

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

第三名

080114

懸「移」浮現—聲懸浮變因對懸浮效果之研究

學校名稱：國立臺中教育大學附設實驗國民小學

作者：	指導老師：
小六 劉晉芸	簡辛如
小五 賴姮妤	黃尚偉
小五 謝沂勳	
小五 郭芷彤	
小五 林知謙	

關鍵詞：聲懸浮、反射板、薄片懸浮

摘要

我們從網路發現超音波居然能讓保麗龍粒懸浮在空中！對**聲懸浮**產生興趣後，我們自製能調整高度的檢測裝置，進行聲懸浮**變因**和**移動**的探討。

我們歸納最適合 **MiniLev 聲懸浮裝置**的換能器是**上 T 下 R 頻率 40 kHz、直徑 16mm、開放型、收發分體**，最佳懸浮高度為 **15mm**，第二節點承載效果最佳。當高度改變，**新節點**是以「**上下交替**」方式增加，造成保麗龍粒上升距離為拉高高度的一半。

我們發現**焦距 15cm 凹透鏡**適合當**反射板**，防水且懸浮效果更佳，**可取代不防水的換能器 R**。**薄片**適合當懸浮物，懸浮穩定且因「**下大上小的順時針螺旋形力道**」造成**自動旋轉效果**。**色紙**經手工或**雷射雕刻機**設計與切割，能製作**可懸浮與旋轉**的美麗造型，藉由**控制高度**還能**改變轉速**，是值得推廣的科普活動！

壹、研究動機

「**西藏的喇嘛居然使用聲音就讓石塊飛到高空**！」（圖 1）」我們在網路上看到一則有趣的古老軼事（參考文獻 1）！聲音真的能讓物體浮起來嗎？！我們針對這個可能性在網路上搜尋，結果找到「**聲懸浮**」實驗！

「聲懸浮」是使用**能發出超音波的換能器**，讓保麗龍粒懸浮在空中。聲懸浮雖然沒辦法浮起石塊，但我們還是對於這個現象感到驚奇。經過簡單測試後，我們發現「聲懸浮」可以懸浮的保麗龍粒比想像中還多很多（圖 2）！甚至還會讓保麗龍碎片產生旋轉（圖 3）、移動等現象。

我們在**五年級自然課「聲音和樂器」**學到聲音的特性，沒想到聲音除了振動，還有那麼多種變化和應用。我們決定深入研究聲懸浮，希望**瞭解聲懸浮的特性**，進而**找到聲懸浮更多的可能性**，希望能夠應用在生活及自然課的教學中。

貳、研究目的

- 一、研究聲懸浮的各種變因與最佳裝置效果。
- 二、分析換能器移動對聲懸浮產生的影響。
- 三、測試反射板取代換能器的可能性與效果。
- 四、研發自創懸浮物的可能性與玩法。

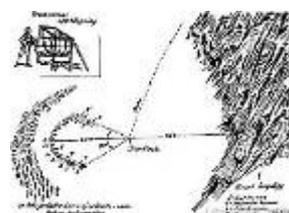


圖 1：西藏喇嘛以樂器移動石塊的軼事繪圖



圖 2：居然可以懸浮 36 顆保麗龍粒！

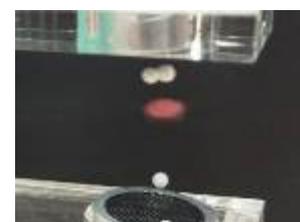
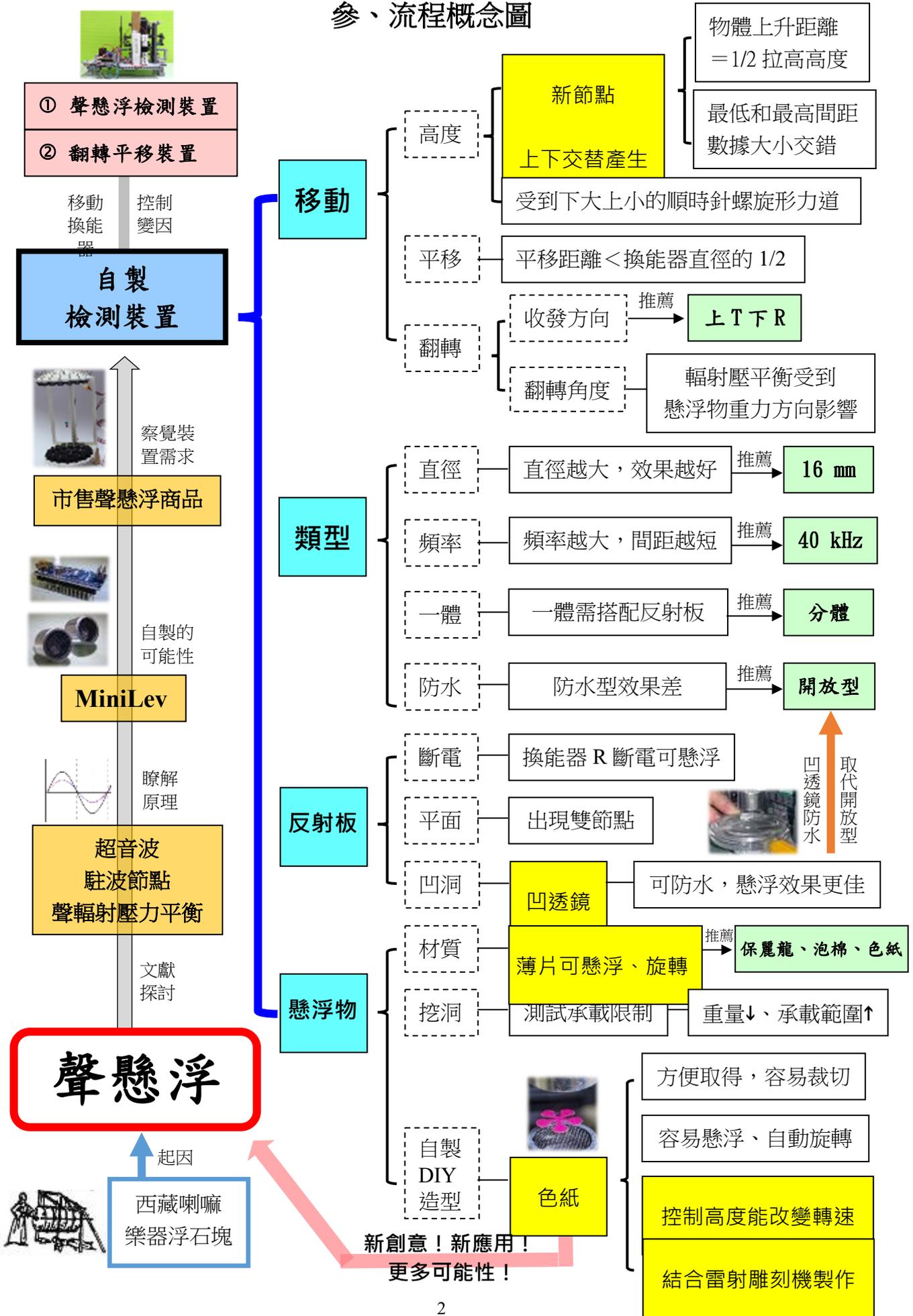


圖 3：紅色部分為保麗龍碎片旋轉的軌跡。

參、流程概念圖



肆、文獻探討

一、西藏喇嘛樂器浮石塊軼事（請見參考文獻 1）：

1939 年瑞典醫生 Jarl 到西藏治療喇嘛。他在居住的修道院，看到一場驚奇的音樂會。喇嘛們正在高處懸崖邊蓋石牆，他們移動大石塊的方法，是將 13 個鼓和 6 個喇叭排列成扇形，樂器都對準放在圓心的石板，石板上放著要移動的大石塊。每一件樂器後面有一排喇嘛，喇嘛開始唱誦禱文及演奏樂器，慢慢地增加聲音節奏。隨著鼓的速度和噪音的增加，大石塊開始搖擺和上升，大石塊經過三分鐘起飛到 250 公尺高，降落在高處懸崖！喇嘛們用這種方法，在 500 公尺長，250 公尺高的拋物線飛行軌道上，每小時運送 5~6 塊大石塊。

Jarl 對於用聲音移動石塊這件事感到驚奇，為了取信大眾，還拍攝了二部影片。但這二部影片被 Jarl 任職的英國科學學會沒收歸檔，再也沒看到。認識 Jarl 的飛航管理員 Henry Kjelson 將這次相關的報告和繪圖記錄在《迷失的技術》一書。

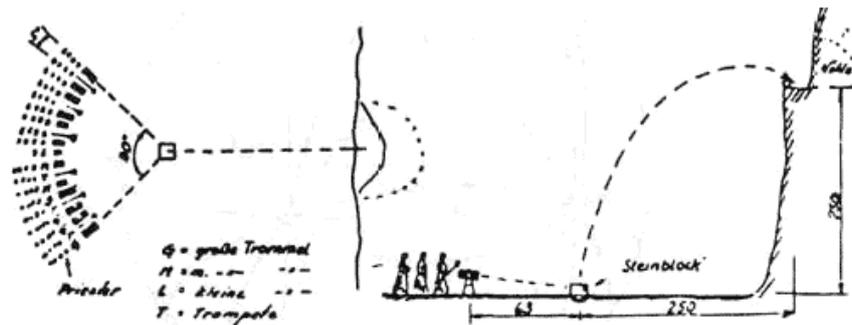


圖 4：Henry Kjelson 書中的素描，左圖為樂器擺放圖，右圖為石塊懸浮的軌跡。

二、聲懸浮原理：

什麼是「聲懸浮」呢？我們嘗試蒐集聲懸浮的相關文獻（請見參考文獻 2~4），整理出「聲懸浮」是藉由超音波產生能夠抵銷物體重力的聲輻射壓力。聲音在空氣中傳播的方式是縱波，會使周圍的空氣分子形成疏密相間的連續波形（請見圖 5）。疏密的空氣分子會有壓力的差異，而產生「聲輻射壓力」（之後簡稱「輻射壓」）。輻射壓能夠推動物體，但想要讓物體懸浮，需要讓物體在各方向受到輻射壓，並達到平衡。

兩個換能器產生的超音波，在適當的距離能夠產生駐波。駐波的特性是節點會靜止不動（請見圖 6），超音波的駐波在節點處輻射壓最小、最穩定，我們稱為「壓力波節點」！

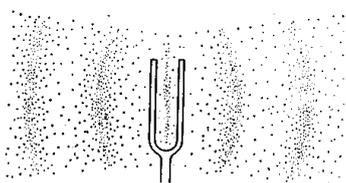


圖 5：聲音是縱波，空氣分子會疏密相間。引自參考文獻 5

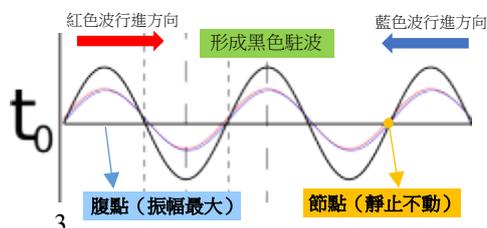


圖 6：駐波（黑色波形）會形成節點和腹點。引自參考文獻 6

壓力波節點的輻射壓是平衡狀態。物體放在壓力波節點，物體重力會被輻射壓抵銷，產生懸浮，就是聲懸浮原理。但物體有重量，所以物體真正懸浮位置會略低於壓力波節點，我們稱這個位置為「承載節點」（見下圖 7）。我們無法觀測壓力波節點，只能藉由保麗龍粒懸浮找到承載節點。承載節點間距與壓力波節點間距大約相等。所以我們決定之後實驗測量「承載節點之間的距離」，命名為「節點間距 d 」（節點間距 d 就是駐波波長，是 $1/2 \lambda$ ）。

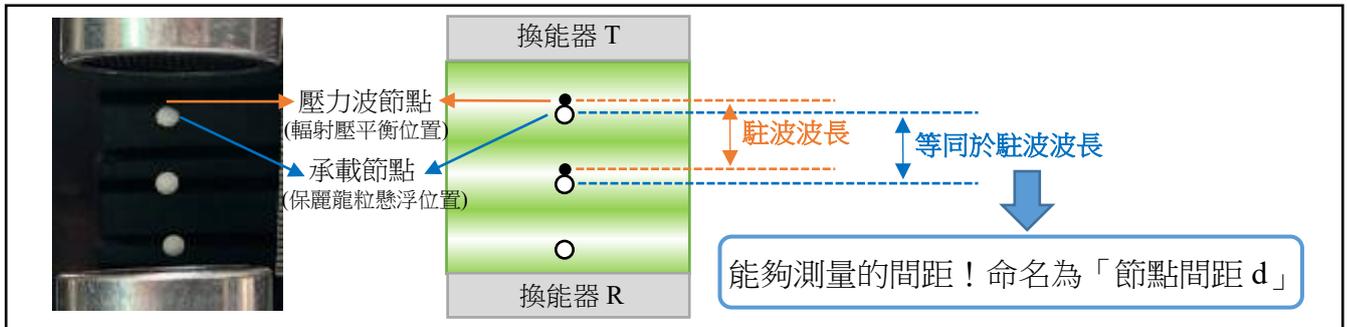


圖 7：承載節點、節點間距 d 的命名與測量。參考自參考文獻 3

三、MiniLev 聲懸浮：

聲懸浮早期只能夠在實驗室進行實驗，因為要使用高壓電，且效果不穩定。後來布里斯託大學的 Asier Marzo 博士發明了 TinyLev，使用換能器和 Arduino 控制板製作出可自行 DIY 的聲懸浮版本（請見參考文獻 4）。但 TinyLev 的製作太過複雜（請見實驗一的市售 C 款，需要 72 顆換能器），且不容易改變變因。我們後來找到 MiniLev（請見參考文獻 7），只用換能器 T 和 R 各一個便能夠製作出懸浮效果。我們同時使用了 Arduino 的 Nano 控制板（控制發聲頻率）及 L298N 驅動板（控制供電與換能器驅動）做為我們裝置的基礎。配置圖如圖 9，Arduino 程式碼為圖 10。

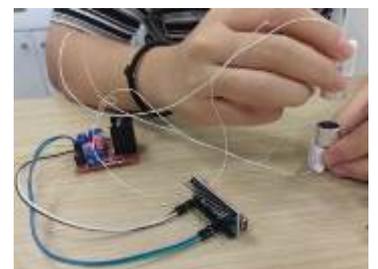


圖 8：根據參考文獻 7 購買材料自行組裝出 MiniLev。

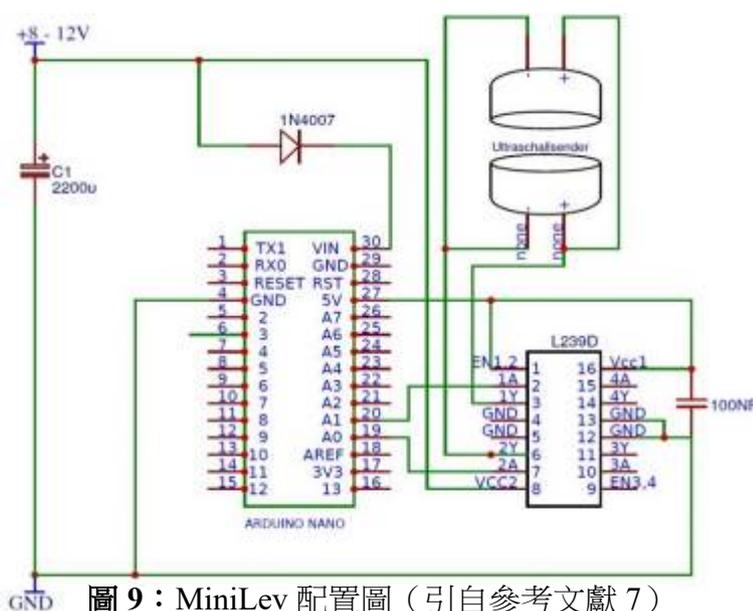


圖 9：MiniLev 配置圖（引自參考文獻 7）

```
byte TP = 0b10101010;
void setup() {
  DDRC = 0b11111111;
  noInterrupts();
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
  OCR1A = 200;
  TCCR1B |= (1 << WGM12);
  TCCR1B |= (1 << CS10);
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
  interrupts();
  ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    PORTC = TP;
    TP = ~TP;
  }
  void loop() {
  }
}
```

圖 10：MiniLev 程式碼（引自參考文獻 7）

伍、實驗裝置設計

我們從「DIY 聲懸浮」網頁學習，以 Arduino 控制板與換能器組裝出可懸浮的聲懸浮實驗裝置。為了能**準確測量換能器各種變因產生的差異**，我們以電子樂高積木，自己設計出**聲懸浮檢測裝置**，不但能固定換能器位置，還能**改變換能器之間的高度**、**替換不同直徑的換能器**。後來更改裝成能夠**平移和翻轉**。同時我們訂出測量的**標準實驗流程**，讓測量更加精準。

一、聲懸浮檢測裝置

測試過市售聲懸浮商品（見實驗一），我們發現市售聲懸浮商品「**裝置結構不穩定且無法調整換能器高度**」。我們以電子樂高積木做底板和支架。中空的底板可讓保麗龍粒直接掉落桌面，不會卡在裝置上。我們還用齒輪、履帶和把手製作出可調整換能器高度的機關，**讓上方換能器能夠改變高度**。經過四代改良，修正了「結構單層會晃、履帶過軟、換能器無法更換、面板電線收納」問題。完成了「**可調整換能器高度、輕鬆更換換能器**」的聲懸浮檢測裝置。

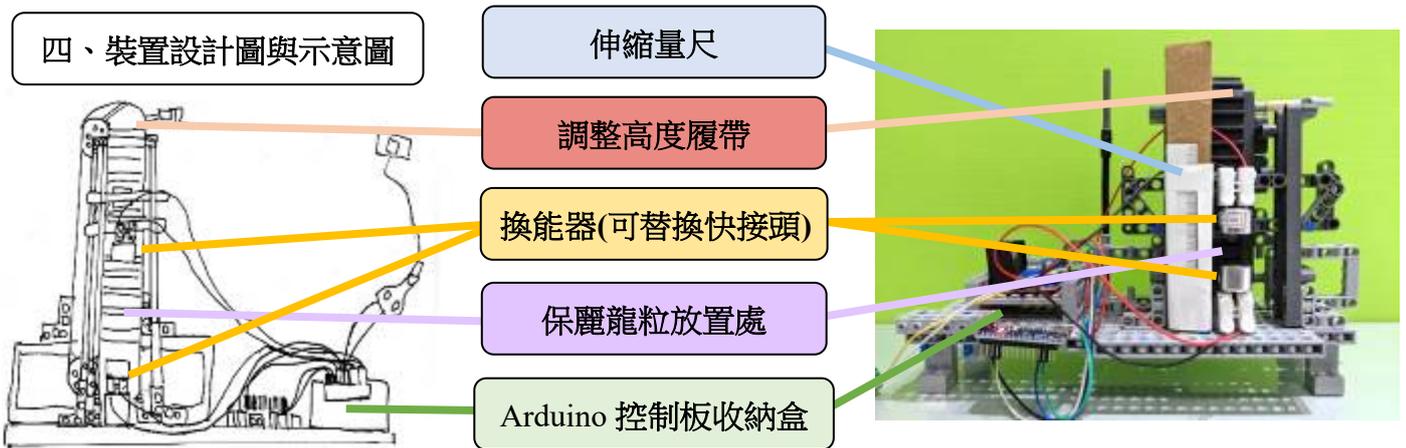
	第一代	第二代	第三代
手持換能器，需要能撐住換能器的支架。	以電子樂高積木製作出可調高的裝置。	改良結構會搖晃，增強成堅固的立體結構	加長履帶，但履帶太軟，導致換能器下垂
			第四代
履帶黏住橫桿，積木夾住橫桿，避免前傾	換能器快接頭與插栓結合，方便插入橫桿	以積木製作小盒子收納 L298N 面板和電線	完成能夠調整高度的聲懸浮檢測裝置。

二、伸縮量尺

為了能精準的測量保麗龍粒的間距，我們以紙板和卡紙設計能夠調整高度的直尺。下方黏貼吸管，可方便將尺插入插栓，固定在裝置旁。	

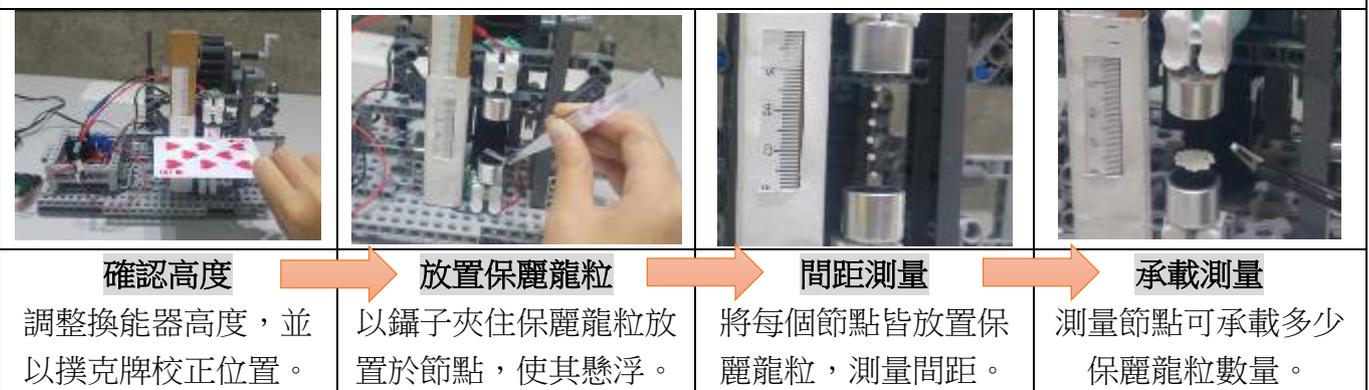
三、鱷魚替換夾

第一代	第二代
市售快接頭只能夾直徑 16mm 換能器。為了檢測不同直徑大小換能器，我們以鱷魚夾設計出可夾住不同直徑換能器的鱷魚替換夾。	



五、「聲懸浮檢測」標準檢測流程

1. **確認高度**：將上方換能器調整至實驗高度，以撲克牌確認量尺與換能器位置是否正確。
2. **間距測量**：以鑷子夾住 1mm 保麗龍粒，在每個節點處放置一顆保麗龍粒。以手機拍攝保麗龍粒的位置，將照片放大後，精準的測量每個節點間距 (d)。
3. **承載測量**：同一個節點放置保麗龍粒後會互相吸引在一起，我們以這個特性進行節點承載保麗龍粒數量的測量。在測量的節點位置不斷放置 1mm 保麗龍粒，直到該節點的保麗龍粒整個垮掉掉落，計算該節點能承載的保麗龍粒數量。同一個節點測三次，取平均。



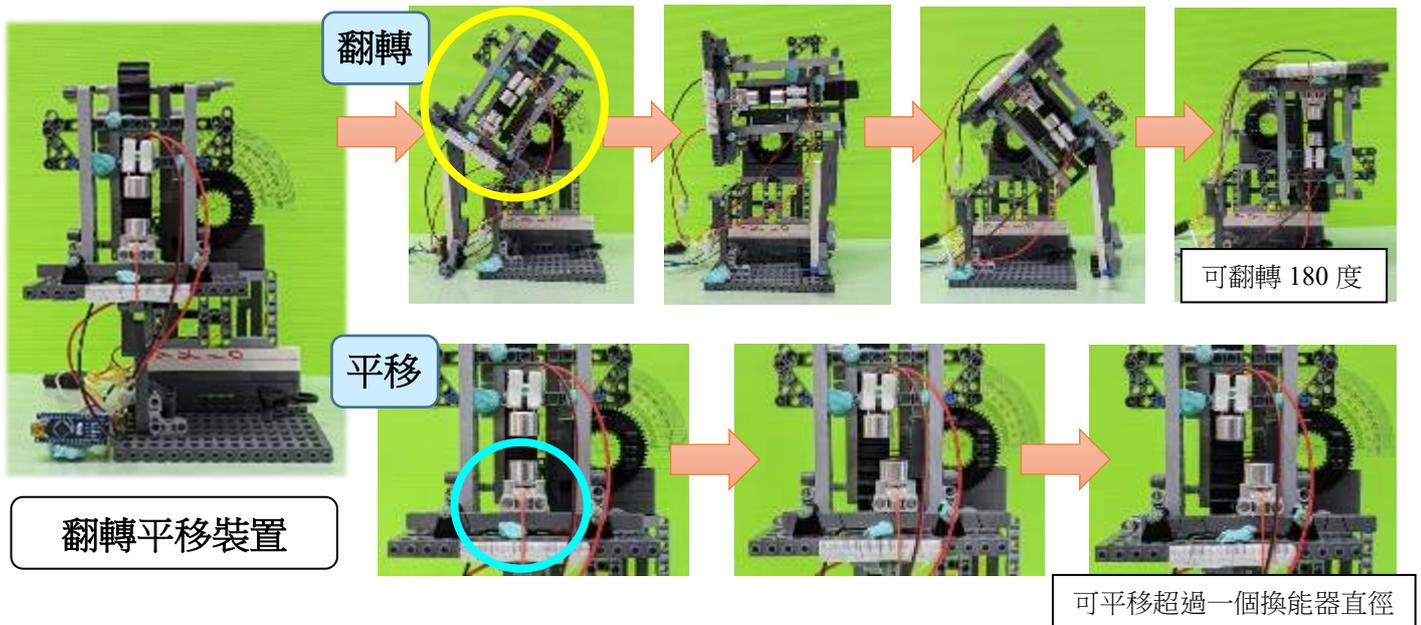
六、自製保麗龍切割器

為了測試薄片的懸浮效果，我們需要將保麗龍或泡棉切成薄片。一開始使用美工刀切割，但厚薄會不一。使用市售保麗龍切割器的範圍太小。於是我們購買鎳鉻絲自行製作保麗龍切割器。



七、翻轉平移裝置

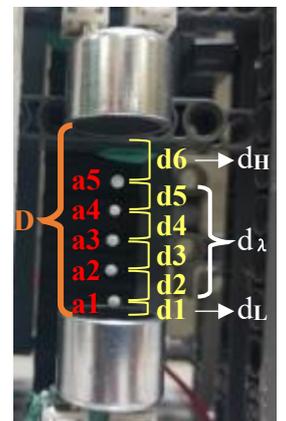
為了測試換能器翻轉和平移的效果。我們將聲懸浮檢測裝置進一步的改裝。除了原本上方換能器能夠「上下調高」外，還增加了「翻轉」和「平移」。「翻轉」是指上下換能器同時做轉動，最多可翻轉 180 度。藉由後方量角器可觀察轉動角度，再用支架固定住實驗角度。「平移」是指下方換能器能夠左右移動，並藉由指針和量尺觀察平移的距離。



八、檢測命名

為了能夠方便稱呼測量的位置點，我們對測量的位置和距離作以下命名：

1. **換能器高度 (D)**：換能器與換能器之間的距離，稱為「換能器高度」(D)。
2. **節點 (a)**：每個能夠懸浮保麗龍粒的位置點稱為「節點」(a)，由下而上做數字編號 (a1、a2、a3...)。
3. **間距 (d)**：節點與節點之間的距離稱為「間距」(d)，測量時以保麗龍粒中心點與下一顆保麗龍粒中心點之間的距離為「間距」。由下而上做數字編號 (d1、d2、d3...)。根據「肆、文獻探討 二、聲懸浮原理」可知



「保麗龍粒之間的距離是駐波波長的節點間距」。因此我們將間距分成三類做分析：

- (1) **最低間距 (d_L)**：就是第一間距 (d1)，是下方換能器到第一顆保麗龍粒的距離。
- (2) **平均間距 (d_λ)**：將保麗龍粒之間間距 (d2~d5) 加總計算平均，為平均間距。因為保麗龍粒之間間距是駐波波長 (1/2 λ) 的長度，因此命名為 d_λ。
- (3) **最高間距 (d_H)**：最高那一顆保麗龍粒到上方換能器的距離 (圖中示範為 d6)。

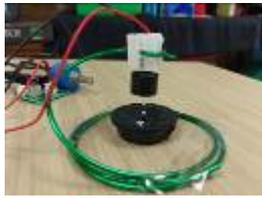
陸、研究過程及結果

實驗一、市售聲懸浮商品：

(一)、研究方法：

我們決定從網路搜尋與購買市售的聲懸浮裝置來認識聲懸浮的構造。我們發現網路上有三種聲懸浮商品。我們買回來加以組裝，測試裝置的性質，分析記錄優缺點。最後以分析的優、缺點，自製出我們所需的聲懸浮檢測裝置！並與市售聲懸浮商品進行比較。

(二)、實驗數據：「市售聲懸浮商品」與「我們自製裝置」之分析：

商品命名	A 款	B 款	C 款	自製檢測裝置
外型照片				
電路板	電焊控制板 (附可調電阻)	Arduino Nano 控制板、L298N 馬達驅動模組	Arduino Nano 控制板、L298N 馬達驅動模組	Arduino Nano 控制板、L298N 馬達驅動模組
換能器	1 顆 40kHz Φ 16mm 超音波喇叭(反射板)	2 顆 40kHz Φ 16mm	72 顆 40kHz Φ 10mm	2 顆 40kHz Φ 16mm
支撐結構	粗鋁線	壓克力盒	3D 列印模子	電子樂高積木
結構組裝狀況	零件需自己組裝，粗鋁線不容易固定高度，會搖動。	已組裝完成，但開箱發現壓克力盒垮掉，需自行黏貼。	需使用焊接進行組裝，難度太高，放棄組裝。	可任意修改和組裝，可調整換能器間距。
操作狀況	調整電阻改變電壓。懸浮效果弱，有雜音、懸浮不穩定	懸浮效果還好，但電線過細易斷，造成無法懸浮。	放棄測試，但根據網路資料，效果應該很好。	懸浮效果不錯，需不斷修改裝置，達到最穩固的結構
價格	900	752	1500	550
優點	1. 可改變高度 2. 可替換換能器 3. 只要單顆換能器 4. 組裝快速	1. 電路容易仿製 2. 不需組裝 3. 有收納電路板	1. 懸浮效果佳 2. 使用多顆小換能器增加效果 3. 高度距離大	1. 高度可以調整 2. 價格最低 3. 可隨意修改 4. 懸浮效果好
缺點	1. 不易懸浮 2. 高度不穩定 3. 每次測試要重新調整電阻 4. 無法仿製	1. 無法調整高度 2. 無法換換能器 3. 結構不穩固 4. 電線太細，容易接觸不良	1. 組裝難度高 2. 無法調整高度 3. 無法換換能器 4. 價格高	1. 需自行組裝

(三)、測試結果：

1. 測試過市售懸浮器商品 A、B、C 款，我們整理出未來的檢測裝置要有以下需求：
(1) 電路板能夠自行組裝；(2) 要能**調整換能器高度**；(3) 要能**更換換能器**；
(4) 收與發換能器各只用一顆；(5) 結構穩定；(6) 可修改調整結構。
2. 我們以上述的需求進行研發組裝，以容易組裝的電子樂高零件，經歷了四代的改良，自製出「**聲懸浮檢測裝置**」(見伍、實驗裝置設計)。擁有「**能夠調整換能器高度、能更換不同直徑大小的換能器、結構穩定、價格便宜**」等優點。

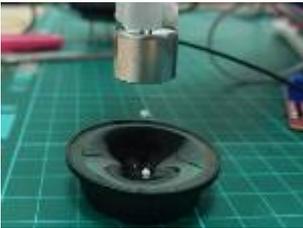


圖 11：A 款是單顆換能器搭配反射板。



圖 12：A 款控制板是電焊組裝，無法仿製。



圖 13：B 款換能器高度固定，無法調整。



圖 14：C 款換能器數量很多，不易組裝。
(引自參考文獻 4)

實驗二、換能器高度：

(一)、研究動機：

換能器移動後還能懸浮嗎？！我們先針對換能器高度進行研究！研究**換能器高度 (D)** 對保麗龍粒懸浮效果與節點數量的影響，並希望找到**懸浮效果最好的換能器高度**。

(二)、研究方法：

1. 網路 DIY 教學採用的是頻率 40 kHz 直徑 16mm 的換能器。因為 Arduino 超音波感應器使用的也是 40 kHz 直徑 16mm 換能器。我們決定換能器高度實驗檢測使用**頻率 40 kHz 直徑 16mm 換能器**。(接下來的說明，**直徑都以 Φ 符號替代**)
2. 將 40 kHz Φ 16mm 收發分體換能器裝在聲懸浮檢測裝置上(發(T)在上、收(R)在下)。
3. **節點間距**：換能器高度調為 10mm，將直徑 2mm 保麗龍粒放置在節點上，直到懸浮。將所有節點都放上保麗龍粒後照相，以照片測量節點間距(d)。重複相同步驟測量 D 為 15~35mm 的節點間距。
4. **承載數量**：在高度 10mm 第一節點(a1) 不斷放入直徑 2mm 保麗龍粒，直到 a1 無法再負荷保麗龍粒，紀錄能承載保麗龍粒數量。測三次取平均。測試所有 D 和節點承載量。

(三)、實驗數據：「換能器高度」檢測數據 (40 kHz、Φ16mm)：

換能器高度(D)		10 mm		15 mm		20 mm		25 mm		30 mm		35 mm	
節點數		2		3		4		5		6		沒有	
節點位置	節點間距	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)
第 6 節點 (a6)	第 7 間距 (d7)										4.5	無法放置	無法放置
	第 6 間距 (d6)								5.3				
第 5 節點 (a5)	第 5 間距 (d5)							7.0	3.0	7.6	5.5		
	第 4 間距 (d4)					8.3	4.0	6.0	5.0	9.6	5.0		
第 3 節點 (a3)	第 3 間距 (d3)			11.6	2.5	9.3	4.5	11.6	4.0	9.0	4.0		
	第 2 間距 (d2)	4.3	3.0	29.6	5.0	22.3	4.5	18.2	4.5	17.6	4.5		
第 1 節點 (a1)	第 1 間距 (d1)	13.3	4.5	14.0	4.0	13.0	4.5	4.0	4.5	12.3	4.5		
			2.5		3.5		2.5		4.0		3.0		
間距 (mm)	最高(dH)	3.0	2.5	4.0	3.0	4.5	無						
	平均(dλ)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.7							
	最低(dL)	2.5	3.5	2.5	4.0	3.0							
承載 (個)	平均	8.8	18.4	13.2	9.3	10.2	無						
	最大值	13.3 (a1)	29.6 (a2)	22.3 (a2)	18.2 (a2)	17.6 (a2)							

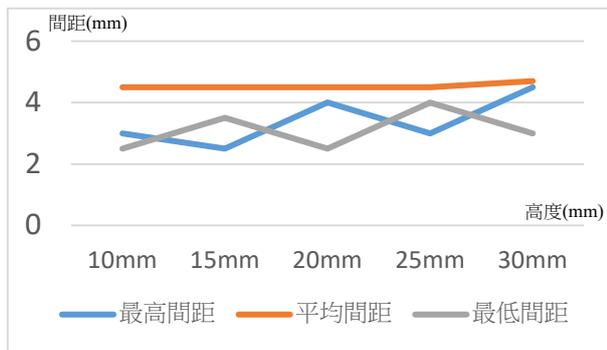


表 1：換能器高度對節點間距折線圖

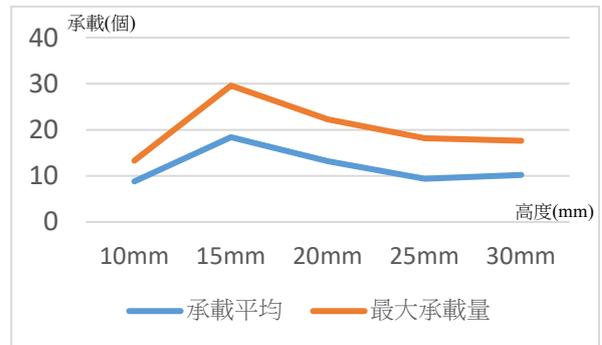


表 2：換能器高度對承載數量折線圖

(四)、研究結果討論：

- 40 kHz、直徑 16mm 換能器在高度 10~30mm 都能懸浮保麗龍粒，超過 30mm 無法懸浮
- 換能器高度越高，產生節點數越多。高度每增加 5mm，會增加一個新節點。
- 由表 1 可知 40 kHz 的平均間距(dλ) (第二間距~倒數第二間距)，在不同高度都維持約 4.5mm。表示換能器調整不同高度，不會影響節點間距 (平均間距(dλ))。
- 由表 2 可知換能器承載保麗龍粒數量以高度 15mm 效果最佳，高度越大或越小，承載量

都會下降。**最大承載量大多在第二節點 (a2)**，隨著節點位置越高，承載數越差。

- 由表 1 可知「最低間距(d_L)與最高間距(d_H)」和「平均間距(d_λ) (約 4.5mm)」不一樣長。**最低間距(d_L)隨著高度變大，數據會大小交錯的變化** (在高度 10、20、30mm 為間距小，在 15、25mm 為間距大)。**最高間距(d_H)的變化與最低間距(d_L)剛好相反，但也呈現大小交錯的變化** (在高度 10、20、30mm 為間距大，在 15、25mm 為間距小)。
- 頻率 40 kHz、直徑 16mm 換能器推薦使用**高度 15mm**，因為節點穩定、承載效果佳。

實驗三、換能器收發方向：

(一)、研究歷程：

換能器分成**發射器 (T)**和**接收器 (R)**兩種。正常狀態是換能器 T 放在上方，R 放在下方做檢測 (上 T 下 R) (如實驗二)。但，如果將換能器 T 和 R 位置對調 (**上 R 下 T**)，懸浮效果是否會有影響呢？我們決定進行上 R 下 T 換能器高度測試，**再與實驗二的數據比較**。

(二)、實驗數據：「換能器上 R 下 T」檢測數據 (40 kHz、 $\Phi 16\text{mm}$)：

換能器高度(D)		10 mm		15 mm		20 mm		25 mm		30 mm		35 mm			
節點數		2		3		4		5		6		沒有			
節點位置	節點間距	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)	承載 (個)	間距 (mm)		
第 6 節點 (a6)	第 7 間距 (d7)										5.5	無法放置	無法放置		
	第 6 間距 (d6)									5.0	3.5				
第 5 節點 (a5)	第 5 間距 (d5)						3.0	7.0	5.0	13.3	5.0				
	第 4 間距 (d4)				4.0	13.6	4.0	8.3	4.5	34.0	4.0				
第 3 節點 (a3)	第 3 間距 (d3)		3.0	15.0	5.0	24.6	4.5	12.0	4.0	12.0	4.5				
	第 2 間距 (d2)	7.3	4.0	17.3	4.5	20.6	3.5	10.6	5.0	14.0	3.5				
第 1 節點 (a1)	第 1 間距 (d1)	12.3	3.0	14.6	1.5	11.3	4.0	6.0	2.0	10.0	4.0				
	最高(d_H)		3.0		4.0		3.0		5.0		5.5			無	無
間距 (mm)	平均(d_λ)		4.0		4.7		4.0		4.5		4.1				
	最低(d_L)		3.0		1.5		4.0		2.0		4.0				
承載 (個)	平均		9.8		15.5		17.5		6.8		14.7	無	無		
	最大值		12.3 (a1)		17.3 (a2)		24.6 (a3)		12.0 (a3)		34.0 (a4)				

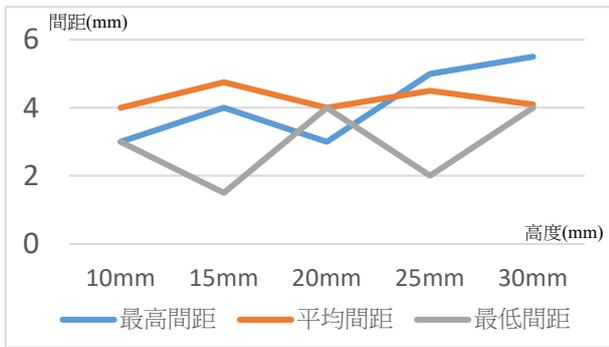


表 3：上 R 下 T 換能器高度對節點間

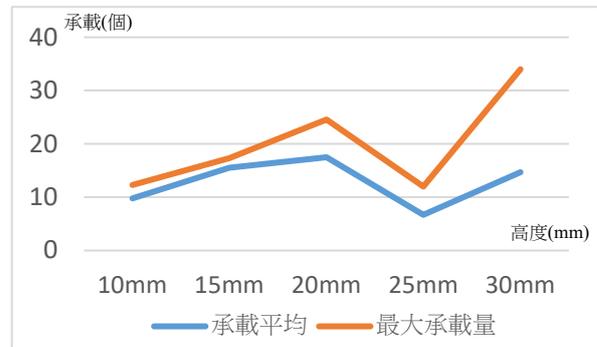


表 4：上 R 下 T 換能器高度對承載數

(三)、研究結果討論：

1. 上 R 下 T 的換能器在**高度 10~30mm** 都能懸浮保麗龍粒，D 超過 30mm 就無法懸浮。
2. 換能器高度越高，產生節點數越多。**高度每增加 5mm，會增加一個節點。**
3. 平均間距(d_{λ}) (從第二間距~倒數第二間距) 數據相似，平均為 4.2mm。
4. **最低間距(d_L)與最高間距(d_H)隨著高度變大，會出現大小交錯的變化。**
5. **承載量最大的節點位置隨著高度(D)越高，節點位置越高(a1→a2 →a3→a3→a4)。**
6. 上 R 下 T 換能器推薦使用高度 20mm，因為節點穩定、承載效果佳。

(四)、上 T 下 R 和上 R 下 T 比較討論：

我們針對上 T 下 R (實驗二) 和上 R 下 T (實驗三) 進行比較，發現以下相同點與相異點：

相同點	相異點	
	上 T 下 R	上 R 下 T
1. 高度 10~30mm 都能懸浮保麗龍粒		
2. 高度超過 30mm 就無法懸浮。		
3. 高度每增加 5mm，會增加一個節點		
4. 平均間距都大約 4mm (表 5)		
5. 最低間距和最高間距的大小不同，隨著高度增加會大小交錯。		
	最佳高度	15mm
	最大承載量位置	大多在 a2
		隨著高度越來越高 (a1→a2 →a3...)
	最低和最高間距	在相同高度時，上 T 下 R 和上 R 下 T 最低與最高間距大小相反 (表 6、7)

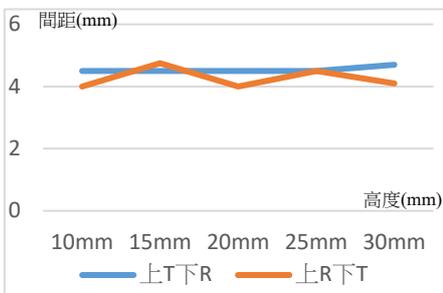


表 5：收發方向對平均間距折線圖

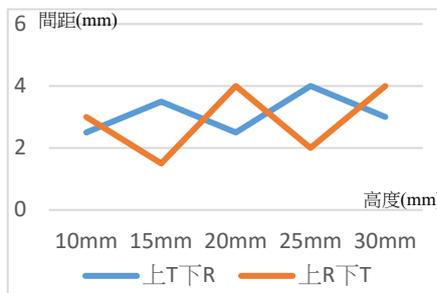


表 6：收發方向對最低間距折線圖

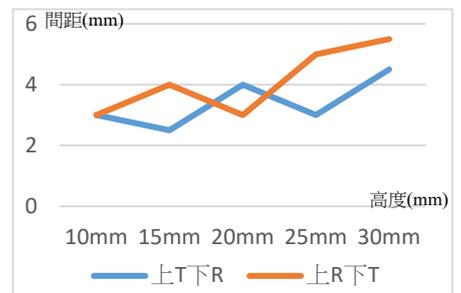


表 7：收發方向對最高間距折線圖

我們比較上 T 下 R 和上 R 下 T，覺得**上 T 下 R 的懸浮效果優於上 R 下 T**！所以我們接下來的換能器變因實驗都以上 T 下 R 擺放換能器。且使用最佳高度 **15mm** 進行實驗比較。

實驗四、高度產生位移：

(一)、研究動機：

在「實驗二、換能器高度」發現當換能器的高度增加，節點會跟著增加！但節點究竟是**如何增加的？**保麗龍粒又會跟著節點移動嗎？我們想知道當不斷抬高換能器高度（D）後，**保麗龍粒會如何移動？**在測試的過程中，發現**保麗龍粒並不是垂直上升，會出現左右、甚至前後移動**，我們決定以**X、Y、Z 軸** 3D 模式紀錄保麗龍粒移動。

(二)、研究方法：

1. **節點移動**：

- (1) 將頻率 40 kHz 直徑 16mm 換能器以上 T 下 R 架設在聲懸浮檢測裝置上。
- (2) 高度設為 10mm，將一顆保麗龍粒放在第一節點(a1)。高度拉高 5mm，觀察保麗龍粒移動到 D=15mm a1~a3 哪個節點。高度再拉高 5mm，觀察保麗龍粒移動到 D=20mm a1~a4 哪個節點。拉高高度直到 D=30mm，紀錄保麗龍粒移動節點位置。
- (3) 將高度 10~30mm 剩餘的每個節點，重複步驟(2)，找到上 T 下 R 的節點改變位置。
- (4) 換能器改成上 R 下 T，進行步驟(2)和(3)，找出上 R 下 T 的節點改變位置。

2. **XYZ 軸位移**：

- (1) 為了紀錄保麗龍粒在 X、Y 軸移動狀況，我們在聲懸浮檢測裝置後面與側面貼上間距 2mm 方格紙。並使用兩台手機分別從正面和側面錄影，觀察保麗龍粒移動位置。
- (2) 將保麗龍粒放在 40 kHz Φ 16mm 上 T 下 R 換能器的 10mm 高度的第二節點(a2)。
- (3) 慢慢的拉高換能器高度（D），以兩台手機錄影保麗龍粒的移動狀況，直到 30mm。
- (4) 從 30mm 高度慢慢減少換能器高度（D），錄製保麗龍粒的移動狀況，直到 10mm。
- (5) 從手機影片紀錄「改變換能器高度（D），保麗龍粒在 X 軸、Y 軸、Z 軸移動位移」，整理成表格，繪製成折線圖。並以 GeoGebra 軟體繪成立體折線圖。



圖 15：後面與側面貼上間距 2mm 方格紙。



圖 16：拉高高度，錄影保麗龍粒的移動位置。



圖 17：播放實驗影片，紀錄移動位置。



圖 18：以 GeoGebra 軟體繪製立體折線圖。

(三)、實驗數據：1. 「節點移動」檢測數據 (40 kHz、Φ16mm)：

(1) 上 T 下 R 節點移動 (同顏色為相同路徑)

高度	10	15	20	25	30
第六節點					a6
第五節點				a5	a5
第四節點			a4	a4	a4
第三節點		a3	a3	a3	a3
第二節點	a2	a2	a2	a2	a2
第一節點	a1	a1	a1	a1	a1

紅色圈圈為新產生節點位置 (上→下→上→下)

(2) 上 R 下 T 節點移動 (同顏色為相同路徑)

高度	10	15	20	25	30
第六節點					a6
第五節點				a5	a5
第四節點			a4	a4	a4
第三節點		a3	a3	a3	a3
第二節點	a2	a2	a2	a2	a2
第一節點	a1	a1	a1	a1	a1

紅色圈圈為新產生節點位置 (下→上→下→上)

2. 「XYZ 軸位移」檢測數據 (40 kHz、Φ16mm)：紅色點 ● 為[出發點]，往上或下移動

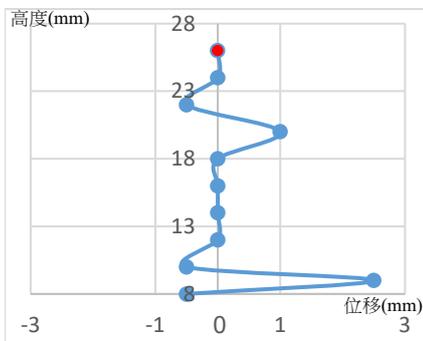


表 8：往下的「X 軸」位移

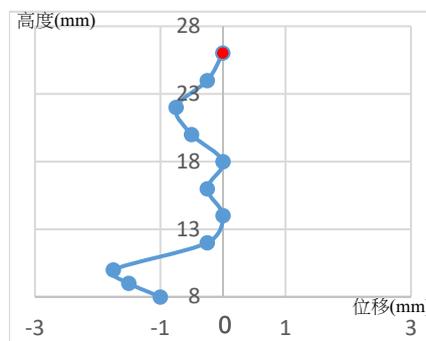


表 9：往下的「Y 軸」位移

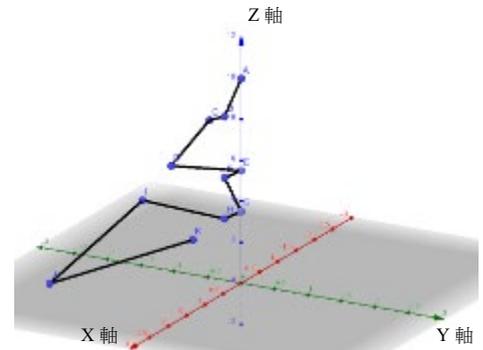


表 10：往下的立體折線圖

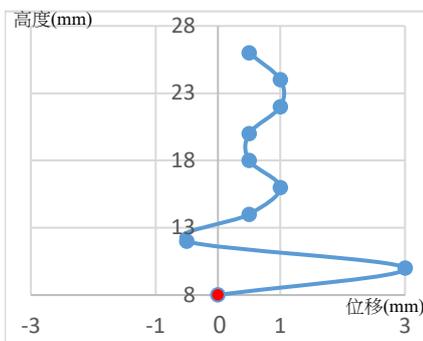


表 11：往上的「X 軸」位移

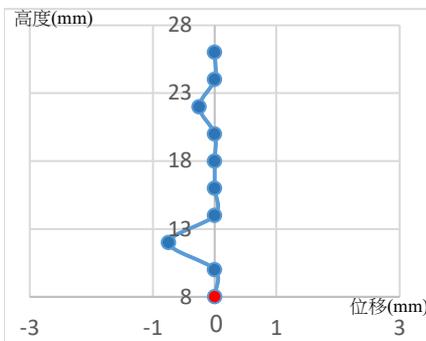


表 12：往上的「Y 軸」位移

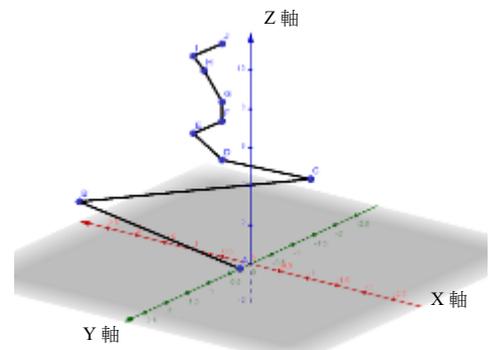


表 13：往上的立體折線圖

(四)、研究結果討論：

1. 當高度增加時，會產生新節點。新節點增加的方式是「上下交替」(上→下→上→下)。
2. 當高度增加時，節點會以階梯式往上升高 (a1→ a1→ a2→ a2→ a3)。當新節點出現在下方，所有節點都會往上移動一個節點位置。新節點出現在上方，節點則不會改變位置。
3. 上 T 下 R 與上 R 下 T 在「節點移動與新節點增加方式」相反。
4. 當高度增加時，保麗龍粒移動軌跡不是直上直下，而是下大上小的順時針螺旋形。

5. 比對實驗二、三的節點高度，推估當換能器高度拉高 20mm (10→30mm)，保麗龍粒 y 軸最大位移為「9、9.5、9、9mm」。可知保麗龍粒往上移動高度約是拉高高度的一半。

實驗五、換能器的平移與翻轉：

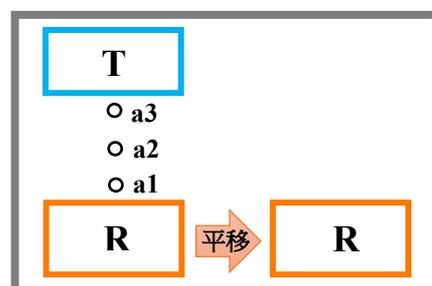
(一)、研究動機：

換能器的移動除了高度，還有**平移**和**翻轉**。將換能器 R 做水平平移，保麗龍粒是否還能夠保持懸浮？在實驗三已知換能器 T 在上方或下方懸浮效果會有差異，那如果**翻轉成其他角度**呢？我們設計**翻轉平移裝置**（見伍、實驗裝置設計），讓換能器做平移和翻轉進行實驗。

(二)、研究方法：

1. 換能器平移（換能器 R 水平往右移動）：

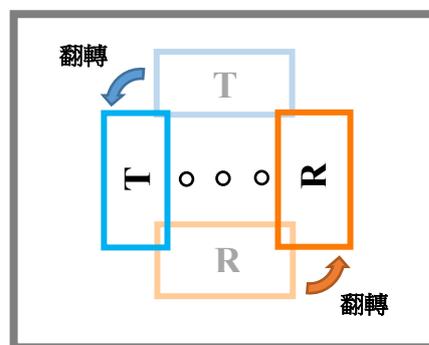
- (1) 40 kHz Φ 16mm 換能器以上 T 下 R 架設，高度為 15mm。
- (2) 在三個節點處（a1、a2、a3）各放置一顆 1mm 保麗龍粒。
- (3) 換能器 R 往右邊平移，直到保麗龍粒其中一顆掉落，以手



機攝影平移過程。播放平移影片，在保麗龍粒掉落那一刻，測量換能器 R 及保麗龍粒平移位置（右為正，左為負）。相同實驗進行十次，計算平移位置的平均值。

2. 換能器翻轉（換能器 T 和 R 從 0 度旋轉至 180 度）：

- (1) 換能器以上 T 下 R 架設，高度為 15mm。
- (2) 每翻轉 10 度，以支架固定角度後，檢測節點數量，並測量第二節點（a2）1mm 保麗龍粒最大承載數量（測三次取平均）。檢測角度從 0 到 180 度。



(三)、實驗數據：「換能器平移、翻轉」檢測數據（40 kHz、 Φ 16mm、D=15mm、a2）：

1. 換能器向右平移（10 次平均，原始數據請見原始資料）：

	下方換能器 R	第一節點（a1）	第二節點（a2）	第三節點（a3）
移動位置	7.7 mm	4.4 mm	2.0 mm	-0.4 mm

2. 換能器角度翻轉：

翻轉角度(度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
節點數(個)	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3
a2 承載量(個)	33.6	23.6	23.0	19.3	18.6	16.3	18.3	19.1	15.0	12.3

翻轉角度(度)	100	110	120	130	140	150	160	170	180
節點數(個)	4	4	4	4	4	4	4	4	3
a2 承載量(個)	23.0	23.3	24.0	25.3	24.6	25.0	25.6	27.0	28.0

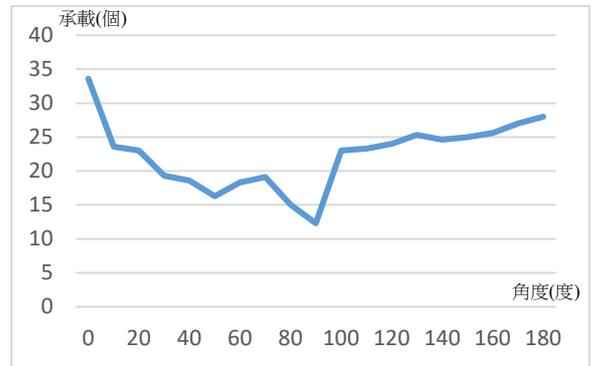
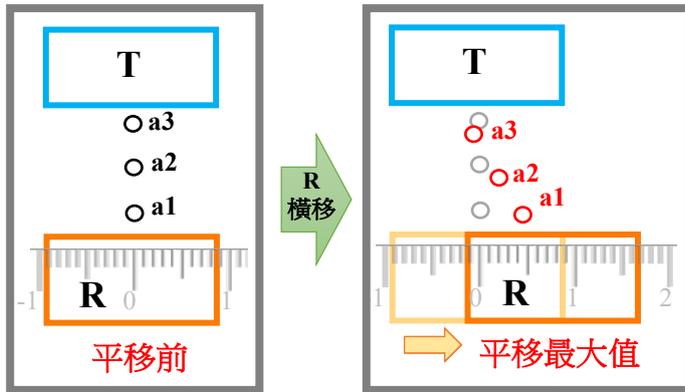
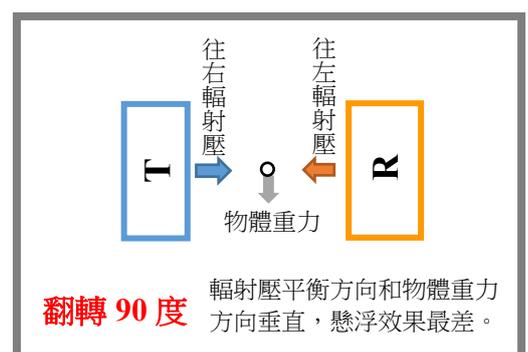
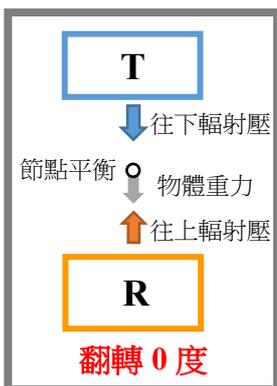


表 14：換能器 R 平移最大值，保麗龍粒對應位置 表 15：換能器 T 翻轉角度對承載數量折線圖

(四)、研究結果討論：

- 平移**：換能器 R 平移後，保麗龍粒會往平移方向移動。但**換能器 R 平移超過半個換能器直徑時，保麗龍粒會因無法維持懸浮而掉落**（換能器平移為 7.7 mm，換能器直徑為 16mm，7.7 mm 大約等於半個換能器直徑）。
- 往右平移時，**下方 a1 往右平移最大**，其次為 a2，上方 a3 則會往左下方移動。當換能器移動 7.7mm，保麗龍粒平移 4.4mm。可知**保麗龍粒平移距離約是換能器平移的一半**
- 翻轉**：由表 15 可知，換能器 T 和 R 翻轉時，轉動角度增加，保麗龍粒承載量越小→**轉動至 90 度（水平）承載量為最小值**→當轉動角度超過 90 度，承載量又逐漸增加。
- 當換能器 T 和 R 傾斜時，節點數會變為 4 個。當在 0、90、180 度時節點則維持 3 個。
- 懸浮效果受到「換能器發射方向」、「懸浮物重力方向」影響**。垂直架設換能器 T 和 R，駐波節點的輻射壓是上下力道平衡。推測翻轉換能器會造成輻射壓平衡力道方向傾斜，但物體重力方向都是朝下。當輻射壓平衡方向和重力方向不同，就越難承載物體。**當換能器 T 和 R 翻轉成水平（輻射壓平衡和重力方向垂直），此時會最難撐住物體重力。**



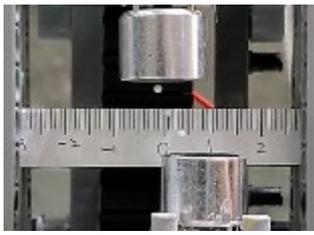


圖 19：換能器平移，保麗龍粒會跟著平移。



圖 20：播放平移影片，以尺觀測位移做紀錄。

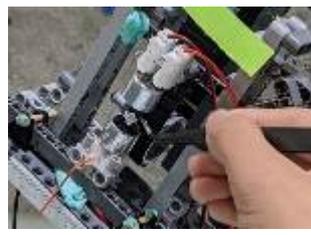


圖 21：翻轉換能器，測試不同角度承載量

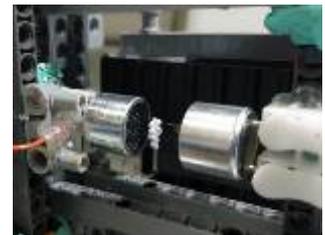


圖 22：翻轉 90 度的水平方向懸浮效果最差。

實驗六、換能器類型（頻率、直徑、防水、一體）：

（一）、研究動機：

我們上網購買換能器，發現換能器除了電子材料行買到的頻率 40 kHz 直徑 16mm 外，還有四種類型可以購買和測試。我們決定測試這些類型的效果差異。這些類型分別為：

1. 不同頻率（直徑為 16mm，但有 25、32、40 kHz）。
2. 不同直徑（頻率為 40 kHz，但直徑有 10、12、16 mm）。
3. 防水型（相對於只有用鐵網封口的開放型，防水型有一層金屬面保護換能器，能夠防止水及異物掉入。防水型頻率為 40 kHz，直徑有 16、18 mm）。
4. 收發一體 TR（相對於收發分體的兩顆換能器 T 和 R（T/R），收發一體（TR）只有一顆，同時擁有發射和接收功能。收發一體頻率為 40 kHz，直徑有 16、18、25mm）。

（二）、研究方法：

1. **不同頻率**：因為 Nano 控制板內的 MiniLev 程式碼是驅動頻率 40 kHz 的換能器，使用其他頻率的換能器無法懸浮。我們嘗試修改程式碼中的一行（OCR1A = 200）。根據參考文獻 7 程式碼，OCR1A 為 200 的計算方式是 $16000 \text{ kHz} / 200 = 80 \text{ kHz}$ ，80 kHz 再除以 2 即為換能器的 40kHz。我們以這個計算方式類推出頻率 25 kHz 的 OCR1A = 320；32 kHz 的 OCR1A = 250，並將修改後的程式碼灌入 Nano 控制板，以聲懸浮檢測裝置進行測試。
2. **不同直徑**：由於不同直徑的換能器大小不一。無法用 16mm 的快接頭連接換能器。我們設計了「鱷魚替換夾」夾住不同直徑大小的換能器（見伍、實驗裝置設計）。我們將不同直徑的換能器夾在鱷魚替換夾，以聲懸浮檢測裝置進行測試。
3. **防水型**：購買不同直徑大小防水型，搭配鱷魚替換夾，以聲懸浮檢測裝置進行測試。
4. **收發一體 TR**：單顆收發一體夾在上方，下方不放換能器，以聲懸浮檢測裝置測試。

(三)、實驗數據與小結：

1. 「換能器頻率」(使用直徑 1mm 保麗龍粒懸浮)：

換能器頻率		25 kHz		32 kHz		40 kHz	
換能器高度		15 mm		10 mm		15 mm	
節點數		2		1		3	
間距 (mm)	最高(d_H)	3.0		5.0		3.0	
	平均(d_λ)	9.0		5.0		4.3	
	最低(d_L)	3.0		5.0		3.5	
承載 (個)	平均	28.8		16.0		14.6	
	最大值	41.6 (a2)		16.0 (a1)		17.3 (a2)	

(註：頻率 25、32 kHz 只列出能夠懸浮保麗龍粒的高度。頻率 40 kHz 只列出高度 15mm 進行比較。)

小結：(1) 不同頻率的換能器只要更改程式碼，也能夠使用 Nano 控制板驅動與進行懸浮。

(2) 換能器頻率越高，能夠懸浮的換能器高度(D)越高、產生的節點數也越多。

(3) 換能器頻率不同，平均間距(d_λ)會不同。當頻率越高，平均間距越短。

(4) 不同頻率懸浮效果最好的是 40kHz。推薦之後使用頻率 40 kHz 進行實驗。

2. 「換能器直徑」(使用直徑 1mm 保麗龍粒懸浮)：

換能器直徑		10 mm		12 mm			16 mm	
換能器高度		10 mm		15 mm		20 mm		
節點數		2		3		4		
間距 (mm)	最高(d_H)	3.0		5.5		5.0		
	平均(d_λ)	4.0		4.3		1.0		
	最低(d_L)	3.0		1.0		4.0		
承載 (個)	平均	4.2		9.1		16.6		
	最大值	6.3 (a1)		14.5 (a2)		25.0 (a2)		

(註：直徑 10、12mm 只列出能夠懸浮保麗龍粒的高度。直徑 16mm 只列出高度 15mm 進行比較。)

小結：(1) 不同直徑的換能器都能懸浮保麗龍粒，直徑越大，懸浮效果越佳。

(2) 換能器直徑越大，能夠懸浮的換能器高度越高、能產生的節點數也越多。

(3) 換能器直徑不同，但平均間距(d_λ)都大約是 4 mm。



圖 23：到電子材料行購買換能器和零件。

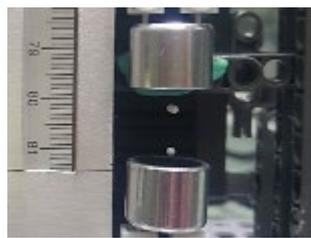


圖 24：頻率 25kHz 的平均間距(d_λ)比較大。

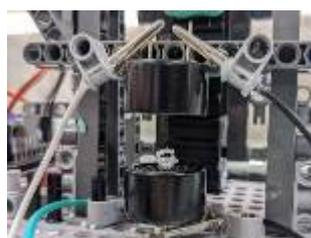


圖 25：鱷魚替換夾能夾住不同直徑換能器



圖 26：收發一體下方放反射板才能懸浮，懸浮高度小於 5mm。

3. 「防水型 vs. 開放型」(使用直徑 1mm 保麗龍粒懸浮):

換能器類型	防水型	防水型	開放型	
換能器直徑	16 mm	18 mm	16 mm	
換能器高度	10 mm	10 mm	10 mm	
節點數	2	2	2	
間距 (mm)	最高 (d_H)	2.0	3.5	3.0
	平均 (d_λ)	5.0	4.5	4.5
	最低 (d_L)	3.0	2.0	2.5
承載 (個)	平均	8.3	7.5	17.5
	最大值	8.6 (a2)	8.3 (a2)	20.0(a1)



開放型



防水型

vs.



收發分體



收發一體

vs.

小結：(1) **防水型懸浮效果差！**不同直徑防水型都只能懸浮高度 10mm。**推薦使用開放型。**

(2) 防水型在高度 10mm 節點數都是 2，與開放型換能器相同。

(3) 防水型平均間距(d_λ)都大約是 4mm，與開放型換能器相同。

4. 「收發一體 TR vs. 收發分體 T/R」(使用直徑 1mm 保麗龍粒懸浮):

小結：(1) 檢測收發一體直徑 16、18、25mm，發現**在任何高度，都無法懸浮保麗龍粒。**

(2) 我們聯想到市售懸浮器商品 A 款，也只有使用單顆換能器。所以嘗試將市售 A 款的**反射板**放在下方，發現直徑 16 mm 收發一體可以在很小的高度 (<5mm) 懸浮。

(四)、研究結果討論：

1. 測試網路買到的四種換能器類型 (頻率、直徑、防水、一體)，我們整理成以下表格：

類型	頻率	直徑	防水型	收發一體 TR
懸浮效果	越大越佳	越大越佳	只限高度 10mm	無法懸浮
推薦使用	40 kHz	16 mm	開放型	收發分體 T/R

→ MiniLev 的換能器建議使用**頻率 40 kHz、直徑 16 mm、開放型、收發分體。**

2. **開放型最大的問題是表面是鐵網，液體和顆粒小的物品會掉進鐵網內，造成損壞。**但檢測防水型換能器的懸浮效果差，**沒辦法用防水型解決開放型會掉進雜物的問題！**

3. 只有**換能器頻率不同，平均間距(d_λ)才會不同。**我們將實驗二、三、五頻率 40 kHz 測到所有 d_λ 平均，得到 4.4mm。我們從波長的計算公式得到頻率 40 kHz 在 30°C 的駐波波長 ($1/2 \lambda$) 為 4.3625mm，誤差值 0.8%。表示**我們測出平均間距(d_λ)與理論數據非常接近！**

駐波波長計算方式：
 聲音速度(v) = $331 + 0.6 \times \text{溫度}(T) = 331 + 0.6 \times 30 = 349 \text{ m/s}$
 聲音速度(v) = 頻率(f) \times 波長(λ) $\rightarrow 349 = 40000 \times \lambda$
 $\rightarrow \lambda = 0.008725 \text{ m} = 8.725 \text{ mm}$
 駐波波長為 $1/2 \lambda = 8.725 \div 2 = 4.3625 \text{ mm}$

實驗七、反射板：

(一)、研究動機：

在實驗過程中，我們曾發生過小插曲！當我們複製第四台聲懸浮檢測裝置，並讓保麗龍粒成功懸浮後，有人發現這個裝置的換能器 R 負極電線「根本沒有接電」！！我們驚訝的發現換能器 R 沒接電，竟然也能產生懸浮效果！我們猜是不是沒插電的換能器 R 被當作反射板，反射了換能器 T 的超音波，而產生了駐波。我們在實驗一的市售 A 款；實驗六的換能器收發一體 TR，都使用過反射板，因此決定針對反射板的類型和運用，進行深入的研究。

(二)、研究方法：

1. 檢測裝置上方架設 40kHz Φ 16mm 換能器，下方放置各種不同的反射板。以高度 15mm 進行第二節點(a2)的 1mm 保麗龍粒承載測量。測三次，記錄平均。
2. 上方換能器分成三種類型（換能器 T、R 及 TR），下方反射板分成四類測試（①換能器類型；②換能器斷電；③不同材質的反射板；④有凹洞的反射板）。

(三)、實驗數據：1.反射板四類測試：（ Φ 1mm 保麗龍粒、D=15mm、a2）：

上方	換能器類型	T	T	R	換能器斷電	T	反射板材質	T	T
下方		R(對照組)	T	R		R(斷電)		撲克牌	木板
承載(個)		33.3	20.0	10.6		5.0		20.0	10.6

上方	T	T	T	T	T	T	T
下方	銅塊	鋁塊	鋁箔	壓克力板	塑膠鏡	玻璃鏡	載玻片
承載(個)	15.0	12.0	19.6	9.6	22.6	20.3	29.3

上方	凹洞反射板	T	T	T	T	T	T	
下方		單凹槽載玻片	超音波喇叭	塑膠淺圓盤	樂高半球積木	圓鐵湯匙	塑膠凹透鏡	塑膠凸透鏡
承載(個)		31.6	11.6	11.3	7.3	22.3	34.0	15.0

（註：收發一體 TR 放在上方，下方使用各種材質的反射板都沒有懸浮效果，所以不列入表格中。）

2.凹透鏡測試：我們發現「塑膠凹透鏡」當反射板的效果很好，於是上網訂購不同焦距的玻璃凹透鏡與原本的塑膠凹透鏡進行比較（凹透鏡直徑都是 5cm）：

上方	T	T	T	T	T	T
下方	焦距 15cm 塑膠凹透鏡 (雙凹)(對照組)	焦距 10 cm 玻璃凹透鏡 (雙凹)	焦距 15 cm 玻璃凹透鏡 (雙凹)	焦距 20 cm 玻璃凹透鏡 (雙凹)	焦距 30 cm 玻璃凹透鏡 (雙凹)	焦距 15cm 玻璃凹透鏡 (平凹)
承載(個)	34.0	23.0	28.3	14.0	13.0	35.6

(四)、研究結果討論：

1. 下方換能器 R 斷電也能產生懸浮，推測換能器的凹洞形狀本身能夠反射超音波。
2. 下方放置**反射板**能讓保麗龍粒懸浮，而且「T+反射板」效果遠優於「收發一體 TR+反射板」（高度 15mm 無法懸浮）。由此可推測**實驗一的市售 A 款商品使用的是換能器 T**。
3. 換能器種類的搭配效果是「T+R」>「T+T」>「R+R」，顯示最適合搭配還是「T+R」。由此可知，**換能器 T 是產生聲懸浮效果的主因！**換能器 T 懸浮效果優於 R。
4. 反射板的材質越光滑、平滑度越高、透光度越高、有凹洞，懸浮效果越好。
5. 反射板推薦使用「**凹透鏡**」，**懸浮效果甚至優於對照組的換能器 R**。凹透鏡建議**焦距為 15cm**，「**雙凹塑膠凹透鏡**」（使用最安全）、「**平凹玻璃凹透鏡**」（效果最佳）。
6. 可將**凹透鏡反射板當成下方的「防水型換能器」使用**。因為下方換能器 R 是開放型，當水滴或碎片掉入鐵網內，會造成換能器損壞，但下方放置凹透鏡，就不怕水滴或碎片！

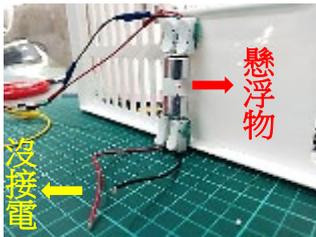


圖 27：下方 R 換能器沒接電，也能夠懸浮！

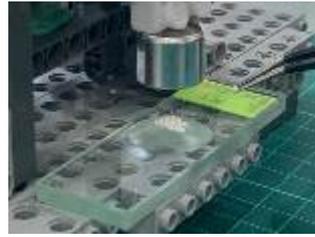


圖 28：單槽凹載玻片的懸浮效果不錯。



圖 29：使用塑膠凹透鏡效果好又安全。



圖 30：效果最佳的是焦距 15cm 平凹玻璃凹透鏡。

實驗八、懸浮物材質：

(一)、研究動機：

只有保麗龍粒適合當懸浮物嗎？在實驗過程中我們發現薄片類型的物品也很適合當懸浮物。我們決定研究薄片的**材質**和**特性**，嘗試找到**適合懸浮的薄片，並自創新的懸浮物！**

(二)、研究方法：

1. 我們選取輕又薄的薄片，以直徑 4mm 的圓孔打孔機進行打洞，做出直徑 4mm 薄片。
2. 有些材料太厚，我們製作**自製保麗龍切割器**來切出薄片（見伍、實驗裝置設計）。
3. 有些薄片太軟，打洞機無法切斷，於是我們使用**雷射雕刻機**切成 4mm 圓形。
4. 我們將直徑 4mm 的圓形薄片檢測物放在聲懸浮檢測裝置高度 15mm 的第二節點(a2)。以「**方便裁切、懸浮、旋轉、和穩定（沒有抖動和變形）**」當作評估項度。

5. 測試**有洞亮片時發現懸浮效果佳**，我們發現**薄片打洞**會影響懸浮效果，因此我們進行各種網狀物，甚至將色紙打洞（外徑直徑 6mm，內徑直徑 4mm 及 3mm）的測試。
6. 上述實驗結束後，我們針對值得研究的懸浮物再進行高度 15mm 的節點數測試。

(三)、實驗數據：1.懸浮物材質（換能器 40 kHz、Φ16mm、上 T 下 R、D=15mm、a2）：

檢測物	影印紙	估價單	色紙	投影片 內襯紙	鋁箔紙	吸油 面紙	保麗龍 薄片	粗吸管	撲克牌
方便裁切	○	△	○	X	○	△	○	○	X
是否懸浮	○	○	○	○	○	○	○	○	△
是否旋轉	○	○	○	○	△	○	○	○	○
穩定	○	○	○	X	X	X	○	X	X
抖動	-	-	-	V	V	V	-	-	V
變形	-	-	-	-	-	V	-	V	-

檢測物	投影片	泡棉 (紅)	高密度 泡棉	有洞 亮片	換能器 鐵網	紗窗	紗網 布料	有洞色紙 外 6 內 4	有洞色紙 外 6 內 3
方便裁切	X	○	○	○	△	△	△	△	△
是否懸浮	○	○	○	○	X	X	X	X	○
是否旋轉	○	○	○	○					X
穩定	○	○	○	X	略	略	略	略	○
抖動	-	-	-	V					-
變形	-	-	-	-					-

2.懸浮物節點檢測（換能器 40 kHz、Φ16mm、上 T 下 R，懸浮物放置從 a1→a2→a3）：

檢測物	鋁箔紙	投影片	影印紙	色紙	泡棉(紅)	保麗龍薄片
節點數	1	1	1	1	2	3
特殊狀況	發出唧唧聲 放 a2 會彈開	a1 會亂轉 放 a2 會彈開	放置 a2 會造 成 a1 抖動	放 a2 會往 上弧形彈開	可在同一節 點重疊 2 片	可在同一節 點平堆 6 片

(四)、研究結果討論：

1. 大部分直徑 4mm 的薄片都能夠懸浮和旋轉，最推薦的材質是**保麗龍、泡棉和色紙**。保麗龍薄片很輕、穩定、節點多，但難切出大面積薄片（因為切片後薄片有空隙，見圖 33）。泡棉很輕、穩定、節點多，但不容易切薄片。**色紙是易取得、穩定、適合裁切**。
2. 最適合懸浮材質是**輕、平整、有韌性**。太軟的材質容易產生變形，導致懸浮時抖動。
3. 太軟或太硬的材質都不適合用打洞機裁切，會造成切不斷或切斷後變形不平整。
4. **有洞的懸浮物能減少重量，增加懸浮可能性**。但當**內徑的洞過大造成邊框過細（網狀）**，**會造成無法懸浮**。邊框夠粗，反而能夠懸浮（例如外徑 6mm 內徑 3mm 色紙）。
5. **薄片懸浮會自動旋轉**。我們發現**調整換能器高度，還能控制薄片轉速，甚至使它停止！**



圖 31：使用直徑 4mm 打孔機做出圓形薄片。



圖 32：保麗龍薄片效果佳，同一節點能放 6 片

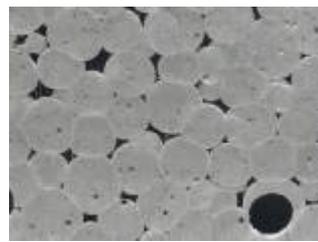


圖 33：保麗龍薄片空隙很多，只能挑完整部分切薄片(例如右下角的洞是 4mm 打孔機切的)。

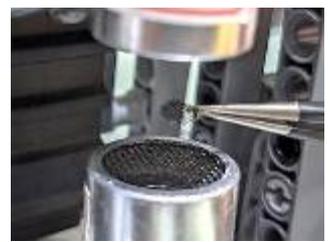


圖 34：網狀結構無法懸浮(例如鐵絲、紗窗)

實驗九、薄片懸浮條件：

(一)、研究動機：

在「實驗八：懸浮物材質」發現色紙是適合懸浮和旋轉的薄片，而且能用雷射雕刻機切出想要的形狀！我們同時也發現色紙中間挖洞能讓重量變輕，更容易懸浮，但色紙邊框過細又無法懸浮。我們決定使用色紙檢驗薄片懸浮的條件和挖洞大小的限制。

(二)、研究方法：

1. 色紙懸浮實驗都是以 RDWorksV8 軟體繪製正方形，以雷射雕刻機切割色紙。將實驗的色紙放在聲懸浮檢測裝置，測試是否能夠懸浮、旋轉及同一節點放置數量。
2. 我們計算色紙面積並推算重量→方法：10 張色紙 18.2g，因此一張色紙 1.82g。一張色紙面積 225cm²。由此推算色紙 1mm²=0.08 mg。但使用雷射雕刻機切割色紙，因高溫燒掉紙，切出來會減少 0.5mm。當軟體繪製邊長 5mm 正方形，切出來變成邊長 4.5mm。
3. **色紙大小**：雷射裁切正方形色紙，測試能夠懸浮的最大正方形。(例如：)
4. **邊框大小**：正方形中心切除一個小正方形，形成邊框。(例如：)
5. **田字大小**：正方形中心切除四個小正方形，形成田字形狀。(例如：)

(三)、實驗數據：1.色紙大小(換能器 40 kHz、Φ16mm、上 T 下 R、D=15mm、a2)：

繪圖邊長(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	
實際邊長(mm)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
面積 (mm ²)	0.25	2.25	6.25	12.25	20.25	30.25	42.25	56.25	
推算重量(mg)	0.02	0.2	0.5	1.0	1.6	2.4	3.4	4.5	
長相									
是否懸浮	X	○	○	○	○	○	X	X	
是否旋轉	/	○	○	○	○	X	/	/	
可放多少(個)	/	4	3	2	1	1	/	/	

2.邊框大小（正方形繪圖邊長 5mm，實際邊長 4.5mm，內切正方形大小為 1~4mm）：

邊框(mm)	4.5	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0.05
內切邊長(mm)	0	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
面積 (mm ²)	20.25	18	16.25	14	11.25	8	4.25	0.25
推算重量(mg)	1.6	1.4	1.3	1.1	0.9	0.6	0.3	0.02
長相								
是否懸浮	○	○	○	○	○	○	X	X
是否旋轉	○	○	○	○	○	○		
可放多少(個)	1	2	2	3	2	1		

3.田字大小（正方形實際邊框皆為 1mm）：

實際邊長(mm)	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
內切邊長(mm)	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.5	4
面積 (mm ²)	30	33	36	39	42	45	48	51
推算重量(mg)	2.4	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2
長相								
是否懸浮	○	○	○	○	○	○	X	X
是否旋轉	○	○	X	X	X	X		
可放多少(個)	1	1	1	1	1	1		

（四）、研究結果討論：

1. 色紙方塊懸浮的條件是邊長小於 5.5mm、重量小於 2.4mg、總面積小於 30.25mm²。
2. 色紙挖洞不可過大，當邊框小於 0.5mm 會無法懸浮。推薦最適合的邊框是 1mm，懸浮數量最多，也最穩定。
3. 色紙挖洞能有效減少重量，讓懸浮物承載範圍更大，懸浮也更穩定。未挖洞色紙懸浮最大邊長 5.5mm，但挖洞後懸浮物邊長可達 9mm！（5.5mm  → 9mm ）
4. 色紙越小越容易懸浮和旋轉，但過小會無法懸浮。當色紙太大只能懸浮，無法旋轉。

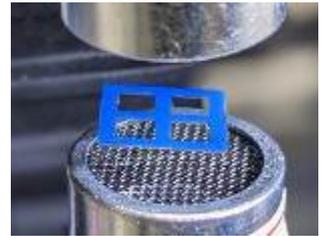
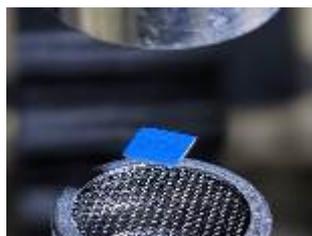
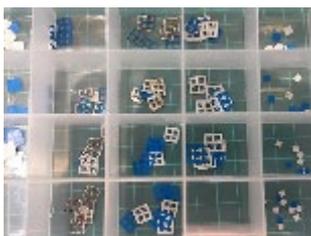


圖 35：使用雷射機切割各種尺寸色紙進行實驗
 圖 36：正方形色紙最大只能承受邊長 5.5mm。
 圖 37：邊框過細懸浮效果差，最佳是 1mm
 圖 38：色紙挖洞後，可承受邊長變大為 9mm。

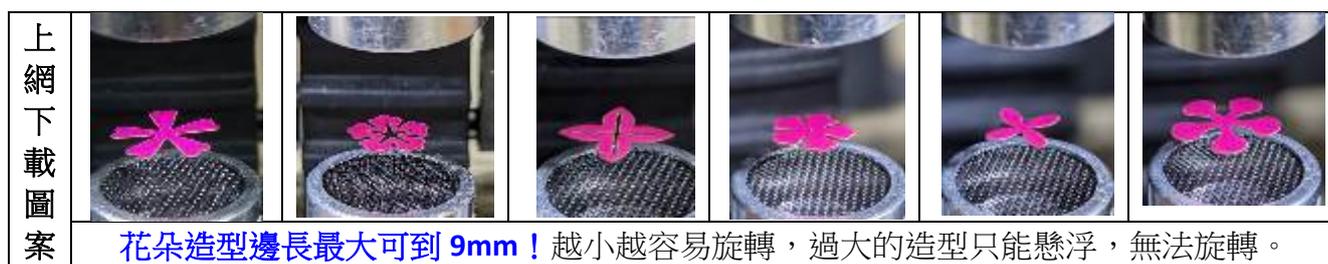
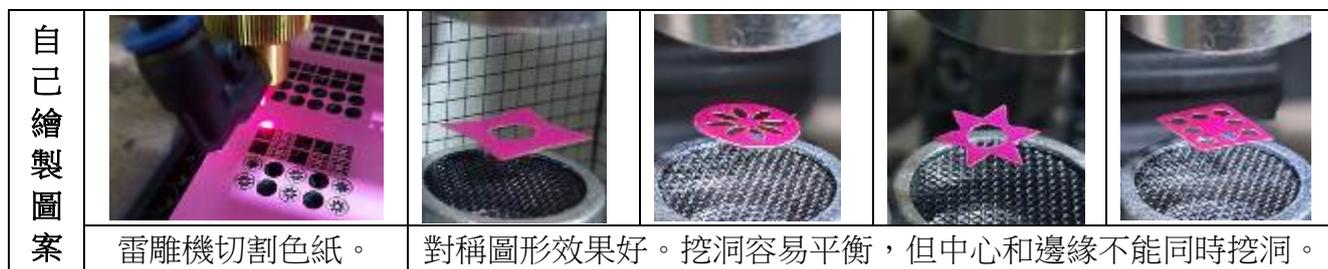
實驗十、色紙造型設計：

「將色紙經過裁切和製作造型，進行懸浮和旋轉，並藉由調整高度控制轉速」是有趣又值得推廣的科普活動。我們思考色紙造型設計的方法，想到以下三種點子：

1. **手切方格紙**：用手繪圖和切割是最簡易的方法。但使用色紙不容易判斷大小，我們想到使用**方格紙進行手繪和切割造型**。但切出來的方格紙很小，需要手很巧才容易完成。如果想**大量製作懸浮薄片**，可以以**市售造型打孔機**（直徑 10mm 以下）做出懸浮薄片。



2. **雷射造型色紙**：由於懸浮的色紙很小，使用**向量繪圖軟體和雷射雕刻機**就可以準確而精細的製作色紙造型。我們以 RDWorksV8 軟體繪製圖形，也**從網路上下載花朵向量圖檔**進行測試（見參考文獻八），都能夠成功的懸浮和旋轉。



3. **立體懸浮色紙**：色紙可以摺成各種造型，我們思考如果**用色紙摺成立體造型**會不會懸浮呢？於是我們使用邊長 5mm 的色紙，以鑷子摺成紙飛機造型，**成功懸浮紙飛機**！

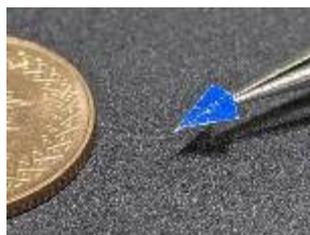


圖 39：鑷子前端夾起超小的紙飛機。



圖 40：紙飛機造型成功懸浮！

柒、討論

一、網路文獻比較

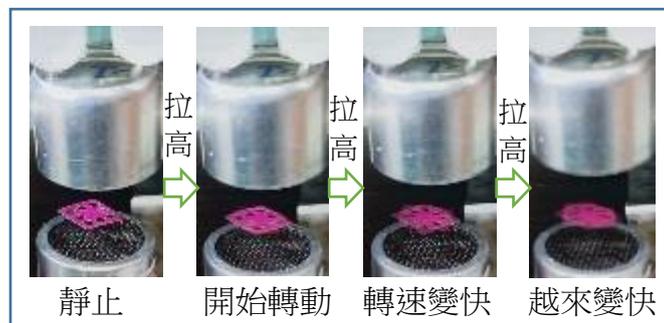
我們上網搜尋有關於聲懸浮的相關文獻，和我們的研究進行比較。整理表格如下：

作品名稱	來源	懸浮裝置	重點摘要	與我們作品的比較
聲壓懸浮 PM2500— 探討聲壓懸浮器可穩定 漂浮物體之條件	60 屆全國科 展高中組 (文獻 9)	(1) 3D 列印 網路模型 (2) TinyLev	以實際實驗和軟體 模擬公式推算 懸浮的條件。	<ul style="list-style-type: none"> ● 我們採用 MiniLev 有更多的變化性，也可改變高度。 ● 我們以現象觀測推論結論。
懸浮一聲	47 屆台北市 科展國中組 (文獻 10)	(1) 聲懸浮商 品拆解喇叭 (2) 透明管	以軟體調整喇叭 頻率，證明球會 浮在節點附近。	<ul style="list-style-type: none"> ● 我們以換能器發聲，不需要透明管協助支撐物品。能進行更多懸浮物的研究。
超音波懸浮	中學生網站小 論文寫作比賽 (文獻 11)	(1) 3D 列印 網路模型 (2) MiniLev	以網路模型和自 製電路板測出 $1/2 \lambda$ 為 4.3mm	<ul style="list-style-type: none"> ● 我們以樂高積木自製檢測裝置，更能依照需求修改。 ● 我們改變高度發現新現象。

從上述文獻作品可知，聲懸浮的實驗非常經典，但卻因為使用 TinyLev 裝置，而無法改變裝置高度及變因操作。且實驗內容大多只檢測懸浮物是在駐波節點上，就停止研究。而我們的作品則在「換能器高度、換能器種類、反射板及懸浮物」都加以研究與突破！

二、薄片旋轉的原因：

在實驗八我們發現「換能器高度改變，薄片轉速會不同」(右圖)。為了進一步研究，我們將花瓣造型薄片，以黑筆做記號。放在不同高度，並以高速攝影機拍攝，計算出花瓣轉速(轉動一圈的秒數)。每種高度拍攝三次求平均。結果如下：



高度(mm)	10	11	13	15	17	19	20	21	23	25	27	28
懸浮		V	V	V	V	V		V	V	V	V	
旋轉		V	V	V	V	V		V	V	V		
轉速(秒)		0.49	0.18	0.14	0.39	0.51		0.82	0.19	0.33		

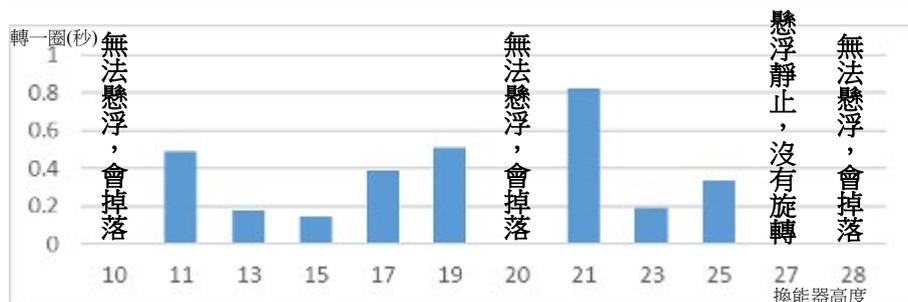


表 16：換能器高度對薄片轉速（轉一圈秒數）長條圖



圖 41：高速攝影機截圖(在花瓣上以黑筆做記號，可算圈數)



圖 42：以高速攝影機拍攝薄片轉動速度。

我們將薄片在高度改變時轉速的變化，列成下面的趨勢表：

高度	10	11	13	15	17	19	20	21	23	25	27	28
轉速變化	無法懸浮	轉速變慢		轉速最快		轉速變慢	無法懸浮	轉速變慢	轉速最快	轉速變慢	沒有轉動	無法懸浮

由上表可知高度和轉速的關係，因此，控制高度可改變轉速！且薄片都是順時針旋轉！

為什麼薄片會旋轉？且又是順時針旋轉？又為什麼在 20mm 的高度會造成薄片停止掉落？

我們觀察到「實驗四」中增加換能器高度，保麗龍粒是順時針螺旋向上的移動軌跡。且螺旋軌跡是兩個螺旋，中間有一段沒有位移（見表 17、18）。上、下兩個螺旋都代表保麗龍粒受到一股順時針的力道，而在中間那段沒有位移，代表力道消失。這和薄片旋轉的規律很像，會在下方和上方作順時針旋轉，但在中間 20mm 卻會停止、掉落。

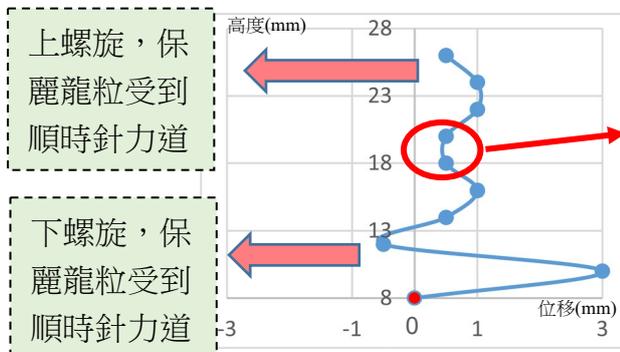


表 17：往上的「X 軸」位移

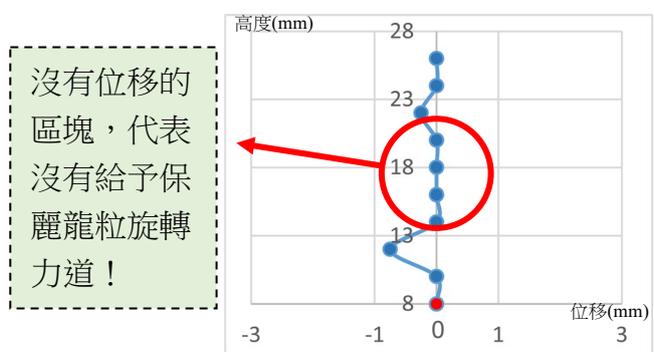


表 18：往上的「Y 軸」位移

由此推論：薄片會順時針旋轉是因為換能器之間會產生一個順時針的旋轉力道。而這股力道是下大上小的螺旋型，中間還會消失。因此換能器高度改變，薄片受到旋轉力道大小不同，而產生轉速改變。甚至拉高到 20mm，會因旋轉力道的消失而無法懸浮掉落。

三、「上 T 下 R」和「上 R 下 T」最大承載位置不同的原因：

實驗中，我們將換能器 T、R 位置調換，發現「上 T 下 R」最大承載位置都是在 a2，而「上 R 下 T」最大承載位置則隨著高度越來越高（見表 19、20）為什麼最佳承載位置會不同？

我們推測是因為換能器 T 位置不同。根據表 19、20，觀察換能器 T 位置（藍色）和最大承載位置（橘色）會發現隨著高度增加，

兩者的範圍會跟著變大（粉紅色）。所以換能器 T 無論放在上或下，換能器 T 和最大承載節點的距離都會隨著 D 增加而增加。

只是因為換能器 T 放在不同位置，最大承載位置（橘色）看起來才不同。

高度	10	15	20	25	30
節點位置				T	T
				a6	a6
			T	a5	a5
		T	a4	a4	a4
	T	a3	a3	a3	a3
	a2	a2	a2	a2	a2
	a1	a1	a1	a1	a1
	R	R	R	R	R

表 19：上 T 下 R 最大承載位置

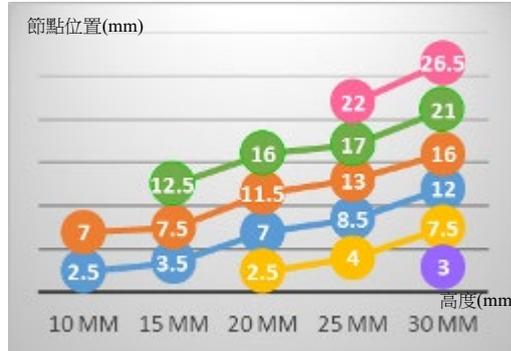
高度	10	15	20	25	30
節點位置					R
				R	a6
			R	a5	a5
		R	a4	a4	a4
	R	a3	a3	a3	a3
	a2	a2	a2	a2	a2
	a1	a1	a1	a1	a1
	T	T	T	T	T

表 20：上 R 下 T 最大承載位置

四、「上 T 下 R」中 d_L 和 d_H 大小交錯的原因：

實驗二中發現「上 T 下 R」的**最低間距(d_L)與最高間距(d_H)**，隨著高度增加出現數據大小交錯。**為什麼會有這樣的差異**？我們將實驗二「上 T 下 R」的節點位置做成表格(表 21)並將拉高高度後的節點位置進行連線(2.5→3.5→7...)，畫成折線圖(表 22)，再和「實驗四」的數據上 T 下 R 節點的移動情形(表 23)進行比較，發現它們的規律是完全相同的。

高度	10	15	20	25	30
a6					26.5
a5				22	21
a4			16	17	16
a3		12.5	11.5	13	12
a2	7	7.5	7	8.5	7.5
a1	2.5	3.5	2.5	4	3



10	15	20	25	30
				a6
			a5	a5
		a4	a4	a4
	a3	a3	a3	a3
a2	a2	a2	a2	a2
a1	a1	a1	a1	a1

表 21：上 T 下 R 節點位置表

表 22：上 T 下 R 位置增加折線圖

表 23：上 T 下 R 節點移動表

從表 21~23 可知當高度增加，**新節點增加在上方時，最低間距 (d_L) 數字就會變大** (2.5→3.5)。當**新節點增加在下方， d_L 是新節點和換能器 R 的距離， d_L 會變小** (3.5→2.5)。因此當新節點增加在上方，最高間距 (d_H) 會變小。新節點增加在下方， d_H 會變大。 **d_L 和 d_H 會大小交錯變化就是因為新節點增加的位置會上下改變，導致 d_L 和 d_H 的間距跟著改變。**

捌、未來研究方向

實驗過程中，我們發現 MiniLev 聲懸浮的一些特別現象，未來可進行更深入的研究。

一、**低點和高點為碗形結構**：當保麗龍粒放置很多時，在**低節點會出現下凹碗形**排列，在**高節點會出現上凹碗形**排列。只有在**中間的節點是呈現平面**。

低節點	中間節點	高節點



圖 43：低節點下凹碗形，高節點則變上凹碗形。

二、**保麗龍粒自動排列結構**：將保麗龍粒放入節點時，**節點產生的吸引力讓保麗龍粒會自動排列成固定形狀**。以下為 1~10 保麗龍粒產生的自動排列形狀，與數學幾何結構息息相關。

數量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
結構										

三：**雙節點**：節點會將所有顆粒都吸引在一起。但使用**平面的材質（例木片、鏡子）當反射板，在同一高度位置會出現兩個節點**。雙節點會互相排斥，不會吸引在一起。

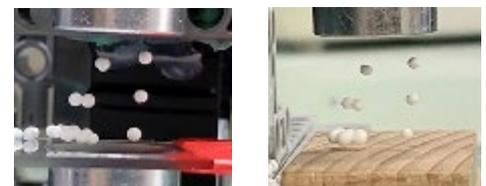


圖 44：雙節點是同一高度位置產生兩個節點。上圖的三個高度位置一共找到六個節點。

玖、結論

一、MiniLev 聲懸浮最佳化：

1. 換能器建議「**頻率 40kHz、直徑 16mm、開放型、收發分體、上 T 下 R**」，懸浮效果最佳
2. 換能器之間的高度 (D) 在 10~30mm 都能夠懸浮保麗龍粒。推薦使用**高度 (D) 為「15mm」**，**最佳懸浮節點為「第二節點 (a2)」**，能夠承載最多的保麗龍粒。
3. 頻率 40 kHz 換能器的平均間距(d_λ)為 4.4mm，就是換能器產生駐波的波長 ($1/2 \lambda$)。
4. 換能器更改不同直徑、不同頻率都可產生懸浮效果。但不同頻率換能器需更改程式碼內容。防水型和收發一體 (TR) 換能器的懸浮效果很差，不建議使用。

二、換能器移動 (高度、平移與翻轉)：

1. 換能器高度越高，產生節點數越多。高度每增加 5mm，會增加一個節點。
2. 當**高度增加，新節點是以「上下交替」方式增加**。當第一個增加節點在下方，下一個增加節點會在上方。節點是上下交替增加，產生以下的影響：
 - (1) **保麗龍粒上升距離只有拉高高度一半**。高度增加 10mm，保麗龍粒只能上升 5mm。
 - (2) 高度增加時，**最低間距(d_L)和最高間距(d_H)數據會大小交錯**。當新節點增加在下方， d_L 間距變小， d_H 間距變大。當新節點增加在上方， d_L 間距變大， d_H 間距變小。
3. **換能器 T 是產生聲懸浮效果的主因**，懸浮效果優於換能器 R。當換能器位置相反 (上 T 下 R 和上 R 下 T)，會造成新節點增加的順序相反、最大承載位置不同。
4. 下方換能器 R 平移超過半個換能器直徑，保麗龍粒會無法懸浮會掉落。
5. 換能器 T 和 R 翻轉時，翻轉角度越接近 90°，懸浮效果越差。因為**輻射壓平衡受到懸浮物重力方向影響**，輻射壓平衡方向和重力方向垂直時，懸浮效果最差。
6. 薄片旋轉是受到**下大上小的順時針螺旋形力道**，高度 20mm 力道會消失導致無法懸浮。薄片在**不同高度受到螺旋形力道不同，產生不同轉速**。因此可藉由**控制高度改變轉速**。

三、反射板：

1. 上方使用換能器 T，**下方放置反射板**也能造成保麗龍粒懸浮。
2. 適合當反射板的材質是光滑、透光度高、有凹洞，推薦使用「**焦距 15cm 的凹透鏡**」。「**雙凹塑膠凹透鏡**」使用很安全，**「平凹玻璃凹透鏡」懸浮效果最佳，優於換能器 R**。
3. 凹透鏡不怕水和雜質，**可當成防水型換能器使用**，能**取代開放型的換能器 R**。

四、懸浮物：

1. **薄片**適合當為懸浮物，因為方便取得和裁切、懸浮效果佳，還會**自動旋轉**。
2. 適合懸浮薄片的材質是輕、平整、有韌性，推薦使用**保麗龍薄片、泡棉薄片和色紙**。
3. 懸浮薄片挖洞可減輕重量，也能讓承載範圍變大。但邊框不可過細，會造成無法懸浮。
4. 「將**色紙**以手工、市售造型打洞機或**雷射雕刻機**製作出各種可**懸浮與旋轉**的美麗造型，並可**藉由控制高度改變轉速**」是有趣又值得推廣的科普活動。

拾、心得

科展是一段很神奇的經驗....當知道自己是科展團隊時，真的很開心。從決定「聲懸浮」主題後，我們又擔心這個研究能不能做出來？不過，才剛開始測試，我就沉迷於其中，因為太有趣了！我開始期待每次的科展課，後來才慢慢發現...原來，辛苦在後頭。我們必須複製網路 MiniLev 的設計製作出裝置，又因為對線路不熟悉，一直失敗，得重新不斷重整線路，才開始漸漸掌握到該如何組裝，甚至到後來挑戰設計自製翻轉平移裝置。這種不斷嘗試，才將裝置做出來的歷程，真的讓我們覺得很興奮、很有成就感！

週三下午的科展留校，也是一大挑戰。我們得面對不斷重複的測試，有時讓我很想睡覺。寒假的四天整天留校考驗，是最累的！不過，當實驗做到煩悶時，伙伴就會意外發現特別現象、說笑話或是嘗試很久的實驗終於成功時，都會讓我們精神一振！和伙伴一起努力的感覺最棒了！其中，我們印象最深刻的是組裝第四台聲懸浮裝置發生的「靈異現象」：那天，成功懸浮保麗龍粒後，效果卻很差。仔細檢查後才發現下面的換能器 R 根本沒接電！重點是「沒接電也可以浮」！科展真是趣事連連！在研究過程中，我們培養了很多能力：注意力集中增加、知道如何從數據中參透結論、在失敗實驗中找到改善方法，甚至挫折容忍力也提高了。更重要的是從一開始研究到最後推敲結論，都是團隊合作，一起同甘共苦！整個科展團隊給我很溫馨的感覺。很感謝這些日子中陪伴我的伙伴、老師和家人，你們辛苦了！

拾壹、參考文獻資料

	參考資料內容	參考資料出處
1	西藏喇嘛浮石塊軼事	失傳多年的西藏古老聲懸浮技術（每日頭條） https://kknews.cc/zh-tw/news/jqqzygq.html
2	聲懸浮的原理	Acoustic levitation(維基百科) https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_levitation
3	聲懸浮原理、圖 7 參考	聲波懸浮（跟著鄭大師玩科學） https://www.masters.tw/233374/acoustic-levitation
4	TinyLev 的製作方式 圖 14 TinyLev 引用	Acoustic Levitator (instructables workshop) https://www.instructables.com/Acoustic-Levitator/
5	圖 5 音叉縱波引用	壹、聲音的產生與傳播（Demolab 悟理!物理） http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=modules/%C1n%AD%B5/section1
6	圖 6 駐波波形引用	駐波（維基百科） https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A7%90%E6%B3%A2
7	MiniLev 的製作方式 圖 9、圖 10 引用	Micro Ultrasonic Levitator (Make:) https://makezine.com/projects/micro-ultrasonic-levitator/
8	下載花朵的向量圖與使用	花の水彩アイコン(illustrAC) https://ac-illustr.com/en/clip-art/1945008/%E8%8A%B1-%E6%B0%B4%E5%BD%A9
9	「聲壓懸浮PM2500」 科展作品	第 60 屆全國科展高中組物理與天文學科 https://www.ntsec.edu.tw/Att.ashx?id=12775
10	「懸浮一聲」科展作品	第 47 屆北市科展國中組物理科 https://sites.google.com/a/nmjh.tp.edu.tw/equipment/main/science/school_sci_exhibition
11	「超音波懸浮」小論文	中學生網站小論文寫作比賽第 1091015 梯次得獎作品 https://www.shs.edu.tw/works/essay/2020/10/2020101506522699.pdf

【評語】 080114

1. 能自行研製組裝聲懸浮設施呈現自製實驗器材之能力，並充分進行相關研究。
2. 能充分掌握各種變因，進行具創意的研究，例如能懸浮並轉動的紙花片。
3. 若對物理觀念駐波節點概念加強釐清會更好。

作品簡報

組別：國小組

科別：物理科

編號：

懸「移」浮現

——聲懸浮變因對懸浮效果之研究



摘要、研究動機與目的

摘要

我們自製能調整高度的檢測裝置，進行各種聲懸浮變因的探討。

1. 最適合MiniLev聲懸浮裝置：

- ① 換能器上T下R、頻率40 kHz、直徑16mm、開放型、收發分體。
- ② 最佳懸浮高度為15mm，第二節點承載效果最佳。
- ③ 高度改變時，新節點會以「上下交替的方式」增加，且保麗龍粒上升高度是拉高高度的1/2。

2. 過程中也發現：

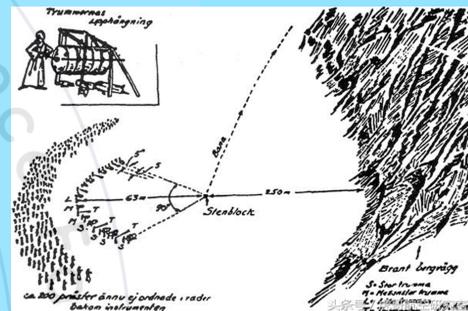
- ① 發現焦距15cm凹透鏡可取代換能器R，可防水效果佳！
- ② 色紙當懸浮物，可藉由控制高度改變轉速，是值得推廣的科普活動。

研究動機

從西藏喇嘛浮石塊的軼事開始，我們在網路上搜尋到「聲懸浮」實驗！

「聲懸浮」是使用超音波讓保麗龍粒懸浮空中。

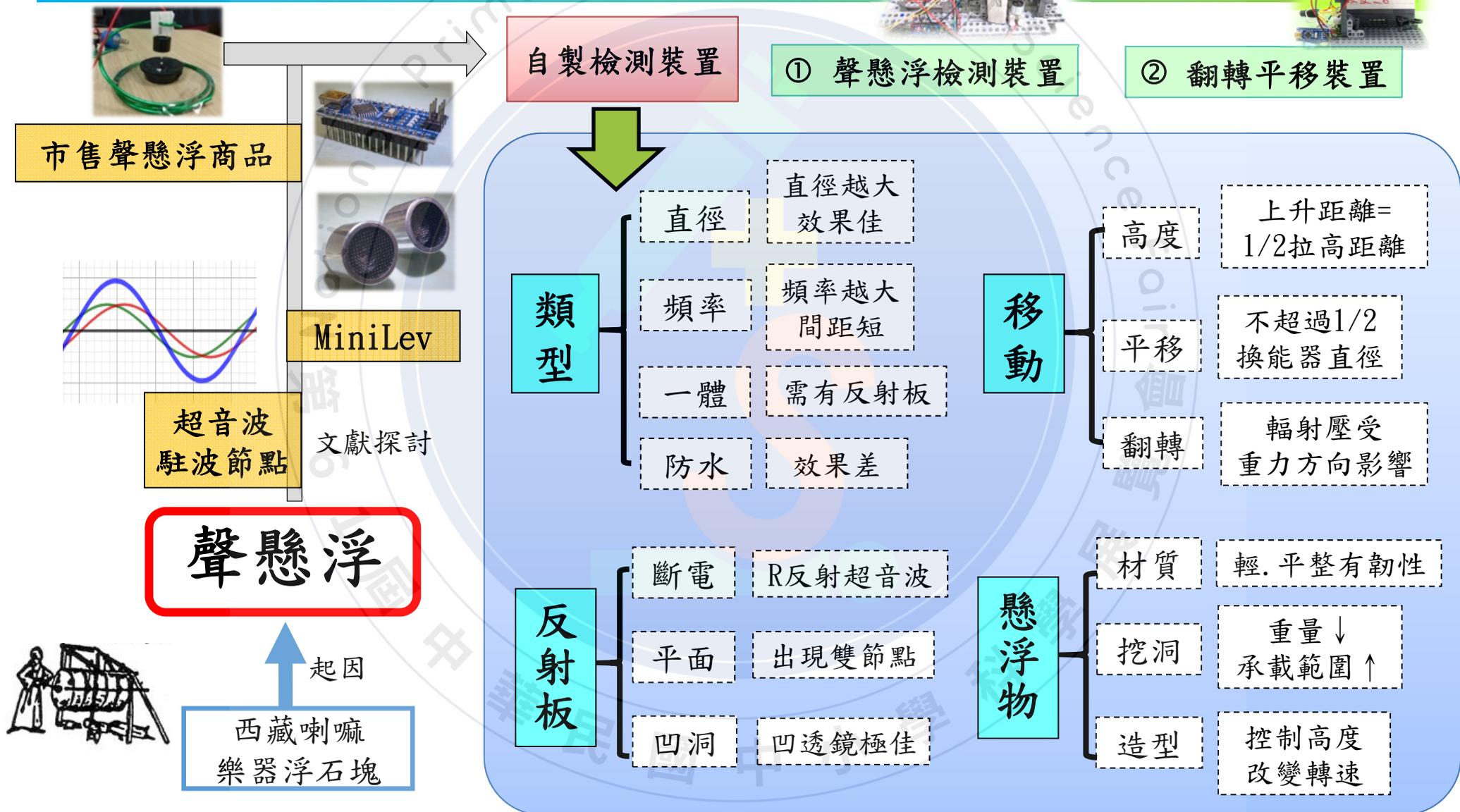
五年級自然課提到聲音特性。我們深入研究聲懸浮，希望瞭解聲懸浮特性，進而找到聲懸浮更多的可能性，應用在生活及自然課教學中。



研究目的

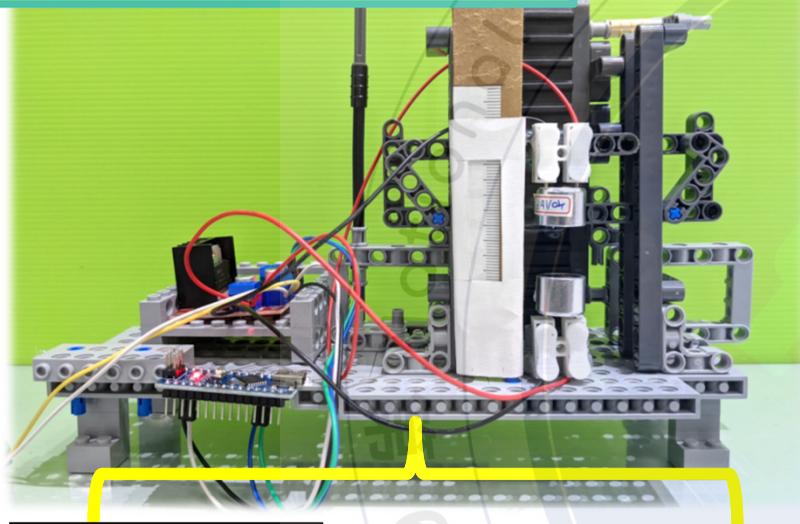
- 一、研究聲懸浮的各種變因與最佳裝置效果
- 二、分析換能器移動對聲懸浮產生的影響。
- 三、測試反射板取代換能器的可能性與效果
- 四、研發自創懸浮物的可能性與玩法。

研究流程

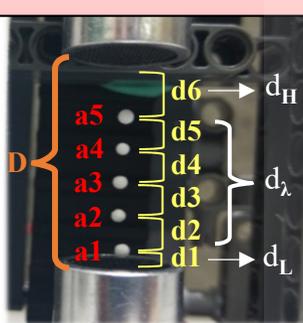


研究方法-裝置及檢測項目

聲懸浮檢測裝置



間距測量



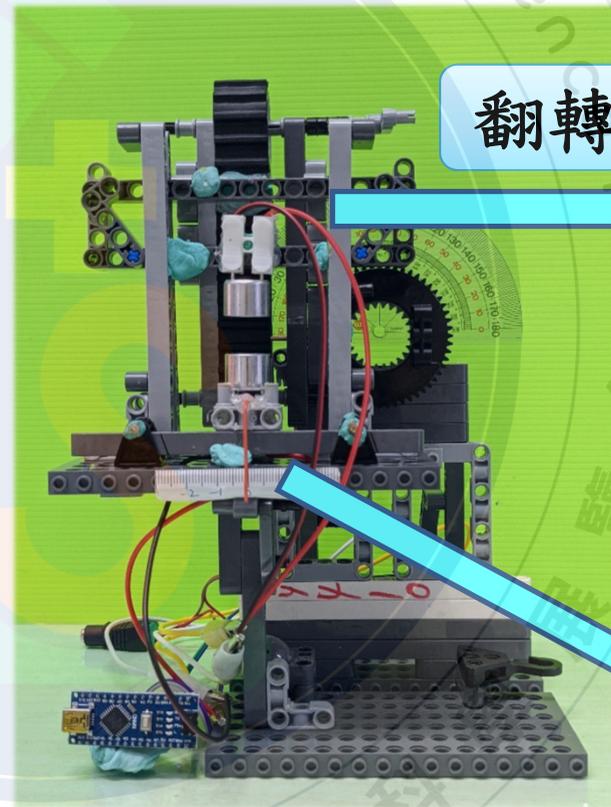
高度改變，會影響
節點數和間距

承載測量

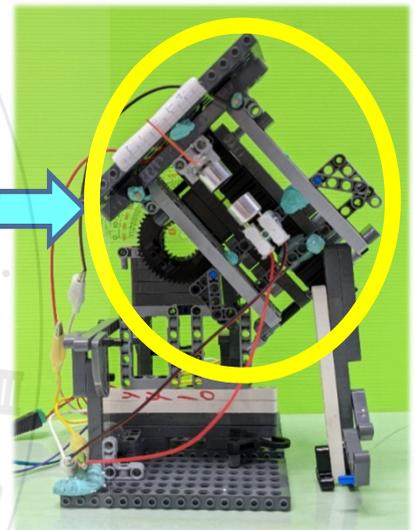


節點、裝置改變，
會影響承載效果

翻轉平移裝置



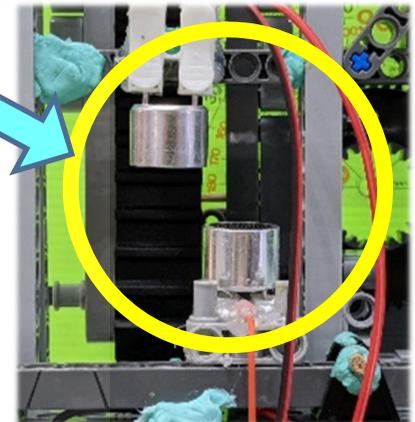
翻轉



了解換能器翻轉後
的聲懸浮效果

了解換能器平移後，
對聲懸浮的限制

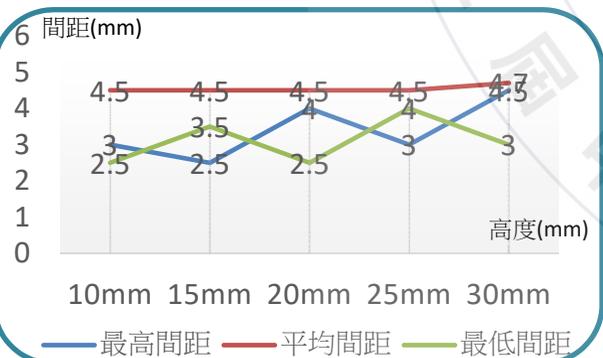
平移



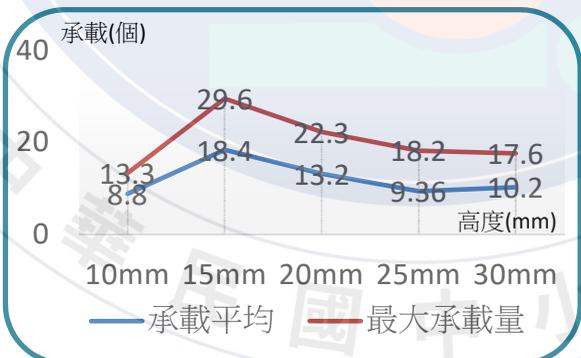
研究結果(一)-換能器高度與位移

高度與節點

換能器高度(D)		10 mm		15 mm		20 mm		25 mm		30 mm	
節點數		2		3		4		5		6	
位置	間距	承載	d								
	d7										4.5
a6	d6							3.0	5.3	5.5	
a5	d5					4.0	7.0	5.0	7.6	5.0	
a4	d4				2.5	8.3	4.5	6.0	4.0	9.6	4.0
a3	d3		3.0	11.6	5.0	9.3	4.5	11.6	4.5	9.0	4.5
a2	d2	4.3	4.5	29.6	4.0	22.3	4.5	18.2	4.5	17.6	4.5
a1	d1	13.3	2.5	14.0	3.5	13.0	2.5	4.0	4.0	12.3	3.0
間距(mm)	平均	4.5		4.5		4.5		4.5		4.7	



不同高度的節點間距



不同高度a2的承載數量

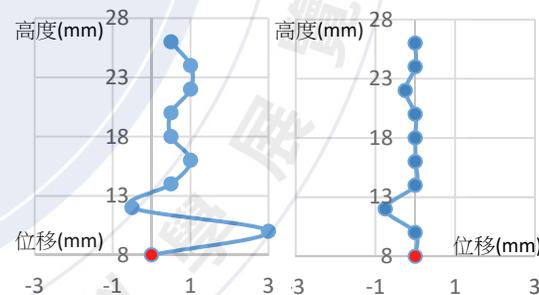
高度增加與節點的移動

高度	10	15	20	25	30
a6					a6
a5				a5	a5
a4			a4	a4	a4
a3		a3	a3	a3	a3
a2	a2	a2	a2	a2	a2
a1	a1	a1	a1	a1	a1

高度(D)拉高，會以上下交替方式產生新節點，且節點移動以「階梯式上升」

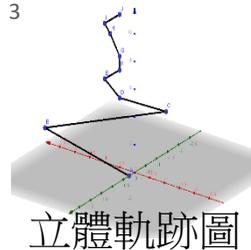
保麗龍球移動軌跡(由下往上移)

X軸移動軌跡 Y軸移動軌跡



測量裝置

移動軌跡是「下大上小的螺旋形」，且往上「移動高度」約是「拉高高度」的1/2。

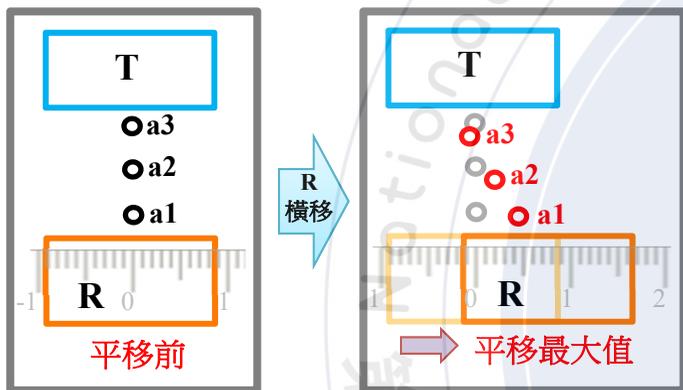


立體軌跡圖

研究結果(二)換能器平移、翻轉與類型

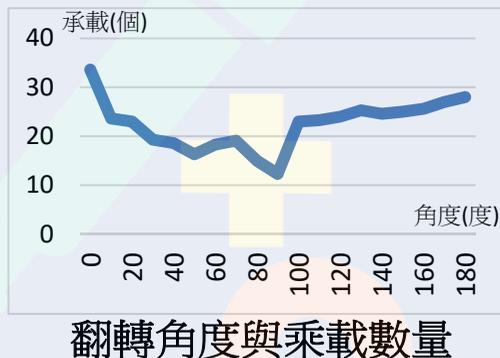
換能器 平移

保麗龍粒平移距離 = 換能器平移距離的1/2



換能器 翻轉

換能器發射方向及懸浮物重力方向會影響懸浮效果(如下圖)。當翻轉90度，輻射壓和重力方向垂直，難撐住物體重力，效果差。



換能器類型

不同直徑

直徑越大，節點多、懸浮效果越佳！



不同頻率

頻率越高，D越高、節點數越多
頻率越高，平均間距(d_λ)越短。

防水型v.s開放型 收發分體與一體

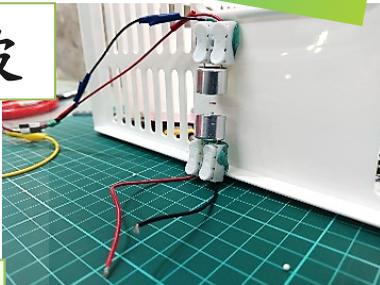
防水型效果差，推薦使用開放型。
收發分體(T和R)效果佳！

研究結果(三)反射板

換能器R沒接電，球也會浮？！

平滑、透光、有凹洞

換能器能反射超音波



有凹洞
反射板

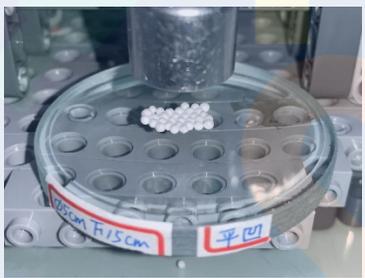
反射板材質
特色

不同反射板
承載狀態

斷電

換能器種類

上T下R > 上T下T > 上R下R



凹透鏡測試

上方	 T	T	T	T	T	 T
	對照組(雙凹)	雙凹	雙凹	雙凹	雙凹	平凹
下方	焦距15cm 塑膠凹透鏡	焦距10 cm 玻璃凹透鏡	焦距15 cm 玻璃凹透鏡	焦距20 cm 玻璃凹透鏡	焦距30 cm 玻璃凹透鏡	焦距15cm 玻璃凹透鏡
承載	34.0	23.0	28.3	14.0	13.0	35.6

1. 反射板以「材質平滑、透光度高、有凹洞」，配合上方換能器T的懸浮效果較佳。
2. 推薦「凹透鏡」擔任反射板，懸浮效果甚至優於對照組的換能器R。凹透鏡建議**焦距為15cm**。
3. 用反射板取代換能器，就能**防水、防小雜質掉入換能器中**。

研究結果(四)懸浮物-1

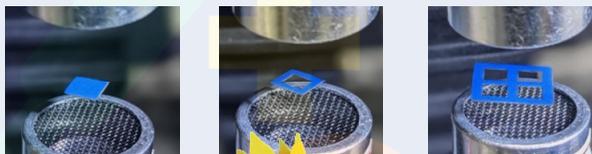
懸浮材質

- 1.直徑4mm圓形薄片，最推薦：色紙、保麗龍薄片、泡棉。
- 2.優質懸浮物特色：輕、平整、有韌性。
- 3.有洞材質可減輕重量，但洞太大或多會無法浮起。



鐵網,無法懸浮

色紙薄片懸浮條件



色紙大小

邊長 (mm)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
圖示								

邊框大小

邊框 (mm)	4.5	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0.05
圖示								

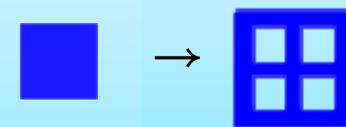
田字大小

邊長 (mm)	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
圖示								

- 1.懸浮條件：邊長 < 5.5mm、重量 < 2.4mg、總面積 < 30.25mm²。
- 2.邊框 < 0.5mm會無法懸浮。邊框1mm最佳。
- 3.挖洞能減少重量，增加承載範圍，懸浮更穩定。

可懸浮最大範圍

挖洞前 → 挖洞後
5.5mm → 9mm



研究結果(四)懸浮物-2

聲懸浮
推廣

手作

打洞機

直徑10mm以下
造型打洞機

大量量產薄片

雷雕造型色紙

手要很巧

手切方格紙

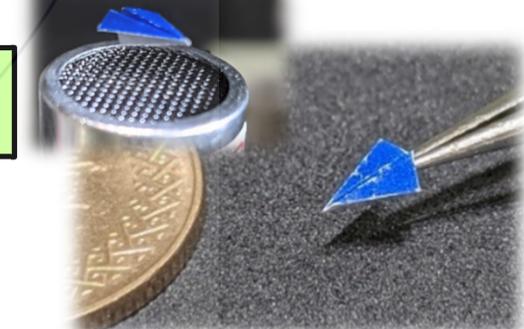
方格紙易判斷大小

立體懸浮色紙

使用邊長5mm色紙
摺紙飛機

RDWorksV8軟體
自己繪製圖形

下載花朵
向量圖檔



討論-薄片旋轉原因

我們發現當「換能器高度改變，薄片轉速會不同」

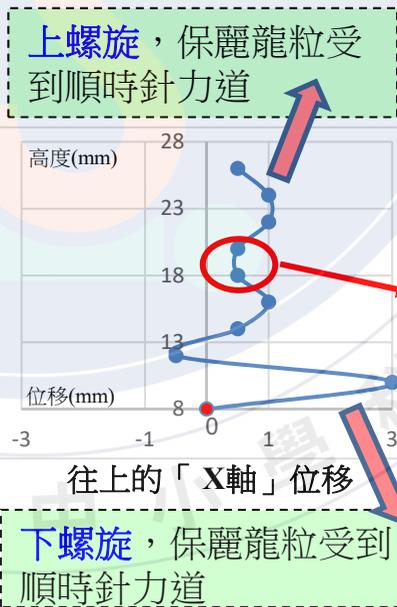


●以高速攝影機記錄各種高度的轉速變化(如右)

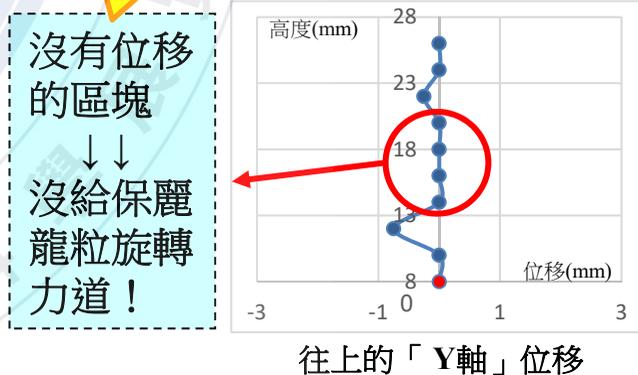
1. 都是順時針旋轉。
2. 以「停止→慢→中→快→中→慢→停止」的規律循環。
3. 在高度20mm會掉落，無法懸浮。

我們發現：

1. 增加換能器高度時，保麗龍粒「順時針螺旋向上」的軌跡移動和薄片旋轉規律相似。
2. 薄片因換能器間會產生順時針下大上小螺旋形旋轉力道，進而順時針旋轉。
3. 換能器高度改變，薄片受到旋轉力道大小不同，而產生轉速改變。甚至拉高到20mm，會因旋轉力道消失而無法懸浮掉落。



為什麼會旋轉？掉落？



結論

找到最佳化類型

直徑16mm
頻率40kHz
開放型
收發分體

換能器

移動

高度影響懸浮變化

找到最佳高度15mm
上升拉高高度一半
新節點上下交替增加
軌跡上小下大螺旋形

聲懸浮

反射板能夠懸浮

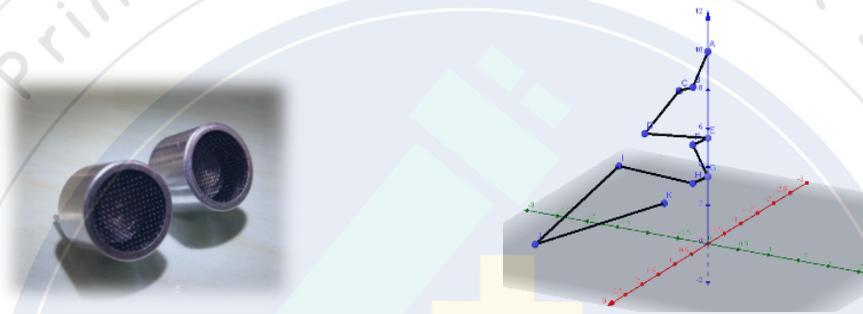
找到最佳反射板
取代換能器R
焦距15mm凹透鏡
當防水型換能器

反射板

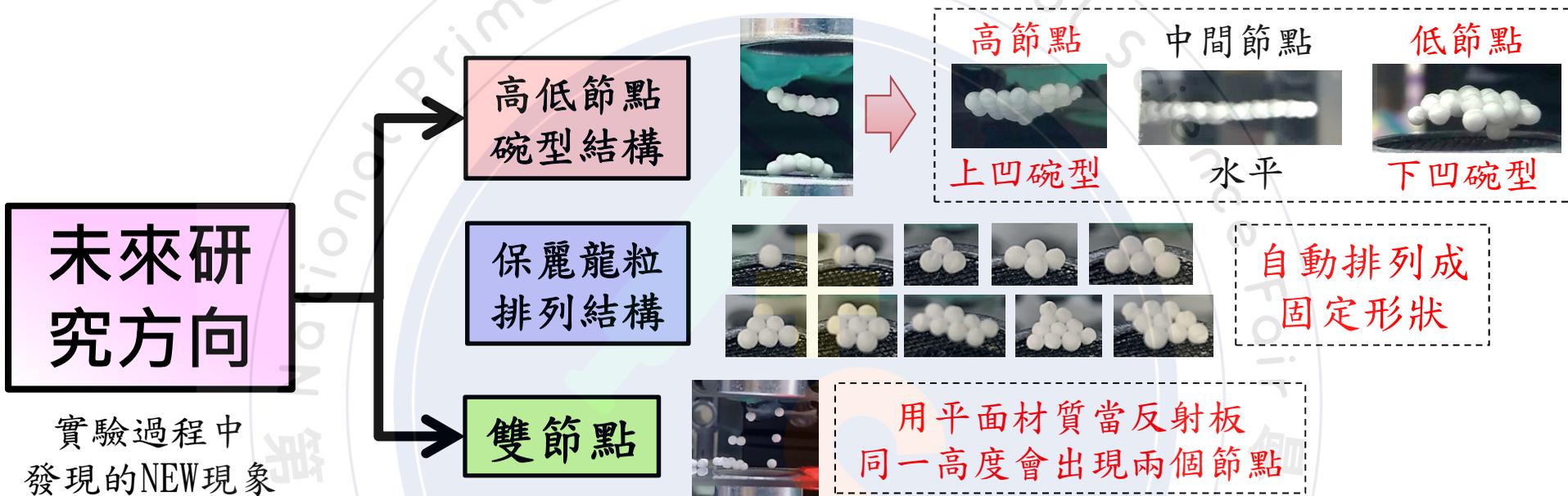
懸浮物

自創薄片懸浮物

找到薄片最佳材質
懸浮又能旋轉
手做雷雕設計造型
高度控制轉速



未來研究方向



文獻資料

- 黃智笙、賴城諭、莊翔鈞(2020)。聲壓懸浮PM2500—探討聲壓懸浮器可穩定漂浮物體之條件。中華民國第六十屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 彭品瑄、蔡松穎、孫旭(2013)。懸浮一聲。台北市第四十七屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 曾柏凱、林祈均、詹沐恩(2020)。超音波懸浮。中學生網站小論文寫作比賽第1091015梯次得獎作品。