

橫流扇噪音特性與其聲音品質之研究

蔡國隆¹、李東徵²、王光賢³

¹ 國立台北科技大學車輛工程技術系副教授

^{2,3} 國立台北科技大學車輛工程技術系研究生

國立台北科技大學車輛工程技術系

106 台北市大安區忠孝東路3段1號

電話：02-2771-2171 分機 3673 Fax：02-2731-4990

E-mail：golong@ntut.edu.tw

摘要

本文應用音質分析技術改善橫流扇(cross flow fan)運轉所產生的刺耳異音問題。其中，計算音質參數可將噪音物理量加以心理化，而聲音編輯法則可由多種噪音控制策略中找出最有效的改善措施。本研究提出改變葉輪扭轉角之設計，結果顯示適當的扭轉角可有效改善橫流扇之聲音品質及整體噪音量，但若扭轉角度過多反而易激發出紊流噪音。

Abstract

This research applies Sound Quality Analysis for improving the annoying noises generated by a cross flow fan. We have discussed the Psychoacoustics using sound quality metrics, and hunted the most effective design from different noise-control strategies. In this paper, the use of appropriate rotor-skewed angle (RSA) can promote not only sound quality but also total noise emission.

關鍵字：橫流扇、聲音品質、葉輪扭轉角

壹、前言

近年來，全球溫室效應持續加劇，人們對於空調機的依賴性也與日俱增。其中，橫流扇相較於軸流扇與離心扇，因其具有構造簡單、低噪音與出風量大等優點，因此較為人們廣泛應用。橫流扇發明迄今一世紀餘，已有諸多學者持續針對橫流扇進行研究與改進，其相關研究可概分為兩個方向：(1)著重於流場型態之確立、量化與最佳化流道設計因子[1-4]。(2)探討流場引發噪音(flow introduced noise)機制與噪音減量設計[5-8]。由於橫流扇之流道設計、送風性能皆已臻相當水準，且空調機之噪音表現也逐漸成為消費者選購時之一大指標，故後者之設計漸為近期研究之主流。為改善橫流扇所產生的尖銳葉片通過頻率(blade passing frequency，簡稱BPF)，本研究先針對原機型以雙耳量測技術錄製改善前的聲音並計算其音

質參數(sound quality metrics)，將此噪音所賦予人耳之聽覺感受加以量化，隨後利用聲音編輯法(sound editing)尋找出最佳之音質優化策略，最後提出葉輪扭轉角之設計。經實驗證明，此設計的確有助於抑制 BPF 及其倍頻噪音，因此，整體音質優化的程度相當明顯。

貳、實驗設計

本研究使用之實驗平台主要由(1)葉輪本體、(2)壓克力模型及(3)定轉速控制系統三大部分所構成，分述如下：

葉輪設計以市售之橫流扇現有產品為主(型號：JEC-110B)，原設計為 4 節長度之葉輪，在本實驗中僅取 2 節長度以降低實驗平台製作之困難與複雜性，為確保葉輪運轉之平順與平衡，葉輪中心以連軸器連接驅動馬達，葉輪之葉片為前傾式，葉輪長度為 200mm、外徑為 110mm、內徑為 90mm、葉片數為 39 片。主要實驗參數設定為葉輪扭轉角(rotor-skewed angle)，分別為 0 度(原型)、5 度與 10 度(分別以 ORI、RSA-5 與 RSA-10 代表)，葉輪加工部分則委由風扇廠商以現有模具製作完成，葉輪成品示意圖如圖 1 所示。

基於避免金屬殼體激發結構共振噪音與方便實驗觀測之考量，本研究製作與原機型相同尺寸之全透明壓克力風道模型，其舌部形狀為 L 型，舌部與背板間隙皆為 5mm，背板為 80mm 單曲率圓弧，詳細風道與風扇相關尺寸如圖 2 所示。

風扇馬達驅動電源為單相 220V 頻率 50/60Hz，最大承載電功率 145W，原機型轉速約為 60Hz-1400RPM，但因實驗比較所需，本實驗使用單相變頻器(型號：PF-605，誤差 $\pm 0.1\text{Hz}$)調整馬達轉速並監控其消耗電功率，搭配高準度閃頻測速儀(型號：SHIMPO DT-311，誤差 $\pm 0.01\%$)將葉輪轉速控制於 1200 至 1800RPM 之合理範圍(間隔為 100RPM)，避免使馬達過載而造成轉速不穩現象。

參、音質評估與優化

本研究以音質分析技術建立一套有效的產品異音改善流程，其執行步驟如下：

3-1 產品原始噪音量測

為避免環境背景噪音與噪音反射造成實驗量測誤差，本研究之量測均在半無響室(截止頻率 100Hz、隔音度 50dB(A)、背景噪音 20dB(A)以下)內進行，並適當地將風扇馬達之振動及噪音隔離。本實驗採用聲學模擬人偶(B&K Head and Torso Simulator Type 4100，誤差 $\pm 0.3\text{dB}$)利用雙耳錄製技術(binaural recording)進行噪音訊號之擷取，並搭配訊號分析儀(B&K Pulse 3560C)將麥克風所量測之聲壓訊號進行快速傅立葉轉換而獲得噪音頻譜。至於橫流扇之噪音量測配置則參考 ISO 11201 與 CNS 8754 所規定，為降低地面反射之影響，風機本體應離地面 1.5m 且麥克風量測位置應距地高 1.2m。此外，麥克風也應距離風機出口中心點約 100cm 夾水平 45 度角以避免氣流直接衝擊麥克風影響量測準確度，實驗架構如圖 3 所示。

圖 4 所示為各轉速下原型風扇噪音(ORI)之頻譜瀑布圖，圖中各轉速皆有兩處極明顯之尖銳窄頻音，經比對其頻率位置後可確定為葉片通過頻率(BPF)之第一與第二倍頻音(1200

至 1800RPM 分別對應為 780 至 1170Hz 與 1560 至 2340Hz 左右), 且其音壓位準比週遭之廣頻噪音高出 15dB 以上。依據聲音品質對於純音調(tonality)之定義, 若某一窄頻音之音壓位準高於鄰近頻帶 7dB 以上, 則人耳就可明顯察覺此窄頻音之存在。因此, 能否抑制 BPF 與其倍頻音之音壓成為決定橫流扇音質優劣之關鍵。

3-2 計算音質參數與聲音編輯

音質分析之目的是要能定量地描述聲音造成人類心理的感受, 目前有陪審團評估(jury test)及音質評估參數兩種方法, 由於前者之執程序相當繁瑣耗時, 故本研究採用音質參數評估法探討橫流扇之噪音特性。本實驗主要使用 Zwicker[9]所歸納出的 4 個常用音質評估參數, 分別是響度(loudness, 記為 N)、尖銳度(sharpness, 記為 S)、粗糙度(roughness, 記為 R)與擾動強度(fluctuation strength, 記為 F), 其切割頻帶單位為 Bark(記為 Z), 計算方式如(1)至(4)式:

$$N = \sum_{j=1}^{24} N'(Z_j) \quad (1)$$

$$S = 0.11 \cdot \frac{\sum_{j=1}^{24} N'(Z_j) \cdot g(Z_j) \cdot Z_j}{N} \quad (2)$$

$$R = \sum_{j=1}^{24} 0.0003 \cdot f_{\text{mod}}(Z_j) \cdot \Delta L(Z_j) \quad (3)$$

$$F = \frac{\Delta L}{\frac{f_{\text{mod}}}{4\text{Hz}} + \frac{4\text{Hz}}{f_{\text{mod}}}} \quad (4)$$

在了解上述 4 個音質參數之運算方式後, 即可將原始噪音訊號利用不同的聲音編輯模式進行音質優化, 本研究主要針對第一與第二倍 BPF 設定可行性較高的簡諧倍頻衰減法(harmonic frequency attenuate, 簡稱 HFA)與頻率峰值限制法(peak limit frequency, 簡稱 PLF)進行聲音編輯, HFA 之設定乃將第一與第二倍頻之 BPF 以底部寬度 10Hz 的 cosine function 降低 25dB, 而 PLF 之設定則將第一倍 BPF 前 10Hz 至第二倍 BPF 後 10Hz 的頻率範圍以 square function 降低 20dB, 如此, 修正曲線上方所扣除的訊號總面積大致相同, 方能判斷何種修正模式可有較佳的音質優化效果。

3-3 實驗結果與討論

分別對各轉速下之原型風扇噪音(ORI)、倍頻衰減編輯音(HFA)與峰值限制編輯音(PLF)進行音質參數計算, 將其運算結果歸納於表一後可以發現, 採用 HFA 編輯模式可使響度值較 ORI 降低 2.5~4.3 sone, 而 PLF 模式僅較 ORI 降低 1.9~3.6 sone。且這兩種修正模式並不會造成粗糙度與擾動強度明顯變化, 雖然因為低頻部分響度下降而導致尖銳度稍微提昇, 但整體音質仍有大幅改善, 由此可知, 抑制 BPF 音壓之方式較針對某一頻帶消音之修正效果為佳。

因此本研究以 HFA 編輯模式為實際改善之藍圖, 考慮實際可行性與產品特性後, 本研

究決定採用葉輪扭轉角設計(RSA-5 與 RSA-10)進行異音改善並逐一進行出風口噪音量測。圖 5 所示為 RSA-5 於各轉速下之噪音瀑布圖，圖中可發現其第一與第二倍 BPF 被有效抑制而廣頻噪音僅略為提昇。另外觀察圖 6 可知，使用 RSA-10 雖可大幅抑制其第一與第二倍 BPF，但反而在較高頻率產生兩個較小的噪音峰值，經比對其頻率位置後可發現約為第三與第四倍 BPF(1200 至 1800RPM 分別對應為 2340 至 3510Hz 與 3120 至 4680Hz 左右)。

另外，分別計算 RSA-5 與 RSA-10 於各轉速下運轉噪音之音質參數，將其結果歸納於表二後可以發現，採用 RSA-5 可使響度值較 ORI 降低 1.2~2.8 sone，而 RSA-10 僅較 ORI 降低 0.6~1.9 sone，但兩者在尖銳度方面不僅增加且更高於 HFA 編輯音。此結果顯示，使用 RSA 設計雖然可以降低整體響度但也因此增強 16Bark(3.15kHz)以上高頻紊流噪音(高於此頻率之聲音皆受加權函數 $g(Z)$ 之影響而增加尖銳度)。此外，兩者皆造成粗糙度顯著提昇而擾動強度大幅衰減，此趨勢與聲音編輯之結果大不相同。詳細觀察頻譜後發現，使用 RSA 設計與原型風扇之出風口噪音波形並無明顯變化(故兩者調變深度 ΔL 之差異不大)，因此可以確定乃調變頻率 f_{mod} 大幅增高所致。因此綜合上述結果可知，葉輪扭轉角之設計使得原本葉片切割氣流時所造成之固定週期性且同相位壓力波動現象轉為較連續相位變化且較為和緩之壓力波動取代，造成原本明顯之 BPF 及其倍頻被其他頻率之噪音耦合或抵銷因而有效改善音質，但若扭轉角度過多，反而容易造成氣流彼此之過度干涉現象因而激發出更高頻的紊流噪音。

肆、結論

現代室內空調機普遍而言噪音量並不大，但在夜深人靜時，某些特別突出的單頻音就會顯得極度惱人，此種異音問題往往需要反覆試誤才能徹底改善。本研究有系統地利用音質分析技術尋求最有效的改善方針，再針對物理現象與其產品特性提出實際改善措施，實驗結果證明，適當的葉輪扭轉角可以明顯改善橫流扇的聲音品質。因此，音質評估技術不但大量節省改善產品異音所需之物力與時間，在產品開發過程中也保有客製化之彈性空間，有助於產業界升級。

伍、誌謝

本研究之實驗量測與平台架設承蒙必凱公司與金億翔公司大力協助與指導，使得本研究得以順利完成，在此僅表達最真誠之敬意與謝意。

陸、參考文獻

- (1) Murata, S., and Nishihara, K., An Experimental of Cross Flow Fan 1st Report, Effect of housing Geometry on the Fan Performance, Bulletin of JSME, Vol.19, pp.314-329 (1976).
- (2) Takushima, A., Y. Shinobu, S. Tanaka and K. Matsuki, Flow Measurements by Laser Doppler Velocimeter in a Cross Flow Fan for Air-Conditioning Use, ASHRAE Transaction, Vol.96, Part 1, pp.497-501 (1990).
- (3) Tanaka, S., and Murata, S., Scale Effects in Cross Flow Fans (Effects of Fan Dimensions on Performances Curve), JSME International Journal, Series B, Vol.37, pp844-852 (1995).

- (4) Tsurusaki, H., Shinobu Y., Tanaka S., and Matsuki K., Study of Cross Flow Fan Internal Flow by Flow Visualization (Discussion of Measured Results by Particle Tracking Velocimetry), JSME International Journal Series B, Vol.39, No.3, pp. 540-545(1996).
- (5) Neise, W., Noise Reduction in Centrifugal Fans: A Literature Survey, Journal of Sound and Vibration, Vol.45, pp.375-403 (1976).
- (6) Chen, P. H., and Lee, D. S., Effect of Tongue Shape on the Performance Curve and the Acoustic Noise of Cross-Flow Fan, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol. 16, No. 5, pp.445-455 (1995).
- (7) Lee, D. S., Chen, P. H., and Miao, J. M., Noise Reduction of a Cross Flow Fan, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol. 20, No. 3, pp.265-273 (1997).
- (8) Hyong, M. K., Discrete Frequency Noise Reduction of the Cross-Flow Fan of the Split Type Room Air-Conditioners Using the Skewed Stabilizers, JSME International Journal Series C, Vol.43, No.1, pp.104-109 (2001).
- (9) Zwicker, E., Fastl, H., Psychoacoustics: Facts and Models, 2nd, Springer-Verlag (1999).

柒、圖表彙整

表一 不同聲音編輯模式之音質比較

Sound Editing	1200RPM			1500RPM			1800RPM		
	ORI	HFA	PLF	ORI	HFA	PLF	ORI	HFA	PLF
N(sone)	10.11	7.61	8.12	12.04	9.02	9.47	14.53	10.17	10.95
S(acum)	2.02	2.12	2.09	2.04	2.17	2.15	2.07	2.25	2.16
R(asper)	0.42	0.46	0.47	0.44	0.48	0.49	0.48	0.51	0.53
F(vacil)	1.12	1.15	1.16	1.10	1.11	1.12	1.13	1.15	1.12

表二 不同葉輪扭轉角之音質比較

SQ Promote	1200RPM			1500RPM			1800RPM		
	ORI	RSA-5	RSA-10	ORI	RSA-5	RSA-10	ORI	RSA-5	RSA-10
N(sone)	10.11	8.95	9.48	12.04	10.16	11.39	14.53	11.76	12.68
S(acum)	2.02	2.31	2.27	2.04	2.30	2.29	2.07	2.32	2.31
R(asper)	0.42	1.37	1.61	0.44	1.49	1.73	0.48	1.57	1.85
F(vacil)	1.12	0.41	0.43	1.10	0.40	0.44	1.13	0.41	0.42
dB(A)	55.8	55.2	55.5	57.6	57.0	57.3	61.3	60.6	60.9

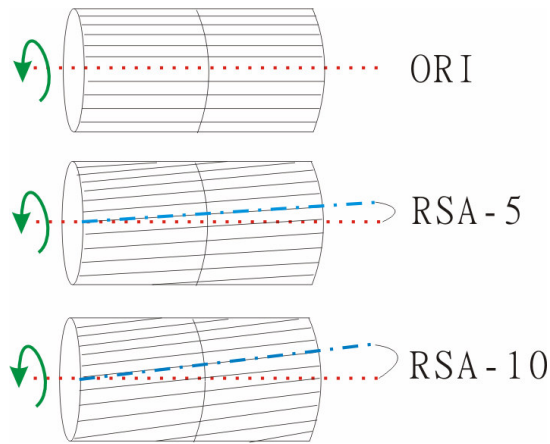


圖 1 葉輪扭轉角示意圖

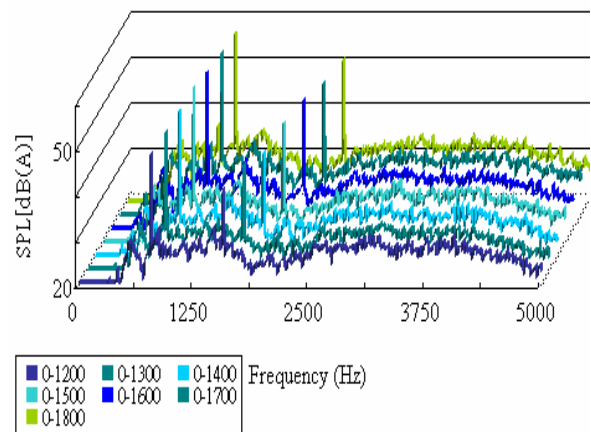


圖 4 ORI 之各轉速噪音瀑布圖

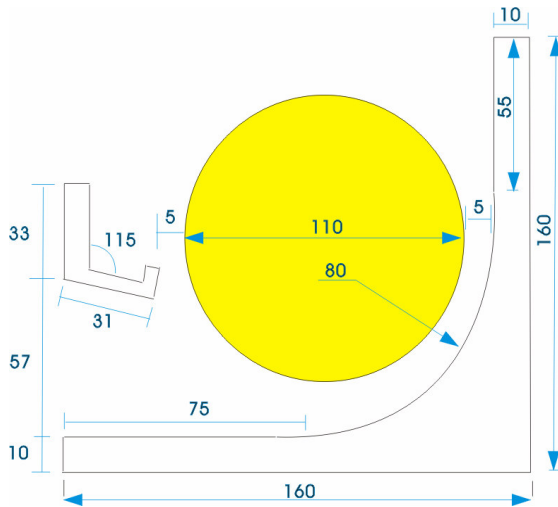


圖 2 流道幾何尺寸示意圖

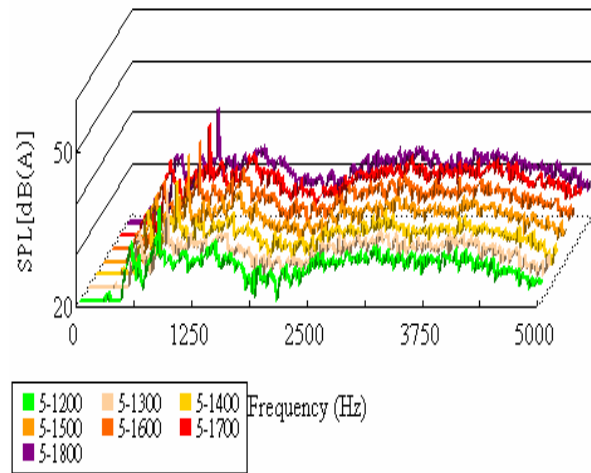


圖 5 RSA-5 之各轉速噪音瀑布圖

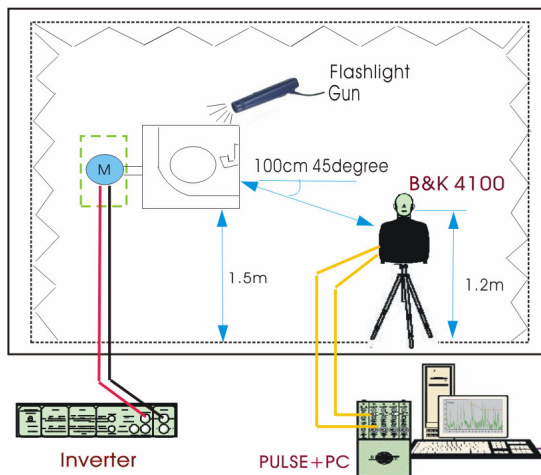


圖 2 出風口噪音量測示意圖

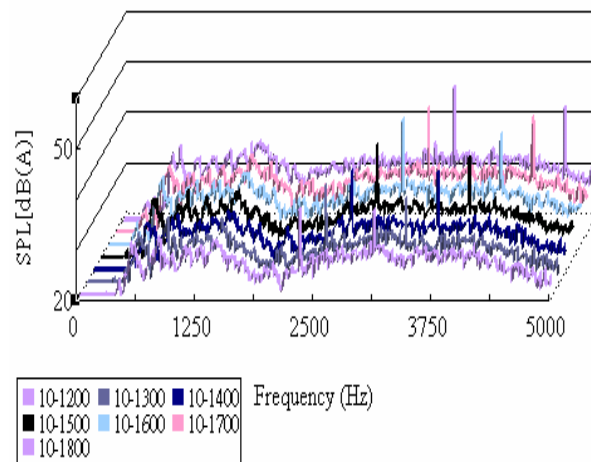


圖 6 RSA-10 之各轉速噪音瀑布圖