

國立成功大學
工業與資訊管理學系學士班
畢業專題

機具配置與工序技能限制下生產線平衡問題
—以某鞋業為例

Assembly line balancing problem with machine and task
constraints—The case study of a shoe manufacturing
company

指導教授：吳政翰 博士

專題組長：陳柏瑋

專題組員：鍾孟璇

廖彥童

何承恩

吳欣儒

中華民國一〇八年十二月

摘要

近年來，隨著市場消費型態轉變，消費者預期之商品交貨時間持續縮減，如成衣業與製鞋業等。面臨產品交期縮短，為達成產能之改善，製造業必然需要藉由「生產線平衡」之概念實現此目標，這也成為本次專題研究之動機與內容。

然而，本次研究之個案針對生產技術人才與工序皆有其對應限制：首先，作業員需依照技能等級分類，各作業員所能操作之工序受其技能等級限制；再者，各項工序也須依照不同機台類型之能力，使用指定機台進行加工等，導致此「生產線平衡」問題須考慮作業員限制及機台限制。因此，在此次研究中，我們以製鞋業為例，單一鞋型為目標，建構一二元整數規劃模型，考慮作業員之技能等級與機台能力之限制，目標為最小化成本，包含工作站、作業員、機台與時間成本，在限制一個工作站只分配一位作業員，且每工作站至多三種機台類型的條件之下，進行「機具配置與工序技能限制下之生產線平衡」。

另外，除建構一模型外，本專題也建構出由原模型分割而成之兩個規模較小的子模型，期許能夠透過兩子模型，在與原模型解差異極小，卻擁有更快的求解速度之下，找出最佳化的生產線配置方式。本專題研究顯示，子模型與原模型之求解品質只存在些微差異，求解速度卻能大幅提升，能夠快速、有效地在較短時間內產生最佳化之工序、作業員與機台分配，減少花費之時間與成本。因此，我們得以利用子模型在短時間內求出最佳解，協助製造商快速進行最佳的生產線配置，提升生產效率及效能。

目錄

摘要.....	3
表目錄.....	6
圖目錄.....	7
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究架構與流程.....	4
第二章 文獻探討.....	6
2.1 生產線平衡 (Assembly Line Balancing, ALB)	6
2.2 資源限制之生產線平衡.....	12
2.3 小結.....	13
第三章 研究方法.....	14
3.1 問題描述.....	14
3.2 模型建立.....	16
3.2.1 問題假設.....	16
3.2.2 符號定義與說明.....	16
3.3.3 模型建構與說明.....	18
3.4 子模型建立.....	20
3.4.1 子模型一問題假設.....	20
3.4.2 子模型一之符號定義與說明.....	21
3.4.3 子模型一之建構與說明.....	22
3.4.4 子模型二問題假設.....	24
3.4.5 子模型二之符號定義與說明.....	24
3.4.6 模型二之建構與說明.....	25

第四章 數值分析.....	27
4.1 範例設計.....	28
4.2 模型結果之說明與比較.....	33
4.2.1 模型結果說明.....	33
4.2.2 模型結果比較.....	45
4.3 敏感度分析.....	47
4.4 模型結果分析與發現.....	49
第五章 結論.....	53
5.1 研究發現.....	53
5.2 未來延伸方向.....	54
參考文獻.....	55
附錄.....	58

表目錄

表 1、作業員可加工之工序表（範例）	15
表 2、機台可加工之工序表（範例）	15
表 3、實驗環境	27
表 4、10 個工序下各作業員可加工之工序表	30
表 5、10 個工序下所需之作業員等級表	31
表 6、10 個工序下各機台類型可加工之工序表	32
表 7、10 個工序下原模型之結果整合表	33
表 8、10 個工序下子模型之結果整合表	35
表 9、20 個工序下原模型之結果整合表	36
表 10、20 個工序下子模型之結果整合表	38
表 11、38 個工序下原模型之結果整合表	40
表 12、38 個工序下子模型之結果整合表	43
表 13、原模型與子模型之結果比較表	46
表 14、27 項資料組合之參數設計說明表	48
表 15、27 項資料組合之模型結果說明表	49
表 16、20 個工序下各作業員可加工之工序表	59
表 17、38 個工序下各作業員可加工之工序表	60
表 18、20 個工序下所需之作業員等級表	62
表 19、38 個工序下所需之作業員等級表	63
表 20、20 個工序下各機台類型可加工之工序表	65
表 21、38 個工序下各機台類型可加工之工序表	65

圖目錄

圖 1、研究架構圖.....	5
圖 2、先行圖示意圖.....	14
圖 3、單一產品生產線平衡示意圖.....	15
圖 4、10 個工序之產品先行圖.....	29
圖 5、10 個工序下原模型之工作站分配示意圖.....	34
圖 6、10 個工序下子模型之工作站分配示意圖.....	35
圖 7、20 個工序下原模型之工作站分配示意圖.....	37
圖 8、20 個工序下子模型之工作站分配示意圖.....	38
圖 9、38 個工序下原模型之工作站分配示意圖.....	41
圖 10、38 個工序下子模型之工作站分配示意圖.....	44
圖 11、工序數與工作站數之關係.....	50
圖 12、工作站與成本之關係.....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 13、20 個工序之產品先行圖.....	58
圖 14、38 個工序之產品先行圖.....	58

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

在今日高度競爭的商業環境中，對於客戶的需求保持高度敏感、強調以客戶為中心的商業模式已是各企業必備的能力。近年來，隨著市場消費型態轉變，消費者對於商品的預期交貨時間不斷縮短，為了使企業得以滿足市場需求，上游製造商更需達成「在交期縮短之下，最大化商品產量」的生產標準，以實現獲利目標。因此，如何在最小化成本之下，達成「交期短、產量大」的生產目標為本專題研究之動機與內容。

本專題以製鞋產業為研究對象。針對製鞋產業而言，面臨上述的市場需求改變，製造商不僅需滿足「在交期縮短之下，最大化商品產量」的目標，更需具備「能因應所需鞋型，快速進行生產線調整」的能力，如此一來，才能迅速回應供應商之需求。然而，過去此製造商之商品生產線多根據以往的實務經驗進行配置，針對以上兩目標，仰賴經驗法則進行生產線配置之方式不僅難以達成產能的提升，更無法具有快速調整生產線之彈性，顯然已不再適用。因此，本專題欲透過科學化的方式更有效且快速地協助個案進行生產線配置之改善，達成上述「在交期縮短之下，最大化商品產量」與「快速進行生產線調整」兩目標。

因此，本專題將運用「生產線平衡 (Assembly Line Balancing, ALB)」之方法協助製造商達成產能改善。「生產線平衡」為以生產目標計算出週期時間，依照每項產品的作業流程，將工序依照先行圖的優先關係安排到合適工作站，使得每個工作站的時間盡可能維持一致，以達到工作站總閒置時間最小之下，最大化設備與人員的使用率。

然而，本次研究之個案針對生產技術人才、機台與工序皆有其對應限制，因此，此研究需將生產流程中對於工序、作業員與機台的限制納入考量。其限制包含：作業員需依照其技能等級分類，各作業員所能操作之工序受其技能等級限制；不同機台類型所能操作之工序不同。加入上述之考量因素後，本專題需進行更具挑戰之資源限制下生產線平衡之規劃。

為達成上述目標，本專題結合資源限制與生產線平衡問題進行探討。在考量作業員技能等級限制與機台能力限制之下，以最小化成本為目標，進行生產線平衡。我們欲透過建立一二元整數規劃的數學模型，利用此模型求得最佳之生產線配置結果。此外，本專題亦藉由原模型拆解、設計出兩子模型，希望能夠透過兩規模較小之子模型，在與原模型之全域最佳解差異極小之下，縮短求解速度，同時得以求出最佳之生產線配置結果。

因此，本專題透過建置一二元整數規劃模型與其拆解而成之規模較小之兩子模型，並進行原模型與子模型之結果比較，期許能夠協助製造商進行最佳化之生產線配置，使其得以在面臨交期縮短之挑戰時，仍能在最小化成本之下，達成最大化產量之目標，並能更快速且準確地根據供應商所需之鞋型進行不同的生產線配置調整，減少換線時間，提高其生產效率及效能，達成「交期縮短之下，最大化商品產量」與「快速進行生產線調整」兩目標，進而實現最終「降低成本，提升利潤」之目的。

1.2 研究目的

透過研究背景之探討，我們得知供應鏈管理對於現今全球競爭市場之重要性，因此期望根據我們專業所學，以製造業為對象，透過建構生產線平衡模型，將生產線以工作站形式布置，進行加工工序、作業員與機台之分配。而此模型需滿足以下研究目的：

1. 建構技能條件與機台限制下之數學規劃問題：

本專題考慮該製造商在生產過程中，針對作業員技能等級與其可加工工序之對應限制，以及各工作站可使用之機台數量限制，建構一二元整數規劃模型，協助該製造商於考量作業員技能條件與機台數量限制之下，達成生產線平衡，最佳化生產線上工序、作業員與機台之配置。

2. 最小化成本：

將生產線平衡工作站數、作業員人數及機台設置數量最小化，使人力成本、機台設置成本與工作站設置成本皆降至最低。

3. 最小化時間：

除了成本之外，亦將加工時間納入考量，使產品總工序加工時間最小化，將產品生產週期時間降至最低。

4. 探討重要因子對最佳解結果之影響：

透過不同規模之工序問題進行模型測試後，本專題進一步針對模型中各參數因子進行分級調整，再進行求解，嘗試從模型結果中探討重要參數因子對最佳解產生之影響。

1.3 研究架構與流程

本研究之研究架構與流程可分為以下幾項：

1. 研究動機與目的：

了解生產線平衡如何在考慮作業員技能等級與機台能力限制之下，得到產品生產線配置之最佳解。

2. 文獻探討與資料蒐集：

蒐集生產線平衡之相關資料，並整理出與本研究相異之處。

3. 建構數學模型：

針對本研究所要探討之資源限制下產品生產線平衡問題，建構一數學模型。

4. 建構子模型：

由原數學模型拆解、建構兩子模型，階段性地加入機台能力限制與作業員技能等級限制，嘗試在與原模型最佳解差異最小之下，加快其求解速度。

5. 驗證分析：

透過範例問題設計及測試，求出原模型與子模型各自之最佳解，並利用原模型與子模型之求解結果及運算速度進行比較，確認兩者之結果與運算速度差異，再擴大問題規模進行模型測試、比較與分析。

6. 結論：

針對研究討論比較結果加以整理提出結論，並指出研究限制與未來研究方向。

將以上研究架構整理如下圖 1 所示：

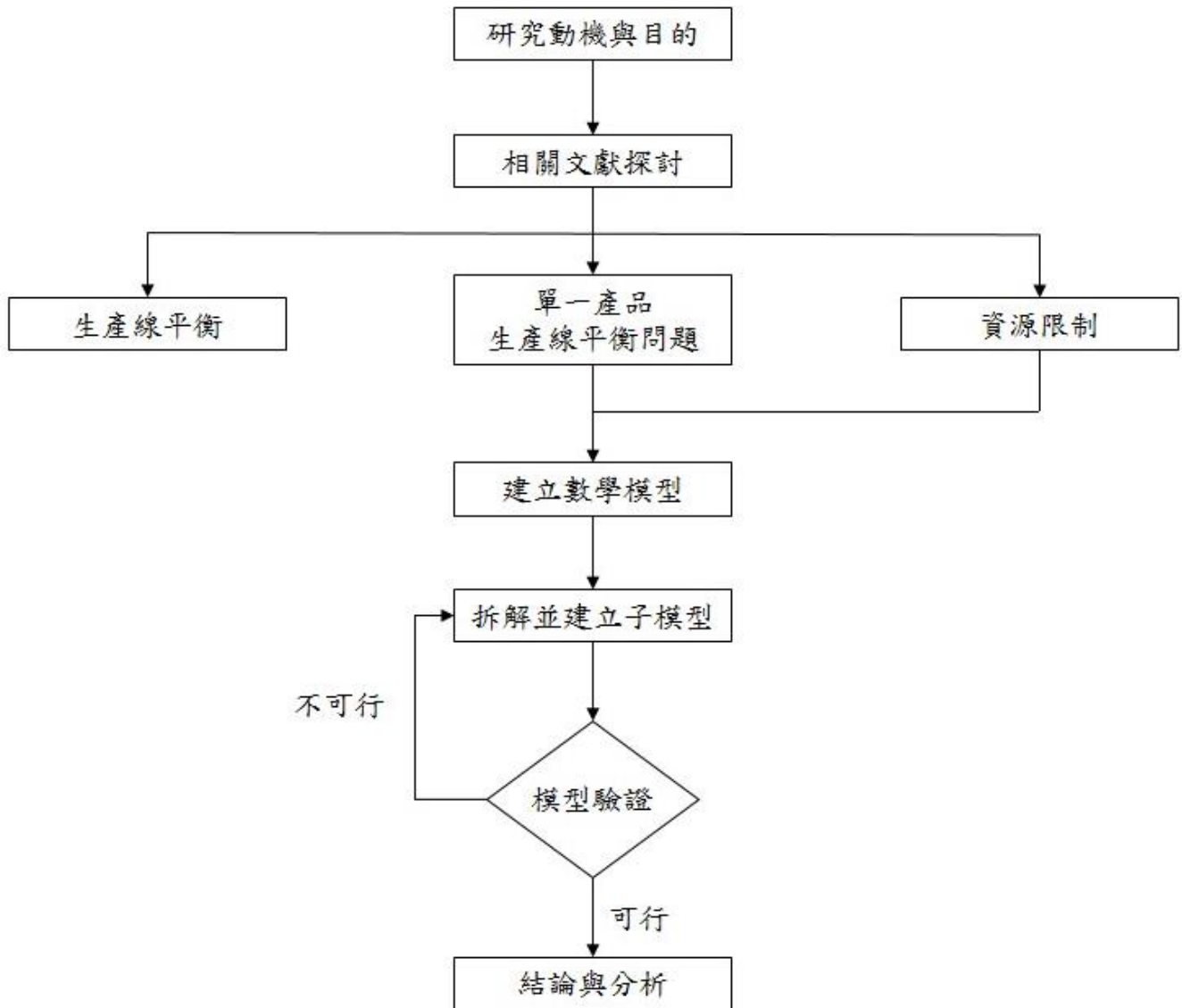


圖 1、研究架構圖

第二章 文獻探討

2.1 生產線平衡 (Assembly Line Balancing, ALB)

「生產線平衡」為在盡可能使生產線上每個工作站有相同的工作負荷、完工時間及產出量之下，將各工序指派至工作站，使得生產線上每個工作站之閒置時間最小及人員及機台效率最大化。

面對生產線平衡問題，多位學者也將不同範圍之問題定義並分類，而本專題將針對單一生產線平衡問題 (Single-model assembly line balancing problem, SALBP) 進行文獻探討。

生產線的重新配置對於實現低成本的生產系統至關重要，生產線平衡被用來尋求支持這一決策過程的優化模型。而學術工作主要集中在配置的核心問題上，即任務分配到工作站，但這些研究中常常有三種問題：

1. 研究人員到目前為止還沒有考慮到「真正的」現實世界的問題。
2. 這些問題得到了解決，但無法令人滿意地解決。
3. 科學結果不能轉回實際應用，例如，因為特殊個案研究的解決辦法不能推廣到一般問題。

解決這個問題的第一步，也是決定性的一步，是對生產線平衡問題進行一致的、權威的分類，在所有的生產線平衡問題中，最有名和研究得最好的無疑是 SALBP 問題。

Becker and Scholl (2006) 依產品數量與是否批量生產將生產線平衡問題分為以下三類：

1. 單一產品生產線平衡問題 (SALBP)：

生產線內只包含一種產品，而工序皆相同，此問題著重於產品工序的前後排序，以提高生產線效率。

2. 混合多產品生產線平衡問題 (MALBP)：

生產線內有兩種以上產品或是有兩種以上類型的產品，而此問題著重於如何將不同產品之工序排入工作站。

3. 批量多產品生產線平衡問題 (MMALBP)：

生產線上的產品有兩種以上且須批量生產，用最大限度減少設置成本，但庫存成本也同時會增加。

而 Scholl (1999) 依據考慮的目標不同，將單一產品生產線平衡問題分為以下四種類型：

1. SALBP-1：在固定的週期時間下，使工作站數最小。

2. SALBP-2：在固定的工作站數下，使工作站的週期時間最小。

3. SALBP-E：工作站數與週期時間不固定下，使生產線效率最大。

4. SALBP-F：給定工作站數與週期時間，找到可行解。

Fleszar and Hindi (2003) 針對 SALBP-1 型問題提出將霍夫曼啟發式 (Hoffmann heuristic) 加上此研究新概念，為多霍夫曼啟發式，霍夫曼啟發式是將所有工序依照先行圖，在滿足週期時間下，從第一個工作站將工序排入，先確認最小化工作站數，在將未分配的工序重複試驗，得到可行解，但由於只使用霍夫曼會讓閒置時間過大，因此改良成多霍夫曼，設置上下界，在過程處理中工序排入工作站能更快的收斂，使得求解速度加快。

SALBP 的九種假設中，關於現實世界的生產線平衡，SALBP 最強大的簡化之一是由假設(S-2)和(S-9)引起的。

(S-2)所有的任務都是在預定的模式下處理的(不存在其他處理方案)。

(S-9)所有工作站對機器和工人一視同仁。

因此，SALBP 的決策問題歸結為分配任務到工作站。

文獻的分類揭示了一些重要的研究開放領域，需要深入討論以縮小研究和實踐之間的差距。下面將討論那些最重要的。

1. 再平衡

在一個現代生產系統的生命週期內，ALB 問題不僅在其構建之前發生一次，而且還會隨著偵察成形或再平衡而不斷發生。為了對需求結構的變化或每當有新的生產技術可用時作出反應，這可能是必要的。

2. 成本協同效益

當多個任務需要相同的資源時，也會出現類似的現象。在這種情況下，當任務被分配到同一工作站時，資本成本可以降低，這通常是通過分區執行的。在文獻中，這些成本方面往往被忽視，成本直接分配給任務或站。然而，這往往不能反映實際情況。在現實生活中，成本只出現在購買或使用的資源定位在一個工作站。通過精確地將成本分配給資源而不是工作站或任務，可以實現決策問題更現實的建模。

3. 順序相依時間增量

任務之間的順序依賴關係也需要進一步研究。如果一個完成的任務的轉換結果妨礙了另一個任務的執行。這些現象不能包含在優先圖的傳統弧中，因為它們只描述兩個任務之間的依賴關係。不考慮這些依賴關係，可能會導致不可行的生產線平衡。

4. 材料供應

另一個重要但幾乎完全被忽視的方面是生產線的材料供應。材料通常是裝在某種容器裡的。一個容器可能是一些傳統的架子或盒子，但也可能是一輛自動導向車輛(AGV)直接把材料送到車站。在這種情況下，關於不同元件的容器的尺寸和它們的分配，會出現新的決策問題。如果同一物料容器為多個工作站提供服務，或者距離根據操作員的實際位置而變化，則工作站時間會受到取物料時行走距離變化的影響。由於這些彼此相互依賴，在實踐中可能有必要同時解決生產線平衡和材料供應問題。

5. 並行工作的地方

此外，很少有人注意並行工作場所。雖然在一個工作站上同時工作需要一個足夠大的場地，但在汽車及相關行業中仍有重要的實際應用。如果任務是相容的，並且不要求工件處於獨佔位置，工人可以同時在不同的安裝位置進行操作。在並行工作的情況下，當一個操作員必須等待另一個操作員完成前一個任務時，優先順序的限制會導致額外的閒置時間。因此，車站時間不再是簡單地把分配的任務時間加起來計算，而是需要一個詳細的調度問題來解決。為了彌補這一研究領域與實踐的差距，必須開發出遠遠超出簡單的工作場所任務分配的優化模型。

6. 處理方案

在過去的幾年裡，許多研究都關注加工的替代方案。大多數任務可以不同的方式執行:更快的機器和(或)多個人員配備減少了處理時間，但通常會增加資金成本(時間成本權衡)。選擇加工方案和同時平衡生產線比依次決定要好。連續規劃方法首先為每個任務選擇一個處理備選方案，然後根據所選擇的備選方案平衡線路。提示同時規劃(可能使用效率較低的演算法)與相繼規劃相比的優勢程度，將在這一領域的研究中具有很大的價值。

SALBP 的假設非常局限於現實世界的生產線系統。因此，研究人員最近加強了他們的努力，以確定、制定和解決更現實的問題。

1. 以成本和利潤為導向的目標

安裝裝配線需要大量(長期)資本投資。成本必須與生產線所獲得的利潤進行對比。安裝和操作成本以及利潤主要取決於週期時間和站的數量，因此以成本為導向的模型與 SALBP-E 密切相關。後一個問題通常分別通過反覆運算 SALBP-1 或 SALBP-2 實例來解決。因此，同樣的程式原則上也可用於以成本或利潤為導向的目標。然而，在某些情況下，有必要考慮明確包含成本和/或利潤的模型。當平衡問題與選擇加工或設備選擇的決策問題相聯繫時，尤其如此。

2. 設備選擇和工藝選擇

設備的選擇應與分配給某一站的任務所引起的要求有關。此外，製造產品的方法取決於設備(機器、人力)。當這些決策與平衡問題相聯繫時，術語生產線設計問題(ALDP)在文獻中經常使用。

設備選擇問題相當於工人選擇問題，在這個問題中，可以獲得在生產速度或品質方面具有不同資格的工人，並根據他們的資格獲得報酬

3. 並行工作站和任務

由於任務的不可分割性，最大任務時間是迴圈時間的下界 c 。如果有一個或多個任務的任務時間是所期望的迴圈時間的幾倍，那麼將多個工作站並行可以解決這個衝突

4. u 型線佈局

u 型生產線平衡問題(UALBP)是由 Milten- burg 和 Wijngaard(1994)提出並建模的。在這個問題中，裝配線被佈置成 u 形。可以將工位佈置成在同一迴圈中可以處理生產線上不同位置的兩個工件。

5. 指派限制

若干類型的限制可能限制分配給工作站的任務。特別是大型工件，如公共汽車或卡車，獲得的工作站只能在其一側執行任務，因為在工件周圍移動將花費大量時間。這導致了與任務相關的限制，因為左手邊任務不能與右手邊的任務相結合。一般來說，不能分配給同一台電腦的任務稱為不相容。

6. 隨機的任務時間

我們假設任務時間是確定的。雖然在高度自動化的線路(如傳輸線路)中經常出現這種情況，但任務時間通常在不同的週期之間變化，特別是在人工作業人員參與的情況下。一般來說，時間隨其複雜性而增加。

7. 結論與進一步研究

調查結果表明，傳統上以簡單問題(SALBP)為研究重點的生產線平衡問題(GALBP)，近年來正朝著以成本函數、設備選擇、並行、u型線佈局和混合模型生產等不同附加特徵來制定和解決廣義問題(GALBP)的方向發展。雖然已經查明和模擬了許多有關的問題，但是，複雜的解決程式的發展才剛剛開始。因此，需要進行額外的重新搜索，以採用最先進的解決方案概念，如元啟發式、高度發達的枚舉和邊界模式到 GALBP。此外，為了測試和比較方法上的改進，需要標準化和現實的測試床。由於研究產生了大量沒有明確方向的問題定義(有人可能會說，通過任意組合問題特徵)，似乎有必要提供一個分類，以便於區分和引用這些問題類型。

2.2 資源限制之生產線平衡

在製造業中，某些產業會有人員上之技能限制或是機台之能力限制，例如成衣業與製鞋業。由於產品加工工序有著難易度之分，難度較高的工序也非在短時間內就能使作業員上手、熟悉，因此每位作業員能夠操作之工序皆因其經驗與能力有著相應限制。另外，機台方面如針車，每部份的車線、車針與針距不同，只要存在著一個參數差異，就會增加換模時間，或者需要進行機台更換。因此，本專題考慮人員技能限制與機台限制，在將作業員分為不同等級，並限制機台所能執行的工序之下，進行生產線平衡。

Ağpak and Gökçen (2005) 過去的文獻只有生產線平衡模型，並未將資源限制納入模型最佳化，所以此研究建構一新的生產線平衡模型並加入資源限制，目標為最小化工作站數與資源數，但由於資源限制下生產線平衡問題為 NP hard 問題，因此此研究求解小規模問題，未擴大問題規模使用啟發式求解。

Moon, Logendran, and Lee (2009) 建構兩生產線平衡之混合整數模型且應用基因演算法擴大問題，目標為最小化工作站成本與作業員成本。第一模型主要為考慮不同能力之作業員限制，每位作業員能執行之工序不一定相同，且成本會依照能力有所分別；第二模型為限制作業員之工時，使作業員不會超過本身的工作負荷，因此該研究不限制一工作站只能有一位作業員，能讓生產線平衡更為彈性化。

Chen, Chen, Su, Wu, and Sun (2012) 建構一生產線平衡之模型適用於成衣業，並利用本研究創新的分組式基因演算法來解決此問題，目標為最小化工作負荷。此研究考慮機台類型與作業員限制，意旨 A 類型機台僅能由某些達到一定技能水準之作業員操作，工序也會依能操作之作業員與機台排入工作站，而此研究只將單一產品生產線平衡擴大問題，並未考慮多產品或批量產品生產線平衡問題。

Moon, Shin, and Kim (2014) 利用基因演算法開發一套解決單一產品生產線平衡問題，針對解決熟練與非熟練工人的限制，目的為最小化工作站成本以及非熟練工人的年薪總和，此研究利用基因演算法克服在 MILP 計算時的負擔，表現出良好的績效，因此證明了基因演算法比 MILP 求解更快速。

2.3 小結

藉由上述文獻探討，生產線平衡已有許多學者針對不同目標或不同問題做論述，大多數研究在資源限制下，只考慮單一產品生產線平衡，少數研究將多產品納入考量，且由於生產線平衡屬於 NP-hard 問題，多數學者除了使用混合整數規劃模型外，也加入了啟發式演算法，使得求解更快速並能擴大問題。

綜觀文獻後，本研究以單一產品生產線平衡加入資源限制，建構一二元整數規劃模型，不僅能使成本降至最低，也生產線效率最大。

第三章 研究方法

3.1 問題描述

本專題之研究對象為考慮作業員的技能與機台限制之下，產品生產線平衡之問題。針對此問題，首先，生產線平衡皆需依照先行圖來確認工序加工的順序，如下圖 2 所示，圖中圓圈代表節點 (node)，表示產品的工序，而所有的工序由弧 (arc) 所連接，若將位於弧的原點之節點以 i 表示，位於弧的終點之節點以 j 表示，工序 j 需在工序 i 完成後才能執行，及工序 i 為工序 j 之先行作業 (predecessor task)，例如工序 2 前面為工序 1，則表示工序 1 需先完成，才能執行工序 2，因此工序 1 也稱作工序 2 的先行作業，而圓圈旁的數字為每個工序的加工時間，為固定且事先已知。

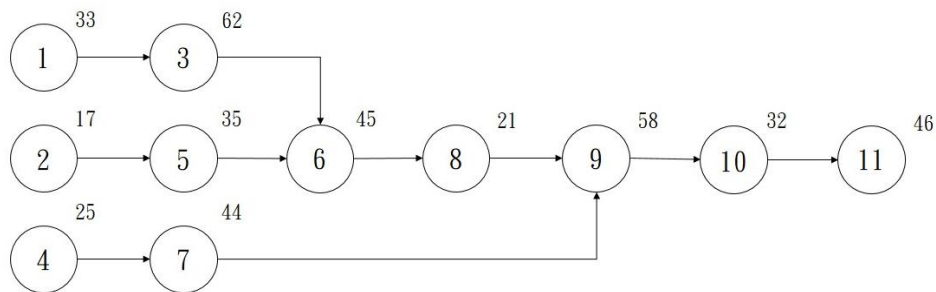


圖 2、先行圖示意圖

確認每項工序之先後關係後，由於不同難易度之工序所能執行的作業員有其相應限制，為確保每個作業員能依其等級分類進行工序加工，我們依據上述先行圖示意圖，建立作業員可加工之工序表，如下表 1 所示。若將作業員分為 3 人，將作業員 1 定為等級 1、作業員 2 定為等級 2 和作業員 3 訂為等級 3，等級數字越大表示能做的工序越多，例如：作業員 1 可加工之工序為工序 1 與工序 3。

表 1、作業員可加工之工序表（範例）

作業員	可加工之工序										
作業員 1	1	3									
作業員 2	1	2	3	6	8	10					
作業員 3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

而另一項限制為，需確定不同機台類型所能加工之工序，如下表 2 所示。若將機台類型分為 4 種，機台類型不相同之下，其對應所能加工的工序也不相同。例如：機台類型 1 能加工之工序為工序 1 與工序 3，而所有工序皆需加入此限制後再排入工作站。

表 2、機台可加工之工序表（範例）

機台	可加工之工序										
機台類型 1	1	3									
機台類型 2	2	3	5	6							
機台類型 3	7	8									
機台類型 4	9	10	11								

經上述設定，產品的每項工序皆有其對應的作業員之技能限制與機台類型之能力限制。為完成該產品，所有加工工序皆需被排入工作站，且全部皆需被加工完成，生產線平衡示意圖如下圖 3 所示，每個工作站皆會分配工序、作業員與機台。

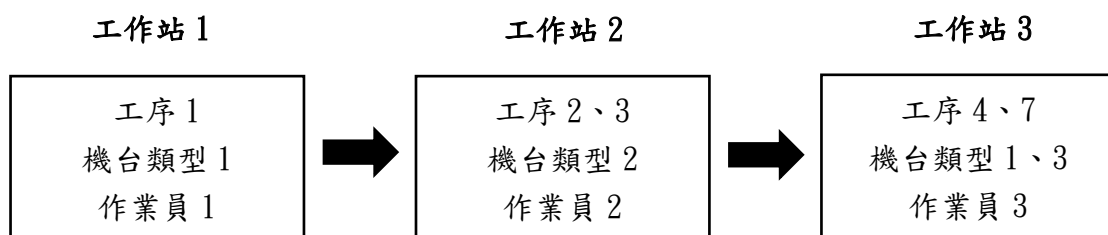


圖 3、單一產品生產線平衡示意圖

本研究將作業員技能、機台能力限制與產品生產線平衡問題結合進行探討，設定一工作站只配置一位作業員，且每一工作站放置之機台類型上限為三種之下，加入所有限制後建立一二元整數規劃模型，達成最小化成本之下，最佳化生產線配置之目標，解決資源限制下產品之生產線平衡問題。

3.2 模型建立

3.2.1 問題假設

本專題建立了以下的基本假設與限制，為建立數學模型前之前提條件，以下為所有之基本假設與限制條件：

1. 鞋型的工序須依照先行關係執行。
2. 週期時間為已知
3. 鞋型的工序加工時間長度已知但不固定。
4. 鞋型的工序對應之作業員等級和所使用之機台類型為已知。
5. 作業員等級不限為一種，一個工作站內限制只有一位作業員。
6. 機台類型不限為一種，一個工作站內放置之機台類型上限為三種。
7. 設置時間已包含在每個工序之加工時間。
8. 工作站內的工序不同時進行。

3.2.2 符號定義與說明

1. 註標
 $i, j \in I$ 令工序為 $i=1, \dots, I$
 $s \in S$ 令工作站為 $s=1, \dots, S$
 $w \in W$ 令作業員為 $w=1, \dots, W$
 $k \in K$ 令機台類型為 $k=1, \dots, K$

2. 決策變數

$$X_{iswk} = \begin{cases} 1, & \text{若工序 } i \text{ 使用機台類型 } k \text{ 安排給作業員 } w \text{ 在工作站 } s \text{ 加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Y_{sw} = \begin{cases} 1, & \text{若作業員 } w \text{ 安排至工作站 } s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Z_{sk} = \begin{cases} 1, & \text{若機台類型 } k \text{ 安排至工作站 } s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$U_s = \begin{cases} 1, & \text{若工作站有被指派工作} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

3. 參數

A_1	工作站成本權重
A_2	作業員成本權重
A_3	機台設置成本權重
A_4	最小化總加工時間權重
CT	週期時間
C_F	一個工作站的設置成本
C_M	一台機器的設置成本
C_W	作業員 w 的成本
F	工作站數限制數量
I_w	作業員 w 可做工序集合
I_k	機台類型 k 可做工序集合
M	極大數
P_{ij}	先行關係集合，工序 i 為工序 j 的前置作業
T_{iw}	作業員 w 做工序 i 的加工時間

3.3.3 模型建構與說明

目標式：

$$\text{Min } C_F \times A_1 \sum_{s=1}^S U_s + A_2 \sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W C_{W \times} y_{sw} + A_3 \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K Z_{sk} + A_4 \sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W \sum_{k=1}^K T_{iw} \times x_{iswk} \quad (0)$$

限制式：

$$\sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W \sum_{k=1}^K x_{iswk} = 1, \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W \sum_{k=1}^K s \times (x_{iswk} - x_{jswk}) \leq 1, \quad \forall (i, j) \in P_{ij} \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^S y_{sw} \leq 1, \quad \forall w \quad (3)$$

$$\sum_{w=1}^W y_{sw} = 1, \quad \forall s \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W \sum_{k=1}^K T_{iw} \times x_{iswk} \leq CT, \quad \forall s \quad (5)$$

$$\sum_{i \neq I_w}^I \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K x_{iswk} = 0, \quad \forall w \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K Z_{sk} \leq 3, \quad \forall s \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K x_{iswk} \leq M \times y_{sw}, \quad \forall s, w \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W x_{iswk} \leq M \times Z_{sk}, \quad \forall s, k \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W x_{iswk} \leq M \times U_s, \quad \forall s, k \quad (10)$$

$$\sum_{s=1}^S s \times x_{iswk} \leq F, \quad \forall i, w, k \quad (11)$$

$$\sum_{i \neq k}^I \sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W x_{iswk} = 0, \quad \forall k \quad (12)$$

$$U_{s+1} - U_s \leq 0, \quad \forall s \quad (13)$$

$$X_{isk}, Y_{sw}, Z_{sk} \in \{0,1\}, \quad \forall i, s, k \quad (14)$$

模型說明：

(0) 最小化成本。包含工作站成本、作業員成本與機台設置成本。

(1) 表示各項工序只能安排給一個作業員使用一種機台類型在一個工作站內。

(2) 為先行關係限制，假設工序 i 為工序 j 的前置工序，將每組先行關係集合 P_{ij} 代入限制式，在相同工作站、作業員與機台下，確保加工完工序 i ，才能加工工序 j 。

(3) 每位作業員只會至多分配至一個工作站。

(4) 每個工作站只會至多分配一個作業員。

(5) 為週期時間限制，確保工序加工時間乘上每個工作站所做工序不超過週期時間。

(6) 確保作業員不會分配到其不會做的工序。

(7) 確保當該工作站被開啟時，其內部的機台數量不超過不超過三台。

(8) 建立變數 X_{iswk} 與 y_{sw} 之間的關聯性，若 $y_{sw} = 1$ 則 X_{iswk} 為任意數。

(9) 建立變數 X_{iswk} 與 Z_{sk} 之間的關聯性，若 $Z_{sk} = 1$ 則 X_{iswk} 為任意數。

(10) 建立變數 X_{iswk} 與 U_s 之間的關聯性，若 $U_s = 1$ 則 X_{iswk} 為任意數。

(11) 為工作站數限制，決定使用在生產線平衡之總工作站數。

(12) 確保機台不會分配到其不會做的工序。

(13) 前面的工作站有被指派工作了之後才會排工作給下一個工作站。

(14) 為變數範圍限制。

本專題此處所設計之最佳化模型為在最小化生產成本與加工時間之目標下，考慮作業員技能與機台限制，進行工序、人員與機台之最佳化配置。然而，本專題欲嘗試在處理小規模問題時，能夠加快其求解速度，並在問題規模擴大，此模型無法求得最佳解時，透過其他方式找出求得結果。因此，本專題利用將此模型進行拆解，建構出兩規模較小之子模型，期許在較快的運算速度之下，求得與原模型最佳解差異最小之最好結果。

3.4 子模型建立

為了在能求得最佳解之情形下，進一步加快求解速度，並找出當原模型無法找出最佳解之下，能夠求得最佳解之方法，我們將模型拆解為兩規模較小之子模型，分別為子模型一與子模型二。子模型一為在最小化成本之目標下，考慮工序與機台能力限制，針對工序與機台進行配置；子模型二為在最小化成本與加工時間之目標下，考慮作業員之技能等級限制，利用模型一之分配結果，針對作業員進行配置。利用上述拆解模型之方式，透過階段性地加入機台能力限制與作業員技能等級限制，企圖透過規模較小之子模型，在較快的運算速度之下，求得與原模型之全域最佳解差異最小之最好結果，並能在原模型無法求解之情形下，藉由子模型求得生產線之最佳配置方法。

3.4.1 子模型一問題假設

1. 鞋型的工序須依照先行關係執行。
2. 週期時間為已知
3. 鞋型的工序加工時間長度已知且固定。

4. 鞋型的工序對應之機台類型為已知。
5. 機台類型不限為一種，一個工作站内放置之機台類型上限為三種。
6. 設置時間已包含在每個工序之加工時間。
7. 工作站内之工序不同時進行。

3.4.2 子模型一之符號定義與說明

1. 註標

$i, j \in I$ 令工序為 $i=1, \dots, I$
 $s \in S$ 令工作站為 $s=1, \dots, S$
 $k \in K$ 令機台類型為 $k=1, \dots, K$

2. 決策變數

$$X_{isk} = \begin{cases} 1, & \text{若工序 } i \text{ 用機台類型 } k \text{ 安排在工作站 } s \text{ 加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Z_{sk} = \begin{cases} 1, & \text{若機台類型 } k \text{ 安排至工作站 } s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Y_{sl} = \begin{cases} 1, & \text{有 1.5 級的工序在工作站} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$U_s = \begin{cases} 1, & \text{若工作站有被指派工作} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

3. 參數

A_1 工作站成本權重
 A_3 機台設置成本權重
 CT 週期時間
 C_F 一個工作站的設置成本
 C_M 一台機器的設置成本
 F 工作站數限制數量
 I_k 機台類型 k 可做工序集合

I_a	技能等級為 1.5 的作業員所做的工序
I_b	技能等級為 2、3、4 的作業員所做的工序
M	極大數
P_{ij}	先行關係集合，工序 i 為工序 j 的前置作業
T_i	工序 i 的加工時間

3.4.3 子模型一之建構與說明

目標式：

$$\text{Min } C_F \times A_1 \sum_{s=1}^S U_s + C_M \times A_3 \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K Z_{sk} \quad (0)$$

限制式：

$$\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K x_{isk} = 1, \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K s \times (x_{isk} - x_{jsk}) \leq 1, \quad \forall (i, j) \in P_{ij} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K T_i \times x_{isk} \leq CT, \quad \forall s \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K Z_{sk} \leq 3, \quad \forall s \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{isk} \leq M \times Z_{sk}, \quad \forall s, k \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^S s \times x_{isk} \leq F, \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$\sum_{i \neq I_k}^I \sum_{s=1}^S x_{isk} = 0, \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{i \neq I_b}^I \sum_{k=1}^K x_{isk} \leq Y_{s0} \times M, \quad \forall w \quad (8)$$

$$\sum_{i \neq I_a}^I \sum_{k=1}^K x_{isk} \leq Y_{s1} \times M, \quad \forall w \quad (9)$$

$$\sum_{l=1}^L Y_{sl} \leq 1, \quad \forall s \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{isk} \leq M \times U_s, \quad \forall s, k \quad (11)$$

$$U_{s+1} - U_s \leq 0, \quad \forall s \quad (12)$$

$$X_{isk}, Z_{sk}, Y_{sl} \in \{0,1\}, \quad \forall i, s, k \quad (13)$$

模型說明：

- (0) 最小化成本。包含工作站成本與機台設置成本。
- (1) 表示各項工序只能安排給一種機台類型在一個工作站內。
- (2) 為先行關係限制，假設工序 i 為工序 j 的前置工序，確保在相同工作站與機台下，加工完工序 i ，才能加工工序 j 。
- (3) 確保工序加工時間乘上每個工作站所做工序不超過週期時間。
- (4) 確保當該工作站被開啟時，其內部的機台數量不超過三台。
- (5) 建立變數 X_{isk} 與 Z_{sk} 之間的關聯性，若 $Z_{sk} = 1$ 則 X_{isk} 為任意數。
- (6) 為工作站數限制，決定使用在生產線平衡之總工作站數。
- (7) 確保機台不會分配到其不會做的工序。
- (8) 建立變數 X_{isk} 與 Y_{s0} 之間的關聯性，若 $Y_{s0} = 1$ 則 X_{isk} 為任意數。
- (9) 建立變數 X_{isk} 與 Y_{s1} 之間的關聯性，若 $Y_{s1} = 1$ 則 X_{isk} 為任意數。
- (10) 若工作站有 1.5 級的工序，則不會有 2, 3, 4 級的工序。

- (11) 建立變數 X_{isk} 與 U_s 之間的關聯性，若 $U_s = 1$ 則 X_{isk} 為任意數。
- (12) 前面的工作站有被指派工作了之後才會排工作給下一個工作站。
- (13) 為變數範圍限制。

3.4.4 子模型二問題假設

1. 鞋型的工序須依照先行關係執行。
2. 週期時間為已知
3. 鞋型的工序加工時間長度已知且固定。
4. 鞋型的工序對應之作業員等級和所使用機台類型為已知。
5. 一個工作站內限制只有一位作業員。
6. 設置時間已包含在每個工序之加工時間。
7. 工作站內的工序不同時進行。
8. 鞋型工序和工作站之對應關係為已知
9. 工作站使用機台為已知
10. 每位作業員對不同鞋型工序所需加工時間為已知
11. 每個工作站所需的最低作業員等級為已知

3.4.5 子模型二之符號定義與說明

1. 註標
 - $i \in I$ 令工序為 $i=1, \dots, I$
 - $s \in S$ 令工作站為 $s=1, \dots, S$
 - $w \in W$ 令作業員為 $w=1, \dots, W$

2. 決策變數

$$X_{isw} = \begin{cases} 1, & \text{若工序 } i \text{ 安排作業員 } w \text{ 在工作站 } s \text{ 加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$Y_{sw} = \begin{cases} 1, & \text{若作業員 } w \text{ 安排至工作站 } s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

3. 參數

A_2	作業員成本權重
A_4	最小化總加工時間權重
CT	週期時間
C_w	作業員 w 之成本
I_s	工作站 s 裡之工序的集合
L_s	工作站 s 內所需之最低技能等級
L_w	作業員 w 之技能等級
M	極大數
T_{iw}	各工人工作時間

3.4.6 模型二之建構與說明

目標式：

$$\text{Min } A_2 \sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W C_w \times Y_{sw} + A_4 \sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S T_{iw} \times X_{isw} \quad (0)$$

限制式：

$$\sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W T_{wi} \times X_{isw} \leq CT, \quad \forall s \quad (1)$$

$$\sum_{i \neq I_s} \sum_{w=1}^W X_{isw} = 0, \quad \forall s \quad (2)$$

$$\sum_{w=1}^W X_{isw} = 1, \quad \forall (i, s) \in I_s \quad (3)$$

$$\sum_{w=1}^W Y_{sw} = 1, \quad \forall s \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^S Y_{sw} \leq 1, \quad \forall w \quad (5)$$

$$\sum_{w=1}^W L_w \times Y_{sw} \geq L_s, \quad \forall s \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{isw} \leq M \times Y_{sw}, \quad \forall s, w \quad (7)$$

$$X_{isw}, Y_{sw}, Q_{sw} \in \{0,1\}, \quad \forall i, s, w \quad (8)$$

模型說明：

- (0) 最小化時間以及作業員成本。
- (1) 每個工作站的週期時間不可高過目標週期時間。
- (2) 導入 model 1 的結果。
- (3) 導入 model 1 的結果。
- (4) 一個工作站最多只能有一個作業員。
- (5) 一個作業員最多只能分配到一個工作站。
- (6) 指派給的作業員必須大於等於該工作站 task 的最高 level。
- (7) 建立 X_{isw} 與 y_{sw} 的關係式。
- (8) 為變數範圍限制。

第四章 數值分析

本專題透過建構一整數規劃模型與兩個拆解後規模較小之子模型，套用設計之範例，進行模型驗證，將兩個子模型之結果與原模型進行比較，檢驗兩者求解品質與求解速度差異。透過確認拆解後之子模型所求得之解與原模型之全域最佳解差異極小，求解速度卻能大幅改善之下，嘗試在處理規模較小之問題時，使用子模型，在較快的運算速度之下，求得問題最佳解，並在原模型無法求解規模較大的問題時，利用子模型求得結果。

本研究採用最佳化求解軟體 Gurobi optimization 8.0.0，此軟體利用分支界限法運算，可確保解為全域最佳解，並搭配 Python 3.6 建構模型進行求解。

Gurobi 對於 Python 支援度較高，其教學手冊大部分皆由 Python 撰寫，因此本研究將模型參數讀取、紀錄等利用 Python 處理，並將模型利用程式語言將其轉換至 Gurobi 做最佳解之運算。

然而，實驗環境會影響實驗數據，因此本研究之實驗數據將於電腦設備之中央處理器 CPU：Intel Core i7-6700HQ、記憶體 4GB*1DDR4(MAX 12)，系統為 Windows 10 家用版環境之下運行，實驗環境細項如下表 3 所示。

表 3、實驗環境

實驗設備	型號
中央處理器 CPU	Intel Core i7-6700HQ
記憶體	4GB*1DDR4(MAX 12)
顯示卡	NV GTX950M 2G
系統	Windows 10 家用版
求解核心	Gurobi optimizer 8.0.0
編譯語言	Python 3.6

4.1 範例設計

本章針對考慮作業員技能等級限制與機台類型限制之問題進行設計，並利用以上範例問題進行模型驗證。首先分別對 10 個工序、20 個工序、38 個工序與 50 個工序個別設計範例，以下為範例說明：

1. 假設有 5 種技能等級的作業員，等級 1 及等級 1.5 薪資為 30000 元、等級 2 薪資為 32000 元、等級 3 薪資為 34000 元、等級 4 薪資為 36000 元。每個工作站內限制安排一位作業員。
2. 假設有 14 種機台類型，每個工作站內不限制只有一種機台類型，上限則為三種機台類型。
3. 假設週期時間上限為 300 秒。
4. 假設一個工作站的設置成本為 20000 元，一台機台的設置成本為 100000 元。

因 50 個工序問題之求解結果無法進行比較，因此以下針對 10、20、38 個工序之範例問題進行詳細說明。

詳細範例說明如下：

產品之工序先行圖如下圖 4 所示，分別為 10、20 及 38 個工序之產品先行圖，圓圈內數字為工序之順序，而圓圈上方之數字為各工序的所需加工時間（秒），例如產品的工序 1 加工時間為 45.95 秒，工序 2 的加工時間為 22.64 秒。

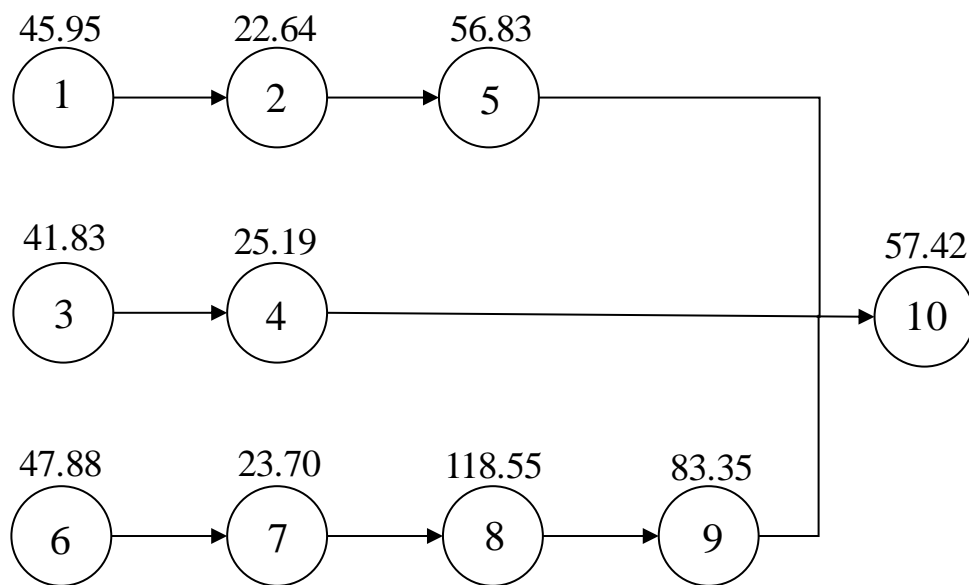


圖 4、10 個工序之產品先行圖

20 個工序之產品先行圖與 38 個工序之產品先行圖請詳見附錄。

在二元整數規劃模型的部分，不同等級之作業員所能操作之產品工序皆有其對應限制，如下表 4 所示，針對工序數 10 之問題而言，作業員人數為 10 人，作業員 1 為等級 1，作業員 5、6、7 為等級 1.5，作業員 10 為等級 2，作業員 8 為等級 3，作業員 2、3、4、9 為等級 4；針對工序 20 之問題而言，作業員人數為 10 人，作業員 1、3、4 為等級 1，作業員 5、6、7 為等級 1.5，作業員 8 為等級 3，作業員 2、9、10 為等級 4；針對工序數 38 之問題而言，作業員人數為 18 人，作業員 1、3、4 為等級 1，作業員 5、6、7 為等級 1.5，作業員 12 至 18 為等級 2，作業員 8 為等級 3，作業員 2、9、10、11 為等級 4。

作業員之等級越高所能加工之工序越多，例如：當產品工序數量為 10 時，作業員 1 能加工工序 2、4、5、7、9、10，作業員 2 能加工工序 1 至工序 10。然而，並不一定每位作業員皆會排入工作站，作業員之分配會依照生產線所需最少人數作為最終安排之作業員人數。

表 4、10 個工序下各作業員可加工之工序表

20 個工序下各作業員可加工之工序表與 38 個工序下各作業員可加工之工序表請詳見附錄。

作業員	可加工之工序									
作業員 1	2	4	5	7	9	10				
作業員 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
作業員 3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
作業員 4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
作業員 5	2	4	5	7	9	10				
作業員 6	2	4	5	7	9	10				
作業員 7	2	4	5	7	9	10				
作業員 8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
作業員 9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
作業員 10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

針對各作業員所能加工之工序限制，依作業員等級區分，等級共 5 種，分別為等級 1、等級 1.5、等級 2、等級 3、等級 4。作業員的等級越高，所能加工之工序越多，等級較高者可做等級較低者之工序，例如：等級 2 之作業員可做等級 1 與等級 2 之加工工序，等級 4 之作業員可做等級 1 到等級 4 之加工工序等。然而，其中所需技能等級為 1.5 之加工工序只能由等級 1.5 之作業員進行加工，不能由其他等級之作業員操作，並且等級 1.5 之作業員可做等級 1 之加工工序。

下表 5 為 10 個工序數下，各項工序對應之所需作業員等級。

表 5、10 個工序下所需之作業員等級表

工序	作業員
1	2
2	1
3	2
4	1
5	1
6	2
7	1
8	2
9	1
10	1

20 個工序下所需之作業員等級表與 38 個工序下所需之作業員等級表請詳見附錄。

此外，產品的每個工序有各自對應使用之機台類型，如下表 6 所示，針對工序數為 10 之問題而言，機台類型為 10 種；針對工序數為 20 及 38 之問題而言，機台類型為 14 種。

每種機台類型能加工之工序皆不相同，一種產品的一個工序只會有一種機台類型加工，一種機台類型可加工不只一種產品工序，例如：針對 10 個工序之問題而言，機台類型 1 可加工工序 2，機台類型 2 可加工工序 4；針對 20 個工序之問題而言，機台類型 5 可加工工序 6 及工序 13，機台類型 13 可加工工序 17 及 18。生產線上一個工作站可以不只放置一種機台類型，但機台類型之限制為至多三種。

機台	可執行之工序
機台類型 1	2
機台類型 2	4
機台類型 3	5
機台類型 4	7
機台類型 5	6
機台類型 6	3
機台類型 7	8
機台類型 8	10
機台類型 9	1
機台類型 10	9

表 6、10 個工序下各機台類型可加工之工序表

4.2 模型結果之說明與比較

經上述範例說明後，本專題為比較原模型與分割後之子模型的生產線平衡結果與運算速度差異，各自經由最佳化軟體 Gurobi 運算得知結果，整合比較成本、作業員派遣數量、機台使用數量與運算速度效率差異。藉由比較原模型與子模型，驗證在求解規模較小之問題時，子模型得以在較原模型更快的運算速度之下，得到與原模型之全域最佳解差異極小之最佳結果，並在面臨原模型無法處理規模較大的問題時，運用子模型進行求解。

4.2.1 模型結果說明

1. 10 個工序之模型結果

(1) 原模型結果

在生產線平衡之下，製造商最終成本為 1206515 元，工作站數為 4 站，工作站 1 加工工序 3、6、7，安排作業員 10（作業員等級 2）使用機台類型 4、5、6；工作站 2 加工工序 1、8，安排作業員 8（作業員等級 3）使用機台類型 7、9；工作站 3 加工工序 2、4、9，安排作業員 1（作業員等級 1）使用機台類型 1、2、10；工作站 4 加工工序 5、10，安排作業員 7（作業員等級 1.5）使用機台類型 3、8，將結果整理如下表 7 所示。

表 7、10 個工序下原模型之結果整合表

工作站	指派工序	作業員數	機台數
1	3,6,7	1	3
2	1,8	1	2
3	2,4,9	1	3
4	5,10	1	2
	總和	4	10

下圖 5 為工作站分配之結果示意圖。

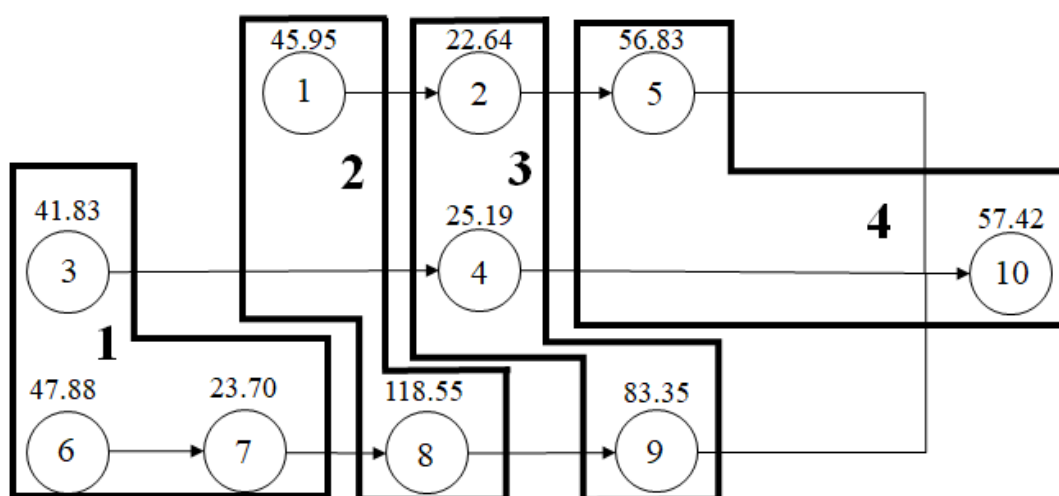


圖 5、10 個工序下原模型之工作站分配示意圖

(2) 子模型結果

將原模型分割為兩子模型後，先由子模型一求出工序與機台配置之最佳解，子模型二再導入子模型一之結果，並針對作業員進行最佳化分配。兩子模型之求解結果為，在生產線平衡之下，製造商最終成本為 1206520 元，工作站數為 4 站，工作站 1 加工工序 1、3、6，安排作業員 10（作業員等級 2）使用機台類型 5、6、9；工作站 2 加工工序 2、4、5，安排作業員 6（作業員等級 1.5）使用機台類型 1、2、3；工作站 3 加工工序 7、8，安排作業員 8（作業員等級 3）使用機台類型 4、7；工作站 4 加工工序 9、10，安排作業員 1（作業員等級 1）使用機台類型 8、10，將結果整理如下表 8 所示。

表 8、10 個工序下子模型之結果整合表

工作站	指派工序	作業員數	機台數
1	1,3,6	1	3
2	2,4,5	1	3
3	7,8	1	2
4	9,10	1	2
	總和	4	10

下圖 6 為工作站分配之結果示意圖。

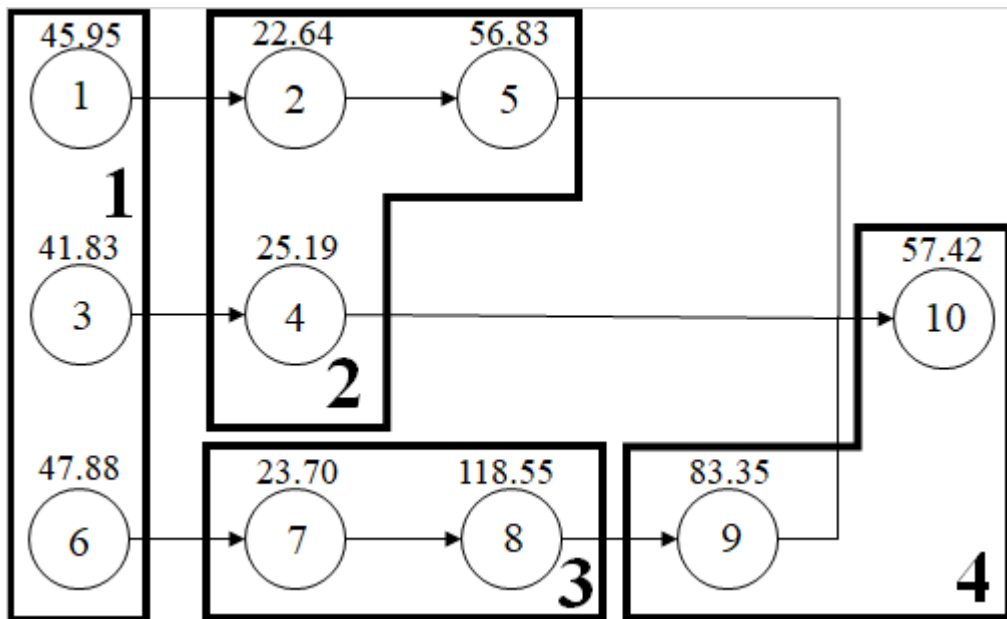


圖 6、10 個工序下子模型之工作站分配示意圖

2. 20 個工序之模型結果

(1) 原模型結果

在生產線平衡之下，製造商最終成本為 2023314 元，工作站數為 6 站，工作站 1 加工工序 6、7、8，安排作業員 10（作業員等級 4）使用機台類型 4、5、7；工作站 2 加工工序 9、10，安排作業員 1（作業員等級 1）使用機台類型 8、10；工作站 3 加工工序 11、12、13、14，安排作業員 2（作業員等級 4）使用機台類型 5、11、14；工作站 4 加工工序 1、3、15、16，安排作業員 9（作業員等級 4）使用機台類型 6、9、12，工作站 5 加工工序 2、17、18、19，安排作業員 5（作業員等級 1.5）使用機台類型 1、7、13；工作站 6 加工工序 4、5、20，安排作業員 8（作業員等級 3）使用機台類型 2、3、10，將結果整理如下表 9 所示。

表 9、20 個工序下原模型之結果整合表

工作站	指派工序	作業員數	機台數
1	6,7,8	1	3
2	9,10	1	2
3	11,12,13,14	1	3
4	1,3,15,16	1	3
5	2,17,18,19	1	3
6	4,5,20	1	3
	總和	6	17

下圖 7 為工作站分配之結果示意圖。

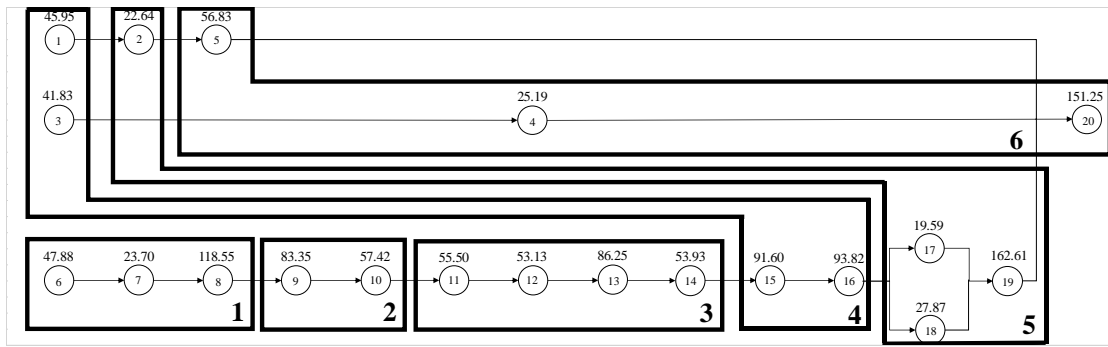


圖 7、20 個工序下原模型之工作站分配示意圖

(2) 子模型結果

在生產線平衡之下，製造商最終成本為 2023319 元，工作站數為 6 站，工作站 1 加工工序 6、7、8，安排作業員 10（作業員等級 2）使用機台類型 4、5、7；工作站 2 加工工序 9、10，安排作業員 1（作業員等級 1）使用機台類型 8、10；工作站 3 加工工序 11、12、13、14，安排作業員 2（作業員等級 4）使用機台類型 5、11、14；工作站 4 加工工序 1、3、15、16，安排作業員 9（作業員等級 4）使用機台類型 6、9、12，工作站 5 加工工序 2、17、18、19，安排作業員 5（作業員等級 1.5）使用機台類型 1、7、13，工作站 6 加工工序 4、5、20，安排作業員 8（作業員等級 3）使用機台類型 2、3、10，將結果整理如下表 10 所示。

表 10、20 個工序下子模型之結果整合表

工作站	指派工序	作業員數	機台數
1	6,7,8	1	3
2	9,10	1	2
3	11,12,13,14	1	3
4	1,3,15,16	1	3
5	2,17,18,19	1	3
6	4,5,20	1	3
	總和	6	17

下圖 8 為工作站分配之結果示意圖。

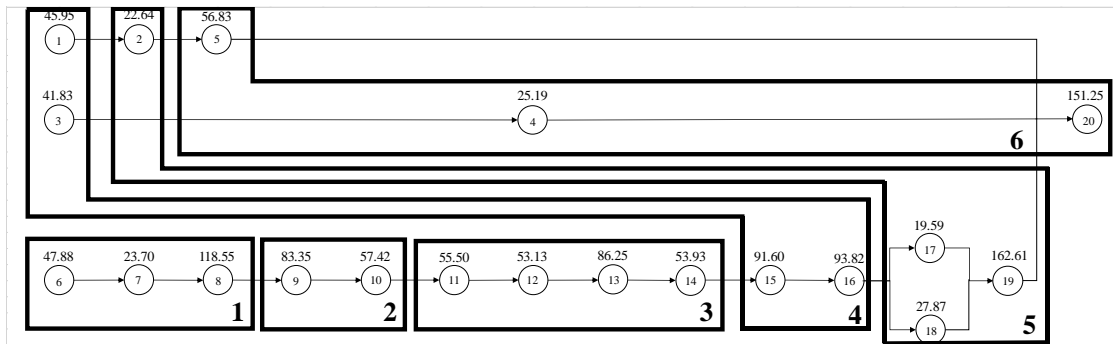


圖 8、20 個工序下子模型之工作站分配示意圖

3. 38 個工序之模型結果

(1) 原模型結果

在生產線平衡之下，製造商最終成本為 4186967 元，工作站數為 15 站，工作站 1 加工工序 6、7、8，安排作業員 16（作業員等級 2）使用機台類型 4、5、7；工作站 2 加工工序 9、10，安排作業員 1（作業員等級 1）使用機台類型 8、10；工作站 3 加工工序 11、12、13、14，安排作業員 9（作業員等級 4）使用機台類型 5、11、14；工作站 4 加工工序 1、3、15、16，安排作業員 14（作業員等級 2）使用機台類型 6、9、12；工作站 5 加工工序 2、17、18、19，安排作業員 5（作業員等級 1.5）使用機台類型 1、7、13；工作站 6 加工工序 4、5、20，安排作業員 17（作業員等級 2）使用機台類型 2、3、10；工作站 7 加工工序 21、22、23、24，安排作業員 12（作業員等級 2）使用機台類型 1、3、8；工作站 8 加工工序 25，安排作業員 2（作業員等級 4）使用機台類型 6；工作站 9 加工工序 26、27，安排作業員 15（作業員等級 2）使用機台類型 6、10；工作站 10 加工工序 28、29，安排作業員 6（作業員等級 1.5）使用機台類型 8、12；工作站 11 加工工序 31，安排作業員 3（作業員等級 1）使用機台類型 8；工作站 12 加工工序 30、32，安排作業員 8（作業員等級 3）使用機台類型 5、11；工作站 13 加工工序 33、34，安排作業員 7（作業員等級 1.5）使用機台類型 1、9；工作站 14 加工工序 36，安排作業員 13（作業員等級 2）使用機台類型 6；工作站 15 加工工序 35、37、38，安排作業員 10（作業員等級 4）使用機台類型 4、7、12，將結果整理如下表 11 所示。

表 11、38 個工序下原模型之結果整合表

工作站	指派工序	作業員數	機台數
1	6,7,8	1	3
2	9,10	1	2
3	11,12,13,14	1	3
4	1,3,15,16	1	3
5	2,17,18,19	1	3
6	4,5,20	1	3
7	21,22,23,24	1	3
8	25	1	1
9	26,27	1	2
10	28,29	1	2
11	31	1	1
12	30,32	1	2
13	33,34	1	2
14	36	1	1
15	35,37,38	1	3
	總和	15	34

下圖 9 為工作站分配之結果示意圖。

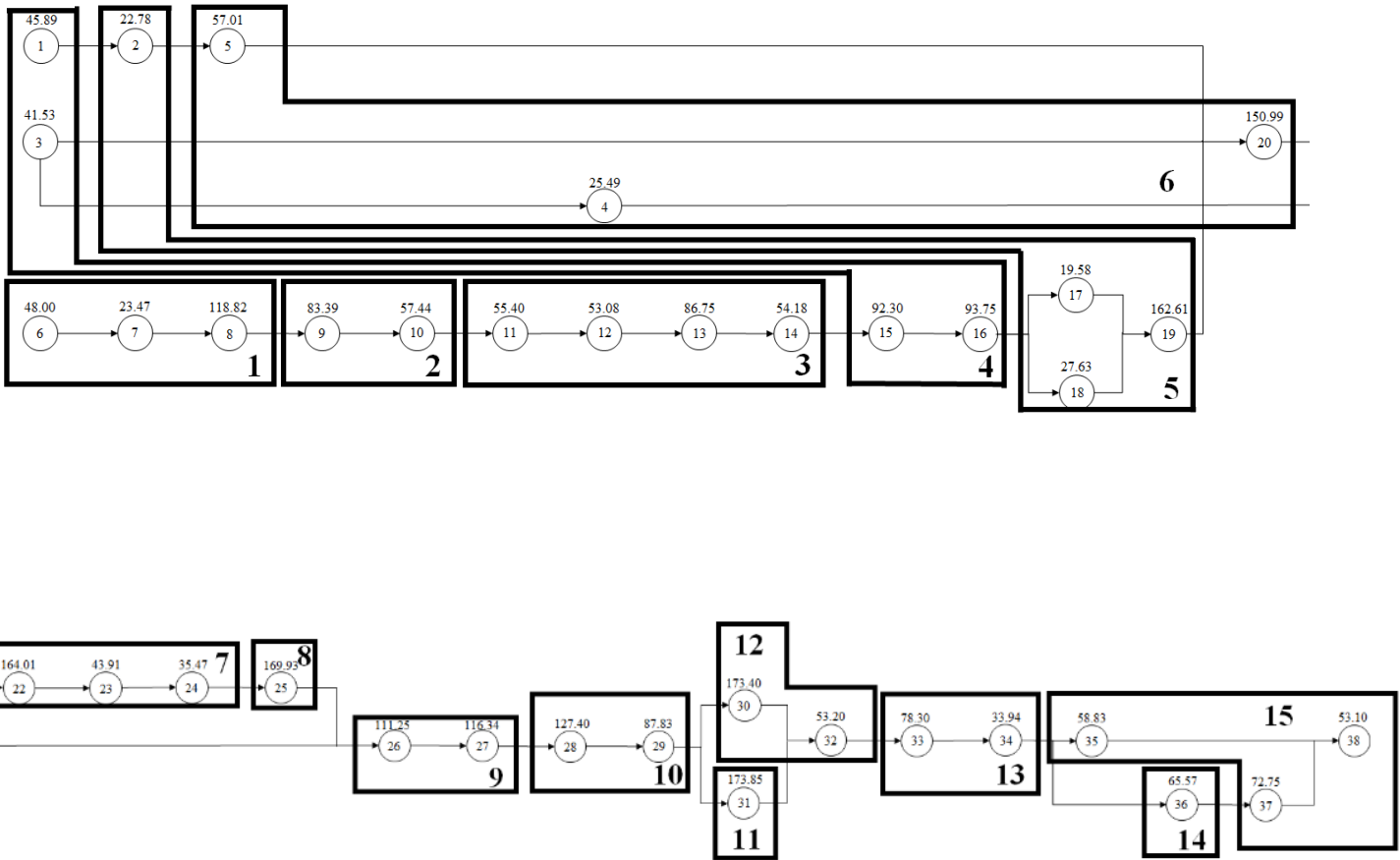


圖 9、38 個工序下原模型之工作站分配示意圖

(2) 子模型結果

在生產線平衡之下，製造商最終成本為 4186969 元，工作站數為 15 站，工作站 1 加工工序 6、7、8，安排作業員 16（作業員等級 2）使用機台類型 4、5、7；工作站 2 加工工序 9、10，安排作業員 4（作業員等級 1）使用機台類型 8、10；工作站 3 加工工序 11、12、13、14，安排作業員 2（作業員等級 4）使用機台類型 5、11、14；工作站 4 加工工序 1、3、15、16，安排作業員 18（作業員等級 2）使用機台類型 6、9、12；工作站 5 加工工序 2、17、18、19，安排作業員 5（作業員等級 1.5）使用機台類型 1、7、13；工作站 6 加工工序 5、20，安排作業員 13（作業員等級 2）使用機台類型 3、10；工作站 7 加工工序 21、22、23、24，安排作業員 15（作業員等級 2）使用機台類型 1、3、8；工作站 8 加工工序 25，安排作業員 10（作業員等級 4）使用機台類型 6；工作站 9 加工工序 4、26、27，安排作業員 14（作業員等級 2）使用機台類型 2、6、10；工作站 10 加工工序 28、29，安排作業員 6（作業員等級 1.5）使用機台類型 8、12；工作站 11 加工工序 31，安排作業員 1（作業員等級 1）使用機台類型 8；工作站 12 加工工序 30、32，安排作業員 8（作業員等級 3）使用機台類型 5、11；工作站 13 加工工序 33、34，安排作業員 7（作業員等級 1.5）使用機台類型 1、9；工作站 14 加工工序 36、37，安排作業員 12（作業員等級 2）使用機台類型 4、6；工作站 15 加工工序 35、38，安排作業員 11（作業員等級 4）使用機台類型 7、12，將結果整理如下表 12 所示。

表 12、38 個工序下子模型之結果整合表

工作站	指派工序	作業員數	機台數
1	6,7,8	1	3
2	9,10	1	2
3	11,12,13,14	1	3
4	1,3,15,16	1	3
5	2,17,18,19	1	3
6	5,20	1	2
7	21,22,23,24	1	3
8	25	1	1
9	4,26,27	1	3
10	28,29	1	2
11	31	1	1
12	30,32	1	2
13	33,34	1	2
14	36,37	1	2
15	35,38	1	2
	總和	15	34

下圖 10 為工作站分配之結果示意圖。

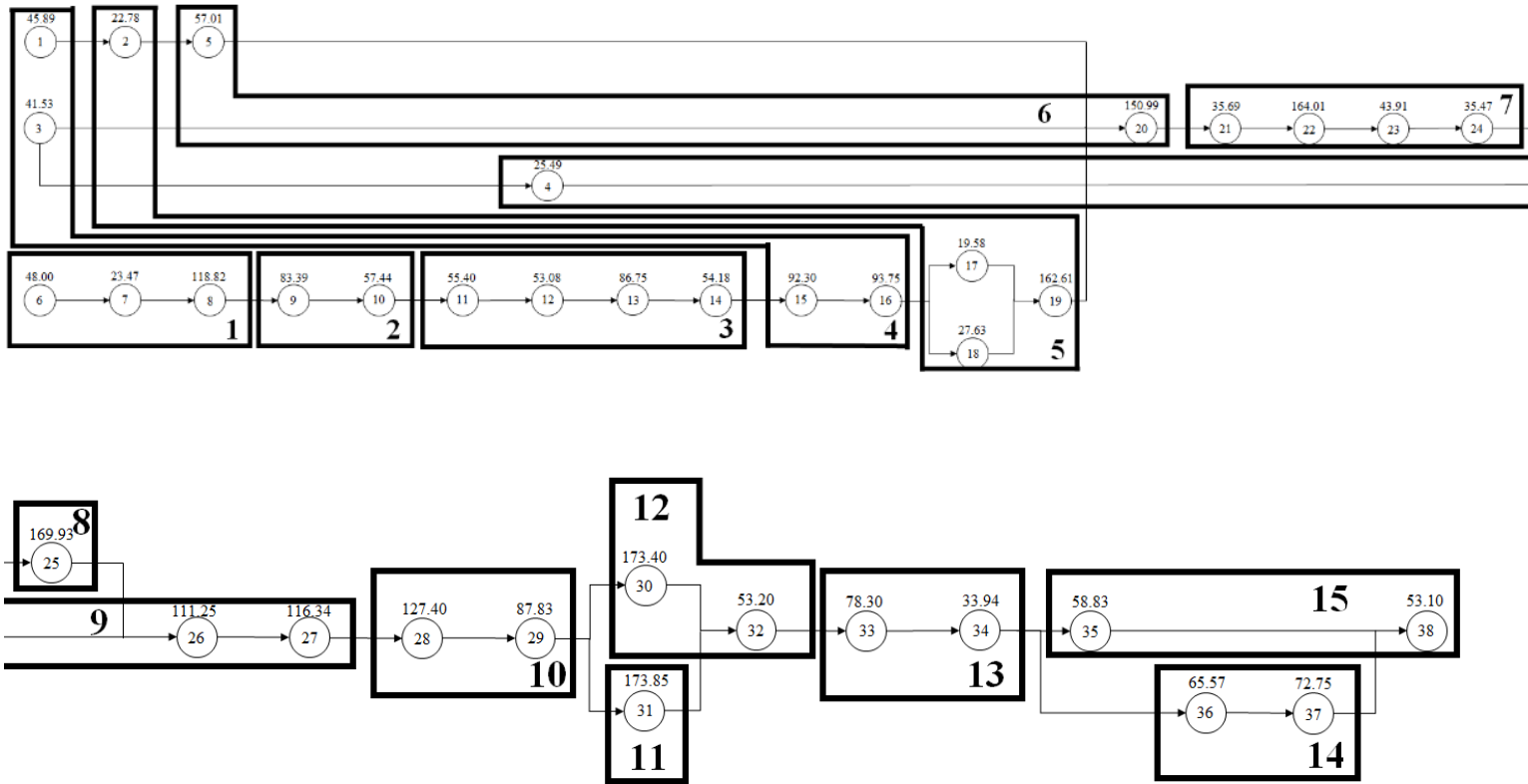


圖 10、38 個工序下子模型之工作站分配示意圖

4. 50 個工序之模型結果

在 50 個工序的問題之下，原模型因求解時間過長，無法由 Gurobi 求得解，所以僅能由 10、20、38 個工序問題之求解結果與子模型進行比較。

4.2.2 模型結果比較

此部分針對 10、20 及 38 個工序的問題，整合原模型與兩子模型求解之結果進行比較，比較項目分別為，最終求得之「生產線建置成本」與「求解時間差異」，並計算出兩模型求得之成本差異率與求解時間差異率，進行更詳細之結果比較。

經由上述結果整理如下表 13 所示，可發現當求解 10 個工序問題時，原模型與子模型求得之成本差異率 $<0.01\%$ ，而運算速度之差異則高達 98.38%；而求解 20 個工序之問題時，在原模型與子模型求得之成本差異率也 $<0.01\%$ 之下，運算速度之差異也高達 73.18%；最後，在求解 38 個工序之規模較大之問題時，原模型與子模型求得之成本差異率也 $<0.01\%$ ，而運算速度之差異更高達 99.75%。

藉由 10、20、38 個工序之問題分別進行原模型與子模型之模型驗證後，結果顯示，當求解三種不同規模之問題時，可從成本差異率均小於 0.01%得知，子模型之求解結果均與原模型差異極小。另外，從兩模型針對三個問題之運算時間差異率分別高達 98.63%、73.18%、99.75%，我們也發現，子模型之求解速度與原模型之求解時間相形之下大幅縮短。

因此，針對三種不同規模問題之求解結果，可見子模型能夠在與原模型求解結果差異極小之下，大幅縮短運算時間。以上結果符合本專題之期待，透過上述之模型驗證，我們得以提高子模型對於求解品質與求解速度之信心，並嘗試在原模型求解速度過久，或無法求得結果時，利用子模型進行求解。

然而，經過 10、20、38 個工序之問題進行模型驗證後，本專題欲更進一步透過多因子實驗設計，針對此子模型進行更全面的模型測試，並透過參數因子的變動，嘗試找出不同因子對模型結果可能產生之影響。實驗設計之詳細內容與模型之求解結果詳見 4.3。

表 13、原模型與子模型之結果比較表

工序數量	作業員數量	工作站限制數	原模型		子模型		成本差異率 (%)	Run time 差異率 (%)
			總成本	Run Time (s)	總成本	Run Time (s)		
10	10	10	1206515	6.57	1206520	0.09	<0.01%	98.63%
20	10	10	2023314	14.73	2023319	3.95	<0.01%	73.18%
38	15	25	4186967	68.00	4186969	0.17	<0.01%	99.75%
50	30	30	求解時間過長		5195867	406.62		

4.3 敏感度分析

為了協助製造商達成生產線平衡，本專題透過建置生產線平衡模型，嘗試在最小化成本與最小化時間之目標下，最佳化生產線中加工工序、作業員與機台之分配。然而，由於建構之模型面臨規模較大之問題時，發生求解時間過久之情形，本專題嘗試進一步將原模型分割為兩子模型，子模型一針對加工工序與機台進行配置，子模型二則是針對作業員進行分配。

建構子模型後，本專題分別設計 10、20、38 個工序之問題，進行原模型與子模型之驗證，並發現子模型得以在與原模型解差異極小的狀況下，大幅加快求解速度，並能在面臨規模較大之問題，原模型無法求解時，求得最佳配置結果。

針對具備高求解品質與良好運算速度的子模型，本節將進一步針對模型中各參數因子進行分級調整，嘗試從不同參數變動後對模型結果之變動，推斷各模型因子與模型結果之間的關係，與其對模型結果之影響。

如下圖所示，本專題利用原數據，分別針對工序數、工作站限制數、作業員限制數進行調整，設計出 27 組資料組合。工序數方面共有 4 個刻度，分別為工序數 50、38、20、10。工序數 50 之問題中，又將工作站之限制數分別設定為 18、19、20、25、30，作業員則在上限數為 18 人至 30 人中變動；工序數 38 之問題中，將工作站之限制數分別設定為 15、16、18、20，作業員則在上限數為 15 人至 20 人中變動；工序數 20 之問題中，又將工作站之限制數分別設定為 6、10、15、20，作業員則在上限數為 6 人至 20 人中變動；工序數 10 之問題中，將工作站之限制數分別設定為 4、5、10，作業員限制數也分別設定為 4、5、10 人。

表 14、27 項資料組合之參數設計說明表

資料組 編號	工序數	工作站 限制數	作業員 限制數
1	50	30	30
2	50	25	25
3	50	20	23
4	50		20
5	50		25
6	50	19	21
7	50		19
8	50		23
9	50	18	20
10	50		18
11	38	20	25
12	38		20
13	38	18	20
14	38		18
15	38	16	18
16	38		16
17	38	15	18
18	38		15
19	20	20	20
20	20	15	15
21	20	10	10
22	20	10	8
23	20	6	6
24	10	10	10
25	10	5	5
26	10	4	5
27	10	4	4

4.4 模型結果分析與發現

針對 27 項資料組合，兩子模型之模型結果如下圖所示：

表 15、27 項資料組合之模型結果說明表

編號	工序數	工作站 限制數	作業員 限制數	工作站 使用數	子模型一 成本	子模型二 成本	子模型一 Run time	子模型二 Run time	總成本	總 Run time
1	50	30	30	19	4580000	615867	406.53	0.09	5195867	406.62
2	50	25	25		4580015	615877	51.94	0.18	5195891	52.12
3	50	20	23	19	4580000	617879	1.09	0.07	5197879	1.16
4	50		20			無可行解	1.46	無可行解	無可行解	無可行解
5	50		25			617879	0.30	0.07	5197879	0.37
6	50	19	21	19	4580000	無可行解	0.35	無可行解	無可行解	無可行解
7	50		19			無可行解	0.34	無可行解	無可行解	無可行解
8	50		23			587880	0.24	0.07	5247880	0.31
9	50	18	20	18	4660000	無可行解	0.30	無可行解	無可行解	無可行解
10	50		18			無可行解	0.24	無可行解	無可行解	無可行解
11	38	20	25	15	3700000	486953	12.08	0.06	4186953	12.15
12	38		20			490952	14.01	0.05	4190952	14.06
13	38	18	20	15	3700000	490955	6.28	0.06	4190955	6.34
14	38		18			492958	8.40	0.06	4192958	8.46
15	38	16	18	15	3700000	486957	0.18	0.06	4186957	0.23
16	38		16			490960	0.19	0.05	4190960	0.23
17	38	15	18	15	3700000	486956	0.13	0.05	4186956	0.17
18	38		15			無可行解	0.15	無可行解	無可行解	無可行解
19	20	20	20	6	1820000	193306	4.62	0.04	2013306	4.66
20	20	15	15	6	1820000	193313.7	2.24	0.03	2013314	2.27
21	20	10	10	6	1820005	203314.1	2.14	0.05	2023314	3.95
22	20	10	8	6	1820000	203309.4	0.56	0.03	2023309	0.59
23	20	6	6	6	1820000	無可行解	0.03	無可行解	無可行解	無可行解
24	10	10	10	4	1080000	126517.7	0.07	0.03	1206518	0.09
25	10	5	5	4	1080000	132522.7	0.08	0.03	1212523	0.10
26	10	4	5	4	1080000	132521.7	0.07	0.03	1212522	0.10
27	10	4	4	無可行解	無可行解	無可行解	無可行解	無可行解	無可行解	無可行解

根據以上模型結果，本專題發現以下幾項關係與影響：

1. 工序數與工作站數之關係

如下圖所示，我們依序對工序數 50、38、20 和 10 做分析，發覺對應之工作站數斜率為負。因此可推得工序之數量與工作站數和成本有著正比關係。

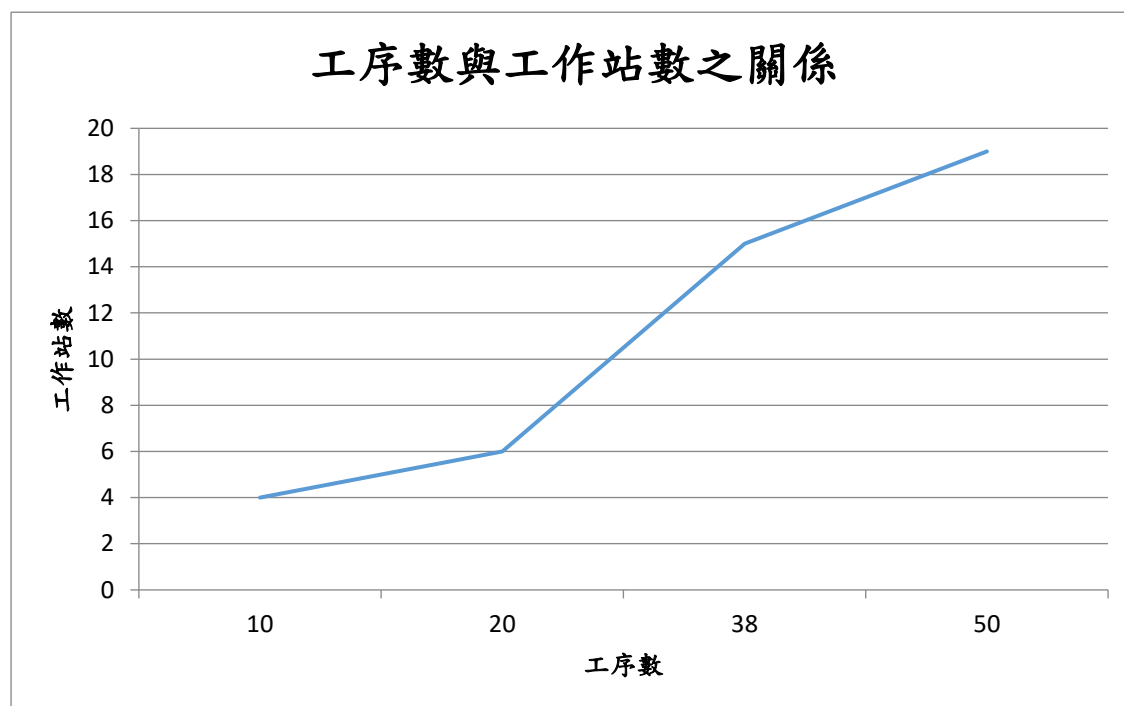


圖 11、工序數與工作站數之關係

2. 工人等級限制與異質性對模型的影響

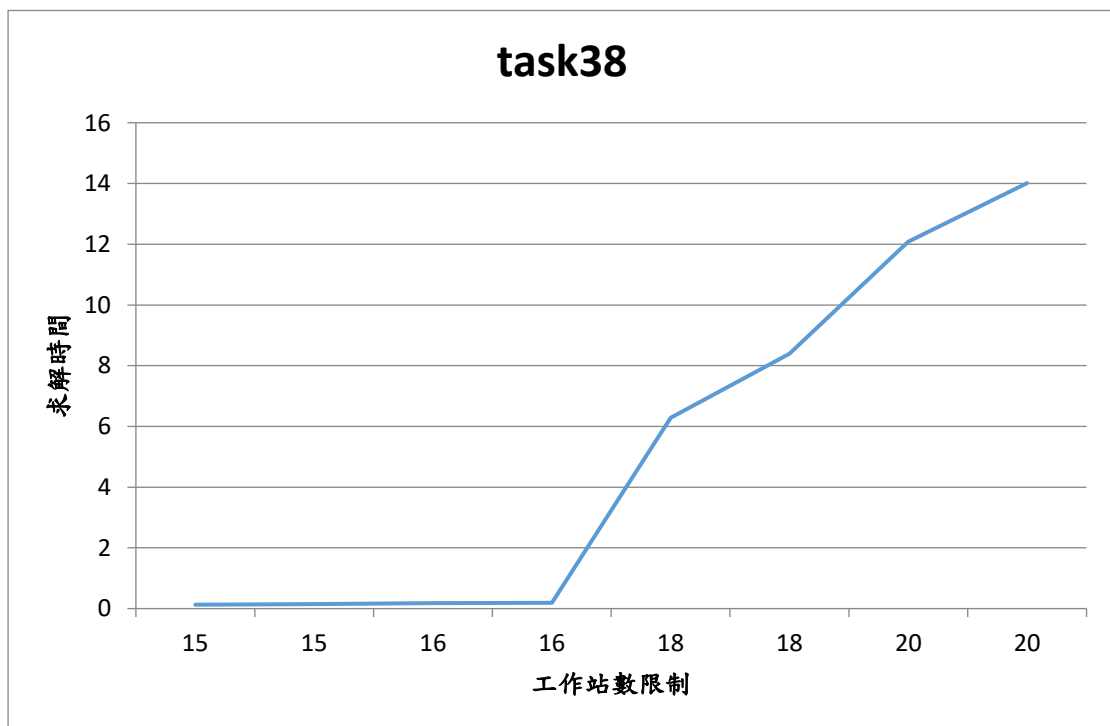
如表 15 所示，工人數目限制與模式的複雜度有關，若壓低工人數限制，將影響部分工人分配的狀況，不僅會影響成本，更可能因限制過多而找不到可行解。而在其背後真正具決定性影響力的，是技能工的等級。若高技能工的人數被壓縮得太少，少於子模型一分配後所需之最低數量，在子模型二的階段將找不到最佳解。

除此之外，我們所設計之技能工加工時間，各個工人處理各工序的時間皆不同。在一般的問題設計裡，不同工人處理各工序的時間是使用一平均值，也就是某一工序，無關乎指派的工人差異，其加工時間皆為等值。這是我們問題設計的獨特之處，這樣的設計更加地貼近現實，且在現場工人的安排上具備很好的彈性。

子模型二是建構在子模型一的分配結果上所進行的再分配，以及工序有著技能等級的限制，當高技能工人數過少時(而這也是普遍的狀況)，子模型二的階段會有找不到可行解的風險；加上加工時間在各工人間有著異質性，這會增加子模型二的複雜性和限制。以上兩點為子模型二在一些資料下找不到最佳解的原因。

3. 工作站限制數對模型之影響

工作站限制太嚴苛，可能會造成沒有可行解的情況，而給予過多的工作站數則會造成求解時間大幅增加，如圖所示，工作站數愈多，程式需要越久的時間得出解，在 38 和 50 個工序數的情況下皆是如此。



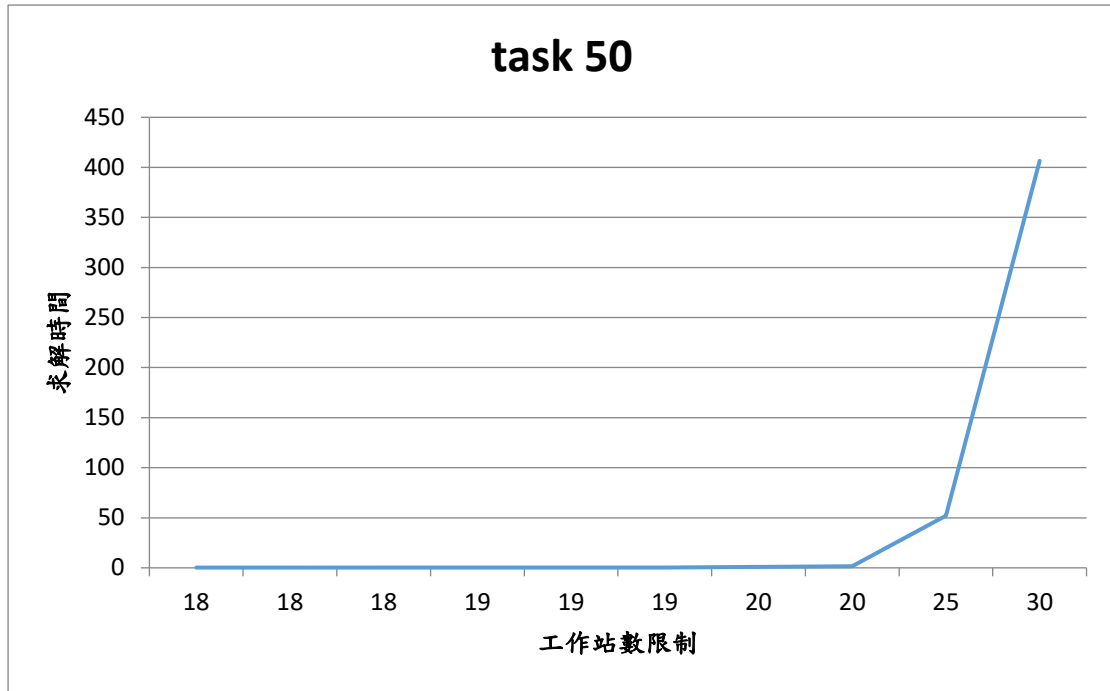


圖 13、工作站數與求解時間之關係

基於以上三點，工序數和對成本有顯著影響；而技能工的人數，則對模型建構的成功與否有顯著影響；工作站的多寡會對程式的求解時間有很大的影響。

第五章 結論

5.1 研究發現

在完成相關文獻探討及考慮作業員限制與機台限制下，我們建構了單一產品生產線平衡的數學規劃模型，並以此模型得出之結果，來提供工廠排程一個穩定、快速且有效率的分配參考，在排程出現臨時狀況時，例如員工缺曠，負責安排工作站分配的人員，可以根據模型所得出的結果，進行有效且快速的人員安排。

我們從各種資料組合的結果分析中，找到具管理意義的改善方向，以下就研究過程中之發現列點說明：

1. 我們設計之子模型能在與全域最佳解之間差異極小的狀況下，大幅地提升運算速度和降低求解的複雜性。
2. 工序的數量將影響工作站的使用數，因此對成本的影響非常明顯。
3. 機台的增設成本最高，因此在細部調整分配時，應優先考慮機台的使用數和分配，並在機台設置數和工作站設置數間取平衡。
4. 高技能工的數量是模式能否產生最佳解的關鍵因素。
5. 工作站限制數為影響求解時間的關鍵因素。

綜合以上，為了達成最小化成本之目的，應特別留意工序之數量和機台的設置數，在管理上，是否能減少不必要之工序和降低機台的使用數；而模式之穩定建構，則是奠基在經過拆解分化後的子模型以及技能工等資源的限制程度，在管理上，應以增加員工以及機台的技能為目標。

掌握以上方向，便能運用我們設計之子模型，在合理的時間內，求出綜合成本與時間因素考量後之最佳解。

5.2 未來延伸方向

本學期針對鞋業製造商進行生產線平衡的模型建置，所採用資料為二手資料輔以我們設計之數值及假設，缺乏對實際工人運作、產線狀況和市場需求的即時和全面掌控，因此模型之結果與實際應用上會有所不同，對產線的問題僅能提供間接之見解；以及相關的假設和限制並未完全符合真實，在應用上還需做些微調整。在模型面上，製造商面臨的問題更接近混合多產品生產線平衡，而我們的模型為較單純之單一生產線平衡，在實際應用上還需對我們的模型做擴展。

本學期已確認資源限制下單一生產線平衡是可行的，但由於時代的趨勢與消費市場習性的轉變，使得多樣化的產品更能刺激擁有多樣需求的消費者，也更能有效力的掌控市場的脈動，若能把模型擴展為混合多產品生產線，將對實際提升工廠排程之競爭力起到更大之效用，並使得生產線平衡更符合現實的需求。若針對上述的考量去修改模型，使生產線平衡朝向多樣化發展，並使用啟發式演算法擴大問題，從結果討論並分析，將可提出在實際運作上具建構性之管理意涵。

參考文獻

1. Ağpak, K., & Gökçen, H. (2005). Assembly line balancing: Two resource constrained cases. *International Journal of Production Economics*, 96(1), 129-140.
2. Akpınar, Ş., & Baykasoğlu, A. (2014). Modeling and solving mixed-model assembly line balancing problem with setups. Part I: A mixed integer linear programming model. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 177-187.
3. Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715.
4. Bukchin, Y., & Raviv, T. (2018). Constraint programming for solving various assembly line balancing problems. *Omega*, 78, 57-68.
5. Chen, J. C., Chen, C.-C., Su, L.-H., Wu, H.-B., & Sun, C.-J. (2012). Assembly line balancing in garment industry. *Expert Systems with Applications*, 39(11), 10073-10081.
6. Defersha, F. M., & Mohebalizadehgashti, F. (2018). Simultaneous balancing, sequencing, and workstation planning for a mixed model manual assembly line using hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 119, 370-387.
7. Dimitriadis, S. G. (2006). Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation. *Computers & Operations Research*, 33(9), 2757-2774.

8. Fleszar, K., & Hindi, K. S. (2003). An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 145(3), 606-620.
9. Gökçen, H., & Erel, E. (1998). BINARY INTEGER FORMULATION FOR MIXED-MODEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM. *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 451-461.
10. Jayaswal, S., & Agarwal, P. (2014). Balancing U-shaped assembly lines with resource dependent task times: A Simulated Annealing approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 522-534.
11. Kellegöz, T., & Toklu, B. (2012). An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3344-3360.
12. Kucukkoc, I., Li, Z., Karaoglan, A. D., & Zhang, D. Z. (2018). Balancing of mixed-model two-sided assembly lines with underground workstations: A mathematical model and ant colony optimization algorithm. *International Journal of Production Economics*, 205, 228-243.
13. Moon I, Logendran R, Lee J. Integrated assembly line balancing with resource restrictions. *Int J Prod Res* 2009;47(19):5525–41.
14. Moon, I., Shin, S., & Kim, D. (2014, 2014//). *Integrated Assembly Line Balancing with Skilled and Unskilled Workers*. Paper presented at the Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World, Berlin, Heidelberg.
15. Ramezani, R., & Ezzatpanah, A. (2015). Modeling and solving multi-objective mixed-model assembly line balancing and worker assignment problem. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 74-80.

16. Roshani,A.,&Giglio,D.(2016).Simulated annealing algorithms for the multi-manned assembly line balancing problem : Minimising cycle time. *International Journal of Production Research*, 1–21.
17. Roshani, A., Roshani, A., Roshani, A., Salehi, M., & Esfandyari, A. (2013). A simulated annealing algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 238-247.
18. Salveson, M. E. (1955). The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, 6(3),18–25
19. Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing of assembly lines*. 2nd ed., Physica, Heideberg and New York.
20. Yeo Keun, K., Yong Ju, K., & Kim, Y. (1996). Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 30(3), 397-409.
21. Zacharia, P. T., & Nearchou, A. C. (2013). A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem. *Computers & Operations Research*, 40(12), 3033-3044.

附錄

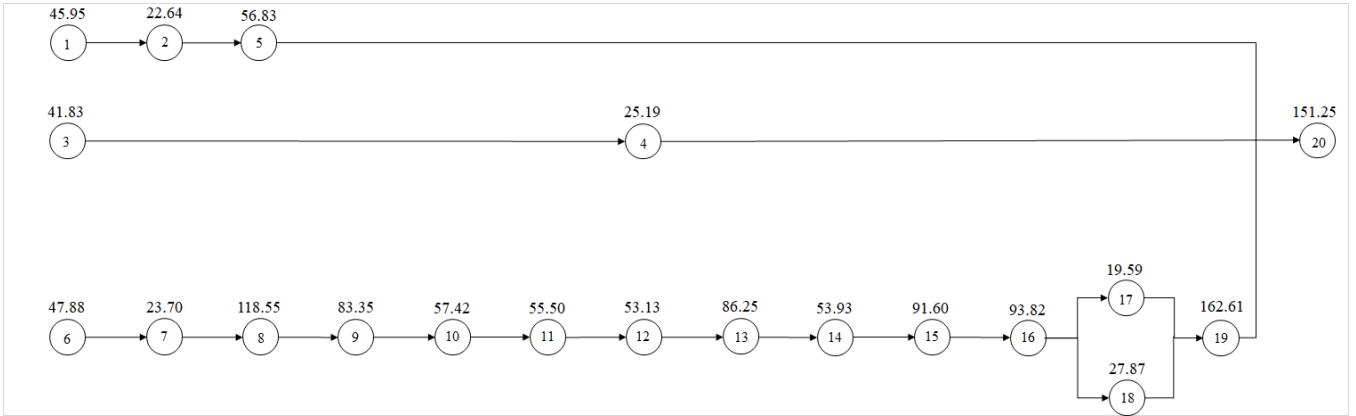


圖 12、20 個工序之產品先行圖

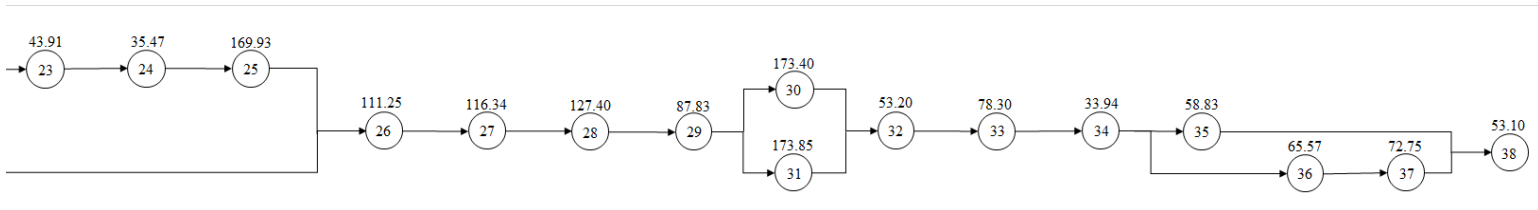
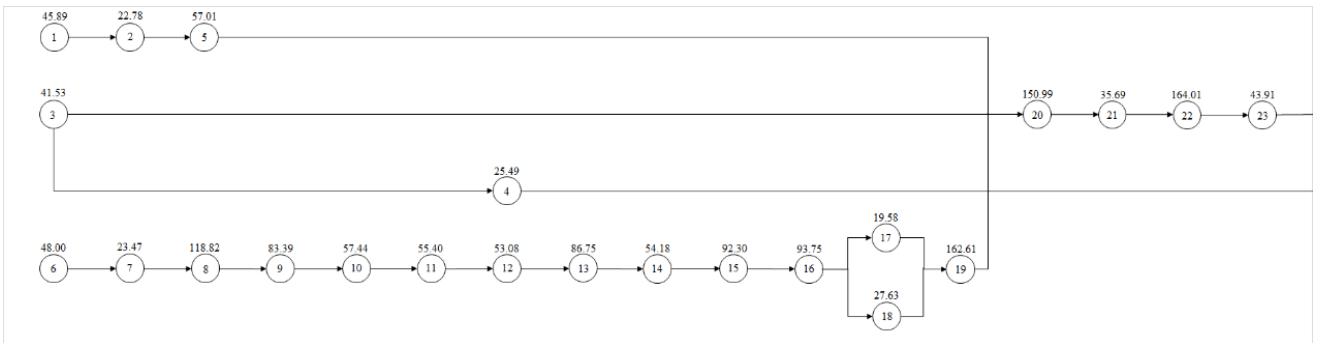


圖 13、38 個工序之產品先行圖

表 16、20 個工序下各作業員可加工之工序表

作業員	可加工之工序																				
作業員 1	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18										
作業員 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20		
作業員 3	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18										
作業員 4	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18										
作業員 5	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18	19									
作業員 6	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18	19									
作業員 7	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18	19									
作業員 8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20		
作業員 10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20		

表 17、38 個工序下各作業員可加工之工序表

作業員	可加工之工序																				
作業員 1	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18										
作業員 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20		
作業員 3	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18										
作業員 4	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18										
作業員 5	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18	19									
作業員 6	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18	19									
作業員 7	2	4	5	7	9	10	12	14	16	17	18	19									
作業員 8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20		
作業員 10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20		
作業員 11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20		
作業員 12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 17	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			
作業員 18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20			

作業員	可加工之工序															
作業員 1	22	26	29	31	34	37										
作業員 2	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38
作業員 3	22	26	29	31	34	37										
作業員 4	22	26	29	31	34	37										
作業員 5	22	26	28	29	31	33	34	37								
作業員 6	22	26	28	29	31	33	34	37								
作業員 7	22	26	28	29	31	33	34	37								
作業員 8	21	22	23	24	26	27	29	30	31	32	34	36	37	38		
作業員 9	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38
作業員 10	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38
作業員 11	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38
作業員 12	21	22	23	24	26	27	29	31	34	36	37					
作業員 13	21	22	23	24	26	27	29	31	34	36	37					
作業員 14	21	22	23	24	26	27	29	31	34	36	37					
作業員 15	21	22	23	24	26	27	29	31	34	36	37					
作業員 16	21	22	23	24	26	27	29	31	34	36	37					
作業員 17	21	22	23	24	26	27	29	31	34	36	37					
作業員 18	21	22	23	24	26	27	29	31	34	36	37					

表 18、20 個工序下所需之作業員等級表

工序	作業員
1	2
2	1
3	2
4	1
5	1
6	2
7	1
8	2
9	1
10	1
11	2
12	1
13	4
14	1
15	2
16	1
17	1
18	1
19	1.5
20	2

表 19、38 個工序下所需之作業員等級表

工序	作業員
21	2
22	1
23	2
24	2
25	4
26	1
8	2
9	1
10	1
11	2
12	1
13	4
14	1
15	2
16	1
17	1
18	1
19	1.5
20	2

27	2
28	1.5
29	1
30	3
31	1
32	3
33	1.5
34	1
35	4
36	2
37	1
38	3

表 20、20 個工序下各機台類型可加工之工序表

機台	可執行之工序	
機台類型 1	2	
機台類型 2	4	
機台類型 3	5	
機台類型 4	7	
機台類型 5	6	13
機台類型 6	3	16
機台類型 7	8	19
機台類型 8	10	
機台類型 9	1	
機台類型 10	9	20
機台類型 11	11	
機台類型 12	15	
機台類型 13	17	18
機台類型 14	12	14

表 21、38 個工序下各機台類型可加工之工序表

機台	可執行之工序					
機台類型 1	2	22	34			
機台類型 2	4					
機台類型 3	5	23				
機台類型 4	7					
機台類型 5	6	13	37			
機台類型 6	3	16	25	27	32	36
機台類型 7	8	19	35			
機台類型 8	10	21	24	28	31	
機台類型 9	1	33				
機台類型 10	9	20	26			
機台類型 11	11	30				
機台類型 12	15	29	38			
機台類型 13	17	18				
機台類型 14	12	14				

