

自動程序控制

周澤川 著

科學技術叢書 / 三民書局印行



自動程序控制

周澤川著

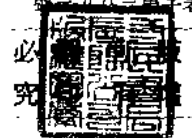
三民書局印行

中華民國六十年八月初版
中華民國六十八年十二月四版

自動程序控制

臺北定價 貳元伍角

行政院新聞局登記證 版字第一〇二〇號
著作權人字號 八三九三



必究
著者 周 澤
發行人 劉 振
出版者 三民書局股份有限公司
印刷所 三民書局股份有限公司

臺北市重慶南路一段六十一號
郵政劃撥九九九八號

序

近年來由於工業的高度發展，自動控制成爲各種工業所共同提倡的一門學問，化工廠的程序動態與自動控制遂成爲各學校化工科、系的必修課程。

本書專爲五年制專科學校化工科學生而編成的教科書，全書編成九章，均採用較簡易的程序系統作爲討論的例子。

撰寫本書時，筆者假定讀者已修讀過，微積分、微分方程，單元操作並略知複變數等知識。本書內容力求簡易，但亦可供四年制大學部學生作參攷之用。

筆者才疏學淺，匆促草成，謬誤之處必所難免，敬祈海內外先進，不吝指教，俾再版時，得以更正，則感激萬分。

周澤川

于台南

60年6月

自動程序控制目錄

序

第一章 程序自動控制概念

1-1	概念	1
1-2	緒論	9

第二章 拉氏變換式

2-1	拉氏變換的定義	13
2-2	簡單函數的變換	15
2-3	導數與積分之變換	19
2-4	解微分方程式及反演拉氏變換	22
2-5	拉氏變換式的其他特性	31

第三章 一階系統之響應

3-1	緒言	37
3-2	轉移函數	37
3-2-1	水銀溫度計	37
3-2-2	轉移函數的特性	39
3-3	暫態響應	41
3-3-1	階梯響應	41
3-3-2	脈衝響應	43
3-3-3	正弦響應	45
3-4	一階轉移函數實例	48

3-4-1 液面高度	49
3-4-2 混合程序	53
3-4-3 時間常數的一般意義	54
3-5 線性化	56
3-6 一階系統串聯的響應	58
3-6-1 簡介	58
3-6-2 非相互作用系統	59
3-6-3 相互作用系統	62

第四章 高階系統：二階系統與控制系統中的各種落後

4-1 二階系統	69
4-1-1 轉移函數	69
4-2 控制系統中的各種落後	79
4-2-1 簡介	79
4-2-2 系統落後	81
4-2-3 傳送落後	83
4-2-4 速度距離落後	84
4-2-5 測量落後	86
4-2-6 信號傳送落後	87
4-2-7 控制儀器落後	88

第五章 閉迴路控制系統

5-1 簡介	93
5-2 組成控制系統的部份	94
5-3 方塊圖 (Block Diagram)	94

5-4	方塊圖的發展步驟.....	96
5-5	控制器與最後控制機構.....	102
5-6	伺服問題 (<i>Servo problem</i>) 與調節問題 (<i>Regulator problem</i>).....	104
5-7	閉迴路轉移函數.....	105
5-7-1	單迴路控制系統伺服問題的轉移函數.....	105
5-7-2	單迴路控制系統的調節問題.....	107
5-7-3	多迴路多負荷控制系統的轉移函數.....	108

第六章 控制作用與簡單控制系統之響應

6-1	控制作用.....	111
6-1-1	簡介.....	111
6-1-2	開關式控制.....	112
6-1-3	浮移控制.....	114
6-1-4	比例控制.....	115
6-1-5	比例——重整控制 (<i>proportional-reset control</i>).....	121
6-1-6	比例——重整——速率控制.....	125
6-2	簡單控制系統的暫態響應.....	127
6-2-1	簡介.....	127
6-2-2	應用比例控制方式，改變置放點的控制問題(伺服問題).....	128
6-2-3	應用比例控制方式，負荷變化的控制問題(調節問題).....	130
6-2-4	應用比例—重整控制方式，負荷變化的控制問題.....	131
6-2-5	應用比例—重整控制方式改變置放點的控制問題.....	132

第七章 頻率響應

7-1	頻率響應簡介.....	137
-----	-------------	-----

7-2 Bode 線圖	144
7-2-1 一階系統	144
7-2-2 二階系統	149
7-2-3 輸送落後	151
7-3 各式控制器	152
7-3-1 比例控制器	152
7-3-2 比例—重整式控制器	152
7-3-3 比例—速率控制器	153
7-4 閉迴路頻率響應	156
7-4-1 開迴路與閉迴路的關係	156
7-4-2 閉迴路頻率響應的特性與階梯響應的關係	161

第八章 穩定度問題

8-1 穩定度 (Stability)	169
8-2 Routh-Hurwitz 判別法	173
8-2-1 Hurwitz 條件	173
8-2-2 Routh 條件	174
8-3 根軌跡法	180
8-3-1 根軌跡的基本概念	180
8-3-2 繪根軌跡的法則	184
8-4 Nyquist 穩定判別法	200
8-5 控制儀器的調節	205
8-5-1 控制儀的調節步驟	206
8-5-2 儀器各種調節度的最佳調節	207

第九章 控制器的機構

9-1	簡介.....	219
9-2	理想控制器與實際控制器的區別.....	220
9-3	空氣控制器機構.....	223
9-4	工業用空氣控制器實例.....	234
9-4-1	替續器 (Relay).....	234
9-4-2	工業用空氣控制器實例.....	235

附 錄

第一章 程序自動控制概念

1-1 概 念

科學愈發達，人類物質文明也愈進步，對於工業產品質與量上的要求愈形迫切，欲供應市場之大量需要，其生產方法必須加以改良程序自動控制 (*Process automatic control*) 遂取代往昔擁擠紊亂的人工管制，成為現代化工廠中最重要之一環。

程序自動控制係工業興起後的一種自然發展結果，而自動控制之應用，亦能促使工業的發達，二者息息相關，互為因果。

何謂自動控制？自動控制為：利用各種測定方法，測得操作程序內變數 (*Variable*) 的情況，然後自動加以適當的調節，使此操作程序保持平衡。本章舉一控制系統的例子，目的是介紹程序自動控制的一些基本原則與它包括的問題，使讀者對以後各章要討論的各類問題有一梗概的觀念。

(一) 系統 (*System*)：一股固定流量 w 之流體，溫度 T_1 度，欲將它加熱到某一要求溫度 T_R 。選一加熱系統如圖 1-1 來完成此項工作。流體流入此攪拌均勻的加熱槽，亦即槽內流體的溫度處處相同。

由槽的底部抽出，已加熱的流體其流量與進口流量相同，在這條件下，留在槽內的流體將會成為定數，出口的溫度與槽內的溫度相同。假定流體的比熱是固定不變，亦即流體比熱不是溫度的函數。若此系統是滿意的設計出口的溫度應該是 T_R 。

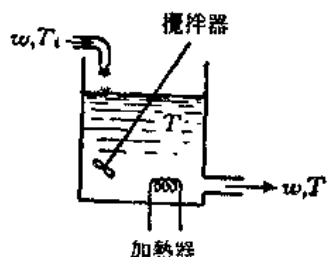


圖 1-1 攪拌加熱槽

(二) 穩恒狀態設計 (*steady state design*): 一個程序操作所有的變數都不是時間的函數, 叫穩恒狀態, 或叫穩態。這加熱程序在穩恒狀態時的能量平衡方程式如下:

$$q_s = wc(T_s - T_{is}) \quad (1.1.1)$$

其中 q_s 是加入槽內的熱量, 加下標 s 表示穩恒狀態。如 T_{is} 表示穩恒狀態進口流體的溫度。良好的設計在穩恒狀態出口的溫度 T_s , 應等於要求溫度 T_R 。所以

$$q_s = wc(T_R - T_{is}) \quad (1.1.2)$$

從物理現象來看, 加熱器供給是固定熱量 q_s , 假使程序條件改變, 亦即進口溫度 T_i 改變, 槽內的溫度就不會是 T_R 了。

一個明顯的問題是如何設計一套加熱器使槽內的溫度不管進口溫度有何變化, 始終維持在 T_R 或 T_R 附近。

(三) 程序控制 (*Process control*): 槽內溫度由 T_R , 突然變成 T , 如何改變加入的熱量 q_s 成 q , 以便校正 T 的誤差。最簡單的方法就是請一工人負責控制這加熱程序, 他拿熱電偶 (*thermocouple*) 或溫度計 (*thermometer*) 測量出口溫度 T 並與 T_R 比較, 若 T 少於 T_R , 則增加加入的熱量 q , T 大於 T_R 則減少 q 。這工作若由機器代替工人, 就叫作自動程序控制。

(四) 不穩狀態: 用機器在控制加入的熱量 q , 它不能像人一樣有思想能決定加入 q 多少, 何時加入; 機器只能在預定方式中執行預定的工作。為了使這些控制在事先決定, 就必須知道由於 T_i 與 q 的改變所引起槽內溫度 T 的改變。這些變數變化關係, 可寫出這程序的不穩狀態或暫態的 (*unsteady state or transient*) 能量平衡來表示。根據能量不滅定律, 加入的能量減去抽出的能量所剩的是槽內瞬時累積能量, 可寫為

$$\text{累積能量} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad \text{單位能量/時間}$$

其中

ρ = 流體密度

V = 槽內流體體積

t = 自變數，時間

C = 流體的比熱

假設進出口流量相同而且是定數，槽內的質量 ρv ，也會是定數。由

累積 = 輸入 - 輸出

不穩狀態能量平衡方程式為

$$\rho v c \frac{dT}{dt} = w c (T_i - T) + q \quad (1.1.3)$$

穩恒狀態能量平衡方程式是由 (1.1.3) 式中令 $\frac{dT}{dt} = 0$ 得到。

因穩恒時溫度 T 不是時間的函數。

(五) 回饋控制 (*feed-back control*): 代替工人控制這加熱槽溫度的機器叫控制器 (*controller*)，它利用槽內即存的溫度 T 與要求溫度 T_R 根據預定的方程式來調整加入槽內熱量 q 的多少。 $T_R - T$ 的溫度差叫誤差。誤差愈大，出口溫度愈不理想，最理想的控制誤差應該是零。根據加入熱量 q 方式的不同產生各種不同控制方式 (*control mode*)。

由現在這誤差的定義來看，我們很自然地會想到控制器加入的熱量應當與誤差成正比例，所以控制器遵行的方程式可寫成

$$q(t) = w c (T_R - T_{is}) + K_c (T_R - T) \quad (1.1.4)$$

其中 K_c 是正比例常數。這種控制方式叫比例控制 (*proportional control or proportional type*)。控制器根據 (1.1.4) 式的指示加入熱量

直到 $q(t)$ 變成 q_s 即 T 等於 T_R 或誤差等於零。如發生正誤差則表示槽內溫度低於所要求者，由 (1.1.4) 知加入熱量 q 即成比例增加。由 (1.1.2) 式 (1.1.4) 式可改寫為：

$$q = q_s + K_c(T_R - T) \quad (1.1.4a)$$

利用系統本身的輸出與要求值間的差額為資訊去控制系統叫回饋控制。由系統中的資訊回饋給控制器，它利用這資訊以某種形式去改變系統。這例中，資訊是槽內溫度 T ，而改變的是加入的熱量 q 。

(六) 暫態響應 (transient responses): 對 (1.1.4a) 式代入 (1.1.3) 式並重新排列得

$$\tau_1 \frac{dT}{dt} + \left(\frac{K_c}{wc} + 1 \right) T = T_i + \frac{K_c}{wc} T_R + \frac{q_s}{wc} \quad (1.1.5)$$

其中

$$\tau_1 = \frac{\rho V}{w}$$

τ_1 的因次 (dimension) 是時間，叫槽的時間常數。即以 w 流量注滿 V 體積所需的時間。進口溫度 T_i 是時間的函數，它的正常量是 T_{i0} ， T_{i0} 固定 q_s 也跟着固定下來。(1.1.5) 式表示由進口溫度 T_i 與加入熱量 q 的變化所引起槽內溫度 T 變化的方程式。假設時間小於零，進口的溫度始終都在穩恒狀態， T_{i0} ，在時間等於零時突然變成 $T_{i0} + \Delta T_i$ ，如圖 1-2 所示。為了數學表示方便起見，將圖 1-2 理想化

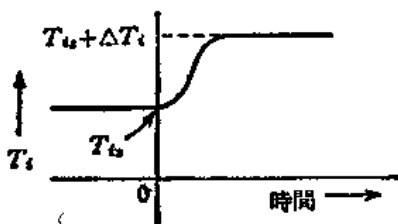


圖 1-3 進口溫度 vs 時間

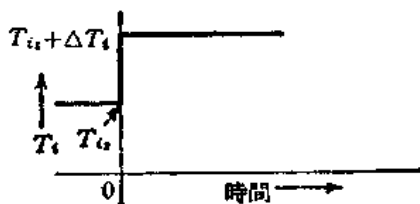


圖 1-2 理想化進口溫度 vs 時間

爲圖 1-3。圖 1-3 的方程式寫成

$$T_i(t) = \begin{cases} T_i, & t < 0 \\ T_i + \Delta T_i, & t > 0 \end{cases} \quad (1.1.6)$$

(1.1.6) 式這種形式的函數叫階梯函數，因爲它形式簡單，變化劇烈被廣泛地應用於暫態響應的研究。圖 1-3 理想化後的溫度變化與圖 1-2 實際溫度變化比較，前者變化更劇烈，所以用理想化代替實際情形意義更好。當 T_i 是一個階梯函數變化槽內溫度有何變化？必須將 (1.1.6) 式代入 (1.1.5) 式並解此微分方程式。因爲這程序在時間等零時是在穩恒狀態，所以它的起始條件 (*initial condition*)

$$T(0) = T_R \quad (1.1.7)$$

(1.1.5) 式，(1.1.6) 式與 (1.1.7) 式聯立可解得

$$T = T_R + \frac{\Delta T_i}{K_c/W_c + 1} [1 - e^{-(K_c/w_c + 1)t/\tau_i}] \quad (1.1.8)$$

這是進口溫度有一個階梯變化，槽內溫度隨之變化方程式，圖 1-4 表示在各種不同可調節的控制參數 K_c 產生溫度 T 與時間關係曲線。這些曲線時間久以後都各自到達新的穩恒狀態位置。

從圖 1-4 可以看到 K_c 愈增大達到穩恒狀態的 T 愈接近 T_R ，爲了使 T 接近 T_R ，就儘量增大 K_c 值，但 K_c 值增大後會引發另一種問題。例如進口溫度 T_i ，我們只考慮它是階梯擾動。它可能有其他擾動現象如

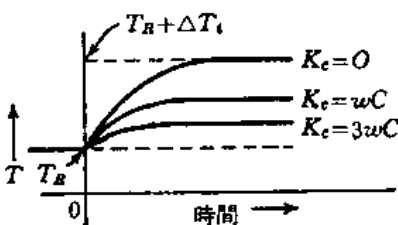
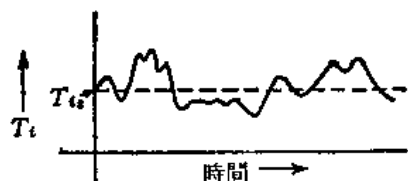
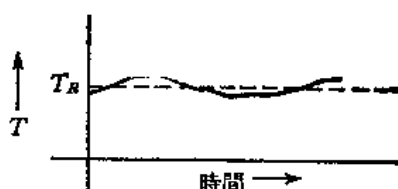


圖 1-4 在各種不同 K_c 值下槽內溫度 vs 時間圖

圖 1-5，它是在穩恒狀態上下波動。圖 1-6 表示沒有控制時槽內溫度受這種擾動的響應。槽內大量流體對進口溫度的波動有延遲響應與整波的作用，槽內溫度 T 的波動就沒有 T_i 多。由 (1.1.4a) 式與圖 1-6，可看出當 K_c 太大，就會發生過度調節放大擾動。 K_c 等於零即無控

制但能消滅擾動。總而言之，由圖 1-4 要使 T 儘量接近 T_R 就要增大 K_c 值，但 K_c 值增大會放大擾動。 K_c 的雙關性質就值得去討論。

圖 1-5 T_i 的擾動特性圖 1-6 T_i 擾動的響應

比例—積分控制 (*proportional-integral control*) 此種控制又叫比例—重整控制 (*proportional-reset control*)，在比例控制系統中再加入積分控制可以獲得許多改進。控制器改變加入熱量是根據下列方程式：

$$q(t) = q_i + K_c (T_R - T) + K_R \int_0^t (T_R - T) dt \quad (1.1.9)$$

這個控制系統有兩個可調節的參數 K_c 與 K_R 。用 (1.1.9) 式為控制方式，槽內溫度 T 對進口溫度 T_i 有一階梯變化的響應，可聯立解

(1.1.3) 式，(1.1.6) 式，(1.1.7) 式與 (1.1.9) 式得到。圖 1-7 表示代表溫度 T 在 K_c 固定 K_R 不同時的響應曲線。從這圖上可以看出 K_c 值不必提得很高，但到了穩恒狀態時 T 就等於 T_R 。由此可知積分控制就可以消去僅用比例控制，穩恒時 T 與 T_R 的偏差。

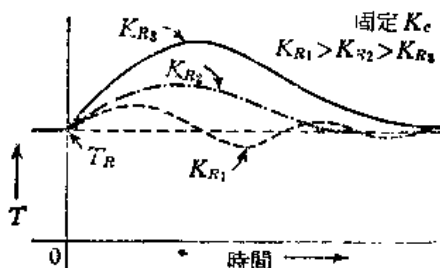


圖 1-7 槽內溫度 vs 時間，對比例重整控制的階梯響應。

從圖 1-7 可以看出 K_{R2} 與 K_{R1} 比 K_{R3} 好，因為 T 比較快回到 T_R 值。但 K_{R2} 與 K_{R1} 就很難選出那個好， K_{R2} 使響應很快地接近 T_R ，但它某一時間 T 與 T_R 有一極大偏差。 K_{R1} 雖偏差小但因有上下波動很久才會使 T 等於 T_R 。對 K_{R1} 與 K_{R2} 的選擇問題是屬於最佳控制的問題，是本書討論範圍以外。

(1.1.4a) 式與 (1.1.9) 式是假設控制器直接接受槽內溫度 T 的資訊。從物理觀點看，這資訊必須透過測量儀器如熱電偶的測得才能送回控制器。插在槽內流體中的熱電偶溫度可能等於、也可能不等於

流體的溫度，這個現象由熱電偶裝置的能量平衡證明。如圖 1-8 假設熱電偶接頭的溫度 T_m 是均勻的，忽略沿熱電偶導線的傳導熱。淨傳入熱電偶接頭的能量是

$$hA(T - T_m)$$

其中 h = 流體與熱電偶接頭間的熱傳係數。

A = 接頭的面積

在接頭能量累積率是

$$mC_m \frac{dT_m}{dt}$$

其中

C_m = 接頭的比熱

m = 接頭的質量

由能量平衡得

$$\tau_2 \frac{dT_m}{dt} + T_m = T \quad (1.1.10)$$

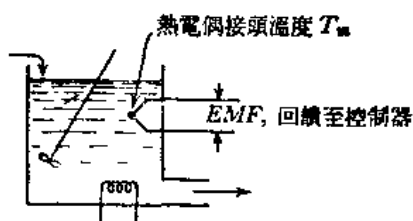


圖 1-8 加熱槽內熱電偶裝置

其中 $\tau_1 = mC_m/hA$ 是熱電偶的時間常數。槽內溫度 T 突然改變，熱電偶溫度 T_m 不能馬上隨之改變，其改變情形類似 $K_c=0$ 時 T_r 改變， T 隨之改變的情形。這現象正如放一溫度計在熱水中，溫度計讀數不會馬上升到水溫。所以控制器接受的資訊是 T_m 不是 T 。(1.1.9) 式必須重寫成

$$q = q_1 + K_c(T_R - T_m) + K_R \int_0^t (T_R - T_m) dt \quad (1.1.9a)$$

控制器用以起作用的誤差是觀察誤差 $T_R - T_m$ 而不是真正誤差 $T_R - T$ 。 T_r 階梯變化後槽內響應溫度 T 可得之於解 (1.1.3) 式，(1.1.6) 式，(1.1.9a) 與 (1.1.10) 聯立方程式及它的初始條件。

$$T(0) = T_m(0) = T_R \quad (1.1.11)$$

因在時間小於零的一段時間裏槽內的溫度是 T_R ，所以熱電偶接頭的溫度與它相同。圖 1-9 表示某一組 K_c 與 K_R 的解，由於熱電偶傳送溫度的延遲 (delay) 使它的響應與在圖 1-7 中相同； K_c, K_R 響應曲線比較，顯然振盪得厲害。當 K_R 值增加，槽內溫度響應振幅增大如圖 1-10，這種控制失敗。誠然圖 1-4， $K_c=0$ 的不控制反應比圖 1-10 不穩定反應好。所以穩定的問題是程序控制中重要課題之一。

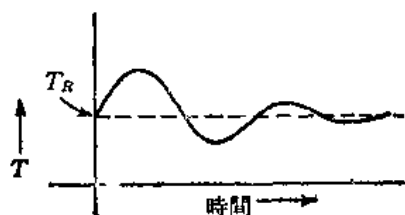


圖 1-9 含測量延遲的槽溫 vs 時間

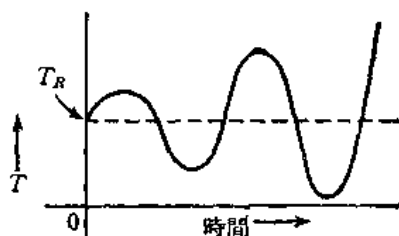


圖 1-10 增加 K_R 的槽溫 vs 時間

(七) 方塊圖 (block diagram): 整個加熱槽控制系統變數間的關係可用一個方塊圖來表示。如圖 1-11，圖中每一方塊代表這系統每一組成組件。其傳送信號與控制過程如圖中箭頭指示。