

臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：物理學

作 品 名 稱：吸管笛的諧音之研究與發展

得 獎 獎 項：第一名

紐西蘭正選代表：紐西蘭 2007 年科技展覽會

學 校 / 作 者：臺北市立麗山高級中學

張毓屏

臺北市立麗山高級中學

陳思妍

簡介



張毓屏(左)

剛進麗山高中時才知道學校有開設專題課程，覺得非常新鮮，我也盡力達成老師給我的目標。覺得只會唸書、做專題是不夠的，平常喜歡打網球、滑冰，以保持體能健康。這次國際科展給我一個很好的機會能夠與高手競爭，也希望自己能更上一層樓。

陳思妍(右)

就讀麗山高中二年級學生，自國小開始接觸科展之類的東西，對理科有濃厚的興趣，有一個數理很強的哥哥，從小有不會的地方，都在最快的速度內有標準的答案。在高二參加物理專題，並有機會榮獲國際科展入圍。

摘 要

吹長笛時，按同一按鍵，以大小不同的力量去吹，會引發不同頻率的泛音，而通常越用力吹，引發泛音的頻率越高，所以我們想了解為什麼越用力，泛音的頻率會高，其間的關係究竟是什麼？

風經過管口會產生各種頻率的噪音，其中某些特定頻率的聲音會因為會在管內形成駐波而放大，所以我們只能聽到某些特定頻率的聲音。當風速增加時，會在管口形成渦漩逸放的紊流現象。其渦漩頻率與流速成正比（註一）。

我們以塑膠管實驗。發現以特定的風速引發該基音後，繼續增加風速，當風速達某一定強度時，才會躍遷為下一個泛音的頻率。這個現象告訴我們：在一封閉管下，風速與泛音的關係並非「線性遞增」，而是越「躍遷遞增」的關係。

另一個實驗測量不同管長、其諧音之頻率的關係，我們可以得知，越短的管子，因為相鄰兩泛音間頻率差較大，越不易激發更高階泛音。

經由這些實驗結果，我們能夠推論：當管子越長、基音頻率越低時，諧音間頻率的差距相對越小，繪出的風速－頻率關係圖應更加顯示了風速與頻率呈正比關係。

未來我們可以以閃頻器觀測紊流渦漩的產生，再變化至不同吹入角度，及各式管口造形，這些實驗能協助我們更進一步了解樂器的發聲原理，甚至開發一個以聲音頻率測量風速的儀器。

註一：林婉如、張璣文 2006 國際科工程組佳作作品。

Abstract

When we press the same key and blow a flute using different strengths, we can get different overtones. Usually, the harder we blow the flute, the higher the frequency we get. We want to understand why we get a higher frequency when we blow harder into the flute and to understand the relationship between them.

When wind passes through the mouthpiece, many kinds of noises will be produced. Some of the frequencies will expand because they will form standing waves in the tube. Therefore, we can only hear certain frequencies. As wind speed increases, a turbulence of the vortex shedding will be formed. The frequency of the vortex shedding and wind speed will be in a direct ratio.

We experiment with plastic tubes. When we increase the wind speed and get certain magnitudes, the frequency will jump to the next overtone. The phenomenon shows that the relation, in a closed tube, between wind speed and harmonics is not a linear increase but a transition increase.

In another experiment, we measured the relationship between wind speed and different lengths of tubes. We can infer that the shorter the tube, the higher high-frequency harmonics can be produced.

Through these experiments, we come to the conclusion that the longer the tube, the lower frequency of the fundamental tone we get and the discrepancy in frequency between harmonics is smaller. Then we make a diagram between wind speed and frequency that indicates that there is a direct ratio between wind speed and frequency.

In the future, we can use “” to observe the production of turbulence. Then we can switch to different angles when we blow into flutes. Otherwise, we can experiment with different shapes of mouthpieces. These experiments can assist us to understand more how the instrument sounds. We can develop a device measuring wind speed with frequency.

壹、前言

一、研究動機

有種樂器叫排笛 (pan flute)，它是由許多不同長度的管子所組合而成的，管子長短也可以影響音的高低。如果我們用吸管加裝一個可以拉動的活塞，並測量其頻率，或許能夠發現有和排笛一樣的現象。

演奏管樂的時候，看起來只有寥寥幾個按鍵，卻能吹出多達三個八度音域 (register) 的音，原因是因為每個較低頻率的基音 (fundamental tone)，可以擁有一到兩個我們所需要的泛音 (overtone)，運用吹奏每個音的力量不同，而有不同的音高。

而我們吹奏笛子的時候，按住固定的孔，如果吹得沒那麼用力，就會得到平常音階上的音；如果太用力吹，使音高不在我們所要的音高內，會有破音的現象，這些破音就是原來吹出那個音的泛音。但為什麼吹用力一點、急一點，就會產生泛音呢？

另外，在我們日常生活中，看到在空中飄揚的旗子隨風擺動，當觀察到風速不同時，旗子振動的頻率會隨著變快或慢，那麼風速和振動頻率是否有關呢？因此我們設計了這套研究，探討風速與頻率間的關係。

二、研究目的

1. 製作吸管笛進行下列實驗，以瞭解吸管笛基本原理。並進而以此實驗設計進行接續的泛音吹奏研究。
 - (1) 同管長下不同口徑與頻率的比較
 - (2) 不同管長、不同口徑下的管子與頻率的關係
 - (3) 聲速與溫度的關係
2. 利用壓克力管模擬吸管笛，研究風速、管長、與頻率間的關係。
 - (1) 探討電壓和風速的關係。
 - (2) 探討固定管長下，吹掠管口的風速與諧音頻率的關係。
 - (3) 探討固定管長下，以不同角度吹掠管口與諧音頻率的關係。
 - (4) 探討固定風速下，伸縮笛管長和諧音頻率的關係

三、文獻探討

1. 聲波 (Sound Wave)

(1) 聲波為縱波 (longitudinal waves)，發聲體震動使介質產生縱向 (與波行進方向平行的方向) 來回的運動。以喇叭為例，當喇叭的薄膜往前推時，壓縮空氣 (壓力增加)；往後推時，擴張空氣 (壓力減少)。聲波也可說是壓力的簡諧運動 (H.S.M.)。此外，繩波為橫波 (transverse waves)，它是一種介質在橫向 (與波行進方向垂直的方向) 來回的運動。

(2) 波的運動皆符合波速

$$V (\text{波速}) = \lambda (\text{波長}) \times f (\text{頻率})$$

的關係。聲波的波速約為

$$V = 331.5 + 0.607 T$$

(其中T為氣溫以 $^{\circ}\text{C}$ 為單位，V以 m/sec為單位。)

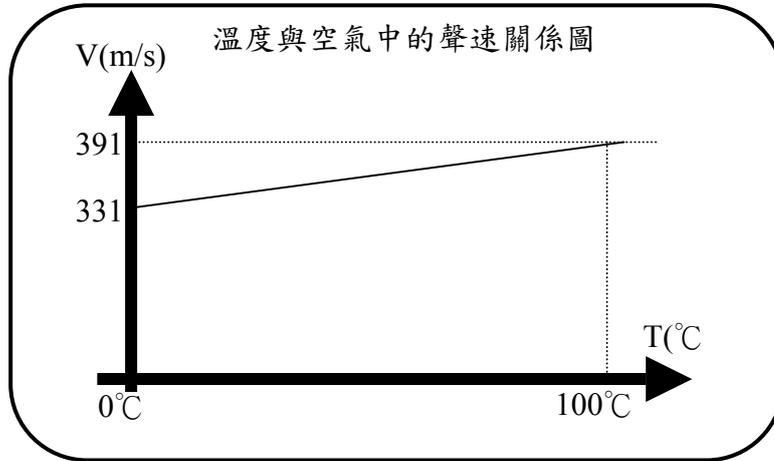


圖1-1 溫度與空氣中的聲速關係圖

(3) 聲波的波形 (waveform) 與頻譜圖

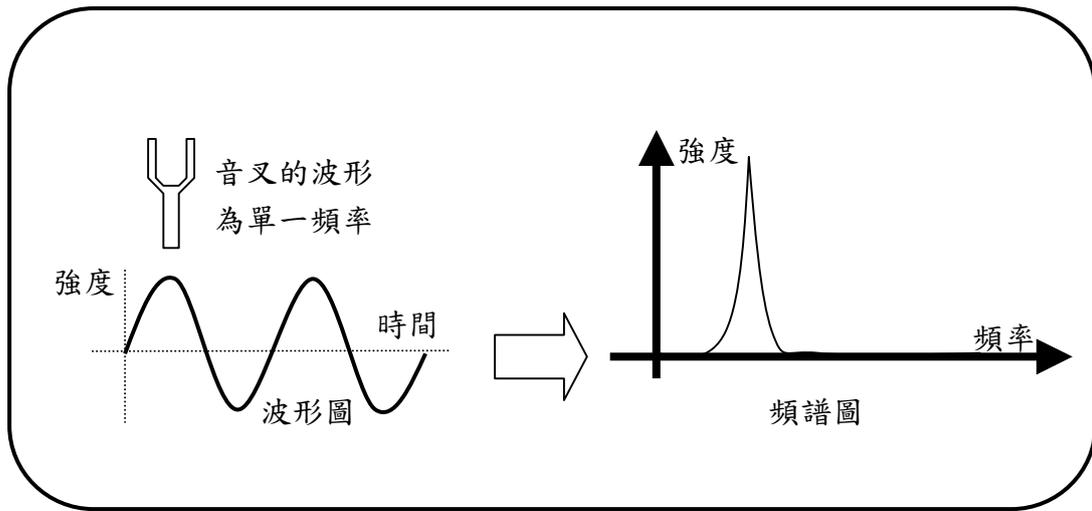


圖 1-2 音叉的波形與頻譜圖

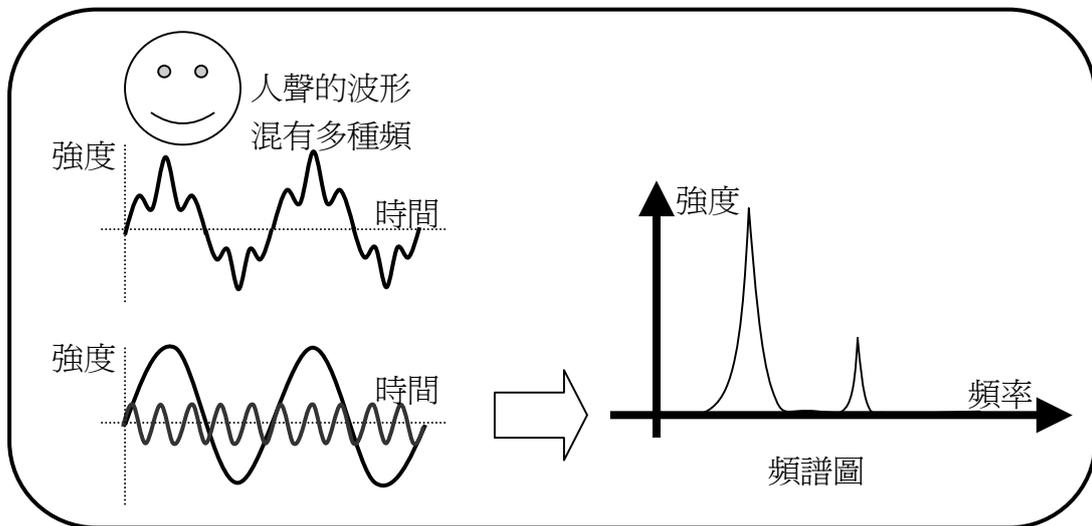


圖 1-3 人聲的波形與頻譜圖

2. 駐波 (standing wave)

(1) 駐波為兩個振幅 (amplitude)、波長、週期皆相同的正弦波相向行進干涉而成的合成波。此種波的波形無法前進，因此無法傳播能量，故名之。駐波通過時，每一個質點皆作簡諧運動 (H.S.M.)。各質點振盪的幅度不相等，振幅為零的點稱為節點或波節 (node)，振幅最大的點位於兩節點之間，稱為腹點或波腹 (antinodes)。

由於節點靜止不動，所以波形沒有傳播。能量以動能和位能的形式交換儲存，亦傳播不出去。

(2) 弦上駐波：撥動兩端固定張緊的弦，使波經兩固定端反射可干涉產生駐波。弦的兩固定端必為節點。

當弦上產生駐波時，弦長 L 為半波長的正整數倍：

$$L = n \left(\frac{\lambda}{2} \right), n \in N$$

由於波的行進速度 v 為「其頻率 f 和波長 λ 的乘積」，且為「弦所受張力 F 和弦的線密度 μ 的比值之平方根」，可知弦上形成駐波時，其頻率 f 為：

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

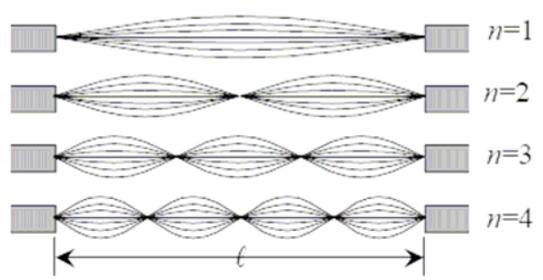


圖 1-4 弦上駐波示意圖

當弦樂器的弦因振動發出聲音時，振動頻率最低者為 $n=1$ 時的情況，稱為基頻或基音 (fundamental frequency)；頻率較高的音稱為泛音 (overtones)，基音和泛音統稱諧音 (harmonics)。

(3) 管中駐波：在同一介質中，如果有兩個相同的波長，相向而行，其相位差為 $1/2$ 時，即可干涉 (interference) 形成駐波。當在共鳴管中形成駐波的頻率與管口外的音叉頻率相同時，則會產生共鳴的現象。當共鳴管中形成駐波時，在開口端處為波腹 (antinodes)，在閉口端處則形成節點 (node)。

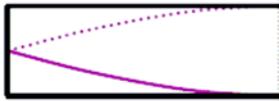
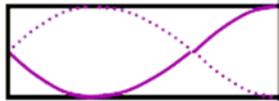
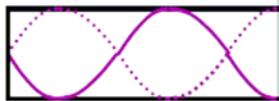
圖	波長與管長之關係	頻率	音名
1	 $L = \frac{1}{4} \lambda$	$f_1 = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{4L}$	基音
2	 $L = \frac{3}{4} \lambda$	$f_2 = \frac{3V}{4L}$	第三諧音 或 第一泛音
3	 $L = \frac{5}{4} \lambda$	$f_3 = \frac{5V}{4L}$	第五諧音 或 第二泛音
n	$L = \frac{(2n-1)}{4} \lambda$	$f_n = \frac{(2n-1)V}{4L}$	第 $(2n-1)$ 諧音 或 第 $n-1$ 泛音

圖 1-5 一端封閉的共鳴管波長與管長的關係圖

3. 管口修正量

(1) 閉管的管口修正量

管內的空氣柱形成駐波時，管口並非位移波的波腹，如右圖，波腹通常在管口外，與管口有一段距離 c ，稱為管口修正量。當空氣以基頻振動時，

$$\lambda = 4(\ell + c) \quad \text{或} \quad f = \frac{v}{4(\ell + c)}$$

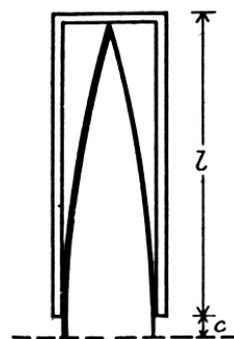


圖 1-6
閉管之管口修正量

Helmholtz 和 Rayleigh 曾經發展出管口修正量的數學理論，一般採行的結果是：若管的內半徑為 r ，則修正量 $c = 0.6r$ ，而且，修正量還與波長有關，通常波長越小，修正量也越小

(2) 開管的管口修正量

由右圖可知當管內空氣以基頻振動時，由於管的兩端均有修正量，故

$$\lambda = 2(\ell + 2c) \quad \text{或} \quad f = \frac{v}{2(\ell + 2c)}$$

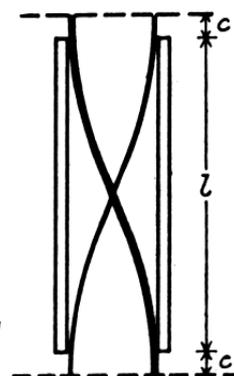


圖 1-7
開管之管口修正量

4. 管樂器的泛音吹奏法

排笛有很多根管來發出聲音，但是梆笛卻只有一根管和六個音孔，怎麼能獲得那麼多的音呢？基本上，如果笛子的管徑確定後，若不改變吹奏力度，音高就同管長成反比：音孔位置越上，音越高。但是笛子一般只有六個音孔，連同底孔也只能奏七個音，顯然不能滿足演奏的需要。因此，笛子有平吹、急吹和超吹三種力度，所發之音也就有平吹音、急吹音和超吹音三種。

這三種音中，平吹音，就是笛子的基音，急吹音乃是基音的高八度音，而超吹音則是比基音高十二度或十五度的音。其中這高八度的音是基音的第一泛音，高十二度的音是基音的第二泛音。笛子的基音有七個，笛子的音域一般為二組半（18 個音），製作得好，音域還可以更寬一點，因此，笛子的泛音至少有十一個。

5. 大氣密度

由 $PM=DRT$ 可以計算大氣密度

P (atm) 大氣密度，以 1 (atm) 計算

M 空氣平均分子量， $0.8 \times 28 + 0.2 \times 32 = 28.8$

R 為常數 0.082

T 是絕對溫度，實驗時氣溫為 15 度 c (=288k)

代入公式， $D=1.2195$

6. 雷諾數

在管流的問題中，流體之流動常受到各種力量之影響，如壓力、重力、黏滯力、彈性力、表面張力等，其中與流體關係最大者當屬黏滯力，即由真實流體所具有之黏性而產生之力，使得流體的流動呈現兩種差異性較大的分類—層流與擾流，此兩種流動現象之區別可由慣性力與黏滯力之比值顯現出來。

$$Re = \rho VD / \mu, Re: \text{雷諾數}$$

ρ : 流體之密度

V : 管路中流體的平均速度

D : 管路直徑

μ : 流體之黏滯係數

7. 風吹聲

當有大風吹過電線時或在空氣中揮舞棍棒時所發出的聲音叫風吹聲。

一個剛體媒質作相對運動時，所產生的相互作用決定於雷諾數：

$$Re = VD / \mu$$

其中 V 是相對速度(m/s)；D 為物體在垂直於運動方向的特徵尺寸(如直徑 m)； μ 是媒質的運動黏滯力阻。

速度大時，剛體後面就要產生尾流；在 Re 大約大於 10 的 5 次方時，差不多整個尾流中都是湍流。在中間狀態，約 $300 < Re < 10^4$ 的 4 次方時，流中常有強烈周期性分量。以流體垂直地流過圓柱為例，尾流中生橫向(與流速，圓柱軸都垂直)振動，圓柱兩側交替地有旋渦脫落，形成旋渦串，圓柱附近的流體就有交變橫向動量，這種現象很普遍，如紙張在空氣中飄落，石頭落入水中，都有來回橫向運動，這等於流體受到圓柱的橫向體積力，由此產生聲場，就是風吹聲。

風吹聲的頻率和斯特勞哈爾數有關，

$$Sr = fD / V$$

其中 f 是頻率(Hz)；D 是直徑(m)；V 是流速 m/s。

8. 邊稜音

由窄縫出來的氣流或液流噴到固體時所產生的聲音稱為邊稜音。

固體一般是正對著窄縫的尖劈，正對小孔的圓稜，但這並不是必要的。必要的是正對流體，使流體分開，從而產生振動。

流體自窄縫噴出後，速度較大，和周圍靜止流體互相摩擦，產生兩串渦旋，渦旋在窄縫的兩邊輪流發出，旋轉方向相反。穩定條件是兩串間的距離和每串中前後渦旋的距離之比， $h/l=0.28$ 。這和風吹聲中圓柱後面的兩串渦旋情況相似。這些渦旋產生寬帶噪聲，即噴氣噪聲。

如在噴口前距離 a 處有一尖劈， a 大於縫寬幾倍，就產生強烈的邊稜音，它的頻率滿足下式：

$$jV=2.12af \quad j \text{ 是一整數}$$

邊稜音的強度還沒有公認的公式，這可能是由於強度因噴口情況不同而異：噴口光滑時，強度較大，反之噴口較粗，則強度即大為減少。

9. 白努力連續方程式 (equation of continuity)

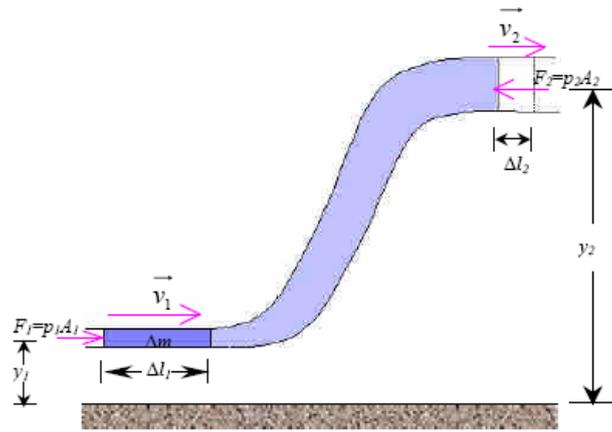


圖 1-8 白努力連續方程式示意圖

如圖所示，有一穩定的流體，流經一個具有不等截面積的導管。若在兩個截面積分別為 A_1 與 A_2 的截面上，流體的流速分別為 v_1 及 v_2 、密度分別為 ρ_1 及 ρ_2 ，則在 Δt 時間內，流經 A_1 截面的流體質量 Δm_1 為：

$$\Delta m_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t \quad \dots\dots (1)$$

流經 A_2 截面的流體質量 Δm_2 為

$$\Delta m_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t \quad \dots\dots (2)$$

假設流體並不能由管壁流入或流出，則在相同時間內，流入 A_1 截面的流體質量應與流出 A_2 截面的流體質量相等，即

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 \quad \dots\dots (3)$$

將 (1)、(2) 兩式代入 (3) 式中，可得

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad \dots\dots (4)$$

也就是說

$$\rho A v = \text{const} \quad \dots\dots (5)$$

式 (5) 稱為連續方程式，相當於流體力學中的質量守恆原理。如果此流體具不可壓縮的性質，即 $\rho_1 = \rho_2$ ，則式 (4) 可寫為

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \dots\dots (6)$$

式 (5) 可寫為

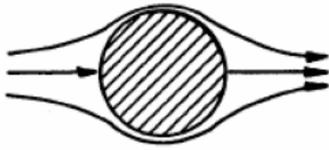
$$A v = \text{const} \quad (7)$$

因此我們定義 $R = A v$ 為體積流率 (volume flow rate)。

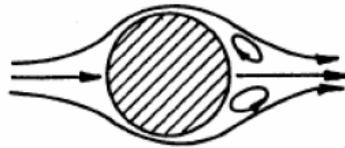
10. 渦旋逸放

使用圓柱體做為鈍體時，渦旋逸放的產生可以分為以下六種情形：

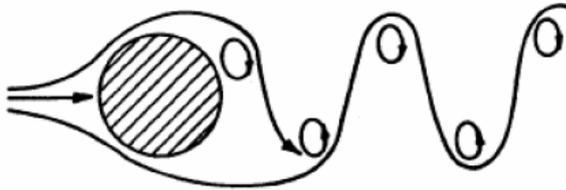
形：



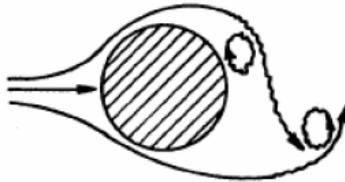
$Re < 5$ 流體順著圓柱體的輪廓而流。



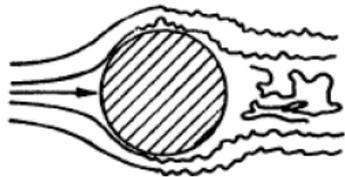
$5 \sim 15 \leq Re < 40$ 從圓柱體的后方分離，並在尾流區產生一對對稱的渦旋。



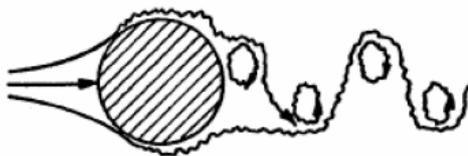
$40 \leq Re < 150$ 尾流區不穩定的向下游流逸，並維持層流的狀態。這稱為層流區(laminar regime)。



$150 \leq Re < 3 \times 10^5$ 層流區開始不穩，並轉為紊流的狀態，但還是保持著凝聚性。此時的邊界層約在 80 度。這稱為次臨界區(subcritical regime)。



$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ 邊界層變為 140 度，圓柱體的阻力係數則降為 0.3，在此時會觀察不到渦旋產生的頻率。這稱為過渡區(transitional regime)。



$3.5 \times 10^6 \leq Re < \infty$ 夾雜著強烈紊流擾動的規則性，渦旋流逸隨著紊流邊界層的發展再次出現。稱為超臨界區(supercritical regime)。

註：出自 2006 年國際科展工程學熱線式渦流流量計，作者：張璿文、林婉茹

11. 渦旋逸放頻率與流量的關係

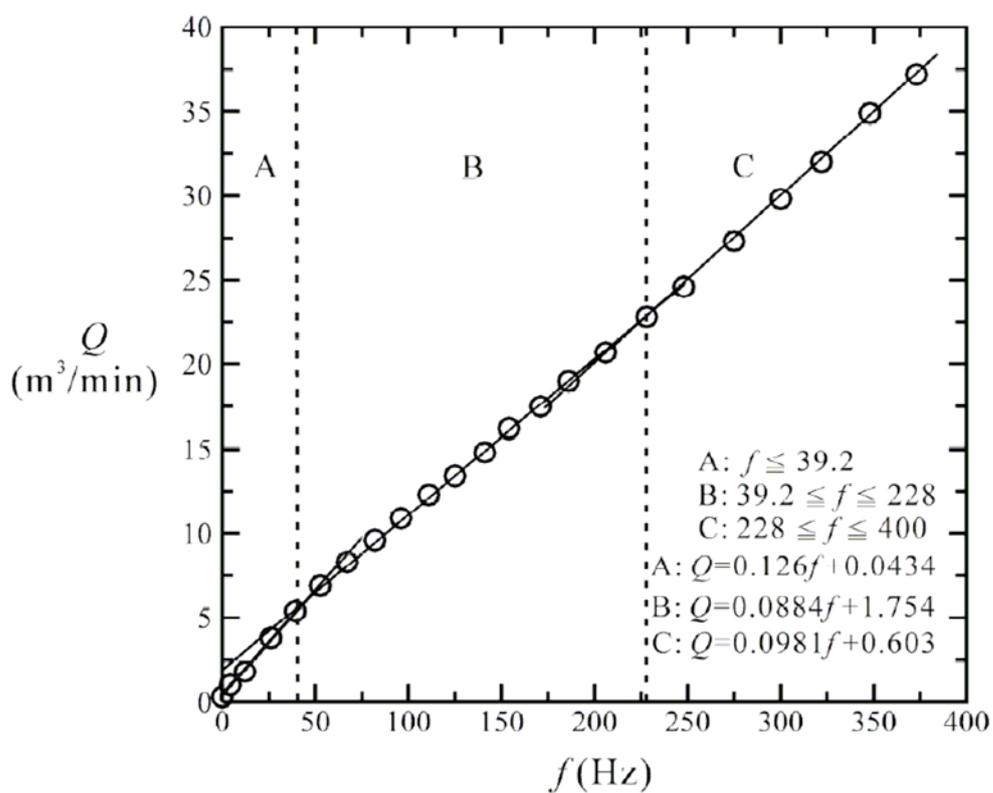


圖 3-5 熱線式渦流流量計的渦旋逸放頻率與流量關係

註：出自 2006 年國際科展工程學熱線式渦流流量計，作者：張璦文、林婉茹

貳、研究方法與過程

一、實驗器材

1. 吸管笛實驗

(1) 自己製作的吸管笛

材料：泡棉膠、吸管（直徑 1.19cm、0.71 cm、0.55cm）、竹筷

製作方法：

- a、先將泡棉膠包裹在竹筷末端，成為一個活塞。
- b、將上述活塞插進吸管中，成為一個可伸縮的笛子



圖 2-1 實驗器材的照片

(2) CPU溫度計：顯示當時共鳴管內溫度。(測量範圍攝氏 0°C~90°C)

(3) 螺旋測微器：測量吸管直徑。

(4) 喇叭：配合測頻軟體，發出固定頻率。

(5) 吹風機：加熱共鳴管用。

(6) 電腦、訊號處理器、麥克風及測頻軟體 Data Studio 及 Signal scope。



圖 2-2 螺旋測微器

2. 壓克力管實驗

各種管長，由左到右依序為：7.5cm、10cm、12.5cm、15cm、17.5cm、20cm。



圖 2-3 壓克力管

3. 打氣筒：體積：2466.29cm³，出口截面積：0.13cm²
4. Pasco 及麥克風
5. 微風計



圖 2-4 實驗器材 Pasco



圖 2-5 麥克風接收器



圖 2-6 打氣桶



圖 2-7 微風計

二、實驗裝置圖：

1. 吸管笛實驗部分

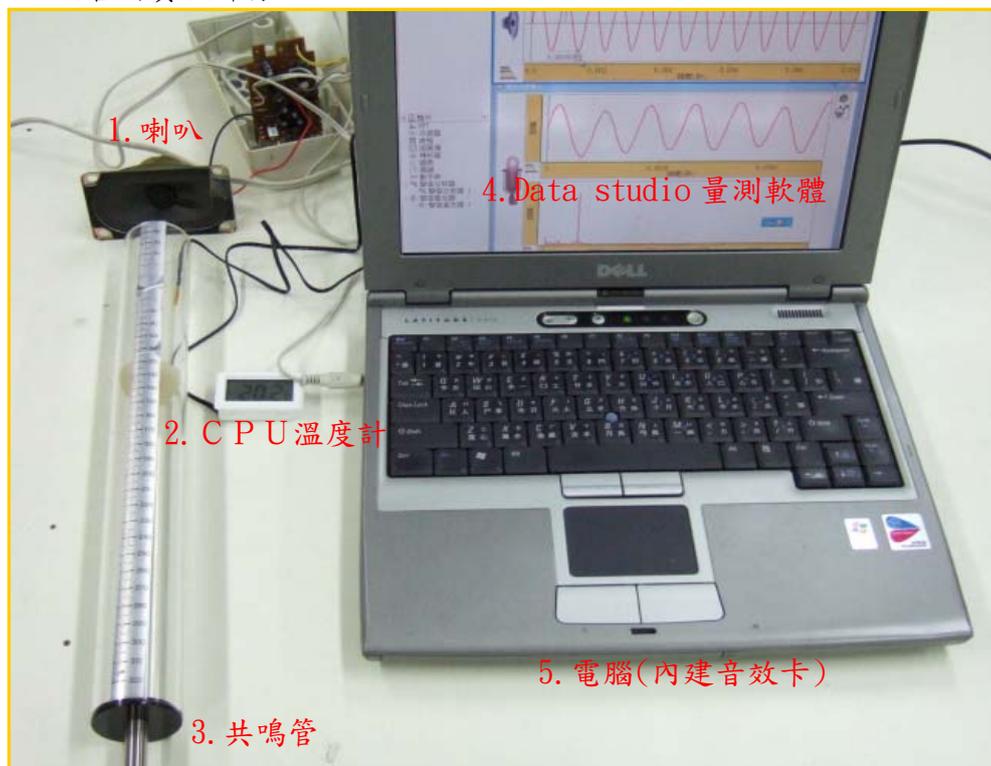
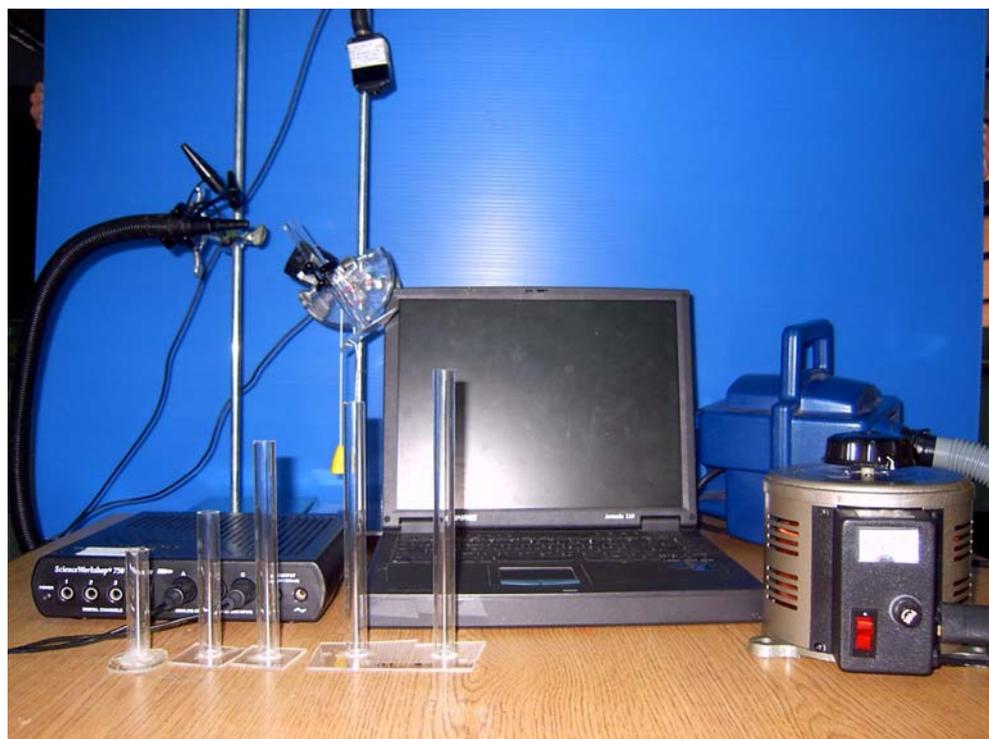


圖 2-8 吸管笛實驗裝置圖

2. 壓克力管實驗部分



三、流程圖

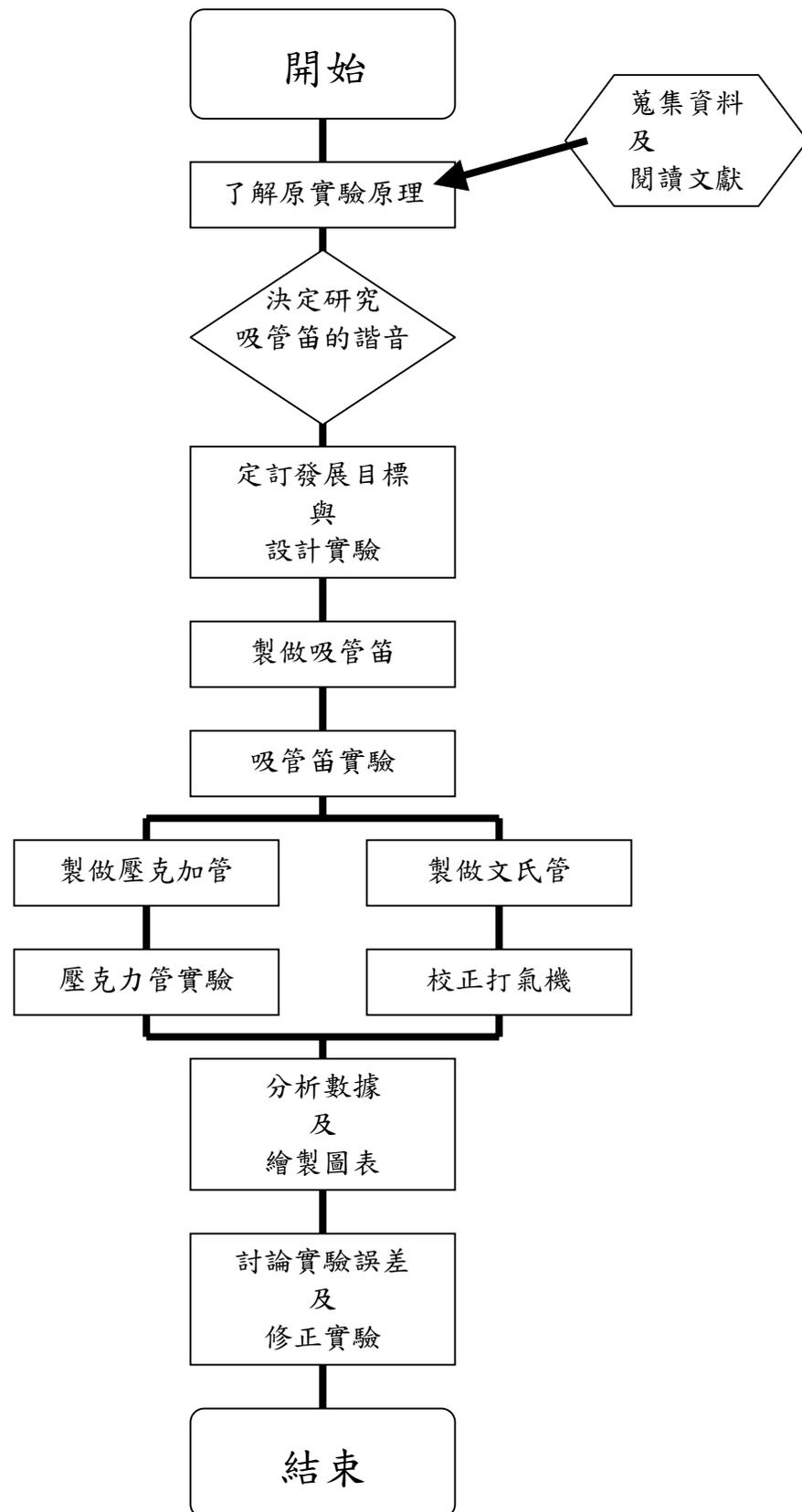


圖 2-9 壓克力管實驗裝置圖

四、實驗步驟

1. 根據研究目的的一的(1)、(2)，製作不同口徑吸管笛。裝置妥當後，進行下述的實驗步驟以研究吸管笛之管長與頻率的關係

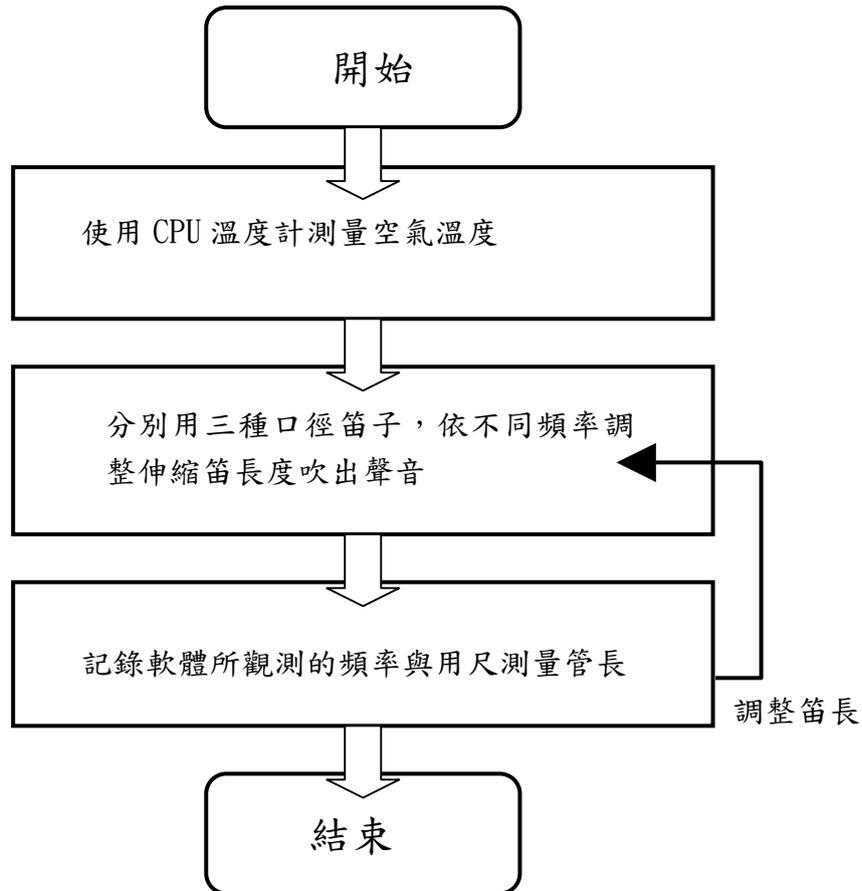


圖 2-9 實驗步驟流程圖 (一)

2. 根據研究目的的一的 (3)，利用下列實驗步驟進行聲速與溫度的關係實驗

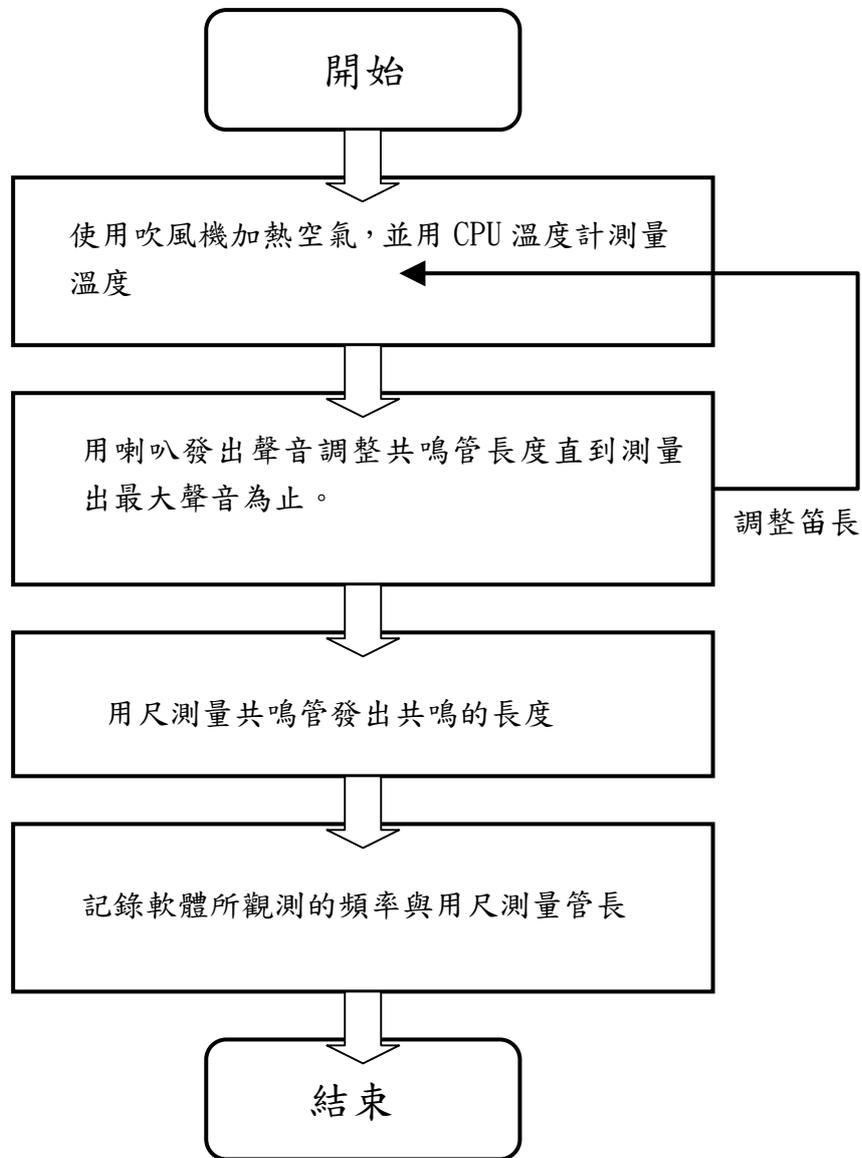


圖 2-10 實驗步驟流程圖 (二)

3. 根據研究目的 2 之 (1)、(2)、(3)、(4)，利用壓克力管模擬吸管笛，進行下述實驗步驟以研究風速與特徵頻率的關係。

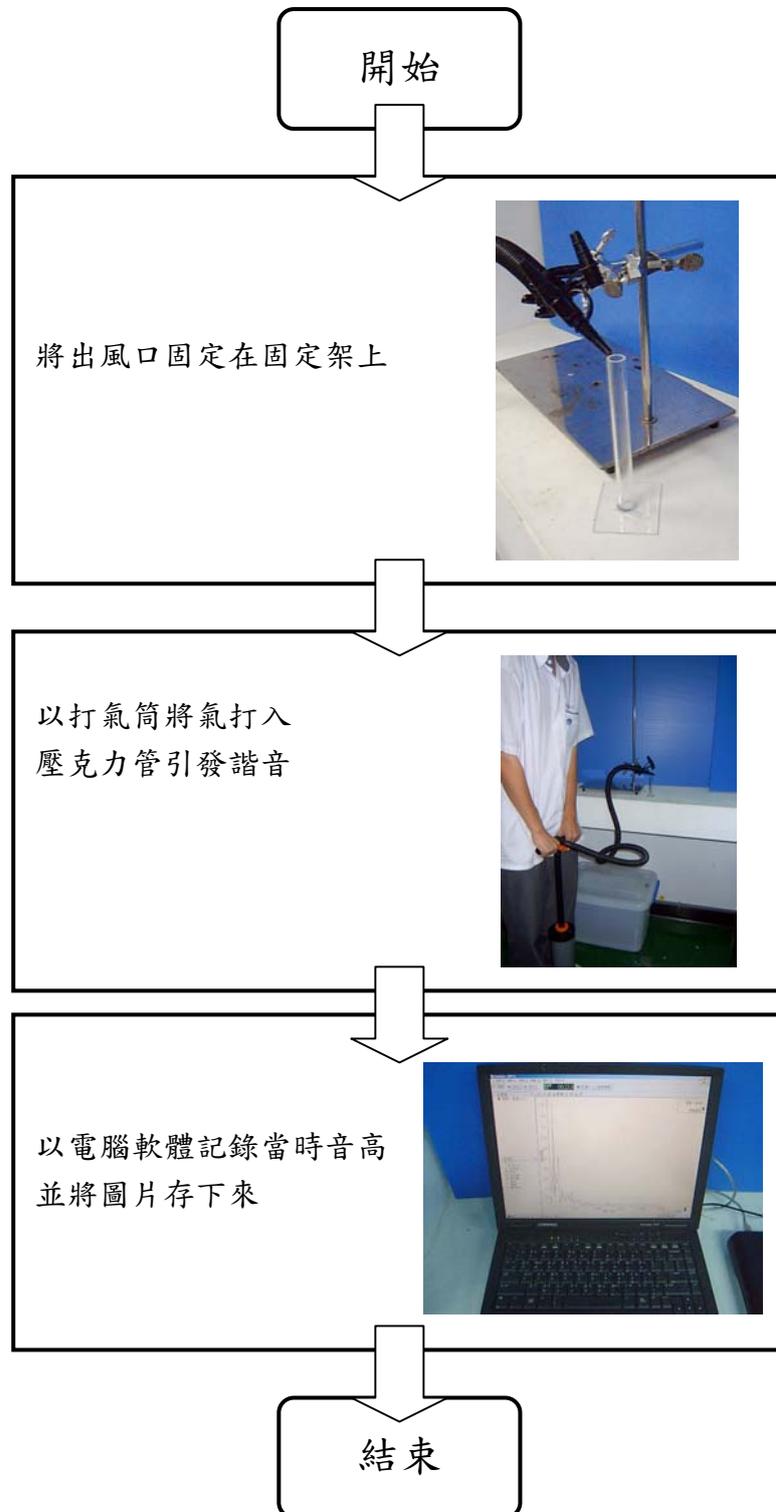


圖 2-11 實驗步驟流程圖 (三)

參、結果與討論

一、同管長下不同口徑與頻率的比較

我們利用不同口徑的吸管笛進行實驗，以瞭解差值與口徑的關係，發現需要引入管口修正量的觀念。

相關實驗結果整理如下圖。

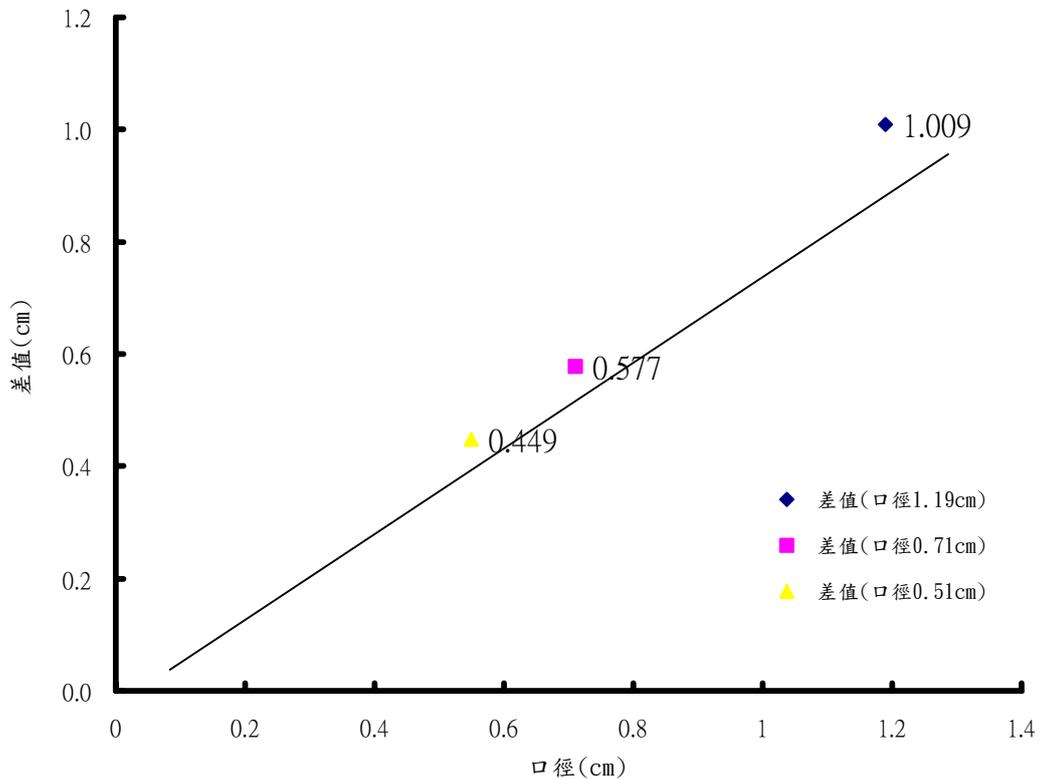


圖 3-1 同管長下不同口徑之吸管笛實驗差值

- 1、由圖 3-1 可知，差值等於四分之一波長減管長，差值會隨著伸縮笛的口徑變大而增加，約為口徑的 0.9 倍，此即管口修正量。
- 2、由表 3-1，發現當共鳴管的形狀、長度不同，其管口修正量應該有所不同，不一定如同文獻探討所提為 $0.6r$ 。

二、不同管長、不同口徑的管子與頻率的關係

在單一管長、不同口徑的吸管笛實驗中，比較管長與頻率的關係其結果如下圖。

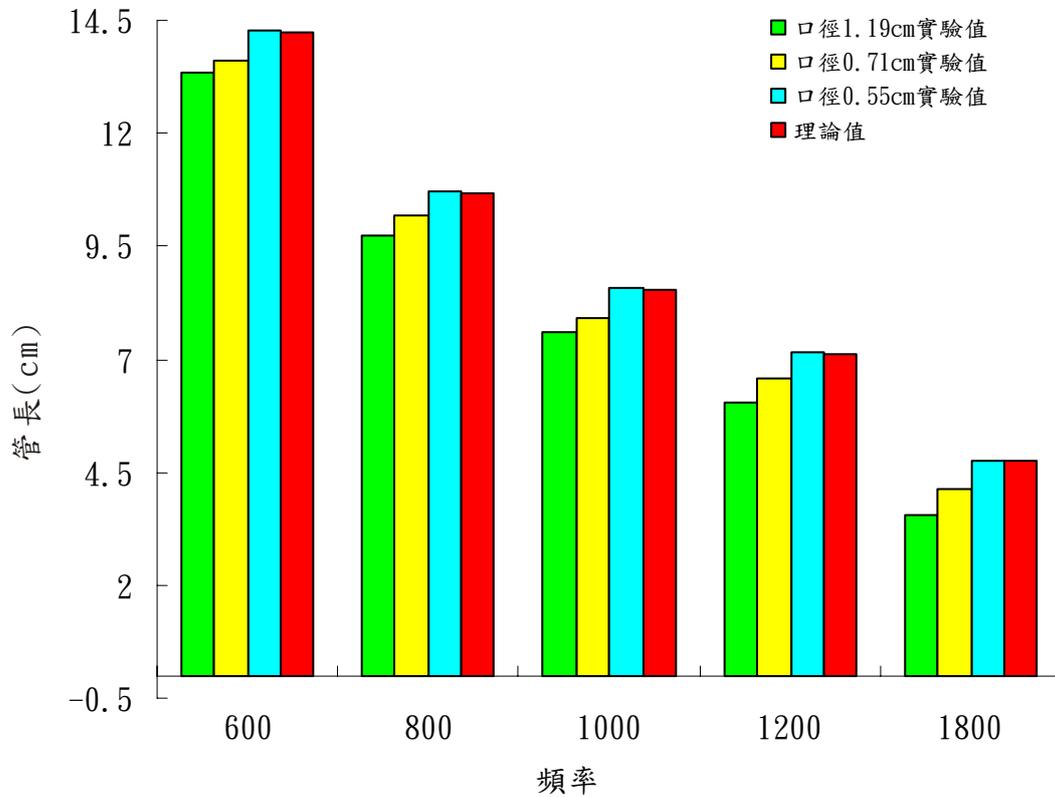


圖 3-2 不同口徑之吸管笛與頻率關係圖

- 1、由圖 3-2 可知，各口徑的吸管笛，所發出來的頻率與管長約成反比。和計算所得到的理論值非常接近。
- 2、各口徑的吸管笛，其第一諧音頻率換算出來的波長皆約為管長的 4 倍。
- 3、由此結果，我們認為此實驗裝置可以確實的測量出管中駐波的頻率等物理現象。所以將以此實驗裝置繼續進行下述實驗。

三、聲速與溫度的關係

本實驗中最重要的物理觀念就是聲波，而聲波的速度和溫度有關係。所以進行下述探討，以瞭解聲速與溫度的關係，藉此可以得到一種簡易的測定聲速的方式，同時也可以反向思考來當作本實驗設計的驗證。

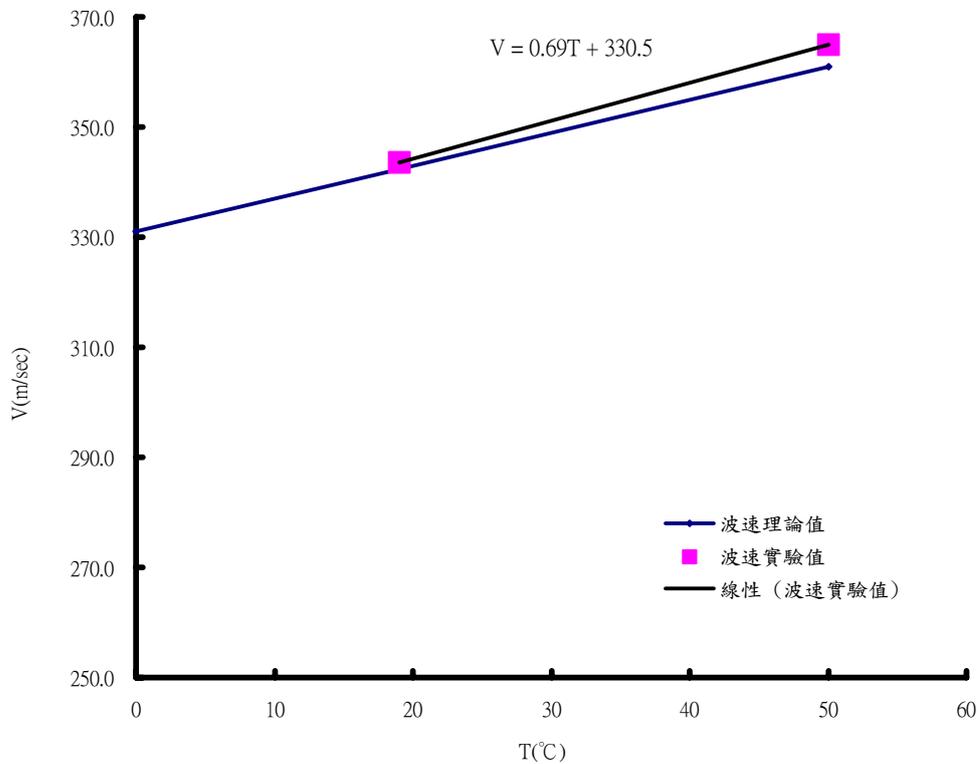


圖 3-3 溫度與聲速的關係圖

- 1、由圖 3-3 可知，50°C 的聲速比 19°C 的聲速快。
- 2、由實驗得到聲速 = 330.5 + 0.69T，
和空氣中聲速的理論： $v = 331 + 0.6T$ (m/sec) 公式十分相符。
- 3、因此本實驗設計的確可以當作聲速的一項簡易測定方式。
- 4、此次只探討溫度對聲音的影響，還沒有探討到溼度和氣壓對聲音的影響，以後可以往這個方向研究。

四、吸管笛實驗的誤差討論

- 1、測量吸管笛口徑的螺旋測微器會把吸管夾扁，造成測量不準確。使用直尺量測吸管的管長的最小刻度只有公厘，公厘以下必須人為估計，會造成誤差。
- 2、利用電腦收集共鳴管的聲音，會受到環境擺放的影響，也容易受到雜音的干擾，所以必須在安靜且沒有閒雜人的環境下做實驗，喇叭放出聲音及麥克風接收聲音都必須維持固定的方向。目前是在音樂科琴房及音樂教室中進行實驗。
- 3、加熱共鳴管，很難維持溫度，而且溫度也不均勻，也會造成溫度量測上的誤差。而且溫度必須要有很大的差距，聲速才會有少許的變化，所以溫度變化的數據並不多，以後還要繼續努力，獲得新數據。

五、不同管長，諧音與頻率的關係

以施不同的力於打氣筒，引發出各管的泛音。相關結果整理如下：

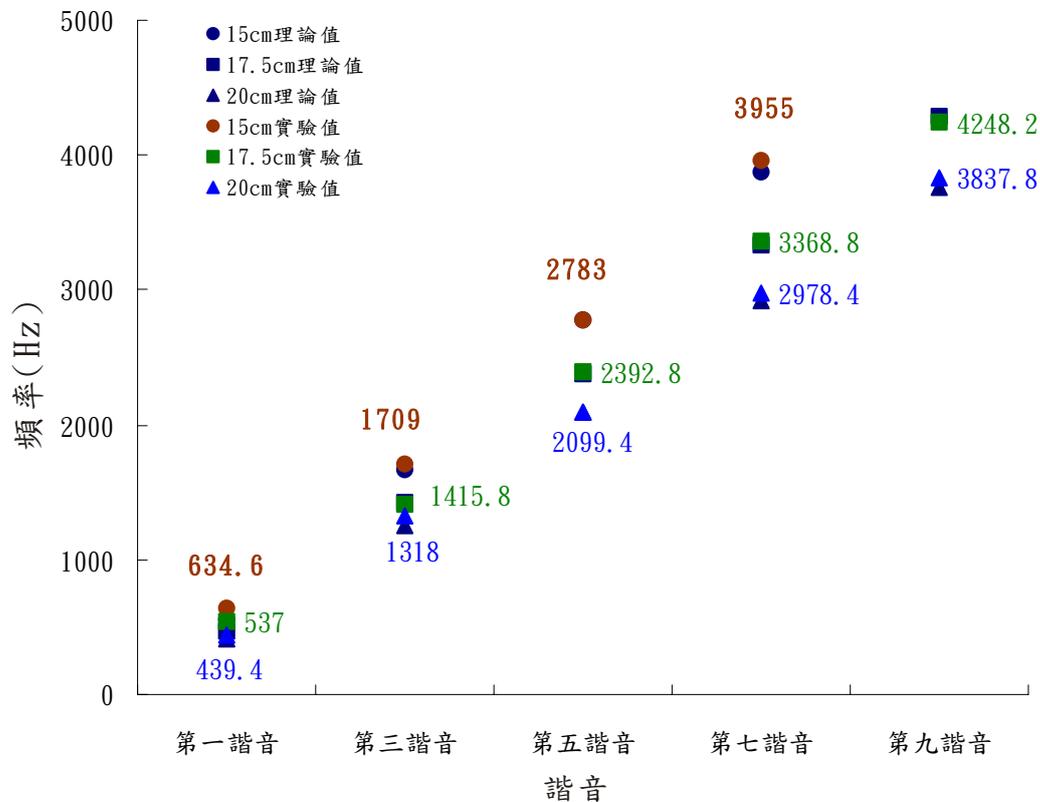


圖 3-4 不同管長，諧音和頻率的關係。

- 1、由文獻探討可知，閉管的各諧音為 1、3、5... 的倍數關係。
- 2、在圖 3-4 中，發現各頻譜的特徵頻率也有相同的關係，表示各頻譜中的特徵頻率的確是空氣柱中的各諧音。
- 3、我們以人力打氣引發泛音的極限為 4500Hz，超過 4500Hz 的泛音由於計時誤差過大，不予列入考慮。

六、電壓和風速的關係

1. 改變電壓以風速計直接接收風速並記錄。
2. 利用電子秤測得風對於空氣的反作用力，讀取數值，再以 $F = \rho AV^2$ 將數值換算回風速。
3. 將作法 1 與作法 2 所繪出的表作疊合，呈下圖：

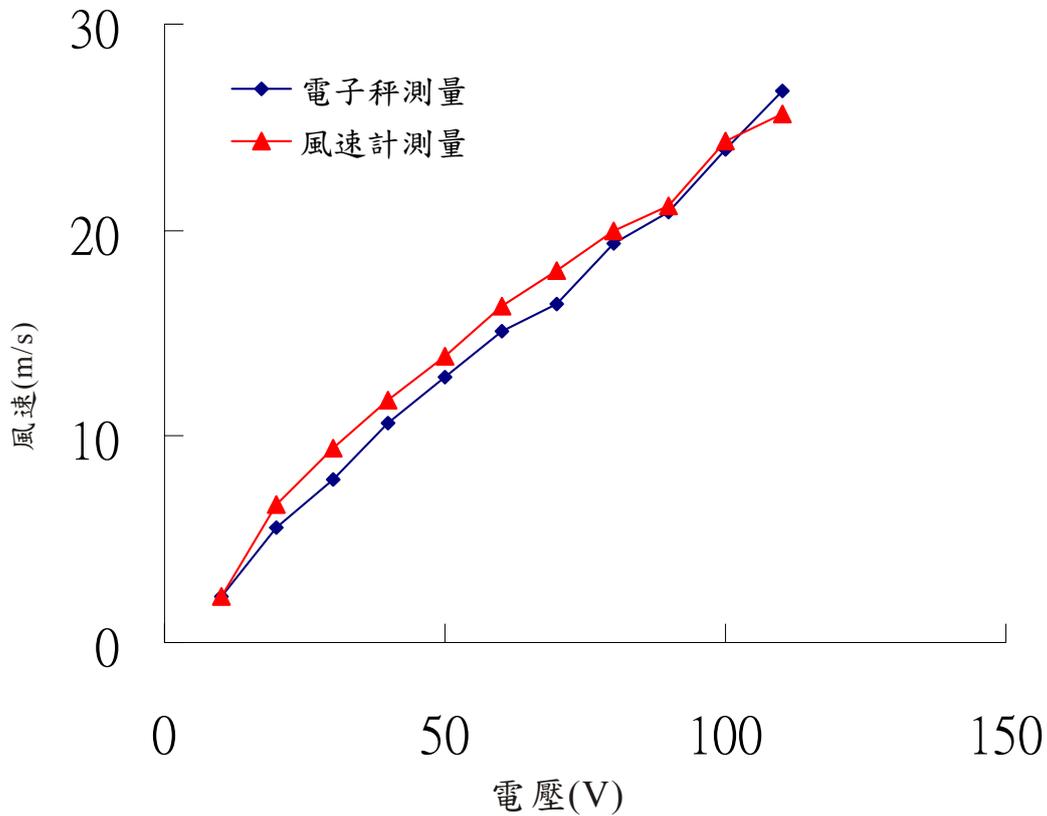


圖 3-5 電壓和輸出風速的關係

運用兩個不同的方式測量風速和電壓的關係，發現用風速計測得的風速和運用電子秤反作用力的讀數均與電壓成正比關係。

七、吹掠管口的風速與諧音頻率的關係

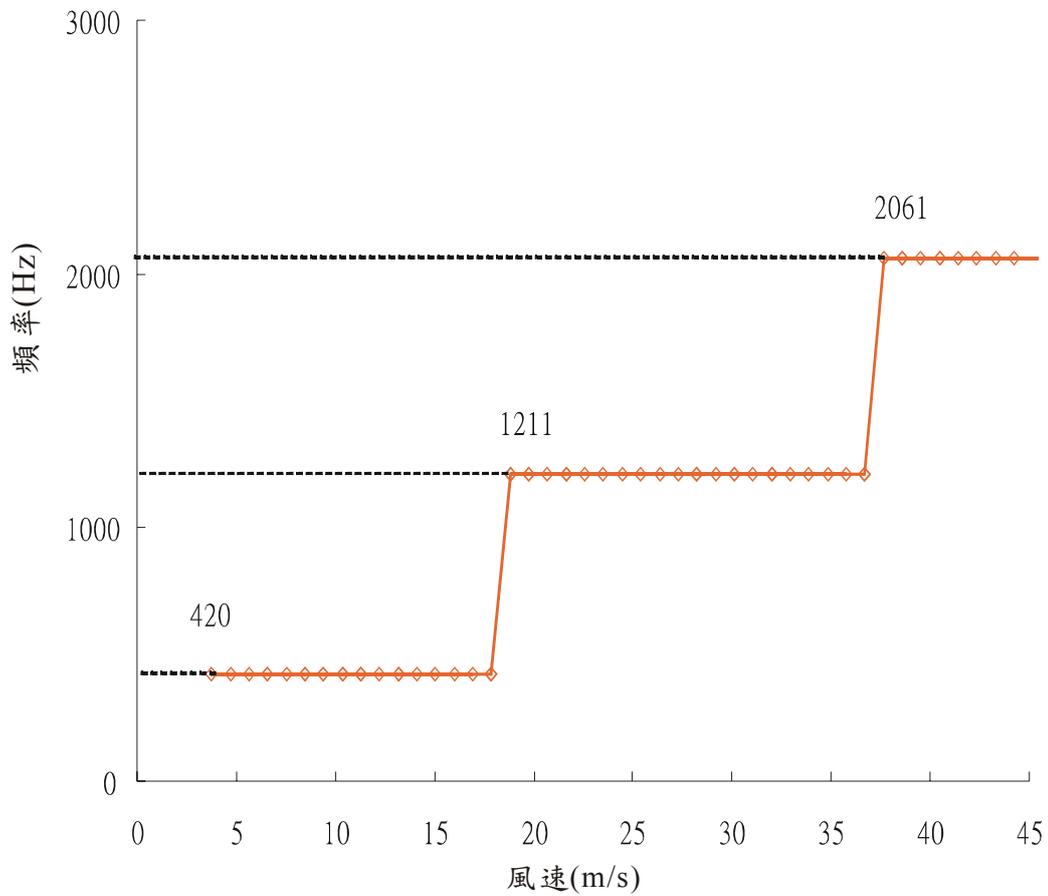


圖 3-6 A 20cm 掠管口的風速與諧音頻率的關係

由圖 3-6A 可知，在 20.00 公分的管長下，當吹掠管口風速越來越大的時候，頻率也會隨著風速的變快呈階梯狀的躍遷遞增，分別跳到各諧音的頻率，呈 1、3、5 的奇數倍數比。

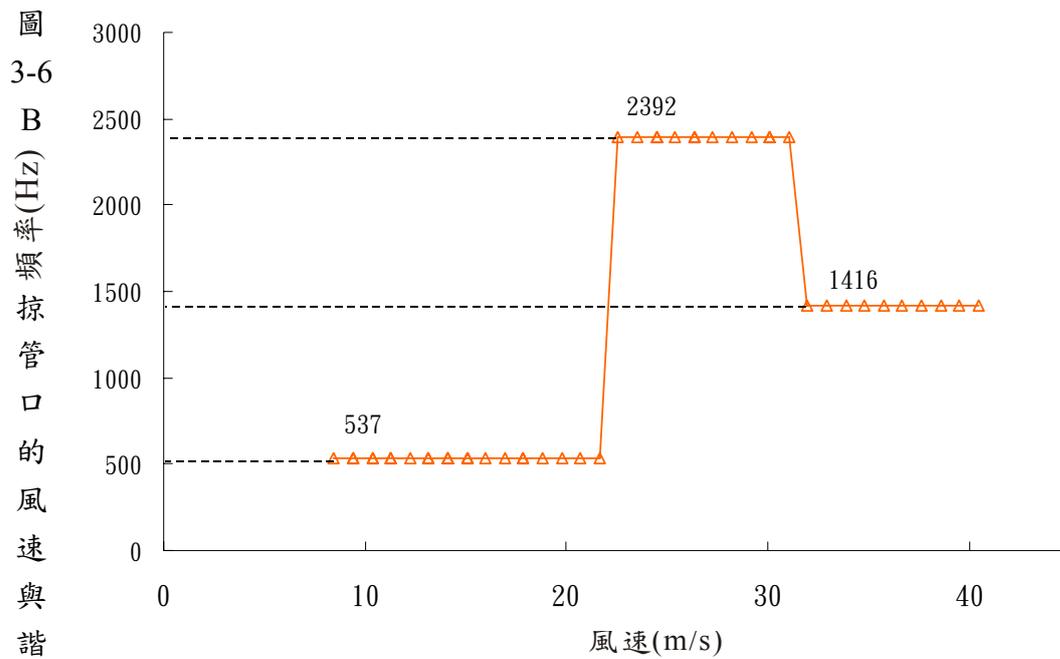


圖 3-6 B 17.5cm 掠管口的風速與諧音頻率的關係

相對於 17.50 公分的管長，雖然頻率也有隨著風速的增強而呈階梯狀的分佈，但有掉落的情形，頻率從基音躍遷至第三諧音之後才跳回第一諧音，但是諧音間的比還是維持基數比。

八、以不同角度吹掠管口與諧音頻率關係

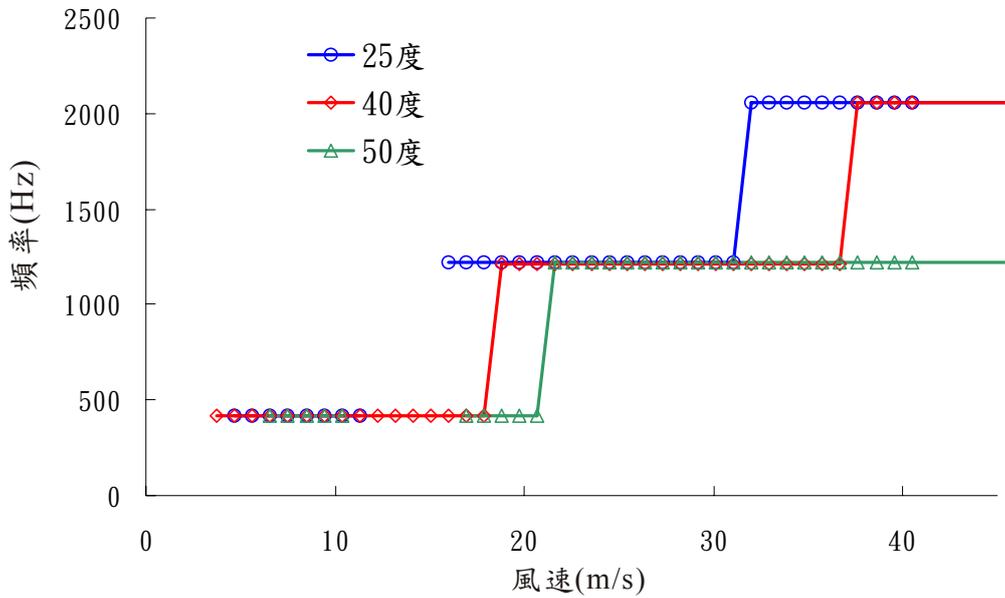
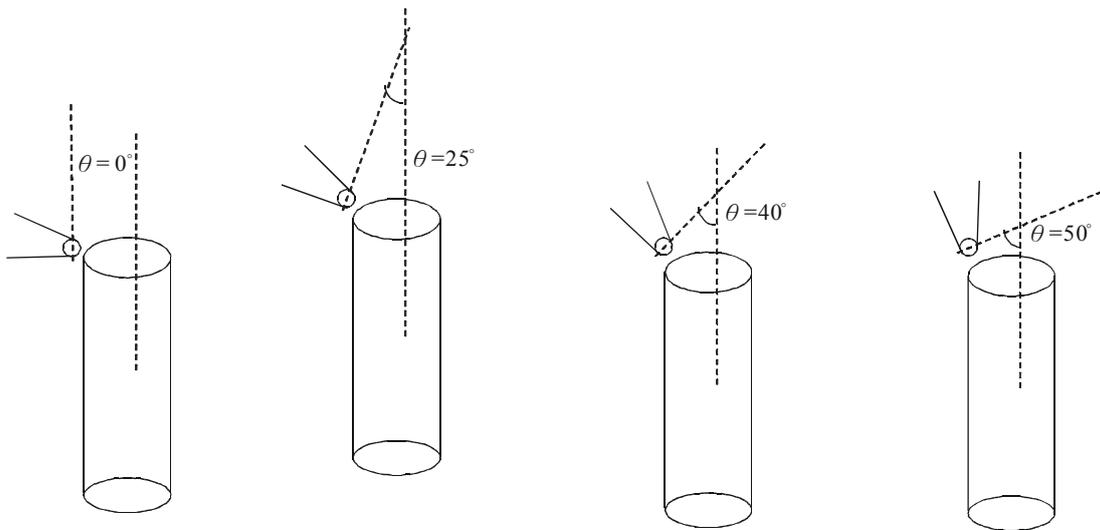
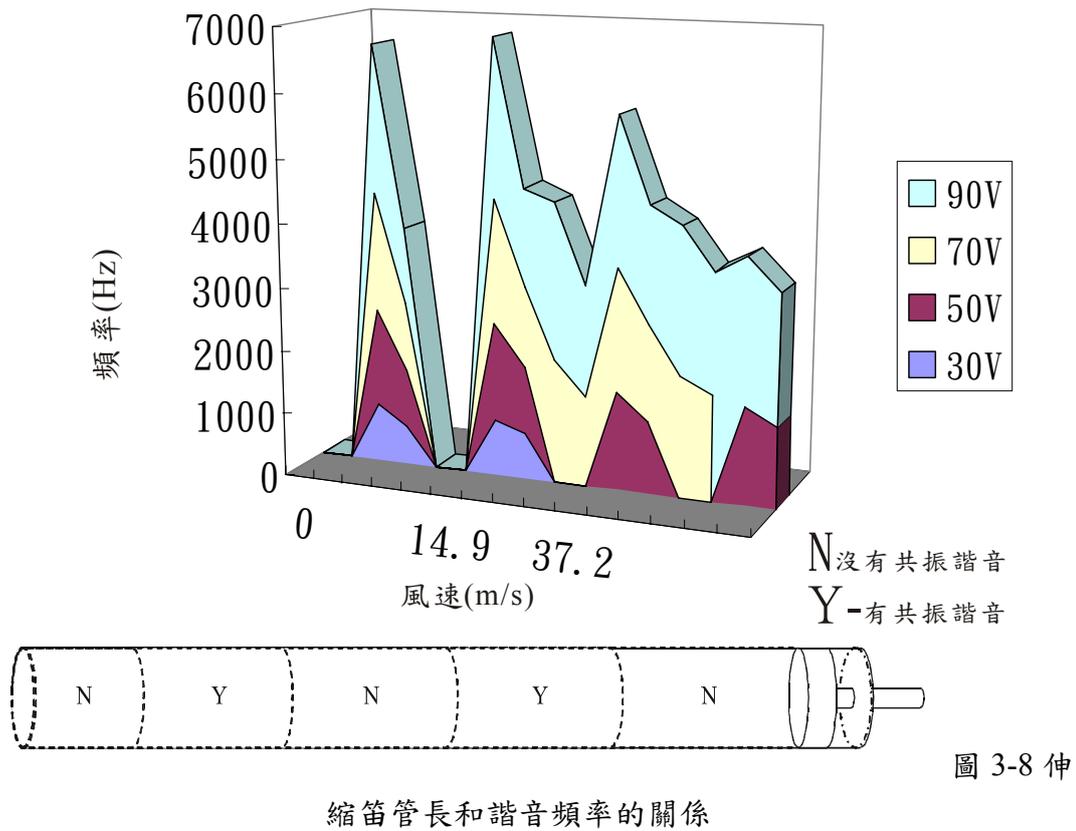


圖 3-7 以不同角度吹掠管口與諧音頻率關係



由圖 3-7，我們發現角度較大時，風幾乎是直接吹入管內，需較大的風速，才會引發諧音的躍遷，且激發的頻率較低；當角度較小時，風吹掠管口產生渦流，會比大角度有早躍遷及能引發較高頻率聲音的特性。

九、伸縮笛管長和諧音頻率的關係



如圖 3-8，單一管長四個風速值以後，發現有些特別的管長會不能引發諧音，但在增加風速後，會把不能引發出諧音的部份縮短，甚至把風速再升高至 70V 和 90V 時，只有兩小段不能引發諧音。

肆、結論與未來展望

一、結論 (Inference)

吸管笛實驗：

- 1、在吸管笛實驗中，各口徑吸管笛其第一諧音頻率換算出來的波長皆約為管長的4倍。
- 2、在吸管笛實驗或是壓克力管實驗皆須討論管口修正量。其中吸管笛部分會隨著吸管笛的口徑變大而增加。因此當共鳴管的材質、形狀、長度不同，其管口修正量應該有所不同，不一定如同文獻探討所提為 $0.6r$ 。
- 3、由實驗得到的聲速經驗公式和理論公式十分相符。因此本實驗設計的確可以當作聲速的一項簡易測定方式。

壓克力管實驗：

- 1、在圖 3-4 可知，管長越短，其斜直線的斜率越大；也就是說，越短的管子，它的泛音頻率爬升地比較快。
- 2、圖 3-5 中，換算的風速和微風器顯示的速度成正比關係。這個現象告訴我們——當打氣速度越快造成出口風速越快時，微風器上所偵測到的風速也越快。
- 3、圖 3-6，當風速增加過程中，風速和頻率為躍遷遞增的關係，我們發現風吹掠管緣產生的渦流頻率，大體上還是隨著風速增加而遞增，且夾雜有各種頻率。
- 4、由圖 3-6B 發現，從高階諧音躍遷回基音後再逐次躍遷至高階諧音的現象，我們認為這應該是因為有夾雜有各種頻率。
- 5、由圖 3-7 的結果，我們推測：角度越小，產生的漩渦越劇烈，越容易躍遷到下一個泛音，反之，角度越大，躍遷到下一階泛音則需要更高的風速。
- 6、圖 3-8 中，利用伸縮笛進行的實驗，發現在固定風速下，並非每位置都能發出共鳴。此外隨著風速增強，在伸縮笛拉長的過程中，在管長前段產生共鳴的位置，呈間斷不連續的，而後段漸漸連續化。

二、未來展望 (Prospection)

- 1、經由伸縮管共振頻率的發現，並非每個位置都能共振出諧音，未來可以探討樂器開孔的位置與實驗是否有所關聯。
- 2、實際上我們人的嘴型並非如打氣機的圓形出風口，之後可延伸不同形狀的出風口而達到改變風速的效果。
- 3、本實驗壓克力管設計只有管身，並無類似笛膜或是簧片的裝置，往後可探討樂器有無簧片的差別。
- 4、我們發現，當風速增加時，所引發駐波的強度也隨之增強，未來可測量聲音強度與風速的關係，並以隔音設備排除打氣機噪音影響。
- 5、文獻指出，一噴流經障礙物後，會產生渦流，未來我們可用噴霧或灑些粉塵的方式，使渦流視覺化，拍攝動態渦流的情形。
- 6、可能的應用：從目前的實驗結果得知，風速和頻率有正比關係。也許可以此原理發展一套利用聲音頻譜測風速的裝置。

伍、資料來源

- 1、林明瑞 (民 94)。高中物理 (上)。南一書局，p1~28。
- 2、國立編譯館 (民 88)。國中選修理化 (二)。國立編譯館，p33~58。
- 3、光復書局編輯部 (民 76)。大英科技百科全書 13。光復書局，p182~195。
- 4、井川憲明、井川隆、都筑卓司、米山正信 (民 82)。牛頓科學研習百科物理。牛頓出版，p64~73。
- 5、馬大猷、沈壕。聲學手冊。科學出版社。P217~218。
- 6、<http://www.pascoaustralia.com/education/dstudio.lasso> (Data studio)

附 錄

頻率(Hz)	口徑(cm)	誤差
600	0.19	6.248%
	0.71	4.491%
	0.55	0.429%
800	0.19	8.921%
	0.71	4.423%
	0.55	0.356%
1000	0.19	11.220%
	0.71	7.355%
	0.55	0.375%
1200	0.19	14.968%
	0.71	7.800%
	0.55	0.351%
1800	0.19	24.942%
	0.71	12.503%
	0.55	0.358%

表 3-1 單一管長口徑跟頻率的關係

口徑(cm)	頻率(Hz)	管長實驗值(cm)	1/4λ 理論值	差值
0.19	600	13.34	14.229	6.248%
	800	9.72	10.672	8.921%
	1000	7.58	8.538	11.220%
	1200	6.05	7.115	14.968%
	1800	3.56	4.743	24.942%
0.71	600	13.59	14.229	4.491%
	800	10.2	10.672	4.423%
	1000	7.91	8.538	7.355%
	1200	6.56	7.115	7.800%
	1800	4.15	4.743	12.503%
0.55	600	14.29	14.229	0.429%
	800	10.71	10.672	0.356%
	1000	8.57	8.538	0.375%
	1200	7.14	7.115	0.351%
	1800	4.76	4.743	0.358%

表 3-2 不同管長、不同口徑之管子率頻的比較(固定頻率下反推管長)

溫度(°C)	頻率(f)	v(實驗值)	v(理論值)
50°C±5%	2000	351.6	361
	2500	348	361
	3000	353.4	360.99
	3500	373.1	360.99
19°C±3%	2000	346.4	342.4
	2500	319.5	342.4
	3000	357	342.3999
	3500	342.3	342.399995

表 3-3 聲速和溫度的關係

理論值	Fir. Har.	Sec. Har.	Thi. Har.	For. Har.	Fif. Har.
7.5cm	1085.6	3256.7			
10cm	822.8	2468.5	4114.2		
12.5cm	662.5	1978.5	3312.5		
15cm	554.5	1663.4	2772.3	3881.3	
17.5cm	476.7	1430.2	2383.6	3337.1	4290.5
20cm	418.1	1254.3	2090.5	2926.7	3762.9
實驗值	Fir. Har.	Sec. Har.	Thi. Har.	For. Har.	Fif. Har.
7.5cm	1122.6	3267.2			
10cm	828.6	2489.6	4150		
12.5cm	732	2002	3369.2		
15cm	634.6	1709	2783	3955	
17.5cm	537	1415.8	2392.8	3368.8	4248.2
20cm	439.4	1318	2099.4	2978.4	3837.8

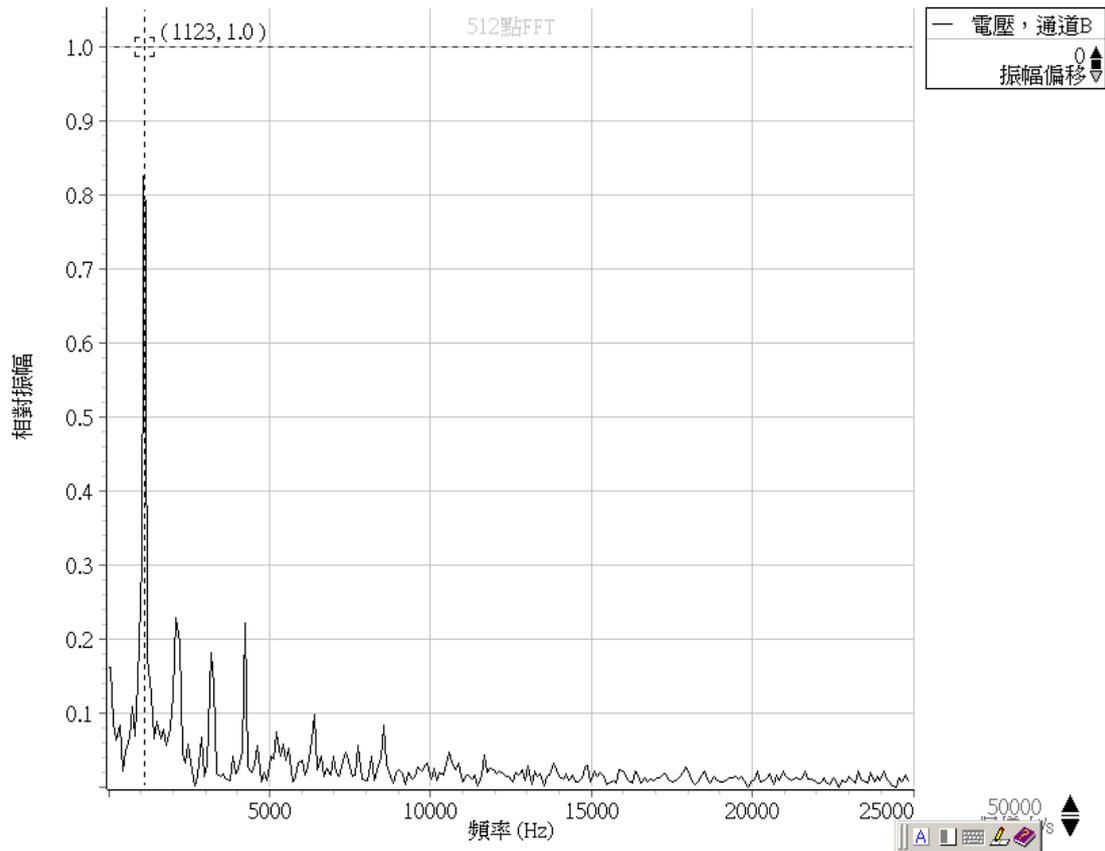
表 3-4 不同管長，諧音和頻率的關係。

次數	Kts	v(m/s)	打氣時間
第一次	3.2	1.6	5.21
第二次	3.8	1.9	5.02
第三次	3.9	1.95	4.19
第四次	4.1	2.05	4.3
第五次	4.7	2.35	4.17
第六次	5.5	2.75	3.57
第七次	6	3	3.39
第八次	6.5	3.25	3.02
第九次	6.6	3.3	3.52
第十次	7.9	3.95	3.11
第十一次	8.7	4.35	2.58
第十二次	8.8	4.4	2.09
第十三次	9.4	4.7	2.81
第十四次	9.8	4.9	2.32
第十五次	9.8	4.9	2.85
第十六次	11	5.5	2.61
第十七次	11.7	5.85	2.38
第十八次	12.1	6.05	1.78
第十九次	12.9	6.45	2.29
第廿次	13	6.5	1.86
第廿一次	14	7	1.9
第廿二次	14.4	7.2	1.19
第廿三次	14.6	7.3	1.03
第廿四次	15.3	7.65	1.9
第廿五次	15.7	7.85	1.19
第廿六次	17.2	8.6	1.51
第廿七次	17.2	8.6	0.85
第廿八次	18.8	9.4	1.23
第廿九次	20.6	10.3	0.72
第卅次	23	11.5	0.57
第卅一次	24.2	12.1	0.54

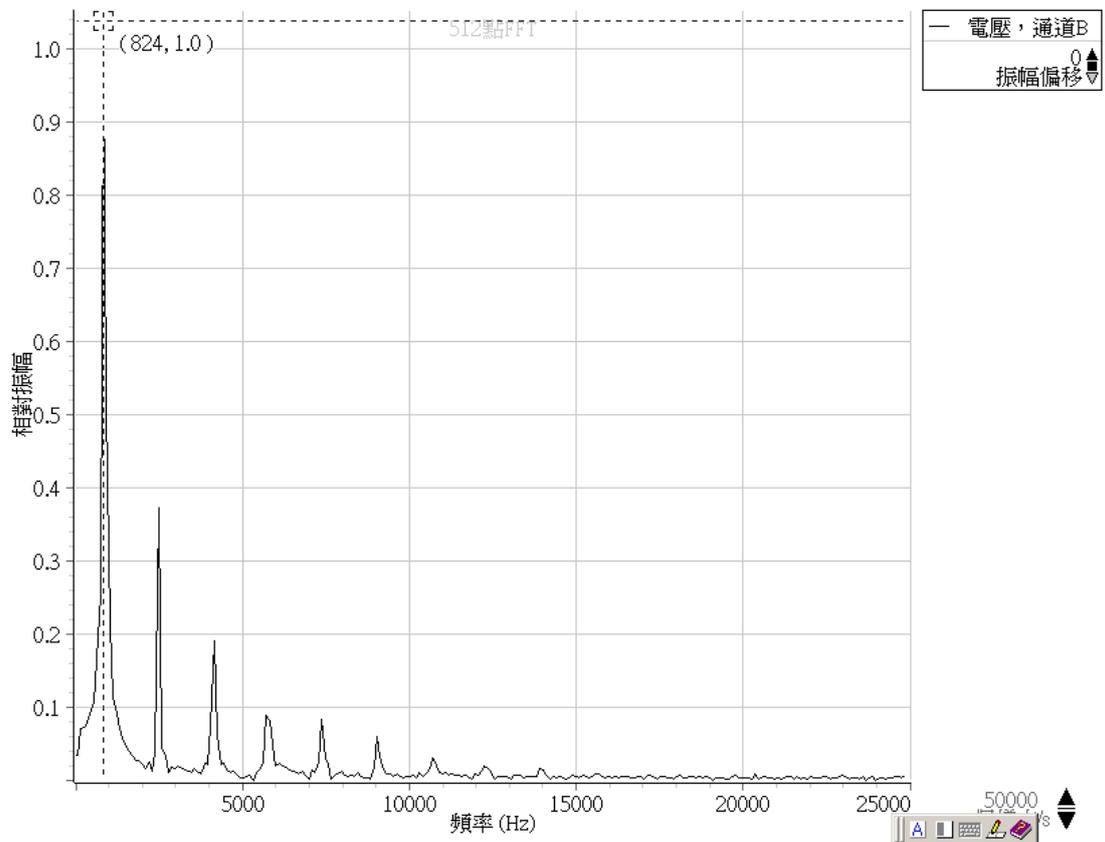
表 3-5 風速與打氣時間之關係圖

fre.	v(m/s)	所屬管長
1122.6	0.46	7.5
3267.2	1.25	7.5
828.6	0.35	10
2489.6	0.92	10
4150	1.7	10
732	0.26	12.5
2002	0.68	12.5
3369.2	1.37	12.5
634.6	0.23	15
1709	0.61	15
2783	1.08	15
3955	1.57	15
537	0.22	17.5
1415.8	0.55	17.5
2392.8	0.91	17.5
3368.8	1.43	17.5
4248.2	1.82	17.5
439.4	0.18	20
1318	0.5	20
2099.4	0.8	20
2978.4	1.09	20
3837.8	1.49	20

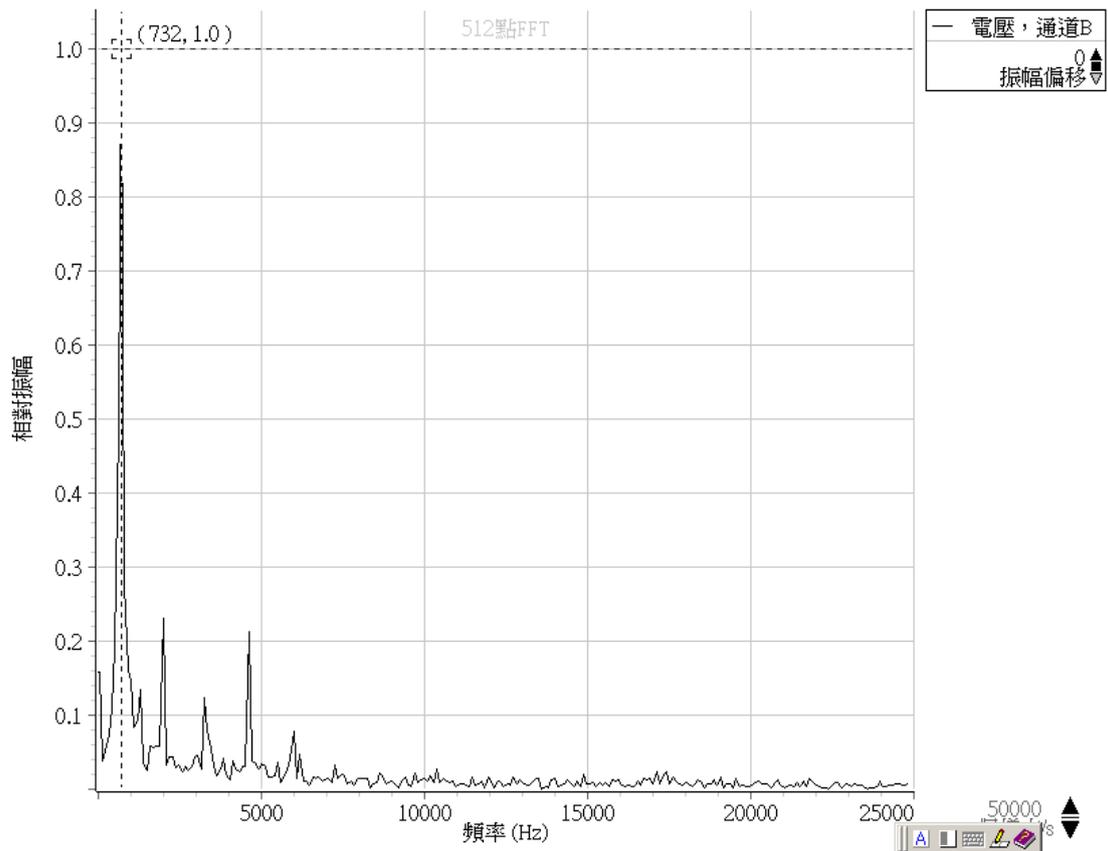
表 3-6 風速與頻率的關係



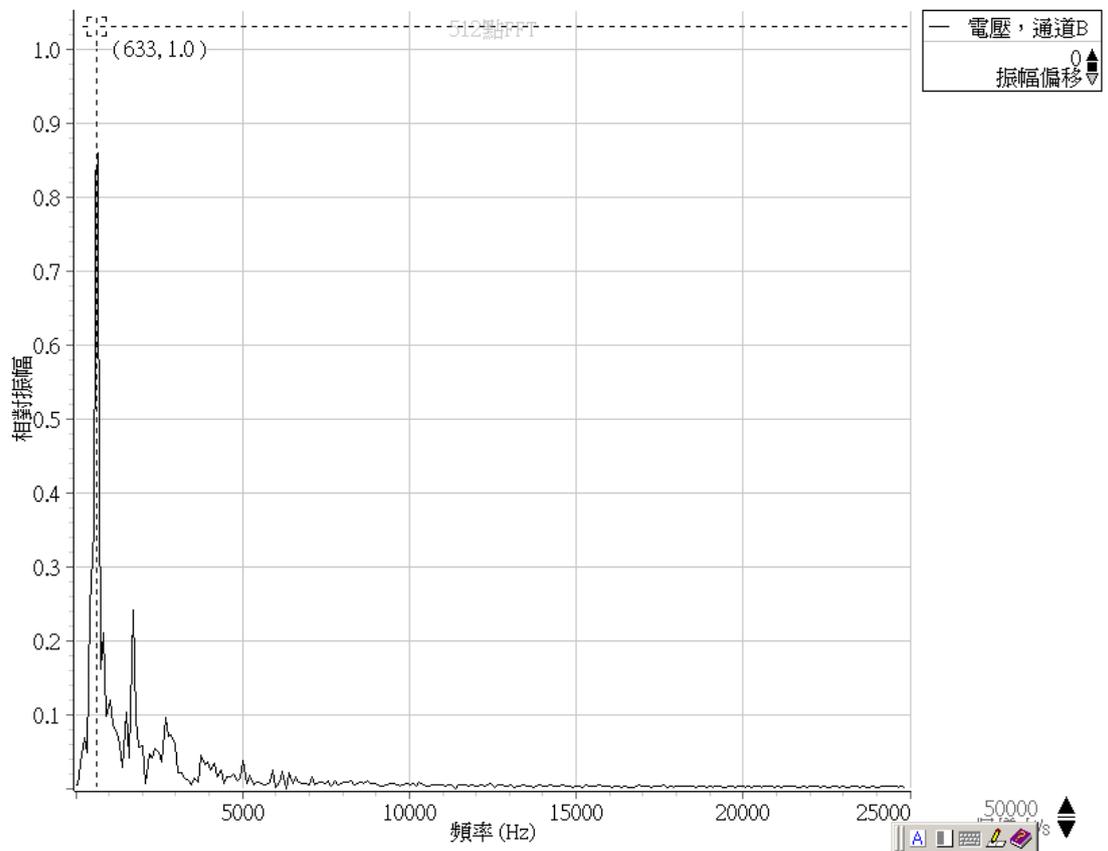
圖一：7.5cm 第一諧音頻譜圖



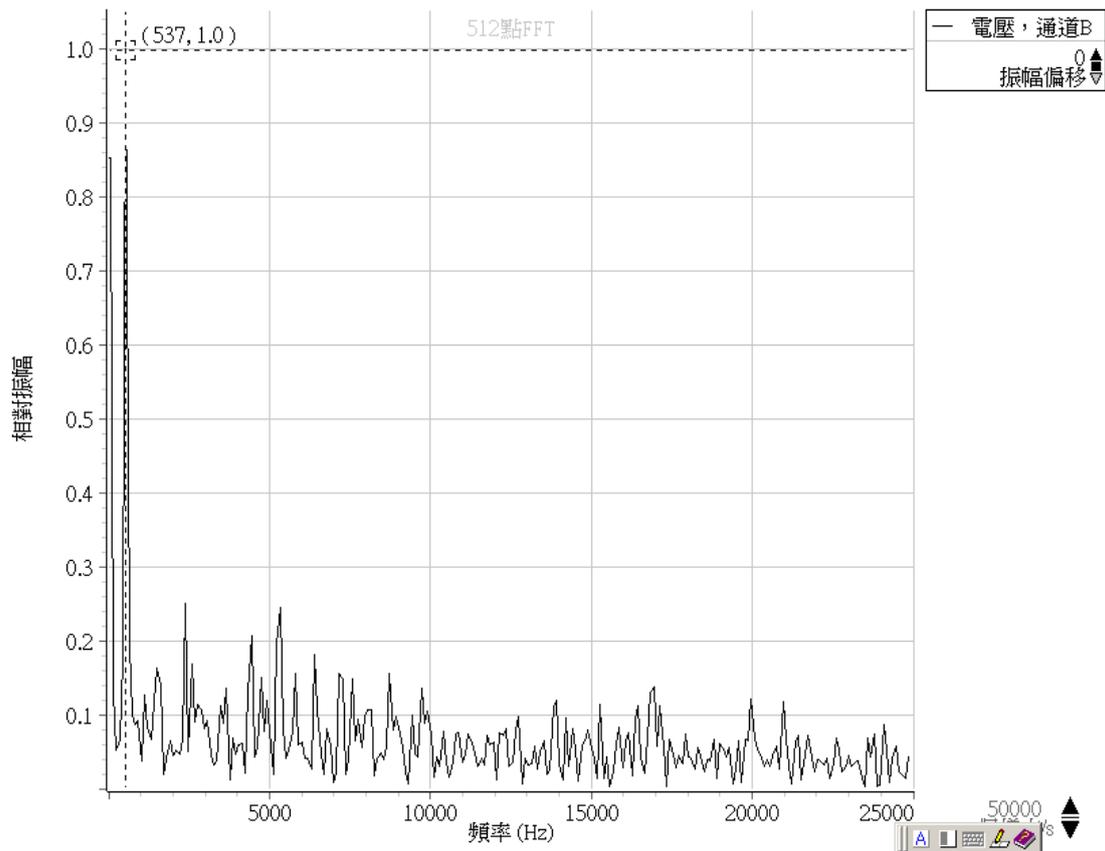
圖二：10cm 第一諧音頻譜圖



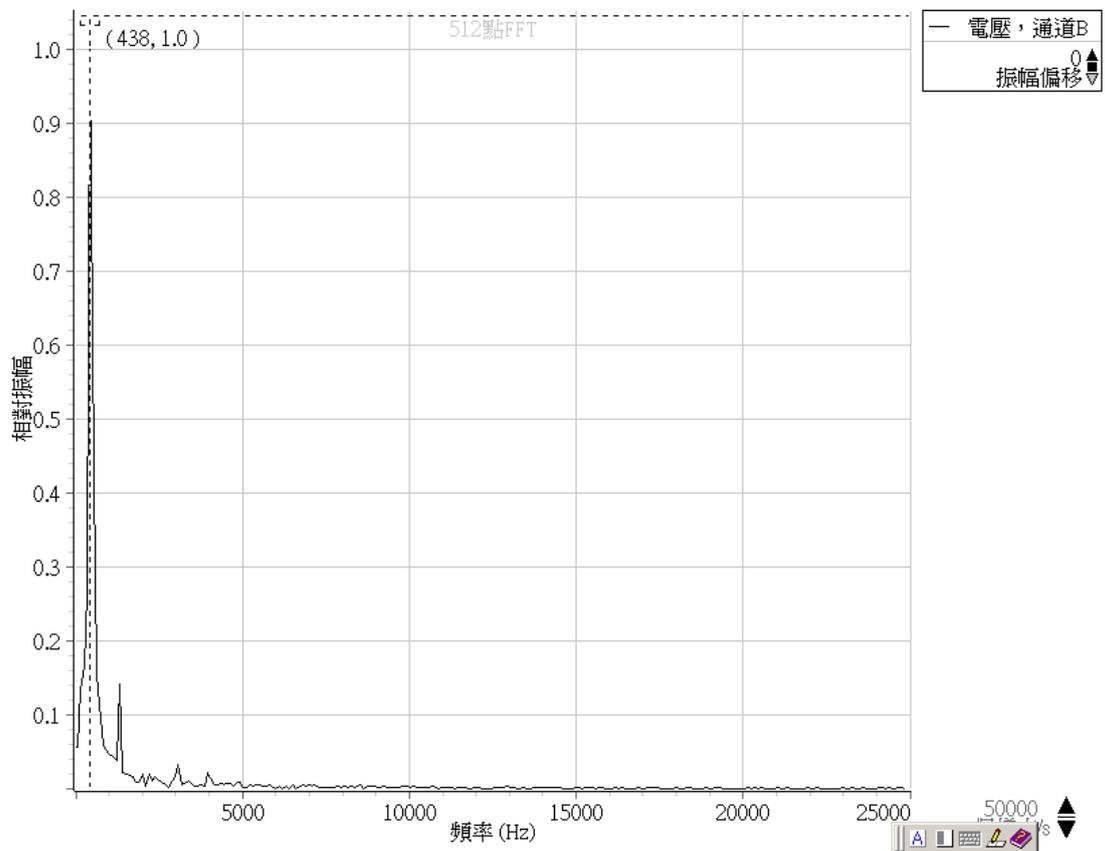
圖三：12.5cm 第一諧音頻譜圖



圖四：15cm 第一諧音頻譜圖



圖五：17.5cm 第一諧音頻譜圖



圖六：20cm 第一諧音頻譜圖

評語

實驗創意佳，尤其發現不少有趣的現象值得進一步探究。完成後，可代表國家出國參展，為國爭光。