

線性

控制系統

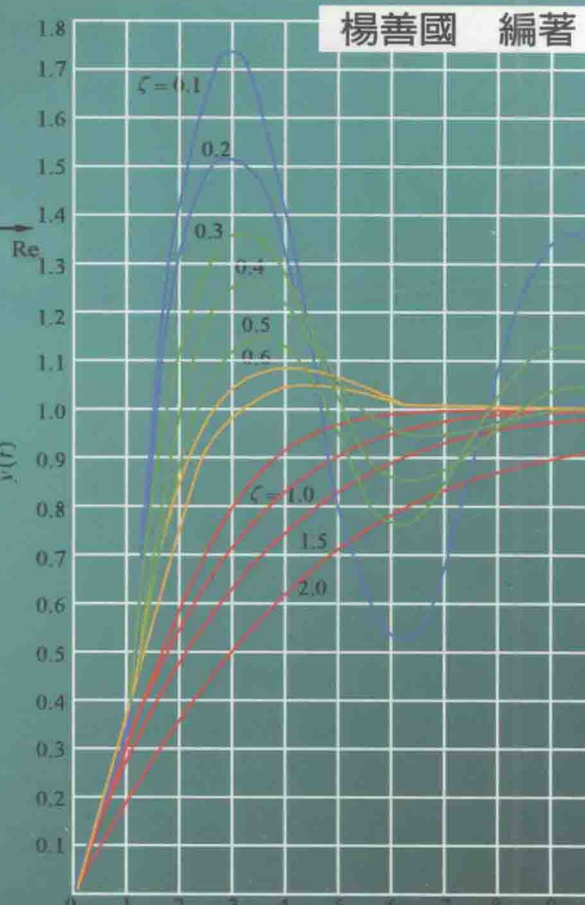
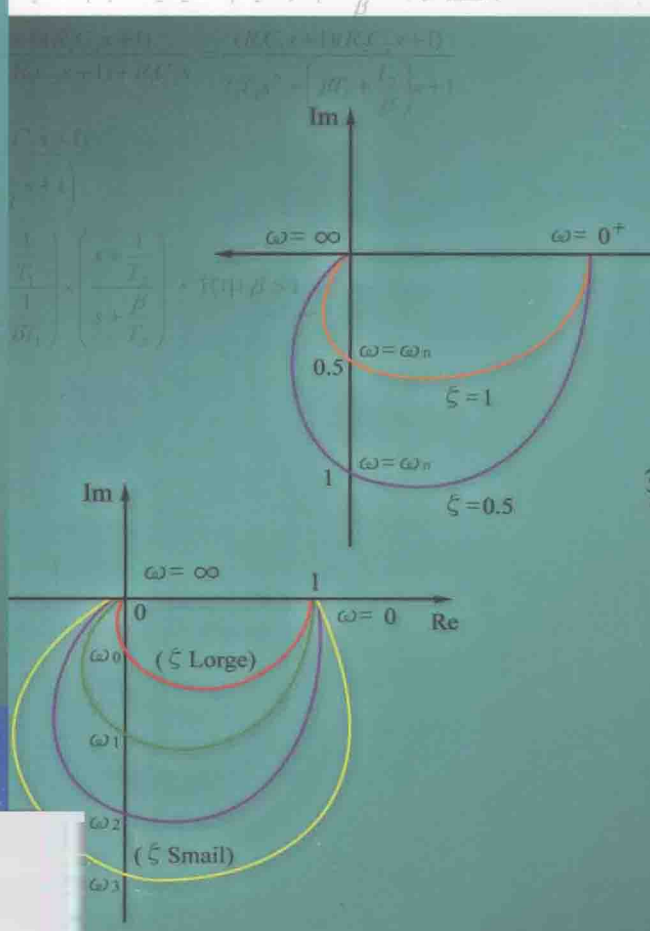
Linear Control System

楊善國 編著

$$\left(\frac{1}{R_1 + C_1 s} \right) + \left(R_2 + \frac{1}{C_2 s} \right) \times I(s)$$

$$(s+1) + R_1 C_2 s = T_1 T_2 s^2 + (R_1 + T_2) s + 1$$

$$T_2 \cdot R_1 C_1 + R_2 C_2 + T_1 C_2 = \beta T_1 + \beta$$



線性控制系統

楊善國 編著

國家圖書館出版品預行編目資料

線性控制系統 / 楊善國編著. -- 初版. -- 臺北縣土城市：全華，2008.01

面；公分

參考書目：面

ISBN 978-957-21-6099-2(平裝)

1. 自動控制

448.9

96023081

線性控制系統

編 著 楊善國

執行編輯 張麗麗

發行人 陳本源

出版者 全華圖書股份有限公司

地 址 236 台北縣土城市忠義路 21 號

電 話 (02) 2262-5666 (總機)

傳 真 (02) 2262-8333

郵政帳號 0100836-1 號

印刷者 宏懋打字印刷股份有限公司

圖書編號 060007

初版一刷 2008 年 3 月

定 價 新台幣 280 元

I S B N 978-957-21-6099-2

全華圖書

www.chwa.com.tw

book@ms1.chwa.com.tw

全華科技網 OpenTech

www.opentech.com.tw

有著作權・侵害必究

序一

控制理論是研究各種系統（包括自然系統和人造系統）的一般性共同控制規律的科學，其應用已遍及當今社會的各個方面，成為人們認識自然和改造自然的重要手段。現代工業文明也表明控制理論是機器自動化的基礎，是將人類從繁重的乃至是危險的體力勞動中解放出來，從而提高勞動生產率和產品質量，並保證勞動者人身安全的關鍵。線性控制系統是控制理論中最為成熟和最為基礎的一個組成分支，是現代控制理論的基石。系統與控制理論的其他分支，都不同程度地受到其概念、方法和結果的影響。

目前雖也已有許多論著和典籍論及線性控制系統問題，但是作為控制理論的教育與研究，當是人們永無止境的追求。本書作者楊善國教授累積二十餘年控制理論教育與研究之經驗，深諳現行控制理論各種書籍的優缺點以及教授執教、學生從學之規律，通過披沙揀金、博採眾長而撰寫成此書，因而使本書內容具有鮮明特色。比如能去蕪存菁，使全書量少而精要，同時能從學習者的立場著眼，不空談高深理論，重在深入淺出、循循善誘，務使學習者能透徹理解、易於掌握；特別是關鍵批註，能交代清楚前因與後果間的邏輯關係，理清來龍去脈，將使學習者常有頓然領悟、融會貫通之感。這些特色也是本書特別值得向讀者推薦的原因。

本書作者楊善國教授曾在中山科學研究院擔任 IDF 戰機空用儀電系統研究多年，隨後在國立勤益技術學院任教，對於控制理論和系統可靠性有精深的研究，已有數十篇論文發表於國內外，並多次在國際大會作特邀演講(Plenary Lecture)，同時楊教授以教書育人為本，對教育教學規律很具心得，2006 年夏參加筆者主持的 Symposium of Multi and Interdisciplinary Engineering Education，其精彩演講令人印象尤深，在諸多專家的推選下，楊教授榮獲了拜耳優秀教

學獎(Bayer Teaching Excellence Award)。由於隔海相望的緣故，我能向楊教授討教的機會並不多，除了郵件往還，我們或一起參加國際學術會議，雖接觸時間不長，我卻深受楊教授虔誠敬業、嚴謹治學、謙和爲人精神的感染，其種種卓越表現，堪稱學者楷模。本人有此機緣與教授切磋，共同探討，自覺受益匪淺，乃樂於爲序。

涂善東
華東理工大學副校長
中國壓力容器學會理事長
IFToMM 可靠性委員會理事

序二

在現代科學技術領域裏，線性控制系統的應用範圍極為廣泛，它涉及到電氣、控制、電子、通訊、機械、儀器儀錶、感測器與檢測、電腦、人工智慧等眾多學科領域。因此，“線性控制系統”課程，現在已經成為大部分工程與技術專業學生的必修課程。

楊善國教授多年從事自動控制理論教學與研究工作，特別是在線性控制系統方面累積了豐富的經驗。仔細閱讀了楊善國教授編寫的“線性控制系統”乙書，對其評價如下：

1. 雖然自動控制理論博大精深，有關線性控制系統方面的著作也非常多，但是，對於初學者來說，抓住線性控制系統基礎與關鍵內容十分重要。楊善國教授根據當前該學科理論與實際密切結合的特點，站在學生和教師不同的側面上去尋找線性控制系統“學習與教學”的盲點與瓶頸。教材內容新穎，題材廣泛，結構別具一格。
2. 教材內容覆蓋了經典控制理論和現代控制理論的線性微分方程、拉普拉斯變換、矩陣、轉移函數、狀態方程等數學基礎部分，方法包括了系統的圖形表示法、時域分析法、根軌跡法、頻率分析法、控制系統的設計與補償等內容，教材重點內容突出，系統編排環環相扣，課程內容安排適中，例題貼切。
3. 本書作者用字遣詞講究，語句清晰通順，教材分析透徹生動，同時注重了理論的嚴密性和方法的實用性，使讀者易於領會和掌握問題的實質，並能較快地用以解決實際問題，是一本不可多得的好教材。

芮延年
于蘇州大學

自序

傳統控制理論自二十世紀初萌芽以來，經歷長時間的淬煉，迄今已逐漸趨於成熟穩定。在這發展的過程中，無數的學者貢獻其相關研究的心血，點滴累積成了今日的成果。當然也因此造成了百家爭鳴、各放異彩的局面。所以坊間可以找到許多這方面的書籍，無論是外文版、中文版或翻譯版均不在少數。

筆者大學部畢業於自動控制系，碩士班唸的是自動控制研究所，而博士學位是在機械所控制組完成的，故可謂控制領域的科班生。筆者曾在中山科學研究院從事控制相關工作六年，繼而投身教職並且擔任控制相關課程的教授工作已逾十五年，因而深深知悉坊間叢書的優缺點以及學生的需求和學習控制理論時的盲點與瓶頸。所以在有機會卸除長年兼任行政工作後的空檔中，將過去的教材做了一番整理，並且編輯成冊，希望能對學習者有所助益。

感謝上海華東理工大學副校長涂善東博士、蘇州大學機電學院院長芮延年博士的撥冗題序。作者才疏學淺，文中恐有謬誤，祈請先進賢達不吝指正，謝謝。願上帝祝福您！

楊善國 謹誌

於國立勤益科技大學自動化工程系

個人網頁：<http://irw.ncut.edu.tw/mechanical/skyang/skyang.htm>

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

本書文句力求清晰通順，使讀者可輕鬆閱讀，且每一個主題講解完後都會有例題，經由例題可使講解更清楚，加倍學習的功效。另外適時地以問答方式提供註解(Note)，使讀者於研讀本書的過程當中，有如親臨教室上課，輕鬆而親切。本書依作者的教學經驗及專業知識，在兼顧學習內容及學習效果的考慮下，內容章節做以下的安排：導論(介紹控制的學術定義以及相關名詞及用語)、數學基礎、系統的數學表示法、系統的圖形表示法、時域分析、根軌跡法、頻域分析、控制系統的設計與補償。本書適用於私立大學、科大電機系「線性控制系統」之課程。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

相關叢書介紹

書號：0229402
書名：信號與線性系統(修訂二版)
編著：賴柏洲
20K/840 頁/620 元

書號：02897017
書名：自動控制(附範例光碟
(修訂版)
編著：胡永柝
16K/472 頁/440 元

書號：0375403
書名：自動控制(修訂三版)
編著：蔡瑞昌, 陳 維, 林忠火
20K/728 頁/550 元

書號：05828
書名：智慧型控制：分析與設計
編著：林俊良
20K/536 頁/480 元

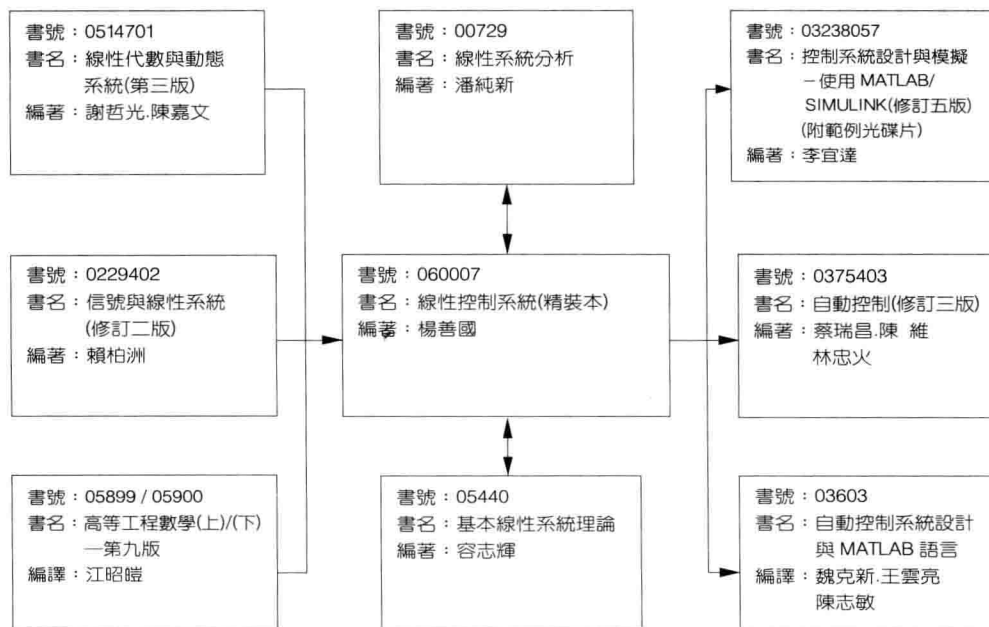
書號：05643007
書名：可程式控制器實習實務
— FX2N(附機電整合丙級
技術士)(附範例光碟片)
編著：張世波, 廖本全, 邱昭益
16K/408 頁/390 元

書號：05803017
書名：FX2/FX2N 可程式控制器
程式設計與實務(修訂版)
(附範例光碟片)
編著：陳正義
16K/360 頁/380 元

書號：05418017
書名：機電整合－可程式控制
原理與應用實務(修訂版)
(附系統光碟片)
編著：廖哲民
20K/480 頁/420 元

◎上列書價若有變動，請
以最新定價為準。

流程圖



目 錄

第 1 章 導 論

1-1 系統分析的流程.....	1-2
1-2 控制與操縱.....	1-3
1-3 控制系統的分類.....	1-5
習題	1-8

第 2 章 數學基礎

2-1 微分方程(Differential equation, DE).....	2-2
2-2 拉氏轉換(Laplace transform)	2-9
2-3 矩陣(Matrix).....	2-14
習題	2-20

第 3 章 系統的數學表示法

3-1 何謂轉移函數(Transfer function)	3-2
3-2 求轉移函數的步驟	3-3
3-3 機械系統.....	3-5
3-4 電路系統.....	3-8
3-5 水位系統.....	3-11
3-6 熱傳系統.....	3-12

3-7 各系統間之類比.....	3-14
3-8 狀態變數表示法(State variable representation).....	3-15
習題	3-22

第 4 章 系統的圖形表示法

4-1 方塊圖(Block diagram)	4-2
4-2 梅森增益公式(Mason's gain formula).....	4-6
4-3 訊號流程圖(Signal flow graph, SFG).....	4-10
習題	4-24

第 5 章 時域分析

5-1 時域分析(Time domain analysis)	5-2
5-2 測試信號(Test signals)	5-3
5-3 暫態響應(Transient response)	5-6
5-4 穩態誤差(Steady state error).....	5-23
5-5 控制系統的穩定性(Stability of a control system)	5-28
5-6 魯斯-賀維茲準則(Routh-Hurwitz criterion).....	5-29
習題	5-38

第 6 章 根軌跡法

6-1 根軌跡(Root locus).....	6-2
6-2 根軌跡的作圖法.....	6-5
6-3 完全根軌跡.....	6-24
6-4 極零點對系統的影響.....	6-26

6-5 具時間延遲(或稱死時間-Dead time)特性系統之 根軌跡.....	6-33
6-6 根廓線(Root contours)	6-37
習題	6-38

第 7 章 頻域分析

7-1 頻率響應(Frequency response)	7-2
7-2 控制系統的頻域規格.....	7-7
7-3 波德圖(Bode diagram)	7-10
7-4 奈奎士穩定(Nyquist stability).....	7-23
7-5 奈奎士圖(Nyquist diagram)	7-24
7-6 增益邊限(Gain margin)、相位邊限(Phase margin)	7-40
習題	7-47

第 8 章 控制系統的設計與補償

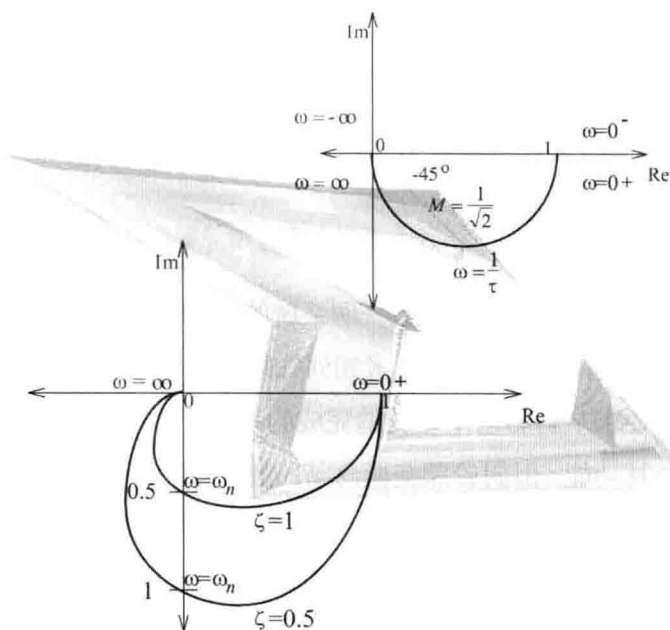
8-1 前言	8-2
8-2 PID 控制器(PID controller)	8-3
8-3 相位補償器(Phase compensator).....	8-5
8-4 時域設計.....	8-15
8-5 頻域設計	8-26
習題	8-37

參考文獻

1

章

導 論



1-1 系統分析的流程

1-2 控制與操縱

1-3 控制系統的分類

1-1 系統分析的流程

人們設計或製造一個系統的目的，是希望該系統依照設計、執行並完成要求的功能。然而設計者如何知曉該系統的特性行為(Performance)是否達到設計要求？對於已生產製造完成的系統，可以在系統實體上進行實作(實驗)以驗證其功能。但對於還在概念階段的系統，或執行實作(實驗)有所不便(例如有破壞性或花費昂貴或耗時)、或在執行實作前基於某種原因欲先初步瞭解其行為的系統，則勢必需要一套方法評估之以知其真相。因為該評估並不是在實際系統上執行測試，所以這一套方法首先須將該系統轉換為適當的數學模型，接著針對該數學模型進行理論分析，圖 1-1 即描述了這個流程。

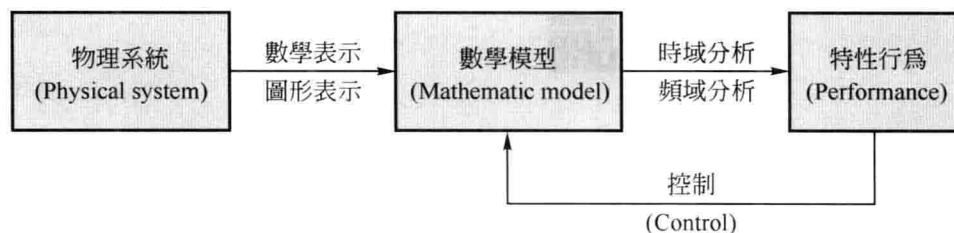


圖 1-1 系統分析的流程

在控制理論的領域裡，經常將一物理系統以數學式或圖形的方式表示之。其中數學式表示法常用的有：(1)轉移函數(Transfer function)，(2)狀態方程式(State equations)；常用的圖形表示法則有(1)方塊圖(Block diagram)，(2)訊號流程圖(Signal flow graph)。得到該系統的數學模型之後，可以用兩種不同的角度對該系統進行分析以得知其特性行為：(1)時域分析(Time domain analysis)，即站在時間座標軸上觀察系統對不同輸入所產生的輸出；(2)頻域分析(Frequency domain analysis)，即觀察系統對不同頻率信號的反應如何。由這兩種角度的分

析，設計者可以充分瞭解該系統的特性行爲。

一般對系統特性行爲的要求有三方面：(1)穩定(Stable)：也就是說系統必須收斂而不可以發散；(2)快速(Fast)：系統只要花很短的時間即可表現出要求的特性行爲；(3)準確(Accurate)：系統的特性行爲與要求的規格很接近。例如：現欲要求一馬達的轉速爲 300rpm，則該馬達於給予電源後由靜止到轉速爲 300rpm 左右所花的時間要愈短愈好(快速)，但不能愈轉愈快以致燒毀(收斂不可以發散)，而且最終實際轉速須與 300rpm 愈接近愈好(準確)。

若系統的特性行爲不能讓設計者滿意，則須找出原因並且改善之，使該系統在經過改善後有新的數學模型，再對新的數學模型進行分析，以得到新系統的特性行爲。如此反覆進行直到系統的特性行爲達到要求，讓設計者滿意爲止。控制(Control)是改善系統特性行爲的有效方法，其實際作法有加入控制器(Controller)或使用補償器(Compensator)等方式。

1-2 控制與操縱

一個系統的行爲，依其管制特性可分爲操縱及控制兩類。

1. 操縱(Manipulate)：無回授(Feedback)功能者，又稱開環路(Open loop)，如圖 1-2 所示。

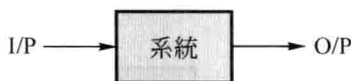


圖 1-2 操縱系統的方塊圖

該類系統的理論輸出係依據系統本身的特性以及在輸入的作用下完成，但實際輸出是否如理論輸出卻無法掌握。此類系統通常應用於使用者對輸出的準確度要求不高的場合，例如驅動教室電風扇的馬達。若依規格電風扇在通電後之轉速應該在 200rpm，但實際轉速如何通常我們並不在

意，快了一點或慢了一點都不要緊，只要會轉、能通風即可。

2. 控制(Control)：有回授功能者，又稱閉環路(Close loop)。

此類系統的輸出信號會回饋到輸入端，成為輸入信號的一部份；也就是說實際驅動系統的信號大小會隨輸出的大小而變化。通常此類系統應用於使用者對輸出的準確度要求很高的場合，例如驅動生產線輸送帶的馬達，方塊圖如圖 1-3 所示。因為加工站間的距離是固定的，加工站間的距離除以輸送帶的速度等於工件於加工站間移動所需的時間。若驅動生產線輸送帶馬達的轉速忽快忽慢，則加工程序勢必大亂，故必須要求該馬達的轉速保持在某個可接受的小誤差範圍之內。回授功能(控制)可以達到這個要求：馬達實際轉速由感測器量度後(V_S)經反向放大器將信號反向(V_B)再回授至輸入端，實際輸入馬達的信號是 V_{in} (定值)加 V_B (為負值)後的 V_E 。若實際轉速太快，則 V_B 變大 V_E 變小，可使馬達轉速變慢；反之，若實際轉速太慢，則 V_B 變小 V_E 變大，可使馬達轉速變快。經由此機制(控制)，馬達則必須(被控制)在要求的轉速下運轉。

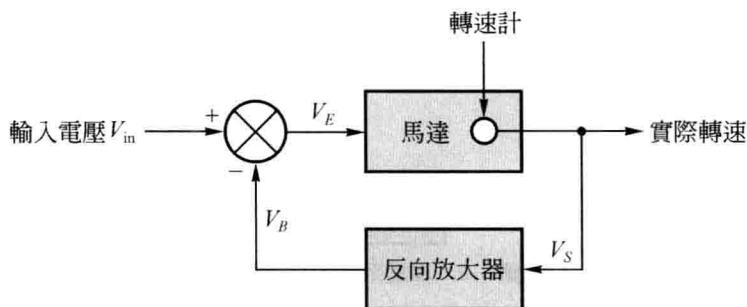


圖 1-3 伺服馬達轉速控制方塊圖

3. 控制系統方塊圖(Block diagram of a control system)：

任何一個控制系統均可以化成如圖 1-4 所示的方塊圖。其中：

(1) 輸入(R)：又稱期望值或目標值、應有值。

- (2) 輸出(C)：又稱控制量或實有值。
- (3) 誤差(E)：輸入值與回授值之差($E = R - B$)。
- (4) 控制區間(G)：受控制之物或機構、空間。
- (5) 控制器(G_C)：可改變控制區間的特性行為以符合要求的裝置。
- (6) 回授(B)：與輸入信號於相加點處相加以產生誤差(E)的信號。

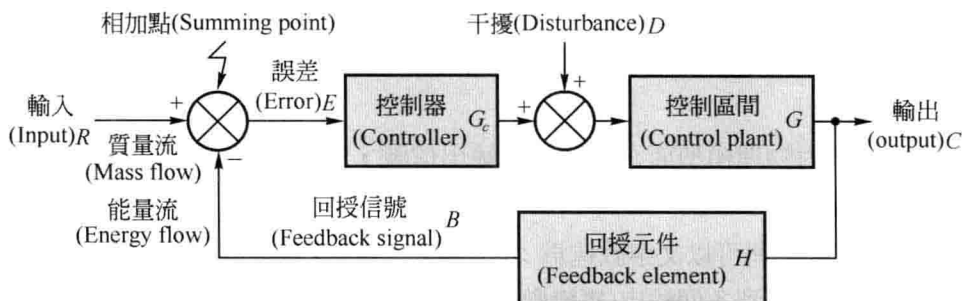


圖 1-4 控制系統方塊圖

1-3 控制系統的分類

控制系統依不同的性質或角度可以有下列的分類。

1. 連續(Continuous-data)或稱類比(Analog)系統與離散(Discrete-data)或稱取樣(Sampled-data)系統。

連續、不連續、類比、離散等名詞間的關係如圖 1-5 所示。另數位系統(Digital)是離散系統中的一個特例，乃指該類系統中之控制器為數位式計算機(Digital computer)。本書所討論的對象為連續系統。

2. 線性(Linear)與非線性(Non-linear)系統。

凡符合重疊定理(Principle of superposition)者若且為若($\Leftrightarrow$)是線性系統。i.e.