

東 海 大 學

工業工程與經營資訊學系

碩士論文

精實拉式生產系統於產線不平衡環境
之研究-以太陽能矽晶製造廠為例

研 究 生 : 李家稜

指 導 教 授 : 鄭辰仰 博士

中 華 民 國 一 〇 四 年 五 月

**The Use of Lean Pull Production System Under
Unbalanced Production Line: A Case Study From
Solar Silicon Manufacturing**

By
Chia-Leng Lee

Advisor : Dr. Chen-Yang Cheng

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

May 2015
Taichung, Taiwan

精實拉式生產系統於產線不平衡環境之研究

-以太陽能矽晶製造廠為例

學生：李家稜

指導教授：鄭辰仰 博士

東海大學工業工程與經營資訊學系

摘 要

在太陽能產業的技術持續快速發展下，其需求量也相對的增加，為了滿足大量的需求量，太陽能製造產業以推式生產系統大量生產來回應顧客，然而太陽能製造產業為流線型加工之生產環境，各站機台加工時間前後差異大，容易導致產能不均，而在生產線不平衡的情形下，在製品反而容易於瓶頸站前堆積，導致生產週期時間過長。為了能夠降低在製品的數量以及縮短總生長時間，本研究根據過去學者所提出各種拉式生產系統，以太陽能矽晶製造廠為研究個案，透過價值溪流圖進行產線分析，導入不同的拉式生產系統，並以反應曲面法找出不同拉式生產系統的最佳績效。最後以系統模擬驗證，結果與現況比較，結果顯示第一型混和拉式生產系統有效降低 25% 的在製品數量及縮短 16% 生產週期時間。

關鍵字：精實生產、看板生產系統、CONWIP 生產系統、Hybrid 拉式生產系統、反應曲面法、系統模擬

The Use of Lean Pull Production System Under Unbalanced Production Line: A Case Study From Solar Silicon Manufacturing

Student : Chia-Leng Lee

Advisor : Dr. Chen-Yang Cheng

Department of Industrial Engineering and Enterprise Information
Tunghai University

ABSTRACT

As solar energy technologies kept progressing, the demand increased. Solar energy manufacturing produced mass production with push system to fulfill the demand. However, if the production line was unbalanced, there were too much work-in-process (WIP) on the production line. To reduce WIP and cycle time, our research use different Types of the pull production system which were proposed by the previous research. These Types of the pull production system are applied in solar silicon manufacturing. Our research analyze production line with VSM and find an optimal performance of pull production system with response surface methodology (RSM). Finally, simulation is used to validate. After compare the result and current data, the 16% of the average cycle time and the 25% of the WIP for hybrid Type 1 production system are reduced.

Keywords : Lean Production, Kanban Pull Production System, CONWIP Production System, Hybrid Production System, RSM, Simulation

致謝詞

時光飛逝，沒想到已到最後的階段了，原本以為自己還會花更多的時間在研究上，從沒想過自己能夠堅持下去，研究所的這兩年，說長不長，倒是過得非常充實，在忙著研究、課程學習、比賽與專案，曾經覺得時間特別難熬，但現在回想起來，其實很短暫的結束了一切。

在這兩年，我學習到很多，其中最困難的一件事，也是我未來還要持續挑戰的，就是時間管理，或許可以照著自己的規劃按部就班的進行，卻常常被不在計劃內的事情打亂，導致很多事情不能順利完成，不僅對於需要負責的事情感到疲憊，對於他人的信用也是同樣容易破壞，這讓我很挫折，當下告知自己不要再犯同樣的錯，但常常難以掌控失控的局面，這是我需要不斷克服的挑戰，我很感謝在這段時間給我支持的人，謝謝淑芬姐，與您一起合作專案的日子，我真的受益良多，以及感謝我的研究室好夥伴們，俊雄與騏璋，能與你們一起比賽，讓我再次體會到什麼是團隊合作與精神，還有羅賓，謝謝你最後階段還這麼的幫助我，一起共患難的精神讓人覺得有你真好，還有雨璇，謝謝你願意花費自己的時間陪我練習，給我中肯的建議，以及台諺，一直打擾你問一堆問題，以及同個研究室的其他夥伴，婉巧、中瑋、大嘴、小胖、政憲及思逸，能忍受我的吵鬧，沒有把我趕出去，謝謝各位。

接著最重要的是，謝謝我們的指導教授鄭辰仰老師，很慶幸選對指導教授，沒有他也沒有現在的我，曾經很怕老師的施壓，雖然知道這是老師的教導方式，以及給我執行專案及比賽的機會，能讓我的履歷表填滿滿外，外加豐富的經驗值，還有實習的機會，很謝謝他，也很開心能夠在老師的底下做研究，在我心目中是最棒的老師。

最後要感謝我的父母，這段時間一直忙於學業，與家人相處時間很少，謝謝父母願意給我機會讀研究所，還有謝謝弟弟願意聽姐姐發牢騷，因為父母的支持與體諒，我才能專心完成學業，謹以此文獻給我摯愛的各位。

家稜 于東海大學工業工程與經營資訊學系 2015 年 7 月

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
致謝詞.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究流程.....	4
1.4 論文架構.....	4
第二章 文獻探討.....	5
2.1 精實生產.....	5
2.2 拉式生產系統.....	8
第三章 研究方法與個案介紹.....	11
3.1 研究方法架構.....	11
3.2 建構價值溪流圖並分析現況.....	12
3.3 導入拉式生產系統.....	14
3.4 建立系統模擬.....	17
3.5 實驗設計與分析.....	19
第四章 實務驗證與分析.....	24
4.1 建構價值溪流圖並進行現況分析.....	24
4.2 導入拉式生產系統.....	28
4.3 建立系統模擬.....	29
4.4 實驗分析及結果.....	36
4.5 敏感度分析.....	51
4.6 小結.....	55
第五章 結論與建議.....	57

5.1	結論	57
5.2	未來建議及討論	57
	參考文獻.....	58

表目錄

表 4.1 各機台加工時間.....	31
表 4.2 統驗證誤差表.....	32
表 4.3 第一次配適實驗矩陣結果.....	37
表 4.4 第一次 WIP 數量配適實驗估計量.....	38
表 4.5 第一次 WIP 數量缺適性檢定.....	38
表 4.6 中央合成設計實驗矩陣.....	39
表 4.7 WIP 數量二階迴歸模型.....	39
表 4.8 WIP 數量二階缺適性檢定.....	40
表 4.9 Cycle time 第一次配適實驗估計量.....	41
表 4.10 Cycle time 缺適性檢定.....	42
表 4.11 Cycle time 最陡上升實驗結果.....	42
表 4.12 Cycle time 第二次配適實驗矩陣結果.....	43
表 4.13 Cycle time 第二次配適實驗估計量表.....	44
表 4.14 Cycle time 第二次缺適性檢定表.....	44
表 4.15 Cycle time 中央合成實驗矩陣及結果.....	45
表 4.16 Cycle time 二階配適迴歸模型表.....	46
表 4.17 Cycle time 二階迴歸缺適性檢定.....	46
表 4.18 各種拉式系統方式.....	49
表 4.19 拉式系統與現況實驗結果表.....	49
表 4.20 現況與各拉式系統改善百分比.....	50
表 4.21 Output 之瓶頸負荷差異百分比.....	51
表 4.22 WIP 之瓶頸負荷比較表.....	52
表 4.23 Cycle time 之瓶頸負荷比較表.....	52
表 4.24 Hybrid Type 1 於不同需求下之看板組合.....	54
表 4.25 不同需求之現況與 Hybrid Type 1 比較.....	54

圖目錄

圖 1.1 全球太陽能光電產值規模.....	1
圖 1.2 矽晶需求量趨勢.....	2
圖 1.3 本研究流程.....	4
圖 2.1 精實五原則.....	6
圖 3.1 本研究架構.....	11
圖 3.2 改善作業流程圖.....	12
圖 3.3 建構價值溪流圖步驟.....	13
圖 3.4 看板設置方式.....	15
圖 3.5 CONWIP 設置方式.....	16
圖 3.6 混合型態一(Hybrid Type 1).....	16
圖 3.7 混合型態二(Hybrid Type 2).....	16
圖 3.8 混合型態三(Hybrid Type 3).....	17
圖 3.9 混合型態四(Hybrid Type 4).....	17
圖 3.10 模擬研究步驟.....	18
圖 3.11 反應曲面實驗步驟.....	20
圖 4.1 太陽能矽晶製造廠製造程序圖.....	24
圖 4.2 現況價值溪流圖.....	27
圖 4.3 個案產線平衡分析圖.....	28
圖 4.4 Warm up 穩定時間趨勢.....	30
圖 4.5 現況模擬系統示意圖.....	30
圖 4.6 看板設製圖.....	33
圖 4.7 Kanban 生產系統模擬示意圖.....	33
圖 4.8 CONWIP 生產系統模擬示意圖.....	34
圖 4.9 Hybrid Type 1 生產系統模擬示意圖.....	34
圖 4.10 Hybrid Type 2 生產系統模擬示意圖.....	35
圖 4.11 Hybrid Type 3 生產系統模擬示意圖.....	35
圖 4.12 Hybrid Type 4 生產系統模擬示意圖.....	36
圖 4.13 沿著最陡上升路徑 Cycle time 對步伐圖.....	43
圖 4.14 多反應值之最佳點重疊範圍.....	47
圖 4.15 不同拉式生產系結果圖示.....	50

圖 4.16 WIP 之瓶頸負荷趨勢圖	52
圖 4.17 Cycle time 之瓶頸負荷趨勢圖	53
圖 4.18 WIP 數量於不同需求下現況與 Hybrid Type 1 系統之比較	54
圖 4.19 Cycle time 於不同需求下現況與 Hybrid Type 1 系統之比較	55

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

隨著工業發展及科技的進步，人類對於能源的需求與日俱增，但現今因全球石油資源有限，以及核能源的高污染及高技術問題，使得傳統發電之方式受到限制，且傳統發電所排放的二氧化碳為造成全球暖化的現象之一，加上全球漸漸提升環保意識，因此各國紛紛開始尋找替代能源，而在眾多替代能源中，其中以太陽能源的應用最受重視(Lewis & Nocera, 2006)，也因近年來太陽能源的是取之不盡的再生能源，可以避免能源被壟斷的問題，且太陽能發電過程中不會產生二氧化碳等溫室氣體，因此不會造成環境污染，使太陽能光電產業具有發展潛力，如圖 1.1 所示，全球太陽能光電產值規模歷年增加，對太陽能光電產業的重視也日益提高。

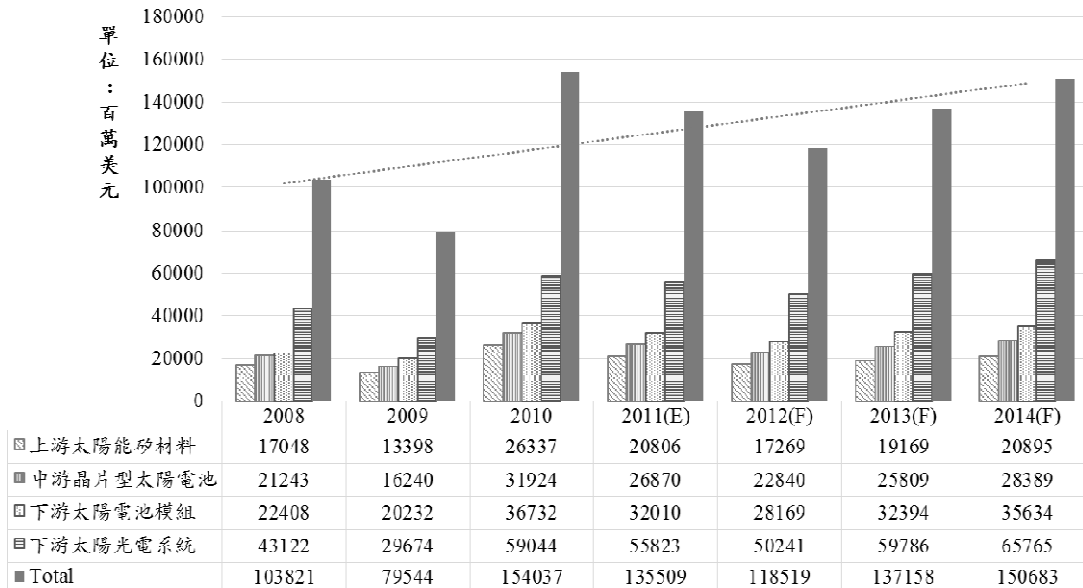


圖 1.1 全球太陽能光電產值規模

資料來源：Programme for Infrastructure Development in Africa (PIDA)

隨著太陽能光電產業日益蓬勃發展，太陽能光電產業的生產技術大幅提升，其產品也日漸多元化，目前製造太陽能產品的材料有單晶矽、多晶矽、非晶矽及砷化鎵等，其中以矽材料最為普遍，因矽材料的製作及加工技術已累積相當成熟的經驗，利用矽材料開發太陽能技術的發展是最為迅速及被受肯定的，而太陽能產品的主要製程從上游到下游為矽原料、矽晶製造、電池製造以及系統設備等，其中，矽晶製造的矽晶片除了為太陽能

電池產品的原料外，同為半導體產品重要的來源之一，而隨著太陽能的產品需求增加，其矽晶片製造的需求也同時增加，如圖 1.2 為近年矽晶需求量的趨勢，若能快速反應市場的需求，將能大幅提升其產業的競爭力。

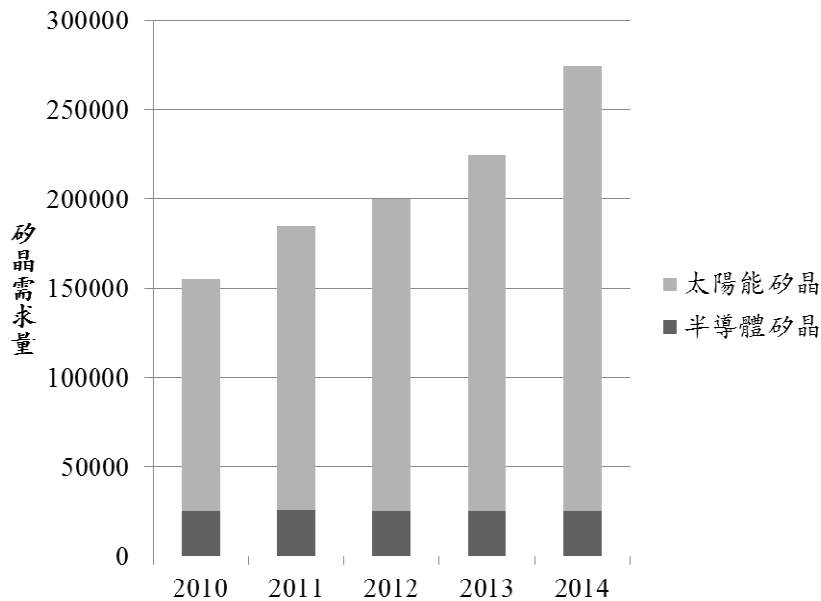


圖 1.2 矽晶需求量趨勢

資料來源：NPD solarbuzz

但現今的太陽能矽晶製造的生產模型多數為推式生產系統(Push Production System)，在製造技術的成熟以及需求量大增之下，透過大量生產的存貨方式因應市場的需求，然而，太陽能矽晶製造的生產環境為流線型生產線，即為一系列的工作站為有順序的進行加工作業，需考慮在此生產環境中，因生產線之各站加工時間前後不一致，使站與站之間的流動不順暢，各站產能不穩定，導致生產線不平衡以及在製品(Work-In-Process; WIP)堆積的風險(Conway, Maxwell, McClain, & Thomas, 1988)。

在此生產線不平衡的環境下，相較於以預測及經濟批量為主的推式生產系統，近年來，精實生產(Lean Production)所採取的看板生產系統(Kanban Production System)為拉式的方式，所以也稱為拉式生產系統(Pull Production System)(Sugimori, Kusunoki, Cho, & Uchikawa, 1977)，與推式生產系統不同的地方在於，推式系統主要透過預測及計畫性大量生產的方式進行投料，以大量存貨的方式因應顧客的需求，但各站機台加工時間前後不一致導致產能不均，以至於生產線不平衡的情形下，在製品反而容易於瓶頸站前堆

積，因大量的在製品導致庫存成本的浪費，以及堆積的在製品造成的生產週期(Cycle time)過長(Ōno, 1988)，而拉式生產系統主要以顧客需求為主進行生產，強調及時生產且快速反應顧客需求(Deleersnyder, Hodgson, Muller-Malek, & O'Grady, 1989)，當下游有需求時上游才開始生產的方式，因此能有效控制 WIP 數量(Monden, 2011)，不易造成製造過量的浪費，達到降低其庫存成本。

而根據文獻，從最初的看板生產系統，到後來提出的不同拉式生產系統，如結合推式及拉式的 CONWIP 生產系統(Spearman, Woodruff, & Hopp, 1990)，或是混合式的生產系統(Wang, Cao, & Kong, 2009)等等，許多文獻探討各式拉式生產系統的績效，或於簡單的生產環境中進行比較(Bonvik & Gershwin, 1996)。本研究將探討太陽能矽晶製造廠，在各站機台產能不均及生產線不平衡之環境下，如長晶站及開方站的加工時間長，但開方站前的開方前處理加工時間段導致大量的 WIP 數量及過長的 Cycle time 情況下，透過不同的拉式生產系統，以反應曲面法找出最佳績效，並以系統模擬為驗證，找出能有效降低 WIP 量及縮短生產週期時間最佳的生產系統。

1.2 研究目的

本研究將針對太陽能矽晶製造廠為個案進行探討，分析其現況的生產環境及特性，並透過精實生產的手法，從定義顧客需求的價值，藉由精實生產改善流程，消除不必要的浪費、縮短製程時間以提高生產效率(Pfeffer & Salancik, 1978; Seth & Gupta, 2005; Shah & Ward, 2007)。

接著探討不同的拉式生產系統於太陽能矽晶製造產業中，如何導入拉式生產系統於產線不平衡的生產環境下，並且能在維持產出率的情形降低 WIP 數量及縮短生產週期時間，本研究試圖利用反應曲面法找出各種拉式系統的最佳績效，並透過系統模擬驗證及比較，找出最適合於太陽能生產環境的拉式生產系統。

本研究依據上述將目的整理如下：

1. 針對太陽能矽晶製造之前段製程為個案進行現況分析，導入不同的拉式生產系統，以達到降低 WIP 數量及縮短生產週期時間。
2. 以反應取面法找出不同拉式生產系統的最佳參數以達到績效，並透過系統模擬進行驗證，比較出最佳的拉式生產系統。

1.3 研究流程

本研究首先針對現況分析，蒐集生產線資料並建構價值溪流圖(Value Stream Mapping; VSM)，針對研究動機及目的之範籌進行相關文獻探討，接著建構現況模擬系統並進行驗證後，導入不同的拉式生產系統於本研究個案，並針對實驗進行分析以找出 WIP 數量及 Cycle time 最短之最佳拉式生產系統，最後提出結論及未來討論建議，整體研究流程如下圖 1.3。

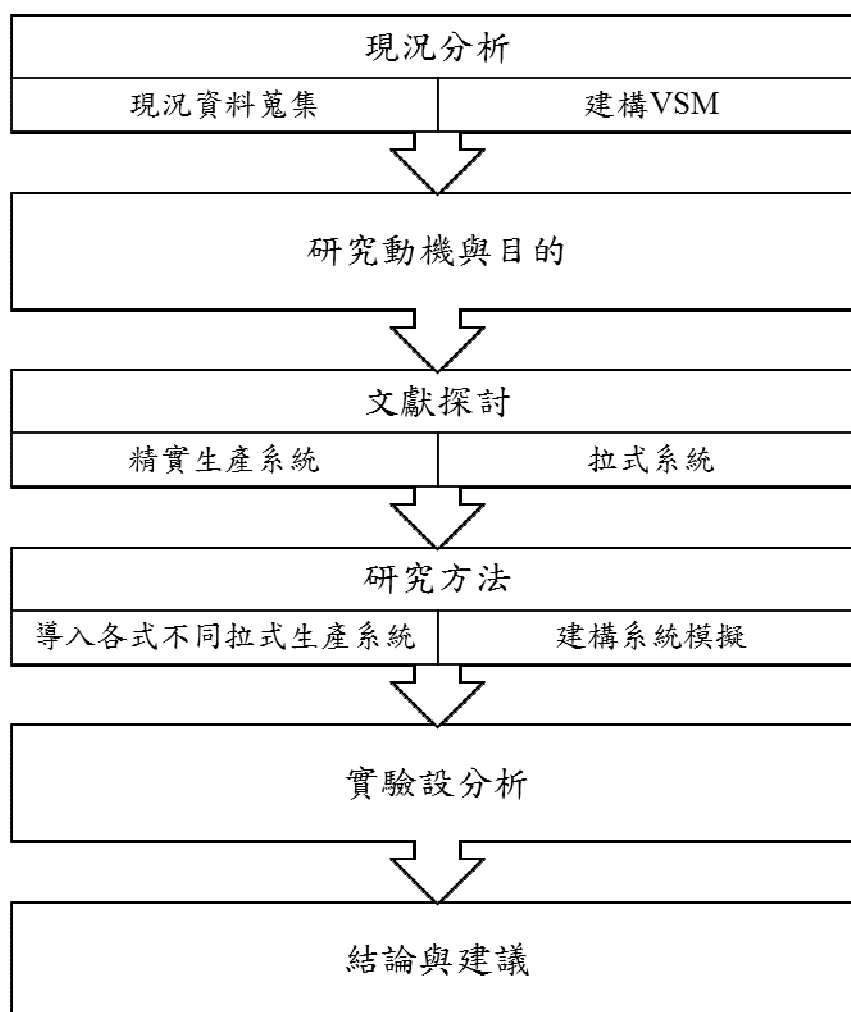


圖 1.3 本研究流程

1.4 論文架構

本研究共分五章，第一章為緒論，說明研究背景動機與目的；第二章則為精實生產及拉式生產系統之文獻探討；第三章為研究方法與個案現況介紹，第四章則為個案實務驗證與分析；最後，第五章為本研究結論及建議。

第二章 文獻探討

此章節將針對本研究涉及之相關文獻進行描述及說明，分為兩個部分，第一部分為精實生產，第二部分為緣起於精實生產的拉式生產系統之相關文獻。

2.1 精實生產

本節將針對精實生產的意義、與豐田式生產系統的關聯、精實生產的五項原則，精實拉式生產系統的介紹等加以描述，如何透過精實生產的方法針對個案進行研究，如何分析現況，以及精實生產成功導入之個案進行介紹。

2.1.1 精實生產的意義

精實生產 (Lean) 此名詞出現於 1990 年由 Womack 及 Jones 出版的一書《The Machine that Changed the World》中，其中源起於豐田汽車公司，以價值鏈的觀念將生產範疇重新定義，其範圍從生產製造管理延伸到產品開發、供應鏈管理和顧客服務。所謂「精實思考」的基礎思維是徹底消除浪費、降低成本；精實不只是改善的工具，更是一套完整的組織管理思維，是組織思考如何在最小成本下，為顧客創造最大價值的方式。

此外，精實思考也與確認顧客價值 (value) 與價值溪流 (value stream) 有關，在消除浪費、創造價值的過程，創造一股暢流 (flow)，捨棄「推式」(push) 生產改採「拉式」生產，依循「剛好及時」(Just in Time; JIT) 與「自働化」兩大生產管理主軸，以追求完善的產品或服務。Ohno (2012) 歸納常見的精實手法包括價值溪流圖、5S (Sort, Segregate, Shine, Strengthen and Standardise)、看板系統、標準作業、5 why、自働化、平準化生產等方式。前述各類手法的共同點則是強調，從接到客戶訂單到出貨這段期間內，藉由移除不具附加價值的作業，提升生產效率與降低成本。

2.1.2 精實五個原則

由 Womack 與 Jones 於 1996 年提出的精實思考方法，從確認價值以及消除浪費，將此方法歸納成五個原則，分別為定義價值、確認價值溪流、暢流，後拉管理以及追求完善，將此五個原則建構如下圖 2.1，並分別對其描述。

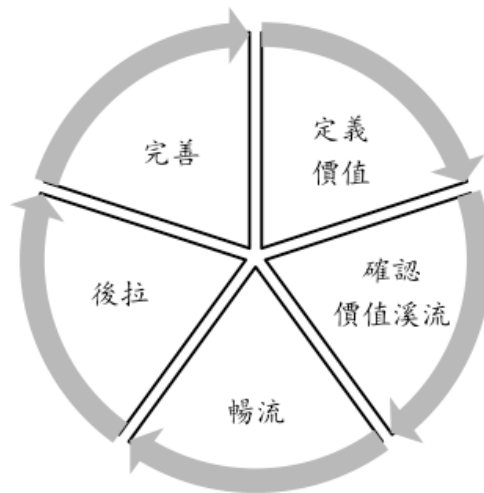


圖 2.1 精實五原則

資料來源:本研究整理

1. 原則一：確定價值

精實系統思考法的關鍵起步為價值。所以動作是否有意，以顧客的觀點來確認價值，也只有就某特定產品、在某特定時間、以特定價值來滿足顧客需求時，才能表達價值所在。

2. 原則二：確認價值溪流

價值溪流是產品從原料通過生產製程到完成成品交至顧客手上的全部活動。精實系統中體現價值溪流的主要工具即是價值流圖(Value Stream Mapping; VSM)，價值流圖為精實概念下的目視化工具，主要是用來分析價值流、發掘浪費所在，進而訂定改善的重要工具，用來確認每項產品的整體價值，價值流圖涵蓋了生產系統中的資訊及物流關聯性。

Monden (2011)將製造現場中的作業分為三種類型，分別為增加價

值作業(Value-adding; VA)、必須但無增加價值作業(Necessary but Non-value Adding; NNVA)、無增加價值作業(Non-value Adding; NVA)，其中增加價值作業為製造產品所需要的直接動作，產生價值的作業則針對原物料或半成品實際的加工，或是實際創造出顧客感受的到的價值，如長晶製程中，真正增加價值作業為長晶過程；必須但無增加價值作業為作業程序中該作業是必要的，但卻沒有產生價值，作業員為了製造產品所必須進行的，但以顧客的角度，不是創造價值的動作。例如作業員搬運裝物料之推車，或需走動記錄物料資訊，為了消除這類型的作業，則需要對作業系統作出較大的改變，像是新的設施規劃等；無增加價值作業為不創造價值且可以被消除的動作，應該被立即消除，也可以由顧客的觀點來看，就是那些增加成本但是不增加產品活動價值的活動。

3. 原理三：使價值溪流暢流

連續流動是精實生產的一項主要目標，從物料供應區域到作業區域都需做緊密連結及不間斷的連續作業。(Marchwinski & Shook, 2003)指出，應使工件儘可能連續流動並且一次只需生產並移動一個或持續小批量工件，使每個工程只需執行下一工程所需工作，即可減少工件與人員的等待，也被稱為單件流(One-piece flow)。

暢流落實的重點由(Womack & Jones, 2010)整理為三個步驟，第一步，明確界定價值且整體價值的確認後，將焦點放於實際的流程上，從開始到完成都須全面考量；第二步為落實第一步，此時必須摒除傳統關於工作、單位的界限，努力形成精實企業整體，並且摒除萬難，使某特定流程成為連續流。最後，一步為第三步則是重新思考特定工作的方法及工具，消除流程中重新檢驗、遺漏、等待等浪費，得以連續方式進行。

4. 原理四：拉式

拉式(Pull)就是由下游顧客的需求，來驅動上游的供給端生產製造。最具代表性的拉式生產系統即 TPS 的看板系統(Kanban System)。

Monden (2011)提到看板系統為一種資訊系統，在製造用以控制工廠內每一道製程針對需要的產品在需要的時間生產所需的數量。

5. 原理五：完善

精實生產的目的在於透過持續不斷的改善，並且設定一個以完善為最終極的目標，因此驅使從事精實生產或服務者而言，以此依目標進行改善，精益求精，追求完善，為非常重要的管理內涵。

透過精實生產的方法分析現場，找出需要改善的浪費，讓生產線順暢。Abdulmalek and Rajgopal (2007)以價值溪流圖分析鋼鐵組裝廠之現況，了解現況生產流動方式，找出改善契機，並透過系統模擬驗證，有效減少前置生產時間並降低在製品數量。Seth* and Gupta (2005)以價值溪流圖分析裝配線的生產現況，以系統模擬有效降低生產週期時間，Gurumurthy and Kodali (2011)以價值溪流圖導入精實生產系統，並以系統模擬導入精實生產系統前後績效比較，並在需求量增加下不增加任何資源以達到目標績效。

2.2 拉式生產系統

看板生產系統被視為最典型的拉式生產系統，日本豐田汽車公司為了實現即時生產(Just In Time, JIT)而提出的(Ohno & Mito, 1988)。Hopp and Spearman (1996)與 Womack and Jones (2010)說明看板生產系統是利用看板在製程之中傳遞所有的資訊流動，並透過看板數量來控制系統內的在製品數量。當產生需求時，產品會離開製造系統，而生產線上的最後工作站透過看板往前一個工作站傳遞需求，並領取所需生產的加工零件或產品，前一個工作站也會將需求訊息再傳遞至前一個工作站，而為了降低成本以及避免在製程上產生不必要的浪費，故每一個工作站將會進行資源與產品數量的控管，使在製品的數量不會超過設定上限。

Williams, Ulgen, and DeWitt (2002)說明看板系統對於即時化生產系統具有代表性，是一種定義生產產品數量的重要方法，常被視為精實生產系統(Lean Production System)的最重要因素，並具有下列三點特性，第一為製造系統使用拉式生產系統，可避免生產線上累積過多的 WIP 數量；第二為使用快速換模技術，使單一產品生產線可改變成產品多樣化的混合生產

線；第三則為了降低 WIP 數量，將生產工單由大批量分割成小批量的多次加工製造。

除了看板生產系統外，Spearman et al. (1990)等人在考慮生產線 WIP 上限的前提下，同樣提出了以拉式生產系統為前提的 CONWIP (CONstant Work-In-Process) 生產系統，其基本觀念是取自於看板拉式系統中，針對製造系統中 WIP 數量控制的理念加以延伸，為生產線的 WIP 數量控制加以改良。CONWIP 生產系統除了保有推式生產系統的高產出率與機器高利用率並擁有看板拉式系統中對於在製品數量的控制，算是經由改良過後的看板拉式系統，利用在一定量之在製品以因應終端需求變化與生產流程中。

CONWIP 生產系統運作方式也是以看板做為工具來控制生產線在製品的數量，不同在於，CONWIP 將整條生產線視為單一工作站，當產生最終端顧客需求時，已完成加工的工件資訊將傳遞看板至生產線最前方，並依據看板進行投料作業；若此時無需求到來，則不會產生看板資訊，透過此方式針對看板數量的設定，使得生產線上 WIP 數量不超過預設的範圍。

而 Bonvik and Gershwin (1996) 指出雖然 CONWIP 生產系統可透過看板數的設定使生產線上的在製品數量不超過設定上限，但當生產線較長時，不容易掌控系統中各工作站的在製品數量，若有機器設備發生故障或加工較長時間的瓶頸站時，將會有大量的在製品堆積在故障機器設備或瓶頸站之前，更無法得知在製品在系統中各工作站分佈之情形。為了解決不易掌控在製品在系統中工作站分佈的問題，提出一個拉式系統之控制方法，此控制方法稱為混合控制生產系統(Hybrid Control System)，主要結合了看板系統，設置獨立看板來控制瓶頸站的投料量。

Gaury, Pierreval, and Kleijnen (2000)將看板系統、CONWIP 系統與混合系統透過基因演算法來求解，並比較何者為最佳的生產系統，在服務水準為 99%情況下，每種系統利用基因演算法求得最佳的看板數以及工作站需進行切割時的切割點與看板數量，並透過模擬實驗顯示混合系統是在相同的服務水準下，比較其系統績效。而 Geraghty and Heavey (2004)研究中使用了 Hodgson and WANG (1991a)所提出的八個混合控制架構，在考慮到存貨水準與最佳安全存貨之情況下，經由模擬實驗較佳的系統績效。

不少學者將拉式生產系統應用於個案，如 Abdulmalek and Rajgopal

(2007)導入拉式系統於鋼鐵製造公司中，並應用精實價值溪流透過模擬系統比較績效。而 Yang, Fu, and Yang (2007)應用演化演算法於半導體 IC 封裝廠之拉式系統問題中，以及 Lu, Yang, and Wang (2011)應用價值溪流圖及多準則決策法於半導體產業進行的精實拉式設計，其拉式生產結合了 CONWIP 系統及看板系統之設計，並以系統模擬進行驗證其系統績效。而本研究將針對太陽能矽晶製造廠為個案，將根據文獻提出的不同拉式生產系統中，分別應用於研究個案，並以反應曲面法找出最佳拉式生產系統，最後以系統模擬驗證績效。

第三章 研究方法與個案介紹

本章分為五節，首先介紹本研究架構，並在此架構下，介紹本研究方法，蒐集現況資料並建構價值溪流圖，導入拉式生產系統，並建立系統模擬以驗證實驗結果。

3.1 研究方法架構

本研究針對太陽能矽晶製造廠之生產環境進行研究，其矽晶製造廠的本站加工機台時間變異大，使得WIP量增加導致大量的庫存成本，因此，在以降低WIP數量並縮短生產週期時間為目標的前提下，以拉式系統進行模擬及驗證本研究建構的架構如圖3.1，首先，蒐集個案的現況資料，分析其現況的問題，接著建構現況的價值溪流圖，並且導入不同的拉式生產系統，接著以反應曲面法找出最佳因子配置，並以系統模擬進行驗證，最後進行比較結果及敏感度分析，找出較佳的拉式生產系統，並建構其未來價值溪流圖。

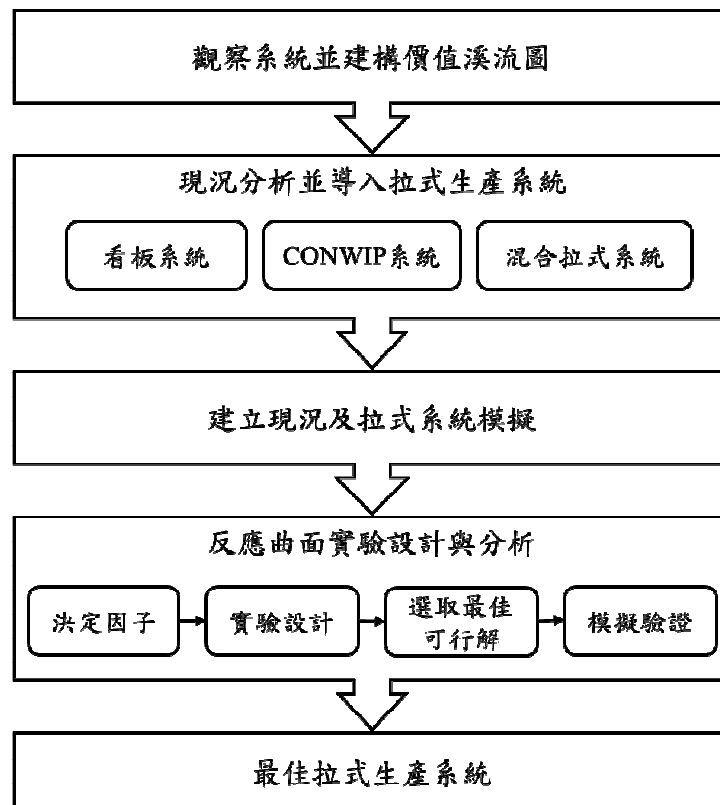


圖 3.1 本研究架構

資料來源:本研究整理

3.2 建構價值溪流圖並分析現況

藉由確定的價值中了解現況系統的運作情形，並建構價值溪流圖以進行現況分析，本節分為四個部分，首先觀察現況的生產系統，以蒐集其相關資料，接著介紹價值溪流圖以及其建構步驟，了解現況系統的運作情形，並且能找出改善的契機，其現況分析之改善作業流程如下圖 3.2，根據價值溪流圖進行分析後，接著計算生產節拍時間，找出影響產線不平衡之工程，最後導入拉式生產系統以達到本研究之改善目的。

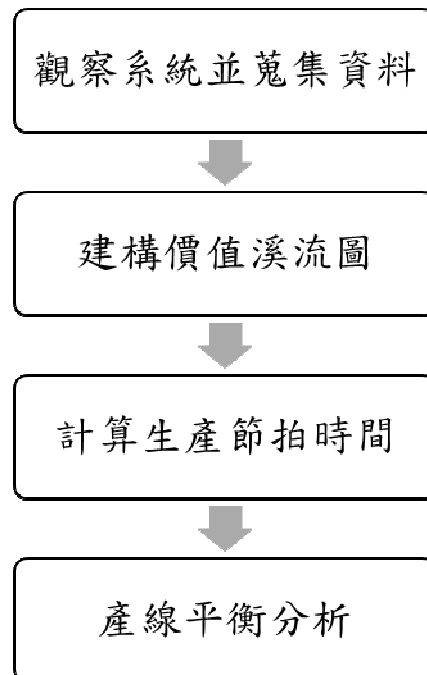


圖 3.2 改善作業流程圖

資料來源:本研究整理

3.2.1 觀察系統並蒐集相關資料

為了解現況的生產系統的實際運作情況，作為建構價值溪流圖的依據，從價值溪流圖找出可改善的契機，明確的設定欲改善目標及範圍，其相關資料可分為物流及資訊流兩個部分，蒐集生產系統中需要的資料整理如下：

1. 物流：生產批量、WIP 數量、存貨數量及產品流動方式等。
2. 資訊流：客訂單總類及需求、生產計畫、訂單頻率及預測頻率等。
3. 機台資訊：生產週期時間、前置作業時間、機台故障時間、換模時間、機台數量及稼動率等。

3.2.2 建構價值溪流圖

價值溪流為一個產品通過其基本生產過程所需的工程活動，包含附加價值及不具有附加價值之活動，進行價值溪流圖分析，意味著對生產的全部過程進行研究，改善全部的生產工程，而非只改善局部工程。要了解全部的生產工程，就必須建立完整的價值溪流圖，從顧客到供應商以及其生產之產品路徑，透過物流及資訊流以簡單清楚的代表圖形，建構現況的價值溪流圖，發現具有附加價值之活動，並找出浪費的根源。

根據 Rother 和 Shook (1998) 《Learning to see》一書中，建構價值溪流圖的步驟如下圖 3.3，首先了解顧客需求，從顧客角度確認產品價值，為顧客帶來價值，第二步驟則建立基本工程，並蒐集每個工程之相關訊息，例如：週期時間、換模時間、機台稼動率等等資訊，第三步驟則建立物流，表示產品之間的流動方向，第四步驟為資訊流，生產時間頻率，生產數量等資訊，最後步驟為建構時間線，在每一工程及庫存底下畫出時間線，以此計算出產品生產的前置時間，及一個產品從上游原物料到下游顧客端出貨的全部時間。

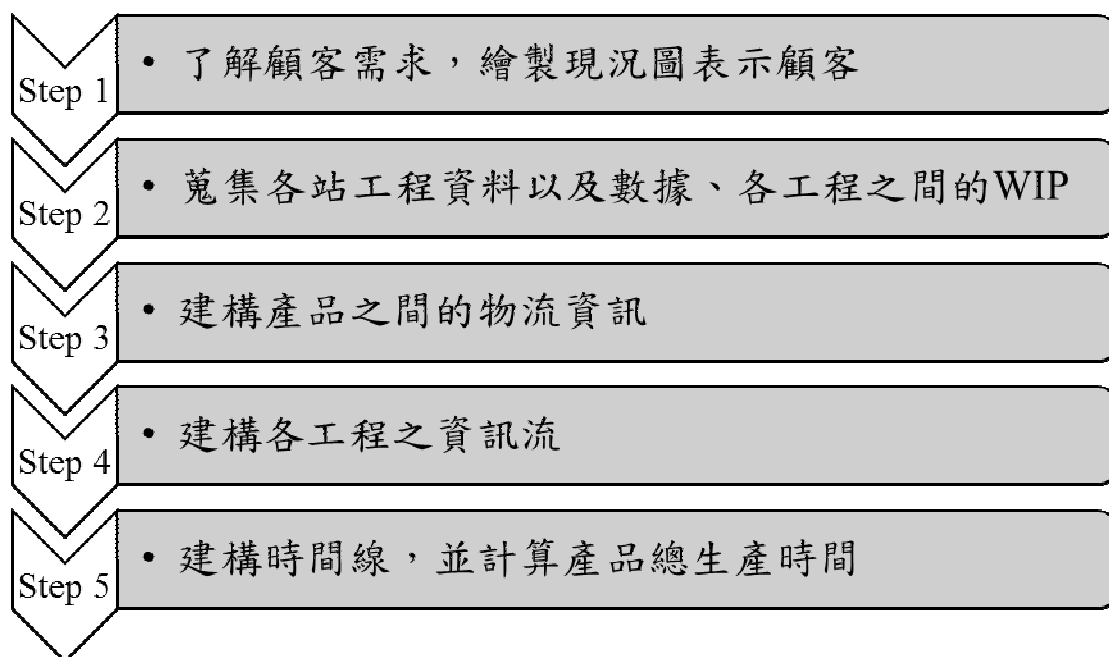


圖 3.3 建構價值溪流圖步驟

資料來源:本研究整理

觀察現況價值溪流圖可發現很多訊息，其中包含具有附加價值的時間，如加工時間，以及不具有附加價值之時間，如搬運及等待等，對顧客

來說不具有生產價值的時間，可藉由此兩種之間的比例評估生產系統的可改善的比率，但為了能夠更精確得知其生產線上的生產狀況，可透過產線平衡計算各站產能，以節拍時間中找出產線不平衡的工程，根據現況分析後，透過拉式生產系統以減少系統可改善的比率。

3.2.3 計算生產節拍時間

生產節拍時間是根據顧客需求，計算花多少時間製造一個零件或一個產品，其目的在於配合顧客的需求進行生產，在做任何計算改善時，最重要的是確認最終顧客的產品價值，每一個製造過程所需的生產節拍時間可了解現在生產狀況及需要改進部分(Rother & Shook, 1999)。節拍時間可以用固定時間內有效的工作時間，除以固定時間內顧客需求量，見公式(1)：

$$\text{生產節拍時間} = \frac{\text{每班有效工作時間}}{\text{每班顧客需求量}} \quad (1)$$

3.2.4 產線平衡分析

產線平衡分析圖可用來掌握製程及生產作業的分析圖，可清楚了解生產線的工程所需的相差狀態，產線平衡分析是根據生產節拍時間 (TT; Takt Time) 進行的工作站編排設計或者針對現有工程指出其瓶頸工程和工程間的平衡損失，以及人力編排上的浪費等，從產線平衡分析圖透過生產節拍時間發現的不平衡中進行改善，衡量生產線是否運行良好或順暢，可計算產線平衡率，其公式如(2)，產線平衡率為生產線衡量的重要指標，本研究針對產線平衡分析後的結果導入拉式生產系統，以改善瓶頸工程造成的堆積及影響。

$$\text{產線平衡率} = \frac{\text{各製程時間加總}}{\text{瓶頸製程} \times \text{站數}} \times 100\% \quad (2)$$

3.3 導入拉式生產系統

本研究導入拉式生產系統主要以三種類型的拉式生產系統為主，分為看板生產系統(KANBAN Production System)、CONWIP 生產系統及混合生

產系統(Hybrid Production System)，將針對個別型態之拉式生產系統以及設置方式進行說明。

3.3.1 看板生產系統

看板生產系統是由生產線最後端的工作站收到訂單需求，當完成品被拿走後，利用看板向前一站傳遞需求資訊，拿取前一工作站的半成品來加工，而被拿取半成品的工作站，則會再往前一工作站拿取半成品進行加工(Sugimori et al., 1977)。而實際導入看板生產系統時，會依據不同種類零件需使用不同的看板，藉由看板的使用，讓每一工作站的在製品數量不超過其設定上限，這些在製品主要功能為緩衝機器故障或生產過程中發生不可預期的中斷時，以利生產進行順暢。本研究將在各個工作站前設置看板，如圖 3.4 看板設置的方式，將依據各站產能決定看板數量，並以系統模擬找出較佳的 WIP 數量及 Cycle time。

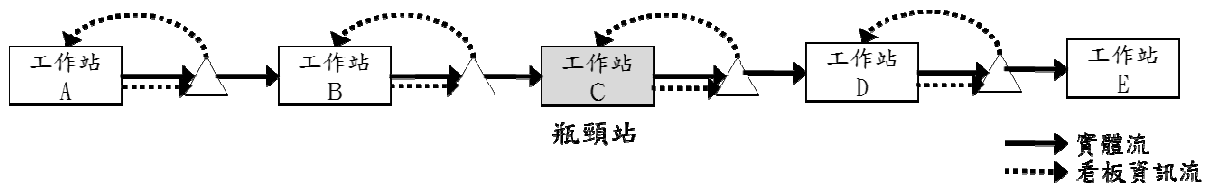


圖 3.4 看板設置方式

資料來源:本研究整理

3.3.2 CONWIP 生產系統

CONWIP 生產系統為結合推式生產及拉式生產的系統，Spearman et al. (1990)提出 CONWIP 生產系統運作方式同樣以看板做為工具來控制生產線在製品的數量，其方式為將整條生產線視為單一工作站，當後端需求來到時，已完成加工的產品會將資訊傳遞至生產線最前方，並根據看板資訊進行投料作業，直到加工完成，經由看板數量的設定，使得生產線上在製品數量不超過預設的範圍。CONWIP 生產系統運作方式如圖 3.5。

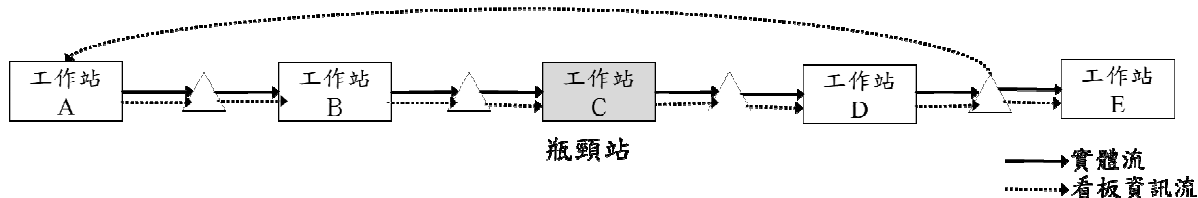


圖 3.5 CONWIP 設置方式

資料來源:本研究整理

3.3.3 混合生產系統

混合生產系統為結合看板生產系統及 CONWIP 生產系統的方式，本研究根據產線平衡分析確定的瓶頸站，分析四種不同方式的混合生產系統 (Wang et al., 2009; Khojasteh-Ghamari, 2012)，分別如下：

1. 混合型態一(Hybrid Type 1)：瓶頸站前設置看板式，其餘為 CONWIP，如圖 3.6。
2. 混合型態二(Hybrid Type 2)：以瓶頸站區分兩段 CONWIP，如圖 3.7。
3. 混合型態三(Hybrid Type 3)：瓶頸站前為 CONWIP，瓶頸站後為 kanban，圖 3.8。
4. 混合型態四(Hybrid Type 4)：瓶頸站前為 Kanban，瓶頸站後為 CONWIP，如圖 3.9。

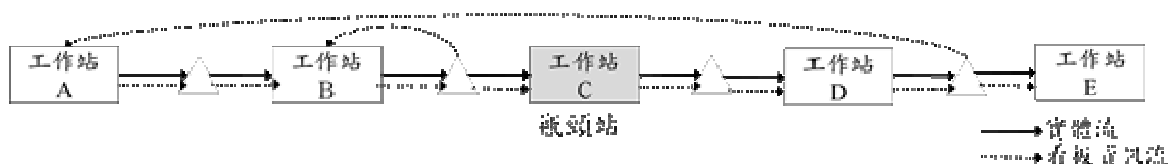


圖 3.6 混合型態一(Hybrid Type 1)

資料來源:本研究整理

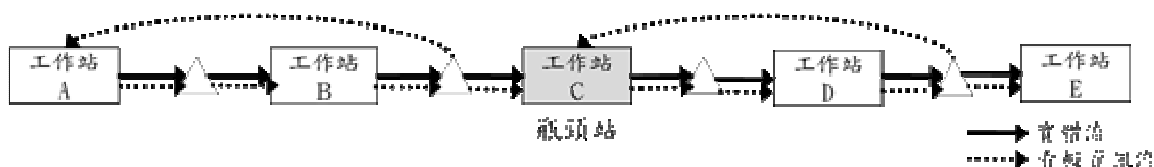


圖 3.7 混合型態二(Hybrid Type 2)

資料來源:本研究整理

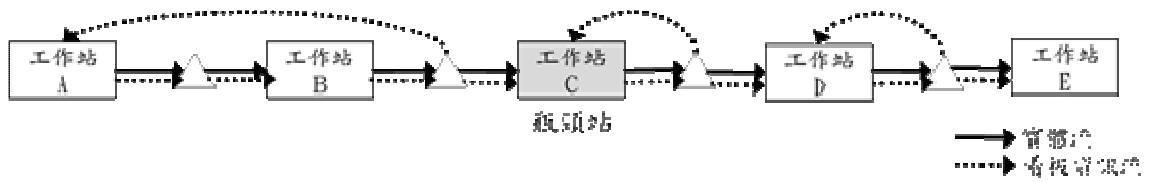


圖 3.8 混合型態三(Hybrid Type 3)

資料來源:本研究整理

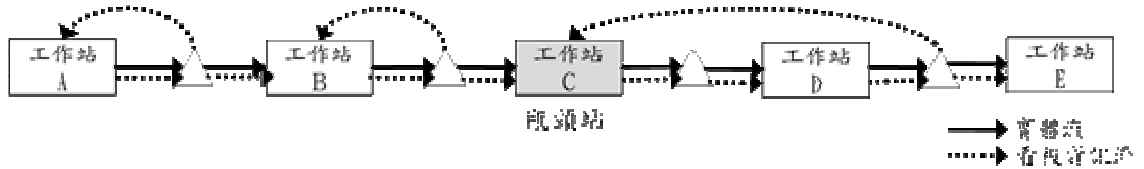


圖 3.9 混合型態四(Hybrid Type 4)

資料來源:本研究整理

3.4 建立系統模擬

系統模擬對已真實存在之系統或即將設立之系統，利用電腦建構抽象模型來模仿一個動態系統，在複雜真實或假設的不同情況下，藉由模擬的方式來描述產品在生產系統的流動方式，不僅可以調整參數，且可重複實驗，以方便推論系統的運作績效與特性，作為後續針對現形狀況的決策之參考。

透過前述的價值溪流圖了解現行狀況及確定改善目標後，其建構系統的根據 Banks (2010)所提出之模擬研究步驟建立現況模擬，並導入各式拉式生產系統，如下圖 3.10 所示。

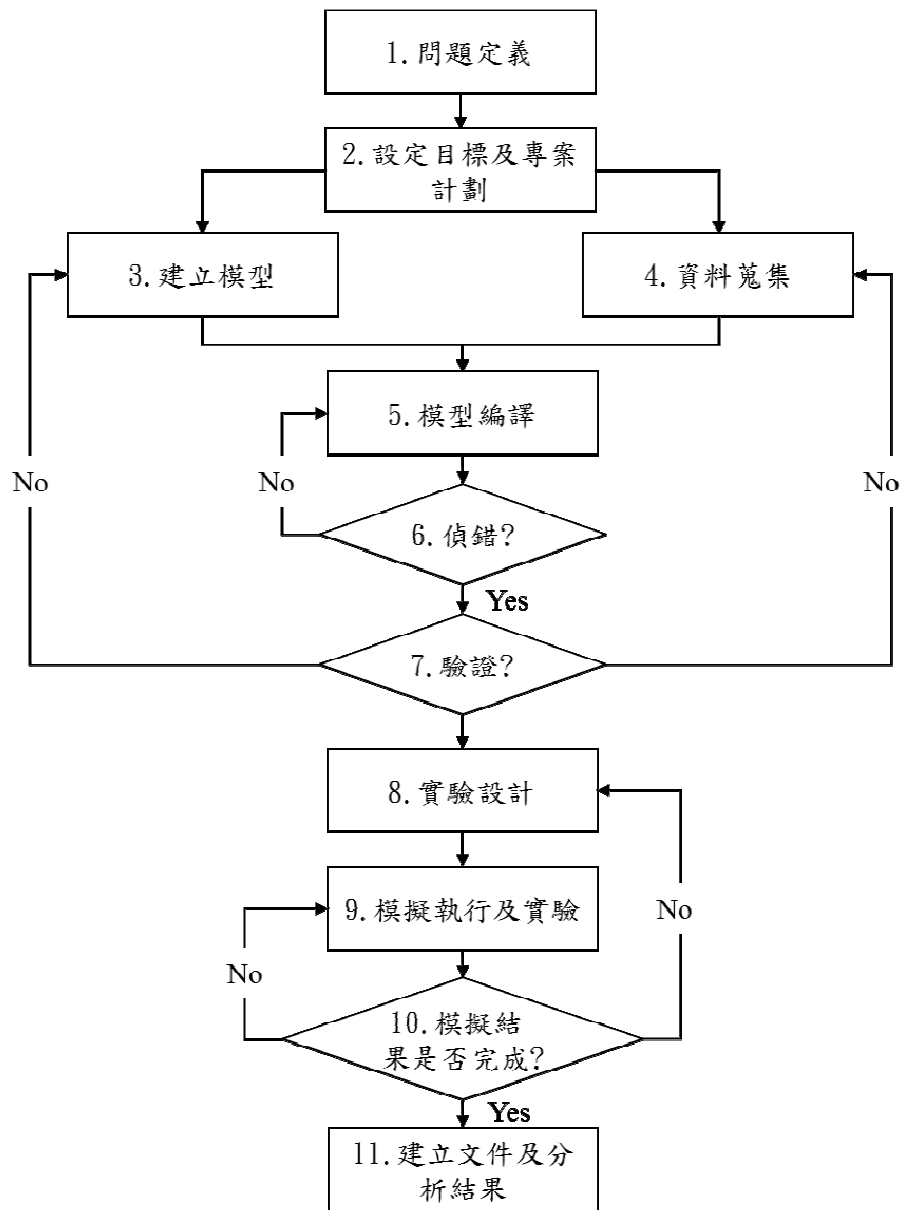


圖 3.10 模擬研究步驟

資料來源: Discrete-Event System Simulation

1. 問題定義：在一個模擬研究進行之前，必須要確保對欲分析之問題有清晰的了解，在不違背合理性的原則之下，也需訂定此模擬分析之基本假設。
2. 設定目標及專案計畫：設定目標代表需要從模擬研究中得到的答案為何，全盤計畫則包括不同情境下的模擬模型之敘述說明。

3. 建立模型：將複雜的真實系統適當簡化，以利建構模擬模型。
4. 資料蒐集：決定模擬模型所需之輸入資料，同時需考慮所需資料之類型、詳細程度、取樣得時間長度，另外需確認所需資料為可取得的。
5. 模型編譯：依模型概念將其轉換成可實際運作之模擬模型。
6. 偵錯(Verification)：檢驗上一步驟中所完成的模擬模型，是否與初始定義的問題結構相符，即檢視模擬模型中的邏輯或程式原始碼是否正確。
7. 驗證(Validation)：驗證步驟 3 模型之概念是否與真實系統相符，並回顧模擬實驗目的，觀察此模型是否能正確描述真實系統的運作情形。
8. 實驗設計：決定所有模擬方案，以及其模擬長度、重複次數。
9. 模擬執行及實驗：執行模擬模型以及收及模擬結果數據，來評估各方案之績效。
10. 模擬結果是否完成：根據已完成之模擬模型及分析結果判定重複次數是否足夠，以及是否需要額外的模擬方案。
11. 建立文件及分析結果：若模擬模型未來有被用於不同分析的機會，則需要將模擬的資料文件化，而這些資料也是作決策時重要的依據，可供日後檢視，或與其他替代系統作比較。

3.5 實驗設計與分析

本研究使用 Minitab 17 統計軟體，進行反應曲面法之實驗設計，反應面法是一種以統計方法輔助求解模擬模型的方法，可以使實驗者在所關切的實驗區域內以系統化方式進行實驗，進而得到所需要的反應值。而蒐集完反應值後，再用迴歸分析尋找反應值與變數間的關係，並以此關係式求得實驗區域內的最佳解。

3.5.1 實驗設計方法

本研究將模擬結果配適為兩組迴歸模型，分別為不同看板張數配置下相同需求下找出 WIP 目標式與 Cycletime 目標式，其步驟如圖 3.11(Montgomery, 2008)。

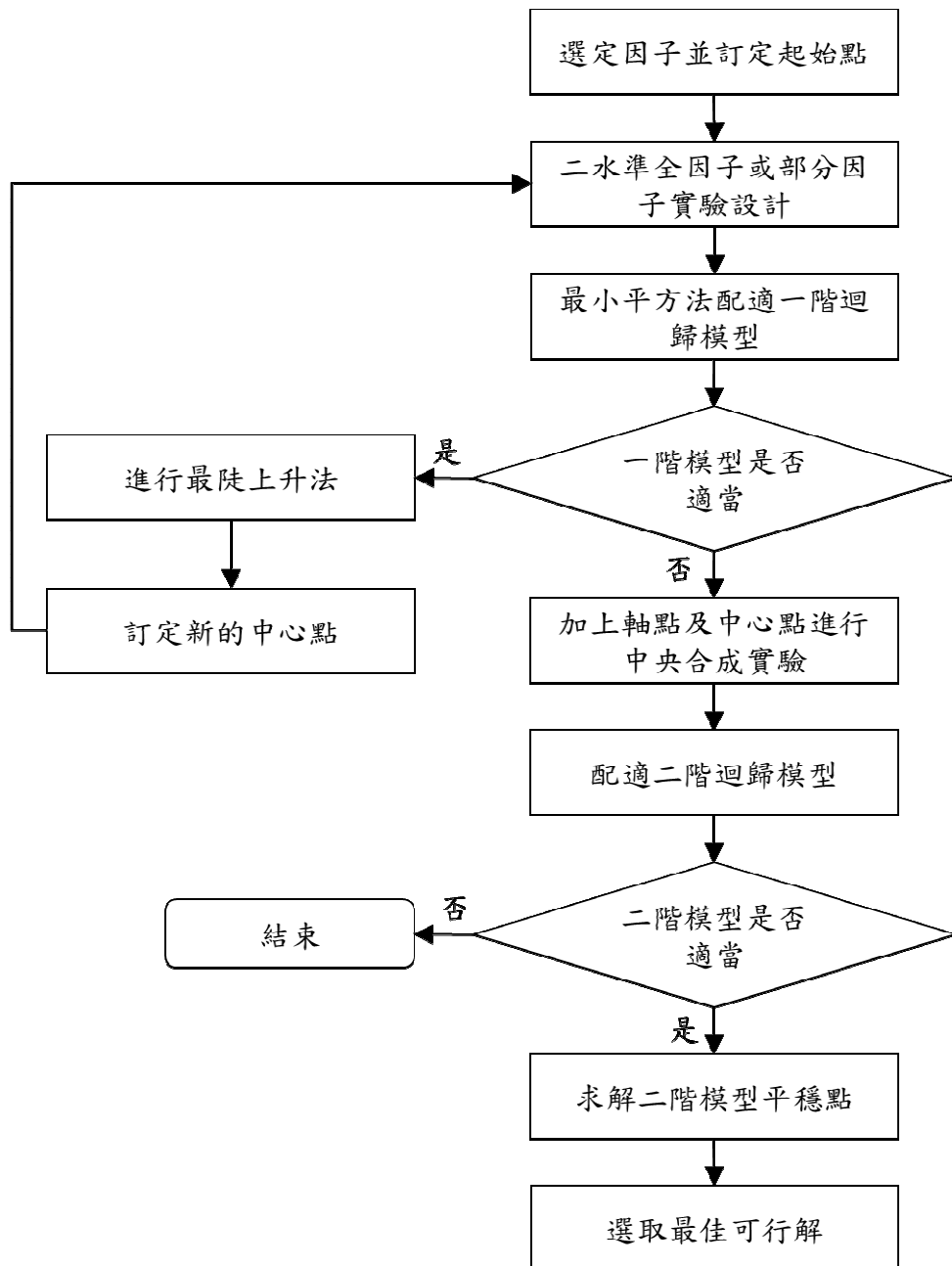


圖 3.11 反應曲面實驗步驟

資料來源: Design and analysis of experiments

首先找出對系統或結果有影響的因子，並選出適當的水準範圍訂定起始值，此起始值通常為原始設定值，並進行二水準全因子或部分因子實驗設計，接下來進行實驗並取得實驗結果數據，實驗結果藉由最小平方方法進行模型的配適作業，所得到以第一目標即為反應變數的一階迴歸模型，如公式(3)。

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i \quad (3)$$

為了確定配適的模型是適當的，首先須由迴歸分析結果用以確定此迴歸模型為顯著的，並且由判定係數可知道模型中應變數和自變數之間的線性關聯強度，接著採用配適的缺適性(Lack of fit)的 F 檢定來檢驗所配適出之迴歸模型是否適當。

若一階迴歸模型為合適則進行最陡上升法，此為一種搜尋實驗最佳點的常用方法，首先利用實驗設計方法取得反應值，再依此反應值配適線性迴歸模型(Linear regression model)，並依據該模型來決定下次實驗應改變的方向以及新的實驗中心點。有了新的中心點，便能依實驗方向找出中心點附近的點，進而重新配置實驗，直到逼近至最佳點為止。

當實驗結果無法配適出一個適合的一階迴歸模型時，表示實驗範圍已經接近了有曲率的最佳解區域，所以一階模型不再適用於逼近最佳解的模型，而需進行配適二階模型，因此需進行一個二階的配適實驗。而在選擇二階模型的配適實驗時，多半會採用中央合成設計(Central Composite Design; CCD)的配適實驗來配適二階迴歸模型，因為此設計為一有效率的配適二階模型的實驗設計。

中央合成實驗以 k 個因子的實驗為例，其包含一個 2^k 因子設計， $2k$ 個軸點實驗和 n_c 個中心點實驗(Montgomery, 2008)。以 CCD 進行實驗後取得反應值數據，再配適二階迴歸模型如公式(4)，同樣以配適不良的 F 檢定來檢驗模型是否適合，若沒有明顯的證據證明模型不適切，則接受此二階迴歸模型。

$$Y = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \text{ for } i < j \quad (4)$$

接受此二階迴歸模型後，將配適結果以矩陣表示(6)，並令其反應變數對個變數之偏微分為零如公式(7)，求出一組解，其解如公式(8)所示，稱為

平穩點(Stationary point)，此平穩點可能為極大值、極小值或鞍點(Saddle point)，若平穩點為極大值或極小值，則表示已達最佳解，可以停止，若平穩點為鞍點，則表示仍有更好的解，須重新進行因子實驗。

$$Y = \beta_0 + x'b + x'Bx \quad (5)$$

$$\text{其中 } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \cdot & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ \cdot & \hat{\beta}_{22} & \cdot & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{sym.} & \cdot & \cdot & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = b + 2Bx = 0 \quad (7)$$

$$x_s = -\frac{1}{2}B^{-1}b \quad (8)$$

得到平穩點之後，將此組解輸入模擬模型即可得到第一目標反應值，檢查是否有符合期望的最低底限，若無法符合所期望的最低底限時則在可修改的情況下應該對期望達到的底限做適當的修改。

3.5.2 多重反應值

反應曲面之問題常牽涉到數個反應值的問題，而在上述方法中我們皆針對單一目標逐次作最佳化，但當單一目標最佳解超出資源限制或當二階模型配適時仍存在缺適性問題，則可用此方法來求得局部最適操作狀態。需要對個別反應建立一適當的反應曲面模型，接著試著找到一組操作條件以最佳化所有反應，或使其維持在一範圍內。

Derringer and Such(1980)的聯立最佳化技術為處理多重反應最佳化的一種有效方法，此方法則使用願望函數(Desirability function)，首先，將每一反應 y_i 轉換為一個個別願望函數 d_i ，其中 $0 \leq d_i \leq 1$ ，若反應 y_i 等於目標則 $d_i=1$ ，反之，反應超過可接受區域則 $d=0$ 。選擇設計變數，最大化總願望為 D ，即 $D=(d_1, d_2, \dots, d_m)^{1/m}$ ，其中 m 為反應 y_i 的個數。

若望大反應 y 的目標值為 T ，則公式為(9)。

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (9)$$

若望小反應 y 的目標值為 T ，則公式為(10)

$$d = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (10)$$

若目標在 L 與 U 之間，則公式為(11)。

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 1 & y > U \end{cases} \quad (11)$$

第四章 實務驗證與分析

本章將針對個案進行應用，第一節將針對個案所觀察的系統蒐集分析，並建構價值溪流圖，進而找出改善契機，第二節則針對現況產線問題導入不同的拉式系統，第三節為透過系統模擬中找出最佳系統，最後一節為比較及實驗結果分析。

4.1 建構價值溪流圖並進行現況分析

藉由觀察系統中蒐集相關資料，了解現況系統的運作情形，並建構價值溪流圖以進行現況分析，本節將詳細介紹個案的相關製程介紹，

4.1.1 觀察系統並蒐集相關資料

本研究個案為太陽能矽晶製造廠之前段製程，其主要產品為矽晶棒及矽晶片，主要製造程序為原料清洗段、電阻分選、配料與坩鍋處理、投料、長晶、開方、電性量測等共 11 道製程，後段製程包含切割、檢測及包裝等作業，如圖 4.1。

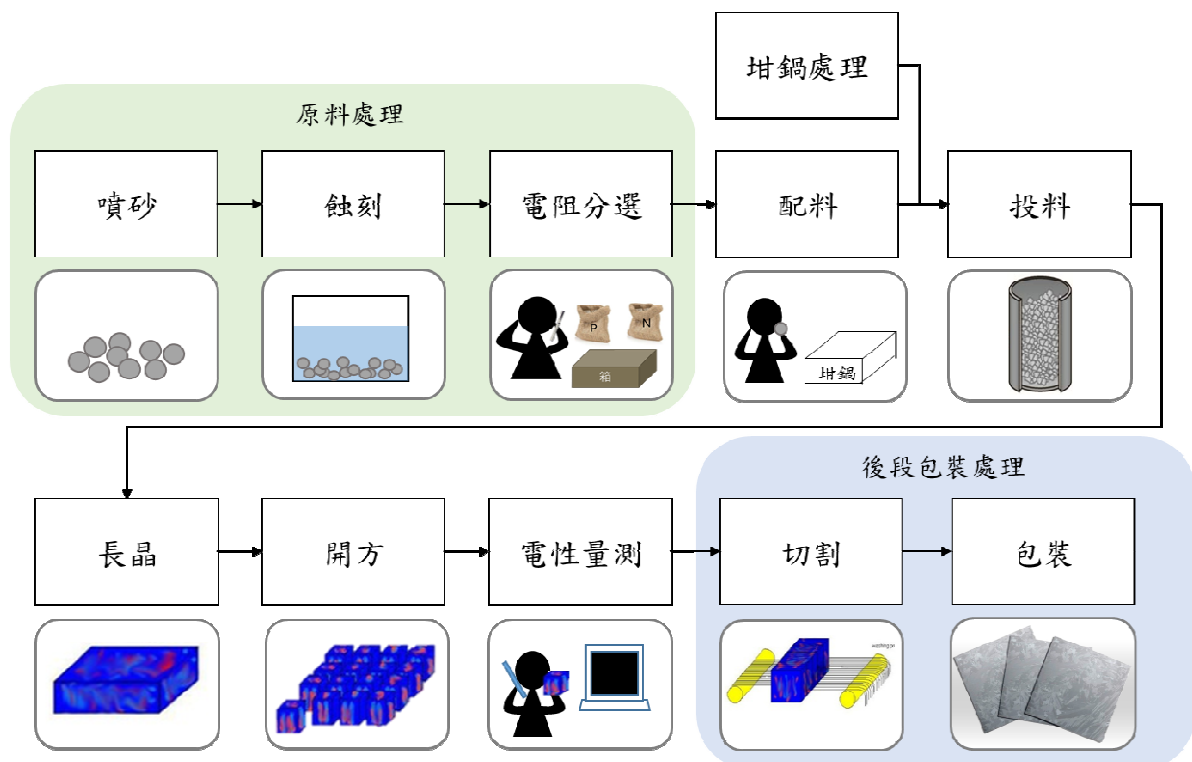


圖 4.1 太陽能矽晶製造廠製造程序圖

接著將針對各站製程進一步描述：

1. 噴砂站(Sand-blaster)：將矽原料進行表面瑕疵及缺陷的處理，以利後續加工程序。
2. 蝕刻站(Etching)：由於經由噴砂處理後的矽原料，其表面因加工而形成損傷，因此透過化學藥劑的蝕刻於矽原料的方式處理表面，噴砂站及蝕刻站又統稱原料清洗站。
3. 電阻分選站(Sorting)：將經過原料清洗站的矽原料進行 P 值及 N 值的分類，並再根據 P/N 值分類阻階，其中阻階分成七個區間。
4. 配料站(Allocation)：由作業將分類完的矽原料依據成分及比例進行檢料作業，直到坩鍋製造完成後，於下一站進行投料作業。
5. 坩鍋處理站(Crucible process)：由石英材質製作而成的坩鍋，為了後續長晶前投料時需要的裝置，其特性耐高溫且不易變形。
6. 投料(Feeding)：根據配料完的矽料及原料，由作業員放置坩鍋內直到完成一鍋後。
7. 長晶站(Growing)：於長晶爐進行加熱，溫度達至 1400 度以上，將坩鍋內的矽料熔解，並逐漸形成立方體狀的矽晶錠(Ingot)，其生成時間長達 80 小時，生成後的矽晶錠需降溫，才可進到下一站。
8. 開方站(Cut)：進行開方作業前會先由作業員進行敲坩鍋，將坩鍋敲碎後，並清洗殘留的矽晶錠，將完成的矽晶錠放置開方機台中進行開方作業，將立方體之矽晶錠開出 25 顆矽晶棒(Brick)。
9. 電性量測(Inspection)：進行抽檢量測作業，將不良部分標計後，進到下一站作業進行切割移除。

其中本研究個案之製程特性為：

1. 本研究個案為前段矽晶棒製造共 11 道製程，後段製程為包裝及檢測，總共為 18 道製程。
2. 每個工作站的機台數不一定相等。
3. 電阻分選站、配料以及後段電性量測為人工作業，其餘為人機作業。

4. 1 個晶錠(Ingot)為 25 個晶棒(brick)。
5. 配料、坩鍋前處理、投料皆為批量生產，批量分別為 16 批、4 批、6 批。
6. 噴砂、蝕刻及電阻分選站預先儲備三天量的物料。
7. 生產系統工作站內皆為等效平行機台。

本研究將蒐集 11 道主要製程的相關的資訊，如使用機台、每個工作站的加工時間、前置作業時間等，作為後續系統模擬輸入的資訊，其系統模擬軟體為 SIMUL 8 Educational Site License，本研究相關資訊由個案公司提供，其細節資訊不便對外公開，因此本研究資訊部分稍做修改，但不影響本研究結果。

4.1.2 建構現況價值溪流圖

本研究根據現況蒐集的相關資訊建構於現況價值溪流圖如圖 4.2 中，由於屬於企業資料，因此數據皆修改過，但不影響本研究結果，觀察整體現況價值溪流圖後，可清楚了解現況，如生產線之 WIP 數量，及浪費價值比例，透過價值溪流圖中找出改善契機，進行產線平衡分析，最後導入拉式生產系統以達到降低整體 WIP 量以縮短產品總生產時間。

C/T: Cycle time; W/H: Working hours; O: 作業人數; M: 機台數; T/B: 移轉批量
 增錫前處理包含Crisible Inspection & Coating, Klin.
 開方前準備包含假增錫 - Ingot Mounting

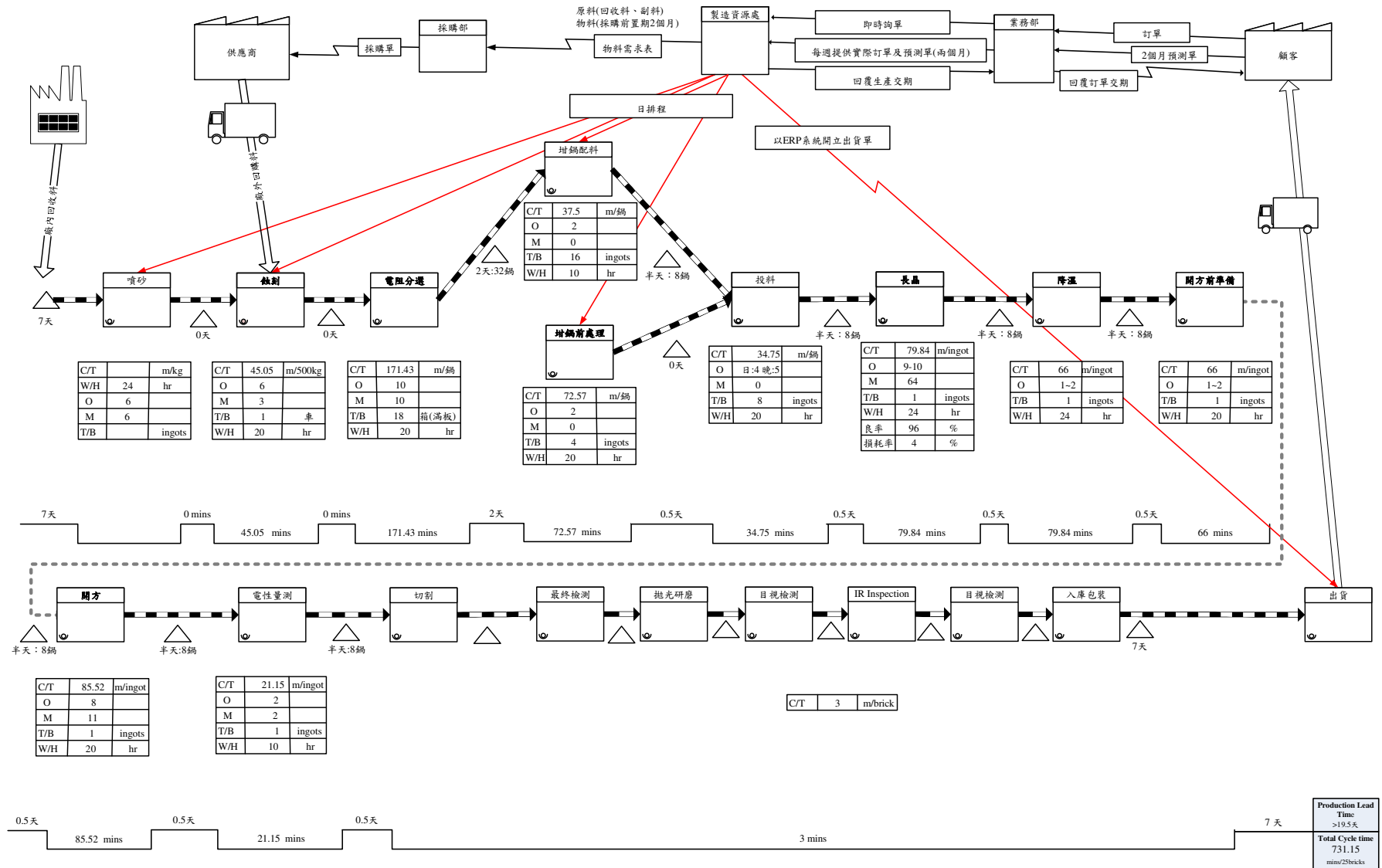


圖 4.2 現況價值溪流圖

4.1.3 計算生產節拍時間

節拍時間為每日可用有效時間除以每日顧客需求量，為了配合顧客需求，以得知產品產出的間隔時間，用以建立產出之標準。在此個案中，機台每日固定稼動時間 1440 分鐘，顧客每日需求量為 16 顆矽晶錠，因此生產節拍時間為 90 分鐘。

4.1.4 產線平衡分析

藉由各站產能計算週期時間，以了解各站生產時間之差距，此案例中可發現開方站於生產線中較長的週期時間，且最為接近生產節拍時間，因此可知此站為本案例之瓶頸站，見下圖 4.3，計算其產線平衡率為 49.86%，低於生產線平衡率標準 70%，由此可知此案例為產線不平衡的環境，且可明顯看出投料站與長晶站週期時間的差異，以及開方前準備與開方站之週期時間的差異大，因此容易堆積 WIP 於長晶站及開方站之前，透過此生產環境中，以模擬方式導入拉式生產系統以降低 WIP 數量及生產週期時間。

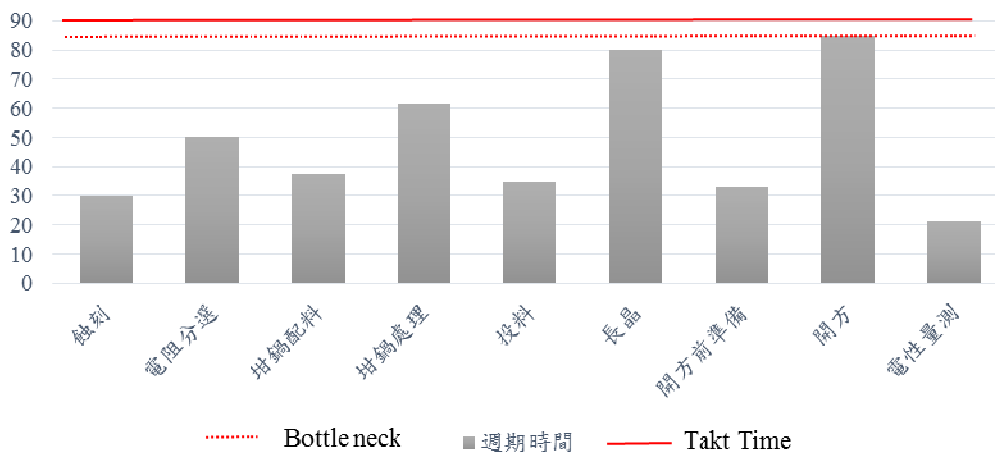


圖 4.3 個案產線平衡分析圖

4.2 導入拉式生產系統

本研究將導入六種不同的拉式生產系統，分別為看板拉式生產系統 (Kanban)、CONWIP 生產系統、混合型態一 (Hybrid Type 1) 生產系統、混合型態二 (Hybrid Type 2)、混合型態三 (Hybrid Type 3) 生產系統以及混合型態四 (Hybrid Type 4)。

其中混合拉式生產系統均為以瓶頸站為區分，Hybrid Type 1 為在瓶頸站前設置看板，其餘為 CONWIP 的生產系統、Hybrid Type 2 則以瓶頸站區分兩段 CONWIP 的生產系統、Hybrid Type 3 為瓶頸站前設 CONWIP，瓶頸

站後均為看板站的生產系統，Hybrid Type 4 則反之，瓶頸站前皆為看板站，瓶頸站後為 CONWIP 的生產系統。

將以系統模擬的方式導入六種拉式生產系統，如何在不平衡的生產環境下，設置不同的看板站，以生產節拍時間為顧客需求間隔時間 90 分鐘，以求 WIP 數量及生產週期時間最低為目標，找出影響系統輸出的參數設定，並針對此系統進一步探討，針對不同需求下的情境分析，找出最佳的看板組合之拉式生產系統。

4.3 建立系統模擬

本章節根據 3.4 節中的圖 3.10 之建立的模擬流程，本研究針對案例公司的 11 道製程進行設計，依序發展模擬模型，作為本研究模擬結果之基礎，本研究所使用的建模工具為 SIMUL 8 Educational Site License 版本 2008，為一套模組化模擬工具，以動態方式及直覺化的方式模擬及分析系統上的變化。由於問題定義及設定目標已於現況分析中了解，本研究將於蒐集資料並建立模型中介紹。

4.3.1 蒐集資料並建立模型

針對現況價值溪流圖為依據，針對生產線之前段的 11 道製程，蒐集模擬所需資料，例如工作站內的機台數、機台加工時間、移轉批量等等，於建構現況價值溪流圖時，完整蒐集其相關資訊，因此以此為依據建立模擬系統。

建立模型時需考量對於模型的設置，首先進行暖機運轉，待系統達到穩定狀態，再進行數據收集，其暖機時間的設置根據系統每間隔時間下的產出量(Output)中的趨勢，如圖 4.4，穩定時間於 24 天以上時，逐漸達到平穩，因此設置一個月 30 天為充分的暖機時間，模擬時間為一年，且為了減低模擬誤差，需進行重複實驗，其重複實驗次數為根據 SIMUL8 內建計算工具，準度需求 5% 內的建議實驗次數為考量，因此重複模擬實驗次數 10 次。

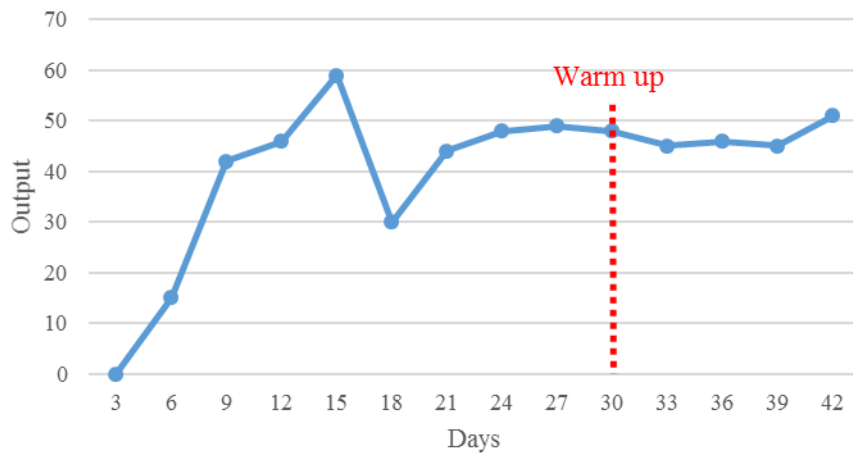


圖 4.4 Warm up 穩定時間趨勢

4.3.2 建立現況模擬系統

透過 4.1 節進行的產線平衡分析，得知瓶頸站為開方站，首先針對各製程設置主要加工機台，其系統模擬主要元件有進站、工作站、緩衝站及出站，使用元件將現況生產線主要架構模擬設置如圖 4.5，並將其蒐集之相關資訊依序輸入於各站工程系統中，如各機台加工時間見表 4.1，在進站時設置投料為 90 分鐘

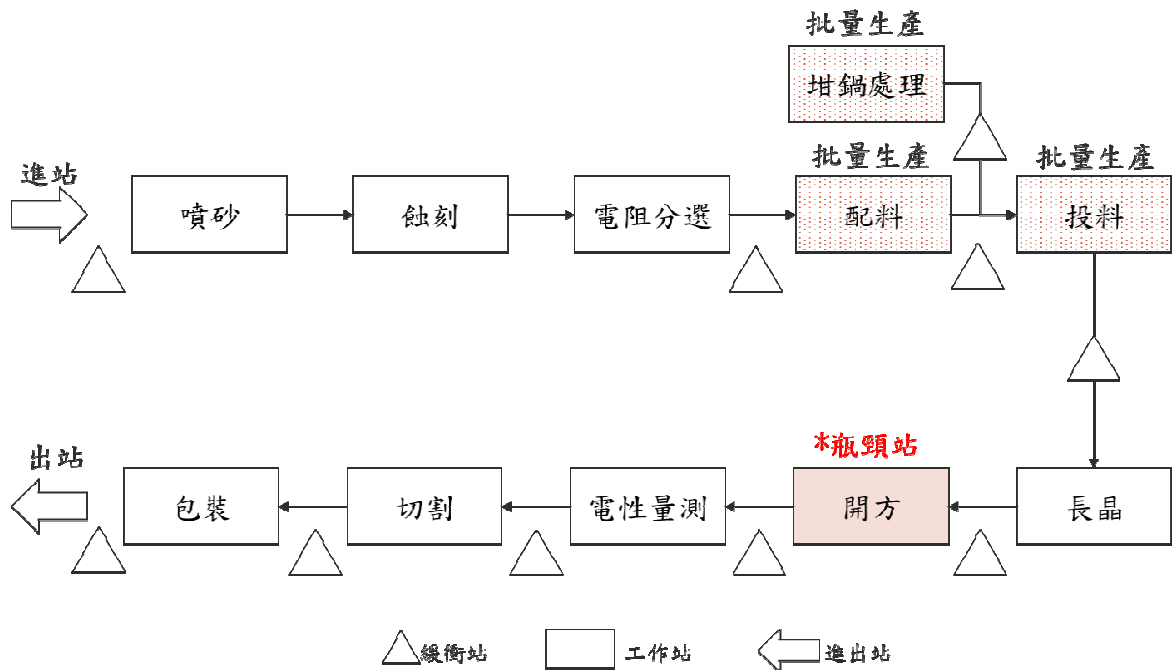


圖 4.5 現況模擬系統示意圖

現況主要批量生產站為配料站(Allocation)、坩鍋處理(Crucible process)及投料站(Feeding)，批量分別為 16 批、4 批及 6 批，因此設定等待產生批量時才能進到下一站生產，由於前段原料處理站為人工作業，此段作業並無明確產量的移轉批量，因此在此段設為無緩衝區且為連續流動方式生產，其餘與現況相同，在每一工程站前設置緩衝區。

表 4.1 各機台加工時間

NO.	製程名稱	機台數	加工時間(min)
1	蝕刻站(Etching)	1	NORM(54.06)
2	電阻分選(Sorting)	1	NORM (30)
3	配料(Allocation)	1	NORM (37.5)
4	坩鍋(Crucible)	1	NORM (72.57)
5	投料(Feeding)	5	NORM (139)
6	長晶(Growth)	63	NORM (5030)
7	開方 1(Cut1)	7	NORM (1228)
8	開方 2(Cut2)	2	NORM (633)
9	開方 3(Cut3)	2	NORM (706)
10	檢查(Inspect)	2	NORM (42.3)
11	包裝(Packing)	1	NORM (75)

由於配料站與坩鍋處理為平行作業，並匯集於投料作業，因此於此段製程設置合併邏輯，以及由於開方站有不同的機台，以先進先出方式設定於開方前處理，分配方式為有空機台則優先進入此站作業。

4.3.3 模擬模型是否合理

模擬模型的合理性需由偵錯(Verification)及驗證(Validation)中分別進行判斷驗證。

1. 偵錯(Verification)：本研究透過 SIMUL 8 自動偵錯功能進行判定，針對模型建立完證的結構通道，從中修正模型中不符合邏輯部分，並以動畫方式呈現是否符合設計邏輯。
2. 驗證(Validation)：針對效度驗證部分，本研究透過模擬之結果與現況真實系統進行比較，以此判斷此模擬模型是否代表真實系統，表 4.2 比較

系統中以三種重要的量測指標作為驗證依據，分別為產出(Output)、生產週期時間(Cycle time)及在製品數量(WIP)，其誤差皆在 10%內，為可接受的範圍內，因此可接受以此代表真實系統。

表 4.2 統驗證誤差表

項目	真實系統	模擬系統*	誤差百分比
Output (Ingot/day)	16	15.97	0.17%
Cycle Time (Ingot/day)	9645.23	10448.36	8.33%
WIP (Ingot/day)	107	110.00	2.80%
*備註	Simul-time : 1 year Warm up : 30 days Rep : 10		

誤差百分比公式如(12)所示(Lu et al., 2011)：

$$\text{誤差} = \frac{|\text{模擬系統} - \text{真實系統}|}{\text{真實系統}} \times 100\% \quad (12)$$

4.3.4 建立拉式生產系統之模擬模型

根據 4.2 節所提出之六種拉式生產系統，透過現況模擬系統中根據不同拉式生產系統設置看板，並以生產節拍時間每間隔 90 分鐘時產生一次需求，建立六種拉式生產系統。

建構模擬模型所需資訊如各製程加工站所需時間以及生產作業時間為 24 小時。由於現況模擬系統為推式生產，轉為拉式生產時，設置生產看板的部份，將透過此軟體設定條件及邏輯，如圖 4.6 在 A 站設置的看板站，於系統開始前，首先設定看板數量，使機台系統開始運作時能先使各個生產站運作，其看板數量為影響系統輸出的參數因子之一，而當生產系統開始運作時，B 站在生產一件產品時，將傳遞一張看板於看板站，A 站從看板站接收到看板後，直至進站傳遞的產品結合才可開始生產。

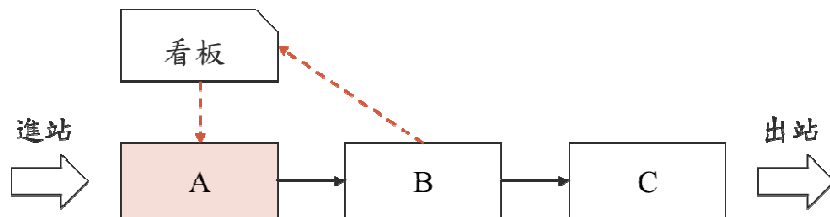


圖 4.6 看板設製圖

根據上述邏輯建構於六種拉式生產系統中，其各個系統模擬畫面分別為 Kanban 生產系統模擬示意圖 4.7、CONWIP 生產系統模擬示意圖 4.8、Hybrid Type 1 生產系統模擬示意圖 4.9、Hybrid Type 2 生產系統模擬示意圖 4.10、Hybrid Type 3 生產系統模擬示意圖 4.11 及 Hybrid Type 4 生產系統模擬示意圖 4.12，並將看板站命為 KANBAN。

Kanban 生產系統為各站設置 KANBAN，由於噴砂站至配料站為人工作業，因此只設置一站 KANBAN 於噴砂站進行拉動生產，其餘皆各站設置 KANBAN 站見模擬示意圖 4.7，而 CONWIP 生產系統則於最前端設置一站 KANBAN 對整個系統進行拉動生產，如圖 4.8。

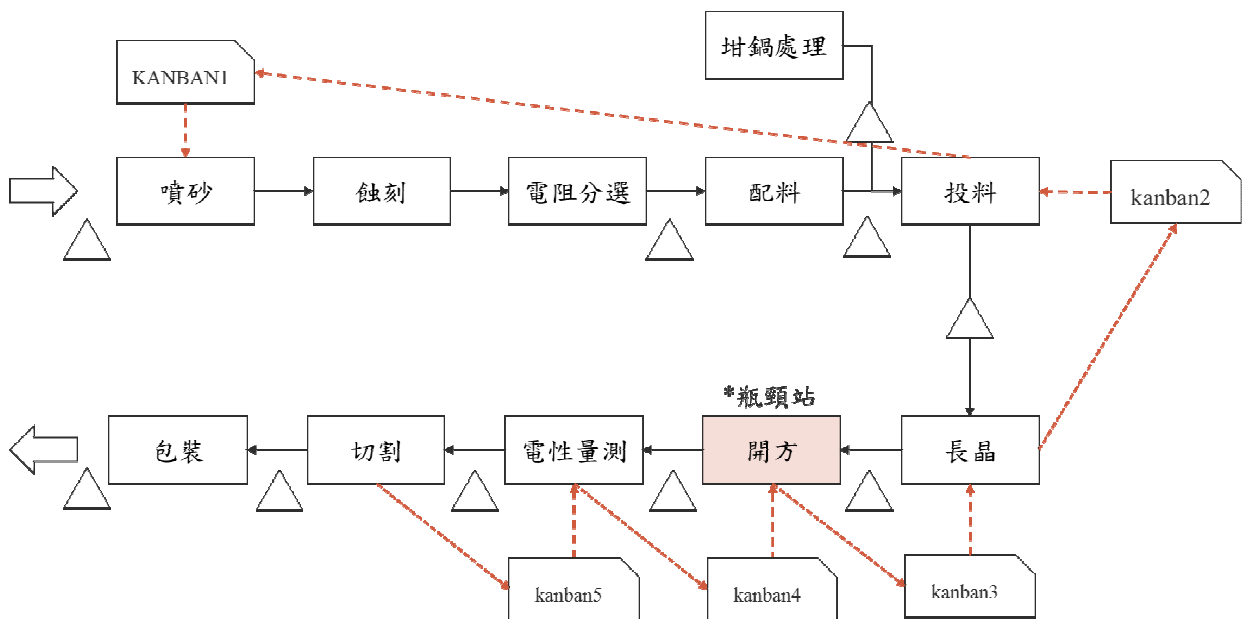


圖 4.7 Kanban 生產系統模擬示意圖

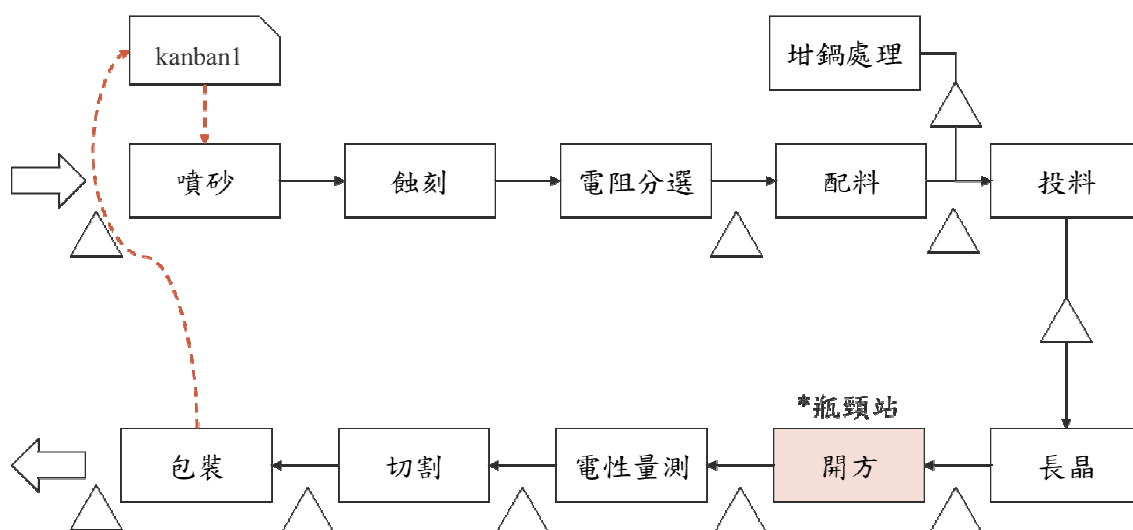


圖 4.8 CONWIP 生產系統模擬示意圖

而 Hybrid Type 1 生產系統則為瓶頸站設置看板，其餘為 CONWIP，如圖 4.9 Hybrid Type 1 生產系統模擬示意圖，於開方站設置 KANBAN2，由電性量測站傳遞生產資訊於 KANBAN2，開方站於 KANBAN2 傳遞資訊才開始生產，而其餘由 CONWIP 拉動，由最後一站傳遞看板資訊於 KANBAN1，噴砂站才開始生產。Hybrid Type 2 生產系統則以瓶頸站區分，設置兩段 CONWIP，如圖 4.10 以開方站區分，設置兩段 CONWIP，前段由長晶站傳遞看板資訊至設置噴砂站的 KANBAN1，後段由包裝站傳遞看板資訊於 KANBAN2。

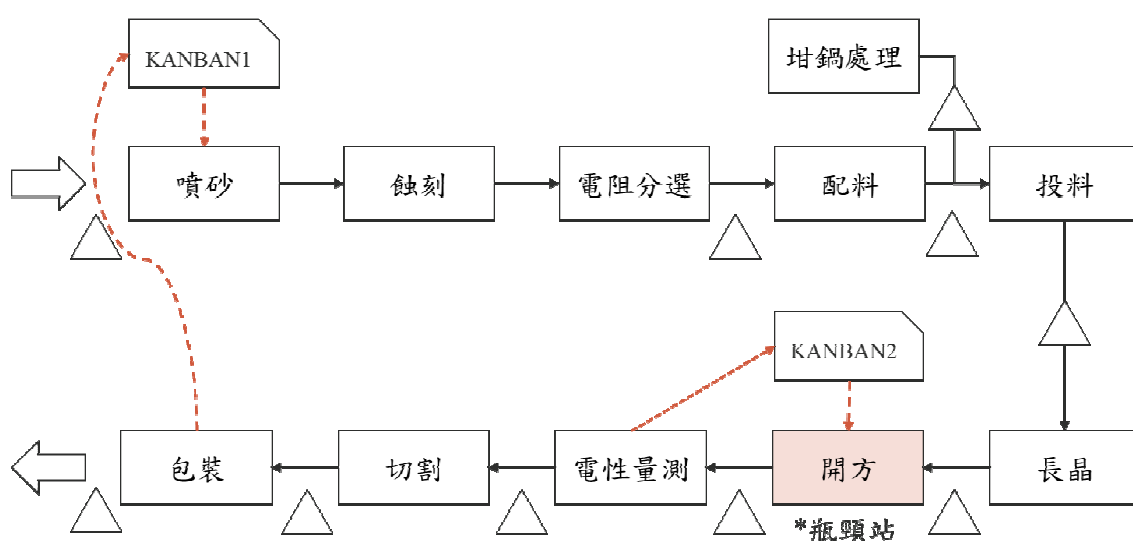


圖 4.9 Hybrid Type 1 生產系統模擬示意圖

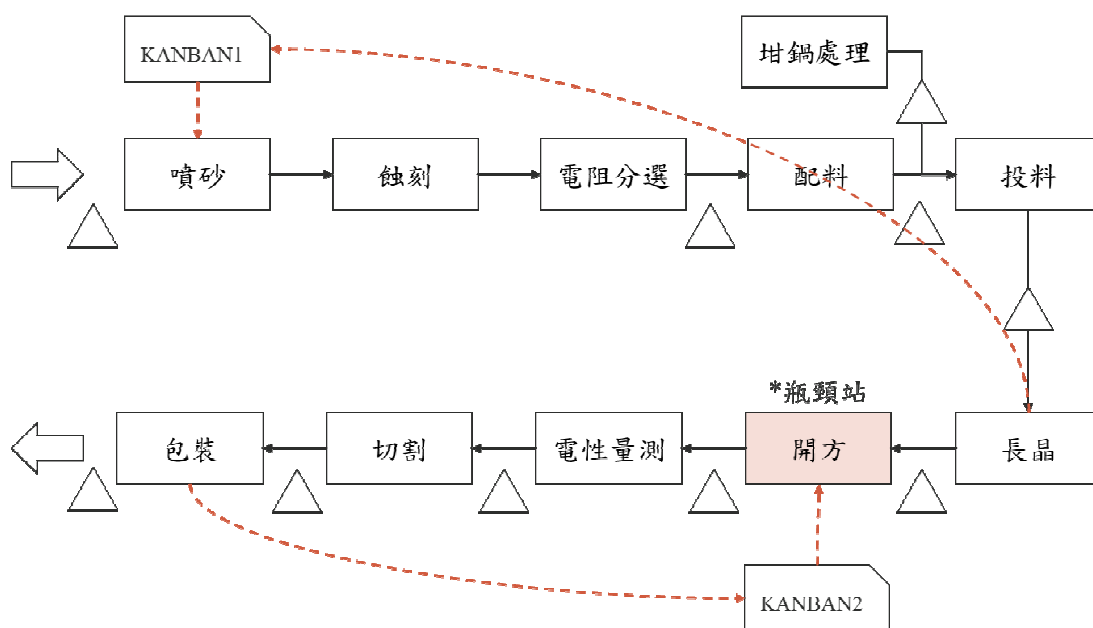


圖 4.10 Hybrid Type 2 生產系統模擬示意圖

Hybrid Type 3 生產系統模擬以瓶頸站為區分，瓶頸站前為 CONWIP，瓶頸站後為 KANBAN，其模擬示意圖如 4.11，開方站為瓶頸站，當長晶站生產時傳遞看板資訊於噴砂站的 KANBAN1，而開方站後為每一站設置 KANBAN 進行拉式生產。而 Hybrid Type 4 生產系統模擬則是相反，瓶頸站前為各站設置 KANBAN，瓶頸站後則由 CONWIP 的方式建立 KANBAN 進行拉動，其模擬示意圖如圖 4.12。

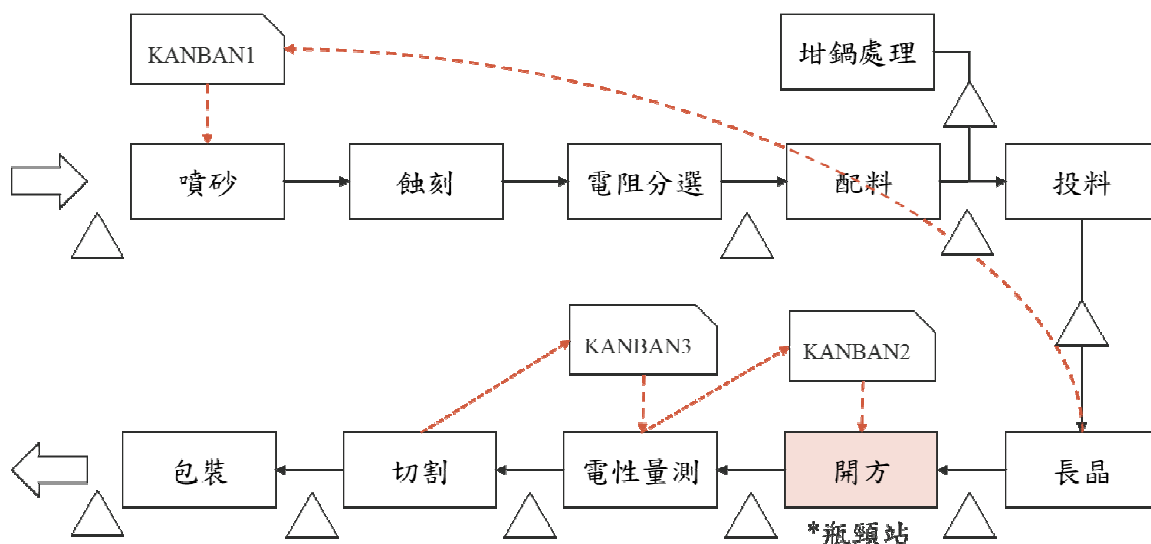


圖 4.11 Hybrid Type 3 生產系統模擬示意圖

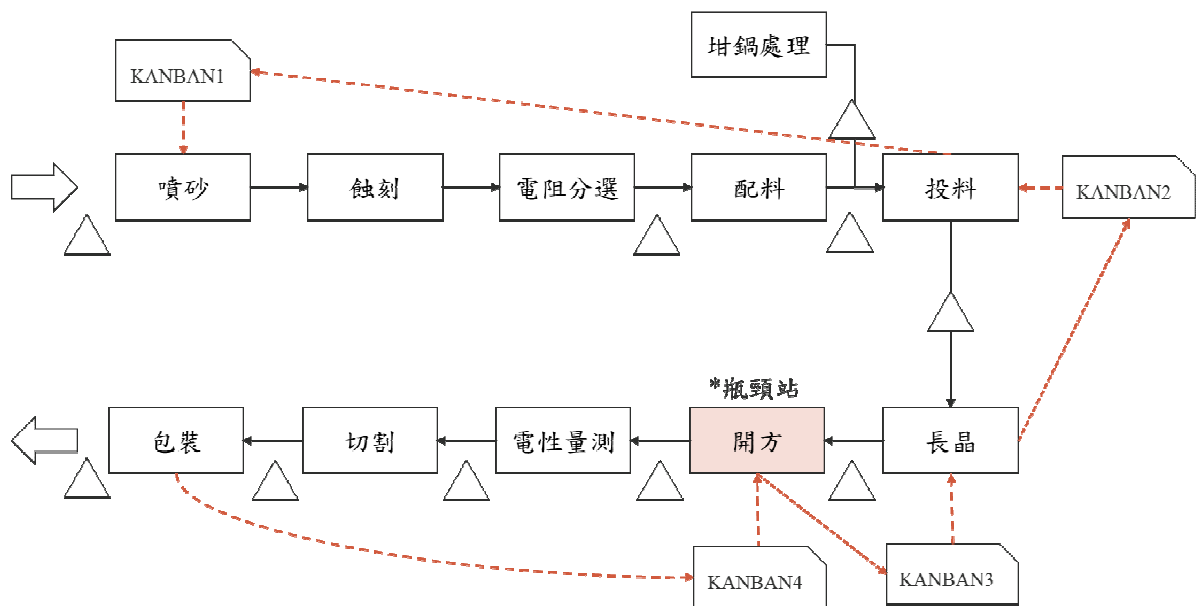


圖 4.12 Hybrid Type 4 生產系統模擬示意圖

由於不同的拉式生產系統有不同的 KANBAN 配置，其每個 KANBAN 的數量皆會影響系統之輸出結果，為了找出每個拉式生產系統的最佳績效，其系統中每個 KANBAN 的數量為拉式生產系統的因子，因此本研究將在下一階段將以反應曲面法找出各個因子水準影響系統結果的最佳組合，並且以一年產出量 5840 顆 Ingot 為基準，設定衡量目標為 WIP 數量及 Cycle time，找出 WIP 及 Cycle time 為最低結果之生產系統。

4.4 實驗分析及結果

本節實驗分析將根據 3.5 節以反應曲面法找出各式不同拉式生產系統的最佳看板配置，由於 Hybrid Type 1 生產系統結合 Kanban 及 CONWIP 的概念，因此由 Hybrid Type 1 生產系統為例，介紹實驗步驟及分析方法，以兩個目標為主，分別為 WIP 數量及 Cycle time，並在下一階段找出的最佳拉式生產進行敏感度分析。

4.4.1 WIP 數量初步實驗

根據上述模擬系統方式，透過不同的看板數配置的情形下，見表 4.3，本研究主要目標有二個，分別為 WIP 數量及 Cycle time，以 Hybrid Type 1 拉式生產系統的實驗設計為例，如 3.5 節描述，由於 Hybrid Type 1 生產系

統為設置兩站 KANBAN 於蝕刻站及開方站，本研究初始實驗設定因子之起始值為 KANBAN1 有 90 張，KANBAN2 有 11 張。

首先，選擇初始實驗範圍為 KANBAN1 (70~110)張、KANBAN2 (9~13)張，所進行之實驗組合如表 4.3。

表 4.3 第一次配適實驗矩陣結果

Run	X1	X2	KANBAN1	KANBAN2	WIP(Ingot)	Cycle time (min)
1	-1	-1	70	9	66.63	9130.38
2	1	-1	110	9	105.75	13398.7
3	-1	1	70	13	68.63	8640.71
4	1	1	110	13	106.75	10548.9
5	0	0	90	11	85.75	9379.56
6	0	0	90	11	85.75	9379.56
7	0	0	90	11	85.75	9379.56
8	0	0	90	11	85.75	9379.56
9	0	0	90	11	85.75	9379.56

其中， X_i 為編碼變數，KANBAN1 及 KANBAN2 為未編碼之自然變數，當自然變數經過編碼後可使因子高、低兩水準分別以 +1、-1 表示，並將二個控制因子由自然變數轉換為編碼變數的過程如式(13)。

$$X_1 = \frac{\text{KANBAN1}-90}{20}, X_2 = \frac{\text{KANBAN2}-11}{2} \quad (13)$$

1. 配適 WIP 一階迴歸模型

以表 4.4 之實驗結果，以 α 顯著水準等於 0.05 進行最小平方法，找出 WIP 數量與各變數之間的關係，本研究以統計軟體 Mintab 17 為工具，配適 WIP 數量與各變數之一階迴歸模型如式(14)，其中設 \hat{Y}_1 為 WIP 目標值，從表 4.4 第一次 WIP 數量配適實驗估計量中可發現迴歸係數的顯著性只有 X_1 小於 0.05，所以此模型只有 X_1 一個變數，且調整型判定係數 R^2 為 0.997，代表變數及反應值的線性有相當的關聯性，其模型為

顯著。

$$\hat{Y}_1 = 86.279 + 19.310X_1 \quad (14)$$

表 4.4 第一次 WIP 數量配適實驗估計量

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	86.279	0.251	344	0
X ₁	19.31	0.376	51.33	<0
X ₂	0.75	0.376	1.99	0.093
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	0.752428	0.9977	0.997	0.99

接著以缺適性檢定確定此迴歸模型是否為線性模型，本研究根據表 4.5 第一次 WIP 數量缺適性中，檢定一階配適迴歸之缺適性 F 檢定值為 7.55，經相對應的檢定統計量查表得知 $F_{0.05,1,6}=5.9874$ ，其模型 F 值大於檢定統計量，代表此一階模型不適當，可知此模型為非線性，因此針對第一目標可進行二階配適模型，即進行中央合成設計實驗。

表 4.5 第一次 WIP 數量缺適性檢定

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lack-of-Fit	1	3.15	3.15	7.55	0.033
Pure Error	6	2.5	0.42		

2. 中央合成設計實驗

由於上步驟之一階模型不適用，故為了配適出一個適用的二階模型，在此採用中央合成設計，中央合成設計包含了一個 2^k 因子，或部份因子設計，並增加 $2k$ 個軸點，及中心點至軸點的距離 $\alpha=(n_f)^{1/4}$ 所決定(其中 n_f 為試驗次數)，加上中心點 n_c 之實驗設計。此例中設定 2^2 實驗加上 α 為 1.414，並加入 5 個中心點做試驗，所進行實驗組合如表 4.6，Run1~Run4 為原本之實驗設計，Run5~Run8 為軸點，Run9~Run13 為中心點。

表 4.6 中央合成設計實驗矩陣

Run	X ₁	X ₂	KANBAN1	KANBAN2	WIP(Ingot)	Cycle time (min)
1	-1	-1	70	9	66.63	9130.38
2	1	-1	110	9	105.75	13398.7
3	-1	1	70	13	68.63	8640.71
4	1	1	110	13	106.75	10548.9
5	-1.4142	0	61.7157	11	58.63	8919.57
6	1.41421	0	118.284	11	113.63	12053.5
7	0	-1.4142	90	8.1716	87.13	1226.01
8	0	1.41421	90	13.828	87.38	8853.48
9	0	0	90	11	85.75	9379.56
10	0	0	90	11	85.75	9379.56
11	0	0	90	11	85.75	9379.56
12	0	0	90	11	85.75	9379.56
13	0	0	90	11	85.75	9379.56

3. 配適 WIP 數量二階迴歸模型

根據表 4.6 二階模型的實驗配適後，透過實驗將結果以迴歸實驗分析，進行二階模型配適得到如式(15)，由配適結果表 4.7 得知其調整後判定系數 R^2 為 0.9992，代表反應值與變數的線性關係強。

$$\hat{Y}_1 = 85.925 + 19.378X_1 + 0.419X_2 + 0.782X_2^2 \quad (15)$$

表 4.7 WIP 數量二階迴歸模型

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	85.925	0.158	543.28	0	
X ₁	54.808	27.404	0.219	125.16	0
X ₂	1.186	0.593	0.219	2.71	0.024
X ₂ *X ₂	3.126	1.563	0.329	4.75	0.001
		S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)

	0.43792	0.9994	0.9992	0.998
--	---------	--------	--------	-------

接著進行缺適性檢定表 4.8，發現二階模型 F 值為 1.07，根據檢定統計量查表得知 $F_{0.05,5,4}=6.2561$ ，檢定統計值大於二階模型值，因此本研究接受此模型為適當的配適線性模型。

表 4.8 WIP 數量二階缺適性檢定

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lack-of-Fit	5	1.54	0.77	1.07	0.389
Pure Error	4	5.77	0.72		

4. 求解 WIP 數量二階模型平穩點

完成適當的二階模型後，接著分析公式的迴歸模型找出最小反應點之平穩點，首先將公式(15)進行偏微分求其為零求解 X_i ，公式為(16)式。

$$\frac{\partial \hat{Y}_1}{\partial X_i} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{Y}_1}{\partial X_1} = 19.378 = 0 \\ \frac{\partial \hat{Y}_1}{\partial X_2} = 0.419 + 0.782X_2 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

求其解(17)之方程式，可得 $X_1=0$ ， $X_2=-0.5358$ ，將此編碼轉換自然變數，及可得知自然變數解如式(18)。

$$0 = \frac{\text{KANBAN1} - 90}{20}, \quad -0.5358 = \frac{\text{KANBAN2} - 11}{2} \quad (18)$$

得出自然變數解分別為 $\text{KANBAN1}=90$ ， $\text{KANBAN2} \approx 9.9283$ ，將此數據帶入系統模擬中，得到解為 $\text{WIP}=85.63$ 及 $\text{Cycle time}=11121.95$ ，此為可接受解，但尚為達到本研究之系統限制，故不為最佳解，因此需重新配置實驗，由於本研究有第二目標 Cycle time 之最短時間，因此決定

Cycle time 求出之結果決定最後的組合。

4.4.2 Cycle time 初步實驗

配適第一目標 WIP 的迴歸模型後，接著配適第二目標 Cycle time，根據第一次配適實驗結果表 4.9，同樣以 α 顯著水準等於 0.05 進行最小平方方法，找出 Cycle time 與各變數之間的關係，配適 Cycle time 與各變數之一階迴歸模型如式(19)，其中設 \hat{Y}_2 為 Cycle time 目標值，從表 4.9 Cycle time 第一次配適實驗估計量中可發現迴歸係數的顯著性只有 X_1 小於 0.05，所以此模型只有 X_1 一個變數，且調整型判定系數 R^2 為 0.5313，代表變數及反應值的線性關聯性不強，其模型為顯著。

1. 配適一階迴歸模型

$$\hat{Y}_2 = 9846 + 1544X_1 \quad (19)$$

表 4.9 Cycle time 第一次配適實驗估計量

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	9846	267	36.91	<0
X_1	1544	400	3.86	0.008
X_2	-835	400	-2.09	0.082
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	973.296	0.5899	0.5313	0.075

同樣以缺適性檢定確定此迴歸模型是否為線性模型，根據表 4.10 一階配適迴歸之缺適性 F 檢定值為 3.52，經相對應的檢定統計量查表得知 $F_{0.05,1,6}=5.9874$ ，其模型 F 值小於檢定統計量，代表此一階模型適當，可知此模型為線性。

表 4.10 Cycle time 缺適性檢定

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lack-of-Fit	1	2450572	2450572	3.52	0.11
Pure Error	6	4180568	696761		

2. 進行最陡上升法

由於上述結果得知適合 Cycle time 的一階迴歸模型後，及可進行最陡上升法對 Cycle time 進行最小值的逼近，首先根據(19)式中，取一階迴歸模型中係數絕對值最大的變數作為基本步伐，再由此基本步伐訂定其他變數的步伐大小，由於此模型只有一個變數，因此針對變數 X_1 的係數 1544，設為基本步伐，並令其編碼後的地步大小為 1。

針對系統實驗的了解，將自然變數的步伐 S_i 設定為 $S_1=5$ ，並將編碼變數的步伐 ΔX_i 轉換為自然變數的單位 ΔS_i ，由於次模型只有一個變數 X_1 ，因此每增加 X_1 一個單位，則增加自然變數 S_1 。

表 4.11 Cycle time 最陡上升實驗結果

Run	X1	X2	KANBAN1	KANBAN2	WIP(Ingot)	Cycle time(min)
Origin	0	0	90	11	85.75	9379.56
Origin+ Δ	1	0	85	11	81.5	8978.21
Origin+2 Δ	2	0	80	11	76.25	8742.22
Origin+3 Δ	3	0	75	11	72.38	8673.91*
Origin+4 Δ	4	0	70	11	66.25	8694.31
Origin+5 Δ	5	0	65	11	61	8787.3

由表 4.11 的實驗結果中建製的圖 4.13 可知道，Cycle time 在第三次實驗時目標值不降反增，由此得知必須重新配置一個新的實驗模型，因此選定 $X_1=75$ 及 $X_2=11$ 為新的中心點。

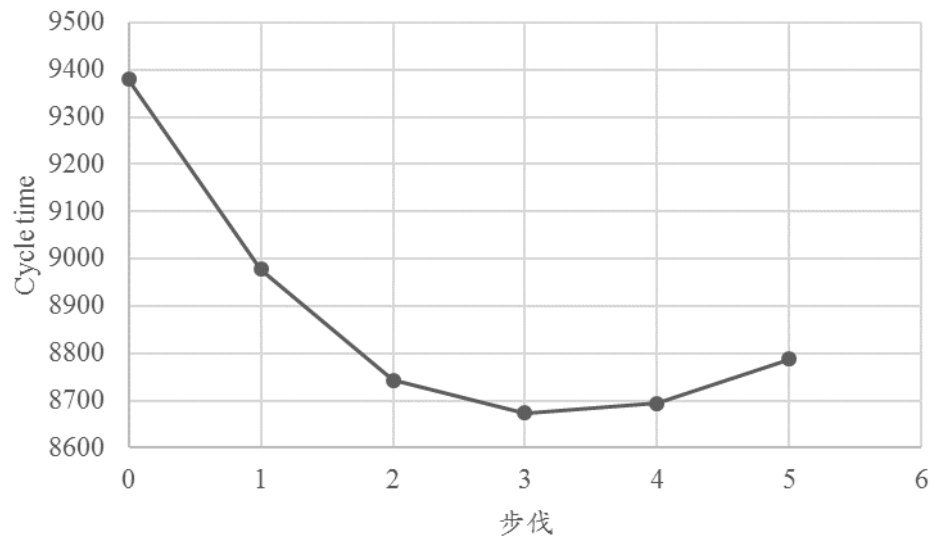


圖 4.13 沿著最陡上升路徑 Cycle time 對步伐圖

3. 第二次配適實驗

因此進行重新配置實驗，同樣將實驗範圍訂為 KANBAN1 (60~90) 張、KANBAN2 (9~13)張，其變數編碼過程如(20)，接著並進行第二次的配適實驗，同樣進行 2^2 次實驗加上 5 個中心點，其實驗組合如表 4.12。

$$X_1 = \frac{\text{KANBAN1}-75}{20}, X_2 = \frac{\text{KANBAN2}-11}{2} \quad (20)$$

表 4.12 Cycle time 第二次配適實驗矩陣結果

Run	X1	X2	KANBAN1	KANBAN2	WIP(Ingot)	Cycle time(min)
1	-1	-1	60	9	56.9	9389.03
2	1	-1	90	9	85.8	11055.3
3	-1	1	60	13	56.3	8708.31
4	1	1	90	13	87.7	8695.19
5	0	0	75	11	72.8	8654.18
6	0	0	75	11	72.8	8640
7	0	0	75	11	72.8	8662
8	0	0	75	11	72.8	8648
9	0	0	75	11	72.8	8664.18

其第二次一階迴歸模型如式(21)，透過估計量表 4.13 得知此迴歸模型只有 X_2 顯著，接著進行缺適性檢定，發現表 4.14 第二次一階迴歸缺適性 F 檢定值為 6.27，經相對應的檢定統計量查表得知 $F_{0.05,1,6}=5.9874$ ，其模型 F 值大於檢定統計量，代表此一階模型不適當，可知此模型為非線性，需進行中央合成實驗。

$$\hat{Y}_2 = 9013 + 760X_2 \quad (21)$$

表 4.13 Cycle time 第二次配適實驗估計量表

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	9013	212	42.45	0
X2	-760	319	-2.39	0.048
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	637.018	0.4487	0.3699	0

表 4.14 Cycle time 第二次缺適性檢定表

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lack-of-Fit	1	1451834	1451834	6.27	0.046
Pure Error		6	1388713	231452	

4. Cycle time 中央合成設計實驗

由於上述模型得知一階模型為非線性，表示已接近最佳點，所以需以二階模型進行分析，因此根據第二次配置實驗組合延伸至中央合成實驗設計表，增加四個軸點以及五個中心點，其配置後的實驗結果如下表 4.15。

表 4.15 Cycle time 中央合成實驗矩陣及結果

Run	X1	X2	KANBAN1	KANBAN2	WIP(Ingot)	Cycle time(min)
1	-1	-1	60	9	56.9	9389.03
2	1	-1	90	9	85.8	11055.3
3	-1	1	60	13	56.3	8708.31
4	1	1	90	13	87.7	8695.19
5	-1.4142	0	53.7868	11	51.13	8809.8
6	1.4142	0	96.2132	11	92.38	10054
7	0	-1.4142	75	8.1716	70.13	10592.5
8	0	1.4142	75	13.828	70.63	8415.5
9	0	0	75	11	72.8	8654.18
10	0	0	75	11	72.8	8640
11	0	0	75	11	72.8	8662
12	0	0	75	11	72.8	8648
13	0	0	75	11	72.8	8664.18

5. 第二次二階配適模型

根據 Cycle time 中央合成設計實驗的二階配適迴歸模型中，完成二階模型的配適後，實驗結果逐步迴歸分析進行二階模型配適可得公式(22)的二階模型。

$$\hat{Y}_2 = 8653.67 + 426.59X_1 - 764.94X_2 + 387.61X_1^2 + 423.66X_2^2 - 419.85X_1X_2 \quad (22)$$

由表 4.16 Cycle time 二階配適迴歸模型結果得知，調整後的判定係數 R^2 為 0.9996，故表示此模型解釋變異的能力強且此迴歸模型是顯著的，進一步進行缺適性檢定，見表 4.17，發現模型的檢定值 $F = 5.57$ 小於 $F_{0.05,3,4} = 6.5914$ ，因此可知此迴歸函數為線性的，表示此二階模型為適當的配適模型。

表 4.16 Cycle time 二階配適迴歸模型表

Term	Effect	Coef	SE	Coef	T-Value	P-Value
Constant	8653.67	7.68	1126.48	0		
X ₁	1206.57	603.29	8.59	70.24	0	1
X ₂	-2163.59	-1081.8	8.59	-125.95	0	1
X ₁ *X ₁	1550.5	775.2	13	59.52	0	1.02
X ₂ *X ₂	1694.7	847.3	13	65.05	0	1.02
X ₁ *X ₂	-1679.4	-839.7	17.2	-48.88	0	1
			S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
			17.1776	0.9998	0.9996	0.9986

表 4.17 Cycle time 二階迴歸缺適性檢定

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lack-of-Fit	3	1666	555	5.57	0.065
Pure Error	4	399	100		

6. 二階迴歸模型平穩點

由於希望能找到極點值，接著將 Cycle time 二階迴歸模型公式(22) 帶入公式(23)矩陣式，求解平穩點得到式(24)。

$$\hat{Y} = \beta_0 + x'b + x'Bx,$$

$$\text{其中 } B = \begin{bmatrix} 387.61 & -209.925 \\ -209.925 & 423.66 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 426.59 \\ -764.94 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$X_S = -\frac{1}{2}B^{-1}b = -0.5 \begin{bmatrix} 0.003526 & 0.001747 \\ 0.001747 & 0.003226 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 426.59 \\ -764.94 \end{bmatrix} = (24)$$

根據矩陣換算結果得到編碼變數為 $X_1=0.0839$ ， $X_2=-0.8612$ ，並根據 (20) 式轉換為自然變數後，得結果為 $KANBAN1 \approx 76.678$ ， $KANBAN2 \approx 9.278$ ，並帶入系統得到解為 $Cycle\ time=8696$ ， $WIP=72.5$ ， $Output=5124.25$ ，其中 Cycle time 已接近系統負荷之最短時間，故可知

此看板配置為最佳解。

4.4.3 尋找多反應值之最佳解

由於上述實驗雖已找出 WIP 數量及 Cycle time 配適迴歸的適當模型，但找出的解為各別反應值之目標值，因為不同的反應值有不同的目標值，由於每日最高需求量約為 16 顆 Ingot，一年產量為 5860 顆，因此 Output 在誤差 5% 下為可接受範圍，本研究將在 Output 大於 5700 顆之下，同時 WIP 數量不超出 90 顆及 Cycle time 不超過 9000 分鐘為目標，找出能滿足此要求之參數值。

首先，分別將前述之實驗設計找出上述實驗的 WIP 及 Cycle time 之模型列於公式，並設定各別目標值，分別為 WIP 之目標 $Y_1 \leq 90$ 、Cycle time 之目標 $Y_2 \leq 9000$ 及 Output 目標值 $Y_3 \geq 5700$ ，根據不同反應值所配適模型的等高線圖各別設定目標後，其重疊部份之等高線圖為可求最佳可行解之範圍，本研究利用 Mintab 統計軟體之 Overlaid Contour Plot 工具，可求出最佳重疊的範圍如圖 4.14，可知其達到本研究目標之參數設定位於空白部份，接著利用個別願望函數進一步求出最佳化之解。

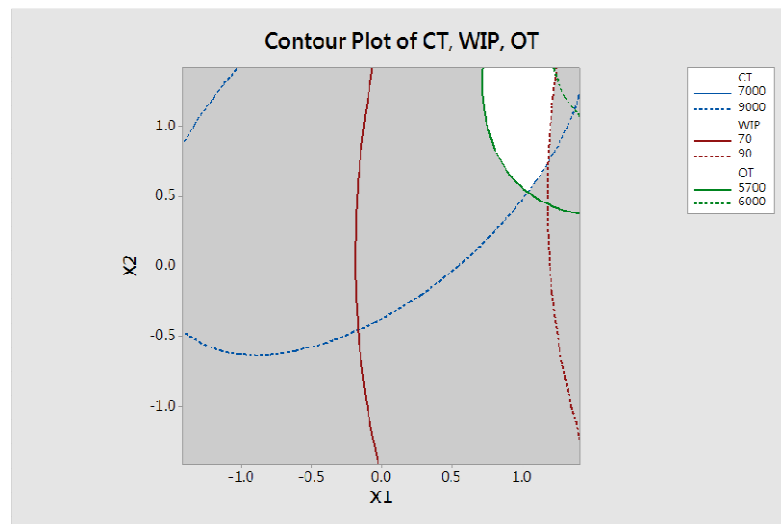


圖 4.14 多反應值之最佳點重疊範圍

根據 3.5 節提及的多反應值公式代入，並將此兩反應值轉換為各別的願望函數如公式(26)、(27)及(28)。

$$\hat{Y} = 8653.67 + 426.59X_1 - 764.94X_2 + 387.61X_1^2 + 423.66 - 419.85X_1X_2 \quad (25)$$

$$d_1 = \begin{cases} 1 & y < 70 \\ \left(\frac{88 - Y_2}{18}\right) & 70 \leq y < 88 \\ 0 & y > 88 \end{cases} \quad (26)$$

$$d_2 = \begin{cases} 1 & y < 7000 \\ \left(\frac{9000 - Y_2}{2000}\right) & 7000 \leq y < 9000 \\ 0 & y > 9000 \end{cases} \quad (27)$$

$$d_3 = \begin{cases} 1 & 5700 < y \\ \left(\frac{Y_3 - 5799}{2000}\right) & 5700 \leq y < 5900 \\ 0 & y > 5900 \end{cases} \quad (28)$$

本研究利用 Minitab 統計軟體做為工具求解願望函數，能滿足 Y_1 、 Y_2 及 Y_3 之目標值對應的參數設定，分別將各個反應值設定目標值，取 WIP 之目標 $T=88$ 及 $L=70$ ，以及 Cycle time 為 $T=9000$ 及 $L=7000$ ，將 Output 之目標值 T 設為最大化以及最低值為 $U=5700$ ，得到編碼變數 $X_1=0.8714$ 及 $X_2=1.4142$ ，以及預測值 $Y_1=84.28$ 、 $Y_2=8562.35$ 與 $Y_3=5796.31$ 。

$$0.8714 = \frac{\text{KANBAN1} - 75}{20}, \quad 1.4142 = \frac{\text{KANBAN2} - 11}{2} \quad (29)$$

將因子轉換為自然變數為 $\text{KANBAN1} \approx 92.4$ 及 $\text{KANBAN2} \approx 13.828$ ，並將此帶入系統模擬得值為 $\text{WIP}=81.75$ 、 $\text{Cycle time}=8729.29$ 及 $\text{Output}=5711$ ，皆符合本研究預期得到之目標，故可將 Hybrid Type1 拉式生產系統看板站設為 $\text{KANBAN1}=92$ ， $\text{KANBAN2}=13$ 。

4.4.4 實驗結果分析

透過反應曲面法能夠在較少的實驗成本及時間下，能夠快速獲得所需目標，本研究將六種不同的拉式生產系統及其最佳看板配置組合如表 4.18 所示，以反應曲面法將結果呈現於表 4.19 及圖 4.15。

表 4.18 各種拉式系統方式

拉式系統	方式
Kanban	各站設置 KANBAN 進行拉式生產。
CONWIP	最前站設置 KANBAN，由最後一站傳遞資訊至最前站進行拉動。
Hybrid1	以瓶頸站區分，瓶頸站設置 KANBAN1，由下一站拉動，最前站設置 KANBAN2，由最後一站傳遞至 KANBAN2 進行拉動。
Hybrid2	以瓶頸站區分兩段 CONWIP，最前站設置 KANBAN1，由長晶站拉動，開方站設置 KANBAN2，由最後一站拉動。
Hybrid3	以瓶頸站區分，瓶頸站前為 CONWIP 拉動，瓶頸站後則各站設置 KANBAN。
Hybrid4	以瓶頸站區分，瓶頸站前各站設置 KANBAN，瓶頸站後由 CONWIP 方式設置 KANBAN。

表 4.19 拉式系統與現況實驗結果表

生產系統	KANBAN 設置站別	各站 KANBAN 數量	Output (Ingot)	WIP (Ingot)	Cycle time (min)
Kanban	(Etching, Feed, Growth, Cut, Inspection)	(16,6,58,22,5)	5,724.00	89.9	9,281.97
CONWIP	(Etching)	-89	5,790.60	85.2	8,787.68
Hybird 1	(Etching, Cut)	(92,13)	5,711.00	81.75	8,729.29
Hybird 2	(Etching, Cut)	(75, 22)	5,766.33	83.33	8,926.74
Hybird 3	(Etching, Cut, Inspection)	(73, 18, 6)	5,743.80	85.4	8,891.64
Hybird 4	(Etching, Feed, Growth, Cut)	(21, 5, 59, 19)	5,784.20	84.9	9,713.12
現況系統			5,829.90	111.7	10,163.13

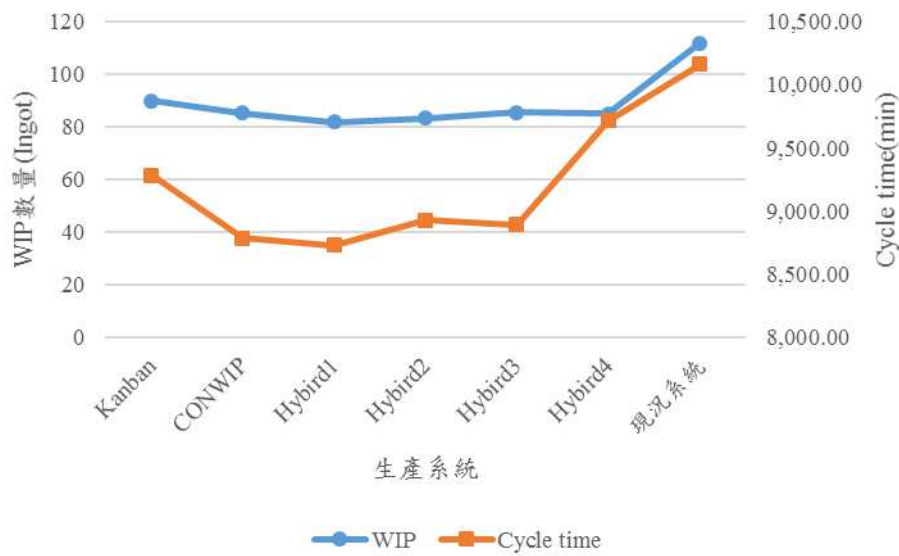


圖 4.15 不同拉式生產系結果圖示

將結果表以圖 4.15 表示，由這六種拉式生產系統中在 Output 接近下進行比較，其中以 Hybrid Type 1 績效最好，其 WIP 與 CT 最低，接著將六種拉式生產系統結果與現況模擬系統進行改善幅度比較，見表 4.20 可發現以 Hybrid Type 1 之改善百分比最為多，其中 WIP 數量從 110 顆 Ingot 降低至 81 顆 Ingot，改善幅度約 25.68% 以及 Cycle time 從 10448.36 分鐘降低至 8729.29 分鐘，改善幅度約 16.45%，因此可說明此系統於此環境中比其他系統表現較好，下一階段將以此系統進行敏感度分析。

表 4.20 現況與各拉式系統改善百分比

拉式系統	WIP 改善百分比	Cycle time 改善百分比
Kanban	18.27%	11.16%
CONWIP	22.55%	15.89%
Hybird 1	25.68%	16.45%
Hybird 2	24.25%	14.56%
Hybird 3	22.36%	14.90%
Hybird 4	22.82%	7.04%

4.5 敏感度分析

將可控制因子固定至最佳解的情形下，改變特定因子以評估此模型是否存在著風險，如果變化不大，代表此模型為可靠，本研究將上節得到的結果分別進行瓶頸站負荷，將拉式生產系統的各個 KANBAN 因子固定後，觀察瓶頸站負荷不同下之變化，接著，根據最佳的拉式生產系統，分析其需求量變化，觀察在不同的需求量與現況系統比較其影響結果。

4.5.1 瓶頸負荷

本研究根據產線平衡分析發現後段製程為瓶頸站，透過減少瓶頸站之機台數來增加負荷，以提升其產線不平率，並輸入系統觀察其變化中，由此分析瓶頸負荷的變動對於現況系統及所有拉式生產系統的影響。因此將瓶頸站負荷增加百分比設定為四種水準，得到現況系統及所有拉式生產系統之 Output 結果表 4.21，可發現兩者差異皆在 5% 之下，代表可以此為同一水平下，分別針對 WIP 及 Cycle time 進行比較。

表 4.21 Output 之瓶頸負荷差異百分比

瓶頸站負荷	Kanban	CONWIP	Hybrid1	Hybrid2	Hybrid3	Hybrid4
0%	1.82%	0.67%	2.04%	1.09%	1.48%	0.78%
7.50%	0.42%	0.31%	0.46%	1.17%	1.38%	1.28%
15.60%	1.07%	0.18%	0.08%	1.02%	1.08%	1.03%
34.50%	1.33%	0.18%	0.00%	1.34%	1.34%	1.34%
48.30%	1.56%	0.25%	0.00%	1.56%	1.56%	1.56%

首先，觀察 WIP 數量於瓶頸各別觀察的不同拉式系統的變化，可發現表 4.22 中，現況系統隨著瓶頸負荷量的增加下，其 WIP 數量同樣增加，而拉式生產系統之 WIP 數量比現況系統低，透過圖 4.16 比較不同拉式系同於不同的瓶頸負荷中的變化，可發現 Hybrid Type 1 拉式系統之 WIP 數量比其他系統更低。

表 4.22 WIP 之瓶頸負荷比較表

瓶頸站負荷	Kanban	CONWIP	Hybrid1	Hybrid2	Hybrid3	Hybrid4	現況系統
0%	89.9	85.2	81.75	83.33	85.4	84.9	111.7
7.50%	82.33	87.13	80.4	82.67	82.67	86	474.5
15.60%	90.33	87.38	80.8	85	79.33	88.67	931.2
34.50%	84	86.25	82.5	82.67	82.33	86.67	1716.9
48.30%	85	86.88	79	79.33	79.33	87.33	2138.3

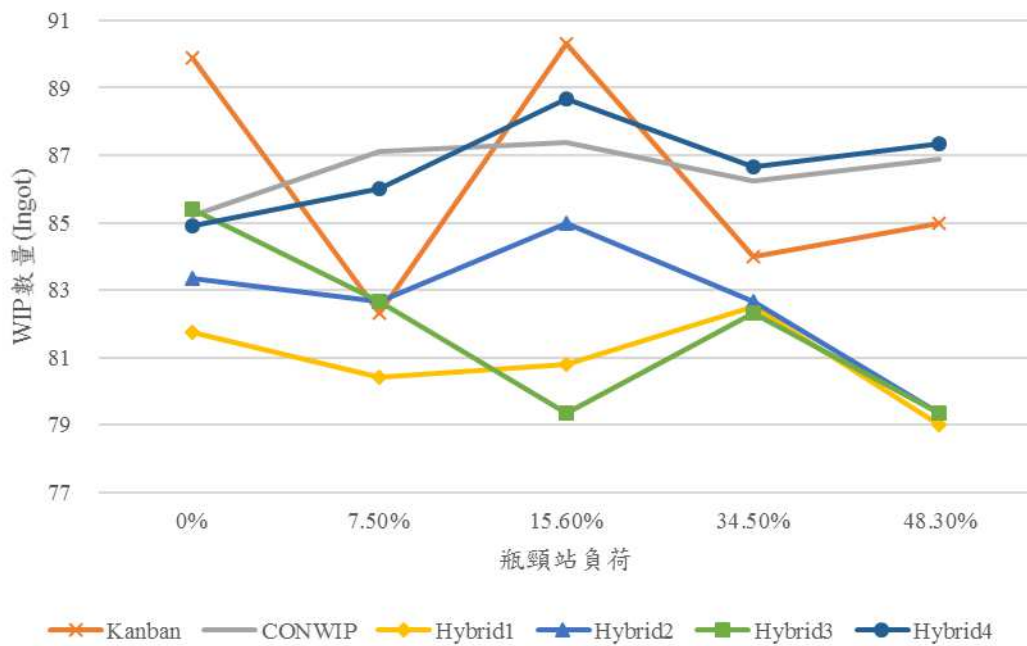


圖 4.16 WIP 之瓶頸負荷趨勢圖

接著觀察 Cycle time 於不同的瓶頸負荷量中之系統比較如表 4.23，可發現現況系統隨著瓶頸負荷增加，其 Cycle time 也隨之增加，而其他拉式生產系統雖然隨著瓶頸負荷增加，卻比現況系統穩定，其中以 Hybrid Type 1 生產系統績效比其他拉式生產系統績效佳圖 4.17。

表 4.23 Cycle time 之瓶頸負荷比較表

瓶頸站負荷	Kanban	CONWIP	Hybrid1	Hybrid2	Hybrid3	Hybrid4	現況系統
0%	9,281.97	8,787.68	8,729.29	8,926.74	8,891.64	9,713.12	10,163.13
7.50%	9,726.65	9,302.14	9,121.92	9,389.86	9,214.42	10,257.44	26,532.32
15.60%	10,527.29	10,077.02	9,858.11	10,165.47	9,960.99	11,101.05	48,526.65
34.50%	12,209.63	11,796.27	11,526.50	11,773.83	11,532.71	12,848.24	86,078.40
48.30%	13,320.32	12,984.49	12,683.22	12,830.07	12,555.86	14,005.93	105,765.21

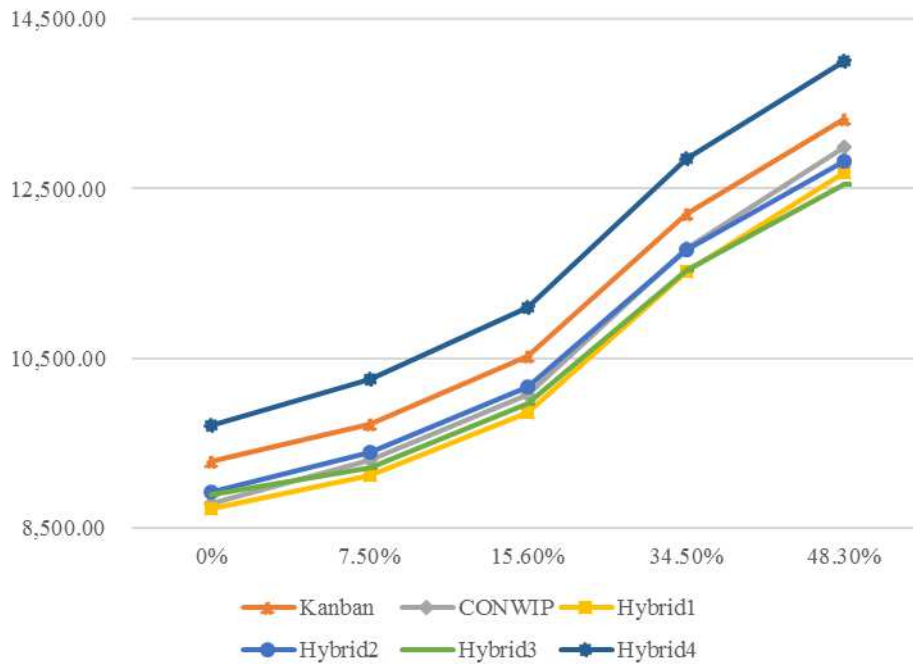


圖 4.17 Cycle time 之瓶頸負荷趨勢圖

由上述瓶頸站負荷之敏感度分析結果，可知現況生產系統因瓶頸站的負荷增加，其 WIP 數量及 Cycle time 同時受到影響而增加，但 Hybrid Type 1 生產系統不會因瓶頸站的負荷受到影響，可知 Hybrid Type 1 系統優於現況生產系統。

4.5.2 需求量變化

本研究接著針對顧客需求進一步分析，以最佳拉式生產系統 Hybrid Type 1 系統，觀察在不同的需求情境下，使用本研究方法得出的因子組合是否有差異，並且分析現況系統及 Hybrid Type 1 系統之間的影響。

首先，將顧客需求分為高需求、中需求及低需求，其中高需求為現況年需求量 5840；而中需求為高需求的 75%，因此中需求總量為 $5840 \times 0.75 = 4380$ ；而低需求則為高需求的 50%，需求量为 $5840 \times 0.5 = 2920$ 。

根據以上三個需求情境，利用系統模擬及反應曲面法找出各個需求下 Hybrid Type 1 系統的最佳因子水準組合，其系統輸出結果如表 4.24，接著根據此因子組合分析現況系統之影響。

表 4.24 Hybrid Type 1 於不同需求下之看板組合

需求量	看板組合配置		Output(Ingot)	WIP(Ingot)	Cycle time(min)
	Etching	Cut			
100%	92	13	5818	80	8657.24
75%	67	15	4416.63	61.25	8705.83
50%	48	8	2994	41.88	9429.97

根據於不同的需求下，將現況系統與 Hybrid Type 1 系統透過系統模擬得出結果呈現於表 4.25。

表 4.25 不同需求之現況與 Hybrid Type 1 比較

需求量	現況系統		Hybrid Type 1 系統	
	WIP(Ingot)	Cycle time(min)	WIP(Ingot)	Cycle time(min)
100%	110	9159.26	80	8657.24
75%	63.75	8737.46	61.25	8705.83
50%	43.63	9613.02	41.88	9429.97

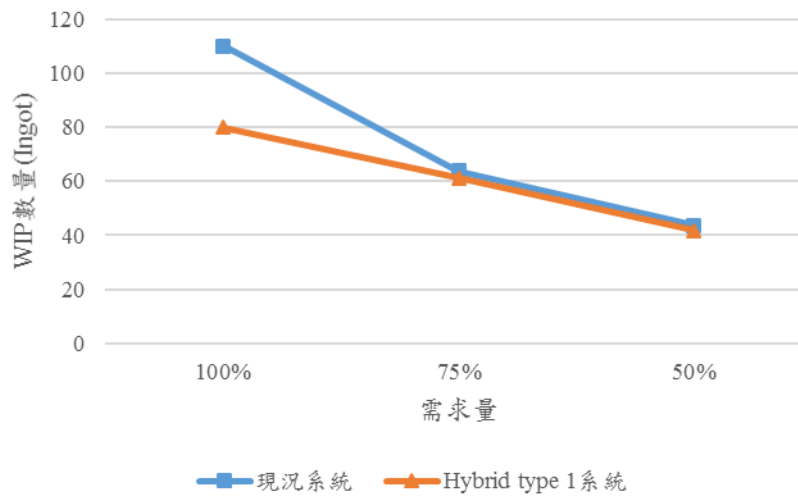


圖 4.18 WIP 數量於不同需求下現況與 Hybrid Type 1 系統之比較

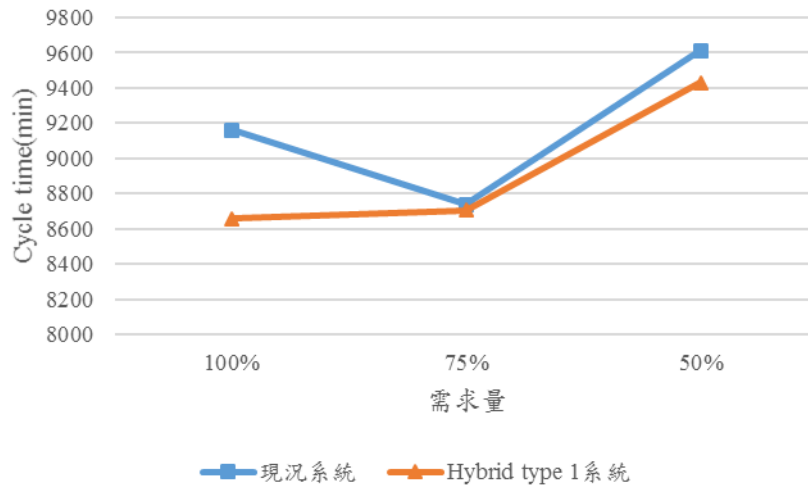


圖 4.19 Cycle time 於不同需求下現況與 Hybrid Type 1 系統之比較

根據比較表繪製之趨勢圖於圖 4.18 及圖 4.19 呈現，可發現 Hybrid Type 1 之 WIP 數量及 Cycle time 績效皆優於現況系統，透過敏感度分析後的結果可知，Hybrid Type 1 系統適合於此生產環境中，且可有效改善 WIP 數量及 Cycle time。

4.6 小結

本研究應用反應曲面法設計不同拉式生產系統之看板數量參數設計，其中為 Hybrid Type 1 有最佳績效，經過現況系統及拉式系統的比較可發現，現況系統的 WIP 數量由 110 顆 Ingot 降低至 80 顆 Ingot，改善幅度約將近 25.68%，以及 Cycle time 從 10448.36 分鐘降低至 8729.29 分鐘，改善幅度約 16%，由此可以看出，藉由導入拉式生產系統來控制 WIP 數量，可有效地改善系統中的浪費。

本研究也同時進行敏感度分析，可藉由分析看出不同的拉式系統是否穩定，在改變瓶頸站的機台數以增加瓶頸負荷水準的情形下，發現拉式生產系統明顯地比現況系統穩定，其中 Hybrid Type 1 系統之 WIP 數量及 Cycle time 比其他拉式生產系統績效較好，而本研究目的是在維持產出率的情況下降低 WIP 數量及縮短 Cycle time，因此在需求情境變化下，本研究建議在高需求情境下，Hybrid Type 1 系統之 KANBAN 配置組合為(Etching, Cut)=(92,13)，中需求情境下，其 KANBAN 配置組合為(Etching,

Cut)=(67,15)，以及低需求之環境下，其看板配置組合為(Etching, Cut)=(48,8)，而從最後的分析發現，Hybrid Type 1 系統依然是優於現況系統之績效，因此可以證明在太陽能矽晶製造的環境中，透過此拉式系統不僅優於現況系統，以及達到本研究之目的。

第五章 結論與建議

5.1 結論

現今太陽能產業的發展迅速，逐漸成為未來重視的一環，而本研究探討太陽能矽晶製造流程，為太陽能產業之上游端，也為供應鏈中最重要的環節，但由於顧客需求變化迅速，難以即時反應，加上產線不平衡的情況下，需求量的多寡容易造成在製品的堆積，及過長的生產週期等等。本研究透過精實的方法分析產業現況，以及導入不同拉式生產系統於此產線不平衡之環境，並透過系統模擬及反應曲面找出最佳的拉式生產系統，得出結果有效地改善 25% 的在 WIP 數量及縮短 16% 的 Cycle time。

5.2 未來建議及討論

本研究在發展過程，雖然達到本研究之目的，但仍未盡完善及尚有需要改善之處，因此本研究將提出以下建議，以供日後相關研究發展及參考之用。

1. 本研究僅針對個案公司進行探討，藉由此案例取得個案方法之績效，然而在進行模擬建構中，基於探討問題為策略性問題，因此訂定一些假設與限制，如前段製程的人員配置流動，不考慮缺貨情形，不良品不重工等，若能將這些假設納入考量，能使拉式系統更加全面。
2. 本研究於最後使用反應曲面法求得不同的拉式生產系統之看板配置組合，未來亦可進行其他實驗設計求取最佳方案，並可比較不同的實驗設計方法是否有差異。
3. 本研究僅針對個案公司進行探討，因應此產業環境，未來可考慮發展不同產業環境下，或多產品之環境下，適合的拉式生產系統之績效比較。

參考文獻

- [1] 王正宜 (2009)。以價值流圖與多準則決策方法進行需求不確定下之精實拉式系統設計，碩士論文，國立成功大學，台南市。
- [2] 吳鴻輝與顏文芳 (2004)。流線式生產線之保護性產能設計模型研究，工業工程學刊，**21**(2), 177-192。
- [3] 財團法人光電科技工業協進會(The Programme for Infrastructure Development in Africa; PIDA) (2011)。全球太陽光電市場與台灣產業。網址：www.pida.org.tw/report/html/member/2012_Q1/2012_Q1_Ch01.pdf
- [4] 扈偉中 (2008)。應用整合型多目標基因演算法於看板張數最佳化之研究，碩士論文，國立雲林科技大學，雲林縣。
- [5] 曾珞萍 (2000)。以反應曲面法尋找多目標模擬模式之最佳解-以半導體封裝廠印字區為例，碩士論文，國立成功大學，台南市。
- [6] Abdulmalek, F. A., & Rajgopal, J. (2007). Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. *International Journal of production economics*, *107*(1), 223-236.
- [7] Bonvik, A. M., & Gershwin, S. B. (1996). *Beyond Kanban: Creating and analyzing lean shop floor control policies*. Paper presented at the Manufacturing and service operations management conference proceeding.
- [8] Banks, J., Carson, J. S., & Nelson, B. L. (2000). *DM Nicol, Discrete-Event System Simulation*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice hall.
- [9] Conway, R., Maxwell, W., McClain, J. O., & Thomas, L. J. (1988). The role of work-in-process inventory in serial production lines. *Operations Research*, *36*(2), 229-241.
- [10] Deleersnyder, J.-L., Hodgson, T. J., Muller-Malek, H., & O'Grady, P. J. (1989). Kanban controlled pull systems: an analytic approach. *Management Science*, *35*(9), 1079-1091.
- [11] Gaury, E., Pierreval, H., & Kleijnen, J. P. (2000). An evolutionary approach to select a pull system among Kanban, Conwip and Hybrid. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *11*(2), 157-167.
- [12] Geraghty, J., & Heavey, C. (2004). A comparison of Hybrid Push/Pull and CONWIP/Pull production inventory control policies. *International Journal of production economics*, *91*(1), 75-90.
- [13] Gurumurthy, A., & Kodali, R. (2011). Design of lean manufacturing systems using value stream mapping with simulation: a case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *22*(4), 444-473.
- [14] Hodgson, T. J., & WANG, D. (1991a). Optimal hybrid push/pull control strategies for a

- parallel multistage system: Part I. *The International Journal of Production Research*, 29(6), 1279-1287.
- [15] HODGSON, T. J., & Wang, D. (1991c). Optimal hybrid push/pull control strategies for a parallel multistage system: Part II. *The International Journal of Production Research*, 29(7), 1453-1460.
- [16] Hopp, W., & Spearman, M. (1996). *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*, 1996. Boston, Massachusetts: Irwin McGraw-Hill. 668 p.
- [17] Jones, D. T., Roos, D., & Womack, J. P. (1990). *Machine that Changed the World*: Simon and Schuster. Retrieved from <https://books.google.com.tw/books>
- [18] Khojasteh-Ghamari, Y. (2012). Developing a framework for performance analysis of a production process controlled by Kanban and CONWIP. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(1), 61-71.
- [19] Lewis, N. S., & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43), 15729-15735.
- [20] Lu, J.-C., Yang, T., & Wang, C.-Y. (2011). A lean pull system design analysed by value stream mapping and multiple criteria decision-making method under demand uncertainty. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(3), 211-228.
- [21] Marchwinski, C., & Shook, J. (2003). *Lean lexicon: a graphical glossary for lean thinkers*: Lean Enterprise Institute. Retrieved from <https://books.google.com.tw/books>
- [22] Monden, Y. (2011). *Toyota production system: an integrated approach to just-in-time*. Retrieved from <https://books.google.com.tw/books>
- [23] Montgomery, D. C. (2008). *Design and analysis of experiments*. Retrieved from <http://guilanstat.ir/wp-content/uploads/Douglas-C.-Montgomery-Design-and-Analysis-of-Experiments-Wiley-2012.pdf> (Original work published 1986)
- [24] Ohno, T. (2012). *Taiichi Ohno's Workplace Management: Special 100th Birthday Edition*. New York: McGraw Hill Professional.
- [25] Ōno, T. (1988). *Toyota production system: beyond large-scale production*: Productivity press, Portland. Retrieved from <https://books.google.com.tw/books>
- [26] Rother, M., & Shook, J. (1999). *Learning to see*. Lean Enterprise Institute, Boston, MA.
- [27] Seth*, D., & Gupta, V. (2005). Application of value stream mapping for lean operations and cycle time reduction: an Indian case study. *Production Planning & Control*, 16(1), 44-59.
- [28] Spearman, M. L., Woodruff, D. L., & Hopp, W. J. (1990). CONWIP: a pull alternative to kanban. *The International Journal of Production Research*, 28(5), 879-894.
- [29] Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *The*

- [30] Solarbuzz(2014). Polysilicon and Wafer Supply Chain Quarterly, from <http://www.solarbuzz.com/reports/polysilicon-and-wafer-supply-chain-quarterly>
- [31] Turner, R., & Lane, J. A. (2013). Goal-Question-Kanban: applying lean concepts to coordinate multi-level systems engineering in large enterprises. *Procedia Computer Science*, 16, 512-521.
- [32] Wang, Y., Cao, J., & Kong, L. (2009). *Hybrid Kanban/Conwip control system simulation and optimization based on theory of constraints*. Paper presented at the Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference on.
- [33] Williams, E. J., Ulgen, O. M., & DeWitt, C. (2002). *Manufacturing modeling methods: an approach and interface for building generic manufacturing kanban-systems models*. Paper presented at the Proceedings of the 34th conference on Winter simulation: exploring new frontiers.
- [34] Womack, J. P., & Jones, D. T. (2010). *Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation*: Simon and Schuster.
- [35] Yang, T., Fu, H.-P., & Yang, K.-Y. (2007). An evolutionary-simulation approach for the optimization of multi-constant work-in-process strategy—a case study. *International Journal of production economics*, 107(1), 104-114.