

國立交通大學
運輸與物流管理學系

碩士論文

考量到達時間不確定性
之短期登機門指派問題

The Short-term Airport Gate Assignment Problem
with the Uncertainty of Arrival Time

研究生：黃景棠

指導教授：黃寬丞

中華民國一〇七年七月

考量到達時間不確定性之短期登機門指派問題

The Short-term Airport Gate Assignment Problem
with the Uncertainty of Arrival Time

研 究 生：黃景棠

Student：King-Tong Wong

指導教授：黃寬丞

Advisor：Kuancheng Huang

國立交通大學
運輸與物流管理學系
碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management

College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Logistics Management

July 2018

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇七年七月

考量到達時間不確定性之短期登機門指派問題

學生：黃景崇

指導老師：黃寬丞 教授

國立交通大學運輸與物流管理學系 碩士

摘要

隨著航空業的發展，航空公司為了應付需求增加的狀況，必須增加班次，使得機場航班班表的密集度提升，航班於登機門之平均作業時間也相對縮短，登機門的平均閒置時間亦減少。如果遇上氣候不佳或是突發狀況導致航班延誤，勢必會衍生班表巨大的變動，造成機場運作的混亂及旅客極大的不便。因此，本研究發展一個完善的「短期」登機門指派模式以及有效的求解方法，對於維持機場服務品質有極大的助益。它使用於突發狀況發生後，以短時間有效解決問題為主，通常並以儘量不變更原訂班表為前提。

本研究所聚焦短期的登機門指派問題，考量登機門指派的限制，以及航班到達時間的不確定性，以臨時登機門變動數以及總延遲時間為最小化的目標，建構最佳化模式。研究的重點之一在於考量到達時間不確定性，以隨機情境模擬其不確定性，並發展隨機規劃模式求解。本研究將利用最佳化的技術，設計啟發式演算法，用以求解大型問題。

透過數值測試結果所示，隨機規劃在本研究之問題上擁有一定的價值，而啟發式演算法的近似解在各類型例題下，皆有 5%以下的與最佳解之差距，能夠在短時間提供登機門指派之規劃者有效的決策輔助。

關鍵字：登機門指派、班機到達不確定性、隨機規劃、啟發式解法

The Short-term Airport Gate Assignment Problem with the Uncertainty of Arrival Time

Student: King-Tong Wong

Advisor: Kuancheng Huang

Department of Transportation and Logistics Management

National Chiao Tung University

Abstract

With the development of the civil aviation industry, airlines need to increase their flight frequencies to deal with the increased demand, leading to a high density of flight schedules at airports. The average operation time of the flights at the gates, as well as the average gate idle time, is expected to be shortened. In case of flight delays due to poor weather or unexpected situations, gate operations and flight schedules will inevitably be greatly impacted, and serious inconvenience is incurred for travelers. Therefore, a sophisticated model, as well as an efficient solution algorithm, for the gate assignment decision problem under possible disruption is crucial for the airports from the aspect of service quality and operation efficiency. It can help effectively handle an unexpected situation within a short period of time and limit the change of the original gate assignment to the minimal.

This study focuses on the short-term gate assignment decision, considering the basic relationship between flights and gates and the arrival time uncertainty associated with the flights. The objective is to minimize the number of gate changes and the total delay time of the flights. One of the key issues is the study is to take the flight arrival time uncertainty into account. Random scenarios are used to simulate the associated uncertainty and a stochastic programming (SP) model has been developed to generate the gate assignment decision. This study also has designed the suitable solution methods, based on some optimization techniques to handle large-scale problems.

Based on the numerical experiment, the value of stochastics programming in this study is considerable. In addition, the gap between optimal solution and approximate solution in the tests of both problem sizes are within 5%, suggesting an acceptable solution quality. It is expected that this study will provide the instant decision support needed by the airport operations of gate assignment planning.

Key Words: Gate Assignment, Flight Arrival Uncertainty, Stochastic Programming, Heuristic Algorithm

致謝

二十四年的四分之一

作為一位香港僑生，在台灣生活了六年，剛好是目前人生的四分之一，要說有沒有後悔離鄉別井到台灣，我能夠確實地說沒有，這六年帶給我的收穫，不論是學業、處事態度、人際關係，都是滿載的，這六年是我最充實的一段旅程，感謝大家的支持與鼓勵。不管以後在哪裡發展，若果有機會在台灣的話，我定會好好貢獻，回饋社會。

黃景棠 謹誌

2018 年 7 月

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iii
目錄.....	iv
圖 目 錄	v
表 目 錄	vi
一、緒論	1
1.1 研究動機與問題背景	1
1.2 研究目的	4
1.3 研究方法與架構	5
二、文獻回顧	7
2.1 中長期登機門指派問題	7
2.2 短期登機門指派問題	9
三、模式建構與求解方法	10
3.1 確定性短期登機門指派模式	10
3.2 考量班機到達不確定性之短期隨機性登機門指派模式	11
3.3 基於拉式鬆弛的禁忌演算法	14
四、數值測試	21
4.1 示例性測試例題	22
4.2 隨機規劃必要性驗證	25
4.3 演算法效能驗證	28
五、結論與建議	31
參考文獻	33
簡歷	36

圖目錄

圖 一 台灣桃園國際機場之客運量	1
圖 二 台灣桃園國際機場之航機架次統計表	2
圖 三 中長期登機門指派問題之考量因素示意圖	2
圖 四 中長期登機門指派問題之考量因素示意圖	3
圖 五 登機門指派之排程示意圖	3
圖 六 機場運作之時間軸與航班到達時間之不確定性	4
圖 七 研究流程圖	6
圖 八 鄰近解搜尋法（位移法與交換法）	15
圖 九 基於拉式鬆弛的禁忌演算法流程圖	16
圖 十 拉式鬆弛法流程圖	20
圖 十一 狀況發生後原訂指派方案之衝突情形	23
圖 十二 小型例題之原訂指派方案	23
圖 十三 本研究隨機性模式之結果	24
圖 十四 以平均值為基礎之確定性模式第一階段機門配置	24

表 目 錄

表 一 各例題之特性	21
表 二 各航班基本資料 (左側)與狀況發生後之資料 (右側).....	22
表 三 小例題之運算結果	26
表 四 大例題、少情境之運算結果	26
表 五 大例題、多情境之運算結果	27
表 六 小例題之模式與演算法比較	28
表 七 大例題、少情境之模式與演算法比較	29
表 八 大例題、多情境之模式與演算法比較	29
表 九 各例題近似解與最佳解之平均差距	30

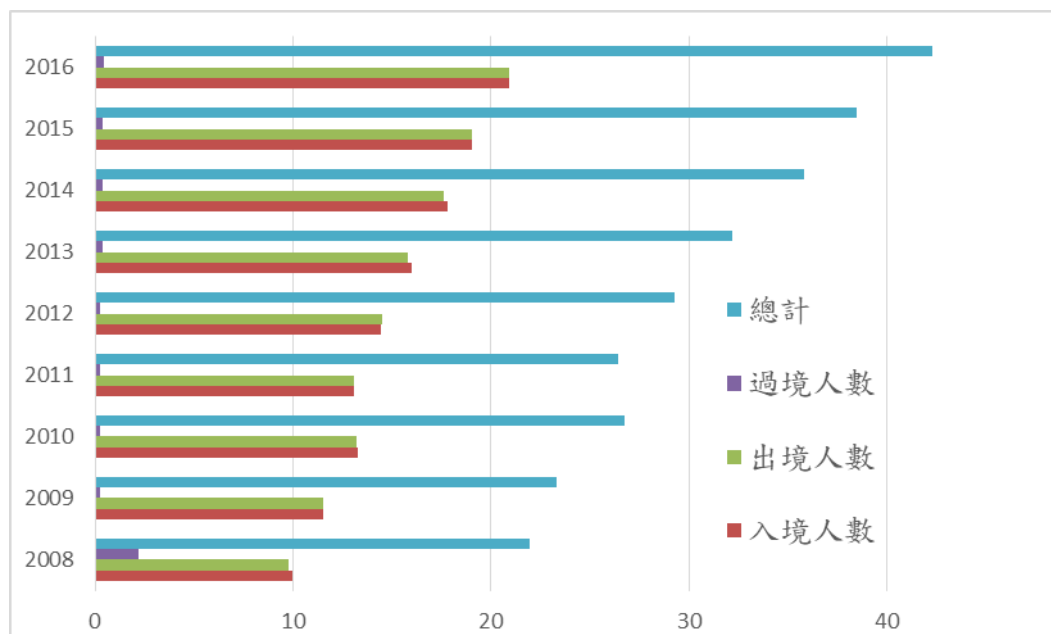
一、緒論

1.1 研究動機與問題背景

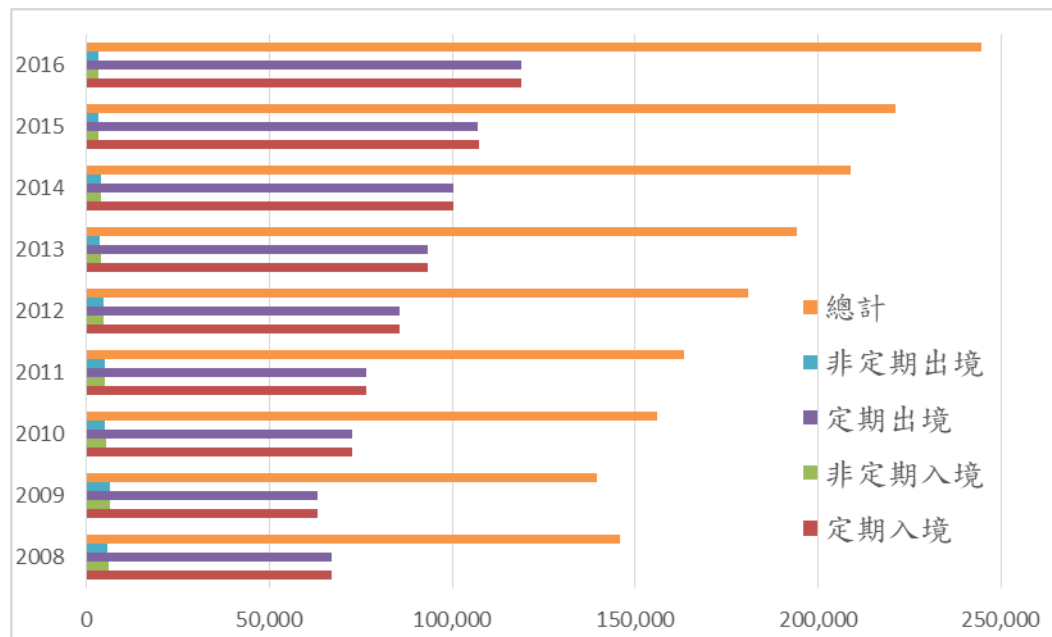
近年來全球旅遊觀光旅次不斷增長，以台灣桃園國際機場 2017 年的資料為例，如圖一自 2008 年陸續開放大陸來台自由行後，旅客人數由 2008 年的 21,936,083 人次增長至 2016 年的 42,296,322 人次，足足成長了 93%。

航空公司也因此增班及開闢新航班以應付需求上升的情況，如圖二航機升降架次的統計，從 2008 年的 145,993 架次增長至 2016 年的 244,464 架次，證明了航班數量逐年成長的趨勢。其中低成本航空公司逐漸興起，與傳統航空公司競爭市場，也是得機場使用量上升的重要推手。

由於上述原因，使得機場航班班表的密集度提升，航班於登機門之平均停留時間縮短，登機門本身的平均閒置時間亦縮短，甚至於尖峰時段會出現航班緊接使用跑道、登機門的情況。若果氣候不佳或是一些突發狀況導致航班延誤或取消，甚至在有登機門失效或機場封閉的情況，勢必會導致航班班表巨大的變動，造成機場運作的混亂及旅客極大的不便。因此，發展一個完善的登機門指派模式以及有效率的求解方法，對於維持機場服務品質有極大的助益。



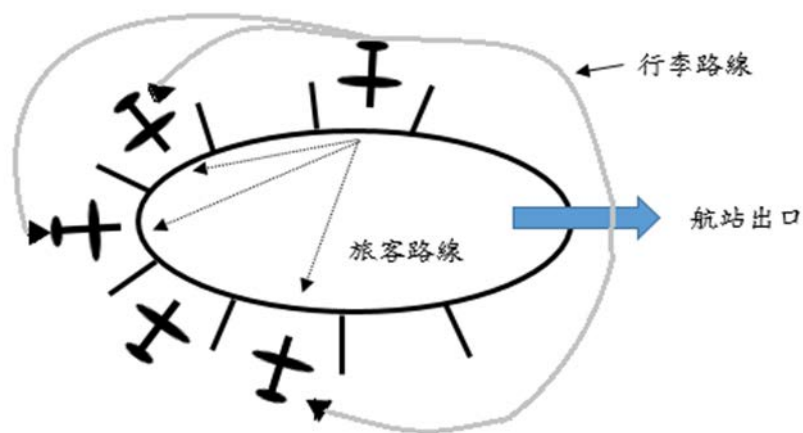
圖一 台灣桃園國際機場之客運量
台灣桃園國際機場股份有限公司(2008-2016)



圖二 台灣桃園國際機場之航機架次統計表
台灣桃園國際機場股份有限公司(2008-2016)

登機門指派問題 (Gate Assignment Problem, GAP)早期由 Steuart (1974)所提出，延伸至今已經發展出不同面向、及考量不同因素的各種模式。一般而言，登機門指派問題主要可分為兩類：計劃性和即時性，也即是中長期規劃及短期規劃。

中長期登機門指派通常用於制定一段時間內各航班與登機門之指派方案，考量的角度以更全面、具體為主，如進出旅客及轉運旅客的方便性、行李處理的順序、接駁車排班的結合等等。以圖三為例，針對各航班使用不同登機門的安排，旅客的步行路徑、距離固然重要，然而行李上下機的安排也會影響登機門的使用時間；若果把轉運旅客也納入考量，除了必須讓轉運旅客能夠順利轉接外，其行李的轉運規劃也相當重要。所以一完善之中長期登機門指派模式須在合理之運算時間內，規劃出考慮全面的指派方案。



圖三 中長期登機門指派問題之考量因素示意圖

短期登機門指派用於應付臨時情況，如突發狀況使得原本之指派規劃不可行，透過重新指派到另一登機門或延誤航班，即時更新可行的規劃。兩者之間的主要差別為短期登機門指派問題主要在考量機場的突發狀況，變動原訂規劃而非重新規劃，且基於機場作業的即時性，相對需要有更快的求解時間。

固然也可將中長期指派的因素納入考量，基本上傳統的短期登機門指派模式主要有兩個最小化目標，分別為登機門重新指派之數量和航班延誤之時間。航班重新指派為該航班被指派到跟原先的不一樣之登機門，所造成旅客的困擾與不便，自不待言。航班延誤時間則是因為該航班所分配之登機門尚未能使用、或轉運旅客還沒就緒，而導致航班延誤抵達登機門或延誤起飛。

以圖四的三個登機門舉例說明，假設因某些狀況使 A 航班未能在原訂時間抵達登機門二，造成延誤，導致如圖五中該延誤航班與後續抵達之航班發生衝突。若重新指派勢必會造成其他機門的航班亦須變動（延誤或指派至其他登機門），但若不重新指派，也將造成該航班、以及後續使用同一機門班機的延誤不可避免。

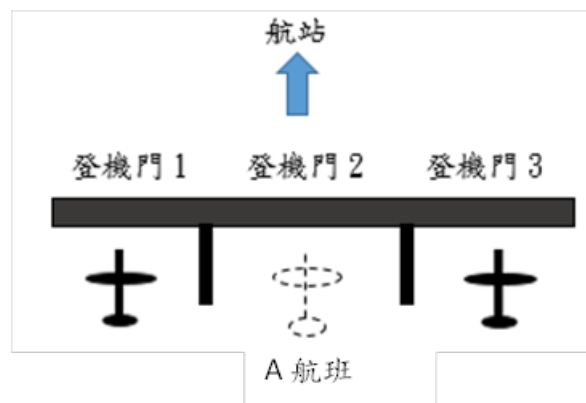


圖 四 中長期登機門指派問題之考量因素示意圖

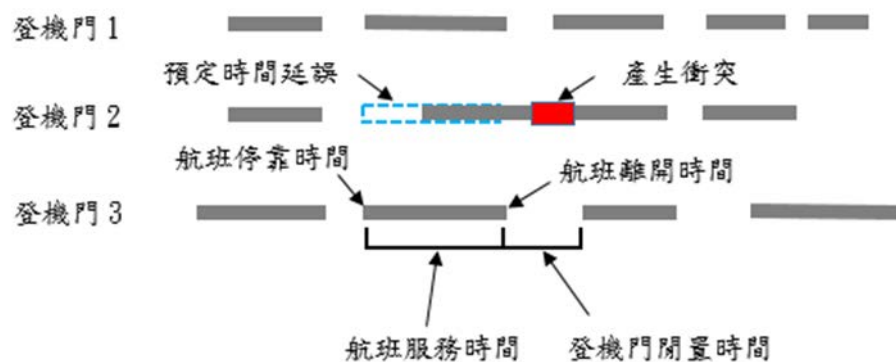
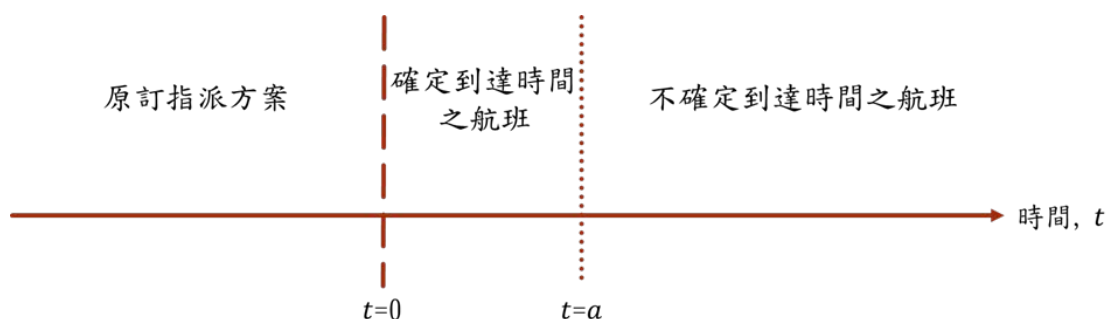


圖 五 登機門指派之排程示意圖

在實際環境中，航班的到離瞬息萬變，中長期的指派模式難以將短期的變化完全納入考量；尤其，即使有快速運算並解決航班衝突的短期登機門指派模式，各種相關的不確定性，也可能仍然難以用模式的結果來運作。所以本研究聚焦於短期的登機門指派問題，但將航班到達時間之不確定性納入模式，借以能夠得到更有效考量後續航班潛在衝突之方法。

問題背景的假設如圖六，在機場運作之時間軸上，若沒有突發狀況發生下，機場會以原訂指派方案運作；當時間為零時，發生突發狀況使某些航班衝突，必須以短期登機門指派解決，而且應該將未來的不確定性因素納入考量。納入決策的航班中，到達時間較早 ($t < a$) 之航班可假設為確定性航班，其到達時間之差異不大；可是到達時間較晚之航班 ($t > a$)，其到達時間可能存在著可觀的不確定性，必須考量其特性而進行指派，才能發展出可靠有效的機門指派決策。



圖六 機場運作之時間軸與航班到達時間之不確定性

1.2 研究目的

本研究以短期登機門指派問題為主題，主要處理航班衝突狀況，有效地進行應急管理(Disruption Management)，並考量航班到達時間之不確定性，歸納分析出適合短期指派的目標（最小化航班重新指派之數量和航班延誤時間），在航班可能發生臨時變動的前提下，可以預先尋找最適合全情境之規劃，以便在航班真正狀況時能迅速做出適當有效的安排。以下為本研究之三個重點：

- (一)模式之合適性：比較以往文獻中所使用的模式構建方法，以模式大小、求解效率與品質作對比，證明本研究的模式之合適性。
- (二)求解效率與品質：以小型例題比較本研究之模式和演算法，得到演算法之求解品質，再以多種參數組合測量演算法，尋找出在可接受的求解時間內能夠求解的問題大小。
- (三)考量不確定性的必要性：與現實操作方法和確定性模式作比較，以求解的品質與效果，證明加入不確定性的必要性。

1.3 研究方法與架構

本研究之架構共包含五個章節，第一章為研究緒論，確立研究目的與範圍、清楚表明研究方向；第二章為文獻回顧，蒐集整理與本研究相關之文獻並回顧；第三章為模式與求解方法之建構，定義問題後，構建本研究之數學模式、演算法步驟，並進程式撰寫；第四章為模式結果與分析，進行小、大型模擬例題測試，以其結果討論；第五章為結論與建議，綜合整理研究的結果來歸納主要結論並對後續的研究提出相關建議。擬定之流程圖如圖七所示，詳細介紹如下所述：

- (一)研究目的與範圍之確立：本研究將站在機場營運者之立場來討論登機門如何分配，考量到達時間之不確定性所帶來的影響來探討登機門指派之短期規劃。
- (二)相關文獻蒐集與回顧：收集有關登機門指派問題之文獻，整理其所考量的因素以及原因，分析與本研究之差異，並確定本研究之方向，另外收集有關隨機規劃之求解法，作為構建求解法的參考。
- (三)模式構建與求解：本研究將參考現有對於短期登機門指派問題所考量的因素，其中包括考量不確定性，以及構建模式之方法，發展一考量到達時間之不確定性的登機門指派模式來求得最佳改善之決策，以快速並有效地修復航班延誤之問題。
- (四)求解演算法建構：由於本研究之模式為NP-Hard的問題，在求解大型例題時為降低求解的時間，本研究使用啟發式演算法來求解此問題。
- (五)數值測試與分析：參考相關文獻以及台灣桃園國際機場之資料模擬出合理之航班班表，並模擬航班延誤之情況發生，以本研究之模式進行測試，分析與探討模式之成果與加入不確定性的必要性。最後，將以具備相當問題規模複雜度的數值測試例題，以進一步了解所發展求解方法在大範圍的環境下之決策是否仍保有其適用性，並對相關參數或演算法進行調整。
- (六)結論與建議：歸納與分析研究結果，比較本研究所考量之不確定性和未考量之模式在時間控制上的差異，分析加入不確定性的必要性，研擬具體可行的結論與建議，並做為後續研究發展的基礎。

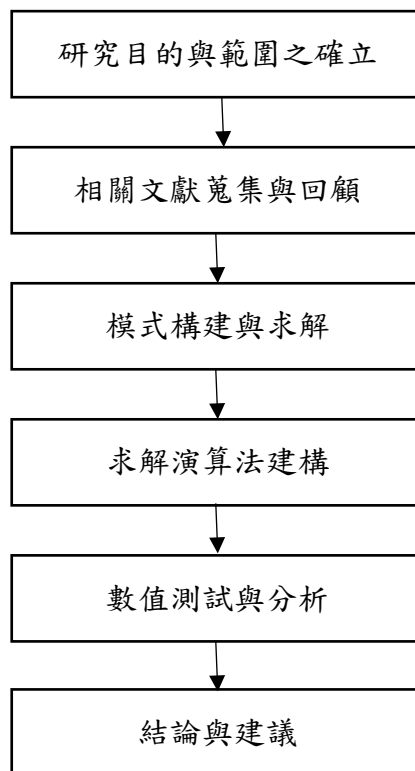


圖 七 研究流程圖

二、文獻回顧

登機門指派問題最早由 Steuart (1974) 提出數學模式，尋找最有效使用登機門之方法。往後的研究方向主要分為兩類：中長期登機門指派問題和短期登機門指派問題，而前者又比後者為數較多。有關登機門指派問題的發展，可參考 Bouras et al. (2014) 之文獻整理，其並以模式設計、求解方法作分類。本研究以短期登機門指派為題，將航班到達時間不確定性納入模式考量。根據此研究的定位，本研究先進行中長期登機門指派問題之相關文獻回顧，如 2.1 小節。了解作為短期登機門指派之基礎問題特性後，進行短期登機門指派問題之相關文獻回顧，如 2.2 小節。

2.1 中長期登機門指派問題

中長期登機門指派問題所考慮的因素大致相似，所對應的數學模式也有一定的共通性，主要相異之處在於模式的表示方式以及特別條件的考量。本研究以 Abdelghany (2009) 為基礎作介紹，當中敘述了影響登機門指派的因素範圍為旅客在航站及飛機間活動的距離，以至包括如航班因無法被指派至一登機門而停靠在停機坪上，旅客需搭乘接駁車至飛機上的範圍。其訂定的主要目標式為最少化未被指派之航班數量以及旅客至登機門總步行距離，意味著可以有效縮短旅客行李搬運距離、降低準備時間，進而提高機場工作效率。其數學模式如下：

參數：

n : 航班總數	$f_{0,i}$: 航班 i 的出境人數
m : 登機門總數	$f_{i,0}$: 航班 i 的入境人數
a_i : 航班 i 的抵達時間	$w_{k,l}$: 登機門 k 至登機門 l 的步行距離
d_i : 航班 i 的離開時間	$w_{0,k}$: 出境大廳至登機門 k 的步行距離
$f_{i,j}$: 從航班 i 轉乘航班 j 的人數	$w_{k,0}$: 登機門 k 至入境大廳的步行距離

決策變數：

$$y_{i,k} = \begin{cases} \text{如果航班} i \text{ 停靠登機門} k, & 1 \\ \text{否則,} & 0 \end{cases}, \quad \forall i, 1 \leq i \leq n, \forall k, 1 \leq k \leq m+1$$

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n y_{i,m+1} \quad (2.1)$$

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m+1} \sum_{l=1}^{m+1} f_{i,j} w_{k,j} y_{i,k} y_{j,l} + \sum_{i=1}^n f_{0,i} w_{0,i} + \sum_{i=1}^n f_{i,0} w_{i,0} \quad (2.2)$$

Subject to

$$\sum_{k=1}^{m+1} y_{i,k} = 1 \quad \forall i, 1 \leq i \leq n \quad (2.3)$$

$$a_i \leq d_i, \quad \forall i, 1 \leq i \leq n \quad (2.4)$$

$$y_{i,k} y_{j,k} (d_j - a_i)(d_i - a_j) \leq 0, \quad \forall (i, j), 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, \forall k, 1 \leq k \leq m \quad (2.5)$$

$$y_{i,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i, 1 \leq i \leq n, \forall k, 1 \leq k \leq m+1 \quad (2.6)$$

目標式 (2.1)為最小化航班未被指派的數量。目標式 (2.2)為最小化旅客的總步行距離，包括入境、出境和轉機旅客，透過適當權重則可將兩目標式合而為一。限制式 (2.3)確保每一航班只能指派至一個登機門。限制式 (2.4)每一航班的抵達時間必須小於離開時間。限制式 (2.5)確保同一登機門不會有航班使用時間重疊的情況發生，屬非線性限制式。限制式 (2.6)設定 $y_{i,k}$ 為指派的二元變數。

以上為中長期登機門指派問題一個相當基本的模式，其他中長期登機門指派問題文獻主要可由兩個角度來分類。其一為模式中所考量或整合的其他因素，其二則著眼於求解方法上的研究。有關考量、整合其他因素的模式，Diepen et al. (2008)整合接駁巴士排班與登機門指派，Kim et al. (2013)和 Yu et al. (2016)考量拖運時間的影響，而且分別把旅客移動時間和旅客滿意度納入考量。另外，Ravizza et al. (2014)把航班停留在登機門之時間改為決策變數，讓航班不必被服務後立即離開。還有，Yan and Tang (2007)、湯慶輝 (2009)、Seker and Noyan (2012)和 Dorndorf et al. (2016)則以航班的不確定性為重點，設計中長期登機門指派。最後，湯慶輝與王渭仲 (2012)考量到離場航班銜接之問題。

關於求解方法上的研究，Bihl (1990)、汪進財 (1992)、顏上堯與張家銘 (1997)、Haghani and Chen (1998)、顏上堯等人 (2003)各提出一整數規劃模式求解；而 Babic et al. (1984)使用分支定限法求解，Yan and Huo (2001)和 Diepen et al. (2012)使用縱列產生法求解。此外，陳春益等人 (1997)和 Yan and Chang (1998)則提出以網路流動方式設計登機門指派模式。另外，Mangoubi and Mathaisel (1985)、Wirasinghe and Bandara (1990)、顏上堯等人 (1998)、Bolal (1999)和 Guépet et al. (2015)也各提出啟發式求解演算法。最後，GAP 問題的求解也有許多巨集演算法 (Meta Heuristics)的應用，包含 Bolal (2001)使用基因演算法，Ding et al. (2004)使用禁忌搜尋法，Ding et al. (2005) 使用模擬退火法。

2.2 短期登機門指派問題

短期登機門指派問題以原訂規劃作基底，由於環境的臨時變化導致原訂規劃不可行，處理航班衝突狀況，有效地進行應急管理（Disruption Management），而透過人工智慧或數學規劃的方法作出改善。相比於中長期，短期登機門指派問題比較小型，但需要更短的運算時間以應付即時性的環境。

在早些年求解法與電腦硬體還未發展完善時，Gosling (1990)、Srihari and Muthukrishnan (1991)、Jo et al. (1997)和 Su and Srihari (1993)各自提出一套由人工智慧來處理的短期登機門指派問題的系統，Cheng (1997)提出整合不同數學模式之系統來解決短期登機門指派問題，Gu and Chung (1999)使用基因演算法求解短期登機門指派問題。

在電腦硬體得以進步後，建構數學模式並使用數學規劃來求解變得可行，Yan et al. (2009) 提出使用網路流動模式來處理短期登機門指派問題，並且考慮短暫封鎖機場所帶來的影響，模式並未考量航班延誤所帶來的影響，只考量航班重新指派至另一登機門。Tang et al. (2010)提出另一網路流動方式之數學模式並加入航班延誤的因素，除此以外，更提出一動態方法來求解問題。Tang (2011)使用並延續 Tang et al. (2010)所提出的模式，考量登機門短暫停止運作和不確定性之航班延誤。Yan et al. (2011)將航班以到達時間遠近分類為確定性和不確定性，以兩階段隨機規劃的方法求解。Maharjan and Matis (2011)考量轉運旅客能否轉運下提出一短期登機門指派模式，Dong and Diego (2017)提出考量轉運旅客步行距離之短期登機門指派模式，並提出一套啟發式演算法用以求解該類問題。最後，汪進財與張東珍 (1996) 以四種短期營運模式作比較，並使用三種指派策略進行運算；盧華安 (2001)提出以拉式演算法求解大型的短期登機門指派問題。

短期登機門指派最重要的決策變數主要是以航班、登機門和時段為主，Yan et al. (2009)、Tang et al. (2010)、Tang (2011)、Yan et al. (2011)、Dong and Diego (2017)和盧華安 (2001)都以時間與空間為主軸，使用網路流動 (Network Flow)模式，將決策變數設定為三維變數，以航班、登機門和時段的三維組合來進行整數規劃；同時以網路形式表示時間與各登機門使用情況，簡明地代表了問題的目標與限制。然而，但由於決策變數設定為三維變數，其中時間維度之時段數量甚多，決策變數的數量會大幅上升，可能導致求解的運算負荷過高，甚至因而難以求解。

由於短期登機門指派著重於運算時間，本研究有別於以往文獻，提出以一般指派變數方式建構模式，並考慮最核心之目標與限制，目標為最少化航班重新指派之數量和航班延誤時間；限制為基本航班與登機門的使用條件。此外，本研究提出一啟發式演算法，以求更有效率求解本問題。

三、模式建構與求解方法

由於以往文獻大多使用網路流動模式設計並研究，但變數過多導致難以處理，有別於以往研究，本研究使用一般指派變數建立短期登機門指派模式，而非網路流動模式。除此以外，模式允許航班使用停機坪，但使用停機坪會降低旅客滿意度，所以增加一項懲罰成本以作模擬。而模式是以下列假設而設計：

1. 原訂指派方案為尚未變更航班到時間時的最佳指派
2. 不考慮航班提前到達登機門
3. 所有航班能夠任意使用所有登機門
4. 不考慮登機門之間的距離
5. 停機坪無容量限制

3.1 小節將介紹短期登機門指派問題的混合整數模式，3.2 小節介紹考量不確定性下兩階段之隨機混合整數模式，3.3 小節介紹本研究所提出之啟發式演算法。

3.1 確定性短期登機門指派模式

本研究提出一混合整數模式，用以求解短期登機門問題，透過兩類型的變數設定航班所指派的登機門以及連結登機門接受服務的時間。並以最小化與原訂登機門指派方案的差異為目標式，再加入基本的航班與登機門相關限制，使得模式求解後，能夠在影響最小的情況下解決航班衝突情況。模式定義如下。

集合定義與參數：

I ：	所有航班之集合	A_i ：	航班 i 表定抵達時間
K ：	所有登機門之集合	S_i ：	航班 i 所需的服務時間
K^0 ：	所有登機門之集合， 包括停機坪	D_i ：	航班 i 最晚離開時間
$Y_{i,k}$ ：	航班 i 與登機門 k 的原訂指派方案	M ：	常數數值
		W ：	權重

決策變數：

$$y_{i,k} = \begin{cases} \text{如果航班} i \text{使用登機門} k, & 1 \\ \text{否則,} & 0 \end{cases}, \forall i \in I, k \in K^0$$

t_i 為航班 i 在登機門開始作業的時間, $\forall i \in I$

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} (t_i - A_i) - W \sum_{i \in I} \sum_{k \in K^0} Y_{i,k} y_{i,k} \quad (3.1)$$

Subject to

$$\sum_{k \in K^0} y_{i,k} = 1, \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$(t_i + S_i - t_j) \leq (2 - y_{i,k} - y_{j,k})M, \quad \forall i, j \in \{I | A_i < A_j\}, k \in K \quad (3.3)$$

$$A_i \leq t_i \leq D_i, \quad \forall t_i \in \mathbb{R}, i \in I \quad (3.4)$$

$$y_{i,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, k \in K^0 \quad (3.5)$$

目標式 (3.1) 為最小化總延誤時間以及最小化航班重新指派後的變動數量，如某航班延誤時間超過設定之延誤時間，則傾向於以改變登機門來解決問題，因此，航班重新指派後與原訂指派相同的數量之權重為 W ， W 會根據不同機場環境下設定，若航班 i 的延誤時間大於或等於 W ，即代表容許航班 i 變動登機門以代替延誤。限制式 (3.2) 確保每一航班只能被安排至一個登機門上，但航班若未被指派到登機門之航班，航班會在停機坪上以接駁巴士的形式進行運作，但此為服務水準最低的方法，不建議使用。限制式 (3.3) 當航班 i 的原訂抵達時間小於航班 j 的原訂抵達時間時，確保同一登機門上，不會有航班之服務時間重疊的情況發生。當兩航班各在不同登機門時，不受此限制式的限制，我們發現在這種情況下左式最大值不會超過 $S_i + E$ (E 為可容許之最大延誤時間) 故 M 設為 $S_i + E$ 最合適。限制式 (3.4) 為航班延誤時間不得超於一特定時間，限制式 (3.5) 設定 $y_{i,k}$ 為二元的變數。

3.2 考量班機到達不確定性之短期隨機性登機門指派模式

雖然前一小節的模式可能可以適當地處理短期的登機門指派問題，但實際情況仍存在很多不確性，足以影響後續登機門指派作業的可靠與穩定，尤其是後續班機的抵達時間，仍可能受到多方因素的影響，其中很多也不是本地機場可以掌握的。

因此，本研究將部分班機抵達時間的不確性納入模式，參考 Yan et al. (2011) 模式中所考量的航班到達不確定性之特性加以延伸，提出以混合整數規劃求解短期登機門指派之問題，如圖六所示並且將航班分類為兩類，與規劃開始時間較近為確定性航班、與規劃開始時間較遠為不確定性航班。概念上參考圖六的假設，也就是規劃開始時間較近之航班的到達時間比較確定，而相對與規劃開始時間較遠之航班的到達時間比較不確定，所以把航班以與規劃開始的時間差分成兩類型，使用確定性等效 (Deterministic Equivalent) 方式，為不確定性航班建立隨機情境以模擬不確定性，所有情境之集合為 Ξ ，而 ξ 代表其中一個情境， A_i^ξ 則為該航班在該情境之到達時間，然後以兩階段的形式求解。根據 3.1 節所提到的短期登機門指派模式進行修改，發展出考量到達時間不確定性之短期隨機登機門指派模式如下。

集合定義與參數：

Ξ : 所有情境之集合 (ξ 代表其中一個情境)	A_i : 航班 i 表定到達時間
I : 所有航班之集合	A_i^ξ : 航班 i 在情境 ξ 到達時間
I^D : 所有確定性航班之集合	S_i : 航班 i 所需的服務時間
I^S : 所有不確定性航班之集合	D_i : 航班 i 最晚離開時間
K : 所有登機門之集合	M : 極大常數數值
K^0 : 所有登機門之集合，包括停機坪	W : 權重
$Y_{i,k}$: 航班 i 與登機門 k 的原訂指派方案	B : 指派至停機坪之懲罰成本

決策變數：

$$y_{i,k} = \begin{cases} \text{如果航班} i \text{使用登機門} k, 1 \\ \text{否則, } 0 \end{cases}, \quad \forall i \in I, k \in K^0$$

t_i 為航班 i 連接登機門的時間, $\forall i \in I$

$$y_{i,k}^\xi = \begin{cases} \text{如果航班} i \text{在情境} \xi \text{使用登機門} k, 1 \\ \text{否則, } 0 \end{cases}, \quad \forall i \in I, k \in K^0, \xi \in \Xi$$

t_i^ξ 為不確定性航班 i 在情境 ξ 連接登機門的時間, $\forall i \in I, \xi \in \Xi$

$$z_{i,k}^\xi = \begin{cases} \text{如果不確定性航班} i \text{在情境} \xi \text{使用登機門} k \text{並與排定登機門一樣, } 1 \\ \text{否則, } 0 \end{cases},$$

$$\forall i \in I, k \in K^0, \xi \in \Xi$$

$$\text{Minimize} \left(\begin{aligned} & \sum_{i \in I} (t_i - A_i) - W \sum_{i \in I} \sum_{k \in K^0} Y_{i,k} y_{i,k} + \\ & \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \left[\sum_{i \in I^S} (t_i^\xi - A_i^\xi) - W \sum_{i \in I^S} \sum_{k \in K^0} z_{i,k}^\xi \right] + \\ & B \left(\sum_{i \in I} y_{i,K+1} + \sum_{i \in I^S} \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi y_{i,K+1}^\xi \right) \end{aligned} \right) \quad (3.6)$$

Subject to

$$\sum_{k \in K^0} y_{i,k} = 1, \quad \forall i \in I \quad (3.7)$$

$$\sum_{k \in K^0} y_{i,k}^\xi = 1, \quad \forall i \in I, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.8)$$

$$(t_i + S_i - t_j) \leq (2 - y_{i,k} - y_{j,k})M, \quad \forall i, j \in \{I | A_i < A_j\}, k \in K \quad (3.9)$$

$$(t_i^\xi + S_i - t_j^\xi) \leq (2 - y_{i,k}^\xi - y_{j,k}^\xi)M, \quad \forall i, j \in \{I | A_i^\xi < A_j^\xi\}, k \in K, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.10)$$

$$y_{i,k}^\xi = y_{i,k}, \quad \forall i \in I^D, k \in K, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.11)$$

$$t_i^\xi = t_i, \quad \forall i \in I^D, k \in K, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.12)$$

$$z_{i,k}^\xi \leq y_{i,k}, \quad \forall i \in I^S, k \in K, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.13)$$

$$z_{i,k}^\xi \leq y_{i,k}^\xi, \quad \forall i \in I^S, k \in K, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.14)$$

$$A_i \leq t_i \leq D_i, \quad \forall t_i \in \mathbb{R}, i \in I \quad (3.15)$$

$$A_i^\xi \leq t_i^\xi \leq D_i^\xi, \quad \forall t_i^\xi \in \mathbb{R}, i \in I^S, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.16)$$

$$y_{i,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, k \in K^0 \quad (3.17)$$

$$y_{i,k}^\xi \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, k \in K^0, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.18)$$

$$z_{i,k}^\xi \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I^S, k \in K^0, \xi \in \mathcal{E} \quad (3.19)$$

目標式 (3.6) 為最小化所有航班之總延誤時間、航班重新指派之數量和指派至停機坪之懲罰成本。限制式 (3.7) - (3.8) 確保每一航班只能被安排至一個登機門上，前者是隨機規劃第一階段的決策，後者則是每個情境下重新指派 (re-course) 的決策。然而，若航班若未被指派到登機門之航班，航班會在停機坪上以接駁巴士的形式進行運作。限制式 (3.9) - (3.10) 當航班 i 的原訂抵達時間小於航班 j 的原訂抵達時間時，確保同一登機門上，不會有航班之服務時間重疊的情況發生。同樣的，前者是隨機規劃第一階段的決策，後者則是每個情境下的調整。限制式 (3.11) - (3.12) 固定確定性航班於第二階的變數，必須與第一階一樣。限制式 (3.13) - (3.14) 在設定變數 $z_{i,k}^\xi$ ，使其與第一階段與第二階段的機門指派變數相結合。限制式 (3.15) - (3.16) 為所有航班延誤時間不得超於一特定時間，限制式 (3.17) - (3.19) 在設定 $z_{i,k}^\xi$ 、 $y_{i,k}$ 和 $y_{i,k}^\xi$ 等二元的變數。

3.3 基於拉式鬆弛的禁忌演算法

當一個最佳化問題為 NP-hard 時，求解時間會隨著問題變大而大幅提升，亦即是指數時間(Exponential time)，為達到求解效率並方便於求解大問題，進而發展出啟發式演算法，時至今時，演算法更趨成熟，發展出高階之巨集式啟發式演算法 (Meta heuristics)，例如基因演算法 (Genetic Algorithm)、螞蟻演算法 (Ant System Algorithm)、禁忌搜尋法 (Tabu Search)、粒子群演算法 (Particle Swarm Optimization)等等。

本研究當規模擴大時，將增加問題的複雜性，造成求解上的不易，並且短期登機門指派問題必須在有限的時間內迅速解決，在此提出一種啟發式演算法進行求解。本研究將以禁忌搜尋法作為主要結構、以拉式鬆弛法求解目標值，稱之為基於拉式鬆弛的禁忌演算法 (Tabu Search with Lagrangian Relaxation, TSLR)，透過此演算法在短時間內求解具有一定規模之問題。

3.3.1 禁忌演算法主要結構

禁忌搜尋法的思想最早由 Glover (1989、1990)提出，它是對局部領域搜索的一種擴展，是一種全局逐步尋優演算法。它引入一個靈活的存儲結構和相應的禁忌準則來避免迂迴搜索，並通過藐視準則來赦免一些被禁忌的優良狀態，進而保證多樣化的有效探索以最終實現全局優化。禁忌搜尋法的基本運作流程如下：

1. 產生初始解
2. 計算其目標值並加入禁忌名單
3. 尋找鄰近解並計算目標值
4. 挑選不在禁忌名單內並且最佳之鄰近解，作為候選解
5. 把候選解加入禁忌名單
6. 進行下一個迴圈

禁忌搜尋法廣泛應用於排班/指派問題上，Laguna et al. (1995)、Yagiura et al. (1999)、Diaz and Fernandez (2001)開始使用禁忌搜尋法，求解一般化指派問題。而 Ding et al. (2004) 則把禁忌搜尋法應用於中長期登機門指派問題上。本研究之禁忌搜尋法流程如圖九所示，內容大致如下：

(一)解之型態

在本研究的演算法中，每一組解代表不同的第一階段指派選擇，透過迭代與更新第一階段指派選擇並比較目標值之高低，從而尋找最適合之第一階段指派選擇，而第二階段指派選擇亦會導致目標值的增減。

(二)產生初始解

本研究以原訂登機門指派方案進行修改，在不變更任何航班登機門之配對下，以往後延誤的方式，求出可行解，並作為初始解。

(三)計算目標值

除了計算第一階段指派之目標值外，各情境第二階段確定性指派會以拉式鬆弛法求解，並加總為目標值。

(四)管理禁忌名單

每當選出下一迭代的候選解時，必須將其加入禁忌名單，無法再次搜尋，而禁忌名單之大小為 10，當名單多於限制時，會以先進先出的方式刪除禁忌各單內之解。

(五)收斂條件

本研究所使用之收斂條件為迴圈數，當演算法未達終止條件時 (迴圈數為 100)，演算法會繼續進行運算。

(六)搜尋鄰近解

本研究於每一迭代搜尋 20 組鄰近解，以兩種方式搜尋：位移法為隨機選擇一航班並改變其登機門；交換法為隨機選擇一航班配對並交換所使用的登機門。兩種鄰近解搜尋法之圖示如圖八。

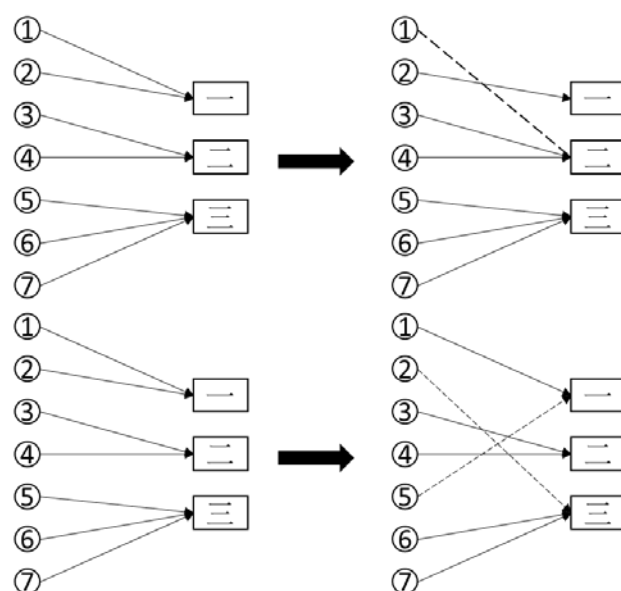


圖 八 鄰近解搜尋法 (位移法與交換法)

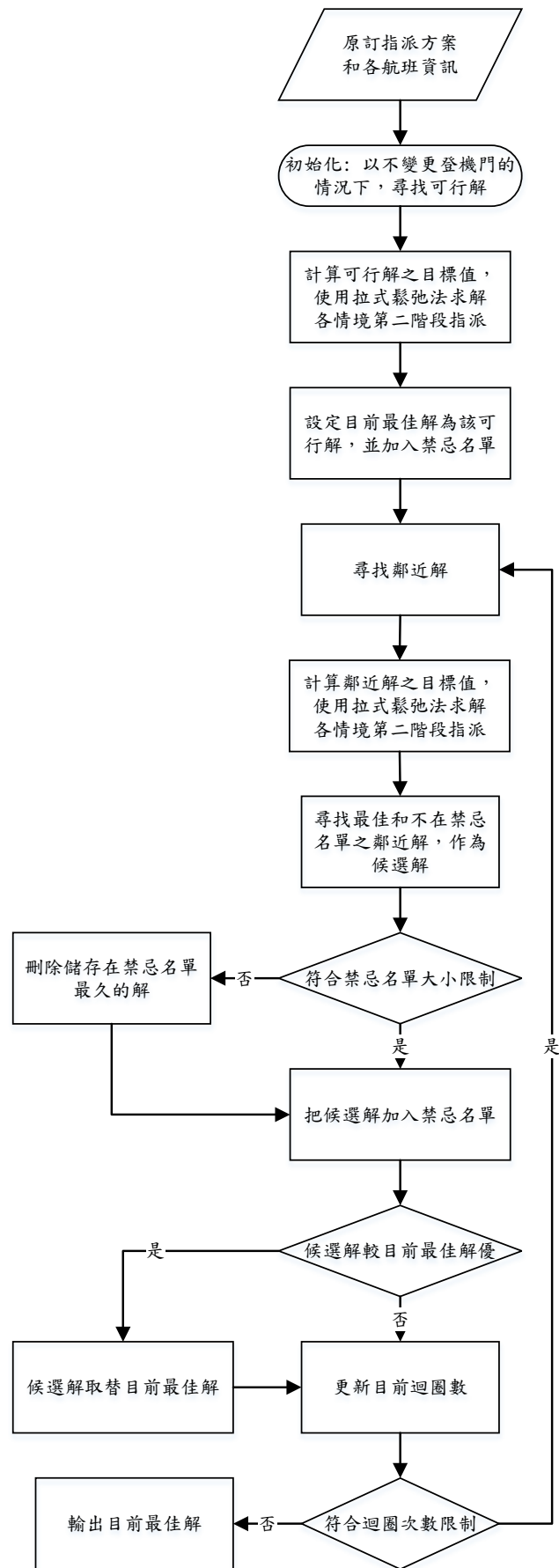


圖 九 基於拉式鬆弛的禁忌演算法流程圖

3.3.2 確定性子問題之求解結構

由於第二階段指派問題亦屬於混合整數問題，當規模擴大時，使用模式求解之效能不高，因此本研究提出以拉式鬆弛法求得近似解，簡化原有模式複雜度，並參考 Fisher (1985)中的調整公式調整步幅。

在評價演算法的優劣時，最直接的檢視方式為比較其所計算的目標值與最佳解之差距，由於在大型問題中求解最佳解較為困難，故可通過下限值 (Lower Bound, LB)與上限值 (Upper Bound, UB)之差距以判斷其演算法求解效果，而拉式鬆弛法 (Lagrangian Relaxation, LR)即是一個有效求解下限值的方法。求解問題時，藉由將限制條件中，一條或多條限制式乘上一懲罰值 (penalty parameters)或拉式乘數 (Lagrangian multipliers)，然後將此限制式移置目標式裡，此放鬆方法目的為讓原問題更易求解，而放鬆後的問題稱為拉式問題。

在此以 Fisher (2004)文獻中拉式問題的基本模式予以作介紹並說明其放鬆原理，該整數規劃模式如下所示，其中 x 為 $[n \times 1]$ 、 b 為 $[m \times 1]$ 、 e 為 $[k \times 1]$ 之矩陣。

$$Z = \min cx \quad (3.20)$$

Subject to

$$Ax = b \quad (3.21)$$

$$Dx \leq e \quad (3.22)$$

$$x \geq 0 \text{ and Integral} \quad (3.23)$$

若將式 (2.22)放鬆，則所得之拉式問題 (LR_u)如下，其中 $u = (u_1, \dots, u_m)$ 為拉式乘數的向量，假設 $X = \{x | Dx \leq e, x \geq 0 \text{ integral}\}$ 對放鬆問題 (LR_u)的可行解有無限多個，而 $Z_0(u)$ 對於所有的乘數 u 也將有無限多個。

$$Z_D(u) = \min cx + u(Ax - b) \quad (3.24)$$

Subject to

$$Dx \leq e \quad (3.25)$$

$$x \geq 0 \text{ and Integral} \quad (3.26)$$

拉式問題提供了原問題之下限值，但此解對於原問題而言仍為不可行解，此時仍須針對原問題放鬆之限制式進行修正，導出可行解稱為上限值，藉由上下限值的差距而得知最佳解的誤差範圍，藉以判斷是否繼續求解的停止機制。

以本研究數學模式的第二階段可以看出，限制式 (3.10)使用兩個決策變數以及大 M 法，是最為複雜之限制式，透過放鬆限制式 (3.10)可大幅降低模式複雜度，拉式鬆弛法流程如圖十，而內容大致如下：

(一)形成拉式問題

去除第一階段之目標式與限制式後，將限制式 (3.10)搬移至目標式，並乘上 u^{ξ}_{ijk} 。當 $A^{\xi}_i + S_i \leq A^{\xi}_j + E$ 時，表示 i 航班之預計抵達登機門時間加上服務時間早於之後所有航班抵達登機們之可延遲最晚時間， u^{ξ}_{ijk} 存在，並設其初始值為零。

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in I^S} (t_i^{\xi} - A_i^{\xi}) - W \sum_{i \in I^S} \sum_{k \in K^0} y_{i,k} y_{i,k}^{\xi} \\
 \text{Minimize} \quad & + B \sum_{i \in I^S} p^{\xi} y_{i,K+1}^{\xi} \tag{3.27} \\
 & + \sum_{i \in I^S} \sum_{j \in I^S} \sum_{k \in K} u_{i,j,k}^{\xi} \left[(t_i^{\xi} + S_i - t_j^{\xi}) - (2 - y_{i,k}^{\xi} - y_{j,k}^{\xi}) M \right]
 \end{aligned}$$

Subject to

$$\sum_{k \in K^0} y_{i,k}^{\xi} = 1, \quad \forall i \in I \tag{3.28}$$

$$A_i^{\xi} \leq t_i^{\xi} \leq D_i^{\xi}, \quad \forall t_i^{\xi} \in \mathbb{R}, i \in I^S \tag{3.29}$$

$$y_{i,k}^{\xi} = y_{i,k}, \quad \forall i \in I^D, k \in K \tag{3.30}$$

$$t_i^{\xi} = t_i, \quad \forall i \in I^D, k \in K \tag{3.31}$$

$$y_{i,k}^{\xi} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, k \in K^0 \tag{3.32}$$

(二) 求解拉式問題

透過以下公式計算各決策變數之係數，然後根據條件決定最佳解。以限制式 (3.28) 決定 $y_{i,k}^\xi$ ，選擇航班 i 之係數較小的 $y_{i,k}^\xi$ 為 1；以限制式 (3.29) 決定 t_i^ξ ，若 t_i^ξ 的係數為正， t_i^ξ 則取 A_i ，若 t_i^ξ 的係數為負， t_i^ξ 則取 D_i 。
決策變數 $y_{i,k}^\xi$ 的係數：

$$-W y_{i,k} + M \left(\sum_{j \in \{I | A_i^\xi < A_j^\xi\}} u_{i,j,k}^\xi + \sum_{j \in \{I | A_i^\xi > A_j^\xi\}} u_{j,i,k}^\xi \right), \forall i, k$$

決策變數 t_i^ξ 的係數：

$$1 + \sum_{k \in K} \sum_{j \in \{I | A_i^\xi < A_j^\xi\}} u_{i,j,k}^\xi - \sum_{k \in K} \sum_{j \in \{I | A_i^\xi > A_j^\xi\}} u_{j,i,k}^\xi, \forall i$$

(三) 計算上、下界

以 $y_{i,k}^\xi$ 與 t_i^ξ 的結果，計算拉式問題之目標式，設為下界。以 $y_{i,k}^\xi$ 的結果，各航班 i 以不發生衝突的情況下靠近 A_i^ξ 來調整 t_i^ξ ，得出原模式之可行解，並設為上界。

(四) 迭代條件

若以下判斷式成立則繼續迭代，否則得出近似解。

$$(\text{目前最佳上界} - \text{目前最佳下界}) / \text{目前最佳下界} > 1\%$$

(五) 調整拉式乘數

透過公式更新步幅（ λ 為固定數值限制 t 的大小），調整並更新各拉式乘數。

$$\text{步幅} = \lambda (\text{目前最佳上界} - \text{目前最佳下界}) / \text{違反值總和}$$

$$\text{新拉式乘數} = \text{舊拉式乘數} - \text{步幅} \times \text{個別違反值}$$

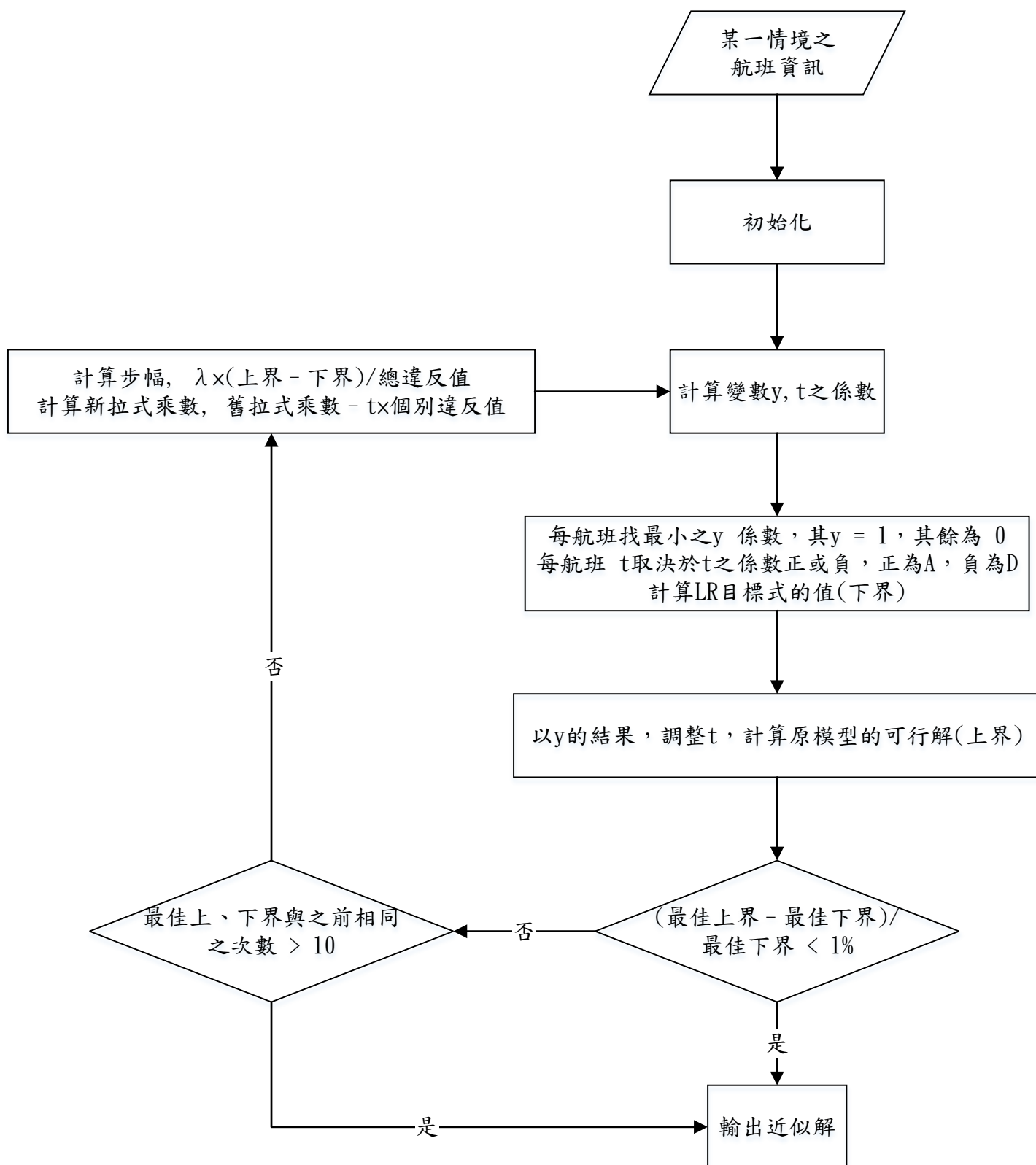


圖 十 拉式鬆弛法流程圖

四、數值測試

本研究分別建立大、小型的登機門指派問題之例題以作測試，而大型例題分為少情境與多情境，共三種，用以呈現本研究所提出數學模式之特性，以及演算法之效能。

小例題之總航班數量為 31、登機門數量為 5、不確定性航班數量為 16、情境數為 20；大例題之總航班數量為 63、登機門數量為 7、不確定性航班數量為 20、情境數為 20 和 60，如表一所示。各類型例題之數量為 10，而延誤航班的數量以及延誤時間為隨機產生。而航班延誤時間與臨時登機門變動之權重為 60。

關於情境的設定，本研究以 20 或 60 個獨立情境描述不確定性航班之延誤時間，各不確定性航班對於各情境內是一指數分配的隨機數（平均值為 30），做為該等航班延誤時間之情境模擬。

本章目的為證明本研究使用隨機規劃之必要性以及演算法之效能，4.1 小節舉出一例題作示範，4.2 小節使用例題驗證資料確定之重要性以及使用隨機規劃之必要性，4.3 小節使用例題測試演算法之效能，並與模式比較。

表 一 各例題之特性

例題特性	小例題	大例題、少情境	大例題、多情境
總航班數量	31	63	63
登機門數量	5	7	7
不確定性航班數量	16	20	20
情境數	20	20	60

4.1 示例性測試例題

以其中一組小例題為例，表二中左側即為各航班的基本資料與表訂指派方案（考量全面的中長期登機門規劃之解），另外圖十一則加上時間軸的資料；如該圖所示，所有中長期指派均無衝突狀況。

然而，班機的實際到達時間存在不確定性，例如假設在狀況發生後發現有 3 班航班無法如期到達登機門，分別是航班 3、9 和 14，各有不同的到達延誤時間，如表二中右側欄位所示。若果沒有變更指派的話，結果如圖十二中而紅色框架即為航班重疊的狀況。

表 二 各航班基本資料 (左側)與狀況發生後之資料 (右側)

航班	原訂指派方案			狀況發生後		
	到達時間	服務時間	使用登機門	到達時間	服務時間	使用登機門
1	366	46	2	366	46	2
2	421	46	2	421	46	2
3	421	57	4	500	57	4
4	444	52	3	444	52	3
5	447	65	1	447	65	1
6	470	56	5	470	56	5
7	498	53	4	498	53	4
8	499	60	2	499	60	2
9	517	48	1	600	48	1
10	545	68	3	545	68	3
11	565	69	4	565	69	4
12	597	55	1	597	55	1
13	597	69	2	597	69	2
14	606	57	5	680	57	5
15	629	55	3	629	55	3
16	678	64	4	678	64	4
17	687	46	5	687	46	5
18	734	69	2	734	69	2
19	741	66	1	741	66	1
20	746	60	2	746	60	2
21	763	46	5	763	46	5
22	808	59	4	808	59	4
23	810	65	2	810	65	2
24	814	66	5	814	66	5
25	838	59	2	838	59	2
26	846	64	1	846	64	1
27	904	48	4	904	48	4
28	935	58	1	935	58	1
29	943	58	3	943	58	3
30	953	50	5	953	50	5
31	960	46	2	960	46	2

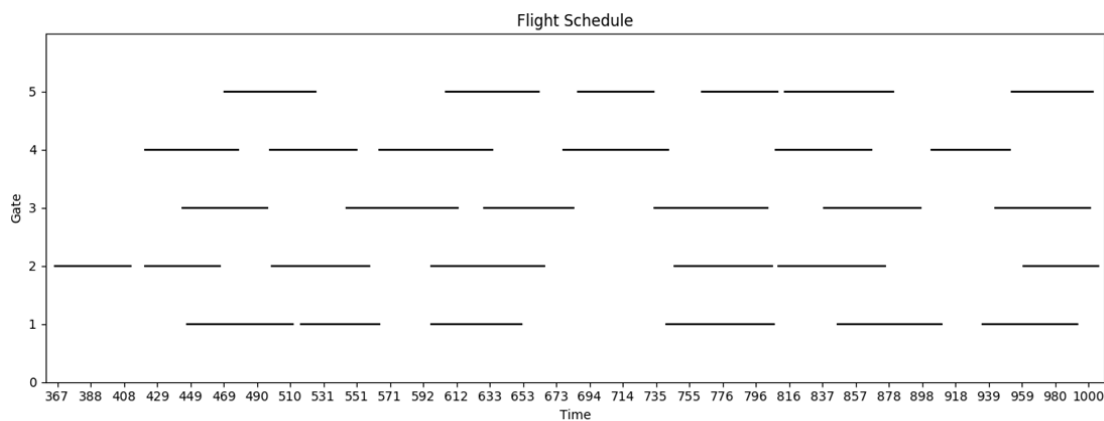


圖 十二 小型例題之原訂指派方案

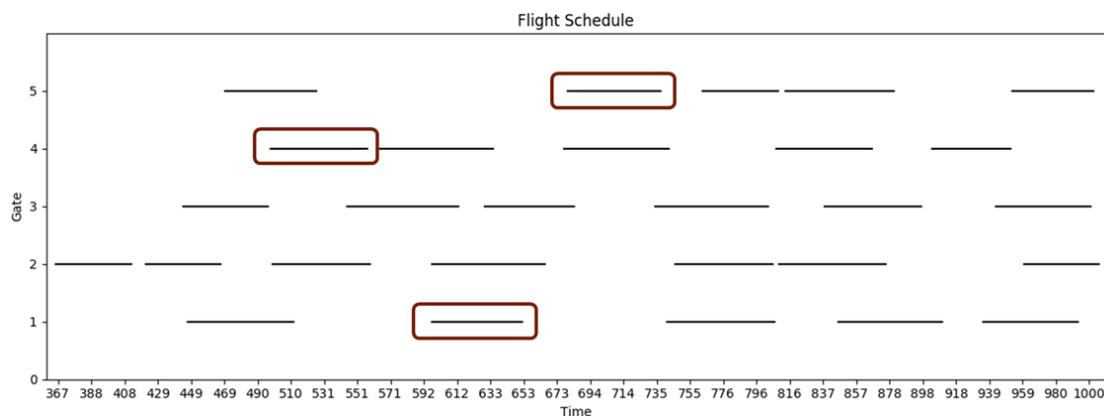


圖 十一 狀況發生後原訂指派方案之衝突情形

當然上述的狀況只是一個大幅簡化的情況，用以說明登機門的衝突；實際上，必須使用更系統性的方式來模擬航機到達時間的不確定性。本研究在此小型範例中，事實上係以 680 分鐘時作為確定性與不確定性航班之分隔線，之前到達的為確定性航班；之後到達的為不確定性航班。另外，關於情境的設定，本範例以 20 個獨立情境描述不確定性航班之延誤時間，各不確定性航班對於各情境內是一指數分配的隨機數（平均值為 30），做為該等航班延誤時間之情境模擬。以本研究之隨機性模式運算得出之結果如圖十三，期望總延誤時間為 98.55 分鐘和期望總登機門變動為 2.15 次。

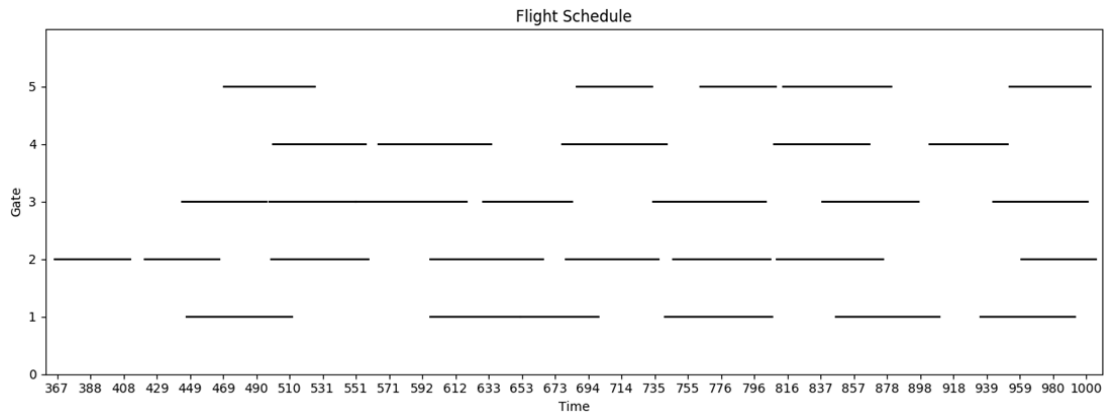


圖 十三 本研究隨機性模式之結果

然而，假設忽略模式的隨機性，以到達時間以平均值帶入，改以確定性模式求解，再把第一階段的機門指派，如圖十四，在各個情境下求出調整 (re-course) 的決策，並匯總所有情境計算期望的延誤時間，借此驗證加入不確定性作考量的價值 (Value of Stochastic Solution, VSS)。發現該期望延誤時間為 101.2 分鐘和期望總登機門變動為 2.15 次，顯示考量不確定性之模式較佳，也說明考量不確定性，會得出不一樣的登機門指派並比較能應付往後的指派工作。

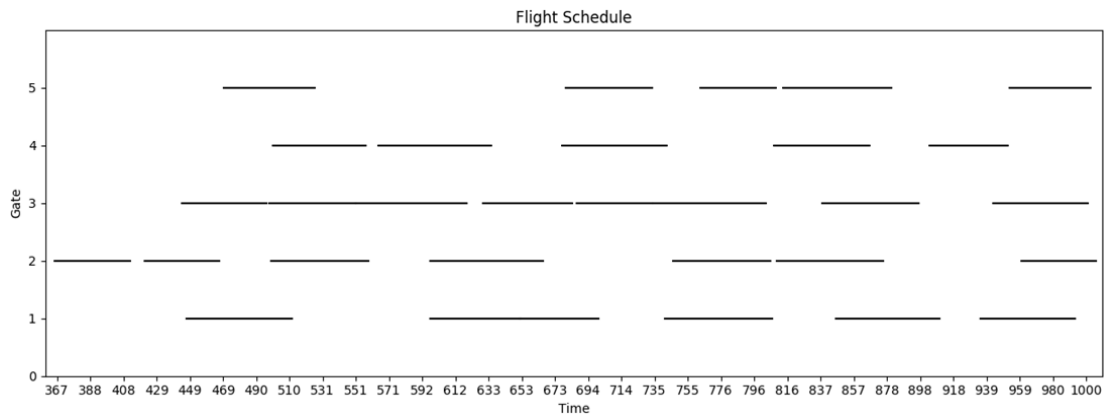


圖 十四 以平均值為基礎之確定性模式第一階段機門配置

4.2 隨機規劃必要性驗證

透過 4.1 小節的例題示範，簡單說明模式的作用後，本研究以三十組不同大小例題分別進行三種運算：第一種為等待情境發生後才運算 (Wait and See, WS)；第二種為使用本研究之模式 (Stochastic Programming, SP)進行運算；第三種為以所有情境之平均運算 (Expectation of Expected Value, EEV)。從而計算完整資訊的期望價值 (Expected Value of Perfect Information, EVPI)以及隨機規劃的價值 (Value of Stochastic Solution, VSS)，運算結果如下列各表。

- 完整資訊之期望價值(EVPI, Expected Value of Perfect Information)

在充滿隨機性的世界裡，想要避免資訊變動帶來的負面影響，最佳的條件便是能夠在情境發生後才處理，分別求解單一情境的最佳解，並計算所有隨機情境目標式的期望值，此數據即為隨機規劃問題中的 WS 值(Wait-and-See solution)；然而在實際生活中，並不是所有的決策問題都能等到情境發生才處理，絕大部分的最佳化問題都需要決策者事先做出決策才有辦法進行接下來的流程，故透過隨機規劃的方式，在情境發生前先求得一個能適應所有隨機情境的解，其目標式則為 RP 值(Recourse Problem solution)，WS 與 RP 之間的差值即為完整資訊的期望價值(EVPI)。

當 EVPI 值偏大時，代表掌握完整資訊對於決策者有相當大的價值，故有投資資訊預測系統的必要，而當其值偏小時，則代表決策者利用隨機規劃求解而得的結果已經相當接近完整資訊下的決策，故應致力於研發隨機規劃。

- 隨機規劃的價值(VSS, Value of Stochastic Solution)

以往確定性的規劃求解問題中，常會以歷史資訊的平均值作為參數設定的依據，利用平均值所求得的目標式值稱為 EV 值(Expected Value)，將求得 EV 值的最佳解代入所有隨機情境中，求得各情境的目標式值後取其期望值，便可得到 EEV 值(Expected value of Expected Value)，而 EEV 與 RP 值之間的差值即為隨機規劃的價值(VSS)。

VSS 值代表原先以確定性規劃求解之問題改為考量隨機性所增加的效益(所降低的成本)，故當 VSS 值愈大，代表隨機規劃能夠替該問題帶來較大的改善效果，而當 VSS 值愈小，則表示隨機規劃的價值無法彰顯。

表 三 小例題之運算結果

小例題	WS	SP	EEV	$EVPI$	VSS
				$ SP - WS $	$ EEV - SP $
1	254	316.7	328.0	62.7	11.3
2	200	269.4	296.2	69.4	26.9
3	249	301.3	301.3	52.3	0.0
4	314	370.1	370.1	56.1	0.0
5	246	318.2	349.5	72.2	31.4
6	157	209.2	209.2	52.2	0.0
7	271	296.2	383.1	25.2	87.0
8	179	250.5	261.7	71.5	11.3
9	228	301.4	319.6	73.4	18.3
10	184	245.8	253.4	61.8	7.6
平均	228	287.9	307.2	59.7	19.3

表 四 大例題、少情境之運算結果

大例題 少情境	WS	SP	EEV	$EVPI$	VSS
				$ SP - WS $	$ EEV - SP $
1	315	377.0	380.0	62.0	3.0
2	307	323.8	409.9	16.8	86.1
3	379	437.7	448.8	58.7	11.1
4	240	278.8	278.8	38.8	0.0
5	441	490.6	510.3	49.6	19.7
6	373	435.3	463.6	62.3	28.3
7	238	295.6	300.5	57.6	4.9
8	415	416.0	521.4	1.0	105.5
9	373	382.1	433.4	9.1	51.3
10	240	278.8	338.8	38.8	60.0
平均	332	371.6	408.5	39.5	37.0

表 五 大例題、多情境之運算結果

大例題 多情境	<i>WS</i>	<i>SP</i>	<i>EEV</i>	<i>EVPI</i>	<i>VSS</i>
				$ SP - WS $	$ EEV - SP $
1	315	368.2	386.0	53.2	17.8
2	309	324.3	416.8	15.3	92.4
3	379	431.1	451.1	52.1	20.0
4	240	269.0	271.4	29.0	2.4
5	441	485.5	502.8	44.5	17.4
6	373	426.1	456.2	53.1	30.1
7	238	286.5	293.6	48.5	7.1
8	420	420.0	534.8	0.0	114.8
9	373	373.0	421.8	0.0	48.8
10	240	269.0	271.3	29.0	2.4
平均	333	365.3	400.6	32.5	35.3

根據以上表格所顯示，*WS* 與 *SP* 之間 (*EVPI*)皆存在平均 30 分鐘以上的差距，表示掌握完美資訊能計算更佳的指派方案，亦即是完美資訊擁有一定的價值，由於 *EVPI* 在求解小例題時差異較大 (平均為 59.7)，說明當問題屬於小規模的時候，完美資訊會更加有價值。而 *SP* 與 *EEV* 之間 (*VSS*)也存在一定的差距，*VSS* 在求解小例題時差異較小 (平均為 19.3)，表示當問題屬於小規模的時候，由於解的目標值差異不大，使用隨機規劃必要性相對較低，在大例題上，*VSS* 則擁有平均 30 分鐘以上的差距，所以當問題屬於大規模的時候，使用隨機規劃必要性相對較高。

三種例題皆顯示出隨機規劃擁有一定的價值，而當問題規模越大，隨機規劃的價值也會隨之上升，然而情境數量與隨機規劃的價值並沒有顯著的關係。

4.3 演算法效能驗證

延續 4.2 小節的結果，隨機規劃擁有一定的價值，可是它是一非常大的混合整數規劃，當問題規模變大時，求解時間會以指數增長，因此本研究提出一演算法，期望能在短時間內求解問題並求得最佳近似解，以三十組不同大小的例題進行以下三種運算：第一種為不作出任何登機門變動下，以延誤的方式求出最佳解；第二種為使用最佳化軟體, Gurobi 求解本研究之模式 (Stochastic Programming, SP)進行運算；第三種為使用本研究之演算法 (Tabu Search with Lagrangian Relaxation, TSLR)進行運算。運算結果如下列各表。

表 六 小例題之模式與演算法比較

小例題	原訂 方案	Gurobi (Optimal)				TSLR			
	延誤 時間	登機門 變動數	延誤 時間	目標值	所需時 間 (秒)	登機門 變動數	延誤 時間	目標值	所需時 間 (秒)
1	356.4	2.1	190.7	316.7	12.0	2.1	191.9	317.9	6.0
2	313.4	2.1	143.4	269.4	16.0	2.1	152.5	278.5	7.0
3	363.5	2.2	172.3	301.3	12.0	2.1	179.3	302.3	7.0
4	486.9	4.2	118.1	370.1	23.0	4.1	141.4	387.4	7.0
5	372.3	2.1	195.2	318.2	12.0	2.1	192.5	318.5	8.0
6	265.7	1.2	140.2	209.2	12.0	1.1	156.3	219.3	5.0
7	343.9	2.1	173.2	296.2	22.0	2.1	182.1	308.1	7.0
8	285.1	2.1	124.5	250.5	12.0	1.0	194.0	254.0	5.0
9	360.6	2.1	175.4	301.4	11.0	2.0	182.4	302.4	6.0
10	278.2	1.2	173.8	245.8	13.0	1.0	187.7	247.7	6.0
平均	342.6	2.1	160.7	287.9	14.5	2.0	176.0	293.6	6.4

表 七 大例題、少情境之模式與演算法比較

大例題 少情境	原訂 方案	Gurobi (Optimal)				TSLR			
	延誤 時間	登機門 變動數	延誤 時間	目標值	所需時 間 (秒)	登機門 變動數	延誤 時間	目標值	所需時 間 (秒)
1	413.5	1.1	311.0	377.0	45.0	1.1	314.1	377.1	11.0
2	351.2	2.1	200.8	323.8	50.0	1.1	271.6	334.6	10.0
3	503.9	2.1	314.7	437.7	47.0	2.0	321.9	441.9	9.0
4	326.8	2.1	155.8	278.8	43.0	1.0	230.4	290.4	9.0
5	631.0	4.1	247.6	490.6	46.0	2.0	403.8	523.8	9.0
6	585.7	5.2	126.3	435.3	49.0	5.1	186.5	492.5	10.0
7	444.3	2.1	169.6	295.6	45.0	2.0	185.1	305.1	9.0
8	510.8	3.1	233.0	416.0	48.0	2.0	330.2	450.2	9.0
9	428.6	2.1	259.1	382.1	44.0	1.2	336.3	408.3	10.0
10	315.5	1.1	215.8	278.8	42.0	1.0	219.0	279.0	9.0
平均	451.1	2.5	223.4	371.6	45.9	1.8	279.9	390.3	9.5

表 八 大例題、多情境之模式與演算法比較

大例題 多情境	原訂 方案	Gurobi (Optimal)				TSLR			
	延誤 時間	登機門 變動數	延誤 時間	目標值	所需時 間 (秒)	登機門 變動數	延誤 時間	目標值	所需時 間 (秒)
1	406.5	1.0	306.6	368.2	134.0	1.0	309.9	370.9	23.0
2	349.0	2.0	203.7	324.3	181.0	1.0	273.1	334.1	28.0
3	501.8	2.0	312.5	431.1	129.0	1.0	390.6	450.6	24.0
4	319.9	2.0	149.4	269.0	122.0	1.0	221.9	281.9	19.0
5	627.3	4.0	243.9	485.5	133.0	4.0	248.2	488.2	25.0
6	578.1	5.0	125.5	426.1	141.0	4.0	184.5	426.5	28.0
7	438.6	2.0	164.9	286.5	136.0	2.0	175.3	296.3	27.0
8	502.9	3.0	236.9	415.5	231.0	1.2	405.2	474.2	26.0
9	413.8	2.0	253.0	371.6	129.0	1.0	316.2	378.2	22.0
10	309.2	1.0	209.4	269.0	117.0	1.0	211.2	271.2	22.0
平均	444.7	2.4	220.6	364.7	145.3	1.7	273.6	377.2	24.4

根據以上表格所顯示，使用原訂方案會得到最差的結果，而本研究之模式求出的為最佳解，但當問題規模變大時，求解時間有著明顯的上升趨勢，在求解小例題時，平均需要 14.5 秒；在求解大例題、少情境時，平均需要 45.9 秒；在求解大例題、多情境時，平均需要 145.3 秒。相對本研究之演算法，在求解時間上擁有更佳的表现，平均求解時間分別為 6.4 秒、9.5 秒、24.4 秒。從三種例題的平均求解時間比較得知，第一、二種例題平均求解時間的差距 (模式的為 31.4 秒；演算法的為 3.1 秒)比第二、三種例題平均求解時間的 (模式的為 99.4 秒；演算法的為 14.9 秒)少了許多，說明問題大小並不是讓求解時間大幅提升的因素，而關鍵因素是問題情境的多少。

本研究與 Yan et al. (2011) 所考量的因素相似，主要差別在於設計模式之方式，Yan et al. (2011) 使用時空網路圖建立模式；本研究使用一般指派變數建立模式。在固定的參數下，Yan et al. (2011)的模式中變數會比本研究的模式多，以小例題的參數為例，其總航班數量為 31、登機門數量為 5、不確定性航班數量為 16、情境數為 20、使用時間為 06:00-20:00 (共 168 個時段)，Yan et al. (2011) 總共有 $((31 - 16) \times 5 \times 168 + 16 \times 5 \times 168 \times 20) = 281,400$ 個變數，而本研究總共有 $(31 \times 5 + 31 + 16 \times 5 \times 20 + 16 \times 20) = 2,106$ 個變數。在數值測試結果上，Yan et al. (2011) 求解的例題參數：總航班數量為 171、登機門數量為 23、情境數為 40、使用時間為 01:00-24:00，不過 Yan et al. (2011) 把例題以一小時分割，每半小時求解一次(總共 46 次)，所以例題規模相對較小，在求解時間上，大部份例題求解需要 1-2 分鐘，甚至有例題求解需要 4 分鐘。而本研究所提出的模式能在更短的時間內求解更大的問題。

除了求解時間的比較外，近似解與最佳解的接近程度也是決定演算法效能的重要因素，而表九為三種例題 (各十組)的近似解與最佳解之平均差距，從表中能夠得知演算法在求解小例題時會較為接近最佳解，當問題規模變大時，近似解與最佳解之差距便會漸漸變大，但差距保持在 5%之內，說明演算法之近似解有一定的可信度。總括而言，演算法能夠在短時間內，求得一定程度上接近最佳解的近似解，所以適合用於本研究所探討之問題上。

表 九 各例題近似解與最佳解之平均差距

	近似解與最佳解 之平均差距 (%)
小例題	2.02
大例題、少情境	4.67
大例題、多情境	3.39

五、結論與建議

近年來，由於低成本航空公司逐漸興起，以及航空公司也因此增班及開闢新航班以應付旅次上升的情況，各地機場的升降架次皆有上升趨勢，使得機場航班班表的密集度提升，登機門本身的平均閒置時間亦縮短，若果突發狀況導致航班延誤或取消，勢必會導致航班班表巨大的變動，造成機場運作的混亂及旅客極大的不便。

而本研究欲聚焦於短期登機門指派規劃，透過數學模式之建立，以最小化登機門變動和延誤時間為目標，此類短期規劃之決策是在分秒必爭的環境下進行，必須考量完善，顧及後續的機場管理，並在短時間內完成，但在過往的研究中大多使用時空網路圖來建立模式，當面對大型規模問題時必需要更多的時間。

因此，本研究之主軸即為決策在考量後續航班的到達時間不確定性下，各航班的登機門指派，並透過啟發式演算法的建立來求得大型規模問題之解，以短時間內規劃出能夠考量後續航班到達時間不確定性之登機門指派。以下為本研究歸納之結論與建議。

5.1 結論

在本研究的數值例題中可發現，完美資料在各種例題皆擁有一定的價值，可惜現實生活難以取得完全準確的資料，必須使用其他技巧來考量現實生活之不確定性，如隨機規劃。

本研究也發現隨機規劃在各種例題皆有一定的價值，而其價值會隨例題大小增長，所以航班到達時間不確定性是登機門指派問題值得考量的條件，而透過隨機規劃求解該類問題是值得探討的方向。

本研究所使用的啟發式演算法在數值測試上有良好的績效表現，且在大型例題中亦可在短時間內求得良好的近似解。與模式結果相比較下，本研究之演算法能在更短的時間內求解出接近最佳解的近似解，由於短期登機門指派問題所重視的一大因素為求解速度，因此本研究之演算法較為適合求解該類問題。

5.2 建議

針對後續研究的相關建議，本研究著重於隨機規劃之模式以及啟發式演算法的建立，因此例題數據並沒有使用實際資料，而是參考文獻以及台灣桃園國際機場的升降資料來設立例題，後續研究可透過訪問機場公司，以實際資料進一步探討問題。

在數值測試中，情境設定方法為所有不確定航班各產生一獨立的指數分配之亂數，而平均皆為相同數值，未來可改為各不確定航班擁有特定的分配以及平均數，甚至可設計航班之間擁有相關性之亂數產生模式。

在本研究所提出的啟發式演算法中，禁忌演算法的收斂條件以及鄰近解搜尋法皆參考文獻普遍所使用的方式設立，未來亦可考量登機門指派問題的特性，設計適合的收斂條件或鄰近解搜尋法，讓演算法能夠更快速收斂和得到最佳的解。

參考文獻

- Abdelghany, A., Abdelghany, K., (2009). Modeling Application in the Airline Industry. Ashgate Publishing Group. Pp. 122-128.
- Babic, O., Teodorovic, D., Tošić, V., (1984). Aircraft stand assignment to minimize walking. J. Transp. Eng. Vol. 110 (1), pp. 55–66.
- Bihl, R.A., (1990). A conceptual solution to the aircraft gate assignment problem using 0, 1 linear programming. Comput. Indus. Eng. Vol. 19 (1), pp. 280–284.
- Birge, J.R., Louveaux, F., (2011). Introduction to Stochastic Programming. Springer Science+Business Media, LLC.
- Bolat, A., (1999). Assigning arriving flights at an airport to the available gates. J. Oper. Res. Soc. pp. 23–34.
- Bolat, A., (2001). Models and a genetic algorithm for static aircraft-gate assignment problem. J. Oper. Res. Soc. pp. 1107–1120 .
- Bouras, A., Ghaleb, M. A., Suryahatmaja, U. S., Salem, A. M., (2014). The Airport Gate Assignment Problem: A Survey. Scientific World Journal 2014.
- Cheng, Y., (1997). A knowledge-based airport gate assignment system integrated with mathematical programming. Comput. Indus. Eng. Vol. 32 (4), pp. 837–852.
- Diaz, J.A., Fernandez, E., (2001). A Tabu search heuristic for the generalized assignment problem. European Journal of Operational Research. Vol. 132, pp. 22-38.
- Diepen, G., Van den Akker, J.M., Hoogeveen, J. A., (2008). Integration of Gate Assignment and Platform Bus Planning. Department of Information and Computing Sciences, Utrecht University.
- Diepen, G., Van den Akker, J.M., Hoogeveen, J.A., Smeltink, J., (2012). Finding a robust assignment of flights to gates at Amsterdam Airport Schiphol. J. Sched. Vol. 15 (6), pp. 703–715.
- Ding, H., Lim, A., Rodrigues, B., Zhu, Y., (2004). New heuristics for over-constrained flight to gate assignments. J. Oper. Res. Soc. Vol. 55 (7), pp. 760–768.
- Ding, H., Lim, A., Rodrigues, B., Zhu, Y., (2005). The over-constrained airport gate assignment problem. Comput. Oper. Res. Vol. 32 (7), pp. 1867–1880.
- Dong Z., Diego K., (2017). Optimization for gate re-assignment. Transportation Research Part B. Vol. 95, pp. 260-284
- Dorndorf, U., Jaehn, F., Pesch, E., (2016). Flight gate assignment and recovery strategies with stochastic arrival and departure times. OR Spectrum pp. 1–29.
- Fisher, M.L. (1985). An Applications Oriented Guide to Lagrangian Relaxation. Interfaces Vol. 15 (2), pp. 10-21.
- Fisher, M.L. (2004). The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. Management Science Vol. 50, pp. 1861–1871.
- Glover, F., (1989). Tabu search: Part 1. ORSA Journal of computing Vol. 1, pp. 190-206.

- Glover, F., (1990). Tabu search: Part 2. *ORSA Journal of computing* Vol. 2, pp. 4-32.
- Gosling, G.D., (1990). Design of an expert system for aircraft gate assignment. *Transp. Res. Part A* Vol. 24 (1), pp. 59–69.
- Gu, Y., Chung, C.A., (1999). Genetic algorithm approach to aircraft gate reassignment problem. *J. Transp. Eng.* Vol. 125 (5), pp. 384–389.
- Guépet, J., Acuna-Agost, R., Briant, O., Gayon, J.P., (2015). Exact and heuristic approaches to the airport stand allocation problem. *Eur. J. Oper. Res.* Vol. 246 (2), pp. 597–608.
- Haghani, A., Chen, M.C., (1998). Optimizing gate assignments at airport terminals. *Transp. Res. Part A* Vol. 32 (6), pp. 437–454.
- Jo, G.S., Jung, J.J., Yang, C.Y., (1997). Expert system for scheduling in an airline gate allocation. *Expert Syst. Appl.* Vol. 13 (4), 275–282.
- Kim, S.H., Feron, E., Clarke, J.P., (2013). Gate assignment to minimize passenger transit time and aircraft taxi time. *J. Guid. Control. Dyn.* Vol. 36 (2), pp. 467–475.
- Laguna, M., Keely, J.P., Gonzalez-Velarde, J.L., Glover, F., (1995). Tabu search for the multilevel generalized assignment problem. *European Journal of Operational Research* Vol. 82, pp. 176-189.
- Lim, A., Rodrigues, B., Zhu, Y., (2005). Airport gate scheduling with time windows. *Artificial Intelligence Review* Vol. 24 (1), pp. 5-31.
- Maharjan, B., Matis, T.I., (2011). An optimization model for gate reassignment in response to flight delays. *J. Air Transport Manag.* Vol. 17 (4), pp. 256–261.
- Mangoubi, R., Mathaisel, D.F., (1985). Optimizing gate assignments at airport terminals. *Transp. Sci.* Vol. 19 (2), pp. 173–188.
- Ravizza, S., Atkin, J.A., Burke, E.K., (2014). A more realistic approach for airport ground movement optimisation with stand holding. *J. Sched.* Vol. 17 (5), pp. 507–520.
- Seker, S., Noyan, N., (2012). Stochastic optimization models for the airport gate assignment problem. *Transportation Research E: Logistics and Transportation Review* Vol. 48 (2), pp. 438–459.
- Srihari, K., Muthukrishnan, R., (1991). An expert system methodology for aircraft-gate assignment. *Comput. Indus. Eng.* Vol. 21 (1), pp. 101–105.
- Steuart, G.N., (1974). Gate position requirements at metropolitan airports. *Transportation Science* Vol. 8 (2), pp. 169–189.
- Su, Y., Srihari, K., (1993). A knowledge based aircraft-gate assignment advisor. *Comput. Indus. Eng.* Vol. 25 (1), pp. 123–126.
- Tang, C.H., Yan, S., Hou, Y.Z., (2010). A gate reassignment framework for real time flight delays. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research* Vol. 8 (3), pp. 299–318.
- Tang, C.H., (2011). A gate reassignment model for the Taiwan Taoyuan Airport under temporary gate shortages and stochastic flight delay. *Systems, Man, and Cybernetics Part A* Vol. 41 (4), pp. 637–650.

- Wirasinghe, S., Bandara, S., (1990). Airport gate position estimation for minimum total costs—approximate closed form solution. *Transp. Res. Part B* Vol. 24 (4), pp. 287–297.
- Yagiura, M., Ibaraki, T., Glover, F., (1999). An ejection chain approach for the generalized assignment problem. Technical Report 99013.
- Yan, S., Chang, C.M., (1998). A network model for gate assignment. *J. Adv. Transp.* Vol. 32 (2), pp. 176–189.
- Yan, S., Huo, C.M., (2001). Optimization of multiple objective gate assignments. *Transp. Res. Part A* Vol. 35 (5), pp. 413–432.
- Yan, S., Tang, C.H., (2007). A heuristic approach for airport gate assignments for stochastic flight delays. *Eur. J. Oper. Res.* Vol. 180 (2), pp. 547–567.
- Yan, S., Chen, C.Y., Tang, C.H., (2009). Airport gate reassignment following temporary airport closures. *Transportmetrica* Vol. 5 (1), pp. 25–41.
- Yan, S., Tang, C.H., Hou, Y.Z., (2011). Airport gate reassignments considering deterministic and stochastic flight departure/arrival time. *Journal of advanced transportation* Vol. 45 (4), pp. 304–320.
- Yu, C., Zhang, D., Lau, H., (2016). MIP-based heuristics for solving robust gate assignment problems. *Comput. Indus. Eng.* Vol. 93, pp. 171–191.
- 汪進財, (1992), 機門指派最佳化模式, 運輸計劃季刊, 第二十一卷第二期, 頁 247-260。
- 汪進財、張東珍, (1996), 動態機門指派績效評估, 運輸計劃季刊, 第二十五卷第一期, 頁 121-144。
- 陳春益、李宇欣、盧華安, (1997), 時空網路應用於機門指派問題之研究, 運輸學刊, 第十卷第三期, 頁 1-20。
- 湯慶輝, (2009), 隨機性班機延誤下穩健最佳化機門指派之研究, 中國土木水利工程學刊, 第二十一卷第一期, 頁 61-71。
- 盧華安, (2001), 因應班機延誤之最佳化即時機門指派, 運輸計劃季刊, 第三十卷第四期, 頁 849-870。
- 顏上堯、杜宇平、朱橋榮, (2003), 機門數量最少化網路模式之研究, 運輸學刊, 第十五卷第二期, 頁 149-164。
- 顏上堯、張家銘, (1997), 機門指派最佳化之研究, 中國土木水利工程學刊, 第九卷第三期, 頁 491-500。
- 顏上堯、韓復華、霍俊明, (1998), 大型機門指派問題最佳化, 中國工業工程學刊, 第十五卷第三期, 頁 245-254。
- 湯慶輝、王渭仲, (2012), 考量到離場航班銜接下桃園國際機場機門指派之研究, 運輸學刊, 第二十四卷第三期, 頁 305 -330。
- 台灣桃園國際機場股份有限公司, (無日期), 台灣桃園國際機場統計資料, 取自:
http://www.taoyuanairport.com.tw/company_ch/Passengerquery。

簡歷



中文姓名：黃景棠

英文姓名：King-Tong Wong

出生日期：民國 83 年 8 月 27 日

聯絡地址：新竹市東區大學路 81 巷 3 弄之 23 號

電子信箱：kingwong827@gmail.com

簡歷：

民國 107 年 7 月 國立交通大學 運輸與物流管理學系碩士班 畢業

民國 105 年 6 月 國立交通大學 運輸與物流管理學系學士班 畢業