

## 射出成形線上品質預測技術 Injection molding online quality prediction technology

粘世智<sup>1\*</sup>、朱柏璋<sup>2</sup>、王伯維<sup>2</sup>、黃明賢<sup>2</sup>、柯坤呈<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立台東專科學校 動力機械科

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學 機電工程系

<sup>3</sup> 私立元智大學 機械工程學系

\*E-mail: d88522009@ntu.edu.tw

### 摘要

隨著工業 4.0 智慧製造的發展，射出成型產業逐漸認同感測器可帶來之生產效益，並在模具上加裝感測器以獲得模內熔膠數據，然而獲得熔膠數據後，欠缺一套自動解析所獲得數據並具體反應成形品質之程式，人工判讀感測數據之方式降低了加裝感測器之效益，故本研究建立了一套完整之製程監測後台程式，以解決廠商獲得熔膠數據後無後台自動解析程式之窘境。本研究建立了射出成形線上品質預測技術，經由擾動學習建立熔膠感測數據與品質間的關聯，並據以由當模次感測資訊即時預測品質區間。射出成形線上品質預測技術分為三大部分，(1)智慧化試模：以智慧化試模中的試模流程得到一合乎所有品質要求之試模曲線，並以此做為擾動學習之基準；(2)建立品質指標：以試模曲線為基準進行擾動實驗，將特徵指標與各品質量測結果進行相關性分析，獲得各品質之對應指標並擬合出預測模型曲線；(3)量產品質預測：在實機量產中經由當模次之感測數據運算獲得各品質之預測值及信心範圍區間，且判定塑件是否符合各品質之要求，最後以人機介面呈現出當模次塑件之品質，並顯示預測值是否落於良品區間。本研究開發之系統成功於當模次塑件頂出時順利判斷出塑件之寬度品質，解決廠商感測數據無法自動分析運用之問題，在量產現場監控塑件品質是否產生變異，即時分檢當模次塑件，降低品管之成本及避免連續生產不良品。

**關鍵詞：**射出成型、智慧化試模、品質預測、工業4.0

### Abstract

With the advent of Industry 4.0 development, the injection molding industry has gradually consented that the injection mold sensing could bring the manufacturing efficiency. The most common applications are the installation of sensors inside the mold. However, after the acquired data of the molding parameters, there is a lack of an automatic analysis software to response the truly measured formed quality. If we utilize the manmade judge of the data, this leads to a reduction of the advantage of implement of sensors. This research develops a complete manufacturing monitoring platform software to solve the difficulty of the analysis of data acquisition investigation. This study also creates the injection mold quality prediction, and by the disturbance learning process, we build the relationship between melted sensing data and product qualities. At the same time, this process is accomplished in a real time to predict the production quality control interval. There are three major prediction technologies in this research. (1) Intelligent molding test: the intelligent sensing process data were fitting to a satisfied mold curve, which is used to be as a basis of disturbance learning algorithm. (2) Form quality index: the fitting mold curve proceeds to perform the disturbance

experiments. The characteristic mold index and mold quality measurements were analyzed to find out the connection between them. From these results, we will summarize to obtain the best prediction of mold curve. (3) Production quality prediction: in the real production process, according to the proposed method, we determined the products quality in the proper range within a confidence level and analyze whether they are satisfied with the requirement of product quality. Finally we will display the results on the human machine interface for us to judge the adequate production quality, which means we can evaluate if they are located inside the reasonable quality interval. This research can contribute two folds. First, we can monitor a single mold production process and then assess the related parameters in an acceptable range, which is the present industrial manufacturer's unsolved problems. Second, in mass production, we can monitor the variation of the productions. If the process is not met the quality control, they will be separate from the good ones. The advantages of this method are we can detached the bade ones in a real time to reduce the cost of quality control as well as avoidance of the bad productions in a continued series.

Keywords : Injection molding, intelligent mold testing, quality prediction, industry 4.0

## 1. 前言

本研究建立射出成形線上品質預測技術，撰寫程式計算當模次感測數據，並於開模時即時進行塑件之品質預測。隨著工業4.0智慧製造的發展，智慧化射出成型已是現今射出成型產業發展的必然趨勢，射出成型產業逐漸認同感測器可帶來之生產效益，許多射出成形的業者紛紛於模內加裝感測器來獲取射出成形過程之模內熔膠數據[1-4]，並以模內熔膠數據進行解析，改善傳統射出成形所使用之觀念及方法。智慧化試模建立在科學試模的基礎之上，進行機械及模內熔膠感測數據之擷取、儲存與分析[5-6]。與傳統試模相較，智慧化試模由傳統的機械參數調整進化為模內熔膠的成型曲線樣態調整，最後在開模前將各感測殘壓曲線收攏，讓開模前成品之殘留壓力降到最小，獲得合乎品質要求之智慧化試模曲線，在移機量產時只要將曲線樣態調整至試模曲線一致即可完成移機試模，改善傳統試模之方法。在射出成形產業大量生產的過程中，品質的檢驗大多已抽樣檢查為主，而抽檢也會有交貨良率的問題；如果生產較為精密的產品，品質的量測更可能進一步改為全檢的方式，全檢非常花費人工及時間，會造成許多不必要的成本，增加人力及時間上的花費。智慧化射出之品質預測分為三大部分，(1)智慧化試模：以智慧化試模中的試模流程得到一合乎所有品質要求之試模曲線，並以此做為擾動學習之基準；(2)建立品質指標：以試模曲線為基準進在實機量產中經由當模次之感測數據運算獲得各品質之預測值及信心範圍區間，且判定塑件是否符合各品質之要求；(3)以人機介面呈現出當模次塑件之品質，並顯示預測值是否落於良品區間。在大量生產的過程中，智慧化射出之品質預測更可以即時判斷塑件是否同時符合所有品質之品管條件要求，區分良品與不良品。

## 2. 研究方法與實驗配置

本實驗使用之射出機為 FANUC 100 噸全電式射出成形機(S2000i100, Fanuc, Japan)，實驗材料 ABS(ABS-PA756, Chi-Mei Corporation, Taiwan)，壓力感測器為 FUTABA 鈕扣型壓力感測器(SSB04kN10x08H, Futaba, Japan)。本實驗使用特別設計之不等厚度凹字平板作為實驗載具(圖 1)，塑件於中間段設計一長方形之靠破，並於末段將厚度 1.5 mm 分別變化為 1 mm 和 2 mm 兩個厚度區域。感測器之安裝位置包括：近澆口位置(SN1)、塑件 1.5mm 區域中段及末段位置(SN2、SN3)、充填末端 1 mm 區域位置(SN4)、充填末端 2 mm 區域位置(SN5)，以及豎澆道正下方位置(SN6)，塑件品質包括 W1、W2、W3、W4 及 W5 五個寬度品質。

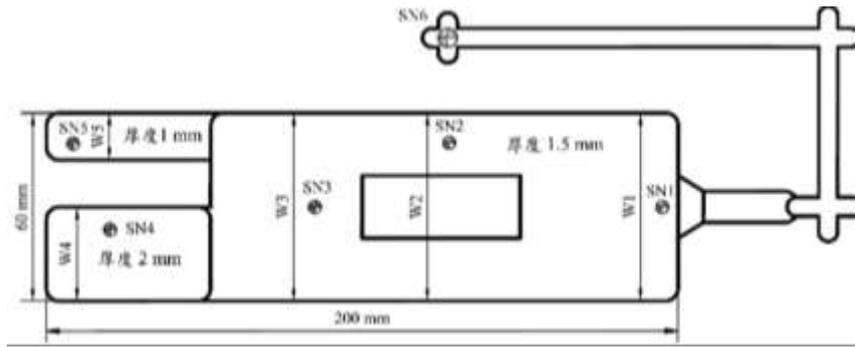


圖 1 成品幾何及感測器之埋設位置

射出成形線上品質預測技術分為 4 個步驟，分別為智慧化試模、指標定義、品質預測模型之建立及即時品質預測之結果。

- (1) 智慧化試模流程(圖 2)：透過智慧化試模流程，包括最佳射速、滿模行程、澆口凝固、分段保壓、及曲線收攏等實驗步驟，透過這些標準實驗步驟之實行獲得可成型良品之試模曲線，並以此做為將來移機量產及成型監測之基準。
- (2) 指標定義流程(圖 3)：以試模曲線為基礎進行分析，並依照領域知識對試模曲線之樣態進行特徵指標定義，包括峰值、能量、粘度、速度、殘壓、壓力差等指標。
- (3) 品質預測模型之建立流程(圖 4)：首先將擾動實驗之數據、實驗成品之量測品質及射出機參數輸入至程式中，並經由 python 程式以上步驟所定義之指標計算出各個特徵指標值，再將各模次的品質量測數據與特徵指標值進行相關性分析以獲得與各品質之相對應高關聯性品質指標，最後建立各寬度品質與對應指標的 XY 散佈圖並擬合預測曲線、信心區間上下邊界曲線(本實驗之上下限具有 96.875% 之信心水準)。
- (4) 實機量產之品質預測流程(圖 5)：首先將實機射出之擷取數據即時輸入至程式中，並進行各品質指標之運算，接著判斷指標是否在良品區間內，如果此模次為良品，將進一步對應之指標值帶入至品質預測模型中，於下一模次開始前預測出本模次各品質之預測值以及信心範圍上下限。

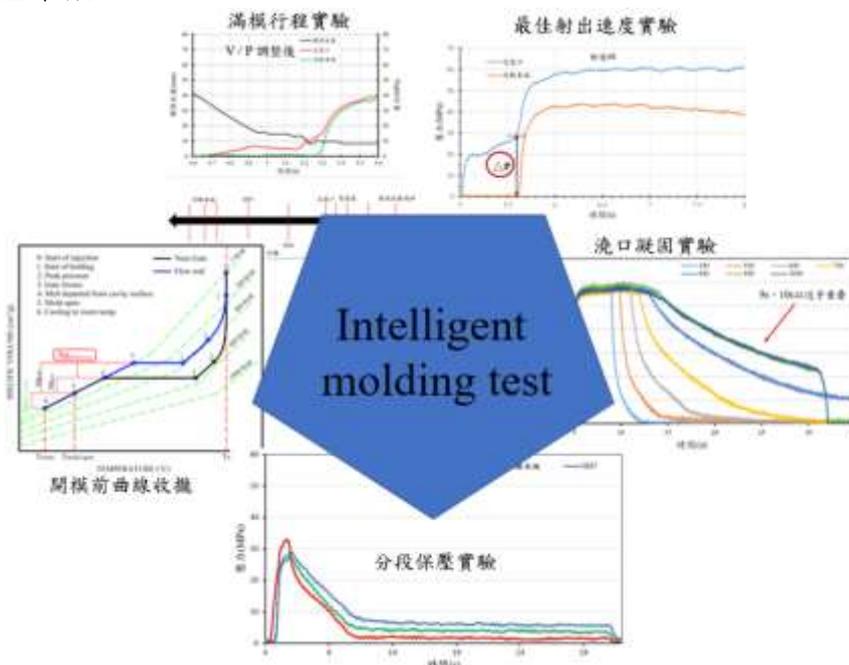


圖 2 智慧化試模流程 [7]

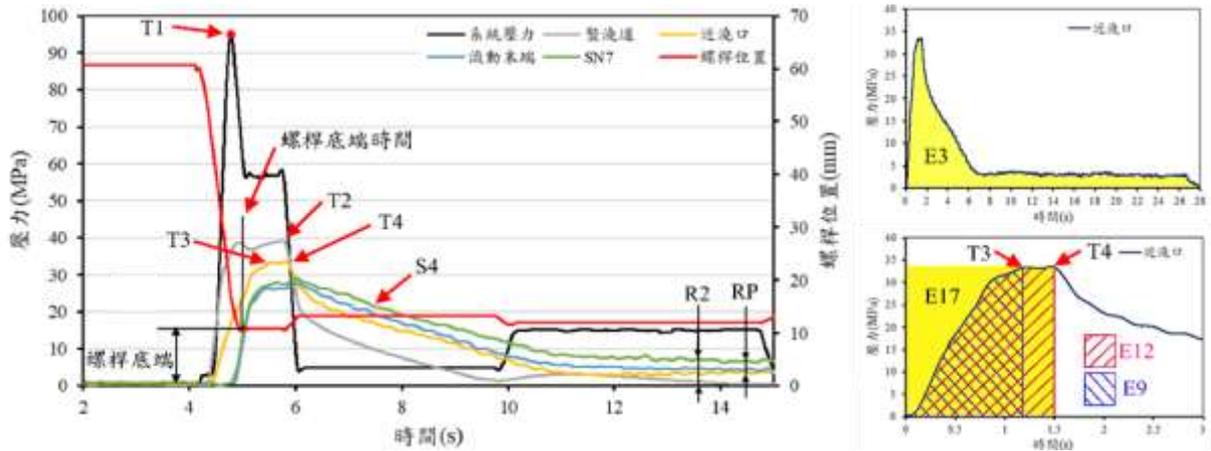


圖 3 智慧化試模流程 [7]

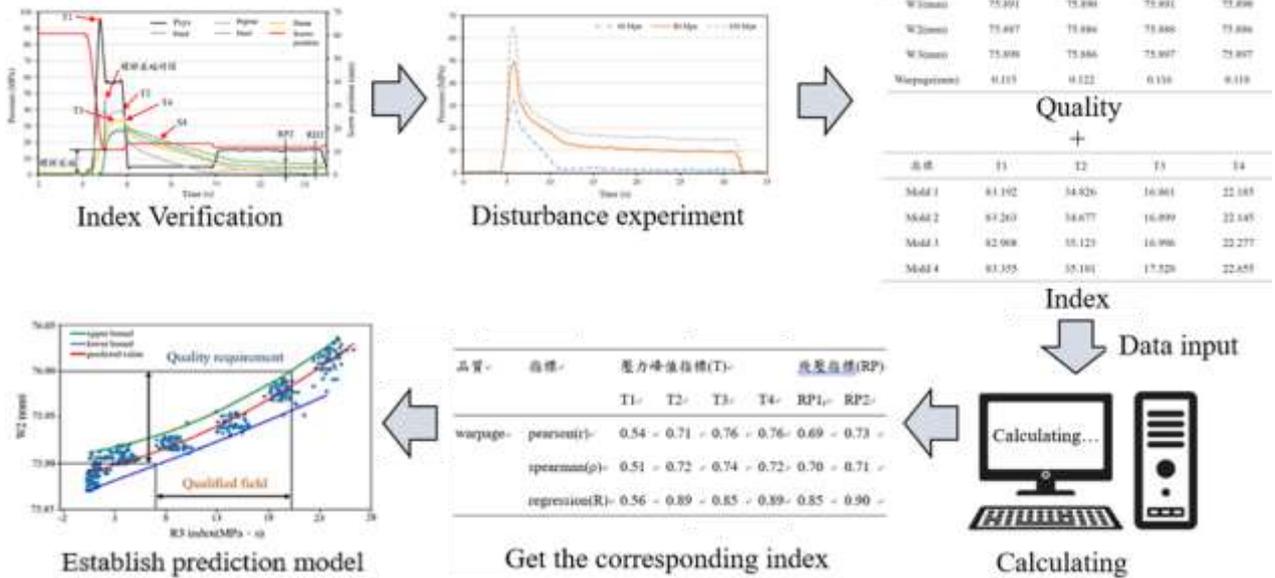


圖 4 建立品質指標與品質預測模型[7]

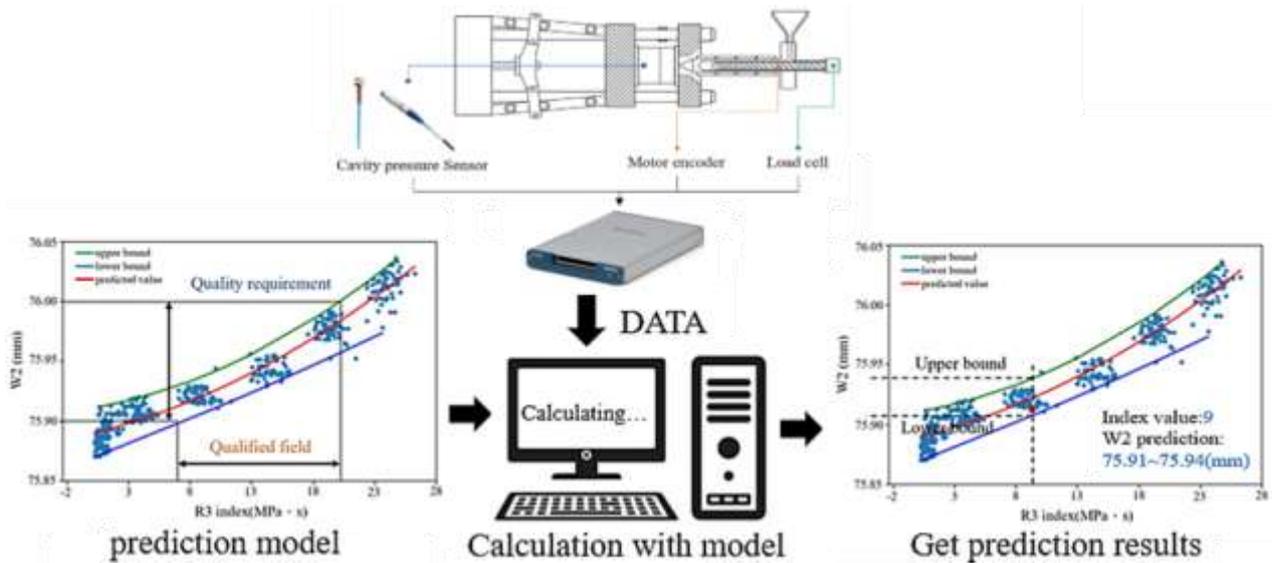


圖 5 實機量產之品質預測流程[7]

### 3. 結果與討論

#### 3.1 智慧化試模結果

首先藉由感測器取得不同射速下的模穴壓力曲線，分析不同射速下熔膠流動的壓力差，並以近澆口與流動末端感測器的最小壓力差取代傳統的 U 型曲線，藉以獲得最佳射速。接下來進行滿模行程實驗尋找一個明顯壓力凸波得到所想要之 V/P 切換時機，再來依照智慧化試模的流程進行澆口凝固實驗找出適當保壓時間後進行分段保壓調整，最後調整至可成型出合乎各項品質要求的成品後即可獲得試模曲線，圖 6 為試模前之成型曲線，此成型曲線之 V/P 切換時機太晚會使近澆口壓力驟升並造成熔膠在模內呈現不穩定的狀態，且各感測器之殘留壓力也較大，使成品在開模後會有較大之殘留應，導致成品可能會有較大之品質變化；圖 7 為試模後之成形曲線，此成型曲線在 V/P 切換上有較佳的切換時機，近澆口壓力曲線無驟升的狀況，表示熔膠處於一較穩定的狀態，且各感測器之殘壓也都因智慧化試模之調整方法而降低，使成品在開模後會有較小的才留應力降低品質變化。

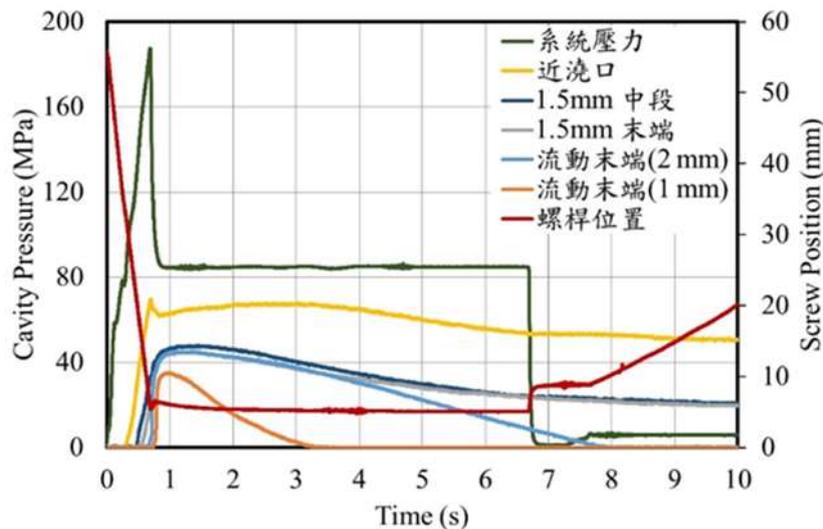


圖 6 智慧化試模前之成形曲線

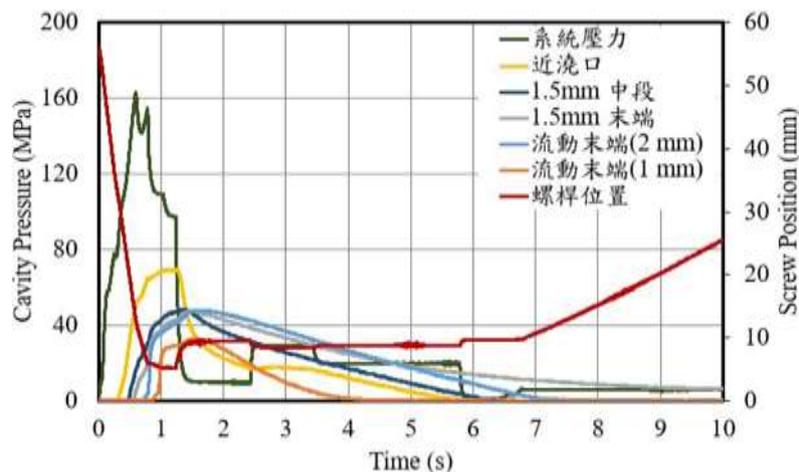


圖 7 智慧化試模後獲得之試模曲線

#### 3.2 指標定義

將智慧化試模後得到之壓力曲線(圖 7)進行分析，並依照試模後之歷程曲線特徵定義各具有物理意義之指標，表 1 為此次研究所定義之指標:指標類別 T 以各壓力曲線之峰值作為特

徵指標，指標類別 RP 以開模前之殘留壓力作為特徵指標，指標類別 RD 以開模前之殘留壓力差做為特徵指標，指標類別 VA 以各壓力曲線之積分作為特徵指標，指標類別 ESC 以螺桿位置與壓力積分，指標類別 VT 以各壓力曲線之峰值與時間之積分做為特徵指標，指標類別 VS 以各壓力曲線之峰值與其峰值時間之積分做為特徵指標，指標類別 S 以冷卻階段之斜率做為特徵指標，指標類別 PD 以豎澆道與各感測位置之流動起始壓力差做為特徵指標

表1 本實驗定義之指標

指標類別	指標代號						指標物理意義說明
<b>VA</b>	VA <sub>1 sys</sub>	VA <sub>2 spr</sub>	VA <sub>3 near</sub>	VA <sub>4 end</sub>	VA <sub>5 mid</sub>		全時間壓力積分
<b>ESC</b>	ESC <sub>1 spr</sub>		ESC <sub>2 spr</sub>		ESC <sub>3 near</sub>		螺桿位移壓力積分
<b>VT</b>	VT <sub>1 sys</sub>		VT <sub>2 spr</sub>				壓力峰值與時間積分
	VT <sub>N1 vip 射速</sub>	VT <sub>N2 噴射速時程</sub>	VT <sub>N3 射速 1-2 段</sub>	VT <sub>N4 射速 2-3 段</sub>	VT <sub>N5 射速 3-4 段</sub>	VT <sub>N6 射速 4-5 段</sub>	近澆口射出峰值與時間積分
	VT <sub>M1 vip 射速</sub>	VT <sub>M2 噴射速時程</sub>	VT <sub>M3 射速 1-2 段</sub>	VT <sub>M4 射速 2-3 段</sub>	VT <sub>M5 射速 3-4 段</sub>	VT <sub>M6 射速 4-5 段</sub>	中間澆口峰值與時間積分
	VT <sub>E1 vip 射速</sub>	VT <sub>N2 噴射速時程</sub>	VT <sub>E3 射速 1-2 段</sub>	VT <sub>E4 射速 2-3 段</sub>	VT <sub>E5 射速 3-4 段</sub>	VT <sub>E6 射速 4-5 段</sub>	遠澆口峰值與時間積分
<b>T</b>	T <sub>1 sys</sub>		T <sub>2 spr</sub>				壓力峰值指標
	T <sub>N1 vip 射速</sub>	T <sub>N2 噴射速時程</sub>	T <sub>N3 射速 1-2 段</sub>	T <sub>N4 射速 2-3 段</sub>	T <sub>N5 射速 3-4 段</sub>	T <sub>N6 射速 4-5 段</sub>	近澆口壓力峰值指標
	T <sub>M1 vip 射速</sub>	T <sub>M2 噴射速時程</sub>	T <sub>M3 射速 1-2 段</sub>	T <sub>M4 射速 2-3 段</sub>	T <sub>M5 射速 3-4 段</sub>	T <sub>M6 射速 4-5 段</sub>	中間澆口壓力峰值指標
	T <sub>E1 vip 射速</sub>	T <sub>N2 噴射速時程</sub>	T <sub>E3 射速 1-2 段</sub>	T <sub>E4 射速 2-3 段</sub>	T <sub>E5 射速 3-4 段</sub>	T <sub>E6 射速 4-5 段</sub>	遠澆口壓力峰值指標
<b>RP</b>	RP <sub>1 near</sub>		RP <sub>2 mid</sub>		RP <sub>3 end</sub>		開模前殘壓指標
<b>RD</b>	RD <sub>1 near-end</sub>		RD <sub>2 near-mid</sub>		RD <sub>3 mid-end</sub>		殘壓差指標
<b>VS</b>	VS <sub>1 sys</sub>		VS <sub>2 spr</sub>				壓力峰值與時間乘積
	VS <sub>N1 vip 射速</sub>	VS <sub>N2 噴射速時程</sub>	VS <sub>N3 射速 1-2 段</sub>	VS <sub>N4 射速 2-3 段</sub>	VS <sub>N5 射速 3-4 段</sub>		近澆口壓力峰值與時間乘積
	VS <sub>M1 vip 射速</sub>	VS <sub>M2 噴射速時程</sub>	VS <sub>M3 射速 1-2 段</sub>	VS <sub>M4 射速 2-3 段</sub>	VS <sub>M5 射速 3-4 段</sub>		中間射出壓力峰值與時間乘積
	VS <sub>E1 vip 射速</sub>	VS <sub>N2 噴射速時程</sub>	VS <sub>E3 射速 1-2 段</sub>	VS <sub>E4 射速 2-3 段</sub>	VS <sub>E5 射速 3-4 段</sub>		遠澆口壓力峰值與時間乘積
<b>S</b>	S <sub>1 spr</sub>	S <sub>2 near</sub>	S <sub>3 end</sub>	S <sub>4 mid</sub>			冷卻階段斜率指標
<b>PD</b>	PD <sub>1 spr-near</sub>		PD <sub>2 spr-mid</sub>		PD <sub>3 spr-end</sub>		壓力差

### 3.3 建立品質預測模型

首先依照智慧化試模之流程尋找合乎品質之試模曲線，將試模曲線之參數做為基礎參數進行擾動，如表 2 所示，擾動參數有第 3 段射速及第 1 段保壓之保壓壓力，將擾動參數進行全因子實驗且每組參數成型 10 模次共獲得 200 模次之數據，並將 200 模次分為 195 組訓練組及 5 組測試組；射出成形線上品質預測技術共分為 4 個步驟，包括：(1)將訓練組數據匯入訓練程式中，建立各模次的成型曲線，並依曲線樣態計算多個自定義的特徵指標；(2)將各模次的品質與多個特徵指標進行相關性分析，並獲得各品質相對應之高關聯性指標；(3)獲得相對應之高關聯性指標與品質的 XY 散佈圖，經由 XY 散佈圖使用非線性迴歸二次曲線來取得預測之指標區間，並完成品值預測模型；(4)最後在預測程式中匯入測試組數據，可由測試組中各品質指標值由 XY 散佈圖與非線性迴歸二次曲線對應出各品質之預測值。

首先將實機射出時所得到之感測數據匯入至訓練程式中，並經過 10 點移動平均將數據將數據之雜訊去除，且在程式中依照歷程曲線樣態進行指標之定義及建立指標之計算方式，計算出此模次之各個指標值，最後將計算出來各個特徵指標輸出並儲存。

將上述之各個特徵指標與量測之寬度經由程式進行相關性分析且計算其 R 平方值，比較其相關性獲得與各品質最高相關性之指標做為主要指標，再尋找與主要指標不同類別之最高相關性指標做為次要指標，將 195 訓練組之主要指標與確認指標其對應之品質建立一個陣列並繪製出指標值與品質之 XY 散佈圖；再來進行上限、下限及預測曲線之擬合，先將 XY 散佈圖上之離群值去除，確保之後擬合不會被離群值所影響，基於 XY 散佈圖將數據進行非線性迴歸二次曲線擬合取得預測之曲線方程式，在以同樣曲線擬合之方式以望小特性獲得預測

上限之曲線方程式，以望大特性獲得預測下限之曲線方程式；最後將上下限曲線、預測曲線及數據在 XY 散佈圖上呈現(圖 8、9)，而在上限與下限之外的數據因上述望大及望小之次數影響可預測之上下限範圍，各佔樣本群之 3.125% (1/32)，因此建立之預測模型可在 93.75% 之信心水準下對品質進行預測。

表 2 擾動參數

名稱(單位)	數值				
計量位置 (mm)	52.9				
鬆退行程 (mm)	3				
射出段數	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	
射出分段位置	52.9	35	32.2	12	
射出速度 (mm/s)	70	56	60、70、80、90	40	
V/P 位置 (mm)	6.2				
保壓段數	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>
保壓壓力 (MPa)	90、95、100、105、110	98	10	30	20
冷卻時間 (S)	20				

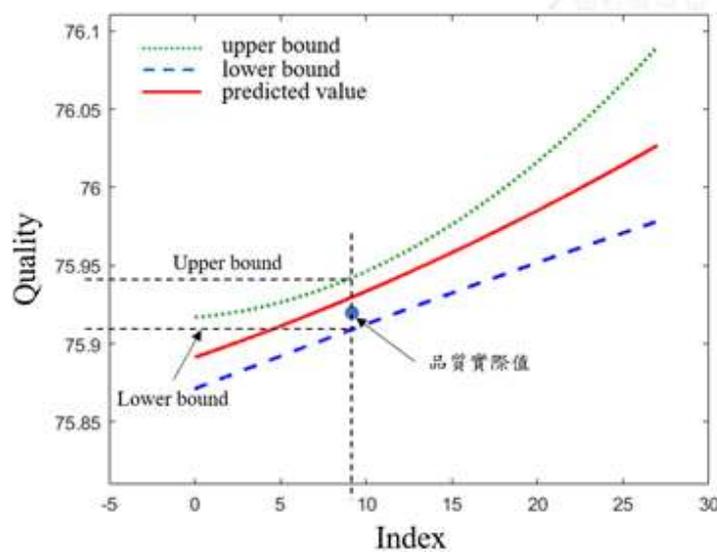


圖 8 由指標值透品質XY散佈圖計算品質預測質及信心範圍上下限[7]

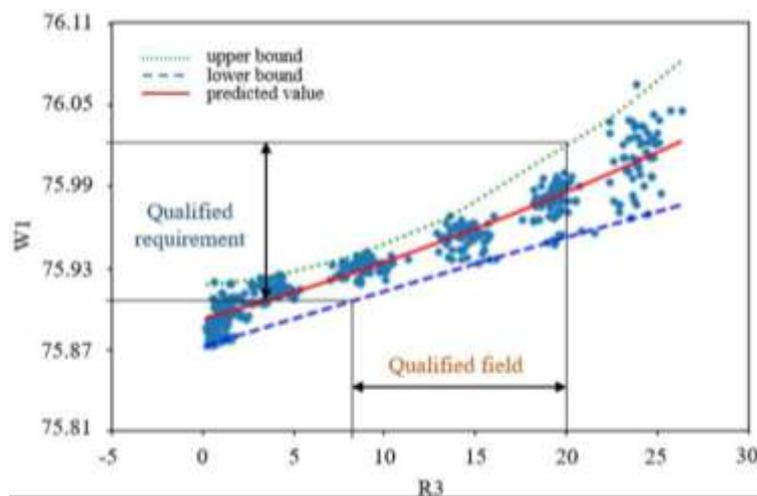


圖 9 由品質XY散佈圖設定良品之指標區間[7]

### 3.4 以非線性迴歸二次曲線獲得各品質預測值之計算

本階段實驗將 5 組測試組之數據匯入至品質預測模型中，並在測試組數據進行各品質對應之主要及次要指標之運算且同樣將其指標進行儲存，將測試組之主要指標及確認指標帶入至預測模型之上下限及預測方程式中，獲得其上下限及預測值，並將其繪製成 XY 散佈圖；品質預測圖中包括預測之上下限值、預測值及當模次之高關聯性指標值，本實驗各品質對應之高關聯性指標分別為，W1 對應 VA4、RP3(圖 10)，W2 對應 VA4、RP3(圖 11)，W3 對應 VSE2、TE2(圖 12)，W4 對應 VSE2、TE2(圖 13)，W5 對應 VSE2、TE2(圖 14)。

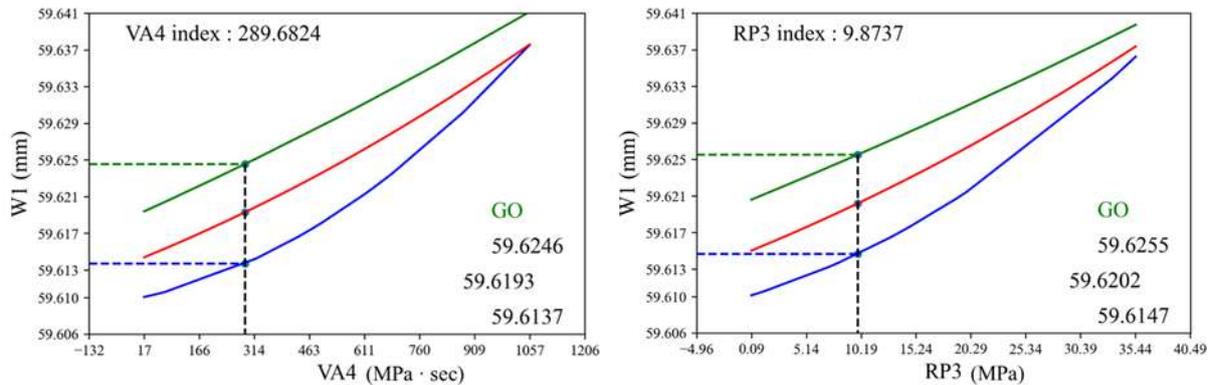


圖 10 W1 品質預測之主指標與確認指標

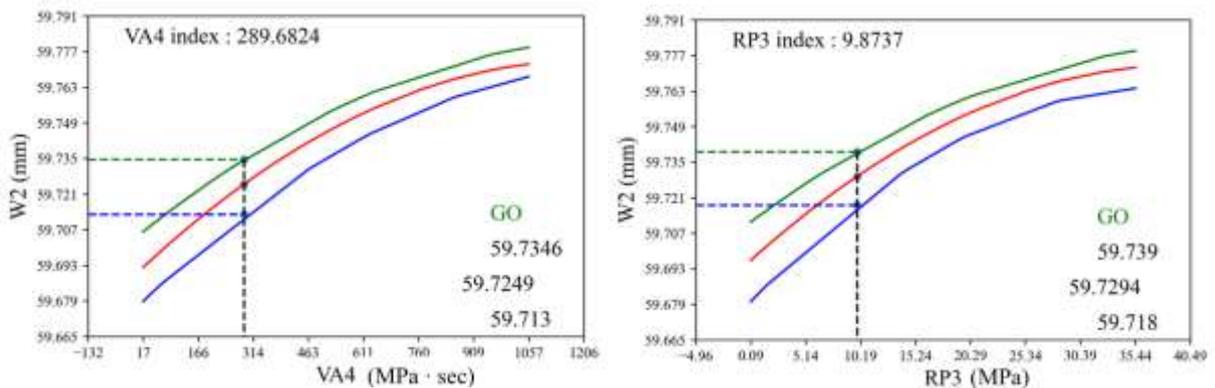


圖 11 W2 品質預測之主指標與確認指標

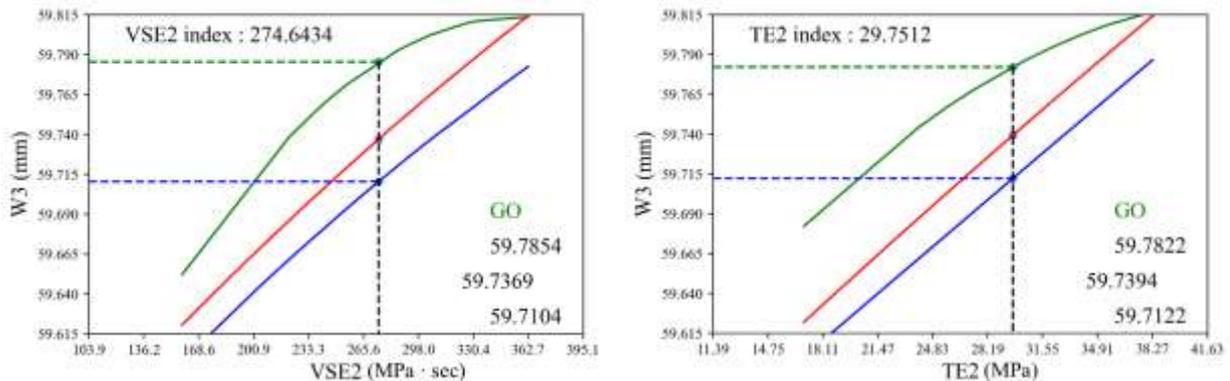


圖 12 W3 品質預測圖

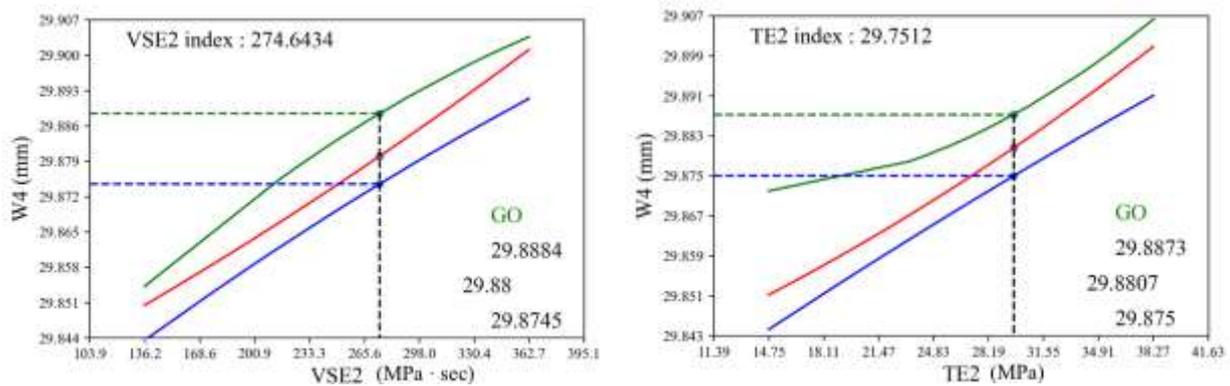


圖 13 W4 品質預測之主指標與確認指標

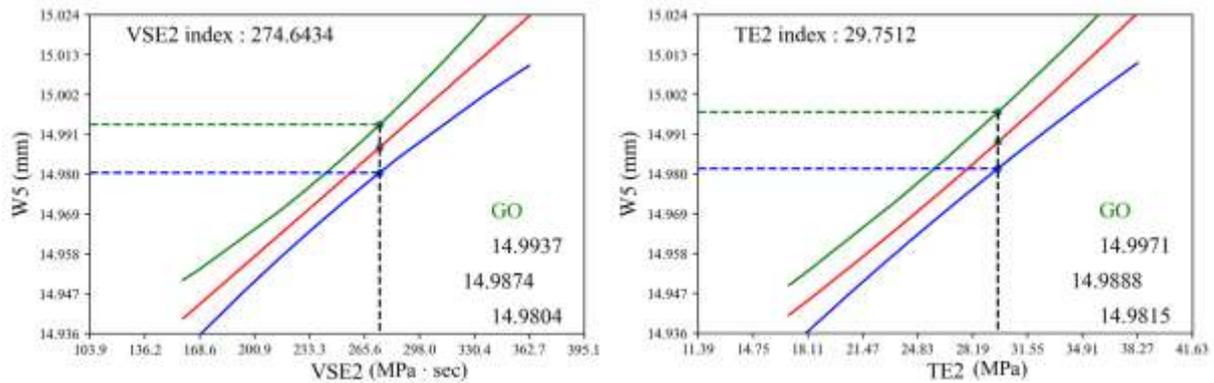


圖 14 W5 品質預測之主指標與確認指標

### 3.5 即時品質預測之結果

圖 15 為量產時品質即時預測之實機相片，射出機旁之電腦螢幕上方顯示當模次之模內壓力現況，及下方顯示上模次塑件之各品質預測值及圖形，程式於射出機下達射出指令時開始擷取感測數據，程式將各感測點之數據圖形化顯示於螢幕上，即時畫出各感測點之壓力歷程。程式將於開模指令下達後停止擷取，開始計算各品質之主指標及確認指標值，並套入品質模型計算出各品質之預測值及信心區間之上下限，所有運算時間會於開模指令下達的 2 秒內完成並顯示於螢幕之上。

本次實驗使用 Qt Designer 將 GUI 介面繪製出來(圖 16)，再將其介面轉成 python 程式碼，並將品質預測程式與 GUI 介面程式碼進行結合，進入實機測試階段程式自動擷取當模次之感測數據，濾除雜訊後計算當模次各品質對應之主要指標及確認指標值。運算出之指標值將分別帶入各品質預測模型中以判斷當模次之主指標與確認指標是否皆落於良品區間範圍之內，方便進行不合格塑件之分檢，程式於下一模次開始前將計算之預測品質數值進行自動存取並判定是否連續出現不良品需做出異常警示，達到當模次塑件品質即時預測與異常監控的目標，圖 15 為整體程式與 GUI 介面整合顯示於電腦螢幕之介面圖，在要開始量產前，按下 Start 鍵程式會開始運行，在射出機開始運作並擷取資料時，程式會進行讀秒，等到射出完成且開模頂出時，才會開始進行讀取資料、計算指標、進行預測及將預測值、預測上下限及圖示顯示在監控螢幕上，並等待下一模次之資料開始擷取。



圖 15 量產時品質即時預測之實機相片

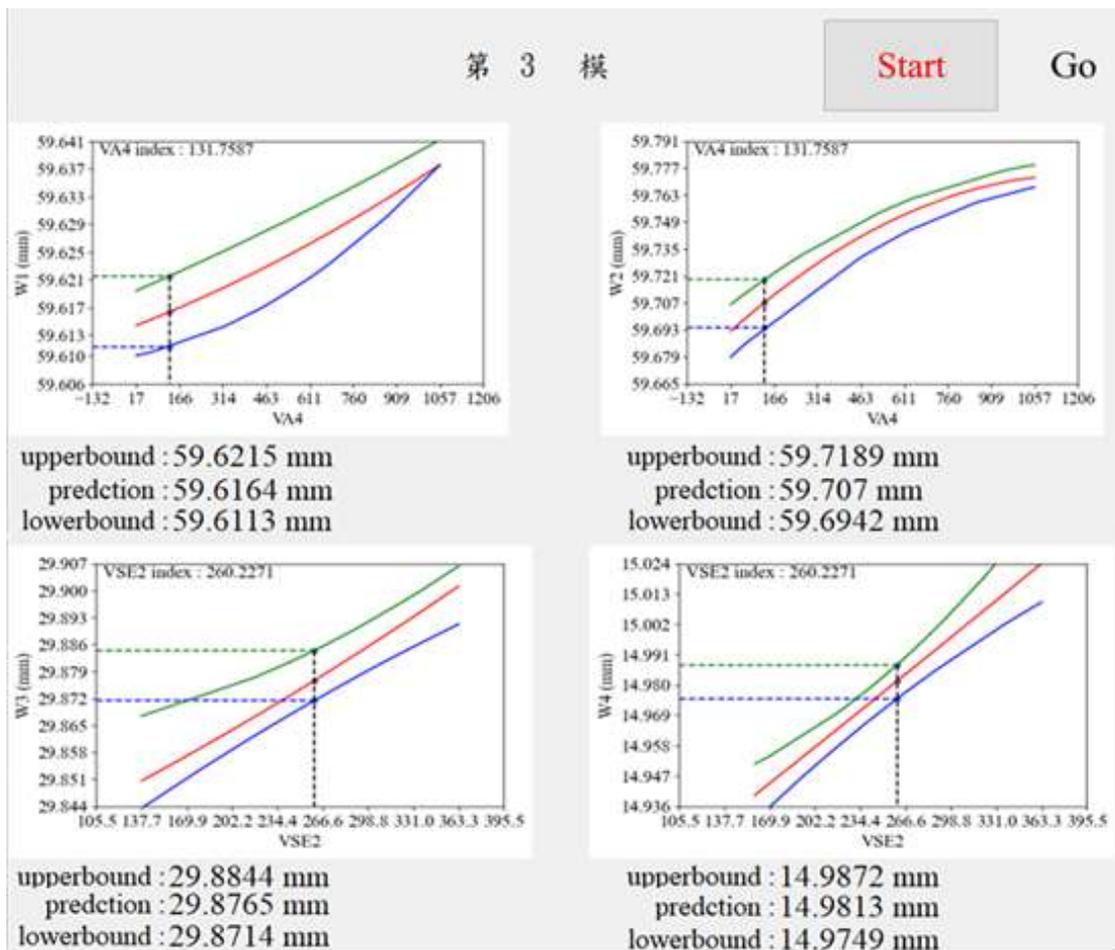


圖 16 品質即時預測之 GUI 介面

### 3.6 即時品質預測技術擴展於其他塑件成形品質預測之限制

本實驗成功的建立了射出成形之線上品質預測技術，運用實際成型特徵與品質數據之統計方法，可同時即時的預測本實驗塑件之五個寬度品質，然而將之運用於其他塑件之成行尚有下列幾點限制：

- (1) 需先建立感測數據試模技術以獲得合理之試模曲線，方能依據試模曲線樣態進行指標定義，以及後續之擾動學習。
- (2) 指標之定義與擾動學習需結合領域知識，以減少指標量及學習模次。
- (3) 模具溫度、熔膠溫度、塑粒材料品質等需穩定，否則將造成曲線特徵指標與品質對應之飄移。
- (4) 關聯性分析找出之品質與對應特徵指標需具備有極高之關聯性係數，否則會窄化甚至無法定義出良品之指標區間。
- (5) 微射出及部分光學件等不方便裝設感測器，或感測器精度及反應速度不夠的地方，因數據收集困難將導致本技術使用上之困難。
- (6) 需裝置足夠之感測器獲得足夠之數據資料，且能建立感測數據與品質之關聯性方能執行該品質之預測。

## 4. 結論

本研究發展了射出成形線上品質預測技術，可以有效解決業界目前擷取感測數據後亟需的後台分析程式問題，有助於量產時當模次的即時塑件品質預測。重點結論如下：

- (1) 透過智慧化試模獲得試模曲線，並依據試模曲線樣態與射出成型領域知識定義多個具有的物理意義之曲線特徵指標。
- (2) 經由塑件品質與曲線特徵指標間之關聯性分析，找出各寬度品質對應之高關聯性品質特徵指標。
- (3) 經由擾動實驗數據建立各品質之預測模型，且有 93.75%之信心水準，並定義出良品之指標區間。
- (4) 測試階段可於開模時經由預測程式自動擷取及運算感測數據，於下模次開始前獲得該模次塑件的品質預測值。
- (5) 射出成形線上品質預測技術可進行當模次即時多品質預測，可即時發現不良品，停機除錯處理不良品問題，避免連續生產不良品，增加生產效率。
- (6) 使用 GUI 顯示預測值，降低使用上的困難，使現場人員更容易即時獲得當模次塑件成型結果。

## 5. 致謝

本論文為科技部計畫編號MOST-108-2622-E-602-001-CC2之產學計畫，由於科盛科技與科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 6. 參考文獻

1. C. T. Huang, Y. H. Hsu, B. S. Chen, "Investigation on the internal mechanism of the deviation between numerical simulation and experiments in injection molding product development," *Polymer Testing*, Vol. 75, pp. 327-336 (2018).
2. S. Kulkarni, "Robust process development and scientific molding: theory and practice," Carl Hanser Verlag, Munchen, Germany (2014).
3. Chen, J.Y.; Yang, K.J.; Huang, M.S. Online Quality Monitoring of Molten Resin in Injection Molding." *International Journal of Heat and Mass Transfer*(2018), 122, 681–693.

4. Gao, R.X.; Tang, X.; Gordon, G.; Kazmer, D.O. Online Product Quality Monitoring through in-Process Measurement. *CIRP Annals*(2014), 63, 493–496.
5. 方詠智，黃明賢、粘世智，“射出成型之智慧試模技術”，國立高雄第一科技大學，機械與自動化工程系碩士論文(2018)。
6. S. C. Nian, Y. C. Fang, M. S. Huang, “In-mold and machine sensing and feature extraction for optimized ic-tray manufacturing,” *Polymers*, Vol. 11(8): 1348 (2019).
7. 林冠廷，黃明賢、粘世智，“基於感測模內熔膠狀態之射出成型參數優化以提昇品質一致性”，國立高雄第一科技大學，機械與自動化工程系碩士論文(2020)。