

參數即時優化的可變結構 PID 神經網路溫度控制器 應用於塑料射出成型製程

本研究提出變結構之 PID 類神經網路 (VS-PIDNN) 溫度控制器之設計與實現，應用於塑料射出成型加熱料管的各區段溫度控制。針對初始溫度不同、目標溫度改變與參數更新時機，本研究設計六項模式切換機制處理以上問題，用以輔助 PID 類神經網路控制器進行即時機器學習參數最佳化。本研究以溫度控制實驗平台進行射出成型機熱澆道與圓頂噴嘴兩種受控場溫度控制，驗證控制器之穩定性與抗干擾能力。VS-PIDNN 控制在暫態響應可減少 PID 控制 43% 的整定時間，及減少 PID 控制 54% 的過衝量。在穩態響應上，VS-PIDNN 控制的溫度誤差區間可達到目標溫度的 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，相較於 PID 控制的溫度振盪區間縮小 53%。

■ 丁彥翔、鄭泗東

關鍵詞：機器學習、PID 類神經網路、學習控制、溫度控制

一、研究緣起

由於動力系統日益複雜，越來越多的系統設計已經從傳統的控制方法轉向基於智慧的控制方法。目前自適應控制技術的根本缺點，例如難以推導的非線性控制律、隨著未知參數的數量呈幾何級數增加的複雜性以及普遍不適合實時應用，迫需尋找其他解決方案。在塑膠射出成型過程中，射料管加熱裝置通常由三到五個階段組成，每個階段都有獨立的溫度控制器，因為都在同一個射出成型管中，階段的溫度會相互影響，除了耦合特性外，較長的延遲時間和較大的時間常數也會增加系統控制的難度。因此，技術人員將花費更多的時間在機器運行前調整控制器的參數。在塑膠射出加工過程中的溫度控制系統相當多，多點溫度系統的控制由於系統的耦合特性而變得困難。

二、研究目的

近年來，在使用機器學習神經網路控制非線性動態系統有許多成功實施例^[1-4]。注塑成型機料筒溫度響應緩慢，在機器的空閒狀態和運行狀態之間的轉換過程中，溫度區域存在顯著的溫度變化，此會導致不均勻的熔體溫度和不一致的產品質量。本研究結合傳統 PID 控制與機器學習神經網路對注塑機射料管之未知非線性溫度響應系統進行即時迭代學習控制，並且考慮以不增加硬體設備升級之時間與成本前提下，著重於設計智慧型控制演算法；此外，本研究設計的控制系統須滿足以下設計需求：第一，系統之穩態響應須符合超精密射出成型製程之規格，意即在感測器精度為 0.1°C 的前提之下，穩態響應的誤差必須在設定溫度的 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 範圍內。第二，在系統溫度不穩定或是塑料

進入造成大幅度降溫的情形之下，控制器可根據系統短時間的性能指標，動態調整其內部參數，並使系統溫度快速地回復至設定溫度，且在溫度回復之過程中，過衝量與回復至穩態所需的時間能夠相較傳統 PID 控制皆有所減少。最後，為了改善後期塑料進入射出機所造成的不穩定現象，控制器針對前期預熱階段也須做出相較於 PID 控制有更佳的控制表現，藉此確保在後續塑料進入時採用相同的控制方式，能夠達到與預熱階段相同的改善效果。

研究方法

本研究設計之溫度控制演算法需滿足以下四項系統需求：

1. 降低系統暫態響應之過衝量 (Overshoot) 與整定時間 (Settle time)，使控制系統能快速進入穩態，儘快進入加工程序。
2. 系統之穩態響應須符合超精密射出成型製成之規格，也就是說溫度感測器需達到 0.1°C 的精度，且溫度的容忍誤差為目標溫度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。
3. 考慮到系統與環境的特性有改變之可能性，控制器之初始化參數必須根據系統現況之特徵計算得出。
4. 針對干擾問題，控制器在初始化參數後，可適應性地在線上微調參數，使系統響應快速恢復至設定目標值。若外在干擾影響使系統響應無法快速恢復至設定目標或是持續將誤差變大，則必須針對干擾減弱、消失時，處理積分控制器修正過多造成的大過衝量。

在滿足設計需求的同時，此軟體設計需與硬體設備配合。下列為控制器設計相關的硬體與軟體之規格：

- 熱電偶與溫度訊號處理器：感測器量程為

0°C 至 600°C ，訊號處理器轉換出來之攝氏溫度精度為 0.1°C 。

- 控制器取樣：取樣頻率為 4Hz，意即每 0.25 秒內須完成一次受控場溫度取樣、控制演算法運算與控制訊號輸出。
- 輸出控制訊號：脈衝寬度調變 (PWM) 訊號控制固態繼電器輸出 220VAC 至加熱裝置，工作週期的解析度設定為 0 至 1250，對應 0 % 至 100 %，控制訊號頻率為 4Hz。

一、變結構 PID 類神經網路演算法

本研究將 PIDNN 架構^[5,6]進行演算法調整，圖一為可變結構 PID 類神經網路控制器方塊圖，將 PID 演算加入類神經網路之隱藏層，對射料管加熱裝置受控場進行溫度控制。以 PID 控制器自動調諧機制^[7]，將調諧結果作為本研究提出之變結構 PID 類神經網路 (Variable Structure PID Neural Network, VS-PIDNN) 控制器的初始化權重，再利用機器學習演算法進行參數即時微調，優化參數更新過程^[8]。最後，針對系統干擾與非線性的問題，除了仰賴 VS-PIDNN 適應性調整的權重，本研究以動態切換模式概念，建立多個控制模式讓系統根據現況自動切換，輔助控制器進行最佳控制。

本研究設計一套六項模式切換機制，主要負責輔助 PID 類神經網路控制器進行最佳控制，同時也解決 PID Layer 三項參數設定問題與啟動 / 停止更新權重之問題，將模式切換控制與 VS-PIDNN 控制器整合的系統方塊圖，如圖二。Mode 1 與 Mode 2 為處理 PID Layer 三項參數設定之模式，兩項模式分別針對不同的系統初始狀態有不同的操作。當 PID Layer 三項參數設定完成後，則初始化所有全連接層之權重並切換至 Mode 6。

$$\text{PWM duty cycle} = \begin{cases} 100\% & \text{if } y(k) < \text{threshold} \\ 0\% & \text{if } y(k) \geq \text{threshold} \end{cases} \quad (2)$$

$$K_P = \frac{0.35 \cdot 4}{\pi \cdot y_{diff}}, y_{diff} = y_{\text{relay,max}} - y_{\text{relay,min}}; K_I = \frac{K_P}{T_i}, T_i = 0.5 \cdot T_{OSC}, T_{OSC} = \text{oscillation period} \quad (3)$$

$$K_D = K_P \cdot T_d, T_d = 0.125 \cdot T_{OSC}$$

當這三項參數計算完成後，會利用 K_P 計算出下個階段之中 VS-PIDNN 實際的控制比例帶寬（式 (4)），並切換至 Mode 6 進行 VS-PIDNN 控制。

$$PB_{New} = \frac{100}{K_P} \quad (4)$$

● Mode 2：高溫啟動進行自然降溫，自動諧調控制器初始化參數

Mode 2 操作模式在啟動時將 PWM 控制訊號的工作週期設定為 0%，使負載電路為斷電狀態，但系統電路上沒有安裝主動降溫設備，因此系統啟動後主要是讓系統自然散熱降溫。降溫至設定目標之後，以設定目標為基準操作起停式控制，並使用與 Mode 1 相同的 VS-PIDNN 控制器參數自動調諧方法。獲得控制器參數 K_P 、 K_I 、 K_D 之後，立刻切換至 Mode 6 進行 VS-PIDNN 控制。

● Mode 3：處理目標溫度由低轉高之狀況

系統在 Mode 5 與 Mode 6 時，皆隨時監測有無更換設定溫度的指令，若接受到設定溫度調高的訊號，會在下一個控制週期切換至此模式並暫時凍結控制器權重的更新。此模式將控制器輸出的 PWM 控制訊號工作週期設定為 100%，等待溫度攀升且進入新的目標溫度之比例帶寬後，立刻切換至 Mode 6。此時，VS-PIDNN 的權重會回到初始化階段，後續則以新的目標溫度為參考，更新其權重值。

● Mode 4：處理目標溫度由高轉低之狀況

此模式的操作方法與 Mode 3 相似，若目標溫度變低時，控制器輸出的 PWM 控制訊號工作週期會被設定成 0%，讓受控場自然散熱降溫。等到溫度下降且低於新的目標溫度之後，立刻切換至 Mode 6。

● Mode 5：VS-PIDNN 控制器參數被暫停更新

當系統在 Mode 6 時監測其響應持續 30 秒維持在容忍誤差範圍內，則會切換至此模式，此時所有控制器內部的權重將暫時停止更新，使用固定的權重操作系統控制。但是當系統監測其響應連續 10 次取樣皆超出容忍誤差範圍，則會判定在最近一次的 Mode 6 並無微調至最佳權重，因此在下一個控制週期會切換回 Mode 6。若進行 PID 控制實驗時，則以 Mode 5 代表 PID 控制模式，以固定的 K_P 、 K_I 、 K_D 進行溫度控制。

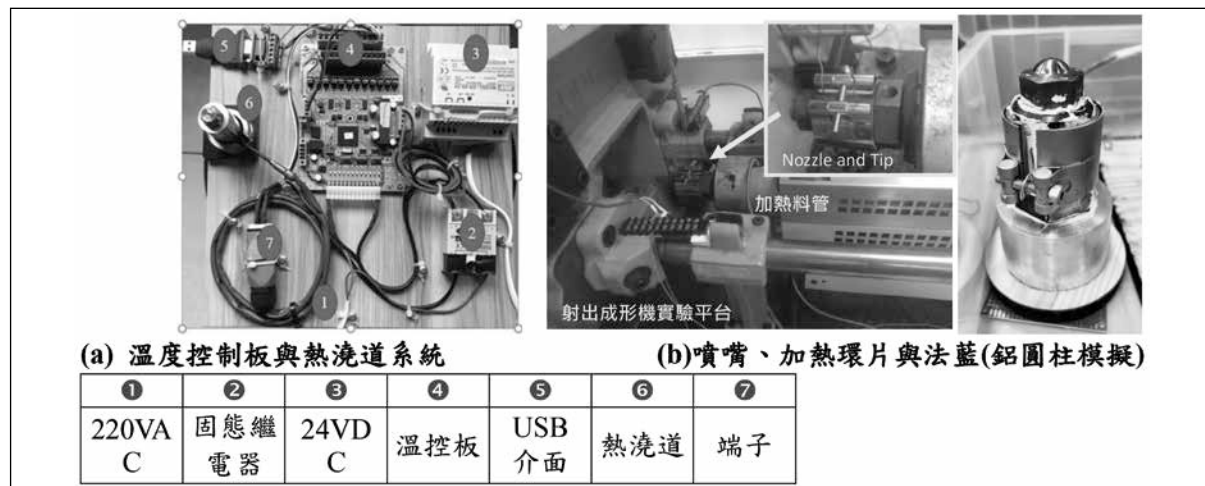
● Mode 6：VS-PIDNN 控制器參數適應性調整

此模式是在 Mode 1 與 Mode 2 調適好初始化參數之後預先排定的模式，主要進行 PID 類神經網路控制器的線上參數微調，若其系統響應持續 30 秒維持在容忍誤差範圍內，則會切換至 Mode 5。VS-PIDNN 參數適應性調整演算主要由兩個階段組成：前向激勵傳播與反向傳播算法（BP 算法）權重更

新。每次迭代中的傳播環節包含兩步：前向傳播階段由系統指令輸入開始，與對應輸出值，從而獲得的響應誤差，順向計算權重與激勵函數之神經網路以獲得輸出響應。反向傳播算法對於每個神經元上的權重，由系統輸出反向往各層神經元進行梯度下降之最佳化 (Gradient Descent with optimizer)。此二階段反覆循環迭代演算，即時調整網路權重更新，即時達到輸入預定目標範圍。最佳化演算法為 Adam，是一種針對梯度與學習率同時進行適應性調整的演算法，其目的是為了更有效地搜尋到全局最佳參數。

結果與討論

本研究所提之變結構 PID 類神經網路溫度控制能夠有效地克服工業溫度控制系統中的時間延遲、耦合效應等問題，並且能夠自主學習並調整以達到更優的溫度控制效果。實驗使用 Matlab 程式進行溫度監控，32 位元處理器之溫度控制板執行 VS-PIDNN 演算，輸出訊號經固態繼電器向加熱器傳輸功率，熱電偶信號採集並轉換回饋溫度。溫度控制板可同時控制 8 套加熱器，取樣頻率為 4Hz，每 0.25 秒內完成一次受控場溫度取樣、控制演算法運算與控制訊號輸出，圖三為實驗平台。

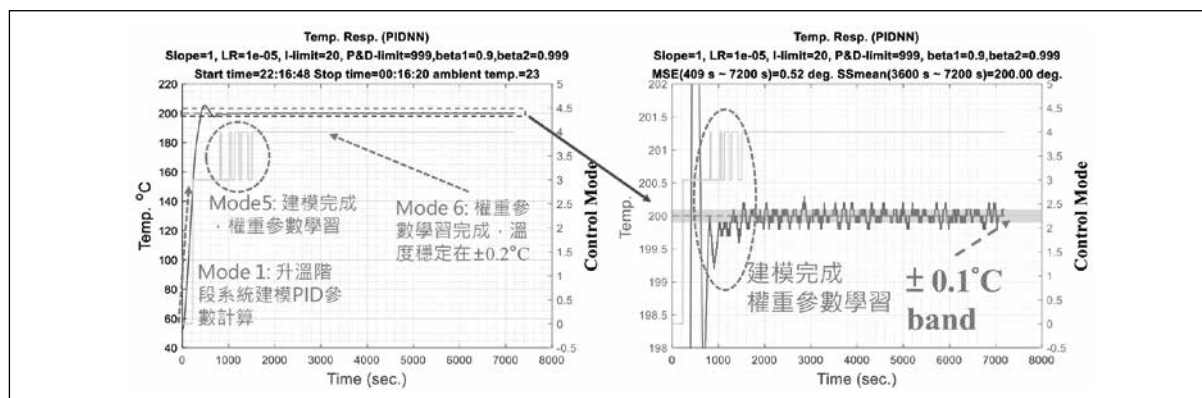


圖三 實驗平台

一、恆溫控制實驗

本研究設計 VS-PIDNN 控制器處理塑料射出成型製程之中塑料進入料管導致降溫現象的同時，也期望提出的 VS-PIDNN 控制演算法能夠在前期塑料未進入料管的恆溫階段提升控制精度，因此設置恆溫控制實驗比較在 PID 控制與 VS-PIDNN 控制在前期恆溫階段的控制性能，也驗證 VS-PIDNN 控制器在恆溫控制的時候，是否能藉著 Mode 5 與 Mode 6 之間的來回切換，儘量使系統誤差最小化，圖四為溫度控制

模式流程，由 Mode 1 之加熱器升溫階段對系統建模與 PID 初始參數計算，建模完成後進行 Mode 6 權重參數學習適應性調整，當系統在 Mode 6 時監測其響應持續 30 秒維持在溫度誤差範圍內，則會切換至 Mode 5 模式，此時所有控制器內部的權重將暫時停止更新，使用固定的權重操作系統控制。但是當系統監測其響應連續 10 次取樣皆超出容忍誤差範圍，則會判定在最近一次的 Mode 6 並無微調至最佳權重，因此在下一個控制週期會切換回 Mode 6。



圖四 溫度控制模式

恆溫控制實驗項目分成二個小項目，分別是自室溫加熱至 200°C 與自 210°C 自然降溫至 200°C。前者主要驗證控制策略，在設定溫度下是否可以達到相同的性能表現，而最後一項主要是驗證六項模式切換機制的 Mode 2 是否成功執行，使 VS-PIDNN 控制系統能夠處理初始溫度高於目標溫度之情況，而在過往許多的相關研究只驗證到初始溫度低於目標溫度之情形，因此六項模式切換機制之中的 Mode 2 可以說是本研究的創新性。

在測試過程之中，除了 PID 控制器與 VS-PIDNN 控制器之中的 K_p 、 K_i 、 K_d 三項參數以及模式切換機制相同之外，熱澆道系統測試時間同樣都設定為 10 分鐘，而圓頭噴嘴的實驗皆設定 50 分鐘；操作 Mode 1 的起停式控制基準都是設定低於目標溫度 15°C 之溫度；初始溫度的設定除了由高溫往下自然降溫的實驗是設定成 210°C 之外，其餘實驗的初始溫度皆設定成 25°C。

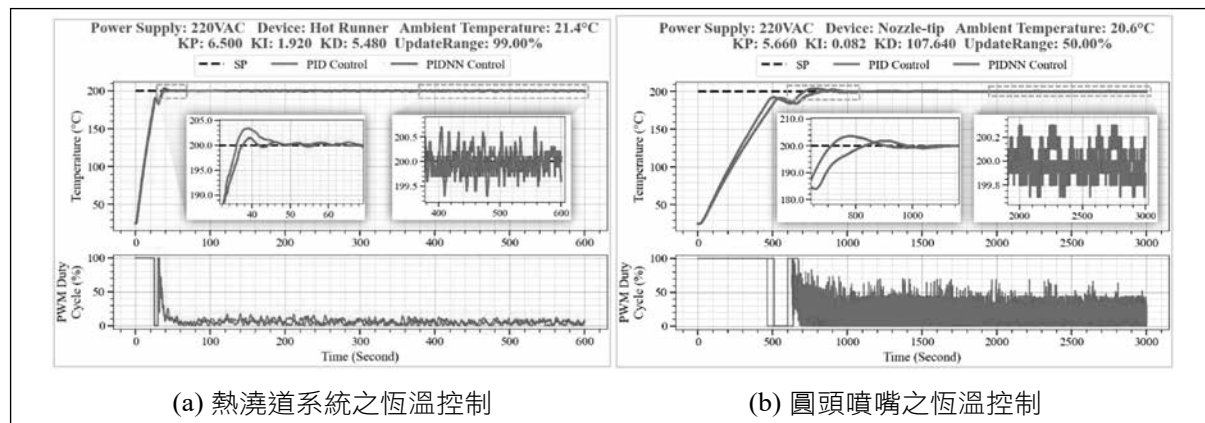
目標溫度至 200°C，於熱澆道系統與圓頭噴嘴上皆操作恆溫控制。圖五 (a) 熱澆道系統溫度響應與其實驗記錄數值，PID 控制下的暫態響應過衝量為 2.1°C、整定時間為 32.25 秒，穩態響應在後期階段的溫度振盪區間為 $\pm 0.7^\circ\text{C}$ ；可變結構 PIDNN 控制下的暫態響應過衝量為 1.6°C、整定時間為 18.50

秒，而穩態響應於後期階段的溫度振盪區間為 $-0.4^\circ\text{C} \sim +0.5^\circ\text{C}$ 。綜觀該次測試之結果，VS-PIDNN 控制在暫態響應與穩態響應上，仍然優於 PID 控制。

圖五 (b) 為圓頭噴嘴之恆溫控制，在前期的全功率升溫階段，PID 控制與 VS-PIDNN 控制的升溫曲線有些微差異，但是本研究在此階段，無論是 PID 控制或是 VS-PIDNN 控制，使用的硬體規格皆相同，測試時的環境溫度也相同，因此難以推測造成此現象的原。由於前期該階段只有單純的全功率升溫操作，且由 Mode 1 起停式控制設定的 PID Layer 三項參數數值也已經固定，因此這次測試出現該現象對於實驗結果不足以造成影響，仍繼續以原本的暫態響應與穩態響應性能分析評斷 PID 控制與 VS-PIDNN 控制之優劣為主。在該次測試之中，根據圖五 (b)，PID 控制下的暫態響應過衝量為 4.1°C、整定時間為 442.50 秒，穩態響應在後期階段的溫度振盪區間為 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ；可變結構 PIDNN 控制下的暫態響應過衝量為 1.9°C、整定時間為 445.00 秒，而穩態響應於後期階段的溫度振盪區間為 $-0.3^\circ\text{C} \sim +0.2^\circ\text{C}$ 。由該次測試之暫態性能來看，PID 控制的整定時間較 VS-PIDNN 控制的整定時間短，但是其實相差不多，而在整定時間差異不大的情況之下，VS-PIDNN

控制擁有明顯較小的過衝量；穩態響應的部分，PID 控制與 VS-PIDNN 控制在溫度振盪區間的表現上實際上平分秋色，不過若有注意到 VS-PIDNN 控制輸出的 PWM 工作

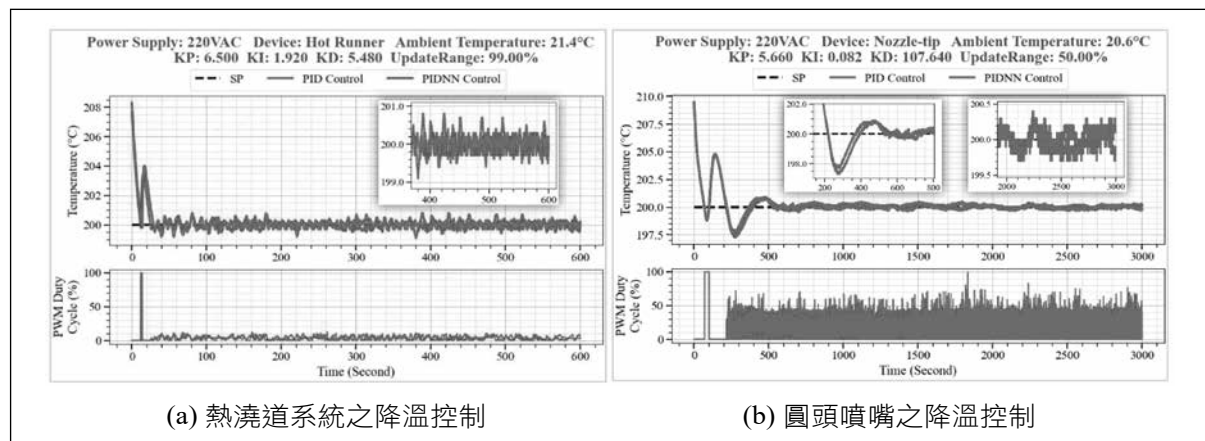
週期，可以發現 VS-PIDNN 控制之下，其 PWM 工作週期在穩態的後期階段相對變動較小也較穩定，這或許是 VS-PIDNN 控制在控制輸出上的優勢。



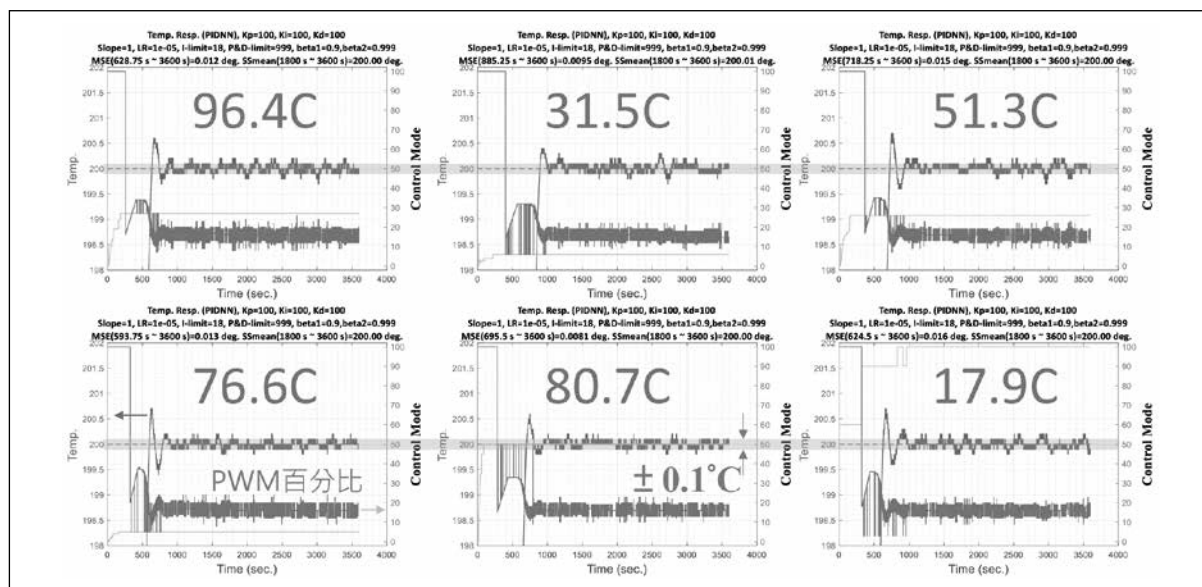
圖五 分別使用 PID 控制器與 VS-PIDNN 控制器於 200°C 進行恆溫控制

圖六 (a) 與圖六 (b) 呈現了本研究驗證 Mode 2 與後續控制穩定性的測試結果，從兩張圖中皆可見 VS-PIDNN 控制在穩態響應的溫度振盪區間皆相較 PID 控制有所改善，而圖六 (b) 之中有明顯地呈現自 Mode 2 切換至 Mode 6 的暫態響應表現，VS-PIDNN 控制在這階段相較 PID 控制以較快的速度針對低衝量進行修正。從以上的測試可知 VS-PIDNN 控制在 Mode 2 的輔助之下，也可自較高的初始溫度開始進行控制，只是如此的

操作在實際應用之中不常見，因此也可得知為何在過去的文獻中，幾乎不存在由較高的初始溫度進行溫度控制的驗證。在單一目標溫度之恆溫控制測試之中，可見本研究提出的可變結構 VS-PIDNN 控制器對於不同的目標溫度、不同的受控場，在控制性能上皆相較於傳統 PID 控制有所提升。圖七為圓頭噴嘴由不同起始溫度升溫至 200°C 之溫度控制響應 (3600 sec)，顯示在高低起始溫度升溫至目標溫度後均能達到 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 誤差內。



圖六 分別使用 PID 控制器與 VS-PIDNN 控制器先自 210°C 自然降溫至 200°C 進行恆溫控制



圖七 圓頭噴嘴由不同起始溫度升溫至 200°C 之溫度控制響應 (3600 sec)

二、多段恆溫控制實驗

多段恆溫控制實驗主要驗證六項模式切換機制之中的 Mode 3 與 Mode 4 切換至 Mode 6 或 Mode 5(PID 控制) 之後，在 VS-PIDNN 控制之下的系統暫態響應性能是否相較於 PID 控制的系統暫態響應性能有所改善。

實驗條件的設定如下：熱澆道系統實驗總時間為 20 分鐘，圓頭噴嘴實驗總時間為 110 分鐘。多段恆溫控制實驗總共有兩次測試，每次測試的初始溫度皆為 25°C，每次測試的目標溫度皆分兩段，第一次測試是目標溫度由低轉高，因此第一段溫度為 150°C，第二段溫度為 200°C；第二次測試的目標溫度是由高轉低，因此第一段溫度為 200°C，第二段溫度為 180°C。而使用熱澆道系統進行實驗的時候，目標溫度切換時間點為第 10 分鐘，使用圓頭噴嘴進行實驗的時候，目標溫度切換時間點為第 50 分鐘。

圖八 (a) 與圖八 (b) 分別在熱澆道系統上與圓頭噴嘴上驗證 Mode 3 的運作，因此

在這兩次測試主要以切換至第二段目標溫度的系統響應暫態與穩態進行分析。根據圖九 (a) 的第二段目標溫度部分，PID 控制下的暫態響應過衝量為 1.3°C、整定時間為 51.25 秒，穩態響應在後期階段的溫度振盪區間為 -0.6°C ~ +0.8°C；可變結構 PIDNN 控制下的暫態響應過衝量為 2.2°C、整定時間為 29.50 秒，而穩態響應於後期階段的溫度振盪區間為 -0.3°C ~ +0.4°C。綜合比較以上資訊，在過衝量性能部分，PID 控制比起 VS-PIDNN 控制更具優勢，但是在整定時間性能部分，VS-PIDNN 控制僅僅花費 PID 控制一半左右的時間，在此本研究採取與 VS-PIDNN 控制架構最佳化實驗相同的評斷方式進行分析，而在暫態響應上的最大訴求在於「快速地」進入穩態，因此 VS-PIDNN 控制器在暫態響應上地性能是勝出的。另外，穩態響應的部分，根據數值結果與圖八 (a)，可變結構 PIDNN 控制器很明顯地在第二段目標溫度相較 PID 控制擁有更好的溫度振盪區間性能。根據圖八 (b)，

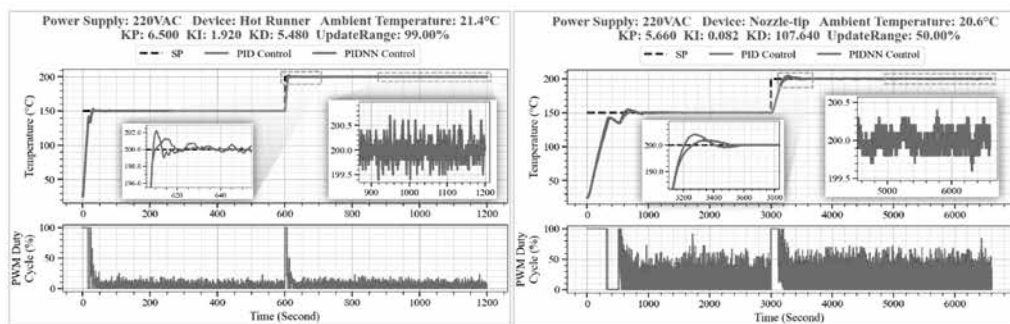
在圓頭噴嘴的第二段目標溫度之恆溫控制部分，PID 控制下的暫態響應過衝量為 4.2°C 、整定時間為 568 秒，穩態響應在後期階段的溫度振盪區間為 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ；可變結構 PIDNN 控制下的暫態響應過衝量為 2.1°C 、整定時間為 561.75 秒，而穩態響應於後期階段的溫度振盪區間為 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。綜觀以上數值資訊，VS-PIDNN 控制在暫態響應的整定時間與過衝量皆相較 PID 控制有所改善，而在穩態響應的溫度振盪區間，VS-PIDNN 控制與 PID 控制平分秋色，但 VS-PIDNN 控制仍然有些微的改善。綜整以上熱澆道系統與圓頭噴嘴的測試結果，可見 VS-PIDNN 控制器搭配 Mode 3 的運作，在面對目標溫度由低轉高時，也能以最快的速度使溫度上升且進入穩態響應。

圖八 (c) 與圖八 (d) 分別呈現 PID 控制與 VS-PIDNN 控制在驗證 Mode 4 運作效果與多段目標溫度控制穩定之結果。根據圖八 (c) 呈現的熱澆道系統測試結果，PID 控制與 VS-PIDNN 控制在第一段目標溫度 200°C 的暫態響應表現是與 200°C 恆溫控制測試結果的趨勢很相近，在這次的測試也是由 VS-PIDNN 控制的表現勝出。切換至第二段目標溫度時，因為熱澆道系統的延遲時間短且熱容量小，加熱速度快速的前提之下，導致在 Mode 4 的自然降溫到達 180°C 並切換至 PID 控制與 VS-PIDNN 控制之後，幾乎沒有低衝量存在，因此在該項測試，本研究著重於第二段目標溫度之穩態響應後期階段。在圖八 (c) 之中的第二段目標溫度穩態響應後期階段，PID 控制下的溫度振盪區間為 $-0.7^{\circ}\text{C} \sim +0.9^{\circ}\text{C}$ ，而 VS-PIDNN 控制下的溫度振盪區間 $-0.4^{\circ}\text{C} \sim +0.5^{\circ}\text{C}$ 。觀察穩態響應，可

見 PID 控制下的溫度振盪非常劇烈，而 VS-PIDNN 控制下雖然偶有起伏，但是有著權重更新的機制，以及 Mode 5 與 Mode 6 之間的來回切換，使溫度的振盪幅度盡可能地減少，因此 VS-PIDNN 控制下的溫度值在圖八 (c) 之中的穩態響應放大圖，幾乎在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 的區間，偶爾有小波動。

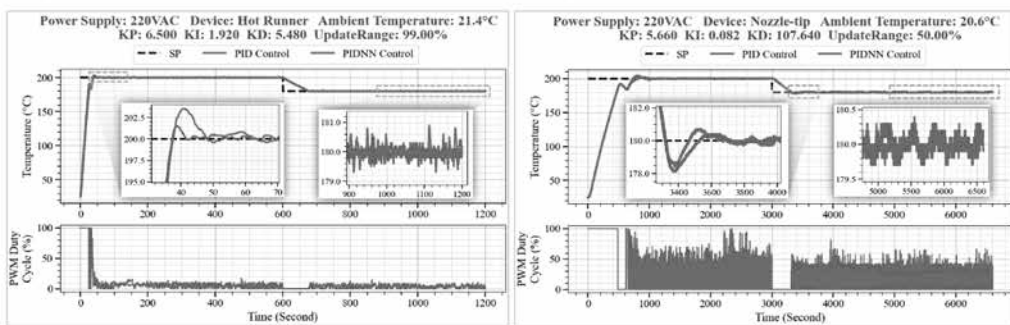
根據圖八 (d)，因為圓頭噴嘴的延遲時間較熱澆道系統長，熱容量也較大，因此在圖中由 Mode 4 切換至 Mode 6 之後，會有一段明顯的低衝量，系統響應才會再回到目標溫度並進入穩態。根據圖表與該次測試之紀錄，在 PID 控制下的暫態響應低衝量為 -1.9°C 、整定時間為 483.50 秒，穩態響應的溫度振盪區間為 $-0.3^{\circ}\text{C} \sim +0.4^{\circ}\text{C}$ ；在 VS-PIDNN 控制下的暫態響應低衝量為 -1.6°C 、整定時間為 447.25 秒，穩態響應的溫度振盪區間為 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。由以上的數據顯示，在暫態響應時，VS-PIDNN 控制器不管在低衝量還是整定時間，皆相較 PID 控制器有所改善，而在穩態響應部分，PID 控制與 VS-PIDNN 控制是不分軒輊。圖八 (e) 為圓頭噴嘴由 26°C 起始溫度至 150°C - 230°C - 300°C - 200°C ，之升降溫度控制響應 (9600 sec)，顯示在升降溫至目標溫度後均能達到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 誤差內。

透過以上四項測試，可知可變結構 PIDNN 控制器搭配六項模式切換機制之中的 Mode 3 與 Mode 4，在面對目標溫度有變更時，是可以穩定且快速地讓溫度進入第二段目標溫度之穩態響應，因此除了原本控制器本身的權重更新機制，另外加入模式切換的機制來輔助控制器處理目標溫度變更的問題，這樣的控制策略經過驗證之後是可行的。



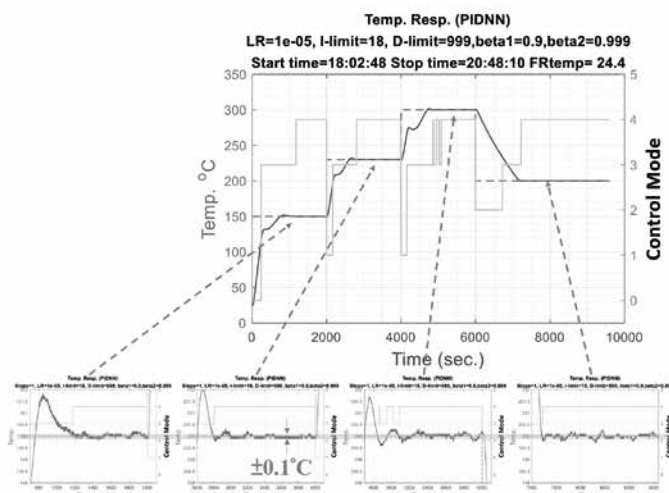
(a) 熱澆道系統之 150°C 與 200°C 升溫控制

(b) 圓頭噴嘴之 150°C 與 200°C 升溫控制



(c) 熱澆道系統 200°C 與 180°C 之降溫控制

(d) 圓頭噴嘴之 200°C 與 180°C 降溫控制



(e) 圓頭噴嘴由 26°C 起始溫度至 150°C-230°C-300°C-200°C，之升降溫度控制響應 (9600 sec)

圖八 PID 控制器與 VS-PIDNN 控制器於 200°C 與 180°C 兩段溫度進行升降溫控制

三、抗干擾驗證

抗干擾實驗目的為驗證塑料進入射出機料管之後，溫度控制器將會如何反應讓系統溫度回復穩定，而實驗過程中，本研究以溫度控制平台上的散熱風扇製造受控場之降溫現象，用以模擬塑料進入真實射出機的短暫降溫現象。抗干擾實驗針對熱澆道系統與圓頭噴嘴系統有不同的測試設定。熱澆道系

統實驗總測試時間為 20 分鐘，在第 10 分鐘時開啟風扇進行干擾，直到測試時間結束為止。圓頭噴嘴實驗的總測試時間為 110 分鐘，在第 50 分鐘時開啟風扇。在所有實驗當中，初始溫度皆為 25°C，目標溫度全程為 200°C。

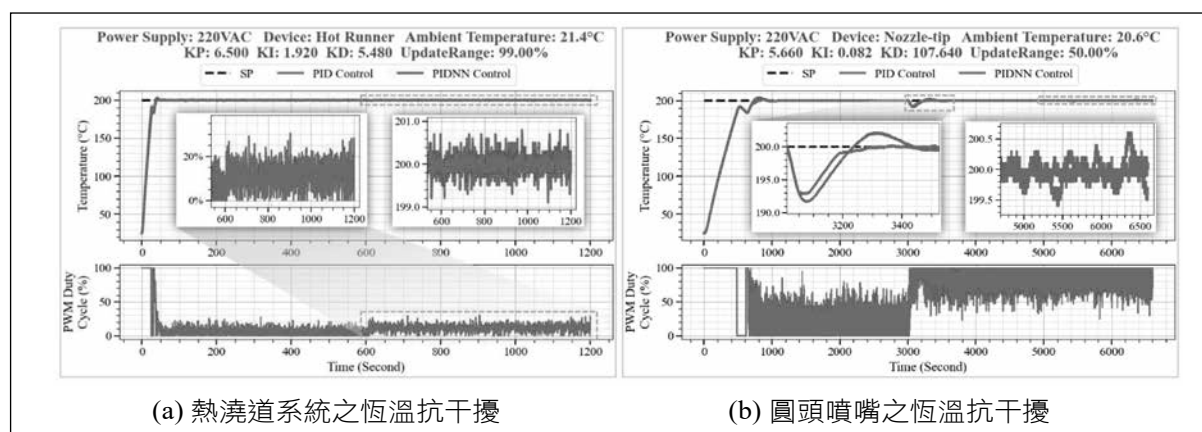
根據圖九 (a) 與其測試紀錄之數值，在第 600 秒散熱風扇開啟之後，無論是 PID 控

制或是 VS-PIDNN 控制，兩者在輸出 PWM 工作週期的數值部分皆有所提升，以繼續維持 200°C 之恆溫控制，且因為熱澆道系統通電之後升溫速度快，因此在加入干擾且控制器有所反應的時候，在系統響應上的變化並不是很明顯。不過，在第 600 秒之後一直存在干擾的前提下，PID 控制下的溫度振盪區間為 $-0.9^{\circ}\text{C} \sim +0.8^{\circ}\text{C}$ ，而 VS-PIDNN 控制下的溫度振盪區間為 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，可見 VS-PIDNN 控制器內部的權重更新機制與 Mode 5、Mode 6 來回七換機制，不斷地使溫度振盪區間收斂。因此根據以上比較，可見在熱澆道系統上且加入干擾之後，VS-PIDNN 控制器的抗干擾能力是比 PID 控制器好的。

根據圖九 (b)，在第 3000 秒開啟散熱風扇進行干擾時，無論是 PID 控制或是 VS-PIDNN 控制，在圓頭噴嘴上皆會一段低衝量之後，溫度才回開始回復至目標溫度。從圖中可見，VS-PIDNN 控制下在 3048 秒左右時開始抬升溫度，且溫度抬升至 3200 秒

之後開始趨緩，並以緩升的方式逐漸靠近目標溫度，反而 PID 控制仍有一個過衝量之後，溫度才逐漸收斂至穩態。再者，在存在干擾的前提下，PID 控制的穩態響應溫度振盪區間為 $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ ，VS-PIDNN 控制的穩態響應溫度振盪區間為 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，由此可見在圓頭噴嘴的測試之中，VS-PIDNN 控制器的權重更新機制與 Mode 5、Mode 6 來回切換，不斷地讓溫度持續向目標溫度收斂。

綜合以上熱澆道系統與圓頭噴嘴的抗干擾測試結果，VS-PIDNN 控制器確實擁有比 PID 控制器更好的抗干擾能力，在干擾發生時能以最快的速度使料管溫度回復至目標溫度，同時，也能透過權重更新的機制，使溫度接近目標溫度時有所緩衝，再緩升至目標溫度，除此之外，在後續穩態的恆溫控制，VS-PIDNN 控制器也能使溫度振盪區間收斂至更小的區間，PWM 工作週期數值的變動幅度也較小。



圖九 分別使用 PID 控制器與 VS-PIDNN 控制器於 200°C 進行恆溫控制，並於第 600 秒時加入散熱風扇干擾模擬真實的塑料進入射出機之情形

結論

本研究提出的可變結構 PID 類神經網路控制器將可變結構控制理論、PID 控制理論、神經網路理論與最佳化演算法理論原理整合，以及最後將軟體與硬體設計相結合，發展出一套完整的溫度控制系統。

在理論部分，除了擁有完整數學推導演算法過程，也採用 Lyapunov 穩定性分析進行 PID 類神經網路控制器推導出控制器穩定之所需條件，且 VS-PIDNN 的初始化問題也在本研究之中被完整地探討，也解釋了每層權重設定初始值的原因。在實驗方面，從模擬與實體的驗證結果皆可以得知可變結構的設計、VS-PIDNN 控制器與六項模式機制相配合，可以在暫態響應上與穩態響應上接相較於 PID 控制器有所改善。從較關鍵的性能指標進行總結，在暫態響應的部分，VS-PIDNN 控制至多可減少 PID 控制 43 % 的整定時間，且 VS-PIDNN 控制至多可減少 PID 控制 54 % 的過衝量。在穩態響應上，VS-PIDNN 控制的溫度振盪區間可達到目標溫度的 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，相較於 PID 控制的溫度振盪區間縮小了 53 %。

另外，本研究之創新性在於透過 VS-PIDNN 控制器架構最佳化實驗，更進一步地探討 VS-PIDNN 控制器架構的條件設定與系統響應之間的關係，而實驗的結果只有在 $\partial y / \partial u$ 的計算型式、學習率與激勵函式對於系統響應的影響能有具體的解釋，其餘 VS-PIDNN 設定的影響與系統響應之間較無直接關係。再者，透過 VS-PIDNN 控制器架構最佳化實驗，也了解到很難單憑系統狀態並即時更新參數的方式達到最佳控制，仍然得加入部份的人為經驗，而本研究提出 VS-PIDNN 暫態條件與穩態條件切換的可變結構設計，即是人為經驗的體現。

參考文獻

1. Karakasoglu, A. Sudharsanan, S. I. and Sundareshan, M. K. (1993). Identification and decentralized adaptive control using dynamical neural networks with application to robotic manipulators. IEEE Trans. Neural Networks, vol. 4, 919–930.
2. Hao, J., Zhang, G., Liu, W., Zheng, Y. and Ren. L. (2021) Data-driven Tracking Control Based on LM and PID Neural Network with Relay Feedback for Discrete Nonlinear Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 11, 11587–11597.
3. Jin, L. Nikiforuk, P. N. and Gupta, M. M. (1994). Dynamic recurrent neural networks for control of unknown nonlinear systems. J. Dyn. Syst., Measur., Contr., vol. 116, no. 4, 567–576.
4. Liu, Y., Xu, S., Hashimoto, S. and Kawaguchi, T., (2020). A Reference-model-based Neural Network Control Method for Multi-input Multi-output Temperature Control System. Processes. vol. 8, no. 11, pp.1365.
5. Shu, H. and Pi, Y. (2000). PID Neural Networks for Time-delay Systems. Computers & Chemical Engineering, vol. 24, 859–862.
6. Ouaret, A., Hocine, L., Boubekur, M. and Guéguen, H. (2020). Supervisory Control of Building Heating System with Insulation Changes Using Three Architectures of Neural Networks. J. Frankl. Inst, vol. 337, 13362–13385.
7. Pandey, S.K., Veeranna, K., Kumar, B. and Deshmukh, K.U. (2020) A Robust Auto-tuning Scheme for PID Controllers. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 47–52.
8. Kingma, D. P. and Ba, J. (2015). Adam: A Method for Stochastic Optimization,” CoRR, abs/1412.6980.
9. Huang, H.-P., Roan, M.-L. and Jeng, J.-C. (2022). On-line Adaptive Tuning for PID Controllers,” IEEE Proceedings Control Theory and Applications, vol. 149, no. 1, 60–67.

作者簡介

丁彥翔 / 國立陽明交通大學 機械工程學系

鄭泗東 / 國立陽明交通大學 機械工程學系 / 指導老師