

公螺旋轉子之模態特性與模型驗證

王栢村¹ 王文志¹ 黃啟順² 劉家良²

¹國立屏東科技大學機械工程系、²漢鐘精機股份有限公司

國科會計畫編號: NSC -100-2622-E-194-006-CC2¹

摘要

本文結合有限元素分析與實驗模態分析對公螺旋轉子進行模型驗證，主要針對公螺旋轉子實際結構建構其有限元素模型並驗證確認模型之等效性。首先說明模型驗證理念與流程，對公螺旋轉子進行有限元素分析，由模態分析及簡諧響應分析，分別求得理論的模態參數及頻率響應函數，並以軸向(Axial)、垂直(Vertical)及水平(Horizontal)三方向進行實驗模態分析，擷取實驗對應結果進行比對。結果顯示理論分析與實驗求得的模態特性相當吻合，也能有效解讀公螺旋轉子的振動模態物理意義。透過模型驗證手法獲得等效於實際結構之公螺旋轉子有限元素模型，未來可應用此有限元素模型進行響應預測與模型變更之設計分析，以加速產品研發時程。

關鍵詞：有限元素分析、實驗模態分析、模型驗證、螺旋轉子、模態參數。

1. 前言

公螺旋轉子為螺旋式壓縮機內部進行氣體壓縮之主要元件之一，其螺旋式壓縮機主要應用於大型空調、食品冷凍等用途，在科技日新月異的市場競爭及需求上，不斷的對壓縮機進行改良設計或研發新型壓縮機，而研發過程中需耗費大量的開模成本與實際實驗量測分析耗費的時間，大大的影響研發人員進行開發或改良產品的困難度，因此藉由等效於實際結構之有限元素模型進行響應預測與模型變更，可大量減少開發之成本與時程。

王等人[1]應用實驗模態分析技術驗證理論所模擬簡支板之邊界條件與實際邊界之等效性。Wang *et al.* [2]運用理論與實驗模態分析技術進行高爾夫球木桿之模型驗證，分別探討高爾夫球木桿在不同邊界條件下之振動特性，包括自由邊界、手握邊界、固定邊界。王等人[3]利用實驗模態分析與有限元素分析，對高爾夫球頭之碳纖維材料試片進行模型驗證，藉由理論模型材料參數不斷修正，測定出試片之機械性質包括楊氏係數、浦松比與剪力模數，並獲得與實際結構等效之有限元素模型。王等人[4]對一多功能車輛(utility vehicle, UV)車架，應用實驗模態分析技術探討其振動特性，並透過預測分析，來確保UV車架之實驗品質與正確性。王等人[5]結合有限元素分析與實驗模態分析進行工具機之模型驗證，為探討工具機具螺栓接合部分，故針對滑件與基座先分別進行模型驗證，確立各組件之實體結構與有限元素模型等效後，再進而組合成完整螺栓複合結構之模型驗證。王等人[6]同樣以結合理論與實驗模態分析方式，分別對車架、前叉、及車架與前叉組合，以堆疊概念進行結構組合層次之模型驗證，並對驗證後模型進行響應

預測，模擬車架與前叉在受力後之變形量與應力強度是否符合規範。

本文研究目的為確認公螺旋轉子之有限元素模型等效於實際結構，即透過模型驗證流程完成模型確認。在實驗模態分析部分，感測器固定於軸向(A)、垂直(V)及水平(H)三個方向分別同時進行量測，優點是一次可獲得三組實驗數據，再進而探討三組不同方向之實驗量測結果比較，並以實驗所得之結構模態參數為基準進行有限元素模型參數之修正，以達到模型驗證之目標。

2. 模型驗證理念

本節說明模型驗證之理念與完整流程，圖1為模型驗證流程圖，主要進行實驗模態分析與有限元素分析，藉由所得到的模態參數進行比對驗證，目的為確認有限元素模型能夠等效於實際結構。首先以實際結構之幾何參數建構有限元素模型進行模態分析，來獲得理論模態參數包含自然頻率及模態振型；實驗部分為對實際結構進行實驗模態分析量測結構之頻率響應函數，再經由曲線嵌合軟體擷取實際結構之模態參數，包含自然頻率、阻尼比及模態振型，最後以實驗之模態參數為基準重覆修正有限元素模型之材料參數，使得理論與實驗所得模態參數相符合，即理論有限元素模型等效於實際結構，以完成模型驗證。

待模型驗證成功後，即可以進行響應預測與模型變更，圖2為模型變更流程圖，經由模型驗證獲得等效之有限元素模型，足以代表並反應實際結構系統特性，可以在假設已知的輸入條件下，對結構系統作預測響應，主要效益是可以減少實際結構之實驗量測分析，若在響應預測發現結構系統響應不符合設計需求，或是有結構破壞之虞，可透過模型變更對結構修改，反覆進行響應預測來達到設計需求，其設計完成後必須再經過一次模型驗證流程，以確認變更後模型之有效性。

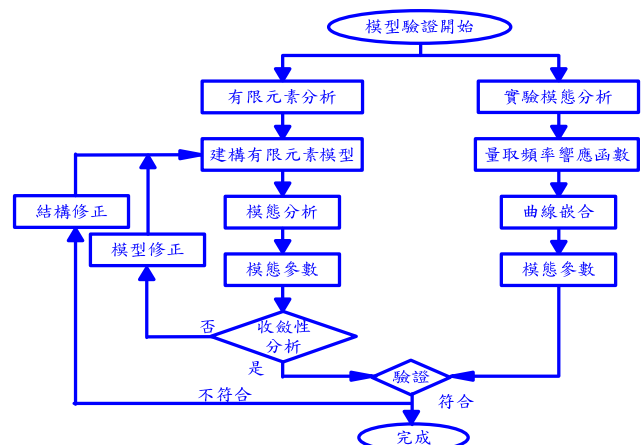


圖 1、模型驗證流程圖

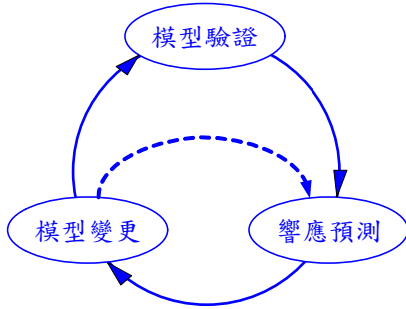


圖 2、模型變更流程圖

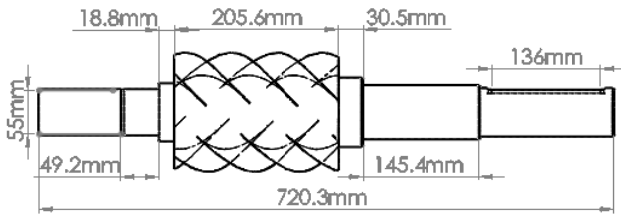


圖 3、公螺旋轉子之幾何尺寸

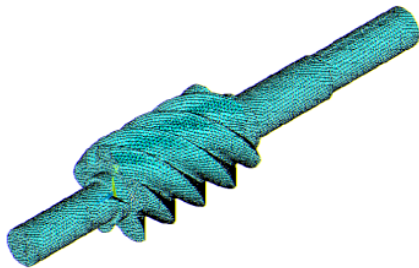


圖 4、公螺旋轉子有限元素模型

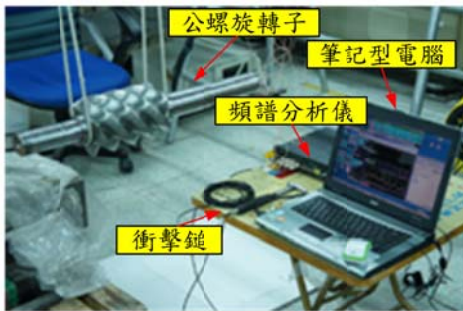


圖 4、實驗架設示意圖

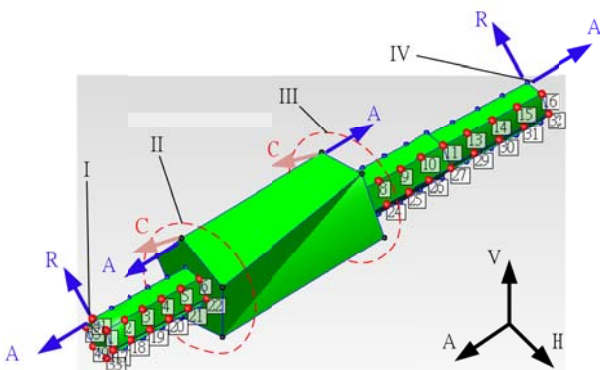


圖 5、實驗量測規劃點示意圖

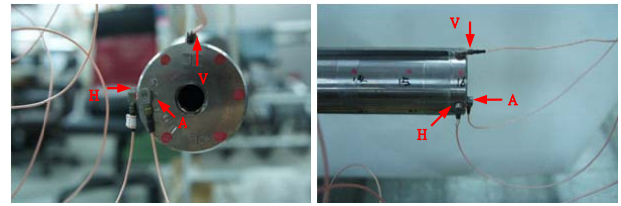


圖 6、單軸向加速度規固定位置

表 1、有限元素分析之公螺旋轉子模態振型圖

模態數	FEA	物理意義	模態數	FEA	物理意義	模態數	FEA	物理意義
F01		(3) 彎曲 (軸對稱)	F08		長軸伸縮	F15		短軸伸縮
F02			F09			F16		
F03		(4) 彎曲 (軸對稱)	F10		(9) 彎曲 (軸對稱)	F17		(8) 彎曲 (軸對稱)
F04			F11			F18		
F05		(5) 彎曲 (軸對稱)	F12		1st 短軸扭轉	F19		(9) 彎曲 (軸對稱)
F06			F13			F20		
F07		1st 長軸扭轉	F14		2st 長軸扭轉	F21		整體伸縮

3. 建構有限元素模型

模型驗證要進行有限元素分析，本節說明如何建構有限元素模型，圖 3 為公螺旋轉子實際結構之幾何尺寸，首先由 3D 繪圖軟體(Solidworks)繪製 CAD 圖檔，再匯入有限元素分析軟體(ANSYS)建構幾何模型，圖 4 為公螺旋轉子有限元素模型，其模型使用線性立方體元素(Solid 45)，每個元素有 8 個節點，每個節點自由度為 u 、 v 、 w 三個方向位移。材料參數採等向性材料模型，楊氏系數為 203GPa，浦松比為 0.3，密度為 7850Kg/m³，有限元素分割採固定元素大小進行自由分割(Free Mesh)，共分割 282,635 個元素及 52,688 個節點，無設定邊界條件及外力負荷，以模擬自由邊界方式進行模態分析，求得理論模態參數，包含自然頻率、模態振型。

4. 實驗方法

本節說明公螺旋轉子之實驗模態分析，實驗儀器架設如圖 4 所示，包括頻譜分析儀(SigLab)、衝擊錘(PCB 086C03)、單軸向加速度規(ENDEVCO 27AM1-10)、筆記型電腦等。為進行 EMA，需對公螺旋轉子規劃實驗量測點數，首先參考表 1 之公螺旋轉各模態之模態振型圖及物理意義，其中，以(n,1)轉子轉軸之彎曲模態(bending mode)最多，n=3 時，模態振型有 2 個節點(nodal point),n 愈大，節點數愈多；又因為此轉子有近似軸對稱特性，可觀察，各彎曲模態均有自然頻率相近且模態振型相同，僅彎曲方向差 90 度相位角的軸對稱模態之現象；如 F01/F02, F03/F04。其他也有長軸及短軸之扭轉模態(torsional mode)以及伸縮模態(extension mode)。

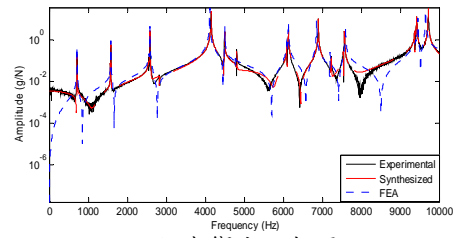
根據表 1 所觀察之轉子模態特性規則，EMA 之實驗量測點如圖 5，(A)因轉子齒型無局部模態(local mode)現象，僅在長軸、短軸之扭轉模態及伸縮模態時齒型部份才有明顯的扭轉模態特性，故主要以圓軸進行佈點量測，採 4 倍原則，將圓軸上分成六等份，每等份規劃 16 個徑向(Radial)量測點，另外圖 5 中 I、IV 為短軸、長軸端面，II、III 為齒型端面，在 I、II、III 及 IV 上規劃 22 個軸向(Axial)量測點，同時 II、III 規劃 10 個週向(Circumferential)量測點，共 128 個實驗量測點，圖 6 為固定三個加速規於轉子長軸端面示意照片，可分別量測轉子 A、V、H 三個方向之加速度。(B)本實驗採固定加速規移動衝擊錘敲擊轉子之軸向、徑向及週向方式進行實驗量測。頻譜分析儀設定頻寬範圍為 0-10kHz、解析頻率 3.125Hz。

利用三顆單軸向加速規分別固定於公螺旋轉子之長軸端軸向(A)、垂直(V)及水平(H)方向如圖 6 所示，優點為可一次完成三組不同方向之實驗量測。藉由實驗量測獲得的頻率響應函數(FRF)匯入曲線嵌合軟體，以求得公螺旋轉子之實際模態參數，包含自然頻率、模態振型及阻尼比。

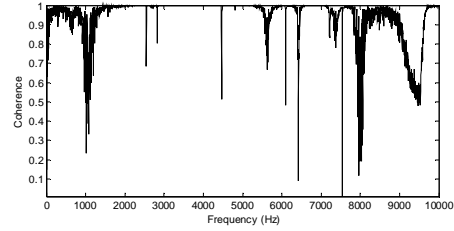
5. 結果與討論

本節將對公螺旋轉子分別由實驗模態分析所獲得 A、V 及 H 方向之三組實驗數據與有限元素分析結果進行比對驗證，包括頻率響應函數、自然頻率及模態振型。

圖 4(a)及圖 5(a)為 A 方向同點與不同點之頻率響應函數圖，其中同點(i = j)，即衝擊錘敲擊之輸入點 j=104，加速規量測輸出點 i=104，所獲得的頻率響應函數稱為同點頻率響應函數(point FRF)，且同點 FRF 特性在兩兩共振點間會有一反共振點出現，圖 4(a)有此合理現象；不同點(j=98)，即 i=104，j=98，所獲得的頻率響應函數稱為轉移頻率響應函數(transfer FRF)。圖 4(a)、圖 5(a)中理論、實驗及合成頻率響應函數曲線，在對應上相當吻合代表曲線嵌合的正確性，圖 4(b)及圖 5(b)為 A 方向同點與不同點關聯性函數圖，當關聯性函數趨近於 1 表示頻率響應函數可信度越高，圖 4(b)及圖 5(b)中關聯性函數，除反共振點因響應小導致關聯性函數偏低外，整體上均趨近於 1 表示實驗結果是有可信度的。

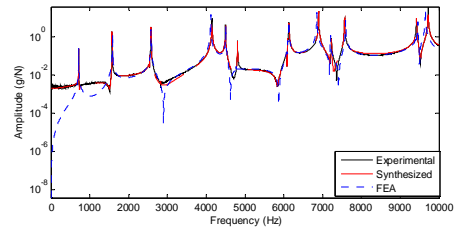


(a) 頻率響應函數圖

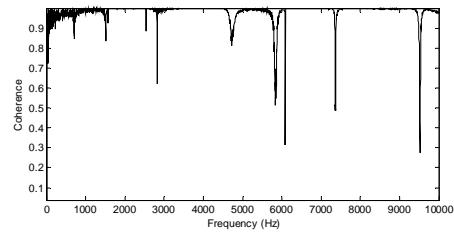


(b) 關聯性函數圖

圖 4、同點(i=104,j=104) (A 方向)



(a) 頻率響應函數圖



(b) 關聯性函數圖

圖 5、不同點(i=104,j=98) (A 方向)

表 1、理論與實驗之自然頻率總表(A 方向)

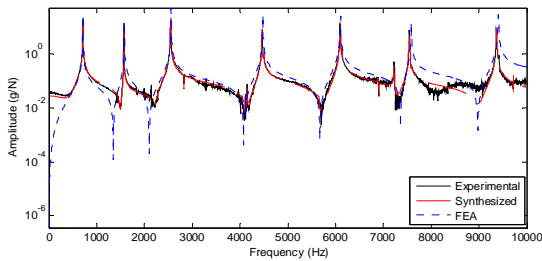
mode	EMA(A) (Hz)	mode	FEA (Hz)	誤差 (%)	阻尼比 (%)	累計平均 阻尼比(%)	物理 意義
-	-	F-01	712.3	-	-	-	(3,1)
A-01	711.47	F-02	713.5	0.29	0.0280	0.02802	彎曲對稱
A-02	1568.8	F-03	1581.3	0.80	0.0146	0.02129	(4,1)
A-03	1575.1	F-04	1584.2	0.58	0.0119	0.01816	彎曲對稱
A-04	2547	F-05	2559.9	0.51	0.0631	0.02939	(5,1)
A-05	2578.3	F-06	2582.5	0.16	0.0200	0.02752	彎曲對稱
A-06	2824.6	F-07	2814.5	-0.36	0.0666	0.03404	1st 長軸扭轉
A-07	4146	F-08	4114.7	-0.75	0.0389	0.03474	長軸伸縮
A-08	4461.2	F-09	4478.3	0.38	0.0524	0.03694	(6,1)
A-09	4495.1	F-10	4505	0.22	0.0222	0.03531	彎曲對稱
A-10	4807.7	F-11	4776.6	-0.65	0.0067	0.03245	1st 短軸扭轉
A-11	6092.3	F-12	6095.7	0.06	0.0248	0.03176	2st 長軸扭轉
-	-	F-13	6102.1	-	-	-	(7,1)
A-12	6132.4	F-14	6132.2	0.00	0.0412	0.03254	彎曲對稱
A-13	6897.1	F-15	6855.3	-0.61	0.0234	0.03184	短軸伸縮
A-14	7226.5	F-16	7202.1	-0.34	0.0428	0.03262	3st 長軸扭轉
A-15	7542.5	F-17	7584.3	0.55	0.0257	0.03216	(8,1)
A-16	7567.4	F-18	7596.2	0.38	0.0292	0.03197	彎曲對稱
A-17	9366.3	F-19	9406.1	0.42	0.0285	0.03177	(9,1)
A-18	9422.3	F-20	9451.3	0.31	0.0337	0.03188	彎曲對稱
A-19	9719.9	F-21	9653	-0.69	0.0154	0.03101	整體伸縮

表 1 為有限元素分析與實驗模態分析(A 方向)之自然頻率總表，表 1 中除 F-01、F-013 到外，其餘的 19 態自然頻率誤差皆在 1% 以下，令 F-01 無對應之原因為此模態非軸向振動所致，最大阻尼比出現在 A-06 模態為 0.067%，累計平均阻尼比為 0.031%。

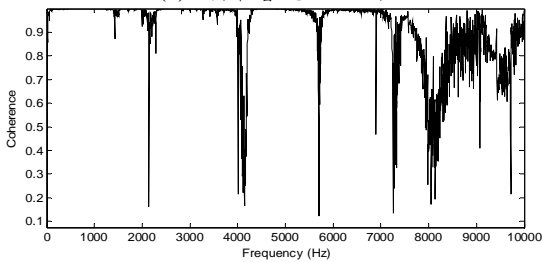
圖 6(a)及圖 7(a)為 V 方向同點與不同點之頻率響應函數圖，圖 6(a)、圖 7(a)中同點(i=j=96)及不同點(i=96、j=1)，在理論、實驗及合成頻率響應函數曲線，對應上皆相當吻合代表曲線嵌合的正確性，圖 6(b)及圖 7(b)為 V 方向同點與不同點關聯性函數圖，圖 6(b)及圖 7(b)中關聯性函數，除反共振點及高頻關聯性函數較低外，其餘均趨近於 1，表示實驗結果是有可信度的。表 2 為有限元素分析與實驗模態分析(V 方向)之自然頻率總表，表 2 中除 F-02、F-04 自然頻率無對應到，因此 2 模態振型屬 H 方向之彎曲模態，其餘的 17 個模態自然頻率比對誤差皆在 1% 以下，而最大阻尼比出現在 V-03 模態為 0.064%，累計平均阻尼比為 0.031%。

表 2、理論與實驗之自然頻率總表(V 方向)

mode	EMA(V) (Hz)	mode	FEA (Hz)	誤差 (%)	阻尼比 (%)	累計平均 阻尼比(%)	物理 意義
V-01	710.6	F-01	712.3	0.24	0.0139	0.01386	(3,1)
-	-	F-02	713.5	-	-	-	彎曲對稱
V-02	1568.8	F-03	1581.3	0.80	0.0143	0.01409	(4,1)
-	-	F-04	1584.2	-	-	-	彎曲對稱
V-03	2547.0	F-05	2559.9	0.51	0.0639	0.03069	(5,1)
V-04	2577.1	F-06	2582.5	0.21	0.0282	0.03006	彎曲對稱
V-05	2828.3	F-07	2814.5	-0.49	0.0561	0.03526	1st 長軸扭轉
V-06	4146.2	F-08	4114.7	-0.76	0.0377	0.03567	長軸伸縮
V-07	4461.1	F-09	4478.3	0.39	0.0523	0.03805	(6,1)
V-08	4494.9	F-10	4505	0.22	0.0222	0.03607	彎曲對稱
V-09	4806.9	F-11	4776.6	-0.63	0.0063	0.03277	1st 短軸扭轉
V-10	6091.5	F-12	6095.7	0.07	0.0245	0.03194	2st 長軸扭轉
V-11	6099.4	F-13	6102.1	0.04	0.0358	0.03229	(7,1)
V-12	6132.0	F-14	6132.2	0.00	0.0405	0.03298	彎曲對稱
V-13	6895.4	F-15	6855.3	-0.58	0.0194	0.03194	短軸伸縮
V-14	7224.9	F-16	7202.1	-0.32	0.0471	0.03302	3st 長軸扭轉
V-15	7542.2	F-17	7584.3	0.56	0.0258	0.03254	(8,1)
V-16	7566.0	F-18	7596.2	0.40	0.0207	0.03180	彎曲對稱
V-17	9365.9	F-19	9406.1	0.43	0.0300	0.03169	(9,1)
V-18	9421.7	F-20	9451.3	0.31	0.0351	0.03188	彎曲對稱
V-19	9720.0	F-21	9653	-0.69	0.0152	0.03101	整體伸縮

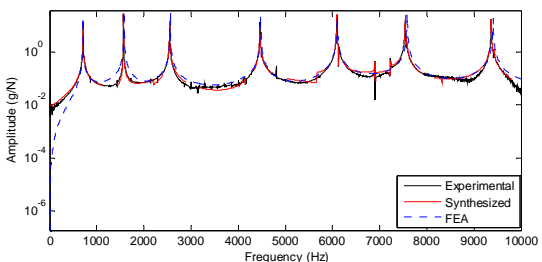


(a) 頻率響應函數圖

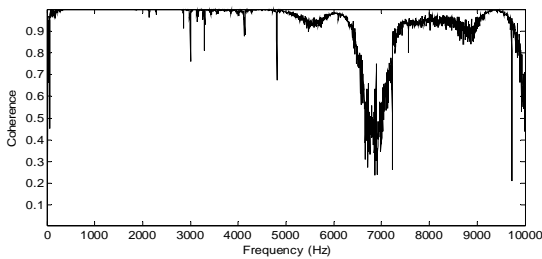


(b) 關聯性函數圖

圖 6、同點(i=96,j=96) (V 方向)

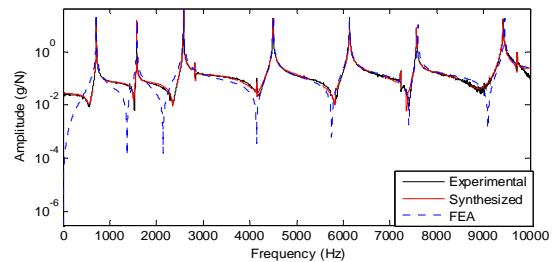


(a) 頻率響應函數圖

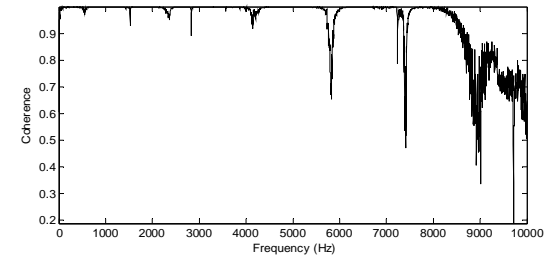


(b) 關聯性函數圖

圖 7、不同點(i=96,j=1) (V 方向)



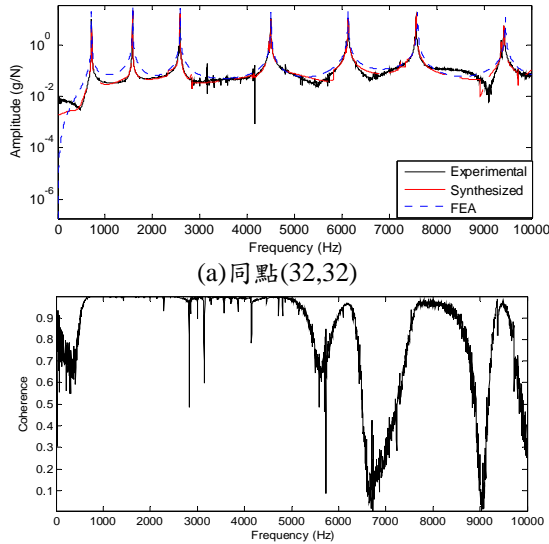
(a) 同點(32,32)



(b) 不同點(32,17)

圖 8、頻率響應函數圖(H 方向)

圖 8(a)及圖 9(a)為 H 方向同點與不同點之頻率響應函數圖，圖 8(a)及圖 9(a)中同點(i=32、j=32)及不同點(i=32、j=1)，在理論、實驗及合成頻率響應函數曲線，對應上皆相當吻合代表曲線嵌合的正確性，圖 8(b)及圖 9(b)為 H 方向同點與不同點關聯性函數圖，圖 8(b)及圖 9(b)中關聯性函數，除反共振點及高頻關聯性函數較低外，其餘均趨近於 1 表示實驗結果是有可信度的。表 3 為有限元素分析與實驗模態分析(H 方向)之自然頻率總表，表 3 中 F-01、F-03 及 F-13 屬於 V 方向之彎曲模態、F-11 屬於 A 方向之軸向模態為自然頻率無對應之原因，其餘的 15 個模態自然頻率誤差皆在 1% 以下，而最大阻尼比出現在 H-03 模態為 0.068%，累計平均阻尼比為 0.035%。



(a) 同點(32,32)
(b) 不同點(32,17)
圖 9、關聯性函數圖(H 方向)

表 3、理論與實驗之自然頻率總表(H 方向)

mode	EMA(H) (Hz)	mode	FEA (Hz)	誤差 (%)	阻尼比 (%)	累計平均 阻尼比 (%)	物理 意義
-	-	F-01	712.3	-	-	-	(3,1)
H-01	712.8	F-02	713.5	0.10	0.0279	0.02793	彎曲對稱
-	-	F-03	1581.3	-	-	-	(4,1)
H-02	1575.1	F-04	1584.2	0.58	0.0118	0.01986	彎曲對稱
H-03	2547.0	F-05	2559.9	0.51	0.0684	0.03605	(5,1)
H-04	2578.3	F-06	2582.5	0.16	0.0199	0.03201	彎曲對稱
H-05	2824.9	F-07	2814.5	-0.37	0.0661	0.03882	1 st 長軸扭轉
H-06	4147.0	F-08	4114.7	-0.78	0.0463	0.04007	長軸伸縮
H-07	4461.5	F-09	4478.3	0.38	0.0504	0.04154	(6,1)
H-08	4495.2	F-10	4505	0.22	0.0222	0.03913	彎曲對稱
-	-	F-11	4776.6	-	-	-	1st 短軸扭轉
H-09	6093.9	F-12	6095.7	0.03	0.0449	0.03977	2st 長軸扭轉
-	-	F-13	6102.1	-	-	-	(7,1)
H-10	6132.4	F-14	6132.2	0.00	0.0412	0.03991	彎曲對稱
H-11	6894.9	F-15	6855.3	-0.57	0.0172	0.03785	短軸伸縮
H-12	7224.5	F-16	7202.1	-0.31	0.0468	0.03860	3st 長軸扭轉
H-13	7540.8	F-17	7584.3	0.58	0.0250	0.03755	(8,1)
H-14	7567.3	F-18	7596.2	0.38	0.0283	0.03689	彎曲對稱
H-15	9365.6	F-19	9406.1	0.43	0.0305	0.03646	(9,1)
H-16	9422.1	F-20	9451.3	0.31	0.0338	0.03630	彎曲對稱
H-17	9720.2	F-21	9653	-0.69	0.0141	0.03499	整體伸縮

表 4 為理論與三組實驗 A、V 及 H 方向之模態振型比較表，採用模態保證指標(MAC)來確認模型比對之相似度，當 MAC 值趨近於 1 代表兩模態振型相對應，表 4 中理論的 21 個模態振型其物理意義可分成彎曲、伸縮及扭轉三種物理意義的模態振型，其中彎曲模態又具有對稱特性，即兩兩自然頻率相近，僅振型擺動方向相差 90 度角，即 V 與 H 方向，其振型比對結果討論如下：

1. 取量測點短軸軸向 6 個量測點進行 A 方向 MAC 比對，從表 4 中理論與 A 方向實驗的模態振型比對，除在 A-10 模態 MAC 值較差外，伸縮模態對應上 MAC 值在 0.9 以上，其餘模態振型 MAC 值也都有 0.7 以上，可

判斷實驗與理論之振型相當一致。在 A 方向 A-10 模態 MAC 值在 0.06，原因為 A-10 模態振型之物理意義上屬於扭轉模態導致 A 方向 MAC 比對相對較差。

2. 取量測點第 1-16 個量測點進行 V 方向 MAC 比對，從表 4 中理論與 V 方向實驗的模態振型比對，在 V 方向的彎曲模態 MAC 值都在 0.8 以上，可判斷實驗與理論之振型相當一致。除 V-11 模態 MAC 值為 0.61，為該模態阻尼比相對較高造成，及其他扭轉、伸縮及 H 方向彎曲模態 MAC 值相對較差，其原因為 V 方向 MAC 與模態作動方向不同所導致。
3. 取量測點第 17-32 個量測點進行 H 方向的 MAC 比對，從表 4 中理論與 H 方向實驗的模態振型比對，在 H 方向的彎曲模態 MAC 值都在 0.8 以上，可判斷實驗與理論之振型相當一致，其他扭轉、伸縮及 V 方向彎曲模態 MAC 值相對較差，其原因為 H 方向 MAC 與模態作動方向不同所導致。

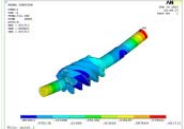
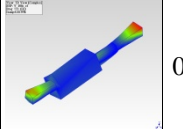
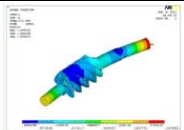
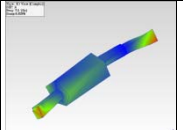
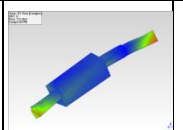
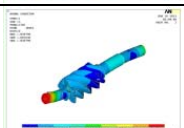
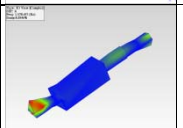
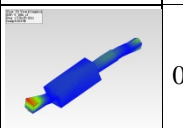

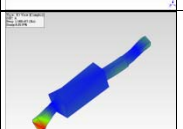
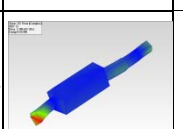

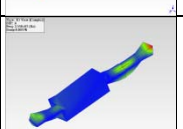
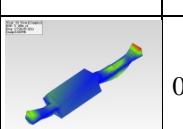
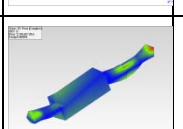
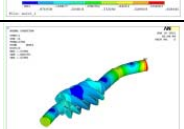
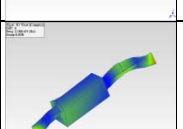
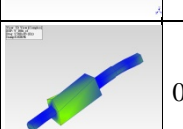
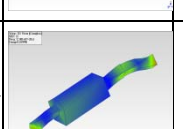
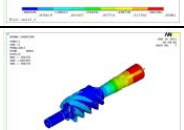
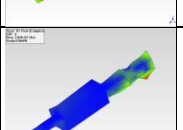
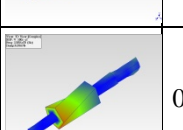
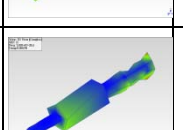
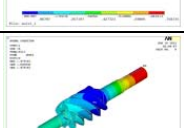
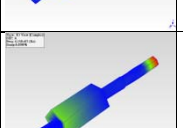
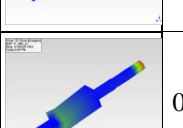
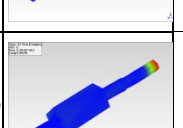
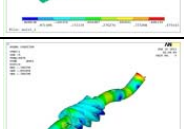
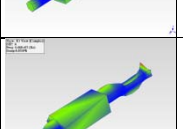
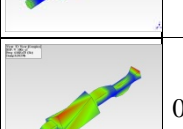
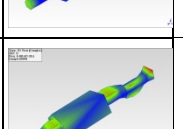
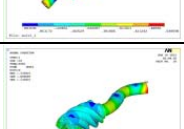
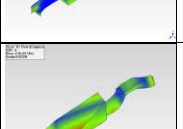
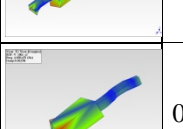
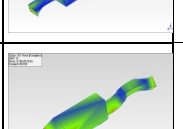
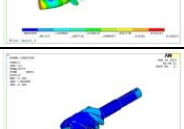
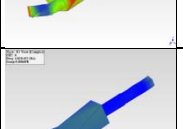
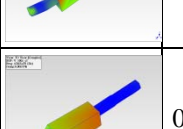
以同時量測 A、V 及 H 方向之實驗模態分析與有限元素分析之結果進行比對，如頻率響應函數、自然頻率及模態振型，在三組方向的實驗、合成及理論頻率響應函數曲線對應上皆相當吻合，代表曲線嵌合之正確性。三組方向之實驗與理論自然頻率比對上誤差皆在 1% 以下，且自然頻率誤差百分比都在正負間變動，再依 MAC 值判斷不同實驗量測方向之模態振型與理論模態振型對應上是相當一致，表示模態參數比對良好，已達到模型驗證目的。

由三組 A、V 及 H 方向之實驗結果比對自然頻率、阻尼比及累計平均阻尼比，再次確認實際模態參數之正確性，表 5 為 A、V 及 H 方向 EMA 所求得之自然頻率比較表，表 5 中以 A 方向之實驗自然頻率為基準與 V、H 方向之實驗自然頻率比較，誤差除少部分趨近於 0% 外，其於自然頻率皆完全吻合。表 6 A、V 及 H 方向 EMA 所求得之模態阻尼比，表 6 中在 3 組方向之最大與次大阻尼比約為 0.06%，對應之物理意義為 V 方向 (5,1) 彎曲模態及第一個長軸扭轉模態，而累計平均阻尼比也相當吻合約在 0.03% 左右。

6. 結論

本文利用有限元素分析與實驗模態分析進行公螺旋轉子之模型驗證，由分析結果得知公螺旋轉子結構具有彎曲、伸縮、扭轉模態特性，並針對轉子模態特性以 A、V 及 H 方向同時量測之實驗手法，獲得與理論分析之模態參數完整對應，且比較三組量測結果再次確認實際模態參數之正確性，進而獲得等效於實際結構之公螺旋轉子有限元素模型，在未來新型轉子設計上可應用此模型驗證獲得等效之有限元素模型，來代表實際結構進行響應預測以模擬反應實際結構之系統特性，進而模型變更達到產品品質提升，以及減少實際實驗量測分析所花費的時程與成本。

表 4、理論與實驗之模態振型比較總表

模態數	FEA	模態數	EMA (A)	A 方向 MAC	模態數	EMA (V)	V 方向 MAC	模態數	EMA (H)	H 方向 MAC	物理意義
F-01		-	-	-	V-01		0.96	-	-	-	(3,1) 彎曲 (V)
F-02		A-01		0.79	-	-	-	H-01		0.99	(3,1) 彎曲 (H)
F-03		A-02		0.80	V-02		0.96	-	-	-	(4,1) 彎曲 (V)
F-04		A-03		0.95	-	-	-	H-02		0.99	(4,1) 彎曲 (H)
F-05		A-04		0.90	V-03		0.97	H-03		0.43	(5,1) 彎曲 (V)
F-06		A-05		0.96	V-04		0.59	H-04		0.98	(5,1) 彎曲 (H)
F-07		A-06		0.93	V-05		0.43	H-05		0.56	1st 長軸扭轉
F-08		A-07		0.99	V-06		0.43	H-06		0.63	長軸伸縮
F-09		A-08		0.92	V-07		0.95	H-07		0.47	(6,1) 彎曲 (V)
F-10		A-09		0.96	V-08		0.13	H-08		0.96	(6,1) 彎曲 (H)
F-11		A-10		0.06	V-09		0.84	-	-	-	1st 短軸扭轉

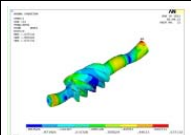
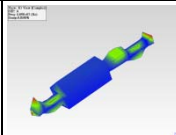
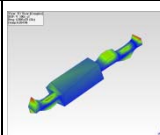
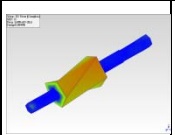
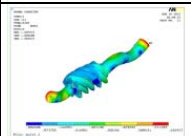
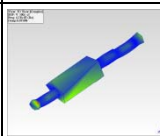
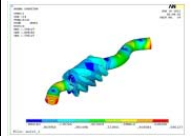
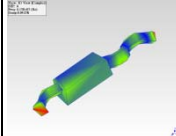
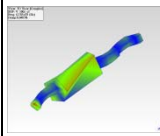
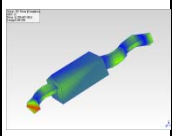
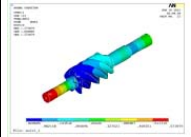
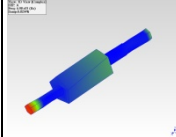
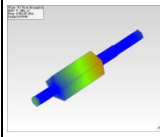
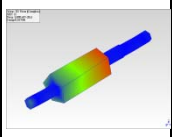
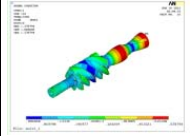
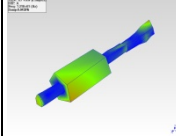
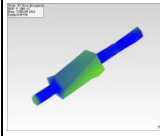
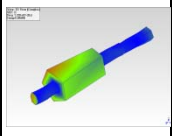
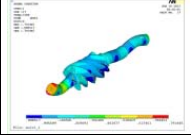
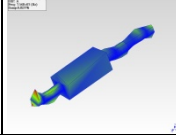
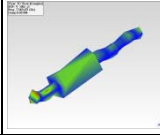
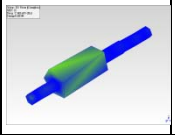
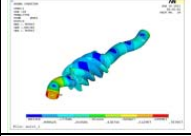
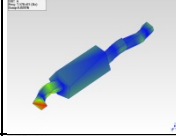
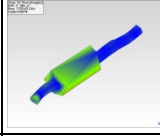
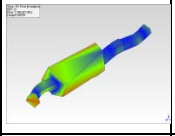
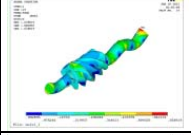
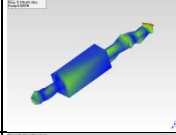
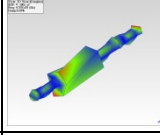
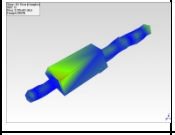
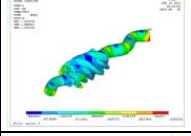
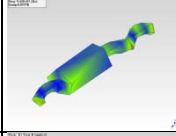
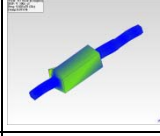
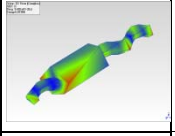
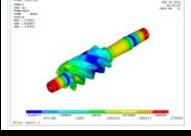
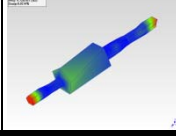
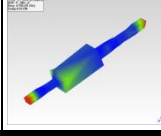
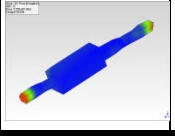
F-12		A-11		0.94	V-10		0.26	H-09		0.07	2st 長軸 扭轉
F-13		-	-	-	V-11		0.61	-	-	-	(7,1) 彎曲 (V)
F-14		A-12		0.95	V-12		0.01	H-10		0.95	(7,1) 彎曲 (H)
F-15		A-13		0.99	V-13		0.06	H-11		0.18	短軸 伸縮
F-16		A-14		0.99	V-14		0.56	H-12		0.23	3st 長軸 扭轉
F-17		A-15		0.83	V-15		0.91	H-13		0.82	(8,1) 彎曲 (V)
F-18		A-16		0.95	V-16		0.45	H-14		0.93	(8,1) 彎曲 (H)
F-19		A-17		0.91	V-17		0.86	H-15		0.22	(9,1) 彎曲 (V)
F-20		A-18		0.93	V-18		0.36	H-16		0.88	(9,1) 彎曲 (H)
F-21		A-19		0.99	V-19		0.10	H-17		0.21	整體 伸縮

表 5、A、V 及 H 方向 EMA 所求得之自然頻率比較表

mode	EMA (A) (Hz)	mode	EMA (V) (Hz)	誤差 (%)	mode	EMA (H) (Hz)	誤差 (%)	物理意義
-	-	V-01	710.6	-	-	-	-	(3,1)
A-01	711.47	-	-	-	H-01	712.8	0.19	彎曲對稱
A-02	1568.8	V-02	1568.8	0.00	-	-	-	(4,1)
A-03	1575.1	-	-	-	H-02	1575.1	0.00	彎曲對稱
A-04	2547	V-03	2547	0.00	H-03	2547	0.00	(5,1)
A-05	2578.3	V-04	2577.1	-0.05	H-04	2578.3	0.00	彎曲對稱
A-06	2824.6	V-05	2828.3	0.13	H-05	2824.9	0.01	1 st 長軸扭轉
A-07	4146	V-06	4146.2	0.00	H-06	4147	0.02	長軸伸縮
A-08	4461.2	V-07	4461.1	0.00	H-07	4461.5	0.01	(6,1)
A-09	4495.1	V-08	4494.9	0.00	H-08	4495.2	0.00	彎曲對稱
A-10	4807.7	V-09	4806.9	-0.02	-	-	-	1 st 短軸扭轉
A-11	6092.3	V-10	6091.5	-0.01	H-09	6093.6	0.02	2 nd 長軸扭轉
-	-	V-11	6099.4	-	-	-	-	(7,1)
A-12	6132.4	V-12	6132	-0.01	H-10	6132.4	0.00	彎曲對稱
A-13	6897.1	V-13	6895.4	-0.02	H-11	6894.9	-0.03	短軸伸縮
A-14	7226.5	V-14	7224.9	-0.02	H-12	7224.5	-0.03	3 rd 長軸扭轉
A-15	7542.5	V-15	7542.2	0.00	H-13	7540.8	-0.02	(8,1)
A-16	7567.4	V-16	7566	-0.02	H-14	7567.3	0.00	彎曲對稱
A-17	9366.3	V-17	9365.9	0.00	H-15	9365.6	-0.01	(9,1)
A-18	9422.3	V-18	9421.7	-0.01	H-16	9422.1	0.00	彎曲對稱
A-19	9719.9	V-19	9720	0.00	H-17	9720.2	0.00	整體伸縮

8. 參考文獻

- [1] 王栢村，陳榮亮，1997，「簡支板實驗模態分析較具之製作」，第十二屆全國技術及職業教育研討會，第 1-10 頁。
- [2] Wang, B. T., and Wu, G. Z., 2005, “Modal Properties of Golf Club Wood Driver in Different Boundary Conditions, ” *Proceedings of Thirteenth National Conference on the Society of Sound and Vibration*, Chang-Hua, Paper No.: C10.
- [3] 王栢村，張年華，黃裕仁，張佐銘，2010，「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。
- [4] 王栢村，陳昱成，陳勇全，2010，「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。
- [5] 王栢村，謝宗廷，陳正陽，周芳俊，2011，「工具機螺栓接合面之模型驗證」，*第十九屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*，彰化，論文編號：D-06。
- [6] 王栢村，陳昱成，2011，「車架與前叉組套件之模型驗證與衝擊試驗響應預測」，*機械技師學刊*，第 4 卷，第 2 期，第 26-33 頁。

表 6、A、V 及 H 方向 EMA 所求得之模態阻尼比

A 方向		V 方向		H 方向		物理意義
阻尼比 (%)	累計平均 阻尼比 (%)	阻尼比 (%)	累計平均 阻尼比 (%)	阻尼比 (%)	累計平均 阻尼比 (%)	
-	-	0.0139	0.01386	-	-	(3,1)
0.0280	0.02802	-	-	0.0279	0.02793	彎曲對稱
0.0146	0.02129	0.0143	0.01409	-	-	(4,1)
0.0119	0.01816	-	-	0.0118	0.01986	彎曲對稱
0.0631	0.02939	0.0639	0.03069	0.0684	0.03605	(5,1)
0.0200	0.02752	0.0282	0.03006	0.0199	0.03201	彎曲對稱
0.0666	0.03404	0.0561	0.03526	0.0661	0.03882	1 st 長軸扭轉
0.0389	0.03474	0.0377	0.03567	0.0463	0.04007	長軸伸縮
0.0524	0.03694	0.0523	0.03805	0.0504	0.04154	(6,1)
0.0222	0.03531	0.0222	0.03607	0.0222	0.03913	彎曲對稱
0.0067	0.03245	0.0063	0.03277	-	-	1 st 短軸扭轉
0.0248	0.03176	0.0245	0.03194	0.0449	0.03977	2 nd 長軸扭轉
-	-	0.0358	0.03229	-	-	(7,1)
0.0412	0.03254	0.0405	0.03298	0.0412	0.03991	彎曲對稱
0.0234	0.03184	0.0194	0.03194	0.0172	0.03785	短軸伸縮
0.0428	0.03262	0.0471	0.03302	0.0468	0.03860	3 rd 長軸扭轉
0.0257	0.03216	0.0258	0.03254	0.0250	0.03755	(8,1)
0.0292	0.03197	0.0207	0.03180	0.0283	0.03689	彎曲對稱
0.0285	0.03177	0.0300	0.03169	0.0305	0.03646	(9,1)
0.0337	0.03188	0.0351	0.03188	0.0338	0.03630	彎曲對稱
0.0154	0.03101	0.0152	0.03101	0.0141	0.03499	整體伸縮

7. 致謝

本文承蒙漢鐘精機股份有限公司與國科會 100 年度產學合作計畫「環保冷媒雙螺旋壓縮機之關鍵技術開發(1/2)」(國科會計畫編號：NSC10 0-2622-E-194-006-CC2)，經費補助提供，特此致謝。