

東 海 大 學

工業工程與經營資訊學系

碩士論文

軟性顯示器

可撓式製造之張力控制模型

研 究 生：黃浩峻

指 導 教 授：王偉華 教授

中 華 民 國 一〇一 年 六 月

# **A Tension Control Model for R2R Manufacturing Process**

By  
Hao-Jyun Huang

Advisor: Dr. Wei-Hua Wang

A Thesis  
Submitted to the Institute of Industrial Engineering and  
Enterprise Information at Tunghai University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science  
in  
Industrial Engineering and Enterprise Information

June 2012  
Taichung , Taiwan , Republic of China

# 可撓式製造之張力控制模型

學生：黃浩峻

指導教授：王偉華 博士

東海大學工業工程與經營資訊學系

## 摘 要

人類文明的發展過程中，對於過往知識的傳遞方法持續的進步，而顯示器正是目前不可或缺的傳遞方法。顯示器的演進，除了成功電子化、彩色化、平面化，接下來更朝向可攜性、大尺寸的方向前進。軟性顯示器因為具備可撓曲的特質，以及低耗能、閱讀舒適、環保等優點，故將成為新世代顯示器的代表之一。軟性顯示器因為基材不宜使用高溫、高壓等製程以及其具備可撓性的特質，故可採用具備連續生產優勢的捲撓式製程生產。縱然捲撓式製程有許多優點，但將其運用在需要高精密度的顯示器生產上，將面臨到軟板張力控制的關鍵問題。

基於捲撓式製程是具動態、受干擾、非線性的系統，PID 控制器的控制效果可能不佳，故本研究提出結合 Fuzzy 的 PID 控制器，以隨時調整 PID 控制器中的增益參數，提升控制效果。

**關鍵字詞：**軟性顯示器、捲撓式製程、PID 控制器、Fuzzy PID 控制器

# **A Tension Control Model for R2R Manufacturing Process**

Student: Hao-Jyun Huang

Advisor: Dr. Wei-Hua Wang

Department of Industrial Engineering and Enterprise Information  
Tunghai University

## **ABSTRACT**

Display interface is indispensable media for new information during the process of development of human civilization. The vision of display interface moves forward large and easy to carry, in addition to the other advantages such as electronic form, color picture and flat screen. Flexible display, one of the representative advance technologies, involve rollable, low power, and readable features. Flexible display substrate should not use high temperature, high pressure process, and with flexible characteristics, can be used with the continuous production advantage of Roll to Roll(R2R) Manufacturing Process. Even if the R2R Manufacturing Process has many advantages, but its use in monitor production requires high precision, and the key issues will face the to web tension control.

R2R Manufacturing Process is a dynamic, disturbed, non-linear systems, and the control effect of PID controller may be poor, this study will combination Fuzzy theory in PID controller to adjust the gain of the PID controller parameters at any time, and enhance the control effect.

**Keywords: Flexible Display, Roll to Roll, PID controller, Fuzzy PID controller**

## 誌謝

本碩士論文的首要誠摯的感謝指導教授王偉華老師的指導。這兩年的碩士生涯，偉華老師總是利用譬喻的方式為學生們說明許多事情，讓許多枯燥乏味的內容變得生活化，吸收起來總是容易許多。除了獲得老師在思考邏輯上的指導，偉華老師總以機會教育的方式，讓學生瞭解到自己平常沒注意到的生活禮儀以及待人處事的道理。一路走來，多謝有老師的叮嚀與指教，我的論文才能夠如期完成。另外，論文口試期間更感謝召集人蔡禎騰老師、口試委員董俊良老師的包容與指導，使得本論文能夠更完整而嚴謹。

研究所的生活與課程讓我擁有許多學習自我表達的機會。課程內容的多元性，除了充實自己的能量，更提升將來面臨不同領域時的應變能力。兩年下來多少有些低落期，但卻使自己在心態以及能力上有更成熟的想法。

感謝博班俊良學長以及昶昕學姐在研究上的幫助。世朋、俐菱以及宣佑這麼多年的陪伴，還有學弟妹光宇、軒豪以及雅涵的幫忙。最後特別感謝我的父母對我念研究所的支持，終於要離開當學生身分，這張證書希望能成為你們的驕傲。在此，謝謝許多關心我的家人、師長以及好朋友們。

黃浩峻 謹誌於

東海大學工業工程與經營資訊學系

中華民國一〇一年六月

# 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的以及貢獻.....	4
1.3 研究範圍.....	5
1.4 研究步驟.....	6
1.5 論文架構.....	6
第二章 文獻探討.....	8
2.1 軟性顯示器與電子紙.....	8
2.2 捲撓式製程.....	16
2.3 軟板傳輸動態方程式.....	17
2.3.1 張力方程式.....	17
2.3.2 滾輪半徑方程式.....	19
2.3.3 滾輪轉動慣量方程式.....	20
2.3.4 滾輪力矩方程式.....	20
2.4 傳統控制理論與模糊控制.....	22
2.4.1 PID 控制理論.....	23
2.4.2 模糊控制理論.....	26
2.4.3 T-S 型模糊控制理論.....	32
第三章 研究方法與工具.....	34

3.1	PID 控制器 .....	35
3.2	模糊控制器.....	37
3.2.1	變數之模糊歸屬函數 .....	39
3.2.2	模糊規則庫的建構 .....	42
3.3	績效衡量標準.....	45
第四章	模擬分析.....	46
4.1	捲撓式傳輸系統輸出響應情形 .....	47
4.1.1	定速滾輪的軟板張力響應 .....	47
4.1.2	固定馬達輸出力矩之軟板張力響應 .....	50
4.2	導入控制器之系統輸出響應情形 .....	51
4.2.1	傳統 PID 控制器 .....	51
4.2.2	模糊 PID 增益控制器 .....	55
第五章	結論與未來研究方向.....	60
5.1	結果與討論.....	60
5.2	未來研究方向.....	61
	參考文獻.....	62
附錄一	軟性顯示器的發展契機與市場 .....	65
附錄二	Pattern 製作技術與解析度 .....	68

## 圖目錄

圖 1.1	捲繞式製程設備的基本組成 .....	2
圖 1.2	捲繞傳輸系統變量.....	4
圖 1.3	研究步驟流程圖.....	6
圖 1.4	論文架構.....	7
圖 2.1	軟性顯示器分類圖.....	9
圖 2.2	E-Ink 顯示技術 .....	10
圖 2.3	Sipix 微杯顯示技術 .....	11
圖 2.4	電濕潤式顯示技術.....	12
圖 2.5	膽固醇式顯示技術.....	13
圖 2.6	R2R 製程程序 .....	16
圖 2.7	雙滾輪單間距傳輸.....	18
圖 2.8	收、放捲滾輪轉動方向與馬達力矩 .....	21
圖 2.9	系統架構圖.....	22
圖 2.10	PID 控制理論結構.....	24
圖 2.11	FLC 控制理論結構.....	28
圖 2.12	離散型、連續型歸屬函數型態 .....	29
圖 2.13	平行推論結構.....	31
圖 2.14	Mamdani 模糊推論結構.....	31
圖 3.1	模擬環境.....	34
圖 3.2	捲繞式傳輸系統.....	35
圖 3.3	PID 控制系統 .....	36
圖 3.4	控制響應狀態.....	37
圖 3.5	模糊控制 PID 結構圖 .....	38
圖 3.6	Fuzzy PID 控制系統 .....	39
圖 3.7	軟板張力誤差歸屬函數 .....	40



圖 3.8	誤差變化量歸屬函數 .....	40
圖 3.9	比例增益係數歸屬函數 .....	41
圖 3.10	積分增益係數歸屬函數 .....	41
圖 3.11	微分增益係數歸屬函數.....	41
圖 4.1	定速滾輪之軟板張力響應圖 .....	47
圖 4.2	最適滾輪速度差之軟板張力響應圖 .....	48
圖 4.3	不同滾輪速度情況底下之軟板張力響應圖 .....	49
圖 4.4	固定馬達輸出力矩之軟板張力響應圖 .....	51
圖 4.5	導入 PID 控制器之張力響應圖 .....	52
圖 4.6	穩態張力響應圖.....	52
圖 4.7	不同軟板張力目標值之張力響應圖 .....	53
圖 4.8	穩態之張力響應圖.....	54
圖 4.9	PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之張力響應圖.....	55
圖 4.10	PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之穩態張力響應圖.....	56
圖 4.11	PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之張力響應圖.....	57
圖 4.12	PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之穩態張力響應圖.....	57
圖 4.13	PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之穩態張力響應圖.....	58
圖 A-1.1	全球電子紙顯示器出貨量與產值預測 .....	67
圖 B-1.1	各種 pattern 技術之解析度與生產率 .....	68

## 表目錄

表 2.1	電子紙主要技術特性 .....	14
表 2.2	PID 增益係數處理效果 .....	25
表 2.3	Ziegler 與 Nichols 調整公式 .....	25
表 2.4	法則庫表示方法 .....	30
表 3.1	PID 增益係數設計規則 .....	37
表 3.2	$K_p$ 模糊控制規則 .....	43
表 3.3	$K_i$ 模糊控制規則 .....	44
表 3.4	$K_d$ 模糊控制規則 .....	44
表 4.1	系統參數設定 .....	46
表 4.2	PID 控制器之響應分析 .....	54
表 4.3	PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之響應分析 .....	56
表 4.4	PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之響應分析 .....	58
表 A-1.1	Kindle 2 電子書閱讀器零組件成本 .....	66

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

在人類文明的發展過程中，對於過往知識的傳遞方法也在持續進步。一般而言，新的紀錄與傳遞方式往往能提升知識傳播速率與廣度，從紙張到陰極射線管顯示器(Cathode Ray Tube Display, CRT)，再從 CRT 至液晶顯示器(Liquid Crystal Display, LCD)的演進可以說明。顯示器除了往電子化、彩色化、平面化的方向邁進，接下來更朝向降低占用空間、增加畫面尺寸及解析度甚至是提升顯示器對環境適應性的需求去設計。為了滿足這些需求，可攜性、大尺寸等想法紛紛注入新一代顯示器的設計思維當中。為了兼具可攜性與大尺寸的設計，將顯示器設計成可撓曲的形式成為最容易聯想到的設計概念。在收納時能將顯示器捲撓成一綑，所以攜帶非常方便。另外，因為顯示器可以撓曲，所以不會受到尺寸限制，故能輕易達到大尺寸的目標。軟性顯示器因為具備可撓性的特質，以及低耗能、閱讀舒適、環保等優點，故將成為新世代顯示器的主流商品。

根據 TNO(Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, TNO)於 2003 年對軟性顯示器下的定義為：「軟性顯示器受到彎曲時，除了曲率半徑可以縮小到幾公分；另外，還必須保留原來的功能。」(羅丞曜，2012)，只要符合上述的定義即稱為軟性顯示器。軟性顯示器中的閱讀器存在龐大的市場，根據(DisplaySearch, 2009)的報告指出，閱讀器的產值將在 2018 年會達到 96 億美元。閱讀器的核心技術是電子紙(E-Paper Display, EPD)。電子紙的結構與一般顯示器類似，中間亦是由多層電路圖形(Pattern)所組成。過去製作 Pattern 會使用曝光、顯影等製程(羅丞曜，2012)。但是基於軟性顯示器具有可撓性以及聚乙炔對苯二甲酸酯(Polyethylene Terephthalate, PET)基材不宜使用高溫、高壓等製程這兩個因素，軟性顯示器可採用具備連續生產優勢的捲撓式製程(Roll to Roll, R2R)並採用網印的方式製作 Pattern，一方面能降低成本另一方面亦可滿足大尺寸要求(Kololuoma *et al.*, 2005)。

捲撓式製程主要分成三大部分，包括放捲端、製程區以及收捲端，另外，為了控制速度、張力以及橫向位移等會加入感測器以及控制器，下圖

1.1 即為捲繞式製程設備的基本組成。

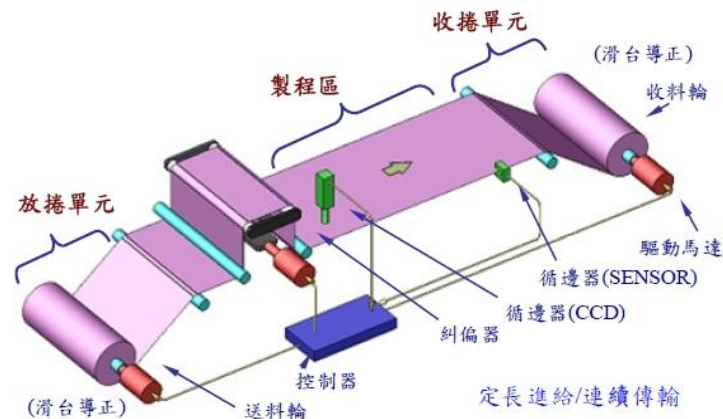


圖 1.1 捲繞式製程設備的基本組成

(機械工業雜誌, June 2010)

製程區是製作 Pattern 的區域，考量到 PET、聚醯亞胺(Polyimide, PI) 這些塑化基材熔點低，工作溫度原則上不能超過攝氏 120 度(劉冠志, 2012)。如果沿用目前積體電路或者是面板廠現有的蝕刻製程生產，材料將暴露於高溫、高壓或者是真空的環境下加工。有鑑於此，網版印刷是另一種 Pattern 製作的可行方案(劉冠志, 2012)。網版印刷不同於傳統蝕刻製程的製作方式，網版印刷先於網版上設計圖形，並以壓印的方式直接於基板上印製圖形，故網版印刷不需利用多道程序即可在基板上完成單層圖形的製作，由於網版印刷是將需要的圖形直接印刷於基板上，不論是在時間或者是廢料處理上，都有相當優越的條件(蔡永明, 1997)。

但是使用網版印刷於半導體、顯示器等高科技領域上，則牽涉到精密度、平穩度、張力等控制上的難題(張嘉勳、林家興, 2010)。這些軟性捲繞式製程面臨的困難與挑戰主要可區分為以下三個構面(黃國興, 2012)：

1. 軟性基材本身：基材形變；溫、濕度影響；表面製程結構；耐溫性；毛邊、靜電、皺摺；硬碎。
2. 軟板夾持：張力控制；循邊導正；定線速；定長進給；傳輸均力夾持；加工組裝精度；滾輪平行度。
3. 製程本身：多層圖樣對位；多層軟板貼合；軟性基板張膜技術；製程面

接觸問題；真空、濕式；製程同步；線上缺陷檢測。

由上面三個構面我們可以看出，基材本身的形變、皺摺；軟板夾持中的張力控制；製程本身的多層圖樣對位、貼合、張膜這些困難與挑戰和軟板張力有關。(黃國興，2012)亦提及幾乎所有使用 R2R 的製程均面臨張力控制這個基本問題。因此，確立了捲撓式製程中軟板張力控制是相當關鍵的問題。

事實上，如何達成定張力控制一直是運用捲撓式製程的產業相當重視的研究主題(蔡明祺 等人，2000)。主要原因是提升捲撓速度能有效降低軟板生產成本，但在高速捲撓的過程中，因為捲撓物的切線速度與張力會隨著製程而產生變化，將導致製程區段的實際張力值與期望張力值之間產生變異(Goddard *et al.*, 1992)。張力值產生變異會使製程區的軟板產生皺摺或者是形變等狀態，若在軟板不是以攤平狀態進行加工製程，勢必導致捲撓物的品質降低，進而影響生產良率，另外，過度的張力控制亦會使捲撓物鬆緊度不一，造成捲撓物的斷裂或鬆脫現象。

另外，在顯示器的製作過程中，為了連接或區隔兩個不同的功能件，層與層之間會鍍上鏈結用的 Pattern，藉由 Pattern 的鏈結，使顯示器發揮其功能，假如製作每層 Pattern 時的軟板張力不同，Pattern 之間會因為對位不準，導致鏈結用的 Pattern 將失效(劉冠志，2012)。因此，為了避免影響 Pattern 之間的鏈結關係，製作每一層 Pattern 時必須維持軟板張力處於允差範圍內。

(Shelton, 1986)以滾輪半徑、轉動慣量、滾輪轉速、軟板張力四個變量進行探討，並建構捲撓式傳輸系統模型。以單滾輪的捲撓式傳輸系統為例，收、放捲滾輪半徑(Ratio, R)受到軟板厚度增減的影響；轉動慣量(Inertia, J)亦將受到滾輪半徑產生變化；另外，滾輪半徑與轉動慣量交互影響滾輪轉速(Velocity, V)；而滾輪轉速與軟板張力(Tension, T)的交互作用將影響軟板張力的變化量。因此，捲撓式傳輸系統是具動態、受干擾、非線性的系統，系統變量如圖 1.2 所示。

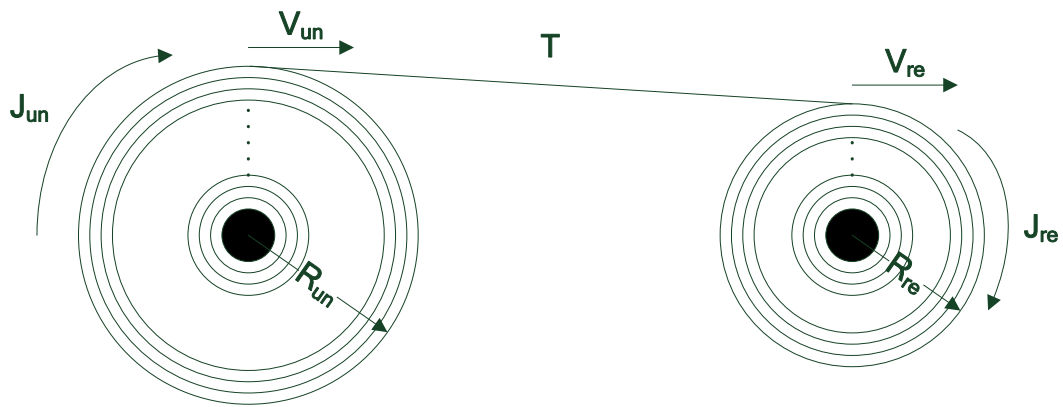


圖 1.2 捲繞傳輸系統變量

過去處理控制問題通常是先建構系統的動態模型，再以控制器進行控制（蔡瑞昌 等人，2008）。其中以 PID 控制理論是最廣泛應用的一種，它不僅原理簡單、容易設計且具有廣泛的適用範圍以及簡單的流程（陳朝光 等人，2004）。固然 PID 控制器對線性系統具備不錯的控制效果；但面對非線性的系統就缺乏適用性與強健性（李允中 等人，2008）。

捲繞式傳輸系統為非線性的系統。面對非線性的受控系統，模糊邏輯控制(Fuzzy Logic Controller, FLC)因為採用語言型控制規則，提供數學模型難以獲取、非線性動態模型以及特性不易掌握的系統不錯的解決方案(Mamdani, Assilian, 1975)，因此，本研究對捲繞式傳輸系統這類型動態、非線性系統的控制方法提出改良方向，使用 FLC 解決 PID 控制器存在的缺點。

## 1.2 研究目的以及貢獻

捲繞式製程已被應用於不同產業中，而本研究亦採用捲繞式製程進行軟性基材進行生產。(劉冠志，2012) 提出製程區進行網版印刷前必須利用張網技術將基板平穩的攤平於製程區內，尤其是需要極高精密度的產品此步驟將顯得更加重要。若是每層圖形的張力不均就可能造成圖形之間的偏移，各層圖形之間的鏈結更可能因此受到影響，嚴重時可能會導致這些產品的功能失效，並使生產的不良率上升（蔡永明，1997）。為了避免軟板張力對生產良率造成影響，我們必須要對軟板張力進行控制。由於捲繞式

傳輸系統屬於非線性的動態系統，使用傳統 PID 控制器將受到固定增益值的限制，故本研究提出導入模糊理論改良傳統 PID 控制器的不足，使控制器能夠藉由調整增益值參數對不同情況有更好的控制效果。本研究採用 (Shelton, 1986) 推導之捲撓式系統動態模型進行控制，目的是希望以此動態模型來驗證，將模糊理論導入傳統 PID 控制器能提升控制的效果。以下是本研究的目的：

1. 本研究將 PID 控制器導入模糊理論於 R2R 系統的控制。
2. 以 Fuzzy PID 控制器與 PID 控制器對捲撓式傳輸系統的控制績效做為驗證，說明本研究提出的控制器設計方向之適當性。

### 1.3 研究範圍

本研究範圍是在具備環境干擾的情況底下，以捲撓式製程中軟板張力與收、放捲滾輪之間的關聯性來建立模糊規則庫的方式對捲撓式製程進行控制，並以本研究所使用的控制效果與過去的研究進行比較，驗證此機制的適當性。本研究的限制與假設如下：

研究限制：

1. 捲撓式製程系統建模受限於實際情況太多變。本研究僅針對關鍵變數進行探討，因此分析上可能與實際的情況有所出入。
2. 由於材料的選擇相當多元，故本研究未考量不同軟板、滾輪材質所造成的影響。僅採用已知且固定的軟板、滾輪參數值進行探討。

研究假設：

1. (黃國興, 2012) 提出軟性捲撓式製程面臨許多困難與挑戰。有鑒於傳輸速度與軟板張力存在於大部分的構面中，故本研究假設傳輸速度與軟板張力為關鍵問題，且為影響產品良率的主因。
2. 本研究所採用的受控系統是根據過去文獻提出之捲撓式製程動態方程式所建構的模擬模型，並假設此模擬模型能夠完整描述實際生產環境。

- 捲繞式製程的傳輸行為包含縱向與橫向動態，但基於高速捲繞的情況下，橫向動態對張力的影響較縱向動態對軟板張力的影響來的小，故本研究假設縱向動態為捲繞式製程中影響軟板張力的主因。

## 1.4 研究步驟

本研究以模擬驗證的方式進行，首先探討過去文獻對捲繞式製程所建構的傳輸動態方程式以瞭解整個捲繞式生產環境，並根據上述之動態方程式於 Matlab 中的 Simulink 介面建立捲繞式製程的動態模擬模型。接下來則是探討軟板張力與收、放捲滾輪力矩之間的關聯性，並藉由模糊規則庫的方式建構兩者之間的關係。最後則是根據這個模糊規則庫對前面所建構的動態模擬環境進行張力控制，使張力變異維持在設定的允差範圍之內。未來，更期望能以相同的邏輯應用於真實生產環境，並達到期望的控制效果。研究步驟如圖 1.3 所示。

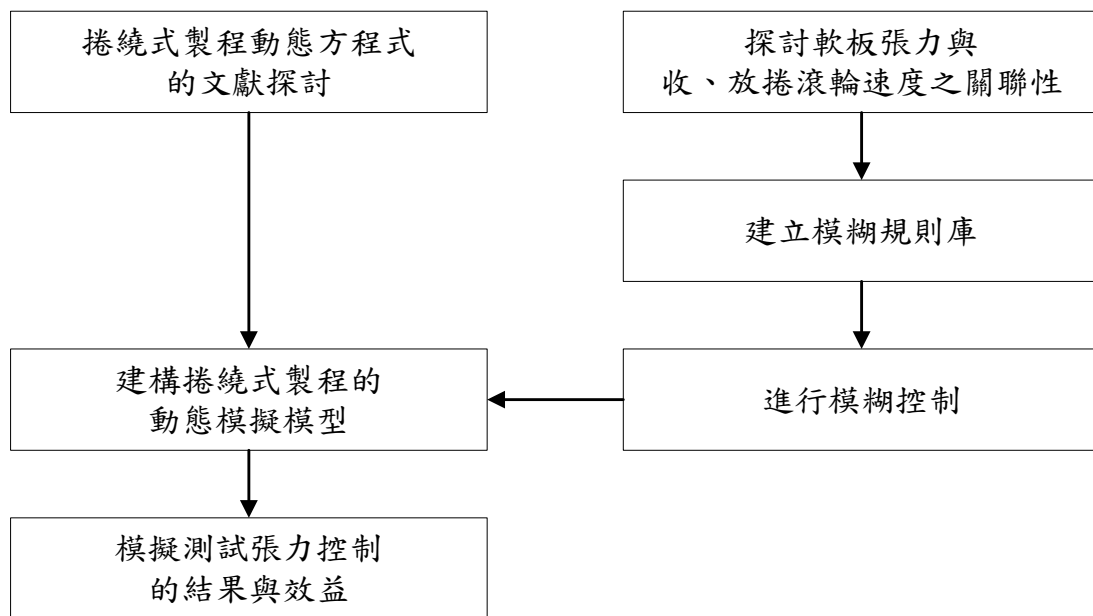


圖 1.3 研究步驟流程圖

## 1.5 論文架構

本研究共分為五個章節。第一章序論，本章主要說明研究背景與動機、研究目的、研究步驟與論文架構等。第二章文獻探討，本章針對軟性顯示器、電子紙、捲繞式傳輸系統、PID 控制器、模糊理論等相關文獻進行探



討。第三章研究方法與工具，本章將根據第二章文獻探討，利用 Matlab 中的 Simulink 建構捲撓式傳輸系統、PID 控制器、Fuzzy PID 控制器，並將這些子系統鏈結成完整的回饋式控制系統，做為分析控制器控制效果的工具。另外，設計績效衡量指標(Performance Measure, P.M.)，做為下個章節控制器績效分析的依據。第四章模擬分析，透過 Case1 與 Case2 不同目標張力值分別使用 PID 控制器以及 Fuzzy PID 控制器對捲撓式系統的軟板張力進行控制，並分析其控制結果。第五章結論與未來方向，總結捲撓式傳輸系統之軟板張力控制問題，使用之 Fuzzy 控制器的控制效果，並提出後續研究的課題。論文架構與研究流程如圖 1.4 所示。

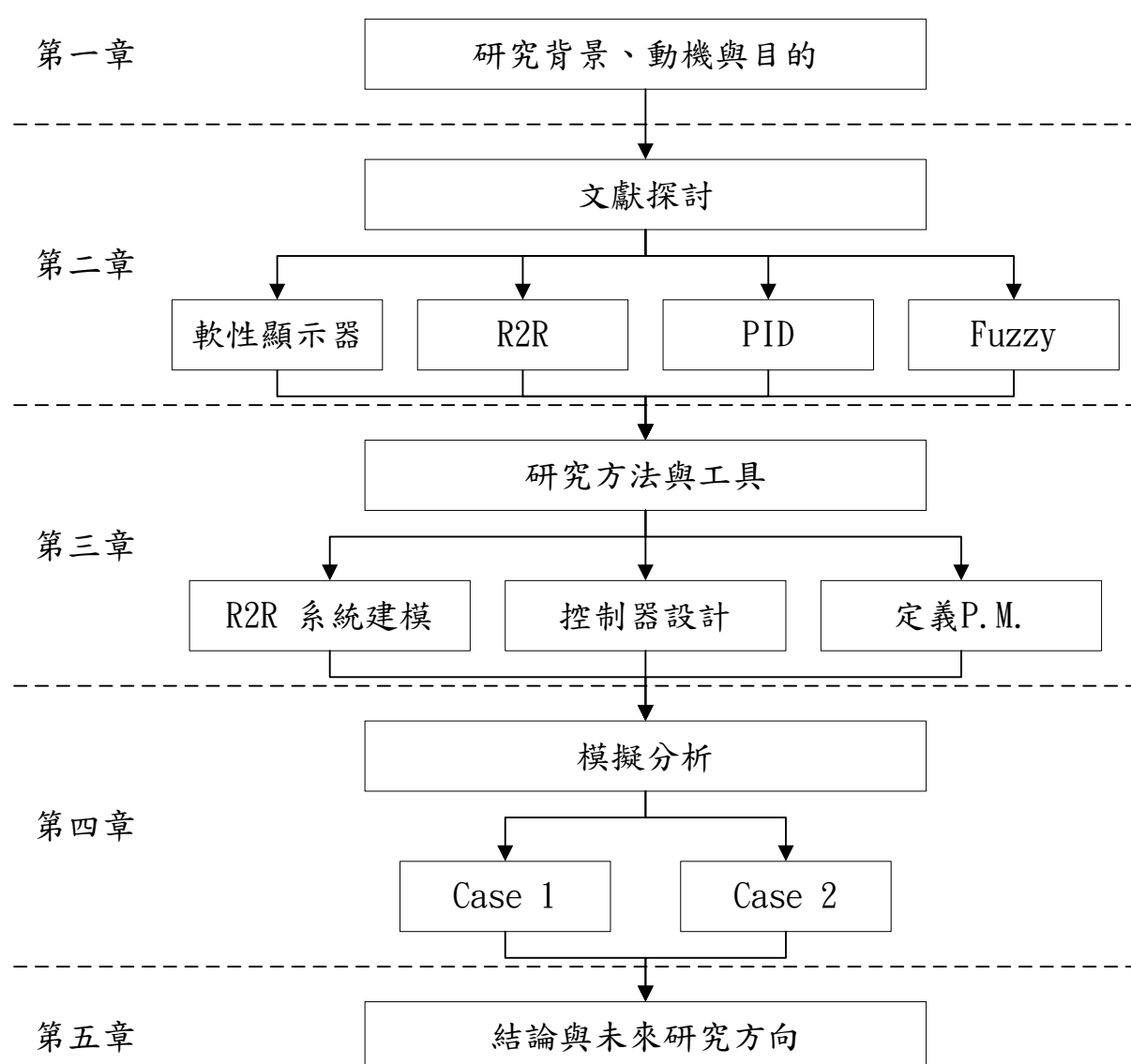


圖 1.4 論文架構

## 第二章 文獻探討

### 2.1 軟性顯示器與電子紙<sup>1</sup>

在資訊爆炸的時代，紙張的使用面臨成本效益與動態資訊的挑戰，傳統的紙張一頁僅能呈現有限的資訊，不同資訊則需要不同面頁呈現，因此，使用紙張來傳遞資訊，一則不環保，一則增加資訊攜帶的難度。因此，能以同一面頁呈現無限資訊的電子紙概念孕育而生，電子紙是指同時具備「像紙一樣輕便」、「像螢幕一樣可以改變內容」兩大特性的顯示器，比傳統的電腦螢幕省電、比筆記型電腦方便，而主要的用途則為閱讀顯示，電子紙具備以下幾個優點（劉冠志，2012）：

#### 1. 健康：

相對於自發光型的顯示器，電子紙與紙張同屬於反射式顯示器，於長時間閱讀的情況底下，眼睛不會受到強光影響，因此可大幅降低對眼睛的傷害。另外，電子紙搭配電子書，將省去學生攜帶書籍的壓力。

#### 2. 環保：

據統計，美國每年使用五千萬噸之紙張，若以電子紙取代紙張，可減少樹木的砍伐，亦可減少原本紙張印刷時產生的汙染。

#### 3. 節能：

電子紙使用反射式顯示，故不需設置背光源，且本身具備雙穩態的特性，僅於轉換畫面時需要施加電壓，是一個具備省電概念的顯示器。

事實上，電子紙隸屬於軟性顯示器中的一種，軟性顯示器(Flexible Display)亦可稱為可撓式顯示器，原理是將微電子元件製作在塑料、薄金屬…等基板上，因為軟性基材具有可撓性的特質，所以最後顯示器也會具有可捲曲的特性。軟性顯示器依據是否使用背光源可區分為自發光型與非自發光型顯示器，自發光型又可依據有機材料的使用分程採用小分子材料的 OLED 以及高分子材料 PLED；非自發光型顯示器則可分成使用液晶材料與非液晶材料兩大類，液晶型產品多半是由 LCD 廠商所開發出，以不使用偏光片或彩色濾光片的方式降低顯示器厚度，或是採用特殊的液晶材

---

<sup>1</sup> 本節係整理自陳麒麟、張榮芳、張加強(2010)。

料及顯示方式達到目標，如雙穩態膽固醇型、雙穩態向列型及高分子分佈型液晶…等（林佳興，2010）。非液晶型顯示器即為前述之電子紙。根據上述軟性顯示器的分類可由圖 2.1 表示。

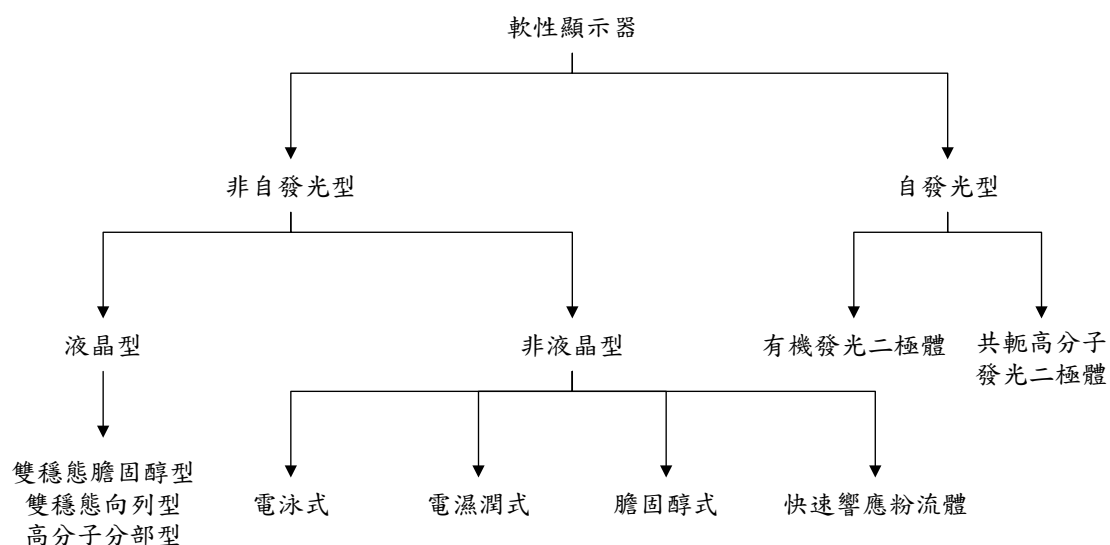


圖 2.1 軟性顯示器分類圖

（林佳興，2010）

輕、薄、耐衝擊特性一向是可攜式產品的訴求，而這正是軟性顯示器初期取代的市場。目前國際面板廠生產軟性顯示器產品，是利用蝕刻或研磨方式將玻璃基板的厚度由 0.7mm 減至 0.3~0.4mm，以達可攜式產品輕、薄的特性。而軟性顯示器則是直接以厚度 0.2mm 以下的塑膠基板進行 Pattern 製作，免去薄型化製程。從技術來看，製程的簡化是具有製程成本優勢。尤其塑膠基板顯示器使用捲繞式生產較具經濟性，加上其在設計時較具彈性，而在顯示介質上除傳統液晶外，亦可搭配有機 EL、電泳法及其他特殊顯示技術，使得塑膠顯示器之發展備受矚目。

近年來，許多公司及研究單位紛紛投入可撓式顯示器新興應用領域，其中以電子紙顯示器之開發最為積極，原因是其外觀能做到像紙或投影片一樣的薄但卻結合了電子顯示器如電腦或個人數位助理(Personal Digital Assistant, PDA)可更新資訊的優點。其厚度約 0.5mm，比傳統 LCD 面板（含背光板時）約 4mm 大約少 90%。電子紙顯示器具有雙穩態的特性，除非畫面內容變換否則不會耗電，因此耗電量可以比 LCD 減少 90%以上。

另外，因為電子紙具備利用環境光源顯示畫面，而非由顯示器本身產生光源而是採用環境光源，因而提供了更舒適的閱讀環境。此優勢將可創造出新興市場，如電子報紙、電子書、電子標籤、電子隨意貼及平面廣告面板等。業者甚至預估，在 2005 年全面採用情形下，潛在商機達 100 億美元。

目前電子紙顯示器的開發仍屬研發階段，發展技術眾多，誰能勝出仍在未定之天，但由於此新興市場應用範圍廣大，各技術開發可針對不同的市場需求設計，或許未來可同時存在不同的顯示技術。目前瞄準此市場之廠商計有 Philips、E-INK、Sipix、Gyricon、Pioeer、Sony、Fuji 與 Canon 等。電子紙的特色是此顯示器具記憶效果，只有切換畫面時才耗電，電源關閉後顯示器仍保持畫面，因此非常省電。以下將針對較為人所熟知的電子紙顯示技術進行探討：

### 1. 電泳顯示器：

較為人熟知的有 E-Ink 公司所開發的微膠囊電子墨水顯示器與 Sipix 公司之微杯化電泳顯示器。所謂的微膠囊電子墨水，係將帶正、負電的許多黑色與白色粒子，密封於微膠囊內，其結構如圖 2.2 所示。

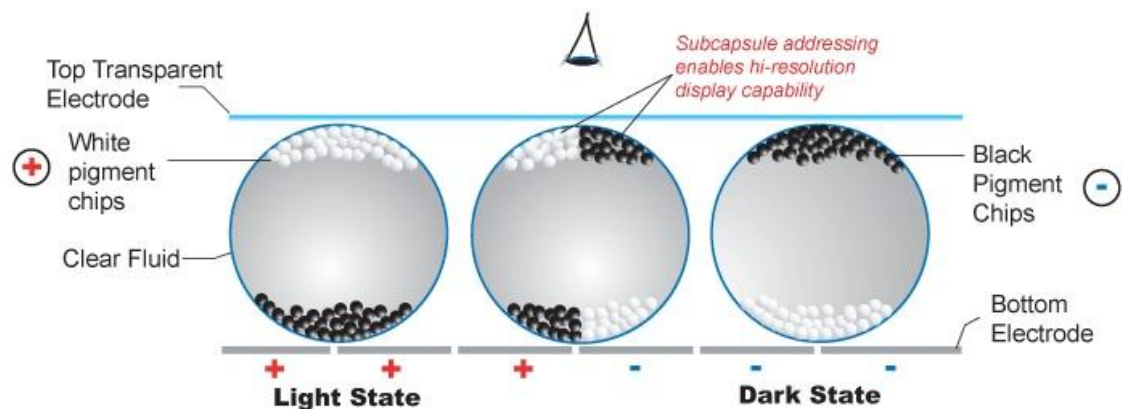


圖 2.2 E-Ink顯示技術

(機械工業雜誌, September 2004)

電子墨水薄膜的頂部是一層透明材料，作為電極端使用；底部是電子

油墨的另一個電極，微膠囊夾在這兩個電極間。微膠囊受負電場作用時，白色顆粒帶正電荷而移動到微膠囊頂部，相應位置顯示為白色；黑色顆粒由於帶負電荷而在電場力作用下到達微膠囊底部，使用者不能看到黑色。如果電場的作用方向相反，則顯示效果也相反，即黑色顯示，白色隱藏。可見，只要改變電場作用方向就能在顯示黑色和白色間切換，白色部位對應於紙張的未著墨部分，而黑色則對應著紙張上的印刷圖文部分。

Sipix 之微杯化技術係強調在連續製程中完成微杯化製作及電泳材料之塗佈與封裝，此顯示技術亦著重在雙穩態顯示模式與低耗電量。其結構如圖 2.3 所示。

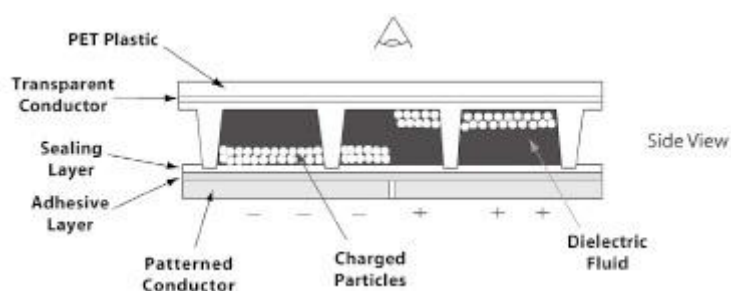


圖 2.3 Sipix微杯顯示技術

(羅丞曜，2012)

## 2. 電濕潤式顯示器：

荷蘭愛因荷芬飛利浦的研究實驗室，使用「電濕潤」技術，設計出新的電子紙原型系統，其結構如圖 2.4 所示。

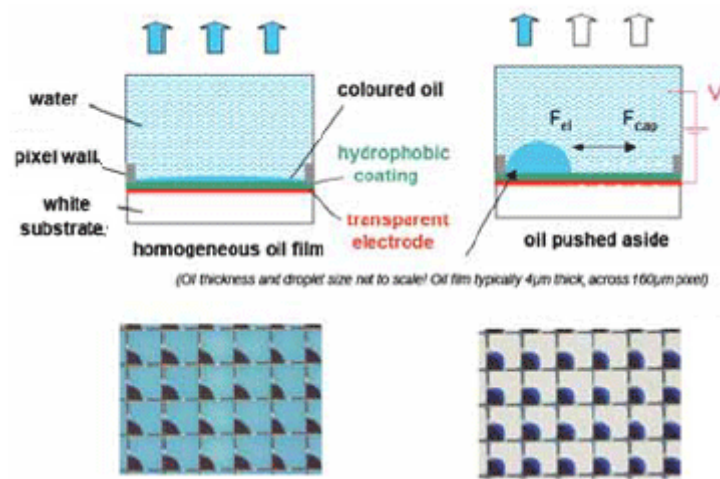


圖 2.4 電濕潤式顯示技術

(羅丞曜，2012)

這種技術中的每一個成像元素都是一個微形的容器，底部為白色不透水的基質，並附有透明的電極。這些小容器裡面裝有油性顏料，最上面再鋪了一層水，也就是說，油性顏料在容器底部與水層之間，形成扁平的薄膜。一旦在電極與水之間施加電壓，其接觸面的張力會發生變化，因此油墨會變形縮小且被水層擠到一邊，部份露出的白色底部便可反射光線，像素所顯現的顏色就變淡了。以此原理，將許多裝有三種基本色（黃色、青色與洋紅色）顏料的微小容器組合在一起，各自接收不同的電壓訊號，達成全色系的顯示器。

### 3. 膽固醇液晶顯示器：

膽固醇顯示器結構如圖 2.5 所示。

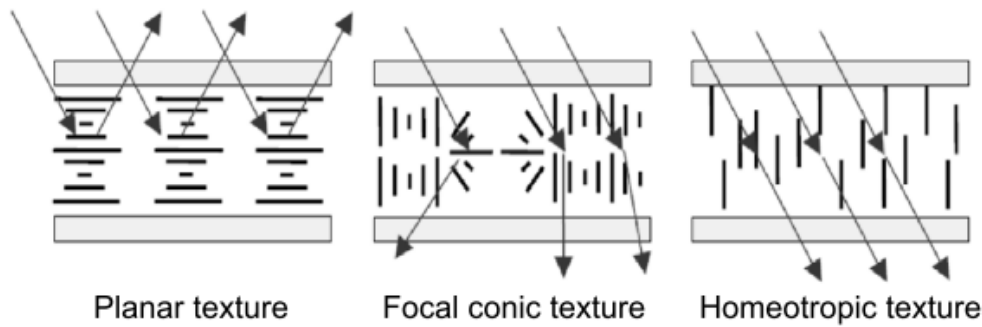


圖 2.5 膽固醇式顯示技術

(劉冠志，2012)

主要利用給予膽固醇液晶適當的驅動電壓，驅使膽固醇液晶轉至平面螺旋型排列(Planar texture)或是垂直螺旋型排列(Homeotropic texture)，藉由膽固醇液晶在平面螺旋型排列與垂直螺旋型排列不同的光學特性達到顯示的目的。此外膽固醇液晶顯示器具備雙穩態的記憶特性，不施加電場驅動仍能維持顯示畫面，因此具有省電的效果。

Planar texture 狀態時，入射光若保有與膽固醇液晶的螺旋方向相同旋光方向的圓偏極光時，此偏極光將被選擇性的反射。Focal conic texture 狀態時，對於入射光具有散射的效應。Homeotropic texture 狀態，光線可以透過液晶層而不被反射或散射。

#### 4. 快速響應液粉流體顯示器：

日本普利司通於 2004 年日本平面顯示器展中首次展出快速響應粉流體顯示器，其操作原理與 E-Ink 的電泳式顯示器相類似，僅差在介質的不同，快速響應粉流體顯示器是利用電壓操作黑白的帶電粒子在空氣中移動而成像。快速響應粉流體顯示器具備高對比、廣視角、高反射率、雙穩態等特性與反應速度快的優勢，但是驅動電壓過高的問題目前仍待解決。

有鑑於電子紙處於新發展階段，下表 2.1 為目前電子紙主要技術特性的整理表格。

表 2.1 電子紙主要技術特性

研發廠商	E-Ink	Sipix	Bridgestone	Fujitsu
基本技術	膠囊型電泳技術	微杯式電泳技術 (Microcup)	電子粉流體 (QR-LPD)	膽固醇液晶 (Ch-LCD)
反射性	35%	40%	30%	30%
對比	10:01	10:01	10:01	06:01
驅動方式	薄膜電晶體(TFT) 主動式矩陣	薄膜電晶體(TFT) 主動式矩陣	被動式矩陣	被動式矩陣
反應速度	400ms	500ms	0.2ms	3 sec
簡述	市佔率九成以上	彩色化較 E-Ink 容易	反應速度快， 軟性化較 TFT 容易	反應速度較慢
主要廠商	元太	友達	台達電	漢瑜

(劉冠志，2012)

由表可以看出目前每種電子紙技術詳細的特性，其中 E-Ink 是目前市佔率最高的顯示技術。

電子紙顯示器雖然有許多優點，但實際上也非完全無缺點。首先是解析度的要求，在液晶顯示器發展至今，人眼已習慣於彩色化、高解析度與高反應速度的畫面呈現，若要重新適應低階的畫面呈現將造成使用者排斥心理。當然，若初期強調與書本紙張相同的應用環境，則在對比與解析度上應要求能達到與報紙相同等級的狀態。其次為人的使用習慣，許多人習慣於閱讀過程加註心得與評比摘要，若換成電子紙張，業者需針對此需求進行設計。而且許多人習慣於書的實體感與厚實感，甚至是紙張的味道，這部分就比較難以被電子紙張所取代。

軟性顯示器的關鍵技術可區分為薄化技術(Thinning Technology)、轉移技術(Transfer Technology)以及直接製程技術(Direct Process Technology)等三大類。以下依序介紹各技術內容與優劣：

1. 薄化技術(Thinning Technology)：



目前捲撓式顯示器所使用的基板材料以玻璃為主，主要是因為玻璃具有耐高溫、耐化學性、安定性高等特性。為了使面板達到可攜式產品輕、薄的要求，面板廠商大多以蝕刻或研磨製程直接將 1.4mm 厚度面板模組減少至 0.8mm 以下。當面板模組厚度降至 0.3mm 以下時，即可實現撓曲的顯示器。

## 2. 轉移技術(Transfer Technology)：

轉移技術顧名思義是利用成熟穩定的玻璃基板 TFT 製造技術。先於玻璃基板上製作 Pattern，再把玻璃基板移除後，將 Pattern 轉貼至軟性基板，實現軟性顯示器技術。

## 3. 直接製程技術(Direct Process Technology)：

不同於前兩項技術將元件製作於玻璃基板上，這項技術直接在軟性基板進行 Pattern 製程，此技術稱為直接製程技術。利用軟性基板可以捲曲特性，發展出連續捲撓式生產，較目前批次連續生產(Batch Type Process)更具經濟效益。儘管 R2R 製造技術被視為下世代 Pattern 製造技術，但由於軟性基板特性不同於目前玻璃基板，因此需要新的 Pattern 製造技術與設備。目前研發多半是將軟性基板黏貼在玻璃基板，再以現有的 TFT 或半導體製造設備進行製作。

最後探討採用以塑膠材料作為可撓式顯示器的基板，由於塑膠不耐傳統半導體高溫製程 (>350°C) 及阻水氣、阻氧氣特性差，所以需發展全新的製程技術及設備，而且製造成本高昂，以下探討可能面臨的挑戰：

1. 不能進行高溫製程，需應用特殊的軟板材料、製程及設備，而且昂貴卻特性差。
2. 阻水氣、阻氧氣特性差，需在塑膠基板表面鍍上多層特殊的 Hard coat 及 Barrier Coat，這樣一來反而會增加成本。
3. 熱膨脹係數大，與玻璃及許多薄膜材料匹配不易，未來大面積顯示器製程中的光學對位問題會愈加嚴重，因此，軟板張力的控制必須精確。
4. 塑膠本身絕緣，不易排除製程中所累積的靜電。不利於未來顯示器 R2R 製程的趨勢發展。

5. 耐高溫的塑膠材料十分昂貴，而且取得不易，不利於我國未來發展平面顯示器產業關鍵零組件的掌握。

基於上述對軟性顯示器材料選擇的挑戰，排除選擇材料的問題，如何在採用塑膠基材的情況下進行軟板張力控制，是一個非常關鍵性的問題。

## 2.2 捲繞式製程

R2R 並非新發展出來的生產方式，相反的，R2R 其實應用領域其實相當廣泛，諸如紡織業、保鮮膜生產、報紙印刷…等。近年來，開始有許多相關研究在探討如何將 R2R 導入高科技產業，觀察過去應用 R2R 的產業與高科技產業製程的差異，不難發現過去應用 R2R 製程的產業並不要求製程精度，反觀高科技產業的製程卻要求極高的精細度，因此在生產設備以及生產方式的設計將成為 R2R 導入高科技產業製程時重要的議題。

R2R 製程程序主要如圖 2.6 所示。可將整個程序區分為沉積(Deposition)、圖形化(Patterning)以及封裝(Packaging)三個部分，其中圖形化階段要求極高的精度，是整個 R2R 製程中最關鍵的程序(Evan, 2006)。

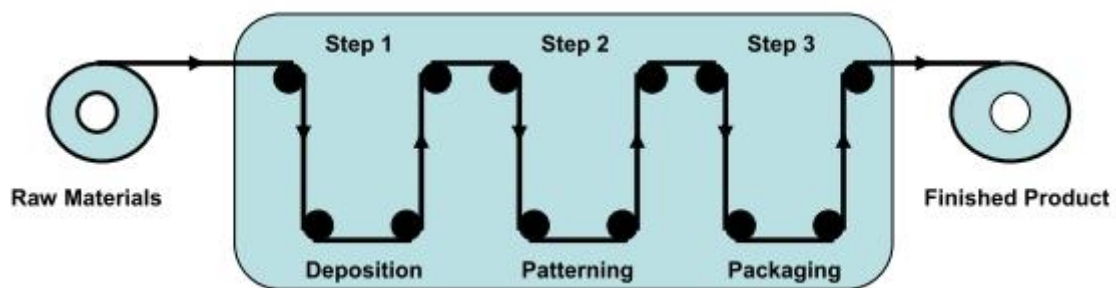


圖 2.6 R2R製程程序

(Gregg *et al.*, 2005)

利用 R2R 製程可使用 PET 做為基板，以低成本製造出輕薄且可捲繞之顯示器。(陳克昌，2004) 提出高科技產業導入 R2R 製程時所需要的關鍵技術：

針對生產線上軟板做張力控制，如果能夠精確控制軟板張力，保持軟

板內部張力的穩定，將可提升最終的產品良率。反之，若沒有對軟板的張力作監測與控制，結果可能導致軟板因張力太大而使得材料過度拉伸，最後導致外型與尺寸和先前所規劃的產品外型相差甚遠。而有些情況下因加工過程需要，必須要在加工區段中有不同的張力，目的是為了展延軟板的長度，為了達到展延的目的所以加工區可能各個區段都有不同的張力，所以如何有效對各區段的張力作控制也是值得重視的課題。另外，軟板必須平穩放置於製程區，當軟板張力不均的情況發生將會嚴重影響整個生產線，因為在加工過程中若有貼合、印刷或是一些需要在軟板表面特定位置做處理的程序，若是軟板張力不均，將會使得這些加工程序在不正確的位置做加工，造成材料浪費。

## 2.3 軟板傳輸動態方程式<sup>2</sup>

在捲撓式製程中收、放捲滾輪的轉速將影響軟板傳輸時的張力，而軟板張力同時也將影響產品的良率。故本節將探討捲撓式製程中的收、放捲滾輪轉速以及軟板張力變化的動態行為，藉由分析軟板的傳輸動態，做為後面對軟板傳輸動態控制的依據。

### 2.3.1 張力方程式

捲撓式製程中所使用的軟板可視為是具有彈性與延展性的材質。當軟板受到兩個傳輸滾輪的拉扯會產生張力，因此，軟板張力的響應是由兩端滾輪所產生的速度差所決定。以下針對雙滾輪單間距的系統進行傳輸動態分析。雙滾輪單間距系統如圖 2.7 所示。

---

<sup>2</sup> 本節係整理自 (Shelton, 1986)；(陳煜傑，2011)。

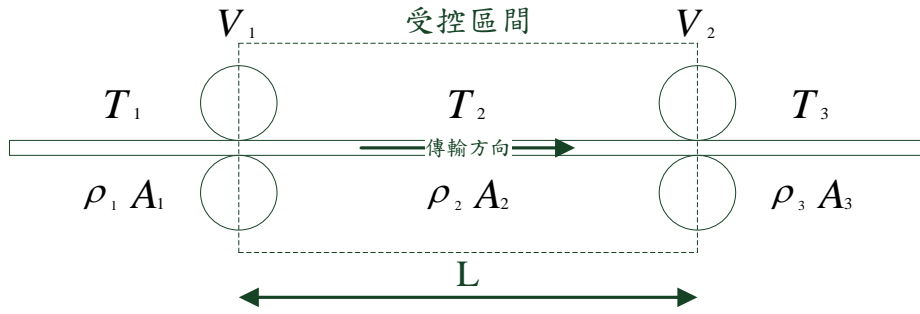


圖 2.7 雙滾輪單間距傳輸

首先我們假設軟板為理想的彈性體。另外，兩滾輪之間的軟板受控區間是固定的，根據質量守恆定律(Principle of Mass Conservation)，進入受控區間的軟板質量等於軟板延展後位於受控區間的質量變化量加上離開受控區間的質量，推得

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 + \frac{d}{dt} \int_0^L \rho_2 A_2 dt \quad (2.1)$$

其中 $\rho_{1,2}$ 為軟板密度， $A_{1,2}$ 為軟板截面積，截面積可由軟板寬度( $h_w$ )以及軟板厚度( $h_t$ )相乘推得， $V_{1,2}$ 為滾輪轉速，亦可將其視為軟板線速度， $L$ 則為兩滾輪之間間距。

考慮瞬時伸長量 $dx_{1,2}$ 的情況，延展前後的質量是相等的，故

$$dm = \rho_1 A_1 dx_1 = \rho_2 A_2 dx_2 \quad (2.2)$$

此時，瞬時截面積 $A_{1,2}$ 亦相等，故可將 2.2 式中的 $A_{1,2}$ 消去，得到

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{dx_1}{dx_2} \quad (2.3)$$

若以應變的形式取代瞬時伸長量 $dx_{1,2}$ ，可將 2.3 式轉換為

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{1}{1 + \varepsilon_2} = (1 - \varepsilon_2) \rho_1 \quad (2.4)$$

將 2.4 式代入 2.1 式可以得到軟板形變與滾輪轉速的關係式如下

$$L \frac{d}{dt} \varepsilon_2 = (1 - \varepsilon_2)V_2 - (1 - \varepsilon_1)V_1 \quad (2.5)$$

在推導動態方程式之前曾經假設軟板為理想的彈性體，所以根據虎克定律(Hooke's Law)可以將軟板形變與張力之間的關係表示如下

$$T_1 = A_1 E_1 \varepsilon_1, T_2 = A_2 E_2 \varepsilon_2 \quad (2.6)$$

其中，E 為軟板的楊氏係數(Young's Modulus)，將 2.6 式代入 2.5 可以得到軟板的張力方程式

$$\frac{d}{dt} T_2 = \frac{EA}{L} (V_2 - V_1) - \frac{1}{L} (V_2 T_2 - V_1 T_1) \quad (2.7)$$

根據 2.7 式可以清楚說明軟板張力與滾輪轉速之間的關係。因此，可以利用收放捲滾輪轉速以及軟板張力計算軟板張力的變化量。

### 2.3.2 滾輪半徑方程式

在軟板傳輸過程中，滾輪的半徑會隨著軟板的轉出與捲入而變化，放捲端滾輪因為將軟板轉出，所以滾輪半徑會隨時間而下降，而收捲端滾輪則因為將加工後的軟板捲入，故滾輪半徑會隨著時間而增加，以下將 $\Delta t$ 時間內滾輪旋轉的圈數表示為

$$\text{圈數} = \frac{\Delta R}{h_t} = \frac{\omega}{2\pi} \Delta t = \frac{V}{2\pi R} \Delta t \quad (2.8)$$

其中， $h_t$ 為軟板厚度， $\Delta R$ 為滾輪半徑變化量， $\omega$ 為滾輪角速度，考慮瞬時的放捲端半徑變化，可得到放捲端的滾輪半徑方程式

$$\frac{d}{dt} R_{un} = -\frac{h_t V_{un}}{2\pi R_{un}} \quad (2.9)$$

同理，亦可推導出收捲端的滾輪半徑方程式

$$\frac{d}{dt} R_{re} = \frac{h_t V_{re}}{2\pi R_{re}} \quad (2.10)$$

### 2.3.3 滾輪轉動慣量方程式

收、放捲滾輪的轉動慣量會隨著滾輪的質量變化，滾輪本身的質量是固定的，變化量主要來自於捲繞於滾輪上軟板質量，因此，我們可以根據收、放捲滾輪的半徑去探討滾輪的轉動慣量並表示如下，首先為放捲滾輪的轉動慣量方程式

$$J_{un} = \frac{\rho_r h_r \pi}{2} (R_c^4 - R_i^4) + \frac{\rho_w h_w \pi}{2} (R_{un}^4 - R_c^4) \quad (2.11)$$

其中， $\rho_{r,w}$ 依序為滾輪與軟板的密度， $h_{r,w}$ 依序為滾輪與軟板的寬度， $R_c$ 為滾輪的外圈半徑， $R_i$ 為滾輪的內圈半徑， $R_{un}$ 為包含軟板的滾輪半徑。同理，亦可推導出收捲滾輪的轉動慣量方程式

$$J_{re} = \frac{\rho_r h_r \pi}{2} (R_c^4 - R_i^4) + \frac{\rho_w h_w \pi}{2} (R_{re}^4 - R_c^4) \quad (2.12)$$

接下來分別針對收、放捲滾輪的轉動慣量進行微分，探討轉動慣量的變化量，同時將式 2.9 與式 2.10 所探討的滾輪半徑方程式代入，依序得到放捲滾輪慣量變化量以及收捲滾輪慣量變化量，分別如下所示

$$\frac{d}{dt} J_{un} = -\rho_w h_w h_t R_{un}^2 V_{un} \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt} J_{re} = \rho_w h_w h_t R_{re}^2 V_{re} \quad (2.14)$$

### 2.3.4 滾輪力矩方程式

藉由探討滾輪的逆、順向力矩推導出滾輪的力矩方程式，根據力矩方程式我們可以計算出收、放捲滾輪的轉速，並於軟板無滑動的情況下，

等同於軟板的傳輸速度。下圖 2.8 為施加於收、放捲滾輪上的逆、順向力矩。

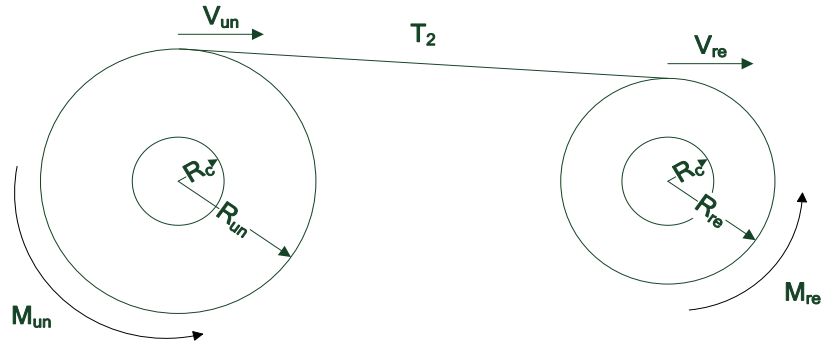


圖 2.8 收、放捲滾輪轉動方向與馬達力矩

軟板由放捲滾輪(Unwind Roller)轉出，此時軟板的張力會對放捲滾輪產生順向力矩，而放捲滾輪本身的控制馬達為了能夠調整軟板張力與滾輪速度則是對放捲滾輪提供逆向力矩。對放捲滾輪的角動量微分以後等於所有的外力矩和，如下所示

$$\frac{d}{dt}(J_{un}\omega_{un}) = \frac{d}{dt}\left(\frac{J_{un}V_{un}}{R_{un}}\right) = (-D\omega_{un} + T_{un}R_{un} - M_{un}) \quad (2.15)$$

其中， $D$  為軸承黏滯摩擦係數， $M_{un}$  為放捲馬達所輸出的力矩，另外  $J_{un}$ 、 $T_{un}$ 、 $R_{un}$  均會隨時間變化，故將上式後半部的微分式展開推得

$$\left(\frac{V_{un}}{R_{un}}\right)\frac{d}{dt}J_{un} + \left(\frac{J_{un}}{R_{un}}\right)\frac{d}{dt}V_{un} - \left(\frac{J_{un}V_{un}}{R_{un}^2}\right)\frac{d}{dt}R_{un} = -D\frac{V_{un}}{R_{un}} + T_{un}R_{un} - M_{un} \quad (2.16)$$

其中， $\omega_{un} = \frac{V_{un}}{R_{un}}$ ，再將滾輪半徑變動方程式以及慣量變動方程式代入式 2.16 可得到放捲滾輪的力矩方程式

$$\frac{d}{dt}V_{un} = \frac{1}{J_{un}}(-DV_{un} - T_{un}R_{un}^2 - \rho_w h_w h_t R_{un}^2 V_{un}^2) + \frac{h_t}{2\pi R_{un}^2} V_{un}^2 - \frac{R_{un}}{J_{un}} M_{un} \quad (2.17)$$

在完成加工製程以後，軟板由收捲滾輪(Rewind Roller)捲入，此時軟板的張力會對收捲滾輪產生逆向力矩，而放捲滾輪本身的控制馬達為了能夠調整軟板張力與滾輪速度則是對放捲滾輪提供順向力矩。同樣對收捲滾輪的角動量微分以後會等於所有的外力矩和，並將滾輪半徑變動方程式以及慣量變動方程式代入，同理可得到收捲滾輪的力矩方程式，如下所示

$$\frac{d}{dt}V_{re} = \frac{1}{J_{re}}(-DV_{re} - T_{re}R_{re}^2 - \rho_w h_w h_t R_{re}^2 V_{re}^2) + \frac{h_t}{2\pi R_{re}^2} V_{re}^2 + \frac{R_{re}}{J_{re}} M_{re} \quad (2.18)$$

## 2.4 傳統控制理論與模糊控制

在處理控制問題之前，必須先對系統進行定義。系統是由一群物件所組成的集合，包含了輸入、輸出以及物件之間的關聯性，並有共同的目標。控制問題中的系統又可分為受控系統以及控制系統兩大類。根據受控系統中可量測到的觀測量(輸出)轉換成可施加於系統上的控制量(輸入)為控制系統處理控制問題最主要的目標。控制系統架構如圖 2.9 所示。

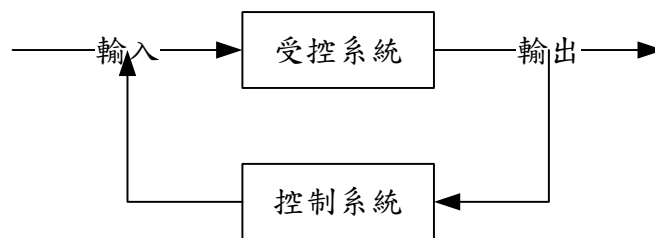


圖 2.9 系統架構圖

所謂控制是使系統的控制變數或輸出值的變化能夠維持於特定的輸入參考值的過程(陳朝光 等人, 2004)。回授控制是藉由量測系統控制變數的值，並實際利用信息去改變控制變數的過程。在我們日常生活無時無刻都存在著與控制有關的問題，例如在騎乘機車的過程，我們會用眼睛去感測行車速度，若是前方路段有障礙或者是暢通，我們會隨不同的狀況控制行車的速度。控制問題看似簡單，但卻存在著相當高的障礙，因為一般來



說控制系統是動態的，我們很難在瞬間下達最正確的控制量。另外，在下達控制量的時間點至系統產生響應時存在時間差，這也深深影響了控制的結果。

最簡單的控制系統就是直接建立輸入、輸出的對應表格，再利用查表的方式進行控制。但是在面對複雜系統時，對應表格會變得相當龐大、複雜，故建構對應表格的方式並不適用於複雜系統的控制問題(陳朝光 等人，2004)。從圖 2.9 可以知道，在建立控制系統之前我們必須先對受控系統進行探討、分析，在徹底了解受控系統以後，才能根據受控系統中輸入與輸出的關聯性建立控制系統。因此，我們需要尋求系統化的方法來處理複雜問題，傳統控制理論在處理複雜系統的控制問題之前，特別強調要先了解系統的數學模型。一般來說，我們會根據物理定律合理建構出受控系統輸入與輸出之間的對應關係，再根據最佳化法則來求解並尋求控制法則。雖然傳統控制理論已經發展的相當完整，但是在面對一些非線性(nonlinearity)、不確定(uncertainty)或時變(time variant)的系統時，建構數學模型還是有其困難度。(陳朝光 等人，2004) 舉例而言，這類複雜系統通常充斥許多非線性的方程組，以往的作法是將系統真實情況利用線性化的方式做概略性或者是區域性的描述，但這僅是以縮小討論範圍於線性情況下與簡化模型的方式描述真實系統，通常這樣的簡化會造成模型與真實系統存在差異，既然無法縝密的利用數學模型描述原系統，當然控制的成效就會受到影響。

#### 2.4.1 PID 控制理論

根據傳統控制理論所設計的諸多控制器中，PID 控制理論是最被廣泛應用的一種，它不僅原理簡單、容易設計且具有廣泛的適用範圍、簡單的流程以及強健性(Robust)，沿用至今已超過半個世紀，直到今日仍被廣泛利用於很多領域(沈金鐘，2001)。PID 為比例-積分-微分控制器，包含比例項(Proportional Term)、積分項(Integral Term) 以及微分項(Derivative Term) 三部分，乘上各自的比例增益係數，同步將出受控系統回授的輸入轉換成控制輸出。其結構如圖 2.10 所示。

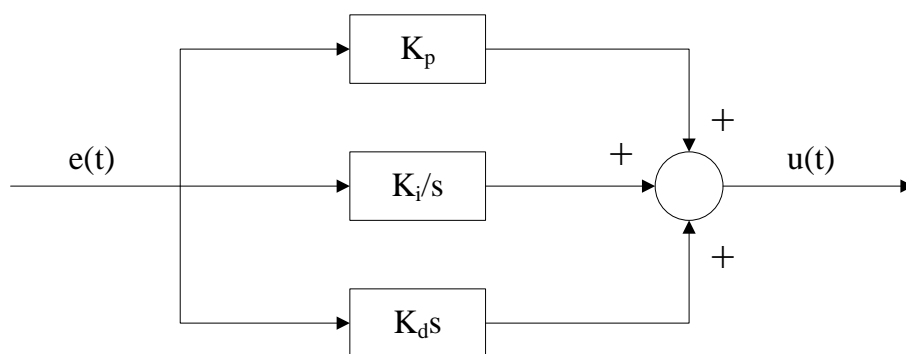


圖 2.10 PID控制理論結構

根據上面的結構圖，並轉換成下面的式子對 PID 控制理論進行說明

$$K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} = u(t)$$

其中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  依序為比例、積分與微分增益係數， $e(t)$  為誤差值，PID 控制理論具誤差值的比例、積分、微分乘上各自的增益係數，並輸出控制量。

比例項能依據誤差大小來調整控制器輸出，提升受控系統的反應速度與精確度，但相對的也將降低受控系統穩定度。積分項可用於消除穩態誤差，但是對於暫態的瞬間變化無法立即作出回饋控制。微分項雖然具有預測誤差趨勢的效果，但卻也容易在暫態時因為誤差較大而有預測值過高的情況發生，並將造成修正量過高使得受控系統不穩定（沈金鐘，2001）。我們可以根據受控系統的特性來設定 PID 控制理論中的增益值，不同的增益值將會影響控制器的控制效果，藉由同時調整三個部分的增益值，控制器將可對受控系統的動態、干擾等影響進行控制。因此，增益值設定的好壞將決定 PID 控制理論的控制效果。一般來說，增益值的設定是由經驗豐富的專家或者操作員藉由試誤法調整至控制效果理想為止，雖然 PID 控制理論在解決回授控制問題有不錯的控制效果，但這也僅限於一些線性系統，若是非線性的系統增益值的設定又會更加困難，甚至造成受控系統的輸出不穩定。下表 2.2 整理  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  三個增益係數於各時域的處理效果 (Franklin *et al.*, 1994)。

表 2.2 PID增益係數處理效果

增益係數	上升時間	超越量	暫態時間	穩態時間
$K_p$	減小	增大	微小變化	減小
$K_i$	減小	增大	增大	消除
$K_d$	微小變化	減小	減小	微小變化

最早的 PID 增益係數調整公式是由 Ziegler 與 Nichols 透過實驗、分析於 1942 年所提出的調整公式。Ziegler 與 Nichols 以極限頻率進行響應，再利用得到的極限週期  $T_u$  與即限增益  $K_u$  來求 PID 控制器的增益係數(Hang *et al.*, 1991)。調整公式如表 2.3 所示(Ziegler, Nichols, 1942)。

表 2.3 Ziegler與Nichols調整公式

控制器類型	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_u$		
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

其中， $T_i$ 、 $T_d$  依序是積分常數與微分常數，可由  $T_i = K_p/K_i$  以及  $T_d = K_d/K_p$  計算得到。

在求取  $K_u$  與  $T_u$  時，Ziegler 與 Nichols 建議是先假設在無積分、微分的情況底下增加比例增益係數，直到受控系統開始震盪為止，此時設定的比例增益稱為  $K_u$  以及震盪週期  $T_u$ 。最後根據  $K_u$ 、 $T_u$  之值代入由 Ziegler 與 Nichols 所提出的經驗公式來求得增益係數。

由於傳統 PID 控制理論中的增益係數為定值，根據固定增益係數對受控系統進行控制縱然能達到預期的控制效果，但鑒於 PID 控制器中三個部份的增益值對不同狀態各自擁有其優缺點，若能根據受控系統回傳的信號，在不同狀態底下即時調整三個部份的增益係數，勢必能提升控制器對受控

系統的控制效果。

除了增益係數的設計以外，何種受控系統該選用何種控制器的問題，可藉由下面針對不同控制器類型來討論適用度（陳朝光 等人，2004）：

1. 比例控制器：比例增益係數  $K_p$  越大，系統響應越快，穩態誤差越小。如欲消除穩態誤差需要有無窮大的增益值，這在實際應用上是無法達成的。
2. 積分控制器：積分控制器可使系統對步階參考輸入的穩態誤差為零，但積分增益係數  $K_i$  越大會使系統震盪越嚴重，造成系統的穩定性降低。
3. 比例-積分控制器：比例-積分控制器可使系統對步階參考輸入的穩態誤差為零，而暫態響應亦可藉由改變零點位置而獲得改善。
4. 比例-微分控制器：比例-微分控制器可以改善系統暫時響應，但無法改善穩態精度。純粹微分控制對系統穩態誤差無任何幫助，故微分控制很少單獨使用。實際應用時可配合一個時間常數較大的極點以利控制器之實現。
5. 比例-積分-微分控制器：系統的穩態誤差可以獲得改善，暫態亦可藉由調整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  等增益係數得到較佳的響應。

#### 2.4.2 模糊控制理論<sup>3</sup>

模糊理論的發展是為了解決真實世界存在的模糊現象。這個理論是由美國柏克萊分校的 Zadeh 教授於 1965 年所提出的論文開始發跡。在某些情況底下，真實系統由於缺乏資訊，對於系統未來的情形無從推測，而當這類型的問題產生時，通常會利用機率以及統計理論去做推論。然而，這類型的理論都有個大前提，就是事件和敘述本身均具有明確的定義，但反觀真實系統，大多數的情況是無法對事件、現象甚至是敘述下達明確的定義，這種含糊不清的關係即稱之為模糊性。模糊理論相較於傳統的數學理論，

---

<sup>3</sup>本節係整理自李允中、王小璠、蘇木春(2008)；孫宗瀛、楊英魁(2005)；中國生產力中心技術引進服務組(2002)。

雖然在結構上很相似，但在本質上卻有很大的差異。例如：在邏輯上，傳統的數學邏輯採用二值邏輯，定義一個元素“是”與“否”屬於某一個集合；而模糊邏輯則是將其發展成多元邏輯，即一個元素不再只是“是”與“否”屬於某一個集合，而是在程度上有“多”與“少”的差別。模糊論利用歸屬函數(Membership Function, MF)來描述一個元素屬於某一個集合的程度，也就是在 0 到 1 之間的數值來表示元素屬於某集合的程度，當某個元素對於集合的歸屬度為 1 則表示這個元素完全屬於這個集合；反之，當歸屬度為 0 則表示此元素完全不屬於這個集合，對於歸屬度介於 0 到 1 的元素對屬於某集合有程度上的區別。

在許多科學或者是工程領域，解決複雜問題的第一步通常是將此複雜問題進行建模，完成建模之後便可透過這個模型對此問題進行評估與分析，進一步設計出控制器對系統加以控制。當數學模型設計的好，控制系統即能成功運作，但假設數學模型無法清楚描述系統特性，即使相關參數估計的再明確，仍然無法彌補數學模型本身的缺陷。反觀日常生活中所面對的問題，在大部分的情況下，這類型的問題與使用傳統物理、數學邏輯所建構的模型幾乎不可能存在一對一的對應關係。因此，傳統數學邏輯明顯不適用於這類型的問題。模糊理論不受明確、精確以及確定性的限制，用來處理這類型問題時反而會激發意想不到的效果。將模糊理論應用於複雜問題上並達到控制系統的目標，稱之為模糊邏輯控制器(Fuzzy Logic Controller, FLC)，FLC 的基本架構如圖 2.11 所示。

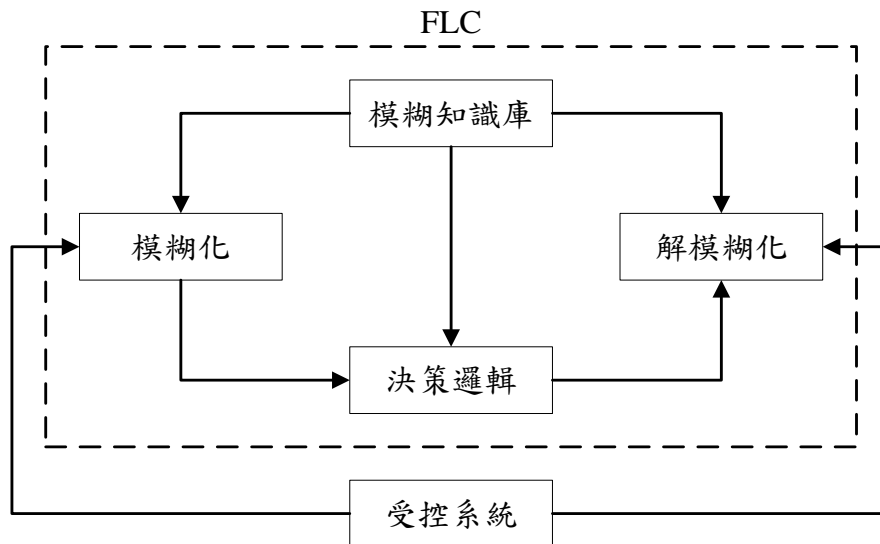


圖 2.11 FLC控制理論結構

(李允中 等人，2008)

FLC 的架構包含模糊化、模糊知識庫、決策邏輯以及解模糊四個部分，依序說明如下：

### 1. 模糊化

用來讀取受控系統輸出的實際資料，並將明確資料藉由模糊化轉換成模糊歸屬函數後，以模糊集合來呈現。模糊歸屬函數可分為離散型與連續型。離散型歸屬函數的特色是簡單明瞭以及易於建立模糊關係矩陣；但缺點是離散區間無法完整、精確的描述系統。常用的連續型歸屬函數有吊鐘形(Bell Shape)、三角形(Triangular Shape)、梯形(Trapezoid Shape)，如圖 2.12 所示。

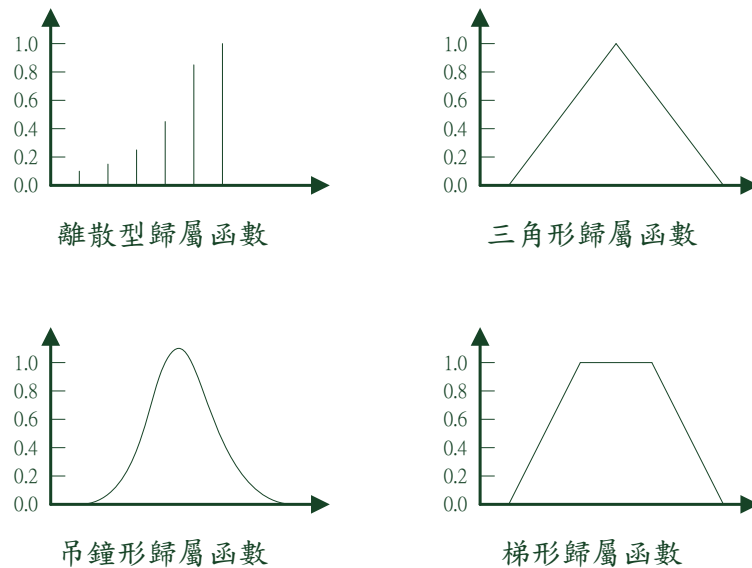


圖 2.12 離散型、連續型歸屬函數型態

(李允中 等人，2008)

連續型歸屬函數的優點在於可微分，對於具有學習機制的系統，使用連續型歸屬函數的處理效果會優於離散型歸屬函數。選擇適當的歸屬函數往往決定能否成功應用模糊理論於實際問題。一般而言歸屬函數的設計並無通用的定理或公式，通常是根據經驗或統計方法來加以確定，很難有客觀性。許多研究均在建立歸屬函數的問題上下了很多功夫，希望能找到系統化的方法以建立較為客觀的歸屬函數。事實上，目前最常見的歸屬函數設計方法是：先建立粗略的歸屬函數，然後藉由“學習”與不斷的試誤，逐步進行修正與調整，使歸屬函數漸趨完善與客觀。

## 2. 模糊知識庫

模糊資料庫是由資料庫以及語言控制規則組成。它提供處理問題時所需要的定義，例如變數的論域、語言項的子集合以及歸屬函數的規畫…等。控制規則庫的設計是利用語言形式將專家經驗或是統計方法所得到的控制規則表現出來，通常是由 IF~Then 的形式來描述系統輸入與輸出之間的關係，以下為簡單的條件式描述語句：

$$R_i : \text{If } x_1 \text{ is } A_i \text{ and } x_2 \text{ is } B_i , \text{ then } y \text{ is } C_i$$

其中 $R_i$ 表示第*i*條控制規則， $x_1$ 、 $x_2$ 與 $y$ 為模糊變數， $A_i$ 、 $B_i$ 與 $C_i$ 為語言變數。句中 if 部分稱為前題部，用於判斷這個與聚是否成立，而後面 then 的部分稱為結論部，用來表示符合條件的結果。控制規則庫通常會利用類似於表 2.4 的方式呈現。

表 2.4 法則庫表示方法

y		x <sub>2</sub>		
		B	M	S
x <sub>1</sub>	B	B	M	S
	M	M	M	M
	S	B	M	S

其中 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $y$ 均分成大的(Big, B)、適中(Medium, M)以及小的(Small, S)三種等級。以表 2.4 為例，法則 3 描述當  $x_1$  是 B 且  $x_2$  是 S 時， $y$  為 S，若寫成 IF~Then 的形式則為：

$R_3$  : If  $x_1$  is Big and  $x_2$  is Small ,then  $y$  is Small

另外，若根據資料分析的結果顯示，某些條件在現實狀況下根本不可能發生，則可將相對應的法則刪去，簡化法則的個數有助於提升運算時的效率。

### 3. 決策邏輯

模糊推論式模擬人類的思考模式而設計。就模糊推論的思維而言，每條規則必定會有貢獻，差別只是程度上的不同，因而採取平行方式處理推理工作，再依據觀測所得的數值和知識庫中的規則計算出規則的適合程度，它的優點是所有法均能同時且公平地受到激發。模糊推論架構如圖 2.13 所示。



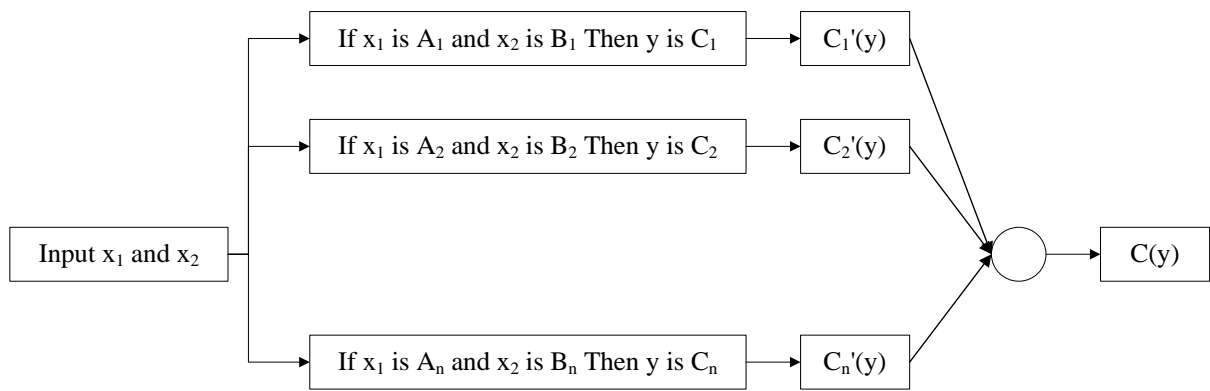


圖 2.13 平行推論結構

(李允中 等人，2008)

語意式的推論法則包含 Mamdani 法、Larsen 法以及 Tsukamoto 法，其中，最常被使用的推論法為 Mamdani 的 Min-Min-Max 推論法則(Lee, 1990)。Mamdani 推論方法是先取每條規則前題部中的最小歸屬函數結構，接著在探討所有規則之時取最大值做為歸屬函數結構，概念如圖 2.14 所示。

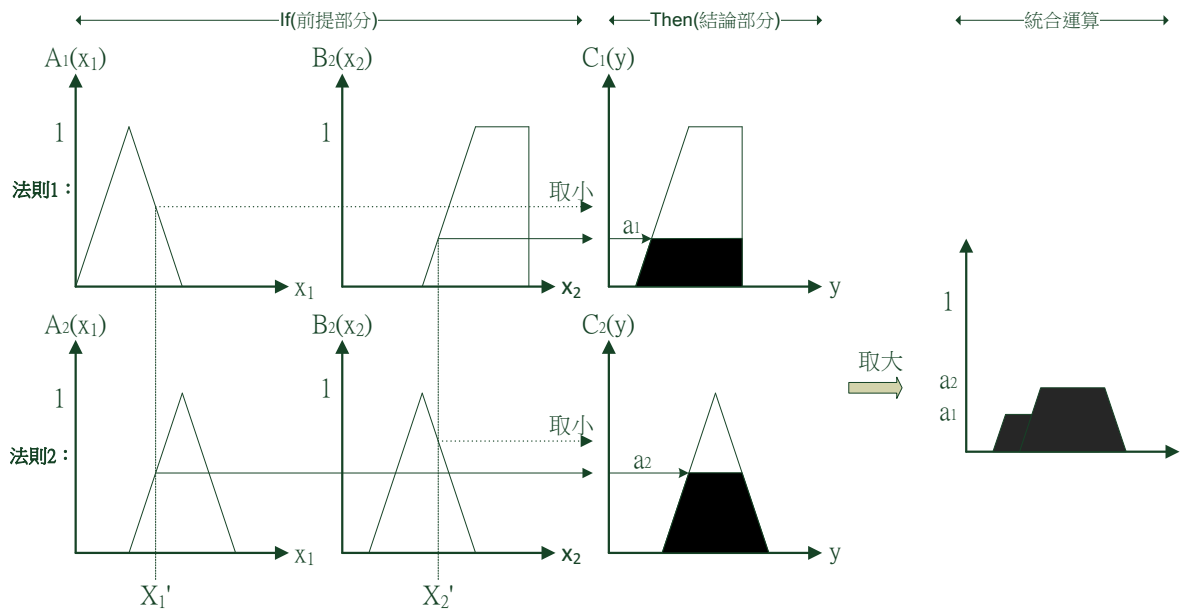


圖 2.14 Mamdani模糊推論結構

(李允中 等人，2008)

#### 4. 解模糊化

解模糊化可分成以下重心法、最大均值法以及使用線性函數表示三種方法：

##### (1) 重心法(Center of Area Method)：

是解模糊化最常用的一種方法，是利用加權平均的計算方法。當輸出歸屬函數  $C(y)$  的論域介於  $[a,b]$ ，則利用重心法解模糊化公式為：

$$y_{coa} = \frac{\int_a^b C(y)y dy}{\int_a^b C(y) dy}$$

##### (2) 最大均值法(Mean of Maximum)：

此亦為離散型的計算方法，根據所定的前提滿足度  $\alpha$  或歸屬函數的歸屬度最大值以上的部分，對此歸屬函數做切割，而以這些論域  $y_j$  歸屬度  $C(y_j)$  的平均值表示之，公式如下：

$$y_{mom} = \sum_{j=1}^l \frac{y_j}{l}$$

其中， $l$  為大於或等於前提滿足度  $\alpha$  或所設定的歸屬度之個數。

##### (3) 結論輸出為前提變數的函數：

假設總共有  $n$  條控制法則，其中第  $i$  條法則可表示為：

$R_i$  : If  $x_1$  is  $A_i$  and  $x_2$  is  $B_i$  , then  $y$  is  $f_i(x_1, x_2)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

當前提滿足度為  $\alpha_i$ ，則

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x_1, x_2)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

#### 2.4.3 T-S 型模糊控制理論<sup>4</sup>

1992 年高木友博(Tomohiro Takagi)及菅野道夫(Michno Sugeno)提出的模糊系統，利用模組化數學之表達方式，將傳統模糊理論與線性理論搭起一座互通的橋梁，使得模糊控制達到精密控制的門檻。此種模糊理論，又

---

<sup>4</sup>本節係整理自陳政立(2008)。

可稱之為 Takagi-Sugeno (T-S) 型模糊控制。

T-S 型模糊控制與傳統的模糊理論模式大致相同，sugeno 僅改變了規則的結論部。結論部均為線性動態方程式，使用輸入變數的函數呈現。以下為簡單的條件式描述語句：

$$R_i : \text{If } x_1 \text{ is } A_i \text{ and } x_2 \text{ is } B_i , \text{ then } y \text{ is } f(x_1, x_2)$$

因此，T-S 型模糊理論是透過數個子線性系統的混合，並且指定歸屬函數及模糊推論句來近似非線性系統。經常被應用於工程及研究的有兩種線性化技術：扇形(Sector)及雅谷梯(Jacobian)線性化方法。此兩種線性化技術，其中雅谷梯線性化法常被用於建立仿射 T-S 型模糊模型(Affine T-S Fuzzy Model) (古忠傑，2006)。藉由局部扇型切法線性化，將受控系統的狀態進行切割，即 T-S 型模糊模型中模糊化的過程。

### 第三章 研究方法與工具

接下來本研究將根據第二章文獻探討介紹的捲撓式傳輸系統與推導出的物理動態方程式進行建模，並於 Matlab 中的 simulink 介面建構出軟板傳輸系統的模擬環境。整個模擬環境包含了捲撓式傳輸系統與控制系統兩大部分，如圖 3.1 所示。

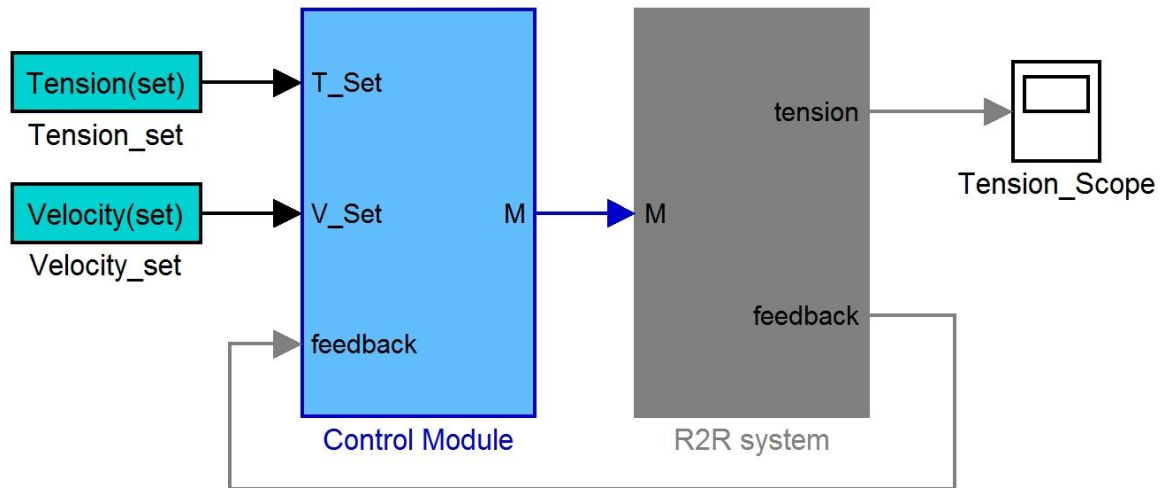


圖 3.1 模擬環境

圖 3.1 中，灰色方塊為捲撓式傳輸系統，藍色方塊則為控制系統。捲撓式傳輸系統是根據第二章文獻探討，以軟板傳輸動態方程式建構而成。控制系統則分別採用 PID 控制器以及 Fuzzy PID 控制器進行控制，設計方法詳述如後。

根據第二章文獻探討所得之軟板傳輸動態方程式建構捲撓式傳輸系統模型如圖 3.2 所示。

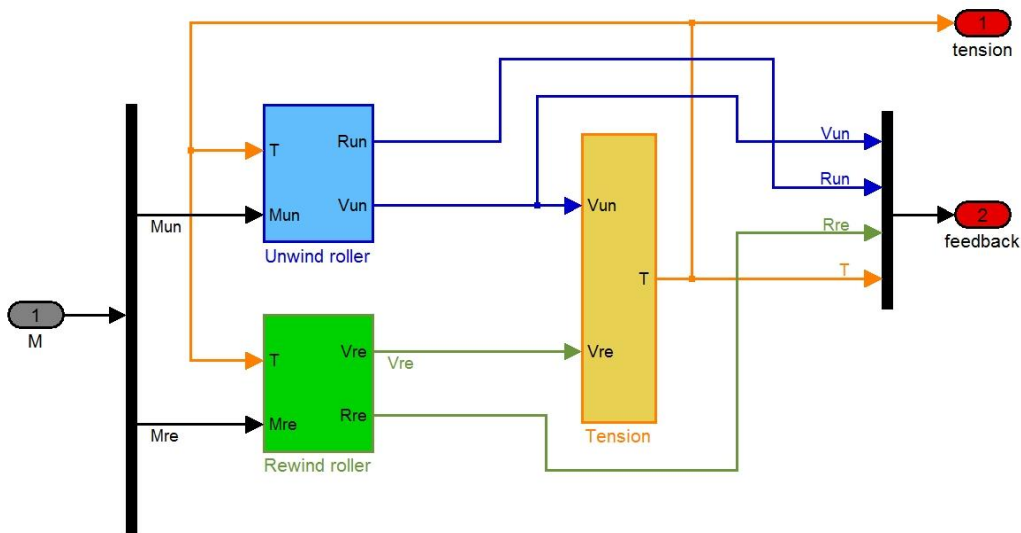


圖 3.2 捲繞式傳輸系統

圖 3.2 為雙滾輪單間距的傳輸環境，藍色方塊為放捲滾輪子系統；綠色方塊為收捲滾輪子系統；黃色方塊則為軟板張力子系統。收、放捲滾輪子系統中，針對滾輪半徑、轉動慣量…等因素對線速度產生的影響進行建模，並以馬達力矩來調整滾輪的輸出的線速度。軟板張力子系統則根據收、放捲滾輪線速度影響軟板張力(Shelton, 1986)的動態方程進行建模。

### 3.1 PID 控制器

PID 控制器的設計概念是根據受控目標值與實際回授值相減所得到的誤差做為輸入，並以此誤差依照受控系統需求分別進行比例、積分與微分運算後加總，並以此值做為受控系統的輸入值對系統進行控制（陳煜傑，2011）。PID 控制器的架構可由下面式子做說明：

$$K_p E_t + K_i \int_0^t E_t dt + K_d \frac{dE_t}{dt} = U_t$$

其中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  依序為比例、積分與微分增益係數， $E_t$  為誤差值，是由目標量( $R$ )與輸出量( $U_t$ )相減後得到。R2R 系統中需要同時控制收、放捲滾輪的線速度，因此本研究將使用兩個 PID 控制器分別對收捲滾輪與放捲滾輪進行控制。

放捲滾輪決定了進料速度，因此控制速度的 PI 控制器以目標速度值與

實際速度值的誤差乘上放捲端滾輪半徑得到角速度誤差 $E_V(t)$ 為輸入值，並輸出放捲滾輪所需施加的力矩 $U_{un}$ 。速度 PI 控制器的架構如下所示：

$$K_p E_V(t) + K_i \int_0^t E_V(t) dt = U_{un}(t)$$

收捲滾輪決定了軟板張力，因此控制張力的 PID 控制器以目標張力值與實際張力值的誤差乘上收捲端滾輪半徑得到角速度誤差 $E_T(t)$ 為輸入值，並輸出放捲滾輪所需施加的力矩 $U_{re}$ 。張力 PID 控制器的架構如下所示：

$$K_p E_T(t) + K_i \int_0^t E_T(t) dt + K_d \frac{dE_T(t)}{dt} = U_{re}(t)$$

根據上面兩個 PID 控制器的設計架構，將其建構於 Smulink 如下圖 3.3 所示。

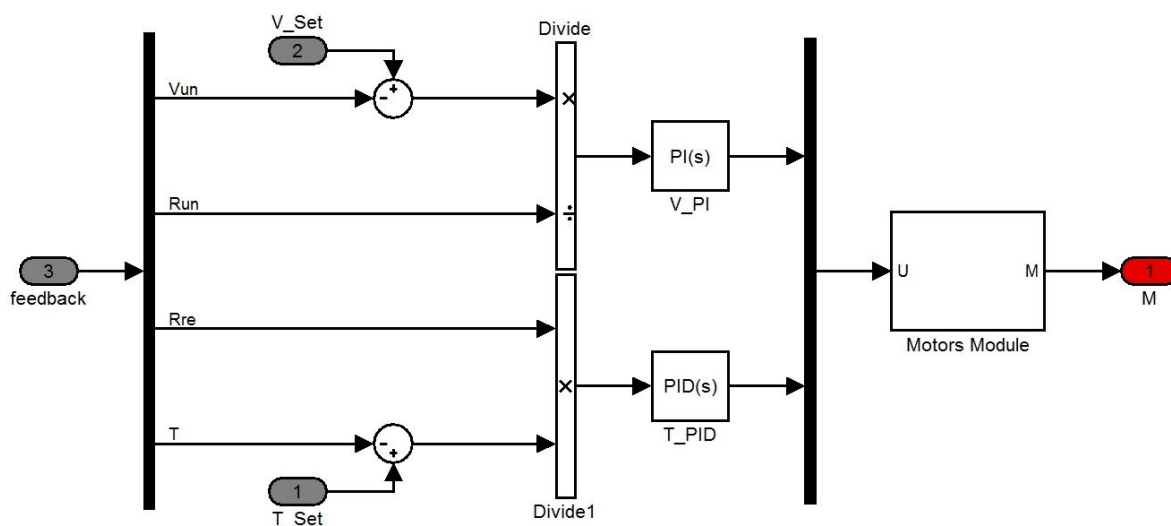


圖 3.3 PID控制系統

上面兩個 PID 控制器中的增益值採用(Ziegler, Nichols, 1942)提出的調整公式尋找 PID 增益參數，得到速度 PI 控制器參數為[-4.0301, -11.3566]，張力 PID 控制器參數為[3.5970, 11.1630, 0.7090]，除了用來當作 PID 控制器的增益係數，後續仍採用此增益參數做為 Fuzzy PID 控制器中的起始增益係數。

## 3.2 模糊控制器

由於 PID 控制器增益係數的設定會影響控制器的控制效果，根據不同狀態(圖 3.4)，(Zhen-Yu *et al.*, 1993)提出如表 3.1 的增益係數設計規則。

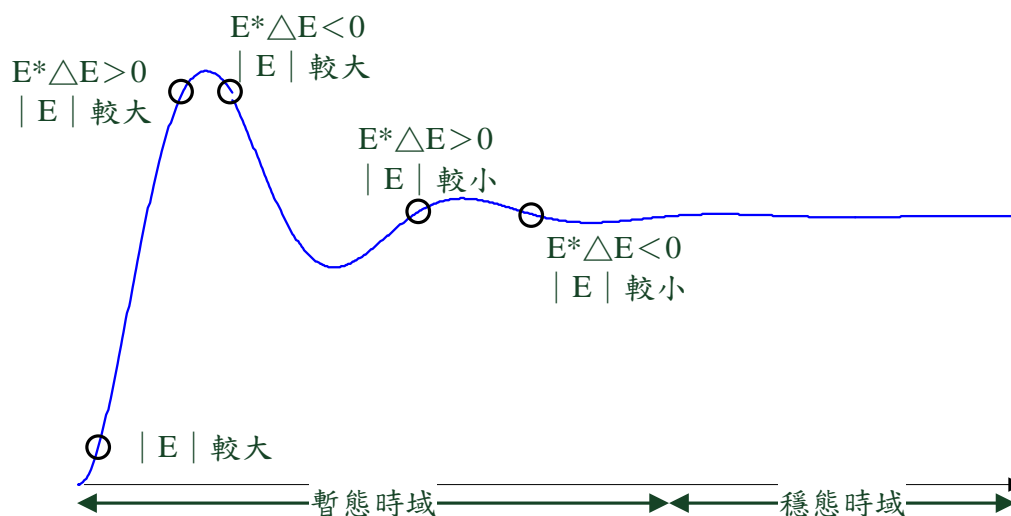


圖 3.4 控制響應狀態

表 3.1 PID 增益係數設計規則

增益值調整		$K_p$	$K_i$	$K_d$
$ E $ 較大		較大	較大	趨近於零
$E \times \Delta E > 0$	$ E $ 較大	較大	適中	較小
	$ E $ 較小	適中	較小	較大
$E \times \Delta E < 0$	$ E $ 較大	適中	適中	較小
	$ E $ 較小	較小	較小	較大

有鑑於增益係數的設計規則存在模糊的特質，故將採用具備語意式的模糊理論設定 PID 增益係數。

傳統 PID 控制理論必須先選擇採用 PI、PD、PID 何種控制器，並設定固定的增益值(沈金鐘, 2001)。PID 的增益係數通常是由專家、試誤法或者是一些調整法則來設定，在設定的同時即考量到穩態與暫態時的情況。

但面臨到，這組參數是考量整體最佳化的目標去設定，因此對於一些局部性的時間點，控制效果卻可能不盡理想。面對傳統 PID 控制器固定增益值的缺點，本研究認為應將固定增益值轉換為具有彈性、可隨不同情況調整的增益值。有鑒於模糊理論能將明確變數集合轉換為模糊變數集合，故本研究提出導入模糊理論，將傳統 PID 控制器固定增益值非 0 即 1 的二值邏輯轉換為介於[0,1]之間的連續函數形式，達到具備彈性調整的特質；另一方面，以受控系統回傳的實際值為依據進行調整，藉此達到即時修正之目的。

本研究將採用(Zhen-Yu *et al.*, 1993)針對 PID 增益係數所提出之調整方法，利用模糊控制規則對 PID 控制器中的增益參數進行即時修正，並以修正後的增益參數對受控系統進行控制。整個模糊控制 PID 系統的結構如圖 3.5 所示。

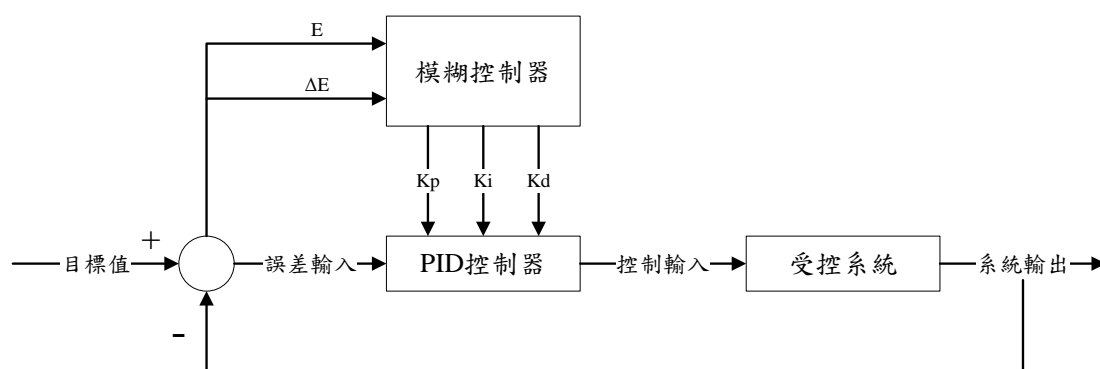


圖 3.5 模糊控制PID結構圖

本研究探討軟板張力這類動態、非線性的模型，導入 Fuzzy PID 控制器的控制效果，故僅對軟板張力控制器導入模糊理論，控制器的設計架構如圖 3.6 所示。



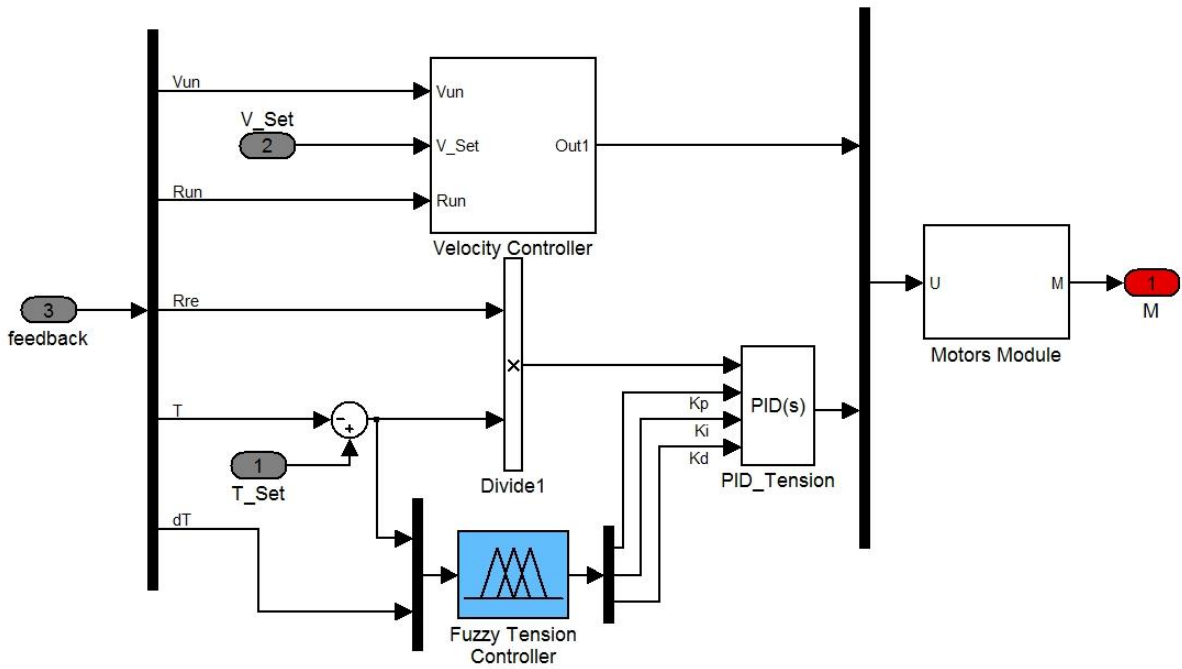


圖 3.6 Fuzzy PID控制系統

圖 3.6 中藍色方塊即為 Fuzzy PID 控制器，以軟板張力誤差和誤差變化量做為模糊控制器的輸入，藉由模糊推論計算出 PID 控制器中的增益參數，PID 控制器再根據輸出的增益參數對軟板張力進行控制。

### 3.2.1 變數之模糊歸屬函數

本研究欲根據受控系統回傳的軟板張力誤差即時調整 PID 增益係數，故針對軟板張力誤差、誤差變化量、比例、積分、微分增益係數進行模糊化。連續型式的歸屬函數的優點是可微分，對於需要運用學習機制的場合，較離散型歸屬函數容易使用(孫宗瀛、楊英魁，2005)。本研究採用連續型式中三角形歸屬函數來定義變數的變化情況。本研究的輸入變數有兩個，即軟板張力誤差以及誤差變化量，輸出變數則為 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 三個增益係數。為了能詳細區分各個變數的變化情況，輸入變量採用七個三角歸屬函數所組成的模糊集合來表示，其定義分別如下：大的負值(Negative Big, NB)、中的負值(Negative Medium, NM)、小的負值(Negative Small, NS)、目標零值(Zero, ZO)、小的正值(Positive Small, PS)、中的正值(Positive Medium, PM)、大的正值(Positive Big, PB)；輸出變量則採用三個三角歸屬函數所組成的模

糊集合來表示，其定義分別如下：大的(Big, B)、適中(Medium, M)以及小的(Small, S) (Zhen-Yu *et al.*, 1993)。在進行製程之前，會先設定軟板張力目標值以及允差範圍，為了簡化運算時的複雜度，會先利用線性轉換將張力誤差以及誤差變化量做線性轉換，將之轉化於-1 到 1 之間，其轉化公式如下。

$$E'_t = \frac{2(E_t - E_{t\min})}{(E_{t\max} - E_{t\min})} - 1$$

$$\Delta E'_t = \frac{2(\Delta E_t - \Delta E_{t\min})}{(\Delta E_{t\max} - \Delta E_{t\min})} - 1$$

其中 $E_t$ 與 $\Delta E_t$ 的論域範圍依序為 $[E_{t\max}, E_{t\min}]$ 以及 $[\Delta E_{t\max}, \Delta E_{t\min}]$ ，其中，論域範圍是指未受控制前的軟板張力值變動區間。歸屬函數的設計將以 0 做為張力誤差值以及誤差變化量轉化後的中心點，左右對稱且均勻的將七個歸屬函數分配於論域範圍內，也就是控制器可以正常運作的範圍以內，得到圖 3.7 為軟板張力的誤差歸屬函數。圖 3.8 誤差變化歸屬函數。

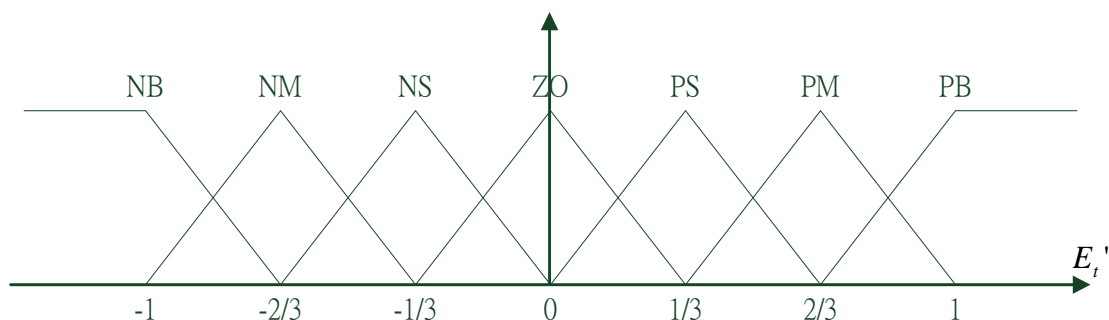


圖 3.7 軟板張力誤差歸屬函數

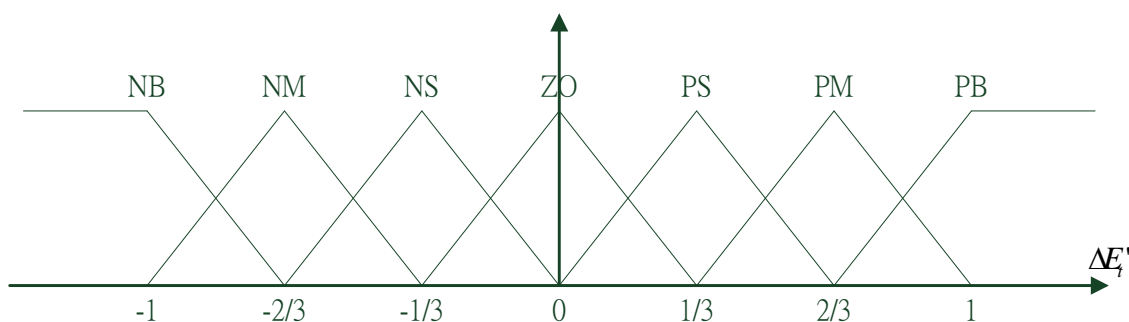


圖 3.8 誤差變化量歸屬函數

輸出變數 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 的論域範圍分別是以 PID 最佳化增益係數 [3.5970, 11.1630, 0.7090] 為中心，根據(Zhen-Yu *et al.*, 1993)所提出的經驗法則， $K_p$ 的論域範圍是左右各相差 6， $K_i$ 的論域範圍是左右各相差 3， $K_d$ 的論域範圍是左右各相差 1.25。另外，輸出變數 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 僅分別使用三個歸屬函數，並將歸屬函數的設計成左右對稱且均勻的分配於論域範圍內。下圖 3.9、圖 3.10、圖 3.11 依序為 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 三個輸出變數的論域以及歸屬函數集合。

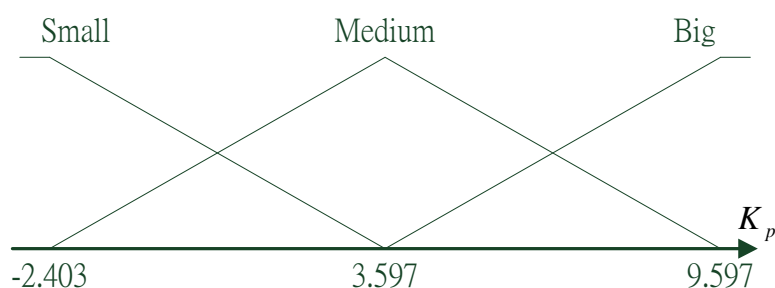


圖 3.9 比例增益係數歸屬函數

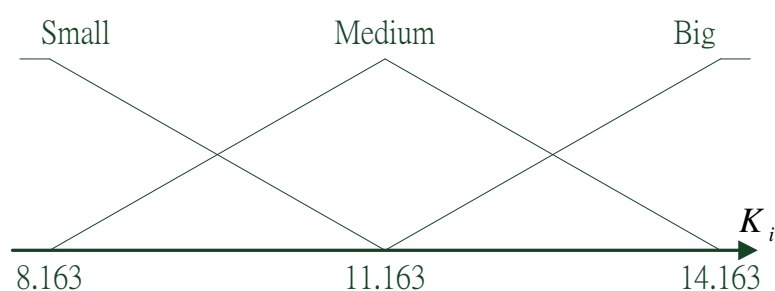


圖 3.10 積分增益係數歸屬函數

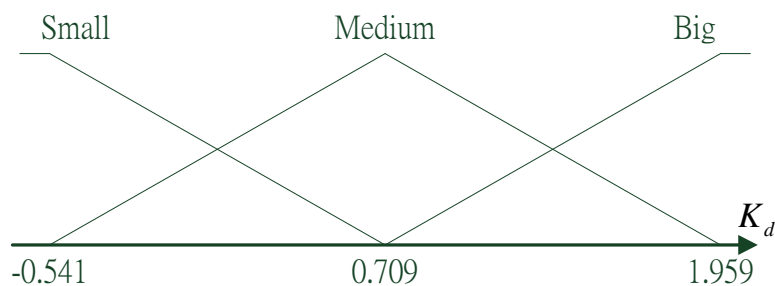


圖 3.11 微分增益係數歸屬函數

### 3.2.2 模糊規則庫的建構

考慮到理想的軟板張力控制能接受的最大超越輸出量、上升時間以及穩態時間等因素，增益參數 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 對不同狀態的處理效果分別如下所述（李允中 等人，2008；孫宗瀛、楊英魁，2005）：

1. 比例項(Proportional Term,  $K_p$ )：提升 PID 控制系統中的 $K_p$ ，可以使受控系統的響應速度加快，減少暫態情況的時間，亦能降低穩態誤差。但是當 $K_p$ 過大時，對受控系統的誤差會變得非常敏感，反而會使受控系統的輸出不穩定。
2. 積分項(Integral Term,  $K_i$ )：PID 控制系統中的 $K_i$ 主要是用於消除受控系統的穩態誤差，提升 $K_i$ 能使受控系統消除穩態誤差的時間降低。但是當 $K_i$ 過大時，會使受控系統因為控制量過大而產生反向誤差。
3. 微分項(Derivative Term,  $K_d$ )： $K_d$ 主要的功能是對受控系統的輸出做預測，提早對誤差進行控制。但是當 $K_d$ 過大時，會提早抑制受控系統的輸出，造成控制時間延長，造成控制干擾的效果降低。

針對上面三種增益係數對不同狀態的處理效果，我們可以根據受控系統的輸出誤差 $E_t$ 以及誤差變化率 $\Delta E_t$ 即時調整增益係數，提升控制效果(Zhen-Yu *et al.*, 1993)。以下分成三個狀態去做考量：

1. 當 $|E_t|$ 較大時表示受控系統輸出處於暫態，此時將會設定較大的 $K_p$ 以及 $K_d$ 來提升響應速度並降低消除誤差的時間，另一方面為了避免控制量過大的情形發生， $K_i$ 會設定趨近於零的值。
2. 當 $E_t \cdot \Delta E_t > 0$ 表示受控系統的輸出往偏離目標值的方向變化。當 $|E_t|$ 較大時表示受控系統輸出處於暫態，將會設定較大的 $K_p$ 、適中的 $K_d$ 以及較小的 $K_i$ ；假如當 $|E_t|$ 較小時表示受控系統輸出處於穩態，則設定適中的 $K_p$ 、較小的 $K_d$ 以及較大的 $K_i$ 藉此提升穩態時的系統穩定性。
3. 當 $E_t \cdot \Delta E_t < 0$ 表示受控系統的輸出往目標值的方向變化。當 $|E_t|$ 較大時表示受控系統輸出處於暫態，因為輸出是往目標值方向變化，故僅需設定適中的 $K_p$ 、適中的 $K_d$ 以及較小的 $K_i$ ；假如當 $|E_t|$ 較小時表示受控系統輸出處於穩態，則設定較小的 $K_p$ 、較小的 $K_d$ 以及較大的 $K_i$ 。

綜合上述軟板張力誤差、誤差變化與比例、增益、積分項的分析，將之轉換成模糊規則，定義如下

IF  $E_t$  is  $A_i$  and  $\Delta E_t$  is  $B_i$  , THEN  $K_p$  is  $C_i$  ,  $K_i$  is  $D_i$  ,  $K_d$  is  $F_i$

其中， $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$ 、 $F_i$ 依序為對應的模糊集合，並使用下表 3.2、3.3、3.4 是根據上述三種狀態應該如何調整增益係數所設計的模糊控制規則，依序為 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 的模糊控制規則(Zhen-Yu *et al.*, 1993)。

表 3.2  $K_p$ 模糊控制規則

$K_p$		$\Delta E$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	M	B	B	B	B	B	M
	NS	S	M	M	M	M	M	S
	ZO	S	S	S	S	S	S	S
	PS	S	M	M	M	M	M	S
	PM	M	B	B	B	B	B	M
	PB	B	B	B	B	B	B	B

表 3.3  $K_i$ 模糊控制規則

$K_i$		$\Delta E$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	M	S	S	S	S	S	M
	NS	B	M	S	S	S	M	B
	ZO	B	B	M	M	M	B	B
	PS	B	M	S	S	S	M	B
	PM	M	S	S	S	S	S	M
	PB	S	S	S	S	S	S	S

表 3.4  $K_d$ 模糊控制規則

$K_d$		$\Delta E$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	M	B	B	B	B	B	M
	NS	S	M	M	M	M	M	S
	ZO	S	S	M	M	M	S	S
	PS	S	M	M	M	M	M	S
	PM	M	B	B	B	B	B	M
	PB	B	B	B	B	B	B	B

本文採用 Min-Min-Max 法(Mamdani 法)進行模糊推論，第一個階段是以最小的觸發強度做為歸屬函數值，但本研究採用明確的誤差值以及誤差變化量做為輸入值，故可忽略這部分；第二個階段則是當有兩個輸入變數時，取較小的歸屬函數值；並在最後一個整合階段取最大的歸屬函數值；並在解模糊化的步驟力用重心法求解。

### 3.3 績效衡量標準

張力控制結果主要可分成暫態與穩態兩個時域進行探討，控制響應圖如圖 3.12 所示（蔡瑞昌 等人，2008）。

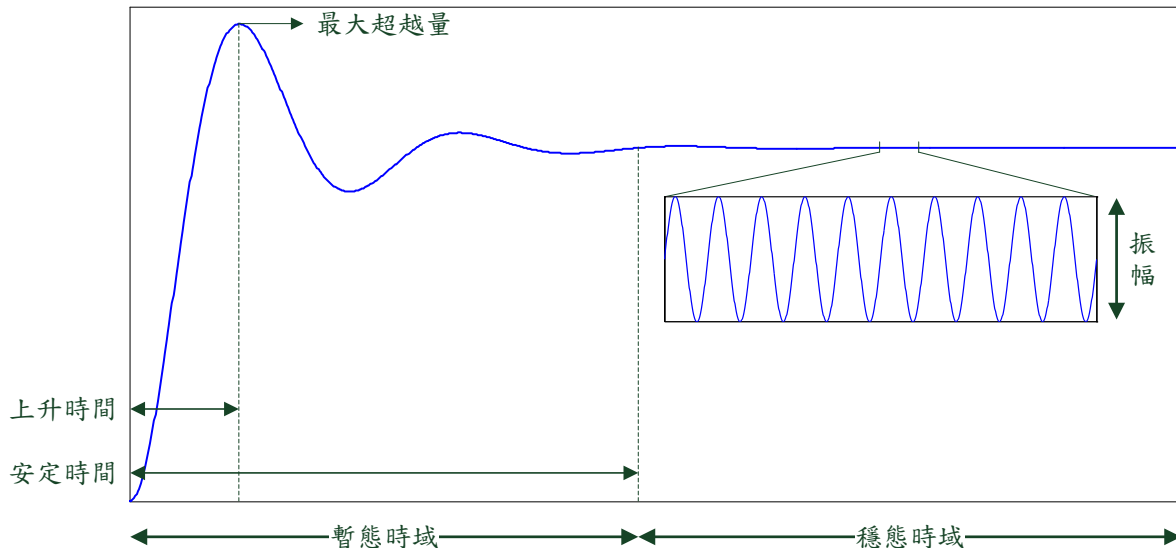


圖 3.12 控制響應圖

控制響應指的是控制系統的輸出值。暫態時域是由控制器開始控制到控制響應達穩態的這段時間所構成，此時，控制器的績效衡量指標有上升時間、安定時間以及最大超越量；另外，穩態時域的控制響應又稱為臨界穩定，一般來說，穩態時域依然存在一個響應振幅，此時，控制器的績效衡量指標即為響應的振幅大小（陳朝光 等人，2004）。第四章的控制器績效分析將以上述幾個績效衡量指標進行探討。

## 第四章 模擬分析

本研究期望藉由模糊控制器修正 PID 控制器中的增益參數，並藉此達成捲撓式傳輸系統傳輸過程中軟板定張力的結果。為了說明軟板張力與收放捲速度之間的關聯性，第一部分將以固定收、放捲滾輪速度的方式對軟板張力進行控制，藉由不同的滾輪速度差對軟板進行拉扯，並對得到的軟板張力響應進行分析。由第二章捲撓式製程傳輸動態的文獻探討我們可以得知，滾輪速度僅能由馬達力矩的設定去控制滾輪速度，因此，第二部分將以固定馬達力矩的方式分析軟板張力響應的情況。分析捲撓式製程的張力響應情況後，將對此捲撓式製程設置控制系統，針對傳統 PID 控制器的控制績效以及利用模糊規則庫即時修正 PID 控制器中的增益參數的控制績效進行差異分析說明。

在進行模擬之前，須先設定捲撓系統以及軟板的系統參數，本研究設定的系統參數如下表所示（陳煜傑，2011）。

表 4.1 系統參數設定

捲撓系統之系統參數	參數值	軟板(PET)之系統參數	參數值
滾輪內徑(m)	0	軟板寬度(m)	0.3
滾輪外徑(m)	0.04	軟板厚度(m)	0.000125
滾輪寬度(m)	0.3	軟板楊氏係數(Gpa)	2.8
滾輪密度(kg/m <sup>3</sup> )	2700	軟板密度(kg/m <sup>3</sup> )	1400
滾輪黏滯摩擦係數	0.001		
滾輪間距(m)	1		
放捲滾輪起始半徑(m)	0.2		
收捲滾輪起始半徑(m)	0.04		



## 4.1 捲撓式傳輸系統輸出響應情形

本節將針對未受控制的捲撓式系統進行探討，期望藉由探討捲撓式系統的輸出響應，找尋合理的控制方式與控制範圍。

### 4.1.1 定速滾輪的軟板張力響應

在導入控制器之前，為了說明滾輪速度造成軟板張力響應的情況，這邊先討論以固定收、放捲滾輪速度的方式模擬軟板張力的響應狀況，以下分成幾個部分進行探討：

1. 設定放捲滾輪轉速為 0.05m/s、收捲滾輪轉速為 0.06m/s；放捲滾輪轉速為 0.05m/s、收捲滾輪轉速為 0.08m/s 兩種情況的軟板張力響應，圖 4.1 為軟板張力的響應情況。藍色線條為放捲滾輪轉速 0.05m/s、收捲滾輪轉速 0.06m/s 的張力響應圖；紅色線條為放捲滾輪轉速 0.05m/s、收捲滾輪轉速 0.08m/s 的張力響應圖。

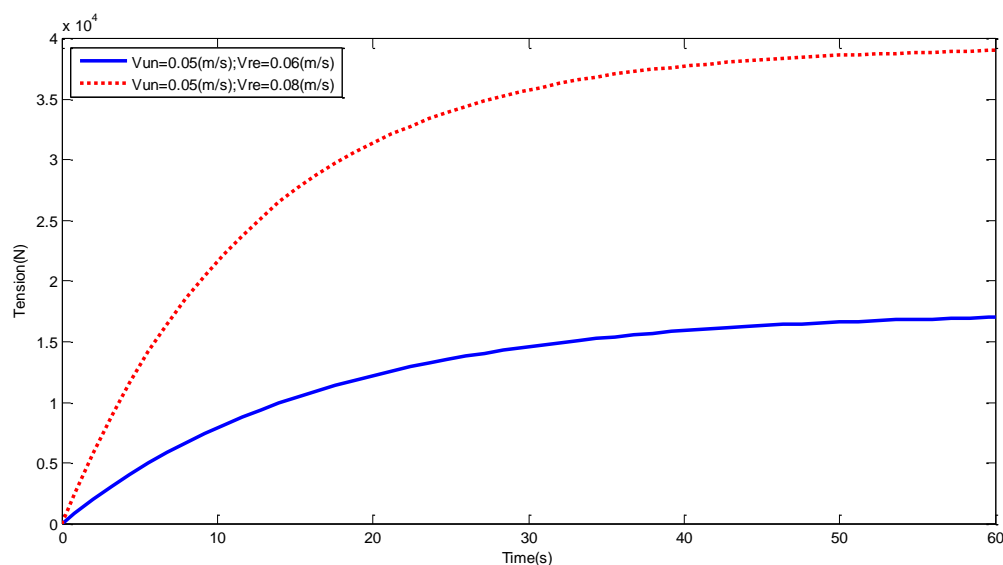


圖 4.1 定速滾輪之軟板張力響應圖

由圖 4.1 可以看出，兩種情況的張力響應都在 60 秒左右收斂於定值，另外，固定放捲端滾輪速度的情況下，提升收捲端滾輪速度因為滾輪速度差增加，使軟板張力增加，但因為速度差異過大造成軟板張力超出期望的軟板張力目標值，接下來將討論滾輪速度差異範圍的軟板張力響應情況。

2. 設定放捲滾輪轉速為 0.05m/s、收捲滾輪轉速為 0.0501m/s；放捲滾輪轉速為 0.05m/s、收捲滾輪轉速為 0.05001m/s；放捲滾輪轉速為 0.05m/s、收捲滾輪轉速為 0.050001m/s 三種情況的軟板張力響應。圖 4.2 為不同速度之軟板張力的響應情況。藍色線條為放捲滾輪轉速 0.05m/s、收捲滾輪轉速 0.0501m/s 的張力響應圖；紅色線條為放捲滾輪轉速 0.05m/s、收捲滾輪轉速 0.05001m/s 的張力響應圖；綠色線條為放捲滾輪轉速 0.05m/s、收捲滾輪轉速 0.050001m/s 的張力響應圖。

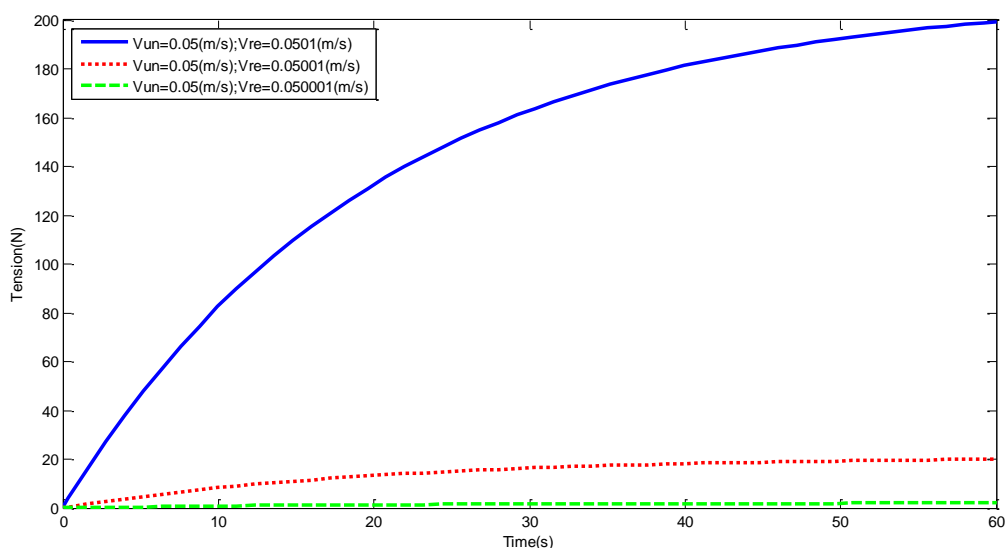


圖 4.2 最適滾輪速度差之軟板張力響應圖

由圖 4.2 可以看出，三種情況的張力響應以速度差為  $10^{-5}$  m/s 的情況最接近目標軟板張力值，此響應情況提供後續設定滾輪速度差的依據。最後要探討的是收、放捲滾輪轉速的調整模式對軟板張力的響應情況。

3. 因為滾輪速度的設定是以高速為目標，故這邊不探討降低轉速產生速度差的情況，而是以固定放捲滾輪速度提升收捲滾輪速度、同時提升收、放捲滾輪速度兩種的調整模式進行探討，分別設定放捲滾輪轉速為 0.05m/s、收捲滾輪轉速為 0.05001m/s；放捲滾輪轉速為 0.05m/s、收捲滾輪轉速為 0.05002m/s；放捲滾輪轉速為 0.1m/s、收捲滾輪轉速為 0.10002m/s；放捲滾輪轉速為 0.1m/s、收捲滾輪轉速為 0.10004m/s 四種軟板張力的響應情況。

四種軟板張力的響應情況如圖 4.3 所示。藍色線條為放捲滾輪轉速 0.05m/s、收捲滾輪轉速 0.05001m/s 的張力響應圖；紅色線條為放捲滾輪轉速 0.05m/s、收捲滾輪轉速 0.05002m/s 的張力響應圖；綠色線條為放捲滾輪轉速 0.1m/s、收捲滾輪轉速 0.10002m/s 的張力響應圖；淡藍色線條為放捲滾輪轉速 0.1m/s、收捲滾輪轉速 0.10004m/s 的張力響應圖。

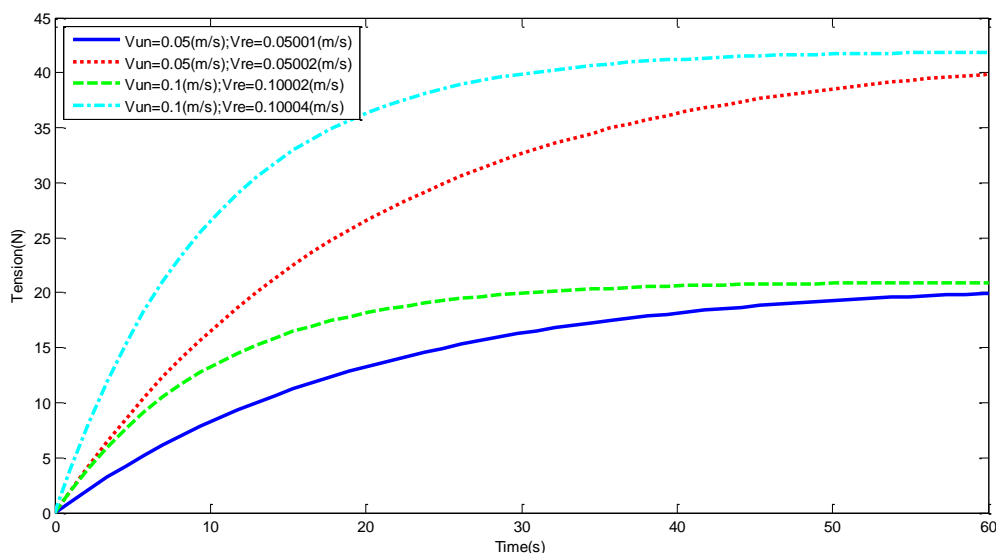


圖 4.3 不同滾輪速度情況下之軟板張力響應圖

由圖 4.3 可以看出，軟板張力響應情況依照收、放捲滾輪速度的不同，有四種情況產生。藍、紅色響應曲線為固定放捲滾輪速度的情況下提升收捲滾輪速度，因為速度差提升，造成軟板張力有增加的情況產生；接下來探討藍、綠色響應曲線以及紅、淡藍色響應曲線，這兩種響應曲線組合均為同時提升收、放捲滾輪的速度，並將速度差增加為兩倍的情況，由響應圖可以發現，這種情況底能夠提升軟板張力的響應速度。

綜合以上各種不同收、放捲滾輪速度設定以及軟板張力的響應情況，我們可以得到下面幾個結論：

1. 當收、放捲滾輪速度之間有差異時，會對軟板進行拉扯，進而產生軟板張力，因此，藉由控制滾輪速度並令收、放捲滾輪之間產生速度差，將能達到控制軟板張力的目標。
2. 縱使收、放捲滾輪之間的速度差能使軟板產生張力，且速度差越大產

生的軟板張力月大，但是當速度差太大反而會施加過度的拉扯力於軟板之上，而有軟板變形、損壞等情況發生，根據以上的響應結果，我們可以大概推估滾輪速度差應低於  $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ，但這僅是大略的觀測值，實際控制範圍將會於後面做探討。

3. 在同時提升收、放捲滾輪速度的情況底下，根據以上軟板張力響應的結果可以發現，提升滾輪速度有助於提升軟板張力收斂於定值的速度，並使軟板張力的響應時間縮短。

#### 4.1.2 固定馬達輸出力矩之軟板張力響應

在導入控制器之前，我們還需討論以固定馬達力矩的方式模擬軟板張力的響應狀況，另外，馬達輸出力矩是介於  $\pm 7.16 \text{Nm}$  之間，因此將在這個輸出力矩範圍內進行探討。軟板必須藉由拉扯才會產生軟板張力，因此，收、放捲滾輪的馬達力矩設定前提為收捲滾輪的力矩必須要大於放捲滾輪的力矩，並以此條件做為依據，對馬達力矩進行模擬分析如下。第一組依序輸入固定的放捲馬達力矩  $-3(\text{Nm})$  以及收捲端馬達力矩  $+1.5(\text{Nm})$ ；第二組則增加收捲端的馬達力矩，設定放捲馬達力矩  $-3(\text{Nm})$  與收捲端馬達力矩  $+7.16(\text{Nm})$ 。收放捲設定的馬達力矩不同會使收、放捲滾輪速度產生差異，當速度差產生就會拉扯軟板而產生軟板張力，同時軟板在受到拉扯後產生的張力亦會對滾輪產生逆向力矩，在這種情況底下軟板張力因同時受到合力矩的影響而隨時間產生波動，由於在軟板響應的前段時域，馬達瞬間提供力矩，造成軟板張力亦有較大的反作用力而產生張力波動幅度較大的情況，接下來因為瞬時力矩變化降低亦將使得軟板的反作用力降低，使得軟板張力的波動漸趨平緩，並產生收斂的情況。固定馬達力矩的情況底下，因為收、放捲滾輪的速度持續在變動，造成軟板張力的波動情況發生，同時探討兩組馬達力矩，馬達力矩差異大時，因為瞬時力矩的輸入將使張力波動幅度提升。圖 4.4 為固定馬達力矩之軟板張力的響應情況。藍色線條為放捲馬達力矩  $-3(\text{Nm})$ 、收捲端馬達力矩  $+1.5(\text{Nm})$  的張力響應圖；紅色線條為放捲馬達力矩  $-3(\text{Nm})$ 、收捲端馬達力矩  $+7.16(\text{Nm})$  的張力響應圖。

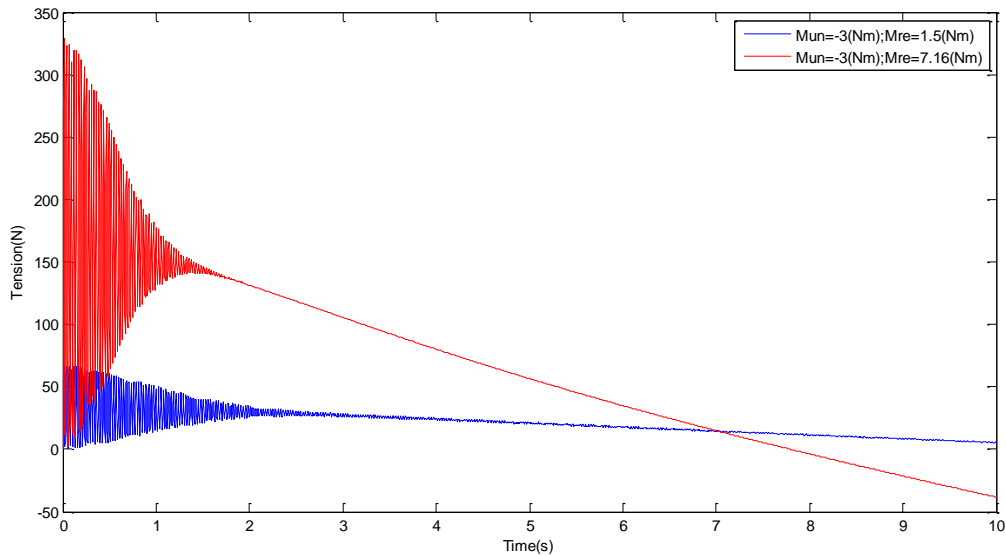


圖 4.4 固定馬達輸出力矩之軟板張力響應圖

## 4.2 導入控制器之系統輸出響應情形

本節將分別探討使用傳統 PID 控制器以及 Fuzzy PID 控制器後的捲撓式傳輸系統的輸出響應情形。

### 4.2.1 傳統 PID 控制器

在討論完捲撓式系統的在未受控制情況時的張力響應後，這個小節將開始導入控制器利用滾輪的馬達力矩對軟板張力進行控制，並根據超越量、暫態時間以及穩態時的震動幅度對控制效果進行分析。每種軟板張力都存在最適合此種材料進行製程的軟板張力目標值，因此，在進行軟板張力控制之前必須先設定軟板的目標張力值，本研究以 30N 的軟版張力值做為目標張力值，來探討 PID 控制器對軟板張力的控制效果。

導入 PID 控制器後的軟板張力響應情況如圖 4.5 所示。

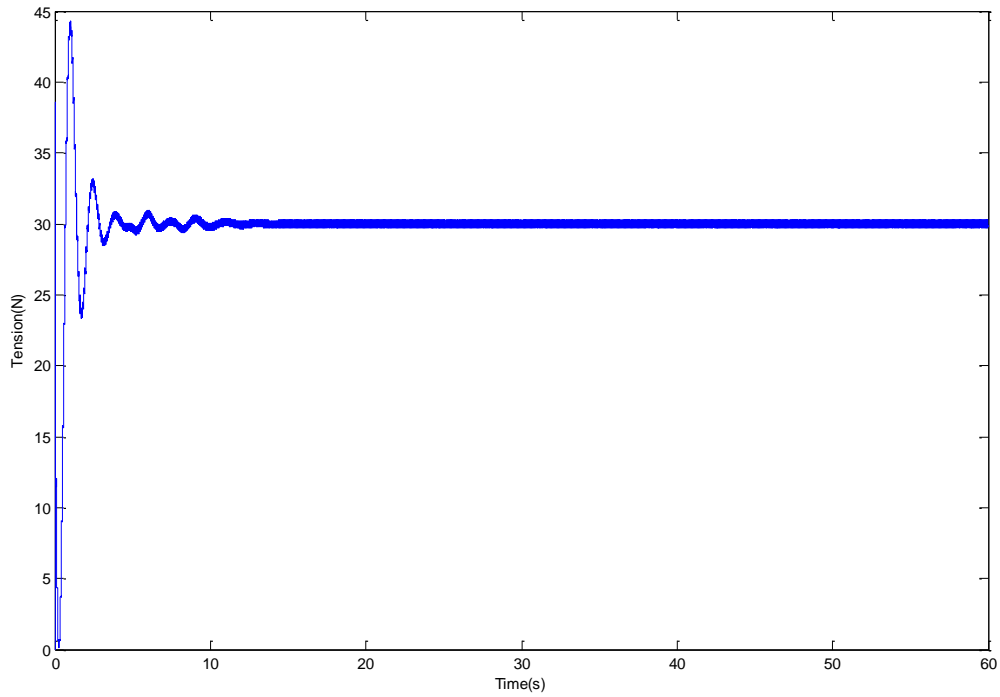


圖 4.5 導入PID控制器之張力響應圖

另外，將穩態時域的軟板張力響應情況放大如圖 4.6 所示。

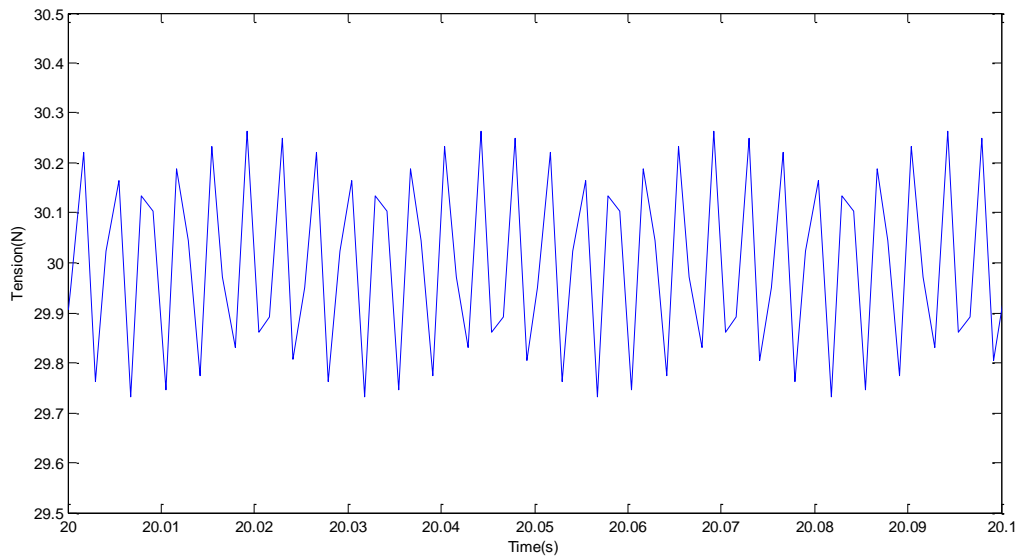


圖 4.6 穩態張力響應圖

由圖 4.5 以及圖 4.6 的穩態張力響應圖可看出，起始的軟板張力為 0N，

藉由 PID 控制器對收捲滾輪力矩進行調整，在起始時域可以看出軟板張力的響應有超越值的情況發生，主要是因為起始張力值與目標張力值存在較大的差距，為了達到目標張力值，控制系統施加了較高的補償量，但卻造成軟板張力值有過度響應的狀況發生，但因本研究主要探討的是軟板處於持續傳輸的過程中是否能達到期待的控制效果，對於軟板張力於起始時域的超越量響應情況不做深入探討，最後軟板張力約在 15 秒時調整至目標張力值 30N 左右。接下來則探討軟板張力於近似穩態時域的張力響應，如圖 4.6 將穩態時域的張力響應情況做部分放大，發現 PID 控制器雖然將軟板張力調整至目標張力值 30N 左右，但軟板張力仍然存在 $\pm 0.3\text{N}$ 左右的持續震盪。

因為不同材料的最適張力值有所不同，另一個模擬項目為，探討面對不同的軟板張力目標值，PID 控制器的張力調整效益，以下將針對目標張力值為 25N、30N、35N 三種情況進行分析。軟板張力響應情況如圖 4.7 所示。藍色線條為目標張力值 25N 的張力響應圖；紅色線條為目標張力值 30N 的張力響應圖；綠色線條為目標張力值 35N 的張力響應圖。

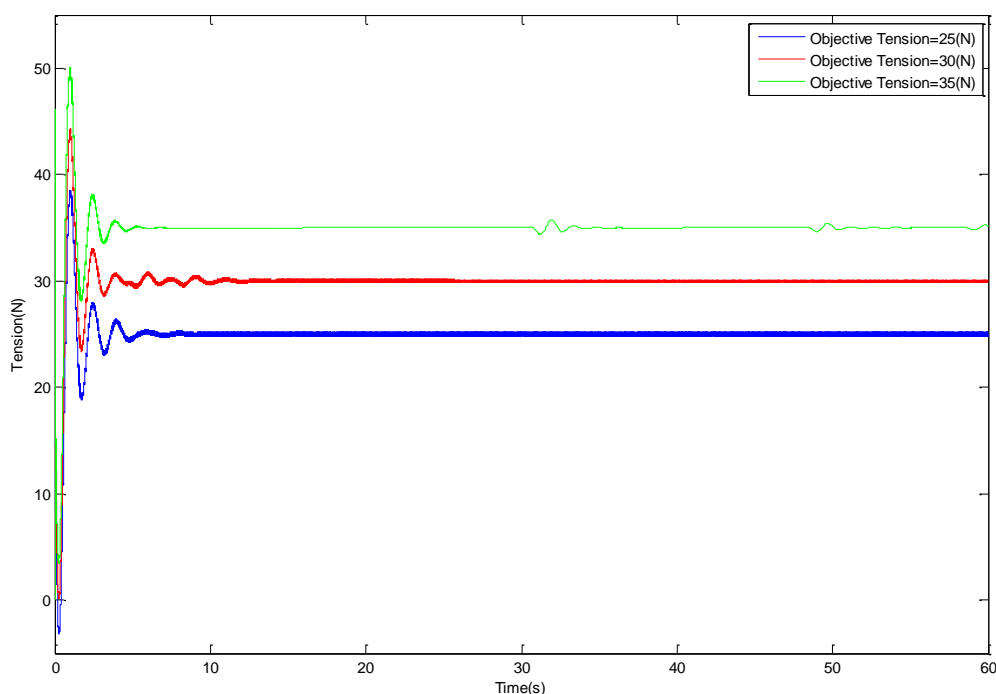


圖 4.7 不同軟板張力目標值之張力響應圖

另外，為了探討穩態時的張力震盪幅度，將穩態時域的軟板張力響應情況放大如所圖 4.8 所示。藍色線條為目標張力值 25N 的張力響應圖；紅色線條為目標張力值 30N 的張力響應圖；綠色線條為目標張力值 35N 的張力響應圖。

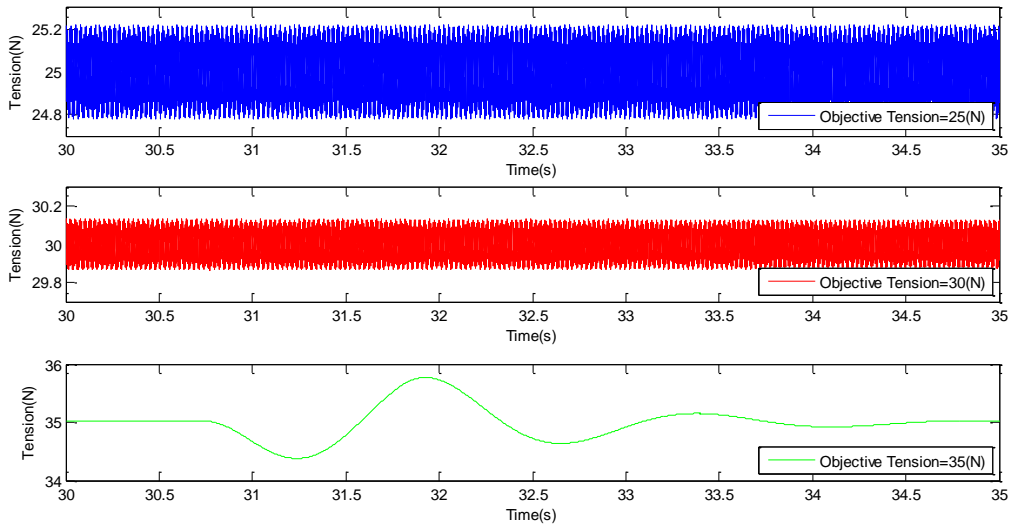


圖 4.8 穩態之張力響應圖

由圖 4.7 與圖 4.8 的穩態張力響應圖可以看出軟板張力的響應情況，根據響應情況整理成表 4.2。

表 4.2 PID 控制器之響應分析

Object Tension	暫態時域			穩態時域
	最大超越量(N)	上升時間(s)	安定時間(s)	振幅(N)
25N	38.523	1.01	11	[-0.2 0.2]
30N	44.293	0.99	15	[-0.15 0.15]
35N	50.564	0.97	8	[-0.62 0.77]

針對 PID 控制器對軟板張力控制績效進行分析，可以得知，PID 控制器對收捲滾輪力矩進行調整需要 10 秒左右的響應時間，而越大的目標張力值會產生越高的超越量響應，另外，因為 PID 控制器的增益值為定值，控



制器無法根據張力的響應情況而做調整，因此，不是用於任意的目標張力值控制。

#### 4.2.2 模糊 PID 增益控制器

本小節分別使用 PID 控制器以及 Fuzzy PID 控制器對兩種軟板張力目標值進行 40 秒的控制模擬，分析導入控制器後的軟板張力響應情況，並探討兩種控制器的控制績效。

情境一是探討目標張力值為 30N 的軟板張力響應情況，其軟板張力響應情況如圖 4.9 所示。其中藍色線條為使用 PID 控制器的張力響應；紅色線為使用 Fuzzy PID 控制器的張力響應。

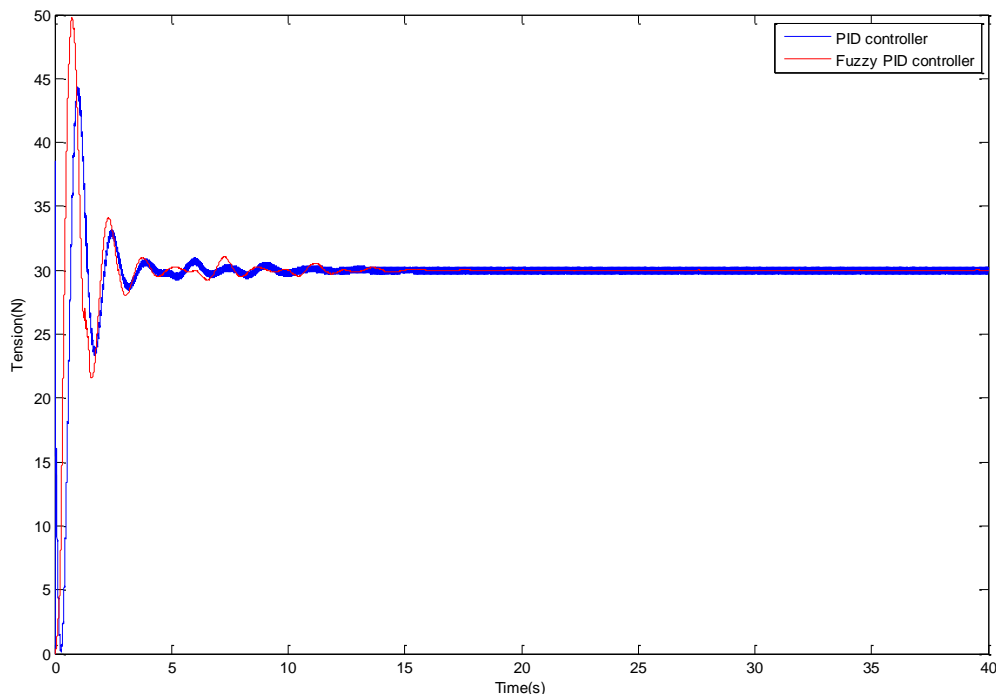


圖 4.9 PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器之張力響應圖

另外，為了探討穩態時的張力震盪幅度，圖 4.10 為放大穩態時域軟板張力響應情況。其中藍色線條為使用 PID 控制器的張力響應；紅色線為使用 Fuzzy PID 控制器的張力響應。

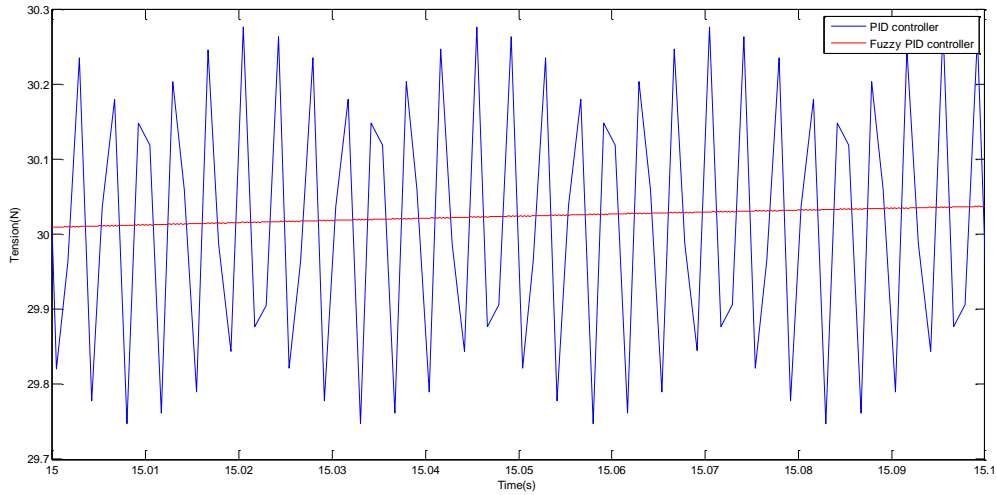


圖 4.10 PID控制器與Fuzzy PID控制器之穩態張力響應圖

根據響應情況整理成表 4.3，針對 PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器的結果進行探討。

表 4.3 PID控制器與Fuzzy PID控制器之響應分析

Object Tension 30(N)	暫態時域			穩態時域
	最大超越量(N)	上升時間(s)	安定時間(s)	震幅(N)
PID Controller	44.31	0.99	15	[-0.25 0.25]
Fuzzy PID Controller	49.76	0.74	15	[-0.01 0.01]

情境二則是探討目標張力值為 35N 的軟板張力響應情況，其響應結果如圖 4.11 所示。其中藍色線條為使用 PID 控制器的張力響應；紅色線為使用 Fuzzy PID 控制器的張力響應。

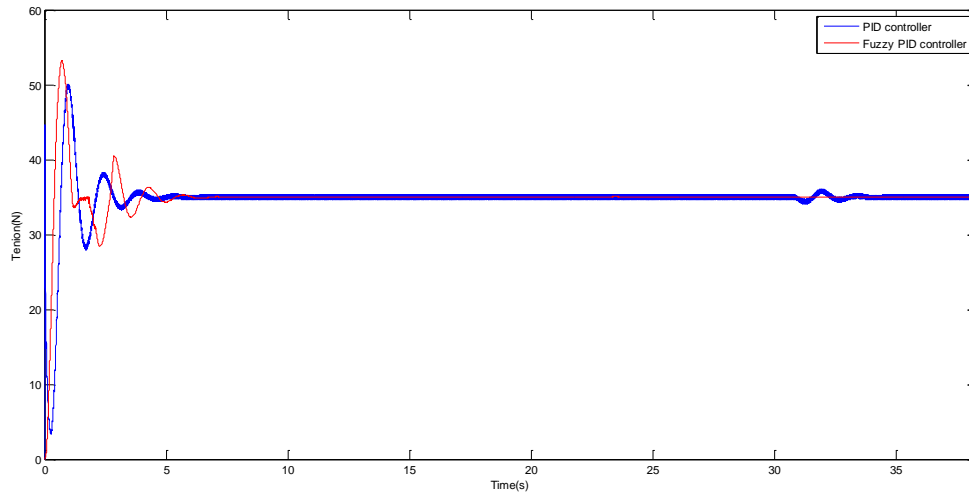


圖 4.11 PID控制器與Fuzzy PID控制器之張力響應圖

另外，為了探討穩態時的張力震盪幅度，圖 4.12 為放大穩態時域軟板張力響應情況。其中藍色線條為使用 PID 控制器的張力響應；紅色線為使用 Fuzzy PID 控制器的張力響應。

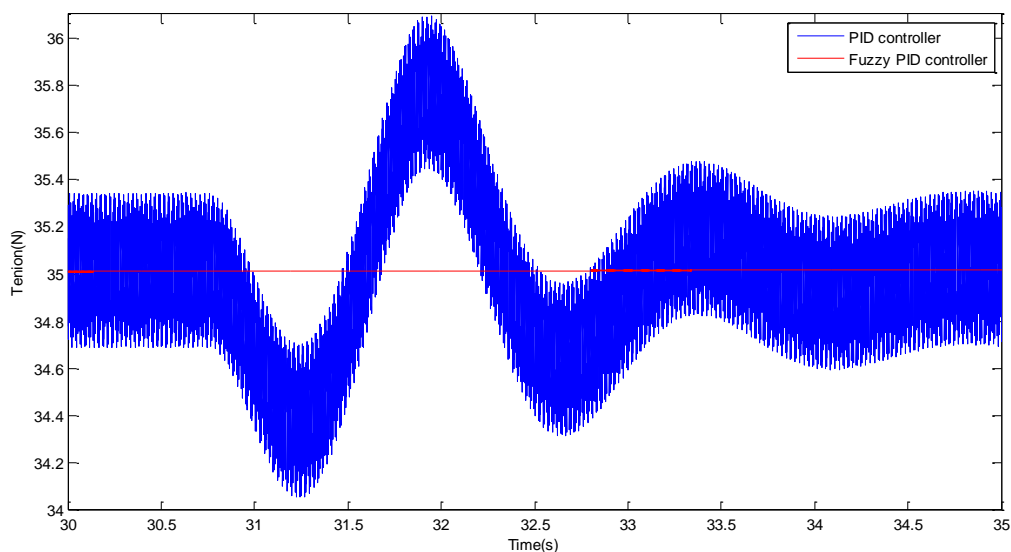


圖 4.12 PID控制器與Fuzzy PID控制器之穩態張力響應圖

由於兩個控制器的控制效果差異較大，故分別將其穩態震幅分開來探討，如圖 4.13(a)為使用 PID 控制器的軟板張力響應情況；圖 4.13(b)則是使用 Fuzzy PID 控制器的軟板張力響應情況。

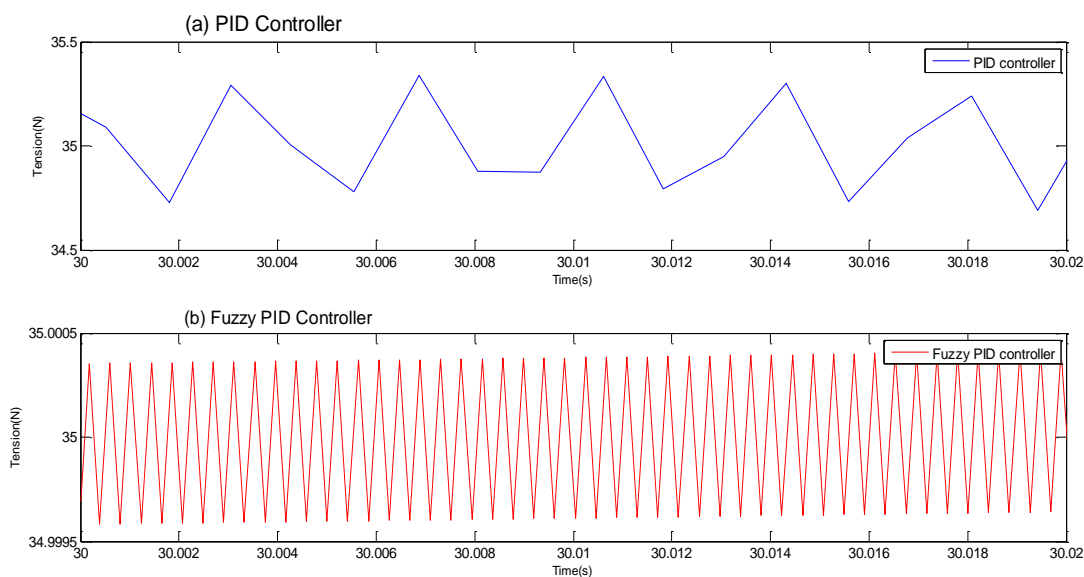


圖 4.13 PID控制器與Fuzzy PID控制器之穩態張力響應圖

圖 4.13(a)與圖 4.13(b)縱軸所顯示的範圍不同，PID 控制器的震幅約在 $\pm 0.5\text{N}$  左右，而 Fuzzy PID 控制器的震幅則為 $\pm 0.0005\text{N}$  左右，兩者震動幅度有很大的差異。

根據響應情況整理成表 4.4，針對 PID 控制器與 Fuzzy PID 控制器的結果進行探討。

表 4.4 PID控制器與Fuzzy PID控制器之響應分析

Object Tension 35(N)	暫態時域			穩態時域
	最大超越量(N)	上升時間(s)	安定時間(s)	震幅(N)
PID Controller	50.08	0.97	7	[-0.3 0.3]
Fuzzy PID Controller	53.18	0.72	7	[-0.005 0.005]

Fuzzy PID 控制器在起始時域的超越量是大於 PID 控制器，原因是 Fuzzy PID 控制器會依據軟板張力的響應情況調整 PID 增益係數，但卻也使得控制系統的穩定度下降，但若是以捲繞式製程持續傳輸的穩態時域來看，

兩個目標張力值情況的穩態震幅，Fuzzy PID 控制器的軟板張力震幅依序為 PID 控制器震幅的 4.00% 以及 1.67%，由張力震幅我們可以得知，Fuzzy PID 控制器的控制效果比 PID 控制器佳。

## 第五章 結論與未來研究方向

本論文針對非線性系統提出控制方法的改善方向。於 Matlab Simulink 環境底下模擬雙滾輪單間距的捲繞式製程結構，探討軟板傳輸的動態行為，並對軟板張力進行控制，期望能夠得到穩定的軟板張力值，以驗證改善方向的適當性。以下對其結果做分析與討論，並提出未來可能的發展以及改進之處。

### 5.1 結果與討論

本論文的貢獻在於傳統 PID 控制器固定增益參數對於輸出響應無法做出即時調整，導致面臨非線性系統時，控制效果不盡理想。另外，在面對不同的控制情況例如改變張力目標值，傳統 PID 控制器的控制效果亦會受到影響，在這種情況下則需針對增益係數重新定義，亦即需要由有經驗的工程師在經過繁瑣的試誤法重新設計增益係數才能得到適用於控制目標的增益係數。因此，本文提出將模糊理論導入 PID 控制器，採用即時調整 PID 增益係數的方式設計 Fuzzy PID 控制器，並利用相同控制目標與傳統 PID 控制器做分析比較。其中，Fuzzy PID 控制器設計之重要議題為：如何以模糊規則調整參數、模糊 PID 控制器穩定度。並於最後採用軟板張力的暫態時間以及穩態時的張力響應震動幅度探討兩種控制器的效果。

PID 增益參數通常是由具有經驗的工程師去做調整。調整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  增益係數之前必須瞭解增益係數各自的效果，例如  $K_p$  能依據誤差大小來調整控制器輸出，提升受控系統的反應速度與精確度，但相對的也將降低受控系統穩定度。 $K_i$  可用於消除穩態誤差，但是對於暫態的瞬間變化無法立即作出回饋控制。 $K_d$  雖然具有預測誤差趨勢的效果，但卻也容易在暫態時因為誤差較大而有預測值過高的情況發生，並將造成修正量過高使得受控系統不穩定。調整這些參數值通常是根據工程師的經驗適量增加或是降低這些增益係數，並於最後獲得增益係數的最佳值。本研究亦是根據這些特性去設計模糊知識庫，隨時調整 PID 控制器的增益值，目的是希望面臨不同的情況都能有較佳的控制效果。不同於傳統 PID 控制器的增益係數是固定的，Fuzzy PID 控制器將隨不同的軟板張力響應情況調整 PID 增益參數，根據模擬結果證實 Fuzzy PID 控制器可獲得較優之控制軟板張力的模擬

結果。

Fuzzy PID 控制器優於傳統 PID 控制器的原因是具有自動搜尋參數的功能，不同時域 PID 增益參數( $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ )各自具有其特性，固定 PID 增益係處縱然具有控制效果，但這僅是以全域響應情況去思考，但是以捲繞式製程的時間分佈來說，占整體時間最大比例的是持續傳輸時的階段，在這個階段使用傳統 PID 控制器的控制結果存在一個較大的軟板張力誤差量，反觀 Fuzzy PID 控制器的控制結果，藉由隨時調整 PID 增益參數的方式對軟板張力響應進行回饋，軟板張力誤差量確實低於傳統 PID 控制器。

## 5.2 未來研究方向

1. 本研究主要將重心放在探討 PID 控制器與導入模糊理論後的 PID 控制器對於軟板張力響應的控制情況。但是在起始時域這兩種控制器均有過高的超越量，未來能朝向設計能改善起始時域軟板張力響應的控制器。
2. 本研究僅針對導入模糊理論於傳統 PID 控制器處理非線性系統的適當性。未來可朝向如何設計 Fuzzy PID 控制器能夠達到更佳的控制效果探討。

## 參考文獻

- [1] 中國生產力中心技術引進服務組(2002)。FUZZY 控制。臺北市：全華科技圖書股份有限公司。
- [2] 古忠傑(2006)。滿足被動特性之仿射式 T-S 模糊模型的穩定性分析與控制器設計(碩士論文)。國立臺灣海洋大學，基隆市。
- [3] 李允中、王小璠、蘇木春(2008)。模糊理論及其應用。台北縣土城市：全華圖書股份有限公司。
- [4] 沈金鐘(2001)。PID 控制器：理論、調整與實現。臺中市：滄海書局。
- [5] 林佳興(2010)。軟性顯示器製造流程與品質特性指標之研究(碩士論文)。東海大學，台中市。
- [6] 施慶隆(2002)。控制系統分析與設計。臺北市：全華科技圖書股份有限公司。
- [7] 孫宗瀛、楊英魁(2005)。Fuzzy 控制：理論、實作與應用。臺北市：全華科技圖書股份有限公司。
- [8] 張嘉勳、林家興(2010)。電子紙市場技術現況與設備發展機會。機械工業雜誌，327，4-14。
- [9] 郭雅欣(2010)。電子紙上來談兵。科學人，101，94-98。
- [10] 陳克昌，莊佳橙，陳信吉(2004)。Roll-to-Roll 捲送設備技術分析。機械工業雜誌，258，122-136。
- [11] 陳政立(2008)。T-S 型模糊控制器併以自調整適應法則應用於非線性系統的發展(碩士論文)。國立臺灣海洋大學，基隆市。
- [12] 陳朝光、陳介力、楊錫凱(2004)。自動控制。台北縣五股鄉：高立圖書股份有限公司。
- [13] 陳煜傑(2011)。軟性基板捲軸式傳輸之縱向與橫向動態整合及控制(碩士論文)。國立成功大學，台南市。
- [14] 陳麒麟、張榮芳、張加強(2004)。軟性顯示器發展及關鍵技術現況。機械工業雜誌，258，110-121。
- [15] 鄔景華(2002)。自動控制原理。臺中市：滄海書局。
- [16] 劉冠志(2012)。【捲對捲網印製程與傳輸技術】。未出版之原始資料。
- [17] 黃國興(2012)。【卷對卷設備技術與超薄玻璃應用】。未出版之原始資料。
- [18] 蔡永明(1997)。網版製版印刷實務。臺北縣新莊市：貝星貿易股份有限公司。
- [19] 蔡明祺、陳寬益、林毅欽(2000)。高速捲繞系統之定張力控制。機械月刊，295，226-236。



- [20] 蔡瑞昌、陳維、林忠火(2008)。自動控制。台北縣土城市：全華圖書股份有限公司。
- [21] 盧俊男(2008)。模型預測控制設計及於雙線性伺服系統之應用(碩士論文)。國立成功大學，台南市。
- [22] 羅丞曜(2012)。【卷對卷軟性顯示器前瞻技術】。未出版之原始資料。
- [23] ArringtonMichael. (2009, April 16). 300,000 Kindle 2s Sold To Date. from The Washington Post:  
<http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2009/04/16/AR2009041603101.html>
- [24] Chang-Woo, L., Kee-Hyun, S. (2010). A Study on Taper-Tension Control Considering Telescoping in the Winding System. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 46(2), 687-693.
- [25] DisplaySearch. (2009, August 26). E-Paper Display Revenues Forecast to Reach \$9.6B by 2018, DisplaySearch Reports; E-Books to Reach 77M Units by 2018. from DisplaySearch:  
[http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/090826\\_e\\_paper\\_display\\_revenues\\_forecast\\_reach\\_9\\_6b\\_by\\_2018.asp](http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/090826_e_paper_display_revenues_forecast_reach_9_6b_by_2018.asp)
- [26] Evan, S. (2006). *Roll to Roll Processing for Flexible Electronics*. Cornell.
- [27] FranklinF.Gene, PowellDavidJ., Emami-Naeini.Abbas. (1994). Feedback control of dynamic systems. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- [28] Ghafari, A. S., Alasty, A. (2004, 3-5 June 2004). *Design and real-time experimental implementation of gain scheduling PID fuzzy controller for hybrid stepper motor in micro-step operation*. Paper presented at the Mechatronics, 2004. ICM '04. Proceedings of the IEEE International Conference on.
- [29] Goddard, R. E., Zheng, Y. F., Hemami, H. (1992). Control of the heel-off to toe-off motion of a dynamic biped gait. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 22(1), 92-102.
- [30] Hang, C. C., Astrom, K. J., Ho, W. K. (1991). Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula. *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, 138(2), 111-118.
- [31] Jeftenic, B. I., Bebic, M. Z. (2010). Realization of Rewinder With a Reduced Number of Sensors. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(8), 2797-2806.
- [32] Kee-Hyun, S., Soon-Oh, K. (2007). The Effect of Tension on the Lateral Dynamics and Control of a Moving Web. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 43(2), 403-411.
- [33] Kee-Hyun, S., Soon-Oh, K., Sang-Hoon, K., Seung-Ho, S. (2004). Feedforward control of the lateral position of a moving web using system identification. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 40(6), 1637-1643.
- [34] Koc, H., Knittel, D., de Mathelin, M., Abba, G. (2002). Modeling and robust control of winding systems for elastic webs. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*,

10(2), 197-208.

- [35] Kololuoma, T., Tuomikoski, M., Haring, T., Kopola, H. (2005, 1-4 Aug. 2005). *Roll-to-roll manufacturing technologies for flexible MEMS applications*. Paper presented at the Optical MEMS and Their Applications Conference, 2005. IEEE/LEOS International Conference on.
- [36] Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 20(2), 404-418.
- [37] Mamdani, E. H., Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13.
- [38] Pagilla, P. R., Siraskar, N. B., Dwivedula, R. V. (2007). Decentralized Control of Web Processing Lines. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 15(1), 106-117.
- [39] Rassweiler Andrew. (April 22, 2009). Amazon's Kindle 2 Costs \$185.49 to Build, iSuppli Teardown Reveals. from iSuppli:  
<http://www.isuppli.com/Teardowns/News/Pages/Amazon-s-Kindle-2-Costs-185-49-to-Build-iSuppli-Teardown-Reveals.aspx>
- [40] Seung-Ho, S., Seung-Ki, S. (2000). A new tension controller for continuous strip processing line. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 36(2), 633-639.
- [41] Shelton, J. J. (1986, 18-20 June 1986). *Dynamics of Web Tension Control with Velocity or Torque Control*. Paper presented at the American Control Conference, 1986.
- [42] Shin, K.-H. (1991). *Distributed control of tension in multispans web transport systems* (Doctoral dissertation). Oklahoma State University.
- [43] T. Takagi, M. Sugeno(1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, 15, 116-132.
- [44] Yerashunas, J. B., De Abreu-Garcia, J. A., Hartley, T. T. (2003). Control of lateral motion in moving webs. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 11(5), 684-693.
- [45] Zhao, Z. Y., Tomizuka, M., Isaka, S. (1992, 13-16 Sep 1992). *Fuzzy gain scheduling of PID controllers*. Paper presented at the Control Applications, 1992., First IEEE Conference on.
- [46] Zhen-Yu, Z., Tomizuka, M., Isaka, S. (1993). Fuzzy gain scheduling of PID controllers. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 23(5), 1392-1398.
- [47] ZIEGLER, J.G., and NICHOLS, N.B. (1942). Optimum settings for auto-matic controllers. *Trans. ASME*, 65, 433-444.

## 附錄一 軟性顯示器的發展契機與市場

在人類文明的發展過程中，對於過往知識的紀錄方法也在持續進步，一般而言，新的紀錄方式往往能提升知識傳播速率與廣度，1897 年陰極射線管顯示器(Cathode Ray Tube Display, CRT Display)的發明，帶起人類利用電子技術進行知識傳遞的新浪潮，並開啟了顯示器市場的大門；接下來，液晶顯示器(Liquid Crystal Display, LCD)帶起第二波的顯示器革命，雖然在當時 LCD 的售價相當高，但依然有不少企業主願意使用 LCD 來替代原本的 CRT，主要原因就在於 LCD 的占用空間比 CRT 低，而如何有效運用辦公空間正是在房地產日漸高漲的世代中相當重要的議題；經過電子化、彩色化、平面化的顯示方式變革成功後，人類期望能繼續降低顯示器的占用空間、增加畫面尺寸及解析度甚至是提升顯示器對環境適應性，而為了滿足這些需求，便攜性、大尺寸、可捲繞等想法紛紛注入新一代顯示器的設計思維當中，並發展出新一代的顯示器諸如 3D 裸眼顯示器、雷射投影顯示器以及軟性顯示器…等。

為了滿足人類對顯示器的種種需求，並加入社會大眾對顯示器的期望諸如節能、環保…等，本研技就將針對軟性顯示器進行研究探討，除了一般性的需求以外，最主要的原因是軟性顯示器的電子紙技術具有雙穩態的特性，這個特性使得軟性顯示器具有降低電量耗損、節能的優點，更是能達到社會大眾期望的新一代顯示技術。

軟性顯示器的核心技術是電子紙(E-Paper Display, EPD)，目前市面上大多數閱讀器均採用微膠囊電泳式技術，這項技術是由 E-Ink 開發，專利目前則掌握在元太科技手中，其它電子紙顯示技術如微杯電泳式(Microcup)由達意科技研發；電子粉流體則是由台達電和日本 Bridgestone 合作開發；工研院則正在研究膽固醇液晶技術(科學人雜誌，2010)。EPD 屬於非自發光類型的顯示器，使用時與紙張、書籍一樣必須依靠環境光源，相對於含有背光模組的 TFT-LCD，EPD 因為是反射環境光源進入使用者的眼睛，所以使用者眼睛的進光量較少，能降低強光對眼睛的傷害，雖然 EPD 因為驅動時間長無法撥放動態的影片，但是卻較適合用於長時間閱讀文章的情況；另外，EPD 的顯示技術通常具有雙穩態的特性，所謂的雙穩態是指顯示單

元在不施加電壓的情況下，可持續維持在亮或暗的任何一種狀態，好處是只有在變換畫面時才需施加電壓驅動顯示單元，平常使用時不需施加任何電壓即可記憶前期畫面，具有降低電量耗損、節能的優點；再者，因為 EPD 與紙張、書籍的特性相似，未來若以 EPD 取代紙張將能減少樹木的砍伐，對地球自然環境的維護也會有所幫助。諸如以上優點，EPD 想必會在新一代顯示器革命浪潮中佔有一席之地。

在投入新技術的研發之前最需要考量的問題是，研發出來的新產品有沒有市場，以及顧客接受度的高低。以亞馬遜推出的第二代電子書閱讀器「Kindle 2」為例，截至 2009 年 4 月為止銷售量已達到 30 萬台，而且預估 Kindle 2 的銷售量將在當年底超過 80 萬台（華盛頓郵報，2009），如果以 iSuppli 在 2009 年調查 Kindle 2 的零組件與成本的分析報告(表 A-1.1)來計算，每台 Kindle 2 的電子紙顯示器模組成本為 60 美元，約為零售價 359 美元的 17% (iSuppli, 2009)，在 2009 年當年度，Kindle 2 的電子紙顯示器模組總成本為 4800 萬美元。為因應未來軟性顯示器產業競爭激烈的市場，如果能降低電子紙顯示器模組的成本，提升與其他競爭產品在價格上的差異性，將有效協助本國軟性顯示器產業發展具有更強的競爭優勢。

**表 A-1.1 Kindle 2 電子書閱讀器零組件成本**

零組件	成本(US dollars)	百分比(%)
電子紙顯示器模組	60	17
無線寬頻模組	39.5	11
八層 PCB 印刷電路板	9.83	3
多媒體應用處理器	8.64	3
鋰聚合物電池芯	7.5	2
主要外殼	4.45	1
影音 IC/電源管理 IC	4.39	1

表 A-1.1 Kindle 2電子書閱讀器零組件成本(續)

電子紙顯示器(EPD)控制器	4.31	1
SDRAM-Mobile DDR 1GB	3.6	1
Flash-NAND, 16GB, MLC	2.5	1
其他成本	32.11	9
材料總成本	176.83	50

(iSuppli, April 22, 2009)

根據科技市調機構 iSuppli 對軟性顯示器的市場需求預測報告中指出，過去幾年間，電子紙顯示器的市場已逐漸成長。預期在明年也就是 2013 年的軟性顯示器市場規模將達到 280 億美元的規模。顯示技術市調機構 DisplaySearch 的預估報告亦指出，2018 年 EPD 的市場需求量將由 2009 年的 2200 萬片成長至 19 億片；產值也會由原本的 4.31 億成長至 96 億美元，為了因應逐漸擴大的市場需求，設計完善的軟性顯示器生產模式以確保軟性顯示器的出貨量是刻不容緩的。

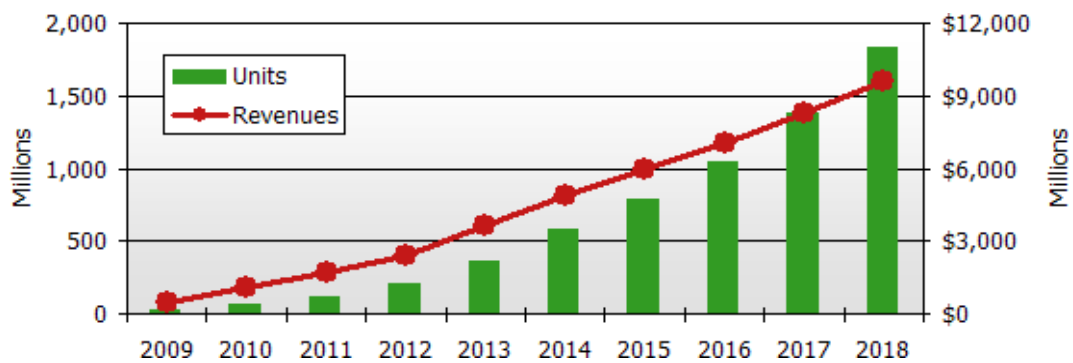


圖 A-1.1 全球電子紙顯示器出貨量與產值預測

(DisplaySearch, August 2009)

## 附錄二 Pattern 製作技術與解析度

顯示器製作 Pattern 的方式很多，目前 LCD 顯示面板是採用蝕刻製程製作所需之 Pattern，圖 1.2 為各種製作圖形的方式。

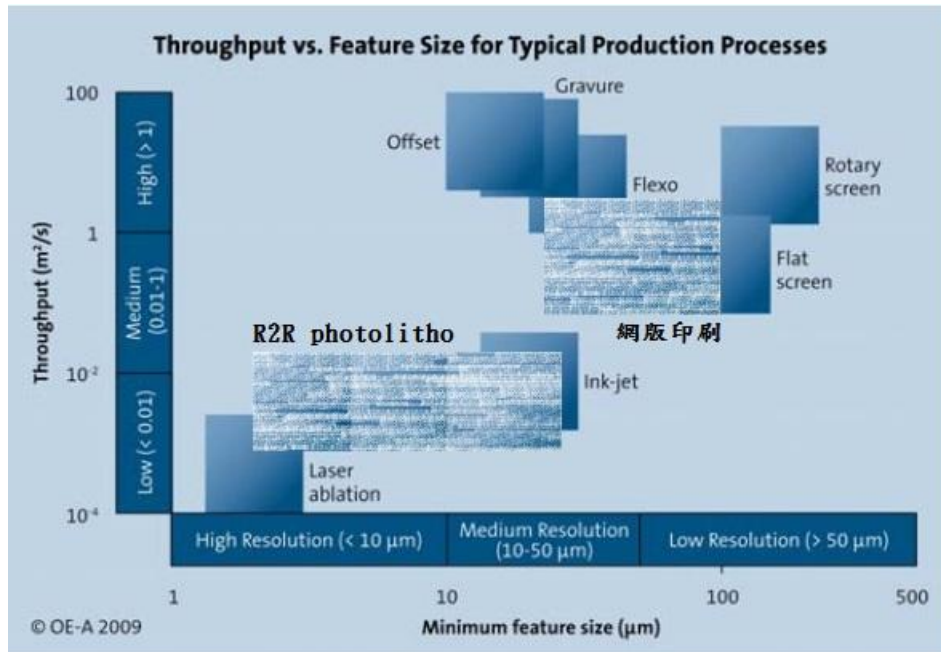


圖 B-1.1 各種pattern技術之解析度與生產率

(劉冠志，2012)

圖 B-1.1 的橫軸代表這些製程所能達到的解析度，縱軸則為生產率。蝕刻製程解析度雖然可達小於  $10\ \mu\text{m}$ ，但相對的產出速率並不高，原因是利用蝕刻製程製作圖形必須經過諸如塗佈、曝光、顯影、蝕刻…等程序才能將一層圖形完成。另外，幾乎所有程序均需利用不同的化學藥劑協助，因此化學藥劑的成本亦相當可觀。

網版印刷不同於蝕刻製程的地方在於，網版印刷是先於網版上設計圖形，並以壓印的方式直接於基板上印製圖形，故網版印刷不需利用多道程序即可在基板上完成單層圖形的製作，由於網版印刷是將需要的圖形直接印刷於基板上，不論是在時間或者是廢料處理上，都有相當優越的條件。事實上，網版印刷是一種歷史相當悠久的技術，隨時間的演進其精細度越來越高，發展至今，利用網版印刷所生產出來的圖形之線寬、線距已能達到與蝕刻製程所生產出來的圖形具有相類似的標準(劉冠志，2012)。若是

希望於軟性基材上製作 Pattern，則要考量到這類型的材料熔點較低，如果沿用目前積體電路或者是面板廠現有的蝕刻製程去生產，將會有非常多的時候材料是暴露於高溫、高壓或者是真空的環境底下進行加工。因此，目前的蝕刻製程是不適用於軟板生產。綜合以上幾點，假設想於軟性基材上製作圖形，又對圖形的精細度沒有太高的需求，並同時以時間、成本作為其生產的主要考量，將可使用網版印刷的方式製作 Pattern。