

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

Solving a Gate Re-Assignment Problem by Stochastic Programming Model and Rolling Horizon Method

黃寬丞 Kuancheng Huang¹

陳鏞維 Borwei Chen²

摘要

隨著後疫情時代全球空運旅客人數逐漸恢復，甚至即將超越疫情前之水準，目前許多機場存在過度的需求與有限的資源之間的不平衡，導致調度及延誤的情形時常發生，產生高額的機場壅塞成本。本研究以機場營運方為角度發展一個登機門指派的決策更新模式，考量登機門指派的限制與航班抵達時間的不確定性，以最小化總延誤時間、登機門總變動數量以及指派至停機坪之總航班數量為目標，建構一兩階段隨機規劃數學模式。研究的重點有二，首先透過不同之隨機情境模擬航班抵達時間之不確定性，並發展隨機規劃模式；除此之外，本研究透過滾動平面法模擬航班抵達時間定期更新之特性，建立一模擬驗證架構。尤其，本研究也設計一啟發式演算法，以求解規模較大的隨機規劃問題。在數值測試的部分，本研究參考桃園國際機場之歷史航班資訊設計數值測試例題。測試結果證明本研究設計之求解方法與架構相較其他方式就能夠做出較佳之決策，而啟發式演算法也能有效地提升求解的效率。最後，本研究也針對相關參數設定進行敏感度分析，以利於提供機場營運方更可靠的決策支援。

關鍵詞：登機門指派問題、隨機規劃、滾動平面法、模擬

Abstract

As the number of global air passengers gradually recovers in the post-pandemic era and may even exceed the pre-pandemic level, many airports are currently facing a worsening imbalance between excessive demand and limited resources, leading to frequent re-scheduling and delay as well as high airport congestion costs. This study develops a decision model for timely gate re-assignment from the perspective of airport operators. This study considers the assignment requirements between flights and gates and the uncertainty of flight arrival times, aiming to minimize the total delay time together with the number of gate changes and that of flights assigned to apron. A two-stage stochastic programming (SP) model is constructed. The study focuses on two main aspects. First, we model the uncertainty of flight arrival times through different stochastic scenarios and develop the associated stochastic programming formulation. Then, we consider the periodic updates of flight arrival times and establish a rolling horizon mechanism and a verification framework. Moreover, this study designs a heuristic algorithm to deal with larger-scale problems. Historical flight information from Taoyuan International Airport (TPE) is used to design numerical test problems. The test results demonstrate that the simulation verification framework designed in this study overall can make better decisions when compared to other solution approaches, and the heuristic algorithm can effectively improve solving efficiency. Finally, sensitivity analyses on relevant parameter settings have been conducted to provide more reliable decision support to airport operators.

Keywords: Gate Assignment Problem, Stochastic Programming, Rolling Horizon Method, Simulation

¹ 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系教授（聯絡地址：30010 新竹市大學路 1001 號綜合一館 8 樓，電話：03-5731928，E-mail: kchuang@nycu.edu.tw）。

² 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士。

一、緒論

近二十年來，全球之空運旅客人數逐年成長，從國際民用航空組織 (International Civil Aviation Organization, ICAO)之統計資料可得知，全球空運年度載客量自 2000 年的 16.74 億，二十年間在 2019 年上升至 44.56 億。雖然在 2020 年後，因嚴重特殊傳染性肺炎(COVID-19)疫情之緣故，各國採取封城等策略導致空運載客量急遽下降，但根據國際航空運輸協會 (International Air Transport Association, IATA)於 2023 年 12 月所提出之空運旅客市場分析報告 (Air Passenger Market Analysis)，該月客運量僅較 2019 年同月份低了 2.5%，顯示出全球的空運需求正在急速的復甦，並其預估全球空運運量將會在 2024 年回復至疫情前的水準，甚至超越疫情前之水準。航空公司為應付此發展，多採取了增加航班、開闢新航班之動作來因應以滿足乘客對於航空運輸之需求。然而，全球各機場的容量皆受到硬體設施及營運調度的限制，導致調度及延誤的情形時常發生，也因此產生了高額的機場壅塞成本。根據美國聯邦航空總署 (Federal Aviation Administration, FAA)在 2023 年 4 月的報告統計，在疫前的 2012 年至 2019 年，總延誤成本由 192 億美元上升至 330 億美元，呈現出各個機場有愈來愈擁擠的趨勢，預料疫後時期相同的問題會更加嚴峻。

由此可知，就機場的容量進行有效率的管理對於機場的營運是非常重要的，而本研究聚焦於機場容量管理當中的登機門指派(gate assignment)規劃與作業進行探討。早在 Bouras et al. (2014)的研究中即指出登機門指派是影響機場營運的一個重要關鍵，有關登機門的指派及排程如圖 1 所示，若有航班延遲到達即有可能造成航班間的衝突。登機門指派問題的研究最早由 Steuart (1974)提出，研究延伸至今主要分成兩個類型，分別為事前指派(pre-assignment / planned assignment)以及即時或重新指派(real-time assignment / re-assignment)兩種。事前指派、或通稱的 Gate Assignment Problem (GAP)，是根據預先安排好的班表事先制定一段時間內的登機門指派方案。此計畫所考慮之因素通常是較為全面性的營運導向，常與機場內其他的決策或考量有關係，如旅客進出場站及轉機之移動距離、行李運送處理之路線、以至飛機之滑行距離等。

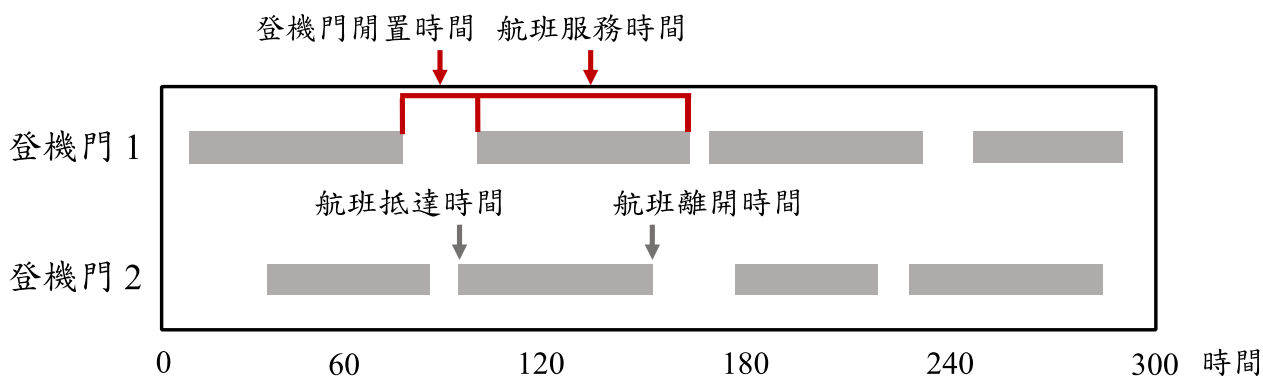


圖 1 登機門指派與排程之示意圖

在營運過程中，航班會因氣候、飛機器械故障等不確定性因素造成延誤或取消等問題，使得航班班表有所變動，進而影響到機場的運作及服務品質。同時，也由於上述之各種不確定性，導致航班的抵達時間在實際營運過程中會有預期之外的變化，而機場營運單位也會定期加以更新。若配合此特性在營運中進行重新指派，即是 Gate Re-assignment Problem (GRAP)，通常根據更新的航班抵達時間定期對原指派方案進行小幅度的變動，可以維持理想的服務品質。此外，若有突發的干擾導致原指派計畫不可行，也必須透過即時登機門指派問題來快速求解新的可行方案，事前指派與即時(或更新)指派問題之研究關聯如圖 2 所示。

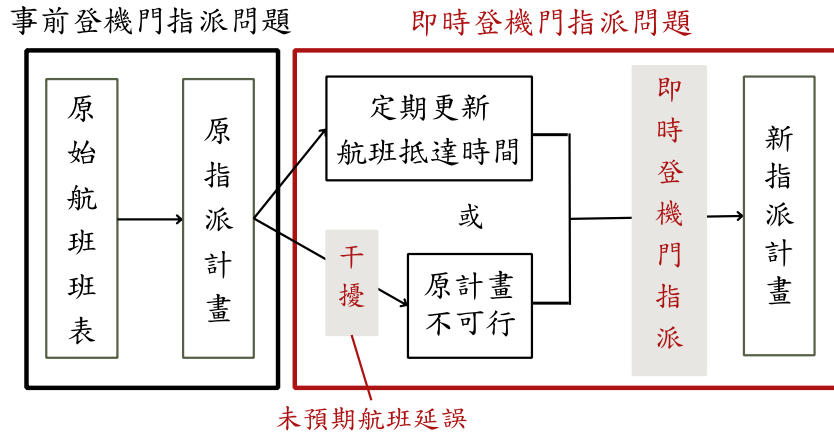


圖 2 事前指派與即時(或更新)指派問題之關聯示意圖

綜合上述之觀點，本研究將航班抵達時間不確定性以及航班抵達時間定期更新之特性納入研究範圍，透過設計兩階段隨機規劃數學模式(Stochastic Programming, SP)納入抵達時間不確定性，並透過滾動平面法(Rolling Horizon, RH)之求解架構考量航班抵達時間定期更新之特性，滾動修正登機門的指派，藉此對整個規劃週期做出更可靠的決策，以降低機場營運方的營運成本。同時，也利用桃園國際機場實際的航班抵達與服務時間歷史資料，設計數值的模擬測試例題，進而將本研究之隨機性方法與確定性方法、以至文獻中之實務指派方式，進行完整的決策分析與比較，以驗證本研究之隨機性方法的求解之品質及效率。

二、文獻回顧

登機門指派問題主要分為兩類型，分別是事前指派以及即時指派兩種，其中又以事前指派的研究較多。相較於事前登機門指派問題(GAP)主要是為了後續營運而預先制定，即時登機門指派問題(GRAP)是在原定計劃已知的情況下，因應實際營運過程中定期更新的航班抵達資訊定期地進行登機門的調整；或是因環境變動導致原指派計畫不可行，就航班衝突的問題即時執行解決的措施。關於登機門指派問題相關研究大致的發展，可參考 Bouras et al. (2014)及 Daş et al. (2020)之文獻整理，前者以不同的模式設計方法以及求解方法將各個研究進行分類，後者則針對目標式的設定面向進行分類。基於本研究以航機抵達的不確定性為重點，以下除回顧運用確定性模式的重要相關研究外，進一步著重隨機性的登機門指派問題之文獻回顧與分析，並比較其與本研究之差異，及說明本研究以隨機規劃模式考量抵達時間不確定性之原因，以及整體上本研究的定位。

2.1 確定性模式之登機門指派問題

在確定性模式之登機門指派問題當中，目標式可根據決策者之偏好設定，常見的目標式有最小化旅客總行走距離、最小化未被指派至登機門的航班數量、最小化飛機拖行距離等，更多詳細的目標式設定可參考 Daş et al. (2020)之文獻整理。隨著旅客人數增加及航班數增多，航班抵達時間的不確定性對決策的績效造成愈來愈大的影響，因此為了克服這個問題，許多研究納入穩健性(robustness)的考量，例如在確定性模式當中加入緩衝時間(buffer time)或閒置時間(idle time)的方式來將航班的不確定性納入考量。Mangoubi & Mathaisel (1985)、Hassounah & Steuart (1993)、Yan & Chang (1998)、Yan & Huo (2001)、Yu et al. (2016)、Deng et al. (2018)、Du et al. (2022)

皆使用在兩連續航班間加入固定緩衝時間的方法來吸收航班抵達時間的隨機性，降低航班衝突發生的機率。其中，Yan & Huo (2001)提到各登機門的閒置時間若是常態分配，有助於提升延誤出發的班機仍然比下一班機抵達時間還要早的機率。其次，Lim & Wang (2005)是以最小化衝突航班數為目標，計算兩航班之間的衝突機率並納入模式考量來做為穩健指派的依據。最後，Cai et al. (2021)同時考慮總乘客行走距離，以及總指派成本，並以延誤成本作為指派成本的依據，根據各個航班的重要性分配權重，在指派過程中優先減少對關鍵航班的干擾和成本，從而使整體航班班表更加高效且具有彈性。

就 GAP 問題的相關研究發展趨勢，近年來多持續著重於目標式的考量面向、加入考慮其他層面的限制式、求解方法的提升等。在目標式的部分，Daş (2017)考慮乘客總行走距離的最小化及靠近商店街之登機門之乘客的最大化，Cai et al. (2021) 考慮總乘客行走距離及總指派成本，Pternea and Haghani (2019) 以先後順序最小化航班分配成本、乘客成功轉機成本和乘客未能轉機成本。另外，就加入其他機場作業限制的研究，Karsu et al. (2021)考慮了最大停等航班數量的限制式，Jiang et al. (2023)考慮了安全限制，以確保飛機於停機坪作業時的安全。

2.2 隨機性模式之登機門指派問題

為完整納入登機門指派的整體規劃，Yan & Tang (2007)提出了一兩階段架構，分別為規劃(planning)及即時(real-time)兩階段，求解的構想是以即時階段所得之結果對規劃階段進行迭代更新，以期取得一個較佳的事前指派方案。是以在規劃階段，作者設計了一個納入情境的隨機性登機門指派模型，並產出一個初始指派計畫；接著將指派計畫被套入即時階段當中，並計算出每個情境下的乘客等待時間，並將此等待時間視為懲罰值放入規劃階段的目標式當中。就整體的求解架構而言，若在數次更新中沒有取得更好的目標式值，迭代求解的流程便停止。

Yan et al. (2011)將航班根據預期到達的時間分為確定性航班(deterministic flight)與隨機性航班(stochastic flight)，前者是到達時間與目前時間較近的航班，而後者是與目前時間差距較遠的航班，因抵達時間的不確定性較大定義為隨機性航班。在其所發展的二階段隨機規劃模式中，一階決策為航班之更新指派決策，二階則為不確定性航班在各個情境下的調整(re-course)決策。尤其，此研究考慮了航班抵達時間定期更新的特性，並提出動態登機門重新指派架構(Dynamic Gate Re-assignment Framework, DGRF)。之後，黃寬丞、黃景棠(2018)參考了 Yan et al. (2011)關於兩類航班的航機到達架構，在設計隨機規劃模式時，改以二元指派變數加上連續性時間相關變數的方式來發展最佳化模式；同時，其也設計了一個基於拉式鬆弛的禁忌演算法來提升該隨機規劃模式的求解效率以因應問題規模的擴大。

Tang (2010)提出了一個基於情境的隨機性即時登機門指派問題，並考慮了短時間的登機門短缺以及航班延誤的隨機性。在決策過程中，模式考慮了兩種狀況，分別是航班被重新指派指其他登機門，以及航班停靠登機門的延誤狀況，也就是對於原指派計畫在空間上及時間上的干擾。

Şeker & Noyan (2012)延伸過去用於穩健確定性模式中所考慮的緩衝時間概念，提出了一個基於情境的隨機性登機門指派模型，考慮航班抵達時間與離開時間之不確定性，以及會因而衍生的航班之間的衝突。其模型之目標式主要為最小化登機門的衝突，但也加入了對於緩衝時間及閒置時間的懲罰項，期望能夠最小化登機門閒置時間的變異。

除上述研究以及本研究所使用的隨機規劃模式之外，穩健最佳化(Robust Optimization, RO)也是常用來考量不確定性的技術。然而，根據 Cuvelier (2015)的結論，當不確定性更為顯著、且納入的情境較能涵蓋不確定性時，隨機模式的表現較為突出；同時相較於穩健最佳化，隨機

規劃尚有另一優點夠根據目前為止獲得的資訊，對於問題提出調整(re-course)決策。此外，Maggioni et al. (2017)透過透過蒙地卡羅法(Monte Carlo Method)的模擬結果發現，雖然穩健最佳化在求解時間上較有優勢，但是使用隨機規劃模式相較能在總成本上有顯著的節省，也證明了隨機規劃模式相較於穩健最佳化通常能夠有較好的決策結果。

雖然穩健最佳化在求解的效率、以至問題規模的適用上較隨機規劃有優勢，然而這個部分能夠透過啟發式演算法的設計來縮短隨機規劃模式之求解時間。相對的，較重要的是從決策輔助的角度出發，雖然前述兩篇文獻並非登機門指派的研究，但可以預期隨機規劃可能會有較好的表現，尤其考量隨機性登機門指派的二階段決策特性，其尚能夠在後續的營運作業提出具有彈性的建議。

綜合以上的文獻回顧，本研究相關之隨機性登機門指派研究統整如表 1。本研究以兩階段隨機規劃模式考慮航班抵達時間不確定性，並在產生決策的過程中使用滾動平面法，將航班抵達時間定期更新的特性納入考慮。同時，本研究並設計啟發式演算法以提升問題的求解效率及可處理的問題規模；並透過設計模擬數值測試，比較不同的登機門指派方法，包含 Yan et al.(2011)文獻中的實務指派方式、確定性模式與本研究隨機模式在決策結果上的差異，以驗證在本決策環境下使用隨機性模式的必要性。

表 1 相關隨機性登機門指派問題文獻彙整表

作者	類型	目標式	不確定性	航班抵達時間 定期更新	啟發式 演算法
Yan & Tang (2007)	事前	最小化： 1. 總乘客等待時間	航班延遲	-	-
Yan et al. (2011)	即時	最小化： 1. 總延遲時間 2. 登機門變動之航班數量	抵達時間 離開時間	V	-
Şeker & Noyan (2012)	事前	最小化： 1. 登機門的衝突 2. 登機門閒置時間的變異	抵達時間 離開時間	-	禁忌搜尋法
黃寬丞、黃景 棠(2018)	即時	最小化： 1. 所有航班之總延誤時間 2. 航班重新指派之數量 3. 指派至停機坪之懲罰值	抵達時間	-	基於拉式鬆弛 的禁忌搜尋法
本研究	即時	最小化： 1. 所有航班之總延誤時間 2. 航班重新指派之數量 3. 指派至停機坪之懲罰值	抵達時間	V	禁忌搜尋法

三、數學模式

本研究將抵達時間不確定性以及航班抵達時間定期更新之特性納入決策考量，以設計出符合機場營運環境之研究架構，分別使用兩階段隨機性數學模式以及滾動平面法來對營運的登機門指派過程進行模擬與求解。本節首先對研究當中所使用之兩階段隨機性數學模式進行介紹。此兩階段隨機規劃數學模式會與滾動平面法結合，用來對滾動平面法中的每個決策週期或稱分析階段，即時地進行登機門指派之更新。因此，以下介紹的數學模式於在每個決策週期中求得解答並執行，但其目標式值並非整個模擬期程的總成本；在本研究中，實際之目標式值將會是在滾動平面法結束後加總計算才能得到，詳細的計算方式將於後續一節進行詳細的說明。

本研究以機場營運方的角度出發，在營運過程中航班的抵達時間會定期更新，根據這些資訊，並嘗試參考航班抵達時間的歷史資料來將不確定性納入考量，藉以最小化總延遲時間以及航班登機門更動與指派至停機坪等負面影響。對於數學模式之假設有下列幾點：首先，每個航班都需被指派至一登機門進行服務，且一登機門不能同時對一個以上的航班進行服務；每個航班能夠使用的登機門沒有限制，但其在抵達與離開時皆使用同一登機門；在問題當中，將停機坪取代登機門的可行性納入考慮，但不鼓勵使用，因此給予一懲罰值；最後，前後兩航班之間轉換所需的作業時間皆已內含在前一航班登機門使用時間之參數之內。

關於本研究問題對航班之分類以及其抵達時間的不確定性，係參考 Yan et al. (2011)之設定，示意圖如圖 3。在每個決策週期定期求解的過程中，更新後之抵達時間(U_i)距目前時間小於一臨界值(在此設定為 $t \leq \tau$)的航班視為確定性航班；反之，其更新後之抵達時間距目前時間較遠(即 $t > \tau$)，不確定性通常較大，因此視其為不確定性航班。在本研究之兩階段隨機規劃模型，將其抵達時間的不確定性透過不同的情境將其納入考量，也就是各航班在不同的情境下，會有不同的抵達時間。圖 3 也透過四個航班，三個情境的示例來說明本研究將航班類型與抵達時間不確定性納入決策模式的方式。

至於隨機規劃模式與決策部分，在模式第一階段綜合考量各個航班抵達時間的情境，做出所有航班的更新指派決策，在模式的第二階段，則是就抵達時間的不確定性實現後，針對不確定性航班針對各情境下做出調整(re-course)決策，數學模式之詳細內容如下。在本研究當中，數學模式的設計參考黃寬丞、黃景棠(2018)的架構，係一以混合整數規劃模型(Mixed Integer Programming Model, MIP)為基礎的二階隨機規劃模式，其中隨機性在於航班的抵達時間。

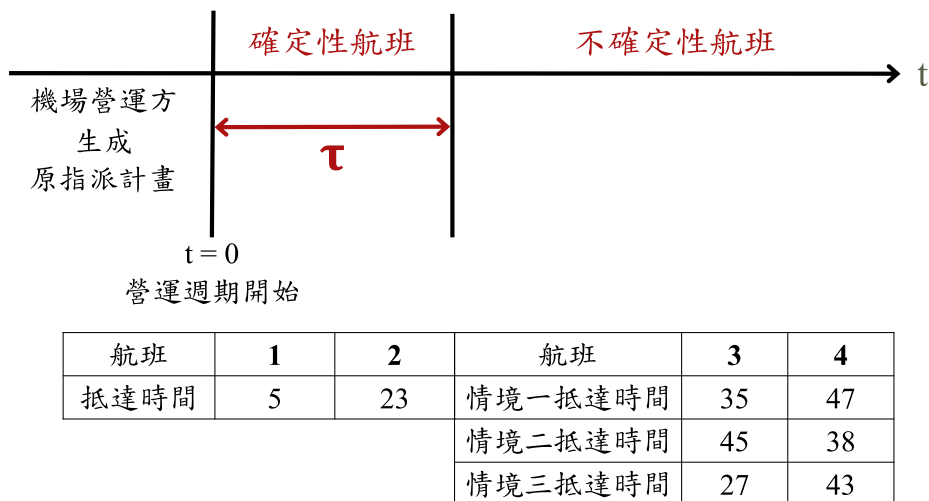


圖 3 隨機性假設示意圖

集合

Ξ : 為所有情境的集合, $\xi \in \Xi$ 。

I : 為航班的集合(其中 I^D 為確定性航班集合, I^S 為不確定性航班集合, $i, k \in I, I = I^D \cup I^S$ 。)

K^0 : 為登機門 (包含停機坪) 的集合($k \in K^0$, $K=0$ 為停機坪, $|K|$ 為登機門之數量。)

參數

p^ξ : 情境 ξ 的發生機率。

Y_{ik} : 航班 i 指派至登機門 k 的事前指派。

A_i : 航班 i 的原訂抵達時間。

U_i : 航班 i 的更新後抵達時間, $i \in I$ 。

U_i^ξ : 航班 i 在情境 ξ 的抵達時間, $i \in I^S$ 。

S_i : 航班 i 的服務時間。

W : 更換登機門的懲罰值。

B : 指派至停機坪的懲罰值。

決策變數

y_{ik} : 為二元變數, 如 $y_{ik}=1$, 代表航班 i 使用登機門 k 。

t_i : 航班 i 在登機門的開始作業時間。

y_{ik}^ξ : 為二元變數, 如 $y_{ik}^\xi=1$, 代表航班 i 在情境 ξ 使用登機門 k 。

t_i^ξ : 航班 i 在情境 ξ 下在登機門的開始作業時間。

z_i : 為二元變數, 如 $z_i=1$, 代表航班 i 使用之登機門與事前指派不同。

z_i^ξ : 為二元變數, 如 $z_i^\xi=1$, 代表航班 i 在情境 ξ 使用之登機門與事前指派不同。

數學模式

$$\text{Min. } \sum_{i \in I^D} (t_i - A_i) + W \sum_{i \in I^D} z_i + \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \left[\sum_{i \in I^S} (t_i^\xi - A_i) + W \sum_{i \in I} z_i^\xi \right] + B \left(\sum_{i \in I^D} y_{i|K+1|} + \sum_{i \in I^S} \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi y_{i|K+1|}^\xi \right) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K^0} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K^0} y_{ik}^\xi = 1 \quad \forall i \in I, \xi \in \Xi \quad (3)$$

$$(t_i + S_i - t_j) \leq (2 - y_{ik} - y_{jk})M \quad \forall i, j \in \{I \mid U_i < U_j\}, k \in K^0 \quad (4)$$

$$(t_i^\xi + S_i - t_j^\xi) \leq (2 - y_{ik}^\xi - y_{jk}^\xi)M \quad \forall i, j \in \{I^S \mid U_i^\xi < U_j^\xi\}, k \in K^0 \quad (5)$$

$$y_{ik}^\xi = y_{ik} \quad \forall i \in I^D, k \in K^0, \xi \in \Xi \quad (6)$$

$$t_i^\xi = t_i \quad \forall i \in I^D, \xi \in \Xi \quad (7)$$

$$U_i \leq t_i \quad \forall t_i \in \mathbb{R}, i \in I \quad (8)$$

$$U_i^\xi \leq t_i^\xi \quad \forall i \in I^S \quad (9)$$

$$z_i \geq \sum_{k \in K^0} y_{ik}(1 - Y_{ik}) \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$z_i^\xi \geq \sum_{k \in K^0} y_{ik}^\xi(1 - Y_{ik}) \quad \forall i \in I, \xi \in \Xi \quad (11)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K^0 \quad (12)$$

$$y_{ik}^\xi \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K^0, \xi \in \Xi \quad (13)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (14)$$

$$t_i^\xi \geq 0 \quad \forall i \in I, \xi \in \Xi \quad (15)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (16)$$

$$z_i^\xi \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \xi \in \Xi \quad (17)$$

目標式(1)欲最小化總延誤時間以及航班更新指派後相對於事前指派計劃之更動數量，以及被指派至停機坪的懲罰值。限制式(2)、(3)限制式確保在兩階段的決策中，每一航班都指派安排至一個登機門或是停機坪，其中限制式(2)為隨機規劃第一階段之決策，而限制式(3)則是隨機規劃第二階段每個情境之調整(re-course)決策。限制式(4)、(5)為衝突避免限制式，確保航班若使用登機門的時間不會有重疊的狀況。限制式(6)、(7)將確定性航班的對應變數固定。限制式(8)、(9)限制確定性與隨機性航班連接登機門之時間不能早於其於各情境更新後之抵達時間。限制式(10)將第一階段決策之指派結果記錄至決策變數 z_i ，若指派結果 y_{ik} 與事前指派 Y_{ik} 相同則為1，否則為0；類似地，限制式(11)將第二階段決策之指派結果記錄至對應情境的決策變數。限制式(12)、(13)定義其中兩個決策變數為二元變數；限制式(14)、(15)定義其中兩決策變數為非負實數；限制式(16)、(17)定義其中兩個決策變數為二元變數。

四、滾動平面法與模擬測試架構

除航班抵達時間不確定性外，本研究也將航班抵達時間定期更新之特性納入研究架構，因此於4.1小節介紹滾動平面法如何處理航班抵達時間定期更新之特性，並解釋其如何與前一節之數學模式進行結合成本研究之模擬驗證架構，藉以產生並評估登機門更新指派的決策。此外，由於一般的登機門指派問題已在Obata (1979)證明其為一個NP-hard的問題，代表隨著問題規模擴大，求解的複雜度與運算時間會大幅提升，使得精確解法(exact solution methods)無法有效率地求出最佳解。尤其，即時的登機門重新指派基於其作業特性，需要在短時間內迅速做出決策，因此將在4.2小節介紹本研究所設計之禁忌搜尋法(Tabu Search, TS)求解程序，以提升問題的求解效率，滿足即時登機門指派問題需快速求解、即時做出更新決策的需求。

4.1 滾動平面法

由於實際營運過程中，航班具有定期更新抵達時間的特性，因此本研究無論是決策的數學模式，或是對應的啟發式演算法，都將建立在滾動平面法的架構下，以模擬航班定期更新抵達時間的特性。滾動平面法是一個在隨機及動態環境下常用的決策方法，這種方法根據目前所獲得的部分資訊，對整個問題做出即時的決策(Sethi, 1991)。由於本研究之問題設定，是在每個決策週期(Decision Epoch)透過新獲得的資訊，對目前時間點至營運結束時間、其或可稱為階段分

析長度(Analysis Horizon)，進行整體的求解。雖然此與常見的滾動平面法應用，將問題切分成數個時間段的子問題進行求解的方式較為不同，然而根據 Toth & Vigo (2014)所提到的界定方式，無論每個決策週期是求解部分問題或整個問題，都可以稱為是滾動平面法，因此本研究也延續上述之方法論定位。以下針對本研究所設計之滾動平面法架構以及相對應的流程進行詳細的介紹，表 2 為本研究之滾動平面法架構當中與各項參數或設定之相關名詞解釋，架構示意圖則如圖 4。

表 2 滾動平面法參數解釋

參數	解釋
總規劃平面 (Overall Planning Horizon)	從設定之營運週期開始時間($t = 0$)至規劃終點。
分析階段(Horizon Index)	記錄目前為第幾個分析階段，或者對應一般滾動平面法所稱的決策週期或決策時點(Decision Epoch)。
滾動長度(Update Interval)	每個決策週期之開始時間向後推移的時間長度。本研究亦將其設為圖 43 的 τ ，同時也是每個週期界定確定性與不確定性航班之時間點。
階段分析長度(Analysis Horizon)	每個決策週期的分析起點至規劃終點。
階段分析起點 (Analysis Start Time)	決策週期之開始時間。
階段執行終點 (Implementation End Time)	每個決策週期中，分析起點+滾動長度的時間點，代表這段期間內登機門的指派就此定案，可以進行實際目標值的計算。
規劃終點(Overall End Time)	規劃平面的結束時間，即最後一班航班完成服務之時間。

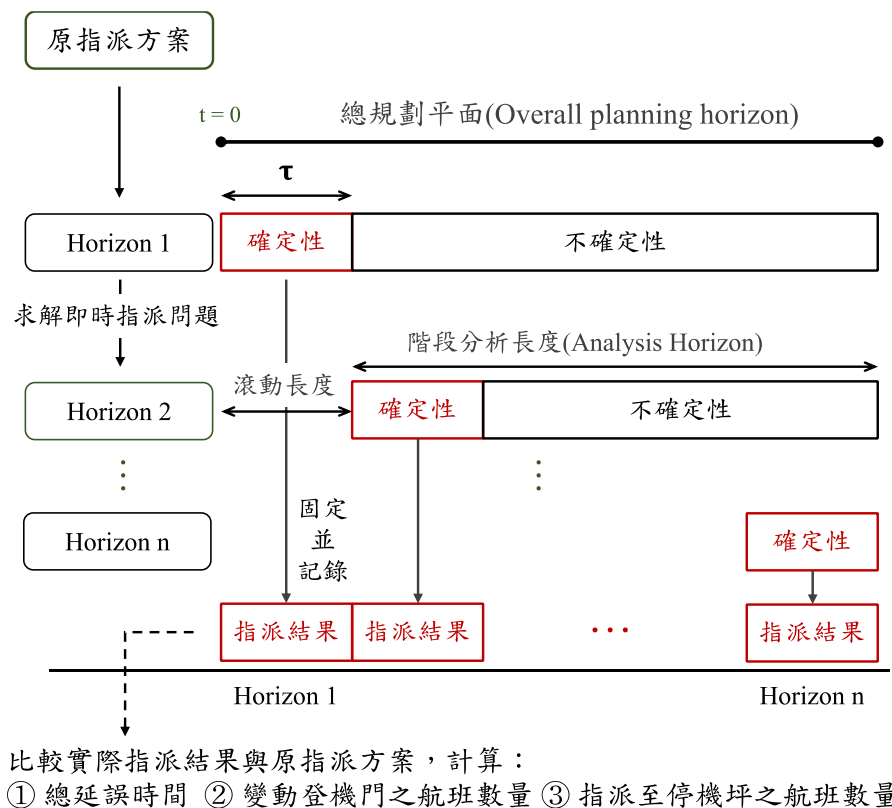


圖 4 滾動平面法架構示意圖

在滾動平面法中，就總規劃平面需要針對滾動週期和階段分析長度進行設定。首先，階段

分析長度在本研究當中，每個決策週期是求解整個問題，即從該週期之分析起點至規劃終點，因此每個決策週期之分析長度會時隨著週期的時間推移而逐漸縮短，而本研究在求解過程中也以 Horizon index 來記錄目前的決策週期。接著是滾動長度，代表每個週期的開始時間向後推移的時間長度，在本研究當中將其設定為與第三節當中，界定確定性航班與不確定性航班的時間長度 τ 相同。因此在每個週期當中，航班更新後抵達時間(U_i)介於階段分析起點與階段執行終點之間的航班視為確定性航班，其餘則視為不確定性航班，且每個週期的開始時間會向後推移 τ 個時間單位。關於總規劃平面，根據本研究之問題假設，總規劃平面是從營運開始時間(即 $t=0$)，至最後一班航班服務結束為止。以下為本研究在滾動平面法下，各個步驟之詳細說明。

1. 初始化：

將 Horizon Index、階段分析起點設定為 0，以及根據滾動長度，設定階段分析長度、階段執行終點在第一個決策週期時的初始值。

2. 模擬與求解：

在每個決策週期開始求解前，首先先界定該週期之確定性航班及不確定性航班，並對該週期對應的階段分析長度，使用 3.3 小節之隨機性模式進行即時登機門指派問題的求解。在求解過後，紀錄本週期當中確定性航班之指派決策，而該週期之確定性航班的指派結果在後續的決策週期皆不可能再做更動。事實上也就是於實際營運過程中，在時間推移後，過去的航班並不能再重新進行指派。接著，更新階段分析起點，推移至下一個決策週期或分析階段，並反覆上述之流程直到所有航班都已被視為確定性航班，並且記錄期指派結果為止。

若起始的以 Horizon 1 為例，其分析起點為 0，分析終點為 $0+\text{滾動長度}(\tau)$ ，代表更新後抵達時間(U_i)在時間點 τ 以前抵達的航班皆為確定性航班，其餘航班皆為不確定性航班。在界定完成後，接著便使用 3.3 小節之隨機性模式進行即時登機門指派問題的求解。在完成求解後，將此次 Horizon 1 當中確定性航班的指派結果記錄，並更新階段分析起點，將其由 0 推移至 τ ，階段執行終點亦是向後推移 τ ，但階段分析長度也隨之縮短 τ 。就這樣一直反覆求解，直到所有航班都已被視為確定性航班及固定其指派結果後，滾動平面法便會終止。

3. 計算實際總延誤時間及變動登機門數量：

在所有決策週期結束，所有航班之指派結果皆固定後，使用所有航班的指派結果與原訂指派計畫進行比較，計算出本研究所考慮的三項目標：總延誤時間、總變動登機門之航班數量，以及總指派至停機坪之航班數量。

4.2 禁忌搜尋法

在過去的研究當中，禁忌搜尋法被廣泛運用在求解各類型的排班以及指派問題上，因此本研究亦選擇使用禁忌搜尋法之架構設計啟發式演算法。禁忌搜尋法之架構與概念最早由 Glover (1990)提出，是局部搜索法(Local Search)的延伸，同樣是透過不斷地產生鄰域解，希望在到達設定之迭代次數前，找到接近最佳解的解決方案。與之不同處是禁忌搜尋法透過設計禁忌準則將過去訪問過的最佳解決方案放入禁忌列表(tabu list)內，防止解決方案被重新訪問，以此避免無法跳脫區域最佳解的狀況；同時，也設計相對應的解除禁忌準則，以確保解的多樣性及對全域進行有效的探索，以下為本研究之禁忌搜尋法演算法詳細架構。

1. 解之型態：

在本研究所設計之演算法中，每一組解為不同的一階指派，包含了以下三個元素：航班編號、指派之登機門，以及開始作業時間，後兩元素分別是對應到數學模式當中的決策變數 y_{ik} 以

及 t_i ，而航班編號即為此兩決策變數之下標 i 。

2. 產生初始解：

本研究為即時的登機門更新指派問題，表示已有事前之指派計畫，因此在設計之演算法當中，初始解的生成方式就透過修改事前指派計畫進行來達成。修改方式是在不變動任何登機門的狀況下，根據更新的抵達時間資訊，在有必要的情況下以延遲的方式產生出可行解，並將此可行解作為初始解。

3. 二階各情境之指派：

在求得前述之一階段指派初始解後，須進一步考量二階之調整決策，因此將初始解帶入各個情境，首先先根據情境下的航班抵達時間進行排序，以先到的航班先指派(First Come First Served, FCFS)，而服務的登機門即為一階求解所得之登機門。然而，若開始作業時間在考量更新後抵達時間所衍生的延遲超過變更之登機門懲罰值，則比較指派至各個登機門對於目標式值之增加，選擇增加最少之登機門進行指派。

4. 計算適配值：

在透過一階指派求得各個情境下的二階調整決策後，使用兩階段的決策結果來計算出解之適配值。在啟發式演算法當中，適配值為用來評估解優秀程度的工具；在本次迭代的所有鄰域解當中，適配值最好的解將用來產生下一次迭代的鄰域解，藉此讓解愈來愈好。而在本研究中，適配值就直接設定為數學模式中的目標式值，適配值愈低則代表此解愈優秀。

5. 更新禁忌列表：

在計算完初始解之適配值後，會將模式第一階段解加入禁忌列表，表示此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，或是因此而無法跳脫區域最佳解。除此之外，在每一次迭代中，所有鄰域解當中適配值最好的解稱為最佳鄰域解，而此解也將是在下一個迭代用來產生鄰域解之候選解，且也會將其加入禁忌列表當中。在本研究當中，禁忌列表的大小設為 10，當禁忌列表已滿時，會依照先進先出的原則，將於列表內待最多迭代次數的解剔除，使其能再次被搜尋。

6. 產生鄰域解：

鄰域解的產生，又稱為移步(move)，指的是由目前的解移動至另一個解的過程。透過使用的移步方法搜尋及產生鄰域解，並選擇最佳鄰域解最為候選解，而此候選解將用於產生下一個迭代的鄰域解。在本研究當中，選擇以單點移動之移步方式生成鄰域解。單點移動法產生鄰域解的方式為隨機選擇一航班並更換其指派之登機門，產生鄰近解之示意圖如下圖 5 所示。

航班編號 i	1	2	3	4	5
登機門 j	2	3	1	2	1

↓

航班編號 i	1	2	3	4	5
登機門 j	2	3	3	2	1

圖 5 單點移動法示意圖

在產生鄰域解後，將會對每個鄰域解進行是否為可行解的檢查，若在單點移動後，航班使用登機門的時間有所重疊，則會將衝突航班的後者延後其開始服務之時間，藉此調整為可行解，再進行後續之演算法流程與適配值之運算。

7. 停止條件：

本研究所使用之停止條件有二，分別為當迭代次數以達設定的次數上限，以及目前最佳解已經在所設定的迭代次數中沒有更新。只要在兩者當中有一個條件已達成，則會跳出演算法，進入下個週期的求解。會這樣設計的原因是由於在某些決策週期當，航班密集度可能較低，因此基本上在透過延誤所產生之初始解便是該週期當中之最佳指派計畫，再對於鄰域解進行搜尋並無太大的意義、只會增加演算法之運算時間，因此考慮使用此設計來提升演算法求解效率。只要在兩者當中有一個條件已達成，則會跳出演算法，進入下個週期的求解。而在未達設定之停止條件前，演算法將持續進行重複上述步驟進行求解。

五、數值測試

本研究在 5.1 小節先以例示性例題為例，以呈現本研究發展之數學模式與滾動平面法架構的特性。5.2 小節將問題規模擴大，以機場規模大小的例題進行模擬例題測試，並對本研究設計之演算法進行效能驗證。在 5.3 小節針對航班延誤嚴重程度、機場擁擠程度以及懲罰值進行敏感度分析，探討在不同設定下使用隨機性模式及其他求解方法之間對指派結果之分析。本研究數學模式及演算法以 Python 語言搭配數學規劃求解器 Gurobi 進程式撰寫，求解環境則為 Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz, RAM 32GB 的桌上型電腦。

5.1 例示性例題

本小節以例示性例題的數值測試，來說明本研究之問題特性，以及分析隨機規劃模型所得結果，並對於四種不同方式之求解結果進行比較，其分別為實務指派方式、具完整資訊之重新指派、滾動平面法下之確定性模式，以及滾動平面法下之隨機性模式。目標在探討本研究所設計之模擬與驗證架構的效益，下方為此四種不同方法之解釋。

1. 實務指派方式

此方法為 Yan et al. (2011)於研究中所提供的機場登機門重新指派實務方法，其指派規則大致可以綜合為以下步驟。至於最大容許時間，在本研究將設定與更換登機門懲罰值 W 相同。

- (1) 延誤策略：適用於若航班等待所造成之延誤時間不超過其最大容許時間。其決策為不更換登機門，並且在原登機門等待至其可用。在此情況下，若該航班的時間窗與後續抵達的航班重疊，則後續的航班也需進行重新指派。
- (2) 具有閒置時間窗的替代登機門：若上述步驟(1)並不可行，則會使用此方案，尋找並指派至閒置時間窗最長，且能同時滿足航班服務時間之登機門進行服務。
- (3) 有時間衝突的替代登機門：若上述步驟仍不可行，便會尋找並指派至衝突時間最短之登機門進行服務，且在此狀況下，後續航班也需進行重新指派。

2. 具完整資訊之重新指派

所謂具完整資訊，代表的是在總規劃平面當中，所有航班的抵達時間全部同時更新變為已知，因此能夠綜合考量將所有航班所需的登機門進行最佳的重新指派。此假設在實際情況中當然不可能發生，但在本研究當中，將以此方法之指派結果視為決策的上限值(upper bound)，用以比較滾動平面法搭配不同模式下的求解效果，也就是測試標竿(benchmarking)。

3. 滾動平面法下之確定性模式：

透過第三節隨機性模式(1)至(17)的簡化，得到(18)至(25)之確定性模式，並結合 4.1 小節的滾動平面法的架構，對該確定性模式求解以得到登機門重新指派的決策。

$$\text{Min. } \sum_{i \in I} (t_i - A_i) + W \sum_{i \in I} z_i + B \sum_{i \in I} y_{i|K+1|} \quad (18)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K^0} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$(t_i + S_i - t_j) \leq (2 - y_{ik} - y_{jk})M \quad \forall i, j \in \{I \mid U_i < U_j\}, k \in K^0 \quad (20)$$

$$U_i \leq t_i \quad \forall t_i \in \mathbb{R}, i \in I \quad (21)$$

$$z_i \geq \sum_{k \in K^0} y_{ik}(1 - Y_{ik}) \quad \forall i \in I \quad (22)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K^0 \quad (23)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (24)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (25)$$

4. 滾動平面法下之隨機性模式

本方法係以第三節之隨機性模式(1)至(17)，結合 4.1 小節的滾動平面法進行模擬與求解。

有關測試之例題，本研究參考實際之機場航班資料，設計一個例示性例題。規模包含 55 個航班，7 個登機門，登機門 8 則設定為停機坪，規劃週期為當日的清晨 5 時至隔日的凌晨 2 時止，共計 21 小時，情境數量則為 5 種。在例示性例題當中， Y_{ik} 、 A_i 、 S_i 、 U_i 為預先設定之參數，變更登機門的懲罰值 W 設為 30，指派至停機坪的懲罰值 B 設為 60。至於滾動平面法當中的滾動週期，即圖 3 與圖 4 當中的參數 τ ，則參考 Yan et al.(2011)，將其設為 60 分鐘，代表每個小時針對航班的資訊更新一次，同時也表示距現在一小時內之航班為確定性航班，之後的航班則為不確定性航班。四種不同求解方法所得出之求解結果如表 3 所示。

表 3 例示性例題求解結果

	具完整資訊之 重新指派	不同求解方式之即時指派		
		實務指派 方式	滾動平面法下之 確定性模式	滾動平面法下之 隨機性模式
目標式值	807	1005	871	823
總延誤時間(分)	687	765	721	733
航班登機門總變動數	4	4	5	3
航班指派至停機坪總數	0	4	0	0
與指派標竿相差比例	-	17.2%	7.9%	2.0%
每週期平均求解時間(秒)	-	-	0.59	8.25
總求解時間(秒)	0.67	negligible	11.39	173.05

從結果中可以看出，具完整資訊之即時指派自然有最低的目標式值，隨機性模式在滾動平面法之下的求解結果最佳，確定性模式次之，最後則是實務指派方式。透過此例示性例題之求解結果，可以看出隨機性模式搭配滾動平面法所做出之指派計畫，其所對應之目標式值，僅與標竿決策、即具完整資訊之更新指派，相差 2%，較實務指派的 17.2% 以及確定性模式搭配滾動平面法的 7.9% 有明顯的優勢，初步顯示本研究所發展的隨機性模式對於登機門重新指派是具有價值的。

除指派結果之外，為瞭解本研究所設計之數學模式與其搭配之滾動平面法的求解效率，因此一併將求解之時間列於表格內。透過表 3 的平均求解時間可以觀察出，在隨機性模式在滾動平面法下，隨著情境的增加，其所需的求解時間也快速增加，這也意味著在對規模更大的例題進行求解時，求解時間只會更長。因此，後續設計啟發式演算法來求解本研究的隨機規劃問題，以在維持可接受求解品質的狀況下，提升求解的效率。

5.2 實務型範例測試

本小節首先在 5.2.1 對桃園機場之環境及航班抵達資料進行簡要說明，並以實際資料為基礎設計具備實務規模之例題。在 5.2.2 呈現測試結果，並在 5.2.3 驗證本研究所設計之禁忌搜尋法演算法效能。

5.2.1 簡介與參數設計

表 4 為桃園國際機場設備及一般性每天航班抵達資料之統計，本研究係以 2024 年 1 月為例。目前兩個航廈總共有 38 個登機門提供服務，且平均每日抵達的航班數量為 289 班，最大每日抵達航班數量則為 300 班。為了簡化研究的複雜度，本研究之例題以一個航廈的規模來考量，將航班數量設定為 146 班，登機門數量設為 17 個，登機門 18 設定為停機坪。然而，依民航局之統計資料，當時桃園國際機場的航班數，僅約為疫情前之 67% 左右；因此，後續會透過航班數量的增加進行敏感度分析，觀察機場擁擠程度對登機門指派決策的影響。

表 4 桃園國際機場設備與航班資料統計表(2024 年 1 月)

登機門數量		平均每日航班數量	最大每日航班數量	廣體客機平均數量	窄體客機平均數量
第一航廈	第二航廈	289	300	149.7	139.5
18	20				

在模擬例題中，原訂抵達時間 A_i 的設定係參考實際機場資料，分析每小時平均抵達航班數量，結果如圖 6 所示。可以發現主要的起降集中在中午 12 時至午夜 12 時之間，而凌晨 2 時至 4 時之航班數量相當少，可視為日與日之間的緩衝及重整時間。因此，本研究將總規劃平面設為一日當中的清晨五時至隔日凌晨一時，共計 21 小時。另外，變更登機門的懲罰值 W 設為 30，指派至停機坪的懲罰值 B 設為 60，也就是相當於造成 30 及 60 分鐘的遲延。

有關航班的更新抵達時間(U_i)、各隨機情境下之更新抵達時間(U_i^ξ)，則是對機場實際航班資料之延誤狀況進行分析，再透過航班延誤狀況的分佈產生隨機變數，並與原訂抵達時間(A_i)相加，以獲得各情境下的更新抵達時間參數。根據實際航班資料所分析出之航班延誤狀況分佈如圖 7，可以發現航班延誤時間之頻率分佈圖與擬合出的常態分佈曲線相近，因此本研究假設延誤時間服從平均 0、標準差為 18 之常態分配來產生隨機情下的抵達時間。

至於航班服務時間參數(S_i)，會受到許多因素之影響，主要包含航班使用之客機大小或類型、航班之載客率等。由於並無法蒐集如此詳盡之相關資訊，在參數設計時無法完全將前述之因素納入例題的設計。因此，本研究在設定該參數時，是將航班類型及狀況簡化，以廣體與窄體兩類型進行分析，藉以設定各機型之航班服務時間參數。關於兩類客機每日航班的相對數量，如表 4 可以發現在每日的數值相當接近，因此在本部分之測試例題中，會以廣體客機與窄體客機各半的比例來設計。

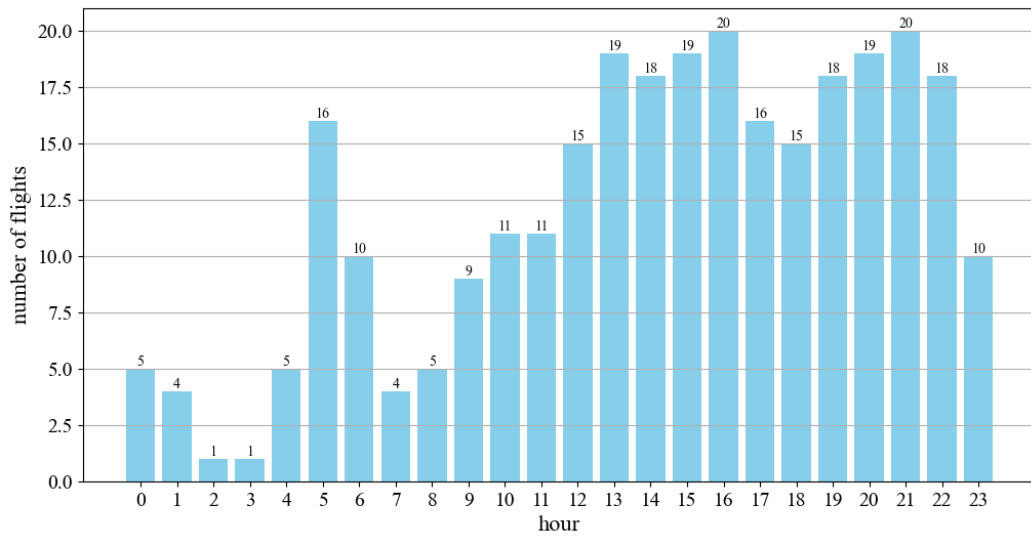


圖 6 平均每小時航班抵達數量統計圖

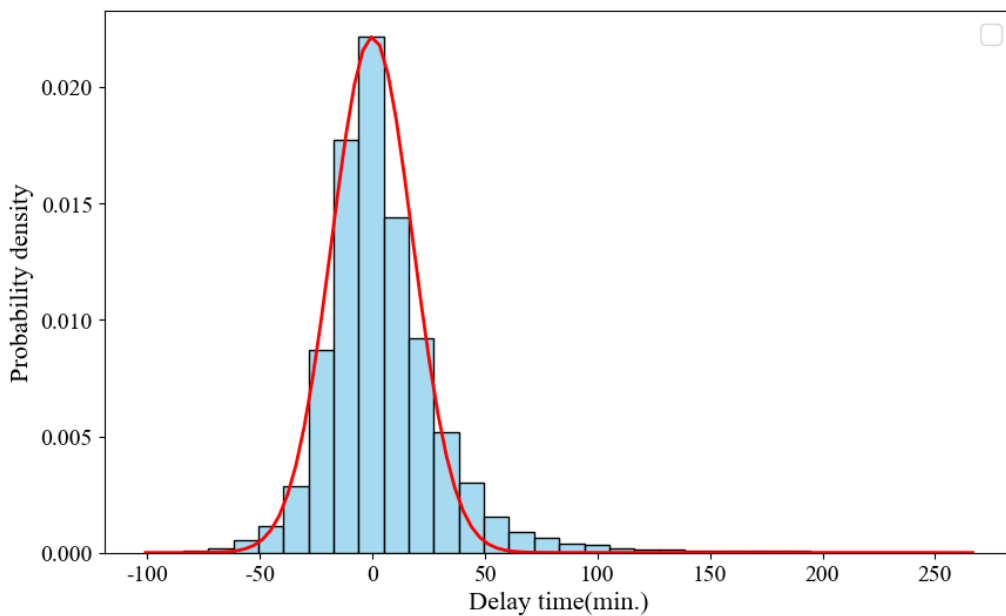


圖 7 航班延誤狀況分佈圖

本研究以離散的情境考慮抵達時間的隨機性，因此模式中要用多少個情境(U_i^ξ)來代表真實情況的不確定性，便是一個非常重要的課題。本研究進行了若干的測試，求解不同情境數的隨機規劃模式，比較其在滾動平面法下所產生結果的穩定性與優劣性。發現若僅使用 5 個抵達時間情境，其求解品質相當不穩定，波動很大；然而，在隨機規劃模式增加到 10 個情境的測試中，求解品質就變得相當穩定。至於 20 個情境的測試，雖求解品質更稍加優異與穩定，但考量到求解時間的增加，本研究即以 10 個情境的隨機規劃模式做為求解的對象。

5.2.2 實務型例題測試結果

在實務型例題的測試中，與例示性例題相同，使用於 5.1 小節所提到的四種不同的方法，並以 10 組例題進行求解，並分析比較求解的結果。實務型例題之之求解結果如表 5，其中之 Gap 為該方法與具完整資訊之標竿指派目標式值差距。

表 5 實務型例題求解結果

	具完整資訊之 重新指派	不同求解方式之即時指派		
		實務指派方式	滾動平面法下之 確定性模式	滾動平面法下之 隨機性模式
平均目標式值	1515.8	1645.8	1638.5	1585.8
平均總延誤時間(分)	1293.8	1324.8	1347.5	1354.8
平均總登機門變動 航班數量	7.4	6.5	9.7	7.7
平均總指派至停機坪 航班數量	0	2.1	0	0
平均 Gap (%)	-	8.41%	7.89%	4.07%

透過表 5 的測試結果可以發現，隨機性模式在滾動平面法下所求解結果與具完整資訊之標竿指派相當接近，差距為 4.07%。至於另兩種方法，確定性模式及實務指派方式在實務型例題測試中，並沒有一定的優劣差異。在某些例題當中，確定性模式之指派決策較佳，而在另外一部分例題中實務指派方式之決策結果較佳。然而，以平均結果來觀察，確定性模式搭配滾動平面法之決策結果較實務指派方式稍佳，二者與具完整資訊之標竿指派分別有 7.89% 及 8.41% 的差距。

除透過目標式值來觀察決策結果外，接著也透過目標式當中的各個項目，即延誤時間、更換登機門數量、指派至停機坪數量，來觀察不同求解方法在決策方式上之差別。從表 5 之決策結果觀察，可以看出確定性模式在延誤時間上雖較隨機性模式稍低，但平均更換登機門的次數卻是隨機性模式較少，最終也因此就總成本而言，使用隨機性模式之求解效果較理想。至於，實務指派方式的平均延誤時間雖為三種方法中最低，然而由於其決策方式容易導致後續的登機門變更、甚至指派至停機坪，也因此其最終指派結果整體是較另外兩個方法為差。透過觀察結果發現，使用隨機性模式搭配滾動平面法在決策中能透過考量抵達時間不確定性，做出較好的決策，也證明使用隨機性模式之價值。

5.2.3 演算法效能驗證

前述測試問題的規模，(1)至(17)的兩階段隨機規劃問題，尚可利用一般的整數規劃套裝軟體求解。但考慮更大問題的適用性，本研究亦利用 4.2 小節之禁忌搜尋法求解隨機規劃模式，並與數學規劃求解軟體 Gurobi 所求得整數規劃問題之精確解，在滾動平面法的模擬架構下，進行登機門更新指派的比較，以驗證設計之啟發式演算法在求解效率上之提升以及求解品質之維持。關於演算法的參數設定，鄰域解數量在例示性例題設定為 50 個，實務型例題則設為 200 個；禁忌列表皆為 10，演算法的停止條件設為迭代達 250 次，或在 50 次迭代中解沒有改進。表 6 為例示性例題及實務型例題 10 個測試題目之平均結果比較。

從表 6 之整理可以看出，在例示性例題的規模當中，使用精確解法及禁忌搜尋法在平均求解時間上並無太大差別，而禁忌搜尋法在大部分的例題當中也能達到最佳解的效果。當例題規模擴大後，求得精確解所需的時間、以至完成滾動平面法模擬的時間，也跟著大幅提升，最終需要到 3700 秒，而若利用本研究所設計之禁忌搜尋法，所需時間僅增加至 157 秒，且求解結果與精確解在的平均差距為 4.85%。顯示此禁忌搜尋法能夠在大幅降低運算時間的狀況之下，尚可維持一定的求解品質，並提供機場營運方一個品質不錯的決策輔助。

表 6 禁忌搜尋法執行結果

	套裝軟體整數規劃最佳解		禁忌搜尋法		Gap
	平均目標式值	平均求解時間(秒)	平均目標式值	平均求解時間(秒)	
例示性例題	538.7	35.6	547.1	33.7	1.50%
實務型例題	1585.8	3737.8	1665.0	156.5	4.85%

5.3 敏感度分析

模式中的許多參數都有可能對於最後的決策產生重大的影響，本研究特別針對航班延誤的嚴重程度以及機場的擁擠程度進行探討。在以下敏感度分析測試的過程中，同樣的參數組合皆進行 10 個例題測試，並以其平均值呈現之決策結果來進行比較及分析。

5.3.1 航班延誤嚴重程度

航班延誤的嚴重程度，也就是航班抵達時間的隨機性，是本研究最重要的課題。在數值測試中，延誤時間的情境是根據常態分配產生，當中平均數代表的是航班的平均延誤時間，而標準差則是代表著不確定性的高低。過去有若干研究針對時間長短的隨機性進行敏感度分析，本研究參考 Schepler et al. (2019)，使用不同的標準差來探討隨機性大小對於決策造成的影響，分別將標準差設定為 9、18 和 27。表 7 為不同航班延誤嚴重程度各種求解方法的結果比較。

表 7 不同延誤標準差之結果統計表(括號內為成本的百分比重)

延誤時間標準差		9	18	27
具完整資訊之 標竿指派	平均總目標式值	557.1	1515.8	1725.5
	平均總延誤時間	554.1 (99.5%)	1293.8 (85.4%)	1440.5 (83.5%)
	平均更換登機門數量	0.1	7.4	9.5
	平均更換登機門懲罰值	3 (0.5%)	222 (14.6%)	285 (16.5%)
滾動平面法 下之 確定性模式	平均總目標式值	557.1	1638.5	1879.6
	平均總延誤時間	554.1 (99.5%)	1347.5 (82.2%)	1489.6 (79.3%)
	平均更換登機門數量	0.1	9.7	13.0
	平均更換登機門懲罰值	3 (0.5%)	291 (17.8%)	390 (20.7%)
	Gap (%)	0%	7.89%	8.96%
滾動平面法 下之 隨機性模式	平均總目標式值	557.1	1585.8	1822.4
	平均總延誤時間	554.1 (99.5%)	1354.8 (85.4%)	1489.4 (81.7%)
	平均更換登機門數量	0.1	7.7	11.1
	平均更換登機門懲罰值	3 (0.5%)	231 (14.6%)	333 (18.3%)
	Gap (%)	0%	4.07%	5.64%
實務指派方式	平均總目標式值	557.1	1645.8	1896.9
	平均總延誤時間	554.1 (99.5%)	1324.8 (80.5%)	1461.9 (77.1%)
	平均更換登機門數量	0.1	6.5	8.9
	平均更換登機門懲罰值	3 (0.5%)	195 (11.8%)	267 (14%)
	平均指派至停機坪次數	0.0	2.1	2.8
	平均指派至停機坪懲罰值	0 (0%)	126 (7.7%)	168 (8.9%)
	Gap (%)	0%	8.41%	9.92%

透過表 7 可以看出，所有方法之決策結果皆會隨著標準差的增加，即延誤狀況愈趨嚴重時，自然造成更多更換登機門的狀況產生，而在實務指派方式中還會出現指派至停機坪的結果，且這兩項決策所造成之懲罰值占總目標式的比例也隨著標準差的增加而提升。若針對每個延誤程度(同一標準差)，比較不同求解方法之決策結果可以發現，在延誤時間標準差為 9 時，航班的整體延誤狀況輕微，導致航班衝突狀況不嚴重，因此大多不會採取更換登機門的策略，這也使不同方法所求解出的更新指派決策幾乎皆相同。隨著延誤時間標準差增加，延誤狀況愈來愈嚴重時，不同求解方法的決策結果也開始產生差異。無論是在標準差為 18、還是 27 的狀況下，本研究之隨機性模式在滾動平面法架構下，皆可與具完整資訊之標準指派達到最小的差距，顯示在不確定性愈高的環境下，考慮航班抵達時間的隨機性至為重要，也由此展現出發展隨機性模式進行登機門更新指派決策的必要性。若忽略航班的抵達時間隨機性，可能會導致整體決策上有較多的登機門更換以及延誤時間產生，對機場營運方造成更大的損失。

5.3.2 機場擁擠程度敏感度分析

每日抵達機場的航班數量差異，能夠直接反映出機場的擁擠程度，因此本研究針對不同航班數量之決策差異進行比對，以了解擁擠程度對於決策上的影響。表 8 為在延誤時間標準差分別為 9、18、27 之下，兩種航班數量之結果比較。在 146 個航班時，所有航班皆能夠在登機門完成服務，基本上沒有航班被指派至停機坪的狀況發生。然而，當航班數量增加到 175 個航班時，尖峰時段航班抵達時間會更加的緊密，登機門的使用狀況愈趨擁擠，使得登機門的更新指派開始因為擁擠及延誤的狀況，將航班指派至停機坪接受服務，而這個狀況也隨著標準差的增加而有提升的趨勢。

若針對機場擁擠的情況(175 個航班)進一步觀察不同標準差下指派決策上的差異。在標準差為 9 時，事實上與不擁擠的情況(146 個航班)的決策類似。但在標準差 18 及 27 的例題當中，除平均總延誤時間以及平均更換登機門次數皆有明顯的提升外；若從延誤時間及更換登機門所造成之懲罰值於目標式之佔比來看，可以發現隨著航班數量的增加，更換登機門之懲罰值占總目標式的比例也有所提升，且開始出現因登機門過度擁擠而指派至停機坪的狀況。

表 8 機場擁擠程度之敏感度分析結果

標準差	航班數量	平均總目標式值	平均總延誤時間	平均更換登機門次數	平均更換登機門懲罰值	平均指派至停機坪次數	平均指派至停機坪懲罰值
9	146	557.1	554.1 (99.5%)	0.1	3 (0.5%)	0	0
	175	699.5	687.5 (98.2%)	0.4	12 (1.8%)	0	0
18	146	1585.8	1354.8 (85.4%)	7.7	231 (14.6%)	0	0
	175	1926.2	1650.2 (79.6%)	14.2	426 (18.5%)	0.7	42 (1.8%)
27	146	1822.4	1489.4 (81.7%)	11.1	333 (18.3%)	0	0
	175	2703.7	2157.7 (79.8%)	16.2	486 (18.0%)	1	60 (2.2%)

5.3.3 更換登機門懲罰值敏感度分析

懲罰值的設定亦有可能會對決策造成不小的影響，因此本小節針對更換登機門之懲罰值(即 W)的大小進行敏感度分析。此敏感度分析，將更換登機門懲罰值分別以 15、30、45 三個值進行測試，並觀察其在延誤標準差為 18 的例題下，各種決策方法於決策上之差異整理如表 9。

表 9 更換登機門懲罰值之敏感度分析結果 (延誤標準差 18)

懲罰值(即 W)		15	30	45
具完整資訊之 標竿指派	平均總目標式值	1395.1	1515.8	1519.2
	平均總延誤時間	1188.1(85.2%)	1293.8(85.4%)	1361.7(89.6%)
	平均更換登機門數量	13.8	7.4	3.5
	平均更換登機門懲罰值	207(14.8%)	222(14.6%)	157.5(10.4%)
滾動平面法 下之 確定性模式	平均總目標式值	1517.1	1638.5	1563.6
	平均總延誤時間	1224.6(80.7%)	1347.5(82.2%)	1424.1(91.1%)
	平均更換登機門數量	19.5	9.7	3.1
	平均更換登機門懲罰值	292.5(19.3%)	291(17.8%)	139.5(8.9%)
	Gap (%)	8.74%	8.09%	2.92%
滾動平面法 下之 隨機性模式	平均總目標式值	1497.4	1585.8	1549.9
	平均總延誤時間	1209.4(80.8%)	1354.8(85.4%)	1437.4(92.7%)
	平均更換登機門數量	19.2	7.7	2.5
	平均更換登機門懲罰值	288(19.2%)	231(14.6%)	112.5(7.3%)
	Gap (%)	7.33%	4.62%	2.02%
實務指派方式	平均總目標式值	1594.3	1645.8	1559.8
	平均總延誤時間	1190.8(74.7%)	1324.8(80.5%)	1403.8(90%)
	平均更換登機門數量	8.9	6.5	2.4
	平均更換登機門懲罰值	133.5(8.4%)	97.5(11.8%)	36(6.9%)
	平均指派至停機坪次數	4.5	2.1	0.8
	平均指派至停機坪懲罰值	270(16.9%)	126(7.7%)	48(3.1%)
	Gap (%)	14.00%	8.58%	2.67%

比較各種方法的結果時，首先可以看到本研究之隨機性模式在滾動平面法之下，針對不同的標準差，皆可與具完整資訊之標竿指派達到最小的差距，凸顯了使用隨機性模式之價值。在懲罰值設定為 15 時，雖實務指派方式之總延誤時間及更換之登機門數量較少，但其決策方法會造成許多航班需指派至停機坪進行服務，因此導致其決策結果整體來說是最差的；至於確定性模式則是在總延誤時間及平均更換登機門數量皆較隨機性模式稍差。接著，若透過各項決策占目標式值之比例來觀察，可以發現在不同的懲罰值下，更換登機門之數量以及其懲罰值佔目標式之比例皆隨著懲罰值的增加而有大幅度的下降，代表隨著懲罰值的提升，在決策上會更傾向於減少登機門之更換，並以更長的延誤時間來因應。此等結果也符合模式對於懲罰值設定之精神。而且，這也是使得各個方法與具完整資訊之標竿指派決策之間的差異，會隨著懲罰值增加，反而越來越小，尤其是之前決策品質不是太好的實務指派方式，甚至都可以達到少於 3% 的差距。

六、結論與建議

本研究針對即時登機門指派、或者稱登機門更新指派問題進行探討，並將航班抵達時間的隨機性納入決策考量，並建立一兩階段隨機規劃數學模式。除此之外，由於在機場實際運作時，並不會在一開始得知所有航班的確切抵達時間，因此本研究也將航班抵達時間定期更新的特性納入考慮，並設計滾動平面法的架構來模擬此一特性，不僅能讓求解方法考量到航班抵達時間而做出更具彈性的決策，也能更加貼近實務運作的模式。

在本研究當中，透過四種不同求解方法之比較，來說明同時考量隨機性以及航班抵達時間定期更新特性的價值。而無論是在例示性例題、還是較大規模的實務型例題，數值測試的結果皆證明了本研究隨機性模式在滾動平面法的架構下，所做出的決策結果都有良好的表現。

除了驗證本研究隨機性模式及滾動平面法的價值外，隨著問題規模的擴大，使用精確求解方法需要花上極大的時間，甚至不能在合理的時間內求出解答。因此，本研究以禁忌搜尋法為架構，設計了一個以先到先服務的原則來對於每個鄰域解進行二階指派決策的演算法。在數值測試中，也透過了不同的例示性例題以及實務型例題證實了本研究所設計的禁忌搜尋法能夠兼顧求解效率及品質，在短時間內求得與最佳解差距不大的近似解。

為更加深入分析各參數設計對於決策所造成之影響，本研究也針對參數之設定進行敏感度分析。在抵達延誤嚴重程度方面，透過試驗結果得知在航班延誤狀況愈大的情況下，更換登機門以及指派至停機坪之懲罰值占目標式值的比例會愈來愈大；且隨著延誤狀況愈來愈嚴重，使用隨機性模式在滾動平面法之下，求解結果也是與具完整資訊之標竿指派最為接近的，證明了考慮航班抵達時間不確定性在即時登機門指派問題當中的必要性。在機場擁擠程度方面，結果顯示當航班數量增加時，會開始出現航班調至停機坪服務的狀況產生，此時就必須由機場營運方權衡延誤或是指派至停機坪對於顧客滿意度及服務水準的影響程度，進而做出取捨。懲罰值的部分，可以觀察到隨著懲罰值的提升，在決策上會更傾向於減少更換使用之登機門，並以更長的延誤時間來進行即時指派決策，符合模式設定懲罰值之精神。

對未來研究的建議，由於本研究並沒有詳細考慮航班機型、以及各個航班或是航空公司對登機門使用之偏好，因此後續可將此部分的限制納入問題考慮當中。除此之外，本研究使用隨機情境來代表航班抵達時間的隨機性，然而此種方法仍然可能因為所選擇情境的不同，導致決策結果之優劣不一。因此，在後續研究中，也能考慮透過其他方法，如機器學習、深度學習等，使用歷史資料產生預測航班抵達時間之模型，並將預測之結果匯入即時登機門指派問題再進行求解，藉以觀察是否能夠藉此幅降低航班延誤的估計，並做出更加穩定可靠的決策。

參考文獻

- 黃寬丞、黃景棠(2018)，「考量到達時間不確定性之短期登機門指派問題」，*中華民國運輸學會 107 年會暨學術論文國際研討會*。
- 交通部民用航空局，交通部民用航空局統計資料，擷取日期：2023 年 9 月 6 日，網站：
<https://www.caa.gov.tw/article.aspx?a=283&lang=1>
- Bouras, A., Ghaleb, M. A., Suryahatmaja, U. S., & Salem, A. M. (2014). The airport gate assignment problem: a survey. *The scientific world journal*, 2014.
- Cai, X., Sun, W., Misir, M., Tan, K. C., Li, X., Xu, T., & Fan, Z. (2019). A bi-objective constrained robust gate assignment problem: Formulation, instances and algorithm. *IEEE transactions on cybernetics*, 51(9), 4488-4500.
- Cuvelier, T. (2015). Implementing and Comparing Stochastic and Robust Programming.
- Daş, G. S. (2017). New multi objective models for the gate assignment problem. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 347-356.
- Daş, G. S., Gzara, F., & Stützle, T. (2020). A review on airport gate assignment problems: Single versus multi objective approaches. *Omega*, 92, 102146.
- Deng, W., Zhao, H., Yang, X., Li, D., Li, Y., & Liu, J. (2018). Research on a robust multi-objective optimization model of gate assignment for hub airport. *Transportation Letters*, 10(4), 229-241.
- Du, W., Zhu, S., Tong, L., Cai, K., & Liang, Z. (2023). Robust gate assignment to minimise aircraft conflicts. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 11(1), 2185497.
- Glover, F. (1990). Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, 20(4), 74-94.
- Hassounah, M. I., & Steuart, G. N. (1993). Demand for aircraft gates. *Transportation research record*(1423).
- Jiang, Y., Wang, Y., Hu, Z., Xue, Q., & Yu, B. (2023). Airport gate assignment problem with harbor constraints based on Branch-and-Price algorithm. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 176, 103192.
- Karsu, Ö., Azizoğlu, M., & Alanlı, K. (2021). Exact and heuristic solution approaches for the airport gate assignment problem. *Omega*, 103, 102422.
- Lim, A., & Wang, F. (2005). Robust airport gate assignment. *17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'05)*,
- Maggioni, F., Potra, F. A., & Bertocchi, M. (2017). A scenario-based framework for supply planning under uncertainty: stochastic programming versus robust optimization approaches. *Computational Management Science*, 14, 5-44.
- Mangoubi, R. S., & Mathaisel, D. F. (1985). Optimizing gate assignments at airport terminals. *Transportation Science*, 19(2), 173-188.
- Obata, T., Sciences, R. P. I. D. o. D., & Systems, E. (1979). The Quadratic Assignment Problem: Evaluation of Exact and Heuristic Algorithms. Rensselaer Polytechnic Institute, August.
<https://books.google.com.tw/books?id=J1emnAEACAAJ>

- Pternea, M., & Haghani, A. (2019). An aircraft-to-gate reassignment framework for dealing with schedule disruptions. *Journal of Air Transport Management*, 78, 116-132.
- Schepler, X., Absi, N., Feillet, D., & Sanlaville, E. (2019). The stochastic discrete berth allocation problem. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 8(4), 363-396.
- Şeker, M., & Noyan, N. (2012). Stochastic optimization models for the airport gate assignment problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 438-459.
- Steuart, G. N. (1974). Gate position requirements at metropolitan airports. *Transportation Science*, 8(2), 169-189.
- Tang, C.-H. (2010). A gate reassignment model for the Taiwan Taoyuan Airport under temporary gate shortages and stochastic flight delays. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 41(4), 637-650.
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. SIAM.
- Yan, S., & Chang, C. M. (1998). A network model for gate assignment. *Journal of advanced Transportation*, 32(2), 176-189.
- Yan, S., & Huo, C.-M. (2001). Optimization of multiple objective gate assignments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(5), 413-432.
- 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.
- 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.
- Yu, C., Zhang, D., & Lau, H. Y. (2017). An adaptive large neighborhood search heuristic for solving a robust gate assignment problem. *Expert Systems with Applications*, 84, 143-154.