

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：物理與太空科學

作品名稱：全民攻笛

得獎獎項：佳作

學校 / 作者：臺北市立麗山高級中學

張毓屏

作者簡介



大家好！我是張毓屏，目前就讀於麗山高中三年級，是數理資優班一員。在這一年的研究中，我要感謝身邊的老師、學長們及教授的幫助，以致於今年的成果有突破性的發展。最重要的是，要謝謝爸媽給我的支持。

國中開始就對物理實驗特感興趣，到麗山高中後開始我的研究生涯。除此之外，利用閒暇時間學習花式冰刀、鋼琴及網球。未來希望進入物理相關科系就讀。

目 錄

作者簡介	1
摘 要	3
Abstract	3
一、前言	4
(一) 研究動機	4
(二) 研究目的	4
(三) 實驗原理	5
二、研究方法及過程	10
(一) 設備及儀器	10
(二) 步驟	11
三、實驗結果與討論	12
(一) 三種不同的管長中，各諧音的頻率比較	12
(二) 使用兩種方式測量變壓器電壓與打氣機的輸出風速	13
(三) 在固定角度、距離下，探討風速與頻率的關係	14
(四) 在固定風速、距離下，探討風吹角度與頻率的關係	15
(五) 在固定風速、角度下，探討風吹距離與頻率的關係	16
(六) 在固定風速、角度、距離下，管長與頻率的關係	17
(七) 在竹管中，吹入角度與頻率的關係	18
(八) 觀察渦流	19
四、結論及未來展望	20
五、資料來源	20
附 錄	21

摘 要

本實驗主要是研究閉管駐波的發聲原理。何謂「閉管駐波」？就是一個管子在相同長度下，用不同的力道吹，會有不同音高的聲音產生，這些音被稱為「諧音」。原管長所能發出的最低頻率稱作「第一諧音」，第二低的聲音稱作「第三諧音」，依此類推。

在簫的演奏上，只要按住同樣的孔，用較大的力量吹，也同樣會發出較高的音；同樣地，在曲笛的演奏技巧上，有平吹、急吹等分別。為什麼吹越用力，音就越高呢？如果現在拿一個大吸管吹（要裝活塞），你會發現，只有在特定的位置（角度）下，才能吹出聲音。那麼，角度對於聲音也有影響嗎？

這些現象的幕後黑手，就是在管口產生的「渦流」，渦流頻率也會隨著風速而增加；而且，渦流的頻率在特定風速下，會有特定的範圍。經由實驗可以大略歸納出，影響閉管駐波的三個主要變因，分別是「風速」、「風吹角度」、及「吹口至管口的距離」。吹得越急，風速就越快，渦流頻率越高，越易使諧音躍遷；吹的角度越小，越易產生渦流，亦易引發聲音；吹的距離越小，渦流越不穩定，越易產生其他的擾動。以上就是本實驗的概略。

Abstract

This project is aimed to fine out how the closed tube can produce a sound. We know what harmonics are. When we hold a big straw and blow with increasing strength (the bottom should be in water), it will generate a higher sound. The high sound is called "harmonic". The lowest sound it can make is "the first harmonic", the second lowest sound is "the third harmonic", and so forth.

Likewise, when we press the same key on vertical bamboo flute with increasing strength, it'll also produce a higher sound. But why do we use the strong air stream to blow the tube to cause the tone to transfer? Now let's blow a straw flute. You will find that you need to blow in the particular position, and then the sound will be produced. So, is there any relationship between the blowing angle and the frequency?

Actually, all these sound are produced by "vortex in the mouthpiece." The frequency of vortex will increase with the wind speed. Moreover, the frequency of vortex has a range. In sum, the higher the wind speed is, the higher the frequency of the vortex is, and leads to the higher frequency of the sound. The smaller the blowing angle is, the easier the vortex will be produced; the easier the frequency will be made. The smaller the distance between the blowing angle and the frequency is, the more unstable the frequency will be. The above is the most important research in this project.

一、前言

(一) 研究動機

經過台北車站，人來人往間，或多或少會看到路人拿著珍珠奶茶，正大口大口地吸。等車時覺得無聊，開始吹吹手上飲料的大吸管。朋友大概覺得此舉動很不正常，在暴笑聲中拍了一下我的背，嘴裡的氣在瞬間吐出來，卻無意間發現，如若吹的很用力，會有另一個較高頻率的聲音產生。這個現象挑起我對管中駐波的興趣，所以設計了一套實驗，以便於更進一步了解管中駐波的現象。

在蒐尋資料的過程中，看到「簫」的介紹，便想到了上次吹的大吸管，這也引發另一個有趣的問題——究竟如何使簫和吸管笛能夠發聲呢？所以建立一個新的實驗，開始研究笛子的發聲原理。

翻開物理課本，聲音學中，詳細閱讀「管中駐波」的部份，波的基本定義是各質點做規律的週期運動，卻不知道是用何種方法使之發聲。因為是閉管，先假設管子裡的空氣不會互相流動，管中各點的空氣分子做管壁間的週期震盪，表示引發駐波的聲音源不在管中。所以我們先做個假設性的預測結果：發聲源應在管口或是管子本身。

若發聲源在管口，元凶可能是風吹到管口後所產生的渦流，或是邊稜；若發聲源是管子本身，就必需歸咎於材質本性問題。

(二) 研究目的

A. 以透明壓克力管模擬排笛

1. 在固定角度、距離下，探討風速與頻率的關係。
2. 在固定風速、距離下，探討風吹角度與頻率的關係。
3. 在固定風速、角度下，探討風吹距離與頻率的關係。
4. 在固定風速、角度、距離下，管長與頻率的關係。
5. 以竹管實際做對照。

B. 以液態流模擬氣態流，觀察渦流在管口內的擾動現象。

(三) 實驗原理

1. 閉管駐波：

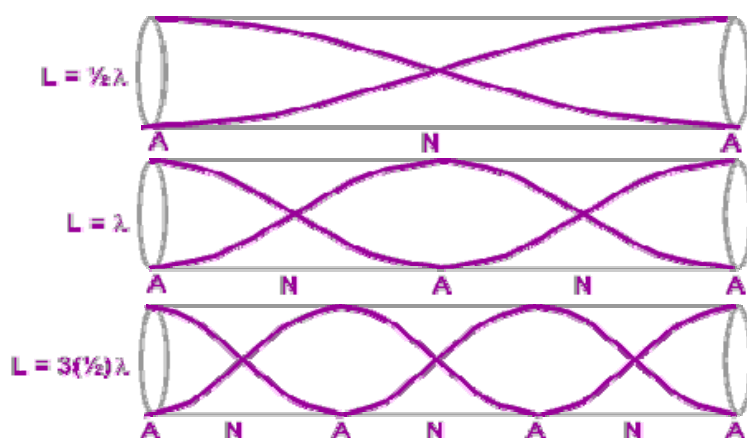


Fig. 1-1

在閉口端空氣振動最子，形成管點；在開口端空氣振動最大，形成腹點。空氣是縱波，是為疏密波，但在圖形上不方便以疏密表示，故用橫波代替。一端開口另一端封閉管子，例：長笛。

(A 是波腹，N 為波節)

$$\text{波長} \quad 2\ell = n\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{2\ell}{n} \propto \frac{1}{n}, n=1, 2, 3, \dots$$

$$\text{頻率} \quad f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2\ell} \Rightarrow f \propto n$$

(註：出自 **PhysicsLAB** copyright 1997-2007, **Catharine H. Colwell**, All rights reserved.

Application Programmer, Mark Acton.)

2. 雷諾數 (Re)：

在管流的問題中，流體之流動常受到各種力量之影，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。

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

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

(註：出自 張璿文、林婉茹，2006，熱線式渦流流量計，台灣國際科展，工程學組。)

3. 渦旋逸放 (Vortex Shedding) :

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：

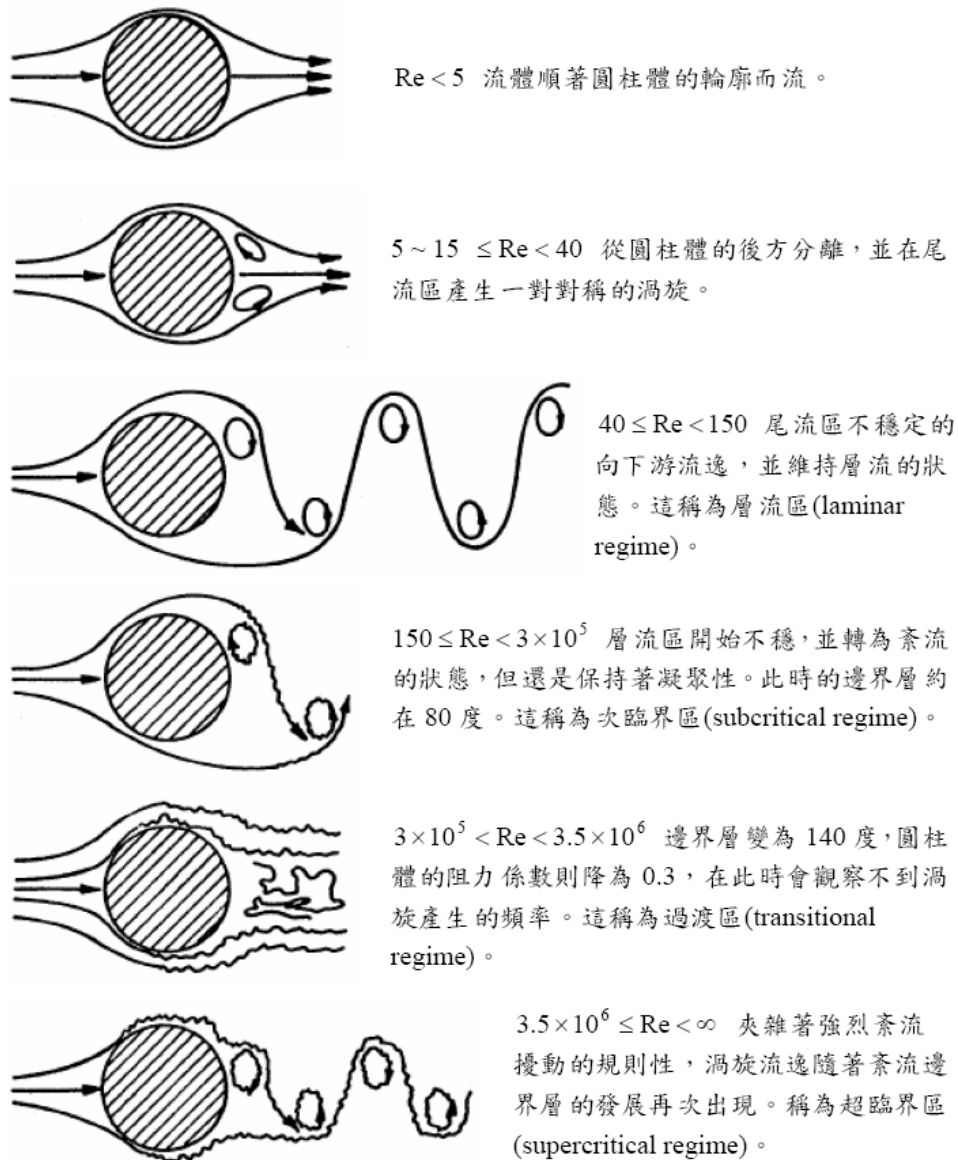


Fig. 1-2

(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)

4. 簧片振動與閉管諧音之頻率比較：

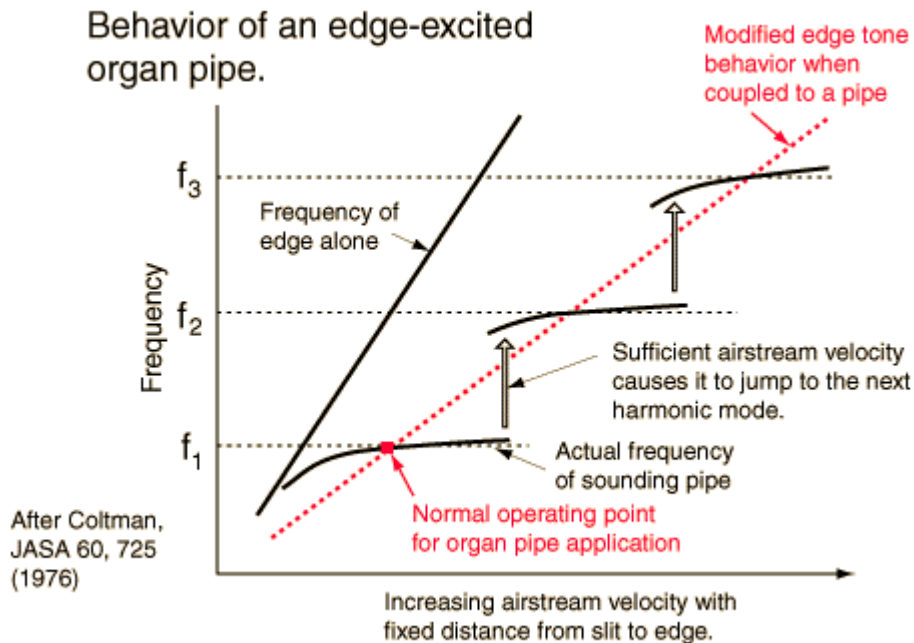


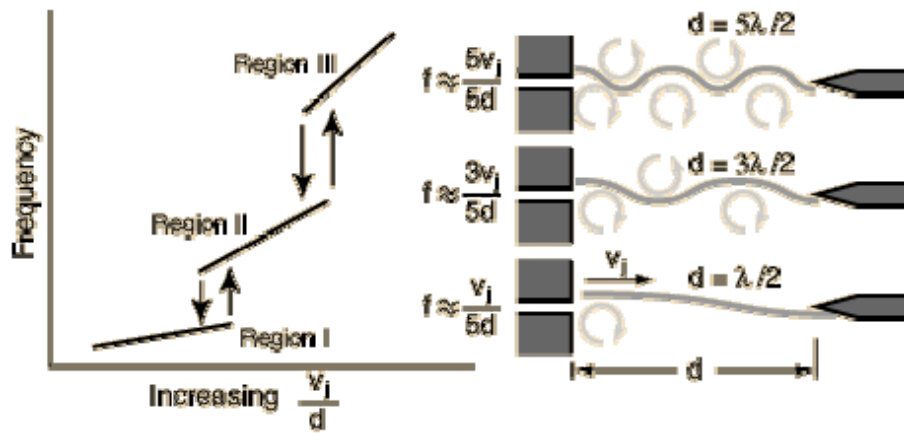
Fig. 1-3

Many texts put forth an explanation of the second in terms of the first, a rather circular procedure in view of the fact that there are many gaps in the theoretical basis for both. Here are plotted the observed oscillation frequencies versus blowing velocity for two jet-edge situations, a normal organ pipe, and a simple edge-tone generator with identical jet-edge geometry. For the pipe one observes oscillation near the frequencies of the normal mode so the pipe, the frequency for each mode rising slightly as blowing velocity is increased. The oscillations jump (with hysteresis) to the successively higher modes as the blowing velocity is increased.

Fig.1-3 很清楚地描述邊稜音 (Edge Tone) 與閉管駐波的差異。邊稜音的頻率直線，隨著風速增加而上升；而閉管駐波為躍遷遞增 (像階梯狀)，而紅色虛線，則表示了管口內的邊稜音 (渦流) 頻率，也隨著風速增加。

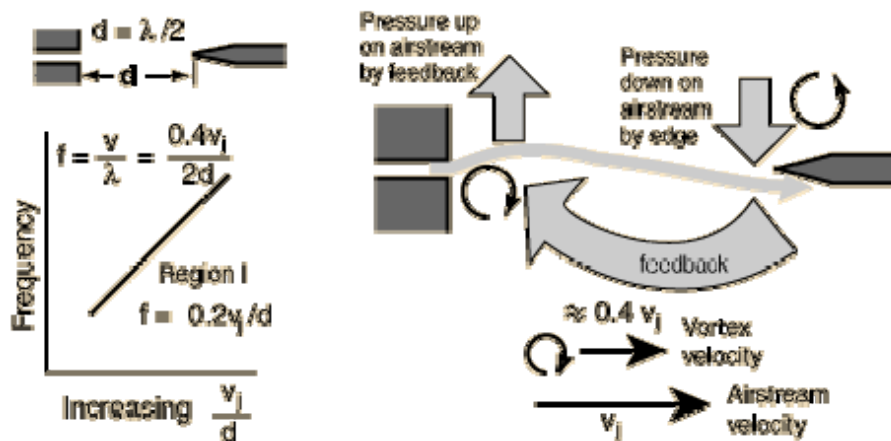
(註：出自 John W. Coltman, 1976, Jet drive mechanisms in edge tones and organ pipes, Scathe locke Road. Pittsbrugh. Pennsylvania 15235, 3319)

5. 邊稜音成因



在管口與狹縫間給定一個距離，邊稜音的頻率會隨風速增加。但是當風速改變時，此邊稜音現有的狀態會被破壞，使邊稜音的狀態躍遷。所以，只要距離固定，給定一個風速，一個穩定的邊稜音是存在的。

6. 邊稜音狀態



第一狀態的線 (Region I) 是邊稜音在管中的主要狀態。邊稜氣流互動的正向回饋 (positive feedback) 形成了一個穩定的音高。此音波長取決於渦流 (vortex) 的擾動，而渦流擾動的速率取決於氣流的快慢，通常認為渦流擾動速率為 0.4 倍的氣流速率。

(註：出自網站 hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

7. 邊稜音

邊稜音管樂器。以邊稜音作聲源的管樂器，稱邊稜音管樂器。常見的邊稜音管樂就是長笛、短笛、竹笛、簫。

當一股氣流以一定速度射向一個帶有尖銳邊緣的管子入口時，氣流就會被分為兩股，形成上下兩個分離的氣體渦旋，渦旋之間產生空吸，導致相互碰撞。如果氣流不斷，渦旋之間的碰撞也就會持續下去，渦旋碰撞發出的聲音就稱為邊稜音。邊稜音的作用在我們生活中屢見不鮮，例如體育老師的哨子，普通人吹口哨，笛子和肅的發聲以及人的歌唱，都與邊稜音發生緊密的聯繫。

邊稜音的頻率變化，關鍵取決於氣流及邊稜噴射角度。在邊稜音產生的許可範圍內（要根據邊稜角的情況而定），角度越大，頻率越高。這是因為射流的角度越大，邊稜音處渦旋的碰撞次數就越多。頻率就越高。

在一定條件下，流速越快，對邊稜音施加的壓力越大，振幅越大。流速加快會引起超吹現象（即抑制了基頻，突出了某一泛音）。如果流壓過強，使管內氣壓大於管外氣壓力，就會失去邊稜音效應而導致啞音。

在音色特點上，單純的邊稜音是一種很弱的、嘶嘶的聲音，本身發出的聲響很小，而且含有較多的高頻雜訊，只有通過共鳴腔體的耦和，聲音才會變大，音色變得圓潤。我們平時很難聽到純粹的邊稜音，是由於邊稜音總是同空氣柱（或腔）的振動耦和在一起。所以很難單獨測定邊稜音的音質特性。譬如，當我們吹響一根管子，這時產生的聲音已經是邊稜音和管內空氣柱混合發出的聲音，邊稜音已淹沒在其中。

8. 笛子

笛子又名橫吹，由竹管製之，經由吹奏讓竹管內的空氣柱振動發聲，常用笛子有兩個八度的音域，聲音清脆、高亢、透明，表現力豐富，深受人們喜愛。



Fig. 1-4

9. 中國笛 DIY

相傳黃帝曾命伶倫為樂官，用竹管以「三分損益法」定訂樂律，中國音樂科學足足較西方早了上千年。三分損益法，是依振動體的長扁做律學計算，其計算是以基礎音乘上三分之二（三分損一分），可得其上五度音。

10. 簫

簫為直吹竹管樂器，吹口刻成V字型，經由吹奏使管內的空氣柱振動而發聲，經由按音孔改變空氣柱的長短，吹奏出音階，音域有兩個半的八度。



Fig. 1-5

11. 排簫（排笛）

排簫通常有 25、16、13 音域等等，但因其音域較窄的限制，慢慢地在樂器合奏中已較少使用，但其特殊的音色及表現力卻一直受到大眾的喜愛。



Fig. 1-6

（註：出自國立民俗技藝文化中心）

二、研究方法與過程

(一) 設備及儀器

1. 變壓器——將打氣機接上變壓器，以調控打氣機輸出的風速大小。
2. 打氣機——製造強風，以模擬人嘴所吹出的風。
3. 自製儀器——為了方便測量角度及距離，因此設計了一個可調控 x 及 y 軸及角度的儀器。
4. 壓克力管——模擬竹管製的簫。
管壁厚度 20mm 外徑 15、25、35mm
管壁厚度 30mm 外徑 16mm
5. 麥克風——接收從壓克力管中所發出的聲音。
6. 電腦——分析及顯示數據。
7. 竹管——以真正的桂竹管實驗，比較壓克力管的不同。

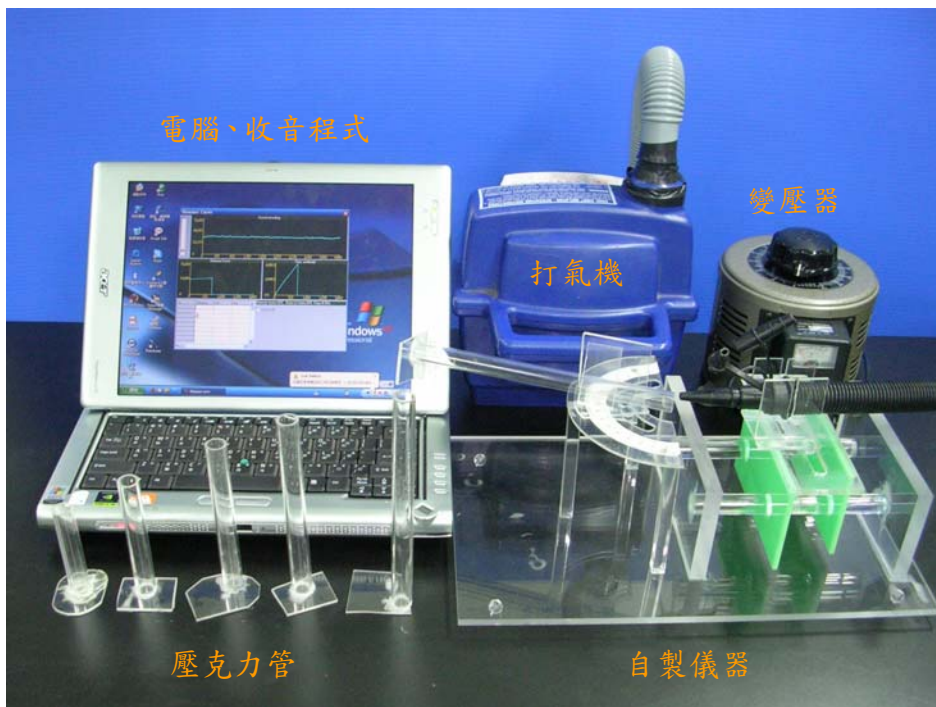
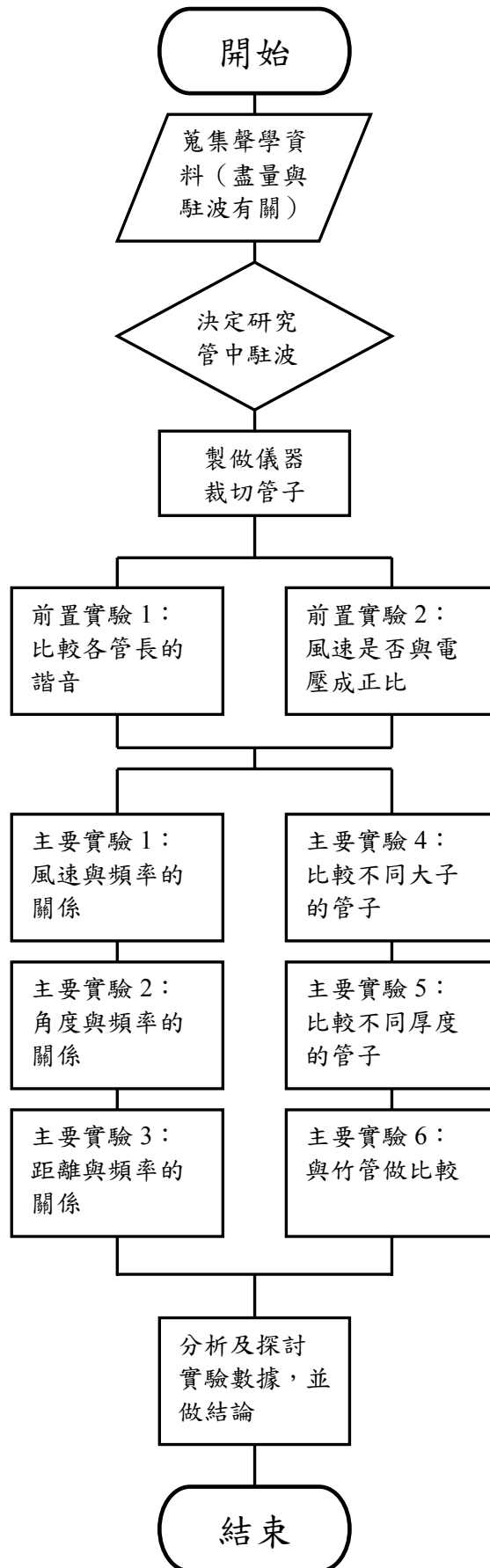


Fig. 2-1

(二) 實驗步驟



三、研究結果與討論

(一) 三種不同的管長中，各諧音的頻比較：

為了解管中駐波原理及映證文獻中的管中駐波理論，實驗了不同的管長；另外加上理論值作對照，實驗結果如下：

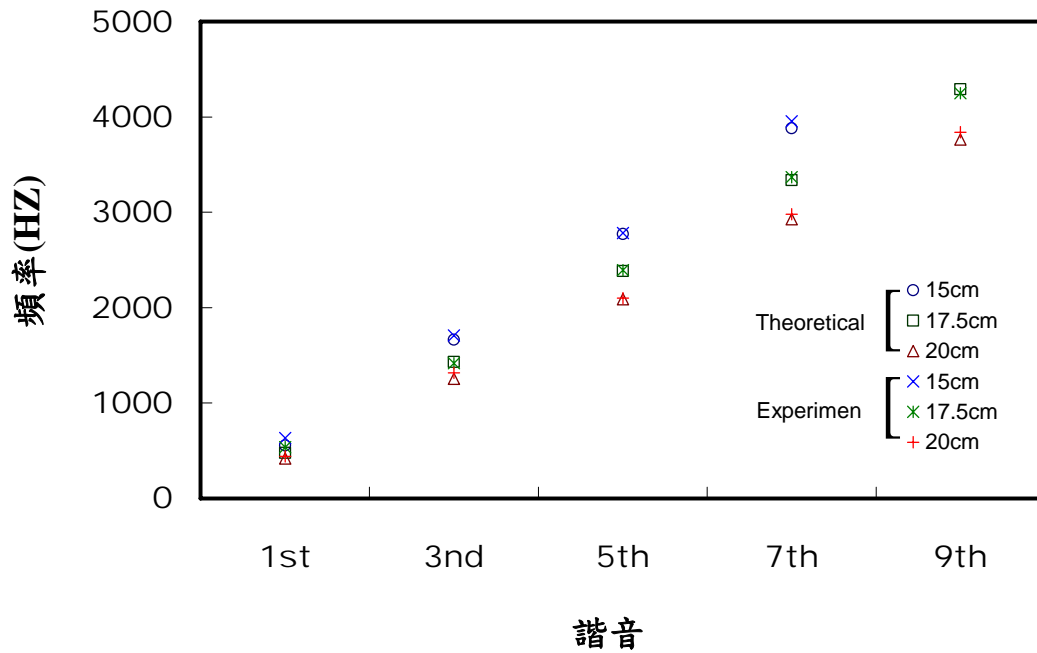


Fig. 3-1

由 Fig.3-1 可知，每種管長的實驗值與理論值幾乎重合，表示往後的實驗出的數值也會有誤差，卻是可信賴的數值。

(二) 使用兩種方式測量變壓器電壓與打氣機的輸出風速。

因為本實驗都是以變壓器調控打氣機輸出的風速，為了確定風速是否與電壓成正比，所以進行了這個實驗。

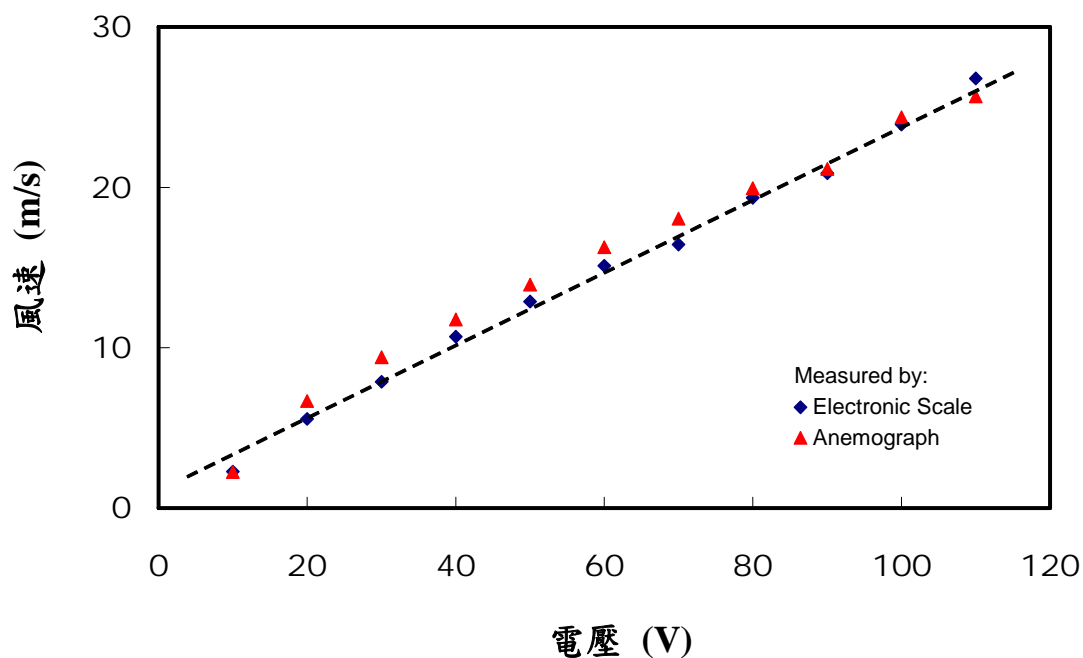


Fig. 3-2

這個實驗以兩種方式進行測試：

1. 以風速計直接測量出口的風速，並記錄數據，經由換算及整理，以紅色點呈現於上圖。
2. 依照 $F = \rho AV^2$ 公式，將出風口對準一個精密電子秤，記錄數據作推算，得到的數值以深藍色點呈現於上圖。

由 Fig.3-2 得知，控制打氣機輸出空氣的變壓器的電壓，與打氣機輸出的風速，有正比關係。對於往後的實驗，變壓器上顯示的電壓就可直接換成風速，作一個快速的對照。

(三) 在固定角度、距離下，探討風速與頻率的關係。

這個實驗，也是整個主題中最重要的一環。為了探討管子到底如何發聲，吹的風速對發聲有無影響，及是否與文獻上的推論一致。

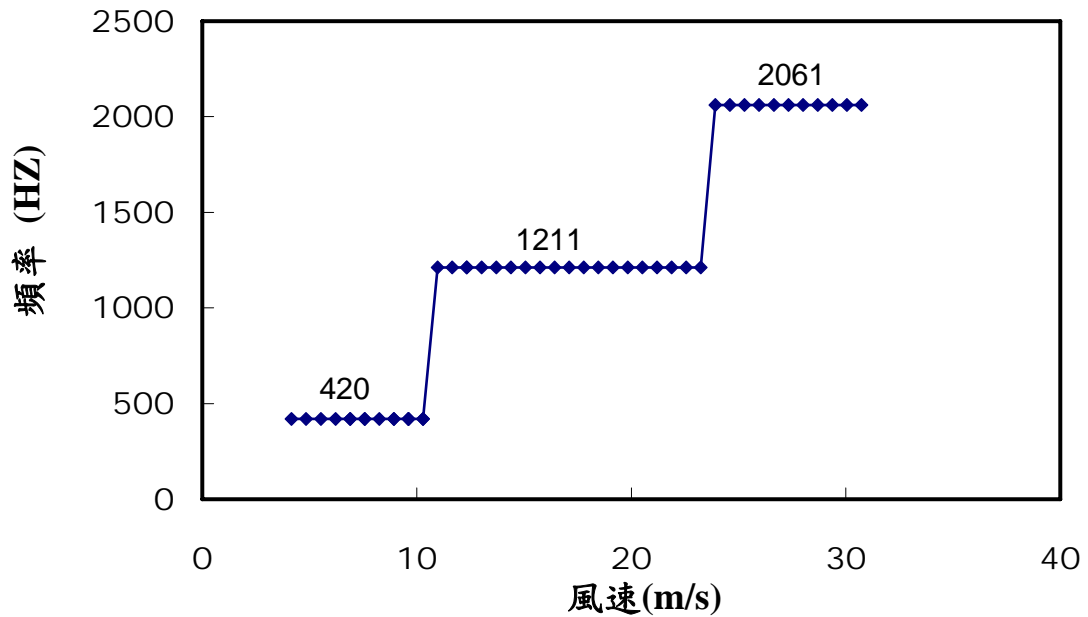


Fig. 3-3

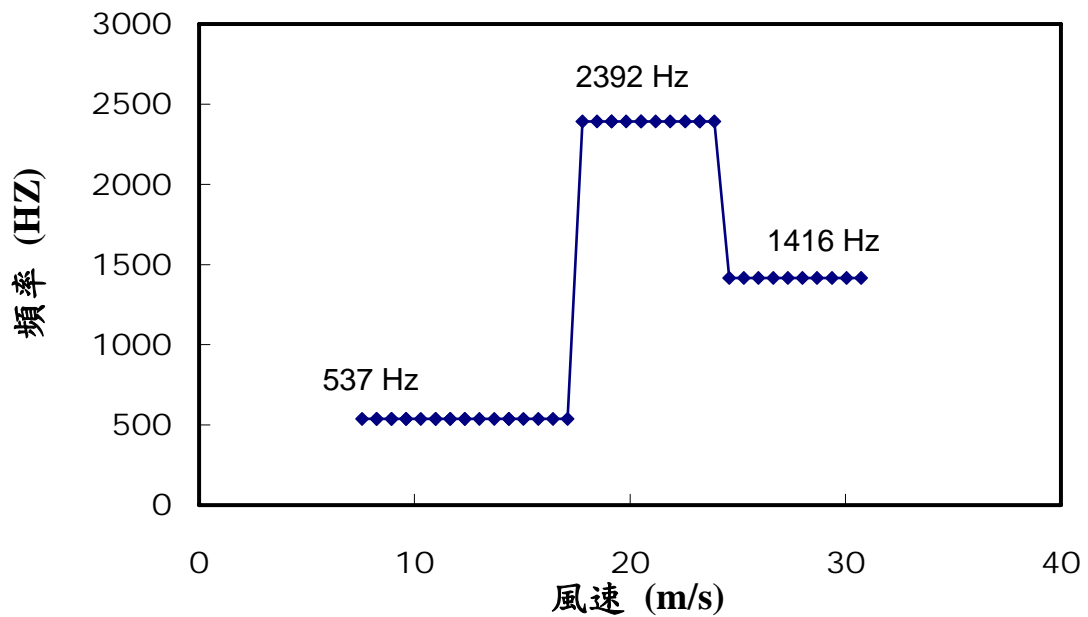


Fig. 3-4

Fig.3-3 很清楚地顯示，風速確實與聲音頻率有「躍遷遞增」的關係——風速越大，越容易引起諧音躍遷。

在 Fig.3-4 中我們很驚訝地發現，雖然風速持續遞增，諧音卻非按照第一、第三、第五的順序遞增；而是先第一諧音，再第五諧音，最後回到第三諧音。

若依照文獻上所指示，諧音應由第一諧音向上作規律的躍遷，Fig.3-4 結果卻非如此，所以又另外設計了以下的實驗。

(四) 在固定風速、距離下，探討風吹角度與頻率的關係。

文獻中指示，諧音的頻率與風吹的角度有些關係，但並未說明究竟是何種關係，這個實驗就是探討這個問題。

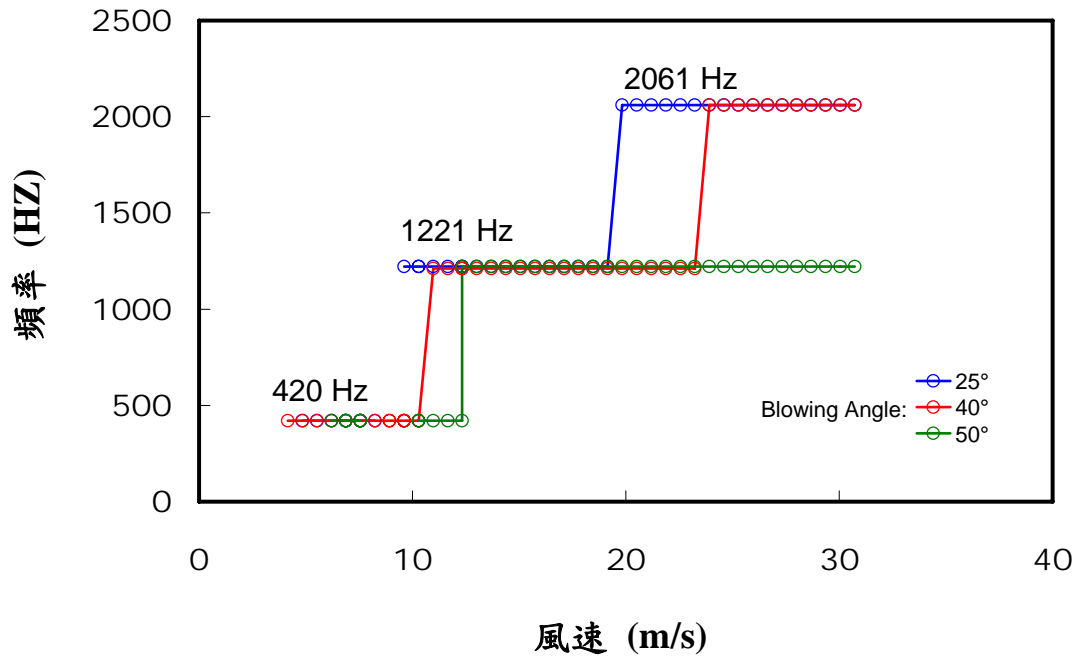


Fig. 3-5

由 Fig.3-5 可以很清楚地看到，同樣是諧音躍遷，吹入角 25 度（藍色標示）就比其他角度還來得早。因此，當角度越小，較易產生邊稜音，使諧音較易躍遷。

此實驗中所謂的吹入角，是指吹入方向與管口面的夾角。如下圖示：

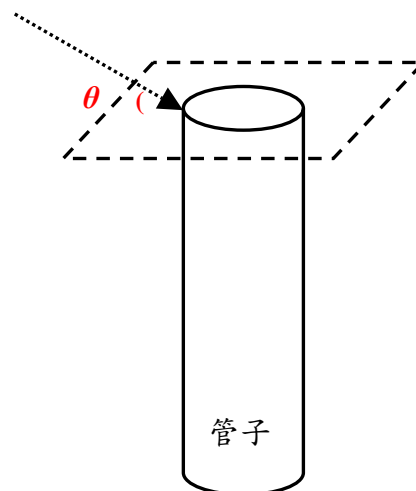


Fig. 3-6

(五) 在固定風速、角度下，探討風吹距離與頻率的關係。

繼續探討 Fig.3-4，除了角度的變因之外，吹口到管口間的距離也是一個關鍵。Fig.3-7 的距離設定為 0.1 公分，而 Fig.3-8 的距離為 0.2 公分。

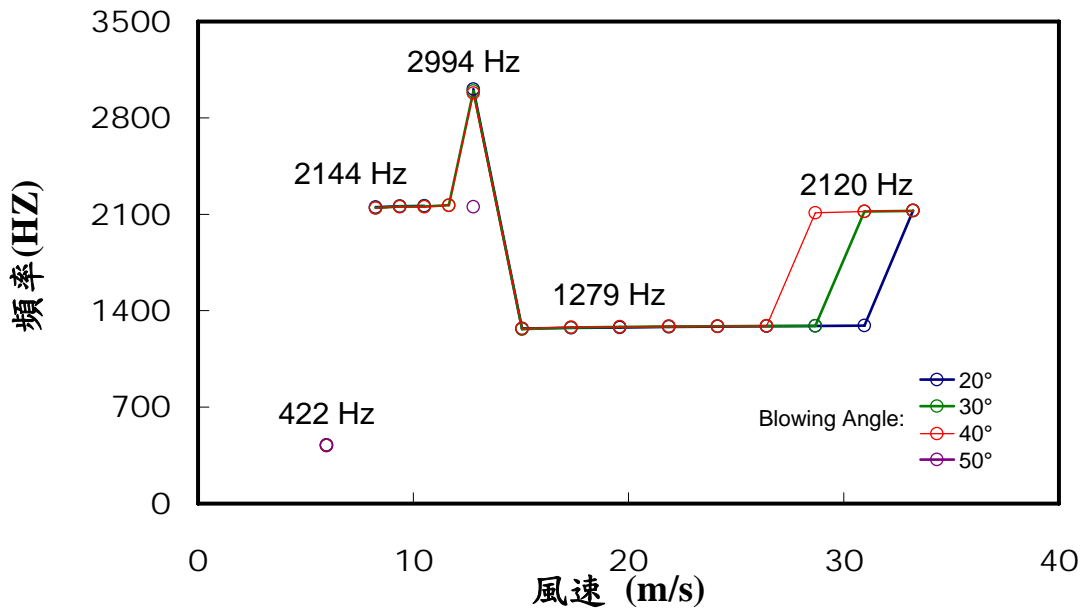


Fig. 3-7

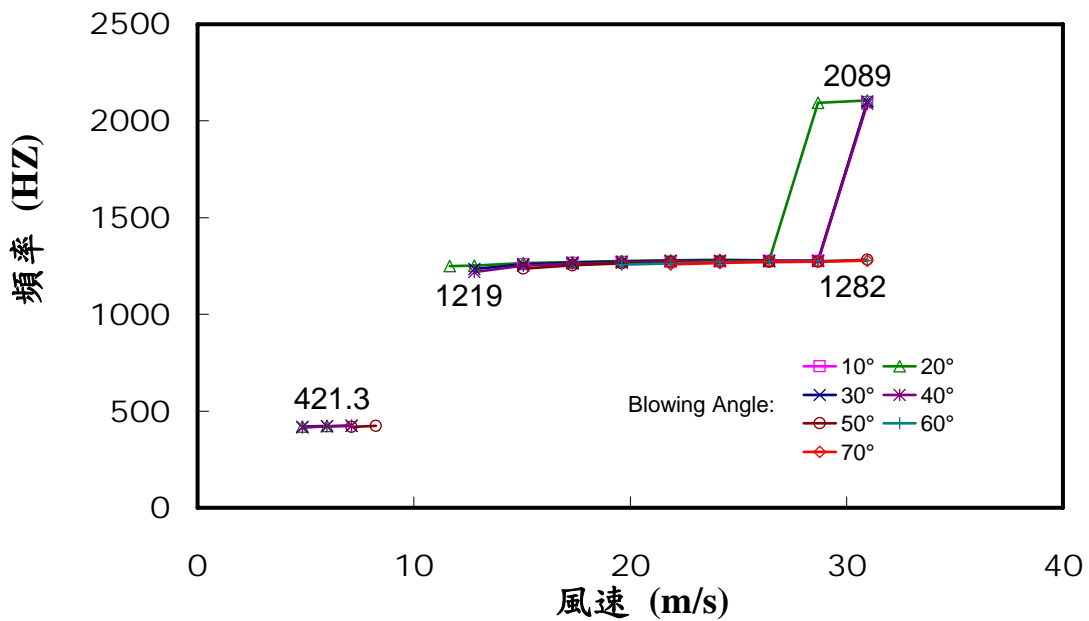


Fig. 3-8

吹口至管口距離為 0.1 公分時 (Fig.3-7)，發現在風速比較小的時候，聲音頻率相當不穩定，有高有低；但風速較強大時，聲音開始從第三諧音躍遷至第五諧音。

(六) 在固定風速、角度、距離下，管長與頻率的關係。

根據公式： $f(\text{頻率})=1/\lambda(\text{波長})$

這個實驗原先只是想映證公式，卻意外發現這種結果：

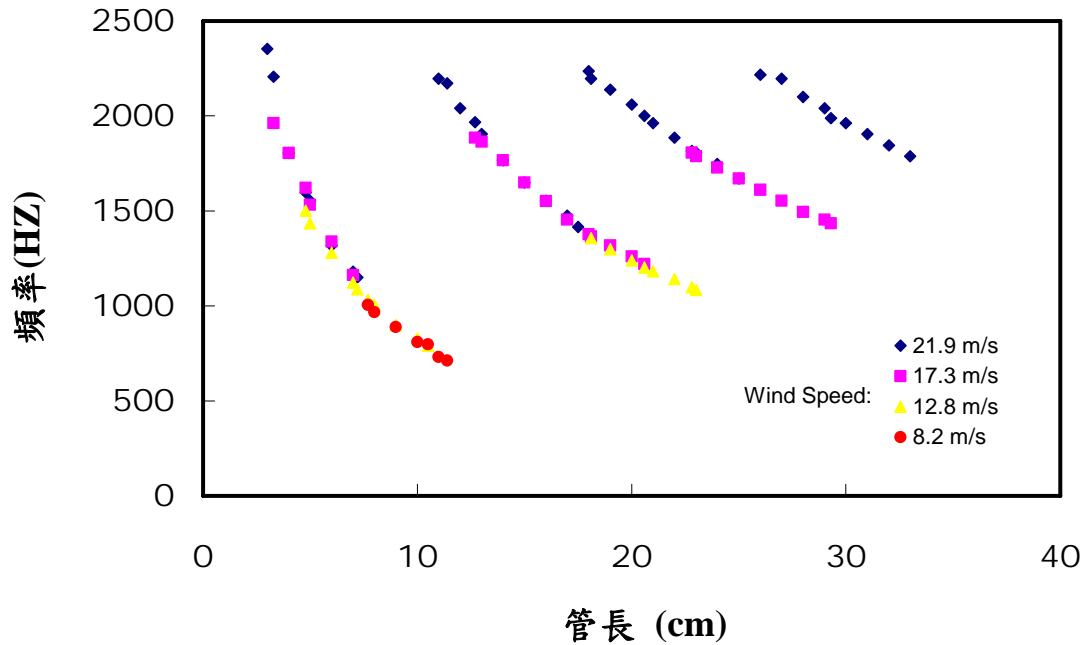


Fig. 3-9

將一個長 40 餘公分的壓克力管內置入一個活塞，當固定的風速下，將活塞由管頂緩緩下拉，在每固定距離的刻度做頻率的測量及記錄，發現頻率呈現多個由高到低的片斷。這個現象出乎意料，因為原本的聲音頻率，應該按照 Fig.3-9 中最左邊那條線延續下去，另外，我們也發現，在諸多聲音片段中，第二、第三、第四條線上，分別是原管長的第三、第五、第七諧音。

另一項發現是，在風速較低的時候，較易引發低頻頻率的聲音。表示在特定的風速下，管口前的氣流擾動會有一定的範圍，所以引發出的聲音也有一定的範圍。

(七) 在竹管中，吹入角度與頻率的關係。

前述的實驗皆由壓克力管模擬竹管樂器，所以我們以真實的竹管做為共振進行實驗。

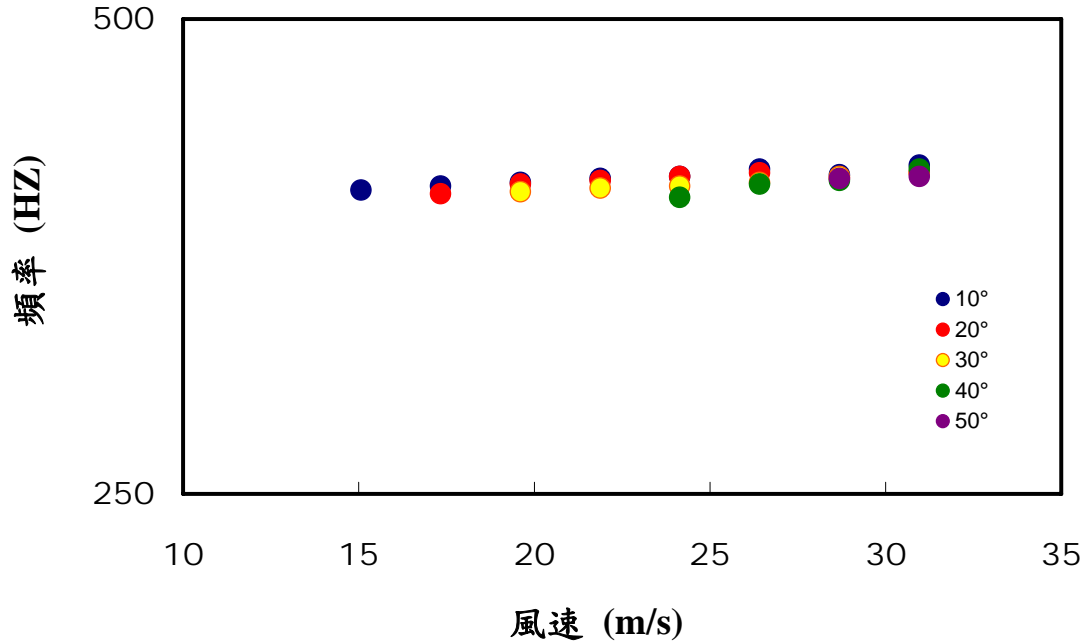


Fig. 3-10

這個實驗的距離設在 0.5 公分，管長 20 公分，聲音頻率較 Fig.3-7 及 Fig.3-8 來得穩定。拿 20 度來說，在聲音出現到最後，頻率會漸漸達到飽和，也就是頻率會越趨近於一直線。

但是，Fig.3-8 中，聲音的頻率只維持在第一諧音，並未躍遷至其他諧音，我們也推測，可能是竹管內部的不整，導致第二狀態的邊稜音無法被竹管共振。

(八) 觀察邊稜音的成因及映證實驗

以實驗是以水為介質，將一個黑色懸浮液體打入放在水中的管子，黑色粒子會隨著水流移動，進而顯示流場。

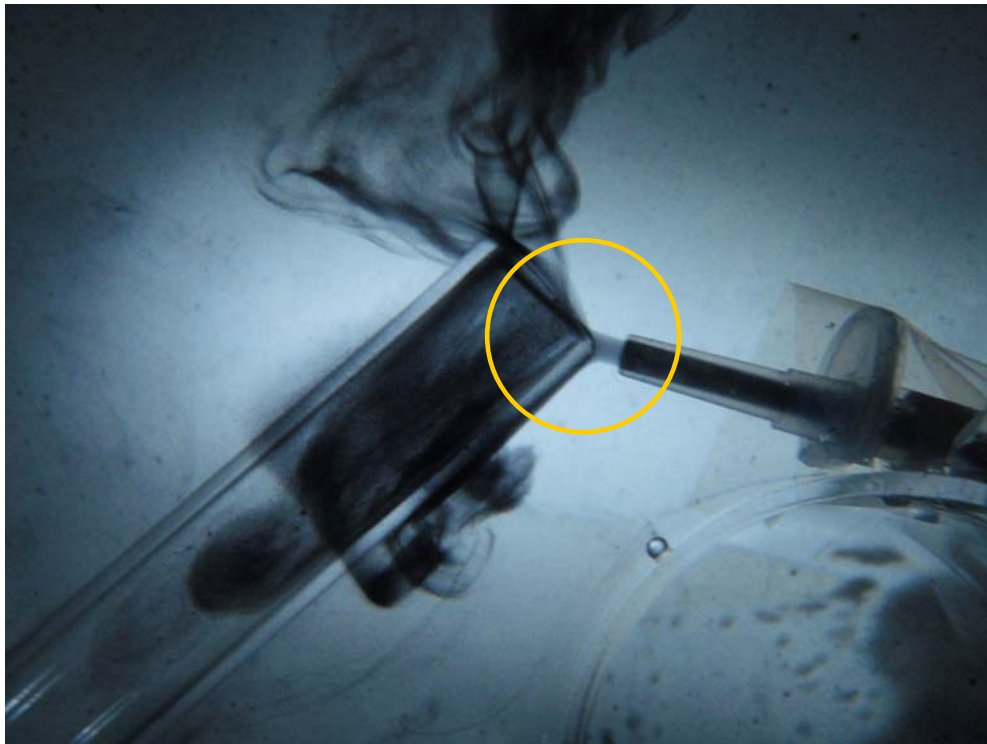


Fig. 3-11

這個實驗是為了映證邊稜音原理是否正確，所以用相機拍攝的方式呈現。Fig.3-11 中很明顯地看到，當水流通過劈尖後，有上下兩道渦流形成；但在液體出口與管口的距離間，並沒有看到懸浮液體的擾動。我們推測，其實，管口前的擾動依舊存在，但振幅過小，以致於不易用肉眼辨識。

四、結論及未來展望

(一) 結論

1. 由 Fig.3-3 推論，風所造成的邊稜音頻率會隨風速上升，因而使閉管諧音頻率被迫向上躍遷。
2. 對於 Fig.3-4，依照文獻 5，我們推測，當風速能量足以使諧音躍遷時（兩個狀態重疊），管內空氣會選擇一種狀態，使能量維持穩定，所以我們先聽到第五諧音，再聽到第三諧音。這是因為能量穩定的關係。
3. 我們可以從 Fig.3-5 推論，角度越小，風吹至管口內的距離越短，依照文獻 5，距離越短越容易產生高頻邊稜音，亦容易使諧音被引發。
4. Fig.3-7 及 Fig.3-8 是吹口至管口距離的實驗。很明顯地，當距離較小時，風所造成的邊稜音，頻率會很不穩定。因此，距離越大，越能使邊稜音頻率穩定，但這個距離不可以太大，否則會因為氣流擴散，風太小，引發的邊稜音頻率過低，無法使管子共振。
5. 在 Fig.3-9 中，為何聲音會呈片斷狀？由文獻 5 推測，在特定風速下，邊稜音頻率具有一定的範圍，而且在此頻帶中，為多個離散音頻。超過這個範圍，便因頻帶中無此聲音源，使管子內的空氣無法被共振，而無法發聲。
6. Fig.3-10 的竹管實驗中，當風速很大時，卻無法使之躍遷至下一諧音。為何有此現象？我們推測，是因竹管內部厚度不夠，必須以較強的聲源才能與管內的空氣共振，因風口至管口間所產生的高頻邊稜音強度不夠大，所以無法使管內空氣共振。

(二) 未來展望

1. 在 Fig.3-9 中的渦流有一定的範圍，究竟這個範圍有多大呢？而這個範圍與哪項變因有關？這是一個有趣的問題，未來可以繼續研究。
2. 整個實驗中，只用了竹管，做材質的比較，雖然竹管的實驗結果可能比較貼近實際的笛或簫，未來或可考慮使用銅管或其他金屬管做進一步研究，將中國竹樂器與西方管樂作比較。
3. 觀察渦流的部份，目前以懸浮粒子溶液當作風，使渦流視覺化。未來可以研究在空氣介質中試驗，以符合實際狀態。

五、參考文獻

1. 張璿文、林婉茹，2006，熱線式渦流流量計，台灣國際科展，工程學組。
2. 張毓屏、陳思妍，2007，吸管笛的諧音之研究與發展，台灣國際科展，物理組。
3. 國立民俗技藝文化中心
4. John W. Coltman, 1976, Jet drive mechanisms in edge tones and organ pipes, Scathelocke Road. Pittsburgh. Pennsylvania 15235, 3319
5. PhysicsLAB Copyright 1997-2007, Catharine H. Colwell, All rights reserved.

附 錄

	15cm	17.5cm	20cm	15cm	17.5cm	20cm
1st	554.5	476.7	418.1	634.6	537	439.4
3nd	1663.4	1430.2	1254.3	1709	1415.8	1318
5th	2772.3	2383.6	2090.5	2783	2392.8	2099.4
7th	3881.3	3337.1	2926.7	3955	3368.8	2978.4
9th		4290.5	3762.9		4248.2	3837.8

Appendix 1 : Fig.3-1 的實驗數據

Voltage (V)	電子秤 (m/s)	風速計 (Kt)	風速計 2 (m/s)
10	2.28	4.73	2.259104
20	5.56	13.99	6.681791
30	7.88	19.7	9.408955
40	10.68	24.63	11.76358
50	12.88	29.16	13.92716
60	15.12	34.08	16.27701
70	16.44	37.8	18.05373
80	19.36	41.76	19.94507
90	20.88	44.3	21.15821
100	23.92	51.02	24.36776
110	26.8	53.78	25.68597

Appendix 2 : Fig.3-2 的實驗數據

角度 40 度，距離 0.1 公分		
風速(m/s)	17.5cm	20cm
4.1608		420
4.8421		420
5.5234		420
6.2047		420
6.886		420
7.5673	537	420
8.2486	537	420
8.9299	537	420
9.6112	537	420
10.2925	537	420
10.9738	537	1211
11.6551	537	1211
12.3364	537	1211
13.0177	537	1211
13.699	537	1211
14.3803	537	1211
15.0616	537	1211
15.7429	537	1211
16.4242	537	1211

17.1055	537	1211
17.7868	2392	1211
18.4681	2392	1211
19.1494	2392	1211
19.8307	2392	1211
20.512	2392	1211
221.1933	2392	1211
21.8746	2392	1211
22.5559	2392	1211
23.2372	2392	1211
23.9185	2392	2061
24.5998	1416	2061
25.2811	1416	2061
25.9624	1416	2061
26.6437	1416	2061
27.325	1416	2061
28.0063	1416	2061
28.6876	1416	2061
29.3689	1416	2061
30.0502	1416	2061
30.7315	1416	2061

Appendix 3 : Fig.3-3, Fig.3-4 實驗數據

風速(m/s)	25°	40°	50°
4.1608		420	
4.8421	420	420	
5.5234	420	420	
6.2047	420	420	420
6.886	420	420	420
7.5673	420	420	420
8.2486	420	420	
8.9299		420	
9.6112	1221	420	
10.2925	1221	420	420
10.9738	1221	1211	420
11.6551	1221	1211	420
12.3364	1221	1211	420
13.0177	1221	1211	1221
13.699	1221	1211	1221
14.3803	1221	1211	1221
15.0616	1221	1211	1221
15.7429	1221	1211	1221

16.4242	1221	1211	1221
17.1055	1221	1211	1221
17.7868	1221	1211	1221
18.4681	1221	1211	1221
19.1494	1221	1211	1221
19.8307	2061	1211	1221
20.512	2061	1211	1221
21.1933	2061	1211	1221
21.8746	2061	1211	1221
22.5559	2061	1211	1221
23.2372	2061	1211	1221
23.9185	2061	2061	1221
24.5998	2061	2061	1221
25.2811	2061	2061	1221
25.9624	2061	2061	1221
26.6437	2061	2061	1221
27.325	2061	2061	1221
28.0063	2061	2061	1221
28.6876	2061	2061	1221
29.3689	2061	2061	1221
30.0502	2061	2061	1221
30.7315	2061	2061	1221

Appendix 4 : Fig.3-5 實驗數據

距離 0.1cm,管長 20cm,改變角度,v-f					
V	v	20°	30°	40°	50°
20	5.9776	425.67	422.33	422.33	422.67
25	7.1131				
30	8.2486	2152	2148.33	2144.67	
35	9.3841	2158.33	2156	2154	
40	10.5196	2162	2157.33	2153.67	
45	11.6551		2167	2163.33	
50	12.7906	3009.33	2994.67	2980.67	2154.67
60	15.0616	1271.67	1267.33	1271.67	
70	17.3326	1276	1277	1279.67	
80	19.6036	1279.33	1282.33	1283.67	
90	21.8746	1282.67	1284.67	1287	
100	24.1456	1285	1288.67	1287.67	
110	26.4166	1287.67	1290.33	1289.67	
120	28.6876	1290.33	1291.33	2111	
130	30.9586	1291.67	2121.33	2120.67	
140	33.2296	2127.33	2126	2127	

Appendix 5 : Fig.3-7 實驗數據

距離 0.2cm,管長 20cm,改變角度,v-f							
v	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
4.8421		419.3	418.3	415			
5.9776		424.3	421	421.3			
7.1131			424.3	424.7	419		
8.2486					423		
9.3841							
10.52							
11.655		1250					
12.791		1252	1234	1219			
15.062	1259	1265	1259	1251	1237		
17.333	1266	1271	1268	1262	1253		
19.604	1270	1276	1273	1268	1264	1257	
21.875	1272	1279	1277	1275	1270	1264	1258
24.146	1274	1282	1278	1276	1273	1270	1266
26.417	1275	1279	1277	1274	1270	1273	1273
28.688	1276	2094	1278	1275	1272	1275	1272
30.959	2097	2106	2101	2089	1282	1278	1277

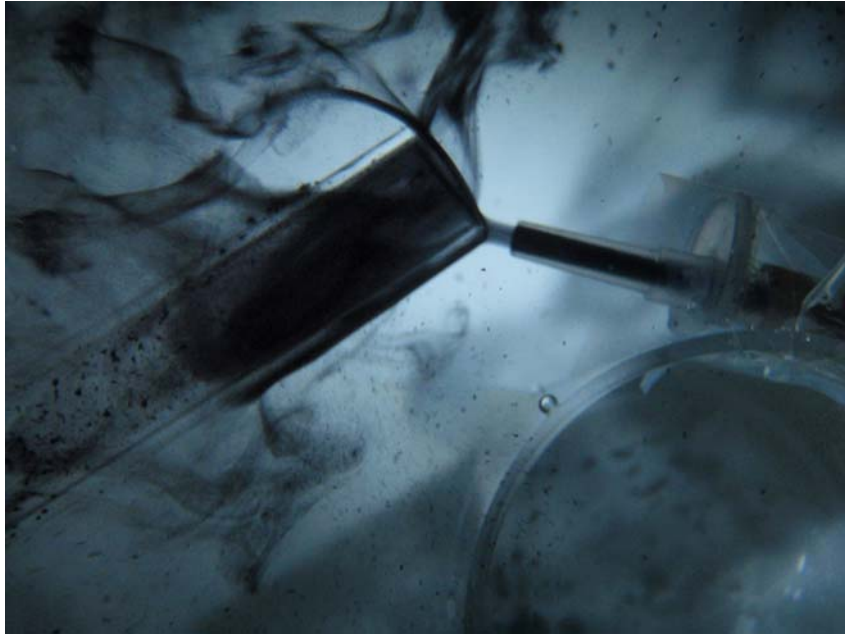
Appendix 6 : Fig.3-8 實驗數據

管長	21.9 m/s	17.3 m/s	12.8 m/s	8.2 m/s
3	2353			
4	1806	1806		
5	1553	1532	1435	
6	1318	1339	1279	
7	1181	1162	1123	
8			1006	967
9			899	888
10			830	810
11	2197			732
12	2041			
13	1904	1865		
14	1767	1767		
15	1650	1650		
16	1553	1552		
17	1475	1455		
18	2236	1377		
19	2138	1318	1299	
20	2060	1260	1240	
21	1963		1182	
22	1885		1142	
23	1807	1788	1084	
24	1748	1728		
25	1670	1670		
26	2217	1611		
27	2197	1553		
28	2100	1494		
29	2041	1455		
30	1963			
31	1904			
32	1845			
33	1787			

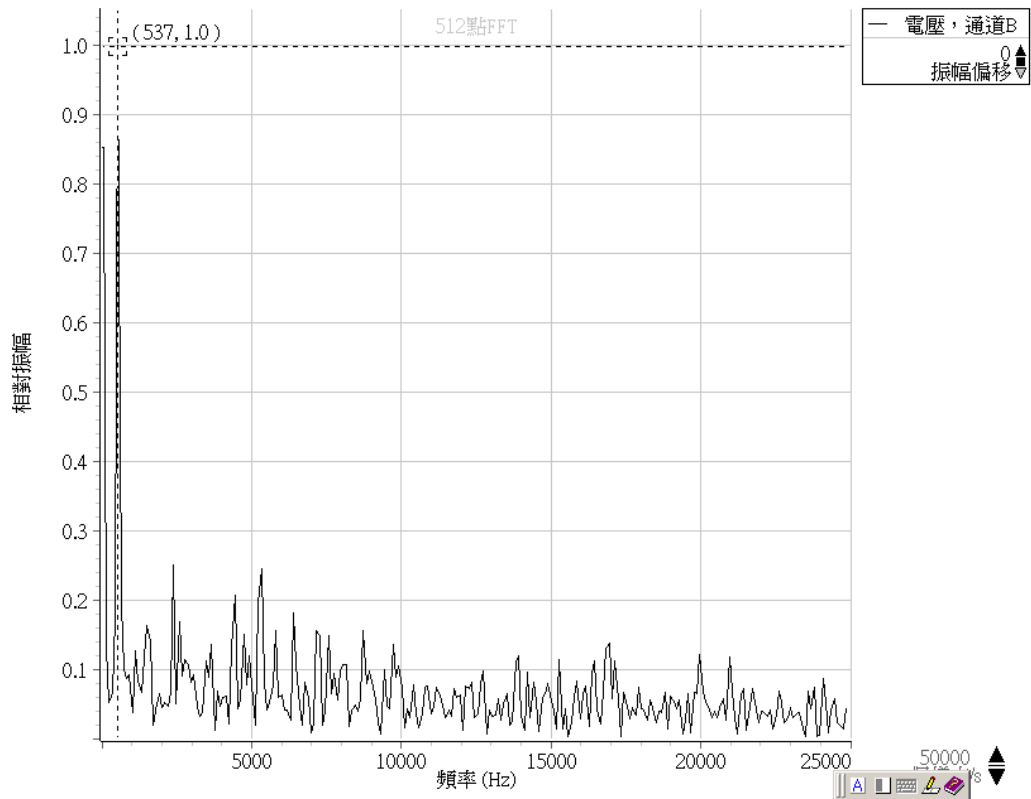
Appendix 7 : Fig.3-9 實驗數據

v	10°	20°	30°	40°	50°
15.0616	410				
17.3326	412	408			
19.6036	414	413	409		
21.8746	416	415	411		
24.1456	417	417	412	406	
26.4166	419	419	414	413	
28.6976	418	417	417	415	416
30.9586	420	419	419	417	417

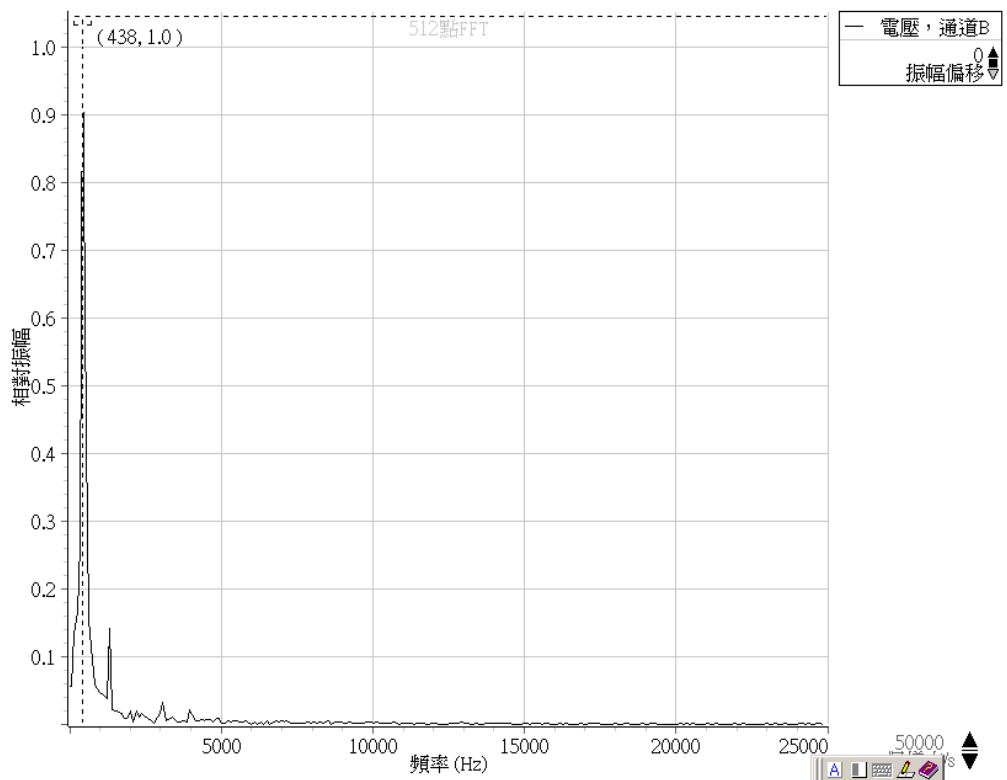
Appendix 8 : Fig.3-10 實驗數據



Appendix 9 : Fig.3-11 實驗補充資料



Appendix 10 : 17.5cm 第一諧音頻譜圖



Appendix 11 : 20cm 第一諧音頻譜圖

評語

優：實驗控制精確，展示渦流之概念。

缺：1) 本主題遍及各種科展，結論亦大同小異。

2) 研究內容只是證實其他參考書目中的結果。