

結合 CAE 與 EMA 於迴轉式壓縮機之模型驗證

王栢村¹ 林聖傑¹ 楊佩宜¹ 張博鈞¹ 林谷樺²

¹屏東科技大學 機械工程系

²瑞智精密股份有限公司

wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

電腦輔助工程分析(CAE)已經廣泛採用取代傳統的試誤法,以輔助產品的設計模擬分析與響應預測,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。本文旨在探討迴轉式壓縮機的分析模型驗證,以確保分析模型的可靠度。迴轉式壓縮機由多個次系統組成,將分別以 CAE 軟體建構其有限元素模型,並進行理論模態分析(TMA);也分別由實驗模態分析(EMA)與 CAE 理論分析執行模型驗證的程序,透過比較由 EMA 及 TMA 分別求得的結構模態參數,可以據以更新確認分析模型的系統參數,如零件的材料性質及接觸介面設定等。結果顯示,每一個次系統及整體的壓縮機系統模型,由觀察比較結構系統的自然頻率及模態振型有合理的對應,可以達到模型驗證的目的。本文採用由下而上的方式,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。此外,由分析模型可以了解壓縮機內部的振動模態特性,將有助於壓縮機的噪音診斷以及設計變更。本文闡述結合 CAE 與 EMA 於分析模型的驗證方法,採用 CAE 的虛擬測試可以系統化地進行產品設計,有助於加速產品開發的時間與降低成本。

關鍵詞: 迴轉式壓縮機、電腦輔助工程分析、實驗模態分析、虛擬測試。

1. 前言

電腦輔助工程分析(Computer Aided Engineering, CAE)相較傳統試誤法(Try and Error)的方式有著快速對產品進行模擬預測的優點,透過 CAE 的模擬預測快速對產品進行設計變更找出產品的最佳設計參數,以縮短產品開發時程、降低開發成本。

CAE 在工程相關的應用案例,雷[1]等人對空調壓縮機支架進行理論模態分析,透過 CAE 之分析模型的幫助,推測壓縮機支架與安裝螺栓斷裂的原因為滾動體與內外圈的接觸點區域強度不夠所導致,並針對此區域進行加強,成功找出壓縮機支架與安裝螺栓斷裂的根本原因。秋與溫[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。溫等人[3]對旋轉型唇型油封進行分析,利用田口法分析與 CAE 模擬預測的方式找出旋轉型唇型油封最佳的參數,最後提供旋轉型唇型油封一有效的設計工具。邱等人[4]以 3 種不同材質之高爾夫球頭進行理論模態

分析與模型驗證,以 ANSYS Workbench 進行最佳化設計,求得 3 種材料之楊氏係數與蒲松比,將材料進行最佳化分析設計,並與實驗進行比對驗證,可快速預測最佳之材料參數。分析模型可靠度的確認以及模型修整上,王等人[5]對工具機線性滑軌進行模型驗證,對線性滑軌之單件以及組件進行模型驗證,透過單件模型驗證修整模型的材料參數,接著組件模型驗證修整模型的接觸面,最後得到工具機線性滑軌等效於實際結構之有限元素模型。王等人[6]對儲液瓶零組件進行模型驗證,利用自然頻率、楊氏係數與密度之間關係修整零件之材料參數,得到儲液瓶零件等效的材料參數。王等人[7]接著利用堆疊得概念,將零件與零件分層次組合,層層確認的儲液瓶的接觸介面,最後完成儲液瓶之模型驗證。王等人[8]對壓縮機中的閥片與護片組件進行噪音評估,衝擊鏈對護片此組合結構進行激振,獲得結構之聲音自身功率頻譜函數、操作模態振型(ODS)。接著與建構閥片與護片組件等效之有限元素模型,與 ODS 進行比較,最後得出閥片與護片組件之結構振動模態,應該不是迴轉式壓縮機高頻帶噪音之主因。王等人[9]接續對壓縮機泵組合進行模型驗證,應用 Bonded、No separation、Standard 三種接觸模擬的方式,模擬泵組合之滑動接觸,最後得到泵組合之等效模型。王等人[10]對迴轉式壓縮機本體組合結構進行模型驗證,依壓縮機的組裝配合方式分階段進行模型驗證,透過分階段的進行模型驗證,逐一確認各階段有限元素模型之接觸介面,最後得到迴轉式壓縮機本體結構之等效模型。

本研究旨在應用 CAE 建立迴轉式壓縮機接觸模擬技術。對壓縮機進行模型驗證,並藉由分析模型觀察實驗中無法量測到的內部元件振動模態,以探討壓縮機運轉中特定噪音頻帶之可能來源,並提供壓縮機的在開發上的設計參考,最後發展迴轉式壓縮機之虛擬測試技術。

2. 迴轉式壓縮機應用與組成介紹

迴轉式壓縮機主要應用於冷氣機、熱泵系統、乾衣機、除濕機、空調機等,作為室內溫度與濕度的調節器。迴轉式壓縮機主要由過濾瓶、泵成品、轉子成品、定子成品、完整泵成品所組成,如圖 1 所示。迴轉式壓縮機冷凍循環流程為透過馬達啟動提供泵成品運作的動力來源,利用泵成品偏心軸與缸體腔室對低溫低壓氣態冷媒進行壓縮,迫使冷媒變成高溫高壓氣態的冷媒,經由冷凝器與外部進行熱交換,將高溫高壓的氣態冷媒凝結成高壓常溫的液態冷媒,之後透過冷媒控制器調節冷媒流量變成低壓液態冷媒,接著低壓的液態冷媒經由

蒸發器從外部吸收熱量蒸發成為氣態冷煤，最後回到過濾瓶進行儲存，等待下一次的冷煤壓縮。

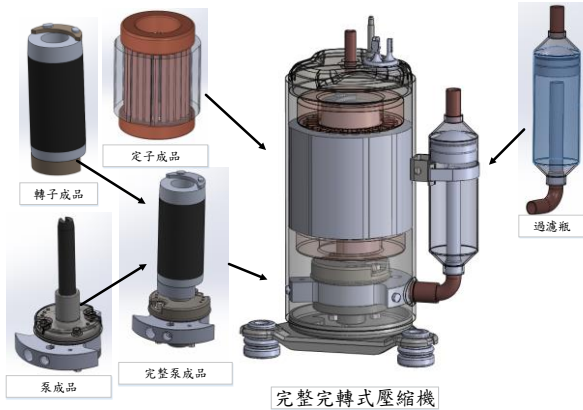


圖1 壓縮機組成示意圖

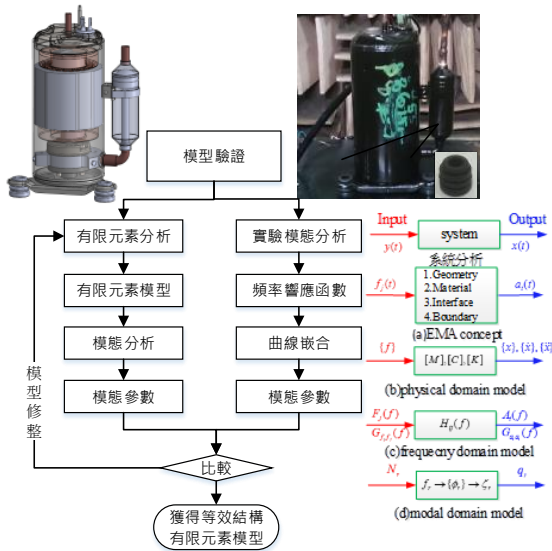


圖2 模型驗證流程圖

3. 模型驗證流程與理念說明

圖 2 為模型驗證流程圖，以實驗模態分析的量測手法與理論模態分析的手法確認迴轉式壓縮機之系統參數。參照迴轉式壓縮機的組成，將迴轉式壓縮機分解成過濾瓶、轉子成品、泵成品、完整泵成品次系統，並對次系統與零件進行材料參數以及接觸介面確認。

3.1 有限元素分析

本節為說明迴轉式壓縮機各次系統與系統有限元素分析項目，如表1壓縮機各次組合模型對應表的所示，依序對迴轉式壓縮機次系統到最後的迴轉式壓縮機系統進行確認。

有限元素模型採用二次立體元素 (Soild185、Soild186、Soild187) 建構有限元素模型，與面對面接觸元素 (Contact 174、Targer170) 模擬壓縮機零件間的接觸行為，採用 Free Mesh 對模型進行元素分割。表2為迴轉式壓縮機零件之材料參數表。

表3為壓縮機組裝配合之接觸參數表，迴轉式壓縮機的組裝方式，有銲接、鉚接、螺栓鎖固、熱套等，配合方式有滑動接觸、三點銲、條銲、壓鑄等。

銲接透過單獨加熱熔點較低的焊料，無熔化工件本身，藉由焊料的毛細作用連接兩相異工件；螺栓鎖固為利用斜面產生的接觸面正壓力抵抗扭轉摩擦阻力，達到結合兩相異零件的方式；熱套為利用材料熱漲冷縮的特性，透過將其中配合件加熱使之膨脹，接著將未加熱零件置入其中，待加熱零件冷卻收縮，最後兩者配合成型。當在壓縮機的組裝方式是以銲接、鉚接、螺栓鎖固、熱套等方式結合時，分析假設上為一體成型，而在有限元素分析採用 Bonded 進行接觸模擬。

滑動接觸則為壓縮機在運轉的過程中有相對運動、分離等情況，如泵之零件軸、葉片、環與缸體、上支座、下支座的滑動接觸；壓縮機運轉的過程中會有相對運動產生，如：閥片與上支座；或是壓條、托架與過濾瓶外殼非銲接，在分析假設中均為接觸面法向無分離、切向可些許滑動，在有限元素分析採用 No Separation 進行接觸模擬。

三點銲與條銲為利用融熔的局部焊料連接兩相異工件的方式，分析假設中只有焊料與結合件為一體成型其餘為接觸面為法向無分離，幾何模型上分別繪製出三點銲與條銲的幾何模型，在有限元素分析接觸模擬利用 Bonded、No Separation 接觸行為模擬融熔區域與未融熔區域。

壓鑄為將熔凝性較好的金屬，如鋁、鋅、鎂、銅等壓鑄合金，以快速高壓注入耐高熱鋼製成的模具內，利用鋼模成型組裝配合工件，在數學模型中假設為一體成型，但在有限元素模型中以幾何共面的方式模擬壓鑄行為。

表1 壓縮機各次系統模型對應表

次系統	數學模型	有限元素模型	佈點規劃
泵成品			
轉子成品			
完整泵成品			
定子成品			
過濾瓶成品			
迴轉式壓縮機			

表2 迴轉式壓縮機零件材料參數表

泵單一零組件總表							
零組件名稱	上支座	下支座	缸體	軸	環	葉片	消音罩
材質名稱	灰鑄鐵	粉末冶金	灰鑄鐵	球墨鑄鐵	灰鑄鐵	高速工具鋼	
材料密度 (kg/m ³)	7243.65	6858.70	7095.88	7099.72	7219.42	8075.47	7850.77
修正後楊氏係數 (GPa)	125.8	145.0	141.5	165.0	134.6	246	145.0
蒲松比	0.29	0.29	0.29	0.28	0.29	0.24	0.29
本體外殼單一零組件總表							
零組件名稱	頂蓋	本體	底蓋	銅內管	壓條	托架	腳架
材質	冷軋鋼板	冷軋鋼板	冷軋鋼板	C1120T	不鏽鋼	SPCC	SPHC
材料密度 (kg/m ³)	8217.15	7786.5	7873.5	8960.09	7850.04	8012.76	7899.88
校正後楊氏係數 (GPa)	186	186	217.0	103.2	195	100.0	225.0
蒲松比	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
過濾瓶單一零組件總表							
零組件名稱	本體	內管	內管	橋板	接續管	彎管	鉸料
材質	SPCC	SPCC	SPCC	SPCC	C1220T-1/2H	C1220T-1/2H	
材料密度 (kg/m ³)	7685.2	7923.5	7923.5	4750.5	8582.7	8895	7850
校正後楊氏係數 (GPa)	194.6	195	195	116.7	113.5	118.5	200
蒲松比	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.3
定子與轉子單一零組件總表							
零組件名稱	頂配重塊	底配重塊	轉子成品	鋁鑄塊	定子成品	銅繞線	螺栓
材質							
材料密度 (kg/m ³)	6470	6470	7610	2436	8010	3700	7850
校正後楊氏係數 (GPa)	96.5	87.5	41.5	60	235	5	200
蒲松比	0.28	0.28	0.28	0.33	0.28	0.3	0.3

3.2 實驗模態分析

圖3為實驗架設示意圖，採用移動衝擊錘固定加速規方式進行實驗量測，實驗架設以尼龍繩懸吊，模擬自由邊界，以及實驗室開發之量測軟體(Sound and Vibration Measurement System, 簡稱SVM)配合訊號截取卡(NI-9234)量測結構之頻率響應函數以及關聯性函數，並將實驗結果匯入曲線嵌合軟體進行曲線嵌合，得到結構之模態參數，包含其自然頻率、模態振型、阻尼比。

表4為壓縮機各系統之實驗規劃表，表中根據結構的振動特性對過濾瓶、轉子成品、泵成品、完整泵成品以及迴轉式壓縮機，在結構的外殼方向(θ)規劃與外殼軸向(z)規劃量測點。

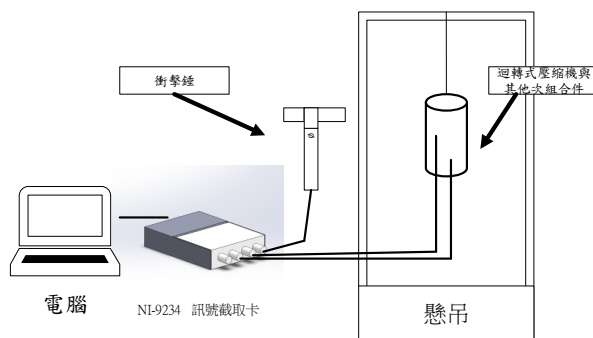


圖3 實驗架設示意圖

表3 壓縮機組裝配合之接觸參數表

組裝方式	壓縮機之區域	接觸模擬方式	區域示意圖
1. 鉚接 螺栓鎖固	1. 過濾瓶零件間結合 2. 壓縮機外殼與零件間結合.	接觸: Bonded	
2. 熱套	1. 定子與壓縮機外殼 2. 轉子成品與軸		
3. 滑動接觸	1. 軸、環、葉片與其他泵零件間接觸 2. 閥片與上支座間接觸 3. 壓條、托架與過濾瓶外殼	接觸: No Separation	
4. 點焊	1. 缸體與壓縮機外殼	接觸: Bonded No Separation	
5. 條焊	1. 腳架與壓縮機底蓋		
6. 壓鑄	1. 轉子矽鋼片與鋁鑄	幾何: 一體成型	

表4 壓縮機各系統之實驗規劃表

次系統	佈點說明	實驗架設
泵成品	62個量測點 ● 消音罩：20點 ● 缸體：10點 ● 下支座：16點 ● 軸：5點	
轉子成品	16個量測點 ● 頂鋁鑄：2點 ● 轉子：12點 ● 底鋁鑄：2點	
完整泵成品	63個量測點 ● 頂配重：5點 ● 轉子成品：48點 ● 底配重：5點 ● 缸體：5點	
定子成品	定子48點 ● 圓周：16點 ● Z方向：3點	
過濾瓶成品	66/53個量測點 ● 外殼：60/48 ● 吸氣管：2/2點 ● 彎管：4/3規劃	
迴轉式壓縮機	206個量測點 壓縮機外殼：117點 過濾瓶：53點 頂蓋：12點 腳架：9點 吸、吐氣管及彎管：各1點	

4. 模型驗證結果與討論

本節分為 6 小節說明迴轉式壓縮機過濾瓶、轉子成品、泵成品、完整泵成品、定子成品、迴轉式壓縮機模型驗證結果：

4.1. 過濾瓶模型驗證結果

表5為過濾瓶模型驗證結果比較表，由表中自然頻率誤差，可看出分析與實驗除了 F-10&E-02 誤差大於 5%外，其餘均在 5%以內，F-10&E-02 對應之物理意義為彎管與內管的擺動模態，推測誤差的可能原因分析模型未將內管與外殼干涉配合的預應力考慮所導致；F-07&E-01 內管的擺動模態、F-09&E-02 為彎管與內管的擺動模態、F-11&E-03 與 F-12&E-04 外殼($\theta=2$)的模態、F-13&E-05 與 F-14&E-06 外殼圓周($\theta=3$)方向之模態，分析 F-07 與 F-09 與實驗結果無對應的原因，推測為實驗中加速規黏貼位置剛好為內管與彎管結構的節線位置，導致實驗只能量測出內管與彎管單一對稱模態振型；局部模態振型對應示意圖與頻率響應函數重疊圖中，實驗中明顯峰值均與分析的模態振型有合理對應。綜合以上實驗與分析之比對結果，過濾瓶之模型驗證結果合理。

4.2. 轉子成品模型驗證結果

表6為轉子模型驗證結果比較表，由表中自然頻率誤差，可看出分析與實驗除了 F-17&E-04 誤差大於 4%外，其餘均在 1%以內，分析中 F-09 至 F-14 對應之物理意義為轉子局部的模態；F-15&E-03 為轉子斜邊的擺動模態；F-17&E-04 為轉子擺動(θ, z)=(2,1)；轉子局部模態振型對應示意圖與頻率響應函數重疊圖之比較圖中可看出實驗中明顯之峰值均有與分析對應；轉子最近點與最遠點在合成頻率響應函數與關聯性函數中可看出其趨勢一致，代表曲線嵌合結果可靠，綜合以上分析與實驗之模態參數比對結果，轉子之模型驗證結果可靠。

4.3. 泵成品模型驗證

表7為泵成品之模型驗證結果比較表，表中最自然頻率誤差介於-7.22%~9.40%頻率誤差，最小頻率誤差為 1.72%；F-07&E-01 與 F-08&E-02 缸體彎曲模態與軸彎曲模態；F-09 閥護片之模態；F-10 軸之膨脹模態；F-11&E-03 與 F-12&E-04 為消音罩(r, θ)=(1,2)；F-13&E-05 與 F-14&E-06 缸體半邊擺動模態與軸彎曲模態；由於實驗只能量測到泵成品外部的響應，故 F-09&F-10 與實驗沒有對應；泵成品局部模態振型對應示意圖與頻率響應函數重疊圖之比較圖中可看出實驗中明顯之峰值均有與分析對應；泵成品最近點與最遠點在合成頻率響應函數與關聯性函數中可看出其趨勢一致，代表曲線嵌合結果可靠，綜合以上分析與實驗模態參數比對結果，泵成品之模型驗證結果可信度高。

4.4. 完整泵成品模型驗證

表8完整泵成品之模型驗證結果，表中 Oa 為頂鋁鑄塊位置的量測到的頻率響應函數，Ob 為缸體位置的

量測到的頻率響應函數，整體自然頻率誤差介於-3.52%~8.65%之間，F-07 為軸之旋轉模態；F-08&Ob-01 與 F-09&Ob-02 為轉子與泵之擺動模態(單邊)；F-10&Ob-02 為轉子與泵之擺動模態；F-11&Oa-03 與 F-12&Ob-03 為轉子與泵之擺動模態與閥護片之模態；F-13&Oa-04 為轉子與泵之擺動模態；Oa-05 為轉子擺動模態與缸體擺動。觀察頂鋁鑄塊(A)與缸體位置(B)位置的頻率響應函數圖比較圖(振幅部)中，可看出 A 位置與 B 位置量測到的自然頻率的峰值有偏移的現象，由峰值偏移的型式推測原因為完整泵成品間有間隙存在，導致當對轉子成品進行激振時響應無法傳遞至泵成品組的缸體位置，使得激振出完整泵成品兩個局部模態。完整泵成品的頻率誤差均在合理的誤差範圍內，經由以上分析與實驗模態參數比對結果，完整泵成品之模型驗證結果可靠。

4.5. 定子成品模型驗證

表9定子成品模型驗證結果比較表，表中自然頻率誤差介於-5.33~7.78%之間，最小頻率誤差為 1.89%，F-007&F-008 與 E-01 為(θ, z)=(2,0)；F-009 至 F-033 為銅繞線模態；F-033&E03 與 E-02 &F-034 為(θ, z)=(3,0) 模態；F-035 至 F-077 為銅繞線模態以及定子局部模態；F-079&F-80 為(θ, z)=(4,0)模態；F-87 為定子的膨脹模態。分析 F-08 與 F-09 與實驗結果無對應的原因，推測為實驗中加速規黏貼位置或者是實驗的激振位置剛好位為於結構的節線位置，導致實驗只能量測出單一對稱模態振型；F-033&E03 與 E-02 &F-034 之頻率誤差介於 1.89%至 7.78%之間，推測造成此誤差的原因為分析模型時假設定子結構為真圓，導致定子成品模態物理意義為(θ, z)=(3,0)，但自然頻率值偏移的現象，局部模態振型對應示意圖與頻率響應函數重疊圖中，實驗中明顯峰值均與分析的模態振型有合理對應。

4.6. 迴轉式壓縮機模型驗證結果

表10為迴轉式壓縮機自然頻率總表，表中自然頻率介於 8.02 至-8.57%之間，最小頻率誤差為-0.74%；分析與實驗的比對上除 O-01、O-02、O-06、O-07、O-09 與分析無對應外，其餘均與分析的結果有合理對應，推測 O-01、O-02、O-06、O-07、O-09 與分析中沒有對應的原因為實際結構中有分析模型尚未考慮到因素引起的模態，如：電接頭與銅繞線接合線、潤滑油的影響、馬達磁場的影響。

表11迴轉式壓縮機模態振型對應表，F-07&O-03、F-08&O-04 為壓縮機外殼頂部與過濾瓶之擺動模態，對應壓縮機分析模型內部的物理意義為泵成品_軸的擺動；F-09&O-05 為壓縮機外殼與過濾瓶之擺動模態，對應分析模型內部的物理意義為完整泵的成品的旋轉模態；F-10&O-08 為壓縮機托架的擺動模態；F-11&O-10 為壓縮機外殼與腳架以及過濾瓶內管之模態；-13&O-12 與 F-12&O-13 為壓縮機外殼與腳架擺動模態以及過濾瓶內管擺動模態，F-12 與 F-13 出現順序顛倒的原因，推測為分析模型中假設過濾瓶內管之幾何外型為真圓，導致模態振型之物理意義相同，出現的順序以及頻

率不同的情況。迴轉式壓縮機內部結構的振動特性，依序為泵成品之軸、過濾瓶內管、泵成品之軸與過濾瓶內管。分析與實驗之模態振型與自然頻率結果均有合理對應，代表迴轉式壓縮機之分析模型貼近於實際結構。

5. 結論

對迴轉式壓縮機次系統到系統確認的流程，得到迴轉式壓縮機得等效分析模型，未來可將次系統到系統的確認流程應用於其他產品開發上；建立起迴轉式壓縮機泵之滑動接觸、缸體與外殼之三點鉸、腳架與底蓋之條鉸、外殼與定子之熱套、轉子成品之壓鑄的模擬方式，未來可將分析模型的分析假設與模擬技術應用於產品設計上；得到迴轉式壓縮機得等效分析模型，並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，未來可將分析模型應用於迴轉式壓縮機之輔助噪音診斷上。

6. 致謝

本文承蒙瑞智精密股份有限公司 103 年度產學合作計畫「壓縮機與空調機系統組裝匹配對振動噪音之影響評估」經費補助，特此致謝。

7. 參考文獻

- [1] 雷振宇, 麻秦凡, 龔俊, 高貴, 2012, 「振動 CAE 分析在空調壓縮機支架設計中的應用」, *機械翻造*, 第 08 期, 第 20-23 頁。
- [2] 丘曉宏, 溫驪, 2015, 「基於 ANSYS 的除濕機底盤強度分析及結構優化」, *家電科技*, 第 005 期, 73-75 頁。
- [3] 溫志湧, 郭威伸, 李春穎, 簡江陵, 2011, 「Design Methodology for the Minimization of Contact Width between Pressure Lip Seal and Shaft」, *中國機械工程學刊*, 第 32 卷, 第 5 期, 第 419-428 頁
- [4] 邱武耀, 蔣蕙婷, 陳彥伊, 邱評新, 2012, 「利用 ANSYS workbench 多目標最佳化預測材料機械性質」, *第二十屆中華民國振動與噪音工程學術研討大會*, 彰化, 論文編號: D-04
- [5] 王栢村, 謝宗廷, 陳正陽, 周芳俊, 2011, 「工具機線性滑軌之模型驗證」, *北京科技大學第六屆學術交流研討會屏東科技大學*, 屏東 論文編號: B06
- [6] 王栢村, 吳秉修, 林建敦, 周建中, 陳金龍, 2013, 「儲液瓶單一零組件之模型驗證與材料參數探討」, *北京科技大學第八屆學術交流研討會*, 屏東, 論文編號: B25。
- [7] 王栢村, 林建敦, 吳秉修, 周建中, 陳金龍, 2013, 「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。
- [8] 王栢村, 林建敦, 吳秉修, 陳金龍, 徐維良, 謝長鴻, 2014, 「閘片與護片組件之模擬與實驗對迴轉式壓縮機之噪音評估」, *精密機械與製造科技研討會*, 屏東, 論文編號: J023。
- [9] 王栢村, 林建敦, 吳秉修, 陳金龍, 徐維良, 謝長鴻, 2014, 「迴轉式壓縮機之泵零件與泵組合件之

模型驗證」, *第二十二屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*, 彰化, 論文編號: B2-2。

- [10] 王栢村, 林建敦, 吳秉修, 林聖傑, 陳金龍, 謝長鴻, 2014, 「迴轉式壓縮機本體與組合件模型驗證」, *中國機工程學會第三十一屆全國學術研討會*, 台中市, 論文編號: 03190。

表5 過濾瓶模型驗證結果比較表

FEA 模態數	EMA			頻率 誤差 (%)	物理意義	
	自然 頻率 (Hz)	模態 數	自然 頻率 (Hz)			阻尼 比(%)
F-07	1204.7	--	--	--	彎管振動 (內管振動)	
F-08	1213.3	E-01	1238.9	0.193	-2.07%	彎管振動 (內管振動)
F-09	2727.7	--	--	--	內管與彎管振動	
F-10	2986.8	E-02	3467.3	0.118	-13.86%	內管與彎管振動
F-11	4117.3	E-03	4105.3	0.228	0.29%	儲液瓶外殼 (0,Z) = (2,1)
F-12	4124.8	E-04	4309.0	0.460	-4.27%	儲液瓶外殼 (0,Z) = (2,1)
F-13	5650.4	E-05	5771.5	0.375	-2.10%	儲液瓶外殼 (0,Z) = (3,1)
F-14	5702.9	E-06	5812.0	0.246	-1.88%	儲液瓶外殼 (0,Z) = (3,1)

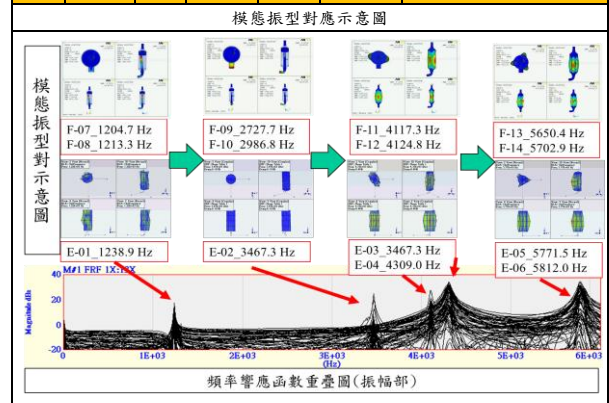


表6 轉子成品模型驗證結果比較表

FEA 模態數	EMA			頻率 誤差 (%)	物理意義	
	自然 頻率 (Hz)	模態 數	自然 頻率 (Hz)			阻尼 比(%)
F-07	9213.3	--	--	--	轉子振動	
F-08	9214.1	E-01	9179.9	2.031	0.37%	轉子振動
--	--	E-02	11275.0	1.412	--	轉子振動(中間振動)
...
F-15	15447.0	E-03	15415.0	1.534	0.21%	轉子振動(斜邊)
F-17	17453.0	E-04	16634.0	1.181	4.92%	轉子振動(0,Z)=(2,1)
F-18	17460.0	--	--	--	--	轉子振動(0,Z)=(2,1)

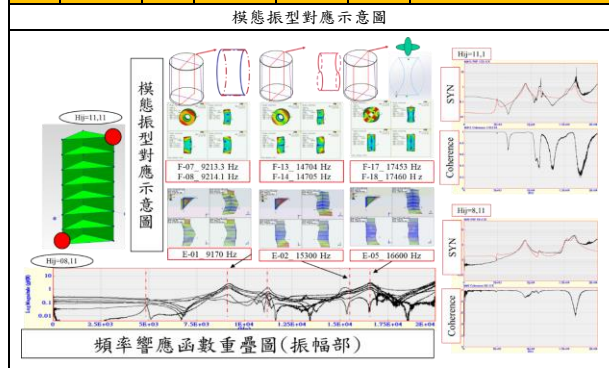


表7 泵成品模型驗證結果比較表

模態數	FEA		EMA		頻率誤差 (%)	物理意義
	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	阻尼比 (%)		
F-07	1733.4	E-01	1868.3	1.462	-7.22%	缸體彎曲模態，軸彎曲模態
F-08	1918.2	E-02	2067.0	0.995	-7.20%	缸體擺動模態，軸彎曲模態
F-09	2421.4	--	--	--	--	閘護片之模態
F-10	3754.4	--	--	--	--	軸之膨脹模態
F-11	4924.2	E-03	4840.9	0.462	1.72%	消音罩(r,θ)=(1,2)
F-12	5050.8	E-04	4950.3	0.365	2.03%	消音罩(r,θ)=(1,2)
F-13	5998	E-05	5482.5	1.108	9.40%	缸體半邊擺動模態，軸彎曲模態
F-14	6269	E-06	5903.3	0.739	6.19%	缸體擺動模態，軸彎曲模態

模態振型對應示意圖

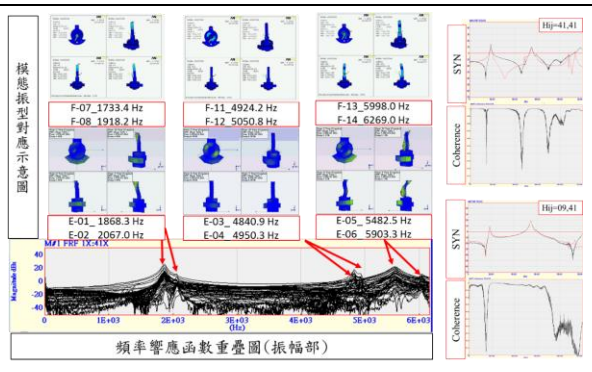


表9 定子成品模型驗證結果比較表

模態數	FEA		EMA		頻率誤差 (%)	物理意義
	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	阻尼比 (%)		
F-007	3193.0	E-01	3371.9	0.161	-5.31%	(0,z)=(2,0)
F-008	3266.3	--	--	--	--	(0,z)=(2,0)
...
F-033	8581.4	E-02	7961.7	1.213	7.78%	(0,z)=(3,0)
F-034	8599.8	E-03	8440.1	1.196	1.89%	(0,z)=(3,0)
...
F-079	14170.0	E-04	13460.0	0.060	5.27%	(0,z)=(4,0)
F-087	15332.0	E-05	16229.0	1.045	-5.53%	膨脹模態

模態振型對應示意圖

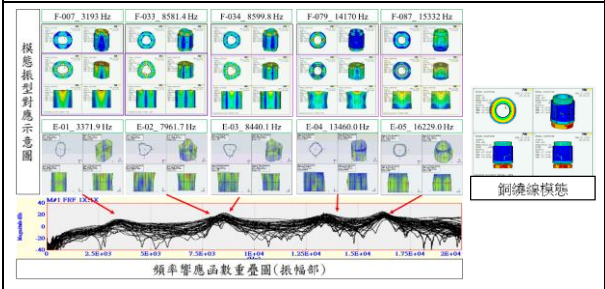


表10 迴轉式壓縮機自然頻率總表

模態數	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	物理意義
F-07	278.9	O-03	284	-1.76%	壓縮機本體外殼輻射濾瓶擺動模態 軸擺動模態
F-08	288.8	O-04	300	-3.71%	壓縮機本體外殼輻射濾瓶擺動模態 軸擺動模態
F-09	430.7	O-05	434	-0.74%	壓縮機本體外殼輻射濾瓶擺動模態 軸擺動模態
		O-06	603		過濾瓶吸氣管擺動模態
		O-07	625		過濾瓶吸氣管擺動模態
F-10	624.2	O-08	690	-9.54%	托架擺動模態
		O-09	784		托架擺動模態
F-11	1041.5	O-10	984	5.84%	壓縮機外殼與腳架擺動模態 過濾瓶內擺動模態
		O-11	1090		壓縮機外殼與腳架擺動模態 過濾瓶內擺動模態
F-13	1274.6	O-12	1180	8.02%	壓縮機外殼與腳架擺動模態 泵軸擺動模態 過濾瓶內擺動模態
F-12	1152.3	O-13	1260	-8.57%	壓縮機外殼與腳架擺動模態 泵軸擺動模態 過濾瓶內擺動模態
F-14	1317.6	O-14	1350	-2.40%	壓縮機外殼與腳架擺動模態 泵軸擺動模態 過濾瓶內擺動模態
F-15	1372	O-15	1450	-5.38%	壓縮機外殼與腳架擺動模態 泵軸擺動模態 過濾瓶內擺動模態

表8 完整泵成品模型驗證結果比較表

模態數	FEA		EMA		頻率誤差 (%)	物理意義
	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	阻尼比 (%)		
F-07	553.22	--	--	--	--	軸之旋轉
F-08	825.85	Ob-01	856	-3.52%	轉子與泵之擺動模態(單邊)	
F-09	877.1	Oa-01	909	-3.51%	轉子與泵之擺動模態(單邊)	
--	--	Oa-02	1780	--	轉子與泵之擺動模態	
F-10	2401.5	Ob-02	2600	-7.63%	轉子與泵之擺動模態	
F-11	2498	Oa-03	2640	-5.38%	轉子與泵之擺動模態，閘護片之模態	
F-12	2810.4	Ob-03	3010	-6.63%	轉子與泵之擺動模態，閘護片之模態	
F-13	2886.7	Oa-04	3160	-8.65%	轉子與泵之擺動模態	
--	--	Oa-05	3990	--	轉子擺動模態，缸體擺動	

模態振型對應示意圖

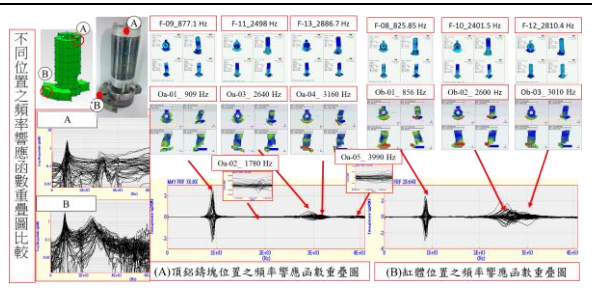


表11 迴轉式壓縮機模態振型對應表

F-07_278.99 Hz	O-03_284 Hz
F-08_288.86 Hz	O-04_300 Hz
F-09_430.79 Hz	O-05_434 Hz
F-11_1041.5 Hz	O-10_984 Hz
F-13_1274.6 Hz	O-12_1180 Hz
F-12_1152.8 Hz	O-13_1260 Hz

Integration of CAE and EMA for Model Verification of Rotary Compressor

Bor-Tsuen Wang¹, Sheng-Jie Lin¹,
 Pei-Yi Yang¹, Bo-Jun Zhang¹, Gu-Hua Lin²

¹National Pingtung University of Science and
 Technology Department of Mechanical
²Rechi Precision Co., LTD

ABSTRACT

Computer aided engineering (CAE) technique has been widely adopted to assist product design simulation and response prediction instead of trial-and-error method. Although CAE is a powerful tool, experimental verification and validation of analytical model is of importance. This work aims to verify the analytical model of rotary compressor and ensure the model reliability. The rotary compressor is composed of various subsystems which finite element (FE) models are constructed by CAE software, respectively, to perform theoretical modal analysis (TMA). Both experimental modal analysis (EMA) and CAE are, respectively, conducted and shown the procedures to validate the constructed FE models. Structural modal parameters obtained from EMA and TMA are compared, so the system parameters such as component material properties and contact interface parameters can be updated accordingly. Results show each subsystem as well as the whole system model of the compressor can be well validated by examining system natural frequencies and mode shapes. The bottom-up approach, i.e. from the subsystem level to the system level, in model verification is shown an effective way to build up and validate the complete system model of rotary compressor. In addition, the modal characteristics inside the compressor can be interpreted from analytical model and helpful for noise diagnosis as well as compressor design modification. The integration of CAE and EMA in system model verification is shown. The virtual testing in adopting CAE for product design can be systematically carried out, so as to reduce the time and cut down the cost in product development.

Keywords: Rotary Compressor, Computer Aided Engineering (CAE), Experimental Modal Analysis (EMA), Virtual Testing (VT).