

組件模態合成法於壓縮機及管路系統之振動分析

Component Mode Synthesis Method for Vibration Analysis of Compressor and Pipe System

王栢村¹ 王皓瑜¹ 李維哲¹ 楊秉煜¹ 張博鈞²Bor-Tsuen Wang¹, Hao-Yu Wang¹, Wei-Zhe Li¹, Bing-Yu Yang¹, Bo-Jun Zhang²¹ 國立屏東科技大學機械工程系¹Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology² 瑞智精密股份有限公司²Rechi Precision Co., LTD

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

迴轉式壓縮機是空調機的關鍵部件，而連接到壓縮機的吸入管和出口管在振動噪音也是關鍵組件，需要模擬壓縮機和管路系統以檢視振動模態。由於壓縮機和管路系統的完整模型在數值分析中需要大量資源，本文採用組件模態合成法 (component mode synthesis, CMS)，探討簡化 CMS 管路模型在管路系統設計變更時，可加速設計過程的可行性。首先構建完整的壓縮機與管路全模型並求解模態參數。接著取得僅壓縮機的 CMS 邊界模型，並將其併入僅管路模型作為 CMS 邊界。簡化的 CMS 管路模型，可以求得模態參數，並與完整模型進行比較，結果顯示有大致對應。採用 CMS 的優點，在求得簡化 CMS 管路模型的振動模態，比完整模型加快許多。因此，可以應用在對具有相同壓縮機的管路進行改善變更設計，求得管路模態特性，以避免運轉中的壓縮機和管路系統的共振。對變更的管路與壓縮機之完整模型也進行模態分析以獲得模態參數，與簡化的 CMS 管路模型都有相近的模態特性。本文應用 CMS 於壓縮機和管路系統的振動分析，結果顯示完整模型和簡化 CMS 模型之間有等效的模態參數，所以 CMS 是有可行性。在考慮管路與壓縮機的邊界效應時，可採用 CMS 進行管路分析。簡化的 CMS 模型求解速度更加有效率，可適用於如本文的管路系統，以及其他複雜結構系統的反覆設計過程。

關鍵字：壓縮機、管路系統、組件模態合成法、振動模態

Abstract

The rotary compressor is a key component in air conditioner. The suction and outlet pipes connected to the compressor are of great concern in noise and vibration. The simulation of compressor and pipe system to examine vibration modes is desired. The full model for compressor and pipe system may demand large resources in numerical analysis. This work employs the component mode synthesis (CMS) method to investigate the feasibility in using the CMS simplified pipe model for the design modification of pipe system to expedite the design process. The full model is first built and solved for modal parameters. The CMS boundary model of compressor-only is then obtained and incorporated into the pipe-only model as the CMS boundary. The simplified CMS pipe model is solved to obtain the pipe's modal parameters that are compared to those from the full model and shown reasonable agreement. The advantage of CMS method for obtaining modal solution of the simplified CMS pipe model is much faster than that of the full model. Therefore, the modified pipe layout with the same compressor CMS boundary model can be examined to obtain the pipe system modal properties so as to avoid resonance excitation for compressor and pipe system in operation. The full model of compressor with the new modified pipe is also performed modal analysis to get modal parameters. Both the simplified CMS pipe model and the full model result in the same modal

characteristics. This work applies the CMS method to vibration analysis of compressor and pipe system and shows the feasibility in terms of the equivalent modal parameters between the full model and the simplified CMS model. The approach can be adopted for pipe system analysis in considering the boundary effect with the connection to compressor. The solution of simplified CMS model is much more efficient and suitable for iterative design process of such the pipe system as well as for other complex structure systems.

Keywords: Compressor, Pipe System, Component Mode Synthesis (CMS), Vibration Modes

1. 前言

有限元素分析於工程設計分析與改善的應用相當普及，而在分析對象為複雜結構時，常會因為計算量過於龐大而耗費大量時間，不符合分析效率之觀點，而為了減少模型分析時的計算量，則模型縮減的相關技術就顯得格外重要。壓縮機為日常生活中空調機之核心，而壓縮機運轉時的振動響應會傳遞管路系統，因此需要對管路系統之振動特性做探討，然而壓縮機全模型過於複雜而導致求解時間拉長，此時導入組件模態合成法 (component mode synthesis, CMS) 來簡化壓縮機模型，減少分析計算量與分析求解時間，即可快速的進行管路系統的振動特性分析，對於日後的管路設計與預測振動分析有相當大的幫助。

王等人 [1] 探討壓縮機吸入口及吐出口銅管之振動特性，針對銅管所組成的四種直條銅管進行模型驗證，獲得實際銅管材料參數，藉此建構銅管之有限元素模型，由有限元素分析及實驗模態分析求得的銅管模態域上有良好的對應，並運用於解析銅管結構振動模態的物理意義，有助於空調機的振動噪音診斷。王等人 [2] 應用模型驗證技術於儲液瓶結構，也獲得完整組合之儲液瓶經校驗後的等效有限元素模型。所建立的分析技術不僅可作為初始設計評估，也有助於輔助壓縮機之振動噪音診斷分析。王等人 [3] 運用實驗模態分析與有限元素分析進行迴轉式壓縮機的模型驗證；將組合複雜的壓縮機分解出次系統與整機系統，由迴轉式壓縮機的次系統層次到整機的系統層次逐一

的進行模型驗證程序，可以有效地完成整體壓縮機分析模型的確認。王等人 [4] 針對自由邊界及腳墊邊界之壓縮機進行模型驗證，並將等效於實際結構之腳墊邊界模型帶入已驗證的管路模型，也進行理論模態分析與實驗模態分析並獲得結構振動模態，結果與實驗所得到的振動模態相對應，合理地預測壓縮機結構的剛體模態和撓性體模態。

王等人 [5] 應用 CMS 於四種不同結構案例進行振動特性的探討，包括固定樑、音叉、小提琴及壓縮機等結構系統，分別由 CMS 次結構分析模型與原始結構全模型之分析結果，進行模態域的驗證，以確認 CMS 應用的正確性與可行性。Zhang et al. [6] 對車輛分析模型劃分成多個次結構，並對每個次結構間的接觸面進行特徵分析 (eigenanalysis)，減少自由度數來獲得更精要的分析模型，且僅犧牲些微的精度，結果顯示使用 matrix filtration technique 技術取代標準 Craig-Bampton CMS，在特徵分析拘束條件的轉換中 constraint mode matrices 及 interface matrices 皆能有效的節省計算所使用的記憶體。

Vysoký [7] 研究小型飛機螺旋槳之模態分析，討論在 ANSYS 軟體環境下有限元素模擬的三種情況，classic approach、cyclic symmetry modelling (CSM) 及 CMS，用此三種方法進行分析，可以發現三者分析結果大致都相互對應。Lu et al. [8] 提出了一種新的自由界面 CMS，通過 Guyan static condensation 或 dynamic condensation 將連桿子結構轉化為超元素，兼容界面上的位移和力。該方法不僅保留了自由界面 CMS 有效降低系統自由度和高精度的優點，而且可以合理地處理集中阻尼，因此在具有局部非線性的結構動態分析中具有廣泛的應用前景。

本文主要是應用 CMS 於壓縮機及管路系統進行振動分析及模態域結果探討，主要目標如下：

1. 為了求得更精簡的模型以減少分析求解時間，將壓縮機結構進行特徵分析得到壓縮機 CMS 邊界模型，並將其連接於管路系統，即可獲得簡化 CMS 管路模型。
2. 將簡化 CMS 管路模型與壓縮機與管路系統全模型進行模態分析，對兩者之模態參數進行比對，目的是為了確認 CMS 模擬的可行性，當模態參數比對良好，代表 CMS 使用於壓縮機及管路系統是可行的。
3. 為了驗證 CMS 用於同一部壓縮機，置換其他管路

系統下的振動響應預測是否可行，本文針對壓縮機 CMS 邊界模型，匹配實驗室管路來預測組合後的振動特性，確認壓縮機 CMS 邊界模型的置換性。

4. 將壓縮機 CMS 邊界模型進行置換實驗室管路的快速振動預測分析，以利後續設計變更作業，來避開管路與壓縮機產生共振，使整體分析流程更快速，以達到提升分析效率之目的。

2. 壓縮機系統組成與 CMS 分析理念

2.1 壓縮機系統組成

壓縮機主要由過濾瓶、泵成品、轉定子成品、完整泵成品，等多個次結構所組成，圖 1 為壓縮機組成示意圖。迴轉式壓縮機主要透過馬達來提供泵成品動力，利用偏心軸的設計使泵能夠在缸體腔室裡對冷媒進行壓縮，而冷媒主要透過管路系統來運送至空調系統各部件進行熱交換，圖 2 為一般管路系統與壓縮機組成示意圖，因此管路系統為空調系統之重要部件，而管路會受到壓縮機運轉時的振動所影響，因此管路

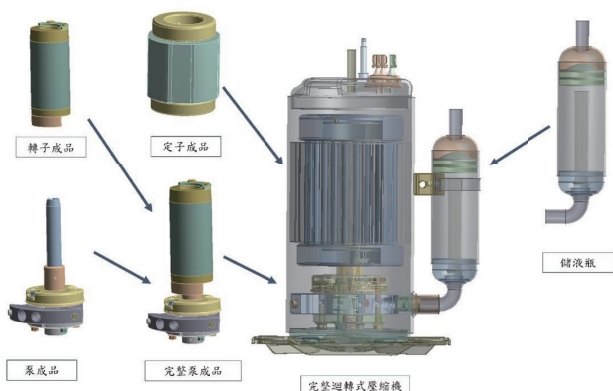


圖 1 壓縮機組成示意圖

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>



圖 2 壓縮機與管路系統組成示意圖

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

的振動特性也是重要專注重點，所以必須進行管路系統的振動特性探討。

2.2 CMS 分析流程與理念

本文主要探討 CMS 於壓縮機及管路系統之振動分析，首先以簡易固定樑結構說明 CMS 之分析流程，圖 3 為 CMS 之分析流程圖，為了驗證 CMS 技術可否用於模擬結構之邊界效應，將固定樑結構分成 A 組件與 B 組件，先將 A 組件之接觸界面進行 CMS 特徵值分析，採用固定介面法 (Craig-Bampton method) 獲得 A 組件的超級元素 (superelement, SE)，最後將 SE 連接於 B 組件的接觸界面上，預期 CMS 簡化分析模型與原始全模型在振動特性上顯現能夠完全一致的特性。

延續固定樑結構的分析理念，說明本文第三章節會應用 CMS 於壓縮機與管路系統的振動分析，圖 4 為 CMS 於壓縮機系統之分析理念，為了驗證 CMS 於壓縮機系統上模擬的可行性，首先將壓縮機系統全模型分解成管路與壓縮機兩部分，接著對壓縮機上與管路的接觸面進行 CMS 特徵分析，獲得壓縮機的 SE，又稱壓縮機之 CMS 邊界模型；最後將壓縮機之 CMS 邊界模型與管路分析模型進行連接，形成簡化 CMS 管路模型，預期原始全模型與簡化 CMS 管路模型在模態域特性上是能夠完全一致的，也符合最初想達成縮減模型、減少求解資源的構想。

確認 CMS 可用於壓縮機於系統邊界之可行性後，第四章節則會針對 CMS 快速置換實驗室管路結構進行分析預測，圖 5 為置換管路系統之振動模態預測流程圖，為了驗證 CMS 置換實驗室管路模型後的

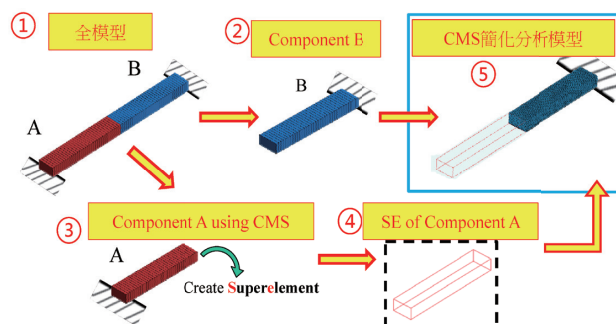


圖 3 CMS 之分析流程

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

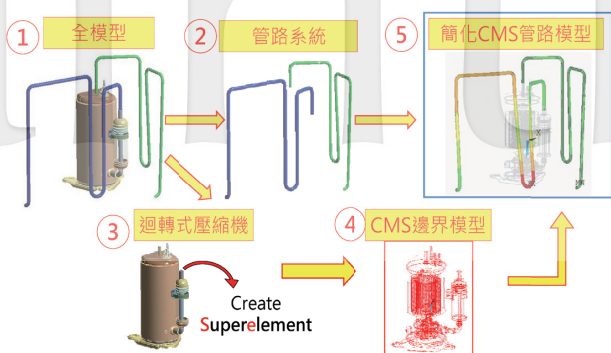


圖 4 CMS 於壓縮機系統之分析理念

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

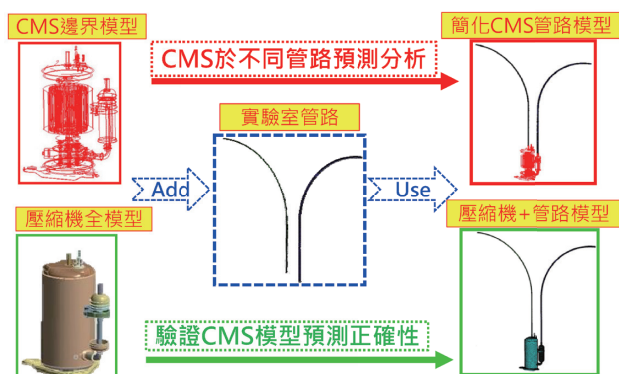


圖 5 置換管路系統之振動模態預測

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

振動模態特性之正確性，因此執行驗證程序，該方法是同時以實體壓縮機全模型加入實驗室管路，來驗證 CMS 邊界模型置換管路模型後的振動模態特性之正確性；若快速置換結構進行模態分析，預測結果與全模型能夠一致，表示 CMS 邊界模型可用於不同管路幾何的振動預測；未來可將 CMS 技術用於管路設計優化，匹配壓縮機的同時能夠避開激振頻率、結構自然頻率，且兼具高效率的分析預測，減少管路變更後繁瑣的分析設定，大幅縮短開發流程。

3. CMS 於壓縮機與管路系統

壓縮機有限元素模型延續王等人 [3] 之結構，圖 6 為壓縮機及管路系統有限元素分析模型，圖 6 (a) 為壓縮機全模型，應用 CMS 對迴轉式壓縮機進行特徵分析來獲得壓縮機之 CMS 邊界模型，圖 6 (b) 為壓縮

機之 CMS 邊界模型，並將其併入管路模型作為 CMS 邊界，最終獲得簡化的 CMS 管路模型，圖 6 (c) 為簡化的 CMS 管路模型；為了確認 CMS 於壓縮機與管路系統的可行性，因此將對壓縮機全模型與簡化的 CMS 管路模型進行模態域結果的比對驗證，包括自然頻率及模態振型。

表 1 為壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型自然頻率總表，比對結果顯示自然頻率誤差皆在 5.47% 以內，在第 2 個模態的自然頻率誤差百分比雖較高，但在頻率實際上只相差了 0.31 Hz，表示自然頻率對應良好。

表 2 為壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型模態振型總表，結果顯示大部分自然頻率及模態振型皆相互對應，但仍有部分的振動模態特性有些微的差異，其中又以旋轉模態的比對較為明顯，換言之，若全模型在特定模態上具有旋轉擺動的特性，則簡化 CMS 管路模型在該模態的振動特性就會有明顯的差異，但整體而言簡化 CMS 管路模型比對全模型都有良好的一致性，表示 CMS 可用於模擬壓縮機與管路系統之振動特性。

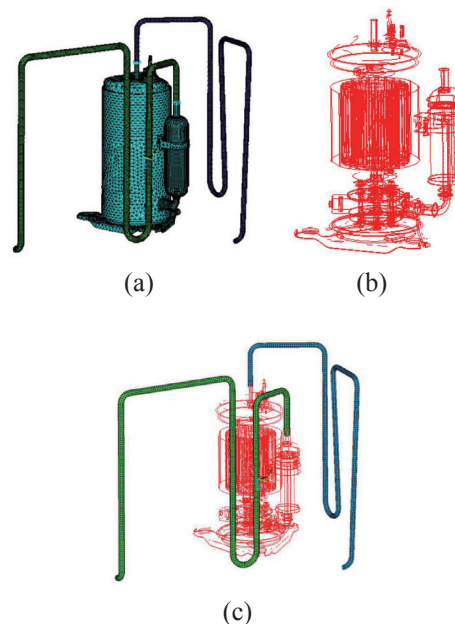


圖 6 壓縮機及管路系統有限元素分析模型：

(a) 全模型；(b) CMS 壓縮機邊界模型；

(c) 簡化 CMS 管路模型

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

表 1 壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型自然頻率
總表

全模型		簡化 CMS 管路模型		頻率 誤差 (Hz)	頻率 誤差 (%)
模態	自然頻 率 (Hz)	模態	自然頻 率 (Hz)		
A-01	5.51	C-01	5.64	-0.13	-2.36
A-02	5.67	C-02	5.98	-0.31	-5.47
A-13	92.56	C-13	92.95	-0.39	-0.42
A-14	104.85	C-14	106.02	-1.17	-1.11
A-15	132.57	C-15	133.07	-0.50	-0.38
A-19	225.61	C-19	225.65	-0.04	-0.02
A-25	388.58	C-25	390.05	-1.47	-0.38
A-34	536.27	C-34	537.21	-0.94	-0.18
A-37	657.63	C-37	658.56	-0.93	-0.14
A-56	1551.04	C-56	1552.29	-1.25	-0.08

表 2 壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型模態振型
總表

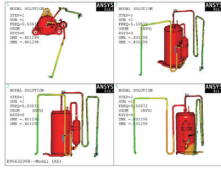
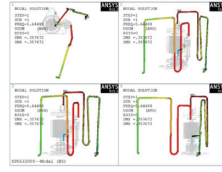
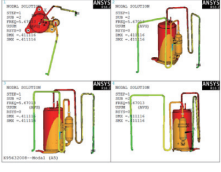
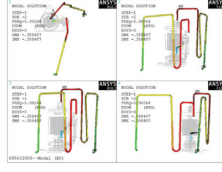
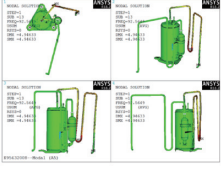
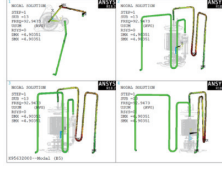
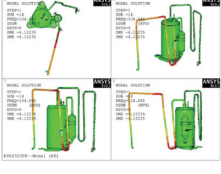
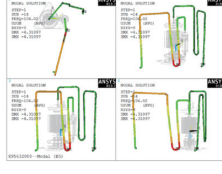
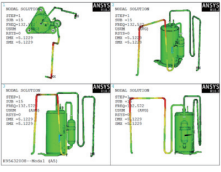
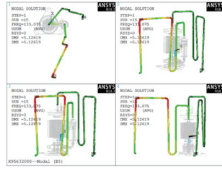
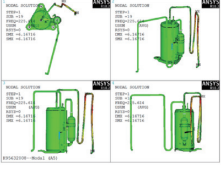
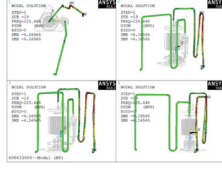
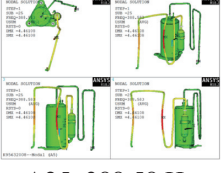
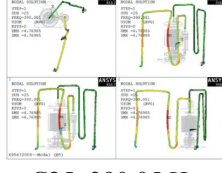
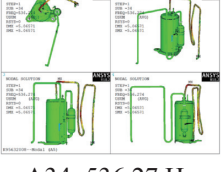
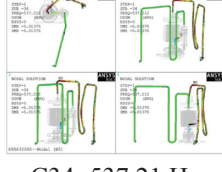
全模型	簡化 CMS 管路模型	物理意義
 A01: 5.51 Hz	 C01: 5.64 Hz	X 方向平移
 A02: 5.67 Hz	 C02: 5.98 Hz	X 方向平移
 A13: 92.56 Hz	 C13: 92.95 Hz	吐出管擺動
 A14: 104.85 Hz	 C14: 106.02 Hz	吸入管擺動

表 2 壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型模態振型
總表 (續)

全模型	簡化 CMS 管路模型	物理意義
 A15: 132.57 Hz	 C15: 133.07 Hz	吸入管擺動
 A19: 255.61 Hz	 C19: 225.65 Hz	吐出管擺動
 A25: 388.58 Hz	 C25: 390.05 Hz	吸入管擺動
 A34: 536.27 Hz	 C34: 537.21 Hz	吐出管擺動

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

4. 置換管路系統之振動模態預測

確認完 CMS 可用於壓縮機於系統邊界模擬之可行性後，接續會針對 CMS 快速置換實驗室管路結構進行分析預測，同時以實體壓縮機全模型加入實驗室管路，來驗證 CMS 邊界模型置換管路模型後的振動模態特性之正確性；實驗室中用來測試壓縮機振動特性所使用的管路稱為實驗室管路，是用來初步評估出廠前的單體壓縮機結構振動值是否合乎允收標準，而再進行壓縮機測試前，則要先對實驗室管路系統進行振動分析預測，因此本章節以實驗室管路系統作為置換的對象，來確認 CMS 邊界模型是否能用於置換其他管路系統，作振動模態的預測。

圖 7 為實驗室管路之有限元素分析模型，圖 7 (a) 為實驗室管路與壓縮機全模型，圖 7 (b) 為簡化 CMS 實驗室管路模型，為驗證預測分析所的模式參數是否正確，因此對兩分析模型進行模式分析，將獲得的模式參數進行比對，來判斷預測的模式域結果之正確性。

表 3 實驗室管路之壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型自然頻率總表，比對結果顯示自然頻率誤差皆在 8.9% 以內，在第 16 個模式頻率誤差百分比雖較高，但在頻率實際上只相差了 16.77 Hz，而在第 23 個與第 30 個模式的自然頻率誤差百分比為 3.5%，結果對應非常良好。表 4 實驗室管路之壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型模式振型總表，結果顯示大部分自然頻率及模式振型皆相互對應，但仍有部分振動模式特性有些許差異，該現象與第三章節分析結果雷同，模式都缺少了旋轉的特性，但整體而言簡化 CMS 實驗室管路模型比對全模型都有良好的一致性，表示

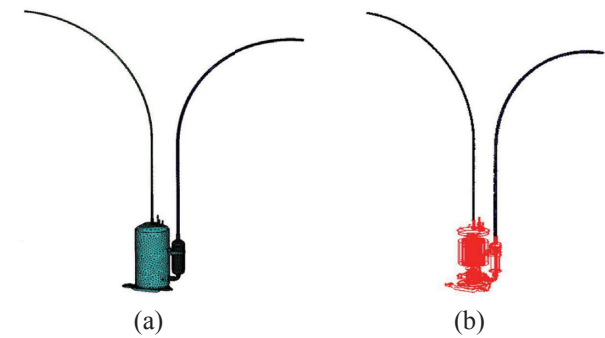


圖 7 實驗室管路系統有限元素分析模型：
(a) 全模型；(b) 簡化 CMS 實驗室管路模型
註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

表 3 實驗室管路之壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型自然頻率總表					
全模型		簡化 CMS 管路模型		自然頻率誤差 (Hz)	自然頻率誤差 (%)
模式	自然頻率 (Hz)	模式	自然頻率 (Hz)		
A-01	5.91	C-01	6.39	-0.48	-8.1
A-02	6.47	C-02	6.61	-0.14	-2.2
A-16	189.17	C-16	172.40	16.77	8.9
A-23	321.53	C-23	310.29	11.24	3.5
A-30	591.25	C-30	570.50	20.75	3.5
A-36	773.70	C-36	744.60	29.10	3.8

CMS 用於置換管路做振動模式的預測，仍具有有一定的可靠性。

表 4 實驗室管路之壓縮機全模型與簡化 CMS 管路模型模式振型總表

全模型	簡化 CMS 管路模型	物理意義
		Y 方向平移
A-01: 5.91 Hz	C-01: 6.39 Hz	
		X 方向平移
A-02: 6.47 Hz	C-02: 6.61 Hz	
		吸入管擺動
A-16: 189.17 Hz	C-16: 172.40 Hz	
		吐出管擺動
A-23: 321.53 Hz	C-23: 310.29 Hz	
		吐出管擺動
A-30: 591.25 Hz	C-30: 570.50 Hz	
		吐出管擺動
A-36: 773.70 Hz	C-36: 744.60 Hz	

註：本文彩色圖，請至電子期刊瀏覽。<http://dx.doi.org/10.6282/JASV>

5. 結論

本文為應用 CMS 於壓縮機及管路系統之振動分析，透過模態分析所獲得的模態參數進行比對驗證，確認 CMS 用於壓縮機及管路系統模擬的可行性與正確性綜合上述結果與討論，得以下幾點結論：

1. 簡化 CMS 管路模型與壓縮機及管路系統全模型之模態參數合理對應，代表簡化之 CMS 管路模型仍保有原結構之振動特性，也佐證 CMS 手法可行。
2. CMS 邊界模型置換實驗室管路的預測分析中，簡化 CMS 實驗室管路模型比對全模型都有良好的一致性，但仍少部分模態沒有對應，推測為 CMS 再縮減模型時減少模型的自由度數量所導致的，此論點可作為下階段研究與改善的方向。
3. 在理論模態分析所花費的時間比較中，全模型的求解需要 2 ~ 3 小時，而運用 CMS 在前置作業的準備需耗掉 10 分鐘來產生 SE，但是結合管路模型進行求解僅需要 30 秒的時間，可看出使用 CMS 可提升分析效率。
4. 未來可將 CMS 技術用於管路設計優化，匹配壓縮機的同時能夠避開激振頻率、結構自然頻率，且兼具高效率的分析預測，減少管路變更後繁瑣的分析設定，大幅縮短開發流程。

致謝

本文承蒙瑞智精密股份有限公司 107 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」計畫經費補助，得以完成本文研究，特此致謝。

參考文獻

- [1] 王栢村、余易璋、王文志、林谷樺。壓縮機吸入口及吐出口銅管之振動特性探討。2016 精密機械與製造科技研討會。屏東，2016；論文編號：A038。
- [2] 王栢村、林建敦、吳秉修、周建中、陳金龍。迴轉式壓縮機儲液瓶之模型驗證。中華民國力學學會第 37 屆全國力學會議暨第一屆國際力學會議。新竹，2013；論文編號：234。
- [3] 王栢村、林聖傑、楊佩宜、張博鈞、林谷樺。結合 CAE 與 EMA 於迴轉式壓縮機之模型驗證。第二十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會。高雄，2016；159-165 頁。
- [4] 王栢村、陳冠鈞、張博鈞、梁秀瑋。壓縮機於空調機邊界之模擬與振動特性探討。第二十六屆中華民國振動與噪音工程學術研討會。新竹，2018；論文編號：028。
- [5] 王栢村、張博鈞、林聖傑、吳盈輝。應用組件模態合成法於結構振動分析。2019 精密機械與製造科技研討會。屏東，2019；論文編號：A044。
- [6] Zhang G, Castanier M P, Pierre C. Efficient component mode synthesis with a new interface reduction method. in 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC). Dearborn, MI, 2004; 2043-2055.
- [7] Vysoký R. Current capabilities of modal analysis of aircraft propeller in ANSYS mechanical environment. AiMT, 2017; 12: 33-47. doi:10.3849/aimt.01160
- [8] Lu K L, Liu Y, Zhang W G, Qiu H Q, Mi W J. Free-interface component mode synthesis method with link substructure as super-element. Procedia Eng, 2011; 16: 685-694. doi:10.1016/j.proeng.2011.08.1142