中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組　物理與天文學科

佳作

051819

horn horn horn-氣動式喇叭之頻率研究

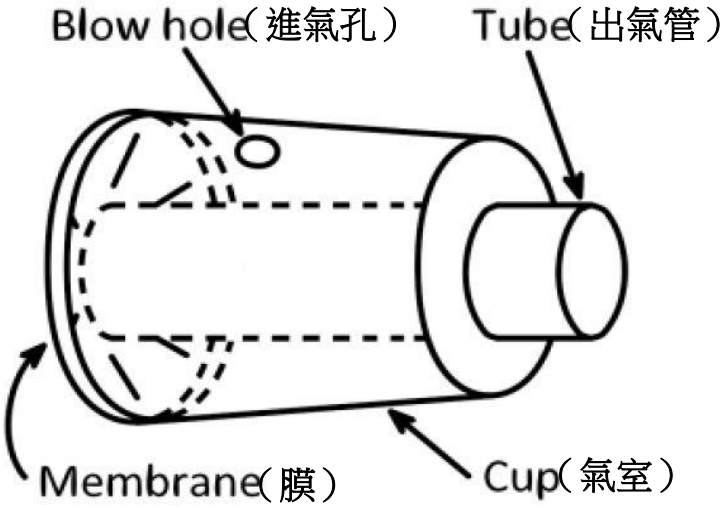
學校名稱：國立彰化高級中學

作者：	指導老師：
高二 李唐安	姚靜穎

關鍵詞：air horn、空氣柱共鳴

摘要

空氣喇叭構造簡單，大致上的構造有進氣孔、氣室、彈性膜與出氣管。當內部氣體流動，引起膜的振動，便會發出聲音。而發聲原理十分複雜，構造有類似可產生共鳴的管子，藉由聲音感測器的測量再經過傅立葉分析，分析顯示聲音的基頻與開管空氣柱共鳴的計算結果不同，閉管亦然。而長度改變、管子口徑，皆會影響聲音的基頻。另外，對聲音強度有影響的則有進氣量及口徑。利用壓力感測器測量氣室內的壓力變化，發現壓力變化的頻譜圖和聲音相同，而壓力變化和膜的開閉相關。我們在這個實驗內探究空氣喇叭如何產生聲音以及影響聲音頻率的原因。



結構示意圖

壹、研究動機

Air horn 在台灣稱作空氣喇叭，因為參加物理辯論賽而接觸到相關資料，當我發現一個小小的空氣喇叭發出的聲音卻如雷貫耳，令我驚訝不已，因此想更深入研究其發聲原理，尤其是發現這麼簡單的喇叭原理卻超過高中所學，讓我更吃驚，於是決定要繼續研究空氣喇叭。

貳、研究目的

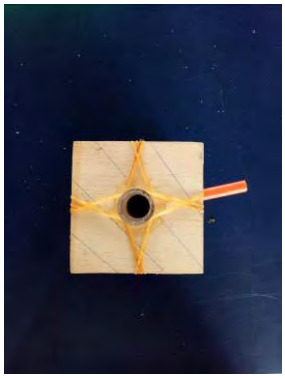
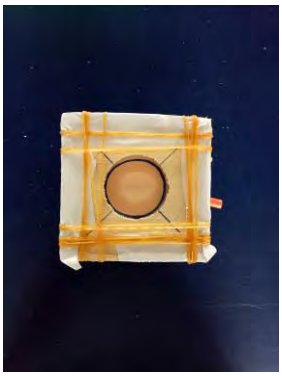
找出空氣喇叭發聲原理和影響其音頻的因素。

參、研究設備及器材

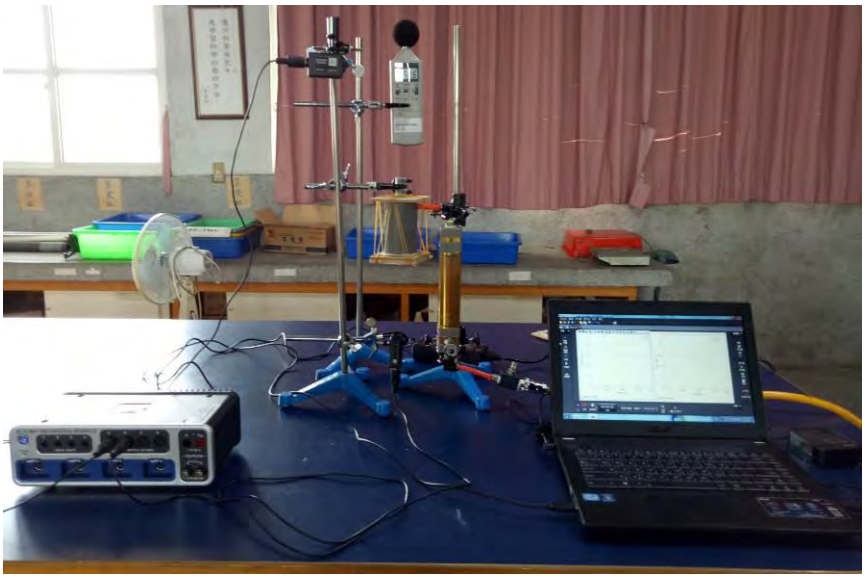
一、測量設備

流量計	空壓機	
分貝器	PASCO	
	聲音感測器	氣壓感測器

二、自製喇叭外觀圖

		
正面圖	側面圖	背面圖

三、裝置圖



肆、研究過程及方法

一、發聲過程

在不進氣的情況下，膜會蓋住出氣管口，則氣室呈密閉狀態，反之如果膜向外擴張，氣室可以和外部相通。吹氣進去時，氣室內氣壓增加，迫使膜被推開，氣室和外部相通，讓氣流可以流出去，氣流一流出去，氣壓降低，膜回到原來位置，氣室封閉。如此反覆，就形成了膜來回振動，發出聲音。

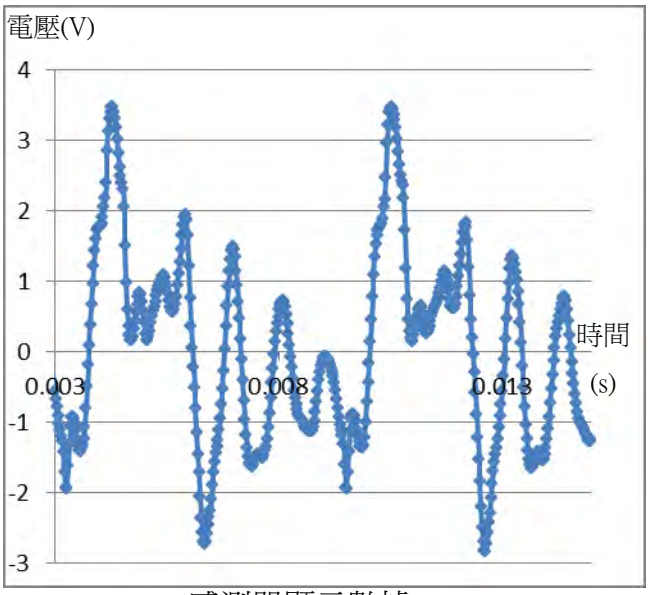
二、實驗

(一)距喇叭出氣管口處 15 公分放置分貝器及 37 公分放置聲音感測器，膜下方 15 公分放置聲音感測器，在氣室置入壓力感測器 (設定取樣頻率 40000Hz)。

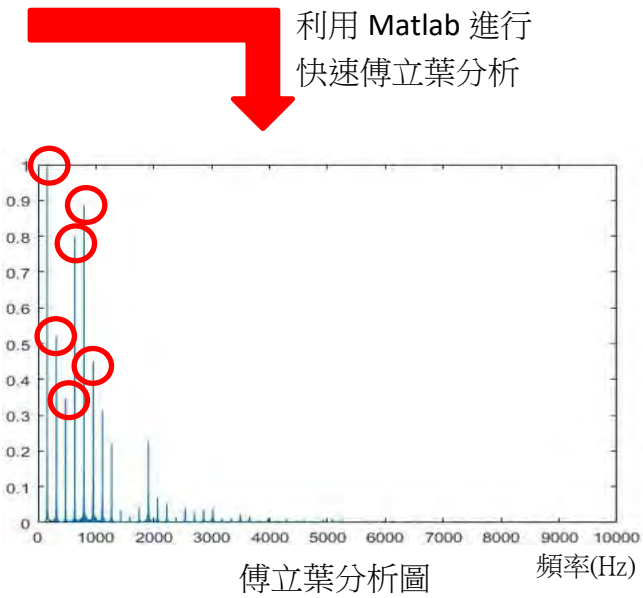
(二)進氣使喇叭產生聲音，持續 10 秒，停止進氣 60 秒，量測音頻、分貝及壓力。

(三)重複步驟 (二)五次，取得五組數據。

(四)將感測器量出的數據用 Matlab 傅立葉分析(設定取樣點數 2^{16}＝65536 個點)，算出頻率圖。如下圖所示



感測器顯示數據



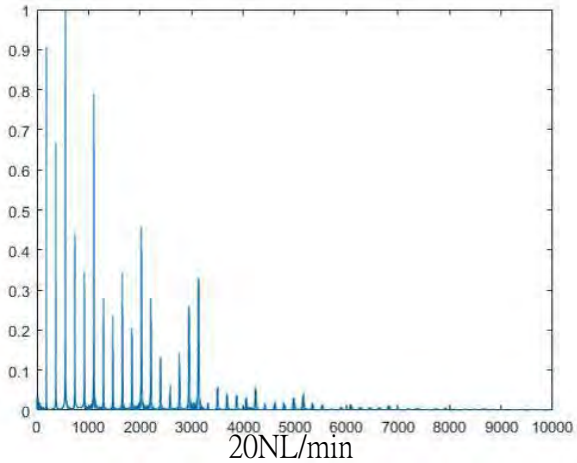
傅立葉分析圖

伍、研究結果

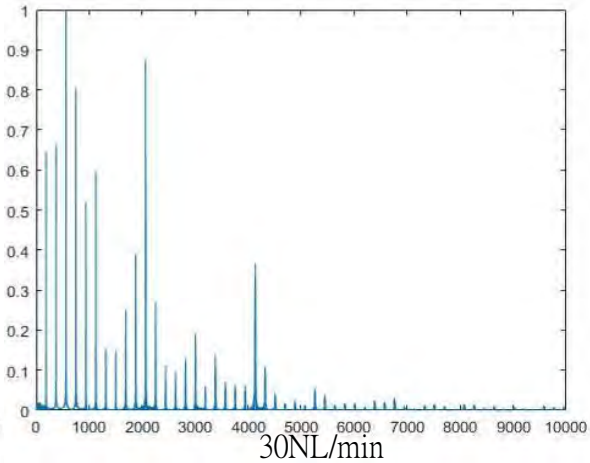
結果一、改變不同流量

控制變因: 長度 18cm、口徑 3cm、膜-塑膠

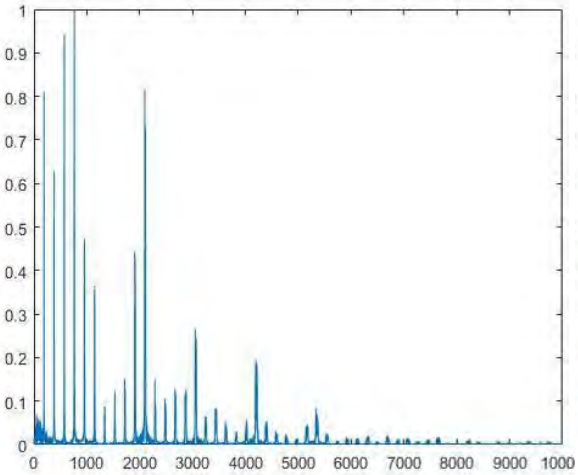
頻譜圖



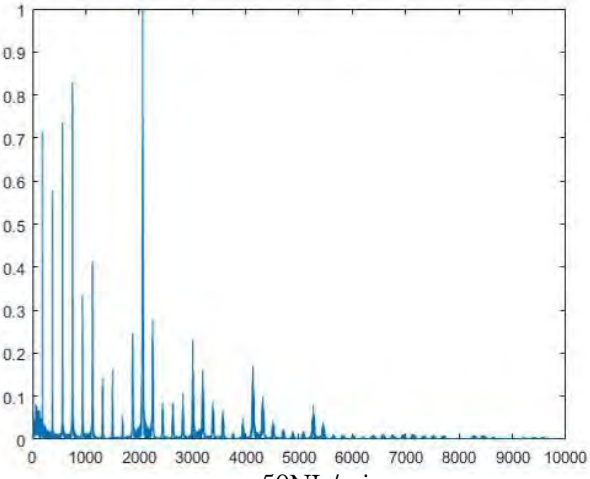
20NL/min



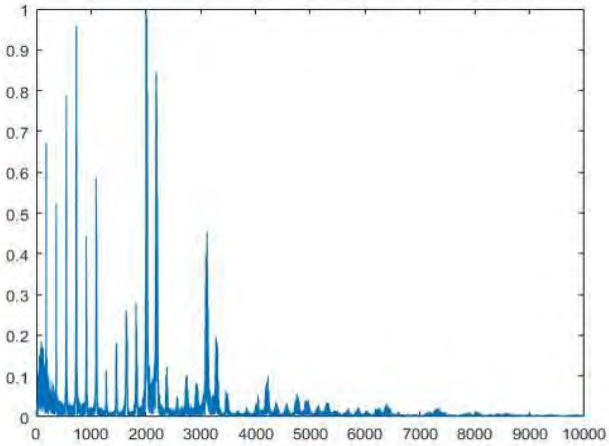
30NL/min



40NL/min



50NL/min



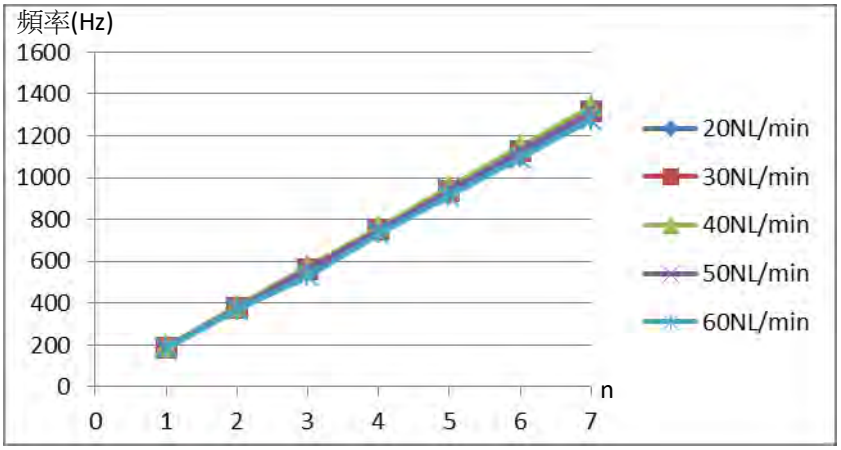
60NL/min

(一)頻率數據表

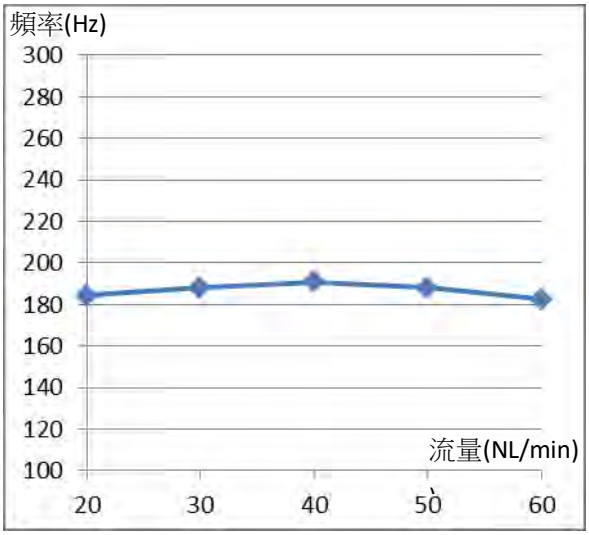
流量	20NL/min	30NL/min	40NL/min	50NL/min	60NL/min
基音	184.3 Hz	188 Hz	191 Hz	188 Hz	182.5 Hz
第二泛音	369.3 Hz	376 Hz	383.3 Hz	375.4 Hz	365 Hz
第三泛音	552.4 Hz	563.4 Hz	575 Hz	564 Hz	529.3 Hz
第四泛音	738.5 Hz	751.3 Hz	762.9 Hz	751.3 Hz	731.8 Hz
第五泛音	919.8 Hz	938.7 Hz	957 Hz	939.9 Hz	913.7 Hz
第六泛音	1104 Hz	1127 Hz	1149 Hz	1128 Hz	1092 Hz
第七泛音	1292 Hz	1315 Hz	1341 Hz	1315 Hz	1274 Hz

(二)頻率比較圖

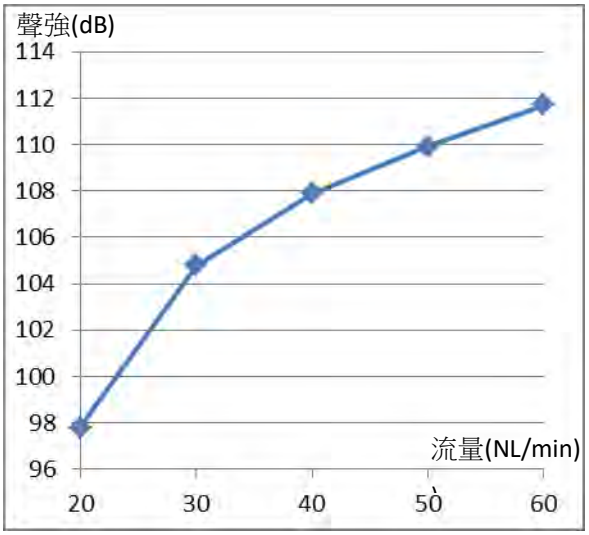
<將頻率由低至高排列，並依序標上 1、2、3、4…，
以便看出這些頻率的倍數關係。>



(三) 基頻比較圖



(四)聲音強度比較圖

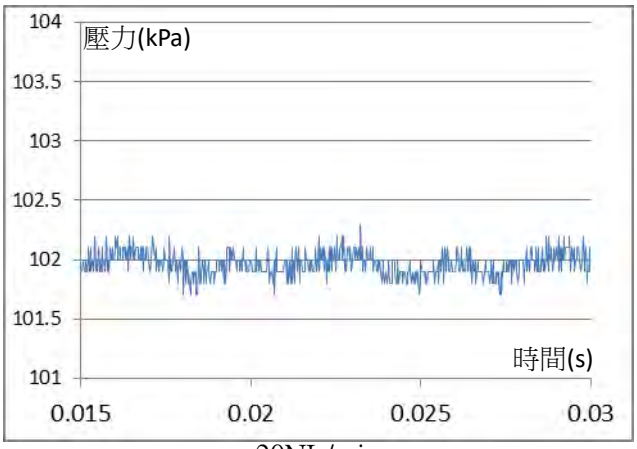


由圖(二)發現倍頻的關係為連續整數比(n=1,2,3,…)而非奇數比(n=1,3,5,…)，此現象與一閉一開空氣柱共鳴產生之頻率不同 (倍頻有奇數比的關係)。由圖(三)及圖(四)流量改變對聲音頻率沒有太大影響，而流量越大，聲音強度越強。

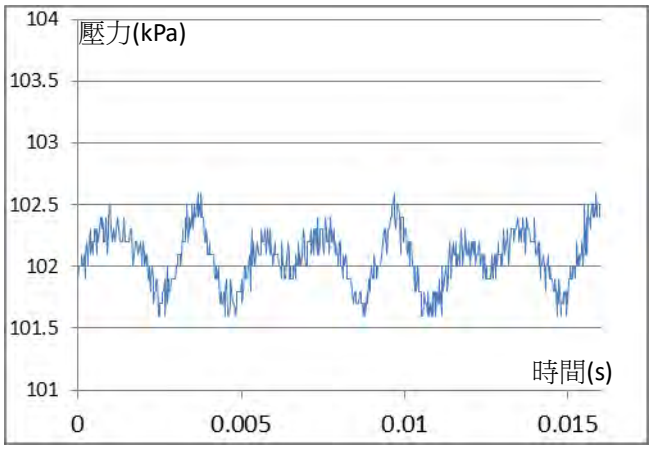
結果二、量測 airhorn 氣室內部壓力

控制變因:長度 18cm、口徑 3cm、膜-塑膠

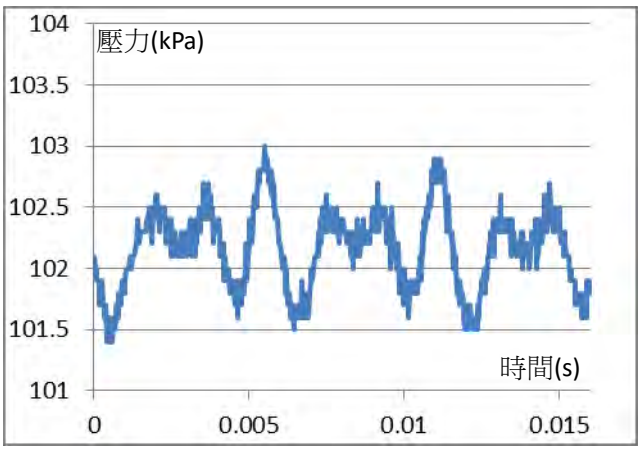
(一)壓力、時間比較圖



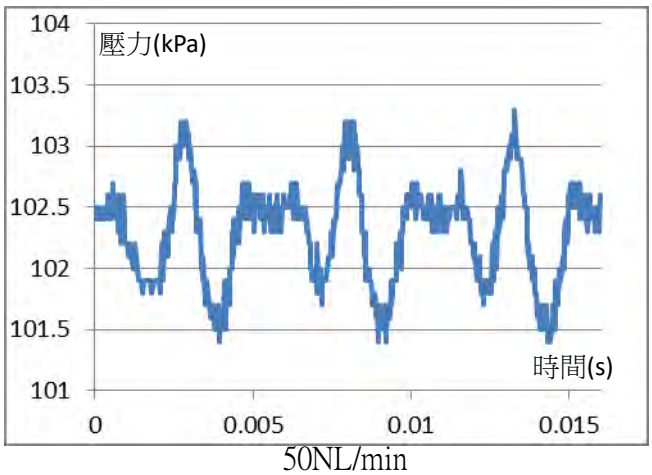
20NL/min



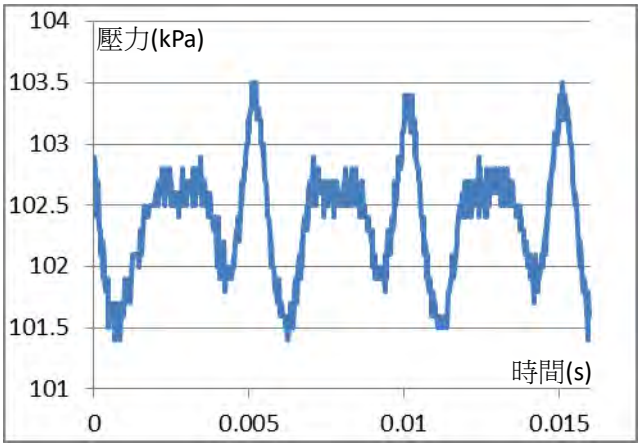
30NL/min



40NL/min

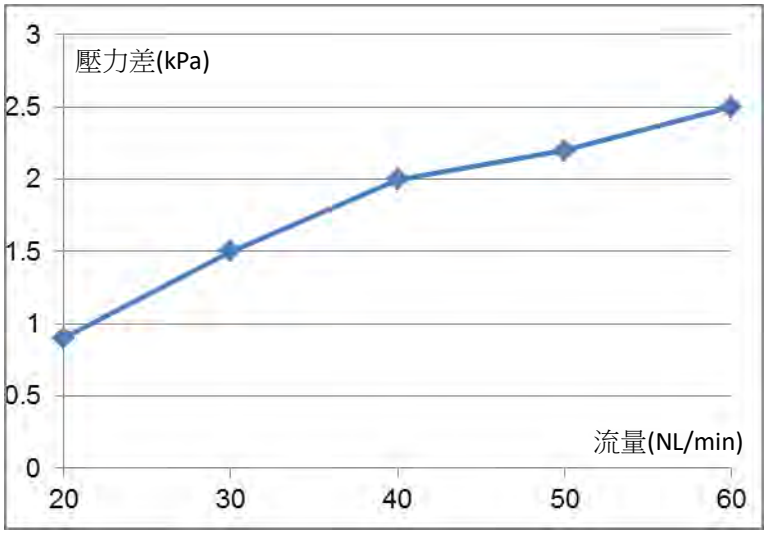


50NL/min

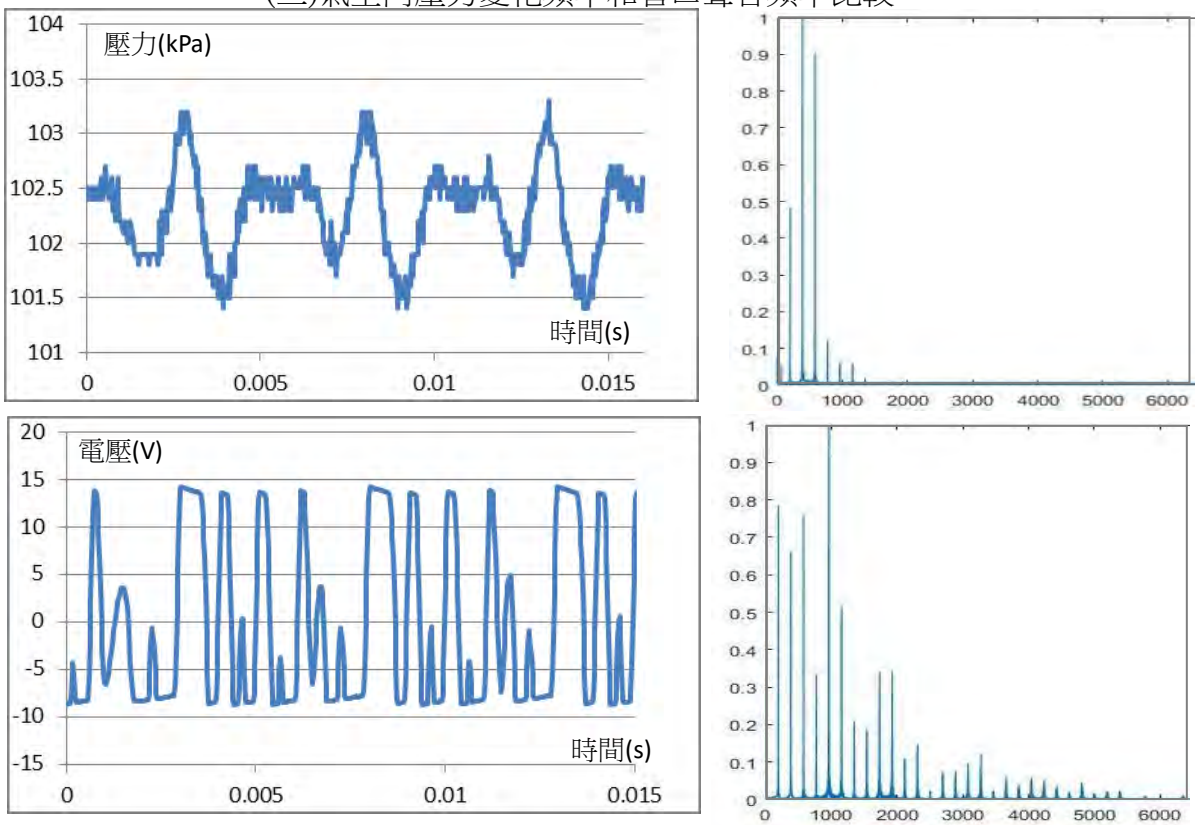


60NL/min

（二）氣室內壓力變化和流量比較圖



(三)氣室內壓力變化頻率和管口聲音頻率比較。



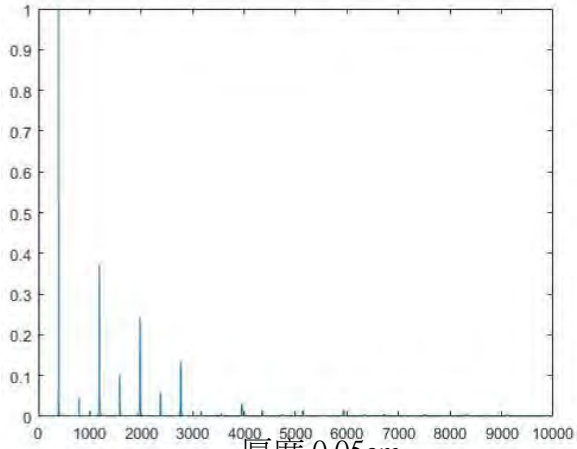
(上)壓力與時間變化圖與頻譜圖(下)聲音與時間變化圖與頻譜圖

壓力感測器裝置於氣室，因此壓力數據顯示是氣室內壓力變化，流量越大，氣室內壓力變化越大。將壓力數據進行傅立葉分析後和聲音頻譜圖比較，兩者頻率相同，而壓力變化和膜的開閉相關，因此推論膜的振動影響聲音基頻。

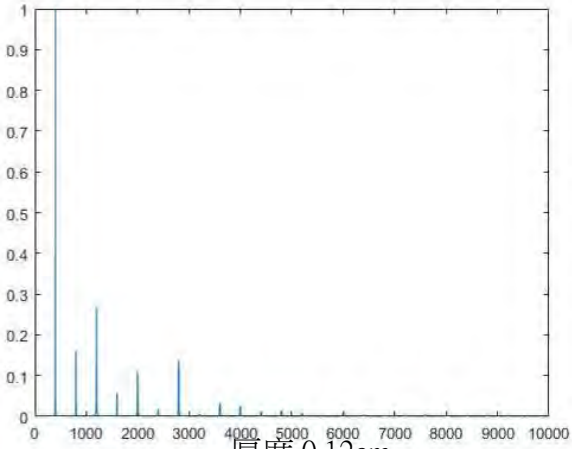
結果三、改變膜的厚度

控制變因:長度 15cm、口徑 3cm、流量 20NL/min

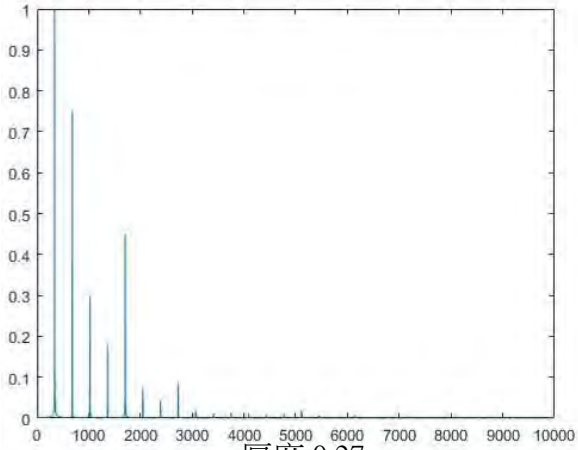
頻譜圖



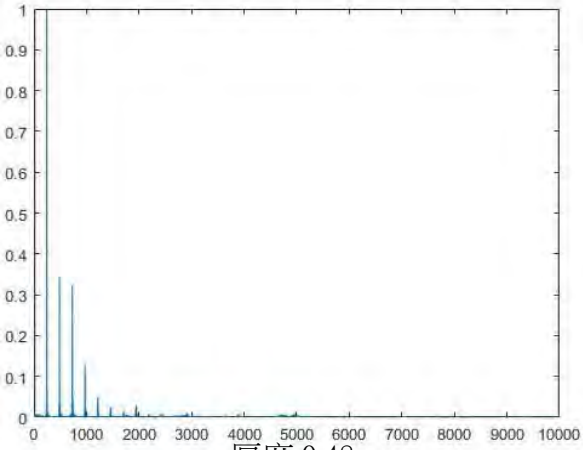
厚度 0.05cm



厚度 0.12cm



厚度 0.27cm

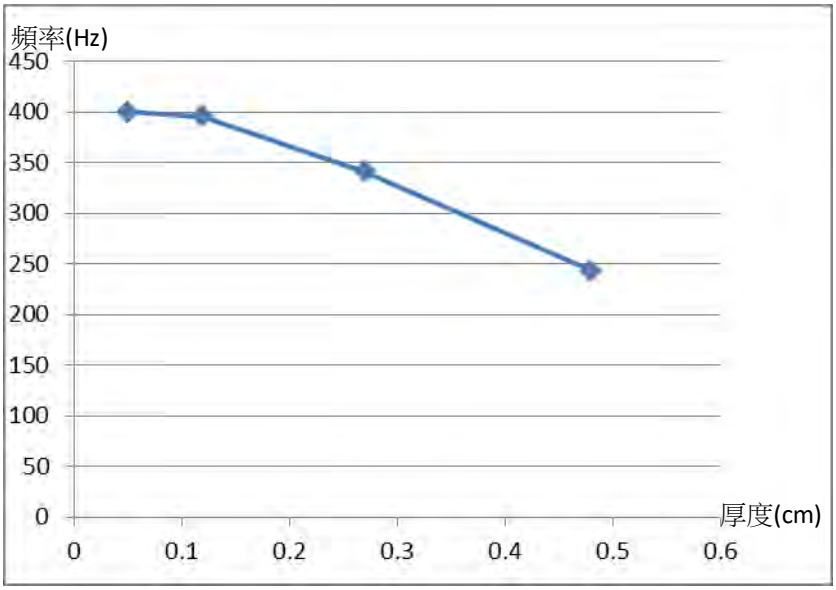


厚度 0.48cm

(一)頻率數據表

厚度	0.05cm	0.12cm	0.27cm	0.48cm
基音	399.5 Hz	395.5 Hz	341.2 Hz	242.9 Hz
第二泛音	799 Hz	791 Hz	681.8 Hz	485.2 Hz
第三泛音	1201 Hz	1187 Hz	1022 Hz	728.1 Hz
第四泛音	1602 Hz	1583 Hz	1363 Hz	970.5 Hz
第五泛音	2003 Hz	1976 Hz	1704 Hz	1213 Hz
第六泛音	2398 Hz	2374 Hz	2045 Hz	1461 Hz
第七泛音	2794 Hz	2766 Hz	2385 Hz	1705 Hz

(二)基頻比較圖

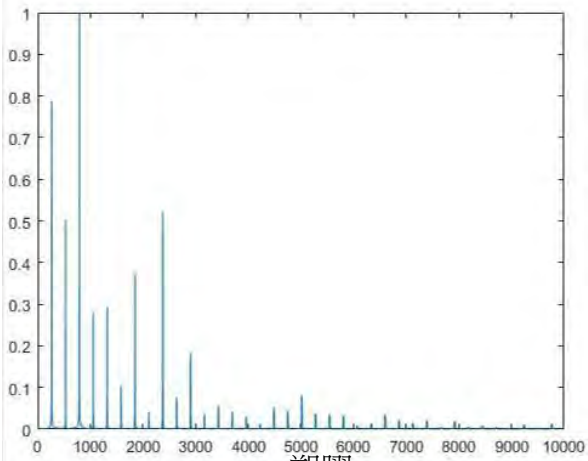


膜的厚度和膜的張力相關，由比較圖可知厚度改變影響聲頻，膜越厚，張力越大，聲音頻率越低。

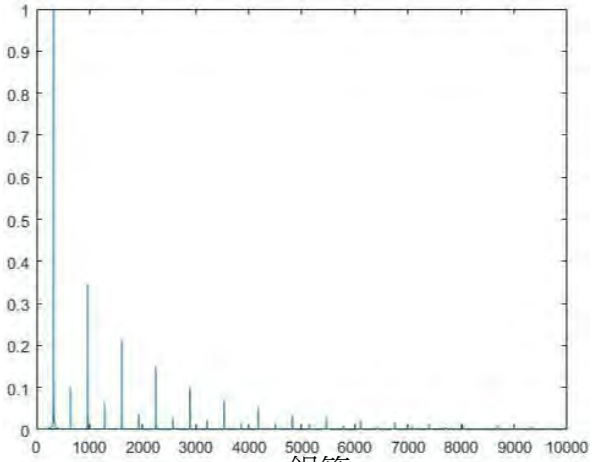
結果四、改變膜的種類

控制變因:長度 18cm、口徑 3cm、流量 20NL/min

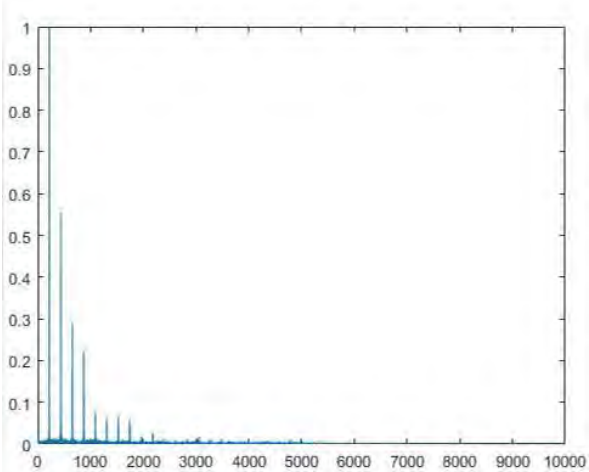
頻譜圖



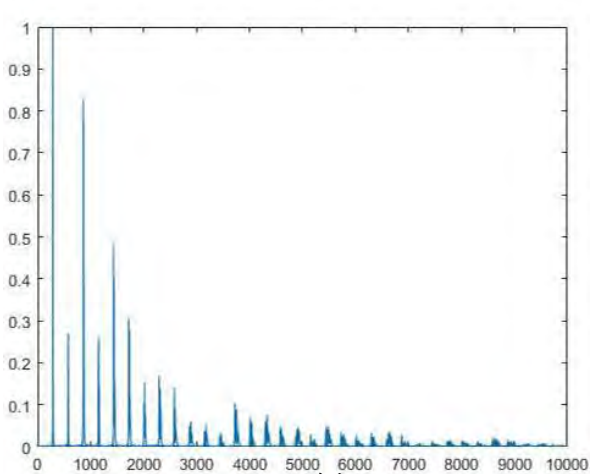
塑膠



鋁箔



橡皮

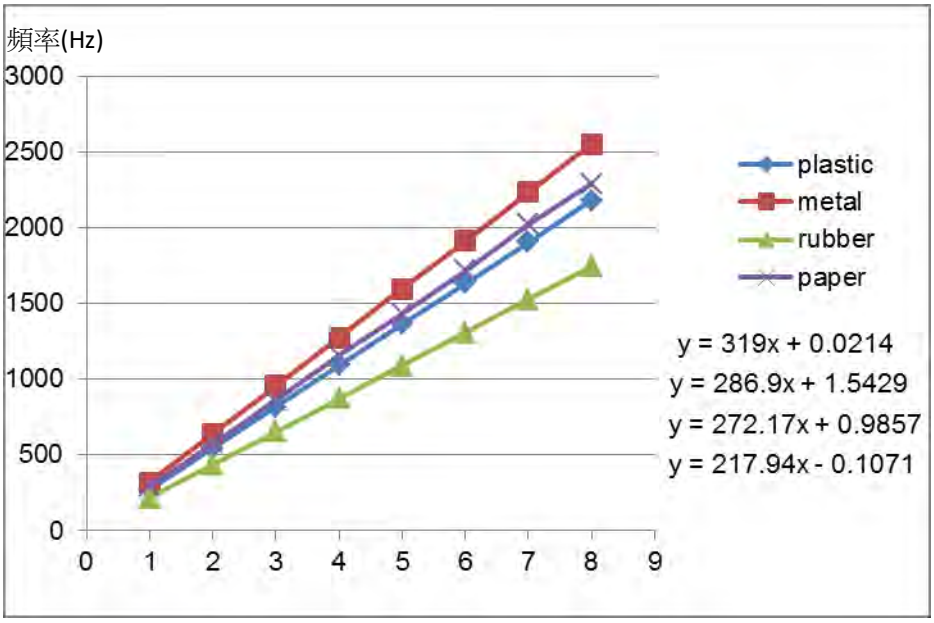


紙

(一)數據平均頻率數據圖

材質	塑膠	鋁箔	橡皮	紙
基音	272.8 Hz	319.2 Hz	217.9 Hz	286.9 Hz
第二泛音	545 Hz	637.8 Hz	435.8 Hz	577.4 Hz
第三泛音	817.3 Hz	957 Hz	653.7 Hz	859.4 Hz
第四泛音	1091 Hz	1276 Hz	871.6 Hz	1155 Hz
第五泛音	1362 Hz	1595 Hz	1089 Hz	1432 Hz
第六泛音	1634 Hz	1914 Hz	1308 Hz	1718 Hz
第七泛音	1906 Hz	2233 Hz	1526 Hz	2021 Hz
第八泛音	2178 Hz	2552 Hz	1743 Hz	2291 Hz

(二)頻率比較圖

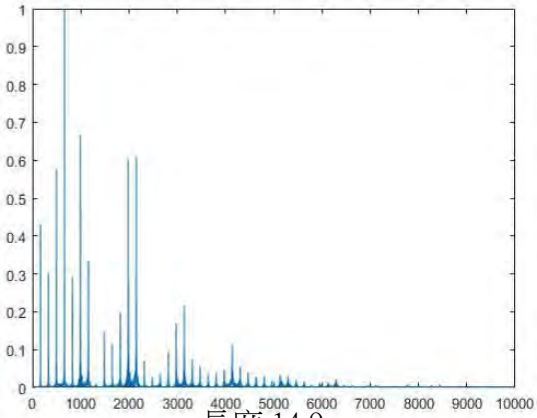


膜的材質不影響倍頻關係，而不同材質張力不同，產生的聲音頻率也不同。

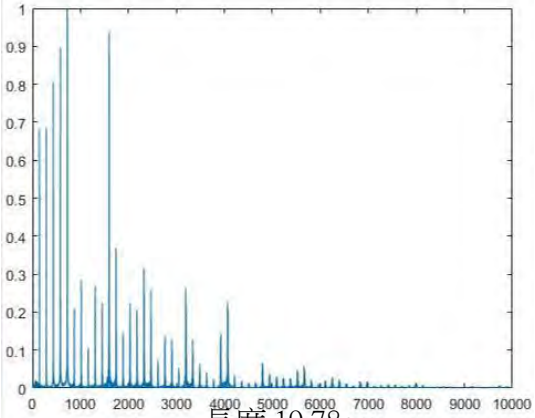
結果五、改變出氣管長度

控制變因:口徑 3cm、流量 30NL/min、膜-塑膠

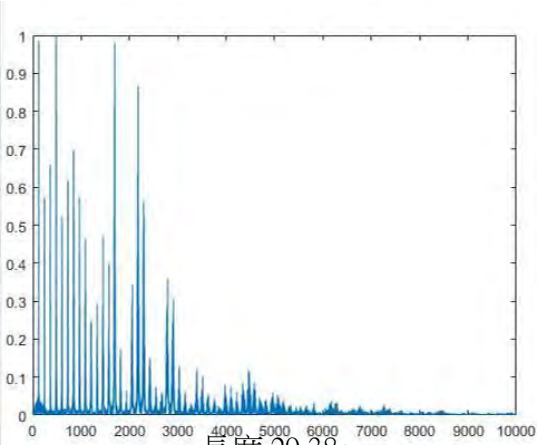
頻譜圖



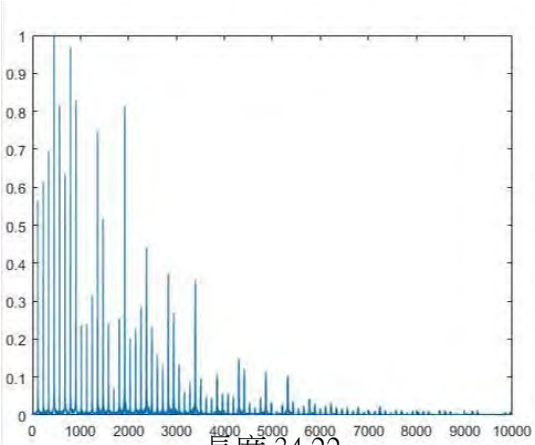
長度 14.9cm



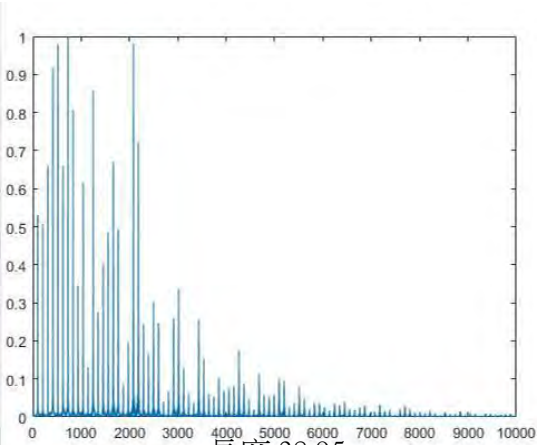
長度 19.78cm



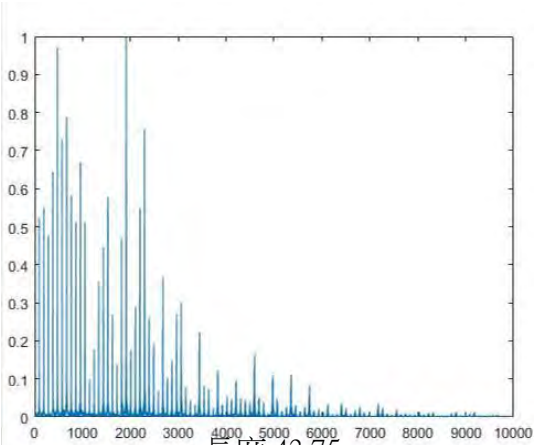
長度 29.38cm



長度 34.22cm



長度 38.95cm

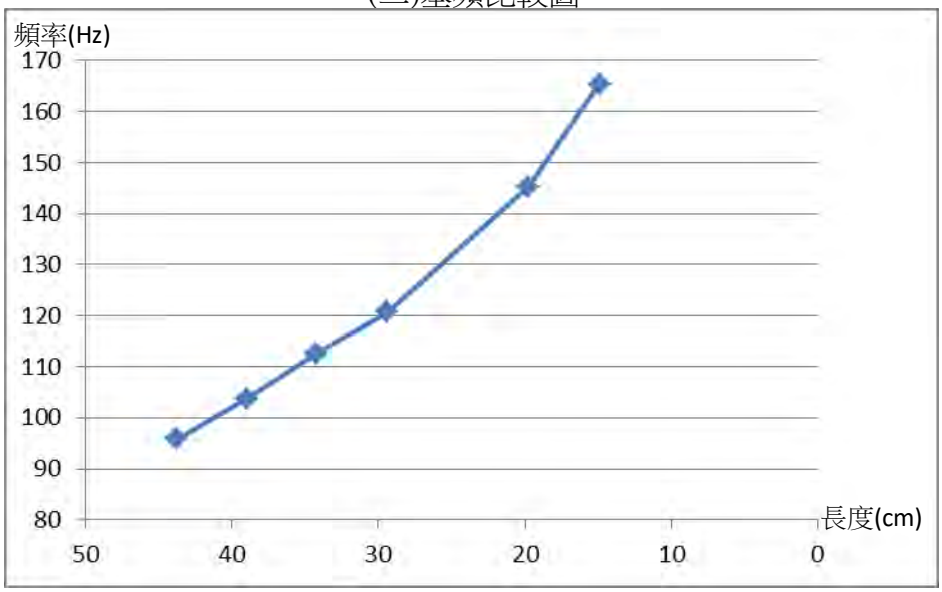


長度 43.75cm

(一)頻率數據表

長度	14.9cm	19.78cm	29.38cm	34.22cm	38.95cm	43.75cm
基音	165.4 Hz	145.3 Hz	120.8 Hz	112.9 Hz	103.8 Hz	95.83 Hz
第二泛音	330.8 Hz	290.5 Hz	241.7 Hz	226.4 Hz	208.1 Hz	191 Hz
第三泛音	496.8 Hz	435.8 Hz	363.2 Hz	339.4 Hz	311.9 Hz	286.9 Hz
第四泛音	662.2 Hz	581.1 Hz	483.4 Hz	452.9 Hz	416.3 Hz	382.7 Hz
第五泛音	827.6 Hz	726.3 Hz	602.4 Hz	565.8 Hz	520 Hz	477.9 Hz
第六泛音	992.4 Hz	871.6 Hz	725.7 Hz	679.3 Hz	623.8 Hz	573.7 Hz
第七泛音	1158 Hz	1017 Hz	847.2 Hz	791.6 Hz	728.1 Hz	669.6 Hz

(二)基頻比較圖

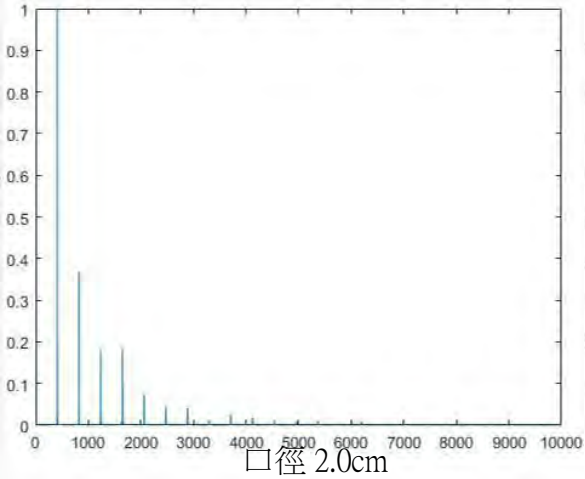


實驗結果顯示管長越長頻率越低，似乎和空氣柱共鳴現象相符，在後面討論中會再深入探究。

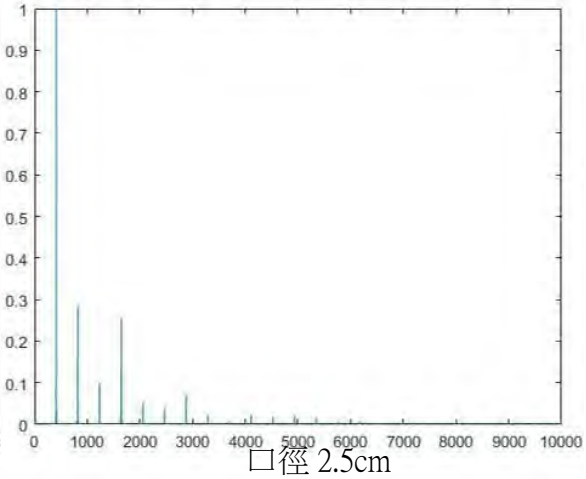
結果六、改變出氣口口徑

控制變因:長度 15cm、流量 20NL/min、膜-橡皮氣球

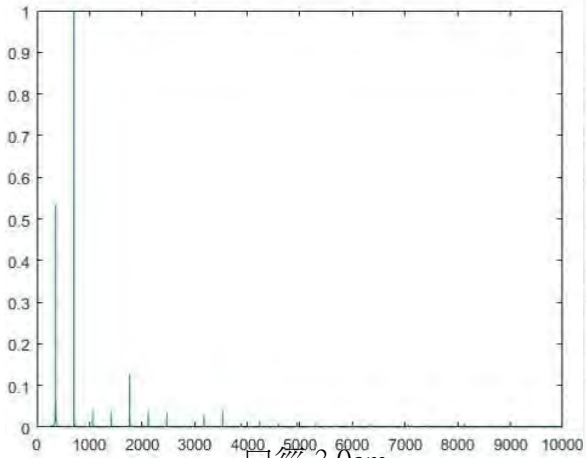
頻譜圖



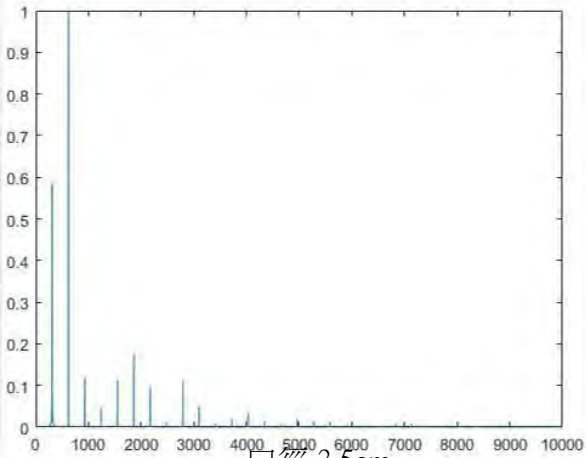
口徑 2.0cm



口徑 2.5cm



口徑 3.0cm

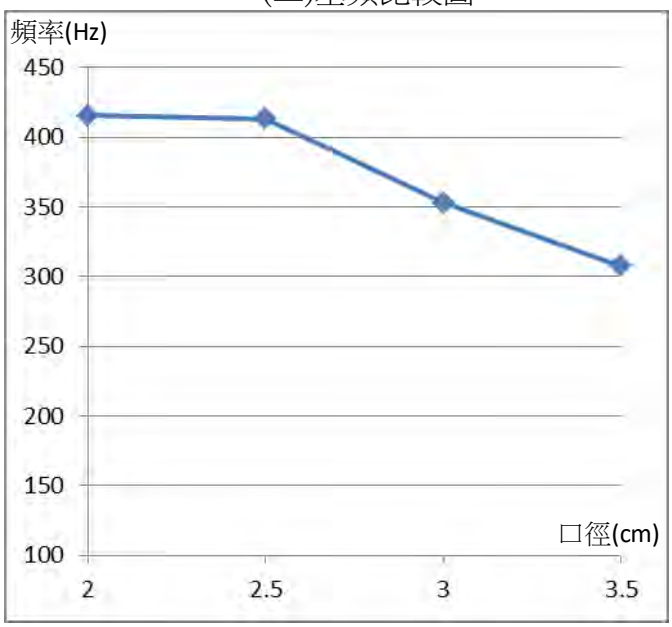


口徑 3.5cm

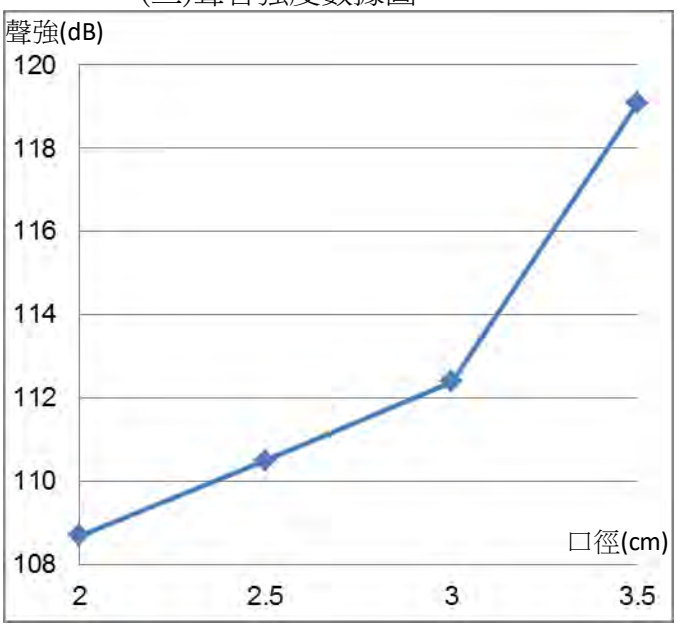
(一)數據平均頻率數據圖

口徑	2.0cm	2.5cm	3.0cm	3.5cm
基音	415.8 Hz	413.2 Hz	353.16 Hz	307.68 Hz
第二泛音	831.8 Hz	826.32 Hz	722.08 Hz	615.56 Hz
第三泛音	1247.75 Hz	1239.4 Hz	1059.4 Hz	923.24 Hz
第四泛音	1663.25 Hz	1652.2 Hz	1417.6 Hz	1230.6 Hz
第五泛音	2079.5 Hz	2065.2 Hz	1770.4 Hz	1538.4 Hz
第六泛音	2495.5 Hz	2478.2 Hz	2123.4 Hz	1846 Hz
第七泛音	2911.25 Hz	2891.4 Hz	2477 Hz	2154 Hz

(二)基頻比較圖



(三)聲音強度數據圖



當出氣管口徑改變，聲音頻率及強度也會隨之變化，口徑增加，聲音頻率降低、聲音強度增加。

陸、討論

一、　同一組數據必須在一小時內測量完畢，避免室溫變化影響共鳴頻率。

二、　避免附近阻礙物反射聲波影響測量頻率，以及附近噪音影響，因此必須選擇開闊且安靜的空間。

三、　由實驗結果一，可知空氣喇叭產生的頻譜關係為連續整數比(n=1,2,3,……)，而非奇數比(n=1,3,5,……)，此現象與一閉一開空氣柱共鳴產生之頻率不同 (倍頻要有奇數比的關係)。

根據雙開或雙閉空氣柱方程式 $f=\frac{n}{2L}v$ ，(其中 n=1、2、3…，n 為正整數)及一閉一開空氣柱方程式 $f=\frac{m}{4L}v$，(其中 m=1、3、5…，m 為奇數)，可知由空氣柱共鳴時產生頻率有特定的倍數關係。實驗發現空氣喇叭產生的頻譜關係符合開口空氣柱特性的整數倍關係(n=1,2,3,…)，但比較空氣柱共鳴的基頻發現與測量數據差異甚多，因此**我們推論聲音的頻率並不是由空氣柱共鳴產生**。

管長	空氣喇叭聲音基頻（傅立葉分析）	開管基頻=$\frac{v}{2L}$（由管長換算）	閉管基頻=$\frac{v}{4L}$（由管長換算）
18cm	307.8Hz	927Hz	463Hz

(當時平均氣溫 t =21.5℃，換算聲速 v= 331+0.6*t ≈ 344 m/s)

五、我們推論，對空氣喇叭持續進氣，當膜和管口間處於閉合狀態，氣室內壓力會上升；當膜受氣體壓力撐開，空氣流出，則氣室內壓力下降，因此我們藉由量測氣室內壓力變化推算膜的振動頻率。根據實驗結果二發現壓力的頻譜分析和聲音的頻譜分析相同。因此**可推論聲音是由空氣喇叭的膜振動所產生**。

六、由實驗結果二發現送入的氣流量越大，氣室內壓力變化越大，測量出聲音強度也越大，推論氣室內壓力差越大，造成膜的振幅增加；振幅越大，聲音強

度越大。

七、在實驗結果三中膜的厚度改變影響基頻。並**再次證明了膜的振動是聲音產生的原因**。厚度增加，膜的彈力係數增加，推動膜所需氣體壓力增加，延遲膜的振動，降低聲音頻率。

八、我們改變了不同膜的材質並分析聲音頻率，記錄在實驗四中，發現不同材質的膜所發出的基頻不相同；且不論膜的材質為何，其頻譜關係皆為整數倍。對照實驗結果一的空氣柱共鳴的基頻（927.8Hz），發現實驗產生的基頻仍不相同，**證明聲音是由膜的振動產生而非空氣柱共鳴。**

九、在實驗結果五中，我們發現：

（一）、不同管長與最高峰值頻率並無直接線性關係。

（二）、不同管長之倍頻仍滿足連續的整數比。

（三）、管長度越長，基頻越低，相關關係並非線性關係。

我們推論是管子增長時，出氣管中空氣量增加，增加了聲音的阻抗；即當膜回彈至閉合位置時，出氣管內的空氣造成膜回彈的阻力，膜的閉合時間延遲，因此膜振動頻率降低，聲音頻率下降。

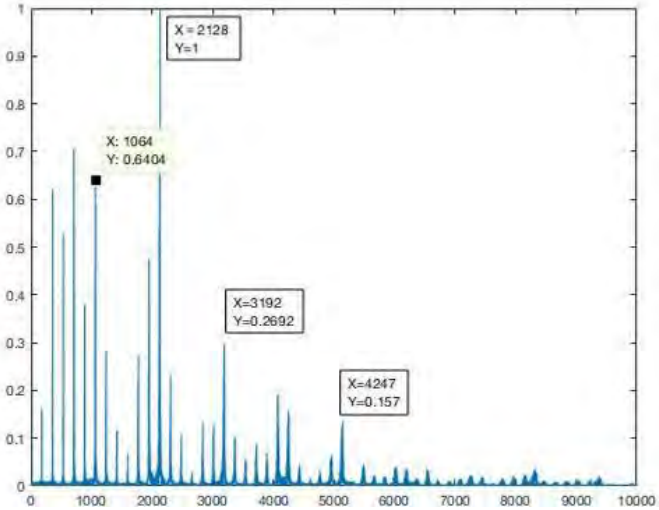
十、下面表格為空氣喇叭產生聲音的基頻與當時管長的共鳴基頻比較，證明聲音不是空氣柱共鳴所產生。

管長	14.9cm	19.78cm	29.38cm	34.22cm	38.95cm	43.75cm
空氣喇叭聲音基頻	165.4 Hz	145.3 Hz	120.8 HZ	112.9 Hz	103.8 Hz	95.83 Hz
雙開管基頻	1154.4 Hz	869.6 Hz	585.4 Hz	502.6 Hz	441.6 Hz	393.1 Hz
一閉一開管基頻	577.2 Hz	434.8 Hz	292.7 Hz	251.3 Hz	220.8 Hz	196.6 Hz

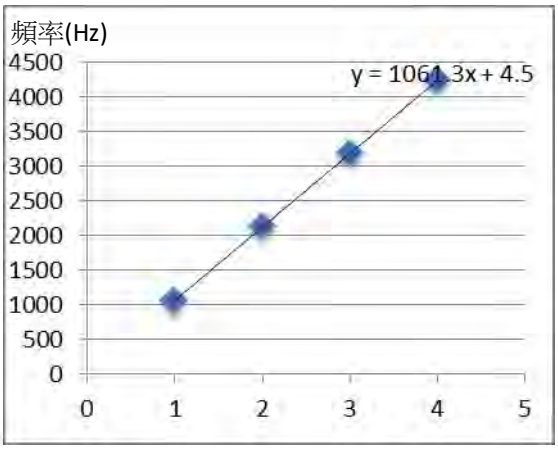
(當時平均氣溫 t =21.5℃，換算聲速 v= 331+0.6*t ≈ 344 m/s)

九、在實驗結果六中，我們研究了固定管長不同口徑的管子，發現管口徑越大，頻率越低。這個結果也呼應了討論九：**表示空氣柱的空氣量會造成膜推送空氣的阻力，影響空氣喇叭產生聲音基頻。**

十、在上述實驗中，我們發現在聲音的峰值頻率與相關參數（如流量、膜的厚度、材質、管長和管徑）皆無特殊直接相關關係。然而有些實驗數據出現特殊倍頻：



將這些頻率比較:



控制參數:長度 15cm、口徑 2cm、流量 20NL/min、膜-塑膠

<將幾個特別高起的頻率標示出來並由低至高排列，並依序標上 1、2、3、4…，以便看出這些頻率的倍數關係。

我們發現這些特別高起的頻率有整數比的倍數關係。並用此一基頻換算開管空氣共鳴柱的管長為 16.2 cm （$L=\frac{v}{2f}$），發現與此實驗所使用的管長甚為接近。**推論可能為空氣柱共鳴的頻率與膜的倍頻接近時，就會有這些特殊倍頻強度增加的現象產生。**但由於膜產生聲音的基頻與管長和管徑有關（在前面討論中的結果），因此我們不容易找到適合的管長產生此一現象。

柒、結論

一、不論改變的變因為何，空氣喇叭產生的聲音頻譜都呈現連續整數比關係。

二、將空氣喇叭產生的基頻與空氣柱共鳴的基頻比較，發現兩者差異甚多，因此我們推論聲音並不是由空氣柱共鳴產生。

三、為了討論產生聲音的原因，我們測量了空氣喇叭氣室內的壓力，發現壓力的頻譜分析和聲音的頻譜分析相同；推論氣室內空氣壓力帶動膜的振動，膜的振動產生聲音。

四、實驗結果流量增加會使聲音強度增加。原因為流量增加會使氣室內壓力差增加，造成膜的振幅增加；而振幅越大，聲音強度越大。

五、膜越厚聲音基頻就越低，推論膜的厚度增加會使膜的張力增加，影響聲音頻率。並再次證明膜的振動是聲音產生的原因。

六、聲音的基頻會隨膜的材質不同而改變，也證明聲音的基頻是由膜產生而非空氣柱共鳴。

七、出氣管長增加聲音基頻會降低。推論是出氣管增長時，管內的空氣量增加，增加膜回彈產生聲音的困難。

但比較空氣喇叭產生聲音的基頻與同管長的雙開口共鳴基頻比較，兩者不相同，證實聲音基頻不是空氣柱共鳴所產生。

八、出氣管口徑會影響聲音頻率，並且口徑越大，基頻愈低且分貝越高。推論是管子口徑增加時，留在出氣管內的空氣增加，同樣增加膜回彈產生聲音的困難，因此管子口徑會影響聲音頻率。

九、我們發現聲音的傅立葉分析偶有特殊倍頻強度增加的現象，推論是因為管長的空氣柱共鳴頻率接近膜的共振頻率時，管內空氣柱產生共鳴增加接近頻率的強度。

十、綜合以上結論，空氣喇叭產生聲音主要與膜的振動有關，而膜的振動與出氣管管長和口徑有關。另外，影響聲音強度的變因有進氣量與出氣管口徑。

捌、參考資料

一、 白明憲(2004)工程聲學(三版)．台北市:全華科技圖書股份有限公司

二、 Bjorn Kolbrek．Horn theory: An interdiction Part 1．Audio X Express

三、 Palm Walter C(1980)air horn．The Journal of the Acoustical Society of America，67，6

四、 楊亦春、滕鵬曉(2010)氣流揚聲器全調製發聲方法研究．聲學學報，35，2

五、 張平柯(2013)．揚聲器的位移共振與速度共振．中南大學學報(自然科學版)，44，12

六、 白春華、嚴峰、王仲琦、吳建星、張超(2008)諧振管對氣流揚聲器發聲特性的影響．北京理工大學學報，28，8

七、 Wikipedia: Air Horn, from https://en.wikipedia.org/wiki/Air_horn

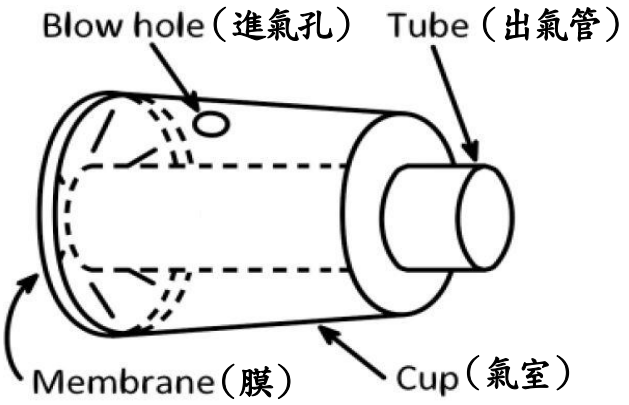
【評語】051819

本作品以 FFT 來分析氣動喇叭產生振動的特性，整體的分析表達完整。研究的主題與方向比較缺乏創意，FFT 的時間截取需要定義，另外對泛音、音色、氣壓等需要加入分析。

作品海報

壹、研究動機

因為參加比賽而接觸到空氣喇叭的相關資料，當我發現一個小小的空氣喇叭發出的聲音卻如雷貫耳，令我驚訝不已，因此想更深入研究其發聲原理，尤其是發現這麼簡單的喇叭原理卻超過高中所學，讓我更是吃驚，於是決定要繼續研究空氣喇叭。



airhorn 結構示意圖

貳、研究目的

探討空氣喇叭發聲原理和影響其音頻的因素。

參、研究設備及器材

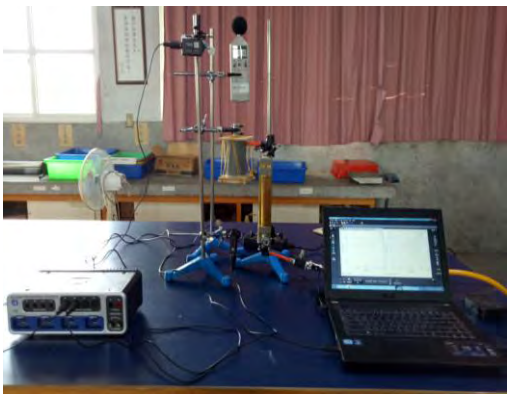
一、測量設備

(一)PASCO一台　　(五)分貝器一台

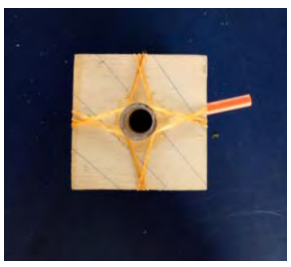
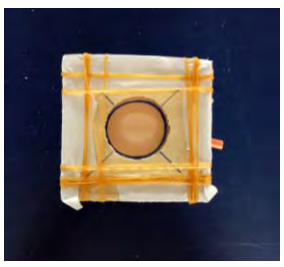
(二)聲音感測器二支　　(六)流量計與針閥一支

(三)壓力感測器一支　　(七)空壓機一台

(四)電腦一台　　(八)雷射都譜勒儀



二、自製喇叭外觀圖

		
正面圖	側面圖	背面圖

肆、研究過程及方法

一、原理

在不進氣的情況下，膜會蓋住出氣管口，則氣室呈密閉狀態，反之若膜向外擴張，則氣室可以和外部相通。進氣時，氣室內氣壓增加，迫使膜撐開，氣室和外部相通，讓氣體可以流出，隨之氣壓降低，膜回到原來位置，氣室封閉。如此反覆，造成膜來回振動，發出聲音。

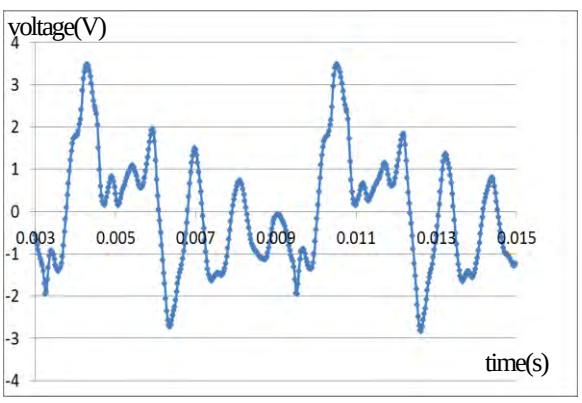
二、實驗測量

(一)距喇叭出氣管口處 15 公分放置分貝器及 37 公分放置聲音感測器，膜下方 15 公分放置聲音感測器，在氣室置入壓力感測器　(設定取樣頻率 40000Hz)。

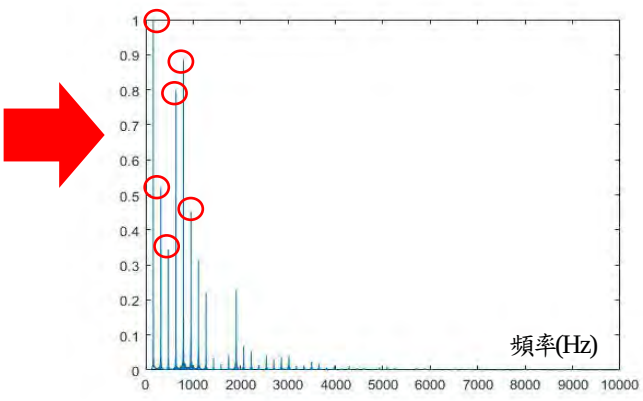
(二)進氣使喇叭產生聲音，持續 10 秒，停止進氣 60 秒，量測音頻、分貝及壓力。

(三)重複步驟 (二)五次，取得五組數據。

(四)將感測器量出的數據用 Matlab 傅立葉分析(設定取樣點數 2^{16}=65536 個點)，算出頻率圖。如下圖所示



感測器顯示數據

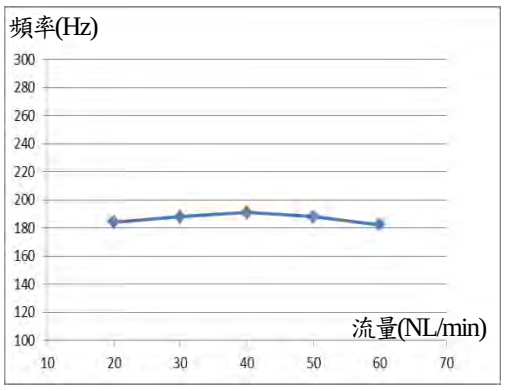


傅立葉分析圖

伍、研究結果

結果一、改變不同流量

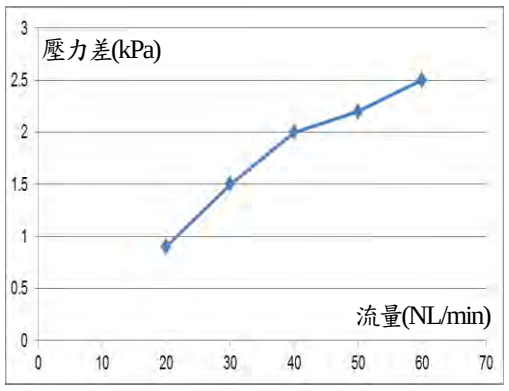
基頻比較圖



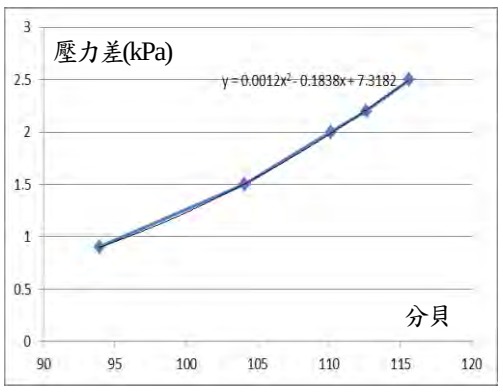
結論:流量改變對產生基頻影響無關。

結果二、氣室內壓力量測

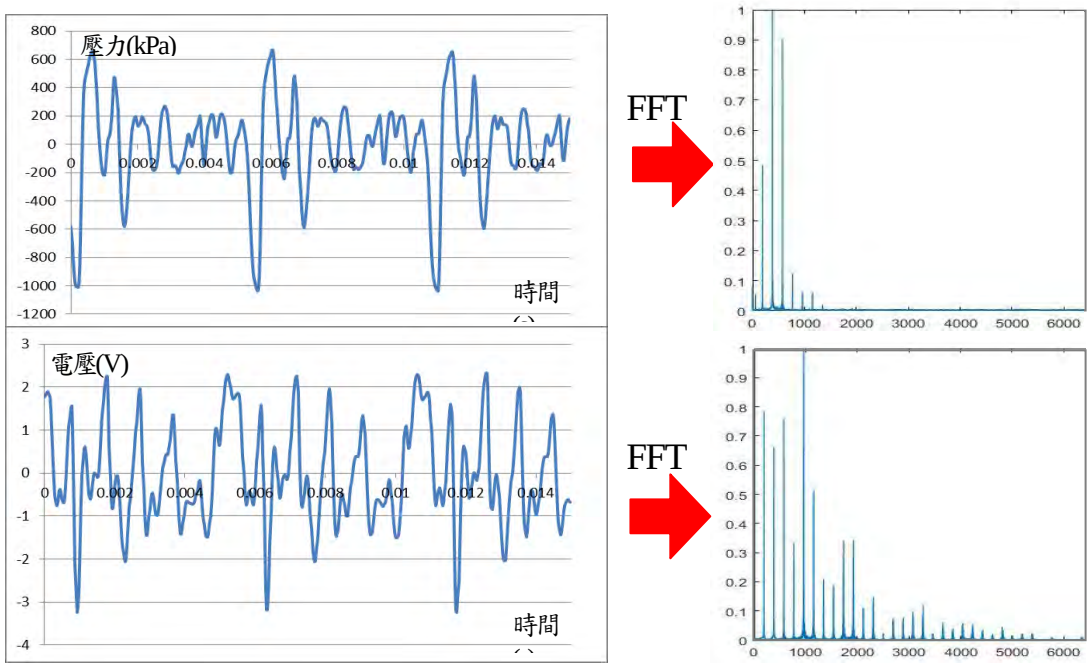
(一)氣室內壓力和流量比較圖



(二)氣室內壓力和分貝比較圖



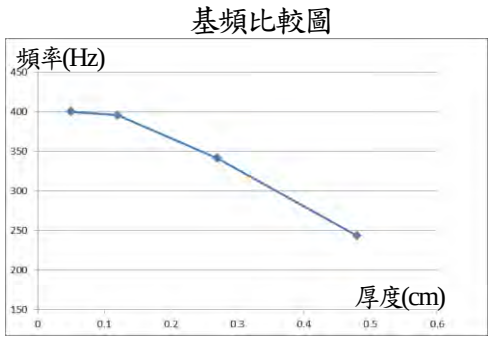
(三) 氣室內壓力變化頻率和管口聲音頻率比較



結論:
(一) 流量越大，壓力差越明顯　(二)聲音強度和氣室內壓力變化有正相關。
(二)壓力變化頻率和聲音頻率相同，但強度不同。

結果三、改變膜的厚度

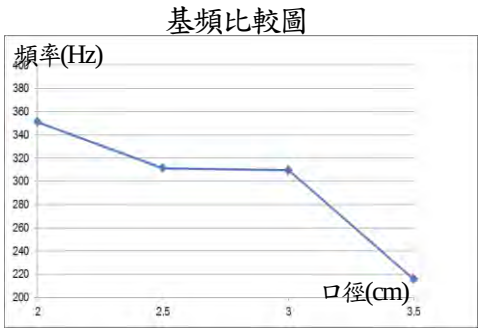
基頻比較圖



結論:厚度越厚，基頻越低。

結果四、改變出氣管口徑

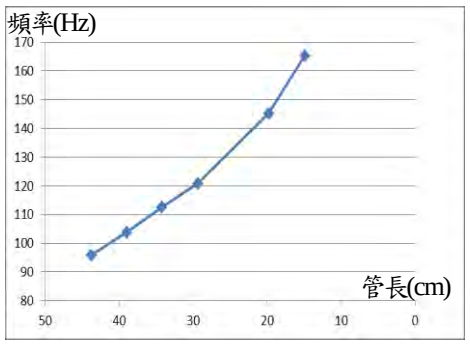
基頻比較圖



結論:口徑越大，基頻越低。

結果五、改變出氣管長度

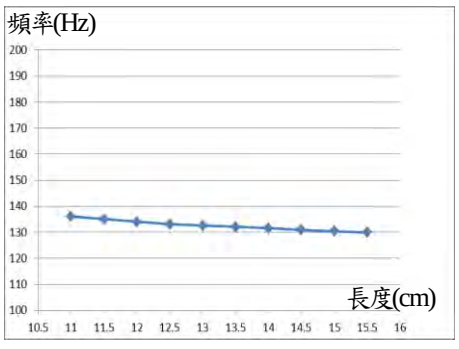
基頻比較圖



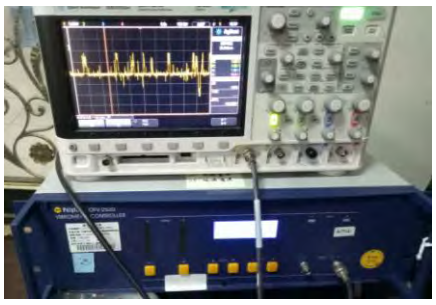
結論:管子越長，基頻越低

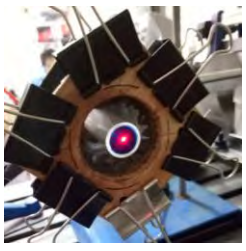
結果六、改變氣室長度

基頻比較圖



結論:氣室長度改變對基頻影響不明顯。

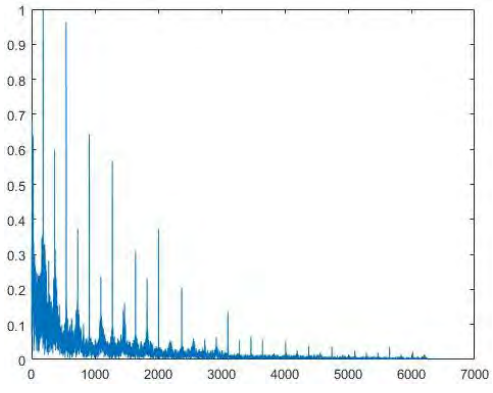




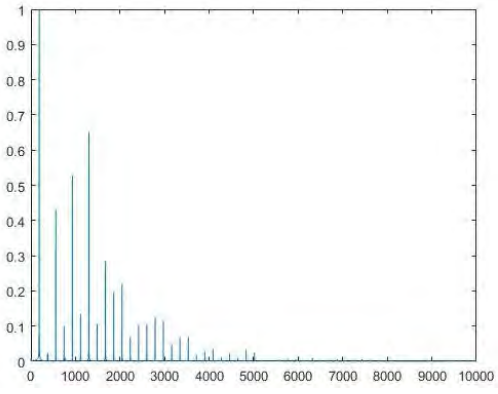
雷射都譜勒儀

結果七、膜振動頻率和聲音頻率比較

膜振動頻譜圖



聲音頻譜圖



流量	膜振動基頻	聲音基頻
20NL/min	182 Hz	186 Hz
25NL/min	187 Hz	185 Hz
30NL/min	186 Hz	184.5 Hz
35NL/min	185 Hz	183.5 Hz
40NL/min	184 Hz	182.5 Hz

結論:(一)膜振動頻率不隨流量增加而有大幅度的改變。(二)膜振動頻率和聲音頻率近乎相同。

陸、討論

一、根據實驗結果一：送入的氣流越大，氣室內壓力變化越大，測量出聲音分貝也越大。由於壓力的頻譜分析和聲音的頻譜分析相同，因此**推論基頻的產生是依靠空氣喇叭的膜振動**。

二、在實驗結果二中我們改變了膜的厚度，發現膜的厚度會影響基頻。並**再次證明膜的振動是聲音產生的原因。**

三、在實驗結果三中，我們研究了固定管長不同口徑的管子，發現管柱口徑越大，頻率越低。這個結果也呼應了後面的討論：**表示空氣柱的空氣量會造成膜推送空氣的阻力，影響膜的振動，進而影響空氣喇叭產生聲音的基頻。**

四、在實驗結果四中，我們發現：

（一）、不同管長之倍頻仍滿足連續的整數比。（二）、管長度越長，基頻越低，相關關係並非線性關係。

此結論表示空氣柱的長度會造成膜振動的阻力，影響空氣喇叭產生聲音的基頻的大小，但由於聲音基頻還是由膜的振動所產生，而非空氣柱共鳴的基頻。

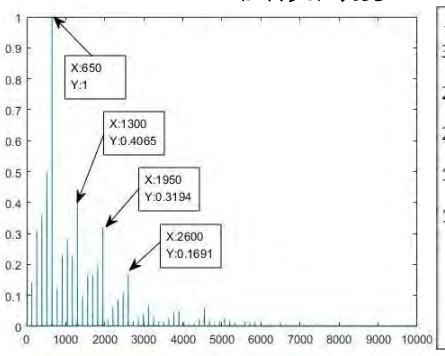
下面表格為空氣喇叭產生聲音的基頻與該管長的共鳴基頻比較，推論聲音基頻不是空氣柱共鳴所產生。

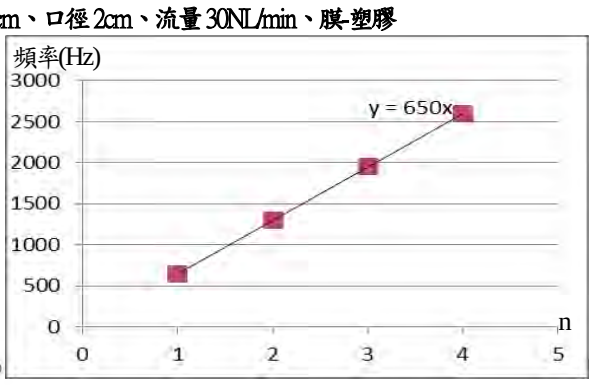
管長	14.9cm	19.78cm	29.38cm	34.22cm	38.95cm	43.75cm
airhorn 聲音基頻（傅立葉分析）	165.4Hz	145.3Hz	120.8HZ	112.9Hz	103.8Hz	95.83Hz
開管基頻=$\frac{v}{2L}$（由管長換算）	1154.4Hz	869.6Hz	585.4Hz	502.6Hz	441.6Hz	393.1Hz
閉管基頻=$\frac{v}{4L}$（由管長換算）	577.2Hz	434.8Hz	292.7Hz	251.3Hz	220.8Hz	196.6Hz

(當時平均氣溫 t=21.5℃，換算聲速 v=331+0.6*t ≈ 344 m/s)

五、在上述實驗中，我們發現在聲音的峰值頻率與相關參數（如流量、膜的厚度、管長和管徑）皆無特殊直接相關關係。然而有些實驗數據會出現特殊倍頻：

控制參數:長度 25.4cm、口徑 2cm、流量 30NL/min、膜-塑膠





我們發現這些特別高起的頻率有整數比的倍數關係。並用此一基頻換算開管空氣共鳴柱的管長為 25.41 cm（$L=\frac{v}{2f}-0.8r$）(註:考慮管口修正量)，發現與此管長甚為接近。**推論可能為空氣柱共鳴的頻率恰與膜的倍頻接近時，就會有這些特殊倍頻強度增加的現象產生。**因此當振動頻率和共鳴頻率差距太大，此時空氣柱無法產生共鳴，因此基頻會成為主頻，且沒有其他高強度倍頻的產生。

六、在實驗結果七，我們向大學端借用雷射都譜勒儀量測膜的振動，我們發現:

(一) 、聲音的頻率和膜振動的頻率近乎相同。

(二) 、在不同流量的情況下， 膜的振動頻率仍和聲音的頻率相同。

(三) 、在 FFT 圖中可以看出特殊倍頻部分強度有所不同。

確認了聲音的基頻是由膜振動所產生，並且管內空氣柱會影響倍頻強度分布。

柒、結論

一、以流量、膜的厚度為操縱變因進行氣壓頻譜分析、聲音頻譜分析以及測量膜的振動頻率，證實膜的振動產生聲音。

二、經由實驗改變管子的口徑與管長，發現皆會影響聲音的基頻；推論出氣管內的空氣柱造成膜推送的阻力，影響膜的振動，進而造成基頻改變。

三、並將空氣喇叭所產生的基頻與由空氣柱管長換算出的駐波基音相較之下差異甚多。證實了聲音的基頻並非由空氣柱共鳴所產生。

四、偶有適當的管長使空氣柱共鳴頻率接近膜的振動之倍頻時，則傅立葉分析中便有特殊倍頻強度增加的現象；說明了管子內的空氣柱除了造成聲音阻抗外，仍有可能發出共振的聲音。

五、利用雷射都譜勒儀精準測量膜的振動，發現膜的振動基頻和聲音基頻相同，確認聲音的基頻是由膜的振動決定。

六、綜合以上結果我們推論:當對空氣喇叭進氣時，藉由膜的振動推送空氣產生聲音，而膜的振動基頻受出氣管內空氣量和膜的材料影響；若有適當管長，則出氣管空氣柱共鳴使特殊倍頻被篩選出。另外，影響聲音強度的變因有進氣量與出氣管口徑。

捌、參考資料

一、 白明憲(2004)工程聲學(三版)．台北市:全華科技圖書股份有限公司

二、 Bjorn Kolbrek．Horn theory: An interdiction Part 1．Audio X Express

三、 Palm Walter C(1980)air horn．The Journal of the Acoustical Society of America，67，6

四、 楊亦春、滕鵬曉(2010)氣流揚聲器全調製發聲方法研究．聲學學報，35，2

五、 張平柯(2013)．揚聲器的位移共振與速度共振．中南大學學報(自然科學版)，44，12

六、 白春華、嚴峰、王仲琦、吳建星、張超(2008)諧振管對氣流揚聲器發聲特性的影響．北京理工大學學報，28，8

七、 Wikipedia: Air Horn, from https://en.wikipedia.org/wiki/Air_horn