

# A Novel Development of Speed Control for Induction Motors based on the Nonlinear System Identification

Aaron Chung and Chung-Neng Huang\*

Graduate Institute of Mechatronic System Engineering, National University of Tainan

*Abstract—According to the recent studies knows that the induction motors are difficult to be simulated precisely through the equivalent circuit of a steady-state response without including a transient one. This study will explore calculation of the precise transfer function of nonlinear control and nonlinear function, which can both cope with the steady-state response performance as well as approximate the transient response. Here, the first step is to set up a mathematic model based on a real system. Second, through the Nonlinear Control Design (NCD) to acquire the nonlinear characteristics of the mathematically and use the identified data based on the given inputs and outputs to simulate the induction motor. These approaches are helpful to design the relative controllers for back up the system stability. The nonlinear parts are explored by using the nonlinear function to approximate the NCD error to achieve a more precise transfer function while keeping simulation errors within an acceptable range.*

**Index Terms—**transient response, induction motor, speed control, nonlinear-system, identification



# 以非線性系統鑑別法為基礎之感應馬達速度控制

鍾亞倫 黃崇能\*

國立臺南大學機電系統工程研究所

## 摘要

在過去的研究中，一般常用感應馬達的穩態響應等效電路來做模擬，但其卻忽略了暫態響應的部分，常導致當負載等外在因素改變時，使得模擬結果與實際狀態產生了誤差。故本研究提出以非線性控制與非線性函數來求出較為精確的轉移函數，不僅符合穩態響應的性能表現，也能逼近暫態響應。在研究步驟中，首先要建立一個接近於實際系統的數學模型，再利用此模型之輸入與輸出關係來做系統鑑別。為了要得知感應馬達的非線性特性，以便求得更精確的數學模型來進行控制器設計，本研究採用非線性控制設計法 NCD (Nonlinear Control Design) 來進行非線性部分的誤差逼近，以求出較精確的非線性轉移函數。本研究所提出方法透過模擬驗證顯示，其誤差均可達到所預期的範圍內。

**關鍵字:** 暫態響應、感應馬達、速度控制、非線性系統鑑別。

## 壹、前言

電腦輔助設計 (Computer Aided Design, CAD) 可說是電腦輔助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 的一部分，是指透過電腦程式來模擬實物，以省卻在實物試驗上的各項成本耗費。故、近年來在工業設計與製造上多利用此方式，來縮短設計周期並提高產品品質。為求得較精確的系統模型，以減少系統模型或控制器與實物間的誤差，如何提升更精確的系統參數鑑別技術為其重要關鍵。

### 一、非線性系統鑑別

非線性系統鑑別乃是由動態系統的同步輸入及輸出數據來估測系統非線性數學模型的理論和方法。這種數學模型是針對系統輸入、輸出特性來逼近真實的非線性系統，逼近的程度取決於對系統的了解及所用的鑑別方法是否合理。依據對鑑別系統特性認識的多寡來區分，非線性系統鑑別可分成兩種類型[1, 2]：

#### 黑箱類型 (Black Box)

待鑑別之系統其基本特性皆是完全未知的，例如線性或非線性，動態或靜態。

#### 灰箱類型 (Gray Box)

待鑑別之系統其一些基本特性已知，如系統為非線性及其頻寬大小為已知。而系統動態方程式之階數與其參數值為不確定。

### 1.1 傳統的系統鑑別

此外，非線性系統鑑別也可依據鑑別方法的不同而區分為參數鑑別及非參數鑑別。傳統的系統鑑別主要以參數鑑別方法為主。然而非線性系統本身的複雜特性使逼近之非線性微分方程式形式不易獲得，參數系統鑑別已有很多人應用在感應馬達的參數估測器上[3]，以及使用在線上適性型馬達之參數的鑑別[4]，但是因為系統參數會隨著，時間，負載，或者溫度而改變[5]，且估測架構都較為複雜，故近年來非參數鑑別方法逐漸受到重視。

### 1.2 智慧型系統鑑別

這領域是與前面是完全不同的，主要含括從數學逼近理論，估測理論，非參數回歸，此運算方法就像是類神經網

路，小波，模糊模型。但在文獻中發現類神經網路非線性系統鑑別[6]不但需要大量的樣本數才可以訓練出較準確的數學模型，而且還會產生過度擬合 (over-fitting) 或不足擬合 (under-fitting) 的狀況。由此可知藉由類神經網路來進行系統鑑別時，是需要大量的數據才能含跨較大範圍的負載變化，以便得到較精準的模型。

在回顧過去文獻時發現，目前針對暫態響應做系統鑑別的研究並不多，且大多數是專注於穩態響應的鑑別[7]，其得到的成果都不夠精確，無法符合實際狀況需要，例如像是工具機等，這種變動負載的平台，它的暫態響應就非常重要，因為它操作狀態一般都是在暫態進行而不會進入穩態，因為在實際的馬達系統操作上是無法避免慣量、質量、阻尼、磁飽和熱效應等因素，且其響應亦無法隨輸入命令而立即改變，故會導致暫態響應的發生，是故本研究將特別針對暫態響應來彌補並改善上述之不足與缺點。控制系統的暫態響應非常重要，因為它是系統動態行為的一部份，輸出響應和輸入兩者之間在達到穩態以前必須加以密切注意[8]。

本研究利用非線性控制設計法 NCD 來進行系統鑑別，透過灰箱建模來鑑別非線性參數。首先假設系統其輸入與輸出之間的關係可用一個非線性數學方程式來表示，定義好非線性函數後，利用 NCD 的最佳化疊代運算過程讓模型與實際系統誤差小於需求值。在過去，研究人員通常將 NCD 用在最佳化多輸入多輸出的 PID 控制器參數調整[9]，以及單輸入單輸出的 PID 控制器參數調整[10]。NCD 最佳化求解主要是透過循序二次程式法 SQP (Sequential Quadratic Programming)，以疊代的方式來求所給定之變數解，而變數最佳[11]化的目標主要關係到時域上所設定之邊界，由使用者所設定。在設定可調變數 (tunable variables) 與不確定性變量 (uncertainty variables) 後，便可以執行最佳化過程。因為可以加入不確定性變量，故可以讓最佳參數解具有適應性以及強健性的優點。

本文架構如下，第二章為研究方法的說明，其中包括 NCD 理論以及 NCD 做非線性系統鑑別的流程。第三章為 V/F 感應馬達速度控制。第四章為模擬實驗。第五章為結果與討論。第六章為結論。

## 貳、非線性控制設計-NCD

### 一、NCD 理論

NCD [11-13]，主要是用來模擬輸出的最佳化工具，並且能在最佳化的過程中，也符合所給定性能的條件，詳細請看文獻中[12]的第三章，其中 NCD 運作演算法在 3-12 的下方有

題及，主要使用 MATLAB 中最佳化工具箱的 `fmincon` 函數。NCD 最佳化時的方程式為：



$$\min_x f(x) \quad \text{subject to} \begin{cases} G_i(x) = 0 & i = 1, \dots, m_e \\ G_i(x) \leq 0 & i = m_e + 1, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

$x$ : 向量大小為 $n$ 的設計參數

$f(x)$ : 目標函數

$G_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m_e$ : 等式限制條件

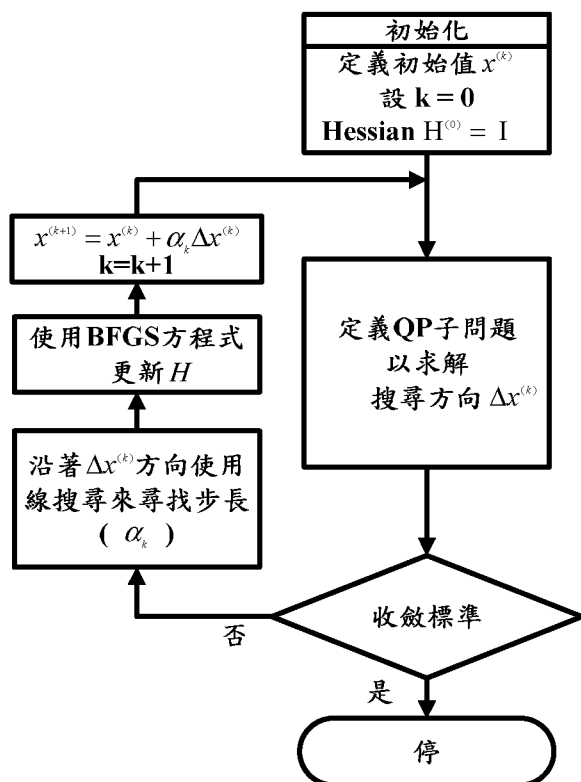
$G_i(x) \leq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m$ : 不等式限制條件

所設計的參數是  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 其邊界為  $x_l \leq x \leq x_u$ 。演算過程經過不斷地疊代運算, 藉由模擬的輸出與限制目標的差值, 做梯度運算, 並且同時調整參數, 以達到最佳化。

### 二、循序二次程式法-SQP

從文獻[13]中的 6-21 得知 fmincon 函數中所使用的運算法是 SQP 法。SQP 法可用來解決重複 QP (Quadratic Programming) 問題, 並且更新所估計的 Lagrangian 函數的 Hessian 矩陣估計值。使用目標函數可以達到線性搜尋的目的, 為了解決 QP 問題程式使用了積極的調整策略。SQP 演算法可以從文獻[13]的 6-28 得知。以下為 SQP 的演算流程[14], 圖一為其流程圖。

step 1 初始化設定:  $k = 0$ ,  $x^{(k)}$ , 收斂參數  $\epsilon$ , 和一個近似 Hessian 矩陣的單位矩陣。



圖一 SQP 流程圖

step 2 搜尋方向: 線性化目標函數和約束函數, 對目前的  $x^{(k)}$ , 和二次步長約束被利用為了線性化子問題。這個問題可以定義是QP子問題, 求解QP可以產生方向向量  $\Delta x^{(k)}$ 。

step 3 收斂標準: 當收斂參數已經小於  $\epsilon$ , 結束疊代並離開。

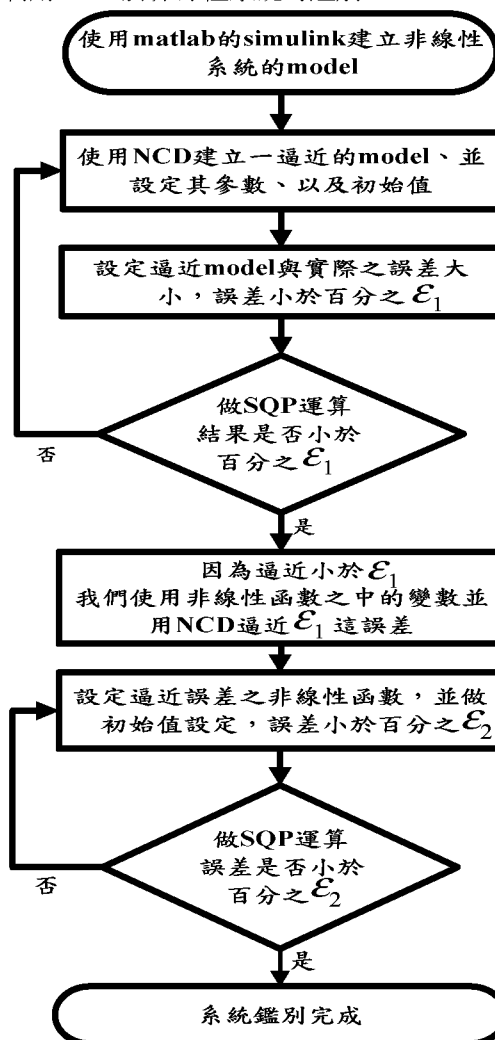
step 4 線收尋: 步長  $\alpha_k$  沿方向是估計基於一個合適的線搜索方法而使用的下降方程式。

step 5 更新 Hessian 矩陣: 使用 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 更新公式, 這選擇保證 Hessian  $H^k$  更新後為正定。

step 6 設計更新: 新的設計更新是更新, 步長 (Step Length)  $\alpha_k$ , 搜尋方向  $\Delta x^{(k)}$ , 如疊代公式  $\Delta x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k \Delta x^{(k)}$ 。

### 三、NCD 鑑別流程

NCD, 雖然大多是使用在非線性系統的控制器設計, 但在本研究將利用 NCD 於非線性系統的鑑別上。



圖二 系統鑑別流程圖

利用 NCD 法做非線性系統鑑別的流程如圖二所示。首先建立一組與真實系統相近的模型, 再以 NCD 作系統鑑別。其次, 建立一標準二階系統, 讓 NCD 逼近此轉移函數, 如果在所設定之誤差百分比在  $\epsilon_1$  之內就選用之, 第三, 在暫態部分還有一些非線性無法逼近, 則使用非線性函數以 NCD 逼近此非線性的現象, 若誤差小於本研究所需求之百分比  $\epsilon_2$  以下, 就代表鑑別完成。

在工業界上最常使用的是感應馬達, 感應馬達 V/F 速度控制為非線性系統, 輸入為電流頻率, 輸出為轉速, 此輸入頻率與輸出轉速為非線性關係, 所以在設計其控制器前, 必須先求出一組很逼近真實系統的模型作線外控制器設計, 控制器設計完就可以應用在實體上, 這模型的優點就是可以讓以後的適應性控制器在較準確的模型上作設計, 比過去不準確的模型來的好。



參、感應馬達

在過去由於交流感應馬達的非線性特性與數學模式過於複雜，使其動態特性難以掌握，因而阻礙了其在變速應用領域的發展，故主要應用於定轉速或多段變速的應用場合。在另一方面，由於在許多應用場合無法加裝轉速計或編碼器等感測裝置，且在成本上亦不符合經濟效益，因此如何在不加裝轉軸感測器(shaft sensor)的條件下，仍能達到較佳的變速控制即成為重要的研究課題。在以數位控制為主的轉速估計運算過程中，轉速估測的正確性不僅影響到速度控制的準確與否，也會影響到速度迴路補償器的設計，這些問題不僅環環相扣，且當誤差過大時，甚至會影響到系統的穩定性。由此可知，高精確度馬達模型在控制系統設計上的重要性。

一、V/F 感應馬達特性

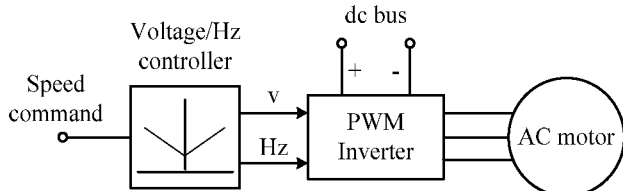
本研究所使用的是鼠籠式交流感應馬達其特性為結構簡單、堅固、不需磁性材料，容易大量製造，且有較高的功率體積比，較低的轉子慣量，較高的起動轉矩，加速與轉速，不需要做碳刷的維修，適合應用於環境惡劣的工作場合。由於上述之優點，所以此馬達已廣泛應用於工業界，近年來由於交流馬達變速控制技術的快速發展再加上交流馬達本身的優點，鼠籠式感應馬達變速驅動系統已廣泛的應用於各種領域。

二、馬達速度控制

傳統上交流馬達之變速控制，由變頻器以開迴路控制方式達成，其結構如圖三所示。變頻器之功能即在於產生一個變壓變頻的三相交流電壓，以提供馬達之變速控制。三相感應馬達的轉速與電源頻率成正比，關係表示如下：

$$N = \frac{120f}{P}$$

上式，N為同步轉速，P為馬達極數，f為電流頻率。對感應馬達而言，三相交流電源在定子造成一個旋轉磁場與轉子之感應磁場交互作用以產生扭矩而使轉子旋轉，交流馬達的轉速與旋轉磁場的電源之振幅、頻率有關，頻率越高則轉速愈快，但若只有改變旋轉磁場的頻率，而沒有改變供給的電壓，馬達的轉矩會隨著頻率的增加而使轉矩下降，使得系統的效率也隨之降低，所以為了維持感應馬達的磁通在一定的大小使感應馬達在最高效率下運轉，也必須調整變頻器輸出的電壓，所以V/F控制就是使得電壓振幅與馬達運轉頻率的比值維持一定值，馬達的磁通大小與此值成正比，就可以達到維持磁通大小並控制轉速的目的。



圖三 開迴路 V/F 感應馬達速度控制

肆、模擬系統與驗證結果

為驗證本研究所提出之非線性系統鑑別法的有效性，本文將利用上節所介紹之V/F 感應馬達為模擬試驗平台來進行速度控制模擬計算。因為感應馬達為高階非線性，耦

合系統，過於複雜所以正符合此研究所提出之非線性系統鑑別的要求。

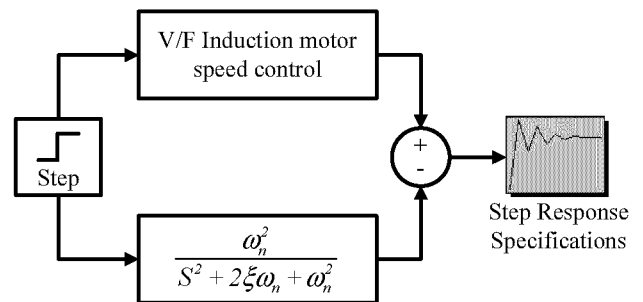
一、系統參數設定與模擬結果

模擬步驟為：

1. 建立用一組與特定 V/F 感應馬達速度相近的控制模型，其模擬參數設定如下表一所示。
2. 用一個標準二階系統 (second order system) 以 NCD 作逼近。

表一：三相感應馬達模擬參數設定  
初始值設定

Y 接線電壓	380 V	額定功率	2.94HP
定子阻抗 $R_s$	3.478 $\Omega$	定子電感 $L_s$	0.01254 H
轉子阻抗 $R_r$	2.546 $\Omega$	轉子電感 $L_r$	0.01226 H
互感 $L_m$	0.3329 H	慣性 $J$	0.0131kg. $m^2$
摩擦係數	0.005752	頻率	50Hz



圖四 用於參數逼近之標準二階模型

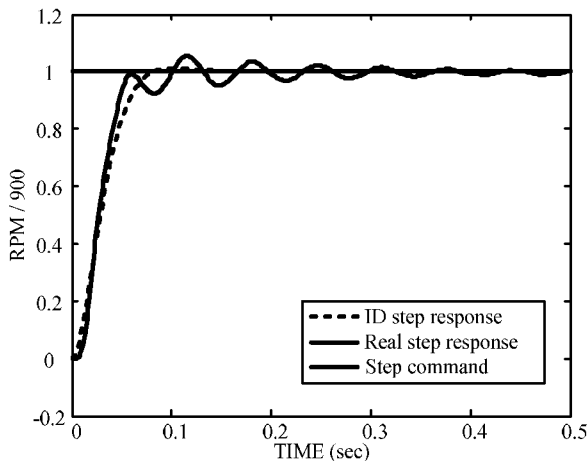
表二：二階模型之初始值設定

誤差範圍	$-0.05 \geq error \geq 0.05$
$\omega_n$ 自然頻率	1
$\xi$ 阻尼比	0.2

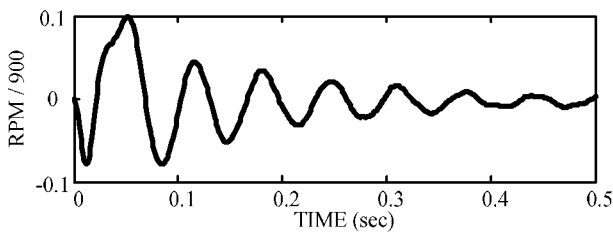
3. 其他非線性的部分，擇選用  $e^{-\xi t} \cdot B \sin(\omega t)$  的函數來逼近。
4. 作無負載的450 PRM、900 RPM、以及1500 RPM，三組響應(Response)的鑑別。

step 1 建立一與實際模型相當的Simulink模型，如圖三。  
step 2 使用NCD建立一組逼近的模型，並設定其參數與初始值，如表二，在選用的平台中本研究使用標準二階系統做逼近，標準二階系統有兩個參數  $\omega_n$  (Natural frequency)與  $\xi$  (Damping ratio)，如圖四。標準二階表式以下列所示：





圖五 利用標準二階函數逼近結果

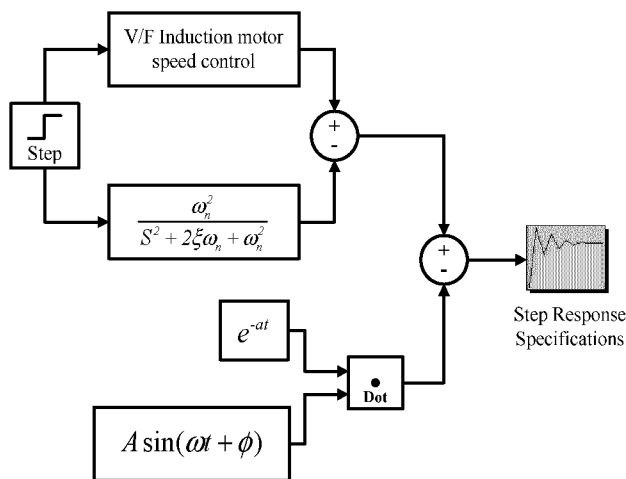


圖六 標準二階轉移函數誤差

圖五所示為利用圖四之二階函數逼近結果。由於還存在一些非線性振盪所引起之誤差如圖六，故本研究擬設計一非線性的誤差補償函數來逼近。

二、誤差補償器設計

由於標準二階的參數已固定，觀察標準二階響應與 V/F 感應馬達速度控制響應作比對，其誤差顯示為圖六，觀察此誤差波形後，發現此誤差類似由  $e^{-at} \cdot A \sin(\omega t + \phi)$  函數所組成。所以本文將利用數學模型  $e^{-at} \cdot A \sin(\omega t + \phi)$ ，來作為非線性誤差的補償項，藉此改善標準二階響應的誤差項以提高 V/F 感應馬達速度控制的精確度。其非線性函數誤差補償設計如圖七所示。此補償器設計可使用任何數學函數的組合做誤差逼近，不只可以用在改善 V/F 速度控制上，也可以應用在其它控制器的補償器設計上。



圖七 誤差補償設計

在這一正弦函數中有振幅A、頻率 $\omega$ 、相位 $\phi$ 以及指數 a 均設定為可調的情況下，再度以NCD法計算後，其結果如表三所示。

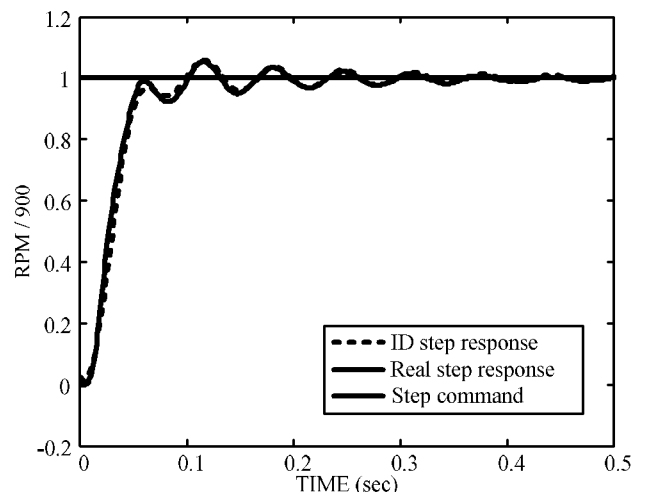
表三：誤差補償器設計參數

誤差範圍	-0.01 $\geq$ error $\leq$ 0.01
振幅 A	0.087
頻率 $\omega$ (rad/sec)	96.5
相移 $\phi$ (rad)	-16
指數 a	4.8

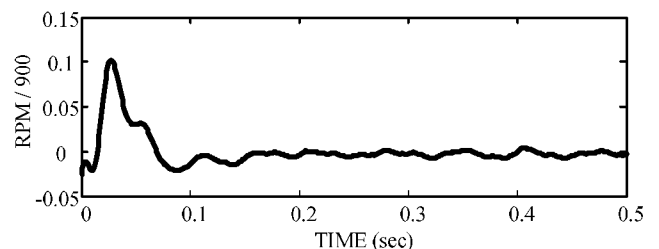
伍、結果與討論

在本文中主要呈現標準二階響應逼近狀況，及三種無負載的輸入 450 RPM、900RPM及 1500RPM時的鑑別的結果與其誤差。結果顯示雖然標準二階的系統無法逼近感應馬達 V/F速度控制，但是在本研究所選用的非線性函數卻可以有效的逼近這些振盪的非線性部分。圖五為使用標準二階轉移函數逼近的結果，圖六所示為標準二階轉移函數逼近誤差，因其誤差在本研究流程中定義之  $\epsilon_i$  以內故選用之，此組鑑別出來後往後再加上非線性函數做誤差逼近時，此標準二階的參數是固定不變的。

在非線性項利用圖七之數學模型，以及表三之參數的條件下，以下為透過標準二階轉移函數於三種不同轉速時的逼近控制效果。900 RPM的模擬結果如圖八所示。圖九為逼近900 RPM時的誤差。

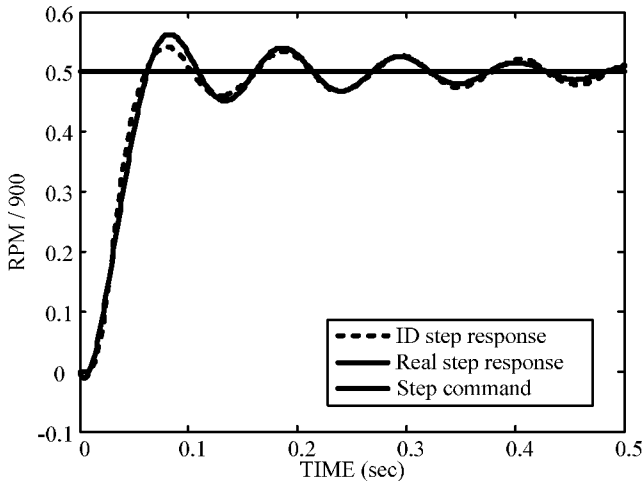


圖八 900 RPM的控制效果

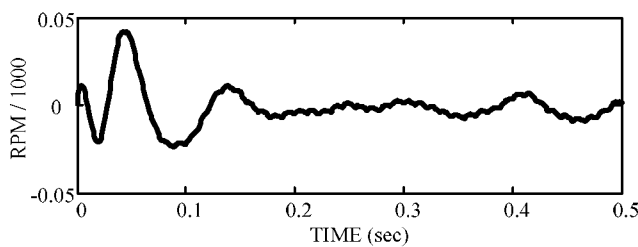


圖九 900 RPM的誤差逼近

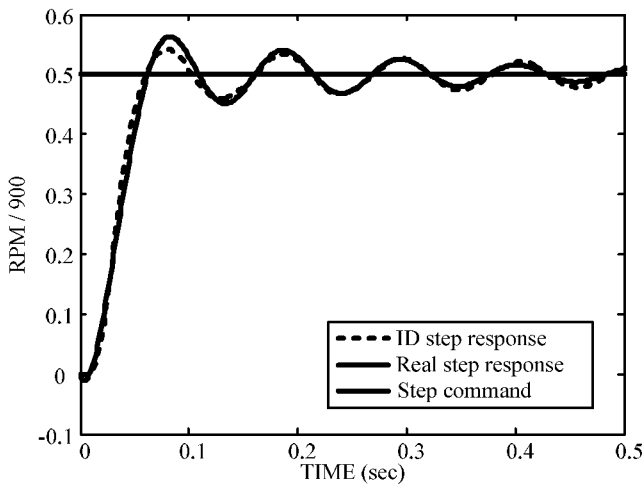




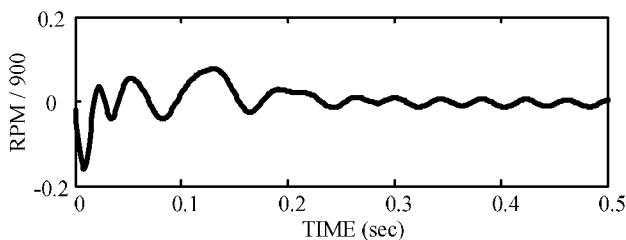
圖十 450RPM的控制效果



圖十一 450RPM的誤差逼近



圖十二 1500RPM的控制效果



圖十三 1500RPM的誤差逼近

在誤差補償設計  $e^{-at} \cdot A \sin(\omega t + \phi)$  參數A的振幅為0.09，頻率為58.5，相移為-15.7，指數a為4.3的條件下，圖十為逼近450RPM的控制效果。圖十一為逼近450 RPM的誤差。而在誤差補償設計參數振幅A為-0.4，偏差值為-0.3，頻率為80，相移為180，指數的a為15時，1500RPM的控制效果如圖十二所示。圖十三為逼近1500RPM的誤差。

觀察上述結果可證，感應馬達之非線性函數模型，在經由本文所提出之補償設計下，於任一轉速命令時都可以獲得控制，且其誤差均可被逼近到所設定的範圍之內。

陸、結論

本研究提出一以NCD法為基礎之系統鑑別技術，透過本法，非線性系統將可在—數學模型的平台被逼近至所要求的誤差範圍內。其有助於在做適應性控制時，能夠提供較為準確的數學模型，於線外做系統控制器設計。此外，本研究主要貢獻有：

1. 由文獻得知，一般相關於NCD法的研究大都只將其運用在控制器的設計上，並尚未有將其利用來實際作為系統鑑別的，而本研究首創將其法使用在系統鑑別上來改善非線性系統於控制上的準確性。
2. 非線性函數誤差補償設計可彌補線性系統所不能逼近之非線性特性，並且可以應用在任一未知的非線性系統的參數鑑別上，如摩擦力、或粘滯摩擦、慣性力等等。
3. NCD系統鑑別可用在任何非線性系統鑑別上。

在未來，本研究將加入變動負載條件，計畫將以—Look up Table的方式讓整個數學模型在任一負載條件下都是精準的，並加入適應性控制器來控制感應馬達速度。

柒、參考文獻

- [1] P. Eykhoff, *System identification: parameter and state estimation*: Wiley-Interscience, 1974.
- [2] J. Sjöberg, Q. Zhang, L. Ljung, A. Benveniste, B. Delyon, P.-Y. Glorennec, H. Hjalmarsson, and A. Juditsky, "Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview," *Automatica*, vol. 31, pp. 1691-1724, 1995.
- [3] K. Yassine, "Recursive identification of induction motor parameters," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 12, pp. 363-381, 2004.
- [4] P. Castaldi, W. Geri, M. Montanari, and A. Tilli, "A new adaptive approach for on-line parameter and state estimation of induction motors," *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 81-94, 2005.
- [5] H. A. Toliyat, E. Levi, and M. Raina, "A review of RFO induction motor parameter estimation techniques," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 271-283, 2003.
- [6] F. A. Mohamed and H. Koivo, "Modelling of induction motor using non-linear neural network system identification," in *SICE 2004 Annual Conference*, 2004, pp. 977-982 vol. 2.
- [7] M. A. Abido and Y. L. Abdel-Magid, "On-line identification of synchronous machines using radial basis function neural networks," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 1500-1506, 1997.
- [8] B. C. Kuo and M. F. Golnaraghi, *Automatic control systems vol. 1*: Wiley Hoboken, NJ, 2003.
- [9] J. Jih-Gau, H. Ming-Te, and L. Wen-Kai, "PID Control Using Presearched Genetic Algorithms for a MIMO System," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 716-727, 2008.
- [10] F. Jurado, M. Ortega, A. Cano, and J. Carpio, "Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant," *Electric Power Systems Research*, vol. 60, pp. 123-135, 2002.
- [11] I. MathWorks, *Nonlinear Control Design Blockset for use with Simulink®: user's guide*: MathWorks Inc., 1997.
- [12] I. MathWorks, *Simulink® Design Optimization™ Getting Started Guide*: MathWorks, 2011.
- [13] I. MathWorks, *Optimization Toolbox™ User's Guide*: Version, 2011.
- [14] C.-Y. Lin, C.-B. Tsay, and Z.-H. Fong, "Computer-aided manufacturing of spiral bevel and hypoid gears by applying optimization techniques," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 114, pp. 22-35, 2001.



## BIOGRAPHIES



**Aaron Chung** was born in 1987, Taipei, Taiwan, received the B.S.M.E from the Oriental Institute of Technology, Taipei, Taiwan. He is currently studying toward the M.S. degree at the Graduate Institute of Mechatronic System Engineering, National University of Tainan, Tainan, Taiwan. His research interests includes motor control, system modelling and identification, adaptive control, and the applications of neural networks.



**Chung-Neng Huang** (IEEE M'04) received the B.S.E.E. from National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan, in 1992, and the M.S.E.E. and PH.D. degrees from Tohoku University, Sendai, Japan, in 1997 and 2000, respectively. From Feb. 2001 to Jul. 2006, he was an assistant professor, and was promoted to be an associate professor at the Vehicle Engineering Department, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan. In Aug. 2006, he transferred to the Graduate Institute of Mechatronic System Engineering, National University of Tainan, Tainan City, Taiwan, as an associate professor and was promoted to be as a professor in Aug. 2011 to present. He received the Golden Medal for the excellent paper in the 98' National Convention of the Institute of Electrical Engineers of Japan in the 100th anniversary of the foundation, the Excellent Achievements for the New Researchers in 2003 from the National Science Council, Taiwan, and the Outstanding Teacher Award in 2008 from the National University of Tainan.

His research and teaching interests are system optimal design, manufacturing/control parameter optimization, hybrid/intelligent controls and green power applications etc..

