以強化學習混合基因演算法

求解隨機性登機門指派問題

|  |  |
| --- | --- |
| 學生: 黃浚瑀 | 指導老師：黃寬丞 教授 |

國家科學及技術委員會 大專生研究計畫

**摘要**

登機門再指派問題（Airport Gate Reassignment Problem, AGRP）是機場每日營運中的核心問題之一，隨著航空量於疫情後迅速回升，登機門不足與航班延誤等問題更為凸顯。傳統模型多假設航班時刻確定，但實際運作中常受各種營運限制影響，導致既有方法難以應用於實際作業環境。因此，本研究與桃園國際機場合作，蒐集實際航班與營運限制資料，考量了航空公司偏好、機型相容性、相鄰登機門限制與 A380 特殊條件等因素，建立一套更貼近實務的登機門指派數學模式。

為因應即時再指派需求，本研究首先透過 Gurobi 求解精確解作為標竿。在演算法開發上，經評估強化學習混合機制之效能瓶頸後，本研究採用禁忌搜尋法（Tabu Search）以提升大規模求解效率。實驗結果顯示，整數規劃模型能提供高品質解，但求解時間較長；相較之下，禁忌搜尋法僅需約 17 秒即可產生穩定可行解，目標式值較原始指派改善約 33%，停機坪航班數亦由 57 架降至平均 20.74 架。研究證實，禁忌搜尋法在求解品質與計算效率間達到良好平衡，適合應用於需要快速反應的即時登機門再指派情境，提供機場營運單位可行的決策支援工具，並具備未來實務部署的潛力。

**關鍵詞**：機場、登機門再指派、考量營運限制、禁忌搜尋法、啟發式解法

A Hybrid Genetic Algorithm with Reinforcement Learning for the Stochastic Gate Assignment Problem

|  |  |
| --- | --- |
| Student: Chun-Yu Huang | Advisor: Kuancheng Huang |

Ministry of Science and Technology

Undergraduate Research Project Scholarship Research Report

**Abstract**

The Airport Gate Reassignment Problem (AGRP) is one of the core operational challenges faced by airports every day. As air traffic rapidly recovered after the COVID-19 pandemic, issues such as gate shortages and flight delays have become increasingly prominent. Traditional models typically assume deterministic flight schedules; however, actual airport operations are influenced by numerous operational constraints. To address this gap, this study collaborates with Taoyuan International Airport to collect real operational data and incorporates practical constraints—including airline gate preferences, aircraft–gate compatibility, adjacency restrictions, and special requirements for A380 aircraft—to develop a mathematical model that more accurately reflects real-world gate assignment conditions.

To meet the requirements for real-time reassignment, this study first utilized Gurobi to obtain exact solutions as a benchmark. Regarding algorithm development, after evaluating the performance bottlenecks of the hybrid reinforcement learning mechanism, we adopted Tabu Search to enhance the efficiency of solving large-scale problems. Results show that while the mathematical model yields high-quality solutions, its computation time is relatively long. In contrast, Tabu Search produces stable solutions within about 17 seconds, improves the objective value by roughly 33% compared with the original assignment, and reduces remote-stand flights from 57 to an average of 20.74. These findings indicate that Tabu Search provides an effective balance between solution quality and efficiency, making it suitable for real-time gate reassignment and offering strong potential for practical deployment.

**Keywords**: Airport, Gate Reassignment Problem, Operating Constraints, Tabu Search, Heuristic Algorithm

目 錄

[壹、 緒論 1](#_Toc218432191)

[1.1 研究背景與動機 1](#_Toc218432192)

[1.2 研究問題與目的 2](#_Toc218432193)

[1.3 研究方法與架構 2](#_Toc218432194)

[貳、 文獻回顧與探討 4](#_Toc218432195)

[2.1 登機門指派模型回顧 4](#_Toc218432196)

[2.2 多目標的登機門指派問題 4](#_Toc218432197)

[2.3 禁忌搜尋法 5](#_Toc218432198)

[2.4 本次研究定位 6](#_Toc218432199)

[參、 研究方法及步驟 7](#_Toc218432200)

[3.1 資料蒐集與前處理 7](#_Toc218432201)

[3.2 確定性數學模型 7](#_Toc218432202)

[3.3 考量營運限制之數學模型 8](#_Toc218432203)

[肆、實驗成果 11](#_Toc218432204)

[4.1 例示性例題 11](#_Toc218432205)

[4.1.1 簡介 11](#_Toc218432206)

[4.1.2. 例示性例題求解結果 12](#_Toc218432207)

[4.2 大範例測試與演算法效能驗證 12](#_Toc218432208)

[4.2.1 簡介 12](#_Toc218432209)

[4.2.2大範例測試結果 14](#_Toc218432210)

[4.2.3演算法效能驗證 15](#_Toc218432211)

[伍、結論與建議 17](#_Toc218432212)

[5.1 結論 17](#_Toc218432213)

[5.2 後續研究建議 17](#_Toc218432214)

[柒、參考文獻 19](#_Toc218432215)

圖 目 錄

[圖 一 十年期桃園機場出入境人數長條圖 1](#_Toc218432216)

[圖 二 研究流程圖 3](#_Toc218432217)

[圖 三 例示性例題原指派甘特圖 11](#_Toc218432218)

[圖 四 例示性例題求解結果甘特圖 12](#_Toc218432219)

[圖 五 桃園機場真實資料圖示化甘特圖 13](#_Toc218432220)

[圖 六 數學模型求解桃園機場真實資料結果甘特圖(90 sec) 14](#_Toc218432221)

[圖 七 數學模型求解桃園機場真實資料結果甘特圖(40 min) 15](#_Toc218432222)

[圖 八 禁忌搜尋法求解桃園機場真實資料結果甘特圖 16](#_Toc218432223)

表 目 錄

[表 一 大範例數學模式測試結果 14](#_Toc218432224)

[表 二 大範例求解結果 16](#_Toc218432225)

1. **緒論**
2. **研究背景與動機**

近年來民眾對航空運輸的需求呈現持續上升趨勢（見圖一），無論是國際旅運的復甦、航空公司航班量的增加，或是各國邊境開放後帶動的旅遊熱潮，都使得機場面臨更高度的營運壓力。然而，相較於需求的快速成長，機場的設施容量、航廈空間及登機門數量皆受限於既有基礎建設，短期內難以大幅擴增。在資源有限的情況下，如何透過更精準的規劃與更有效率的排程作業來提升整體運用效益，已成為多數機場亟須面對的課題。

在眾多運作流程中，登機門指派問題（Gate Assignment Problem, GAP）是關鍵的營運問題之一。登機門是機場不可替代的資源，任何衝突、延誤或配置不當，都可能造成航班延宕、旅客不便、地勤作業壅塞等一連串連鎖效應。隨著航班密度提升與營運環境的不確定性加劇（例如氣候因素、航空公司需求變動），傳統以人工經驗或靜態規劃為主的指派方式，已難以因應現今高度動態且複雜的營運情境。因此，各機場紛紛開始尋求具備更高求解效率與彈性的演算法與決策工具，希望能在有限時間內快速找出品質良好的登機門指派方案，進而提升資源利用率與航班準點率。

在此背景下，研究登機門指派問題並開發有效的求解方法，不僅具有理論價值，更對實務機場運作具重大意義。

一張含有 文字, 螢幕擷取畫面, 字型, 數字 的圖片

AI 產生的內容可能不正確。

圖 一 十年期桃園機場出入境人數長條圖

1. **研究問題與目的**

登機門再指派問題（Airport Gate Reassignment Problem, AGRP）是機場營運管理中一項重要的資源配置課題，隨著疫情後航空旅客量快速回升，航班密度與營運複雜度顯著提高，使登機門調度的重要性更加凸顯。然而，機場可用登機門數量有限，且實際營運中經常伴隨航班延誤、提前抵達，以及航空公司臨時提出的登機門調整需求，使原先規劃完成的指派結果難以維持穩定。多數既有研究多著重於靜態或理想化情境，較少納入真實營運下的即時性與調度限制，因此其研究成果難以直接應用於實務場域。

在實際機場運作中，登機門指派通常於前一日晚間依據隔日航班班表完成初步規劃。然而，當營運日開始後，系統會陸續接收到航班延誤、航班異動或航空公司提出更換登機門等請求。調度人員必須在航班抵達前，依據最新資訊即時調整登機門配置，以確保營運順暢並降低衝突風險。此類「登機門再指派」情境具有高度動態性與時間壓力，要求調度決策不僅需符合多項營運限制，亦須在極短時間內產生可行且品質良好的解。

基於上述實務需求，本研究聚焦於登機門再指派問題，並以即時調度為核心研究情境，探討在既有航班班表基礎上，如何快速且有效地進行登機門重新配置。為因應大規模航班與即時決策需求，本研究採用禁忌搜尋法（Tabu Search）作為主要求解策略。禁忌搜尋是一種以鄰域解為基礎的啟發式演算法，能從既有指派結果出發，透過持續探索鄰域並避免陷入區域最佳解，在有限計算時間內迅速產生品質良好的改善方案。此特性使其特別適用於機場動態營運環境，能兼顧原有排程的延續性與即時調整的彈性，為實務登機門再指派提供具可行性的解決方案。

1. **研究方法與架構**

為了客觀且嚴謹地評估啟發式演算法（實驗組）在解的品質與計算效率上的表現，我們選定Gurobi作為對照組。Gurobi能夠有效地對本研究所建立的 整數規劃模型(Integer Programming Model)求得精確解。藉由將啟發式演算法所得的解與 Gurobi 在相同條件下輸出的最優解進行比較，本研究得以全面驗證所提出之混合式解決方案的有效性、實用價值以及應對大規模問題時的計算效率差異。

一張含有 文字, 圖表, 螢幕擷取畫面, 字型 的圖片

AI 產生的內容可能不正確。

圖 二 研究流程圖

1. **文獻回顧與探討**
2. **登機門指派模型回顧**

[Daş et al.[1]](#r1)等人於 2020 年的研究對登機門指派問題進行了全面回顧，深入分析了不同研究的目標分類、模型方法及解決策略。該研究指出，傳統的 GAP 模型通常假設航班的抵達和離開時間是固定的，這種靜態假設雖簡化了問題，但忽略了實際運營中廣泛存在的不確定性因素，例如航班延誤、取消以及突發事件等。為了更準確地反映現實場景，近年來的研究逐漸將隨機性納入考量，並採用情境生成（Scenario Generation）或機率模型（Probabilistic Models）模擬不同的不確定性情境。這些方法不僅提高了模型的穩健性，也為機場管理者提供了更靈活的決策支持工具。此外，該研究強調了混合方法在 GAP 解決策略中的重要性。傳統的確切解法（Exact Methods），如分支定界法（Branch-and-Bound）和動態規劃（Dynamic Programming），雖然能夠找到全局最優解，但因計算成本過高，難以應對大型問題的實際需求。因此，越來越多的研究將確切解法與啟發式演算法（Heuristic Algorithms）相結合，形成混合方法。

1. **多目標的登機門指派問題**

在實際機場運營中，登機門的管理與指派是個相當複雜的問題，航班常因天氣干擾等不可抗力因素導致延誤、取消，這對登機門資源的動態管理產生不小的挑戰。同時，學者們對於登機門指派問題（GAP）績效指標的偏重有所不同，因而發展出各式各樣研究模型。例如，為了完整考量航班抵達時間之不確定性，[Yan & Tang[2]](#r2)以旅客步行時間為目標，並使用隨機規劃（Stochastic Programming），提出了一兩階段架構，第一階段建立初步的登機門指派計畫，第二階段在航班抵達資訊更新後進行動態調整，以適應即時變動。

[黃景棠[3]](#r3)的研究聚焦於短期登機門指派問題，特別針對突發情況和航班到達時間的不確定性。此研究採用了隨機規劃模型，更注重模擬突發事件導致的即時性調整需求。模型透過隨機生成不同的航班抵達情境，模擬延誤或提前到達的可能性，進一步評估這些不確定性對登機門資源分配的影響。此模型之設計不僅要最小化延誤時間和登機門變更次數，還需將原定計畫的調整幅度控制在最小範圍內，以減少對機場運營的干擾。

Yan et al.[4]針對登機門重新指派問題提出了一種新的方法，該方法根據航班到達與離開時間的確定性程度，將航班區分為確定性航班 (deterministic flights) 與隨機性航班 (stochastic flights)。確定性航班指的是距離當前時刻較近且其時間變動較小的航班，而隨機性航班則是距離當前時刻較遠，且其時間變動較大的航班。此外，該研究建立了一個0-1整數規劃模型(Integer Programming Model)，其目標為最小化登機門重新指派過程中的時間與空間不一致性 (inconsistency)，使得即時指派方式更能適應航班時間的變動，進而提升機場運營的靈活性與效率。

黃寬丞、陳鎛維[5]的研究中採用了滾動平面法（Rolling Horizon Method），進一步提升模型應對動態環境的能力。滾動平面法以固定的時間間隔更新航班狀態，並根據最新資訊重新調整登機門分配策略，使得短期決策與長期規劃得以有效結合。同時，為了處理大型問題中可能面臨的計算時間過長挑戰，研究設計了啟發式演算法，在保證解的品質的同時顯著縮短了求解時間，提供高效的解決方案。

除了針對不確定性和評估指標進行改善，Liang, et al.[6] 則主要針對確定性環境下的演算法進行改良，提出了一種基於基因演算法（Genetic Algorithm）的高效解決方案。他們的研究主要聚焦於遠端停機坪指派懲罰成本、乘客步行時間以及飛機滑行道上的燃料消耗。機場管理人員可以根據不同情況調整加權組合，實現高效的登機門指派決策支援。在他們的基因演算法中，採用了動態調整交叉機率（適應度高者交叉率較小）、將整個種群拆分為多個子群並進行並行運算，以及利用CSP（Constraint Satisfaction Problem）的概念來生成初始可行解等技術，加速了基因演算法在登機門指派問題中的求解過程。

機場真實營運時會遇到許多實務上的挑戰，如航空公司偏好、大小飛機相鄰不被允許、人員作業習慣等等。Yan、Shieh 與 Chen[7]提出了一個模擬框架，透過量化營運習慣、為機場客製化彈性緩衝時間等方法，檢驗登機門指派系統在真實運作中的可行性與效益。She, et al.[8]提出了一個機場登機門分配問題 (AGAP) 的多目標整數規劃模型和演算法，考量到最大化營運商偏好如登機門位置、乘客數量與減少拖曳次數並最小化因時刻表變動產生的穩健性成本。Bi, et al.[9]以登機門的利用率為目標，並考量到如登機門機型限制，相鄰停機坪機型限制等與登機門相關實務限制的條件。此類研究凸顯了在 GAP 領域中，模型若欲產生實質價值，必須超越數學規劃的理論框架，轉而回應機場管理單位在實際部署中面臨的挑戰與需求。

1. **禁忌搜尋法**

針對登機門指派問題（GAP）的求解效率與實務應用性，啟發式演算法（Metaheuristics）一直是學界研究的重點。由於 GAP 屬於 NP-hard 問題，傳統數學規劃方法在處理大型機場數據時往往力有未逮，因此學者們致力於開發更高效的搜尋策略。例如，Xu & Bailey [10]針對以最小化旅客總轉機與步行時間為目標的靜態指派問題，首先將其建構為混合0-1二次整數規劃模型，並進一步線性化。為了克服精確解法在計算時間上的限制，他們設計了一種禁忌搜尋演算法（Tabu Search），透過特殊的鄰域移動策略（如插入與交換）與候選清單機制，證實了該方法在處理大型樞紐機場數據時，能比傳統分支定界法（Branch and Bound）更快速地取得高品質的解。

除了單純考慮旅客步行距離，指派計畫的穩定性亦是機場運作的關鍵。Wei & Liu [11] 提出了一個多目標模型，旨在同時最小化旅客總步行距離以及最大化指派計畫的強健性（Robustness）。該研究將強健性定義為「登機門閒置時間分散度」的最小化，讓各登機門的緩衝時間分佈更均勻，以吸收航班延誤的衝擊。在方法論上，他們提出了一種混合基因演算法（Genetic-Tabu Algorithm），以基因演算法為主架構，並結合禁忌搜尋來處理約束條件與進行局部改良，在旅客滿意度與機場資源分配的均衡性之間取得折衷。

隨著人工智慧技術的發展，結合學習機制的演算法成為近年的研究趨勢。Li et al.[12] 指出傳統演算法往往缺乏對歷史搜尋經驗的記憶與利用，因此提出了一種結合機率學習機制的「可行與不可行禁忌搜尋演算法」（PLFITS）。該方法引入了強化學習的概念，透過維護一個機率矩陣來引導搜尋方向；同時，該研究採用了策略性震盪（Strategic Oscillation）機制，允許搜尋過程暫時進入不可行解區域（即暫時允許登機門衝突），藉此跳脫局部最佳解。實驗結果顯示，此方法在多個國際機場的基準測試中，全面刷新了文獻中的最佳解紀錄。

此外，針對不同演算法在不同規模問題上的適用性，Aktel et al.[13]進行了深入的比較研究。該研究考量了登機門資源不足時需將航班指派至停機坪（Ungated flights）的情況，以最小化未指派航班數與總步行距離為雙重目標。他們比較了貪婪演算法、模擬退火法（Simulated Annealing）以及一種採用機率性特赦準則（Probabilistic Aspiration Criterion）的改良型禁忌搜尋法。研究發現，雖然模擬退火法在中小規模問題上表現穩定，但在處理超大規模的航班指派時，改良後的禁忌搜尋演算法展現了更優異的求解能力與收斂效果。

1. **本次研究定位**

上述文獻為本研究奠定了理論基礎與技術方向，本研究將整合這些研究成果，並與桃園國際機場合作，在我們前往參訪實地考察其實務作業限制後，基於歷史資料進一步開發出不僅能提升運算效率、改善解的品質，並且適用於機場實務的解決方案。我們透過禁忌搜尋法，結合桃園機場登機門指派歷史資料，並納入實務營運限制，設計一套混合式解決方案；同時，期望在實際機場運營中有效應對各種挑戰，並顯著提升資源分配效率與整體指派品質。

1. **研究方法及步驟**

**3.1 資料蒐集與前處理**

收集桃園國際機場實際航班時刻、登機門配置、飛機機型、航班抵達延誤統計等歷史資料，並對於不合理之數據進行過濾。

**3.2 確定性數學模型**

黃寬丞、陳鎛維[5]於考量航班抵達時間不確定性之隨機性登機門指派問題中，為確定性模式提出以下之數學模式：

目標式如下:

集合定義與參數:

|  |  |
| --- | --- |
|  | 所有航班的集合, 。 |
|  | 登機門的集合。 |
|  | 登機門(包含停機坪)的集合。 |
|  | 航班的原訂抵達時間。 |
|  | 航班指派至登機門的事前指派 |
|  | 航班的更新後抵達時間。 |
|  | 更換登機門的懲罰成本 |
|  | 指派至停機坪的懲罰成本。 |

決策變數：

為二元變數，代表航班使用登機門。

航班在登機門的開始作業時間。

為二元變數，若航班使用之登機門與事前指派不同則。

限制式：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

**3.3 考量營運限制之數學模型**

本研究欲以機場運營方的角度，修改黃寬丞、陳鎛維[5]於考量航班抵達時間確定性登機門指派問題中所提出之數學模式，設計更貼近現實的限制式，為以後實際落地做準備。

目標式如下:

集合定義與參數:

|  |  |
| --- | --- |
|  | 所有航班的集合, 。 |
|  | 廣體客機集合。 |
|  | 窄體客機集合。 |
|  | 超大型客機集合。 |
|  | 登機門的集合。 |
|  | 登機門(包含停機坪)的集合。 |
|  | 航班若能被派去登機門則為1，反之為0。 |
|  | 若登機門與相鄰則為1，反之為0。 |
|  | 航班的原訂抵達時間。 |
|  | 從登機門更換至登機門的懲罰成本。 |
|  | 航班指派至登機門的事前指派。 |
|  | 航班的更新後抵達時間。 |
|  | 航班的服務時間。 |
|  | 指派至停機坪的懲罰成本。 |

決策變數

|  |  |
| --- | --- |
|  | 為二元變數，代表航班使用登機門。 |
|  | 航班在登機門的開始作業時間。 |
|  | 為連續變數，表示航班使用之登機門與事前指派不同而產生的總懲罰成本。 |
|  | 為二元變數，若航班的結束服務時間比航班的開始服務時間還要早則 = 1 |

限制式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |
|  |  | (2) |
|  |  | (3) |
|  |  | (4) |
|  |  | (5) |
|  |  | (6) |
|  |  | (7) |
|  |  | (8) |
|  |  | (9) |
|  |  | (10) |
|  |  | (11) |

目標式旨在最小化三類成本，包含總延誤時間、航班更換登機門的成本，以及航班被指派至停機坪所造成之懲罰成本。對機場營運方而言，登機門重新指派往往需同步調整原已配置於登機門周邊之地勤資源，如餐車、垃圾車及其他支援設備，此類調整將產生額外作業成本。為統一衡量標準，本研究將上述成本皆以時間單位進行量化與比較。

式 (1) 與式 (2) 用以確保每一航班皆恰好被指派至一個可相容之登機門，並滿足登機門與機型之相容性限制；式 (3) 與式 (4) 則用以避免登機門使用時段發生重疊，確保任兩航班不會同時使用同一登機門。式 (5) 用於計算航班因重新指派至不同登機門所產生之額外成本；而式 (6) 與式 (7) 則為 XL 型班機之專屬限制，規定當 XL 型班機停靠於登機門時，其相鄰兩側登機門僅能停靠 S 型班機，以符合實際營運與安全規範。

**3.4 考量營運限制之數學模型**

禁忌搜尋法（Tabu Search, TS）由 Glover（1989）提出，是一種元啟發式演算法（Meta Heuristics），常用於求解大型組合最佳化問題，如排程、指派、路線規劃與資源配置等。本研究在演算法設計初期曾嘗試結合強化學習與基因演算法之混合式方法，惟在大規模與即時再指派情境下，該方法於收斂速度與計算效率上出現明顯效能瓶頸，難以滿足即時決策需求。因此，本研究改採禁忌搜尋法，以提升求解效率與解品質的穩定性。

禁忌搜尋法的核心概念為在局部搜尋過程中記錄近期採用的解或移動，以避免搜尋反覆回到已探索的區域，降低陷入區域最佳解（Local Optimum）的風險，並提升尋找較佳全域解的能力。其透過禁忌列表（Tabu List）限制近期移動，使搜尋得以向未探索區域擴展；同時，當被禁忌的移動可產生優於目前最佳解的結果時，仍可依據願望準則（Aspiration Criterion）予以採用，以進一步提升解的品質。以下為本研究詳細之演算法架構：

1. 產生初始解：  
    本研究為登機門再指派問題，因此已有原始指派計劃，在我們的演算法當中，初始解即是原始指派，後續我們將據此進行修改。
2. 鄰域解產生：

每一次迭代會產生數個符合營運限制之鄰域解，主要移動方式可分為「移動」與「交換」，每次產生鄰域解皆有一定機率選擇其中一個方式。

* 移動：隨機選擇一個在停機坪的班機，改指派到另一個可行登機門。
* 交換：隨機選擇兩個航班，交換登機門。

1. 計算適配值：

為每個鄰域解計算其目標式值（與前章數學模式之目標式相同），並根據以下準則選擇解：

* 若解為 tabu，但解比歷史最佳解更佳，則仍可採用。
* 若解非 tabu，則取當前迭代最佳值。

1. 更新禁忌列表

在計算完初始解之適配值後，會將整個初始解之即時指派結果加入禁忌列表，表示解在禁忌的期間內無法再次被搜尋，以避免重複搜尋造成不必要的循環，或是因而無法跳脫區域最佳解。

1. 停止條件

本研究中所使用之停止條件為當迭代次數已達設定的次數上限，便會跳出演算法停止搜尋，並將這段期間內，具有最低適配值的登機門指派方式當作最後結果。

**肆、實驗成果**

本研究在第 1 小節中將以示例性資料進行測試，以驗證所建立之數學模式的正確性與可行性。接著在第 2 小節，將運用桃園機場的實際營運資料，分別採用考量營運限制的整數規劃模型與禁忌搜尋法進行模擬測試與效能比較。本研究之數學模式與演算法均以 Python 語言實作，並搭配數學規劃求解器 Gurobi 進行求解；所有實驗皆在搭載 Apple M3 處理器與 16GB 記憶體的筆記型電腦上執行。

**4.1 例示性例題**

**4.1.1 簡介**

為了驗證本研究所發展之數學模式的正確性與可行性，我們根據桃園國際機場之實際營運狀況與航班資料，自行設計一個例示性案例。此案例假設單日航班數量較少，並簡化登機門數量、配置與機型限制，以便觀察模型在基本條件下的運作情形。此例題包含100班航班，5個登機門，1個無限容量停機坪(Gate 6)，規劃週期為一天共1440分鐘。圖三為此例題之原指派結果甘特圖，原指派使用航班到達即服務準則生成。

此外，在此階段中，我們主要著重於模型運算流程的驗證，而非追求最優解之效率表現。藉由小規模實例的求解結果，可以初步確認本研究模型的建構合理性。

一張含有 文字, 螢幕擷取畫面, Rectangle, 圖表 的圖片

AI 產生的內容可能不正確。

圖 三 例示性例題原指派甘特圖

**4.1.2. 例示性例題求解結果**

模型在 Gap 值 6.95% 的情況下即可產生穩定且合理的登機門指派方案。此結果代表模型能在有限時間內收斂至具可行性的近似最優解，並成功滿足所有營運與排程限制條件。從指派結果可觀察到，航班間並無登機門衝突，且登機門分配相對均衡，顯示模型能有效反映航班時段重疊及登機門利用率的實際狀況。

一張含有 螢幕擷取畫面, Rectangle, 文字, 正方形 的圖片

AI 產生的內容可能不正確。

圖 四 例示性例題求解結果甘特圖

**4.2 大範例測試與演算法效能驗證**

**4.2.1 簡介**

本研究的大範例測試採用桃園國際機場 2025 年 6 月 23 日的實際航班資料作為測試案例，當日共有 428 架次航班。桃園機場原配置 38 個登機門，但其中D9候機室因施工而封閉，故本研究可運用之登機門數量為 37 個。

在航班特性方面，我們假設當日航班包含不同機型大小：小型（S）236 架、中型（L）190 架，以及大型（XL）2 架。為了使模型更貼近真實運作情境，本研究在設計懲罰項時參考了「桃園國際機場航空器停靠停機坪原則」中的相關規範，其中跨航廈更換登機門需付出較高營運成本，因此在模型中透過懲罰權重予以反映。

其中，客運停機坪停機位列表及可停靠最大機型與其特殊限制一表提到，僅C2、D6可停放目前全球載客量最高，體積最大的客機空中巴士A380機型。且當C2停機位停放 A380機型時，C3停機位僅限停放 ICAO C 類航空器，C1/C2間及 C2/C3間裝備區須淨空。本研究使用矩陣檢索相鄰的登機門對，若此登機門對相鄰則值為1。對於停放XL機型的登機門，確保其相鄰登機門不可停放L以上機型。

此外，考量航空公司之固定營運偏好，本研究對於 （航班i若可被指派到登機門j，則為1）加入硬限制：長榮航空班機僅能指派至 B 與 C 航廈的登機門；華航班機則限於 A 與 D 航廈。此設定反映實務上航空公司長期使用特定航廈以維持地勤運作效率之需求。

在實驗假設部分，由於實務上難以準確掌握機場於何時得知航班即將延誤，以及航班抵達時間會在抵達前多久進行更新，本研究在模型設計中假設機場於當日凌晨 0 時即已掌握該日所有航班之更新後抵達時間與服務結束時間，並據此進行登機門指派與再指派作業。

在原始班表中，共有 57 架次航班因登機門需求與時段重疊無法完全指派至登機門，而需停靠於停機坪。本研究將以此真實情境為基礎，透過數學模式與禁忌搜尋法進行重新指派，並比較兩者在求解品質與計算效率上的差異。

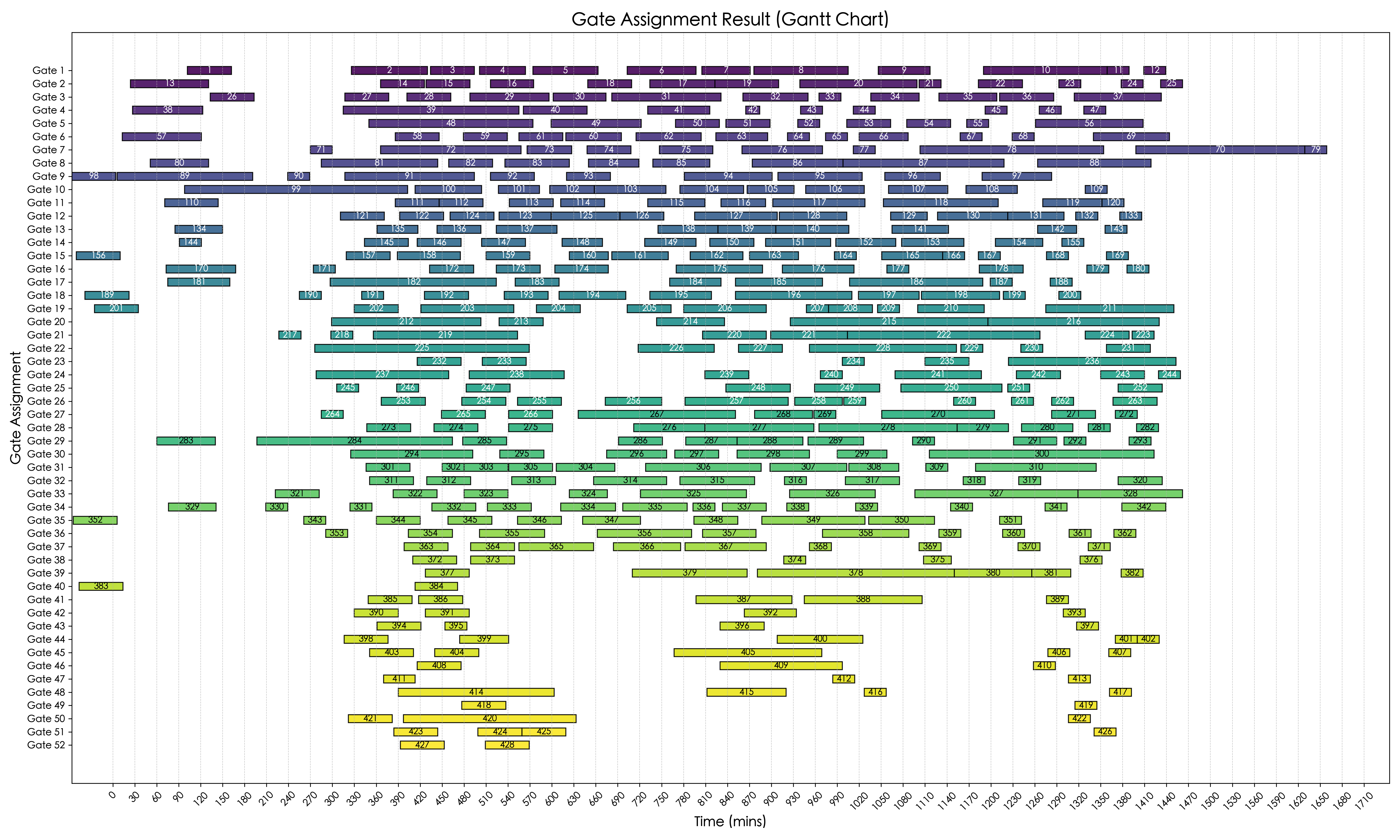


圖 五 桃園機場真實資料圖示化甘特圖

**4.2.2大範例測試結果**

在大範例中，我們使用考量營運之數學模型，對桃園機場真實資料進行求解，以及進行結果分析和比較。可以觀察出模型求解結果明顯降低了總延誤時間，以及減少被派至停機坪的航班數量，證實了數學模型應用於實例的可行性與潛力。

使用模型求解90秒時即可獲得品質良好的可行解，若進一步拉長求解時間，可以觀察到在約40分鐘時模型的Gap值達到23.6%且不再變動，與求解90秒之解相比，Gap值下降了38%，減少了4班被派至停機坪的飛機架次。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 考量營運限制之數學模型 | |
| 求解時間(s) | 90 | 2400 |
| 目標式值 | 2940 | 2065 |
| MIP Gap | 61.6% | 23.6% |
| 被派至停機坪的航班數 | 27 | 23 |

表 一 大範例數學模式測試結果

一張含有 文字, 螢幕擷取畫面, 圖表, 行 的圖片

AI 產生的內容可能不正確。

圖 六 數學模型求解桃園機場真實資料結果甘特圖(90 sec)

一張含有 文字, 螢幕擷取畫面, 圖表, 行 的圖片

AI 產生的內容可能不正確。

圖 七 數學模型求解桃園機場真實資料結果甘特圖(40 min)

**4.2.3演算法效能驗證**

根據前一節的結果，利用整數規劃模型進行大範例求解時，雖然約90秒即可獲得品質良好的解，但在實務機場營運中，調度人員必須在短時間內因應航班延誤、登機門衝突等即時狀況，求解速度仍具改善空間。為提升此動態再指派問題之反應效率，本小節引入禁忌搜尋法（Tabu Search），並將其求解結果與 Gurobi 所求得之最佳解進行比較，以驗證本研究設計之演算法在計算效率與解的品質上的整體表現。針對演算法的參數設定部分，設定鄰域解數量為 20 個，禁忌列表大小為 10，演算法的停止條件設為當迭代數達 300 次，演算法即停並進入下一個週期進行後續的求解。目標式值與求解時間的計算方式為透過本演算法求解50次後的平均結果。

根據表一之大範例求解結果可觀察到，桃園機場的原始指派方案目標式值為 5097，顯示現行登機門排程仍存在改善空間。透過考量營運限制後的數學模式進行改善後，其目標式值降為 2940，然而由於模型在大規模問題上的求解時間需達 90 秒，對於機場需即時應對航班延誤或異動的實務環境而言，其反應速度仍略顯不足。相比之下，禁忌搜尋法展現出顯著的計算效率優勢，其求解時間僅需 17.36 秒便能產生品質良好的解，且所得目標式值為 3411.98，雖未達最佳解，但仍明顯優於原始排程（約進步了33%）。此外，在停機坪使用方面，原始指派需派遣 57 架航班至停機坪，數學模式可將此數量減至 27 架，而禁忌搜尋法的平均結果更降至 20.74 架，顯示禁忌搜尋法在重新分配登機門以降低停機坪需求方面具有更佳的實務效果。整體而言，禁忌搜尋法在求解速度與資源配置品質之間取得良好平衡，特別適合應用於需要快速反應的大規模登機門再指派情境中，其實務應用價值明顯高於僅能提供理論最佳解卻耗時較長的數學規劃方法。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 桃園機場原指派 | 考量營運限制之數學模型 | 禁忌搜尋法 |
| 目標式值 | 5097 | 2940 | 3411.98 |
| 求解時間(s) | - | 90 | 17.35742360115051 |
| 派至停機坪  航班數 | 57 | 27 | 20.74 |

表 二 大範例求解結果

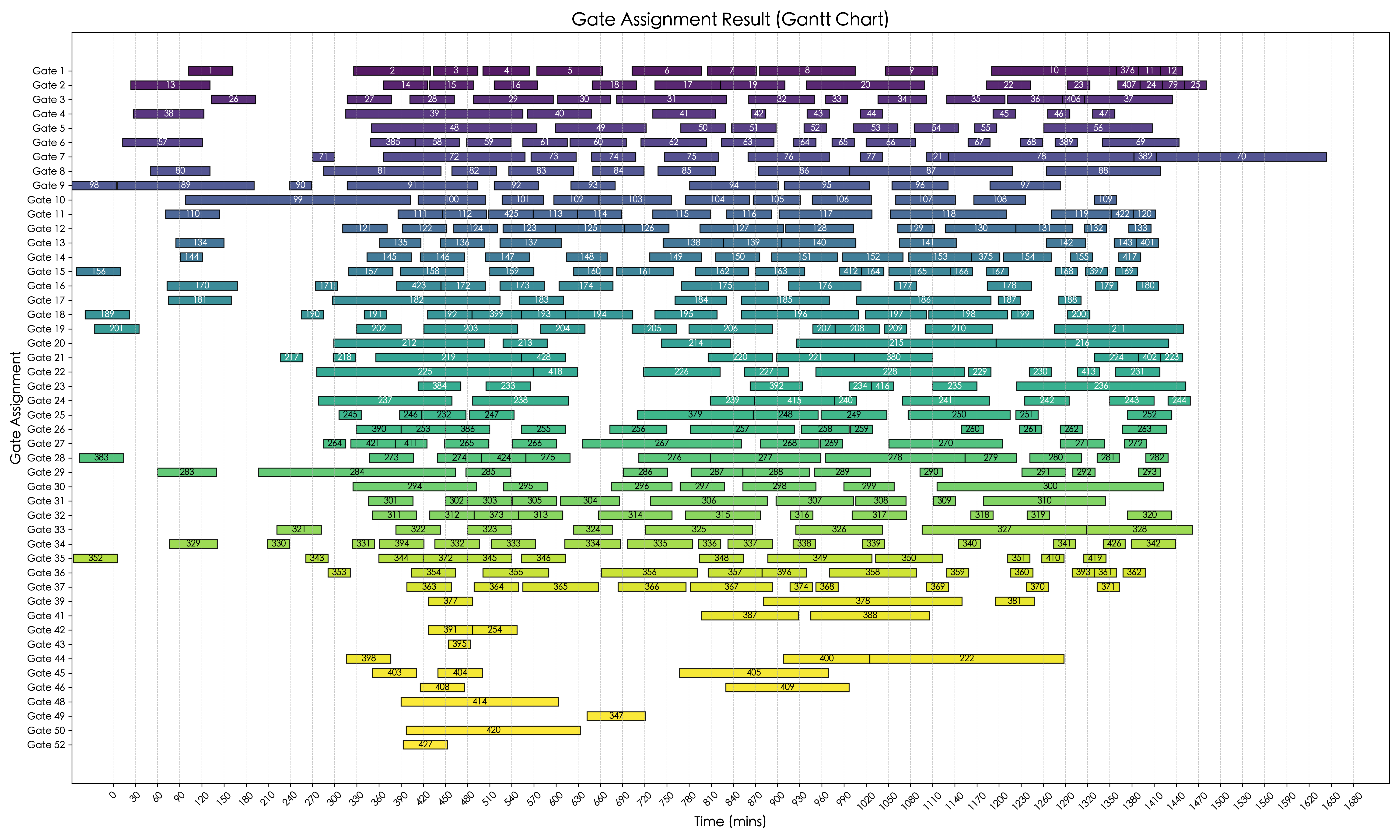


圖 八 禁忌搜尋法求解桃園機場真實資料結果甘特圖

**伍、結論與建議**

**5.1 結論**

本研究聚焦於桃園國際機場的登機門再指派問題，並將機場實際營運時的限制納入考量，以此建立一數學模式。除此之外，在我們實際造訪桃園機場後，發現他們更新指派的頻率相當高，需要一個可以盡快進行決策輔助支援的工具。研究初期曾嘗試以強化學習結合基因演算法進行求解，然而考量其在大規模問題下所面臨之效能瓶頸，以及機場對即時性之實務需求，最終改以禁忌搜尋法作為主要求解方法，期望在解的品質與求解效率之間取得良好平衡。

在本研究中，數學模型的驗證部分，例示性小範例顯示模型能在合理的計算時間內產生無衝突且符合營運限制的可行方案，證明模型建構之正確性。進一步應用於桃園機場實際資料後，模型在 90 秒內即可求得品質良好的解，並能相較於原始排程大幅改善目標式值、降低登機門衝突與減少停機坪使用。然而，機場的作業需要一個可以更即時的決策反應系統，依此數學模型的求解時間限制了其作為即時決策工具的可能性。

相較之下，禁忌搜尋法展現極佳的求解效率，平均僅需約 17 秒便能產生具實務價值的指派結果，遠低於數學規劃模型所需時間。雖然其目標式值略遜於數學模型的最佳解，但仍遠優於桃園機場原始指派方案，並能有效降低停機坪使用航班數。禁忌搜尋法能在短時間內找到高品質解，搭配其良好的彈性與可調整性，面對即時航班延誤與不確定性時將會是一項有效工具。

整體而言，本研究成功建構一套結合理論模型與啟發式演算法的混合式解決方案，不僅能提升登機門指派品質，更能在動態營運情境中提供快速且實用的決策支援。研究成果提供桃園機場具體可行的改善方向，也為未來動態登機門指派與相關資源配置研究奠定重要基礎。

**5.2 後續研究建議**

針對未來研究的相關建議，首先，本研究主要以確定性資料進行建模，雖在模型內包含部分懲罰項處理延誤影響，惟未全面納入隨機性因素。航班抵達與離場時間受天氣、空域壅塞、航空公司作業等因素影響甚鉅，未來可結合隨機規劃、機率模型或情境生成方式，使模型更能反映真實營運的動態性與不確定性。其次，本研究模型雖已納入部分航廈偏好、登機門相鄰性與大型機型限制，但仍有實務條件可持續深化，例如：地勤人力調度、旅客步行時間、滑行道行駛時間等等，未來若能進一步整合上述面向，將能使模型更全面地支援機場營運決策。最後，是引入滾動平面法（Rolling Horizon）架構，讓模型能在航班資訊更新時自動重新求解，不僅更貼近機場實際營運的情況，也更能驗證系統於即時環境中的反應能力。

**柒、參考文獻**

[1] Daş, G. S., Gzara, F., & Stützle, T. (2020). A review on airport gate assignment problems: Single versus multi objective approaches. Omega, 92, 102146.

[2] Yan, S., & Tang, C. H. (2007). A heuristic approach for airport gate assignments for stochastic flight delays. European Journal of Operational Research, 180(2), 547-567.

[3]黃景棠. (2018). 考量到達時間不確定性之短期登機門指派問題.

[4] Yan, S., Tang, C. H., & Hou, Y. Z. (2011). Airport gate reassignments considering deterministic and stochastic flight departure/arrival times. Journal of advanced transportation, 45(4), 304-320.

[5]黃寬丞、陳鎛維（2024年12月）。利用隨機規劃模式與滾動平面法求解登機門 更新指派問題。發表於中華民國運輸學會 113 年學術論文研討會

[6] Liang, B., Li, Y., Bi, J., Ding, C., & Zhao, X. (2020). An improved adaptive parallel genetic algorithm for the airport gate assignment problem. Journal of Advanced Transportation, 2020(1), 8880390.

[7] Yan, S., Shieh, C.-H., & Chen, M.-S. (2002). A simulation framework for evaluating airport gate assignments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 36*(10), 885–898.

[8] She, Y., Zhao, Q., Guo, R., & Yu, X. (2022). A robust strategy to address the airport gate assignment problem considering operators' preferences. *Computers & Industrial Engineering*, *168*, 108100.

[9]Bi, J., Wang, F., Ding, C., Xie, D., & Zhao, X. (2022). The Airport Gate Assignment Problem: A Branch-and-Price Approach for Improving the Utilization of Jetways. *Computers & Industrial Engineering*, *164*, 107878.

[10] Xu, J., & Bailey, G. (2001). The Airport Gate Assignment Problem: Mathematical Model and a Tabu Search Algorithm. Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 1-10.

[11] Wei, D., & Liu, C. (2007). Optimizing Gate Assignment at Airport Based on Genetic-Tabu Algorithm. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, 1135-1140.

[12] Li, M., Hao, J. K., & Wu, Q. (2022). Learning-driven feasible and infeasible tabu search for airport gate assignment. *European Journal of Operational Research*, 302(1), 172-186.

[13] Aktel, A., Yagmahan, B., Özcan, T., Yenisey, M. M., & Sansarcı, E. (2017). The comparison of the metaheuristic algorithms performances on airport gate assignment problem. Transportation Research Procedia, 22, 469-478.

[14] Hu, X. B., & Di Paolo, E. (2007, September). An efficient genetic algorithm with uniform crossover for the multi-objective airport gate assignment problem. In 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation (pp. 55-62). IEEE.

[15] Bolat, A. (2001). Models and a genetic algorithm for static aircraft-gate assignment problem. Journal of the Operational Research Society, 52(10), 1107-1120.

[16] Ding, C., Bi, J., & Wang, Y. (2023). A Hybrid Genetic Algorithm Based on Imitation Learning for the Airport Gate Assignment Problem. Entropy, 25(4), 565.