

射出成形模內感測系統之設計與成品品質線上檢測

Design of in-mold sensing system for injection molding and online inspection of product quality

趙廷偉*、鄒濠亘、黃俊欽

Ting-Wei Zhao*、Hao-Hsuan Tsou、Chung-Ching Huang

國立高雄科技大學 模具工程研究所

Mold and Die Engineering Department, National Kaohsiung University of Sciences and Technology

*E-mail: F108147119@nkust.edu.tw

摘要

近年來工業界吹起一股工業 4.0 的革命風潮，主要目的為獲得有效資料並進行大數據分析來預測品質，以射出成形為例常使用模內感測器作為數據擷取的媒介，但如果感測器位置設計不佳時，則無法擷取較敏感的模穴內部物理量，用以預估產品的品質。由於模內感測器價格昂貴且可能對模具造成破壞，因此利用有限的感測器數量去擷取物理量並進行線上品質檢測是一大難題。本研究以盒型產品為例，以側壁內凹的變形量作為品質指標，說明如何利用最少數量的溫度及壓力感測器，安裝於適當的位置，即可順利進行品質指標的線上檢測。

藉由模流分析技術解析造成盒型產品側壁變形的因素，並找出融膠在整個成型過程中，與該因素關聯性較高，而且適合作為訊號擷取的物理量，以及該物理量變化較敏感的位置，作為後續感測系統設計的依據。

研究結果顯示，造成盒型產品側壁變形的因素，包括：(1)公母模側的冷卻差異造成盒形產品取出時，內外側溫度差異甚大，(2)產品取出時溫度過高，塑料剛性不足。這些因素可以藉由在盒形產品轉角處的公母模側安裝溫度感測器，擷取射出成形過程中的模具溫度變化，並藉由後續的曲線特徵化與數據化處理，例如開模瞬間公母模溫度差及開模瞬間公母模平均溫度判斷產品取出瞬間公母模的冷卻差異及公母模的絕對溫度，再利用公母模溫度曲線下平均面積差可判斷完整射出成型過程公母模的冷卻差異程度。

關鍵詞：射出成型、感測系統、溫度曲線、關聯性分析、盒型產品側壁變形

Abstract

In recent years, there has been a wave of Industry 4.0 revolution in the industry. The main purpose is to obtain effective information and perform big data analysis to predict quality. Taking injection molding as an example, in-mold sensors are often used as data acquisition media. However, if the position of the sensor is not well designed, the more sensitive physical quantities inside the cavity cannot be captured to estimate the quality of the product. Since the in-mold sensor is expensive and may cause damage to the mold, it is a big problem to use a limited number of sensors to capture physical quantities and perform online quality inspection. In this study, a box-shaped product is taken as an example, and the deformation of the concave side wall is taken as the quality index. Explain how to use the minimum number of temperature sensors, installed in an appropriate location. Then the online inspection of quality indicators can be carried out smoothly.

Analyze the factors that cause the deformation of the side wall of the box-shaped product by the MoldFlow analysis technology. And find out that the melt is highly correlated with this factor during the whole molding process, and it is suitable as a physical quantity for signal extraction. And the position where the change of the physical quantity is more sensitive is used as the basis for the design of the subsequent sensing system.

The research results show that the main factors that cause the sidewall deformation of box-shaped products include: (1) When the box-shaped product is taken out due to the cooling difference between the male and female mold sides, the temperature difference between the inner and outer sides is very large. (2) The temperature is too high when the product is taken out, and the rigidity of the plastic is insufficient. These factors can be achieved by installing temperature sensors on the male and female mold sides at the corners of the box-shaped product. Capture the mold temperature change during the injection molding process and use the subsequent curve characterization and data processing. For example, the temperature difference between the male and female molds at the moment of mold opening and the average temperature of the male and female molds at the moment of mold opening determine the cooling difference of the male and female molds at the moment the product is taken out and the absolute temperature of the male and female molds. Then, the average area difference under the temperature curve of the male and female molds can be used to determine the degree of cooling difference between the male and female molds during the complete injection molding process.

Keywords : Injection molding, sensing system, temperature curve, correlation analysis, box-shaped product sidewall deformation

1. 前言

塑膠產品在目前的日常生活中隨處可見，而射出成型技術為製造塑膠產品的重要技術之一。近年來各國競爭激烈再加上勞力短缺與群眾環保意識等社會議題，國際間都在發展新的模式以突破目前的困境，德國提出的工業 4.0 架構提供最好的工具與轉機。「工業 4.0」一詞最早出現在 2011 年德國漢諾威工業展開幕典禮時，梅克爾總理宣布德國將進入「工業 4.0」時代，其內容涵蓋先前工業 1.0(水力與蒸汽動力進行機械化生產)、工業 2.0(電力進行大量流水線式生產)與工業 3.0(導入電子與資訊技術實現自動化生產)。工業 4.0 的關鍵要素為物聯網 (Internet of Things, IoT)，物聯網可以將所有機台或感測器藉由網路進行群組監測或是群組控制，再透過一些規則、演算法甚至人工智慧使機台之間也可以自行交換資訊，這對於傳統製造業來說是個相當大的技術突破。

從過往的文獻中可得知，大多針對模內即時訊號擷取特徵值並進行特徵值的判別[1, 2]，抑或是建立預測模型[3-5]，往往忽略感測器安裝位置的合適性，將導致是否能正確反應品質，若判斷錯誤會影響數據監測的成本與效益。以產品翹曲為例，大多利用 L 形或 V 形特徵之產品探討翹曲機制[6, 7]。本研究將以一盒形產品為例探討翹曲機制，並設計一套決定感測器位置的標準設計流程進行翹曲變形的線上監測。

2. 實驗方法

2.1 研究架構

研究流程如圖 1 所示，首先藉由文獻回顧得知影響盒型產品側壁變形的主要因素，篩選影響側壁變形最劇烈的製程參數，並規劃單因子分析實驗。再利用模流分析技術解析影響側壁變形的因素，並找出熔膠在整個過程中，與側壁變形關聯性較高的物理量特徵(系統參數)，以便作為訊號擷取的物理量。依據篩選出的系統參數探討感測器敏感度，最後決定該物理量變化較敏感的位置，作為後續感測系統設計的依據。說明如何利用最少數量的溫度及壓力感測器，安裝於適當的位置，進行品質指標的線上檢測。

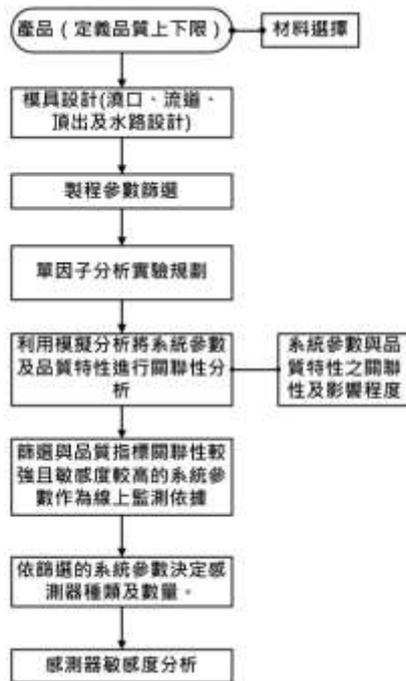


圖 1 研究流程

2.2 研究模型及材料

本實驗盒形產品使用材料為丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物，料號為 ABS PA757，其尺寸為長 125mm、寬 60mm、高 45mm 與底部肉厚為 3mm，側壁肉厚為 2mm，拔模斜度為 2 度，澆口形式設計為直接進膠，為了限制保壓時間，在直接澆口下方設計一方形約 10×10×1.5mm，其中成品的詳細尺寸如圖 2 所示。

本研究使用 Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2021 進行分析，將以上模型進行建立、設計澆口及冷卻系統，確認初期模擬成型參數，評估適當的成型參數下，產品是否有缺陷，如：包風、結合線、縮痕評估、水路冷卻速率等等。確認成型可行性，並建立成可執行暫態分析的模式，如圖 3 所示。

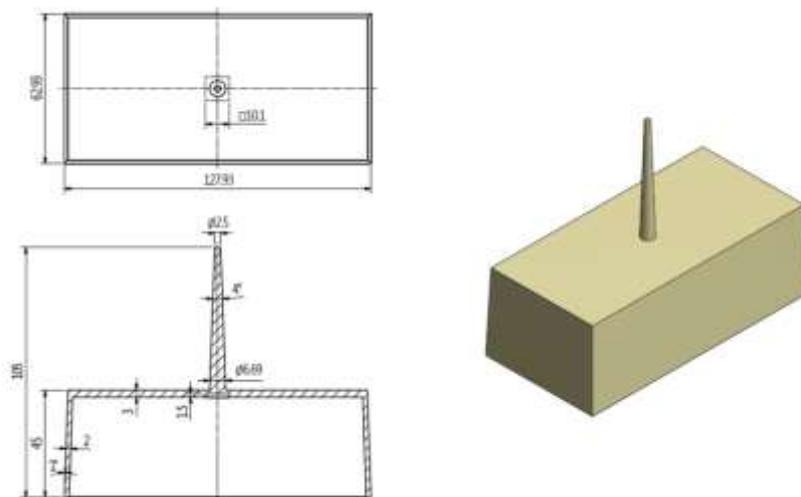


圖 2 成品 3D 及詳細尺寸圖

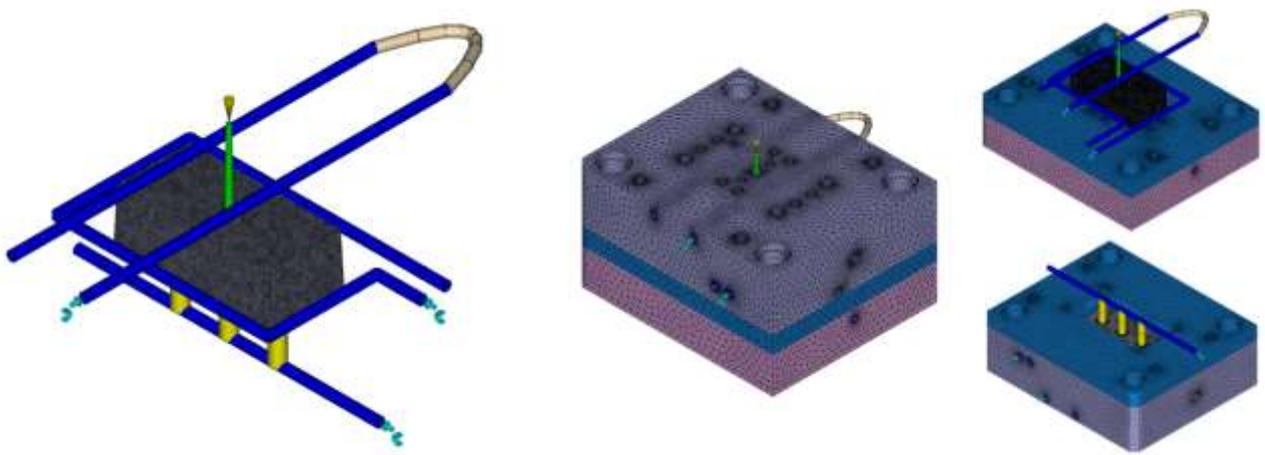


圖 3 模流分析網格模型配置

2.3 製程參數篩選

透過文獻整理了解製程參數對品質的影響，如表 1 所示，差異冷卻會導致產品厚度方向熱應力不對稱，導致收縮不一致，開模時平均溫度高會導致塑料剛性不夠，或開模時產品內外側有溫度差，最後都可能產生翹曲[6-8]，因此透過改變熔膠溫度、冷卻時間及模具溫度觀察側壁變形的情況。差異收縮會導致產品內部區域應力拉扯，最後產生翹曲，因此透過改變保壓壓力及保壓時間觀察盒形產品側壁變形的影響。

本研究以熔膠溫度、冷卻時間、保壓壓力及模具溫度進行模擬分析規劃，探討側壁變形與系統參數的關聯性。

表 1 製程參數對品質的影響

品質	主因	因素	製程參數	篩選結果
翹曲 (側壁變形)	冷卻差異	熱應力不對稱導致收縮不一致，開模時平均溫度高導致剛性不夠，最後產生翹曲。	熔膠溫度 保壓時間 冷卻時間 保壓壓力 模具溫度	熔膠溫度 冷卻時間 保壓壓力 模具溫度
	收縮差異	產品內部區域應力拉扯最後產生翹曲。	保壓壓力 保壓時間 模具溫度	保壓壓力 保壓時間 模具溫度

2.4 特徵量化指標

(1) 模具溫度曲線

以熔膠的角度來觀看，當高溫熔膠注入模穴後，此時熔膠開始傳熱，若在模具(靠近模穴表面處)裝設溫度感測器，如圖 4 所示，量測模具的溫度曲線，可發現當高溫熔膠注入模穴，此時當熔膠接觸到模穴後開始進行傳熱，因為熔膠溫度很高，熱焓量較多，感測器會瞬間升高溫度，此時傳熱速度也較快，隨著冷卻水路系統、環境溫度等等影響，模具溫度會慢慢下降至趨於平緩，最後達穩定狀態。模具溫度曲線隨時間在整個成型週期下的變化，可當作在週期時間內模具受到熔膠影響後，每秒在模具的熱量變化，若把它進行積分，則變成整個週期內模具傳熱的總熱量。此時在產品公母模兩側裝設感測器，分別提取公母模的模具溫度曲

線，如圖 4 所示，將公母模溫度曲線下面積相減，為成型週期內公母模總熱量差異，當公母模總熱量差異面積越大，代表產品兩側傳熱效果差異越多。最後再將公母模溫度曲線下面積差對週期時間進行微分，便得到每秒公母模傳熱速度的差異，當兩者差異越多，代表產品內外側的熱應力相差越大。

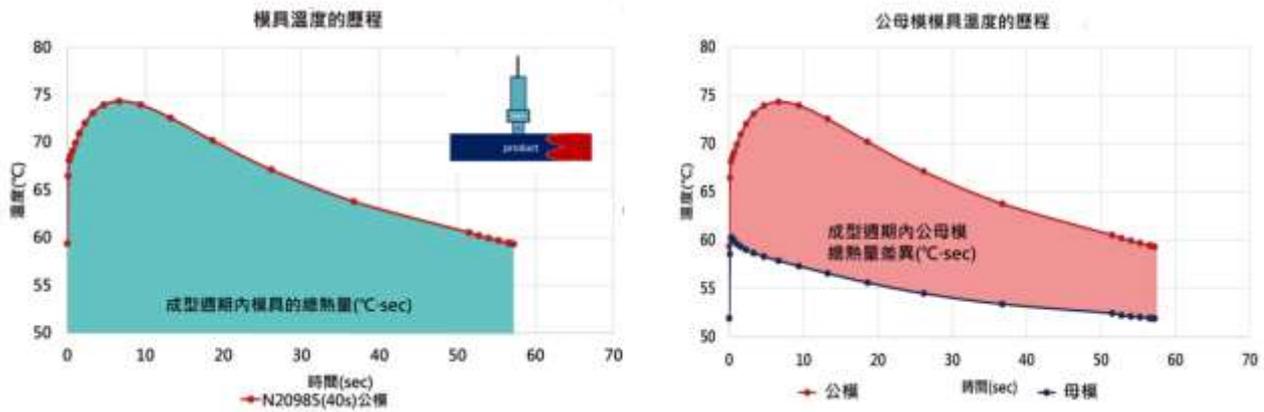


圖 4 模具溫度曲線及公母模模具溫度的歷程

由上述結果，可利用(1)公母模溫度曲線下的面積差異監測產品在成型過程中，產品內外側的熱應力，並間接得知每秒公母模傳熱速度的差異，後續直到開模後，再利用(2)開模瞬間公母模的溫度差異，觀察產品兩側收縮不一致的情況，同時也利用(3)開模瞬間公母模平均溫度評估產品在頂出後的塑料剛性，若平均溫度過高，表示產品取出時的溫度較高，則產品剛性較弱，易產生變形。利用這 3 個溫度的系統參數作為線上監測的指標。

由上述分析可得盒形產品的轉角處冷卻差異，是造成產品側壁變形的主因，因此放置 2 個溫度感測點位於盒形產品的轉角處，如圖 5 所示，作為模擬分析的模具溫度感測點，分別測量公模及母模的溫度歷程，觀察產品內外側模具溫度變化的差異。圖 6 顯示公母模兩個模具溫度感測點隨時間的變化，將模擬分析的公母模溫度曲線匯出後，如圖 7 所示，分別量化監測側壁變形的系統參數，如：公母模溫度曲線下平均面積差、開模瞬間公母模溫度差及開模瞬間公母模平均溫度。

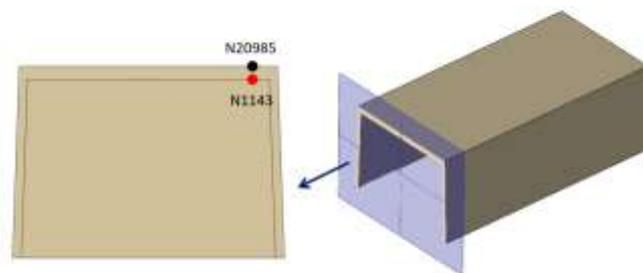


圖 5 分析的模具溫度感測點

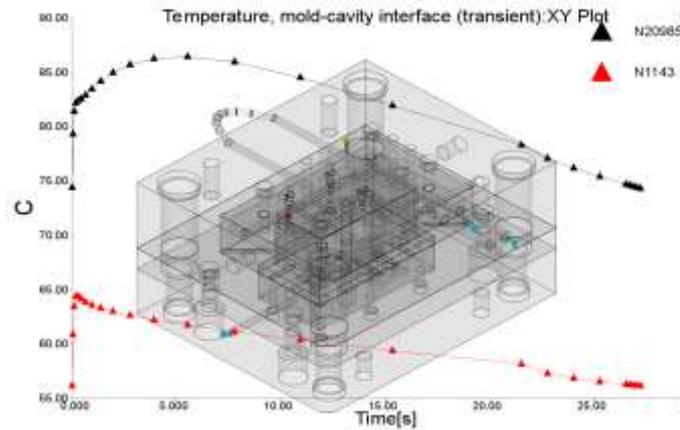


圖 6 模流分析隨時間的模具溫度變化(感測點)

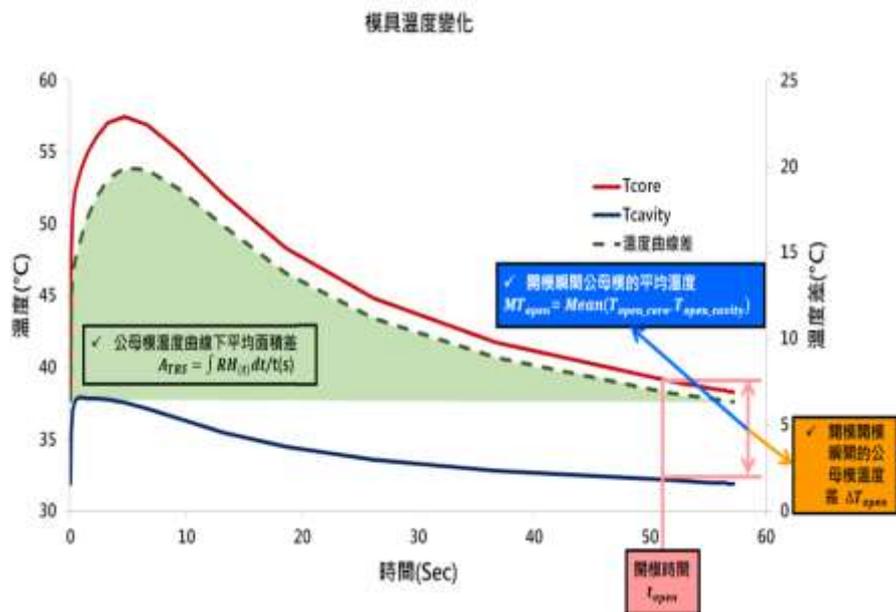


圖 7 量化溫度曲線特徵值

2.5 篩選方式

為了篩選適合監測品質的系統參數，本研究應用統計分析的手法，例如：相關係數 (Correlation Coefficient, r) 及變異係數 (Coefficient Of Variation, CV)，篩選原則如下：

- (1) 條件一: 利用相關性分析得知，與品質指標相關性呈強相關的系統參數，代表兩者呈現線性相依。
- (2) 條件二: 透過變異係數分析得知，當變異係數越大，則系統參數的離散程度較大，代表敏感度較高。

與品質指標關聯性呈強相關且變異係數較大的系統參數，作為後續感測系統設計的依據，其系統參數篩選法則表，如表 2 所示，首先滿足條件一的情況下，再進行條件二的影響權重排序。

表 2 系統參數篩選法則表

系統參數篩選法則	
條件一	相關係數屬強相關($r > 0.7$)
條件二	變異係數進行排序
備註	先滿足條件一再進行條件二

以下針對相關係數及變異係數進行詳細說明:

1. 相關係數(Correlation Coefficient, r):

相關係數(r)又稱皮爾森相關係數(r)，其公式定義如式 1，常用於衡量兩個變數之間的線性相依的程度，其值介於-1 與 1 之間。根據一般研究， $|r|$ 小於 0.3 以下為弱相關， $|r|$ 介於 0.3~0.7 為中度相關， $|r|$ 大於 0.7 以上為強相關[9]，但此公式只能證明兩者有無相關，無法清楚了解兩者離散程度。

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2} \sqrt{\sum(y-\bar{y})^2}} \quad (\text{式 1})$$

2. 變異係數(Coefficient of Variation, CV)

變異係數(CV)其公式定義如式 2，為了比較兩組或兩組以上的資料差異，利用相對的測量值作為比較的標準，因此無論兩筆資料的單位與取值範圍是否相同，若計算標準差相對於算術平均數的百分比，就可清楚比較資料的離散程度。利用相同平均值比較，當變異係數百分比愈大表示資料間的離散程度也愈大。因此本研究將透過變異係數，選擇數據離散性較大的系統參數，以利後續作為品質監測的指標。

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (\text{式 2})$$

S_x :標準差； \bar{x} :算術平均數

2.6 實驗設計與流程

透過改變不同製程條件下，觀察每個因子對產品品質的影響，將 2.3 節篩選的製程參數，進行單因子模擬實驗設計，規劃公模溫度、熔膠溫度、保壓壓力、冷卻時間為主要控制因子，執行單因子分析實驗，建立品質指標與系統參數關聯性分析，如表 3 所示。

表 3 一次一因子實驗規劃表

組	製程參數							冷卻時間(s)	
	熔膠溫度(°C)	公模溫度(°C)	母模溫度(°C)	保壓第一段		保壓第二段			
				壓力(MPa)	時間(sec)	壓力(MPa)	時間(sec)		
0	205	50	50	60	5	60	5	40	
1		70							
2		30							
3	230	50							
4	180								
5	205								70
6									50
7									60
8		10							
備註		母模溫度固定50°C、射出時間為1.5s、V/P切換點為95%							

3. 結果與討論

以一次一因子實驗規劃進行模流分析，如表 4 所示，為模擬分析後量化的系統參數及側壁內凹值，透過分析結果了解影響側壁內凹的相關因素，並證明量化後的特徵值可進行監測，最後挑出合理的系統參數。

表 4 一次一因子模流分析結果

組	製程參數							系統參數					品質 側壁內凹(翹曲)(mm)							
	熔膠溫度(°C)	公模溫度(°C)	母模溫度(°C)	保壓第一段		保壓第二段		冷卻時間(s)	開模瞬間公母模溫度差	開模瞬間公母模平均溫度	公母模溫度曲線下平均面積差	壓力峰值		壓力曲線下面積						
				壓力(MPa)	時間(sec)	壓力(MPa)	時間(sec)													
0	205	50	50	60	5	60	5	40	7.43	55.63	11.99	48.75	269.14	0.51						
1		70							19.41	64.13	23.36	48.99	276.45	1.35						
2		30							-4.99	46.79	0.24	48.51	276.22	0.01						
3	230	50							60	5	70	5	70	8.41	56.57	13.60	52.19	338.88	0.62	
4	180													6.00	54.24	9.65	37.98	171.09	0.51	
5	205													7.43	55.63	11.99	48.75	291.55	0.41	
6														50	7.43	55.63	11.99	48.75	255.16	0.67
7														60	7.43	55.63	11.99	48.75	255.16	0.67
8		10	4.06	52.54	8.39	48.64	265.35	0.38												
備註		母模溫度固定50°C、射出時間為1.5s、V/P切換點為95%																		

3.1 系統參數與品質的關聯性分析

圖 8 所示，為系統參數與品質(側壁變形)的關聯性與變異數分析，由相關性分析結果得知系統參數，如：開模瞬間公母模溫度差、開模瞬間公母模平均溫度及公母模溫度曲線下平均

面積差與側壁變形呈強相關性(相關係數>0.7)，代表可利用三者進行側壁變形的監測。再透過變異數分析，得知何者敏感度較高，當變異係數越大，代表系統參數的離散程度越大，越適合進行監測。依據相關性及變異係數排名結果可得，監測側壁變形的系統參數排序為開模瞬間公母模溫度差>公母模溫度曲線下平均面積差>開模瞬間公母模平均溫度。

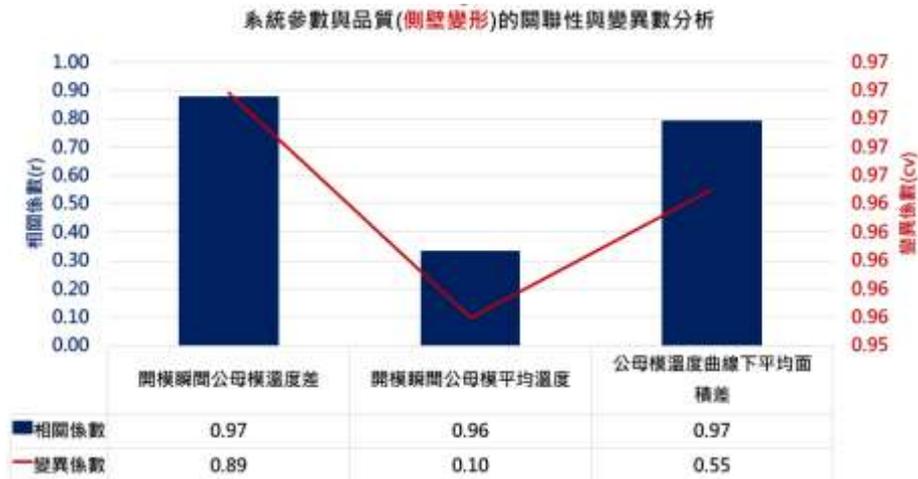


圖 8 系統參數與品質(側壁變形)的關聯性與變異數分析

3.2 感測器敏感度分析

依據篩選出的系統參數，作為後續適合訊號擷取的物理量。最後挑選該物理量變化較敏感的位置，以達到最能反應品質的目的。

(1) 模具溫度曲線(定義感測點)

依據 2.4 節分析後，需在公母模各裝置一支模具溫度感測器，如圖 9 所示，為公母模溫度感測器安裝示意圖。以此盒形產品為例，由於產品、澆口、流道及水路系統的對稱性，因此將盒形產品展開，分成四等分，劃出路徑圖，如圖 10 所示。利用單因子分析的第 0 組實驗，依據圖 10 的路徑劃出公母模的溫度變化，如圖 11 所示，為產品頂出時公母模溫度路徑曲線，紅色為公模溫度、藍色為母模溫度、綠色為兩者相減的溫度，最後得兩點最為敏感的位置(橘圈及紫圈處)。但紫圈處有水路系統設計，如圖 12 所示，無法將感測器設計在此處，因此決定將感測器設計在橘圈處，即為盒形產品角落處。

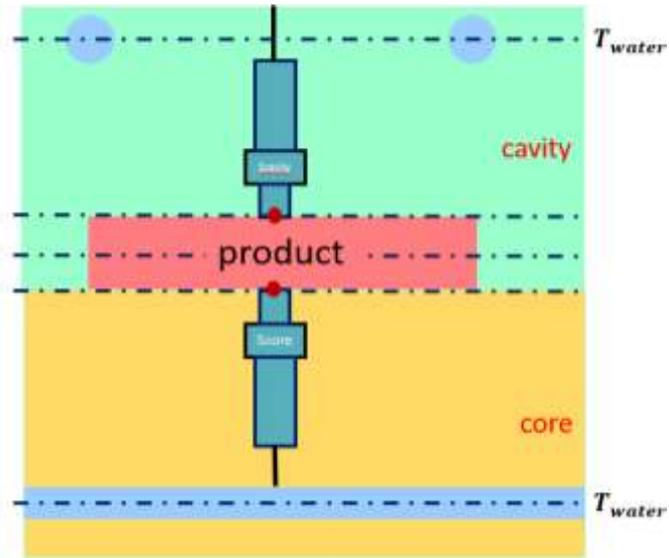


圖 9 溫度感測器安裝示意圖

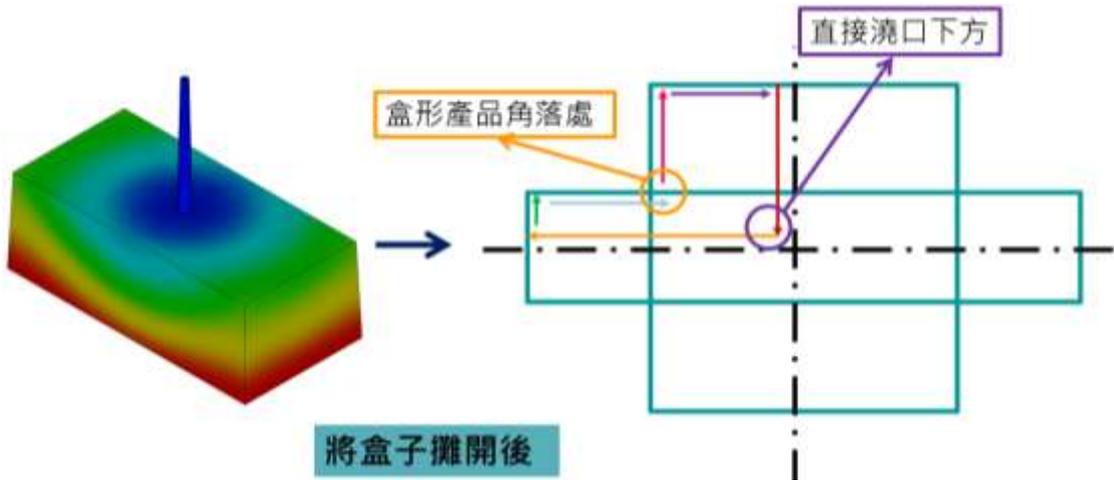


圖 10 盒形產品分區方式

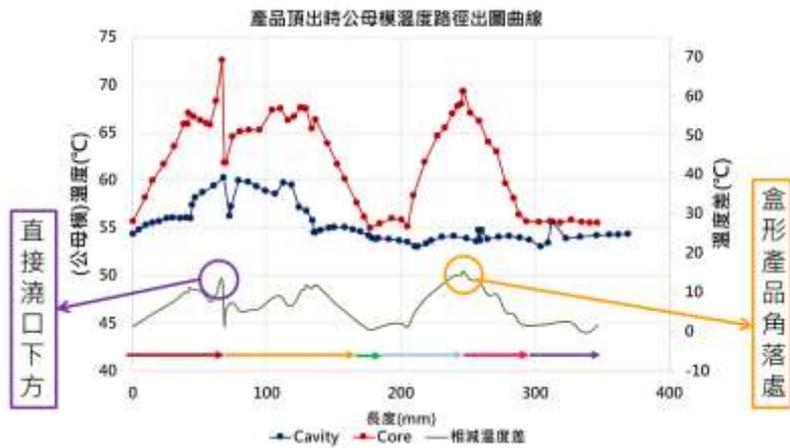


圖 11 產品頂出時公母模溫度路徑出圖曲線

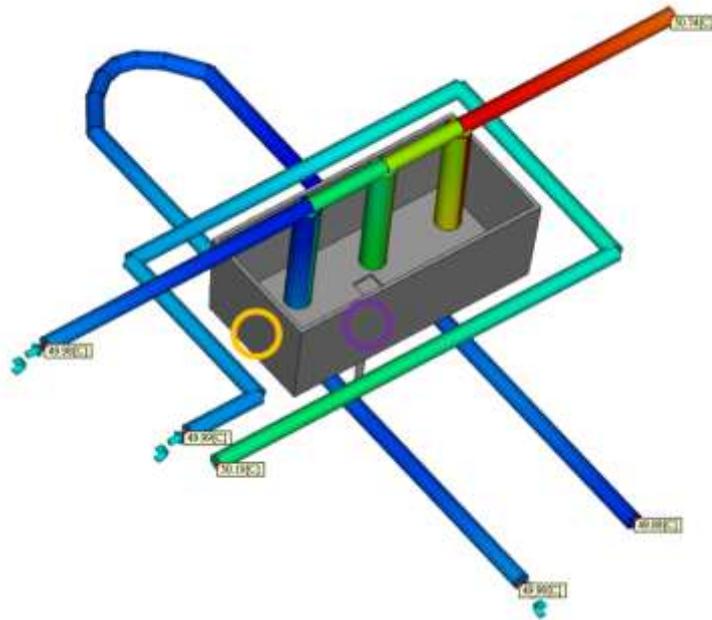


圖 12 產品水路設計圖

如表 5 所示，為監測側壁變形的系統參數，依據系統參數及位置，最後決定感測器的種類及數量。

表 5 依系統參數決定感測器種類

品質	系統參數			感測器種類	總和
翹曲	開模瞬間公母模溫度差	開模瞬間公母模平均溫度	公母模溫度曲線下平均面積差	溫度感測器*2(公、母模各一支)	溫度感測器*2

4. 結論

1. 以盒形產品的為例，針對側壁變形藉由模流分析技術挑選最適合監測品質的物理量及最佳監測位置，研究結果顯示，造成盒形產品側壁變形的主要原因，包括:(1)公母模側冷卻差異造成盒形產品取出時，內外側溫度差異甚大，(2)產品取出時溫度過高，塑料剛性不夠，
2. 針對模具溫度曲線，進行曲線特徵化及數據化處理，由開模瞬間公母模溫度差及開模瞬間公母模平均溫度判斷產品取出瞬間公母模的冷卻差異及公母模的絕對溫度，再利用公母模溫度曲線下平均面積差可判斷完整射出成型過程公母模的冷卻差異程度。

5. 感謝詞

特別感謝以下單位：合軒科技股份有限公司黃偉耕經理對於感測器規格評估及安裝的協助；南臺科技大學王智昊教授對於機台訊號擷取、系統架構及程式撰寫的相關協助。

5. 參考文獻

- [1] J.-Y. Chen, K.-J. Yang, and M.-S. Huang, "Online quality monitoring of molten resin in injection molding," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 122, pp. 681-693, 2018.
- [2] B. P.K, M. Khan, and S. Harbinder, "Recent methods for optimization of plastic injection molding process—a retrospective and literature review," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, 2010.
- [3] 陳俊翰, "射出成形智能模型建構與參數優化及修正應用之研究," 2020.
- [4] X. Zhou, Y. Zhang, T. Mao, and H. Zhou, "Monitoring and dynamic control of quality stability for injection molding process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 249, pp. 358-366, 2017.
- [5] J. C. Chen, G. Guo, and W.-N. Wang, "Artificial neural network-based online defect detection system with in-mold temperature and pressure sensors for high precision injection molding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, no. 7, pp. 2023-2033, 2020.
- [6] J. Kovacs and B. Sikló, "Investigation of cooling effect at corners in injection molding," *International Communications in Heat and Mass Transfer - INT COMMUN HEAT MASS TRANS*, vol. 38, pp. 1330-1334, 2011.
- [7] P. S. F. F. Alves, "Shrinkage and warpage behaviour on injection moulding parts," 2008.
- [8] 和. 山田, 榮. 西郷, and 宏. 田中, "射出成形品のコーナ一部内そり変形予測," *成形加工*, vol. 14, no. 8, pp. 496-499, 2002.
- [9] 黃嫻璇, "綠色招募活動對組織人才吸引力之影響：以個人組織配適知覺為中介變數與個人環保態度為干擾變數," 企業管理學系, 東海大學, 2018.