

壓縮機簡化模型之模擬與驗證探討

王栢村¹、林修齊¹、陳建宇¹、李易緯¹、張博鈞¹、梁秀璋²

¹ 國立屏東科技大學機械工程系，屏東 91201 ² 瑞智精密股份有限公司，桃園 32849

✉ 王栢村, E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要 電腦輔助工程分析(CAE)為最常採用的有限元素分析(FEA)已經廣泛應用以取代傳統的試誤法，輔助產品的設計模擬分析與響應預測。由於壓縮機內部結構複雜，採用全模型時，其元素節點數多，而導致求解時間的增加；為加速開發設計變更流程，尤其是空調機系統的模擬分析，簡化的壓縮機模型可以有效率地進行系統響應預測。本文探討的壓縮機系統與吸入及吐出銅管相接，並安置於三個橡膠腳墊上，主要探討合理及有效的簡化迴轉式壓縮機模型之技術。為了簡化 CAE 分析模型，忽略了壓縮機本體的內部元件，而以質量及質量慣性矩效應取代，使得簡化模型與全模型在物理域呈現等效。對簡化壓縮機模型進行理論模態分析(TMA)可以求得結構模態參數，結果顯示，壓縮機的簡化及全模型有等效的模態特性，包括剛體模態及彈性體模態可合理對應，代表簡化分析模型能等效於全模型。此簡化分析模型可以應用到空調機包含壓縮機、管路、腳墊、以及冷凝器與機殼等之進階系統分析。本文闡述簡化模擬分析技巧以及驗證分析程序，所發展的方法也可以應用其他結構分析。

關鍵詞：有限元素分析;迴轉式壓縮機;簡化分析模型;模態參數

Simulation and Verification of Simplified Rotary Compressor Model

Bor-Tsuen Wang¹, Shiou-Chi Lin¹, Jian-Yu Chen¹, Yi-Wei Li¹, Bo-Jun Zhang¹, Hsiu-Wei Liang²

¹ Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 91201

² Rechi Precision Co., LTD, Taoyuan 32849

✉ Bor-Tsuen Wang, E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

ABSTRACT Computer Aided Engineering (CAE), the most common method finite element analysis (FEA), has been widely adopted instead of trial-and-error method for assisting product design simulation and response prediction. Due to the complex structure of rotary compressor, the full model can be large in terms of elements and nodes and result in long solution time. For expediting the development time in particular in simulating the conditioner system with the compressor, the simplified rotary compressor model is needed for efficient system response prediction. This work aims to discuss the modeling technique for obtaining the reasonable and effective simplified model of rotary compressor that is connected to the inlet and outlet pipe lines and rest on three rubber pads. To simplify the CAE model, we neglect some of internal parts in the compressor but add mass and mass inertia effects such that the simplified and full models can be equivalent in physical domain. The simplified compressor model is then performed theoretical modal analysis (TMA) by FEA to obtain structural modal parameters. Results show both the simplified and full compressor models have the equivalent modal properties, including both rigid body modes and flexible body modes that match to each other reasonably. This implies that the simplified model is equivalent to the full one. The simplified rotary compressor model is useful for advanced analysis such as the simulation of conditioner system that consists of the compressor, inlet and outlet pipelines and rubber pads as well as the condenser unit and body cases. The simplified modeling techniques and verification procedures are addressed. The developed methodology can also be applied to other structures as well.

Keywords: finite element analysis (FEA), rotary compressor, simplified model, modal parameters.

1. 前言

在設計開發低振動噪音壓縮機的同時，須要瞭解壓縮機的振動傳遞方法，為了快速開發低振動噪音的壓縮機，因而對壓縮機分析模型做簡化來縮短求解時間，使設計變更流程更加快速。

王等人[1]對螺栓接合面結構建立有限元素模型進行模態分析，以求得結構的模態參數，包括自然頻率與模態振型。結果顯示，理論模態參數與實驗求得的結果相當吻合。螺栓接合面結構之有限元素模型的阻尼效應模擬，也分別以常數阻尼比以及元素阻尼兩種方式，進行簡諧

響應分析之比較探討。本文所發展的螺栓鎖固搭接平板模擬技術，有助於如工具機及螺栓組裝機器等工程結構之模擬分析。

王等人[2]建立可拋棄刀片之端銼刀之有限元素模型，模型則以 ANSYS 有限元素分析軟體進行建構。藉由模態參數比對之結果可以確定所建構之有限元素模型等效於實際結構，未來更可特別在挾持邊界之有限元素模型進行其他分析，如頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)之模擬及切削響應之預測。

王等人[3]對工具機之螺栓接合接觸結構分別進行有限元素分析與實驗模態分析獲得模態參數與頻率響應函數，將結果進行比對，確定有限元素模型能等效於實際結構，最後透過模型驗證的手法，針對螺栓接合接觸模型進行校正，以確定擬定模型的正確性。

王等人[4]對工具機常用之組件線性滑軌利用傳統實驗模態分析的手法，透過頻率響應函數的截取，進行曲線嵌合得到模態參數，應用實驗所得之數據進行有限元素分析數據之比對，透過修改有限元素模型的參數，以獲得系統響應等效於實際結構之有限元素模型。

王等人[5]發展了模型驗證分析工具，應用於模型更新中之模態參數比對，確認更新後分析模型能更等效於實際結構，模型驗證分析工具模組更能用於比對實驗之重現性及重複性。

邱等人[6]由數值解理論之有限元素分析對手動鑽床進行模態分析與簡諧分析，求得結構之模態參數(自然頻率、模態振型)與頻率響應函數。以實驗模態分析所得模態參數為基準，就兩種方法求得之模態參數來進行比較驗證，進而確認有限元素分析法所建構之理論模型正確性與合理性。所建立的實際結構等效分析模型，將可運用於往後鑽床設計之頻率預測分析。

本文建構壓縮機簡化分析模型，主要省略全模型壓縮機內部結構，在簡化內部結構過程中，會改變質量、質心、質量慣性矩及結構之模態參數，為了等效全模型，則透過有限元素分析，確認物理性質並驗證振動特性；此外，也另對管路分析模型進行靜力分析求得勁度矩陣[K] (stiffness matrix)，做為建構等效空調機邊界之簡化分析模型的管路邊界參數。透過本文可以了解邊界模擬的建立方法，在未來可以當作進一步探討的參考。

2. 壓縮機之簡化分析模型

本節主要說明迴轉式壓縮機模型進行簡化，圖 1(a)為迴轉式壓縮機全模型，(b)為迴轉式壓縮機簡化分析模型，在簡化的過程中為了使壓縮機簡化分析模型仍保有全模型之物理特性，因此對壓縮機之物理特性進行確認達到等效，物理特性包含質心位置、質量以及質量慣性矩，表 1 為物理特性參數校正表，最終透過理論模態分析求得理論模態參數，作為驗證之比對參數，確認簡化分析模型與全模型之等效性。

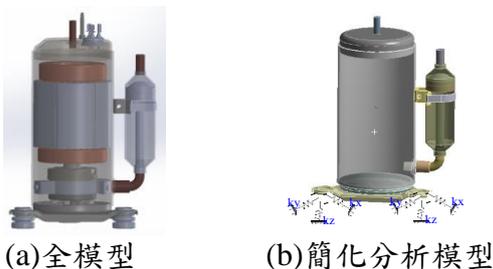


圖 1 迴轉式壓縮機示意圖

表 1 壓縮機物理特性參數表

質心位置(mm)	全模型本體(mm)	簡化本體(mm)	
dX	1.254	1.200	
dY	12.548	12.449	
dZ	18.254	19.338	
全模型質量(kg)	簡化模型質量(kg)	MASS 元素質量(kg)	
8.0995	2.2671	5.8324	
全模型慣性矩(kg/m ²)	簡化模型質量(kg/m ²)	MASS 元素質量(kg/m ²)	
X	3.212E-02	1.686E-02	1.522E-02
Y	3.048E-02	1.545E-02	1.499E-02
Z	1.359E-02	6.502E-03	7.077E-03

2.1 壓縮機有限元素分析模型

在簡化壓縮機內部結構過程中會導致壓縮機的物理性質如:質心位置、質量以及質量慣性矩有差異，為了使簡化模型等效於全模型，因此先透過軟體 SolidWorks 求得簡化模型與全模型物理特性的差異，再利用軟體 ANSYS 在簡化模型中加入 Mass 元素，使全模型與簡化模型有相同的質心位置、質量以及質量慣性矩。

針對迴轉式壓縮機全模型於理論模態分析設定說明如下。圖 2(a)所示為全模型之有限元素模型係採用 Solid185、186、187 元素建構分析模型，以 free mesh 進行網格劃分，位移限制則是以 joint-body to ground 彈性支撐的形式設定於腳架處來模擬橡膠腳墊之邊界效應，三軸方向之參數為 4360、4290、42580N/m，旋轉方向則是 1.775、1.5、0.43N-m/，模擬橡膠腳墊。負荷條件在模態分析上不做設定，簡諧響應分析頻寬設定 0-2500Hz，並個別設定三方向 1N 簡諧激振外力於全模型，來獲得壓縮機全模型之頻率響應函數。

壓縮機簡化分析模型於理論模態分析之設定說明如下。圖 2(b)所示為簡化分析模型之有限元素模型則是採用 Solid185、186、187 元素建構分析模型，以 free mesh 進行網格劃分，位移限制則是以 joint-body to ground 彈性支撐的形式設定於腳架處來模擬橡膠腳墊之邊界效應，邊界參數則與全模型相同來模擬橡膠腳墊，簡諧響應分析設定三方向 1N 簡諧激振外力於簡化分析模型，獲得頻率響應函數。

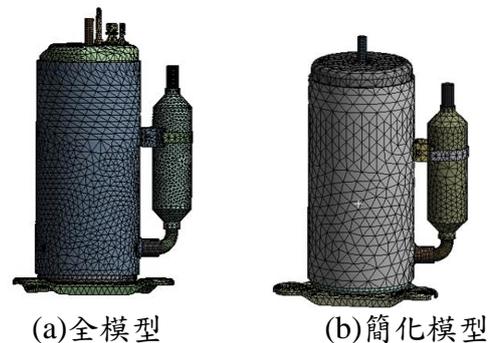
2.2 壓縮機全模型與簡化之振動模態比較

本節透過模態分析來獲得迴轉式壓縮機全模型與簡化分析模型之模態域之結果，表 2 為壓縮機全模型與簡化模型自然頻率比較表，全模型以 R 表示，簡化模型以 P 表示，表 3 為壓縮機全模型與簡化模型模態振型比較表，綜合討論如下:

- 1.由表 2 自然頻率比較表中可發現，全模型與簡化分析模型在剛體模態上有良好對應，誤差皆在 1.5%以內，表示簡化分析模型在物理特性上具等效於全模型。
- 2.表 3 為模態振型比較表，模態振型特性的對應上具有相同的物理意義，顯示全模型與簡化分析模型在低頻剛體運動具有良好的等效性
- 3.由全模型與簡化分析模型的比對良好，間接表示兩者分析模型的物理性值具有等效性，方能在低頻剛體運動上有良好的對應。

表 2 壓縮機全模型與簡化模型自然頻率比較表

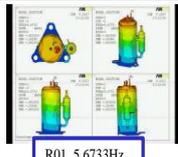
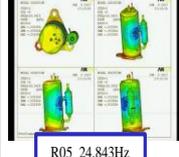
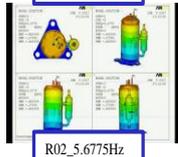
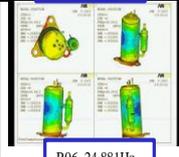
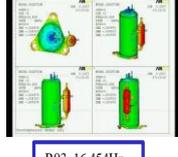
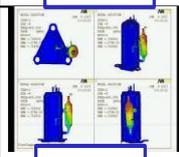
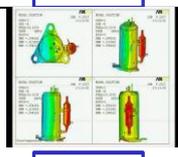
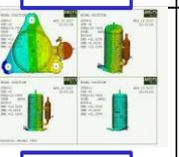
MODE	全模型	MODE	簡化模型	誤差%	物理意義
	自然頻率(Hz)		自然頻率(Hz)		
R1	5.6733	P1	5.617	-1.002%	X軸平移
R2	5.6775	P2	5.619	-1.041%	Y軸平移
R3	16.454	P3	16.417	-0.225%	Z軸旋轉
R4	19.824	P4	19.741	-0.420%	Z軸平移
R5	24.843	P5	24.627	-0.885%	Y軸旋轉
R6	24.881	P6	24.788	-0.379%	X軸旋轉
R9	488.098	P7	464.292	-5.124%	儲液瓶擺動



(a)全模型 (b)簡化模型

圖 2 壓縮機有限元素模型示意圖

表 3 壓縮機全模型與簡化模型模態振型比較表

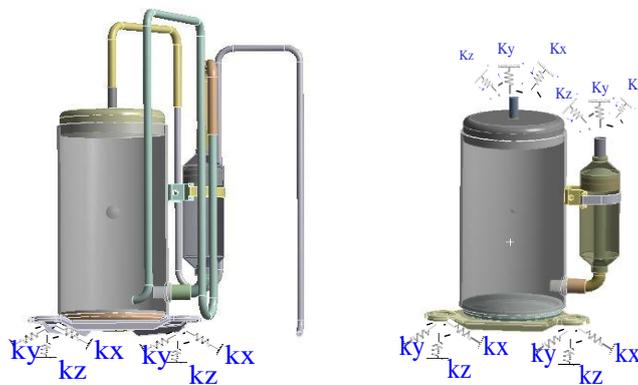
全模型	簡化模型	物理意義	全模型	簡化模型	物理意義
 R01_5.6733Hz	 P01_5.617Hz	X軸平移	 R05_24.843Hz	 P05_24.627Hz	X軸旋轉
 R02_5.6775Hz	 P02_5.619Hz	Y軸平移	 R06_24.881Hz	 P06_24.788Hz	Y軸旋轉
 R03_16.454Hz	 P03_16.417Hz	Z軸旋轉	 R09_488.098Hz	 P07_464.292Hz	儲液瓶擺動
 R04_19.824Hz	 P04_19.741Hz	Z軸平移			

3. 壓縮機與管路實際邊界之模擬

前節可以了解到腳墊邊界下的壓縮機全模型與簡化模型之自然頻率與模態振型在剛體模擬下對應良好。本節在腳墊邊界壓縮機簡化模型加入管路邊界進行管路邊界效應的探討，確認實際邊界之壓縮機簡化分析模型等效於等效實際邊界之壓縮機簡化分析模型，圖 3(a)為實際邊界之壓縮機簡化分析模型，圖 3(b)為等效實際邊界之壓縮機簡化分析模型。

3.1 管路靜態剛性等效邊界模擬

為了模擬等效實際邊界之壓縮機簡化分析模型，須先獲得吸入及吐出銅管之結構勁度矩陣，即為 K 矩陣，因此針對吸入吐出銅管於靜力分析下的設定方法進行說明，銅管採用 Solid185、186、187 元素，位移限制則是設定固定邊界，負荷條件係個別輸入三軸方向的力 1N 以及三軸旋轉方向之力矩 1N*m，輸出求得軸向位移、旋轉位移，並獲得柔度矩陣後進行逆矩陣求得勁度矩陣，即為吸入吐出銅管之 K 矩陣，表 4 為吸入吐出銅管之柔度矩陣，表 5 為吸入吐出銅管之勁度矩陣。



(a) 實際邊界

(b) 等效實際邊界

圖 3 壓縮機與管路分析模型示意圖

表 4 吸入及吐出管之柔度矩陣表

吸入管位移							吐出管位移						
	x(m)	y(m)	z(m)	θ_x (rad)	θ_y (rad)	θ_z (rad)		x(m)	y(m)	z(m)	θ_x (rad)	θ_y (rad)	θ_z (rad)
Fx(N)	1.17E-03	6.85E-04	1.71E-04	1.14E-04	1.51E-03	2.38E-03	Fx(N)	6.19E-03	1.83E-03	1.00E-03	4.33E-05	1.30E-02	2.55E-02
Fy(N)	6.85E-04	7.36E-04	3.14E-06	1.08E-03	8.14E-05	1.67E-02	Fy(N)	1.83E-03	3.83E-03	1.73E-03	1.30E-02	2.76E-05	1.61E-02
Fz(N)	1.71E-04	1.18E-06	3.17E-03	1.91E-03	1.40E-02	3.32E-05	Fz(N)	1.00E-03	1.73E-03	3.91E-03	2.02E-02	1.31E-02	7.13E-05
Mx(N-m)	1.14E-04	1.08E-03	1.91E-03	9.32E-02	4.82E-04	2.55E-04	Mx(N-m)	4.33E-05	1.30E-02	2.02E-02	1.75E-01	1.57E-04	1.67E-04
My(N-m)	1.50E-03	8.14E-05	1.40E-02	4.83E-04	9.03E-02	4.55E-04	My(N-m)	1.30E-02	2.76E-05	1.31E-02	1.58E-04	1.77E-01	8.63E-06
Mz(N-m)	2.38E-03	1.67E-02	3.32E-05	2.55E-04	4.56E-04	1.09E-01	Mz(N-m)	2.55E-02	1.61E-02	7.13E-05	1.74E-04	8.62E-06	2.18E-01

表 5 吸入及吐出管之勁度矩陣

吸入管[k]							吐出管[k]						
	x(m)	y(m)	z(m)	θ_x (rad)	θ_y (rad)	θ_z (rad)		x(m)	y(m)	z(m)	θ_x (rad)	θ_y (rad)	θ_z (rad)
Fx(N)	8.74E+02	1.54E+02	5.77E+01	4.74E-01	2.35E+01	4.28E+01	Fx(N)	4.45E+02	9.68E+00	3.13E+01	4.37E+00	3.04E+01	5.28E+01
Fy(N)	1.54E+02	5.17E+02	2.01E+01	6.83E+00	5.79E+00	7.59E+01	Fy(N)	9.67E+00	6.27E+02	2.30E+02	2.00E+01	1.76E+01	4.74E+01
Fz(N)	5.88E+01	2.14E+01	1.05E+03	2.21E+01	1.64E+02	5.51E+00	Fz(N)	3.13E+01	2.30E+02	1.74E+03	1.84E+02	1.26E+02	1.29E+01
Mx(N-m)	4.99E-01	6.86E+00	2.22E+01	1.11E+01	3.50E+00	1.06E+00	Mx(N-m)	4.36E+00	2.00E+01	1.84E+02	2.84E+01	1.33E+01	2.02E+00
My(N-m)	2.38E+01	6.00E+00	1.64E+02	3.50E+00	3.69E+01	1.64E+00	My(N-m)	3.04E+01	1.76E+01	1.26E+02	1.33E+01	1.72E+01	4.82E+00
Mz(N-m)	4.27E+01	7.59E+01	5.29E+00	1.05E+00	1.60E+00	1.52E+00	Mz(N-m)	5.28E+01	4.74E+01	1.29E+01	2.03E+00	4.82E+00	1.43E+01

3.2 壓縮機與管路邊界有限元素分析模型

首先針對實際邊界之壓縮機簡化分析模型圖 4(a)於理論模態分析設定說明如下。迴轉式壓縮機簡化模型，沿用第二章節的簡化有限元素模型，在簡化模型本體與儲液瓶加入吸入與吐出銅管建構模型，元素與分割設定想同，吸入及吐出銅管作為固定邊界，負荷條件在模態分析上不做設定。

接著針對等效邊界之壓縮機簡化分析模型圖 4(b)於理論模態分析設定進行說明，迴轉式壓縮機簡化模型，在設定方面相同故沿用第二章節的簡化有限元素模型，係採吸入吐出銅管設定也是以 joint-body to ground 彈性支撐的形式設定於吸入吐出管聯接處，並設定表 5 吸入吐出銅管之勁度矩陣之參數值，負荷條件在模態分析上不做設定。

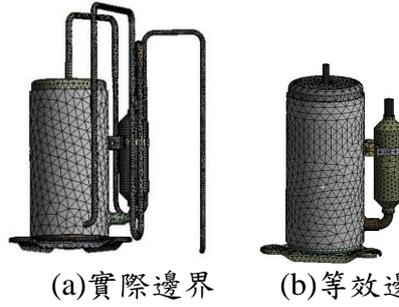


圖 4 壓縮機簡化分析模型之有限元素模型

3.3 壓縮機管路實際邊界與等效邊界之震動模態比較探討

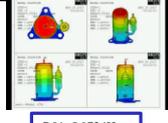
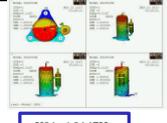
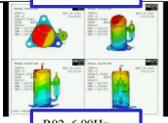
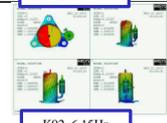
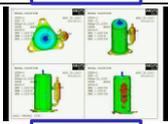
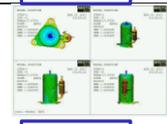
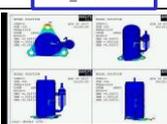
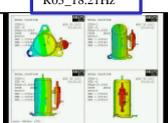
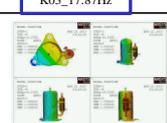
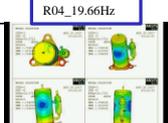
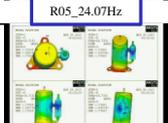
本小節針對空調機邊界下的壓縮機簡化分析模型進行銅管邊界效應的探討，確認等效實際邊界之壓縮機簡化分析模型等效於實際邊界之壓縮機簡化分析模型，以靜力分析得吸入吐出銅管之邊界參數，且應用等效邊界之模擬方法模擬吸入吐出銅管對壓縮機產生的邊界效應，表 6 為壓縮機實際邊界與等效實際邊界自然頻率比較表，R 表示實際邊界，K 表示等效實際邊界，表 7 為壓縮機實際邊界與等效實際邊界模態振型比較表，綜合結果可得以下結論：

1. 由表 6 自然頻率比較表中，顯示實際邊界之壓縮機簡化分析模型與等效實際邊界之壓縮機簡化分析模型之頻率誤差小，除 R36&K7 之頻率誤差-9.60%外，其餘皆在 2% 以內。
2. 在表 7 模態振型比較表中顯示兩分析模型於模態振型上有好的對應，其中影響剛體運動的對應優劣係由邊界參數為主導，此也間接顯示等效邊界之模擬方法可等效吸入吐出銅管邊界。
3. 在彈性體模態的對應上較無太大差異，表示吸入吐出銅管對於迴轉式壓縮機簡化分析模型所產生的邊界效應影響甚小。
4. R36&K7 自然頻率物差相對於其他模態之頻率誤差來的大，其可能是因為等效實際邊界之壓縮機簡化分析模型。

表 6 壓縮機與管路實際邊界與等效邊界自然頻率比較表

MODE	實際邊界	MODE	等效邊界	誤差 %	物理意義
	自然頻率 (Hz)		自然頻率 (Hz)		
R1	5.97	K1	6.01	-1%	X軸平移
R2	6.09	K2	6.15	-1%	Y軸平移
R3	18.21	K3	17.87	2%	Z軸旋轉
R4	19.66	K4	19.88	-1%	Z軸平移
R5	24.07	K5	25.28	-5%	Y軸旋轉
R6	24.72	K6	25.99	-5%	X軸旋轉
R36	557.65	K7	508.80	-9.60%	吸入管、吐出管、儲液瓶擺動
R52	1114.80	K9	1112.90	-0.17%	儲液瓶擺動
R54	1188.50	K10	1188.30	-0.02%	腳架擺動
R56	1229.00	K11	1229.02	0.00%	腳架擺動
R59	1357.60	K12	1357.66	0.00%	腳架擺動
R68	1731.60	K14	1701.72	-1.76%	吸入管、儲液瓶、腳架擺動
R70	1751.50	K15	1751.21	-0.02%	腳架擺動
R73	1827.20	K16	1824.21	-0.16%	吐出管擺動
R76	1978.00	K17	1967.50	-0.53%	本體、儲液瓶擺動

表 7 壓縮機實際邊界與等效實際邊界模態振型比較表

實際邊界	等效邊界	物理意義	實際邊界	等效邊界	物理意義
 R01_5.9724Hz	 K01_6.0147Hz	X軸平移	 R52_1114.80Hz	 K09_1112.90Hz	儲液瓶擺動
 R02_6.09Hz	 K02_6.15Hz	Y軸平移	 R54_1188.50Hz	 K10_1188.30Hz	腳架擺動
 R03_18.21Hz	 K03_17.87Hz	Z軸旋轉	 R56_1229.00Hz	 K11_1229.02Hz	腳架擺動
 R04_19.66Hz	 K04_19.881Hz	Z軸平移	 R59_1357.60Hz	 K12_1357.66Hz	腳架擺動
 R05_24.07Hz	 K05_25.28Hz	X軸旋轉	 R68_1731.60Hz	 K14_1701.72Hz	吸入管、吐出管、儲液瓶擺動
 R06_24.72Hz	 K06_25.99Hz	Y軸旋轉	 R70_1751.50Hz	 K15_1751.21Hz	腳架擺動
 R36_557.65Hz	 K07_508.80Hz	吸入管、吐出管、儲液瓶擺動	 R73_1827.20Hz	 K16_1824.21Hz	吐出管擺動
			 R76_1978.00Hz	 K17_1976.50Hz	本體、儲液瓶擺動

4. 結論

本文針對空調機邊界下的壓縮機簡化分析模型進行銅管邊界效應的探討，以靜力分析得吸入吐出銅管之邊界參數，且應用等效邊界之模擬方法模擬銅管對壓縮機產生的邊界效應，綜合上述結果可得以下結論：

- (1).由腳墊邊界的自然頻率與模態振型發現，在剛體模態之簡化分析模型與全模型對應良好。
- (2).由實際邊界的自然頻率與模態振型發現，實際與等效對應很好。
- (3).應用等效邊界之模擬方法模擬銅管對壓縮機產生的邊界效應，由結果討論中顯示，無論是在自然頻率、模態振型的比對上皆有良好對應，表示管路極適合應用等效邊界模擬方法來探討邊界效應。
- (4).下階段工作預計會針對等效邊界模擬應用上，考慮加入銅管的質量矩陣，藉此獲得完整的邊界參數，以利後續邊界模擬之應用。
- (5).未來可針對實際空調機邊界下的迴轉式壓縮機進行實驗模態分析，求得實際空調機之邊界參數，以利往後室外機系統之分析預測，達到快速開發低振動噪音的室外機之目標。

5. 致謝

本文承蒙瑞智精密股份有限公司 105 年度產學合作計畫「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」經費補助，特此致謝。

6. 參考文獻

- [1] 王栢村，王廷維.「螺栓鎖固搭接平板之模擬分析與驗證」，第二十二屆中華民國振動與噪音工程學術研討會.彰化，2014: A1-3。
- [2] 王栢村，梁秀璋，簡文通，吳育仁，周嘉莉.「端銑刀有限元素模型驗證與振動模態特性探討」//『屏東科技大學』暨『北京科技大學』第四屆學術交流研討會.屏東，2009：第 C-86--C-90 頁。
- [3] 王栢村，謝宗廷，陳正陽，周芳俊.「工具機螺栓接合面之模型驗證」，第十九屆中華民國振動與噪音工程學術研討會.大葉大學，2011: D-09。
- [4] 王栢村，謝宗廷，陳正陽，周芳俊.「工具機線性滑軌之模型驗證」，2011 兩岸綠色暨防災科技學術研討會.屏東，2011: B-06。
- [5] 王栢村，謝宗廷，黃俞憲.「模型驗證工具程式發展與結構模型更新之應用」，中華民國振動與噪音工程學會第20屆學術研討會.彰化，2012: C-06。
- [6] 邱武耀，吳柏毅，馮昶欽，陳彥伊，邱柏欽.「手動鑽床之振動特性與模態分析」，第十七屆中華民國振動與噪音工程學術研討會.台北，2009: A-08。