

壓縮機於腳墊邊界之模擬與實驗驗證

王栢村¹、張博鈞¹、梁秀瑋²、林谷樺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

迴轉式壓縮機安置於空調機系統的聯結方式，係放置於橡膠腳墊並以並聯接吸入吐出管路。本文主要是針對迴轉式壓縮機之腳墊邊界的模擬技術進行研究，並探討壓縮機之振動特性，首先對腳墊邊界壓縮機進行實驗模態分析(experimental modal analysis, EMA)，獲得結構之模態參數，此外也建構了壓縮機之有限元素模型，特別之處在於腳墊邊界模擬技巧，係以彈性支撐透過三個軸方向與旋轉方向的等效剛度進行腳墊邊界模擬，由理論模態分析(theoretical modal analysis, TMA)，將獲得的理論模態參數與實驗模態參數進行比對，並以實驗模態參數為校正基準修正理論分析模型，結果顯示壓縮機分析模型結合腳墊模擬方法，可明確得模擬出實際結構之振動特性。為了加速分析效率，本文對壓縮機分析模型進行簡化，並使簡化壓縮機分析模型等效於壓縮機全模型，不僅減少求解時間，且在模態參數的準確度必須兩者相互等效；建構簡化模型的技巧上，也考慮了因忽略複雜幾何而產生的質量效應，結果顯示簡化壓縮機模型足以模擬實際壓縮機之振動特性。未來可將簡化分析模型運用於更高層次的分析需求，例如空調機內部聯接之管路與其他組件的多系統組合分析。

關鍵詞：壓縮機、腳墊邊界、彈性支撐、簡化分析模型、振動響應。

1. 前言

在設計開發低振動噪音壓縮機的同時，除了瞭解本身結構的振動特性外，也須要去探討邊界議題，以橡膠腳墊邊界為例，不同材料的腳墊，便會對壓縮機產生不同的邊界效應，進而影響壓縮機對外的振動傳遞；此外，最佳化分析手法也是在開發設計低振動噪音壓縮機上常用的手段，而最佳化分析是以多次循環求解的方式來找出最接近分析目標的結果，在工程設計上須耗費大量的求解時間，因此透過簡化分析模型，可大量減少分析求解時間，同時達到最初預期之分析目標。

王等人[1]對迴轉式壓縮機以CAE軟體建構有限元素模型，並進行理論模態分析(TMA)，同時也透過實驗模態分析(EMA)求得的壓縮機結構模態參數；最後執行模型驗證的程序，透過比對EMA及TMA分別求得的結構模態參數，進而確認分析模型的系統參數，包含材料性質及接觸介面設定，最終獲得等效實際壓縮機之有限元素模型。Park *et al.* [2]主要是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。Seo *et al.* [3]探討空調機噪音源的傳遞方式，主要

是藉由空氣與結構兩種路徑來傳遞，其中由風扇結構設計可改善空氣傳遞所產生之噪音，以及變更熱交換器排列方式亦可降低系統阻力；在結構傳遞上可由隔音材料裝置於過濾瓶以及改變壓縮機的裝置角度皆可改善結構傳遞所產生之噪音。由於往復式壓縮機在運行加壓時，入口管會發生異常的劇烈振動Liang *et al.* [4]針對此現象進行研究，包含了模態分析求得管常的共振頻帶，以及速度頻譜分析和壓力脈動測量，結果發現影響入口管振動大小之因素來自大的壓力脈動和聲學共振，因此也提出消除振動的解決方式，以擴大收分流管的緩衝體積和調整入口管之長度，和增加彎曲的曲率半徑都是可以避免聲音共振。Woo *et al.* [5]為了降低壓縮機的噪音量，利用修改壓縮機內部零件結構之幾何外型尺寸與邊界條件，藉以改變結構之自然頻率，以避開機器運轉時所產生的轉速倍頻，進而使整體噪音量降低。王等人[6]針對壓縮機之儲液瓶進行模型驗證，分別採用有限元素分析、實驗模態分析將儲液瓶分為八個層次的組合結構，對每一階段組合結構進行EMA、FEA將獲得的自然頻率、模態振型進行比對並修正分析模型，最終獲得完整組合的等效儲液瓶之有限元素模型。

本文運用有限元素分析與實驗模態分析，對迴轉式壓縮機進行理論與實驗量測分析，本文主要目標如下所示：

1. 對腳墊邊界下的壓縮機進行實驗模態分析，求得壓縮機之模態參數，包含自然頻率、模態振型以及模態阻尼比。
2. 利用有限元素分析以彈性支撐的方式模擬實際壓縮機之腳墊邊界，透過模型驗證流程，確認理論分析模型之腳墊邊界參數。
3. 透過簡化全模型壓縮機幾何來建構簡化分析模型，同時加入等效質量並確認物理性值的等效性，達到縮短分析計算時程的目標。
4. 最終透過模型驗證流程，確認簡化分析模型與壓縮機全模型之等效性，便有助於輔助預測迴轉式壓縮機在實際邊界的振動響應。

2. 壓縮機腳墊邊界之模擬與驗證

本節說明壓縮機腳墊邊界之模擬與驗證，並針對壓縮機腳墊邊界之實驗方法進行說明，同時在有限元素分析軟體建構分析模型時，則是延用文獻[1]迴轉式壓縮機等效分析模型，作為本次壓縮機腳墊邊界模擬所採用的分析模型；最後透過模型驗證流程，圖1為模型驗證流程圖，將理論模態分析與實驗模態分析所求得的模態參數進行比對，如有誤差則透過重複的修正模型，直到相互吻合，最終獲得等效於實際腳墊邊界下的壓縮機有限元素模型。

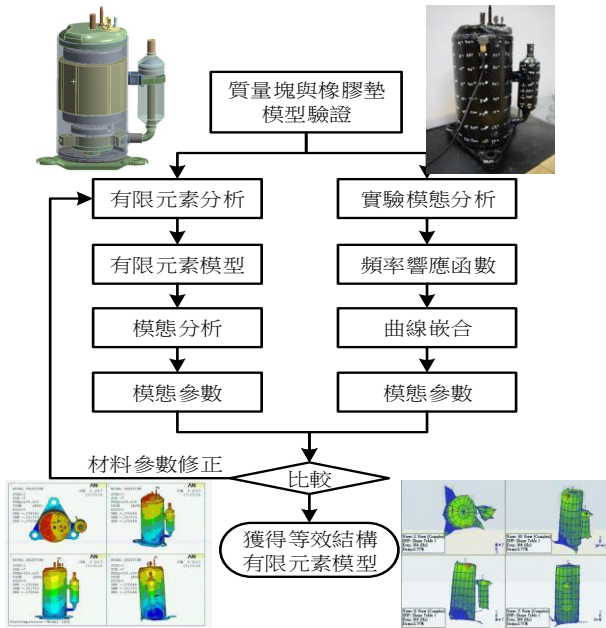


圖 1 模型驗證流程圖



圖 2 壓縮機實驗量測架設圖

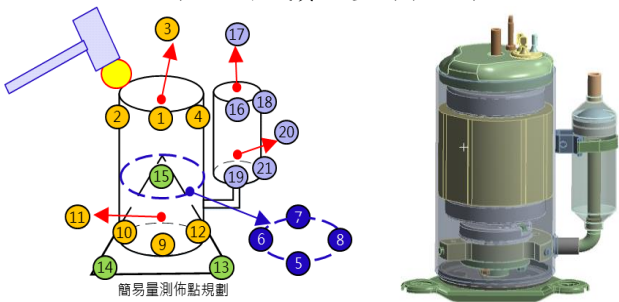


圖 3 壓縮機量測點規劃 圖 4 壓縮機分析模型示意圖

2.1 迴轉式壓縮機腳墊邊界之實驗模態分析

本節針對室外機系統之壓縮機進行實驗模態分析，透過實驗模態分析瞭解實際邊界下壓縮機之振動特性。圖 2 為壓縮機量測實驗之示意圖，採用固定衝擊錘移動三軸向加速度計進行敲擊實驗，實驗量測規劃點共 21 點，圖 3 為壓縮機量測點規劃。透過敲擊實驗結果可得壓縮機之頻率響應函數，最後匯入 ME'scopeVES 曲線嵌合軟體中進行曲線嵌合，擷取模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比。

2.2 迴轉式壓縮機腳墊邊界之有限元素分析

在分析模型的建構上，係先以實際結構幾何來建構有限元素模型，圖 4 為壓縮機有限元素模型示意圖，元素模型採用立方體元素 Solid185、186、187；元素分割採用 Free Mesh 對模型進行元素分割，共 427281 個節點、203234 個元素，位移限制則是以 joint-body to ground 彈性支撐的形式設定於腳架處來模擬橡膠腳墊之邊界效應，三軸方向之剛度 x 、 y 、 z 分別為 4360、4290、42580N/m，旋轉方向 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 則是 101.70、85.94、24.64N-m/rad，最後進行理論模態分析，故不做任何外力負荷設定，由理論模態分析可求得壓縮機結構之模態參數，包含自然頻率、模態振型。

2.3 模型驗證之結果與討論

表 1 壓縮機腳墊邊界之自然頻率總表

| Mode | EMA | Mode | FEA | 誤差% | 物理意義 |
|------|-----------|------|-----------|-------|----------|
| | 自然頻率 (Hz) | | 自然頻率 (Hz) | | |
| E01 | 5.68 | F01 | 5.67 | 0.18 | X軸平移 |
| -- | -- | F02 | 5.67 | -- | Y軸平移 |
| E02 | 16.5 | F03 | 16.45 | 0.30 | Z軸旋轉 |
| E03 | 19.9 | F04 | 19.82 | 0.40 | Z軸平移 |
| E04 | 24.8 | F05 | 24.84 | -0.16 | Y軸旋轉 |
| -- | -- | F06 | 24.88 | -- | X軸旋轉 |
| E05 | 293 | F07 | 289.63 | 1.15 | 本體、儲液瓶擺動 |
| E06 | 304 | F08 | 300.60 | 1.12 | 本體、儲液瓶擺動 |

表 2 壓縮機腳墊邊界之模態振型總表

| E01-5.68 Hz | E02-16.5 Hz | E03-19.9 Hz | |
|--------------|--------------|---------------|--------------|
| X軸平移 | Z軸旋轉 | Z軸平移 | |
| F01-5.67 Hz | F02-5.67 Hz | F03-16.45 Hz | F04-19.82 Hz |
| X軸平移 | Y軸平移 | Z軸旋轉 | Z軸平移 |
| E04-24.8 Hz | E05-293 Hz | E06-304 Hz | |
| Y軸旋轉 | 本體、儲液瓶擺動 | 本體、儲液瓶擺動 | |
| F05-24.84 Hz | F06-24.88 Hz | F07-289.63 Hz | F08-300.6 Hz |
| Y軸旋轉 | X軸旋轉 | 本體、儲液瓶擺動 | 本體、儲液瓶擺動 |

本文所進行的模型驗證方法主要是以有限元素分析與實驗模態分析所獲得的模態參數作為比對依據，經由比較自然頻率與模態振型，驗證理論分析模型與實際結構的等效性；針對模型驗證結果顯示做以下說明：

1. 由表 1 壓縮機腳墊邊界之自然頻率總表得知，壓縮機分析模型以彈性支撐的設定方式來模擬腳墊邊界，低頻剛體模態的比對上誤差皆在 0.5% 以內，彈性體模態在 1.2% 以內，表示模型驗證成功。
2. 表 2 為壓縮機腳墊邊界之模態振型總表，在低頻率之模態振型比對上，也具有相同物理意義，彈性模態也有合理的對應。
3. 由結果與討論得知，以彈性支撐的設定方式來模擬腳墊邊界，可有效的預測迴轉式壓縮機於腳墊邊界下的振動響應。

3. 壓縮機簡化分析模型之模擬與驗證

在開發室外機的同時，會對分析模型進行響應預測及設計變更，來達到結構輕量化、低噪音低振動的目標，因此對分析模型進行最佳化分析是必經的手段，透過簡化分析模型，可大量減少分析求解時間，亦可達到最初預期之分析目標，因此可把壓縮機內部結構忽略來達到簡化的目的，最終透過理論模態分析求得理論模態參數，作為驗證之比對依據，確認簡化分析模型與全模型之等效性，建立等效壓縮機簡化分析模型。

3.1 簡化分析模型之建構

本節主要說明簡化分析模型之建構方法，簡化方式係將全模型壓縮機模型進行簡化，圖 5 為壓縮機全模型與簡化模型示意圖，簡化方式是將壓縮機內部結構忽略，在簡化的過程中為了使壓縮機簡化分析模型仍保有全模型之物理特性，因此也針對壓縮機之物理特性進行確認達到等效，物理特性包含質心位置、質量以及質量慣性矩。

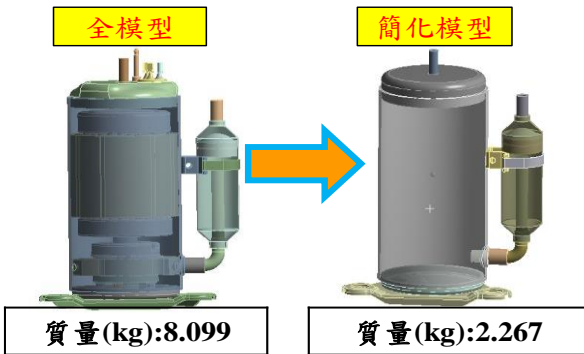


圖 5 壓縮機全模型與簡化模型示意圖

3.2 簡化分析模型之有限元素分析

建構簡化分析模型是採用，Solid185、186、187 元素，並考慮簡化分析模型在經簡化的過程中質量會減少，因此加入 mass 元素補足因簡化而減少得質量，元素分割以 free mesh 進行網格劃分，共 80944 個節點、30130 個元素，位移限制則是與全模型邊界參數相同，以 joint-body to ground 彈性支撐的形式設定於腳架處來模擬橡膠腳墊之邊界效應，最後進行理論模態分析，故不做任何外力負荷設定。

3.3 簡化分析模型之結果與討論

本節透過模態分析來獲得迴轉式壓縮機全模型與簡化分析模型之模態域結果，經由結果比較可得下列幾點結果做說明：

1. 由表 3 全模型與簡化模型之自然頻率總表中，全模型與簡化分析模型在剛體運動上有良好對應，誤差皆在 1.0% 以內。
2. 在自然頻率總表中，彈性體模態能夠對應的模態數較少，推測為壓縮機簡化分析模型因內部零件的簡化所導致模態數對應較少。
3. 表 4 為全模型與簡化模型之模態振型總表，模態振型特性的對應上具有相同的物理意義，顯示全模型與簡化模型在低頻剛體運動上具有良好的等效性。

表 3 全模型與簡化模型之自然頻率總表

| MODE | 全模型 | MODE | 簡化模型 | 誤差% | 物理意義 |
|------|----------|------|----------|-------|----------|
| | 自然頻率(Hz) | | 自然頻率(Hz) | | |
| R01 | 5.67 | P01 | 5.62 | -1.00 | X軸平移 |
| R02 | 5.67 | P02 | 5.62 | -1.04 | Y軸平移 |
| R03 | 16.45 | P03 | 16.42 | -0.23 | Z軸旋轉 |
| R04 | 19.82 | P04 | 19.74 | -0.42 | Z軸平移 |
| R05 | 24.84 | P05 | 24.63 | -0.89 | Y軸旋轉 |
| R06 | 24.88 | P06 | 24.79 | -0.38 | X軸旋轉 |
| R07 | 289.63 | | | | 本體、儲液瓶擺動 |
| R08 | 300.60 | | | | 本體、儲液瓶擺動 |
| R09 | 488.10 | P07 | 464.29 | -5.12 | 儲液瓶擺動 |
| R10 | 566.28 | | | | 儲液瓶擺動 |
| | | P08 | 691.83 | | 儲液瓶擺動 |
| | | P09 | 869.84 | | 儲液瓶擺動 |
| | | P10 | 1100.81 | | 儲液瓶擺動 |
| R11 | 1139.34 | | | | 儲液瓶擺動 |
| | | P11 | 1181.99 | | 儲液瓶擺動 |
| | | P12 | 1320.60 | | 儲液瓶、腳架擺動 |

表 4 全模型與簡化模型之模態振型總表

| R01_5.67Hz | R02_5.68Hz | R03_16.45Hz |
|--------------|--------------|---------------|
| | | |
| X軸平移 | Y軸平移 | Z軸旋轉 |
| P01_5.6170Hz | P02_5.6190Hz | P03_16.4172Hz |
| | | |
| X軸平移 | Y軸平移 | Z軸旋轉 |
| R04_19.82Hz | R05_24.84Hz | R06_24.88Hz |
| | | |
| Z軸平移 | Y軸旋轉 | X軸旋轉 |
| P04_19.74Hz | P05_24.63Hz | P06_24.79Hz |
| | | |
| Z軸平移 | Y軸旋轉 | X軸旋轉 |

4. 結論

本文針對壓縮機於腳墊邊界下之振動特性進行模擬與驗證，由實驗模態分析與有限元素分析求得壓縮機於腳墊邊界下之模態參數，經由模型驗證程序，驗證分析模型之邊界參數；最後也針對了簡化分析模型之建構方法與驗證結果進行探討，綜合以上之實驗與分析結果可得下列幾點結論：

1. 本文建立了壓縮機於腳墊邊界之模擬技術與驗證流程，最終獲得實際腳墊邊界之邊界參數，同時也運用有限元素分析來預測壓縮機於腳墊邊界下的振動特性。
2. 在簡化分析模型之模擬與驗證議題上，提出了快速且有效的驗證方法，包含物理性質、模態域特性的驗證，最終獲得具壓縮機全模型之振動特性的簡化分析模型。
3. 建構簡化分析模型所使用的節點數由 427281 減少至 80944 個，在分析求解上大幅減少了求解時間且有效的預測腳墊邊界下的壓縮機振動響應。
4. 未來可將本文所建構之簡化分析模型加入實際空調機邊界，亦可快速得預測壓縮機於空調機邊界下的振動響應，並提供開發低振動噪音之壓縮機設計之參考依據。

5. 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。

6. 參考文獻

- [1] 王栢村，林聖傑，楊佩宜，張博鈞，林谷樺，2016，「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。
- [2] Park, S. G., Park, J. T., Seo, K. W., and Lee, G. B., 2012, "Comparison of the Sound Quality Characteristics for the Outdoor Unit according to the Compressor Model," *International Compressor Engineering Conference, Purdue University, USA*, Paper 2229.
- [3] Seo, S. H., Park, J. K., and Cho, K. S., 2000, "Source Identification and Reduction of Noise for the Outdoor Unit of Room Air Conditioner," *International Compressor Engineering Conference, Purdue University, West Lafayette, IN, USA*, paper 1486.
- [4] Liang, Z., Li, S., Tian, J., Zhang, L., Feng, C., and Zhang, L., 2015, "Vibration Cause Analysis and Elimination of Reciprocating Compressor Inlet Pipelines," *Engineering Failure Analysis*, 48, 272-282.
- [5] Woo, S., Lee, U., Sung, C., Shin, C., and Kim, S., 2008, "Noise Reduction in Two-Cylinder Rotary," *International Compressor Engineering Conference, Purdue University, West Lafayette, IN, USA*, paper1897.

- [6] 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。

Simulation and Experimental Verification of Rotary Compressor in Rubber Pads Boundary

Bor-Tsuen Wang¹, Bo-Jun Zhang¹,
Hsiu-Wei Liang², Gu-Hua Lin²

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

²Rechi Precision Co., LTD

Abstract

The rotary compressor in the air conditioner is placed on the rubber pads and connected to the inlet and outlet pipe lines. This work aims to study the simulation techniques for the rotary compressor rest on the rubber pads only to examine the compressor's vibration characteristics. Experimental modal analysis (EMA) on the compressor at pad boundary is first conducted to obtain structural modal parameters. The compressor's finite element (FE) model is also constructed. In particular, the pad boundary is simulated by flexible support joint that consists of translational and rotational stiffness effects in three directions, respectively. Through theoretical modal analysis (TMA), the numerically obtained modal parameters can be compared to those from EMA. The FE model can then be calibrated base on the experimentally obtained modal data. Results show the compressor model as well as the pad simulation can properly reveal the practical structural vibration characteristics. To expedite the analysis efficiency, we aim to simply the compressor model such that the simplified compressor model can be equivalent to the full one. Not only the solution time can be reduced, but also the solution accuracy in term of modal parameters must be equivalent to each other for both the simplified and full models. The simplified modeling technique accounts for the equivalent mass effect adjustment while some of the complex geometry bodies are neglected or simplified. Results show the simplified compressor model is good enough to predict and characterize the practical compressor's vibration modes. The developed simplified compressor model can be adopted for advanced analysis need, such as linking to the pipe lines and other components in the air conditioner for system level analysis.

Keywords: compressor, rubber pad, flexible support, simplified analytical model, vibration response.

壓縮機於腳墊邊界之模擬與實驗驗證

王栢村¹、張博鈞¹、梁秀璋²、林谷樺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

迴轉式壓縮機安置於空調機系統的聯結方式，係放置於橡膠腳墊以並聯接吸入吐出管路。本文主要是針對迴轉式壓縮機之腳墊邊界的模擬技術進行研究，並探討壓縮機之振動特性，首先對腳墊邊界壓縮機進行實驗模態分析(experimental modal analysis, EMA)，獲得結構之模態參數，此外也建構了壓縮機之有限元素模型，特別之處在於腳墊邊界模擬技巧，係以彈性支撐透過三個軸方向與旋轉方向的等效剛度進行腳墊邊界模擬，由理論模態分析(theoretical modal analysis, TMA)，將獲得的理論模態參數與實驗模態參數進行比較，並以實驗模態參數為校正基準修正理論分析模型，結果顯示壓縮機分析模型結合腳墊模擬方法，可明確得模擬出實際結構之振動特性。為了加速分析效率，本文對壓縮機分析模型進行簡化，並使簡化壓縮機分析模型等效於壓縮機全模型，不僅減少求解時間，且在模態參數的準確度必須兩者相互等效；建構簡化模型的技巧上，也考慮了因忽略複雜幾何而產生的質量效應，結果顯示簡化壓縮機模型足以模擬實際壓縮機之振動特性。未來可將簡化分析模型運用於更高層次的分析需求，例如空調機內部聯接之管路與其他組件的多系統組合分析。

關鍵詞：壓縮機、腳墊邊界、彈性支撐、簡化分析模型、振動響應。

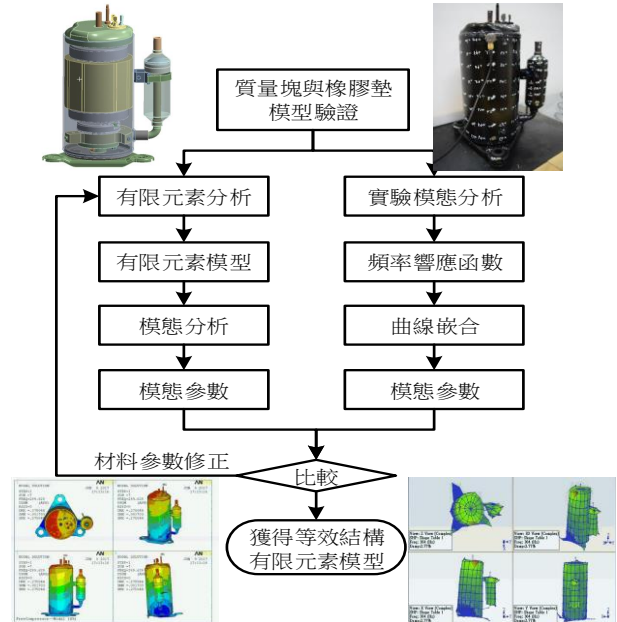
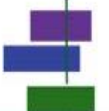


圖 1 模型驗證流程圖



中華民國力學學會年會暨

第 41 屆全國力學會議授權同意書

為推廣科技部優良成果，積極協助產業技術升級，提升我國科技水準，厚植國家經濟發展基礎，並促進產學合作的機會，茲同意無償授權科技部工程科技推展中心將本人於

中華民國 106 年 11 月 24-25 日，由國立成功大學主辦

會議名稱：2017 中華民國力學學會年會暨第 41 屆全國力學會議

口頭發表論文

海報展覽

專題演講

之錄影檔、聲音檔、照片、投影片、論文摘要及全文內容，予以數位典藏並上網公開播放。本資料僅供科技部工程司產學媒合之目的使用。

立同意書人：_____

身分證字號：_____

聯絡電話：_____

中華民國 年 月 日