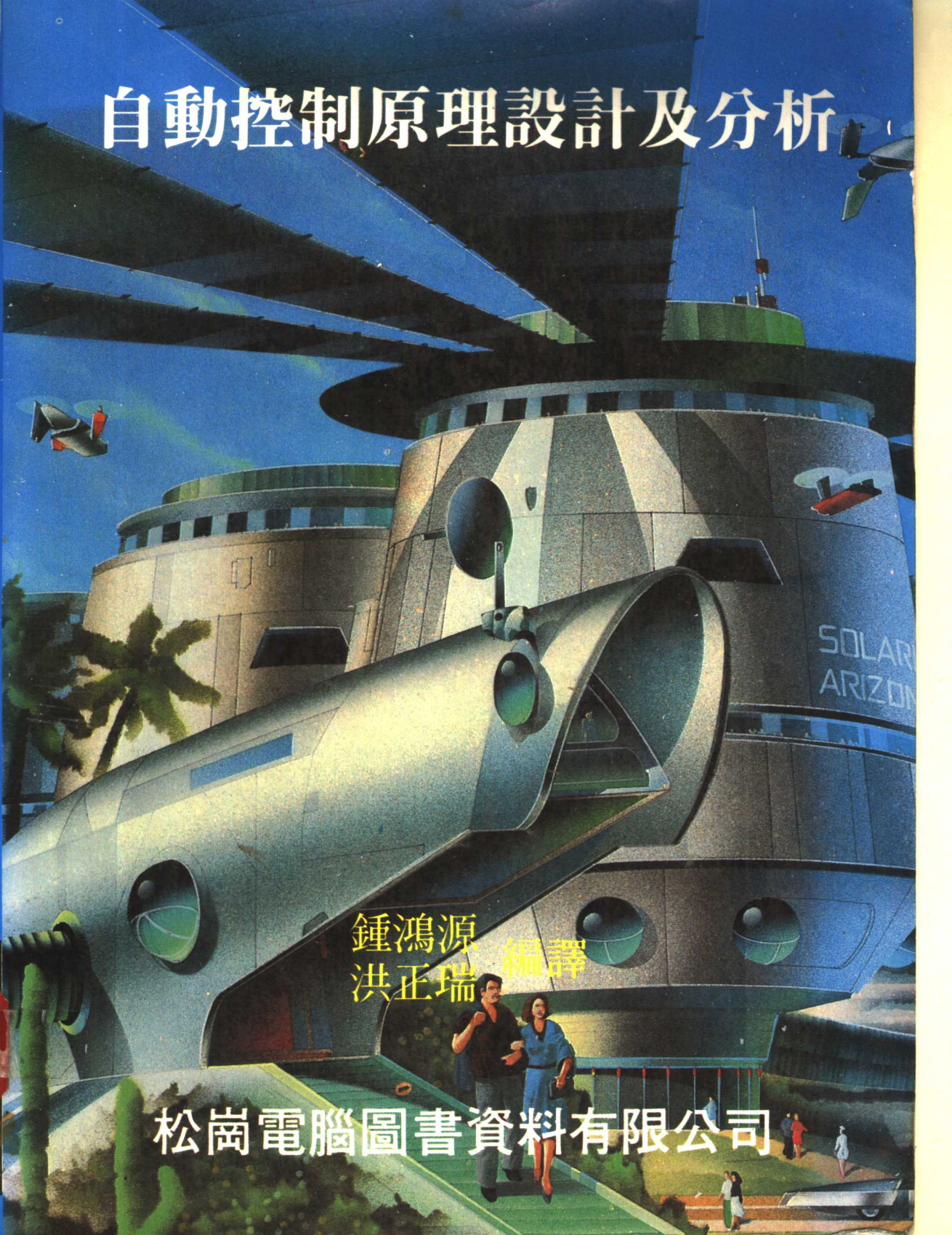


自動控制原理設計及分析



鍾鴻源 編譯
洪正瑞

松崗電腦圖書資料有限公司

自動控制原理設計及分析

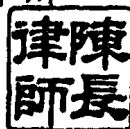
鍾鴻源
洪正瑞 編譯

松崗電腦圖書資料有限公司 印行

松崗電腦圖書資料有限公司已
聘任本律師為常年法律顧問，
如有侵害其著作權或其他權益
者，本律師當依法保障之。

長立國際法律事務所

陳 長 律 師



自動控制原理設計及分析

編譯者：鍾鴻源・洪正瑞

發行人：朱 小 珍

發行所：松崗電腦圖書資料有限公司

台北市仁愛路二段一一〇號三樓

電 話：3930255

郵政劃撥：0109030-8

印刷者：建發印刷設計公司

版權所有



翻印必究

每本定價 320 元整

中華民國七十五年七月初版

書號：5101017

本出版社經行政院新聞局核准登記，登記號碼為局版台業字第三一九六號

編譯序言

本書最主要是爲大四或研一程度的學生而編，當做修習間斷控制系統或數位濾波器之先修教材。此外，本書亦可供控制工程師們自修研習用。

本書的內容係根據美國奧本大學 (Anburn University) 電機系兩位教授 Charles L. phillips / H. Troy Nagle, Jr. 合編之教材加上 B. C. Kuo 教本的一些基礎理論而編成，兼顧理論及實際應用，讓讀者先瞭解自動控制系統的觀念，進而學習如何去分析系統，並運用何種有效的方法去分析與設計系統。尤其是，本書列舉了很多實際的應用例子加以討論說明，使讀者得到設計的經驗與心得。特別是，從事於控制工程的各級工程人員，可以從本書學到一些近代控制方法與微電腦應用技術，藉以提昇設計技術層次，促進國家的經濟建設發展。

鑑於潮流所趨，以及現實的需要，各大專院校紛紛開設有關於控制系統方面的課程，使學習工程的學生都能具備系統理論及應用的概念，能夠肩負未來的艱鉅任務。所以，本書可當做訓練的教材，其深入淺出的介紹，並可增進學習的興趣。

本書之出版要感謝松崗圖書公司的吳守信經理以及曾俊傑先生之協助。另外，第一版出書，錯誤在所難免，敬請各界先進高明惠予指正，以便再版時加以更正嘉惠讀者。

鍾鴻源

謹誌於國立成功大學機械工程學系

民國七十五年六月一日

目 錄

編譯序言

第一章 簡 介	1
1.1 概論	1
1.2 數位控制系統	2
1.3 控制的問題	5
1.4 衛星模式	6
1.5 伺服馬達系統模式	8
1.6 溫度控制系統	11
1.7 拉氏轉換	13
1.8 結論	17
問 題	18
第二章 Z轉換	21
2.1 定義	21
2.2 轉換的計算	23
2.3 S平面與Z平面間之映像	29
2.4 反Z轉換	31
2.5 Z轉換的定理	38
2.6 轉換的限制	48
2.7 脈波轉移函數	49

2.8	零階保持的脈波轉移函數及 $G(s)$ 與 $G(z)$ 間之關係	53
2.9	取樣間的響應	54
2.10	信號流程圖	65
2.11	多速取樣率系統	79
	問 題	96

第三章 取樣及重建..... 105

3.1	簡介	105
3.2	取樣資料控制系統	105
3.3	理想的取樣器	108
3.4	計算 $E^*(S)$	111
3.5	$E^*(S)$ 的特性	115
3.6	資料重建	118
3.7	數位到類比轉換	127
3.8	類比到數位轉換	130
3.9	結論	138
	問 題	142

第四章 開路迴路間斷性系統..... 147

4.1	簡介	147
4.2	$E(Z)$ 及 $E(Z)$ 之間的關係式	147
4.3	脈波轉移函數	149
4.4	包含數位濾波器的開路系統	154
4.5	修改式 Z -轉換	158
4.6	有時間延遲的系統	162
4.7	非同步式取樣	165
4.8	狀態變數模式	169
4.9	連續性狀態變數的回顧	171

4.10	間斷狀態方程式	176
4.11	摘 要	180
	問 題	181
第五章	閉合迴路系統	189
5.1	簡介	189
5.2	基本觀念	189
5.3	推導程序	193
5.4	狀態變數模式	201
5.5	摘 要	211
	問 題	212
第六章	系統的時間響應特性	221
6.1	簡介	221
6.2	系統的時間響應	221
6.3	系統特性方程式	230
6.4	將 S-平面對映到 Z-平面	230
6.5	穩態精確度	237
6.6	模擬	242
6.7	模擬程式語言	247
6.8	結論	250
	問 題	253
第七章	穩定性分析技術	259
7.1	簡介	259
7.2	穩定性	259
7.3	雙線性轉換	264
7.4	ROUTH-HURWITZ 準則	266

7.5	Jury 穩定性試驗	270
7.6	根軌跡	275
7.7	Nyquist 準則	279
7.8	Bode 圖	289
7.9	頻率響應的解釋	292
7.10	閉迴路頻率響應	294
7.11	概 論	300
	問 題	302

第八章 數位控制器之設計..... 311

8.1	簡介	311
8.2	控制系統之規格	311
8.3	補償	316
8.4	相位落後補償.....	319
8.5	相位超前補償.....	325
8.6	相位超前設計步驟.....	328
8.7	落後——超前補償.....	334
8.8	積分及微分濾波器.....	337
8.9	PID 控制器	340
8.10	PID 控制器之設計	343
8.11	以根軌跡圖來設計	348
8.12	結 論	354
	問 題	356

第九章 極點定位設計和狀態估算..... 363

9.1	簡介	363
9.2	極點定位	363
9.3	狀態估算	372

9.4	降階觀測器	382
9.5	阿克曼公式	389
9.6	可控制性和可觀測性	397
9.7	具有輸入的系統	402
9.8	總 論	408
	問 題	410

第十章 線性二次式最佳控制..... 415

10.1	簡 介.....	415
10.2	二次式花費函數.....	416
10.3	最佳原理	418
10.4	線性二次式最佳控制.....	422
10.5	最小原理.....	433
10.6	穩態最佳控制.....	435
10.7	總 結.....	444
	問 題.....	446

第十一章 類比濾波器的資料取樣轉換..... 449

11.1	簡介.....	449
11.2	取樣資料之轉換	449
11.3	連續濾波器設計的回顧〔 6 〕.....	466
11.4	轉換類比濾波器.....	470
11.5	結 論	482
	問 題	484

第十二章 數位濾波器結構..... 487

12.1	簡 介.....	487
12.2	直接結構.....	487

12.3	二階模組	493
12.4	串級實現	498
12.5	並聯實現	501
12.6	PID控制器	507
12.7	梯狀實現	508
12.8	其他結構	515
12.9	結 論	515
	問 題	519
第十三章 以微電腦來完成數位濾波器		521
13.1	簡 介	521
13.2	INTEL 8086	521
13.3	實現二階模組	525
13.4	高階濾波器的並聯實現	540
13.5	高階濾波器的串級實現	543
13.6	結構的比較	545
13.7	機器的比較	546
13.8	INTEL 2920	552
13.9	其它的微處理機	562
13.10	結 論	569
	問 題	572
第十四章 有限字長效應		575
14.1	簡 介	575
14.2	固定點數字系統	575
14.3	係數量化	594
14.4	訊號量化分析	600
14.5	極限環	617

14.6	有限字長對設計濾波器的影響	634
14.7	串級二階模組	634
14.8	並聯二階模組	654
14.9	結 論	655
	問 題	662
第十五章 實例研討		665
15.1	簡 介	665
15.2	伺服馬達系統	665
15.3	室內環境控制系統	674
15.4	飛機降落系統	681
附錄 I 電腦程式		695
附錄 II 訊號流程圖解法		707
附錄 III 計算 $E(S)$ *		713
附錄 IV 矩陣的回顧		721
附錄 V 設計公式		729
附錄 VI Z-轉換公式表		731

第一章 簡介

1.1 概論

本書所要討論的是如何來分析及設計具有數位電腦的閉迴路系統。閉迴路系統內的電腦可以修正系統的動態響應，使得系統更趨穩定。

閉迴路系統意即輸入訊號為輸出訊號的函數。圖 1-1 所示即為一個簡單的閉迴路系統，系統中要被控制的部份稱為“裝備”（plant）。感知器用來測量裝備的響應，然後將其結果和我們所設定的響應作比較，兩者的訊號之差可以使系統的實際響應趨近我們所設定的響應，而使兩者訊號差趨近零。一般而言，假如裝備的輸入訊號是實際響應及設定響應之差，則常會產生一些不必要的響應，因此，訊號之差必須再由別的系统來處理，例如，使用補償器，控制器，或濾波器。

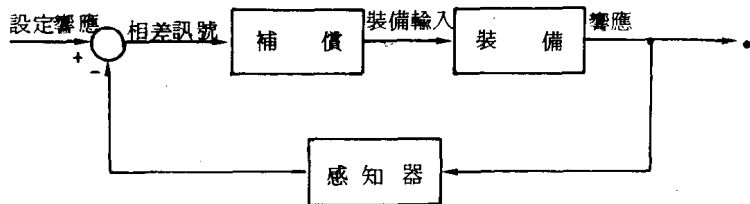


圖 1 1 閉迴路系統

例如飛機的著陸系統便是一個閉迴路系統，在圖 1-1 中，裝備代表了飛機，輸入訊號表示導航器處理各種不同的資料後所得的結果。導航器是個感知器，可用來測量飛機的位置、速度、平衡、動作等資料。設定的響應及導航器所需的飛行路徑。補償器即導航器用來修正飛行路徑偏差的方法。因此在本例中，補償器

、感知器、及響應等等均為導航器的函數。

現在來考慮圖 1-1 中各種型式的系統，其中感知器為一個專用的測量儀器，而補償器的功能由數位電腦來執行。電腦內的程式要規劃成和裝備有同樣的動態響應。例如，若設計一個自動著陸系統，則著陸必須要能平穩安全，且飛機不能受到過大的壓力。

本書要討論分析及設計的古典控制技術及現代控制技術。所有的控制系統技術都能適用於綫性非時變系統，綫性系統也要用到重疊定理〔1〕。假設系統的輸入 $X_1(t)$ 可以產生一個輸出 $Y_1(t)$ ，輸入 $X_2(t)$ 可以產生一個輸出 $Y_2(t)$ ，若系統為綫性，則由重疊定理可知輸入 $X_1(t)+X_2(t)$ 可以產生輸出 $Y_1(t)+Y_2(t)$ 。事實上，所有的系統都是非綫性的，然而，若系統變數變化不大的話，則可以用綫性的方法來解這個系統。

若系統的參數不隨時間而變的話，便稱之為非時變系統。時變系統的例子之一為太空火箭的推進段，由於飛行時會消耗燃料，因此火箭的重量會隨著時間而減少。

間斷時間系統僅在某一特定時間才能改變其值。另一方面，連續時間系統又稱類比系統，其訊號可以隨著時間作連續的變化。雖然在此所示的分析及設計方法僅適用於綫性系統，但另外也要討論一些非綫性系統的效應。

在此所討論的補償器或控制器即為數位濾波器，濾波器可用轉移函數來表示。數位控制器之轉移函數的設計方法會在第 2 章到第 10 章中詳細討論到。一旦知道轉移函數之後，便可以將之寫成數位電腦的程式，或將之製成特殊的硬體。這些方法會在第 12，13，14 章中討論到。

本章其次要討論的是數位控制系統的例題。然後討論閉迴路系統中三種典型的裝備之方程式。最後討論一些拉氏轉換理論的基本結果。

1.2 數位控制系統

在此要以美國海軍航空母艦〔2〕的自動著陸系統為例，來說明數位控制系統的基本結構。



飛機駕駛艙內部。自動飛行控制系統包含許多數位電子電路。

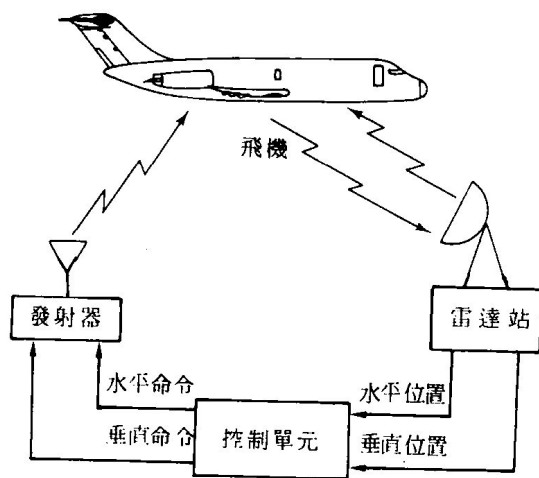


圖 1-2 飛機自動著陸系統

圖 1.2 所示為飛機自動著陸系統。該系統包含了三個基本部分：飛機、雷達、控制器。在控制系統工作期間，雷達會偵測飛機的垂直及水平位置，然後將資料轉送到控制器，控制器再計算出垂直及水平位置的命令，將之傳送到飛機的自動導航器上，以修正飛機的誤差。

圖 1-2 中的控制器是一部數位電腦。水平控制系統可以控制飛機的水平位置，垂直控制系統可以控制飛機的垂直位置，這兩個控制系統互不相關。為了簡化起見，在此僅討論水平控制系統。

圖 1-3 所示為水平控制系統的方塊圖。飛機的水平位置 $Y(t)$ 表示飛機和航空母艦降落甲板區的中心綫之水平距離。控制系統要使 $Y(t)$ 為零。雷達每隔 0.05 秒測量 $Y(t)$ 一次。因此 $Y(KT)$ 是 $Y(t)$ 的取樣值，其中 $T = 0.05$ 秒， $K = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。數位控制器處理這些取樣值之後再產生一個水平命令每隔 $T = 0.05$ 秒更換一次， T 即為取樣週期。然後飛機會根據水平命令來改變其水平位置 $Y(t)$ 。

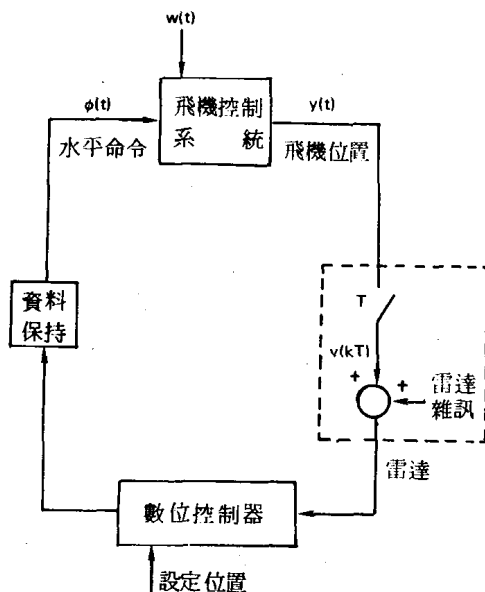


圖 1-3 飛機控制系統

圖 1-3 所示為兩個額外的輸入，這些是不需要的輸入，我們稱之為干擾，並希望它們為零。第一種干擾就是風 $W(t)$ ，它會影響到飛機的位置。第二種干擾為

雷達的雜訊，會使得雷達不能測出飛機真正的位置。由於感知器無法做到十全十美，因此在控制系統中一定會存在感知器的干擾。

設計這個系統的問題在於，存在著風和雷達雜訊的干擾下，如何使 $Y(t)$ 趨近於零。爲了要作出有效的設計，必須要知道水平位置 $Y(t)$ ，水平命令輸入 $\phi(t)$ ，及風輸入 $W(t)$ 三者之間的數學關係。例如，McDonnell-Douglas 公司的 F4 戰鬥機之水平控制系統爲一個九階非綫性微分方程式〔3〕。在這種情況下，水平命令 $\phi(t)$ 的振幅非常小，因此非綫性的效應不會影響到系統，故可將系統視爲九階綫性微分之方程式。

控制系統設計者的任務是要以數位控制器來完成這些工作。整個系統是九階方程式、風、雷達雜訊、取樣週期 T ，及響應特性等等的函數。第 8，9，10，11 章會介紹設計數位控制器時所用的各種不同的方法。

如何推導九階方程式的方法不在本書的討論範圍，因此，本書要介紹三種較簡單的控制系統，來說明如何推導出系統的數學方程式。其中兩個爲位置控制，第三個爲溫度控制。

1.3 控制的問題

我們將控制的問題列述於下。一般而言，誤差訊號需要由控制器或濾波器來處理以使適合某些控制法則及規格。這些法則爲：

1. 排除干擾。
2. 穩態誤差。
3. 傳輸響應。
4. 裝備內參數變化之靈敏度。

要解決控制問題的方法有：

1. 選擇較好的感知器。
2. 導出裝備，感知器等之方程式。
3. 根據導出來的方程式及控制法則來設計控制器。
4. 以模擬及系統測試的方法來評估設計結果。



以微電腦為主的測量系統及數位
控制器

1.4 衛星模式

首先，我們以衛星的高度控制系統為例，來討論如何導出系統的數學方程式。假設衛星是球狀的，並有推進器，如圖 1-4 所示。假設 θ 是衛星的俯仰角，另外，推進器亦可控制衛星的俯仰角及滾轉角，這三種角度可構成衛星的三軸控制。為了方便起見，在此僅考慮控制系統的俯仰軸，意即控制俯仰角 $\theta(t)$ 。

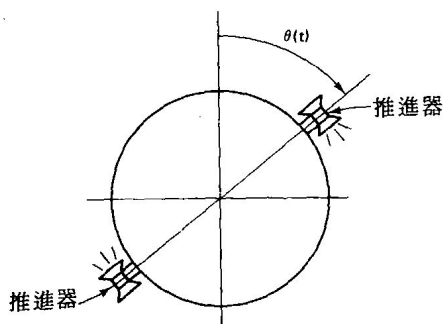


圖 1-4 衛星

衛星的推進器動作時便產生一個扭力 $T(t)$ 。圖 1-4 所示為兩個推進器正在動作，其動作的方向可以減少 $\theta(t)$ 。另兩個推進器動作時可以增加 $\theta(t)$ 。由