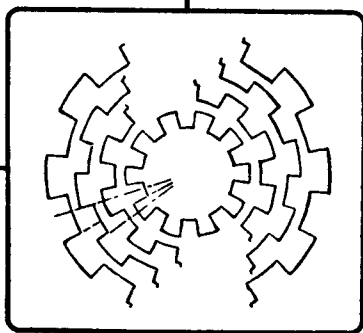
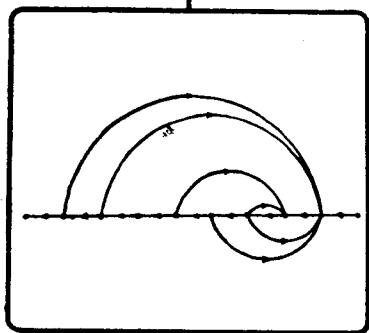
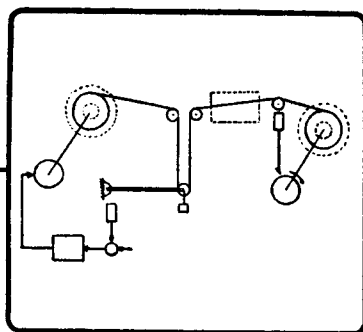
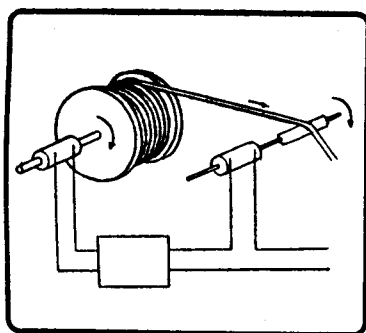


自動控制系統

Automatic Control Systems

THIRD EDITION BENJAMIN C. KUO

上冊 余政光譯



大中國圖書公司印行

大專用書

自動控制系統

Automatic Control Systems

Third Edition Benjamin C. Kuo

上 冊 余政光 譯

大中國圖書公司印行



版權所有・翻印必究

譯者：余政光
發行人：薛瑜
出版者：大中國圖書公司

台北市重慶南路一段66號
電話：3111487 郵政：2619號

登記證：局版台業字第0653號
中華民國六十六年九月初版
基本定價四元

編號：753

自動控制系統

上 冊

目 錄

第一章 緒 論

1-1 控制系統.....	1
1-2 回授及其效應.....	6
1-3 回授控制系統的種類.....	12

第二章 基本數學運算

2-1 緒 論.....	17
2-2 複變數.....	17
2-3 拉氏轉換.....	21
2-4 以部份分式展開法求反拉氏轉換.....	26
2-5 應用拉氏轉換解普通線性微分方程.....	31
2-6 基本矩陣理論.....	34
2-7 矩陣代數.....	41
2-8 Z- 轉換.....	51

第三章 轉移函數與信號程圖

3-1 緒 論.....	66
3-2 線性系統之轉移函數.....	66

3-3	線性系統之脈衝響應	71
3-4	方塊圖	74
3-5	信號流程圖	81
3-6	綜合信號流程圖之基本性質	84
3-7	信號流程圖之各項定義	84
3-8	信號流程圖代數	88
3-9	信號流程圖之繪製	90
3-10	信號流程圖之通式	94
3-11	應用增益通式於方塊圖	99
3-12	間斷信號系統之轉換函數	101

第四章 動態系統的狀態變數特性

4-1	前 言	118
4-2	狀態方程式與動態方程式	120
4-3	狀態方程式之矩陣表示	124
4-4	狀態過渡矩陣	126
4-5	狀態過渡方程式	130
4-6	狀態方程與高階微分方程之關係	137
4-7	相位變數式之轉換	140
4-8	狀態方程式與轉移函數之關係	148
4-9	特性方程式特徵值及特徵向量	151
4-10	A 矩陣的對角化 (相似轉換)	153
4-11	約旦標準式	159
4-12	狀態圖	164
4-13	轉移函數之分解	176
4-14	型式式之轉換	183

4-15 線性系統的可控制.....	187
4-16 線性系統的可察性.....	199
4-17 可控制、可察性及轉移函數之關係.....	204
4-18 非線性狀態方程及其特性.....	207
4-19 線性間斷數據系統狀態程式.....	212
4-20 間斷狀態方程式的二轉換解.....	218
4-21 間斷數據系統的狀態圖.....	221
4-22 抽樣數據系統的狀態圖.....	225
4-23 線性時變系統的狀態方程式.....	227

第五章 物理元件的數學模型

5-1 前 言.....	245
5-2 網路方程式.....	246
5-3 機械系統元件之模型.....	248
5-4 機械系統的方程式.....	266
5-5 控制系統的誤差感測裝置.....	273
5-6 速度計.....	285
5-7 控制系統中的直流馬達.....	286
5-8 二相感應馬達.....	293
5-9 步級馬達.....	296
5-10 牽力控制系統.....	304
5-11 導邊控制系統.....	307
5-12 含傳輸滯後之系統.....	313
5-13 尋光系統.....	315

第六章 控制系統的時域分析

6-1	引 言.....	334
6-2	對於控制系統時間響應的典型測試信號.....	335
6-3	控制系統的時域特性——穩態響應.....	337
6-4	控制系統的時域特性——暫時響應.....	351
6-5	二階系統的暫態響應.....	353
6-6	位置控制系統的時間響應.....	366
6-7	在回授控制系統的時間響應中微分控制的影響.....	379
6-8	在回授控制系統的時間響應中積分控制的效應.....	385
6-9	比率回授或轉速計回授控制.....	389
6-10	狀態變數回授的控制.....	390

自動控制系統

上 冊

第一章 緒 論

1-1 控制系統

近些年來，在現代文明與科技發展上，自動控制系統扮演了很重要的角色。在住家方面；自動控制被應用於溫度與濕度的自動調節，提供了舒適的現代化家庭生活。在工業方面；自動控制系統的應用異常廣泛，如產品之品質管制、自動機器、機械工具控制、太空科技、武器系統、計算機系統、運輸系統，以及自導機器等等。甚至於有關存貨控制、社會經濟系統控制、環境和水力系統等的問題都可經由自動控制理論得到解決。

圖 1-1 所示方塊圖乃說明了控制系統的基本觀念，動作信號 e 經由控制系統元件後提供一個指示

，此系統之目的即是將變數 c 控制於該指示內。

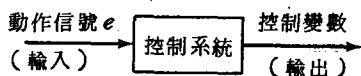


圖 1-1 基本控制系統

一般的說法，被控變數為系統之輸出，而動作信號為系統之輸入，舉一個簡單的例子——汽車之導向控制（Steering Control），二個前輪之方向可視為被控制變數，即輸出，而其方向盤之位置可視為輸入，即動作信號 e ，由此可知，某導向機械包括被控制系統及汽車之可動部份，以另一觀點來說，若我們所要控制的是汽車的速度，則加速器之壓力總和為動作信號，

而速度視為被控變數。

有許多系統同時含有幾個被控變數，受控於幾個輸入信號，這種系統謂之“多變數系統”（Multivariable system）

開路控制系統（非回授系統）

自動化，這個名詞常被誤解為是控制系統。所謂“自動化”，其含意為必須有適應多種工作條件的能力，並且，對於許多種輸入能有令人滿意的反應，而控制系統却不一定有此特質。通常，為達自動化的目的，我們將輸出變數反饋（回授）回去與命令信號相較得之。一組不含回授部份的系統謂之開路系統，是最簡單經濟的控制系統，不幸的是，開路系統缺乏變化，準確度又低，除了最簡單的型式外，別無其他用途。

譬如家用火爐之控制。假設該火爐僅有一個控制開關週期的定時裝置，欲調整溫度於適當位準，操作者必須估計火爐開著的時間，然後定時，時間一到，火爐即自動關上，如此，一旦估計錯誤，室內溫度便高於或低於要求之值。很顯然的，此種控制系統不準確且不可靠。其不準確之理由為（一）火爐特性未知（二）無室外溫度控制，而室外溫度直接影響室內溫度。這說明了開路系統沒有適應環境條件及外來干擾的能力，使用起來亦相當不便。在火爐控制上來說，或許，實驗者能將室內溫度控制於理想之值，然而，若門窗在工作週期內被斷續開關，其最後溫度就又脫離了準確值。

洗衣機也是屬於一種開路系統，因為其洗衣時間仰賴於操作者的估計與判斷。一架真正的電動洗衣機，能夠不斷的檢查衣服的清淨程度，反覆清洗，直到達成理想清潔度，即自動停止。

雖然，開路控制系統用途有限，却是閉路控制系統的主要元件。圖 1-2 所示為閉路控制系統之方塊圖。輸入信號或參考信號 r 施於控制器，輸出一個動作信號 e ，該動作信號激勵控制程序，驅動被控信

號至所要求之值。

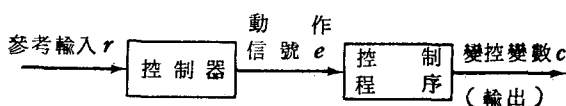


圖 1-2 開路控制系統之方塊圖

閉路控制系統（回授控制系統）

開路控制系統之所以準確度低及適應力低，乃是由於其輸入和輸出間缺乏了一條回授接線。為獲得更準確之控制，被控信號 $C(t)$ 必須回授至輸入端與參考輸入相較，同時，一個與輸出入間信號差成正比的動作信號，被送入系統中以校正誤差。一組含有一條或多條回授的系統謂之閉路系統。人類或許是現存最複雜最精巧的回授控制系統。一個人可以看作是一組能勝任高度複雜工作的多變數控制系統。

讓我們舉例說明一個人宛如一組回授控制系統。當一個人欲取桌上的一件物品時，大腦即傳送一個信號使手臂完成這項工作，他的雙眼則宛如檢測器不斷的回授手的位置信號。手與物體間的距離為誤差，當手到達物體位置時，誤差即為 0。這是閉路控制一個典型的例子。如果一個人被告訴去取該件物品，隨即被蒙上眼睛，則，他僅能估計物體的正確位置，然後伸手去取，這很可能使他碰不到物體，且差一大段距離，此乃因為蒙上眼睛後，即失去回授路徑，而此人之工作即宛如開路系統。圖 1-3 所示即為把人類當作閉路系統之方塊圖。

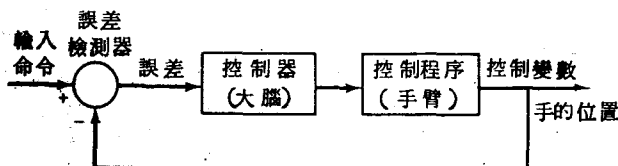


圖 1-3 人類宛如閉路控制系統工作之方塊圖

圖 1-4 所示為閉路控制系統的另一例子，即船舵控制系統之方塊圖，此時，控制目的為船舵的位置，而參考輸入乃施於方向盤上，驅動控制器和傳達的是方向盤和船舵位置之間的信號差，當船舵位置與參考方向成一直線時，誤差檢測器之輸出即等於 0，假設方向盤位置作 R 單位的角位移 (Sudden Rotation)，如圖 1-5(a) 之時間信號。船舵位置為時間函數，其響應可以是圖 1-5(b) 中的任一種，視系統之特性而定。由於物理系統有電子和機械慣量，船舵位置無法在瞬間改變太多，但，會漸漸的趨向於理想的方向，通常，船舵位置終止前，

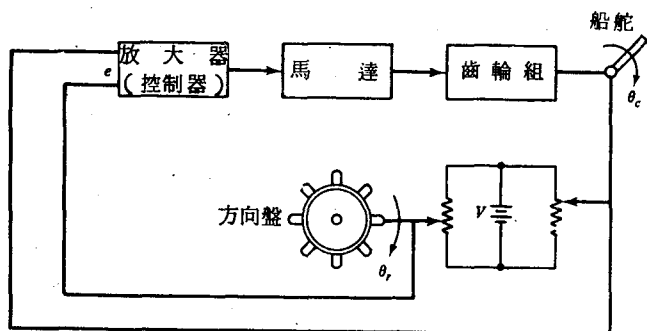


圖 1-4 船舵控制系統

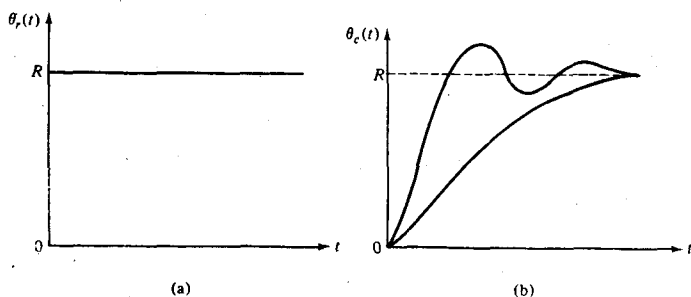


圖 1-5 (a) 船舵控制系統之角位移 (b) 典型的輸出響應

其響應會發生振盪現象，很顯然的，這並不合乎我們的理想。

圖 1-6 為閉路控制系統之基本元件及方塊圖。其組態並未硬性規

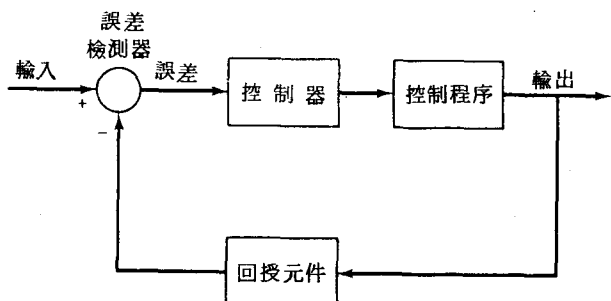


圖 1-6 閉路控制系統方塊圖

定，在更複雜的系統中，可以含更多的回授路徑及元件方塊。

圖 1-7(a) 所示為纏繞裝置之鬆緊控制系統的元件。一個含有布或線纜的解繞筒，解繞下來的物品被送入裁剪單位或印刷單位，然後，再纏繞於另一個轉軸上。此控制系統之目的在維持物品或織物於指定之緊密度，而避免物品之收縮或皺摺等。

為調整其緊密度，織布延著一條半迴路下垂，然後，再繞於一個負載軸承上，該軸承附著於一個能允許其自由上下的軸壁上，軸承與軸臂間的接合部份稱為跳桿（Dancer）。

通常，在系統工作時，織布運行之速度一定，跳桿之理想位置為水平，提供一個相當於跳桿重量之一半的緊密度與解繞軸承相接之電氣制動器乃用來產生制動轉矩乃控制跳桿於水平位置。

在實際工作上，由於外來的干擾，織布原料的改變、及解繞軸承漸減的有效直徑，跳桿桿臂很難維持水平，除非有一俱測裝置，感測出跳桿位置，並給予適當的制動轉矩控制。

角度偵測器用來感測角度偏差，並供給一個誤差信號控制制動轉

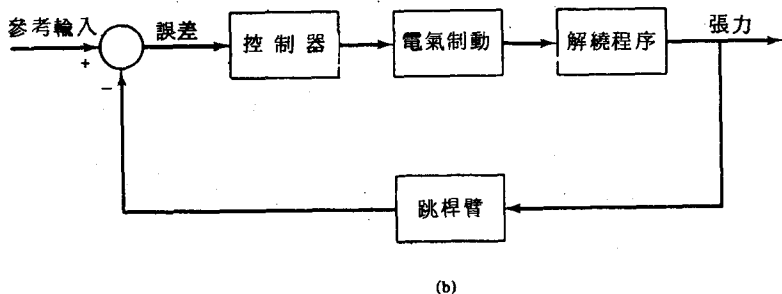
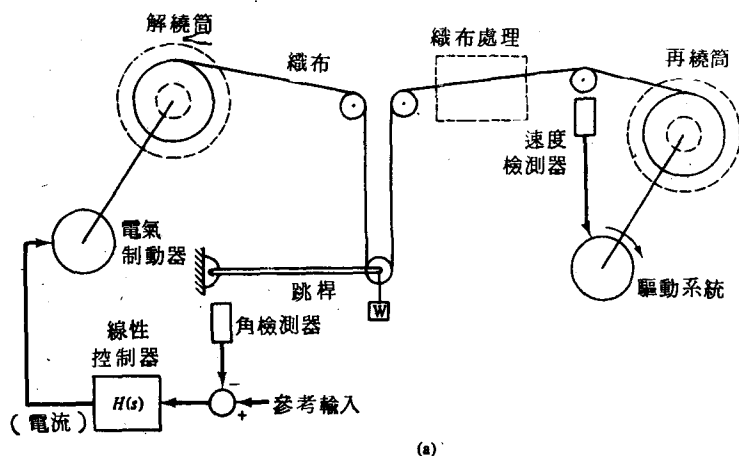


圖 1-7 (a) 鬆緊控制系統 (b) 鬆緊控制系統元件之方塊圖及相互間之關係

矩，藉以校正跳桿位置之誤差。圖 1-7(b) 所示為此鬆緊控制系統之方塊圖。

1-2 回授及其效應

回授觀念在控制系統上扮演了相當重要的角色。在前節中，我們曾論及回授是閉路控制系統的主要部份，一組沒有回授的控制系統，準確度差，可用度低，無法滿足實際需要，若以更嚴格的觀點來說，

回授的定義及真諦比前節的例子來得深遠，且更難以論證。事實上，回授之用途並不只是將輸出入相較藉以減少誤差而已，減少系統誤差僅僅是回授多種用途中的一種而已。我們即將列舉回授系統的各種反應特性，諸如穩定性，頻帶寬度，綜合增益，阻抗特性及電敏度。

為澈底了解回授在控制系統上之反應，我們必須由多方面去說明其現象。當回授之目的為控制時，其存在可以很簡單的被說明出來。在許多情況之下，我們可以將原本是非回授的物理系統，經由某些方法變為回授系統。一般來說，若有因果關係之循環時序存在於系統變數之間，則我們就說回授是存在的，這個觀點無異於告訴我們，在大多數系統中，回授可視為非回授系統，無論如何，此回授定義與控制系統理論，可適用於大多數系統中。至於是否含物理回授系統，則端看前曾提及的回授感應是否存在而定。

我們即將研究的是回授在系統工作的各種情況之下的反應。由於沒有足夠線性系統之數學基礎及理論根據，我們僅能將重點放在簡單的靜態系統上。圖 1-8 所示為簡單回授系統之組態，圖中， r 為輸入信號， c 為輸出信號， e 為誤差，而 b 為回授信號，參數 G 和 H 可視為定值增益。加以簡單代數運算，即可證明此系統之輸出入關係式如下：

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

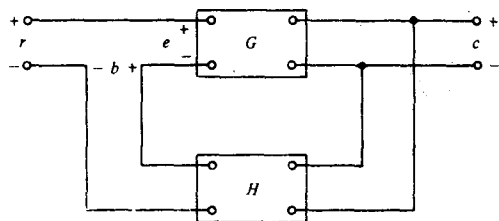


圖 1-8 回授系統

利用此回授系統之基本關係式，即可導出回授的許多反應關係。

綜合增益回授之響應

由（1-1）式可以看出，非回授系統之增益 G ，受了回授因數 $1+GH$ 的影響。圖1-8系統之回授為負值，因此，其回授信號為負號，但由於 GH 本身可以是負號，所以，回授反應可以任意設計為增加或減少其增益。在一組實用的控制系統中， G 和 H 為頻率的函數，因此， $1+GH$ 之值在某一頻率範圍內會大於1，但在另一頻率範圍內會小於1。亦即，在一組系統中，回授能於某一頻率範圍內增加其增益，而在另一頻率範圍內減少其增益。

回授效應對穩定度之影響

說明系統是否能隨著輸入命令而正常工作的觀念就是穩定度（Stability）。較通俗的說法，若一組系統的輸出脫離了控制，或毫無休止的增大，則謂之不穩定。

為討論穩定回授之反應，讓我們再回到（1-1）式，當 $GH=-1$ 時，對於任一定值輸入，其輸出均為無限大，因此，我們可以說，回授可導致一組系統由原來的穩定狀態變至不穩定，明確的說，回授是一枝雙口武器（Twoedged sword），若使用不當，則禍害無窮。尚須指明的是，我們現僅討論靜態情形，事實上，並不只有 $GH=-1$ 才導致系統的不穩定。

一組系統加上回授後的優點之一為，能將不穩定系統穩定化。假設圖1-8之系統處於 $GH=-1$ 的不穩定狀態，若我們再加上一條負回授 F 路徑，如圖1-9所示，則整個系統的輸出入關係式變為

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

很顯然的，由於 $GH=-1$ ，含 G 和 H 的內環路（Inner-loop）回授系統是不穩定的，但却能由慎選出來的外環路（Outes-loop）回

授增益 F 穩定整個系統。

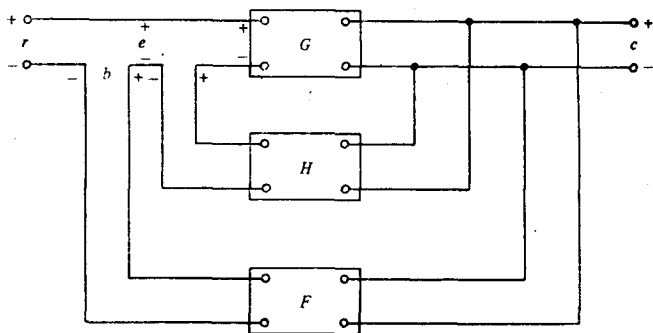


圖 1-9 雙回授路徑之回授系統

回授對靈敏度之影響

靈敏度在控制系統之設計上扮演了相當重要的角色。所有的物理元件都會隨著環境和年限而變質，我們不能奢望控制系統之參數在系統的工作生命期間固定不變。譬如，當電動機工作時，其線繞電阻值必然會隨著馬達溫度之上升而改變，一般來說，一組良好的控制系統，對於其參數之變化應感覺不出，而仍能隨著命令工作。我們即將討論的是回授對於參數變化的靈敏度。

若圖 1-8 中之 G 為可變參數，則綜合系統增益 M 對於 G 改變的靈敏度定義為

$$S_a^M = \frac{\partial M / M}{\partial M / G} \dots\dots\dots (1-3)$$

∂M 為 M 隨 G 之變化而改變之值， $\partial M / M$ 及 $\partial M / G$ 分別表示 M 和 G 的變化百分比。靈敏度函數 S_a^M 之表示式可由 (1-1) 式導出如下

$$S_a^M = \frac{\partial M}{\partial G} \frac{G}{M} = \frac{1}{1 + GH} \dots\dots\dots (1-4)$$

此關係式告訴我們，只要增加 GH 之值，即可降低靈敏函數之值，以

達系統之穩定。反觀開路系統，其系統增益與 G 變化之間的關係為單對單形式。

通常，一組回授系統之增益對參數變化的靈敏度視該參數之位置而定。讀者可自行導出圖1-8中系統對 H 變化的靈敏度。

回授對於外來干擾或雜訊的反應

所有的物理控制系統在工作時都會受外來信號或雜訊的影響。這類信號如電子放大器之熱雜訊電壓，以及電動機之電刷或整流子雜訊。

回授對於雜訊的反應，僅與雜訊進入系統的入口位置有關。在許多情況之下，回授能降低雜訊系統的干擾。

讓我們來瞧瞧圖1-10所示之系統。圖中 r 為命令信號 n 為雜訊。在沒有回授的情況之下， $H = 0$ ，其輸出信號 C 為

$$C = G_1 G_2 e + G_2 n \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

式中 $e = r$ 。其信號雜訊比之定義為

$$\frac{\text{正常信號輸出}}{\text{雜訊輸出}} = \frac{G_1 G_2 e}{G_2 n} = G_1 \frac{e}{n} \quad \dots\dots\dots (1-6)$$

很顯然的，若欲提高信號雜訊比，在 n 值固定的情況之下，唯一的法是提高 G_1 或 e 之值，改變 G_2 之值對雜訊比毫無影響。

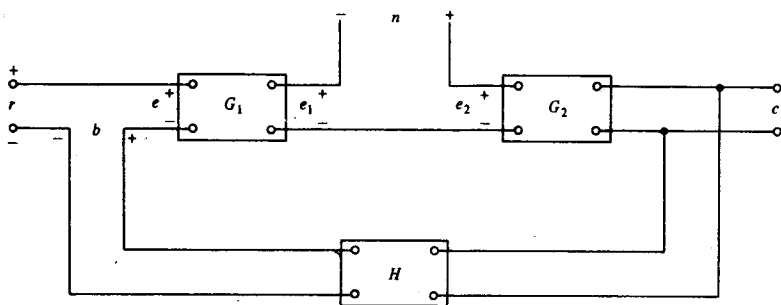


圖 1-10 含雜訊之回授系統