

第一章 緒論

本論文提出一個“可調整擺錘”之倒單擺追蹤系統的研究，並以系統數學模型的分析與模擬為導向，從而對其平衡定位控制器和追蹤控制控制器的設計，提出可行的方法。本論文所採用的控制法則，為極點配置法和自適應網路模糊推論系統(ANFIS)方法，各別用於系統的平衡定位控制與平衡追蹤控制的模擬，其結果為可行，但仍有相當大的改善空間。希望由於本研究，可進而推廣在其它特殊型式之倒單擺平衡控制系統，做出可行的研究。

本論文之組織架構，第一章敘述了本研究的動機，方法與限制；第二章將介紹相關研究文獻、模糊控制、及自適應網路模糊推論系統(ANFIS)控制之理論；第三章推導出可調整擺錘之倒單擺系統的數學模型及其控制器的設計，其中包含狀態回授的平衡定位控制的模擬，及自適應網路模糊推論系統的平衡追蹤控制的模擬；第四章則是模擬步驟與結果；第五章為結論與後續研究的建議。

1-1 研究背景與動機

“可調整擺錘”之倒單擺平衡定位與追蹤系統控制器的設計研究。控制目標包含擺杆(Inverted Pendulum Bar)擺角的平衡控制，及其擺錘質心在滑車(Cart)直線運動方向投影點之追蹤控制。其中在擺杆上的擺錘，可事先指定質量的大小，並可調整至不同高度位置做定位，使之產生各種不同狀態之慣性矩的合成倒單擺。再依此各種不同狀態的合成倒單擺，設計出控制器對其產生穩定的定位和追蹤的效果，並分析控制器的參數、在不同擺錘狀態下倒單擺在平衡定位及追蹤控制狀態下，彼此互相的影響。

倒單擺的平衡控制，可以想像是一個飛向太空的火箭，當火箭在升空

時，若火箭胴體的軸線與預定升空角度兩者間，可能因為大氣中不確定的擾動，所造成的平衡誤差，或者是因為火箭的氣動外型不對稱，火箭推進器的噴嘴出力不均勻，因而造成的側向推力，使得火箭在升空過程中搖擺不穩定。此現象就如同倒單擺平衡控制系統一般，在理想的狀態下，其控制行為為一個不穩定且非線性的回授控制系統。

如下圖 1-1 所示，即為一般論文所探討的倒單擺系統的示意圖，它是典型的非線性及不穩定受控系統，如果沒有適當的控制力作用在它上面，它隨時會有可能向左右任何方向傾倒。在這裡，只考慮滑車一維直線運動的問題，即擺杆和滑車只在圖 1-1 所在平面上運動。它包含了一輛可在有限長度的滑軌上做直線來回運動的滑車，及栓鎖在上面，可做左右擺動的倒單擺擺杆，其中 F 為推動滑車的驅動力， x 代表滑車的輸出位置， θ 為擺杆與鉛垂線的輸出夾角。

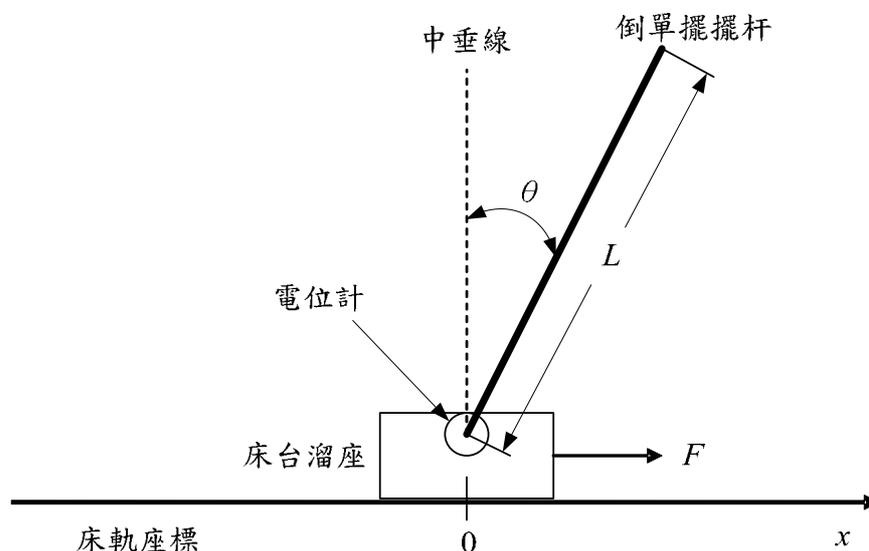


圖 1-1 倒單擺平衡控制系統(不含擺錘)之機構示意圖

在過去，有關於簡單的直線型運動倒單擺系統的文獻，大部份皆如上圖 1-1 所示的機構示意圖。其它也有一些文獻有述及類似型式的倒單擺平衡控

制系統，是採用在擺杆頂端，加上一個固定且不可調整的擺錘。但是在其動態方程式求解推導的過程中，多為簡化並忽略了細長形擺杆之慣性矩對整個倒單擺平衡控制系統之影響，因此所求得的系統動力微分方程式，是否可以精確符合真實倒單擺平衡控制系統之真實物理狀況，是值得深思探討？而且此類倒單擺系統的擺錘，是位於擺杆的最頂端位置且固定不可調整，因此也就沒有討論到，若擺錘的鎖附位置可以調整改變，因擺杆和擺錘所組成的合成慣性矩被改變了，其對平衡控制條件所產生的影響。這種狀況，可以類似於火箭升空時，由於推動引擎消耗燃料，則燃料質量的輸送和損耗，必造成火箭質量和質心的位置，在每個飛行時段不會保持在一定的狀態。因此火箭升空飛行時的質量和慣性矩必然不會處於恒定的狀態。在本論文中，並不準備對火箭這類巨大的航空器做出龐大的系統分析與數學模型的推導，但是希望借由此可調整擺錘之倒單擺系統的研究探討來分析，當擺錘狀態可做調整改變時，其控制器的設計和模擬，以此為基礎做為其它不同的被控制系統機構及其控制器設計的參考。

本論文所要研究的可調整擺錘之倒單擺系統，其系統機構示意圖如下圖 1-2 所示，由此可以看出擺錘在擺杆的鎖附定位位置。

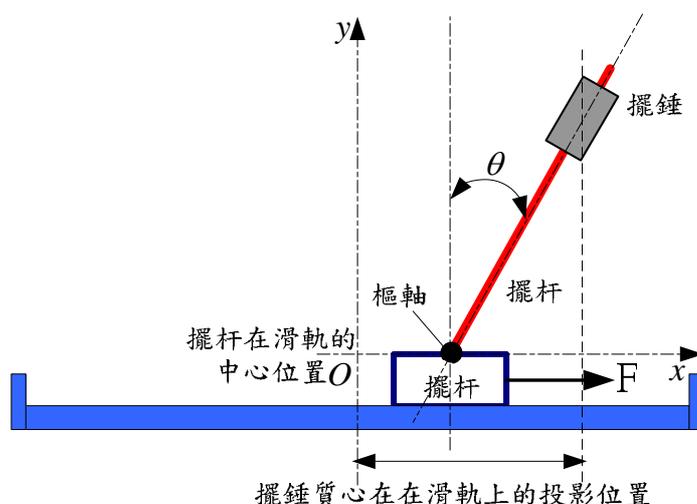


圖 1-2 可調整擺錘之倒單擺平衡控制系統機構示意圖

由上述的機構示意圖我們可以很清楚地看出，本論文所要研究之倒單擺系統的機構模型最主要的不同點，是在擺杆上安裝上一個可替換不同質量的擺錘，而且可以事先將其在擺杆上不同的高度上做定位。由於擺錘在不同質量和高度定位的搭配，使得擺杆和擺錘的合成質量與合成慣性矩會有不同的對應狀態。所以在數學模型的推導過程中，除了根據物理的運動力學和數學推導的方法，據以推求出不同的動力微分方程式，並且需將可調整擺錘的可調整參數納入數學模型的推導中。以求得具有可調整參數之被控系統的動力微分方程式，或是可調整為不同矩陣組態的空間狀態方程式(Space State Equation)。

關於控制器設計方面，在以往用古典控制理論設計控制器時，例如極點配置方法，須先找出受控系統的數學模型。因此控制器的性能與受控系統是否能被精確的描述有密切的關係。而且加上古典控制是利用轉移函數(Transfer Function)，求出系統控制器的增益值，進行單一輸入與單一輸出的系統平衡控制。不過，由於極點配置方法是對單一操作點做平衡定位控制，要做到平衡追蹤控制，可設計多個不同的操作點並直接對這些操作點進行輪替式的平衡控制，這也許是做出追蹤控制的不錯方法，但是考慮到對每一個操作點進行線性化、最佳化等運算，會造成大量的運算負擔，結果顯而易知這樣的控制器效率必定不大好。

所以關於平衡追蹤控制的設計方法，有必要想出其它可行的方式，而智慧型控制理論應是不錯的考慮方向。在智慧型控制理論中的模糊控制(Fuzzy Control)理論，是利用語意資訊，可以建立起如人類知識般有著許多優點的強健性、近似值理論和規則式演算法[1]，利用條件式語句，將人類的知識系經驗轉換成控制法則，因此依據模糊控制理論設計出來的控制器，具有較佳的強健性(Robustness)和容錯性(Fault Tolerance)，適合應用於非線性或不確定

的系統[2]，模糊邏輯可以仿照人類知識實現控制標的而不需牽扯到精深的數學推導[3-4]。這種控制方式可以不依賴於數學模型，僅依賴於人的經驗累積、感覺和邏輯判斷。由此得到啟發，將頭腦中的經驗加以綜合，把憑藉經驗所採取的相應措施總結成一條條控制規則，進而設計與構成一個控制系統去取代人對複雜的控制過程的掌控，這種控制就是所謂的模糊控制。

在實現智慧型控制的同時，為了精確的掌握系統響應特性。利用“學習”不斷地修正控制器參數和收斂控制與控制目標的誤差，是達到智慧型控制的第一步。“學習”可以透過系統判別的方式降低影響動態系統性能的不確定因素，因此增加系統的資訊可以更有效的控制受控系統[5]。智慧型控制理論中的類神經網路(Neuro Network)，則是模仿人腦的運作處理方式，使其具有分散、平行、快速、大量處理訊息的特性，利用類神經網路的學習功能，使其具有類似人類的學習功能，可應用於系統的辨識(Identification)和估測(Estimate)[6-8]。

結合自適應類神經學習網路和模糊推論系統[9]，使其互補成為所謂的自適應網路模糊推論系統(Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System，以下簡稱為 ANFIS)。ANFIS 包含了學習網路不受模式限定的學習能力，良好的歸納能力，和強大的非線性映射能力等優點，並可以根據模糊邏輯，依現有的語意知識對系統作初始化，以及從系統中，以萃取方式建構知識，具有補足類神經網路“黑盒子(Black Box)”缺點[10]的能力。本研究即是利用 ANFIS 之自適應學習之特性，透過系統的數學模型，基於人的經驗或是直覺而任意設定輸入—輸出狀態空間分割點的個數及位置，產生大量的輸入—輸出對資料，且對大量已知的輸入—輸出對資料，學習產生模糊控制規則。以期能建立一個使用控制規則和數學運算較少，並具有平衡追蹤控制功能的可調整擺錘之倒單擺追蹤系統。

在本論文，除了利用傳統回授控制理論的極點配置法(Pole Placement Method)，使倒單擺質心在滑車運動方向的投影點平衡在操作點的定點位置上，並可事先在如 MATLAB 等模擬軟體上先進行模擬驗證。也將利用非傳統的智慧型控制，如此之前所提到的 ANFIS 控制方式，進行倒單擺平衡追蹤控制的模擬，如弦波，方波及鋸齒波等軌跡運動的追蹤(Tracking)控制。期望藉由 ANFIS 的自適應學習和模糊推論控制能力，將不易以古典控制和現代控制的方法，以 ANFIS 去達到有效的操控，並驗證其控制能力。

有一點需要強調說明的是，此處所提出的可調整擺錘之倒單擺系統的追蹤控制模擬，所要量測和追蹤的對應分析質點是擺錘質心(均質擺錘，其質心和體心是同一點)在擺杆樞軸軸心在水平直線運動方向上的投影點。在此並不同於一般論文所提的倒單擺系，是著眼於滑車上某質點的定位控制與位移追蹤控制。

1-2 研究目的

基於上述研究背景與動機，本研究所欲達成的具體目的如下述幾點：

1. 推導建立可調整擺錘之倒單擺系統的數學模型，據以求得系統的動力微分方程式和空間狀態方程式。
2. 以傳統回授控制理論，利用極點配置法設計控制器，模擬出時域響應狀態圖。
3. 建立發展 ANFIS 所產生的模糊控制器，將其用於可調整擺錘之倒單擺平衡控制系統的追蹤控制，以解決複雜、高階及非線性之控制問題。
4. ANFIS 控制方法應用於倒單擺追蹤控制中，其被追蹤點可做簡

諧運動(Simple Harmonic Motion)、方波、鋸齒波等軌跡運動的追蹤(Tracking)控制。以做為未來應用在雙軸平面上做圓周運動追跡的研究基礎。

1-3 研究範圍與限制

本研究根據上述的研究背景與動機、研究目的，將研究範圍與限制界定如下：

1. 本研究所設計之 ANFIS 控制器為具有離線學習功能，利用對多點操作點之狀態空間所產生的輸入—輸出對資料，學習改變控制器之操作參數之系統架構，並據以產生模糊控制規則。
2. 本研究運用 ANFIS 所設計，用以產生模糊控制器之程式，為具有自適應學習和模糊推論的功能，其產生之模糊邏輯控制器(Fuzzy Logic Controller, FLC)，其輸入與輸出的歸屬函數採用 S 型曲線。
3. 本研究之模擬驗證部份，以可調整擺錘之倒單擺為模擬對像，以 Matlab 6.5 及 Simulink 進行所設計之控制器的模擬測試。
4. 本研究之可調整擺錘之倒單擺系統，其機構各元件設為均質材料，故所求各元件的質心與體心，可視為同一質點。

1-4 研究方法

為達成預定之研究目的，同時考量研究範圍與限制，本研究擬採用之研究方法分述如下：

1. 針對極點配置法、ANFIS 等相關文獻以敘述性方式進行探討，並分析其特性。
2. 對類似系統的數學模型推導之相關文獻以敘述性方式進行探討，並據以推導求出可調整擺錘之倒單擺系統的數學模型。
3. 以軟體模擬 ANFIS 對數學模型學習而產生的模糊控制規則的能力，以及各相關參數對學習收斂之影響，找出可供改進的地方。
4. 利用 ANFIS 產生的離線模糊控制器，以軟體進行模擬測試，觀察模擬結果以驗證其可行性的程度為何？以做為控制器參數調整之依據。
5. 設定各種波形訊號追蹤控制狀態，並以軟體模擬控制器之控制能力，以及各相關參數對於控制誤差收斂之影響。觀察模擬結果以驗證其可行性，以模擬結果作為控制器參數調整之依據。

1-5 研究步驟

本節針對本研究之研究步驟作一詳細說明，並將研究步驟繪製成流程圖，如圖 1-3 所示。

1. 確定研究目標。
2. 擬定研究計劃：依據研究目標，蒐集相關文獻、確定研究主題、訂定研究目的、擬定研究方法與研究步驟。
3. 理論分析與文獻探討：蒐集有關模糊控制器、類神經適應學習學習控制器及模糊類神經適應學習控制器之相關文獻，以作為本研究之理論基礎與控制器設計之參考。

4. 規劃系統架構：根據研究目標，規劃本研究之系統整體架構，並細分為可調整擺錘之倒單擺系統的設置與數學模型推導，控制器設計兩個部分。
5. 系統設置：說明可調整擺錘之倒單擺系統的機構設置，並根據物理學、工程力學中的動力學與靜力學的理论，對被控制機構對象進行數學模型的推導與建立。
6. 軟體模擬：以 Matlab 6.5 撰寫模擬程式，測試控制器之控制性能，並分析模擬結果，作為控制法則修改之依據。
7. 測試與記錄：對各種平衡控制狀態進行模擬，記錄並分析，驗證其控制的能力。
8. 歸納結論與建議：根據測試之結果，歸納研究心得並作出結論，並從結果中提出本研究之未來後續發展與建議。
9. 撰寫研究報告。

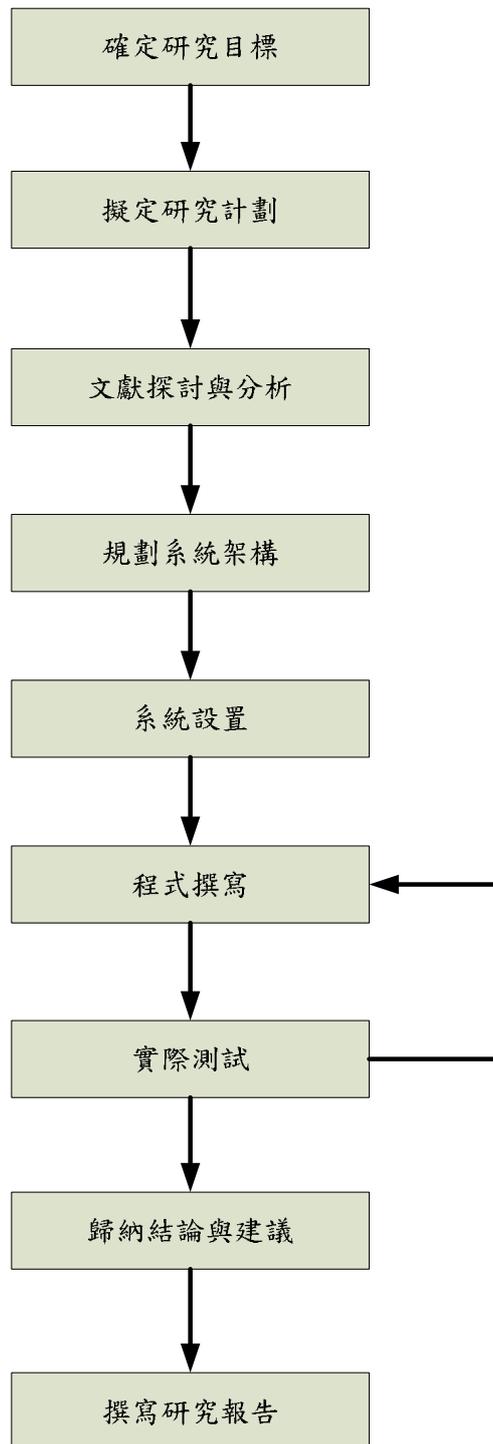


圖 1-3 研究步驟流程圖