

射出成型機加熱料管之自調整 PID 溫度控制

Self-Tuning PID Temperature Control for Plastic Injection Molding Processes

呂奇瓚、廖本右

Chi-Huang Lu, Pen-Yu Liao

本文提出塑膠射出成型機之自調整 PID 溫度控制之設計與實現。此研究是基於小波模糊類神經網路來設計自調整比例積分微分 PID 控制器，採用的小波模糊類神經網路是用來建構該射出成型機加熱料管其多變數受控系統的數學模型，並經由廣義預估性能指標來推導出本文所提之自調整 PID 控制法則。PC-based 控制器實現射出成型機加熱料管之自調整 PID 溫度控制系統，經實驗結果顯示所提自調整 PID 溫度控制器擁有著令人滿意的溫控值追蹤能力。

This report presents a self-tuning proportional-integral-derivative (PID) controller based on wavelet fuzzy neural networks (WFNNs) for plastic injection molding processes. A mathematic model using WFNN is constructed for the controlled nonlinear multivariable system, and the self-tuning PID controller is derived via a generalized predictive performance criterion. The illustrative nonlinear multivariable system is used to demonstrate the effectiveness of the proposed strategy. The PC-based controller is used to implement a self-tuning PID temperature control system for plastic injection molding process. The experiment shows that the proposed self-tuning PID temperature control method has the satisfying temperature performance under set-point changes.

一、前言

塑膠射出或押出成型是聚合物程序工業裡廣泛被使用的技術。國內的廠家已有三十多年生產射出成型機的豐富製造經驗。以品質性能而言，比起擁有歷史悠久的歐洲射出成型機以及鄰近的日本機器，國產機器屬中下層次。目前國產機器雖有 80% 內銷，但最近外銷量逐年增加，且技術層次的需求不斷地提升。塑膠射出品已被廣泛地應用於民生必需品，汽車外殼、齒輪、飛機及太空梭中的零件，甚至人造義肢及人工心臟等方面，且其用處正不斷地擴大。有些如 CD 等高科技射出成型塑品的品質及精度愈來愈嚴、尺寸公差從早期的毫米級到目前的微米級。為了強化市場的競爭力，提升塑品精度、品質與性能，射出成型機的主要技術研發和提昇是重要的課題。

連續時間和離散時間的自調整控制法則在這幾十年來已經被持續發展中⁽¹⁻⁴⁾。採用類神經網路在控制應用也成為自調整控制的設計方法之一，這是由於類神經網路可以模式化非線性系統的緣故，由參考文獻⁽⁵⁻⁷⁾可獲知類神經網路如何運用在非線性系統的適應控制設計上。此外值得一提的遞迴式類神經網路 (recurrent neural network) 它具有動態映射能力，可以工作在未模式化動態系統上展現出良好的控制性能輸出，該遞迴式類神經網路是一種反饋式網路，具備自我迴授和節點與節點之間的連繫能力，目前研究學者們已經十分成功地把遞迴式類神經網路的控制方法運用到工業系統上^(4, 8, 9)。

小波類神經網路現在變得越來越重要，在於它具有具有數學學習、非線性映射、平行協調處理與小波分解等能力，而這小波類神經網路這些特別的能力已經在文獻⁽¹⁰⁻¹²⁾裡被證實。由於小波類神經網路可以近似任意連續函數，並且以高精度和快速的學習效能進行，所以研究人員運用了此小波類神經網路作為控制系統的數學模型建立與系統控制使用等⁽¹³⁻¹⁵⁾。這幾十年文獻中，小波模糊類神經網路結合了模糊邏輯的研究有：Abiyev 等學者所提模糊小波類神經網路作為動態受控體之辨識和控制⁽¹⁶⁾；文獻⁽¹⁷⁾提出之機器人的非奇異終端順滑模型控制，而機器人的操控即是使用模糊小波類神經網路來達成；Zekri 等學者所提自適應型小波模糊類神經網路方法來處理非線性系統⁽¹⁸⁾。

大部分的工業系統常出現非線性且多輸入多輸出的本質，如此的多變數系統它們的交互耦合的輸出值會被系統操作的控制量大小所影響，為了控制這樣的工業控制系統，一般的工業控制器只是採用單一輸出量且固定 PID 參數控制器加以控制而已，為獲得較好的控制性能這些控制器 PID 參數卻必須經常以手動調整。因此，本研究的動機是將傳統單迴路 PID 控制方法展延到多變數系統的自調整 PID 控制器。有關此類研究文獻有 Yamamoto 等所提出的多變數自調整 PID 控制器設計和實驗評估方法^(19, 24)；文獻^(20, 21)的 PID 控制器設計是以模糊類神經網路和混合式漸近代數的合成方法來完成；以及改進自調整模糊 PID 控制器的文獻⁽²²⁾，並且依此技術應用到開關式磁阻馬達直接驅動液壓機的容積控制上。

本文提出射出成型機加熱料管之自調整 PID 溫度控制之設計與實現，有關射出成型機加熱程序可以參閱相關文獻⁽²⁹⁻³³⁾。該研究是基於小波模糊類神經網路的多變數自調 PID 控制器來進行多輸入多輸出系統的辨識與控制，該控制器其 PID 參數的適應性是透過廣義預估控制性能指標計算獲得，藉由實驗進行自調整 PID 控制器對射出成型機加熱料管的溫度控制系統進行可行性和有效性的驗證。除此章節外，本文的安排如下：第二節簡介射出成型機與說明該加熱料管的熱控系統架構；第三節描述多變數自調 PID 控制法則的推導，以及參數辨識器是以遞迴最小平方演算法來估算出小波模糊類神經網路的系統參數；第四節進行熱控實驗來驗證所提出 PC-based 的 PID 控制器的性能輸出；第五節為本文結論。

二、射出成型機與熱料管加熱系統

塑膠射出成型機是一種眾所皆知的塑膠加工機，主要應用在於塑膠製品成型。而塑膠射出成型的程序是將塑膠原料加熱變成熔融之液狀物體，經過高壓射入成型模穴中，並經冷卻固化後開模取出成型品；這種方法可以很容易而且非常有效率的生產三次元塑膠製品。當使用不同成型模具和原料，即可快速製得精密度良好的成型品。塑膠射出成型機主要應用在於塑膠射出成型製品之領域；如矽膠類產品、精密塑膠凸輪、PET 容器製品、汽機車工業零件、民生工業產品等，亦可廣泛應用微射出領域以生化、醫療、微機電、資訊、光電、精密

測量元件等為主要訴求，精密射出以 3C 消費性電子產品、半導體零件、資訊週邊產品、光學鏡片、導光板、IC 卡、電子工業零件等的發展應用重點。

生產高品質、高性能的全電式射出成型塑品完全須仰賴射出成型機的閉迴路控制技術。典型的受控變數是加熱料管出口之熔膠溫度和壓力；控制變數則是螺桿轉速、射量與加熱料管的各段溫度。其中加熱料管的各區段溫度控制影響成品品質及製造成本極大，本文所述的溫度控制即以此加熱料管為控制對象。基本上，射出機加熱料管各段溫度區的動態行為是多變數、互相耦合且非線性的。一般而言，當室溫變化、螺桿的轉速變化、周遭氣流當設定點變動、聚合物的比熱、熱傳導性和黏性變化，則迴路的控制參數值均需經由人為或自動的重新調整，使調整後的控制器能適切地將加熱料管中各段溫度的變動或誤差，控制在容許的規格內。本文發展實用精密溫度控制器，使各段溫度輸出達到的控制規格內，研究所採用的射出機溫度控制系統包括自然氣冷式的加熱料管、熱電偶溫度量測與控制介面卡、固態繼電器、個人電腦系統等。

圖 1 為本研究所採用射出成型機加熱料管的熱控系統結構圖，加熱料管依照射嘴部份與螺桿計量區、壓縮區、進料區等位置區隔成四個適當的加熱段，由電熱片與量測各段溫度輸出的熱電偶 TC 所構成。螺桿計量區、壓縮區、進料區等區的加熱器容量是相同，而射嘴部份的加熱器容量反倒小些。每一溫度區段各有兩組加熱器片和一安置於加熱器群間的熱電偶電壓感測到的溫度值，經由溫度量測與控制介面卡之類比轉數位 AD 單元將其轉換成數位信號傳給電腦，電腦處理此數位信號並代入控制法則計算，得到適當的控制量，再轉換成脈波調變 PWM 控制信號，控制介面卡 DIO 單元。最後由此控制介面卡根據此控制信號驅動固

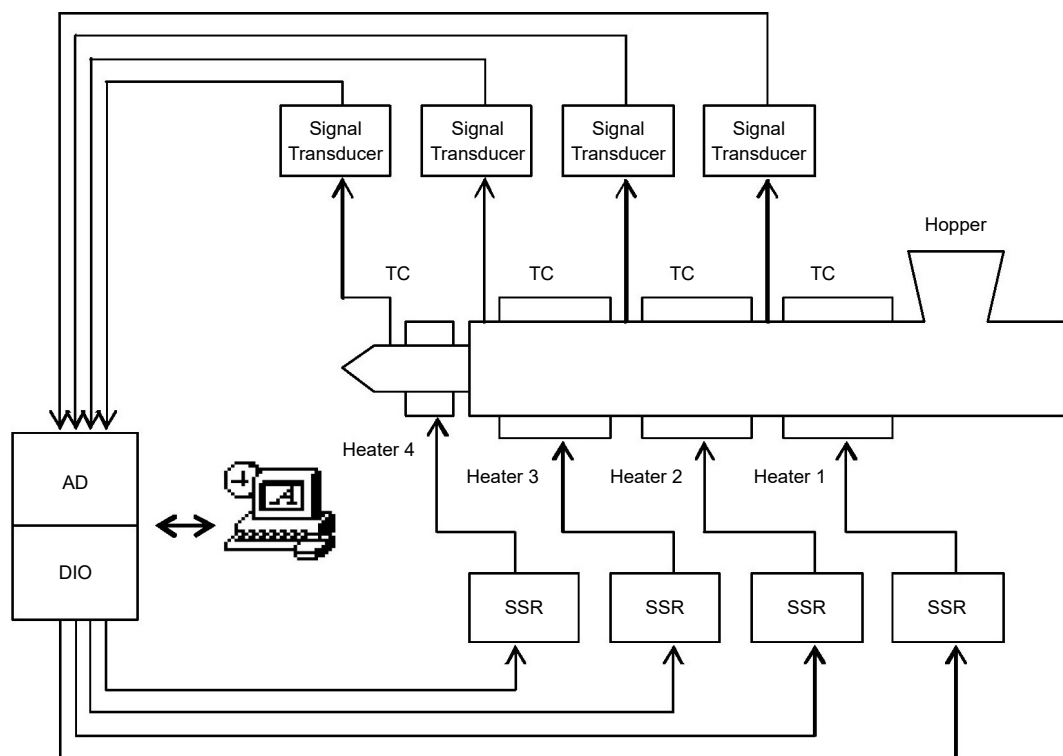


圖 1. PC-based 溫度控制系統。

態電驛 SSR 的開啟/關閉時間，以 PWM 方式來能量調整進行控制加熱器的熱能大小，以達到射出成型機加熱料管其溫度控制的目的。一般而言，射出成型機要求的溫度控制性能必須滿足下列的規格：(1) 步階響應的超越量少於 3 °C 與穩態誤差少於 ±5 °C，(2) 在溫度設定點變動時控制器可自動進行控制器參數調諧。

三、溫度控制法則

1. 多變數 PID 控制法則

本節討論射出成型機加熱料管其多輸入多輸出加熱系統所發展出的多變數 PID 控制器。現假設一非線性離散時間系統為下列非線性自動回歸移動平均 (nonlinear autoregressive moving averaging, NARMA) 模型為加熱料管的多變數數學模型，其數學式表示為：

$$\mathbf{y}(k) = f(\mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-m)) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{u}(\cdot) : Z^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ 和 $\mathbf{y}(\cdot) : Z^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ 分別系統的輸入和輸出變數， $f(\cdot) : \mathfrak{R}^{m+2} \rightarrow \mathfrak{R}^n$ 表示非線性系統函數， m 是系統輸出階數。本研究中是以小波模糊神經網路來近似上式之非線性多變數系統 (1)，該 WFNN 的模糊推理為：

R_l ：若 $x_i(k)$ 是 $F_{i\ell}$ ，則 $\mathbf{y}(k)$

$$\text{為 } \mathbf{A}(z^{-1})\mathbf{y}(k-1) + \mathbf{B}(z^{-1})\mathbf{u}(k-1) \quad (2)$$

其中 $x_i(k)$ 是第 i 輸入變數， $F_{i\ell}$ 是對應於模糊變數 $x_i(k)$ 的模糊集合， $\mathbf{y}(k)$ 是 WFNN 的輸出向量，而 $\ell = 1, \dots, L$ 是 WFNN 的模糊規則數量，此外 $\mathbf{A}(z^{-1})$ 是對角多項式矩陣表示為：

$$\mathbf{A}(z^{-1}) = \text{diag}\{A_1(z^{-1}), A_2(z^{-1}), \dots, A_n(z^{-1})\} \quad (3)$$

其中 $I + \mathbf{A}(z^{-1}) = \bar{\mathbf{A}}(z^{-1})$ 是二階多項式矩陣， $\mathbf{B}(z^{-1})$ 是多項式矩陣其表示為：

$$\mathbf{B}(z^{-1}) = \begin{bmatrix} B_{11}(z^{-1}) & B_{12}(z^{-1}) & \dots & B_{1n}(z^{-1}) \\ B_{21}(z^{-1}) & B_{22}(z^{-1}) & \dots & B_{2n}(z^{-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1}(z^{-1}) & B_{n2}(z^{-1}) & \dots & B_{nn}(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

文獻^(23,24) 所提之多變數控制系統指出，當採用多迴路控制方式時給予補償函數可以達到多變數系統的解耦能力，此補償器是一種靜態參數的設計方法：

$$\mathbf{H} \equiv \mathbf{B}^{-1}(1)\mathbf{A}(1) \quad (5)$$

這樣的補償器辦法具備低頻交互影響的作用。將 (2) 式和 (5) 式整理後可建構擴展型動態系統模型，其描述如下式：

$$\bar{\mathbf{A}}(z^{-1})\mathbf{y}(k) = \mathbf{B}(z^{-1})\mathbf{H}\mathbf{v}(k-1) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{v}(k)$ 表示為擴展系統的輸入信號向量。依文獻⁽²⁴⁾ 說明該擴展型動態系統可以近似一解耦系統，下面系統模型是由原系統中多項式矩陣其對角元素來組成一解耦之系統動態方程式：

$$\bar{A}_i(z^{-1})y_i(k-1) = \bar{B}_i(z^{-1})v_i(k-1) \quad (7)$$

其中

$$\bar{A}_i(z^{-1}) = 1 + \bar{a}_{i1}z^{-1} + \bar{a}_{i2}z^{-2} \quad (8)$$

$$\bar{B}_i(z^{-1}) = \sum_{o=1}^n B_{io}(z^{-1})h_{oi} \quad (9)$$

接著多變數 PID 控制法則的設計是採用文獻^(25,27) 的廣義預估性能指標：

$$J_i(k) = \sum_{j=1}^{N_p} (\hat{y}_i(k+j) - r_i(k))^2 + \sum_{j=1}^{N_u} q_i(z^{-1})\Delta v_i^2(k+j-1) \quad (10)$$

其中 N_p 是預估輸出水平， $r_i(k)$ 是參考輸入，並且 $\hat{y}_i(k+j)$ 是第 j 步之預估值。 N_u 是控制輸出水平， $q_i(z^{-1})$ 是相對於 $v_i(k)$ 的權重多項式。

在此為減少執行計算量吾人設定 $v_i(k+j) = v_i(k)$ ，接著最小化廣義預估性能函數，可得

$$J_i(k) = (F_i y_i(k) + G_i \Delta v_i(k) + X_i - I r_i(k))^T (F_i y_i(k) + G_i \Delta v_i(k) + X_i - I r_i(k)) + q_i(z^{-1})\Delta v_i^2(k) \quad (11)$$

其中

$$F_i = [f_{i1}(z^{-1}) \quad f_{i2}(z^{-1}) \quad \cdots \quad f_{iN_p}(z^{-1})]^T$$

$$G_i = [g_{i1,0} \quad g_{i2,1} \quad \cdots \quad g_{iN_p,N_p-1}]^T$$

$$X_i = \left[g_{i1,1}\Delta v_i(k-1) \quad \cdots \quad \sum_{\rho=1}^{N_p} g_{iN_p,\rho}\Delta v_i(k-\rho) \right]^T$$

I 是單位矩陣， $\Delta = 1 - z^{-1}$ ，(11) 式的 $f_{ij}(z^{-1})$ 與 $g_{ij,j}$ 是要解 Diophantine 方程式 (12) 和 (13) 方可獲得：

$$1 = e_{ij}(z^{-1})\bar{a}_i(z^{-1}) + z^{-j}f_{ij}(z^{-1}) \quad (12)$$

$$g_{ij}(z^{-1}) = \Delta e_{ij}(z^{-1})\bar{b}_i(z^{-1}) \quad (13)$$

由於廣義預估性能函數 $J_i(k)$ 是二次式方程式，因此可以以下面方程式來獲得的最小解。

$$\frac{\partial J_i(k)}{\partial (\Delta v_i(k))} = 0 \quad (14)$$

接著由 (14) 式可推導產生下面的方程式：

$$G_i^T (F_i y_i(k) + X_i - I r_i(k)) + (G_i^T G_i + q_i(z^{-1})q_{i0})\Delta v_i(k) = 0 \quad (15)$$

進而選擇適當的權重多項式，可將 (15) 式整理推導為 (16) 式：

$$\Delta v_i(k) = \frac{G_i^T I r_i(k) - G_i^T F_i y_i(k)}{G_i^T G_i + q_{i0}^2} \quad (16)$$

為獲得所需之多變數 PID 控制器，增量式數位型 PID 控制律是被提出，它的數學表示式為：

$$\Delta v_i(k) = k_{Ii} r_i(k) - \varphi_i(z^{-1}) y_i(k) \quad (17)$$

其中

$$\varphi_i(z^{-1}) = (k_{Pi} + k_{Ii} + k_{Di}) - (k_{Pi} + 2k_{Di})z^{-1} + k_{Di}z^{-2}$$

此外，(16) 式中的是滿足 (18) 關係式：

$$F_i y_i(k) = F_{i0} y_i(k) + F_{i1} y_i(k-1) + F_{i2} y_i(k-2) \quad (18)$$

其中

$$F_{i0} = [f_{i1,0} \quad f_{i2,0} \quad \cdots \quad f_{iN_p,0}]^T$$

$$F_{i1} = [f_{i1,1} \quad f_{i2,1} \quad \cdots \quad f_{iN_p,1}]^T$$

$$F_{i2} = [f_{i1,2} \quad f_{i2,2} \quad \cdots \quad f_{iN_p,2}]^T$$

因此，根據 (16)、(17) 和 (18) 方程式的數學關係，可以推導產生本研究所提出的多變數控制器其 PID 參數方程式：

$$k_{Pi} = -(G_i^T G_i + q_{i0}^2)^{-1} (G_i^T F_{i0} + 2G_i^T F_{i1}) \quad (19)$$

$$k_{Ii} = (G_i^T G_i + q_{i0}^2)^{-1} G_i^T I \quad (20)$$

$$k_{Di} = (G_i^T G_i + q_{i0}^2)^{-1} G_i^T F_{i2} \quad (21)$$

2. 參數辨識

此節是進行自調整控制器的 PID 參數即時適應值之獲得，為使控制系統能全區域地操作，(1) 式將分成幾個部分系統行為的操作區域，依文獻^(15, 28) 此動態系統可以用 WFNN 模型來描述為：

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \sum_{\ell=1}^L \mathbf{w}_{\ell}(k) (\mathbf{A}_{\ell}(z^{-1}) \mathbf{y}(k-1) + \mathbf{B}_{\ell}(z^{-1}) \mathbf{u}(k-1)) \quad (22)$$

其中

$$w_{\ell}(k) = \frac{\bar{\mu}_{\ell}(k)}{\sum_{\ell=1}^L \bar{\mu}_{\ell}(k)}$$

$$\bar{\mu}_{\ell}(k) = \prod_{i=1}^{(m+2) \times n} \mu_{i\ell}(k)$$

$$\mu_{i\ell}(k) = \left(\frac{x_i(k) - m_{i\ell}}{\sigma_{i\ell}} \right) e^{-\left(\frac{(x_i(k) - m_{i\ell})^2}{2\sigma_{i\ell}^2} \right)}$$

$m_{i\ell}$ 和 $\sigma_{i\ell}$ 分別表示為小波函數之 translation 值和 dilation 值，而參數辨識是採用遞迴最小平方 (recursive least squares, RLS) 演算法來估算出該小波模糊類神經網路的每一個參數值大小：

$$\hat{\theta}_i(k) = \theta_i(k-1) + \frac{P_i(k-1)\zeta_i^T(k)(y_i(k) - \zeta_i^T(k)\hat{\theta}_i(k-1))}{1 + \zeta_i(k)P_i(k-1)\zeta_i^T(k)} \quad (23)$$

$$P_i(k) = P_i(k-1) + \frac{P_i(k-1)\zeta_i^T(k)\zeta_i(k)P_i(k-1)}{1 + \zeta_i(k)P_i(k-1)\zeta_i^T(k)} \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_i &= [\theta_{i1}^T \quad \theta_{i2}^T \quad \cdots \quad \theta_{i\ell}^T]^T \\ \zeta_i &= [\zeta_{i1}^T \quad \zeta_{i2}^T \quad \cdots \quad \zeta_{i\ell}^T]^T \\ \hat{\theta}_{i\ell} &= [\hat{a}_{i\ell 1} \quad a_{i\ell 2} \quad \hat{\mathbf{B}}_{\ell 1} \quad \cdots \quad \mathbf{B}_{\ell m}]^T \\ \zeta_{i\ell} &= w_{i\ell} \left[[y_i(k-1) \quad y_i(k-2) \mathbf{u}^T(k-1) \quad \cdots \quad \mathbf{u}^T(k-m)]^T \right] \end{aligned}$$

此外，方程式 (7) 的未知參數也同樣採用 RLS 演算法來求得：

$$\hat{\mathcal{G}}_i(k) = \mathcal{G}_i(k-1) + \frac{p_i(k-1)\zeta_i^T(k)(y_i(k) - \zeta_i^T(k)\hat{\mathcal{G}}_i(k-1))}{1 + \zeta_i(k)p_i(k-1)\zeta_i^T(k)} \quad (25)$$

$$p_i(k) = p_i(k-1) + \frac{p_i(k-1)\zeta_i^T(k)\zeta_i(k)p_i(k-1)}{1 + \zeta_i(k)p_i(k-1)\zeta_i^T(k)} \quad (26)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{\mathcal{G}}_i &= [\hat{a}_{i1} \quad \hat{a}_{i2} \quad \hat{b}_{i1} \quad \cdots \quad \bar{b}_{im}]^T \\ \zeta_i &= [y_i(k-1) \quad y_i(k-1) \quad v_i(k-1) \quad \cdots \quad v_i(k-m)]^T \end{aligned}$$

四、溫度控制實驗結果

1. 即時適應控制演算程序

本溫度控制系統的即時適應控制演算程序，它是撰寫程式來遞迴地來更新小波模糊類神經網路的系統參數，也使得自調整控制器可以即時自動算出該控制器參數的 PID 增益值大小。此操作步驟為下：

- 步驟 (1) 選定參考輸入信號與取樣時間。
- 步驟 (2) 讀取加熱料管各溫度區的輸出溫度值。
- 步驟 (3) 更新 WFNN 類神經網路參數值。
- 步驟 (4) 依補償器方程式計算出 H 值。
- 步驟 (5) 計算多變數 PID 的參數增益值。
- 步驟 (6) 輸出控制信號至各個固態繼電器 SSR。
- 步驟 (7) 重複步驟 2 至步驟 6。

2. 溫度控制實驗

本實驗是用來驗證所提多變數自適應 PID 溫度控制器對射出成型機加熱料管具備有溫度設定點追蹤性能並符合控制規格等能力。圖 2 為本溫控實驗的加熱料管溫度控制系統實體圖，實驗依照第三節提出控制法則設計技術，採用視窗式 C++ Builder 語言來撰寫即時多變數自適應 PID 溫度控制程式，以實現 PC-based 控制器並進行溫控性能測試。為符合第 2 節所述射出成型機加熱料管其溫度輸出性能規格，該溫控實驗選取了預估輸出水平為 $N_p = 15$ 、控制性能權重為 $q_{i0} = 1$ 以及取樣時間為 10 秒。



圖 2. 射出成型機之加熱程序系統。

本研究的第一個實驗是針對射出成型機加熱料管的第 2 個溫度區，進行單輸入單輸出的溫度控制追蹤實驗，圖 3 顯示在該溫度區的溫度響應結果，實驗結果顯示所設計的 PC-based 溫控器有能力在 20 分鐘內到達 160°C 溫度設定值，並使得該溫度區加熱料管一直保持 160°C 溫控值直到取樣次數 500 結束。由圖中的溫度歷程顯示出溫度控制系統的溫度輸出響應的超越量是小于 5°C ，而穩態誤差的溫度響應在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 之內。

第二個實驗進行了 300 次的取樣工作也就是說合計進行 50 分鐘的溫度控制實驗，此次是將射出成型機加熱料管的各個溫度區採用多輸入多輸出控制策略來進行多變數溫度控制。本實驗是將射出成型機加熱料管的第 1 溫度區至第 4 溫度區其溫控值分別設定為 150°C 、 160°C 、 170°C 與 180°C 。圖 4 顯示該其溫度穩態響應的實驗數據是符合性能規格，說明著加熱料管各個溫度區的溫度響應其超越量均小於 10°C ，由圖 4 中可以看出在第 150 取樣次數以後的穩態誤差會少於 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。由以上兩個實驗可確實驗證出所提 PID 控制器具備實務技術的有效性，實驗結果展示不錯控制能力這也說明此控制策略亦可應用在相關動態系統與工業設備上。

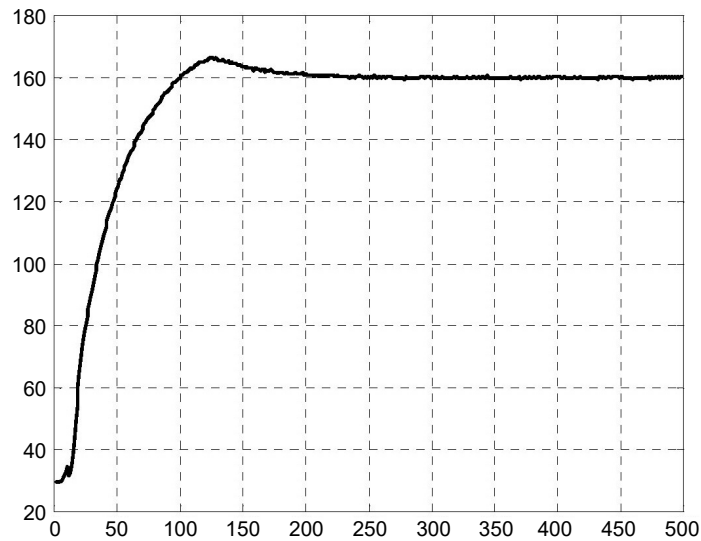


圖 3. 單一溫度區的步級輸出響應。

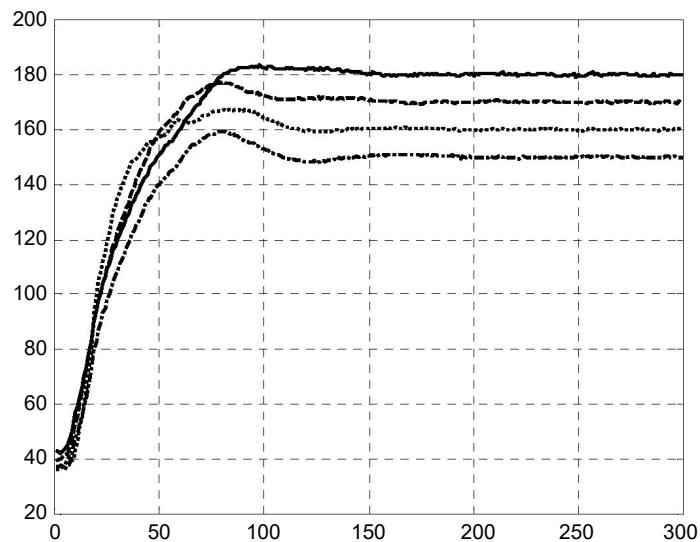


圖 4. 四個溫度區的多輸出設定點溫度響應。

五、結語

本文提出了射出成型機加熱料管之自調整 PID 控制器的設計方法，藉由小波模糊類神經網路來近似一非線性多變數受控系統，並設計出自調整 PID 控制器以達到控制系統具備良好的性能輸出。此 PID 控制器具有適應性是採用遞迴最小平方法來即時辨識出該多變數受控體的動態系統數學模型。研究運用廣義預估控制法則與離散速度型 PID 控制律的對應數學關係，來推導所提自調整 PID 控制器中比例積分微分參數值。所提控制策略已經以 PC-based 控制器技術實現在射出成型機加熱程序上，由實驗顯示出該自調整 PID 控制器具備對多輸入多輸出加熱料管的熱控系統有著溫控值自動調整能力與及溫度穩態誤差會小於攝氏 0.5 度的性能規格。

參考文獻

1. K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive control*, London: Addison-Wesley (1995).
2. K. R. Sales and S. A. Billings, *International Journal of Control*, **51**, 753-769 (1999).
3. P. He, and S. Jagannathan, *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics B*, **37** (2), 425-436 (2007).
4. C. H. Lu and C. C. Tsai, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, **55** (3), 1-10 (2008).
5. K. S. Narendra and K. Parthasarathy, *IEEE Trans. Neural Networks*, **1**, 4-27 (1990).
6. O. Adetona, E. Garcia, and H. Keel, *IEEE Trans. Neural Networks*, **11** (1), 102-109 (2000).
7. S. S. Ge, J. Zhang, and T. H. Lee, *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics B*, **34**, 1630-1645 (2004).
8. R. J. Wai and F. J. Lin, *IEEE Trans. Aerospace* (2001).
9. P. Potocink and I. Grabec, *Neurocomputing*, **43**, 107-126 (2002).
10. Q. Zhang and A. Benveniste, *IEEE Trans. Neural Networks*, **3** (6), 889-898 (1992).
11. Y. C. Pati and P. S. Krishnaprasad, *IEEE Trans. Neural Networks*, **4** (1), 73-85 (1993).
12. B. Delyon, A. Juditsky, and A. Benveniste, *IEEE Trans. Neural Networks*, **6** (2), 332-348 (1995).
13. S. J. Yoo, J. B. Park, and Y. H. Choi, *Int. J. Contr. Autom. Syst.*, **3**, 43-55 (2005).
14. S. J. Yoo, Y. H. Choi, and J. B. Park, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, **53**, 1381-1394 (2006).
15. C. H. Lu, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**, 9, 3733-3742 (2009).
16. R. H. Abiyev and O. Kaynak, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **55** (8), 3133-3140 (2008).
17. C. K. Lin, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, **14** (6), 849-859 (2006).
18. M. Zekri, S. Sadri, and F. Sheikholeslam, *Fuzzy Sets and Systems*, **159**, 2668-2695 (2008).
19. K. Fuji, T. Yamamoto. and M. Kaneda, *IFAC int. Symp. on Advance Control of Chemical Processes*, Banff, 107-112 (1997).
20. C. C. Lee, Y. H. Lee, and C. C. Teng, *Asian Journal of Control*, **4** (4), 433-438 (2002).
21. A. Kwiatkowski, H. Werner, J. P. Blath, A. Ali, and M. Schultalbers, *Control Engineering Practice* (2009).
22. J. M. Zheng, S. D. Zhao, and S. G. Wei, *Control Engineering Practice* (2009).
23. C. H. Lu, P. Y. Liao, Y. H. Chang, C. M. Liu, J. Y. Guo, *Int. Conf. Machine Learning and Cybernetics*, 755-759 (2014).
24. T. Yamamoto and S. L. Shah, *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, **151**, 645-652 (2004).
25. D. W. Clarke and C. Mohtadi, *Automatica*, **25** (6), 859-857 (1989).
26. B. Kouvaritakis and M. Cannon, *Nonlinear Predictive Control— Theory and Practice*, London: IEE (2001).
27. S. Huang, K. K. Tan, and T. H. Lee, *Applied Predictive Control*, Springer-Verlag (2002).
28. C. F. Juang and C. T. Lin, *IEEE Trans. Neural Networks*, **10** (4), 828-845 (1999).
29. S. Kenig, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **14** (6), 819-823 (2001).
30. J. M. Liang and P. J. Wang, *Journal of Injection Molding Technology*, **6** (1), 58-71 (2002).
31. S. N. Huang, K. K. Tan and T. H. Lee, *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, **34** (3), 363-368 (2004).
32. C. Shen, L. Wang and L. Li, *Journal of Materials Processing Technology*, **183** (2-3), 412-418 (2007).
33. J. Chen, M. Savage and J. Zhu, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **36** (1-2), 43-52 (2008).

作者簡介

呂奇璜先生為國立中興大學電機博士，現為修平科技大學電機系教授。

Chi-Huang Lu received his Ph.D. in Electrical Engineering from National Chung-Hsing University. He is currently a professor in Department of Electrical Engineering at Hsiuping University of Science and Technology.

廖本右先生為修平科技大學電機碩士，現為宏晉儀控科技公司經理。

Pen-Yu Liao received his M.S. in Electrical Engineering from Hsiuping University of Science and Technology. He is currently a manager at Monicon Instrument Corporation.