

2023年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告表單

題目名稱：探討孔洞轉盤之風洞聲音性質

一、摘要

本實驗源自於生活中孔洞與縫隙的氣流噪音現象，為了解其中聲音機制與關係，我們以警笛(Siren)做為模型，並與聲波基本原理及氣流變化作為研究背景進行吹洞頻率、風速與洞口形貌對聲音頻率、聲音強度進探討，實驗結果可以發現吹洞頻率越高會導致音頻分佈越高，且呈正相關，而風速越大會導致音量的增加，但若將圓形孔洞變成三角形孔洞則會使聲音音頻降低。

二、探究題目與動機

在日常生活中，我們可以觀察到當氣流流經縫隙或是孔洞時會產生噪音，而這些噪音又有不同的音高，在進一步探討這個問題的過程中，我們發現警笛最早就是利用氣流流過孔洞進而產生的巨大聲響來達到警示的效果，而在 Scientific American、Exploratorium 等科學遊戲網站中也有以警笛為原型的科學玩具，但原理經常說其產生的音頻跟氣流通過孔洞的次數成正比，這令我們感到好奇！難道真的成正比嗎？不會有其他因素影響這個結果嗎？，為了更了解其中的機制，我們運用自製的含洞圓盤來研究風洞與聲音頻率及音量之關係。

三、探究目的與假設

(一) 探討氣流穿過孔洞的頻率對聲音音頻之影響。

假設：因為孔洞頻率影響氣流的疏密變化，所以我們推測音頻與吹洞頻率呈正相關，當孔洞頻率提高時，聲音頻率也會隨之提高。

(二) 探討穿孔氣流速度對聲音音頻與強度之影響

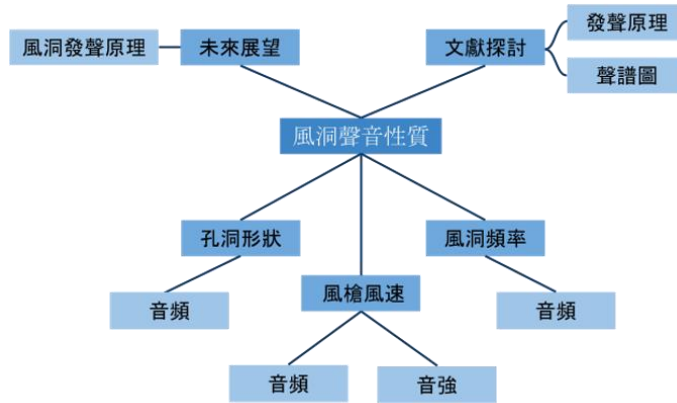
假設：因為氣流速度不影響其疏密變化頻率，所以我們推測風速不影響聲音頻率，但會使音量增強。

(三) 探討孔洞形狀對聲音音頻之影響

假設：因為孔洞形狀會影響對氣流切割的情形，所以我們推測當氣流經過三角形孔洞時會因氣流不對稱，導致更低音頻產生。

四、探究方法與驗證步驟

一、研究架構



圖一 研究架構圖

二、實驗原理與分析方法

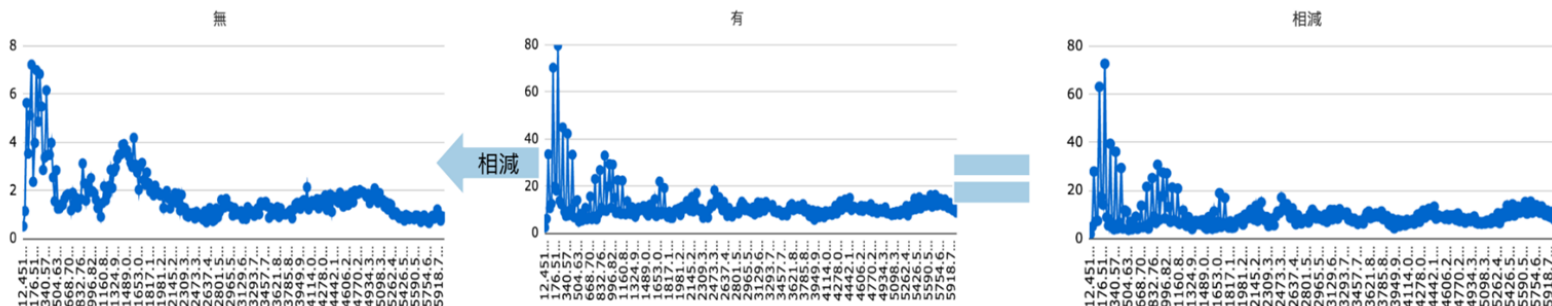
(一) 氣流穿孔發聲原理

當氣流經過旋轉的有孔圓盤時，氣流會因為通過與不通過孔洞，使孔洞後方產生的空氣分子產生密部與疏部的氣流變化，進而形成縱波，而當轉盤的轉速增加使氣流在單位時間內產生更多的疏密變化，則會導致縱波的頻率增加，進而產生更高頻的聲音。

而聲音的強度大小則會受到空氣分子在疏密變化時的緊密程度影響，當通過孔的氣流越大，空氣分子在被阻擋時會產生較密集的空間密度，而又通過孔洞時則會產生較疏鬆的空間密度，此變化會增加聲波的振幅，進一步增強聲音強度。

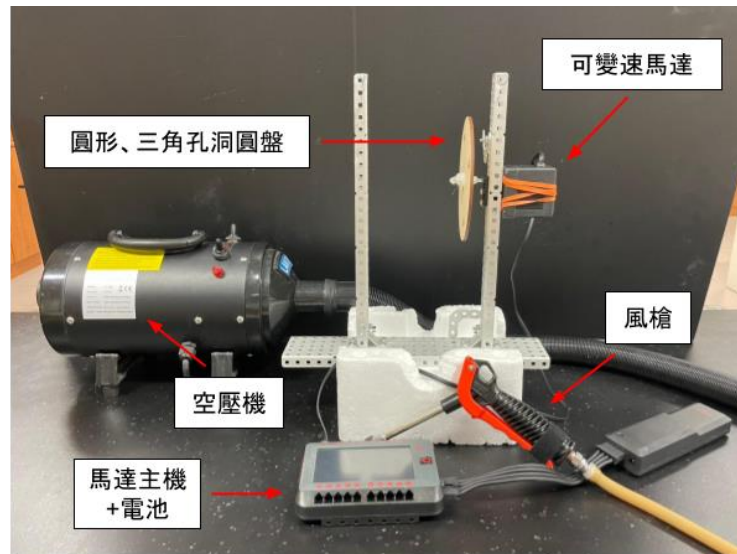
(二) 聲譜圖(Spectrogram)

為了瞭解孔洞圓盤產生的聲音形貌，我們利用 `phyphox` 進行聲譜圖的分析。而聲譜圖是由時間、頻率與信號強度組成，我們可以在圖中觀察聲音由甚麼頻率的聲音構成，以及其音頻強度。因為直接測量可能會因為環境音而產生誤差，所以我們分別測量風槍對準及沒對準孔洞的數據，再將其相減即可得到單純由氣流產生的音頻數據，如圖二。



圖二 數據分析過程

三、實驗架設



四、實驗步驟

(一) 實驗一:探討氣流穿過孔洞的頻率和不同形狀孔洞對音頻之影響

1. 將圓形孔洞圓盤連接至馬達垂直懸空架設在桌面上
2. 開啟風槍並將風速調至 17m/s
3. 開啟馬達，將圓盤轉速調至風槍吹洞頻率至 67Hz
4. 使用 phyphox 紀錄風槍未對準圓盤孔洞時的聲譜得到環境音數據
5. 將風槍放置於離孔洞 1cm 處，將風槍吹向孔洞
6. 使用 phyphox 記錄聲譜得到環境音和圓盤音數據
7. 由環境音和氣笛音數據減去環境音數據以取得由圓盤產生的聲音數據
8. 將聲音數據轉換成頻域圖，並分析其音頻峰值
9. 將吹洞頻率依序調至 83Hz, 100Hz, 117Hz, 133Hz 並重複步驟 4~8
10. 將轉盤換為三角形孔洞轉盤並重複步驟 1~9

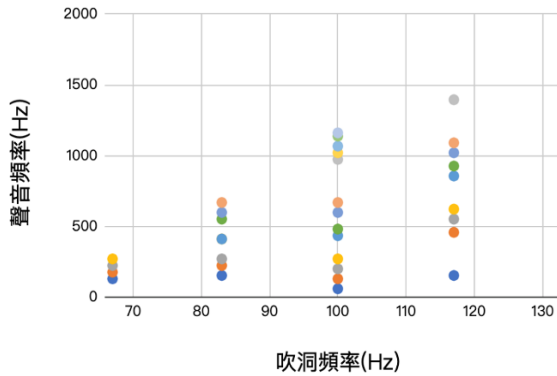
(二) 實驗二:探討穿孔氣流速度對聲音音頻與強度之影響

1. 將圓形孔洞圓盤連接至馬達垂直懸空架設在桌面上
2. 開啟風槍並將風速調至 6m/s
3. 開啟馬達，將吹洞頻率調至 100Hz
4. 使用與實驗一相同之數據取得方式取得由圓盤產生的聲音數據
5. 將聲音數據轉換成頻域圖，並分析其音頻峰值與聲音強度
6. 將風速依序調至 9m/s, 12m/s, 15m/s, 18m/s 並重複步驟 4~5

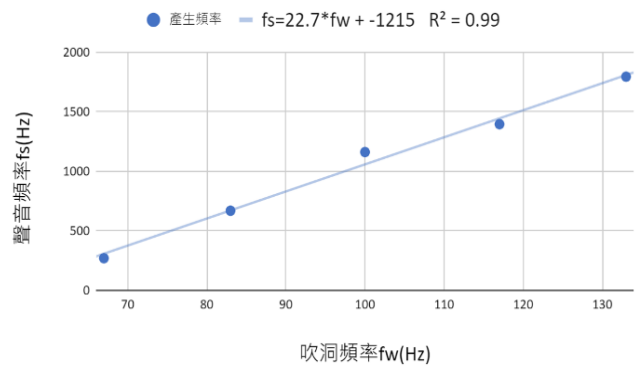
五、研究結果與討論

(一) 探討氣流穿過孔洞的頻率對聲音音頻之影響

在實驗一中我們使用相同的風速對我們孔洞圓盤進行風洞發聲，並在各吹洞頻率的頻譜圖中找到其頻率峰值，並將其數據紀錄於下圖三、四。



圖三 聲音頻率對吹洞頻率關係圖

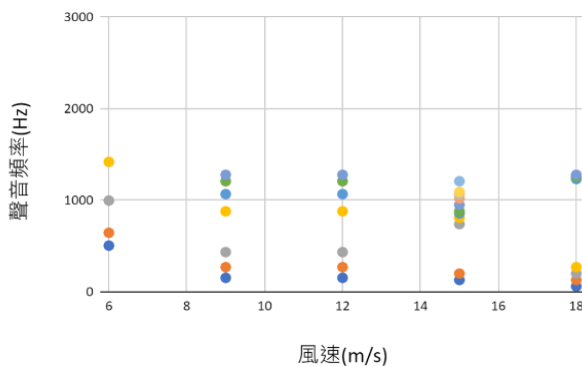


圖四 圓形孔洞最高音頻對吹洞頻率關係圖

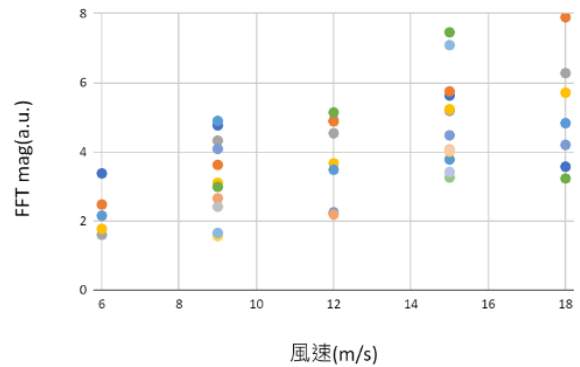
我們得知當吹洞頻率提高時，氣流經過孔洞的頻率也隨著提高，且最高音頻也隨之提高，符合上述原理結果，但各吹洞頻率下皆有相似音頻產生，我們認為由於孔洞圓盤的聲音組成是因為氣流的變化，但氣流的通過形貌會因為孔洞圓盤對於氣流的「切割」所導致，被切割後的氣流會因為流速快慢的關係導致伯努力定律中的壓力大小變化影響其空氣分子的運動，進而產生不同頻率的分子振動結果。在上圖四中我們可以觀察到最高音頻與吹洞頻率會呈現正相關的關係，但其結果並非是吹洞頻率直接對應到聲音音頻，而是具有 $fs = 22.7 * fw - 1215$ 的轉換關係，其中 fs 為聲音音頻、 fw 為吹洞頻率，在此關係式中我們可以發現要產生聲音的最低吹洞頻率 $fw = 53.52$ Hz，若低於此吹洞頻率則無法產生孔洞轉盤的發聲效果。

(二) 探討穿孔氣流速度對聲音音頻與強度之影響

在實驗二中我們將吹洞頻率控制在100Hz，並在各風速條件下利用實驗一的數據處理方法，將數據整理成風速對頻率關係圖，如下圖五、六。



圖五 聲音頻率對風速關係圖

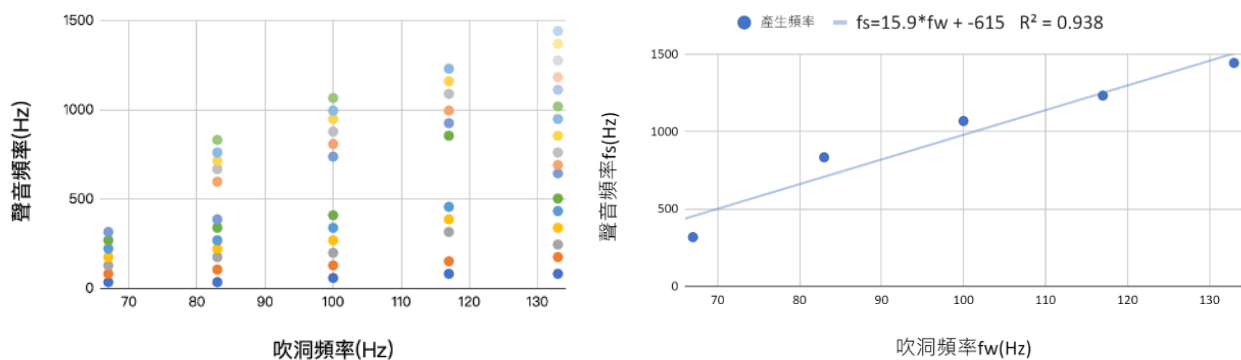


圖六 聲音強度對風速關係圖

在圖五中我們可以觀察到當吹洞頻率不變時其聲音最高頻率接相近，但依舊可以在圖中觀察到當風速越強，音頻的分布就逐漸集中，我們認為這可能是當風速越強會導致疏密波的疏密程度差異更大，其分布結構則相對集中，進而產生更加集中的壓差變化，因此產生更集中的頻率分布。在圖六中可以得知當風速提高時，各頻率音強皆有顯著上升的趨勢，因為當風速增強時分子具有較大的動能使之能在聲波震動時具有較大的位移進而產生較大的聲音強度與音量。

(三)探討孔洞形狀對聲音音頻之影響

為了瞭解孔洞形狀是否會影響聲音頻率，我們將圓形孔洞圓盤換成三角形孔洞圓盤，並重複與圓形孔洞圓盤相同的實驗過程，最終將各吹洞頻率下的音頻製成下圖七、八。



圖七 三角形圓盤音頻對吹洞頻率關係圖 圖八 三角孔洞最高音頻對吹洞頻率關係圖

在圖七中可以觀察到其變化趨勢與圓孔轉盤相似，不過三角形孔洞實驗的分佈皆比圓形孔洞圓盤還要低，我們認為這是因為三角形孔洞對於氣流的「切割」與圓形孔洞不同所導致，因其形狀不像圓形一樣具有對稱性質，這可能會造成氣流通過孔洞後其亂流型態會影響聲音音頻的分佈。而在圖八中我們可以發現其最高音頻與吹洞頻率具有正相關的關係，其關係式為 $fs = 15.9 * fw - 615$ ，其產生聲音的最低吹洞頻率為 $fw = 38.68 \text{ Hz}$ 。

五、結論與生活應用

一、研究結論

- (一)在圓形孔洞圓盤實驗中，聲音頻率會隨著吹洞頻率而增加，其最高音頻會與吹洞頻率呈正相關，但具有產生聲音的最低吹洞頻率限制，除最高頻率外，其餘較低的聲音頻率也會因氣流結構而產生重疊之處。
- (二)在氣流實驗中可以發現氣流大小不影響音頻整體分布，惟其內部分佈會受氣流流速越大而越集中。而當風速越大會導致其聲音強度越強，音量也越大。
- (三)若將圓形孔洞換成三角形孔洞，其聲音頻率分布一樣會隨穿洞頻率的增加而有所提升，但三角形孔洞所產生之聲音頻率會小於圓形孔洞的聲音頻率，其最高頻率變化與最低吹洞頻率限制也小於圓形孔洞圓盤。

二、生活應用

我們發現許多樂器是藉由氣流流過不同大小或形狀的孔洞來產生不同的音效，像直笛和風笛，將汽笛妥善調整之後也能作為一種樂器演奏。另一方面，這個現象也能運用於降噪，在汽車、飛機和建築物建造的時候也會進行風洞測試，藉由調整縫隙或孔洞的形狀和大小來降低強風吹過時所產生的噪音。

六、參考資料

- 一、Regina Collecchia, & Dan Somen, & Kevin Mcelroy.(2014) The Siren Organ. https://www.researchgate.net/publication/265595108_The_Siren_Organ
- 二、Scientific American. (2016). Build A Siren Disk. <https://www.scientificamerican.com/article/building-a-disk-siren/>
- 三、Exploratorium. (n.d.). Siren disk. <https://www.exploratorium.edu/snacks/siren-disk>
- 四、Lumen Learning. (n.d.). 17.3 Sound intensity and sound level. Lumen Learning Physics for Algebra-Based Courses. <https://courses.lumenlearning.com/atd-austincc-physics1/chapter/17-3-sound-intensity-and-sound-level/>