

廣體客機旅客登機策略之研究： 以波音 747-400 機型為例

PASSENGER BOARDING STRATEGIES FOR WIDE-BODY AIRCRAFTS: A CASE STUDY OF BOEING 747-400

韓復華 Anthony F. Han¹
朱政威 Alonzo C. Chu²

(96 年 1 月 28 日收稿，96 年 10 月 16 日第一次修改，96 年 12 月 31 日
第二次修改，97 年 11 月 25 日定稿)

摘 要

航班延誤不僅會增加機場額外作業成本，還會降低其運作效率和搭機旅客的滿意度。「週轉時間 (turnaround time)」是衡量航班運作效率的重要指標，而旅客登機時間 (passenger-boarding time) 即是影響週轉時間的重要因素。因此，登機策略 (boarding strategy) 之良窳為旅客快速登機之關鍵。有鑒於不同機型的座艙設計將會影響旅客登機策略之研擬，本研究針對「廣體客機」旅客登機策略問題進行深入研究。問題模式方面，本文延伸 van den Briel 等人 Airbus A320 窄體客機之研究，對波音 747-400 廣體客機構建非線性雙元整數規劃 (BIP) 模式。本研究首先設計小型測試例題求取最佳解 (exact solution) 來驗證 BIP 模式之正確性；並根據其結果，提出一個新的登機策略——「非對稱倒金字塔型 (ARP)」策略；其次分別以波音 747-400 和 Airbus A320 兩種機型經濟艙為實例，比較 ARP 登機策略和傳統登機策略之干擾值。比較結果顯示，ARP 登機策略之干擾值不論是在廣體客機波音

-
1. 國立交通大學運輸科技與管理學系所教授 (聯絡地址：300 新竹市大學路 1001 號 交通大學運輸科技與管理學系所；電話：03-5731680；E-mail：afhan@mail.nctu.edu.tw)。
 2. 國立交通大學運輸科技與管理學系所博士候選人 (E-mail：zucw.tem93g@nctu.edu.tw)。

747-400 或是窄體客機 Airbus A320 機型皆為最小。此外，敏感度分析結果亦顯示 ARP 登機策略之優越性且不易受機型座艙設計或登機組數等外在因素的影響，故在實際應用上深具潛力。

關鍵詞：登機策略；雙元整數規劃

ABSTRACT

Flight delay not only results in additional operating costs at an airport but also deteriorates the service for airline passengers. "Turnaround time" is an important indicator for measuring the operation efficiency, and passenger-boarding time is the key factor that affects the turnaround time, therefore, the quality of boarding strategy is the key for fast passenger boarding. Due to different aircraft cabin designs affecting the drawing up of passenger boarding strategy, this paper focused on the passenger boarding strategy for "wide-body aircraft" for further research. Efficient boarding of passengers can reduce the turnaround time, increase operational efficiency of an airline, and also shorten the wait and boarding time of passengers. In this paper, we extended the model developed by van den Briel et al. to the application of the wide-body aircraft boarding strategy problem. The extended model was formulated as a non-linear BIP problem and validated with some small numerical examples. We proposed a new aircraft-boarding strategy termed the "Asymmetrical Reverse Pyramid (ARP)". We also applied the ARP strategy to both the Boeing 747-400 and the Airbus A320 aircrafts, and compared it with recently developed boarding strategies, such as back-to-front (BF), outside-inside (OI), and reverse pyramid (RP). Results showed that the ARP strategy is more efficient and robust than other strategies tested.

Key Words: Boarding strategies; Binary integer programming

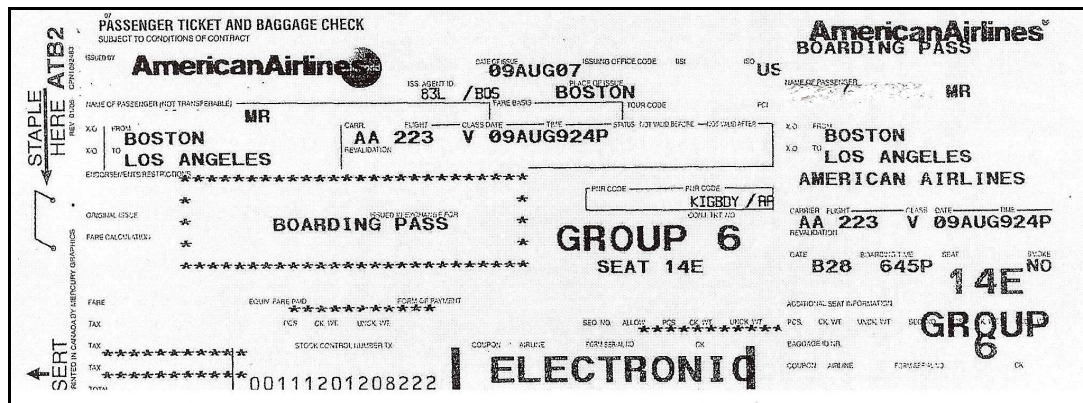
一、前言

在講究快速的現代商業活動下，飛航旅次的需求因應而生。以中正國際機場為例，啟用之初，進出航機僅三萬架次，而今已成長近十四萬架次，旅客運量從民國 68 年的三百萬人次，至民國 93 年止，已成長為二千萬人次^[1]。由此可知，不管是個人或者是企業，提供其快捷、方便、安全的飛機運輸服務，在現今追求時效和提高市場競爭力的環境中占有重要的地位。且由於航空運輸屬於高科技與高成本的事業，故吸引許多學者投入研究，盼達到降低成本、提升市占率與利潤等目標。也因為如此，以往在航空營運與管理的相關學術領域中，均較偏重於需求面的航空市場旅運需求分析、市場行銷策略與管理或是營運面的飛航排程、空服員／維修人員排班與輪值等相關議題上，相關文獻也甚多，但似乎甚少針對航空旅客登機策略 (boarding strategies) 問題作深入探討及研究。

另一方面，由於飛機的航班具有一定之計劃與排程，一旦航班發生延誤，將不僅僅是影響到其他航班作業的進行，還會降低搭機旅客的滿意度和整個機場的運作效率。而傳統用來衡量商業航班運作效率的指標就是「週轉時間 (turnaround time)」，即是指飛機從抵達機場至起飛之時間。因為週轉時間對整條航線的營運成功有著全面性的影響。較短的週轉時間能使航空公司的飛機具有較高的使用率，並提高旅客的舒適滿意度以及提高利潤。較長的週轉時間則會減少用來生產服務並製造利潤之飛行時間。其中，影響週轉時間的因素包括旅客下飛機、卸下行李、加油、卸下貨物、飛機維護、裝載貨物、裝載行李以及旅客登機等。若可改善其中一項時，便能縮短週轉時間。但其中最難縮短的便是旅客登機時間 (van den Briel 等人^[21])，因為航空公司對旅客登機方面並沒有相關措施及控制，故當航空公司想加快旅客登機速度時，就必須針對登機策略 (boarding strategy) 作規劃及研究。

就航空旅客登機問題之相關文獻而言，大部分的文獻皆是以模擬的方式來進行相關研究。Marelli 等人^[3]就利用模擬分析的方式，以窄體客機波音 757 機型為例，設計出一套旅客上下飛機的模擬 (passenger enplane/deplane simulation, PEDS) 來測試不同的登機策略。結果顯示登機旅客由外坐到內 (意即擁有窗邊座位的旅客先坐，接下來是中間的座位，最後是靠近走道的座位) 的方式登機可以大幅縮短登機時間。之後聯合航空公司 (United Airlines) 便採用該登機策略，並是第一個實際應用成功的案例。接著 Kimes and Young^[4]在研究報告中指出航空公司使用該項登機方法成功之後，United Airlines 卻停止由外而內的登機方式，改採現今傳統頭等艙的旅客先登機，接下來是經濟艙的旅客，然後是最後十排的旅客，最後是其餘旅客的方式來登機。Van Landeghem and Beuselinck^[5]也利用模擬的方式提出能最快使旅客搭上飛機就坐的方式，是按照排與列一個座位一個座位的讓旅客分別登機的方式，並宣稱可使整個旅客登機時間減半。但該法並未獲得回響和應用成功的案例。但其研究中分析了許多登機策略的搭配，其中較為可行且有效率的策略為將同列座位分為左、右邊，個別呼叫旅客的座位號碼和所在列數來登機的策略。van den Briel 等人^[2]則針對美西航空公司 (America West Airlines) 發展一解析性的非線性整數規劃模式來分析旅客登機問題，並提出傳統由後至前 (back-to-front) 和由外而內 (outside-inside) 混合的倒金字塔型 (reverse pyramid) 登機策略，應用結果顯示平均每位旅客之登機時間可減少 2 分鐘以上且所有航班之總登機時間降低約 20%，效果良好。張惇嘉等人^[6]則將此非線性整數規劃模式轉換成 0-1 整數規劃模式來求解，亦有類似之結果。在 America West Airlines 成功實施倒金字塔型登機策略後，United Airlines 也開始仿效倒金字塔型登機策略，推出簡稱為「WIMA」的登機程序，也就是「靠窗 Window」、「中間 Middle」和「走道 Aisle」三個英文單字的縮寫。United Airlines 並預期這套流程可以將平均登機時間縮短四到五分鐘，每年因此可以節省一百萬美元 (商業週刊第 940 期^[7])。由此可見，如何有效將登機旅客分組及安排座位來提升旅客的登機速度與降低航空公司的營運成本有密切關係。而有關把旅客分組登機的作法，在美國各大航空公司均已實施。首先在每位旅客的登機證 (boarding pass) 上面印清楚其分組編號 (見圖 1 所示)，該旅客之登機組別為第 6 組 (Group 6)，然後在正式開始登機時，再由廣播方式告知其登機組別，再讓旅客依序登機。至於不同的登機策略，或許有不同的登機方式，但實施上均大致相同。

如上所述，如何有效將登機旅客分組及安排座位，就可看出登機策略之優劣；且目前有關登機策略問題的相關研究似乎皆只針對單走道的窄體客機（如波音 757 和 Airbus A320）進行探討，其中並無文獻以廣體客機為對象作深入研究，但不同機型的座艙設計勢必會影響旅客登機策略之研擬。再者，依據國內各家航空公司公布的機隊資料（民國九十五年十二月）統計（如表 1）顯示，擁有較多座位數和較寬敞乘坐空間的雙走道「廣體客機（wide-body aircraft）」是目前國內各家航空公司機隊最多採用的機型（約占 67.9%）。而廣體客機中又以美國波音公司所製造的 B747/B777 系列機型為代表（約占 52.2%）。緣此，本研究將針對廣體客機的旅客登機策略進行探討及分析。



資料來源：本研究。

圖 1 實際旅客登機證 (boarding pass) 範例圖

表 1 臺灣主要航空公司機隊各機型統計表

航空公司		華航	長榮	國泰	遠東	立榮	復興	華信	總計
廣體	B747/B777 系列	34	21	38	0	0	0	0	178
	A300/A330/A340 系列	21	11	44	0	0	0	0	
	MD11	0	9	0	0	0	0	0	
窄體	B737/B757 系列	12	0	0	7	0	0	0	84
	A320/A321 系列	0	0	0	0	0	8	0	
	MD82/MD83/MD90	0	18	0	9	11	0	0	
	FK50/FK-100	0	0	0	0	0	0	7	
	DASH 8	0	0	0	0	11	0	0	
	ATR72 系列	0	0	0	0	0	10	0	

資料來源：本研究整理。

本文之架構，第二節進行登機問題之描述；第三節探討廣體客機登機策略問題數學模式，並設計小型測試例題以進行模式正確性之驗證；第四節進行不同登機策略干擾值的計算分析；第五節提出結論與建議。

二、問題描述

依上述所言，航空旅客登機問題即是讓旅客快速登機，使登機時間最小化。因此必須設法降低登機過程中所產生的干擾。由於頭等艙和商務艙座位數少且優先登機，故一般登機策略之研究主要是針對經濟艙進行探討。故本節將先定義旅客登機過程中會產生的干擾因素；接著再介紹目前文獻中的由後至前 (BF)、由外而內 (OI) 及倒金字塔 (RP) 三種登機策略和本研究所提出的非對稱倒金字塔型 (ARP) 登機策略。

2.1 登機干擾因素之探討

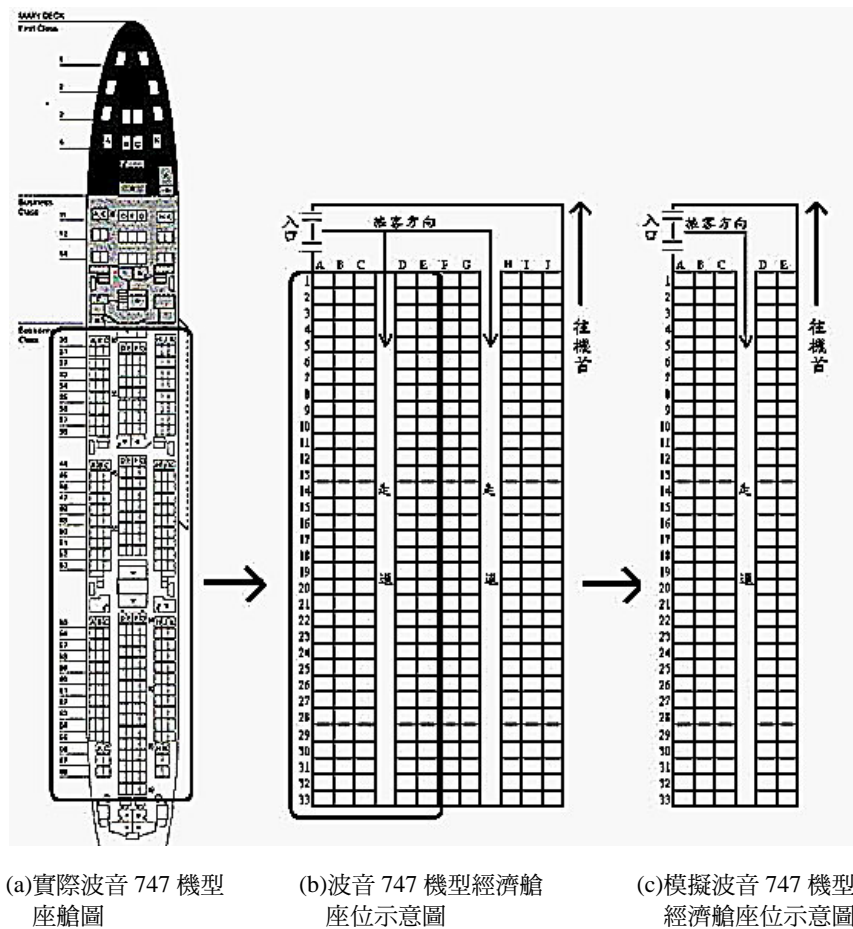
「登機干擾 (boarding interference)」是指一名旅客在登機過程中，被另一名旅客影響而被阻擋或延誤使得無法順利就座的干擾情況。並假設受到登機干擾的旅客數量最少化與登機時間最少化具有其一致性，意即一個旅客受到干擾時，到達座位的時間會比順暢地到達座位的時間來的長，因此當受到登機干擾的旅客變多時整個登機的時間也會變長。故減少旅客所受到之干擾，也就能縮短每位旅客的就座時間，最終則會縮短整個登機的時間 (boarding time)。

一般而言，登機干擾可分為兩類：座位干擾 (seat interference) 和走道干擾 (aisle interference) (van den Briel 等人^[21])，分別說明如下文。

2.1.1 座位干擾

「座位干擾」是指登機旅客其就座順序與座位排列發生衝突時，而產生座位靠近走道 (靠走道或靠中間) 的登機旅客必須起身讓裡面座位 (窗邊或靠中間) 登機旅客進入所造成的干擾而言。其衝突指的就是旅客登機過程會產生座位干擾的情況。

若以國泰航空波音 747-400 機型之座艙設計為例，其機型屬於廣體機型，機艙內有兩條走道，故一個完整的波音 747-400 經濟艙有 33 排 ($N=33$)，左側三個座位、中間四個座位、右側三個座位。由於機型擁有兩條走道之緣故，因此已經進入不同走道的登機旅客不會互相影響，故本研究將其從中剖半，假設視為兩個獨立系統。本研究實際國泰航空波音 747-400 機型經濟艙座位和模擬示意圖如圖 2 所示。圖 2(a) 為實際國泰航空波音 747-400 機型的座艙圖；由於本研究僅針對經濟艙進行探討，故圖 2(b) 為國泰航空波音 747-400 機型經濟艙座位示意圖；圖 2(c) 則是經本研究簡化過後的國泰航空波音 747-400 機型經濟艙座位示意圖。



資料來源：(a)國泰航空公司網頁^[8]，<http://www.cathaypacific.com/>。
(b)和(c)本研究。

圖 2 實際國泰航空波音 747-400 機型經濟艙座位和模擬示意圖

以圖 2(c) 之座位排列來看，左側座位之“A”表窗邊的座位，“B”表中間的座位，“C”表靠走道的座位；右側座位之“D”表靠走道的座位，“E”表靠邊的座位。圖 1(c)中每列有 3 排座位之區域，經旅客登機就座方式的排列組合後，會產生三類共 20 種座位干擾狀況，van den Briel 等人^[2]依座位干擾組合和參數值之不同歸類成 12 種座位干擾，本研究整理如下表 2 所示。此外，由於廣體客機波音 747-400 機型之座位，右側只有 2 排座位，所以原先 van den Briel 等人^[2]針對 AirBus A320 機型右側 3 排座位的座位干擾和參數值皆不適用，而需以 2 排座位來看。故波音 747-400 機型之右側 2 排的座位干擾有兩種狀況，本研究修改如表 3 所示。

表 2 三排座位干擾分類表

		登機方式排列組合 ("[]")內表就座旅客；"→"表就座順序)	座位干擾組合	對應 參數	對應 參數 ^[2]	所對應 參數值 ^[2]
每 列 有 三 排 座 位	第一類	<u>3 個旅客同時就座：</u> 有 $3!=6$ 種就座方式；扣除不會產生座位干擾的狀況[A,B,C]；總共會產生 5 種座位干擾	[A, C, B] [C, A, B] [C, B, A] [B, A, C] [B, C, A]	S1	λ_1^s	1.5
	第二類	<u>2 個旅客先就座，另 1 個旅客後就座：</u> 有 $2(2 \text{ 種組合}) \times 3(3 \text{ 種位置})=6$ 種就座方式；扣除不會產生座位干擾的狀況[A,B] → [C]；共會產生 5 種座位干擾	[B, A]→[C]	S2	λ_2^s	0.5
			[A, C]→[B] [C, A]→[B]	S3	λ_3^s	1.5
			[B, C]→[A] [C, B]→[A]	S4	λ_4^s	2.5
		<u>1 個旅客先就座，另 2 個旅客後就座：</u> 有 $3(3 \text{ 種位置}) \times 2(2 \text{ 種組合})=6$ 種就座方式；扣除不會產生座位干擾的狀況[A]→[B,C]；共會產生 5 種座位干擾	[A]→[C, B]	S5	λ_5^s	0.5
			[B]→[A, C] [B]→[C, A]	S6	λ_6^s	1.5
			[C]→[A, B] [C]→[B, A]	S7	λ_7^s	2.5
	第三類	<u>3 個旅客依序就座：</u> 有 $3!=6$ 種就座方式；扣除不會產生座位干擾的狀況[A]→[B]→[C]；總共會產生 5 種座位干擾	[A]→[C]→[B]	S8	λ_8^s	1
			[B]→[A]→[C]	S9	λ_9^s	1
			[B]→[C]→[A]	S10	λ_{10}^s	2
			[C]→[A]→[B]	S11	λ_{11}^s	2
			[C]→[B]→[A]	S12	λ_{12}^s	3

資料來源：本研究整理和 van den Briel 等人^[2]。

表 3 二排座位干擾分類表

		登機方式排列組合 ("[]")內表就座旅客；"→"表就座順序)	座位干擾組合	對應 參數	所對應 參數值
每 列 有 二 排 座 位	第四類	<u>2 個旅客同時就座：</u> 有 $2!=2$ 種就座方式；扣除不會產生座位干擾的狀況[E,D]；總共會產生 1 種座位干擾	[D,E]	S13	0.5
		<u>2 個旅客依序就座：</u> 有 $2!=2$ 種就座方式；扣除不會產生座位干擾的狀況[E]→[D]；總共會產生 1 種座位干擾	[D]→[E]	S14	1

資料來源：本研究。

茲將上述四類共 22 種座位干擾詳細說明如下：

(一) 第一類座位干擾：

(S1) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 A、B、C 的旅客同時一起就座，因此可能會產生：(1) A 先就座，然後 C 就座，B 的旅客再就座，而 C 必須起身的座位干擾 ([A, C, B])；(2) C 先就座，使得 B 或 A 的旅客再就座，而 C 或 B 必須起身的座位干擾 ([C, A, B] 和 [C, B, A])；或(3) B 先就座，C 或 A 的旅客再就座，而 B 或 C 必須起身的座位干擾 ([B, A, C] 和 [B, C, A])，共 5 種座位干擾情況。對應參數為 λ_1^s ，其參數值為 1.5。

(二) 第二類座位干擾：

(S2) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 A、B 的旅客一起先就座，然後座位號碼為 C 的旅客就座，就可能產生：B 先就座，然後 A 就座，最後 C 就座，而 A 必須起身的座位干擾 ([B, A] \rightarrow [C])。對應參數為 λ_2^s ，其參數值為 0.5。

(S3) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 A、C 的旅客一起先就座，然後座位號碼為 B 的旅客就座，就可能產生：(1) A 先就座，然後 C 就座，最後 B 就座，而 C 必須起身的座位干擾 ([A, C] \rightarrow [B])；(2) C 先就座，然後 A 就座，最後 B 就座，而 A 必須起身的座位干擾 ([C, A] \rightarrow [B])，共 2 種座位干擾情況。對應參數為 λ_3^s ，其參數值為 1.5。

(S4) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 B、C 的旅客一起先就座，然後座位號碼為 A 的旅客再就座，因此可能會產生：(1) B 先就座，然後 C 就座，最後 A 就座，而 B 和 C 必須起身的座位干擾 ([B, C] \rightarrow [A])；或(2) C 先就座，然後 B 就座，最後 A 就座，而 B 和 C 必須起身的座位干擾 ([C, B] \rightarrow [A])，共 2 種座位干擾的情況。對應參數為 λ_4^s ，其參數值為 2.5。

(S5) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 A 的旅客先就座，然後座位號碼為 B 和 C 的旅客在一起就座，因此可能會產生：A 先就座，然後 C 就座，最後 B 就座，而 C 必須起身的座位干擾 ([A] \rightarrow [C, B])。對應參數為 λ_5^s ，其參數值為 0.5。

(S6) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 B 的旅客先就座，然後座位號碼為 A 和 C 的旅客再一起就座，因此可能會產生：(1) B 先就座，然後 A 就座，最後 C 就座，而 B 必須起身的座位干擾 ([B] \rightarrow [A, C])；或(2) B 先就座，然後 C 就座，最後 A 就座，而 B 和 C 必須起身的座位干擾 ([B] \rightarrow [C, A])，共 2 種座位干擾的情況。對應參數為 λ_6^s ，其參數值為 1.5。

(S7) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 C 的旅客先就座，然後座位號碼為 A 和 B 的旅客在一起就座，因此可能會產生：(1) C 先就座，然後 A 就座，最後 B 就座，而 C 必須起身的座位干擾 ([C] \rightarrow [A, B])；或(2) C 先就座，然後 B 就座，最後 A 就座，而 C 和 B 必須起身的座位干擾 ([C] \rightarrow [B, A])，共 2 種座位干擾的情況。對應參數為 λ_7^s ，其參數值為 2.5。

(三) 第三類座位干擾：

(S8) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 A 的旅客先就座，然後座位號碼為 C 的旅客再就座，最後座位號碼為 B 的旅客就座，因此可能會產生：A 先就座，然後 C 就座，最後 B 就座，而 C 必須起身的座位干擾 ([A]→[C]→[B])。對應參數為 λ_8^s ，其參數值為 1。

(S9) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 B 的旅客先就座，然後座位號碼為 A 的旅客再就座，最後座位號碼為 C 的旅客就座，因此可能會產生：B 先就座，然後 A 就座，最後 C 就座，而 B 必須起身的座位干擾 ([B]→[A]→[C])。對應參數為 λ_9^s ，其參數值為 1。

(S10) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 B 的旅客先就座，然後座位號碼為 C 的旅客再就座，最後座位號碼為 A 的旅客就座，因此可能會產生：B 先就座，然後 C 就座，最後 A 就座，而 B 和 C 必須起身的座位干擾 ([B]→[C]→[A])。對應參數為 λ_{10}^s ，其參數值為 2。

(S11) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 C 的旅客先就座，然後座位號碼為 A 的旅客就座，最後座位號碼為 B 的旅客就座，可能產生：C 先就座，然後 A 就座，最後 B 就座，而 C 必須起身的座位干擾 ([C]→[A]→[B])。對應參數為 λ_{11}^s ，其參數值為 2。

(S12) 左側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 C 的旅客先就座，然後座位號碼為 B 的旅客再就座，最後座位號碼為 A 的旅客就座，因此可能會產生：C 先就座，然後 B 就座，最後 A 就座，而 C 和 B 必須起身的座位干擾 ([C]→[B]→[A])。對應參數為 λ_{12}^s ，其參數值為 3。

(四) 第四類座位干擾：

(S13) 右側同列座位中、同一登機群組、座位號碼為 D、E 的旅客同時一起就座，所以會產生 [E,D] 的座位干擾情況。即座位號碼為 E 的旅客先就座，然後座位號碼為 D 的旅客再就座，因此會產生：E 先就座，然後 D 就座，而 E 必須起身的座位干擾。其參數值的計算方式如下：

$$\lambda_{13}^s = 1 \text{ (起身 1 次的參數值)} \times 0.5 \text{ (機率)} + 0 \text{ (沒有起身的參數值)} \times 0.5 \text{ (機率)} = 0.5$$

(S14) 右側同列座位、同一登機群組、座位號碼為 E 的旅客先就座，然後座位號碼為 D 的旅客再就座，因此會產生 [E]→[D] 的座位干擾情況。即 E 先就座，然後 D 就座，而 E 必須起身的座位干擾。其參數值的計算方式如下：

$$\lambda_{14}^s = 1 \text{ (起身 1 次的參數值)} \times 1 \text{ (機率)} = 1$$

2.1.2 走道干擾

「走道干擾」是指當登機旅客放置行李到頭上的置物箱時，會占住走道而擋到後方前

進的登機旅客而造成的干擾而言。在實務上，航空公司通常會將旅客分批來登機，並不會同時登機。所以在考慮走道干擾的情況時，會以登機旅客在同一登機群組或不在同一登機群組兩種情境來加以假設。

若登機旅客在同一登機群組，則會產生 (A1) ~ (A3) 三種狀況的走道干擾；若登機旅客不在同一登機群組，則會產生 (A4) ~ (A6) 三種狀況的走道干擾，總共有下列六種走道干擾，其對應之參數值如表 4 所示：

- (A1) 相同登機群組之情況下、同列同側，所產生的走道干擾；
- (A2) 相同登機群組之情況下、同列不同側，所產生的走道干擾；
- (A3) 相同登機群組之情況下、不同列，所產生的走道干擾；
- (A4) 不同登機群組之情況下、同列同側（或右側），所產生走道干擾；
- (A5) 不同登機群組之情況下、同列不同側（或右側）優先登機，產生走道干擾；
- (A6) 不同登機群組之情況下、不同列，所產生的走道干擾。

表 4 走道干擾之對應參數值表

走道干擾	對應參數 ^[2]	說明	參數值 ^[2]
A1, A2, A3	$\lambda_1^a, \lambda_2^a, \lambda_3^a$	同一登機組別內之干擾	$\frac{1}{S_1}$
A4, A5, A6	$\lambda_4^a, \lambda_5^a, \lambda_6^a$	不同登機組別間之干擾	$\frac{1}{S_1 S_2}$

(註： S_1 和 S_2 皆為登機組別的人數)

資料來源：本研究整理。

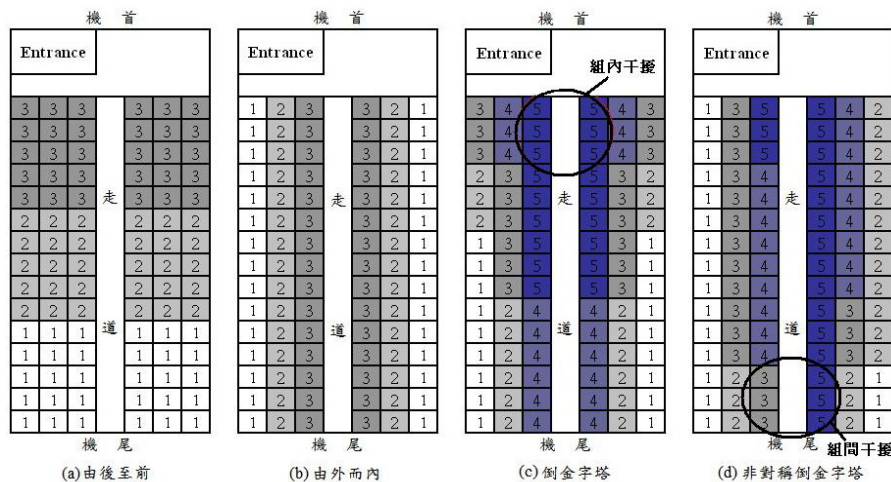
2.2 登機策略

傳統相關文獻中所提及的登機策略分別是：由後至前 (BF)、由外而內 (OI) 及倒金字塔 (RP) 三種；本研究則針對廣體客機的座艙設計特性和上述傳統三種登機策略的缺點，提出「非對稱倒金字塔型 (ARP)」登機策略。上述四種登機策略示意圖如圖 3 所示。圖 3 以 AirBus A320 之經濟艙（中間為走道，左、右兩側各 3 排座位）為簡例來說明上述四種不同登機策略下的登機方式。圖 3 中不同之數字代表不同之登機順序。「1」代表最先登機之旅客，「2」代表其次登機之旅客，其餘則以此類推。將四種登機策略的進行方式和特性，分述如下。

1. 由後至前 (back-to-front, BF) 的登機策略

此種型態即是一般航空公司傳統所採用的登機方式。此法是在頭等艙和商務艙的旅客登機後，再安排經濟艙的旅客按照座位最後面一排一直坐到最前面一排的順序來登機。其邏輯是減少前方旅客在走道上所形成的阻礙，使得前往後方就坐的旅客得以前進。然而這

種由後至前的座位順序雖不會造成走道上的干擾，但會使得同組的旅客因為就座次序的不同而不方便就座，因而產生座位干擾。若以圖 3 為例，圖 3(a)表由後至前(BF)登機策略，表示旅客從機尾朝機首方向依序登機。



資料來源：本研究。

圖 3 不同登機策略示意圖

2. 由外而內 (outside-inside, OI) 的登機策略

此種型態的登機方式為：由擁有窗邊座位的旅客先登機，接著是中間座位的旅客登機，而靠近走道位置的旅客最後才登機的順序來就座。此種登機方式雖不會造成座位的干擾，但卻有可能會出現因為擺放行李所造成的走道干擾。以圖 3 為例，圖 3(b) 表由外而內 (OI) 登機策略，表示旅客由窗戶朝走道方向依序登機，可避免座位干擾之產生。

3. 倒金字塔型 (reverse pyramid, RP) 的登機策略

此種登機方式為 van den Briel 等人^[2]所提出，結合上述兩種登機策略的優點，以依循由外而內、由後至前的規則進行登機。所以不會產生靠走道的旅客先坐，窗邊、中間座位的旅客到達座位時，靠走道之旅客必須起身讓裡面座位旅客進入的座位干擾；且可減少登機過程中旅客同時進入同一列座位時，因擺放行李所造成的走道干擾。以圖 3 為例，圖 3(c) 為倒金字塔型 (RP) 登機策略，旅客依循由外而內、由後至前之方式依序登機，也可避免座位干擾之產生且可比 OI 登機策略減少走道干擾。

4. 非對稱倒金字塔型 (asymmetric reverse pyramid, ARP) 的登機策略

此種登機方式為本研究首先提出，其登機方式跟上述的倒金字塔型的登機方式類似。但本研究認為：(1) van den Briel 等人^[2]的倒金字塔型登機策略，雖不會產生座位干擾，但還是會產生走道干擾的現象；(2) 由於不同機型座艙的排列方式和登機組別人數不均等因

素不盡相同的緣故，所以並不能保證能規劃出完全的倒金字塔型登機方式。故，基於上述兩項原因，本研究設計出「非對稱倒金字塔型 (ARP)」的登機策略。其主要概念也是遵循由外而內、由後至前的規則進行登機，但是會利用非對稱型的登機方式，來避開倒金字塔型登機策略（完全對稱型登機方式）會產生同一登機組別走道干擾的狀況（同一登機群組所產生的干擾值大於登機旅客不在同一登機群組所產生的干擾值），藉此再有效降低走道干擾的因素，而使得整個登機流程更加順暢。以圖 3 為例，圖 3(d) 則為非對稱倒金字塔型 (ARP) 登機策略，也是依循由外而內、由後至前方式登機，但是透過非對稱的排列方式，避免產生同一登機組別走道干擾的狀況，藉此減少干擾值。（組內之走道干擾值大於組間之走道干擾值）。

三、廣體客機旅客登機問題模式

本節延伸 van den Briel 等人^[2]之非線性整數規劃模式，針對廣體客機座艙的座位安排，構建其旅客登機問題模式；由於數學模式屬於非線性整數規劃模式且其目標式為平方 (quadratic) 和立方 (cubic) 式。故此類問題已被歸類為 NP-hard 問題，具有求解時間冗長和困難的特性，極不易求取該模式之最佳解 (exact solution)。因此在第 3 小節設計小型例題加以測試，求取最佳解來驗證本研究數學模式之正確性，並當作往後實際個案計算干擾值時，登機策略評估比較的基礎。內容分述如下。

3.1 廣體客機旅客登機問題之非線性整數規劃模式

茲以國泰航空波音 747-400 機型為例構建數學模式，對廣體客機旅客登機問題進行探討。本研究以 2.1.1 小節圖 2(c) 為例，進行數學模式構建。數學列式如下：

3.1.1 數學列式

廣體客機旅客登機問題之非線性雙元整數規劃模式相關之集合、參數、決策變數、目標式、限制式敘述如下：

1. 集合：

N ：飛機座位列數量的集合；

M ：飛機座位位置的集合；

（以國泰航空波音 747-400 型之經濟艙來說，則 $M = \{A, B, C, D, E\}$ ）

L ：表飛機走道左側的座位；

（以國泰航空波音 747-400 型之經濟艙來說，則 $L = \{A, B, C\}$ ）

R ：表飛機走道右側的座位；

（以國泰航空波音 747-400 型之經濟艙來說，則 $R = \{D, E\}$ ）

G ：表旅客登機時分組數量的集合。

2. 參數：

i ：表旅客座位所在的列數， $i \in N$ ；

j ：表旅客座位的位置， $j \in M$ ；

k ：表旅客登機時所在的分組， $k \in G$ ；

λ_s ：表旅客登機過程時座位干擾的期望參數值；

($\lambda_1^s \sim \lambda_{14}^s$ 代表 14 種座位干擾參數。其詳細所對應之參數值請參閱表 2 和表 3)

λ_a ：表旅客登機過程時走道干擾的期望參數值。

($\lambda_1^a \sim \lambda_6^a$ 代表 6 種走道干擾參數。其詳細所對應之參數值請參閱表 4)

3. 決策變數：

x_{ijk} ：若旅客座位 (i, j) 分配到第 k 組的話，則 $x_{ijk} = 1$ ；反之， $x_{ijk} = 0$ 。對所有的 $i \in N, j \in M$, and $k \in G$ 。

依據上述之數學符號，本研究廣體客機旅客登機問題之非線性雙元整數規劃模式的數學定式 (formulation) 如下：

$$\text{Minimize } Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (1)$$

其中，

$$\begin{aligned} Z_1 = & \lambda_1^s \sum_{i \in N} \sum_{k \in G} x_{iAk} x_{iBk} x_{iCk} + \lambda_2^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iAk} x_{iBk} x_{iCl} + \lambda_3^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iAk} x_{iBl} x_{iCk} \\ & + \lambda_4^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iAl} x_{iBk} x_{iCk} + \lambda_5^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iAk} x_{iBl} x_{iCl} + \lambda_6^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iAl} x_{iBk} x_{iCl} \\ & + \lambda_7^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iAl} x_{iBl} x_{iCk} + \lambda_8^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l, m \in G: k < l < m} x_{iAk} x_{iBm} x_{iCl} \\ & + \lambda_9^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l, m \in G: k < l < m} x_{iAl} x_{iBk} x_{iCm} + \lambda_{10}^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l, m \in G: k < l < m} x_{iAm} x_{iBk} x_{iCl} \\ & + \lambda_{11}^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l, m \in G: k < l < m} x_{iAl} x_{iBm} x_{iCk} + \lambda_{12}^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l, m \in G: k < l < m} x_{iAm} x_{iBl} x_{iCk} \end{aligned} \quad (1a)$$

$$Z_2 = \lambda_{13}^s \sum_{i \in N} \sum_{k \in G} x_{iDk} x_{iEk} + \lambda_{14}^s \sum_{i \in N} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iDk} x_{iEl} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} Z_3 = & \lambda_1^a \sum_{i \in N} \sum_{u, v \in L: v \neq u} \sum_{k \in G} x_{iuk} x_{ivk} + \lambda_1^a \sum_{i \in N} \sum_{u, v \in R: v \neq u} \sum_{k \in G} x_{iuk} x_{ivk} \\ & + 2\lambda_2^a \sum_{i \in N} \sum_{u, v \in M: u \neq L, v \in R} \sum_{k \in G} x_{iuk} x_{ivk} + \lambda_3^a \sum_{a, b \in N: a < b} \sum_{u, v \in M} \sum_{k \in G} x_{auk} x_{bvk} \\ & + \lambda_4^a \sum_{i \in N} \sum_{u, v \in R} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iuk} x_{ivl} + \lambda_4^a \sum_{i \in N} \sum_{u, v \in L} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iuk} x_{ivk} + \lambda_5^a \sum_{i \in N} \sum_{u \in L, v \in R} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{iuk} x_{ivl} \\ & + \lambda_5^a \sum_{i \in N} \sum_{u \in R, v \in L} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{ivk} x_{iul} + \lambda_6^a \sum_{a, b \in N: a < b} \sum_{u, v \in M} \sum_{k, l \in G: k < l} x_{auk} x_{bvl} \end{aligned} \quad (1c)$$

Subject to

$$\sum_{k \in G} x_{ijk} = 1 \text{ for all } i \in N, j \in M \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M} x_{ijk} \geq C_{\min} \text{ for all } k \in G \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M} x_{ijk} \leq C_{\max} \text{ for all } k \in G \quad (4)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \text{ for all } i \in N, j \in M, k \in G \quad (5)$$

目標式 (1) 的部分， Z 為最小化總干擾值。其中，目標式 (1a) 表三排座位會產生的 12 種座位干擾加總；目標式 (1b) 則為廣體客機二排座位所需的座位干擾加總；而目標式 (1c) 則為走道干擾加總。限制式的部分，式 (2) 代表每一個座位僅能被指派到一個組別；式 (3) 及式 (4) 則代表一個登機組別的人數下限與上限；式 (5) 則代表 x_{ijk} 為 0-1 整數雙元變數。

3.1.2 討論

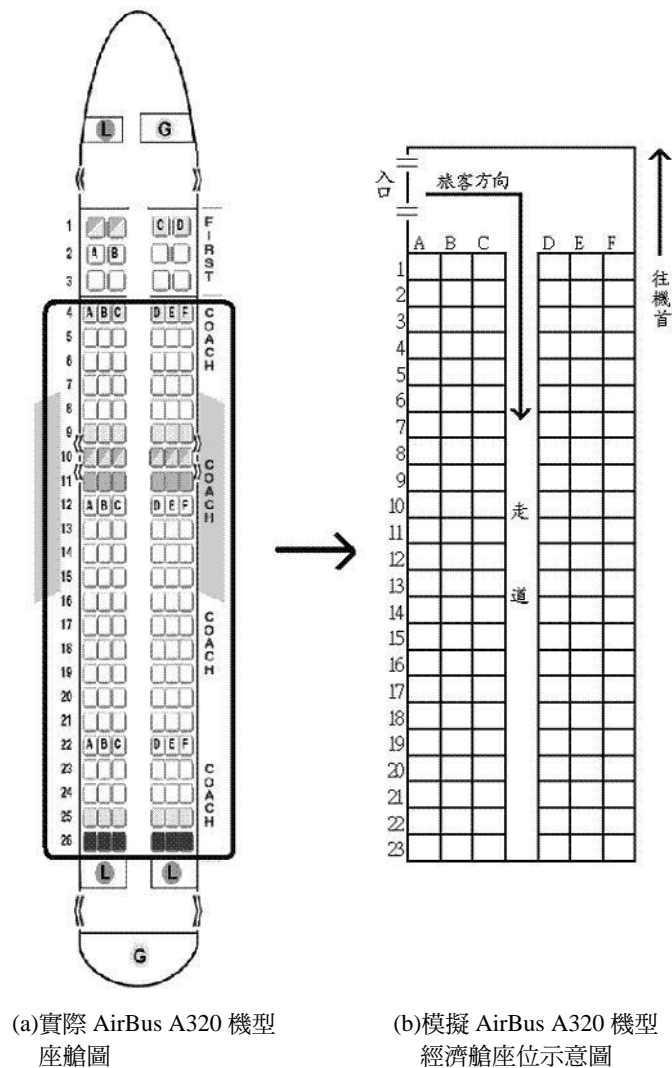
由於非線性雙元整數規劃模式在應用上，直接求解困難；且實務問題之規模又更大，所以 van den Briel 等人^[2]雖有建立其數學模式，但實際上是採取一解析性的方法來進行登機策略的比較分析。故為了驗證數學模式之正確性，本研究將透過設計小型測試例題的方式來求取其最佳解，以了解模式所能求得之最佳登機策略，並從中獲取登機策略研擬的靈感和雛型，來當作往後不同登機策略比較分析的對照基礎。

3.2 模式驗證

3.2.1 小型測試例題說明

為驗證本研究數學模式之正確性，本小節將透過 3.1 節廣體客機旅客登機問題之非線性雙元整數規劃模式，以國泰航空波音 747-400 機型為例，來設計小型測試例題以進行模式驗證；且亦根據 van den Briel 等人^[2]之 Airbus A320 (窄體客機) 模式，以 Airbus A320 機型之經濟艙為例，設計小型測試例題來進行比較。

廣體客機國泰航空波音 747-400 機型示意圖如圖 2 所示。本研究國泰航空波音 747-400 機型小型測試例題之規模為 3 至 7 列 ($N = 3 \sim 7$)；左側三排座位，右側二排座位 ($N = 5$)；登機組數為 2 至 4 組 ($G = 2 \sim 4$)。此外，單走道窄體客機 Airbus A320 經濟艙內的座位分配示意圖如下圖 4。圖 4(a) 為實際 Airbus A320 機型的座艙圖；圖 4(b) 為模擬 Airbus A320 機型經濟艙座位示意圖。其 Airbus A320 小型測試例題之規模為 3 至 7 列 ($N = 3 \sim 7$)；左側三排座位，右側三排座位 ($M = 6$)；登機組數為 2 至 4 組 ($G = 2 \sim 4$)。



資料來源：(a) Mobile.SeatGuru.com^[9]，<http://mobile.seatguru.com/>。
(b) 本研究。

圖 4 實際 Airbus A320 機型經濟艙座位和模擬示意圖

3.2.2 測試結果

本小節依據 3.2.1 小節之小型例題，配合本研究發展之非線性整數規劃模式，以 C++ 程式語言來模式化問題，並利用 LINGO 套裝軟體進行最佳化求解。國泰航空波音 747-400 與 Airbus A320 機型之小型例題之最佳解結果如表 5 和表 6 所示。茲將兩種機型小型測試例題最佳解中總干擾值最小（表 5 和表 6 中打*者）的登機型態繪製成圖 5 所示。

表 5 國泰航空波音 747-400 (廣體機型) 小型例題最佳解結果表

組數 (G)	列數 (N)	最佳解	登機策略型態
2	3	10.2009	非對稱型倒金字塔
	4	13.12	非對稱型倒金字塔
	5	16.1192	非對稱型倒金字塔
	6	19.0830	非對稱型倒金字塔
	7	22.0759	非對稱型倒金字塔
3	3	8.92*	非對稱型倒金字塔
	4	11.3475	非對稱型倒金字塔
	5	13.7376	非對稱型倒金字塔
	6	16.18	非對稱型倒金字塔
	7	18.6565	非對稱型倒金字塔
4	3	9.5649	非對稱型倒金字塔
	4	11.72	非對稱型倒金字塔
	5	14.1696	非對稱型倒金字塔
	6	16.5593	非對稱型倒金字塔
	7	19.0232	非對稱型倒金字塔

表 6 Airbus A320 (窄體機型) 小型例題最佳解結果表

組數 (G)	列數 (N)	最佳解	登機策略型態
2	3	12.1632	由外而內
	4	15.0578	由外而內
	5	19.102	由外而內
	6	22.6011	由外而內
	7	26.0708	由外而內
3	3	11.0034*	由外而內
	4	13.872	由外而內
	5	16.8	由外而內
	6	19.7316	由外而內
	7	22.7052	由外而內
4	3	11.7534	非對稱型倒金字塔
	4	14.477	非對稱型倒金字塔
	5	17.2618	非對稱型倒金字塔
	6	20.1245	非對稱型倒金字塔
	7	23.0748	非對稱型倒金字塔

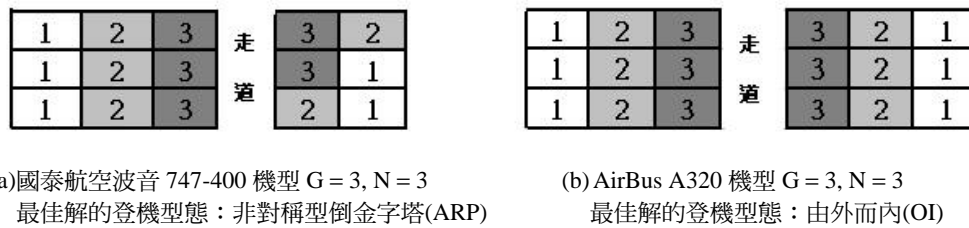


圖 5 兩種機型小型例題最佳解中總干擾值最小的登機型態

3.2.3 測試結果分析

觀察 3.2.2 小節之小型測試例題結果進行比較分析，可歸納出下列幾點：

1. 綜合上述所言，本研究所建立之非線性整數規劃模式，確實能求取旅客登機策略問題之最佳解，可驗證本研究數學模式之正確性。
2. 由國泰航空波音 747-400 機型小型例題最佳解結果表（如表 5 所示）可發現：在不同登機組數和列數下的最佳解中，總干擾值最小者發生在登機組數為 3 組（ $G = 3$ ）時，所對應之登機策略皆為「非對稱倒金字塔型（ARP）」策略。原因在於廣體機型之座艙設計為左側三個座位，右側二個座位，所以登機組數無法像 Airbus A320 機型（左右兩側皆 3 排座位）恰可將每組平均分配於左、右兩側的同一排中。而登機組數為 3 組恰可將每組平均分配於左側的 3 排座位中，故最佳解中總干擾值最小者是發生在登機組數為 3 組時。
3. 再觀察 Airbus A320 機型小型例題最佳解結果表（如表 6 所示）可發現：最佳解中總干擾值最小者，也發生在登機組數為 3 組（ $G = 3$ ）時，所對應之登機策略為「由外而內（OI）」策略。其原因為 Airbus A320 機型左右兩側各有三排座位（如 2.1 小節之圖 1 所示），故登機組數為 3 時，恰可將每組皆平均分配於左、右兩側的同一排中，因而完全不會產生座位干擾。
4. 另外由 LINGO 最佳化國泰航空波音 747 機型和 Airbus A320 機型之小型測試例題的過程中發現，因為座位干擾的懲罰值大於走道干擾的懲罰值，故最佳解之總干擾值大部分由走道干擾所構成。而「非對稱倒金字塔型」策略，因為依循由外而內、由後至前的規則進行登機分組，所以不會產生靠走道的旅客先坐，窗邊、中間座位的旅客到達座位時，靠走道之旅客必須起身讓裡面座位旅客進入的座位干擾，且可減少登機過程中旅客因擺放行李所造成的走道干擾，因此擁有較低的總干擾值。因此，除了 Airbus A320 機型在登機組數為 2 和 3 組時恰可將每組皆平均分配於左、右兩側之外，當登機組數超過三組時，國泰航空波音 747 機型與 Airbus A320 機型之最佳登機策略皆為「非對稱倒金字塔型」。
5. 由上述幾點結論可發現，「非對稱型倒金字塔（ARP）」登機策略，在國泰航空波音 747-400 機型和 Airbus A320 機型小型測試例題中，最佳登機型態大部分為「非對稱倒金字塔型（ARP）」登機策略。

四、登機策略比較分析

由於登機問題之數學模式複雜，若以實際機型之問題規模來進行最佳化求解，其變數和限制式將多達上萬，求解時間勢必過長，極不易求解。故本研究亦建立 Airbus A320 登機問題模式，透過文獻中所提到的登機策略（由後至前 BF、由外而內 OI 及倒金字塔型 RP）和本研究所提出之非對稱倒金字塔型（ARP）登機策略，計算廣體客機波音 747-400 和窄體客機 Airbus A320 兩種機型不同登機策略下的干擾值，以比較分析其優劣。本節先針對個案機型進行不同登機策略干擾值之計算，並對結果作分析與探討；另外，為了解座位與走道干擾所對應之參數值對於不同登機策略之影響，4.2 小節設計 2 種情境進行敏感度分析與探討。各節內容分述如下：

4.1 不同登機策略結果比較分析

本研究不同登機策略比較分析所採用的實際個案，以國泰航空波音 747-400 和 Airbus A320 機型為例。實際國泰航空波音 747-400 和 Airbus A320 機型經濟艙座位和模擬示意圖如圖 2 和圖 4 所示。

登機策略比較分析之求解工具為採用 ILOG OPL Studio 套裝軟體。ILOG OPL Studio 除可進行最佳化之運算外，還可進行試算之用。其技巧為利用本研究之數學模式為基礎，在程式中將不同登機策略所對應之運算式予以變數宣告，並附加相關限制式處理的方式來建立試算模式。此方法不但可運算各種不同策略下之干擾值總合，還具有節省於其他軟體重新構建模式之時間成本和快速進行運算求得答案之優點。

而本研究國泰航空波音 747-400 機型經濟艙之問題規模為：有 33 列座位數（座位列數量 $N = 33$ ）；左側三個座位，右側二個座位（座位行數量 $M = 5$ ）；Airbus A320 機型的經濟艙之問題規模為：有 23 列座位數（座位列數量 $N = 23$ ）；左右各有三排座位（座位行數量 $M = 6$ ）。登機組數方面，兩種機型皆假設為 3 組至 6 組（ $G = 3 \sim 6$ ）。四種登機策略（由後至前、由外而內、倒金字塔型和非對稱倒金字塔型）干擾值的計算結果如下表 7 所示。

由表 7 之不同登機策略下干擾值計算結果，分別針對國泰航空波音 747-400 和 Airbus A320 機型繪圖（如圖 6 和圖 7 所示）進行比較分析，可發現下列幾點結論：

1. 從圖 6 和圖 7 整體來看，本研究所提出之「非對稱倒金字塔型（ARP）」登機策略，在不同登機組數的計算結果中，不論是在廣體客機（國泰航空波音 747）或是窄體客機（Airbus A320）機型，都有最小的干擾值（除了 Airbus A320 在登機組數 $G = 3$ 時以外）。此模擬結果也與 3.2.3 小節小型例題最佳解的測試結果相符。顯示本研究干擾值計算結果正確且 ARP 登機策略確實有其應用潛力。

表 7 不同登機策略下干擾值計算結果表

		由後至前 (BF)	由外而內 (OI)	倒金字塔型 (RP)	非對稱倒金字塔型 (ARP)
登機組數 $G = 3$	波音 747-400	136.5870	90.2352	121.0904	83.4471
	AirBus A320	144.1254	70.4324	92.2499	79.3682
登機組數 $G = 4$	波音 747-400	154.5720	94.0698	115.8486	86.6238
	AirBus A320	146.4300	79.0519	71.4367	70.8508
登機組數 $G = 5$	波音 747-400	156.4455	85.0410	116.0541	83.7408
	AirBus A320	148.7124	79.9572	72.8608	71.584
登機組數 $G = 6$	波音 747-400	141.6726	91.6248	108.8460	84.1562
	AirBus A320	150.5052	73.7472	81.8688	72.7543

資料來源：本研究

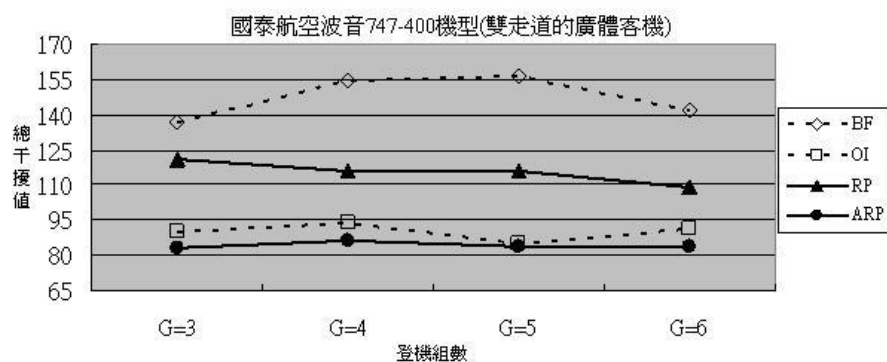


圖 6 國泰航空波音 747-400 機型之各策略計算結果圖

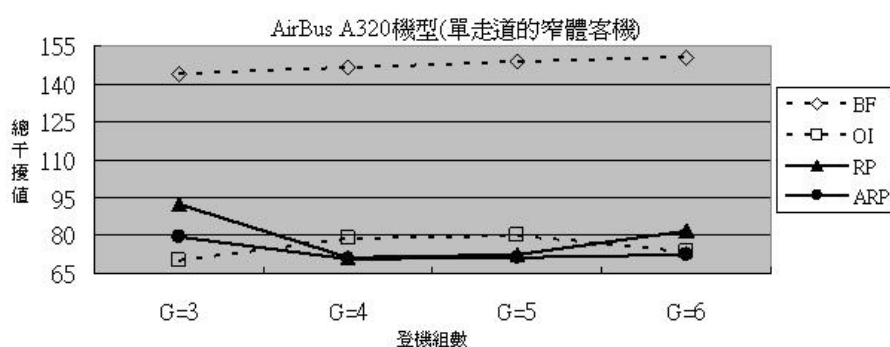


圖 7 AirBus A320 機型之各策略計算結果圖

2. 觀察圖 6 之四種登機策略，可清楚發現波音 747-400 機型之平均總干擾值從小至大的排序為 $ARP < OI < RP < BF$ 。由此可見本研究 ARP 登機策略在波音 747 機型（雙走道的廣體客機）之效果顯著。
3. 觀察圖 7 中 Airbus A320 之干擾值計算結果可發現：(1) 本研究之 ARP 策略之平均總干擾值依舊比其他三種策略來的低，顯示本研之 ARP 策略確實可比 RP 策略，可再有效降低走道干擾的因素，而使得整個登機流程更加順暢；(2) 其平均總干擾值從小至大的排序為 $ARP < RP < OI < BF$ ，故 RP 策略的平均總干擾值確實比 OI 和 BF 兩種登機策略來的低，此點與 van den Briel 等人^[2]文中的模擬結果一致。但 RP 策略（平均總干擾值 79.6）與 OI 策略（平均總干擾值 80.7）之差異甚小。可見 van den Briel 等人^[2]所提的 RP 策略在 Airbus A320 機型（單一走道的窄體客機）之效果並不是非常顯著。
4. 由上述第 2、3 點結論可發現：(1) 傳統 BF 策略不管是在何種機型，其總干擾值皆比其他三種登機策略來的高出許多，故最不建議採用；(2) 不同登機策略與不同機型座艙座位設計對於總干擾值的影響有密切關係，所以當航空公司考慮旅客登機策略問題時，應與其機型之座艙座位設計因素搭配考量。
5. 觀察圖 7，在登機組數 $G = 3$ 時，Airbus A320 機型的干擾值皆比其他三種登機策略來的小。此點也與先前 3.2.3 小節小型例題最佳解的測試結果：Airbus A320 機型在 3~7 列數下登機組數 $G = 3$ 時，最佳解對應之登機策略為「由外而內 (OI)」策略的結果符合且相互呼應。其原因為 Airbus A320 機型左右兩側各有三排座位，故登機組數 $G = 3$ 時，恰可將每組皆平均分配於左、右兩側的同一排中，因而不產生座位干擾。顯示本研究之干擾值計算結果正確，且可反應出登機組數和不同機型座艙座位設計對於干擾值的影響關係。
6. van den Briel 等人^[2]只針對單一走道的窄體客機 Airbus A320 機型之經濟艙進行模擬，結果顯示 RP 策略的總干擾值的確比傳統登機策略 (OI 和 BF 兩種登機策略) 來的低。但由於實務上存在不同機型有著不同的座艙座位設計之因素，加上登機組數設定不同所產生的影響 (上述第 5 點)，本研究從國泰航空波音 747-400 機型（雙走道的廣體客機）在不同登機組數下，四種登機策略干擾值計算結果發現，干擾值最小的登機策略為本研究所提出的 ARP 登機策略；但是 RP 策略的平均總干擾值卻比 OI 策略還高 (見圖 5 所示)，此點與 Airbus A320 機型的計算結果不同。顯示不同機型座艙座位設計對於不同登機策略干擾值確實有影響，此結果也是本文新研究發現之一。

4.2 不同懲罰參數值之敏感度分析

本研究所考量的登機干擾因素，主要為座位干擾和走道干擾兩項。此兩種干擾因素所對應的參數值，本文為參考過去文獻的資料來作相關運算和分析。然而為了解干擾參數值的改變是否會對登機策略造成影響，即登機策略的穩健性 (robustness)，本小節設計 2 種情境進行分析探討。

4.2.1 座位干擾參數 λ^s 之敏感度分析

放大座位干擾參數值的目的，在於了解「登機組別人數之多寡」，是否會影響航空旅客登機過程的順暢性。因此本研究將原先座位干擾參數值放大每組（平均分組）登機人數的十分之一倍（例：登機人數為 100 人，若分 4 組，則每組登機人數為 25 人，即放大 2.5 倍），再進行兩種機型不同登機策略干擾值的計算。結果如圖 8 和圖 9 所示。

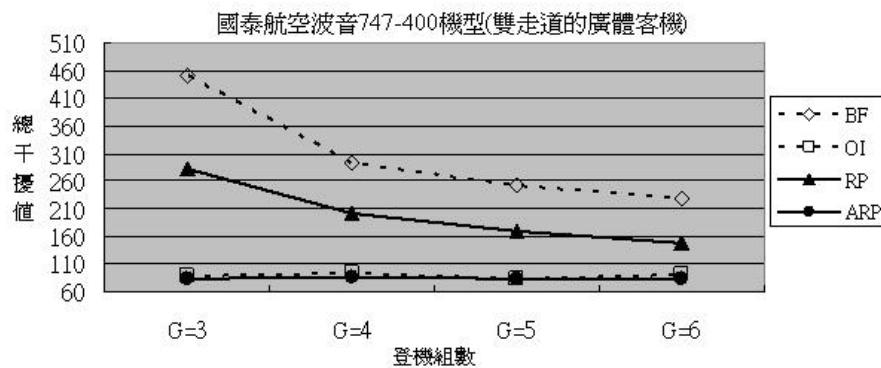


圖 8 放大座位干擾參數下國泰航空波音 747-400 機型各策略計算結果圖

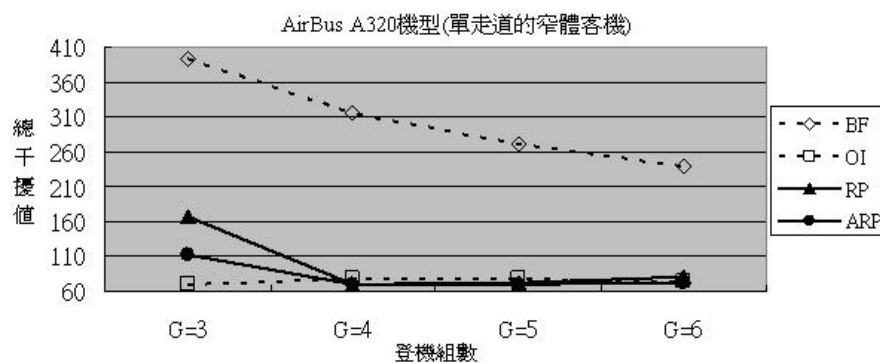


圖 9 放大座位干擾參數下 Airbus A320 機型之各策略計算結果圖

由圖 8 和圖 9 的整體趨勢可發現，由後至前的登機策略 (BF) 之總干擾值皆隨著登機組數的增加而下降。即登機組數越小，每組的登機人數會越多，因此會造成登機旅客因就座順序不同而需起身讓座的座位干擾情況產生的機率變大，所以總干擾值會比登機組數多（登機人數少）來的大。此點與實務上的登機狀況相符，也驗證了本模式之正確性。另外，由於 BF 登機策略會產生大量座位干擾，故會受到放大座位干擾參數值的影響最大；而非對稱倒金字塔型 (ARP) 登機策略幾乎不受影響，也驗證 ARP 登機策略之穩定性。

4.2.2 走道干擾參數 λ^a 之敏感度分析

由於走道干擾是指當登機旅客放置行李到頭上的置物箱時，會占住走道而擋到後方前進的登機旅客而造成的干擾。因此為了解當「航空旅客之行李增加」時，對登機策略之影響，本研究將走道干擾參數值放大 2 倍，進行兩種機型不同登機策略干擾值的計算。結果如圖 10 和圖 11 所示。

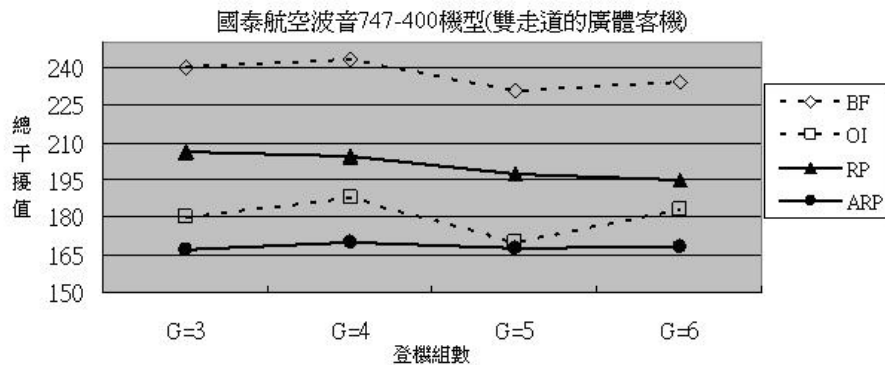


圖 10 放大走道干擾參數下國泰航空波音 747-400 機型各策略計算結果圖

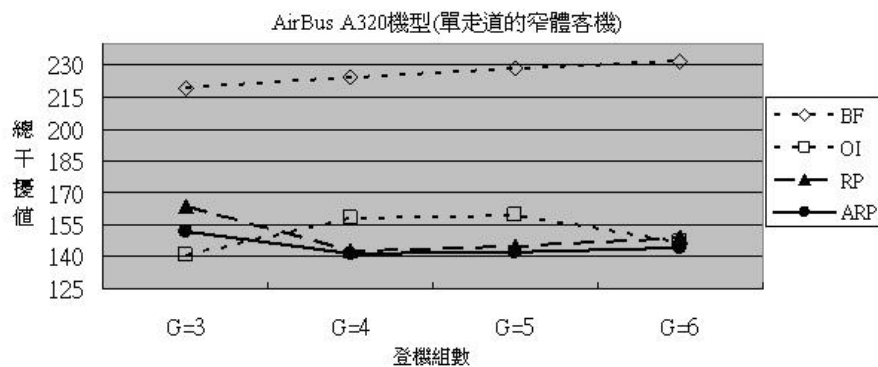


圖 11 放大走道干擾參數下 Airbus A320 機型之各策略計算結果圖

比較圖 10 和圖 6，以及圖 11 和圖 7 的整體趨勢可發現，不論是在廣體還是窄體機型，不同登機策略其總干擾值的趨勢走向，與原先無放大走道干擾參數值時的計算結果相近。再仔細觀察圖 10 廣體機型的計算結果發現，ARP 登機策略依舊是所有登機策略中總干擾值最小者，但與 RP 和 OI 登機策略間的差距變大，效果更加顯著。表示本研究 ARP 登機策略可不受放大走道干擾參數值之影響（即實務上登機旅客行李增加的情況），展現其實用性和應用潛力。

五、結論與建議

航空運輸產業由於其高科技、高成本的特性使然，不管是實務界還是學術領域皆致力於降低成本、提升服務品質等目標的達成。其中，成本的降低更是各家航空公司的主要目標。因此，如何有效減少營運成本的浪費，長久以來大眾的研究目標始終投注在人力和油料的成本方面。故有相當多的研究文獻著重在航空產業相關人員的排班、輪值和飛航排程方面。而相較於上述研究，本文針對廣體客機之旅客登機策略問題進行探討。本研究在問題面和方法論方面可獲致下列三點結論：

1. 本研究成功地針對廣體客機旅客登機問題構建非線性雙元整數規劃模式；並自行設計小型測試例題來求取最佳解以驗證本研究數學模式的正確性。另外，為便於評估實際個案機型不同登機策略之優劣，本研究亦利用模擬試算的方法來分析；結果顯示，本研究模擬試算模式可確實求解不同登機策略的總干擾值，並符合其問題特性。
2. 經最佳化小型例題的求解結果顯示：(1) 由於 Airbus A320 機型（單一走道的窄體客機）經濟艙左、右各三排對稱座位的設計，「由外而內 (OI)」的登機策略在登機組數為三組時，可讓旅客產生最小登機干擾的方式；(2) 在國泰航空波音 747 機型（雙走道的廣體客機）的小型例題測試結果中，最佳解皆為「非對稱型倒金字塔型 (ARP)」登機策略，此點恰驗證本研究 ARP 登機策略的可用性。
3. 另外，由不同登機策略比較分析結果也可發現：(1) 傳統「由後至前 (BF)」的登機方式，將會造成嚴重的座位干擾，而座位干擾的懲罰值又比走道干擾的懲罰值來的高，因此傳統 BF 登機策略最不建議使用；(2) 從廣體客機國泰航空波音 747-400 機型干擾值計算結果發現 RP 策略的平均總干擾值卻比 OI 策略還高，此點與 Airbus A320 機型的計算結果不同，顯示不同機型座艙座位設計對於不同登機策略的干擾值確實有所影響；(3) 本研究所提出的 ARP 登機策略，其平均總干擾值不論是在廣體或窄體客機中皆為最小，顯示 ARP 登機策略可不受不同機型座艙座位設計或不同登機組數等外在因素的影響，故確實比其他三種登機策略更佳，在實務的應用上也更有潛力和彈性。

除上述結論外，在未來研究方面，本研究數學模式係參考延用文獻 van den Briel 等人^[2]之座位干擾和走道干擾的參數值進行分析。後續研究應可針對不同機型的走道和座位狀況，以及不同機場的旅客特性（如：性別、年齡、體型或步行速度等），進行實際資料蒐集與分析，並建立登機策略之模擬模式，作進一步的探討。

參考文獻

1. 交通部民用航空局，中正國際機場網頁，「營運統計」，<http://www.cksairport.gov.tw/CKSchi/index.jsp>，民國九十五年。

2. van den Briel, Menkes H. L., Villalobos, J. R., Hogg, G. L., Lindemann, T., and Mule, A. V., "America West Airline Develops Efficient Boarding Strategies", *Interfaces*, Vol. 35, No. 3, 2005, pp. 191-201.
3. Marelli, S., Mattocks, G., and Merry, R., "The Role of Computer Simulation in Reducing Airplane Turn Time", *AERO Magazine* 1, 1998, Retrieved November 2002 from http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_01/textonly/t01txt.html#fig1.
4. Kimes, S. E. and Young, F., "The Shuttle by United", *Interface*, Vol. 27, No. 3, 1997, pp. 1-13.
5. Van Landeghem, H. and Beuselinck, A., "Reducing Passenger Boarding Times in Airplanes: A Simulation Based Approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 142, No. 2, 2002, pp. 294-308.
6. 張惇嘉、相元翰、王偉丞，「以 0-1 整數規劃法最佳化旅客登機策略」，國立交通大學運輸科技與管理系 95 級大學畢業專題（指導教授：韓復華），民國 95 年 1 月。
7. 彭皓偉，「登機加速-航空公司每年省三千萬」，*商業週刊*，第 940 期，民國九十四年，頁 164-165。
8. 國泰航空有限公司，國泰航空公司網頁，「747-400 Standard 座位表」，<http://www.cathaypacific.com/cpa/contentjps/seatmap.jsp>，民國九十五年。
9. Mobile.SeatGuru.com, "Airbus A320", <http://mobile.seatguru.com/>, 2006.