

10. 以控制觀點看自然鐵則—有得必有失

控制科技的發展過程是漫長的，除了受控本體、致動器、感測器與控制器實體的開發外，還包括控制器中各種控制理論的研究，這些控制理論正是系統中運籌帷幄的總司令，乍聽之下，總司令似乎是威風八面，系統必言聽計從，朝著終極目標前進；但在實際狀況下卻是總司令戰戰兢兢，系統時有不從，即使銜命前進也未必如願達成目標，這些狀況就好像我們在處理事情時所受的遭遇一般，究其原因，正是「有得必有失」的自然鐵則所致。

「有得必有失」早已是一般人的經驗與認知，因為凡事要面面俱到是不可能的，此外人們總希望能在事先便看穿得失，讓事情的處理過程更加平順，只是古諺有云：「塞翁失馬，焉知禍福」，要想看穿得失，必須要有足夠的智慧，通常人們只能「事後諸葛」加以評斷，畢竟周遭環境是動態的，要想隨時掌握住所有影響事情的因素，根本是不可能的，所以人們在事情順利完成之後，每有慶幸大喜之感。話說至此，難道爾後我們面對事情時，除了自身努力外，非得默默祝禱祈求神佛上帝庇佑不可？底下將以部分篇幅先談談控制理論的發展與系統的本質，再來說明在控制的研究過程中，有那些觀念可以當作我們處理事情的借鏡或權衡得失的準則。

控制理論的發展

控制理論的發展可先從電磁學大師麥克斯威爾談起，他不僅以敏銳的眼光洞穿電磁現象，提出麥克斯威爾方程式統一電磁理論，還曾在早年率先以數學方法探討瓦特用來控制蒸氣機轉速的飛球系統，發表了世上第一篇關於控制回饋理論的論文，自此數學便成為探究控制理論的重要工具。

控制理論的發展約可分為五個階段：(1)傳統控制，(2)最佳化控制，(3)穩健控制，(4)自動化控制，以及(5)智慧型控制，每個階段在年代上多有重疊較難區分，以下將以特性上的差異來加以劃分。

首先是傳統控制，它以單純的系統為對象，所使用的控制理論也易懂實用，其中最經典的就是 PID 控制，但是傳統控制在系統規格的要求較不嚴謹，因此試誤法(trial-and-error)扮演著相當重要的角色，由於傳統控制易懂實用，至今仍廣泛使用在單純的系統上。

當控制理論漸趨成熟，設計者自認對系統已能掌握，便開始有最佳化的考量，希望達到反應最快、成本最省、出力最小等最好的控制目的，不幸的是，這

些最好的控制目的，還是無法背離「有得必有失」的自然鐵則，當完成某個最好的控制目的，同時也將失去某些好的系統特性，例如當系統被設計成反應最快時，它的輸入就必須最大，經常導致不合理的輸入量，所以傳統控制轉換為最佳化控制的過程如曇花一現，「最不可能的控制」成為最佳化控制的代名詞，它無法改變系統「有得必有失」的宿命。不過值得一提的是，雖然最佳化控制難以實現，與它息息相關的最佳化理論卻在許多不同的領域中開花結果。

在最佳化控制的發展過程中，除了無法背離「有得必有失」的自然鐵則外，設計者自認為能夠完全掌握系統的想法也是一個致命傷，因為系統不確定量的存在終究是個事實，幸好經過一陣短暫的摸索後，終於發展出能夠消除或容忍系統不確定量的穩健控制，在 1990 年代穩健控制理論的研究與運用達到高峰，對於系統的非線性行為提出了許多修正的控制法則，包括適應控制、可變結構控制、 H_{∞} 控制等，都是穩健控制階段的產物。

在穩健控制發展的時期，控制的軟硬體技術已漸趨成熟，控制器的計算能力更是一日千里，設計者開始擺脫控制單一系統的限制，走入分散式系統，以同時控制多個系統為目標，同時完成多項控制目的，讓系統與系統之間能夠溝通、連結與合作，進而演變成自動化控制，在此自動化階段，工廠的生產線與倉儲系統的自動化技術開發與實現，確實是為工業界帶來了一片生機，不幸的是，也為社會的失業率與產業外移埋下伏筆，讓社會大眾的生活壓力更加沉重，「有得必有失」再次考驗人類的智慧。

有了自動化控制為基礎，控制理論便再往智慧型控制推進，意圖改變系統只能循著固定模式操作的現象，希望賦予機器智慧，讓它們能針對環境的變化與多樣的控制目的，做出自我判斷，進而修正自身的系統行為，主動達成控制的目標。此時此刻正處於智慧型控制的萌芽時期，有些智慧型科技的發展是因應人類的需要，有些則是由於人類自身的好奇，例如機器人科技界號稱在 2050 年，期望能夠舉辦一場人與機器的足球大賽，不論是否成真，卻已顯示出人類造人的好奇心，只能拭目以待了，但是「有得必有失」的自然鐵則又將如何考驗人類，能不擔心嗎？

系統特性

在控制理論中，有三項基本的系統特性是設計者所要掌握的，其一是系統的穩定性(stability)，其二是系統的動態行為，最後是系統的穩態誤差(steady-state error)。

在穩定性方面，俄國的里奧波諾夫(Lyapunov) 於 1890 年代以系統總能量為基礎，提出里奧波諾夫穩定性定理，他證明只要系統的總能量越來越小，最後終會趨向於零達到穩定，這是百年來控制界用來分析系統穩定性的主要定理之一，其他的還有路斯-赫維茲準(Routh-Hurwitz criterion)則與根值軌跡(Root Locus)等用來判定系統穩定性的方法。在穩定性的探討中，可以發現一項重要的規律性，「在可控的條件下，系統越穩定越難控制」，以人力車競賽為例，若是可以使用三輪車與腳踏車參加競賽，相信會騎腳踏車者一定以腳踏車為工具，而捨棄穩定性高的三輪車，除了因為腳踏車輕巧以外，主要是它在轉彎的操控性上占有絕對的優勢，但是對未曾騎腳踏車者來說，只有選擇穩定性高的三輪車了，當然最後的贏家非腳踏車莫屬。

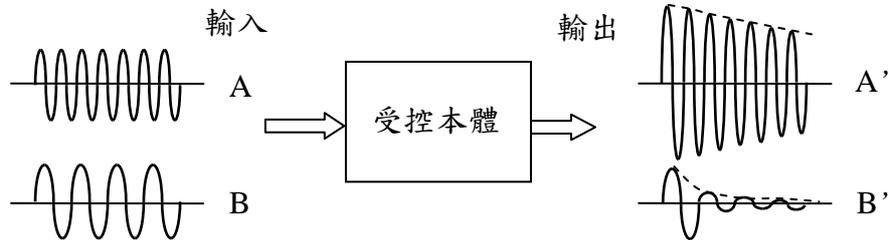
在動態行為方面，通常以三種系統規格來評估設計的優劣性，包括上升時間(rise time)、超越量(overshoot)與安定時間(settling time)，其中上升時間越短代表系統衝向控制目標的能力越強，超越量越小代表系統過度反應的現象越弱，安定時間越短代表系統抵達控制目標的速率越快。在一般狀況下，上升時間短、超越量小、安頓時間短是設計者所希望的，但是它們彼此間卻經常存在著互相牽制的作用，例如當上升時間較短時，常導致較大的超越量與較長的安頓時間，三者無法同時滿足，因此必須利用經驗法則加以適度，在得與失之間做出取捨，這又是「有得必有失」的再度展現。

在穩態誤差方面，穩態誤差越小代表系統離控制目標的精準度越高，在一般狀況下，零穩態誤差是設計者所希望的，但是穩態誤差能否完全消除，卻與受控本體自身的性質有著極大的關係，往往不是利用控制手段就必定能夠達到的，換句話說，要提高系統的精準度前，必須要對受控本體有所了解，畢竟「知己知彼」才能「百戰百勝」。

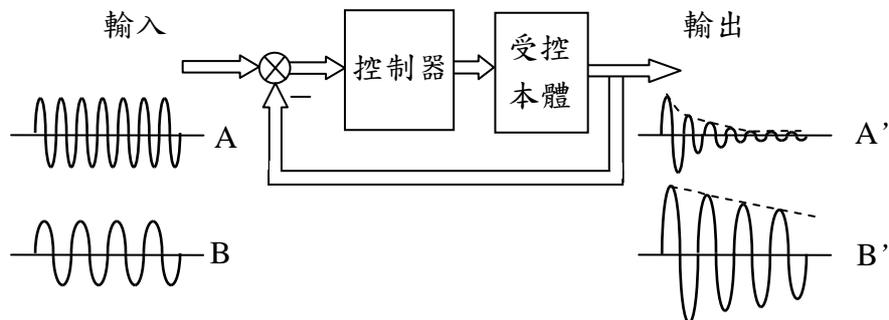
從以上系統各種特性的描述，似乎已隱約嗅出些微的哲理，如「在可控的條件下，系統越穩定越難控制」、「有得必有失」、「知己知彼，百戰百勝」等，這些論述或多或少都反應出事情所具有的共通性，底下再針對受控本體的極點與零點做說明，這是「知己知彼」相當重要的觀念。

受控本體的極點與零點是控制理論的術語，用文字直接解釋可能較難理解，底下將以圖示法做說明，並以人的本性來比喻。首先討論極點，在下圖中受控本體接受到兩個輸入訊號 A 與 B，其中訊號 A 對受控本體有明顯的刺激，因此獲得的輸出反應是先高漲再慢慢消退的現象，是屬於刺激強化的現象，而訊號 B 的輸出反應則是被壓抑且迅速消退，以系統的觀點來看，受控本體有個極點與訊號 A 有關。若將受控本體視為甲生，訊號 A 與 B 視為外在的誘因，如 A 為打

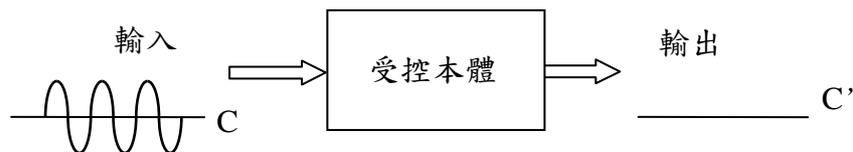
電動，B 為讀書，則很明顯地甲生對打電動有興趣，當一接觸到電動，精神先高漲再隨時間玩興慢慢消退，而對讀書則興趣不高，碰到書之後精神就隨著時間呈現快速消退的現象，換句話說，甲生有個極點與打電動有關。



接著將受控本體經由控制器調整，在下圖中受控後的系統對訊號 A 不再有明顯的反應，反而呈現出被壓抑且迅速消退的現象，而受控後系統對訊號 B 則顯示出高漲再慢慢消退的現象，換句話說，受控本體的極點已經經由回饋的手段加以調整。再以甲生為例，甲生為了改正行為模式，經過生活型態調整後，對誘因 A 的打電動不再有興趣，因為碰到電動後的精神狀態即呈現快速消退的現象，而對誘因 B 的讀書則相當感興趣，一接觸到讀書後精神就高漲，且隨著時間慢慢消退，換句話說，甲生的極點已經受到生活型態的適度調整。

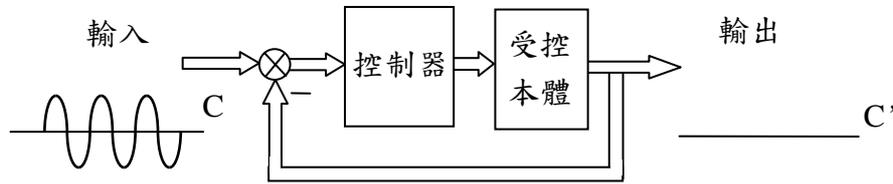


再來探討零點，以下圖為例，由圖中的輸出訊號可知受控本體具有零點，雖然它接收到輸入訊號 C 卻不會在輸出端產生任何訊號，也就是說受控本體不會受到訊號 C 的刺激。若將受控本體視為乙生，訊號 C 視為外在的誘因，如打棒球，則很明顯地可以看出乙生對打棒球一點興趣都沒有，接觸到棒球後根本不為所動，毫無感覺，換句話說，乙生有個零點與打棒球有關。



接著將受控本體經由控制器調整，企圖改變它的零點，如下圖所示，從圖中可以看出控制器根本無法調整受控本體的零點，亦即零點無法以回饋的手段來

改變。再以乙生為例，雖然試圖經由生活型態的調整，去改正行為模式，但是乙生始終對打棒球(誘因 C)不感興趣，換句話說，乙生的零點是無法以調整生活型態的方式來改變。



總而言之，受控本體的極點與零點，正如人的個性，每個人對不同的事物都會有不同的偏好，也就是說具有不同的極點與零點，因此在與人相處時，一定要多觀察對方，去了解他個性上的極點與零點，才能知道那些事物是屬於極點，可以經由協商得到妥協，那些事務是屬於零點，不用刻意去協商，如此一來，「知己知彼」就可以避免掉許多因個性上的差異所造成的爭端。

得失平衡

從控制理論的研究中，最能感受到的就是「有得有失」的鐵則，這個鐵則時時在提醒設計者，需以更謹慎的思維去處理系統，並且要細膩地去權衡系統的運作，到底該「得」多少？應「失」多少？在權衡得失的過程中，能否充分掌握受控系統的特性，便成為控制成功的重要關鍵，而權衡得失的作為，使得系統時時處於動態平衡的狀況之下，底下將以「得失平衡」的觀念來看待科技與社會的關係，並且舉例稍做說明。

首先來談「世界人口膨脹，糧食面臨短缺」的問題，乍看之下，人口膨脹當然導致糧食短缺，因此要解決糧食短缺的問題，只有設法提高糧食的產量，這正是科技界面對問題時所採取的方法，他們大力提倡基因作物的栽培，並且利用一些已經在產量與品質上獲得突破的作物，在國際間大肆吹捧基因作物的優點；幸好還有一些有良知的科技學者適時提出警告，要大眾謹慎面對基因作物對人體的影響，要科技界切實掌控基因作物的不當繁殖，因為一旦生物圈失序，其後果將使人類陷入難以挽回的浩劫，以上所提是科技界面對此社會問題的作法。

那麼科技界的處理手段是否正確可行？以下再從其他領域專家的論點來評估，這些專家明白指出世界的糧食根本未曾短缺，依據他們多年的調查與研究，在一些落後地區所存在的糧食短缺問題，主要都是因為政局的不穩定，當地的掌權者為了鞏固政權，以大量的糧食去換取武器與戰備物資，根本無暇理會人民的生計，在這種惡劣的局勢之下，當然會導致糧食短缺。從以上的論述可以看出來

科技界在面對「世界人口膨脹，糧食面臨短缺」的問題時，他們並沒有去深入了解問題的根源，甚至有刻意迴避的嫌疑，只一味地循著自己的私慾去獲取更多的研究機會，當然也就不會認真去思考，自己所進行的研究是否會製造出更大的麻煩。這種對問題認知的偏差早已存在許多現實的問題當中，所有的控制當然也是徒勞無功。

再來談「廣設監視器以降低犯罪率」的問題，這也是用來降低犯罪率最直接的方法，目前各都會地區的監視器幾乎是到處可見，人們為了住家與自身的安全，也樂於看到監視器的裝設，並不在意隱私權受到侵犯的問題，自願在監視器下安然處之，一時之間都會地區的犯罪率確實有下降的趨勢，顯然地，人們願意用隱私權的「失」，去換取住家安全的「得」。

然而都會地區的犯罪率下降，並不代表其他的地區也會跟著下降，相反地，根據英國的統計報告，其他的地區反而上升了，換句話說，都會地區藉由控制的手段，只是將犯罪的事件推移至其他地區。換句話說，廣設監視器也許真的將都會地區的犯罪率降低了，但是並沒有辦法真正降低全國的犯罪總數。那麼究竟什麼方法才能有效地降低犯罪率？方法無他，必須重視家庭、學校與社會的教育，還必須重視經濟的提升、政治的清廉、法治的公正等，這些才是降低犯罪率的根本之道。

最後以物理學中的「熵」來說明「有得有失」的意義，依據「熵」的定義，整個世界的亂度是朝著增大的趨勢在走，也就是說世界只會越來越亂越無序。可是依據控制原理，利用控制手段確實能夠有效地解決區域性的失序問題。這兩者間顯然存在著以下的關聯性：區域性秩序的控制常導致其他區域的無序加遽，這個事實似乎意味著「將自己的快樂建築在別人的痛苦之上」是個控制的必然結局，是否真的如此，不用去妄下斷言，不過若是問我意見，我會說：

「讓一切回歸自然吧！面對問題時，控制絕不會是最好的方法，更不會是必要的手段。」