

# 回授控制溯源

【摘要】回授控制這一觀念的由來可以追溯到水鐘、恆溫器以及控制風車轉動的機械等發明。

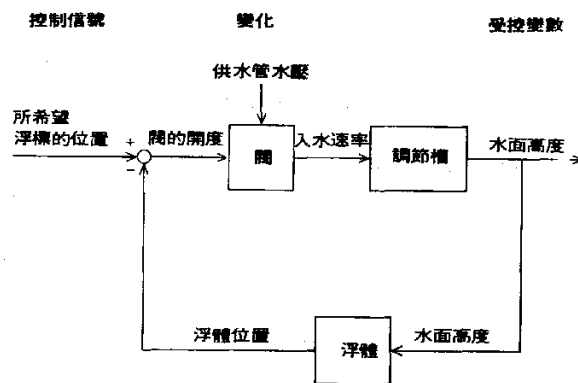
每個動物都可說是一個能自我調節的系統，是因為動物的生存、穩定性、大部分的行為都呈現回授控制（Feedback control）的特性。間的萬象：從肉食動物的繁殖環，到證券市場的漲跌，都逃不脫回授作用的法力。不過，令人感到不解的是，回授控制的現象既然這樣普遍，然而在科技的發展上，回授控制觀念的理論研究，卻出現得很遲。「回授」這個名詞本身就是個新發明，它是在本世紀初，無線電界的先進撰造的。對回授原理的意義做進一步的探討，也是不太久的事，主要得力於已故的溫納先生（Norbert Wiener）和他的同事，在1940年代所做的研究。

回授控制是技術孕育出科學的一個例子。回授原理的應用是從簡單的機械開始，其中有些得追溯到二千年前或更早，恆溫器與飛球調速器則是近代著名的實例。在1930年代以前，一些簡單的早期發明，雖已發展到高度精巧的地步，但回授控制仍是一個抽象的觀念，沒有得到太多的重視。到了三十年代，生物學家與經濟學家才開始注意到他們自己的研究對象和工程師們的回授控制裝置之間的顯明類似。活生生的有機體與經濟行為上的某些調節過程，表現出相同的因果循環，並且顯然遵從同樣的定律。無疑的，在研究各式各樣的動態行為上，回授控制的觀念不失為一項靈活有力的工具。今天，回授控制不僅廣泛的應用在機具器械上，還被視為是科學上一個重要的統一觀念。

本文的主題是放在這個觀念的歷史發展上。它的歷程可以很明確地找出來，是因為對回授控制能下一個嚴密的定義。溫納的說法是：「把一個系統產生的結果，再送回這個系統，以控制整個系統的一個方法。」美國電機工程學會（AIEE）在1951年，提出一個比較正式的定義：「一個回授控制系統，有下述的傾向：使系統中的一個變數與另一變數，維持一特定關係，所採用的方式是把這些變數的函數加以比較，利用它們的差值，做為控制的原動力。」這種系統的目的在能自動執行命令，它的方法是把受控變數（controlled variable）（輸出信號），與控制變數（command variable）（輸入信號）維持在同一標準上，雖受到任何未能預料的干擾，也仍要如此。控制信號可能是一直不變的，如恆溫器上所標定的溫度；也可能不斷的在變化，如汽車的動力操縱系統中方向盤的操作。不管那種情況，要回授控制系統有效地工作，就須使受控變數極忠實地跟隨著控制信號。

回授控制系統的主要特點是，整個系統構成一個頭尾相接的封閉環路（closed-loop）（圖一）。輸出信號的狀況由感覺器械來察知，並把所得信號送回輸入端。在輸入端，回授信號與控制信號相減，若結果不為零，此系統就產生一個糾正的動作，動作的幅度與方向，要看偏差，或差誤信號的大小來決定。以家用恆溫器為例，假如室內溫度比所需的溫度低了，這恆溫系統的反應就是供熱量的增加，也就是輸出信號的負向變化，引起正向的糾正動作。一般來說，一信號歷經回授系統的環路後，以相反的符號轉回來。符號的改變對系統的穩定度非常重要；如果回授信號不改變符號，會造成惡性循環，增加了輸出與預定水準的偏差量。

圖一：典型的封閉回授環路。箭頭代表信號，方塊代表由信號操縱的實體。本圖是「水鐘」的水流調節槽的簡化方塊圖，可配合圖二來看。

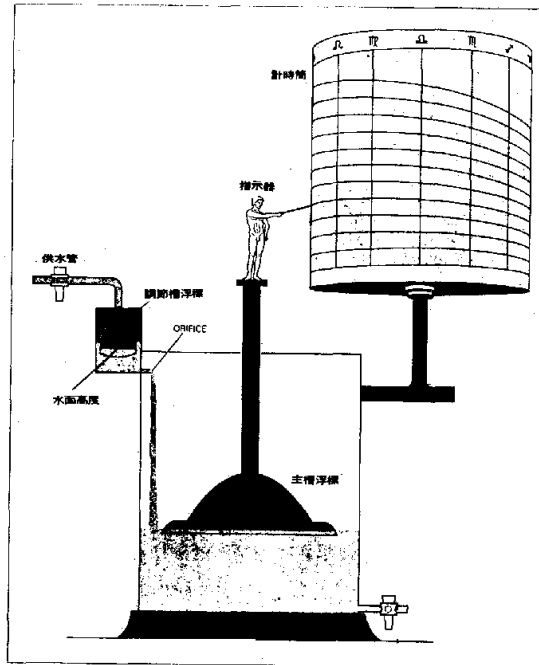


回授觀念的起源與發展的軌跡，可以用三種器械來說明：古代的水鐘、恆溫器、與控制風車的機械構造。現在讓我們來追溯它們的歷史與發源地。

現在已知最早的回授控制器械，是紀元前三世紀發明的水鐘（water clock），這是一位希臘機匠克提斯百（Ktesibios）所發明的。他當時是在亞歷山大城，為埃及國王 Ptolemy II 工作。他對自己的發明（除了水鐘，還有壓力幫浦、水風琴和幾種弩砲）所做的說明，現已失傳，幸好在「建築學」（De Architectura）這本書中有記載，這書是羅馬建築師兼工程師維特露維斯（Vitruvius）的傑作。

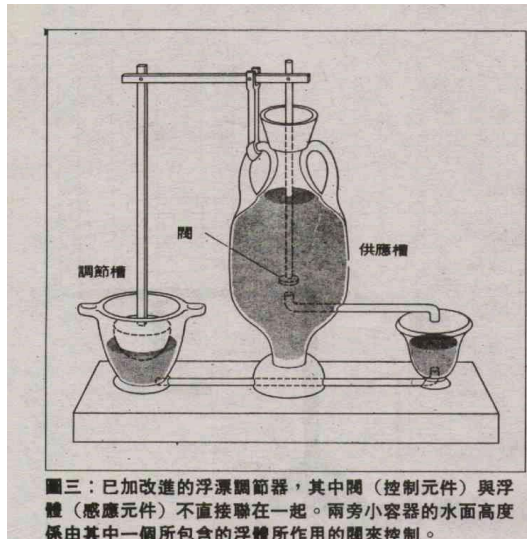
維特露維斯對克提斯百的水鐘，描述得並不太清楚。不過，德國古典學者狄伊爾（Hermann Diels），還是把這些晦澀的文字加以譯解，重繪成似可信賴的圖形。水鐘是利用水慢慢的滴流來計時的，水以穩定速率流進一個槽子，槽內水面浮著一個標示器，當水面上升時就指示出時間（圖二）。為了使水以穩定的速率滴流，克提斯百發明了一種器械，類似現代汽車上的汽化器（carburetor）。這器械是個裝有浮閥（float valve）的調節槽，裝設在供水管與接水槽之間，用來調節水流。當浮閥浮在某一高度時，閥打開的程度恰可使流入計時槽的水，保

持一定的速率。如果因某種緣故，調節槽內的水面降低或昇高時，浮閥也就隨著下降或昇高，等於自動把供水口開大一點或關小一點，以增加或減少進水的流量，直到水面恢復正常為止。

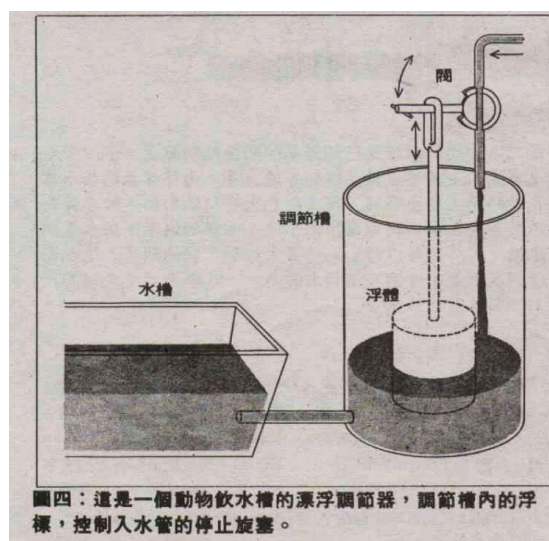


圖二：古代的水鐘是已知最早的回授控制裝置。水以一定速率流入主槽，主槽浮標即等速上昇，由浮標上的指示器在計時筒上指出時間，筒上刻劃出時間的間隔，隨季節而不同。左上端的調節槽控制水流入主槽的速率。供水管的水壓，與「調節浮體」的位置，控制了閥的開度，這也影響到入水量，即調節槽的水面高度，這水面高度又轉而控制調節浮體的位置。

此後過了大約三世紀，在亞歷山大的希羅（Hero of Alexandria）所著的「氣力論」（Pneumatica）中，又看到了漂浮式的自動調節器。希羅是位多產的著作家，撰寫的範圍包括：數學、測量術、光學、機械學、氣力學、自動機（automatons）與軍事工程學。他的「氣力論」中，有許多現代發明驚人的早期構想，所記述的幾種漂浮式調節器，比克提斯百的要精確得多。有一個名為「分酒器」（winedispenser）的，閥和浮體並不直接聯在一起，而是經由一套槓桿聯絡，這說明了在回授控制器械中，感應元件與控制元件可以分得很開（圖三）。



到了九世紀，漂浮式調節器又在阿拉伯出現。在一本名為「論巧妙的機械」（On Ingenious Mechanisms）的書中，提供了八個浮閘用於自動控制的實例，顯然曾受到希羅氣力論的影響。這本書的著者是巴格達姓 BanuMusa 的三兄弟。他們的設計使浮閘系統的精確程度增加了不少，有一個是利用「旋塞」（Stopcock）做為調節閘，而不用平板對著水管口的原始設計（圖四）。

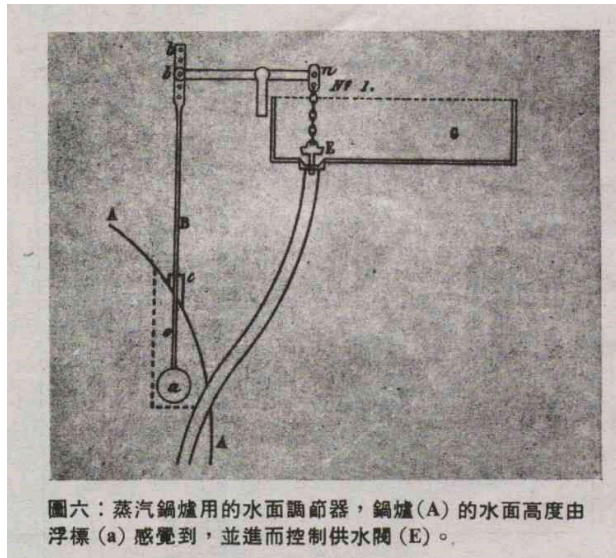


在中世紀以前的一段時期，回教世界中有不少可稱道的工藝成就與浮閘有關，工匠製造了龐大精美的水鐘，利用玩偶戲劇化的表演來指示時間。在三本留傳下來的書裏，對水鐘有詳確的記述。頭一本，大概在九世紀寫的，是一位通常叫「假阿基米德」（Pseudo-Archimedes）的佚名作者所著。另外兩本的著者，是十三世紀的 Ibn al-saati 與 al-Jazari。這三本書裏所講的水鐘，都是應用克提斯百的浮閘調節器，但所控制的是主浮槽的出水量，而非流入量。因此，計時是靠水面下降，而不是升高（圖五）。



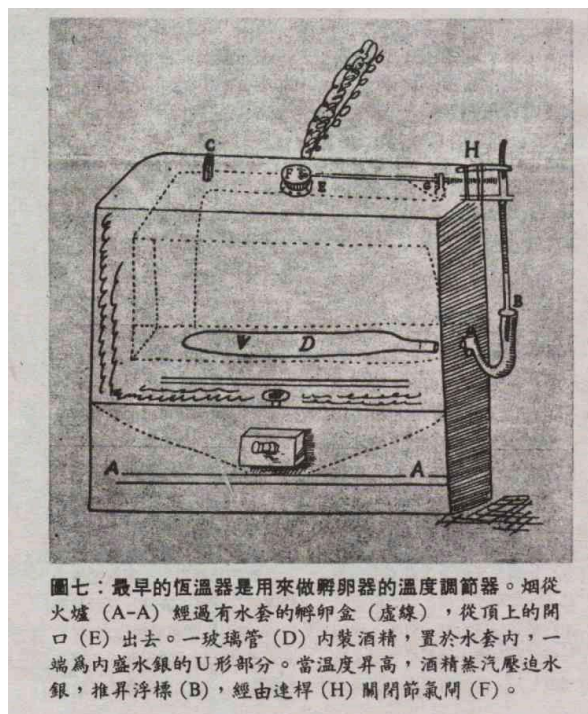
在這些記錄以後，浮閘就看不到了。中世紀，文藝復興或巴洛克(Baroque)時期的技術文獻中，都沒有提到水面調節裝置的利用。甚至附有優美插圖的希羅的氣力論的拉丁文翻譯本（1575年出版），對技術的發展雖然影響頗大，但也沒有提醒工程師，把漂浮式調節器的設計當做一個回授控制的方法來看待。

到了十八世紀中葉，漂浮式調節器又在英國給發明出來，而且可以明顯的看出，發明的人並不知道它以前的那段滄桑史。它的再生，在一本1746年的建築手冊（The Country Builder's Estimator）中首先提到，作者是索孟（William Salmon），把它用做家用貯水池的水面調節器。1758年，英國的橋樑與隧道建築家布瑞德林（James Brindley）獲得一項蒸汽機的專利，包括一組調節鍋爐內水面高度的浮閘。不多年後，一位蘇聯蒸汽引擎先驅波里祖諾夫（I. I. Polzunov），為了同樣的目的，設計出類似的器械。1784年在英國，烏德（Sutton Thomas Wood）又再一次取得相同發明的專利，其設計酷似希羅在十七個世紀前設計的老古董（圖六）。漂浮式調節器很快贏得普遍的賞識，視為鍋爐給水的一種方法。今天它更是廣泛的應用到各種場合。



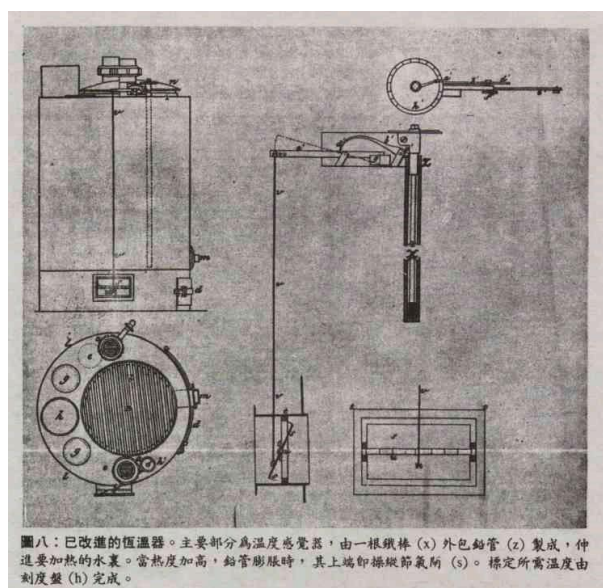
恆溫器沒有很古老的歷史。它的第一個原始型式出現在十七世紀初，是荷蘭工程師德爾貝來 (Cornelis Drebbel) 所發明的，他那時已移居到英國。他設計這個器械的主要目的是用在煉金術 (alchemy) 上；他相信要是能把煉金的溫度，長時間保持穩定，就能把基本金屬變成金子。

德爾貝來的裝置基本上是個盒子，底部是火爐，再上面有一根內裝空氣或酒精的管子，管的一端有 U 形頸，這部份裝填水銀 (圖七)。當盒內溫度升高時，內管中空氣或酒精蒸汽的壓力增加，就把水銀向上頂，進而推舉一根桿子，藉機械力關閉節氣閘，使火勢減低。反過來說，若溫度比所需的低，汽壓減小，水銀下降，機械聯桿就使節氣閘開得大點。



德爾貝來的裝置不僅可做熔化試驗，還能使孵卵器維持一定溫度。他這個調溫器的操作似乎相當良好，使許多倫敦皇家學會的會員，包括波義耳（Robert Boyle），列恩（Christopher Wren），與晚一輩的虎克（Robert Hooke），都對它感到興趣。以後的幾個世紀，類似的爐子經常都有報導，在德、法與美國製成，都可以明顯看得出來，曾受到德爾貝來設計的影響。法國自然哲學家，也是發明家的列歐穆（Rene-Antoine de Reaumur），說明這種爐子可供人工孵化小雞。

此後有兩個世紀，除了這些零散的報導外，德爾貝來經由回授調節溫度的想法並沒有引起多大的注意。後來這觀念突然激起全工程界的興趣，這要歸功於一位巴黎的發明家龐尼曼（Bonnemain）。1783年，龐尼曼可能是從列歐穆用人工孵卵器成功的孵出小雞，得到了靈感，自己就設計了一個，也取得了法國的專利。他接著很有成效的，把這個自動調溫孵卵器用在一所大農場上，供應小雞給皇室及巴黎的市場。龐尼曼的發明比稍早的溫度調節器更靈光得多；它有靈敏的溫度感覺器，是用二種金屬製成（一根鐵棒裝在一個鉛管中），還有一些設計上的巧妙地方（圖八）。他一直都不願把這個裝置的詳細內容向世人公開。最後到了1824年，法國學會（French Society）為了獎勵發展國家工業，勸他把溫度調節器的詳細說明出版。英國和德國的主要技術雜誌都很快的推出翻譯本，也立刻在百科全書上佔了一席之地。1839年，英國化學家尤爾（Andrew Ure）在他所編的工藝、製造品與礦物辭典中，為解說龐尼曼的和一些他自己所設計的調溫器，而撰了一個新名詞——恆溫器（thermostat）。

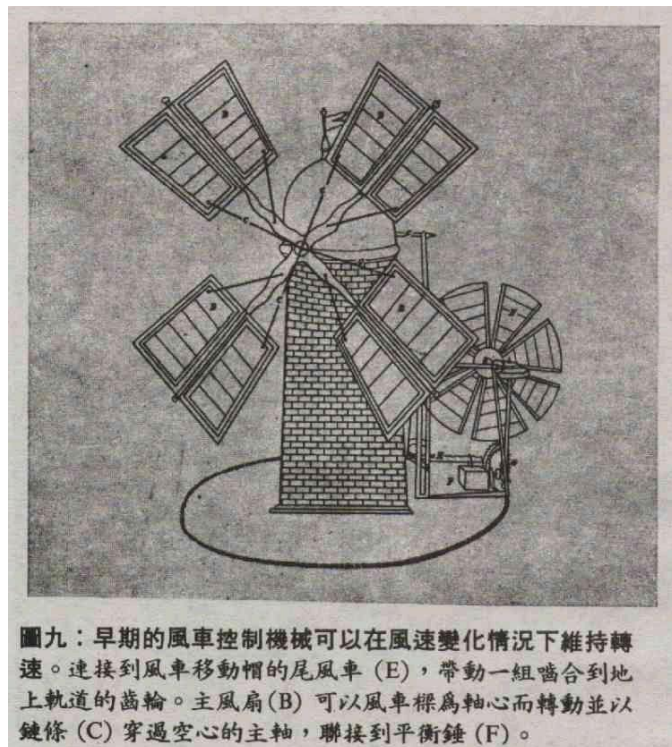


圖八：已改進的恆溫器。主要部分為溫度感覺器，由一根鐵棒（x）外包鉛管（z）製成，伸進要加熱的水裏。當熱度加高，鉛管膨脹時，其上端即操縱調節氣所（s）。標定所需溫度由刻度盤（h）完成。

回授機械的第三個歷史線索，要從自動控制風車器械的發明說起。這些器械都是十八世紀英國的風車匠設計出來的；他們是精明能幹的一群，結合了各種工

藝技術，並具有基本的科學態度。十八世紀到十九世紀，許多著名的英國機械工程師，都是從風車匠起家的。

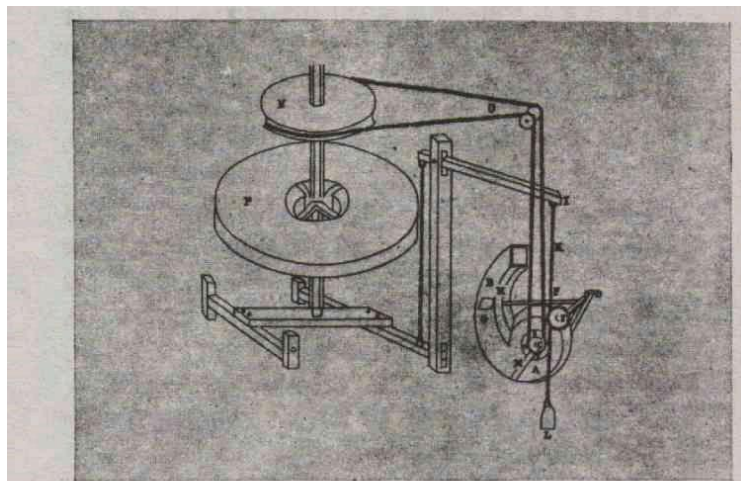
第一個風車匠設計的回授器械，由愛德孟·李（Edmund Lee）在 1745 年取得專利。他是利用一個尾風車（fantail）使風車能一直正對著風面（圖九）。尾風車是一架小型的風車，朝向和主風車對的方向互成直角，它接在風車塔移動帽的後面，並經由一組齒輪控制移動帽的旋轉，移動帽再帶動主風車對準風向。當主風車正對著風時，尾風車因與風平行，而不能轉動。風向一有變動，尾風車受到了風，就旋轉起來，並慢慢的推動移動帽；同時尾風車也跟著在遷移位置，直到它與風平行而主風車向著風為止。簡單的說，整個系統成了一個封閉環路。在實際情況下，風向不停的在變，尾風車就可視為一個簡陋的伺服系統（servo-system）。



李氏的風車還有一項發明，就是隨著風速的變化，來調節磨粉機的轉速，目的在防止磨石過度磨損，以及磨出的粉細度不均勻。他對付這個問題的辦法是：使風車帆葉能以支持它的軸臂為軸心而轉動，帆葉又以鏈索聯接到一只平衡錘。風速中庸時，最先著風的帆葉緣是向前傾斜；當飛速過大時，帆葉上所受的風力大於平衡錘的重力，帆葉就被吹得向後翻，風車的轉速就受到抑制。

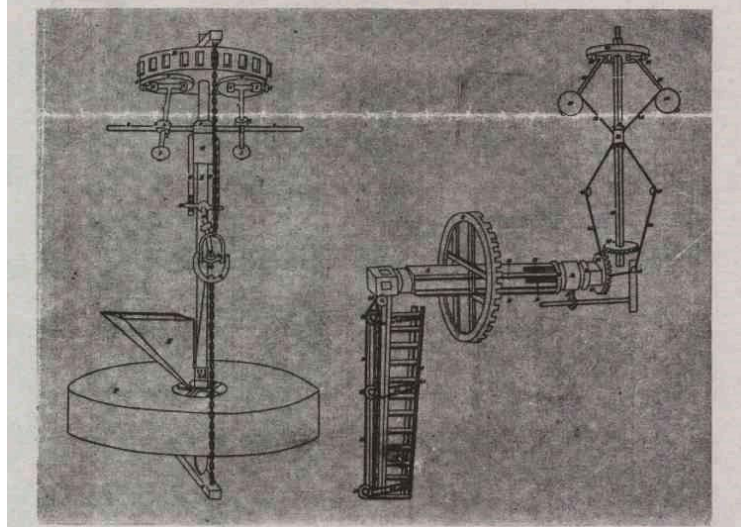
這套系統還不能算是回授控制，因它並沒有設法把受控變數——速率的變化，很準確的察覺出來。為了對風車的速度做真正的回授控制，必須找到相當靈敏的方法，來測量速率。

一種叫做「升降張力器」(lift-tenter)的機械裝置正符合了這項要求，這是英國風車匠希爾頓(Robert Hilton)在1785年發明的。當轉速增加時，磨石有要分開的趨勢，這裝置就產生一和轉速成比例的抗拒力量，把磨石壓緊(圖十)。1787年，英國風車匠，也是發明家的麥德(Thomas Mead)，把升降張力器的觀念與離心擺(centrifugal pendulum)的原理給合起來，製成一具速度控制系統，把回授的原理表現得淋漓盡致。旋轉的擺可以很靈敏的感覺到磨石的轉速，並經由適當的機械連接，來調整風車帆葉的受風面積，使風車的轉速保持一定(圖十一)。



圖十：升降張力器能抑制在轉速增加時磨石分開的趨勢。動磨石(P)隨風車速度的增加而降低。速度的測度，可由離心扇(A)排風護罩中阻尼物(B)的位移達成。

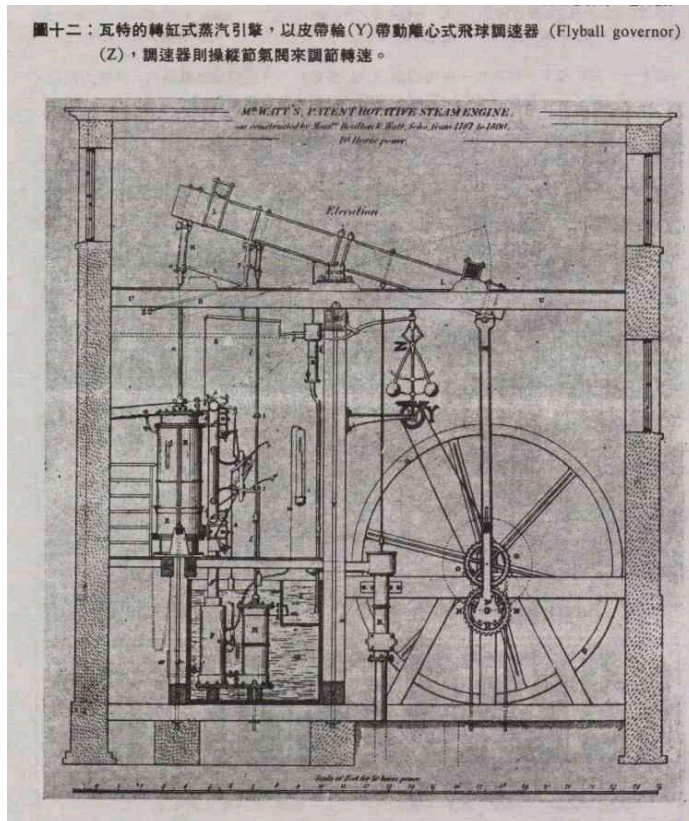
圖十一：左：風車的轉速由一組離心擺(上端)感覺到，並進而牽動風車的升降張力機組。右：另一組離心擺(上)可減少扇葉(下)的面積來調節轉速。



離心擺的觀念立刻受到蒸汽引擎先進們的衷心歡迎，蒸汽引擎那時還是剛萌芽的新技術。瓦特(James Watt)與他的同夥波爾頓(Matthew Boulton)，

正要建一座大型工廠，採用新式的轉缸引擎（rotary engine）。這種連續動作的引擎，它的速度調節系統，需要做全新的設計，因為當時已有的裝置都不適用。1788年11月，瓦特和他的同事設計出一套「離心式速度調節器」。年底左右，第一個調速器（governor）就裝上了引擎。瓦特的調速器成了整個技術史上，最為人熟悉的圖形（圖十二）。在發明後的幾年裏，它簡直成了蒸汽引擎的招牌，在每架蒸汽機的頂端神氣活現的旋轉著，更廣泛而有力的說明了回授控制的作用。調速器也立刻給請進了教科書與工程手冊，發明家也開始在別的技术領域，發展回授裝置。

圖十二：瓦特的轉缸式蒸汽引擎，以皮帶輪(Y)帶動離心式飛球調速器 (Flyball governor) (Z)，調速器則操縱節氣閥來調節轉速。



令人奇怪的是，這些隨著工業革命的發生而問世的回授裝置，都是在英國發明出來的。即使這些發明家並不是英國人，像著名的德爾貝來和巴平（Denis Papin）（法國人，曾發明安全閥，一種不甚完整的回授裝置），但是在英國工作時，就推出了發明。為什麼歐陸地區這樣落後呢？舉例來說，浮閥在希羅的氣力論翻譯本中，就有記載，這書在1575年刊行時，流傳得很廣，但歐陸的工程師與發明家卻忽略了。一直等到兩世紀後，這個裝置又在英國給發明出來時，才認真的加以研究，這是什麼原因呢？

對這個問題有個解釋似乎有理，說是在十六世紀到十八世紀這段時期，歐陸思想之所以排斥回授控制，是因為一個：以預先嚴格規定的計劃來進行控制的控制觀念，早已先入為主了。在工藝方面，這個觀念也有無數的發明物來支持，

如自動機、鐘錶、音樂匣和計時機械驅動的太陽系儀等。這種對既定計劃的迷戀，也反映在歐陸人那時所盛行對政府的看法上(專制政體 absolute government)，和經濟制度上(重商主義 merchantilism)。然而在英國，科學家、發明家與哲學家，早在十八世紀就開始有一個不同的控制觀念，所形成的系統是真正自動的，包括能維持平衡與活動狀態的固有機械裝置。在工藝學上，這種思想導致了回授裝置的產生；在經濟學上，它啟發了亞當史密斯的自由市場理論；在政治科學上，它建立了權力的區分與立憲的政體。

(譯自 Scientific American Oct. 1970)

(譯者通訊處：左營勵志新村二巷九號)

原作者簡介

原作者 Otto Mayr 是美國 National Museum of History and Technology of the Smithsonian Institution 機械工程方面的主持人。

引用自 科學月刊 1973 年 10 月第 46 期 [回授控制溯源](#)