

科學圖書大庫

控制技術

譯者 高 材 柏小松

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會

監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有

不許翻印

中華民國六十七年八月十日初版

控制技術

基本定價 3.40

譯者 高材 美國西北大學電機碩士
柏小松 國立清華大學應用物理碩士

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 財團法人 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號
7815250

發行者 財團法人 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第15795號

承印者 大原彩色印製企業有限公司 台北市西園路2段396巷19號
電話：3611986・3813998

我們的工作目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成為事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，尤為社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啟發，始能為蔚為大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啟導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尚有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏為監修人，編譯委員王洪鎰氏為編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分為叢書，合則大庫。為欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於為國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特摺誠呼籲：

自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；

大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

原 序

在本書中所採用的術語是根據國際電工委員會(I.E.C.)在其所出版的“國際電工字彙(第二版), 37 集, 自動控制和調節系統”一書而來的。

另外一個 I.E.C. 所推薦的是使用點號(,)來代替小數點, 因為句號(·)在數學的運算裏是作為乘法來用。譯者註: 在中文本中我們仍依照慣例用句號(·)作為小數點。

目 錄

A 部份

控制的理由	1
定義和基本觀念	3
開環控制	3
常態之維持	4
反饋控制	4
閉環的組成	6
水位控制	6
溫度控制	6
控制因數	6
控制器的特性	9
比例控制器	9
比例性範圍	9
啓／閉控制器	11
重疊	12
線性與非線性控制器	12
校正範圍	13
二階控制器	14
多階控制器	15
控制迴路元件的時間行爲	18
控制迴路及其部門的動態行爲	18
n 次系統	19
零次延遲	20
一次延遲	20
n 次延遲	22
具有死時的部門	24
I- 控制器	24

D- 部門	26
控制組件的結合	28
PI- 控制器	28
PD- 控制器	29
PID- 控制器	30
啓／閉控制器的動力學	31
殘留誤差	33
控制器與高次控制迴路	36
穩定性之探討	40
軌跡圖的使用	41
控制的準確性	43
具有振盪響應的控制迴路	44
啓／閉控制器的動態行爲	46
使用啓／閉控制器時的殘留誤差	47
實用控制器的結構和特性	50
對距離和角度的檢測元件	50
壓力檢測元件	52
流量檢測元件	55
溫度檢測元件	56
電的溫度檢測元件	57
密度和厚度檢測元件	59
其他檢測元件	60
置定值和比較器組件	62
接受定比較值的儀器	64
壓力換能器	65
P- 控制器之實化	66
D- 控制部門	70

I - 控制器.....	72	頻率響應.....	117
氣動控制器與控制部門.....	73	總頻率響應.....	120
氣動 PD- 控制器.....	73	頻率響應的圖示.....	123
氣動 I- 控制器.....	75	控制迴路的穩定性.....	126
液壓控制部門.....	78	一般常用部門的頻率響應曲線.....	128
液壓功率部門.....	78	控制性能.....	131
最後控制元件.....	80	控制品質的改進.....	135
能量流的最後控制元件.....	80	干擾之消除.....	135
電力驅動.....	82	串級系統.....	137
氣動和液壓功率驅動.....	84	有前置調整的閉環控制.....	138
電力最後控制元件.....	85	一些特殊的控制型式.....	139
電子最後控制元件.....	87	可變指令控制.....	139
B 部份		多項控制.....	140
開環控制.....	93	比值控制.....	141
常態之維持.....	93	拉卜拉士轉換.....	142
反饋控制.....	94	有控制路徑的啓／閉控制器.....	142
閉環的諸部門：描述.....	94	控制品質的改進.....	147
閉環中的活動量.....	96	連續控制部門的結構和描述.....	148
自我操作或外力幫助的控制器.....	97	最後控制部門.....	154
有或沒有等化的系統.....	97	電晶體.....	154
比例控制器.....	97	閘流體.....	156
殘留誤差.....	100	控制—技術符號和公式表.....	159
啓／閉控制器.....	102	C和E 部分	
線性與非線性系統.....	104	對實驗之前言.....	161
系統的性質.....	105	實驗 1 (C) 開環亮度控制.....	166
有與沒有補償的系統.....	105	實驗 2 (C) 閉環亮度控制之初	
n 次系統.....	105	步實驗.....	168
死時部門.....	109	實驗 3 (E) 在沒有閉環控制時.....	172
測試信號.....	109	維持一常態的例子。一個	
I- 控制器.....	111	獨立燈泡的電流／電壓特	
D- 部門.....	113	性。	
PID- 控制器.....	117	實驗 4 (E) 產生不同振幅和方	

向的階梯形信號·····	174
實驗 5(E) 定義一個 P- 部門 的靜態轉換函數 K_p , 校 正範圍 Y_1 和是 K_p 函數 的比例性範圍 X_p ·····	177
實驗 6(E) 以差值放大器和求 和部門來代替比較器和P- 部門。 $\pm Y_1$ 和 X_p 的定義	180
實驗 7 (C, E) 一線性及一 非線性最後控制元件之行 爲的探討。特性之產生···	184
實驗 8(C) 開環控制之探討， 在此 K_c 的定義視 K_c 和 K_c 之值而定·····	188
實驗 9(E) 一個具有 P- 控制 器，線性最後控制元件及 零次控制路徑之閉合控制 迴路的構造與探討·····	191
實驗 10(E) 一個具有 P- 控制 器，線性最後控制元件及 一次，二次和三次控制路 徑之行爲·····	194
實驗 11(C) 一個二次系統控制 迴路中超越的遏止·····	197
實驗 12(C) 一個具有零次及一 次系統之 PID- 控制器的 參考轉換函數·····	201
實驗 13(E) 一個具有 PI- 控 制器和零次系統之閉合控 制迴路的行爲·····	204
實驗 14(E) 二階控制器之探討 ；控制器特性的產生；三 階控制器的特性·····	207

實驗 15(C) 一個具有啓／閉控 制器，可變交換界限（置 定值之變化）及交換時間 變動之模型控制迴路的組 成·····	210
實驗 16(E) 死時 T_d 對二階控 制迴路特性寬度之影響···	213
實驗 17(E) 啓／閉控制器被一 個具有較高放大因數的連 續部門之取代·····	216
實驗 18(E) 產生一個具有不同 積分時間之積分控制部門 的特性曲線·····	219
實驗 19(C) D- 部門的單位階 梯形響應·····	222
實驗 20(C) 探討結合控制器（ P, PD, PI, PID）的 特性·····	226
實驗 21(E) 具有零次，一次， 二次及三次時間行爲系統 之特性的產生·····	229
實驗 22(E) 死時部門之探討···	232
實驗 23(C) 由P-和I-部門來組 成 D- 部門·····	235
實驗 24(C) 由一個具有一次反 饋之 P- 控制器來組成一 個有 PI- 行爲的控制器	238
實驗 25(C) 利用具有外部電路 的萬用組件（運算放大器 ）作為 I- 部門·····	241
實驗 26(E) D- 部門頻率響應 的定義·····	244
實驗 27(E) I- 部門頻率響應	

的定義·····	247
實驗28(E) P- 部門的頻率響應的定義·····	250
實驗29(C) 藉着可變參考值(程式控制)對具有連續控制器之模型烤爐的溫度控制·····	252
實驗30(C) 具有啓/閉控制器之溫度控制迴路的探討;系統之時間常數的效應;反饋對控制行為的改進···	255
實驗31(C) 有一干擾 z 之PI-控制器的亮度控制·····	259
實驗32(C) 雙迴路串級控制···	262
實驗33(C) 定電流源·····	265
實驗34(E) 定電壓源·····	268
實驗35(C) 有干擾交換的定電	

壓源·····	272
實驗36(C) 直流馬達速率控制···	275
實驗37(C) 利用速率變動對具有峰值電流限制的直流馬達之速率控制;雙迴路控制·····	279
實驗38(C) 發電機的電壓控制···	283
實驗39(E) 利用馬達電流作轉矩控制·····	287
實驗40(E) 具有電流和轉矩限制的直流馬達速率控制···	292
實驗41(E) 具有溫度,電流和轉矩限制的直流馬達控制···	295

D 部份

實際計算的例子·····	298
--------------	-----

A 部分

控制的理由

由於在我們周圍的世界，以及個人生活裏機械化的結果，我們對控制一詞非常的熟悉。在我們日常生活裏我們常將控制與調整互相混淆。在技術的觀點裏，控制更準確的說法是指反饋控制並且常常是指“閉環控制”，而“調整”，或“置定”更準確的，則被描述為“開環控制”。然而，不僅只定義這些字句也讓我們看看一些例子來解釋這兩種意義之間的不同。

我們藉着開關來打開或關掉樓梯的電燈和搭乘由按鈕控制着的電梯。我們駕車和開船。當我們在一部車子裏時我們藉着改變暖氣或通風系統來調整 - 而非控制 - 車內的溫度。踩油門或煞車板來增加或減低車子速度的動作亦是一個調整步驟，其目的是要得到所要的速度。

在我們前面所提的例中，我們是倚賴機械或電子系統的自動功能，或是我們直接且謹慎地控制它們的功能。這些調整都不是自我控制的因它們不能校正外界干擾所生的效應；只有當這些外界的干擾引起了操作員的注意時才由他去校正。

以一個電燈經由開流體聯於一電壓源的情形為例。燈的光強度由光電池度量此電池聯有一電錶。當所施的電壓變動，燈的光強度亦變動。一個觀察者可以察覺這個變動但如果他要知道變動的程度怎樣他可以從電錶得到精確的值。若他希望保持光強度不變，他可調整開流體控制直到電錶回到原來的讀數。這個實驗的目的，光強度不受供應電壓變動的影響，是藉着用手調整某件東西而達成的。

看過一些開環控制的例子，現讓我們研究幾個反饋控制的例子。一個電燙斗的溫度能保持不變是藉着雙金屬條它的作用如同一個二階控制。這作用不需要家庭主婦的任何幫助；藉着調整旋鈕他簡單地選擇所希望的溫度即可。反饋控制亦存在於汽車的水冷線路裏，使水的溫度不論空氣溫度的變動和

2 控制技術

引擎負載的情況如何多少都近乎一定。

車子電機的電壓亦是受到控制的，在低速時它必須夠高來使點火電路，燈光，及其他地方的功能都正常，但在高速行駛時它不能太高。最後 - 且是非常重要的 - 一例，我們所用之電力的電壓和頻率都必須控制在非常窄的限制內。

現在我們再回到電燈的實驗來。現存調整光強度的方法可以變成一個控制系統即利用光電池的電壓輸出可控制閘流體電路。顯然地，若實際的強度和所期望的強度間有一差異時所安排的系統必須能改變電燈的電壓以使這差異減少。因此現在就有可能在一較大的限制間變動供應電壓卻不致引起大的光強度變化。

所必須瞭解的是我們是在控制着光電池面積上的光強度。若光電池離電燈遠些，電燈會變更亮；把它移近些，電燈就會暗些。當然也有可能設計一閘流體電路使施於電燈的電壓保持一定，不管電源電壓是否變動。然而，這不是真正的控制，它僅是對干擾（亦即，電源電壓的變動）的補償，並且也只適合這種的干擾。舉例而言，這種的控制就不能補償把燈塗黑，或灰塵落在燈泡上的情形。一個真正的閉環控制遠優於這一方面因它能補償在供應和光電池之間任何能量流中的干擾。

定義和基本觀念

國際電工委員會(I.E.C.)在1966年出版的第50號刊物，37集，37.05.005節裏給予如下的定義。“控制”：支配任何機械，器具、程序、或機械與器具組合體之工作性能的方法和手段。在此所要討論的主題包括有三個基本觀念：開環控制、常態之維持與反饋控制。這些觀念在日常生活裏常被誤用，故在此我們將更準確地來定義它們。

開環控制

開環控制是一種經由一連串的鏈間接影響某物（如一個程序）的控制，這些鏈我們將稱之為系統。這種系統的設計在於假設程序是一直受到相同手段和相同方式的影響。它需要操作人員去檢查調整後的結果，如有必要需再作進一步的調整——這調整不是自動的。例如，水槽之輸出管的閥由可以遙控之裝有馬達的齒輪組來打開的情形。在此系統有開關、馬達、齒輪箱、閥轉桿、閥錐體（或稱閥塞）及閥座。在一系列動作的開始是由開關的操作叫流體從槽中流出。若系統中的每一部分都正常，閥就會被打開（圖1）。若系統的操作受到干擾如，閥不能轉動，或馬達壞了，而且這情形不能獲得補償因此槽內的流體也就無法流出（圖2）

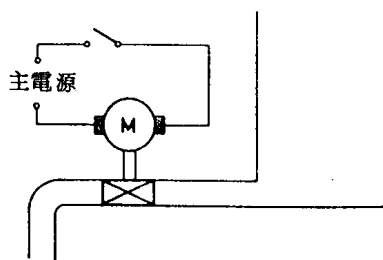


圖 1

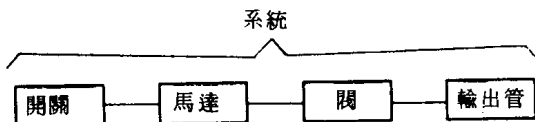


圖 2

常態之維持

我們已經知道一個控制系統常用來維持某個常態的情形，如室溫。在科學界一和在自然界中一許多用來維持某一常態的安排並沒有被稱作控制。舉一自然界裏的例子，山中的湖泊是由一些細流匯集而成，而它的出口則成爲一條河。當然水的流入量是大於蒸發的速率而且湖的深度也由出口的高度來決定。

科學界常將此一系統用於公共給水蓄水池中，池水是由小溪流匯集而來的。超過日用的水量可讓其溢出（圖3）而蓄水池的水位可維持一定：所以水壓是一定的。這不是真正的控制，因為在這過程中並沒有任何東西反饋到輸入端。只有當水位被度量並與需要的高度比較後，用比較的結果來調整溪水流入量的大小时，這水位纔可說是受到控制的。

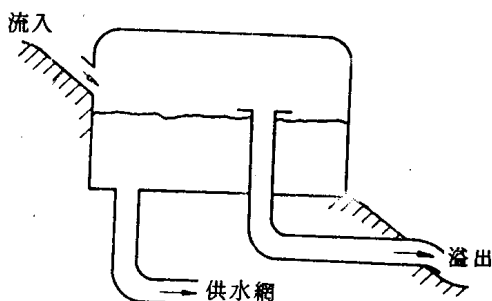


圖 3

反饋控制

反饋控制是一種安排，在其中被控制之變數的值（被控變數或控制量）與參考變數（置定值）的值相比較，二者之間的差異（偏差）即用來調整被控變數以便使偏差能減到零。此時被控變數的值完全與置定值相等。因此反饋控制需要一個閉合迴路（閉環）的存在。

由此描述，我們可以看見一個控制系統包括數個鏈。再舉蓄水池的例子，首要的鏈是能量流或質量流（蓄水池的進水量），它產生了被控變數（水位）。一個度量設備（檢測元件）測知了被控變數的大小並與參考變數的瞬間值比較。這兩個值的差異驅動入口閥因而控制水位。所以水位和流入口之間形成了閉合迴路。這些直接影響被控變數的鏈即形成了系統。

在檢測元件和系統輸入端之間的那些鏈組成了控制器。由這些我們可以

在腦海裏組成一個控制系統的印象圖並且對於許多問題在建立其系統的模型之前最好先進行這一步。

考慮圖 4 中的簡單迴路。產生被控變數 x 的能量流以符號 z 表之。在系統輸入端的小圓表示最後控制元件，這元件能隨着控制器輸出值 y 的大小來增加或減少 z 的值。

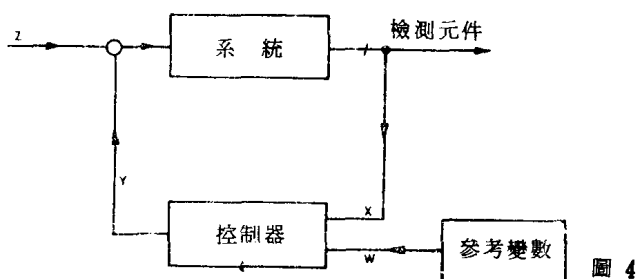


圖 4

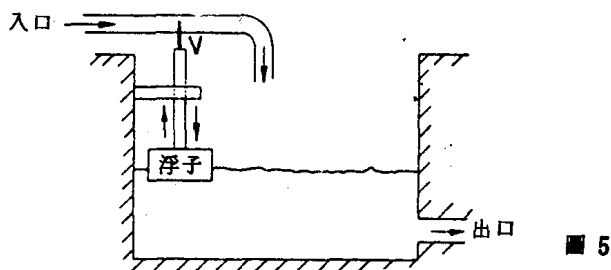
雖然本書主要在討論一些技術上的程序，但大家必須記得在自然界中也存在許多重要的控制系統。如身體內的一些系統在控制體溫、平衡、血流及其他更多的功能。然而所有的控制系統都得遵循相同的律—這些律將在以下幾章中討論。這些定律把迴路中各元件的特性（及他們聯結的方法）相關聯以表現出整個迴路的行為。在開始探討這些特性之前，複習一下前面學過的東西是大有助益的。

閉環的組成

迴路是由許多鏈組成的，這些鏈可以分爲兩類：系統和控制器。被控變數 x 是系統的輸出，它是由能源 z 所產生的。 z 值的改變影響 x 值，這些改變由檢測元件度量後送到控制器。控制器比較 x 值和置定值 w ，二者的差異稱爲偏差 ε 。控制器再利用偏差 ε 形成一校正變數 y 將其送到能量供應閥來改變 z 值使得 x 值接近於置定值。下二例將說明這種控制迴路。

水位控制

在一槽中液體的液面不論出口量大小的改變如何，都要保持不變的情形（圖 5）。



首先假設所有的情況都是穩定的，也就是說，液面在正確位置並且閥 V 是關閉的。現若液體流出水槽則液面下降，浮子的下降使閥打開讓液體流進槽內。當液面上升，浮子也上升。當達到正確的液面時閥再度關閉。注意此類系統之工作不需要外界的能量供應。

溫度控制

在瓦斯加熱式烤爐中之溫度是由熱電偶 T_h 度量的（圖 6）。

控制器比較熱電偶電壓和參考電壓，並利用二者間的差異去操作一馬達驅動的閥，此閥可按着需要增加或減少瓦斯的供應量。這類系統需要外界供應的能量，在此例中是電力。

控制因數

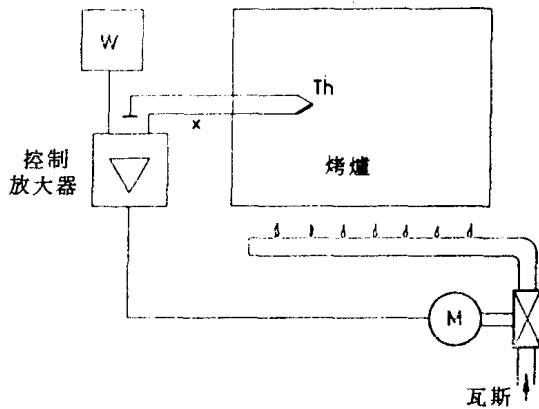


圖 6

到目前為止所舉的這些例子告訴我們一個閉環控制系統是如何工作的，但並沒有指明此系統有多好、多壞、多快或多慢。在此我們使用“好”這一詞來意謂系統的偏差，是已儘可能的小。為了解釋控制系統的效率讓我們來研究一個電力加熱式烤爐其內的溫度用熱電偶 T_h 來量度的情形（圖 7）。

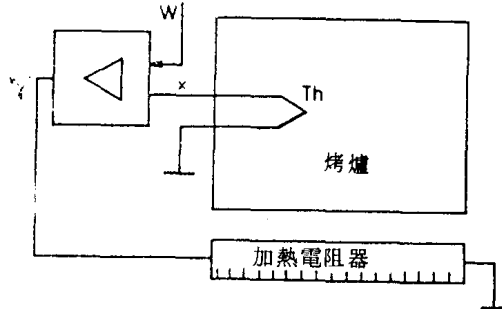


圖 7

控制放大器將熱電偶之輸出 x 與參考電壓 w 之值比較。 x 、 w 只要有相同因次（電壓）二者即具有相同之極性。若 w 大於 x 則下式成立：

$$(w - x) K = y$$

在此 K 是一因數表示 $(w - x)$ 值在控制放大器中被放大的倍數。熱電偶的輸出由溫度 θ 決定。若此輸出以比值 x/θ 來計算則參考電壓 w 較易設定。

溫度之改變 $\Delta\theta$ 導致加熱功率 P 的改變，所以我們能定義總放大因數 K_L 為

$$\Delta \theta \cdot K_L = \Delta P$$

K_L 的因次是 $\frac{1}{\theta} \cdot V \cdot A$ 。在 $0 \leq \Delta \theta \leq \theta$ 區域內，放大因數 K_L 是正實數。在一普通的放大器中（例如在收音機中）放大因數是輸入功率與輸出功率間之比值或輸入電壓與輸出電壓間的比值，所以是不具因次的。我們的放大因數因關聯着不同的物理量（物理的、化學的、電的）故具有因次。譬如，在烤爐加熱例中的放大因數其因次是瓦/ $^{\circ}C$ 。對水位控制，因次或許是厘米（閥的移動）/米（液面的改變），或在燈光設備裏是安培/米燭光。值得注意的是這放大因數亦常稱為控制因數，控制比值，甚或迴路增益。