

科技用書

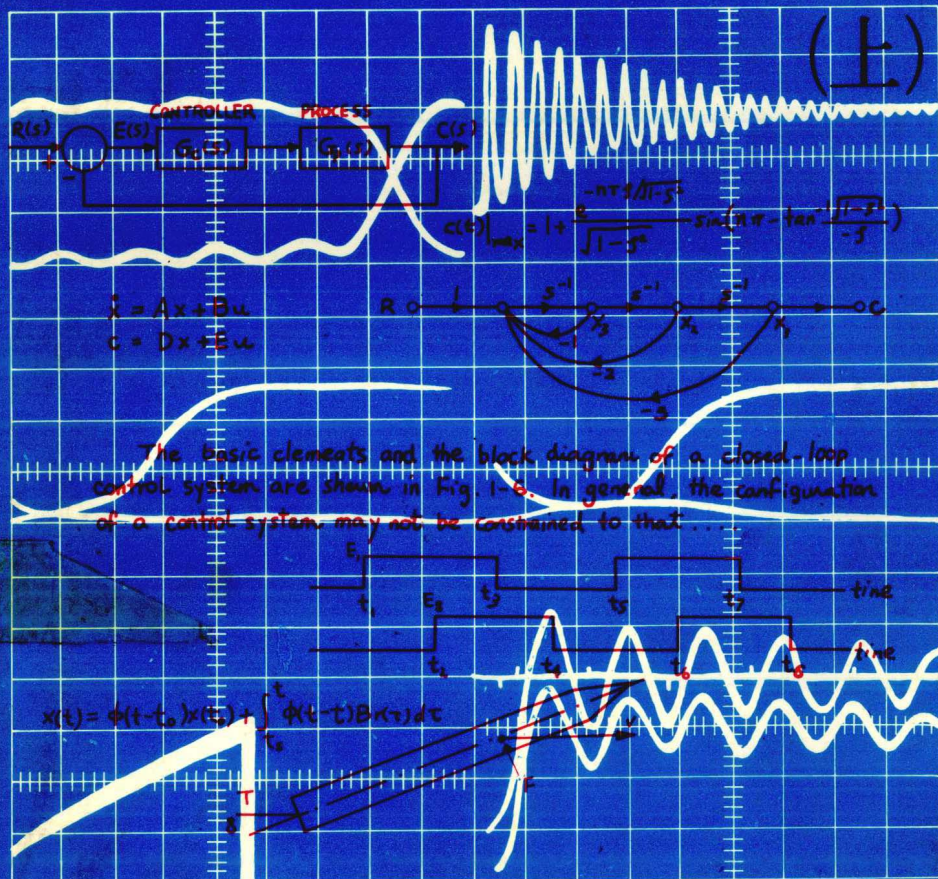
自動控制系統

Automatic Control Systems

陳英忠 譯

fourth edition

Benjamin C. Kuo

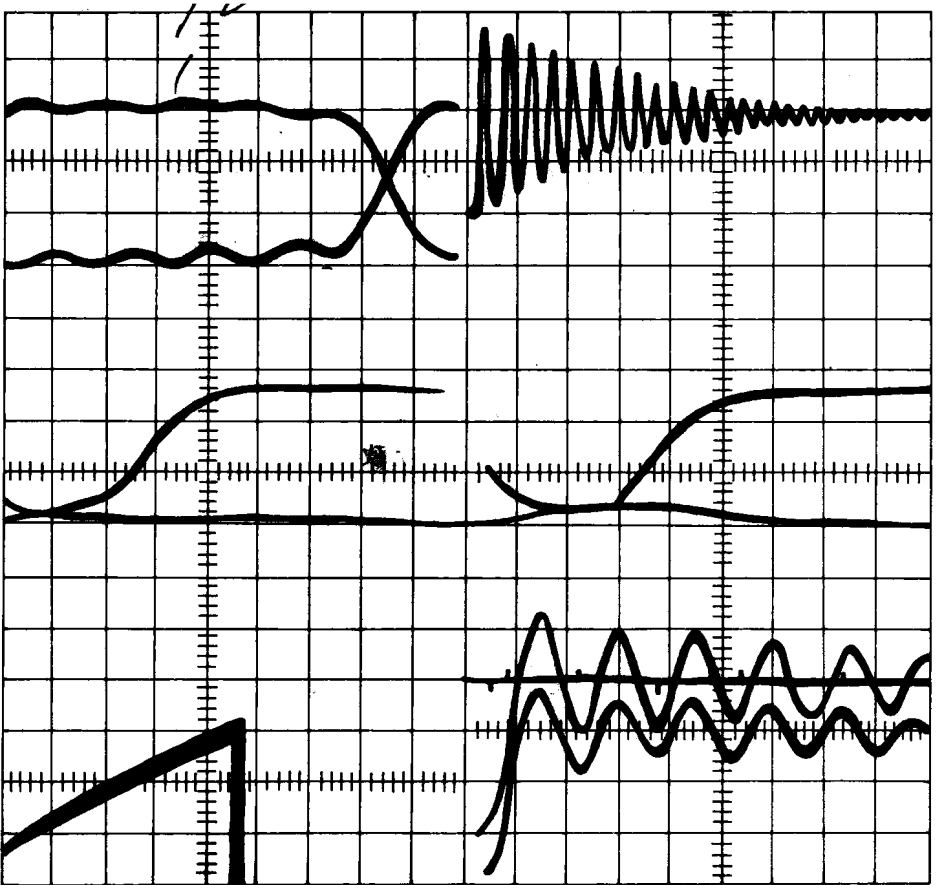


大行出版社印行

技用書

自動控制系统

Automatic Control Systems





中華民國七十二年六月 日初版

書名：自動控制系統(上)

著作者：陳 英 忠 譯

發行人：裴 振 九

出版者：大 行 出 版 社

社址：台南市體育路41巷26號

電話：651916 號

本社免費郵政劃撥帳號南字第32936號

本社登記證字第：行 函 院 新聞局

局版台業字第0395號

總經銷：成大書局有限公司

台南市體育路41巷26號

電話：613685 號

特 價：平一六五元精一九五元

編 號：T 0 0 0 2 4 - 0 0 4 4 0

同業友好・敬請愛護

原 序

這本自動控制系統的書是自 1962 年發行以來的第三次修訂本。前兩次的修訂，大都注重於狀態變數技巧的介紹以及離散資料系統和連續資料系統的綜合。近五年來，雖然控制系統的教學並沒有多大的改變，但是由於微電子學以及控制技術不斷地改進，因此教科書必須經常地修訂，本版乃就此而做進一步的修訂。

這一次的修訂，主要是注重於數位控制，同時增添許多設計方面的主題。大體上而言，本書的許多章節都已經重寫過，最明顯的改變是把“最佳控制簡介”這一章給刪除了。因為在大學課程中，其效果頗值得商榷。

第四版仍然適合大學控制系統課程的教科書。雖然近十五年來，現代控制理論已有極大的發展，但是如何準備適當而有價值的教材則是一件不容易的事。其困難主要在於現實生活中所遇到的大都為非線性控制系統，而存在著時變的參數，因而無法肯定其特性。在控制系統中，要在最佳控制理論和古典控制方法兩者間作一適當的選擇是不容易的。事實上，要在大學課程中講授最佳控制理論也不是件容易的事；甚而，工業上許多實用的控制問題仍然還要藉著古典的方法來解答。儘管現代控制理論所用的一些技巧比古典方法更能解決複雜的問題，但是這些方法在實際應用時，卻必須受到相當多的限制。筆者認為，一位現代控制工程師，仍需具備古典與最佳控制技巧的廣泛知識，而現代控制理論的認識更能提早解答複雜的控制問題的能力。因此，在初級控制課程中介紹狀態變數與狀態方程式還是必須的，雖然此種講法從理論的觀點來看也許不是很嚴密的。

近幾年來，微算機已有了突破性的發展。有許多以前認為藉著硬體實作太複雜或不經濟的控制規劃，現在都可由數位控制器來完成。筆者深信，不久的將來，數位控制器在大多數的控制系統中將扮演著

極重要的角色。這蘊意著，初學的學生必須適切的接觸數位控制，將來在更專業的課程中，方能體會出研究此一課程對更進一步的處理方法的重要性。讀者將發現，若以類比控制的觀點來研究數位控制將是有所助益且能勝任愉快，因為許多數位控制的分析與設計方法事實上就是有關類比控制的延伸。

本書所收集的教材，都是筆者在 Urbana-Champaign 城 Illinois 大學多年來教授大四控制工程的內容精華。本書亦可用於自修及專業參考書。如果出版人同意，將可取得完整的習題解答。

第四版總共十章及兩篇附錄。第一章介紹控制系統的基本概念。反饋的定義及影響，以及各種控制系統的定義和舉例說明。第二章是數學基礎及入門準備，內容包括拉氏轉換、Z 轉換、微分、差分方程、矩陣代數及各種轉換方法的應用。第三章討論了模擬化線性系統的轉移函數和信號流程圖。第四章包括物理系統的數學模擬，舉例說明在控制系統中使用到的典型轉換器及原動機。當然，因為實用上有太多的控制裝置，在此討論的不可能毫無遺漏。第五章介紹動態系統的狀態變數分析法，同時定義可控制性和可觀測性。第六章敘述控制系統的時域分析。利用時域及 S 平面極、零點的解釋來說明控制系統的性能。第七章討論根軌跡法。第八章介紹時域技巧的各種設計方法。本版的修訂有一大特色，就是相同類的設計技巧緊接分析主題後加以討論。如此，讀者將由於基本觀念清晰，對於分析與設計技巧能夠緊密關連而互相對照參考。第九章談到頻域分析和奈氏準則。第十章則討論了頻域的控制系統設計。

這本書的內容實際上超過一學期所需的教材。若作為大學教本，則像第二章的複習教材，可以指定學生自行研讀。若只講授古典控制的分析與設計課程，則第五章可略過，其他幾章介紹設計的某些章節，只要與狀態變數有關的均可省略，而不失其連貫性。數位控制雖與連續資料系統混合在一起，但如有必要，亦可很容易的刪除。筆者認為這本書的教材足夠安排一學期或兩學季教學使用。

Champaign Illinois

B. C. Kuo

目 錄

第一章 緒 論	1
1-1 控制系統	1
1-2 反饋是什麼？其有何功效？	7
1-3 反饋控制系統的種類	13
第二章 數學基礎	19
2-1 引 言	19
2-2 複變數觀念	19
2-3 微分方程	23
2-4 拉氏轉換	26
2-5 利用部份分式展開法求反拉氏轉換	34
2-6 拉氏轉換在解線性常微分方程式上的應用	40
2-7 基本的矩陣理論	44
2-8 矩陣代數	51
2-9 向量—矩陣形式的狀態方程式	60
2-10 差分方程	61
2-11 z 轉換	64
2-12 z 轉換應用於解線性差分方程	75
第三章 轉移函數，方塊圖及信號流程圖	85
3-1 引 言	85
3-2 線性系統的脈衝響應和轉移函數	86
3-3 方塊圖	95
3-4 信號流程圖	103

3-5	信號流程圖的基本性質摘要	106
3-6	有關信號流程圖的一些定義	106
3-7	信號流程圖代數	110
3-8	建立信號流程圖之例	112
3-9	有關信號流程圖其一般性的增益公式	116
3-10	一般性增益公式於方塊圖上的應用	123
3-11	狀態圖	125
3-12	離散資料系統的轉移函數	137

第四章 物理系統的數學模擬..... 163

4-1	引 言	163
4-2	電網路的方程式	165
4-3	機械系統其元件的模擬	167
4-4	機械系統的方程式	185
4-5	控制系統中的感測器與編碼器.....	193
4-6	控制系統中的直流電動機	212
4-7	雙相感應電動機	225
4-8	非線性系統的線性化	229
4-9	具有傳輸延滯的系統	238

第五章 線性動態系統的狀態變數分析..... 256

5-1	引 言	256
5-2	狀態方程式的矩陣表示法	256
5-3	狀態轉移矩陣	259
5-4	狀態轉移方程式	265
5-5	狀態方程式與高階微分方程式之間的關係	274
5-6	轉換至相位變數正規形式的轉換法	278
5-7	狀態方程式與轉移函數之間的關係	286

5-8	特性方程式、特性值及特性向量	290
5-9	A矩陣的對角化(相似變換法)	293
5-10	喬登正規形式	300
5-11	轉移函數的分解	306
5-12	線性系統的可控制性	312
5-13	線性系統的可觀測性	323
5-14	關於可控制性與可觀測性的不變性定理	327
5-15	可控制性、可觀測性與轉移函數之間的關係	331
5-16	線性離散資料系統的狀態方程式	335
5-17	離散狀態方程式的 z 轉換解	341
5-18	離散資料系統的狀態圖	345
5-19	抽樣資料系統的狀態圖	350

第一章 緒 論

1—1 控制系統 (Control Systems)

在這章簡介中，將使讀者熟習下列的主題：

- 1 控制系統是什麼。
- 2 為何控制系統如此重要。
- 3 一個控制系統的基本組成是什麼。
- 4 為何大部份的控制系統均與反饋結合在一起。
- 5 控制系統的種類。

關於前面兩項，我們可以人類為例子，人類可能是世界上所存在的最複雜、最巧妙的控制系統。一個常人可以完成相當多的工作，其中包括下決定。某些工作，如拾取東西或由某一地點走到另一地點等，都是一些稀鬆平常的事。但在某些情況下，有些工作必須盡可能地以最好的方式來完成。例如，一個跑百碼短距離的選手必須盡可能在最短時間內跑完；而另一方面，一個馬拉松選手除了必須儘快的跑以外，還必須控制能量的消耗，才能達成最好的成績。因此，我們可以說，在人的一生中，有非常多的“目的”要被完成；而完成這些目的的方法經常需要用到控制系統。

近幾年來，控制系統在現代文明方面及技術上已扮演著逐漸重要的角色。實際上，我們每天生活的每一方面均受到某種控制系統的影響。例如，在家庭生活方面，自動控制在暖氣與空氣調節系統方面，調節了家庭與建築物的溫度及濕度而使生活舒適。為了使能量的消耗達到最高效率，在大公司及工廠的建築中，許多現代的暖氣及空氣調

2 自動控制系統（上）

節系統均由計算機來控制。

在工業方面的各個部門都有很多的控制系統，例如，品管、自動化零件裝配線、機械工具控制、航空技術及武器系統、計算機控制、運輸系統、電力系統、機器人（robotics），以及許多其他方面；甚至如存貨的控制、社會及經濟的系統控制等均可由自動控制理論來達成。

不管我們所有的控制系統是那一類，系統的基本要素可描述如下：

- 1 控制的目的
- 2 控制系統的成分
- 3 結果

這三個基本要素之間的基本關係可利用圖 1-1 (a) 所示的方塊圖 (block diagram) 來說明。以比較科學的術語來說，這三個基本要素可分別確認為圖 1-1 (b) 所示的輸入、系統成分、及輸出。

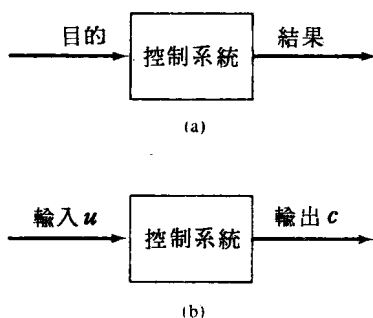


圖 1-1 一個控制系統的基本組成

一般而言，控制系統的目的是，輸入 u 經由控制的單元 (elements)，以某種特定的方式來控制輸出 c 。系統的輸入又叫做激勵信號 (actuating signals)，而輸出就是所謂的受控變數 (controlled variables)。

以汽車的方向盤控制作為圖 1-1 所示控制系統的一個簡單例子

。兩個前輪的方向可當做受控變數 c ，即輸出；而方向盤的方向就是激勵信號 u ，即輸入。在此情況下，此控制系統或過程是由導向機構以及整輛汽車的動作所組成；然而，若其目的改為控制汽車的速率，則施於加速器的壓力為激勵信號，而速率則為受控變數。就整體而言，可將此汽車的控制系統視為兩個輸入（方向盤與加速器）與兩個輸出（方向與速率）。在此情況中，兩個控制與輸出之間是互相獨立的；但一般而言，有些系統其中的控制是相互有關聯的。超過一個輸入與一個輸出的系統稱為多變數系統（multivariable systems）。

我們以汽車引擎的空轉速率控制做為控制系統的另一例子。此一控制系統的目的是要維持此引擎的空轉速率在一相當低的值（為了節省燃料），而不管外加的引擎負載有多少（例如，變速裝置，加強排擋裝置、空氣調節等）。如果沒有空轉—速率控制，任何突加的引擎負載將使引擎速率降低而可能導致引擎熄火停止。因此，空轉—速率控制系統的主要目的是（1）消除或減少由於外加於引擎負載所引起的速率下降，與（2）保持引擎空轉速率在一所需之值。圖 1-2 是由輸入—系統—輸出之觀點來看空轉—速率控制系統的方塊圖。在此情況下，節流閥角度 α （throttle angle）與負載轉矩 T_L （由於外加的空氣調節、加強排擋裝置、變速裝置、或制動裝置等）做為輸入，而引擎速率 ω 做為輸出。引擎是為受控程序或系統。

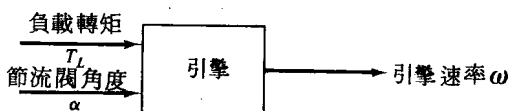


圖 1-2 空轉—速率控制系統

開迴路控制系統（無反饋系統）Open-Loop Control systems (Nonfeedback Systems)

如圖 1-2 的空轉—速率控制系統並不太複雜，稱之為開迴路控制系統；其不難發現此系統不能令人滿意地達到所希望的性能要求。例如，如果節流閥角度 α 設定在某一初值，而其相對應於某一引擎速

4 自動控制系統（上）

率；當外加一負載轉矩 T_L 時，並沒有任何方法可以避免引擎的減速。爲使此系統工作的唯一途徑是當負載轉矩改變時，必須有某些方法來調整 α ，以保持 ω 於所需的準位。

由於開迴路控制系統的簡單與經濟，可以發現在許多場所都有此類系統的應用。實際上，1981年以前製造的汽車都沒有空轉—速率控制系統。

洗衣機是另一典型的開迴路系統，此乃由於清洗的時間完全由操作人的判斷與估計所決定之故。一個「真正的」自動洗衣機應有不斷檢查衣服乾淨程度的能力，而當衣服合乎乾淨的標準時，洗衣機能夠自行停止。

一個開迴路控制系統的組成可分爲兩部份：控制器（controller）與受制程序，如圖 1-3 的方塊圖所示。一個輸入信號或指令（command） r 加到控制器，其輸出作爲激勵信號 u ；激勵信號再控制受制程序，如此，受控變數 c 才能完成某些既定的標準。

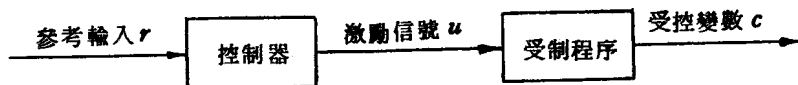


圖 1-3 一開迴路控制系統的組成

以簡單的例子而言，控制器將依系統的性質而變，而可能是放大器、機械鏈傳動、或其他的控制方式。在更巧妙的電子控制中，控制器可能是電子計算機，如微處理機。

閉迴路控制系統（反饋控制系統）Closed-loop Control Systems (Feedback Control Systems)

要有較精確且較能適應的控制，在開迴路控制系統中，所缺失的是將系統的輸出連接至或反饋至輸入。爲了獲得較精確的控制，受控信號 $c(t)$ 必須饋送回去並與參考輸入（reference input）比較，然後，與輸出、輸入之差成正比的激勵信號經由系統送出，用來校正誤差。一個具有單一或多個反饋路徑的系統——如上文所述——就稱爲

閉迴路系統。

一個閉迴路空轉—速率控制系統的方塊圖示於圖1-4中。參考輸入 ω_r ，設定所需的空轉速率。通常，當負載轉矩為零時，引擎的空轉速率必須與參考值 ω_r 相同；而由於任何干擾，如負載轉矩 T_L ，所

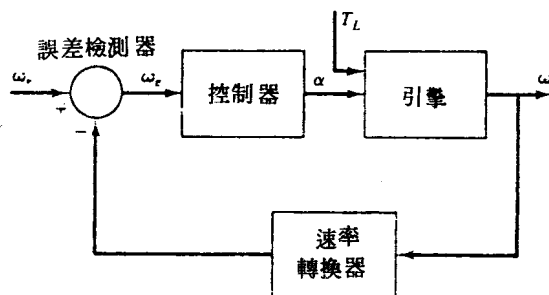
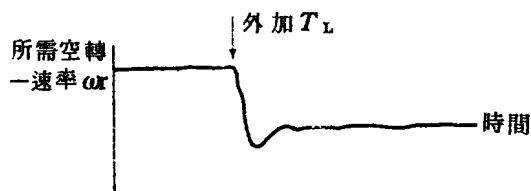
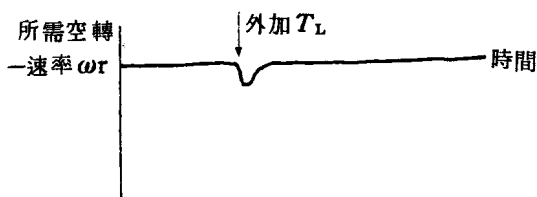


圖 1-4 閉迴路空轉—速率控制系統



(a)



(b)

圖 1-5 (a)一個開迴路系統典型的空轉—速率響應。
(b)一個閉迴路系統典型的空轉—速率響應。

6 自動控制系統（上）

引起的實際速率與所需速率之間的差將由速率轉換器（Speed transducer）與誤差檢測器（error detector）所測得，而控制器將會處理此誤差，再提供一個信號來調整節流閥角度 α 以修正此誤差。

圖 1-5 所示是一開迴路與閉迴路空轉—速率控制系統性能的比較。在圖 1-5 (a) 中，開迴路系統的空轉速率在負載轉矩加上去後，將會降低而穩定於一較低的值。而在圖 1-5 (b) 中，閉迴路控制系統的空轉速率在 T_L 加上去後，將會很快地回復到原先設定的值。

上述所說的空轉—速率控制系統亦可稱為一調整系統（regulator system），其目的是要維持系統的輸出在某種預設的準位。

圖 1-6 所示是一文字處理器（word processor）或一電動打字機的印刷輪軸控制系統，其可作為閉迴路控制系統的另一例子。此印刷輪軸，典型的有 96 或 100 個字體，將被旋轉直到所須的字體剛好在小鎚前面的位置來印字。字體的選擇是經由鍵盤以一般的方法來達成；一旦鍵盤上的某一個盤被壓下，就有一個指令使印刷輪軸由目前的位置轉到另一個位置；微處理機計算所須要移動的方向與距離，然後送出一個邏輯控制信號給功率放大器，而後再控制馬達來驅動印刷輪軸。此印刷輪軸的位置由一位置感測器測得，而其輸出將與微處理機中所指定的位置加以比較。馬達將被控制以便驅動印刷輪軸達到所須的位置。實用上，由微處理機控制器所產生的控制信號必須能夠相當快速地驅動印刷輪軸由某一位置到另一位置，如此才能在一定的時間範圍內準確地完成印刷工作。

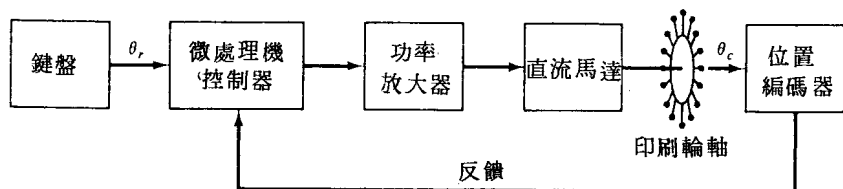


圖 1-6 印刷輪軸控制系統

圖 1-7 顯示此系統的一組典型的輸入與輸出。當給予一個參考輸入時，此信號以一步級函數 (step function) 表示。由於馬達的電路有電感，而且機械負載有一慣量存在，印刷輪軸不能瞬間移到所需的位置。典型地，印刷輪軸將隨著如圖所示的響應，然後在某一時間 t_1 以後穩定於此新的位置。印字必須等到印刷輪軸停止後才能開始；否則，此字體將會弄髒模糊。圖 1-7 顯示，當印刷輪軸穩定後，由 t_1 到 t_2 的期間是預定做印字用的，因此在 $t = t_2$ 以後，此系統就預備再接收另一新的指令了。

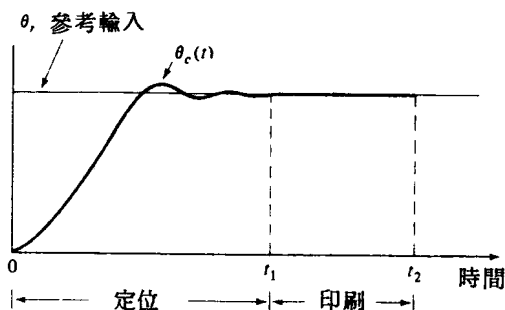


圖 1-7 印刷輪軸控制系統典型的輸入與輸出

1-2 反饋是什麼？其有何功效？(What Is

Feedback and What Are Its Effects?)

1-1 節中所舉的例子對於使用反饋的理由似乎太過簡單了。在這些例子中，使用反饋的目的是要減少參考輸入與系統輸出之間的誤差。然而，從理論的觀點來看，控制系統的反饋效應之意義遠比這幾個例子深奧。系統誤差的減少只是反饋對系統的重要影響之一而已，下一段將指出反饋對系統的特性——諸如穩定性、頻帶寬、整體增益、阻抗及靈敏性——亦有影響。

爲了瞭解反饋對控制系統的影響，必須以寬廣的思維來觀察其現

8 自動控制系統(上)

象。當爲了控制的目的而審慎地引入反饋時，它的存在性是很容易確認的；然而，有很多情形，平常被認爲內在非反饋的物理系統，以某種方式來看時，却是一反饋系統。一般而言，當因果關係的閉合順序（closed sequence of cause-and-effect relation ships）存在於系統的變數之間時，則可說反饋是存在的。在許多系統中，一般情形下被認爲非反饋的系統，從此觀點（上句所說的反饋觀點）來看就一定會被認爲是反饋系統。無論如何，利用反饋及控制系統原理，一旦反饋——此反饋是就上述的反饋意義而言——的存在建立起來，則此一般性的反饋定義能使很多系統——無論具有或不具有實際的反饋——以一有系統的方法加以學習、研究。

吾人將於此研究反饋對系統性能（performance）各方面的功效。因爲沒有線性系統原理所需的根基及數學基礎，因此對於底下的討論，只能依據簡單的靜態系統的記號（notation）加以研究。考慮圖1-8所示的簡單反饋系統，其中 r 爲輸入信號， c 爲輸出信號， e 爲誤差， b 爲反饋信號，參數 G 及 H 可當做定值增益；經過簡單的運算，可以很容易地得到此系統的輸入與輸出關係爲

$$M = \frac{c}{r} = \frac{G}{1+GH} \quad (1-1)$$

利用此反饋系統結構的基本關係，可以發現反饋的一些有意義的功效。

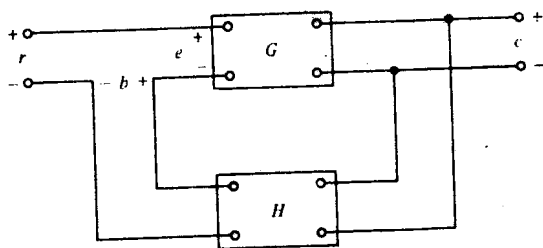


圖1-8 反饋系統

反饋對總體增益的影響(*Effect of Feedback on Overall Gain*)

由式(1-1)可知，反饋對非反饋系統其增益 G 的影響是 $1 + GH$ 這個因子。因為假設反饋信號為一負號，所以圖1-8的系統中反饋的基準是負的，數量 GH 本身包含一負號，因此反饋的一般性功效為增加或減小增益。在實際控制系統中， G 和 H 是頻率的函數，所以 $1 + GH$ 的大小在某頻率範圍將大於1，而在別的頻率範圍却是小於1，因而，反饋在某頻率範圍可增加系統的增益，而在別的範圍却減小。

反饋對穩定性的影響(*Effect of Feedback on Stability*)

穩定性為描述系統是否能夠跟隨輸入指令的觀念。以不太嚴謹的方式來說，一系統若其輸出失去控制或增至無窮大，則稱為不穩定。

為了研討反饋對穩定性的影響，回顧式(1-1)。若 $GH = -1$ 則對任何有限值的輸入，其輸出為無窮大。由此可知，反饋可使一原為穩定的系統變為不穩定。當然，反饋如同一把雙面刀，若使用不當是有害的。無論如何，應指出的是，在這裏只處理靜態的情形，而一般而言， $GH = -1$ 並非使系統不穩定的唯一條件。

含有反饋的優點之一是，其可使一不穩定系統穩定，這是可以證實的。假設圖1-8的反饋系統由於 $GH = -1$ 而不穩定，若經由負反饋 F 引入另一反饋迴路——如圖1-9所示，則整個系統的輸入、輸出關係為

$$\frac{c}{r} = \frac{G}{1 + GH + GF} \quad (1-2)$$