

空調室外機系統之實驗模態分析與模型更新

Experimental Modal Analysis and Model Updating on Outdoor Unit of Conditioner

王栢村、張博鈞、陳冠鈞、梁秀璋

WANG Bor Tsuen, Zhang Bo Jun, CHEN Guan Zhou, LIANG Hsiu Wei

(台灣 屏東縣內埔鄉學府路 屏東科技大學機械工程系)

(Mechanical Engineering Department, National Pingtung University of Science and Technology, Shuefu Road, Neipu, Pingtung, Taiwan)

Abstract: The correctness and reliability of Finite element (FE) model is crucial to ensure structural simulation to fulfill its purpose. This work presents the FE modeling techniques and model updating for outdoor unit of conditioner (OUC). The original FE model of OUC has to reveal the reality of structure, including geometry, material, interface and boundary conditions, and to be validated by experiments. The general approach is to perform experimental modal analysis (EMA) on the real structure and obtain structural modal parameters. At the meantime, one can numerically obtain structural modal parameters from FE model. Model updating is to adjust the FE model such that both FE model and real structure are equivalent base on the agreement of structural modal properties. Results show the updated FE model of OUC can reveal good agreement with real structure in modal and frequency domain properties.

Key words: Outdoor Unit of Conditioner (OUC), Experimental Modal Analysis (EMA), Finite element analysis (FEA), Model Updating

摘要: 有限元素模型(FE model) 的正確性和可靠性對於確保結構模擬達到其分析目的相當重要。本文介紹了空調室外機(OUC) 有限元素模型之建模技術與模型更新。建構 OUC 的有限元素模型必須呈現結構之物理特性, 包括幾何形狀, 材料性質, 接觸介面和邊界條件等, 並施以實驗進行驗證。一般的方法是對結構進行實驗模態分析(EMA)以獲得結構模態參數。同時, 也可由有限元素模型之數值分析求得理論模態參數。模型更新在調校有限元素模型參數, 使得分析模型和實際結構之結構模態特性相符。結果顯示, 更新後的有限元素模型在結構模態和頻率域特性能充分呈現空調室外機實際結構振動特性。

关键词: 空調室外機; 實驗模態分析; 有限元素分析; 模型更新

1 前言

空調室外機(outdoor Unit of Conditioner, OUC)即為分離式冷氣機的室外機體, 其振動噪音往往透過底盤、樑架、管路、牆面傳遞到室內, 影響到自己或鄰居引起身心的不舒適, 因此開發低振動噪音的室外機的過程中, 需要透過電腦輔助工程分析結合模型驗證程序, 探討實際室外機結構的振動模態特性, 且有助於 OUC 之振動噪音診斷; 雖然 CAE 為功能強大的應用工具, 仍然需要實驗的驗證與認證。本文為對 OUC 之分析模型進行模型驗證以確認分析模型的可靠度, 透過分析模型觀察空調室外機內部結構之振動特性找出壓縮機產生異音的可能零件, 以輔助空調室外機之噪音診斷。

王等人^[1]運用有限元素分析與實驗模態分析, 對空調室外機系統進行理論與實驗量測分析, 結合模型驗證之程序, 比對模態參數確認空調室外機分析模型與實際結構之間的等效性, 最終獲得等效於實際結構之空調室外機分析模型, 藉此探討室外機內部各次系統的振動模態特性, 便有助於空調室外機系統之振動噪音診斷。丘等人^[2]對除濕機底盤進行理論模態分析, 以除濕機壓縮機的

倍頻與底盤的前三個模態作為除濕機底盤共振頻率與底盤強度之參考，最後以調整加強條、工字筋、凹槽結構幾何特徵方式改善底盤的強度與自然頻率，藉此消除壓縮機與底盤共振產生的噪音問題。Silveira *et al.* [3] 對往復式壓縮機進行振動與噪音量測，並量化和確定噪聲的發生源，同時也對振動傳遞到系統的方式進行探討，準確地描述所有的噪音問題，最後透過新開發的組套件來變更現有的產品，達到靜音得效果。Park *et al.* [4] 透過特徵值的拓撲優化設計來降低壓縮機產生的噪音，主要以工程結構噪聲改善的實際案例為例子，由實驗模態分析與噪音量測得知，模態振型與高噪音遇有明顯的關聯性，因此透過有限元分析之特徵值的拓撲優化設計來改善結構的噪音。Kim *et al.* [5] 透過表面振動以及聲音強度的量測，確認壓縮機的異音傳遞方式，將壓縮機本體進行次組合之模型驗證程序。第 1 層次進行泵組合件的驗證，第 2 層次對轉子成品與泵的組合進行驗證，第 3 層次加入本體外殼進行驗證，第 4 層次則是加上本體外殼之零組件，最後進行整機壓縮機之模型驗證，共分為 5 個案例。為了減低壓縮機整體的噪音量進行模型的修整，於過濾瓶新增 L 型支架以固定內管結構，並在過濾瓶的本體加上橡膠墊圈，整體模型之修改使得壓縮機之噪音頻譜下降 20 dB。Maglie *et al.* [6] 介紹了工具機從精密複雜的有限元素模型到簡化表示的過程，在計算時間和資源方面的效率皆有達倒顯著的效果，並加入自動化求解的應用，也透過不同的分析驗證，獲得工具機簡化有限元素模型。

本文運用有限元素分析與實驗模態分析，對 OUC 進行分析模型更新，主要目標如下所示：

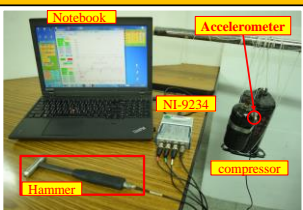
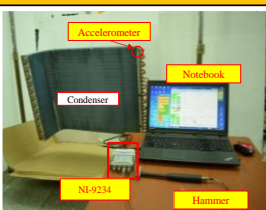


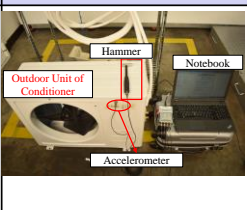
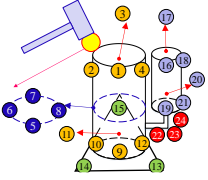
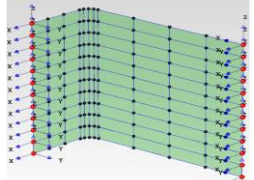
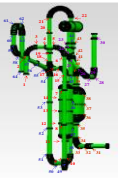
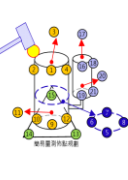
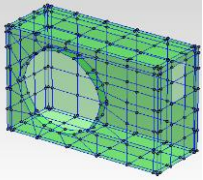
1. 對 OUC 系統與次系統之分析模型進行模型更新，以 OUC 內部的冷凝器與迴轉式壓縮機為更新對象，同時以實驗模態分析進行驗證；確認理論與實際結構之間的等效性。
2. 將更新完成的冷凝器與迴轉式壓縮機分析模型加入於 OUC 分析模型，再次進行模型的驗證，確認結構之物理特性，包括幾何形狀，材料性質，接觸介面和邊界條件等，以零件、次系統、整機系統逐步驗證的方式，更新 OUC 之有限元素模型，最終獲得等效於實際結構之空調室外機分析模型。
3. 未來可藉由分析模型探討 OUC 內部各次系統的振動模態特性，便有助於空調室外機系統之振動噪音診斷。

2 空調室外機之實驗模態分析

為了確認更新後的 OUC 模型與實際結構之間的等效性，因此需要實驗的驗證，本文主要以實驗模態分析為實驗方法，將所獲得的模態參數，做為校正理論分析模型的基準。

首先針對欲更新的零件與次系統結構進行實驗模態分析，冷凝器於自由邊界下的實驗架設主要以釣魚線懸吊模擬自由邊界，以固定衝擊槌移動加速度計的方式進行實驗，佈點規劃則是在冷凝器左右銅管；在迴轉式壓縮機於自由邊界下之實驗架設上，也是以釣魚線懸吊來模擬自由邊界，運用固定驅動器衝擊錘，移動感測器加速規的實驗方式進行；最後對空調室外機系統進行實驗模態分析，採用固定衝擊錘移動三軸向加速度計進行敲擊實驗，透過敲擊實驗結果可得結構之頻率響應函數，再經由 ME'scopeVES 軟體截取實驗模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比，完成 OUC 系統與次系統之實驗模態分析。

表 1 室外機系統與次系統之實驗規劃總表

	自由邊界下壓縮機	自由邊界下冷凝器	系統邊界之管路	系統邊界之壓縮機	外部機殼
實際結構					
佈點					

3 空調室外機之有限元素分析模型更新

有限元素分析模型的等效性，對於響應預測以及設計變更顯得相當的重要，攸關於結構模擬達能否達到分析目的；本文延續文獻^[1]之空調室外機系統之有限元素模型，對其進行模型變更，使得 OUC 系統之分析模型在結構模態和頻率域特性充分呈現空調室外機實際結構振動特性，本節將對有限元素分析模型之更新方法、分析設定、模型更新結果進行說說明。

首先說明空調室外機模型更新方法，主要更新的分析模型主要為冷凝器與迴轉式壓縮機；在冷凝器模型更新上，改善了文獻^[1]的冷凝器分析模型之幾何過於簡化的缺點，更新後的冷凝器模型是以實體幾何建構冷凝器之銅管，使其在物理性質上更貼近於實際結構；在迴轉式壓縮機的更新上，更新後的壓縮機模型加入了實體幾何結構，包含馬達轉定子、泵組零件以及過濾瓶等重要組零件，主要改善了壓縮機幾何過於簡化的缺點；更新後的分析模型皆會進行模型驗證程序，以實驗模態參數最為基準，修正更新的分析模型；接著將完成驗證後的冷凝器與壓縮機模型加入於 OUC 系統之模型內，替換須改善的零件與次系統結構，最後進行理論模態分析求解理論模態參數，以利後續與實驗模態參數做比對驗證，確認更新後的 OUC 模型是否等效於實際結構。

在 OUC 之理論模態分析設定上，將說明空調室外機系統有限元素模型之建立方式、接觸介面之分析假設、接觸介面之模擬方式，其設定方式如下：

1. OUC 系統與次系統之有限元素模型均採用二次立體元素 3-D 20-Node Structural Solid 結構元素 (Solid186)與 3-D 10-Node Tetrahedral Structural Solid 結構元素(Solid187)建構、質量元素 (Mass21)、梁元素(188)以及殼元素(Shell181) 建構有限元素模型。
2. OUC 之材料參數設定值則參照文獻^[1]之材料參數；接觸分析設定主要可分為 Bonded、No Separation 以及 Joint-fix, Bonded 用於模擬焊接與螺絲鎖固, No Separation 用於模擬壓縮機內部零件間的滑動接觸, Joint-fix 用於模擬 OUC 鈹金間的螺絲鎖固。
3. 空調室外機系統與次系統之分析模型均採用自由分割(Free Mesh)進行元素分割，共 427281 個節點、203234 個元素。
4. 邊界條件則以底板支撐架為固定邊界，壓縮機腳墊邊界以彈性支撐方式模擬，設定三軸方向 x 、 y 、 z 為:4620、4620、29000N/m, 旋轉方向 為 100、80、9 N-m/rad。
5. 進行理論模態分析求得空調室外機系統結構的理論模態參數，最後也進行簡諧響應分析，給予三軸方向為 1N 簡諧激振外力，輸出獲得空調室外機結構三軸方向之頻率響應函數。

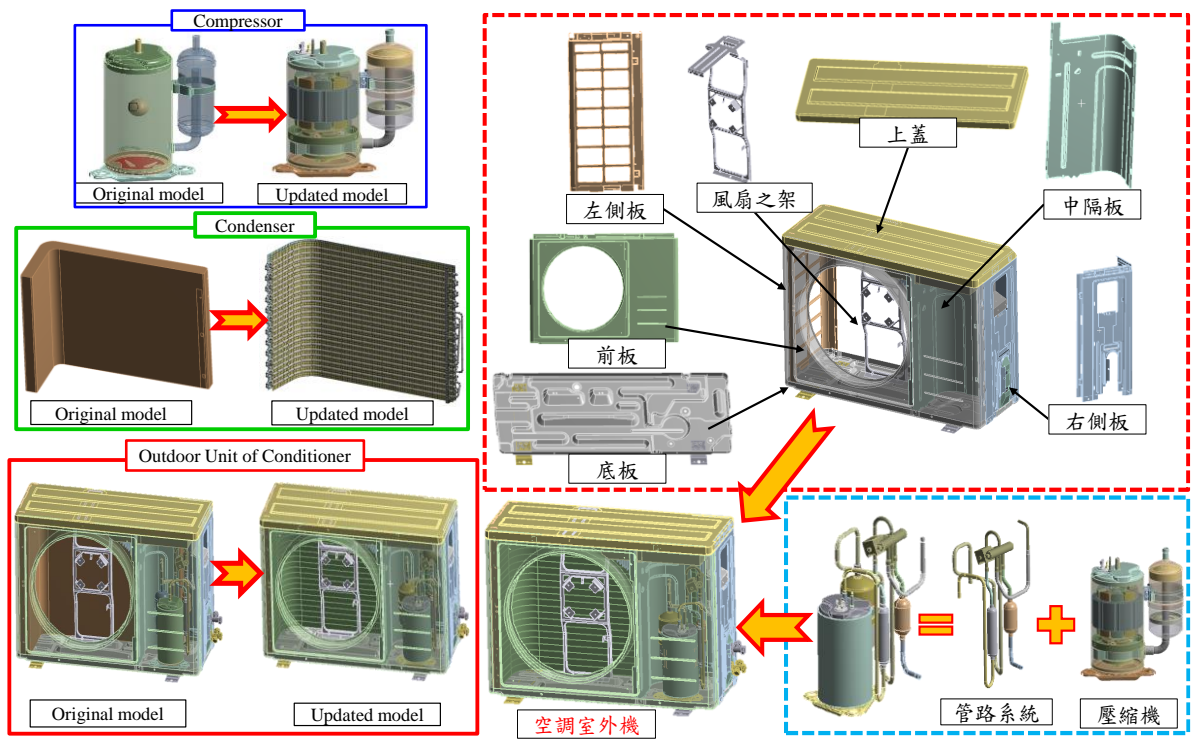


圖 1 空調室外機系統與次系統之模型更新架構圖

4 模型更新結果與討論

本文更新 OUC 系統內部的冷凝器與壓縮機結構，並進行了實驗模態分析、理論模態分析以及簡諧響應分析，將獲得的模態域和頻率域結果進行比對驗證，確認有限元素分析模型的等效性；表 2 為空調室外機系統之外部機殼模態振型，表 3 為空調室外機系統之壓縮機模態振型，表 4 為空調室外機系統之管路系統模態振型，圖 5(a)為 OUC 模態振型與 Z 方向頻率響應函數比較圖，圖 5(b)為 OUC 模態振型與 Y 方向頻率響應函數比較圖；驗證結果說明如下：

1. 由表 2 可觀察 OUC 外部機殼模態振型的物理意義，實驗與分析的模態振型皆有良好得對應，理論分析模型的自然頻率也相當接近實驗的自然頻率。
2. 由表 3 得知 OUC 系統下的壓縮機之模態域結果，可觀察到理論 OUC 分析模型能完整模擬實際結構單純壓縮機擺動的 Local mode 現象，自然頻率的比對也相當接近。
3. 透過表 4 結果的觀察，理論分析模型能夠完全模擬壓縮機做剛體運動而牽動管路擺動的現象；OUC 的 Global mode 條件下，管路的模態振型特性也具有當良好的對應，自然頻率的比對也相當接近。
4. 圖 5(a)、(b)為空調室外機之模態振型與 FRF 比較圖，紅色虛線為簡諧響應分析求得的頻率響應函數，黑色曲線為實驗之頻率響應函數，兩曲線之峰值位置為結構之自然頻率，且所對應的模態振型也具有相同的物理意義。

表 2 空調室外機系統之外部機殼模態振型

FEA			
U18-45.048 Hz	U26-73.181 Hz	U42-109.16 Hz	U95-213.18 Hz
Local mode-冷凝器	Local mode-室外機殼	Local mode-室外機殼	Local mode-室外機殼
EMA			
O12-45.6 Hz	O16-75 Hz	O22-111 Hz	O31-206 Hz
Local mode-冷凝器	Local mode-室外機殼	Local mode-室外機殼	Local mode-室外機殼

表 3 空調室外機系統之壓縮機模態振型

FEA			
U100-220.43 Hz	U154-317.16 Hz	U213-399.17 Hz	U351-594.35 Hz
壓縮機、過濾瓶 X 方向擺動	壓縮機、過濾瓶 X 方向擺動	壓縮機、過濾瓶 Y 方向擺動	過濾瓶 Z 方向擺動
EMA			
C16-213 Hz	C18-308 Hz	O20-348 Hz	O24-568 Hz
壓縮機、過濾瓶 X 方向擺動	壓縮機、過濾瓶 X 方向擺動	壓縮機、過濾瓶 Y 方向擺動	過濾瓶 Z 方向擺動

表 4 空調室外機系統之管路系統模態振型

FEA			
U03-6.49 Hz	U04-12.566 Hz	U12-27.5 Hz	U13-30.606 Hz
Compressor Rigid - (Y)	Compressor Rigid - (θ_z)	Global mode	Global mode
EMA			
P01-6.26 Hz	P02-13.1 Hz	P05-26.3 Hz	P06-32.5 Hz
Compressor Rigid - (Y)	Compressor Rigid - (θ_z)	Global mode	Global mode

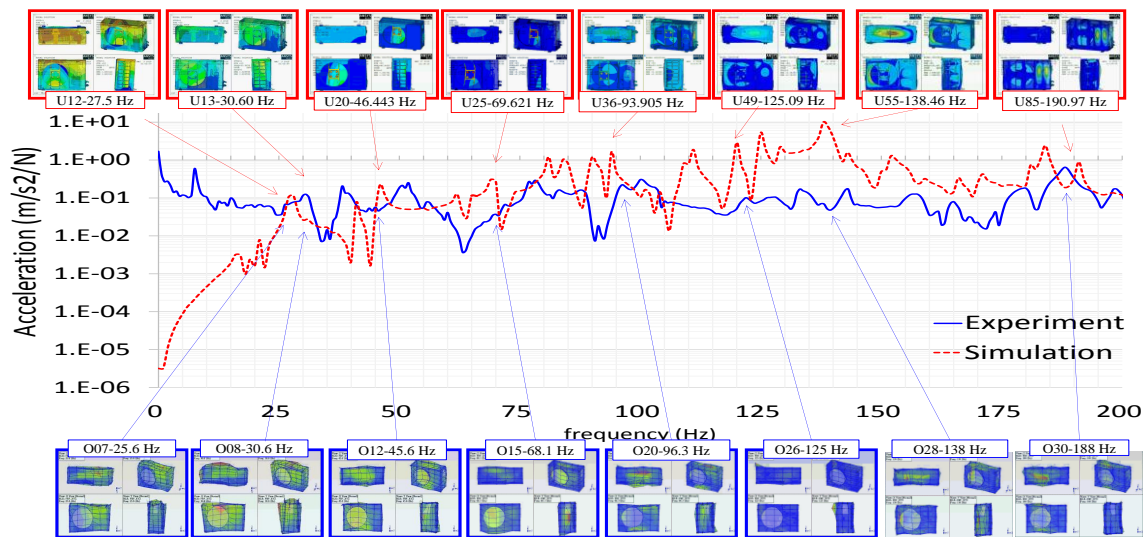


圖 5 空調室外機模態振型與 Z 方向頻率響應函數比較圖

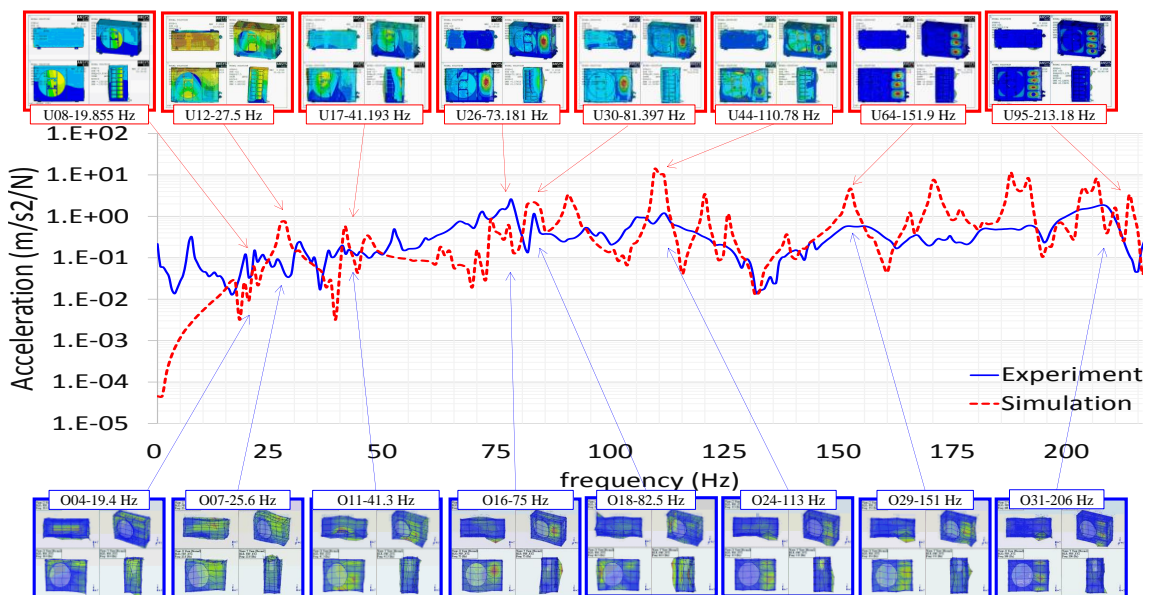


圖 6 空調室外機模態振型與 Y 方向頻率響應函數比較圖

4 結論

本文介紹了空調室外機(OUC)有限元素模型之建模技術與模型更新方法，主要對冷凝器與迴轉式壓縮機進行模型變更，同時進行模型驗證程序，以實驗模態分析所獲得的模態參數做為修正分析模型的基準；最後將更新完成的冷凝器與迴轉式壓縮機分析模型加入於 OUC 分析模型內，再一次進行模型驗證程序；綜合上述結果與討論得總結如下：

1. 對空調室外機(OUC)內部的冷凝器與迴轉式壓縮機進行模型變更，並透過模型驗證程序，確認兩分析模型與實際間的等效性，完成結構之物理性質的確認，包括幾何形狀，材料性質，接觸介面和邊界條件等。
2. 更新後的冷凝器與迴轉式壓縮機模型加入於 OUC 模型內，再一次進行模型驗證程序，在模態域的結果顯示，無論是外部機殼或是內部的壓縮機與管路系統，在模態參數的比對上皆有良好的對應性，表示更新後的 OUC 模型足以顯示實際 OUC 系統的結構振動特性。
3. 在 OUC 之頻率域比對中，實驗與分析的頻率響應函數之峰值尖銳度有落差，推測為理論析模型的簡斜響應係以 Mode Superposition 進行計算，阻尼效應的輸入是以一常數值進行設定，以至於頻率響應函數之振幅有落差，但峰值頻率所對應的模態振型有良好的對應，因此確定完成空調室外機之模型更新。
4. 本文所進行空調室外機系統各零件之更新技巧、邊界模擬、接觸型式以及分析模型之驗證方法，提供空調機設計開發人員建立空調系統模擬應用上的標準作業流程，減少設計開發所需的時程。
5. 未來可應用於探討空調室外機分析模型應用於振動與噪音之診斷方法，可透過分析模型的幫助觀察到實驗儀器無法量測到的內部振動特性，藉此輔助空調室外機之振動與噪音之診斷。

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。

References

- [1] 王栢村, 張博鈞, 陳冠鏘, 梁秀瑋, 2017, 「空調室外機系統之模擬技術與實驗驗證」, *屏東科技大學暨北京科技大學第十二屆學術交流研討會*, 屏東, 論文編號: A15。
- [2] 丘晓宏, 温骊, 2015, 「基於 ANSYS 的除濕機底盤強度分析及結構優化」, *家電科技*, 廣東, 第 005 期, 73-75 頁。
- [3] Silveira, M., 2004, "Noise and Vibration Reduction in Compressors for Commercial Applications," *International Compressor Engineering Conference*, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, Paper No.: C065.
- [4] Park, J., and Wang, S., 2008, "Noise Reduction for Compressors by Modes Control Using Topology Optimization of Eigenvalue," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 315, No. 4-5, pp. 836-848.
- [5] Kim, J. D., Lee, B. C., Bae, J. Y., Ban, J. O., and Kim, Y. H., 1998, "Noise Reduction of a Rotary Compressor Using Structural Modification of the Accumulator," *International Compressor Engineering Conference*, West Lafayette, IN, USA, Paper 1265.
- [6] Maglie, P., Carbini, R., Weikert, S., Wegenr, K., 2010, "Efficient mechatronic evaluation of machine tool designs using model reduction," *Proceedings of the 12th Mechatronic Forum Biennial International Conference*, Vol. 1, pp. 285-292.