

Engineering/Control Systems

SUPPLEMENTS



VIA INTERNET

Control Systems Engineering, Second Edition gives students a clear and thorough introduction to controls. Designed to motivate students' understanding, the book emphasizes the practical application of systems engineering to the design and analysis of feedback systems. Using a rich pedagogy, Norman S. Nise challenges students by applying control systems theory and concepts to real-world problems. The book's updated content and format make it *the* text that enables students to build the control systems needed to support today's advanced technology.

FEATURES

Incorporates continuing design examples within the text, giving students a realistic view of specific stages in the control systems design process.

Provides students with an enhanced pedagogy, including highlighted chapter objectives and summaries, and readily identified design examples and design problems.

Includes an optional, but integrated introduction to state-space methods of designing control systems.

Includes numerous in-chapter exercises, end-of-chapter problems, design examples, and design problems.

Offers a tutorial on using MATLAB® in designing control systems, as well as in-chapter exercises and end-of-chapter problems which use MATLAB.

ALSO AVAILABLE:

Using MATLAB® to Analyze and Design Control Systems, Second Edition
Naomi Ehrich Leonard, Princeton University, and William S. Levine,
University of Maryland (0-8053-2193-4)

With this new edition, students learn MATLAB 4.2, software used to perform calculations and generate graphs essential to control system analysis and design. An introduction to SIMULINK® software and Handle Graphics is also included in the book.



THE BENJAMIN/CUMMINGS
PUBLISHING COMPANY, INC.

ISBN 957-98974-2-5



9 789579 897426

Cover image ©1994 Roger Ressmeyer/Starlight

Nise

控制系統工程

第二版

洪王
清孟
寶輝
·
白賴
鯨秋
勝庚

RT
448.9
7760
192677

ME066

國立勤益科技大學圖書館



192677

控制系統工程

第二版

原著 Nise

洪清寶·白鯨勝
王孟輝·賴秋庚

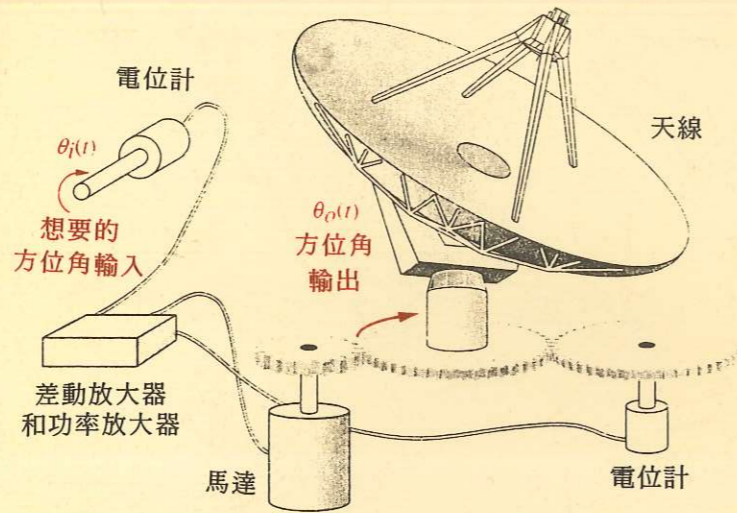
譯

滄海書局

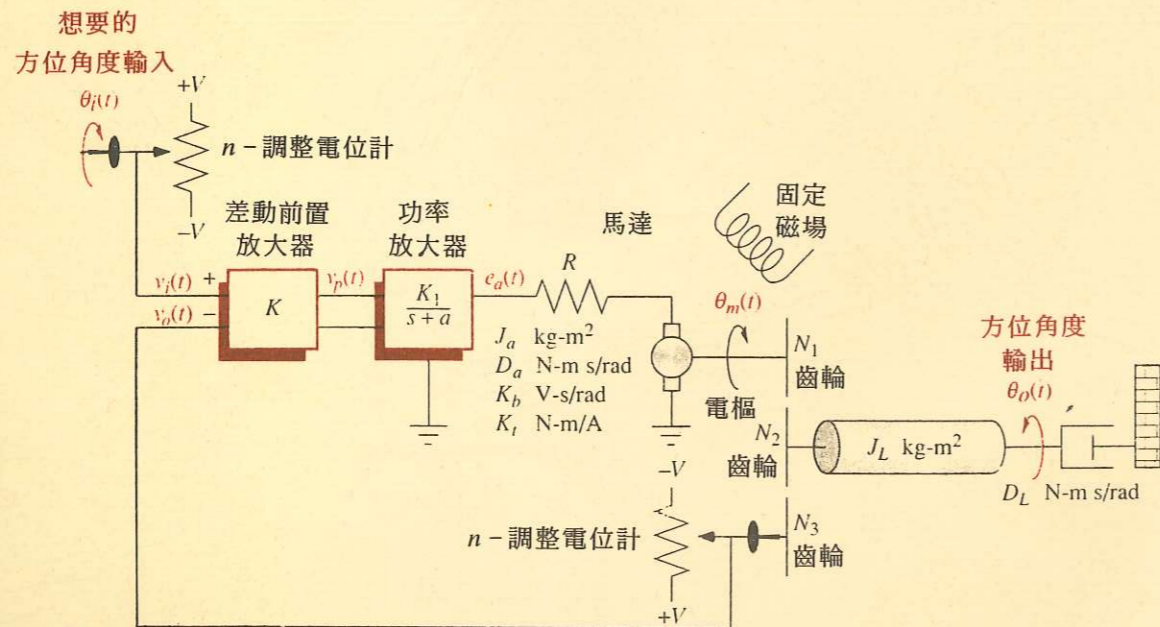
◆ Addison-Wesley Publishing Company

天線方位控制系統

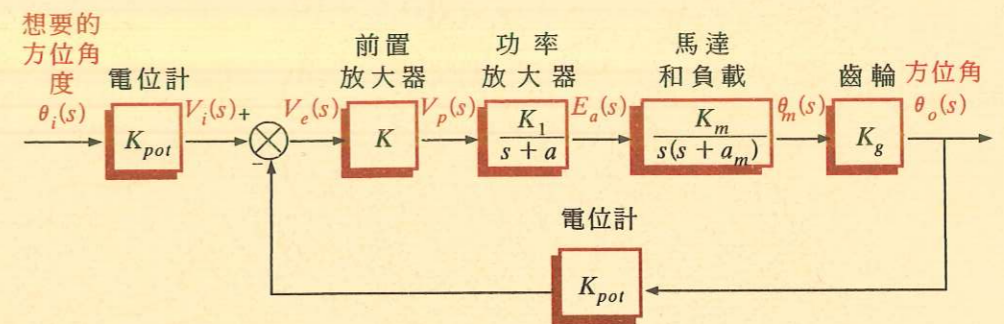
配置圖



概要圖



方塊圖



概要圖參數

| 參數 | 架構1 | 架構2 | 架構3 |
|-------|------|------|------|
| V | 10 | 10 | 10 |
| n | 10 | 1 | 1 |
| K | - | - | - |
| K_1 | 100 | 150 | 100 |
| a | 100 | 150 | 100 |
| R | 8 | 5 | 5 |
| J_a | 0.02 | 0.05 | 0.05 |
| D_a | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| K_b | 0.5 | 1 | 1 |
| K_t | 0.5 | 1 | 1 |
| N_1 | 25 | 50 | 50 |
| N_2 | 250 | 250 | 250 |
| N_3 | 250 | 250 | 250 |
| J_L | 1 | 5 | 5 |
| D_L | 1 | 3 | 3 |

方塊圖參數

| 參數 | 架構1 | 架構2 | 架構3 |
|-----------|-------|-----|-----|
| K_{pot} | 0.318 | | |
| K | - | | |
| K_1 | 100 | | |
| a | 100 | | |
| K_m | 2.083 | | |
| a_m | 1.71 | | |
| K_g | 0.1 | | |

RT
448.9
7760
192677

第一版

控制系統工程

原著 Nise

洪清寶 · 白能勝 譯
王孟輝 · 賴秋庚



國立勤益科技大學圖書館



192677

滄海書局

◆ Addison-Wesley Publishing Company

滄海書局敬贈
台中市西屯區文華路92之1號
電話：(04)451-8718
傳真：(04)451-8718
郵政劃撥：0002634518

序言

本書介紹學生控制系統工程的理論與實務，書中強調回授系統的分析與設計之實際應用。

對於學習電機、機械、航空及化學工程的學生而言，控制系統工程的研讀是必要的。從飛機、太空船到機器人及程序控制系統等學科裏都可以發現控制系統廣泛的被應用。

本書適於高年級專科生、大學工科學生及欲透過自修精通此科的人士研讀。研讀本書的學生應具備基本的物理、數學及微分方程課程等訓練。其他需要的背景，包括拉氏轉換 (Laplace transforms) 及線性代數亦編入本教科書各章及附錄中。在不影響其連續性下，如果學生不需要，可略去這些複習的教材。

重要特色

下述為第二版的重要特色，每一項討論如下：

- 標準化的章節組織
- 質與量的剖析
- 全書中例題與實例之研究
- 充分的說明
- 每章末附有大量的習題
- 強調設計
- 彈性的範圍
- 強調電腦輔助分析與設計

標準化的章節組織

每一章以主題摘要開始。主題清楚的區分為數字及標名部分，數字的部分接著一或多個實例研究，如大綱所示。每一章末有簡短總結，幾個需要簡短答案的複習問題及家庭作業習題。

質與量的解釋

解釋清楚而完整，並適時的包括背景資料之簡短複習。以合乎邏輯的方式建立標題，對於新觀念的基礎及專門術語均仔細的陳述以避免對學生造成過度的壓力並有助於自修。

雖然定量的解答顯然重要，但為了發展正確設計所需的洞察力，對問題定性及直觀的了解與求解則更重要。因此可能的話，在定量的分析與設計被介紹之前，新的觀念將從定性的觀點加以討論。例如在第 8 章，學生可以簡單的察看根軌跡，並描述當系統的參數（如增益）改變時，在暫態響應的定性改變。從第四章的少數簡單方程式將有助於發展此一能力。

例題與實例之研究

全書中藉由大量標示數字及標名的例題解釋說明。每章標示數字及主題的實例研究。這些實例研究都是實際的應用問題，用以證明每章所介紹的觀念。每一實例包含具挑戰性的問題，學生可以動手做，以測試其對內容的了解程度。

天線方位角之位置控系統為本書從頭到尾採用的實例之一。其目的在說明每一章節的新內容對於同一物理系統的應用，以加強設計過程之連續性。另外更具有挑戰性的實例，無人駕駛潛艇，在本課程中的五章中亦被探討。

充分的說明

觀念及程序的可見性對學生的了解有決定性的影響。因此，本書中約有 750 個相片，圖形及表格用來說明所討論的主題。

每章末附有大量的習題

每一章最後附有多樣的家庭作業，使學生能自我測試對本章所提到內容的了解程度。問題隨著困難及複雜度而變化，大部分的章節含有實際生活的問題，以幫助學生維持學習的動機。

強調設計

本教科書特別強調設計，第八、九、十一、十二及十三章主要集中於設計，即使是強調分析的章節，儘可能的也包括簡單的設計例題。

全書中涉及物理系統的設計例題被標以 D 的圖樣。每一章未涉及實際物理系統的問題，則以設計問題的標題分開。在此一例題及問題中，想要的響應被指定，而學生必須估算特定的系統參數（如增益），或指定某些參數值的系統規格。

此外，本書亦包含純數學系統的設計例題及問題（未標以圖樣者）。

由於可見性對設計的瞭解是如此的重要，本書特別說明不熟悉的設計規格與熟悉的規格之間的關聯性。例如較不熟悉的相位邊限被當成設計規格之前，先說明較熟悉的超越量百分比間的關聯。

本書中將介紹一般型式的設計問題，一種解決問題的方法將被提出。在許多例子中是採取按部就班的程序：首先陳述設計的目的，接著例題以下述的步驟提供證明方法，做簡化的假設，以表格或圖形呈現出結果，比較改進的系統與原始系統的性能，這項比較也核對了簡化假設的正確性。

暫態響應設計的主題在本書中包羅萬象，它們包括：

- 利用根軌跡調整增益的設計
- 藉由根軌跡做補償及控制器的設計
- 利用弦式頻率響應方法調整增益的設計
- 藉由弦式頻率響應方法做補償設計

- 使用極點安置技巧在狀態空間中做控制器的設計
 - 使用極點安置技巧在狀態空間中做觀測器的設計
 - 藉著在根軌跡上的增益調整做數位控制系統的設計
- 穩態誤差設計在本書中亦涵蓋豐富的内容，包括：
- 增益調整
 - 藉由根軌跡做補償設計
 - 藉由弦式頻率響應方法做補償設計
 - 在狀態空間中積分控制的設計
- 最後，增益設計產生的穩定度問題由下述方法來檢驗：
- 羅斯赫維滋準則 (Routh-Hurwitz Criterion)
 - 根軌跡 (Root locus)
 - 奈奎斯特準則 (Nyquist Criterion)
 - 波德圖 (Bode plots)

彈性的範圍

本書的內容可調整為一學期或一學年的課程，其組織是彈性的，允許教師選取最適於需求及時間限制的内容。

全書中，狀態空間的方法伴隨古典方法之介紹。章節（含例題、複習問題與習題）中涵蓋狀態空間的標以 S 的圖樣，不失其連續性時可予忽略。希望只研究古典方法的讀者可以跳過標有 S 圖樣的章節。若欲加入狀態空間模型基本介紹時，講義可包括第三章的内容。

在一學年的課程中，狀態空間分析在第四、五、六章，而狀態空間設計在第十二章，並可涵蓋古典方法。另一種選擇可集合標有 S 圖樣的章節成一獨立單元，接著教古典方法。在一學期的課程中，可略去十三章的數位控制系統。

強調電腦輔助分析與設計

控制系統的問題，特別是使用根軌跡分析與設計，是極為繁瑣的，因為他們的解包含了嘗試錯誤。為了解決這些問題，學生應當可以使用適當軟體或程式計算。

本書中所提到的許多問題可以無需藉助電腦求解。另一部分的問題需要電腦求解，也可以使用掌上型可程式計算機求解。例如學生可以使用可程式計算機來①決定 S 平面上的一點是否也在根軌跡上，②求奈奎斯特及波德圖的大小及相位頻率響應資料，及③以下述表示二階系統之間的轉換。

- 在極座標上極點的位置
- 在卡式座標上極點的位置
- 特性多項式
- 自然頻率及阻尼比
- 安定時間及超越百分比

- 峰值時間及超越百分比
- 安定時間及峰值時間

掌上型計算機的優點是做作業和考試時較為方便。附錄D之程式以 Microsoft QuickBASIC 寫成，可以改置於可以使用 BASIC 程式之掌上型計算機。視 BASIC 的形式及使用的機型而定，這些程式可能需要做部分的修改。

大型或個人電腦更適於大量計算的應用，如繪製時間響應、根軌跡、頻率響應曲線及求狀態轉移矩陣。這些電腦同時提供實際的環境以從事控制系統的分析及設計。第二版的 MATLAB 亦選擇性的包含在本書中，不使用 MATLAB 者可以設計自己的程式或其他如 Program CC 的程式，附錄D的 QuickBASIC 程式也可以在個人電腦上使用。

沒有使用電腦或可程式計算機，學生將無法獲得有意義的分析及設計結果，因而使學習的經驗受限。

本版新增內容

在第二版裏對於採用本書第一版的學生及教授們的建議，我們已做了修改及增加內容，以下為第二版的主要改變。

章末習題 章末習題的數目由第一版的 382 題增加到第二版的 478 題。

MATLAB 使用 MATLAB 做電腦輔助分析設計以選擇性的架構含在討論及習題中。MATLAB 的內容標以一特殊的“M”圖標，以表示使用 MATLAB 求解的範例或習題。MATLAB 的內容及其參考資料包含在附錄C中。自修指引中包括 MATLAB 程式碼及說明。因為 MATLAB 程式碼在本書中並不使用，控制系統的學習及其應用的討論不致於產生中斷。在不失其連續性之下，教師可依需要略去 MATLAB 的內容。

目的 每章先陳述主要目的，描述學生要學什麼，及如何應用這些知識於每章最後的實例研究中。

實例研究 如前所述，除了第一章之外，每章均有清楚標示的部分含有一或多個實例研究以強調每章之主題。每一實例研究後，均附有挑戰性的問題，以測試學生對本章內容的瞭解程度。

圖標 本書中從頭到尾所使用的三種圖標如左邊區域所示：

M M圖標表示 MATLAB 討論的範例及問題。MATLAB 的部份為一種補充資料，並非使用本書所必須的。

S S圖標強調狀態空間討論的範例及問題。如 MATLAB 一樣，狀態空間的內容是可選擇性的，在不影響連續性的條件下可以忽略。

D D圖標清楚的表示涉及物理系統的設計問題。

第一章 明白的闡述控制系統的歷史，並區分六個部分：液位控制、蒸汽壓及溫度控制；速度控制；穩定度，穩定化及導引；20 世紀的發展及現代的應用。

第二章 電機系統的討論已被修改，因此，可快速提出無需拉氏轉換的系統表示、分析及設計方法，本章也加入了電氣類比的部分。

第四章 第二版部分增加了如何由步級響應測試，求得轉移函數的討論。

第六章 加入反係數法的討論，並說明另一種別於 ϵ 法則的羅斯表第一行為零之方法。第六章也討論有限輸入—有限輸出 (BIBO) 穩定度的定義。

第八章 為了更加簡潔起見，根軌跡漸近線的推導移到附錄，而根軌跡法則清楚的區分為兩種：一種提供快速的繪圖，一種用來作精確的繪圖。根軌跡法則也提及了複數極點離開角及到達角的計算。同時也討論了求分離點及匯合點轉移的方法。

第十章 本章包括藉由頻率響應測試求轉移函數的方法及證明。

附錄C 此一新增附錄是 MATLAB 自修學習指引，著重於配合本書的控制系統。

附錄E 對於不具電機背景的學生，此一新增附錄為推導電樞控制直流馬達的步驟及參數之關係。

附錄F 此一新的附錄推導當 $t_0 \neq 0$ 時狀態方程式的解，以提供豐富性及另一種觀點。

附錄G 此附錄證明兩種根軌跡法則的推導。一種推導根軌跡的漸近線（此內容在第八章），另一種則推導分離點及匯合點的轉移方法。

章節組織

通常在課程內容之組織有助於瞭解作者的用意。下述的段落將彰顯這個主題。

第一章的主要目標是給予學生學習動機。本章中學生可學到日常生活中許多控制系統的應用及有關於學習的好處與此一領域的發展過程。控制系統工程的設計目標，如暫態響應、穩態誤差及穩定度將被介紹以達到這些設計目標。

許多學生在分析及設計的初步，將物理系統轉換成圖示時，感到困擾。此一步驟需要許多基於經驗的簡化和假設，而一般學院的學生並不具備這些經驗。在第一章中加入了一些假設以補足此一經驗之不足。

第二、三及五章敘述物理系統的表示方式。第二、三章涵蓋開迴路系統的模型化，分別使用頻率響應及狀態空間技巧。第五章討論互聯開迴路子系統的表示及簡化，本書只使用一種物理系統表示式。電氣、機械（往復及旋轉兩種）及電機系統被用來做為模型化、分析及設計的範例。非線性系統的線性化——一種被工程師用來簡化系統以表示其數學式的技巧——亦被提及。

第四章介紹系統分析，亦即找尋與描述系統的輸出響應。把第四及第五章的順序顛倒，或把第四章的部份分配至各章中作分析，這種安排看起來是蠻合理的。但是，根據我多年的教學經驗，有點讓學生知道系統表示式的應用，可以提高其學習的興趣。

第六、七、八章回到控制系統的設計與分析，包括穩定度的研究（第六章），穩態誤差（第七章），及使用根軌跡技巧的高階系統暫態響應（第八章），第九章則涵蓋使用根軌跡作補償器及控制器的設計。

第十和十一章著重於弦波頻率分析及設計。第十章如同第八章一樣，涵蓋了穩定度，暫態響應及穩態誤差分析的基本概念。並且用奈奎斯特及波德法則代替根軌跡技巧。第十一章如同第九章一樣涵蓋了補償器的設計，但是從弦波頻率技術的觀點而非根軌跡。

狀態空間設計及數位控制系統的分析及設計分別在第十二及十三章介紹以使本書的內容更為完整。雖然這些章節可用來做為欲繼續從事控制系統工程研究學生的簡介，但作者前述章節分析與設計討論的補充資料仍是相當有用的。在此二章中的主題雖然無法給予一完整的交待，但所強調的大綱清楚且合乎邏輯，且與本書的其他部分相結合。

輔助教材

下述內容為控制系統工程第二版的輔助教材。

使用 MATLAB 之分析及設計控制系統，第二版 由 Naomi Ehrich Leonard（普林斯頓大學）和 William S. Levine（馬里蘭大學）所著，此易於使用的手冊透過範例及練習教導學生使用 MATLAB 4.1 及 4.2 版。SIMULINK 的範圍一併編入第二版。本手冊遵循控制系統工程 (Control System Engineering) 的組織編排是本書理想的補充教材。(32193-4)

控制系統工程解答手冊，第二版 Norman S. Nise 著，本手冊包含了本書中大部分問題的詳解 (35426-3)，解答手冊只供任課教授使用。

PowerPoint 講課投影片 大約有 200 張取材自本書重要圖片的電子全彩投影片以 Microsoft's PowerPoint 3.0, Adobe Acrobat 格式成 PostScript 檔製作。

這些投影片完全適用於 PowerPoint 及 Acrobat 軟體。僅藉 ftp 由匿名 (anonymous) 從 bc.aw.com 可取得。

控制系統設計軟體 對於使用控制系統工程第二版及利用 MATLAB 來分析及設計控制系統第二版。二本書的讀者，其所須含有 MATLAB M 檔案的軟體磁片可以免費從 MathWorks 公司取得。使用包裝在本書的藍卡即可訂購你的軟體，或者藉 ftp 由匿名從 MathWorks 或 bc.aw.com 取得。

對於有關控制系統工程的更多資訊及其教學軟體，請用代表號 1-800-950-BOOK 與 Addison-Wesley · Benjamin/Cummings 的經銷商聯絡。

誌謝

我要感謝我在加州 Polytechnic 大學的同事，Pemona 及其他對兩版控制系統工程有貢獻的人。沒有他們的支持，本書將無法達到此一成果。電機及電腦工程學系及系主任 Richard

Cockrum、工學院院長 Edward Hohmann 對此一計畫全面的持續支持，更是無價的幫助我完成此一工作。

第二版完全由我的同事 Samy M. El-Sawah 校對，對於閱讀的學生亦一併感謝。

我也要感謝重點研究群給予了我他們寶貴的時間與我在加州 Redwood 城討論第一版的修訂。他們包括 San Antonio 德州大學的 Lola Boyce, Pittsburgh 大學的 John Chiasson, 加州大學的 Mahlon D. Heller; Rolla, Missouri 大學的 Leslie R. Koval; Louisiana Tech 大學的 Bill Ray; 及 Brigham Young 大學的 Wynn Stirling。

第二版的原稿由許多的評審仔細審察過，他們對內容的專精知識及對細節的注意給予了許多的建議及改善。特別是 Carnegie Mellon 大學的 Charles P. Neuman 對整個計劃的許多建議及鼓勵我在第二版中加入了 MATLAB，其他的評審除了重點研究群外，他們無價的貢獻也在此一併誌謝，如 South Carolina 大學的 Stephen R. McNeil, San Diego 大學的 Robert L. Mertz, Kansas 大學的 Medhat M. Morcos; Missouri Columbia 大學的 Satish S. Nair 及 Northeastern 大學的 Bruce Wilson。

我也特別要感謝過去三年來使用前一版的學生，他們的建議提供了新版改進所需的觀點。

最後我要感謝 Benjamin/Cummings 出版公司及全體職員，對此計畫全面的發行所提供的專業支持。特別是執行編輯 Dan Joraanstad 對於本書發行的全力支持。總編輯 Tim Cox 對於整個計畫的建議及持續精神上的合作。副編輯 Lisa weber 由緊密的製作行程導引本書成一專業的風格；Aquisition 編輯在此計劃初期的工作，組織重點研究群及對初稿的審察；助理編輯 Laura Cheu 對初稿的美術著作；攝影助理編輯 Lisa Lougee 對本版動態新的相片之研究及取得，及發展編輯 Denise Penrose 與 Jannine Drew 增加了本書之清晰。

Norman S. Nise

目錄

| | |
|---------------------|----|
| 1 簡介 | |
| 1.1 簡介 | 2 |
| 1.2 控制系統的歷史 | 4 |
| 1.3 控制系統工程師 | 7 |
| 1.4 響應特性及系統結構 | 8 |
| 1.5 分析及設計的目的 | 11 |
| 實例研究 天線方位角：位置控制系統簡介 | 13 |
| 1.6 設計過程 | 16 |
| 1.7 電腦輔助設計 | 21 |
| 總結 | 22 |
| 複習問題 | 23 |
| 問題 | 23 |
| 參考文獻 | 27 |
| 2 頻域模型 | |
| 2.1 簡介 | 30 |
| 2.2 拉氏轉換複習 | 31 |
| 2.3 轉移函數 | 39 |
| 2.4 電路之轉移函數 | 41 |
| 2.5 往復式機械系統轉移函數 | 54 |
| 2.6 旋轉機械系統轉移函數 | 60 |
| 2.7 齒輪系統的轉移函數 | 64 |
| 2.8 機電系統轉移函數 | 68 |
| 2.9 電子電路類比 | 74 |
| 2.10 非線性 | 77 |
| 2.11 線性化 | 78 |
| 實例研究 天線控制：轉移函數 | 82 |
| 人類腿的轉移函數 | 84 |
| 總結 | 86 |
| 複習問題 | 86 |
| 問題 | 87 |
| 參考文獻 | 98 |

3 時域模型

| | |
|-------------------------|-----|
| 3.1 簡介 | 100 |
| 3.2 一些觀察 | 101 |
| 3.3 一般狀態空間表示式 | 105 |
| 3.4 狀態空間表示式的應用 | 107 |
| 3.5 轉移函數到狀態空間的轉換 | 113 |
| 3.6 狀態空間到轉移函數的轉換 | 119 |
| 3.7 線性化 | 120 |
| 實例研究 天線控制：狀態空間表示式 | 123 |
| 藥劑吸收 | 125 |
| 總結 | 127 |
| 複習問題 | 128 |
| 問題 | 128 |
| 參考文獻 | 135 |
| 4 時間響應 | |
| 4.1 簡介 | 138 |
| 4.2 極點、零點與系統響應 | 139 |
| 4.3 一階系統 | 141 |
| 4.4 簡介二階系統 | 144 |
| 4.5 一般二階系統 | 148 |
| 4.6 欠阻尼二階系統 | 151 |
| 4.7 增加極點之系統響應 | 161 |
| 4.8 含零點之系統響應 | 164 |
| 4.9 狀態方程式之拉氏轉換解 | 169 |
| 4.10 狀態方程式之時域解 | 171 |
| 4.11 電腦模擬之時域響應 | 177 |
| 實例研究 天線控制：開迴路響應 | 179 |
| 無人駕駛潛艇：開迴路傾斜響應 | 181 |
| 總結 | 184 |
| 複習問題 | 185 |
| 問題 | 186 |
| 設計問題 | 194 |
| 參考文獻 | 195 |

5 互聯子系統之簡化

| | |
|--------------------------|-----|
| 5.1 簡介 | 198 |
| 5.2 方塊圖 | 199 |
| 5.3 回授系統之分析與設計 | 207 |
| 5.4 信號流程圖 | 209 |
| 5.5 梅生法則 | 210 |
| 5.6 狀態方程式之信號流程圖 | 215 |
| 5.7 狀態空間中之另一種表示式 | 215 |
| 5.8 相似轉換 | 225 |
| 實例研究 天線控制：閉迴路響應之設計 | 235 |
| 無人駕駛潛艇：傾斜角度控制表示式 | 239 |
| 總結 | 241 |
| 複習問題 | 242 |
| 問題 | 243 |
| 設計問題 | 257 |
| 參考文獻 | 259 |

6 穩定度

| | |
|-----------------------------|-----|
| 6.1 簡介 | 262 |
| 6.2 羅斯-赫維茲準則 | 264 |
| 6.3 羅斯-赫維茲準則：特殊案例 | 268 |
| 6.4 羅斯-赫維茲準則附加例子 | 274 |
| 6.5 狀態空間的穩定度 | 281 |
| 實例研究 天線控制：經由增益值做穩定度設計 | 283 |
| 無人駕駛潛艇：由增益之穩定度設計 | 284 |
| 總結 | 286 |
| 複習問題 | 286 |
| 問題 | 287 |
| 設計問題 | 293 |
| 參考文獻 | 295 |

7 穩態誤差

| | |
|------------------------|-----|
| 7.1 簡介 | 298 |
| 7.2 對單一回授系統之穩態誤差 | 302 |
| 7.3 靜態誤差係數及系統型態 | 307 |
| 7.4 穩態誤差規範 | 311 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 7.5 干擾下的穩態誤差 | 313 |
| 7.6 非單一回授的穩態誤差 | 315 |
| 7.7 靈敏度 | 318 |
| 實例研究 天線控制：以增益對穩態誤差的設計 | 321 |
| 雷射碟影記錄器：以增益對穩態誤差的設計 | 322 |
| 總結 | 324 |
| 複習問題 | 325 |
| 問題 | 325 |
| 設計問題 | 338 |
| 參考文獻 | 340 |
| 8 根軌跡技巧 | |
| 8.1 簡介 | 342 |
| 8.2 定義根軌跡 | 346 |
| 8.3 根軌跡的特性 | 349 |
| 8.4 繪製根軌跡 | 351 |
| 8.5 修飾根軌跡草圖 | 356 |
| 8.6 一個例題 | 364 |
| 8.7 以增益調整做暫態響應設計 | 367 |
| 8.8 一般化的根軌跡 | 370 |
| 8.9 正回授系統的根軌跡 | 373 |
| 8.10 極點靈敏度 | 375 |
| 實例研究 天線控制：以增益做暫態設計 | 377 |
| 總結 | 382 |
| 複習問題 | 382 |
| 問題 | 383 |
| 設計問題 | 384 |
| 參考文獻 | 398 |
| 9 根軌跡設計 | |
| 9.1 簡介 | 400 |
| 9.2 藉由串聯補償改善穩態誤差 | 403 |
| 9.3 藉由串聯補償改善暫態響應 | 413 |
| 9.4 改善穩態誤差和暫態響應 | 427 |
| 9.5 回授補償 | 439 |
| 9.6 補償的具體實現 | 449 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 實例研究 天線控制：落後領前補償 | 453 |
| 無人駕駛潛艇：領前和回授補償 | 456 |
| 總結 | 459 |
| 複習問題 | 460 |
| 問題 | 460 |
| 設計問題 | 467 |
| 參考文獻 | 472 |
| 10 頻率響應技巧 | |
| 10.1 簡介 | 474 |
| 10.2 漸近近似：波德圖 | 480 |
| 10.3 奈氏準則簡介 | 497 |
| 10.4 描繪奈氏圖 | 503 |
| 10.5 由奈氏圖求穩定度 | 508 |
| 10.6 增益邊限和相位邊限 | 512 |
| 10.7 由波德圖求穩定度 | 514 |
| 10.8 閉迴路暫態和閉迴路頻率響應間的關係 | 517 |
| 10.9 閉迴路和開迴路頻率響應間的關係 | 519 |
| 10.10 閉迴路暫態和開迴路頻率響應間的關係 | 524 |
| 10.11 由頻率響應求穩態誤差特性 | 528 |
| 10.12 帶有時間延遲的系統 | 531 |
| 10.13 以實驗求轉移函數 | 536 |
| 實例研究 天線控制：穩定度設計及暫態性能 | 539 |
| 總結 | 541 |
| 複習問題 | 542 |
| 問題 | 542 |
| 參考文獻 | 551 |
| 11 頻率響應設計 | |
| 11.1 簡介 | 554 |
| 11.2 利用增益調整設計暫態響應 | 555 |
| 11.3 落後補償 | 556 |
| 11.4 領先補償 | 561 |
| 11.5 落後—領先補償 | 566 |
| 實例研究 天線控制：增益設計 | 571 |
| 天線控制：串聯補償設計 | 571 |

| | |
|----------------------------|-----|
| 總結 | 573 |
| 複習問題 | 573 |
| 問題 | 574 |
| 設計問題 | 577 |
| 參考文獻 | 579 |
| 12 狀態空間設計 | |
| 12.1 簡介 | 582 |
| 12.2 控制器設計 | 583 |
| 12.3 可控制性 | 589 |
| 12.4 控制器設計之另一種方法 | 593 |
| 12.5 觀測器設計 | 597 |
| 12.6 可觀測性 | 603 |
| 12.7 觀測器設計的另一種方法 | 606 |
| 12.8 穩態誤差 | 611 |
| 實例研究 天線控制：控制器及觀測器的設計 | 618 |
| 總結 | 623 |
| 複習問題 | 624 |
| 問題 | 624 |
| 設計問題 | 629 |
| 參考文獻 | 630 |
| 13 數位控制系統 | |
| 13.1 簡介 | 635 |
| 13.2 建立數位電腦之模式 | 638 |
| 13.3 Z-轉換 | 641 |
| 13.4 轉移函數 | 645 |
| 13.5 方塊圖化簡 | 647 |
| 13.6 穩定度 | 650 |
| 13.7 穩態誤差 | 654 |
| 13.8 Z 平面上的暫態響應 | 658 |
| 13.9 Z 平面上的增益設計 | 660 |
| 實例研究 天線控制：經由增益的暫態設計 | 662 |
| 總結 | 666 |
| 複習問題 | 666 |
| 問題 | 667 |

| | |
|--|-----|
| 設計問題 | 671 |
| 參考文獻 | 672 |
| 附錄 A 符號表 | 673 |
| 附錄 B 矩陣、行列式，及系統方程式 | 677 |
| 附錄 C MATLAB 學習指引 | 685 |
| 附錄 D 微軟 QuickBASIC 程式 | 721 |
| 附錄 E 直流馬達示意圖推導 | 731 |
| 附錄 F $t_0 \neq 0$ 時狀態方程式的解 | 734 |
| 附錄 G 根軌跡規則：推導 | 736 |
| 字彙 | 745 |
| 著作權 | |
| 部分習題解答 | |
| 索引 | |