自動控制原理

Fundamentals of Automatic Control

原著者：Robert C. Weyrick

譯述者：沈　宏　達

科技圖書股份有限公司

本公司經新聞局核准登記
登記證局版臺業字第1123號

書　　名：自動控制原理
原 著 者：Robert C. Weyrick
譯 述 者：沈 宏 達
發 行 人：趙 國 華
發 行 者：科技圖書股份有限公司
臺北市博愛路185號二樓
電　　話：3 1 1 0 9 5 3
郵政劃撥：1 5 6 9 7 號
特價新臺幣110元

原　序

自動控制，已成爲現代科技中不可或缺的一環。從工作母機、化工程序到太空船，幾乎工業上各部門，都賴自動控制系統以達成其高性能的要求。

今日的控制系統，其發展的原動力有二；一爲二次大戰時軍事上的需求，另一爲1940年至1950 年間發展出來的完整綫性系統理論。基於這種理論的自動控制方法，在實用上已證明可行，且已被廣泛應用着。雖然最近的發展着重在複雜的非綫性系統的控制，但古典的綫性方法仍爲自動控制的基礎，本書的目的，即在介紹這種基本的分析與設計方法。

工程技術人員與控制系統的關係愈來愈密切，不僅就測試、校正與維護觀點而言是如此，即就標準化的設計方面亦然。因此，很多工程技術的課程，都有自動控制方面的介紹。這些課程中都已介紹過微積分，因此，技術人員用的自動控制課程中除了直觀的推論外，亦可加入一些數學推導。

已出版的各種自動控制書籍已數以百計。因此，也許有人會問「爲什麼又寫了一本？」概略檢視一下，可發現現有的各種教科書都適合工程師的程度。其內容皆着重在控制系統的理論，且假定讀者已具備微積分及微分方程完整知識。只有少數控制書是寫給技術人員用的。本書儘量少用數學，以敍述爲主。試圖銜接基礎教科書與高深教科書間的鴻溝。

雖然書中的理論與方法是爲適合一般控制應用而介紹，却以伺服機構作爲全書中控制系統的典型。伺服機構不但在工業上廣被應用，就在實驗室中也很適合。這些實驗室的經驗在學習控制系統時很值得介紹的。

關於預備知識，假定讀者已具基本的物理知識，包括力學及電磁學。如果在電子學方面有些基礎，將有助於了解放大器方面的內容，不過這對整個課題的學習無足重輕。研讀本書不需廣泛數學基礎，但

假定讀者已熟知代數、三角及複數。簡略的微積分知識將有助於由數學觀點學習控制系統，但並不需要很精通。僅需熟悉微分與積分的觀念就夠了，書中雖用到微分方程，但有適當的介紹與說明足供了解主題。

第一章介紹自動控制中負反饋的概念及控制系統的方塊圖表示法。第二章介紹物理系統的數學模式表示法。第三章介紹自動控制所用的各種裝置，可分爲轉換器、功率主動器及放大器。

第四章用最少的數學推介簡單控制系統的暫態性能。第五章利用時域分析的拉氏變換法，接着第四章的內容。這方法未經嚴格處理，我們强調的是它可作爲處理控制系統的有力工具。

頻率響應法的分析與設計，在第六章及第七章中有詳細介紹。這個方法以圖形爲主，工專學生應很容易理解與應用。

第八章是實際操作的觀點介紹控制系統的測試。

最後一章概略介紹非綫性及其他較高深的論題。雖說本書不對非綫性的理論作詳細說明，但技術人員還是要明白它的存在，與對綫性系統的限制。

本書可作爲一個學期自動控制課程的教科書。由於學生程度及課程目的各有不同，不一定要每章都教。如果不注重分析，第二章及第五章的大部分內容可以刪去，仍不失其連貫性。第三章亦可作選擇性的講授，其中有幾節介紹的元件是伺服機構中不常見的，這幾節可刪去不講。

本書主要是供工專學生用的。但從事實際工作的工程師或技術人員如想對自動控制作初步了解，本書也對他們有益。

Robert C. Weyrick

威 立 克

自動控制原理

目　錄

原 序

第一章　導　論

1.1　簡　介 …… 1
1.2　自動控制的歷史 …… 2
1.3　開迴路與閉迴路控制 …… 4
1.4　連續與不連續的控制 …… 7
1.5　方塊圖 …… 8
1.6　方塊圖的簡化 …… 10
1.7　閉迴路轉移函數 …… 11
1.8　精確性及穩定性 …… 16
1.9　自動控制的應用 …… 18
1.10　伺服機構 …… 18
1.11　程序控制 …… 19
1.12　發　電 …… 21
1.13　數值控制 …… 22
1.14　交　通 …… 23

第二章　數學模式

2.1　簡　介 …… 29
2.2　線　性 …… 30
2.3　微分方程式 …… 31

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

2.4 機械系統 …… 34
2.5 電 路 …… 41
2.6 熱系統 …… 45
2.7 液系統 …… 49
2.8 系統的一般特性 …… 52
2.9 微分方程式的解 …… 53
2.10 聯立方程式 …… 57

第三章 控制系統的元件

3.1 簡 介 …… 63
A. 轉換器
3.2 電位器 …… 64
3.3 同步機 …… 71
3.4 分解機 …… 79
3.5 同步機應用於伺服機構 …… 80
3.6 直線位置轉換器 …… 83
3.7 轉速計 …… 85
3.8 加速計 …… 88
3.9 應變計 …… 89
3.10 溫度轉換器 …… 91
3.11 轉換器的摘要 …… 94
B. 功率主動器
3.12 直流馬達 …… 94
3.13 交流馬達 …… 103
3.14 齒 輪 …… 106
3.15 齒輪比的選擇 …… 111
3.16 控制閥 …… 114
C. 放大器
3.17 簡 介 …… 117
3.18 運算放大器 …… 118

3.19 功率放大器 …… 126
3.20 電晶體放大器 …… 127
3.21 矽控整流器的控制 …… 130
3.22 磁放大器 …… 131
3.23 旋轉的功率放大器 …… 133
3.24 調制器與解調器 …… 134

第四章 物理系統的暫態響應

4.1 簡 介 …… 147
4.2 輸入函數 …… 148
4.3 一階系統 …… 151
4.4 電阻-電感串聯電路 …… 154
4.5 伺服馬達 …… 156
4.6 調速系統（速率伺服機構）…… 160
4.7 二階系統 …… 164
4.8 電阻-電感-電容的串聯電路 …… 166
4.9 位置伺服機構 …… 167
4.10 暫態響應的特性 …… 171
4.11 微分反饋的阻尼 …… 174

第五章 暫態分析用拉氏變換解法

5.1 導 論 …… 184
5.2 拉氏變換的性質 …… 185
5.3 拉氏變換定理 …… 188
5.4 應用拉氏變換解微分方程式 …… 190
5.5 拉氏定義域的轉移函數 …… 195
5.6 伺服馬達的轉移函數 …… 198
5.7 位置伺服機構的暫態分析 …… 201
5.8 穩態誤差 …… 204
5.9 系統的穩定性 …… 211

5.10 特性方程式 ……212
5.11 魯斯準則 ……214
5.12 根之軌跡的分析 ……218

第六章 頻率響應分析

6.1 簡 介 ……227
6.2 交流電路的分析 ……228
6.3 正弦輸入的微分方程式變換 ……231
6.4 頻率響應的極座標圖形 ……233
6.5 波德圖 ……235
6.6 頻率響應的通用曲線 ……238
6.7 常數因子式圖形 ……239
6.8 積分或微分因子式圖形 ……240
6.9 一階因子式的圖形 ……241
6.10 二階因子式的圖形 ……247
6.11 頻率響應的特性值 ……251
6.12 穩定性準則 ……254
6.13 閉迴路頻率響應 ……257
6.14 尼科爾圖表 ……261

第七章 控制系統的設計

7.1 簡 介 ……273
7.2 一般性考慮 ……275
7.3 按比控制 ……276
7.4 按比加積分控制 ……278
7.5 落後補償 ……281
7.6 按比加微分控制 ……287
7.7 領先補償 ……289
7.8 落後-領先補償 ……296
7.9 三種型式的控制器 ……301

7.10 反饋補償 …… 302
7.11 微分反饋的補償 …… 305
7.12 前饋控制 …… 312
7.13 摘 要 …… 313

第八章 控制系統的測試

8.1 簡 介 …… 321
8.2 測試目的 …… 322
8.3 測試方法 …… 324
8.4 暫態響應測試 …… 326
8.5 頻率響應測試 …… 326
8.6 轉移函數的測量 …… 331
8.7 速度響應的測試 …… 336
8.8 控制系統的規格 …… 337
8.9 控制系統的調整：齊格勒尼科爾法 …… 340

第九章 控制系統的非線性性質

9.1 簡 介 …… 347
9.2 小訊號的線性化 …… 348
9.3 不連續的非線性性質 …… 349
9.4 非線性的效應 …… 351
9.5 描述函數 …… 352
9.6 飽和及靜止區 …… 353
9.7 滯後現象 …… 357
9.8 穩定性的分析 …… 358

附 錄

A 拉布拉斯變換對表 …… 365
B 部份分式的展開法 …… 371
C 符號說明 …… 377
D 希臘符號說明 …… 381
E 部份習題答案 …… 383

第一章

導　論

1-1 簡　介

自動控制（automatic control）在現代生活的各方面所扮演的角色愈來愈重要。由家庭中常用的自動烤麵包機、自動調溫爐，到供發電及太空探險用的複雜控制系統，自動控制都影響着我們的生活。

自動控制的發展可說是第二次的工業革命。十九世紀的工業革命，使人類可利用更多的能量。人類利用蒸汽的能量取代了大部份的風力及水力。煤、天然氣、石油及其副產品等燃料，成爲製造業及運輸業的主要能源。在工業發展中最主要的能量形式爲電力，將來會用核能轉變成電力。

欲有效利用能量，須學會控制與調節。二十世紀的工業革命，即以人類能學得此能力爲特色。能量再加上控制的方法，就可讓機器以極高效能，完成大部份體力與心智上的工作。

很多從事工業的人都必須接觸控制系統（control systems），有時只是操作而已。因此工程師或技術人員，若能有自動控制的知識，對他們自己是有益的。此外，還可得其他利益。自動控制系統具有動態的性質，因此學習控制的理論，可作爲了解動態系統（dynamic system）的基礎。而且，必須對一個系統的動態特性有所了解才能對其有效地控制。

控制系統中，常使用各種型式的元件，包括機械、電機、電子、液壓（ hydraulic ）、氣壓（ pneumatic ）及它們的混合。因此，從事控制工作的人必須熟悉各種元件的原理與特性。

自動控制是一門聯合的學科，它集合許多不同學科的知識。研究自動控制，可以將一些看來不相關的學科結合在一起，以解決同一問題。

自動控制的觀念亦具有更廣的含意。雖然我們只關心自動控制在工程上的應用，但其觀念卻可應用到別的部門去。經濟、商業及政治系統都逐漸以自動控制來處理。雖然人類行爲的多變性，造成分析上的紛擾，但只要能多了解這些系統的動態，控制它們的能力即可加強。

此外，人體本身的各種功能，即是以許多複雜的控制系統來控制。例如，控制體溫、化學反應及開車等類的動作。

1-2 自動控制的歷史

雖然可能有更早的發明，一般都公認 James Watt 在 1788 年發明的飛球調速器（ flyball gavernor ）爲第一個不用人的控制系統。Watt 認爲，用人來開閉蒸汽閥（ steam valve ）的活門，使其等速運轉，並不是

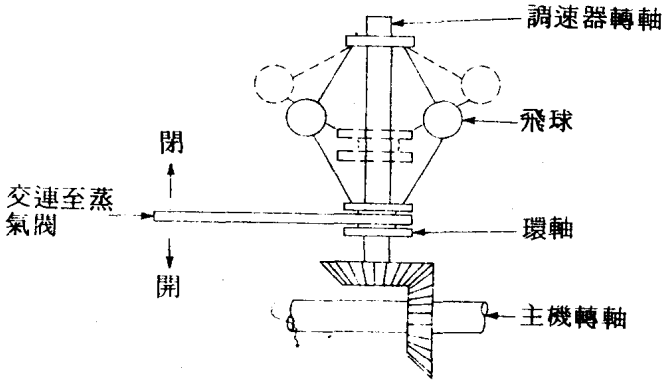

圖 1-1 飛球調速器

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

最好的方法。他發明的調速器如圖 1-1，全由機械元件所組成，而連至蒸汽閥的主軸。若調速器的轉軸轉速增加，兩個球也隨之加速而向外張開。因此，接到蒸汽活門的連接器，就沿著軸上昇而將活門關上，使蒸汽閥減速。如果調速器轉速降低，兩個球成相反的動作，而使蒸汽閥加速。

此利用自動控制來提高精確度的努力有一個不好的副作用，造成系統的不穩定，使整個系統會在預定的工作點倘振盪或追逐（hunting）。如上所述，用調速器控制的蒸汽閥，其轉速會在預定值附近作上下不停的變動，早期解決此問題全憑直覺與經驗。

第一個自動控制的理論分析爲 James Clerk Maxwell 在 1868年對飛球調速器穩定性所作的研究。不久之後，就有 Hurwitz 在 1875 年，Routh 在 1884 年，Liapounov 在 1892 年相繼提出自動控制理論方面重要的論文。接着就有別類機器的調速器出現，到了 1900 年代初期即應用到工業上去。同時，也有人研究利用自動控制元件來操縱船隻。

近代對控制的興趣的開始，一般公認是 1934 年 Hazen[2] 集合了早期作者的論文，並發表一套自動控制系統的嚴謹理論。同一時期，Nyquist[3]、Black[4] 及 Bode[5] 因設計電話系統的穩定放大器，推動了反饋理論（feedback theory）的發展。

由於二次大戰的需求，使自動控制這一學門進步神速。主要是對船隻、飛機及雷達天線等，要準確而迅速的控制，才造成理論與實際的突飛猛進。在 1945 年提高了戰時安全規定，也使控制學門迅速進步。由那時起，就有各種此方面的書籍及論文出版，而且在工業及軍事上廣爲應用。

1 *J. C. Maxwell, "On Governors," Proc. R. Soc. (Lond.) vol. 16. 1868, p. 270.*
2 *H. L. Hazen, "Theory of Servomechanisms," J. Franklin Inst., vol. 218, September 1934. p. 279.*
3 *H. Nyquist, "Regeneration Theory," Bell Syst. Tech. J., vol. 11. January 1932, pp. 126-147.*
4 *H. S. Black, "Stabilized Feedback Amplifiers," Bell Syst. Tech. J., vol. 13, January 1934, pp. 1-18.*
5 *H. W. Bode, "Amplifiers," U.S. Patent 2,123 178 (1938).*

1940及1950年代，在控制系統的設計與分析方面，有兩種不同但極有關聯的方法。在美國是着重頻率響應法（frequency response method）的研究。俄國則對暫態分析（transient analysis）或時域響應技術（timeresponse technique）的研究有相當成就。近幾年來，這兩個方法已逐漸融合，目前分析上的問題，大多同時應用此種方法。

半導體元件（semiconductor device）與電算機(electronic computer)，這兩種技術的齊頭並進，使現代的自動控制有很大的進展。由眞空管、電晶體到積體電路的應用，使控制設備、測量儀器有更高的精確度、可靠度，並降低了成本。電算機時代的來臨，對控制系統有重大影響。高速數位電算機（digital computer）幫助控制龐大而複雜的系統，以處理其間錯綜複雜的數字。數位電算機在工業生產控制系統中應用極廣，它同時測量許多變數並加控制，以得到最佳的性能。

1-3 開迴路與閉迴路控制

「控制」這名詞，在字典中有很多定義。如命令、引導、管理與調節等。所以控制系統可說是由許多元件組合在一起，以引導能量注入機器或程序，使其達成預定的性能。

「自動」這名詞的含意是，能自己運動或驅動。因此，自動控制系統即爲自己驅動的系統。

一個控制系統，不論是否自動都可區分爲開迴路（open-loop）與閉迴路（closed-loop）兩類。茲舉一例說明自動控制及其分類。

圖1-2爲一個用電熱器加熱的爐子，以一開關調節加熱器的幾種大小不同的電流。開關的位置即爲輸入量，它刺激系統產生輸出。爐子的溫度即爲輸出量或控制量。因爲電熱器的電流量會改變，故可稱爲操作量（manipulated quantity）。

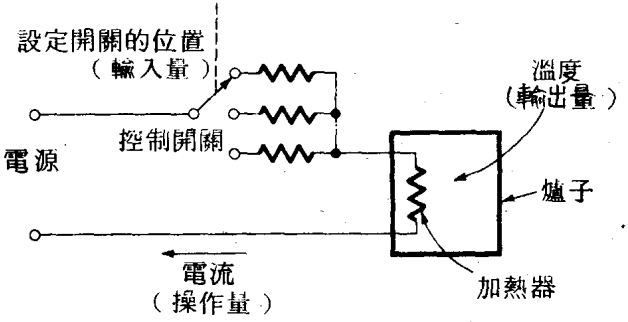

圖 1-2 爐子溫度之控制，開迴路

只要將開關定在一個位置，爐子的溫度即由電熱器的電流及爐壁的散熱來決定。如果該溫度不合要求，此現象本身即無法改變輸入狀態。也就是輸出量不能改變輸入量。這種控制稱爲開迴路控制系統(open-loop control system）。只要外界溫度有變化，爐子的溫度也將隨之而變。由此可見，開迴路系統中，如有任何因素擾亂了欲控制的物理量，即無法加以矯正。

此系統可再增加一個人，以維持爐溫在預定值。即如圖 1-3 。此人可注視爐中的溫度計以調整控制開關，得到最接近預定值的溫度。我們要知道的是，增加一個操作人員後，輸出就可反饋（ feed back ） 與預定值作比較。對加熱器所作的控制，是由預定溫度與實際值間的誤差（error）

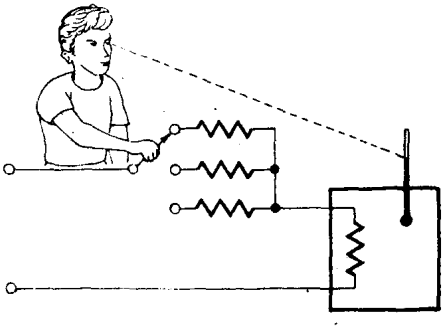

圖 1-3 爐子溫度之控制，人員操作的閉迴路

或差別（difference）來決定。任何操作的目的都是要減少誤差。例如，若爐溫太低即須昇高加熱電流，以提供更多熱量。

輸出量可改變輸入量的系統，稱爲閉迴路控制系統（closed-loop control system）又稱爲反饋控制系統（feedback control system）。在圖 1-3 中，只要順着封閉迴路繞一圈，就可了解反饋的作用。實際溫度與預定值之間的比較工作，由操作員的大腦執行；命令則由肌肉的反應來執行。此種由人員操作的閉迴路控制系統往往不合要求。操作員變換開關會使溫度高於或低於預定的溫度，不過操作員的經驗可減少誤差。電源的變動或外界溫度的改變，會使輸出狀況改觀，以致操作員須重用新的操作原則。而且要一個人隨時注視溫度計並調整開關，也是一件無聊而且浪費時間的工作。上面介紹的即爲人員操作的閉迴路控制系統。

如欲進一步改進其性能，而得更精確的控制，可利用機械、電機或其他型式的比較與控制裝置以取代人員的操作。圖 1-4 即爲一個不須人員參與的自動閉迴路爐溫控制系統。溫度是由熱電偶（thermocouple）測量，這是一種電壓與溫度成正比的裝置（參閱 3-10 節）。此電壓反饋後，與一個代表預定溫度的電壓比較。兩電壓的差，經過放大後，可控制電熱器的電流。因爲反饋電壓是與參考電壓相減，故稱爲負反饋訊號（negative feedback signal）。

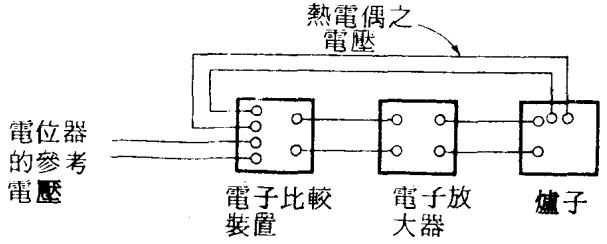

圖 1-4　爐子溫度之控制，自動閉迴路

此例子可說明爲何自動閉迴路系統能比人更迅速而且精確。而人類也不用再做這些辛苦的工作了，閉迴路系統的負反饋作用可由測量出存在值，並與預定值比較，再由誤差量產生矯正動作，以消除誤差，這樣就可使某一變數或條件維持在預定值。負反饋的概念（ negative feedback concept ）爲設計自動控制系統的基礎。

1-4 連續與不連續的控制

對於開迴路及閉迴路控制的區分，可作進一步的分類。即以控制能量由動力源流入負載驅動訊號型式爲基礎此控制分爲兩類，第一類是不連續控制（ discontinuous control ）或數位（ digital control ）控制；第二類是連續（ continuous ）控制或類比控制（ analog control ）。

不連續或數位訊號，是作分立（ discrete ）式變化，其值皆爲某一範圍內的分立值。最簡單的不連續控制爲開閉式控制（ on-off control ），此輸入訊號的作用是使動力流通或切斷。操作開關後，除了相反操作外，不能再作進一步的控制。因爲只有兩個分立的狀態，故可屬於不連續的操作。圖 1-5 (a)的電燈迴路，即爲開閉式控制的例子。

另一類不連續控制爲步進式控制（ step control ），其能量傳輸的速率有幾種可能值。如圖 1-5 (b)所示，一個變壓器，具有許多分頭的次極圈可經多段開關作選擇，並接到燈炮。此時可由不同的電壓作用在燈炮，使輸入功率逐段增加。此外，圖 1-2 及圖 1-3 中，爐溫的控制亦即步進式控制系統。

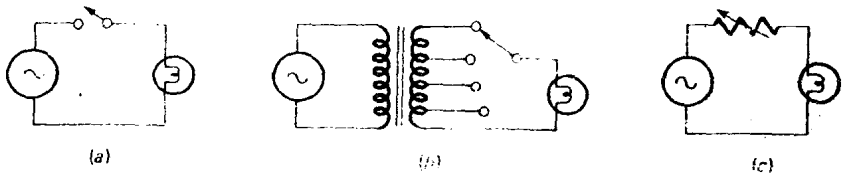

圖 1-5 (a)開閉式(b)步進式及(c)連續式控制燈泡

類比控制的訊號都是連續變化的，且在極大值與極小值之間的任何數值都有可能變化。圖 1-5(c)爲一個可變電阻與燈炮串聯。電阻值作連續變化時，流入燈炮的功率亦隨之作連續變化。圖 1-4 的爐溫控制也是連續控制的一例。

本書僅將討論連續的控制系統，其理由如下：連續控制比不連續控制的用途廣，在最基本的應用上尤其如此。對於連續控制，只需不太複雜的數學即可了解反饋控制系統的理論，而不連續控制即不如此簡單。因此不連續控制的研究，可說是高深的課題，而不在基本控制書的範圍。

1-5 方塊圖

控制系統是許多元件相互連接的組合。在對其深入研究前，須先學會系統的表示法，以便分析與設計。爲了簡化起見，通常使用許多相互連接的方塊或盒子來模擬系統。這種表示法稱爲方塊圖（ block diagram ）。每個方塊不一定代表完整的元件，但可表示系統中的某一項作用。一個方塊的輸出，如不因接至其他方塊的輸入而受影響，此方塊即可單獨考慮。當各方塊間用適當的有向線段連接時，即可顯示系統如何在工作。每一條連接線皆代表系統的一個變數或物理量，箭頭則表示資料傳輸的方向。因此，方塊圖所提供有關性能的資料，是着重系統中究竟發生了什麼事，而不注重完成此作用的方法。

一個方塊的輸出訊號與輸入訊號的比值，可顯示訊號通過方塊時所受的作用。這個比值，定義此方塊的轉移函數（ transfer function ）。每

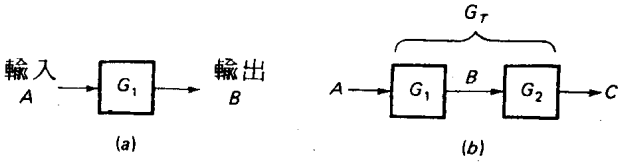

圖 1-6 (a)獨立方塊及(b)串聯方塊

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com