

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030106

笛音管演奏器

學校名稱：新北市立板橋國民中學

作者： 國一 邱庠熙 國一 陳沛甯 國一 洪瑋琪	指導老師： 莊順源 胡文達
---	-----------------------------

關鍵詞：駐波理論、腔體共振、笛音管

摘要

原本只是要製作自動笛音管演奏器，但由第一支笛音管發現當逐漸增加空氣柱長度時，原本逐漸降低的音高會突然發生音高躍升現象，而且會間隔一段又重複發生，讓我們找不出可用的較低音階。根據我們研究結果，這個現象應是由於我們給的風速、風量過大所造成，降低風速、增加笛音頭氣切角度及加大氣切口面積可以減少音高躍升現象。本研究也發現所用之笛音管其發聲存在著基音頻率偶數倍之泛音，說明著其發聲機制應符合兩端皆封閉之駐波理論，而在大風量吹奏之下，管內逐漸累積一段不容易震盪之空氣柱，隨著空氣柱增長，累積的空氣柱逐漸達到不穩定平衡的臨界點，因此產生音高突然躍升現象。

壹、 研究動機

生活上自動控制的機具愈來愈普及，學校科學營也增加了一些自動化的課程，再加上國中音樂課都要學直笛，看到有人很快上手但有些人就不容易演奏一首簡單的曲子，因此讓我們發想能否製造出可以自動演奏的笛音管機器，於是著手進行研究。我們利用壓克力管加上 3D 列印的氣嘴充當笛音管，再以空壓機吹氣，利用水柱封住管子底部並調節氣柱長度以改變音高，但很快就碰到一個問題，我們找不到演奏曲子所需的 21 個音階，連 10 個音階都找不到。

貳、研究目的

- 一、 實作一支利用水柱高度控制音高的笛音管並探究其特性。
- 二、 探討影響笛音管音高的變因：
 - (一) 空氣柱長度
 - (二) 笛音管口徑
 - (三) 氣切口角度
 - (四) 氣切口大小
 - (五) 吹氣強度
- 三、 探究笛音管音高躍升現象。
- 四、 使用 Arduino 開發板製作自動笛音管演奏器。

參、研究設備與器材

項次	名稱	項次	名稱	項次	名稱
1	筆電	8	電阻、電晶體	15	電線、杜邦線、
2	開關、麵包板	9	焊槍、焊錫	16	抽水馬達
3	螺絲起子等工具	10	壓克力管	17	電磁閥
4	直尺、游標尺	11	空壓機、橡皮管	18	傳輸線
5	風速器	12	熱熔槍、膠	19	支架、橡皮塞
6	直流電源供應器	13	3D 列印機、建模軟體	20	雷射切割機及其操作軟體
7	分析頻譜軟體 (audacity)	14	Arduino(UNO 版)、 氣壓感測模組	21	空壓機、風管、控 氣閥



肆、研究過程或方法

一、文獻探討

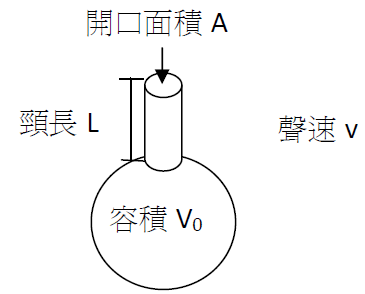
(一) 駐波理論：

在一介質中，若有兩波波長相同，且相向而行，則可互相干涉形成駐波（standing wave）。一般入射波與反射波之間的相互干涉即為駐波；共鳴管中可形成駐波的最低頻率稱為基音，其餘較高頻率則稱為泛音。

(二) 腔體共振理論：

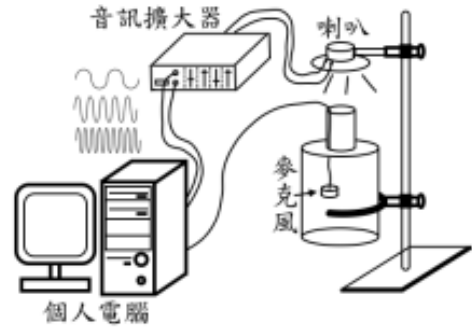
如右圖所示，將理想共鳴腔分為瓶身及頸部兩部分。其中開口面積 A ，頸長 L ，瓶身容積 V_0 ，當聲速 v 時，此共鳴腔共振頻率 f 為

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L}}$$



(三) 根據中華民國第 43 屆科學展覽會(2003)，高中組物理科(作者：江文馨、林佳燕、陳怡文、陳怡雯)，「先聲奪人—從共鳴管到共振子」所獲得的結論摘要如下：

本實驗利用音效處理軟體混合各頻率 \sin 波，作為強迫共振系統聲源，測出容器的共振頻率，發現圓柱形的窄頸容器具有一系列泛音，但其中的基音頻率變化卻符合赫爾姆霍茲共振子的理論趨勢，顯示系統的共振同時具有駐波及共振子的性質。進一步測量瓶內各點的振幅發現其聲波共振的方式與共振子有相當的共通性，卻也有駐波的存在。



(四) 根據中華民國第 50 屆科學展覽會(2009)，高中組物理科(作者：許婷)，「腔體共振之探討」所獲得的結論摘要如下：

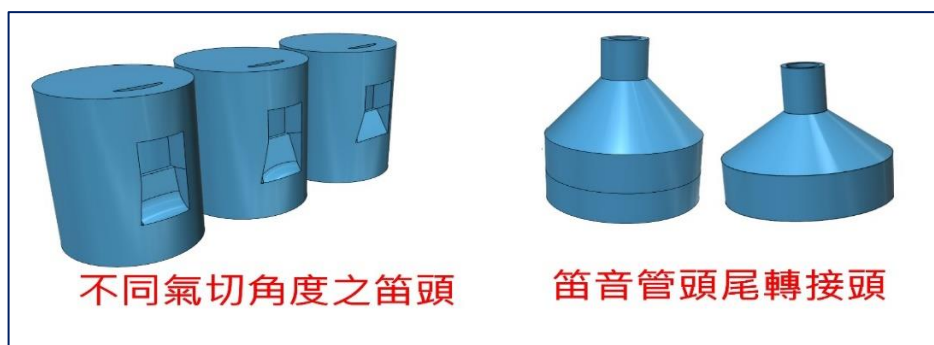
1. 邊界效應確實存在：共鳴腔開口與腔體外氣體接觸之處，有一有效空氣柱在腔體外影響共鳴腔共振頻率。
2. 由頻譜分析圖顯示的連續泛音可知圓底燒瓶、柱狀共鳴管內均有駐波模式的共振，而兩節圓筒瓶的共振模式更為複雜。
3. 圓底燒瓶、改變開口口徑的柱狀共鳴管及兩節圓筒瓶均符合腔體共振理論。
4. 在均勻柱狀共鳴管的實驗中，管長修正比例與管長倒數成正相關，管長越長修正長度越長。
5. 同一管徑開管修正長度大於閉管修正長度，開管修正長度與閉管修正長度比值介於1 與2 之間。
6. 共鳴管管徑越小越符合駐波理論。



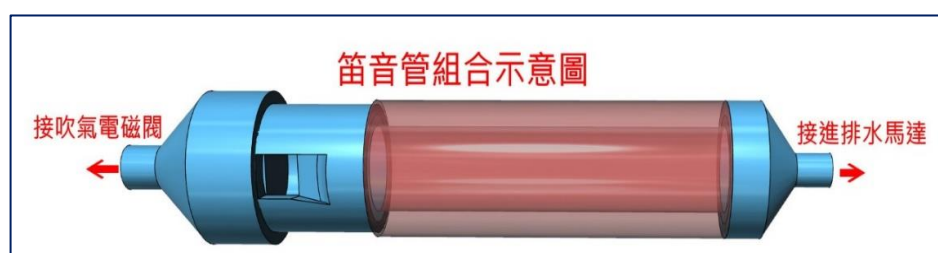
(五) 中華民國第 28 屆科學展覽會(1988)，國中組物理科(作者：胡長松、吳唐林)，「氣體壓力的變化會影響聲音的傳播速度嗎？」其研究結論為一大氣壓以內氣體壓力不會影響聲速。聲速與氣體介質分子量平方根成反比。

二、實作一支利用水柱高度控制音高的笛音管並探究其特性。

- (一) 參考直笛的構造，利用 3D 建模軟體畫好笛音管頭，最重要的是氣切口斜角及氣切口大小。
- (二) 選用不同口徑的壓克力管為管柱，再利用 3D 建模軟體畫好尾端轉接頭以便轉接水管利用水量來控制空氣柱長度調整音高。

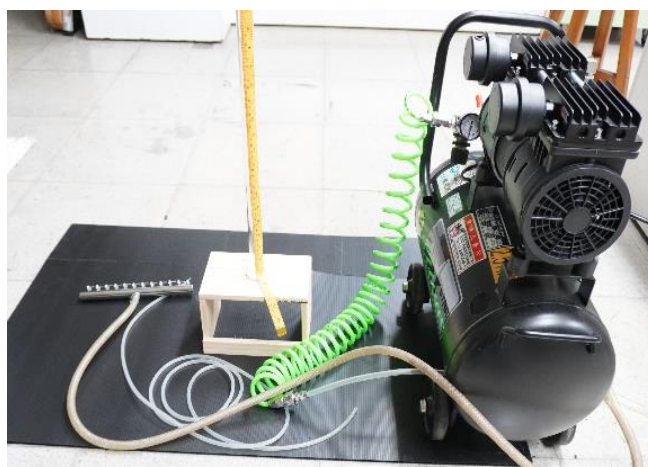


圖一：不同氣切角度之笛頭及笛尾轉接頭

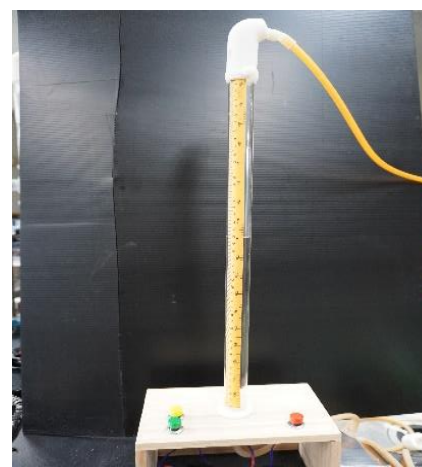


圖二：笛音管組合示意圖

- (三) 利用空壓機接上 9mm 口徑風管，以風速器測出風速 3.5m/s，接上笛音管即可吹出響亮的聲音，再注入水改變空氣柱長度，便可吹出不同音高的聲音。
- (四) 利用 audacity 軟體分析笛音的頻率並探討其發聲特性。



圖三：單一支笛音管搭配空壓機

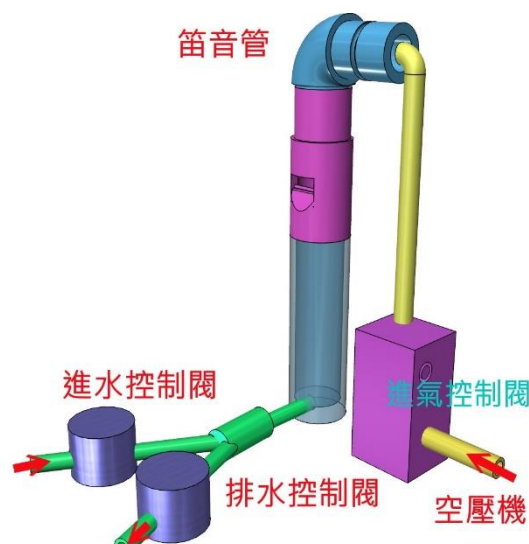


圖四：笛音管裝置圖

三、 探討影響笛音管音高的變因：

(一) 空氣柱長度

1. 裝置如圖五，將水注入笛音管中最高處(約離氣切口 3 公分)。
2. 啟動空壓機以一定的風速對笛音管吹氣，同時利用聲音分析軟體 audacity 進行錄音。
3. 以 audacity 分析描繪頻譜，讀取響度最大之峰值頻率。
4. 降低水位(即增加空氣柱長度)重複步驟 2、3。



圖五：笛音管裝置示意圖

(二) 笛音管口徑

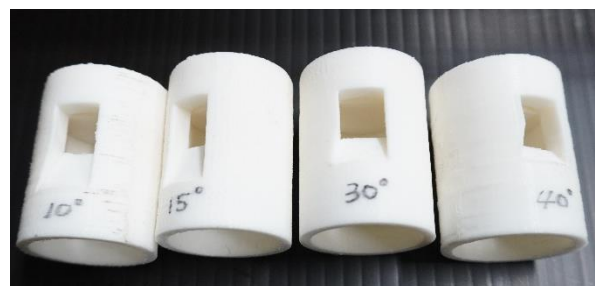
1. 同前項裝置，只是更換不同口徑之壓克力管，其他如氣切口大小及氣切角度、吹氣風速都保持一定。
2. 分析比較不同管徑對其音高有何影響。



圖六：不同口徑之笛音管

(三) 氣切口角度

1. 同實驗(一)裝置，只是更換不同氣切角度之笛頭，其他如笛音管口徑、氣切口大小及吹氣風速都保持一定。
2. 分析比較不同氣切角度對其音高有何影響。



圖七：不同氣切角度之笛頭

(四) 氣切口大小

1. 同實驗(一)裝置，只是更換不同氣切口大小之笛頭，其他如笛音管口徑、氣切角度及吹氣風速都保持一定。
2. 分析比較不同氣切口大小對其音高有何影響。



圖八：不同氣切口大小之笛頭

(五) 吹氣強度

1. 同實驗(一)裝置，只是調整空壓機出氣強弱，以風速器測量即將引入笛音管之風速大小。
2. 另外也可以變換不同的導氣管以改變風速。
3. 記錄不同風速下各氣柱長度對應的頻率。

四、探究笛音管音高躍升現象

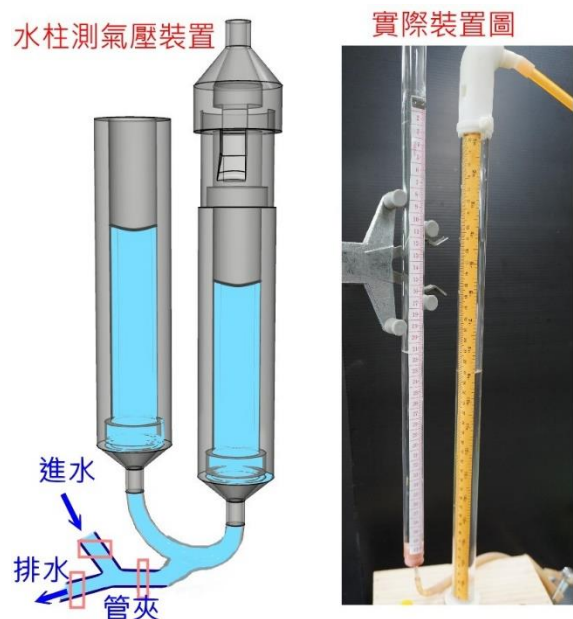
- 前面實驗三-(一)探討笛音管音高變因-空氣柱長度對音高的影響，發現音高雖隨空氣柱長度愈長音調愈低，但每隔一段高度即發生突然音高躍升(如圖十三)，使我們無法得到較低的音階，於是想探究到底是何因素造成。

(一) 音高躍升是空壓機吹氣的穩定度造成的嗎？

1. 我們使用的空壓機雖標榜可定壓輸出，但必須進一步確定。首先設定空壓機以一定壓力吹氣，利用風速計於風管出口測量風速，每 30 秒測一次風速，連續測量 5 分鐘，檢測其穩定度。
2. 將風管接上笛音管吹嘴，固定空氣柱長度，吹出聲音並量測頻率，每 30 秒測一次音高，連續 5 分鐘，檢測空壓機連續運作下對頻率的影響有多大。

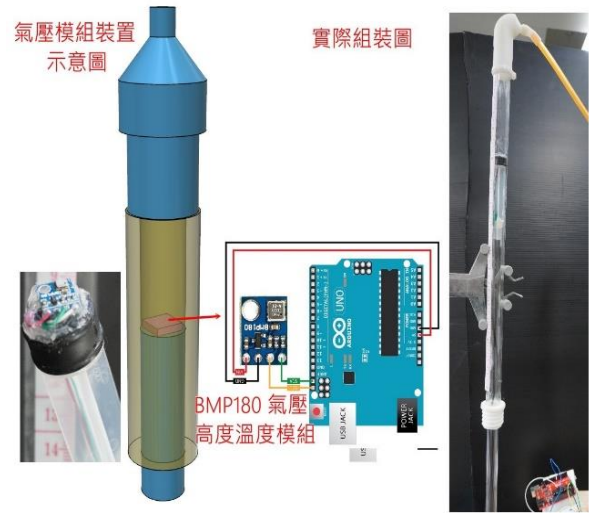
(二) 音高躍升是累積於笛音管內的氣壓造成的嗎？

- 我們想到兩種方法來測量笛音管內的氣體壓力，想了解音高躍升時，氣體壓力是否呈現不同的變化。
1. 第一種方法：利用笛音管下端本接通進排水的管子改接到另一支壓克力管，形成連通管裝置如圖九水柱測氣壓裝置圖。觀測兩管內水柱高度差即可換算笛音管內氣壓。吹奏時紀錄兩管水面高度差，並同時分析其音高。



圖九：水柱測氣壓裝置圖

2. 第二種方法：利用氣壓感測模組配合 arduino 開發板，將感測模組黏貼在一注射筒活塞上方，再將注射筒活塞套接在一支壓克力管上，使活塞可以在笛音管內自由上下但又可以達到封閉的效果。感測模組導線由下方引出接到 arduino 接腳上，將裝有感測模組的管子插入笛音管中以調整笛音管內空氣柱長度，裝置如圖十氣壓模組測氣壓裝置圖。



圖十：氣壓模組測氣壓裝置圖

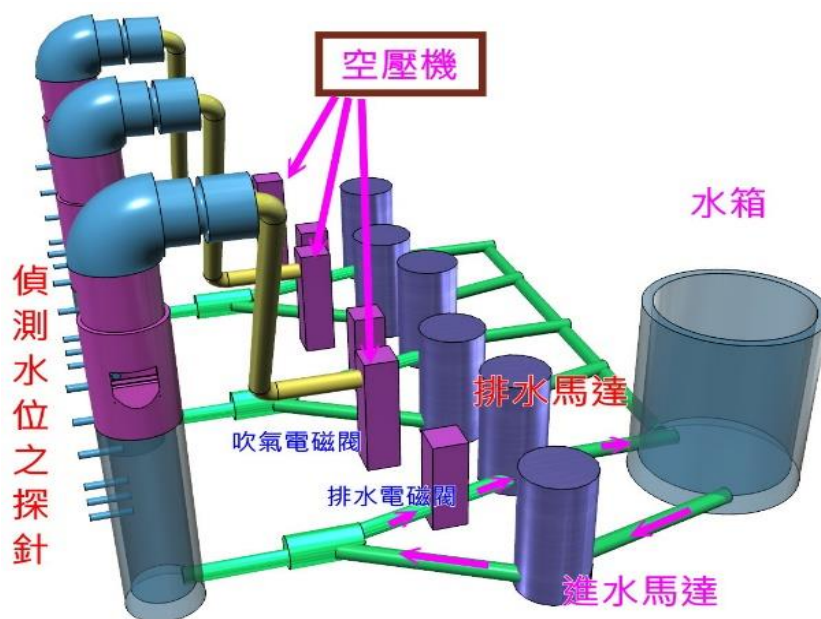
管內空氣柱長度，裝置如圖十氣壓模組測氣壓裝置圖。吹奏時藉著與電腦連接的 arduino 板子送出測得之溫度及氣壓，並同時分析其音高。

(三) 音高躍升是風速太大造成的嗎？

1. 利用連通管裝置觀測笛音管內氣壓的方法，固定笛音管空氣柱長度，利用空壓機風管風量控制閥改變不同風量，量測笛音管內氣壓與吹奏音高的關係。
2. 固定空氣柱長度 10、20、30 公分，作笛音管內氣壓與音高的關係圖。

五、使用 Arduino 開發板製作自動笛音管演奏器

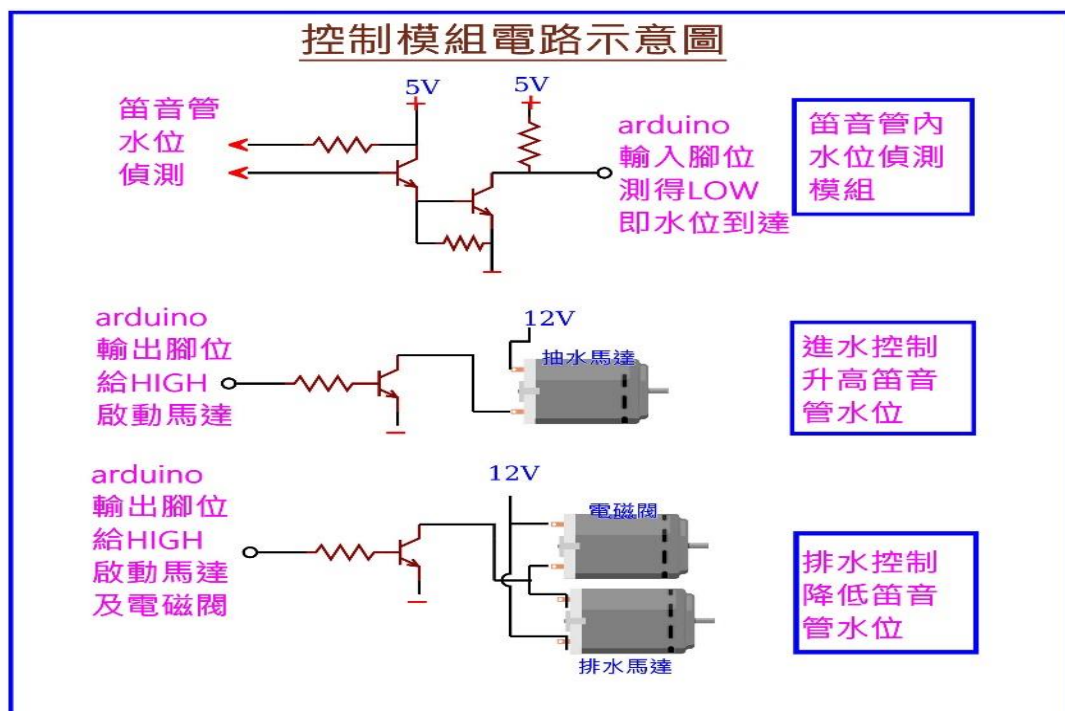
(一) 裝置示意圖如圖十一，整體架構可區分為四個部分。



圖十一：自動演奏笛音管裝置示意圖

1. 音高控制機制：利用進水馬達將水由水箱送到笛音管中以增加笛音管內水位高度，而排水馬達搭配電磁閥(因為我們使用的馬達必須靠電磁閥來止逆)用以排出笛音管中的水以降低水位，如此調解笛音管中空氣柱長度以改變吹出笛音之音高。
2. 吹奏機制：由空壓機送空氣並由電磁閥控制吹氣時機，電磁閥通電開啟即對笛音管吹氣，便可吹出某一音階之笛音。
3. 偵測機制：笛音管上根據不同水位高低分別實測出發音之音階，在相對高度安裝探針穿透管內，每個探針負責一個音階，此探針利用偵測電路可偵測水位是否到達該高度，以便控制笛音管吹出之音高。
4. 演奏控制機制：樂曲簡譜存於 arduino 開發板，依據讀取之音高及節拍控制進水馬達進水或排水馬達排水，同時不斷偵測水位之高度，當達到所需之音高高度時即啟動吹氣電磁閥發出該音階，並依據節拍調整持續吹氣時間。

(二) 控制模組電路如圖二十：



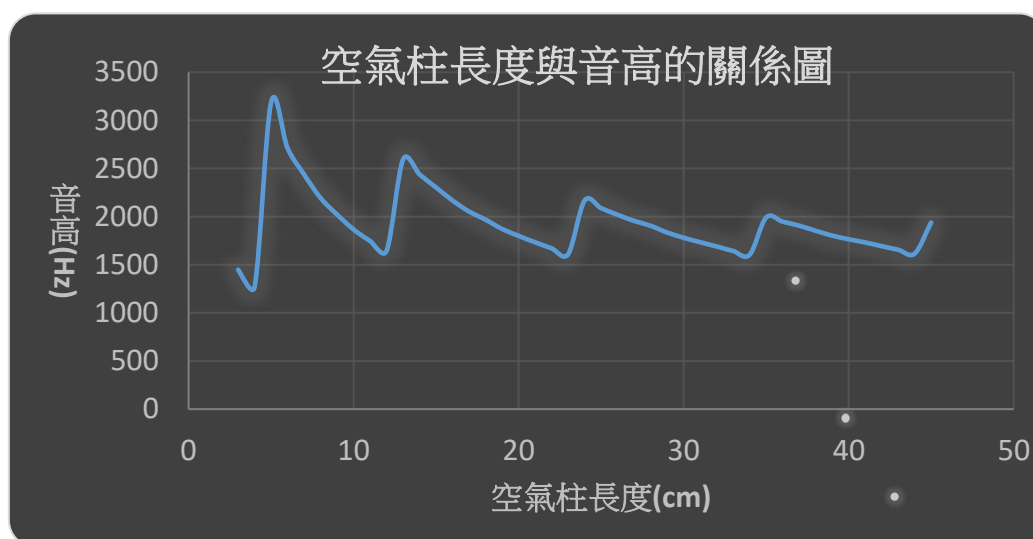
圖十二：控制模組電路示意圖

伍、研究結果

一、實作一支利用水柱高度控制音高的笛音管並探究其特性。

(一) 利用空壓機接上 9mm 口徑風管，以 3.5m/s 風速吹笛音管，空氣柱長從 3 公分慢慢增加倒 45 公分，分別分析頻譜測出頻率，結果如圖十三。

(二) 由圖十三發現其頻率並非如預期空氣柱愈長頻率愈低，而是出現週期性突然升高現象，為什麼會這樣？我們後面進一步探究這個奇妙現象。

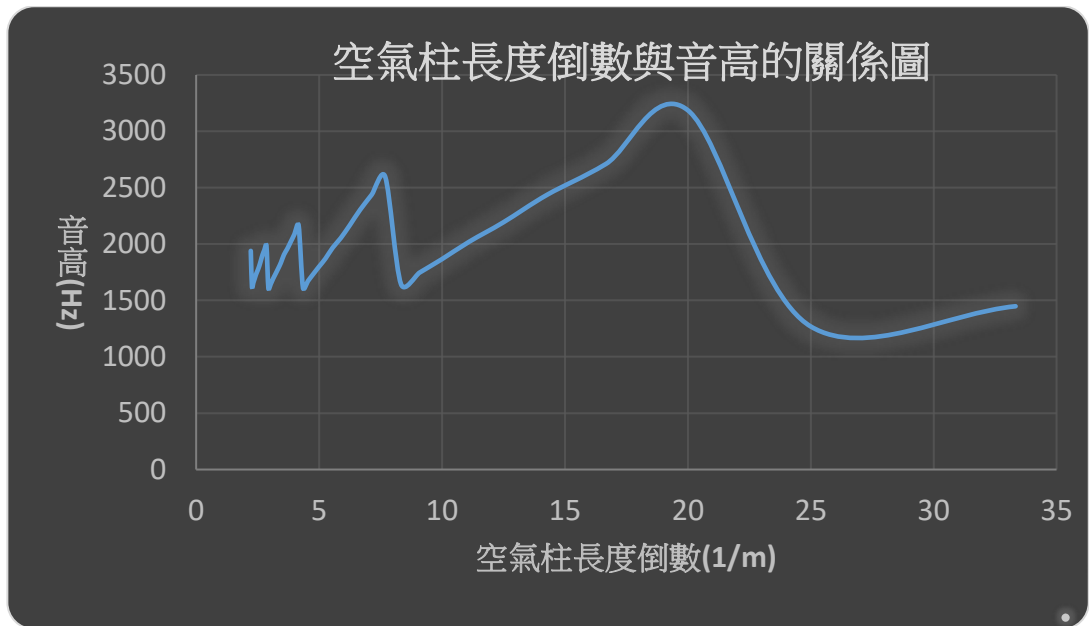


圖十三：空氣柱長度與音高的關係圖(數據：附件表十三)

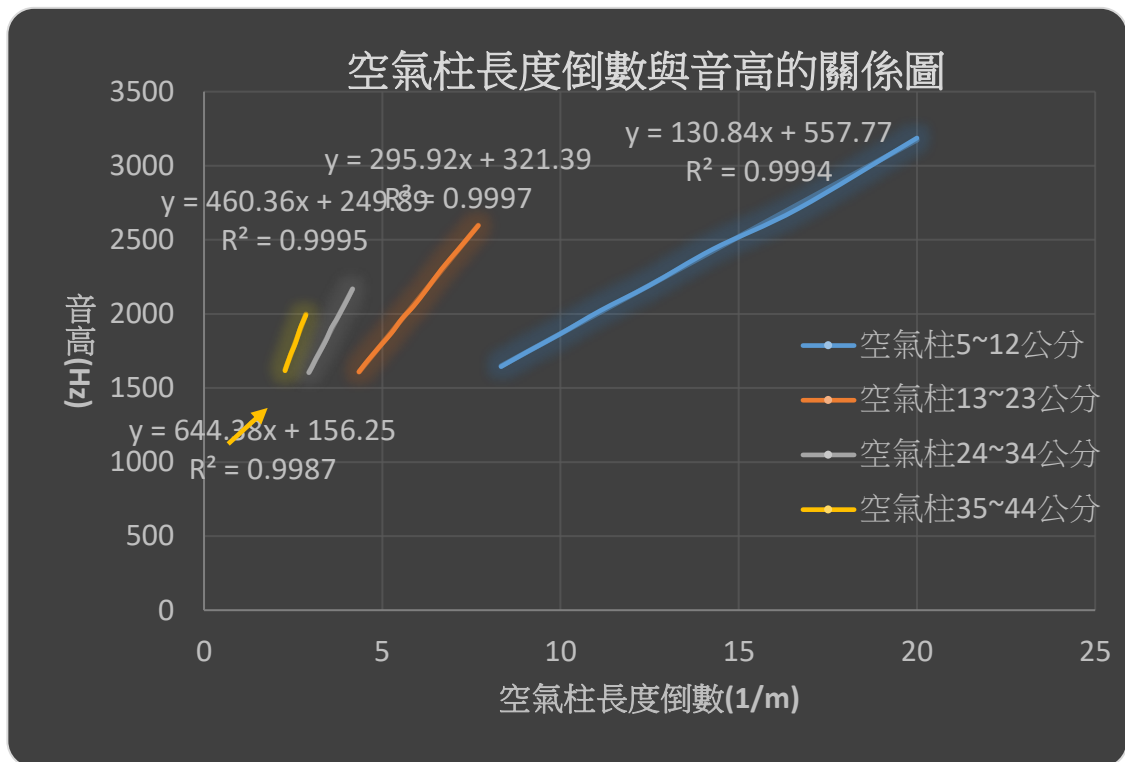
二、探討影響笛音管音高的變因：

(一) 空氣柱長度

1. 結果如圖十三，為更了解音高與氣柱長度關係，進一步作空氣柱長度倒數與音高關係圖如圖十四。
2. 去除前面 3 公分及 4 公分的數據(因為水位過高幾乎要碰及氣切口，水面受風吹振動起伏過大應有較大誤差)並分段作各段空氣柱長度倒數與音高關係圖並加上趨勢圖如圖十五。
3. 圖十五可發現其相關係數 R 平方都高達 0.99 以上，表示空氣柱長度倒數與音高呈正相關符合文獻資料中的駐波理論。但為什麼會出現階段反覆升高的現象呢？而且這個現象使我們無法找到可用的一個完整的 8 度音，更別說我們需要 3 個 8 度音才能演奏大部分曲子。



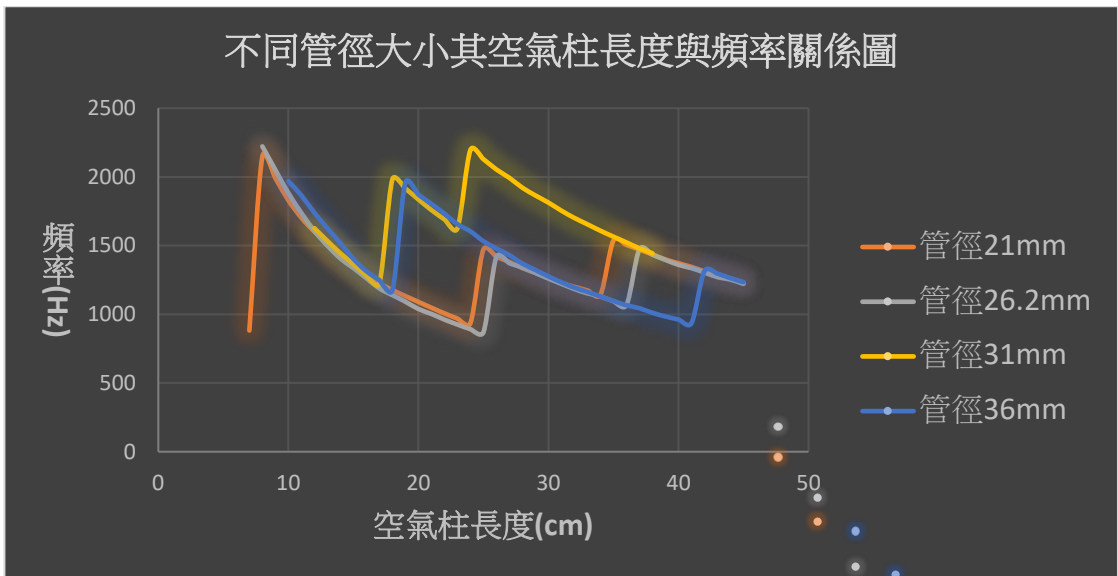
圖十四：空氣柱長度倒數與音高的關係圖(數據：附件表十四)



圖十五：空氣柱長度倒數與音高的關係圖(加上趨勢線及相關係數 R 平方)

(二) 笛音管口徑

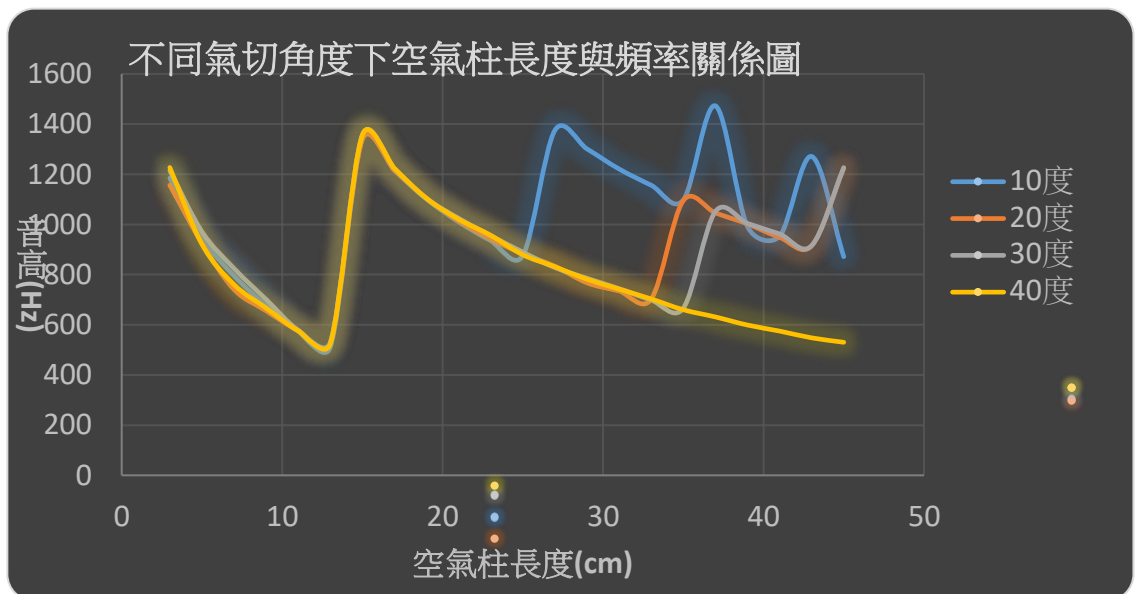
1. 分別以 4 種不同口徑之壓克力管來測量空氣柱長度與音高的關係如圖十六，發現空氣柱長度短的時候(小於 10 公分)口徑愈大愈不容易吹出聲音，但之後同樣出現每隔一段空氣柱長度就會出現音高躍升的情況，而且口徑大小對音高的影響不大。圖十六中未標出的點為該空氣柱長度下無法吹出聲音。



圖十六：不同笛音管口徑其空氣柱長度與音高的關係圖(數據：附件表十六)

(三) 氣切口角度

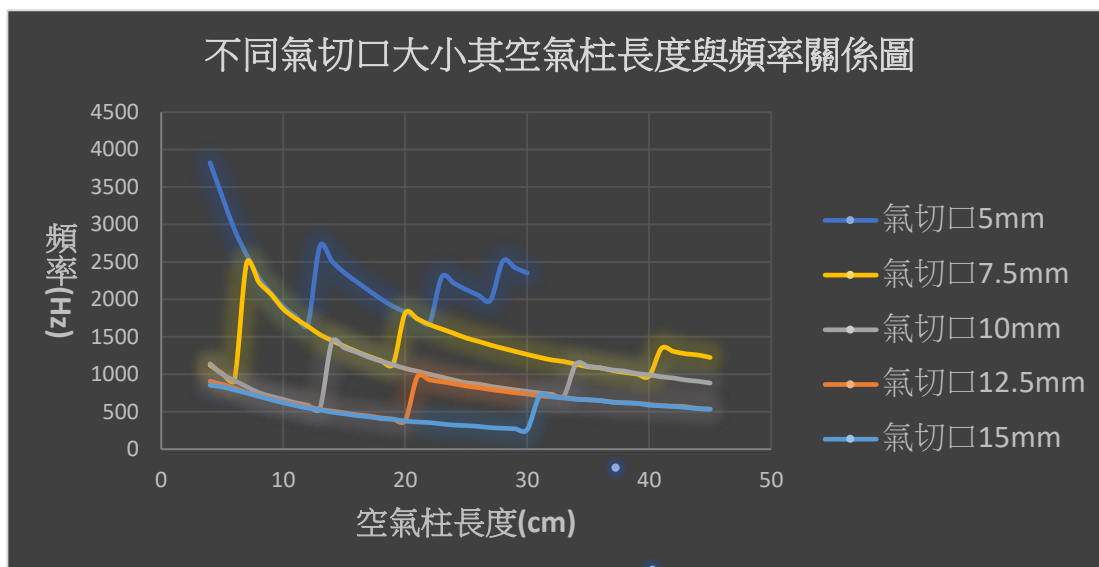
1. 分別以 4 種不同氣切口角度來測量空氣柱長度與音高的關係如圖十七，發現氣切角度在未發生音高躍升情況下幾乎不影響音高。
2. 氣切角度愈大重複出現音高躍升之現象愈少發生。



圖十七：不同氣切角度其空氣柱長度與音高的關係圖(數據：附件表十七)

(四) 氣切口大小

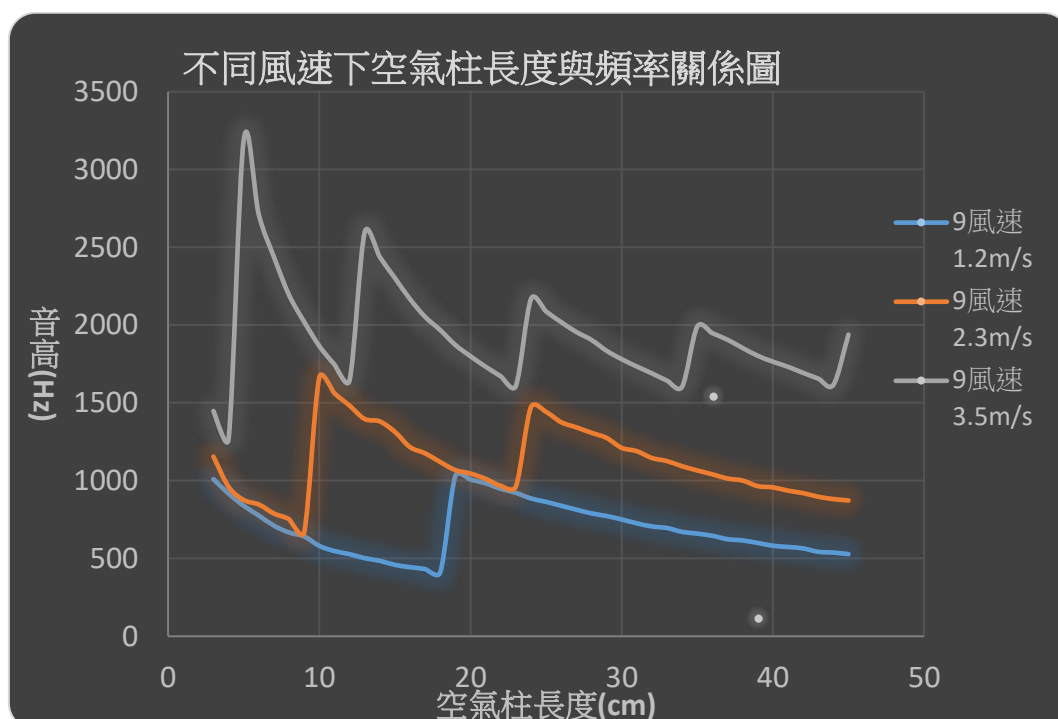
1. 分別以 5 種不同氣切口大小來測量空氣柱長度與音高的關係如圖十八，發現氣切口大小對音高影響不大。
2. 氣切口愈大重複出現音高躍升之現象愈少發生。



圖十八：不同氣切口大小其空氣柱長度與音高的關係圖(數據：附件表十八)

(五) 吹氣強度

1. 分別以 3 種不同吹氣風速來測量空氣柱長度與音高的關係如圖十九，發現風速愈小間隔重複出現音高躍升之次數愈少。我們推論這種階段重複出現音高躍升的現象是風速過大所造成，一般笛子由人力吹奏風速不像空壓機吹氣的強，因此看不到這種現象。
2. 圖十九中，風速 1.2m/s 與 2.3m/s 在空氣柱長 20 公分左右其頻率幾乎相等，顯示只要風速不造成音高躍升現象則風速對音高的影響不大。



圖十九：不同風速其空氣柱長度與音高的關係圖(數據：附件表十九)

三、探究笛音管音高躍升現象

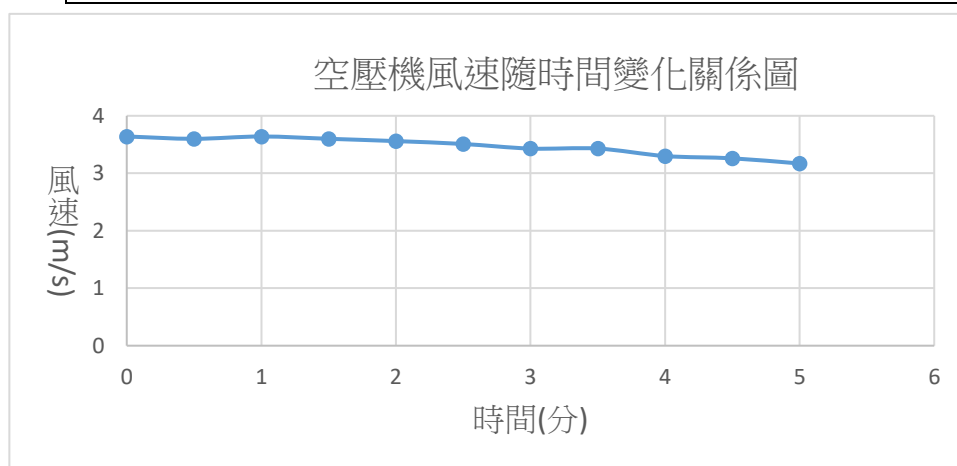
(一) 空壓機穩定度的影響

1. 檢測空壓機的穩定度：

- (1) 設定空壓機以約 3.5m/s 風速吹氣，每 30 秒測風速一次，連續 5 分鐘，數據如表二十，關係圖如圖二十空壓機風速隨時間變化關係圖：
- (2) 空壓機吹氣時間愈長的確有漸弱的趨勢。

表二十空壓機風速隨時間的變化

時間(分)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
風速(m/s)	3.64	3.6	3.64	3.6	3.56	3.51	3.43	3.43	3.3	3.26	3.17
平均風速(m/s)：3.47			標準差：0.16				變異係數：4.70%				



圖二十：空壓機風速隨時間變化關係圖

2. 空壓機持續吹氣對音高的影響：

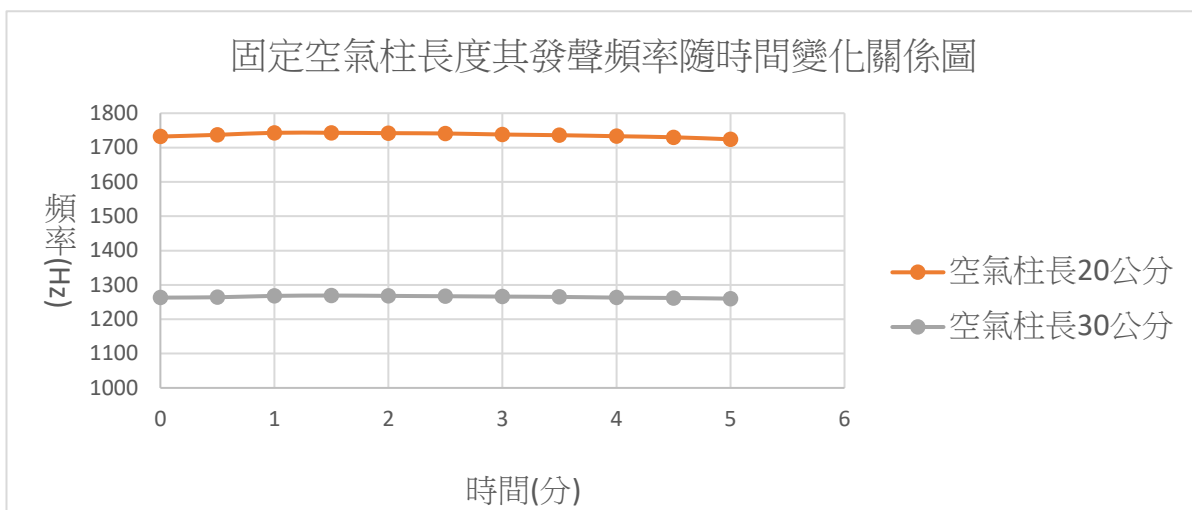
- (1) 空壓機持續吹氣氣流漸弱，但對音高影響多大？
- (2) 固定空氣柱長度，空壓機連續吹氣 5 分鐘，每隔 30 秒紀錄音高一次得數據如下：

① 空氣柱長 20cm：

時間(分)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
頻率(Hz)	1732	1737	1743	1743	1742	1741	1738	1736	1733	1730	1724
頻率平均 1736.27Hz			標準差 6.07				變異係數 0.35%				

② 空氣柱長 30cm：

時間(分)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
頻率(Hz)	1263	1264	1268	1269	1268	1267	1266	1265	1263	1262	1260
頻率平均 1265.00 Hz			標準差 2.86				變異係數 0.23%				

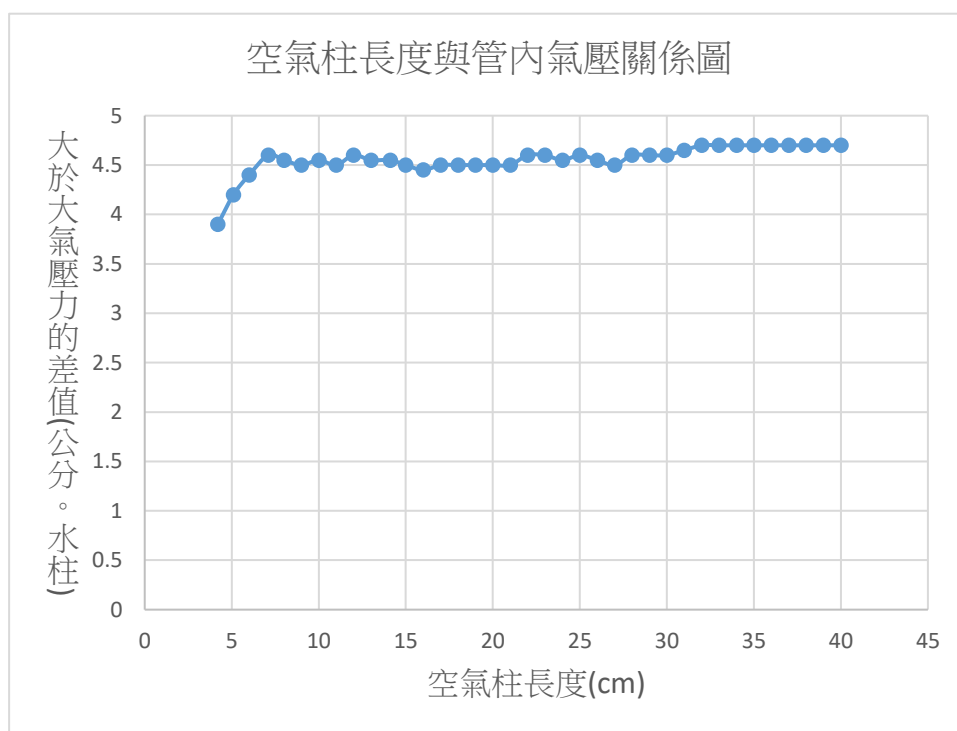


圖二十一：固定空氣柱長度其發聲頻率隨時間變化關係圖

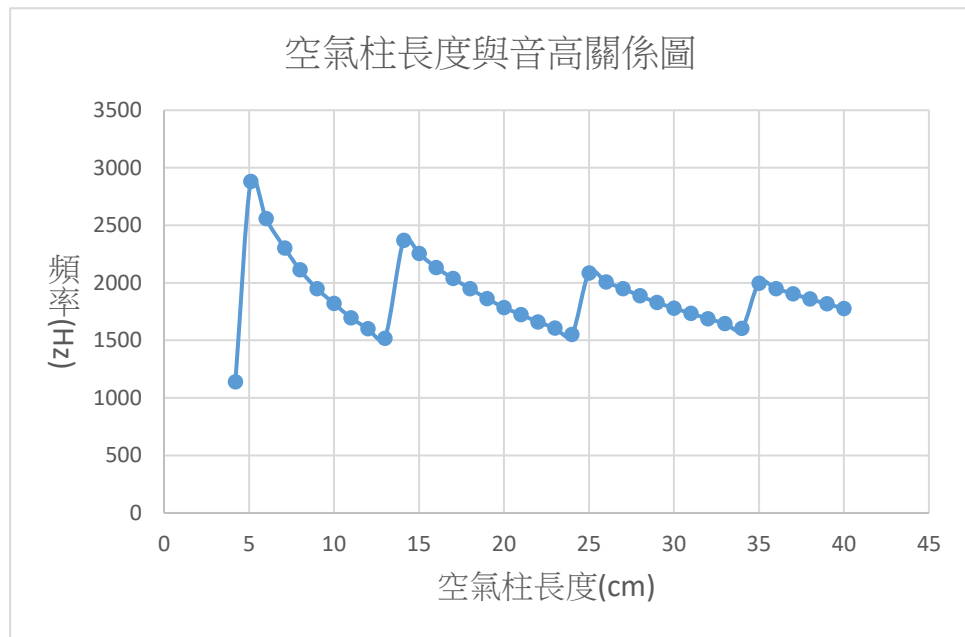
(3) 由圖二十一可知，空壓機持續吹氣雖然不穩定，但在有限時間內對頻率的影響很小，而且在實際操作上吹奏音階時間更短，因此可忽略空壓機氣流不穩定對音高的影響。

(二) 笛音管內的氣壓的影響

1. 利用方法一連通管兩管內水柱高度差測笛音管內氣壓，得圖二十二空氣柱長度與管內氣壓關係圖，另同時分析音高得圖二十三空氣柱長度與音高關係圖

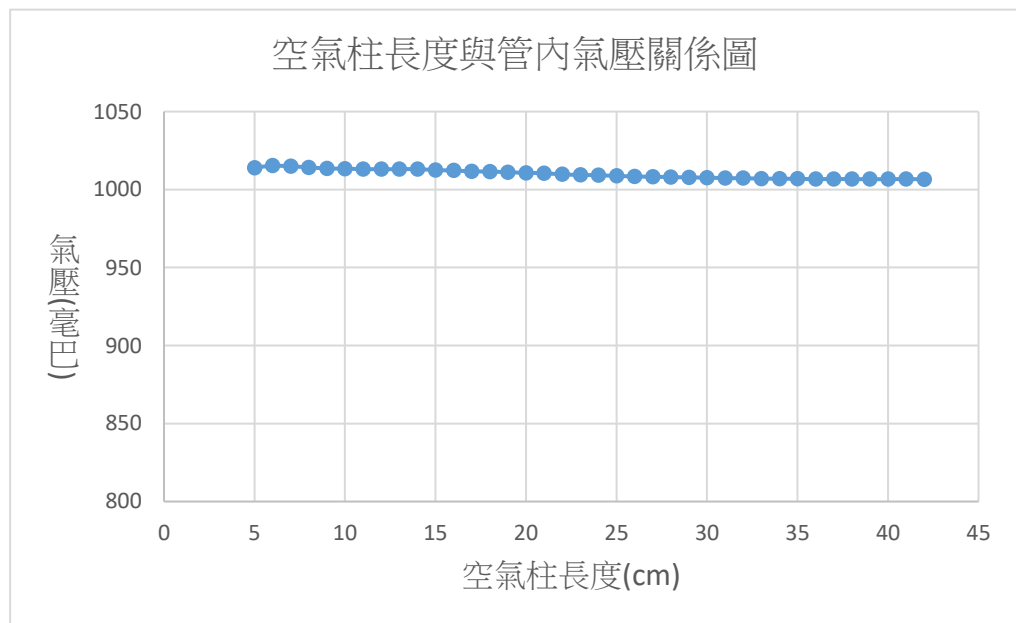


圖二十二空氣柱長度與管內氣壓關係圖(數據於附件表二十二)

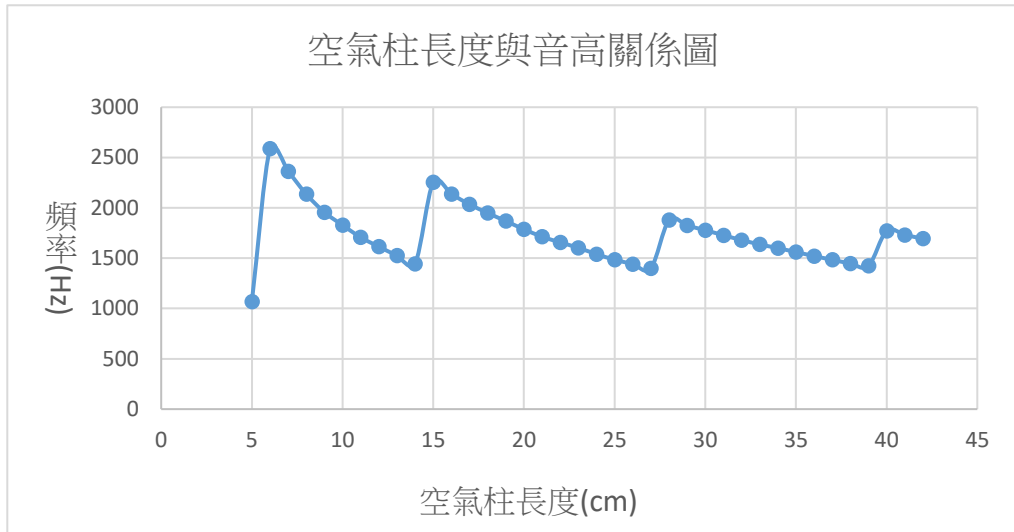


圖二十三空氣柱長度與音高關係圖(數據於附件表二十二)

- 用方法二氣壓感測模組加上 arduino 開發板測笛音管內氣壓，得圖二十四空氣柱長度與管內氣壓關係圖，另同時分析音高得圖二十五空氣柱長度與音高關係圖



圖二十四空氣柱長度與管內氣壓關係圖(數據於附件表二十四)

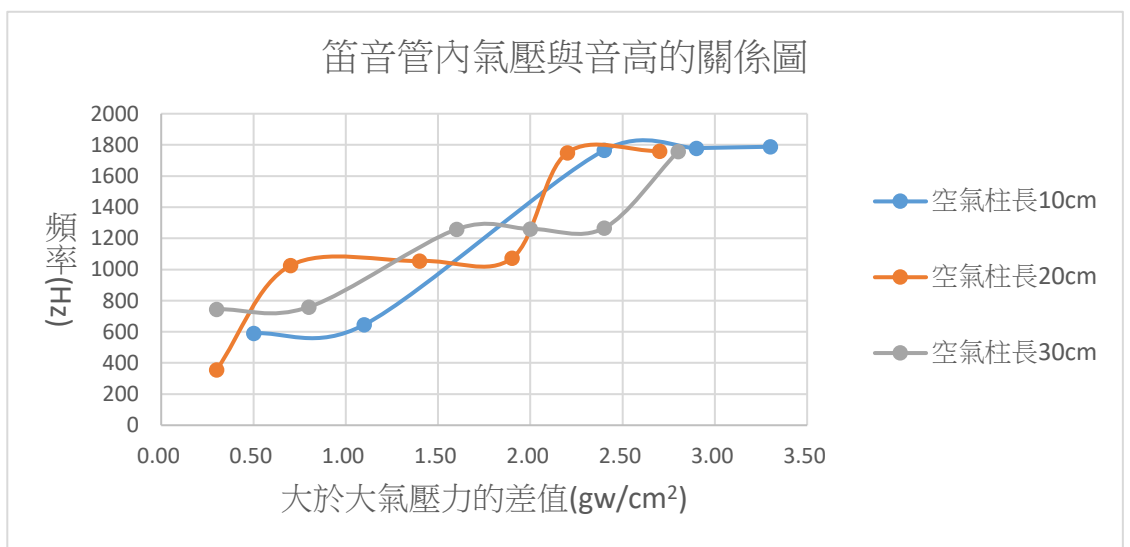


圖二十五空氣柱長度與音高關係圖(數據於附件表二十四)

3. 上列 2 個方法觀測笛音管內氣壓與空氣柱長度以及音高的關係，都無法解釋音高躍升現象。

(三) 風速的影響：

1. 固定空氣柱長度，改變風量，觀測笛音管內氣壓與音高的關係，結果如圖二十六。圖二十六中以橘色數據(空氣柱長 20cm)為例說明，笛音管內氣體壓力大於大氣壓力 0.6 公分水柱後繼續加大空氣量使氣壓大於大氣壓力 2 公分水柱前，其頻率變化不大，但風量使氣壓大於大氣壓力 2 公分水柱以上，其頻率會突然躍升，顯示風量過大時，不同的空氣柱長度會在超過某一量值下發生音高突然躍升現象。沒發生躍升之前氣壓大小對音高影響很小。



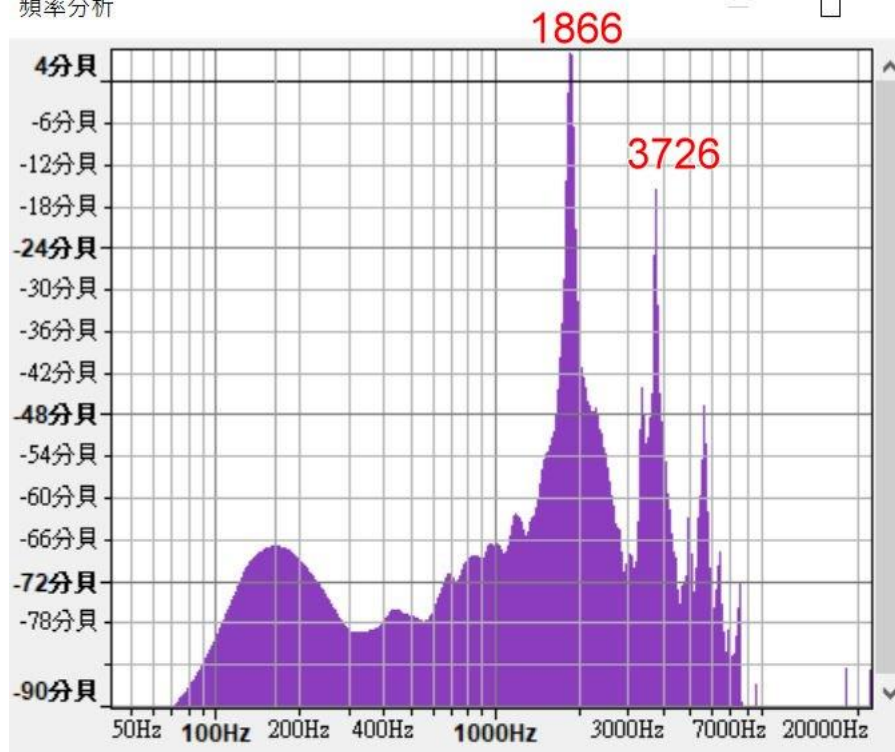
圖二十六笛音管內氣壓與音高的關係圖(數據於附件表二十六)

陸、討論

一、為什麼空氣柱長度逐漸增加後會發生如圖十三，音高會突然躍升現象？

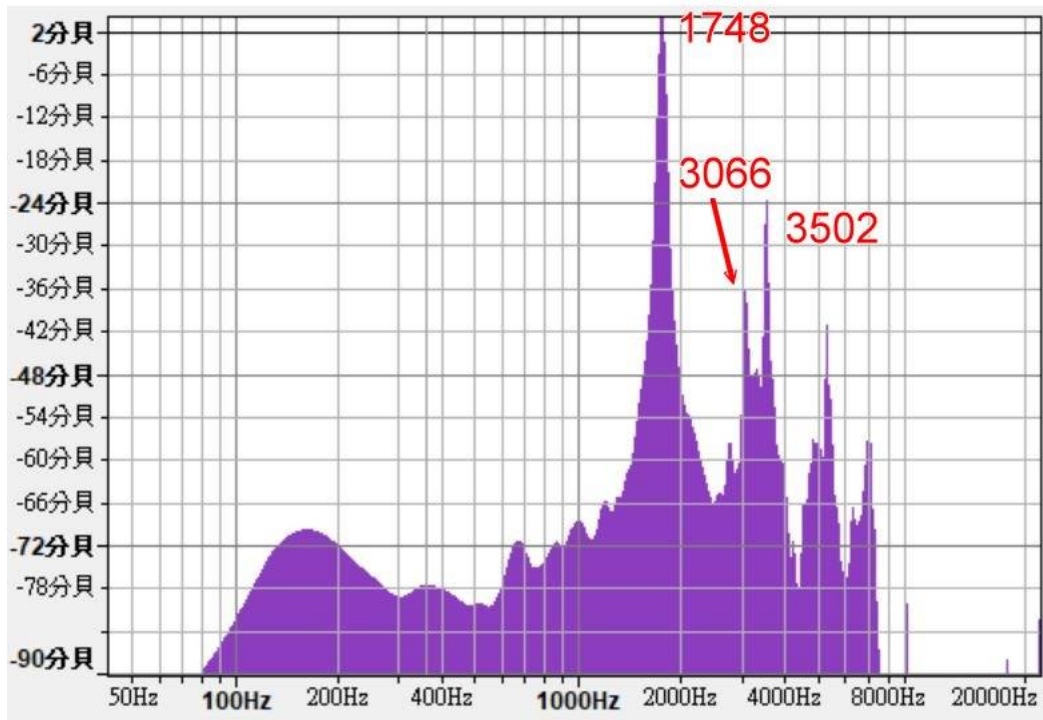
- (一) 原本懷疑是空壓機不穩定的氣流造成，但由圖二十一可知，空壓機不穩定的氣流對音高的影響可忽略。
- (二) 另外猜測當音高躍升發生時笛音管內氣壓可能會有一些變動，但由圖二十二及圖二十三、圖二十四及圖二十五可知，當音高躍升發生時笛音管內氣壓並無明顯變化。
- (三) 風速大當然笛音管內氣壓就愈大，但在一定的風速下當逐漸增長空氣柱長度，並不會有明顯氣壓變化，圖二十六可發現，當風量過大時不同的空氣柱長度都可能發生音高躍升，只是發生的壓力值看不出規則，需要下面進一步的分析。
- (四) 由圖十七發現氣切角度愈大，分流到管內的空氣量相對減少，類似風速降低的效果。由圖十八發現氣切口愈大，累積管內的空氣量相對減少，也有類似風速降低的效果。
- (五) 我們仔細分析發生躍升現象之鄰近空氣柱長度發聲的頻譜如圖二十七~圖三十一，其中發生躍升現象的是在空氣柱長度 13 公分時(圖三十)。圖二十七是空氣柱長度 10 公分時的頻譜圖，這是一般正常頻譜可看到基音響度較大，而其泛音頻率為基音的 2 倍。圖二十八是空氣柱長度 11 公分時的頻譜圖，可看到除了基音 1748Hz 及 2 倍泛音 3502Hz 外，中間出現了 3066Hz 的頻率。圖二十九是空氣柱長度 12 公分時的頻譜圖，可看到基音及 2 倍泛音之間出現其他頻率且響度比重更大了。到了圖三十(空氣柱長度 13 公分時的頻譜圖)，躍升頻率響度搶過基音頻率，即發生音高躍升現象。圖三十一是空氣柱長度 14 公分時的頻譜圖，躍升確定，只看到躍升後之基音與 2 倍泛音。

頻率分析

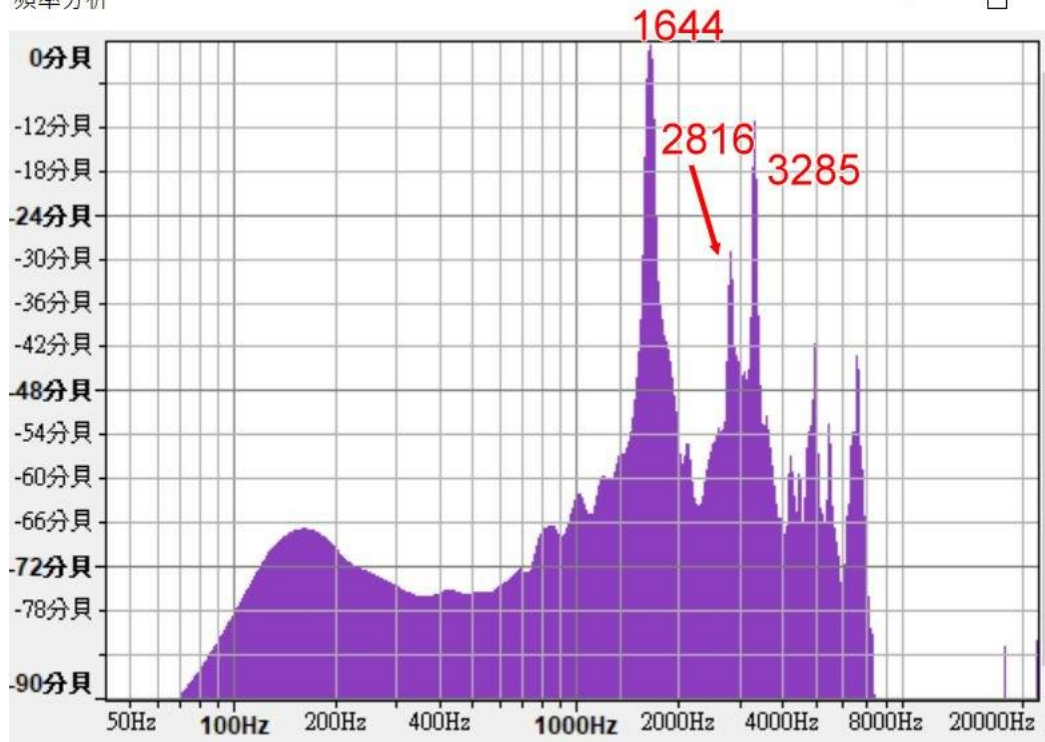


圖二十七：空氣柱長度 10 公分時的頻譜圖

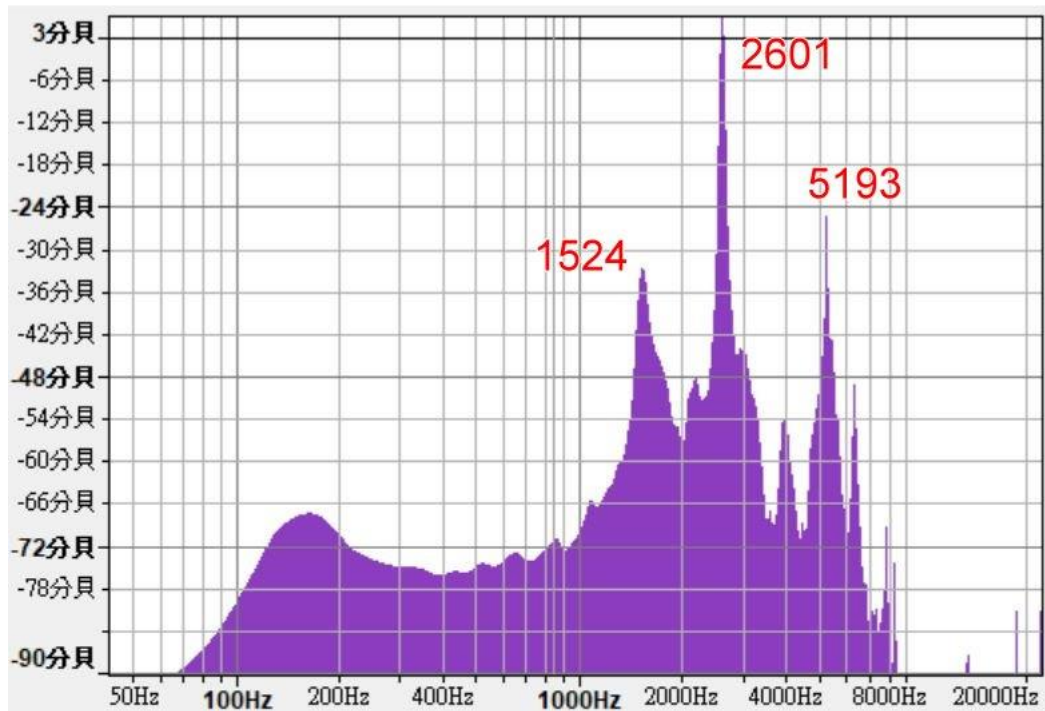
頻率分析



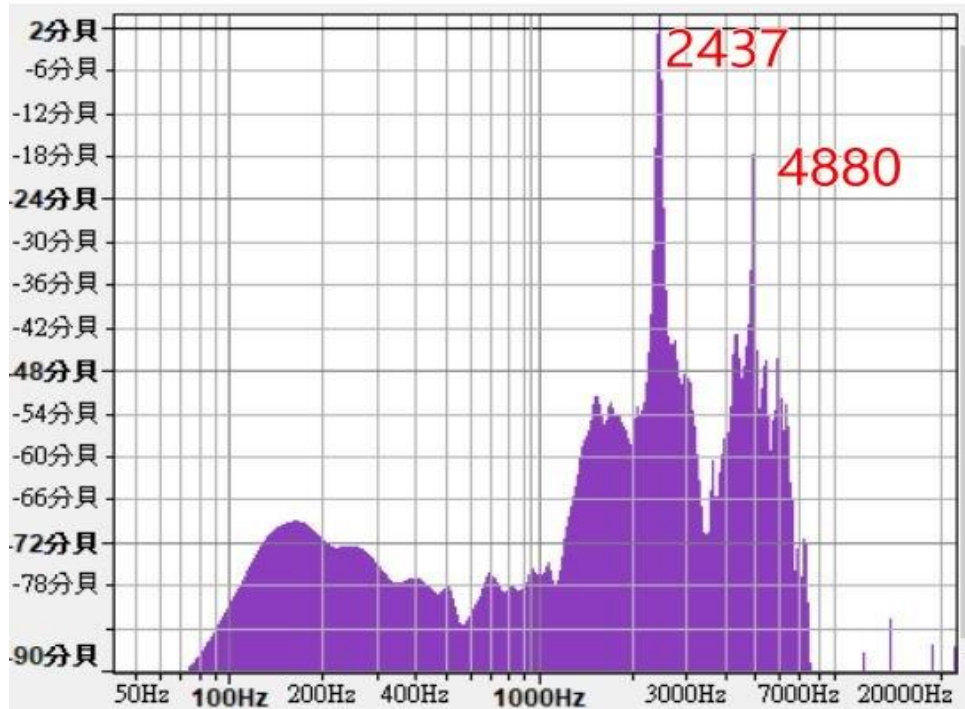
圖二十八：空氣柱長度 11 公分時的頻譜圖



圖二十九：空氣柱長度 12 公分時的頻譜圖



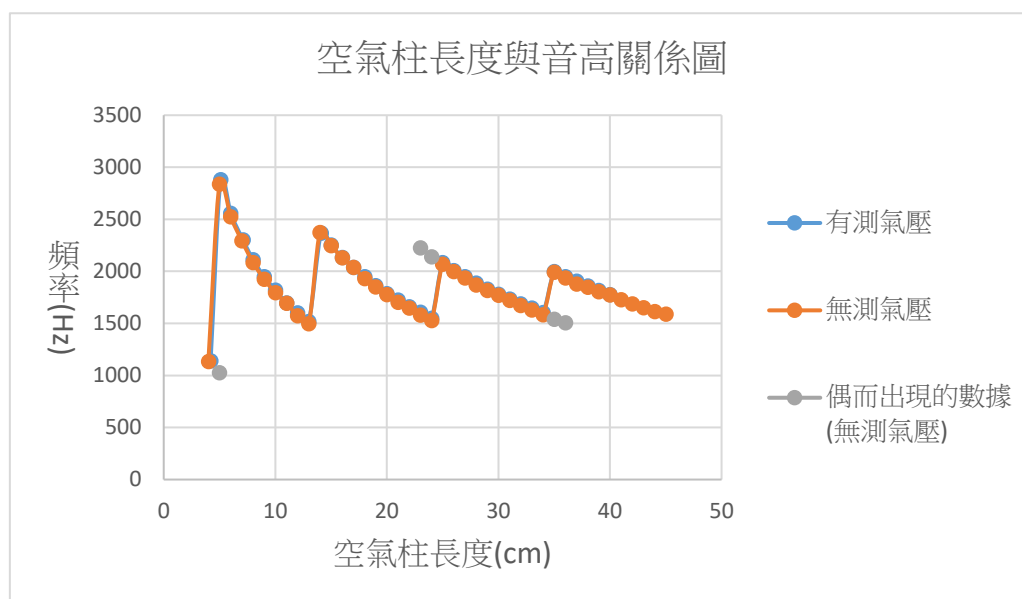
圖三十：空氣柱長度 13 公分時的頻譜圖



圖三十一：空氣柱長度 14 公分時的頻譜圖

(六) 由圖十九發現風速愈大，造成音高躍升現象愈頻繁，說明音高躍升現象應是由於風速所造成，圖二十六也可證實。但在一定風速下，空氣柱多長時會發生音高躍升？

1. 我們重新再仔細多作幾次測量，逐漸增加空氣柱長度，以一定風量吹奏笛音管，分析其音高得到空氣柱長度與音高關係圖如圖三十二。
2. 這是利用兩種方式得到的數據，藍色的是利用連通管一邊讀出氣壓一邊分析頻率，橘色的只用單獨的笛音管，未進行氣壓測量。我們發現兩個數據重疊性相當高，兩個方法得到的結果具有一致性。
3. 圖三十二中灰色的數據點是在多次測量中偶而出現的數據，音高躍升大部分出現在空氣柱長 25 公分，偶而會提早到 23 公分，事實上在 23~25 公分之間若對笛音管氣切口以手指稍堵塞一下，讓氣流有一點變化很容易就造成音高躍升現象。我們推論這時是處於一個不穩定平衡的臨界點。



圖三十二：空氣柱長度與音高關係圖(數據於附件表三十二)

4. 進一步分析其中一組數據，其中理論空氣柱長度 L' 計算如下：

(1)空氣柱長 14 公分前根據兩端都封閉的駐波理論 $L'=1/2 \lambda$

$L'=1/2 * v/f$ ， v 為聲速，當時室溫約 30°C ， $v=349\text{m/s}$ 。 f 為頻率 λ 波長。

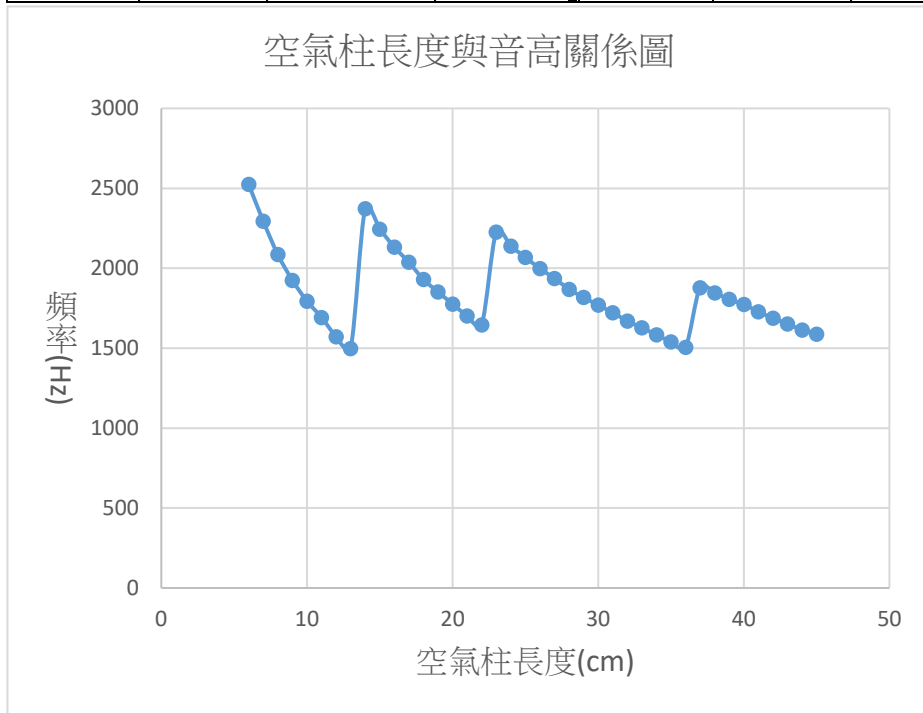
(2)空氣柱長 14~22 公分躍升後， $L'=\lambda$ ， $L'=v/f$

(3)空氣柱長 23~36 公分第二次躍升後， $L'=3/2 \lambda$ ， $L'=3/2*v/f$

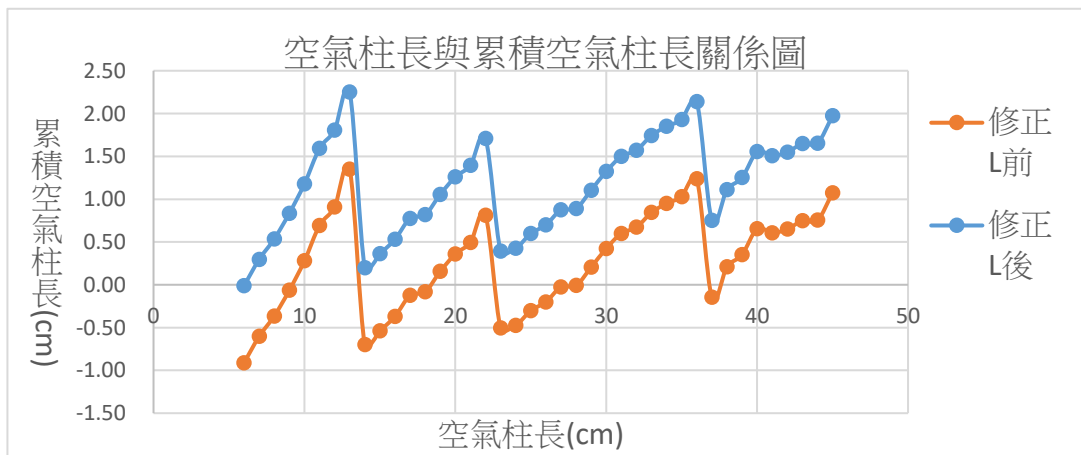
(4)空氣柱長 37~45 公分第三次躍升後， $L'=2 \lambda$ ， $L'=2*v/f$

空氣柱長 $L(\text{cm})$	頻率(Hz)	理論空氣柱長 $L'(\text{cm})$	累積空氣柱長 $\Delta L=L-L'(\text{cm})$	空氣柱長 $L(\text{cm})$	頻率(Hz)	理論空氣柱長 $L'(\text{cm})$	累積空氣柱長 $\Delta L=L-L'(\text{cm})$
6	2525	6.91	-0.91	26	1998	26.20	-0.20
7	2295	7.60	-0.60	27	1937	27.03	-0.03
8	2086	8.37	-0.37	28	1869	28.01	-0.01
9	1925	9.06	-0.06	29	1818	28.80	0.20
10	1795	9.72	0.28	30	1770	29.58	0.42
11	1693	10.31	0.69	31	1722	30.40	0.60
12	1573	11.09	0.91	32	1671	31.33	0.67
13	1498	11.65	1.35	33	1628	32.16	0.84
14	2374	14.70	-0.70	34	1584	33.05	0.95
15	2246	15.54	-0.54	35	1541	33.97	1.03
16	2132	16.37	-0.37	36	1506	34.76	1.24
17	2038	17.12	-0.12	37	1879	37.15	-0.15
18	1930	18.08	-0.08	38	1847	37.79	0.21

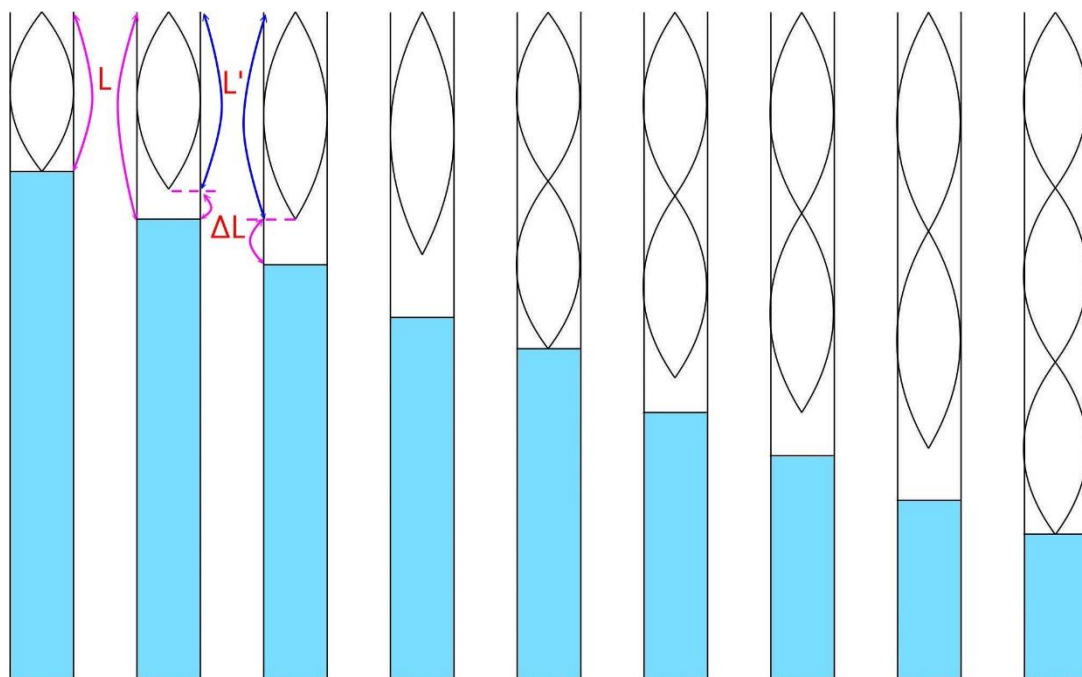
空氣柱長 L(cm)	頻率(Hz)	理論空氣柱長 L'(cm)	累積空氣柱長 $\Delta L = L - L'$ (cm)	空氣柱長 L(cm)	頻率(Hz)	理論空氣柱長 L'(cm)	累積空氣柱長 $\Delta L = L - L'$ (cm)
19	1852	18.84	0.16	39	1806	38.65	0.35
20	1777	19.64	0.36	40	1774	39.35	0.65
21	1702	20.51	0.49	41	1728	40.39	0.61
22	1647	21.19	0.81	42	1688	41.35	0.65
23	2227	23.51	-0.51	43	1652	42.25	0.75
24	2139	24.47	-0.47	44	1614	43.25	0.75
25	2069	25.30	-0.30	45	1589	43.93	1.07



圖三十三空氣柱長度與音高關係圖

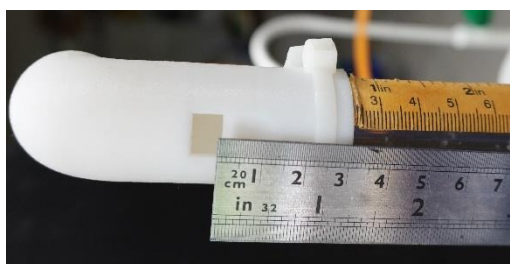


圖三十四空氣柱長與累積空氣柱長關係圖



圖三十五空氣柱累積及音高躍升示意圖

5. 圖三十四空氣柱長與累積空氣柱長關係圖中，累積空氣柱長之所以有負值(橘色圖，修正 L 前)，原因是量度空氣柱長度起點差異所造成，經檢視我們的笛音管量度



圖三十六空氣柱長度須修正增加 0.9 公分

起點應修正增加 0.9 公分長如右圖三十六。故修正 L 後如藍色圖，其趨勢是相同的。比對圖三十四與圖三十三可知，音高躍升現象的發生即因空氣柱逐漸累積，累積到一定程度達到最不穩定狀態便發生音高躍升現象，其結果可以以圖三十五示意圖說明。

柒、結論

- 一、本研究之笛音管發聲模式，以泛音之存在符合駐波理論，其駐波模式應為兩端封閉之空氣柱(因存在 2 倍泛音)。
- 二、由圖三十五可說明音高躍升現象的發生是因空氣柱逐漸增長後，波長變長音高變低同時有部分空氣開始累積，空氣累積愈來愈長，最後累積到一定程度達到不穩定狀態，便發生波長變短音高變高的倍頻音高躍升現象。

三、本研究最終欲製作自動演奏之笛音管，經由各項變因之深入探討，為避免音高躍升現象，必須降低風速，但降低風速會使音量變小，共振聲音也較不飽滿，因此必須搭配氣切角度變大以及增大氣切口。為了有較好的音質及演奏至少 21 個音階，我們以三支壓克力管搭配不同氣切口大小組合成我們的自動笛音管演奏器。根據圖十八(不同氣切口大小其空氣柱長度與音高關係圖)可知，選用 21mm 口徑壓克力管 3 支，氣切角度 15 度，氣切口大小分別為 7.5、10、12.5mm 長，寬 10mm，風速 3.4m/s，這樣的組合就可以吹奏頻率涵蓋 536~2231Hz，共有 4 個八度音可以使用，一般歌曲演奏應是綽綽有餘。

捌、參考資料及其他方法

- 一、中華民國第 50 屆科學展覽會（2009），高中組物理科(作者：許婷)，「腔體共振之探討」。
- 二、中華民國第 28 屆科學展覽會（1988），國中組物理科(作者：胡長松、吳唐林)，氣體壓力的變化會影響聲音的傳播速度嗎？
- 三、江文馨、林佳燕、陳怡文、陳怡雯（2003）。先聲奪人—從共鳴管到共振子。全國科學展覽會，高中組，物理科。

● 附件：

一、空氣柱長度對音高的影響(表十三)

9 風速 3.5m/s	
空氣柱長度 (cm)	頻率(Hz)
3	1448
4	1269
5	3187
6	2710
7	2438
8	2193
9	2021
10	1866
11	1747
12	1644
13	2596
14	2438
15	2303
16	2167
17	2053
18	1968
19	1872
20	1800
21	1733
22	1671
23	1609
24	2168
25	2088
26	2019
27	1956
28	1905
29	1835
30	1781
31	1734
32	1690
33	1643
34	1604
35	1991
36	1948
37	1906
38	1853
39	1803
40	1765
41	1732
42	1693
43	1656
44	1616
45	1939

二、空氣柱長度倒數與音高的關係(表十四)

空氣柱長度 L(cm)	頻率(Hz)	1/L (1/cm)	1/L 平方根
3	1448	33.33	5.77
4	1269	25.00	5.00
5	3187	20.00	4.47
6	2710	16.67	4.08
7	2438	14.29	3.78
8	2193	12.50	3.54
9	2021	11.11	3.33
10	1866	10.00	3.16
11	1747	9.09	3.02
12	1644	8.33	2.89
13	2596	7.69	2.77
14	2438	7.14	2.67
15	2303	6.67	2.58
16	2167	6.25	2.50
17	2053	5.88	2.43
18	1968	5.56	2.36
19	1872	5.26	2.29
20	1800	5.00	2.24
21	1733	4.76	2.18
22	1671	4.55	2.13
23	1609	4.35	2.09
24	2168	4.17	2.04
25	2088	4.00	2.00
26	2019	3.85	1.96
27	1956	3.70	1.92
28	1905	3.57	1.89
29	1835	3.45	1.86
30	1781	3.33	1.83
31	1734	3.23	1.80
32	1690	3.13	1.77
33	1643	3.03	1.74
34	1604	2.94	1.71
35	1991	2.86	1.69
36	1948	2.78	1.67
37	1906	2.70	1.64
38	1853	2.63	1.62
39	1803	2.56	1.60
40	1765	2.50	1.58
41	1732	2.44	1.56
42	1693	2.38	1.54
43	1656	2.33	1.52
44	1616	2.27	1.51
45	1939	2.22	1.49

三、不同笛音管口徑其空氣柱長度與音高的關係(表十六)

管徑大小	16.2 mm	21 mm	26.2 mm	31 mm	36 mm
空氣柱長度 (cm)	頻率 (Hz)	頻率 (Hz)	頻率 (Hz)	頻率 (Hz)	頻率 (Hz)
7	926	882			
8	1865	2149	2222		
9	1706	1991	2051		
10	1584	1830	1883		1969
11	1489	1703	1738		1865
12	1408	1602	1607	1627	1739
13	1352	1514	1500	1534	1626
14	1301	1432	1407	1445	1518
15	1255	1357	1337	1365	1404
16	1210	1296	1263	1284	1314
17	1172	1227	1189	1225	1248
18	1132	1177	1140	1182	1175
19	1095	1133	1092	1151	1159
20	1061	1090	1039	1136	1172
21	1033	1048	1003	1159	1184
22	1001	1007	962	1191	1233
23	972	969	926	1225	1256
24	1408	935	892	2196	1604
25	1374	1472	869	2129	1532
26	1348	1419	1419	2054	1479
27	1315	1381	1372	1993	1430
28	1286	1336	1341	1921	1369
29	1260	1302	1301	1865	1323
30	1227	1264	1260	1813	1276
31	1202	1227	1222	1754	1233
32	1178	1200	1184	1701	1194
33	1151	1174	1153	1655	1163
34	1131	1143	1130	1608	1130
35	1102	1138	1095	1565	1097
36	1088	1105	1067	1523	1066
37	1059	1471	1474	1480	1044
38	1367	1435	1434	1444	1011
39	1345	1399	1396		984
40	1314	1371	1360		962
41	1298	1345	1336		936
42	1267	1313	1304		1316
43	1247	1287	1271		1296
44	1222	1261	1253		1263
45	1200	1232	1222		1234

四、不同氣切角度其空氣柱長度與音高的關係(表十七)

氣切角度	10 度	20 度	30 度	40 度
空氣柱長度 (cm)	頻率 (Hz)	頻率 (Hz)	頻率 (Hz)	頻率 (Hz)
3	1185	1156	1214	1227
5	946	925	971	921
7	795	741	825	760
9	676	656	701	667
11	575	576	579	576
13	510	527	530	523
15	1342	1339	1357	1356
17	1215	1216	1223	1223
19	1101	1104	1104	1104
21	1010	1015	1024	1021
23	935	942	955	957
25	876	883	890	879
27	1375	833	828	831
29	1301	767	785	782
31	1221	735	744	742
33	1156	702	699	703
35	1098	1095	666	660
37	1473	1046	1052	631
39	992	1002	1004	599
41	952	949	962	575
43	1271	915	916	548
45	872	1223	1227	530

五、不同氣切口大小其空氣柱長度與音高的關係(表十八)

氣切口高度	15 mm	12.5 mm	10 mm	7.5 mm	5 mm
空氣柱長度(cm)	頻率(Hz)	頻率(Hz)	頻率(Hz)	頻率(Hz)	頻率(Hz)
4	855	908	1140	1121	3825
5	831	866	1001	1010	3375
6	792	817	917	922	2934
7	750	758	834	2485	2594
8	704	715	755	2231	2293
9	661	673	706	2068	2085
10	621	630	665	1873	1908
11	582	599	620	1746	1780
12	550	570	588	1643	1657
13	526	531	539	1531	2711
14	494	509	1440	1450	2509
15	473	487	1354	1375	2359
16	449	461	1297	1305	2238
17	433	444	1230	1241	2121
18	409	419	1177	1184	2007
19	398	402	1129	1134	1907
20	376	381	1077	1820	1832
21	363	969	1041	1739	1748
22	355	926	1000	1663	1690
23	337	900	962	1604	2303
24	322	874	923	1546	2215
25	315	843	887	1485	2131
26	304	822	870	1440	2056
27	288	796	839	1390	1992
28	280	776	815	1347	2510
29	272	753	791	1306	2424
30	262	737	772	1265	2352
31	706	713	750	1227	
32	700	702	733	1192	
33	684	693	710	1170	
34	668	669	1136	1134	
35	660	659	1107	1100	
36	649	650	1087	1086	
37	627	629	1057	1050	
38	618	620	1043	1025	
39	613	612	1009	1003	
40	588	597	993	977	
41	579	581	966	1345	
42	570	574	950	1305	
43	557	568	923	1273	
44	541	543	907	1258	
45	534	536	883	1224	

六、不同風速其空氣柱長度與音高的關係(表十九)

風速			1.2m/s	2.3m/s	3.5m/s
空氣柱長度 L(cm)	1/L (1/m)	(1/L)平方根	頻率(Hz)	頻率(Hz)	頻率(Hz)
3	33.33	5.77	1010	1155	1448
4	25.00	5.00	917	961	1269
5	20.00	4.47	839	876	3187
6	16.67	4.08	776	847	2710
7	14.29	3.78	711	789	2438
8	12.50	3.54	667	752	2193
9	11.11	3.33	642	667	2021
10	10.00	3.16	581	1665	1866
11	9.09	3.02	548	1562	1747
12	8.33	2.89	528	1483	1644
13	7.69	2.77	502	1397	2596
14	7.14	2.67	485	1381	2438
15	6.67	2.58	459	1314	2303
16	6.25	2.50	444	1216	2167
17	5.88	2.43	432	1176	2053
18	5.56	2.36	410	1120	1968
19	5.26	2.29	1031	1068	1872
20	5.00	2.24	1007	1046	1800
21	4.76	2.18	983	1012	1733
22	4.55	2.13	948	967	1671
23	4.35	2.09	922	962	1609
24	4.17	2.04	886	1474	2168
25	4.00	2.00	864	1442	2088
26	3.85	1.96	839	1376	2019
27	3.70	1.92	814	1343	1956
28	3.57	1.89	790	1308	1905
29	3.45	1.86	773	1275	1835
30	3.33	1.83	751	1211	1781
31	3.23	1.80	726	1190	1734
32	3.13	1.77	706	1146	1690
33	3.03	1.74	696	1126	1643
34	2.94	1.71	671	1093	1604
35	2.86	1.69	660	1066	1991
36	2.78	1.67	646	1041	1948
37	2.70	1.64	624	1014	1906
38	2.63	1.62	616	1001	1853
39	2.56	1.60	600	965	1803
40	2.50	1.58	582	957	1765
41	2.44	1.56	574	936	1732
42	2.38	1.54	565	920	1693
43	2.33	1.52	543	897	1656
44	2.27	1.51	538	882	1616
45	2.22	1.49	528	873	1939

七、空氣柱長度與管內氣壓及頻率的關係
(表二十二)

笛音管內水柱高(cm)	右管水柱高(cm)	壓力差(cm水柱)	頻率(Hz)
4.2	0.3	3.9	1139
5.1	0.9	4.2	2881
6	1.6	4.4	2557
7.1	2.5	4.6	2302
8	3.45	4.55	2112
9	4.5	4.5	1948
10	5.45	4.55	1821
11	6.5	4.5	1696
12	7.4	4.6	1602
13	8.45	4.55	1519
14.1	9.55	4.55	2369
15	10.5	4.5	2254
16	11.55	4.45	2133
17	12.5	4.5	2039
18	13.5	4.5	1950
19	14.5	4.5	1863
20	15.5	4.5	1786
21	16.5	4.5	1724
22	17.4	4.6	1660
23	18.4	4.6	1608
24	19.45	4.55	1550
25	20.4	4.6	2085
26	21.45	4.55	2008
27	22.5	4.5	1950
28	23.4	4.6	1887
29	24.4	4.6	1829
30	25.4	4.6	1780
31	26.35	4.65	1734
32	27.3	4.7	1688
33	28.3	4.7	1647
34	29.3	4.7	1604
35	30.3	4.7	1997
36	31.3	4.7	1950
37	32.3	4.7	1905
38	33.3	4.7	1859
39	34.3	4.7	1817
40	35.3	4.7	1777

八、空氣柱長度與管內氣壓及頻率的關係
(表二十四)

笛音管內水柱高(cm)	笛音管內氣壓(豪巴)	頻率(Hz)
5	1014.01	1068
6	1015.27	2588
7	1014.95	2364
8	1014.23	2136
9	1013.59	1956
10	1013.38	1828
11	1013.14	1707
12	1013.03	1614
13	1013.07	1526
14	1013.1	1444
15	1012.5	2256
16	1012.2	2138
17	1011.71	2035
18	1011.52	1949
19	1011.14	1869
20	1010.7	1787
21	1010.5	1714
22	1009.73	1657
23	1009.39	1603
24	1009.18	1540
25	1008.76	1485
26	1008.41	1442
27	1008.22	1399
28	1008.02	1878
29	1007.79	1824
30	1007.64	1778
31	1007.34	1728
32	1007.26	1680
33	1007.04	1637
34	1006.95	1600
35	1006.89	1561
36	1006.68	1521
37	1006.79	1484
38	1006.67	1448
39	1006.66	1423
40	1006.67	1772
41	1006.71	1731
42	1006.63	1694

九、固定空氣柱長，管內氣體壓力與音高關係(表二十六)

室溫：30.2°C、大氣壓力：1024.3gw/cm²

氣壓 (gw/cm ²)	左管內 水柱高 (cm)	笛音管內 水柱高 (cm)	笛音管內氣壓 大於大氣壓力 值(cm 水柱)	頻率(Hz)
1027.68	9.5	10	0.50	590
1028.292	8.9	10	1.10	645
1029.618	7.6	10	2.40	1765
1030.128	7.1	10	2.90	1779
1030.535	6.7	10	3.30	1788
1027.476	19.7	20	0.30	356
1027.884	19.3	20	0.70	1025
1028.598	18.6	20	1.40	1055
1029.108	18.1	20	1.90	1072
1029.414	17.8	20	2.20	1749
1029.924	17.3	20	2.70	1760
1027.476	29.7	30	0.30	745
1027.986	29.2	30	0.80	759
1028.802	28.4	30	1.60	1258
1029.21	28	30	2.00	1261
1029.618	27.6	30	2.40	1266
1030.026	27.2	30	2.80	1757

十、不同方法其空氣柱長度與音高的關係(表三十二)

連通管測氣壓				不測氣壓		
右管水柱高 (cm)	左管水柱高 (cm)	笛音管內氣壓 (大於大氣壓力 cm 水柱)	頻率(Hz)	空氣柱長 度(cm)	頻率(Hz)	偶出現異常 頻率(Hz)
4.2	0.3	3.9	1139	4	1133	
5.1	0.9	4.2	2881	5	2838	1028
6	1.6	4.4	2557	6	2525	
7.1	2.5	4.6	2302	7	2295	
8	3.45	4.55	2112	8	2086	
9	4.5	4.5	1948	9	1925	
10	5.45	4.55	1821	10	1795	
11	6.5	4.5	1696	11	1693	
12	7.4	4.6	1602	12	1573	
13	8.45	4.55	1519	13	1498	
14.1	9.55	4.55	2369	14	2374	
15	10.5	4.5	2254	15	2246	
16	11.55	4.45	2133	16	2132	
17	12.5	4.5	2039	17	2038	
18	13.5	4.5	1950	18	1930	
19	14.5	4.5	1863	19	1852	
20	15.5	4.5	1786	20	1777	
21	16.5	4.5	1724	21	1702	
22	17.4	4.6	1660	22	1647	
23	18.4	4.6	1608	23	1579	2227
24	19.45	4.55	1550	24	1529	2139
25	20.4	4.6	2085	25	2069	
26	21.45	4.55	2008	26	1998	
27	22.5	4.5	1950	27	1937	
28	23.4	4.6	1887	28	1869	
29	24.4	4.6	1829	29	1818	
30	25.4	4.6	1780	30	1770	
31	26.35	4.65	1734	31	1722	
32	27.3	4.7	1688	32	1671	
33	28.3	4.7	1647	33	1628	
34	29.3	4.7	1604	34	1584	
35	30.3	4.7	1997	35	1992	1541
36	31.3	4.7	1950	36	1938	1506
37	32.3	4.7	1905	37	1879	
38	33.3	4.7	1859	38	1847	
39	34.3	4.7	1817	39	1806	
40	35.3	4.7	1777	40	1774	
				41	1728	
				42	1688	
				43	1652	
				44	1614	
				45	1589	

【評語】 030106

研究中對於整體現象的觀察與實驗之設計都有詳盡的說明與科學化數字的分析。是一個相當詳盡的研究報告。提出的建議可以就他們所發現的狀況作出改善，相當值得鼓勵。

作品簡報



笛音管演奏器

國中組
物理科

研究問題- 笛音管演奏器找不到可用的低音階

利用空壓機吹奏笛音管，當逐漸增加空氣柱長度時，原本逐漸降低的音高會突然發生音高躍升現象，並間隔重複發生。

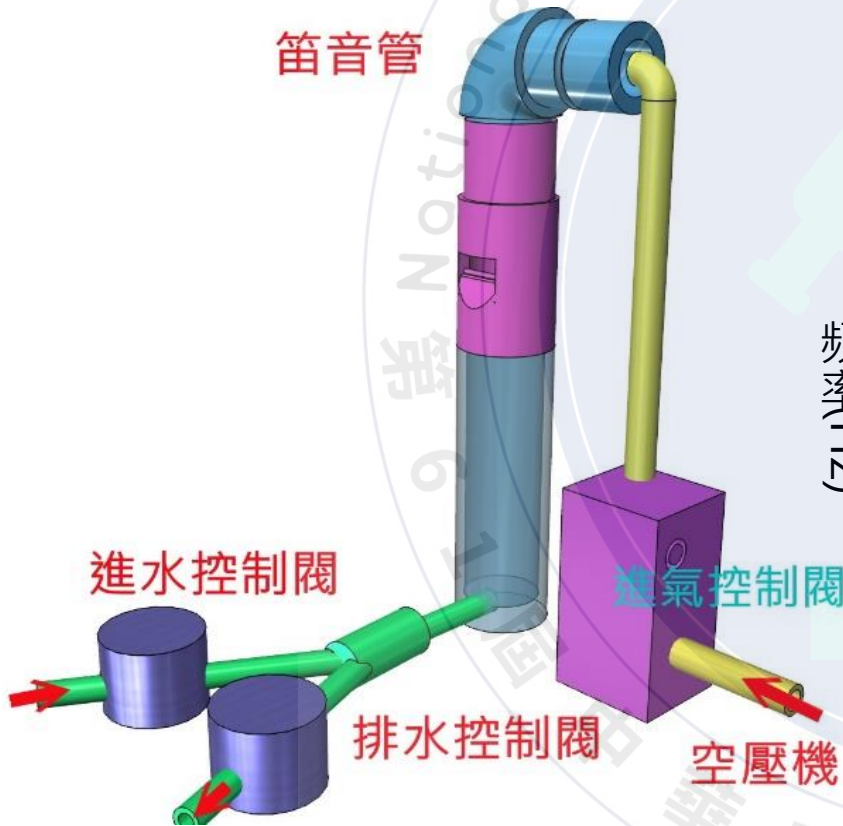


圖1、笛音管裝置示意圖

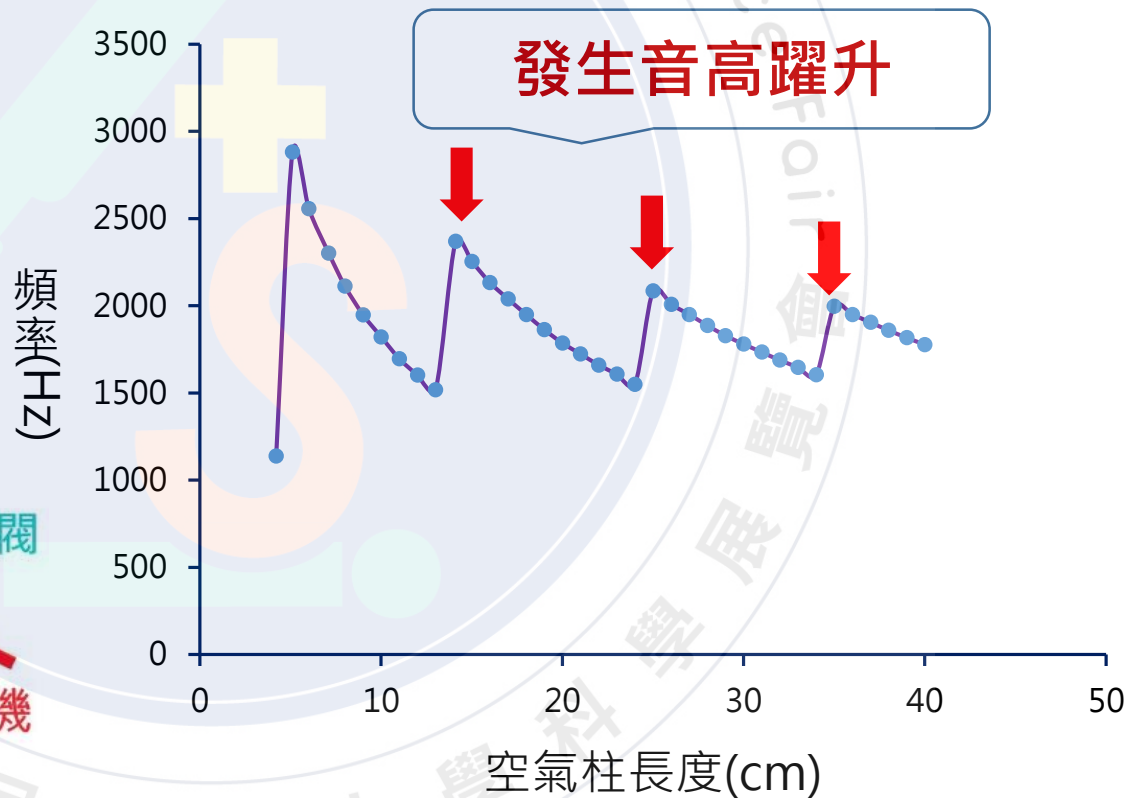


圖2、音高躍升現象

研究結果-探究笛音管的特性

圖3、不同管徑大小

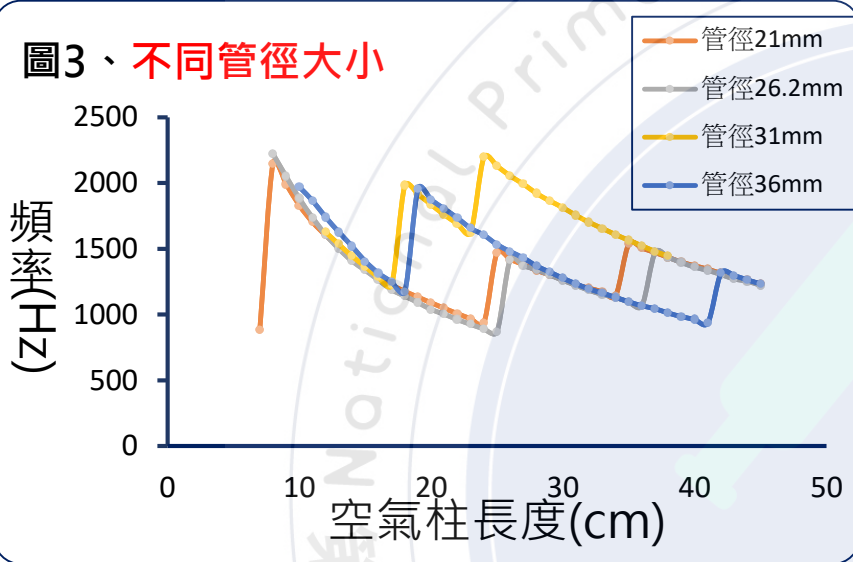


圖4、不同氣切角度

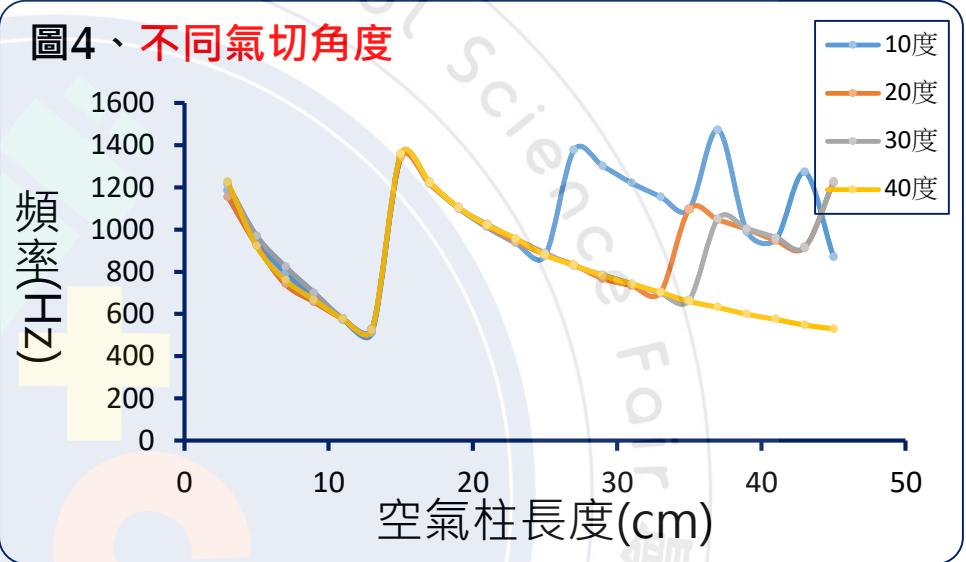


圖5、不同氣切口大小

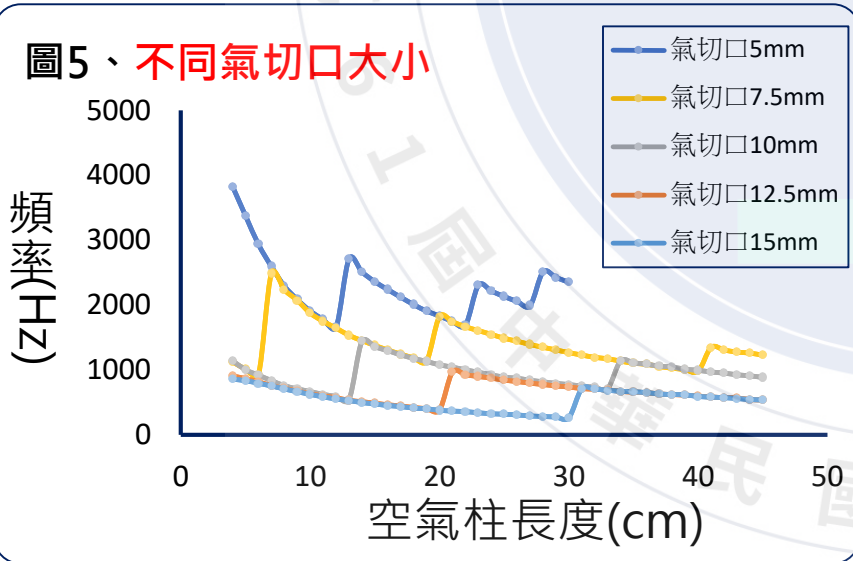
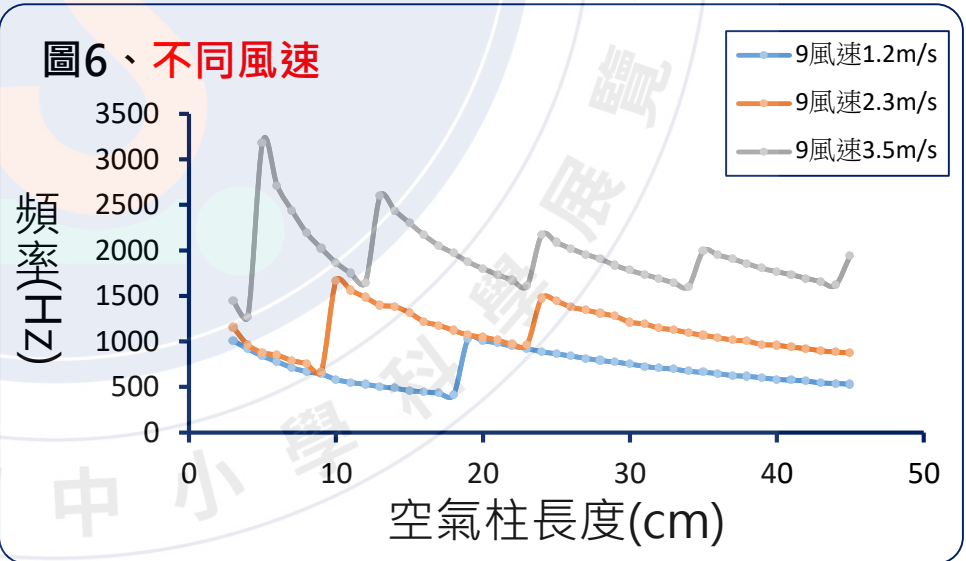


圖6、不同風速



研究結果-探究笛音管的特性

音高與空氣柱長度倒數
呈正相關，顯示符合駐
波理論。

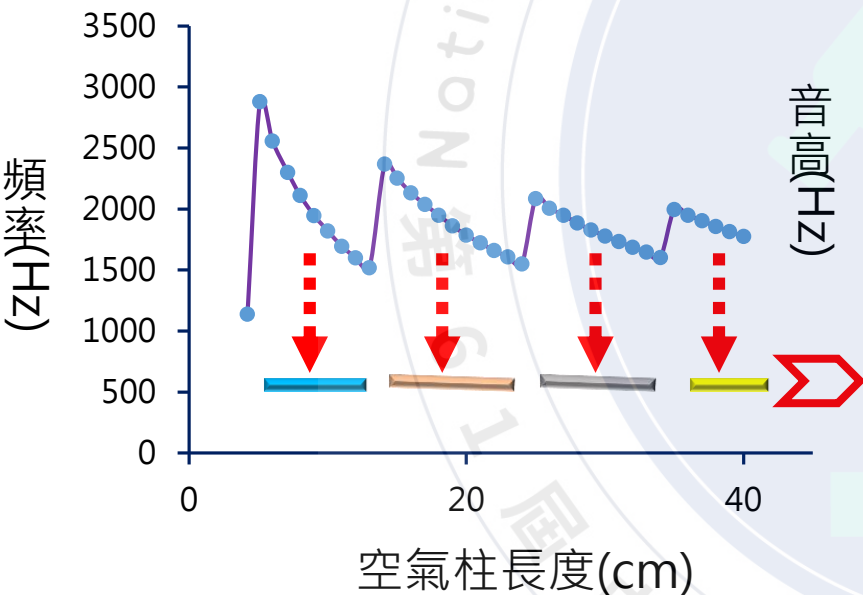


圖7、空氣柱長度與音高的關係圖

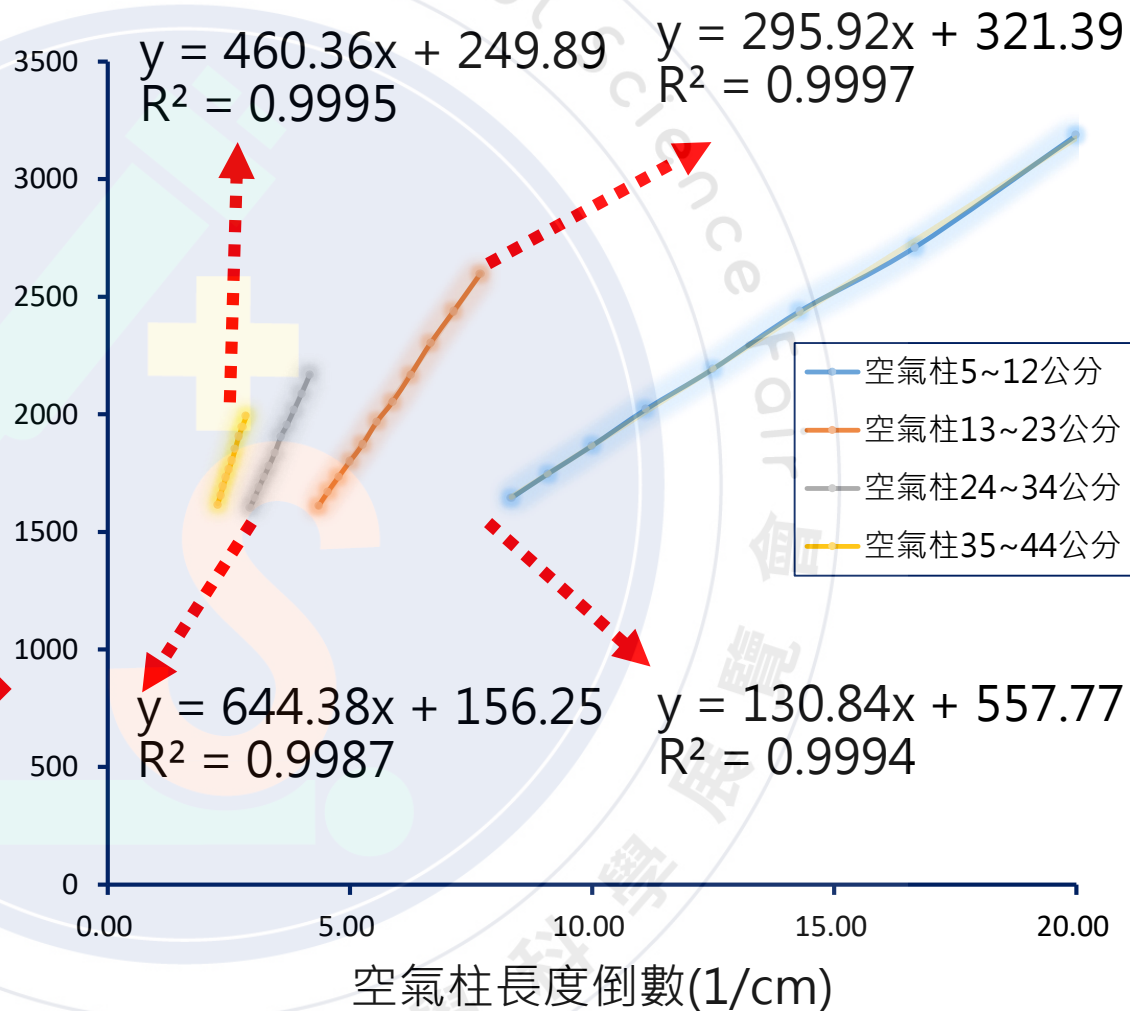


圖8、空氣柱長度倒數與音高的關係圖

研究結果-探究音高躍升的原因-空壓機

空壓機不穩定的風速與音高躍升現象無關

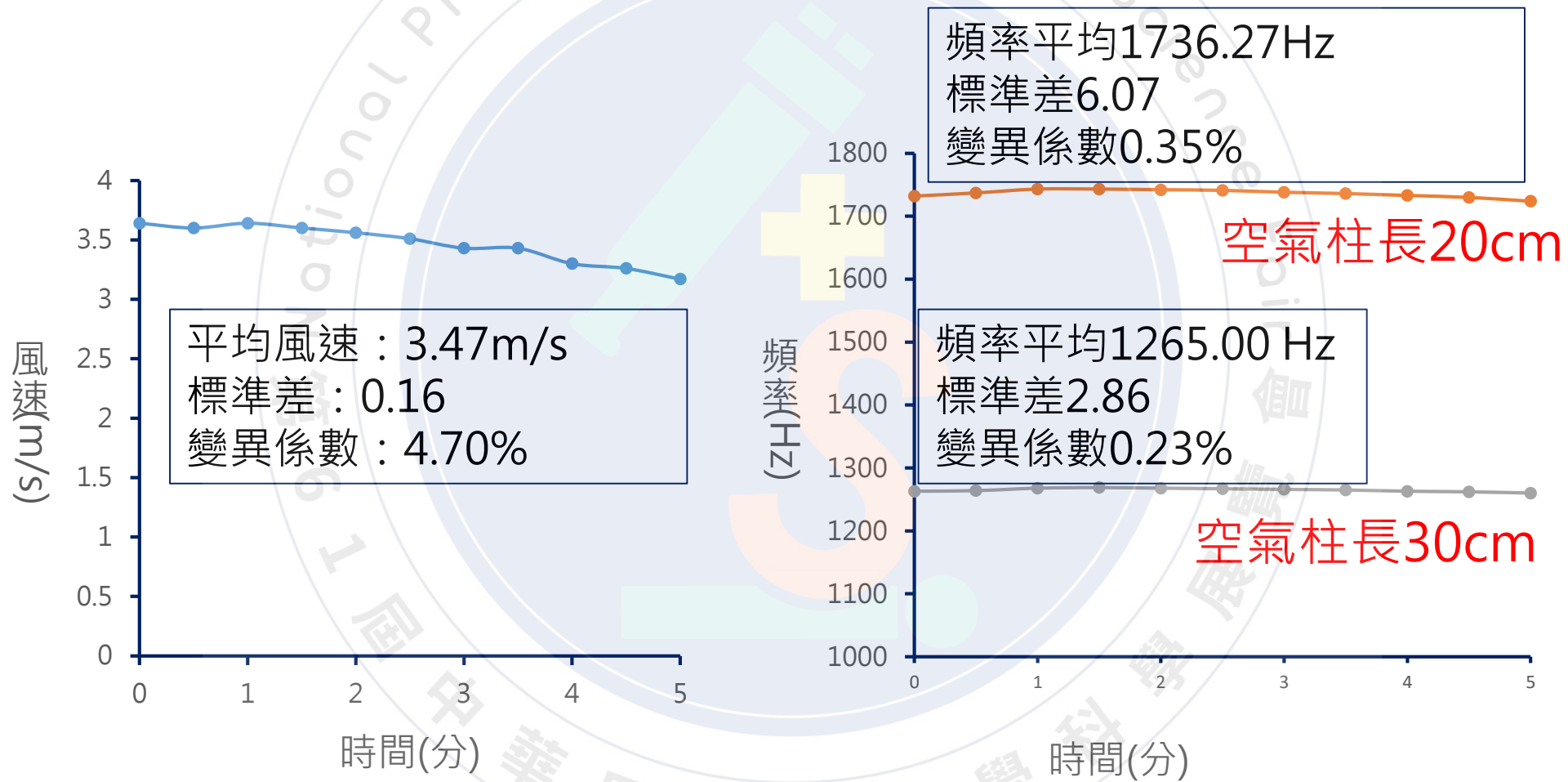


圖9、空壓機風速隨時間變化關係圖

圖10、空壓機運轉時間與音高關係圖

研究結果-探究音高躍升的原因-氣壓

笛音管內的氣壓與音高躍升現象無關

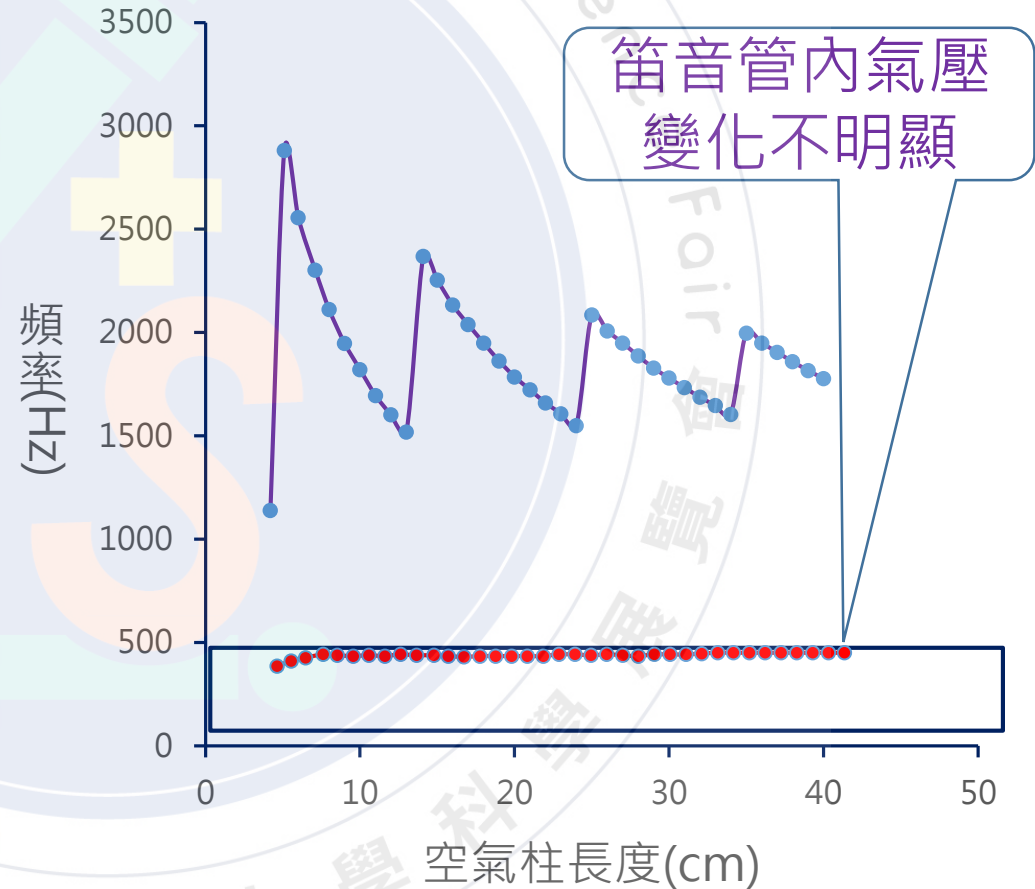
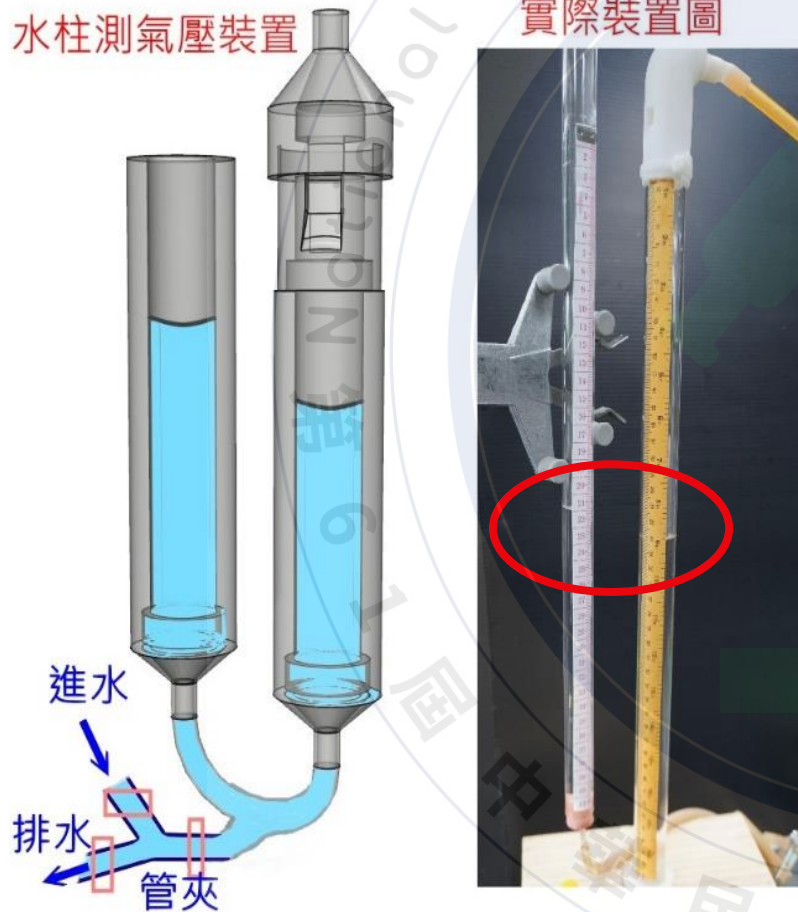


圖11、利用連通管測量笛音管內氣壓

圖12、笛音管內氣壓與音高躍升對照圖

研究結果-探究音高躍升的原因-風速

風速應該是造成音高躍升現象的主因。風速愈大，音高躍升現象愈頻繁。

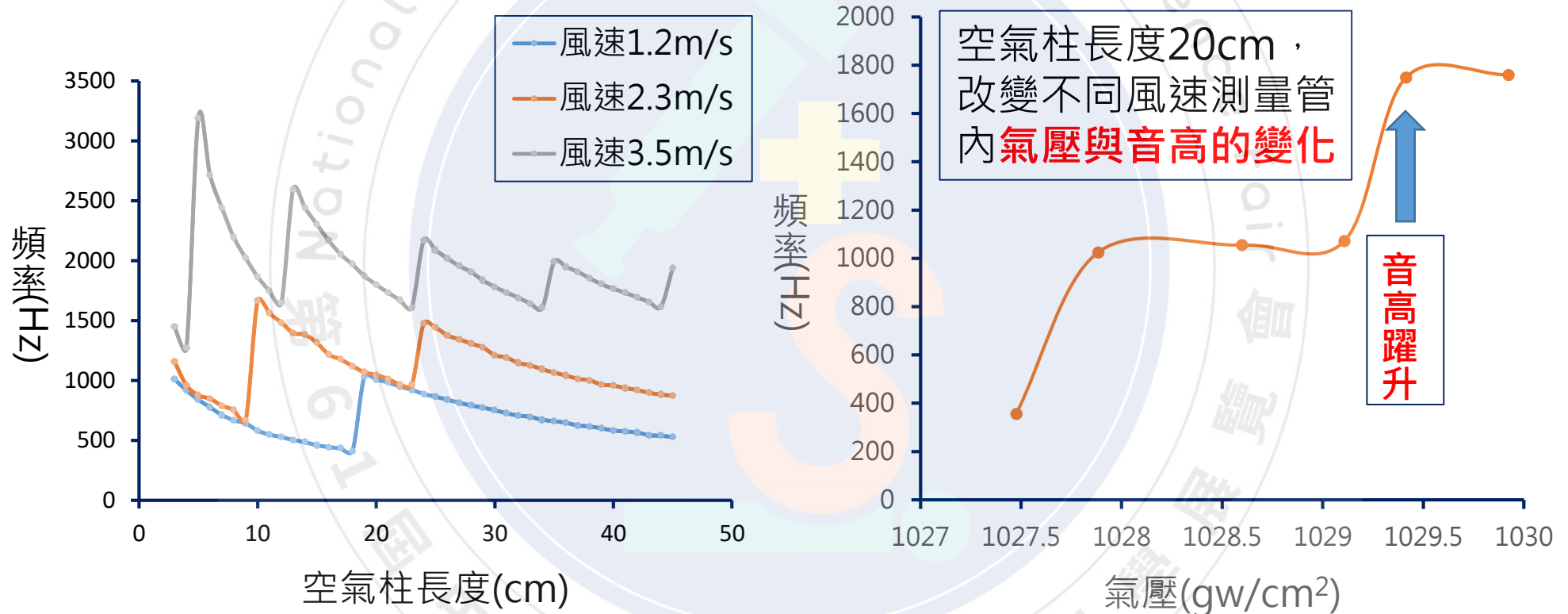


圖13、不同風速對音高躍升的影響

圖14、不同氣壓對音高躍升的影響

研究結果-探究音高躍升的原因-躍升前後頻譜

躍升前後發生了什麼變化？

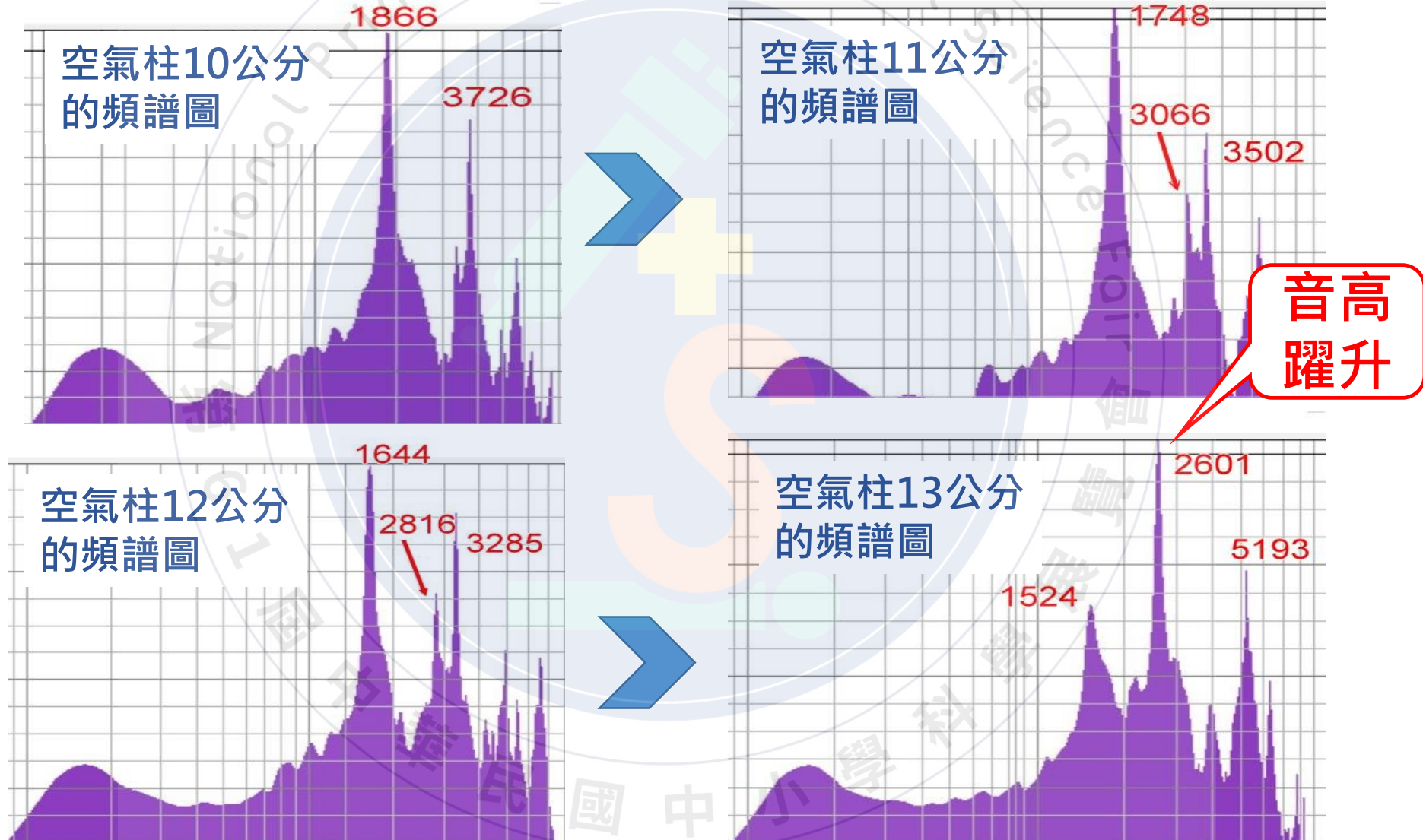


圖15、躍升前後之頻譜圖

研究結果-探究音高躍升的原因-空氣累積管內

實體空氣柱長度(L)大於理論值(L')，且差值(ΔL)逐漸變大。

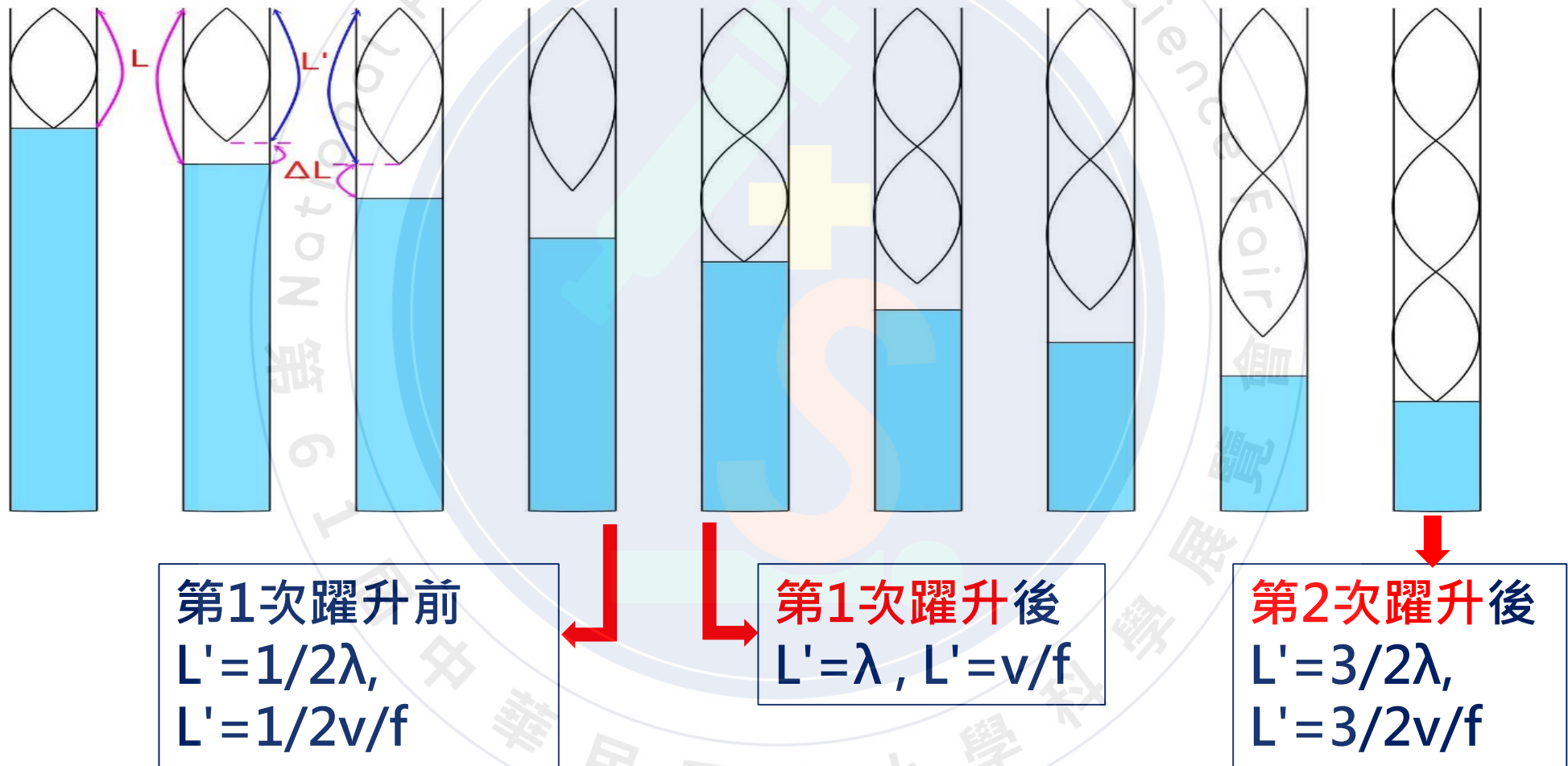


圖16、理論空氣柱長度推算示意圖

結論-音高躍升的原因是因為空氣的累積

大量空氣



空氣柱累積



音高躍升

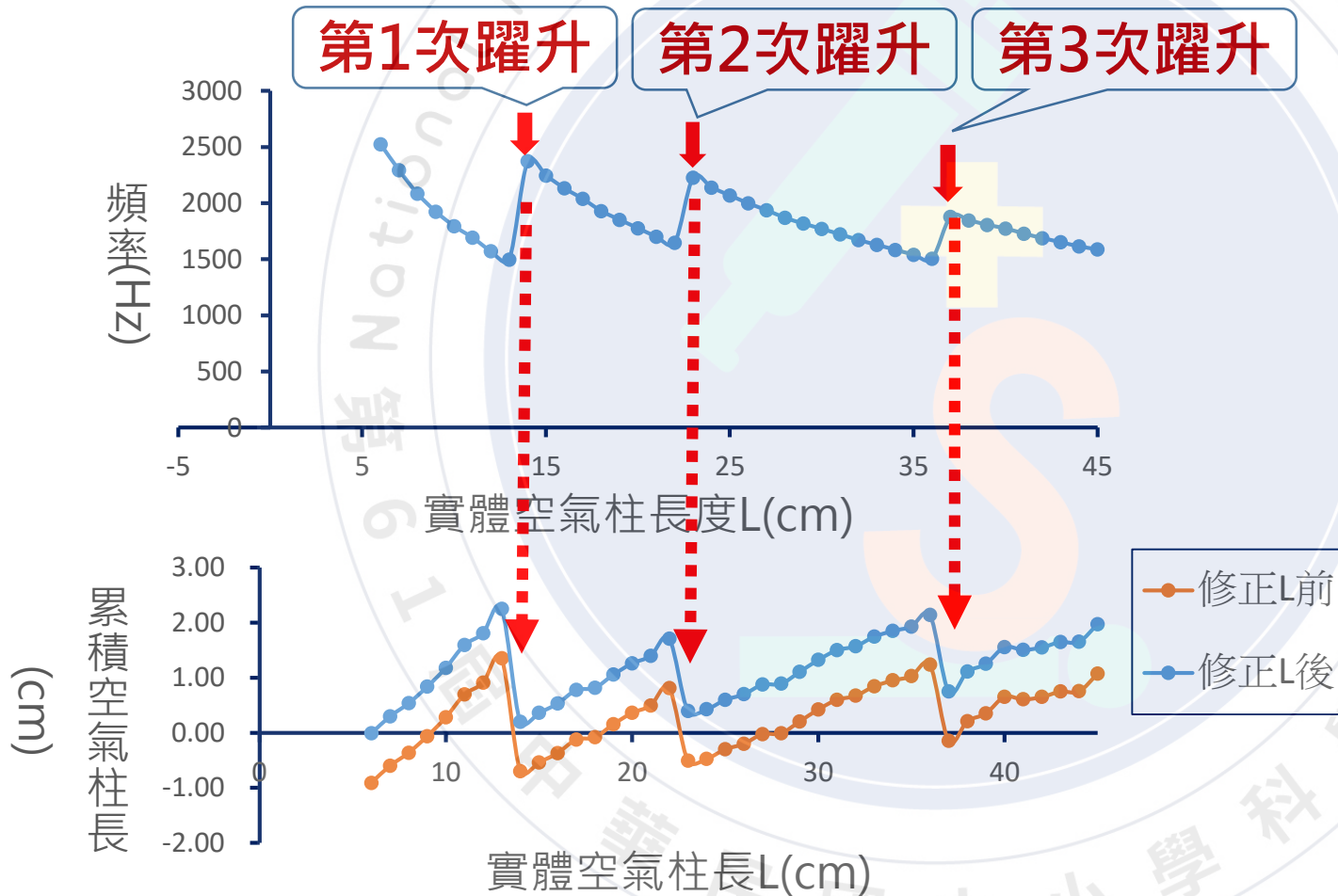


圖18、實體空氣柱長度須修正增加0.9cm

圖17、空氣柱長度與累積的空氣柱關係圖說明音高躍升現象

應用-笛音管演奏器實作

21mm口徑壓克力管3支

氣切角度15度

氣切口長7.5、10、12.5mm

氣切口寬10mm

風速3.4m/s

組成可吹奏頻率536~2231Hz，共有4個八度音的笛音管演奏器。

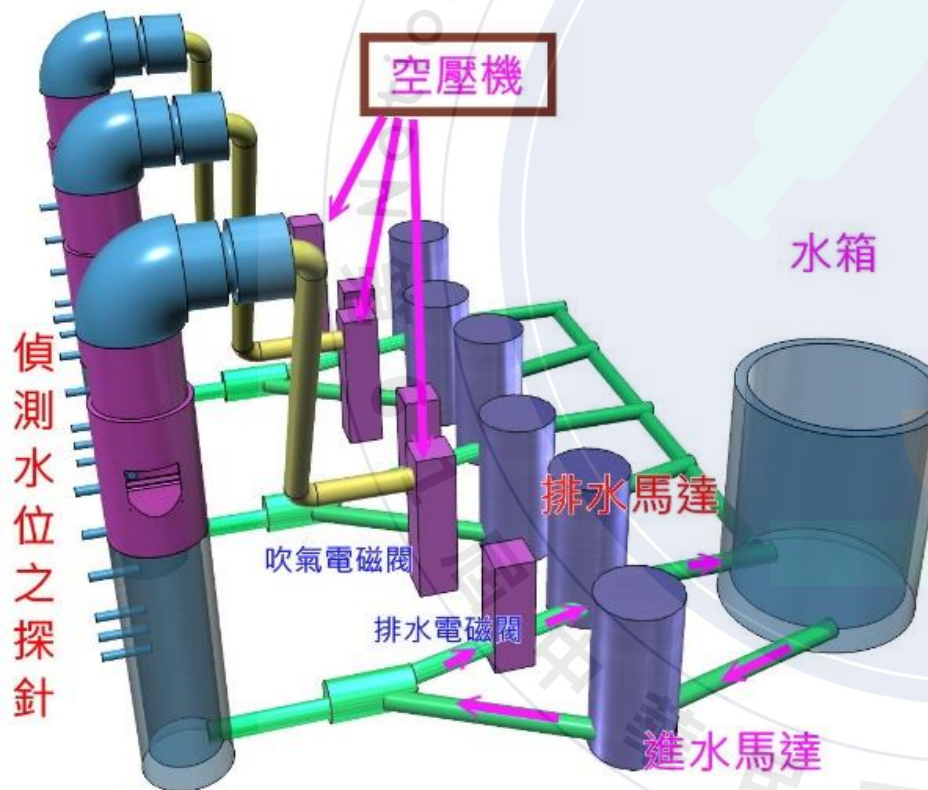


圖19、自動演奏笛音管裝置示意圖

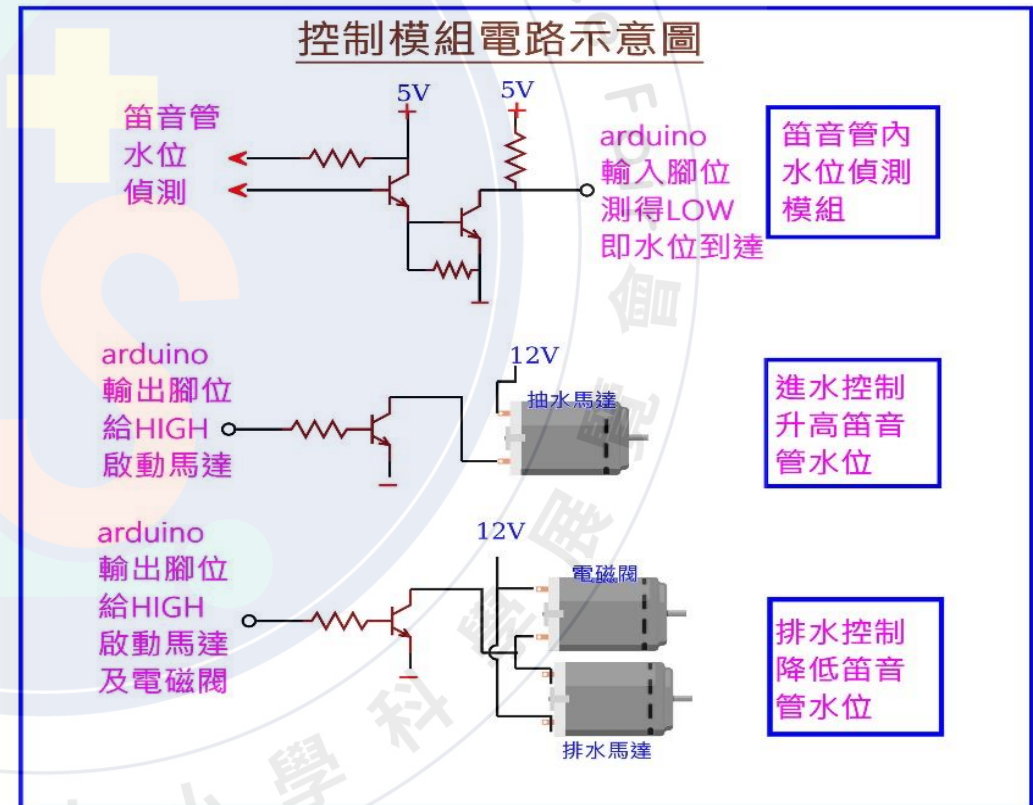


圖20、控制模組電路示意圖

參考資料

1. 許婷 (2009) 。腔體共振之探討。中華民國第50屆科學展覽會高中組物理科。
2. 胡長松、吳唐林 (1988) 。氣體壓力的變化會影響聲音的傳播速度嗎？中華民國第28屆科學展覽會國中組物理科。
3. 江文馨、林佳燕、陳怡文、陳怡雯 (2003) 。先聲奪人—從共鳴管到共振子。全國科學展覽會高中組物理科。