

# 自動控制系统

原著者 Benjamin C. Kuo

譯著者 顏 奎 奎

曉園出版社  
北京圖書出版公司

# 自動控制系统

原著者 Benjamin C. Kuo

譯著者 賴 鑫 奎

曉園出版社  
世界图书出版公司

## 内 容 简 介

B. C. Kuo Automated Control Systems 5th ed. 1989

## 自动控制系统

B.C.库奥 著

顿鑫奎 译著

晓园出版社 出版

世界图书出版公司 北京分公司重印

(北京朝内大街 137 号)

北京中西印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992年2月重印 711×1245 1/32

1992年2月第1次印刷 印张: 35

印数: 0,001—1,660

ISBN7-5062-1180. 7/TN.8

定价: 29.80 元

世界图书出版公司通过中华版权代理公司

购得重印权限国内发行

# 原 序

寫自動控制系統第五版的動機，主要在說明電腦輔助學習在控制系統範疇的重要性。電腦在控制系統中的應用範圍，不僅包含分析和設計，且可做控制器之用。大多數在古典控制理論的設計方法極依賴嘗試錯誤法，因此對一問題的設計無法導出唯一解。在最佳控制中，由於設計過程極為複雜，因此需要數值反覆計算。除簡單的系統外，若無電腦的輔助要實行控制系統的分析或設計將極為冗長乏味。雖然大型科學電腦很普遍且容易取得，一般讀者仍須面對是否能獲得或準備程式來使用一般性電腦，這些都是耗時的工作。筆者相信我們的時間應花費在控制問題的瞭解與執行，而不要浪費在單調的計算上。

最近幾年，個人電腦已成為很有效且價廉的工具，所以被許多人容易且有效地用來解決複雜的控制系統問題。當學生為完成系統的分析 and 設計而學習控制理論，此種發展趨勢使控制系統的學習更容易。

此書可當大學生在線性控制系統課程的課本。雖然近 20 年間有相當多的近代控制理論已經發展出來，準備合適且有意義的教材給現代控制系統入門課程，則是一困難的工作。問題之所以繁雜，是因為現實生活中的控制系統皆甚複雜，且為非線性，有的時變參數且常表現出不確定的性質。一般公認在最佳控制理論和古典控制技巧間存有一種明顯區分。事實上，在大學入門階段教導最佳控制理論有些困難，因此有關工業上許多實用的控制系統仍以古典方法來解決。雖然使用現代控制理論的一些技巧，比古典方法在解決許多複雜問題更有效力，但這些方法在實際應用上常常有些限制。筆者深信，身為一個現代控制工程師應在最佳控制和古典控制上均具備廣博的知識。現代控制理論的知識應增加個人在解決複雜問題的分析透視能力。因此，即使在處理上不及理論立場的精確。在入門階段介紹狀態變數和狀態方程式的主題是極重要的。這說明讀者應當做更高等的控制系統研究，尤其是現代控制理論。研讀控制系統重要的是要學習技巧的變化和解決問題，而解決問題的目的，即在於使系統滿足所有設計規格。儘管此說明有點過於簡化，但課本內容各章確能描寫時域和頻域轉換分析和設計方式的技巧。

近幾年來微電腦正蓬勃發展，現今已有許多含有微處理器數位控制器的控制系統。這說明初學學生需要理解數位控制理論，以便體認尋求更深研究主題的重要性。

。讀者將發現，研讀數位控制與類比控制更有用而且有趣，因為大部分的數位控制的分析和設計方法為類比控制的延伸。

讀者應牢記著，儘管我們可以利用電腦除去控制系統設計和分析的單調乏味，然而我們不能全依賴電腦。這是在課本上我們極力依據理論和分析過程，並把使用電腦僅做為一種工具的原因。必須強調的是有涵養的工程師，不僅知道如何使用電腦，而且知道如何說明計算結果和判斷其正確性。通常工程師亦應知道怎樣準備電腦程式，以便解決問題，若不完全了解基本原則，是不可能做出這些的。

本書內容是筆者在 Urbana-Champaign 伊利諾伊州立大學教授高級控制系統多年的精華，可適合自習及專業參考。

第五版總共分十章及二個附錄。第一章介紹控制系統的基本觀念。包含回授的定義及結果，各種控制系統的定義及說明。第二章說明數學基礎及準備，主題涵蓋拉氏變換、 $Z$ -變換、微分及差分方程、矩陣代數和變換方法的應用。第三章討論轉換函數及標準線性系統信號流程圖方法。第四章包括物理系統的數學模式。典型的換能器和控制系統中所使用的主要原動機均有描述，實際上控制元件種類繁多，因此系統模式的處理無法盡述。第五章介紹動態系統狀態變數的分析方法，另外有可控制性及可觀測性的定義。第六章描述控制系統的時域分析，控制系統在實際時間領域的計算和在  $S$ -平面使用極點——零點——的解析方法。第七章討論根軌跡法。第八章解說使用時域技巧的各種設計方法。此增訂版的特色之一，是緊接在分析主題之後，有一連串設計技巧的討論。如此一來，讀者對基本觀念仍然清晰，對分析及設計技巧關係可以密切並前後對照。第九章處理頻率分析和倪奎士特穩定準則。第十章討論頻域控制系統的設計。

本書內容比一學期能教授的多，做大學課本用時，第二章內容可指定為複習教材。第五章僅涉及古典分析設計方式可以省略，有關狀態變數設計的某些章節可以略去而不失連貫性。數位控制系統所涵蓋為連續資料系統的集合，但可依學習意願而省略，筆者認為此課本內容可安排為一學期或二季期的課程。

*Department of Electrical  
and Computer Engineering  
University of Illinois  
at Urbana-Champaign  
Urbana, Illinois 61801*

B.C. KUO

# 目 錄

## 第一章 緒 論 1

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1.1 控制系統 .....      | 1  |
| 1.2 何謂回饋及其效應 .....  | 7  |
| 1.3 回饋控制系統的種類 ..... | 12 |

## 第二章 數學基礎 19

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 2.1 前 言 .....                 | 19 |
| 2.2 複變數概念 .....               | 19 |
| 2.3 微分方程式 .....               | 22 |
| 2.4 拉氏變換 .....                | 25 |
| 2.5 以部分分式展開法求拉氏變數 .....       | 33 |
| 2.6 應用拉氏變換以解線性常微分方程式 .....    | 38 |
| 2.7 基本矩陣理論 .....              | 41 |
| 2.8 矩陣代數 .....                | 48 |
| 2.9 狀態方程式的向量矩陣形式 .....        | 55 |
| 2.10 差分方程式 .....              | 57 |
| 2.11 $z$ 變換 .....             | 59 |
| 2.12 應用 $z$ 變換以解線性差分方程式 ..... | 69 |

## 第三章 轉換函數、方塊圖及信號流程圖 77

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 3.1 前 言 .....            | 77 |
| 3.2 線性系統的脈衝響應和轉換函數 ..... | 78 |

|      |                |     |
|------|----------------|-----|
| 3.3  | 方塊圖            | 83  |
| 3.4  | 信號流程圖          | 91  |
| 3.5  | 信號流程圖的基本特性摘要   | 94  |
| 3.6  | 信號流程圖定義        | 94  |
| 3.7  | 信號流程圖代數        | 98  |
| 3.8  | 信號流程圖的構圖實例     | 100 |
| 3.9  | 信號流程圖的一般增益公式   | 104 |
| 3.10 | 一般增益公式在方塊圖中的應用 | 110 |
| 3.11 | 狀態圖            | 111 |
| 3.12 | 離散資料系統的轉換函數    | 122 |

#### 第四章 物理系統之數學模式化 147

|     |               |     |
|-----|---------------|-----|
| 4.1 | 前 言           | 147 |
| 4.2 | 電路方程式         | 148 |
| 4.3 | 機械系統元件之模式化    | 150 |
| 4.4 | 機械系統之方程式      | 166 |
| 4.5 | 控制系統中的感測器及編碼器 | 173 |
| 4.6 | 控制系統中的直流馬達    | 191 |
| 4.7 | 雙相感應馬達        | 203 |
| 4.8 | 非線性系統的線性化     | 207 |
| 4.9 | 具有傳輸落後的系統     | 214 |

#### 第五章 線性動態系統之狀態變數分析 235

|     |               |     |
|-----|---------------|-----|
| 5.1 | 前 言           | 235 |
| 5.2 | 狀態方程式之矩陣表示法   | 235 |
| 5.3 | 狀態轉移矩陣        | 238 |
| 5.4 | 狀態轉移方程式       | 244 |
| 5.5 | 狀態方程式與高階的起始狀態 | 251 |

|      |                     |     |
|------|---------------------|-----|
| 5.6  | 轉換至相位變數標準型式         | 254 |
| 5.7  | 狀態方程式和轉換函數間的關係      | 261 |
| 5.8  | 特性方程式、固有值及固有向量      | 265 |
| 5.9  | $A$ 矩陣的對角化(相似變換)    | 267 |
| 5.10 | 約旦標準型式              | 274 |
| 5.11 | 轉換函數之分解             | 278 |
| 5.12 | 線性系統之可控制性           | 284 |
| 5.13 | 線性系統的可觀測性           | 294 |
| 5.14 | 可控性及可觀性的不變性定理       | 297 |
| 5.15 | 可控制性、可觀測性和轉換函數之間的關係 | 301 |
| 5.16 | 線性離散資料系統的狀態方程式      | 304 |
| 5.17 | 離散狀態方程式的 $z$ 變換解    | 309 |
| 5.18 | 離散資料系統的狀態圖          | 313 |
| 5.19 | 取樣資料系統之狀態圖          | 317 |

## 第六章 控制系統的時域分析 349

|      |                  |     |
|------|------------------|-----|
| 6.1  | 前言               | 349 |
| 6.2  | 控制系統時間響應的典型測試信號  | 350 |
| 6.3  | 控制系統的時域性能——穩態誤差  | 353 |
| 6.4  | 控制系統的時域性能——暫態響應  | 369 |
| 6.5  | 二階系統的暫態響應        | 370 |
| 6.6  | 印字盤控制系統之時域分析     | 384 |
| 6.7  | 增加極點及零點至轉換函數上的效應 | 401 |
| 6.8  | 轉換函數的主極點         | 408 |
| 6.9  | 控制系統的穩定性——簡介     | 416 |
| 6.10 | 穩定性、特性方程式及狀態轉移矩陣 | 417 |
| 6.11 | 決定線性控制系統穩定性的方法   | 422 |
| 6.12 | 羅士-赫維茲準則         | 423 |

## 第七章 根軌跡的繪製技巧 449

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 7.1 | 前 言            | 449 |
| 7.2 | 根軌跡之基本條件       | 450 |
| 7.3 | 完全根軌跡之作圖       | 456 |
| 7.4 | 根軌跡作圖的一些重要特徵   | 490 |
| 7.5 | 根廓線——多參數變化     | 500 |
| 7.6 | 具有純時間延遲之系統的根軌跡 | 509 |
| 7.7 | 離散資料控制系統的根軌跡   | 522 |
| 7.8 | 根的靈敏度——系統的健全度  | 527 |

## 第八章 控制系統的時域設計 541

|      |                   |     |
|------|-------------------|-----|
| 8.1  | 前 言               | 541 |
| 8.2  | PID 控制器的時域設計      | 543 |
| 8.3  | 相位前引和相位落後控制器的時域設計 | 558 |
| 8.4  | 極點——零點對消控制        | 583 |
| 8.5  | 前向及前饋補償           | 594 |
| 8.6  | 次要迴路回饋控制          | 598 |
| 8.7  | 狀態回饋控制            | 604 |
| 8.8  | 以狀態回饋完成極點安置設計     | 605 |
| 8.9  | 具有積分控制的狀態回饋       | 611 |
| 8.10 | 控制器的數位製作          | 618 |

## 第九章 控制系統的頻域分析 641

|     |                                |     |
|-----|--------------------------------|-----|
| 9.1 | 前 言                            | 641 |
| 9.2 | 奈氏穩定性準則                        | 645 |
| 9.3 | 奈氏準則的應用                        | 660 |
| 9.4 | 增加 $G(s)H(s)$ 的極點和零點對奈氏軌跡形狀的影響 |     |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| .....                                    | 671 |
| 9.5 多迴路系統的穩定性.....                       | 676 |
| 9.6 具有時間延遲之線性控制系統的穩定性.....               | 681 |
| 9.7 頻域特性.....                            | 685 |
| 9.8 二階系統的 $M_p$ 、 $\omega_p$ 和頻帶寬度.....  | 685 |
| 9.9 增加零點於開迴路轉換函數的影響.....                 | 691 |
| 9.10 加入極點於開迴路轉換函數的影響.....                | 694 |
| 9.11 相對穩定性——增益邊限、相位邊限和 $M_p$ .....       | 698 |
| 9.12 相對穩定性與波第圖之絕對值曲線斜率的關係.....           | 709 |
| 9.13 $G(j\omega)$ ——平面上之等 $M$ 軌跡.....    | 710 |
| 9.14 $G(j\omega)$ ——平面上的等相位軌跡.....       | 715 |
| 9.15 絕對值與相位平面上的等 $M$ 與等 $N$ 軌跡——尼可圖..... | 717 |
| 9.16 非單位回饋系統之閉迴路頻率響應分析.....              | 722 |
| 9.17 頻域之靈敏度研究.....                       | 723 |
| 9.18 數位控制系統的頻率響應.....                    | 726 |

## 第十章 控制系統的頻域設計 747

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 10.1 前 言.....         | 747 |
| 10.2 相位前引控制器.....     | 751 |
| 10.3 相位落後控制器.....     | 763 |
| 10.4 落後—前引控制器.....    | 774 |
| 10.5 橋接 $T$ 型控制器..... | 778 |

## 附錄A 頻域圖 791

|                        |     |
|------------------------|-----|
| A.1 轉換函數的極座標圖.....     | 791 |
| A.2 轉換函數的波第圖(折線圖)..... | 799 |
| A.3 大小與相位圖.....        | 813 |

## 附錄B 拉氏變換表 817

## 索 引 821

# 第一章

## 緒論

### 1.1 控制系統

本章之目的為使讀者熟悉下列主題：

1. 控制系統是什麼。
2. 控制系統為什麼重要。
3. 控制系統的基本元件。
4. 為何回饋要納入大多數的控制系統中。
5. 控制系統的種類。

關於前兩項主題，吾人試以人類為例；因人體可能是目前最微妙且複雜的控制系統。一般人可從事包括做決策在內的各式各樣工作，有些工作如撿拾物品或從事某一點走到另一點，常以慣常的方式為之。在某種情形下，這些工作可以最佳的方法來執行。例如一位百碼短跑選手，即以在最短的時間內跑完全程為目標；而馬拉松長跑者的目標則不同，他不但期望以最短的時間跑完全程，還要隨時控制體能的消耗，才能達成最好的成績。因此我們可以說生活中有無數的“目標”須要達成，而達成這些目標的手段，常牽涉到控制系統的需要。

近年來，控制系統已在現代文明與技術的發展過程中佔有日益重要的角色。實際上我們日常生活中有不少活動就已普遍受到某種控制系統的影響。就以居家生活為例，冷暖氣系統中的自動控制裝置可調節室內的溫度及濕度而使人們過得更舒適。為了達到最大的能源使用效率，有些大型辦公室及工廠樓房的冷暖系統都以電腦來控制。

工業上也處處可見控制系統，像產品品質管制、自動化裝配線、工作母機、太空技術與武器系統、電腦控制、捷運系統、動力系統、機器人等皆是。甚至如存貨控制及社會經濟系統管制之問題，亦可由自動控制的學理來著手。

## 2 第一章 緒 論

不管控制系統型式為何，該系統的基本要素可以描述如下：

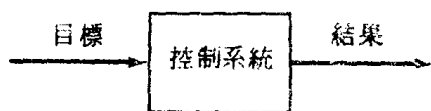
1. 控制的目標
2. 控制系統元件
3. 結果

圖 1-1 (a) 以方塊圖的形式說明此三種基本要素的關係。

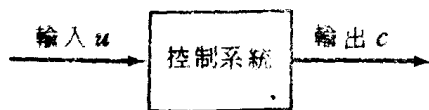
若以更科學的術語來說，這三個基本要素又可分別以輸入，系統元件及輸出表示其間的關係，如圖 1-1 (b) 所示。

一般而言，控制系統的目標在於經由控制系統的元件 ( element )，以輸入  $u$  ( input  $u$  ) 所設定的方式來控制輸出  $c$  ( output  $c$  )。此系統的輸入稱為致動信號 ( actuating signals )，輸出則稱為受控變數 ( controlled variables )。

為說明圖 1-1 形式的控制系統，吾人試以汽車的方向控制為例。兩個前輪的方向可視為受控變數  $c$  ( 或輸出 )，方向盤的方向即為致動信號  $u$  ( 或輸入 )。



(a)



(b)

圖 1-1 控制系統的基本元件



圖 1-2 空轉速率控制系統

在此情形下的控制系統（或過程）則由整部汽車的轉向機械作用與動力所組成。但假如我們的目標是要控制汽車速率的話，則油門所承受的壓力為致動信號，而汽車的速率即為受控變數。整體而言，汽車控制系統可以視為具有兩項輸入（即方向盤與油門）及兩項輸出（方向與速率）的控制系統。本例中兩項控制與輸出皆相互獨立，但通常控制和輸出是成對出現的。我們稱此種具有一個輸入和輸出以上的系統為多變數系統（multi-variable system）。

另一個例子是汽車引擎的空轉速率控制系統（idle-speed control system），其目標在於不管引擎的實際負載力如何（如傳輸、動力轉向、空氣調節等），仍使引擎的空轉速率維持在極低的水準以達省油之功效。若無該控制系統，任何突然加諸引擎的負載會使引擎速率降低，甚至造成引擎的失速。因此，空轉速率控制系統的兩個主要目標是：(1)當引擎加負載時，使速率下降的情形消失或降至最低程度；(2)維持引擎空轉速率於一定水準。圖 1 - 2 是從輸入—控制—輸出的觀點來說明空轉控制系統之方塊圖。本例中節氣閥角度  $\alpha$ （throttle angle  $\alpha$ ）及負載力矩  $T_L$ （load torque  $T_L$ ）（係由空氣調節、動力轉向、傳輸或剎車等造成）為輸入，引擎速率  $\omega$  為輸出，而引擎為受控過程（controlled process）或系統。

### 開迴路控制系統(非回饋系統)

圖 1 - 2 所說明的空轉速率控制系統較不複雜，稱為開迴路控制系統（open-loop control system），我們不難發現此類系統無法滿意地達成要求的水準。例如，若節氣閥角度  $\alpha$  先固定在某一速率的初值上，當加上負載力矩  $T_L$  時，我們無法防止引擎速率的下降。唯一使該系統有效運作的方法，只有隨著負載力矩的改變來調整  $\alpha$ ，才能使引擎速率  $\omega$  維持在一定水準。

由於開迴路系統既簡單又經濟，因此實用上廣泛被應用，因而在一九八一年以前所生產的汽車根本沒有裝置空轉速率控制系統。

洗衣機也是開迴路系統的另一例，因它的洗衣時間完全由人為操作來判斷與估計。一台真正的全自動洗衣機應有連續檢查衣物是否洗清及在洗清之後能自動切斷電源的裝置。

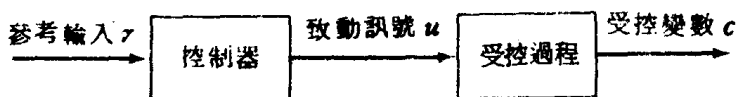


圖 1-3 開迴路控制系統之元件

開迴路系統通常分為兩部分：控制器（controller）及受控過程（controlled process），如圖 1-3 所示。當輸入信號（或稱命令） $r$  進入控制器後，其輸出則為致動信號  $u$ ，此致動信號再控制受控過程，使受控變數  $c$  根據設定的標準執行命令。

在簡單一點的情況，控制器依系統性質的不同，可為放大器、機械連桿組或其他控制方法。在較複雜的電子控制系統中，控制器可能是一具電子計算機，如微處理機。

### 閉迴路控制系統(回饋控制系統)

從輸出到輸入無法產生迴路或回饋（feedback）是開迴路系統的最大缺點，以致該系統的控制效果不夠精確，適應性也差。為了達成更精確的控制，受控信號  $c(t)$ （controlled signal）應該回饋並與參考輸入比較，再由輸出與輸入的差依比例決定新的致動信號，並經由系統來更正誤差。如此，具有一個或多個回饋路徑的系統稱之為閉迴路系統（closed-loop system）。

圖 1-4 所示為閉迴路控制系統，參考輸入  $\omega_r$ （reference input）設定在某一空轉速率上。一般當負載力矩為零時，引擎空轉（at idle）的速率應與參考輸入  $\omega_r$  一致，任何由負載力矩  $T_L$  所造成實際速率與設定速率的偏差，均可由速率轉換器及誤差檢測器測出。控制器處理此偏差後，會提供一個信號來調整節氣閥角度  $\alpha$  以更正誤差。

圖 1-5 為開迴路與閉迴路系統典型操作效果的比較。在圖 1-5(a)，負載力矩產生之後會使開迴路系統空轉速率下降並停留在某一較低值上。而圖 1-5(b)所示者，為當  $T_L$  發生時，閉迴路系統空轉速率很快地回復到原值的情形。

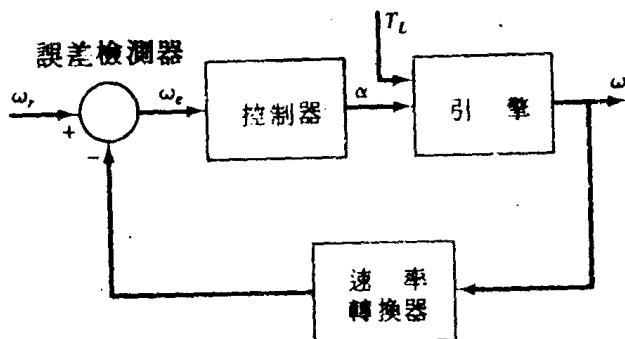


圖 1-4 閉迴路空轉速率控制系統

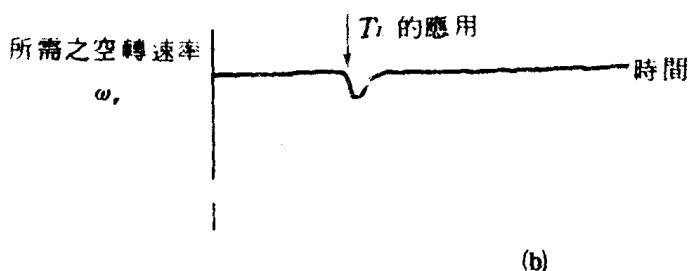
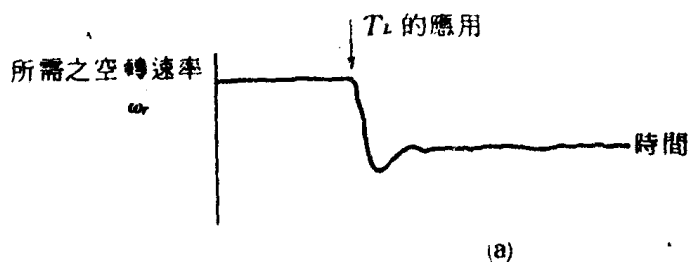


圖 1-5 (a) 典型開迴路系統的空轉速率響應

(b) 典型閉迴路系統的空轉速率響應

以上所說明的空轉速率控制系統也稱為調節系統 (regulator system)，其目的在於維持系統輸出於某一設定水準。

圖 1-6 所示之文書處理機 (word processor) 或電動打字機的印字盤

## 6 第一章 緒 論

控制系統，為閉迴路控制系統的另一例。印字盤通常具有九十六或一百個字元，它在印字時要轉到合適的位置，以便印字錘印出所要的字。字元的選擇由鍵盤決定，當某一個字鍵被按下時，即發出指令叫印字盤轉到最新的位置。

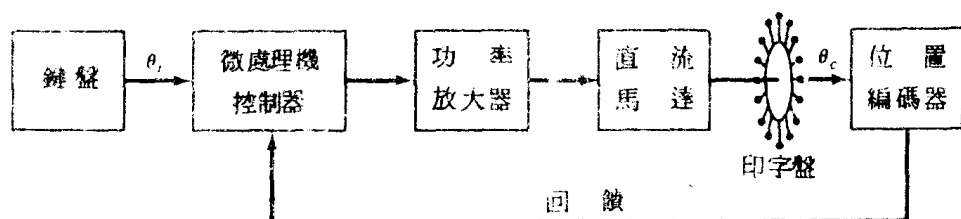


圖 1-6 印字盤控制系統

微處理機算出必須轉動的方向和距離後，會發出邏輯控制信號給控制印字盤馬達轉動的功率放大器。位置感應器測出印字盤的位置後，會與微處理機所定的位置相比較，然後再控制馬達轉動印字盤到我們所要的位置。實用上，由微處理機所產生的控制信號應該能夠迅速地將印字盤的位置自由變換，使得印字工作能準確地在規定的時間內完成。

圖 1-7 係典型的印字盤控制系統的輸入與輸出之設定。當參考命令輸

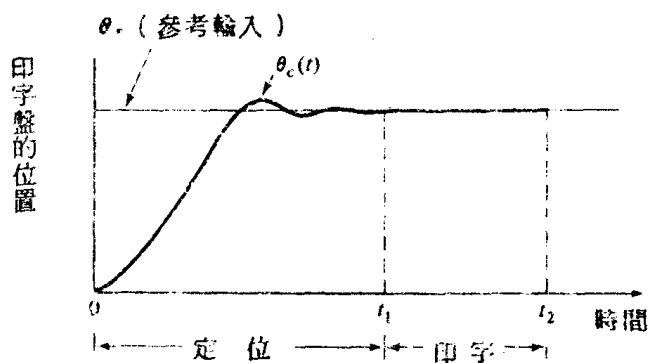


圖 1-7 典型的印字盤控制系統之輸入與輸出

入 ( reference command input ) 給定後，此信號即代表一個步級函數 ( step function )。馬達電路的感應作用及機械負載力的慣性 ( inertia ) 會使印字盤無法立刻移到我們所要的位置。通常在  $t_1$  時間以後，它會隨著如圖所示的反應停留在新的位置上。一直到印字盤停止後，印字機才開始印字，否則所打出的字會模糊不清。圖 1-7 說明印字盤定位之後，從  $t_1$  到  $t_2$  的期間保留作印字之用，因此當  $t = t_2$  時，該系統便準備接受新的命令。

## 1.2 何謂回饋及其效應

1.1 節為說明使用回饋的動機而舉的例子相當簡化，這些例子中，回饋只有降低系統輸出與參考輸入間的誤差之作用而已。然而理論上的控制系統的回饋效應其重要性要比這些例子所顯示者還要顯著，降低系統誤差只是其中之一罷了。以下各節將介紹控制系統之回饋在下列系統操作特徵上的效應如穩定性 ( stability )、頻帶寬度 ( bandwidth )、全級增益 ( overall gain )、阻抗 ( impedance ) 及靈敏度 ( sensitivity ) 等。

為了瞭解回饋在控制系統中的影響，我們將以各種角度來研究此現象。當回饋主要是為控制而引入時，我們很容易就能確定回饋的存在。但物理系統中有很多情況原本是非回饋系統，但以另一種方式來看却變成具有回饋的現象。通常可以這麼說，只要系統的變數之間有封閉的因果關係存在時，則回饋存在。這個觀點將無可避免地使一些通常認為不具回饋的系統，變成有回饋的系統。在回饋和控制系統理論的適用範圍內，這個廣義的回饋定義，可使許多具有或不具有實際回饋的系統，在符合上述回饋的觀念下，可以有系統的方法來研究它。

現在我們以系統在工作時的各種狀況來研究回饋的效應。毋需線性系統理論的背景與數學基礎，此時我們只用前述的靜態系統符號來討論。考慮圖 1-8 所示的簡單回饋系統的結構，其中  $r$  是輸入信號， $c$  是輸出信號， $e$  為誤差，而  $b$  為回饋信號，參數  $G$  和  $H$  可視為定值的增益。經過簡單的代數計算，可輕易地指出系統的輸入—輸出關係為：