

組件模態合成法於壓縮機及管路系統之振動分析

王栢村¹ 王皓瑜¹ 李維哲¹ 楊秉煜¹ 張博鈞²

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系

² 瑞智精密股份有限公司

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(Component Mode Synthesis, CMS)方法，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，可以求得其模態參數，並與完整模型進行比較，結果顯示有大致對應。採用 CMS 方法的優點，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激勵。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 方法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 方法是具有可行性。在考慮管路與壓縮機的邊界效應時，可採用 CMS 方法進行管路分析。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。

關鍵詞：壓縮機、管路系統、組件模態合成法、振動模態

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效應會帶動管路系統，因此需要對管路系統之振動特性做探討，然而整體分析時壓縮機結構過於複雜而導致求解時間拉長，此時導入縮減模型的相關技術來簡化壓縮機模型，達到減少分析計算量的效果後，則可以減少分析求解時間，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結構改善有相當大的幫助。

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] 由迴轉式壓縮機的次系統層次到整機的系統層次之模型驗證程序，可以有效地完成整體壓縮機分析模型的確認。

王等人 [4] 應用 CMS 於結構之振動分析，對四種不同結構案例，包括兩端固定樑、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。

王等人 [5] 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。

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，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 方法，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 *et al.* [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，The Classic Approach、Cyclic Symmetry Modeling (CSM) 以及 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 方法，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(Eigenanalysis)得到壓



縮機CMS邊界模型，並將其連接於管路系統進行模態分析，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兩者振動分析之模態參數進行比對，目的是為了確認CMS之正確性，如果模態參數比對良好，代表CMS使用於壓縮機及管路系統是可行的。
- (3) 確認完CMS使用於壓縮機及管路系統之可行性後，將壓縮機CMS邊界模型與不同管路匹配進行振動分析測試，進行不同管路的快速振動預測分析，以利後續設計變更作業，使整體分析流程更快速，以達到提升分析效率之目的。

2. 壓縮機系統組成與組件模態合成法分析理念

2.1 壓縮機系統組成

壓縮機主要由過濾瓶、泵成品、轉子成品、定子成品、完整泵成品，為多個次結構所組成，而部件多導致結構複雜，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，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，因此管路的振動特性也是重要的一環，所以必須進行管路系統的振動特性探討。

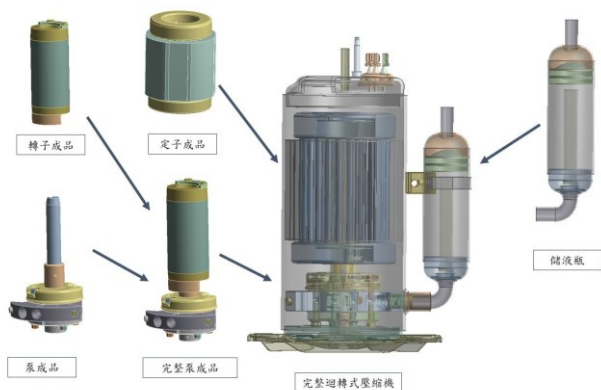


圖 1 壓縮機組成示意圖

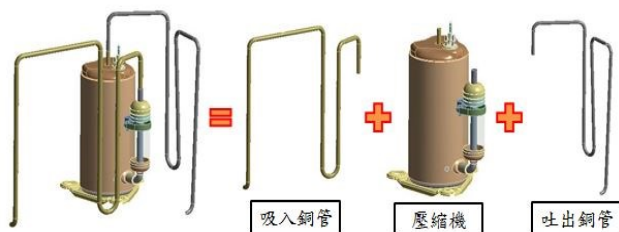


圖 2 壓縮機與管路系統組成示意圖

2.2 組件模態合成法分析流程與理念

本文主要探討組件模態合成法於壓縮機及管路系統之振動分析，圖3為組件模態合成法分析理念，首先訂定壓縮機本體與管路系統之邊界，接著將壓縮本體進

行特徵分析，獲得壓縮機之CMS邊界模型，最後將CMS邊界模型使用於管路獲取簡化CMS管路模型進行振動分析，並取得其模態參數，最終和壓縮機與管路系統全模型振動分析後所得模態參數做比較，可以預期進行CMS模擬與全模型分析兩者所得模態參數會相互對應，即可佐證CMS之可行性。

確認此手法的可行性後，將僅壓縮機CMS邊界模型置於欲分析的不同管路作匹配，進行振動分析來預測其振動特性，將預測結果與其全模型模擬之實際結果作比對，也發現兩者的模態參數有所對應，因此證明CMS具有高可信度，後續未來應用可以壓縮機CMS邊界模型使用於欲分析之管路上快速的進行振動預測，而使用CMS的優點在於可以完成各種邊界條件的模擬和各種不同的系統做匹配，如此可以省去大量的分析時間，並可以快速的對管路進行設計變更，有效率的達到工作目標。

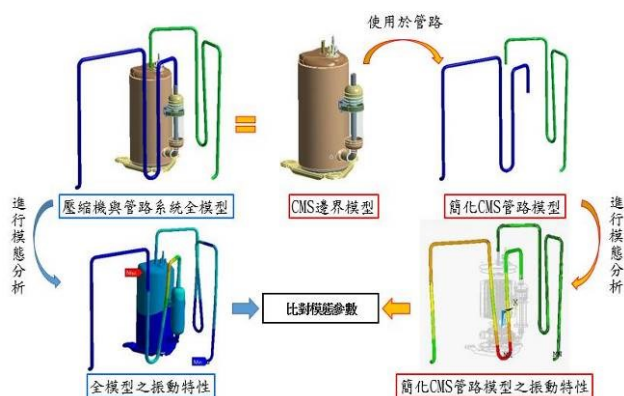


圖 3 組件模態合成法分析理念

3. 組件模態合成法於壓縮機與管路系統

壓縮機有限元素模型參照王等人[3]之結構，圖4為壓縮機及管路系統有限元素分析模型，而圖4(a)為壓縮機全模型，應用CMS於壓縮機及管路系統，利用特徵分析於壓縮機本體來獲得壓縮機之CMS邊界模型，圖4(b)為壓縮機之CMS邊界模型，並將其併入僅管路模型作為CMS邊界，最後以獲得簡化的CMS管路模型，圖4(c)為簡化的CMS管路模型，並將其與壓縮機全模型進行振動分析，以獲取兩者之模態參數包括自然頻率及模態振型，比對分析結果以確認CMS之正確性。

表1為使用CMS手法與壓縮機及管路系統全模型模態分析後所得之自然頻率，由低頻至高頻共挑選了10個自然頻率進行比對，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0.31Hz，而在第19個模態頻率誤差百分比甚至只有0.02%，對應非常好。

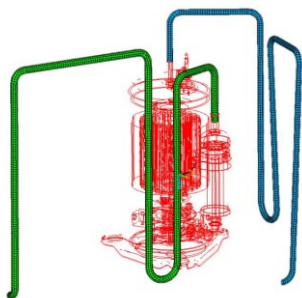
表2為使用CMS手法與壓縮機及管路系統全模型模態分析之自然頻率與模態振型比對，結果顯示大部分自然頻率及模態振型皆相互對應，但仍有部分未討論之模態有些許差異，而這些模態皆有共同特性，也就是模態缺少了旋轉的特性，而對於此現象需進一步做後續的探討。



(a) 全模型



(b) CMS 壓縮機邊界模型



(c) 簡化 CMS 管路模型

圖 4 壓縮機及管路系統有限元素分析模型

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
				X方向平移
A-01_5.51 Hz		C-01_5.64 Hz		Y方向平移
A-02_5.67 Hz		C-02_5.98 Hz		吐出管擺動
A-13_92.56 Hz		C-13_92.95 Hz		吸入管擺動
A-14_104.85 Hz		C-14_106.02 Hz		吸入管擺動
A-15_132.57 Hz		C-15_133.07 Hz		吐出管擺動
A-19_225.61 Hz		C-19_225.65 Hz		吸入管擺動
A-25_388.58 Hz		C-25_390.05 Hz		吐出管擺動
A-34_536.27 Hz		C-34_537.21 Hz		吐出管擺動
A-37_657.63 Hz		C-37_658.56 Hz		吐出管擺動
A-56_1551.04 Hz		C-56_1552.29 Hz		

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		自然頻率 誤差 (Hz)	自然頻率 誤差 (%)
mode	自然頻率 (Hz)	mode	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

4. 不同管路系統之振動模態預測

將簡化 CMS 管路模型與壓縮機及管路系統全模之分析結果比較，結果比對良好，因此進行壓縮機 CMS 邊界模型匹配不同管路之振動模態預測。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，初步評估壓縮機振動特性是否合乎標準，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，以確保後續步驟之正確性，因此本章節以實驗室管路系統作為振動特性之探討對象。圖 5 為實驗室管路之有限元素分析模型，將圖 4(b)之 CMS 邊界模型使用於實驗室管路，獲得簡化 CMS 管路模型，圖 5(b)為簡化 CMS 管路模型，接著進行振動分析，為確認預測模態是否正確，另外也對圖 5(a)之實驗室管路之壓縮機全模型進行振動分析，最後將兩者分析後之模態參數包括自然頻率及模態振型進行比，來判斷預測之準確性。

表 3 為使用 CMS 手法與實驗室管路之壓縮機全模型模態分析後所得之自然頻率，由低頻至高頻共挑選了 6 個自然頻率進行比對，比對結果顯示自然頻率誤差皆在 8.9%以內，在第 16 個模態頻率誤差百分比雖較高，但在頻率實際上只相差了 16.77Hz，而在第 23 個與第 30 個模態的自然頻率誤差百分比甚至只有 3.5%，結果對應非常良好。

表 4 為使用 CMS 手法與實驗室管路之壓縮機全模型模態分析之自然頻率與模態振型比對，結果顯示大部分自然頻率及模態振型皆相互對應，但仍有部分未討論之模態有些許差異而這些模態皆有共同特性，與第 3 章節分析結果相似，模態缺少了旋轉的特性，而對於此現象需進一步做後續的探討。

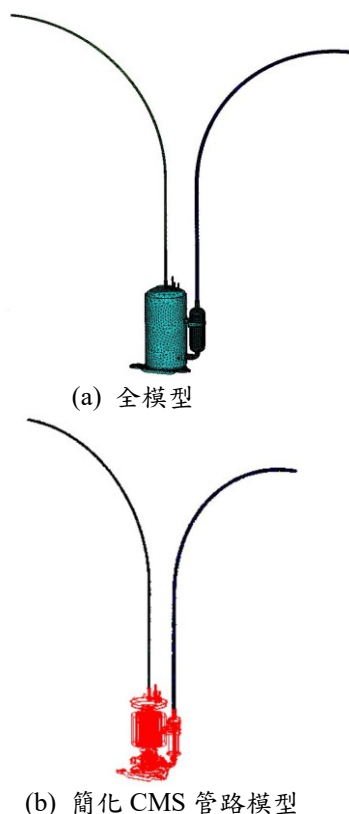


圖 5 實驗室管路系統有限元素分析模型

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 (%)
mode	自然頻率 (Hz)	mode	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	29.1	3.8

表 4 實驗室管路之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
		y 方向平移
A-01_5.91 Hz	C-01_6.39 Hz	x 方向平移
		吸入管擺動
A-02_6.47 Hz	C-02_6.61 Hz	吐出管擺動
		吐出管擺動
A-16_189.17 Hz	C-16_172.40 Hz	吐出管擺動
		吐出管擺動
A-23_321.53 Hz	C-23_310.29 Hz	吐出管擺動
		吐出管擺動
A-30_591.25 Hz	C-30_570.50 Hz	吐出管擺動
		吐出管擺動
A-36_773.70 Hz	C-36_744.60 Hz	

5. 結論

本文為應用 CMS 於壓縮機及管路系統之振動分析，亦將分析過程與分析結果與同樣進行振動分析之壓縮機全模型進行比對，得到結論如下：

- (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 管路模型可以保留原結構之振動特性，而佐證 CMS 手法之可行。
- (2) 計算取得壓縮機之 CMS 邊界模型後，將其併入僅管路模型作為 CMS 邊界，做簡化的 CMS 管路模型之振動分析求解時間僅僅 10 分鐘，而在全模型求解上一般電腦則需 2~3 個小時，如此看出使用 CMS 手法可以大大的提升工作效率。
- (3) 在確認 CMS 手法之正確性後，未來可將壓縮機之 CMS 邊界模型與不同管路進行快速匹配，不僅可以快速的進行振動模態預測，還能在一定時間內完成龐大的工作量，反之若使用全模型進行管路之振動預測分析，則需耗費大量的工作時間，不符合效率之觀點。
- (4) CMS 之優點在於可以快速的進行模態預測，但仍少部分模態沒有對應，需進一步評估以確保應用分析的可行。

6. 致謝

本文承蒙瑞智精密股份有限公司經費補助，令研究計畫「組件模態合成法於壓縮機及管路系統之振動分析」得以完成，特此致謝。

7. 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」，*精密機械與製造科技研討會*，屏東，論文編號：A038，2016。
- [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」，*第 37 屆力學會議暨第一屆國際力學會議*，新竹，論文編號：234，2013。
- [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，第 159~165 頁，2016。
- [4] 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，論文編號：A044，2019。
- [5] 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，論文編號：028，2018。
- [6] G. Zhang, M. P. Castanier, and C. Pierre, "Efficient Component Mode Synthesis with a New Interface Reduction Method," *22nd International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Dearborn, MI, pp 2043–2055, 2004.

- [7] R. Vysoký, "Current Capabilities of Modal Analysis of Aircraft Propeller in ANSYS Mechanical Environment," *Advances in Military Technology*, vol. 12, No. 1, pp 33-47, 2017.
- [8] K. L. Lu, Y. Liu, W. G. Zhang, H. Q. Qiu, and W. J. Mi, "Free-interface component mode synthesis method with link substructure as super-element," *Procedia Engineering*, vol.16, pp 685–694, 2011.

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

Bor-Tsuen Wang¹ Hao-Yu Wang¹ Wei-Zhe Li¹
Bing-Yu Yang¹ Bo-Jun Zhang²

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

²Rechi Precision Co., LTD.

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

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



第二十七屆中華民國振動與噪音工程學術研討會 中原大學 中華民國一〇八年六月二十二日
The 27th National Conference on Sound and Vibration, Taoyuan City, June 22th, 2019.

as for other complex structure systems.

Keywords: compressor, pipe system, component mode
synthesis (CMS), vibration modes.

