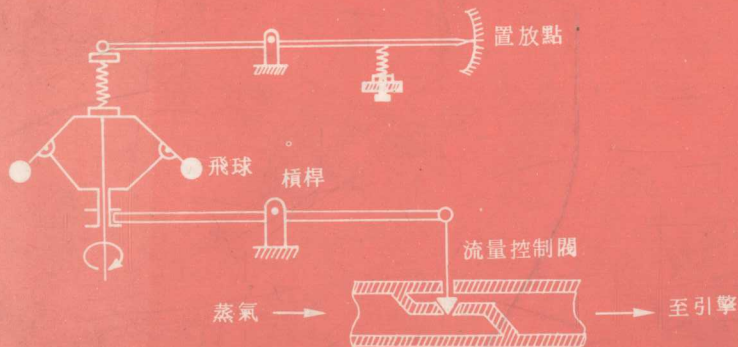


# 控制系統解析

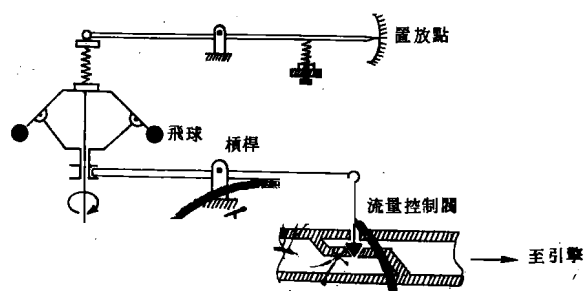
王錦銘 著



SUPER 超級科技圖書股份有限公司

# 控制系統解析

王錦銘 著



SUPER

超級科技圖書社

# 控制系統解析

Control System and Problems Solving

版權所有

超級

翻印必究

著作權登記台內著字第25986號

作者 王錦銘  
發行人 林國富  
發行所 超級科技圖書股份有限公司  
業務部 永和市林森路50號4樓  
電話 9251021  
郵政劃撥帳號 1009155-4  
行政院新聞局登記證局版台業字第2405號  
承印者 申全盛彩色印刷廠  
中和市員山路294巷9號  
初版 中華民國七十二年五月  
四版 中華民國七十五年二月  
定價 新台幣貳佰肆拾元整

# 序

初學者研習一門學科，往往花費許多時間在教科書上，仍然無法獲得清晰明確的觀念。對問題的處理束手無策，便求助於坊間習題解答。但繁瑣笨拙式的解答，並未能帶給讀者觀念上的任何突破。若解答謬誤，只有加深對理論的誤解。筆者研究控制系統多年，於臺大研究所求學期間，即深感國內缺乏一本觀念敘述詳盡，輔以大量問題解析的控制書籍。

本書內容極為廣泛，包括大學部線性控制所有課程，更論及一般教科書所忽略的控制課題，諸如：模式簡化、靈敏度分析、系統辨別、PID 控制器及時域代數設計等等。學習控制的最終目的是「設計與補償」。然而，學校因時數關係多未能詳細講授，甚至只是蜻蜓點水式帶過，是學生最感生疏而畏懼之一環。筆者刻意在第十章中，有系統的介紹設計與補償技巧，期引發學生注意與興趣。

本書敘述扼要詳盡，尤注重物理觀念的理解及應用。對重要問題儘可能系統步驟化，告訴讀者處理問題的程序。每章後的問題大量取自教科書中習題，並輔以各種考試試題。每個範例或問題，都經由筆者簡潔有條理的加以解析，俾以訓練讀者解題能力，加深對控制系統的了解。書後附錄高等考試、研究所入學試題，供讀者考試參考之用。

筆者對本書之價值深具信心，若採用為課堂上補充教材，必能收相輔相成之效。對有志參加考試之讀者，更有非常之助益。

在此要感謝超級科技圖書社幾位負責人，敬業負責的態度，使本書更加完善。並感謝所有提供資料的好友。筆者才疏學淺，疏漏或不妥之處在所難免。尚祈先進學者，惠予指正幸。

王 錦 銘 謹識  
中華民國七十二年五月

# 修訂版序

本書發行迄今一年又十個月，發行期間廣受讀者好評。為使本書更形完善，本修訂版增刪許多資料。增加的有：

- (1) 1-3 節「控制器」，介紹各種工業控制器。
- (2) 2-5 節「範例」，闡釋對物理系統建立其數學模式。
- (3) 5-7 節「微分控制積分控制對時間響應的影響」。
- (4) 6-6 節「雙線性變換」，應用羅斯準則於離散系統。
- (5) 7-5 節「根廓線」，討論兩個參數同時改變的根軌跡。

除此之外，每章後的問題去蕪存精重新編排，並增添研究所、高考試題。

本書標題雖為問題之解析，但也具有教科書的用途。欲進一步瞭解線性系統理論之讀者，可參考筆者所著「線性系統解析」一書。（超級科技圖書社發行）

筆 者      修訂於  
中華民國七十四年三月

# 目 錄

## 序

### 第一章 導論 1

1-1 控制系統 ..... 1

1-2 回授控制系統的種類 ..... 2

1-3 控制器 ..... 4

1-4 控制系統的研究 ..... 6

問題解析 ..... 9

### 第二章 物理系統的數學模式 19

2-1 轉移函數..... 19

2-2 方塊圖..... 21

2-3 訊號流程圖..... 25

2-4 物理系統模型..... 29

2-5 範例..... 32

問題解析 ..... 36

### 第三章 狀態變數分析 69

|      |                        |    |
|------|------------------------|----|
| 3-1  | 狀態變數的描述                | 69 |
| 3-2  | 狀態轉移方程式                | 71 |
| 3-3  | 狀態轉移矩陣                 | 72 |
| 3-4  | 特殊矩陣 $A$ 求 $\exp(A t)$ | 76 |
| 3-5  | 狀態圖                    | 77 |
| 3-6  | 微分方程式到動態方程式            | 80 |
| 3-7  | 相位變數典型式的轉換             | 83 |
| 3-8  | 矩陣的對角化                 | 84 |
| 3-9  | 矩陣的喬頓典型式               | 86 |
| 3-10 | 轉移函數矩陣                 | 88 |
| 3-11 | 轉移函數的分解                | 88 |
| 3-12 | 控制性和觀測性的介紹             | 91 |
| 3-13 | 線性系統的狀態控制性             | 92 |
| 3-14 | 線性系統的觀測性               | 94 |
|      | 問題解析                   | 96 |

#### 第四章 離散資料系統

133

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 4-1 | 緒論             | 133 |
| 4-2 | $Z$ 轉換         | 135 |
| 4-3 | 反 $Z$ 轉換       | 138 |
| 4-4 | 離散轉移函數         | 140 |
| 4-5 | 連續動態方程式的離散化    | 143 |
| 4-6 | $Z$ 轉換解離散狀態方程式 | 144 |
| 4-7 | 離散狀態圖          | 146 |

|           |     |
|-----------|-----|
| 問題解析..... | 149 |
|-----------|-----|

|                   |            |
|-------------------|------------|
| <b>第五章 時域特性分析</b> | <b>169</b> |
|-------------------|------------|

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5-1 緒論.....               | 169 |
| 5-2 暫態響應的性能規格.....        | 170 |
| 5-3 二階系統的暫態響應.....        | 172 |
| 5-4 特性根和系統工作性能.....       | 175 |
| 5-5 模式簡化.....             | 177 |
| 5-6 穩態誤差.....             | 180 |
| 5-7 微分控制積分控制對時間響應的影響..... | 186 |
| 問題解析.....                 | 189 |

|                    |            |
|--------------------|------------|
| <b>第六章 靈敏度和穩定性</b> | <b>221</b> |
|--------------------|------------|

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 6-1 靈敏度分析.....                | 221 |
| 6-2 穩定性的定義.....               | 223 |
| 6-3 特性根和穩定性.....              | 223 |
| 6-4 <u>羅斯 - 赫維茲</u> 穩定準則..... | 225 |
| 6-5 相對穩定性.....                | 230 |
| 6-6 離散資料系統的穩定性.....           | 232 |
| 問題解析.....                     | 234 |

|                 |            |
|-----------------|------------|
| <b>第七章 根軌跡法</b> | <b>261</b> |
|-----------------|------------|

|     |             |     |
|-----|-------------|-----|
| 7-1 | 基本概念        | 261 |
| 7-2 | 根軌跡的作圖規則    | 262 |
| 7-3 | 例題說明與分析     | 264 |
| 7-4 | 根軌跡的一般圖形與特性 | 267 |
| 7-5 | 根廓線         | 270 |
| 7-6 | 結論          | 272 |
|     | 問題解析        | 273 |

## 第八章 頻率響應法

309

|     |                  |     |
|-----|------------------|-----|
| 8-1 | 緒論               | 309 |
| 8-2 | 波德圖              | 310 |
| 8-3 | 波德圖的構成           | 318 |
| 8-4 | 系統型式及增益與大小對數圖的關係 | 322 |
| 8-5 | 極小相系統            | 325 |
| 8-6 | 系統轉移函數辨別         | 326 |
| 8-7 | 極座標圖             | 328 |
|     | 問題解析             | 331 |

## 第九章 頻域特性分析

349

|     |           |     |
|-----|-----------|-----|
| 9-1 | 奈氏穩定準則    | 349 |
| 9-2 | 奈氏準則的應用   | 352 |
| 9-3 | 相對穩定性     | 356 |
| 9-4 | 控制系統的頻域特性 | 359 |

|     |                     |     |
|-----|---------------------|-----|
| 9-5 | 頻率響應與時間響應的關係 .....  | 360 |
| 9-6 | 閉路頻率響應 .....        | 365 |
| 9-7 | 使用M圓調整增益 .....      | 369 |
| 9-8 | <u>尼可士</u> 圖表 ..... | 371 |
| 9-9 | 頻域中的靈敏度研究 .....     | 376 |
|     | 問題解析 .....          | 378 |

## 第十章 控制系統的設計與補償 413

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 10-1  | 緒論 .....        | 413 |
| 10-2  | PID控制器 .....    | 414 |
| 10-3  | 基本補償網路 .....    | 417 |
| 10-4  | 時域設計的初步考慮 ..... | 420 |
| 10-5  | 時域補償 .....      | 422 |
| 10-6  | 時域中的代數設計 .....  | 425 |
| 10-7  | 頻域設計的初步考慮 ..... | 426 |
| 10-8  | 頻域補償 .....      | 430 |
| 10-9  | 補償摘要 .....      | 434 |
| 10-10 | 補償器合成 .....     | 435 |
| 10-11 | 狀態回授設計 .....    | 437 |
|       | 問題解析 .....      | 443 |

## 附錄一 歷年高等考試考題彙編

477

- (一) 69 年高等考試控制工程試題..... 477
- (二) 70 年高等考試控制工程試題..... 480
- (三) 71 年高等考試控制工程試題..... 483
- (四) 72 年高等考試控制工程試題..... 485
- (五) 73 年高等考試控制工程試題..... 490

## 附錄二 歷屆研究所考試考題彙編

493

- (一) 70 年中正理工學院電機研究所試題..... 493
- (二) 71 年中正理工學院電機研究所試題..... 495
- (三) 72 年中正理工學院電機研究所試題..... 497
- (四) 72 年台灣大學電機研究所控制系統試題..... 499
- (五) 70 年清華大學電機研究所控制系統試題..... 501
- (六) 71 年清華大學電機研究所控制系統試題..... 503
- (七) 73 年交通大學電機研究所控制系統試題..... 505
- (八) 73 年台灣大學電機研究所控制系統試題..... 507
- (九) 74 年台灣大學電機研究所控制系統試題..... 509

## 主要參考書籍

511

# 第一章

## 導 論

### 1-1 控制系統

控制意謂著調整 ( regulate ) 或命令 ( command ) , 控制系統定義為在某種調整或命令的要求下所相關的系統。控制系統依其是否有回授 ( feedback ) 作用 , 分為底下兩類 :

(一) 開路控制系統 ( open-loop control system )

輸出對控制動作無影響的控制系統，稱為開路控制系統。圖1-1為此種系統之方塊圖 ( block diagram ) 。

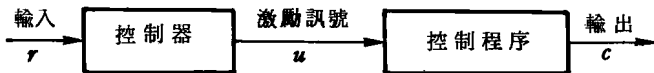


圖 1 - 1 開路控制系統

輸入  $r$  (或稱為命令  $r$ ) 進入控制器 ( controller ) , 產生控制程序 ( controlled process ) 的輸入激勵訊號 ( actuating signal )  $u$  ,  $u$  控制輸出  $c$  達到預定工作結果。

(二) 閉路控制系統 ( closed-loop control system )

輸出訊號對控制動作有直接影響的控制系統，稱為閉路控制系統。圖1-2為此種系統之方塊圖。

## 2 控制系統解析

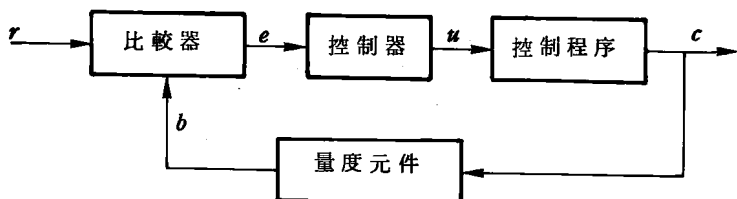


圖 1-2 閉路控制系統

輸入訊號  $r$  與回授訊號  $b$  在比較器 (comparator) 中比較，產生誤差訊號 (error signal)  $e$ ，此訊號加至控制器以減少誤差，並使系統輸出  $c$  達到所期望之值。閉路系統具有輸出訊號的回授作用，因此稱為回授系統。

### 【註釋】

1. 開路控制系統輸出並不回授與輸入作比較，只適用於輸入與輸出間關係為已知，且無任何干擾的系統。
2. 閉路控制系統中，若誤差訊號為輸入訊號與回授訊號的差，稱為負回授，否則稱為正回授。圖 1-3 為比較器〔或稱誤差檢測器 (error detector)〕的符號簡圖。

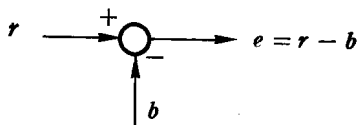


圖 1-3 相減的比較器符號

## 1-2 回授控制系統的分類

回授控制系統的一般構成，以圖 1-4 的方塊圖來表示。

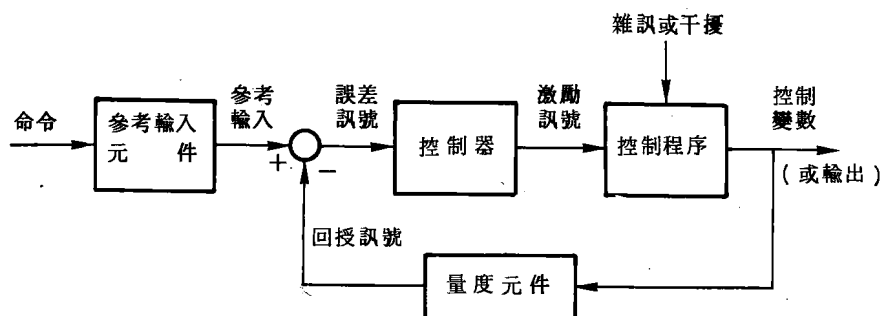


圖 1-4 一般回授控制系統方塊圖

回授控制系統的目的，是使控制變數（controlled variable）（或輸出）遵從控制命令，且不因外來干擾（disturbance）或雜訊（noise）使控制變數有所變動。

回授控制系統依其控制變數的種類，可分為伺服機構（servo mechanism）、程序控制（process control）及自動調整（automatic regulation）三大類。分類情形列於表 1-1。

表 1-1 回授控制系統分類

| 控制名稱 | 控制變數             |
|------|------------------|
| 伺服機構 | 機械位置，角度，速度       |
| 程序控制 | 化工溫度，壓力，流量，液面，濕度 |
| 自動調整 | 電壓，電流，旋轉速度，電力    |

回授控制系統依其訊號在系統中的型式，又可分為連續資料（continuous-data）及離散資料（discrete-data）系統。分類情形列於表 1-2。圖 1-5 為計算機控制系統的基本元件圖。由於數位計算機具有高速正確運算的能力，利用數位計算機設計控制器已是近代工業控制的主流。

#### 4 控制系統解析

表 1-2 回授控制系統分類 (依訊號型式)

| 控制名稱 | 系統訊號型式     |
|------|------------|
| 連續資料 | 都是連續時間的函數  |
| 離散資料 | 具有脈波序列或數位碼 |

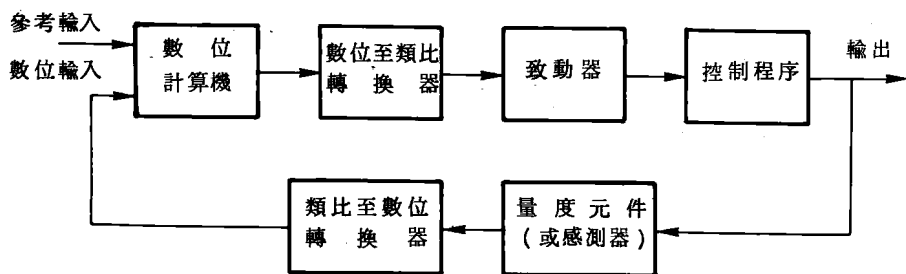


圖 1-5 計算機控制系統

### 1-3 控制器

控制器係將系統輸出值與輸入參考值加以比較，視其誤差量之大小產生激勵控制訊號，以減少此誤差至零或一最小值之裝置。圖 1-6 為包含誤差檢視器及控制器之方塊圖。

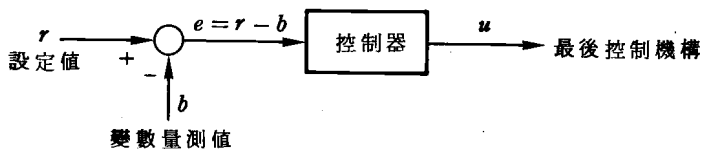


圖 1-6 誤差檢測器與控制器方塊圖

工業控制器可依其控制方式，分為下列幾類：

### 雙位置或開關控制器 ( two-position or on-off controller )

此控制方式最為簡單，價格低廉，控制器輸出只為固定兩個值（開或關）。 $u(t)$ 與 $e(t)$ 關係如下

$$\begin{aligned} u(t) &= M, & e(t) > 0 \\ &= 0, & e(t) < 0 \end{aligned}$$

### 比例控制器 ( proportional controller )

控制器輸出與誤差訊號大小成正比，通常用在需要快速動作來維持的控制系統。 $u(t)$ 與 $e(t)$ 之關係

$$u(t) = K_p e(t)$$

比例控制器實際上乃一可調增益之放大器。

### 積分控制器 ( integral controller )

控制器輸出的變化率與誤差訊號成正比，即

$$\frac{d u(t)}{d t} = K_I e(t) \quad \text{或} \quad u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt$$

積分控制有時稱為重置控制 ( reset control )，能提高系統穩態精確度。

### 比例積分控制器 ( proportional-integral controller )

比例控制與積分控制合併使用之控制器，即

$$u(t) = K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt$$

## 比例微分控制器 ( proportional-derivative controller )

比例微分控制器之控制動作由下式所定義：

$$u(t) = K_p e(t) + K_p K_D \frac{de(t)}{dt}$$

微分控制有預先校正誤差訊號之作用，在控制某些負載突然改變的程序非常有用。注意，微分控制不能單獨使用，因其控制動作僅在暫態過程中有效。

## 比例積分微分控制器 ( proportional-integral-derivative controller )

此控制器通常又稱為三式控制器 ( three-mode controller )，其定義如下：

$$u(t) = K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt + K_p K_D \frac{de(t)}{dt}$$

此組合動作有每種控制動作之優點，通常在一些負載改變很快很大的系統。

控制器多以電氣或加壓之流體為其動力來源，若依動力來源加以區分，可分為：電子式控制器 ( electronic controller )，氣壓式控制器 ( pneumatic controller ) 或油壓式控制器 ( hydraulic controller )。

# 1-4 控制系統的研究

控制系統之研究與設計，通常經由下列四個程序：

1. 建立模型 ( modeling )
2. 數學描述 ( mathematical description )