

雨刷馬達之故障特徵分析與診斷

Fault characteristic analysis and diagnosis of wiper motor

王栢村¹、王簡俊維¹、*徐詩瑜¹、蔡岳潤²、吳盈輝³

¹ 國立屏東科技大學機械工程系

² 台灣致聯科技有限公司

³ 國立內埔高級農工職業學校機械科

摘要

雨刷馬達的狀態會影響雨刷刷拭的品質。本文量測三種故障雨刷馬達運轉之振動噪音，探討雨刷馬達之零件故障與運轉振動與噪音之間的關聯性。首先，介紹雨刷馬達的結構與故障部位，包括：蝸輪蝸桿、軸承及換向器故障，以及彙整雨刷馬達之運轉特徵頻率。其次，規劃雨刷馬達運轉之振動噪音量測架構與方法。並分別對量測的三軸向加速度振動與噪音訊號，進行時頻分析、頻譜分析與時間波形分析。由互相比較振動噪音響應，可瞭解故障部位對應之特徵。由時頻分析可快速瞭解雨刷馬達的運轉狀態，而頻譜分析取得振動與噪音頻譜，可以有效辨識換向器與軸承故障。但是，對於蝸輪蝸桿的故障，由於其特徵頻率低於 1 Hz，必須從時間波形分析，才能診斷其故障。最後，本文建立基於振動噪音響應的故障雨刷馬達之分析與診斷流程，未來可應用於雨刷馬達的狀態監測以及故障診斷。

關鍵字：雨刷馬達、振動噪音、量測、故障、診斷

Abstract

The condition of the wiper motor affects the quality of wiping. This work measures the noise and vibration of three kinds of faulty wiper motors, and discusses the relationship between the failure of wiper motor parts and the running noise and vibration. First, the structure and fault parts of the wiper motor are introduced, including: worm gear, bearing and commutator faults. The operating characteristic frequencies of the wiper motor are also summarized. This work plans the noise and vibration measurement method for the operating wiper motor. Time-frequency analysis, spectral analysis and time waveform analysis are respectively performed on the measured triaxial acceleration vibration and noise signals. By comparing the noise and vibration responses with each other, the corresponding characteristics of the fault location can be understood. Time-frequency analysis can quickly understand the operating status of the wiper motor, and spectral analysis can obtain noise and vibration spectrum, which can effectively identify commutator and bearing faults. However, for the fault of the worm gear, because its characteristic frequency is lower than 1 Hz, it must be analyzed from the time waveform to diagnose the fault. Finally, this work develops the analysis and diagnosis process of the faulty wiper motor based on the noise and vibration response, which can be applied to condition monitoring and fault diagnosis of the wiper motor in the future.

Keyword: Wiper motor, noise and vibration, measurement, fault, diagnosis

一、前言

雨刷系統確保駕駛車輛時，保持良好的視野，除了應對雨水的清除，同時也需要具備使用時的體驗，當雨刷馬達故障時會產生運轉噪音，會使駕駛者和乘客感受不佳；所以需透過建立分析流程與工具，藉此來提升雨刷系統之馬達的品質和性能。

了解雨刷馬達振動和噪音產生的原因，對於解決這些問題至關重要。透過量測、分

析和診斷馬達的振動噪音來找到解決方案，改善兩刷馬達，降低馬達運轉時的振動和噪音，提供汽車駕駛者與乘客更舒適的使用體驗。王等人[1]闡述 SPR 噪音源(Source)、傳輸路徑(Path)與收受端(Response)之理念，建立標準化量測與診斷作業流程，實務應用於雙螺桿壓縮機，建立噪音量測與特徵分析流程，分別進行收受端與傳輸路徑測試，最終比對得知運轉頻率與壓縮機接近自然頻率，有可能引發共振效應。王等人[2]對迴轉式壓縮機進行噪音診斷，透過麥克風進行聲音量測與加速規進行振動量測，透過兩者比對，找到高貢獻度頻帶，確認噪音發生來源。Feng *et al.*[3]進行文獻回顧，彙整機械故障時，量測運轉時噪音，並將隨機信號轉為時間-頻率關係圖來進行分析，其中使用快速傅立葉轉換，結合時間波形，可以分析簡諧運動之機械聲音壓力位準變化。Wen *et al.*[4]針對運轉有噪音之壓縮機進行噪音頻率分析，透過麥克風與加速規進行實驗模態分析(experimental modal analysis, EMA)，得到壓縮機組件之自然頻率，並與壓縮機運轉噪音進行比較，發現是儲液瓶之自然頻率接近壓縮機頻率，引起共振所產生噪音。

兩刷馬達運轉時，會因內部零件故障，使得馬達運轉發出噪音，運用診斷不同形式馬達之噪音量測與特徵分析。王等人[5]對一組具 12 音階的竹製打擊樂器進行聲音特性探討，將時間域波形透過快速傅立葉轉換(fast Fourier transform, FFT)處理，以頻譜分析方式進行分析。Oehlmann[6]使用時頻圖於故障馬達零組件之分析，得到故障馬達零組件之振動特性，並分析故障馬達時頻圖特徵頻率之對應情形。Park *et al.* [7]針對齒輪箱的故障馬達及正常馬達進行時頻分析，透過比對兩者時頻圖，可以了解馬達運轉之故障頻譜特徵。Berntsen *et al.*[8]對故障滾動軸承的運轉頻率使用時頻圖，並結合包絡線進行分析，可以確認滾動軸承故障時之運轉頻率的變化，並應用於預防機械故障中。

針對運轉頻率較低的馬達零件，運用時間波形分析技術，探討運轉狀態與時間波型的關聯。Abboud *et al.*[9]針對運轉的故障馬達進行時間波形分析，可以了解有輕微故障的馬達，在時間波形上，仍然可以呈現循環的信號。Antoni[10]分析機械之循環平穩時間域訊號，分析馬達齒輪箱的運轉情形，在運轉不平穩時，時間域訊號循環情形不穩定。

本文探討兩刷馬達之零件故障與運轉之噪音與振動之間的關聯性，透過精密麥克風與三軸向加速規，量測馬達之噪音與振動，以時頻、頻譜與時間域圖，比較不同分析方式、量測通道、馬達之間的振動與噪音特徵，診斷各種故障分析方法及其特徵，探討與故障部位之間的關聯性，得到馬達故障部位對應之特徵頻率。最後，依照各步驟程序，建立兩刷馬達之噪音與振動分析特徵對應故障部位之分析流程，未來可應用於兩刷馬達的狀態監測以及故障診斷。

二、兩刷馬達結構與運轉特徵頻率

本章將對三種不同形式的故障兩刷馬達，量測其運轉振動與噪音頻譜，其中三種故障形式為，蝸輪蝸桿故障、滾動軸承故障及換向器故障的兩刷馬達，依序探討馬達的種類、零組件接合情形與兩刷馬達故障部位，彙整馬達之運轉頻率特徵。

2.1 兩刷馬達結構與三種故障部位

本節說明兩刷馬達實體結構組成、兩刷馬達的類型，以及三個馬達故障的部位。圖 1 為兩刷馬達實體圖，馬達類型為直流馬達，其定子由軛鐵殼與磁鐵構成，磁鐵貼於軛鐵內側表面，將 3 種不同故障部位之兩刷馬達進行編號，#1 為蝸輪蝸桿故障，#2 為滾動軸承故障，#3 為換向器故障之兩刷馬達。圖 2 為兩刷馬達模型圖，馬達主要的零件組成結構，總共分為 7 個部分，表 1 為兩刷馬達零件總表，馬達組件接合部分主為，定子與換向器之軸承接合，轉子與軸承接合，電刷與銅片接觸，蝸輪蝸桿接合運轉。

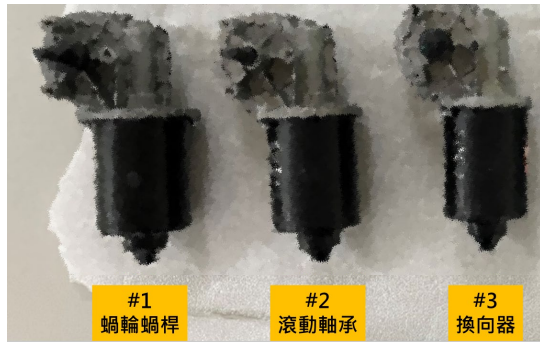


圖 1 兩刷馬達實體圖

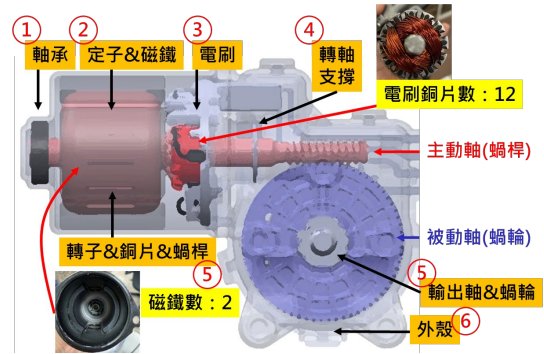


圖 2 兩刷馬達模型圖

表 1 兩刷馬達零件總表

序號	馬達零件	零件數量
1	軸承	
2	定子(外殼&磁鐵)	定子磁鐵數: 2
3	電刷	電刷數: 3
4	轉軸支撐	
5	輸出軸&蝸輪	蝸輪齒數: 55
6	換向器(轉子&銅片&蝸桿)	銅片數: 12
7	馬達外殼	

表 2 兩刷馬達運轉頻率特徵表

運轉特徵 頻率	變數符號及 階次(order)	order (X)	蝸輪蝸桿故障(#1)		滾動軸承故障(#2)		換向器故障(#3)	
			頻率(Hz)	週期	頻率(Hz)	週期	頻率(Hz)	週期
馬達 (motor) 轉速/頻率	$f_m = 1X$	1X	$f_m = 36.25$ (2175rpm)	$t_m = 27.5\text{ms}$	$f_m = 37.6$ (2256rpm)	$t_m = 26.6\text{ms}$	$f_m = 36.5$ (2190rpm)	$t_m = 27.4\text{ms}$
蝸桿軸 (worm) 轉速頻率	$f_w = f_m = 1X$	1X	$f_w = 36.25$	$t_w = 27.5\text{ms}$	$f_w = 37.6$	$t_w = 26.6\text{ms}$	$f_w = 36.5$	$t_w = 27.4\text{ms}$
蝸輪(gear) 轉速頻率	$f_g = \frac{f_w}{N_g} = 0.018X$, $N_g = 55$ (蝸輪齒數)	0.018X	$f_g = \frac{f_w}{N_g} = 0.659$	$t_g = 1.517\text{ s}$	$f_g = \frac{f_w}{N_g} = 0.684$	$t_g = 1.463\text{ s}$	$f_g = \frac{f_w}{N_g} = 0.663$	$t_g = 1.506\text{ s}$
電刷(brush) 轉速/頻率	$f_b = N_b f_m = 12X$ $N_b = 12$ (電刷銅片數)	12X	$f_b = 12f_m = 435$	$t_b = 2.29\text{ms}$	$f_b = 12f_m = 451.2$	$t_b = 2.21\text{ms}$	$f_b = 12f_m = 438$	$t_b = 2.28\text{ms}$
電刷 轉速/頻率 倍頻	$f_{b,h} = hf_b$, $h = 1, 2, \dots$	12X, 24X, 36X, ...	$f_{2b} = 870$	$\frac{1}{2}t_b = 1.14\text{ms}$	$f_{2b} = 902.4$	$\frac{1}{2}t_b = 1.10\text{ms}$	$f_{2b} = 876$	$\frac{1}{2}t_b = 1.14\text{ms}$

2.2 兩刷馬達運轉特徵頻率

根據馬達零件與零件之接合情形彙整相關轉速頻率，表 2 為兩刷馬達運轉頻率特徵表，說明如下：

1. 轉子運轉頻率為馬達轉速頻率 f_m ，定義為一個階次(order)為 1X，可方便推算其

他運轉頻率之階次。

2. 蝸桿軸轉速頻率 f_w 與馬達轉速頻率相同，即 $f_w = f_m$ 。運轉時，會受到定子、換向器銅片與蝸桿等其他零件影響，會呈現 f_w 倍數情形。蝸輪齒數 $N_g=55$ 齒，當蝸桿軸每轉一圈，蝸輪運轉一齒，蝸輪轉速頻率 $f_g = f_w/N_g$ 。
3. 電刷與換向器之銅片接觸，接觸之換向器銅片數量 $N_b=12$ 片，電刷轉速頻率 $f_b = N_b f_m$ 。電刷轉速頻率 f_b 會受到其他零件影響，呈現電刷轉速頻率 f_b 倍數情形，為 $h f_b$ ， $h=1,2,\dots$ 。

將上述馬達運轉特徵頻率，以頻率(Hz)及階次(X)形式呈現，將應用於時頻與頻譜分析。計算各部件的運轉頻率週期，後續應用於時間波形分析，將時間週期與馬達運轉頻率特徵進行比對，可以得到振動噪音特徵，以進行診斷。

三、兩刷馬達之振動噪音量測

本章介紹兩刷馬達在運轉時產生的振動噪音與馬達部件之間的對應關係，並說明兩刷馬達於運轉狀態下，振動噪音量測之架設情形，透過實驗量測可獲得兩刷馬達運轉之振動噪音量測結果，後續將針對實驗結果，進行特徵分析。

圖 3 為兩刷馬達振動傳遞路徑流程圖，兩刷馬達運轉之相關頻率會經過馬達系統之結構路徑，傳遞到兩刷馬達之外，產生振動響應(Response)訊號 $a_i(t)$ ，再藉由空氣路徑，產生噪音響應(Response)訊號 $p_k(t)$ ，後續可以根據振動與噪音響應，來規劃兩刷馬達運轉噪音振動量測之架設，透過三軸向加速規與精密麥克風，量測兩刷馬達運轉之振動噪音，在兩刷馬達運轉狀態，量測振動與噪音之響應，分為振動與噪音兩部分：

1. R-test-V (R=Response、V=Vibration)，使用三軸向加速規，量測加速度 $ax(t)$ 、 $ay(t)$ 、 $az(t)$ 。
2. R-test-N (A=Air、N=Noise)，使用精密麥克風，量測聲音壓力 $p(t)$ 。

圖 4 為兩刷馬達運轉之振動噪音實驗量測架設圖，說明兩刷馬達於運轉狀態下，量測振動與噪音響應之架設情形。透過三軸向加速規，量測加速度響應，將加速規固定於轉子-定子外殼，其量測方向設定為：轉子軸向設為 X 方向；轉子徑向、垂直蝸輪設為 Y 方向；轉子徑向、平行蝸輪設為 Z 方向。透過聲音與振動量測系統(Sound and Vibration Measurement, SVM)進行數據量測與分析。量測設定，Window 加權函數選擇 Hanning，運轉噪音量測時間為 60 秒，有效頻寬(fc)為 20000 Hz，頻率解析度(df)為 1.5625 Hz。透過實驗量測，探討兩刷馬達運轉之振動噪音，於後續章節進行分析探討。

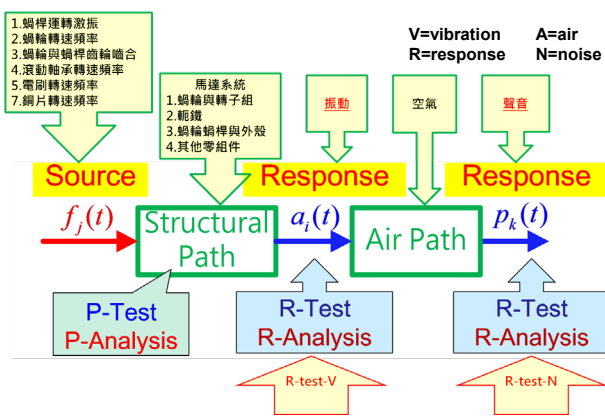


圖 3 兩刷馬達振動傳遞路徑流程圖

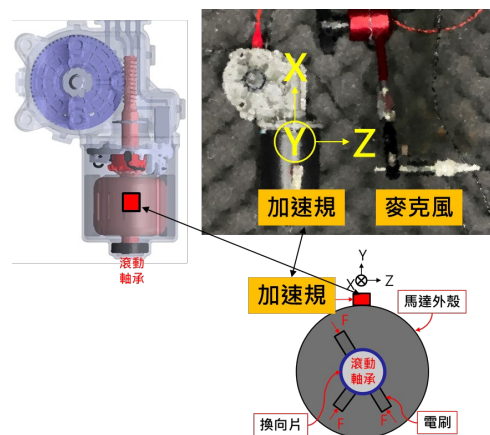


圖 4 兩刷馬達運轉之振動噪音實驗量測架設圖

四、不同故障兩刷馬達之振動噪音特徵比較探討

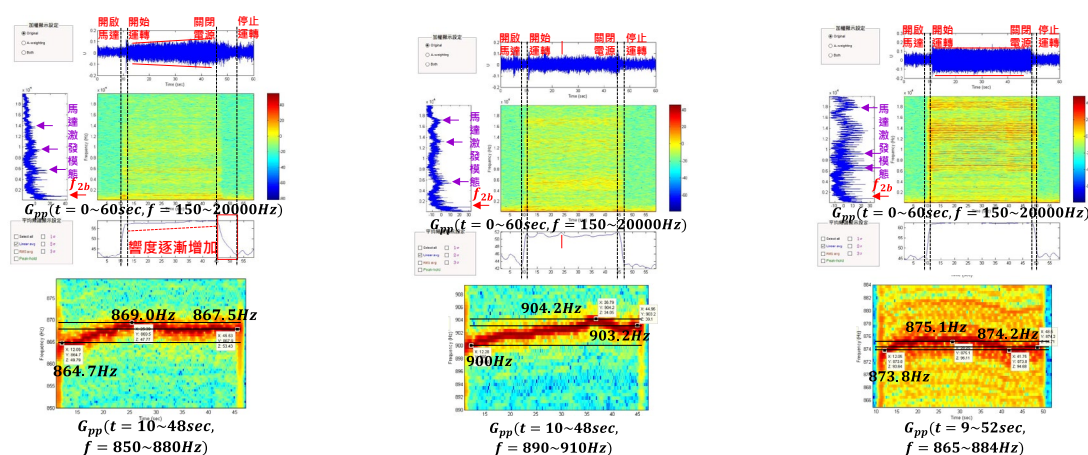
本節探討不同故障兩刷馬達之振動噪音特徵，透過振動響應訊號與噪音響應訊號，分別進行時頻、頻譜與時間波形分析，比較3種不同故障的兩刷馬達之特徵分析。

4.1 時頻分析

透過 SVM 進行時頻分析，SVM 介面主要分為4部分，(1)時間波形 $p(t)$ 、(2)時頻圖 $G_{pp}(f, t)$ 、(3)聲音響度圖 $L_p(t)$ 以及(4)自身功率頻譜 $G_{pp}(f)$ 。以 $G_{pp}(f, t)$ 時頻圖為基準，比較分析方式對應之量值，說明各兩刷馬達時頻分析特徵。觀察圖5不同故障兩刷馬達音訊之時頻分析圖，分析特徵如下：

1. 根據圖5(a)時間波形 $p(t)$ ，對應時間之響度圖 $L_p(t)$ ，會發現有緩慢上升趨勢，並且而在兩刷馬達關閉電源到完全停止運轉，花費約5s，響度下降趨勢較慢。以#1：蝸輪蝸桿故障兩刷馬達與其他故障兩刷馬達加速度之響度圖相互比較，可以發現圖5(b)#2：滾動軸承故障兩刷馬達之 $p(t)$ 與 $L_p(t)$ 不穩定；圖5(c)#3：換向器故障兩刷馬達之 $p(t)$ 與 $L_p(t)$ 運轉平穩，無上升、下降趨勢。
2. 在自身功率頻譜 $G_{pp}(f)$ ，發現三種兩刷馬達最大峰值頻率接近2倍的電刷轉速頻率 f_{2b} ，故判斷有電刷轉速倍頻現象 hf_b ；而電刷轉速倍頻 hf_b 之振動，會激發馬達本身的自然頻率，產生模態激振頻率的峰值。此外在圖5(c)之 $G_{pp}(f)$ ，可以發現 hf_b 倍頻峰值量值比其他馬達的量值高，判斷是換向器與電刷接觸時，因為接觸不良導致撞擊，使振動量值變大。
3. 深入分析時頻圖 $G_{pp}(f, t)$ ，馬達開始穩定運轉時，到關閉馬達前時間段，發現頻率不一致；擷取並觀察時頻圖最大峰值頻率部分，可以發現運轉頻率不穩定。

藉由時頻分析，比較三種故障兩刷馬達之運轉時頻分析特徵，發現當馬達運轉時，峰值頻率隨時間變化，推測為兩刷馬達運轉過程，有轉速變化；由自身功率頻譜 $G_{pp}(f)$ ，觀察到，最大峰值頻率接近 f_{2b} ，推測有倍頻現象，激發了馬達結構本身的自然頻率。



(a) #1：蝸輪蝸桿故障兩刷馬達 (b) #2：滾動軸承故障兩刷馬達 (c) #3：換向器故障兩刷馬達

圖5 不同故障兩刷馬達音訊之時頻分析圖

4.2 頻譜分析

本節探討故障兩刷馬達運轉噪音振動之頻譜分析，透過實驗量測，獲取馬達運轉振動噪音響應，分析馬達結構自然頻率被激發之主要峰值頻率，以及馬達運轉相關頻率之特徵。接續進行平滑化頻譜曲線分析，判斷頻譜中明顯峰值區域。在三種故障兩刷馬達

中，針對有滾動軸承故障兩刷馬達，另外進行特徵分析，來判斷該兩刷馬達運轉頻譜對應之滾動軸承故障頻率。藉由比較三種故障兩刷馬達運轉之平滑化頻譜之特徵，以了解並期望判斷兩刷馬達故障部位具體的對應頻譜特徵與關聯性，未來有機會透過頻譜特徵，快速檢測兩刷馬達故障部位。

4.3 頻譜與平滑化頻譜曲線分析

透過馬達運轉振動噪音頻譜，藉由頻譜分析，觀察原始頻譜以及平滑化頻譜曲線，判斷主要峰值頻率與頻譜分析特徵。圖 6 為不同故障兩刷馬達原始頻譜曲線與平滑化頻譜曲線 0~5000 Hz 比較圖，首先觀察原始頻譜曲線，可觀察到馬達運轉頻率 f_m 與電刷運轉頻率 f_b 之倍頻情形，並且可以觀察到主要峰值頻率，有振幅調制 (Amplitude Modulation, AM) 情形，其中心頻率為 f_{2b} ，邊帶頻率 (Side Band Frequency) 為馬達運轉頻率 f_m 。

為了瞭解兩刷馬達運轉頻率對結構自然頻率之激發情形，因此將兩刷馬達運轉振動噪音頻譜，進行曲線平滑化處理，去除馬達運轉頻率 f_m 倍頻峰值，平滑化之馬達與電刷運轉倍頻之頻率峰值，可擷取兩刷馬達運轉之振動噪音響應之激振頻率，觀察三個兩刷馬達皆有激發振動之頻率，可以判斷 $f_{2b} \sim f_{3b}$ 之間，有明顯激振頻率，所以導致兩刷馬達運轉頻率在 f_{2b} 呈現較大量值。

接續比較三種故障兩刷馬達運轉之平滑化頻譜分析特徵，圖 7 為不同故障兩刷馬達音訊平滑化頻譜分析特徵綜合比較圖，藍色曲線為蝸輪蝸桿故障 (#1)，紅色曲線為滾動軸承故障 (#2)，綠色曲線為換向器故障 (#3)，藉由平滑化頻譜曲線特徵，可以找到滾動軸承故障與換向器故障兩刷馬達之運轉頻率頻譜特徵：

1. #2：滾動軸承故障兩刷馬達之運轉頻率，在圖 7 (b) X 方向與 (d) Z 方向，可以找到馬達運轉激振頻率，在 2000~5000 Hz，有激振模態。
2. #3：換向器故障兩刷馬達之運轉頻率，在圖 7 可以看到 8000 Hz 以上頻率，有明顯的電刷倍頻，因此判斷是換向器故障，導致電刷與換向器撞擊，產生振動與噪音。

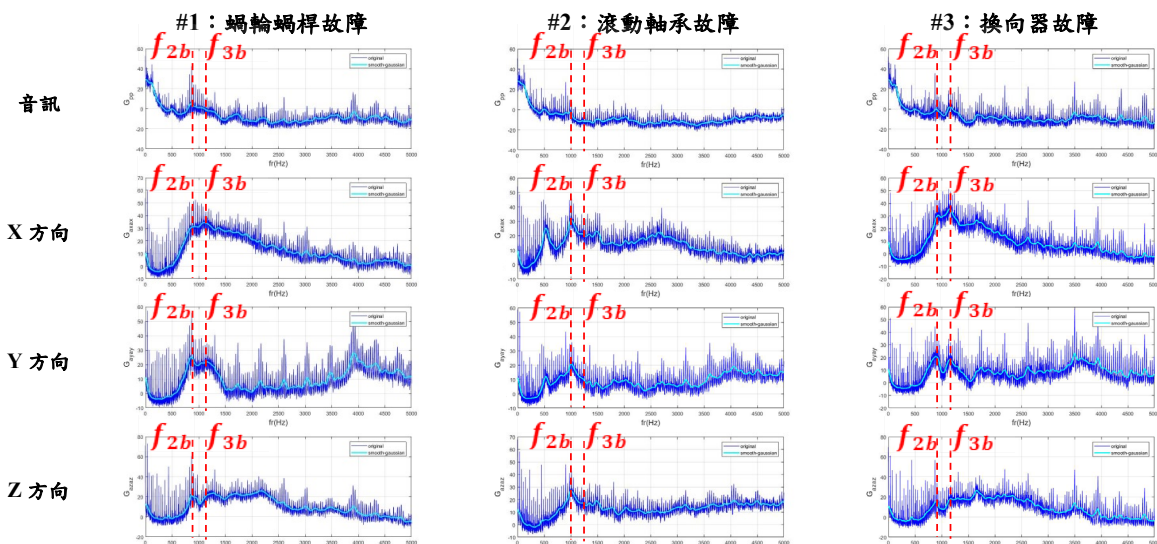
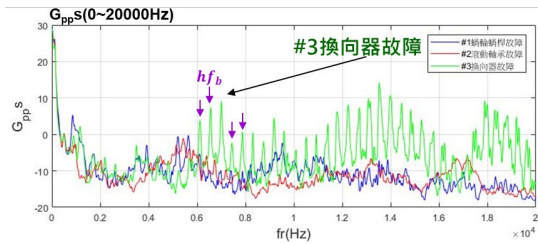
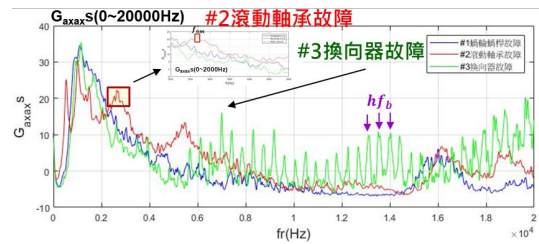


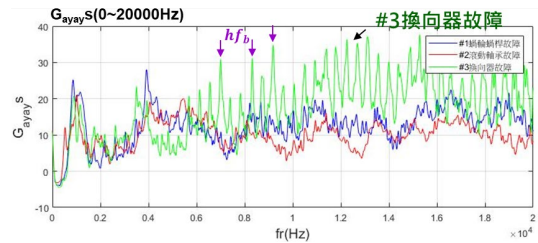
圖 6 不同故障兩刷馬達原始頻譜曲線與平滑化頻譜曲線 0~5000 Hz 比較圖



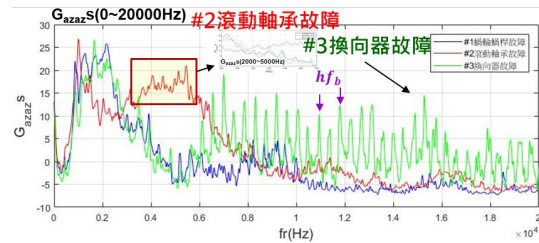
(a) $G_{pps}(0\sim 20000\text{ Hz})$ 頻譜圖



(b) $G_{axaxs}(0\sim 20000\text{ Hz})$ 頻譜圖



(c) $G_{ayays}(0\sim 20000\text{ Hz})$ 頻譜圖



(d) $G_{azazs}(0\sim 20000\text{ Hz})$ 頻譜圖

圖 7 不同故障兩刷馬達 0~20000 Hz 平滑化頻譜分析特徵綜合比較圖

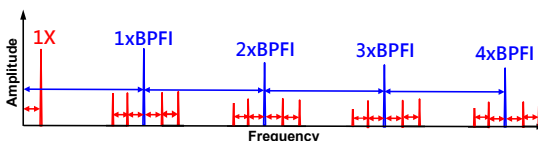


圖 8 滾動軸承故障 BPF 滾動軸承內圈對應通過頻率示意圖

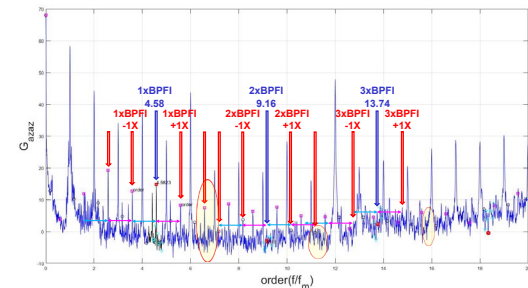


圖 9 #2：滾動軸承故障兩刷馬達 Z 方向(轉子徑向，平行蝸輪)BPF 滾動軸承內圈通過頻率圖

藉由頻譜平滑化曲線，可以明顯觀察到，換向器故障(#3)兩刷馬達與滾動軸承故障(#2)兩刷馬達之運轉特徵，而蝸輪蝸桿故障(#1)馬達之故障部位，蝸輪轉速頻率 f_g 約為 0.6 Hz，較難在頻譜分析中觀察到，則需要在後續時間波形分析章節進行探討。

4.4 #2 兩刷馬達滾動軸承故障頻率分析

在三種故障兩刷中，滾動軸承故障(#2)兩刷馬達，根據頻譜特徵與滾動軸承內圈通過頻率(Ball Pass Frequency of inner-ring, BPF)的關聯，判斷該兩刷馬達之運轉頻譜對應之滾動軸承故障頻率。圖 8 為滾動軸承故障 BPF 滾動軸承內圈對應通過頻率示意圖，說明在滾動軸承內圈故障時，以 1xBPFI 為中心頻率，有馬達轉速頻率 1X 之邊帶頻率，呈現振幅調制 AM。並且以 1xBPFI 為基頻，可觀察到 BPF 有倍頻情形，而倍頻同樣呈現振幅調制 AM，有馬達轉速頻率 1X 之邊帶頻率。BPF 參考值方程式如式(1)，其中 NB 為滾珠數量。

$$0.6 \times NB \times f_m \quad (1)$$

滾動軸承故障(#2)兩刷馬達之滾動軸承故障部位頻率分析結果，判斷滾動軸承內圈部分故障，圖 9 為 #2：滾動軸承故障兩刷馬達 Z 方向(轉子徑向，平行蝸輪)BPF 滾動軸承內圈通過頻率圖，X 軸為階次 X(order)，為馬達轉速頻率(Hz)，以 4.58X 為 BPF 滾動軸承內圈通過頻率，可以觀察到對應之 1X 邊帶頻率，同時存在倍頻現象，於 9.16X 為 2 倍的 BPF，且 2BPFI 有 1X 邊帶頻率，證明滾動軸承有內圈故障。

4.5 時間波形分析

在分析案例的故障兩刷馬達中，有蝸輪蝸桿故障之兩刷馬達，而蝸輪轉速頻率 f_g 約為 0.6 Hz，較難在頻譜分析中觀察到，因此，需要進行時間波形分析，來判斷蝸輪運轉週期對應之頻率特徵。圖 10 為不同故障兩刷馬達 X 方向(轉子軸向)之 5s 時間波形分析的特徵綜合比較圖，其中藍線為馬達運轉振動之原始時間波形曲線，紅線為時間波形之包絡線，擷取各兩刷馬達轉子軸向 40~45 s 之時間域，在圖 10(a)觀察到週期性波形為蝸輪轉速週期 t_g ，即 f_g 蝸輪轉速頻率，並且觀察到週期性波形為馬達運轉週期 t_m ，與其他馬達比較，確認蝸輪蝸桿故障馬達之 t_m 振動加速度高於其他兩種馬達的 t_m 振動加速度，推測是因為兩刷馬達蝸輪蝸桿接合情形不佳，導致 t_g 與 t_m 振動加速度變大，因此判斷兩刷馬達蝸輪蝸桿有故障。蝸輪轉速頻率計算方程式如式(2)。

$$f_g = \frac{f_w}{N_g} \quad (2)$$

五、故障兩刷馬達之分析診斷流程

本文透過三種故障兩刷馬達之運轉振動噪音的分析實務案例，本章將建立故障兩刷馬達量測、分析和診斷流程。圖 11 為兩刷馬達故障振動噪音之量測特徵分析流程圖，詳細說明如下：

1. 本文根據的 3 種不同故障型式的兩刷馬達，進行診斷，分別為蝸輪蝸桿故障(#1)馬達、滾動軸承故障(#2)馬達以及換向器故障(#3)兩刷馬達，使用透過三軸向加速規與精密麥克風，藉由穩定供應電流，使馬達穩態運轉，量測其振動(R-test-V)與噪音(R-test-N)響應。
2. 透過時頻分析得到運轉時間對應之自身功率頻譜 $G_{pp}(f, t)$ 與聲音壓力位準 $L_p(t)$ ，自身功率頻譜 $G_{pp}(f)$ 進行頻譜分析，時間波形 $P(t)$ 進行時間波形分析。
3. 診斷馬達振動噪音頻率與運轉特徵頻率之關聯性，獲得故障診斷結果，探討各量測通道之分析結果，如時頻、頻率與時間之異常現象及其發生原因。
 - (1) 時頻分析可判斷頻率會隨時間產生變化，都是頻率上升，經過一段時間後再下降，並且馬達自然頻率會被激發。
 - (2) 頻譜分析可找到換向器故障(#3)兩刷馬達之運轉特徵，在 8000 Hz 以上頻率，有明顯的電刷倍頻，而滾動軸承故障(#2)兩刷馬達在 2000~5000 Hz 可以找到不同於其他馬達運轉之模態激振頻率，與滾動軸承故障有關。
 - (3) 時間波形分析觀察到週期性波形為蝸輪轉速週期 t_g ，即 f_g 蝸輪轉速頻率，並且觀察到週期性波形為馬達運轉週期 t_m ，經與其他馬達比較，確認蝸輪蝸桿故障馬達之 t_m 振動加速度高於其他兩種馬達的 t_m 振動加速度。
4. 本文彙整 3 個兩刷馬達之運轉振動噪音分析結果進行診斷，判斷故障部位對應之頻譜、時間波形的分析特徵，未來若分析特徵數量足夠，可以進行兩刷馬達之運轉振動噪音盲測，即只使用兩刷馬達之運轉振動噪音進行分析，便可以透過分析特徵，得知故障部位，方便進行後續馬達故障改善。

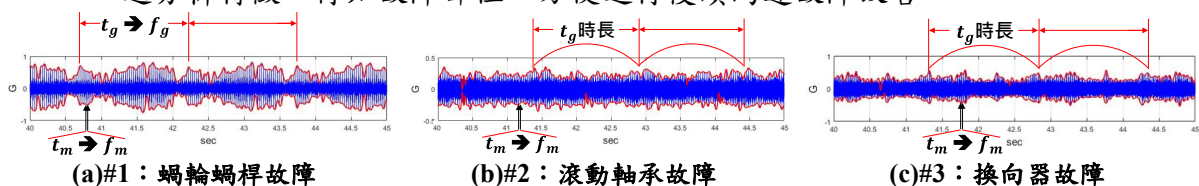


圖 10 不同故障兩刷馬達 X 方向(轉子軸向)之 5s 時間波形分析的特徵綜合比較圖

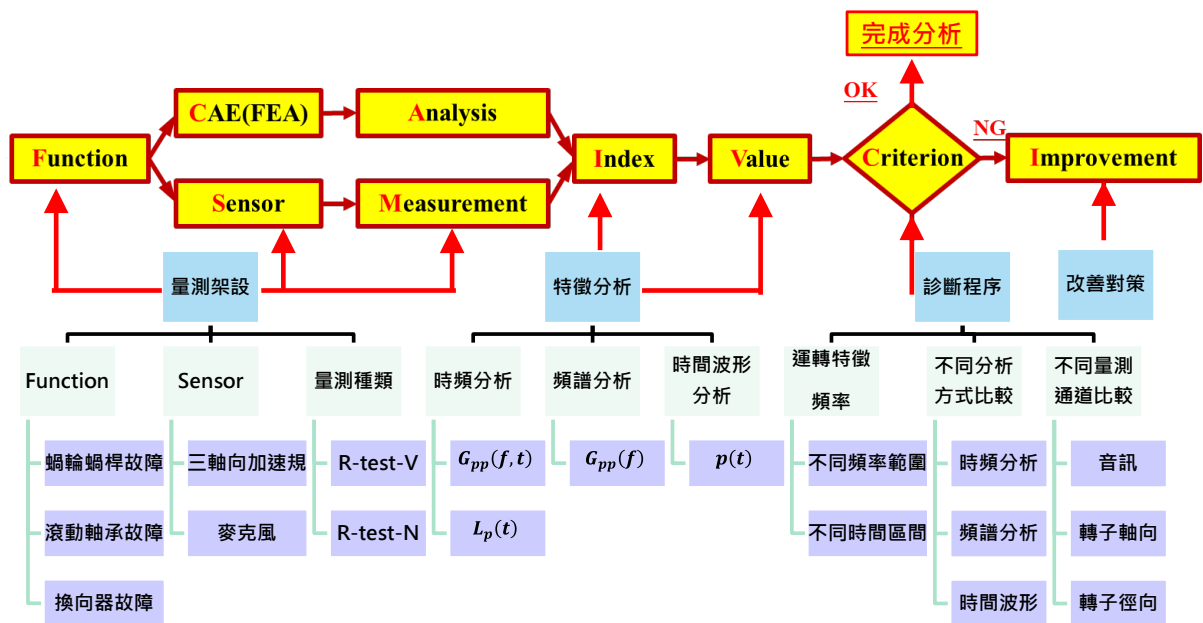


圖 11 兩刷馬達故障振動噪音之量測特徵分析流程圖

六、結論

本文探討三種故障兩刷馬達運轉之振動噪音，有蝸輪蝸桿故障(#1)、滾動軸承故障(#2)及換向器故障(#3)兩刷馬達，探討兩刷馬達之零件故障與運轉之噪音與振動的關聯性，透過時頻、頻譜與時間域分析，探討各種故障部位之間的關聯性，建立馬達之噪音與振動分析特徵對應故障部位之診斷流程，其主要結論如下：

1. 透過時頻分析、頻譜分析與時間波形分析，得到運轉時間對應之自身功率頻譜 $G_{pp}(f, t)$ 、聲音壓力位準 $L_p(t)$ 、時間波形 $p(t)$ 及自身功率頻譜 $G_{pp}(f)$ ，並透過與馬達運轉頻率特徵進行比對，診斷各自對應之特徵與振動噪音產生原因。
2. 進行兩刷馬達噪音振動之時頻分析特徵，可發現其最大頻率峰值會隨時間產生變化，代表兩刷馬達並非完全固定轉速，並且馬達自然頻率會被激發。
3. 進行兩刷馬達運轉噪音振動之頻譜分析，透過觀察原始頻譜曲線與平滑化頻譜曲線，分析兩刷馬達運轉相關頻率與倍頻情形：
 - (1) 可以觀察到主要峰值頻率，有振幅調制 AM 情形，其中心頻率為 $2f_b$ ，邊帶頻率為馬達運轉頻率 f_m 。將頻譜曲線平滑化，進行分析，判斷兩刷馬達之運轉激振頻率在 $f_{2b} \sim f_{3b}$ 之間，所以兩刷馬達運轉頻率在 f_{2b} 呈現較大量值。
 - (2) 換向器故障(#3)兩刷馬達之運轉特徵，在 8000 Hz 以上頻率，有明顯的電刷倍頻，而滾動軸承故障之兩刷馬達在 2000~5000 Hz 可以找到不同於其他馬達運轉之模態激振頻率。
 - (3) 針對滾動軸承故障(#2)兩刷馬達，額外滾動軸承故障分析，發現 Z 方向(轉子徑向，平行蝸輪)有 BPF1 滾動軸承內圈通過頻率 4.58X，且可以觀察到對應之 1X 邊帶頻率，同時存在倍頻現象，於 9.16X 為 2 倍的 BPF1，且 2BPF1 有 1X 邊帶頻率，證明滾動軸承有內圈故障。
4. 蝸輪蝸桿故障(#1)兩刷馬達之時間波形，觀察到 X 方向(轉子軸向)的加速度響應，有較大的蝸輪轉速週期 t_g 與馬達運轉週期 t_m 。
5. 透過量測蝸輪蝸桿故障、滾動軸承故障、換向器故障之三種故障部位之兩刷馬達運轉之振動噪音，確認故障部位對應之特徵：

- (1) 蝸輪蝸桿故障(#1)兩刷馬達，採用時間波形分析是比較有效的方法，可觀察明顯馬達運轉週期。
 - (2) 滾動軸承故障(#2)兩刷馬達，在馬達轉速頻率 f_m 到電刷轉速頻率 f_b 間，會發現有滾動軸承故障之 BPF 滾動軸承內圈通過頻率。
 - (3) 換向器故障(#3)兩刷馬達，可在 8000 Hz 以上頻譜圖，觀察到明顯電刷倍頻之頻率峰值 hf_b 。
6. 本文建立了馬達之噪音與振動分析特徵對應故障部位之診斷流程，未來可藉由此分析程序，探討不同類型故障兩刷馬達之診斷及分析，進而找到馬達故障的原因，作為後續的改善參考依據，並且可應用於不同故障馬達的監測和分析診斷。

七、參考文獻

1. 王栢村、王文志、王廷維、黃啟順，中華民國振動與噪音工程學會第 21 屆學術研討會，「機械噪音測量和診斷定制程序：雙螺桿壓縮機之應用」，台北，論文編號：A0011，2013。
2. 王栢村、陳柏儉、余易璋、林聖傑、王文志，精密機械與製造科技研討會，「迴轉式壓縮機組裝於冷氣機之振動噪音特性探討」，屏東，論文編號：A-036，2015。
3. Z.Feng, F.Ming and F.Chu, "Recent Advances in Time-frequency Analysis Methods for Machinery Fault Diagnosis: A Review with Application Examples", Mechanical Systems and Signal Processing, vol.38, pp. 165-205, 2013.
4. Z.Wen, Y.Zhang, Y.Hu, R.Zhang, H.Gu and J.Zhang, "Research on Low Frequency Vibration of Rotary Compressor" 24th ICEC, no.1424,2018.
5. 王栢村、俞均翰、林冠廷、楊博舜、王昱棠、黃家賢、吳盈輝，第二十三屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，「竹製打擊樂器之聲音特性探討」，台北，論文編號：B-5，2015。
6. H.Oehlmann, D.Brie, M.Tomczak and A.Richard, "A Method for a Analysing Gearbox Faults Using Time-Frequency Representations", Mechanical Systems and Signal Processing, vol.11, pp.529-545, 1997.
7. J.Park, Y.Kim, B.D.Youn, Y.Chen, M.J.Zuo and Y.C.Bae, "An Image-Based Feature Extraction Method for Fault Diagnosis of Variable-Speed Rotating Machinery", Mechanical Systems and Signal Processing, vol.167, pp. 108-120, 2022.
8. J.Berntsen, A.Brandt and K.Gryllias, "Enhanced Demodulation Band Selection Based on Operational Modal Analysis (OMA) for Bearing Diagnostics", Mechanical Systems and Signal Processing, vol.181, pp. 109-125, 2022.
9. D.Abboud, S.Baudin, J.Antoni, D.Rémond, M.Eltabach and O.Sauvage, "The Spectral Analysis of Cyclo-non-stationary signals", Mechanical Systems and Signal Processing, vol.75, pp. 280-300, 2016.
10. J.Antoni, "Cyclic Spectral Analysis in Practice," Mechanical Systems and Signal Processing, vol.21, pp. 597-630, 2007.