

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 自然科

第二名

081562

候風地動儀真的會準嗎？地動儀的自製與探討

學校名稱：嘉義市西區興嘉國民小學

作者：	指導老師：
小六 林慶安	拱玉郎
小六 陳俞廷	黃錦甘
小六 林庭羽	
小六 吳庭睿	
小六 張卓如	

關鍵詞： 候風地動儀、地震波、擺線

候風地動儀真的會準嗎？地動儀的自製與探討

～ 本文僅向在震災中受難的人們以及家屬祈福並致意 ～

壹、摘要

我們成功設計了「組合式」地動儀，兼具立桿式和懸吊式的特性，並研究各種變因和地震波對地動儀的影響。在我們模擬的地震波中，以水平分力最多的雷利波成功撞擊機率最高。我們發現所有地動儀有共同難題，例如：中柱擊中兩個八道的中央時會一次撞落兩個鋼珠，或中柱來回擺盪撞擊而擊落兩個鋼珠，而且因每個牙機均獨立，當鋼珠已掉落一顆時，不能防止另一顆鋼珠掉落。我們對於馮銳認為張衡的地動儀應是「懸吊式」的看法存疑，因為懸吊式的中柱無法避免來回擺盪而發生兩次撞擊。我們提出內旋輪線(hypotrochoid)的模型觀念嘗試來解釋各種撞擊情形。

貳、研究動機

在我們自然課本（牛頓版 6 上）「颱風與地震單元」的習作有一段文字提到東漢科學家張衡發明的「候風地動儀」。西元 132 年發明的候風地動儀，它的外型像酒甕，中央有一隻棍子，當地震來時，棍子會倒向地震發生的方向，因而引起龍口吐出銅球，就知道地震發生的方位，這是世界上最早的地震測量儀，比其他國家同類型儀器早了一千多年。可是自然老師說：「實際上的候風地動儀內部構造已失傳，古書上只有候風地動儀的外型描述」，這令我們十分好奇，候風地動儀真的可以偵測地震嗎？於是先收集相關資料，再動手自製一個地動儀，來驗證候風地動儀到底準不準？

參、研究目的

「慣性」是物質的一種「保持物體運動狀態」的特性。依據牛頓第一運動定律(慣性定律)，當物體不受力或所受合力為零，則靜者恆靜，動者恆作等速度直線運動。地面和地動儀的中柱本來靜止，一旦地面改變運動狀態時，中柱來不及反應會朝反方向運動，候風地動儀就是利用慣性定律設計的的驗震工具（候風地動儀的風是指“地氣”）。

本研究首先收集地動儀的資料，瞭解相關的歷史考據以及各式地動儀結構演進，以做為我們設計地動儀的參考。目前有關張衡的候風地動儀，長久以來都是認為地動儀在中心有個「直立」的中柱，但近年來有人提出中柱應是「懸吊式」，於是我們想設計出「組合式的」地動儀，兼具立桿式和懸吊式的特性。

以下是我們想要探討的主題：

問題一、各式地動儀的演進和比較

問題二、自製立桿式地動儀

問題三、自製懸吊式地動儀

問題四、(1) 各種操縱變因對「立桿式地動儀」的影響

(2) 各種操縱變因對「懸吊式地動儀」的影響

問題五、(1) 模擬的地震波對「立桿式地動儀」驗震效果之影響

(2) 模擬的地震波對「懸吊式地動儀」驗震效果之影響

問題六、地動儀的中柱晃動情形探討

問題七、將來的設計展望

肆、研究材料和設備

材 料	指北針、合板、木條、鋼珠、鐵管、塑膠水桶、水平儀、杯子、鐵釘、塑膠電線壓條、半圓形木條、圓形磁鐵、漆包線、強力膠、噴漆、膠帶
使用工具	電鑽、鋸子、鐵鎚、鐵釘、尺、三用電表、攝影機、軟體 KMPlayer

伍、研究過程和方法

問題一、各式地動儀的演進和比較

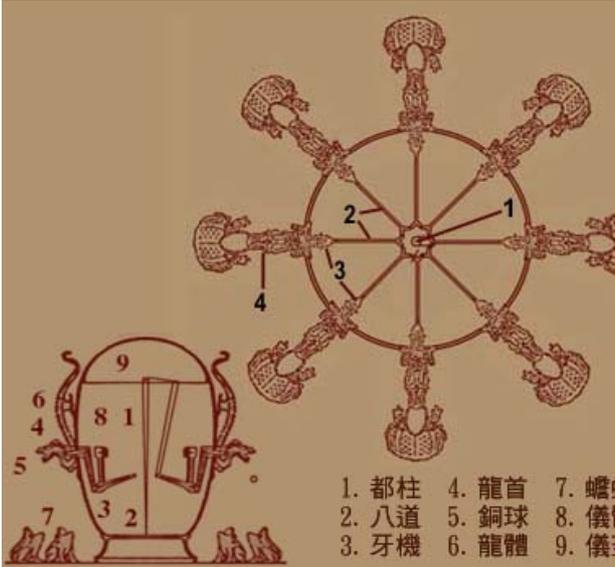
【研究步驟】利用網際網路的 google 搜尋引擎，收集地動儀資料，比較各式地動儀的演進，以作為我們設計的參考。

【研究結果】我們將我網路所查的資料整理在【表 1】和【圖 1】之中。

【表 1】各式地動儀的比較

名稱	候風地動儀	候風地動儀	1/3 大地動儀
年代	132 年（東漢順帝永建 七年）	1951 年	2004 年
作者	<u>張衡</u>	<u>王振鐸</u>	<u>馮銳</u>
結構	外形似酒樽，內部有都柱，都柱旁有八道，並有精巧的傳動機構。外部有八條口內含銅丸的龍，下有八個張嘴的蟾蜍，遇有地震，內部的機關會被觸動，使龍口之丸吐出，掉入下面的蟾蜍口中，發出激揚的振聲。【後漢書·張衡傳】	中柱為立桿式。中柱上大粗下細，造型不穩定。	中柱為懸吊式。結構精密，利用各種數據，借助各種儀器希望能準確地把地震感應表現出來。
驗證	有一次，一個龍吐丸但是人們沒有感覺地動，洛陽的學者都認為候風地動儀不能驗震，但是過幾天，報來隴西地震的消息，於是人們都嘆服地動儀的精妙。	唐山大地震時，地動儀有過反應	對 4 次實際地震事件已經實現了良好的驗震反應。
評語	內部構造失傳，成為千古之謎	飽受中外學者批評。認為僅是不能動的概念模型。	歷史學家批評：反對“古代機械現代化”，應把歷史儀器還原到當時真實的技術水平
陳列	失 傳	陳列於大陸的中國歷史博物館	河南博物院、中國國家地震局資訊中心

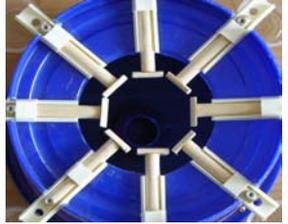
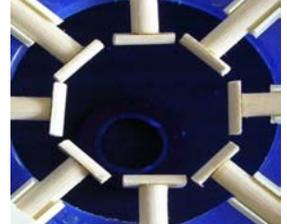
【圖 1】各式地動儀的演進與外觀

			
<p>(1) <u>服部一三</u>。日本地震學家。於 1875 年復原地動儀的模型是最早將地動儀介紹給西方的學者。立桿式。</p>	<p>(2) <u>米倫 (John Milne)</u>。英國地震學家。於 1883 年設計地動儀模型。立桿式。</p>	<p>(3) <u>呂彥直</u>，於 1917 改進的<u>米倫</u>設計候風地動儀模型。立桿式。</p>	<p>(4) <u>李志超</u>，於 1993 地動儀的復原模型。立桿式。</p>
	 <p>1. 都柱 4. 龍首 7. 蟾蜍 2. 八道 5. 銅球 8. 儀體 3. 牙機 6. 龍體 9. 儀蓋</p>		
<p>(5) <u>王振鐸</u>，於 1951 年研製的地動儀，成為數十年來中國公開承認的地動儀唯一器形。立桿式。</p>	<p><u>王振鐸</u>復原的候風地動儀的內部構造。 地動儀的各部位名稱如下： 1.都柱 2.八道 3.牙機 4.龍首 5. 銅球 6.龍體 7.蟾蜍 8.儀體 9.儀蓋</p>	<p>(6) <u>馮銳</u>，於 2004 年提出懸吊式地動儀。上圖是 1/3 大地動儀，懸吊式。</p>	

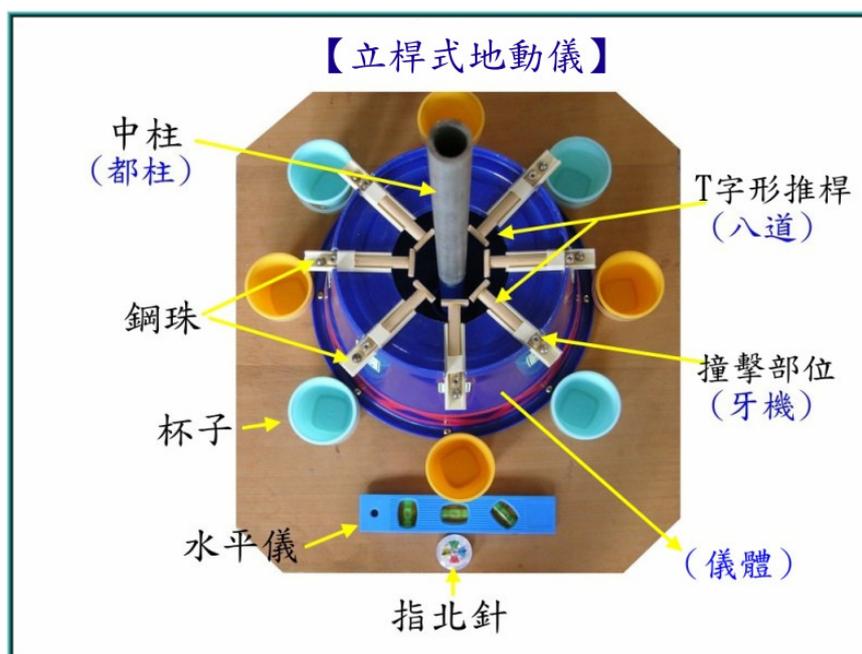
問題二、自製「立桿式地動儀」

【製作步驟】

【圖 2】「立桿式地動儀」的製作流程

			
<p>1. 鋸 54x60cm 的合板，形狀八角形</p>	<p>2. 以電鑽和鋸子在塑膠桶底部，鑿出一個 12cm 的圓洞，以及八個缺口，桶子高度 35cm</p>	<p>3. 鋸出 10cm 塑膠電線壓條，作為鋼珠移動溝槽，並在溝槽一端鑽洞</p>	<p>4. 以半圓形木條做成 T 字的推桿（相當於古書的八道）</p>
			
<p>5. 左側螺帽、上方白色蓋子、右側的短木棒，三者可巧妙地防止 T 字的推桿脫落</p>	<p>6. 八個 T 字的推桿完成圖</p>	<p>7. 溝槽靠圓心位置較低，靠外側水平位置較高，以防止鋼珠因小震動而掉落。</p>	<p>8. 中心推桿剛好形成一個「正八邊形」，本裝置還可以調整八邊形的大小。</p>
			
<p>9. 在裝置的北邊黏上一個指北針</p>	<p>10. 在指北針旁黏上一個水平儀，用來校正水平</p>	<p>11. 裝置的底部黏上一個中空圓環</p>	<p>12. 圓環可幫助立桿式的中柱固定於圓心</p>
			
<p>13. 鋼珠溝槽分別放上鋼珠，鋼珠的位置相當於古書的「牙機」。</p>	<p>14. 在八個方位分別黏上兩層塑膠杯。兩層塑膠杯可方便將鋼珠倒出，也可以減少鋼珠彈跳動能。</p>	<p>15. 放置中柱，桶上貼上八個方位標籤</p>	<p>16. 立桿式地動儀完成圖</p>

【圖 3】立桿式地動儀完成圖



【結果討論】

我們所製作的「立桿式地動儀」具有下列特點：

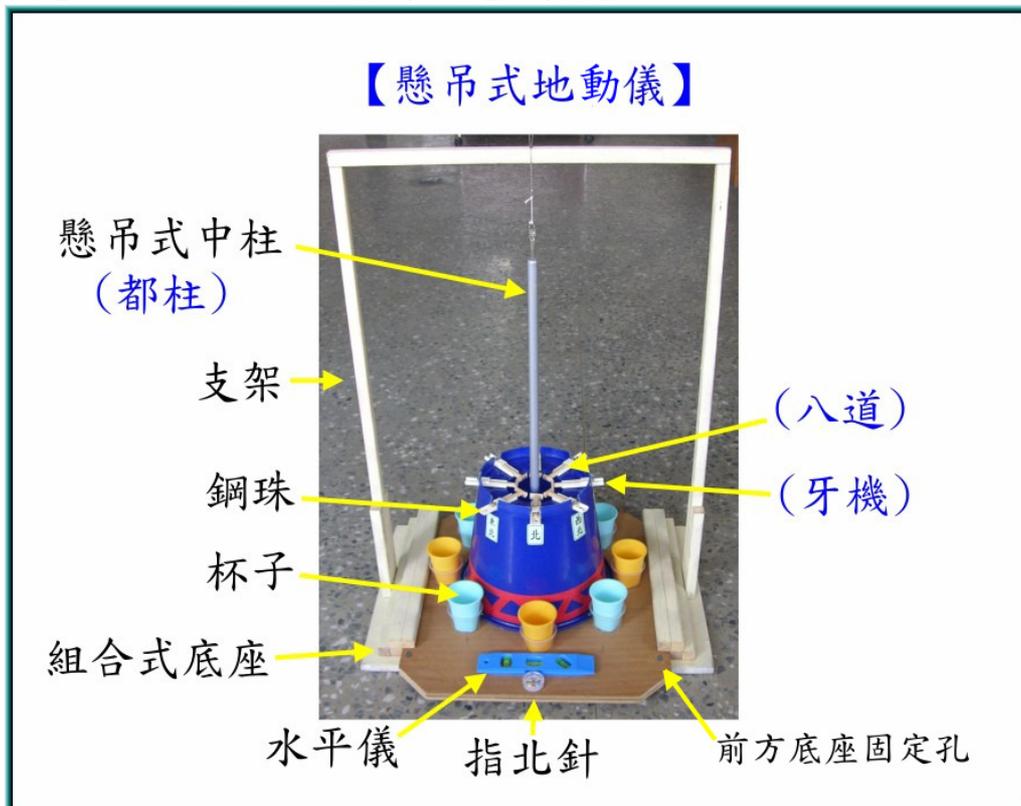
- (1) 利用塑膠桶作為地動儀的結構體應是很有創意的想法。我們原本是利用鐵絲去折出我們需要的結構體外型，也試過利用木材作為結構體，發現都沒有比用塑膠桶來的方便又精確，圓柱形塑膠桶上下的兩個圓形的平面，都很平整且對稱。
- (2) 我們設計的地動儀有輕巧、低成本的優點，而且符合地動儀原本的設計原理，並能實際從事各種驗證實驗，也因為輕巧所以靈敏度不錯。
- (3) T 字的推桿的左側螺帽、上方白色蓋子、右側的短木棒，三者可巧妙地防止 T 字的推桿在被中柱撞擊時而脫落。T 字形推桿的溝槽在靠圓心位置較低，靠圓外側位置較高，溝槽一端用電鑽鑽的圓洞，都是可防止鋼珠被一般震動震落的設計，參見【圖 2-5】。
- (4) 我們原設計的塑膠溝槽並不是直的，本想在塑膠溝槽的末端利用酒精燈的火來烤成上翹，以用來防止鋼珠被一般震動震落，結果發現 T 字型推桿在被撞擊時，會被上翹的溝槽頂住而不能順暢向外推，經一番思考才想到將塑膠溝槽改良成直式的。
- (5) 本裝置可作為很棒的地震單元的教具，也可考慮申請「新樣式專利」。

問題三、自製「懸吊式地動儀」

【製作步驟】 【圖 4】 「懸吊式地動儀」的製作流程

1. 釘製底座的溝槽	2. 組合式底座	3. 懸吊式底座完成圖	4. 懸吊式中柱用繩子固定在懸臂正中央
5. 將立桿式地動儀中柱移去，然後將地動儀插入底座的溝槽	6. 後方底座固定螺絲	7. 前方底座固定孔，為活動式的，鐵釘可以拔下或插上	8. 完成懸吊式地動儀

【製作結果】 【圖 5】 懸吊式地動儀完成圖



【結果討論】 我們自製的懸吊式地動儀的優缺點如下：

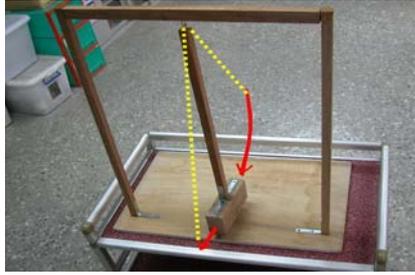
1. **優點**：可以很容易的將「立桿式地動儀」改裝成「懸吊式地動儀」，確實可以作為很棒的實驗裝置。
2. **缺點**：裝置變複雜，影響動的變因增多了，整體重量也增加了。

問題四 (1)、各種操縱變因對「立桿式地動儀」的影響

【實驗方式】

- (1) 以單次震動力道、連續震動力道、中柱的高度、中柱直徑、中柱材質等分別為操縱變因，實驗紀錄對立桿式地動儀的影響。每一種條件實驗次數 25 次，只記錄中柱倒下時第一次的撞擊點，震源來自北方，由北向南水平敲擊底座。
- (2) 中柱的高度：以 30cm、50cm、70cm 代表低中高的中柱，直徑均是 2.5cm 的鐵管。
- (3) 中柱直徑：以直徑 2cm、3cm、4cm 分別代表小中大的中柱直徑。
- (4) 中柱材質：以鐵管、木棍、塑膠管進行實驗。高度均為 30cm、直徑均為 2.5cm。
- (5) 為了準確控制撞擊力道而製作大木槌（5cm×10cm×20cm），並架設木槌座，以擺動角度大小，控制撞擊力道，成功克服力道大小的控制。撞擊角度為 30、60、90 度。

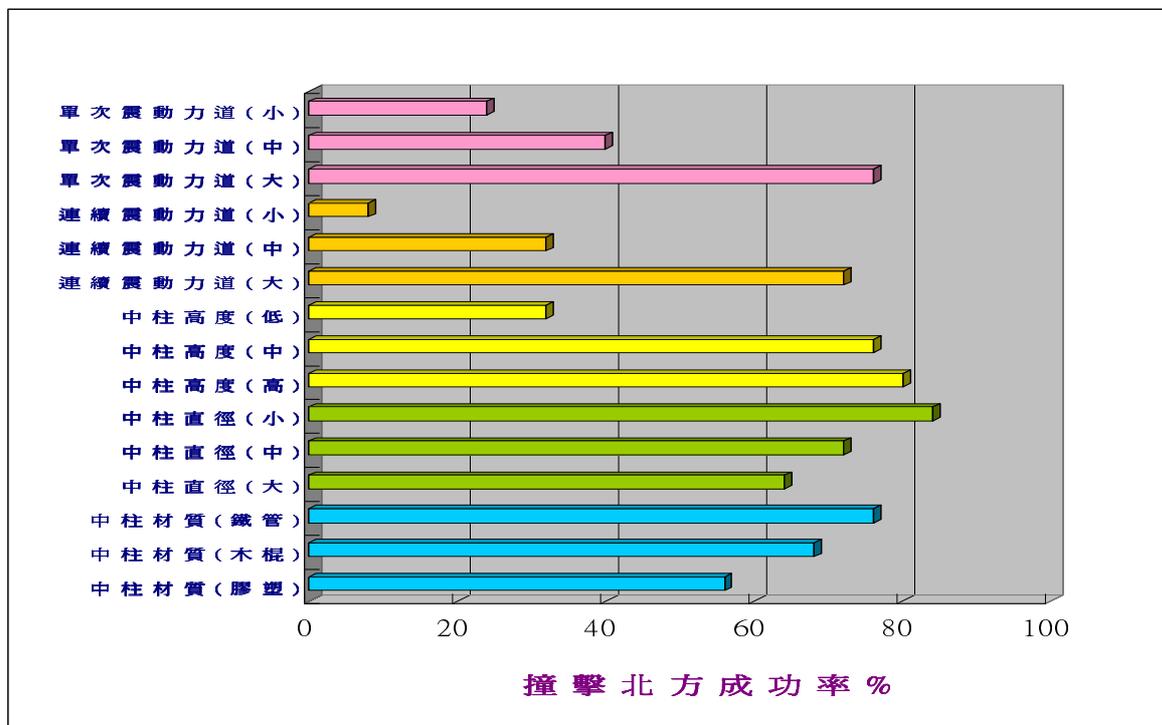
【圖 6】 撞擊實驗的裝置

		
(1) 木槌和木槌支架，以角度控制撞擊力道的大小	(2) 不同高低、粗細、材質的中柱	(3) 利用切割機切出中柱，確保中柱底部平整垂直
		
(5) 「立桿式地動儀」撞擊實驗之操作情形	(6) 「懸吊式地動儀」的撞擊實驗。 注意：上圖中有兩個不同支撐的架子。	

【研究結果】 【表2】「立桿式」地動儀—各種操縱變因之探討

操縱變因		中柱撞擊方位								撞擊北方成功率	鋼珠落下成功率
		北	東北	西北	南	東南	西南	東	西		
單次震動力道	小	6	3	2	4	2	3	2	3	24 %	16 %
	中	10	1	4	3	1	2	2	2	40 %	24 %
	大	19	3	2	1	0	0	0	0	76 %	52 %
連續震動力道	小	2	3	4	4	4	3	3	2	8 %	8 %
	中	8	2	6	2	2	2	1	2	32 %	20 %
	大	18	3	2	1	0	0	1	0	72 %	64 %
中柱高度	低	9	0	3	10	0	3	0	0	36 %	28 %
	中	19	2	0	1	1	0	0	2	76 %	44 %
	高	20	1	0	1	1	0	1	1	80 %	52 %
中柱直徑	小	21	1	3	0	0	0	0	0	84 %	68 %
	中	18	1	4	2	0	0	0	0	72 %	60 %
	大	16	3	2	3	1	0	0	0	64 %	52 %
中柱材質	鐵管	19	0	3	0	1	1	1	0	76%	60 %
	木棍	17	1	4	1	0	1	1	0	68 %	36 %
	塑膠	14	7	1	2	0	1	0	0	56 %	28 %

【圖7】「立桿式」地動儀—各種操縱變因之探討



【結果討論】

1. **單次震動力道實驗**：當撞擊力道強時撞擊成功率越高，當撞擊力道越小時撞擊成功率越低。當撞擊力道偏小時，倒向南邊以及其它方位的機率也會增高。
2. **連續震動力道**：當撞擊力道越強時撞擊成功率會越高，當撞擊力道越小時撞擊成功率越低。當撞擊力道偏小時，連續撞擊反而會使成功率降低。
3. **中柱高度實驗**：中柱越高越對地面的震動的感受也越靈敏，撞擊成功機率也越高。但中柱過高會不易站穩，中柱需放置好多次才能站穩，使得實驗難以進行。
4. **中柱直徑實驗**：以直徑較小的中柱成功率較高，但三者差異不大，可能因為直徑大小差異並不顯著。中柱直徑太大時，八邊形內徑太小無法容納時，若又要觀察其晃動情形，只能更改實驗方式，即是將桶子拿掉，用簡易式的地動儀直接觀察中柱的擺動【圖 18】。
5. **中柱材質實驗**：以鐵管成功率最高，塑膠管因重量較輕也對震動敏感，連地面普通的震動，都可能會有影響。中柱重量過輕時，雖倒向北邊但未必都能成功將鋼珠擊落。

問題四（2）、各種操縱變因對「懸吊式地動儀」的影響

【實驗條件】除了中柱改懸吊式外，其它條件同上面問題四-1

【研究結果】 見【表 3】和【圖 8】

【結果討論】

1.單次震動力道實驗：

力道太小時中柱不會撞擊到八邊形，沒有效果，鋼球不會掉落。力道大時撞到北方的機會大增，撞擊成功的機會增加。中柱有沒有正確放到八邊形中央很重要【圖 15-3】。如果中柱原本起始點位置就在八邊形的中心偏南，當輕微來自北邊的震動時，中柱先會擺向北邊卻還沒撞到 T 字形推桿時，中柱即向南方擺動，反而先撞到南邊。

2.連續震動力道實驗：

震盪力道小時，中柱會在八邊形內形成小花式擺動【圖 15-1】，震盪力道稍大時，中柱會形成橢圓形小花式擺盪【圖 15-2】；震盪力道更大時，中柱會在北、南方前後擺動【圖 15-3】，連續震動會造成中柱在八邊形內形成花朵式擺盪，所以對八個方位都可能碰撞。

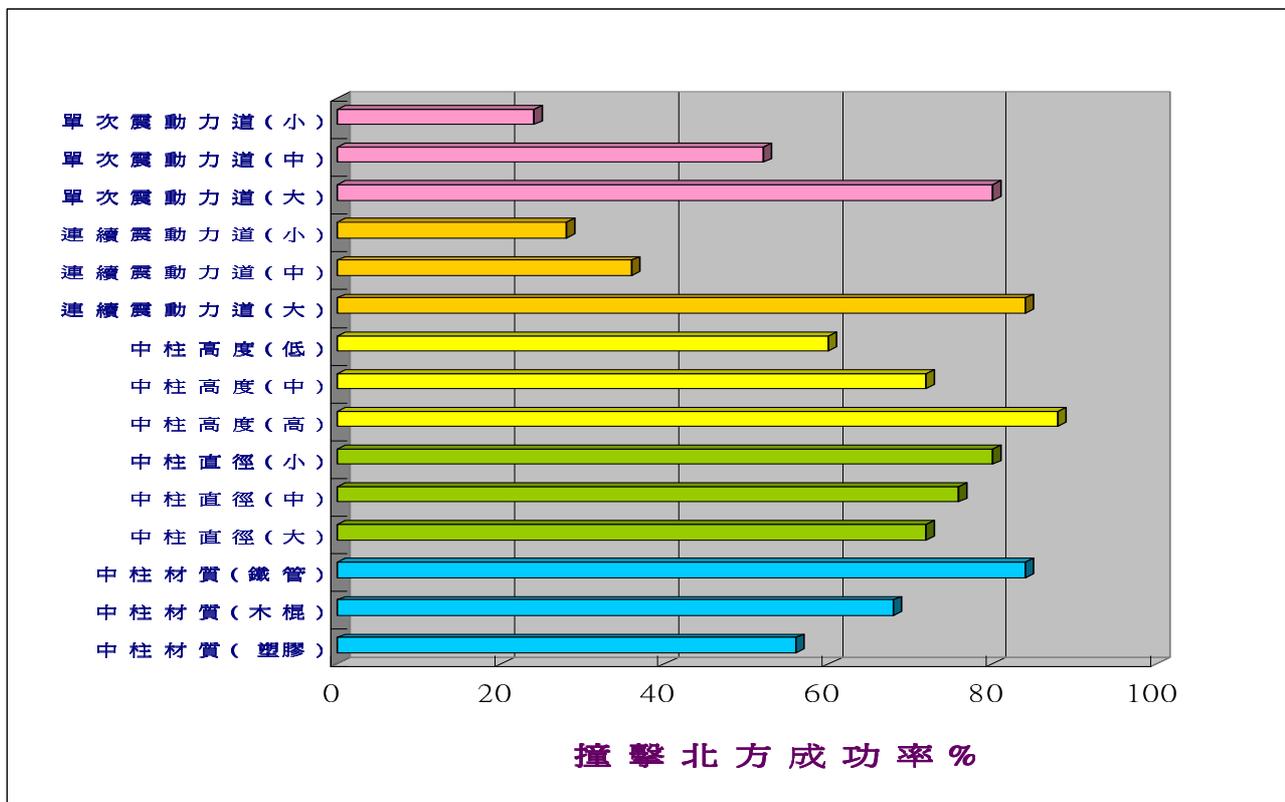
3.中柱懸掛高度實驗：

中柱懸掛越高時，對同樣的敲擊震動，中柱的前後擺動幅度會變大，靈敏度會提高，更容易將鋼珠撞落。中柱降低時，對同樣的敲擊震動，中柱的前後擺動幅度會變小，反而不容易將鋼珠撞落。

【表 3】 「懸吊式」地動儀—各種操縱變因之探討

操縱變因		中柱撞擊方位								撞擊北方成功率	鋼珠落下成功率
		北	東北	西北	南	東南	西南	東	西		
單次震動力道	小	15	1	2	4	1	2	0	0	24 %	16 %
	中	18	1	2	2	0	1	1	0	52 %	32 %
	大	21	0	0	1	1	1	1	0	80 %	60 %
連續震動力道	小	7	1	2	7	3	2	2	1	28 %	8 %
	中	9	1	1	10	2	1	1	0	36 %	20 %
	大	21	0	0	4	0	0	0	0	84 %	68 %
中柱懸掛高度	低	15	1	1	4	2	0	1	1	60 %	28 %
	中	18	1	1	3	1	1	0	0	72 %	64 %
	高	22	0	0	2	0	1	0	0	88 %	76 %
中柱直徑	小	20	0	1	3	0	1	0	0	80 %	68 %
	中	19	1	2	0	1	1	0	1	76 %	52 %
	大	18	1	2	1	1	1	1	0	72 %	36 %
中柱材質	鐵管	21	0	0	3	0	1	0	0	84 %	68 %
	木棍	17	1	1	4	1	1	0	0	68 %	56 %
	塑膠	14	1	1	4	2	1	1	1	56 %	40 %

【圖 8】 「懸吊式」地動儀—各種操縱變因之探討



4.中柱直徑實驗：

中柱最好是實心直徑較小的鐵管或鐵條，但要有一定的重量，才能具有足夠動能以撞落鋼珠；過大的直徑也會容易一次撞到兩個八道，因而撞落兩顆鋼珠。

5.中柱材質實驗：

材質以較重的鐵管效果最好，在相同的擺動下，鐵管重量較大所以產生的動能較多，撞擊力道會較強。

6. 其他發現：地面震動力道要夠強中柱才会有力量將鋼球撞落，但是地面連續劇烈震動，也會把其它方位的鋼珠一併震落，所以我們對古代的候風地動儀心存懷疑，古代的八道和牙機等傳動部位會如此精巧嗎？不會在劇烈震動時震落(而非撞擊)其它的鋼珠？實驗證實，懸吊式的中柱反彈撞向兩邊的機會極大，所以我們對於馮銳所提出張衡的地動儀是懸吊式的看法，也相當存疑。懸吊式的優點是靈敏，較不會受到上下震動的影響，但最大缺點是會南北來回擺動撞擊，這是無法避免的，並很常一次撞落兩顆鋼珠。相對的，立桿式的地動儀雖然對震波的反應稍微不靈敏，但中柱大都只會倒一次，常常只撞落一個鋼珠。

問題五- (1)、模擬的地震波對「立桿式地動儀」驗震效果之影響

【實驗方式】首先收集整理地震波的特性，以便使我們的撞擊實驗更具意義，體波和表面波的特性整理如【表 4】和【圖 9】所示。

- (1) P 波伸張型—在底座北端由上向下敲
- (2) P 波壓縮型--在底座北端由下向上敲擊
- (3) S 波--在底座北端由下向上斜向敲擊
- (4) 雷利波--在底座北端由北向南水平敲擊
- (5) 洛夫波--在底座北端鎖上一個 150cm 的木桿然後左右甩動 20cm

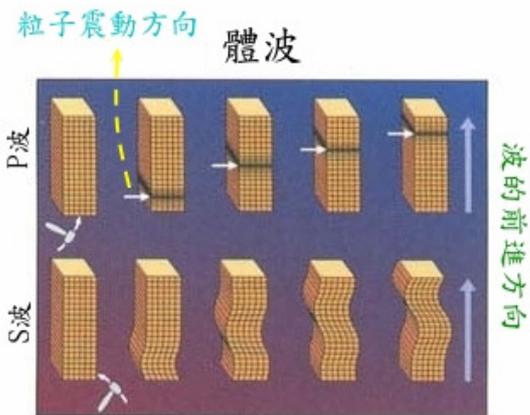
【實驗條件】(1) 每一種條件實驗次數 25 次 (2) 只記錄中柱倒下時第一次的撞擊點
(3) 震源均來自底座北端

【表 4】體波和表面波的特性整理

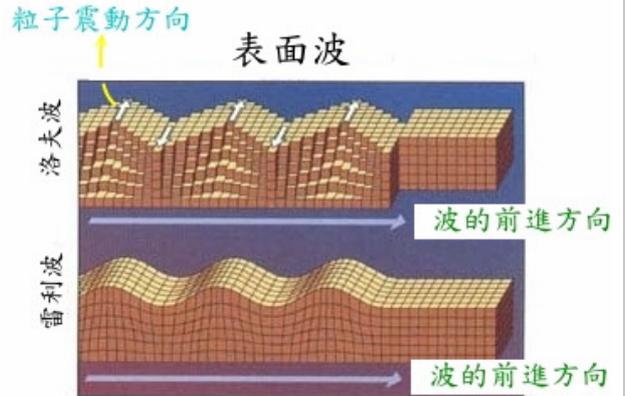
種類		特徵	速度和感受
體波	在地球內部傳播	P 波 (Pressure, 壓縮)	速度依次為 P 波、S 波、洛夫波及雷利波。因此地震時，我們會先感覺到上下的振動，其次水平的振動，接著緩慢的水平搖擺，最後是緩慢的前上後下的搖滾振動。
		S 波 (Shear, 剪力)	
表面波	限於地表附近傳播	洛夫波 (Love Wave)	有如沿著水平面左右擺動的 S 波，在垂直地面方向上沒有震動，屬於縱波，傷害嚴重。
		雷利波 (Rayleigh wave)	

【圖 9】波的前進方向、粒子運動、P 波的伸張型、壓縮型等之圖示

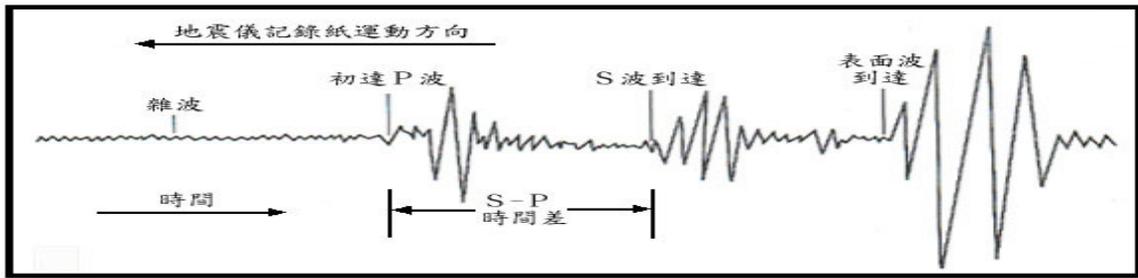
(1)



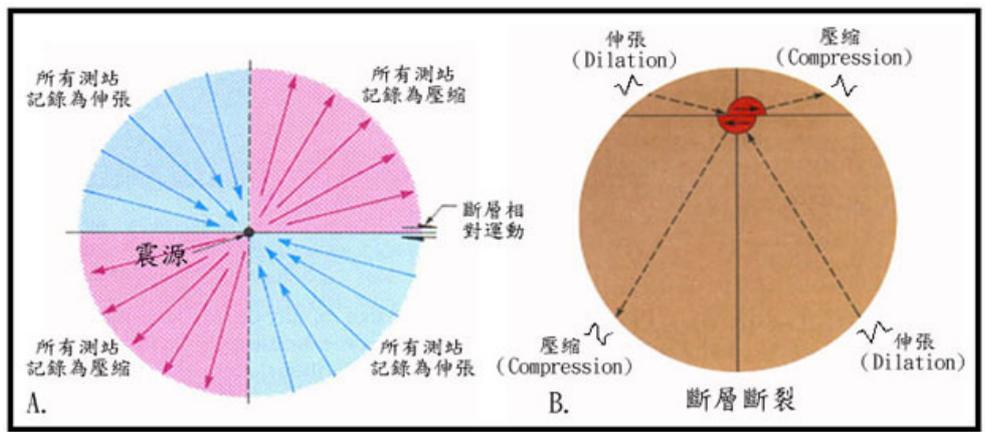
(2)



※注意上圖的敲擊點



(3) 各種地震波到達的先後順序



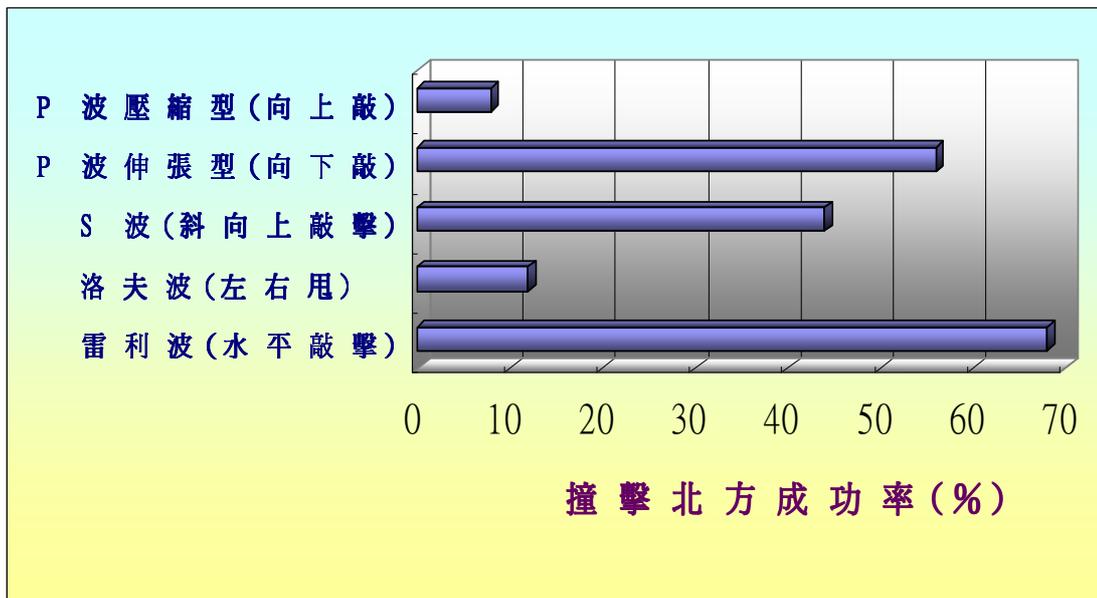
(4) P 波的伸張型與壓縮型可以用來決定斷層運動的方向 (參見: 維基百科)

【研究結果】

【表 5】地震波對「立桿式地動儀」的影響

種類			中柱撞擊方位								撞擊北方 成功率 (%)	鋼珠落下 成功率 (%)	
模擬的 地震波		敲擊 方式	北	東 北	西 北	南	東 南	西 南	東	西			
體 波	P 波	壓 縮 型	向上敲	2	1	3	8	3	2	3	3	8 %	8 %
		伸 張 型	向下敲	14	1	2	4	1	1	1	1	56 %	40 %
	S 波	斜向上敲擊	11	4	1	6	1	1	0	1	44 %	28 %	
表 面 波	洛 夫 波	左右甩	3	2	1	4	3	2	7	3	12 %	8 %	
	雷 利 波	水平敲擊	17	3	5	0	0	0	0	0	68 %	52 %	

【圖 10】不同敲擊方式對「立桿式地動儀」的影響



問題 五-(2)、模擬的地震波對「懸吊式地動儀」驗震效果之影響

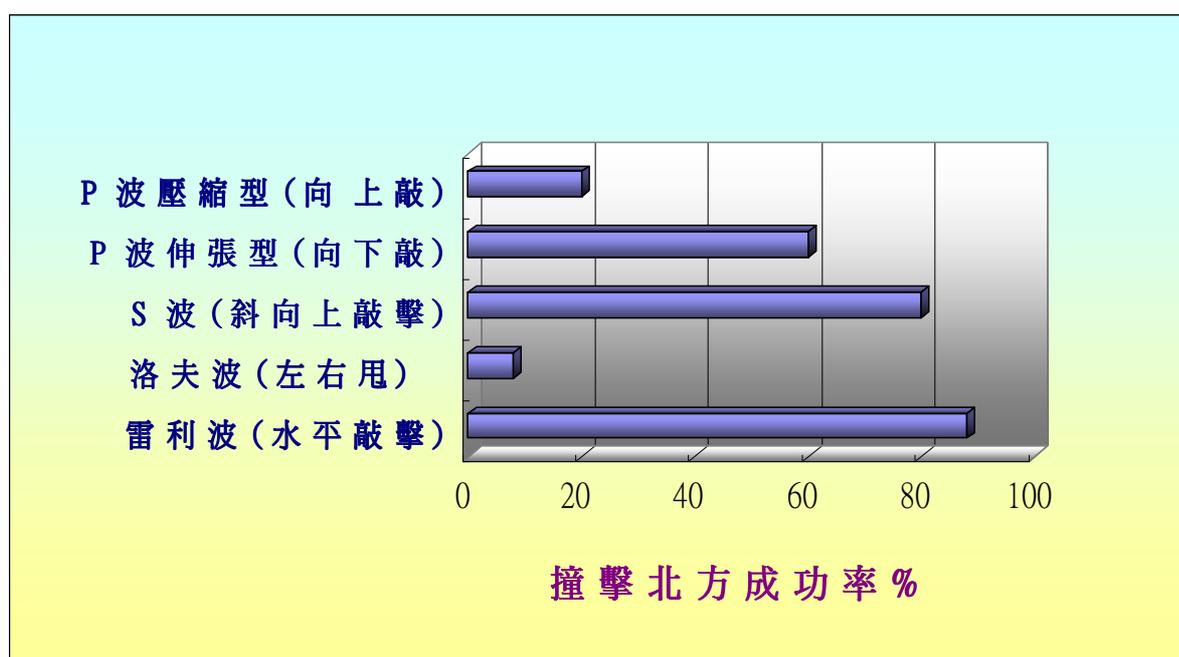
【研究步驟】實驗方式和實驗條件和上面問題五-(1)相同

【研究結果】

【表 6】 地震波對「懸吊式地動儀」的影響

種類			中柱撞擊方位								撞擊北方 成功率 (%)	鋼珠落下 成功率 (%)	
模擬的 地震波	敲擊 方式		北	東北	西北	南	東南	西南	東	西			
體 波	P 波	壓 縮 型	向上敲	5	1	1	15	0	1	1	1	20 %	16 %
		伸 張 型	向下敲	15	2	1	2	1	2	1	1	60 %	44 %
	S 波	斜向上敲擊	20	1	0	4	0	0	0	0	0	80 %	56 %
表 面 波	洛夫波	左右甩	2	4	4	2	4	3	3	3	8 %	8 %	
	雷利波	水平敲擊	22	1	1	0	1	0	0	0	88 %	72 %	

【圖 11】不同敲擊方式對「懸吊式地動儀」的影響



【結果討論】

1. 「立桿式地動儀」成功撞擊機率比較：

（敲法） 水平敲擊>向下敲>斜向上敲>左右甩>向上敲

（類型） 雷利波>P 波伸張型>S 波>洛夫波>P 波壓縮型

2. 「懸吊式地動儀」--成功撞擊機率比較：

（敲法） 水平敲擊>斜向上敲>向下敲>向上敲>左右甩

（類型） 雷利波>S 波>P 波伸張型>P 波壓縮型>洛夫波

3.雷利波實驗：

因為撞擊由北向南水平打擊，所以水平分力最多，成功機率也最高。

4. P 波伸張型實驗：

在底座北端向下敲擊，基座平面在北端會向下傾斜，會使中柱更容易倒向北邊。

5. P 波壓縮型實驗：

在底座北端在向上敲，中柱撞擊南方機率會增加，反而降低成功撞擊北方的機率。在底座北端向上敲或向下敲時，地動儀的基座會有傾斜的現象，因而影響撞擊南北邊的機率，若是真實的地面受的地震波時，影響應不至於有如基座所受到這樣大的傾斜度。

6. S 波實驗--斜向上敲擊：

只有部分的由北向南的水平分力，所以偏北的機率中等。

7. 洛夫波實驗：

洛夫波與中柱擺動容易有共振現象的發生，因此中柱撞向各個方位的機率都有，成功撞擊機率很低。因為中柱會在中心位置以小花形狀左右擺動，對東西方位的撞擊機率會增加，洛夫波也容易和中柱的晃動形成共振，而將中柱的晃動情形增大【圖 15-5】。

8.其他發現：

我們模擬的地震波和實際的地震波應該會有很大的差距，我們的目的最重要是想模擬不同角度的撞擊效果。但是將不同角度的撞擊和各種地震波相互對照的實驗設計，也是具有相當的意義的。

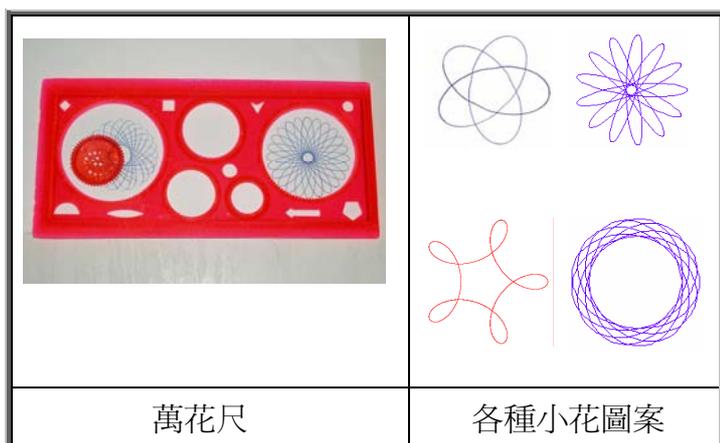
問題六、地動儀的中柱晃動情形探討

【研究步驟】

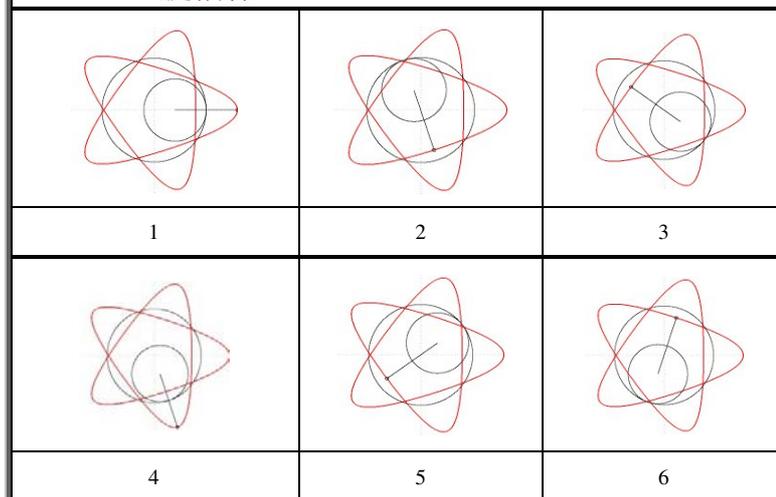
我們觀察到中柱的擺動情形很像是萬花尺所畫出的小花圖案。萬花尺使用時把筆尖放入花尺小孔，將花尺在大圓洞中來回轉動，畫成花狀圖案。大小不同的花尺，加上不同位置的小孔，都會產生不同圖案。

【圖 12】萬花尺及所畫出的小花圖案

【圖 13】數位攝影機錄影紀錄亮光貼紙的擺動



【圖 14】萬花尺的小花圖案是一種擺線。地動儀中柱的擺動形式有可能類似擺線的內旋輪線。下面 6 個圖當中的黑點移動順序，可構成內旋輪線。



內旋輪線 是追蹤附著在圍繞半徑為 R 的固定的圓內側滾轉的半徑為 r 的圓上的一個點得到的轉跡線，這個點到內部滾動的圓的中心的距離是 d 。

內旋輪線的數學方程式：

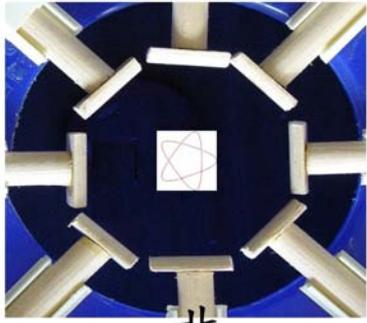
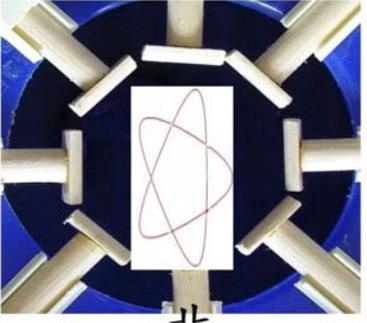
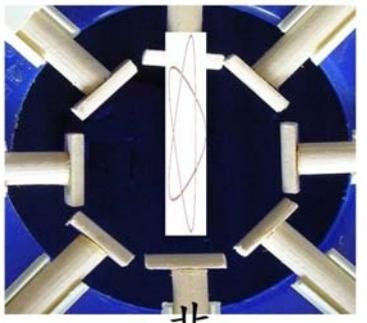
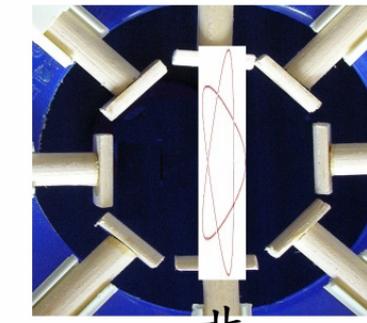
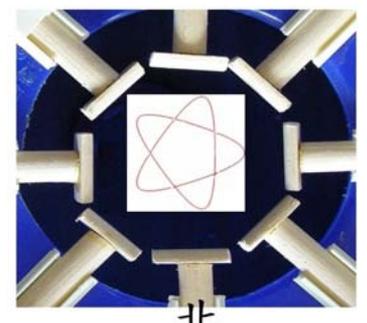
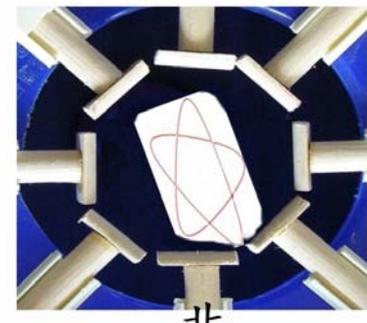
$$x = (R - r) \cos \theta + d \cos \left(\frac{R - r}{r} \theta \right)$$

$$y = (R - r) \sin \theta - d \sin \left(\frac{R - r}{r} \theta \right)$$

(參見：維基百科)

【研究結果】

【圖 15】嘗試以擺線來解釋各種撞擊情形

 <p>北</p>	 <p>北</p>	 <p>北</p>
(1) 中柱輕微晃動時像小花圖	(2) 由北向南水平撞擊底座，先撞擊北邊，然後就停止。會只撞落一個鋼珠。	(3) 中柱原本中心點若偏南，可能先撞擊南邊。此外底座向上敲擊（P波壓縮型）時，中柱也可能先撞擊南邊。
 <p>北</p>	 <p>北</p>	 <p>北</p>
(4) 由北向南劇烈水平撞擊底座（雷利波），中柱可能先撞到北邊，擺盪回來又撞到南邊，會一次撞落兩個鋼珠。	(5) 左右甩的洛夫波，中柱可能撞向任何一方。洛夫波會引起中柱擺動的共振放大作用。	(6) 擺線突出的點撞到 2 個推桿中間（上圖的右下方），可能會一次撞落兩個鋼珠。

【結果討論】

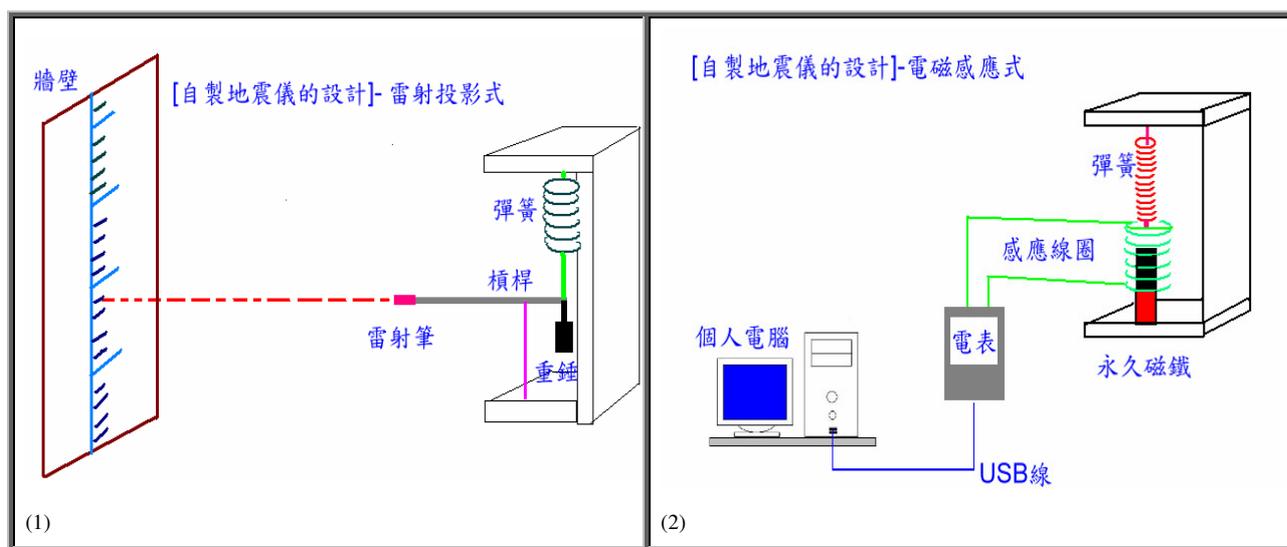
我們推想地動儀中柱的擺動有可能類似擺線的內旋輪線(hypotrochoid)，而內旋輪線乃是一種符合數學方程式的曲線。地動儀的中柱搖晃構成的小花圖案，我們在中柱上方的圓面貼一個直徑 3mm 的亮光小貼紙，用 SONY 數位攝影機錄影紀錄亮光貼紙的擺動情形【圖 13】，然後用 KMPlayer 軟體擷取影片畫格成為連續圖片。發現單一敲擊基座時，亮光貼紙的擺動很像是逐漸縮小的內懸輪線，縮小原因是因中柱和地面之間的摩擦力。實際上當連續敲擊基座時，內旋輪線形狀會因地面的震動而連續改變。我們提出此一模型嘗試去解釋我們觀察到的結果，雖不是最好的模型，但是能解釋部分的實驗結果。

問題七、將來的設計展望

第一種雷射投影式地震儀【圖 16-1】的設計是利用慣性原理和槓桿原理。以雷射光點投射遠方有刻度的牆壁上，因為施力臂大於抗力臂，支點到牆壁都是抗力臂，又因抗力臂距離相當長，所以可以將地震訊號放大，測量牆壁上光點移動距離就可以得知地面上下震動的程度。

第二種電磁感應式地震儀【圖 16-2】的設計已獲得初步的成功【圖 17】，它除了應用慣性原理，也利用我們在五年級電磁鐵單元自然所學到磁生電的原理，也就是磁通量改變能產生感應電流，地面震動能使永久磁鐵和線圈產生相對運動，因而產生感應電流。若再以透過具有 USB 介面且感應靈敏的電表，就能以電腦長時間記錄地面的震動。將來可將上述兩種地震儀，分別結合在本研究的自製地動儀上，就能一舉兩得，既能記錄震源的方向又可以偵測震度強弱，相信一定能進行很多有趣的科學實驗。

【圖 16】兩種能測量上下震度強弱的地震儀構想圖



【圖 17】自製電磁感應式地震儀

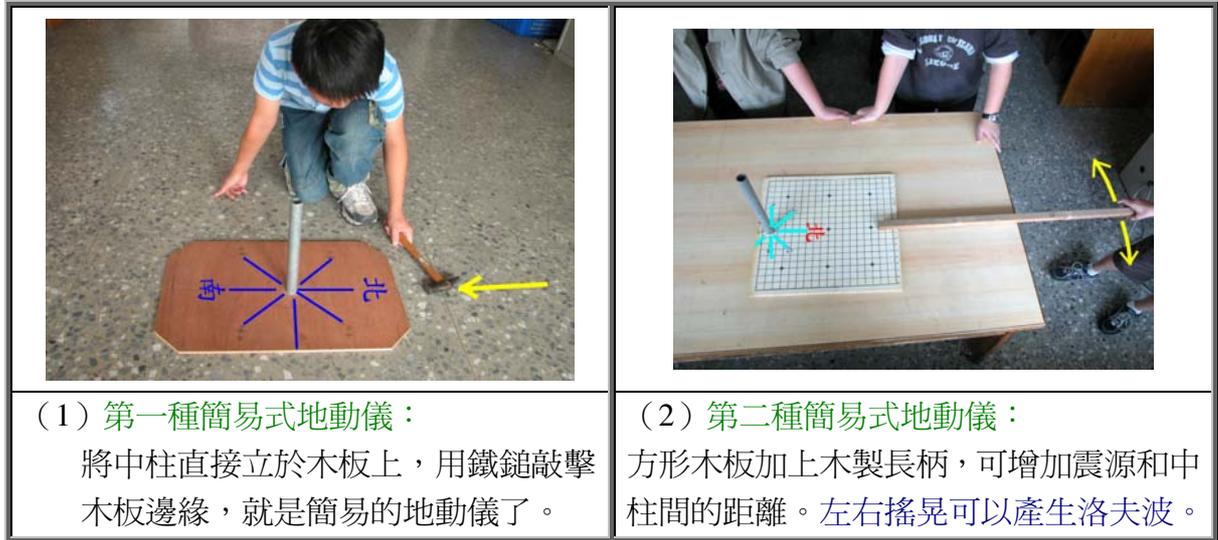


我們利用永久磁鐵、線圈以及三用電表製成電磁感應式地震儀，已獲得初步的成功，最高可產生左 180mA 左右的電流。當地面震動時可產生感應電流。而且可以利用電表讀出的電流的正負值，來分辨 P 波壓縮型和伸張型。

陸、研究與討論

1. 我們也可以將候風地動儀的實驗簡化如【圖 18】，並且結構更簡單，數據的再現性很好，可應用於地震單元的教學活動。但缺點是不具有候風地動儀的結構體，例如沒有八道、牙機、儀體，所以很難體驗出原本張衡的候風地動儀的優缺點所在。

【圖 18】候風地動儀的實驗簡化



2. 我們自製的地動儀到底對幾級震度的地震會有反應呢？這個有趣的問題最好是以真實的地震來驗證，不過其實答案是可以約略估算出來的。可以依據八十九年「交通部中央氣象局地震震度分級表」來估算出來，我們的懸吊式地動儀對震度 3 級左右的地震可能會有反應。立桿式地動儀對 3~4 級左右的地震可能會有反應。

【表 7】交通部中央氣象局地震震度分級表 (部分節錄)

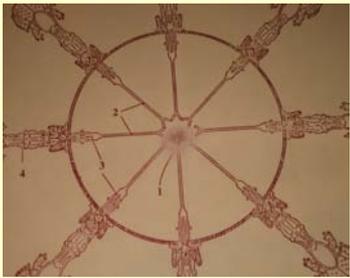
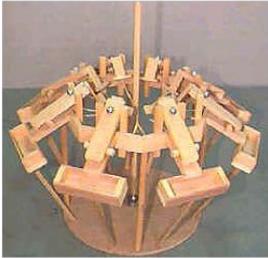
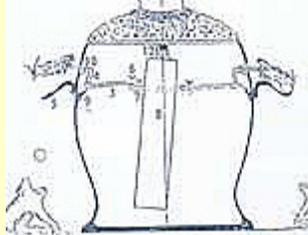
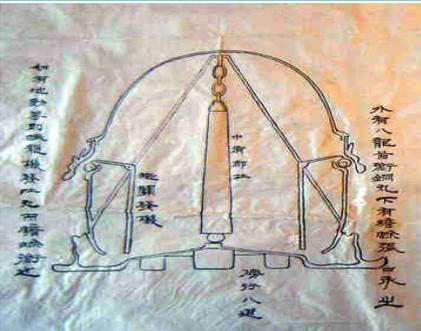
震度分級：3 (弱震)	人的感受：幾乎所有的人都感覺搖晃，有的人會有恐懼感。 屋內情形：房屋震動，碗盤門窗發出聲音，懸掛物搖擺。 屋外情形：靜止的汽車明顯搖動，電線略有搖晃。
震度分級：4 (中震)	人的感受：有相當程度的恐懼感，部分的人會尋求躲避的地方，睡眠中的人幾乎都會驚醒。 屋內情形：房屋搖動甚烈，底座不穩物品傾倒，較重傢俱移動，可能有輕微災害。 屋外情形：汽車駕駛人略微有感，電線明顯搖晃，步行中的人也感到搖晃。

3. 我們對於馮銳所提出張衡的地動儀是懸吊式的看法，相當存疑。懸吊式的優點是靈敏，較不會受到上下震動的影響，但最大缺點是很容易南北來回撞擊。但立桿式地動儀它的中柱大都只會倒一次。
4. 自製立桿式地動儀具有下列優點：
以塑膠桶作為地動儀的結構體，具有方便又精確的優點，並能實際從事各種驗證實驗。螺帽以及溝槽上方白色蓋子，可巧妙地防止 T 字形推桿脫落。T 字形推桿溝槽外高內低，以及溝槽的圓洞，都是防止溝槽上的鋼珠掉落的巧妙設計。

5.自製地動儀有下列缺點，但相信也是歷史上所有其它地動儀的難以克服的難題：

當基座過度劇烈震動時，可能將其它方位的鋼珠震落。當地震力強度過大，中柱可能產生「反彈作用」，可能會一次撞落兩個鋼珠。萬一撞擊位置在兩組 T 字形推桿的中間，可能擊落兩顆鋼珠。見【圖 19】之整理。

【圖 19】其它各種地動儀的缺點整理

各種立桿式地動儀			
			
<p>缺點: (圖 19-1)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 八道過於接近，中柱容易撞擊兩個牙機。 2. 而且因每個牙機均獨立，銅球掉落一顆時，不能防止另一顆銅球掉落。 3. 不能避免中柱的反彈作用 	<p>缺點: (圖 19-2)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 牙機間的空隙過大，中柱會掉進空隙而卡住。 2. 每個牙機均獨立運作。 3. 中柱過細，重量太輕，倒下向下壓的力量不足 	<p>缺點: (圖 19-3)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 中柱太低，不靈敏 2. 中柱過粗，不靈敏 3. 中柱過粗會撞倒兩個八道。 	<p>缺點: (圖 19-4)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 不能防止中柱不會一次撞落兩個銅球。 2. 牙機的龍首輕輕咬住銅球，當劇烈震動時仍會導致多個鋼球被震落。 3. 每個牙機仍是獨立運作。 4. 中柱的反彈作用
各種懸吊式地動儀			
			
<p>缺點: (圖 19-5)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 中柱容易前後擺動撞擊，易撞落兩個銅球。 2. 每個牙機均獨立運作。 3. 中柱和八道之間的距離太遠，不容易成功撞擊。 	<p>缺點: (圖 19-6)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 中柱容易前後擺動撞擊，易撞落兩個銅球。 2. 每個牙機也是獨立運作。 3. 古代機器現代化 	<p>缺點: (圖 19-7)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 中柱容易前後擺動撞擊 2. 圖中八道裝置並不完整，八道只有建置北邊一組以供研究用。 3. 古代機器現代化 	

6. 「立桿式地動儀」成功撞擊機率比較：
（敲法） 水平敲擊>向下敲>斜向上敲>左右甩>向上敲
（類型） 雷利波>P波伸張型>S波>洛夫波>P波壓縮型
7. 「懸吊式地動儀」--成功撞擊機率比較：
（敲法） 水平敲擊>斜向上敲>向下敲>向上敲>左右甩
（類型） 雷利波>S波>P波伸張型>P波壓縮型>洛夫波
8. 雷利波實驗：因為撞擊由北向南水平打擊，所以水平分力最多，成功機率也最高。
9. 洛夫波實驗：洛夫波與中柱擺動容易有共振現象的發生，因此中柱可能撞向各個方位，因此成功撞擊機率很低。
10. P波伸張型實驗：在底座北端向下敲擊，基座平面在北端會向下傾斜，會使地動儀的中柱更容易倒向北邊。
11. 我們模擬的地震波和實際的地震波應該會有很大的不同，例如：頻率、波長、強弱、地面傾斜程度等方面的不同。但我們主要目的是想模擬不同角度的撞擊效果，然而本研究將不同的撞擊方式和各種地震波相呼應，並將實驗條理化，也應是很有意義的實驗設計。
12. 我們嘗試以逐漸縮小內旋輪線來解釋各種撞擊情形，雖不是最好的模型，但是能夠解釋部分的實驗。
13. 將來的設計展望：雷射投影式的地震儀，是利用慣性原理和槓桿原理，將地震訊號放大，以雷射將光點投在遠方的牆壁上。另一種電磁感應式的地震儀，利用永久磁鐵和線圈產生相對運動，因而產生感應電流，以電腦記錄電流大小和地震的強度。

柒、結論

東漢時代的張衡，就知道用科學方法來說明地震現象，甚至巧妙應用了慣性原理，而當時的許多民族都只知道用神話來解釋地震，所以張衡可說是一位了不起的科學家。但地動儀以現在科技水準來看還是很不精確，只有在某些特殊震波下才會準確。所有地動儀，包括我們設計的地動儀都具有一些難題，我們發現所有地動儀都有共同難題，例如：中柱擊中兩個八道的中央時會一次撞落兩個鋼珠，或中柱來回擺盪撞擊而擊落兩個鋼珠，而且因每個牙機均獨立，當鋼珠已掉落一顆時，不能防止另一顆鋼珠掉落。我們對於馮銳認為張衡的地動儀應是「懸吊式」的看法相當存疑，「懸吊式」的優點是靈敏，且較不會受到上下震動的影響，但最大缺點是中柱非常容易來回擺盪撞擊，幾乎都會一次撞落兩個鋼珠。雷利波實驗，因為由北向南水平撞擊，所以水平分力最多，當力道夠大時成功機率較大。我們嘗試以擺線來解釋各種撞擊情形，雖不是最好的模型，但是能解釋部分的實驗結果。

捌、參考資料

書名 或 網頁名稱	作者	出版社 或 網址	
自然科學圖解百科 ---地質與變遷	徐美玲	泛亞文化	
地震百問		交通部中央氣象局	
候風地動儀		維基百科	http://zh.wikipedia.org
擺線，內旋輪線		維基百科	http://zh.wikipedia.org
天地經緯-- <u>張衡</u> 地 動儀	河南博物院	河南文化網	http://www.hawh.cn

【評語】 081562

從古代文獻仿製候風地動儀，討論地震波與其影響，並以數位儀器攝影，驗證候風地動儀珠子掉落的方位，具有國小地震簡易自製儀器的實用性，極具巧思的表現，獲得評審一致讚賞。