

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：口琴簧片振動與氣流的影響

得 獎 獎 項：第三名

學 校 / 作 者：臺北市立麗山高級中學

陳泓文

作者簡介



我是陳泓文，今年就讀麗山高中二年級。我喜歡音樂、打球、看書。個性內向，喜歡嘗試新事物的我，希望能培養出各方面的興趣。我的生活就是專題、唸書、社團三者互補所組成的，覺得唸書唸的很悶時，就去打打球或是去做些實驗，發現一些原本自己不知道的事，總是會讓人很興奮。感到疲乏時，社團是一個讓我充電的好地方，而且不論是交流或表演，也可以學到不少經驗。雖然很忙碌，但相對也過的很充實，這就是我的高中生活。

目 錄

作者簡介	1
摘 要	3
Abstract	4
壹、前言	5
一、研究動機	5
二、研究目的	5
三、實驗原理	5
貳、研究方法及過程	7
一、實驗設備	7
二、流程圖	8
參、實驗流程	10
肆、研究結果	15
一、不同長度之簧片的頻率測量	15
二、管口遮住部分面積	15
三、加入各種氣流因子	16
四、外加楔形障礙物時吹音和吸音之比較	17
五、氣流對簧片振動模態之影響	18
伍、討論	19
陸、結論	20
柒、未來展望	21
捌、參考資料	21
附 錄	22

摘要

本研究主題在測量口琴簧片受到各種氣流因子影響後，所產生音色、音頻等變化之探討。在過去我們認為，一片簧片不論如何吹奏，其發出的頻率皆相同。但是事實上，演奏家控制氣流的強弱、方向、渦流等，便可吹奏出多樣的音頻。

探討形狀因子對簧片頻率的影響，如：長度、寬度、厚度對頻率所造成的影響。自製口琴，利用變壓器控制送風機風速。

探討氣流因子對簧片主頻之影響，利用各種不同的自製吹嘴，改變風速、角度、渦流…等，找出可能使簧片改變頻率的氣流因素。

實驗結果發現改變風速會影響簧片主頻的變化，風速越大，頻率越大，為一條平滑線。但並非一直都會上升，當簧片頻率上升至某一極限，便無法再利用風速使頻率上升。例如實驗四吸音標準狀態下，風速大於 8 Kt 後，頻率一直停在 429Hz。

在外加障礙物時(模擬吹奏舌頭時隆起)和標準狀態(正常零度入射)下頻率比較吹音和吸音有明顯的差異。吹音時，同風速下，其頻率比標準狀態高，發生音升；吸音時，同風速下，其頻率比標準狀態低，發生音降，具應用性。

我們發現在頻率改變時，簧片的振動型態會有所不同，所以利用高畫素像機拍攝和電腦相位差算出簧片之曲折點至尾端的距離，發現頻率和簧片之曲折點至尾端的距離成正向關係。如實驗五中頻率從 414 至 419Hz，簧片的曲折點到振動端距離也明顯變大。

我們發現吹嘴和口琴只要稍有一點空隙(大約在 0.2cm 左右)，便會和完全吻合時有顯著的頻率差距(吻合後大約比有空隙低 20Hz 左右)，此實驗頻率變化現象和現實壓音頻率變化極為相近。實驗過程中發現，改變簧片吹嘴的吻合程度，吹入口琴的風速相近，但頻率變化卻也有壓音的音頻變化。在實驗三加入各種氣流因子發現入射角度和標準情形差異不明顯，因此推論壓音的頻率變化和風力強度、入射角度關係不大，壓音主要為渦流所造成的現象。

簧片振動模式改變，導致簧片振動頻率發生變化，且簧片的自然頻率不變。當壓音產生時，氣流在振動面造成妨礙簧片振動的抗力，但琴格內部同時也給簧片的風壓，使簧片產生一種非自然振動的頻率。

Abstract

The theme of the research is to explore the changes on its timbre and frequency after the harmonica reed is influenced by each kind of air current factor. In the past, most people think no matter how to play the reed, the frequency it produced was supposed to be the same. But in fact the frequency will be changeable under different direction, turbulent flow and air intension by the perform.

First to explore the basic feature of harmonica reed, for example: The length, the width, thickness cause the influence on the frequency. To make the self-made harmonica, using the transformer control air feeder wind speed.

To discussion the influenced caused by air current factors, and use each kind of different self-restraint to boast, change the wind speed, angle, turbulent flow, in order to discover possible factors the reed causes to change the frequency of the air current factor.

The experimental result discovered the change of wind speed can affect the change of basic frequency, the stronger speed cause the bigger frequency, It will be a curve. But it will not be rising continuously, when the reed frequency rise to some limit, it is unable to cause the frequency rise again by using the wind speed. For example experiment four sound absorption standard conditions, after the wind speed is higher than 8 Kt, the frequency continuously stops in 429Hz.

To compare obstacle (simulation plays when tongue sticks out) and the standard condition (normal zero degree incidence), comparison blows the sound agreement sound absorption to have the obvious difference. When blows the sound, under the same wind speed, its frequency is higher than the standard condition, has the sound to rise; When sound absorption, under the same wind speed, its frequency is lower than the standard condition, has the sound to fall. The harmonica terminology for presses the sound, extremely has the application.

We discovered when frequency change, the reed vibration condition have differently, therefore use the camera photography and the computer phase different figures out the reed winding point to the end distance, discovered the frequency and the reed winding point relate to end distance is being connected. If tests five medium frequencies from 414 to 419Hz, the reed winding point is away from to the vibration end also obviously changes.

The different reed vibration condition cause the frequency to change. Natural frequency is constant. When cause "bending" (the frequency is lower than the standard condition), the airflow make a force keep from reed vibration. But the chamber air pressure still drive reed. therefore cause the reed to give off not natural frequency sound

壹、前言

一、研究動機

在吹奏口琴時，如果改變嘴型、舌頭的位置和吹奏角度，造成的氣流變化，便能在同一個簧片下產生不同的音色及頻率變化。因此想對簧片與氣流變化關係做細部研究，加入各種的影響因素，如入射角度、障礙物、風速等，並探討其中的關係。

我們查了文獻後發現利用改變口腔形狀、舌頭的位置、用氣力度和角度，令簧片作出聲音壓低或聲音壓高的現象，稱為壓音(note bending)。比如說我們對吹氣簧片 E 吹氣，如果我們改變一些吹奏技巧，就有可能從 E 的音高降一個半音到 Eb，甚至是一個全音或更低的音高，取決於簧片基本音高、演奏者的技巧、口琴品質等因素。

二、研究目的

1. 研究壓音的運作原理。
2. 探討形狀因子對簧片頻率的影響。
3. 探討氣流因子對簧片頻率的影響。
4. 研究使簧片產生最廣的音色變化。

三、文獻探討

口琴簧片(圖 1-1)發聲的原理為「閉簧原理」(Closing Reed) (圖 1-2)，也就是說簧片是由座板上被固定的一面，往座板的另一面振動而發聲。

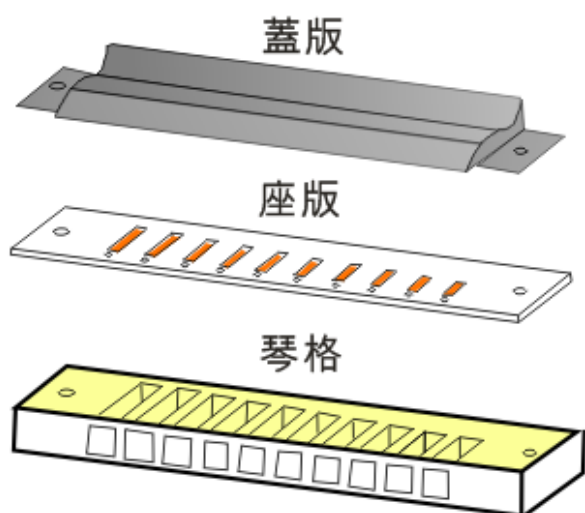


圖 1-1、口琴構造圖

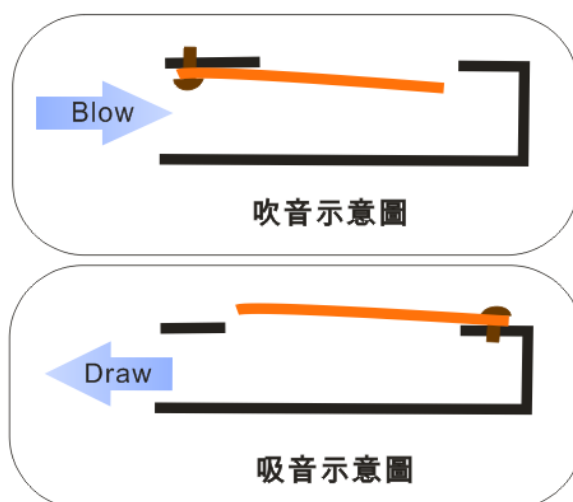


圖 1-2、簧片振動

一、物體共振之自然頻率

1. 用力敲擊一具有彈性的物體，會使物體被迫產生而運動稱為**強迫振動**(forced vibrations)，如於橋上行軍時齊步踏步的行走頻率，若與橋的**自然頻率**(natural frequency)相關聯，則會驅使橋以大幅度震動產生共振。
2. 所謂**共振**(resonance)就是一個物體受到的強迫振動的頻率與自然頻率相等引發大幅度振動所產生的現象。
3. 本實驗使用參考書中蒐集的矩形體自然頻率公式：

$$\omega_n = \alpha^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}$$
$$= \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

m = mass of beam per unit length
 E = Young's modulus
 I = Second moment of area of beam section

Second moment of area(面積二次矩)

$$I_x = \int y^2 dA$$

I_x = the moment of inertia about the axis x

dA = an elemental area

y = the perpendicular distance to the element dA from the axis x

Second moment of area - rectangular cross section

$$\text{Rectangle: } I_x = \frac{bh^3}{12}$$

- b = width (x -dimension),
- h = height (y -dimension)

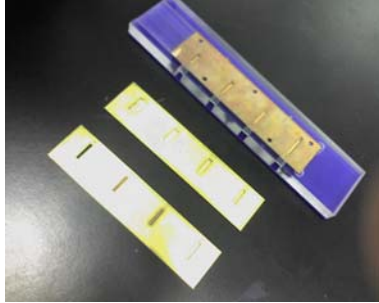
貳、研究方法與設備

一、實驗設備

1.



2.



3.



4.



自製器材

1. 壓克力口琴
2. 簧片三片(長寬厚)
3. 吹嘴數個(不同入射角)
4. 角錐數個(障礙物)

廠製器材

5. 固定夾兩支
6. 風速計
7. 數位量測儀器 聲音感測器
8. 變壓器
9. 送(抽)風機
10. 筆記型電腦
11. Datastudio 軟體

5.



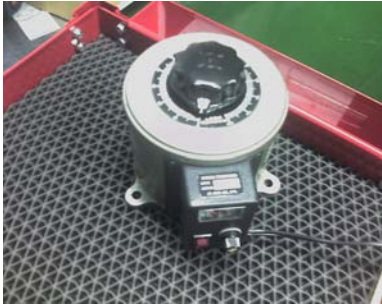
6.



7.



8.



9.

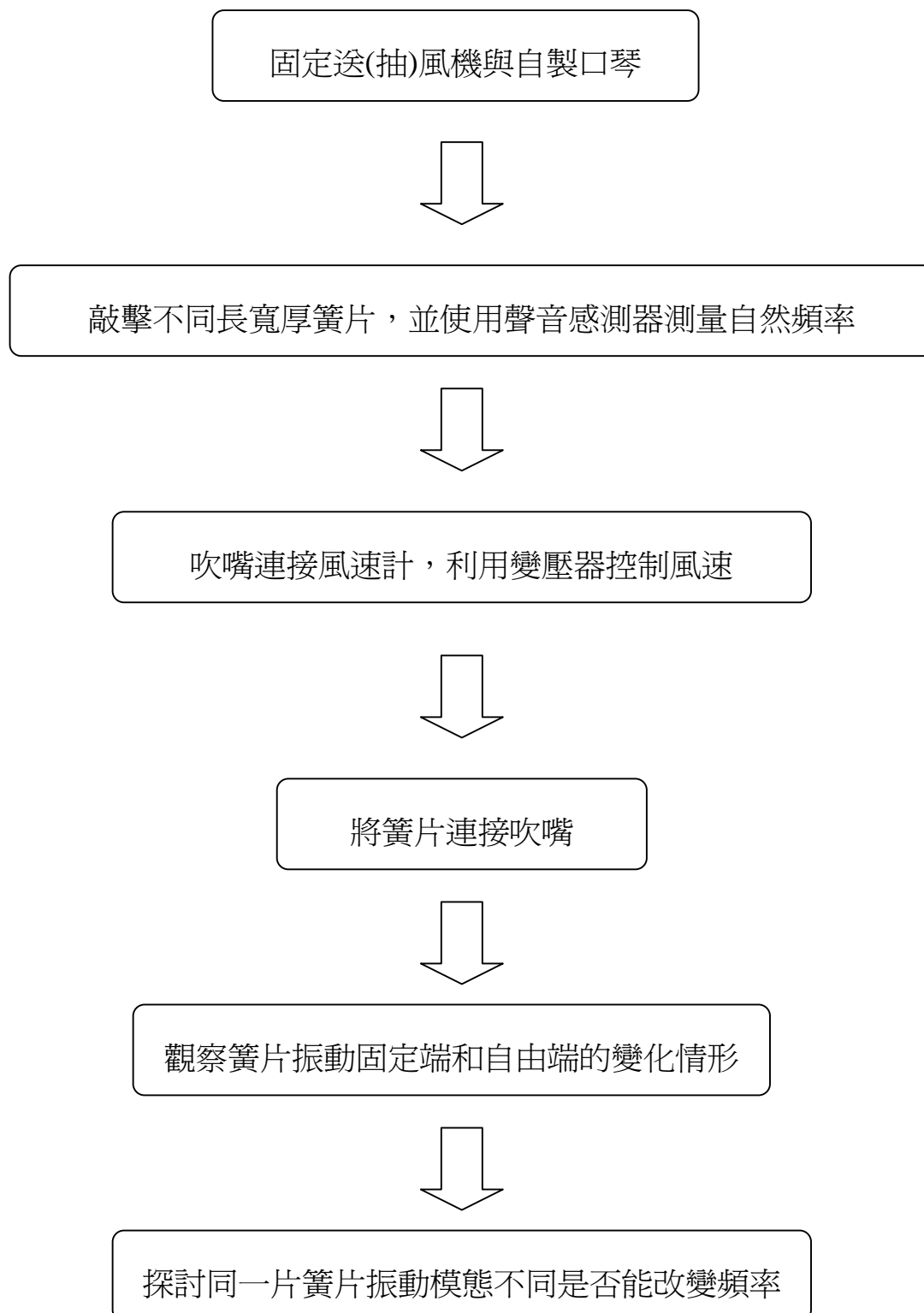


10.

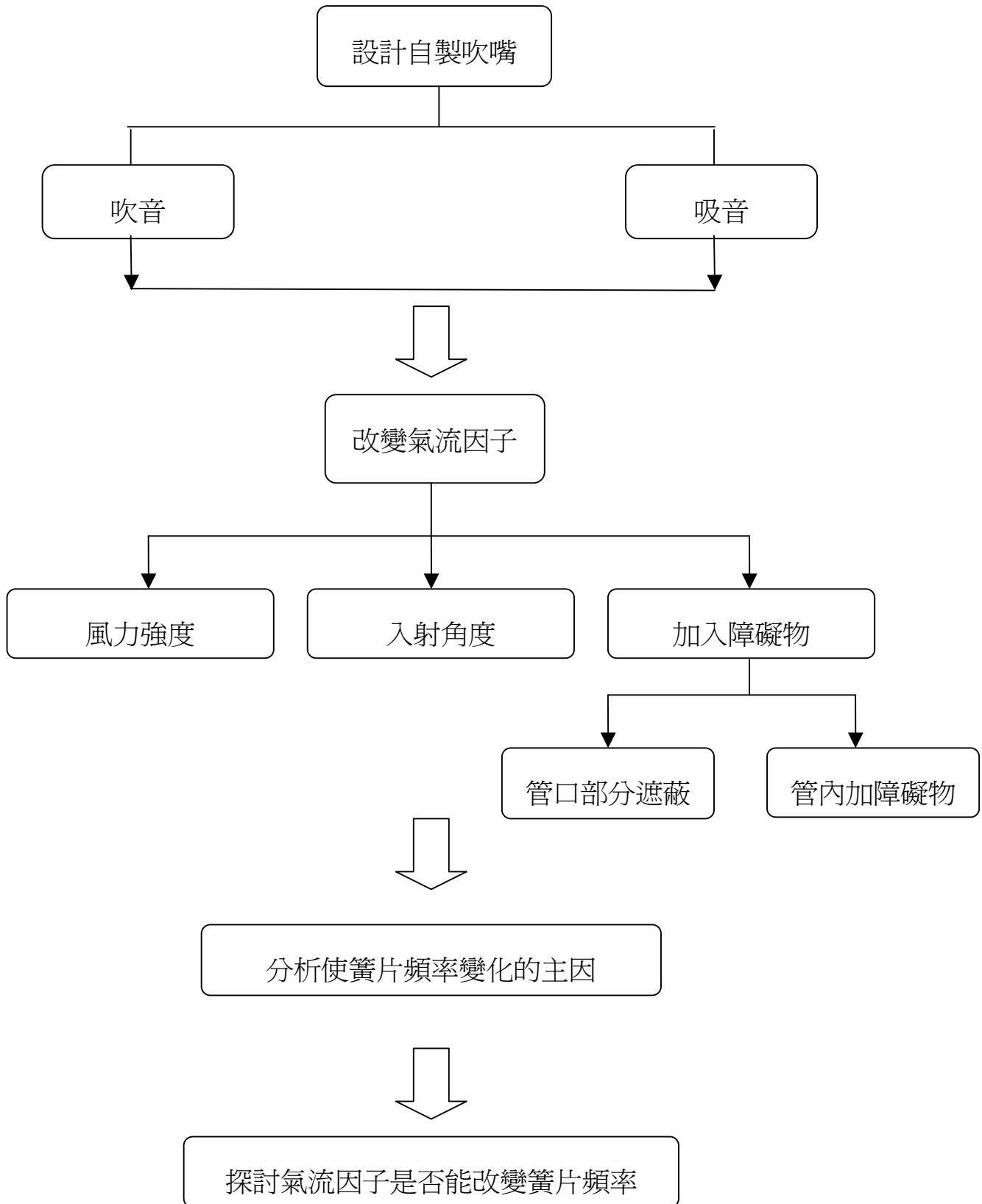


二、流程圖

實驗一：探討形狀因子對簧片頻率的影響



實驗二：探討氣流因子對簧片頻率的影響



參、實驗流程

一、探討形狀因子對簧片頻率的影響

將簧片利用固定夾使之固定。使用數位截取儀器連接聲音感測器測量，敲擊不同長度、寬度、厚度的簧片，使簧片自然振動，利用 Data Studio 軟體可測得簧片自然頻率，驗證理論。

二、測量前置實驗

1. 將送(抽)風機連接變壓器，最後再將風速計對準吹嘴(圖 3-2)，測電壓和風速的關係(圖 3-1)。
2. 測量各種角度聲音感測器對主頻的指向性，找出最佳角度和位子，並加以固定(圖 3-3)。
3. 利用壓力感測器測出風口的壓力，繪製測風壓和風速的關係(圖 3-4)。
4. 自製琴格後端連接壓力感測器，同步測量(圖 3-5)琴格內部壓力變化(圖 3-6、3-8)和聲音感測器測量簧片聲頻(圖 3-7)，並做傅立葉轉換(圖 3-9、3-10)。

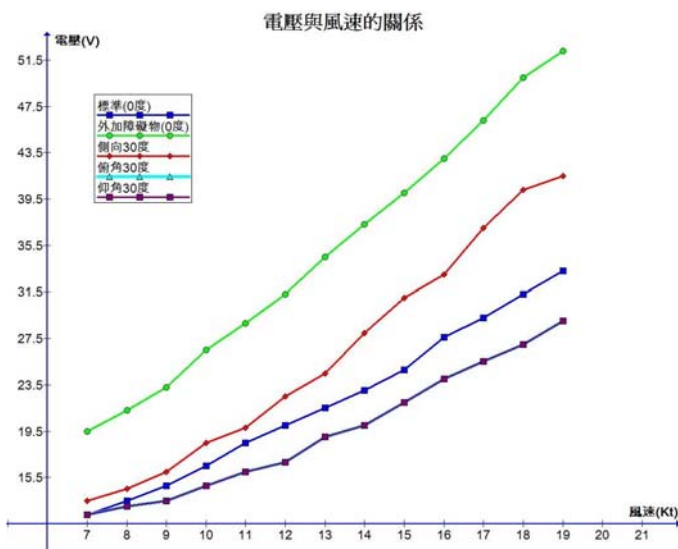


圖 3-1、風速與電壓的關係圖



圖 3-2、固定風速計

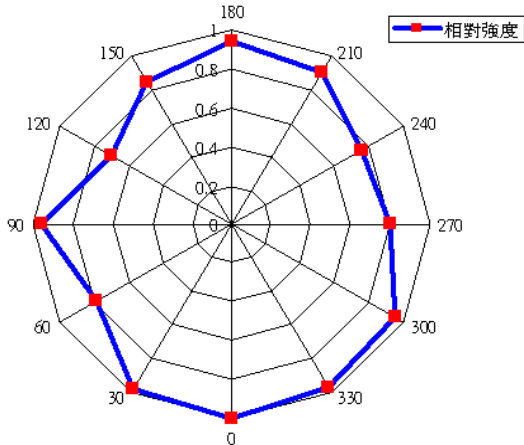


圖 3-3、主頻對強度的關係圖

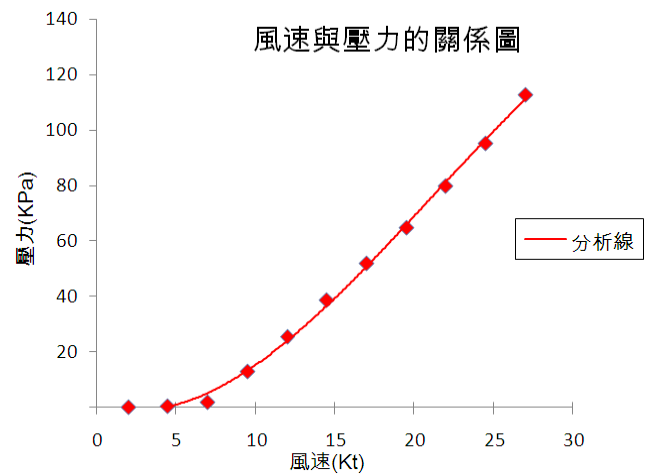


圖 3-4、出風口風速與壓力的關係圖



圖 3-5、同步測量聲音和風壓

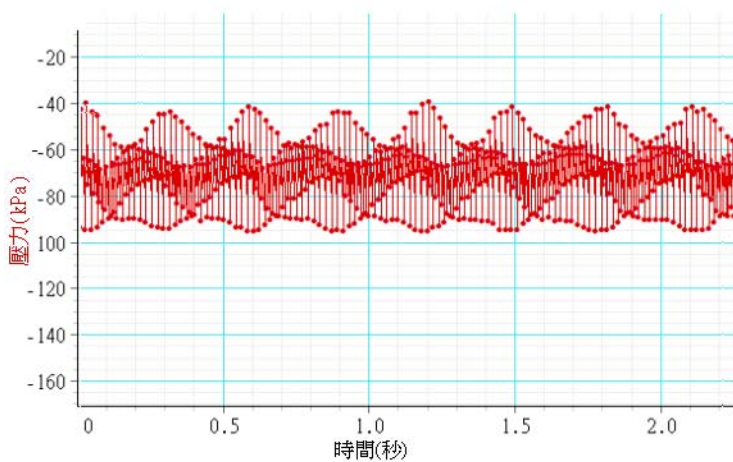


圖 3-6、琴格內部壓力變化圖(變壓器 20v)

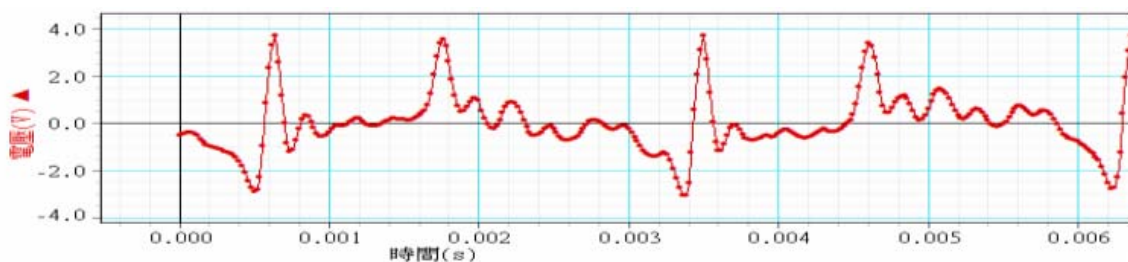


圖 3-7、簧片發聲波形圖

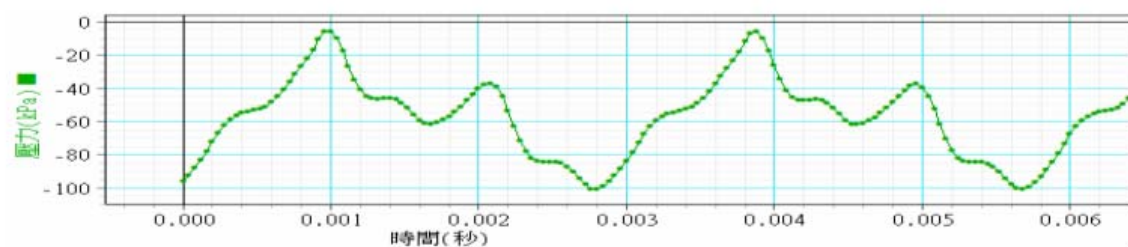


圖 3-8、琴格風壓波形圖

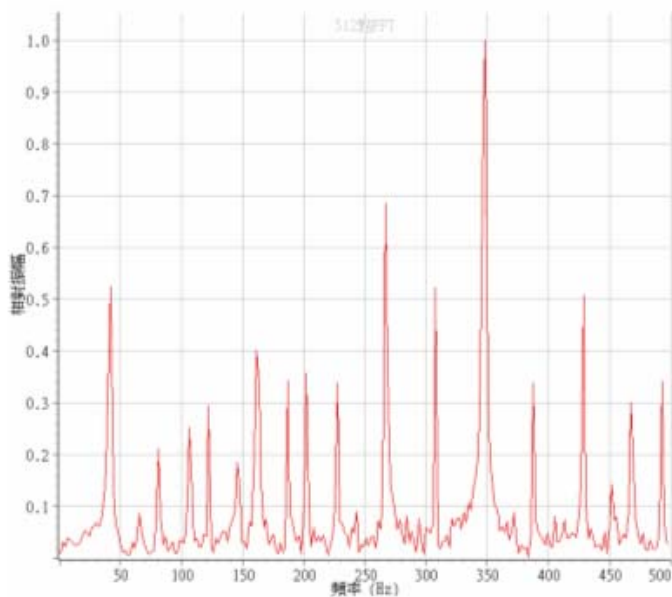


圖 3-9、聲音頻譜圖

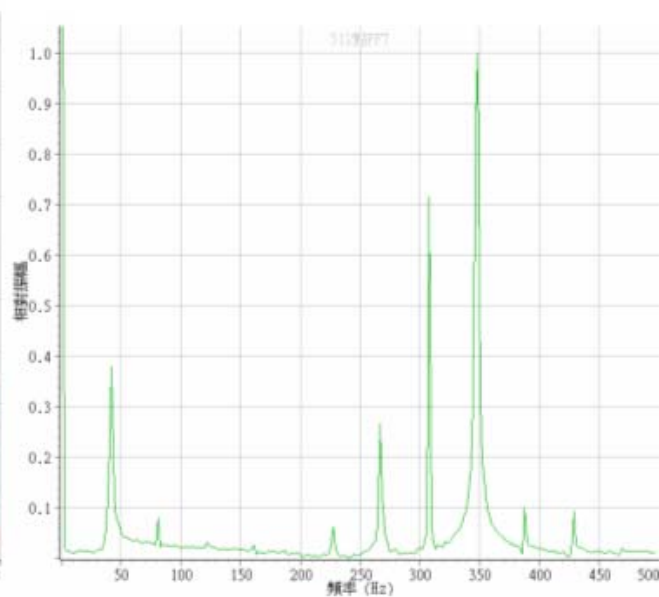


圖 3-10、風壓頻譜圖

四、探討氣流因子對簧片主頻之影響

1. 利用前置實驗電壓與風速圖，探討風速與簧片振動頻率之關係。
2. 使用橡膠軟管作吹嘴，緊貼住口琴，拿一薄的硬性材料，遮住吹嘴部分面積，探討遮住前後頻率的變化。
3. 製作壓克力吹嘴(圖 3-11)，使吹嘴能完全吻合於口琴吹口，避免漏風之影響，並用各種入射角度，探討入射角度對頻率的影響。
4. 在自製吹嘴中加入楔形障礙物(圖 3-12)，並用風速計控制最終風速，設法產生渦流，探討渦流對頻率變化的影響。

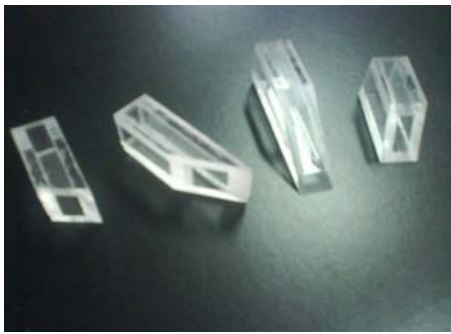


圖 3-11、壓克力吹嘴

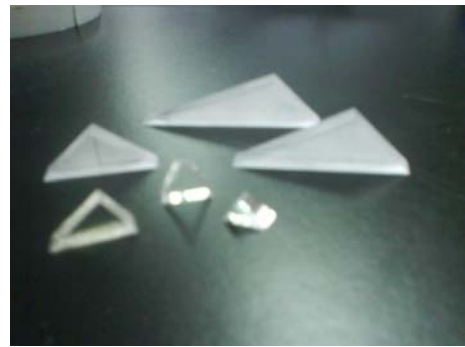


圖 3-12、楔形障礙物
(楔形障礙物 長 1.5cm 寬 0.5cm 高 0.7cm)

四、外加障礙物時吹音和吸音之比較

1. 將量測儀器精密度調高，做細微風速下頻率的變化。
2. 分別對同一個簧片利用吸音和吹音做比較。
3. 由實驗三發現加障礙物時和標準情形差異頗大，因此對此變因做深入研究。
4. 比較外加障礙物吸音和吹音頻率變化之差異。
5. 從吹音和吸音實驗可知，吸音簧片要把吹音簧片(圖 3-13)倒置在座版上(圖 3-14)，才能使之發聲。

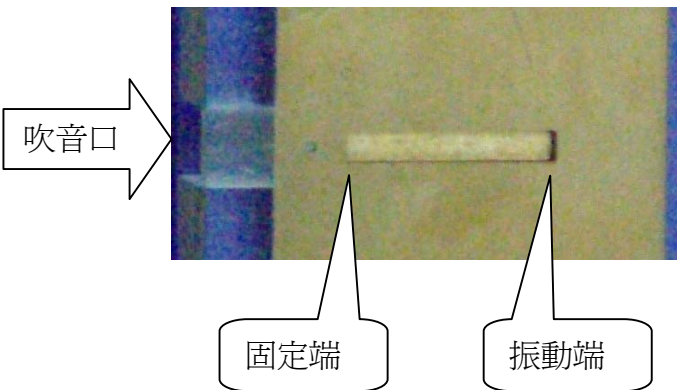


圖 3-13、變更前吹音簧片圖

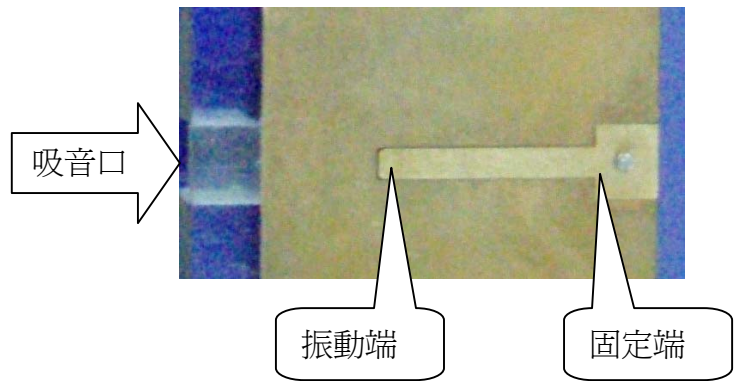


圖 3-14、倒置後吸音簧片圖

五、探討頻率變化對簧片振動曲折點之影響

1. 發現當在簧片音頻改變時，簧片的曲折點(圖 3-15)會隨之移動，並做此實驗。
2. 將口琴簧片連接至自製壓克力透明琴格上，並固定放大鏡，方便觀察。
3. 利用變壓器控制風速，聲音感測器收音，探討在頻率變化時，曲折點的變化情形(圖 3-16)。
4. 使用針來測量其曲折點，將針擺在簧片之上，當針的位置對簧片振動影響最小時，即為簧片之曲折點。(圖 3-17)
5. 用高畫素相機來拍攝其振動時曲折點之不同。再利用陰影之直線是否平行簧片來測量曲折點。並利用像素比例來測量其曲折點至尾端的距離。



圖 3-15、簧片曲折點示意圖

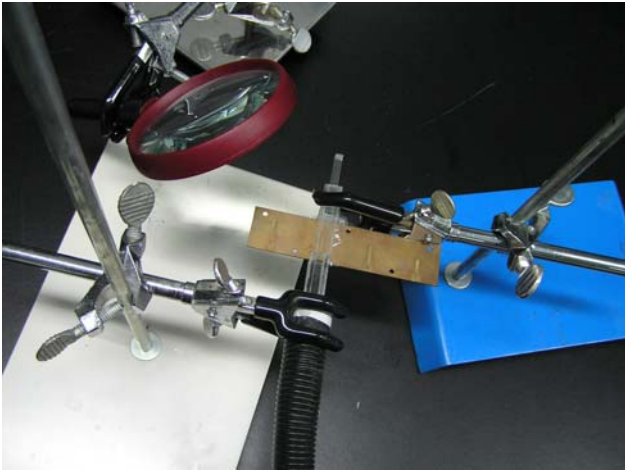


圖 3-16、簧片曲折點示意圖



圖 3-17、利用針觀察簧片曲折點

六、吹嘴垂直驅策簧片觀察

1. 固定吹嘴高度由自由端往固定端緩慢水平移動，探討頻率變化(圖 3-18)。
2. 固定吹嘴對簧片位置，施予不同強度之風速，探討頻率變化。



圖 3-18、垂直驅策簧片實驗圖

肆、研究結果與討論

研究結果

一、不同長度之簧片的頻率測量

固定簧片寬度 0.2cm，厚度 0.1mm，敲擊不同簧片所測得的自然頻率頻率值。(圖 4-1)

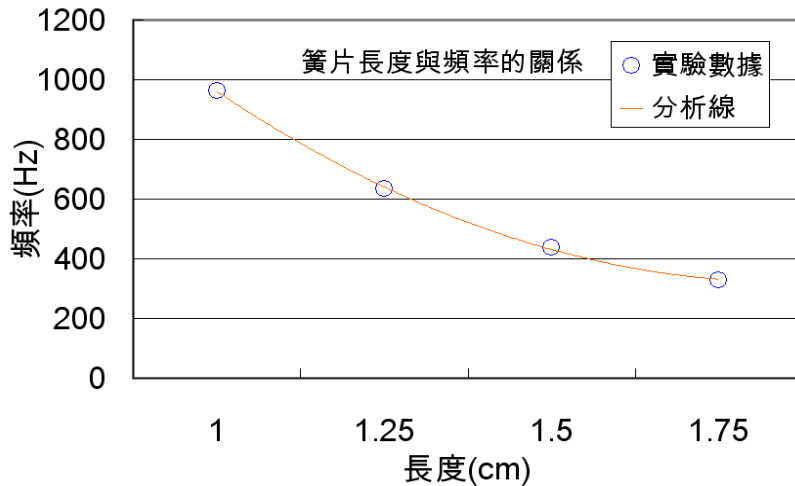


圖 4-1、長度與頻率之關係

由實驗可知簧片的長度平方會與頻率成反比。

二、管口遮住部分面積

固定電壓 25V(風速 7.5m/s)，使用直徑 0.5cm 吹嘴，以一硬性材料遮住其 1/2 吹嘴面積大小，改變入射口徑，探討其頻率的變化。(圖 4-2)

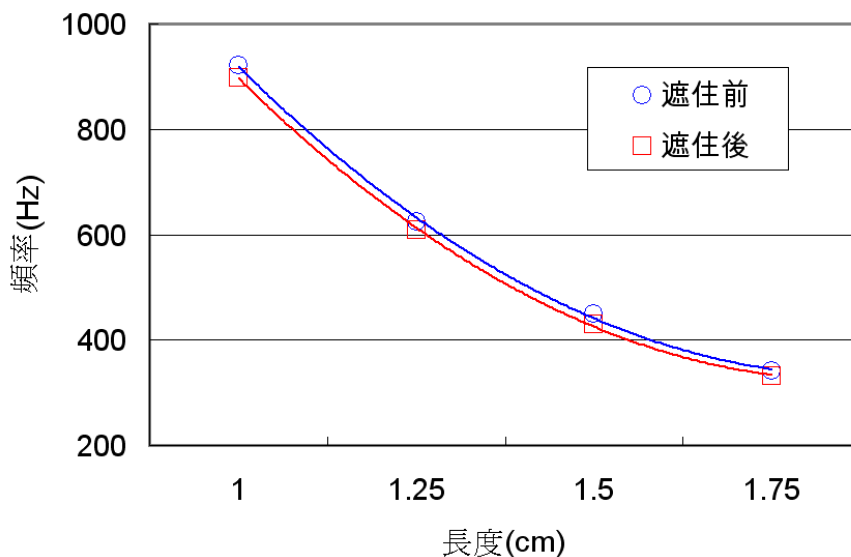


圖 4-2、吹嘴前加入二維障礙物前後關係圖

從實驗二發現遮住管口確實有頻率下降的趨勢，但由於同時改變風速和渦流等變因，因而自製組裝式吹嘴和角錐，想將變因分開來討論。我們進一步發現吹嘴和口琴吻合程度改變，只要稍有一點空隙，便會和吻合情形有顯著的頻率差距(吻合後大約比有空隙低 20Hz 左右)，此實驗頻率變化現象和現實壓音頻率變化極為相近。

三、加入各種氣流因子(吹音)

我們發現簧片會因某些變因而使頻率產生變化，因此將氣流分成單一變因討論。

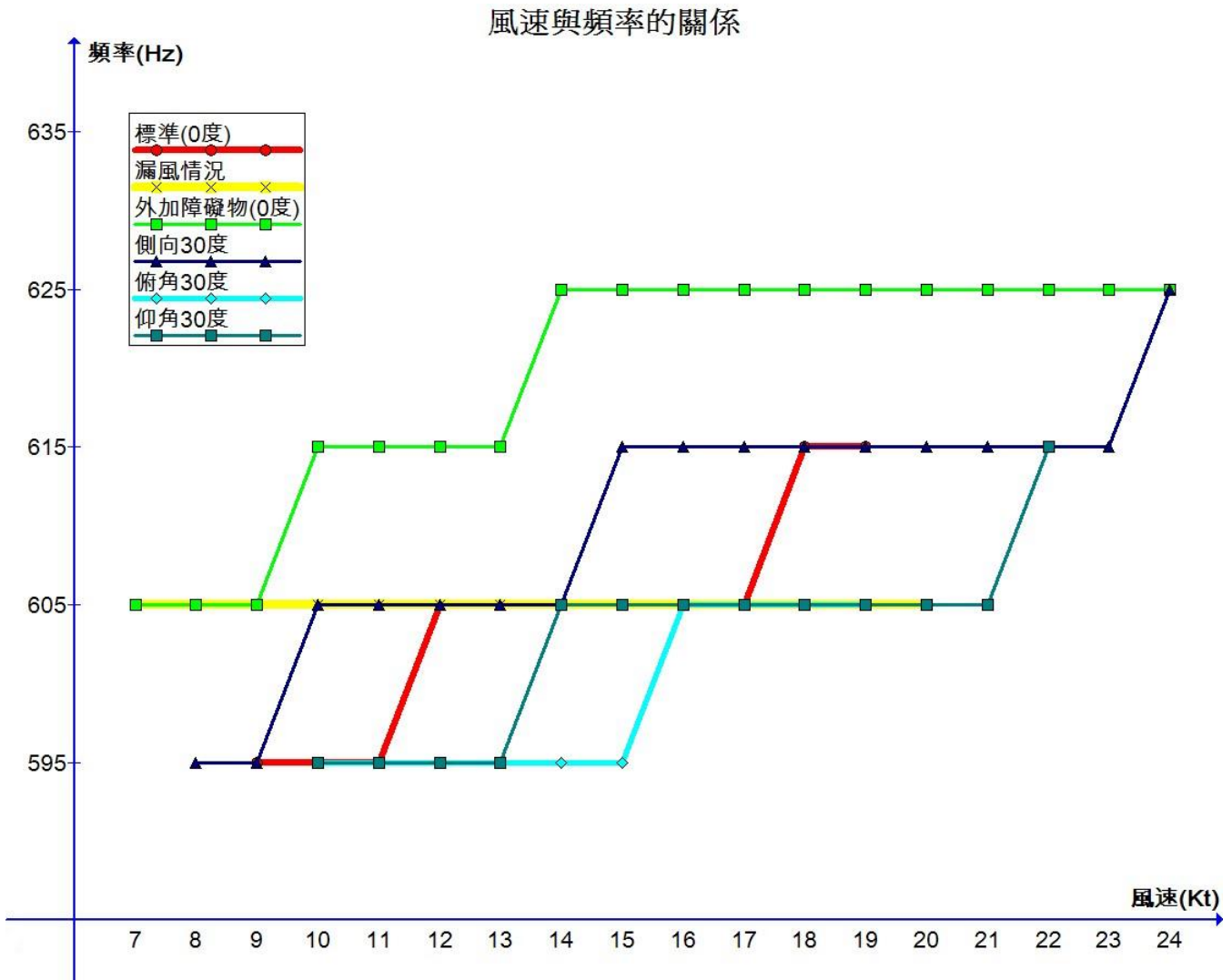


圖 4-3、風速與頻率的關係圖-吹音簧片長度 1.25cm 寬度 0.2cm 厚度 0.1cm。

1. 1kt(海浬/小時)等於 0.51m/s
2. 吹嘴和口琴吹口無法吻合時(漏風情況)，所測得的頻率都一樣。
3. 自製吹嘴吻合之後會發現頻率風速會隨著頻率改變而上升。
4. 此實驗由於儀器精密度問題，導致測得頻率間距過大，但由於頻率變化差高達 30Hz，因此確定頻率確實會因風速提高而上升。並且我們再之後的實驗改善了這個問題，設法把精密度提高。

四、外加楔形障礙物時吹音和吸音之比較

我們由實驗三發現，吹音狀態在加障礙物時在同風速下會有明顯較高的頻率。所以想對外加障礙物和標準狀況(入射 0 度)做較精確的研究。分別利用抽風機和送風機利用變壓器控制風速，比較外加障礙物時的頻率變化，簧片長度 1.50cm 寬度 0.2cm 厚度 0.1cm。

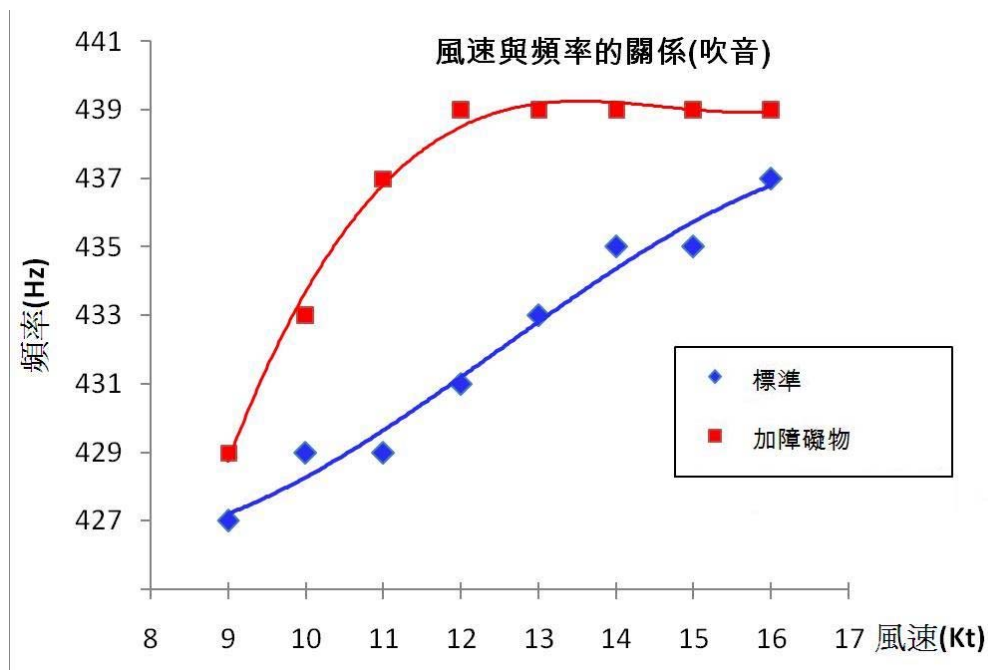


圖 4-4、吹音狀態下風速與頻率的關係

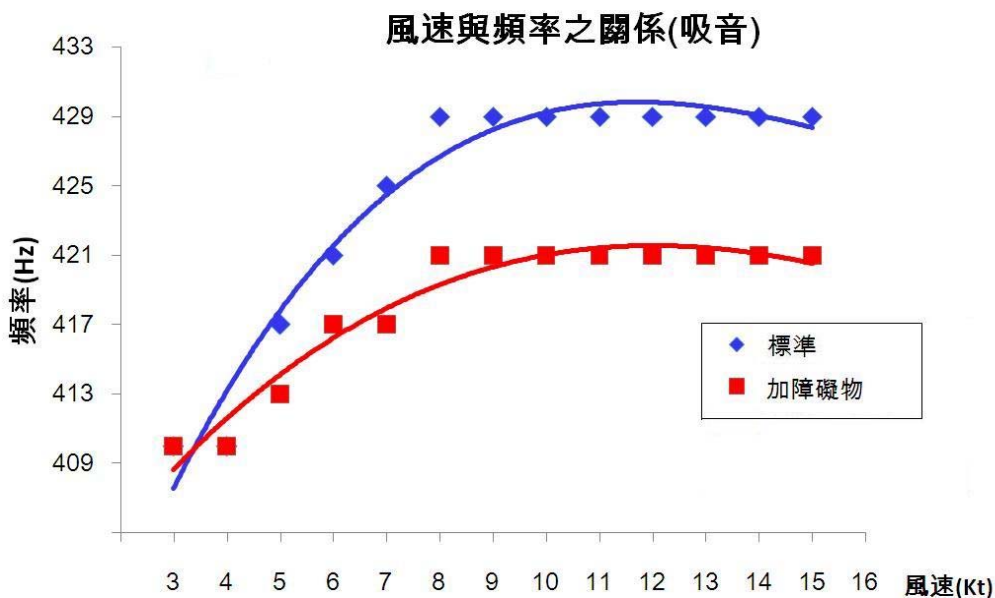


圖 4-5、吸音狀態下風速與頻率的關係

1. 由此實驗發現，吸音(圖 4-4)和吹音(圖 4-5)會產生不同現象。在同風速下，分別產生比標準狀況高(音升)和低(音降)的的頻率。
2. 提高風速使頻率上升，但頻率上升至一定數值，便無法繼續上升。

五、氣流對簧片振動模態之影響

我們由實驗三發現，簧片之頻率隨著風速的增加而變上升。這使我們想了解其原因，所以我們就假設幾個原因：

1. 當風速增加時，簧片之音頻會跳到泛音，而使頻率增加。可是由於音頻的增加並不是突然躍升，所以我們就想了其他解釋之道。
2. 增加風速，簧片之振動模態是否改變。

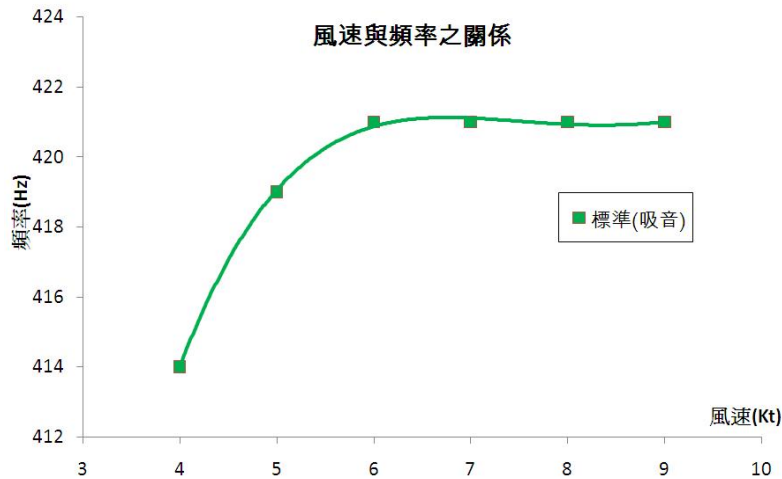


圖 4-6、曲折點之風速與頻率的對照圖

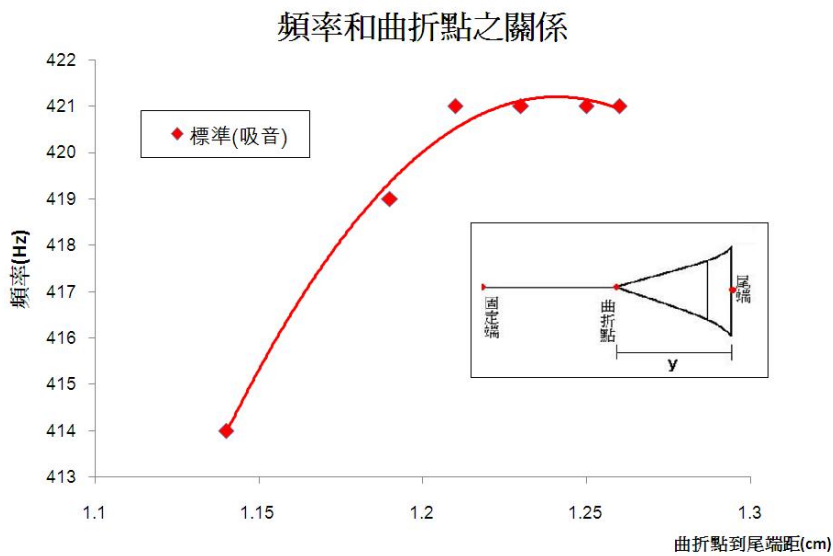


圖 4-7、頻率與曲折點之關係圖

由實驗發現簧片之曲折點至尾端的距離(y)會跟頻率成正向關係(圖十八)。在頻率從 414 升到 419Hz 時，頻率變化最大，簧片的曲折點到尾端的距離也明顯變大。

伍、討論

一. 使簧片造成壓音的現象：

1. 改變入射口徑大小
(模擬嘴唇控制吹奏口徑)
2. 吸音外加障礙物
(模擬吸音舌頭隴起)
3. 吹嘴吻合狀態改變氣流方向
(目前吹奏無此運用)

二. 分析可能造成壓音的原因：

1. 泛音造成主頻的躍遷
2. 簧片本身振動型態變化造成主頻變化
3. 氣流改變阻尼受迫振動, 使簧片振動頻率改變

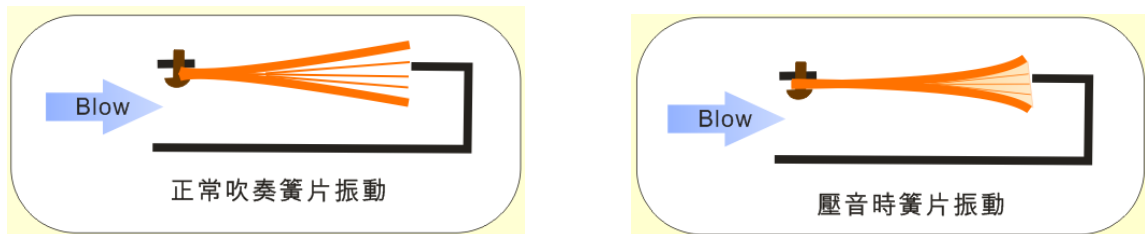


圖 4-8、壓音和正常吹奏比較

三. 頻率分裂情形

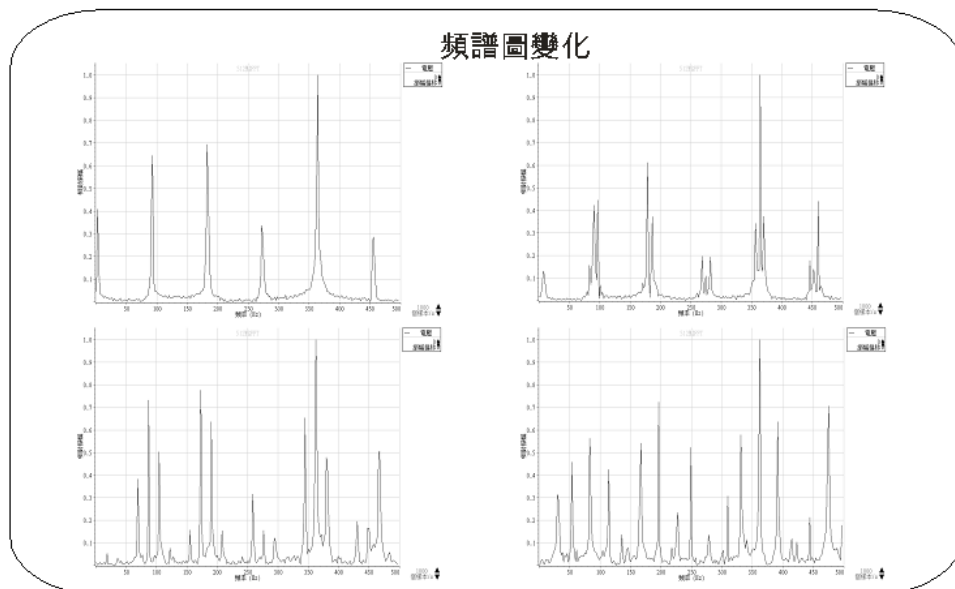


圖 4-9、頻率分裂頻譜圖變化

伍、結論

- 一. 在簧片基本性質探討發現簧片長度的平方會和頻率成反比，和理論相符合。
- 二. 管口遮住部分面積實驗，最先發現會有頻率下降的現象(四片簧片都約降了 20~30Hz)，此時驗的優點為可以立刻明顯比較出前後的差距，確認頻率會因氣流因素而改變。
- 三. 從加入各種氣流因子實驗中發現，風速越大，頻率越大(頻率最大差 30Hz)。
- 四. 且標準情形(正常零度入射)和外加障礙物時有最明顯差異，同風速下時，其頻率會比不加障礙時高出許多；從仰角 30 度和俯角 30 度入射吹送時，同風速下時，其頻率會比標準狀況略低，但差異不大；側向吹送時，同風速下時，其頻率會比標準狀況略高，但差異也不明顯。
- 五. 加入各種氣流因子實驗中，推測頻率上升的簧片在某些風速下會產生頻率的突然躍升，改善儀器的精密度後，發現風速對頻率的關係為平滑線，否定了躍遷的說法。
- 六. 風速和頻率的關係圖可發現，風速和頻率為正相關，但當風速漸增時，簧片頻率會到達一飽和質，此時變無法再利用風速使頻率上升。如風速和頻率的關係圖吸音標準狀態下，風速大於 8 Kt，頻率便無法在上升。
- 七. 外加障礙物時吹音和吸音之比較中，分別造成兩種不同的現象：
 1. 吹音時，同風速下，其頻率比不加障礙物時高，發生音升。
 2. 吸音時，同風速下，其頻率比不加障礙物時低，發生音降。
- 八. 發現當簧片頻率改變，發現簧片振動型態改變。簧片之曲折點至振動端的距離會跟頻率成正向關係。如風速對曲折點之變化中頻率從 414 至 419Hz，簧片的曲折點到尾端距離也明顯變大。
- 九. 我們發現吹嘴和口琴只要稍有一點空隙(大約在 0.2cm 左右)，便會和完全吻合時有顯著的頻率差距(吻合後大約比有空隙低 20Hz 左右)，此實驗頻率變化現象和現實壓音頻率變化極為相近。在留空隙和吻合情況時，吹入口琴的風速相近，但頻率變化卻很明顯。在實驗三加入各種氣流因子發現入射角度和標準情形差異不明顯，因此推論壓音的頻率變化和風力強度、入射角度關係不大，壓音主要為渦流所造成的現象。
- 十. 簧片振動模式改變，導致簧片振動頻率發生變化，且簧片的自然頻率不變。當壓音產生時，渦流在振動面造成妨礙簧片振動的抗力，但琴格內部同時也給簧片週期性的風壓，使簧片產生一種非自然振動的頻率。

陸、未來展望

1. 從實驗過程中，我們發現改變氣流方向和氣流出口，也會使簧片造成壓音等頻率變化，現實壓音都是改變演奏者的氣流。因此想改良口琴，希望可以做出一把同一簧片可以變換頻率的口琴。
2. 我們發現除了主頻變化，簧片的會有類似頻率分裂的現象(圖 4-9)，往後可以探討此頻率分裂所造成聲波的影響。
3. 研究驅策力如何使簧片振動發生改變，未來打算將簧片放大大利用光閘測量頻率，並測量簧片擺動幅度，並希望可以進一步解釋簧片振動頻率改變原因。

柒、參考資料

Enhanced harmonica James F .Antaki

Free reed acoustics James P Cottingham

材料力學(下) 劉上聰

靈光乍現——閃頻法配合相位調製對週期振動物體的研究 研究學生：邢本元

http://etds.ncl.edu.tw/theabs/site/sh/detail_result.jsp 連續鋼架之自然頻率分析

<http://harmonica.cc.ccu.edu.tw/~tdc/hardware/parts.HTM> 口琴結構簡介

<http://www.phy.fju.edu.tw/lab/ph304/voice.htm> 聲學

<http://www.overblow.com/> 國外研究口琴壓音網站

http://en.wikipedia.org/wiki/Second_moment_of_area 面積二次矩

捌、附錄

一、驗證理論中的的自然頻率公式

表 8-1、不同長度自然頻率

長度(m)	0.01	0.0125	0.015	0.0175
寬度(m)	0.002	0.002	0.002	0.002
厚度(m)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
簧片質量(g)	0.0376	0.047	0.0564	0.0658
理論頻率值(Hz)	1046.33	598.96	415.94	305.59
量測頻率值(Hz)	962.45	633.89	437.28	329.21

(楊式係數代 10^{11} N/m²)

二、不同長度之簧片的自然頻率測量之頻譜圖

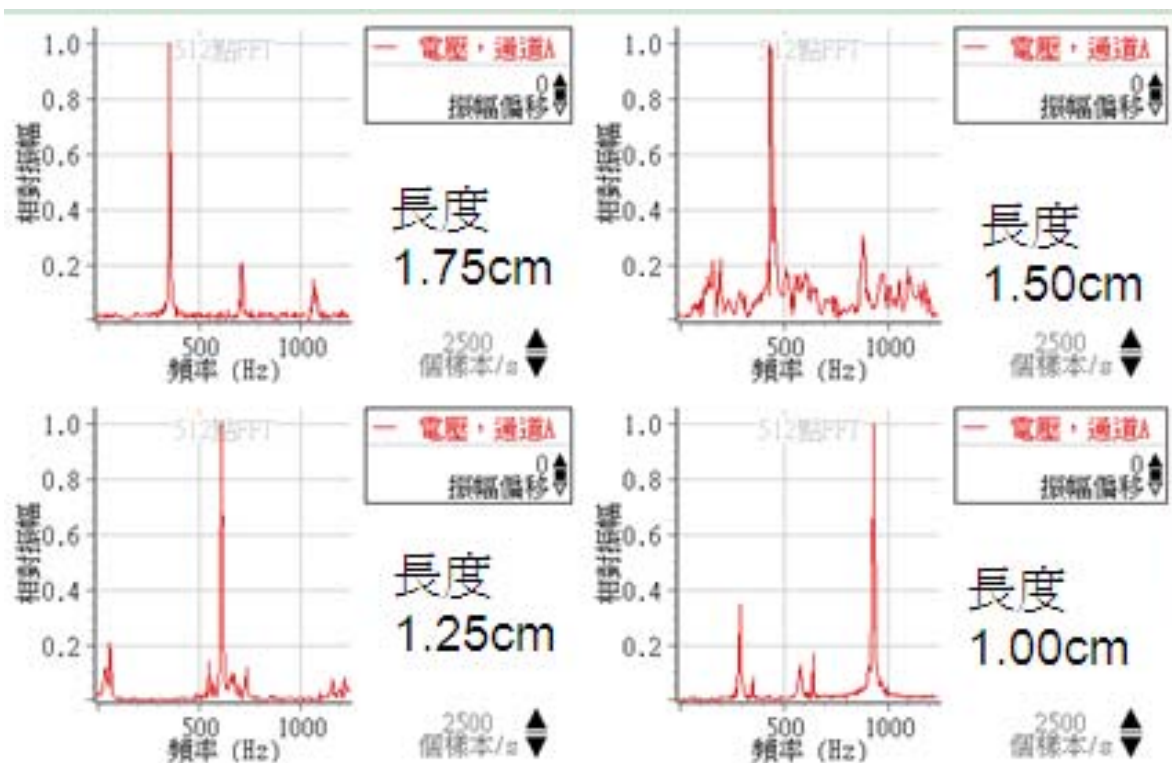


圖 8-1、不同長度簧片頻譜圖

三、不同寬度之簧片的自然頻率測量之頻譜圖

固定簧片長度 1.25cm ，厚度 0.1mm ，敲擊不同寬度簧片所測得的自然頻率頻率值。

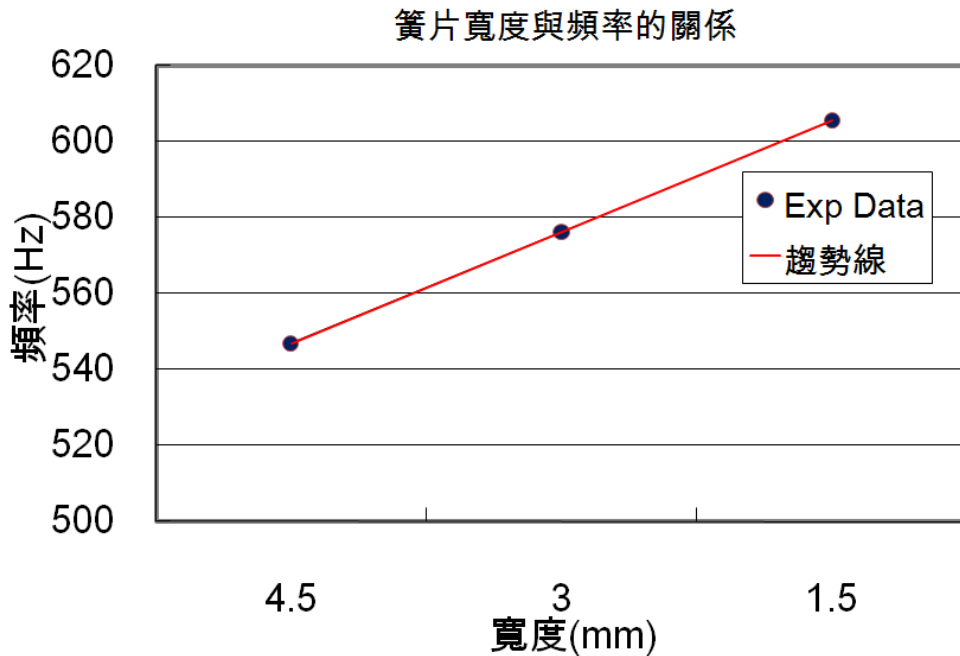


圖 8-2、不同寬度簧片和頻率關係圖

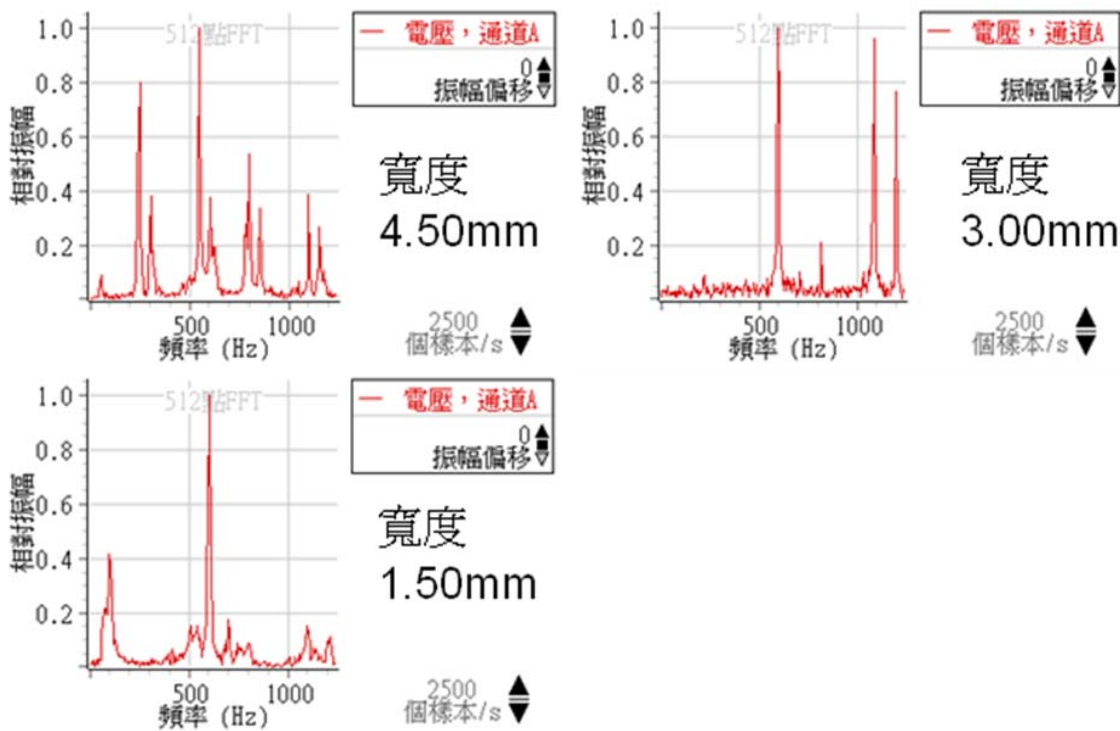


圖 8-3、不同寬度長度簧片頻譜圖

四、簧片振動時琴格內部的壓力(相對)

表 8-2、不同電壓對琴格內部造成風壓強度

電壓 (V)	平均壓力 (kPa)	最大壓力值 (kPa)	最小壓力值 (kPa)
0	0	/	/
5	0		
10	2.2		
15	9.6		
20	22.5	53.6	-4
25	34.5	88.6	-12.7
30	45.5	119.9	-27.3
35	57.1	157.4	-49.1
40	68.8	191.8	-71.9
45	81.7	229.2	-88.1

(簧片長度 1.75cm，簧片到變壓器電壓至 20V 後開始振動)

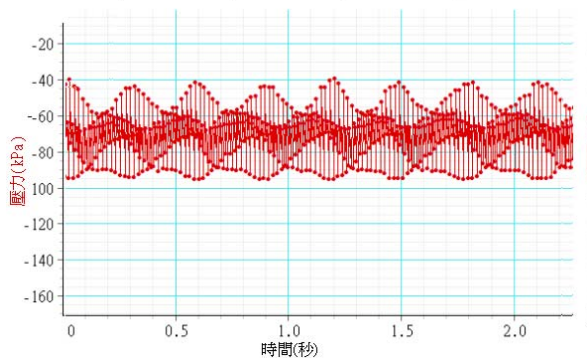


圖 8-4、電壓 20V 風壓波形圖

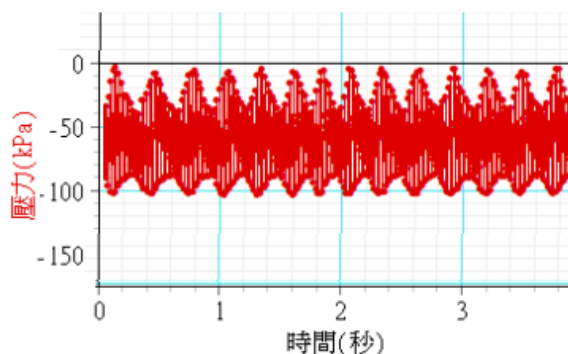


圖 8-5、電壓 25V 風壓波形圖

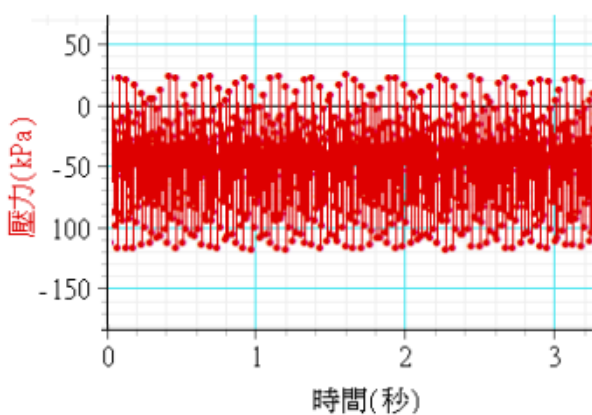


圖 8-6、電壓 30V 風壓波形圖

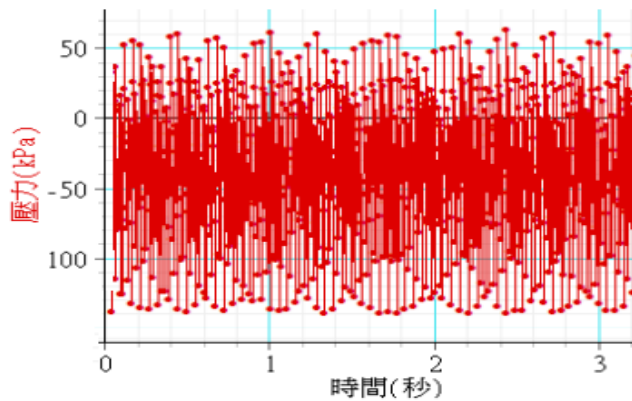


圖 8-7、電壓 35V 風壓波形圖

不同簧片同步測量風壓和簧片收音波形圖(電壓 25v)

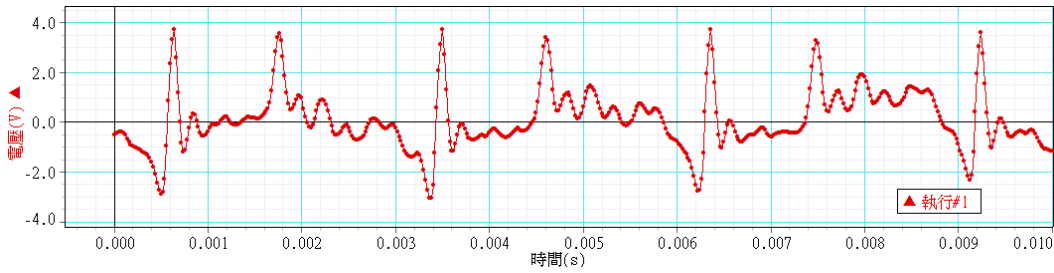


圖 8-8、
長度 1.75cm
聲音波形圖

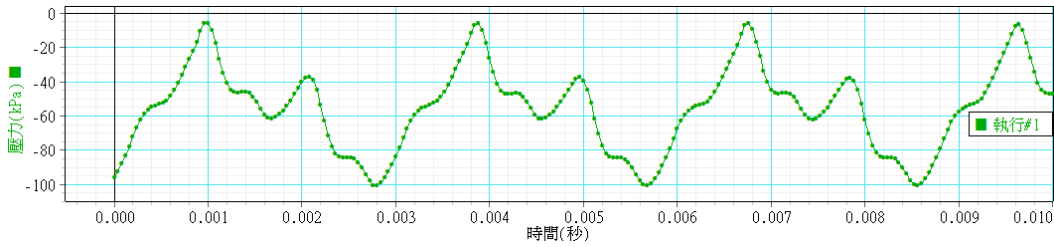


圖 8-9、
長度 1.75cm
風壓波形圖

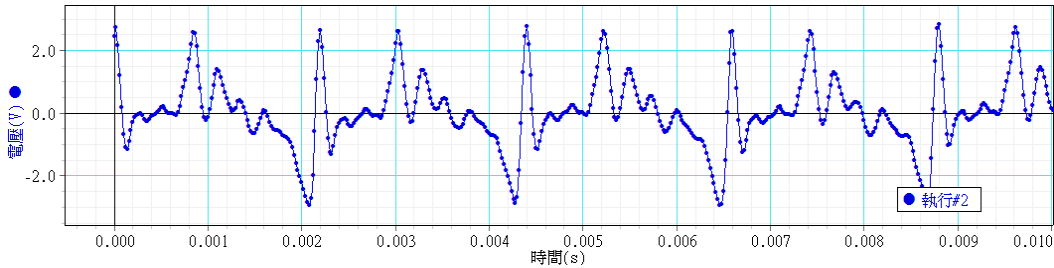


圖 8-10、
長度 1.50cm
聲音波形圖

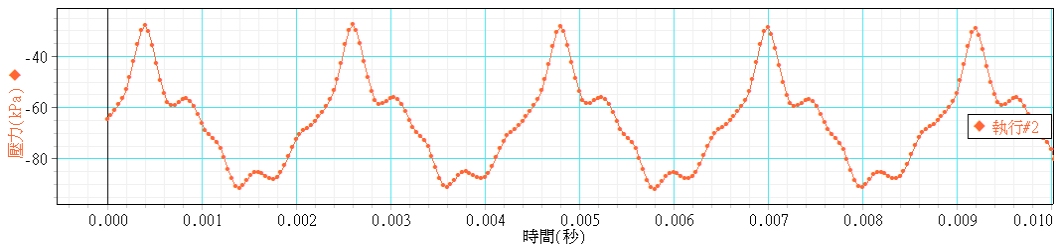


圖 8-11、
長度 1.50cm
風壓波形圖

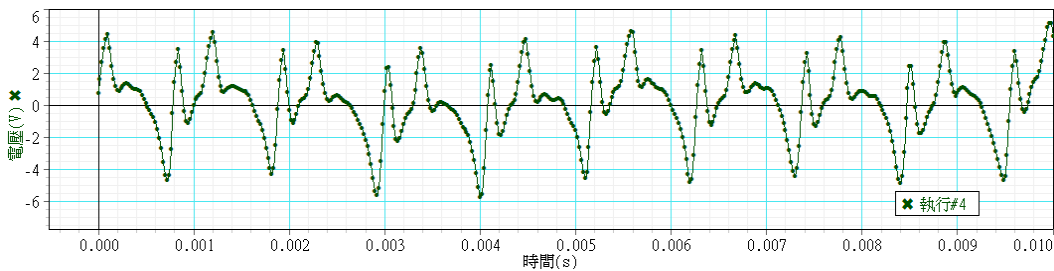


圖 8-12、
長度 1.50cm
風壓波形圖

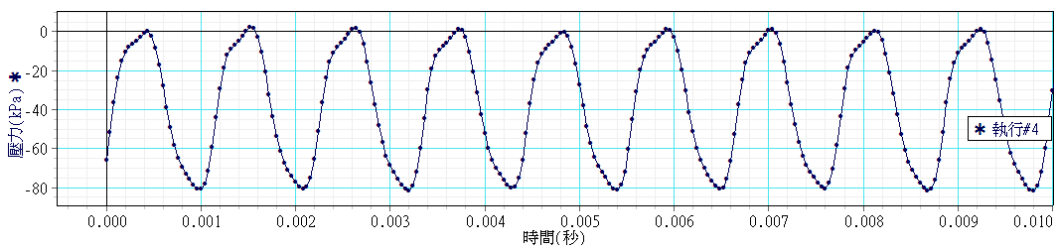


圖 8-13、
長度 1.00cm
風壓波形圖

五、吹嘴垂直驅策簧片

我們使用直徑 0.5cm 的吹嘴，距離自由端簧片上方 0.5cm 處，改變不同風速，測量簧片振動時所產生的頻率。並水平移動吹嘴測量同一片簧片對不同位置施壓所產生頻率之變化。

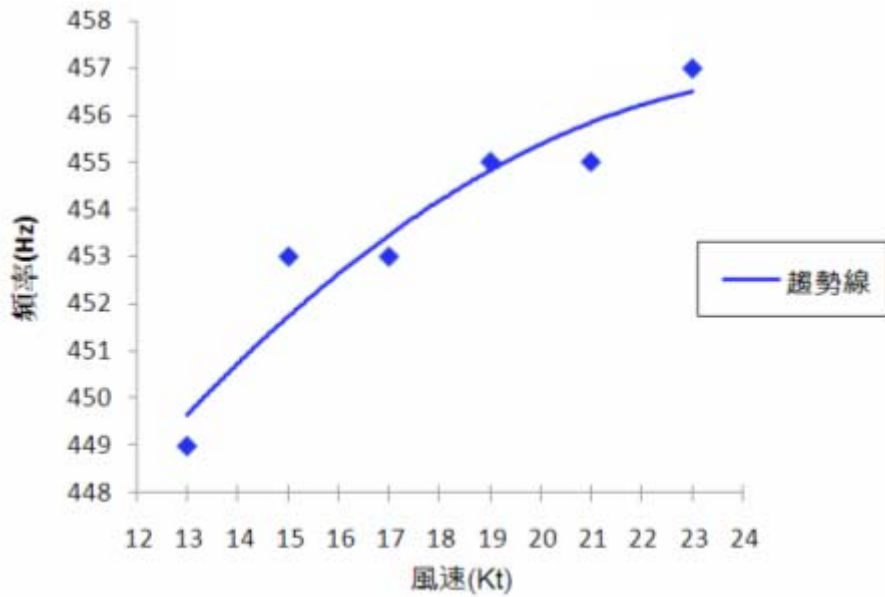


圖 8-14、不同風速下垂直對簧片施壓關係圖

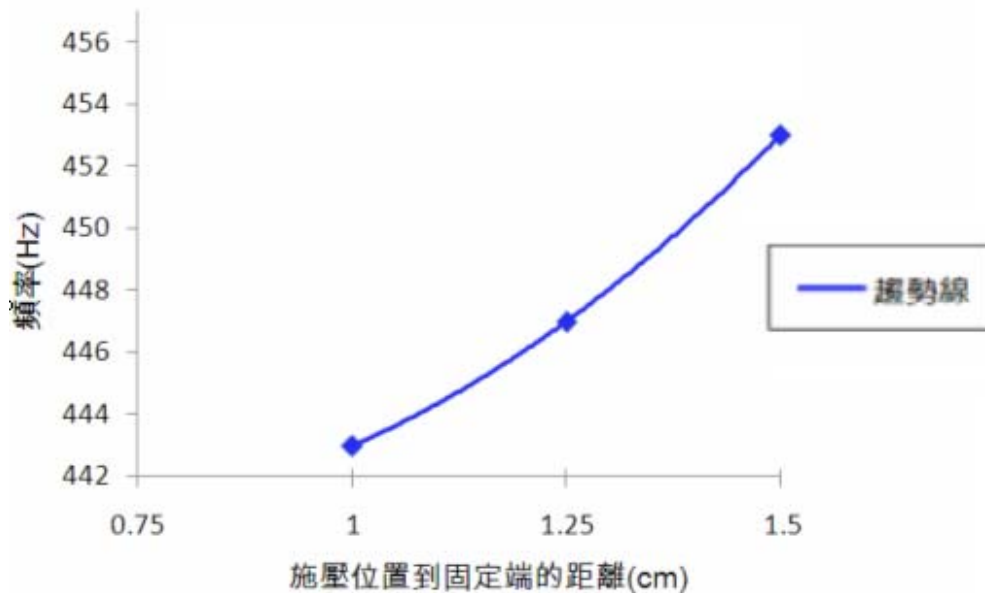


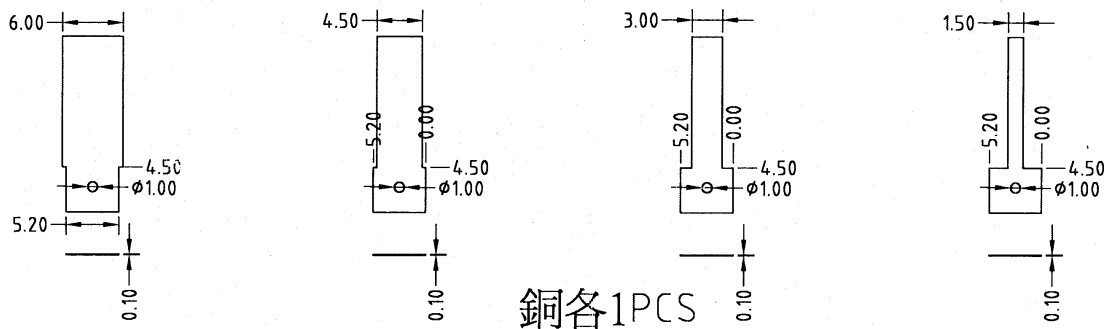
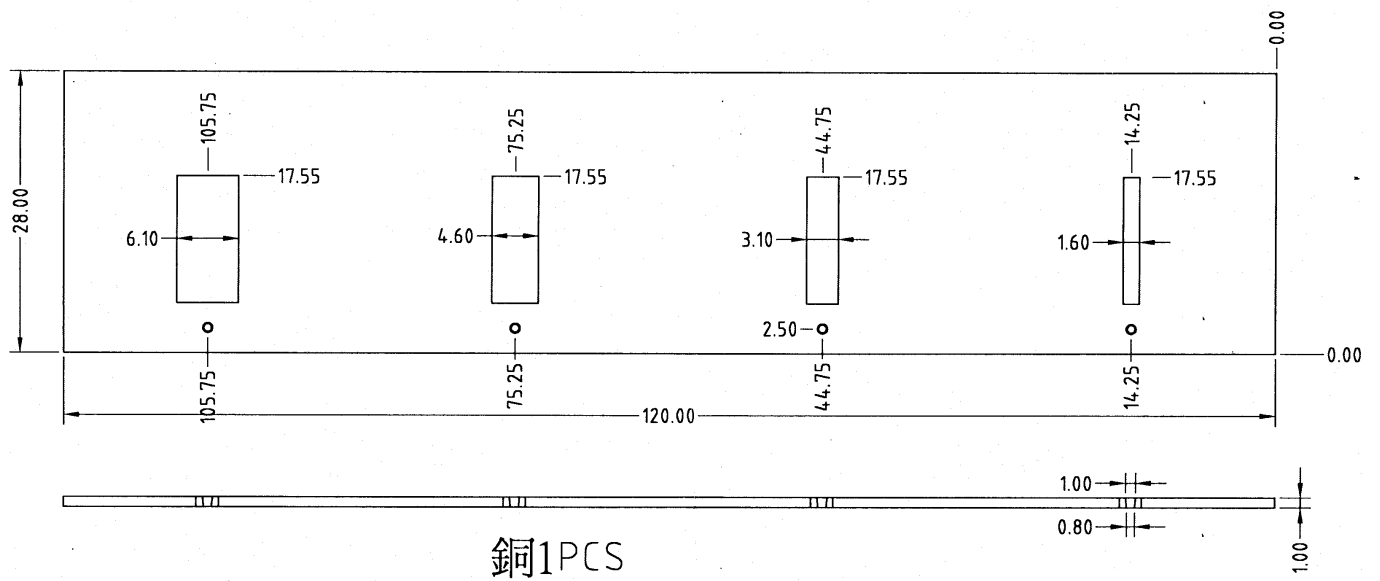
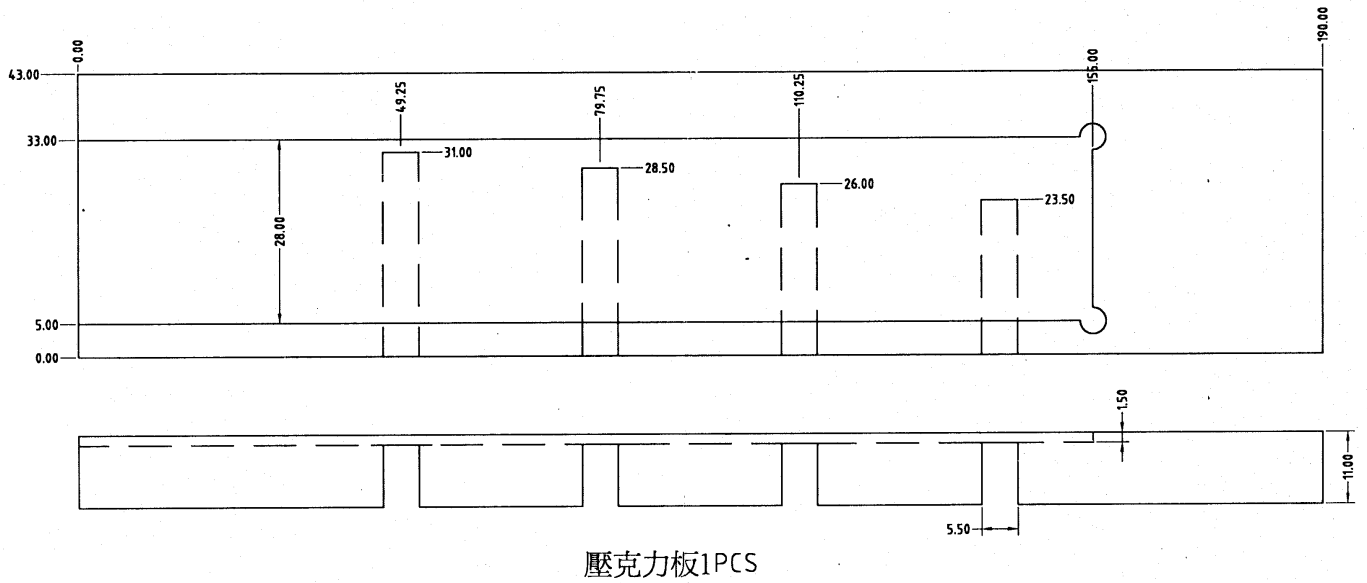
圖 8-15、不同位置垂直對簧片施壓關係圖

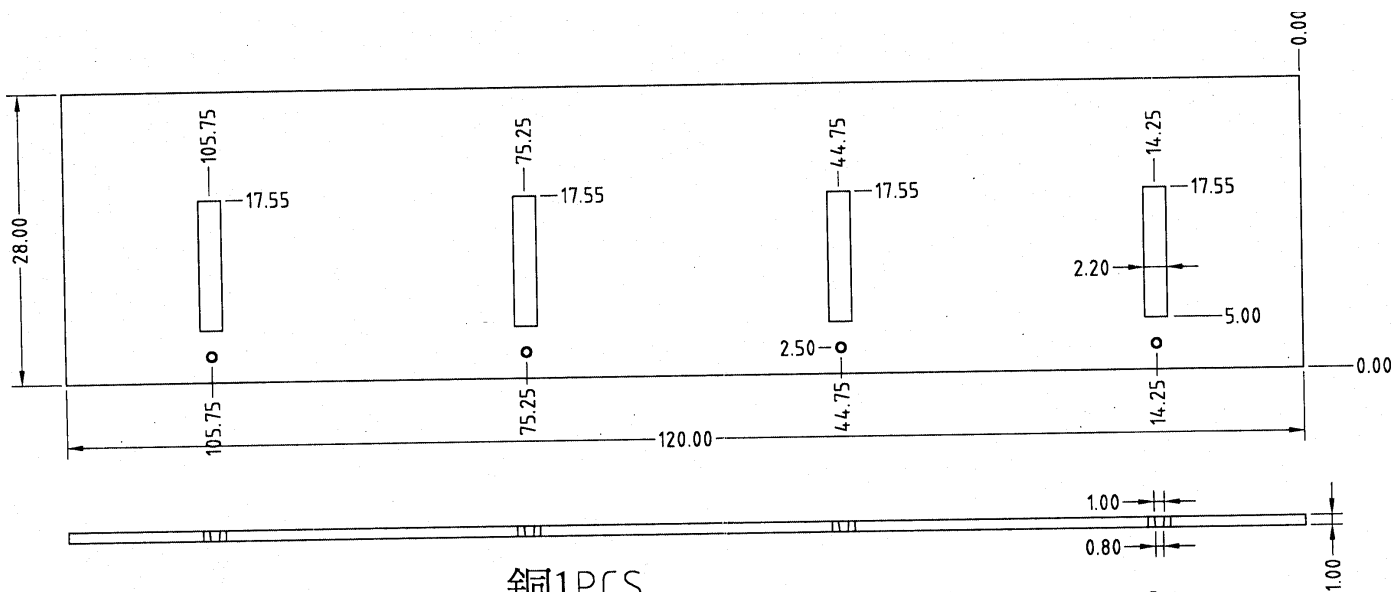
六、頻率與曲折點之口琴簧片之振動圖(紅色線為曲折點)



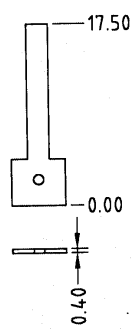
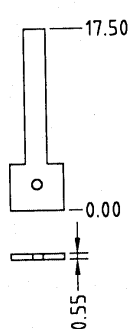
圖 8-16、簧片曲折點位置圖

六、自製口琴設計圖

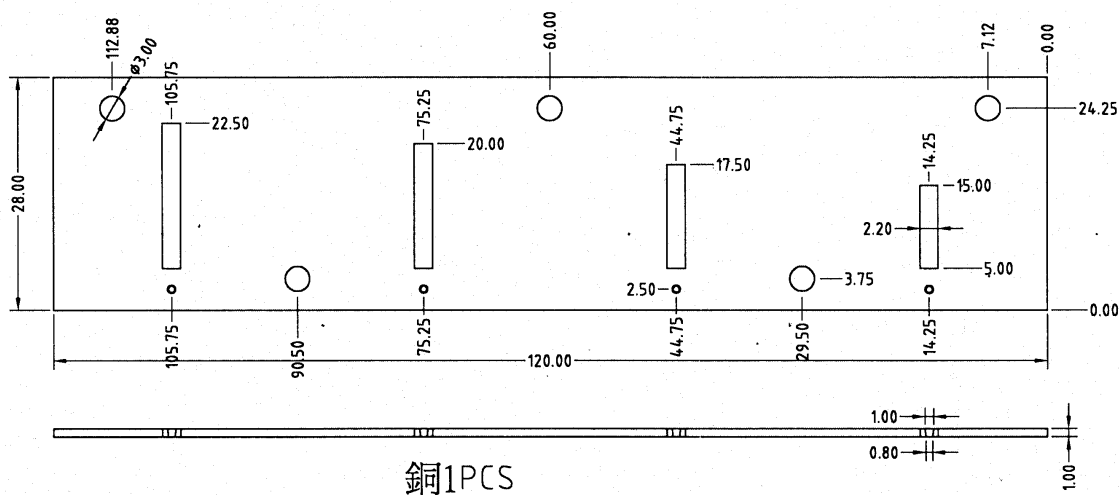
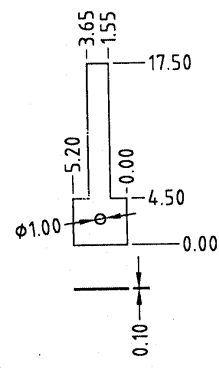
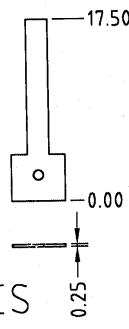




銅1PCS

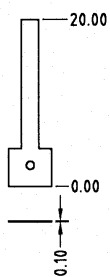
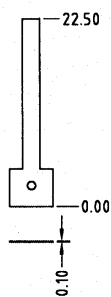


銅各1PCS

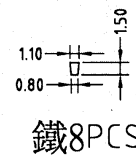
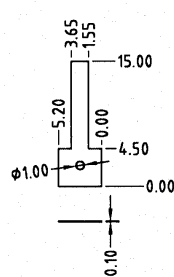
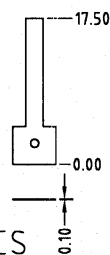


銅1PCS

M3螺絲10PCS



銅各1PCS



鐵8PCS

評語

以實物現場 demo 複雜的簧片振盪原理，並可近乎完整地解釋簧片發音的基本原理，非常難得。