

閥片與護片組件之模擬與實驗對迴轉式壓縮機之噪音評估

王栢村¹、林建敦¹、吳秉修¹、陳金龍²、徐維良²、謝長鴻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

摘要

某一型之單缸變頻迴轉式壓縮機發現在 800Hz 到 1200Hz 頻寬有高貢獻度異音。壓縮機之泵組零件中有一閥片與護片組合，其功能在壓縮過程透過閥片開啟而釋放高壓冷媒，閥片在開啟與閉合時，與護片之接觸動作，恐怕有造成壓縮機高噪音之異音疑慮，因此本文發展診斷方法與流程，以確認閥片與護片組零件是否為此型壓縮機運作之振動或噪音源。實驗設計係以一微小衝擊錘敲擊護片，同時量測聲音響應，藉由敲擊護片表面不同位置，量得聲音自身功率頻譜函數，並可獲得護片可能之自然頻率以及對應的操作變形振型(ODS)。也建構閥片與護片組零件包含接觸元素效應之有限元素模型，進行理論模態分析以求得結構模態參數。由三組不同的閥片與護片組零件可量測得聲音頻譜，發現有類似特徵，並可獲得結構之自然頻率與 ODS。由模擬分析結果發現，理論自然頻率及其對應之模態振型與實驗之 ODS 相對應，可證明理論有限元素模型之分析結果的合理性，並可作為噪音診斷之參考。經由檢視聲音頻譜以及比對理論模態振型，閥片與護片組零件之結構振動模態，應該不會是此型壓縮機高噪音頻帶之主因，此發現對壓縮機噪音診斷有幫助，也可應用此診斷手法於其他有興趣之零組件。

關鍵字：迴轉式壓縮機、有限元素模型、閥片與護片組件、噪音診斷

1. 前言

市售之冷氣、冰箱等家電內部主要運作皆運用迴轉式壓縮機，為了使迴轉式壓縮機品質提升滿足客戶之需求，就需要針對振動與噪音進行改善，因此透過有限元素分析之應用，可作為振動與噪音之輔助診斷，導入有限元素分析節省不必要之製程成本與時間，進行結構實驗與分析進行比對能了解結構之模態特性，找出最有可能產生噪音之零組件進行改善，以達到最省成本與時間效益。

本文針對迴轉式壓縮機上支座含閥片與護片組零件之模擬與實驗的噪音評估，為探討此主題而進行文獻回顧，首先對壓縮機噪音相關之文獻，楊[1]進行空調系統噪音與內部壓縮機之振動與噪音關聯性探討，隨頻率下降壓縮機與空調噪音值均下降，壓縮機

噪音與整體空調噪音呈非線性關係在於壓縮機與風扇噪音之貢獻度大小有差距變化，空調外機結構較薄自然頻率低，所以容易被壓縮機低頻之振動激出低頻噪音。王等人[2]針對迴轉式壓縮機進行噪音特性之分析，以 receiver test 以及 steady test 量測方法進行噪音量測，得知噪音頻譜異因主要的貢獻帶為 30-120Hz、200-540Hz、700-900Hz 及 1050-1600Hz。

Zhu *et al.*[3]針對迴轉式壓縮機過濾瓶進行模態分析，固定邊界時模態分析頻率第 7、8 模態的自然頻率最靠近噪音貢獻頻帶 400Hz、500Hz、1250Hz，在過濾瓶中加一環形薄板進行模型的修改，但不影響結構之剛性，得到頻率值下降，整體噪音也降低 0.60.6 dB(A)，後續模型修改將壓縮機之吸入管縮短，噪音貢獻頻帶噪音分別下降了 13、14、8dB(A)，整體下降了 1.1 dB(A)。Wang *et al.*[4]對壓縮機進行噪音的量測，文中說明在 1600Hz 的頻率值有最高的噪音量，以模態分析與拓樸優化法進行分析，只運用原始設計變數的 10%，目標頻率 1744Hz 已移轉至超過 2500Hz，可得知比原始設計在高噪音的頻帶頻率降低了，同時增加上下支架提高剛性。

為了要了解噪音改善之實驗規劃與流程，針對實驗設計與方法之進行文獻探討，Woo *et al.*[5]針對 TBR 馬達因共振等緣故形成噪音，分成 4 個類別進行探討如何降低噪音，並對壓縮機與馬達進行修改，壓縮機的轉定子之間因有偏心量而造成磁力不平衡的現象是因壓縮機與轉子有共振之現象，以提高轉子的第一個結構自然頻率、將轉子幫浦與外殼緊緊所固改變其邊界條件、解決辦法針對馬達的軸心進行改善、以不降低壓縮機運轉的效率，將定子的尺寸進行修改 4 種方法進行馬達降噪之測試與改進，達成 TBR 壓縮機總噪音量減低 6dB 之成果。王等人[6]對多功能車輛(utility vehicle, UV)UV 車架之振動模態的探討，以完整之實驗模態分析(EMA)流程由預測至後處理，對整體車架之振動模態進行探討，以作為後續模型驗證與設計變更之用。

迴轉式壓縮機在 800Hz 至 1200Hz 有高噪音貢獻度，在壓縮過程中，閥片會在腔室中釋放出氣體壓力，不確定是否為可能的噪音來源，本文目的主要針對閥片與護片組件進行探討與噪音評估，為了解閥片與護片組件是否為迴轉式壓縮機高噪音頻帶之可能噪音來源，所以探討閥片與護片組件之振動模態特性，並建立起實驗方法與流程以及分析模擬技術，同時以 FEA 分析結果作為振動噪音之輔助診斷。

2. 迴轉式壓縮機閥片與護片組件之振動噪音診斷流程

圖 1 為迴轉式壓縮機上支座含閥片與護片實際結構圖，上支座含閥片與護片結構為泵組零件重要零組件之一，本文主要針對閥片以及護片進行探討，圖 2 為上支座含閥片與護片數學模型示意圖，閥片與護片是透過鉚釘與上支座進行鉚合為一組件，整體壓縮機進行運轉時，會有高壓氣體與冷媒於壓縮機中進行循環，閥片最主要在於當壓縮機運轉於高壓點時將會開啟，使高壓氣體與冷媒由上支座氣孔通過，當高壓氣體與冷媒通過後閥片將會閉合並以此為循環，而護片功能重要在於擋住閥片，避免閥片因氣體壓力過大而斷裂，因此在迴轉式壓縮機運轉過程中，閥片開啟和閉合與護片接觸作動，產生異音之虞。

為了確認閥片與護片組件是否為此型壓縮機在 800Hz 至 1200Hz 高噪音頻帶的可能噪音來源，因此發展出噪音評估的診斷方法與流程，首先實驗設計對 3 組相同的上支座含閥片與護片組件結構進行振動模態之重複性實驗，因護片結構甚小，所以係以一微小衝擊錘敲擊護片，同時量測聲音響應，敲擊護片表面不同位置，量得聲音壓力自身功率頻譜密度函數，並得到結構自然頻率以及操作變形振型(ODS)，也建構閥片與護片組件包含接觸元素效應之有限元素模型，並進行理論模態分析(TMA)，分析結果求得結構自然頻率與模態振型。

將聲音壓力自身功率頻譜密度函數所得之操作變形振型(ODS)與分析之振動模態進行比對，驗證理論分析結果之合理性，而此噪音診斷流程並無法進行完整之模型驗證，因護片結構很小，不能進行完整的實驗模態分析(EMA)，所以選擇進行聲音量測，但由於實驗品質不夠好，故以聲音壓力自身功率頻譜密度函數及操作變形振型(ODS)與分析進行比對，並以分析結果做為輔助診斷，對噪音進行影響性評估。

3. 閥片與護片組件之實驗與有限元素分析方法

為了確認閥片與護片組件是否為振動與噪音來源，故制定診斷流程與方法，實驗方法是對 3 組上支座含閥片與護片組件進行重複性實驗，再透過實驗與有限元素分析進行比對驗證分析結果之合理性，本節分為 2 小節，分別說明實驗與分析之方法，3.1 為閥片與護片組件之振動模態實驗以及 3.2 為閥片與護片組件有限元素之振動模態分析。

3.1 閥片與護片組件之振動模態實驗

圖 3(a)、(b)為上支座含閥片與護片組件實際結構佈點與敲擊點方向示意圖，由於閥片已經鉚合在護片底下，因此僅能針對護片部分進行實驗，因護片結構微小，選用加速規恐會有質量效應影響，故進行聲音之量測，於護片之表面共規劃了 6 個量測點數，每一量測點之敲擊為 Y 方向。

圖 3(c)為上支座含閥片與護片組件實際敲擊位置圖，3、4、5 號點因結構太小無法敲擊到，所以敲擊中間點的位置。圖 4 為上支座含閥片與護片組件實

驗架設圖，實驗訊號量測儀器為頻譜分析儀(Siglab)，以小型衝擊錘(084A17)為驅動器，以麥克風(PCB 130D20 SN 21922)為感測器，以移動衝擊錘，固定麥克風於 1 號點之方式進行實驗，實驗點數共 6 點，因此會得到 3 組聲音壓力自身功率頻譜密度函數、結構自然頻率與操作變形振型(ODS)，後續將與理論模態分析(TMA)所得結構自然頻率與模態振型進行比對探討。



圖 1 上支座含閥片與護片實際結構圖

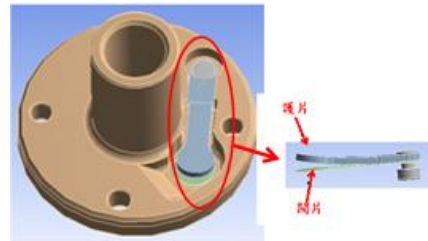
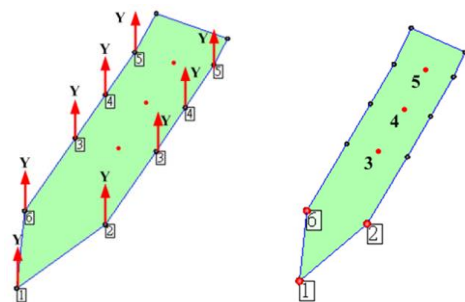


圖 2 上支座含閥片與護片數學模型示意圖



(a) 實際結構佈點示意圖



(b) 敲擊點方向示意圖 (c) 實際敲擊位置圖

圖 3 上支座含閥片與護片組件實驗點數規劃圖



圖 4 上支座含閥片與護片組件實驗架設圖

3.2 閥片與護片組件有限元素之振動模態分析

圖 5 為上支座含閥片與護片組件有限元素模型圖，進行理論模態分析(TMA)選用元素為立體元素 SOLID186 以及接觸元素 CONTACT174、TARGET170，有 7 組接觸條件，材料則使用等向性材料，上支座楊氏係數為 125.8GPa，密度為 7243.65Kg/m³，閥片楊氏係數為 210GPa，密度為 7684.2Kg/m³，護片楊氏係數為 200GPa，密度為 7871.9Kg/m³，鉚釘楊氏係數為 200GPa，密度為 7850Kg/m³，蒲松比皆為 0.29，以 free-mesh 進行分割，元素共有 15266 個、節點共有 25609 個，將上支座底部設定位移限制，6 個自由度皆設定拘束，且無外力輸入。

接觸模擬則分為一體成型與滑動接觸，圖 6 為上支座含閥片與護片接觸模擬示意圖，閥片與護片之間、閥片與上支座之間實際結構為滑動接觸，而有限元素模型則模擬為標準接觸(Standard)，圖 6(a)為閥片與護片接觸模擬示意圖，標準接觸(Standard)將閥片設定為 CONTACT174(主動接觸件)，護片設定為 TARGET170(被接觸件)，圖 6(b)為閥片與上支座接觸模擬示意圖，閥片設定為 CONTACT174(主動接觸件)，上支座設定為 TARGET170(被接觸件)，其他部分之接觸則設定為一體成型，分析模擬得到之結構自然頻率與模態振型後續將與實驗之結構自然頻率與操作變形振型做完整探討。

4. 閥片與護片組件噪音診斷結果與討論

圖 7(a)-(c)為閥片與護片組件聲音壓力自身功率頻譜密度函數圖，由 3 組上支座含閥片與護片組件之重複性實驗，聲音壓力頻譜圖取同點進行比較，X 軸為頻率(Hz)而 Y 軸為振幅值，每個峰值所代表的結構自然頻率皆有標示頻率值，三組聲壓頻譜圖最低頻率分別為 5190Hz、5440Hz、5640Hz，最高頻率則分別為 14400Hz、14900Hz、15600Hz，因麥克風為感測器，低頻部分響應並不明顯。3 組實驗所得之聲音壓力頻譜圖，呈現出趨勢的一致性，因此 3 組實驗可看出重複性，為了將 3 組實驗與有限元素分析結果做一比對因此彙整出表 1。

表 1 為閥片與護片組件實驗與分析對應之自然頻率總表，由實驗與分析之振動模態與結構自然頻率進行比對，進一步對有限元素模型接觸模擬進行修正，得到最接近實際結構之模擬方式，表中實驗之結

構自然頻率誤差最多 8%，其他皆在 5% 以內，且可看出實驗第一組至第三組結構自然頻率值呈現出由低至高的趨勢，3 組實驗結果結構自然頻率產生之差異性，主要因為上支座含閥片與護片結構是由鉚釘鎖固，3 組鉚釘鎖緊程度並不相同才會產生頻率差異性。三組實驗差異性比較後，針對操作變形振型(ODS)與有限元素分析之模態振型進行比對而彙整出圖 8。

圖 8(a)-(e)為閥片與護片組件操作變形振型(ODS)與有限元素分析之模態振型比較圖，以第二組實驗之操作變形振型(ODS)為合理之假設與 FEA 模態振型進行比對，圖 8(a)為 O-01 與 F-04 比對，模態振型並沒有對應，主要原因可由分析之模態振型看出是護片 X 方向的第一彎曲模態，而 X 方向並無法進行實驗，因此模態並沒有對應。圖 8(b)為 O-02 與 F-05 振型比對，物理意義為 Y 方向之護片第二彎曲模態，實驗的 3 號、4 與 5 號點同時上下擺動與分析模態振型對應。

圖 8(c)-(e)為 O-03 與 F-06、O-04 與 F-07 以及 O-05 與 F-10 之振動模態比對，O-03 與 F-06、O-04 與 F-07 模態振型物理意義為 Y 方向之護片第一扭轉模態，實驗部分可看到 1、2 與 4 號點的上下擺動，局部模態振型之作動可與分析有所對應。O-05 與 F-10 模態振型物理意義為 Y 方向之護片第一扭轉模態，實驗部分可看到 1、2 與 4 號點的上下擺動，因實驗局部模態振型之作動與分析有所對應。圖 8(d)為 O-06 與 F-11 模態振型比對，物理意義為 Y 方向之護片第二彎曲模態，可明顯看出實驗之不動點為 2、5 號點，與分析所得模態振型明確對應。

5. 結論

泵組合件在壓縮過程藉由閥片開啟而釋放高壓冷媒，閥片在開啟與閉合時，與護片之接觸動作，可能造成此型號壓縮機高噪音之異音疑慮，因此發展診斷方法與流程，以確認閥片與護片組件是否為此型壓縮機運作之振動或噪音源。診斷流程中透過實驗手法的建立，以探討閥片與護片之結構模態特性，由於護片結構甚小且以麥克風為感測器，量測得知在低頻的部分響應並不明顯，5000Hz 以上高頻部分則獲得 6 個結構自然頻率。

也透過有限元素分析，建構起閥片與護片組件之接觸模擬之分析技術，同時進行理論模態分析(TMA)，分析得到結構自然頻率與對應之模態振型並與實驗進行比對，進一步修正分析模型之接觸設定，由實驗與分析振動模態比對結果可看出模態振型的對應性雖不明顯但仍有局部性的對應，而分析與實驗比對頻率範圍是在 5973.1Hz 以上，且分析所得之自然頻率最低頻在 2061.9Hz，由實驗與分析之結果顯示並不在 800Hz-1200Hz 的高噪音頻帶內，所以閥片與護片組件不是此型號之迴轉式壓縮機高噪音頻帶最主要的噪音來源。

為了解此型號迴轉式壓縮機之閥片與護片組件可能產生的噪音問題，故制定噪音診斷程序與方法，因無法進行完整實驗模態分析(EMA)，所以對聲音進行量測，透過有限元素分析之建立與實驗比對驗證達到輔助診斷之應用，所得診斷結果僅針對此型迴轉式壓縮機，後續則可於其他有興趣之零組件運用此噪音

診斷流程。

6. 誌謝

本文承蒙瑞智精密股份有限公司 101 年度產學合作計畫「冷媒壓縮機噪音評價與異音診斷流程之建置與應用」，經費補助，特此致謝。

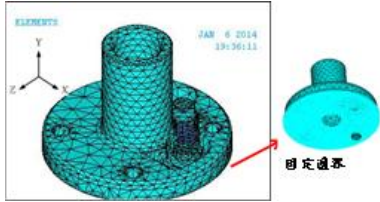
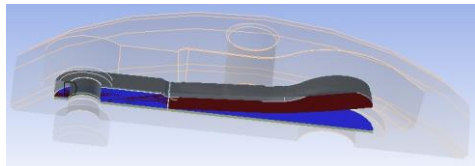
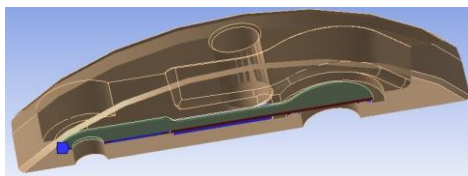


圖 5 上支座含閥片與護片組件有限元素模型圖



(a) 閥片與護片接觸模擬示意圖

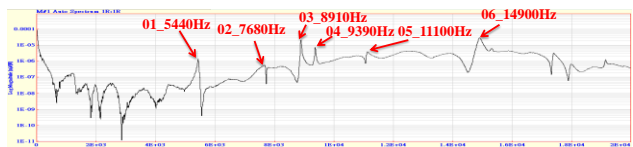


(b) 閥片與上支座接觸模擬示意圖

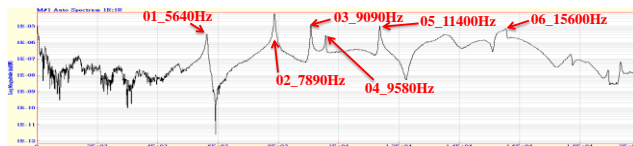
圖 6 上支座含閥片與護片接觸模擬示意圖



(a) 第一組



(b) 第二組

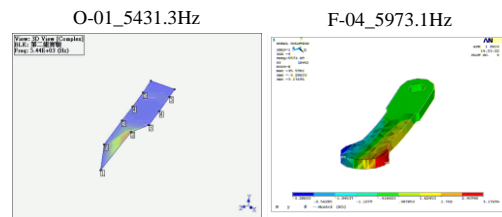


(c) 第三組

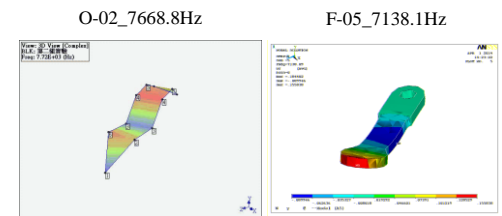
圖 7 上支座含閥片與護片組件聲音壓力頻譜圖

表 1 閥片與護片組件實驗與分析對應之自然頻率總表

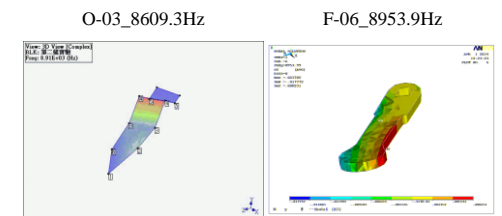
ODS (Hz)	第一組	第二組	第三組	mode	FEA (Hz)	物理意義
--	--	--	--	F-01	2061.9	閥片第一扭轉模態_Y
--	--	--	--	F-02	2352.3	護片第一彎曲模態_Y
--	--	--	--	F-03	2360.9	閥片第一彎曲模態_Y
O-01	5187.5	5431.3	5637.5	F-04	5973.1	護片第一彎曲模態_X
O-02	7537.5	7668.8	7887.5	F-05	7138.1	護片第二彎曲模態_Y
O-03	8725.0	8906.3	9087.5	F-06	8953.9	護片第一扭轉模態_Y
O-04	9193.8	9387.5	9568.8	F-07	9270.5	護片第一扭轉模態_Y
--	--	--	--	F-08	12452.4	閥片第二扭轉模態_Y
--	--	--	--	F-09	13279.7	護片第二扭轉模態_Y
O-05	10906.3	11187.5	11375.0	F-10	13626.5	護片第一扭轉模態_Y
O-06	14412.5	14925.0	15237.5	F-11	16359.6	護片第二彎曲模態_Y
--	--	--	--	F-12	17960.3	護片第二彎曲模態_X



(a) O-01 與 F-04 之模態振型對應圖

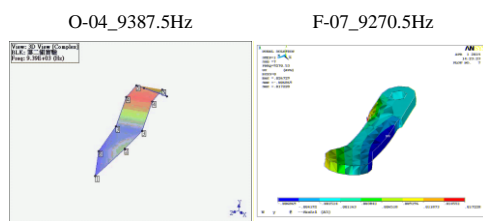


(b) O-02 與 F-05 之模態振型對應圖

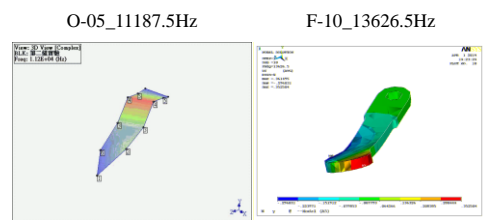


(c) O-03 與 F-06 之模態振型對應圖

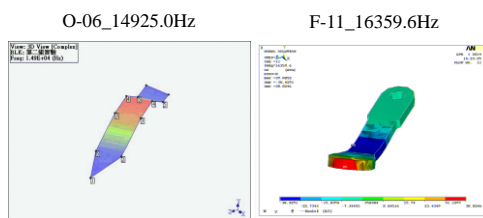
圖 8 閥片與護片組件 ODS 與 FEA 模態振型比較圖



(d) O-04 與 F-07 之模態振型對應圖



(e) O-05 與 F-10 之模態振型對應圖



(f) O-06 與 F-11 之模態振型對應圖

圖 8 閘片與護片組件 ODS 與 FEA 模態振型比較圖(續)

7. 參考文獻

1. 楊煥弟, 壓縮機噪聲振動與空調外機噪聲關係分析, 噪聲與振動控制, 第 1 卷, 第 29 期, 第 149-152 頁, 2009
2. 王栢村, 謝宗廷, 周建中, 陳金龍, 迴轉式壓縮機之噪音特性比較分析, 精密機械與製造科技研討會論文集, 屏東, 論文編號: G002, 2012
3. Zhu, B., Gao, Q., Chen, Z., and Wen, C., Analysis of Acoustic Characteristics of Accumulator of Rotary Compressor, International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, Paper1856, 2008
4. Wang, S., Park, J., Hwang, I. S. ; and Kwon, B., Sound Reduction Of Rotary Compressor Using Topology Optimization, International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, Paper1560, 2002
5. Woo, S., Lee, U., Sung, C., Shin, C.; and Kim, S., Noise Reduction in Two-Cylinder Rotary, International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, paper1897, 2008
6. 王栢村, 陳昱成, 陳勇全, 車架之實驗模態分析實務與振動模態特性探討, 中華民國振動與噪音工程學會第十八屆學術研討會, 台北, 論文編號: C-150, 2010

Simulation and Experimental Investigation on Valve and Protection Leaves Assembly for Noise Evaluation of Rotary Compressor

Bor-Tsuen Wang¹, Chien-Tui Lin¹, Bing-Hsiu Wu¹、Chin-Lung Chen²、Wei-Liang Hsu²、Hsieh-Chang Hung²

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

²Rechi Precision Co., LTD

Abstract

A rotary compressor is known for high noise contribution in the frequency ranges between 800Hz to 1200Hz. The valve and protection leaves assembly in the pump case is functioned to release the high pressure refrigerant during the compressing process through the valve leaf. The valve leaf in contacting the protection leaf involved the open-and-close motion is of concern for its contribution to noise emission during the compressor operation. This work develops the diagnosis procedure to clarify the possible cause of noise and vibration due to the valve and protection leaves assembly. The experimental approach is designed to measure the sound pressure response by using a small hammer applied normally onto the protection leaf. The sound pressure auto spectrum due to the roving impact along the protection leaf can be obtained, and so forth the operational deflection shape (ODS) of the protection leaf in resonances can be visualized. The finite element (FE) model for the leaves assembly consisting of contact pair elements is also constructed and performed theoretical modal analysis (TMA) to get modal parameters. The sound spectra for three different sets of leaves assemblies are measured and revealed similar characteristics, in which the structural resonances can be identified as well as their ODSs. Simulation results show theoretical natural frequencies and their mode shapes are comparable with those ODS. This indicates the FE model is reasonable and can be used for diagnosis purpose. According to the investigation on examining the measured sound spectra and theoretical vibration mode shapes, the valve and protection leaves assembly may not be the cause for the critical bands in the compressor noise. The find out is important, and the investigation procedure is useful for other interested components as well.

Keywords : Rotary Compressor, finite element model, Leaves Assembly, Noise Diagnosis