

馬達軸承故障線上診斷技術研究

葛世偉、李明遠

國立高雄應用科技大學 電機工程學系

通訊作者電子郵件：shihwei@mail.ee.kuas.edu.tw

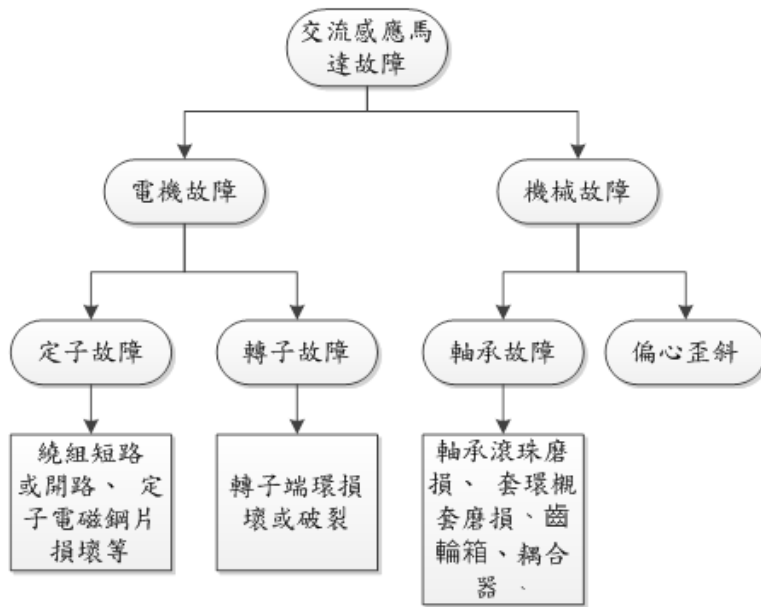
摘 要

馬達動力為生產製造不可或缺的動力來源，一旦故障發生必須停止生產排除故障原因，方可繼續生產，如能及時預測發生提前即予更換，就可避免因故障所衍生工安與意外災害發生，縮短停工影響，而馬達兩端必須藉助軸承支撐，一旦軸承受損會造成轉子偏心或轉子與定子間短路等現象；傳統的馬達故障診斷系統，是利用單一感測器收集馬達訊號加以分析。然而單一訊號可分析的故障種類有限，如購買國外線上診斷儀器屬昂貴之設備，本文即在討論藉馬達驅動器已具備之電壓、電流、速度感知器外，在馬達平台上裝設震盪與水平檢出電路，藉由震盪頻譜分析判斷轉子軸承是否發生異狀，驗證線上故障診斷，提前更換軸承，避面因軸承磨損造成馬達定子線圈短路，以及帶動之負載故障，減輕損害，同時希望展延至其他類型之馬達故障線上診斷。

關鍵字：故障診斷、電流感知、速度感知、線上故障診斷

一、緒 論

工廠之動力多使用三相馬達，其中又以交流三相感應馬達居多，較精密製造業則多使用三相永磁同步居多，因此一旦馬達故障將會影響生產進行與產量，如何預知進行維護減少故障突然停機所造成原物料及成品之損失，有時尚會造成公案線上人員之傷害，如何預為檢知進行預防保養降低損失與防止不幸事故發生，是工程維護與研究人員的重要課題；本研究以三相交流感應電動機異常行為為條件，由於存在故障和診斷的可能性因素頗多，對電機械研究者而言為一挑戰。從故障分類討論，可區分為電器故障與機械故障，其中機械故障中又以軸承 (bearing) 與齒輪箱所引起之振動故障具多，偏心 (Eccentricity) 其次；電器部分又可區分為定子故障與轉子故障等兩部分，如圖一所示[1-2]；又依電機電子協會統計馬達故障最多為軸承，其次為定子繞組如表一所示；但亦可區分為時域分析與頻域分析法。電動機線上狀態監測方法繁多，常見之監測法 (condition monitoring methods) 繁多，諸如振動監測法 (vibration monitoring methods)、熱監測法 (thermal monitoring)、化學監測法 (chemical monitoring)、噪音監測法 (acoustic emission monitoring)、電流信號頻譜分析法等；非線上則有田口分析法、快速傅立葉級數分析、模糊分析、神經網路基因分析法等；上述這些方法均需仰賴感測元件與昂貴的感測元件或測試專用儀表方可達成；振動監測、熱監測、化學監測、與噪音監測均可借助頻域頻譜分析。而生產線大多數均依賴可程式控制器 (Programmable Logical Controller, PLC) 與工業電腦組成之控制監控系統，且不論何種方法均需要電流、電壓、壓力、溫度、速度、與位置等信號之檢出至控制系統中，本文即在運用驅動器本身已有之電流檢出信號、電壓信號、平台上之震動感測頻率分析、溫度熱像檢出比對、偏心位移等感知器作為故障檢出與保護之判斷。



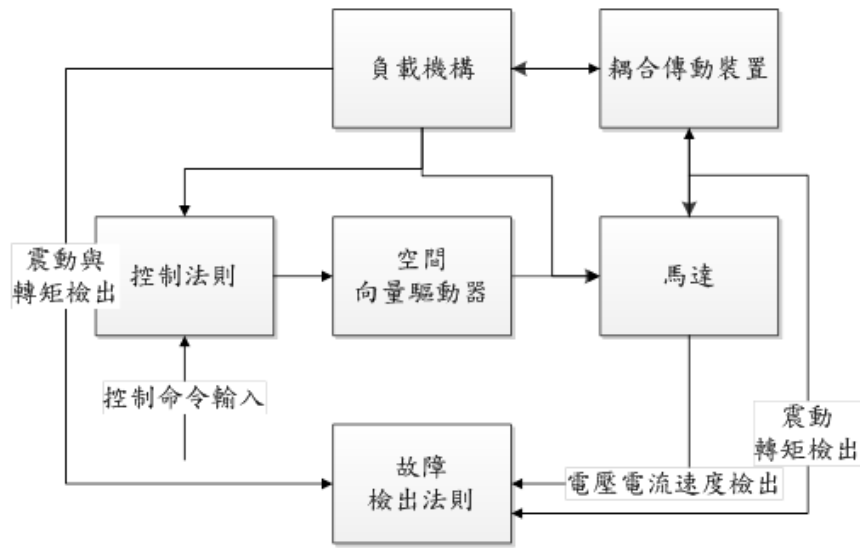
圖一 馬達機械故障與電器故障分類

表一 電機電子學會統計馬達故障之元件

故障元件類	IEEE-IAS	EPRI(Electric Power Research Institute)
軸承類	44%	41%
繞組類	26%	36%
轉子類	8%	9%
其它	22%	14%

二、系統架構

測試中使用線上偵測法及時檢出，一般由負載機構、耦和傳動裝置、馬達及驅動器、控制法則、以及故障檢出控制法則等單元組成，故障檢出控制法則其檢出信號有馬達與負載之電壓、電流、速度、位置、轉矩、震動頻率與噪音、以及熱變化等組成，至於控制法則則分為時域與頻域兩部分，藉由頻域與時域之響應曲線比對，較易分析故障成因。系統架構如圖二所示。



圖二 馬達控制系統故障分析方塊圖

2.1. 電流分析

可藉由定子電流之變化量與相位變化，當正常狀態時，三相電流均衡且向量何微零，即

$$i_a = I_m \cos(\omega t - \varphi) \tag{1}$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - \varphi - \frac{2}{3}\pi) \tag{2}$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - \varphi + \frac{2}{3}\pi) \tag{3}$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{4}$$

一旦發生某一相定子線圈短路或多項線圈短路，會造成氣隙轉矩 (air gap torque) 之變動，即氣隙轉矩與電流間之關係為

$$T = \frac{p}{2\sqrt{3}} [(i_a - i_b) \int [V_{ca} - R(i_c - i_b)] dt - (i_c - i_a) \int [V_{ab} - R(i_a - i_b)] dt] \tag{5}$$

藉由轉矩之變動量或波形之變動或李沙育圖形，判斷定子線圈短路或開路。

依據交流電機多使用空間向量，因此可藉 d-q 軸電流大小與相角之變化判斷電機故障[3]，即

$$I_{SD} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a - \frac{i_b}{\sqrt{6}} - \frac{i_c}{\sqrt{6}} \tag{6}$$

$$I_{sQ} = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{i_c}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sD} \\ I_{sQ} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2. 轉子不平衡

當轉子發生故障時必須藉助頻域響應或頻譜分析或轉矩頻譜，因轉子電阻不易量測且變化不大無規律性變化，如以三相四極 10Hp@220V 之電阻測試如表一所示。換言之軸心旋轉之軌跡不會正圓運動，此時可由相位平面顯示；尤其轉子端環斷裂常衍伸震動或與定子接觸短路發生。

表一 不同負載下馬達阻抗之變化估測

	R_s	X_{ls}	R_r	X_{lr}	X_m
實測值	3.3500	2.1803	1.9900	2.1803	51.4373
0% 負載	3.3450	2.1292	1.9210	2.1232	51.3186
誤差	0.1493	2.3437	3.46733	2.6189	0.2308
25% 負載	3.3150	2.2662	1.9410	2.2172	51.2906
誤差	1.04477	3.9398	2.4623	1.6924	0.2852
50% 負載	3.3550	2.1989	2.0310	2.1002	51.686
誤差	0.1493	0.8531	2.0603	3.6738	0.3330
75% 負載	3.3550	2.1452	1.9910	2.1302	51.3272
誤差	0.1493	1.6099	0.0503	2.2978	0.2140
100% 負載	3.4350	2.3452	1.9410	2.2522	51.2206
誤差	2.5373	7.5632	2.4623	3.2977	0.4213

2.3. 滾珠軸承

當滾珠軸承發生故障可區分為內環、外環、與滾珠等受損，不論何種情況，均會造成偏心運轉或可由馬達軸承兩側之震動檢測，且會產生噪音，適合使用頻譜分析法進行診斷。

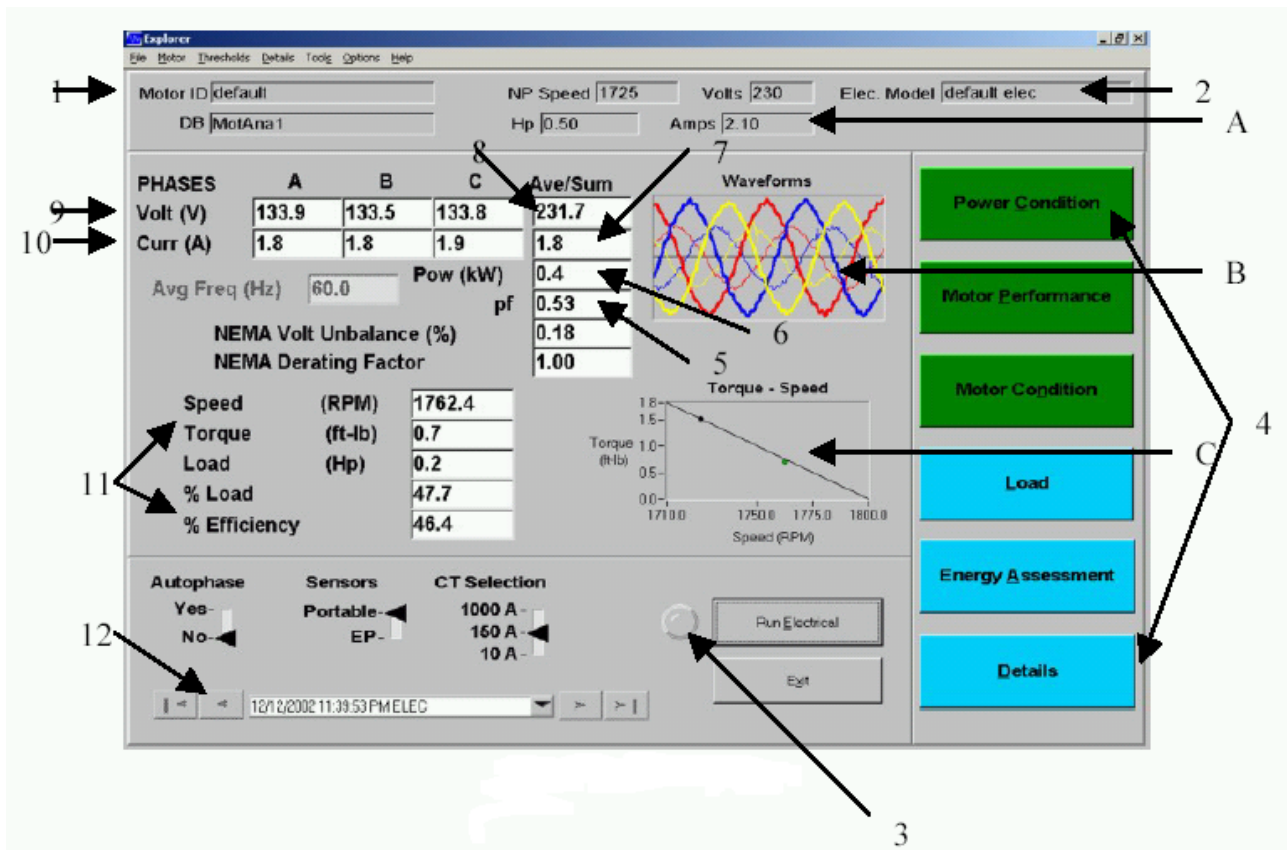
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (9)$$

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s)$$

三、案例討論

此以九頭連續金屬伸線製成為研究對象，其由供線、九組連續伸線張力控制 (tension control)、收線整列捲取控制、舞輪 (Dance roller) 組等所組成，本實測時將所有之信號送至電腦，同時由無線網路送至行動裝置上，進行遠端監控與線上監控，經由內設程式計算判定馬達是否正常運轉，電腦畫面區分為線電流、線電壓、

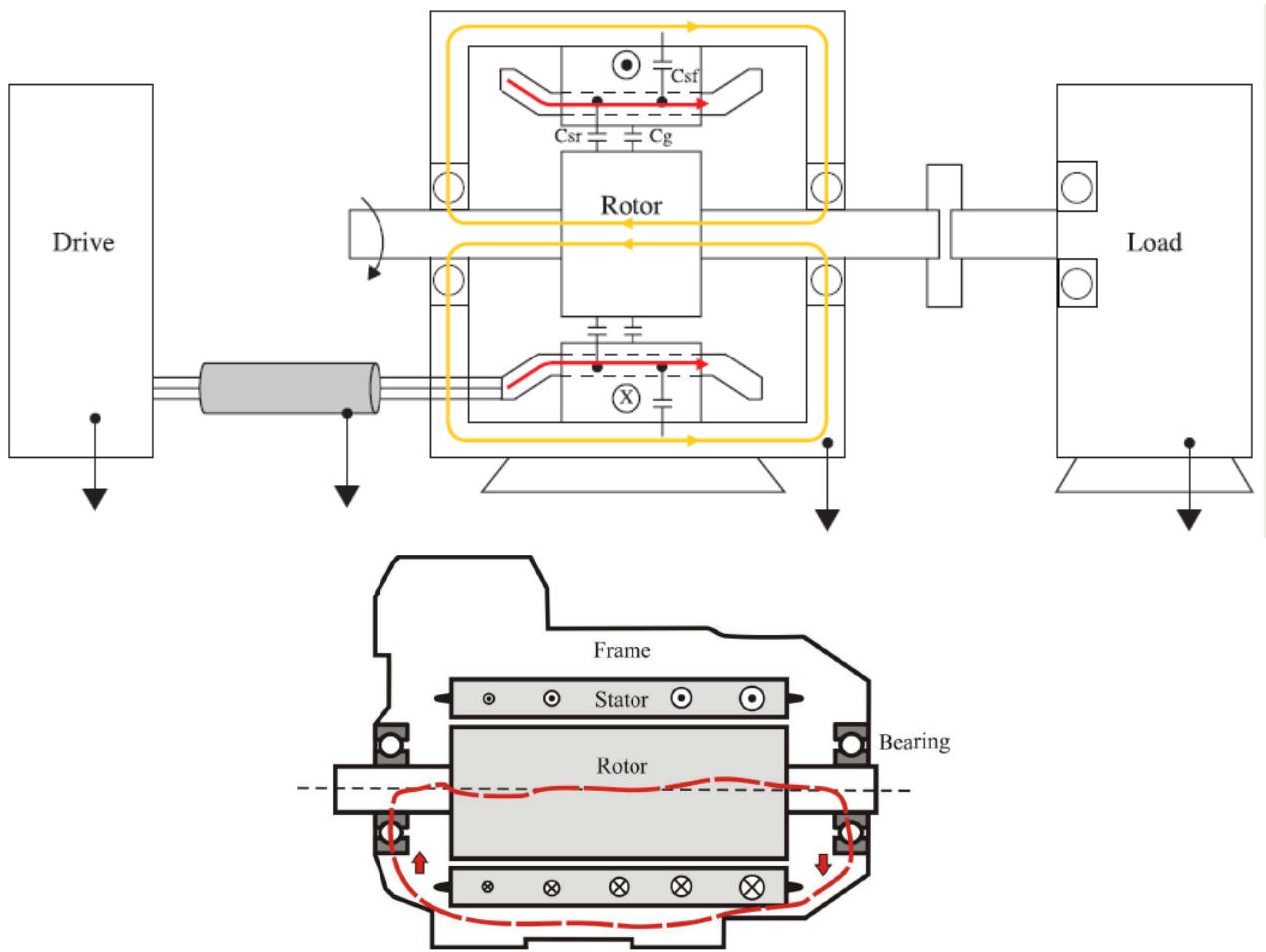
相電流、相電壓、對地電位、相位平面等，如圖三所示。藉由驅動器之電流檢出，一旦故障發生三相電流不平衡，阻值改變，功率因數隨之變動，因此相位平面隨之變動，由正圓變為橢圓或相移發生，由此發出警示訊號，提醒操作人員注意。



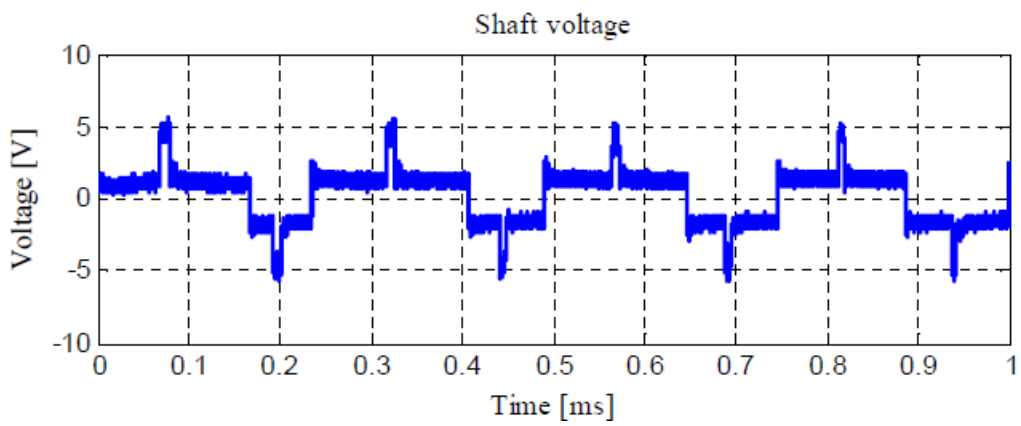
- 1.待測馬達代號；2.目前使用的電力種類；3.LED 動態指示燈；
- 4.測試功能選項；5.平均功率因數；6.總消耗功率；
- 7.線對線的平均電流；8.線對線的平均電壓；
- 9.各相對中心或對地電壓；10.各相相電流；
- 11.馬達各項測試數據；12.目前測試數據的檔案名稱；
- A.待測馬達標籤上標示的規格；B.電壓電流波型顯示；
- C.顯示 Torque 對時間或 Torque 對轉速之分析圖。

圖三 馬達線上監控畫面

一般張力控制系統之馬達多裝設滾珠軸承，油膜軸承較少見，故以滾珠軸承為探討，滾珠軸承故障多分為內環、外環、與滾珠損傷等；由於目前生產線多使用變頻器驅動馬達做變速或變轉矩控制，如果屏蔽沒做好，極易造成軸承因高頻率對軸承電流流動所形成的迴圈，此一高頻震盪使軸承磨損，軸承易歪斜，進而造成轉子與定子間氣隙不均勻偏心運轉，如圖四中的虛線所示，由軸、軸承和電機的框架形成一個迴圈；進而造成轉子偏擺旋轉，噪音增加，故可由頻譜與噪音檢出等發現軸承故障，將所量測蒐集到之信號經由快速傅利葉級數轉換為頻譜分析法，取出故障所需資料進行診斷；有時亦可由水平面的跳動震動或水平偏移量做輔助判斷，如圖五所示。頻譜圖診斷轉子故障與油膜軸承故障的重點在於 0.5X、1X、2X，以及伴隨產生其他整數倍轉速頻率的諧波。由現場測試知其位移偏心與電壓相角之變動如表二所示。



圖四 高頻磁通包圍的轉子造成軸和軸承電流之影響



圖五 馬達軸承頻譜分析

表二 伸線系統軸承故障造成知相角與偏心距

	偏心距 Eccentricity	角度[°]
無故障 no fault	0.99	45
U 相故障	0.75	-72.4
U 相嚴重故障	0.52	-70.3
S 相故障	0.75	12.2
S 相嚴重故障	0.52	10.1
T 相故障	0.75	45
T 相嚴重故障	0.52	45

四、結論與展望

馬達線上檢測屬即時檢測系統，不用停止生產線運轉，即可檢出馬達可能之故障，作為預測馬達動力可能之情況，減少因馬達故障造成之工安事故發生，但必須建立自我學習途徑，因有些馬達事故原因仍屬未明狀態，如能藉由自我學習機制，即可減少錯誤之判斷或未能適時將故障檢出，減少生產製程之損失。

五、參考文獻

- [1] Peter Vas, "Parameter estimate, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines", Clarendon Press Oxford, 1993
- [2] P. J. Tavner and J. Penman, "Condition monitoring of electrical machines", Herfordshire, England: Research Studies Press Ltd., ISBN:0863800610, 1987
- [3] I. Y. Onel, M.E.H. Benbouzid, "Induction Motor Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative study", 2007 IEEE, PP1073--1078
- [4] Jaroslaw Kurek, Adam Biernat, Jan Szczypior, "Rotor bar Fault Diagnosis of Induction Motor based on Single-class SVM", International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering ", Willkazy 2007, Poland, Przegland Elektrotechniczng
- [5] Benbouzid M.E.H., "A review of Induction Motors Signature Analysis as medium for Fault Dections", IEEE Transactions on Industrical Electronics. Vol. 47, October, No. 5. Pp984—993, 2000.