

# 程序控制儀器學

Process Control  
Instrumentation Technology

(第二版)

原著者：Curtis D. Johnson

譯述者：陳金榮 林陳玉美

科技圖書股份有限公司

# 程序控制儀器學

Process Control  
Instrumentation Technology

(第二版)

原著者：Curtis D. Johnson

譯述者：陳金榮 林陳玉美

科技圖書股份有限公司

# 序 言

由於知識與技術雙方面的進展，因而急切需要程序控制專業人才的培養。時至今日，程序控制活動的範圍可分成三大類，每一類中又包含設備與訓練兩項。程序控制系統工程師所擔任的是總體程序控制系統的設計，而成為製造程序專業人員所需求者。這種活動，必需具備有關穩定度、模式特徵、以及程序控制環路的動態特性等的基本理論知識。程序控制技師與應用工程師的任務，是用特殊元件組成整體的系統設計。故需具備在程序控制環路上使用的量測，電子與氣力的特性，具有優良而深入設計知識與了解。程序控制的操作技師或技術員的任務為，控制系統設備的安裝與環路元件的測試。故需具備對量測，電子的，氣力的與機械方面諸特性的良好操作知識。

本書編纂目的是提供程序控制的操作方面要求為主，亦即，適用作程序技師與技術員等的訓練用。目前已有若干優良教科書，對穩定度與程序控制系統設計準則用 Laplace 轉換法作詳細說明。但這些書中的每章節中並不包含系統元件的說明，諸如量測法，信號調節以及最終控制元件等。自然，這些書中缺少了控制元件用的 Laplace 轉換學理與足夠的數學背景，使環路元件的設計不能符合規範要求。在本書中已具有足夠的程序控制特性敘述；諸如元件、模式與穩定度等，分別在量測技術、控制模式以及最終控制元件等各章節中均有詳細說明。並為符合目前的趨勢，又強調程序控制技術的數位觀念。

閱讀本書的程度以大二，或二年制高級班四年制初級班的技術學院程度，已具有基本物理，類比與數位電子知識，數學程度只限用大代數敘述，若具有微積分程度則更有利。

在準備本書作第二版改版中，筆者曾就技術世界作若干深入

的觀察，得到不少技術訓練的新生力量。其中之一是，使已形成明顯的主題具有永久性，這些範圍仍將繼續需要學習，暴漲而具發展特性的新技術更予廣泛搜羅。因之，目前的版本要比第一版的範圍包括更廣，並改善其解釋與陳述方式以利學習。更重要一點是，對程序控制最近發展的技術範圍加以擴充。其中包含用微電算器作直接數位控制（direct digital control, DDC）。

曾經用過第一版的讀者將會發現本書中的第三，五，七，八與第十章中的改變，顯示出數位技術與電算器使用範圍已予擴大，並將若干主題重行整理以求更為有效。其他的擴充部分計有壓力與流量測定與氣力及最終控制操作等。

吾對第一版使用者所提供的建議作為本書修訂之用，至深感謝。

C. D. Johnson 約翰生

# 目 錄

## 序 言

## 第一章 程序控制介紹

### 講授目標

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 1.1 概 說 .....         | 1  |
| 1.2 程序控制的定義 .....     | 2  |
| 1.3 程序控制的構成要素 .....   | 4  |
| 1.3.1 元件的認定 .....     | 4  |
| 1.3.2 方塊圖 .....       | 5  |
| 1.4 程序控制的評估 .....     | 7  |
| 1.4.1 系統評估的標準 .....   | 8  |
| 1.4.2 動態反應的評估準則 ..... | 10 |
| 1.5 類比對數位程序 .....     | 11 |
| 1.5.1 類比處理 .....      | 12 |
| 1.5.2 數位處理 .....      | 13 |
| 1.6 單位，標準與定義 .....    | 18 |
| 1.6.1 單 位 .....       | 18 |
| 1.6.2 標準信號 .....      | 21 |
| 1.6.3 定 義 .....       | 22 |
| 1.6.4 程序控制製圖 .....    | 28 |
| 1.7 時間反應 .....        | 29 |
| 1.7.1 非振盪型反應 .....    | 30 |
| 1.7.2 振盪型反應 .....     | 32 |
| 1.8 有效數與統計學 .....     | 33 |
| 1.8.1 有效數字 .....      | 33 |

## 2 控制程序儀器學

|                 |    |
|-----------------|----|
| 1.8.2 統計學 ..... | 35 |
| 1.9 結 論 .....   | 38 |
| 1.10 習 題 .....  | 39 |

## 第二章 類比信號調節

### 講授目標

|                        |    |
|------------------------|----|
| 2.1 概 說 .....          | 42 |
| 2.2 類比信號原理 .....       | 43 |
| 2.2.1 信號單位變更 .....     | 43 |
| 2.2.2 線性化 .....        | 43 |
| 2.2.3 轉 換 .....        | 45 |
| 2.2.4 濾波與阻抗匹配 .....    | 46 |
| 2.3 電橋與電位計線路 .....     | 46 |
| 2.3.1 電橋線路 .....       | 47 |
| 2.3.2 電位計電路 .....      | 58 |
| 2.4 運算放大器 .....        | 61 |
| 2.4.1 運算放大器特性 .....    | 62 |
| 2.4.2 運算放大器規格 .....    | 65 |
| 2.5 儀器中的運算放大器線路 .....  | 66 |
| 2.5.1 電壓隨耦器 .....      | 67 |
| 2.5.2 反相放大器 .....      | 67 |
| 2.5.3 非反相放大器 .....     | 68 |
| 2.5.4 差動放大器 .....      | 69 |
| 2.5.5 電壓、電流轉換器 .....   | 70 |
| 2.5.6 電流 - 電壓轉換器 ..... | 71 |
| 2.5.7 抽樣與保持 .....      | 72 |
| 2.5.8 積分器 .....        | 72 |
| 2.5.9 線性化 .....        | 74 |
| 2.5.10 特殊積體線路 .....    | 75 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| 2.6 工業電子學 .....   | 76 |
| 2.6.1 矽控整流器 ..... | 77 |
| 2.6.2 雙向控制器 ..... | 80 |
| 2.7 結 論 .....     | 80 |
| 2.8 習 題 .....     | 81 |

### 第三章 數位信號調節

#### 講授目標

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 3.1 概 說 .....               | 85  |
| 3.2 數位的基本 .....             | 87  |
| 3.2.1 數位資訊 .....            | 87  |
| 3.2.2 小數的二進數 .....          | 89  |
| 3.2.3 Boolean代數 .....       | 90  |
| 3.2.4 數位電子學 .....           | 92  |
| 3.3 轉換器 .....               | 94  |
| 3.3.1 比較器 .....             | 94  |
| 3.3.2 數位到類比轉換器 .....        | 95  |
| 3.3.3 類比到數位轉換器 (ADC.) ..... | 100 |
| 3.4 資料收集與輸出系統 .....         | 108 |
| 3.4.1 資料收集系統 .....          | 109 |
| 3.4.2 資料輸出模型 .....          | 111 |
| 3.4.3 應用時注意事項 .....         | 112 |
| 3.5 結 論 .....               | 113 |
| 3.6 習 題 .....               | 114 |

### 第四章 熱換能器

#### 講授目標

|               |     |
|---------------|-----|
| 4.1 概 說 ..... | 117 |
|---------------|-----|

#### 4 控制程序儀器學

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 4.2 溫度的定義 .....      | 118 |
| 4.2.1 熱能 .....       | 118 |
| 4.2.2 溫度 .....       | 119 |
| 4.3 金屬電阻對溫度裝置 .....  | 122 |
| 4.3.1 金屬電阻對溫度 .....  | 123 |
| 4.3.2 電阻對溫度近似法 ..... | 125 |
| 4.3.3 電阻、溫度檢測器 ..... | 128 |
| 4.4 熱電阻器 .....       | 132 |
| 4.4.1 半導體電阻對溫度 ..... | 132 |
| 4.4.2 熱電阻器 .....     | 134 |
| 4.5 熱電偶 .....        | 135 |
| 4.5.1 熱電效應 .....     | 135 |
| 4.5.2 熱電偶 .....      | 137 |
| 4.5.3 熱電偶換能器 .....   | 142 |
| 4.6 其他熱換能器 .....     | 144 |
| 4.6.1 雙金屬片 .....     | 144 |
| 4.6.2 氣體溫度計 .....    | 146 |
| 4.6.3 蒸氣壓溫度計 .....   | 147 |
| 4.6.4 液體膨脹溫度計 .....  | 149 |
| 4.7 設計上的考慮 .....     | 149 |
| 4.8 結 論 .....        | 153 |
| 4.9 習 題 .....        | 155 |

### 第五章 機械換能器

#### 講授目標

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 5.1 概 說 .....      | 157 |
| 5.2 位移、位址或位置 ..... | 158 |
| 5.2.1 電位計 .....    | 158 |
| 5.2.2 電容與電感 .....  | 158 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.2.3 可變磁阻 .....                      | 159 |
| 5.3 應變換能器 .....                       | 161 |
| 5.3.1 應變與應力 .....                     | 162 |
| 5.3.2 應變計原理 .....                     | 166 |
| 5.3.3 金屬應變計 .....                     | 168 |
| 5.3.4 半導體應變計 (SG <sub>s</sub> ) ..... | 171 |
| 5.3.5 負 荷 .....                       | 173 |
| 5.4 運動換能器 .....                       | 173 |
| 5.4.1 運動種類 .....                      | 173 |
| 5.4.2 加速計原理 .....                     | 177 |
| 5.4.3 加速計的種類 .....                    | 181 |
| 5.4.4 應 用 .....                       | 183 |
| 5.5 壓力換能器 .....                       | 184 |
| 5.5.1 壓力原理 .....                      | 185 |
| 5.5.2 壓力轉換器 ( $p > 1$ 個大氣體 ) .....    | 188 |
| 5.5.3 壓力換能器 ( $p < 1$ atm ) .....     | 189 |
| 5.6 流轉換器 .....                        | 191 |
| 5.6.1 固體流的測量 .....                    | 191 |
| 5.6.2 液體流量 .....                      | 193 |
| 5.7 結 論 .....                         | 198 |
| 5.8 習 題 .....                         | 199 |

## 第六章 光換能器

### 講授目標

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 6.1 概 說 .....       | 202 |
| 6.2 EM輻射的基礎 .....   | 203 |
| 6.2.1 EM輻射的本質 ..... | 204 |
| 6.2.2 光的特性 .....    | 207 |
| 6.2.3 發光能量原理 .....  | 212 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 6.3 光檢測器 .....      | 217 |
| 6.3.1 光檢測器的特性 ..... | 217 |
| 6.3.2 光導體檢測器 .....  | 218 |
| 6.3.3 光伏打檢測器 .....  | 222 |
| 6.3.4 光二極體檢測器 ..... | 225 |
| 6.3.5 光放射檢測器 .....  | 225 |
| 6.3.6 其他檢測器 .....   | 228 |
| 6.4 光高溫計 .....      | 229 |
| 6.4.1 熱輻射 .....     | 229 |
| 6.4.2 寬波帶高溫計 .....  | 231 |
| 6.4.3 窄波帶高溫計 .....  | 233 |
| 6.5 光源 .....        | 234 |
| 6.5.1 傳能光源 .....    | 235 |
| 6.5.2 雷射原理 .....    | 237 |
| 6.6 用途 .....        | 241 |
| 6.6.1 標籤檢查 .....    | 241 |
| 6.6.2 混濁度 .....     | 242 |
| 6.6.3 測距 .....      | 245 |
| 6.7 結論 .....        | 246 |
| 6.8 習題 .....        | 247 |

## 第七章 最終控制元件

### 講授目標

|                  |     |
|------------------|-----|
| 7.1 概說 .....     | 250 |
| 7.2 最終控制操作 ..... | 251 |
| 7.2.1 信號變換 ..... | 251 |
| 7.2.2 致動器 .....  | 252 |
| 7.2.3 控制元件 ..... | 252 |
| 7.3 信號轉換 .....   | 253 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 7.3.1 類比電信號 ..... | 254 |
| 7.3.2 數位電信號 ..... | 256 |
| 7.3.3 氣壓信號 .....  | 257 |
| 7.4 致動器 .....     | 260 |
| 7.4.1 電力驅動器 ..... | 261 |
| 7.4.2 氣力致動器 ..... | 269 |
| 7.4.3 液壓致動器 ..... | 271 |
| 7.5 控制元件 .....    | 272 |
| 7.5.1 機械式的 .....  | 272 |
| 7.5.2 電力式 .....   | 273 |
| 7.5.3 液 閥 .....   | 277 |
| 7.6 結 論 .....     | 283 |
| 7.7 習 題 .....     | 284 |

## 第八章 控制器原理

### 講授目標

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 8.1 概 說 .....      | 287 |
| 8.2 程序特性 .....     | 288 |
| 8.2.1 程序方程式 .....  | 288 |
| 8.2.2 程序負荷 .....   | 289 |
| 8.2.3 程序延遲 .....   | 290 |
| 8.2.4 自身調節 .....   | 290 |
| 8.3 控制系統參數 .....   | 291 |
| 8.3.1 誤 差 .....    | 291 |
| 8.3.2 可變範圍 .....   | 293 |
| 8.3.3 控制參數範圍 ..... | 293 |
| 8.3.4 控制延遲 .....   | 294 |
| 8.3.5 呆時間 .....    | 294 |
| 8.3.6 循 環 .....    | 295 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 8.3.7 控制器模式 .....          | 295 |
| 8.4 不連續控制模式 .....          | 296 |
| 8.4.1 兩位置模式 .....          | 297 |
| 8.4.2 多位置模式 .....          | 300 |
| 8.4.3 浮動控制模式 .....         | 301 |
| 8.5 連續控制模式 .....           | 306 |
| 8.5.1 比例控制模式 .....         | 306 |
| 8.5.2 積分控制模式 .....         | 309 |
| 8.5.3 微分控制模式 .....         | 312 |
| 8.6 組合控制模式 .....           | 314 |
| 8.6.1 比例積分控制 (PI) .....    | 314 |
| 8.6.2 比例、微分控制模式 (PD) ..... | 317 |
| 8.6.3 三模式控制器 (PID) .....   | 319 |
| 8.6.4 專門名詞 .....           | 322 |
| 8.7 結 論 .....              | 323 |
| 8.8 習 題 .....              | 324 |

## 第九章 類比控制器

### 講授目標

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 9.1 概 說 .....      | 327 |
| 9.2 一般性質 .....     | 328 |
| 9.3 電子類比控制器 .....  | 329 |
| 9.3.1 誤差檢視 .....   | 330 |
| 9.3.2 單一模式 .....   | 330 |
| 9.3.3 複合控制模式 ..... | 340 |
| 9.4 氣力控制器 .....    | 345 |
| 9.4.1 一般特徵 .....   | 345 |
| 9.4.2 模式的形成 .....  | 345 |
| 9.5 設計上諸考慮 .....   | 350 |

|               |     |
|---------------|-----|
| 9.6 結 論 ..... | 355 |
| 9.7 習 題 ..... | 356 |

## 第十章 數位控制原理

### 講授目標

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 10.1 概 說 .....          | 358 |
| 10.2 基本數位方法 .....       | 359 |
| 10.2.1 簡單警報器 .....      | 359 |
| 10.2.2 多變數警報器 .....     | 360 |
| 10.2.3 互作多變數控制 .....    | 361 |
| 10.3 計算機資料儲存 .....      | 364 |
| 10.3.1 資料擷集系統 .....     | 364 |
| 10.3.2 警告鈴 .....        | 365 |
| 10.3.3 電算器 .....        | 365 |
| 10.3.4 週邊單元 .....       | 366 |
| 10.4 計算機監督控制 .....      | 366 |
| 10.5 直接數位控制 (DDC) ..... | 370 |
| 10.5.1 一般描述 .....       | 370 |
| 10.5.2 DDC構圖 .....      | 374 |
| 10.6 DDC的實際考慮 .....     | 377 |
| 10.6.1 一般描述 .....       | 378 |
| 10.6.2 輸入/輸出 .....      | 378 |
| 10.6.3 取樣資料程序 .....     | 380 |
| 10.6.4 控制器模式 .....      | 386 |
| 10.6.5 程式設計考慮 .....     | 391 |
| 10.6.6 程式語言 .....       | 397 |
| 10.7 DDC舉例 .....        | 398 |
| 10.8 結 論 .....          | 406 |
| 10.9 習 題 .....          | 406 |

# 第十一章 控制環路特性

## 講授目標

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 11.1 概 說 .....                  | 410 |
| 11.2 控制系統結構 .....               | 411 |
| 11.2.1 單一變數 .....               | 411 |
| 11.2.2 分段控制 .....               | 414 |
| 11.3 多變數控制系統 .....              | 415 |
| 11.3.1 類比控制 .....               | 416 |
| 11.3.2 監督與直接數位控制 .....          | 417 |
| 11.4 控制系統品質 .....               | 418 |
| 11.4.1 品質的定義 .....              | 418 |
| 11.4.2 品質量測 .....               | 422 |
| 11.5 穩定性 .....                  | 426 |
| 11.5.1 為何不穩定 .....              | 426 |
| 11.5.2 穩定性準則 .....              | 429 |
| 11.6 程序環路調諧 .....               | 431 |
| 11.6.1 開路暫態反應法 .....            | 432 |
| 11.6.2 Ziegler-Nichols 氏法 ..... | 436 |
| 11.6.3 頻率反應法 .....              | 437 |
| 11.7 結 論 .....                  | 443 |
| 11.8 習 題 .....                  | 444 |

## 附 錄

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| A-1 單 位 .....             | 449 |
| A.1.1 國際制 ( SI ) 單位 ..... | 449 |
| A.1.2 其他單位 .....          | 449 |
| A.1.3 標準字首 .....          | 451 |
| A-2 數位複習 .....            | 452 |

|              |                  |     |
|--------------|------------------|-----|
| A.2.1        | 數 系 .....        | 452 |
| A.2.2        | Boolean 代數 ..... | 457 |
| A.2.3        | 數位電子建立方塊 .....   | 459 |
| A-3          | 熱電偶溫度電壓表 .....   | 461 |
| A-4          | 機械複習 .....       | 467 |
| A.4.1        | 運 動 .....        | 467 |
| A.4.2        | 力 .....          | 468 |
| A-5          | P 與 ID 符號 .....  | 472 |
| A.5.1        | 緒 言 .....        | 472 |
| A.5.2        | 相互接線 .....       | 472 |
| A.5.3        | 氣球符號 .....       | 473 |
| A.5.4        | 儀器符號 .....       | 474 |
| A-6          | 名詞解釋 .....       | 476 |
| 單數習題答案 ..... |                  | 483 |

# 第一章 程序控制介紹

## 講授目標

本章將考慮整體程序控制圈 ( process-control loop ) 的功能與特徵。在讀完本章後，應該能夠：

- (1) 畫程序控制圈的方塊圖 ( block diagram )，並對每一元件 ( element ) 作一描述。
- (2) 舉出三種動態變數 ( dynamic variables )。
- (3) 列舉三種評估程序控制圈響應的準則 ( criteria )。
- (4) 定義類比信號處理 ( analog signal processing )。
- (5) 列舉兩種數位程序控制 ( digital process control ) 的類型。
- (6) 定義精度 ( accuracy )，滯後 ( hysteresis ) 與靈敏度 ( sensitivity )。
- (7) 舉出量度長度、時間、質量與電流的國際制 ( SI ) 單位。
- (8) 將物理量從國際制轉換成英制，或其逆轉換。

## 1.1 概 說

要有效地研究程序控制中的每一元件，需對程序控制原理有整體的了解。若了解某一特殊元件影響全體控制問題的行為，對控制原理便可全然了解。本章主要是對程序控制作一般性介紹，且強調工業上的應用。

若先考慮整個系統的操作，則一個複雜系統的每一元件，可更容易的被瞭解。明顯地，在研究一部汽車的所有元件，而不先注意這部車輛的運轉，帶着某些特性，結果會註定失敗的。保持這個觀念，本章討論的是整體控制圈的功能與特徵。

## 1.2 程序控制的定義

自從第一個生物在地球上出現以後，在自然界，與程序控制有關聯的操作，早已存在。這方面的程序控制，可能在世界的某些角落仍不斷的繼續着。我們能夠認定自然程序控制（natural process control），是一種調整（regulate）某些對活着的有機體非常重要的內部天然特質的一種操作。因此，自然調整最普通的例子如體溫、血壓、視網膜的光強度、體內流體的流量等等。

人們發覺需要調節在他們四周的一些外部天然參數（external physical parameters）以維持生命。因此激起了人爲程序控制（artificial process control），這種調整的完成，是經由參數的觀察，並與所希望值作比較，且採取所需的行動，使參數回到所希望值。這些控制的例子，如發現用火點亮、加熱、煮熟食物，簡單的熔鍊等。

程序控制的實際名詞，是當人們學習採用自動調整程序（automatic regulatory procedures）作更有效地製造產品發展而來的。這種程序是自動的，人們不再是調整過程的需要者或是主要部份。我們所關心的是了解這種自動調整應用在各種工業製造過程。開始的目的是提供程序控制正式的定義以及用來描述的名詞。首先考慮的是術語：

### 〔1〕動態變數（dynamic variables）

任何物理參數，可以自然的發生變化或受外界影響而變化的稱爲動態變數。動態（dynamic）這個字，含有隨時間變化的觀念，這種變化，可能來自一些未知或不明確的影響。變數（variable）這個字，只敘述受到這些影響而發生變化的能力。對程序控制，我們有興趣的是那些在工業應用上需要調整的動態變數。典型的例子如溫度、壓力、流量、液位、力量、光亮度與濕度。

### 〔2〕調整（regulation）