

自我調適模糊灰色預測控制器於空調系統之 節能控制

林助訓

摘要

本文提出灰色預測理論結合模糊控制理論的設計方法，設計一自我調適模糊灰色預測控制器，藉由灰色預測器預測空調空間溫度的誤差，產生一增益更新因數，作為系統輸入控制量的調整，達到事前控制的目的。針對空調箱風車，利用一可調速感應馬達驅動器作為閉迴路溫度控制，以進行節能控制。所採用之可調速感應馬達驅動器係選用市售變壓變頻之變頻器作為控制系統之致動器，藉以調控馬達之轉速而獲得節能之效果；而有關控制方法則改良文獻上一自我調適模糊比例積分控制，藉另外加入反積分終結迴路可以消除控制器之飽和效應，不僅可以獲得較佳性能，並且在中、輕載下可以得到很高百分比之節能效果。最後並建立一雛型控制系統及提供一些實測結果以驗證節能之有效性。

關鍵詞：灰色預測、自我調適、反積分終結。

Energy Saving Control by a Self-Tuning Fuzzy Based Grey Prediction Controller in HVAC Systems

Juh-Shinun Lin

Abstract

The design method of the combination of the grey theory and fuzzy control is proposed in this paper. Using a grey predictor to predict the temperature errors of the building facility space and then a gain updating factor will be generated which can be used in adjustment of the control energy of the system. The design of the self-tuning fuzzy based grey prediction controller is used for the closed loop temperature control of an air handling unit to save energy. An commercial VVVF inverter is adopted as the actuator of the system to change the motor speed for energy saving. Then, the self-tuning fuzzy based grey prediction controller is adapted by adding an extra anti windup to eliminate the saturation effect of the controller. It turns out that not only better performance can be achieved but also very high percentage of energy saving can be obtained for medium and light load. Finally, a prototype is constructed and some experimental results are given to verify the effectiveness of energy saving.

Keywords: grey prediction, self tuning, anti windup.

壹、前言

2007年國際氣候變化組織(IPEC)提出報告，確立地球表面暖化原因在於人類產業革命後石化燃料的大量使用，而我國是世界上最缺乏能源加之一，石油幾乎完全仰賴進口，因此油品價格極易受到國際環境影響，近年來由於國際原油價格波動顯著，為反應國際油價，高能源價格的趨勢席捲而來，欣喜的看到國內的「企業」及「學校」積極的在節約能源。以國內夏日用電情況而言，空調負載幾乎佔尖峰負荷的三分之一，可說甚值得考慮減輕尖峰負載。另一方面，隨著生活水準日漸提高，人們對環境舒適度要求相形增加，且許多高科技產業像光電、電子、資訊、生物技術，醫藥等不斷擴充與升級，亦需藉冷凍空調以控制產品的品質，使得空調系統需求與日俱增。冷凍及空調皆利用搬移熱量以達到溫度控制的作用；而冷凍空調系統存在時間延遲(time delay)、時變(time variance)和非線性(nonlinear)諸問題，欲精確控制其動態行為非常不容易，倘以傳統的 ON-OFF 控制或 PID 控制將無法在性能需求上得到相當滿意的效果。為因應地球溫室效應的影響，作為地球的每一份子應有責任共同來維持地球的生態平衡。爰此，作者選定空調節能為主題，擬應用最近十多年已發展成熟的變頻馬達驅動器針對空調系統中加以研析其節能效果。

傳統的空調系統控制，基本上採用 ON/OFF 控制，如此斷斷續續的運轉造成室內受控溫度高高低低變化與人體不舒適的感覺，同時由於感應馬達過大的啟動電流亦會造成額外地耗損與減少驅動器的壽命。近年來由於馬達驅動技術之進步，應用可調速馬達驅動器於空調系統之節能優點[1][2][3]亦慢慢地為大家所接受。依相似定律[4]，空調箱之背壓 p 與風量 q 依序分別與其驅動馬達之轉速 N 成平方及一次方成正比，而馬達之軸功率 P_w 則為

$$P_w = \frac{pq}{\eta} = k \frac{N^3}{\eta} \quad (1)$$

上式中 η 為風車之效率， k 為比例因數。

因此當空調負載需求降低成一半時，所需風量成比例降低一半，但空調箱風管內背壓則以平方關係式降低成四分之一，亦即軸功率降低為原來之八分之一，因此借著變頻器適當地調控馬達轉速，甚易獲得節能之效果。

由於空調系統是個甚複雜之非線性系統，因此本文提出模糊控制器與灰色預測器結合的方法，由灰色預測器預測下一時刻的溫度誤差，經由模糊調適器獲得一增益更新因數，再將此因數作為原模糊控制器的輸出能量的調整。此種模糊控制器與灰色預測器結合方法，乃是針對下一時刻所需之能量作一事先的補償動作，有別

於傳統模糊控制只針對當時的系統狀態作控制，為一事前控制設計的方法。在本文後續內容即在針對空調系統中之空調箱風車，採用一市售變頻器作為風車馬達之調速控制用，研析如何利用上述方法兼顧良好室溫控制及節能效果設計達到最佳化。

貳、空調箱風車系統簡介

本文所選用的實驗設備，以圖 1 所示為一全凍結式儲冰空調系統，其主機容量為 60 冷凍噸，儲冰能力為 380 噸-小時。其運轉模式有儲冰、溶冰與空調三種模式；儲冰模式係利用夜間製冰儲存以提供日間使用，如此可轉移日間尖峰電力；溶冰模式係溶解夜間所儲存之冰層以提供空調冷房所需之冰水；而空調模式則在儲冰模式儲冰量不足以應付空調負載時，可予回復空調模式繼續運轉。空調系統於儲冰模式運轉時 PM3、FM4 及 PM5 之三部驅動馬達皆需運轉；溶冰模式 FM1、PM7 及 PM9 之三部驅動馬達皆需運轉；而空調模式 FM1、PM2、PM3 及 FM4 之四部驅動馬達皆需運轉，用以帶動水量與風量以與冷媒循環系統進行熱交換完成冷氣供應。

本論文主要是針對圖 1 系統中之溶冰模式探討如何節約能源。首先經由冰水泵浦馬達 PM7 之動力，帶動 C1 及 C2 儲冰水槽之冰水，使其經由熱交換器循環，

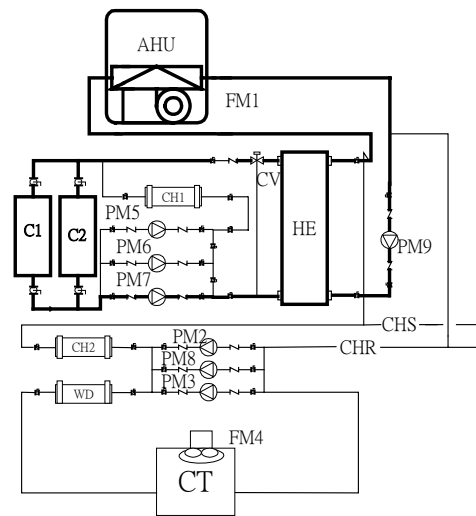


圖 1 本實驗之空調系統

表 1 圖 1 中各設備代號名稱

設備代號	設備名稱	設備代號	設備名稱	用途說明		
				儲冰模式	溶冰模式	空調模式
C1	儲冰水槽	FM1	空調箱風車馬達		*	*
C2	儲冰水槽	PM2	冰水機循環泵浦馬達			*
CH1	滴冰水器	PM3	冷卻水循環泵浦馬達	*		*
CH2	冰水器	FM4	冷卻水塔風扇馬達	*		*
WD	凝水器	PM5	滴水冰水泵浦馬達	*		
CV	控制閥	PM6	預備泵浦馬達			
CT	冷卻水塔	PM7	溶冰冰水泵浦馬達		*	
HE	熱交換器	PM8	預備泵浦馬達			
AHU	空調箱	PM9	冰水循環泵浦馬達		*	

俾將另一較高溫冰水迴路(或稱為二次冰水迴路)之熱量移走；其次經由二次冰水迴路之循環泵浦馬達 PM9 之動力，將冰水帶到空調箱 AHU，將空調空間之熱量移走；與空調箱 AHU 連接之風管共四個出風口，提供長寬高各為 18m,12m 及 6m 空調空間所需低溫空氣；此低溫空氣經由 FM1 馬達驅動空調箱風車在空調空間內循環，產生冷房效果。本研究主要目的即在固定

PM7 與 PM9 之單純條件下，並假設 C1 及 C2 儲冰量足夠充分，使得二次冰水管路進入空調箱入口之冰水溫度維持在 5°C。因此在此隔離的單純情況下，藉由調變 FM1 馬達的轉速，吾人可以很清楚地觀察其節能效果。在本研究中，FM1 之調速控制係採用德國西門子所生產 3 相 220V，10HP 無感測向量變頻器，並採用 VVVF 方式，即維持變頻器電壓與頻率成定比例調變，俾保持 FM1 馬達氣隙磁場強度為定值。

參、模糊灰色預測控制器之設計

一、灰色控制理論

灰色控制理論於 1985 年由鄧聚龍教授所提出[5]。當一個系統的輸入與輸出的數學模型不明確時，可利用該理論基礎，將所得之資料進行灰建模，找出系統輸入與輸出的關聯性，作為預測控制時的準則。灰色控制理論之所以被廣為應用的原因，在於其只需少筆已知的系統資料即可算出精確的預測值，並據以預測系統未來的趨勢，再進行下一步的控制決策。因此灰色預測控制可以作到防患未然，達到即時控制，並能提高適應能力。相較於其它估測理論，於運算時需大量的資料與學習時間，計算更為精簡與快速。目前此理論已廣為應用在水文、軍事、經濟、交通、人口預測、石油探勘、醫學及病理分析上。

應用灰色理論作預測控制時，首先必

須取得一組時序的狀態建立原始序列 $T^{(0)}$ [6] [7]

$$T^{(0)} = (T^{(0)}(0), T^{(0)}(1), T^{(0)}(2), T^{(0)}(3))$$

將原始序列 $T^{(0)}$ 作累加生成(Accumulated Generating Operation, AGO)，可得到

$$T^{(1)}(1) = T^{(0)}(1)$$

$$T^{(1)}(2) = T^{(0)}(1) + T^{(0)}(2)$$

$$T^{(1)}(3) = T^{(0)}(1) + T^{(0)}(2) + T^{(0)}(3)$$

接著對 $T^{(1)}$ 作均值生成，可得

$$Z^{(1)}(2) = 0.5 T^{(1)}(1) + 0.5 T^{(1)}(2)$$

$$Z^{(1)}(3) = 0.5 T^{(1)}(2) + 0.5 T^{(1)}(3)$$

則灰色一階微分方程式可寫成灰差分方程式：

$$T^{(0)}(k) + cZ^{(1)}(k) = d, k=2,3 \quad (2)$$

其中 c 、 d 為待定係數可利用最小平方法求得

$$\begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

$$\text{其中 } B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} T^{(0)}(2) \\ T^{(0)}(3) \end{bmatrix}$$

最後再利用逆累加生成 (Inverse Accumulated Generating Operation, IAGO) 還原，求出 GM(1,1)之預測方程式

$$\hat{T}^{(0)}(k+1) = (1-e^c)[T^{(0)}(1) - \frac{d}{c}]e^{-ck} \quad (4)$$

將 $k=1, 2, 3$ 分別代入，則可得對原始狀態第二點、第三點的預測值及未來狀態第四點的預測值。

二、模糊理論

模糊理論於 1965 年由 Zadeh 教授所提出[8]，模糊控制理論應用了模糊集合理論，模擬人類的邏輯思維，以人工智慧的方式對受控系統進行控制。傳統模糊控制器的設計方法包含模糊化(Fuzzifier)、建立模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)、定義模糊推論(Fuzzy Inference)及解模糊化(Defuzzifier)四大步驟。本文所用之語句變數有正規化定義於區間[-1,1]之溫度的誤差 se 及溫度誤差的變化率 sce ，輸出控制變數 scu ，代表下一時刻溫度的誤差 $s\hat{e}$ 與溫度誤差的變化率 $sc\hat{e}$ 以及正規化於區間[0,1]之增益更新因數 a 。模糊控制的推論過程說明如下[9][10]：

以 Mamdani 型式的 Minimum Inference Engine 為模糊推論，其推導公式如下：

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^m (\mu_{A_1^l}(x_1) \wedge \mu_{A_2^l}(x_2) \wedge \mu_{B^l}(y)) \quad (5)$$

其中， x_1 、 x_2 、 y 分別代表模糊集合 se 、 sce 、 scu ， $\mu_{A_1^l}(x_1)$ 為 se 之歸屬函數， $\mu_{A_2^l}(x_2)$ 為 sce 之歸屬函數， $\mu_{B^l}(y)$ 為 scu 之歸屬函數， l 為各模糊集合的歸屬函數指標， m 為所觸發之規則數， $\mu_{B'}(y)$ 為

推論結果。而結合灰色預測器之模糊調適器，其推論如下：

$$\mu_{D'}(z) = \max_{k=1}^n (\mu_{C_1^k}(x_1^*) \wedge \mu_{C_2^k}(x_2^*) \wedge \mu_{D^k}(z)) \quad (6)$$

其中， x_1^* 、 x_2^* 、 z 分別代表模糊集合 $s\hat{e}$ 、 $sc\hat{e}$ 、 a ， $\mu_{C_1^k}(x_1^*)$ 為 $s\hat{e}$ 之歸屬函數， $\mu_{C_2^k}(x_2^*)$ 為 $sc\hat{e}$ 之歸屬函數， $\mu_{D^k}(z)$ 為 a 之歸屬函數， k 為各模糊集合的歸屬函數指標， n 為所觸發之規則數， $\mu_{D'}(z)$ 為推論結果。

解模糊化的方法有很多種，本文乃採用重心解模糊化法(Center of Gravity Defuzzification)。其推導公式分別如下：

$$Y^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{B^i}(y_i) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{B^i}(y_i)} \quad (7)$$

同理

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{D^j}(z_j) \cdot z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{D^j}(z_j)} \quad (8)$$

其中 i 、 j 為所得之結論輸出規則， Y^* 與 Z^* 為分別為兩模糊控制器的輸出控制量 scu 與 a 。

肆、設計步驟

灰預測控制主要目的是由一組數據中，找出每筆資料間的關係，進而推論其未來發展的狀況。基於此方法，將灰預測所得之輸出訊號作為受控器的控制輸入，進行系統的控制，此即灰色預測控制。

本文將灰預測器與模糊控制器結合，應用在空調空間的溫度控制，其控制架構方塊圖如圖 2 所示，茲簡要說明如下[11]：

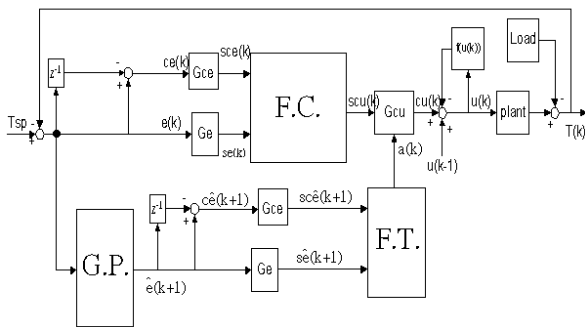


圖 2 控制架構方塊圖

首先控制器在每一取樣時間讀取空調空間溫度 $T(k)$ 和溫度設定點 T_{sp} 比較，計算出溫度的誤差 $e(k)$ 及溫度誤差的變化率 $ce(k)$ ，作為模糊控制器(F.C.)的兩個輸入信號。將溫度的誤差 $e(k)$ 送到灰預測器(G.P.)中進行灰預測，則可獲得下一取樣時間的溫度誤差 $\hat{e}(k+1)$ 及溫度誤差的變化率 $\hat{c}e(k+1)$ ，作為模糊調適器(F.T.)的兩個輸入信號，因模糊控制器是以語言化敘述的模糊控制規則為主體，因此將明確的輸入誤差及誤差變化率轉換為模糊變數值，且利用 G_e, G_{ce} 比例因數(scaling factors)，將

兩輸入信號正規化於區間[-1,1]內；方塊 F.C. 與 F.T. 皆有類似的架構，各包含四個主要部份，即模糊化界面、模糊規則庫、推理機構與解模糊化界面。模糊邏輯控制器的功能是判斷目前溫度誤差與溫度誤差的變化率的方向、大小、誤差變化速度，仿效人類邏輯思維，將兩輸入模糊變數與語言化敘述的模糊控制規則相結合而進行近似推論，再透過推論合成規則進行演算，經由解模糊化後可以得到一明確輸出值 $scu(k)$ ，即為在該取樣時間之輸出變數的增量，而模糊調適器(F.T.)的功能是預測下一取樣時間的溫度誤差與溫度誤差的變化率的方向、大小、誤差變化速度，藉由模糊近似推論，決定增益更新因數 $a(k)$ 大小，再與比例因數 G_{cu} 及 $scu(k)$ 相乘作為輸出控制變數的增量 $cu(k)$ 。反積分終結迴路(anti-windup loop)功能在避免使致動器進入飽和狀態。輸出控制變數 $u(k)$ 等於目前的增量 $cu(k)$ 與前一次的操作量 $u(k-1)$ 之和，再透過一多功能卡之 D/A 轉換器轉換為 DC 0-10V 作為變頻器的輸入信號，此信號即對應感應馬達 0-2100 rpm 之轉速。

由上述之說明可歸納出本文控制系統的基本設計詳細步驟如下：

步驟一：定義輸入輸出變數

本文所述之自我調適模糊灰色預測控制器 (self-tuning fuzzy grey prediction controller) 架構如圖 2 所示，為一雙輸入單輸出的閉迴路回授控制系統，是一種利用

誤差驅動來產生控制訊號的推理機構， $T(k)$ 為空調空間溫度、 T_{sp} 為溫度設定點， $u(k)$ 為控制器的輸出變數。將溫度的誤差 $e(k)$ 及溫度誤差的變化率 $ce(k)$ ，作為模糊控制器兩個輸入信號，定義如下：

$$e(k) = T_{sp} - T(k) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} ce(k) &= e(k) - e(k-1) \\ &= T(k-1) - T(k) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 k 和 $k-1$ 表目前取樣及上一取樣時間。

$$se(k) = e(k) * Ge \quad (11)$$

$$sce(k) = ce(k) * Gce \quad (12)$$

將溫度的誤差 $e(k)$ 送到灰預測器中進行灰預測，算出預測下一取樣時間的溫度誤差 $\hat{e}(k+1)$ 及溫度誤差的變化率 $\hat{c}e(k+1)$ ，作為模糊調適器(F.T.)的兩個輸入信號，定義如下：

$$\hat{c}e(k+1) = \hat{e}(k+1) - \hat{e}(k) \quad (13)$$

$$\hat{s}e(k+1) = \hat{e}(k+1) * Ge \quad (14)$$

$$s\hat{c}e(k+1) = \hat{c}e(k+1) * Gce \quad (15)$$

$$cu(k) = scu(k) * Gcu * a(k) \quad (16)$$

$$u(k) = u(k-1) + cu(k) \quad \text{未飽和時或} \quad (17)$$

$$u(k) = u(k-1) + cu(k) - f(u(k)) \quad \text{飽和時}$$

$$\text{其中 } f(u(k)) = \begin{cases} u_{\max} & \text{如果 } u(k) > u_{\max} \\ u_{\min} & \text{如果 } u(k) < u_{\min} \\ u(k) & \text{其他部分} \end{cases}$$

上式 $f(u(k))$ 為反積分終結函數，比例因數的選取是依據觀察實驗結果來決定，因此本控制器中的 Ge 與 Gce 依序分別選定 0.066 及 3.33，如此可以將 $e(k)$ 、 $ce(k)$ 和 $\hat{e}(k+1)$ 、 $\hat{c}e(k+1)$ 正規化定義於區間 $[-1,1]$ ，此外 $a(k)$ 亦已正規化於 $[0,1]$ 區間內。

步驟二、定義模糊變數數與歸屬函數

為了得到良好的控制要求，必須針對模糊控制的輸入輸出與增益更新因數等各變數，根據實際情況劃分成適當數量的模糊區域，即選擇適當數量的模糊變數，以涵蓋輸入輸出變數及增益更新因數的整個分布空間，對於上述變數 $se(k)$ 、 $sce(k)$ 、 $\hat{s}e(k+1)$ 、 $s\hat{c}e(k+1)$ 、 $scu(k)$ 及 $a(k)$ 我們分別定義 7 個模糊語言變數，對於每一語言變數，我們就可選擇適當的歸屬函數。語言變數 $se(k)$ 、 $sce(k)$ 、 $\hat{s}e(k+1)$ 、 $s\hat{c}e(k+1)$ 、 $scu(k)$ 及 $a(k)$ 定義如下 [11]：

$$A_1(se(k)) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$A_2(sce(k)) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$B(scu(k)) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$C_1(\hat{s}e(k+1)) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$C_2(s\hat{c}e(k+1)) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$D(a(k)) = \{ZE, VS, S, SB, MB, B, \text{及 } VB\}$$

其中

NB: Negative Big

- NM:Negative Medimum
- NS:Negative Small
- ZE:Zero
- PS:Positive Small
- PM:Positive Mediinnm
- PB:Positive Big
- VS:Very Small
- S:Small
- SB:Small Big
- MB:Medium Big
- B:Big
- VB:Very Big

如圖 3 所示，有關 $se(k)$ 、 $sce(k)$ 、 $\hat{se}(k+1)$ 、 $sc\hat{e}(k+1)$ 及 $scu(k)$ 的歸屬函數都是以相同的方式定義，利用對稱三角形(除了在兩極端使用梯形的歸屬函數)，具有相等的基數且跟相鄰的歸屬函數含有 50% 的重疊。

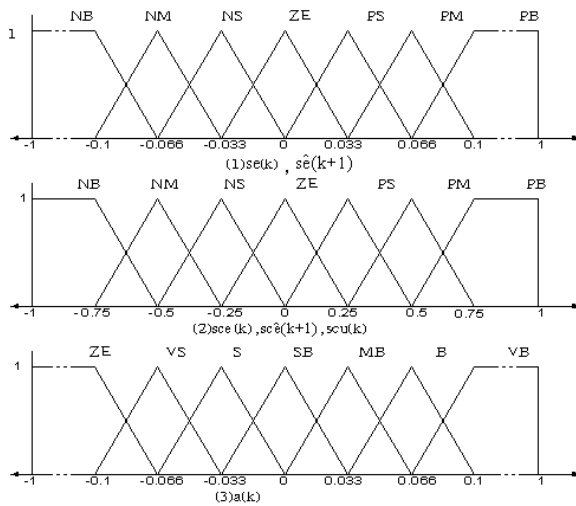


圖 3 (1) $se(k)$ 、 $\hat{se}(k+1)$ (2) $sce(k)$ 、 $sc\hat{e}(k+1)$ 、 $scu(k)$ (3) $a(k)$ 之歸屬函數

步驟三、製作模糊規則

經由作者對空調系統控制長期實驗累積經驗，將 $scu(k)$ 和 $a(k)$ 的語言描述值 (linguistic value)推理法則分別表示如下

$$R_i: \text{ if } se(k) \text{ is } A_{1i} \text{ ,and } sce(k) \text{ is } A_{2i} \text{ ,} \\ \text{ then } scu(k) \text{ is } B_i$$

其中 i 表第 i 條規則

$$R_j: \text{ if } \hat{se}(k+1) \text{ is } C_{1j} \text{ ,and } sc\hat{e}(k+1) \\ \text{ is } C_{2j} \text{ , then } a(k) \text{ is } D_j$$

其中 j 表第 j 條規則

以 $se(k)$ 為橫軸， $sce(k)$ 為縱軸，我們可以做出一張表格，如圖 4 所示，對每一組輸入對 $(se(k),sce(k))$ 、 $(\hat{se}(k+1) , sc\hat{e}(k+1))$ ，各有一對應的就是所謂的模糊法則表(fuzzy rule table) ，

$se(k)$ $sce(k)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PB	PB	PB

(a)

$\hat{se}(k+1)$ $sc\hat{e}(k+1)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VB	VB	VB	B	SB	S	VS
NM	VB	VB	B	B	MB	S	PS
NS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS
ZE	S	SB	MB	ZE	MB	SB	S
PS	VS	S	VS	VB	B	NB	VB
PM	VS	S	MB	B	B	VB	VB
PB	ZE	S	SB	SB	B	VB	VB

(b)

圖 4 模糊法則表(a) $scu(k)$ (b) $a(k)$

步驟四、模糊推論方法與解模糊化

本文利用 min-min-max 推論方式來作模糊推論，其中 min 可解釋為”and”之意，也就是模糊交集運算，而 max 可解釋為”or”，也就是模糊聯集運算。經由模糊推論計算的結果為一模糊值，必須加以轉換成明確值(解模糊化)，本文解模糊化方法採用”重心法則”如(7)、(8)式重寫如下，即

$$scu(k)^* = \frac{\sum_i \mu_{C_i}(scu(k)) \cdot scu(k)}{\sum_i \mu_{C_i}(scu(k))} \quad (18)$$

同理

$$a(k)^* = \frac{\sum_j \mu_{D_j}(a(k)) \cdot a(k)}{\sum_j \mu_{D_j}(a(k))} \quad (19)$$

伍、實體製作與實測結果

本文所建構之雛型系統，包含：

一、 RT-DAC3 多功能 I/O 卡

包含 16 個單端多工的類比輸入通道，解析度為 12bit，輸入範圍為 +/-10V 可程式化增益，轉換時間為 6 微秒，4 個類比輸出通道，解析度為 12bit，輸出範圍可為 0-5V，+/-5V，0-10V，轉換時間為 10 微秒，因為其支援軟體功能完整，可減少研發時間故採用之。在 Windows 環境下可作為即時 (real time) 資料擷取與控制用。類比輸入通道負責接收轉換後的等效空調空間溫度，類比輸出通道送出模糊灰色預

測控制的輸出信號，輸入至變頻器以 VVVF 方式帶動空調箱風車運轉。

二、溫度感測電路:

溫度感測是藉由 PT-100 白金感溫元件達成，在 0°C 至 300°C 間之電阻為線性，適合於室溫作量測，其每°C 的電阻變化量為 0.385Ω/°C，透過溫度-電壓轉換將空調空間 0°C 至 50°C 轉成 0 至 10V 之類比電壓信號。

三、致動器

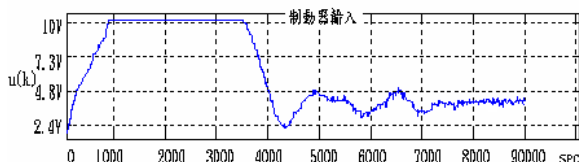
採用德國西門子所生產之 3 相 220V，10HP 無感測向量變頻器，其控制方法是採用 VVVF 方式，使用馬達為三相 220V，3 馬力之感應馬達。

四、控制軟體

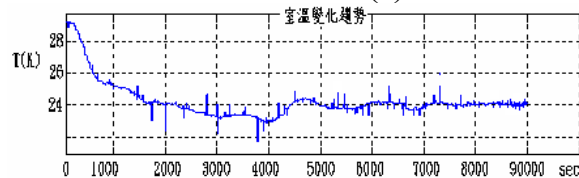
本文是運用 Matlab/Simulink 來開發控制軟體，即前節所描述之自我調適模糊灰色預測控制器，且透過 Matlab 所提供之 Real-Time Windows Target，並結合 RT-DAC3 multi I/O 卡上 A/D、D/A 轉換器與外部硬體做信號傳輸。空調空間溫度信號，經修正電路轉換為 0 至 10V 類比電壓信號，透過卡上 A/D 轉換器傳回至 Matlab/Simulink 下做運算，如此構成閉迴路控制。

圖 5 所示為比較未加入一額外反積分終結迴路對室溫變化趨勢及節能之影響，設定參數 $G_e=0.0666$ ， $G_{ce}=3.33$ ，

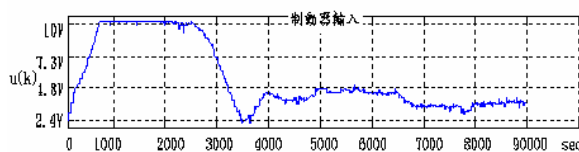
$G_{cu}=0.05$ ，進入空調風車入水口冰水溫度維持在 5°C ，室外周圍溫度為 30°C ，室內溫度為 29°C ，設定點溫度設為 24°C ，有少許人員自由進出。圖 5(a)-(b)為未加反積分終結迴路的室溫暫態響應與致動器驅動控制訊號，由於積分器飽和現象，使驅動馬達全速(2100rpm 即快速降溫，耗能最大區段)運轉時間拉長產生不必要的耗損，除使安定時間延長如圖所示約 7300 秒才達到穩定的設定點，且會產生過大的超越量，此在夏天溫差大時將更為明顯，圖 5(c)-(d)所示為加入反積分終結迴路的室溫暫態響應與致動器驅動控制訊號，大約在相同的環境所作的測試，由曲線可知全速運轉時間較圖 5(b)少約 1000 秒，且安定時間加快許多，約於 4500 秒達到穩定的設定點，比圖 5(b)快 2700 秒。



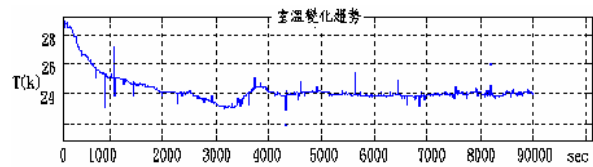
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 5 (a)-(b)為未加反積分終結迴路的致動器驅動控制訊號與室溫暫態響應 (c)-(d)為加反積分終結迴路的致動器驅動控制訊號與室溫暫態響應

圖 6 為將增益更新因數 $a(k)$ 設為 1，即為一般標準的模糊 PI 控制器架構，經長期實驗累積經驗，獲得以下最佳參數值即 $G_e=0.0666$ ， $G_{ce}=3.33$ ， $G_{cu}=0.02$ ，進入空調風車入水口冰水溫度維持在 5°C ，室外周圍溫度為 32°C ，室內溫度為 30°C ，設定點溫度為 25°C ，由圖 6 室溫變化曲線可知，誤差很大時，空調箱風車以全速(2100rpm)運轉，約十分鐘內可將室溫降至 27°C 內，此為人感覺舒適感溫度範圍，並於 4000 秒將室溫控制在設定點，由於室外溫度變化與對流(打開四面窗戶)，由曲線得知皆能維持在設定點，在 6000 秒將設定點改為 26°C ，觀察曲線暫態響應最大超越量為 0.3°C 。

圖 7 為將增益更新因數 $a(k)$ 採用圖二之自我調適控制，即本文所提之自我調適模糊灰色預測控制器，設定參數 $G_e=0.0666$ ， $G_{ce}=3.33$ ， $G_{cu}=0.05$ ，室外周圍溫度為 37°C ，室內溫度為 31°C ，設定點溫度為 25°C ，由室溫變化曲線，誤差很大時，空調箱風車以全速(2100RPM)運轉，約十分鐘內可將室溫降至 27°C 內，並於

5000 秒將室溫控制在設定點，於 9000 秒將設定點改為 26°C，進觀察曲線暫態最大

超越量為 0°C。跟圖 6 比較本文控制法確實可得到較少的最大超越量，較小的上升時間。

由以上可知，當溫差很大時，空調箱風車全速加速運轉，當達到設定點時，空調箱風車以平穩速度運轉，就本實驗場所，在穩定設定點 25°C 約以 1000rpm 左右 (視室外天氣變化及室內各種變動的熱源影響)作修正運轉，由於空調箱風車(3 馬力)運轉特性之近似方程式(經實測結果)：

二次近似方程式：

$$p(f)=0.608f^2 - 22.23f+365.05 \quad (20)$$

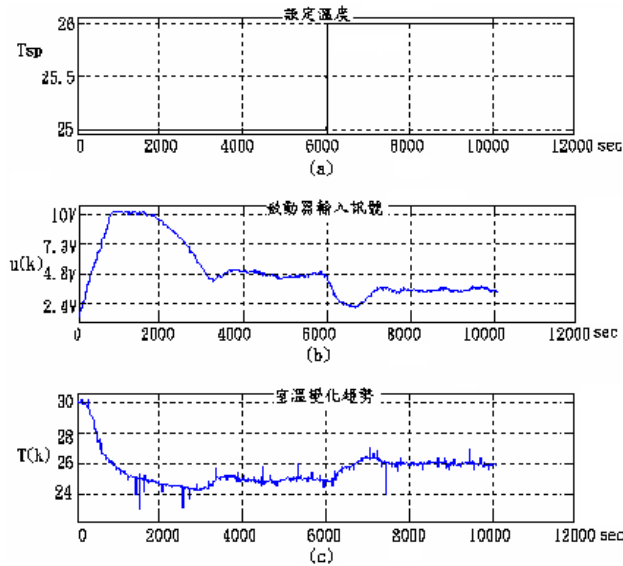


圖 6 a(k)=1 之 (a) Tsp (b) u(k) (c) T(k)變化圖

其中 P：感應馬達輸入總功率
f：感應馬達之電源頻率

由以上方程式可知 3 馬力空調箱風車，輸入功率與轉速為平方關係，此種特性適合為維持室溫而長時間運轉在低速的空調場所，跟一般定頻驅動比較可大幅度節省能耗。由上述經實測結果及過去一年期間實際運轉紀錄可以評估本實驗之空調系統附屬設備在變頻控制下之電力消耗，並與定頻(未做變頻)控制作節能比較，根據過去一年使用狀況及台灣天氣溫度分佈評估，一般停機及維修約佔 4 個月，空調使用約佔 8 個月以每天運轉十小時整年約 2000 小時運轉時間，在溶冰模式運轉下，需啓動空調箱風車一部、溶冰冰水循環泵浦及冰水循環泵浦各一部之附屬動力設備 (不包含壓縮機)如圖 1 所示。針對過去一

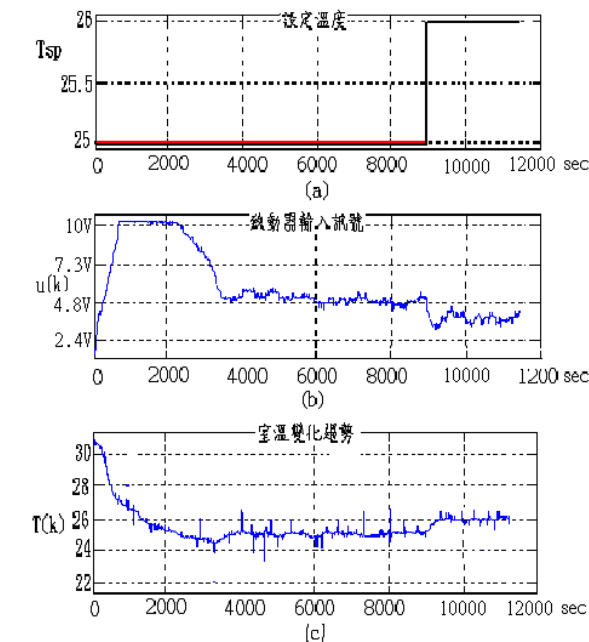


圖 7 a(k)自我調適之(a) Tsp (b) u(k) (c) T(k)變化圖

年本空調系統於溶冰模式下之使用狀態示於表 2。空調箱風車之 3HP 驅動馬達以整年使用狀態示於表 3。表 4 為以每年節省

表 2 過去一年溶冰模式下之使用狀態

以風車轉速(rpm)概分 負載等級	% 責任週期 (duty cycle)
2100 rpm (快速降溫)	10%
1500 rpm	12%
1000 rpm	68%
800 rpm	10%

表 3 3HP 空調箱風車之驅動馬達以整年使用狀態

風車 (rpm)	責任週期 (%)	需求馬力 (H P)	權重馬力 (H P)
2100	10	2.4	0.24
1500	10	1	0.1
1000	68	0.4	0.272
800	12	0.28	0.033
等效總需求馬力 HP			0.65

表 4 變頻及定頻節能效果比較

控制模式	定頻控制情況 (60HZ)	變頻控制情況(VVVF)
權重馬力 (HP)	1.64	0.65
每年運轉時數 (HR)	2000	2000
每年耗電量 (KWH)	2444	968
每度電單價 (元)	2.5	2.5
每年耗電量金額(元)	6110	2421
每年節省金額 (元)	-0	3689

金額、投入經費評估來比較變頻控制與定頻控制省能結果。由表 4 結果可見，僅以空調箱風車之 3HP 驅動馬達調速控制而言，一年即可節省 1476 度用電量(即 3689 元)。若同時考慮整體空調系統如表一所示之九部馬達之協調節能控制，當可獲得更大的節能效益。

陸、結論

本文提出一自我調適模糊灰色預測控制器雛型架構應用於空調系統中之空調箱風車之室溫控制。由於空調空間為非線性，深受室外天氣變化及室內各種變動的熱流遲延影響，且建模不易，採用自我調適模糊灰色預測控制器的空調空間，不僅可獲得較佳性能且在中、輕負載下亦能得到很高比例的節能效果。較一般傳統模糊控制器，經實驗結果，在設定點附近擾動（設定溫度改變或外氣干擾）得到較小的最大超越量，較少的上升時間。又空調箱風車，輸入功率與轉速為平方關係，此種特性適合為維持室溫而長時間運轉在低速的空調場所，可大幅度節省能耗。

參考文獻

- [1] W.L. Chan S.M. Suen A.T.P. So, "A Study On Electrical Performance of Modern VVVF For HVAC Applications," Proceeding of The 4th International Conference on Advances in

- Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, Hong Kong, November 1997.
- [2] Nguyen H. V., Goldschmidt V. ,” Modelling of A Residential and The Duty Cycle of A Compressor-Driven HVAC System,” ASHRAE Trans. 1983, vol.89, part 2A, pp. 361-372.
- [3] Green R H. ,”An Air Condition Control System Using Variable-Speed Water Pumps,” ASHRAE Trans., 1994, vol.100, part 1, pp. 463-470.
- [4] James B. Rishel, P.E., ”HVAC Pump Handbook,” Systecon Inc West Chester, 1996.
- [5] 鄧聚龍, “灰色控制系統” 華中理工大學出版社, 1975.
- [6] 溫坤理等, ”灰預測原理與應用” 全華科技圖書公司, 2002.
- [7] 張偉哲等, ”灰關聯模型方法與應用” 高立圖書公司, 2000.
- [8] L. A. Zadeh, ”Fuzzy Sets”, Informat. Control, No.8, 1965, pp. 338-353.
- [9] L. X. Wang, “A Course in Fuzzy Systems and Control”, Prentice-Hall, 1997.
- [10] 王文俊, ”認識 Fuzzy” 全華科技圖書公司, 2001.
- [11] Mudi, R.K., Pal, N.R., ” A Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers,” IEEE Transactions on Fuzzy System,” VOL. 7, NO. 1, pp. 2-16, February 1999.
-