

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 氣體輔助射出成型製程中氣壓系統之強健控制研究

計畫類別：√ 個別型計畫      整合型計畫  
計畫編號：NSC 89 - 2218 - E - 164 - 003 -  
執行期間：89 年 12 月 01 日至 90 年 07 月 31 日

計畫主持人：趙時勉

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：修平技術學院電機系

中 華 民 國 90 年 10 月 20 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 氣體輔助射出成型製程中氣壓系統之強健控制研究

計畫編號：NSC 89-2218-E-164-003-

執行期限：89年12月01日至90年07月31日

主持人：趙時勉

執行機構及單位名稱：修平技術學院電機系

### 一、中文摘要

新近發展的氣體輔助射出成型(又稱中空射出成型)是一種革新性的射出成型技術。藉著這些氣體的輔助可以將壓力導至遠離澆口的模穴處，來幫助熔融塑膠的成型，因此對射出成品品質有相當關鍵性的良好影響。雖然氣體輔助射出成型有許多優點，但新的製程也引進了新的製程參數，使得成型製程更複雜、困難。

以現今氣體輔助射出成型的製程而言，為了達到最佳的氣體射入口之供給壓力或是模穴內的氣體壓力發展與分佈，以達到成型產品品質的設定規範，大都是以反覆測試及修正誤差來完成及維持這些重要的製程參數。對於因各種不同原因所造成的偏異，也僅能隨情況加以重覆而繁瑣的調整。

因此，本計劃以參數模式為主的強健性(Robust)控制理論為基礎，設計一不受動態模式準確程度影響的閉回路控制系統，並經由一系列的實驗來加以驗證。除可大幅度的降低在求得動態模式的工作上與後續的調整。並可簡化產業界發展成為商用機台的複雜程度。

**關鍵詞：**氣體輔助射出成型、強健性控制理論

### Abstract

The gas-assisted injection molding (GAIM) process, being an innovative injection molding process, has good gas pressure transmitting characteristics in the melt that can assist the melt fill, pack and

cooling in the mold cavity. This can substantially improve the quality of the products. Despite the advantages associated with the process, molding window and process control becomes more critical and difficult since additional processing parameters are involved.

For most recent GAIM process, to achieve optimal inlet gas pressure or the gas pressure development in the melt to obtain the best products' specification. The gas pressure regulation mostly tuned by repeated changing operating conditions, which relies upon a trial and error procedure, to accommodate and maintain the processing parameters.

Therefore, this project developed a parametric model base robust control system to minimized the modeling effort and simplify the controller tuning and yet still can achieve the desired performance under the variations of the process.

**Keywords:** Gas Assisted Injection Molding , Robust Control,

### 二、緣由與目的

在所有對於高分子材料的加工製程中，射出成型製程，因其生產成本低、產品質量輕與可製造形狀複雜產品的特點，而成為最重要的加工技術之一。雖然此加工法的應用已相當的長久和廣泛，但是影響成型品其品質與精度的最主要因素如收縮、凹陷與翹曲變形等現象，直至目前為止在成形品上還是經常發生的問題。如何妥善的解決上述的問題，是最近幾年研究的大方向。氣體輔助射出成型製程[1]，便

在這種需求下成為一主要且成功的解決方法。

氣體輔助射出成型雖然有許多優點，但新的製程也引進了新的製程參數，使得成型製程更複雜、困難。以現今氣體輔助射出成型的製程而言，氣體壓力的控制應該是最重要的。無論是射入口之供給壓力或是模穴內的壓力發展與分佈均是氣體輔助射出成型產品品質的決定性製程參數。因此，氣壓系統的設計與氣壓壓力的控制能否達到製程參數規格的需求，應是氣體輔助射出成型製程是否成功的問題所在。不幸的是，氣體為一高壓縮性質的流體，再加上氣體在熔融塑膠內二相流的複雜界面，要能達到製程參數規格的需求，相當的困難。

如同傳統射出成型的作法[2]，應用在氣體輔助射出成型機氣體壓力調控系統的動態特性也可以經由流體運動的基本定理與方程式[3]描述出。但描述氣體壓力動態特性的數學方程式過於複雜而無法應用於控制系統的設計。因此藉由在某些操作點所做的線性化假設，可以簡化為低階且線性的動態方程式，再經由簡單的步階測試與曲線擬合的方法獲得方程式中相關參數的數值來設計控制器。此方式雖然容易但描述系統的動態的能力則是較差。控制系統的性能會因此而有相當程度的影響。

因此，設計一不受動態模式準確程度影響的閉回路控制系統，應可大幅度的降低在求得動態模式的工作上與後續控制器的調整。基於此種需求，本計劃發展一以強健控制理論為基礎的氣壓控制系統。

為了驗證所提出的方法，我們以實驗來加以驗證。鑑於製程之複雜性，除了延用即有之射出機外，也建構一氣體輔助射出機，如圖一。對於數據的讀取、記錄與運算，採用軟體 Labview 及相關所屬的 I/O 界面卡來完成。至於實驗所使用之模具將分為兩種：一為單純之圓筒型模具，以用來驗證氣體壓力的動態模式與閉迴路控制系統；另一則為迴紋針 (spiral) 型狀之模具，以用來量測射入氣體壓力與模穴內融溶塑膠的壓力變化。

### 三、理論基礎

#### (一) 動態模式

近些年來，以閉迴路步階響應曲線及曲線擬合 (curve fitting) 的方法來進行二階或一階動態模式的參數估測，已有相當多的研究成果。其主要是經由改變閉迴路系統中之比例控制器的增益值，可使閉迴路系統的輸出響應曲線產生不同程度的振盪。由比對標準的二階或一階步階響應曲線的某些特定點，即可求得所須之動態方程式參數值。在這許多的方法中，本文採用 G.P. Rangaiah 及 P.R. Krishnaswamy 的方法，其步驟可參考[4]。在實際的應用上，對雜訊的影響應加以考慮。另外，由於輸入訊號為單純的步階訊號，此方法對於時變的系統並不能有效的反映隨時間變化的參數。然而，對時不變且具有固定參數的系統，在慎選操作點的前提下，此方法有一定的準確程度。

#### (二) 以 LQR 設計之 PID 控制器

假設系統可以下列狀態方程式表示

$$\dot{x}(t) = \underline{A}x(t) + \underline{B}u(t) \quad (1)$$

$$z(t) = \underline{C}x(t)$$

式中之  $x$  為狀態向量 ( $n$  維實數向量)， $u$  為控制向量 ( $r$  維實數向量)， $\underline{A}$  為  $n \times n$  常數矩陣， $\underline{B}$  為  $n \times r$  常數矩陣。 $z$  為輸出向量 ( $m$  維實數向量)， $\underline{C}$  為  $m \times n$  常數矩陣。若假設步階設定輸入訊號為  $z_o$  ( $m$  維實數向量)，並定義誤差函數

$$e(t) = z_o - z(t) \quad (2)$$

對追蹤的問題而論，其控制的目的是使

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (3)$$

若系統為狀態可控且可測 (controllable and observable)，由 Bryson and Ho [5]，下列等式左側矩陣必然存在並令其等於  $S$

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

若定義線性二次性能指標函數為

$$J = \int_0^{\infty} (e'(t)Q_1 e(t) + [u_o - u(t)]' Q_2 [u_o - u(t)] + \dot{w}'(t)R\dot{w}(t)) dt \quad (5)$$

其中之  $u_o$  定義為系統在穩態時的控制輸入

並可證明

$$u_o = S_{22}z_o \quad (6)$$

式(11)中之  $Q_1$  為一恒正 (positive definite) 之實數對稱矩陣,  $Q_2$  為半恒正 (semi-positive definite) 之實數對稱矩陣,  $R$  則為一恒正之實數對稱矩陣。則最佳之控制 (  $J$  有最小值時 ) 為

$$u(t) = Mx(t) + L \int_0^t e(t) dt + Nx(t) \quad (7)$$

$L$ ,  $M$  及  $N$  均為常數矩陣, 並可以式 (9) 至 (11) 求得。而  $P$  則由下列的 Riccati 方程式獲得

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A' & 0 \\ B' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C'Q_1C & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{bmatrix} R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

$$M = S_{22} + P_{22}^{-1}P_{12}S_{12} \quad (9)$$

$$L = R^{-1}P_{12}'S_{12} + R^{-1}P_{22}'S_{22} \quad (10)$$

$$N = -R^{-1}P_{12}'S_{11} - R^{-1}P_{22}'S_{21} + S_{22}C + P_{22}^{-1}P_{12}'S_{12}C \quad (11)$$

因此方程式 (1) 在選取適當的狀態變數下 (如選取追蹤誤差為其狀態變數) 可將最佳之控制視之為比例、積分與微分控制器。而式 (9) 至 (11) 即可提供各項增益值的調節法則。

### (三) H 的設計理論

如圖二所示, H 控制理論就是要找到一控制器  $K(s)$  使下列不等式成立

$$\|T_{zw}(P, K)\|_{\infty} \leq \chi \quad (12)$$

其中

$$z = T_{zw}(P, K)w \quad (13)$$

$$T_{zw}(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (14)$$

式中之  $W_1, W_2$ , 和  $W_3$ , 為待定的靈敏度函數的權重函數、控制能量函數的權重函數與互補靈敏度函數的權重函數,  $z$  為輸出,  $w$  為輸入,  $P$  為擴增系統矩陣,  $K$  為控制器。要解決這個問題, 所需要的相關理論, Glover and Doyle [6] 已提供相當完整的解決方法, 而 Matlab 也有相對應的程式可供應用。因此, H 控制器的設計重點則在選擇適當的權重函數。為保持良好的追蹤性能

及維持系統於受到擾動時仍能保持穩定, 在選擇時  $W_3$  基本上為不確定程度的最大上限。一般而言, 愈高頻則不確定因素愈高, 所以  $W_3$  為嚴格遞增函數, 採高通函數。  $W_1$  為輸入參考訊號的加權整形函數, 一般為低通函數型式並盡量使穩態誤差為零。

### 四、模擬與實驗結果

依實驗所量測之閉迴路氣體射入壓力的響應曲線圖。及前述所討論的方法及步驟, 可得開迴路二階氣體壓力動態模式 (15), 各參數估測的結果列於表 1。

$$G_{op}(s) = \frac{P_f(s)}{P_e(s)} = \frac{k_o e^{-ds}}{(t_a s + 1)(t_r s + 1)} \quad (15)$$

式中之  $P_e = i_c \times 6.25 \times k_2$  psi. 為設定之壓力,  $k_o$  為系統開回路之增益值。  $P_f$ , 調節閥出口之壓力,  $t_a$ , ER-3000 的充壓時間常數,  $t_r$ , 壓力調節閥的充壓時間常數。

由數值模擬的結果比對於開迴路實驗的結果, 如圖三。在不同操作條件下的差異可達到平均值的百分之十左右。

圖四為系統控制方塊圖, 其中之 num(s) 及 den(s) 分別為開迴路二階氣體壓力動態轉移函數的分子、分母項。控制器則以狀態方程式表示。依前所述之方法, LQR 的設計以式 (15) 及取各參數值的平均值為其常態 (nominal) 數學模式。而 H 控制器的設計仍以式 (15) 及取各參數值的平均值為其常態 (nominal) 數學模式。圖五為選擇  $W_3$  時, 由分析所得不確定程度的結果。基本  $W_3$  上為其最大值的包絡線。因此依前之原則

$$W_1^{-1} = \frac{5(1 + s/100)}{(1 + s/5)} \quad (16)$$

$$W_3^{-1} = \chi \frac{0.0012(1 + s/0.01)}{(1 + s/1000)} \quad (17)$$

$W_1$  及  $W_3$  的頻率響應如圖六。以此引入 Matlab 中的相關程式即可得到 H 控制器。

將上述結果分別代入圖四中, 對步階輸入的時間響應如圖七。可以看出 H 對

量測雜訊的抑制較佳。但差異並不嚴重。事實上, LQR 為  $\|T_{zw}(P, K)\|_2 < \chi$  的結果, 對模式的不確定程度與外界干擾同樣具有強健的控制能力。因此, 在實際的應用上選擇具有簡單 PID 架構的 LQR 控制器。實驗的結果如圖八及圖九所示, 前者為單純閉迴路氣壓系統壓力的時間響應而後者為模穴內溶膠壓力與氣壓壓力的時間響應。

## 五、結論

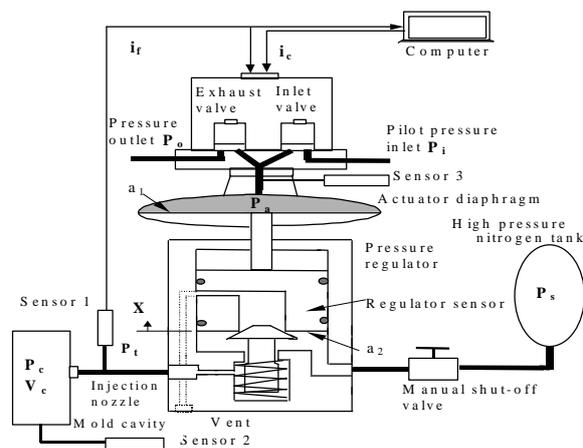
經由分析與實驗的結果, 我們提出了一二階線性動態方程式來描述氣體的射入壓力動態特性。此一二階線性動態方程式為了簡化複雜氣壓系統的控制, 乃是經由簡單的曲線擬合的方法求得, 對系統動態的描述依操作條件有相當大的變化。因此我們設計了一不受動態模式準確程度影響且具有抑制量測干擾的閉回路控制系统, 且控制器具有比例, 積分與微分控制器的架構, 除可大幅度的降低在求得動態模式的工作上與後續的控制器增益調整外, 也可減低更換舊控制器的需求。

## 五、參考文獻

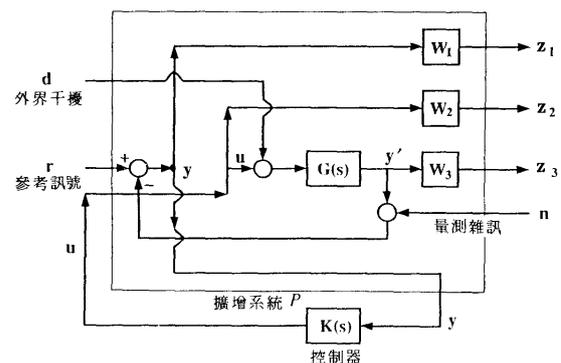
- [1] K. C. Rush, *Gas-assisted Injection Molding - A New Technology Is Commercialized*, *Plastics Engineers*, July, 35-38 (1989).
- [2] F. W. Paul and A. Shankar, *A Mathematical Model For The Evaluation Of Injection Molding Machine Control*, *ASME Trans. J. of Dynamic, System, Measurement and Control*, 104, March, 86-92 (1982).
- [3] S. M. Chao, S. M. Wang and S. C. Chen, *Dynamic modeling of gas pressure control system for gas-assisted injection molding process*, *Polymer Eng. And Science*, Vol. 40, No. 3, pp. 583-594, 2000.
- [4] P. R. Krishnaswamy and G. P. Rangaiah, *Closed-Loop Identification Of Second Order Dead Time Process Models*, *Trans IchemE*, 74, Part A, January, 30-34 (1996).
- [5] A. E. Bryson, Jr. and Yu-Chi Ho,

*Applied Optimal Control : Optimization, Estimation and Control*, Hemisphere Publishing Corporation, 1975.

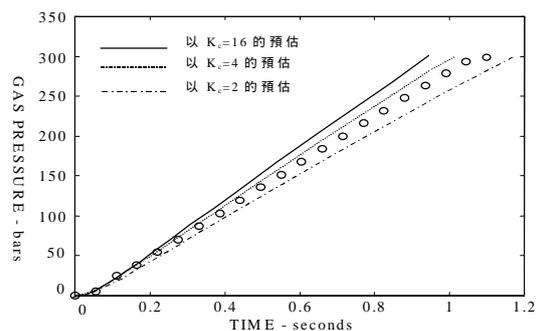
- [6] K. Glover and J. C. Doyle, *State-space formulæ for all stabilizing controls that satisfy an H -norm bound and relations to risk sensitivity*, *System and control letters*, Nov. pp. 167-172, 1988.



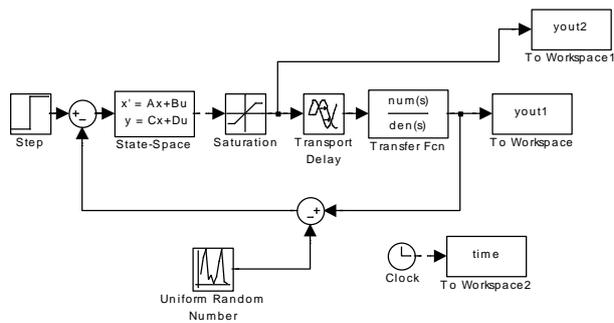
圖一 氣體輔助設出機剖面示意圖



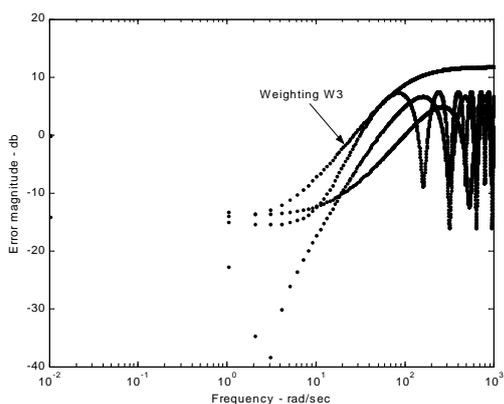
圖二 控制迴路架構示意圖



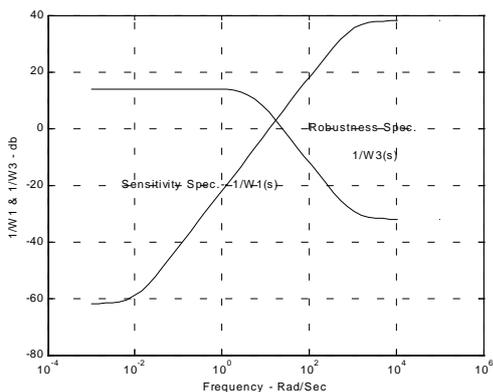
圖三 開迴路動態模式時間響應



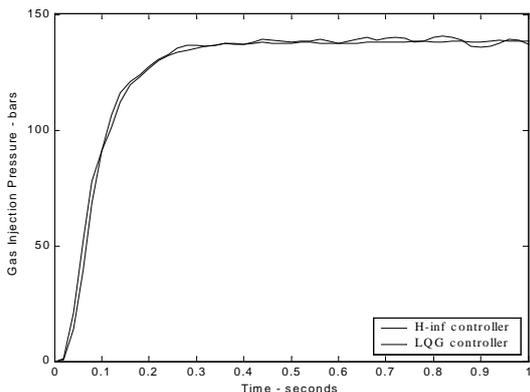
圖四控制系統方塊圖



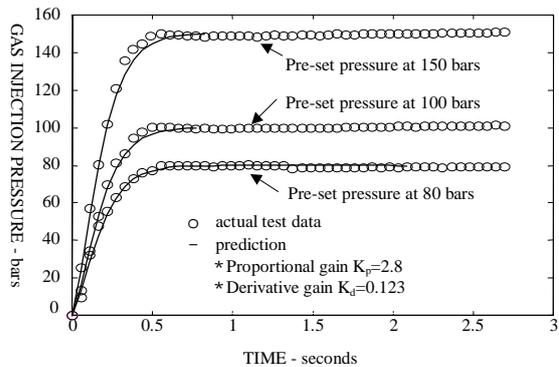
圖五系統動態模式的不確定頻率響應



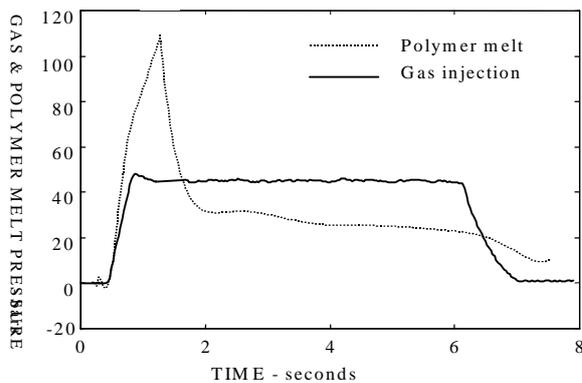
圖六  $W_3$  與  $W_1$  的頻率響應



圖七 LQR 及 H 控制器的時間響應



圖八氣體射入壓力步階響應-PID 閉回路控制



圖九氣體射入壓力與模穴內溶膠壓力反應—設定條件，充氣時間 6 秒

表一以二階閉回路步階響應估測氣體壓力動態模式參數之結果

參數 條件	t	a	$K_0$	d
$K_c=2$	0.0428	11.5	24.46	0.014
$K_c=4$	0.053	10.7	20.85	0.015
$K_c=16$	0.052	12.28	22.55	0.02