

73.826
CHY

73.826
CHY

基本伺服機構 系統設計

Introduction to
Servomechanism System
Design

原著者：William M. Humphrey

譯述者：陳 浩 湧

科技圖書股份有限公司

基本伺服機構 系統設計

Introduction to
Servomechanism System
Design

原著者：William M. Humphrey

譯述者：陳 浩 湧

科技圖書股份有限公司

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：基本伺服機構系統設計

原著者：William M. Humphrey

譯述者：陳浩湧

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市博愛路185號二樓

電話：3110953

郵政劃撥帳號15697

六十八年八月初版

特價新台幣80元

原 序

本書編寫目的在於溝通數學伺服理論與實際設計兩者間的鴻溝，既可作為教科書，或執業工程師參考之用，也可作為獨自學習之用。

本書材料從分析與設計的基本概念着手，導出各種形式伺服機構的重要特性。用五種基本伺服機構特性上半定量的比較，作為結論。本書重點放在詳細說明迅速分析與設計系統所需的技巧，以及在工程目的上導出足夠正確的近似方法。列出實際例子作為說明。問題與答案可供給學生估計對內容了解的程度。

研讀本書的基礎課程為微積分、常係數微分方程式，拉氏轉換，與線性電路理論。這些在凡爾根波 (M. E. Van Valkenburg) 的網路分析中大部分都有。對線性移動與轉動系統的物理，以及運算放大器的理論與實際的了解，亦為有用的基礎。

附錄中的實驗指針，為本書重點。實驗手續，儀器設備與原理整理，均予列出。各個實驗的基礎，為本書所導出的基本原理。本書與實驗指針配合，可在基本伺服系統設計中組成一完整的講解與實驗課程。

感謝辭略！

William M. Humphrey 亨夫萊
勞倫斯維爾，紐澤西州

目 錄

第一章 基本概念

1.1	何謂伺服機構	1
1.2	伺服系統的基本特性	3
1.3	驅動馬達的選擇	3
1.4	伺服系統特性	4
1.5	標準圖形	5
1.6	頻率響應方法	9
1.7	頻率響應測試	10
1.8	積分器	11
1.9	波德圖形	12
1.10	在時域上積分	13
1.11	結論	16
問 題	16

第二章 伺服系統分析技巧

2.1	頻率 - 響應分析	18
2.2	暫態分析	21
2.3	拉氏變換簡介	23
2.4	轉移函數	24
2.5	方塊圖代數	25
2.6	積分器的增益	28
2.7	環路內積分器的頻率響應解法	30
2.8	理想馬達伺服系統	32
2.9	結論	35
問 題	36

第三章 拉氏轉換

3. 1	基本性質	39
3. 2	轉換舉例	40
3. 3	拉氏轉換表	41
3. 4	穩定度	45
3. 5	積分器	46
3. 6	簡單的伺服系統	48
3. 7	結論	50
	問題	51

第四章 簡單伺服系統性能

4. 1	速度常數	53
4. 2	伺服系統的一階近似法	55
4. 3	線性機械元件	57
4. 4	反射慣量	62
4. 5	結論	65
	問題	65

第五章 伺服系統

5. 1	直流伺服馬達特性	68
5. 2	ω_m 的因次	73
5. 3	驅動放大器的阻抗對 ω_m 的影響	76
5. 4	電樞電感	78
5. 5	伺服馬達常數	81
5. 6	K_{mTE} 與 K_{mT} 的關係	82
5. 7	高值極點的效應	83
5. 8	直流馬達最大功率點	84
5. 9	結論	86
	問題	86

第六章 基本伺服系統設計

6. 1	電力頻率	88
6. 2	在最大功率點的齒輪比	89
6. 3	馬達轉折頻率, ω_m	89
6. 4	關 - 閉環路, $\omega_{c,p}$	89
6. 5	計算放大器增益	95
6. 6	速度常數	97
6. 7	轉矩勁度	97
6. 8	轉矩擾動	98
6. 9	線性度	104
6. 10	直接設計	104
6. 11	結論	107
	問題	108

第七章 轉速計與反電動勢穩定法

7. 1	轉速計穩定法	111
7. 2	位置環路包圍轉速計環路	121
7. 3	方塊圖代換	124
7. 4	轉矩勁度	126
7. 5	干擾的方塊圖代數	129
7. 6	反電動勢穩定法	130
7. 7	結論	134
	問題	134

第八章 穩定度

8. 1	極點與零點	136
8. 2	s 平面二次式響應	139
8. 3	閉 - 環路例	142
8. 4	標準二次式	145
8. 5	標準二次式極點的幾何特性	147
8. 6	從極點位置求暫態響應	149

8.7	相量增益	150
8.8	M 圓	153
8.9	增益邊際與相位邊際	154
8.10	尼可斯圖形	156
8.11	尼可斯圖形例	160
8.12	結論	165
	問題	165
第九章 積分網路補償		
9.1	積分網路	169
9.2	位置環路	171
9.3	積分網路伺服機構性能	172
9.4	K_v 形式	176
9.5	積分網路伺服轉矩勁度	177
9.6	積分網路增益表示式	178
9.7	積分網路伺服機構設計例	180
9.8	指定硬體	184
9.9	結論	186
	問題	186
第十章 領先網路與黏滯耦慣性阻尼伺服機構		
10.1	領先網路特性	188
10.2	領先網路的伺服位置環路	191
10.3	領先網路伺服機構轉矩勁度	192
10.4	領先網路伺服機構速度常數	193
10.5	領先網路伺服機構設計例	194
10.6	黏滯性耦合慣性阻尼伺服機構簡介	197
10.7	伺服馬達與簡單伺服機構	197
10.8	黏滯性耦合慣性阻尼器	201
10.9	VCID 伺服機構位置環路	204

10.10	VCID 伺服機構性能	207
10.11	結論	210
問題	210

第十一章 共振、 ω_{cp} 的限制：標度、飽和與追蹤系統

11.1	負載共振的分析	211
11.2	一般的頻寬限制	215
11.3	經驗的頻寬數據	215
11.4	標度	217
11.5	飽和	219
11.6	自動追蹤系統簡介	225
11.7	正割校正	225
11.8	人工位置跟踪伺服機構	229
11.9	速度記憶	230
11.10	掃描器	231
11.11	結論	231
問題	233

第十二章 誤差估計

12.1	干擾誤差	236
12.2	靜態摩擦誤差	239
12.3	馬達起動電壓誤差(靜態)	240
12.4	轉速計雜音誤差(靜態)	241
12.5	組件誤差(靜態)	241
12.6	轉換器誤差(靜態)	244
12.7	齒輪誤差(靜態)	245
12.8	偏向誤差(靜態)	247
12.9	穩態轉矩誤差(靜態)	247
12.10	陣風誤差(靜態)	248
12.11	轉速計漣波誤差(動態)	250

12.12	目標運動誤差(動態)	250
12.13	誤差常數	252
12.14	通過追蹤方法	256
12.15	追蹤雜音(動態)	260
12.16	結論	265
問題		265

第十三章 電液式伺服機構

13.1	基本關係式	267
13.2	馬達 - 閥門分析	272
13.3	洩漏流量	275
13.4	壓縮流量: 流力共振	275
13.5	流力伺服系統	279
13.6	結論	280
問題		280

第十四章 設計的一種方法 - 系統性能比較

14.1	驅動功率	281
14.2	系統頻寬	282
14.3	性能計算	283
14.4	飽和	284
14.5	系統性能比較	284
14.6	伺服機構性能比較例	288
問題		289

附 錄

A	運算放大器	290
B	性能補償曲線	296
C	轉換等值	300
D	慣性矩計算	302
E	選題解答	304
F	實驗	307

第一章

基本概念

introductory concepts

本書目的在使讀者推導理論基礎時能對實際的閉 - 環路伺服系統 (closed-loop servomechanism systems) 獲得實體的概念。本書所採取的步驟為，根據適當的近似法以獲得快速的設計技巧。這些方法對大多數的設計狀況，都夠正確。

1-1 何謂伺服機構

首先我們說伺服機構 (servos) 為一閉 - 環路控制系統 (closed-loop control system)，用來決定機械負載的位置、速度、或加速度。為詳細說明此一原始定義，同時使定義更加正確。我們先看「閉環路」(closed-loop) 一詞的意義，同時在提出正式定義前先看一些相關的概念。

為明瞭閉 - 環路系統，我們先看看開環路 (open loop) 系統。在一開環路系統裏，輸出並不加測量，亦不用任何方式來影響系統的工作。自動洗碟機即為開環路系統的一例，因其用固定方式工作，而無視碟子乾淨的程度。同理，一個手動的壁爐加熱器，亦為開 - 環路系統。反之，在閉 - 環路系統中，輸出參數 (output parameter) 被測量並與輸入命令比較；兩者之差 (稱為誤差) 用來使系統自行校正。因此可導出一重要觀念，即閉 - 環路系統為一歸零系統 (null-seeking systems)。閉 - 環路系統的例子，為一可自動控制溫度調節的家庭加熱系統。

2 基本伺服機構系統設計

閉 - 環路系統優於開 - 環路系統之點為，較不受騷擾的影響。騷擾，對影響一系統的輸出很不利，而騷擾可由內部元件，或外在影響所產生。由外在產生騷擾的例，如烤箱的開口。一個自動控制溫度調節的烤箱，可自行校正此一騷擾。反之，一手動的固定輸入功率的烤箱，因為開口的冷卻效果，與加熱元件的輸入功率又無變化，將會有更大的溫度變化。由系統元件部份所產生的騷擾之例，為電熱式熱水器加熱元件溫度的標度。在閉 - 環路水溫控制系統，可加上所需能量使水溫保持一定。一開 - 環路系統則無法補償效率的降低，經過幾年後，熱水的溫度將愈來愈低。

一個可變自耦變壓器 (variable autotransformer) 加上整流器即構成一可變開 - 環路直流電壓源；一個經過穩壓的電源 (regulated power supply) 即為一閉 - 環路裝置。很明顯，有穩壓的電源較開 - 環路系統更準確地控制直流電壓。線電壓 (line-voltage) 或負載的變化，以及元件的更換，對於開 - 環路系統的影響更甚於對閉 - 環路系統的影響。

閉 - 環路系統的缺點，為具有穩定度問題。尤其在需要較佳特性時為然。此可導出一基本概念，即閉 - 環路系統有一基本的矛盾，當增益增加時可減少誤差到可忍受的程度。可是，就一般而言，增益增加將降低穩定度。因此，由於穩定度的影響，在特性上將有一限制。閉 - 環路系統當增益增加時，反應亦較快；因此，考慮到穩定度時，對反應速度亦有一限制。總之，閉 - 環路系統必須將誤差減少到可接受的程度，且對於命令或騷擾的反應亦必須夠快。

在本書內，「伺服機構」(servomechanisms) 將指閉 - 環路控制系統，其功能為利用馬達以定出機械性負載的位置。這些伺服系統為使用比例式控制 (proportional-control) 而非開關式 (on-off) 控制 (一種自動控制溫度調節的室內加熱系統為，開關式控制系統)。在比例式控制伺服系統中，命令與輸出兩者之間大小與極性的差 (稱為誤差) 均可用來作控制用。本書的主題為討論利用電子儀表與馬達的伺服系統，在第十三章又考慮液電伺服 (electrohydraulic servos) 系統的特性。由本書中可發現，

伺服系統只有很少的基本設計規範與特性準則。對某一特定的應用，我們很直覺的就會選擇最佳組成，然後預測其特性。最後詳加設計。

1-2 伺服系統的基本特性

伺服系統有四種重要特性：

1. 伺服系統為受誤差 (error) 所激發；此誤差，為所要的輸出與實際輸出之差。
2. 伺服系統的輸出 (output) 功率，較從輸入訊號所得的更大。例如一電位計的控制鈕，只有一個手指的控制距離，可是一條重達幾噸的天線，由此電位計當作伺服系統的一部份來控制。
3. 功率加給負載，假定對誤差信號、其衍生，與其積集的組合成正比。(此乃表示線性的假定，對大多數伺服系統分析是正確的。有關若干例外，對非線性的假定亦在本書中討論，那是為設計工程的觀點而設的)。
4. 實際的伺服系統是穩定 (stable) 的。不穩定的伺服系統並非有用的元件。

1-3 驅動馬達的選擇

在設計伺服系統時，一些項目很早即需考慮。最重要的是加到負載上的功率，必須決定以定出驅動馬達的大小。在定出伺服系統上驅動馬達的大小時，有五點必須知道。即(1)不平衡 (或其他穩定者) 的負載轉矩 (load torque)，(2) 暫態轉矩 (transient torques)，(3) 負載轉動慣量值，(4) 負載所需加速度，(5) 負載所需速度。

加到負載上的功率，可由這些參數求出。最壞情況的負載尖峯功率，可由尖峯轉矩之和乘以最大速度計算得出。此值即為加到負載上的尖峯功率的保守值。可是，如果當需要尖峯速率，並不需要尖峯轉矩時，則最壞情況下的尖峯功率，可能較以上所計算的為小。因為不平衡轉矩值很小，所以通常不必考慮。可是摩擦轉矩可能需要馬達功率 (例如在儀器伺服系統內)。

在定出驅動馬達大小的時候，有一重要事實亦需考慮。即有時一部份的能量進入馬達本身內部去。馬達也有慣量，此慣量須被加速，這就需要轉矩。此轉矩與馬達速度的乘積，為馬達所需功率的一部份。該部份功率並不傳到負載。因此，在定出馬達的大小時，必須考慮馬達所傳輸的全部

4 基本伺服機構系統設計

功率。

例題 1-1 定出馬達大小。

考慮一具有以下特性的負載：

穩態負載轉矩	10 lb·ft
暫態轉矩	2 lb _r ·ft
負載（與馬達）轉動慣量*	4 slug·ft ²
負載最大加速度	100°/s ²
負載最大速度	40 rpm

試計算最壞情況下馬達所需功率。(a)用馬力表示，(b)用瓦特表示（轉換因數見附錄 C）

解

(a) 因為 $4 \text{ slug}\cdot\text{ft}^2 = 4 \text{ lb}\cdot\text{ft}\cdot\text{s}^2$,

$$T_{\text{accel}} = 4 \text{ lb}\cdot\text{ft}\cdot\text{s}^2 \times \frac{100^\circ}{\text{s}^2} \times \frac{1 \text{ rad}}{57.3}$$

$$= 6.98 \text{ lb}\cdot\text{ft} \approx 7 \text{ lb}\cdot\text{ft}$$

$$T_{\text{total}} = 10 + 2 + 7 = 19 \text{ lb}\cdot\text{ft}$$

$$P_{\text{max}} = T_{\text{max}} \Omega_{\text{max}}$$

$$= 19 \text{ lb}\cdot\text{ft} \times 40 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times 360 \frac{\text{deg}}{\text{rev}} \times \frac{1 \text{ rad}}{57.3 \text{ deg}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$= 79.6 \frac{\text{lb}\cdot\text{ft}}{\text{s}}$$

$$= 79.6 \left(\frac{\text{lb}\cdot\text{ft}}{\text{s}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{hp}}{550 \text{ lb}\cdot\text{ft}/\text{s}} \right)$$

$$= 0.1445 \text{ hp}$$

(b) $P_{\text{max}} = 0.1445 \text{ hp} \times 746 \frac{\text{W}}{\text{hp}} = 108 \text{ W}$

1-4 伺服系統特性

以下所考慮伺服系統的兩個基本特性是，第一，伺服系統用一些誤差來表示的正確性 (accuracy)。這些誤差，包括由命令狀態、負載轉矩，以及諸如馬達、轉速計、同步器、電子零件等所產生者。第二個特性是，當命令改變時，伺服系統由暫態到穩定所需的時間。

這些特性標準，均包括在本書內。這些參數與特性的計算，均基於伺服系統環路 (servo loops) 的有效頻寬 (significant bandwidth) (開環路或閉環路頻寬)。

*關於轉動慣量的解釋，見 4-3 節。

有一很重要的基本概念是，環路頻寬 (loop bandwidth)，經常受設計者無法控制的因素所限制。需注意者，若干物理的實際性，限制了伺服環路可獲得的頻寬。而伺服環路頻寬是決定伺服系統的誤差特性與安定時間 (settling-time) 特性。在交流伺服系統，環路頻寬是由載波頻率 (carrier frequency) 所限制。例如，一個 400-Hz 的伺服系統，可能較 60-Hz 的伺服系統有較寬的頻寬。另一個限制伺服系統頻寬的影響是，負載構造上的共振 (load structural resonance)；由變速箱驅動大轉動慣量的天線系統，可由變速箱的發條與負載慣量而具有 2 或 3 Hz 的自然共振頻率，如此形成了伺服環路系統頻寬的上限。

本書重點，在於強調伺服系統性能可由頻寬特性計算出來，而頻寬則由已知的限制特性決定。此種技巧，可導致一簡單而直接的設計方法。

1-5 標準圖形

若所有的環路，可化簡為如圖 1-1 所示的形式，(稱為標準圖形) (standard diagram)，則系統設計用的數學可大為簡化。

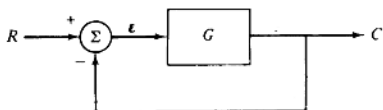


圖 1-1 標準圖形

方程式(1-1)到(1-5)，描述此標準閉-環路系統的特性。

$$C = G\epsilon \quad (1-1)$$

$$\epsilon = R - C \quad (1-2)$$

因此

$$C = G(R - C) = GR - GC \quad (1-3)$$

或

$$C + GC = GR, \quad C(1 + G) = GR \quad (1-4)$$

且

$$\frac{C}{R} = \frac{G}{1 + G} = G' \quad (1-5)$$

此系統的輸入為 R ，代表參考量；輸出為 C ，稱為被控制量，誤差為 ϵ 。由誤差乘以環路增益 G ，得到被控制量輸出 C 。式(1-1)到(1-5)，

6 基本伺服機構系統設計

在描述環路的工作時，非常有用。

表 1-1 閉環路增益為開環路增益的函數

開環路增益	閉環路增益
G	$G' = \frac{C}{R} = \frac{G}{1+G}$
> 1	1
< 1	G
≈ 1	$\frac{1}{2}$ 至 ∞

表 1-1 表示式(1-5)的一般特性。此表對圖 1-1 所示標準圖形，用不同的開 - 環路增益 G ，定出閉環路增益 C/R 值。若開環路增益 $G \gg 1$ ，則式(1-5)的分母大約為 G 。因此閉 - 環路增益為 1。亦即，當開 - 環路增益很高時，閉 - 環路增益為 1。若開 - 環路增益 $G \ll 1$ ，則分母約為 1。因此，閉 - 環路增益約為 G 。示如圖 1-2。圖 1-2 為一增益函數圖形。當

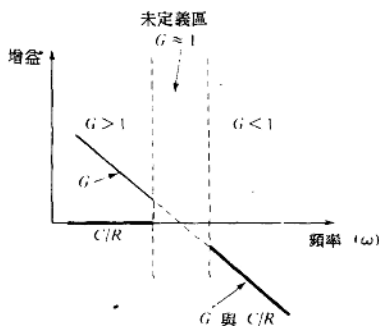


圖 1-2 閉環路增益與開環路增益 (G) 對頻率 (ω) 的圖形

開 - 環路增益 $G > 1$ (左邊部份)，閉 - 環路增益 C/R 等於 1；當開環路增益 $G < 1$ (右邊部份)，則閉環路增益 C/R 大約與開環路增益相等。

表 1-1 第三種情形為，當開 - 環路增益約為 1 時的情況。當開 - 環路增益等於 1 時，閉 - 環路增益為從 $\frac{1}{2}$ 到 ∞ 間的不定值。若開環路相位為 0°

，則分母值為 2。閉 - 環路增益為 $\frac{1}{2}$ 。若開 - 環路相位為 180° ，則分母為 0，且增益為 $-\infty$ 。很明顯，只有當開 - 環路增益靠近 1 時才會發生穩定性問題。因為只要增益遠大於 1，閉 - 環路增益就趨近於 1；只要增益遠小於 1，閉 - 環路增益就大約等於其增益本身。不穩定，可能發生的區域，只有當增益約等於 1 時。了解此一事實，就可使伺服系統的穩定性問題很容易處理。

另一標準圖形的特性，為誤差增益 (error gain) 性能。式 (1-6) 至 (1-9) 描述此一誤差增益性能。

$$\epsilon = \frac{C}{G} \quad (1-6)$$

$$C = R \frac{G}{1+G} \quad (1-7)$$

因此

$$\epsilon = R \frac{G}{1+G} \times \frac{1}{G} = \frac{R}{1+G} \quad (1-8)$$

或

$$\frac{\epsilon}{R} = \frac{1}{1+G} \quad (1-9)$$

這些方程式，均可直接導出。式 (1-6) 表示誤差等於被控制量除以增益。式 (1-7) 表示被控制量等於參考量乘以 $G/(1+G)$ ，(由式 1-5 定得)。將式 (1-6) 與 (1-7) 組合，可得式 (1-8)。式 (1-9) 係將該式用誤差增益形式表示。

表 1-2 誤差增益為開環路增益的函數

開環路增益	誤差增益
G	$\frac{\epsilon}{R} = \frac{1}{1+G}$
> 1	$1/G$
< 1	1
≈ 1	$+\frac{1}{2}$ 至 $+\infty$

表 1-2 為式 (1-9) 特性的總結。若開 - 環路增益大於 1，則誤差增益約為 $1/G$ ；若開 - 環路增益小於 1，則分母約為 1，而誤差增益也為 1。