

# 2023 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

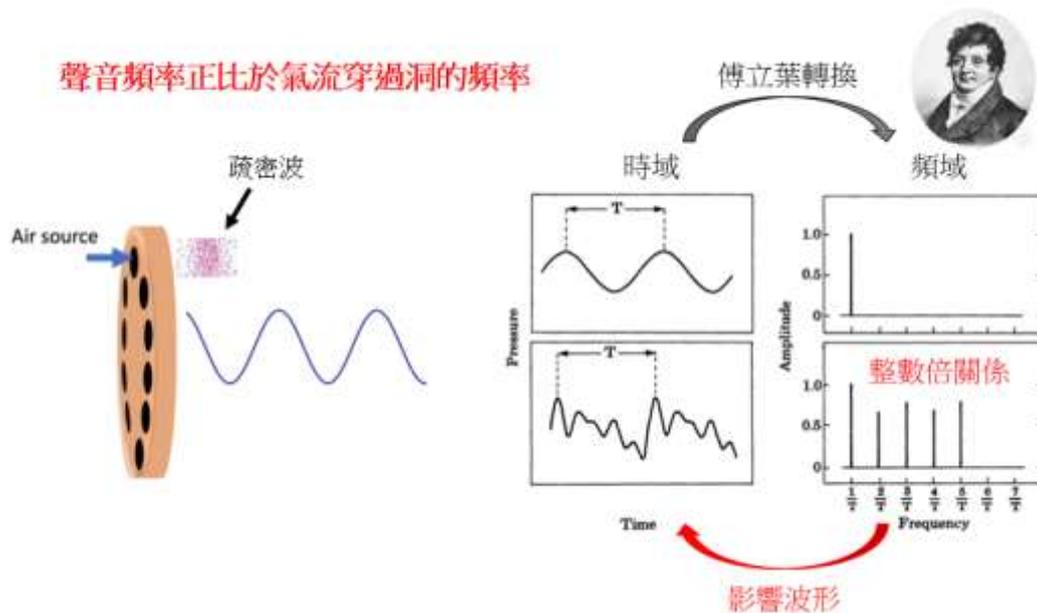
## 普高組 成果報告表單

<b>題目名稱：</b> 高速轉盤產生風切聲之性質與原理
<b>一、摘要</b> <p>如果使氣流通過轉動的有孔圓盤，結果會產生明顯的聲音。一開始我們認為造成聲音是因為氣流被圓盤切成一段段的疏密波，但儘管使用了吸音棉等裝置，對錄下來的聲音做傅立葉分析卻發現仍有許多無法解釋的現象，包含基頻的振幅很小而泛音的能量卻很大、出現了馬達和氣閥以外的噪音等等。後來我們改進了研究方法並使用更多理論解釋，例如運用物理引擎 COMSOL 模擬、查詢各方面文獻。歷經這些探究過程，我們最後觀察到明顯的一組諧波，基頻等於洞數乘以轉動頻率，其第 <math>n</math> 個振幅隨著 <math>n</math> 增加逐漸遞減。</p>
<b>二、探究題目與動機</b> <p>在一次物理相關活動中，觀察到風流經轉動圓盤時，悅耳的聲音就此產生，老師說聲音的產生和直升機轉動風切以及空氣柱震動有高度相關性，於是我們對此感到非常好奇。</p> <p>不同的條件下對聲音的特性有什麼影響呢?之後看了些相關資料發現這個問題還有很多面向及細節可以去發展，並可將高中所學的波動推廣至更深層面的探討，於是我們利用數學模型，將其更加定量的去做分析，從而探討其背後所代表的物理意義。</p>
<b>三、探究目的與假設</b> <p><b>目的：</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>一、探討聲音的組成及來源</li><li>二、探討各種因素（孔的數目、孔的位置、孔的大小、轉速）對頻率模型的影響</li><li>三、探討其後續泛音的性質與來源</li><li>四、探討其餘相關因素對聲音的影響</li></ul> <p><b>假設：</b></p> <p>我們一開始猜測這個聲音的產生很可能是來自於空氣粒子經過旋轉圓盤的洞，被其切割而成的疏密波，故聲音的頻率將和單位時間內洞經過的次數有直接關係。基於以上原因，我們做出以下假設：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>(一)聲音的頻率和圓盤轉速、孔的數目呈正比關係</li><li>(二)聲音的頻率不受孔的位置、孔的大小等變因所影響。</li></ul>
<b>四、探究方法與驗證步驟</b> <p><b>一、實驗歷程：</b></p> <p>在一開始，我們認為只是簡單的架設實驗器材並使用手機錄音並改變其相關物理參數即可完成實驗數據，應該不會有什麼太難的阻礙，但實際下去操作後才發現要有精確的聲音分析其步驟是相當繁複且困難的，在經歷不斷失敗、改良、錄音，一次次地找出問題所在並進行修正，最後才能得到較接近理論的曲線及聲音分析圖。</p>

## 二、實驗理論：

### (一) 疏密波：

隨著光碟旋轉，氣流被切成一段段的空氣粒子，空氣粒子在光碟後方震動因而產生了疏密波而被人耳聽見。



### (二) 基頻與諧波：

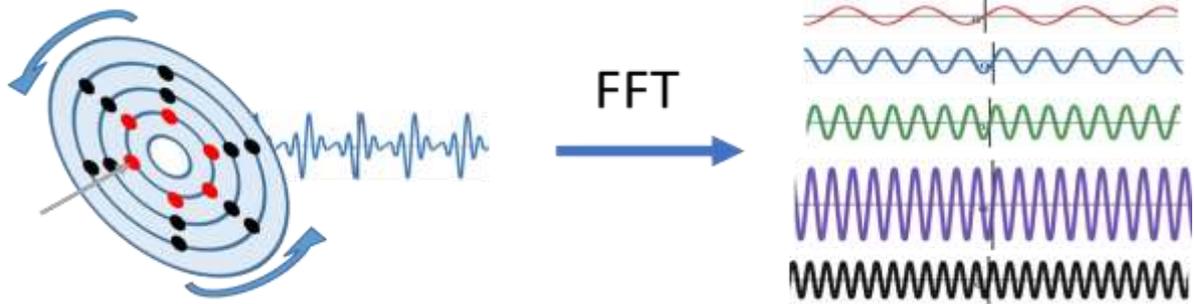
當一個複雜週期波 (非正弦波) 進行傅立葉分析就能拆解成一系列諧波。假設基頻的頻率為  $f_p$ ，後續諧波會和基頻有整數倍的關係，基頻決定聽到聲音的頻率，諧波則決定聽到聲音的音色。

### (三) 空間頻率：

每單位尺度上，出現幾個同樣的幾何結構。在這裡是指每單位長度下產生波的數量，其波型近似於方波。也就是說，如果洞數為  $q$  的光碟在每秒轉  $R$  圈的情況下使氣流通過，此時疏密波的頻率 (即基頻)  $f_p$  為  $q$  和  $R$  的乘積。

### (四) 傅立葉轉換：

一段週期性複合波可被拆解成一系列整數倍頻率關係的正弦波之疊加

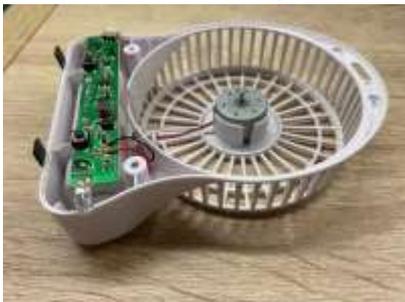


### 三、實驗準備：

光碟片、馬達裝置、墊圈、螺帽、手鑽、電鑽、鑽床、鑽頭、吸音棉、隔音箱、指向型麥克風、空氣幫浦、塑膠軟管、鱷魚夾、Sensor、COMSOL (物理場模擬軟體)、Python (執行傅立葉分析)、Audacity (聲音分析軟體)

### 四、實驗方法：

(一) 裝置：為了製作合適的馬達裝置，我們自生活中常見的小電風扇 (檔位太少，且大小不足容納光碟片)，逐步改良成更加穩定的設備 (空間中聲音的反射以及噪音影響實驗結果)，到最後加上自製吸音箱。



小電風扇



馬達裝置



吸音空間

(二) 測定馬達轉速：我們將感應器設置在開一孔的光碟片上方，使其旋轉時能恰好通過又不會撞到，並將資料傳輸到 Arduino 裡，利用每秒其感應器通過孔的頻率即可得到每秒鐘轉速。

(三) 鑽孔：先在光碟片上替欲鑽孔之中心做上記號，拿中心衝敲擊使其有凹陷處，接著在不同直徑下的洞選用合適的鑽孔設備 (手鑽：1-3mm)、(電鑽：3-5mm)、(鑽床：5mm 以上)

#### (四) 實驗架設

1. 將光碟片固定於馬達裝置上

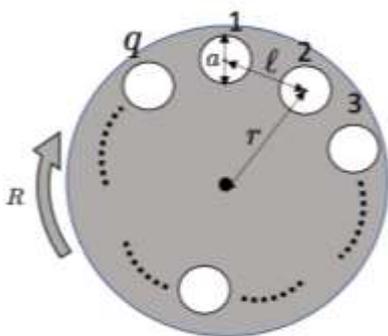
2. 選定其轉速所對應電壓之檔位
3. 開啟裝置使其旋轉
4. 選定固定位置導入穩定氣流
5. 將指向型麥克風安裝在光碟後方收音(疏密波產生處)
6. 錄下聲音並導入電腦，用 Audacity 選取合適音段
7. 匯入 Python 做傅立葉分析
8. 完成不同變因下之紀錄

#### (五) 聲音分析

1. 將音檔匯入 audacity，選取一段適當音訊，並輸出成.wav 檔（保持音訊完整性）
2. 將音訊導入 Python，可得 FFT（Fast Fourier Transform, 快速傅立葉轉換）或 STFT（Short Time Fourier Transform, 短時距傅立葉轉換）圖
3. 因為在一般情況下基頻為振幅最大的，並且會伴隨著一組泛音出現，由以上的特性我們可以找到基頻的位置
4. 再利用程式中尋找峰值的功能確認基頻的頻率
5. 最後用理論公式  $f_p = qR$  與實驗結果對照
6. 每組實驗採納 30 組數據，並在最後比較圖中加上誤差棒（error bar）

#### 五、實驗分析：

示意圖：



- ( $q$ ) 洞的數量 (個)
- ( $r$ ) 洞的中心和光碟中心的距離 (公分)
- ( $R$ ) 每秒鐘轉速 (rps)
- ( $a$ ) 洞的直徑 (毫米)

變因一：( $q$ ) 洞的數量

實驗結果 (單位：赫茲)

洞的數量	4	6	8	10
理論值	132	198	264	330
實驗值	135	205	270	325

由結果可以觀察到隨著洞數增加，基頻頻率增加，並滿足線性關係，和我們推導的

理論高度符合。

變因二：(r) 洞的中心和光碟中心的距離

實驗結果 (單位：赫茲)

洞的位置	外圈	中圈	內圈
理論值	264	264	264
實驗值	260	254	258

由結果可以觀察到洞中心到光碟中心的距離增加，頻率不變，但聲音變大。和我們推導的理論高度符合。

變因三：(R) 每秒鐘轉速

實驗結果 (單位：赫茲)

轉動速度	13rps	26rps	33rps	65rps	91rps
理論值	104	208	264	520	728
實驗值	124	199	274	505	704

由結果可以觀察到隨著轉速增加，基頻頻率增加，並滿足線性關係，和我們推導的理論高度符合。

變因四：(a) 洞的直徑

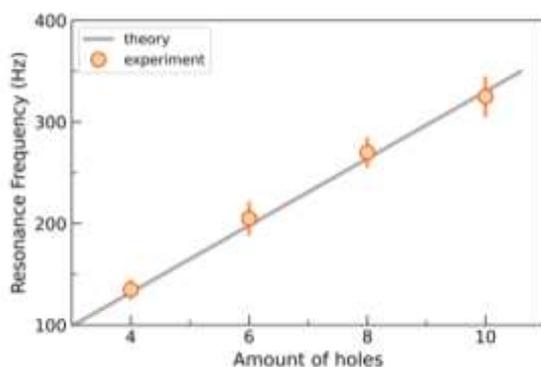
實驗結果 (單位：赫茲)

洞的直徑	3mm	5mm	7mm
理論值	264	264	264
實驗值	260	260	260

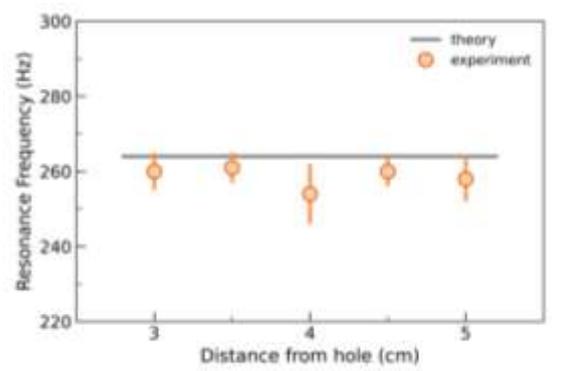
由結果可以觀察到洞的直徑變大，頻率不變，但聲音變大。和我們推導的理論高度符合。

## 六、實驗結果：

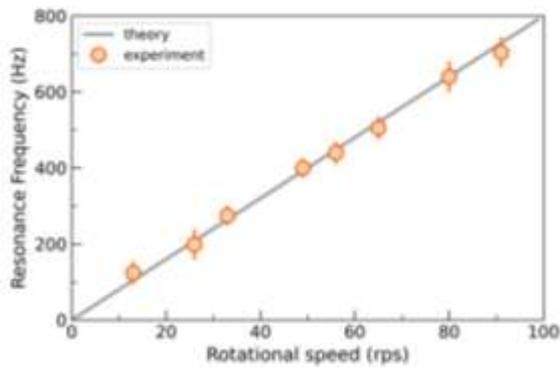
變因一：(q) 洞的數量



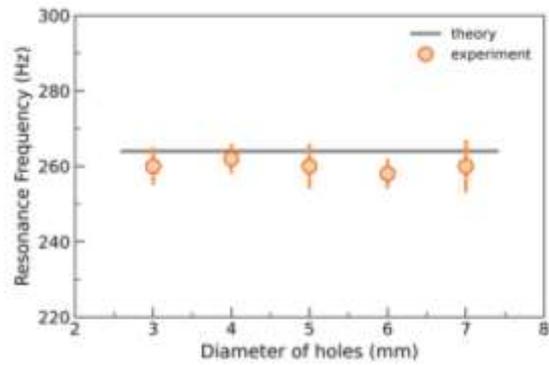
變因二：(r) 洞的中心和光碟中心的距離



變因三：(R)每秒鐘轉速



變因四：(a) 洞的直徑



## 五、結論與生活應用

### 一、結論

- (一) 在討論基頻模型時，用疏密波的概念即可解釋
- (二) 聲音頻率受到轉速及洞的數量影響，並滿足公式 ( $f_p = qR$ )
- (三) 聲音大小受洞的大小，洞的位置不同而改變
- (四) 基頻跟倍頻的比例受洞的數量、洞的位置、洞的大小影響

### 二、生活應用

- (一) 我們認為可以利用上述實驗可改變聲音到特定頻率的特徵製作樂器。
- (二) 後來我們也有差詢相關文獻資料，發現這個原理有應用在早期的警報器上。
- (三) 風力發電的葉片會切過流經的空氣會因為上述原理產生聲音，或許會造成附近居民的不適以及困擾。我們認為我們對於風切聲的頻率研究或許可以應用在降低風力發電機噪音之頻率至人耳無法聽見的範圍來減少風力發電所造成的外部成本。

## 參考資料

- [1] Milne Edward Arthur and Fowler Ralph Howard 1921 Siren harmonics and a pure tone siren Proc. R. Soc. Lond. A98414–427 <http://doi.org/10.1098/rspa.1921.0015>
- [2] Wightman, F. L., & Green, D. M. (1974). The Perception of Pitch: The pitch of a sound wave is closely related to its frequency or periodicity—but the exact nature of that relation remains a mystery. American Scientist, 62(2), 208–215. <http://www.jstor.org/stable/27844816>