

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

全電式射出成型機的動態模式與 DSP 控制器之發展研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-164-003-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：修平技術學院電機工程系

計畫主持人：趙時勉

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 14 日

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 全電式射出成型機的動態模式與 DSP 控制器之發展研究

計畫類別： 個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC 92 - 2212 - E - 164 - 003 -

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 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 93 年 10 月 11 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 全電式射出成型機的動態模式與 DSP 控制器之發展研究

計畫編號：NSC 92 - 2212 - E - 164 - 003 -

執行期限：92 年 08 月 01 日至 93 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

本計畫研究之目標為：(1) 發展全電氣式射出機伺服馬達驅動之射出系統的速度與位置動態模式及其控制系統(2) 以 TMS320LF2407 EVM 研製一全數位控制器，使其成為一個獨立系統，除了能以即時的方式執行所設計的控制法則應用於伺服馬達驅動之射出系統的速度與位置外，並期望能完成一低成本、具修改彈性的多用途控制器，以利於後續之發展。

為驗證系統之可行性，除了以電腦軟體模擬分析驗證外，並將製作一套雛型機設備來測試整體系統之性能。

**關鍵詞：**全電式射出成型機、單晶片控制器，交流同步伺服馬達

### Abstract

The goals of this project are focus on: (1) developing a linear position and velocity dynamic model of the Electric drive IMM and its associated control system design and (2) utilizing TMS320F2407 EVM and necessary peripheral electronic circuits to implement a flexible, maintainable and low cost controller for the designed Electric drive IMM control system. To verify the feasibility of the proposed study, simulation and experiment will be conducted.

**Keywords:** Electric Drive Injection Molding Machine、DSP controller, AC Servo Motor

### 二、緣由與目的

近年來，由於環保意識抬頭，促使塑膠射出成型機的發展由傳統油壓式漸漸的

向省能源化之全電式射出成型機種轉移。異於傳統油壓式射出機所使用的油壓致動器或油壓馬達，所謂全電式射出成型機是指射出、計量、夾模、頂出、調模、射座進、退等系統全部以電氣伺服馬達或感應馬達來驅動的射出成型機。全電式射出機之主要致動元件是交流同步伺服馬達，並具有將馬達旋轉運動轉換成直線運動的傳動機構，包括有時規皮帶，滾珠導螺桿，齒輪，齒條，區柄一滑塊等元件之組合，如圖一。而伺服馬達可說是全電氣式射出機的心臟，除了提供動力外，如配合回授元件及控制器，可對射出螺桿的位置，速度或模穴壓力作閉迴路的控制。目前國內外生產全電式射出機的廠商有相當成功的進展，並各有其專利。但在學術上的研究，射出成型機的動態模式與控制系統研究文獻中，所知的幾乎都在油壓驅動的領域中[1-5]，全電氣式射出機除了少數製造廠商的技術報告與專利說明外，與傳統油壓式射出機比較則相當的缺乏。雖然交流同步伺服馬達的動態模式與其控制之學術研究相當的豐富，但與射出成型製程中各項製程參數(如溶膠壓力、射出速度)之關係，則相當的匱乏。為了確實瞭解與提供進一步發展全電氣式射出機之重要知識，實有必要加以深入探討。因此，本計畫將先推導交流同步伺服馬達驅動之射出系統的線性化動態模式(包含時規皮帶，滾珠導螺桿，齒輪等元件)，以此一參考模式進行閉迴路之系統判別已確定動態模式之可靠性後，並依此進行控制系統的設計，透過閉迴路控制，對射出成形品的重量變化量，頻率響應精度，精確而多段的射出速度設定，防止塑膠在射出中途凝固、過壓、溢料、產生殘留應力，並縮短生產時間等

之要求有一完整之研究。為了完成上述構思的驗證，我們將先建立一完整的分析方法後，再透過分析的結果建立一雛型機並研製一以 TI 生產之 TMS320LF2407 控制晶片，來實現交流同步伺服馬達驅動之射出控制系統。此控制晶片將可以提供一組高性能全數位交流馬達之驅動控制，並且能構成完整之射出伺服控制系統。由於微處理機之進步快速，全數位化交流伺服馬達驅動系統成為一種發展趨勢[6-12]，使得交流馬達的磁場導向控制、向量控制、及電流迴路、速度迴路、位置迴路等控制器之計算皆能在微處理機內以軟體實現。與類比系統比較，以微處理機設計之數位控制器除具有控制法則調整彈性、無放大器偏移之困擾、成本低及體積小之優點外，利用微處理機可以執行複雜之計算與可結合各種演算法則如模式參考 ( Model Reference )、自調式 ( Self-Tuning )、最佳控制 ( Optimal Control )、H- 等控制理論所發展出的控制法則，因此相當適合發展為高速及高性能之控制器並應用在具有非線性效應的伺服馬達射出伺服控制系統。

因此本計畫研究之目標將為：

1. 發展全電氣式射出機伺服馬達驅動之射出系統的速度與位置動態模式及其控制系統
2. 以 TMS320LF2407 EVM 研製一全數位控制器，使其成為一個獨立系統，除了能以即時的方式執行所設計的控制法則應用於伺服馬達驅動之射出系統的速度與位置外，並期望能完成一低成本、具修改彈性的多用途控制器，以利於後續之發展。

為驗證系統之可行性，除了以電腦軟體模擬分析驗證外，並將製作一套雛型機設備來測試整體系統之性能。因此在程式發展上，輸入與輸出的界面程式將以 VisSimTI C2000 RAPID PROTOTYPING [13] 程式撰寫後，經由 TI 所提供的編譯程式編譯後產生一可在 DSP 晶片執行的執行檔。此一執行檔即可經由 TMS320LF2407 EVM，提供上述高性能全數位交流馬達之驅動控制功能，以構成全電氣式射出機伺服馬達驅動之射出系統。

### 三、研究方法、進行步驟

本研究計畫的目的除了針對全電氣式射出成型製程中最重要的製程參數：溶膠射出螺桿之速度與位置進行動態模式及其控制的研究外，也將以 TMS320LF2407 EVM 研製一個控制晶片並結合週邊電路，來實現所設計之伺服馬達驅動之射出系統的速度與位置之控制系統，如圖二。有關本計畫研究的方法與步驟如下，流程圖如圖三，並分為模擬與實驗兩部份。在實驗硬體組裝之前，整合系統將先以模擬的方式完成。

#### 一、模擬部份

##### 1. 動態轉移函數

首先，將針對全電氣式射出機伺服馬達驅動之射出系統建立雛型架構，並依規範需求選擇元件後，先建立適當之數學模式並利用 Matlab/Simulink 此一簡易有效的電腦模擬工具來進行系統動靜態模擬。模擬的方法為先以 Matlab/Simulink 將所建立雛型架構的伺服馬達驅動之射出系統部分依據已知元件設計及性能參數建立線性動態模式，並在不同的操作點，進行數值模擬。這些結果將用來進行位置迴路之動態模式的鑑別。一二階的參數模式將被選擇來近似輸入位置命令與輸出轉角之動態關係，本研究將採用 G.P. Rangaiah 及 P.R. Krishnaswamy[14] 的曲線擬合 (curve fitting) 的方法來進行模式的參數估測。在計算時，將以狀態變數方程式來實現以利後續控制法則的推導。模擬的結果及方法評估後將作為實測中模式判別的主要依據。AC 伺服馬達的先期性能測試，將提供實測的數據以確定掌握各需求線性模式內之參數值。伺服系統的設計將分成位置迴路、速度迴路及電流迴路來進行分析。其中控制法則則使用參數系統模式方法並以線性二次性能指標為理論基礎來進行控制器的評估與設計[15]。在完成各迴路的設計後，整體系統之模擬將考慮負載所產生的影響。其中之負載以螺桿移動速度變化的線性函數來實現。在整體系統模擬分析的結果滿足設計之需求後，我們將依此建立 TI C2000 RAPID PROTOTYPING 之程式，並在進入硬體實測前，先經由 XDS510PP

EMULATOR 進行 DSP IN THE LOOP 的模擬與除錯。

## 2. 控制器的設計

在本研究中，將使用參數系統模式方法並以線性二次性能指標為理論基礎來進行控制器的評估與設計。相較於以置極點方法（此方法乃依經驗將系統特性函數極點置於所定之位置），線性二次性能指標方法經由極小化其設定誤差與控制輸入之二次性能指標方程式，不僅能獲得理想的響應性能，也自動地使系統具有穩定的響應性能。

## 3. 系統整合

在完成個別項目之分析後，其結果將可先由 Simulink 來進行整體控制系統之模擬，其結果在符合規範需求時，將進一步經由 VISSIM 之 TI C2000 RAPID PROTOTYPING 進行 Hardware in the loop simulation，以驗證原先所訂定的性能需求。

## 二、實驗部份

為了實際驗證所建構之系統，本計畫建立一實驗雛形機來驗證模擬設計之可行性。硬體之組成如圖一，其中主要之元件包含：（1）一組射出系統之機構組件：此機構有由一具永磁式交流同步伺服馬達帶動滾珠導螺桿作線性運動，直線運動最大行程為 300mm，最大速度為 300mm/sec。交流同步馬達功率為 2.2KW，具 Hall Sensor 感測磁極位置及增量式光學編碼器感測轉子或磁極位置。（2）一組換流器(Inverter)及其驅動電路（3）DSP 伺服運動控制器：此控制器為整個系統之核心單元，主要是一個由 Spectrum Digital 公司生產之 TMS320LF2407 DSP 晶片及其週邊電路所組成的 TMS320LF2407 評估板。

在本計畫中，我們將利用此評估電路板構建如圖二中之伺服控制器。構建完成之伺服控制器將可先經由 JTAG 與模擬器執行除錯再載入評估電路板來控制交流伺服馬達。其中，交流伺服馬達位置解碼與座標轉換、電流迴路、速度迴路、位置迴路、控制法則、位置命令等之計算，全部在 DSP 晶片內實現。（4）一台個人電腦：

作為整個系統人機介面監控之發展使用。除了可透過 JTAG 或 RS-232 傳輸線與 TMS320LF2407 評估板通訊以進行對伺服機構之運動監視與控制，亦可作為控制器設計、系統模擬分析、DSP 軟體撰寫、程式上載/下載至 TMS320LF2407 評估板等之功能使用。

## 四、結論

### 一、伺服系統之數學模式

永磁式交流同步馬達之數學模式 [16]，由三相圓筒型永磁式交流同步馬達之等效電路方程式，經由適當之矩陣轉換，電流控制，並採圖二所示之磁場導向控制方式，與下列之負載轉矩方程式，則交流同步馬達之速度迴路可表示如圖四之方塊圖，此方塊圖可作為速度迴路控制器設計之依據。基本上，當選擇比例(Proportional)速度迴路控制器時，一二階的閉迴路參數模式（轉移函數）可近似輸入電流命令與輸出轉角速度之動態關係，式(1)

$$G(s) = \frac{\omega_m(s)}{i_q^*(s)} = \frac{K_m}{(\tau_e s + 1)(\tau_m s + 1)} \quad (1)$$

式中之  $\omega_m$  為馬達之機械轉速， $i_q^*$  為輸入電流命令， $K_m$  為等效增益值， $\tau_e$  為等效電器時間常數， $\tau_m$  為等效機械時間常數。

經由 AC 伺服馬達的先期性能測試所提供實測的數據，線性模式內之各參數值可由曲線擬合(curve fitting)的方法來進行模式的參數估測。

### 二、控制器的分析

在追蹤的問題上，可量測的系統變數多為輸出變數而非狀態變數。因此，線性二次性能指標函數應為

$$J = \int_0^{\infty} (y'Qy + u'Ru)dt \quad (2)$$

其中

$$y(t) = Cx(t) \quad (3)$$

式中之  $y$  為輸出向量（ $m$  維實數向量）， $C$  為  $m \times n$  常數矩陣。 $x$  為狀態向量（ $n$  維實數向量），假設步階設定輸入訊號為  $z_0$ （ $m$  維實數向量），並定義誤差函數

$$e(t) = z_0 - y(t) \quad (4)$$

對追蹤的問題而論，其控制的目的是使

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (5)$$

若受控系統為可控制且輸出可量測，則下列矩陣必然存在

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1} \equiv \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

則比例、積分與微分控制器可改寫為

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \dot{x}(t) \quad (7)$$

因此定義線性二次性能指標函數

$$J = \int_0^{\infty} \left( e'(t) Q_1 e(t) + [u_o - u(t)]' Q_2 [u_o - u(t)] + \dot{u}'(t) R \dot{u}(t) \right) dt \quad (8)$$

其中之  $u_o$  定義為系統在穩態時的控制輸入並可證明等於

$$u_o = S_{22} z_o \quad (9)$$

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。 $K_p$ ， $K_i$  及  $K_d$  均為常數矩陣。由前述之結論，相對的 Riccati 方程式為

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A' & 0 \\ B' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C' Q_1 C & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

一旦矩陣  $P$  由式(10)計算出， $K_p$ ， $K_i$  及  $K_d$  等常數矩陣即可意以下列式子求得

$$K_p = S_{22} + P_{22}^{-1} P_{12} S_{12} \quad (11)$$

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

$$K_d = -R^{-1} P_{12}' S_{11} - R^{-1} P_{22} S_{21} + S_{22} C + P_{22}^{-1} P_{12} S_{12} C \quad (13)$$

### 三、結論與成果

在實驗方面，對於數據的韻取、記錄與運算，除了使用了高速的個人微電腦外，並採用以多樣性、易於修改且容易編寫的程式語言—VisSim/TI Rapid prototyper 5.0f，此一程式是由美國 Vissim 公司所發展出來的一套應用於 TI TMS320LF2407

DSP 的發展程式軟體。圖五為原型機測試結果的響應曲線圖。

由測試的結果，在閉迴路位置與速度的控制上，均能達到原計預期的要求，不過在模式的判別上，也在預期中會有比較大的誤差，雖然可經由微小的調整來修正，但並非可行之途，在進一步的研究中，以較精確的遞迴最小平方誤差的判別方法，會有較佳的結果，另外在負載的影響上，因硬體建構的限制，較複雜的負載變化並未考慮在測試中。

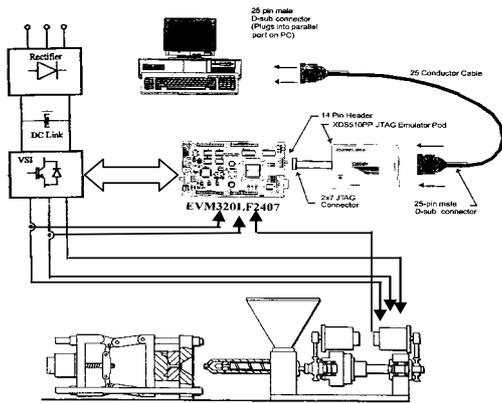
但由於所設計之測試系統已擺脫固定型態之控制器結構，而可以針對製程特性的要求，僅經由軟體程式的編寫與更改控制法則的應用來完成，對未來的測試應有較大的修改空間。

### 六、參考文獻

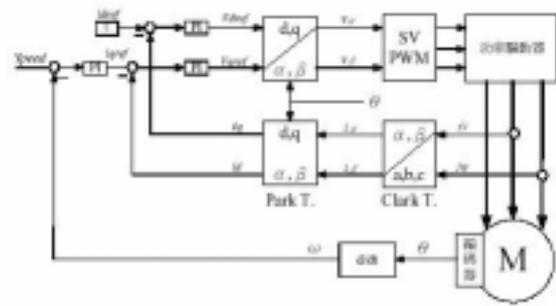
1. F.W. Paul and A. Shankar, A Mathematical Model For The Evaluation Of Injection Molding Machine Control, ASME Trans. J. of Dynamic, System, Measurement and Control, 104, March, 86-92 (1982)
2. M. R. Kamal, W. I. Patterson, D. Abu Fara and H. Haber, A Study In Injection Molding Dynamics, Polymer Engineering And Science, 24, June, 686 (1984).
3. A. R. Agrawal, I. O. Pandelidis and M. Pecht, Injection Molding Process Control — A Review, Polymer Engineering And Science, 27, Mid-October, 1345 (1987).
4. D. Zheng, A. Alleyne and H. Havlicsek, Control-Oriented Modeling of an Injection Molding Machine Including the Fill-To-Pack Transition, Proceeding of the ASME, 1-8, 2000
5. C. P. Chiu, M. C. Shih and J. H. Wei, Adaptive Model-Following Control Of The Mold Filling Process In An Injection Molding Machine, Polymer Engineering And Science, 31, August, 1123-1129 (1991).
6. T.S.Kuo and Y.Y. Tzou, "Implementation and analysis of DSP assembly language for space vector pulse width modulation," Proceedings of the 17th Symposium on Electrical Power Engineering, pp304-308, 1996
7. D.S. Meshkat, "Using DSPs in AC induction motor drives," Control Engineering,

pp54-56, Feb, 1988.

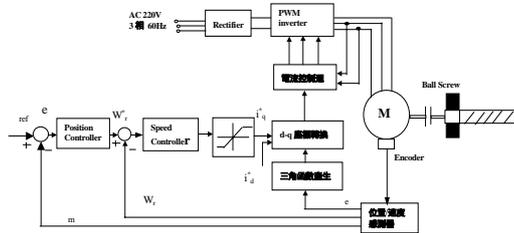
8. Sensorless control with Kalman filter on TMS320 fixed-point DSP, Texas Instruments application report BPRA057, TI Europe, July 1997.
9. K.M. Chung, Astro Wu and Tresna Hidajat, Using TMS320C24x DSP controller for optimal digital control, Texas Instruments application report SPRA295, Jan. 1998
10. Irfan Ahmed, Implementation of PID and deadbeat controller with the TMS320 family, Texas Instruments application report SPRA 083, 1997.
11. TMS320C24X DSP Controllers Reference Set , Vol. 1&2, Handbook of Texas Instruments,(1999).
12. TMS320LF2407 EVM Technical Reference , Spectrum Digital Inc., Dec. 2000,
13. VISSIM/TI C2000 Rapid Prototyper User ' s Guide Version 4.5, Visual Solutions, Inc.
14. 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).
15. K. J. Astrom and B. Wittenmark, Computer Controlled Systems, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, Inc. (1984).
16. B.K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, Inc., 1986.



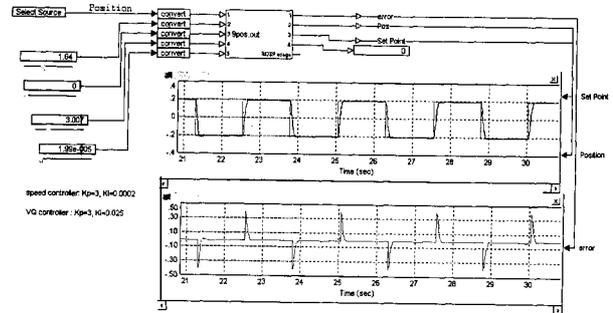
圖一 全電式射出成型機示意圖



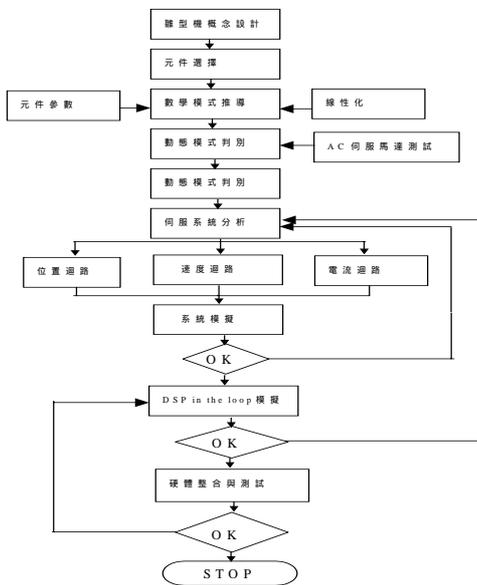
圖四 閉迴路控制示意圖



圖二 全數位交流伺服馬達控制單晶片架構示意圖



圖五 閉迴路位置控制響應圖



圖三 研究方法與步驟流程示意圖