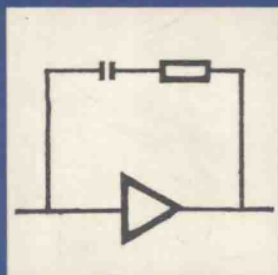
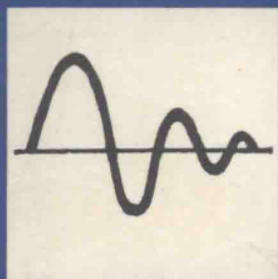
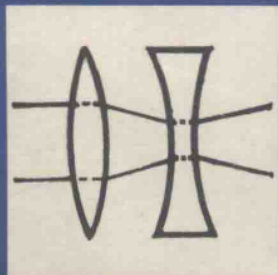




適應控制系統

Control Systems of Adaptive

韓曾晉 編著



科技圖書股份有限公司

適應控制系統

韓曾晉 編著

科技圖書股份有限公司

行政院新聞局登記證 局版台業字第 1123 號

版權所有 • 翻印必究

適應控制系統

編著者：韓 會 晉

發行人：趙 大 慶

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市重慶南路一段 49 號四樓之 1

電 話：3118308 · 3118794

郵政劃撥帳號 0015697-3

81 年 6 月初版

特價新台幣 240 元

ISBN: 957-655-130-7

前 言

本書介紹控制系統的適應控制理論，除可作為大學部、研究所電機、機械，及控制系所教材範本外，尚可作為控制工程技術人員自修參考書籍。

本書的主要內容是討論適應控制系統的構成原理和分析設計問題。引言介紹了全書的概貌；第一章為預備知識；第二章為系統的參數估測和狀態估測；第三、四章介紹隨機適應控制系統；第五章介紹參考模型適應控制系統。在閱讀本書前，讀者應當具備自動控制理論（主要是線性系統理論）和機率論方面的基本知識。目錄中凡註有*號的章節，屬於較深入的內容，初學時，可以先跳過它。

適應控制是綜合運用現代控制理論的一門新興技術，目前正處在發展階段，由於作者才疏學淺，疏漏錯誤之處在所難免，尚祈讀者先進不吝提出批評指正。

編著

韓曾晉

適應控制系統 目 錄

前 言

第零章 引 言

0·1	什麼是適應控制·····	1
0·2	兩種重要的適應控制系統·····	5
0·3	適應控制的應用概況·····	9
0·4	參考文獻·····	11

第一章 預備知識

1·1	隨機過程及其數學描述·····	14
1·2	相關函數·····	19
1·3	z 變換·····	25
1·4	功率頻譜密度·····	34
1·5	參考文獻·····	36

第二章 參數估測和狀態估測

2·1	系統鑑別概述·····	37
2·2	最小平方的一般原理·····	44
2·3	系統脈衝響應函數的鑑別·····	58
2·4	線性差分方程模型的最小平方估測·····	67
2·5	線性差分方程模型的廣義最小平方估測和多級最小平方 估測·····	76
2·6	狀態估測——卡爾曼濾波器·····	89
2·7	推廣卡爾曼濾波器 [*] ·····	129
2·8	參考文獻·····	134

第三章 隨機控制和隨機適應控制(一)

3.1 最小方差控制	138
3.2 自我校正調節器	161
3.3 謹慎控制器	187
3.4 終點質量控制問題(實例分析)	192
3.5 參考文獻	200

第四章 隨機控制與隨機適應控制(二)

4.1 動態規劃	203
4.2 隨機最佳控制	221
4.3 隨機適應控制的基本觀念和特性	256
4.4 隨機適應控制演算法之例*	269
4.5 參考文獻	276

第五章 參考模型適應控制系統

5.1 李爾普諾夫穩定性的觀念及基本定理	279
5.2 受控裝置全部狀態可直接獲取時的適應控制系統設計	287
5.3 根據裝置輸入輸出設計適應控制系統	306
5.4 關於局部參數最佳化的設計方法	333
5.5 參考模型適應控制系統的應用實例	340
5.6 參考文獻	346

附 錄

附錄 I 關於頻譜分解定理的證明	349
附錄 II 關於分數傳輸延遲的影響	350
附錄 III 關於定理七的證明	354
附錄 IV 關於矩陣 $V(\lambda, k)V^T(\lambda, k)$ 非奇異的條件	356
附錄 V 關於受控裝置(連續時間系統)用計算機控制時的脈衝轉移函數表	358

引 言

作為引言，將闡明以下三個問題：

- 一、什麼是適應控制；
- 二、兩種重要的適應控制系統；
- 三、適應控制的應用概況。

0.1 什麼是適應控制

適應控制的研究裝置是具有不確定性的系統，這裏所謂「不確定性」是指描述受控裝置及其環境的數學模型不是完全確定的，其中包含一些未知因素和隨機因素。

任何一個實際系統都具有不同程度的不確定性，這些不確定性有時表現在系統內部，有時表現在系統外部。從系統內部來講，描述被控裝置動態過程的數學模型的結構和參數設計者事先並不一定能確切知道。描述外部環境對系統的影響，可以等效地用許多擾動來表示。這些擾動通常是不可測的，它們可能是確定性的（如常值負載擾動），也可能是隨機性的（如海浪和陣風擾動）。此外，還有一些量測的雜訊從不同的測量反饋回路進入系統。這些擾動和雜訊的統計特性常常是未知的，面對這些客觀存在的各式各樣的不確定性，如何選擇適當的控制法則，使得某一指定的性能指標達到並保持最佳或近似最佳，這就是適應控制所要研究解決的問題。

為了進一步說明適應控制問題與確定性最佳控制問題、隨機最佳控制問題等等的差別，下面舉一個線性、離散時間系統的例子。設受控裝置的狀態方程式和量測方程式分別由下式表示：

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi(\theta, k)\mathbf{x}(k) + \Gamma(\theta, k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (0-1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(\theta, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (0-2)$$

式中 k —— 離散時間， k 為整數；

θ —— s 維未知參數向量；

$\mathbf{u}(k)$ —— m 維控制向量；

$\mathbf{y}(k)$ —— r 維輸出向量；

$\mathbf{x}(k)$ —— n 維狀態向量。

$\Phi(\theta, k)$ ， $\Gamma(\theta, k)$ ， $\mathbf{H}(\theta, k)$ 分別為 $n \times n$ ， $n \times m$ ， $r \times n$ 矩陣。

$\{\mathbf{w}(k)\}$ ， $\{\mathbf{v}(k)\}$ 分別為 n 維和 r 維的隨機擾動和量測雜訊，受控裝置的結構可用圖 0-1 表示。

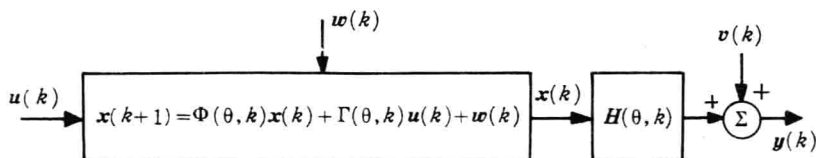


圖 0-1 受控裝置的結構圖

【一】 確定性最佳控制問題

這是一種最簡單的情況，它相當於：

(1) 矩陣 $\Phi(\theta, k)$ ， $\Gamma(\theta, k)$ ， $\mathbf{H}(\theta, k)$ 中的參數向量 θ 是已知的，即矩陣 Φ ， Γ ， $\mathbf{H}$ 是已知的。

(2) $\{\mathbf{w}(k)\}$ 與 $\{\mathbf{v}(k)\}$ 是時間 k 的已知函數，另外系統的初始狀態也認為是已知的，通常是：

$$\mathbf{w}(k) = \text{固定向量}, \mathbf{v}(k) = 0, \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 = \text{已知固定向量}$$

所以確定性最佳控制問題的描述是：在已知裝置模型和環境模型條件下，選擇一個控制序列 $\mathbf{u}(0)$ ， $\mathbf{u}(1)$ ， $\dots$ ， $\mathbf{u}(N-1)$ ，使得某一指定的性能指標函數 J 達到最小。

$$J = \sum_{k=0}^N C[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k] = \text{最小} \quad (0-3)$$

其中 $C[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k]$ 表示第 k 時段的代價，整個控制過程共分 N 段， J 表示整個控制過程的總代價，即系統的性能指標。 C 、 J 都是狀態變數、控制變數和時間等的標度函數。

【二】 隨機最佳控制問題

這種情況要比確定性最佳控制問題複雜一些，它所對應的條件是：

(1) 矩陣 $\Phi(\theta, k)$, $\Gamma(\theta, k)$, $\mathbf{H}(\theta, k)$ 中參數向量 θ 是已知的，即矩陣 Φ 、 Γ 、 $\mathbf{H}$ 是已知的。

(2) 擾動 $\{\mathbf{w}(k)\}$ 和雜訊 $\{\mathbf{v}(k)\}$ 是隨機序列，但假定它們的統計特性是已知的。另外，系統的初始狀態 $\mathbf{x}(0)$ 是一個隨機向量，其統計特性也認為是已知的。

隨機最佳控制問題的描述是：在裝置和環境的數學模型以及性能指標都已給定的條件下，要求選擇一個控制序列 $\mathbf{u}(0), \mathbf{u}(1), \dots, \mathbf{u}(N-1)$ ，使得總代價的數學期望值達到最小，即：

$$J = E \left\{ \sum_{k=0}^N C[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k] \right\} = \text{最小}$$

由於此時， C 是一個隨機函數，所以用 C 的機率平均值來計算和比較性能指標的大小才有意義。

【三】 適應控制問題

這是一種最複雜的情況，其所對應的條件為：

(1) 矩陣 $\Phi(\theta, k)$, $\Gamma(\theta, k)$, $\mathbf{H}(\theta, k)$ 中的參數向量 θ 是未知的（即矩陣 Φ , Γ , $\mathbf{H}$ 中有些元未知）。

(2) $\{\mathbf{w}(k)\}$, $\{\mathbf{v}(k)\}$ 是隨機序列，它們的統計特性是未知的；此外，系統的初始狀態 $\mathbf{x}(0)$ 是一個隨機向量，其統計特性也是未知的。假定 $\{\mathbf{w}(k)\}$, $\{\mathbf{v}(k)\}$, $\mathbf{x}(0)$ 都是常態分佈； $\{\mathbf{w}(k)\}$, $\{\mathbf{v}(k)\}$ 都是零均值，其協方差矩陣分別為 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ ； $\mathbf{x}(0)$ 的均值為 $\bar{\mathbf{x}}_0$ ，協方差矩陣為 $\mathbf{P}_0$ ；則對確定性最佳控制而言，相當於： $\mathbf{x}(0) = \bar{\mathbf{x}}_0 = \text{已知}$ ， $\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2 = \mathbf{P}_0 = \mathbf{0}$ 。對隨機最佳控制而言，相當於 $\mathbf{x}(0) = \bar{\mathbf{x}}_0 = \text{已知}$ ， $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{P}_0$ 已知。而對適應控制而言，則 $\bar{\mathbf{x}}_0, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{P}_0$ 可能部分未知或者全部未知。

因此，適應控制問題的描述可歸納為：在裝置和環境的數學模型不完

全確定的條件下，設計控制序列 $u(0), u(1), \dots, u(N-1)$ ，使得指定的性能指標盡可能地接近和保持最佳。

對於適應控制系統來說，可能還存在兩種不同的情況。一種情況是，系統本身的數學模型是不確定的，例如模型的參數未知，但系統基本工作在確定性的環境之下，這類系統稱為確定性適應控制系統；另一種情況是，不僅受控裝置的數學模型是不確定的，而且系統還工作在隨機環境之下，這類系統稱為隨機適應控制系統。當隨機擾動和量測雜訊都比較小時，對於參數未知的裝置的控制可以近似地按確定性適應控制問題來處理。

經過以上的分析，我們可以初步了解最佳控制問題與適應控制問題在描述上的一些差別。其中最主要的一點是：對於最佳控制問題來說，一般都認為受控裝置的數學模型已知，即在模型已知的條件下設計最佳控制法則；但對適應控制問題來說，由於裝置的數學模型事先未知，不能直接應用最佳控制的方法來設計系統，而需要尋求新的設計方法。

什麼是適應控制的設計方法？它與常規控制或者最佳控制相比較有何異同？簡單地說，與常規反饋控制系統和最佳控制系統一樣，適應控制系統中的控制作用，也是基於一定的數學模型和一定的性能指標綜合出來的。所不同的是：適應控制所依據的數學模型由於經驗知識較少，需要在系統的運行過程中去提取有關模型的信息，使模型逐漸完善，具體地說，可以根據裝置的輸入輸出數據，不斷地鑑別模型的結構和參數，這個過程稱為系統的線上鑑別。隨着生產過程的不斷進行，經過線上鑑別，模型會變得愈來愈準確，愈來愈接近於實際。既然模型在不斷地改進，顯然，基於這種模型綜合出來的控制作用也將隨之不斷改進，在這個意義下，控制系統具有一定的適應能力。譬如說，當系統在設計時，由於裝置特性的初始信息比較缺乏，系統在開始投入運行時可能性能不理想，但是只要經過一段運行，經過線上鑑別和控制以後，控制系統可以逐漸適應，最終將自身調整到一個滿意的工作狀態，並使系統的性能指標漸近地趨於最佳。再比如某些受控裝置，其特性可能在運行過程中要發生較大的變化，但是經過線上鑑別和控制，系統也能逐漸適應。由此可見，經過鑑別（包括對系統的結構、參數、性能指標等的鑑別）而獲得的適應能力是適應控制系統的主要特點。

當然，常規反饋控制系統，對於系統內部特性的變化和外部擾動的影響都具有一定的抑制能力，但是常規反饋控制系統不具備上述“適應”能

力，因此，當系統內部特性或外部擾動的變化幅度很大時，系統的性能指標不僅不可能保持最佳，而且常常要大幅度下降，甚至會引起系統的不穩定。

由此可見，對於那些裝置特性或擾動特性變化範圍很大，同時又要求經常保持高性能指標的一類控制系統採用適應控制方法是很有效的。

最後應當指出，適應控制系統比常規反饋控制系統要複雜得多，因此成本也高得多，而且常常還需要借助於計算機才能夠實現，所以在設計控制系統時，從滿足系統的性能指標的要求出發，如果採用常規反饋控制能夠達到目的，就應當優先考慮常規反饋控制的方案，這是系統設計的基本原則。適應控制方案只是在常規反饋控制達不到期望的性能指標時才考慮採用的。

0·2 兩種重要的適應控制系統

自從五十年代末期由美國麻省理工學院提出第一個適應控制系統以來，先後出現過許多形式完全不同的適應控制系統，但是，發展到現階段，無論從理論研究和實際應用的角度來看，比較成熟的適應控制系統有以下兩大類，本書只討論這兩類較完善的系統。

【一】 參考模型適應控制系統

參考模型適應控制系統由以下幾部分組成，即：參考模型、受控裝置、常規反饋控制器和適應控制回路（適應控制律），系統的結構圖如圖 0-2 所示。

從圖 0-2 可以看出，該類適應控制系統實際是在原來的反饋控制系統的基礎上再附加一個參考模型和一個控制器參數的自動調節回路，其中參考模型的輸出響應 $y_m(t)$ 直接表示系統希望的動態響應，所以參考模型相當於輸出響應的一個樣本，這種用模型輸出來直接表達對系統的性能要求，對於某些生產機械的控制系統，例如某些電力驅動系統，往往是很直觀很方便的。

控制器參數的適應調整過程是這樣的：當參考輸入 $r(t)$ 同時加到系統和參考模型的入口時，由於裝置的初始參數不確定（事先未知）控制器的初始參數不可能設定得很好，因此一開始系統的輸出響應 $y(t)$ 與模型的

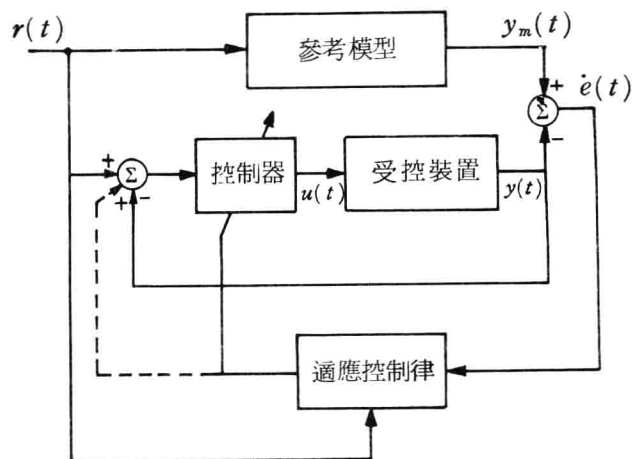


圖 0-2 參考模型適應控制系統的結構圖

輸出響應 $y_m(t)$ 是不會完全一致的，結果產生偏差信號 $e(t)$ ，當信號 $e(t)$ 進入適應調整回路後，經過由適應控制律所決定的運算，產生適當的調整作用，直接改變控制器的參數，如果直接改變控制器的參數不方便，也可產生等效的附加控制作用，如圖 0-2 中虛線所示。從而使系統的輸出 $y(t)$ 逐步與模型輸出 $y_m(t)$ 接近，直到 $y(t) = y_m(t)$ ，當偏差信號 $e(t) = 0$ 後，適應調整過程就自動停止，控制器參數也就自動設定完畢。

由此可見，儘管系統初始參數未知，但通過對參考模型輸出 $y_m(t)$ 和裝置輸出 $y(t)$ 的量測和比較以及相應的控制器參數的適應調整，系統初始參數的不確定對系統運行性能的影響將逐步被減小。經過一段運行，系統對參考輸入的動態響應最終將自動地調整到與希望的動態響應相一致，這就是參考模型適應控制的基本工作原理。當裝置特性在運行中發生變化時，控制器參數的適應調整過程與上述過程完全一樣。

設計這類適應控制系統的核心問題是如何選擇適應控制律，關於適應控制律的設計目前存在兩種不同的方法。其中一種稱為參數最佳化的方法，即利用最佳化技術尋找到一組控制器的參數，使得某個預定的性能指標（例如 $J = \int e^2(t) dt$ ）達到最小。適應控制律的另一種設計方法是基於穩定理論的設計方法，其基本思想是保證控制器參數的適應調整過程是穩定的，然後再使這個調整過程盡可能收斂得快一些，由於適應控制系統一般都是非線性的，因此，這種適應控制律的設計自然要採用適用於非線性系

統的穩定理論，李爾普諾夫穩定理論和波波夫的超穩定理論都是設計適應控制系統的有效工具。保證系統穩定是系統設計最基本的要求，所以基於穩定理論的設計方法，近年來已引起了廣泛的注意。

本書的第五章將對參考模型適應控制系統的分析 and 設計方法進行較系統的介紹，特別是對於應用李爾普諾夫穩定理論設計參考模型適應控制系統的方法將進行詳細的介紹。

【二】 具有受控裝置數學模型線上鑑別的適應控制系統

這種適應控制系統的一個主要特點是具有被控裝置數學模型的線上鑑別環節，根據系統的運行數據，首先對被控裝置進行線上鑑別，然後再根據鑑別得來的模型參數和事先指定的性能指標，在線上地選擇控制法則。通常這種系統在設計鑑別演算法和控制演算法時，考慮了隨機擾動和量測雜訊的影響，所以應該屬於隨機適應控制系統這一類。這類系統的結構可以用圖 0-3 來表示。圖中 $r(k)$ 為參考輸入， $w(k)$ 、 $v(k)$ 分別為隨機擾動和量測雜訊， $\hat{\theta}(k)$ 、 $\hat{x}(k)$ 分別表示裝置的參數估測和狀態估測。 $y(k)$ 為裝置的觀測輸出， $u(k)$ 為輸入控制法則。

適應控制系統由受控裝置、鑑別器和控制器三部分組成。鑑別器根據一定的估測演算法，在線上地計算受控裝置未知參數 θ 和未知狀態 $x(k)$ 的估測值 $\hat{\theta}(k)$ 、 $\hat{x}(k)$ 。控制器再利用估測值 $\hat{\theta}(k)$ 、 $\hat{x}(k)$ 以及事先指定

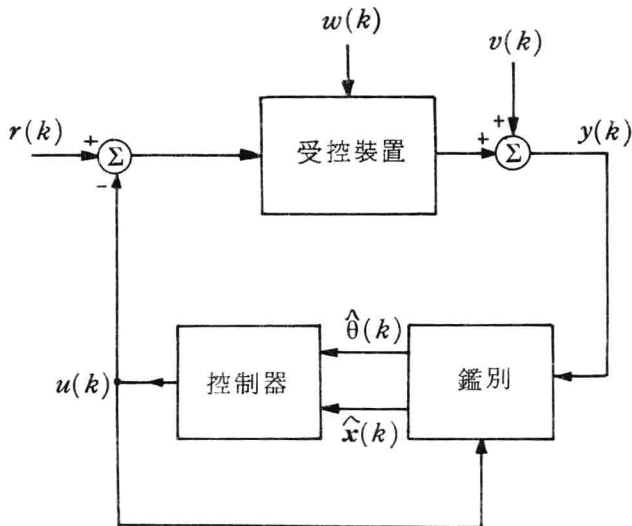


圖 0-3 具有線上鑑別的適應控制系統

的性能指標，選擇最佳控制法則 $u(k)$ ，這樣，經過不斷的鑑別和控制，系統的性能指標將漸近地趨於最佳。這是由於在這類適應控制系統中，受控裝置的初始不確定性可以經過對裝置參數和狀態的線上鑑別而逐步達到減小，如果裝置的參數估測 $\hat{\theta}(k)$ 和狀態估測 $\hat{x}(k)$ 都是收斂的，而且最後都漸近地收斂到它們各自的實際值，那麼，最終的適應控制也將收斂到其最佳控制（裝置參數已知時的最佳控制）。

圖 0-3 中的鑑別器和控制器實質都是一些遞迴演算公式，要即時地完成所需的遞迴運算必須採用數位計算機，因此，這類隨機適應控制系統實際上是一種計算機控制系統。設計這類適應控制系統的理論基礎，是估測理論和隨機最佳控制理論。本書的第二章將對參數估測和狀態估測的有關理論和演算法進行詳細的介紹。至於隨機最佳控制問題，目前廣泛採用兩種不同的數學模型來進行分析和設計，在工業程序控制領域內，應用得比較多的是普通的輸入輸出模型，例如象最小平方誤差控制、自我校正調整器等等這些實際已經證明是行之有效的控制方法，都是採用輸入輸出模型來進行分析和設計的。本書的第三章將集中討論如何應用輸入輸出模型，對某些隨機控制系統和隨機適應控制系統進行分析和設計。

狀態空間模型是現代控制理論中經常用到的系統描述方法。它在太空科技，工業控制，系統工程等各個方面都獲得了成功的應用。本書的第四章將着重討論如何應用狀態空間模型和動態規劃法（一種最佳化的演算法）來設計一些較複雜的隨機控制系統和隨機適應控制系統。

由於隨機控制與隨機適應控制關係十分密切，如果裝置和環境的模型已知時，系統的控制問題屬於隨機控制問題的話，那麼，當模型參數未知時的控制問題，就轉化成為隨機適應控制問題了。從以後的分析（第四章）讀者將會看到隨機適應控制實際上是非線性隨機最佳控制的一種近似解法。因此，從教學上考慮，編者認為，將這兩種控制問題合在一起，按所採用數學模型的不同形式分兩章來講授，也許比較方便。

上述兩種適應控制系統的共同特點是：控制器的參數隨着裝置特性的變化和環境的改變將不斷地進行調整，因而控制器具有一定的“適應”能力。但是，控制器參數調整方法兩種系統各不相同，第一類系統控制器的參數調整是基於參考模型輸出與系統實際輸出的偏差，而第二類系統控制器的參數調整則基於裝置的參數鑑別。另外，兩種系統設計思想也不一樣，第一類系統是從保證系統穩定的角度來設計適應律，而第二類系統決定

控制律的依據是某一性能指標的最佳化，不過從近幾年的發展趨勢來看，兩種設計方法也在互相影響，互相補充。

最後應當指出，上面介紹的兩類適應控制系統只是目前已經出現的為數衆多的適應控制系統中的一部分，不過是近十餘年來國際國內比較重視，研究得也比較充分的一部分。我們選擇這類系統為代表的另一個原因是因為這些系統已獲得了實際應用。

0.3 適應控制的應用概況

早在五十年代末期，由於飛行控制的需要，美國麻省理工學院 (MIT) 的懷特克 (Whitaker) 教授首先提出了參考模型適應控制方法，並且企圖用它來解決飛行器的自動駕駛儀的問題。限於當時計算機技術和控制理論的發展水平，這些新的控制思想，沒有得到應有的普及和推廣。爾後，經過二十餘年的努力，適應控制理論和系統的設計方法都有了一定的進展，特別是由於近十餘年來計算機技術的快速發展，計算機和微處理機的廣泛普及，適應控制的應用這個課題又重新引起控制工程師們很大的興趣，七十年代以來，適應控制不僅在工程應用方面取得了較大的進步，出現了一批成功應用的實例，在非工程領域，如：社會、經濟、管理、生物、醫學等方面也進行了一些新的探索。下面僅對近十年來適應控制在工程應用的幾個方面，作一概略的介紹。

如前所述，飛行器的控制是較早應用適應控制技術的領域，這是由於飛機的動態特性決定於許多環境參數和結構參數，例如與動態氣壓、高度、質量、機翼角、阻尼板位置等等參數都有關。在不同的環境下，這些參數可能在相當大的範圍內變化，因此，要想在不同的飛行條件下都能獲得高性能指標往往是很困難的。傳統的解決辦法是根據不同的環境條件，按事先安排好的程序，切換控制器的增益以適應不同的環境，為了確定當時的環境條件，需要量測所有影響飛機動態特性的參數，這種辦法既不經濟，也不實際，實踐中只能測量幾個主要參數，例如只量測動態氣壓和高度，因此控制性能不可能很理想。對於飛機這種工作環境複雜、參數變化幅度大的受控裝置，採用適應控制方案當然是十分合理的。因為採用適應控制以後，不僅常規控制系統中使用的複雜的轉換器可以大大節省，而且在不同飛行條件下的控制性能也能得到改善。文獻 [6] 提出了一種數位適應

控制系統，經過混合數位模擬試驗，證實了採用適應控制的優越性。

大型油輪的自動駕駛儀是成功應用隨機適應控制的另一個例子。文獻[7]提出了一種適應自動駕駛儀，用它取代了原有的PID調整器，實踐證明應用了適應駕駛儀後，在變化的複雜隨機環境下，例如在海浪、潮流、陣風等的擾動下，以及在不同的氣候條件、不同的負荷、不同的航速下，油輪都能適應，並且能夠經濟地和穩定可靠地工作。

在工業程序控制方面，由於原材料的成分不穩定（其成分是隨機波動的），或者由於改換產品品種，或者由於設備磨損，這些因素都要使生產的工作參數發生變化，從而使產品質量不穩定，常規的PID調整器不能很好地適應操作參數的變化，需要經常進行調整，當採用自我校正調整器後，由於調節器參數可以隨環境和特性的變化而自動調整設定，所以對於各種不同的運行條件，調節器都能很好地工作，並且使受控程序輸出對其設定值的平方誤差達到最小，這樣產品的質量就比較穩定，同時也能節省原材料的消耗（第三章），另外，由於自我校正調整器的演算法簡單，通常用微計算機就可以實現，因此，最近幾年在工業程序控制的許多領域，例如：造紙機的基重控制，濕度控制；水泥的配料控制；鍋爐和熱交換器的溫度控制等等方面，應用自我校正調整器都取得了一定的成功[8]。

在電力驅動領域，近年來成功地應用了參考模型適應控制技術，由可控閘流體供電的直流控速和交流控速系統，在採用了適應的電流調節器和速度調節器後，可以保證當系統參數，例如：慣量、時間常數、放大倍數等等在大範圍內變化，甚至當系統結構也發生變化時；直流控速系統中當主回路的電流由連續變到斷續時；整流器-電動機系統的開迴路轉移函數由二階變為一階，而且增益和時間常數的變化幅度可能達到數十倍時；即使裝置的結構和參數發生如此巨大的變化，但經過適應控制方法，控速系統的動態響應仍舊可以保持與希望的響應（參考模型的輸出）相接近[10]，從而為設計高性能的控速系統提供了一條重要途徑。在高精度的追蹤系統中，例如衛星追蹤望遠鏡的高精度追蹤系統，由於採用了參考模型適應控制技術，自動補償了系統在低速和超低速運行時，系統慣量的變化，增益的變化，以及摩擦負載的非線性特性的變化，從而大幅度地提高了系統的穩態和動態追蹤精度[11]，[14]。

以上介紹的只是近年來適應控制在工程應用方面的幾個實例。更全面的應用情況讀者可以參閱文獻[14]。助使僅從以上幾個方面的應用經驗

，已充分肯定了適應控制的必要性，因為利用這種控制技術的確能夠解決一些常規反饋控制所不能解決的複雜的控制課題。從另一方面看，微計算機和微處理機的價格日益下降，這也為適應控制技術的具體實現提供了比較有利的物質條件。因此，可以預料，適應控制技術的應用在今後還會有更大的發展。

在非工程應用方面，如何應用適應控制方法來研究具有不確定性的高維數的大系統，這是一個值得注意的新動向。另外，應用對偶控制（一種較複雜的隨機適應控制演算法，詳見本書的第四章）研究隨機資源分配問題、研究總體經濟系統的隨機最佳化問題，近年來也引起了人們的注意[12]，[13]。

適應控制系統的進一步的發展將走向所謂“自學習”系統和“智能控制”系統。這類系統除具有前述一般的適應功能外，還應當擁有：大型記憶、模式識別、以及各式各樣帶有智能性的高級決策功能。這類系統能夠記住系統過去的經驗和教訓，識別曾經發生過的情況，並且能夠基於過去的經驗來逐步改進其適應動作。設計這類系統所採用的方法除解析方法外，更重要的是模擬人類行為的方法。所以研究這類系統，除需要控制理論的知識外，還需要大量其他方面的專業知識，這將大大超出本書討論範圍。另外，無論是理論研究還是實際應用，這類系統目前都還處在探索階段。因此，本書就不詳細討論了。

0·4 參考文獻

- [1] George. E. Saridis:
Self-organizing control of stochastic systems. Control and systems theory volume 4, 1977.
- [2] Tsypkin. Ya. Z.
Adaptation and Learning in Automatic systems mathematics in science and engineering, 1971.
- [3] K. S. Fu:
Learning Control Systems-Review and outlook. IEEE AC-15. 1970. No 2.
- [4] K. S. Fu: