

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 工程學(一)科

第二名

探究精神獎

052316

Fano 型多管陣列裝置對吸音透氣研究及應用

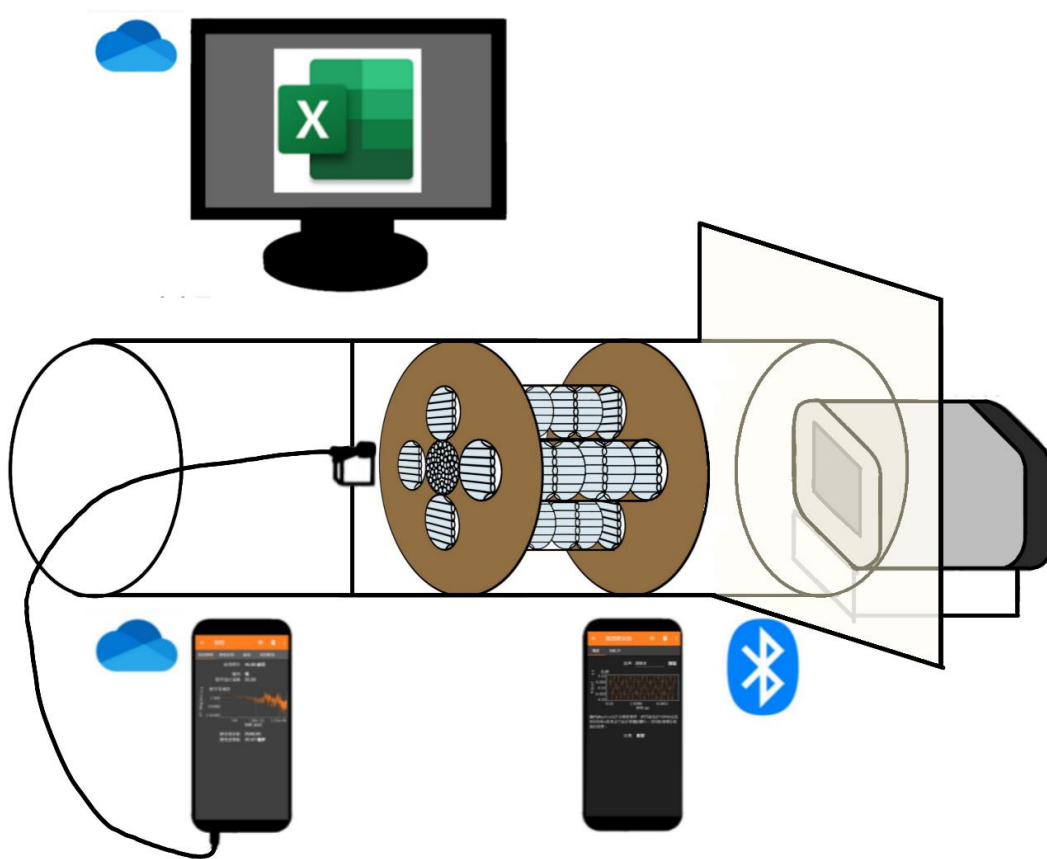
學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 郭亦洵 高二 何晨睿	指導老師： 徐志成 張良肇
-------------------------	---------------------

關鍵詞：多管陣列、Fano 共振、吸音

摘 要

本研究以吸管製作 Fano 型多管陣列結構裝置並放置於壓克力管中進行研究，利用藍芽喇叭連接手機播放聲頻穿透設計之 fano 吸管陣列結構，其結構分為幾種，其一為多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)，其二為交錯排列陣列之共振結構，量測兩結構間所造成聲波的干涉造成之吸音特性，設計 Fano 型之多管陣列結構，實驗以收音麥克風連接手機軟體進行聲頻量測，再將實驗數據匯出進行圖表製作與計算分析，實驗結果得出組合式最佳 fano 聲頻結構可使 700Hz~1800Hz 之聲頻穿透率下降至原來的 8%~12%，於 1400Hz 時可消除至 1%以下，並能達到高透氣率，為具有高透氣、高吸音頻寬及低成本之新型超穎聲學材料。



圖一、Fano 型多管陣列結構實驗示意圖

壹、研究動機

防噪在聲學上對於環保是重要的一大課題，而防噪的技術主要分成吸音與隔音兩種。而吸音材料大部分具有多孔性及鬆散性的特性，使聲波進入孔隙時一部分聲能化為熱能而被吸收掉；隔音裝置則有許多是透過不同排列組合使聲音反射或用圍護結構將噪聲控制在一定範圍內而達到消音效果，利用干涉降低共振的頻率也是消音的手法之一，但這些消音裝置大部分都無法達到透氣且同時消音的效果，因此本研究想以吸管製成可兼具透氣功能之消音結構，以吸管平行壓克力管排列(空氣流道結構)及交錯式陣列排列(共振結構)的可透氣式多管陣列進行 Fano 型組裝，利用手機軟體發出固定頻率範圍之聲譜觀察其在不同變因下，此類結構對共振產生之影響，希望能找出最有效消音及透氣的方法。

貳、研究目的

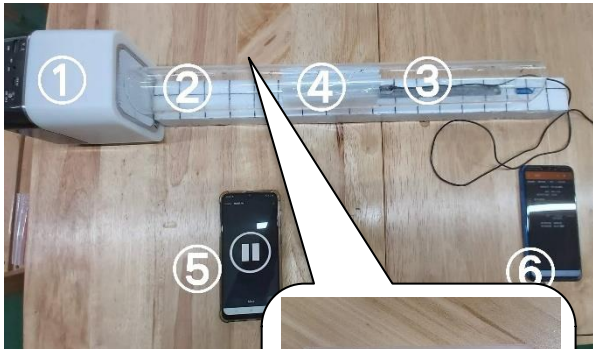
本研究測量聲波在圓柱壓克力管中受多管陣列結構影響之共振情形，改變變因將平行壓克力管排列(空氣流道結構)長度及擺放位置改變、調整交錯式陣列排列(共振結構)間距、開管閉管、交錯角度及收音位置，分析其對共振產生之改變，並將結構組合成組合結構(Fano 結構)，檢視結構組合是否能同時達到消音且透氣之效果。

- 一、改變平行式多管陣列(空氣流道結構)(管長、擺放位置)，探討聲頻穿透率及透氣率，測量不同結構間距聲譜關係
- 二、改變交錯式多管陣列(共振結構)(間距、遮蓋長度、管口開閉、排列角度、材質)，探討聲頻穿透率及透氣率，測量不同結構間距聲譜關係
- 三、改變量測方法(駐波管法、白噪音法)比較量測聲譜差異
- 四、組合多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)與多管陣列為交錯式排列(共振結構)的上述變因，探討聲頻穿透率及透氣率

參、研究設備及器材

一、多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)

二、多管陣列交錯式排列(共振結構)



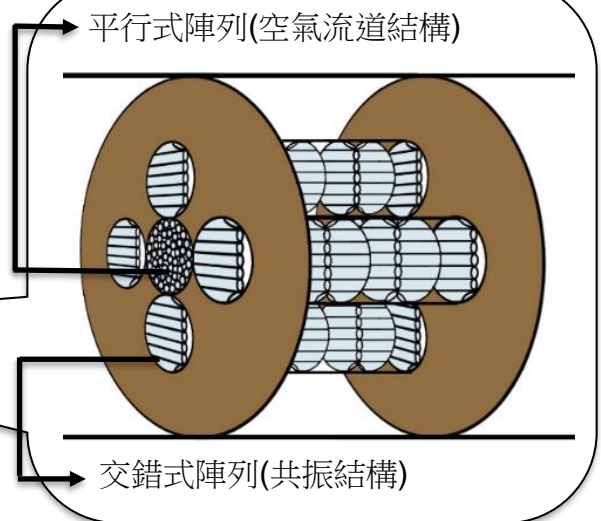
- ①藍芽喇叭
- ②壓克力管(小)
- ③麥克風
- ④實驗結構
- ⑤手機(連接喇叭發聲)
- ⑥手機(連接麥克風接收)



- ⑦壓克力管(大)
- a) 開管且遮蓋長度短(壓克力管 50%)吸管結構
- b) 開管且遮蓋長度長(壓克力管 87.5%)吸管結構
- c) 閉管且遮蓋長度短(壓克力管 50%)吸管結構
- d) 閉管且遮蓋長度長(壓克力管 87.5%)吸管結構
- e) 開管且遮蓋長度短(壓克力管 50%)紙多管結構
- f) 開管且遮蓋長度長(壓克力管 87.5%)紙多管結構



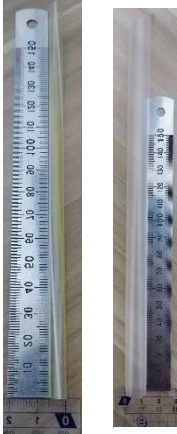

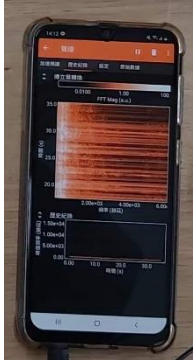


圖二、平行壓克力管排列(空氣流道結構)與交錯式排列(共振結構)實驗裝置圖

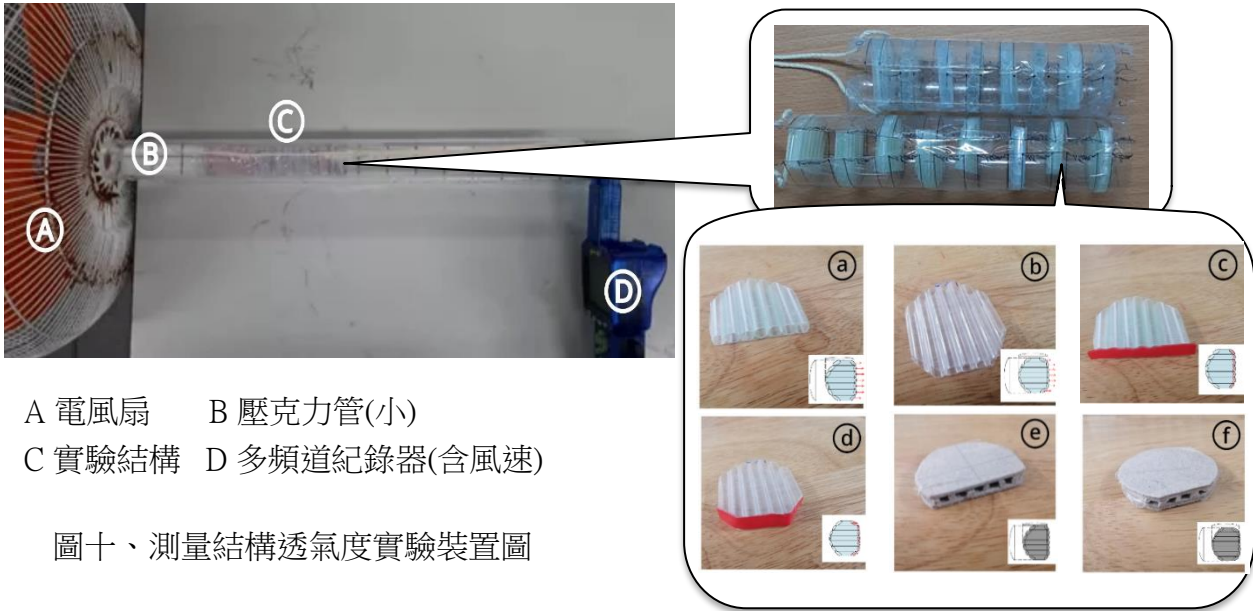


圖三、組合式結構(Fano 型結構)實驗裝置圖

表一、研究設備與器材表

 <p>圖四、藍芽喇叭</p>	<p>1.喇叭(聲源)</p> <p>(1)發聲源裝置</p> <p>(2)可用手機調整 播放 16000Hz 白 噪音或單頻 328Hz</p>	 <p>圖五、壓克力管</p>	<p>2.壓克力大管</p> <p>(1)擺放結構</p> <p>(2)小壓克力管徑外圈 5cm，內圈 4.3cm、長度 46cm</p> <p>(3)大壓克力管徑外圈 20cm，內圈 19.4cm、長 度 50cm</p>
 <p>圖六、吸管</p>	<p>3.吸管</p> <p>(1)組成多管陣列 結構</p> <p>(2)口徑 1.2cm 或 口徑 0.7cm</p>	 <p>圖七、麥克風</p>	<p>4.麥克風</p> <p>(1)接收聲音</p> <p>(2)收音 0~5000Hz</p>
 <p>圖八、手機 app：White Noise</p>	<p>5 手機 (HUAWEI INE-LX2)</p> <p>(1)連接喇叭播音</p> <p>(2)利用手機 app：White Noise 連接喇叭發出白 噪音</p> <p>(3)利用手機 app：phyphox 連 接喇叭發出單頻</p>	 <p>圖九、手機 app：phyphox</p>	<p>6.手機 (SAMSUNG Galaxy A50)</p> <p>(1)連接麥克風收音</p> <p>(2)利用手機 app： phyphox 連接麥克風接 收各頻率強度</p>

三、測量不同多管陣列結構的透氣程度



A 電風扇 B 壓克力管(小)
C 實驗結構 D 多頻道紀錄器(含風速)

圖十、測量結構透氣度實驗裝置圖

利用電風扇產生風，並於管口處利用風速計紀錄壓克力大管內有無結構對風速的差異

肆、研究過程或方法

一、文獻探討

表二、文獻探討表

文章	作者	摘要	對研究的幫助	出處
雙模態費諾可透氣是超穎材料應用於寬頻聽覺濾波。	蕭翎文	Fano 型陣列結構消音原理及模式	認識 Fano 型陣列結構，由此發想出將吸管排列成此型態進行實驗	國立台灣大學工學院機械工程系碩士論文(2020)。
可實現寬頻寬角度隔聲的薄層通風結構	林遠鵬 梁彬 楊京 程建春	Fano 共振耦合可對不同角度入射的低頻聲波高效隔離，且通風量高(通風面積>50%)	了解不同角度入射 Fano 型結構可能產生之差異以及 Fano 型結構之通風效果	南京大學學報(自然科學版)第 55 卷第五期 2019 年 9 月。

聲學超材料與超表面研究進展。	丁昌林 董儀寶 趙曉鵬	聲學超材料的發展及成效	了解我們想在圓管中排列的 Fano 型多管陣列結構在電磁學中產生之效果類比	西北工業大學智能材料實驗室物理學報 (2018)
以互相關檢測理論開發無響室吸音係數測試法之研究—以多孔性材料為樣本	陳炯堯 張奕瑞	聲波各角度入射多孔性結構之效果研究，目標為開發無響室	了解能讓聲波在多孔性材料中消音效果更佳 00 的變因	朝陽科技大學建築系技術學刊第 20 卷 (2005)
Recent Advances in Acoustic Metamaterials for Simultaneous Sound Attenuation and Air Ventilation Performances	Sanjay Kumar Heow Pueh Lee	不同類型之 Fano 型結構對聲波路徑之影響，以及消音效果之優劣比較	了解 Fano 共振結構消音原理以及我們想做的交錯式排列結構中聲波移動之路徑及預期效果	Recent Advances in Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials

從以上文獻看出目前主要的 Fano 型結構研究多為電磁學方面研究，結構類型分為螺旋式或迷宮式排列，螺旋式結構為多，而研究結果顯示 Fano 型結構消音效果佳，故本研究嘗試進行迷宮型多管陣列結構，將結構以多管陣列製作，希望達成更佳消音。

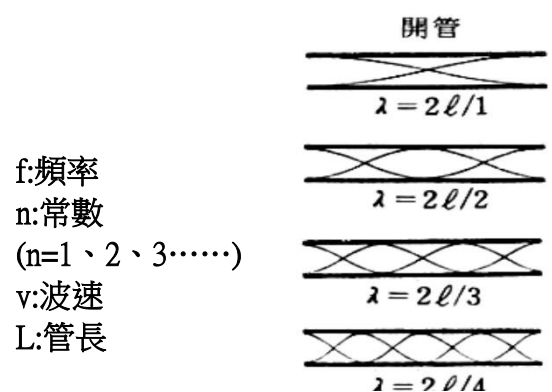
二、基本原理

(一)開管空氣柱駐波

振幅頻率相同但行進方向相反的波在互相干涉後會產生駐波。當駐波產生時，介質上波節處永遠靜止不動，而二相鄰波節的中間點振動幅度最大，稱為波腹，當空氣柱形成駐波時，管長為二分之一波長的整數倍。

$$f = \frac{nv}{2L}$$

則駐波頻率為 $n=1$ 時為基音， $n=$ 其他數值時為泛音，基音為第一峰



圖十一、駐波示意圖

值，而泛音以第二、三、四峰值呈現。

(二)吸音係數

當聲音入射材料時，其入射聲能一部分被吸收，一部分穿透，另一部分被反射，吸音係數一般用於表示材料之吸音能力大小，其中反射係數即是反射聲能 E_r 與入射聲 E_i 之比。吸音係數公式如下

$$\alpha = \frac{(E_i - E_r)}{E_i} = \frac{(E_b + E_t)}{E_i}$$

E_i :入射波的總能量
 E_r :反射波的能量
 E_b :被結構吸收的能量
 E_t :通過結構的能量
 α :吸音係數

(三)消音器

利用聲音的吸收、干涉等原理阻礙聲音傳播讓氣流通過的設備。分為以下幾種：

表三、消音器類型與原理表

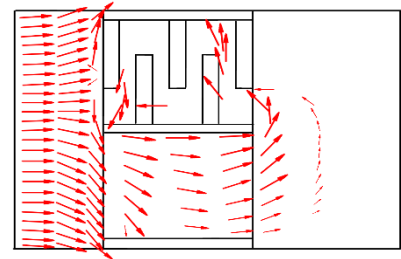
1.阻性消音器(吸音型)	把吸音材料固定在氣流流動的管道內壁或按一定方式排列在管道，利用吸音材料的多孔性及鬆散性，使聲波進入孔隙時一部分聲能化為熱能而被吸收掉。消高頻和中頻噪音的效果較好
2.共振型消音器	利用管道開孔與共振腔相連接，利用小孔處的空氣柱和空腔內的空氣構成了共振系統。當外界噪音頻率和共振系統의 相同頻率時，小孔中的空氣柱發生共振並與孔壁發生劇烈摩擦而消耗聲能，達到消音的效果
3.抗性消音器(膨脹型)	由管和小室相連而成，利用風管截面的改變使聲波向聲源方向反射回去而起到消音作用，對於消除低頻噪音有一定效果
4.阻抗複合型消音器	將阻性及抗性消音器通過適當結構組合，對低頻到高頻區噪音均具有良好的消音效果
5.吹出口型消音器	改變音源的頻率特性再予以吸收或隔

	絕，如送風機噪音。範圍：低、中、高 頻率音
6.調音型消音器	針對必要之單頻音提供所需減音量再配 合吸音型消音器之使用，使單頻音與其 他頻率音量差縮小，而降低單頻音之影 響，如管道之消音
7.干涉型消音器	利用波之破壞性干涉降低音能，如壓縮 機、汽機車排氣管噪音。範圍：低頻率 音

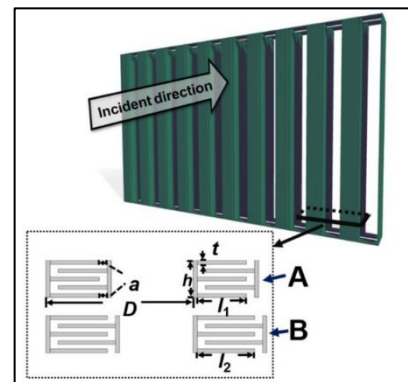
(四)法諾共振(fano 共振)

法諾共振是透過週期性結構缺陷讓聲場特性改變進而達到消音效果，結構中的曲折創造出足夠長的流道，而因為路徑愈長頻率愈低，故在當結構整體厚度相同時，只要增加曲折密度便可使共振頻率降低，而當聲音頻率於結構共振頻率附近時，其區為之聲能相位會與穿過無結構空流道之聲波相反，速度場、聲強度場改變指向往回捲曲，形成相消性干涉，經過結構後之區域，聲壓場、速度場、聲強度場之振幅衰減至零，達到降低穿透率吸音之效果。

我們使用的結構類型在其他文獻中被稱為傳統迷宮式空間盤繞材料，如圖所示總長度為 t ，整體寬度為 a ，通道寬度和線圈的牆壁厚度分別為 d 和 w ，而聲波在結構中的軌跡為 L (由紅線表示)。這樣的結構具有充滿介質的單直通道等效模型不同的折射指數。



圖十二、Fano 共振聲場示意圖



圖十三、迷宮狀空間摺疊結構

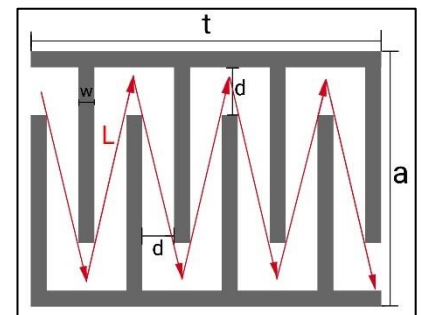
相對折射指數可以表示為

$$n_r = L_{\text{eff}} \div t$$

其中有效的總通道長度表示為

$$L_{\text{eff}} = N \times L$$

n_r 為折射指數
 L_{eff} 為有效通道長度
 t 為結構總長度
 N 為通道數
 L 為一通道長度



交錯型 Fano 共振結構單體共振頻率公式可能為 $f =$

圖十四、Fano 聲波軌跡

$$\frac{nv}{2L \times n_r} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

引用自：

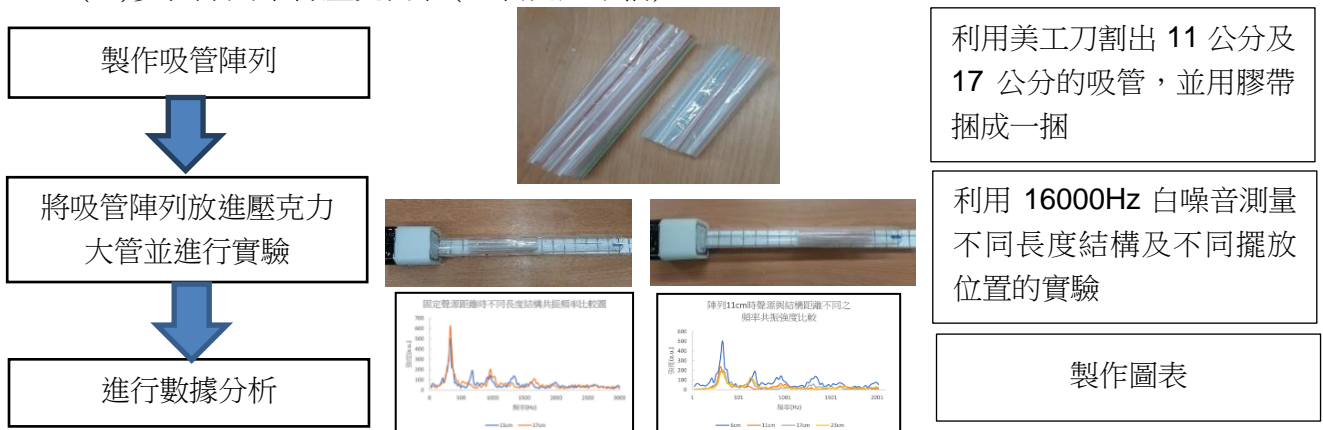
1. 雙模態費諾可透氣是超穎材料應用於寬頻聽覺濾波
2. Recent Advances in Acoustic Metamaterials for Simultaneous Sound Attenuation and Air Ventilation Performances

三、設計原理與方法

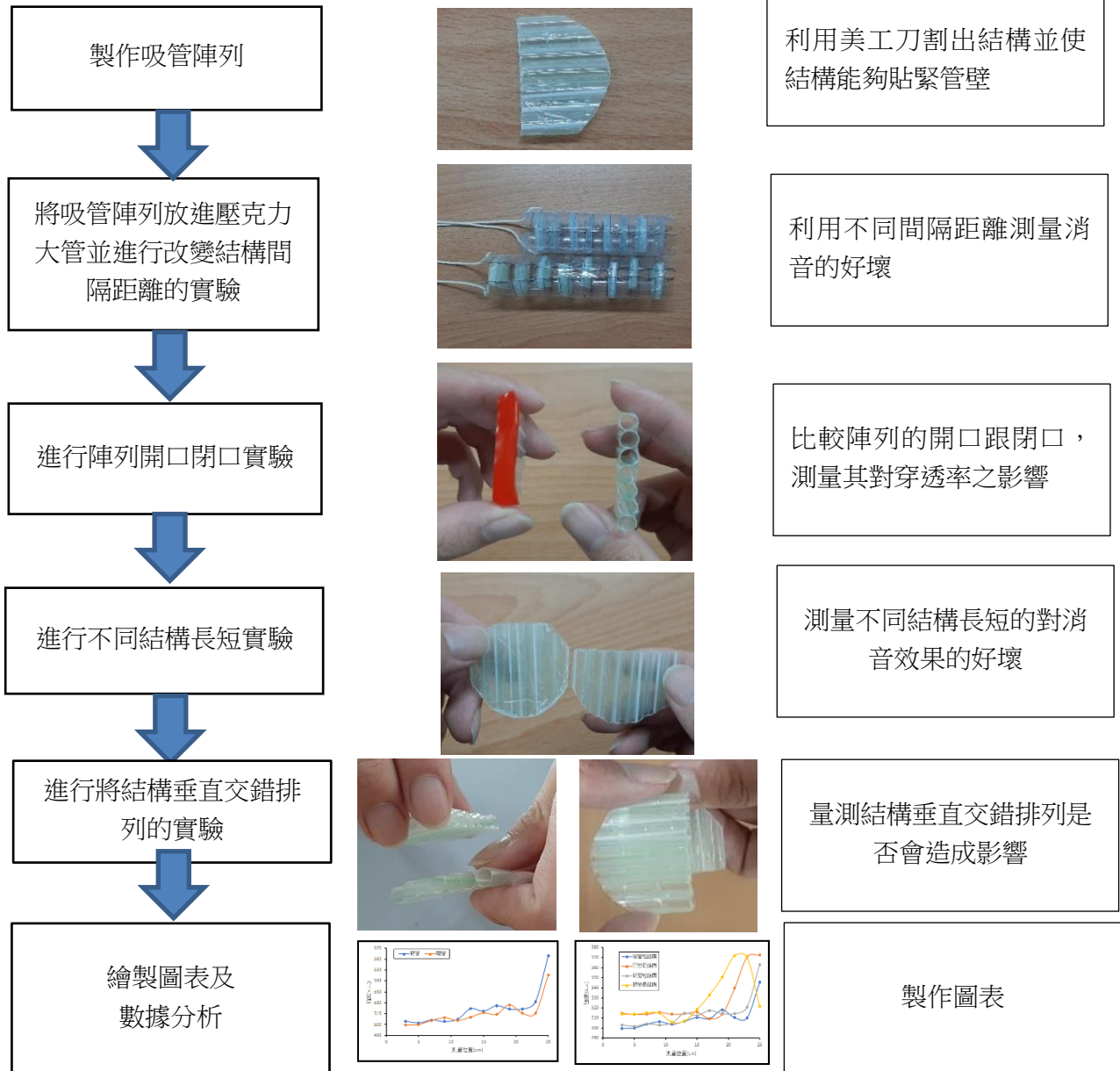
- (一) 本實驗主要是利用干涉型消音器之消音方式，在結構中以空流道、多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)與多管陣列交錯式排列(共振結構)進行 Fano 型組裝調整，試圖使聲速在通過結構時產生快慢區別，形成破壞共振達成消音。
- (二) 為增加消音頻寬，採漸變式之交錯式排列多管陣列(共振結構)期望增加頻寬
- (三) 調整頻寬方式：以增加共振結構組數使其流道密度增加，共振頻率下降
- (四) 在空氣流道部分採多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)排列，透過整流調整減少擾流增加透氣

四、實驗流程圖

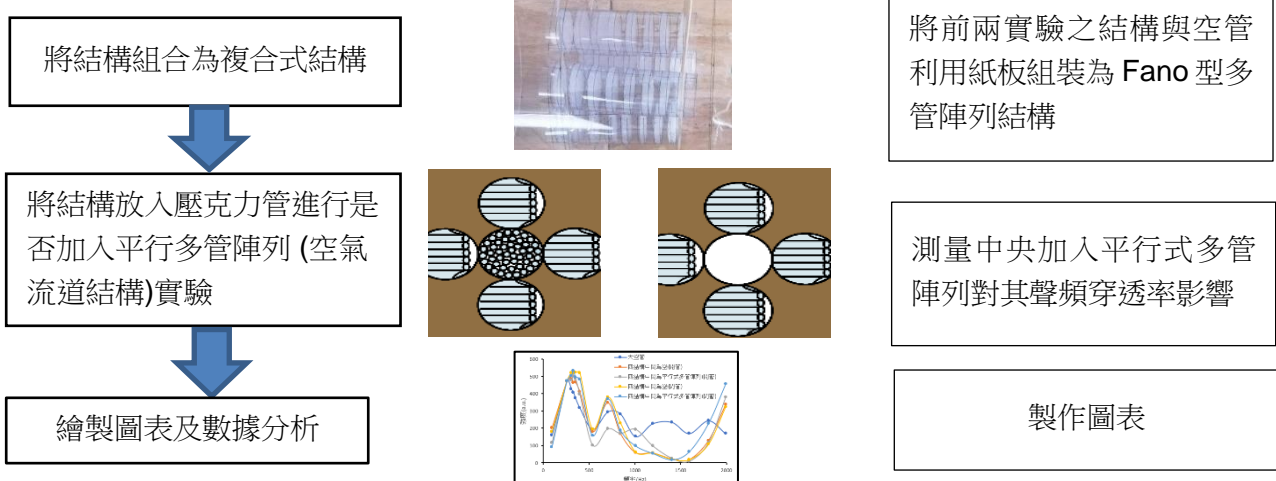
(一) 多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)



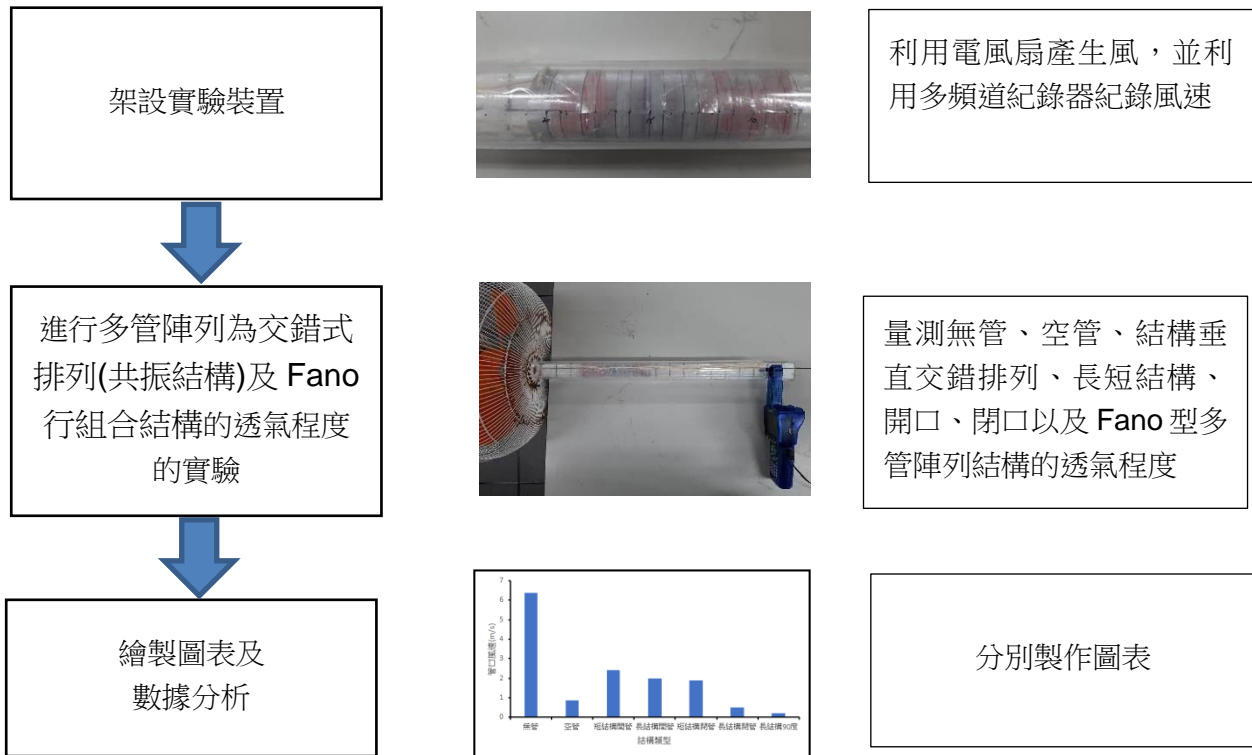
(二)多管陣列交錯式排列(共振結構)



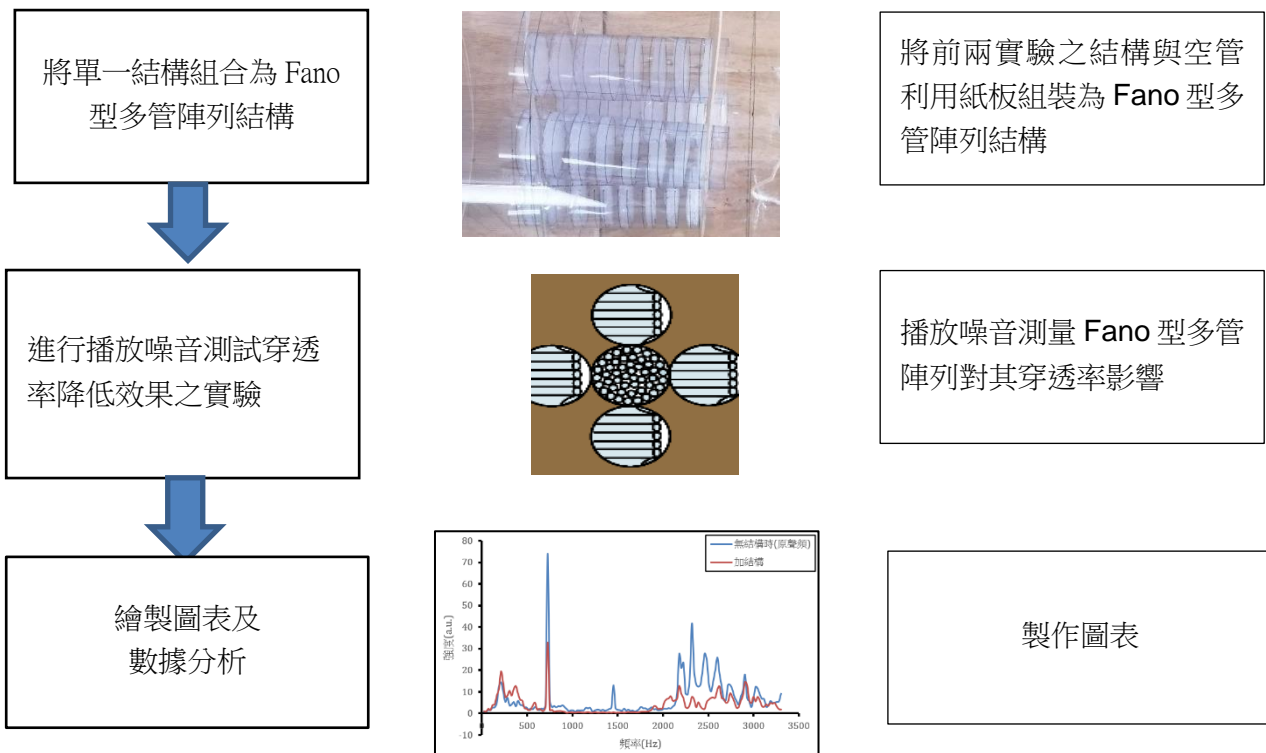
(三)Fano 型組合多管陣列結構



(四)測量多管陣列交錯式排列(共振結構)及 Fano 型多管陣列結構的透氣程度



(五)噪音於 Fano 型組合多管陣列結構之聲頻穿透量測

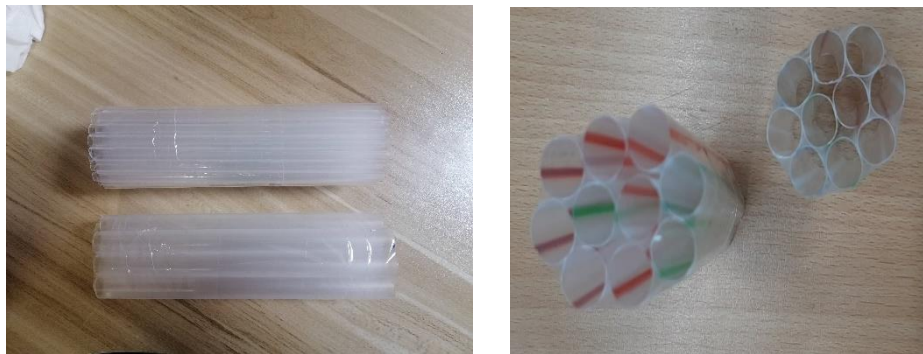


五、實驗過程與步驟



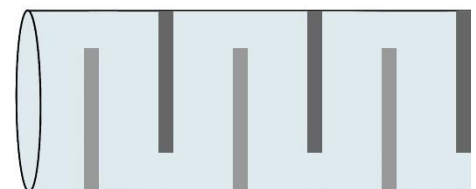
圖十五、交錯式排列(共振結構)裝置

量測方法採用白噪音法語單頻逐點測量聲譜方式，白噪音法能快速量測但在中低頻準確度較差，故亦採用單頻逐點量測提升準確度。利用手機 app(左)連接藍芽喇叭發出 16000Hz 的白噪音或 328Hz 的單頻，經過內含結構的壓克力管並利用在結構後的麥克風連接手機(右)接收(app: phyphox)測量聲譜，並匯出數據至 excel 整理並繪製圖表



圖十六、平行式排列吸管結構(空氣流道結構)

此為平行式多管陣列(空氣流道結構)，將口徑 1.2cm 的吸管切割成 11cm 或 17cm 兩種並平行排列



圖十七、交錯式吸管結構(共振結構)

此多管陣列交錯式排列(共振結構)，利用口徑為 0.7cm 之吸管製成一面可貼緊壓克力大管管壁的結構，並交錯擺放



圖十八、組合式吸管結構(fano 型結

此結構為多管陣列交錯式排列(共振結構)及平行式多管陣列(空氣流道結構)組合而成的 Fano 型多管陣列結構，四周擺放多管陣列交錯式排列(共振結構)，中間則為空的或平行式多管陣列(空氣流道結構)



圖十九、測量結構透氣度實驗裝置

利用電風扇產生風，並於管口處利用多頻道紀錄器紀錄壓克力管內有無結構對風速的差異

六、實驗方法及步驟

(一)前置實驗：測量壓克力大管的共振

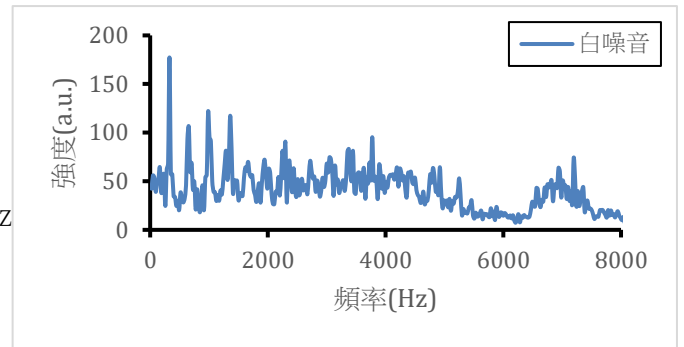
1.架設壓克力管、發聲、接收裝置

- (1)壓克力管管徑外圈 5cm，內圈 4.3cm
- (2)藍芽喇叭播放之白噪音頻率為 0~16000Hz
- (3)麥克風最高收音頻率大約在 5000Hz

2.將麥克風置於壓克力大管進行實驗

3.分析實驗結果

- (1)將 phyphox 軟體聲譜接收之數據匯整至 excel
- (2)將數據繪成圖表觀察



圖二十、壓克力大管頻譜圖

(二)多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)

1.製作吸管陣列

- (1)將口徑 1.2cm 之吸管製成長度不同之多管陣列結構
- (2)裁切為 11cm 和 17cm 長之吸管各 10 隻
- (3)將 10 隻裁切好的吸管以膠帶捆為恰好可塞進壓克力管之大小



圖二十一、平行式結構(空氣流道結構)實驗示意圖

2.架設壓克力管、發聲、接收裝置

- (1)藍芽喇叭播放之白噪音頻率為 0~16000Hz

3.將麥克風置於多管陣列後進行實驗

- (1)多管陣列置於壓克力管中固定公分數位置
- (2)麥克風(連接手機)置於多管陣列後(1cm 處)，並利用手機 phyphox 軟體聲譜接收其穿過陣列後之各頻率共振強度



圖二十二、平行式結構(空氣流道結構)實驗裝置圖

4.分析實驗結果

- (1)將 phyphox 軟體聲譜接收之數據匯整至 excel
- (2)將各實驗不同頻率之多次實驗結果平均後製成圖表觀察

(三)多管陣列為交錯式排列(共振結構)

1.製作吸管陣列

(1)將口徑0.7cm 之吸管製作成佔壓克力管開口 $\frac{1}{4}$ 的多管陣列結構



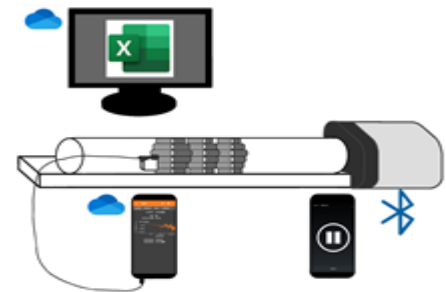
2.架設壓克力管、發聲、接收裝置

- (1)壓克力管管徑外圈 5cm，內圈 4.3cm
- (2)藍芽喇叭播放之白噪音頻率為 0~16000Hz
- (3)麥克風最高收音頻率大約在 5000Hz

圖二十三、交錯式結構(共振結構)

3.將麥克風置於多管陣列後進行實驗

- (1)多管陣列置於壓克力管中固定公分數位置
- (2)喇叭利用 16000Hz 白噪音發聲
- (3)麥克風(連洗手機)置於多管陣列後(3cm 處)，並利用手機 phyphox 軟體聲譜接收其穿過陣列後之各頻率共振強度，觀察是否能達到消音效果



圖二十四、交錯式結構(共振結構)實驗示意圖

4.分析實驗結果

- (1)將 phyphox 軟體聲譜接收之數據匯整至 excel
- (2)將各實驗不同頻率之多次實驗結果平均後製成圖表觀察

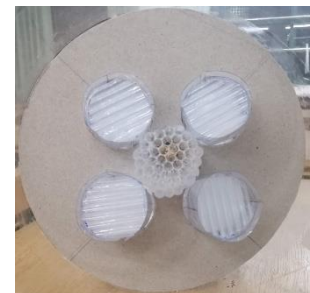


圖二十五、交錯式結構(共振結構)實驗裝置圖

(三)多管陣列為組合式(fano 型結構)

1.製作多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)及多管陣列交錯式排列(共振結構)

(1)多管陣列交錯式排列(共振結構)及多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)組合成四周為多管陣列交錯式排列(共振結構)中間為空或多管陣列平行壓克力管(空氣流道結構)的組合式 Fano 結構



圖二十六、組合式結構(fano 型結

2.架設壓克力管、發聲、接收裝置

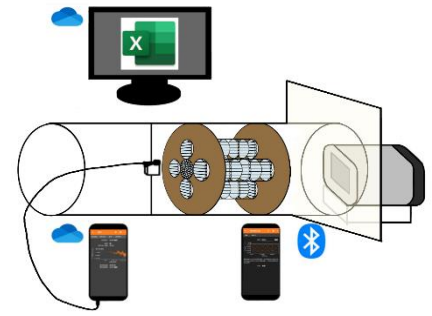
- (1)壓克力管管徑外圈 20cm，內圈 19.4cm
- (2)藍芽喇叭播放之白噪音頻率為 0~16000Hz
- (3)麥克風最高收音頻率大約在 5000Hz

3.將麥克風置於 Fano 多管陣列後進行實驗

- (1)多管陣列置於壓克力管中固定公分數位置
- (2)喇叭利用 16000Hz 白噪音發聲
- (3)麥克風(連接手機)置於多管陣列後(3cm 處)，並利用手機 phyphox 軟體聲譜接收其穿過陣列後之各頻率共振強度，觀察是否能達到消音效果

4.分析實驗結果

- (1)將 phyphox 軟體聲譜接收之數據匯整至 excel
- (2)將各實驗不同頻率之多次實驗結果平均後製成圖表觀察



圖二十七、組合式結構(fano 型結構)實驗示意圖

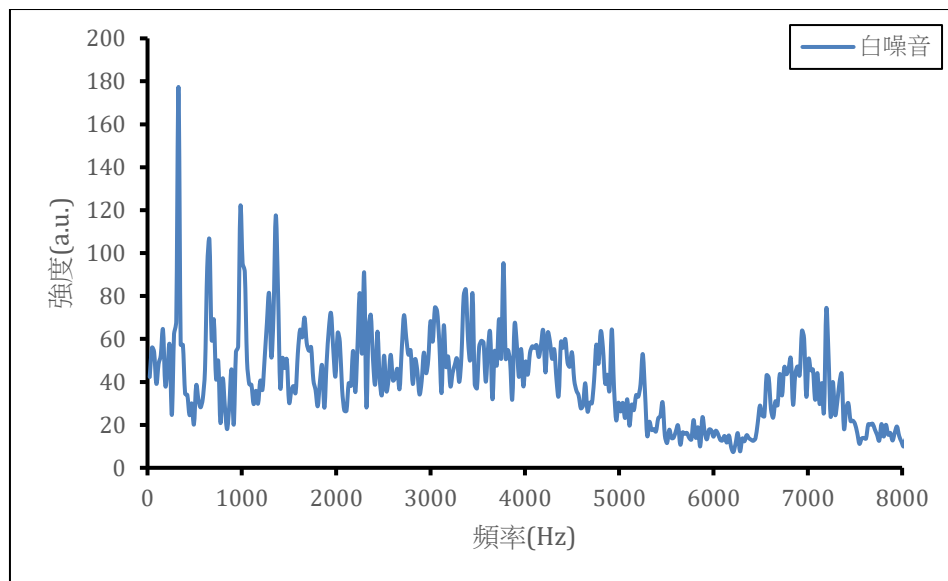


圖二十八、組合式結構(fano 型結構)實驗裝置圖

伍、研究結果

一、前置實驗

(一)白噪音穿透空壓克力管聲譜量測



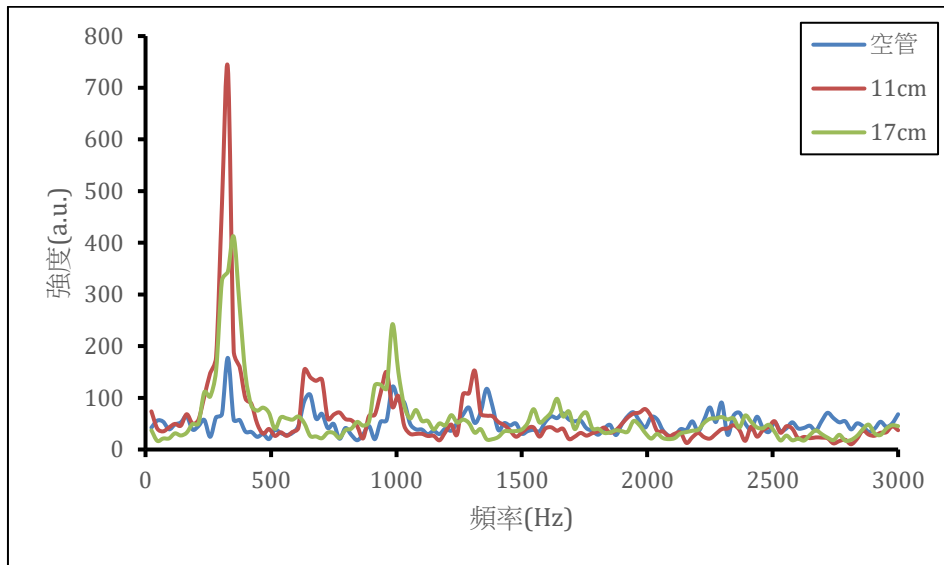
圖二十九、白噪音穿透空壓克力管原始頻譜圖

1.原始空的壓克力管最大共振頻率為 328Hz

二、平行式多管陣列(空氣流道結構)實驗

(一) 改變多管陣列管長，測量並比較 11cm 和 17cm 之管長造成之共振峰值。

將 11cm 和 17cm 結構距離聲源 8cm 固定位置，並於結構後 1cm 放置麥克風分別進行收音，量測其共振情形

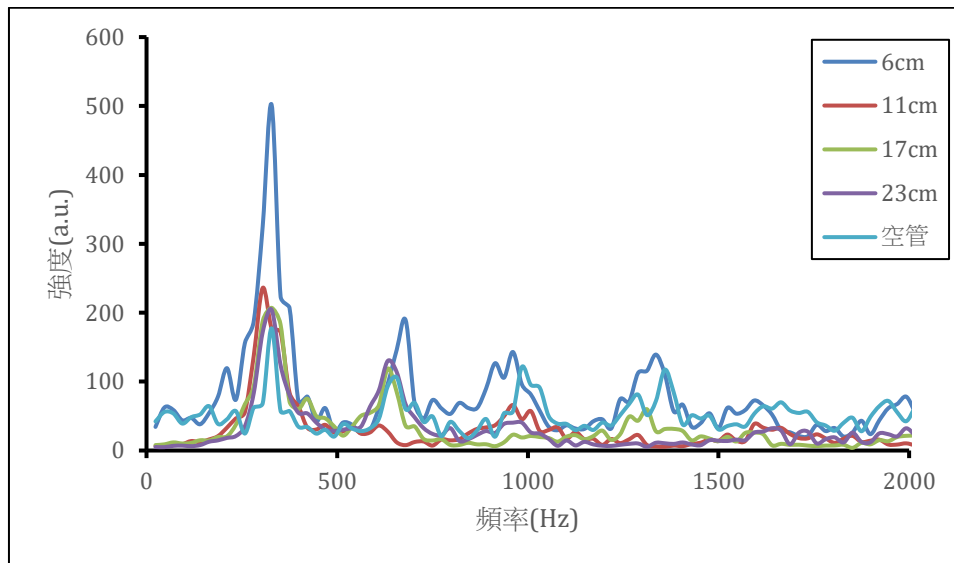


圖三十、白噪音穿透加入不同長度平行式多管陣列(空氣流道結構)後之頻譜比較圖

1. 儘管結構的長度不同，其消音的效果皆未因此有太大的差異，無論多管陣列為 11cm 或 17cm，都消不掉壓克力大管的頻率(328Hz)，反而有增強之趨勢

(二) 改變多管陣列放置位置，測量不同位置空腔大小之共振頻率高低。

將 11cm 長之結構置於距聲源 8cm 處，分別在結構後 6cm、11cm、17cm 及 23cm 放置麥克風收音測量共振



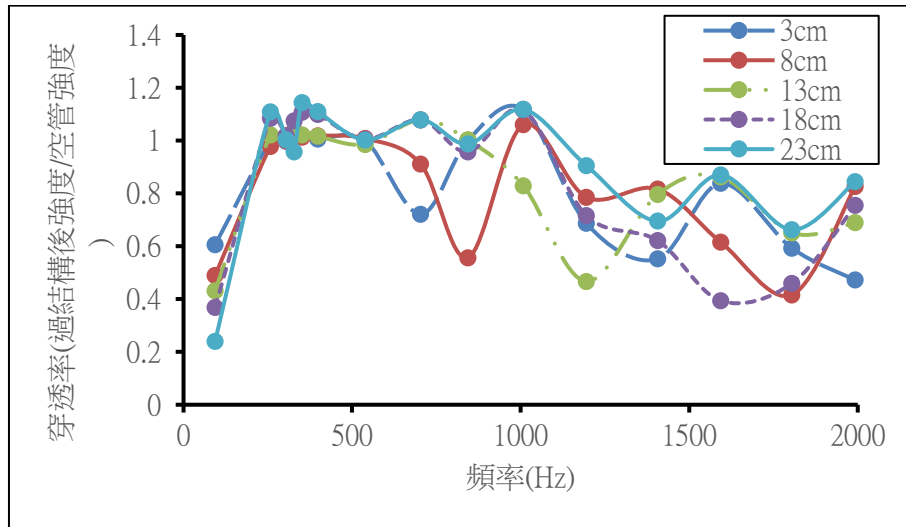
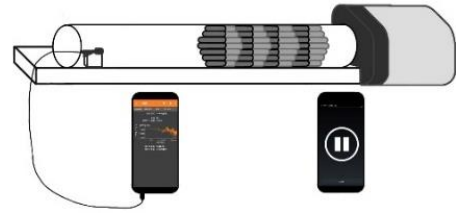
圖三十一、白噪音穿透 11cm 平行式多管陣列(空氣流道結構)不同接收位置頻譜比較圖

1. 由此圖可以得知無論收音麥克風與聲源距離遠或近都未測得明顯相消使強度變弱

2. 距離聲源愈近時，強度相較起來會愈強

三、多管陣列為交錯式排列(共振結構)

(一)前置實驗，量測收音位置對各頻率穿透率影響
將長度為 2~4cm、間距皆為 1cm 之結構裝於距離聲源 8cm 處，改變麥克風在結構後之接收位置進行各頻率穿透結構後之穿透率量測比較

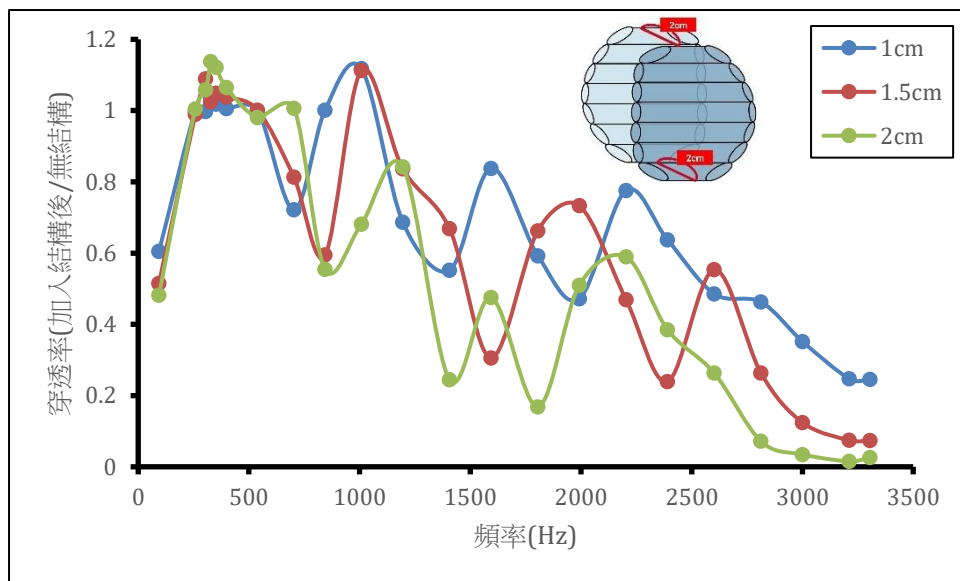


圖三十二、收音位置對各頻率穿透率影響

1.可看出不同位置之接收確實會影響曲線起伏，但未有特定位置導致整體消音效果極佳或極差之狀況出現，故測量接收位置對實驗結果影響不大

(二) 交錯式排列(共振結構)間距對單頻穿透率之影響

將三組相同長度(2~4cm)，間距分別為 1cm、1.5cm、2cm 之結構分別置於距離聲源 8cm 處，進行 100~3300Hz 單頻穿透結構後各強度之量測，並將結果除以無結構空管狀態數值，進行穿透率比較



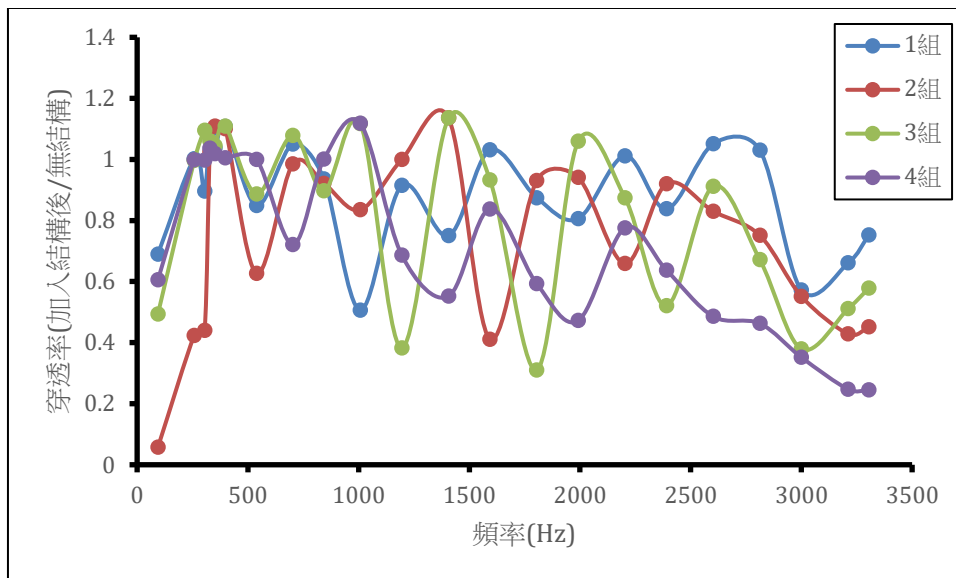
圖三十三、交錯式排列(共振結構)間距對單頻穿透率之影響

1.可發現此類結構無論間距為何，高頻率部分消音效果皆較低頻率部分佳

2.整體看來結構間距為 2cm 時穿透率最低，消音效果最佳

(三) 交錯式排列(共振結構)組數對白噪音穿透率之影響

將相同長度(2~4cm)、同間距結構置於距聲源 8cm 處，改變其結構交錯組數(使結構為 1 組、2 組、3 組、4 組)，並將結果除以無結構空管狀態數值，進行穿透率比較

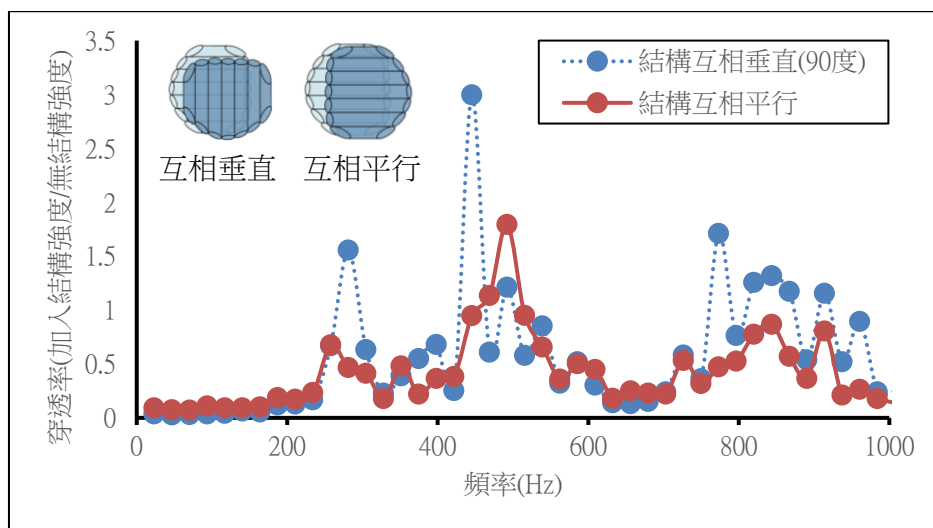


圖三十四、交錯式排列(共振結構)組數對白噪音穿透率之影響

1. 無論加入幾組結構皆發現其呈現各有強弱之狀態
2. 若從整體趨勢觀察可看出在 1000Hz 前各變因之消音狀態差不多，但在 1000Hz 後組數愈多穿透率愈低

(三) 交錯式排列(共振結構)排列角度對白噪音穿透率之影響

將相同長度(2~4cm)、同間距結構置於距聲源 8cm 處，改變其結構交錯角度(使結構呈垂直 90 度及 180 度)，並將結果除以無結構空管狀態數值，進行穿透率比較

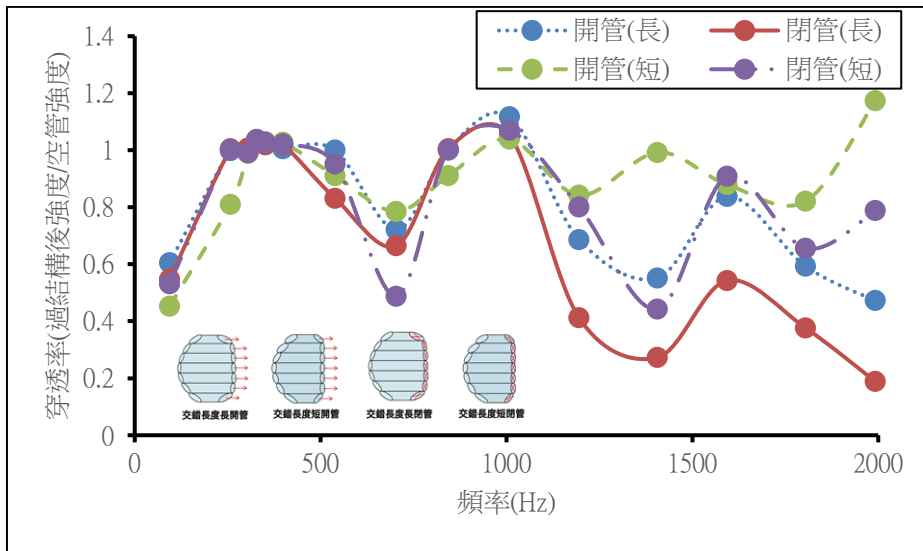


圖三十五、交錯式排列(共振結構)排列角度對白噪音穿透率之影響

1. 可發現 0~250Hz 之頻率被有效消除(穿透率趨近於 0)
2. 儘管各有強弱部分，整體看來互相平行結構之穿透仍率較互相垂直結構低，消音效果較佳

(四) 交錯式排列(共振結構)管口開閉及長度對各頻率強度之影響

分別將長(2~4cm)、短(1~3cm)之相同間距結構置於距聲源 8cm 處，改變其結構中多管陣列之管口開閉進行量測，並將結果除以無結構空管狀態數值，進行穿透率比較

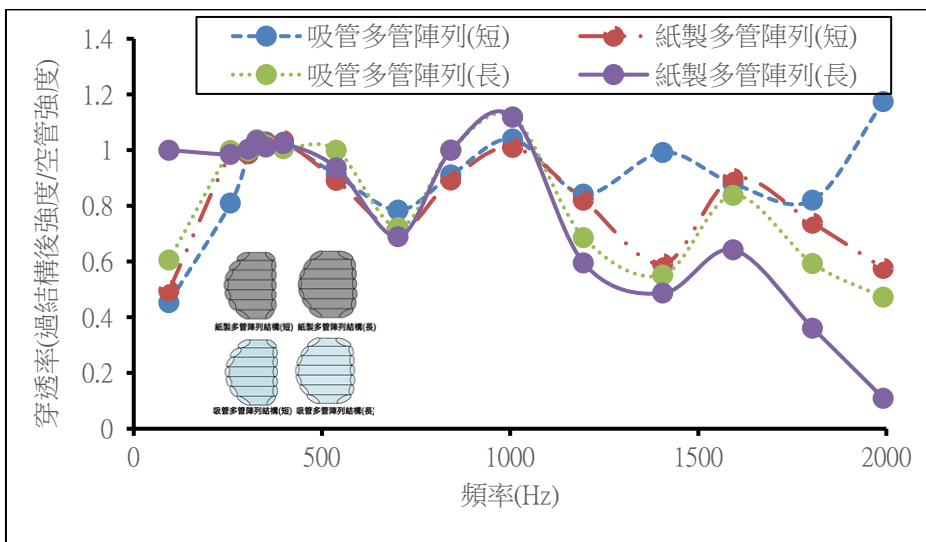


圖三十六、交錯式排列(共振結構)管口開閉及長度對各頻率強度之影響

- 1.相同結構長度狀況下閉管穿透率皆較開管低，故閉管消音效果較佳
- 2.當結構長度愈長，管長交錯遮蓋長度愈長，消音效果愈佳

(五) 交錯式排列(共振結構)材質對單頻穿透率之影響

分別將長(2~4cm)、短(1~3cm)之相同間距結構置於距聲源 8cm 處，改變其結構中多管陣列之材質(塑膠及紙板)進行量測，並將結果除以無結構空管狀態數值，進行穿透率比較

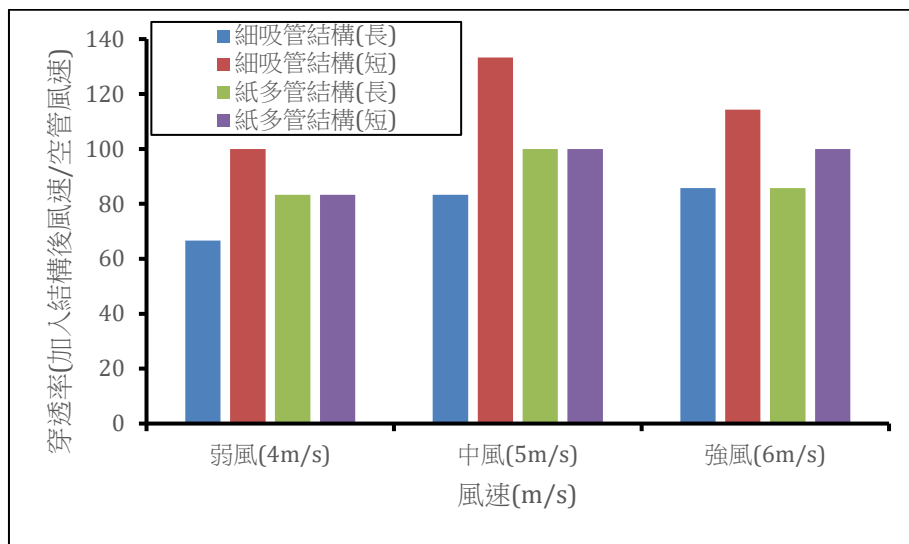


圖三十七、交錯式排列(共振結構)材質對單頻穿透率之影響

- 1.管長交錯遮蓋長度長(2~4cm)之結構消音效果較交錯長度較短(1~3cm)之結構好
- 2.紙製結構穿透率較塑膠吸管製結構低、消音效果較佳，但結構不堅固耐用

(六)、結構透氣度比較

取間距相同之結構，利用電風扇送弱(4m/s)、中(5m/s)、強(6m/s)風分別測量不同長度(1~3cm及 2~4cm)及材質之多管陣列結構以及無結構時之另一端管口風速，並且計算加入不同結構時之穿透率比較各結構透氣度



圖三十八、結構透氣度比較

1、空管之透氣程度並非最佳，加入結構可能使透氣度變好

2、加入各結構後透氣率表 (透氣率 = $\frac{\text{結構風速}}{\text{空管(無結構)風速}}$)

表四、各結構透氣率表

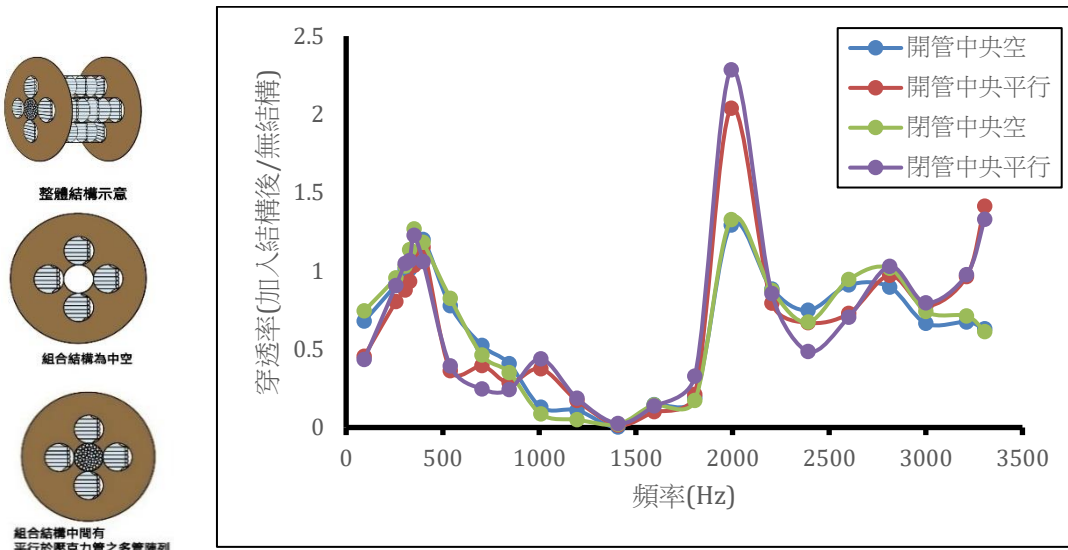
	塑膠多管結構(長)	塑膠多管結構(短)	紙多管結構(長)	紙多管結構(短)
弱風(4m/s)	66.7	100	83.4	83.4
中風(5m/s)	83.4	133.4	100	100
強風(6m/s)	85.7	114.3	85.7	100

由上可見，無論加入何種交錯式排列(共振結構)皆能將透氣度維持在無結構狀態之 66%以上，且若使用的是塑膠製短(1~3cm)結構，甚至能將透氣流速較原本更高

四、Fano 型複合組裝之多管陣列

(一)組合結構對聲頻穿透率之影響

將交錯式排列(共振結構)以及平行式多管陣列(空氣流道結構)以不同方式複合式組裝為 Fano 型多管陣列結構，並透過單頻量測比較其穿透率

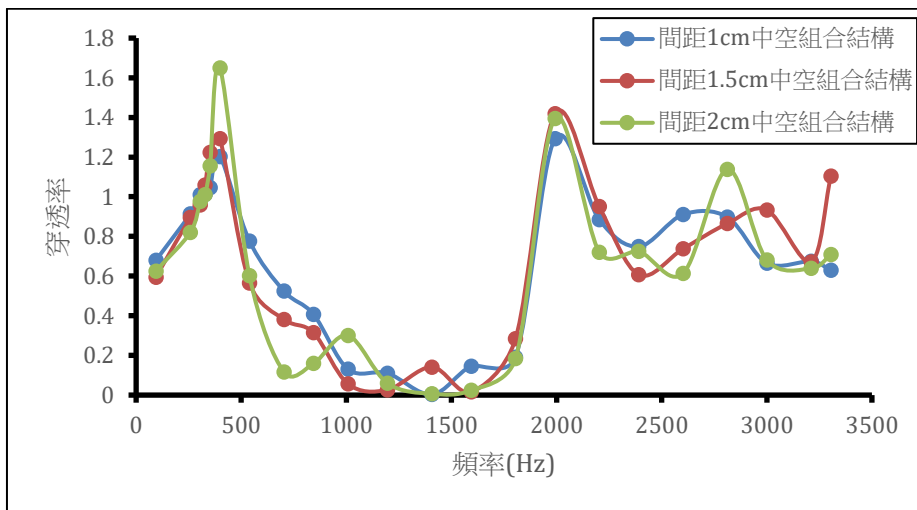


圖三十九、組合結構改變中央結構組合及管口開閉穿透率比較

1. 四種組合結構消音效果最佳頻段皆落在 1200Hz~1800Hz
2. 中央加入平行式多管陣列(空氣流道結構)之組合結構在 1000Hz 之消音效果較未加入平行式多管陣列之組合結構佳
3. 中央加入平行式多管陣列(空氣流道結構)之組合結構在 2000Hz 之共振效果較未加入平行式多管陣列之組合結構強

(二)不同間距組合結構對聲頻穿透率之影響

將單一不同間距之交錯式結構(共振結構)別組裝為 Fano 型多管陣列結構，並透過單頻量測比較其各頻率之穿透率

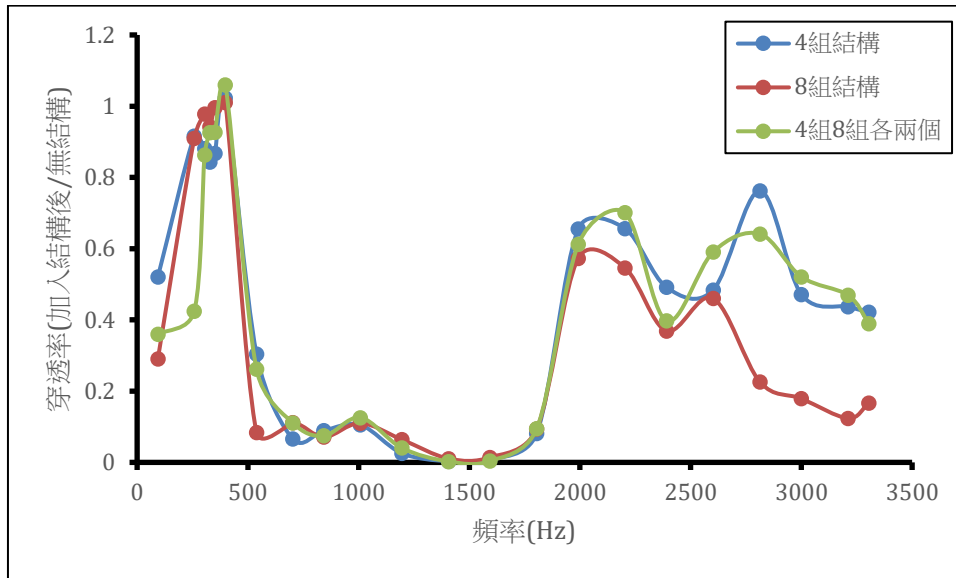


圖四十、Fano 型多管陣列組合結構間距對其穿透率比較

1. 可見三種間距之消音頻寬皆落在約 700~1800Hz，整體消音頻寬受間距影響較不明顯
2. 可發現間距為 2cm 時 700~850Hz 之消音性能較 1cm 及 1.5cm 佳，但在 1000Hz 時會產生較強之穿透率

(三)固定總結構厚度時改變結構組數及組合對聲頻穿透率之影響

將組合結構中四個交錯式排列(共振結構)之長度皆固定為 18.8cm 長，透過單頻量測比較 4 組結構(間距為 2cm)、8 組結構(間距約為 0.6cm)與 4 組 8 組結構各兩個組合時各頻率之穿透率差距

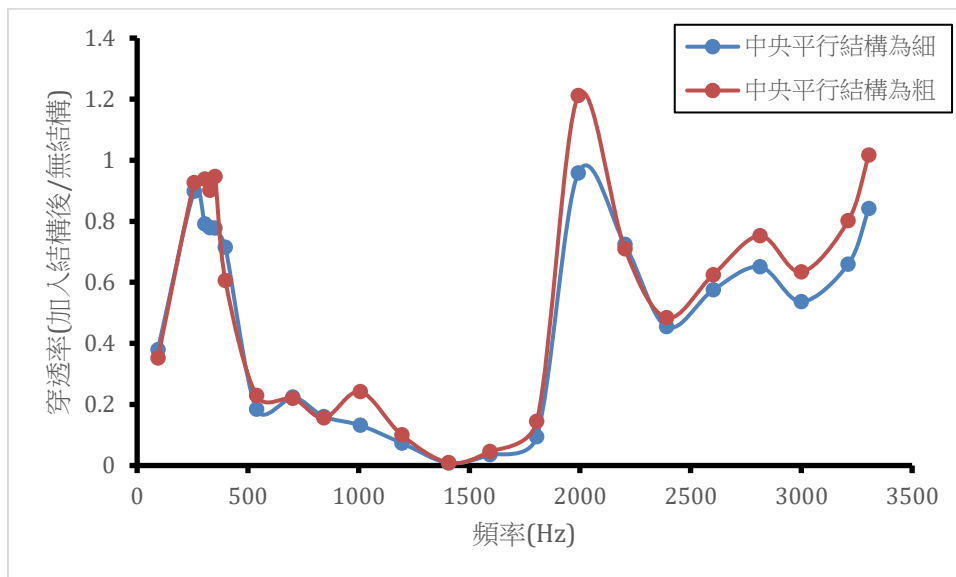


圖四十一、Fano 型組合結構中交錯式排列(共振結構)組數及混搭組裝對其穿透率比較

1. 結構密集(8 組)使整體消音頻寬由約 700Hz~2200Hz 擴展到 550Hz~1800Hz，達到擴展消音頻寬之效果
2. 將結構完全改為 8 組時有效在 2800Hz~3300Hz 降低其單頻穿透率，達到相較 4 組與 4 組 8 組各兩個組合時更佳之消音效果

(四)不同平行式多管陣列(空氣流道結構)粗細之聲頻穿透率比較

改變結構平行式多管陣列(空氣流道結構)部分之管徑粗細，比較單頻測試中對穿透率造成之影響

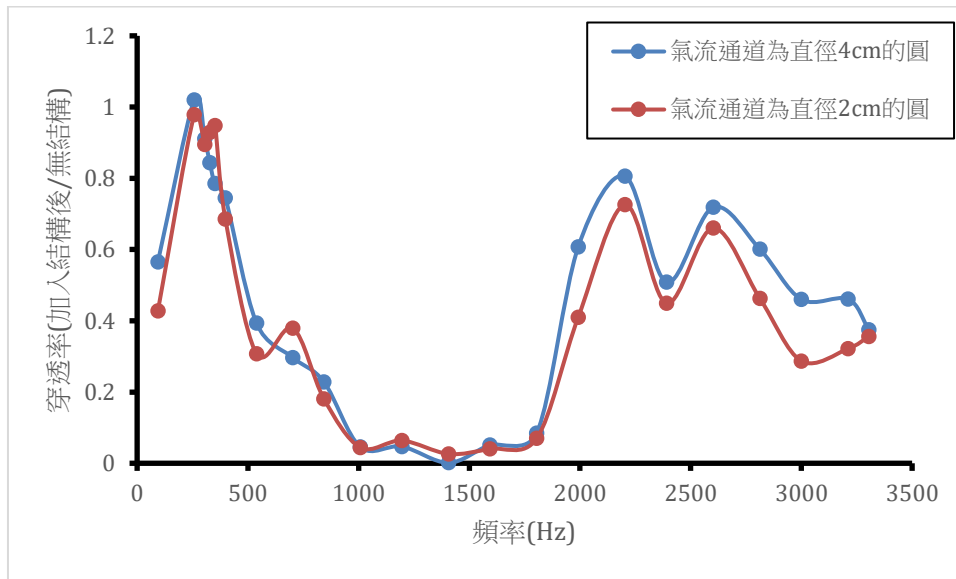


圖四十二、Fano 型組合結構中央平行式多管陣列(空氣流道結構)管徑對其穿透率比較

1.可見當中央平行式多管陣列(空氣流道結構)管徑較粗時在 1000Hz 時穿透率明顯較高，而在主消音頻率(700Hz~1800Hz)部分影響較小，主消音頻率以外之其他頻率則有了較管徑細時更強之穿透率

(五)不同無結構通道截面積之聲頻穿透率比較

改變結構中央無結構通道截面積，比較單頻測試中對穿透率造成之影響

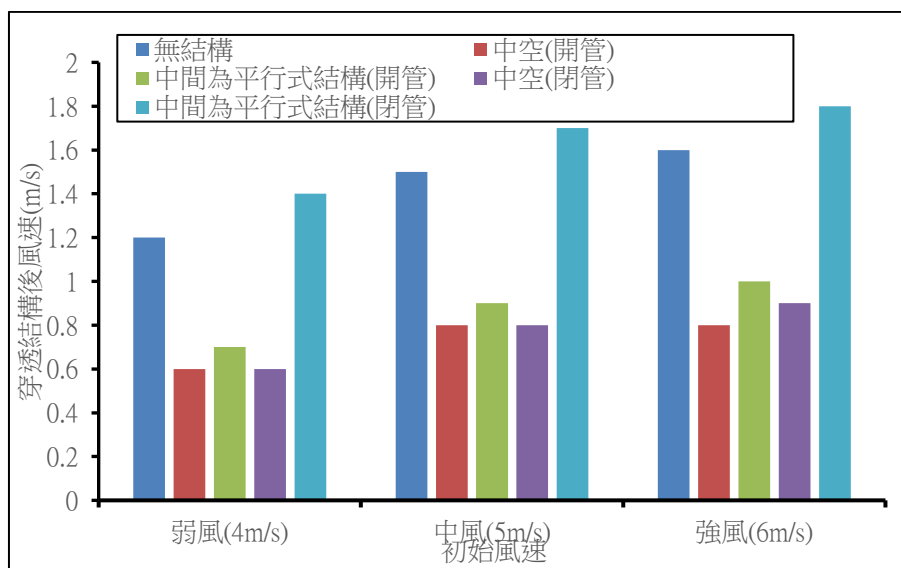


圖四十三、Fano 型組合結構中央無結構通道截面積對其穿透率比較

1.空流道之截面積較小時，主消音頻寬(約 1000~1800Hz)消音效果與截面積較大時差不多，但在較高頻率(約 2000Hz~3300Hz)時其穿透率低，整體消音效果優於空流道截面積大之組合結構

(六)各組合式結構對氣流穿透率之影響

利用電風扇送弱(4m/s)、中(5m/s)、強(6m/s)風分別測量不同結構組合排列之 Fano 型多管陣列結構以及無結構時之另一端管口風速，並且計算加入不同結構時之穿透率比較各結構透氣度



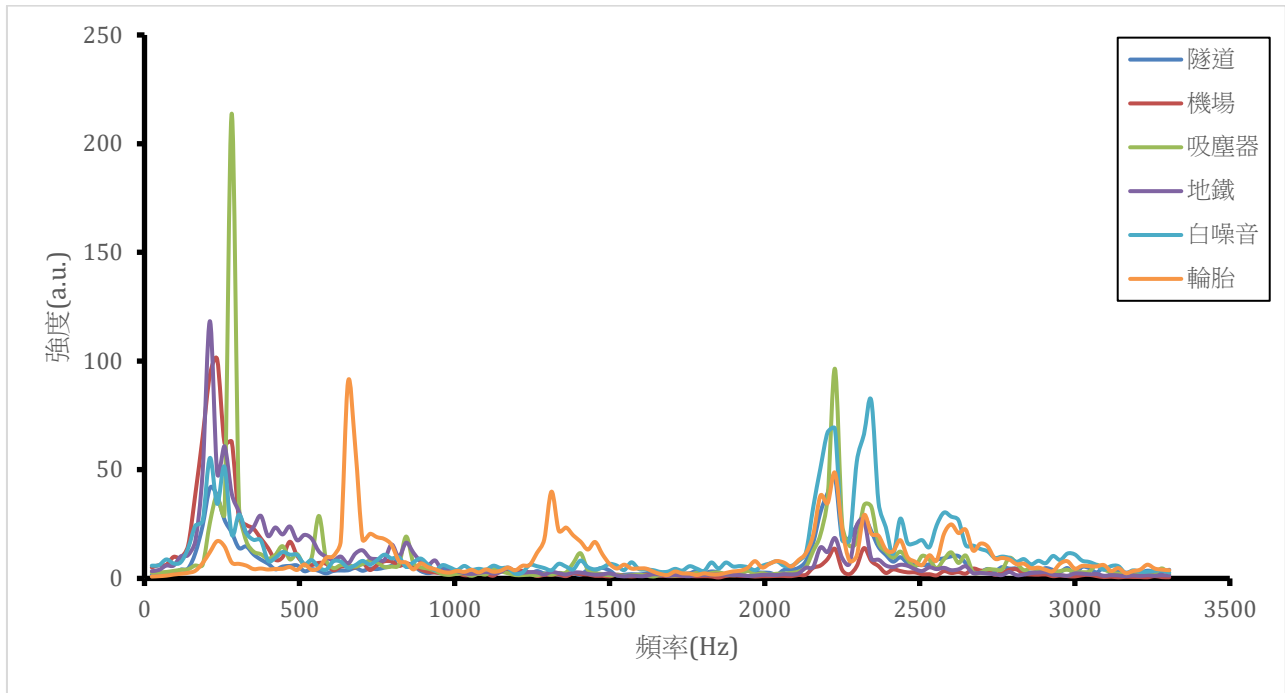
圖四十四、Fano 型組合結構透風程度比較

- 1.無論此種結構中是否加入平行式多管陣列結構，皆可維持相較無結構時 50%以上透氣效果
- 2.結構中加入平行式多管陣列結構(空氣流道結構)，氣流穿透率可提升到 112.5~116.67%

五、實際噪音消音效果量測

(一)各種噪音之噪音頻段測試

尋找被其他消音器研究做為消音目標之噪音音檔，測試下列幾種生活中常產生之噪音之噪音頻段，測試之噪音有：隧道、機場、吸塵器、地鐵、輪胎以及白噪音

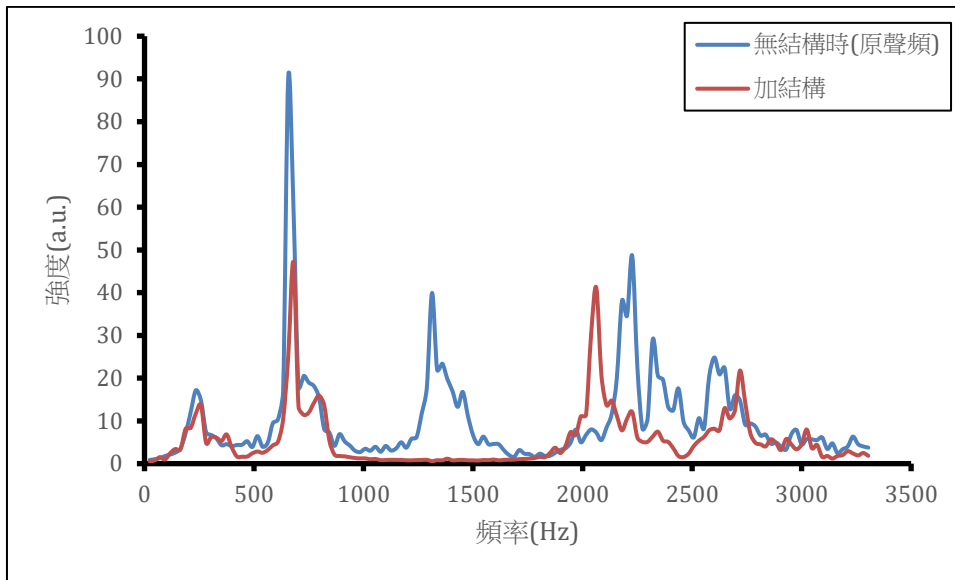


圖四十五、各種噪音頻段疊圖

1. 隧道噪音頻段約為 200~300Hz、2200~2400Hz
2. 機場噪音頻段約為 200~300Hz
3. 吸塵器音頻段約為 700~750Hz、2200~2600Hz
4. 地鐵噪音頻段約為 150~400Hz、2200~2350Hz
5. 白噪音頻段約為 150~250Hz、2150~2650Hz
6. 輪胎噪音頻段約為 650~700Hz、1300~1400Hz、2200~2600Hz

(二)輪胎噪音消音效果

測試各種噪音穿過 Fano 型多管陣列裝置後之吸音效果，發現其對公路行駛車輛之輪胎噪音展現相當好的吸音效果，下圖為播放輪胎噪音的音檔，測試組合結構之消音效果

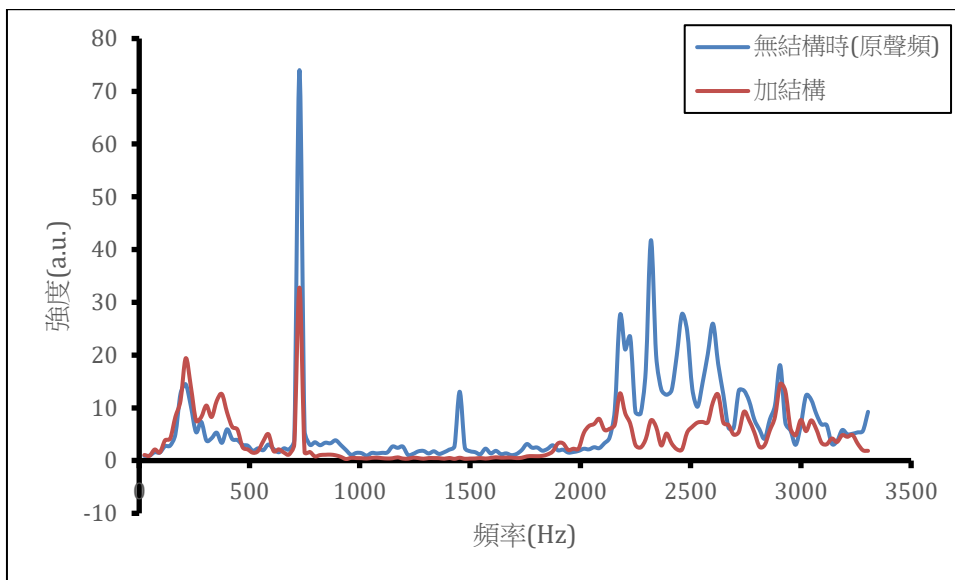


圖四十六、輪胎噪音穿透結果之吸音效果

- 1.加入結構後可有效消除輪胎噪音最強頻段(約 700Hz 及約 2200~2800Hz)之噪音
- 2.在 2000Hz 時會產生一個較強的共振，符合前面以單頻進行量測的實驗中所得之結果

(三)吸塵器消音效果

測試各種噪音穿過 Fano 型多管陣列裝置後之吸音效果，發現其對於吸塵器之噪音展現吸音效果，下圖為播放吸塵器噪音的音檔，測試組合結構之消音效果

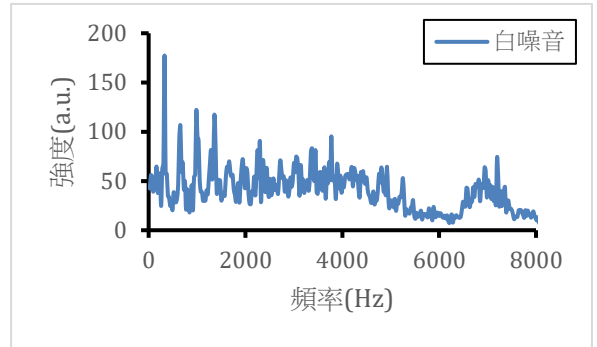


圖四十七、吸塵器噪音穿透結果之吸音效果

1. 加入結構後可消除吸塵器噪音最強頻段(約 700Hz、約 1400Hz 及約 2200Hz~2800Hz)噪音

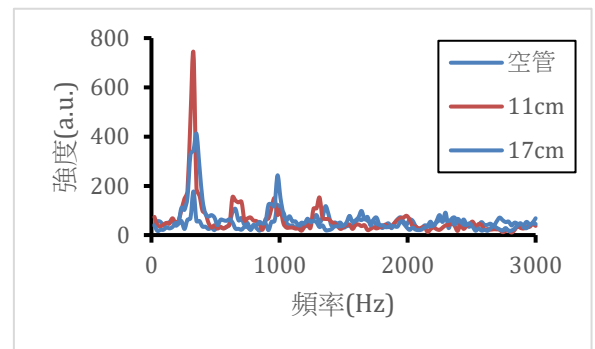
陸、討論

一、從前置實驗中我們可以看出原始壓克力管共振為 328Hz，溫度 22 度 $v=343(m/s)$ ，壓克力管管長 46cm，帶入開管空氣駐波公式 $f = \frac{nv}{2L}$ ，得理論共振值為 372Hz，較實際量測值高。



圖四十八、白噪音穿透無結構空管原始頻譜圖

二、計算後得知原始白噪音在穿透 11cm 之平行式多管陣列(空氣流道結構)後強度比無結構時增強了 416%，在穿透 17cm 之平行式多管陣列(空氣流道結構)後，強度比無結構時增強了 232%，反而增強原本共振頻率強度。



圖四十九、白噪音穿透加入不同長度平行式多管陣列(空氣流道結構)後頻譜比較

三、透過推測出之公式計算交錯式排列(共振結構)可能產生之共振頻率

$$f = \frac{nv}{2L \times n_r}$$

($n=1、2、3、\dots$)

n_r 為折射指數； L_{eff} 為有效通道長度
 t 為結構總長度； N 為通道數； L 為一通道長

推算多管陣列交

錯式排列(共振結構)之

共振頻率約為 1500Hz，為其主共振消音頻寬。

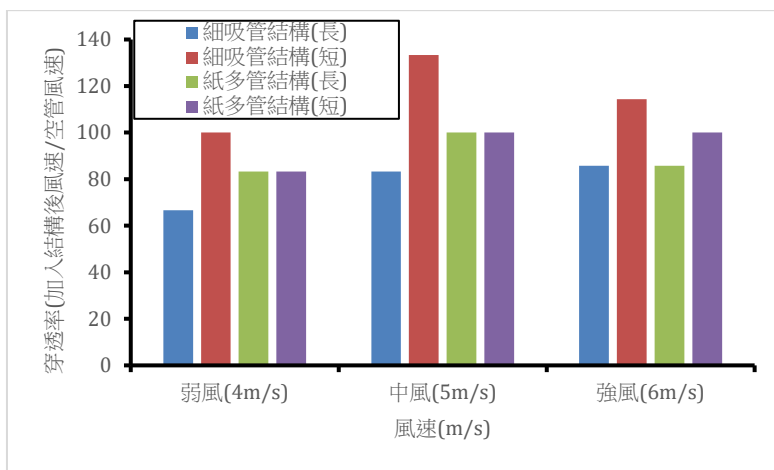
(使用條件間距 1cm 結構為例， $n_r \cong 3$ ； $L=0.04(m)$ ，若考慮漸變性，則頻寬範圍約為 1000Hz~1400Hz 之間，實驗結果符合預期)

四、多管陣列為交錯式排列(共振結構)聲音穿透率實驗中比對疊圖可見，大多數結構都可達到在各頻率皆降低原始發出聲波強度至的效果，但仍有少部分結構(如垂直 90 度排列之結構)有在特定頻率共振加強導致噪音加劇的問題，而由前述之各圖表總和整理可得間距大、管口閉、交錯遮蓋長度長、平行排列、組數多之結構有較好的消音效果，推測是因為間距增大時通道單一長度不變但整體結構厚度較厚故穿透率較低；管口閉可避免聲音在傳播過程中在結構中產生共振，使聲音強度加強；交錯遮蓋長度長之結構其通道較長故穿透率較低；平行(180 度)排列之結構通道較垂直(90 度)排列之結構簡單，故共振較少穿透率低；4 組結構整體厚度較厚，傳聲路徑較長故穿透率較小。

五、Fano 型多管陣列組結構實驗中可見，各種組合式結構消除 1200~1800Hz 頻率之效果皆差不多，但中央加入平行式多管陣列(空氣流道結構)之組合結構在 1600Hz 時共振加強，推測其為平行式多管陣列(空氣流道結構)本身產生之共振所致；結構組數增加(為 8 組)時消音頻寬

向低頻產生拓展，推測是因為有效通道長度增加影響其共振頻率；平行式多管陣列(空氣流道結構)管徑較粗時消音頻寬外之頻率共振增強，推測是因為管徑粗使該頻率共振增強；中央無結構空流道截面積較小(為直徑 2cm 之圓)時整體消音效果較佳。

六、多管陣列為交錯式排列(共振結構)之透氣度實驗中當我們在壓克力管中加入結構，仍能將透風率維持在原本之 66%以上，並不會使其通風性完全消失，而有些結構，如：開管且平行排列的短結構(1~3cm)甚至可能使其透風性較未加裝結構實來的更好，我們推測這是因為當結構使壓克力管有了穩定的傳聲路徑時，風的運送不會受到原本管中渦流之干擾，因此反而能更有效的透氣。



圖五十、不同材質結構透風度比較圖

七、Fano 型多管陣列組結構之透氣度實驗中當我們在壓克力管中加入結構，皆仍能將透風率維持在原本之 50%以上，並不會使其通風性完全消失，而中央加入平行式多管陣列(空氣流道結構)，甚至可能使其透風性較未加裝結構實來的更好，我們推測這是因為平行式多管陣列(空氣流道結構)使壓克力管有了穩定的傳聲路徑，氣流的傳遞不會受到原本管中渦流之干擾，因此反而能更有效的透氣。

柒、結論

一、多管陣列為交錯式排列(共振結構)塑膠吸管間距為 2cm、遮蓋長度較長、管口閉口、排列角度平行時，消音效果較佳，可達無結構時之 54.31%

二、Fano 型組合式結構無論中間是否加入平行式多管陣列(空氣流道結構)皆可有效消除 1200Hz~1800Hz 之聲音(約能將其降至無結構時之 8%~16%)，並將 1400Hz 降至無結構時之 1% 以下

三、Fano 型組合式結構中央加入平行式多管陣列(空氣流道結構)後透風效果較中空佳並皆為 112.5~116.67% 以上，具有高透氣特性，為良好消音特性

四、此 Fano 型多管陣列裝置對於消除吸塵器及輪胎之噪音效果佳，將吸塵器之噪音降至無結構時之 **20%**；將輪胎之噪音降至無結構時之 **27%**

本研究得出結論為 Fano 型多管陣列的確為可應用於生活中消除噪音，在公路輪胎噪音及吸塵器運轉之噪音有非常好的吸音特性，並同時達到吸音及透氣之材料，目前最佳結構可接近完全消除 1400Hz 之噪音(降至無結構時強度之 1%以下)，且亦可使 700Hz~1800Hz 之噪音至無結構時之 8%~12%，並達到高透氣率，使透氣度較無結構得到提升，未來可能可以再嘗試將各種組合改變結構參數或將不同 Fano 結構以串聯或並聯組合，比較不同組合之吸音效能、頻寬及透氣效果，找出高吸音頻寬及高透氣率之裝置，並改變結構材質(如：3D 列印)測試各性能

捌、參考文獻資料

- 一、國立台灣大學機械工程學系機械系電子報。可透氣式聲音濾波器。劉建豪
- 二、南京大學學報(自然科學版)第 55 卷第五期 2019 年 9 月。可實現寬頻寬角度隔聲的薄層通風結構。林遠鵬、梁彬、楊京、程建春
- 三、中國聲學學會。聲學前沿動態| 寬頻通風隔聲窗。2020 年 4 月 15 日
- 四、東海大學普物實驗。共振管實驗組
- 五、國立臺灣師範大學物理系(2011)。聲波的波形與頻率的關係。2011 年 6 月 20 日
- 六、西北工業大學智能材料實驗室物理學報(2018)。聲學超材料與超表面研究進展。丁昌林、董儀寶、趙曉鵬
- 七、國立台灣大學工學院機械工程系碩士論文(2020)。雙模態費諾可透氣是超穎材料應用於寬頻聽覺濾波。蕭翎文
- 八、常見工業噪音控制技術
- 九、每日頭條。空調消聲器的原理和種類。2019 年 9 月 5 日
- 十、朝陽科技大學建築系技術學刊第 20 卷。以互相關檢測理論開發無響室吸音係數測試法之研究－以多孔性材料為樣本(2005)。陳炯堯 張奕瑞
- 十一、Recent Advances in Acoustic Metamaterials for Simultaneous Sound Attenuation and Air Ventilation Performances。Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore。Sanjay Kumar Heow Pueh Lee

【評語】 052316

1. 本研究以吸管製作 Fano 型多管陣列結構裝置並放置於壓力管中，利用藍芽喇叭連接手機播放聲頻穿透設計之吸管陣列結構，成果顯示可達有效消音及透氣。
2. 作品以現有文獻做延伸，利用易取得的材料(如吸管、壓力管)，實作具有創意與實質功能性之成品。
3. 報告內容豐富完整，對聲波的基本原理及消音的原理有進行了解，實驗方法、流程及步驟說明清楚有邏輯，實驗測試完整詳細，整體表現具有一定水準，亦有具體結論。
4. 建議應由理論模擬出發，挑選出最關鍵參數，並進行參數最佳化，最後才進行實驗。

作品簡報



Fano型多管陣列裝置對吸音 透氣研究及應用

高級中等學校組

工程學科(一)

前言

研究動機

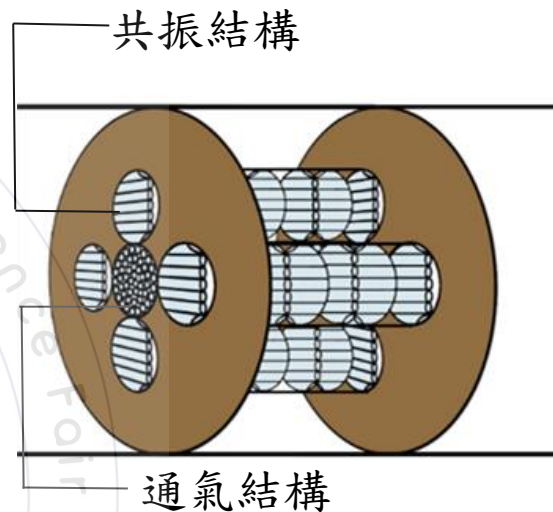
噪音問題輕則使生活品質下降，重則損害聽覺，許多消音器都無法同時達到消音與透氣，使其性能受限，本研究想以Fano共振原理組合結構，嘗試製作高透氣、高消音頻寬、高吸音率材料，使其運用於生活。

研究目的

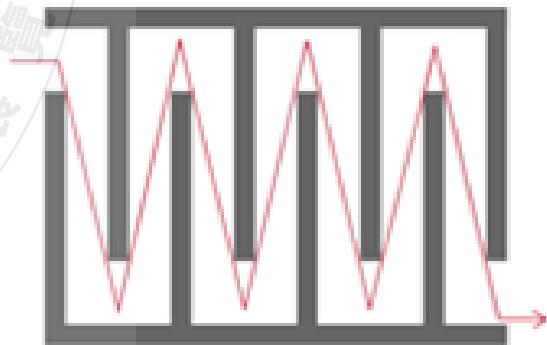
一、改變交錯式多管陣列(共振結構)變因
(間距、遮蓋長度、管口開閉、結構組數、材質)
探討吸音率及透風程度

二、Fano型組合(共振結構+通氣結構)變因
(間距、管口開閉、結構組數、通氣結構類型)
探討吸音率及透風程度

三、Fano型(多管陣列結構)之噪音音檔實測
探討實際面對噪音吸音性能



圖一、Fano型組合結構



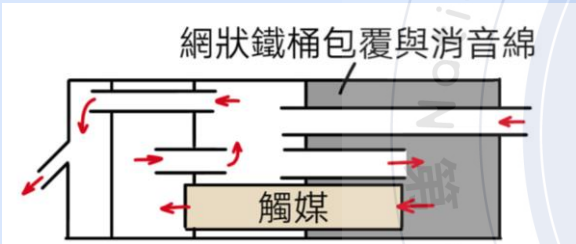
圖二、交錯式多管陣列 2

研究方法-原理

多孔隙吸音結構

中高頻吸音效果佳
(吸音率0.4~0.9)

干涉型吸音結構



圖三、排氣管流道示意圖

Helmholtz空腔陣列

空氣通過徑向並局部共振



圖四、Helmholtz共振流道示意圖

Fano共振(法諾共振)

聲音頻率於結構共振頻率附近時，其區為之聲能相位會與穿過無結構空流道之聲波相反，形成相消性干涉，達到降低穿透率吸音之效果。

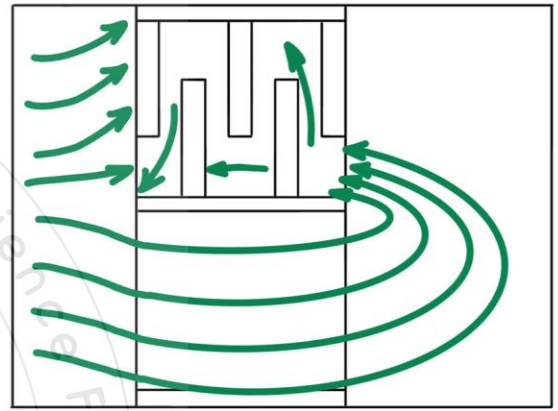
$$L_{eff} = N \times L$$

$$n_r = L_{eff} \div t$$

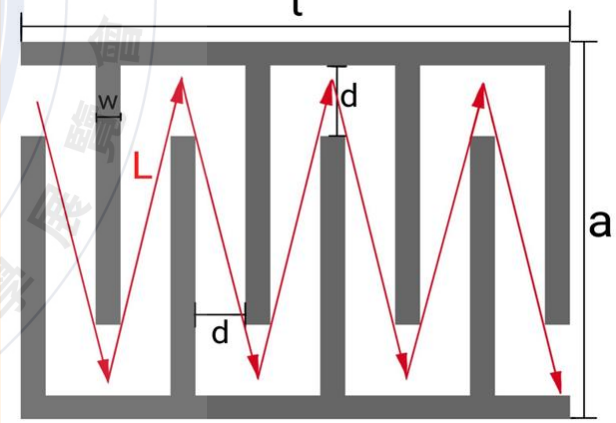
$$f = \frac{nv}{2L \times n_r}$$

($n=1, 2, 3, \dots$)

- n_r : 折射指數
- L_{eff} : 有效通道長度
- t : 結構總長度
- N : 通道數
- L : 一通道長度

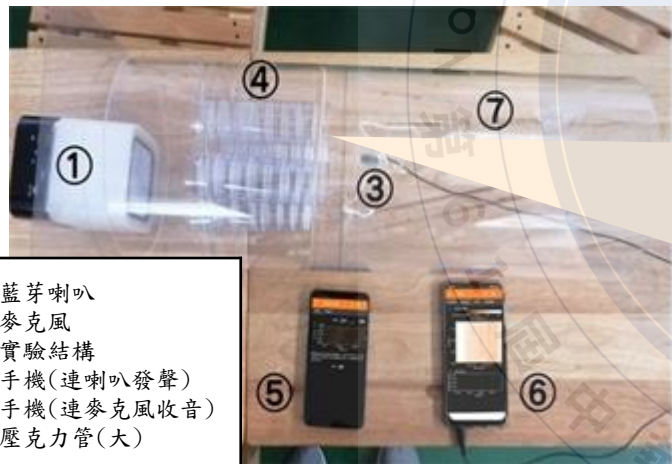
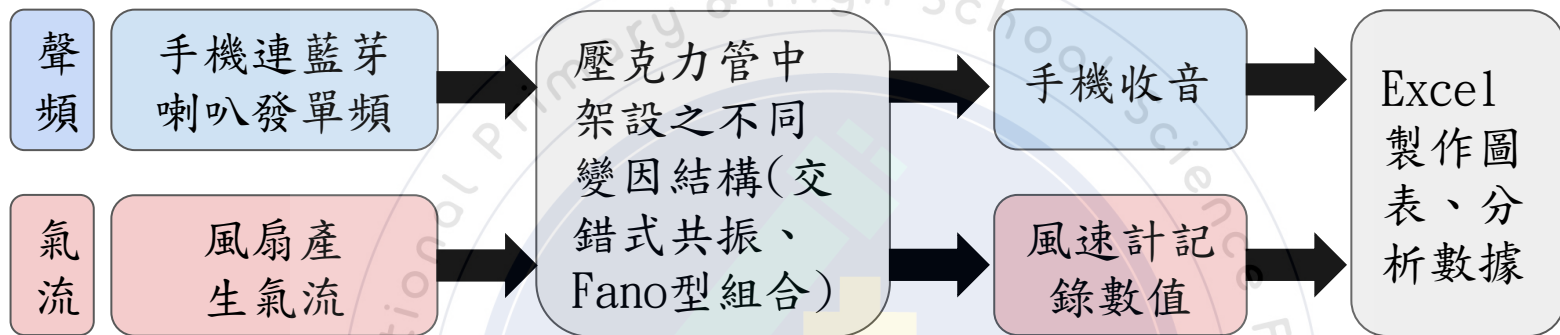


圖五、Fano結構聲場示意圖

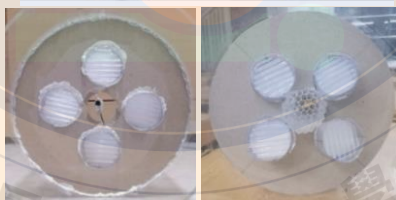
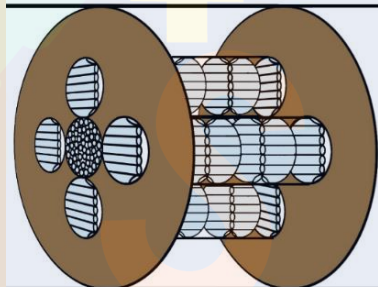


圖六、迷宮型結構示意圖

研究方法-器材與方法



圖七、聲波穿透率量測裝置



圖八、組合結構圖

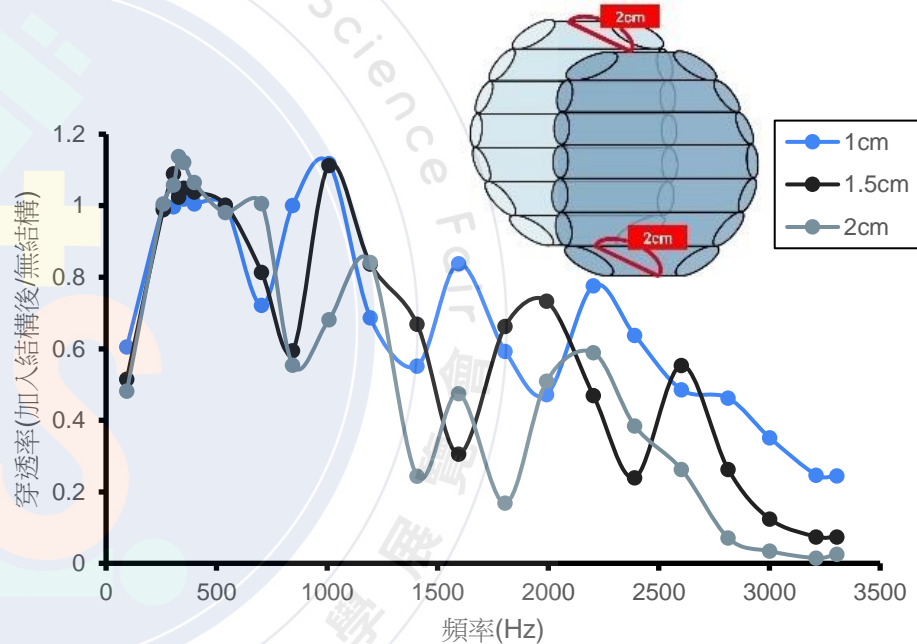
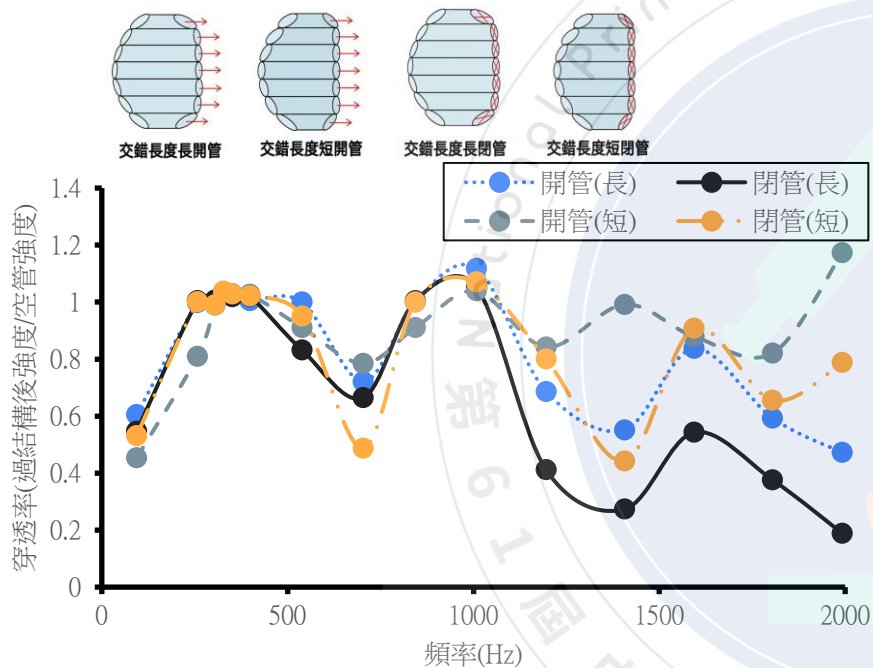


圖九、氣流穿透實驗裝置圖

研究結果-交錯式多管陣列(共振結構)

◆ 改變交錯遮蓋長度，及開閉管對聲譜影響

◆ 改變結構間距，比較其對聲譜影響



圖十、管口開閉、長度對交錯式多管陣列穿透率影響

圖十一、結構間距交錯式多管陣列穿透率影響

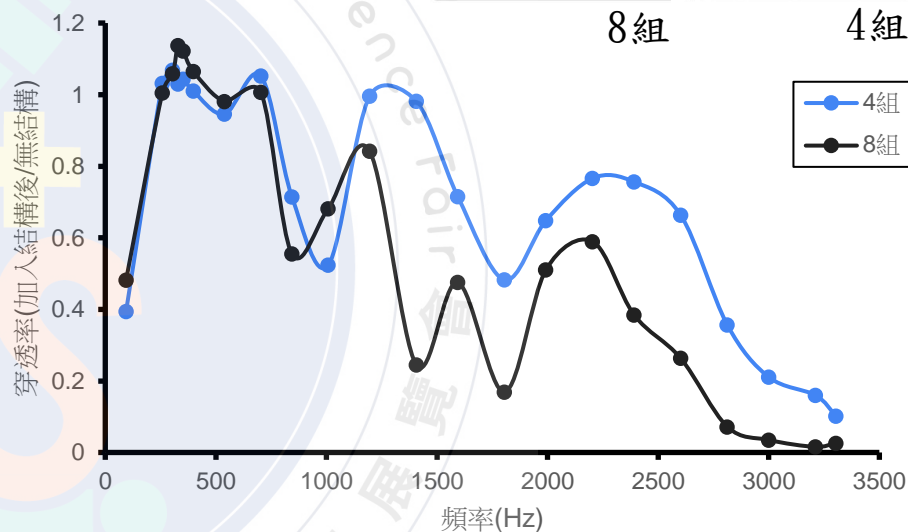
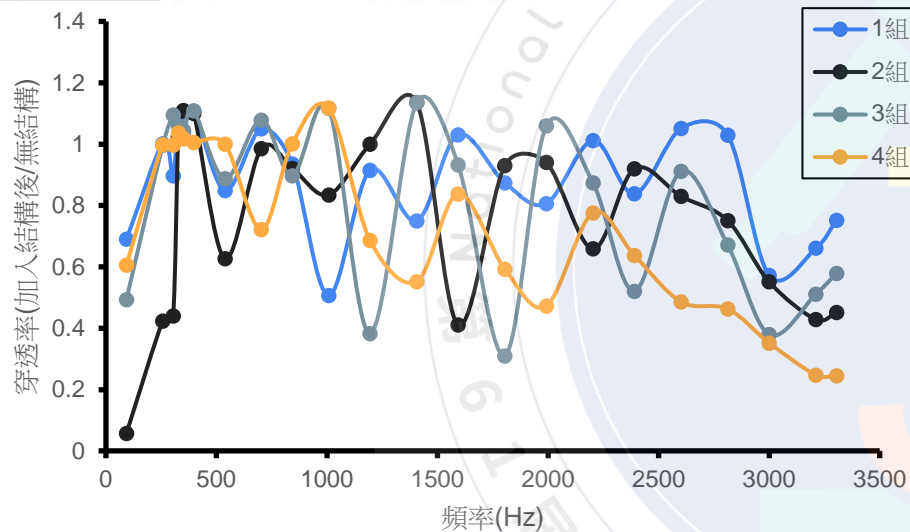
- 交錯遮蓋長度長之結構穿透率較低
- 閉管結構穿透率較開管結構低

- 間距為2cm時整體穿透率較低

研究結果-交錯式多管陣列(共振結構)

◆ 改變組數使結構厚度不同探討聲譜差異

◆ 在相同的厚度中改變組數，探討密度不同時聲譜差異



圖十二、結構組數對穿透率影響

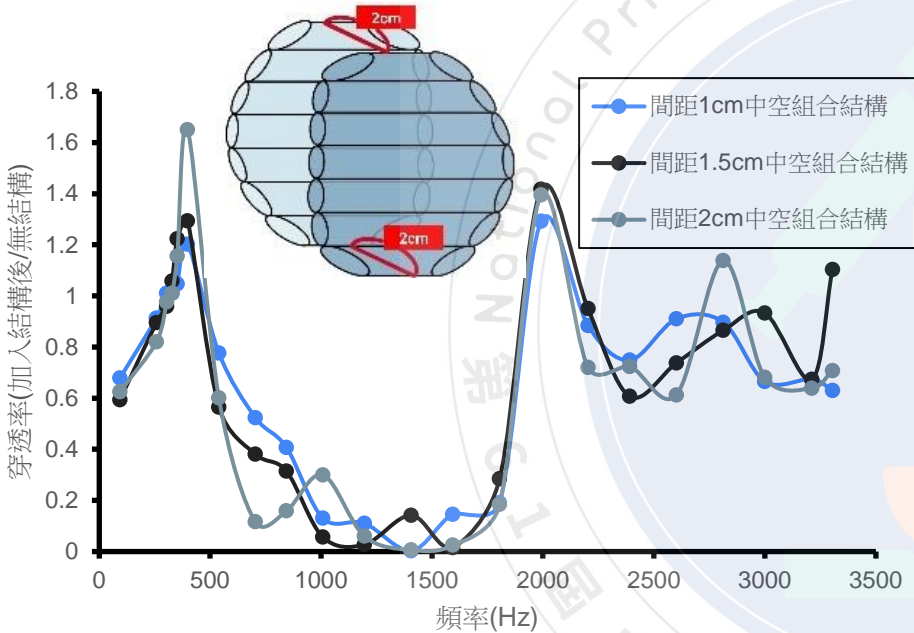
- 組數愈多整體穿透率愈低，消音效果佳
- 組數愈多，高頻消音效果愈明顯

圖十三、結構密度對穿透率影響

- 密度愈高穿透率愈低消音效果佳
- 密度愈高，3000Hz以上消音效果愈明顯

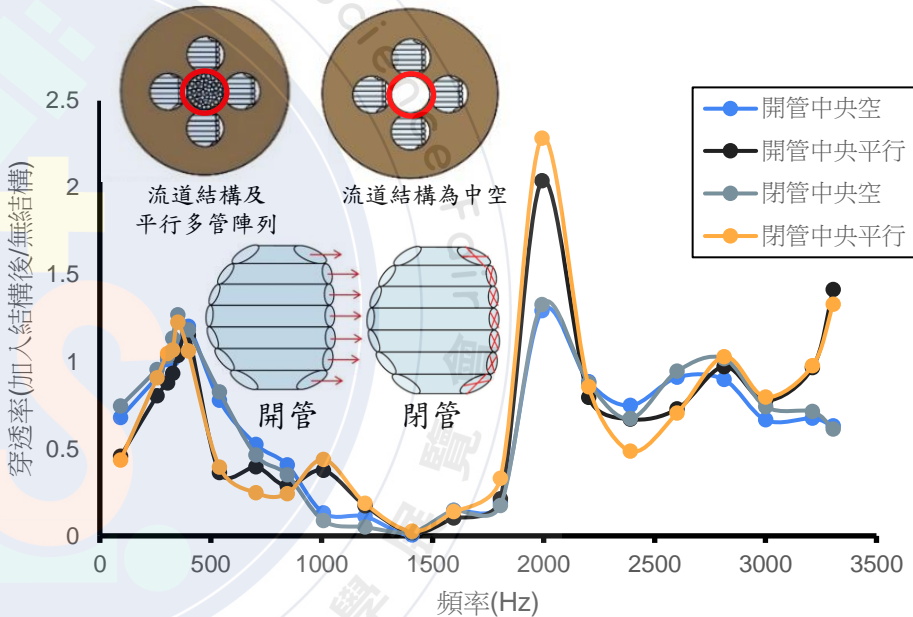
研究結果-Fano組合結構

◆ 比較共振結構間距對消音效果影響



◆ 比較共振結構開閉管對消音效果影響

◆ 改變組合結構，比較加裝通氣結構對聲音影響



圖十四、不同間距之組合結構穿透率差異比較

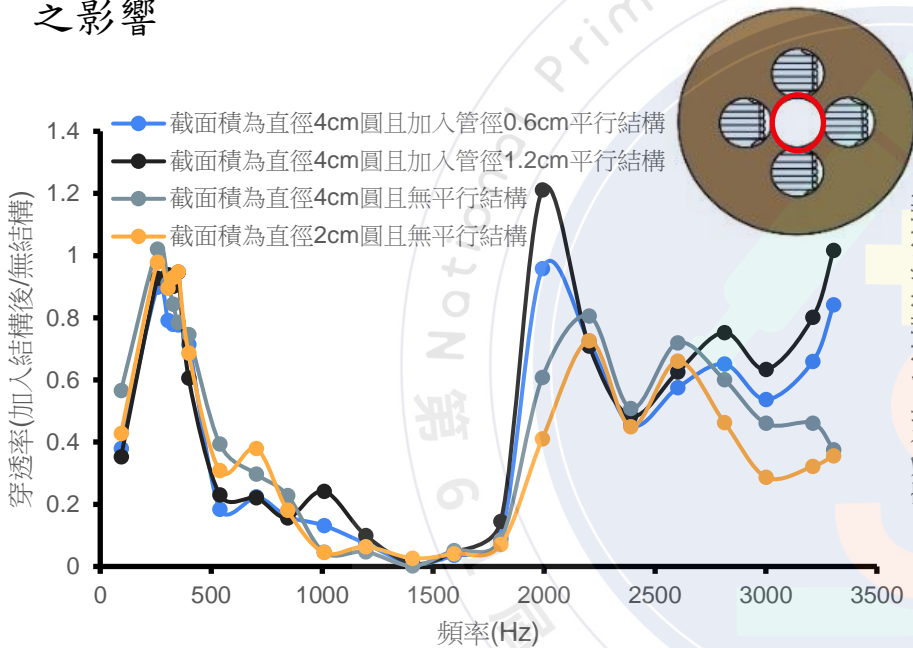
圖十五、結構管口開閉之組合結構對穿透率差異比較

- 主消音頻寬約為700Hz~1800Hz，1400Hz最佳
- 間距2cm之消音頻寬最大

- 主消音頻寬約為700Hz~1800Hz，1400Hz最佳
- 消音效果不受管口開閉影響

研究結果-Fano組合結構

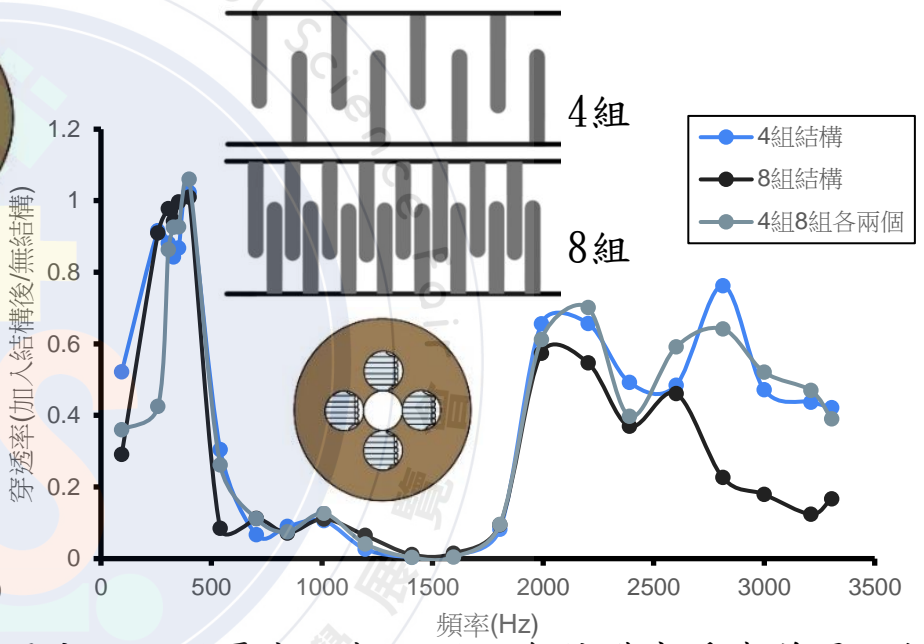
◆ 比較中央通氣結構改變時聲音穿透率受到之影響



圖十六、中央通氣結構改變之穿透率比較

- 中央平行式多管陣列(空氣流道結構)管徑粗時 1000Hz 穿透率增，主消音外頻率穿透率增
- 空流道截面積減小時，高頻率(約2000Hz~3300Hz) 穿透率變低，整體消音效果佳

◆ 比較不同組數及結構組合對聲音穿透率造成之影響

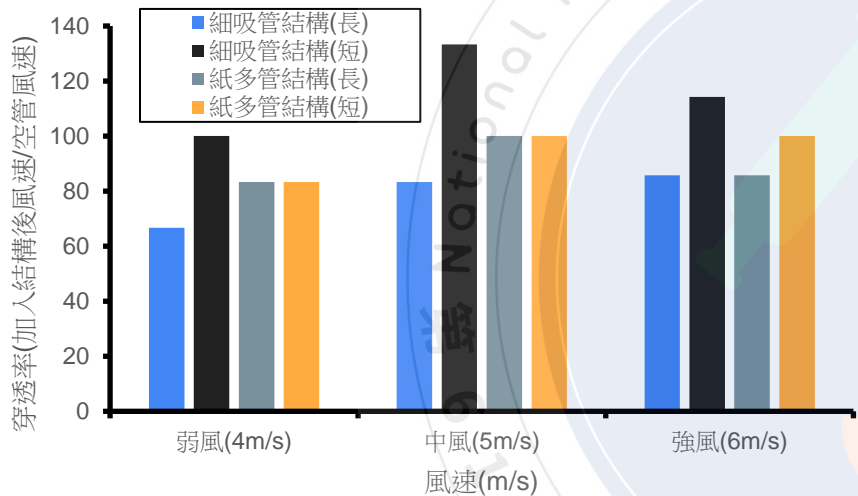


圖十七、同厚度組數不同組合結構穿透率差異比較

- 8組結構使頻寬加大，向低頻擴展至550Hz
- 最佳降噪值為1400Hz可至無結構時之1%以下

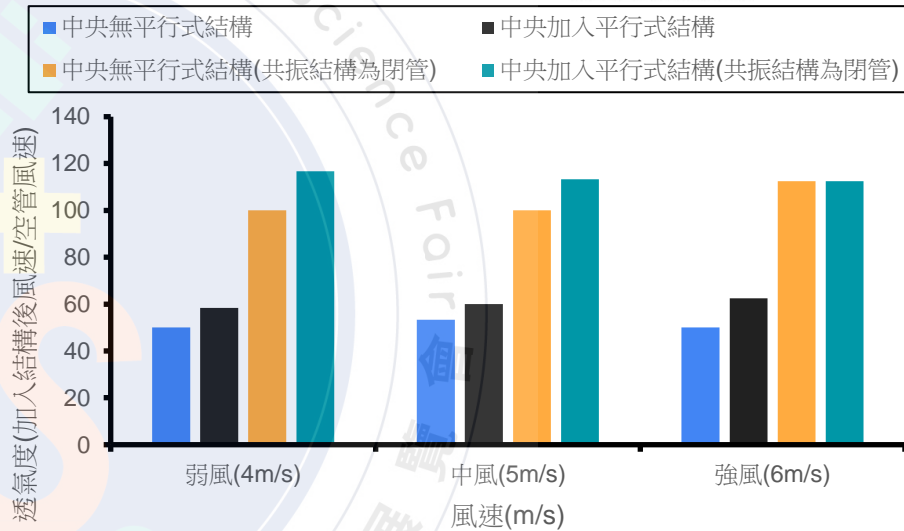
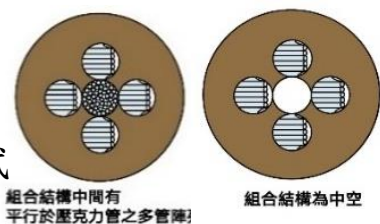
研究結果-氣流穿透

◆ 各種共振結構氣流穿透測試



圖十八、不同結構氣流穿透風速比較

◆ 各種Fano行多管陣列氣流穿透測試

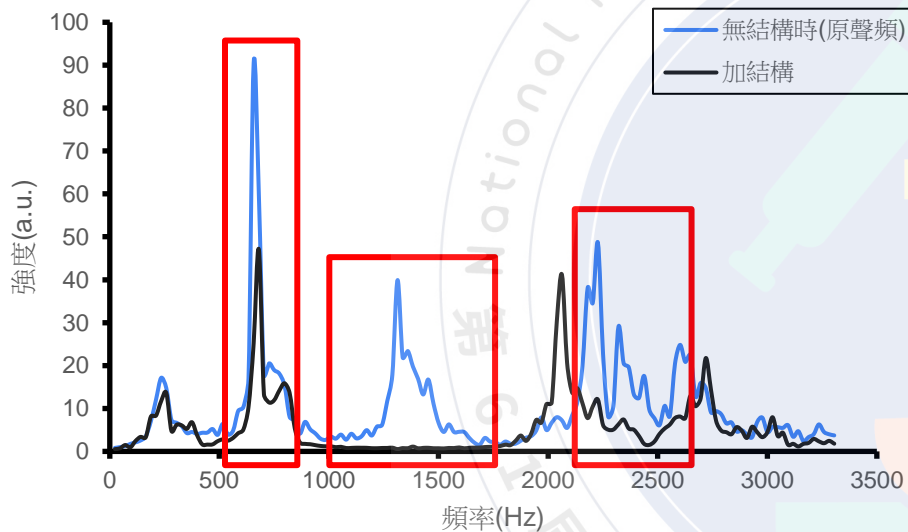


圖十九、各中央通氣結構穿透率風速比較

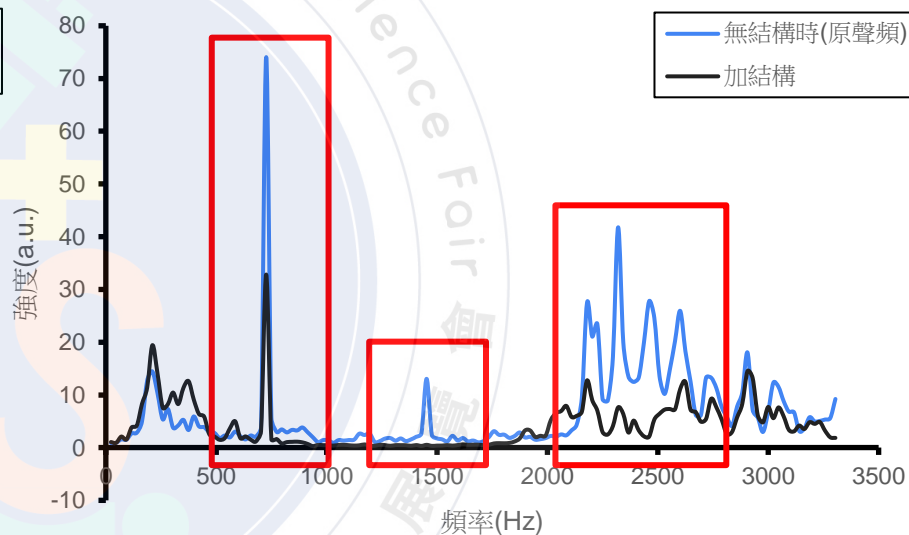
- 無論何種結構至少都能將氣流穿透率保持在原本之66%以上
- 無加入空氣流道結構，風速能於無結構時50%以上
- 加入空氣流道結構，因導流因素使風速較原本佳

研究結果-Fano組合結構

◆ 室外公路噪音，室內風機(吸塵器)噪音消音實測



圖二十、輪胎噪音穿透之吸音效果



圖二十一、吸塵器噪音穿透之吸音效果

- 輪胎及吸塵器噪音頻率約於700Hz、1400Hz~1800Hz、2200Hz~2800Hz
- 加入結構後可有效消除噪音最強頻段(約700Hz及約2200~2800Hz)之噪音

研究結果解釋

間距 → 間距增耗能增吸音佳

遮蓋長 → 長度增耗能增吸音佳

開閉管 → 閉管共振干擾少吸音佳

組數 → 組數多通道長增吸音佳

$$f = \frac{nv}{2L \times n_r}$$

n_r ：折射指數

v ：聲速

N ：通道數

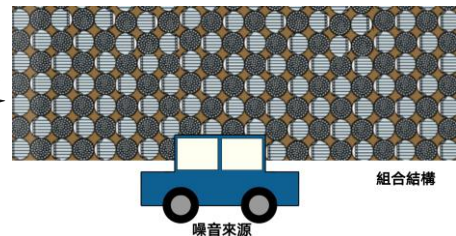
L ：一通道長度

算得共振頻率約1500Hz，為主消音頻率。(間距1cm， $n_r=3$ ； $L=0.04(m)$ ，考慮結構漸變性，頻寬範圍約為1000Hz~1400Hz間，結果符合預期)

消音材料種類	一般吸音裝置	圓柱形聲學超穎材料耦合 (文獻中Fano共振消音裝置)	組合結構 (漸變管距+流道陣列+多管材料)
消音頻寬	200Hz~1200Hz	700Hz~1600Hz	700Hz~1800Hz
消音降噪值	10~15dB	20dB~40dB	各頻率無結構時之8%~12%； 1400Hz可至無結構時之1%以下
氣流透風率	不透風	33.4%	80%以上

結論

- 目前最佳結構可**接近完全消除1400Hz之噪音(降至無結構時強度之1%以下)**，且亦可使**700Hz~1800Hz之噪音至無結構時之8%~12%**，並達到高透氣率，使透氣度較無結構提升。
- Fano型多管陣列材料便宜且好取得，可應用於生活中消除噪音並透氣，如輪胎及吸塵器運轉之噪音等。
- 未來可嘗試改變結構參數或將不同Fano結構以串聯或並聯組合，比較不同組合吸音效能、頻寬及透氣效果，找出高吸音頻寬及高透氣率裝置，改變結構材質(如：3D列印)測試性能。
- 本材料可製作隔音牆用於商場或隧道中打造通風且安靜之環境或是裝於吸塵器、電腦風扇等電器中使其運轉時同時降噪並散熱。



參考資料

1. Sanjay Kumar and Heow Pueh Lee(2020)。Recent Advances in Acoustic Metamaterials for Simultaneous Sound Attenuation and Air Ventilation Performances
2. 劉建豪。可透氣式聲音濾波器。國立台灣大學機械工程學系機械系電子報vol.13 no.4[註1]
3. LIU Sheng-Chun and LI Kun(2017)。Ultra-broadband helical-structure acoustic metamaterials
4. 林遠鵬、梁彬、楊京、程建春(2019)。可實現寬頻寬角度隔聲的薄層通風結構。南京大學學報(自然科學版)第55卷第五期