

壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討

Noise and Vibration Characteristics of Compressor in Different Operating Conditions

王栢村¹、陳伯晉^{2*}、張博鈞³

¹國立屏東科技大學機械工程系 教授

²國立屏東科技大學機械工程系 碩士研究生

³瑞智精密股份有限公司 工程師

摘要

噪音在近年來已成為產品設計的評估指標，而在壓縮機同樣也是非常重要的一環。本文目標在探討壓縮機於空調機不同工況下之振動與噪音關聯性，並探討振動與噪音響應和結構振動模態的關聯性。壓縮機與冷媒吸入管與吐出管是影響空調機振動噪音的主要關鍵組件，首先，由噪音頻譜以及各組件的振動頻譜，可以辨識出高貢獻度的主要中心頻帶，並由振動與噪音響應主要中心頻帶的比較，找出共通性之中心頻帶，再與對應中心頻帶之壓縮機結構振動模態，探討其間的交互影響。結果顯示，89.1Hz~112Hz 與 708Hz~1413Hz 為壓縮機於不同工況下之振動與噪音響應主要影響之頻帶，由對應之振動模態振型觀察得知，冷媒的吸入管與吐出管的振動特徵與主要的中心頻帶極為相關，是需要關注之重點。本文建立了壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性評估手法，此診斷解析主要組件及高貢獻度頻帶的模式，可對結構振動與噪音特性快速評估，以期提供壓縮機振動噪音改善之參考。

關鍵字：壓縮機、振動、噪音、中心頻帶

Abstract

Noise has been of great interest for product design and an important evaluation index for compressors as well. This work aims to discuss the noise and vibration (N&V) characteristics of rotary compressor in different operating conditions and present the correlation study between noise, vibration response and structural vibration modes. The compressor and inlet and outlet pipes in a conditioner are main components attributing N&V response. First, by inspection of noise spectrum and vibration spectra of different components, the major contribution of central frequency bands can be identified. By comparison of N&V spectra, the correlated major frequency bands can then be obtained. The compressor and pipe's structural mode shapes in these frequency bands can be visualized to observe the structural effect on N&V response. Results show 89.1Hz~112Hz and 708Hz~1413Hz are most contributed frequency bands. In particular, the inlet and outlet pipes structural modes are greatly related to these bands. This work establishes the N&V evaluation procedure for the compressor operating in different conditions. The diagnosis approach in identifying the key components

and major contributed N&V central bands can provide the quick evaluation that is useful for the improvement of compressor regarding N&V concerns.

Keywords: compressor, vibration, noise, central frequency band.

一、前言

噪音在近年來已成為產品設計的重要評估指標，隨著時代的進步，人們對生活舒適度的要求日益增高。同樣的，於壓縮機設計中也是十分重要的一環，如何抑制壓縮機與管路的振動進而降低噪音為目前的重點課題。本文目標為探討壓縮機於不同工況下之振動與噪音的關聯性，並探討振動與噪音響應和結構振動模態之間的關聯性，尋求響應較大之頻帶與對應之結構振動模態，做為未來關注之重點。

本文係以壓縮機作為研究主體，王[1]對壓縮機於系統邊界進行模型驗證，分別進行有限元素分析與實驗模態分析，並將結果進行比對，驗證其等效性。結果顯示，模型驗證成功，並獲得等效於實際結構之有限元素分析模型。王等人[2]對空調室外機進行整機系統的模擬，其中包含鈹金機殼、壓縮機、四方閥與配管、冷凝器及風扇等次結構，並以模型驗證手法確認其分析模型的等效性。結果顯示，室外機分析模型可有效模擬出實際結構之振動模態特性。王等人[3]對壓縮機系統邊界之四方閥連接的四條管路進行模型驗證，包含理論模態參數與實驗模態參數的比對。結果顯示，自然頻率誤差約在 10% 以下，代表所建構之有限元素模型具有一定的可信度。

噪音量測為本文重要的量測方式，Bakowski et al. [4] 對位於波蘭的街道進行長達一年的噪音量測，其採樣時間為 1 分鐘。結果評估出了 A 型的不確定度，並提出了新的參數應用於等效聲壓的變異性評估。Giorgio et al. [5] 探討水下輻射噪音量測的準確性與可靠性，於開放水位設置一個循環測試程序，與其他機構之結果進行對比，最後比較了不同的方法與結果。

噪音響應與結構模態之間的關聯性為本文目標之一，王等人[6]對拇指琴樂器進行聲音量測分析與有限元素分析，以此探討拇指琴發聲與振動的關聯性。結果顯示，拇指琴的主要聲音特性是由琴片結構中的第一個結構振動頻率產生。王等人[7]探討竹琴之振動模態與發聲機制，以了解竹管琴組的發聲機制。結果顯示，敲擊不同位置的發聲頻率與結構振動模態具有很高的關聯性，未來可應用於竹管之設計變更。

本文首先建構應用 SVM 後處理分析軟體，以縮短量測後數據處理的分析時間。對壓縮機於系統邊界在不同工況下進行振動與噪音響應量測，並由噪音頻譜以及各組件的振動頻譜，可以辨識出高貢獻度的主要中心頻率，並由振動與噪音響應主要中心頻率的比較，找出共通性之中心頻率的頻帶，最後與對應中心頻率的頻帶之壓縮機結構振動模態[1]，探討之間的交互影響。

二、壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討分析理念

本文係以 MADI 振動噪音診斷流程[8]進行分析，係以量測、分析、診斷與對策四階段工作，進行此專案之探討。圖 1 為壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討分析

流程圖，目標在探討壓縮機於不同工況下之振動與噪音之關聯性，並探討振動與噪音響應和結構模態的關聯性。圖 2 為 SPR 系統流程圖，由對壓縮機系統邊界進行實驗模態分析獲得結構振動模態，並於壓縮機在制熱運轉與制冷運轉下進行振動量測，獲得通過結構路徑的振動響應；同時於壓縮機在制熱運轉與制冷運轉下進行噪音量測，獲得通過結構路徑與空氣路徑之噪音響應。圖 3 為頻譜分析流程圖，將量測獲得之訊號透過 SVM 分析軟體進行數據後處理，將量測數據由時間域轉換至頻率域，並透過 1/3 八音頻帶分析獲得主要中心頻率。並由振動與噪音響應主要中心頻率的比較，找出共通性之中心頻率的頻帶，再與對應中心頻率的頻帶之壓縮機結構振動模態，探討其間的交互影響。

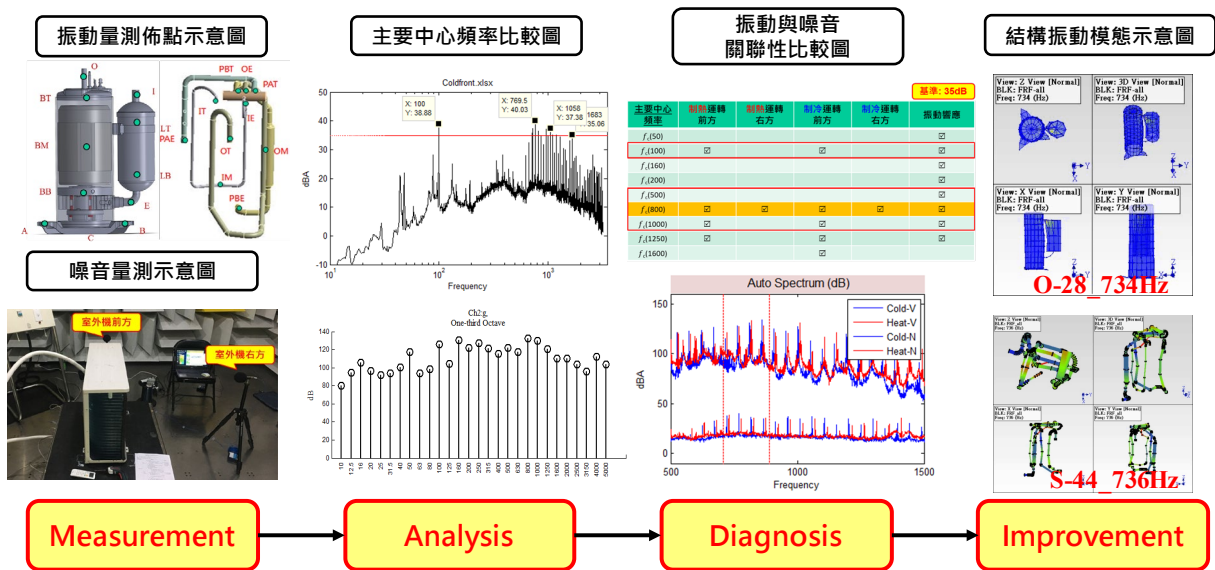


圖 1 壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討分析流程圖

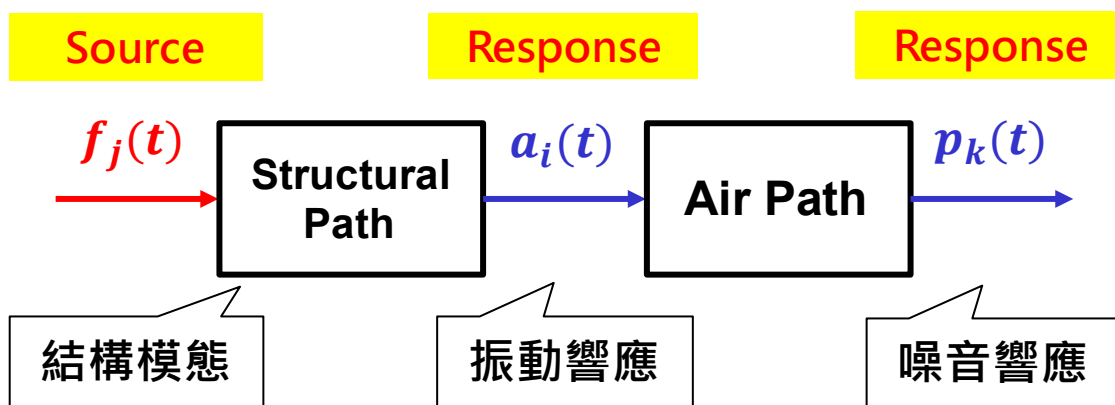


圖 2 SPR 系統流程圖

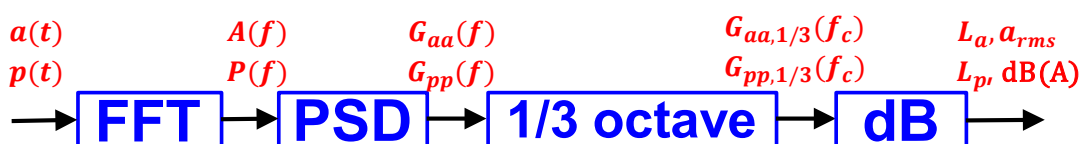


圖 3 頻譜分析流程圖

三、應用 SVM 後處理分析程式

本文係以 SVM 客製化振動噪音量測系統[9]進行振動響應量測與訊號後處理，將訊號由時間域轉至頻率域，並透過 1/3 八音頻帶分析獲得主要中心頻率，然而操作時間耗時、重複性高，並且主要中心頻率較難以辨識，是故嘗試運用 MATLAB 軟體製作應用 SVM 後處理分析程式，並分為一般模組與比較模組兩種不同面向的介面，預期達到縮短分析時程、提升工作效率之目標。

應用 SVM 後處理分析程式之一般模組的主要用途為辨識單一數據之主要中心頻率，圖 4 為應用 SVM 後處理分析程式之一般模組示意圖，除了透過設立基準線，自動查找較高之主要中心頻率之外，同時附加了 dB 值顯示、頻率範圍控制、線性軸及對數軸切換、轉速倍頻線顯示、截圖與數據輸出功能，使執行單一數據之主要中心頻率查找及相關用途變得更簡潔方便。另一方面，也製作了應用 SVM 後處理分析程式之比較模組，圖 5 為應用 SVM 後處理分析程式之比較模組示意圖，此模組主要用途為不同數據之比較，除了與一般模組相同的頻率範圍控制、線性軸及對數軸切換、轉速倍頻線顯示與截圖功能外，加入了以基準線為基準，找出共同較高之主要中心頻率，以快速對不同數據進行關聯性評估。

應用 SVM 後處理分析程式將應用於壓縮機於制冷與制熱運轉下之振動特性比較，以快速查找出壓縮機各部位振動響應之主要中心頻率，並找出共同較高之主要中心頻率，探討壓縮機於不同工況下之振動與噪音響應的關聯性。

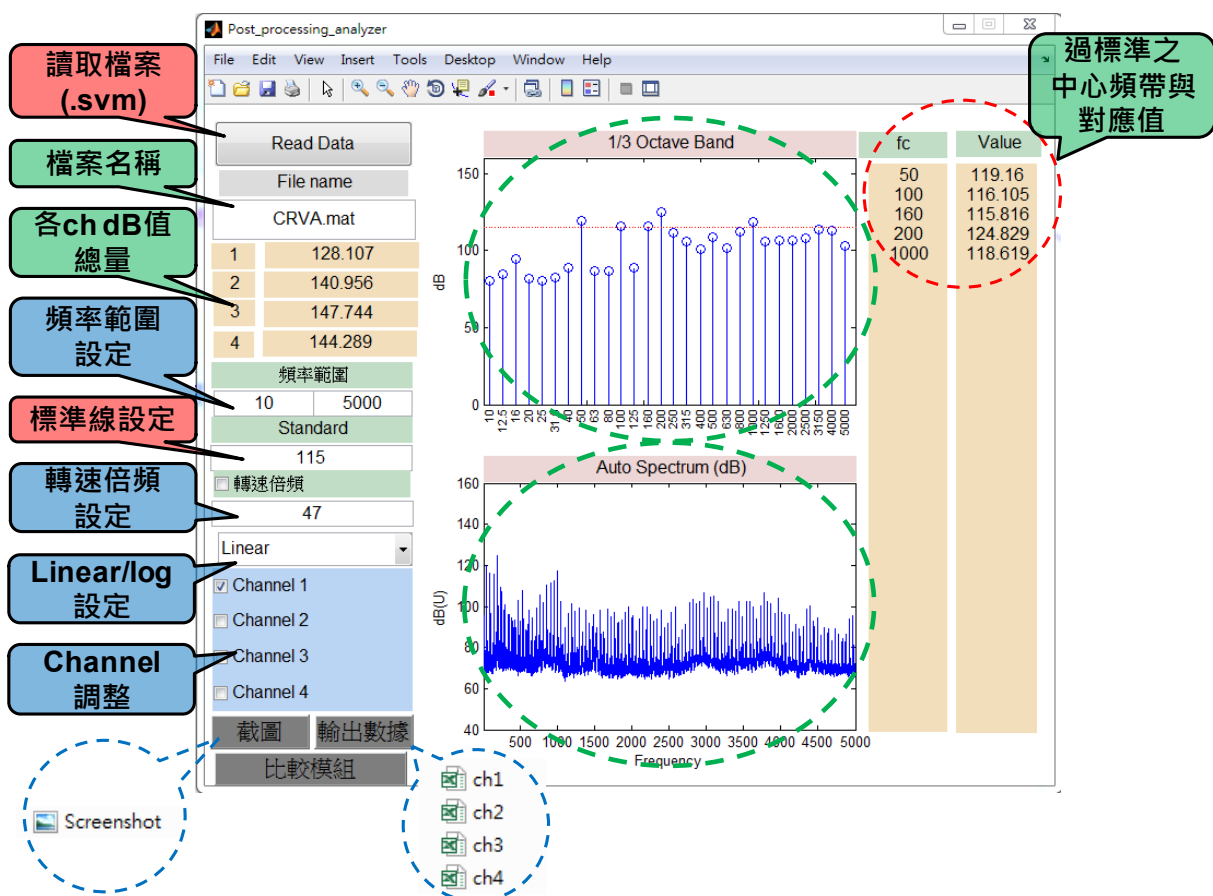


圖 4 應用 SVM 後處理分析程式之一般模組示意圖

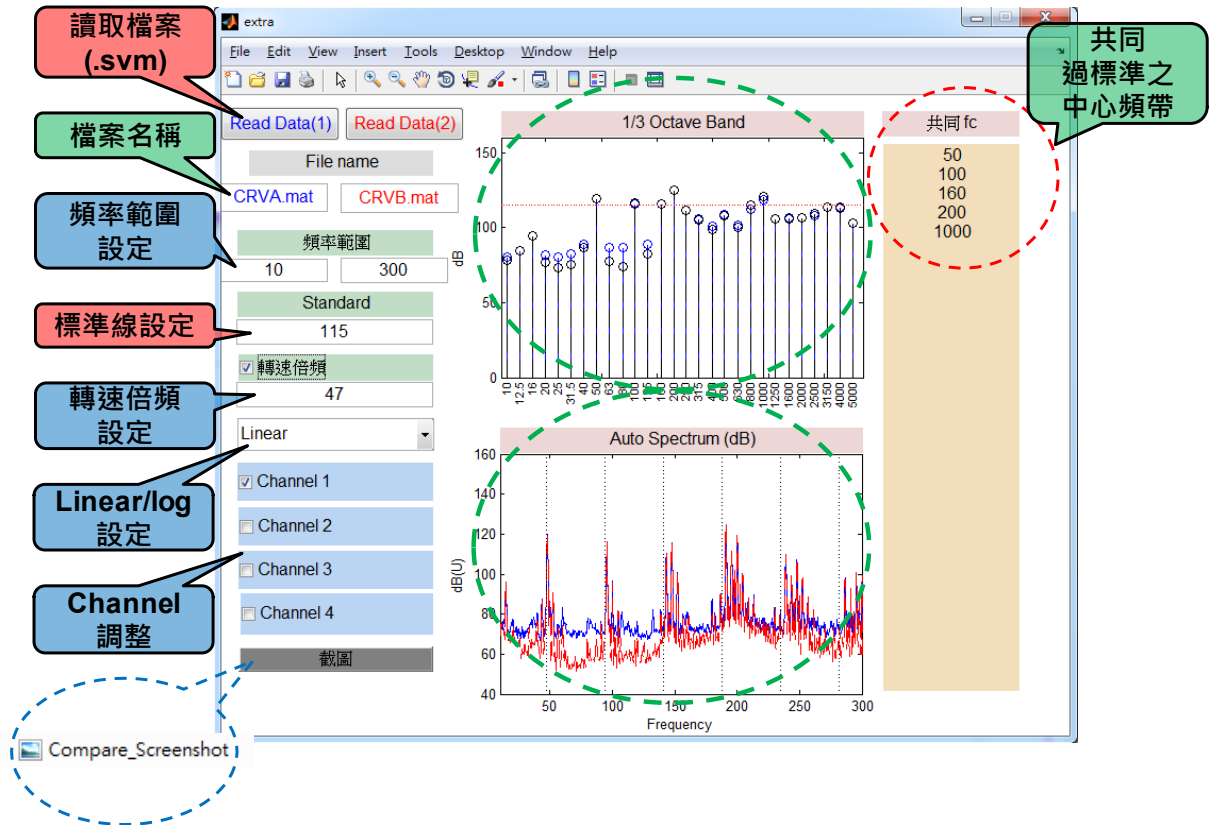


圖 5 應用 SVM 後處理分析程式之比較模組示意圖

四、壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討

本節先對壓縮機於不同工況下之振動與噪音響應進行量測，並運用上節建立之 SVM 後處理分析軟體進行壓縮機於不同工況下之振動特性比較，並結合壓縮機於不同工況下之噪音特性與結構振動模態進行綜合比較，探討其關聯性。

(一) 壓縮機於不同工況下之振動特性比較

首先進行壓縮機於不同工況下之振動響應量測，圖 6 為壓縮機於不同工況下之振動響應量測佈點示意圖，於壓縮機本體佈置 9 點，並於管路上佈置 10 點，共佈置 19 點。同時將單軸向加速規黏貼至壓縮機外殼上作為參考點並將三軸向加速規依據佈點規劃依序黏貼，再於壓縮機於制熱運轉下與制冷運轉下分別進行量測，共獲得 38 筆數據。並透過上節建構的 SVM 後處理分析程式進行主要中心頻率之分析與比較。

將主要中心頻率之基準線設立為 135dB，並以此查找出較高之主要中心頻率，表 1 為壓縮機於不同工況下之各部位振動響應主要中心頻率比較表，其中藍色字體代表此振動響應僅於壓縮機於製冷運轉下顯現，紅色字體代表此振動響應僅於壓縮機制熱運轉下顯現，黑色字體代表此振動響應於兩種不同工況下均有顯現，由表中可以發現， $f_c(50)$ 、 $f_c(100)$ 、 $f_c(160)$ 、 $f_c(200)$ 、 $f_c(500)$ 、 $f_c(800)$ 、 $f_c(1000)$ 、 $f_c(1250)$ ，為較高之主要中心頻率，將與壓縮機於不同工況下之噪音特性進行比較，探討其關聯性。

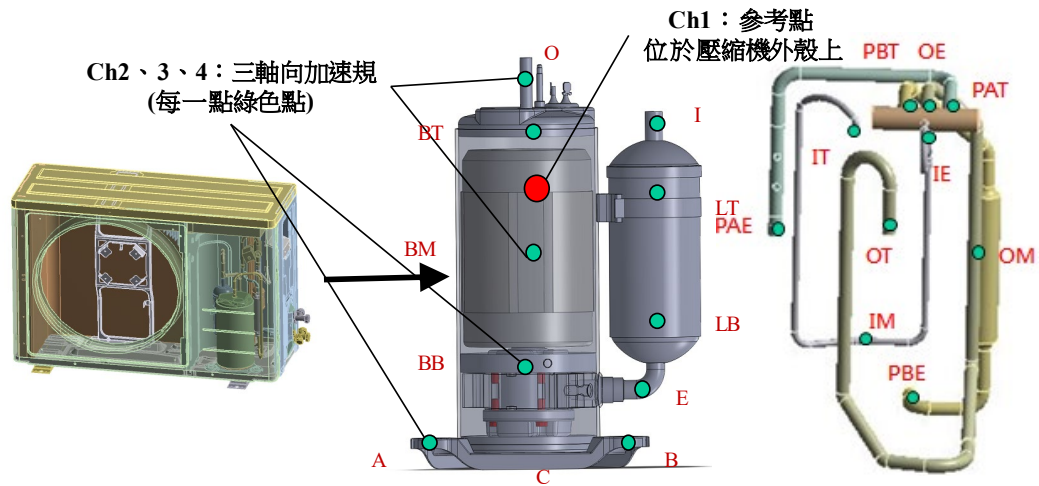


圖 6 壓縮機於不同工況下之振動響應量測佈點示意圖

表 1 壓縮機於不同工況下之各部位振動響應主要中心頻率比較表

編號	位置	X 方向	Y 方向	Z 方向
BT	本體上端	$f_c(1000)$	$f_c(50)$	
BM	本體中端	$f_c(1000)$	$f_c(50)$	
BB	本體下端		$f_c(50)$	
LT	儲液瓶上端	$f_c(1000)$	$f_c(50), f_c(100), f_c(160), f_c(200), f_c(500)$	$f_c(50), f_c(200)$
LB	儲液瓶下端		$f_c(50), f_c(100), f_c(160), f_c(200), f_c(500)$	$f_c(50), f_c(200), f_c(500)$
E	彎管	$f_c(50)$	$f_c(50)$	$f_c(50)$
A	腳墊 A	$f_c(50)$	$f_c(50), f_c(1000)$	$f_c(1000)$
B	腳墊 B	$f_c(50)$	$f_c(50), f_c(1000)$	$f_c(1000)$
C	腳墊 C	$f_c(50)$	$f_c(50), f_c(1000)$	$f_c(1000)$
IT	吸入管首端	$f_c(50), f_c(200), f_c(500), f_c(1000)$	$f_c(800), f_c(1000)$	$f_c(50), f_c(160), f_c(200), f_c(500)$
IM	吸入管中端	$f_c(50) \cdot f_c(500)$	$f_c(50), f_c(160), f_c(200), f_c(500), f_c(1000)$	$f_c(50)$
IE	吸入管末端		$f_c(800)$	$f_c(50), f_c(500)$
OT	吐出管首端	$f_c(500)$	$f_c(500), f_c(1000)$	$f_c(50), f_c(500)$
OM	吐出管中端	$f_c(50)$	$f_c(50), f_c(1000)$	$f_c(1000)$
OE	吐出管末端	$f_c(50), f_c(160), f_c(800)$	$f_c(1000)$	
PAT	A 管首端		$f_c(1250)$	
PAB	A 管末端		$f_c(1250)$	
PBT	B 管首端			
PBB	B 管末端	$f_c(1000)$	$f_c(1000)$	$f_c(1000)$

(二) 壓縮機於不同工況下之噪音特性比較

首先對壓縮機於不同工況下之噪音響應進行量測，圖 7 為壓縮機於不同工況下之噪音響應量測示意圖，分別將麥克風置於壓縮機之前方與右方，並於壓縮機於制熱運轉與制冷運轉下進行噪音響應量測，共獲取 4 筆數據。而由於此量測數據是由另一頻譜分析軟體進行量測的，並不適用於 SVM 後處理分析程式，是故利用自身功率頻譜密度函數的對數軸數據與 1/3 八音頻帶數據有相對應之特性，查找出壓縮機於不同工況下之噪音響應主要中心頻率。

將主要中心頻率之基準線設立為 35dB，查找出於自身功率頻譜密度函數對數軸上的峰值，以此尋求相對應之主要中心頻率，並於不同數據間進行相互比較，表 2 為壓縮機於不同工況下之噪音響應主要中心頻率比較表，由此表可以發現壓縮機於不同工況下共同較高之主要中心頻率為 $f_c(100)$ 、 $f_c(800)$ 、 $f_c(1000)$ 、 $f_c(1250)$ ，將與壓縮機於不同工況下之振動特性進行比較，探討其關聯性。

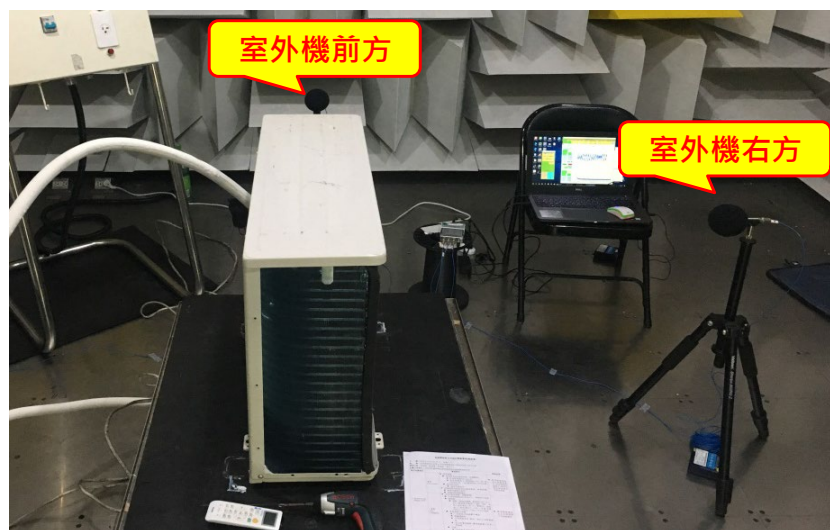


圖 7 壓縮機於不同工況下之噪音響應量測示意圖

表 2 壓縮機於不同工況下之噪音響應主要中心頻率比較表

主要中心頻率	制熱運轉前方	制熱運轉右方	制冷運轉前方	制冷運轉右方
$f_c(100)$	☑		☑	
$f_c(800)$	☑	☑	☑	☑
$f_c(1000)$	☑		☑	
$f_c(1250)$	☑		☑	
$f_c(1600)$			☑	

(三) 壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討

將壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性進行相互比較，查找出共同較高之主要中心頻率，表 3 為壓縮機於不同工況下之振動與噪音響應主要中心頻率比較表，其中較高之主要中心頻率為 $f_c(100)$ 、 $f_c(800)$ 、 $f_c(1000)$ 、 $f_c(1250)$ ，其中對應的頻帶為 89.1~112Hz 與 708Hz~1413Hz，為振動與噪音主要影響之頻帶。此外吸入管與吐出管於振動與噪音響應中具有較多之中心頻帶，為需要關注之重點。

最後將壓縮機於不同工況下之振動與噪音響應和結構振動模態進行比較，探討其交互影響，圖 8 為壓縮機於不同工況下之振動噪音響應與結構模態比較圖，透過主要中心頻率的頻帶查找出相對應之結構振動模態，獲得了以下幾點重要結果：

- (1) 於 $f_c(100)$ 有對應之結構振動模態，其自然頻率為 94.9Hz，推測為管路擺動造成的影響。
- (2) 於 $f_c(800)$ 有對應之結構振動模態，其自然頻率為 734Hz、764Hz、798Hz、857Hz、890Hz，推測為吸入管與吐出管造成的影響。
- (3) 於 $f_c(1000)$ 有對應之結構振動模態，其自然頻率為 972Hz、1000Hz、1100Hz，推測為壓縮機本體、腳墊、吸入管、吐出管與 B 管造成的影響。
- (4) 於 $f_c(1250)$ 有對應之結構振動模態，其自然頻率為 1178Hz、1240Hz、1296Hz、1340Hz、1380Hz、1410Hz，推測為 A 管造成的影響。

表 3 壓縮機於不同工況下之振動與噪音響應主要中心頻率比較表

主要中心頻率	制熱運轉 前方	制熱運轉 右方	制冷運轉 前方	制冷運轉 右方	振動響應
$f_c(50)$					☑
$f_c(100)$	☑		☑		☑
$f_c(160)$					☑
$f_c(200)$					☑
$f_c(500)$					☑
$f_c(800)$	☑	☑	☑	☑	☑
$f_c(1000)$	☑		☑		☑
$f_c(1250)$	☑		☑		☑
$f_c(1600)$			☑		

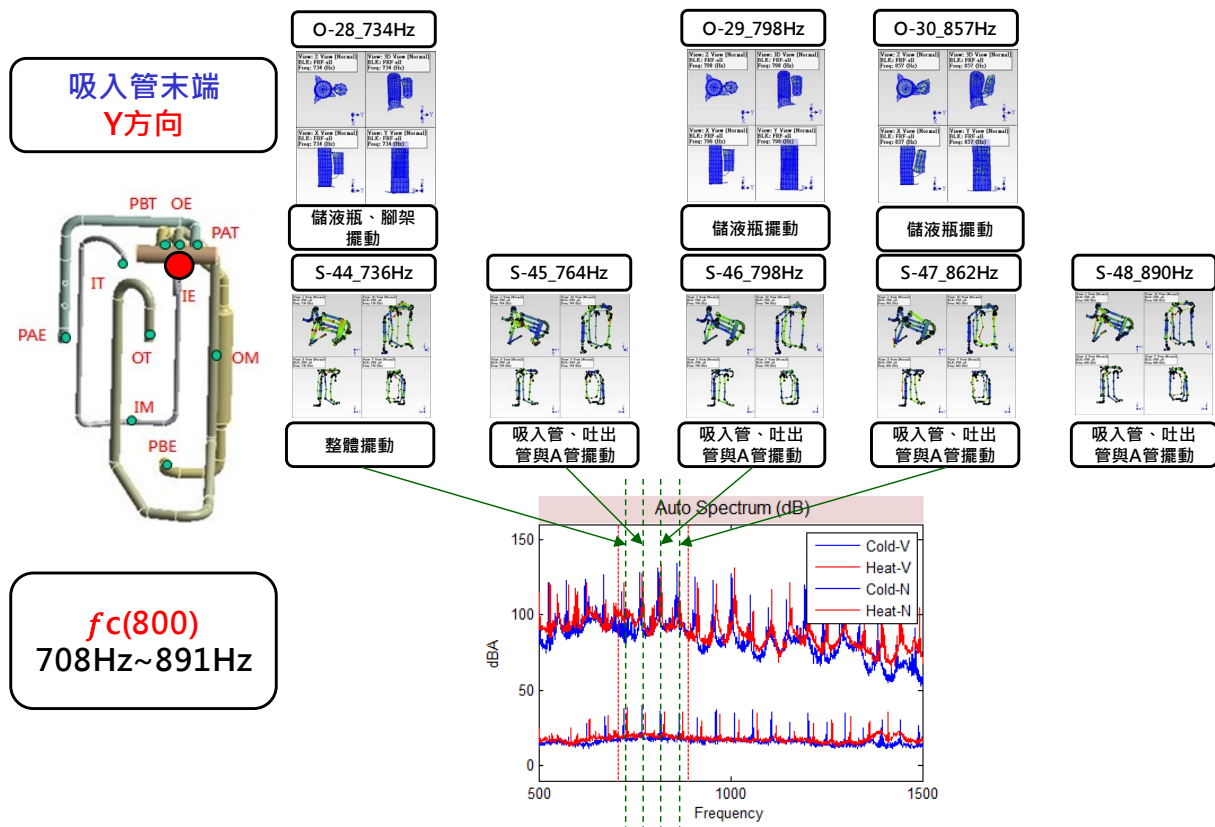


圖 8 壓縮機於不同工況下之振動噪音響應與結構模態比較圖

五、結論

本文首先建構應用 SVM 後處理分析軟體，以縮短量測後數據處理的分析時間。之後對壓縮機於系統邊界在不同工況下進行振動與噪音響應量測，並由振動與噪音響應主要中心頻率的比較，找出共通性之中心頻率的頻帶，最後與對應中心頻率的頻帶之壓縮機結構振動模態[1]，探討其之間的交互影響，獲得了以下幾點結論：

- (1) 成功建構應用 SVM 後處理分析程式，其中包含一般模組與比較模組，未來應用於主要中心頻率的判別與不同數據的主要中心頻率比較探討。
- (2) 建立了壓縮機於不同工況下之振動與噪音評估手法，在未來會以此方法進行壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性快速評估。
- (3) 於壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討中，發現 89.1Hz~112Hz 與 708Hz~1413Hz 為振動與噪音主要影響之頻帶，並尋求到相對應之結構振動模態。
- (4) 於壓縮機在不同工況下之振動與噪音特性探討中，吸入管與吐出管於振動與噪音中有較多的主要中心頻率，為需要關注之重點。
- (5) 在未來壓縮機於不同工況下之振動與噪音特性探討中，應與壓縮機系統邊界模型進行比對，以期能更正確的觀察響應狀況。

六、誌謝

本文承蒙瑞智精密股份有限公司 107 學年度產學合作計畫「壓縮機輸入源對系統振動噪音評估及響應預測技術之發展與應用」經費補助，特此致謝。

七、參考文獻

1. 王栢村，「壓縮機與室外機系統組裝匹配基於振動噪音之設計分析與實驗探討」，瑞智精密有限公司專題結案報告，桃園，2019。
2. 王栢村，張博鈞，陳冠鏘，梁秀璋，「空調室外機系統之模擬技術與實驗驗證」，屏東科技大學與北京科技大學學術研討會，屏東，論文編號：A15，2017。
3. 王栢村，陳冠鏘，張博鈞，吳盈輝，梁秀璋，「空調機內部管路系統之模擬與驗證」，中華民國力學學會第四十一屆全國力學會議，台南，論文編號：D-1156，2017。
4. A. Bakowski, L. Radziszewski and Z. Skrobicki, "Assessment of Uncertainty in Urban Traffic Noise Measurements," *Procedia Engineering*, vol.177, pp. 281-288, 2017.
5. G. Tani, M. Viviani, M. Felli, F. H. Lafeber, T. Lloyd, B. Aktas, M. Atlar, S. Turkmen, H. Seol, J. Hallander and N. Sakamoto, "Noise Measurement of a Cavitating Propeller in Different Facilities: Results of the Round Robin Test Programme," *Ocean Engineering*, vol.213, Article 107293, 2020.
6. 王栢村，黃柏翔，楊昶昱，吳盈輝，「拇指琴之聲音特性探討」，第十六屆精密機械與製造科技研討會，屏東，論文編號：A032，2018。
7. 王栢村，陳冠鏘，黃家賢，張博鈞，吳盈輝，「竹琴之振動模態與發聲機制探討」，第十五屆精密機械與製造科技研討會，屏東，論文編號：A041，2017。
8. <https://aitanhv.blogspot.com/2020/06/madi-for-product-noise-and-vibration.html> (2020.08.20)
9. https://aitanhv.blogspot.com/2015/03/blog-post_31.html (2020.08.20)