

—基本及高級控制應用—

電腦程序控制

Elements of

Computer

葉思武編譯

Process Control

With Advanced
Control Applications

PRADEEP B. DESHPANDE

RAYMOND H. ASH

電腦程序控制

—基本及高級控制應用—

Elements of
Computer
Process Control

With Advanced
Control Applications

PRADEEP B. DESHPANDE
RAYMOND H. ASH

葉思武 編譯

復 文 書 局

電腦程序控制

著作權執照台內著字第 號

版權所有



翻印必究

中華民國七十四年八月初版發行

特價 160 元

著 作 者： PRADEEP B. DESHPANDE
RAYMOND H. ASH

編 譯 者： 葉 思 武

發 行 者： 吳 主 和

發 行 所： 復 文 書 局

地址：臺南市東門路421巷28號

門市：台南市林森路二段63號

電話：(06)2370003·2386937

郵政劃撥帳戶 0032104—6號

No.28. LANE421 DONG-MEN
ROAD TAINAN TAIWAN REPUBLIC
OF CHINA
TEL:(06)2370003·2386937

本書局經行政院新聞局核准登記發給
出版事業登記證局版台業字第0370號

序 言

本書是為有志於學習基本電腦程序控制者而寫，為能充分獲得益處，讀者須於線性控制理論有過初階課程。為了求得傳統控制器的諸調諧常數，讀者還須略悉解微分方程的拉氏轉換法，程序控制系統的方塊圖表示法，開路／閉路暫態響應，程序控制系統的穩定度以及頻率響應法（依據波德圖）。

把電腦應用在控制上有很多方法。有一法是用數位電腦代替傳統控制系統的類比控制器，利用數位電腦程式來執行控制器方程式；故至少在理論上，一個適當的電腦程式可以代替很多的類比控制器。這種控制方法稱為直接數位控制（direct digital control）。在本書中，主要是談到我們簡稱為電腦控制系統的直接數位控制系統其設計及完成。

數位電腦在控制上的第二種應用稱作監督控制。在這種應用裡，主電腦程式依據某些預定的運作策略，經常的計算和更新類比控制器的設定點，電腦硬體調整類比控制器的設定點以便將工場的運作維持在某一最佳準位上。另一種應用型態是電腦執行資訊功能。此種應用裡，電腦收集工場資料，處理之，儲存之，並將之與操作者和其他人員溝通；在這個例子裡，電腦無須對程式運作做直接的變動。

圖 1 所示為典型的電腦控制回路，當然這個回路很可能僅為工場中數百個這樣的回路之一。電腦藉一個稱作類比——數位轉換器的裝置將量測變數取樣，並與設定點比較而得到一個誤差量測，數位電腦程式則對這個誤差採取行動，其結果即為控制命令。控制命令藉一個

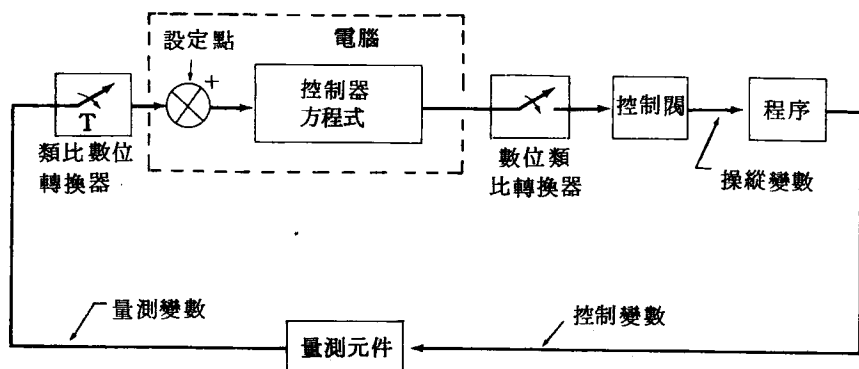


圖 1 典型電腦控制系統

稱作數位——類比轉換器的裝置將之轉換成連續的信號，而後饋入控制閥。這個策略反復進行以便將誤差降至可接受的準位。作為控制工程師，我們必須能夠設計、分析，以及完成這樣的電腦控制系統。

本書開始先以一章來回顧線性控制理論及其對傳統控制問題的應用，隨後各章則談及電腦控制回路的不同元件。電腦控制回路的分析需要有Z轉換的底子，本書稍前會向讀者介紹Z轉換及其於電腦控制系統研究上的用處。前十二章若能了解，那麼讀者將有能力設計和分析電腦控制系統，剩下的幾章則針對高等控制觀念的設計與應用。如果一個電腦控制能實現的話，那麼這些觀念不僅特別有用而且很能夠直截了當的完成。

作為一本教科書，本書中的材料足夠電腦程序控制一學期課程所需。電機工程系和機械系的老師們也可發現本書適合作為取樣控制理論的一個課程。在Louisville大學，本教材曾被用於化學、機械以及電機工程的課堂上，學生們的反應相當良好。

我們很感謝Procter and Gamble公司的支持以及Louisville大學化學及環境工程系主任，Charles A. Plank 教授對本書的策劃，也要特別感謝同一系上的高級秘書，Mary Gerstle女士，她

是那麼有耐性地一頁又一頁地打著滿是數學的教材。Darrel Chenoweth 教授提供一些 Z 轉換的問題而一些電腦程式則由研究生 R. Alan Schaefer, F. Joseph Schork, 及 P. C. Goptaratnam 所發展。我們也感謝 P. M. Christopher 教授對本書中部分教材的編輯意見。

Pradeep B. Deshpande
Raymond H. Ash

Louisville, Kentucky
Cincinnati, Ohio

目 錄

第一部份：基本電腦程序控制

第一章 傳統控制系統回顧	1
1.1 程序控制介紹	1
1.2 程序動態及數學模式	1
1.3 動態程序型式	5
(Types of Dynamic Processes)	
1.4 基本回饋控制	17
1.5 傳統控制系統穩定度	28
1.6 有問題的控制情況	30
第二章 電腦控制的硬體與軟體	33
2.1 傳統控制與電腦控制對比	33
2.2 電腦基本觀念	36
2.3 電腦系統硬體觀念	45
2.4 電腦系統軟體觀念	57
2.5 可配置數位系統與網路 (Configurable Digital Systems and Networks)	67
第三章 簡單回路的電腦控制	70
3.1 目前系統	70
3.2 轉換成電腦控制	74

第四章	程序取樣的數學式	79
第五章	Z 轉換	85
5.1	各種函數的 Z 轉換	86
5.2	Z 轉換的性質	89
5.3	反 Z 轉換	93
第六章	脈衝轉移函數	101
6.1	取樣器的複數級數表示法	101
6.2	脈衝轉移函數的導出	104
第七章	資料留持 (Data Hold)	109
7.1	零階留持的轉移函數	112
7.2	一階留持的轉移函數	114
7.3	取樣頻率的考慮	118
7.4	最佳取樣週期的選擇	122
第八章	取樣系統的開路響應	125
8.1	開路響應例	126
第九章	取樣控制系統的閉路	130
9.1	閉路脈衝轉移函數	130
9.2	決定閉路暫態響應的例子	138
第十章	取樣控制系統的設計	142
10.1	速置法則	145
10.2	Dahlin 法則	148
10.3	傳統控制器的數位等效	151

10.4 雜訊程序信號的處理.....	157
第十一章取樣控制系統的穩定度.....	167
11.1 Schur-Cohn 穩定準則	170
第十二章 改良Z轉換(Modified Z Transforms)	174
12.1 改良 Z 轉換的定義與計算.....	174
12.2 應用於滯時系統的改良 Z 轉換.....	176
12.3 應用改良 Z 轉換求兩取樣瞬間之間的輸出.....	181
第二部份：高級控制觀念的設計與應用	
第十三章 程序之模式化以及驗判	189
(Process Modeling and Identification)	
13.1 由階狀測試資料求得的程序模式.....	190
13.2 程序驗判的脈衝測試.....	198
13.3 時域程序驗判.....	210
第十四章 具滯時的程序法則	226
(Algorithms for Processes with Dead Dead time)	
14.1 Smith 預估器法則.....	226
14.2 分析預估器法則.....	236
14.3 Gautan 與Mutharasan 法則	242
第十五章 前饋控制(Feedforward Control)....	251
15.1 引言及設計基礎.....	251
15.2 例 1	256
15.3 例 2	259

第十六章 串級控制 (Cascade Control)	263
16.1 串級系統控制器設計	267
16.2 串級控制技術在工業上的應用	286
16.3 使用串級控制的時機	289
第十七章 多變數控制系統	293
17.1 交互作用的量度	293
17.2 交互作用與去耦	303
附錄A Z 轉換及改良Z 轉換表	315
附錄B 練習題	319
附錄C1 求反Z 轉換的電腦程式	339
附錄C2 取樣系統的開路模擬程式	342
附錄D 脈衝分析程式	350
附錄E 時域程序驗判	371
附錄E 1 資料組列印	378
索引	380

第一章 傳統控制系統回顧

本章中我們將複習並強調某些重要的線性控制理論觀念，以及它們對傳統程序控制的應用。線性控制理論是導出電腦控制觀念的基礎，這也是本書的主題。澈底的複習這些觀念，將十分有助於讀者了解隨後有關電腦控制的材料。

1.1 程序控制介紹

在化工應用範圍裡，我們定義程序（process）為一些相連結的硬體（如桶槽、管子、管接頭、馬達、軸、聯軸器，各類儀表等）的集合，每個元件都朝向一個整體的目標——生產產品或一小組相關的產品。這個定義也適用於程序工程師的觀點，他的工作是設計這個硬體。從控制工程師的觀點來說，焦點與其說是集中在硬體不如說是集中在物理變數上（例如，溫度、壓力、液位、流量、電壓、速度、位置與成分等）。控制工程師的興趣是要知道這些變數如何影響其它變數以及如何隨時間而變，在程序控制裡，基本的目的是維持某些關鍵程序變數，使之儘可能接近他們所希望的所謂設定值。從所有的程序變數當中，選出某些變數做為關鍵程序變數，因為將它們保持在指定值也就意味著生產目標能令人滿意。這些生產目標為：

- 達到所要的產能，即生產量。
- 在可接受的成本下生產。
- 生產滿意的品質產品。

2 電腦程序控制—基本及高級控制應用

——以安全方式並在對環境產生最小的損害下做上述的事情。

在處理程序控制觀念時，將物理變數分類如下是相當方便的：

——輸出——這些是欲維持在某一希望值的關鍵程序變數，即它們是受控制的變數。

——輸入——當這些變數變動時，會引起一個或數個輸出變動。這些輸入更可細分為控制輸入（control inputs）及擾動輸入（disturbance inputs）。

——a）控制輸入。這些輸入也可稱為操縱變數（manipulated variables）。控制器改變這些變數，使得輸出維持在設定點。例如致動器（actuators）之類的控制閥或變速泵等，常改變程序流率，以便控制某些輸出。

——b）擾動輸入。其它以任何方式影響輸出的變數稱為擾動輸入或程序負荷（process loads）。這些擾動輸入會引起程序輸出產生不希望有的變動。

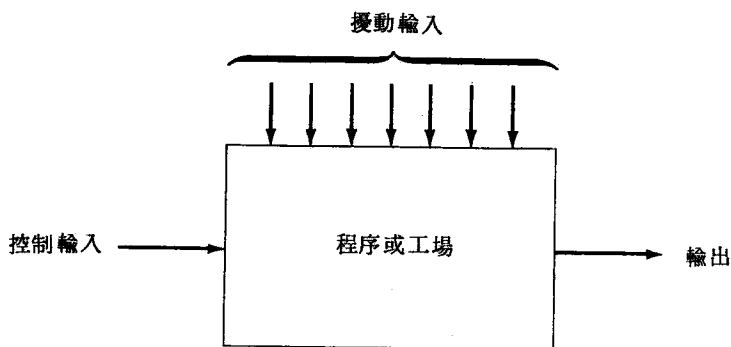


圖 1.1
典型方塊圖

1.2 程序動態及數學模式

控制策略發展的目標是尋求如何改變一個控制的輸入，以便改正程序希望值與程序輸出值間的偏差。在大部分的程序裡都有慣性以及潛在的延遲現象，所以導出工作相當複雜。延遲的意義為，在控制輸入裡，如果發生一個突然的變動，輸出不會很快的跟上，也就是說在輸出達到它的新值以前，有段時間上的落後。

要做好控制程序的工作，我們就必須知道控制輸入在數量上如何影響輸出。如果一個控制輸入變動一已知量，我們必須知道

——輸出最後會變動多少，往那個方向變。

——輸出將會隨著怎樣的軌跡，即輸出隨著時間變動的型式。

這些問題的解答要靠程序的動態數學模式來提供。模式提供程序輸入與輸出間的函數關係，可以定義為任一數學式子或公式；當獨立變數值（即輸入）已知時，將這些值代入公式計算，就可以預測相關的變數（即輸出）。因此數學模式是一種表現法，從這個表現裡能夠預測程序的物理行為。

輸入與輸出間一種因果關係（cause-and-effect）的圖樣表示，我們稱之為方塊圖，如圖 1.1 所示。通常程序的每一部份為一個方塊；簡單的方塊通常有一個輸出，一個控制輸入和幾個可研判或量測的擾動輸入，也可能存在一些影響輸出的不可研判或未知的擾動輸入。方塊圖也表示輸入與輸出間，量的因果關係（即數學模式）。

一個程序中任何已知的物理變數可以為圖 1.1 所示的任何一種型式。也就是說一個程序方塊的輸出或控制輸入可以為任何程序方塊的擾動輸入。

數學模式由物理定律或化學定律導出，下面為一些例子：

——質能守恆（即非穩態材料和能量平衡）。

——牛頓運動定律。

——克希爾夫（Kirchhoff）電路定律。

——氣體狀態方程式。

這些模式通常為微分方程式，而方程式又涉及變數隨時間及隨變數本身的變化。為了由已知的輸入變動來預測輸出行為，我們必須解這些

4 電腦程序控制—基本及高級控制應用

微分方程式，但是它們多半比代數方程式還難解。

某些程序為線性的，也就是說可用線性微分方程式或代數方程式來描述，而且可應用重疊原理；大多數為非線性且以非線性微分方程式來描述。但是後者在某些正常運作準位 (normal operating level) 的附近可以用線性微分方程式來近似。我們對控制下的程序感興趣的是它在某些運作準位附近的行為，因此我們通常使用這種近似法。

線性微分方程式可用拉氏轉換轉換成代數式，從而導得轉移函數。因為拉氏轉換將微分方程式轉換成代數方程式，因此解也就變得很容易了。

轉移函數 $G(s)$ 是一種數學式，代表程序輸出的拉氏轉換 $Y(s)$ 與輸入的拉氏轉換 $M(s)$ 的比值，如圖 1.2 所示。記住輸出 $Y(t)$ 和輸入 $M(t)$ 是以偏差變數表示的，即

$$\begin{aligned} Y(t) &= y(t) - y_{\text{穩態}} \\ M(t) &= m(t) - m_{\text{穩態}} \end{aligned} \quad (1.1)$$

因此在穩態運作準位， Y 和 M 將為零。由轉移函數， $Y(t)$ 對指定的 $M(t)$ 的響應可由下式得到

$$Y(s) = G(s)M(s) \quad (1.2)$$

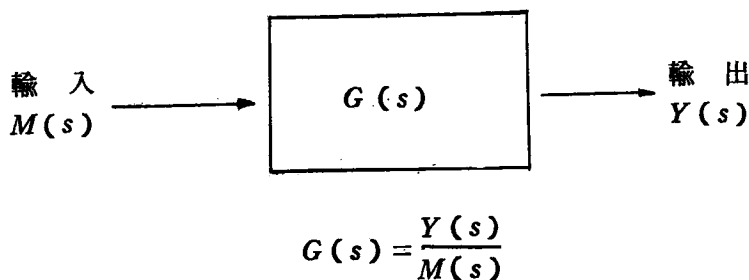


圖 1.2 示於方塊圖的轉移函數

1.3 動態程序型式 (Types of Dynamic Processes)

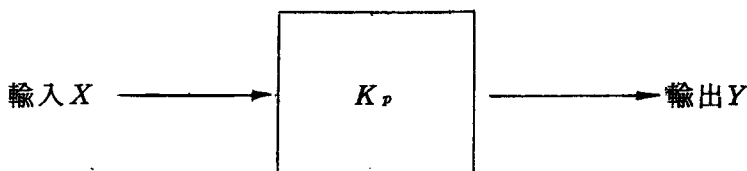
程序可歸類為下列幾種型式：

- 瞬間或穩態 (Instantaneous or steady state) 。
- 一階延遲 (First-order lag) 。
- 二階延遲 (Second-order lag) 。
- 滯時 (Dead-time) 或傳送延遲 。

當然某些程序可能很高階，但是稍後我們將可看到它們的行為通常可以帶滯時的一階或二階延遲來近似。

瞬間程序

這類程序的動態可以忽略掉，也就是說對所有實際目標，輸出隨著輸入迅速的變化，使得程序總是保持在穩態。瞬間程序的表示如圖 1.3a，例如考慮圖 1.3b 所示，具線性流量特性的一個控制閥的運作，在這種情況下



$$\text{模式: } Y(t) = K_p X(t)$$

$$\text{轉移函數: } G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

式中 s = 拉氏轉換變數

$$\text{程序增益 } K_p = \frac{\text{輸出變動}}{\text{輸入變動}}$$

圖 1.3a 瞬間程序

6 電腦程序控制—基本及高級控制應用

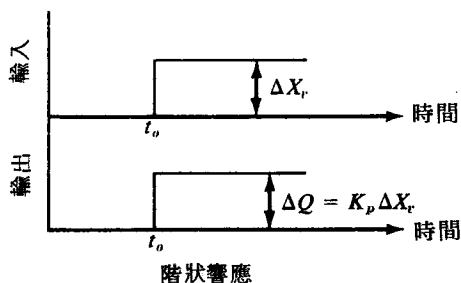
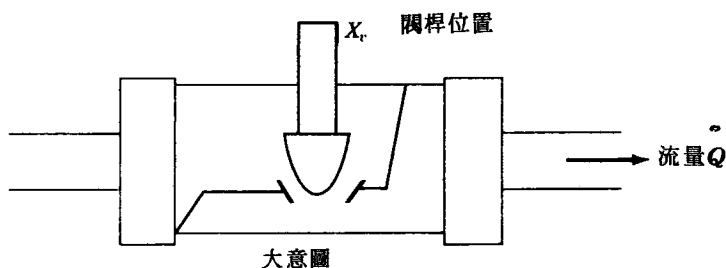


圖 1.3 b 瞬間程序例

輸入為閥位置 X_v	0 至 100 %
輸出為流量 Q	0 至 $Q_{\max}$

$$K_p = \frac{\Delta Q}{\Delta X_v} = \frac{\text{gpm}}{\%} \quad (1.3)$$

一階延遲

隨著輸入階狀變動 (step change)，一階程序的輸出是以典雅的指數上升來變動，這類程序的模式、參數和轉移函數為

$$\text{程序模式: } \tau \frac{dy}{dt} - y = K_p x \quad (1.4)$$

式中，

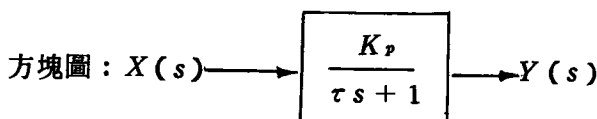
x = 程序輸入

y = 程序輸出

K_p = 程序穩態增益

τ = 時間常數

$$\text{轉移函數: } G_p(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad (1.5)$$



動態參數：

$$\text{穩態增益 } K_p = \frac{\text{輸出的最終穩態變動}}{\text{輸入變動}}$$

時間常數， τ ：對一定的（即階狀）輸入變動，達到響應最終值的 63.2% 所需的時間。

一階延遲的階狀響應如圖 1.4 所示。

很多感測器／傳送器、最終控制元件及為數不少的程序都是一階延遲的例子。圖 1.5 為一階程序的一個簡單例子，流進攪拌槽的量相等。

輸入：流入液體的溫度 T_i ；

輸出：流出液體的溫度 T_o 。（由於攪拌良好，假設等於槽內液體的溫度）