

迴轉式壓縮機永磁同步馬達之電磁噪音模擬技術研究

Investigation on Electromagnetic Noise Simulation Technology of Permanent-Magnet Synchronous Motor of Rotary Compressor

張博鈞¹ 郭孝軍¹ 王栢村² 潘昱豪² 蔡文俊²

Bo-Jun Zhang¹, Hsiao-Chun Kuo¹, Bor-Tsuen Wang², Yu-Hao Pan², Wen-Chun Tsai²

¹ 瑞智精密股份有限公司

¹Rechi Precision Co., Ltd.

² 國立屏東科技大學機械工程系

²Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology

E-mail: 1070244@rechi.com

摘要

迴轉式壓縮機運轉時產生的馬達電磁噪音，主要是馬達電磁力的激振頻率與馬達結構自然頻率接近時，所引發的結構共振現象，並透過空氣路徑傳遞形成電磁噪音。本文主要說明永磁同步馬達電磁噪音模擬技術與驗證方法，運用電腦輔助工程分析 (computer aided engineering, CAE) 將複雜電磁噪音問題，以多重物理耦合的假設方式，去拆解成兩個階段，階段一為磁固耦合、階段二為聲振耦合。首先建立馬達分析模型，同時執行模型驗證程序，確認模型的等效性。並將馬達的電磁力，作為外力激振施加於定子結構模型，便完成第一階段的磁固耦合之響應預測分析。接續將電磁力激振下的結構振動響應，與外部聲場模型進行耦合分析，探討聲振耦合狀態下的聲學響應。最後配合實際馬達量測系統，量測運轉下的振動與噪音，作為驗證 CAE 模擬正確性的參考依據。結果顯示，透過磁—固—聲多重物理耦合技術，可明確地預測馬達振動與噪音特性。本文建立的馬達電磁噪音模擬技術，適用於設計初期的振動噪音特性預測，可快速識別異音頻率範圍，並著手設計變更，在追求馬達效率指標的同時，也掌握良好的聲音表現。

關鍵字： 永磁同步馬達、磁固耦合、聲振耦合、電磁噪音

Abstract

The electromagnetic noise generated by the motor when the rotary compressor is operating is mainly due to the structural resonance phenomenon caused when the excitation frequency of the motor's electromagnetic force is close to the natural frequency of the motor structure, and is transmitted through the air path to form electromagnetic noise. This work explains the electromagnetic noise simulation technique and verification method of permanent magnet synchronous motor, and uses computer aided engineering (CAE) to break down the complex electromagnetic noise problem into two stages based on the assumption of multi-physical coupling. The first stage is the coupled electromagnetic-structural simulation, and the second stage focuses on the vibro-acoustic analysis. First, a motor model is established, and model verification (MV) is performed to confirm the equivalence of the model. The electromagnetic force of the motor is applied to the stator structure model as an external excitation force to complete the first stage of response prediction (RP) analysis of the magneto-solid coupling. Next, the structural vibration response under electromagnetic force excitation is coupled with the external sound field model to analyze the acoustic response under the vibro-acoustic

coupling. Finally, it cooperates with the actual motor test system to measure the vibration and noise during operation, which serves as a reference for verifying the correctness of the CAE simulation. The results show that the vibration and noise characteristics of the motor can be clearly predicted through magneto-solid-acoustic multi-physical coupling. This work establishes the simulation technique and verification process of permanent magnet synchronous motor noise. It is suitable for the initial design stage of the motor to quickly identify the abnormal noise frequency range. While pursuing motor efficiency indicators, we can keep up good sound performance.

Keywords: Permanent-Magnet Synchronous Motor, Electromagnetic-Structural Simulation, Vibro-Acoustic Analysis, Electromagnetic Noise

1. 前言

迴轉式壓縮機的馬達在設計階段，主要以扭矩與效率為主要的設計指標，而振動噪音的指標，通常是在樣品製做出來後，透過實驗量測做特性的量化；由此現象顯示，從設計到呈現樣品的過程，設計者對振動噪音的設計面向是無所適從的，即便有電腦輔助工程分析 (computer aided engineering, CAE) 軟體的輔助，也會碰上電磁分析軟體無法模擬結構振動特性的窘境、結構分析軟體有電磁力激振輸入手法的技術門檻；因此，若能同時運用電磁、結構和聲學模擬技術，執行多重物理耦合，建立馬達電磁噪音的分析手法，便能在馬達開發程序之中，提前預測馬達的聲學表現，藉此篩選掉較差的設計型式，減少試作成本與開發時程。

在電磁噪音分析研究中，電磁力的激振假設是執行電磁噪聲模擬時，首要必須考慮的議題，馬達的工況負載條件、轉子動態表現影響著電磁激振的響應，Lou et al. [1] 提出了抑制電動車馬達之電磁噪音的方法，以轉子槽數做設計變數，運用 CAE 軟體計算馬達徑向電磁力，並指出槽數的增加可降低電磁力波之振幅值，且電磁力分布更加均勻，進而優化電磁噪音。Pang et al. [2] 結合磁固聲多重物理耦合分析，探

討磁極偏心對馬達振動響應與電磁噪音的變化，並指出磁極偏心影響著馬達之氣隙磁密諧波畸變率，其可作為馬達噪音優化設計的參考指標。Ito et al. [3] 探討永磁同步馬達的轉子偏心與傾斜狀態下，電磁力波型與電磁力頻譜的特徵差異性，並解釋轉子傾斜和偏心所造成的電磁力邊帶不對稱的原因。

馬達電磁噪音是多重物理耦合下，所形成的複雜問題，在模擬應用上使用到的物理場越完整，所獲得的分析結果越貼近真實狀況，Deng 與 Zuo [4] 講述電動車永磁同步馬達電磁振動與噪音，引述眾多學者的研究，並彙整出永磁同步馬達的發聲機制、分析預設方法以及抑制手段，同時將車輛的工況條件列為優化聲音品質的設計關鍵變數。Li et al. [5] 對極高速永磁同步馬達進行磁熱雙向耦合，將計算出的損耗以熱源的形式輸入流場中進行馬達溫度分析，求得馬達的溫度分布，將模擬結果與實驗結果進行比對，結果顯示磁熱雙向耦合可準確地預測馬達溫升情況。Li et al. [6] 運用有限元素分析對永磁同步馬達進行模態分析，透過簡化分析模型，計算自由邊界下的模態參數，同時執行實驗模態分析 (experimental modal analysis, EMA)，驗證分析模型的準確性，並作為改善電動車馬達振動噪音的基礎。張與王 [7] 結合 EMA 與理論模態分析，以空鐵芯、繞線組合狀態逐一完成模型驗證程序，並解釋了正向性材料對模態振型的關聯性，也將複雜的馬達繞線組合進行數學模型化的解析，定義了分析模型在模擬設定上的假設條件，最終建立永磁同步馬達之等效分析模型。黃 [8] 說明了異步馬達與同步馬達的電磁噪音發聲機制，其中在轉子運動時產生的偏心問題，也解釋了氣隙變化對徑向電磁力波的影響，以及馬達拍頻音的成因及原理，最終提出解決電磁噪音的方法，包含槽極數、斜槽、定子外型、轉子磁障設計。

本文針對永磁同步馬達電磁噪音的分析技術建立與驗證進行探討，主要研究目標如下：

- (1) 淺談馬達電磁噪音的發聲機制與電磁力理論計算，並運用傳遞路徑分析 (transfer path analysis, TPA) 理念，規劃馬達電磁噪音研究之技術路徑。
- (2) 對電磁分析模型進行模型驗證，確保後續磁固耦合的電磁激振力符合真實馬達運轉情況；接續探討轉子同心、靜偏心與動偏心運轉行為，觀察電磁力特性的影響。

- (3) 建立馬達等效實際結構的有限元素模型，運用到 EMA 與理論模態分析，來執行模型驗證程序，為後續的聲振耦合分析，提供更精確的分析模型。
- (4) 對馬達進行穩態運轉與升轉 run-up 測試，以振動噪音之時頻圖與頻譜圖作為評價指標，驗證馬達磁一固一聲多重物理耦合的正確性。

2. 馬達電磁噪音發聲機制與理論說明

迴轉式壓縮機永磁同步馬達在運轉時，轉子與定子之間的氣隙空間會形成氣隙磁場，並以馬達的極對數為週期分布於氣隙空間，而氣隙磁場會產生週期性的電磁激振力；電磁力又可分解出徑向、切向與軸向力，切向力主導轉子產生的轉矩，徑向力主導著定子鐵芯的徑向振動。而在結構共振表現上，激振力的方向與結構振動方向一致時，容易放大振幅；由於多數馬達的定子結構，在勁度特性上會小於轉子結構；因此，定子為電磁噪音最主要的振動響應結構，馬達徑向電磁力為引發電磁噪音的主要作用力。

2.1 馬達電磁力理論說明

已知馬達徑向電磁力為主導電磁噪音的關鍵，根據麥克斯韋應力張量方法，徑向力密度 P_r 可以表示為式 (1)，單位為 N/m^2 ，其中 b_{rs} 是氣隙中的徑向磁通密度，以 T 為單位， μ_0 是真空磁導率，單位為 H/m，當忽略切向磁通密度時，所產生的徑向磁通密度 b_{rs} 可以表示為式 (2)。

$$P_r \approx \frac{b_{rs}^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

$$b_{rs} = (B_{r_mag} + B_{r_arm})\lambda_r \quad (2)$$

其中 B_{r_mag} 和 B_{r_arm} 分別是無槽徑向永磁場和無槽徑向電樞反應場。 λ_r 是相對磁導的有效值。通過使用傅立葉轉換 B_{r_mag} 、 B_{r_arm} 和 λ_r 分別可以表示為式 (3)、式 (4) 及式 (5)。

$$B_{r_mag} = \sum_n B_{mn} \cos(np\theta - 2\pi n f_1 t) \quad (3)$$

$$B_{r_arm} = \sum_h \sum_v B_{av}^h \sin(vN_p\theta - 2\pi s_{v,h} f_h t + \theta_h) \quad (4)$$

$$\lambda_r = \lambda_0 + \sum_\mu \lambda_{r\mu} \cos(\mu Q_s \theta) \quad (5)$$

其中， p 為極對數， Q_s 為槽數， N_p 為馬達的空間週期數， f_1 是電流的基波頻率， f_h 是電流諧波的頻率， θ_h 為電流諧波的相位角， B_{av}^h 為由頻率為 f_h 為電流諧波所產生的電樞反應場的第 vN_p 諧波的振幅。

$s_{v,h}$ 表示電樞反應場的旋轉方向，1 表示正向旋轉，-1 表示反向旋轉。將式 (2) 至式 (5) 代入式 (1)，可以得到考慮電流諧波的徑向力密度，可寫成式 (6) 表示，單位為 N/m^2 。

$$P_r = \frac{1}{2\mu_0} \left[\sum_n B_{mn} \cos(np\theta - 2\pi n f_1 t) + \sum_h \sum_v B_{av}^h \sin(vN_p\theta - 2\pi s_{v,h} f_h t + \theta_h) \right]^2 \times \left[\lambda_0 + \sum_\mu \lambda_{r\mu} \cos(\mu Q_s \theta) \right]^2 \quad (6)$$

2.2 馬達電磁噪音研究之技術路徑

TPA 可用於解析系統上的振動噪音傳遞，將系統明確分類出激振源 (source)、傳遞路徑 (path) 與響應端 (response)，方便解析各路徑上的振動噪音傳遞之因果關係。以本文的研究項目電磁噪音為例，圖 1 為馬達電磁噪音之技術路徑圖，可將電磁噪音的傳遞路徑分成三個部分，分別為電磁場路徑、結構路徑以及空氣路徑；而在上半部的分析方法中，有細分出路徑的分析 path-analysis (P-analysis)，以及單純只關注響應結果的 response-analysis (R-analysis)；依此類推圖 1 的下半部則是實驗方法，差別在於採用實驗來獲得路徑與響應的結果，以 path-test (P-test) 與 response-test (R-test) 表示之。

本文將以圖 1 的技術路徑為主軸，說明電磁噪音的分析手法與驗證流程，首先說明馬達電磁場路徑 (electromagnetic path) 的驗證，分析採用電磁分析軟體執行計算，實驗則是以實際馬達結構進行動力計測試，並從電磁場的響應結果進行比對，確認電磁模型與實際結構的等效性，也才可將模擬的電磁力作為結構的激振源；在馬達結構路徑 (structural path) 的驗證，模擬是採用結構模態分析，實驗是用模態測試，以模態參數作為模型驗證的比對指標，驗證模型的正確性，方可進行磁固耦合模擬，並求得振動響應；獲

得結構振動響應後，便能將振動響應作為空氣路徑 (air path) 的激振源，進行聲振耦合狀態下的聲場模態分析，對應的實驗方法可用聲學照相機捕捉馬達在空氣中的空氣振型，最後關注聲場的響應，即為磁-固-聲多重物理耦合下的馬達電磁噪音。

3. 永磁同步馬達之電磁力分析

永磁同步馬達輸入來源為電源、控制器及工況負載等，影響著馬達驅動的方式；而馬達種類、轉定子型式與繞線參數會改變馬達電磁特徵，包含磁路、電磁力空間階次，進一步影響電磁力時間域波形、電磁力波密度響應，最終影響馬達電磁噪音的聲音特性。

3.1 電磁力分析之模型驗證

電磁分析應用於永磁同步馬達上，可計算出馬達的電磁力結果，並提供給結構有限元素模型作為激振力的輸入；因此，電磁分析模型的正確性會影響著後續結構振動行為表現，本小節將說明馬達電磁分析模型驗證流程，並將分析求得的電磁響應結果，作為與實驗比對的主要指標。在電磁分析之有限元素模型的建構，是採用二維平面模型建構，圖 2 為馬達電磁分析模型，轉定子為無斜槽設計的 6 極 9 槽馬達，銅線為集中繞線，並設定矽鋼片與磁鐵的 B-H 磁滯曲線、剩餘磁化強度 B_r 等多個材料參數，接續在定子外圍處定義電磁場的計算邊界，以 Z 軸方向為旋轉軸計算不同轉速下的電磁力響應，包含頓轉扭力、磁通密度與反電動勢。

欲從實驗方法取得馬達電磁響應結果，可透過馬達綜合測試設備、表磁設備與動力計取得，圖 3 為馬達實驗測試設備，表 1 為馬達電磁響應之實驗與分析比對結果，頓轉轉矩是馬達無電流下，轉一圈所形成的力矩變化，本案為 6 極 9 槽的馬達，因此會形成 18 個轉矩波，而分析與實驗的頓轉轉矩振幅與轉矩波皆有對應上；表面磁通所形成的牛角波振幅可評估充磁是否完整，在表面磁通結果的比對上，牛角波型的趨勢有對應；於反電動勢解果比對，波型趨近正弦波、振幅值接近；上述分析與實驗的電磁響應結果皆

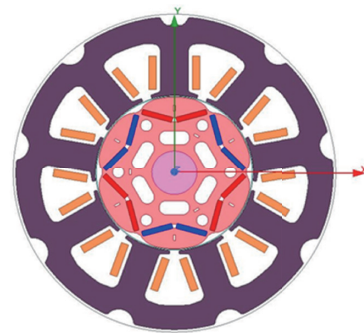


圖 2 馬達電磁分析模型

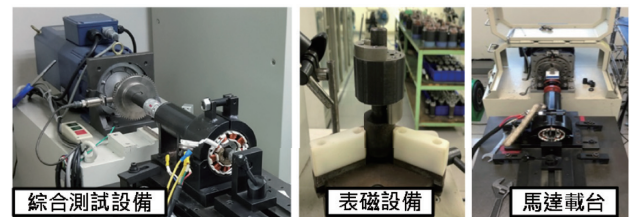


圖 3 馬達實驗測試設備

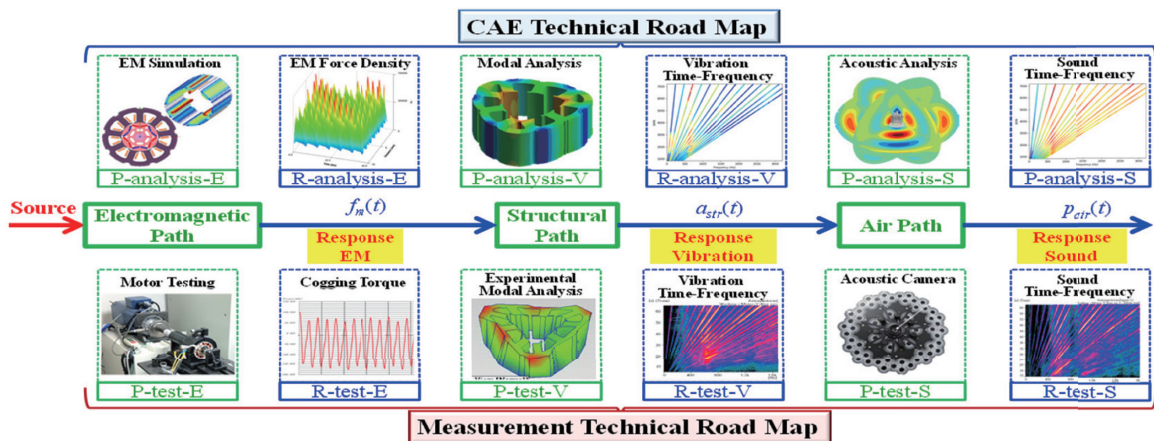
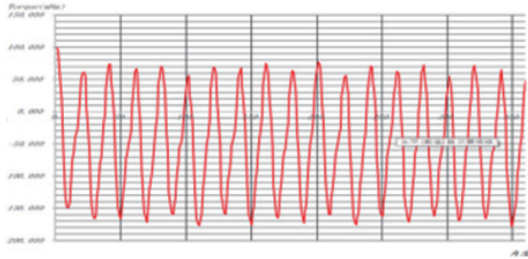
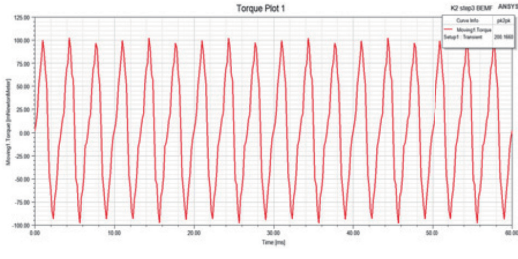
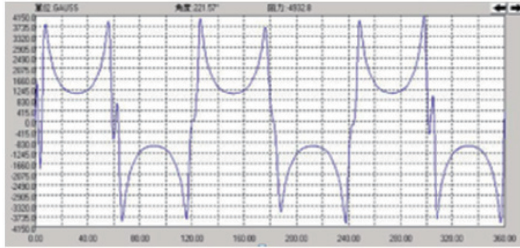
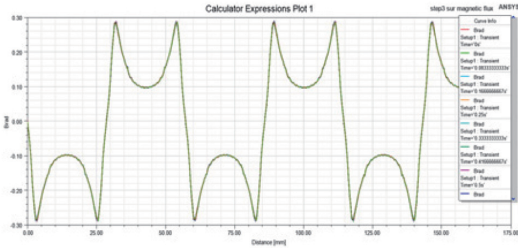
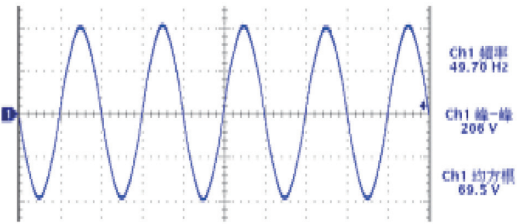
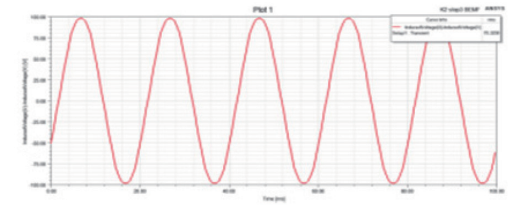


圖 1 馬達電磁噪音之技術路徑圖

表 1 馬達電磁響應之實驗與分析比對表

實驗	分析
<p>頓轉轉矩</p> 	
<p>表面磁通</p> 	
<p>反電動勢</p> 	

有對應上，表示電磁分析模型具有良好的等效性，其電磁力結果可作為後續結構模型的激振來源。

3.2 轉子運動行為分析

在實際壓縮機狀態下，轉定子之間的氣隙偏心問題是很常見的，而組裝精度、結構剛性以及磁力不均都可能引發氣隙偏心的情況；因此，本小節將針對馬達轉定子的氣隙偏心問題進行探討，圖 4 為馬達轉子不同運動模式，圖 4 (a) 同心、圖 4 (b) 靜偏心與圖 4 (c) 動偏心，採用電磁分析計算轉定子的運動行為對電磁力的影響。

轉子偏心引發的氣隙不均問題，會影響著定子各齒面所受到的電磁力大小，表 2 為轉子不同運動模式的分析結果，由電磁力波形可顯示不同齒部上隨時間的電磁力變化，轉定子同心在齒部上受到的電磁力均等，靜偏心則是轉子靠近的齒部會有較大的電磁力，反之則偏小，而動偏心的特性則是每一齒受到的電磁力會隨著時間而變化，並無固定的磁力大小。

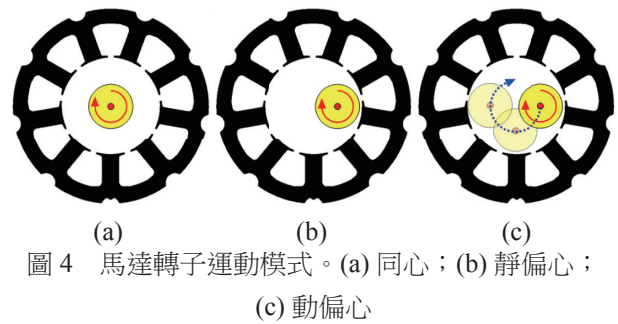
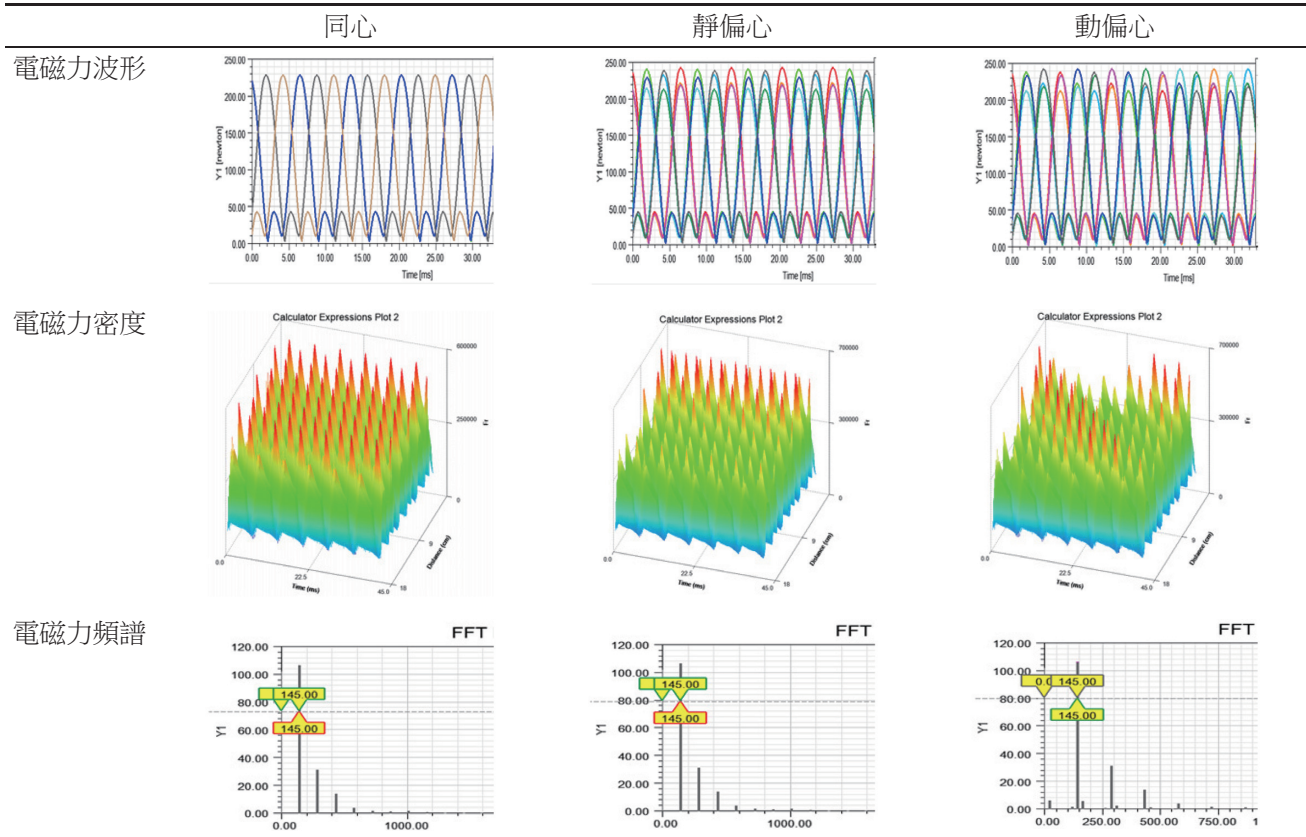


圖 4 馬達轉子運動模式。(a) 同心；(b) 靜偏心；(c) 動偏心

電磁力密度則是將齒部的電磁力，用三維的形式來觀察，分別為時間、齒部位置、振幅大小為單位，可將轉子旋轉一圈的電磁力以圖像化呈現，電磁力密度在同心狀態下呈現各齒部所受的電磁力都均等，於靜偏心狀態下為最接近轉子的齒部電磁力最大，且每一齒的電磁力之最大振幅值不會因時間而變化，在動偏心狀態中，齒部受電磁力之最大振幅值會隨著時間不斷的變化。

電磁力頻譜是將電磁力波形進行傅立葉變換求

表 2 馬達轉子不同運動模式之分析結果



得，同心狀態電磁力會在低階次有較高的貢獻度，且峰值頻率與馬達的極數為倍頻關係，越高階次的電磁力越小，且每齒的電磁力均等；於靜偏心狀態則是與同心的特性一致，差異在於每齒的電磁力大小會因為偏心現象而有不同；動偏心的結果則會出現邊頻 (sideband) 現象，此現象較貼近實際壓縮機運轉情況，後續磁固耦合分析便會以動偏心之電磁力結果，作為結構的外力激振來源。

4. 馬達振動噪音量測系統之模型驗證

在馬達初期設計階段中會使用馬達振動噪音量測系統，對馬達單獨做振動與噪音的實驗評價，其目的是忽略壓縮機其他部件的干擾，只關注馬達運轉產生的電磁噪音，本文將以馬達安裝於振動噪音量測系統，作為 CAE 模型的實際結構狀態，並執行模型驗證程序，結合理論模態分析與 EMA，將分析與實驗求得的結構模態參數進行比對驗證，確認分析模型的等效性。

馬達振動噪音量測系統是由多個零件所組成，而結構會因為幾何尺寸、材料性質、接觸行為以及邊界條件而影響模態參數結果，圖 5 為馬達振動噪音量測系統組合圖，並將複雜的量測系統分類為三類，分別為零件狀態、次系統以及系統狀態，本文所執行的模型驗證流程是以單獨零件進行模型驗證，確認幾何尺寸，並修正材料性質，進入到次系統狀態則是將完成驗證的零件組裝起來，藉此模擬出接觸效應，最後於系統狀態則是修正邊界效應。

4.1 量測系統之 EMA

本文所執行的 EMA 是利用衝擊錘為力轉換器，加速度計為感測器，以敲擊的手法執行模態測試；由於量測系統零件眾多，因此不逐一列舉說明，僅針對關鍵的馬達結構及組合後的馬達振動噪音量測系統進行說明，圖 6 為 EMA 之實驗架設，圖 6 (a) 為定子繞線組合、圖 6 (b) 為馬達振動噪音量測系統；在定子繞線組合的 EMA 是參照張與王 [7] 的實驗方法，

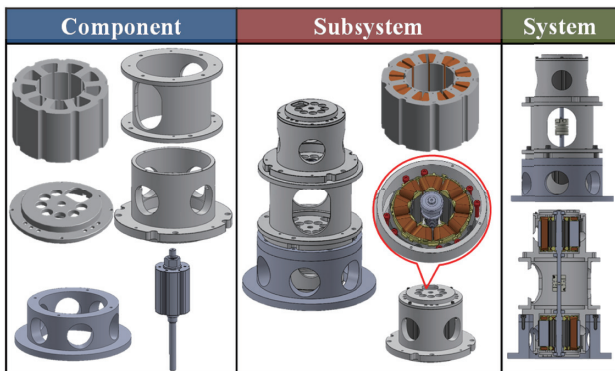


圖 5 馬達振動噪音量測系統組合圖

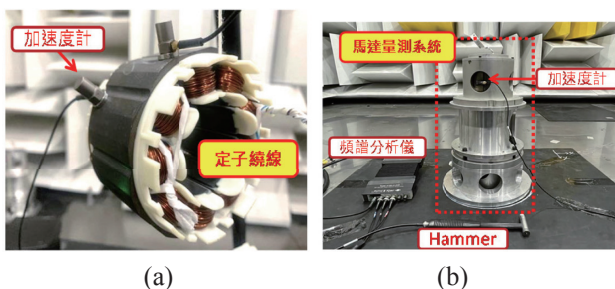


圖 6 EMA 之實驗架設。(a) 定子繞線組；(b) 馬達振動噪音量測系統

以懸吊方式模擬自由邊界，在馬達量測系統的模態測試，是放置於地面，兩種狀態的實驗都是以固定加速度計、移動衝擊錘的方式進行。

4.2 量測系統之有限元素分析

本小節說明馬達振動噪音量測系統之模型的建模手法與分析假設，圖 5 為馬達振動噪音量測系統之模型，馬達空鐵芯是一體成型的建模方式，表 3 為馬達材料參數表，使用正向性材料的假設，模擬矽鋼片堆疊效應，繞線的分析假設則是加入質量元素分布於定子的齒部，並輸入銅繞線組合對應的等效質量與轉動慣量，彌補因模型簡化而失真的物理性質，接續加入簡化後的銅繞線幾何，分布於定子槽內，以黏合的形式模擬兩結構間的接觸行為，最後輸入正向性材料模擬簡化銅繞線模型；透過調適簡化銅模型的楊氏係數與剪切模數，使得定子繞線組合的自然頻率與模態振型，對應 EMA 的模態參數；馬達振動噪音量測系統主要都是以鋁合金加工製成，密度為 $3,681 \text{ kg/m}^3$ ，以等向性材料做假設，楊氏係數為 68 GPa 、蒲松比 0.33 。

實際結構的馬達安裝於量測系統上，是使用螺栓鎖固型式做固定，模擬上則是以黏合假設的方法模擬螺栓鎖固的接觸效應；量測系統的邊界是放置於地面，且馬達運轉所產生的機構不平衡力甚小，不會造成量測系統位移現象，因此將模型與地板接觸面設定固定邊界，全模型皆以立體元素建構，模態分析無須設定外力負荷。

4.3 結構振動模態之驗證結果

模型的等效性可透過實驗與分析求得的模態參數進行比對，表 4 為定子繞線組合狀態下的實驗與分析之自然頻率總表，結果顯示定子繞線組合於自由邊界下自然頻率之平均相對誤差為 -0.68% 、方均根值為 3.42% ；圖 7 為定子繞線組合之模態參數與頻率響應函數 (frequency response function, FRF) 比對圖，FRF 虛數部曲線上有峰值的位置，是可能有自然頻率

表 3 馬達材料參數表

項目	鐵芯	銅線
Density (kg/m^3)	7,396.60	None
Young's Modulus X (GPa)	175.00	35.00
Young's Modulus Y (GPa)	175.00	35.00
Young's Modulus Z (GPa)	198.00	—
Poisson's Ratio XY	0.30	0.34
Poisson's Ratio YZ	0.30	0.34
Poisson's Ratio XZ	0.30	0.34
Shear Modulus XY (GPa)	71.00	3.50
Shear Modulus YZ (GPa)	5.20	—
Shear Modulus XZ (GPa)	5.20	—

表 4 定子繞線組合之自然頻率表

Mode	EMA 繞線		CAE 繞線		相對誤差 (%)	物理意義 (θ, Z)
	f_r		Mode	f_r		
1	984		1	980	-0.4	(2, 2)
2	997		2	1,018	2.1	(2, 2)
3	1,430		3	1,402	-2.0	(2, 1)
			4	1,463	2.3	(2, 1)
4	2,300		7	2,349	2.1	(3, 2)
			8	2,351	2.2	(3, 2)
5	3,770		12	3,544	-6.0	(3, 1)
			13	3,549	-5.9	(3, 1)

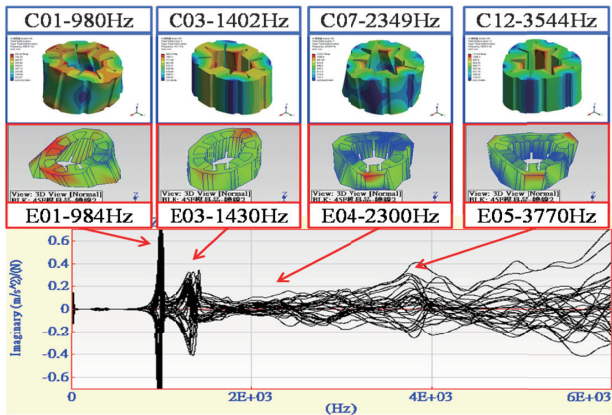


圖 7 定子繞線組合之模態參數與 FRF

的典型特徵，而模態振型的解讀方式採用 (θ, Z) 做解釋， θ 為圓周方向的等分數， Z 為定子高度方向的等分數，以分析的第三模態振之型特徵 $(2, 1)$ 為例，其表示該模態振型為圓周方向為 2 等分， Z 軸向振動呈現一致，是典型的呼吸模態 (hoop mode)；而分析的第七模態的振型特徵 $(3, 2)$ 表示該模態振型為圓周方向為 3 等分， Z 軸向振動呈現 2 等分的反向振動，是典型的扭轉模態 (torsional mode)，圖 7 的自然頻率與模態振型皆有吻合對應，表示定子繞線組合的分析模型，與實際結構之間的等效性良好。

將完成模型驗證的定子繞線組合分析模型與馬達量測系統進行組合接觸，執行理論模態分析，由於量測系統的零件眾多，且非馬達的振動模態不是本文關注的重點，因此僅列舉馬達於量測系統邊界下的模態參數；表 5 為馬達量測系統的實驗與分析自然頻率比對總表，結果顯示自然頻率的平均相對誤差為 -1.83%、方均根值為 4.80%；圖 8 為馬達量測系統之實驗與分析模態參數比對圖，由於馬達安裝於量測系統內部，在模態振型特徵的顯示無法直觀的呈現，因此分析的模態振型是將外部零件進行隱藏，並獨立顯示馬達結構，藉此輔助實驗與分析的模態參數比對，實驗與分析在模態參數有良好對應，表示獲得等效實際馬達量測系統之分析模型。

完成了結構的模型驗證後，便可將徑向電磁力輸入到定子的齒部上，定義結構阻尼比 0.03，執行電磁激振下的簡諧響應分析，完成磁固耦合程序；最後將馬達量測系統之分析模型加入外聲場模型中，圖 9 為馬達量測系統之聲學模型，以聲振耦合的方式，將結

表 5 馬達量測系統之自然頻率表

系統 EMA		系統 CAE		相對誤差 (%)	物理意義 (θ, Z)
Mode	f_r	Mode	f_r		
1	1,382	6	1,430	3.49	(2, 2)
2	1,564	7	1,433	-8.38	(2, 2)
3	2,610	15	2,504	-4.07	(2, 1)
	2,610	16	2,582	-1.08	(2, 1)
4	3,012	19	2,864	-4.93	(3, 2)
	3,012	20	2,869	-4.75	(3, 2)
5	4,471	28	4,278	-4.31	(3, 1)
	4,471	29	4,289	-4.07	(3, 1)
6	5,747	44	6,023	4.80	(4, 1)
	5,747	45	6,038	5.06	(4, 1)

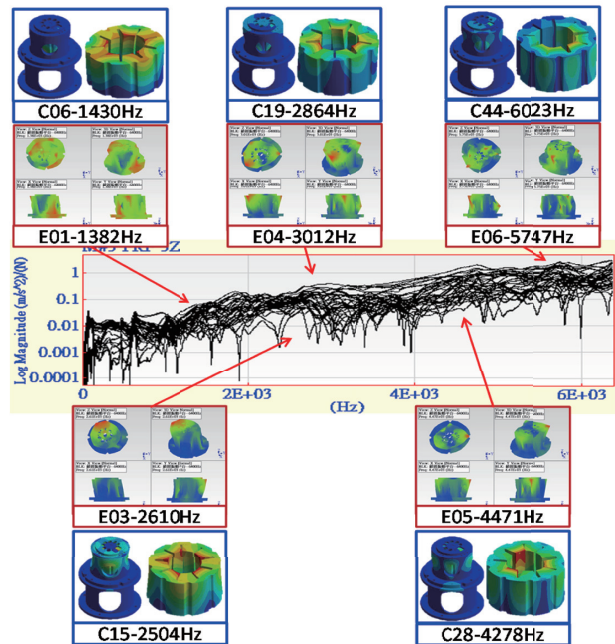


圖 8 馬達量測系統之模態參數與 FRF

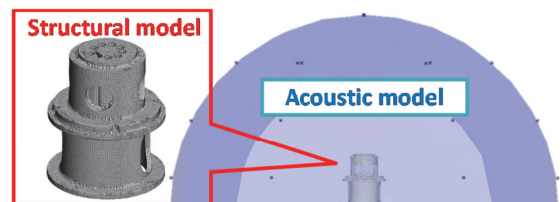


圖 9 馬達量測系統之聲學模型

構振動響應傳遞至聲學模型中，透過聲學分析，計算振動響應所引發的電磁噪音結果。

5. 馬達電磁噪音實驗與分析比對

完成了電磁分析模型與結構分析模型之模型驗證，並執行了磁—固—聲的多重物理耦合，然而馬達電磁噪音模擬的仿真度，需要透過實驗量測數據來佐證，本節將說明電磁噪音的實驗方法與驗證結果。

5.1 馬達振動與噪音實驗架設

馬達振動量測系統的實驗場域是放置在環控半無響室內地面進行實驗，圖 10 為馬達量測系統運轉狀態之實驗架設，環境溫度控制在攝氏 25°C，使用麥克風量測聲音壓力，與馬達的量測距離為 1 m，振動量測採用三軸向加速度計，並安置於定子外徑圓周上；實驗方法可分為兩種，分別為穩態負載固定轉速的 steady-state，以及空載變動轉速的 run-up test，兩種測試的轉速範圍是 800 ~ 7,200 rpm，並以時頻圖 (time-frequency plot) 與頻譜圖作為與模擬的比對指標。

5.2 馬達電磁噪音驗證結果

定子振動所引發的電磁噪音，其主要的發聲頻率在 4 kHz 以內，4 kHz 以上的噪音來源與控制器及載波頻率相關，因此本文針對 3200 Hz 內的振動與噪音特性進行探討，圖 11 為馬達量測系統之徑向振動時頻圖，圖 12 則為聲音時頻圖結果，由圖 11 上至下分



圖 10 馬達量測系統運轉狀態之實驗架設

別為 CAE 模擬的振動響應、無負載的 run-up test 以及有負載的 steady-state 振動結果，其中 CAE 的時頻圖是取雙數之倍頻結果來顯示，run-up test 的時頻圖 X 軸為頻率、Y 軸為秒速 s，steady-state 振動結果是將各轉速頻譜重疊，可得近似 run-up 之時頻圖，X 軸為頻率、Y 軸為轉速，可以清楚區分出轉速倍頻與結構自然頻率，斜線的是隨著時間升轉的轉速頻率，而不隨時間變化的頻率，則是為結構自然頻率。

馬達電磁激振力在低階次會有較大的貢獻度，越高皆次發展便會隨之遞減，因此在圖 11 與圖 12 中可以觀察馬達運轉時，6、12、18、24 倍頻的響應較明顯，符合 6 極 9 槽的馬達特性；此外，馬達運轉至高轉速時，受電磁力激發的電磁噪音相對於低轉速更加明顯，其原因為低轉速時低階次的激振頻率與結構自然頻率相距甚遠，因此不會產生明顯的電磁噪音；反之高轉速時，低階次的激振頻率就容易與結構自然頻率產生共振；以圖 12 為例可觀察到馬達量測系統的自然頻率大約落在 650 Hz、1000 ~ 1500 Hz、2500 ~ 3000 Hz，若要讓馬達 6 倍頻與第一個結構自然頻率 650 Hz 產生共振，則必須將轉速升至接近 6,500 rpm 方能達成；由此可證，低轉速較不容易引發電磁噪音的原因便來源於此。

已知馬達電磁噪音在高轉速時較明顯，因此列舉 7,200 rpm 與 6,600 rpm 轉速下的噪音頻譜，進行實驗與分析結果的比對，確認各峰值頻率是否對應，圖 13 為馬達量測系統 7,200 rpm 之噪音頻譜，分析的頻譜取雙數倍頻的噪音值以長條圖顯示，實驗則是噪音頻譜圖，在分析的主要發聲頻率皆有對應上實際運轉下的發聲頻率；主要的發聲頻率上雖都有對應，但噪音的量值未能完全的對應，其原因來自分析模型的阻尼效應導致，在進行電磁激振下的簡諧響應分析時，需要交代結構的阻尼比，本文採用常數阻尼比的假設進行分析，因此振動與噪音的響應上，會有振幅偏移的現象，圖 14 為馬達量測系統 6,600 rpm 之噪音頻譜，比對結果也是頻率有對應上，振幅有偏移現象。

接續執行時頻圖與模態參數的比對，目的是用於解釋時頻圖中的自然頻率是否有對應到模態分析結果，圖 15 為馬達量測系統之時頻圖與模態參數比對，比對結果可以得知，實驗量測到的自然頻率在 650 Hz 為量測系統的整體擺動模態，1000 ~ 1500 Hz 為馬

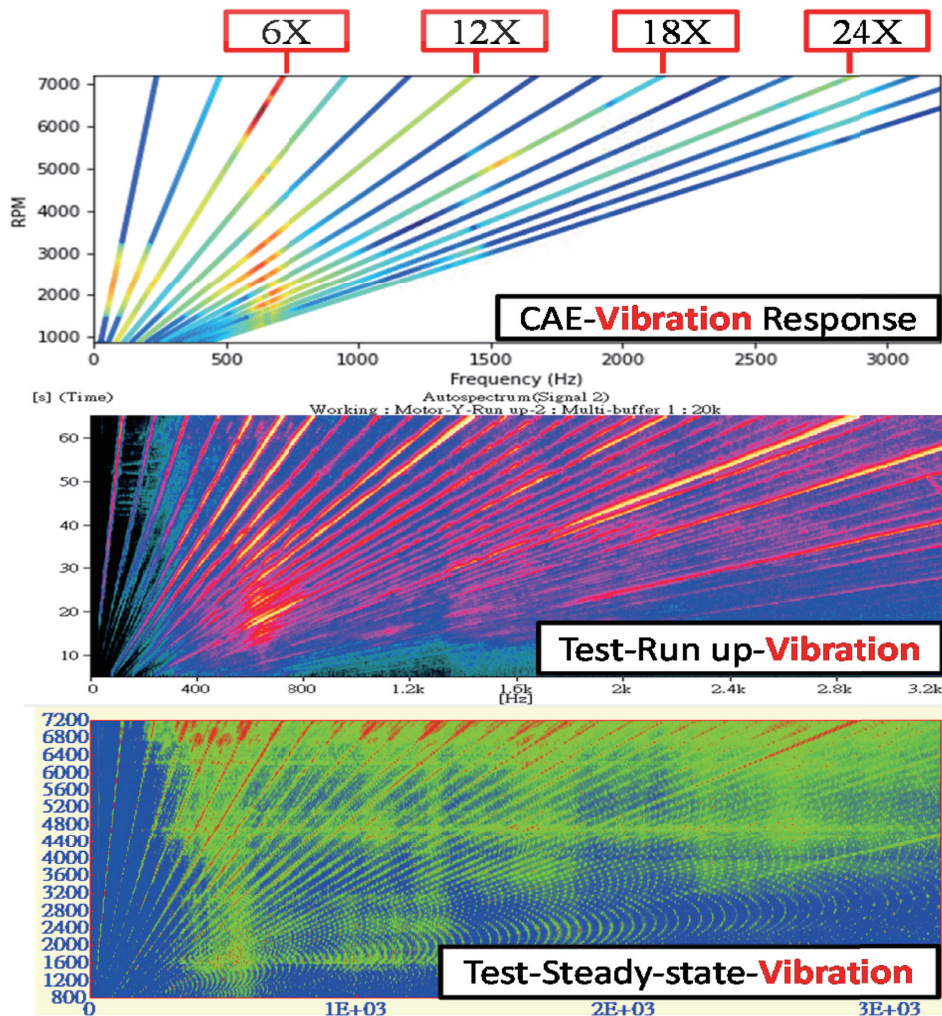


圖 11 馬達量測系統之振動時頻圖

達 (2, 2) 的振動模態，2500 ~ 3000 Hz 為馬達 (2,1) 與 (3, 2) 的振動模態

完成了電磁噪音的實驗與分析比對，綜合上述實驗與分析結果可得下列重點：

- (1) 時頻圖的結果呈現 6、12、18、24 倍頻有明顯的振動噪音貢獻，符合實際 6 極 9 槽馬達特性。
- (2) 分析與實驗之振動噪音時頻圖，在轉速倍頻與結構自然頻率的出現位置相當一致，表示電磁噪音與結構共振有明顯的關聯性。
- (3) 電磁噪音頻譜比對，主要的峰值頻率皆有對應，但振幅大小無法完全對應，其偏移現象是分析的結構阻尼比為主因。
- (4) 完成時頻圖與頻譜圖的比對，確認馬達電磁噪音的分析與實驗具有良好的等效性。

6. 結論

本文針對永磁同步馬達電磁噪音的分析技術建立與驗證進行探討，執行了磁—固—聲多重物理耦合分析，模擬馬達電磁噪音特性，同時搭配馬達實際運轉量測進行比對，確認模擬的正確性，綜合上述實驗與分析結果可得下列幾點結論：

- (1) 運用 TPA 理念，將複雜的電磁噪音有系統的拆解出電磁場路徑、結構路徑以及空氣路徑，方便釐清各路徑上研究重點。
- (2) 於電磁分析上，探討了轉子運動行為對電磁力響應的差異，得知轉子同心運轉過於理想化，轉子動態偏心較符合軸彎曲或轉子不對心的真實運轉情況。

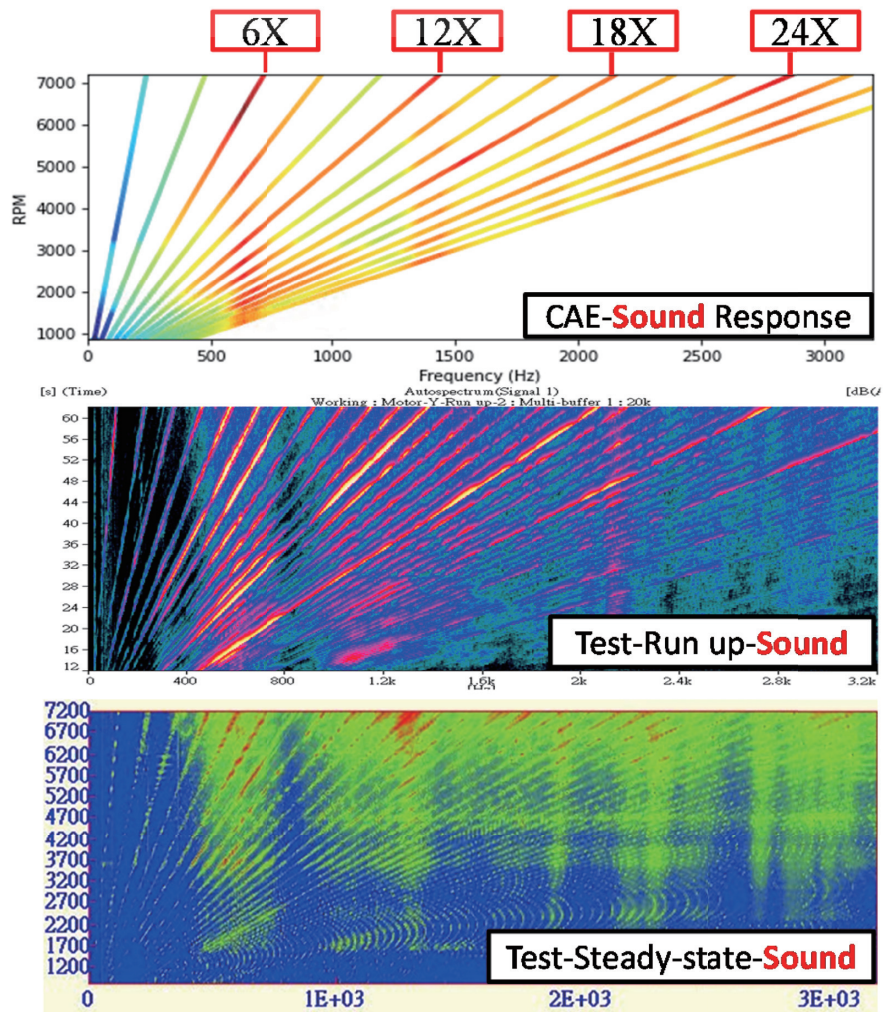


圖 12 馬達量測系統之噪音時頻圖

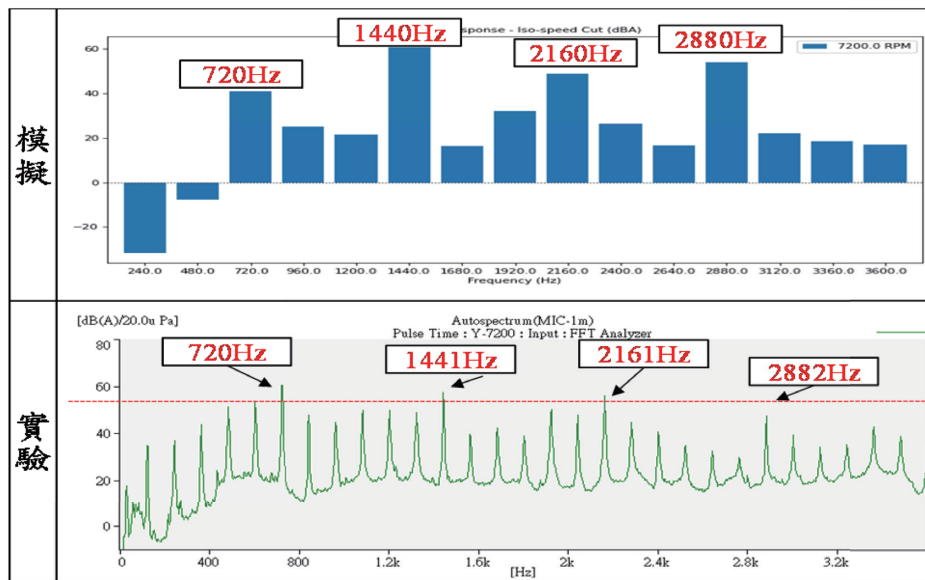


圖 13 馬達量測系統 7,200 rpm 之噪音頻譜

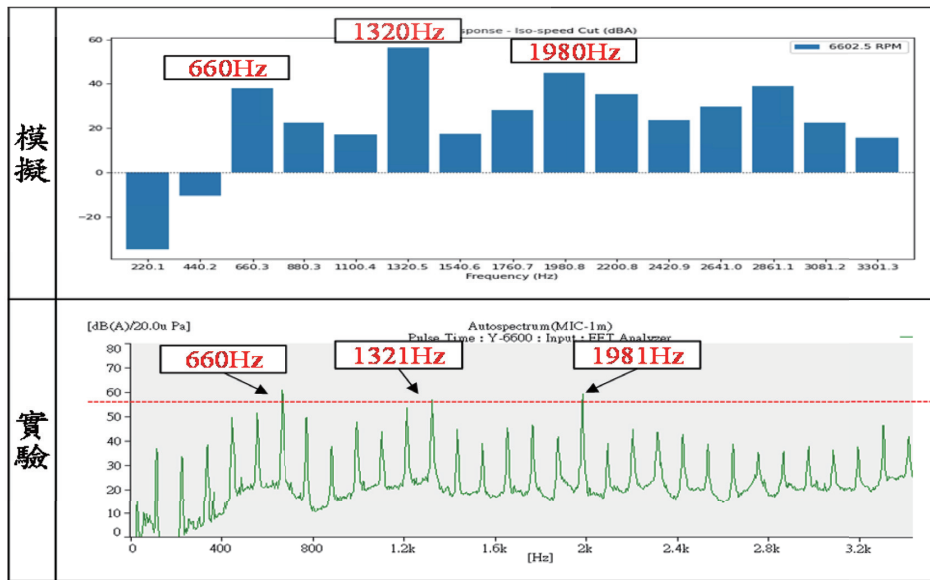


圖 14 馬達量測系統 6,600 rpm 之噪音頻譜

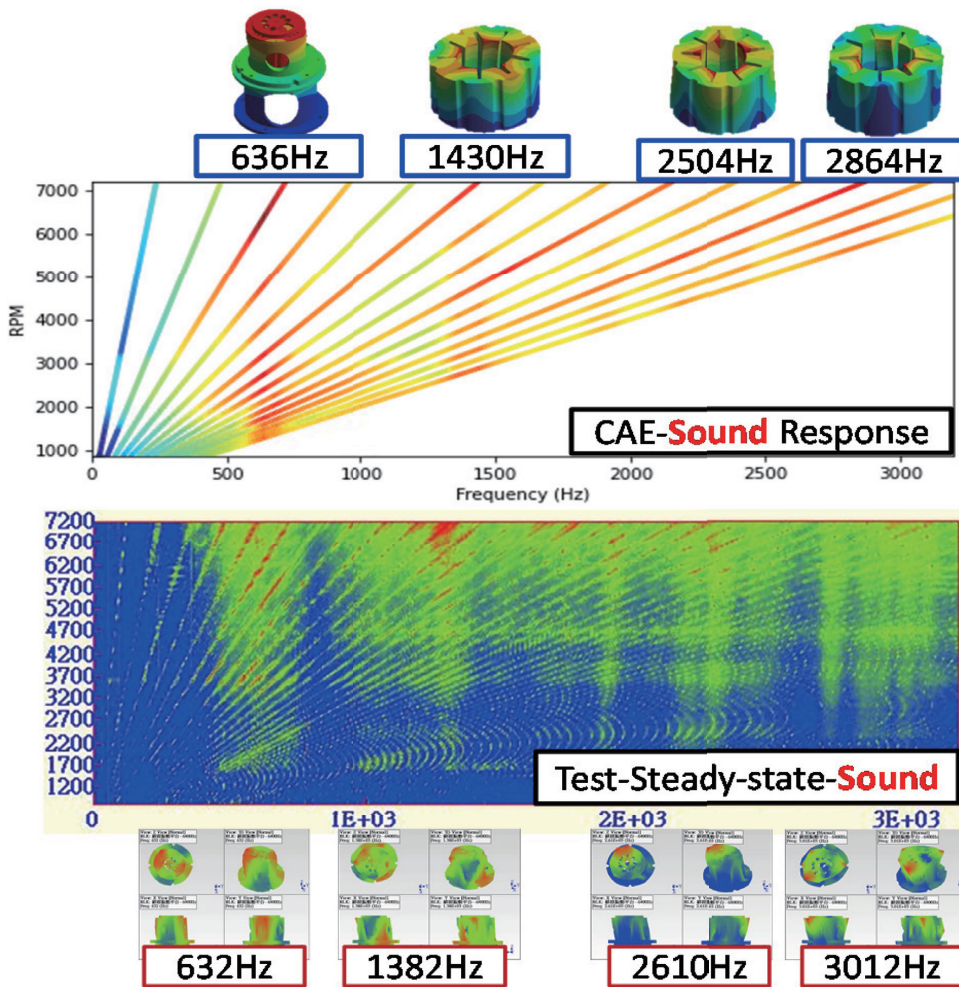


圖 15 馬達量測系統之時頻圖與模態參數比對

- (3) 電磁之有限元素分析的模型驗證，採用頓轉轉矩、表面磁通與反電動勢，作為驗證比對指標，比對結果實驗與分析有良好的對應，完成電磁模型驗證。
- (4) 結構模型驗證是鎖定馬達振動噪音量測系統為主體，透過 EMA 與理論模態分析進行模型驗證，自然頻率與模態振型有良好的對應，最終獲得等效實際結構之有限元素模型。
- (5) 電磁噪音的實驗與分析比對，採用時頻圖與頻譜圖進行比對，比對結果顯示在 6、12、18、24 倍頻有較高的振動噪音貢獻，另外也得知高轉速的運行較容易激發電磁噪音。
- (6) 在馬達的實驗與分析之噪音頻譜比對上，主要發聲頻率皆有對應，但振幅大小無法完全對應，其偏移現象是分析模型是以常數阻尼比的假設所致，抑或未考慮其他激振力的因素，如機械不平衡力。
- (7) 時頻圖與模態參數的比對，在實驗與分析上都有高度對應，表示分析模擬出來的電磁噪音與實際馬達具有良好的等效性。

綜合上述結論，本文建立的馬達電磁噪音模擬技術，適用於設計初期的振動噪音特性預測，並做相對性的比較，快速識別異音範圍並著手設計變更，在追求馬達效率指標的同時，也掌握良好的聲音表現。

參考文獻

- [1] Lou X, Zhang S, Chen X, Gao Y, Ji W. Improvement and application of electromagnetic vibration and noise suppression method for electric vehicle motor. *Heliyon*, 2023; 9: e20900. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e20900
- [2] Pang L, Yang Q, Shen H, Qin H, Zhao C. Research on vibration and noise of magnetic pole eccentricity tangential magnetizing parallel structure hybrid excitation synchronous motor. *Energy Rep*, 2022; 8(S13): 233-240. doi:10.1016/j.egy.2022.08.081
- [3] Ito F, Takeuchi K, Kotsugai T, Matsushita M. A study on asymmetry of electromagnetic force modes of permanent magnet synchronous motors with rotor eccentricity. *IEEE Trans Magn*, 2021; 57: 8103306. doi:10.1109/TMAG.2020.3027816
- [4] Deng W, Zuo S. Electromagnetic vibration and noise of the permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles: An overview. *IEEE Trans Transp Electrif*, 2019; 5: 59-70. doi:10.1109/TTE.2018.2875481
- [5] Li Z, Wang P, Liu L, Xu Q, Che S, Zhang L, Du S, Zhang H, Sun H. Loss calculation and thermal analysis of ultra-high speed permanent magnet motor. *Heliyon*, 2022; 8: e11350. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e11350
- [6] Li H B, Zhang D, Xu P Y, Cao C, Hu D H, Yan X J, Song Z, Hu Z. Analysis on the vibration modes of the electric vehicle motor stator. *Vib Proced*, 2019; 22: 81-86. doi:10.21595/vp.2019.20555
- [7] 張博鈞、王栢村。迴轉式壓縮機永磁同步馬達之結構模態分析與模型驗證。應用聲學與振動學刊，2023；15：13-20。doi:10.6282/JASV.202312_15(1_2).0002
- [8] 黃輝。滾動轉子式制冷壓縮機噪聲與振動。北京：科學出版社，2019。

