

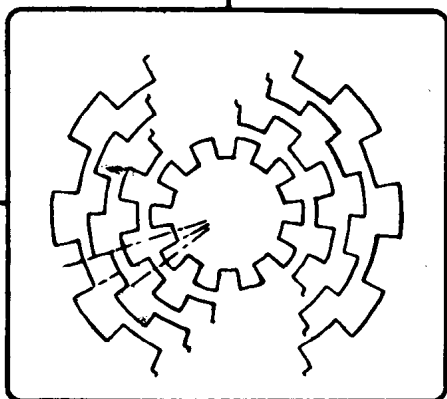
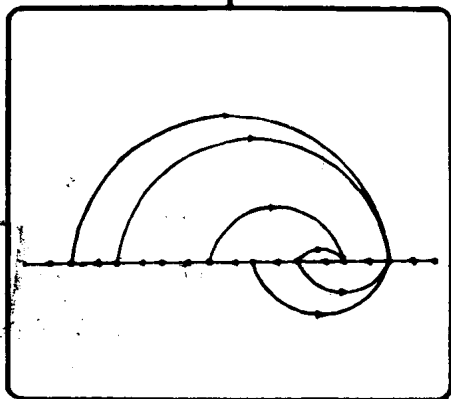
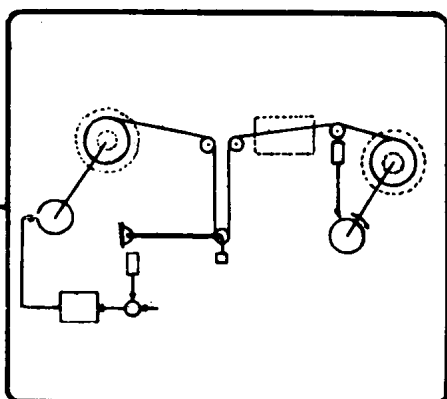
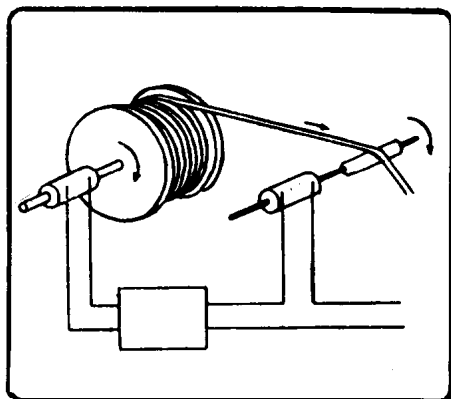
第三版

自動控制系統

林國富 譯 王師 校訂

BENJAMIN C. KUO THIRD EDITION

Automatic Control Systems



羅拔書局印行

第三版

自動控制系統

林國富 譯

王師 校訂

羅拔書局印行

王 序

自動控制的觀念與方法，其應用是多方面的。諸如：增進生活舒適的設備系統，工業生產的系統，一切有效的經營與管理，社會與經濟體系的控制，生態環境的控制等，均與自動控制的原理息息相關。

B. C. KUO 所著 *Automatic Control Systems* 之 1975 年第三版，是從其第二版作了一番大幅度修訂的版本。此書是目前大專學校自動控制課程之最佳版本。其內容非常齊全勻稱，遠非其他此類書籍之偏而不全者可比擬。此書就論及的系統而言，包括了連續系統與間斷系統；延時系統與非延時系統；線性系統與非線性系統。就系統之分析與設計方法而言，包括了古典的方法與近代的方法。這些方法均各有其優點，誠不可偏廢。

連續系統的數學模式是微分方程式，將其轉換為代數方程式須藉助於拉氏轉換法；間斷系統的數學模式是差分方程式，將其轉換為代數方程式須藉助於 Z -轉換法。於是，連續系統可用訊號流程圖表示；同樣地，間斷系統也可用訊號流程圖表示。故這兩種系統實具有類比性，學會了一種系統的處理法則，將很容易觸類旁通，而領悟了另一種系統的處理法則。KUO 氏將連續系統與間斷系統等量齊觀，平行安排，確實增加了教與學不少的方便，這一特色是目前旁的教本所沒有的。

余任教自動控制課程多年，曾先後採用 KUO 著第二版及第三版作為教本，發現原著第三版由於翻新伊始，錯誤甚多，有些是由於打字排印的錯誤，有些是由於原著者之疏忽。余曾將發現之錯誤列為勘誤表，寄給原著者，承其欣然接納，允於再版時加以訂正。

林國富君現將 KUO 著第三版譯為中文，其文詞忠實而通順；復經余詳加校閱，將原著之錯誤逐一加以改正；並加註解，使理易

明，此對讀者而言，當較閱讀原著更感方便而收事半功倍之效。

系統用訊號流程圖表示的主要優點，是可用 *Mason* 增益公式統一求解。這一求解過程是基於觀察法，憑看圖直接寫出結果，而避免了繁瑣的演算。*Mason* 增益公式的應用，是由訊號流程圖內順向路徑的條數以確定公式內容的項數，如果將訊號流程圖內之順向路徑畫在主幹及上側，而將逆向路徑畫在下側，這樣，也許使路徑增加了一兩個交越點，但是，不僅獲得了統一性，而且增加了方便性。要從訊號流程圖內找尋順向路徑時，僅須在訊號流程圖之主幹與上側去找尋，而不必浪費時間與分散注意力於下側。余基於以上觀點，悉將各訊號流程圖作了統一的修訂。

此一中文本不僅適合於作大專學校自動控制課程之教本，也可供專業人員及其他人士自修與參考。雲陽出版社願印行此書，對我國科技發展將是有所貢獻的。

 CONTROL SYSTEMS RESEARCH LABORATORY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN, URBANA, ILLINOIS 61801 217/333-4341

January 12, 1976

Smith S. Wang
Professor and Head
Electronics Eng. Dept.
Taiwan Provincial
Taipei Institute of Technology
3. Section 1, Shin - Sheng South Road
Taipei, Taiwan, Republic of China

Dear Professor Wang:

Thank you for your letter of January 5 and the enclosed errors you have found in my book, AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS, 3rd edition. These errors and some others that I have found will be corrected in the second printing of the book. I hope that you will keep on sending me any additional errors you may come across.

I am enclosing a copy of the solutions manual for your use.

Sincerely yours,



B. C. Kuo
Professor

BCK:mjc
Enclosure

原序

本書的第一版出版於 1962 年，其特徵是包括有取樣資料和非線性控制系統的章節。對於控制系統的分析與設計全是古典的。

1967 年出版的第二版有兩個主要的改變，也就是包括了狀態變數的技巧以及間斷資料系統和連續資料系統的集成。在第二版中省略了非線性系統的章節，但却又使得本書的使用者有些失望。因為在修訂的當時，筆者覺得主題及有限的篇幅實難容納該等非線性系統。

第三版仍然是為高年級而寫的控制系統課程的初級教科書。雖然在過去十年間現代控制理論中發生很大變化，但是對現代初級控制系統的課程準備適當的教材，仍是一件困難的工作。問題複雜的地方是因為很難在大學課程時教有關現代控制理論新發展的相關主題。在控制系統中唯一具體的情況是許多工業上的實際問題仍是用古典法解出。雖然一些現代控制理論的技巧是相當有用，可用來解更複雜的問題，但是所做出來的解，實際應用時通常有較多的限制。不過，必須體認到現代控制工程中，都應該對古典的和現代的控制方法有所了解。後者會加強及擴展未來解實際問題的能力。筆者的主張，是在教初級和中級控制系統理論時使兩者平衡。因此，在這個版本裡，同樣強調古典法和現代控制理論。

在最近幾年已經出版了許多包括現代控制理論為主題的初級書籍。有些作者企圖使古典的控制和現代的控制合而為一，但根據批評家和評論家的看法大多數是失敗了。雖然這個目標是相當需要，但是若只由說明的觀點來做，似乎得不到好的解答。一直到新理論和新技術已發展成適合這麼做以前，可能仍然無法達到這個目的。以某些角度來看，控制系統可視為學習如何以不同方法解一種問題——控制——的科學。這些解問題的不同方法可互相比較及斟酌，但是可能無法統一所有的作法。在本書中的作法是分別採用古典法

和現代研討法，但是儘可能地交替考慮這兩種方法，並比較出每一種的優點和缺點。有許多說明用的例題分別以兩種方法解出來。

許多現有的控制系統的教科書，被批評為沒有包括適當的實際問題。理由之一也許是因為許多教科書的作者是理論家，缺乏實作的背景以及提供實際生活例子的必要經驗。另外一個理由可能是，大多數實際生活中的問題是相當複雜，將其列入於控制系統課程中是很困難，因而很難找到適合於初級程度的說明例子。通常，將問題簡化來適合教材中完美的理論和設計技巧時會喪失相當多的真實性。雖然如此，大多數在高年級學習控制系統的學生，並不繼續向研究所發展，而他們必須將他們的知識立即用於他們的新工作中。對於這些學生而言，這是極重要的，而他們急需知道所要面對的控制系統實際上究竟是像什麼呢？因此，筆者在這本書中介紹了許多各種場合的實際例題。在本書中家庭作業的習題也企圖反映所提供的更接近實際生活的問題。

本新版和前兩版比較的特色，茲強調如下：

1. 同樣重視古典和現代控制理論。
2. 包括了取樣資料和非線性系統。
3. 實際系統的例題和家庭作業的習題。

本書是筆者在 *Urbana-Champaign* 的 *Illinois* 大學高年級控制系統課程許多年裡慢慢累積資料寫成的。此外，這本書是寫成適合自修和參考用的形式。

第一章說明控制系統的基本觀念。談到了回授的定義及其影響。第二章說明數學的基礎及準備。其主題包括了拉氏轉換、 Z 轉換、矩陣代數及轉換法的應用。轉移函數和訊號流程圖是在第三章中討論。第四章介紹對動態系統的狀態變數研討法。控制度和觀測度的定義和觀念在此先做個初步的介紹。這些主題稍後將用來作線性控制系統的分析與設計。第五章討論物理系統的數學模式。在此，特別強調電機系統。實際上所使用的典型轉換器和控制系統也在此說明。但並不企圖徹底地包括各種形式的控制系統與裝置。第六章

VII

介紹控制的時域響應分析，同時使用古典和現代研討法，並指出一些在時域中簡單的設計考慮。第七、八、九章的主題是有關於穩定度、根軌跡、以及控制系統的頻域響應。

在第十章中討論控制系統的設計，是採用基本的古典研討法。第十一章包括了一些擇適控制的主題，筆者主張，若時間容許，可在大學階層裡教這些。這本書所包括的教材是超過了一學期的需要。

在準備寫這本書時的一大難題，是如何選擇本書所涵蓋的主題。爲了保持本書合理的大小，使某些原來計劃主題的手稿，必須予以割愛。這些包括了訊號流程圖和時域的分析、間斷資料系統、李亞普諾穩定度法的第二種方法、函數分析的敘述、狀態平面分析、以及一些關於製造擇適控制的主題等等。筆者覺得如果包括了這些主題，將實質地增加本書的精彩，但是書本的價錢就要增高了。

筆者真誠地感謝 *Illinois* 大學的 *W. L. Everitt* 院長(已榮譽退休)、以及 *E. C. Jordan*、*O. L. Gaddy*、和 *E. W. Ernst* 諸位教授，在本書計劃中所給予的鼓勵與支持。筆者也感謝 *Virginia* 大學的 *Andrew Sage* 博士和 *Illinois* 大學的 *G. Singh* 博士所提供寶貴的建議。尤其也要感謝 *Jane Carlton* 女士對原稿所做良好打字及她對校稿有極大的幫助。

Urbana, Illinois

BENJAMIN C. KUO

目 錄

第一章 概論

1—1	控制系統	1
1—2	何謂回授及其影響	7
1—3	回授控制系統的種類	12

第二章 數學基礎

2—1	導言	19
2—2	複變數的觀念	19
2—3	<u>拉氏轉換</u>	22
2—4	<u>拉氏轉換</u> 以部份分式展開法求出	27
2—5	<u>拉氏轉換</u> 在解線性常微分方程式中的應用	32
2—6	基本矩陣理論	34
2—7	矩陣代數	40
2—8	<u>Z轉換</u>	49

參考資料	59
------	----

習 題	60
-----	----

第三章 轉移函數及訊號流程圖

3—1	導言	65
3—2	線性系統的轉移函數	65
3—3	線性系統的脈衝響應	69
3—4	方塊圖	73
3—5	訊號流程圖	80

2 目 錄

3—6	訊號流程图的基本特性摘要	83
3—7	訊號流程图的定義	84
3—8	訊號流程图的代數法則	87
3—9	訊號流程图的作圖實例	90
3—10	訊號流程图的一般增益公式	94
3—11	一般增益公式在方塊图中的應用	99
3—12	間斷資料系統的轉移函數	101
	參考資料	110
	習 題	110

第四章 動態系統的狀態變數特性論述

4—1	狀態觀念的介紹	117
4—2	狀態方程式和動態方程式	119
4—3	狀態方程式的矩陣表示法	122
4—4	狀態變換矩陣	124
4—5	狀態變換方程式	128
4—6	狀態方程式和高階微分方程式之關係	133
4—7	相位變數典型式的轉換	135
4—8	轉換至狀態方程式和轉移函數之間的關係	142
4—9	特徵方程式，特徵值，特徵向量	145
4—10	A 矩陣的斜角化（相似轉換）	147
4—11	喬頓典型式	152
4—12	狀態圖	156
4—13	轉移函數的分解	168
4—14	轉換至模態形式	174
4—15	線性系統的控制度	178
4—16	線性系統的觀測度	189
4—17	控制度，觀測度和轉移函數之間的關係	194
4—18	非線性狀態方程式及其線性化	197
4—19	線性間斷資料系統的狀態方程式	201

4—20	間斷狀態方程式的 Z 轉換解答	206
4—21	間斷資料系統的狀態圖	209
4—22	取樣資料系統的狀態圖	213
4—23	線性時變系統的狀態方程式	216
參考資料		220
習 題		222

第五章 物理系統的數學模式

5—1	導言	233
5—2	電網路方程式	234
5—3	機械系統元件的模式	236
5—4	機械系統的方程式	253
5—5	控制系統中的誤差感測裝置	259
5—6	轉速計	272
5—7	控制系統中的直流馬達	273
5—8	雙相感應馬達	279
5—9	步級馬達	282
5—10	張力控制系統	291
5—11	邊緣導引控制系統	293
5—12	具有傳輸延遲的系統	299
5—13	太陽追蹤器系統	301
參考資料		306
習 題		307

第六章 控制系統的時域分析

6—1	導言	321
6—2	控制系統時間響應的典型測試訊號	322
6—3	控制系統的時域工作性能——穩態響應	325
6—4	控制系統的時域工作性能——暫態響應	337

4 目 錄

6—5	二階系統的暫態響應.....	339
6—6	位置控制的時間響應.....	351
6—7	微分控制在回授控制系統中對時間響應的影響...	364
6—8	積分控制在回授控制系統中對時間響應的影響...	369
6—9	速率回授或轉速計回授控制.....	373
6—10	狀態變數回授的控制.....	374
參考資料.....		377
習 題.....		377

第七章 控制系統的穩定度

7—1	導言.....	387
7—2	穩定度，特徵方程式，及狀態變換矩陣.....	388
7—3	有輸入時的線性非時變系統的穩定度.....	391
7—4	決定線性控制系統的穩定度的方法.....	394
7—5	<u>羅斯 - 赫維滋</u> 準則.....	395
7—6	<u>奈氏</u> 準則.....	405
7—7	<u>奈氏</u> 準則的應用.....	420
7—8	$G(s)H(s)$ 的其他零點和極點對奈氏軌跡形狀的影響.....	430
7—9	多迴路系統的穩定度.....	435
7—10	具有時間延遲的線性控制系統的穩定度.....	440
7—11	非線性系統的穩定度—— <u>鮑伯</u> 準則.....	443
參考資料.....		448
習 題.....		450

第八章 根軌跡的技術

8—1	導言.....	457
8—2	根軌跡的基本條件.....	458
8—3	完全根軌跡的作圖.....	463

8—4	應用根軌跡的技巧來解多項式的根	502
8—5	根軌跡作圖的一些重要影響	507
8—6	根廓線——多參數變量	518
8—7	具有純時間延遲的根軌跡	526
8—8	根軌跡和極座標圖之間的關係	539
8—9	間斷資料控制系統的根軌跡	542
	參考資料	547
	習 題	550

第九章 控制系統的頻域分析

9—1	導 言	555
9—2	頻域特性	559
9—3	二階系統的 M_p 、 ω_p 及頻帶寬度	560
9—4	加零點於開路轉移函數的影響	564
9—5	加極點於開路轉移函數的影響	569
9—6	相對穩定度——增益邊限、相位邊限、及 M_p	571
9—7	波德圖大小曲線的斜率和相對穩定度之間的關係	581
9—8	$G(j\omega)$ 平面上常數 M 的軌跡	582
9—9	$G(j\omega)$ 平面上常數相位的軌跡	587
9—10	在大小對相位平面上的常數 M 及 N 圖—— <u>尼可圖</u>	589
9—11	回授不為1的閉路頻率響應分析	595
9—12	頻域中的靈敏度	596
	參考資料	599
	習 題	599

第十章 簡介控制系統的設計

10—1	導 言	605
10—2	控制系統的古典設計法	612
10—3	相位前引補償法	618

6 目 錄

10 — 4	相位落後補償法.....	640
10 — 5	落後 - 前引補償.....	659
10 — 6	橋接 T 型網路補償.....	665
參考資料.....		673
習 題.....		674

第十一章 簡介擇適控制

11 — 1	導言.....	683
11 — 2	解析設計.....	685
11 — 3	參數的擇適.....	697
11 — 4	用特定之特徵值來設計系統——控制度的應用.....	700
11 — 5	狀態觀測器的設計.....	703
11 — 6	擇適線性調整器的設計.....	717
11 — 7	具有部份狀態回授的設計.....	737
參考資料.....		744
習 題.....		745

附錄 A 頻域圖

A — 1	轉移函數的極座標圖.....	752
A — 2	轉移函數的 <u>波德圖</u> (角圖).....	758
A — 3	大小 - 對 - 相位圖.....	771

附錄 B 拉氏轉換表

附錄 C 拉格朗乘數法

索引

第一章 概論

1—1 控制系統

近年來，在發展及增進現代文明與科技上，自動控制系統不斷的增加其重要性。在家庭裡，自動控制在暖氣及空氣調節系統中，調節現代家庭裡的溫度及濕度以獲得舒適的生活。在工廠裡，自動控制系統有許多種應用；例如，製造產品的品質管制、自動控制化、機械工具控制、現代太空工學及武器系統、電算機系統、傳輸系統、以及機器人等。甚至，如存貨控制、社會及經濟系統控制、環境及水文系統控制等問題，亦可以自動控制的理論加以研究。

基本控制系統的觀念以方塊圖說明於圖 1-1 中。系統實際上是以激勵訊號 (*actuating signal*) e 經過控制系統的元件用預定的方式控制變數 c 。

以更淺顯的話來說，被控制的變數是系統的輸出，而激勵訊號就是輸入。例如，在自動的鋼板控制中，兩個前綱輪的方向當作被控制的變數 c ，即為輸出；綱輪的位置是輸入，即激勵訊號 e 。控制的過程或系統在本例中是由鋼製的機械所組成，包括了整個自動的活動部份。但是，如果被控制的是汽車的速率，則所加於加速器的壓力是激勵訊號，速率即被控制的變數。

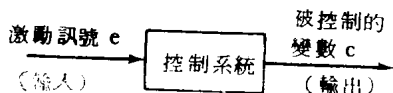


圖 1-1 基本控制系統

2. 自動控制系統

在很多種情況之下，許多變數同時受許多輸入所控制。像這樣的系統稱為**多變數系統** (*multivariable system*)。

開路控制系統 (無回授系統)

Open-Loop Control Systems (Nonfeedback Systems)

自動這個詞在控制系統中隱含著一些技巧 (*sophistication*)。自動一詞，通常是指系統經常對許多工作條件作適當的調整，也就是對某種輸入作令人滿意的反應。但是，並非任何形式的控制系統都有自動的特性。通常是以反饋輸出的變數回來和命令訊號 (*command signal*) 相比較以達到自動的特性。當系統並沒有回授構造時，稱為**開路系統** (*open-loop system*)，這是最簡單及最經濟的一種控制系統。不幸的是，開路控制系統並不準確，且少變化，除了最簡單的應用以外，幾乎不多用。

例如，控制家庭暖氣加熱用的鍋爐。假設鍋爐僅由一時間裝置來控制，它只是控制鍋爐開和關的週期。為了調整溫度至適當準位 (*level*)，人們必須預先估計鍋爐要處於開的時間是多久，然後再依此設置定時器。當時間一到時，鍋爐就關掉。但是，這使得室內溫度不是高於就是低於所期望的值，因此導致預先估計所產生的不準確。不需要更深一層的研討，就可很明顯的看出這種控制是不準確的，且不太可靠。不準確的理由之一，是因誰也無法知道事實上鍋爐的確實特性。另一個因素是人們無法控制室外的溫度，然而它確實會影響室內的溫度。這同時也指出了，開路控制系統在工作時的一個非常不便之處，也就是系統並不能依環境狀況的變化或外界的干擾而作適當的調整。在鍋爐控制的例子中，也許由於經驗可以提供一些所希望的室內溫度控制；但是，如果門或窗在工作週期內斷續的開著或關著時，最後室內的溫度並不能以開路控制作準確的調整。

電動洗衣機是另一個開路系統的典型實例，因為所洗的時間完全由人們的判斷和估計來決定。一個真正自動的電動洗衣機，必須能夠不斷的檢查衣服的清潔度，且當達到所希望的清潔程度時機器自己會關掉。

雖然開路控制系統有使用上的限制，但它是組成閉路控制系統的基本元件。一般而言，開路控制系統的元件可以圖 1-2 的方塊圖來表示。輸入訊號或命令 r 加於控制器，而控制器的輸出即激勵訊號 e ；然後激勵訊號激勵所控制的過程，驅使被控制的變數 c 至所期望的值。

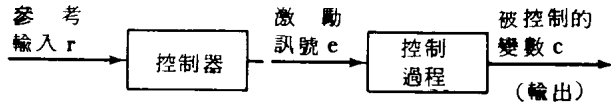


圖 1-2 開路控制系統的方塊圖

閉路控制系統（回授控制系統）

Closed-Loop Control Systems (Feedback Control Systems)

在開路控制系統中所損失的更準確及更富調節的控制，只是因為缺少一個環路（*link*）或一從輸出至系統輸入的回授。為了要獲得更準確的控制，被控制的訊號 $c(t)$ 必須要反饋回來和參考輸入（*reference input*）作比較，且激勵訊號是輸入輸出之間的差異，必須送經系統來校正誤差。如剛才所敘述的具有一個或多個回授路徑的系統稱為開路系統。在所有回授控制系統中，人類本身也許是最複雜的一種，他是具有許多輸入和輸出的控制系統，來擔任高度複雜的工作。

為了說明人亦可視為回授控制系統，讓我們考慮實際上人們如何取得餐桌上的東西。當人碰到目標後大腦就送出一訊號給手臂來完成工作。眼睛可看做是感測裝置（*sensing device*），它連續的送回手臂位置的資料。手和目標物之間的距離是誤差，最後當手碰到目標物時誤差降至零。這就是個典型的閉路控制的實例。但是，如果一個人矇著眼睛去取這個東西，則他只能估計它的實際位置來走近目標。結果東西很可能在邊緣地區而找不到。眼睛矇著了，回授路徑就斷了，人的動作就變成一個開路系統。人取東西的例子，以圖 1-3 中的方塊圖來說明。