

串級預估控制用於熱泵溫度控制之研究

Cascade smith strategy for heat pump temperature humidity control

蔡貴義¹、吳文楷²
Kuei-I Tsai¹ and Wen-Kai Wu²

¹國立勤益科技大學冷凍空調與能源系

¹Department of Refrigeration, Air-Conditioning and Energy Engineering,
National Chin-Yi University of Technology

E-mail : tsai ky@ncut.edu.tw

²國立勤益科技大學冷凍空調與能源系 碩士生

²Graduated student of Department of Refrigeration, Air-Conditioning
and Energy Engineering, National Chin-Yi University of Technology

E-mail : a7518405@hotmail.com

摘要

在工業過程中大滯後系統普遍存在。本文以一熱泵系統加熱裝置為研究對象，針對該溫度控制系統具有大滯後的特點，採用串級控制(cascade control)結構結合Smith預估控制器的控制方案，內環路採用Smith預估器，可大幅度降低滯後對控制系統動態性能的影響，外環採用PID控制以降低穩態誤差。PID控制器之整定採粒子群法 (PSO)最佳尋優策略，並以研華公司之監控軟體(ADAMView)完成實現熱泵加熱系統高精確之溫濕度控制。經由實測應印證，本文所提控制系統與單回路PID控制或Smith預估控制相比具有更優的動態特性和強健性。

關鍵字詞：串級控制； Smith 預估控制器；監控軟體；熱泵系統

Abstract

The large time delay systems widely exist in industry process. according to the controlled object of the temperature and humidity with large time delay, a scheme by use of cascade control and Smith predictor is adopted. Smith controller is used in inside loop to reduce the influence on dynamic characteristic by large time delay . PID controller is used in outside loop to eliminate static error. This heat pump system is realized by the technique of adamview. The experiment showed that the cascade control and Smith controller system were much better than single PID loop or predictor system in dynamic performance and robustness.

Key words: large time delay; cascade control system; PID controller; Smith predictor

1. 前言

PID 控制器調節簡單、易於實現、運行可靠是工業製程控制廣泛採用的控制器。隨著對控制性能要求的不斷提高，傳統 PID 控制器已不能滿足實際的要求。在較為複雜，特別是被控對象具

有純滯後之系統，即使測量信號已傳送達控制器，但執行機構接受信號後欲立即動作，需經過一段滯後時間，才能改變被控制量。如此必然產生較大的超調量和較長的調節時間，使系統的穩定性降低暫態過程變差。

如果採用傳統 PID 單迴路控制，熱泵壓縮機排氣壓力的變化導致冷媒流量的變化，冷媒流量的變化隨之引起乾燥室室溫的變化，因此產生了控制過程上的時間滯後問題而達不到預期的控制效果。對於熱泵乾燥機這類具有時變參數和非線性的大滯後、大慣性的控制問題。

本文控制方法是採用串級控制(cascade control)結構結合 Smith 預估控制器的控制方案，內環路採用 Smith 預估器，可大幅度降低滯後對控制系統動態性能的影響，外環採用 PID 控制以降低穩態誤差。PID 控制器之整定採粒子群法(PSO)最佳尋優策略以期望本文熱泵乾燥機有更優良的動態特性和強健性

本文控制之實現以研華公司之監控軟體(ADAMView)完成實現熱泵加熱系統高精確之溫濕度控制。

2. Cascade smith 控制策略

2.1 Smith 預估控制器的控制方案

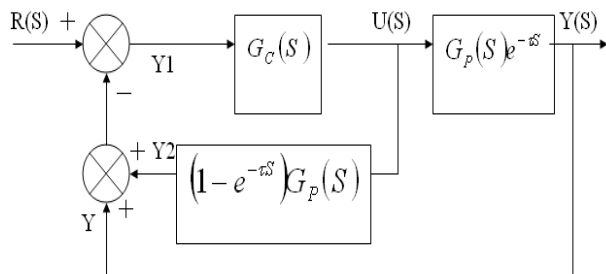


圖 1. 史密斯預估控制結構圖

Smith 預估控制的特點是預先估計出製程在基本擾動下的動態特性，再由預估器進行補償的控制過程。以一轉移函數加入到反饋控制系統中，以補償控制過程的動態特性，使滯後的被控量超前反應到控制器，使控制器提前動作，而減少超調量，加速調節過程。如圖 1.所示

Smith 預估控制結構圖如圖 1.所示，經補償後，純滯後的影響被消除，使系統可以使用較大的調節增益來改變調節品質。Smith 補償函數為：

$$G_L(S) = G_p(S)(1 - e^{-\tau S}) \quad (1)$$

設 $G_p(S) = \frac{K_p}{T_p S + 1}$ ，由(1)式得

$$G_L(S) = G_p(S)(1 - e^{-\tau S}) = \frac{K_p(1 - e^{-\tau S})}{T_p S + 1} \quad (2)$$

(2)式相應的微分方程為

$$T_p \frac{dy_I}{dt} + y_I(t) = K_p[u(t) - u(t - \tau)] \quad (3)$$

(3)式相應的差分方程為

$$y_I(kT) - ay_I[(k-1)T] = b[u(k-1)T - u[(k-1)T - \tau]] \quad (4)$$

式中 $a = \exp(-\frac{T}{T_p})$, $b = K_p[1 - \exp(-\frac{T}{T_p})]$ ，

(4)式為 Smith 預估控制運算式

2-2 串級控制(cascade control) 控制方案

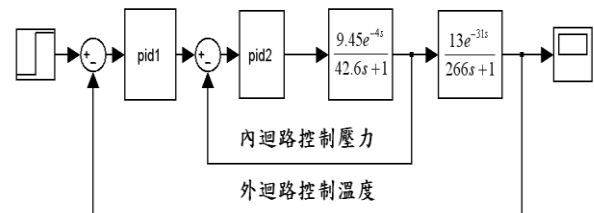


圖 2. 熱泵乾燥機串級控制圖

熱泵控制系統採用主控迴路和副控迴路相配合的 Smith 預估串級控制如圖 2.，可以獲得較好的控制效果。

串級控制由於能夠改善單環路的控制效能，並能有效減低因負荷干擾造成的偏差，特別是在操作變數有干擾影響或是驅動器為非線性時。串級控制的特性可歸納於以下幾點：

1. 內環路可自行消除相位落後，以改善主環路的反應速度。
2. 當內環路有增益偏差時，串級控制能有效地消除。
3. 當內環路有負荷擾動時，串級控制系統能在

不影響主環路變數下，於內環路中有效地消除。

4. 串級系統的效能好壞取決於內環路變數的選取必須盡可能讓最大的負荷干擾發生在內環路，並且內環路的作動變數和內環路的量測變數必須有強烈的因果關係存在。

5. 當串級系統內環動作相對於外環越快的時候，串級控制越能表現其優越性。

6. 因為內環路的快速響應，程序之非線性部份可予以降低。

7. 因為內環加快了控制閥和內環路變數之間的響應速度，所以外環路之可控性可予以改善。

8. 串級控制系統對於負荷變數的擾動相較於單環路控制系統有較好之適應能力。

在本文中，控制目的為乾燥室溫溼度設定點追蹤(set-point tracking)以及輸出干擾之排除(output disturbance rejection)，控制架構為串級回授控制。對於控制系統的性能，以其誤差絕對值之積分(integral of absolute error, IAE)做為表示，IAE之定義為：

$$J = IAE \equiv \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

IAE之最小值即代表控制系統之最佳性能。

以下我們將探討一階帶時延(first-order-plus-dead-time, FOPDT)程序模式之P/I/PID控制系統性能。FOPDT之表示式如下：

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\tau s}}{T_s + 1}$$

將內環路稱為第二環路，其FOPDT表示式為

$$G_{p2} = \frac{K_2 e^{-\tau_2 s}}{T_2 s + 1}$$

外環路為第一環路，其FOPDT表示式為

$$G_{p1} = \frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 s + 1}$$

外環路與內環路之時延比值為 $\eta = \tau_1 / \tau_2$

($\eta \tau_2 = \tau_1$) 可以將

$$G_{p1} = \frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 s + 1} \text{ 寫出如下: } G_{p1} = \frac{K_1 e^{-\eta \tau_2 s}}{T_1 s + 1}$$

經由系統辨識實際熱泵系統轉移函數求得如下：

$$G_{p1} = \frac{13e^{-31s}}{266s + 1}$$

$$G_{p2} = \frac{9.45e^{-4s}}{42.6s + 1}$$

其中 T 、 K 、 τ 為

T : 時間常數(S)；

K : 穩態時的增益大小；

τ : 延遲時間(S)]

2.3 高精確度溫濕度控制之實現

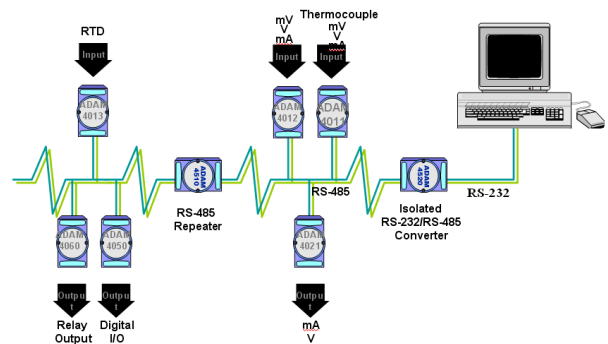


圖 3. 監控系統架構

本文控制之實現以研華公司之監控軟體(ADAMView)完成實現熱泵加熱系統高精確之溫濕度控制。(ADAMView) 監控系統架構如圖 3. 所示。以監控軟體來設計出適用各種形態的執行程式。藉由圖行監控將現場感測器測到的信號，傳至個人電腦中，經過研判後將這些信號以圖形呈現在螢幕上，亦可在螢幕畫面上直接以滑鼠來更改現場的開關狀態或設定。

2.4 粒子群法(PSO)最佳尋優策略

2.4.1 PSO 算法原理

PSO 最佳化是將尋優的參數組合成群體，經由對環境的適應度來將群體中的個體向較佳的區域移動。在描述個體時，將其看成是一個沒有體積的微粒，結合微粒的歷史最佳位置和群體歷史最佳位置信息，以一定的速度向目標值逼近。第 i 個微粒可以表示成 D 維向量， $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ ，微粒的速度表示成 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ ，這個微粒經歷的最佳位置表

示為 $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$ ，也稱為 P_{best} 。群體所有微粒經歷的最好位置的索引號用 g 表示，記為 P_g ，也稱為 G_{best} 。第 i 個微粒從 n 代進化 $n+1$ 代，經由下式進行更新：

$$v_{id}^{n+1} = wv_{id}^n + c_1r_1^n(p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2r_2^n(p_{gd}^n - x_{id}^n) \quad (5)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (6)$$

式中， w 表示慣性權重，它使微粒保持運動慣性，使其具有擴展搜索空間的趨勢，有助於新區域的搜索。 c_1 、 c_2 均為正實數，稱為加速度常數，係將每個微粒推向 P_{best} 和 G_{best} 的統計加速度的權重。 r_1^n ， r_2^n 為在區間 $[0,1]$ 變化的隨機數。

2.4.2 PSO 算法流程

PSO 算法的計算流程可描述如下：

先設置有關參數，如種群規模 m ，慣性權重 w ，加速度常數 c_1 、 c_2 ，結束的條件等。

Step1: 初始化群體中的微粒，包括微粒的初始位置和初始速度。

Step2: 評價各微粒的適應度函數值 $f_{fitness}$ 。

Step3: 對每個微粒，將其適應度值更優，則用當前適應度值更新 P_{best}

Step4: 將每個微粒的適應度值與群體經歷過的歷史最佳位置 G_{best} ，同時記錄其索引號。

Step5: 根據算式(5)更新各微粒的位置和速度。

Step6: 計算最佳化性能指標，達到結束條件，則返回當前最佳微粒的結果，算法結束；否則返回 step2，繼續下一循環。

基於 PSO 的 PID 參數整定目標函數的選擇利用 PSO 對 PID 控制器的參數進行最佳化整定，其關鍵在於目標函數的選擇。本文利用主目標和輔助目標相結合的方法來確定目標函數

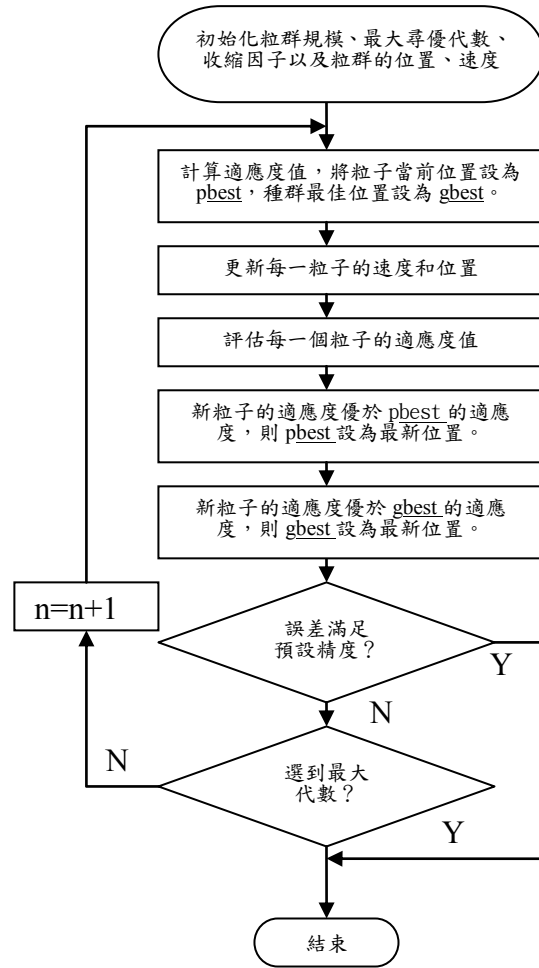


圖 4.PSO 運算流程圖

f_{object} 是基於這樣的考慮；在調節時間 T_s 滿足要求的情況下，IAE 性能指標可能比較大，這種情況下的系統響應是不滿足要求的，因此在滿足主目標穩定時間 T_s 的情況下，用 IAE 性能指標來約束目標函數 f_{object} 。此外，在不同的控制器整定場合中，可能要根據具體的問題來選擇相應的最佳化目標函數。

假設乾燥室溫度的設定值為 50°C ，對於粒子群 PID 控制方法，在經過 200 次迭代後，得到整定後的 PID 參數為 $K_p = 0.5136$ ， $K_i = 0.0068$ ， $K_d = 5.0883$ ，流程圖如圖 4.所示

3. 結果與討論

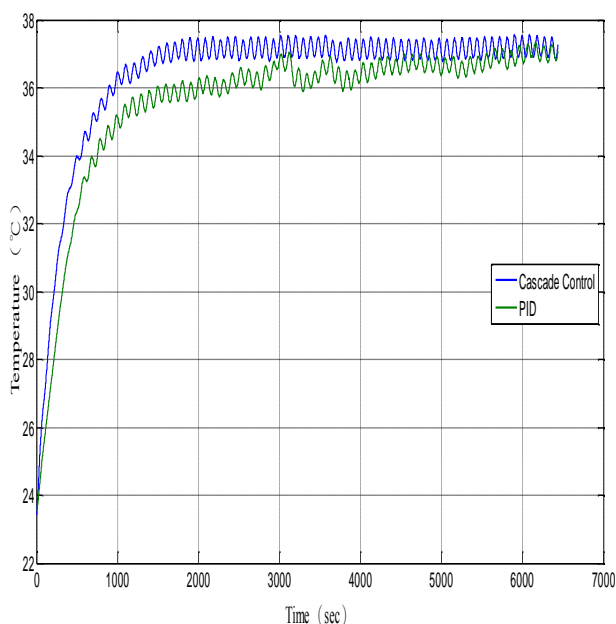


圖 5.單 PID 與 Cascade control 之比較

本文所提控制系統與單回路PID控制相比具有更優的動態特性和強健性。如圖 5.所示

由以上之推導、討論，以及實驗的結果，可以獲得以下之幾點結論：

1. 熱泵控制系統之溫濕度精密控制，本文提出之 PSO 最佳化 PID 控制器參數調整方案能快速得到所對應之最佳參數值。對於負荷干擾排除以及設定點追蹤提供溫濕度精密控制。
2. 由串級控制得知在內環路和外環路各種不同的配對狀態，內環路對負荷擾動排除之性能調節不一定要調到最佳狀況；而內環路動態較外環路慢時，串級控制也可獲得比單環路系統好的性能。
3. 利用研華公司之監控軟體(ADAMView)完成實現熱泵加熱系統高精確之溫濕度控制，其附加機制提供測試系統更佳之輔助。
4. 利用提供之方法進行串級控制對熱泵系統之溫濕度精密控制進行試驗，得到不錯之效果；將模擬之結果應用於所模擬之結構，也獲得性能極大之改善，而類比之架構也概括顯示出評估之可行性。

4. 結論

傳統的 PID 控制系統對於延遲大、非線性強、控制信號反應慢的複雜熱加工過程往往不能獲得滿意的控制效果。熱泵乾燥機系統的温度控制問題是一個典型的時間滯後問題。史密斯預估控制技術配合串級控制技術應用在該系統，可以即時檢測系統中可能引起被控制量發生變化的一些因素加以控制，可有效克服熱泵乾燥機延遲大、反應慢的問題。熱泵乾燥機系統把主要的擾動包含在副控迴路中，經由副控迴路的調節作用，在擾動影響到主控迴路參數之前，削弱了擾動作用的影響。這種控制方法在熱處理、化工、機械加工、金屬冶煉等工業亦具有推廣價值。

5. 誌謝

本研究為低溫熱泵乾燥裝置的研製及其控制策略計畫編號 NSC101-2622-E-167-020-CC3 之計畫，由於國科會產學合作的支持，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. Chao, Y. C., Huang, H. P., and Lin, H. S. "The Optimal Tuning of Cascade Control System," *Bulletin of the College of Engineering, National Taiwan University*, vol. 31, pp.47-66, 1982.
2. Eker, I., and Johnson, M. A. "New Aspects of Cascade and Multi-Loop Process Control," *Trans IChemE*, vol. 74, pp. 38-54, 1996.
3. Franks, R. G., and Worley, C. W. "Quantitative Analysis Cascade Control," *Ind. Eng. Chem*, 48(1956),1074-1079.
4. Huang, H. P., Chien, I-Lung, Lee, Y. C., and Wang, G. B., "A Simple Method For Tuning Cascade Control Systems," *Chem. Eng. Comm.*, vol. 165, pp.89-121, 1998.
5. Ko, B., and Edgar, T. F. "Performance Assessment of Cascade Control Loops" *AICHE journal*, vol. 46, no. 2, pp. 281-291, 2000.