD與大樓擺動週期相同,其擺動約 7 秒一次來回循環,因此在日常運轉的情況下,TMD的作用與擺動並非顯而易見。當罕見的大颱風來襲時,例如 100 年回歸期發生一次的大颱風作用下,TMD將來回擺動 150 公分,而經過特殊設計的緩衝系統(Bumper System)將用來預防與減低超過 150 公分擺動時之影響。
- (六) **主要油壓粘滯性阻尼器**:TMD質量塊下共設置 8 支斜向的大型油壓粘滯性阻尼器(Primary Hydraulic Viscous Damper),其設計概念在於自動的吸收球體質量塊擺動時之衝擊能量,並藉由大樓的擺動來抵消所吸收的能量。
- (七) **緩衝系統(Bumper System)**:TMD質量塊下放置一可限制球體質量塊擺動的緩衝環(Bumper Ring),緩衝環則連結 8 支水平向大型緩衝油壓粘滯性阻尼器(Snubber Hydraulic Viscous Damper),其設計目的在於抑制罕見的大颱風或大地震作用時造成TMD來回擺動超過 150 公分之消能及束制安全系統。

- (八) Pinnacle-TMD:高度達 450~508 公尺範圍的細長塔尖(Pinnacle)內亦設置了兩個小型調質阻尼器,每個質量塊為 6 公噸,其設置目的為降低鋼結構的疲勞應力。經分析估計,在塔尖平均每年約有 18 萬次的來回擺動,此擺動頻率與位移將因過度反覆擺動而造成鋼結構的疲勞,而Pinnacle-TMD的設置將可減少 40%的塔尖擺動量。
- (九) 設計: TMD由加拿大Motioneering公司負責設計、製造與施工。另TMD之相關主體結構之需求與分析、設計配合則仍由本工程結構顧問-永峻工程顧問(股)公司負責整體結構設計。



Taipei 101-TMD 阻尼器的側面圖(上圖左)及俯視圖(上圖右)

(以上資料來源:台北 101 金融大樓公關處)

## 二、簡諧運動:

在自然界中或日常生活中，我們常可看到許多週期性的震動現象，例如彈簧的伸縮、吊燈或鐘擺的擺動、水面小船的浮沉、樂器簧片或琴弦的振動等。甚至固體內部的分子或原子在其平衡位置附近也不停地在振動。此外水波、聲波、電磁波等波動現象都和振動有關。從理論上來分析，這些振動現象，不管有多複雜，都是由一種最簡單、最基本的振動所組成，這些振動可有不同的頻率和振幅，但運動的模式則相同。這種振動稱為簡諧運動（simple harmonic motion）。簡稱 S.H.M. 其定義為「一質點在其平衡位置（即所受合力為零的位置）附近，沿一直線作往復的週期性運動。」 --【高級中學物質科學物理篇上冊 p.155 出版社：南一書局】

## 三、共振

任何由彈性物質組成的物體，受到微擾時，將以自己特殊的頻率振動，我們稱之為物體的自然頻率，其大小與物體的幾何形狀和彈性程度有關。而且，幾乎任何東西都會以一種或多種的自然頻率振動。例如當一把螺絲起子掉落在水泥地板時，



地板受到擾動而以它的自然頻率產生了複雜的振動，因為摩擦的緣故，該振動將逐漸衰弱而消失。反之，在工廠中，大型機器的運轉，地板受到長期規律性的擾動，造成地板的強迫振動會持續至關機為止。

當物體的強迫振動頻率等於自然頻率時，振幅會明顯的增加。此現象稱為共振。

【<http://www.phys.tku.edu.tw/S5/0608.html>】

所謂「共振」：「物体有其自然頻率，當振動源與物体的振動頻率一致就會產生共振。」如九二一大地震時，由於地震頻率與大樓的第十二層的振動頻率相同，產生共振效果，所以第十二層樓受創最為嚴重。亦即**如果兩項頻率一致，則會產生加乘或擴大的效果(如例圖所示)**；相反的，**如果兩項頻率剛好相反，則會產生歸零或減少的效果**。【<http://www.w3.org/TR/REC-html40>】

#### 四、振動能量吸收

在二棵樹之間做四條擺錘，擺錘的細繩長度不必相等，石頭的形狀也不重要。現在，只以手搖動 D 的擺錘之後，便發生了不可思議的現象。請問是以下那種現象呢？

- (1)只有 A 的擺錘開始搖動。
- (2)只有 B 的擺錘開始搖動。
- (3)只有 C 的擺錘開始搖動。
- (4)ABC 擺錘一齊搖動起來。
- (5)沒有擺錘搖動。



答：(2)

與石頭的重量、形狀無關，只有與石頭重心位置等長的擺錘開始搖動，其他幾乎不動。

依繩子長度的不同，每一個擺錘振動的次數也不同，配合其長度的擺動次數，便稱為此擺錘的固有振動數，一般而言，**物體被與固有振動數相同的外來振動數搖動，便會吸收其能源，自己開始動了起來，這種性質稱為「共振」**問題中的圖 B 與圖 D 的擺錘就是這種關係，相反地，固有振動數不存在不同的物體之間，因此，不同物體之間不會產生共振。

【[http://pei.cjjh.tc.edu.tw/chem\\_37\\_2.htm](http://pei.cjjh.tc.edu.tw/chem_37_2.htm)】

## 評語

080107 國小組物理科

小球大功用

1. 可模擬實際大樓的樣態做實驗，以免誤差大。
2. 此主題研究難度高，具挑戰性。