

# 中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 物理科

第一名

080103

神奇的殊途「同」歸—探討不同變因對於節拍器  
達到同步時間的影響

學校名稱：新北市板橋區埔墘國民小學

|                                 |                  |
|---------------------------------|------------------|
| 作者：<br><br>小五 陳姿妤<br><br>小五 蕭瑋均 | 指導老師：<br><br>麥竹君 |
|---------------------------------|------------------|

關鍵詞：節拍器、同步原理

## 得獎感言

### 揭開同步的神祕面紗 —— 戀戀科展樂趣多

看到節拍器像變魔術般的同步，我們就對這個現象感到十分好奇，便選定為這次科展的題目，積極展開了這段研究旅程。

剛開始實驗時，節拍器都無法達到同步，我們的情緒簡直跌落谷底，後來大家互相共勉，帶著毅力解決疑難，想出控制起始條件的對策，終於親眼見證了節拍器第一次同步，大家興奮的歡呼，也讓我們有繼續實驗的動力。

研究過程中，最精彩的非【夾角實驗】莫屬，隨著吊線與板子夾角愈小，板子晃動愈加劇烈，好奇與擔憂的掙扎不時纏繞心頭，每一次實驗的變化都令我們驚訝，經過多次挑戰更小的角度後，發現一大祕密——「原來角度越小，節拍器會由同向同步，轉為反向同步」，實在獲益匪淺。

另外，我們集思廣益、發揮創意，用樂高玩具及馬達，自製【軌跡記錄器】，畫出板子左右晃動的運動軌跡，終於發現板子是節拍器「力」的展現，並解釋出同步運作的原理。

實驗要成功，團隊合作當然是最重要的。雖然我們常常發生意見不合，但終能用言語和解，並互相學習。此外，我們從本次研究學到物理上的力學原理，更學到如何控制變因，以及做簡報和寫報告的技巧。未來我們一定會記取經驗，並將這次的缺失加以改進。

我們認為科展是十分有趣的科學研究，不斷的從未知中摸索、尋找，當不斷換路、轉彎、倒退、思考，在研究中用融會貫通的知識推理揣摩，解開謎樣的驚奇連連，更是帶來前所未有的體驗與豐富的收穫，在一次次磨練中，提升團隊的實力，步步耐心學習，達成所謂「更上一層樓」。

科展也是很值得嘗試的科學活動，如果想要參與比賽，最重要的就是選題，要注意到平凡中的不平凡，並具學術性及實用性價值，擬定實驗架構時，就必須：(1)緊扣題目；(2)解決問題，富有創意；(3)科學方法完整。在研究前，還要先釐清題目已有哪些研究成果？另外也要注意報告的內文結構需完整，圖比表更重要，且必須在結論中做出「延伸推論」！

能夠得獎，我們要感謝老師及主任的指導與不斷的鼓勵，也要感謝父母的支持與陪伴，當我們精疲力竭時，他們就開始加油打氣、激勵我們，再來還要感激市賽評審教授提供的想法、意見。在此，我們要謝謝所有人的幫助，使我們創出佳績！

本次的科展是我們第一次參加，有著老師及家長的指導與鼓勵，我們才能完成所有實驗、研究推論及一篇完整的報告。一知道我們投入心血研究的作品榮獲「第一名」，實在難以相信，

成功的那一刻，激動的情緒更是難以言喻，這一連串的努力換來了甜美的果實，對大家來說，值得了。



我們正認真的動手製作實驗裝置架



經過幾個月的努力，我們終於獲得市賽特優國展的佳績



老師和爸媽與我們共同分享全國第一的喜悅!

## 摘要

從影片看到多個節拍器，在數分鐘後，居然可以同步，好奇的我們開始構思適合的實驗裝置，探討影響同步時間的可能原因，最後整理出節拍器、吊線及板子三項因素。

在節拍器因素方面，我們發現節拍器越多、頻率越低、擺放間距越大、間距中心偏移越多，都會讓達到同步的時間增加。而且多個節拍器不同的撥法、擺放形狀都會影響同步的時間。

在吊線因素方面，吊線越長、越細、吊線材質較軟、固定位置越靠近板子中心、與板子間的夾角越大，也會讓節拍器同向同步的時間拉長。但從 50 度角減少時開始產生反向同步的現象。

至於板子因素，板子越重、表面材質摩擦力越大，會讓節拍器同步的時間增加，但相同重量時，板子厚度及材質並不會影響節拍器同步的時間。

## 壹、研究動機

在電視上看到有關「神奇的同步」影片(如圖)，不同時間開始晃動的節拍器，經過一段時間後，居然能齊聲擺動，如此同步，讓我們覺得很不可思議，好奇的想要知道其中的祕密。



32 個節拍器同步影片

(資料來源：<https://www.youtube.com/watch?v=GOJnGDIsyN8>)

【相關課程】應用到四下的單擺原理，以及五上的力與運動及摩擦力探討。

## 貳、研究目的

- 一、探討節拍器擺動頻率對於達到同步時間的影響
- 二、改變吊線材質、線徑與長度對於節拍器達到同步時間的影響
- 三、探討節拍器擺放位置對於達到同步時間的影響
- 四、改變吊線固定的位置對於節拍器達到同步時間的影響
- 五、探討板子的重量與厚度對於節拍器達到同步時間的影響
- 六、改變板子材質對於節拍器達到同步時間的影響
- 七、改變吊線和板子間的夾角對於節拍器達到正反向同步時間的影響
- 八、觀察不同的節拍器數量、擺放形狀及撥法對於達到同步時間的影響
- 九、探討節拍器同步過程的運動模式

## 參、研究設備及器材

|              |                                                                       |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 自製節拍器同步實驗裝置架 | 木製U型固定架、節拍器、木心板、夾板、壓克力板、玻璃板、鐵線、紗線、釣魚線、強力夾、螺絲、鐵釘、角片                    |
| 輔助用具         | 筆記型電腦、麥克風、GoldWave 聲波分析軟體、相機、相機支架、水平儀、小紙箱、電池及小的圓形大理石(配重用)、花布、書法墊布、毛巾布 |
| 軌跡分析用具       | Tracker 軌跡分析軟體、自製軌跡記錄器、方格紙、簽字筆、軟木塞、貼紙                                 |
| 量測用具         | 碼錶、直尺、量角器、三角板、電子磅秤、游標尺                                                |

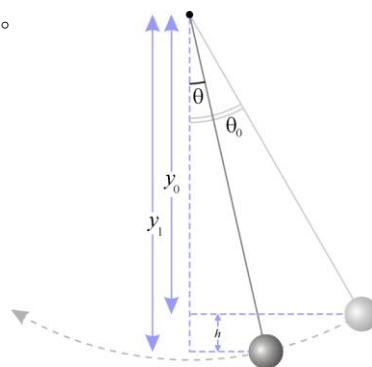
## 肆、研究過程及方法

### 一、相關資料蒐集與探討

(一) 同步：我們在上網找資料時，發現原來「同步」是自然界中的一種自然現象，它可以在物理、化學、生物許多的領域上被發現。它是兩個或兩個以上振動系統相位間的協調一致現象，最早的研究是 1673 年惠更斯對牆面上的兩個鐘擺耦合同步的現象觀察。同步現象不僅在自然界廣泛存在，而且它在實際應用中更是非常重要的。

(二) 單擺原理：我們發現影片中的板子在晃動時，就像單擺一樣來回擺動，而單擺的週期與單擺的長度有關，單擺週期公式如下：

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$



## 二、實驗設計及方法

### (一) 自製節拍器同步實驗裝置架

網路上的節拍器同步實驗(如下圖)，是將節拍器放置在板子上，板子下方放了兩個空的汽水罐，我們發現板子底下空的汽水罐，不易控制其定位點，無法準確觀測影響同步的變因。



進一步研究新聞影片，我們覺得利用吊線來固定板子，比較容易控制變因，因此設計自製一個【節拍器同步實驗裝置架】，並分析節拍器同步的因素，可從下面三大系統來探討：

1. **節拍器**：探討不同的節拍器頻率、數量、擺放形狀、擺放位置、不同的節拍器撥法的影響。
2. **吊線**：探討不同吊線材質、線徑、線長、吊線固定位置、吊線與板子間的夾角的影響。
3. **板子**：探討不同板材、板厚、板重、表面材質，對於節拍器達到同步時間的影響。

在正式實驗前，我們先利用椅子、木棍、棉線、鐵線、木心板，模擬安裝實驗裝置架雛型，做為正式實驗的參考。以下是第一代(吊線為棉線)及第二代(吊線改為鐵線)的裝置架雛型。



第一代實驗裝置架雛型

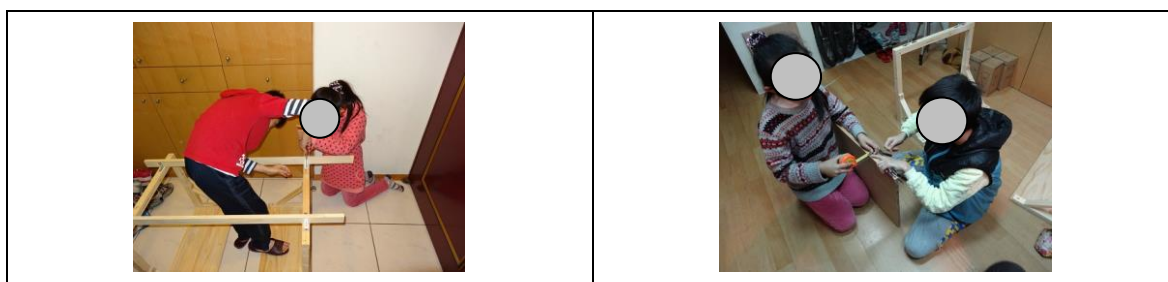


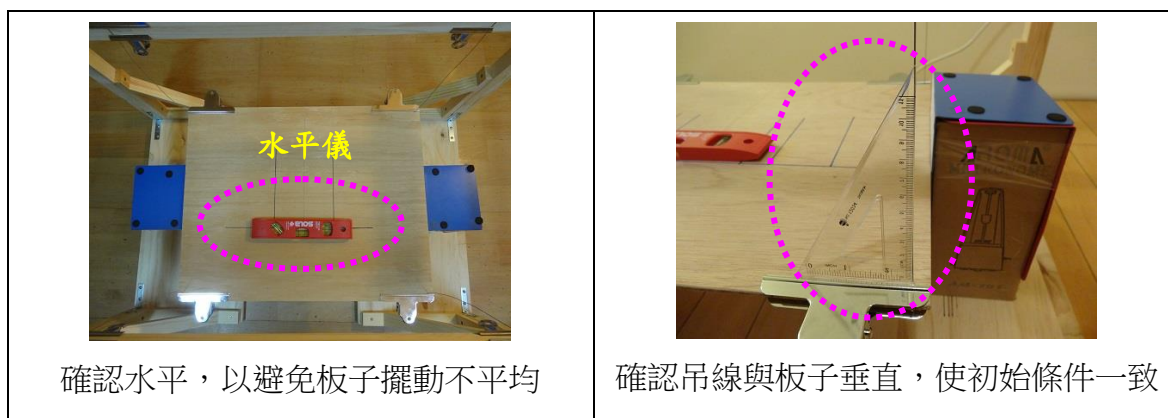
第二代實驗裝置架雛型

經過模擬裝置架的製作，我們發現了下列問題，並想出解決方法：

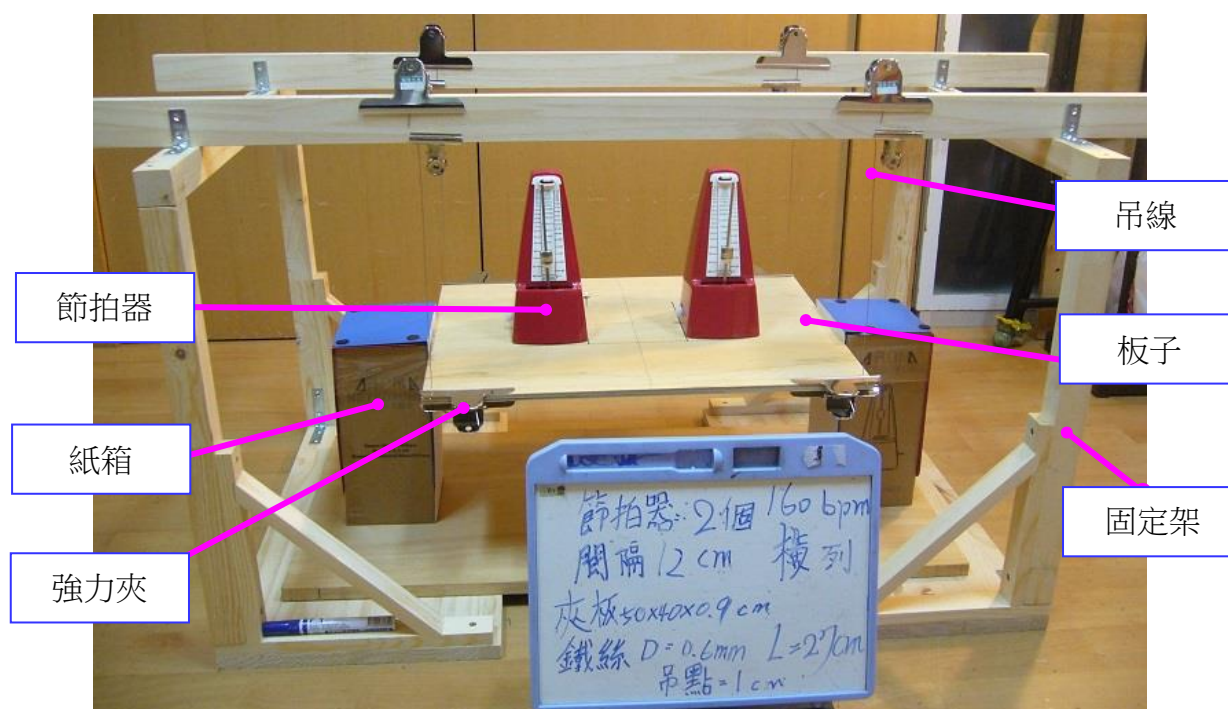
1. 吊線：若採用棉線，當固定在木板上時，因綁法技巧的因素，不容易控制吊線的長度，且棉線用久了會有鬆脫分叉的問題，因此正式實驗時改用鐵線，比較可以折彎及控制長度。
2. 吊線固定的方式：利用強力夾，先將需要的鐵線長度折好，再用夾子固定，這樣的固定方式也有利於後面實驗的多次拆裝使用。

由於上面模擬裝置架的製作，我們累積了經驗，而設計以下的正式實驗裝置架：





裝置架組裝



節拍器正式實驗裝置

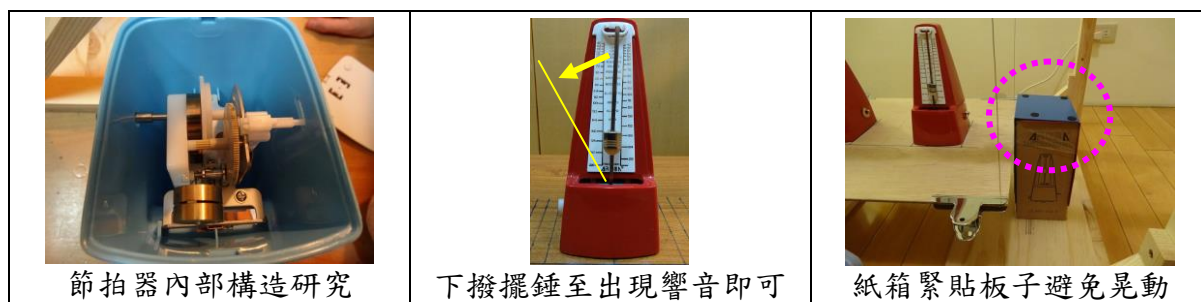
## (二) 實驗起始條件的確認

在初步實驗時，發現往下撥動節拍器擺錘時，會造成板子晃動，影響節拍器開始擺動的起始條件，因此為了使每次的實驗起始條件一致，我們設計下面的步驟及方法：

1. 節拍器校正：每天做實驗前，以聲波分析，測量節拍器的擺動頻率，確認功能正常。
2. 節拍器撥動方式：為了讓手撥動節拍器的撥法有一致性，我們設定下面的方式。
  - (1) 節拍器擺錘下撥方式：以手撥至節拍器發出響音即可，然後雙手同時放開，讓節拍器擺錘開始擺動，以避免晃動到木板，使起始條件一致。
  - (2) 節拍器擺錘撥動方向：為測得節拍器同向同步的時間，實驗設定兩個節拍器撥動的方向相反，例如：左邊的節拍器往左撥(記做L)，而右邊的節拍器往右撥(記做R)。至於其他節拍器數量或進行吊線與板子夾角之實驗時，則會另外設定撥動的方向。
3. 使板子靜止的方式：從之前的模擬實驗發現，往下撥動節拍器擺錘時，會造成初始時板子

不穩定的晃動，使實驗數據不精確，所以我們改良成，先在板子兩側用紙箱當固定器緊貼板子，往下撥動擺錘後，再輕輕穩定的移開兩側的紙箱，讓板子隨節拍器的擺動而自然晃動，如此一來，實驗的起始條件就有一致性。

4. 計時起點與終點：在前面提到兩側緊貼板子的紙箱移開，使板子隨節拍器擺動自然晃動後，開始按下碼錶，當做節拍器同步實驗的起點，然後直到聽到節拍器同步的一致性響音後，按下碼錶做為計時終點。



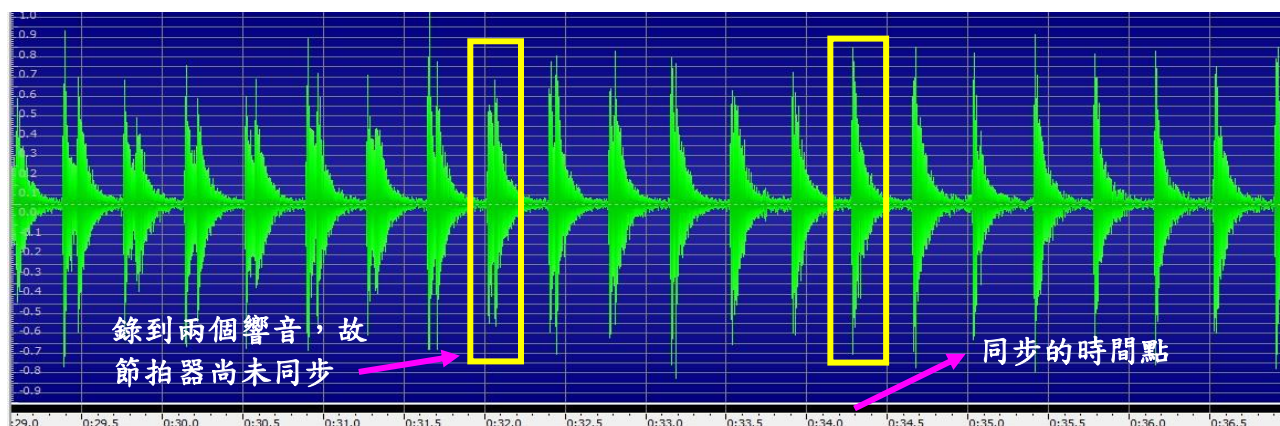
### (三) 節拍器同步的確認

當節拍器的擺動「同步」後，會感覺所有節拍器只有一個響音，並且擺錘的擺幅相同，因此需要做到耳到、眼到。但這樣的人為誤差會比較大，因此我們藉助電腦聲波分析軟體 GoldWave，分析錄到的節拍器響音，確認節拍器實際達到同步的時間。

此外，我們也拍攝實驗過程，以便後續分析與探討。

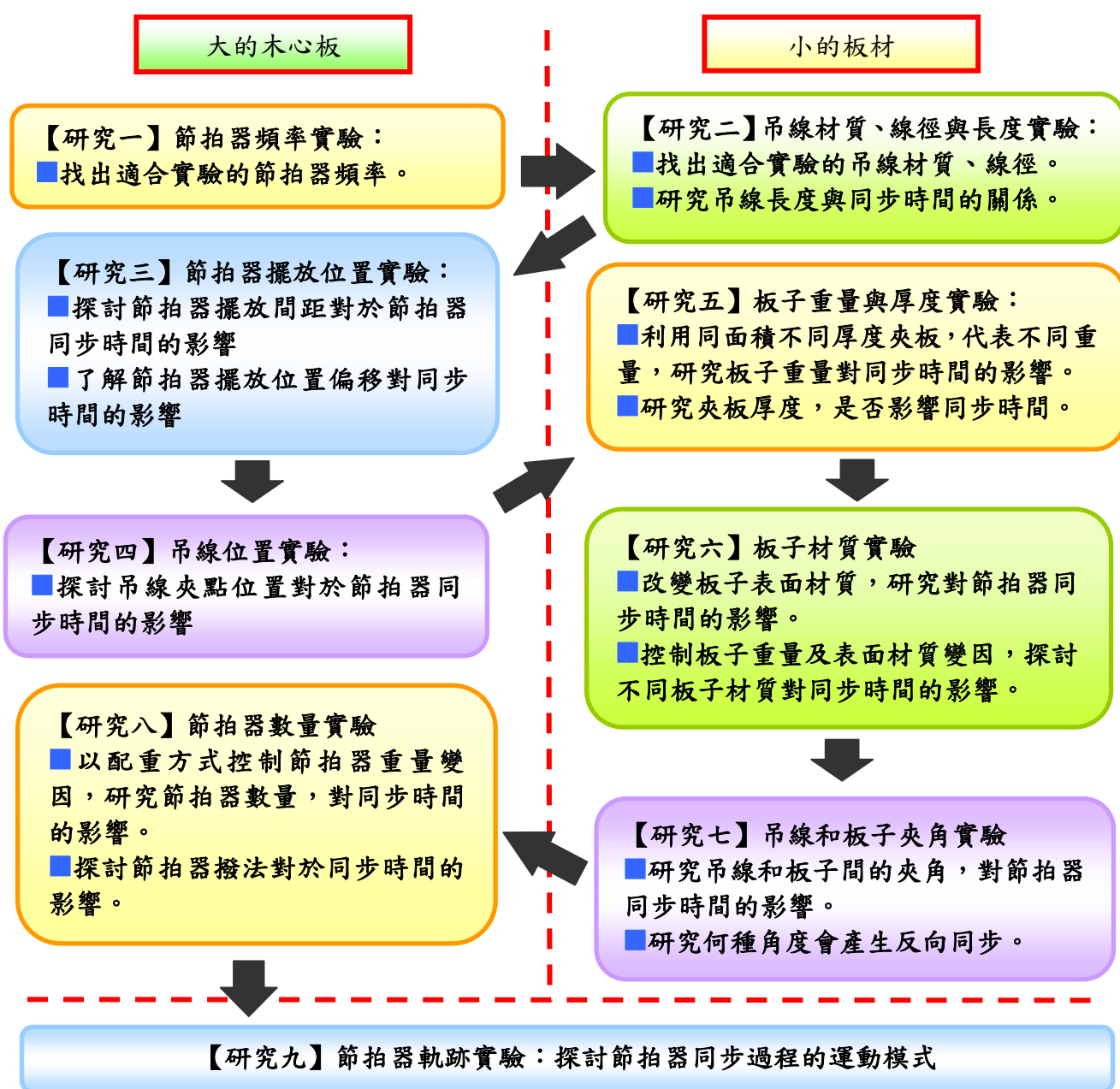
GoldWave聲波分析方法如下：

1. 先以碼錶記錄耳朵聽到所有節拍器只有出現一個響音的時間，因為同步過程中，有時會經歷反向同步，此時也會只有一個響音，因此透過記錄碼錶時間，可辨別實際的同步聲波。
2. 聲波分析：先選擇碼錶時間前後約 4 秒左右的聲波，然後將聲波放大(時間秒數可取至小數點第 2 位)，以檢視節拍器響音是否重疊，假如聲波重疊，代表該時間為節拍器同步的時間，如下圖。假如範圍內沒有同步的聲波時，則可再往後找尋同步的聲波。



聲波分析圖例(GoldWave軟體)

#### (四) 研究流程



#### (五) 實驗的各項變因

|     |                            |
|-----|----------------------------|
| 節拍器 | 數量、頻率、間距、撥法、間距中心的偏移距離、擺放形狀 |
| 吊線  | 吊線材質、線徑、長度、吊點、吊線與板子間的夾角    |
| 板子  | 板子材質、板厚、重量、表面材質            |

在實驗時，我們改變其中一項視為操作變因，其餘各項變因則維持不變視為控制變因。

## 伍、研究結果

### 【研究一】節拍器頻率實驗

我們想要了解不同節拍器頻率(bpm, beat per minute, 拍/分)對於達到同步時間的影響，同時訂定後續實驗時，何種節拍器頻率最適合，因此我們做了以下的實驗：

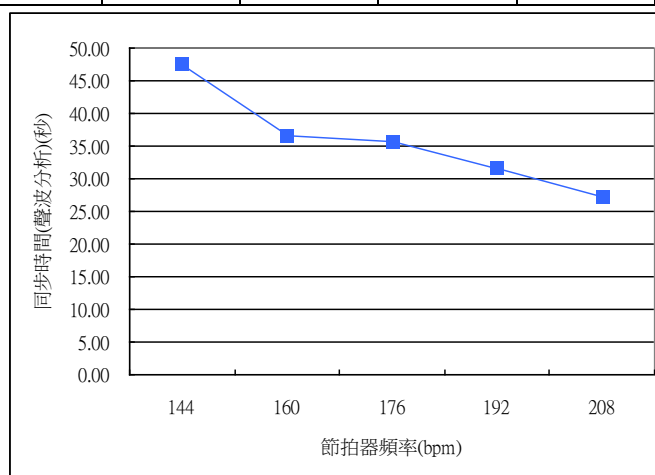
#### ■實驗(節拍器頻率選定實驗)

##### (一) 實驗方法

1. 使用 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板，將節拍器的分別以不同的頻率：144 bpm、160 bpm、176 bpm、192 bpm、208 bpm 進行實驗，吊線材質為鐵線(長度 27cm)。
2. 節拍器擺放間距的決定：我們用節拍器擺錘的擺幅，來決定擺錘擺動不會彼此碰觸的最小距離，再加上一點裕度，成為 2 個節拍器在板子放置的最小間距。我們觀察節拍器擺錘的擺幅為 5cm，因此各加上 1cm 的裕度，因此 2 個節拍器擺放間距=6cm\*2=12cm。

##### (二) 實驗結果

| 節拍器<br>頻率(bpm) | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | 實 驗 次 數    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 144            | 碼 錶        | 46.39 | 42.31 | 41.44 | 45.05 | 44.34 | 43.91 |
|                | 聲 波 分 析    | 50.93 | 46.76 | 41.93 | 47.99 | 49.48 | 47.72 |
| 160            | 碼 錶        | 36.35 | 35.73 | 34.69 | 35.59 | 33.46 | 35.16 |
|                | 聲 波 分 析    | 36.60 | 37.48 | 35.40 | 37.41 | 35.58 | 36.49 |
| 176            | 碼 錶        | 36.25 | 35.35 | 35.22 | 33.00 | 34.86 | 34.94 |
|                | 聲 波 分 析    | 37.00 | 36.08 | 35.75 | 33.34 | 36.57 | 35.75 |
| 192            | 碼 錶        | 31.94 | 30.17 | 37.01 | 36.85 | 31.73 | 33.54 |
|                | 聲 波 分 析    | 30.06 | 27.56 | 35.41 | 35.39 | 30.00 | 31.68 |
| 208            | 碼 錶        | 24.98 | 34.97 | 24.10 | 35.38 | 28.45 | 29.58 |
|                | 聲 波 分 析    | 24.49 | 32.75 | 22.12 | 31.71 | 25.34 | 27.28 |



節拍器頻率對同步時間的影響

##### (三) 實驗討論

1. 隨著頻率增加，節拍器同步所需的時間就會越短。

2. 在節拍器校正後發現，機械式節拍器實際頻率都會比設定的 bpm 快或慢。因此先實測每個節拍器真正 bpm，以利後續實驗的觀察。
3. 節拍器一開始是很穩定的反向同步，之後步調就開始變亂，再來會有一段極度不協調(2 個節拍器的響音此起彼落)，隨後頻率慢的節拍器會開始加大擺幅，追趕上頻率快的節拍器，此時，頻率快的節拍器會呈現擺幅很小的趨勢，最後兩者就同步了。
4. 頻率 208bpm 及 192bpm 時，節拍器會很快同步，對於起始條件的控制更不容易，因此在撥節拍器的一點點小誤失，同步時間上就會有即大的差異，至於 144bpm 的頻率則需花較多的時間同步。
5. 為了節省實驗時間，以多做相關變因的實驗，並顧及須觀察節拍器在同步過程中的各種現象，因此在後續實驗，我們選定以 160bpm 做為節拍器同步實驗的頻率。

## 【研究二】吊線材質、線徑與長度實驗

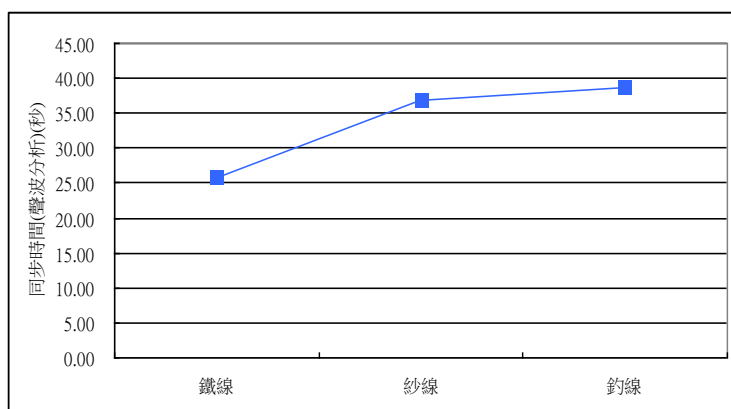
### ■實驗一(吊線材質選定實驗)

#### (一) 實驗方法

以 50cm\*40cm\*5mm 厚度之夾板，用 3 種不同材質但線徑相同(0.6mm)的吊線(鐵線 22 號、紗線、釣魚線 12 號)\*27cm 的長度固定板子，節拍器頻率 160bpm，間距 12cm。

#### (二) 實驗結果

| 吊線材質 | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 鐵線   | 碼錶         | 30.03 | 27.98 | 26.88 | 27.64 | 28.99 | 28.30 |
|      | 聲波分析       | 25.01 | 26.14 | 25.36 | 26.34 | 26.05 | 25.78 |
| 紗線   | 碼錶         | 36.85 | 37.96 | 37.13 | 34.29 | 36.31 | 36.51 |
|      | 聲波分析       | 37.80 | 38.21 | 37.59 | 35.20 | 36.03 | 36.97 |
| 釣線   | 碼錶         | 37.82 | 37.19 | 39.67 | 41.25 | 36.34 | 38.45 |
|      | 聲波分析       | 37.80 | 37.41 | 40.70 | 39.22 | 38.28 | 38.68 |



吊線材質對節拍器同步時間的影響



紗線安裝



釣線安裝

### (三) 實驗討論

1. 紗線討論：紗線的材質比軟，無法穩定板子在左右的方向上晃動，有時呈現圓周式晃動，因此節拍器擺錘的力量傳遞較不穩定，使同步所需的時間較鐵線的吊線來的長。
2. 釣線討論：與紗線的情況相似，同步所需的時間比鐵線長。但釣線表面又較紗線光滑，摩擦力小，板子晃動的度稍大於紗線的吊線，因此同步所需的時間較紗線來的長一些。
3. 因為鐵線的穩定度高於紗線及釣線，且可承受的板子重量也較大，因此我們決定以鐵線做為板子的吊線材質。

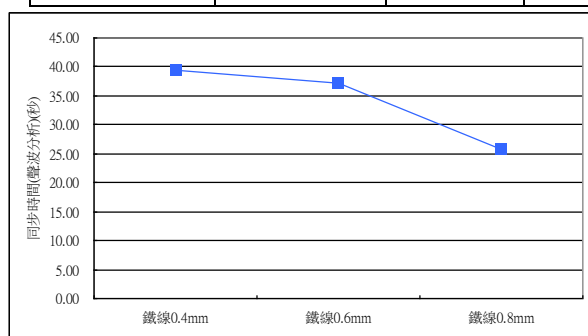
### ■實驗二(吊線線徑實驗)

#### (一) 實驗方法

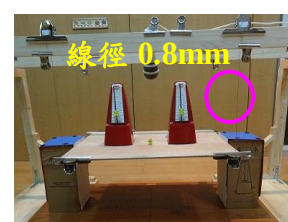
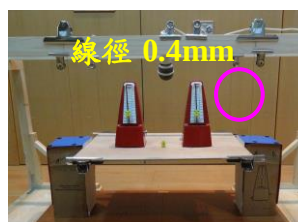
以 50cm\*40cm\*5mm 厚度之夾板，用 3 種不同線徑(0.4mm、0.6mm、0.8mm)的鐵線\*27cm 的長度固定板子，2 個節拍器擺放間距 12cm，節拍器頻率 160bpm。

#### (二) 實驗結果

| 鐵線線徑   | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|--------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 0.4 mm | 碼錶         | 39.30 | 39.71 | 37.13 | 37.26 | 38.35 | 38.35 |
|        | 聲波分析       | 40.38 | 40.43 | 38.15 | 38.12 | 39.67 | 39.35 |
| 0.6 mm | 碼錶         | 37.92 | 36.64 | 35.59 | 36.88 | 35.07 | 36.42 |
|        | 聲波分析       | 37.80 | 36.74 | 37.99 | 37.64 | 36.00 | 37.23 |
| 0.8 mm | 碼錶         | 27.15 | 27.00 | 27.08 | 26.02 | 24.78 | 26.41 |
|        | 聲波分析       | 26.34 | 25.95 | 27.50 | 25.25 | 24.49 | 25.91 |



吊線線徑對節拍器同步時間的影響



### (三) 實驗討論

1. 線徑越細時，板子比較無法穩定在左右的方向上晃動，節拍器擺錘的力量傳遞較不穩定，使同步所需的時間加長。
2. 雖然鐵線越粗，板子可更穩定擺動，但在實驗安裝時不易折彎，且較為費時，因此後續實驗我們仍選定鐵線線徑 0.6 mm 做為吊線。

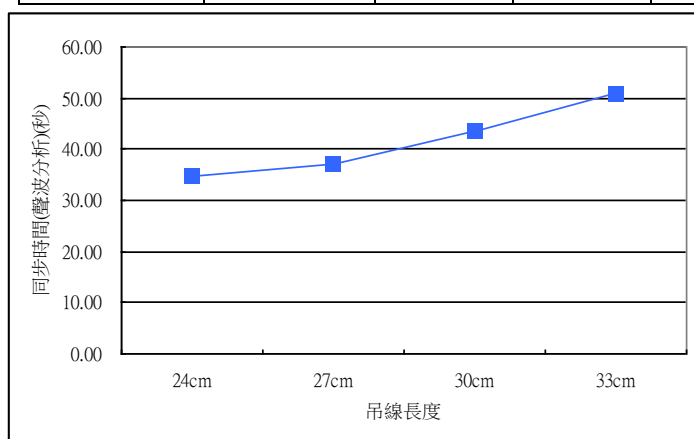
### ■實驗三(吊線長度實驗)

#### (一) 實驗方法

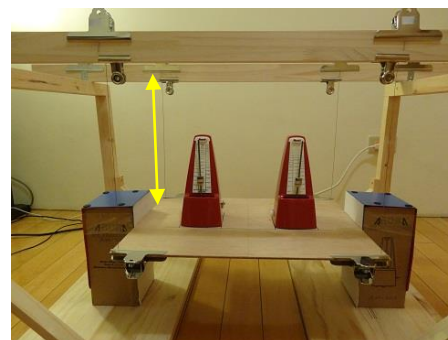
以 50cm\*40cm\*5mm 厚度之夾板，用 4 種不同線長(24cm、27cm、30cm、33cm)固定板子，2 個節拍器擺放間距 12cm，節拍器頻率 160bpm。

## (二) 實驗結果

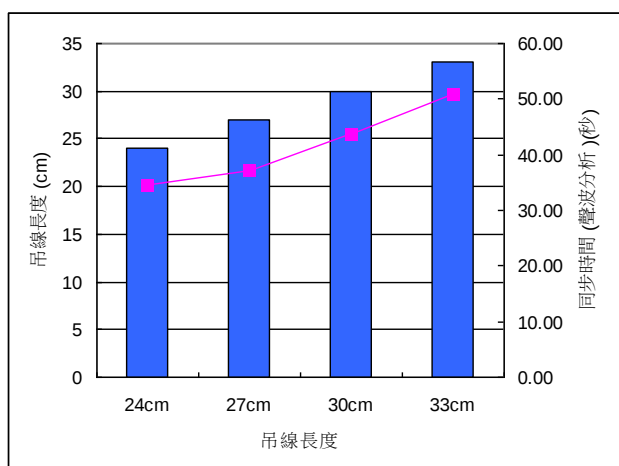
| 吊線長度 | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 24cm | 碼錶         | 35.59 | 33.06 | 32.25 | 33.18 | 34.70 | 33.76 |
|      | 聲波分析       | 36.96 | 34.76 | 33.04 | 33.93 | 34.74 | 34.69 |
| 27cm | 碼錶         | 37.92 | 36.64 | 35.59 | 36.88 | 35.07 | 36.42 |
|      | 聲波分析       | 37.80 | 36.74 | 37.99 | 37.64 | 36.00 | 37.23 |
| 30cm | 碼錶         | 45.85 | 42.85 | 43.10 | 39.83 | 40.30 | 42.39 |
|      | 聲波分析       | 46.21 | 44.12 | 44.07 | 41.09 | 42.65 | 43.63 |
| 33cm | 碼錶         | 52.31 | 48.96 | 48.60 | 49.56 | 49.94 | 49.87 |
|      | 聲波分析       | 53.73 | 49.55 | 49.19 | 50.87 | 50.40 | 50.75 |



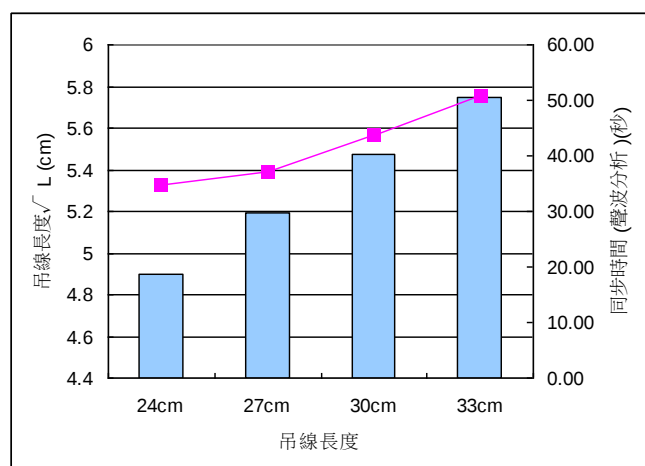
吊線長度對節拍器同步時間的影響



調整吊線長度



吊線長度與節拍器同步時間的關係



吊線長度根號( $\sqrt{L}$ )與同步時間的關係

## (三) 實驗討論

1. 吊線長度的探討：當以線材懸吊板子時，板子與吊線系統就像一個單擺，而我們知道單擺的週期隨著線長增加而變長，代表當我們加長吊線時，板子左右晃動週期加大，所以板子在一定時間內左右晃動的次數減少，使節拍器相互作用次數較少，因而加長同步所需的時

間。故吊線越長，節拍器同步所需時間越久。

2. 因單擺週期與線長的根號成正比例，因此我們好奇的將線長開根號(吊線長度 $\sqrt{L}$ )，然後比較線長根號與同步時間是否具有比例關係，但從前圖來看，並不具有正比例關係，推論可能與板子會受到節拍器擺錘擺動產生的作用力，因此並不完全是純粹的單擺緣故。
3. 從實驗的結果，我們發現30cm、33cm的線長，節拍器同步所需的時間較長，會使實驗時間加長，且吊線太長，不容易彎腰穩定地撥動節拍器；而24cm的吊線長度太短，我們不好使用紙箱固定板子，因此我們決定採用27cm做為板子吊線長度。

### 【研究三】節拍器擺放位置實驗

改變節拍器之間的位置，觀察不同位置對於節拍器達到同步時間的影響。

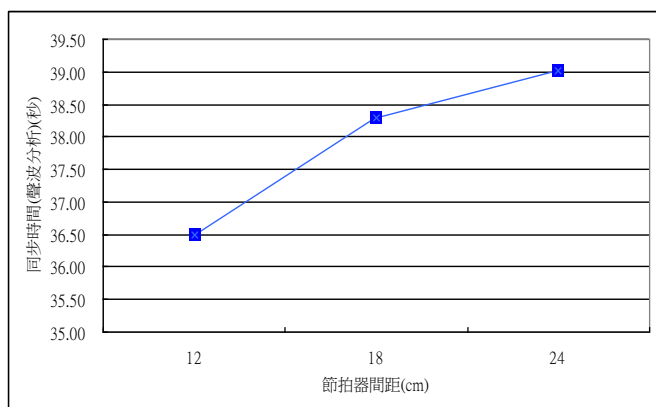
#### ■實驗一(節拍器間距實驗)

##### (一) 實驗方法

在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，將 2 個節拍器之間的擺放間距調為 12cm、18cm、24cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。

##### (二) 實驗結果

| 節拍器<br>間距 | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 12cm      | 碼錶         | 36.35 | 35.73 | 34.69 | 35.59 | 33.46 | 35.16 |
|           | 聲波分析       | 36.60 | 37.48 | 35.40 | 37.41 | 35.58 | 36.49 |
| 18cm      | 碼錶         | 34.73 | 33.20 | 38.14 | 38.72 | 36.44 | 36.25 |
|           | 聲波分析       | 37.43 | 36.07 | 39.82 | 40.40 | 37.79 | 38.30 |
| 24cm      | 碼錶         | 37.85 | 42.30 | 34.47 | 37.29 | 35.34 | 37.45 |
|           | 聲波分析       | 39.63 | 40.51 | 36.66 | 41.33 | 36.97 | 39.02 |



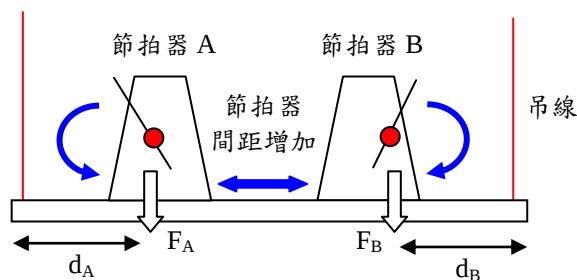
節拍器間距對同步時間的影響



##### (三) 實驗討論

1. 從實驗結果來看，節拍器間距加大，同步所需的時間越長。

2. 推論在節拍器間距加大時，因為節拍器擺錘擺動產生的作用力，越靠近吊線的固定點(支點)，力臂( $d_A$ 、 $d_B$ )變短，對板子產生的力矩變小( $F_A \times d_A$ 、 $F_B \times d_B$ )，故板子不易晃動的情況下，節拍器彼此相互作用的時間拉長，使達到同步所需時間增加。



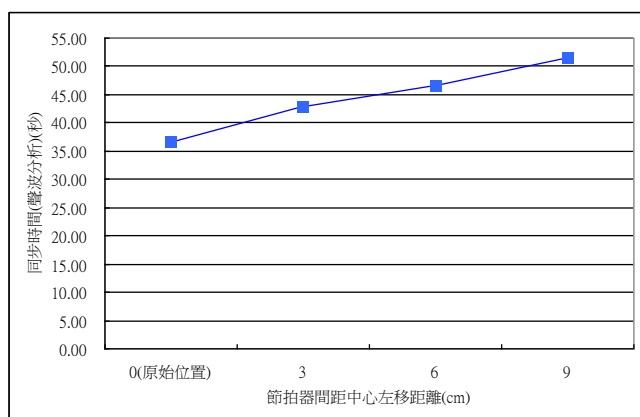
## ■實驗二(節拍器擺放間距中心偏移實驗)

### (一) 實驗方法

在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，將 2 個節拍器之間的間距固定為 12cm，然後將中心點往一側(左移)3cm、6cm、9cm。吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。

### (二) 實驗結果

| 節拍器間距中心<br>左移距離 | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 0cm<br>(原始位置)   | 碼錶         | 36.35 | 35.73 | 34.69 | 35.59 | 33.46 | 35.16 |
|                 | 聲波分析       | 36.60 | 37.48 | 35.40 | 37.41 | 35.58 | 36.49 |
| 3cm             | 碼錶         | 44.04 | 42.06 | 39.82 | 47.08 | 40.80 | 42.76 |
|                 | 聲波分析       | 44.67 | 40.56 | 39.84 | 47.88 | 41.23 | 42.84 |
| 6cm             | 碼錶         | 46.11 | 53.74 | 45.55 | 38.46 | 45.60 | 45.89 |
|                 | 聲波分析       | 44.23 | 53.14 | 47.60 | 43.24 | 45.11 | 46.66 |
| 9cm             | 碼錶         | 47.42 | 54.73 | 51.66 | 50.67 | 53.21 | 51.54 |
|                 | 聲波分析       | 46.72 | 56.00 | 51.23 | 48.23 | 55.10 | 51.46 |



節拍器間距的中心偏移(往左)對同步時間的影響

### (三) 實驗討論

1. 節拍器間距的中心往左偏移越多，同步所需的時間越長。
2. 推論節拍器間距的中心為 2 個節拍器的重心位置，當重心往一邊偏移時，作用在板子上的重力不平均，給板子的外力加大，板子明顯晃動，使得節拍器彼此相互作用的時間拉長，

達到同步所需時間增加。

#### 【研究四】吊線固定位置實驗

將吊線綁在靠左/右、靠中間等 4 個不同間距的位置，觀察不同吊線固定位置對於節拍器達到同步時間的影響。(注意：吊點須與板子垂直)

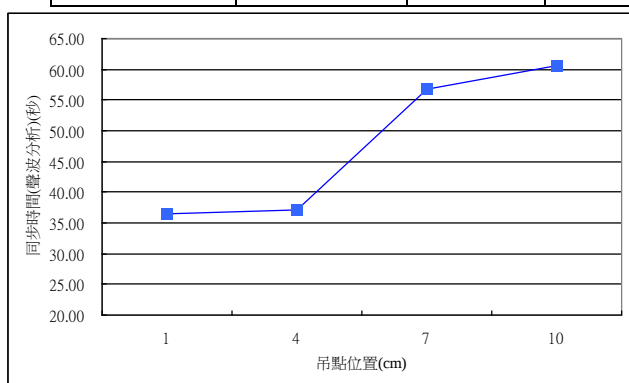
##### ■實驗(吊線固定點位置實驗)

###### (一) 實驗方法

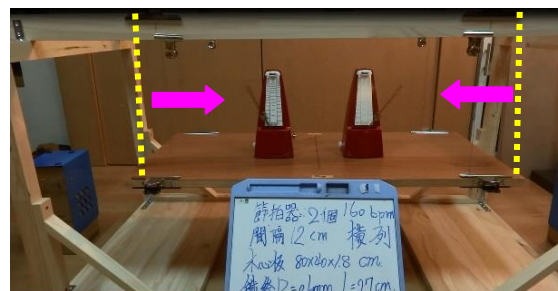
在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，距離板子邊緣 1cm、4cm、7cm、10cm 的位置固定吊線。2 個節拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。

###### (二) 實驗結果

| 吊點位置 | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 1cm  | 碼錶         | 36.35 | 35.73 | 34.69 | 35.59 | 33.46 | 35.16 |
|      | 聲波分析       | 36.60 | 37.48 | 35.40 | 37.41 | 35.58 | 36.49 |
| 4cm  | 碼錶         | 32.58 | 31.11 | 35.30 | 35.93 | 36.88 | 34.36 |
|      | 聲波分析       | 36.59 | 35.67 | 38.17 | 35.26 | 40.01 | 37.14 |
| 7cm  | 碼錶         | 59.60 | 58.39 | 51.31 | 52.23 | 48.73 | 54.05 |
|      | 聲波分析       | 61.58 | 59.51 | 53.24 | 51.94 | 57.14 | 56.68 |
| 10cm | 碼錶         | 54.24 | 65.45 | 54.48 | 62.99 | 60.11 | 59.45 |
|      | 聲波分析       | 53.88 | 66.77 | 54.95 | 65.25 | 61.62 | 60.49 |



吊線固定位置改變對節拍器同步時間的影響



改變吊線固定位置

###### (三) 實驗討論

1. 吊線的位置越往板子中心靠近時，節拍器同步所需的時間越長。
2. 推論吊線的位置越往板子中心時，就好像吊線的固定點(支點)往節拍器靠近，所以節拍器擺錘擺動產生的作用力，對板子產生的力矩變小，故板子不易晃動的情況下，節拍器彼此相互作用的時間也相對拉長，使同步的時間增加。與節拍器間距改變的情況類似，只是本項實驗是支點往作用力靠近，而節拍器間距改變時，則是作用力往支點靠近。

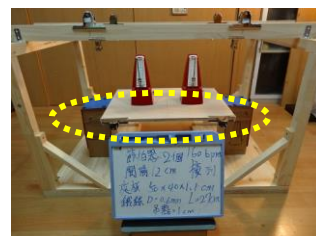
## 【研究五】板子的重量與厚度實驗

將板子的厚度加以改變，以觀察不同板子重量對於節拍器達到同步時間的影響，以及厚度對於節拍器達到同步時間是否有影響。

### ■實驗一(板子重量實驗)

#### (一) 實驗方法

分別安裝相同尺寸(50cm\*40cm)但厚度分別為 5mm、7mm、9mm、11mm 之夾板進行實驗，因為板子面積一樣，改變板子厚度即改變板子體積，又因為夾板材質密度相同，因此改變厚度即改變了板子重量。2 個節拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。



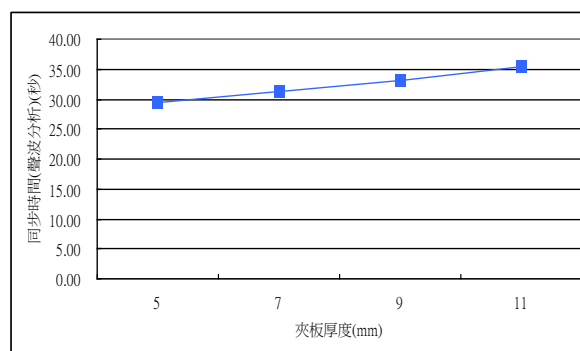
改變板子厚度

#### (二) 實驗結果

| 夾板厚度<br>(重量)    | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 5mm<br>(685g)   | 碼錶         | 29.49 | 29.20 | 29.20 | 28.68 | 28.25 | 28.96 |
|                 | 聲波分析       | 29.67 | 29.98 | 29.18 | 29.22 | 29.15 | 29.44 |
| 7mm<br>(847g)   | 碼錶         | 29.11 | 31.68 | 31.16 | 30.84 | 32.42 | 31.04 |
|                 | 聲波分析       | 28.30 | 32.40 | 30.66 | 32.13 | 32.83 | 31.26 |
| 9mm<br>(1183g)  | 碼錶         | 30.75 | 32.29 | 34.02 | 30.75 | 30.54 | 31.67 |
|                 | 聲波分析       | 35.10 | 34.28 | 34.67 | 30.92 | 30.24 | 33.04 |
| 11mm<br>(1284g) | 碼錶         | 32.97 | 33.58 | 32.44 | 35.18 | 34.39 | 33.71 |
|                 | 聲波分析       | 34.14 | 34.89 | 33.48 | 37.12 | 37.22 | 35.37 |

#### (三) 實驗討論

1. 板子越重，節拍器同步的時間會增加。
2. 因為板子面積一樣，所以當板子越厚，代表重量越重，而節拍器擺錘擺動產生的作用力沒有改變，因此較不容易趨動更重的板子，使得節拍器彼此相互作用的時間拉長，同步的時間增加。



板子厚度(重量)改變對節拍器同步時間的影響

### ■實驗二(厚度配重實驗)

#### (一) 實驗方法

相同尺寸(50cm\*40cm)但厚度分別為 5mm 之夾板由配重(847-685=162g)至 7mm 之夾板，以及 9mm 之夾板由配重(1284-1183=101g)至 11mm 之夾板。2 個節拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。



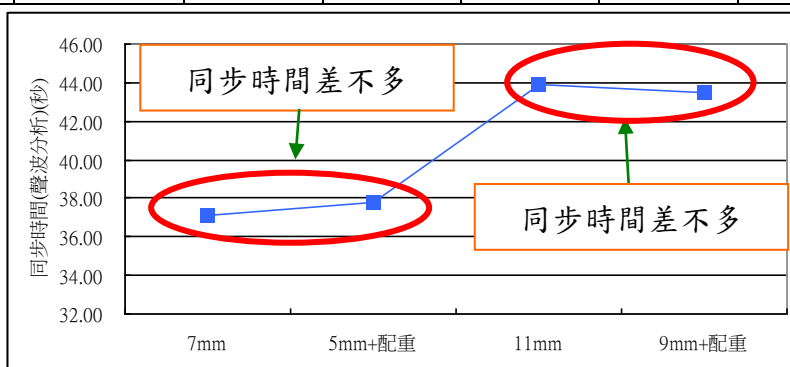
利用廢電池將 5mm 配重至 7mm 重量



利用廢電池將 9mm 配重至 11mm 重量

## (二) 實驗結果

| 夾板厚度            | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 7mm             | 碼錶         | 37.24 | 37.23 | 36.97 | 38.04 | 36.19 | 37.13 |
|                 | 聲波分析       | 38.19 | 36.94 | 36.75 | 36.89 | 36.89 | 37.13 |
| 5mm 配重至 7mm 重量  | 碼錶         | 38.26 | 33.68 | 36.87 | 38.67 | 39.22 | 37.34 |
|                 | 聲波分析       | 39.15 | 36.21 | 36.13 | 38.75 | 38.82 | 37.81 |
| 11mm            | 碼錶         | 46.41 | 44.97 | 43.34 | 43.64 | 43.32 | 44.34 |
|                 | 聲波分析       | 43.38 | 44.80 | 43.28 | 43.22 | 44.67 | 43.87 |
| 9mm 配重至 11mm 重量 | 碼錶         | 41.31 | 38.63 | 44.44 | 40.67 | 44.25 | 41.86 |
|                 | 聲波分析       | 43.37 | 43.28 | 44.85 | 40.46 | 45.37 | 43.47 |



板子厚度改變對节拍器同步時間的影響

## (三) 實驗討論

1. 當兩個重量相同的板子，雖然厚度不同，但是节拍器達到同步的時間其實是差不多的。
2. 為什麼配重至厚的板子時，所得到的同步時間，與同重量的板子，還是有一點落差，我們推測是因為配重無法真正達到原本板子材質那樣均勻的緣故。

## 【研究六】板子材質實驗

### ■板子材質初始實驗

#### (一) 初始實驗方法

我們先以相同尺寸 50cm\*40cm\*5mm(厚度)之夾板、壓克力進行板子材質的初始實驗。2 個节拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，节拍器頻率 160bpm。



板材-壓克力

## (二) 初始實驗結果

| 板子材質<br>(重量)   | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 夾板<br>(685g)   | 碼錶         | 30.03 | 27.98 | 26.88 | 27.64 | 28.99 | 28.30 |
|                | 聲波分析       | 25.01 | 26.14 | 25.36 | 26.34 | 26.05 | 25.78 |
| 壓克力<br>(1132g) | 碼錶         | 31.30 | 33.74 | 32.76 | 31.58 | 34.65 | 32.81 |
|                | 聲波分析       | 34.30 | 36.85 | 35.32 | 35.25 | 36.50 | 35.64 |

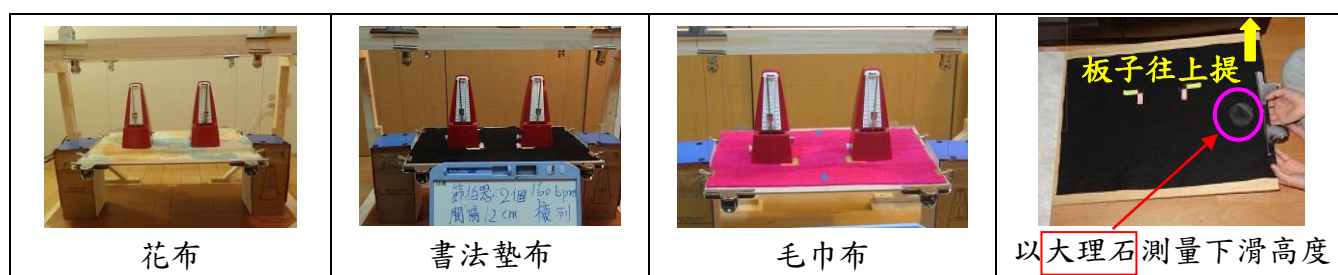
## (三) 初始實驗討論

1. 從初始實驗，我們注意到除了板子重量外，板子表面與節拍器接觸的材質若不同，也可能影響節拍器同步的時間，因此我們應用五上所學到的摩擦力，設計了實驗一。
2. 從數據可以看出板子重量越重，節拍器同步所花的時間越長。但是初始實驗中，除了材質，還有重量變因還未控制，因此正式實驗時，我們將重量及表面材質變因固定，以探討板子材質是否會影響節拍器同步的時間，因此設計了實驗二進行探討。

### ■實驗一(板子表面材質實驗)

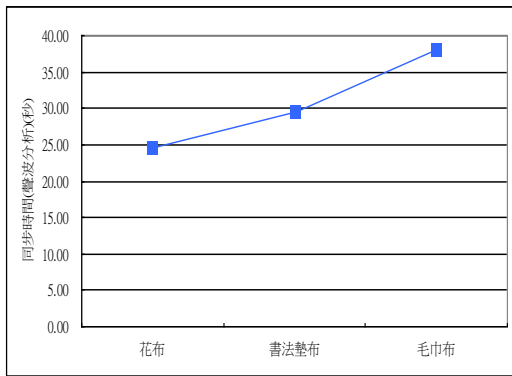
#### (一) 實驗方法

1. 在相同尺寸 50cm\*40cm\*5mm(厚度)夾板上，夾持書法墊布、花布、毛巾布，以改變夾板與節拍器間的接觸表面材質，進行節拍器同步實驗。2 個節拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。
2. 量測表面材質之摩擦力：在相同夾板表面夾持書法墊布、花布、毛巾布，利用固定重量之小型圓形大理石，以斜板原理，將夾板慢慢上升，直到大理石開始下滑，便量測「下滑高度」，求得摩擦力大小。

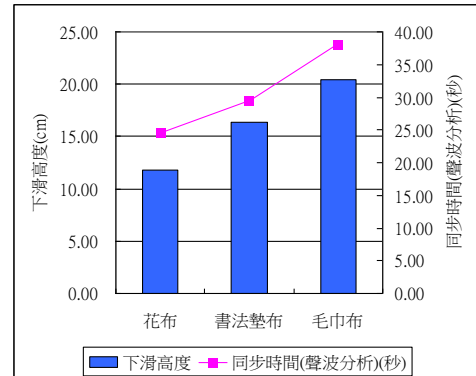


#### (二) 實驗結果

| 板子<br>表面材質 | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 花布         | 碼錶         | 26.79 | 26.62 | 25.19 | 25.47 | 26.40 | 26.09 |
|            | 聲波分析       | 24.93 | 24.88 | 24.35 | 24.91 | 23.75 | 24.56 |
| 書法墊布       | 碼錶         | 29.19 | 29.61 | 28.80 | 29.80 | 27.76 | 29.03 |
|            | 聲波分析       | 29.00 | 28.18 | 29.95 | 31.99 | 28.14 | 29.45 |
| 毛巾布        | 碼錶         | 38.67 | 36.91 | 36.98 | 39.33 | 37.19 | 37.82 |
|            | 聲波分析       | 39.07 | 37.05 | 36.84 | 39.84 | 37.52 | 38.06 |



板子表面接觸材質對節拍器同步時間的影響



板子表面摩擦力對節拍器同步時間的影響

### (三) 實驗討論

1. 從數據來看，板子表面材質改變，節拍器同步的時間也會隨之改變。也就是板子**表面材質摩擦力越大，節拍器同步所花的時間越長**。
2. 就摩擦力而言，毛巾布>書法墊布>花布，而同步時間也是毛巾布>書法墊布>花布，表示板子表面接觸材質摩擦力越大，會抵消節拍器擺錘擺動對板子產生的作用力，使節拍器之間相互作用減少，導致節拍器同步的時間也會隨之增加，對我們來說，真是一個大的發現。

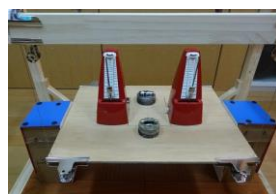
### ■實驗二(板子材質配重實驗)

#### (一) 實驗方法

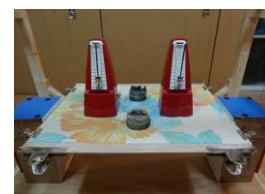
1. 相同尺寸 50cm\*40cm\*5mm 之夾板配重(1132-685=447g)至與壓克力重量相同，控制重量變因，然後探討材質因素對同步時間的影響。2 個節拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。
2. 從實驗一知道，板子表面材質對同步時間有影響，因此再將「壓克力表面加上花布」，以及「夾板表面加上花布+配重(1132-685=447g)」二組板子，控制表面材質的變因進行實驗。



壓克力+花布



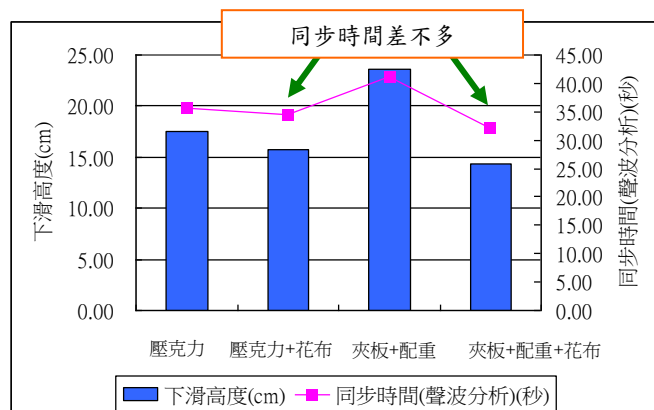
夾板+配重



夾板+配重+花布

#### (二) 實驗結果

| 板子<br>表面材質   | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 壓克力<br>+花布   | 碼錶         | 33.81 | 32.37 | 33.25 | 32.12 | 34.72 | 33.25 |
|              | 聲波分析       | 34.65 | 34.48 | 36.14 | 33.24 | 34.50 | 34.60 |
| 夾板+配重        | 碼錶         | 38.34 | 39.75 | 40.87 | 37.97 | 38.71 | 39.13 |
|              | 聲波分析       | 43.83 | 42.23 | 41.80 | 38.38 | 39.53 | 41.15 |
| 夾板+配重+<br>花布 | 碼錶         | 29.03 | 28.08 | 28.25 | 33.40 | 31.14 | 29.98 |
|              | 聲波分析       | 30.75 | 31.23 | 31.57 | 36.16 | 31.46 | 32.23 |



改變板子材質(控制重量變因)對同步時間的影響

### (三) 實驗討論

1. 控制重量及表面材質二項變因後，只剩板子材質這項變因，從實驗數據知道，「壓克力+花布」與「夾板+配重+花布」同步的時間是差不多的，可能誤差在於配重無法真正達到板子材質本身那樣均勻的緣故，因此可以得知板子材質不影響節拍器達到同步的時間。
2. 另外比較「壓克力」與「夾板+配重」，會發現夾板的表面摩擦力較大(下滑高度大)，所以節拍器達到同步的時間較長，與我們在實驗一得到的結果是相吻合的。

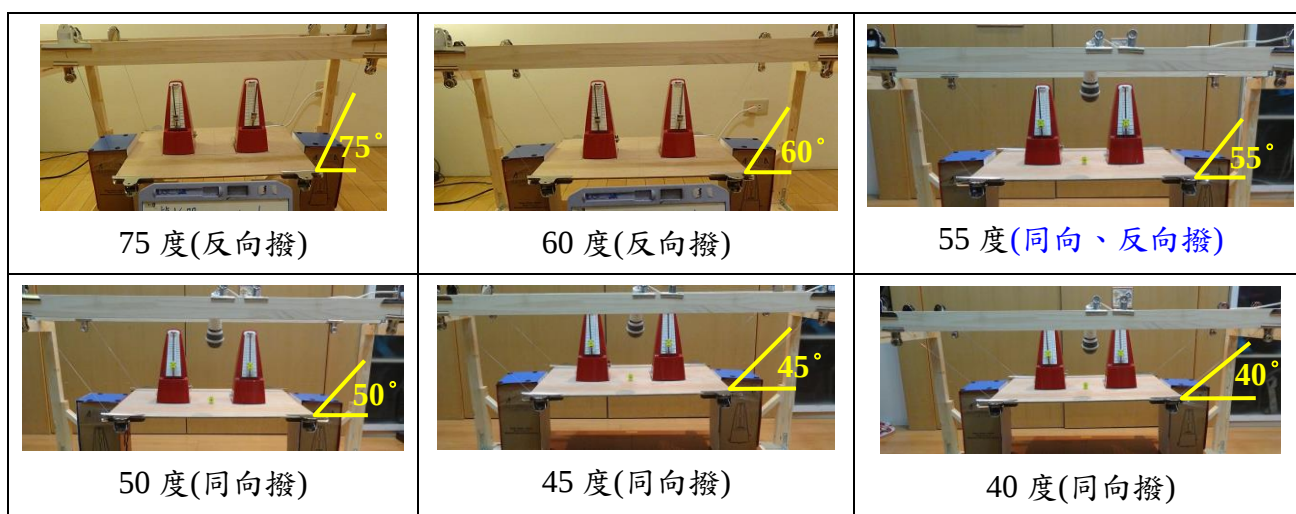
### 【研究七】吊線和板子夾角實驗

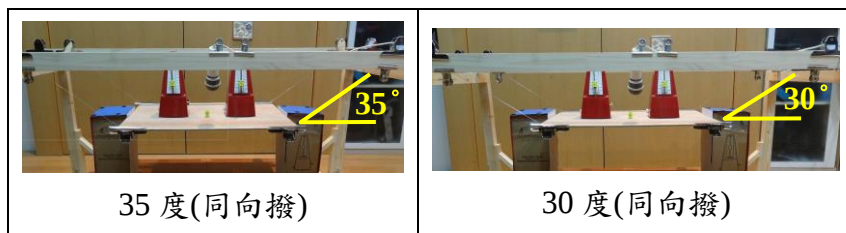
觀察吊線與板子間不同的夾角對於達到同步時間的影響，並探討同步後節拍器會同向或反向。

#### ■實驗(吊線與板子間的夾角實驗)

##### (一) 實驗方法

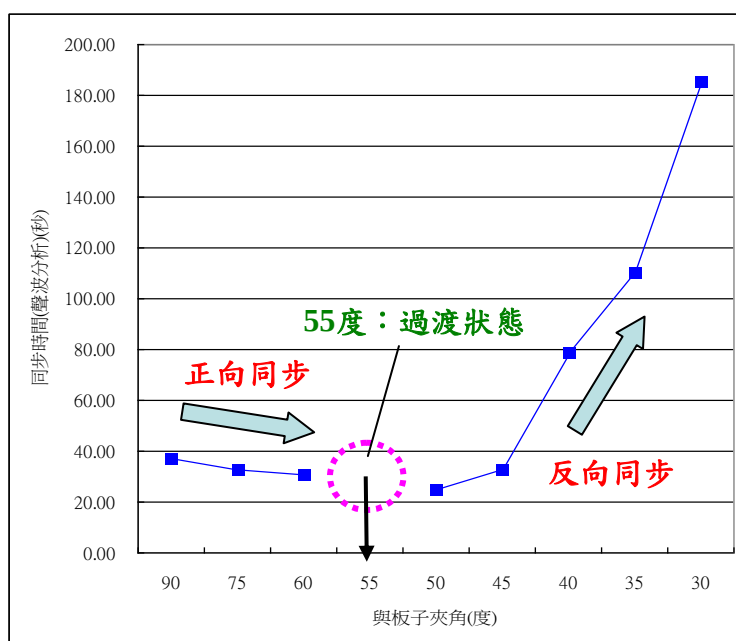
相同尺寸 50cm\*40cm\*5mm 之夾板，將吊線分別與板子夾角成 90 度、75 度、60 度、55 度、50 度、45 度、40 度、35 度與 30 度。2 個節拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。基於之前的模擬實驗，我們設定 2 個節拍器的起始撥法如下：





## (二) 實驗結果

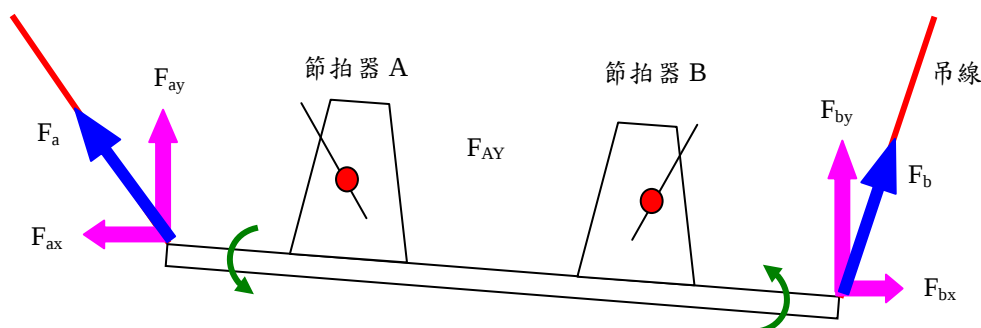
| 與板子夾角          | 達到同步的時間(秒) |        |        |        |        |        |        |
|----------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | 實驗次數       | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 平均     |
| 90 度<br>(原始位置) | 碼錶         | 37.92  | 36.64  | 35.59  | 36.88  | 35.07  | 36.42  |
|                | 聲波分析       | 37.80  | 36.74  | 37.99  | 37.64  | 36.00  | 37.23  |
| 75 度           | 碼錶         | 35.44  | 31.35  | 31.33  | 32.84  | 33.60  | 32.91  |
|                | 聲波分析       | 36.47  | 31.55  | 31.15  | 31.99  | 33.28  | 32.89  |
| 60 度           | 碼錶         | 29.31  | 34.80  | 31.12  | 32.70  | 35.40  | 32.67  |
|                | 聲波分析       | 30.33  | 32.66  | 29.57  | 30.43  | 31.70  | 30.94  |
| 50 度           | 碼錶         | 25.59  | 23.50  | 25.71  | 22.92  | 25.46  | 24.74  |
|                | 聲波分析       | 25.13  | 24.00  | 26.10  | 22.95  | 26.05  | 24.85  |
| 45 度           | 碼錶         | 33.12  | 31.60  | 31.43  | 31.49  | 31.68  | 31.86  |
|                | 聲波分析       | 34.61  | 32.60  | 32.58  | 31.58  | 32.78  | 32.83  |
| 40 度           | 碼錶         | 70.84  | 71.27  | 81.14  | 76.82  | 72.42  | 74.50  |
|                | 聲波分析       | 79.14  | 75.79  | 83.34  | 78.93  | 76.19  | 78.68  |
| 35 度           | 碼錶         | 99.02  | 100.80 | 112.75 | 110.46 | 111.51 | 106.91 |
|                | 聲波分析       | 101.74 | 103.17 | 118.89 | 113.24 | 114.51 | 110.31 |
| 30 度           | 碼錶         | 195.79 | 176.18 | 180.19 | 176.27 | 180.35 | 181.76 |
|                | 聲波分析       | 205.30 | 186.32 | 185.92 | 175.50 | 173.65 | 185.34 |



吊線和板子間的夾角對節拍器同步時間的影響

### (三) 實驗討論

1. 吊線和板子間的夾角由 90 度減少至 60 度時，板子會加大左右晃動幅度，而頻率低的節拍器會大幅度的擺動，追上頻率高的節拍器，因此節拍器同步時間加快。
2. 當夾角=45 度時，同向撥動擺錘，結果一段時間後，會變成反向同步，而到達同步的時間比吊線夾角 90 度時來得短。
3. 後來我們再針對 45 度上下的角度範圍，增加了 55 度、50 度，以及 45 度以下的實驗。發現 55 度時，節拍器無法呈現穩定的反向或同向同步(故無法取得數據)，而到了 50 度時，節拍器開始呈現反向同步，因此推論 55 度是同向同步到反向同步的過渡階段。
4. 當角度由 50 度持續減少到 30 度時，節拍器反向同步時間明顯增加，推論是角度越小，吊線受力的水平分力( $F_x$ )越大，讓板子上下晃動程度增加，使得節拍器同步時間加長。



## 【研究八】節拍器數量實驗

### ■實驗一(節拍器數量實驗)

#### (一) 實驗方法

1. 在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，將節拍器擺放數量由 2 個，改為 4 個，測試 4 個節拍器同步的時間。4 個節拍器的撥法，由左至右為：左撥(記做 L)、左撥(L)、右撥(記做 R)、右撥(R)，亦即記做 LLRR。4 個節拍器擺放間距 12cm，吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。
2. 另外，由「【研究五】板子的重量實驗」知道，板子重量會影響節拍器同步的時間。因此，我們將木心板上的 2 個節拍器，加上 2 個節拍器的配重，使其重量與 4 個節拍器相同，然後進行節拍器同步實驗。



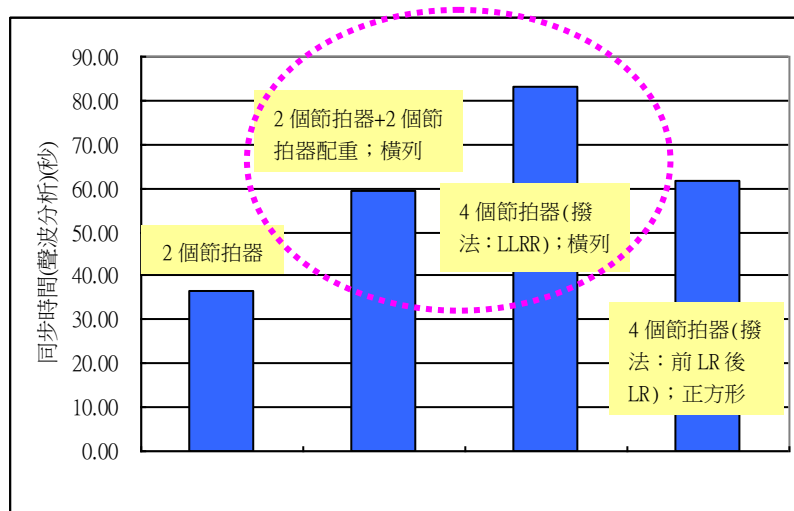
2 個節拍器 + 2 個節拍器配重



4 個節拍器(橫列，搭配不同的撥法)

## (二) 實驗結果

| 節拍器數量及撥法                    | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 2 個節拍器                      | 碼 錶        | 36.35 | 35.73 | 34.69 | 35.59 | 33.46 | 35.16 |
|                             | 聲 波 分 析    | 36.60 | 37.48 | 35.40 | 37.41 | 35.58 | 36.49 |
| 2 個節拍器+<br>2 個節拍器配重；橫列      | 碼 錶        | 49.18 | 49.55 | 49.96 | 55.90 | 49.86 | 50.89 |
|                             | 聲 波 分 析    | 56.14 | 60.74 | 61.72 | 59.44 | 58.32 | 59.27 |
| 4 個節拍器<br>(撥法：LLRR)；橫列      | 碼 錶        | 78.40 | 80.05 | 65.50 | 85.36 | 84.84 | 78.83 |
|                             | 聲 波 分 析    | 80.25 | 84.03 | 79.60 | 84.01 | 87.78 | 83.13 |
| 4 個節拍器<br>(撥法：前 LR 後 LR)正方形 | 碼 錶        | 59.55 | 54.02 | 55.56 | 64.04 | 57.04 | 58.04 |
|                             | 聲 波 分 析    | 59.47 | 62.25 | 61.98 | 67.75 | 57.84 | 61.86 |



節拍器數量對節拍器同步時間的影響

## (三) 實驗討論

1. 「2 個節拍器」同步時間<「2 個節拍器+2 個節拍器配重(橫列)」，符合節拍器所趨動的重量越重，達到同步的時間越長的發現。
2. 「2 個節拍器+2 個節拍器配重(橫列)」同步時間<「4 個節拍器(撥法：LLRR)(橫列)」，推論是因為 4 個節拍器最靠兩側的節拍器彼此間距大於 12cm，因此從「【研究三】節拍器擺放位置實驗」知道，節拍器間距越大，達到同步的時間越長。
3. 「4 個節拍器(撥法：LLRR) (橫列)」同步時間>「4 個節拍器(撥法：前 LR 後 LR)(正方形)」，推論 4 個節拍器排成正方形時，其節拍器間距都是 12cm，所以達到同步的時間較前者短。
4. 「4 個節拍器(撥法：前 LR 後 LR)(正方形)」同步時間>「2 個節拍器+2 個節拍器配重(橫列)」，推論 4 個節拍器擺成正方形時，雖然前後節拍器間距都是 12cm，但前排的節拍器會與後排的節拍器相互作用，因此達到同步的時間較後者長些。

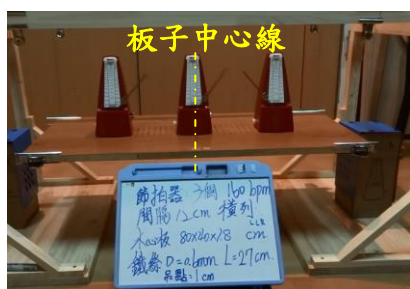
## ■實驗二(節拍器撥法實驗)

### (一) 實驗方法

在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，將節拍器擺放數量由 2 個，改為 3 個、4 個節拍器，研究討論節拍器撥法的影響。3 個、4 個節拍器擺放間距皆為 12cm，但擺放 3 個節拍器時，中間的節拍器則改放在木心板的中心線上，以使重心平均。吊線仍為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm。

1. 三個節拍器撥法：LLR、LRL (L 表向左撥、R 表向右撥)
2. 四個節拍器撥法(一個橫列排法)：LLRR、LRLR、LLLR、LRLR

四個節拍器正方形排法：撥法->前 LR 後 LR、前 RR 後 LL



3 個節拍器(搭配不同的撥法)



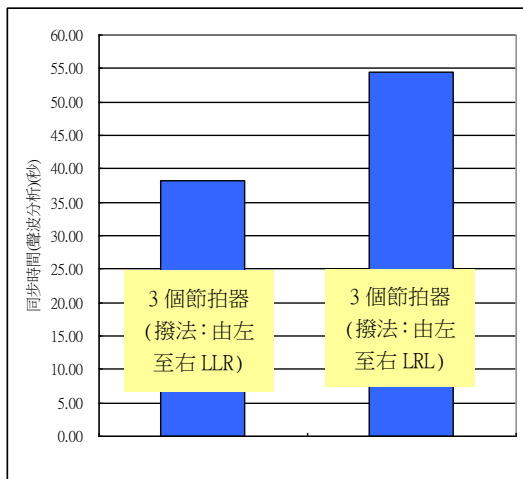
4 個節拍器(正方形排法)

## (二) 實驗結果

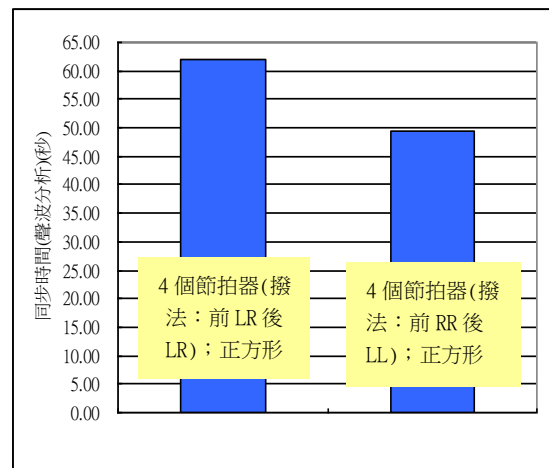
| 3 個節拍器撥法(橫列)  | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|---------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| LLR<br>(由左至右) | 碼錶         | 42.07 | 34.71 | 32.45 | 45.21 | 38.99 | 38.69 |
|               | 聲波分析       | 42.06 | 35.92 | 33.35 | 43.50 | 36.68 | 38.30 |
| LRL<br>(由左至右) | 碼錶         | 49.38 | 50.47 | 51.60 | 60.76 | 59.34 | 54.31 |
|               | 聲波分析       | 47.23 | 49.52 | 53.58 | 60.50 | 61.17 | 54.40 |

| 4 個節拍器撥法(橫列)   | 達到同步的時間(秒) |       |       |        |       |        |       |
|----------------|------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                | 實驗次數       | 1     | 2     | 3      | 4     | 5      | 平均    |
| LLRR<br>(由左至右) | 碼錶         | 78.40 | 80.05 | 65.50  | 85.36 | 84.84  | 78.83 |
|                | 聲波分析       | 80.25 | 84.03 | 79.60  | 84.01 | 87.78  | 83.13 |
| LRLR<br>(由左至右) | 碼錶         | 91.67 | 80.96 | 96.72  | 94.06 | 103.52 | 93.39 |
|                | 聲波分析       | 94.95 | 87.47 | 101.65 | 94.82 | 107.67 | 97.31 |
| LLLR<br>(由左至右) | 碼錶         | 39.47 | 39.52 | 39.56  | 38.52 | 39.73  | 39.36 |
|                | 聲波分析       | 39.25 | 42.60 | 40.89  | 38.65 | 39.11  | 40.10 |
| LRLR<br>(由左至右) | 碼錶         | 45.09 | 32.32 | 46.08  | 40.74 | 31.06  | 39.06 |
|                | 聲波分析       | 47.78 | 38.61 | 49.58  | 44.17 | 39.03  | 43.83 |

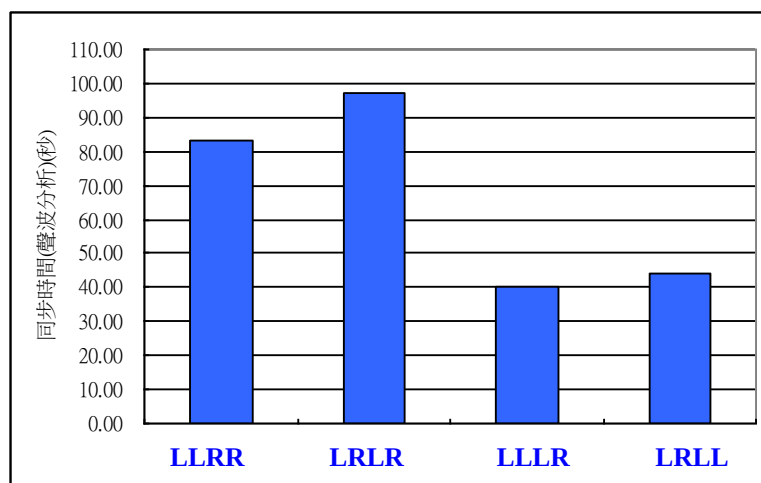
| 4 個節拍器撥法(正方形)       | 達到同步的時間(秒) |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 實驗次數       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均    |
| 前 LR 後 LR<br>(由左至右) | 碼錶         | 59.55 | 54.02 | 55.56 | 64.04 | 57.04 | 58.04 |
|                     | 聲波分析       | 59.47 | 62.25 | 61.98 | 67.75 | 57.84 | 61.86 |
| 前 RR 後 LL<br>(由左至右) | 碼錶         | 40.22 | 46.08 | 40.48 | 56.52 | 55.36 | 47.73 |
|                     | 聲波分析       | 41.45 | 47.75 | 43.80 | 57.43 | 56.47 | 49.38 |



3 個節拍器撥法對同步時間的影響



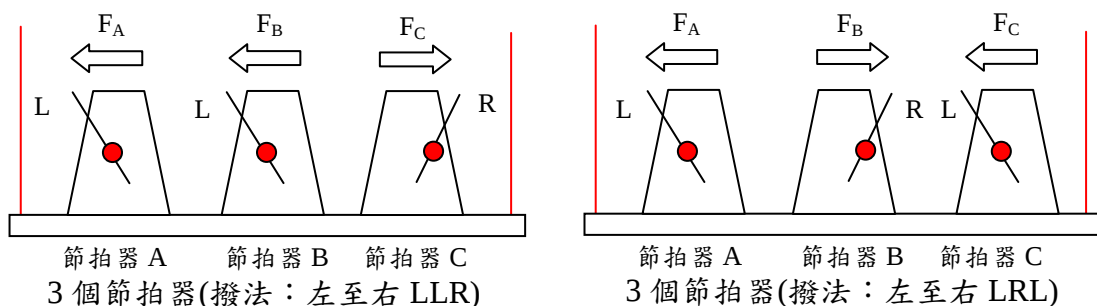
4 個節拍器(正方形)撥法對同步時間的影響



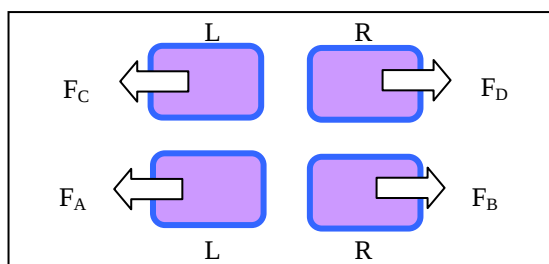
4 個節拍器數量(橫列擺法)撥法對節拍器同步時間的影響

### (三) 實驗討論

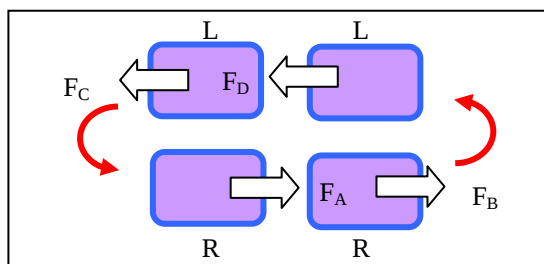
1. 「3 個節拍器(撥法：由左至右 LLR)」同步時間<「3 個節拍器(撥法：由左至右 LRL)」，推論前者左側兩個節拍器同向的作用力大於最右側的節拍器，相互作用較明顯，同步時間較短，而後者位在中間的節拍器須與左邊與右邊的節拍器相互作用，所以同步時間較長。



2. 「4 個節拍器(撥法：前 LR 後 LR)(正方形)」同步時間>「4 個節拍器(撥法：前 RR 後 LL)(正方形)」，前者 4 個節拍器彼此作用力容易抵消，使板子不易晃動，使達到同步所需時間較長；而後者，前後節拍器形成扭轉的作用力，使板子容易晃動，使達到同步所需時間較短。



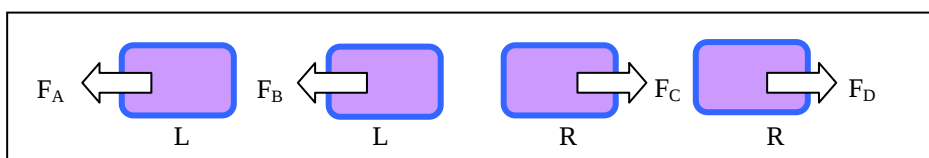
4 個節拍器 (正方形)  
(撥法：前 LR 後 LR)



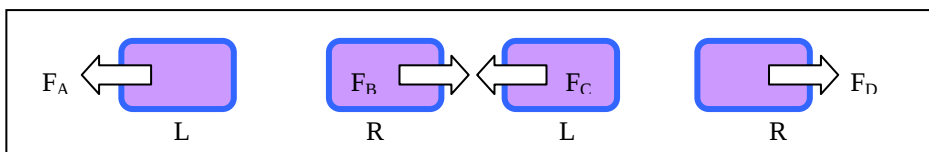
4 個節拍器 (正方形)  
(撥法：前 RR 後 LL)

### 3. 4 個節拍器數量(橫列擺法)撥法結果討論：

(1) 「4 個(節拍器撥法：由左至右 LLRR)」同步時間 < 「4 個(節拍器撥法：由左至右 LRLR)」，推論由於後者之擺法，中間穿插兩個不同撥動方向之節拍器，因而彼此相互作用時間增加，使達到同步所需時間較長。

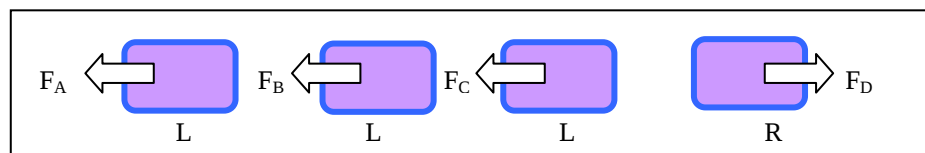


4 個(節拍器撥法：由左至右 LLRR)

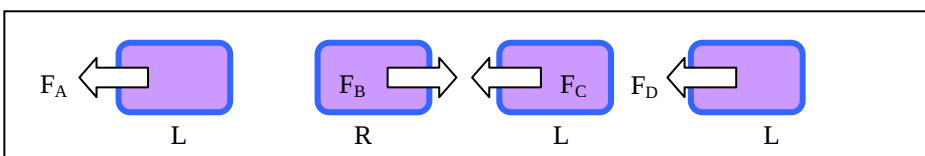


4 個(節拍器撥法：由左至右 LRLR)

(2) 「4 個(節拍器撥法：由左至右 LLLR)」同步時間 < 「4 個(節拍器撥法：由左至右 LRLL)」，前者左側 3 個節拍器同向的作用力大於最右側的節拍器，相互作用更明顯，同步時間更短，而後者位在中間的節拍器須與左邊與右邊的節拍器相互作用，所以同步時間較長一些。



4 個(節拍器撥法：由左至右 LLLR)



4 個(節拍器撥法：由左至右 LRLL)

(3) 「4 個(節拍器撥法：由左至右 LLRR)」同步時間 > 「4 個(節拍器撥法：由左至右 LLLR)」，

推論由於後者之排法，節拍器彼此相互作用明顯大於前者，因而達到同步時間更短。

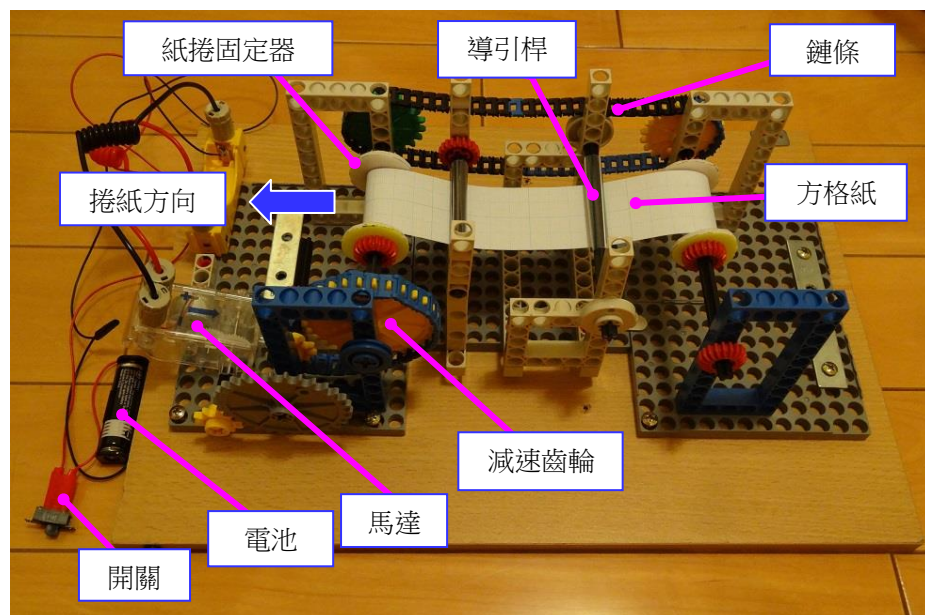
### 【研究九】節拍器同步軌跡實驗

我們對於節拍器怎麼達到同步的過程感到好奇，於是想到在板子下加裝一支筆，然後利用【自製軌跡記錄器】，將節拍器同步過程中，板子左右晃動的模式畫下來。

#### ■實驗(節拍器同步軌跡實驗)

##### (一) 實驗方法

1. 我們利用太陽能車的零件，製作一個軌跡記錄器裝置如下：

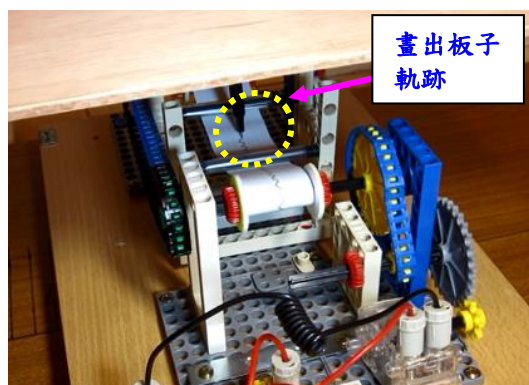
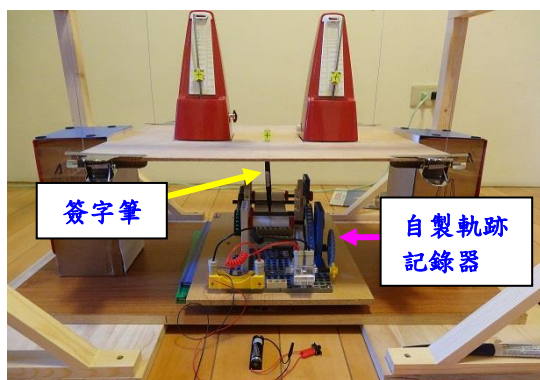


自製軌跡記錄器

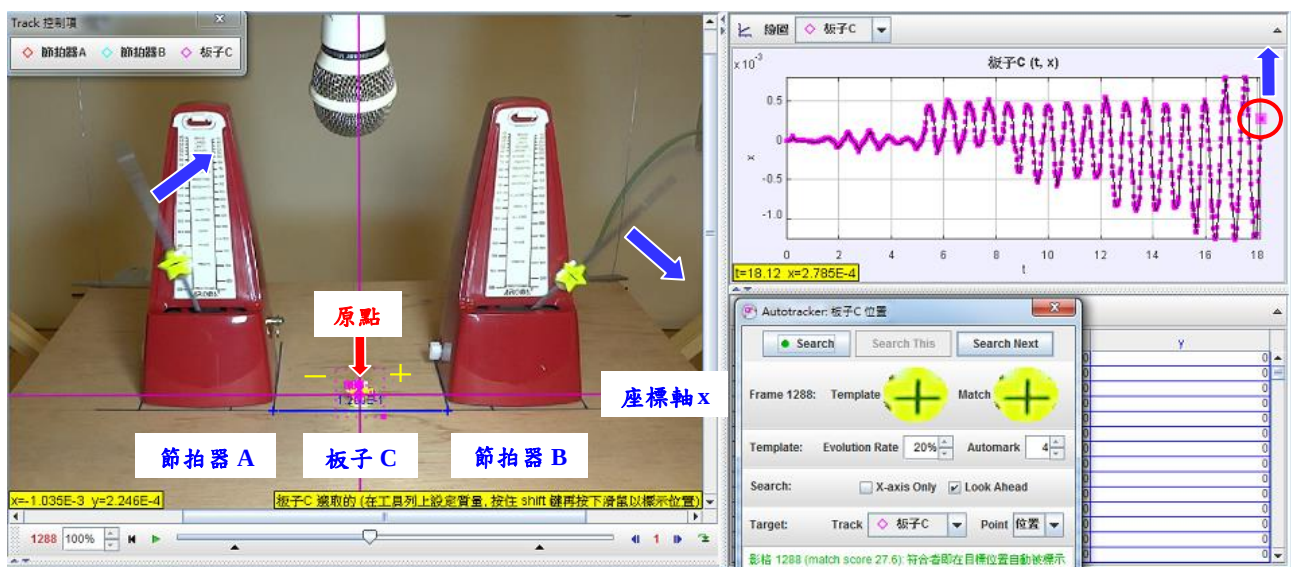


軟木塞簽字筆  
固定器

2. 再以軟木塞製作簽字筆固定器，以黏膠固定在板子下。這個裝置是利用簽字筆隨板子的晃動，將軌跡畫在記錄器的方格紙上，進行實際觀察。

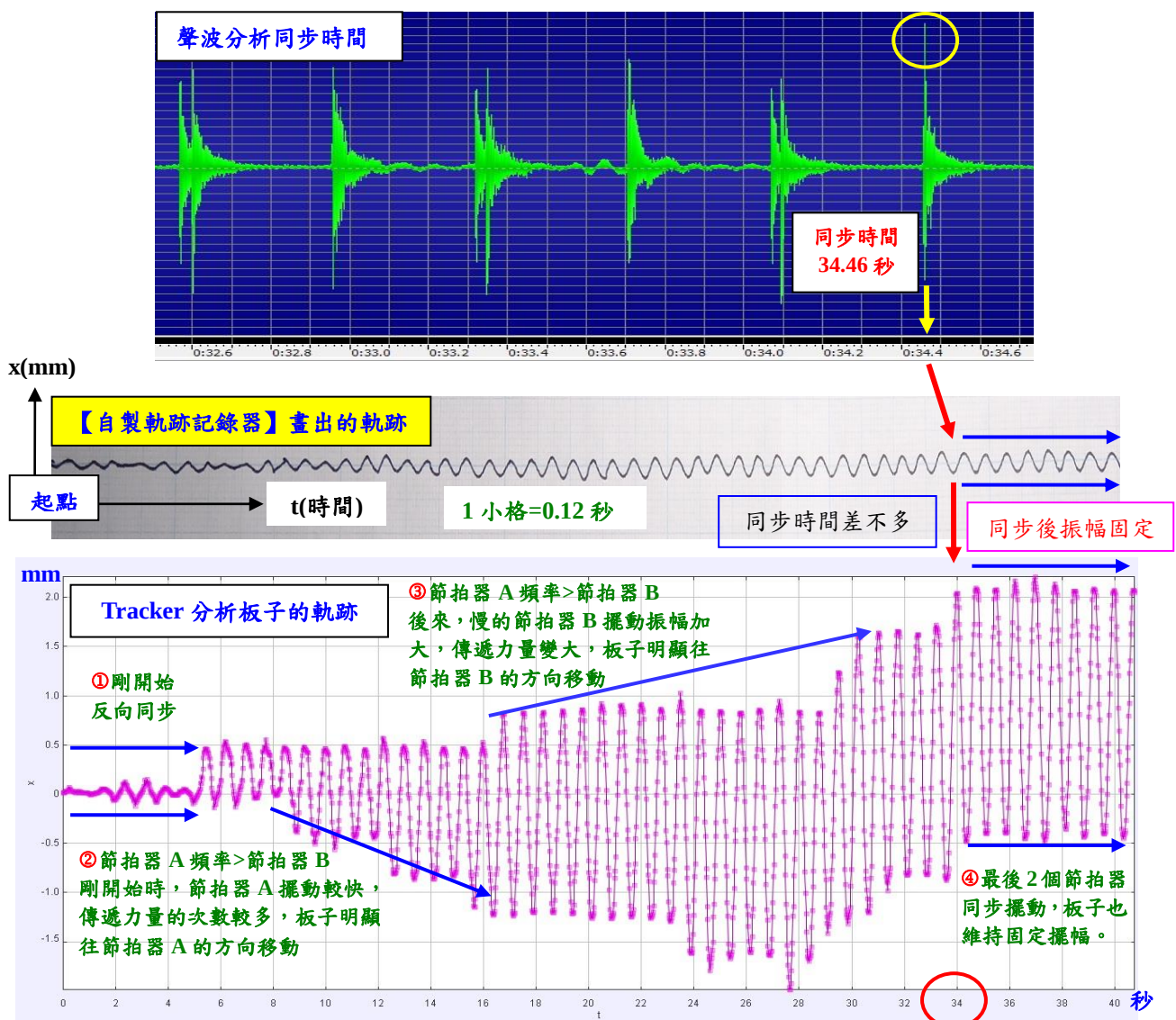


3. 由於板子晃動幅度很小(5mm 以內)，軌跡記錄器畫出的板子軌跡不容易判讀，為了更清楚了解節拍器同步過程板子的運動軌跡，我們再多使用 Tracker 軟體分析。為了精確分析軌跡，我們在節拍器及板子都黏上畫十字型的亮光貼紙。



## (二) 實驗結果

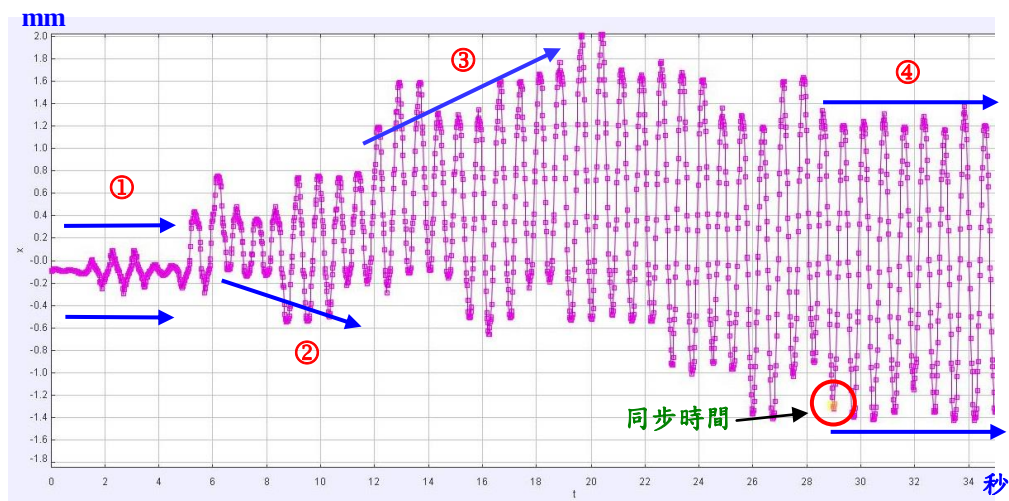
以下為 50cm\*40cm\*5mm 厚度之夾板，27cm 鐵線吊線，節拍器頻率 160bpm，間距 12cm，分別以聲波、自製軌跡記錄器、軌跡分析軟體在節拍器同步過程所得到的板子運動軌跡圖。



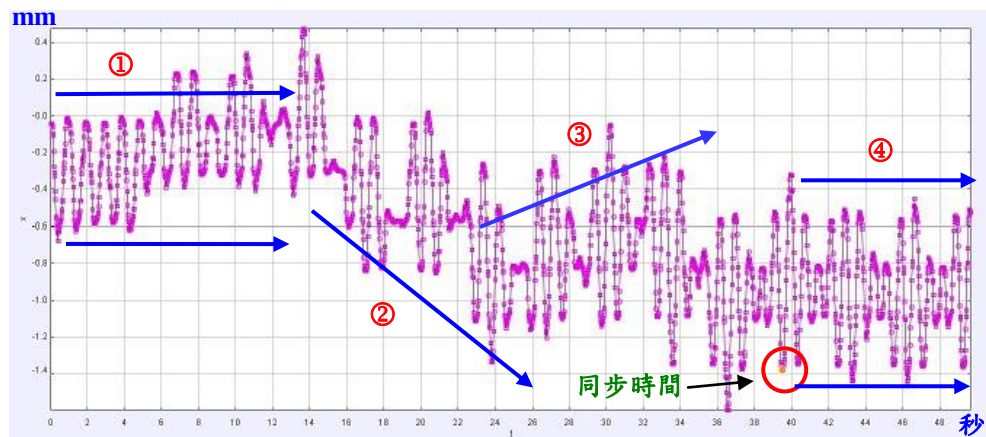
### (三) 實驗討論

1. 一開始 2 個節拍器反向同步，板子軌跡維持在中間左右。由於節拍器 A 頻率>節拍器 B，剛開始時，節拍器 A 擺動較快，傳遞力量次數較多，板子明顯往節拍器 A 方向移動。後來，慢的節拍器 B 擺動振幅加大，傳遞力量變大，板子明顯往節拍器 B 方向移動。同步後，板子維持一定擺幅，而且 2 個節拍器同步擺動，板子的振幅也較同步前來得大。也就是，板子晃動幅度，是 2 個快慢的節拍器，彼此作用力互相抵消或相加的效果所造成。
2. 我們後來就 2 個節拍器的其他情況，進行軌跡實驗與分析，也發現相同的結果(以下實驗吊線為 27cm 鐵線，節拍器頻率 160bpm)：

(1) 表面材質: 在 50cm\*40cm\*5mm 厚度之夾板上，夾持書法墊布，節拍器擺放間距 12cm。



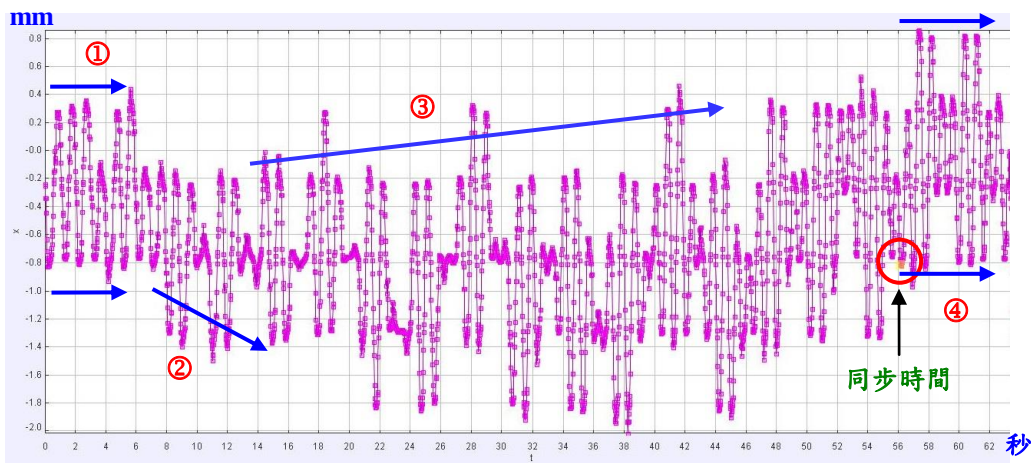
(2) 節拍器擺放間距 24cm: 在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，將 2 個節拍器之間的擺放間距調為 24cm。分析木心板的軌跡，發現隔一段時間都有一小段板子幾乎不動的情況，推論是木心板(1.9kg)比夾板(685g)較重，2 個節拍器產生力量抵消後，對木心板的趨動能力變弱的緣故，即使在同步後也有相同的現象。



(3) 吊點 10cm: 在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，距離板子邊緣 10cm 的位置固定吊線。2 個節拍器擺放間距 12cm。



(4) 節拍器間距中心偏移 9cm：在 80cm\*40cm\*1.8cm 木心板上，節拍器間距 12cm，然後將間距中心點往一側(左移) 9cm。可以注意到板子軌跡幾乎在原點以下，代表板子往左側 (-x)移動，這是因為整個節拍器重心已往左偏移的緣故。



## 陸、討論

### 一、從【研究一】節拍器頻率實驗發現

(一) 節拍器隨著頻率增加，同步所需的時間就會越短。

### 二、從【研究二】吊線材質、線徑與長度實驗發現

(一) 當吊線材質為紗線及釣線，或吊線線徑越細時，板子比較無法穩定在左右的方向晃動，節拍器擺錘的力量傳遞較不穩定，故同步所需的時間較長。

(二) 以線材懸吊板子時，板子與吊線系統就像單擺，吊線加長時，板子左右晃動週期加大，使節拍器相互作用次數減少，加長同步所需的時間。故吊線越長，同步所需時間越久。

### 三、從【研究三】節拍器擺放位置實驗發現

(一) 節拍器間距加大，使節拍器擺錘擺動產生的作用力，因為越靠近吊線的固定點(支點)，對板子產生的力矩變小，故板子不易晃動的情況下，節拍器彼此相互作用的時間拉長，導致達到同步所需時間增加。

- (二) 節拍器間距的中心為 2 個節拍器的重心位置，當重心往一邊偏移時，作用在板子上的重力不平均，給板子的外力加大，板子會明顯晃動，使得節拍器彼此相互作用的時間拉長，達到同步所需時間增加。

#### 四、從【研究四】吊線固定位置實驗發現

- (一) 吊線的位置越往板子中心靠近時，則吊線的固定點(支點)往節拍器靠近，節拍器擺錘擺動產生的作用力，對板子產生的力矩變小，故板子不易晃動的情況下，節拍器彼此相互作用的時間也相對拉長，使同步的時間增加。

#### 五、從【研究五】板子的重量與厚度實驗發現

- (一) 板子重量越重時，由於節拍器擺錘擺動產生的作用力沒有改變，因此較不容易趨動更重的板子，使得節拍器彼此相互作用的時間拉長，同步的時間增加。
- (二) 當兩個重量相同厚度不同的板子，並不會影響節拍器達到同步的時間。

#### 六、從【研究六】板子材質實驗發現

- (一) 板子表面材質摩擦力越大，節拍器同步所花的時間越長。
- (二) 板子表面接觸材質的摩擦力越大，會抵消節拍器擺錘擺動對板子產生的作用力，使得節拍器之間相互作用減少，導致同步的時間增加，對我們來說，是此次實驗的一個大發現。
- (三) 從「壓克力+花布」與「夾板+配重+花布」的實驗，得知板子材質不影響同步的時間。

#### 七、從【研究七】吊線和板子夾角實驗發現

- (一) 當吊線和板子間的夾角由 90 度減少至 60 度時，板子加大晃動幅度，而頻率低的節拍器會大幅度的擺動，追上頻率高的節拍器，因此節拍器同步時間加快。
- (二) 當夾角=55 度時，節拍器無法呈現穩定反向或同向同步，推論 55 度是同向同步到反向同步的過渡階段。當角度由 50 度往 30 度減少時，節拍器反向同步時間明顯增加，推論是角度越小，吊線受力的水平分力越大，讓板子上下晃動程度增加，而使同步時間加長。

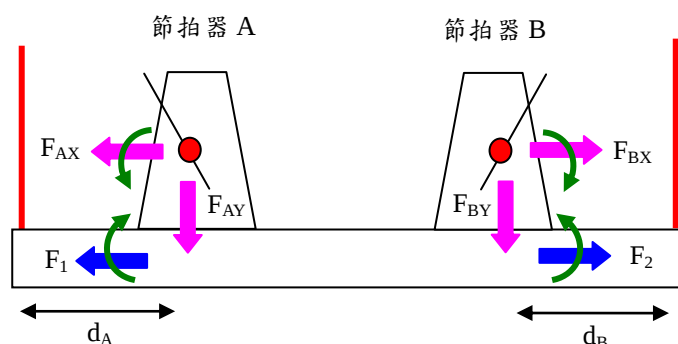
#### 八、從【研究八】節拍器數量實驗發現

- (一) 若以橫列的方式擺放節拍器，當節拍器數量增加後，由於最靠兩側的節拍器彼此間距變大，會使節拍器達到同步的時間相對增加。
- (二) 當節拍器排成前後列，且前後列節拍器間距都相同，由於前排的節拍器會與後排的節拍器相互作用，會影響節拍器達到同步的時間，當然這其中還需考慮節拍器撥法的因素。

#### 九、節拍器同步的運作原理及【研究九】軌跡應證說明如下：

- (一) 由以上各種的研究結果，以及透過【研究九】的軌跡實驗，我們可以總結歸納節拍器同步的運作原理為：當擺錘來回擺動時，會對底下的板子產生一個反作用力(如下圖)，如：節拍器 A 擺錘往左產生逆時針的力矩時，板子為了力矩平衡，同時產生一個順時針的力

矩，此力矩則產生向左的反作用力  $F_1$ ，而影響到節拍器 B 擺錘的擺動；這時節拍器 B 擺錘本身的擺動，也同樣使板子產生另一個反作用力  $F_2$ ，影響到節拍器 A 擺錘的擺動，就這樣兩個節拍器擺錘來回擺動，並透過板子產生相互作用，直到兩個節拍器擺錘達到同樣的擺幅為止，這時就是我們看的節拍器「同步」現象。



(二) 當擺錘經由節拍器對板子施加作用力時，節拍器與板子間的接觸表面摩擦力，就會抵消擺錘來回擺動對板子產生的反作用力，所以達到同步的時間會增加。

## 柒、結論

- 一、影響節拍器達到同步的因素有：節拍器因素、吊線因素、板子因素。
- 二、節拍器因素：節拍器越多、頻率越低、擺放間距越大、間距中心偏移越多，都會讓節拍器同步的時間增加。而且多個節拍器不同撥法、擺放形狀都會影響同步的時間。
- 三、吊線因素：吊線越長、越細、吊線材質較軟、固定位置越靠近板子中心、與板子夾角越大，也會讓節拍器同向同步時間增加，但從 50 度角減少時開始產生反向同步的現象。
- 四、板子因素：板子越重、表面材質摩擦力越大，會讓節拍器同步時間會增加，但板子厚度及材質並不會影響節拍器同步時間。
- 五、在本次科展中，我們利用自製的節拍器同步裝置架以及軌跡記錄器，成功觀測影響節拍器同步因素的變因，並探討同步過程的運動模式，而且訂定實驗的起始條件，使實驗數據能較準確反應各項因素的變化情形。
- 六、透過探討影響節拍器同步的因素，使我們對節拍器在彼此相互的耦合作用有進一步的認識與定量分析，也提供了一個研究節拍器耦合作用的實驗裝置及研究架構。

## 捌、參考資料

1. 台灣 Wiki 「同步」：<http://www.twwiki.com/wiki/%E5%90%8C%E6%AD%A5>。
2. 維基百科：「擺」<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%93%BA>
3. 國立中央大學物理演示實驗：擺的同步現象  
<http://demo.phy.tw/experiments/dynamics/synchronization/>

## 【評語】 080103

時間掌控良好，實驗設計精巧，利用現代科技能自行設計製軌跡紀錄器，來記錄並分析實驗軌跡。