

中華民國第四十三屆中小學科學展覽會參展作品專輯

高中組

物理科

科別：物理科

組別：高中組

作品名稱：響螺發音頻率之探討

關鍵詞：頻率、轉速、共振

編號：040105

學校名稱：

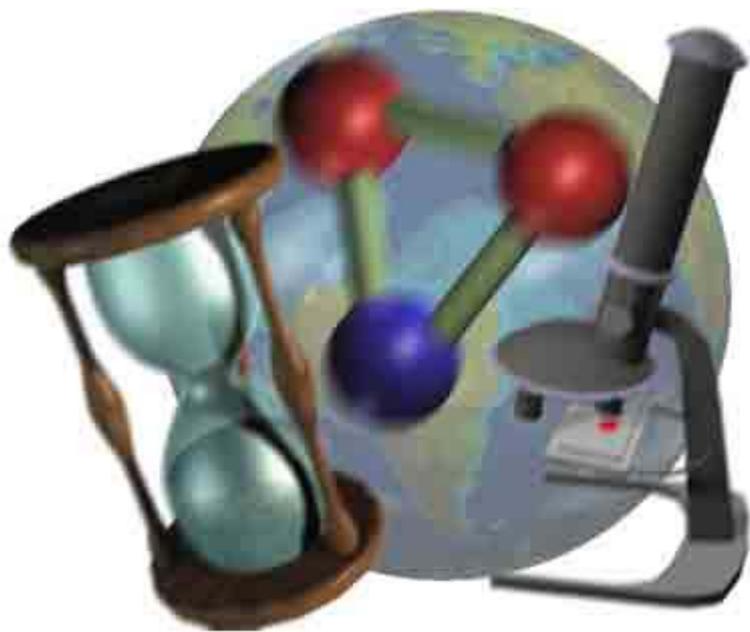
高雄縣立路竹高級中學

作者姓名：

林坤祥、張博文、葉嘉容、陳正偉

指導老師：

戴嘉亨、鍾志輝



摘 要

民俗技藝中有一項童玩「竹製的響螺」，經由在自然科學研習社的活動過程，我們發覺以底片盒所製成的的響螺，也具有相同的效果。進一步在實驗中了解到其頻率與多項因素有關，因此想藉由自行設計的工作平台進行頻譜數據量取，而從所得數據分析發現：

- 一、響螺在垂直地面旋轉時並無法發出聲音，但當與地面不垂直時反而會發出聲音；由此可知，響螺是在不垂直地面的情況下與空氣有較劇烈摩擦進而在筒內產生共鳴。
- 二、當響螺傾斜時，它的特徵頻率會隨著傾斜角增大而有先降低而後升高的現象發生，此與空氣摩擦程度有關。
- 三、響螺之轉速愈快，特徵頻率會愈大，但增加到某一程度時其特徵頻率會回到較低之頻率。
- 四、響螺的缺口如果加長或加寬皆會提高其特徵頻率。
- 五、缺口厚度較薄會使特徵頻率降低，但會使響度加大。
- 六、缺口受風邊如果是凸出則特徵頻率較低，反之凹陷時會較高
- 七、響螺之材料與管子直徑皆不影響其特徵頻率。
- 八、響螺管子愈長，其特徵頻率會愈低，反之則較高，但太短的共鳴管所產生之特徵頻率需修正為八分之一波長的共振。

壹、研究動機

在一次民俗技藝展覽中，我們被以竹子做成的響螺所發出的聲音深深的吸引，因此在自然科學研習社的社團時間與老師討論後，發現以底片盒來取代竹製品所製成的響螺，也具有相同的效果，經由初步實驗發現，所產生之頻率與兩端閉管共鳴柱之頻率公式有所出入，因此想藉由自製的響螺來對其發音頻率進行研究，期能對其頻率之特性與影響頻率之因素做一較完整的探討，進而了解響螺發音之機制。

貳、研究目的

- 一. 研究如何利用底片盒來製作成響螺。
- 二. 設計可控制轉速與測量頻譜之工作平台。
- 三. 了解響螺頻率之特性。
- 四. 了解傾斜角對響螺發音頻率之影響。
- 五. 了解轉速對響螺發音頻率之影響。
- 六. 了解缺口形狀對響螺發音頻率之影響。
- 七. 了解材質對響螺發音頻率之影響。
- 八. 了解底片盒長度對響螺發音頻率之影響
- 九. 了解底片盒口徑對響螺發音頻率之影響

參、研究設備與器材

- 一、 筆記型電腦
- 二、 旋轉控制台
- 三、 聲音感測器
- 四、 噪音計
- 五、 轉速錶
- 六、 熱電偶溫度計
- 七、 底片盒、竹籤、鋁罐、鋁箔紙
- 八、 竹製響螺、熱熔膠
- 九、 量角器
- 十、 游標尺

附圖：各項器材照片

旋轉馬達與支座	轉速控制與電源	底片盒材質響螺	訊號處理器
			
噪音計	熱電偶溫度計	竹製響螺	聲音感測器
			

肆、研究原理

一、兩端閉管駐波頻率特性：

在同一介質中，若有兩相同波長之波，相向而行，其相位差為 $1/2$ 時，則可互相干涉形成駐波(standing wave)。一般在入射波與反射波之間的相互干涉即為駐波；當在共鳴管中形成駐波的聲波頻率與管口外的音叉頻率相同時，則音叉會產生共鳴(resonance)的現象。共鳴管中可形成駐波的最低頻率稱為基音，以上則稱為泛音。當共鳴管氣柱中形成駐波時，在開口端處為波腹，在閉口端處則形成節點；如果兩端點皆為閉管，

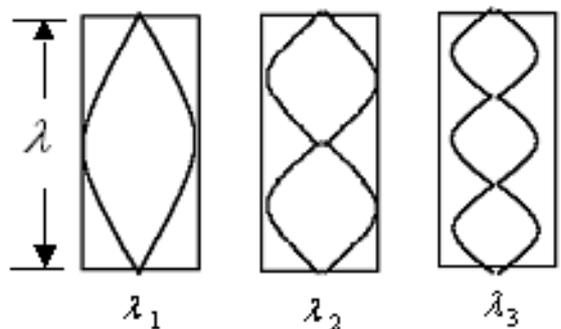
則會形程如右圖所示的駐波型態，因此可推得共鳴頻率之條件如(1)所示

$$f = \frac{nv}{2L} \quad \text{其中 } n=1,2,3,4 \quad (1) \quad \text{其}$$

中 L 為管長

$$\text{又聲音之速率為 } v=331+0.6t \quad \text{其中 } t \text{ 是溫度} \quad (2)$$

因此只要測量出共鳴管之長度與當時之溫度，便可利用(1)與(2)式，加以計算能引起共鳴之特定頻率有哪些，此時可以再與實驗值相比較，檢驗上式之

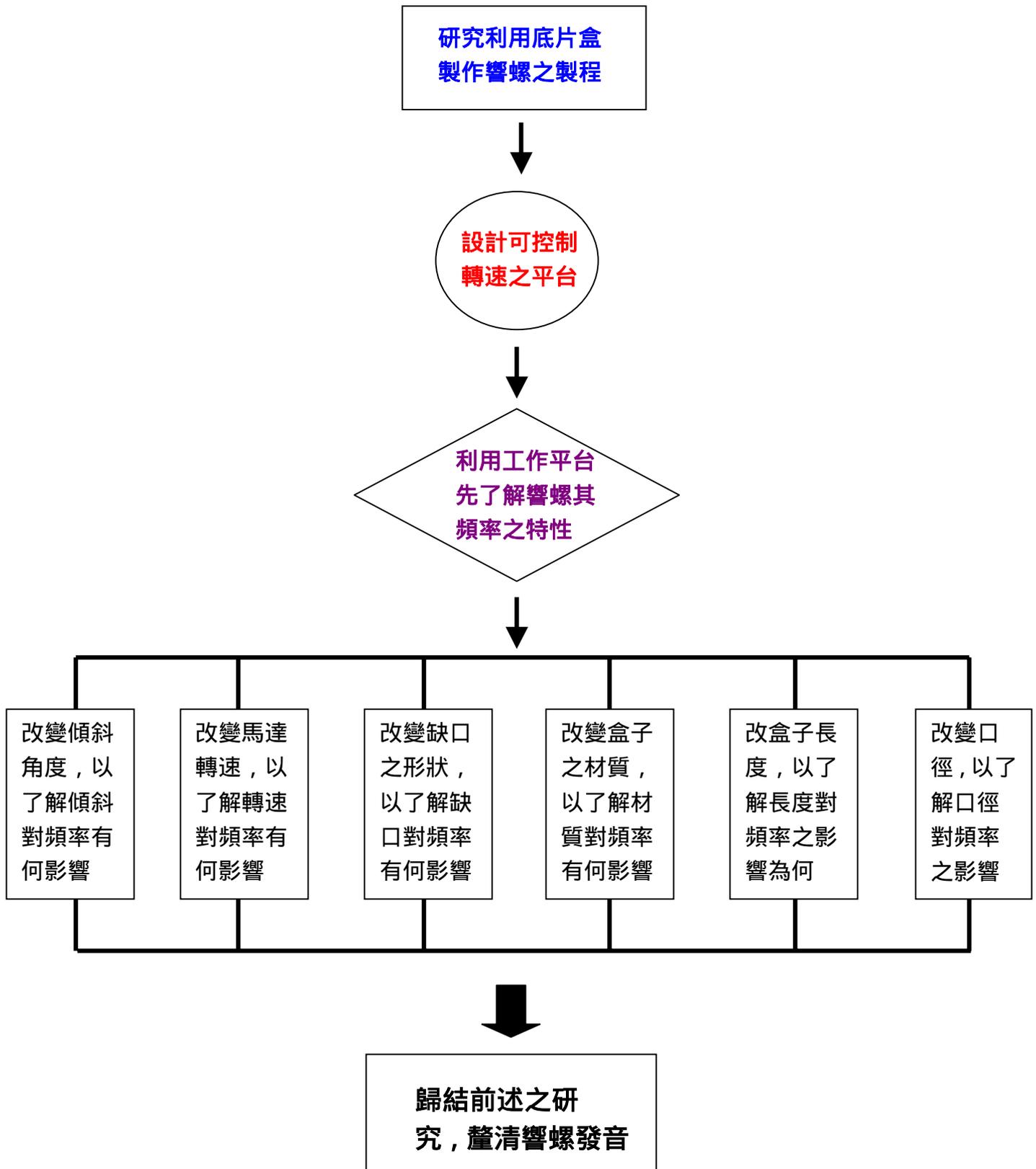


理論在響螺中是否可行。

二、邊稜效應：

笛子或響螺能產生聲音，是因為流動的空氣住被笛子或響螺缺口邊緣的稜邊，強制的地切成兩路。一路流入內部，另一路流出外部，空氣被強制切成兩路所產生的摩擦聲音即為發音之來源。

伍、研究流程



陸、研究過程

一. 過程一：研究如何利用底片盒來製作響螺

(一) 原本設計

在民俗技藝中有一種在旋轉的過程中會發出聲響的陀螺（如右圖所示），我們稱它為『響螺』，此陀螺是以竹子為主體切割成兩端開口，再以兩個圓形木片加以封住上下兩端，在上下各鑽一個洞，將竹籤從中央插入，完善後在竹子本體腹部切割出長方形的缺口，最後以棉線纏繞並拉動，使之旋轉而發出聲音。



此項作品需要利用鋸子與雕刻刀加以完成，對於學生而言是屬於較危險且複雜的工作，因此本研究嘗試以較簡易的底片盒加以製作，希望能減少危險性與帶來便利性。

(二) 後來設計

本研究利用底片盒與竹籤組合形成作品，製作過程如下圖所示，並在圖之下方加以說明。



在底片盒腹部切割出長方形缺口。



再以竹籤從底片盒中央處插入並刺穿底部。



最後以熱融膠在竹籤與底片盒交接處上膠（上與下），使兩者緊密結合。

(三) 分析

1. 空底片盒可以在照相館免費索取，且竹籤亦相當便宜，製作過程只需利用刀子切割洞口，所以用此材料來製作響螺相當省錢、方便且安全。
2. 所製成的響螺在旋轉過程中，底片盒與竹籤有可能會鬆脫分離，因此必須利用熱融膠加以固定。
3. 上熱融膠時，膠的量不需太多且需盡量均勻，以免影響旋轉時之穩定性。

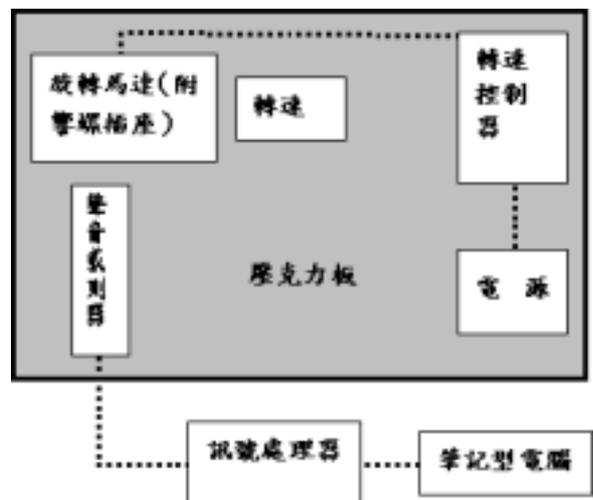
二.過程二：設計可控制轉速與測量頻譜之工作平台

(一) 設計緣由

在研究一開始我們發現轉速是影響頻率的其中一項因素，而且每一次利用手工方式打出去的轉速皆不相同，因此為了固定與改變旋轉速率，本研究小組嘗試規劃一個可控制轉速的工作平台，再請廠商把成品製作完成。

(二) 設計結果

1. 設計平面圖如右圖所示，底座為壓克力板，其中旋轉馬達中心軸附有響螺可插入的固定座，此座可以調整傾斜之角度。
2. 轉速錶可以測出馬達之轉速，以作為固定或調整轉速用之依據。
3. 轉速控制器可以調整旋轉之快慢，以固定或調整轉速。
4. 響螺所發出之聲音以聲音感測器加以收集後傳至訊號處理器 (workshop)，再傳送至電腦，形成頻率與聲音強度圖。



(三) 分析

1. 此工作平台在運作時會產生雜音與振動，因此在實驗時應予固定，以避免雜

訊干擾實驗。

2. 使用轉速錶時應在馬達轉軸處貼一反光平面板，以利訊號之反射與接收，而所測得之轉速幾乎為一固定值，因此利用轉速錶所得轉速能當作轉速依據用。

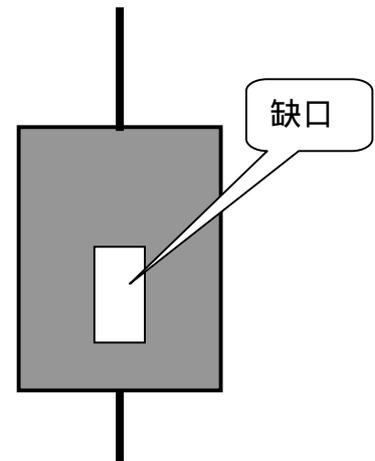
(四) 討論

在實驗過程中發現此平台在控制轉速與測量頻率等兩方面有良好的效果與方便性，因此本設計對此實驗而言應是可行。

三.過程三：了解響螺發音頻率之特性

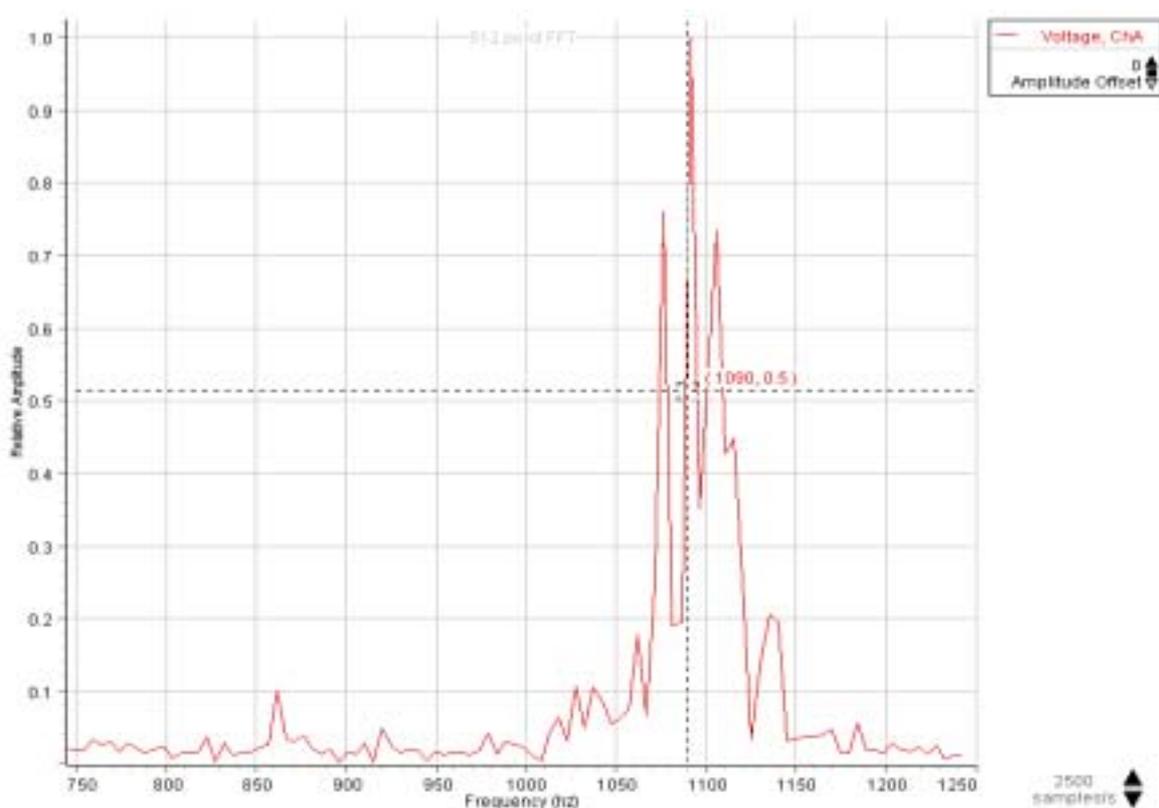
(一) 步驟：

本研究想了解響螺所發出來的聲音，其特性為何？因此利用前述之工作平台並搭配底片盒製成的響螺，進行研究，並且事先在響螺腹部切出長 1.5 公分、寬 0.5 公分長方形的開口（如右圖所示），固定轉速控制器之刻度，利用聲音感測器與電腦擷取十次頻率之數據並存檔。



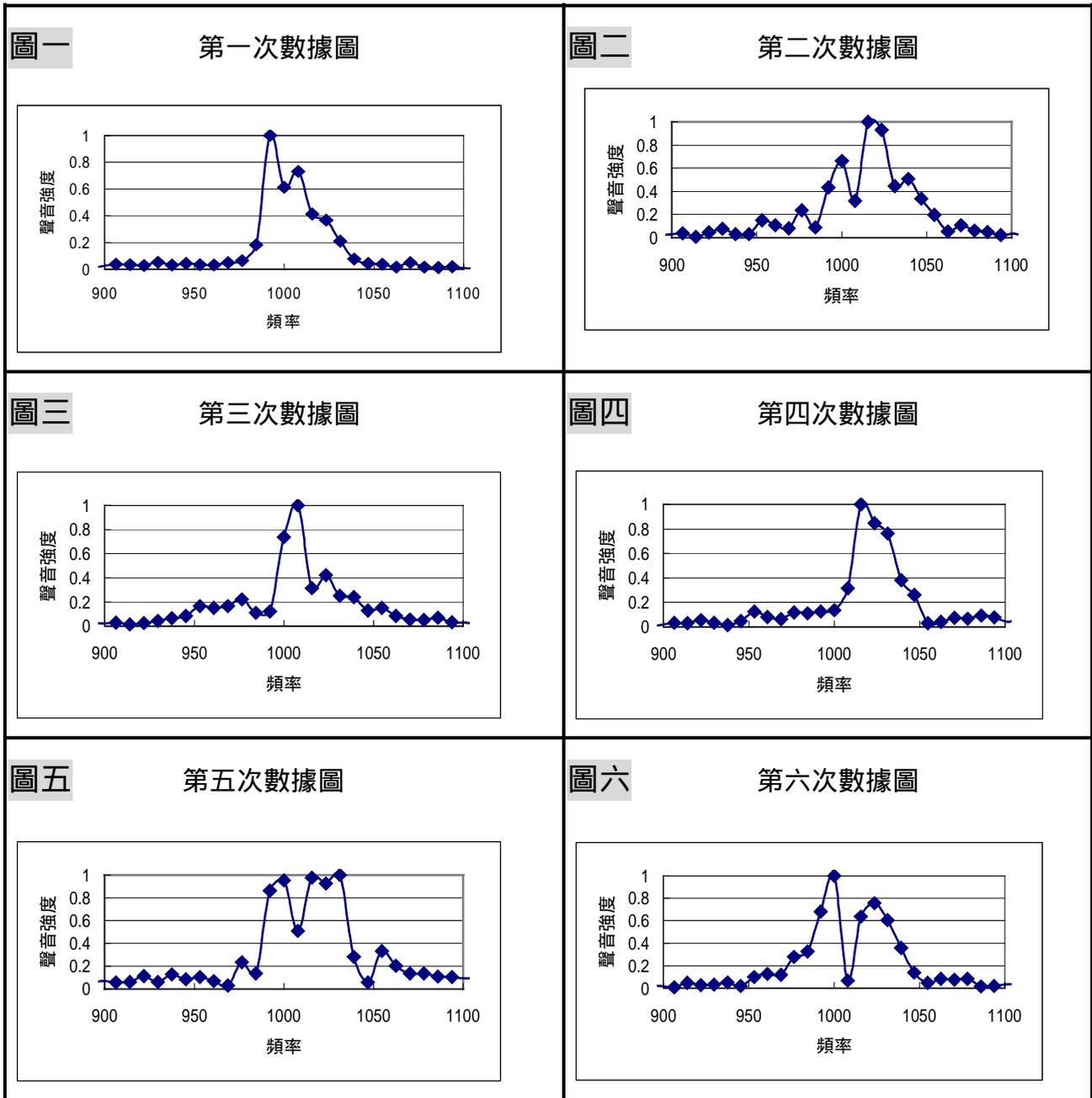
(二) 結果：

經由聲音感測器傳送至電腦之資料所顯現的圖形如下圖所示。



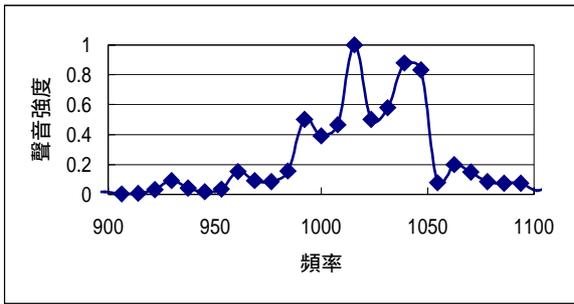
圖形說明：由聲音感測器傳送至電腦所形成的座標圖中，橫軸為頻率（單位為赫茲），縱軸為聲音之強度，圖中設定聲音強度最強者的波幅為 1，根據上圖所示，經由十字虛線搜尋到強度最強的頻率約為 1090Hz 附近。

根據所得的圖形，把數據加以輸出後，會形成純文字檔，再將此檔案以 Excel 軟體加以處理，使得不同次的圖形得以疊加在一起，最後畫成圖形如下圖所示。



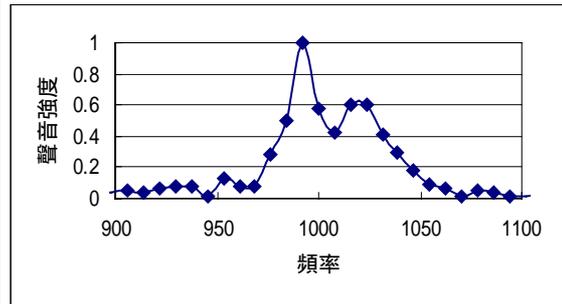
圖七

第七次數據圖



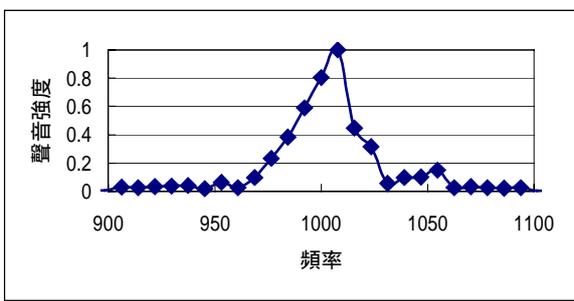
圖八

第八次數據圖



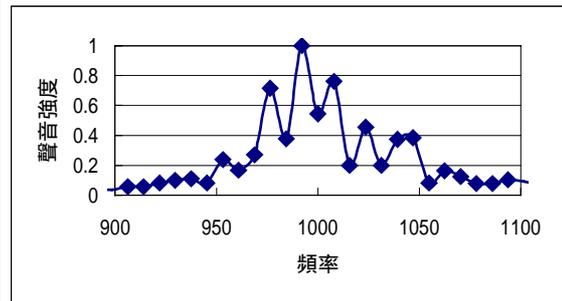
圖九

第九次數據圖



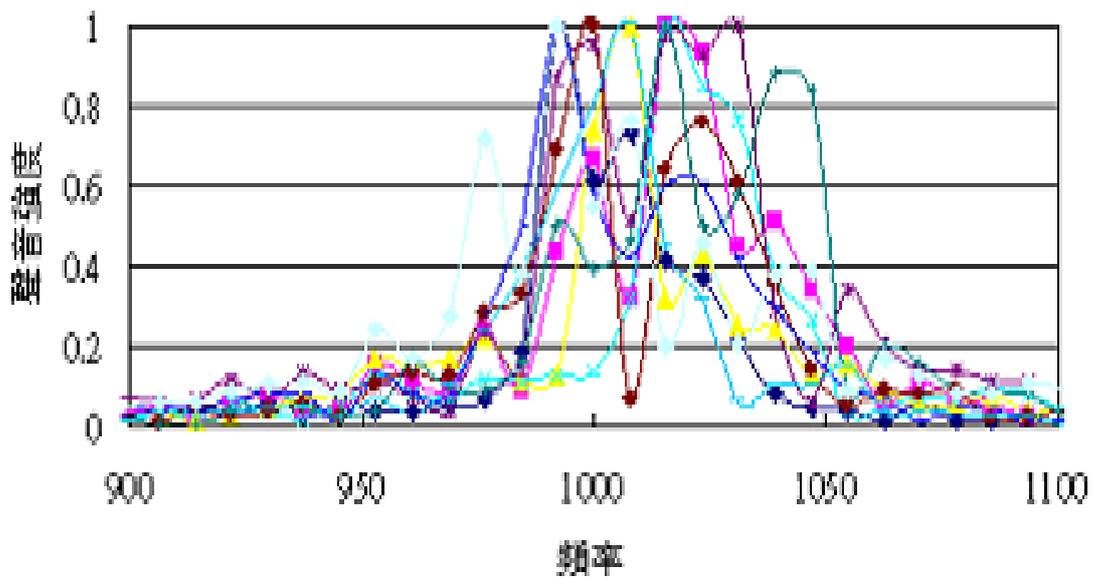
圖十

第十次數據圖



把上述十次所得數據之圖形加以疊加在一起，可得下面之綜合圖。

十次數據綜合圖



(三) 分析

上圖中的主要頻率並不固定，因此找出其共同的分布曲線，再由此曲線之半弧高處，取中央頻率當作特徵頻率，根據上述方式所得特徵頻率約為 1010Hz，所得如右圖所示。

(四) 實驗討論

1. 由上圖十條曲線中的任一條，可發現響螺在旋轉過程中所發出的頻率並非單一頻率，其中包含有特徵頻率與多個次要之頻率，因此為多頻率的混頻。

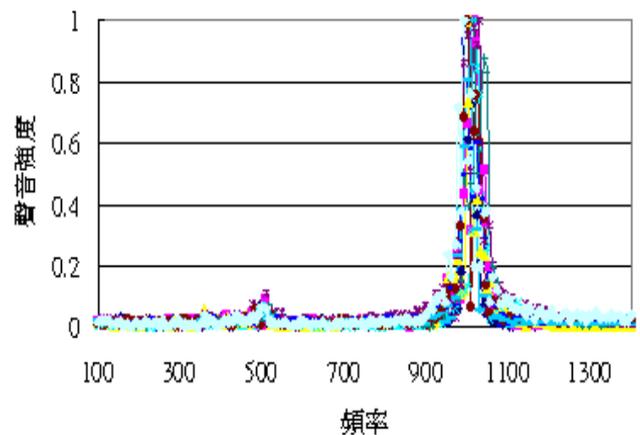
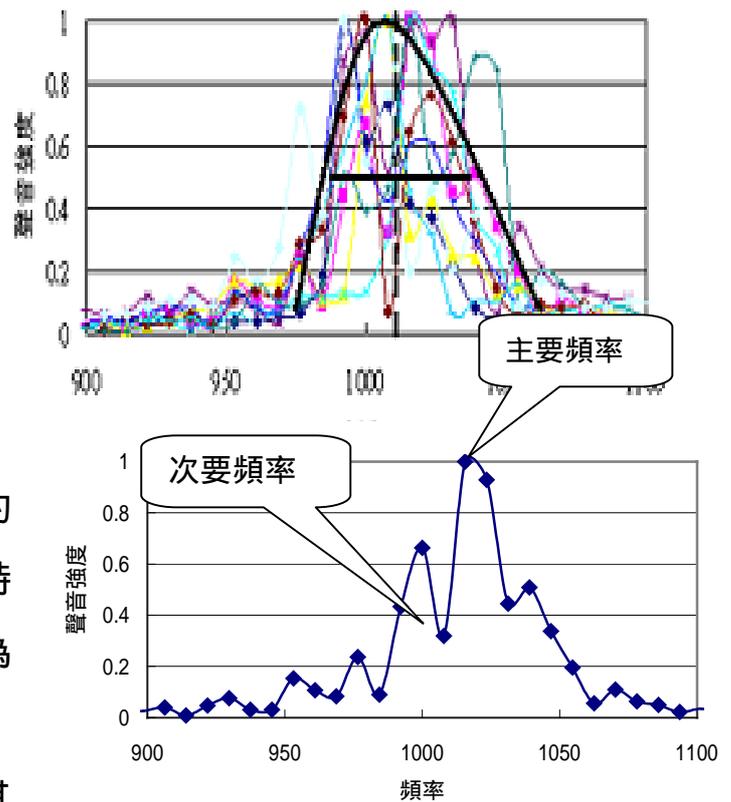
2. 右圖為將整個數據合成之圖形，其中特徵頻率為 1010Hz，但我們也有注意到，在 500Hz 之附近也有一個峰值，此兩頻率相差約 2 倍，代表在共鳴管內的共鳴頻率有著整數倍之關係，只是在此狀態下允許 1010Hz 之頻率存在。

3. 在圖形中尚有其他更小的峰值，此應為背景頻率，因此在做此實驗時週遭儘可能無雜音，避免影響特徵頻率之判斷。

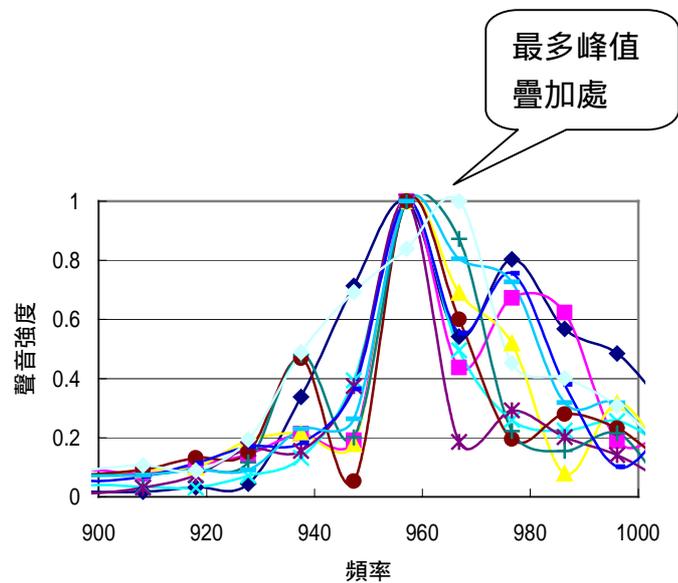
4. 響螺在旋轉過程中所發出的特徵頻率也並不固定，因此在決定特徵頻率時，先找出其共同的分布曲線，再取此曲線半弧高處之中央處的頻率為特徵頻率，因為此頻率為最有可能頻率。

5. 在找出其共同的分布曲線之前應先將偏離主要區域的曲線剔除在外，以免影

十次數據綜合圖



響特徵頻率之判斷。



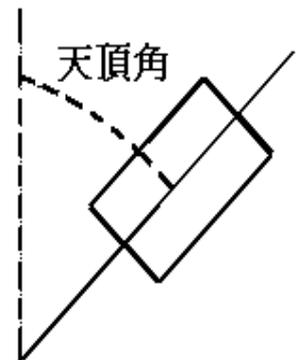
6. 另外也可以依據最多個峰值疊加處來決定特徵頻率之值，此外也可以將十個峰值之頻率相加後平均，也是另一種找尋特徵頻率的方式。

四.過程四：了解響螺傾斜對頻率之影響

步驟一：

緣由：本研究一開始時是把響螺垂直插在馬達轉軸中心處，轉動時並無法發出聲音，經由改變角度令其傾斜後，可以發出聲音，因此才会有改變角度之實驗。

定義：『天頂角』 即是以觀察者頭頂之方向為基準，亦即為 0 度，如與頭頂之間有一夾角，此夾角稱為天頂角（如右圖所示）。



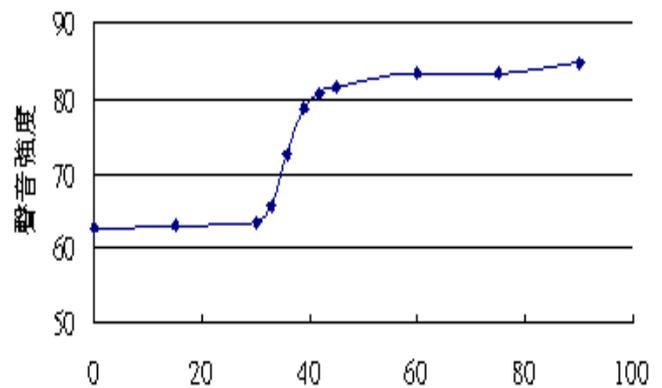
說明：從垂直方向天頂角為零開始改變至水平方向天頂角 90 度止，每隔 15 度為一測量點，另外在 30 至 45 度間再增加 4 個點，共計 11 個測點，在每一個測點同時以噪音計加以測量聲音之強度五次，除此之外還需測量背景聲音之強度以作為比較之用。

(一) 結果：測點聲音強度 (單位：分貝)

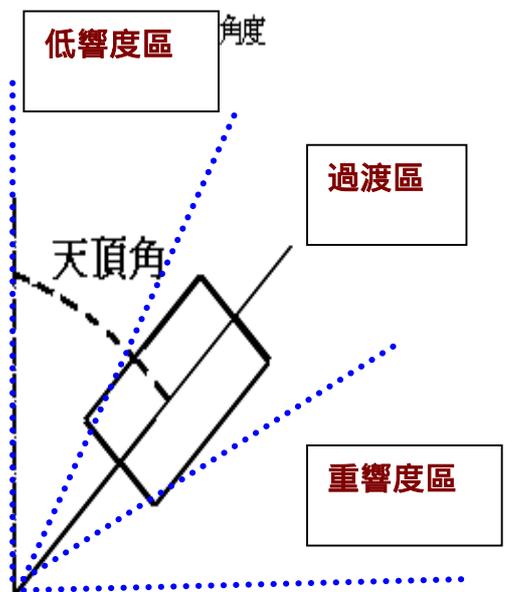
實驗項次	天頂角角度	數據一	數據二	數據三	數據四	數據五	平均
背景聲音強度		62.1	61.9	61.7	61.8	62	61.9
1	0	62.6	62.9	62.5	62.6	62.8	62.7
2	15	63.1	62.8	63.1	63.2	62.9	63.1
3	30	63.6	63.8	63.4	63.6	63.5	63.6
4	33	66.5	66.8	66.4	66.6	66.6	65.6
5	36	72.3	72.6	72.1	72.5	72.3	72.4
6	39	78.7	78.4	78.4	78.6	78.5	78.5
7	42	80.9	80.5	80.7	80.8	80.9	80.8
8	45	81.5	81.2	81.6	81.3	81.5	81.4
9	60	82.9	83.4	83.4	83.5	83.7	83.4
10	75	83.1	83.6	83.4	83.3	83.6	83.4
11	90	84.6	84.7	84.3	85.0	85.2	84.8

(二) 分析與討論：

1、將上述角度對聲音強度平均值作圖
如右圖所示，由圖形可以看出聲音之強度在傾斜角 30 度到接近 60 度之間有較大之變化，因此我們可以將上圖中的角度分成三個不同的區域 (如下圖所示)。



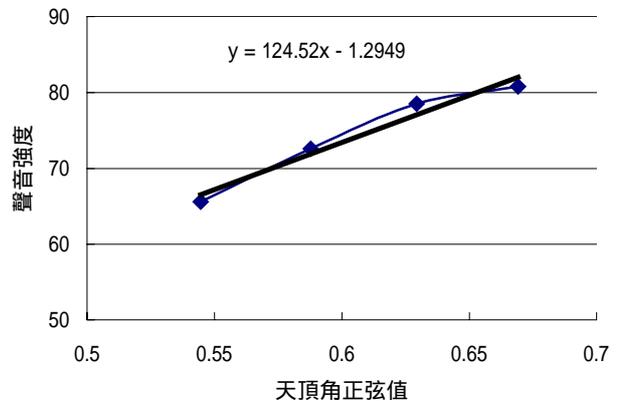
2、其中 0 到 30 度因為響度較低，我們稱呼它為低響度區，主要是因為在此角度範圍內缺口處與空氣之摩擦較小，所以聲音強度最弱。



3、另外 30 到 60 度因為響度有劇烈變化，我們稱呼它為過渡區，主要是因為在此角度範圍內缺口處與空氣之摩擦呈現較不穩定狀態，所以聲音強度有所不同。

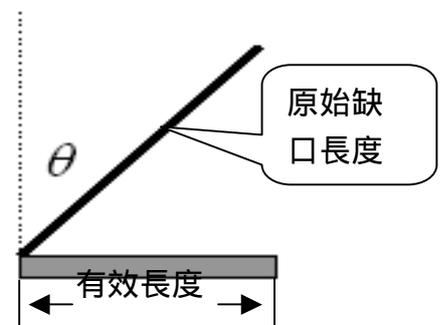
4、最後在 60 到 90 度因為響度最強，因此我們稱呼它重響度區，主要是因為在此角度範圍內缺口處與空氣之摩擦較劇烈，所以聲音強度最強。

天頂角正弦值對聲音強度作圖



5、聲音強度突升的天頂角區間（由 33

度至 42 度）特別加以分析：將此區間的天頂角取正弦值後，再對聲音強度作圖，如右圖所示，由圖形可發現天頂角取正弦值（如下圖所示）後與聲音強度幾乎成正比，亦即響螺在過渡區階段，其聲音強度會與響螺缺口高度之有效長度（原長取正弦值）有正比關係。



6、根據 $v=r\omega$ ，當角度變大時期旋轉半徑亦變大，雖角速率不變，但線速率變大，因此相對空氣之流速變快，吹入之動能增高，所以響度會增高。

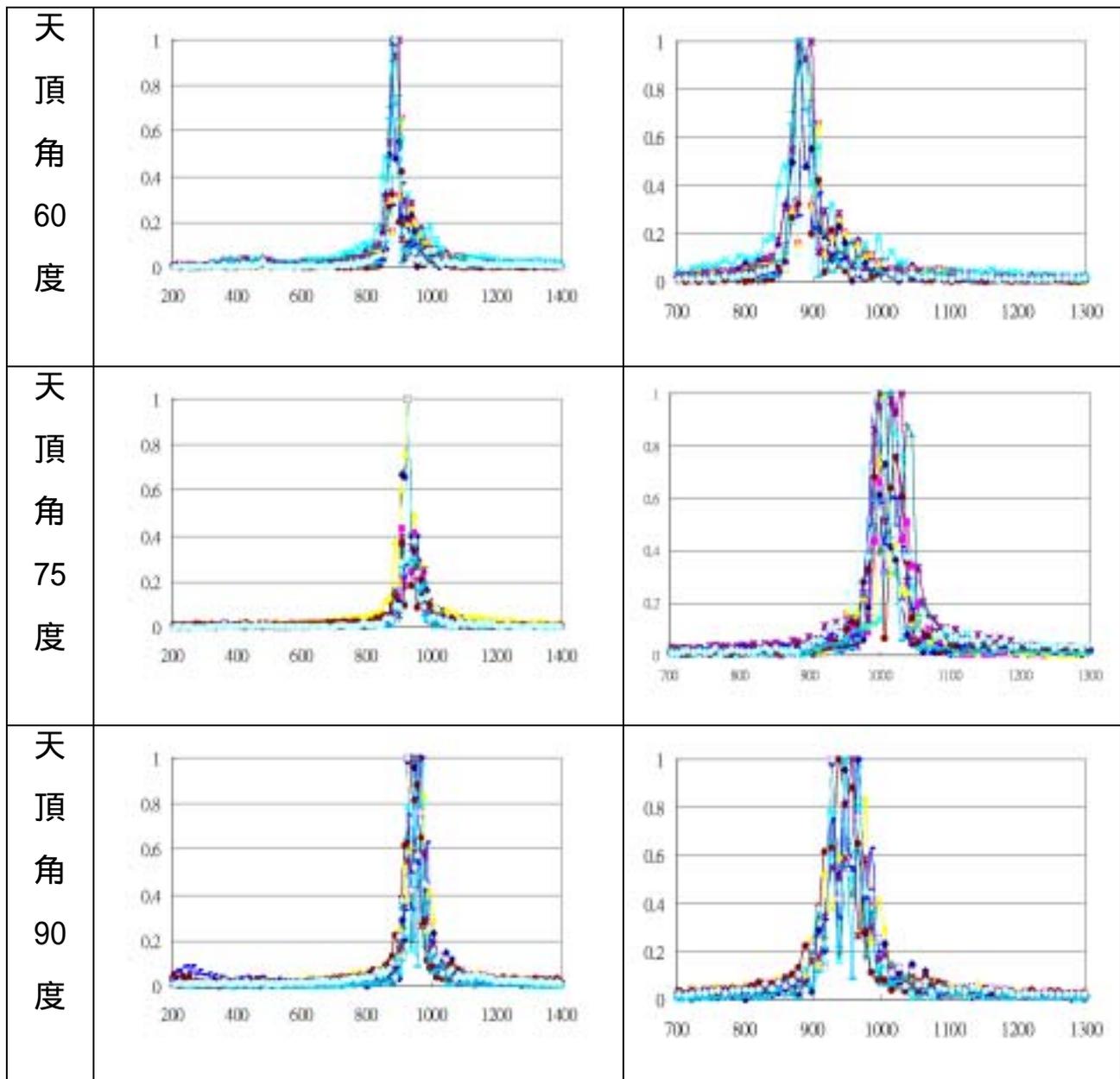
7、由實驗結果可以理解響螺之發聲原因為響螺本體在不穩定狀態下（本體不為直立而有傾斜），缺口與空氣互相摩擦而導致聲音之產生。

步驟二：

如同前一實驗之測點，以每隔 15 度之點為測點，分別擷取頻譜數據各 10 組，再將十次數據所得圖形合併成一圖形。

（一）結果：以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度

說明	十次數據綜合圖	峰值放大圖
天頂角 0 度		
天頂角 15 度		
天頂角 30 度		
天頂角 45 度		



(二) 分析討論：

1. 由圖形去分析每一測點之特徵頻率，結果如下表所示：

天頂角	0	15	20	25	30	45	60	75	90
特徵頻率	不明顯	不明顯	1039 Hz	1101 Hz	1015Hz	830Hz	888Hz	907Hz	947Hz

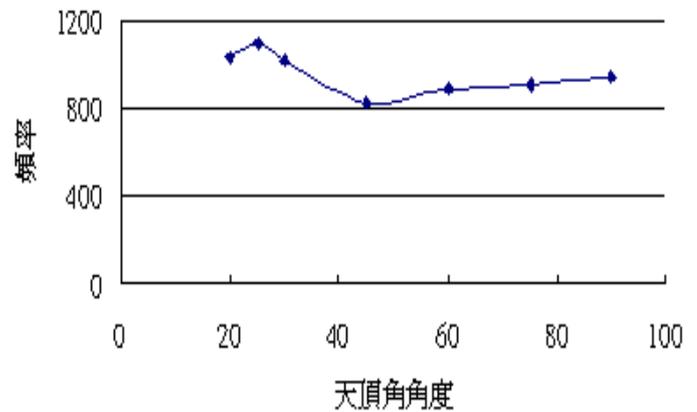
上述之數據作成圖形（如右圖所示），可發其特徵頻率會隨著天頂角角度變大而有先升後降、最後又升高之趨勢。

2. 現在 0 至 30 度前低角度傾斜時，其特徵頻率並不彰顯，主要原因為在此區為低摩擦區，與空氣摩擦情況不明顯，使得特稱頻率無法凸顯出來。

3. 在改變角度過程中，以 45 度附近時之頻率最低，主要原因為在此區為過渡區，雖有與空氣摩擦，但因不穩定使得頻率較高的特徵頻率無法保住，因而退回頻率較低的特徵頻率。

4. 當角度大於 60 度後，特徵頻率亦逐漸增高，主要原因是此區為重響度區，與空氣摩擦甚烈，因此造成除了響度增大外，頻率亦跟著增高。

天頂角與頻率關係圖



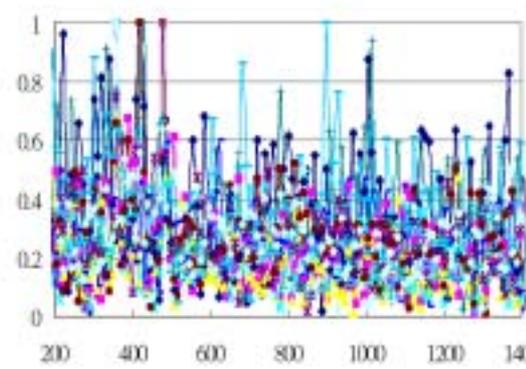
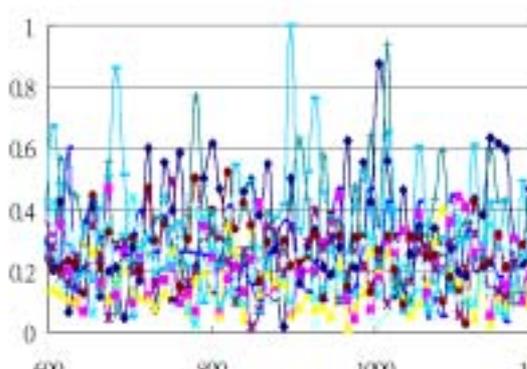
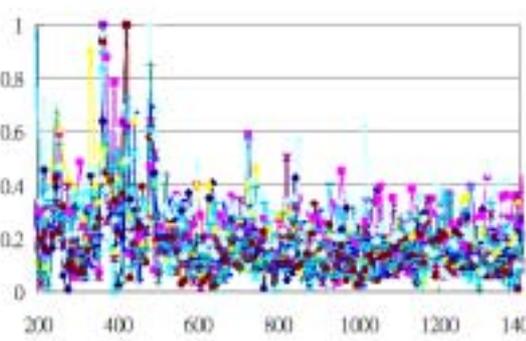
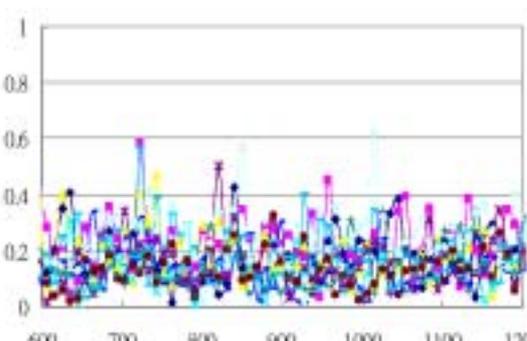
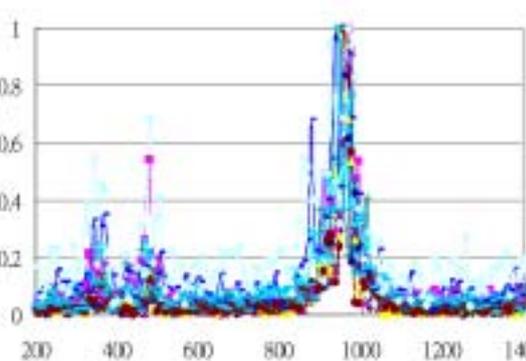
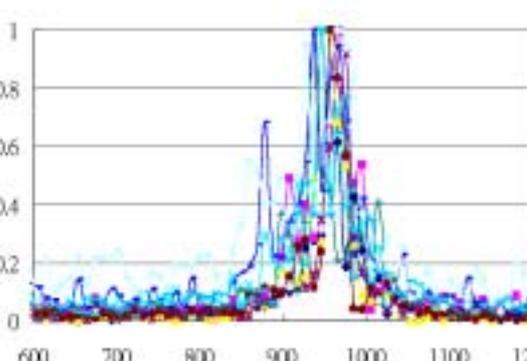
五.過程五：了解轉速對響螺發音頻率之影響

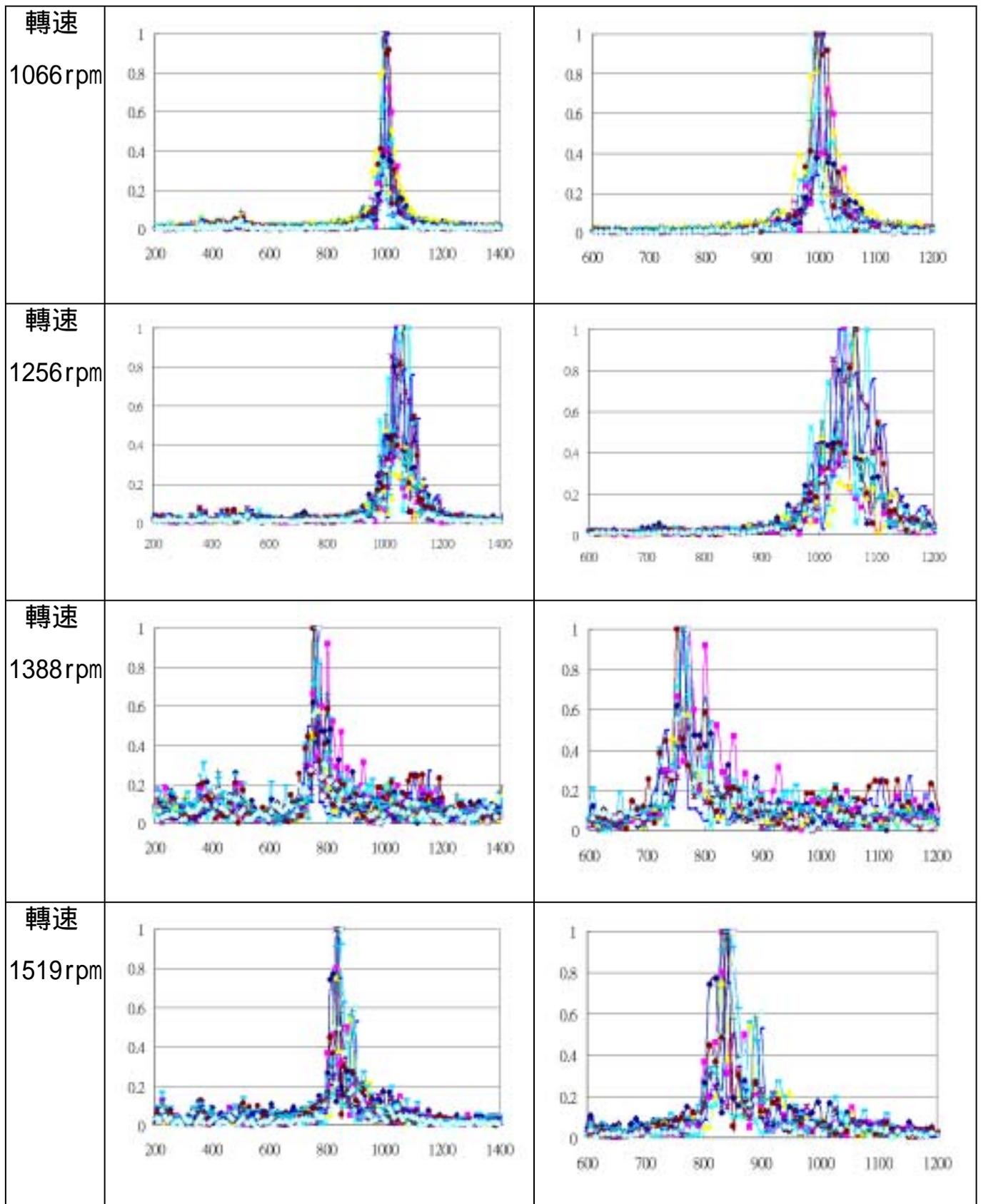
(一) 步驟：

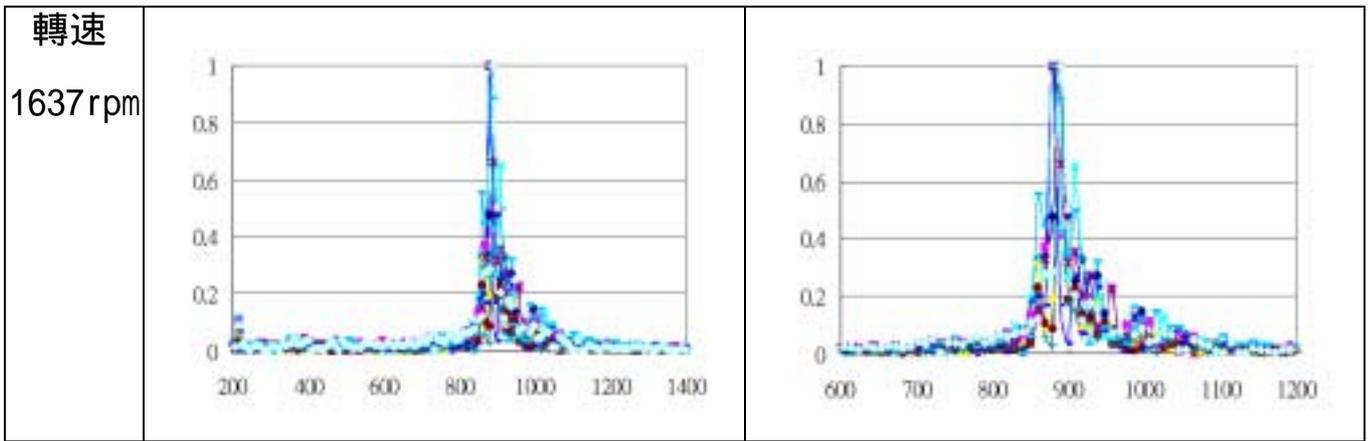
為了瞭解轉動快慢對響螺頻率是否有影響，於是對同一響螺固定其他因素而改變不同的轉速，且在不同轉速下皆測量十組數據。

(二) 結果：

以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度

說明	十次數據綜合圖	峰值放大圖
轉速 475rpm	 <p>Frequency spectrum plot for 475 rpm. The x-axis represents frequency from 200 to 1400 Hz, and the y-axis represents sound intensity from 0 to 1. The plot shows a dense distribution of peaks across the entire frequency range, with several prominent peaks reaching an intensity of 1.0.</p>	 <p>Zoomed-in frequency spectrum plot for 475 rpm. The x-axis represents frequency from 600 to 1200 Hz, and the y-axis represents sound intensity from 0 to 1. This view highlights several sharp peaks, with the highest reaching an intensity of 1.0.</p>
轉速 641rpm	 <p>Frequency spectrum plot for 641 rpm. The x-axis represents frequency from 200 to 1400 Hz, and the y-axis represents sound intensity from 0 to 1. A very prominent peak is visible at approximately 400 Hz, reaching an intensity of 1.0. Other smaller peaks are scattered across the frequency range.</p>	 <p>Zoomed-in frequency spectrum plot for 641 rpm. The x-axis represents frequency from 600 to 1200 Hz, and the y-axis represents sound intensity from 0 to 1. The plot shows a relatively flat spectrum with several small peaks, none reaching an intensity of 1.0.</p>
轉速 876rpm	 <p>Frequency spectrum plot for 876 rpm. The x-axis represents frequency from 200 to 1400 Hz, and the y-axis represents sound intensity from 0 to 1. A very sharp and narrow peak is observed at approximately 950 Hz, reaching an intensity of 1.0. There are also smaller peaks at lower frequencies.</p>	 <p>Zoomed-in frequency spectrum plot for 876 rpm. The x-axis represents frequency from 600 to 1200 Hz, and the y-axis represents sound intensity from 0 to 1. This view clearly shows the sharp peak at approximately 950 Hz, which reaches an intensity of 1.0.</p>



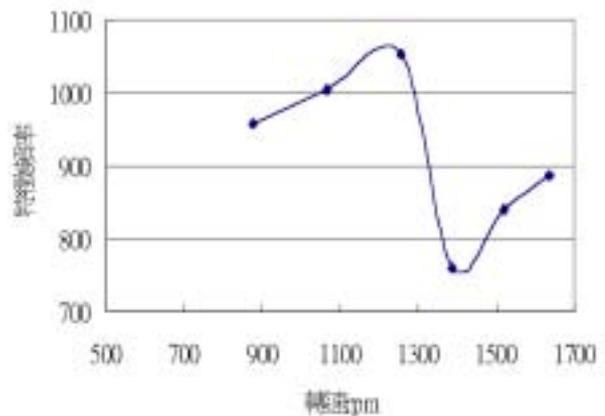


(三) 分析與討論

1. 不同轉速所對應的特徵頻率如下表所示：

轉速	475rpm	641rpm	876rpm	1066rpm	1256rpm	1388rpm	1519rpm	1637rpm
特徵頻率	無	無	957Hz	1005Hz	1054Hz	761Hz	839Hz	886Hz

2. 將數據加以作圖，由右圖可發現當轉速較慢時，特徵頻率並不明顯，此乃在低轉速與空氣的摩擦震動所產生之頻率與底片盒之引起共振之條件不吻合，故無共振現象發生。



3. 當轉速逐漸增加至接近 900rpm 附近時，特徵頻率相當明顯，亦即在此轉速時，缺口與空氣摩擦產生之聲音頻率符合共振管內共振之條件，因此

能量可以保持住。

4. 當轉速增加至 1300rpm 附近時，特徵頻率突然下降，此因共鳴中具有過渡段無法共鳴，能量無法吸收，因而回到較低的特徵頻率來，如上圖所示之共鳴條件情形圖形所示。

5. 當轉速持續增加時頻率亦跟著增加，但受限於響螺結構之問題（會斷掉），使得轉速無法增加太高，因此更高轉速的數據無法呈現，此有待更深入之研究。

6. 由轉速的實驗中可以了解到，響螺本體之轉速是影響其發音頻率的一項因素。

六.過程六：了解缺口形狀對響螺發音頻率之影響

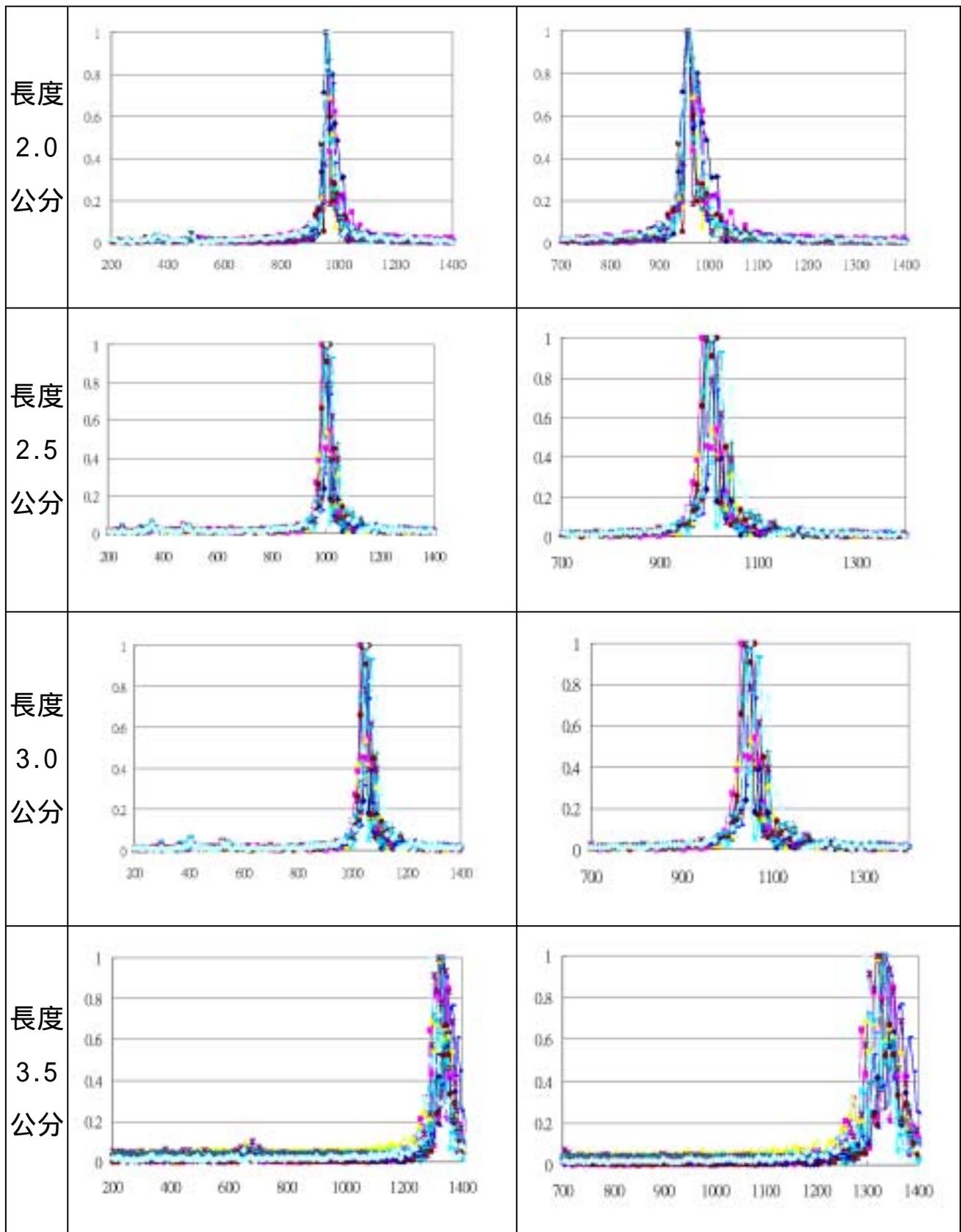
(一) 步驟一：改變缺口之高度

1. 過程：

為了解缺口高度對頻率有否影響，於是利用原始高為 0.5 公分，寬為 0.5 公分之缺口，逐步將高度每隔 0.5 公分擷取十次數據，最後把缺口高度加高成 3.5 公分。

2. 結果：以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度。

說明	十次數據綜合圖	峰值放大圖
長度 0.5 公分		
長度 1.0 公分		
長度 1.5 公分		

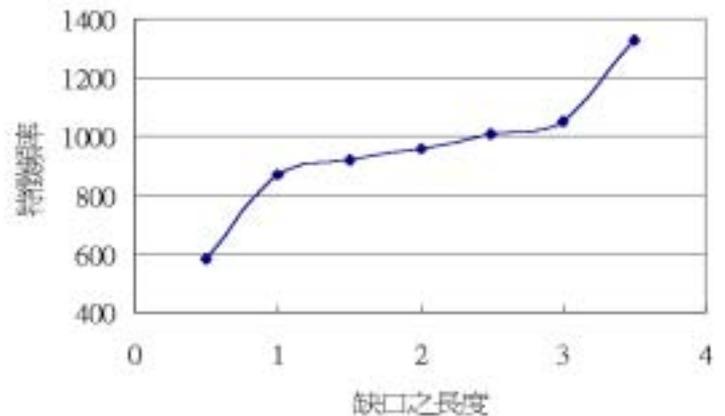


3. 分析與討論

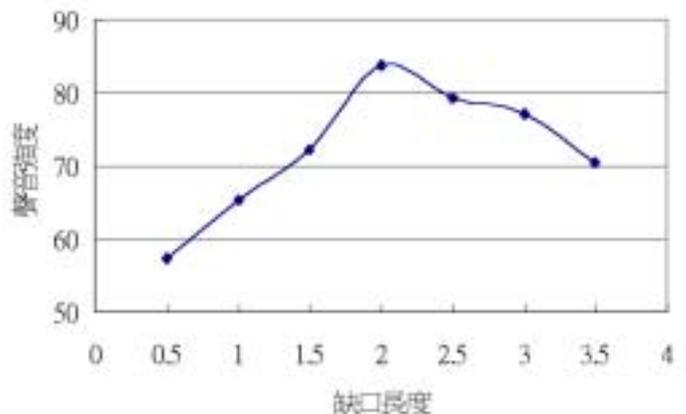
- a. 改變缺口長度後將所得的特徵頻率與缺口長度製成表格，並加以作圖，結果如下所示：

缺口長度	0.5 公分	1.0 公分	1.5 公分	2.0 公分	2.5 公分	3.0 公分	3.5 公分
缺口面積	0.25 平方公分	0.5 平方公分	0.75 平方公分	1.0 平方公分	1.25 平方公分	1.5 平方公分	1.75 平方公分
特徵頻率	585Hz	867Hz	917Hz	957Hz	1005Hz	1050Hz	1328Hz
聲音強度	57.3	65.3	72.2	83.8	79.3	77.1	70.4

- b. 在右圖中可發現缺口之長度愈長，其特徵頻率也愈高，其原因為長度愈長與空氣摩擦愈大，因此缺口之長度也是影響特徵頻率的其中一項因素。

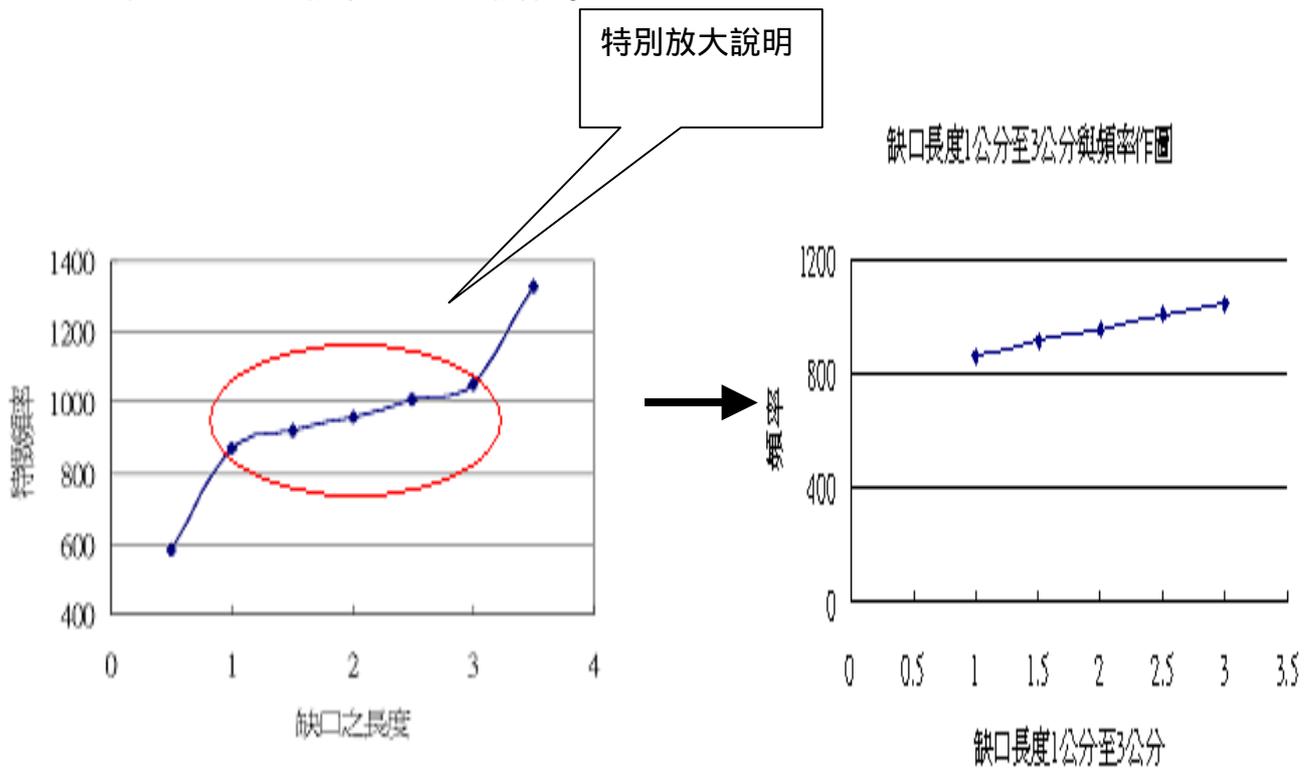


- c. 將缺口長度與聲音強度作圖，可得下圖，可知缺口太小無法讓空氣進入，於是聲音較弱，缺口太大反而無法保有聲音之能量。



- d. 由上圖缺口長度可發現在 1 公分至 3 公分幾乎成一直線，因此將此處特別放大，從放大之圖形可知道（如下圖所示），缺口之長度在

適當的範圍（1 公分至 3 公分）內其頻率與長度會有正比的關係，亦即頻率與缺口面積有正比之關係。



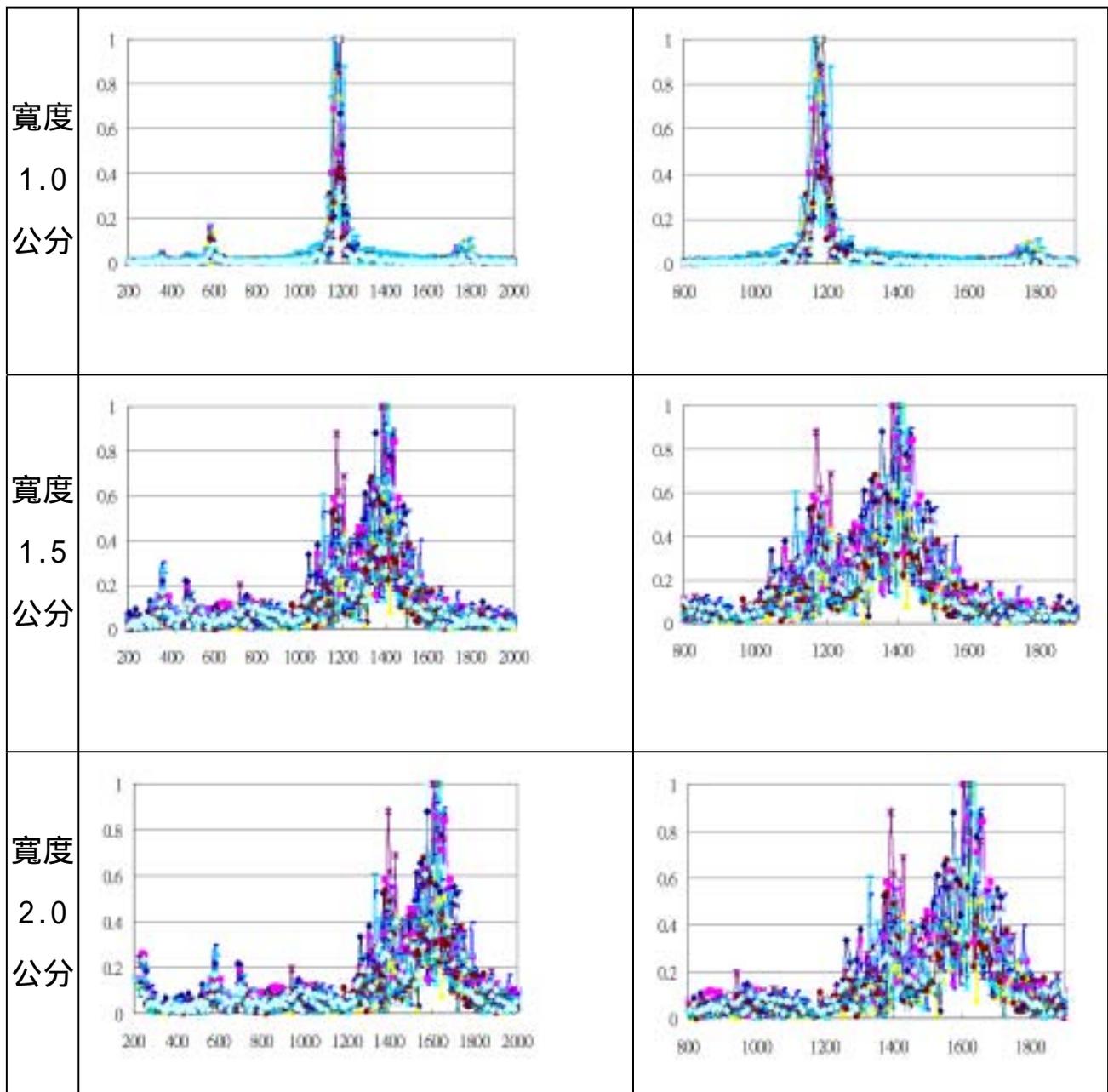
(二) 步驟二：改變缺口之寬度

1. 過程：

為了解缺口寬度對頻率有否影響，於是利用原始高為 2.0 公分，寬為 0.5 公分之缺口，逐步將寬度每隔 0.5 公分測量十次，最後把缺口寬度加寬成 1.0 公分、1.5 公分、2.0 公分等幾項。

2. 結果：以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度

說明	十次數據綜合圖	峰值放大圖
寬度 0.5 公分		



3. 分析與討論：

a. 找出上述圖形之特徵頻率，再與缺口寬度製成表格與作圖，如下所示：

缺口寬度	0.5 公分	1.0 公分	1.5 公分	2.0 公分
缺口面積	0.25 平方公分	0.5 平方公分	0.75 平方公分	1.0 平方公分
特徵頻率	961Hz	1181Hz	1406Hz	1626Hz
分貝	72.7	80.4	82.3	77.9

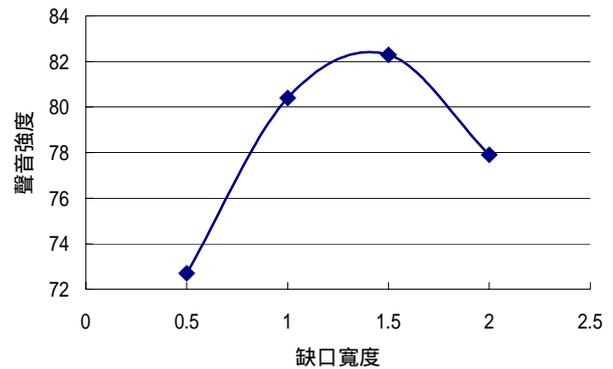
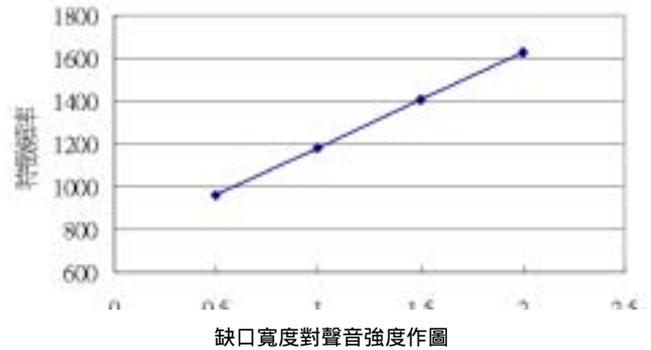
由圖形可知，增大缺口之寬度同時會使特徵頻率增高，且幾乎成正比，由此可知寬度與頻率成正比，亦即缺口面積與頻率成正比。

b. 上述頻率會增高之原因為寬度增大時會與空氣之摩擦更劇烈，因此特徵頻率相對亦會增高。

c. 增大缺口之寬度同時會使聲音之強度增大(如右圖所示)，其原因為與上述相同，因此洞口加寬不僅使其特徵頻率增高同時也會加大聲音強度。

d. 缺口如太寬，其聲音強度反而會下降，主要是因為洞口太大，聲音能量反而比較無法保住。

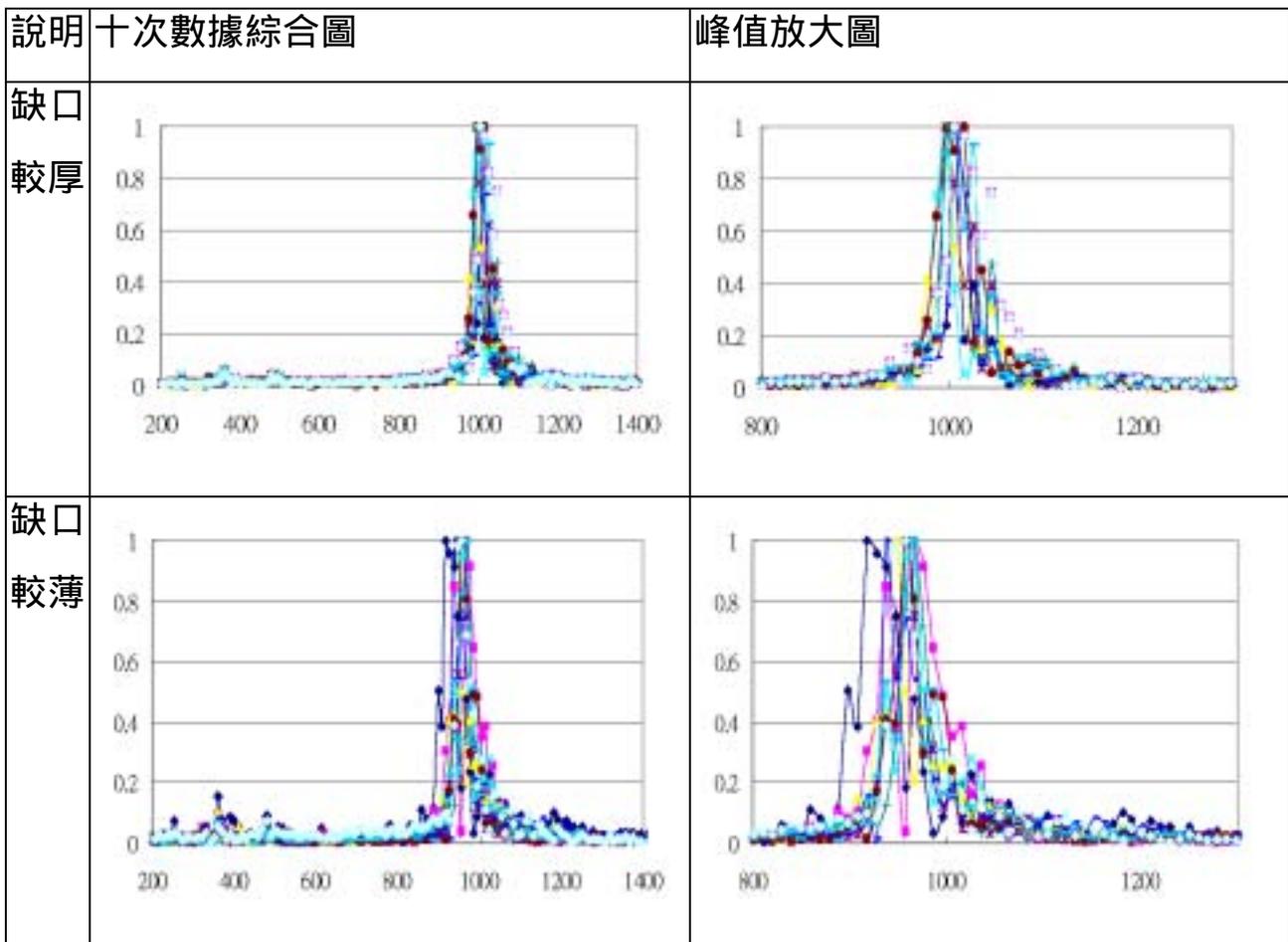
e. 由前面兩個實驗（改變缺口高度與寬度）都可以得出它們與頻率都有成正比之關係，因此我們從實驗結果可以認定缺口面積與頻率有正比的相關性。



(三) 步驟三：改變缺口之厚度

1. **過程**：為了了解缺口之厚度是否會影響頻率，於是我們將缺口削薄，再與原始未削薄的底片盒進行頻率測量，再固定其他因素，測量頻率十次。

2. **結果**：以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度



3. 分析與討論：

a. 將缺口由原來之厚度改成較薄，所得特徵頻率如右表所示，可知缺口之厚度愈薄，其特徵頻率會較低。

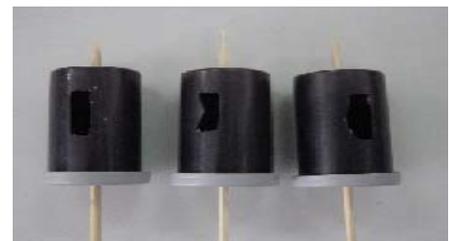
缺口型態	厚	薄
特徵頻率	1005Hz	966Hz
分貝	76.9	84.3

b. 缺口之厚度愈薄的振動與鋼片振動相似，愈薄的鋼片在振動時，振幅會較大但其頻率會較低，愈厚的振幅會較小但頻率較高。

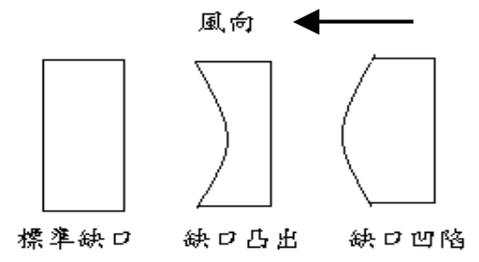
c. 由實驗可知如把缺口削薄，會使得特徵頻率降低，但是聲量會變的較響。

(四) 步驟四：改變缺口受風邊之凸與凹

1. **過程：**為了了解缺口形狀到底對頻率是否有影響，於是改變缺口受風邊之形狀（如右圖照片所示），固定轉速與傾斜角度，測量十次。



2. **結果**：以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度。



說明	十次數據綜合圖	峰值放大圖
缺口為直線		
缺口為凸		
缺口為凹		

3. 分析與討論：

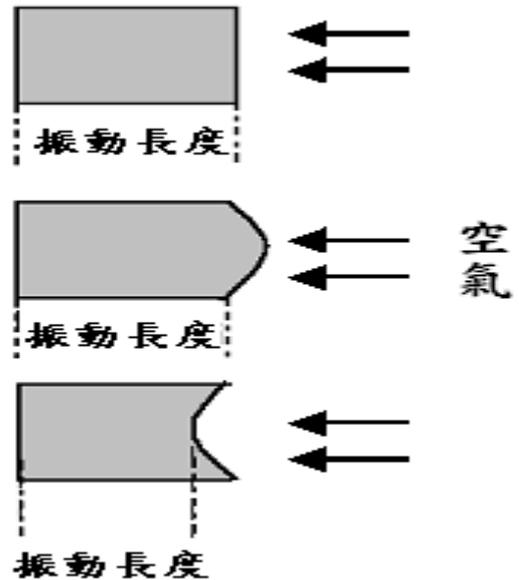
a. 將上述不同形狀缺口的特徵頻率求出後製成表格，如右表所示。

缺口形狀	直線	凸	凹
主要頻率	957Hz	927Hz	1030Hz

b. 不同缺口形狀有不同之特徵

頻率，其中以凸出的型態頻率最低，凹的型態頻率最高，其原因為缺口為凸者其振動長度較長，凹者較短（如右圖所示），如彈簧一般，彈簧愈長，其振動頻率會較低，愈短者頻率會較高。

c. 可見缺口的形狀也是影響特徵頻率的其中一項因素。



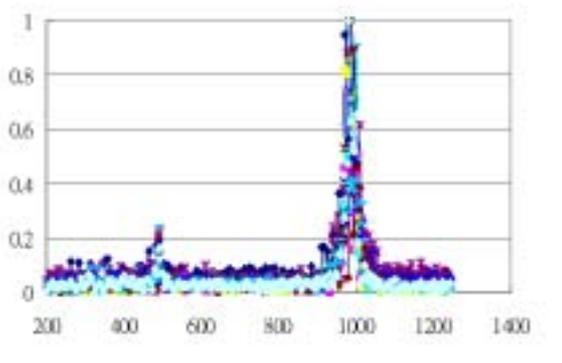
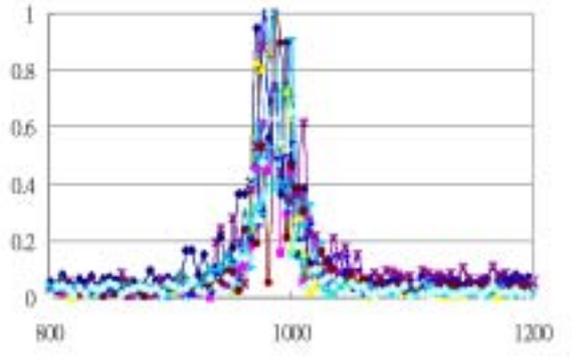
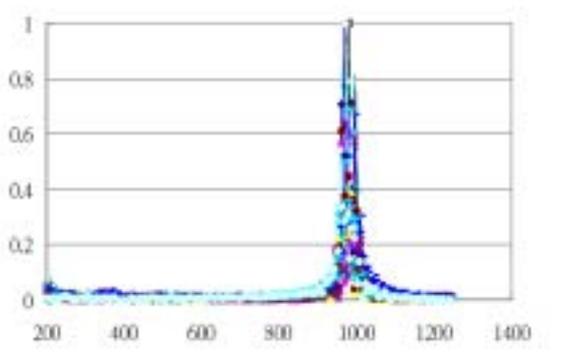
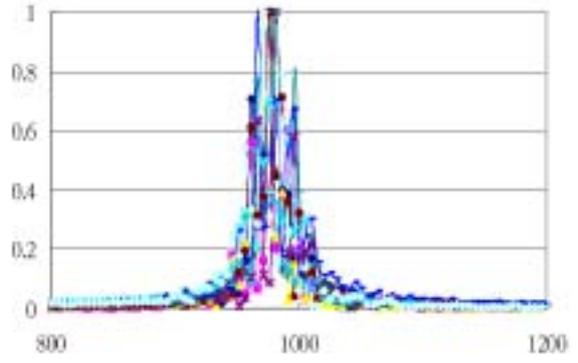
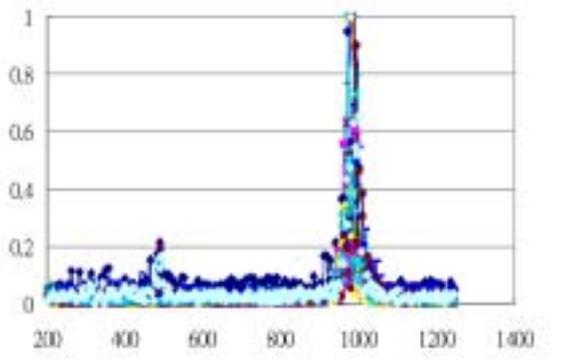
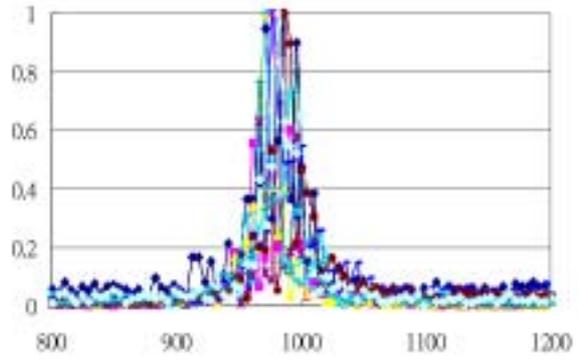
七. 過程七：了解材質對響螺發音頻率之影響

(一) 步驟：

為了了解響螺之材料是否對頻率有影響，於是將其他因素皆固定只改變不同的材質進行頻譜測量，本實驗共用三種不同材質，本實驗分別為 HDPE 塑膠(底片盒)、竹筒、鐵筒，每一種材質均擷取十組數據。

(二) 結果：

以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度

說明	十次數據綜合圖	峰值放大圖
HDPE 塑膠 材質		
竹筒 材質		
鐵筒 材質		

(三) 分析與討論

1. 將不同材質之響螺之特徵頻率製成表格 (如右所示), 所發出之特徵頻率並無太大的差異, 亦即在相同的條件共鳴管之材質並不是影響特徵頻率之因素。
2. 不同材質所發出聲音差異在於波形不同, 相對造成音色也跟著不同, 其中竹筒所發出的音色較為渾厚。
3. 本實驗只針對三種材料進行研究, 其他的材料因取材問題而未納入實驗中, 因此有未完整之處, 故材料之特性對頻率的影響可在往後進行更深入的探討。

材質	主要頻率
HDPE 塑膠	986Hz
竹筒	981Hz
鐵筒	989Hz

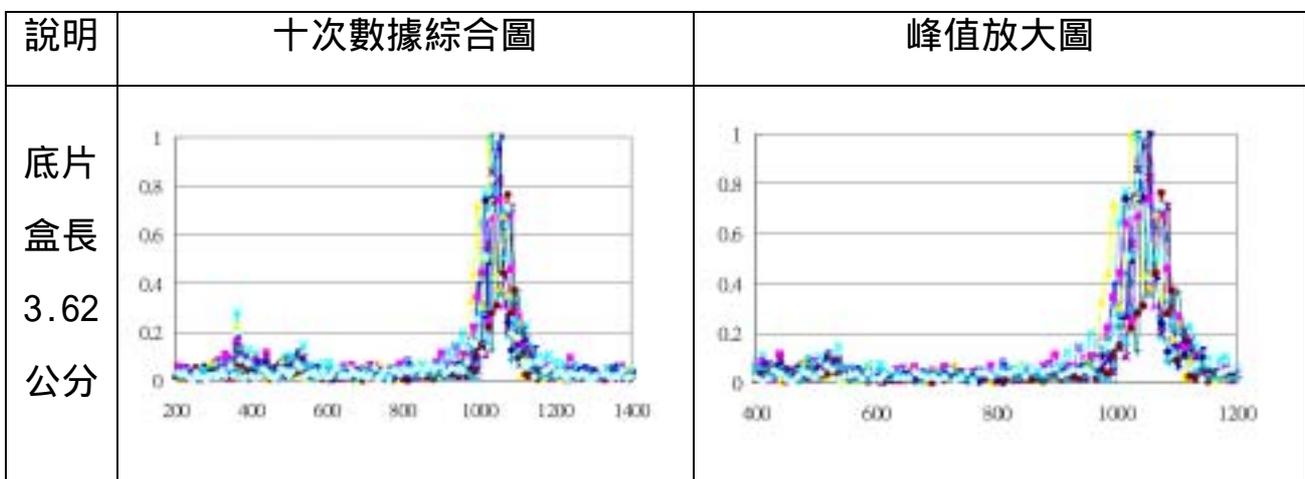
八. 過程八：了解底片盒長度對響螺發音頻率之影響

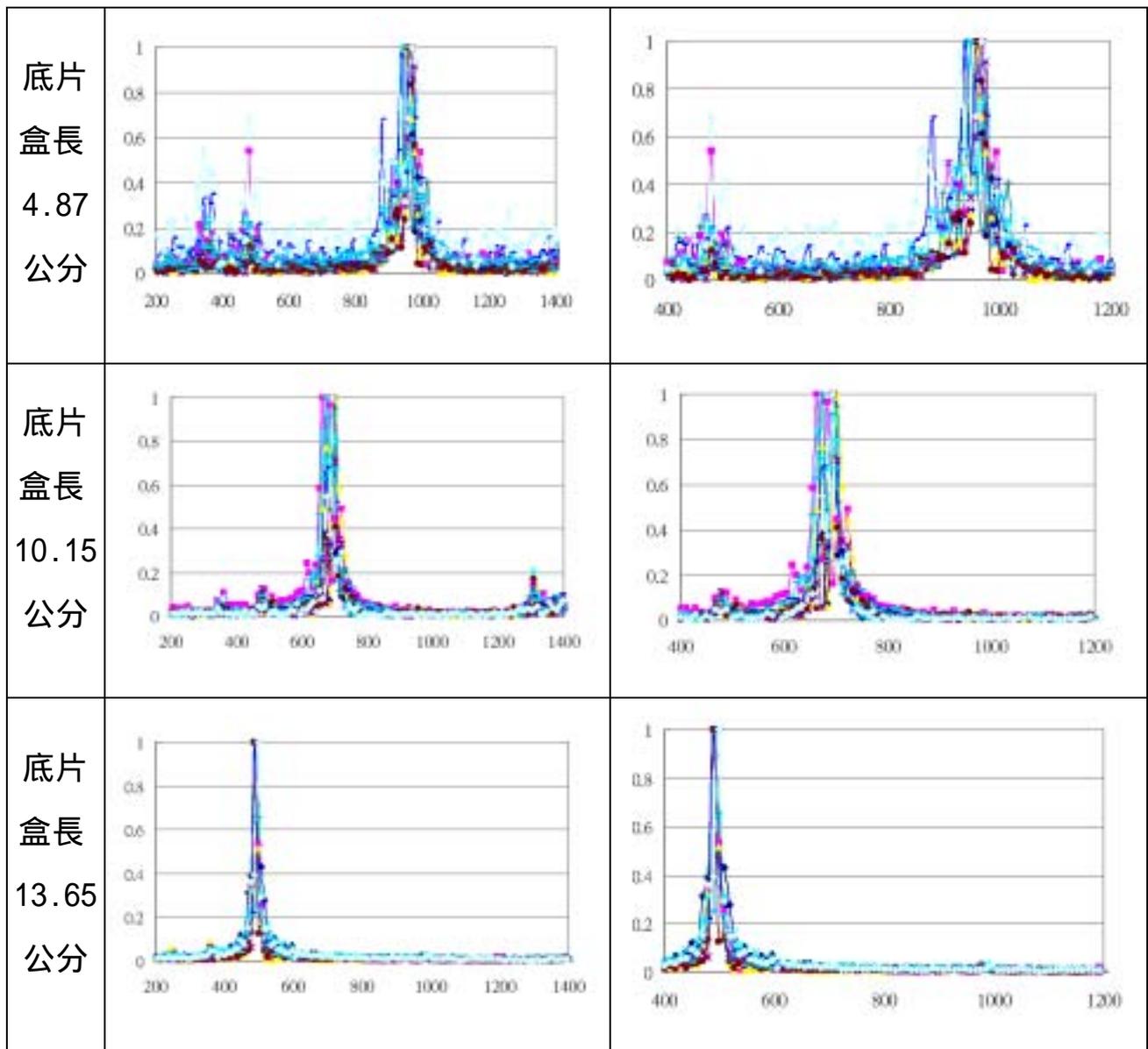
(一) 步驟：

為了了解底片盒長度對頻率是否有所影響, 於是利用同材質的底片盒, 缺口相同, 只改變其本體之高度, 其作法是以一個底片盒長度為標準長度, 利用剪刀將底片盒剪短, 此外將二 (或三個) 個底片盒組裝, 形成較長的響螺, 利用不同長度底片盒固定角度與轉速, 測量十組數據, 所得數據加以繪圖並疊加在一起。

(二) 結果：

以下所有圖形 X 軸為頻率, Y 軸為聲音強度





(三) 分析與討論

1. 將底片盒之長度與特徵頻率加以製作成表格與圖形，如右表與下圖所示，從表格中可看出長度愈長頻率愈低。

實驗項次	1	2	3	4
底片盒長度	3.62cm	4.87cm	10.15cm	13.65cm
實驗特徵頻率	1044Hz	957Hz	683Hz	488Hz
理論特徵頻率	4738Hz	3522Hz	1688Hz	1256Hz
相對誤差	77.96%	72.83%	59.54%	61.15%

2. 當管長愈長時其頻率愈低，由此可知底片盒內部之高度會影響特徵頻率之值，可根據原理中的兩端閉管求頻率之公式（1）得知：

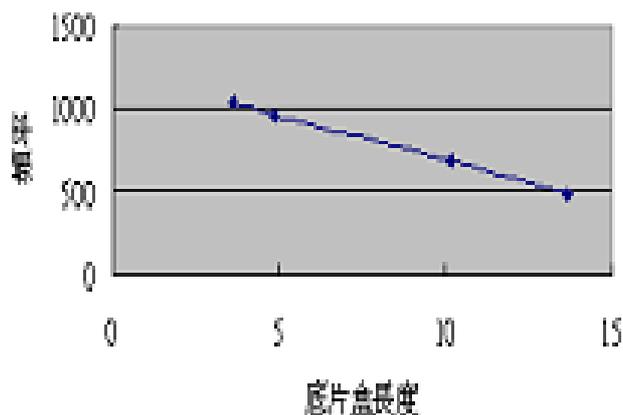
$$f = \frac{nv}{2L} \quad (1)$$

其中 $n=1, 2, 3, 4$

但是經由上述公式加以計算理論特徵頻

率（結果如上表所示），發現底片盒之長度較短時，公式（1）便不成立，因此公式（1）有修正之必要。

底片盒長度與頻率



3. 由實驗值與理論值之差異，我們提出將公式（1）修改成

$$f = \frac{nv}{2ml} \quad (2) \text{ 其中 } n=1 \text{ 且 } m=1.2.3.4$$

再由公式（2）進行數據分析，得下表：

實驗項次	1	2	3	4
底片盒長度	3.62 公分	4.87 公分	10.15cm	13.65cm
實驗特徵頻率	1044Hz	957Hz	683Hz	488Hz
M=1 時之理論特徵頻率	4738Hz	3522Hz	1688Hz	1256Hz
M=1 時相對誤差	77.9%	72.83%	59.54%	61.15%
M=2 時之理論特徵頻率	2369Hz	1761Hz	844Hz	628Hz
M=2 時相對誤差	55.92%	45.66%	19.08%	22.29%
M=3 時之理論特徵頻率	1579Hz	1184Hz	563Hz	419Hz

M=3 時之相對誤差	33.9%	19.2%	21.31%	14.14%
M=4 時之理論特徵頻率	1184.5Hz	888Hz	422Hz	314Hz
M=4 時相對誤差	11.9%	7.8%	61.85%	55.41%
M=5 時之理論特徵頻率	947.6Hz	710.4Hz	338Hz	251Hz
M=5 時之相對誤差	9.2%	25.8%	102.07%	94.42%

4. 在上表中帶入之 m 值，計算出理論的特徵頻率之過程中，當 m 為 4 的時候，對頂次 1 與 2 較短的共鳴管，其誤差平均值最低，因此公式 (1)

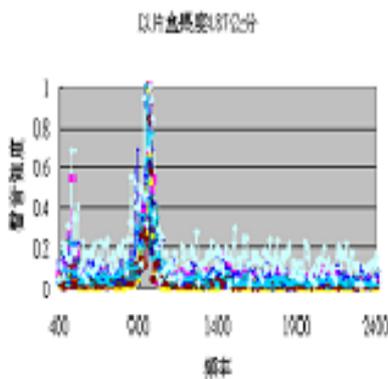
$$f = \frac{nv}{2L} \quad n=1, 2, 3, 4 \quad \text{因此在共鳴管較短時，應改成下列式子}$$

$$f = \frac{nv}{8L} \quad n=1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

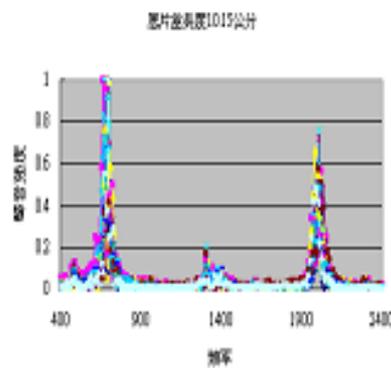
亦即原為半波長之共振，在共振管較短時會形成八分之一波長之共振。

5. 由相對誤差值可看出，當共振管之長度較長時，理論值與測量值會較接近，代表上述公式 (1) 適合於較長的共振管，而當管長較短時必須修正公式。

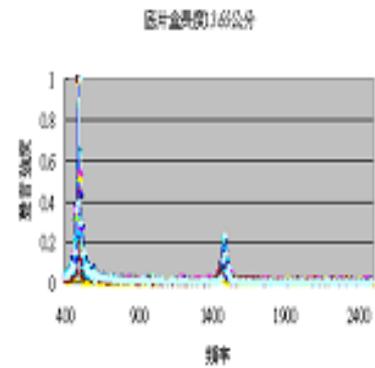
6. 比較 4.87 公分、10.15 公分、13.65 公分等三個底片盒所產生之頻譜 (如下圖)，可發現共振管較長時，其泛音會較明顯，短時泛音會較不彰顯，且其泛音之頻率與與基音有整數倍之關係。



管長 4.87 公分
頻率對聲音強度作圖



管長 10.15 公分
頻率對聲音強度作圖



管長 13.65 公分
頻率對聲音強度作圖

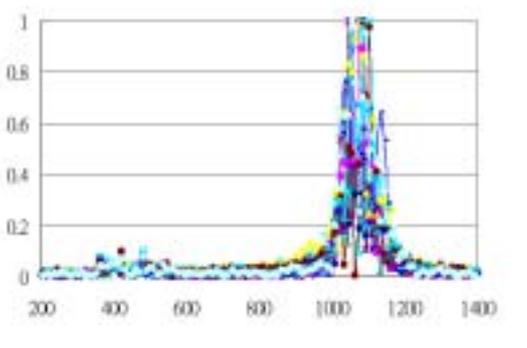
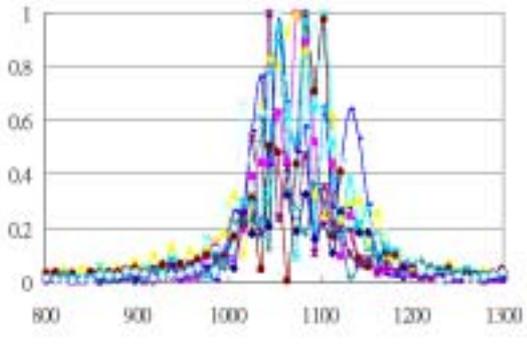
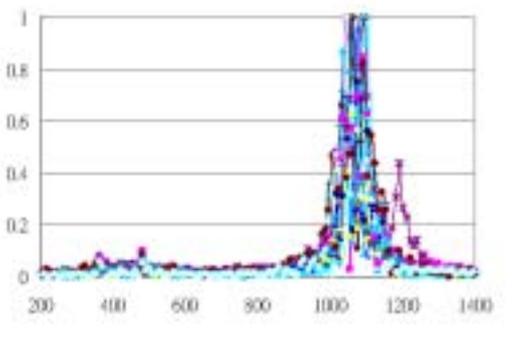
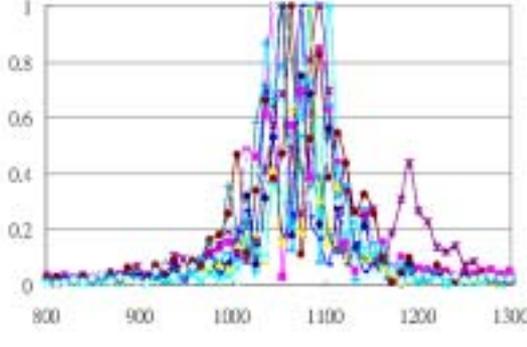
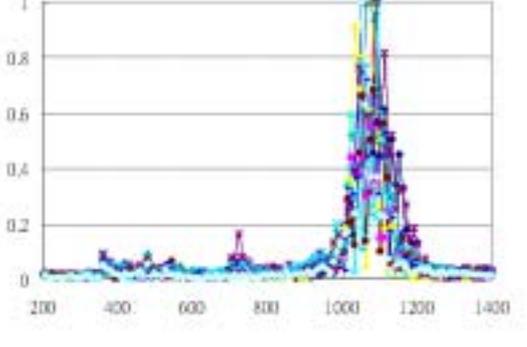
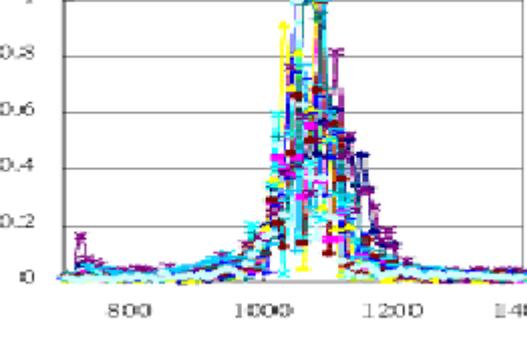
九.過程九：了解底片盒口徑對響螺發音頻率之影響

(一) 步驟：

為了了解底片盒口徑對頻率是否有影響，於是利用同材質，長度相同，缺口大小相同，但直徑不同的底片盒，在相同的轉速下進行數據量取，每一種底片盒各擷取十組數據。

(二) 結果：

以下所有圖形 X 軸為頻率，Y 軸為聲音強度

說明	十次數據綜合圖	峰值放大圖
直徑 2.3 公分		
直徑 3.1 公分		
直徑 4.5 公分		

(三) 分析與討論：

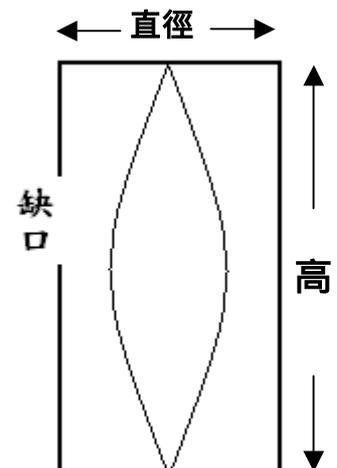
1. 由上數之數據可發現三次之特徵頻率相當接近，約在 1070Hz 附近，此時將底片盒之直徑與其本身之高度作成表格，並列出直徑/高度與頻率之關係如下。

實驗項次	1	2	3
直徑 (公分)	2.3	3.1	4.5
高度 (公分)	4.87	4.87	4.87
直徑/高度	0.47	0.64	0.92
特徵頻率	1070Hz	1075Hz	1072Hz

2. 由上述三個圖形所得特徵頻率，可發現到底片盒之直徑對本身之特徵頻率並無影響。

3. 由實驗得知特徵頻率與響螺之本體長度有關，但與直徑無關，雖然如此我們也注意到口徑特大與特小的響螺，兩者間有著音色不同的差異，是可以再深入去了解的。

4. 由改變底片盒長度與口徑兩個實驗結果可發現到，響螺共振之長度是以底片盒之高度為主而不以直徑為主（如右圖所示），這以我們未進行研究前的原始想法有著 180 度的大轉變。



柒、總結

實驗發現，以底片盒製成的響螺，在旋轉的過程中，所產生的特徵頻率與多項因素有關，因此藉由自行設計的工作平台進行數據量取，從所得數據分析得下列幾項研究結果。

- 一、響螺在垂直地面時並無法發出聲音，但當與地面不垂直時反而會發出聲音；
由此可知，響螺是在不垂直地面的情況下與空氣摩擦進而在筒內產生共鳴。
- 二、當響螺傾斜時，它的特徵頻率會隨著傾斜角增大而有先降低而後升高的現象發生，此與空氣摩擦程度有關。
- 三、響螺之轉速愈快，特徵頻率會愈大，但增加到某一程度時其特徵頻率會回到較低之頻率。
- 四、響螺的缺口如果加長或加寬皆會提高特徵頻率。
- 五、缺口厚度較薄會使特徵頻率降低，但會使響度加大。
- 六、缺口受風邊如果是凸出則特徵頻率較低，反之凹陷時會較高。
- 七、響螺之材料與管子直徑皆不影響其特徵頻率。
- 八、響螺愈長，特徵頻率會愈低，反之則較高，但太短的共鳴管所產生之特徵頻率需修正為八分之一波長的共振。

捌、參考資料

- 一. 連坤德、陳忠志 (1999)。基礎物理：翰林出版社。
- 二. 呂助增、鄭伯崑 (1990)。實驗物理方法：聯經出版社。
- 三. 曹培熙、駱劍秋 (1986)。大學基礎物理學 (上)：曉園出版社。

評語

1. 響螺發音頻率之探討，主題明確，材料合乎鄉土性，是台灣兒童小時候的必然玩具之一。
2. 解決問題的創意，旋轉及傾斜機構的設計使用方面，與思考邏輯程序詳實，均值得稱許。
3. 團隊表現良好。對於響螺流場的認知若能百尺竿頭，更進一步加以深入探討，使其知其然亦知其所以然，則作品將更斐然。