

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040111

以 Color Schlieren 光學顯像技術研究噴嘴過濾器來達到降噪的目的

學校名稱：臺北市立建國高級中學

作者： 高二 黃冠博	指導老師： 高君陶
---------------	--------------

關鍵詞：Schlieren、nozzle block flow、光學顯像

摘要

本實驗利用航太領域的光學影像顯示科技-Color Schlieren 來觀測空氣中的流體變化，實驗過程以製作一個能夠看見氣流流動情形的簡易實驗裝置為目標，利用光線通過疏密不同的空氣而產生折射現象差異發展出一個簡單、方便組裝的實驗裝置，最後以 Color Schlieren 光學顯像技術觀察氣槍噴嘴在操作時噴嘴附近空氣密度變化的情形，發現噴嘴塊狀流為產生極大噪音的來源，並錄音然後繪製頻譜，比較各種自製噴嘴的降噪效果及其塊狀流的消除情形，自製的噴嘴過濾器比較直孔及螺旋孔兩種結構，並改變不同孔數，研究發現直孔效果優於螺旋孔，且孔數越多其降噪效果越明顯。

壹、研究動機

人耳長期暴露於噪音的環境中容易造成聽力受損，尤其是長時間處於 90dB 以上的環境下，對耳朵的傷害更加劇烈，甚至會產生永久性聽覺損失，目前這種長時間造成的聽力損失無法治療，所以降低環境噪音勢必是一件重要之事，我發現在從事機械組裝或機器維修時常用到的「氣槍噴嘴」，是一個很嚴重的噪音來源，往往造成使用者聽力受損的職業病，因此我決定設計連接氣槍噴嘴的過濾器來改善這個問題。

貳、研究目的

在進行噴嘴降噪的研究之前，我必須找出造成極大噪音的來源，以及製作出一個能夠看見聲音傳遞過程的實驗裝置，因此我使用「Color Schlieren 光學顯像技術」來觀察噴嘴前方出口的塊狀流變化情況，探討降噪效果。

Color Schlieren 光學顯像技術是一個很適合用來觀察處於密度分布不均勻流場的物體，熱流、波動、空氣流動、風洞……皆會使流場密度分布不均勻，而聲音是一種需要透過空氣傳遞的縱波，在傳遞過程中會產生疏密變化，如果能對傳遞介質的密度情況進行顯像，將可對噪音進行最直接的研究及觀察，因此我選擇利用光學顯像技術直接觀察塊狀流分佈情形，製作出價廉又實惠的「自製噴嘴過濾器」，找出有效降噪的幾何結構與機制。

以下為幾個重要實驗目的：

以Color Schlieren光學顯像技術進行噴嘴降噪研究

- 一、以光學顯像找出氣槍噴嘴噴氣時產生噪音的來源
- 二、自製噴嘴過濾器並與未加裝過濾器的氣槍噴嘴做比較

(一) 直孔噴嘴過濾器顯像

(二) 螺旋孔噴嘴過濾器顯像

三、繪製出各種噴嘴噴氣時的頻譜圖並疊合做比較

參、研究設備及器材

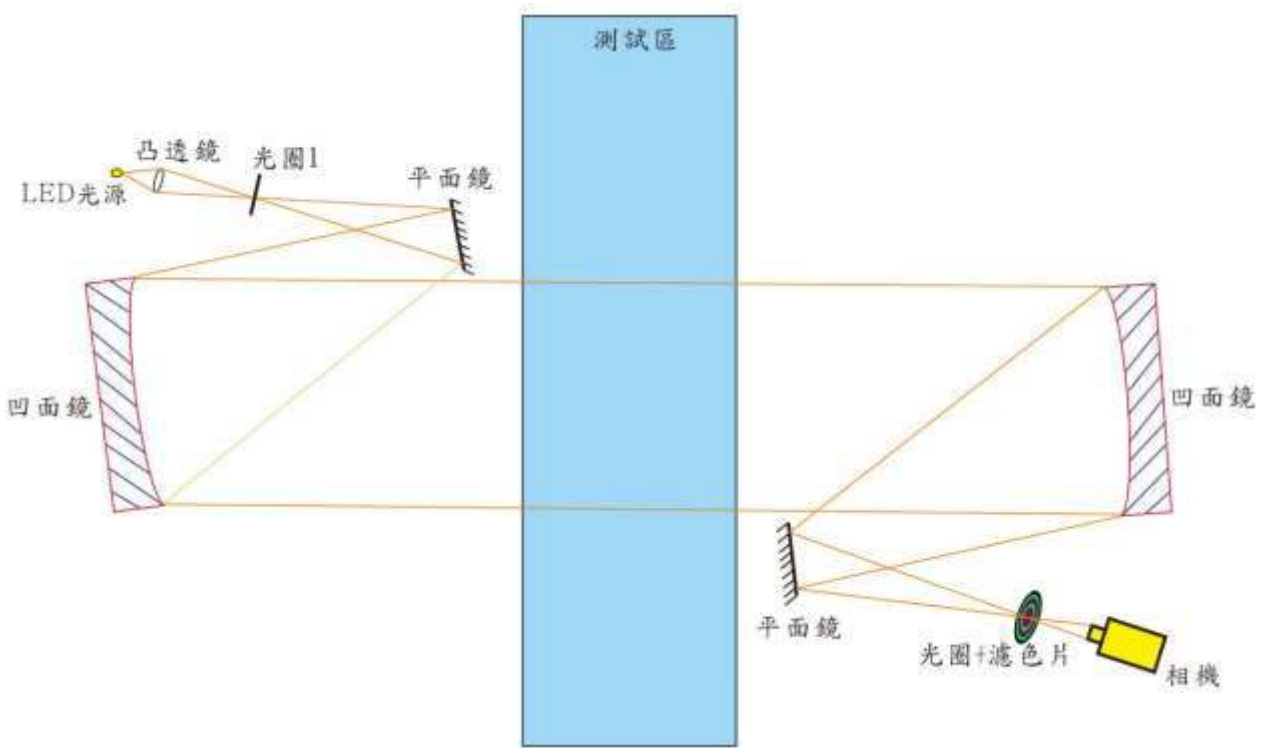
器材名稱	圖片	說明
凹面鏡		<p>圓形凹面鏡：</p> <p>直徑為 15 公分，焦距長約 90 公分，架設在固定板上，固定板可以 360° 旋轉，亦可以調整凹面鏡與水平方向的夾角。</p>
LED 光源		<p>採用直徑約 5 公分的 LED 燈作為光源。</p>
凸透鏡		<p>凸透鏡架設在 LED 燈的前方，匯聚 LED 燈的發散光，使其聚焦在焦點上。</p>

<p>光圈與彩色濾色片</p>		<p>光圈 1： 架設在凸透鏡的焦點上，經由凸透鏡匯聚的光線通過光圈後即成為一個點光源。</p> <p>光圈 2： 架設在相機前，在光圈上可加裝彩色濾色片(color mask)，並控制光進入相機的光通量。</p>
<p>分光鏡 (BeamSplitter)</p>		<p>通過光圈的光線遇到凹面鏡後，凹面鏡將光線反射至分光鏡上，有一半的光線會直接穿透分光鏡，另一半的光線被分光鏡反射到別處。</p>

<p>相機與相機腳架</p>		<p>照相固定於腳架上，採用 B 快門 避免操作時晃動造成影像模糊或失焦</p>
<p>噪音計（加裝麥克風）</p>		<p>噪音計：量測分貝值 旁邊加裝麥克風並連至電腦，用以錄下噴氣時的聲音</p>
<p>氣槍噴嘴與空氣壓縮機</p>		<p>按下氣槍噴嘴把手後將噴出高壓氣體</p>

肆、研究過程或方法

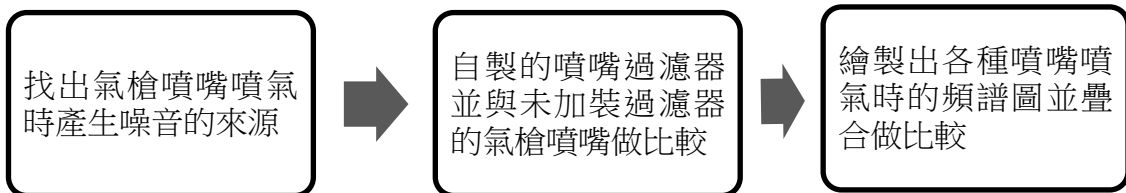
一、實驗裝置：標準 Color Schlieren



圖(一)標準 Color Schlieren 法

二、以 Color Schlieren 光學顯像技術進行噴嘴降噪研究

採用標準 Color Schlieren 裝置拍攝氣槍噴嘴噴氣時周圍流體的情形，並加裝噪音計測量噪音，用麥克風錄下噪音然後以 Audacity 進行分析。



本實驗分為以下三個部分：

(一)以光學顯像找出氣槍噴嘴噴氣時產生噪音的來源

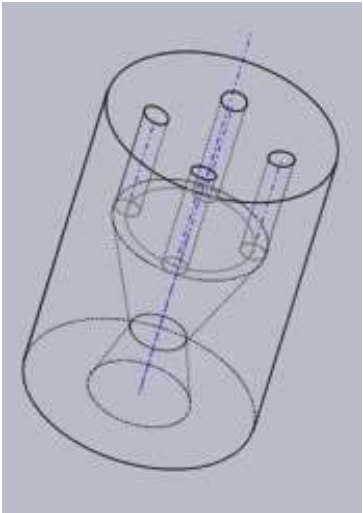

將氣槍噴嘴噴氣時的情形進行顯像，觀察噴嘴前方顯像下的氣體顏色並記錄噪音值。

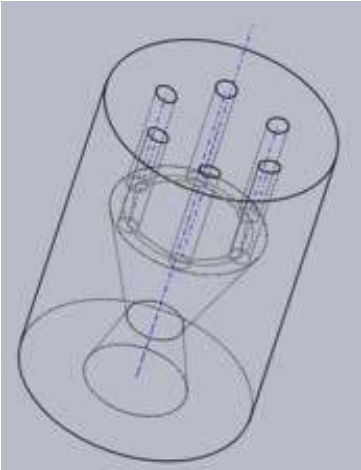

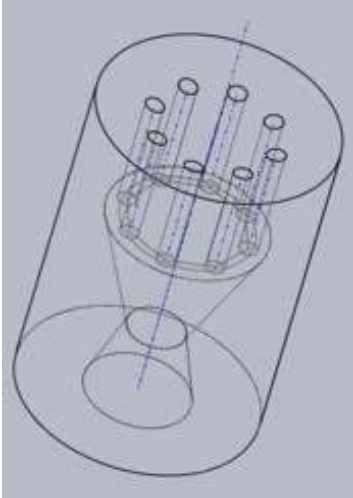

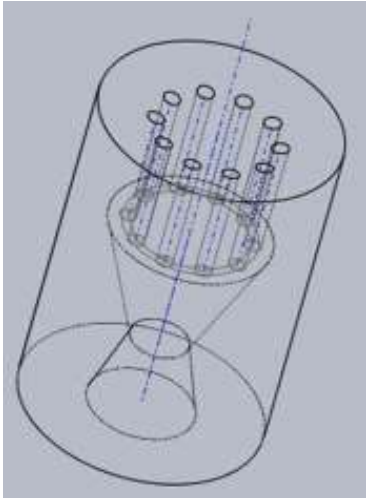

(二)自製噴嘴過濾器並與未加裝過濾器的氣槍噴嘴做比較

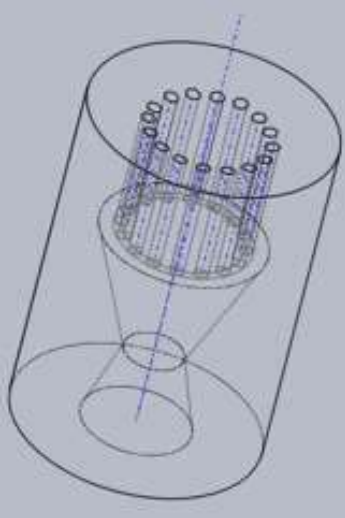

自製噴嘴過濾器的出口總面積=氣槍噴嘴管口面積

自製的噴嘴過濾器由於孔徑較小且有螺旋孔，故以「3D 列印」的方式製出，如下：

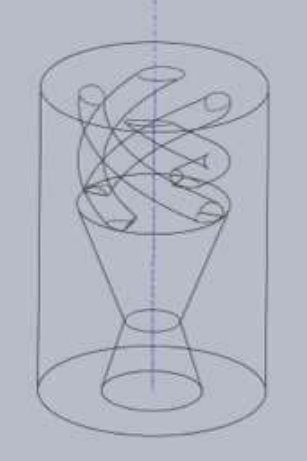

直孔

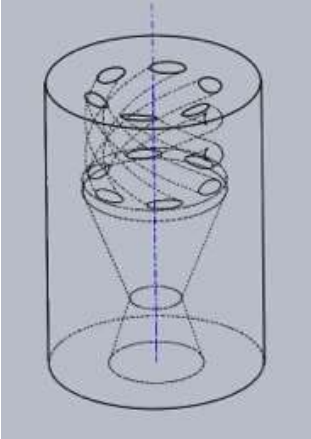

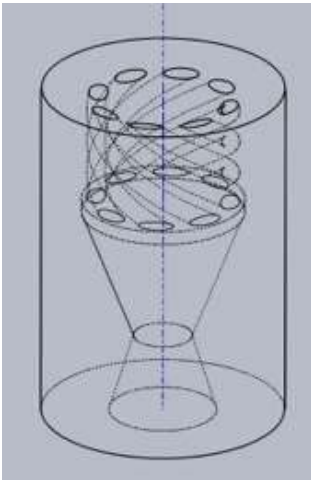

孔數	孔徑(直徑)	結構圖	圖片
4	2.00(mm)		

6	1.63(mm)		
8	1.41(mm)		
10	1.26(mm)		

16	1.00(mm)		
----	----------	---	---

螺旋孔

孔數	孔徑(直徑)	結構圖	圖片
4	2.00(mm)		

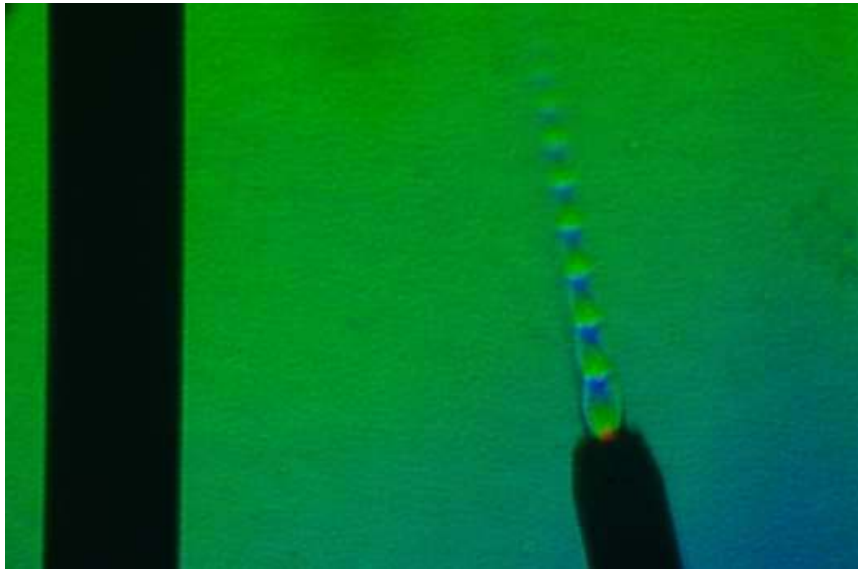
6	1.63(mm)		
8	1.41(mm)		

伍、研究結果

以 Color Schlieren 光學顯像技術進行噴嘴降噪研究

一、找出氣槍噴嘴噴氣時產生噪音的來源

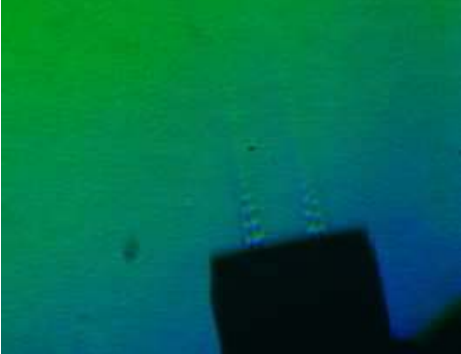
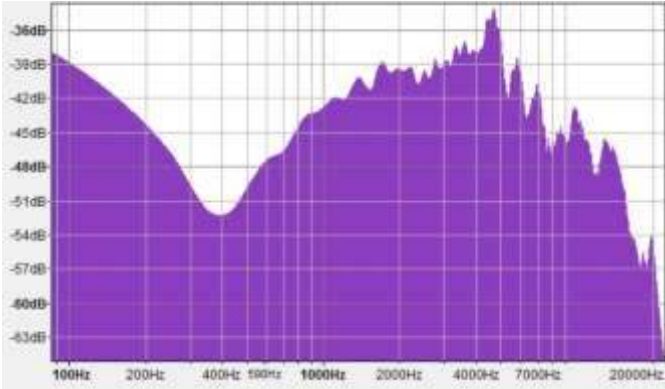
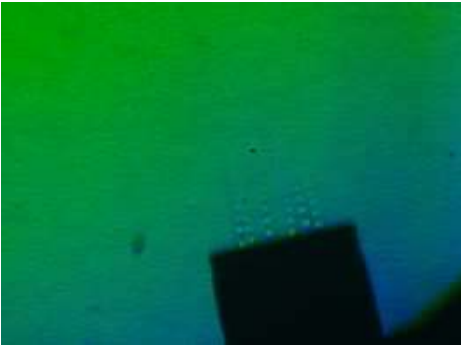
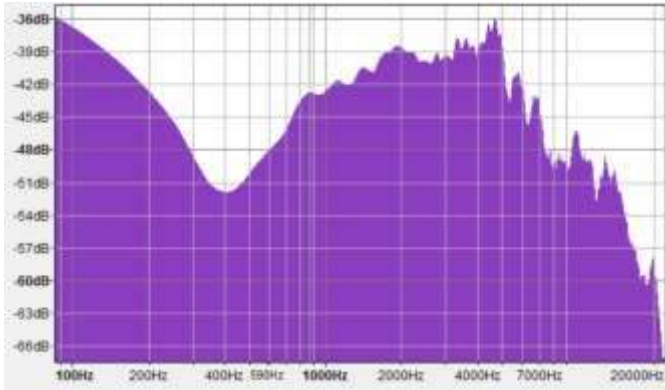

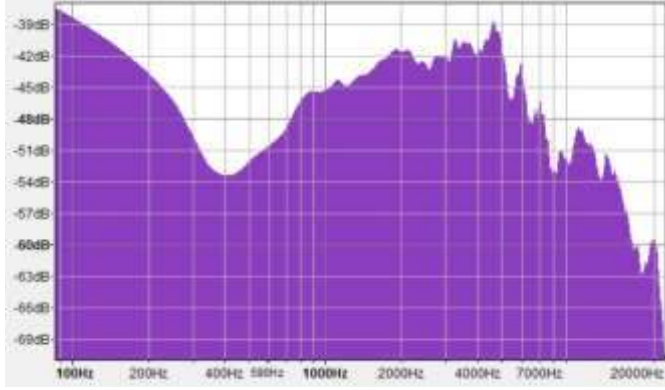
將氣槍噴嘴噴氣時的情形進行顯像，得到如圖(二)的結果：

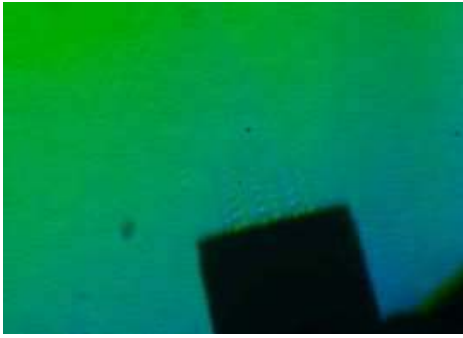
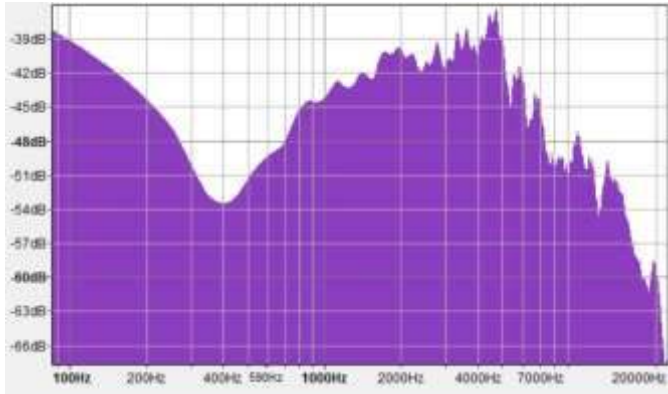
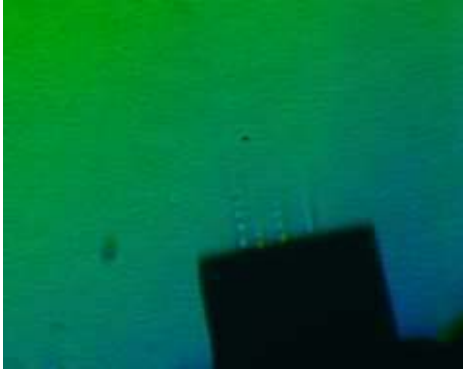
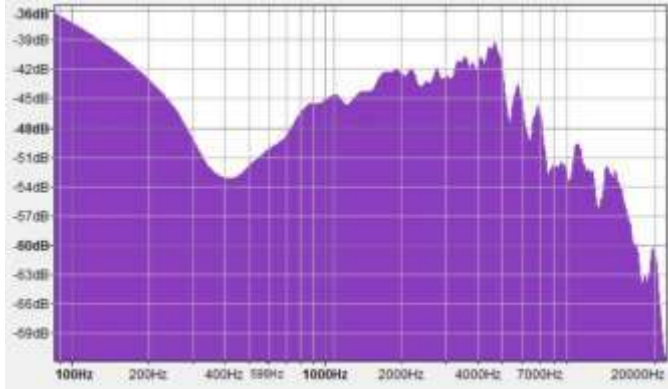


圖(二)


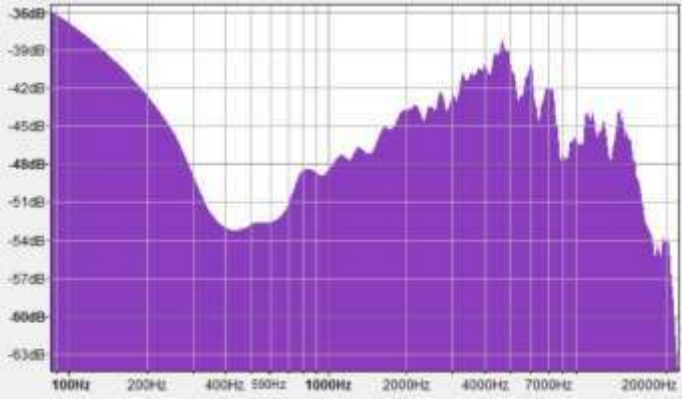

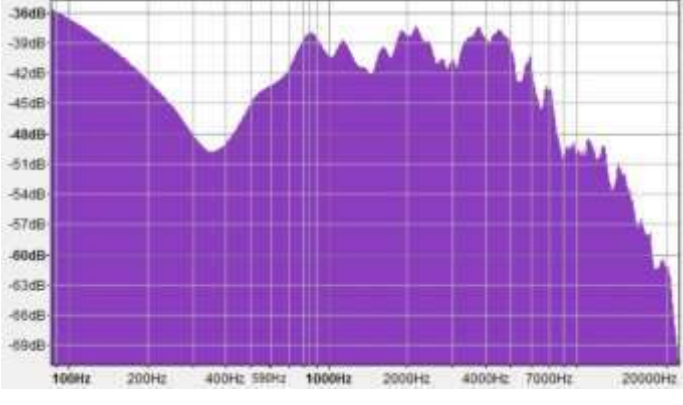

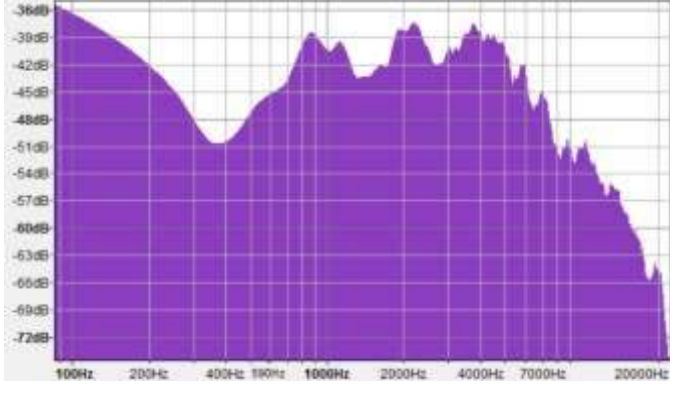
二、自製噴嘴過濾器並與未加裝過濾器的氣槍噴嘴做比較

直孔

孔數	dB	圖片	頻譜圖
4	92	 <p data-bbox="512 801 603 840">圖(三)</p>	
6	90	 <p data-bbox="507 1332 598 1370">圖(四)</p>	
8	87	 <p data-bbox="512 1825 603 1863">圖(五)</p>	

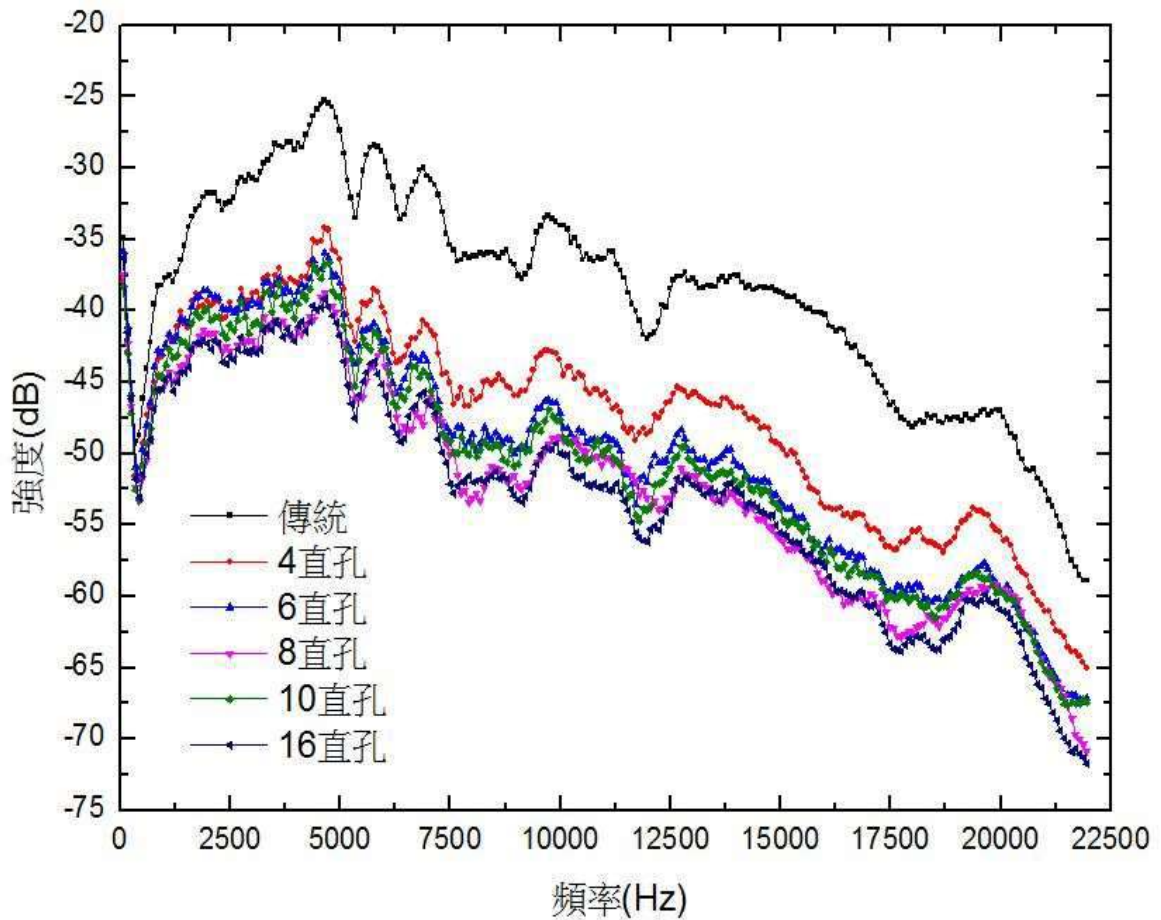
10	84	 <p data-bbox="523 499 616 539">圖(六)</p>	
16	77	 <p data-bbox="523 1016 616 1057">圖(七)</p>	

螺旋孔

孔數	dB	圖片	頻譜圖
4	94	 <p data-bbox="497 689 587 728">圖(八)</p>	
6	89	 <p data-bbox="497 1193 587 1232">圖(九)</p>	
8	87	 <p data-bbox="497 1697 587 1736">圖(十)</p>	

三、繪製出各種噴嘴噴氣時的頻譜圖並疊合做比較

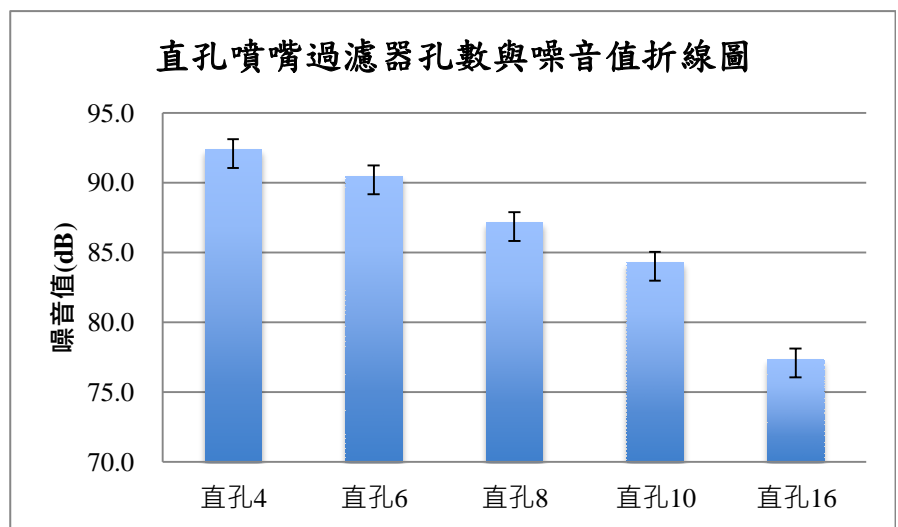
直孔噴嘴過濾器與氣槍噴嘴頻率-分貝折線圖



圖(十一)

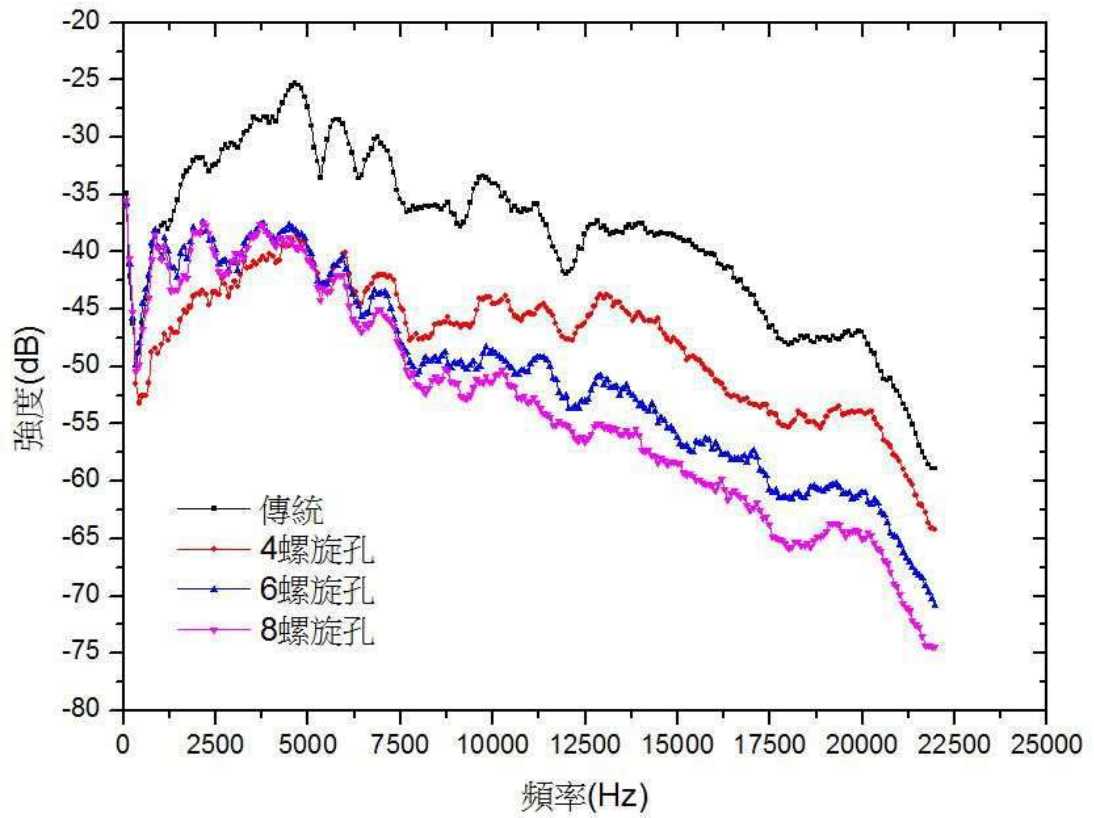
直孔噴嘴過濾器孔數與噪音值折線圖

孔數	噪音值	降噪率
4	92	16%
6	90	18%
8	87	20%
10	84	23%
16	77	30%



圖(十二)

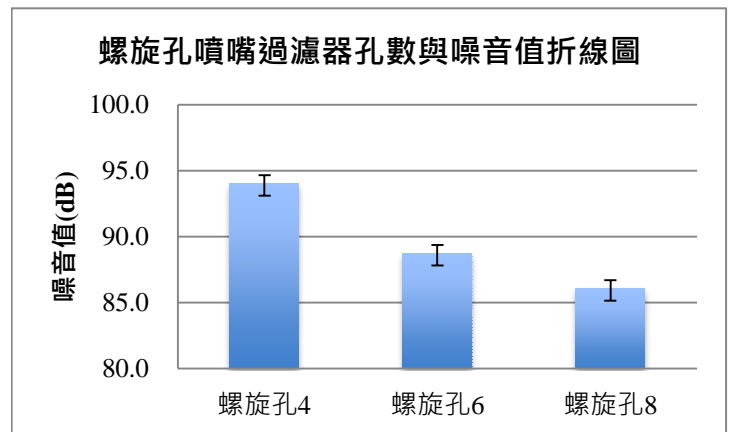
螺旋孔噴嘴過濾器與氣槍噴嘴頻率-分貝折線圖



圖(十三)

螺旋孔噴嘴過濾器孔數與噪音值折線圖

孔數	噪音值	降噪率
4	94	14%
6	90	18%
8	87	20%



圖(十四)

陸、討論

一、何謂 Schlieren 光學顯像？

Schlieren 光學顯像技術可以拍攝到肉眼無法看到的氣流形態，光線通過密度不均勻的流體後會因折射率不同而產生不同角度的偏折，這些光線會打在彩色濾色片(color mask)的不同地方，進而產生與底色不同的顏色，因此能看見流體的形態。

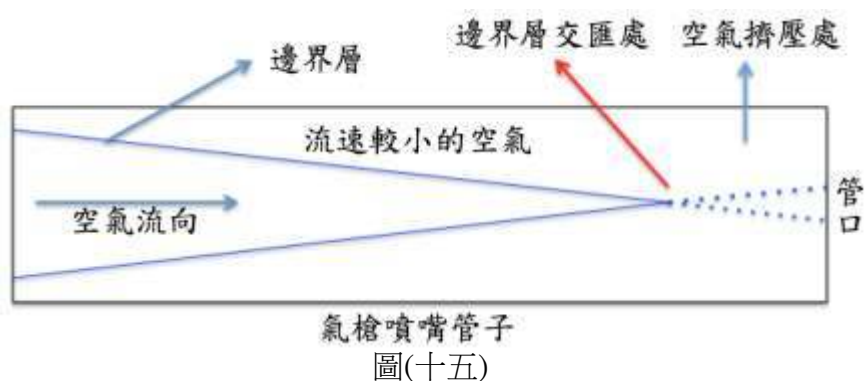
二、為何使用 Color Schlieren 光學顯像技術進行噴嘴降噪研究？

光學顯像有分為很多種，包括 Shadow Graph、Double-pass Schlieren、Mourédifferential Interferometry。Shadow Graph 的裝置靈敏度不夠高，成像品質也不夠好，Double-pass Schlieren 的裝置拍出來的影像對比強但會變形，至於不使用 Mourédifferential Interferometry 的原因是因為他用的不是一般的光源而是電磁波，觀察噴嘴塊狀流這種因為空氣密度不同而造成的空氣流動不需要用到如此困難技術。

而我最終使用標準的 Color-Schlieren 的原因是因為他的裝置中有一組平行光，所以影像不會變形，這個裝置的靈敏度不會太差，將正常體溫的手放入測試區中仍然可以看見手附近所散失的熱流，目前美國國際太空署所使用的航太顯像裝置也是這一種，因為這個裝置容易捕捉影像，而且兩面凹面鏡在光源夠強的情況下可以無限加長，也就是測試區可以變得很大，可以用來觀測較多種東西。

三、噴嘴塊狀流是如何產生的？

當按下氣槍噴嘴開關時，空氣快速通過管子，由於空氣的黏滯性，管壁附近的空氣流速會比管子中央的空氣流速要來得慢，因而形成一個越靠近管口處越厚的邊界層，如圖(十



五)、邊界層交匯處與管口之間便是空氣擠壓處，空氣在這個區段不斷擠壓，壓力比環境空氣高許多，當擠壓到一定程度時便會噴出，然後再重新累積，重複上述過程之後便是我們光學顯像裡所看到的噴嘴塊狀流。

四、噪音計的分貝值與頻譜圖的差異

同樣的聲壓下，人對於高頻率聲音的敏感度高於低頻率聲音，因此在計算分貝值時，將人對於不同頻段的聲音感受不同這項因素考慮進去，並作適當的加權，加權有分很多種，其中較常用的為A加權及C加權。A加權所得出來的曲線叫合乎人耳實際聽到的聲音響度，C加權為儀器實際所測得的分貝值。

而頻譜圖分析軟體的作用便是將錄到的一段聲音進行分析，然後將各種不同頻率的音頻所對應的分貝值繪製成折線圖，也就是頻譜圖。

五、自製噴嘴過濾器的設計理念為何？

要減弱噴嘴塊狀流，勢必有很多種方法，但是這一切都必須建立在一個前提之下：不過分減低空氣出來的強度，不然會失去氣槍噴嘴的本意。

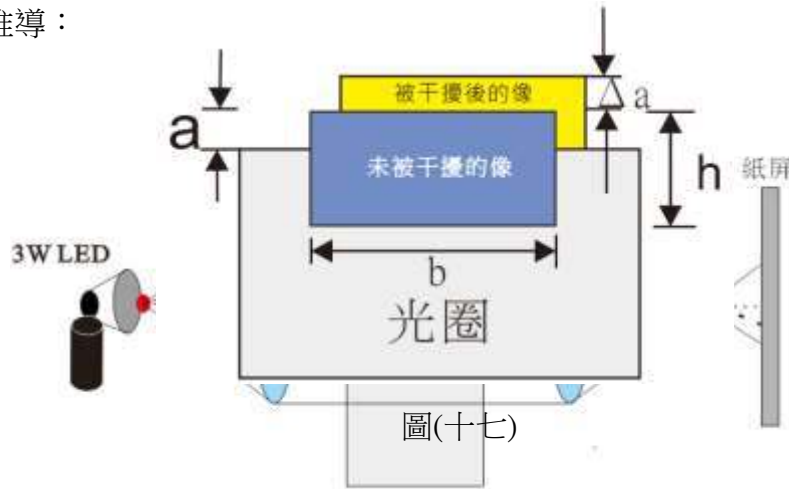
曾經有構想過使用網狀撓性物來削弱噴嘴塊狀流，可是即使降噪效果很好，空氣通過一片網子強度勢必會下降許多，因此直接阻擾或者破壞空氣流動來達成降噪這個概念是不可行的。

至於我設計的直孔以及螺旋孔噴嘴過濾器的概念是這樣的，藉由空氣進入過濾器分流，出來之後再匯合，以確保空氣強度不會減低太多，而此過程中亦不會出現大塊的噴嘴塊狀流，可以大幅度減低噪音。螺旋孔的部分則是希望空氣能夠在螺旋管子中稍微減慢速度但是又不要減少太多。

六、如何提升影像品質？

如果想要再觀察更細微的空氣流動變化來增進實驗的品質，那麼勢必須要提升實驗裝置的靈敏度，因此我對這方面也作了一些研究，發現靈敏度與遮光率有很大的關係，

遮光率公式推導：



圖(十六)

$$E = \frac{B \cdot b \cdot h}{m^2 f_1 f_2} \dots\dots\dots ①$$

E 為經過光圈後的照度，也就是平均灰階值，B 為 LED 亮度，b 為未被干擾的像的寬度，h 為未被干擾的像的高度，m 為放大率，f₁ 為第一面凸透鏡的焦距，f₂ 為第二面凸透鏡的焦距：

$$E = \frac{B \cdot b \cdot a}{m^2 f_1 f_2} \dots\dots\dots ②$$

a 為光通過的高度，ΔE 為被干擾後的像的照度，Δa 為被干擾後的像和未被干擾的像的頂端相隔距離：

$$\Delta E = \frac{B \cdot h \cdot \Delta a}{m^2 f_1 f_2} \dots\dots\dots ③$$

如圖所示：

$$\tan \phi = \frac{\Delta a}{f_2} \dots\dots\dots ④$$

ϕ 為光線在過程中的偏折角：

$$\Delta a = \tan \phi \times f_2 \dots\dots\dots ⑤$$

因為偏折角度很小，故 $\tan \phi = \phi$ ，將此代回：

$$\Delta a = \phi \times f_2 \dots\dots\dots ⑥$$

將⑥代回③得到：

$$\Delta E = \frac{B \cdot h \cdot \phi}{m^2 f_1} \dots\dots\dots ⑦$$

將⑦除以②得到：

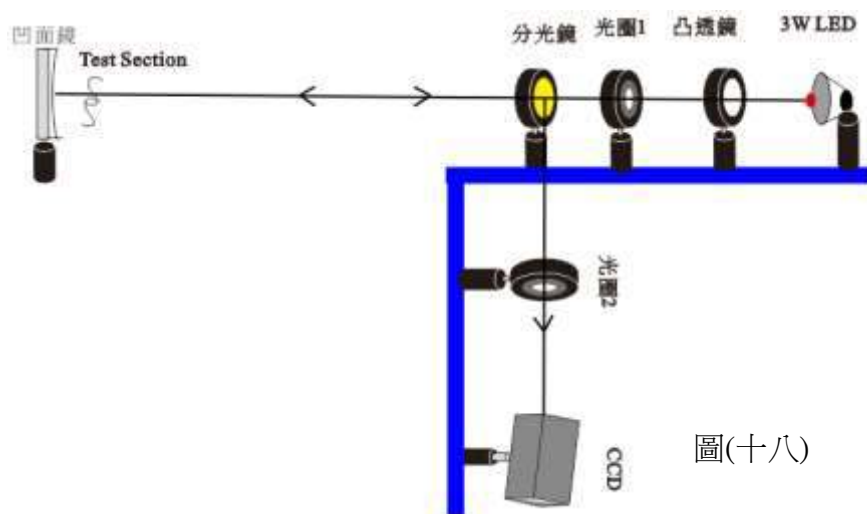
$$C \equiv \frac{\Delta E}{E} = \frac{f_2}{a} \times \phi \dots\dots\dots ⑧$$

$$\text{遮光率} = 1 - C \text{ 且 } \phi = \frac{\Delta E}{E} \times \frac{a}{f}$$

C 為擾動光源照度與原始照度比，E 為經過光圈後的照度，也就是平均灰階值， ΔE 為平均灰階值差、f 為凹面鏡焦距、a 為光通過的高度，亦即光圈孔徑的直徑大小， ϕ 為偏折角(弧度)

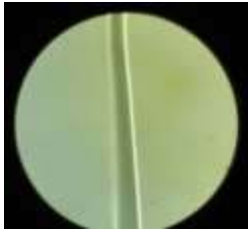
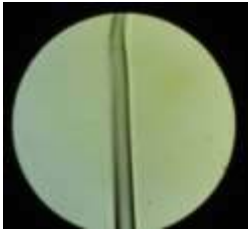
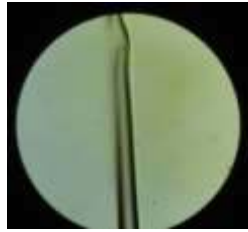
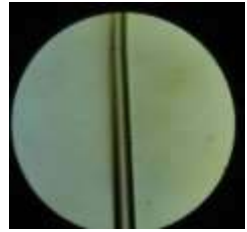




比較不同遮光率對影像的影響：

本實驗採用的實驗裝置為黑白 Double-pass Schlieren，如圖(十八)






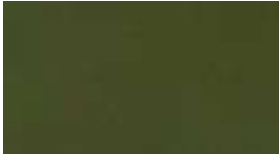


圖(十八)

以下為不同遮光率所拍出的影像

	樣本一	樣本二	樣本三	樣本四
圖片				
	樣本五	樣本六	樣本七	樣本八
圖片				

將每張照片的 左:3000、右:1800、上:1000、下:1700 取樣(大約 $0.45 \times 0.82\text{cm}$)，再利
用程式 Matlab 算出取樣方格內的每個畫素的灰階質並取平均，然後計算該圖片的
實際遮光率，以下為各種遮光率之下取樣的照片：

	樣本一	樣本二	樣本三
圖片			
	樣本四	樣本五	樣本六
圖片			
	樣本七	樣本八	



程式計算後的各樣本實際遮光率：

	樣本一	樣本二	樣本三	樣本四
Cut off%	0% off	4.52% off	10.06 off	21.25 off
	樣本五	樣本六	樣本七	樣本八
Cut off%	53.73%off	62.14% off	74.29% off	91.87% off

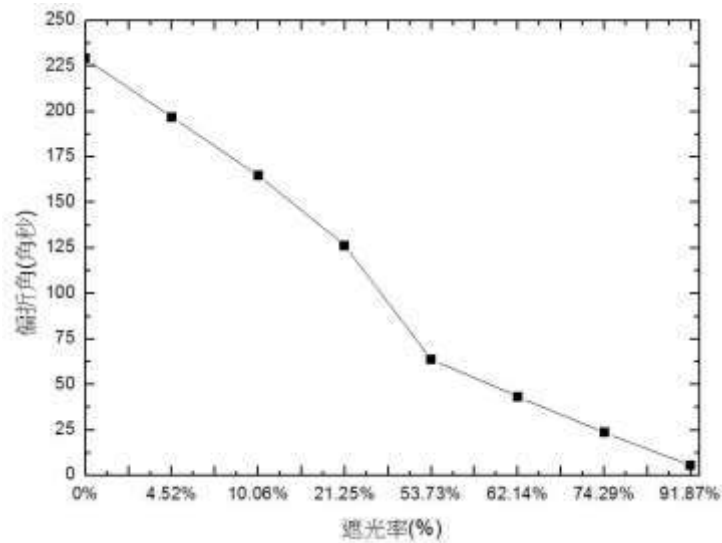
從上面可以觀察到，遮光率越低的影像，其氣流輪廓越不明顯、越不立體，當遮光率為 0% off 時即成為 Shadow Graph。

在 0%到 100%off 的黑白 Double-pass Schlieren 圖片中，0% off 的影像亮度最高但廓最不明顯、最不立體且熱氣流的影像變化也不大，從各個樣本來看，遮光率越低，所得到的影像亮度越高但成像品質越低，不過 91.887%off 的影像卻又呈現一片黑，故根據 0%到 91.87%off 影像可以得知，遮光率落在 40%到 60%off 的黑白影像有較好的成像品質、熱氣流輪廓也明顯且熱氣流影像的對比程度也較大。

算出各個取樣的平均灰階值之後作出以下圖表：

灰階值 E	遮光率	$\Delta E/E$	a(mm)	f(mm)	角秒
180.07	0%	100.00%	2	1800	229.18
171.92	4.52%	94.58%	1.8	1800	196.94
161.98	10.06%	89.94%	1.6	1800	164.90

141.80	21.25%	78.75%	1.4	1800	126.34
83.32	53.73%	46.37%	1.2	1800	63.63
68.18	62.14%	37.86%	1	1800	43.39
46.29	74.29%	25.71%	0.8	1800	23.57
14.65	91.87%	8.13%	0.6	1800	5.59



圖(十九)

由圖(十九)可知遮光率越高時，所需光線偏折角就越小即可透過本裝置明顯的看到光線的偏折變化。

七、噴嘴過濾器設計理念

本實驗所製作的氣槍噴嘴噴嘴過濾器要在「不減低單位時間流量」的前提下製作

氣槍噴嘴的出口(噴嘴過濾器的入口)面積為 4mm^2

設 n 孔數的噴嘴過濾器每個孔的截面積為 A_n ，則噴嘴過濾器的出口總面積為 nA_n

舉例來說：4 孔的氣槍噴嘴過濾器，其出口總面積為：

$$4A_4 = 4\text{mm}^2$$

根據連續方程式可以推得：

$$nA_n \times v_1 = 4(\text{mm}^2) \times v_2$$

讓 $nA_n = 4(\text{mm}^2)$ (出口總面積 = 入口總面積)

這樣一來就能確保流速前後相等($v_1 = v_2$)，又流量為：

$$\text{流量} = \text{出口總面積} \times \text{流速} \times \text{時間}$$

出口總面積與流速皆相等時，單位時間流量即一樣

柒、結論

以 Color Schlieren 光學顯像技術進行噴嘴降噪研究

一、找出氣槍噴嘴噴氣時產生噪音的來源

塊狀流為產生極大噪音的來源，圖(二)中的菱形波塊為空氣擠壓的現象，在光學顯像下氣塊密度越高，顏色與底色差異越大，圖中可發現菱形波塊上半部為綠色，下半部為藍色，因此可得知此為一疏密波塊，類似聲音的疏密波，尤其以管口出處的紅色波塊擠壓程度最劇烈，產生極大噪音。

二、自製噴嘴過濾器並與未加裝過濾器的氣槍噴嘴做比較

直孔噴嘴過濾器:

由圖(十一)可發現 8 孔及 16 孔的直孔噴嘴過濾器在高頻段的消除方面明顯比 4、6、10 孔的噴嘴過濾器來的好，就降噪率而言，降噪率 30% 的 16 孔直孔噴嘴過濾器降噪程度最佳，之所以能夠降噪是因為將氣槍噴嘴噴出的空氣達到分流的目的。

螺旋孔噴嘴過濾器:

螺旋孔噴嘴過濾器的降噪率並沒有比同孔數的直孔噴嘴過濾器來的好，初步推測可能是氣體進入噴嘴過濾器的螺旋管內然後撞擊到管壁，產生噪音，不像直孔的噴嘴過濾器一樣空氣是完全順著管壁流動，未來可能須針對不同螺距的噴嘴過濾器進行實驗方可得知。

三、繪製出各種噴嘴噴氣時的頻譜圖並疊合做比較

由圖(十一)可以發現加裝直孔噴嘴過濾器的氣槍噴嘴，噴氣時的聲音在各個人耳可以接收到的頻段達到約減少 15 分貝的降噪效果，由圖(十三)可發現螺旋噴嘴過濾器可達到約減少 12 分貝的降噪效果。

觀察圖(十一)及圖(十三)可以發現直孔以及螺旋孔噴嘴過濾器在 7500hz 以上的音頻有相對大幅度的降噪效果，而 7500hz 以上的聲音正好是人耳敏感的高頻段，另外可發現螺旋孔噴嘴過濾器大約在 7500hz 以上時，不同孔數的過濾器降噪效果開始拉大。

目前兩種噴嘴過濾器的降噪效果都有孔數越多降噪效果越好的趨勢，不過目前由於 3D 列印技術的解析度問題，在入口面積 = 出口面積的前提下，無法繼續印製更高孔數的噴嘴過濾器，實為可惜。

四、應用性及未來發展:

噴嘴降噪方面：

目前我有想到一個新的噴嘴過濾器結構，那就是導流針錐，藉由一個長形物體，讓空氣順其外側流過，來抑制噴嘴塊狀流的產生，其示意圖如下：



其他應用性：

將漏氣的小容器放入測試區中，可追蹤容器漏氣的位置，以光學方法測定的優點是此法空間解析度較高，可作較準確的判斷與修復。

再者利用本裝置來觀測手機、筆記型電腦或是強調散熱的裝置，藉由此方法加以改良外殼的設計，可增加元件的壽命與效能。

若能將此實驗裝置的凹面鏡跟測試區加大，便可以觀察運動中的物體，例如：行進中的物體受到的空氣阻力、自由落體過程中周邊空氣流動情形，甚至可以觀察飛行器高速行進時的周邊氣流影像，藉此能夠改良飛彈、戰機的外型，降低空氣阻力影響並提高速度，這種實驗裝置是未來科技發展非常重要的工具。因此不論是在日常生活中可以應用這樣的技術，甚至可以利用在國防工業上。

捌、參考資料及其他

- [1] McGraw-Hill Science & Technology Encyclopedia: Schlieren photography from <http://www.answers.com/topic/schlieren-photography>, 2013.
- [2] Schlieren and Shadowgraph Techniques Visualizing Phenomena in Transparent Media by G.S. Settles, Penn State University from <http://books.google.com.tw/books?id=HWtB2R0gWFgC&pg=PA29&lpg=PA29&dq=schlieren&source=bl&ots=sJILW-2iYV&sig=KNUSEsTrAY4byEX9UyagFgW3zIA&hl=zh-TW&sa=X&ei=igX-UsO3KpCEkgXC-4HYAw&ved=0CCkQ6AEwADgK#v=onepage&q=schlieren&f=false>, 2013.
- [3] Laser Schlieren and Shadowgraph - Springer, P. K. Panigrahi and K. Muralidhar, *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat 23 and Mass Transfer*, Springer Briefs in Thermal Engineering and Applied Science (P25、P30), 2013.
- [4] Chien-Chih Chen and Chen-Ching Ting, *Investigating the Effect of Color Mask on Sensitivity for the Color Schlieren Imaging*, International Journal of Engineering and Technology Innovation, 3: (2):114-122, March, 2013.
- [5] Chen-Ching Ting and Chien-Chih Chen, *Detection of Gas Leakage Using Micro Color Schlieren Technique*, Measurement, 46: 2467-2472, October, doi:10.1016/j.measurement.2013.04.073, 2013.
- [6] Tai-Fa Young, Chien-Chih Chen, Yu-Sheng Liang, Yi-Hua Pan, Kuan-Po Huang, Chen-Ching Ting, *Study on nozzle flow dispersion for noise reduction by using micro color Schlieren technique*, International Journal of Modern Physics and Application, 1(1):9-14, March, 2014.
- [7] 洪有成(民 101)。紋影顯像技術之定量與定性分析(Quantitative and Qualitative Analysis using Schlieren Technique) 國立台北科技大學製造科技研究所碩士學位論文。
- [8] 陳建置、吳明憲、陳育煒、林桂儀、丁振卿，以彩色 Schlieren 顯像技術探討熱流震盪受聲音影響，CSSV 2010，中華民國振動與噪音工程學會第 9 屆第 1 次年會暨第 18 屆學術研討會，June 12, 台北, 2010.

【評語】 040111

本作品以 color Schlieren 光學顯像技術，觀察氣槍噴嘴附近密度之變化，並且發現噪音之來源。作者並且設計數種不同形狀之過濾器，以減少噴嘴之噪音。經過顯像技術之影像實驗，成功找出最能降低噪音之過濾器。研究題目具有實際應用性，可廣泛應用到降低日常生活之噪音來源。

作品內容偏重實驗之定性觀察，缺乏物理參數之測量，及數據分析。如能增加這些內容，作品之深度可以增加，有理論的基礎，可以了解問題的原因，作品之品質及水準會大幅提升。