

東 海 大 學

工業工程與經營資訊研究所

碩士論文

以複迴歸分析結合資料包絡法最佳化射出  
成型作業之翹曲、收縮與頂出時體積收縮比



研 究 生：黃靖雅

指 導 教 授：黃欽印 博士

陳武林 博士

中 華 民 國 九 十 九 年 六 月

**Optimization of injection molding process parameters  
using combination of multiple regression analysis and data  
envelopment analysis to minimize the Warpage, Shrinkage  
and Volumetric shrinkage at ejection**

By  
Ching-Ya Huang

Advisor : Prof. Chin-Yin Huang  
Prof. Wu-Lin Chen

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 2010  
Taichung , Taiwan

# 以複迴歸分析結合資料包絡法最佳化射出成型作業 之翹曲、收縮與頂出時體積收縮比

學生：黃靖雅

指導教授：黃欽印 博士  
陳武林 博士

東海大學工業工程與經營資訊研究所

## 摘要

在進行塑膠射出成型加工的過程中，為了獲得所期望的產品品質，往往需先決定射出成型的參數組合，射出成型的參數設定眾多且複雜，目前多倚賴技師以試誤法找出塑膠射出成型生產之參數組合，但這樣的做法需花費相當多的時間和成本。過去對於塑膠射出成型的文獻中普遍只針對單一品質特性進行分析討論或採用反應曲面法的方式進行二個品質特性的分析，鮮少有多個品質特性的分析。故此，本研究透過複迴歸分析找出多個依變數對一個自變數之間的函數關係，並求得三個品質參數(翹曲、收縮、頂出時體積收縮)之迴歸方程式，再透過輸入製程參數便可獲得一組對應的翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之輸出值，接著利用資料包絡法多項投入與多項產出的特性衡量出最有效率的參數組合，最後透過Moldflow驗證整體實驗之準確性。

本研究使用 Solidworks 軟體繪製出相機機殼模型來進行分析，以射出時間、射出壓力、保壓時間、保壓壓力、冷卻時間、冷卻劑溫度、熔劑溫度、模具溫度、開模時間等九個製程參數作為初始控制因子。首先，以 Moldflow 模擬軟體進行工件實際充填模擬，再進一步利用田口直交表及變異數分析找出製程之顯著因子(射出時間、射出壓力、保壓時間、保壓壓力)，接著透過複迴歸分析結合資料包絡法搜尋出最佳化翹曲、收縮及頂出時體積收縮(多品質參數)之最佳解組合。故本研究提出一個可行的實驗步驟方法，作為工程師進行整體考量時的參考依據。

**關鍵字：**塑膠射出成型、田口直交表、複迴歸分析、資料包絡法、最佳化

# **Optimization of injection molding process parameters using combination of multiple regression analysis and data envelopment analysis to minimize the Warpage, Shrinkage and Volumetric shrinkage at ejection**

Student: Ching-Ya Huang

Advisor : Prof. Chin-Yin Huang

Prof. Wu-Lin Chen

Department of Industrial Engineering and Enterprise Information  
Tunghai University

## **ABSTRACT**

In the process of plastic injection molding, in order to obtain the desired product quality, it needs to determine the proper settings for the injection molding process parameters. Because the parameter settings are very huge and complex, now rely on technicians use try and error method to find the proper settings of plastic injection molding parameters. In the past for the plastics injection molding of literature in general on a single quality characteristic analysis or use response surface method to do two quality characteristics analysis. In this thesis, use multiple regression analysis to identify multiple dependent variables for a functional relationship between one independent variable. And create a predictive model for warpage, shrinkage and volumetric shrinkage at ejection. Then use data envelopment analysis to find the optimum process parameter combinations. Finally, confirmed by the software Moldflow.

In this study, use the software Solidworks to create a digital Camera thin shell. And nine process parameters are considered in the research: injection time, injection pressure, packing time, packing pressure, cooling time, cooling temperature, mold-open time, melt temperature, and mold temperature. First, use the software Moldflow to the actual filling simulation. And use Taguchi's orthogonal array and ANOVA to find the significant factors of process. Finally, use combination of multiple regression analysis and data envelopment analysis to optimal the warpage, shrinkage and volumetric shrinkage at ejection. In this study, I anticipate that the procedure applied in my thesis will prove a useful modeling/optimization procedure that can be applied in practice to injection molding, and potentially to other polymer processes.

**Keywords: Injection molding, Taguchi's orthogonal array, Mutiple regression analysis, Data envelopment analysis, Optimization.**

## 誌謝

兩年的研究所即將畫上句點，求學生涯也將暫時告一段落，心情是無比的複雜，轉眼之間，六年的歡樂時光就快要過去，我們也即將邁向另一個人生的旅程。特別是研究所的兩年我得到了更多珍貴的人生態度，黃欽印老師更是我人生階段中很重要的恩師，在這兩年中細心的指導與教誨，使我在專業領域及待人處世上受益良多。

本研究論文之完成，首先要感謝黃欽印老師與陳武林老師無私的教誨、每周 Meeting 時總是用心的指導我們、引導我們學習到許多研究的方法與思考的方向，使我能逐步的完成這份論文，雖然剛開始對於論文領域的不熟悉，感到徬徨無措，但老師們細心的指導，讓我漸入佳境。在研究學習的過程中，讓我不僅僅學到解決問題的方法也慢慢訓練自己邏輯思考及口頭報告的能力，不論是課業或做人處事態度上，師長們總是不厭其煩的叮嚀與囑咐，讓我能夠持續地進步往前。

兩年的研究所生活中，承蒙多位系上老師、靜怡學姐、弼仁學長的帶領及指教，還有文冠、斯暢、怡芳、世倫等研究室夥伴們的互相勉勵，玠孝、容慈、詩彥等學弟妹們給予我的支持與鼓勵，使我在學習的過程中仍然充滿著歡笑與喜悅。

最後特別要感謝我最愛的家人，謝謝你們一路以來的支持，還有最親愛的朋友們，總是陪我一起開心一起難過，在我最灰心失落的時候給予我最大的力量，如果沒有你們的關心與陪伴，讓我能一心一意的專注於學業上，就無法成就今天的我，謝謝你們。

謹將這份成果獻給每一位幫助過我的貴人，有你們支持及鼓勵，才能完成此論文。

黃靖雅 謹誌於

東海大學工業工程與經營資訊研究所

虛擬企業與資料探勘研究室

中華民國九十九年六月

# 目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的與範圍.....	2
1.3 研究架構與流程.....	5
第二章 文獻探討.....	7
2.1 射出成型簡介.....	7
2.1.1 射出成型機介紹.....	8
2.1.2 射出成型之流程.....	9
2.2 射出成型成品品質因素.....	10
2.2.1 翹曲(Warpage).....	12
2.2.2 收縮(Shrinkage).....	12
2.2.3 頂出時體積收縮比(Volumetric shrinkage at ejection).....	12
2.3 射出成型機器控制及製程控制.....	13
2.4 射出成型常用之最佳化方法.....	14
2.5 小結.....	17
第三章 研究方法.....	18
3.1 模流分析.....	19
3.1.1 電腦輔助工程(Computer-Aided Engineering, CAE).....	19
3.1.2 前置處理(Preprocessing).....	20
3.1.3 模擬分析(Simulation).....	34

3.1.4 後段處理(Postprocessing).....	36
3.2 田口直交表結合變異數分析.....	37
3.3 迴歸分析.....	39
3.3.1 迴歸模型簡述.....	39
3.3.2 簡單線性迴歸分析(Simple regression analysis).....	40
3.3.3 線性複迴歸分析(Multiple regression analysis).....	41
3.3.4 多項式迴歸分析.....	42
3.3.5 因果模型建構問題.....	44
3.3.6 自變數選擇的技術(Variables-selection techniques).....	44
3.3.7 殘差分析.....	45
3.3.8 判斷模型的適切性.....	46
3.3.9 小結.....	47
3.4 資料包絡法.....	48
3.4.1 Farrell 模式.....	49
3.4.2 DEA 模型理論.....	51
3.4.3 DEA 之特性.....	55
3.4.4 DEA 之限制.....	56
3.4.5 DEA 之應用程序.....	57
第四章 實驗模擬與分析.....	58
4.1 田口直交表結合變異數分析.....	58
4.1.1 選定欲研究之製程參數及品質特性.....	58
4.1.2 選定因子水準.....	59
4.1.3 變異數分析.....	63
4.2 複迴歸分析.....	73
4.2.1 自變數的挑選.....	74
4.2.2 殘差分析及影響力分析.....	78

4.2.3 迴歸方程式.....	83
4.2.4 顯著性檢定.....	84
4.2.5 預測及彙整結果.....	85
4.3 資料包絡法 .....	86
4.3.1 整體效率分析.....	87
4.3.2 參考群體分析(Reference frequencies).....	88
4.3.3 效率前緣(Efficiency Frontier) .....	88
4.3.4 資料包絡法最佳化之結果 .....	89
4.3.5 結果驗證.....	90
4.3.6 小結.....	91
第五章 結論及未來研究方向.....	92
5.1 結論.....	92
5.2 未來之研究方向 .....	93
參考文獻.....	94
附錄 A: 實驗 81 組之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比 .....	97
附錄 B: 實驗 81 組加入交互作用項及平方項之參數組合.....	100
附錄 C: 各品質參數之庫克距離.....	103
附錄 D: 各品質參數之顯著性檢定 .....	106
附錄 E: 實驗 1350 組之整體效率分析.....	115
附錄 F: 結果驗證(78 組資料)之整體效率分析 .....	125

## 圖目錄

圖 1.1、本研究之架構與流程.....	6
圖 2.1、塑膠射出成型步驟.....	7
圖 2.2、射出成型機結構.....	8
圖 2.3、射出成型流程.....	10
圖 2.4、塑膠成型成品可能產生之瑕疵 .....	10
圖 2.5、射出成型常見的缺陷及成因 .....	11
圖 2.6、塑膠射出成型加工流程.....	13
圖 3.1、本研究方法之步驟.....	18
圖 3.2、塑膠射出成型 CAE 分析之三大階段 .....	20
圖 3.3、本研究之數位相機前蓋之薄殼模型 .....	21
圖 3.4、本研究模型之網格圖示.....	22
圖 3.5、本研究模型之詳細網格檢定 .....	22
圖 3.6、MOLDFLOW 建議之最佳澆口位置.....	23
圖 3.7、本研究模型之一個澆口設置 .....	24
圖 3.8、本研究模型之二個澆口設置 .....	24
圖 3.9、本研究模型之一個澆口設置之充填結果 .....	25
圖 3.10、本研究模型之二個澆口設置之充填結果 .....	25
圖 3.11、本研究模型之澆流道設定-1 .....	26
圖 3.12、本研究模型之澆流道設定-2 .....	26
圖 3.13、本研究模型之澆流道設定-3 .....	27
圖 3.14、本研究模型之澆流道圖示 .....	27
圖 3.15、本研究模型之冷卻系統設計-1 .....	28
圖 3.16、本研究模型之冷卻系統設計-2 .....	28
圖 3.17、本研究成品之冷卻系統.....	29
圖 3.18、本研究塑料之詳細物理特性資料 .....	30

圖 3.19、本研究塑料之製造特性.....	30
圖 3.20、本研究塑料之 PVT 圖 .....	31
圖 3.21、本研究模具材料之製造特性資料 .....	31
圖 3.22、本研究成型機台之詳細資料-1 .....	32
圖 3.23、本研究成型機台之詳細資料-2 .....	32
圖 3.24、電腦模擬流程圖.....	34
圖 3.25、數位相機前蓋模型之製程參數測量點 .....	36
圖 3.26、包絡曲線圖.....	48
圖 3.27、技術效率與配置效率.....	50
圖 4.1、本研究之複迴歸分析之步驟 .....	73
圖 4.2、翹曲之單向度圖形.....	78
圖 4.3、收縮之單向度圖形.....	79
圖 4.4、頂出時體積收縮比之單向度圖形 .....	79
圖 4.5、翹曲之雙向度圖形.....	80
圖 4.6、收縮之雙向度圖形.....	80
圖 4.7、頂出時體積收縮比之雙向度圖形 .....	80
圖 4.8、翹曲之影響力索引圖.....	82
圖 4.9、收縮之影響力索引圖.....	82
圖 4.10、頂出時體積收縮比之影響力索引圖 .....	83
圖 4.11、本研究之資料包絡法分析步驟.....	86
圖 4.12、本研究之效率前緣圖.....	89

## 表目錄

表 2.1、射出成型文獻之整理.....	16
表 3.1、PC、ABS、PC/ABS 材料特性表.....	29
表 3.2、本研究之製程參數初始設定值.....	33
表 3.3、COOL、FLOW、WARP 模組之分析結果及應用效益.....	35
表 4.1、本研究選用之製程參數及品質特性.....	58
表 4.2、本研究之各參數因子水準.....	59
表 4.3、本研究之 L <sub>27</sub> 直交表.....	60
表 4.4、本研究之 L <sub>27</sub> 直交表對應之參數組合.....	61
表 4.5、實驗 27 組之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比模擬結果.....	62
表 4.6、射出時間之變異數分析表.....	63
表 4.7、射出壓力之變異數分析表.....	64
表 4.8、保壓壓力之變異數分析表.....	65
表 4.9、保壓時間之變異數分析表.....	66
表 4.10、冷卻時間之變異數分析表.....	67
表 4.11、冷卻液溫度之變異數分析.....	68
表 4.12、開模時間之變異數分析表.....	69
表 4.13、熔劑溫度之變異數分析表.....	70
表 4.14、模具溫度之變異數分析表.....	71
表 4.15、本研究整理之顯著因子結果.....	72
表 4.16、翹曲之自變數的挑選.....	75
表 4.17、收縮之自變數的挑選.....	76
表 4.18、頂出時體積收縮比之自變數的挑選.....	77
表 4.19、翹曲之迴歸係數及顯著性檢定.....	84
表 4.20、收縮之迴歸係數及顯著性檢定.....	84
表 4.21、頂出時體積收縮比之迴歸係數及顯著性檢定.....	85

表 4.22、四個顯著製程參數之新因子水準 .....	85
表 4.23、投入、產出變數之相關性分析 .....	87
表 4.24、1225 組 DMUs 之整體效率分析.....	87
表 4.25、1225 組 DMUs 之參考群體分析.....	88
表 4.26、最佳製程參數組合之實際值與預測值 .....	89
表 4.27、實際值之整體效率分析.....	90
表 4.28、實際值之參考群體分析.....	90
表 4.29、最後之最佳製程參數組合 .....	91

# 第一章 緒論

本章節主要在說明本研究之整體結構，透過研究背景與動機清楚導引出本研究之目的，並利用研究目的與範圍定義研究的範疇邊界，將依下列三點逐項說明：

## 1.1 節 研究背景與動機

## 1.2 節 研究目的與範圍

## 1.3 節 研究架構與流程

### 1.1 研究背景與動機

高科技產品與製造科技的日新月異，好的產品不斷的被推陳出新，許多「可攜式消費性的電子產品」，帶給消費者(使用者)更多輕巧性、多功能性，消費性資訊產品除了設計多樣化，亦提昇產品的功能，在設計上也朝向輕、薄、短、小來發展。所以在全球化競爭激烈的市場中，要如何透過各種方法來加快產品上市速度、降低成本、減少不良品浪費、增加利潤等都是企業所關注的焦點。

塑膠材料發展至今種類繁多，且用途廣泛，具備高機械強度、高耐腐蝕性、質量輕、成本低、可回收、外觀色澤美且加工成型容易等特性。根據「塑膠工業技術發展中心」之資料可知，塑膠產業目前面臨以下巨大挑戰：1、原油價格持續高漲，塑膠價格隨之增漲；2、模具鋼材價格高漲；3、塑膠製品成形週期要求更短；4、塑膠製品價格更便宜，競爭越來越激烈。因此射出成型的生產技術與產品的品質變得更加重要。

射出成型與模具設計為高分子加工最重要的技術之一，因其成型速度快，且成品尺寸容易控制，除了可以製造複雜幾何形狀之產品外，並且可以大量生產，故廣為業者所使用。然而塑膠射出成型最重要的關鍵在於模具的設計與加工，工業產品無不依賴模具才得以大量生產，因此模具才被稱為工業產品之母。目前，塑膠射出成型被廣泛應用於3C (電腦、通訊、消費性電子)產品機殼的生產，尤其是應用於筆記型電腦、手機、PDA、MP3、數位相機等產品的外殼及零件上。

而在射出成型參數設定上主要可分為兩類：1、以師傅或技師依賴過去之經驗來進行射出成型的參數設定。2、工程師使用模流分析軟體找出射出成型參數的初始值，並透過模擬找出適合的參數組合。這兩類的方法尚無法快速準確的找到參數的最佳組合，且試誤的過程中需花費相當多的時間及成本。隨著 CAE(Computer-Aided Engineering) 電腦輔助工程分析技術的推陳出新，CAE 模流分析在塑膠射出模具設計與製作上逐漸被重視與廣泛的應用，但是由於產品設計日益複雜化，傳統的簡易網格分析形式已經無法滿足跨時代的產品設計與需求，進而影響模具建構上的困難及計算結果的正確性。

整體而言，塑膠射出成型產品的品質不只受到起始參數的影響，也受到製程中環境、機台，與塑膠分子特質的眾多非線性因子的影響。在(Huang et al.,2008)的研究中，視每一個變數與單一品質參數 (Shrinkage (收縮)) 有一對應關係這樣的結構是有被討論的空間。一、射出成型的品質參數不止一個；二、參數間的關係有時是多階的，意即某些最終品質變數受到層層的製程中的變數影響。單單控制某些表層的變數不足以控制最後產品的品質。

故本研究針對塑膠射出成型之製程參數，以田口直交表搭配變異數分析找出顯著之製程參數(射出壓力、射出時間、保壓壓力、保壓時間)，接著應用複迴歸分析結合資料包絡法找出最佳之參數組合，建立一套射出成型作業之翹曲、收縮與頂出時體積收縮比(多品質參數)最佳化的搜尋方法。

## 1.2 研究目的與範圍

由於 3C 產品的普遍性與競爭性使得產品的設計需求也日漸複雜，但新產品的開發週期卻因市場的激烈競爭而日益縮短，而且對品質的要求也越來越高，為了因應整個競爭趨勢，採用 CAE 與最佳化方法已是較符合潮流之手段。藉由 CAE 的分析與最佳化方法之應用，可達到縮短產品開發週期、提升品質與降低開發成本等助益。塑膠射出成型製程相當複雜，牽涉因素眾多，有許多的影響因子都將導致產品產生不可預測的缺失，如收

縮、翹曲、包風、流痕、凹陷、剪應力等。Park and Kim(2000)提出，塑膠模具設計者通常須同時面對多樣缺陷，通常這些缺陷互相衝突與相依，因此，需要靠彼此之間的交換、妥協才能得到最終解。他們發表的自動射出成型方法學共有兩個特徵：其一是實行運用理論，利用目標函數將原本多目標最佳化問題轉換為單目標最佳化問題。其二是自動考慮製程變異，以直接搜尋法為基礎完成塑膠射出最佳化程序，這個方法學已經成功運用在實際生產上，有助於提升產品的性能與品質。

Liao et al.(2004)提出射出成型條件設計中，減少收縮與翹曲量的產生為提高產品品質最重要的一部分。Jansen et al.(1998)提出保壓壓力及保壓時間為影響收縮很重要之因素。Huang and Tai(2001)也提出保壓壓力為影響塑件翹曲之最重要之參數，其次則是模具溫度、熔劑溫度及保壓時間等參數。而 Ozcelik and Sonat(2008) 則認為模具溫度、熔融溫度、射出時間、射出溫度為最小化翹曲之重要參數。因此，透過文獻之整理以射出時間、射出壓力、保壓壓力、保壓時間、冷卻時間、冷卻溫度、模具溫度、熔劑溫度、開模時間等九個重要的製程參數作為本研究之初始參數選擇，目標是希望建立一最佳化射出成型製程之方法使得收縮、翹曲及頂出時體積收縮比降至最低，並找出其製程參數組合。

#### 本研究之詳細敘述如下:

1. 本研究選擇九個初始參數，每個參數各有三個水準，故以  $L_{27}$  田口直交表找出初始之 27 組實驗參數組合，並利用此 27 組參數組合以 Moldflow 進行模擬實驗，得出四組翹曲、四組收縮值及一組頂出時體積收縮值。接著以變異數分析表找出相機機殼製程顯著之參數組合。
2. 透過變異數分析所求得之顯著因子，為射出壓力、射出時間、保壓壓力、保壓時間共四個顯著因子三個水準進行全因子實驗即  $81(3^4)$  組之參數設定值，其餘的五個因子水準則固定在 Level 2(Moldflow 預設值)，再利用 Moldflow 進行模擬，取得品質特性翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之實驗數值。

3. 以 SPSS Statistics 17.0 統計軟體將 81 組實驗數值透過複迴歸分析找出多個依變數對一個自變數之間的函數關係，並進行殘差分析以及影響力分析，刪除庫克距離較大的離群資料，接著再使用顯著性檢定檢查所有自變數  $x$  和依變數  $y$  的關係是否達到顯著水準，最後求得三個品質參數之迴歸方程式，並透過輸入製程參數便可獲得一組對應的翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之輸出預測值。
4. 接著透過三個品質參數之迴歸方程式所獲得的 1350 組預測之實驗數據，使用 Banxia Frontier Analyst 3 資料包絡法軟體之 CCR 產出模式衡量出最有效率的參數組合，亦即相對效率值為 1 者（落於生產邊界上），為具效率單位。
5. 最後將資料包絡法所計算出的預測組之最有效率參數組合，透過 Moldflow 進行模擬，取得四組翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之輸出實際值，接著再加上使用透過複迴歸分析刪除庫克距離值較大以及殘差值較大之後的 57 組實際值，共 61 組實驗數據透過 Banxia Frontier Analyst 3 資料包絡法軟體最後篩選出最佳解之參數組合。

**本研究主要之研究限制與範圍如下：**

1. 由於資源及成本上的限制，本研究以模流分析軟體 Moldflow 代替實際射出成型機台，實驗所需之數據皆由 Moldflow 軟體模擬取得。
2. 在塑膠射出成型中，控制參數可分為機器參數及製程參數兩類。本研究僅考量製程參數因子的部分，部份機器參數則以 Moldflow 預設值設定。
3. 本研究所考慮之九個製程參數皆假設為可控制因子，未考量之因子以 Moldflow 預設值設定。

### 1.3 研究架構與流程

本研究所使用之研究架構與流程主要分為四個階段：(1)射出成型流程之探討 (2)射出成型製程控制之發展文獻 (3)研究方法之發展 (4)系統實作及分析。研究架構圖可參考圖 1.1。

#### 步驟一、射出成型流程之探討

1. 了解目前塑膠射出成型產業面臨的挑戰及在參數設定上所遭遇之困難點及對於品質的影響。
2. 射出成型簡介、原理：首先藉由射出成型製造過程之簡介，充分瞭解射出成型如何製造出成品，包括射出成型機之構造與其功能。
3. 射出成型流程：透過熟悉射出成型製造之詳細步驟，瞭解於各階段中眾多因素之時間關係、因素與最終成品之影響等。
4. 射出成型成品品質要素：說明射出成型產品的品質要素、機器參數、製程參數及其他製程流程對於產品品質特性影響的一系列過程。並說明塑膠射出成型產品導致不良品的缺陷情形。

#### 步驟二、射出成型製程控制之發展文獻

首先針對過去應用於製程參數最佳化的文獻進行探討與分析，並進一步說明射出成型之機器控制與製程控制對於產品品質之影響及一般常用於射出成型之參數最佳化的方法。

#### 步驟三、研究初始條件之建立

使用 Solidworks 軟體繪製相機機殼 CAD 模型，接著透過研究情境之建立，以 Moldflow 軟體模擬射出成型的實際製造過程，從成品模型之建立、機器參數之設置、製程參數之設定。接著敘述田口直交表、變異數分析法如何應用於本研究，並說明複迴歸分析及資料包絡法之理論背景、重要概念及實驗實施之步驟。

#### 步驟四、實驗與結果分析

此階段為實作部份，以 Moldflow 模擬透過田口直交表及變異數分析所找出的四個顯著因子並進行全因子實驗之產生的 81 組參數組合進行實驗，再透過透過複迴歸分析找出多個依變數對一個自變數之間的函數關係，接著應用資料包絡法衡量出最佳的參數組合。包括實驗執行、資料分析及結果說明，並對本實驗所提出的方法進行驗證。最後為本研究做一結論，並建議未來的研究方向。

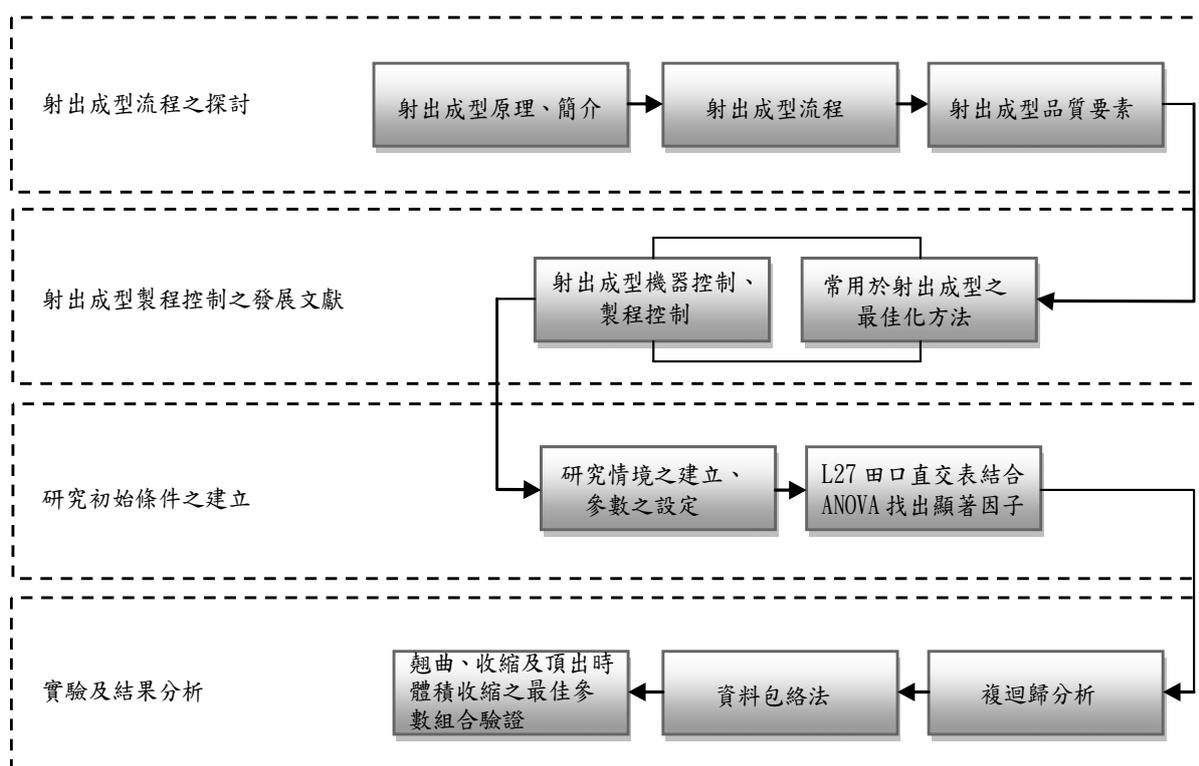


圖 1.1、本研究之架構與流程

## 第二章 文獻探討

### 2.1 射出成型簡介

一般塑膠成型的方式有射出成型(injection molding)、押出成型(extrusion molding)、吹製成型(blow molding)、共射成型法(co-injection molding)、氣體輔助成型法(gas-assisted injection molding)等，其中以射出成型法是使用最為廣泛的塑膠成型技術(Jay Shoemaker, 2006)。射出成型具有生產效率高、製程可自動化，也適合於成型複雜度高之塑件。而塑件品質的提升則須依靠良好的模具設計、適合的材料選擇以及適當的成型參數設定。射出成型的程序，是先將高分子顆粒在加熱筒(Cylinder)中加熱溶解，使成流體狀態，繼而利用壓縮力將此熔膠注入模型中，再加以冷卻硬化後，取出成品。以熱塑性塑膠進行射出成型，中間並沒有化學反應產生。熱固性塑膠一般無法用傳統的射出機成型，最近發展出來的熱固性射出機則是針對熱固性塑膠性質而設計，可使用於如電木粉等之熱固性塑膠，與熱塑性塑膠的差別主要在於成型時模具是熱的，熔融的塑料在模具內進行化學反應而固化(陳劉旺 et al., 1989)。塑膠成型的步驟通常包含加熱塑料成熔融態、充填、保壓、冷卻和頂出等步驟(羅壬成,2006)，如圖 2.1，在過程中需透過控制大量的參數，使成品達到企業要求之品質，而控制的參數大致可分為兩類：機器參數及製程參數。其中機器參數是指任何可從機台上設定或調整的參數；而製程參數是指任何能直接影響塑膠高分子的參數。



圖 2.1、塑膠射出成型步驟

### 2.1.1 射出成型機介紹

一部完整的射出成型機主要分為油壓系統、射出系統、模具系統及鎖模系統單元，如圖 2.2(源自 Jay Shoemaker, 2006)。以下針對各個部分進行詳細之說明(陳良相 et al., 2005):

1. **油壓系統**：射出成型機的油壓系統提供開啟與關閉模具的動力，蓄積並維持鎖模力頓數，旋轉與推動螺桿前進，並致動系統之頂出銷以及移動公模側。
2. **射出系統**：包括了料斗(hopper)、迴轉螺桿、料筒(barrel)組合和噴嘴(nozzle)。主要的功能是存放及輸送塑料，使塑料歷經進料、壓縮、排氣、熔化、射出及保壓階段。
3. **模具系統**：包括了導桿(tie bars)、固定模板(stationary platen)、移動模板(movable platen)和容納模穴、流道系統、頂出銷和冷卻管路的模板(molding plates)。主要功能是使熱塑性塑膠的熔膠在模穴內凝固成需要的形狀及尺寸。
4. **鎖模系統**：用來開啟/關閉模具，支撐與移動模具組件，產生足夠的力量以防止模具被射出壓力推開。

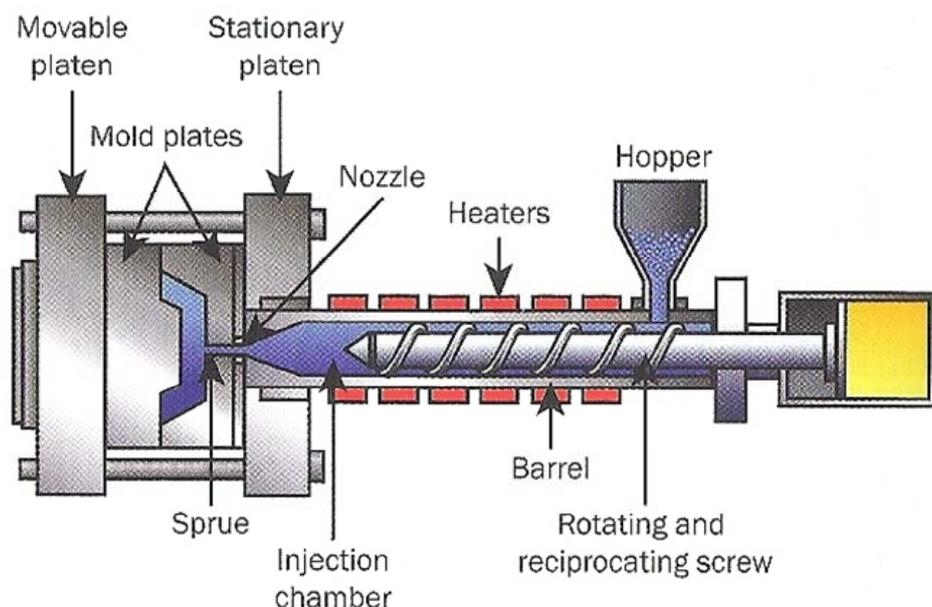


圖 2.2、射出成型機結構

### 2.1.2 射出成型之流程

射出成型流程的整體循環週期如圖 2.3 所示，主要分為鎖模階段、充填階段、保壓階段、冷卻階段和開模階段等五大階段 (盧俊廷, 2005):

1. **塑膠原料烘乾及熔融和模具加熱**：射出成型加工製作前需先將塑膠原料預熱熔化，並加熱模具，一般是將塑膠原料倒入料筒內，依不同塑膠原料會設定料筒溫度及加熱時間。料筒加熱動作最主要是去除塑膠原料的殘留水分，稱為烘乾動作；塑膠原料在料筒中完成烘乾後，即流入料管內加熱熔化，主要使用油壓馬達帶動螺桿轉動使塑膠原料流入料管，再由料管周圍包覆的加熱片加熱，提供足夠的熱量使塑膠保持熔融狀態。
2. **鎖模階段(Clamping)**：熔融高分子聚合物以高射出壓力射入模具中，為使模具不產生被頂開狀況，所以需要極高壓力使模具不被頂開，此力量稱為鎖模力，其循環為在成品頂出後開始至一新成品完成時再次啟動。
3. **充填階段(Filling)**：熔融高分子聚合物在料管內，利用油壓馬達轉動螺桿向前推進，將熔融塑膠原料射入模具中，此時熔融塑膠原料經由料管中，流過噴嘴、澆道、流道、澆口、進入模穴中充填整個模具。
4. **保壓階段(Packing)**：充填結束後施以一壓力維持住螺桿不後退，直到澆口冷卻凝固所費的時間，此稱為保壓時間，此動作主要為了彌補因冷卻造成高分子的體積收縮，使成品更加緻密，所以施以一壓力保持，也被稱為後充填時間。
5. **冷卻階段(Cooling)**：充填及澆口冷卻後，直到成品固化強度足以頂出，主要避免脫模時因強度不足而產生變形，此階段同時射出機也對高分子聚合物作加熱及計量動作，計量是以螺桿後退之距離算得。
6. **開模階段(Mold-open)**：成品固化至足以頂出時，射出機進行離模動作，使可動側模板與固定側模板分離，成品因冷卻收縮的關係附著於可動側模板，配合頂出機構將成品頂出。

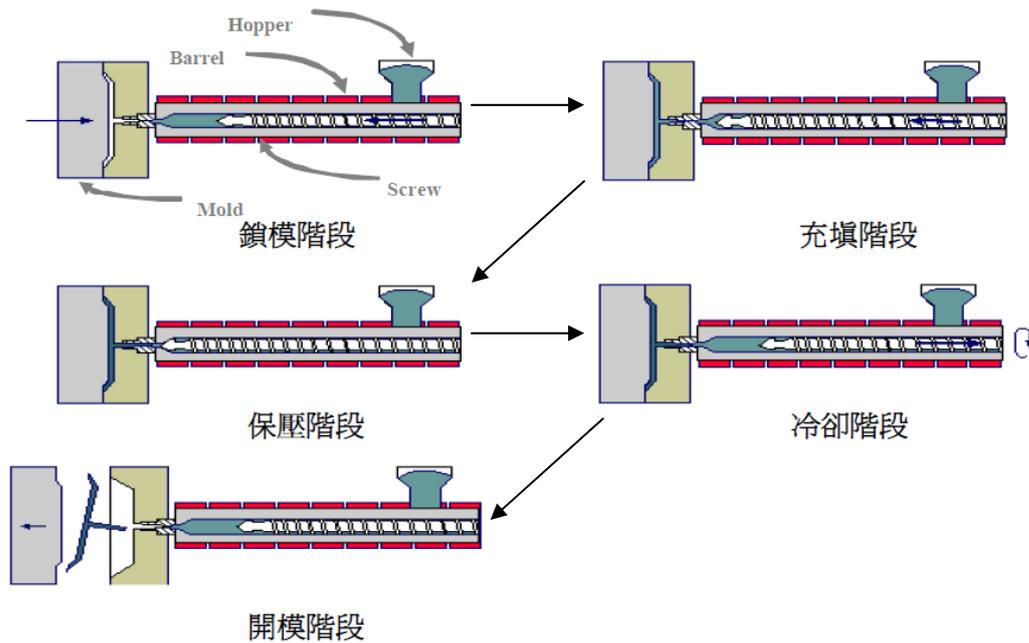


圖 2.3、射出成型流程

## 2.2 射出成型成品品質因素

一般塑膠射出成型成品常出現之瑕疵項目包括：翹曲、收縮、尺寸精度不良、塑料充填不足、凹陷、燒痕、剝離、黑斑、黑紋、流痕、強度不足、毛邊等問題如圖 2.4 所示。其中 Yang and Gao(2006)認為產品重量是射出產品品質很重要的品質屬性，因為產品重量與其他的品質特性相關，特別是尺寸。而楊景程(2000)認為塑膠成型成品之收縮、凹陷、翹曲變形為業界所面臨之最重要的問題。

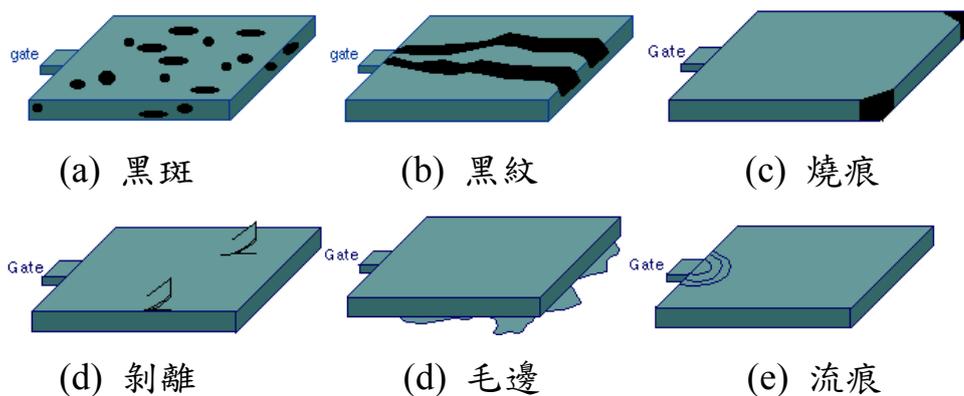


圖 2.4、塑膠成型成品可能產生之瑕疵

在射出成型的過程中，產品會因為成型材料本身性質、成型條件設定不當、模具設計或製作不完備、成品設計不良及射出成型機成型能力不足等主要的加工要因對產品品質產生影響，如圖 2.5(源自羅壬成)。當塑件成品產生以下缺陷時，可針對以下因素進行修正(張永彥, 2006):

1. **設備不良**：必須選用適合之射出成型機台大小、射出噸數及相關之塑料儲存、輸送等。
2. **材料不佳**：塑料的選擇依照產品外殼之機械強度要求及作業需求，必須選擇合適之塑料來進行加工。材料不佳易造成成品的缺陷。
3. **製程不佳**：射出成型中的速度、成型週期、充填時間、充填壓力、保壓時間、冷卻時間...等，皆為製程中重要的參數條件。塑膠成型加工之製程條件應隨時調整至最合適之參數組合。
4. **模具不良**：模具的設計精度與製造因素將直接影響產品的品質。

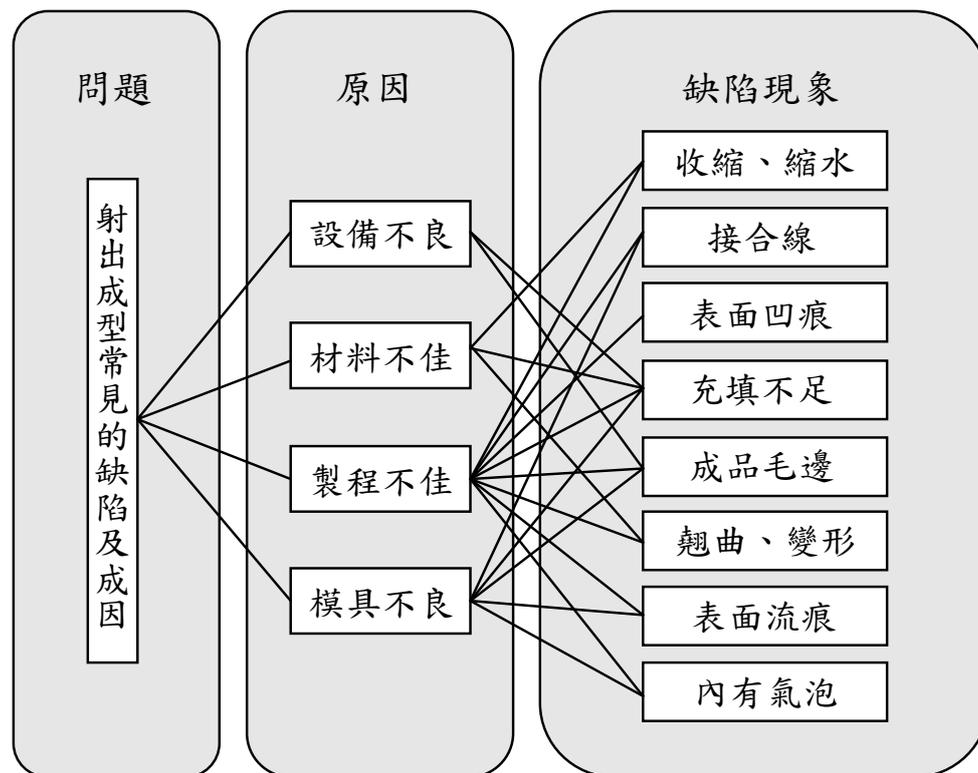


圖 2.5、射出成型常見的缺陷及成因

因為目前產品的外觀部位和大量生產零件大多以射出成型為主要生產方式，也由於厚度變薄及微小尺寸的運用，所以翹曲(Warpage)、收縮(Shrinkage)、凹陷(Sink mark)和殘留應力(Residual stress)等現象相對明顯，造成影響產品的品質、精度及成品外觀，而在成型當中發生的不良品現象很多，並非一兩項所引起的，以下，對本研究所選定的品質瑕疵與成型參數有關的原因，作一簡單介紹：

### **2.2.1 翹曲(Warpage)**

翹曲(warpage)是成品未按照設計的形狀成型，發生表面的扭曲，翹曲導因于成品的不均勻收縮。假如整個成品有均勻的收縮率，塑件變形就不會翹曲，而僅僅會縮小尺寸，然而會引起不均勻的收縮一般都是因為射出參數的不良設定或冷卻系統設計不良，使溫度分佈不平均，另外不同的分子配向性(Orientation)也會造成翹曲的發生。翹曲會使得成品扭曲變形，造成外形尺寸的不精確及殘留應力的發生，因此會降低成品之機械強度與幾何外形之精度。

### **2.2.2 收縮(Shrinkage)**

塑膠射出成形先天上就會發生收縮，因為從製程溫度降到室溫，會造成聚合物的密度變化，造成收縮。塑膠的收縮是由於該材料體積的改變所造成。當塑膠從模具中由熔融狀冷卻到固體狀，很有可能就會造成收縮。收縮主要可以分為(1)均勻收縮：主要是是目標尺寸呈幾何的減少，收縮會成一致性，沒有變形，也沒有改變形狀，只是比目標尺寸還要小一點。(2)非均勻收縮：整體呈幾何減少，是不確定性的收縮，在材料上不同點的線收縮率都不太一樣。

### **2.2.3 頂出時體積收縮比(Volumetric shrinkage at ejection)**

頂出時體積收縮比是在成品冷卻到周圍環境溫度時(25°C /77°F)。主要是代表在成品頂出時對於最初成品體積收縮之百分比。頂出時的體積收縮結果也可以用檢測模型的凹陷(Sink index)。體積收縮必須均勻的分佈於整個成品以減小翹曲的產生，並盡量小於塑膠材料的推薦值。高的收縮值可以指出成品有凹陷或者氣孔等瑕疵狀況。

## 2.3 射出成型機器控制及製程控制

Chen and Turng(2005)將近年來射出成型控制方法做了一系列之整理，他們先將射出成型製程中所有的參數分為三個層級：機械參數(Machine variables)、製程參數(Process variables)、與品質參數(Quality variables)。機械參數包括製程當中所有與機臺設定有關的參數，如料筒溫度(Barrel temperature)、噴嘴溫度(Nozzle temperature)、冷卻液溫度(Coolant temperature)、保壓壓力(Packing pressure)、保壓時間(Packing time)、注射速度等(Injection speed)等；製程參數包括所有製造過程中，經一系列反應與影響所造成之參數，如塑料在各不同時間點與位置之溫度(Melt temperature)、塑料壓力(Melt pressure)、塑料之最大剪應力(Maximum shear stress)等；而品質參數則是與成品品質有關之所有數值，如成品之收縮量(Shrinkage)、翹曲量(Warpage)、重量與厚度(Weight and thickness)、表面凹凸程度(Sink marks)等。Seow and Lam(1997)提到塑膠射出成型加工流程，其製程條件因素為：射出速度包括了充填速度、螺桿轉速、開關模速度、頂出速度等。射出壓力包括了充填壓力上限(一段壓)、保壓壓力(二段壓)、螺桿背壓等。射出溫度包括了料缸溫度、噴嘴溫度、模具溫度等。成型時間包括了充填時間、保壓時間、冷卻時間等。成型位置包括了進料位置、充填與保壓轉換位置、頂出量、殘留量等，如圖 2.6 所示。

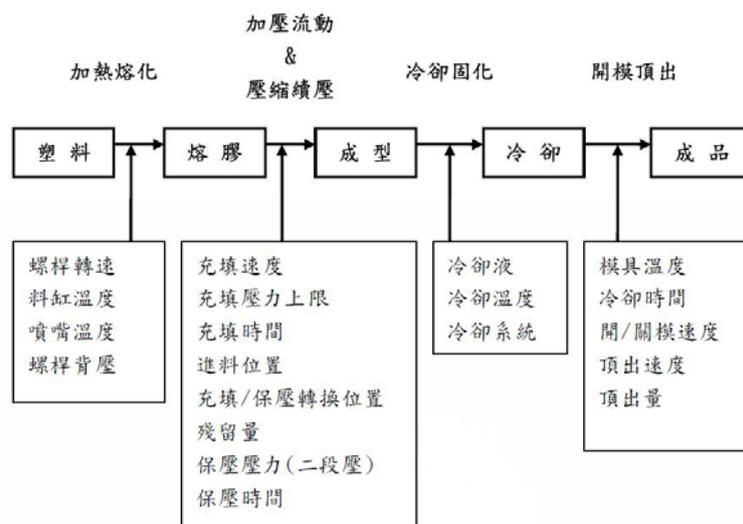


圖 2.6、塑膠射出成型加工流程

當一週期之射出成型製造參數完成設定後，經過機械制動器使整個製造動作開始運作。在製造過程中，由於塑料與機臺受到各因子(包括可控制與無法控制之因子)間交互作用的影響，使製程狀態會隨時間而變動。於製程結束後，所完成之成品品質情況即為品質參數，而品質輸出與期望成果之間的落差，為此封閉控制系統中之回饋資料。透過良好的機器控制及製程控制，以確保機台能穩定的執行射出成型作業並使得製造的過程不產生任何的品質缺失為成形作業之最終目標。

Agrawal et al.(1987)提出了『塑料參數(Plastic variables)』的概念(即製程參數)，其結果顯示將製程參數作為控制對象時，能更正確的掌控模穴與成品狀況。目前，我們只針對其中某幾個特定的參數進行分析並找出最佳的參數設定組合。其中 Zhao and Gao(1999)提出不同的製程參數會影響射出成型產品的品質，像是熔劑溫度、模具溫度、射出壓力、射出速率、射出時間、保壓壓力、保壓時間、冷卻溫度。

## 2.4 射出成型常用之最佳化方法

近年來常用於最佳化射出成型製程之方法，一般為先利用模流分析軟體如 Moldflow、C-Mold、Moldex 3D...等，進行產品塑件之模擬產出，接著以單一或是結合兩種以上的最佳化方法進行實驗分析，其中可能包括田口品質方法、數值模擬分析、線性迴歸模型、反應曲面法、類神經網路、基因演算法...等方法，皆為射出成型製程常用之最佳化方法。

過去針對單品質參數進行分析之文獻包括，Lee and Kim(1997)使用田口實驗設計針對由不同厚度構成的塑件進行幾何因子之最佳化設計，並得到在不同厚度條件下可明顯改善翹曲。而 Shen et al.(2006)針對品質特性收縮進行研究得出結合倒傳遞類神經網路及基因演算法之方法，可有效解決射出成型製程條件與其品質特性間複雜的非線性關係的問題。Kurtaran et al.(2005)以基因演算法及類神經網路僅針對最小化翹曲進行分析，發現類神經網路具有良好的預測能力且基因演算法為一個可有效找尋最佳解的方法。Hua et al.(1997)則是利用模擬退火法針對手機薄殼進行製程參數最佳化分析並有效地減小翹曲量。Ozcelik and Erzurumlu(2005)針對平板模穴之幾

何尺寸進行幾何尺寸最佳化分析，他們利用全因子直交表結合反應曲面法與基因演算法進行最佳化模擬，得到最佳之幾何尺寸組合，減小翹曲情形。過去文獻通常只做單品質參數的研究，但目前工業產品不只要顧慮到一個品質而是要兼顧多項品質，所以單單控制某一個品質變數不足以控制最後產品的品質。

而針對多品質參數進行分析之文獻包括，Liao et al.(2004)透過 Cyclone Scanner, PolyWorks 測量手機機殼翹曲及收縮值，利用田口品質方法及變異數分析進行分析，找出保壓壓力為影響翹曲及收縮最重要之影響因子。洪啟偉(2007)則利用反應曲面法及田口品質方法針對翹曲及收縮進行分析比較時，發現反應曲面法為一優於田口品質方法的最佳化方法。而 Chiang and Chang (2007)利用 PC/ABS 塑料之手機機殼模型，利用變異數分析及反應曲面法進行翹曲及收縮分析時，找出模具溫度、保壓時間、保壓壓力、冷卻時間此四個製程參數之最佳參數組合，使得翹曲及收縮值減少。

而過去鮮少有文獻以迴歸分析結合資料包絡法進行翹曲、收縮及頂出時體積收縮兩種以上品質特性的分析研究。像是 Carlos E. Castro(2004)透過線性迴歸和類神經網絡結合資料包絡法使縫合線有效的減少並找出最佳的參數組合。而 Velia García Loera et al.(2008)僅透過實驗設計和資料包絡法減少成品之週期時間與翹曲並找出最有效率的參數組合。射出成型之最佳化相關文獻整理於表 2.1。

表 2.1、射出成型文獻之整理

作者(年份)	品質特性	研究方法	選擇之參數	最佳化方法
單一品質特性				
Hasan Kurtaran et al.(2005)	Warpage	Design of experiment(DOE), Artificial neural network, Genetic algorithm Moldflow	MOTE, MET, PP, PT, COTI	ANN GA
Shen Changyu, et al. (2006)	Shrinkage	Artificial neural network, Genetic Algorithm(GA), Design of experiment (DOE)	MET, MOTE, IT, PT, holding pressure	ANN GA
羅壬成(2006)	Warpage	Taguchi method Moldex3D	MOTE, IT, MET, Runner position, Plastic material	Taguchi method
Tuncay Erzurumlu, Babur Ozcelik (2005)	Warpage or Sink index	Taguchi method, ANOVA analysis MoldFlow	PP, MOTE, MET, Rib cross-section type, Rib layout angle	Taguchi method
Babur Ozcelik*, Ibrahim Sonat (2008)	Warpage or Force	Regression analysis, ANOVA, Taguchi method, Structure analysis Moldflow	Thickness (0.9, 1, 1.1 mm), PP, PT, MET, MOTE	Taguchi method Regression analysis
Wei-Jaw Deng, et al.(2008)	Weight	Taguchi method, Regression analysis, Davidon-Fletcher-Powell (DFP)method	IT, PP, IS, VP switch. Fixed MET:40°C IP: 150 MPa	Taguchi method Regression analysis, DFP
陳詞章 et al.(2005)	Weld line	Regression analysis	MOTE, MET, PP, Injection Rate Thickness	Regression analysis
Carlos E. Castro (2004)	Weld line	Linear regression, Artificial neural network, Data envelopment analysis Moldflow	MOTE, MET at injection MET at ejection Position of gate	DEA
Hasan Kurtaran et al. (2006)	Warpage	ANOVA analysis, Design of experiment(DOE), Response surface method(RSM), Genetic Algorithm(GA), MoldFlow	PP, PT, COTE, MET, MOTE	RSM, GA

作者(年份)	品質特性	研究方法	選擇之參數	最佳化方法
<b>多品質特性</b>				
<b>Liao et al. (2004)</b>	<b>Warpage, and Shrinkage</b>	Taguchi method (L27), ANOVA, F-test ◦ C-MOLD	MOTE, MET, PP, IR	Taguchi method
<b>S. J. Liao, W. H. Hsieh(2004)</b>	<b>Warpage, and Shrinkage</b>	Taguchi method, Artificial neural network	PP, MOTE, MET, Injection speed	ANN
<b>Ko-Ta Chiang, Fu-Ping Chang (2006)</b>	<b>Shrinkage and Warpage</b>	Response surface methodology(RSM), Sequential approximation optimization (SAO), Centered central composite design (CCD), ANOVA analysis	PT, PP, MOTE, COTE	RSM SAO
<b>Velia García Loera et al. (2008)</b>	<b>Cycle time and Warpage</b>	Data Envelopment analysis(DEA), Design of experiment(DOE),	PP, PT, MET, GTmp, NTmp, IS	DEA

## 2.5 小結

透過過去文獻的回顧，射出成型成品之品質普遍為大家所關注的研究方向，研究者皆希望可以透過一良好且適當的方法使產品在快速生產之餘品質同樣具備優良的水準。而單一使用田口品質方法、類神經網路或是基因演算法等方法已無法滿足多個目標輸出之需求，林啟濠(2005)提出以基因演算法結合類神經網路可以加快最佳化的速度，且楊景程(2000)也說明了結合倒傳遞類神經網路與基因演算法具有方便性、泛用性及適應性、穩健性、實用性、全域性和平行性等優點。而 Carlos E. Castro(2004)也提出線性迴歸類神經網路結合資料包絡法可以滿足多個目標輸出的需求，代替以往田口品質法只能針對單一性質的問題。故本研究將採用複迴歸分析結合資料包絡法，並應用田口直交表之水準搭配變異數分析找出顯著之參數組合，藉此找出多個目標品質特性之最佳組合。

### 第三章 研究方法

本研究所使用之研究方法主要分為四個步驟：(1)創建實驗之模型 (2) 進行實驗設計 (3)建立數學模型 (4)完成最佳化結果。研究方法之步驟可參考圖 3.1。步驟一：透過模擬軟體 Moldflow 進行模流分析，取得實驗製程及成品結果等相關資料；步驟二：透過田口直交表及變異數分析找出製程之顯著因子；步驟三：使用複迴歸分析求得各品質參數之預測方程式；步驟四：最後利用資料包絡法衡量出最有效率之參數組合。

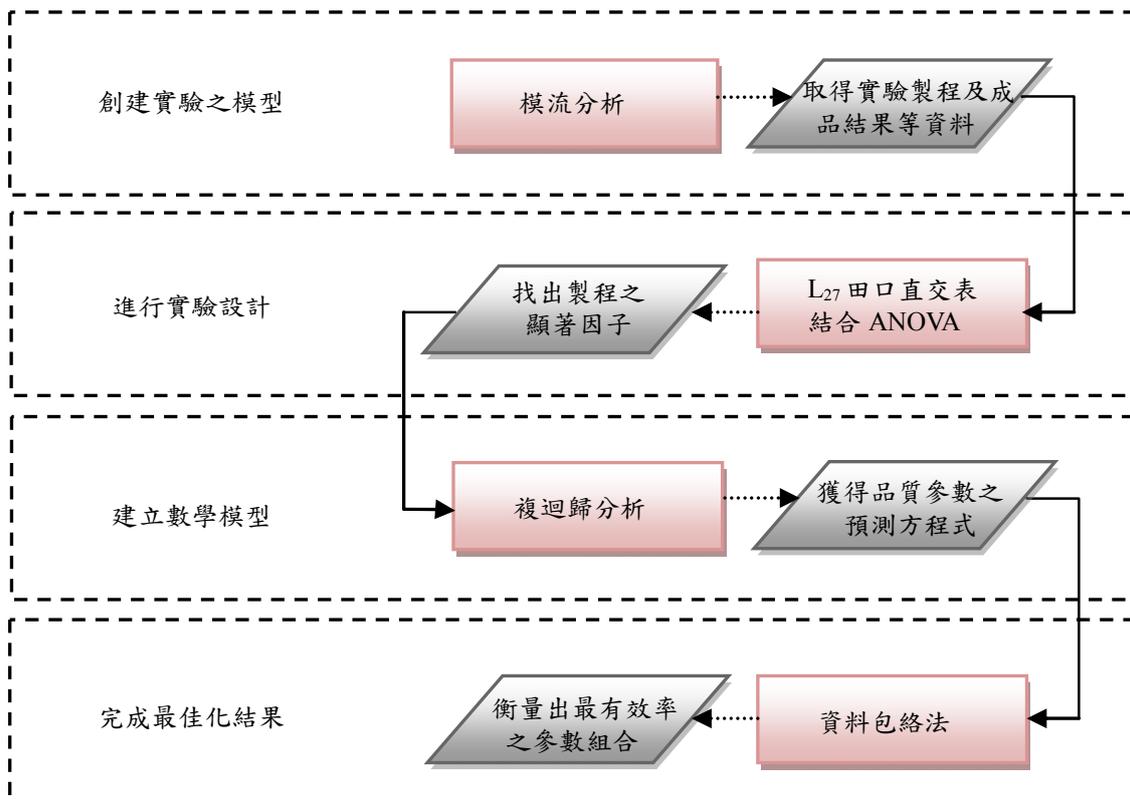


圖 3.1、本研究方法之步驟

## 3.1 模流分析

### 3.1.1 電腦輔助工程(Computer-Aided Engineering, CAE)

CAE(Computer-Aided Engineering) 電腦輔助工程分析早期主要是用於建築工業與航太工業上，後來也逐漸被應用於塑膠射出與塑膠模具工業。1978 年 Mr. Colin Austin 在澳洲墨爾本創立 MOLDFLOW 公司，當時所開發之 Moldflow 軟體僅能提供簡單的 2D 流動分析，但自 1980 年代起，隨著理論基礎日趨完備，電腦設備與數值計算的發展迅速，CAE 軟體模擬的功能也不再侷限於流動現象之探討。目前常見應用於塑膠工業之 CAE 模流分析軟體有 Moldflow、Moldex-3D、Polyflow 等。模流分析技術日漸純熟，使用者可透過電腦進行產品開發設計前的模具、塑膠材料及射出機台之選擇，並對於成品製程操作條件、流道設計...等加工參數進行模擬，以減少產品於現場實際試誤時之成本與時間的浪費，以期達到 CAE 模流分析與現場實務同步化，進而達成快速及周密的生產流程藉此提升產業之競爭力。

本研究所採用的 CAE 模擬軟體是 Moldflow 塑膠模流分析之 MPI (Moldflow Plastic Insight)。MPI 為塑膠射出成型充填、保壓及冷卻過程的電腦輔助分析軟體，用來幫助模具設計者射出成型加工業者，在開模生產前或生產過程中經由電腦模擬的結果，了解塑膠在充填保壓及冷卻過程中的各種狀態，如溫度、壓力、密度、流速、剪切應力及剪切應變等之分佈變化。進而由這些資料數據決定或是修正最適當的加工條件及作為模具設計的參考。例如：選擇較佳的澆口及進澆方式、多模穴的配置、融合線及排氣孔位置預測，並提供保壓時間、保壓壓力、鎖模力、射出壓力、加工溫度、模具溫度及收縮率分佈的預測等。使得使用者可在短時間內開發新產品且降低不良率、減少成本支出及製造品質優良之產品。

射出成型製程之電腦輔助設計分析可分為三大階段：前置處理階段(Preprocessing)、模擬分析階段(Simulation)、後段處理階段(Postprocessing) (陳良相 et al., 2005)。如圖 3.2 所示。接下來的部份將針對各個階段設定進行說明。

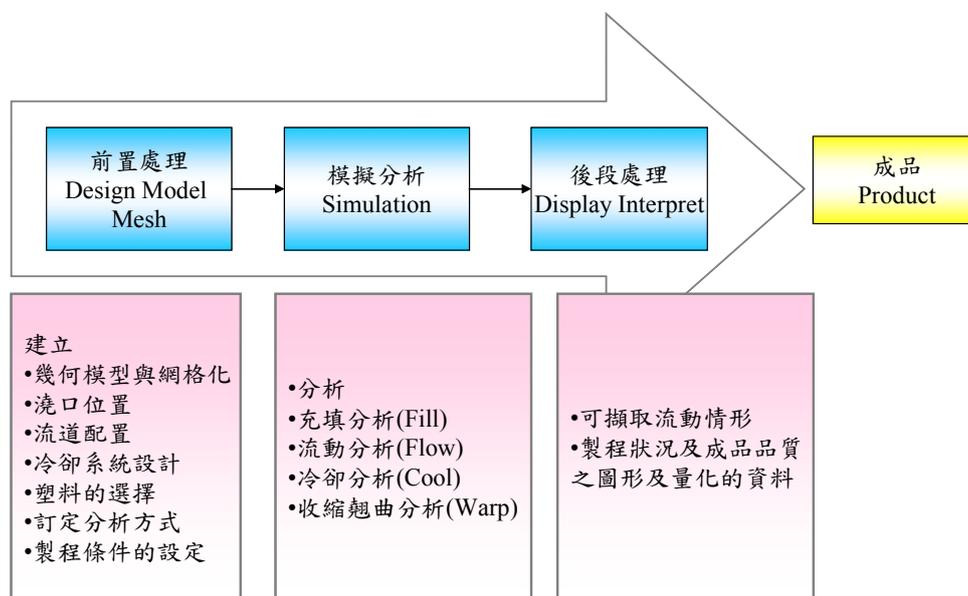


圖 3.2、塑膠射出成型 CAE 分析之三大階段

### 3.1.2 前置處理(Preprocessing)

前置處理階段為塑膠射出成型 CAE 分析中最重要的一個環節，成品塑件的模擬分析設定都在此時完成，若此階段發生差錯，則所有分析結果將不具任何意義。此階段主要之目的為建立幾何模型及建立網格、決定澆口位置、設定流道配置、設計冷卻系統、選擇塑膠射出材料、訂定欲採取之分析模式、製程條件設定等(陳良相 et al., 2005)。以下將針對本研究之模型建立、網格設定、材料選擇、模擬設定等前置階段的設定進行詳細說明。

#### 3.1.2.1 模型建立

幾何模型可利用 Pro-Engineer、SolidWork、AutoCAD、Rhion 等 CAD 軟體來建構，在轉換成 STL、STP、IGES 等形式之圖檔後匯入 Moldflow 軟體之專案(project)中，又幾何模型亦可直接在 Moldflow 軟體中來建立。本研究採用 Solidworks 軟體建立數位相機前蓋之薄殼模型如圖 3.3 所示。

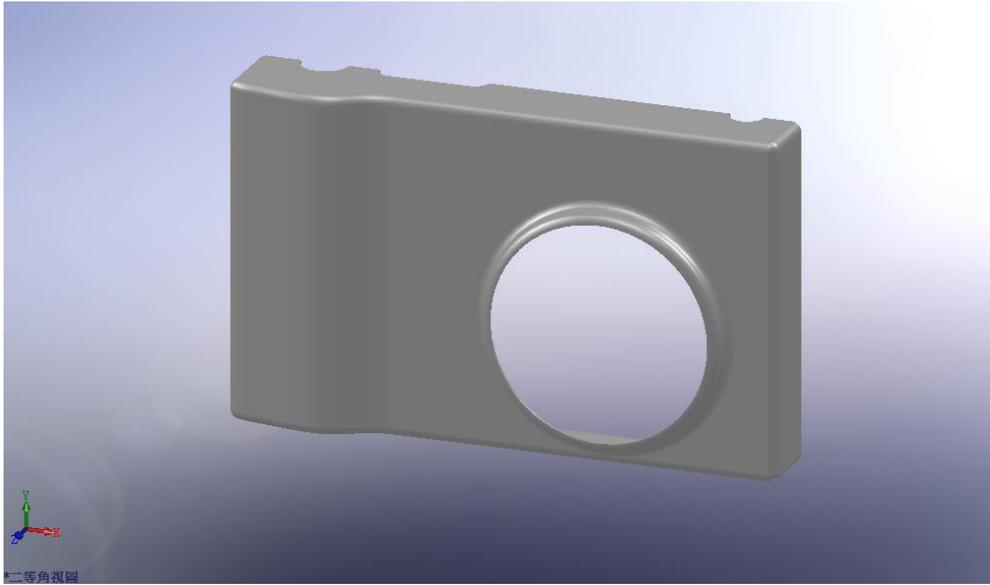


圖 3.3、本研究之數位相機前蓋之薄殼模型

### 3.1.2.2 網格建立

幾何模型建構後需要再經網格的劃分，將原來建構的模型切割成元素(element)與節點(node)之組合，然後便可利用每個元素間的關係、特性和材料屬性等資料，進行充填、保壓、冷卻和翹曲等問題之分析。本文是在 Solidworks 軟體建構幾何模型，再轉換成 STL 檔匯入 Moldflow 軟體中。

就網格形式而言，可分為 midplane(2D) 及 fusion(2.5D)，本研究以 midplane 進行模擬，其結果，midplane 之網格切割，如圖 3.4 所示。透過符合網格(Match mesh)與網格平滑化(Smooth mesh)之網格的處理方法以達到較好的網格品質。網格優劣會影響分析準確度，須注意的是網格的縱橫比(aspect ratio)，網格縱橫比若太高，會影響翹曲變形分析的準確性。在本研究之分析模型中網格縱橫比皆保持在 9 以下，網格方向性亦均一且完全相連。並透過 Match ratio 作為檢視網格品質的重要指標。其中，若要進行流動分析，Match ratio 最少要到達 85%以上。若想得到較準確的翹曲結果，Match ration 最好在 90%以上。本研究之網格品質指標如圖 3.5 所示。

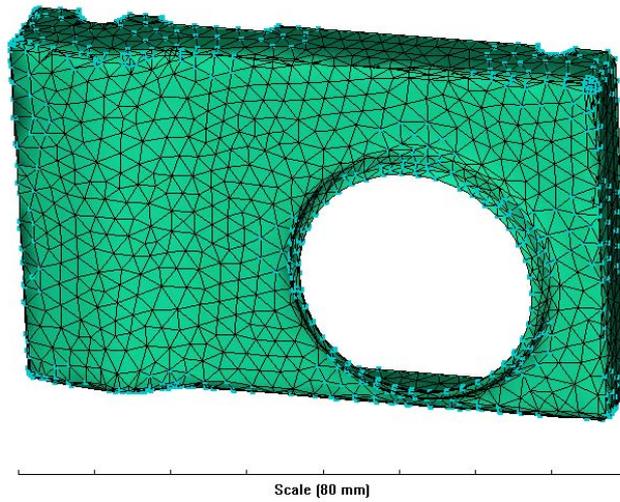


圖 3.4、本研究模型之網格圖示

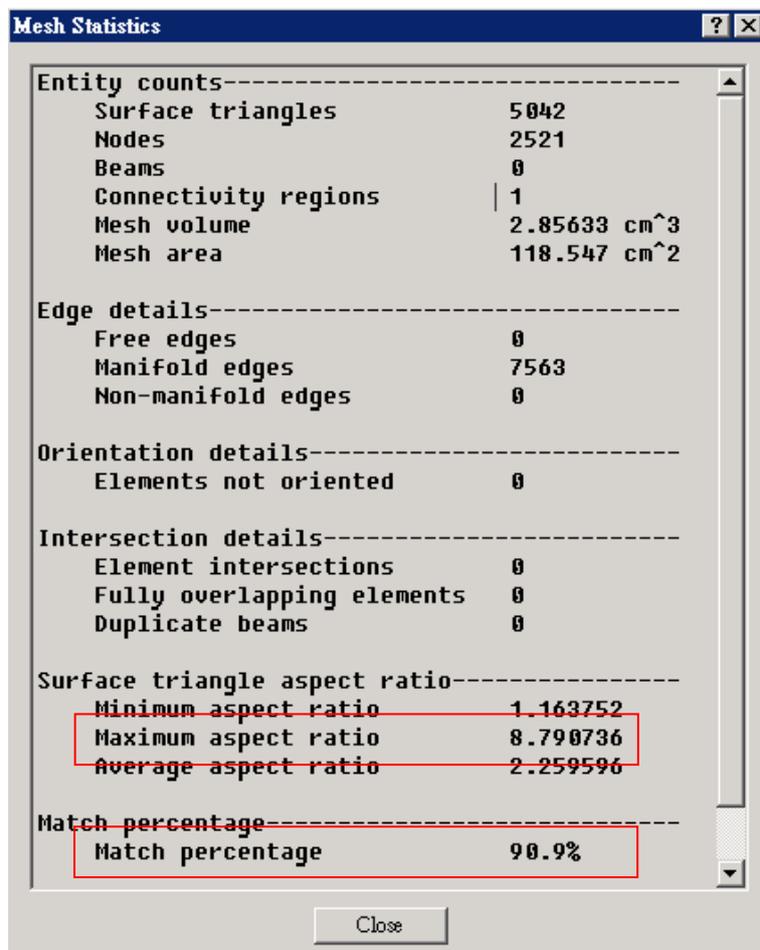


圖 3.5、本研究模型之詳細網格檢定

### 3.1.2.3 澆口數目及澆口位置設置

模具之設定為一模一穴，進澆位置透過 Moldflow MPI 之 Gate Location 分析形式進行實驗分析，找出此數位相機模型之最佳澆口位置分佈圖，如圖 3.6 所示。

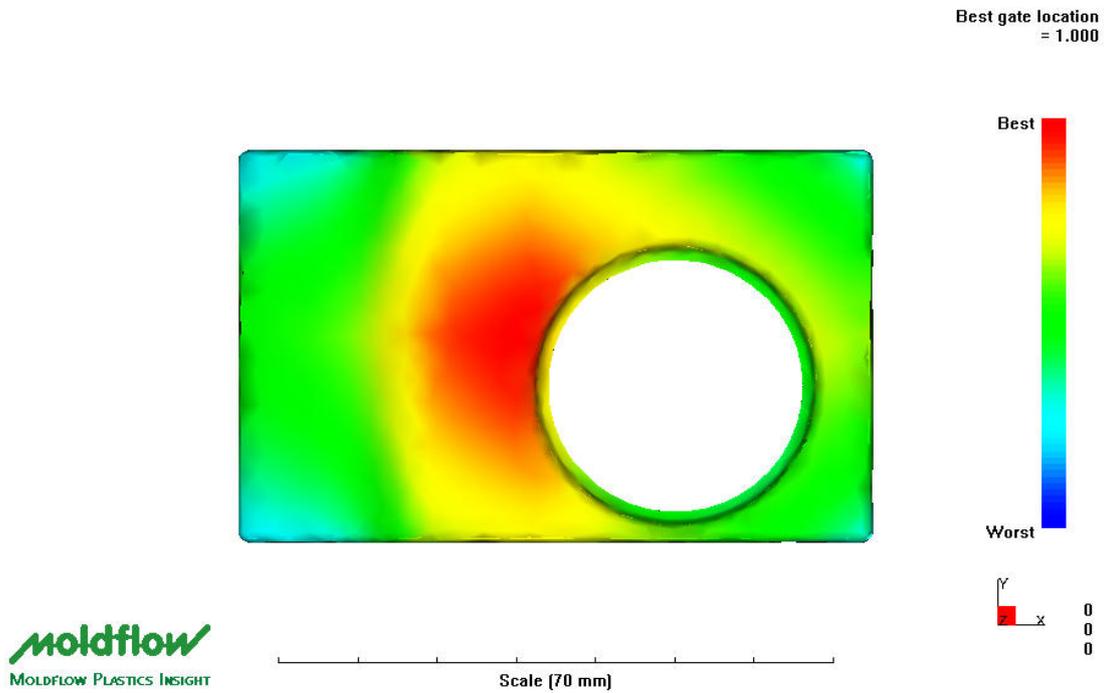


圖 3.6、Moldflow 建議之最佳澆口位置

接下來決定澆口數目，本研究分別設置一個澆口及二個澆口來進行模擬，如圖 3.7 和圖 3.8 所示。

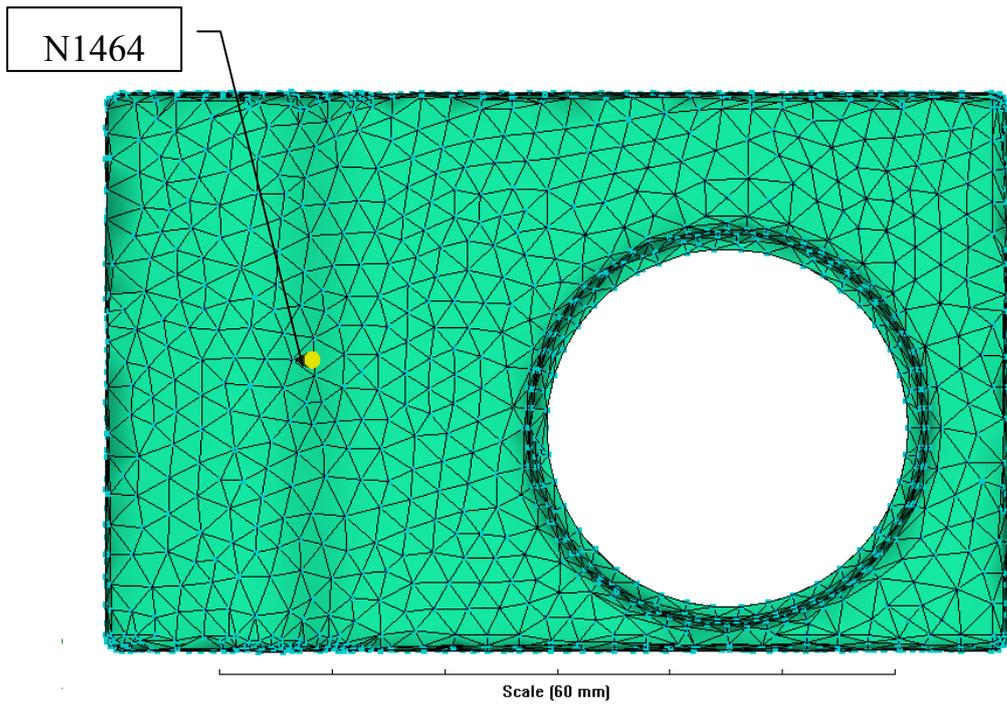


圖 3.7、本研究模型之一個澆口設置

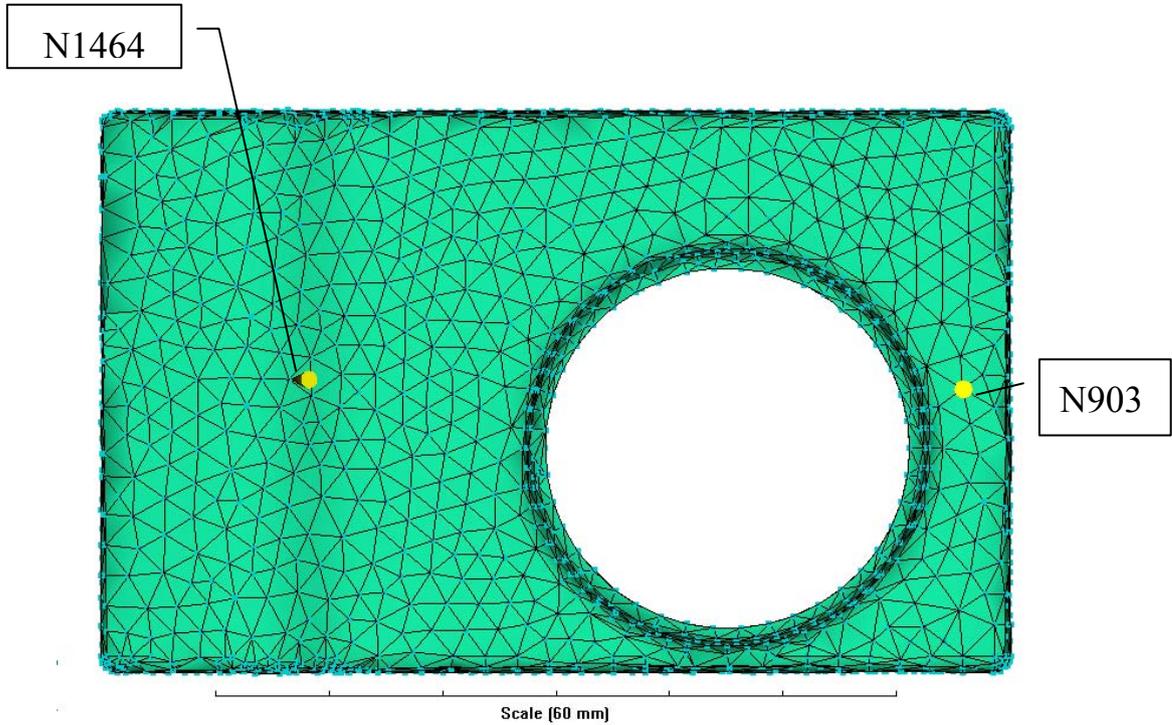


圖 3.8、本研究模型之二個澆口設置

透過 MPI/Flow 即流動分析，進行兩種方案的分析，得到了充填分析結果，如圖 3.9 和圖 3.10 所示。透過充填分析結果可以發現設置一個澆口的充填時間為 0.4972s，且會發生短射現象，故本研究最後採用二個澆口之設置，其充填時間為 0.2430s。

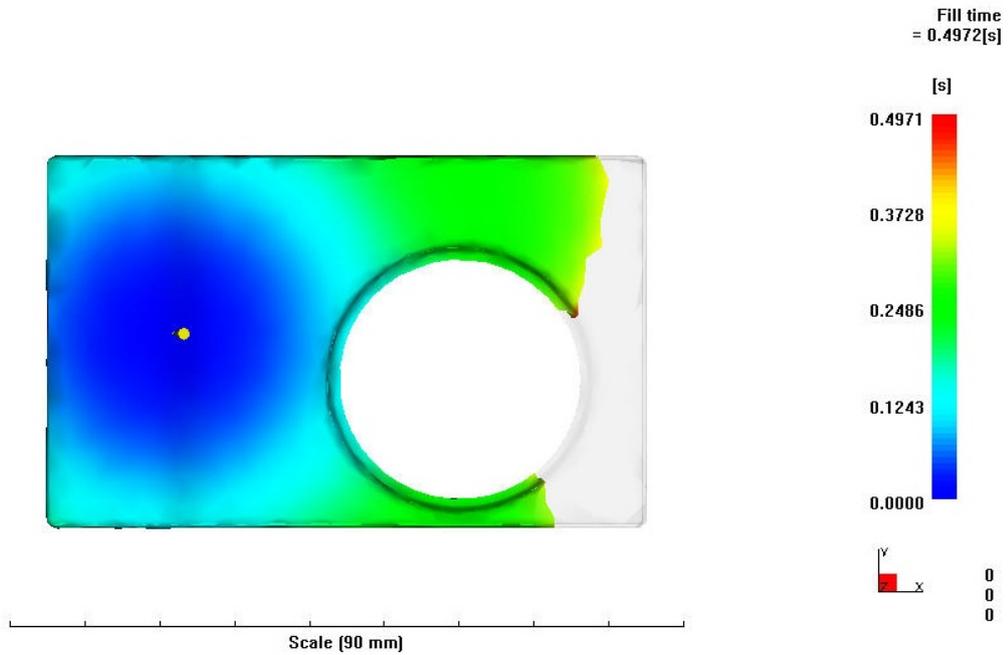


圖 3.9、本研究模型之一個澆口設置之充填結果

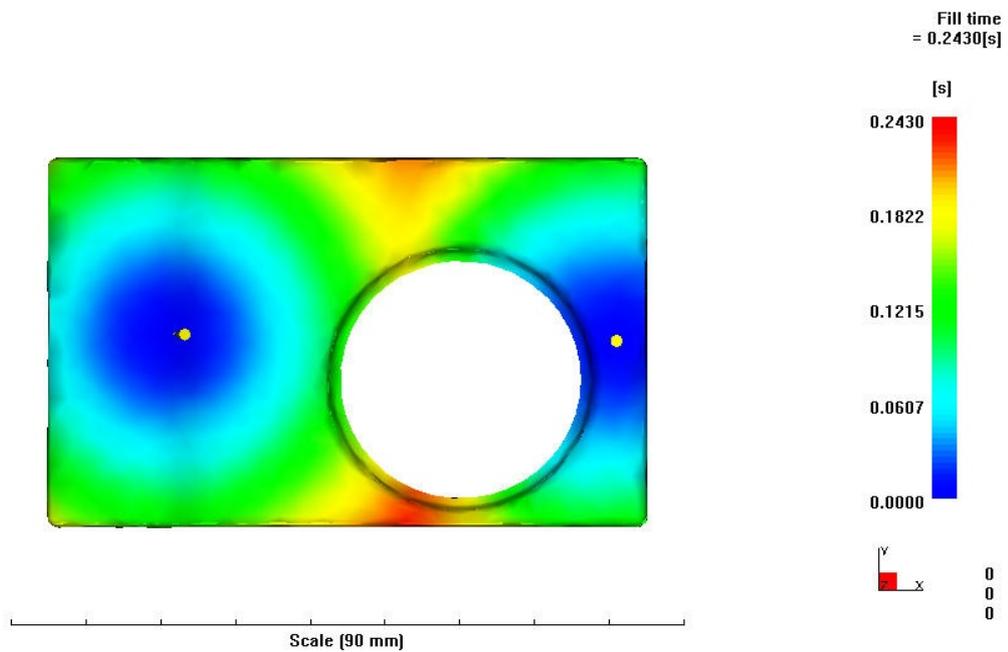


圖 3.10、本研究模型之二個澆口設置之充填結果

### 3.1.2.4 澆流道系統設置

本研究之初始澆流道採用潛狀澆口(Submarine)設定，詳細設計如圖 3.11~圖 3.14 所示。潛狀澆口為圓錐形澆口，又稱為隧道澆口或鑿子澆口，可使澆口分離自動化，且進澆位置可自由選擇在塑件表面、側面或裡面，可用於表面不容許留有澆口痕跡之成品。方式簡單，唯有加工時須考慮死角容許尺寸問題。

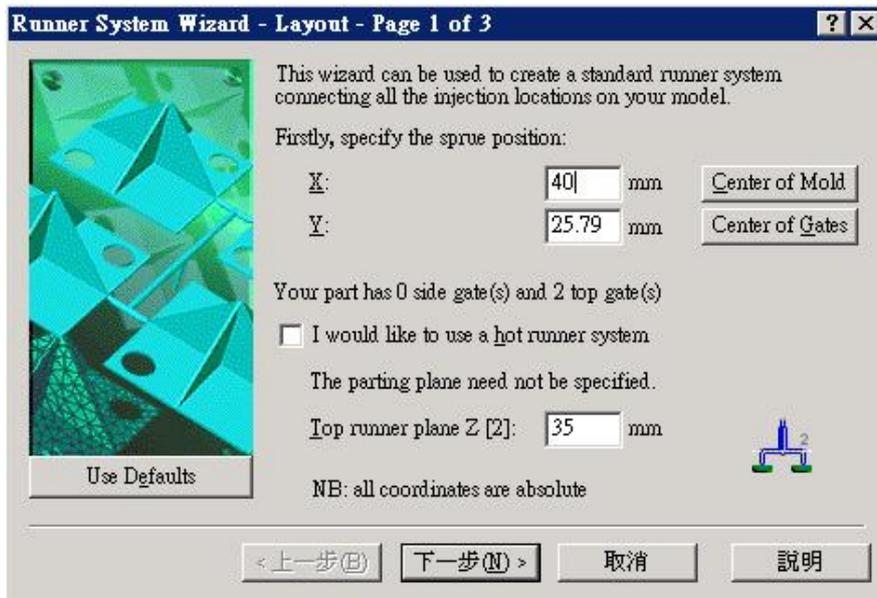


圖 3.11、本研究模型之澆流道設定-1

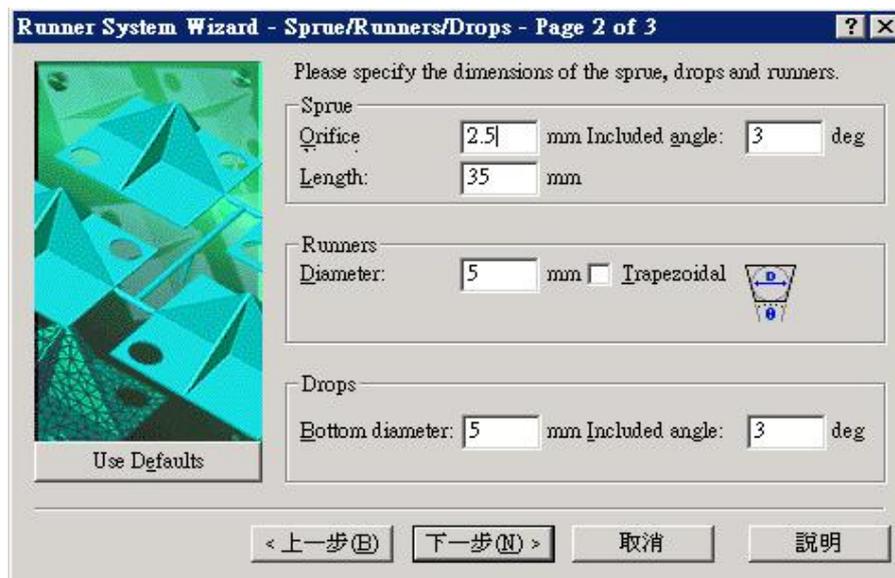


圖 3.12、本研究模型之澆流道設定-2



圖 3.13、本研究模型之澆流道設定-3

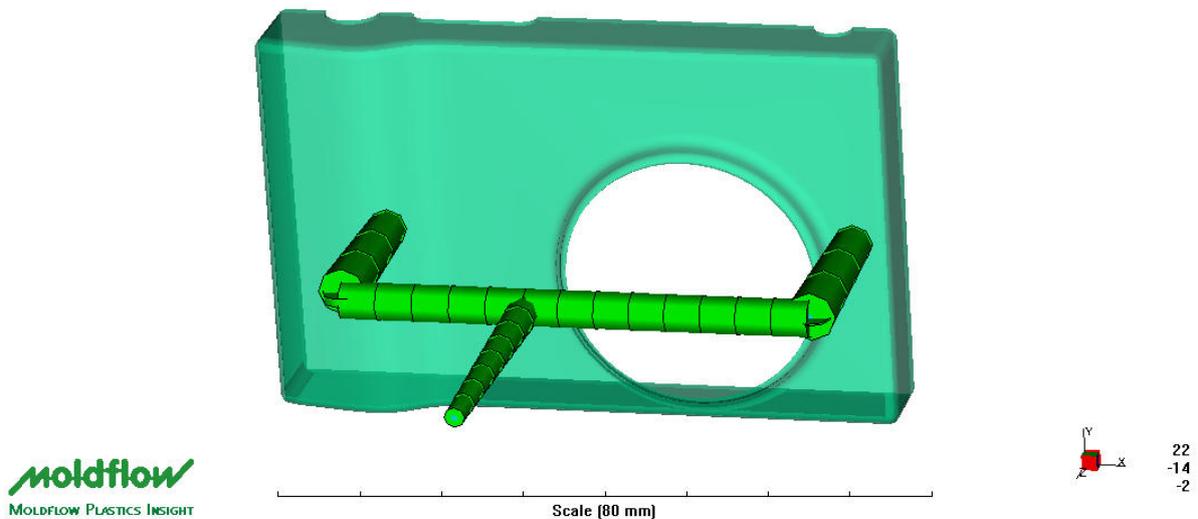


圖 3.14、本研究模型之澆流道圖示

完成澆流道系統之建立後，下一步則是建立模穴冷卻系統，冷卻系統對塑件的影響非常大，冷卻的好壞將直接影響塑件的表面質量、機械性能和結晶度。且冷卻時間也決定了塑件成型周期的長短，直接影響產品的成本。

本研究採用冷卻水作為降低模型溫度之冷卻液，將模具內熱量有效的減少。冷卻系統之詳細設定如圖 3.15、圖 3.16 所示。建置完成後之冷卻流道系統如圖 3.17 所示。

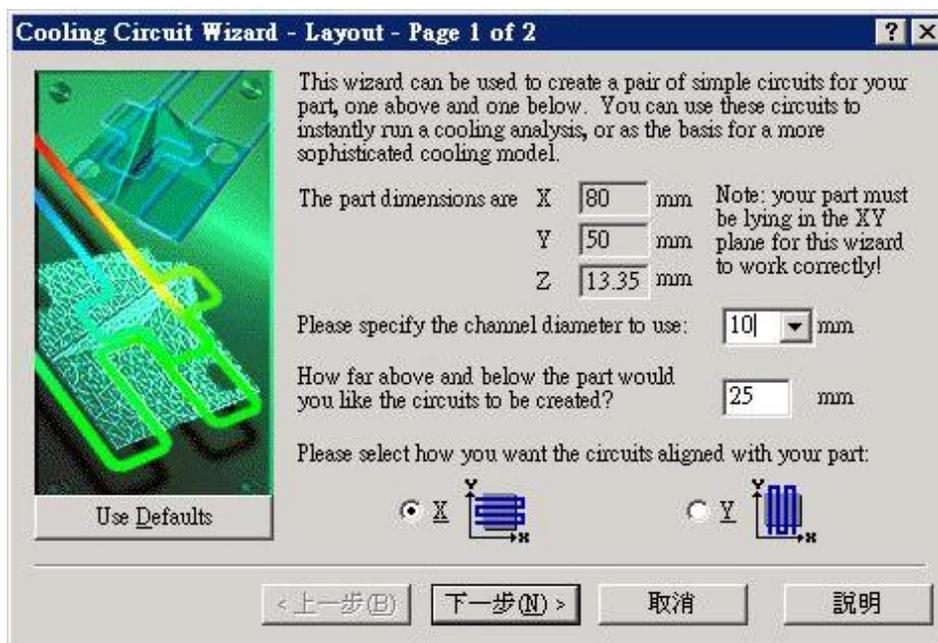


圖 3.15、本研究模型之冷卻系統設計-1

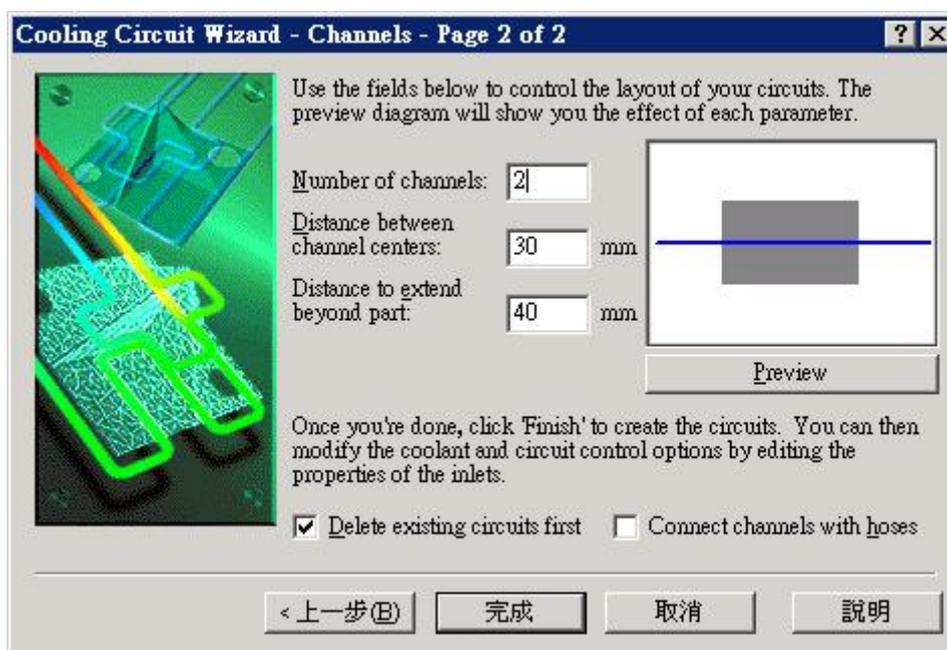


圖 3.16、本研究模型之冷卻系統設計-2

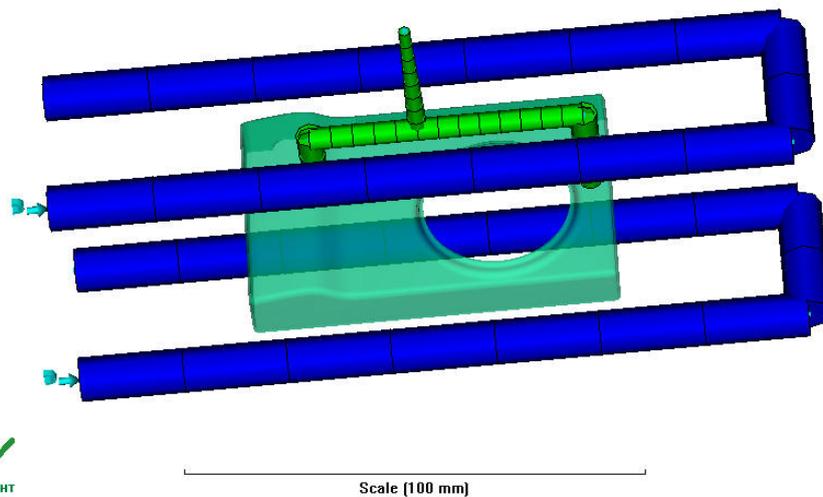


圖 3.17、本研究成品之冷卻系統

### 3.1.2.5 材料選擇

材料選擇的部份，將針對塑膠材料及模具的選擇進行說明，本研究選用之塑膠材料為美國奇異公司所生產之型號 GE Cycloy C2950 PC/ABS 之塑料，模具材料則採用 TOOL STEEL P-20，模具機台為 Milacron 公司所生產之型號 Roboshot 330i 330 tons 8.90 oz (44mm)High Spd/Pres。

目前，數位相機常用塑膠材料主要有 PC、ABS 和 PC/ABS 三大類。由於 PC/ABS 具 PC、ABS 材料之特點，具有優良的成型加工性能、流動性好、強度較高(抗拉伸強度 56MPa，抗彎曲強度 86MPa)等特性，如表 3.1。

表 3.1、PC、ABS、PC/ABS 材料特性表

材料	材料強度	硬度	溫度	其它特性
PC	69 MPa	120 R	130 °C	無毒、透光、低溫特性較好
ABS	43 MPa	100 R	60 °C	配色、噴塗、電鍍等特性好
PC+ABS	56 MPa	110 R	60 °C	各項性能居中，加工、流動性好

PC/ABS 材料建議之射出成型製程條件為熔劑溫度於 255°C ~295°C、模具溫度於 60°C ~80°C、注射速度越高越好…等。本研究採用 PC/ABS 塑料之詳細物理特性及製造特性如圖 3.18、圖 3.19，壓力比容溫度(PVT)資料

如圖 3.20 所示，模具材料製造特性如圖 3.21，射出成型機台詳細資料如圖 3.22、圖 3.23 其中，PVT 圖是指塑膠材料隨著壓力及溫度的變化而發生體積上的變化。在充填及保壓階段時，塑膠材料會隨著壓力的增加而膨脹，而在冷卻的階段時，塑膠隨著溫度的降低而收縮。

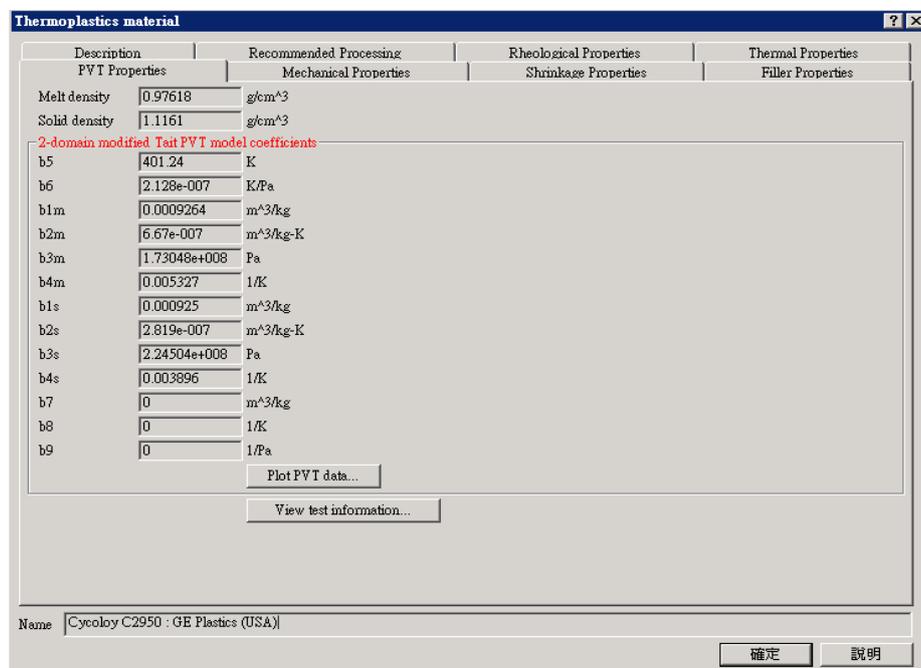


圖 3.18、本研究塑料之詳細物理特性資料

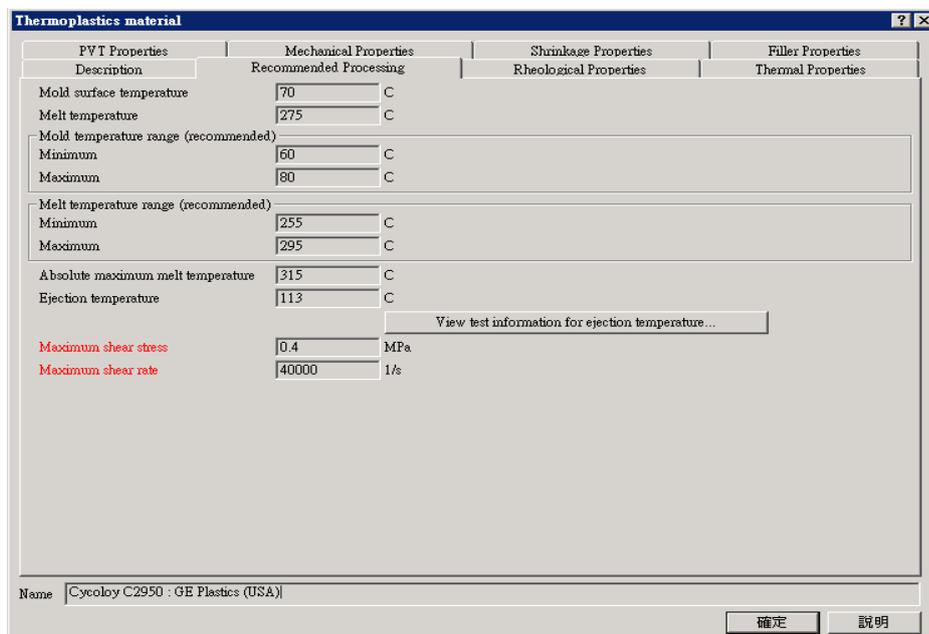


圖 3.19、本研究塑料之製造特性

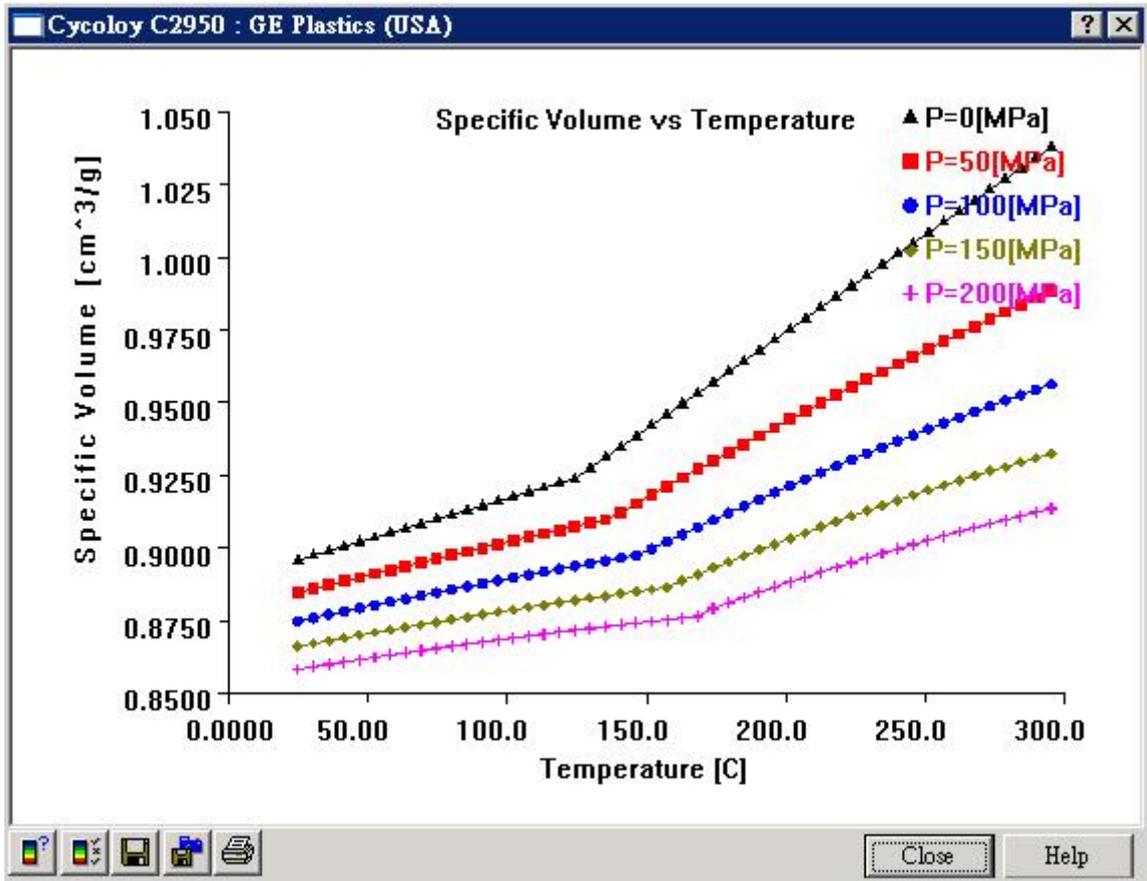


圖 3.20、本研究塑料之 PVT 圖

Mold material	
Description	Properties
Mold density	7.8 g/cm <sup>3</sup> (0:30)
Mold specific heat	460 J/kg-C (0:2000)
Mold thermal conductivity	29 W/m-C (0:1000)
Mold mechanical properties	
Elastic modulus (E)	200000 MPa (0.3e+006)
Poissons ratio (ν)	0.33 [0:1]
Mold coefficient of thermal expansion	1.2e-005 1/C (0:10)
Name	Tool steel P-20

圖 3.21、本研究模具材料之製造特性資料

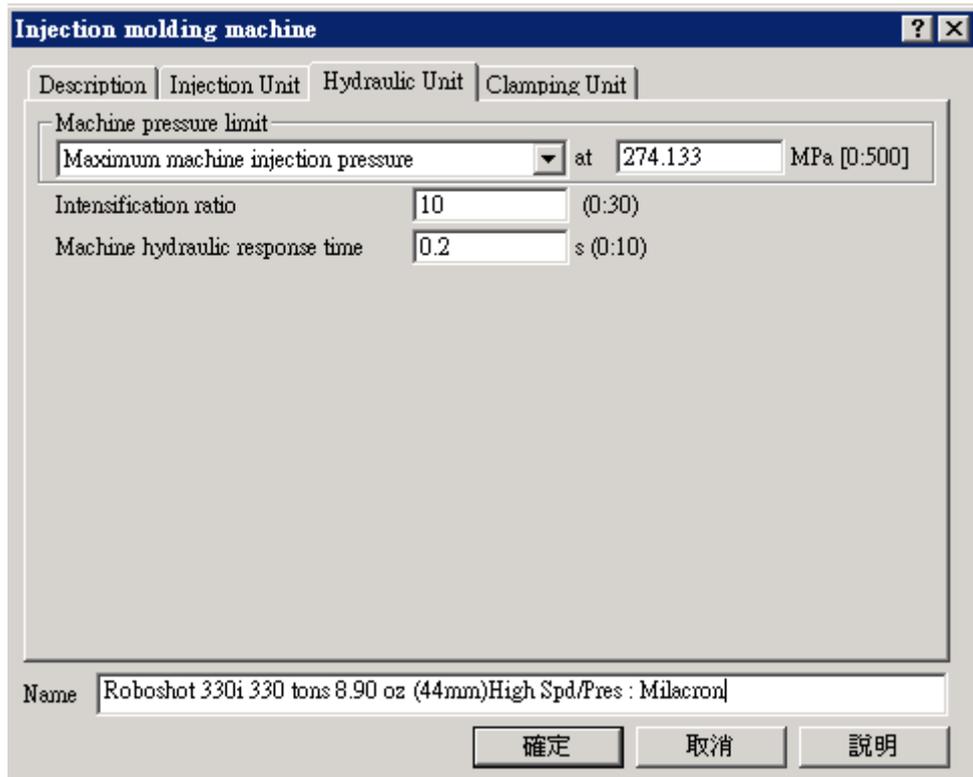


圖 3.22、本研究成型機台之詳細資料-1

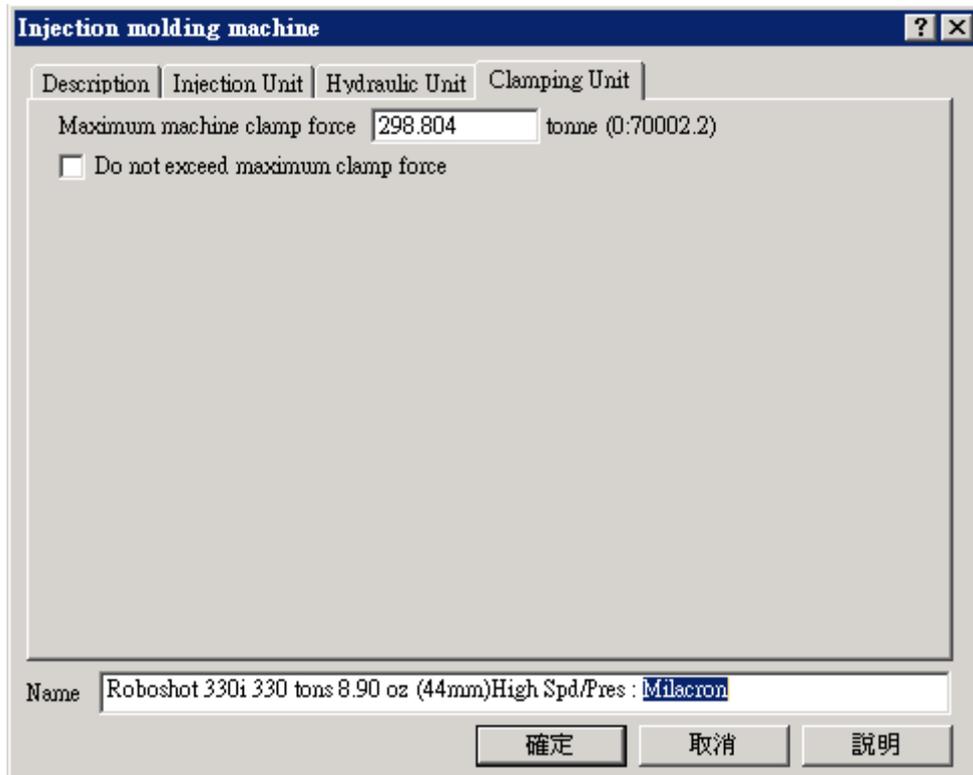


圖 3.23、本研究成型機台之詳細資料-2

### 3.1.2.6 模擬設定

完成模型建立及機器參數設置之後，前置階段的最後步驟即為模擬設定，進行模擬製造前必須先設定製程參數。本研究將針對射出時間(Injection Time)、射出壓力(Injection Pressure)、保壓壓力(Packing Pressure)、保壓時間(Packing Time)、冷卻時間(Cooling Time)、冷卻液溫度(Coolant Temperature)、開模時間(Mold-Open Time)、溶劑溫度(Melt Temperature)、模具溫度(Mold Surface Temperature)等九個製程參數進行研究分析，期望找出塑膠射出成型製程中，使得翹曲、收縮及頂出時體積收縮品質特性最佳之參數組合。製程參數之初始值以 Moldflow 預設值作為起始設定值，如表 3.2 所示。

表 3.2、本研究之製程參數初始設定值

射出成型參數	射出成型參數	參數簡稱	起始設定值
Injection Time(S)	射出時間	INT	1
Injection Pressure(MPa)	射出壓力	INP	120
Packing Time(S)	保壓時間	PP	100
Packing Pressure(MPa)	保壓壓力	PT	10
Cooling Time(S)	冷卻時間	COTI	19
Coolant Temperature(°C)	冷卻液溫度	COTE	25
Mold-Open Time(S)	開模時間	MOO	5
Melt Temperature(°C)	熔劑溫度	MET	275
Mold Temperature(°C)	模具溫度	MOTE	70

其中，保壓時間為充填時間壓力速度控制切換成保壓壓力控制上的時間；保壓壓力為充填壓力由速度控制切換成保壓壓力控制；冷卻時間為保壓結束後會有一段時間不再對塑件施加壓力，等待塑件凝固直到頂出的時間；開模時間為成型終了取出成品時，模具打開至成品彈出的時間，成品與模具不再進行熱量的交換；熔劑溫度為熔劑在進入澆流道前，塑膠熔融狀態之溫度值；模穴溫度為當塑料注入模穴時，接觸模穴壁前之模穴表面溫度，此溫度值將會影響冷卻流程之冷卻率。

### 3.1.3 模擬分析(Simulation)

大部分零件流動分析的步驟皆大同小異，整個模擬分析流程如圖 3.24 所示(陳良相 et al., 2005)。在 Moldflow 模流分析軟體中，可依據不同的需求提供不同的分析模組，其中分析形式包括 Flow 流動充填分析、Cool 模具冷卻分析、Warp 翹曲變形分析、Stress 塑膠應力分析、GAS 氣輔中空成形…等。在分析過程中，須先對冷卻、充填及保壓進行最佳化，唯有如此才能獲得準確的翹曲及收縮值。

故本研究選用熱塑性射出模組中的 Cool+Flow+Warp 之連串流程分析形式進行分析。表 3.3 為此三種分析形式可得之分析結果與應用效益。

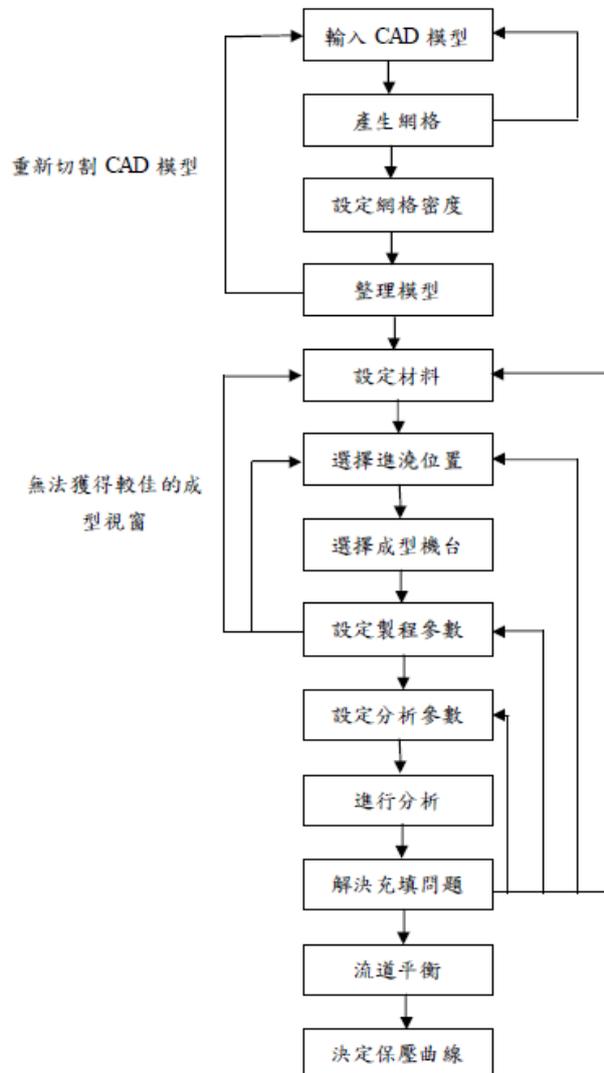


圖 3.24、電腦模擬流程圖

表 3.3、Cool、Flow、Warp 模組之分析結果及應用效益

	分析結果	應用效益
<b>Cool</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 計算模具截面溫度分佈，提供冷卻管路配置時參考</li> <li>2. 計算冷卻管路之溫度、雷諾數、冷劑流率及模壁面之溫度分佈、溫差、凝固時間</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 設計均勻有效之冷卻系統</li> <li>2. 減少成品扭曲、改善品質</li> <li>3. 找出局部熱點或冷點</li> <li>4. 縮短成型週期</li> </ol>
<b>Flow</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 有限元素數值計算，可提供模穴及澆道之充填時間、溫度分佈、壓力分佈、剪力分佈。</li> <li>2. 有限差分數值分數，可計算保壓壓力、保壓時間、體積收縮率等。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 縮短成型週期及交貨時間</li> <li>2. 選擇澆口位置及數目</li> <li>3. 防止不均勻收縮</li> <li>4. 降低不良率</li> <li>5. 流動平衡</li> </ol>
<b>Warp</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 讀取流動、冷卻之分析結果，配合材料物性，計算成品之各方向收縮率、面積收縮率、體積收縮率。</li> <li>2. 計算各方向之翹曲率</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 模擬可能之翹曲情況</li> <li>2. 尋找造成翹曲之原因，以降低變形量</li> </ol>

(源自林瑞璋, 2001)

透過流動分析結果觀察熔膠是否同時到達模穴各個角落；而冷卻分析結果為判斷冷卻系統之冷卻效果，且所得之冷卻時間可用來判斷塑件的成型周期；翹曲分析主要針對模型翹曲及收縮的類型、範圍及原因進行分析。其中塑件體積的收縮與線性收縮受模具的限制、結晶、配向性所影響，而翹曲則與收縮的變異有關(Jay Shoemaker, 2006)。陳良相 et al.(2005)認為最主要影響翹曲產生的因素主要可分為三大類：(1)冷卻性差異(Differential Cooling)、(2)收縮不均(Differential Shrinkage)、(3)配向性影響(Orientation Effects)。

### 3.1.4 後段處理(Postprocessing)

經過一連串的冷卻、充填、保壓及翹曲分析之後，便完成塑膠成品整體之模擬工作。接著，我們可從 Moldflow 中擷取需要之成品分析的資料，例如：熔融液流動情形、製程狀況、成品品質翹曲及收縮值…等圖形或量化的資訊。而後段處理階段主要之目的即為取得每一次實驗之製程資訊及成品結果等資料，進行記錄及分析進行回饋，使得成品之資訊及結果可作為下一次生產製造的參考依據。

本研究採用之塑件為數位相機前蓋薄殼模型，對於數位相機產品汰換率如此高的時代來說，產品的美觀及堅固耐用為消費者的優先考量，數位相機機殼整體的品質特性也同樣是製造商最關注的目標。因次，本研究將針對相機機殼整體之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比進行分析，透過擷取數位相機前蓋薄殼模型的四個角點之結點(以 N1991、N1962、N1955、N2261 表示)及四個角點所連成的邊長(以 E1、E2、E3、E4 表示)作為翹曲及收縮之分析資料取得考量基準。如圖 3.25 所示。

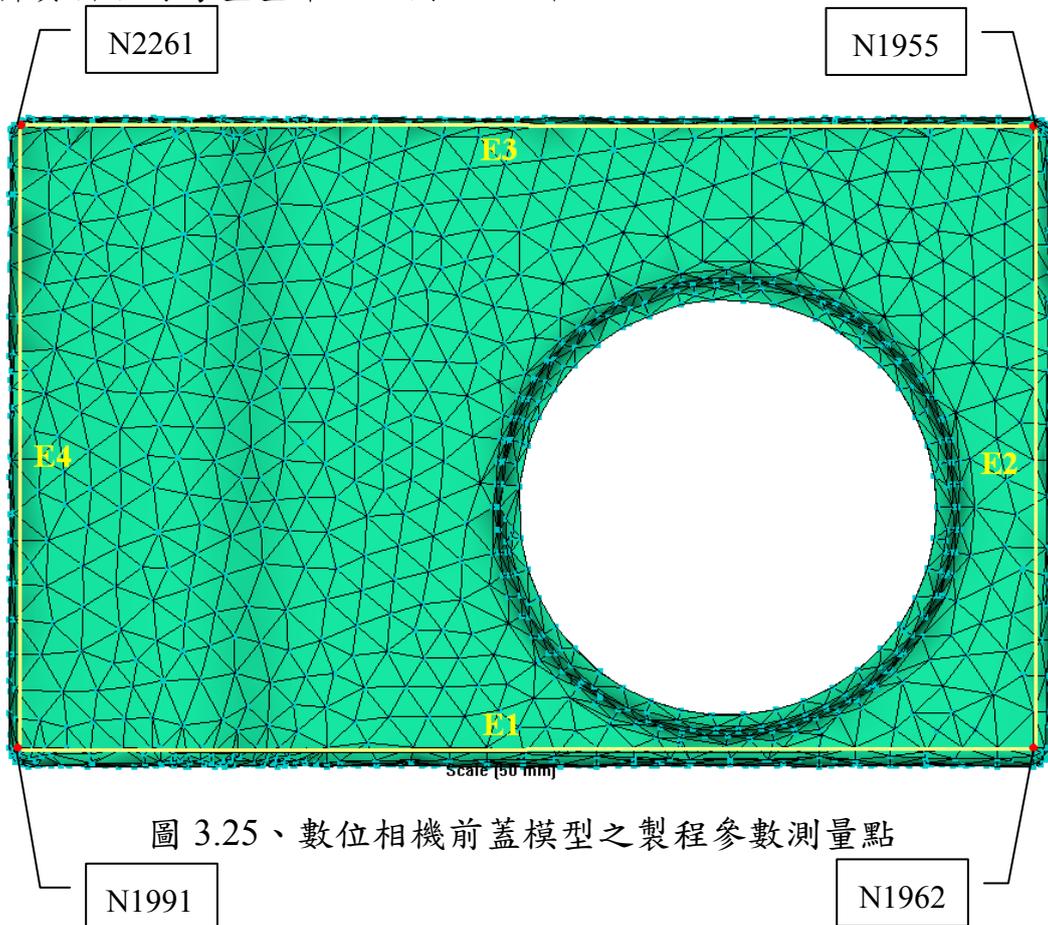


圖 3.25、數位相機前蓋模型之製程參數測量點

## 3.2 田口直交表結合變異數分析

早在 1920 年代 Fisher 利用實驗計劃法 (Design of Experiments, DOE) 對小麥品種進行遺傳研究，他建立了實驗設計的基本原理及有關數據分析的技術，使用變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA) 作為實驗設計中主要的統計分析工具，幾乎所有領域的實驗都採用了此學理。1940 年代 Finney 提出多因素實驗的部份實施法以期降低實驗次數而又能保有實驗的效果，更奠定了現代實驗設計的基礎。到了 1950 年代至 1960 年代初，田口玄一 (Genichi Taguchi) 結合 Fisher 在農業實驗中所建立的變異數分析法，以及 Rao 之規劃實驗的直交表，發展出田口實驗計劃法 (Taguchi Methods)，又稱為穩健性設計 (Robust Design)，除了各因子的主效應外，乃在尋求各因子間交互作用對輸出回應的最佳化，或避免其對輸出回應的負面影響(即不探討或分析各因子間的交互作用)，為一工程最佳化的策略。

本研究應用田口直交表結合變異數分析工具之目的為找出 CAE 模流分析初始選取之九個製程參數中，何者為數位相機前蓋薄殼射出成型製程中之顯著參數。田口品質方法的特色在於利用直交表規劃實驗以進行數據分析。使用直交表設計實驗可以使設計者以快速且經濟的方式，同時研究多個可控制因子對於品質特性之平均值及變異數的影響(楊景程, 2000)。本研究之田口直交表結合變異數分析實驗步驟包含以下幾個步驟：

### 1. 選定品質特性：

品質特性會直接影響產品品質，必須明確訂出欲改善的特性，最好選擇可測量的實數參數，使工程問題加以量化，達到可計量的目標。以本研究為例，品質特性為翹曲、收縮及頂出時體積收縮比，這些值越小表示品質越好。

### 2. 選擇控制因子和水準：

在此步驟中，可由設計者自由設定及選擇控制因子的水準，並可藉由調整這些控制因子的水準，找出最佳的參數組合，使品質特性符合產品要求。本研究的控制因子有九個包括：射出時間、射出壓力、保壓時間、保壓壓力、冷卻時間、冷卻液溫度、開模時間、熔融溫度及模具溫度。

### 3. 選用適當的直交表：

田口玄一提出直交表的目的是，在於利用較少的實驗次數（相對全因子實驗而言）來獲得所需之目的或結果。依控制因子及其水準的數目選定適當的直交表，安排完整的實驗計劃。本研究根據所使用的九個控制因子及三水準，因此採用  $L_{27}$  之直交表。

### 4. 執行實驗：

依照直交表的規劃執行實驗，紀錄並整理實驗的數據，以求出各因子的變動對品質特性和品質特性變異的效應，進而調整因子獲得一組新的設計值，使品質特性最接近理想機能。本研究透過 Moldflow CAE 模流分析軟體進行完整之模擬分析，取得實驗之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比數據。

### 5. 變異數分析：

變異數分析的首要目的是評估實驗誤差(Experiment Error)，在田口實驗計劃法中，我們常將交互作用視為實驗誤差的一部份，當因子效應夠大時（相較於實驗誤差），才認定此因子效應為「有意義的」或是「重要的」。有了實驗誤差後，即可評估每一個因子效應相對於實驗誤差的重要性。只有顯著的因子效應才會被用在預測的公式中。變異數分析應用統計檢定方式來辨別各別因素之影響效果，彌補田口品質方法無法研判各實驗參數對品質特性之影響能力及誤差程度。此階段的目的是在於找出對於品質特性翹曲、收縮及頂出時體積收縮比有顯著影響之製程參數。

### 3.3 迴歸分析

迴歸分析(Regression)為十九世紀末高登(Gorden)發表一項利用父母身體的特徵去預測子女身體特徵的一個研究。迴歸分析是一種統計分析方法，它利用一組預測變數(或稱獨立變數)的數值，對某一準則變數(或稱應變數)做預測，它也可以做為評估預測變數對準則變數的效用。迴歸的主要目的是做預測，目標是發展一種能以一個或多個預測變數的數值來做為應變數預測的方法。

#### 3.3.1 迴歸模型簡述

迴歸模型是解釋統計關係中兩個基本要素的表示法：

1. 表示反應變數(response variable)Y 隨著預測變數(predictor variable)X 做系統性變動的傾向。
2. 資料點在統計關係曲線(curve of statistical relationship)周圍散佈。

將上述兩種特性的觀念延伸即為：

1. 母體觀察值 Y 對不同水準的觀察值 X 存在一機率分配。
2. 此機率分配的平均數隨著 X 做某些系統性的變動。

這些機率分配的平均數與 X 的水準間具有一系統性關聯，此系統性關聯稱為 Y 對 X 的迴歸函數(regression function of Y on X)；至於迴歸函數的圖形則稱為迴歸曲線(regression curve)。如果預測變數不只一個，則迴歸模型必須擴充至更高的維度空間，假設現有兩個預測變數  $X_1$  及  $X_2$ ，則對每一( $X_1, X_2$ )的組合，迴歸模型都假設反應變數 Y 具有一機率分配；而此機率分配的平均數和預測變數  $X_1$  及  $X_2$  的系統性關係，則以迴歸曲面表示之。

在瞭解迴歸模型的含意後，接著就是迴歸模型的建構。通常在構造模型時必須將事實縮減至可控制的程度，所以大部分的迴歸模型中只考慮有限的幾個預測變數。在許多研究中，選取符合分析目的之某種意義上「好」的預測變數是相當重要的，因此做此種選擇的一個主要考慮方向是：模型中已有一些暫時性的預測變數後，一個新的預測變數再被選入能降低多少反應變數 Y 的未解釋變異？其他考慮方向包括：對所分析現象的因果關係，該變數是否為重要成因？該變數是否比其他待選變數更能精確、快速

或經濟地獲得？以及該變數可控制的程度？

在預測變數選定後，接著要考慮的是迴歸函數的形式。有時候，雖然相關的理論可以提供適當的函數形式，但大多數的迴歸函數形式是在資料蒐集之後再依經驗決定。在這樣情況下，直線或二次函數的模型通常被當做是初步的近似形式。事實上，即使資料背景或理論中能提供相關的函數形式，但這些簡單形式的迴歸函數仍有使用的價值，尤其當真正的函數形式十分複雜，但線性函數或二次函數可以合理近似時更是如此。另外，在構造迴歸模型時，通常限制模式僅涵蓋預測變數的某一區間或範圍。此範圍可能是研究之初就設定好的，或者是手中資料的範圍，若超出此範圍太遠，則迴歸函數的適用性將產生很大的疑問。

另外，既使反應變數 Y 與預測變數 X 之間存在統計關係，但這並不代表 X 與 Y 之間就具有因果關係。不論 X 和 Y 之間的統計關係多強，迴歸模型都不能讓我們做出兩者有「因果」關係型態的結論。此外，即使高度統計關係確實反映了因果關係，此因果關係也可能是反向的，即 Y 影響 X 而非即 X 影響 Y，所以統計關係和因果關係實質上的意義是不同的。

迴歸分析主要又可以分為線性迴歸和非線性迴歸，當線性迴歸式只有一個獨立變數時，稱為簡單線性迴歸，若超過一個以上的獨立變數時，則稱為多元線性迴歸。而迴歸模型無法呈現線性關係，如迴歸式中自變數具有多項式或交互作用項，亦即依變數 Y 與自變數 X 間無法表示為線性方程式，需以另種函數關係呈現。以下是分別對於各種迴歸模式做大略的介紹。

### 3.3.2 簡單線性迴歸分析(Simple regression analysis)

簡單線性迴歸 Anderson et. al(2006)關係式如下所示：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

上面的方程式中包括了兩個變數，x 是獨立變數，用來詮釋相依變數 y，而  $\beta_0$  和  $\beta_1$  為未知的參數， $\varepsilon$  為誤差項(error item)。誤差項通常被假設服從常態分布如下所示：

$$\varepsilon \in N(0, \sigma^2)$$

因此相依變數  $y$  在任意的  $x$  值下服從平均數為  $\beta_0 + \beta_1 x$  而變異數為  $\sigma^2$  的常態分配。

迴歸模型的參數稱為迴歸係數或迴歸參數(regression coefficients)。最小平方方法(Least squares method)是一個普遍常用且簡單估計迴歸參數的方法，其目的在於使殘差平方和達到最小，而所謂的殘差是指實際值與迴歸線之間的差距，殘差平方和利用式子可表示如下：

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 X_i)^2$$

其中  $(x_i, y_i)$  代表第  $i$  個觀察值， $i=1, 2, \dots, n$ ，將上述式子針對  $\beta_0$  與  $\beta_1$  進行一階偏微分後並令微分式皆為零，解聯立方程式後得到  $\beta_0$  與  $\beta_1$  的估計值分別為  $\hat{\beta}_0$  與  $\hat{\beta}_1$ ，因此所估算的線性迴歸式  $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$ 。當得出估計的迴歸方程式之後，即可求出預測值、擬合值和殘差等，並可評估模式擬合的好壞。

### 3.3.3 線性複迴歸分析(Multiple regression analysis)

多元線性迴歸式 Anderson et. al(2006)，採用的模式如下：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

其中  $\varepsilon$  的假設與在簡單線性迴歸中相同，當獨立變數不只一個，相依變數與多個獨立變數之間的線性關係式便稱為多元線性迴歸式。

如果有  $n$  組觀察值  $(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{kj}, y_j)$ ，其中  $j=1, 2, \dots, n$ ，可以利用矩陣方式表達如下：

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

根據上面的矩陣能夠將矩陣式改寫成如下簡式：

$$Y = XB + E$$

然後運用最小平方法找出  $B$  的估計值，也就是要使  $(Y - XB)^T(Y - XB)$  為最小值，對  $B$  微分後並令其等於 0，得到  $B$  的解為：

$$\hat{B} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

其中  $X^T$  和  $X^{-1}$  為矩陣  $X$  的轉置矩陣(transpose matrix)和反矩陣(inverse matrix)

複迴歸分析用多個自變數去解釋另一個依變數之迴歸分析，在實務上和依變數  $Y$  有關的自變數可能很多，因此只用一個自變數的迴歸方程式來解釋依變數  $Y$  的變異可能是不足夠的，所以在實務上通常會使用多個自變數來預測或解釋依變數  $Y$ 。在意義上使用多變數具有以下二個優點(黃文隆、黃龍，2003)：

1. 增加模型可解釋部份，降低隨機誤差。
2. 避免對依變數  $Y$  具有較大影響自變數的遺漏。

在瞭解線性迴歸模型的基本涵意與參數估計方式後，再進行線性迴歸分析前必須滿足以下的假設，如下所式：

1. 依變數延著迴歸線上的變異需服從常態分配。
2. 依變數延著迴歸線上的變異需為固定常數。
3. 依變數延著時間軸上的變異是序列獨立。
4. 依變數與自變數的關係為線性關係，若是發現依變數與自變數呈現非線性關係時，可以透過轉換(transform)成線性關係，再進行迴歸分析。
5. 多元迴歸式自變數間必需相互獨立。

### 3.3.4 多項式迴歸分析

而迴歸模型無法呈現線性關係時，將反應變數  $y$  的變動以預測變數  $x$  的多項式來解析的模式即稱為多項式迴歸模型，如下所示：

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2}^2 \dots + \beta_p X_{ip}^p + \varepsilon_i$$

其中  $i=1, 2, \dots, n$ ，多項式迴歸模型可視為一般線性迴歸模型的特例，在實務上此模型易於處理，對於原始資料的可以得到較佳的預測值，故成為最

常用的曲線反應模型。

多項式迴歸模型可包括自變項為二次項、三次項等等，以及自變項具有交互作用項的存在，下列為各種多項式迴歸模型範例：

1. 二項式多元迴歸模型

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \varepsilon_i \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n$$

2. 交互作用迴歸模型

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_{11} X_{i1}^2 + \beta_{22} X_{i2}^2 + \beta_{12} X_{i1} X_{i2} + \varepsilon_i$$

其中， $\beta_{12} X_{i1} X_{i2}$  稱為交互作用項式，表示  $X_{i1}$  和  $X_{i2}$  對  $Y_i$  的反應效應是交互影響的，迴歸係數  $\beta_{12}$  稱為交互作用係數(interaction effect coefficient)，故此迴歸模式又稱為交互作用迴歸模型(interaction regression model)。

多項式迴歸模型對於原始資料可反應較佳的預測值，但在使用上的仍有許多限制需注意：

1. 高階次數(三階以上)的多項式迴歸模型，當在資料範圍外作插補時，可能轉到非預期的方向，偏離預期的迴歸模型。因此在構造迴歸模型時，通常限制模式僅涵蓋預測變數的某一區間或範圍。此範圍可能是研究之初就設定好的，或者是手中資料的範圍，若超出此範圍太遠，則迴歸函數的適用性將產生很大的疑問。
2. 足夠高階(一般以超過五階項次)的多項式迴歸模型可以做到完全預測，預測的結果可與原始資料相同，但是採用高階多項式的迴歸函數，反而不能清楚的呈現  $X$  與  $Y$  之間的迴歸關聯，會導致歧異的插補結果。
3. 項次階數較低(如二階項次)的迴歸模型，提供關於反應函數預測之較基本訊息，與原始資料殘差較大，而項次階數較高(如三階、四階項次)的迴歸模型，在指定反應函數預測時可提供較精細的訊息，殘差較小且預測值近似原始資料。
4. 依據上述所示，若多項式的某一乘冪項保留，則所有相關較低階項次也

都必須保留其中，也就是不能去掉模型中某預測變數的二次項而保留其三次項或四項。

### 3.3.5 因果模型建構問題

無論採用非線性的神經網路或古典的多元迴歸建立模型，研究者經常面臨以下四類問題(葉怡成，2005):

1. **模型過度配適**: 所謂模型過度配適是指過多的自變數或模型過度訓練使的模型在訓練時誤差較小，而測試範例誤差則變大，一般而言，可使用逐步迴歸的方式來刪除較不重要的變數。
2. **自變數共線性(Multicollinearity)**: 模型中之自變數彼此有高度相關時，稱為共線性(multicollinearity)，共線性的現象可能會影響迴歸係數的信賴度和它的解釋能力，但可能不會對迴歸模型的預測能力產生影響，換言之，該模型還是可以用來預測。
3. **殘差變異不均(Heteroscedasticity)**: 殘差變異不均是指延著迴歸線或平面之殘差變異數不為固定數，由於殘差變異數不均估計之迴歸係數較不精準，估計之標準差為偏誤的可能為高估或低估，因此判定係數與標準差為不可信賴，對個別迴歸之顯著性也不能確定。
4. **殘差序列相關(Serial correlation)**: 迴歸分析的假設之一是殘差值是獨立，統計獨立的特色為相臨殘值之間為 0 相關，換言之，對所有的  $k > 0$ ， $ACF(k)=0$ ，其中  $k$  值為殘值之間的滯延。殘差序列相關通常為一階，使用 DW 統計量即可偵測出，當模型殘差有顯著一階相關時  $ACF(1)$  不等於 0，故估計之判定係數、標準差、與迴歸係數個別  $t$  統計量為不可信賴。

### 3.3.6 自變數選擇的技術(Variables-selection techniques)

1. **所有可能迴歸模式(all possible regressions)**: 顧名思義，此技術是考慮所有可能的迴歸模式。例如，在迴歸模式中有三個自變數則考慮所有可能的迴歸模式之組合共有八種，研究者可定義一種或多種判定準則，選取一種變數組合來建立最佳迴歸模型。
2. **最大  $R^2$  增進法(Maximum  $R^2$  improvement)**: 當自變數太多時所有

可能迴歸模式在計算上相當不易，最大  $R^2$  增進法類似所有可能迴歸模式，其首先檢查所有簡單線性迴歸模式的  $R^2$  值最大者，其次在考慮其他自變數並檢查那一個自變數加入模式後  $R^2$  值最大，再將此自變數納入迴歸模式中，當兩個自變數的迴歸模式建立後比較在迴歸模式中自變數和不在模式中的自變數，並決定移出一個自變數取代另一個自變數所得到的  $R^2$  值是否更大。

3. **逐步迴歸法(Stepwise regression):** 每次只挑選一個貢獻最大的自變數進入迴歸模式，而後逐次挑選自變數直到無顯著貢獻為止。
4. **後退消去法(Backword eliminating):** 所有變數進入迴歸模式，而後逐次刪除貢獻較小之自變數，直到所有自變數皆有顯著貢獻為止。
5. **前進選擇法(Forward selection):** 類似逐步迴歸，但採用不同的判別統計量。

### 3.3.7 殘差分析

#### 1. 常態性的假設檢定

##### (1) 繪圖法:

- a.  $e_i$  對  $X$  之圖形是否具有齊變異 ( $Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$ )。
- b.  $\varepsilon_i$  對  $\hat{y}$  之圖型：應表示  $e_i$  與  $\hat{y}$  無關。
- c. 繪製殘差常態分配圖(normal probability plot)。

#### 2. 殘差之獨立性檢定(針對有時間順序關係)

##### (1) 檢定殘差獨立性檢定方法(Durbin-Watontest)：

$$DW = \frac{\sum_{t=1}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

DW 統計量介於 0 到 4 之間，一般而言 DW 統計量在 2 到 2.5 之間，表該模型無一階自我相關，DW 統計量偏向 0 和 4 之間，表示模型有正自我相關與負自我相關。

### 3.3.8 判斷模型的適切性

#### 1. 迴歸模型係數顯著性檢定

線性迴歸係數顯著性檢定是針對迴歸係數  $\beta_j$  做顯著性測試，即  $H_0: \beta_i = 0$  VS  $H_1: \beta_i \neq 0$  迴歸係數顯著性以  $t$  統計量判定公式如下：

$$t_0 = \frac{b_i}{se(b_i)}$$

當  $|t_0| > t_{\alpha/2, n-p-1}$  時表示此迴歸係數顯著，其中  $n$  為收集到範例資料數量， $p$  為欲估計模型參數之數目。

#### 2. 變異數分析

迴歸模型顯著性檢定是指因變數  $y$  與自變數  $x$  間是否存在線性關係之測試，即檢定  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_i = 0$  VS  $H_1: \beta_i$  不全為 0。迴歸模型顯著性以  $F$  統計量判定為：

$$F_0 = \frac{SSR / p}{SSE / (n - p - 1)} = \frac{MSR}{MSE}$$

其中  $MSR = \frac{SSR}{p}$  為解釋均方差， $MSE = \frac{SSE}{n - p - 1}$  為未解釋均方差，由上式可知  $F$  統計量的義意相當於解釋均方差與未解釋均方差之比例值，因此  $F$  統計量越大，代表自變數與因變數越可能存在線性關係。

### 3.3.9 小結

從文獻整理中瞭解到迴歸分析的具有三大功能，首先是描述：描述  $x$  如何影響  $y$ 。這是所有的文獻都會出現的部份，而且將會被當成下一個步驟「控制」的必要參考因素，而且都會加以與實際的現況映對比較。二是預測：先給定預測變數  $x$  的值，才能由迴歸式求  $y$  的值，但要特別注意預測的適用範圍，預測是迴歸最常被應用的方式大部份的文獻都會預測為主題來介紹迴歸。還有就是屬於控制與改善：控制欲得到的輸出  $y$ ，再求應放入什麼樣的輸入  $x$ ，在描述完成描述  $x$  如何影響  $y$  之後，最有價值的方案就是反向思考，這樣的反應在實際的情境是否還有可改善空間，如果改善了  $x$  之後，是不是就能改善結果，然後針對問題提出改善建議。

而最後本研究是採用以上迴歸分析介紹中的非線性迴歸分析之多項式迴歸分析，亦即加入自變項間的交互作用項以及平方項，希望能透過分析建立一個迴歸模式來預測製程參數(自變項)與各品質參數(依變項)之間的關係。

### 3.4 資料包絡法

一般經濟學理論多數利用預設的生產函數求得生產可能曲線，以評估組的生產力。所謂生產可能曲線(或稱包絡線)，係在各種投入下其最大可能產出的連線。凡落在生產可能曲線上的點，稱為有效率的生產點，其餘落在生產可能曲線外的點，則稱為無效率的生產點。而估計生產可能曲線的方法，除了參數法，尚有資料包絡法(DEA)；資料包絡法本質上是一種數學規劃模式，利用觀察而得的資料，計算出組織內各決策單位 (Decision Making Units, DMU)之相對效率。利用線性規劃評估比較決策單位之效率，此觀念來自於 Farrell(1957)提出以生產前緣(Production Frontier)作為生產效率衡量的基礎，之後美國 Charnes、Cooper 與 Rhodes 三位學者於 1978 年所發展出的綜合性績效衡量指標，其 CCR 模型促使資料包絡分析法(DEA)的建立，並成為目前評估相對效率的一項重要而有效的管理科學方法論。

在經濟學的理论中，於生產技術固定的條件下，各種可能投入與產出所形成的集合，稱之為「生產可能集合」 (Production Possibility Set)；而各種投入組合能使產出最大的集合，稱為生產可能集合的「效率前緣」 (Efficiency Frontier)；各投入組合與效率前緣間所形成的數學關係，稱之為「生產函數」 (Production Function)。包絡曲線 (Envelope)所顯示出來的意義，即是在所有生產可能集合中最有利組合點所形成的邊界。

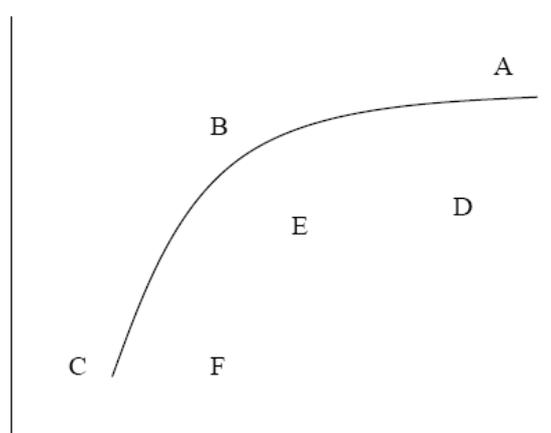


圖 3.26、包絡曲線圖

若廠商投入與產出的組合落於效率前緣上，則視該廠商為“有效率”的廠商，若廠商投入與產出的組合落於效率前緣內，則視該廠商為“無效率”的廠商。如圖 3.26，假設 A、B、C 所構成的曲線於包絡曲線，其代表的即是相對有效率的廠商，其他如 D、E、F 等點由於落於包絡曲線所形成的集合內，其所代表的即是相對無效率的廠商。為了更深入瞭解 DEA 模式，本文先從 Farrell 模式談起，其次再探討 DEA 模式。

### 3.4.1 Farrell 模式

資料包絡法是源自於 Farrell 在 1957 年以片段性生產曲線估計邊界的效率衡量為概念 Farrell (1957) 將效率區分為技術效率 (Technical Efficiency, TE) 及配置效率 (Allocative Efficiency, AE):

1. **技術效率:** 廠商在投入要素的量固定之下，所可以生產之最大產量之能力。
2. **配置效率:** 廠商在生產技術與投入要素之相對價格已給定的情況下，以最適當之投入去生產產品之能力。

此種評估效率模式有分為投入導向及產出導向兩種，所謂投入導向是指在特定產出水準下，使用最低的投入；產出導向則是在投入既定下，可獲得最大的產出。

Farrell 理論基於三個基本假設：第一、生產前緣 (Production Frontier)：生產前緣是由最具效率的生產點連接而成，任一生產點與生產前緣之差異，表該生產點無效率的大小。即廠商利用現有的技術水準，配合即定的要素組合，若生產達到最大產出水準時，該生產點會落在生產前緣上。若該生產點不在生產前緣上，即表示該生產點無效率。第二、固定規模報酬 (Constant Returns to Scale)：此理論假設廠商之生產技術為固定規模報酬。第三、生產前緣凸向原點 (Convex)，每點斜率皆不為正。

假設有一廠商使用兩種投入 ( $X_1, X_2$ )，生產單一產品為  $Y$ ，此廠商為固定規模報酬之廠商， $UU'$  為等產量曲線，代表生產一單位的  $Y$ ，所需投入 ( $X_1, X_2$ ) 的最小可能組合，線上每一點皆具完全技術效率，如圖 3.27 所示。若生產組合落在  $UU'$  的右上方，如  $Q$  點，則表示其不具有技術效率，

因為在 P 點的生產組合時也可以生產出與 Q 點相同的產量，因此 Q 點的技術效率可定義為：

$$\begin{aligned} TE &= OP/OQ \\ &= 1 - PQ/OQ \\ 0 &\leq TE \leq 1 \end{aligned}$$

當  $OP/OQ = 1$  時，則代表此廠商為具有完全技術效率 (Fully Technically) 之廠商，其觀察值會落在  $UU'$  上(如 P 點)。若  $OP/OQ < 1$  時，則表示此廠商為不具完全技術效率。

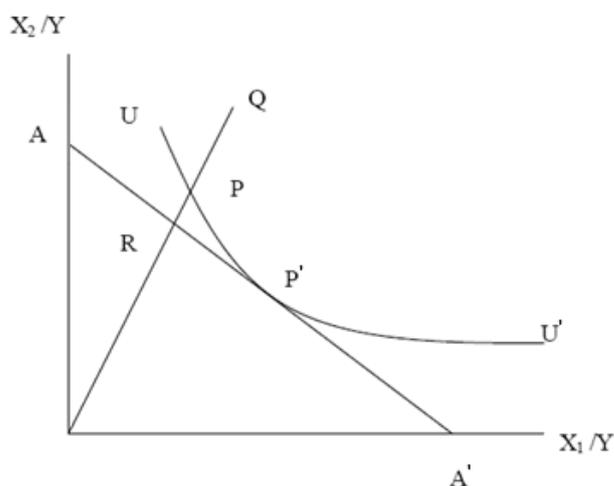


圖 3.27、技術效率與配置效率

若此時廠商所面對的要素市場為完全競爭市場時，則投入要素的相對價格比為  $AA'$  之斜率，由此可定義 Q 點之配置效率(AE)為  $OR/OP$ ，而  $RP$  表示其配置無效率之部份，並可定義總經濟效率( Total Economic Efficiency, EE):

$$EE = OR / OQ$$

由此也可發現總效率是技術效率與配置效率之乘積:

$$\begin{aligned} TE \times AE &= (OP / OQ) \times (OR / OP) \\ &= (OR / OQ) \\ &= EE \end{aligned}$$

因此圖中  $P'$  點則表示其不但具有技術效率也具有配置效率。

### 3.4.2 DEA 模型理論

Farrell(1957)提出生產前緣(Frontier)，衡量效率之觀念，利用「非預設生產函數」代替「預設函數」來預估效率值，奠定了資料包絡分析法的理論基礎。而資料包絡分析法(Data Envelopment Analysis；DEA)，起源於 Charnes, Cooper and Rhodes(1978)所提出之 CCR 模式，討論規模報酬為固定之情形。其後 Banker, Charnes and Cooper(1984)將 CCR 模式中要求規模報酬為固定之限制取消，發展出規模報酬可變動下效率值之計算模式，提出 BCC 模式。以下則分別詳細介紹此兩種模式：

#### 3.4.2.1 CCR 模式

Farrell 於 1957 年提出生產前緣的概念後，1978 年由 Charnes、Cooper 與 Rhodes 利用 Farrell 效率衡量模式之觀點，利用多項投入及多項產出效率衡量的概念，在固定規模報酬(CRS)假設下，探討投入導向與產出導向二種模式，尋找出最大產出或最小投入為邊界，將受評估之各項產出與投入因子利用數學規劃分別加以線性組合，以兩個線性組合之比值代表受評估單位之效率，各個受評估之效率值介於 0 與 1 之間。並將此定名為 DEA 法。DEA 模型之 CCR 模式可表示如下：

假設有 K 個被評估的決策單位，使用 N 種投入，生產 M 種產出，當評估第 K 個 DMU 之效率值時，以  $V_n$  與  $U_m$  分別代表第 n 項投入與第 m 產出的未知權重，同時計算產出與投入的比值，求得各單位的績效值，如下所示：

$$\text{Max } H_K = \frac{\sum_{m=1}^M U_m Y_{k'm}}{\sum_{n=1}^N V_n X_{k'n}} \dots\dots\dots(3-1)$$

s.t.

$$\frac{\sum_{m=1}^M U_m Y_{km}}{\sum_{n=1}^N V_n X_{kn}} \leq 1$$

$$U_m, V_n \geq \varepsilon > 0$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

其中

$Y_{km}$ : 表第 k 個 DMU 的第 m 項產出值

$X_{kn}$ : 表第 k 個 DMU 的第 n 項投入值

$U_m$ : 表第 k 個 DMU 的第 m 個產出值的加權值

$V_n$ : 表第 k 個 DMU 的第 n 個投入值的加權值

$H_k$ : 第 k 個 DMU 的相對效率值

$\varepsilon$ : 表一極小的正數

本模型是在限制各個 DMU 之效率在 0 與 1 之間，尋找出使 HK' 最大之 V 與 U 的權數，HK' 之最大值為 1。各個 DMU 均會進入目標及限制函數中，所有的限制條件均相同，因此所得到的各 DMU 之效率值可互相比，即所謂的相對效率。 $U_m, V_n \geq \varepsilon$ ，表示每一項投入與產出均不能忽略不計。

由於(3-1)式是分數規劃模式(fractional programming)也就是非線性規劃，故在求解上並不容易，因此將其轉變為線性規劃模式來求解，從經濟角度共可分為下列二種模式，說明如下：

1. 產出導向模式：在投入項加權組合值為 1 的限制下，極大化產出項的效率值(HK)。

$$\text{Max } H_{K'} = \sum_{m=1}^M U_m Y_{k'm} \dots\dots\dots(3-2)$$

s.t.

$$\sum_{m=1}^M U_m Y_{km} - \sum_{n=1}^N V_n X_{kn} \leq 0$$

$$\sum_{n=1}^N V_n X_{k'n} = 1$$

$$U_m, V_n \geq \varepsilon$$

$$m = 1, 2, \dots M$$

$$n = 1, 2, \dots N$$

$$k = 1, 2, \dots K$$

2. 投入導向模式：在產出項加權組合為 1 的限制下，極小化投入項的效率值(HK)。

$$\text{Min } H_{K'} = \sum_{n=1}^N V_n X_{k'n} \dots\dots\dots(3-3)$$

s.t.

$$\sum_{m=1}^M U_m Y_{km} - \sum_{n=1}^N V_n X_{kn} \leq 0$$

$$\sum_{n=1}^N V_n X_{k'n} = 1$$

$$U_m, V_n \geq \varepsilon$$

$$m = 1, 2, \dots M$$

$$n = 1, 2, \dots N$$

$$k = 1, 2, \dots K$$

CCR 模式分為二部份，一部份為純粹考慮技術上資源是否恰當，為技術效率衡量指標。另一部份為考慮生產規模，以規模效率作為效率衡量的指標。若整體效率等於 1，則表示無論是純粹技術面或生產規模皆已達最具效率；若整體效率小於 1，則表示無效率，可能是由技術無效率或未達最適規模所導致的，亦或二者皆無效率。

### 3.4.2.1 BCC 模式

上述 CCR 模式與 Farrell 一樣是假設固定規模報酬狀態下，而計算出的 DMU 效率值。但當規模為非固定時，可能由於運作規模不當，而造成無效率。因此由 Banker、Charnes 及 Cooper 於 1984 年針對 CCR 模式，擴充為以變動規模報酬的觀念，探討有關技術效率、規模效率、規模報酬等問題，簡稱為 BCC 模式。我們直接以線性規劃模式說明如下：

$$\text{Max } H_{K'} = \sum_{m=1}^M U_m Y_{k'm} - \alpha \dots\dots\dots(3-4)$$

s.t.

$$\sum_{n=1}^N V_n X_{kn} = 1$$

$$\sum_{m=1}^M U_m Y_{k'm} - \sum_{n=1}^N V_n X_{k'n} - \alpha \leq 0$$

$$U_m, V_n \geq \varepsilon > 0$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

利用對偶理論轉換，並同時加入  $\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1$  的新限制條件：

$$\text{Min } H_{K'} = \theta_{k'} - \varepsilon \left( \sum_{m=1}^M S_{k'm} + \sum_{n=1}^N S_{k'n} \right) \dots\dots\dots(3-5)$$

s.t.

$$\theta_{k'} X_{k'n} - \sum_{k=1}^K \lambda_k X_{kn} - S_{k'n} = 0$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k Y_{km} - S_{k'm} = Y_{k'm}$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1$$

$$\lambda_k, S_{k'm}, S_{k'n} \geq 0$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

此式最大的差別在於  $\lambda_k$  的總和被限制為 1。這個動作在移除 CCR 模型中 DMU 為固定規模報酬的假設限制。因此，BCC 模型允許 DMU 為變動規模報酬且可衡量每個 DMU 的規模效率與純技術效率。

DEA 法是以 CCR 模式之固定規模報酬來衡量 DMU 的整體效率，即將所有的 DMU 做相互比較，而 BCC 模式是以變動規模報酬來衡量 DMU 的技術效率，即將條件相當的 DMU 分別作比較，但其中存在各 DMU 是否處於適當的生產規模下的差異。因此二者合併使用下，可計算出整體技術效率 ÷ 技術效率 = 規模效率。由此可推測 DMU 整體無效率的原因，一方面是管理不佳所造成的資源浪費，另一方面是 DMU 處於最適規模下所造成的生產規模上的無效率。

### 3.4.3 DEA 之特性

1. **可處理多元投入、多元產出之評估問題**：DEA 易於處理多元投入多元產出之評估問題，而無須面臨預設生產函數的認定及參數估計的困難，在實際運用上較為可行。
2. **單位不變性(Units Invariance)**：只要受評估之 DMU 使用相同的計量單位，則各目標函數不受投入產出計量單位的影響。

3. **可以單一綜合指標衡量效率：**以 DEA 評估效率的結果是一個綜合指標，可作為描述經濟學上總要素生產力(Total Factor Productivity)之概念，容易對受評估單位作比較。
4. **權重之決定不受人為主觀因素的影響：**DEA 模式中之權數值係由數學規劃產生，無人為主觀的成份，因而能滿足立足點之公平原則，且在設定的評估方式下任何一組受評單位均無法以主觀判斷找到另一組權重，而使其效率大於 DEA 模式的評估結果。
5. **可同時處理比率資料及非比率資料：**DEA 不但可處理比率尺度(Ratio Scale)資料，亦可同時處理順序尺度(Ordinal Scale)資料，使得其在資料處理上較具彈性。
6. **可處理組織外之環境變數：**基於 DEA 方法可同時處理比率資料及非比率資料的特性，因而對於組織外之環境變數亦可加以處理，亦即可同時評估不同環境下 DMU 之效率。
7. **可獲得資源使用狀況之相關資訊：**由 DEA 模式中差額變數分析及效率值分析，可瞭解組織資源使用狀況，進而提供管理者擬定決策時之參考力。

#### 3.4.4 DEA 之限制

1. DEA 無法處理產出項為負值的情形。
2. 投入與產出項目不宜過多，易使大多數 DMU 之效率值為 1。
3. 易受資料外圍者的影響，故樣本間的差異太大時，會導致結果的改變。
4. DMU 之同質性程度會影響分析結果，因同質性愈高，其評估效果愈好。
5. 樣本中若有極端值(outlier)出現，將造成結果有顯著變動或失誤。
6. 所求得之效率值為一相對效率值，並非絕對效率值。
7. DEA 模式未考慮隨機誤差，所以認為所有誤差皆是無效率產生，所以資料準確性愈高，求得的評估效率才能愈正確。
8. DEA 模式對 DMU 之效率值並未有進一步排序，且必須進一步調查方能找出真正無效率之因素。

### 3.4.5 DEA 之應用程序

為能有效運用 DEA 至實際問題上，Golany and Roll(1989)提出一系統化的 DEA 應用程序整體性架構，該應用程序僅能作為一般化準則，實際應用時，尚須配合研究目的調整，此系統化程序包含三個主要階段，詳細說明如下：

1. **定義並選擇進行分析之 DMUs**：運用 DEA 除須先找出一組具同質性的 DMUs 外，尚須確認 DMUs 間差異。但愈多 DMUs 進行分析，不僅會使同質性降低，而且分析結果亦會受外生因素影響，故可運用「DMU 之數量至少應為投入與產出項目個數總和的兩倍」的經驗法則(Golany and Roll,1989)，決定 DMUs 數量。另須配合研究目的及所需 DMUs 數量，決定研究期間的長短。
2. **決定攸關且適切的投入與產出變數**：初步選擇時，考慮的範圍越廣越好。但如果引入大量變項，會釋放 DMUs 間的大部分差異，導致多數 DMUs 會具高效率，而失去評估的意義。一般而言，模式中投入與產出變數之選擇可以相關研究文獻、管理經驗判斷篩選法、非 DEA 之數量方法及敏感度分析實施變數篩選。
3. **應用 DEA 模式及分析結果**：DMUs、投入/產出變項選擇與效率衡量有密切相關。因此，最初的選擇並不能保證最符合分析目的，必須反覆執行到無確切停止的條件存在。經由不同的 DMUs、變項或模式得出多組結果，供實際應用參考。在進行實證分析時，通常應包含下列分析結果：
  - (1)效率值分析：瞭解造成無效率 DMUs 之原因。
  - (2)參考群體分析：作為無效率 DMUs 競爭比較之參考。
  - (3)差額變數分析：顯示無效率 DMU 之改善方向與幅度。
  - (4)目標改善分析：提供無效率 DMU 之改善水準。

根據以上 DEA 應用程序之說明，本研究資料包絡法分析所應用的程序主要為：1、定義並選擇進行分析之 DMUs；2、決定適切的投入與產出變數；3、整體效率值分析；4、參考群體分析。透過分析結果衡量出最有效率的決策單位。

## 第四章 實驗模擬與分析

### 4.1 田口直交表結合變異數分析

#### 4.1.1 選定欲研究之製程參數及品質特性

本研究透過 Solidworks 軟體建立數位相機前蓋之薄殼模型，在匯入 Moldflow 模流分析軟體進行網格化及模流分析，選用之塑膠材料為美國奇異公司所生產之型號 GE Cycloy C2950 PC/ABS 之塑料，模具材料則採用 TOOL STEEL P-20，模具機台為 Milacron 公司所生產之型號 Roboshot 330i 330 tons 8.90 oz (44mm)High Spd/Pres 進行塑膠射出成型最佳化翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之分析。首先，我們選取射出成型製程中重要的九個製程參數及三個品質特性進行 Moldflow 之模擬實驗，如表 4.1。首先選用田口直交表  $L_{27}$  進行模擬實驗，接著透過變異數分析找出與品質特性具顯著相關之參數進行後續的最佳化分析，期望找出使得翹曲、收縮及頂出時體積收縮比最小的參數組合。其中，實驗數值的測量透過擷取數位相機前蓋薄殼模型的四個角點之節點值(以 N1991、N1962、N1955、N2261 表示) 作為翹曲實驗數據及四個角點所連成的邊長(以 E1、E2、E3、E4 表示)作為收縮之實驗數據，及模型頂出時體積收縮比之最大值作為實驗數據。因此，測量結果包含四個翹曲測量值、四個收縮測量值及一個頂出時體積收縮比。

表 4.1、本研究選用之製程參數及品質特性

射出成型參數	射出成型參數	參數代碼
Injection Time	射出時間	INT
Injection Pressure	射出壓力	INP
Packing Pressure	保壓壓力	PP
Packing Time	保壓時間	PT
Cooling Time	冷卻時間	COTI
Coolant Temperature	冷卻劑溫度	COTE
Mold-Open Time	開模時間	MOO
Melt Temperature	熔劑溫度	MET
Mold Temperature	模具溫度	MOTE
品質特性	品質特性	特性代碼
Warpage	翹曲	N1991, N1962, N1955, N2261
Shrinkage	收縮	E1, E2, E3, E4
Volumetric Shrinkage at ejection	頂出時體積收縮比	Volume

#### 4.1.2 選定因子水準

選定欲研究之製程參數及品質特性之後，將根據 Moldflow 之參數預設值訂定各參數之因子水準，如表 4.2。本實驗中共有九個實驗因子，設定每個實驗因子具有三個水準。因此本研究選用  $L_{27}$  直交表，如表 4.3 所示。

表 4.2、本研究之各參數因子水準

射出成型參數	射出成形參數	參數簡稱	L1	L2	L3
Injection Time(S)	射出時間	INT	0.5	<b>1</b>	1.5
Injection Pressure(Mpa)	射出壓力	INP	100	<b>120</b>	140
Packing Pressurc(MPa)	保壓壓力	PP	80	<b>100</b>	120
Packing Time(S)	保壓時間	PT	7.5	<b>10</b>	12.5
Cooling Time(S)	冷卻時間	COTI	14	<b>19</b>	24
Coolant Temperature(°C)	冷卻劑溫度	COTE	20	<b>25</b>	30
Mold-Open Time(S)	開模時間	MOO	4	<b>5</b>	6
Melt Temperature(°C)	熔劑溫度	MET	270	<b>275</b>	280
Mold Temperature(°C)	模穴溫度	MOTE	65	<b>70</b>	75

由於 PC/ABS 塑膠材料的熔劑溫度建議值為  $255^{\circ}\text{C} \sim 295^{\circ}\text{C}$  之間以及模具溫度建議值為  $60^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$  之間。因此，熔劑溫度和模具溫度以參數預設值  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  之界限作為因子水準選取的範圍，而模具其餘的七個製程參數之 L1 及 L3 因子水準範圍則以上表所示。接著，將直交表對應之參數設定值如表 4.4 代入 Moldflow 進行模擬分析，取得翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之實驗值，其實驗結果如表 4.5 所示。

表 4.3、本研究之  $L_{27}$  直交表

$L_{27}$	INT	INP	PP	PT	COTI	COTE	MOO	MET	MOTE
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1

表 4.4、本研究之  $L_{27}$  直交表對應之參數組合

$L_{27}$	INT	INP	PP	PT	COTI	COTE	MOO	MET	MOTE
1	0.5	100	80	7.5	14	20	4	270	65
2	0.5	100	80	7.5	19	25	5	275	70
3	0.5	100	80	7.5	24	30	6	280	75
4	0.5	120	100	10	14	20	4	275	70
5	0.5	120	100	10	19	25	5	280	75
6	0.5	120	100	10	24	30	6	270	65
7	0.5	140	120	12.5	14	20	4	280	75
8	0.5	140	120	12.5	19	25	5	270	65
9	0.5	140	120	12.5	24	30	6	275	70
10	1	100	100	12.5	14	25	6	270	70
11	1	100	100	12.5	19	30	4	275	75
12	1	100	100	12.5	24	20	5	280	65
13	1	120	120	7.5	14	25	6	275	75
14	1	120	120	7.5	19	30	4	280	65
15	1	120	120	7.5	24	20	5	270	70
16	1	140	80	10	14	25	6	280	65
17	1	140	80	10	19	30	4	270	70
18	1	140	80	10	24	20	5	275	75
19	1.5	100	120	10	14	30	5	270	75
20	1.5	100	120	10	19	20	6	275	65
21	1.5	100	120	10	24	25	4	280	70
22	1.5	120	80	12.5	14	30	5	275	65
23	1.5	120	80	12.5	19	20	6	280	70
24	1.5	120	80	12.5	24	25	4	270	75
25	1.5	140	100	7.5	14	30	5	280	70
26	1.5	140	100	7.5	19	20	6	270	75
27	1.5	140	100	7.5	24	25	4	275	65

表 4.5、實驗 27 組之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比模擬結果

	N1991	N1962	N1955	N2261	E1	E2	E3	E4	Volume
1	0.2222	0.2118	0.2151	0.203	0.4014	0.1292	0.3728	0.171	4.384
2	0.2137	0.2027	0.2077	0.1953	0.3856	0.1226	0.3598	0.1619	4.346
3	0.2185	0.2082	0.2126	0.2001	0.395	0.1273	0.3681	0.1666	4.379
4	0.1436	0.1322	0.1392	0.125	0.2532	0.0529	0.2346	0.0913	3.281
5	0.1513	0.1416	0.1466	0.133	0.2675	0.0643	0.2475	0.1006	3.468
6	0.1416	0.1301	0.137	0.1223	0.2491	0.0516	0.2308	0.0896	3.154
7	0.1032	0.0902	0.098	0.0821	0.173	0.0035	0.1579	0.0379	3.936
8	0.0927	0.0798	0.0877	0.0693	0.1497	-0.0153	0.1321	0.0187	4.095
9	0.0986	0.0867	0.0947	0.0783	0.165	-0.0014	0.1503	0.0341	3.973
10	0.1602	0.1564	0.1612	0.1521	0.2877	0.0609	0.2717	0.1046	4.337
11	0.1455	0.1416	0.1412	0.1356	0.262	0.0564	0.2432	0.0959	3.938
12	0.1414	0.1365	0.1354	0.1301	0.2526	0.0504	0.2309	0.0896	3.989
13	0.0697	0.0593	0.0776	0.0559	0.083	-0.0475	0.0739	-0.013	2.063
14	0.0677	0.0593	0.0718	0.0542	0.091	-0.0379	0.0797	-0.0041	2.018
15	0.0735	0.0618	0.0824	0.0575	0.0873	-0.0491	0.0779	-0.0126	2.086
16	0.1367	0.1358	0.1243	0.1288	0.2529	0.0685	0.2254	0.1026	3.593
17	0.1352	0.134	0.1249	0.1289	0.2506	0.0647	0.2261	0.0994	3.369
18	0.131	0.1303	0.1192	0.1246	0.243	0.059	0.2161	0.0937	3.526
19	0.1446	0.1537	0.1601	0.1062	0.2521	0.0288	0.2252	0.0535	7.185
20	0.1339	0.1483	0.1488	0.1027	0.247	0.0297	0.2139	0.0475	6.509
21	0.1216	0.1423	0.144	0.1021	0.2177	0.0251	0.1904	0.0434	6.474
22	0.1563	0.1809	0.1834	0.1507	0.3036	0.0629	0.2963	0.0983	7.855
23	0.15	0.1893	0.1672	0.1452	0.3118	0.0546	0.2718	0.0897	7.12
24	0.1786	0.2015	0.1828	0.1496	0.35	0.0686	0.3018	0.106	7.41
25	0.0673	0.0611	0.0939	0.0325	0.0558	-0.0288	0.0621	-0.0166	3.294
26	0.0951	0.0826	0.1094	0.051	0.1015	-0.0014	0.1003	-0.0039	3.055
27	0.0794	0.0698	0.0991	0.0393	0.0651	-0.0164	0.0728	-0.0138	3.21

### 4.1.3 變異數分析

透過上個階段取得實驗數據結果之後，我們須進一步找尋九個參數因子中哪些是影響品質特性的顯著因子。故採用變異數分析法來做顯著因子的搜尋。表 4.6~ 表 4.14 為翹曲、收縮及頂出時體積收縮比實驗值作為依變數，而各以九個製程因數為反應因子所得之變異數分析表。

表 4.6、射出時間之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.007	2	.003	1.781	.190
	組內	.044	24	.002		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.004	2	.002	.924	.411
	組內	.058	24	.002		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.006	2	.003	1.785	.189
	組內	.039	24	.002		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.006	2	.003	1.454	.253
	組內	.053	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.026	2	.013	1.279	.296
	組內	.240	24	.010		
	總和	.266	26			
E2	組間	.007	2	.004	1.482	.247
	組內	.058	24	.002		
	總和	.065	26			
E3	組間	.024	2	.012	1.467	.251
	組內	.197	24	.008		
	總和	.221	26			
E4	組間	.013	2	.006	2.173	.136
	組內	.070	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	32.125	2	16.062	9.526	.001
	組內	40.466	24	1.686		
	總和	72.591	26			

表 4.7、射出壓力之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.018	2	.009	6.713	.005
	組內	.032	24	.001		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.022	2	.011	6.585	.005
	組內	.040	24	.002		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.019	2	.009	8.566	.002
	組內	.026	24	.001		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.020	2	.010	5.861	.008
	組內	.040	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.087	2	.043	5.797	.009
	組內	.179	24	.007		
	總和	.266	26			
E2	組間	.016	2	.008	3.825	.036
	組內	.049	24	.002		
	總和	.065	26			
E3	組間	.072	2	.036	5.813	.009
	組內	.149	24	.006		
	總和	.221	26			
E4	組間	.020	2	.010	3.719	.039
	組內	.063	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	10.119	2	5.059	1.944	.165
	組內	62.472	24	2.603		
	總和	72.591	26			

表 4.8、保壓壓力之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.023	2	.012	10.197	.001
	組內	.027	24	.001		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.031	2	.015	11.613	.000
	組內	.032	24	.001		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.019	2	.009	8.731	.001
	組內	.026	24	.001		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.030	2	.015	12.279	.000
	組內	.030	24	.001		
	總和	.060	26			
E1	組間	.124	2	.062	10.550	.001
	組內	.141	24	.006		
	總和	.266	26			
E2	組間	.038	2	.019	16.636	.000
	組內	.027	24	.001		
	總和	.065	26			
E3	組間	.105	2	.052	10.889	.000
	組內	.116	24	.005		
	總和	.221	26			
E4	組間	.044	2	.022	13.919	.000
	組內	.038	24	.002		
	總和	.082	26			
Volume	組間	11.310	2	5.655	2.215	.131
	組內	61.280	24	2.553		
	總和	72.591	26			

表 4.9、保壓時間之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.001	2	.001	.287	.753
	組內	.049	24	.002		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.004	2	.002	.872	.431
	組內	.058	24	.002		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.000	2	.000	.124	.884
	組內	.044	24	.002		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.003	2	.001	.591	.562
	組內	.057	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.025	2	.012	1.237	.308
	組內	.241	24	.010		
	總和	.266	26			
E2	組間	.003	2	.002	.664	.524
	組內	.062	24	.003		
	總和	.065	26			
E3	組間	.016	2	.008	.950	.401
	組內	.204	24	.009		
	總和	.221	26			
E4	組間	.005	2	.003	.813	.455
	組內	.077	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	18.225	2	9.112	4.023	.031
	組內	54.366	24	2.265		
	總和	72.591	26			

表 4.10、冷卻時間之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.000	2	.000	.006	.994
	組內	.051	24	.002		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.000	2	.000	.002	.998
	組內	.063	24	.003		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.000	2	.000	.043	.958
	組內	.044	24	.002		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.000	2	.000	.012	.988
	組內	.060	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.000	2	.000	.005	.995
	組內	.266	24	.011		
	總和	.266	26			
E2	組間	.000	2	.000	.005	.995
	組內	.065	24	.003		
	總和	.065	26			
E3	組間	.000	2	.000	.020	.980
	組內	.220	24	.009		
	總和	.221	26			
E4	組間	.000	2	.000	.009	.991
	組內	.082	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	.263	2	.132	.044	.957
	組內	72.328	24	3.014		
	總和	72.591	26			

表 4.11、冷卻液溫度之變異數分析

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.000	2	.000	.011	.989
	組內	.051	24	.002		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.000	2	.000	.014	.986
	組內	.063	24	.003		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.000	2	.000	.004	.996
	組內	.045	24	.002		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.000	2	.000	.003	.997
	組內	.060	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.000	2	.000	.006	.994
	組內	.266	24	.011		
	總和	.266	26			
E2	組間	.000	2	.000	.001	.999
	組內	.065	24	.003		
	總和	.065	26			
E3	組間	.000	2	.000	.000	1.000
	組內	.221	24	.009		
	總和	.221	26			
E4	組間	.000	2	.000	.001	.999
	組內	.082	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	.107	2	.054	.018	.982
	組內	72.484	24	3.020		
	總和	72.591	26			

表 4.12、開模時間之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.000	2	.000	.015	.985
	組內	.051	24	.002		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.000	2	.000	.026	.974
	組內	.063	24	.003		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.000	2	.000	.005	.995
	組內	.045	24	.002		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.000	2	.000	.016	.985
	組內	.060	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.001	2	.000	.024	.976
	組內	.265	24	.011		
	總和	.266	26			
E2	組間	.000	2	.000	.034	.967
	組內	.065	24	.003		
	總和	.065	26			
E3	組間	.000	2	.000	.010	.990
	組內	.220	24	.009		
	總和	.221	26			
E4	組間	.000	2	.000	.014	.986
	組內	.082	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	.226	2	.113	.038	.963
	組內	72.364	24	3.015		
	總和	72.591	26			

表 4.13、熔劑溫度之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.000	2	.000	.113	.893
	組內	.050	24	.002		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.000	2	.000	.043	.958
	組內	.062	24	.003		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.000	2	.000	.073	.930
	組內	.044	24	.002		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.000	2	.000	.016	.984
	組內	.060	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.001	2	.001	.046	.955
	組內	.265	24	.011		
	總和	.266	26			
E2	組間	.000	2	.000	.004	.996
	組內	.065	24	.003		
	總和	.065	26			
E3	組間	.001	2	.000	.036	.965
	組內	.220	24	.009		
	總和	.221	26			
E4	組間	.000	2	.000	.007	.993
	組內	.082	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	.036	2	.018	.006	.994
	組內	72.555	24	3.023		
	總和	72.591	26			

表 4.14、模具溫度之變異數分析表

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
N1991	組間	.000	2	.000	.087	.917
	組內	.050	24	.002		
	總和	.051	26			
N1962	組間	.000	2	.000	.037	.964
	組內	.062	24	.003		
	總和	.063	26			
N1955	組間	.000	2	.000	.032	.968
	組內	.044	24	.002		
	總和	.045	26			
N2261	組間	.000	2	.000	.016	.985
	組內	.060	24	.002		
	總和	.060	26			
E1	組間	.001	2	.000	.043	.958
	組內	.265	24	.011		
	總和	.266	26			
E2	組間	.000	2	.000	.035	.966
	組內	.065	24	.003		
	總和	.065	26			
E3	組間	.001	2	.000	.029	.971
	組內	.220	24	.009		
	總和	.221	26			
E4	組間	.000	2	.000	.017	.983
	組內	.082	24	.003		
	總和	.082	26			
Volume	組間	.028	2	.014	.005	.995
	組內	72.563	24	3.023		
	總和	72.591	26			

其中射出壓力、保壓壓力為 N1991、N1962、N1955、N2261、E1、E2、E3、E4 之顯著因子(p 值<0.05)，而射出時間、保壓時間則為 Volume 之顯著因子(p 值<0.05)。以表 4.15 呈現整理之結果，聯集之後取射出時間、射出壓力、保壓壓力、保壓時間為整體分析之顯著因子。

表 4.15、本研究整理之顯著因子結果

	N1991	N1962	N1955	N2261	E1	E2	E3	E4	Volume	U
INT									⊙	●
INP	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		●
PP	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		●
PT									⊙	●
COTI										
COTE										
MOO										
MET										
MOTE										

\* ⊙符號表 p 值<0.05 之顯著的製程因子

\* ●符號表聯集後的顯著製程因子

## 4.2 複迴歸分析

從變異數分析的結果得知射出時間、射出壓力、保壓壓力及保壓時間四個製程參數為品質特性的顯著因子，因此在這個階段中我們將利用四個因子三個水準產生  $81(3^4)$  組的全因子實驗之參數組合進行 Moldflow 的模擬實驗，並取得翹曲、收縮及頂出時體積收縮之實驗值，再從四個翹曲及四個收縮值中，取最大翹曲值、最大收縮值及最大頂出時體積收縮比作為輸出值以進行複迴歸分析，如附錄 A。圖 4.1 為本研究複迴歸分析之執行步驟。進行複迴歸分析之前，因為參數間的關係有時是多階的，可能會彼此影響，意即某些最終品質變數會受到層層的製程中的變數影響，故我們需增加四個製程因子之間的交互作用項，以及平方項再來進行複迴歸分析，如附錄 B。

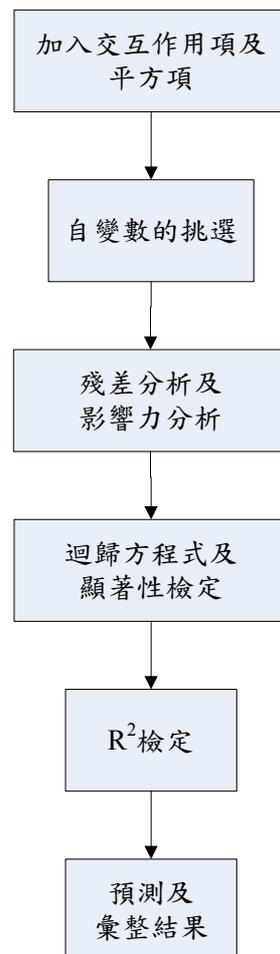


圖 4.1、本研究之複迴歸分析之步驟

#### 4.2.1 自變數的挑選

本研究的自變數挑選採用後退消去法(Backword eliminating)，並決定刪除顯著水準  $\alpha=0.1$ ，其步驟如下：

1. 從所有自變數都包括在模式內開始，刪除一個自變數。

$$NetF = \frac{(SSR_{X_1 \dots X_k} - SSR_{X_1 \dots -X_i \dots X_k}) / df_{X_1 \dots X_k} - df_{X_1 \dots -X_j \dots X_k}}{SSE_{X_1 \dots X_k} / df_{SSE}}$$

$X_i$  為眾多自變數中，淨 F 檢定最不顯著的自變數，且 p 值  $> \alpha$ 。執行步驟 2，假如所有淨 F 檢定之 p 值都  $< \alpha$ ，即停止。

2. 刪除步驟 1 之自變數  $X_i$  後，再刪除另一最不重要的一個自變數。除  $X_i$  外，計算每一個自變數的淨 F 檢定，挑淨 F 檢定最不顯著且 p 值  $> \alpha$ 。

$$NetF = \frac{(SSR_{X_1 \dots -X_i \dots X_k} - SSR_{X_1 \dots -X_i -X_j \dots X_k}) / df_{X_1 \dots -X_i \dots X_k} - df_{X_1 \dots -X_i -X_j \dots X_k}}{SSE_{X_1 \dots -X_i \dots X_k} / df_{SSE}}$$

除  $X_i$  外， $X_j$  為眾多自變數中，淨 F 檢定最不顯著的自變數，且 p 值  $> \alpha$ 。執行步驟 2，假如所有淨 F 檢定之 p 值都  $< \alpha$ ，即停止。

3. 重複步驟 2，直到沒有自變數之淨 F 檢定之 p 值  $> \alpha$ ，便停止後退消去法，得到最終模式。

本研究透過統計軟體 SPSS Statistics 17.0，分別將實驗資料之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比進行複迴歸分析之後退消去法的結果如表 4.16~表 4.18 所示。

表 4.16、翹曲之自變數的挑選

模式	選入的變數	刪除的變數	方法
1	PPPT, INP, INT, PP <sup>2</sup> , INTPT, INPPT, INT <sup>2</sup> , INPINT, PT <sup>2</sup> , INPPP, PT, PP, INP <sup>2</sup> <sup>a</sup>	.	選入
2	.	PT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 ≥ .100)。
3	.	INTPT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 ≥ .100)。
4	.	PPPT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 ≥ .100)。
5	.	INPPT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 ≥ .100)。
6	.	PT <sup>2</sup>	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 ≥ .100)。

由上表可知，對於品質參數翹曲而言，透過後退消去法，最後所選得的製程參數有 INP、INT、PP、INP<sup>2</sup>、INT<sup>2</sup>、PP<sup>2</sup>、INP\*INT、INP\*PP、INT\*PP 共九個自變數。

表 4.17、收縮之自變數的挑選

模式	選入的變數	刪除的變數	方法
1	PPPT, INP, INT, PP2, INTPT, INPPT, INT2, INTPP, INPINT, PT2, INPPP, PT, PP, INP2 <sup>a</sup>	.	選入
2	.	PPPT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ ) <sup>a</sup>
3	.	PT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ ) <sup>a</sup>
4	.	INTPT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ ) <sup>a</sup>
5	.	PT2	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ ) <sup>a</sup>
6	.	INPPT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ ) <sup>a</sup>
7	.	PP	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ ) <sup>a</sup>

由上表可知，對於品質參數收縮而言，透過後退消去法，最後所選得的製程參數有 INP、INT、INP<sup>2</sup>、INT<sup>2</sup>、PP<sup>2</sup>、INP\*INT、INP\*PP、INT\*PP 共八個自變數。

表 4.18、頂出時體積收縮比之自變數的挑選

模式	選入的變數	刪除的變數	方法
1	PPPT, INP, INT, PP2, INTPT, PT2, INT2, INTPP, INPPT, INPINT, INPPP, PT, PP, INP2 <sup>a</sup>	.	選入
2	.	INPPP	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ )。
3	.	PT2	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ )。
4	.	PP	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ )。
5	.	PPPT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ )。
6	.	PT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ )。
7	.	INT	往後消去法 (準則:F-刪除的機率 $\geq .100$ )。

由上表可知，對於品質參數收縮而言，透過後退消去法，最後所選得的製程參數有 INP、INP<sup>2</sup>、INT<sup>2</sup>、PP<sup>2</sup>、INP\*INT、INP\*PT、INT\*PP、INT\*PT 共八個自變數。

## 4.2.2 殘差分析及影響力分析

### 4.2.2.1 殘差分析

1. 單向度圖形(直方圖):先將殘差  $E$  或標準化殘差  $Z$  畫直方圖，如果直方圖成鐘型，表示符合常態分配。
2. 雙向度圖形(殘差圖):在縱軸放標準化殘差，橫軸放  $X$  或  $\hat{Y}$ 。當殘差圖越亂，看不出任何圖形，表示直線迴歸模式越合適。

將各品質參數進行殘差分析後之單向度圖形及雙向度圖形如圖 4.2~圖 4.7 所示。從圖中可發現，本研究各品質參數知單向度圖形均為鐘型，即符合常態分配；雙向度圖形之殘差圖分佈很亂，沒有任何形狀，表示直線迴歸模式均合適。

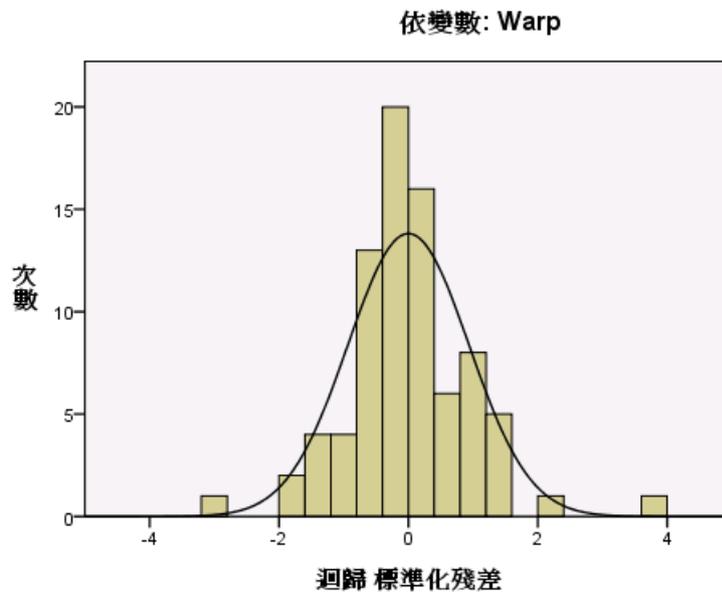


圖 4.2、翹曲之單向度圖形

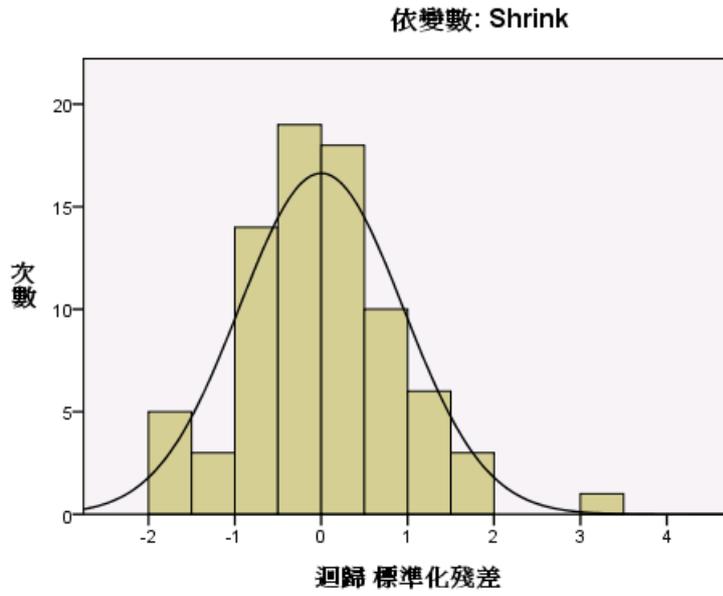


圖 4.3、收縮之單向度圖形

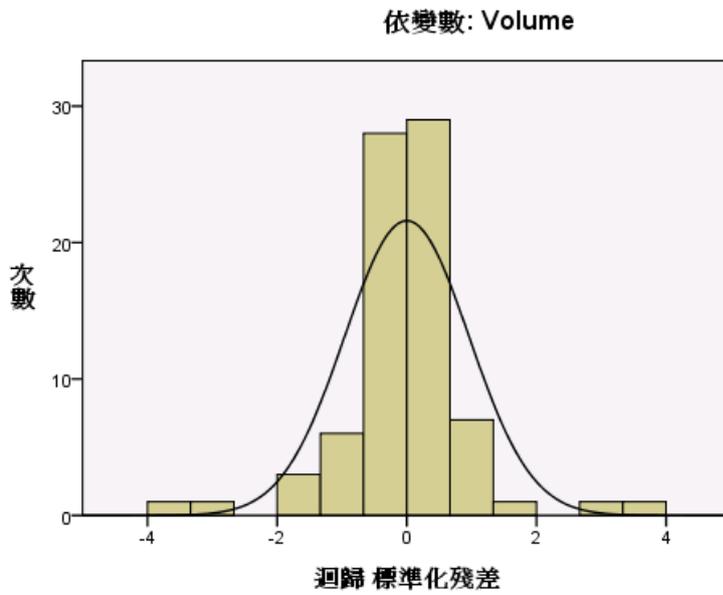


圖 4.4、頂出時體積收縮比之單向度圖形

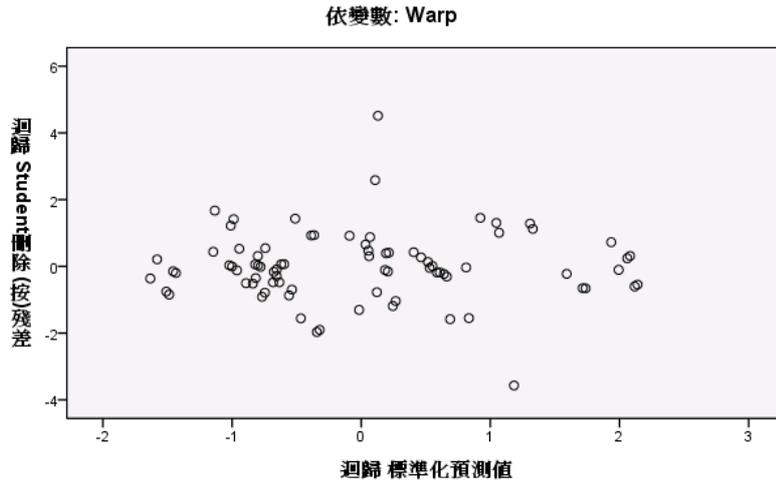


圖 4.5、翹曲之雙向度圖形

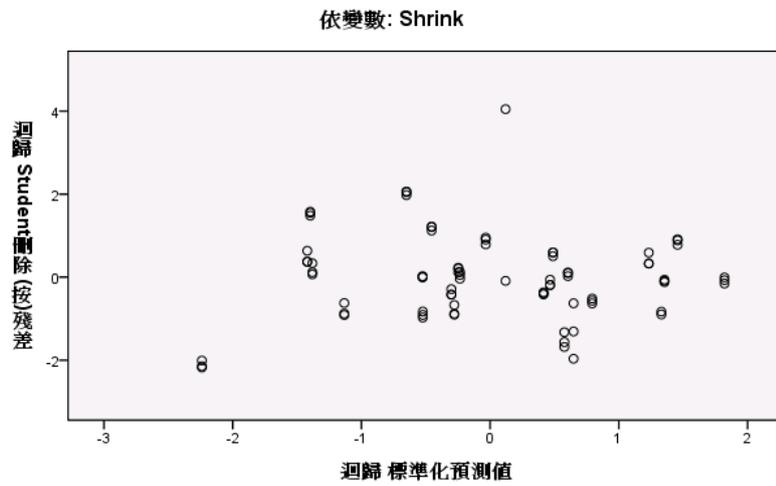


圖 4.6、收縮之雙向度圖形

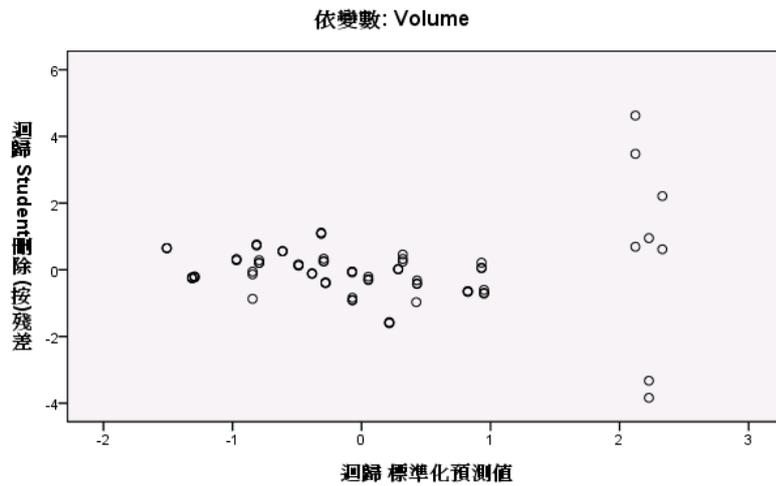


圖 4.7、頂出時體積收縮比之雙向度圖形

#### 4.2.2.2 影響力分析

接著我們可以透過影響力分析來檢視迴歸模式結果會不會受少數觀察點的影響，因此，需要一些統計量來標示觀察點對迴歸模式結果的影響。常用的統計量有刀切法殘差、槓桿量數、DF 適合度(difference between the fitted value)和庫克距離(Cook's distance)。本研究使用庫克距離來作影響力分析。庫克距離乃為一種綜合判斷法，其係以個別迴歸係數做為判斷第  $i$  筆資料是否異常之依據，庫克距離之計算如下：

$$D_i = \frac{e_i^2}{p \cdot \hat{\sigma}^2} \left( \frac{h_{ii}}{1 - h_{ii}} \right)$$

在方程式中庫克距離以  $D_i$  表示， $e_i^2$  為第  $i$  個觀察值的內在學生化殘差值， $\hat{\sigma}^2$  為誤差項均方， $p$  為自變數個數， $h_{ii}$  為槓桿值。其定義為若  $D_i > F_{\alpha, p, n-p}$ ，表示第  $i$  筆資料為具有影響性的偏離值（通常取  $\alpha=0.5$ ），且  $e_i$  夠大表示此筆資料為 Y 座標偏離值，若  $h_{ii}$  夠大則表示此資料為 X 座標偏離值。當庫克距離  $>1$ ，便應注意，對模式結果影響很大，也可將庫克距離畫在縱軸，案例 ID 畫在橫軸，稱為影響力索引圖(Index influence plot)，可了解庫克距離在某些案例裡是否有很大的差異。

本研究透過 SPSS 軟體求出複迴歸分析中各個品質參數之庫克距離，如附錄 C，並畫出影響力索引圖，首先將翹曲 81 組資料中庫克距離較大的第 56 組及第 64 組資料刪除，再將剩下的 79 組資料進行收縮之複迴歸分析，並刪除 79 組中庫克距離較大的第 64 組資料刪除，最後將剩下 78 組資料進行頂出時體積收縮之複迴歸分析，且刪除 78 組中庫克距離較大之第 55 組、第 57 組、第 58 組、第 60 組及第 62 組資料，其翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之影響力索引圖如圖 4.8~圖 4.10 所示。最後將刪除庫克距離後的 79 組之翹曲資料、78 組之收縮資料及 73 組之頂出時體積收縮比資料進行複迴歸分析，以求得更準確的迴歸方程式。

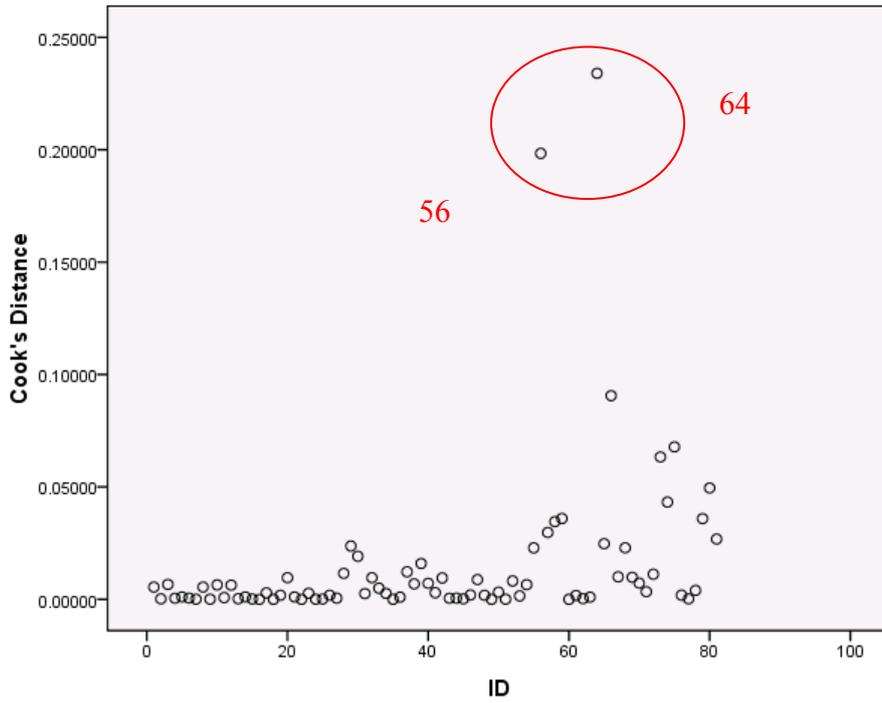


圖 4.8、翹曲之影響力索引圖

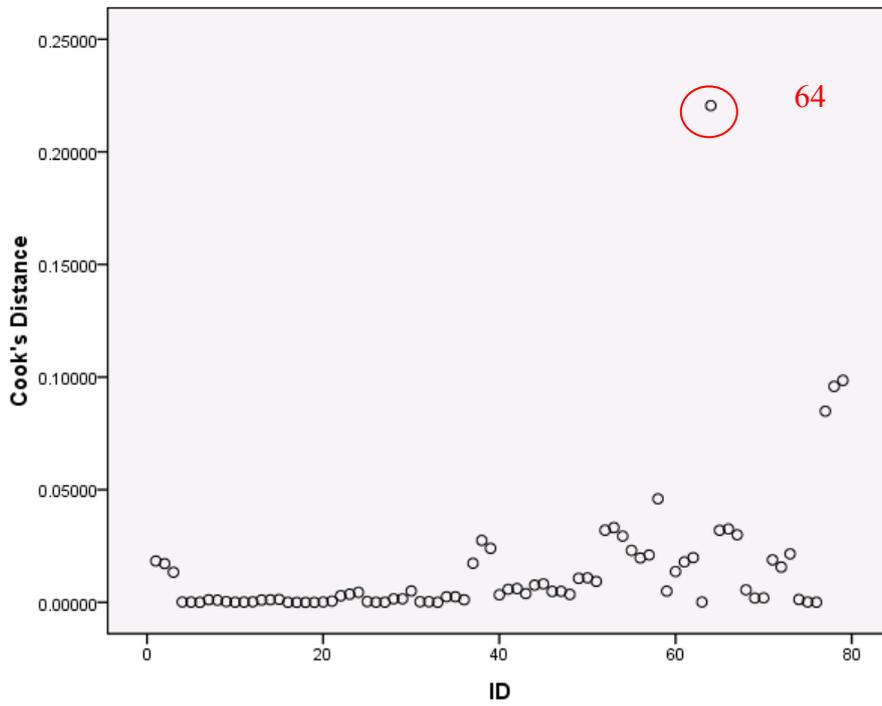


圖 4.9、收縮之影響力索引圖

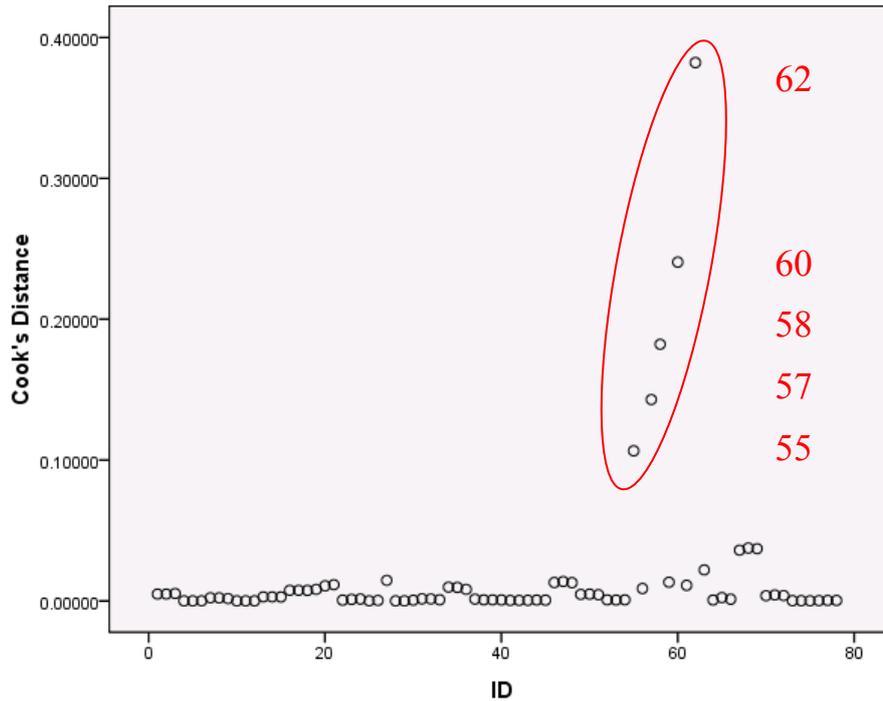


圖 4.10、頂出時體積收縮比之影響力索引圖

### 4.2.3 迴歸方程式

本研究透過 SPSS 軟體進行複迴歸分析，最後求得之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之迴歸方程式如下：

$$\text{Warp} = 1.45 - 0.011\text{INP} - 0.238\text{INT} - 0.00823\text{PP} + 0.000046\text{INP}^2 + 0.108\text{INT}^2 + 0.00016\text{PP}^2 - 0.00176\text{INP} * \text{INT} + 0.00001\text{INP} * \text{PP} + 0.00211\text{INT} * \text{PP}$$

$$\text{Shrink} = 1.32 - 0.0145\text{INP} + 0.35\text{INT} + 0.000086\text{INP}^2 + 0.0603\text{INT}^2 - 0.000013\text{PP}^2 - 0.00593\text{INP} * \text{INT} - 0.000026\text{INP} * \text{PP} + 0.00122\text{INT} * \text{PP}$$

$$\text{Volume} = 27.0 - 0.348\text{INP} + 0.00165\text{INP}^2 + 2.74\text{INT}^2 - 0.00035\text{PP}^2 - 0.0751\text{INP} * \text{INT} - 0.000613\text{INP} * \text{PT} + 0.0369\text{INT} * \text{PP} + 0.0839\text{INT} * \text{PT}$$

#### 4.2.4 顯著性檢定

接著對於每一迴歸係數執行t檢定，在考慮其它在迴歸模式自變數後，測驗迴歸係數數值是否等於零，如果要對一組迴歸係數進行顯著性檢定，可執行淨F檢定。因此我們將各品質參數進行顯著性檢定，其透過後退消去法所產生之各模式的檢定結果如附錄D所示。而其各品質參數最終模式之迴歸係數及顯著性檢定如表4.19~表4.21所示，由表中可知各品質參數最終之迴歸係數之P值均小於0.1，亦即具有顯著性。

表 4.19、翹曲之迴歸係數及顯著性檢定

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B之估計值	標準誤差	Beta 分配		
6 (常數)	1.450	.129		11.203	.000
INP	-.011	.002	-4.273	-6.667	.000
INT	-.238	.036	-2.282	-6.631	.000
PP	-.008	.001	-3.155	-5.749	.000
INP2	4.550E-5	.000	4.233	6.937	.000
INT2	.108	.010	2.079	10.350	.000
PP2	1.624E-5	.000	1.248	2.496	.015
INPINT	-.002	.000	-2.169	-9.481	.000
INPPP	9.662E-6	.000	.580	2.082	.041
INTPP	.002	.000	2.236	11.150	.000

a. 依變數: Warp

表 4.20、收縮之迴歸係數及顯著性檢定

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B之估計值	標準誤差	Beta 分配		
7 (常數)	1.315	.193		6.811	.000
INP	-.014	.003	-2.185	-4.565	.000
INT	.350	.068	1.296	5.129	.000
INP2	8.561E-5	.000	3.106	6.772	.000
INT2	.060	.020	.448	3.037	.003
PP2	-1.290E-5	.000	-.383	-2.542	.013
INPINT	-.006	.000	-2.826	-16.852	.000
INPPP	-2.603E-5	.000	-.606	-3.229	.002
INTPP	.001	.000	.504	3.331	.001

a. 依變數: Shrink

表 4.21、頂出時體積收縮比之迴歸係數及顯著性檢定

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配		
7 (常數)	26.962	2.641		10.209	.000
INP	-.348	.044	-5.590	-7.822	.000
INP2	.002	.000	6.376	8.928	.000
INT2	2.742	.278	2.136	9.859	.000
PP2	.000	.000	-1.133	-14.274	.000
INPINT	-.075	.005	-3.971	-16.558	.000
INPPT	.000	.000	-.178	-1.862	.067
INTPP	.037	.005	1.606	7.805	.000
INTPT	.084	.039	.381	2.145	.036

a. 依變數: Volume

#### 4.2.5 預測及彙整結果

本研究將 81 組資料透過 SPSS 軟體之複迴歸分析，最後得到三組品質參數之預測方程式，並透過輸入製程參數獲得一組對應的翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之輸出預測值。因此我們需新制訂四個顯著製程參數的因子水準，透過變異數分析結果我們可以知道射出時間和保壓壓力為最顯著的因子，所以這兩個製程參數我們採用較多的因子水準組合，故使用 7 個水準組合，而另外兩個製程參數則採用 5 個水準。最後產生的因子水準如表 4.22 所示，因此可以產生  $5*7*7*5=1225$  組預測資料。再進行資料包絡法找出一個可以快速搜尋射出成型製程參數設定以達最佳化多目標之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比組合之搜尋方法。

表 4.22、四個顯著製程參數之新因子水準

射出成型參數	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Injection Pressure(MPa)	100	110	120	130	140		
Injection Time(S)	0.5	0.67	0.84	1	1.17	1.34	1.5
Packing Pressure(MPa)	80	86.67	93.34	100	106.67	113.34	120
Packing Time(S)	7.5	8.75	10	11.25	12.5		

### 4.3 資料包絡法

首先將複迴歸分析結果得到的品質參數預測方程式，透過輸入製程參數獲得 1225 組翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之預測值，故本研究選取 1225 組預測值為 DMU，在 DEA 研究中，投入變數與產出變數選取是最重要的步驟。不同的投入和產出變數可能會導致評估效果的不同。因此透過參考射出成型之相關文獻，本研究將收縮和頂出時體積收縮比作為投入變數，將翹曲作為產出變數。故本研究資料包絡法之執行步驟如圖 4.11 所示。而在進行資料包絡法分析時，因為 DEA 無法處理負值，故我們必須將資料中的負值資料取其絕對值再來進行分析，在收縮值資料中若為負值，則是代表其值為一膨脹值，主要是因為流動不均勻造成此部份密度較為緊實，進而導致膨脹發生。而在 DEA 模型所選擇的投入與產出變數因為需要同向的關係，若有負相關存在，則必需將該項目剔除。故本研究針對所選出的投入與產出變數再進行相關檢定，其分析結果如表 4.23 所示。

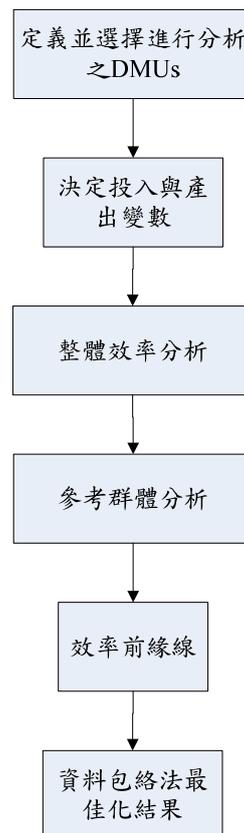


圖 4.11、本研究之資料包絡法分析步驟

表 4.23、投入、產出變數之相關性分析

		相關		
		Warpage	Shrinkage	Volumetric shrinkage at ejection
Warpage	Pearson 相關	1	.986**	.910**
	顯著性 (雙尾)		.000	.000
	個數	1350	1350	1350
Shrinkage	Pearson 相關	.986**	1	.940**
	顯著性 (雙尾)	.000		.000
	個數	1350	1350	1350
Volumetric shrinkage at ejection	Pearson 相關	.910**	.940**	1
	顯著性 (雙尾)	.000	.000	
	個數	1350	1350	1350

\*\* 在顯著水準為0.01時 (雙尾)，相關顯著。

由上表可知本研究所選擇所有投入、產出項成正相關，且達顯著水準，亦符合 DEA 的同向性(Isotonicity)，即當投入增加，產出不得減少。因此可採用此 DEA 模型進行分析。

#### 4.3.1 整體效率分析

接著將 1225 組 DMUs 之投入項、產出項預測資料應用 Banxia Frontier Analyst 3 電腦軟體分析，以 CCR 模式產出導向，而 CCR 模式產出導向是指在使用現有投入水準之下，其模式的目標在追求產出極大化，因為本研究目標為最小化翹曲值，因此我們將產出變數一翹曲，以(1-翹曲值)作處理，進而求得 1225 組 DMUs 的總效率，如附錄 E，其效率值達到 1，為有效率之單位。其整體效率分析結果如表 4.24 所示。

表 4.24、1225 組 DMUs 之整體效率分析

DMU	Score
560	100
840	100
871	100
1151	100
1186	100
1187	100
1188	100
1189	100
1190	100

由上表可知第 560 組、第 840 組、第 871 組、第 1151 組及第 1186 組~第 1190 組整體效率值為 1，為最有效率之單位。

#### 4.3.2 參考群體分析(Reference frequencies)

傳統 CCR 模式為了加強鑑別程度，避免發生有效率 DMU 過多而導致判斷優劣的情況，常藉助對偶模式所求出的  $\lambda_k$ ，其值不為 0 時所對應的  $DMU_k$  為受評估單位之參考 DMU，當某 DMU 出現在其他 DMU 參考點的次數越多時，表示該 DMU 有效率的強度(Robustness)則越強，若有效率的 DMU 不曾出現在其他 DMU 參考點中，這種 DMU 可能為外圍值(Outlier)，其效率值還是為 1，表示若其投入項或產出項稍有變動，其效率值即可能小於 1。故本研究之參考群體分析如表 4.25 所示。

表 4.25、1225 組 DMUs 之參考群體分析

DMU	Reference Count
560	773
840	624
871	402
1151	182
1186	47
1187	0
1188	0
1189	0
1190	0

由上表可知第 560 組、第 840 組、第 871 組、第 1151 組及第 1186 組之參考次數最多，故本研究最後選擇這五組的決策單位為最有效率單位。

#### 4.3.3 效率前緣(Efficiency Frontier)

包絡線(envelopment)是 DEA 效率評估模式的理論基礎。在經濟意義上是指最有利的投入產出所形成的前緣，即「基於投入資料，決定之最大產出」藉由直線或是曲線將這些效率單位連結起來，構成之效率前緣線。凡是落在邊界上的 DMU，表示其投入與產出組合是有效率的；若是落在邊界右邊的 DMU，則表示其投入與產出組合是無效率的。本研究之效率前緣線如圖 4.12 所示，是由第 560 組、第 840 組、第 871 組、第 1151 組及第 1186

組所組成，即為圖中之五個圓點所連成之曲線，而其它落在曲線右邊的方形點則為無效率的決策單位。

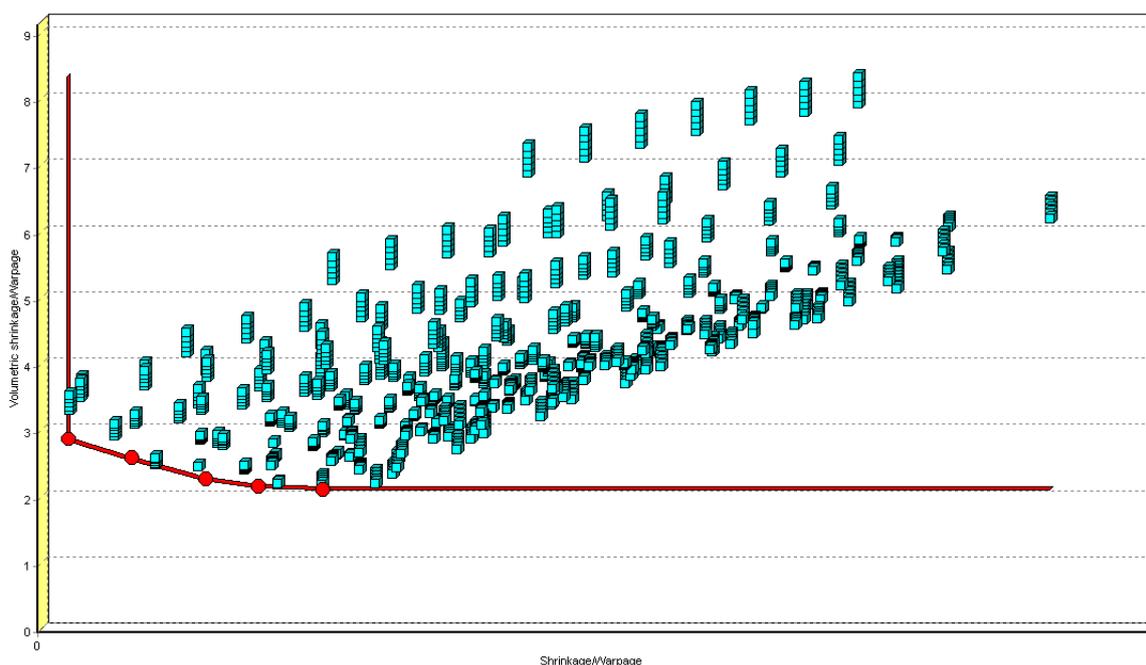


圖 4.12、本研究之效率前緣圖

#### 4.3.4 資料包絡法最佳化之結果

透過資料包絡法衡量出最有效率的決策單位，且透過參考群體分析找出參考次數高的決策單位，結果為第 560 組、第 840 組、第 871 組、第 1151 組及第 1186 組，故這五組為 1225 組預測資料中製程參數為最佳之參數組合，其製程參數組合之實際值與預測值如表 4.26 所示。

表 4.26、最佳製程參數組合之實際值與預測值

DMU	製程參數										實驗數值	Warp	Shrink	Volume
	INP	INT	PP	PT	COTI	COTE	MOO	MET	MOTE					
560	120	0.67	120	12.5	19	25	5	275	70	預測值	0.0963612	0.1396847	1.9018685	
	130	0.84	120	12.5	19	25	5	275	70	實際值	0.0796	0.1232	2.065	
840	130	1	120	7.5	19	25	5	275	70	預測值	0.0929808	0.1075677	1.941769	
	140	1.17	120	7.5	19	25	5	275	70	實際值	0.072	0.0925	1.961	
710	140	1.34	120	7.5	19	25	5	275	70	預測值	0.0906	0.0814	2.041575	
	120	0.67	120	12.5	19	25	5	275	70	實際值	0.078	0.0835	2.068	
1151	130	0.84	120	12.5	19	25	5	275	70	預測值	0.0997372	0.0435987	2.3027385	
	130	1	120	7.5	19	25	5	275	70	實際值	0.0882	0.0597	2.826	
1186	140	1.17	120	7.5	19	25	5	275	70	預測值	0.1065168	0.0125827	2.544249	
	140	1.34	120	7.5	19	25	5	275	70	實際值	0.1114	-0.0948	3.367	

### 4.3.5 結果驗證

最後驗證部分，首先將資料包絡法所得之五組最佳參數組合 (第 560 組、第 840 組、第 871 組、第 1151 組及第 1345 組)透過 Moldflow 進行模擬，取得五組翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之實際值，接著再加上先前 81 組實際值透過複迴歸分析刪除庫克距離值較大之後的 73 組實際值，總共 78 組實驗資料透過 Banxia Frontier Analyst 3 電腦軟體進行整體效率分析 (如附錄 F)及參考群體分析，再次搜尋其最佳之參數組合，藉此驗證第一階段之搜尋結果，而此驗證階段的搜尋結果如下表 4.27 和表 4.28 所示。

表 4.27、實際值之整體效率分析

DMU	Score
44	100
45	100
840	100
871	100
1151	100
54	97.82
52	97.80
53	97.13
43	96.88
560	94.19

表 4.28、實際值之參考群體分析

DMU	Reference Count
840	62
1151	12
871	9
45	9
44	1

透過整體效率分析及參考群體分析之結果可知，再次搜尋的結果第一階段中五組最佳參數組合之第 840 組、第 871 組及第 1151 組為最有效率的組合，而第 560 組的效率值也高達 94.19%，但第 1186 組的效率值因為實際值與預測值誤差百分比較大，其效率值只有 71.28%，故我們剔除此組參數組合。因此最後最佳之製程參數組合如表 4.29 所示。

表 4.29、最後之最佳製程參數組合

DMU	製程參數											
	INP	INT	PP	PT	COTI	COTE	MOO	MET	MOTE	Warp	Shrink	Volume
840	130	0.84	120	12.5	19	25	5	275	70	0.072	0.0925	1.961
1151	140	1.17	120	7.5	19	25	5	275	70	0.0882	0.0597	2.826
871	130	1	120	7.5	19	25	5	275	70	0.078	0.0835	2.068
560	120	0.67	120	12.5	19	25	5	275	70	0.0796	0.1232	2.065

#### 4.3.6 小結

透過以上的結果驗證，在第一階段中所得到的五組最佳組合，透過 Moldflow 進行模擬取得實際值，可發現五組中有三組（第 840 組、第 1151 組及第 871 組）的整體效率優於大部分的 73 組實際值，因此可以做為其他組別的標竿，而第 560 組的效率值也高達 94.19%，但第 1186 組的效率值因為實際值與預測值誤差百分比較大，其效率值只有 71.28%，故我們剔除此組參數組合。最後可以驗證此搜尋方法是有效的，亦即理論與驗證是符合的。因此透過資料包絡法再次的搜尋，最後可產生四組最佳之製程參數組合。且根據結果可知，在五組最佳解中又以第 840 組的參考次數最高，而其對應之參數設定值為射出壓力 130MPa、射出時間 0.84s、保壓壓力 120MPa、保壓時間 12.5s、冷卻時間 19s、冷卻溫度 25°C、開模時間 5 s、熔劑溫度 275°及模具溫度 70°C，此時塑件可得最佳化之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比組合，達到最佳品質結果。

## 第五章 結論及未來研究方向

### 5.1 結論

產業界中生產塑膠成品的的方法，以射出成型為最主要，成型件表面常見的缺陷，會影響到產品的生產品質，產品開發時若能從射出成型製造條件的觀點，充分利用資訊以確認設計結構、模具設計開發、模具製造加工等，將可降低生產成本及增進產品的競爭力，因為在射出成型產業中塑件品質優劣及產品生命週期速度為公司降低成本之關鍵，故本研究以數位相機前蓋薄殼製程之顯著因子進行實驗分析，透過模擬取得與參數相對應之翹曲、收縮及頂出時體積收縮數據，再使用複迴歸分析找出多個依變數對一個自變數之間的函數關係，求得自變數與依變數具因果關係的迴歸線，並透過輸入製程參數便可獲得翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之預測輸出值。最後，以資料包絡法之多項投入與多項產出的特性搜尋出製程之最佳參數組合，證實此方法可行且可快速的找出最佳多個品質特性結果，找出最佳化之製程參數組合。在此實驗搜尋的範圍中，我們得到四組翹曲、收縮及頂出時體積收縮結果為最佳之解決方案。

針對此多目標問題，本研究提出一個可行的實驗步驟方法，透過複迴歸分析結合資料包絡法找出一個可以快速搜尋射出成型製程參數設定以達最佳化多目標之翹曲、收縮及頂出時體積收縮組合之搜尋方法，作為工程師進行整體考量時的參考依據。本研究建立一品質預測的方程式，可以提供射出成型工程師未來在進行塑膠產品參數設定時，有一參數選擇之參考依據，更能有效減少製造成品發生缺陷之成本損失。

## 5.2 未來之研究方向

1. 在射出成型製程中，控制參數大致可分兩大類：機器參數和製程參數。而這些變數皆對於產品最終品質及製程的經濟性有顯著的影響。本研究主要只針對製程參數進行分析探討，未來可增加機器參數分析以更進一步的改善塑件品質。
2. 本研究僅針對翹曲、收縮及頂出時體積收縮比之品質特性進行分析，但實際上縫合線、剪應力、包風等特性同時也為塑件品質之考量因素，未來若能考慮更多品質特性進行分析研究，相信可使機台在實際操作時得到更全面性的考量。
3. 因為 Banxia Frontier Analyst 3 電腦軟體 DMU 數目受限在 1500 組內，所以本研究將因子水準組合數控制在 1350 組，未來若能擴大其因子水準的範圍，以更多數據來進行資料包絡法分析能獲得更高的準確度。
4. 本研究僅以模流分析軟體 Moldflow 代替實際射出成型機台，實驗所需之數據皆由 Moldflow 軟體模擬取得。未來若能透過實際射出成型機台進行研究，相信可以發現更多實際製程中所需注意的影響因素，並能驗證本研究透過複迴歸分析及資料包絡法分析的可行性。

## 參考文獻

### 中文

- [1] 林啟濂，2005。一般最佳化方法在塑膠射出成型之應用，機械工程系，台灣科技大學。
- [2] 林瑞璋，2003。塑膠膜電腦輔助設計-MoldFlow 軟體應用，全威圖書有限公司。
- [3] 洪啟偉，2007。以雙反應曲面法與非線性規劃進行塑膠射出成形作業之最佳化設計，工業工程與經營資訊學系，東海大學。
- [4] 陳劉旺、丁金超，1989。高分子加工，高立圖書有限公司。
- [5] 陳良相、黃子健、劉昭宏，2005。Moldflow MPI 實用基礎，全華科技圖書股份有限公司。
- [6] 陳詞章、郭南村、陳俊吉、陳俊生，2005。ABS 射出成型件縫合線強度之探討，機械工程系，龍華科技大學。
- [7] 黃文隆、黃龍，2003。迴歸分析，滄海書局。
- [8] 張永彥，2006。塑膠模具設計學，全華科技圖書股份有限公司。
- [9] 楊景程，2000。射出成型機最佳參數之預測，纖維高分子工程，台灣科技大學。
- [10] 葉怡成，2005。預測工程學，中華大學教材(未發表)。
- [11] 盧俊廷，2005。薄殼射出成型品翹曲變形之量測與分析，應用數學學系，中興大學。
- [12] 羅壬成，2006。模流分析與射出成型控制參數的優化，工學院精密與自動化工程，交通大學。

### 英文

- [1] Agrawal, A.R., Pandelidis, I.O., Pecht, M., 1987. Self-tuning control of ram velocity in injection molding. *Polymer Engineering and Science*, 27 (18), 1345-1357.
- [2] Anderson, D.R., Sweeney, D.J., Williams, T.A., Chen, J.C., 2006. Statistics for Business and Economics: A Practical Approach, *Thomson Learning, Singapore*.
- [3] Banker, R.D., Charnes, A., Cooper, W.W., 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30 1078-1092.
- [4] Chen, Z., Turng, L.S., 2005. A review of current developments in process and quality control for injection molding, *Advances in Polymer Technology*, 24 165-182.

- [5] Chiang, K.T., Chang F.P., 2006. Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 35 468-479.
- [6] Castro, C.E., 2004. Multiple criteria optimization in injection molding. The Ohio State University.
- [7] Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2 429-444.
- [8] Farrell, M. J., 1957. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120 253-281.
- [9] Golany, B., Yaakov, R., 1989. An application procedure for DEA. *Omega*, 17(3), 237-250.
- [10] Huang, C.Y., Chen, W.L., Cheng, C.M., 2008. Prognostication of Product Quality in Plastic Injection Molding. *Intelligent Manufacturing*.
- [11] Huang, M.C., Tai, C.C., 2001. The Effective Factors in the Warpage Problem of an Injection-Molded part with a Thin Shell Feature. *Journal of Material Process Technology*, 110(1), 1-9.
- [12] Hua, Y., Wu, Y.H., Wang, K.K., 1997. An Optimization Scheme for Part Quality in Injection Molding. American Society of Mechanical Engineers, *Materials Division (Publication) MD*, 79 139-149.
- [13] Park, J.C., Kim, B.H., 2000. Automated Molding Design Methodology to Optimize Multiple Defects in Injection Molded. *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 1(1).
- [14] Jansen, K.M.B., Pantani, R., Titomanlio, G., 1998. As-molded shrinkage measurement on polystyrene injection molded products. *Polymer Engineering Science*, 38 254-264.
- [15] Jay Shoemaker (Ed.), 2006. Moldflow Design Guide- A resource for plastics Engineers. *Hanser Gardner Publications Incorporation*.
- [16] Kim, B. H., Lee, B.H., 1997. Variation of Part Wall Thickness Reduce Warpage of Injection-Molded Part: Robust Design Against Process Variability. *Polymer Plastics Technology and Engineering*, 36(5), 791-807.
- [17] Kurtaran, H., Ozcelik, B., Tuncay, E., 2005. Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 169 314-319.
- [18] Liao, S.J., Chang, D.Y., Chen, H.J., Tsou, L.S., 2004. Optimal Process Condition of Shrinkage and Warpage of Thin-Wall Parts. *Polymer Engineering Science*, 44(5), 917-928.

- [19] Liao, S.J., Hsieh, W.H., 2004. Shrinkage and warpage prediction of injection-molded thin-wall parts using artificial neural networks. *Polymer Engineering Science*, 44 2029-2040.
- [20] Seow, L.W., Lam, Y.C., 1997. Optimizing flow in plastic injection molding. *Materials Processing Technology*, 72 333-341.
- [21] Ozcelik, B., Sonat, I., 2008. Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. *Material and design*, 30 367-375.
- [22] Ozcelik, B., Erzurumlu, T., 2005. Determination of Effecting Dimensional Parameter on Warpage of Thin Shell Plastic Parts Using Integrated Response Surface Method and Genetic Algorithm. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32 1085–1094.
- [23] Ozcelik, B., Erzurumlu, T., 2005. Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method. *Elsevier Ltd. Material and Design*, 27 835-861.
- [24] Shen, C., Wang, L., Li, Q., 2006. Optimization for injection molding process conditions of refrigerator top cover using combination method of artificial neural network and genetic algorithms. *Polymeric Plastic Technique Engineering*, 46(2), 105-112.
- [25] Loera, V.G., Castro, J.M., Diaz, J.M., Mondragon, O.L.C., Cabrera-Rios, M., 2008. Setting the Processing Parameters in Injection Molding Through Multiple-Criteria Optimization: A Case Study. *IEEE Transcation on Systems, Man and Cybernetics-part C Application and Review*, 38(5).
- [26] Yang, Y., Gao, F., 2006. Injection Molding Product Weight: Online Prediction and Control Based on a Nonlinear principle Component Regression Model. *Polymeric Science*, 46(4), 540-548.
- [27] Zhao, C., Gao, F., 1999. Melt Temperature Profile Prediction for Thermoplastic Injection Molding. *Polymer Engineering Science*, 39(9), 1787-1801.

## 附錄 A: 實驗 81 組之翹曲、收縮及頂出時體積收縮比

	翹曲	收縮	頂出時體積收縮比
1	0.2185	0.395	4.379
2	0.2182	0.3944	4.378
3	0.2169	0.3922	4.364
4	0.1611	0.2867	3.611
5	0.161	0.2863	3.61
6	0.1601	0.2847	3.596
7	0.1154	0.1973	2.724
8	0.1156	0.1969	2.723
9	0.1145	0.1951	2.706
10	0.2006	0.3635	4.08
11	0.2003	0.3629	4.079
12	0.1998	0.3622	4.078
13	0.1451	0.2556	3.288
14	0.1452	0.2551	3.287
15	0.1448	0.2545	3.286
16	0.0982	0.1632	2.25
17	0.098	0.1629	2.251
18	0.0978	0.1626	2.249
19	0.2271	0.4148	4.56
20	0.2264	0.4134	4.516
21	0.2253	0.4117	4.503
22	0.1612	0.2931	3.683
23	0.1607	0.2919	3.642
24	0.1596	0.2905	3.627
25	0.1111	0.1965	2.683
26	0.1103	0.195	2.642
27	0.1092	0.1931	2.264

	翹曲	收縮	頂出時體積收縮比
28	0.1952	0.3589	4.869
29	0.195	0.3589	4.879
30	0.1981	0.3646	4.958
31	0.1472	0.265	4.016
32	0.1471	0.2651	4.023
33	0.1487	0.2679	4.073
34	0.1068	0.1776	3.158
35	0.107	0.1776	3.163
36	0.1084	0.1805	3.2
37	0.136	0.2522	3.551
38	0.1335	0.2447	3.509
39	0.1332	0.2471	3.506
40	0.0982	0.1743	2.926
41	0.096	0.1696	2.882
42	0.0957	0.1691	2.883
43	0.078	0.0835	2.068
44	0.0775	0.0779	2.048
45	0.0778	0.0772	2.054
46	0.1528	0.2846	3.924
47	0.153	0.2847	3.939
48	0.1517	0.2827	3.921
49	0.1068	0.197	3.146
50	0.1074	0.1973	3.155
51	0.1063	0.1952	3.138
52	0.0674	0.1021	2.015
53	0.0678	0.1027	2.028
54	0.0677	0.1007	2.014
55	0.2068	0.3438	7.623

	翹曲	收縮	頂出時體積收縮比
56	0.1449	0.2523	3.853
57	0.2079	0.3452	6.844
58	0.1528	0.2605	4.782
59	0.1465	0.2469	4.573
60	0.1712	0.2751	6.899
61	0.1617	0.2321	7.921
62	0.1614	0.2345	6.631
63	0.1618	0.2355	8.349
64	0.1954	0.3269	7.239
65	0.1214	0.2301	3.745
66	0.1751	0.3106	6.779
67	0.1362	0.1936	4.24
68	0.1366	0.194	4.355
69	0.1352	0.1922	4.284
70	0.108	0.0802	3.177
71	0.1049	0.0744	3.16
72	0.1049	0.0746	3.165
73	0.1021	0.1438	3.199
74	0.1003	0.1455	3.186
75	0.1004	0.1425	3.197
76	0.1011	0.078	3.2
77	0.0982	0.0732	3.206
78	0.0981	0.0721	3.21
79	0.1165	-0.063	3.203
80	0.1137	-0.0656	3.22
81	0.1132	-0.0662	3.224

## 附錄 B: 實驗 81 組加入交互作用項及平方項之參數組合

	INP	INT	PP	PT	INP2	INT2	PP2	PT2	INPINT	INPPP	INPPT	INTPP	INTPT	PPPT
1	100	0.5	80	7.5	10000	0.25	6400	56.25	50	8000	750	40	3.75	600
2	100	0.5	80	10	10000	0.25	6400	100	50	8000	1000	40	5	800
3	100	0.5	80	12.5	10000	0.25	6400	156.25	50	8000	1250	40	6.25	1000
4	100	0.5	100	7.5	10000	0.25	10000	56.25	50	10000	750	50	3.75	750
5	100	0.5	100	10	10000	0.25	10000	100	50	10000	1000	50	5	1000
6	100	0.5	100	12.5	10000	0.25	10000	156.25	50	10000	1250	50	6.25	1250
7	100	0.5	120	7.5	10000	0.25	14400	56.25	50	12000	750	60	3.75	900
8	100	0.5	120	10	10000	0.25	14400	100	50	12000	1000	60	5	1200
9	100	0.5	120	12.5	10000	0.25	14400	156.25	50	12000	1250	60	6.25	1500
10	120	0.5	80	7.5	14400	0.25	6400	56.25	60	9600	900	40	3.75	600
11	120	0.5	80	10	14400	0.25	6400	100	60	9600	1200	40	5	800
12	120	0.5	80	12.5	14400	0.25	6400	156.25	60	9600	1500	40	6.25	1000
13	120	0.5	100	7.5	14400	0.25	10000	56.25	60	12000	900	50	3.75	750
14	120	0.5	100	10	14400	0.25	10000	100	60	12000	1200	50	5	1000
15	120	0.5	100	12.5	14400	0.25	10000	156.25	60	12000	1500	50	6.25	1250
16	120	0.5	120	7.5	14400	0.25	14400	56.25	60	14400	900	60	3.75	900
17	120	0.5	120	10	14400	0.25	14400	100	60	14400	1200	60	5	1200
18	120	0.5	120	12.5	14400	0.25	14400	156.25	60	14400	1500	60	6.25	1500
19	140	0.5	80	7.5	19600	0.25	6400	56.25	70	11200	1050	40	3.75	600
20	140	0.5	80	10	19600	0.25	6400	100	70	11200	1400	40	5	800
21	140	0.5	80	12.5	19600	0.25	6400	156.25	70	11200	1750	40	6.25	1000
22	140	0.5	100	7.5	19600	0.25	10000	56.25	70	14000	1050	50	3.75	750
23	140	0.5	100	10	19600	0.25	10000	100	70	14000	1400	50	5	1000
24	140	0.5	100	12.5	19600	0.25	10000	156.25	70	14000	1750	50	6.25	1250
25	140	0.5	120	7.5	19600	0.25	14400	56.25	70	16800	1050	60	3.75	900
26	140	0.5	120	10	19600	0.25	14400	100	70	16800	1400	60	5	1200
27	140	0.5	120	12.5	19600	0.25	14400	156.25	70	16800	1750	60	6.25	1500
28	100	1	80	7.5	10000	1	6400	56.25	100	8000	750	80	7.5	600
29	100	1	80	10	10000	1	6400	100	100	8000	1000	80	10	800
30	100	1	80	12.5	10000	1	6400	156.25	100	8000	1250	80	12.5	1000
31	100	1	100	7.5	10000	1	10000	56.25	100	10000	750	100	7.5	750
32	100	1	100	10	10000	1	10000	100	100	10000	1000	100	10	1000
33	100	1	100	12.5	10000	1	10000	156.25	100	10000	1250	100	12.5	1250

	INP	INT	PP	PT	INP2	INT2	PP2	PT2	INPINT	INPPP	INPPT	INTPP	INTPT	PPPT
34	100	1	120	7.5	10000	1	14400	56.25	100	12000	750	120	7.5	900
35	100	1	120	10	10000	1	14400	100	100	12000	1000	120	10	1200
36	100	1	120	12.5	10000	1	14400	156.25	100	12000	1250	120	12.5	1500
37	120	1	80	7.5	14400	1	6400	56.25	120	9600	900	80	7.5	600
38	120	1	80	10	14400	1	6400	100	120	9600	1200	80	10	800
39	120	1	80	12.5	14400	1	6400	156.25	120	9600	1500	80	12.5	1000
40	120	1	100	7.5	14400	1	10000	56.25	120	12000	900	100	7.5	750
41	120	1	100	10	14400	1	10000	100	120	12000	1200	100	10	1000
42	120	1	100	12.5	14400	1	10000	156.25	120	12000	1500	100	12.5	1250
43	120	1	120	7.5	14400	1	14400	56.25	120	14400	900	120	7.5	900
44	120	1	120	10	14400	1	14400	100	120	14400	1200	120	10	1200
45	120	1	120	12.5	14400	1	14400	156.25	120	14400	1500	120	12.5	1500
46	140	1	80	7.5	19600	1	6400	56.25	140	11200	1050	80	7.5	600
47	140	1	80	10	19600	1	6400	100	140	11200	1400	80	10	800
48	140	1	80	12.5	19600	1	6400	156.25	140	11200	1750	80	12.5	1000
49	140	1	100	7.5	19600	1	10000	56.25	140	14000	1050	100	7.5	750
50	140	1	100	10	19600	1	10000	100	140	14000	1400	100	10	1000
51	140	1	100	12.5	19600	1	10000	156.25	140	14000	1750	100	12.5	1250
52	140	1	120	7.5	19600	1	14400	56.25	140	16800	1050	120	7.5	900
53	140	1	120	10	19600	1	14400	100	140	16800	1400	120	10	1200
54	140	1	120	12.5	19600	1	14400	156.25	140	16800	1750	120	12.5	1500
55	100	1.5	80	7.5	10000	2.25	6400	56.25	150	8000	750	120	11.25	600
56	100	1.5	80	10	10000	2.25	6400	100	150	8000	1000	120	15	800
57	100	1.5	80	12.5	10000	2.25	6400	156.25	150	8000	1250	120	18.75	1000
58	100	1.5	100	7.5	10000	2.25	10000	56.25	150	10000	750	150	11.25	750
59	100	1.5	100	10	10000	2.25	10000	100	150	10000	1000	150	15	1000
60	100	1.5	100	12.5	10000	2.25	10000	156.25	150	10000	1250	150	18.75	1250
61	100	1.5	120	7.5	10000	2.25	14400	56.25	150	12000	750	180	11.25	900
62	100	1.5	120	10	10000	2.25	14400	100	150	12000	1000	180	15	1200
63	100	1.5	120	12.5	10000	2.25	14400	156.25	150	12000	1250	180	18.75	1500
64	120	1.5	80	7.5	14400	2.25	6400	56.25	180	9600	900	120	11.25	600
65	120	1.5	80	10	14400	2.25	6400	100	180	9600	1200	120	15	800
66	120	1.5	80	12.5	14400	2.25	6400	156.25	180	9600	1500	120	18.75	1000
67	120	1.5	100	7.5	14400	2.25	10000	56.25	180	12000	900	150	11.25	750
68	120	1.5	100	10	14400	2.25	10000	100	180	12000	1200	150	15	1000
69	120	1.5	100	12.5	14400	2.25	10000	156.25	180	12000	1500	150	18.75	1250

	<b>INP</b>	<b>INT</b>	<b>PP</b>	<b>PT</b>	<b>INP2</b>	<b>INT2</b>	<b>PP2</b>	<b>PT2</b>	<b>INPINT</b>	<b>INPPP</b>	<b>INPPT</b>	<b>INTPP</b>	<b>INTPT</b>	<b>PPPT</b>
<b>70</b>	120	1.5	120	7.5	14400	2.25	14400	56.25	180	14400	900	180	11.25	900
<b>71</b>	120	1.5	120	10	14400	2.25	14400	100	180	14400	1200	180	15	1200
<b>72</b>	120	1.5	120	12.5	14400	2.25	14400	156.25	180	14400	1500	180	18.75	1500
<b>73</b>	140	1.5	80	7.5	19600	2.25	6400	56.25	210	11200	1050	120	11.25	600
<b>74</b>	140	1.5	80	10	19600	2.25	6400	100	210	11200	1400	120	15	800
<b>75</b>	140	1.5	80	12.5	19600	2.25	6400	156.25	210	11200	1750	120	18.75	1000
<b>76</b>	140	1.5	100	7.5	19600	2.25	10000	56.25	210	14000	1050	150	11.25	750
<b>77</b>	140	1.5	100	10	19600	2.25	10000	100	210	14000	1400	150	15	1000
<b>78</b>	140	1.5	100	12.5	19600	2.25	10000	156.25	210	14000	1750	150	18.75	1250
<b>79</b>	140	1.5	120	7.5	19600	2.25	14400	56.25	210	16800	1050	180	11.25	900
<b>80</b>	140	1.5	120	10	19600	2.25	14400	100	210	16800	1400	180	15	1200
<b>81</b>	140	1.5	120	12.5	19600	2.25	14400	156.25	210	16800	1750	180	18.75	1500

### 附錄 C: 各品質參數之庫克距離

	Warp_Cook's	Shrink_Cook's	Volume_Cook's
1	0.00546	0.01833	0.00484
2	0.0002	0.0172	0.00487
3	0.00664	0.01338	0.00528
4	0.00048	0.00015	0.00003
5	0.00106	0.0001	0.00003
6	0.00053	0.00001	0.00007
7	0.00008	0.00112	0.00218
8	0.00547	0.00094	0.00216
9	0.00008	0.00032	0.00173
10	0.00642	0.00005	0.00001
11	0.00075	0.00011	0.00001
12	0.0063	0.0002	0
13	0.00027	0.001	0.00288
14	0.00106	0.00113	0.00286
15	0.00014	0.00129	0.00284
16	0	0.00001	0.00752
17	0.00284	0	0.00756
18	0.00002	0	0.00747
19	0.00181	0	0.00818
20	0.00961	0.00012	0.01069
21	0.00108	0.00052	0.01149
22	0	0.00293	0.00058
23	0.00267	0.00359	0.0011
24	0.00003	0.00443	0.00134
25	0.00015	0.00034	0.00006
26	0.00179	0.00006	0.00036
27	0.00052	0.00003	0.01461

	<b>Warp_Cook's</b>	<b>Shrink_Cook's</b>	<b>Volume_Cook's</b>
<b>28</b>	0.01155	0.00156	0.00002
<b>29</b>	0.02371	0.00156	0.00005
<b>30</b>	0.01913	0.00506	0.00051
<b>31</b>	0.00256	0.00027	0.00149
<b>32</b>	0.00959	0.00026	0.0014
<b>33</b>	0.00491	0.00003	0.00084
<b>34</b>	0.00263	0.00245	0.00981
<b>35</b>	0	0.00245	0.00961
<b>36</b>	0.00096	0.00114	0.00818
<b>37</b>	0.01224	0.01733	0.00131
<b>38</b>	0.00687	0.02747	0.00076
<b>39</b>	0.01594	0.02397	0.00073
<b>40</b>	0.00711	0.00334	0.00069
<b>41</b>	0.00293	0.00578	0.00035
<b>42</b>	0.0095	0.00608	0.00036
<b>43</b>	0.00046	0.00386	0.00044
<b>44</b>	0.00051	0.00763	0.00062
<b>45</b>	0.00025	0.0082	0.00056
<b>46</b>	0.00193	0.00483	0.01306
<b>47</b>	0.00878	0.0049	0.01375
<b>48</b>	0.00178	0.00351	0.01292
<b>49</b>	0.00001	0.01064	0.00462
<b>50</b>	0.00318	0.01088	0.00483
<b>51</b>	0.00004	0.00926	0.00444
<b>52</b>	0.00817	0.03203	0.00077
<b>53</b>	0.00152	0.0332	0.00063
<b>54</b>	0.00652	0.02939	0.00078
<b>55</b>	0.02287	0.02304	0.10659
<b>56</b>	0.19839	0.01968	0.0088

	<b>Warp_Cook's</b>	<b>Shrink_Cook's</b>	<b>Volume_Cook's</b>
<b>57</b>	0.02972	0.021	0.143
<b>58</b>	0.03454	0.04596	0.18221
<b>59</b>	0.03594	0.00495	0.0133
<b>60</b>	0.00002	0.01369	0.24052
<b>61</b>	0.00173	0.01793	0.01108
<b>62</b>	0.00033	0.01986	0.3822
<b>63</b>	0.00097	0.00013	0.02201
<b>64</b>	0.23403	0.22051	0.00067
<b>65</b>	0.02472	0.03199	0.00239
<b>66</b>	0.09061	0.03257	0.0012
<b>67</b>	0.00999	0.03001	0.03603
<b>68</b>	0.02291	0.00552	0.03756
<b>69</b>	0.00981	0.00186	0.0371
<b>70</b>	0.00718	0.00196	0.00371
<b>71</b>	0.00341	0.01887	0.00423
<b>72</b>	0.01115	0.01565	0.00379
<b>73</b>	0.06334	0.02153	0.00018
<b>74</b>	0.04324	0.00126	0.00015
<b>75</b>	0.06779	0.00016	0.00013
<b>76</b>	0.00184	0.00005	0.0002
<b>77</b>	0.00021	0.08486	0.00032
<b>78</b>	0.00394	0.09588	0.00035
<b>79</b>	0.0359	0.09852	
<b>80</b>	0.04953		
<b>81</b>	0.02682		

## 附錄 D: 各品質參數之顯著性檢定

翹曲之顯著性檢定

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配		
1 (常數)	1.451	.150		9.700	.000
INP	-.011	.002	-4.206	-6.276	.000
INT	-.252	.040	-2.419	-6.338	.000
PP	-.008	.002	-3.046	-5.250	.000
PT	-.004	.011	-.209	-.411	.683
INP2	4.568E-5	.000	4.250	6.820	.000
INT2	.107	.011	2.071	10.110	.000
PP2	1.599E-5	.000	1.229	2.410	.019
PT2	.000	.000	.390	.937	.352
INPINT	-.002	.000	-2.161	-9.261	.000
INPPP	9.502E-6	.000	.571	2.008	.049
INPPT	-2.039E-5	.000	-.143	-.548	.586
INTPP	.002	.000	2.251	10.994	.000
INTPT	.001	.002	.138	.830	.410
PPPT	-2.264E-5	.000	-.140	-.598	.552
2 (常數)	1.424	.134		10.634	.000
INP	-.011	.002	-4.190	-6.304	.000
INT	-.251	.040	-2.409	-6.366	.000
PP	-.008	.001	-3.027	-5.268	.000
INP2	4.576E-5	.000	4.257	6.880	.000
INT2	.107	.011	2.072	10.176	.000
PP2	1.600E-5	.000	1.230	2.427	.018
PT2	.000	.000	.250	1.052	.297
INPINT	-.002	.000	-2.163	-9.333	.000
INPPP	9.549E-6	.000	.574	2.031	.046
INPPT	-2.687E-5	.000	-.189	-.803	.425
INTPP	.002	.000	2.251	11.064	.000
INTPT	.001	.001	.130	.791	.432
PPPT	-2.835E-5	.000	-.175	-.810	.421

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	
	B之估計值	標準誤差	Beta 分配			
3	(常數)	1.418	.133		10.637	.000
	INP	-.011	.002	-4.179	-6.306	.000
	INT	-.239	.036	-2.293	-6.593	.000
	PP	-.008	.001	-3.041	-5.310	.000
	INP2	4.558E-5	.000	4.241	6.876	.000
	INT2	.107	.011	2.074	10.220	.000
	PP2	1.608E-5	.000	1.236	2.447	.017
	PT2	.000	.000	.287	1.233	.222
	INPINT	-.002	.000	-2.163	-9.360	.000
	INPPP	9.548E-6	.000	.574	2.037	.046
	INPPT	-2.538E-5	.000	-.178	-.761	.449
	INTPP	.002	.000	2.245	11.074	.000
	PPPT	-2.603E-5	.000	-.161	-.749	.457
4	(常數)	1.429	.132		10.806	.000
	INP	-.011	.002	-4.153	-6.297	.000
	INT	-.239	.036	-2.288	-6.602	.000
	PP	-.008	.001	-3.148	-5.696	.000
	INP2	4.549E-5	.000	4.232	6.886	.000
	INT2	.108	.010	2.077	10.269	.000
	PP2	1.617E-5	.000	1.243	2.469	.016
	PT2	.000	.000	.188	.985	.328
	INPINT	-.002	.000	-2.165	-9.401	.000
	INPPP	9.592E-6	.000	.576	2.053	.044
	INPPT	-3.014E-5	.000	-.212	-.924	.359
	INTPP	.002	.000	2.240	11.090	.000

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配		
5 (常數)	1.449	.130		11.131	.000
INP	-.011	.002	-4.279	-6.637	.000
INT	-.238	.036	-2.284	-6.599	.000
PP	-.008	.001	-3.152	-5.710	.000
INP2	4.557E-5	.000	4.240	6.906	.000
INT2	.108	.010	2.078	10.283	.000
PP2	1.619E-5	.000	1.245	2.475	.016
PT2	1.417E-5	.000	.014	.469	.641
INPINT	-.002	.000	-2.168	-9.425	.000
INPPP	9.652E-6	.000	.580	2.068	.042
INTPP	.002	.000	2.238	11.096	.000
6 (常數)	1.450	.129		11.203	.000
INP	-.011	.002	-4.273	-6.667	.000
INT	-.238	.036	-2.282	-6.631	.000
PP	-.008	.001	-3.155	-5.749	.000
INP2	4.550E-5	.000	4.233	6.937	.000
INT2	.108	.010	2.079	10.350	.000
PP2	1.624E-5	.000	1.248	2.496	.015
INPINT	-.002	.000	-2.169	-9.481	.000
INPPP	9.662E-6	.000	.580	2.082	.041
INTPP	.002	.000	2.236	11.150	.000

收縮之顯著性檢定

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配		
1 (常數)	1.365	.291		4.686	.000
INP	-.014	.003	-2.164	-4.213	.000
INT	.344	.077	1.274	4.456	.000
PP	-.001	.003	-.187	-.430	.668
PT	.001	.020	.027	.071	.943
INP2	8.547E-5	.000	3.101	6.476	.000
INT2	.061	.021	.450	2.923	.005
PP2	-7.428E-6	.000	-.221	-.574	.568
PT2	7.903E-5	.001	.030	.095	.925
INPINT	-.006	.000	-2.827	-16.153	.000
INPPP	-2.435E-5	.000	-.567	-2.651	.010
INPPT	-2.694E-5	.000	-.073	-.373	.710
INTPP	.001	.000	.508	3.217	.002
INTPT	.000	.003	.020	.163	.871
PPPT	-4.839E-6	.000	-.012	-.065	.948
2 (常數)	1.370	.280		4.897	.000
INP	-.014	.003	-2.164	-4.247	.000
INT	.345	.077	1.274	4.494	.000
PP	-.001	.003	-.194	-.466	.643
PT	.001	.019	.018	.052	.959
INP2	8.547E-5	.000	3.101	6.527	.000
INT2	.061	.021	.450	2.946	.004
PP2	-7.428E-6	.000	-.221	-.579	.565
PT2	7.903E-5	.001	.030	.095	.924
INPINT	-.006	.000	-2.827	-16.280	.000
INPPP	-2.435E-5	.000	-.567	-2.672	.010
INPPT	-2.694E-5	.000	-.073	-.376	.708
INTPP	.001	.000	.508	3.242	.002
INTPT	.000	.003	.020	.160	.873

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	
	B之估計值	標準誤差	Beta 分配			
3	(常數)	1.376	.257		5.347	.000
	INP	-.014	.003	-2.166	-4.290	.000
	INT	.344	.076	1.273	4.538	.000
	PP	-.001	.003	-.194	-.469	.641
	INP2	8.545E-5	.000	3.100	6.580	.000
	INT2	.061	.020	.450	2.969	.004
	PP2	-7.428E-6	.000	-.221	-.583	.562
	PT2	.000	.000	.044	.293	.770
	INPINT	-.006	.000	-2.827	-16.411	.000
	INPPP	-2.436E-5	.000	-.567	-2.695	.009
	INPPT	-2.526E-5	.000	-.069	-.399	.691
	INTPP	.001	.000	.508	3.267	.002
	INTPT	.000	.003	.021	.171	.864
4	(常數)	1.373	.255		5.385	.000
	INP	-.014	.003	-2.166	-4.324	.000
	INT	.349	.070	1.291	5.011	.000
	PP	-.001	.003	-.194	-.472	.639
	INP2	8.544E-5	.000	3.099	6.628	.000
	INT2	.061	.020	.450	2.991	.004
	PP2	-7.428E-6	.000	-.221	-.587	.559
	PT2	.000	.000	.051	.358	.721
	INPINT	-.006	.000	-2.827	-16.532	.000
	INPPP	-2.437E-5	.000	-.567	-2.716	.008
	INPPT	-2.440E-5	.000	-.066	-.389	.698
	INTPP	.001	.000	.508	3.292	.002
5	(常數)	1.389	.250		5.565	.000
	INP	-.015	.003	-2.203	-4.524	.000
	INT	.349	.069	1.292	5.048	.000
	PP	-.001	.003	-.195	-.477	.635
	INP2	8.552E-5	.000	3.103	6.679	.000
	INT2	.061	.020	.450	3.011	.004
	PP2	-7.427E-6	.000	-.221	-.591	.556
	INPINT	-.006	.000	-2.828	-16.647	.000
	INPPP	-2.433E-5	.000	-.566	-2.729	.008
	INPPT	-2.225E-6	.000	-.006	-.231	.818
	INTPP	.001	.000	.508	3.313	.001

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配			
6	(常數)	1.389	.248		5.604	.000
	INP	-.015	.003	-2.207	-4.565	.000
	INT	.349	.069	1.292	5.083	.000
	PP	-.001	.003	-.195	-.480	.633
	INP2	8.552E-5	.000	3.103	6.726	.000
	INT2	.061	.020	.450	3.032	.003
	PP2	-7.427E-6	.000	-.221	-.595	.554
	INPINT	-.006	.000	-2.828	-16.764	.000
	INPPP	-2.433E-5	.000	-.566	-2.748	.008
	INTPP	.001	.000	.508	3.337	.001
7	(常數)	1.315	.193		6.811	.000
	INP	-.014	.003	-2.185	-4.565	.000
	INT	.350	.068	1.296	5.129	.000
	INP2	8.561E-5	.000	3.106	6.772	.000
	INT2	.060	.020	.448	3.037	.003
	PP2	-1.290E-5	.000	-.383	-2.542	.013
	INPINT	-.006	.000	-2.826	-16.852	.000
	INPPP	-2.603E-5	.000	-.606	-3.229	.002
	INTPP	.001	.000	.504	3.331	.001

頂出時體積收縮比之顯著性檢定

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B之估計值	標準誤差	Beta 分配		
1 (常數)	1.732	3.674		.471	.639
INT	.574	1.599	.225	.359	.721
PP	.043	.057	.694	.756	.452
PT	.412	.400	.830	1.030	.307
INP2	.000	.000	1.730	4.660	.000
INT2	2.500	.405	1.948	6.180	.000
PP2	.000	.000	-1.123	-1.388	.170
PT2	.001	.016	.038	.059	.953
INPINT	-.075	.008	-3.989	-9.332	.000
INPPP	.000	.000	-.716	-1.607	.113
INPPT	-.004	.001	-1.024	-2.470	.016
INTPP	.035	.008	1.517	4.550	.000
INTPT	.094	.062	.429	1.521	.134
PPPT	.000	.001	-.202	-.533	.596
2 (常數)	1.636	3.264		.501	.618
INT	.573	1.585	.224	.361	.719
PP	.043	.056	.695	.764	.448
PT	.431	.224	.870	1.923	.059
INP2	.000	.000	1.730	4.699	.000
INT2	2.499	.401	1.947	6.233	.000
PP2	.000	.000	-1.124	-1.402	.166
INPINT	-.075	.008	-3.988	-9.412	.000
INPPP	.000	.000	-.715	-1.619	.111
INPPT	-.004	.001	-1.025	-2.497	.015
INTPP	.035	.008	1.517	4.588	.000
INTPT	.095	.061	.430	1.538	.129
PPPT	.000	.001	-.202	-.539	.592

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配		
3 (常數)	1.868	3.177		.588	.559
PP	.043	.056	.696	.771	.444
PT	.435	.222	.878	1.959	.055
INP2	.000	.000	1.726	4.725	.000
INT2	2.546	.377	1.983	6.749	.000
PP2	.000	.000	-1.128	-1.418	.161
INPINT	-.074	.006	-3.892	-11.871	.000
INPPP	.000	.000	-.731	-1.673	.099
INPPT	-.004	.001	-1.049	-2.605	.012
INTPP	.036	.006	1.579	5.612	.000
INTPT	.105	.053	.479	1.978	.052
PPPT	.000	.001	-.212	-.571	.570
4 (常數)	2.730	2.781		.982	.330
PP	.034	.053	.549	.638	.526
PT	.355	.172	.717	2.070	.043
INP2	.000	.000	1.724	4.745	.000
INT2	2.560	.374	1.995	6.840	.000
PP2	.000	.000	-1.120	-1.415	.162
INPINT	-.074	.006	-3.897	-11.957	.000
INPPP	.000	.000	-.722	-1.665	.101
INPPT	-.004	.001	-1.053	-2.631	.011
INTPP	.036	.006	1.576	5.633	.000
INTPT	.105	.053	.476	1.976	.053

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤差	Beta 分配		
5 (常數)	4.398	.943		4.666	.000
PT	.357	.171	.721	2.092	.040
INP2	.000	.000	1.660	4.777	.000
INT2	2.563	.373	1.997	6.879	.000
PP2	.000	.000	-.656	-2.111	.039
INPINT	-.074	.006	-3.902	-12.030	.000
INPPP	.000	.000	-.615	-1.545	.127
INPPT	-.004	.001	-1.058	-2.654	.010
INTPP	.036	.006	1.580	5.677	.000
INTPT	.104	.053	.474	1.981	.052
6 (常數)	4.433	.953		4.654	.000
PT	.365	.173	.736	2.113	.038
INP2	.000	.000	1.274	5.220	.000
INT2	2.584	.376	2.013	6.867	.000
PP2	.000	.000	-1.106	-10.316	.000
INPINT	-.073	.006	-3.862	-11.818	.000
INPPT	-.004	.001	-1.081	-2.685	.009
INTPP	.035	.006	1.513	5.445	.000
INTPT	.106	.053	.482	1.990	.051

## 附錄 E: 實驗 1350 組之整體效率分析

33.95% 1	71.66% 34	67.35% 67	53.70% 100
34.13% 2	72.34% 35	67.49% 68	61.31% 101
34.31% 3	35.79% 36	67.64% 69	61.09% 102
34.48% 4	35.84% 37	67.78% 70	60.88% 103
34.66% 5	35.89% 38	36.15% 71	60.67% 104
37.09% 6	35.94% 39	36.06% 72	60.46% 105
37.29% 7	35.99% 40	35.97% 73	35.13% 106
37.49% 8	38.63% 41	35.88% 74	34.94% 107
37.70% 9	38.69% 42	35.79% 75	34.75% 108
37.91% 10	38.74% 43	38.51% 76	34.56% 109
40.85% 11	38.80% 44	38.41% 77	34.38% 110
41.09% 12	38.86% 45	38.31% 78	37.04% 111
41.33% 13	42.03% 46	38.21% 79	36.83% 112
41.58% 14	42.09% 47	38.11% 80	36.63% 113
41.82% 15	42.16% 48	41.33% 81	36.43% 114
45.47% 16	42.22% 49	41.23% 82	36.22% 115
45.76% 17	42.29% 50	41.12% 83	39.28% 116
46.06% 18	46.16% 51	41.02% 84	39.05% 117
46.35% 19	46.24% 52	40.92% 85	38.83% 118
46.65% 20	46.31% 53	44.79% 86	38.60% 119
51.34% 21	46.39% 54	44.67% 87	38.38% 120
51.70% 22	46.47% 55	44.55% 88	41.93% 121
52.07% 23	51.36% 56	44.43% 89	41.68% 122
52.44% 24	51.45% 57	44.31% 90	41.42% 123
52.82% 25	51.53% 58	49.04% 91	41.17% 124
59.07% 26	51.62% 59	48.89% 92	40.92% 125
59.53% 27	51.71% 60	48.75% 93	45.14% 126
60.01% 28	58.13% 61	48.61% 94	44.84% 127
60.49% 29	58.24% 62	48.48% 95	44.55% 128
60.98% 30	58.35% 63	54.38% 96	44.27% 129
69.71% 31	58.46% 64	54.21% 97	43.98% 130
70.35% 32	58.57% 65	54.04% 98	49.07% 131
71.00% 33	67.21% 66	53.87% 99	48.72% 132

48.39% 133	42.83% 166	33.81% 199	29.79% 232
48.05% 134	42.45% 167	33.48% 200	29.46% 233
47.72% 135	42.08% 168	36.75% 201	29.13% 234
54.00% 136	41.71% 169	36.35% 202	28.80% 235
53.60% 137	41.35% 170	35.97% 203	31.31% 236
53.24% 138	46.38% 171	35.59% 204	30.94% 237
52.89% 139	45.94% 172	35.22% 205	30.58% 238
52.54% 140	45.50% 173	38.99% 206	30.22% 239
33.04% 141	45.08% 174	38.55% 207	29.88% 240
32.76% 142	44.66% 175	38.12% 208	32.76% 241
32.49% 143	30.11% 176	37.70% 209	32.41% 242
32.23% 144	29.79% 177	37.29% 210	32.06% 243
31.97% 145	29.48% 178	26.96% 211	31.72% 244
34.38% 146	29.18% 179	26.63% 212	31.39% 245
34.09% 147	28.88% 180	26.32% 213	38.11% 246
33.80% 148	30.96% 181	26.04% 214	38.40% 247
33.52% 149	30.63% 182	25.78% 215	38.69% 248
33.24% 150	30.30% 183	27.52% 216	38.98% 249
35.95% 151	29.99% 184	27.23% 217	39.28% 250
35.63% 152	29.68% 185	26.94% 218	41.82% 251
35.32% 153	31.95% 186	26.66% 219	42.16% 252
35.02% 154	31.60% 187	26.38% 220	42.50% 253
34.72% 155	31.30% 188	28.27% 221	42.84% 254
37.78% 156	31.00% 189	27.96% 222	43.19% 255
37.44% 157	30.71% 190	27.66% 223	46.37% 256
37.11% 158	33.27% 191	27.37% 224	46.77% 257
36.78% 159	32.94% 192	27.08% 225	47.18% 258
36.45% 160	32.62% 193	29.13% 226	47.59% 259
39.97% 161	32.30% 194	28.81% 227	48.01% 260
39.59% 162	31.99% 195	28.49% 228	52.08% 261
39.26% 163	34.86% 196	28.18% 229	52.57% 262
38.94% 164	34.51% 197	27.88% 230	53.08% 263
38.62% 165	34.16% 198	30.14% 231	53.59% 264

54.11% 265	55.58% 298	55.20% 331	48.34% 364
59.53% 266	55.82% 299	55.14% 332	48.09% 365
60.16% 267	56.07% 300	55.08% 333	52.96% 366
60.81% 268	62.18% 301	55.02% 334	52.67% 367
61.47% 269	62.48% 302	54.97% 335	52.38% 368
62.14% 270	62.78% 303	61.38% 336	52.09% 369
69.68% 271	63.08% 304	61.30% 337	51.81% 370
70.53% 272	63.39% 305	61.23% 338	57.79% 371
71.40% 273	71.70% 306	61.16% 339	57.45% 372
72.30% 274	72.09% 307	61.09% 340	57.11% 373
73.21% 275	72.48% 308	69.49% 341	56.77% 374
84.36% 276	72.88% 309	69.40% 342	56.44% 375
85.59% 277	73.28% 310	69.31% 343	63.98% 376
86.85% 278	85.38% 311	69.22% 344	63.57% 377
88.15% 279	85.89% 312	69.13% 345	63.15% 378
89.49% 280	86.40% 313	80.63% 346	62.75% 379
41.69% 281	86.92% 314	80.51% 347	62.35% 380
41.83% 282	87.44% 315	80.39% 348	72.63% 381
41.98% 283	43.57% 316	80.27% 349	72.16% 382
42.13% 284	43.53% 317	80.15% 350	71.70% 383
42.28% 285	43.48% 318	43.48% 351	71.25% 384
45.27% 286	43.44% 319	43.25% 352	70.80% 385
45.43% 287	43.40% 320	43.03% 353	41.62% 386
45.60% 288	46.69% 321	42.82% 354	41.27% 387
45.77% 289	46.64% 322	42.60% 355	40.92% 388
45.94% 290	46.59% 323	45.95% 356	40.58% 389
49.64% 291	46.55% 324	45.71% 357	40.25% 390
49.83% 292	46.50% 325	45.49% 358	43.49% 391
50.03% 293	50.48% 326	45.26% 359	43.11% 392
50.23% 294	50.42% 327	45.04% 360	42.74% 393
50.43% 295	50.37% 328	49.10% 361	42.38% 394
55.11% 296	50.32% 329	48.84% 362	42.02% 395
55.34% 297	50.26% 330	48.59% 363	45.75% 396

45.33% 397	37.84% 430	34.70% 463	43.20% 496
44.93% 398	41.13% 431	34.30% 464	43.64% 497
44.53% 399	40.70% 432	33.90% 465	44.09% 498
44.14% 400	40.27% 433	36.66% 466	44.55% 499
48.48% 401	39.86% 434	36.21% 467	45.01% 500
48.02% 402	39.45% 435	35.77% 468	47.95% 501
47.57% 403	43.23% 436	35.34% 469	48.48% 502
47.13% 404	42.76% 437	34.92% 470	49.02% 503
46.70% 405	42.30% 438	37.99% 471	49.57% 504
52.04% 406	41.85% 439	37.51% 472	50.14% 505
51.58% 407	41.41% 440	37.05% 473	53.96% 506
51.13% 408	45.78% 441	36.59% 474	54.62% 507
50.68% 409	45.26% 442	36.14% 475	55.29% 508
50.25% 410	44.74% 443	39.64% 476	55.98% 509
56.81% 411	44.24% 444	39.19% 477	56.69% 510
56.26% 412	43.75% 445	38.74% 478	61.86% 511
55.73% 413	48.90% 446	38.30% 479	62.71% 512
55.21% 414	48.30% 447	37.88% 480	63.58% 513
54.70% 415	47.73% 448	42.08% 481	64.47% 514
62.93% 416	47.23% 449	41.57% 482	65.39% 515
62.27% 417	46.74% 450	41.07% 483	72.75% 516
61.62% 418	53.37% 451	40.58% 484	73.90% 517
60.99% 419	52.75% 452	40.10% 485	75.08% 518
60.37% 420	52.15% 453	45.05% 486	76.31% 519
38.44% 421	51.56% 454	44.47% 487	77.58% 520
38.00% 422	50.98% 455	43.90% 488	88.71% 521
37.58% 423	34.63% 456	43.34% 489	90.39% 522
37.16% 424	34.21% 457	42.80% 490	92.15% 523
36.75% 425	33.81% 458	39.33% 491	93.97% 524
39.61% 426	33.42% 459	39.71% 492	95.87% 525
39.15% 427	33.04% 460	40.09% 493	44.70% 526
38.71% 428	35.55% 461	40.48% 494	44.96% 527
38.27% 429	35.12% 462	40.88% 495	45.22% 528

45.48% 529	48.67% 562	96.77% 595	90.22% 628
45.74% 530	48.72% 563	50.26% 596	89.77% 629
48.66% 531	48.78% 564	50.08% 597	89.33% 630
48.96% 532	48.83% 565	49.89% 598	49.57% 631
49.26% 533	52.30% 566	49.71% 599	49.18% 632
49.56% 534	52.36% 567	49.53% 600	48.79% 633
49.87% 535	52.42% 568	53.33% 601	48.41% 634
53.56% 536	52.48% 569	53.12% 602	48.04% 635
53.91% 537	52.54% 570	52.92% 603	52.01% 636
54.27% 538	56.85% 571	52.72% 604	51.59% 637
54.63% 539	56.92% 572	52.52% 605	51.17% 638
55.00% 540	56.99% 573	57.27% 606	50.76% 639
59.77% 541	57.06% 574	57.05% 607	50.36% 640
60.20% 542	57.13% 575	56.84% 608	55.04% 641
60.64% 543	62.61% 576	56.63% 609	54.57% 642
61.08% 544	62.69% 577	56.42% 610	54.11% 643
61.53% 545	62.77% 578	62.33% 611	53.65% 644
67.96% 546	62.86% 579	62.08% 612	53.21% 645
68.50% 547	62.94% 580	61.83% 613	58.80% 646
69.06% 548	70.36% 581	61.58% 614	58.30% 647
69.62% 549	70.46% 582	61.34% 615	57.84% 648
70.20% 550	70.55% 583	68.85% 616	57.39% 649
79.21% 551	70.65% 584	68.55% 617	56.94% 650
79.94% 552	70.74% 585	68.25% 618	64.32% 651
80.68% 553	80.93% 586	67.95% 619	63.77% 652
81.44% 554	81.06% 587	67.66% 620	63.23% 653
82.22% 555	81.18% 588	77.71% 621	62.69% 654
95.93% 556	81.31% 589	77.37% 622	62.17% 655
96.91% 557	81.43% 590	77.04% 623	71.57% 656
97.92% 558	96.08% 591	76.71% 624	70.89% 657
98.95% 559	96.25% 592	76.38% 625	70.22% 658
100.00% 560	96.42% 593	91.13% 626	69.57% 659
48.62% 561	96.60% 594	90.67% 627	68.93% 660

82.55% 661	61.73% 694	55.03% 727	60.65% 760
81.76% 662	61.02% 695	54.27% 728	66.28% 761
80.99% 663	72.05% 696	53.52% 729	67.43% 762
80.24% 664	71.10% 697	52.80% 730	68.63% 763
79.49% 665	70.17% 698	61.16% 731	69.86% 764
46.91% 666	69.26% 699	60.22% 732	71.14% 765
46.36% 667	68.38% 700	59.32% 733	79.49% 766
45.82% 668	43.08% 701	58.44% 734	81.13% 767
45.30% 669	42.52% 702	57.59% 735	82.83% 768
44.78% 670	41.99% 703	37.14% 736	84.61% 769
48.47% 671	41.46% 704	37.54% 737	86.47% 770
47.89% 672	40.95% 705	37.95% 738	43.53% 771
47.32% 673	44.39% 706	38.37% 739	43.86% 772
46.82% 674	43.81% 707	38.80% 740	44.20% 773
46.35% 675	43.24% 708	40.61% 741	44.54% 774
50.84% 676	42.69% 709	41.08% 742	44.89% 775
50.28% 677	42.15% 710	41.56% 743	47.28% 776
49.74% 678	46.01% 711	42.05% 744	47.66% 777
49.20% 679	45.39% 712	42.56% 745	48.05% 778
48.68% 680	44.79% 713	44.85% 746	48.44% 779
53.94% 681	44.21% 714	45.41% 747	48.84% 780
53.32% 682	43.63% 715	45.98% 748	51.90% 781
52.71% 683	48.34% 716	46.57% 749	52.35% 782
52.12% 684	47.74% 717	47.17% 750	52.81% 783
51.54% 685	47.16% 718	50.15% 751	53.27% 784
57.85% 686	46.59% 719	50.84% 752	53.75% 785
57.23% 687	46.04% 720	51.54% 753	57.73% 786
56.62% 688	51.65% 721	52.26% 754	58.27% 787
56.02% 689	50.98% 722	53.00% 755	58.83% 788
55.43% 690	50.32% 723	57.02% 756	59.40% 789
63.95% 691	49.67% 724	57.88% 757	59.98% 790
63.19% 692	49.05% 725	58.78% 758	65.35% 791
62.45% 693	55.82% 726	59.70% 759	66.04% 792

66.74% 793	71.27% 826	65.63% 859	65.01% 892
67.46% 794	71.57% 827	65.52% 860	64.58% 893
68.20% 795	71.86% 828	73.23% 861	64.16% 894
75.88% 796	72.16% 829	73.09% 862	63.75% 895
76.73% 797	72.46% 830	72.95% 863	72.36% 896
77.60% 798	82.14% 831	72.81% 864	71.84% 897
78.54% 799	82.52% 832	72.68% 865	71.32% 898
79.52% 800	82.91% 833	84.01% 866	70.81% 899
91.30% 801	83.31% 834	83.85% 867	70.31% 900
92.52% 802	83.70% 835	83.69% 868	82.52% 901
93.78% 803	98.06% 836	83.53% 869	81.93% 902
95.07% 804	98.54% 837	83.37% 870	81.34% 903
96.39% 805	99.02% 838	100.00% 871	80.77% 904
49.16% 806	99.51% 839	99.80% 872	80.20% 905
49.32% 807	100.00% 840	99.61% 873	98.69% 906
49.48% 808	52.82% 841	99.41% 874	97.85% 907
49.64% 809	52.73% 842	99.22% 875	97.02% 908
49.81% 810	52.65% 843	54.22% 876	96.21% 909
52.86% 811	52.57% 844	53.87% 877	95.41% 910
53.04% 812	52.49% 845	53.52% 878	53.18% 911
53.23% 813	56.10% 846	53.18% 879	52.59% 912
53.41% 814	56.01% 847	52.85% 880	52.02% 913
53.60% 815	55.92% 848	57.04% 881	51.45% 914
57.46% 816	55.83% 849	56.66% 882	50.90% 915
57.67% 817	55.73% 850	56.28% 883	55.19% 916
57.88% 818	60.40% 851	55.91% 884	54.63% 917
58.09% 819	60.30% 852	55.54% 885	54.09% 918
58.31% 820	60.21% 853	60.57% 886	53.56% 919
63.31% 821	60.11% 854	60.14% 887	53.04% 920
63.55% 822	60.01% 855	59.72% 888	58.42% 921
63.78% 823	65.97% 856	59.31% 889	57.81% 922
64.04% 824	65.86% 857	58.91% 890	57.21% 923
64.30% 825	65.74% 858	65.44% 891	56.62% 924

56.04% 925	53.48% 958	38.49% 991	42.96% 1024
62.48% 926	52.84% 959	38.98% 992	43.37% 1025
61.79% 927	52.22% 960	39.48% 993	45.50% 1026
61.19% 928	58.73% 961	39.99% 994	45.95% 1027
60.60% 929	57.96% 962	40.52% 995	46.40% 1028
60.03% 930	57.21% 963	42.52% 996	46.86% 1029
69.06% 931	56.49% 964	43.11% 997	47.33% 1030
68.32% 932	55.78% 965	43.70% 998	50.08% 1031
67.59% 933	63.72% 966	44.32% 999	50.61% 1032
66.88% 934	62.83% 967	44.95% 1000	51.14% 1033
66.18% 935	61.95% 968	47.58% 1001	51.69% 1034
78.00% 936	61.11% 969	48.30% 1002	52.26% 1035
77.06% 937	60.28% 970	49.04% 1003	56.00% 1036
76.14% 938	70.42% 971	49.80% 1004	56.60% 1037
75.25% 939	69.34% 972	50.58% 1005	57.22% 1038
74.37% 940	68.29% 973	54.20% 1006	57.89% 1039
90.86% 941	67.28% 974	55.06% 1007	58.58% 1040
89.60% 942	66.30% 975	56.00% 1008	63.95% 1041
88.39% 943	79.73% 976	56.98% 1009	64.73% 1042
87.20% 944	78.35% 977	57.99% 1010	65.52% 1043
86.04% 945	77.02% 978	63.28% 1011	66.34% 1044
50.47% 946	75.73% 979	64.42% 1012	67.17% 1045
49.82% 947	74.49% 980	65.60% 1013	74.94% 1046
49.17% 948	32.42% 981	66.83% 1014	75.99% 1047
48.55% 949	32.78% 982	68.19% 1015	77.08% 1048
47.94% 950	33.15% 983	38.74% 1016	78.19% 1049
52.21% 951	33.53% 984	39.07% 1017	79.34% 1050
51.51% 952	33.92% 985	39.41% 1018	44.94% 1051
50.83% 953	35.19% 986	39.76% 1019	45.17% 1052
50.16% 954	35.60% 987	40.11% 1020	45.40% 1053
49.52% 955	36.03% 988	41.80% 1021	45.63% 1054
54.81% 956	36.47% 989	42.18% 1022	45.86% 1055
54.14% 957	36.91% 990	42.57% 1023	48.10% 1056

48.35% 1057	50.03% 1090	52.95% 1123	54.62% 1156
48.60% 1058	52.86% 1091	52.73% 1124	54.11% 1157
48.86% 1059	52.89% 1092	52.51% 1125	53.62% 1158
49.12% 1060	52.93% 1093	56.14% 1126	53.13% 1159
51.96% 1061	52.96% 1094	55.89% 1127	52.65% 1160
52.25% 1062	53.00% 1095	55.65% 1128	57.07% 1161
52.54% 1063	56.82% 1096	55.40% 1129	56.59% 1162
52.84% 1064	56.86% 1097	55.16% 1130	56.12% 1163
53.14% 1065	56.90% 1098	59.57% 1131	55.65% 1164
56.98% 1066	56.94% 1099	59.29% 1132	55.19% 1165
57.30% 1067	56.98% 1100	59.02% 1133	60.57% 1166
57.62% 1068	61.80% 1101	58.75% 1134	60.03% 1167
57.95% 1069	61.85% 1102	58.52% 1135	59.50% 1168
58.28% 1070	61.90% 1103	64.78% 1136	58.99% 1169
63.51% 1071	61.94% 1104	64.50% 1137	58.48% 1170
63.90% 1072	61.99% 1105	64.21% 1138	65.78% 1171
64.30% 1073	68.46% 1106	63.93% 1139	65.23% 1172
64.70% 1074	68.51% 1107	63.66% 1140	64.69% 1173
65.11% 1075	68.56% 1108	71.68% 1141	64.15% 1174
72.20% 1076	68.61% 1109	71.33% 1142	63.63% 1175
72.71% 1077	68.66% 1110	70.99% 1143	73.43% 1176
73.22% 1078	78.37% 1111	70.69% 1144	72.75% 1177
73.73% 1079	78.43% 1112	70.39% 1145	72.08% 1178
74.26% 1080	78.49% 1113	83.06% 1146	71.42% 1179
85.31% 1081	78.56% 1114	82.66% 1147	70.77% 1180
85.92% 1082	78.62% 1115	82.26% 1148	84.02% 1181
86.54% 1083	93.67% 1116	81.86% 1149	83.14% 1182
87.17% 1084	93.75% 1117	81.47% 1150	82.28% 1183
87.81% 1085	93.83% 1118	100.00% 1151	81.44% 1184
49.89% 1086	93.91% 1119	99.43% 1152	80.62% 1185
49.92% 1087	93.99% 1120	98.86% 1153	100.00% 1186
49.96% 1088	53.41% 1121	98.30% 1154	100.00% 1187
49.99% 1089	53.18% 1122	97.74% 1155	100.00% 1188

100.00% 1189	54.47% 1199	62.58% 1209	76.93% 1219
100.00% 1190	53.89% 1200	61.83% 1210	75.81% 1220
54.18% 1191	60.10% 1201	71.44% 1211	92.46% 1221
53.52% 1192	59.40% 1202	70.48% 1212	92.46% 1222
52.88% 1193	58.72% 1203	69.54% 1213	92.46% 1223
52.26% 1194	58.05% 1204	68.63% 1214	92.46% 1224
51.65% 1195	57.40% 1205	67.74% 1215	92.46% 1225
56.28% 1196	64.95% 1206	80.48% 1216	
55.66% 1197	64.14% 1207	79.26% 1217	
55.06% 1198	63.35% 1208	78.08% 1218	

## 附錄 F: 結果驗證(78 組資料)之整體效率分析

37.71% 1	83.14% 27	97.13% 53
37.74% 2	34.93% 28	97.82% 54
37.92% 3	34.87% 29	24.46% 57
49.09% 4	34.18% 30	27.07% 60
49.11% 5	44.87% 31	30.18% 62
49.36% 6	44.80% 32	49.58% 65
68.62% 7	44.17% 33	43.61% 67
68.63% 8	59.77% 34	42.85% 68
69.15% 9	59.66% 35	43.51% 69
41.40% 10	58.88% 36	80.10% 70
41.43% 11	51.42% 37	83.55% 71
41.46% 12	52.18% 38	83.38% 72
54.94% 13	52.24% 39	60.45% 73
54.95% 14	65.13% 40	60.45% 74
55.00% 15	66.28% 41	60.81% 75
84.69% 16	66.28% 42	81.51% 76
84.68% 17	96.88% 43	84.17% 77
84.77% 18	100.00% 44	84.71% 78
35.82% 19	100.00% 45	91.82% 79
36.20% 20	45.62% 46	88.46% 80
36.35% 21	45.44% 47	87.71% 81
48.13% 22	45.72% 48	94.19% 560
48.70% 23	60.00% 49	100.00% 840
48.96% 24	59.78% 50	100.00% 871
70.01% 25	60.18% 51	100.00% 1151
71.16% 26	97.80% 52	71.28% 1186