

壓縮機吸入口及吐出口銅管之振動特性探討

王栢村¹、余易璋¹、王文志²、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

摘要

壓縮機為空調機中主要元件，經由吸入口銅管以及吐出口銅管連接壓縮機運送循環冷媒，以達到空調機的正常運轉，此管路結構即可能為空調機的噪音來源，而其管路振動響應也是重要的議題。本文主要探討壓縮機吸入口及吐出口銅管之振動特性，首先針對吸入口及吐出口銅管所組成的四種直條銅管進行模型驗證，以校正銅管的材料參數，其次建構吸入口及吐出口銅管之有限元素模型，套入此校正的材料參數，透過有限元素分析(FEA)與實驗模態分析(EMA)可分別求結構的模態參數，結果顯示，由 FEA 及 EMA 求得的銅管結構自然頻率與模態振型有良好的對應，可以確認銅管的有限元素模型等效於實際結構，同時可解析銅管結構振動模態物理意義，有助於空調機的振動噪音診斷。

關鍵字：有限元素分析、實驗模態分析、模型驗證、模態參數

1. 前言

現今社會，人類對於生活品質越來越重視，因此生活中的產品性能、品質、可靠度要求越來越高，近年來業界廠商也漸漸地將預售產品之重心成為業界關注之重點之一。空調機設備是現今家庭、辦公大樓...等必需品之一，其中壓縮機為空調系統中主要元件，而空調機在運轉中之噪音與振動會經由內部管路結構傳遞室內，因此希望透過空調機內部路徑結構之振動特性探討，而找出空調機所產生振動噪音之來源，有助於廠商之研發人員改善與設計之參考。

為了解空調機之振動與噪音來源，需進行模型驗證確認模型之可靠度，並探討結構之振動特性，首先進行模型驗證相關之文獻回顧，王等人[1]主要目的為測定材料結構之機械性質包含楊氏係數、普松比、剪力模數，並以碳纖維試片為例，結合有限元素分析與實驗模態分析進行模型驗證，獲得試片之材料參數，且使用加速規與麥克風兩種感測器進行模型驗證比較，確認試片材料參數之正確性。王等人[2]說明結合有限元素分析與實驗模態分析方法做為結構模型驗證理念之應用，並且亦可做為往後其他相關振動之後續研究，以自由邊界之板結構為例，首先，有限元素分析探討四種元素之收斂性分析，則以殼元素較佳，並求得理論模態參數，其次，進行實驗模態分析取得

實驗模態參數，最後將獲得理論與實驗模態參數結果互相驗證。林等人[3]針對自由邊界薄殼結構，結合有限元素分析與實驗模態分析進行模型驗證，主要在於理論數學模型之合理性與正確性，以得到能代表實際結構之等效分析模型。邱等人[4]對手動鑽床振動態特性與模態分析進行探討，由數值解理論之有限元素分析進行模態分析與簡諧分析，求得結構之模態參數與頻率響應函數，再以實驗模態分析所得模態參數，藉由兩種分析結果進行比較驗證，並建構之理論模型正確性與合理性，獲得實際結構等效分析模型。王等人[5]將壓縮機之泵零件與泵組零件進行模型驗證，主要建立泵組零件有限元素模型，其了解其結構特性，並探討泵組零件結構模型之接觸模擬包含一體成型(Bonded)之模擬、標準接觸(Standard)之模擬、無分離接觸(No separation)之模擬。

為探討空調機之異音來源，針對噪音量測之進行文獻回顧與探討，Park *et al.* [6]針對空調機之室外機產生之聲音品質評估，主要噪音源為運轉中之風扇與壓縮機，並了解空調機之噪音傳遞路徑，在進行不同壓縮機時產生的噪音評估，定義是否影響到人身理感受之評估標準。王等人[7]以接受端測試(Receiver Test)探討迴轉式壓縮機與空調機對應之噪音特性比較，探討消音棉與外殼對降低冷氣機噪音的影響，結果顯示消音棉可有效降低中心頻率 1600Hz 以上的頻帶，而冷氣機外殼並無明顯的降噪效果，甚至會引發額外的噪音。Tree *et al.*[8]提到冰箱、冷凍庫以及空調系統中壓縮機為最主噪音來源，其噪音最主要的傳遞路徑有兩種，分別為空氣傳遞與管路之傳遞路徑。Oh *et al.*[9]製冷機組中壓縮機為整體噪音貢獻最大的來源，最主要的部份來自壓縮機外殼之噪音產生，由壓縮機內部結構產生共振效應傳遞至外殼而產生噪音，並針對外殼進行噪音特性之實驗模態分析，作為後續之探討。Huang *et al.*[10]壓縮機以 run-up 實驗方法針對旋轉式壓縮機進行量測，由噪音頻譜瀑布圖了解壓縮機主要噪音頻帶，發現發現在轉速為 2700rpm 時，儲液瓶內管產生 1080Hz 的噪音源，並以加強板進行固定修正，進而降低噪音量。

本文主要探討一空調機，其壓縮機之吸入口及吐出口銅管之模態特性，運用模型驗證之手法進行 FEA (finite element analysis)與 EMA(experimental modal analysis)比較其所得模態參數，取得單一銅管之正確材料參數，將此材料參數套入吸入口及吐出口銅管之有限元素模型進行模型驗證，獲得等效實際結構之模

型。未來可將其分析結果與空調機所產生之振動噪音來源輔助診斷，有助於廠商之研發人員改善與設計之參考。

2. 吸入口及吐出口銅管簡介與研究方法

迴轉式壓縮機為冷氣機系統結構之重要核心，而壓縮機之吸入口及吐出口銅管主要為送出及回收冷媒之重要路徑結構，圖 1 為本次研究之壓縮機冷媒輸送路徑結構實體圖，其結構是由不同尺寸之銅管組合而成，且組合方式如圖 2 說明如下，首先小尺寸銅管置入大尺寸銅管至約 1cm 再進行銲接方法完成不同尺寸銅管之銜接，做為壓縮機運轉時輸送冷媒之重要結構路徑。

本文探討壓縮機吸入口及吐出口銅管之振動特性手法，圖 3 為模型驗證的流程圖，在有限元素分析時，首先建立有限元素模型，模型中包含幾何尺寸、材料參數與邊界條件設定，接著進行模態分析求取理論模態參數，而實驗模態分析時，首先規劃量測方式，包含感測器選用、量測點規劃，接著量測頻率響應函數，進行曲線嵌合擷取實驗模態參數，進一步比對理論與實驗模態參數，並重複修整模型，直到相互吻合，獲得等效於實際結構之有限元素模型，並透過上述模型驗證流程理念，接著進行探討壓縮機吸入口及吐出口銅管之振動特性，首先針對四種不同尺寸之銅管進行材料參數之校正，以確保銅管之材料參數正確性，接續將吸入口及吐出口銅管之有限元素模型參數套入銅管材料參數校正結果，透過有限元素分析 (FEA) 與實驗模態分析 (EMA) 進行模型驗證確認模型之可靠度，並藉由模態振型了解結構模態特性。

3. 不同尺寸銅管之材料參數探討

壓縮機之吸入口及吐出口銅管路徑結構是由不同尺寸之銅管組合而成，因此須針對不同尺寸銅管之材料參數進行校正，以確保銅管之材料參數正確性。圖 4 為不同尺寸之銅管實體圖，共有四種尺寸之銅管須進行材料參數之探討，其材料規格如表 1 銅管規格表，分別訂定為 Type1~ Type4。

3.1 有限元素分析 (finite element analysis, FEA)

依據實際結構定義幾何尺寸、材料參數與邊界條件，建立有限元素模型，並探討以 BEAM4 三維樑元素及 SOLID45 三維線性立方體元素之分析結果與實驗進行比對，了解兩種元素之差異性，希望透過使用 BEAM4 取代 SOLID45 之有限元素模型建構，以加速分析求解時間。

3.1.1 BEAM4 元素

BEAM4 為線架構之樑元素給予銅管外徑與內徑假設為銅管之實際結構。圖 5(c) 為 BEAM4 銅管之有限元素模型圖，材料參數設定，如表 1 銅管規格表，並進行元素分割，且收斂性分析自然頻率誤差在 3% 以下，採自由邊界，進行模態分析與簡諧響應分析，另外在簡諧響應分析時，設定外力 F_y 為 -1 N 於加速

規固定點位置 ($i=1$) 以對應實際量測方向，求解 Y 方向之頻率響應函數，依據上述分析步驟完成 Type1~ Type4 之有限元素分析。

3.1.2 SOLID45 元素

SOLID45 為三維線性立方體元素，建構有限元素模型與銅管之實際結構為相近。圖 5(d) 為 SOLID45 銅管之有限元素模型圖，其材料參數設定，如表 1 銅管規格表，並進行元素分割，且收斂性分析自然頻率誤差在 3% 以下，採自由邊界，進行模態分析與簡諧響應分析，在簡諧響應分析時，給予外力 F_y 為 -1 N 於加速規固定點位置 ($i=1$) 以對應實際量測方向，分別求解 Y 方向之頻率響應函數，依據上述分析步驟完成 Type1~ Type4 之有限元素分析。

3.2 實驗模態分析 (experimental modal analysis, EMA)

規劃實驗量測方式，如圖 6 銅管之實驗量測架設圖，首先銅管部分以懸吊方式架設，模擬結構之自由邊界，感測器選用單軸向加速規 (endevco 27AM1-10)，與驅動器衝擊錘 (PCB-086E80)，將加速規固定於銅管之 1 號量測點，移動衝擊錘敲擊垂直銅管 Y 方向之量測點，如圖 5(b) 所示，共規劃 8 個量測點，透過頻譜分析儀進行實驗量測取得銅管之頻率響應函數，後處理以曲線嵌合軟體 ME'scopeVES 擷取模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比，依據上述實驗步驟分別進行 Type1~ Type4 之實驗模態分析。

3.3 結果與討論

在不同尺寸銅管之材料參數校正上，有限元素分析分別採用 BEAM4 及 SOLID45 元素進行分析，其結果與實驗進行材料參數校正比對，探討兩種元素之差異性影響。在者以這套量測系統進行模型驗證，來驗證等效於實際結構之有限元素模型，並確保銅管之材料參數正確性。

透過有限元素分析與實驗模態分析，分別比較頻率響應函數、自然頻率與模態振型來進行模型驗證，因 Type1~ Type4 之驗證結果皆良好，在此取 Type4 為代表敘述說明，在實驗模態分析與有限元素分析分別獲得 Y 方向之頻率響應函數，圖 7 為 Type4 銅管之頻率響應函數圖，將實驗、曲線嵌合、分析之頻率響應函數重疊比較，確認實驗與分析結果之等效性，比較，圖 7(a) 的 BEAM4 頻率響應函數及 7(b) 的 SOLID45 頻率響應函數，在實驗量測點 (加速規固定位置) 與敲擊點之同點及最遠點皆為對應良好。表 2 為 Type4 銅管之自然頻率總表，表中 ε_r 為自然頻率誤差 (%)、 $\bar{\varepsilon}$ 為自然頻率誤差平均值、 ε_{rms} 為自然頻率誤差平均平方根植、 $\varepsilon_{r,max}$ 為自然頻率誤差最大值、 $\varepsilon_{r,min}$ 為自然頻率誤差最小值，方程式如下：

$$\varepsilon_r = \frac{f_r - f_r}{f_r} \times 100\% \quad (1)$$

其中， f_r 為分析之自然頻率、 f_r 為實驗之自然頻率。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{r=1}^N \varepsilon_r}{N} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^N \varepsilon_r^2}{N}} \quad (3)$$

其中, ε_r 為自然頻率誤差、 N 為自然頻率誤差之數量。

表 2(a) 為 BEAM4 之比對結果, 在實驗自然頻率 E01~E06 對應分析自然頻率分別為 F01~F06、F08, F09、F11, F12、F14, F15, 其依模態物理意義為對稱模態(X,Z)=(1,3)~(X,Z)=(1,8), 其中 X 與 Z 為 x 與 z 方向之節線數, $\bar{\varepsilon}$ 為 1.04%, 未對應之模態 F07, F13 為 z -軸向振動模態、F10 為 z -伸長振動模態, 由表 2(b) SOLID4 比對結果顯示, 在實驗自然頻率 E01~E06 對應分析自然頻率分別為 F01~F06、F08, F09、F11, F12、F14, F15, 其依模態物理意義為對稱模態(θ , Z)=(1,3)~(θ , Z)=(1,8), 其中 θ 與 Z 為圓環與 z 方向之節線數, $\bar{\varepsilon}$ 為 -0.47%, 未對應模態 F07, F13 為 θ -膨脹模態、F10 為 z -伸長振動模態, 因實驗量測方向無法取得上述模態, 故為合理之現象。

接著將有限元素分析與實驗模態分析模態振型進行比較, 圖 8 為理論分析與實驗量測之銅管振動模態振型特性, 從分析模態振型顯示, F01~F06、F08, F09、F11, F12、F14, F15, 其模態物理意義為對稱模態(θ , Z)=(1,3)~(θ , Z)=(1,8), 與實驗 E01~E06 模態振型對應相當吻合。透過模型驗證手法獲得銅管之正確材料參數, 表 3 為不同尺寸銅管之材料參數表, 利用 BEAM4 校正銅管材料參數分別接近為 100GPa; SOLID45 則為 110 GPa, 接續將吸入口及吐出口銅管之有限元素模型參數套入此校正的材料參數, 進行模型驗證來確認模型之可靠度。

經由模型驗證結果, BEAM4 及 SOLID45 元素在頻率響應函數與模態振型比對相當吻合, 而自然頻率 f_r 平均誤差 1.04% 以下, 因此吸入口及吐出口銅管以 BEAM4 元素建構有限元素模型取代 SOLID45 以加速分析求解時間。

4. 壓縮機吸入口及吐出口銅管之模型驗證

壓縮機為空調機中主要元件, 經由吸入口銅管以及吐出口銅管連接壓縮機運送循環冷媒, 以達到空調機的正常運轉, 此管路結構即可能為空調機的噪音來源, 而其管路振動響應也是重要的議題, 本節依照模型驗證流程, 透過有限元素分析(FEA)與實驗模態分析(EMA)進行模型驗證確認模型之可靠度, 並藉由模態振型了解銅管結構模態特性。

4.1 壓縮機吸入口銅管之模型驗證

本小節針對吸入口銅管進行模型驗證, 透過分析與實驗結果比對, 包含自然頻率(f_n)、模態振型(ϕ_n)、模態保證指標(MAC), 獲得等效於實際結構之有限元素模型, 未來可應用於空調機振動噪音源輔助

診斷和廠商之研發人員改善與設計之參考。

首先說明, 吸入口銅管結構由 Type2、Typ3 銅管組合而成, 如圖 9(a)所示。圖 9 (c) 為吸入口銅管有限元素模型圖, 元素採用 BEAM4 三維樑元素, 其銅管銜接處以元素搭接方式進行接合, 假設為一體成型, 材料參數設定, 如表 3 不同尺寸銅管之材料參數表, 並進行元素分割, 且收斂性分析 ε_r 在 3% 以下, 位移限制於壓縮機儲液瓶及冷氣機底部制振器位置設定固定邊界, 並進行模態分析與簡諧響應分析, 在簡諧響應分析時, 給予外力 F_x 為 -1 N 於加速規固定點位置($i=17$)以對應實際量測方向, 求解 X 方向之頻率響應函數。

在其規劃實驗量測方式, 參考圖 10 吸入口銅管之實驗量測架設圖, 感測器選用三軸向加速規(endevco 65-100), 與驅動器衝擊錘(PCB-086E80), 將加速規固定於銅管之 17 號量測點, 移動衝擊錘敲擊垂直銅管 XYZ 方向之量測點, 如圖 9(b)所示, 共規劃 41 個量測點, 其中 1~33 號量測點敲擊 X 方向; 1~7、17~23、27~33 敲擊 Y 方向; 9~15、35~37 敲擊 Z 方向; 34~41 敲擊 Normal 方向, 透過頻譜分析儀進行實驗量測取得吸入口銅管之頻率響應函數, 後處理以曲線嵌合軟體擷取模態參數, 包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比。

對壓縮機之吸入口銅管結構進行模型驗證, 透過有限元素分析與實驗模態分析, 分別比較頻率響應函數、自然頻率與模態振型來進行驗證, 確認等效實際結構模型之可靠度。在實驗模態分析與有限元素分析分別獲得 X 方向之頻率響應函數, 圖 11 為吸入口銅管之 X 方向頻率響應函數圖($H_{17,17}$), 由實驗、曲線嵌合、分析比較結果, 其趨勢對應良好。比較實驗模態分析與有限元素分析之自然頻率, 表 4 為吸入口銅管之自然頻率總表, 在實驗自然頻率 E01~E04、E06、E07、E09 對應分析自然頻率分別為 F01、F03~F04、F06、F07、F08, 其模態物理意義需搭配圖 12 吸入口銅管之物理意義解讀輔助圖與圖 13 理論分析與實驗量測之吸入口銅管振動模態振型特性, 進行振動特性解讀, 將吸入口銅管分為 M、U、L 管三大部分之來說明, 其振動特性可分為 X、Y、Z 方向振動, 以 F01、F02、F05 舉例說明振動特性, F01: M-X 側向振動、F02: M-U-Y 側向振動、F05: M-U-L-Z 垂直振動, 可由此說明來瞭解其他模態之振動特性, 其 $\bar{\varepsilon}$ 誤差 8.06%, 未對應模態為 F02: M-U-Y 側向振動、E05: M-Z 垂直振動、E08: M、-Y+Y 振動、E10: M-U-L-X 側向振動, 推測可能原因為使用 BEAM4 元素進行有限元素分析無法得到 θ -膨脹模態與伸長模態所造成, 此為合理之現象。

由壓縮機吸入口銅管之模型驗證結果, 頻率響應函數與模態振型比對對應良好, 且表 4 中 FEA+mass 為有限元素模型加入加速規質量效應進行模型驗證以符合實際需求, 其 $\bar{\varepsilon}$ 降為 2.74%,

4.2 壓縮機吐出口銅管之模型驗證

本小節針對吐出口銅管進行模型驗證，透過分析與實驗結果比對，獲得等效於實際結構之有限元素模型。首先說明，吐出口銅管結構由 Type3、Typ4 銅管組合而成，如圖 14(a)所示。圖 14 (c)為吐出口銅管有限元素模型圖，元素採用 BEAM4 元素，其銅管銜接處以元素搭接方式進行接合，假設為一體成型，材料參數設定，如表 3 不同尺寸銅管之材料參數表，元素分割進行收斂性分析， ε_r 在 3% 以下，位移限制於壓縮機本體及冷氣機底部制振器位置設定固定邊界，進行模態分析與簡諧響應分析，另外在簡諧響應分析時，設定外力 F_y 為 -1 N 於加速規固定點位置($i=26$)以對應實際量測方向，求得 Y 方向之頻率響應函數。

其在規劃實驗量測方式，參考圖 15 吸入口銅管之實驗量測架設圖，感測器選用三軸向加速規 (endevco 65-100)，與驅動器衝擊錘(PCB-086E80)，將加速規固定於銅管之 26 號量測點，移動衝擊錘敲擊垂直銅管 XYZ 方向之量測點，如圖 14(b)所示，共規劃 38 個量測點，其中 10~16、20~26、32~38 號量測點敲擊 X 方向;10~38 敲擊 Y 方向;5~8、28~30 敲擊 Z 方向;1~9 敲擊 Normal 方向，透過頻譜分析儀進行實驗量測取得吸入口銅管之頻率響應函數，後處理以曲線嵌合軟體擷取模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比。

對壓縮機之吐出口銅管結構進行模型驗證，透過有限元素分析與實驗模態分析，分別比較頻率響應函數、自然頻率與模態振型來進行驗證，確認等效實際結構模型之可靠度。在實驗模態分析與有限元素分析分別獲得 Y 方向之頻率響應函數，圖 16 為吐出口銅管之 Y 方向頻率響應函數圖($H_{26,26}$)，將實驗、曲線嵌合、分析進行比對，其趨勢對應良好。比較實驗模態分析與有限元素分析之自然頻率，表 5 為吐出口銅管之自然頻率總表，在實驗自然頻率 E01、E02、E04、E05、E07、E09 對應分析自然頻率分別為 F02、F03、F04、F07、F08，其模態物理意義需搭配圖 17 吐出口銅管之物理意義解讀輔助圖與圖 18 理論分析與實驗量測之吐出口銅管振動模態振型特性，進行振動特性解讀，將吐出口銅管分為 M 、 U 、 L 管三大部分之來說明，其振動特性可分為 X 、 Y 、 Z 方向振動，以 F01、F02、F06 舉例說明振動特性，F01: $M-U-Y$ 側向振動、F02: $M-U-X$ 側向振動、F06: $M-Z$ 垂直振動，可依照此說明瞭解其餘模態之振動特性，其 ε_r 為 1.81%，其中 E05、E06 對應 F06、F05; E11、E12 對應 F10、F11 模態成顛倒，未對應模態 F01: $M-U-X$ 側向振動、E03: $U-X$ 側向振動、E 08: $M-U-Y$ 側向振動、E10: $M-U-Y$ 側向振動，推測可能原因為使用 BEAM4 元素進行有限元素分析無法得到 θ -膨脹模態與伸長模態所造成，此為合理之現象。

由壓縮機吐出口銅管之模型驗證結果，頻率響應函數與模態振型比對對應良好，在有限元素模型可加入加速規質量效應進行驗證以符合實際需求。

5. 結論

本文主要探討壓縮機吸入口及吐出口銅管之振動特性，首先針對四種不同尺寸之銅管進行材料參數之校正，以確保銅管之材料參數正確性，並探討 BEAM4 及 SOLID45 元素之分析結果與實驗比對，了解兩種元素之差異性，希望透過使用 BEAM4 取代 SOLID45 之有限元素模型建構，以加速分析求解時間，接續將吸入口及吐出口銅管之有限元素模型參數套入上述校正結果，透過有限元素分析(FEA)與實驗模態分析(EMA)進行模型驗證確認模型之可靠度，並藉由模態振型了解結構模態特性。結果顯示，以 BEAM4 校正銅管材料參數其接近為 100GPa;SOLID45 則為 110 GPa，吸入口及吐出口銅管由 FEA 及 EMA 求得的銅管結構自然頻率與模態振型有良好的對應，可以確認銅管的有限元素模型等效於實際結構。未來可應用於空調機振動噪音源輔助診斷和廠商之研發人員改善與設計之參考。

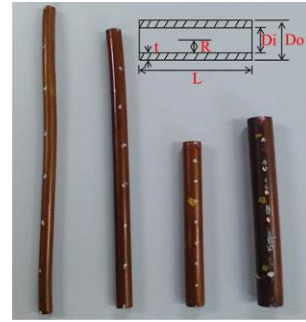
6. 誌謝

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. 王栢村，張年華，黃裕仁，張佐銘，應用實驗模態分析於碳纖維試片之機械性質測定，機械技師學刊，屏東，論文編號：C22，2010
2. 王栢村，曹文昌，應用有限元素與實驗模態分析之結構模型驗證，中華民國振動與噪音工程學會第十屆學術研討會，台北市，第 131-138 頁，2002
3. 林鴻裕，劉思正，王栢村，厲光耀，應用有限元素法與實驗模態分析之圓柱形薄殼結構模型驗證，中華民國振動與噪音工程學會第十一屆學術研討會，基隆，第 198-205 頁，2003
4. 邱武耀，吳柏毅，馮昶欽，陳彥伊，邱柏欽，手動鑽床之振動特性與模態分析，第十七屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，台北，論文編號：A-08，2009
5. 王栢村，林建敦，吳秉修，陳金龍，徐維良，謝長鴻，迴轉式壓縮機之泵零件與泵組零件之模型驗證，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：B2-2，2014
6. S. G. Park, J. T. Park, K. W. Seo, and G. B. Lee, Comparison of the Sound Quality Characteristics for the Outdoor Unit according to the Compressor Model, International Compressor Engineering Conference, Purdue University, USA, Paper 2229, 2012
7. 王栢村，陳柏儉，余易璋，林聖傑，王文志，迴轉式壓縮機組裝於冷氣機之噪音特性探討，精密機械與製造科技研討會，屏東，論文編號：A036，2015

8. D. R. Tree, and W. A. Shryock, Effects of the Suspension System and Housing on the Noise Output of Rotating Vane Compressor, International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, paper197, 1976.
9. J. E. Oh, Y. J. Huh, and C. Y. Ahn, Identification of Vibration-Induced Noise Radiated from Compressor Shell, International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, pp.259-264, 1994.
10. J. P. Huang, Y. S. Hu, S. H. Xia, and J. Xu, Noise Reduction Technology for Inverter Controlled Rotary Compressor, International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, Paper1948, 2010.



Type4 Type3 Type2 Type1

圖 4 不同尺寸之銅管實體圖

8. 圖表彙整



(a)吸入口銅管 (b)吐出口銅管
圖 1 壓縮機冷媒輸送路徑結構實體圖

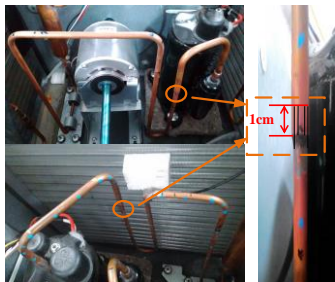
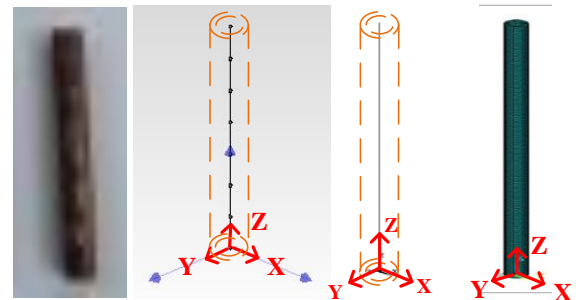


圖 2 不同尺寸銅管之銜接圖



(a)實際結構 (b)實驗量測圖(c) BEAM4 (d) SOLID45
圖 5 銅管之實驗與分析模型示意圖



圖 6 銅管之實驗量測架設圖

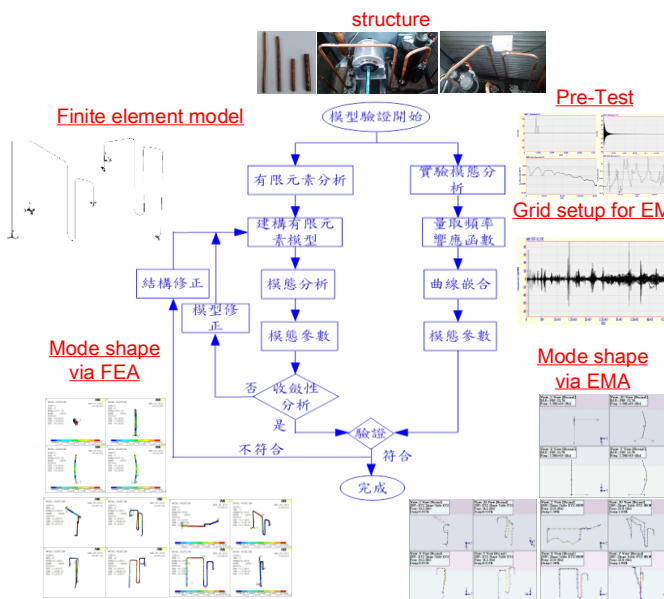
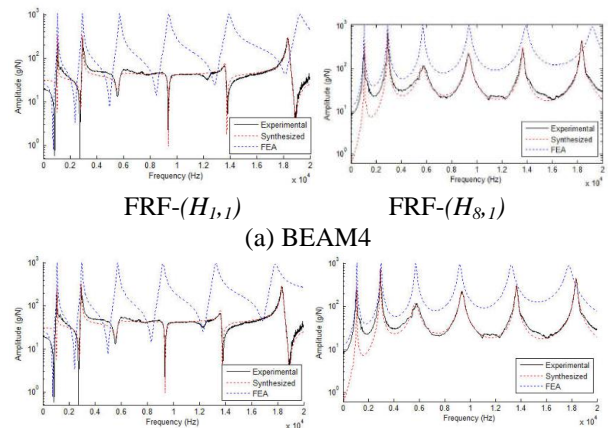


圖 3 模型驗證流程圖



(a) BEAM4
(a) SOLID45
圖 7 Type4 銅管之頻率響應函數圖

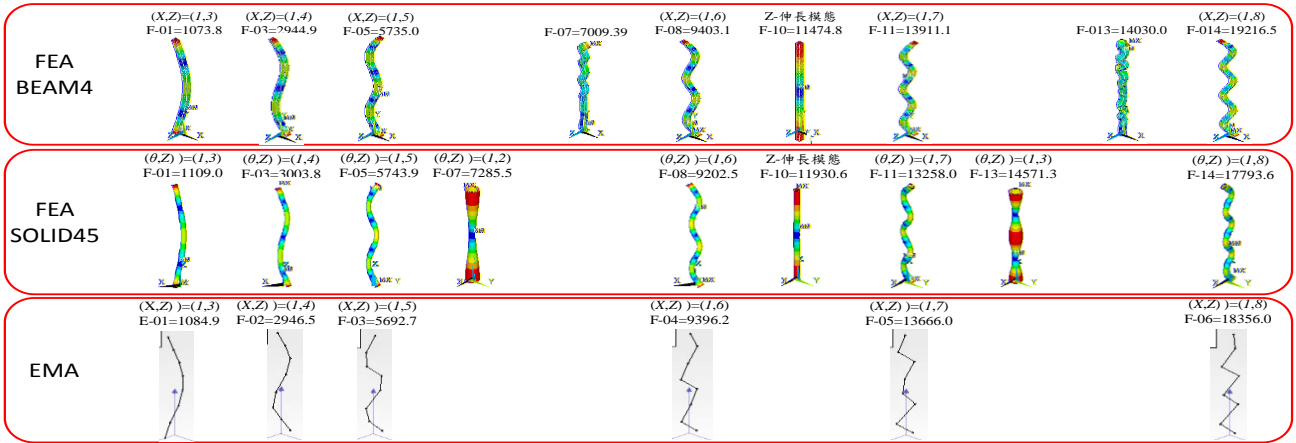
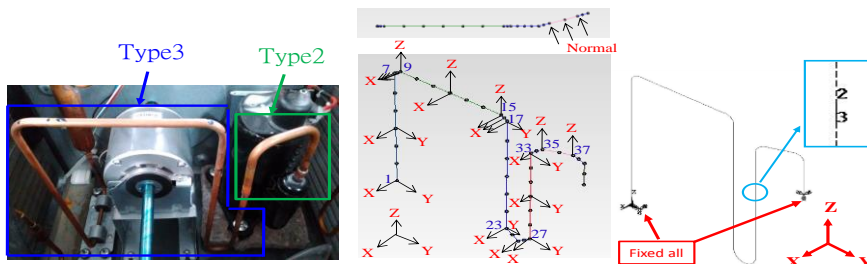


圖 8 理論分析與實驗量測之銅管振動模態振型特性



(a) 實際結構 (b) 實驗量測圖 (c) 有限元素模型

圖 9 吸入口銅管之實驗與分析模型示意圖

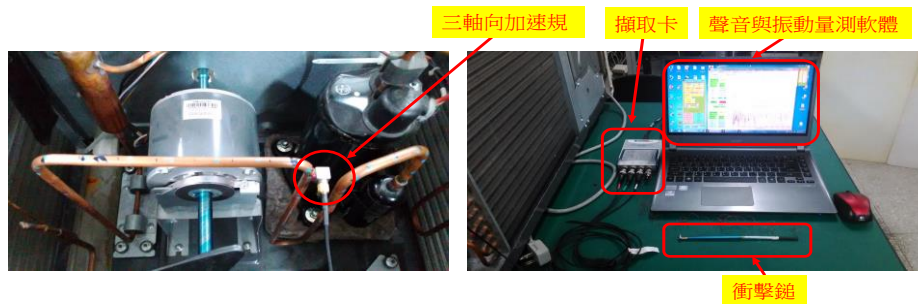


圖 10 吸入口銅管之實驗量測架設圖

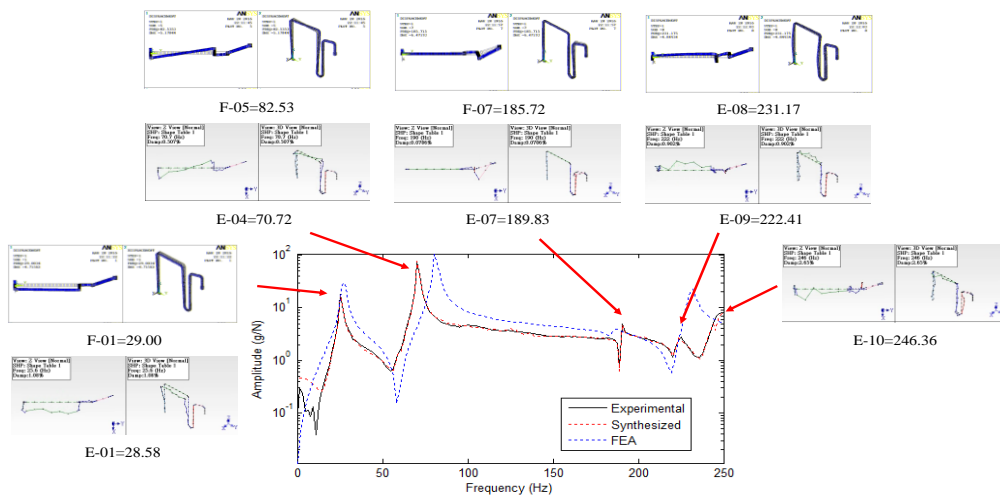


圖 11 吸入口銅管之 X 方向頻率響應函數圖($H_{17,17}$)

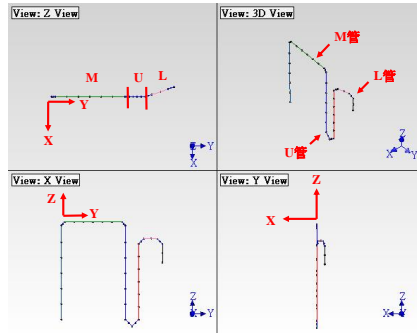
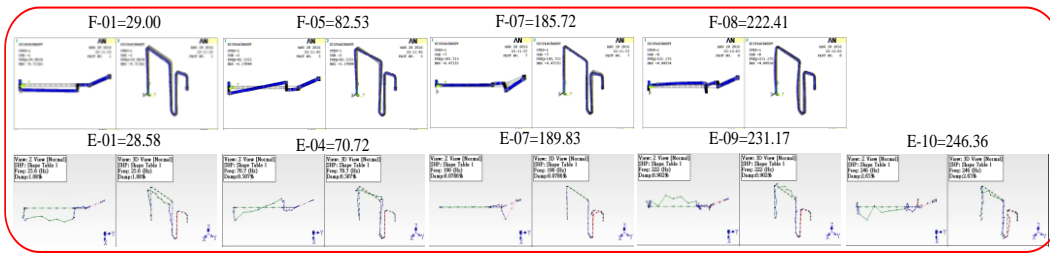
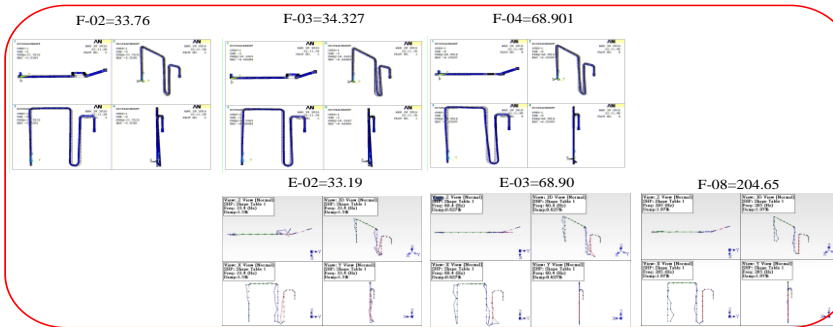


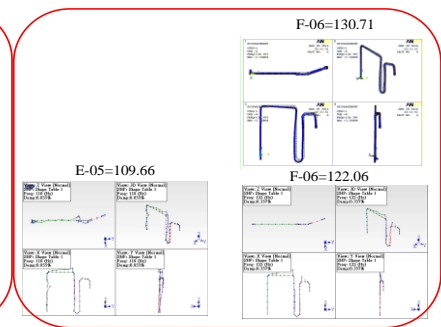
圖 12 吸入口銅管之物理意義解讀輔助圖



X-方向模態振型

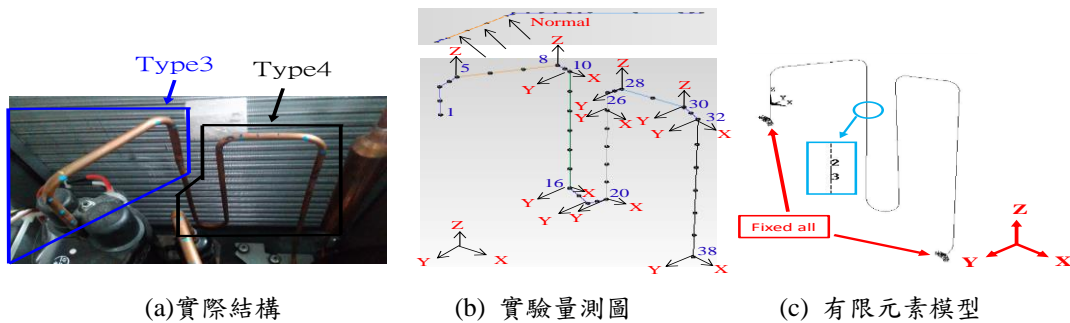


Y-方向模態振型



Z-方向模態振型

圖 13 理論分析與實驗量測之吸入口銅管振動模態振型特性



(a) 實際結構

(b) 實驗量測圖

(c) 有限元素模型

圖 14 吐出口銅管之實驗與分析模型示意圖



圖 15 吐出口銅管之實驗量測架設圖

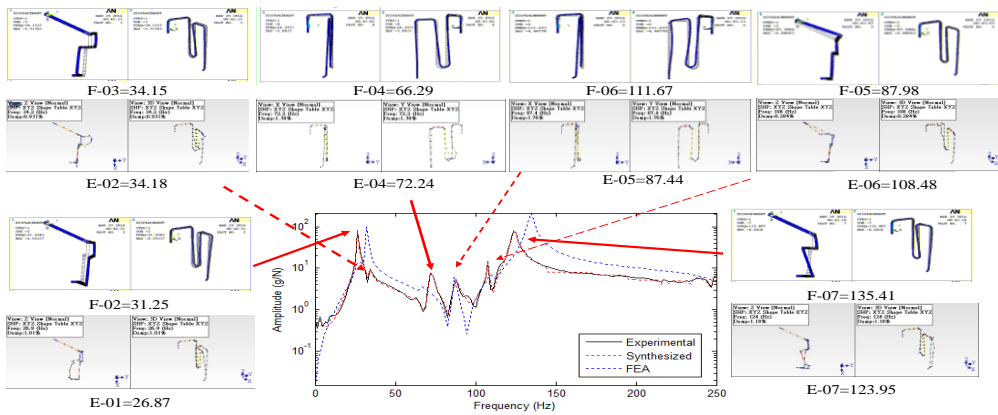


圖 16 吐出口銅管之 Y 方向頻率響應函數圖($H_{26,26}$)

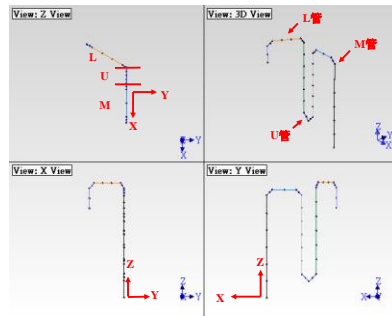
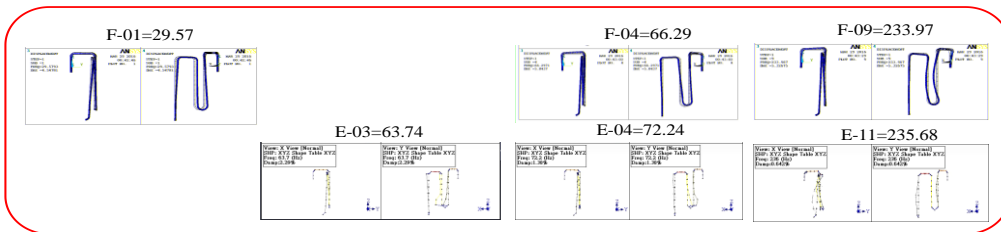
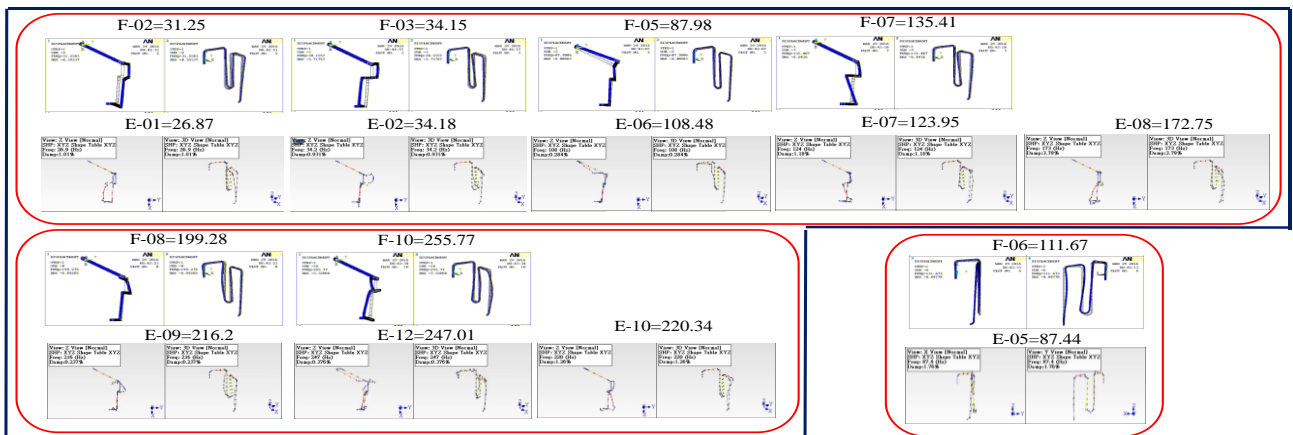


圖 17 吐出口銅管之物理意義解讀輔助圖



X-方向模態振型



Y-方向模態振型

Z-方向模態振型

圖 18 理論分析與實驗量測之吐出口銅管振動模態振型特性

表 1 銅管規格表

Type	外徑 Do (mm)	內徑 Di (mm)	厚度 t (mm)	長度 L (mm)	重量 (g)	密度 (kg/m ³)	材料參數(GPa)	浦松比
Type1	12.7	10.5	1.1	91.78	30.6	8317.363	105	0.34
Type2	9.5	8.1	0.7	80.32	13.6	8749.786	105	0.34
Type3	8	6.4	0.8	138.34	21.15	8448.956	105	0.34
Type4	6.35	4.95	0.7	152.49	15.85	8365.74	105	0.34

表 2 Type4 銅管之自然頻率總表

(a) BEAM4

EMA		FEA		$\varepsilon_r = \frac{f_r - f_r}{f_r}$ (%)	ζ_r	物理意義 (x,z)
Mode	f_r (Hz)	Mode	f_r (Hz)			
E-01	1084.9	F-01	1073.8	-1.03	0.34	對稱模態 (1,3)
		F-02	1073.8			
E-02	2946.5	F-03	2944.9	-0.06	0.52	對稱模態 (1,4)
		F-04	2944.9			
E-03	5692.7	F-05	5735.0	0.74	3.95	對稱模態 (1,5)
		F-06	5735.0			
		F-07	7009.3			z-軸向振動
E-04	9369.2	F-08	9403.1	0.36	1.35	對稱模態 (1,6)
		F-09	9403.1			
		F-10	11474.8			z-伸長模態
E-05	13666.0	F-11	13911.1	1.76	0.50	對稱模態 (1,7)
		F-12	13911.1			
		F-13	14030.0			z-軸向振動
E-06	18356.0	F-14	19216.5	4.48	0.4	對稱模態 (1,8)
		F-15	19216.5			
	$\bar{\varepsilon}$			1.04		
	$\bar{\varepsilon}_{rms}$			2.04		
	$\varepsilon_{r,max}$			4.48		
	$\varepsilon_{r,min}$			-1.03		

(b) SOLID45

EMA		FEA		$\varepsilon_r = \frac{f_r - f_r}{f_r}$ (%)	ζ_r	物理意義 (0,z)
Mode	f_r (Hz)	Mode	f_r (Hz)			
E-01	1084.9	F-01	1109.0	2.23	0.34	對稱模態 (1,3)
		F-02	1109.0			
E-02	2946.5	F-03	3003.8	1.95	0.52	對稱模態 (1,4)
		F-04	3003.8			
E-03	5692.7	F-05	5743.9	0.90	3.95	對稱模態 (1,5)
		F-06	5743.9			
		F-07	7285.5			膨脹模態 (1,2)
E-04	9369.2	F-08	9202.5	-1.77	1.35	對稱模態 (1,6)
		F-09	9202.5			
		F-10	11930.6			z-伸長模態
E-05	13666	F-11	13258.0	-2.98	0.50	對稱模態 (1,7)
		F-12	13258.0			
		F-13	14571.3			膨脹模態 (1,6)
E-06	18356.0	F-14	17793.6	-3.16	0.4	對稱模態 (1,8)
		F-15	17793.6			
	$\bar{\varepsilon}$			-0.47		
	$\bar{\varepsilon}_{rms}$			2.29		
	$\varepsilon_{r,max}$			2.23		
	$\varepsilon_{r,min}$			-3.16		

表 3 不同尺寸銅管之材料參數

Type	銅管尺寸 Φ(外徑)_(1/厚) (mm)	BEAM4					SOLID45				
		重量 (g)	密度 (kg/m ³)	修正後 材料參數 (GPa)	浦松比	Elements	密度 (kg/m ³)	修正後 材料參數 (GPa)	浦松比	Elements	
Type1	12.7_1.1	30.6	8317.363	101.41	0.34	23	8317.363	109.96	0.34	29992	
Type2	9.5_0.7	13.6	8749.786	98.01	0.34	20	8749.786	108.43	0.34	12880	
Type3	8_0.8	21.15	8448.956	100.26	0.34	36	8448.956	109.8	0.34	29362	
Type4	6.35_0.7	15.85	8365.74	102.4	0.34	38	8365.74	110.8	0.34	18330	

表 4 吸入口銅管之自然頻率總表

EMA		FEA		$\varepsilon_r = \frac{f_r - f_r}{f_r}$ (%)	FEA+mass		$\varepsilon_r = \frac{f_r - f_r}{f_r}$ (%)	ζ_r	MAC			
Mode	f_r (Hz)	Mode	f_r (Hz)		Mode	f_r (Hz)			XYZ	X	Y	Z
E-01	25.58	F-01	29.00	13.38	F-01	25.80	0.87	1.13	0.83	0.85	0.85	0.37
-	-	F-02	33.76	-	F-02	32.27	-	-	-	-	-	-
E-02	33.19	F-03	34.32	3.43	F-03	34.01	2.49	0.74	0.61	0.83	0.82	0.79
E-03	60.42	F-04	68.90	14.04	F-04	65.04	7.65	0.63	0.68	0.28	0.8	0.91
E-04	70.72	F-05	82.53	16.71	F-05	74.88	5.89	0.50	0.88	0.88	0.4	0.13
E-05	109.66	-	-	-	-	-	-	0.85	-	-	-	-
E-06	122.06	F-06	130.71	7.09	F-06	124.39	1.90	0.35	0.48	0.22	0.87	0.97
E-07	189.83	F-07	185.72	-2.17	F-07	185.58	-2.23	0.07	0.84	0.93	0.35	0.29
E-08	204.65	-	-	-	-	-	-	1.93	-	-	-	-
E-09	222.41	F-08	231.17	3.94	F-08	228.32	2.65	0.88	0.44	0.55	0.39	0.82
E-10	246.36	-	-	-	-	-	-	2.65	-	-	-	-
	$\bar{\varepsilon}$			8.06			2.74					
	$\bar{\varepsilon}_{rms}$			10.26			4.06					
	$\varepsilon_{r,max}$			16.71			7.65					
	$\varepsilon_{r,min}$			-2.17			-2.23					

表 5 吐出口銅管之自然頻率總表

EMA		FEA		$\varepsilon_r = \frac{f_r - f_e}{f_r} (\%)$	FEA+mass		$\varepsilon_r = \frac{f_r - f_e}{f_r} (\%)$	ζ_r	MAC	MAC	MAC	MAC
Mode	f_r (Hz)	Mode	f_r (Hz)		Mode	f_r (Hz)			XYZ	X	Y	Z
		F-01	29.57		F-01	26.317						
E-01	26.87	F-02	31.254	16.32	F-02	26.754	-0.43	1.01	0.52	0.62	0.63	0.17
E-02	34.18	F-03	34.156	-0.07	F-03	32.626	-4.55	0.931	0.5	0.86	0.65	0.72
E-03	63.74							2.29				
E-04	72.24	F-04	66.297	-8.23	F-04	63.298	-12.38	1.38	0.76	0.93	0.6	0.37
E-05	87.44	F-06	111.67	27.71	F-06	101.63	16.23	1.76	0.03	0.24	0.73	0.89
E-06	108.48	F-05	87.98	-18.90	F-05	87.235	-19.58	0.284	0.19	0.71	0.91	0.74
E-07	123.95	F-07	135.41	9.25	F-07	115.73	-6.63	1.18	0.94	0.36	0.95	0.11
E-08	172.75							3.78				
E-09	216.2	F-08	199.28	-7.83	F-08	199.19	-7.87	0.237	0.66	0.78	0.86	0.05
E-10	220.34							1.26				
E-12	247.01	F-09	233.97	-5.28	F-09	225.17	-8.84	0.376	0.45	0.92	0.65	0.87
E-11	235.68	F-10	255.77	8.52	F-10	250.42	6.25	0.642	0.79	0.55	0.85	0.22
ε				2.39			-4.20					
$\varepsilon_{r,max}$				13.77			10.77					
$\varepsilon_{r,min}$				27.71			16.23					
$\varepsilon_{r,min}$				-18.90			-19.58					

Discussion on Vibration Characteristics of Inlet and Outlet Copper Pipes of Compressor

Bor-Tsuen Wang¹, Yi-Zhang Yu¹, Wen-Chih Wang², Gu-Hua Lin²

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

²Rechi Precision Co., LTD

can be well interpreted and useful for air-conditioner's noise and vibration diagnosis.

Keywords : Finite Element Analysis (FEA),
Experimental Modal Analysis (EMA),
Model Verification, Modal Parameter

Abstract

The compressor is the key component in the air-conditioner. There are inlet and outlet copper pipes connected to the compressor for transferring coolant circularly. Possible noise sources from the pipe structures as well as the vibration response are of concern. This work aims to investigate the inlet and outlet copper pipes' vibration behaviors. First, four different straight copper pipes that are made of the inlet and outlet pipes are performed model verification to calibrate material properties such that the calibrated material parameters can be applied to construct the finite element (FE) model of inlet and outlet pipes. Through finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA), the FE model can be validated by comparing modal parameters obtained from analysis and experiments, respectively. The good comparison of natural frequencies and mode shapes from both FEA and EMA indicates the FE model is equivalent to the practical structure, and the pipes' modal characteristics