

射出成型機智慧自適應控制與製程最佳化技術的發展

Process Parameter Optimization and Adaptive Control System for Injection Molding Industry Applications

劉冠言¹、鄭豐榮¹、黃聖杰^{1*}、彭信舒²、朱孝業³

¹ 國立成功大學機械工程系

² 逢甲大學機械與計算機輔助工程系

³ 崑山科技大學機械工程系

*通訊作者：黃聖杰

*E-mail: jimpp1@mail.ncku.edu.tw

摘要

參數設定會決定射出成型產品品質，此外，有許多外在因素會對品質造成影響，如環境因素或材料批次不同導致熔膠性質不穩定，使其在長時間的生產過程中產生產品品質不穩定的現象。本研究以機台化為目標，並以最少感測器量測值為基礎建置科學化標準參數設定流程來找到優化的射出參數，使生產過程中即使在無使用自適應系統的情況下也有穩定的生產。下一步發展感測器結合自適應控制系統來最小化產品重量變異量，穩定產品品質。最後以不同材料進行實驗，驗證系統的有效性且適用於不同機台，並證明實施產業化的可行性。

本研究將產品重量定義為產品品質指標，最小化產品重量變異量將得到穩定的產品品質。本研究以射嘴壓力感測器和哥林柱應變感測器等模外感測器擷取機台資訊便達到全面機台化生產。在實驗中我們根據射嘴壓力特徵值定義適當的 V/P 切換點、射出速度與保壓壓力，以鎖模力峰值定義適當鎖模力。最後將黏度因子、射嘴壓力峰值與鎖模力峰值定義為品質特徵點，與實驗得到的優化後的射出參數納入自適應控制系統，透過不同材料進行實驗後驗證了系統的有效性，達到最小化產品重量變異量的目標。

關鍵詞：射出成型、射嘴壓力、鎖模力、科學化標準參數流程、自適應控制系統

Abstract

The parameter setting will decide the quality of the injection molded product. The quality of injection molded parts may be altered by environment changes, different material batches and improper processing parameter settings etc., resulting in unstable product quality in the long-term production process. This research aims at machine tooling and established a science based standard process parameter setting process for injection molding machine based on the least sensors, so that the production process is stable even without the use of the adaptive system. The next step is to combine the sensor with an adaptive control system to minimize product weight variation and stabilize product quality. Finally, experiments were carried out with different materials to verify the effectiveness of the system and to be suitable for different machines, and to prove the feasibility of industrialization.

In this study, product weight is defined as our product quality. Minimizing product weight variation will result in stable product quality. In this study, sensors such as nozzle pressure sensor and strain gauge sensor are used to capture machine information to achieve full-scale machine production. In the experiment, we define the appropriate V/P switchover point, injection speed and packing pressure according to the characteristics of the nozzle pressure, and define the appropriate

clamping force by the peak value of the clamping force. Finally, the viscosity index, nozzle peak pressure and peak value of the clamping force are defined as quality characteristics, and the optimized injection parameters obtained from the experiment are incorporated into the adaptive control system. The effectiveness of the system is verified after experiments with different materials. The goal of minimizing product weight variation is achieved.

Keywords: injection molding, nozzle pressure, clamping force, scientific standard parameter process, adaptive control system.

1. 前言

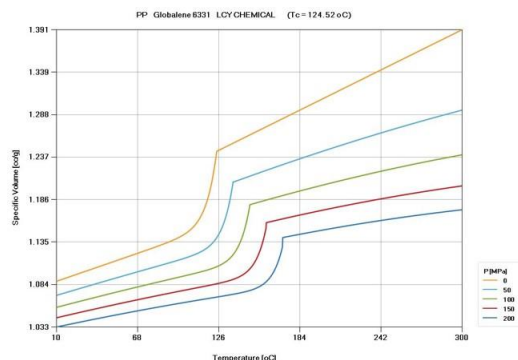
近年來本研究室在射出成型的自適應控制系統上投入許多心力進行研究。在建置射出成型自適應控制系統前，為了瞭解射出成型機台的硬體規格，陳建融等人[1]建置一智慧伺服油壓系統來模擬射出成型機的充填與保壓階段，並設計一模糊控制器以提供更穩定的射出速度與保壓壓力控制。林俊穎等人[2]使用智慧伺服油壓系統模擬射出成型的速度控制、壓力控制及保壓切換位置控制，採用位置控制精度為0.1 mm的伺服閥。陳沂曠等人[3]藉由安裝壓力感測器在射出機台的射嘴端上，即時量測射嘴端壓力曲線，將黏度因子作為線上品質之依據。蔡明宏等人[4]將類神經網路納入至自適應控制系統中，藉由程式計算每一模次之黏度因子、射嘴壓力峰值與模內熔膠溫度，並將這些上述之品質因子導入類神經預測模型，以預測下一模次之產品品質。范姜嘉誠等人[5]將模內溫度感測器移除，以一射嘴壓力感測器所擷取到的壓力曲線，經由程式計算的黏度因子與壓力峰值作為線上品質監控的依據，從中發現黏度因子與射嘴壓力峰值與產品重量有很強的關聯性，以此作為自適應系統調控的依據。蘇祈偉等人[6]建置一射出成型製程參數優化的流程，藉由射嘴壓力感測器所擷取到的壓力歷程，並根據程式擷取的壓力峰值找到適當保壓切換位置，經由鎖模力峰值找到適當的鎖模力。最後，藉由三種不同黏度的材料驗證自適應系統的有效性。

本研究建立於過去的研究成果之上，將定義一套標準射出參數建置流程來找到優化後的射出參數，並結合自適應控制系統來最小化產品重量變異量，穩定產品品質。最後，以不同材料進行實驗來驗證系統的有效性。

2. 理論背景

2.1 P-V-T關係

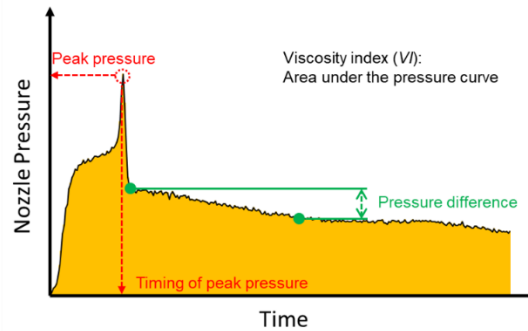
本文利用聚丙烯為原料來進行實驗，圖一為聚丙烯之P-V-T曲線圖，根據P-V-T曲線圖可以得知壓力、比容以及溫度之間的關係。在定壓之下，比容與溫度成正比關係，所以如何有效透過射出速度和保壓切換位置來穩定射出壓力曲線是非常重要的。



圖一：聚丙烯(PP)之P-V-T圖

2.2 射出壓力曲線

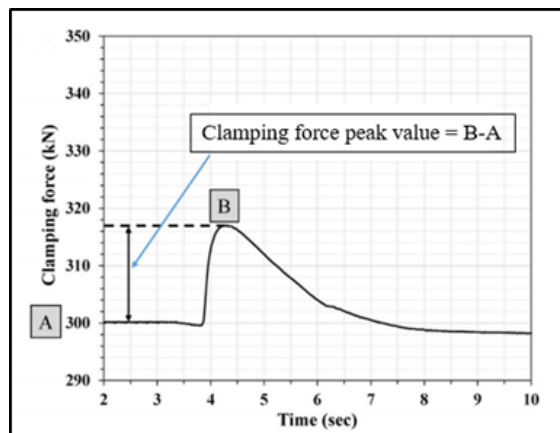
透過射出壓力的大小與產品重量可謂是息息相關，黃明賢[7]利用各種壓力感測來觀察器壓力峰值、黏度因子、能量因子和壓力梯度這些參數和產品重量之間的關係，其中射嘴壓力感測器擷取射嘴端的壓力峰值與黏度因子隨著射出速度的變化會與產品重量有著很高的關聯性，因此本研究將採用黏度因子和壓力峰值作為調控射出參數的基準。本研究也依據射嘴壓力的特徵，射嘴壓力峰值、射嘴壓力峰值時間點與射嘴壓力差來優化保壓切換位置、射出速度與保壓壓力，圖二為壓力曲線示意圖。



圖二：壓力曲線示意圖

2.3 鎖模力峰值

在射出成型製程中，鎖模力為重要且關鍵的成型參數之一，其主要目的為確保生產所用模具可在適當鎖模力設定條件下運作。應變感測器安裝在哥林柱之適當位置上，可直接量測模具上高壓後哥林柱所受之應變並精確換算獲得實際鎖模力大小，經由實驗發現鎖模力在射出以及保壓階段時會產生一射出鎖模力峰值之特徵，如圖三所示。本研究針對三種黏度材料，以射出鎖模力峰值量化模面分離程度，作為判別不同黏度材料適當鎖模力之依據，得出三種材料之適當鎖模力。



圖三：射出鎖模力峰值示意圖

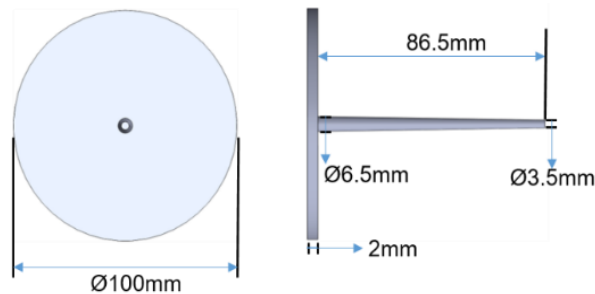
2.4 自適應控制

自適應系統是能調整其自身行為，即使在已改變了的環境下，仍能達到最好的或容許的品質，對於環境與材料變化具有自適應能力的系統稱為自適應系統。本文研究射出成型過程中，隨著模數不斷地增加，產品品質容易受外在因素影響，造成射出產品品質不

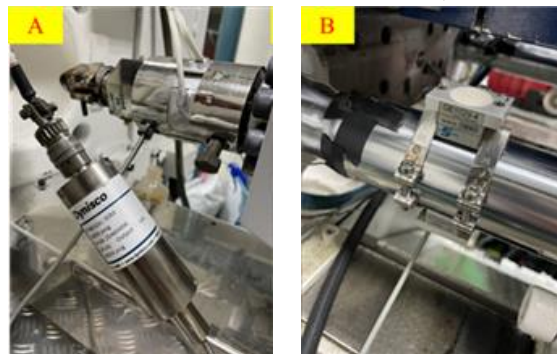
穩定。本研究將射嘴壓力曲線特徵，射嘴壓力峰值、黏度因子、射嘴壓力差與鎖模力峰值納入至自適應控制系統中，如此一來便可針對長時間生產之下熔膠壓力的變化，根據回傳的射嘴壓力與鎖模力資訊來調整適當之機台射出參數進而穩定產品重量。

3. 實驗系統介紹

本文實驗使用之射出成型機為全力發機械股份有限公司所生產之60噸油壓式射出機台，型號為CLF-60TX。並使用薄圓盤工件其產品圖如圖四所示。射出原料為三種不同黏度之聚丙烯(PP)，熔膠流動指數分別為8、14.5、26，並在機台射嘴端安裝Dynisco公司所生產的壓力感測器及GFRAN公司所生產的應變感測器，其型號為PT4655XL，如圖五所示。並利用研華股份有限公司所生產的資料擷取器，最大擷取率為200kHz，符合資料擷取需求。



圖四：薄圓盤尺寸



圖五：感測器於機台安裝之位置(A)壓力感測器安裝於射嘴端，(B)應變感測器安裝於哥林柱上

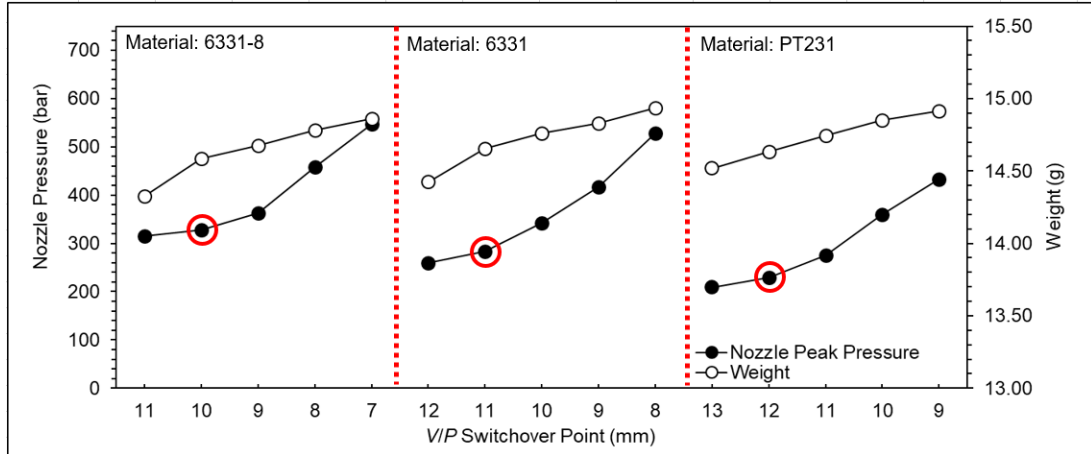
4. 實驗結果與討論

4.1 保壓切換位置優化實驗與結果

在射出成型加工過程中，保壓切換位置是重要的製程參數之一，理論的最佳保壓切換位置是於模穴體積 98% 進行切換，保壓切換位置切換過早與過晚會使得產品有缺陷。因熔膠具有可壓縮性，若設置過晚的保壓切換位置時，在模具滿穴的時候螺桿會繼續往前擠壓，熔膠繼續充填，使得射嘴壓力急遽上升；反之，若保壓切換位置過早時，則沒有熔膠壓縮所產生的壓力峰值。因此，適當的保壓切換位置為當射嘴壓力有微小峰值時的情況，圖六為三種材料在不同保壓切換位置下射嘴壓力峰值與產品重量之關係。此實驗設置不同保壓切換位置，觀察射嘴壓力曲線，找到適當的保壓切換位置，實驗參數如表 1 所示。

表 1 保壓切換位置實驗參數

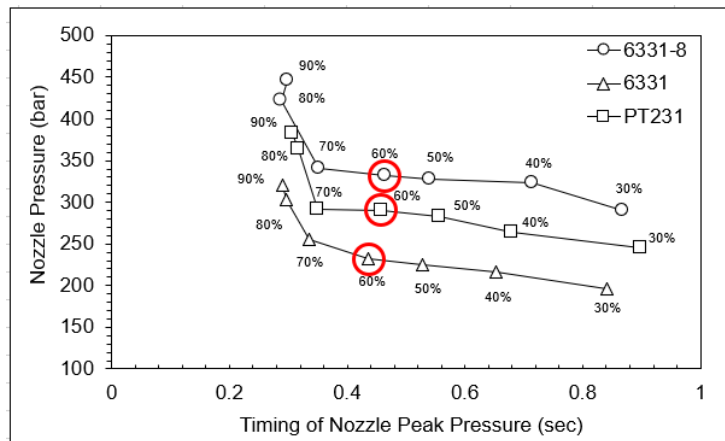
V/P	6331-8	7, 8, 9, 10, 11
switchover point (mm)	6331	8, 9, 10, 11, 12
	PT231	9, 10, 11, 12, 13



圖六：三種材料在不同保壓切換位置下射嘴壓力峰值與產品重量之關係

4.2 射出速度優化實驗設置與結果

射出速度實驗是為了觀察在不同的射出速度下，螺桿是否能夠在一定的速度下精準的停止在機台所設定的位置。圖七為三種不同黏度材料在不同射出速度下的射嘴壓力峰值與射嘴壓力峰值時間點。從射嘴壓力峰值時間點與射嘴壓力峰值可觀察到隨著射出速度的增加射嘴壓力峰值會些微的增加，且射嘴壓力峰值時間點會隨之減少。考慮到避免模穴內部過度充填，並且盡可能減少射出成型週期，以穩定且有效率的方式生產，適當之射出速度為 60%。



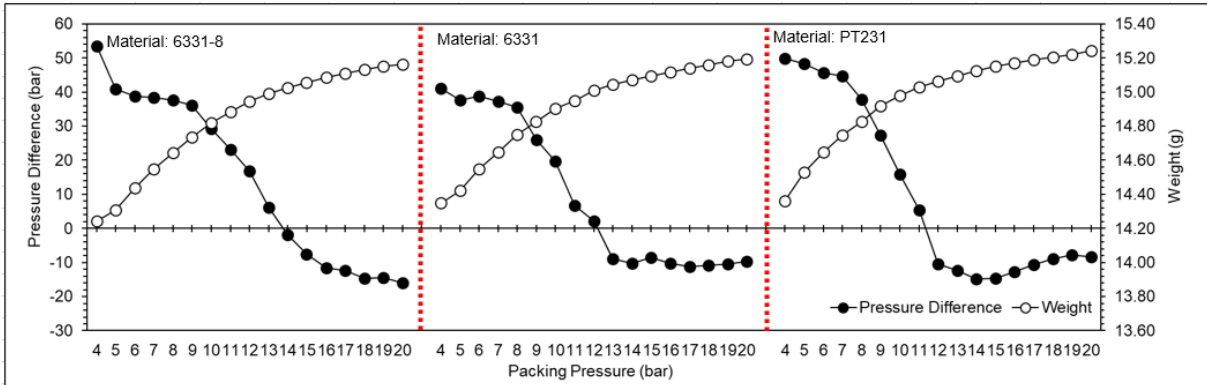
圖七：三種材料在不同射出速度下的射嘴壓力峰值與壓力峰值時間點之關係

4.3 保壓壓力優化實驗與結果

射出成型過程熔膠充填至模穴內，產品會在冷卻時而有收縮現象產生，因此保壓壓力的設定是至關重要。保壓壓力主要是於充填階段與保壓切換位置之後，以一定的壓力補償熔膠進入至模穴內部，直到澆口固化為止。此實驗設置不同保壓壓力進行實驗，探討

保壓壓力、射嘴壓力差與產品重量之間的關聯性，並決定適當的保壓壓力。

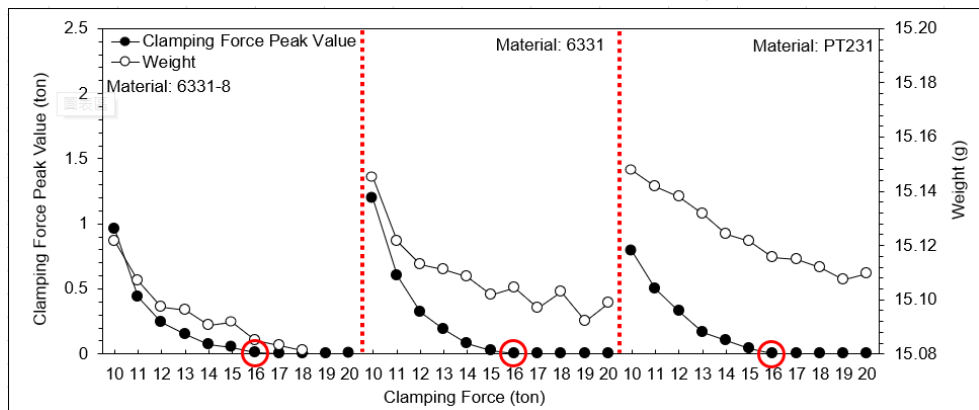
在保壓階段時，若保壓壓力不足，射嘴壓力會有持續壓力降的情形，是因為模穴壓力高於螺桿往前推力，導致螺桿無法繼續前進補償熔膠進入至模穴內部；若保壓壓力設定足夠，則在保壓階段時，射嘴壓力會呈現水平的狀態，代表螺桿能夠一開始就往前進，持續補償熔膠進入至模穴內部；在設定更高的保壓壓力時，其射嘴壓力曲線會有下凹再上升的情形發生，其可能原因是射出成型機的PID控制所造成的響應。圖八為三種材料在不同保壓壓力下壓力差與產品重量之關係。本研究將根據產品重量及射嘴壓力差來決定適當地保壓壓力。從結果可看出 6331-8、6331 及 PT231 產品重量與射嘴壓力差的收斂情形，其適當的保壓壓力分別為 15、14、13bar。



圖八：三種材料在不同保壓壓力下壓力差與產品重量之關係

4.4 鎖模力優化實驗與結果

鎖模力會影響射出成型產品的品質，特別是厚度較薄的產品或黏度較低的材料，在低鎖模力的情形下容易導致產品有毛邊的缺陷，而高鎖模力則會導致排氣不良，進而導致短射。因此，設定適當鎖模力至關重要。藉由本次研究所定義之鎖模力峰值能夠找到合適的鎖模力，以穩定產品重量。圖九為不同鎖模力下鎖模力峰值與產品重量之關係。從結果可觀察出，隨著鎖模力增加，鎖模力峰值會隨之下降，產品重量也隨之降低，且於 16 噸的鎖模力時，鎖模力峰值已趨近於零，代表射出與保壓階段其鎖模力足以負荷模穴內部的壓力。考慮到在機台不穩定之情形，模具可能會發生撐模的情形，將適當鎖模力乘以 1.2 倍的安全係數，以確保在射出成型過程不會有撐模的情況發生。



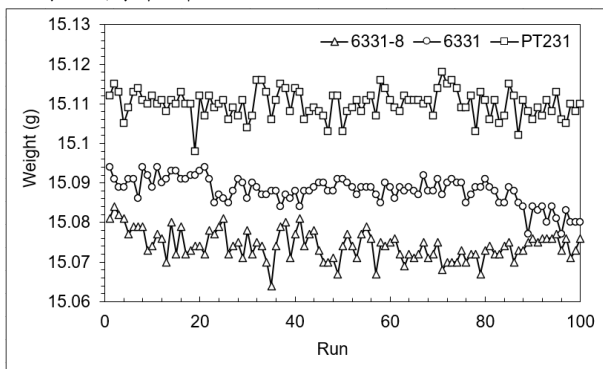
圖九：三種材料在不同鎖模力下鎖模力峰值與產品重量之關係

5. 自適應控制系統實驗

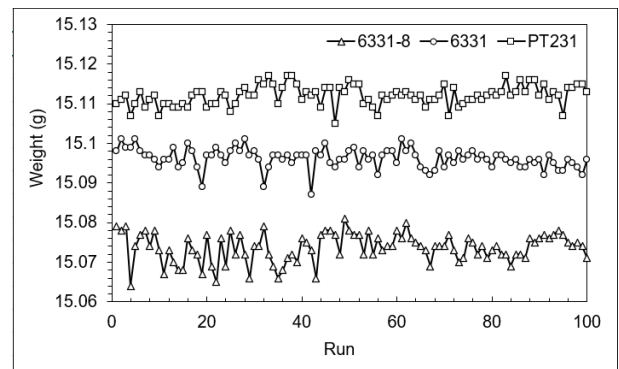
在射出成型製程中，即便是設定適當之製程參數，在機台長時間生產下，產品重量也將因材料批次及環境因素等影響無法長時間維持一樣的重量品質。因此本研究建立了一套自適應控制系統，整合前期實驗結果，以黏度因子、射嘴壓力峰值作為保壓切換位置及射出速度調控之依據，線上監測射出鎖模力峰值維持趨近0值，將此邏輯納入自適應控制系統中；由機台上安裝之感測器，透過系統即時擷取計算壓力資訊及鎖模力資訊，同時繪製射出壓力曲線圖，判定適當射出參數回授至機台控制器進行調控。同時記錄每一模次之射出資訊，使產品重量維持良好的穩定性，本文將以變異量和標準差作為產品重量是否穩定之指標。

5.1 自適應控制系統實驗結果與討論

此章節進行 100 模次有無自適應控制系統之實驗，以驗證自適應調控系統之確效性。自適應調控系統將與機台進行連線，即時擷取機台當前之射出速度、保壓切換位置、鎖模力以及從機台感測器獲得黏度因子、射嘴壓力峰值及射出鎖模力峰值，經由系統分析每一模次並調整至該模次最適當之射出參數，並藉由系統監測觀察每一模次之射出鎖模力峰值，確保無模面分離現象，為最穩定之生產狀態，使產品重量品質維持一致。實驗結果如圖十所示。



圖十：未使用調控系統之產品重量



使用調控系統之產品重量

5.2 實驗結果分析

在使用自適應控制系統之實驗下，三種不同黏度材料之壓力曲線皆更為穩定。從計算結果得知有自適應控制系統下，各項材料之產品重量變異量與標準差有下降的趨勢，如表二所示。

表二：有無系統之產品重量變化

產品重量變異量		
材料	無系統	有系統
6331-8	0.133%	0.106%
6331	0.113%	0.092%
PT231	0.132%	0.079%

產品重量標準差		
材料	無系統	有系統
6331-8	0.0037 g	0.0034 g
6331	0.0035 g	0.0025 g
PT231	0.0035 g	0.0025 g

6. 結果與討論

本研究建立了一套自適應控制系統，將系統與機台連線，僅以最少的模外感測器即時擷取生產資訊，於系統介面上即時掌握生產現況，同時系統將以品質監控特徵為依據，自動分析每一模次之適當參數並回饋至機台控制器進行調控，以此最小化產品重量變異量。

透過前期實驗得出高中低黏度材料適當之射出參數，在未使用系統時已經達到穩定的產品生產過程，從自適應控制實驗結果驗證了使用自適應控制系統射嘴壓力曲線將更加穩定，高中低黏度材料之產品重量標準差分別降低至0.0034 g, 0.0025 g, 0.0025 g，相較於未使用系統調控的情況下，更能有效提升生產過程穩定性，同時證實了自適應系統應用於不同黏度材料之可行性及確效性。

7. 參考文獻

1. Chien-Jung Chen, Kuo-Tsai Wu and Sheng-Jye Hwang, "Development of a Servo-hydraulic System with a Self-tuning Fuzzy PID Controller to Simulate Injection Molding Process," *Microsystem Technologies*, Vol. 27, pp. 1217-1238 (2021).
2. Chun-Ying Lin, Fang-Cheng Shen, Kuo-Tsai Wu, Huei-Huang Lee and Sheng-Jye Hwang, "Injection Molding Process Control of Servo-hydraulic System," *Applied Sciences*, Vol.10, pp. 71 (2019).
3. Yi-Sheng Chen, Kuo-Tsai Wu, Ming-Hong Tsai, Sheng-Jye Hwang, Huei-Huang Lee, Hsin-Shu Peng and Hsiao-Yeh Chu, "Adaptive Process Control of the Changeover Point for Injection Molding Process," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 40, pp. 383-394 (2021).
4. Ming-Hong Tsai, Jia-Chen Fan-Jiang, Guan-Yan Liou, Feng-Jung Cheng, Sheng-Jye Hwang, Hsin-Shu Peng and Hsiao-Yeh Chu, "Development of an Online Quality Control System for Injection Molding Process," *Polymers*, Vol.14, pp. 1607 (2022).
5. Jia-Chen Fan-Jiang, Chi-Wei Su, Guan-Yan Liou, Sheng-Jye Hwang, Huei-Huang Lee, Hsin-Shu Peng and Hsiao-Yeh Chu, "Study of an Online Monitoring Adaptive System for an Injection Molding Process Based on a Nozzle Pressure Curve," *Polymers*, Vol. 13, pp. 555 (2021).
6. Chi-Wei Su, Wei-Jie Su, Feng-Jung Cheng, Guan-Yan Liou, Sheng-Jye Hwang, Hsin-Shu Peng and Hsiao-Yeh Chu, "Optimization Process Parameters and Adaptive Quality Monitoring Injection Molding Process for Materials with Different Viscosity," *Polymer Testing*, Vol. 109, pp. 107526 (2022).
7. J. Y. Chen, K. J. Yang, and M. S. Huang, "Quality indexes design for online monitoring polymer injection molding," *Advances in Polymer Technology*, Vol. 2019, pp.1-20 (2019).