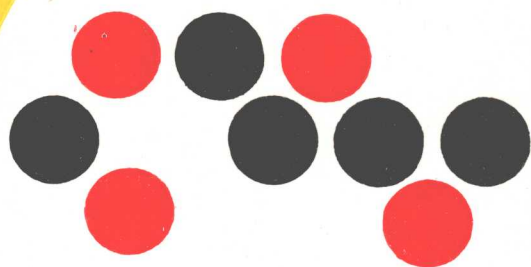


自動控制

李嘉猷著

科學技術叢書 / 三民書局印行



自 動 控 制

李 嘉 猷 著

學歷：成功大學電機系碩士

現職：成功大學電機系講師

三 民 書 局 印 行

教育部 教科圖書 發售片 具審定執照

茲據 三民書局 呈送李嘉猷編

五年制三專自動控制(附冊)經本部審定合於五年制三專之用其有效期限自中華民國二十六年一月一日起至中華民國二十七年一月一日止

合行發給執照

右給 三民書局 收執

中華民國



中華民國二十六年一月一日

© 自動控制

作者 李嘉猷

發行人 劉振強

出版者 三民書局股份有限公司

印刷所 三民書局股份有限公司

地址／臺北市重慶南路一段六十一號

郵撥／〇〇〇九九九八一五號

初版 中華民國七十六年八月

編號 S 44200

基本定價 肆元貳角貳分

行政院新聞局登記證局版臺業字第〇二〇〇號

版權所有・翻印必究

編輯大意

本書係遵照民國七十二年一月教育部公布之五年制工業專科學校電機工程科「自動控制」課程標準編著而成。

本書全一冊，適合五年制工專電機工程科電機電力組第四學年下學期，一學期3學分，每週授課3小時教學之需；亦可供儀表控制組第五學年上學期，一學期4學分，每週授課4小時教學之用。

自動控制係達成自動化的方法，其系統觀念亦可應用於管理科學之範疇，因此成為電機、化工、機械等工程方面必備的知識，本書主要介紹控制之組件、應用、轉移函數與回授系統的實際應用，並討論穩定度之分析。

本書於公餘課畢之暇完成，又見識有限，疏誤之處恐所難免，敬請方家先進及使用本書的讀者不吝指正。

自動控制 目 次

編輯大意

第一章 緒 論	1
1-1 控制系統之發展與其展望	1
1-2 控制系統之定義	3
1-3 自動控制系統之分類	4
1-4 自動控制系統之應用範圍	10
習 題 一	15
第二章 自動控制組件簡介	17
2-1 機械系統之數學模式	17
2-2 轉換器	24
2-3 直流伺服馬達	35
2-4 二相感應馬達	39
2-5 步進馬達	42
2-6 放大器	46
習 題 二	52
第三章 自動控制之應用	53
3-1 自動調整	53

3-2	程序控制	54
3-3	伺服機構	63
	習題三	70
第四章	控制系統之數學技術	71
4-1	緒 言	71
4-2	微分方程式	71
4-3	複變數及 s 平面	74
4-4	拉氏變換式	77
4-5	以拉氏變換解微分方程式	91
	習題四	95
第五章	控制系統之表示法	97
5-1	緒 言	97
5-2	轉移函數	97
5-3	方塊圖	100
5-4	信號流程圖	110
	習題五	119
第六章	時間響應分析	121
6-1	緒 言	121
6-2	回授控制系統暫態分析之典型測試輸入信號	121
6-3	回授控制系統之時域性能特性	124
6-4	回授控制系統之暫態響應	126
6-5	回授控制系統之穩態誤差	132

6-6	簡介系統穩定度之分析	136
	習題六	145
第七章	根軌跡法	149
7-1	緒 言	149
7-2	根軌跡之定義	149
7-3	根軌跡之構成技術	154
7-4	根軌跡之一般圖形與特性	162
	習題七	166
第八章	頻率響應分析	169
8-1	緒 言	169
8-2	頻率響應特性之定義	170
8-3	頻率響應與時間響應之比較	176
8-4	極座標圖	178
8-5	包德圖	182
8-6	尼克圖	197
8-7	倪奎士穩定度準則	209
8-8	相對穩定度——增益裕度及相位裕度	225
	習題八	234
第九章	控制系統設計	239
9-1	緒 言	239
9-2	PID 控制器	241
9-3	補償器網絡	245

9-4 時域設計與補償·····	252
9-5 頻域設計與補償·····	258
習題九·····	269

第十章 控制系統模擬 ····· 271

10-1 緒 言·····	271
10-2 以類比計算機作系統模擬·····	272
10-3 以數位計算機作系統模擬·····	276
10-4 混合式系統模擬·····	284
習題十·····	287

第一章 緒 論

1-1 控制系統之發展與其展望

利用回授 (feedback) 方式來控制系統的輸出響應，已有一段漫長的歷史。回授控制之第一樁載於史實的應用事例，係為希臘人蓋茲堡 (Ktesibios) 在西元前三世紀時，利用浮球調節器機構 (float regulator mechanisms) 控制液體流量所做的水鐘。約於西元前250年時，腓龍 (Philon) 亦利用浮球調節器，發明了可自動保持煤油液面高度的油燈。西元一世紀時，希羅 (Heron) 在他所著的「氣壓學」(*Pneumatica*) 書中，曾概述當時數種應用浮球調節器原理所設計的液面保持機構。

近代歐洲所創作的第一件回授控制系統，係為荷蘭人卓別爾 (Cornelis Drebbel 1572-1633) 的溫度調節器。其後，帕平 (Dennis Papin 1647-1712) 在西元1681年研製了第一個蒸汽鍋爐用的壓力調節器，該調節器的形式類似於目前壓力快鍋的安全氣閥。最先用於工業製程的自動回授控制系統 (automatic feedback control system)，一般咸信是瓦特 (James Watt's) 於 1769 年為控制蒸汽引擎轉速所發展的飛球離心調速機 (flyball governor)。

早期的控制理論係由米諾斯基 (Minorsky)、倪奎士 (Nyquist) 和赫任 (Hazen) 等人所發展。在 1922 年時，米諾斯基從事船舶自動駕駛控制器之研究，提出如何由系統之微分方程式來判斷其穩定度

(stability) 的方法。1932 年，倪奎士發展出一套由穩態正弦輸入的開迴路響應，來決定其閉迴路系統穩定度的簡單準則。1934 年，赫任在位置控制系統中首先導入“伺服機構 (servomechanisms)” 此一名詞，並研究其輸出響應能緊隨輸入變化的繼電器伺服機構 (relay servomechanisms) 之設計。

在 1940 年以前，自動控制理論發展得甚少且慢，大多數控制系統的設計，完全是一種個人技藝的表現。第二次世界大戰期間，基於戰爭的需要，大量的研究人員研究開發飛機自動導航系統、槍砲定位系統、雷達追蹤系統和其他應用回授控制原理所研製的軍事設備。這些研究，使得自動控制理論的發展，真可謂是一日千里。在 1940 年代的十年中，由於數學和分析方法的大量發展與應用，終於建立起控制工程 (control engineering) 這門工程學科。

古典控制理論 (classical control theory) 的主要核心為頻率響應法 (frequency-response methods) 和根軌跡法 (root-locus method)，前者發展於四十年代，可用來設計能滿足性能規格 (performance specifications) 的線性回授控制系統；後者發展於四十年代末期，可用來探討參數變動時閉迴路系統的穩定度。然而，利用古典控制理論所設計的系統，雖然特性良好且穩定，但常非最佳之設計。故自五十年代末期起，控制設計問題的重點便由單純的系統設計轉向最佳控制系統 (optimal control system) 之設計。由於具有多端輸入與多端輸出的現代設備日益複雜，描述此類控制系統所需的方程式愈來愈多，使得僅能處理單輸入——單輸出系統 (single-input-single-output system) 問題的古典控制理論難以解析此類多變數系統 (multivariable system)。故自 1960 年起，開始發展近代控制理論 (modern control theory)，以配合機器設備與日漸增的複雜性，

並滿足軍事、太空科學與工業應用上對穩定度、精確度及多種性能規格的嚴格要求。

自從類比和數位計算機問世以來，許多新穎的控制方式被相繼提出與應用。邇來，計算機自動控制技術日漸開發成熟，可用來監控電機、機械、化工及冶金等工業的複雜製程 (process)。此外，計算機亦已開拓了控制概念在非工程領域，如商業管理、醫學、社會學等方面的應用。在可預見的未來，由於計算機控制在自動化 (automation) 上的推廣，將可更大幅度地改善我們的科技工業，並為人類帶來更大的福祉。

1-2 控制系統之定義

近年來，控制系統已在近代文明和技術的發展上，扮演了日益重要的角色。實際上我們日常生活中的每一種活動，都受到某種控制系統或多或少的影響。以居家生活為例，冷暖氣系統中的自動控制裝置，可調節室內溫度的及濕度，使得人們過得更舒適。為了獲致最大的能源使用效率，有些大型辦公室和工廠建築物的冷暖氣系統，還用電腦來輔助控制。在各種工業中，也是到處可見到控制系統的踪影，如產品的品質控制、自動化裝配線、航空設備、武器系統、運輸系統、機器人 (robot) 及電腦控制等比比皆是。甚至如存貨控制、社會和經濟系統控制等問題，亦可用自動控制理論予以處理。

所謂控制系統 (control system)，係指藉之可依所期望方式維持或改變機器設備 (plant) 內有關物理量的系統。不論控制系統的形式為何，每個系統中均含有三項基本要素，即控制目標 (control objectives)、控制系統組件 (control system components) 和控制

結果 (control results) 三者。這三項基本要素之間的基本關係，以方塊圖方式示於圖1-1(a)。若以較科學的表示法論之，則此三要素可等效於圖 1-1(b) 所示的輸入 (input)、控制系統(control system) 和輸出 (output)。一般而言，控制系統的控制目標係為藉由施加輸入 u 至控制系統中，使輸出 c 能以一種預知的方式受控制。系統的輸入和輸出，亦常分別稱為激勵信號 (actuating signal) 和受控變數 (controlled variable)。

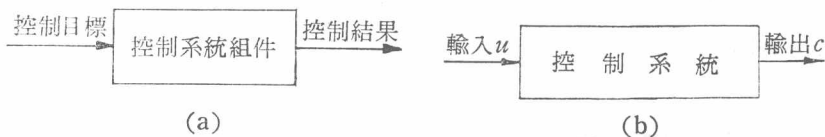


圖 1-1 控制系統的基本要素

舉例而言，汽車驅動系統的速率爲其油門踏板上之壓力或油門位置的函數。只要能控制好施加於油門踏板 (accelerator pedal) 上的壓力，便能維持所需要的速率值，或使速率作適當變化。如圖 1-2 所示，含油門、汽化器 (carburetter) 和引擎裝置的汽車驅動系統構成一個完整的控制系統。對汽車驅動系統而言，輸入是指施加於油門踏板上的壓力，輸出則係指汽車的實際速率。

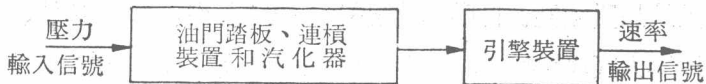


圖 1-2 汽車驅動系統

1-3 自動控制系統之分類

控制系統之分類與其使用的控制方式有關。依其是否使用回授，

可分為開迴路控制系統 (open-loop control systems) 和閉迴路控制系統 (closed-loop control systems)。依其分析和設計的方法來分類，可分為線性 (linear) 和非線性 (nonlinear) 系統，及時恒 (time invariant) 和時變 (time varying) 系統。若以信號在系統中的型態來分，可分為連續數據 (continuous-data) 和取樣數據 (sampled-data) 系統，及調變 (modulated) 和未調變 (unmodulated) 系統。由系統元件的型式來分，則可分為電機控制系統、液壓 (hydraulic) 控制系統、氣壓 (pneumatic) 控制系統及生物控制系統等。依系統輸入之設定值是否恒定或變化，可分為調整器系統 (regulator systems) 和追從系統 (follow-up systems)。又依其應用類型來分類，則可分為程序控制 (process control)、伺服機構 (servomechanisms)、序向控制 (sequential control) 和數值控制 (numerical control)。控制系統也常由系統的主要控制目的來分類，例如位置控制系統 (positional control system) 和速度控制系統 (velocity control system) 都是以其所控制的輸出變數來分類。除此以外，還有許多以其他系統特性來分類的控制系統，在此不再一一贅述。

茲舉數種系統分類的實例來作說明：

開迴路控制系統

開迴路控制系統係指一個其輸出量無法影響輸入量的系統。開迴路系統之輸出，易受外在干擾、負載變動、控制器或受控設備之特性變化等因素所影響而產生誤差，而系統本身却無法藉由自動調整輸入來矯正其誤差。如圖 1-3 所示，開迴路系統可劃分為控制器 (controller) 和受控設備 (controlled plant) 兩部分，輸入信號或命

令 (command) r 施加於控制器之輸入端，控制器之輸出被視為激勵信號 u ，該激勵信號則用來控制受控設備以使受控變數 c 達成所期望的目標。

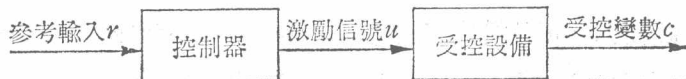


圖 1-3 基本開迴路控制系統

開迴路系統之優點是其結構簡單及成本低廉，然而由於其未能測知實際輸出與期望輸出間的誤差，隨時自動地適當調整輸入以矯正非預期之干擾所造成的誤差，因此所得之控制結果有時便會不太理想或根本不可靠。

閉迴路控制系統

開迴路控制系統之所以無法具有較精確且具順應性的控制，在於其缺少一條從輸出回至輸入的回授路徑 (feedback path)，以致於輸出易受外在干擾所影響。圖 1-4 所示為一基本的閉迴路控制系統，為

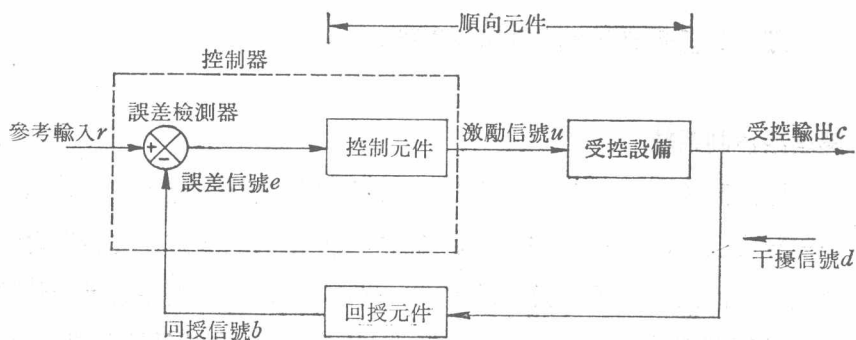


圖 1-4 基本閉迴路控制系統

了能獲得更準確的控制，受控輸出信號 c 應藉由回授元件產生回授信號 b 。然後利用誤差檢測器 (error detector) 比較參考輸入 (reference input) 信號 r 與回授信號 b ，以產生誤差信號 e 。誤差信號 e 經由控制元件加以放大處理後產生激勵信號 u ，之後將激勵信號 u 輸入受控設備便可獲得合乎期望值的受控輸出 c 。

閉迴路控制系統的優點，在於回授的加入會使得系統對外在的干擾及內部元件之參數的變動顯得較不敏感。亦即回授系統內可用較不精確或較便宜的元件來組成系統，而依舊能獲得相當精確的控制結果。

線性和非線性控制系統

所謂線性系統，是指其輸入與輸出之間成比例關係而且適用重疊定理 (superposition principle) 的系統，反之便是非線性系統。嚴格地說來，線性系統實際上並不存在，因為所有的物理系統或多或少都會具有一些非線性的現象。當控制系統的信號幅度被限制在非線性現象較不顯著的範圍內時，便可將該系統視為線性系統。但當信號幅度超出線性操作範圍時，若系統的非線性現象過分顯著，則在此情形下系統就不再被視為線性系統。控制系統中常見的非線性效應有下列數種：放大器在輸入信號變大時的飽和現象、馬達磁場的飽和特性、兩傳動齒輪間的齒隙 (backlash) 現象、彈簧的非線性特性、非線性摩擦及液體的壓縮等等。有時設計者會故意地將非線性特性加入控制系統中，用以改善其性能或提供更有效的控制。例如，在飛彈和太空船的飛行姿勢控制 (attitude control) 中，噴射口常架於推進器之兩側以提供控制飛行姿勢用的反作用力矩。這些噴射口常以全開或全關的方式來控制，因此可以每隔一段適當時間便產生固定量的氣體來有效控制太空船或飛彈的飛行姿勢。

線性系統的主要優點是易於分析，有許多解析和圖解的方法可資利用。非線性系統則不易以數學方法來處理，同時也缺乏一些可解析任何形式之非線性系統的有效解法。

時恒和時變控制系統

若一控制系統之所有元件的參數值 (parameter values)，在系統工作時均不隨時間變化，則稱此系統為時恒系統。多數的控制系統都包含有其參數會隨時間漂移或變化的元件。例如，馬達繞組之線電阻在溫度上升時，其電阻值會略為增加。又例如，當一枚火箭昇空後，空氣的密度會隨高度之變化而異，火箭本身的質量也會因燃料的消耗而減少，內部控制元件的參數因此隨之而改變。這些因素均足以影響火箭的飛行，因此該系統便是一時變系統。雖然線性時變系統仍歸屬於線性系統，但這類系統的分析與設計常遠較線性時恒系統來得複雜。

連續數據控制系統

若一系統中各部分之間的信號，都是連續時間變數 t 的函數，則此系統稱之為連續數據系統。所有連續數據系統的信號又分交流 (ac) 與直流 (dc) 兩類。交流和直流控制，在控制工程中有其特殊的意義，與一般電機工程所用的交流和直流的定義不同。交流控制系統，通常係指系統中的信號被以某種調變方式加以調變。換言之，所謂直流控制系統，並不代表系統中所有的信號都是單向直流的形態，而是表示信號未加以調變而已，直流控制系統內的信號依傳統的定義而言仍是交流形態。

直流控制系統所用的典型元件有電位計、直流放大器、直流馬達和

直流轉速計等。交流控制系統常用的典型元件有同步器 (synchros)、交流放大器、交流馬達、交流轉速計、陀螺儀 (gyroscopes) 和加速儀 (accelerometers) 等。實際上，並非所有的控制系統皆可嚴格區分為交流或直流形態。在同一系統中，交流及直流組件常被混合裝置在一起，而以調變器 (modulator) 及解調器 (demodulator) 來匹配系統中不同形態的信號。

取樣數據控制系統

取樣數據系統不同於連續數據系統的地方，在於系統中某些部分的傳輸信號係以脈波列 (pulse train) 形態為之。通常，取樣數據系統僅在斷續的特定瞬間接收數據或訊息。例如，在控制系統中的誤差信號可用斷續的脈波形態提供誤差訊息給系統其他部分。在此情形時，控制系統在兩個連續的脈波之間無法接收到有關誤差信號的訊息。

圖 1-5 所示為典型的取樣數據系統，圖中一連續性的輸入信號 $r(t)$ 施加於系統之輸入端，所產生的誤差信號 $e(t)$ 被一取樣器 (sampler) 加以取樣，而得一序列的脈波，然後再送至系統內控制其他部分之元件。在控制系統中使用取樣器有多重之優點，最明顯的就是使得一昂貴的設備得以讓許多控制路徑分時 (time-sharing) 使用，發揮一物多用的效能。

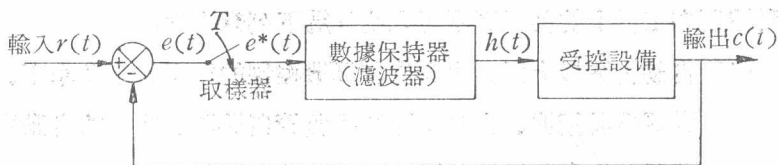


圖 1-5 基本取樣數據控制系統