

國家科學叢書

控制系統工程

I. J. Nagrath

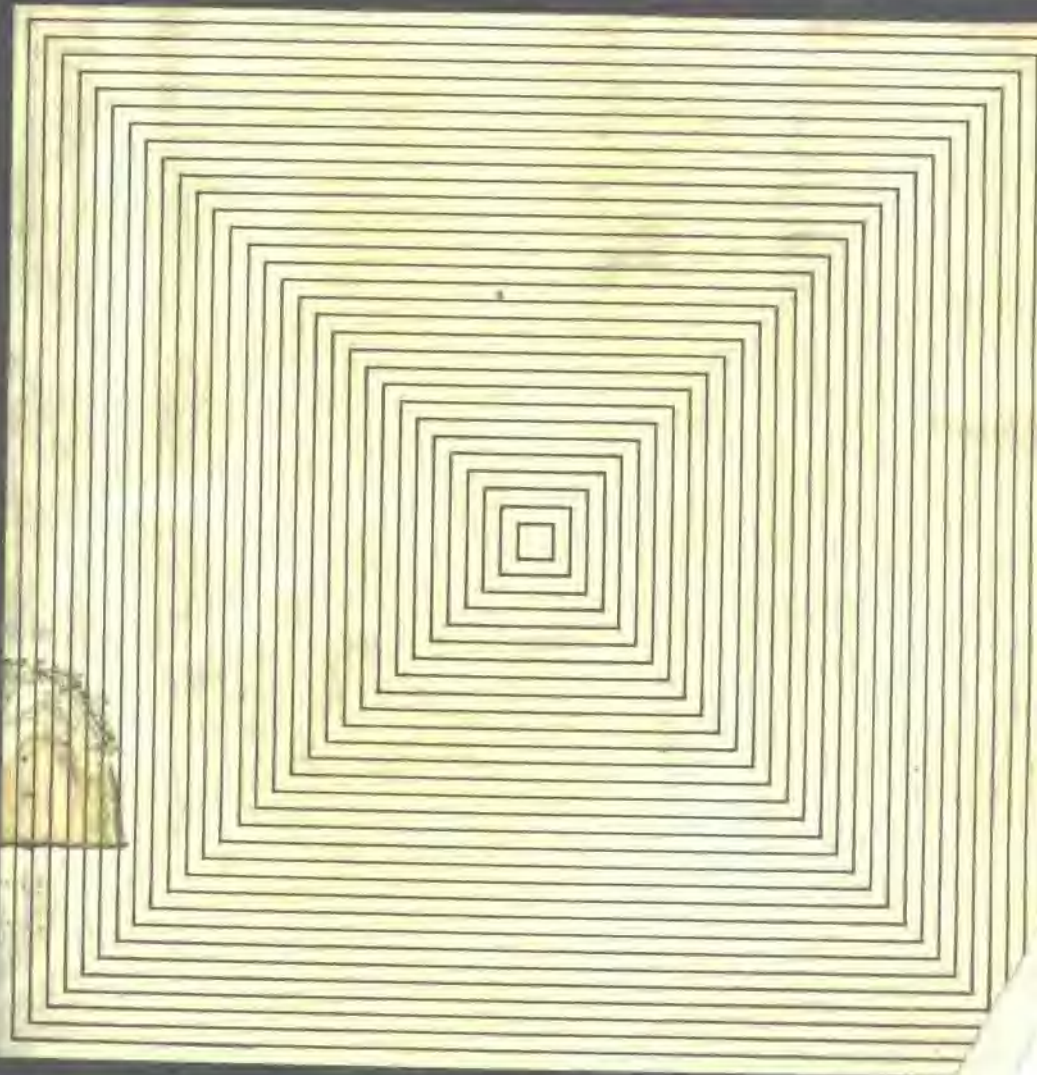
M. Gopal

著

劉文超

許渭州

譯



CONTROL SYSTEMS
ENGINEERING

控制系統工程

原著者：I. J. Nagrath
 M. Gopal
譯者：劉文超
 許渭州

國家書店有限公司印行

有著作權
不准翻印

控制系統工程

定價：新台幣貳佰捌拾元整

原著者：I. J. Nagrath
 M. Gopal

譯者：劉文超·許渭州

總策劃：林洋慈

發行者：國家出版社

總經理：國家書店有限公司

郵撥：一〇四八〇一帳戶

公司：台北市新生南路一段126之8號三樓

電話：3912425·3914261·3942824

 3926748·3917918·3926749

印刷所：建昇印刷廠

中華民國七十一年九月初版

行政院新聞局局版台業字第零陸叁貳號

譯者序

「控制工程」為大專院校電機、控制等系科之重要課程，學分與時數均佔相當比重。近年來由於工程科學的發達使得控制理論、技術的發展與應用益形突飛猛晉。目前市面上有關控制方面的專書雖然甚多，但多有所偏重，難使一個初學者對控制理論有通盤的認識。

本書內容包括物理系統的數學模式、反饋特性、時間響應分析、穩定度觀念、根軌跡技術、頻率響應分析、頻域中之穩定度、補償技術、態變數分析及非綫性系統等，舉凡與控制系統有關之重要觀念與技術皆已涉獵。且本書內容的安排，有條不紊，由淺入深，而且每章之後均附有習題，可供讀者熟練各項定理、技巧的應用。

筆者在大學時代修習「控制系統工程」時就曾深深感覺到國內實缺乏一本簡易、明確之入門書。經多方搜尋之後終於找到一本理想的控制專書，亦即 I. J. Nagrath 及 M. Gopal 所合著之「控制系統工程」。今將其譯成中文，除可供讀者自習研讀外，更可用來應付如高考、特考等重要之考試。

本書編印過程雖力求嚴謹，但疏漏之處仍在所難免，尚祈讀者不吝賜教指正。

劉文超·許渭州

謹誌於成大電研所博士班

民國七十一年八月

原著序

本書的目的在提供大學工科學生對於連續線性和非線性控制系統有一個整體的處理。其重點在以各種不同工程上的訓練為例，來闡述基本系統的概念。我們儘量使現代法順沿古典法而經由一自然程序使得現代與古典法趨於統一。其中更強調其相互關係並注重它們各自的優點。

平常教大學控制系統時會發覺需要一本關於控制系統分析和設計，而能經由各種包括五金類的實際系統以灌輸學生確切概念的書。為滿足此種需要，本書特別注重前面的部分。此外為加強此一部分，第四章中涵蓋了電力、水力及氣體元件的控制系統，以使教師在教大學控制系統時毋須再參考其他書籍的控制部分。

在第三章前言中對於如何將反饋觀念與靈敏度結合以解決“為何要反饋”的問題亦費了相當的功夫。這些觀念隨後在探討根軌跡技術的第七章以根靈敏度的形式加以討論。

穩定度的觀念是以有界之擾動力其響應附合於特性方程之根在 S —平面的位置來介紹。介紹完穩定度觀念（第六章）後，隨後立即討論其在時域中的解，亦即陸斯（Routh）穩定度準則。而其頻域解將在第九章中適時提出。穩定度更廣泛的一般解主要將在非淺性系統的最後一章中求出。然後各種不同穩定度求法將以它們各自的設計應用觀點詳加比較。

本書亦將強調控制系統的設計方向。古典及現代設計觀念早在時域及頻域分析的章節中介紹過。這些觀念本已有充分敘述，且時域和頻域設計的相互關係是以二階系統作詳盡的處理，此乃因其發生頻繁和由於大多數的高階系統實際上都可以二階系統作為近似。然後第十章中討論補償技術理論上更複雜系統的設計。最後更有用的古典設計（包括串接和反饋）方

法是以幾個例題來敘述。

第十一章對於態變數分析和設計有更詳盡、更佳的連結。本章首先介紹矩陣元素觀念進而處理公式、對角化、解、可控制性、可觀察性和穩定度的問題，最佳控制和態變數反饋設計中的元素概念用來闡述態變數這種工具的好處。本章的目的事實上是在使讀者對於現代控制理論有更進一步的研究。

十二章使大學生了解非線性系統的奧妙，旨在使讀者注意線性模型的限制。

本書在適當地地方皆穿插了例題。選擇這些例題的著眼點除了闡述相關的觀念外，它們亦用來幫助讀者到達更高的應用境界。而在必要時利用同樣的方法加以提示而不解答方式。問題的解答給予讀者莫大的信心鼓舞。

本書事前已假定讀者對於某些基本工具如複變數、拉氏轉換和元素矩陣代數已稍具基礎。但對於包括部分分數展開、代數方程求根以及矩陣代數的介紹均在附錄有所補充。

本書旨在成爲大學工程課程不可或缺的控制系統課程。這些教材已以目前形式出現於正式課程中。本書中各章的順序和結構，在使學生預先訓練和能有彈性適應課程中的變化。

在此首先要感謝威斯康辛大學的壽金斯教授 (T.J.Higgins) 讓我們選用其課程筆記中關於穩定度 (第六章) 的觀念中某些教材。另外作者那格拉斯亦感謝海金斯教授介紹作者於威斯康辛求學時接受控制系統的訓練。

對於紐約的邁克一希爾公司允許我們選用由林取 (Linch) 和儲克梭 (Truxal) (1962) 所著的 " 系統分析入門 (Introductory System Analysis) " ，亦不勝感激所選用的教材如問題 3.8 的形成。

另外要銘謝彼拉尼 (Pijan) 的柏拉技術科學院暨宅伯 (Jaipur) 的馬拉維亞地方工程學院的權威們提供本書必要的協助。

那格拉斯 (I. J. Nagrath)

格 柏 (M. Gopal)

1975 年 8 月

目 錄

第一章 前 言	1
1-1 控制系統	1
1-2 伺服機械	5
1-3 自動控制的發展歷史	6
1-4 多變數控制系統	10
1-5 非工程領域的控制理論應用	11
第二章 物理系統的數學模式	
2-1 前言	13
2-2 物理系統的微分方程式	15
2-3 轉移函數	31
2-4 方塊圖算術	42
2-5 信號流程圖	50
第三章 控制系統的反饋特性	
3-1 反饋與無反饋系統	67
3-2 利用反饋以減少參數變化	68
3-3 利用反饋控制系統的動態	71
3-4 利用反饋以控制擾動信號的效應	73
3-5 再生反饋	80
第四章 控制系統與成份	

4-1	前言	91
4-2	非線性系統的線性近似	92
4-3	電氣系統	93
4-4	水利系統	109
4-5	氣體系統	123

第五章 時間響應分析，設計要求與性能指標

5-1	前言	135
5-2	標準測試信號	136
5-3	一階系統的時間響應	138
5-4	二階系統的時間響應	142
5-5	穩態誤差及誤差常數	154
5-6	二階系統的設計要求	159
5-7	較高階系統的設計考慮	165
5-8	性能指數	167
5-9	圖解的例子	170

第六章 穩定度觀念與代數標準

6-1	穩定度觀念	187
6-2	穩定度的必要條件	192
6-3	福偉志穩定準則	194
6-4	路斯穩定準則	196
6-5	相關穩定分析	203

第七章 根軌跡技術

7-1	前言	207
7-2	根軌跡觀念	208

7-3	根軌跡的建立	212
7-4	根輪廓	238
7-5	系統之傳輸落後	244
7-6	特性方程式根的靈敏度	246

第八章 頻率響應分析

8-1	前言	259
8-2	時間和頻率響應的相互關係	260
8-3	極化圖	267
8-4	波德圖	271
8-5	全通和最小相位系統	285
8-6	轉移函數的實驗決定	288
8-7	Log一大小值對相位圖形	292

第九章 頻域中之穩定度

9-1	前言	297
9-2	數學上的前導	297
9-3	奈奎斯特穩定準則	301
9-4	利用奈奎斯特準則其相對穩定度的評估	312
9-5	閉迴路頻率響應	326

第十章 補償技術

10-1	前言	349
10-2	設計前的考慮事項	351
10-3	基本補償器的實現	358
10-4	時域中之串接補償	366
10-5	頻域中之串接補償	386

10-6	反饋補償	404
第十一章 態變數分析及設計		
11-1	前言	419
11-2	狀態、態度數和態模型的觀念	420
11-3	由轉移函數及反轉移函數之態模型導數	431
11-4	對角化	440
11-5	態方程之解	448
11-6	可控制性和可觀察性的觀念	459
11-7	反饋控制系統對操作指數之設計	467
11-8	以態變數反饋對閉迴路響應來設計控制系統	478
第十二章 非線性系統		
12-1	前言	493
12-2	一般物理的非線性特性	498
12-3	相位—平面法：基本概念	504
12-4	奇異點	507
12-5	相位軌跡之建立	520
12-6	以相位平面法來做系統分析	534
12-7	描述函數法：基本概念	539
12-8	描述函數的導出	541
12-9	以描述函數法來分析穩定度	550
附錄 I	拉氏轉換	567
附錄 II	矩陣代數簡介	575
附錄 III	代數方程式根的決定	583
附錄 IV	習題解答	589
索引		

第一章

前言

INTRODUCTION

1-1 控制系統 (The control system)

所謂控制系統乃是能按照所須要的方式來維持或改變機械裝置或其他設備內的每一個量。舉例而言，汽車的驅動系統，其速度是加速器位置的函數；只要控制好施於加速器上的壓力就能維持所須要的速度（或改變所須要的速度）。汽車的驅動系統（油門，汽化器和引擎裝置）就是控制系統。圖 1.1 所示就是一般的控制系統。對汽車的驅動系統而言，輸入（命令信號）是施於加速器踏板上的力，而汽車的速度就是輸出（被控制）變數。

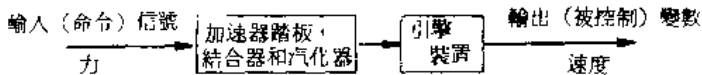


圖 1.1 基本控制系統

閉迴路控制 (Closed-Loop Control)

我們再考慮一次汽車的驅動系統，汽車的轉動，速度和加速度是由以下因素來決定的：駕駛員、交通路況和加速器、離合器、齒輪槓桿、剎車器、輪胎等裝置的適當操作。假設駕駛員希望維持每小時 50 公里的速度，他可借助於加速器使汽車加速到這個速度，然後使加速器保持穩定，只要一路上沒有其他變化出現，汽車的速度就會維持不變。而汽車的實際速度將由速率計測出，並且呈現於指示盤上，駕駛員可由指示盤上的讀數來

2 控制系統工程

和自已所想要的速度互相比較。假如和預期的速度不相同時，駕駛員即可決定增加或減速度，此項決定就是透過他的腳施壓力於加速器踏板上來達成。

這些操作可由圖 1.2 表示出來。和圖 1.1 的程序相比較可知圖 1.2 之程序為閉迴路；亦即輸出的瞬間信號反饋到輸入，而且用來修改輸入信號，使之完成所須要的輸出信號。這就是為什麼圖 1.1 稱為開迴路系統而圖 1.2 卻稱為閉迴路系統。

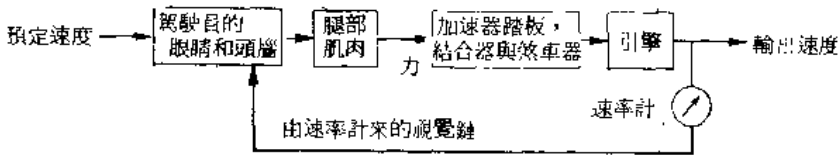


圖 1.2. 人工控制的閉迴路系統圖

在圖 1.2 所表示的系統型態中包含了操作員的連續控制，他們就是所謂的人工控制系統。在許多複雜及快速動作的系統中，控制迴路並不希望出現人為的因素，因為系統的響應可能快至操作員無法跟隨，或者操作員的技巧可能沒有那麼好，況且，有些系統，例如飛彈發射系統是自動破壞的，所以一定要排除人為的因素。縱使在某些可能使用人工控制的情況下，有時為了經濟上的考慮，也是儘量減少人為的管理。對於多數使用一些相同工作能力的設備，雇用人力是較為合適的。和上述設備相結合的系統就是所謂的自動控制系統。事實上，對多數情況而言，自動控制的工作能力要比人工強，而且它能完成一些人力所無法達到的事情。

一般自動控制系統的方塊圖如圖 1.3 所示，一個錯誤檢測器將一個得自反饋單元而且是輸出響應函數的信號和參考輸入信號相比較。此二信號間任何的差異都將會產生一個錯誤或正確的信號驅使控制單元工作。控制

單元於是將改變裝置（控制組織）的情況，以減少原來的錯誤。

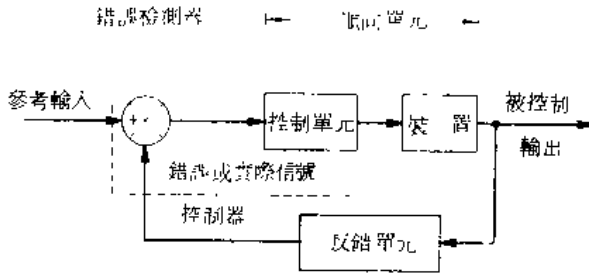


圖 1.3. 自動控制系統的一般方塊圖

爲了對控制系統間各組織的相互作用有更深的了解，我們將討論如圖 1.4 所示的簡單速度控制系統。在此系統中，直流馬達和負載被當成裝置（plant），它的軸心速度是被控制的。輸出是由同軸發電機（反饋單元）測量而得。它供應一個和軸心速度 w_0 成正比的電壓 $v_b = (K_t w_0)$ 。此電壓和相對於所要的速度 ω_d 的參考電壓 v_r 相比較。此項電壓的誤差（錯誤信號）經放大後用來改變場電流以便減少錯誤信號。

對於一明顯的座標系統的操作，如我們假設一穩定的速度 1000 轉/分是由於 $v_r = 100$ 伏特及 $K_t = 0.01$ 伏特/每分轉 所完成，則 $v_b = v_r - v_b = 90$ 伏特。如果有一擾動出現（例如負載減少）會引起速度增加， v_b 增加而且 v_r 減少，因而使 i_a 減少。這項馬達轉矩減少的結果將促使在新的穩定狀況下的速度更接近原來的速度（所須要者）。上述反饋工作可減少實際速度與所要速度間的誤差。

開迴路控制（Open-loop Control）

如前所述，任何不能自動校正其輸出變化的物理系統就稱爲開迴路系統。此系統就如圖 1.5. 的方塊圖所示。在這些系統中，如果外加條件維持不變時，對於固定的輸入，其輸出亦將維持固定。輸出可借適當的調整

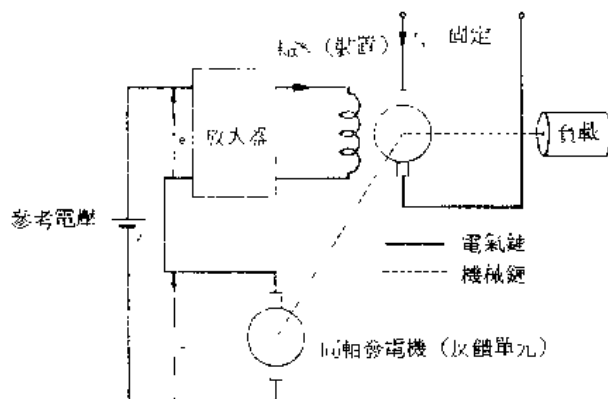


圖 1.4. 閉迴路速率控制系統

輸入信號而達到所須要的值，但是如果改變外在條件或系統內部的參數時，將會引起輸出變化，而與所須要的值不同。因此，開迴路系統只適用於變化能被容忍或者系統本身能限制參數變化且外在條件能被良好的控制下的情況。

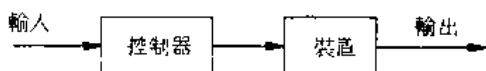


圖 1.5. 開迴路系統的一般方塊圖

開迴路系統與閉迴路系統最重要的差別就在於反饋的工作。如考慮一個交通系統，要調節十字路口的交通流量，若紅綠燈裝在計時器上，且預先決定好閃亮間隔的時間，則此系統可稱為開迴路系統。很明顯的，此項裝置並沒有考慮到十字路口上往兩個不同方向的交通流量變化率。如果採用另一種方法，考慮兩個不同方向的交通流量速率，並且加以比較，用其差額來控制紅綠燈閃亮間隔的時間，就可完成一閉迴路系統（反饋控制）

。反饋的概念在交通控制上有很大的用處。

不幸的，反饋對多數控制系統而言是最基本的原理，其中會牽涉到振盪的機率，有關反饋原理的詳細討論與互有牽連的穩定度問題將在本書稍多加以處理。

1-2 伺服機械 (Servomechanisms)

近代有用的項目如伺服機械或伺服 (servo) 是限制於反饋控制系統之中，它的控制變數是機械位移，或位移的時間導數，即速度或加速度。

如圖 1.6 . 所示為一個伺服系統用來置定負載軸心，它的負載是由驅動馬達透過齒輪而帶動。它的輸出 (控制) 和需要 (參考) 位移分別為 θ_c 和 θ_R ，經一對儀表測量並比較後輸出一和角位移誤差 $\theta_E = \theta_R - \theta_c$ 成比例的電壓 v_E 。此電壓 $v_E = K_P \theta_E$ 被放大並用來控制供應驅動馬達電樞電壓的直流發電機的場電流。

為了瞭解此系統的操作，假設 $K_P = 100$ 伏特 / 徑且輸出的軸心位移是 0.5 徑。相對於此條件下，滑臂 B 的電壓為 50 伏特，如滑臂 A 也保持 50 伏特，則實際信號為零 ($v_E = 0$)，且馬達的輸出轉矩為零，於是負載將保持在 0.5 徑的位置。

假如所須要的新位置是 0.6 徑，為了如此，滑臂 A 將轉放到 60 伏特的位置，而滑臂 B 仍保持為 + 50 伏特。因而將會產生 + 10 伏特的實際信號，此信號經放大後送到伺服馬達而產生一輸出轉矩以重定負載的位移。惟有在實際信號變成零時，系統才會趨向靜止狀態，亦即滑臂 B 和負載達到了相當於 0.6 徑的位置 (+ 60 伏特的位置)。

位移控制系統有相當多的應用，如機器工具位移控制，紙張磨平轉筒的定拉力控制，熱轉筒磨平的金屬片厚度的控制，雷達追蹤系統，發射引導系統，慣性導引，船隻的轉動穩定性等。本書將討論其中一些應用。

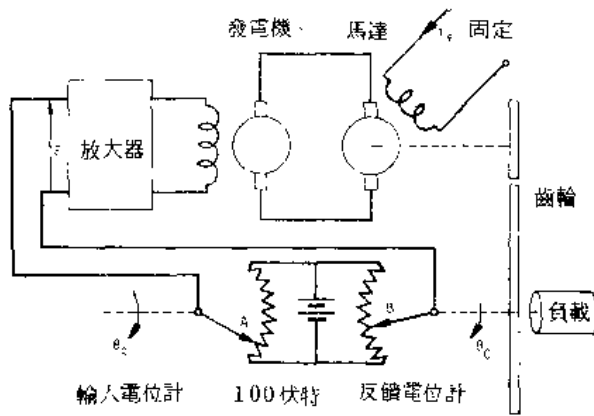


圖 1.6. 位移控制系統

1-3 自動控制的發展歷史 (Historical Development of Automatic Control)

研究自動控制的主要發展歷史是極有用處的。自動控制系統一直到十八世紀中期才出現，第一個控制系統是詹姆士瓦特於 1770 年所發明的飛球調速機，用來控制蒸汽引擎的速度。此裝置經常用於探索方面，大約一百年後，馬克思威爾分析飛球調速器的動態。

如圖 1.7. 所示為一使用飛球調速機的速度控制系統，調速機直接用齒輪和輸出軸心結合在一起，所以飛球的速度和引擎的輸出速度成正比。節流閥的槓桿用來置定所須要的速度。如圖 1.7. 之槓桿軸能將離心力由飛球傳送到下方彈簧座的底部。在穩定情況時，飛球的離心力與彈簧的力達成平衡，並且打開流量控制閥至剛好維持引擎速度到所須要值的程度。

假如引擎速度比預定值小時，飛球的離心力就會減少，作用於彈簧的結果促使 X 向下移動。透過槓桿工作，此項結果將使控制閥打得更開，而使引擎的速度增加直到平衡達到為止。假如速度增加時，將會產生相反的

【註1】作用。

引擎速度的改變可由裝置節流閥槓桿來完成，如要得到較高速度時，節流閥槓桿向上移動促使 X 下降而將控制閥打得更開，使速度增加。如要得到較低速度，可用相反的动作。

重量物體如船隻、槍砲等位移的重要性在第一次世界大戰中很快就被明瞭與熟悉。在1920年以前，米諾斯基（Minorsky）就能在船上用自動掌舵系統來作一般的事務，並將槍砲裝置於船上。

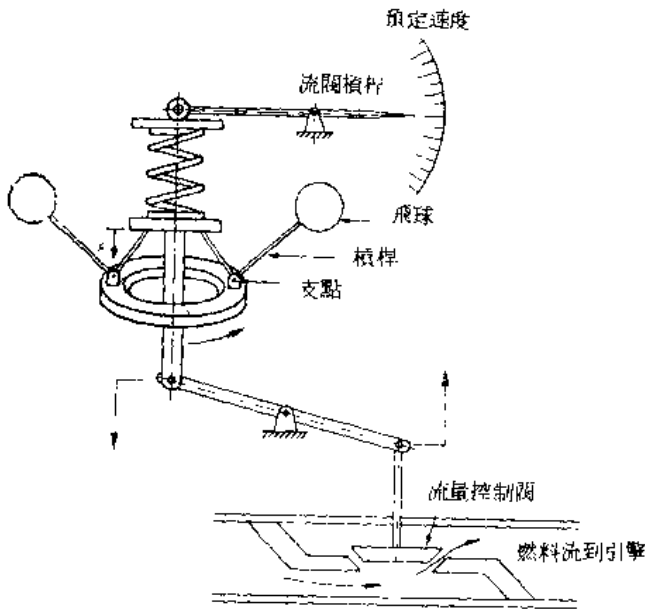


圖 1.7. 速度控制系統

自動控制的明顯期是赫任（Hazen's）在1934年的工作。他的工作可能是第一次努力一些有關伺服機械的普通理論，“伺服”這個字就是由他所創始。

【註1】：和離心力比起來，重力通常可以忽略