

應用區塊等候於機場航機起飛延滯管理之研究

研究生：梁錦昌

指導教授：許巧鶯

國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班

摘 要

近年來，國際油價的逐年上漲不但造成航空公司燃油成本的增加，更導致整體航空運輸產業營運環境日趨嚴峻，如何降低航機燃油損耗紓緩航空公司艱難之營運處境已成為重要的探討議題。另外，過去針對航機起飛延滯進行探討之研究雖證實航機地面等候策略應用於擁擠機場之可行性，但進一步依據航機操作特性，探討其機場延滯指派策略之研究卻付諸闕如。有鑒於都市交通研究中Dougherty(1997)利用區塊等候概念改善車隊燃油損耗狀況之車隊擁擠現象，與擁擠機場下起飛航機為等候使用跑道而形成之航機延滯情形極其相似；並且，航機於跑道旁停等區和機門停機坪之停等狀態亦符合區塊等候定義。本研究擬以結合區塊等候與燃油節省兩概念之研究方法探討擁擠機場中起飛航機之指派策略。

本研究模擬擁擠機場中起飛航機之空側地面移動及停等狀態，根據Dougherty(1997)將延滯車隊分區停等降低燃油損耗之概念，構建適用於起飛航機之區塊等候指派模式，分析航管單位採取連續指派與區塊等候之延滯成本差異。首先以擁擠機場航機接續起飛之概念，模擬並計算航機由機門滑行至跑道旁停等區之時間，以瞭解航機於跑道旁停等所耗之燃油成本；爾後，分析區塊等候指派下起飛航機停等於機門及跑道旁之情形，探討航機起飛延滯之影響範圍，同時，推估起飛航機面臨降落航機優先使用跑道下之起飛時間，以整合區塊等候指派模式，進一步構建起飛航機於機場空側地面之延滯對旅客、機場管理單位與航空公司所產生影響之延滯成本模式。

本研究蒐集中正國際機場南機坪發生擁擠之實際資料進行兩種指派之範例分析。結果顯示，於區塊等候策略下，航機燃油成本明顯低於連續指派之結果；且航管單位若能視機場航機起降情形，於跑道旁停等區指派適當之起飛航機停等可有效抑制旅客旅行時間增加，並可避免起飛航機因滑行距離差異導致之跑道空滯現象，及降低後續航班因前機佔用機門而停靠時間延後之窘境，同時達到降低航機燃油損耗之效益；另燃油價格波動對區塊等候之最適指派亦有極大影響。本研究之結果與機場跑道旁停等區之實務容量規劃一致，驗證本研究區塊等候模式之應用性。

Applying Block Queue On Airport Departure Flight Management

Student: Chin-Chang Liang

Advisor: Chaug-Ing Hsu

Department of (Institute) Transportation Technology and Management

National Chiao Tung University

ABSTRACT

With the fuel price soaring in the past years, it not only increases airlines' expenditure of fuel, but also aggravates the operation condition of airline industry. Therefore, how to ease airlines' financial difficulty by fuel-saving has become an import issue. In addition, most past studies about departure flight delay has proved the application of ground holding policy, but seldom concerned the assignment policy of departure flights in congestion airport according to the fuel consumption of aircrafts. The congestion situation and the operational status of aircrafts waiting at terminal apron and holding pad are similar as the block queue of cars waiting for service in the slow moving system by Dougherty (1997). Therefore this study aims to combine block queue concept and fuel-saving concept to formulate models on analyzing assignment policy for departure flights of the congested airport.

The aims of this study are to develop an aircraft assignment model based on the concept of block-queuing proposed by Dougherty (1997), so as to minimize departure flights' fuel cost in a congestion airport, and compare the difference of delay cost between block-queuing assignment and consecutive assignment. The study derives the time of each departure flight from apron to holding pad based on Air Traffic Control Rule assigning departure flights consecutively, and calculates the fuel cost of each flight due to taxing and waiting for departure. The study then explores the block-queuing conditions of departure flights according to the connective relations of flights' departure time to construct a block-queuing assignment model with considerations of various situations and decide whether a departure flight should wait at terminal apron or holding pad. Furthermore, the study formulates delay cost functions with respect to passengers, airline and airport operators.

The study collects data about the schedule of departure/arrival flights and the delay of departure flights in C.K.S International Airport to demonstrate the application of the model. The results show that block-queuing assignment method significantly reduces more fuel cost as compared with consecutive assignment method. It may increase the fuel-saving efficiency, while reduce airport operators' cost due to an idle runway and passengers' cost caused by delay in the congestion airport. Furthermore, the fuel price is shown to have significantly impacts on the assignment policy.

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
目 錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vi
符號說明.....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究範圍.....	4
1.4 研究流程與架構.....	6
第二章 文獻回顧.....	9
2.1 區塊等候之應用.....	9
2.2 流量管理之研究.....	12
2.3 航空延滯分析.....	13
2.4 機門指派之研究.....	15
2.5 航機移動及其相關研究.....	16
2.6 空側相關研究.....	17
第三章 區塊等候下航機起飛過程之模擬.....	21
3.1 連續指派之航機燃油損耗.....	21
3.2 降落航班的影響.....	23
3.3 延滯擴散衍生之起飛延滯航班.....	25
3.4 區塊等候下航機於空側地面之移動.....	27
3.5 區塊等候下，起飛延滯航機抵達跑道後，進入跑道時間之估算.....	32
3.6 區塊等候下，起飛航機空側移動之模擬.....	36
3.7 成本函數構建.....	39
第四章、範例分析.....	42
4.1 基本參變數設定.....	42
4.2 範例說明.....	43
4.3 機場管理單位連續指派之分析.....	46
4.3.1 連續指派下航機移動情況.....	46
4.3.2 連續指派下航機燃油成本.....	53
4.3.3 連續指派下後續航班機門停靠時間之分析.....	57

4.4 區塊等候下航機燃油損耗.....	61
4.4.1 區塊等候下航機移動情況.....	61
4.4.2 區塊等候下航機燃油成本及衍生成本.....	74
4.5 敏感度分析-延長機場關閉時長.....	79
第五章 結論與建議.....	84
5.1 結論.....	84
5.2 建議.....	85
參考文獻.....	86



圖目錄

圖 1.1 全球民航業燃油成本比重變化圖.....	1
圖 1.2 研究範圍.....	5
圖 1.3 研究流程圖.....	7
圖 1.4 研究架構圖.....	8
圖 2.1 都市延滯車隊區塊等候架構圖.....	10
圖 2.2 區塊等候概念示意圖.....	11
圖 3.1 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b > 0$ 且 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st} < T_{i-k,d}^b$ ，第 i 架航機之等候示意圖.....	30
圖 3.2 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b > 0$ 且 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st} \geq T_{i-k,d}^b$ ，第 i 架航機之等候示意圖.....	31
圖 3.3 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b = 0$ ，第 i 架航機之等候示意圖.....	31
圖 3.4 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b < 0$ ，第 i 架航機之等候示意圖.....	32
圖 3.5 區塊等候下航機起飛過程各時間之決策流程.....	38
圖 4.1 連續指派下各航班移動時間比較.....	52
圖 4.2 連續指派下各航班之空側地面停等時長.....	52
圖 4.3 連續指派下各航班於跑道旁停等之燃油成本及停等時長.....	54
圖 4.4 連續指派下各航班離開機門時間與後續航班停靠機門時間.....	58
圖 4.5 連續指派與區塊等候下停等區指派 1 架航機，各航班滑行時間之比較..	67
圖 4.6 區塊等候下停等區指派 1 架航機時，各航班於空側地面停等之時長.....	67
圖 4.7 不同指派量下各航班由機門開始滑行之時間比較.....	70
圖 4.8 區塊等候下各航班於機門額外停等之時長.....	71
圖 4.9 區塊等候下各航班於跑道旁停等之時長.....	72
圖 4.10 區塊等候下各航班因無法接續進入跑道以致於跑道空滯的時長.....	73
圖 4.11 區塊等候下停靠相同機門之後續航班被延誤的時長.....	73
圖 4.12 區塊等候下大型航機與重型航機之成本比較.....	76
圖 4.13 區塊等候下總成本之改善效益.....	76
圖 4.14 區塊等候下各項衍生成本之比例.....	78
圖 4.15 連續指派與區塊等候之延滯成本比較.....	78
圖 4.16 後續航班旅客延滯時間成本.....	81
圖 4.17 地勤人員超時作業工時成本.....	82
圖 4.18 跑道空滯成本.....	82
圖 4.19 航機地面空調與外部電源成本.....	82
圖 4.20 航機燃油成本.....	83
圖 4.21 總延滯成本.....	83
圖 4.22 成本改善效益.....	83

表目錄

表 2.1 航機作業分析研究特性與方法.....	19
表 2.1 航機作業分析研究特性與方法(續).....	20
表 3.1 不同起降型態下航機起飛之隔離標準.....	23
表 4.1 範例相關參數值.....	43
表 4.2 受機場暫時關閉影響之起飛航班資訊.....	44
表 4.3 後續航班停靠機門之資訊.....	45
表 4.4 中正國際機場南機坪，各機門至 06 跑道旁停等區之距離.....	46
表 4.5 連續指派下各航班之空側移動時間 (9:05, $T_{1,a}=0$).....	48
表 4.6 連續指派下起飛航機燃油成本.....	55
表 4.7 機門停靠時間被延誤之航班，可停靠機門之最早時間(9:05, $T_{1,a}=0$).....	57
表 4.9 推擠性延誤航班停靠機門資訊.....	58
表 4.8 連續指派下停靠相同機門之後續航機被延滯的時長 (9:05, $T_{1,a}=0$).....	59
表 4.10 區塊等候下指派 1 架航機至跑道旁停等時，各航班之空側移動時間....	62
表 4.11 區塊等候下指派 1 架航機至跑道旁停等時，對推擠性延誤航班之影響	66
表 4.12 連續指派與區塊等候之成本比較.....	77
表 4.13 不同關閉時長下各延誤類型之航機數.....	79
表 4.14 不同關閉時長下航班之起飛順序.....	80



符號說明

符 號	意 義
i	機場於 T_0 時間擁擠產生後，起飛延滯航機進入跑道起飛之順序
j	機場於 T_0 時間擁擠產生後，降落航班抵達跑道之順序
FC_i	第 i 架起飛航機之燃油成本(元)
$C_{i,f}$	第 i 架起飛航機單位時間之燃油成本(元/分鐘)
α_i	第 i 架起飛航機於跑道旁停等時，航機的燃油損耗率(公斤/分鐘)
F	航空燃油之單位容量成本(元/公升)
PC_i	與第 i 架起飛航班停靠相同機門之後續航機，其旅客延滯時間成本(元)
r_i	與第 i 架起飛航班停靠相同機門之後續航機，其旅客乘載率
P_i	與第 i 架起飛航班停靠相同機門之後續航機，其旅客成載量(人)
V	旅客平均時間價值(元/分鐘)
GC_i	區塊等候下第 i 架航機衍生之超時作業工時成本(元)
G_i	第 i 架其非航機停等於機坪時，其地勤作業所須人員數(人)
S	地勤人員每小時超時作業薪資(元/小時)
RC_i	區塊等候下，第 i 架起飛航機衍生之跑道空滯時間成本(元)
R	跑道的時間價值(元/分鐘)
EC_i	第 i 架起飛航機停等於機門停機坪之地面空調與外部供電成本(元)

符號說明

符 號	意 義
E	地面空調與供電設備單位時間之收費(元/分鐘)
$S_{i-1,i}$	第 $i-1$ 架起飛航機與第 i 架起飛航機滑行時，應保持之安全間距(公尺)
L_i	第 i 架起飛航由機門停機坪滑行至跑道旁停等區之距離(公尺)
v	航機於機場空側地面滑行之速度(海浬/小時)
$T_{i,a}$	連續指派下，第 i 架起飛航機由機門開始滑行的時間
$T_{i,h}$	連續指派下，第 i 架起飛航機滑行至跑道旁停等的時間
$T_{i,d}$	連續指派下，第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,d'}$	連續指派下，未考量降落航班之影響時，第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,d''}$	連續指派下，考量第 i 架起飛航機前降落航班 j 之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,d'''}$	連續指派下，綜合考量第 i 架起飛航機前後降落航機之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道時間
$T_{j,r}$	降落航班 j 抵達跑道頭的時間
$T_{j,e}$	降落航班 j 離開跑道的時間
$T_{j,a}$	降落航班 j 之降落門檻時間，即跑道開始維持淨空之時間
T_o	機場擁擠發生之時間
$T_{i,c}$	第 i 架起飛航班關閉艙門之時間
$T_{i,g}$	與第 i 架起飛航班停靠相同機門之後續航機，表定停靠機門的時間

符號說明

符 號	意 義
$T_{i-y,g}$	在第 i 架起飛航機與第 i-y 架起飛航機停靠相同機門之狀況下，第 i-y 架起飛航機表定停靠機門之時間。其中，y 表示兩航機間隔之起飛序號。
$T_{i-y,a}$	在第 i 架起飛航機與第 i-y 架起飛航機停靠相同機門之狀況下，第 i-y 架起飛航機實際停靠機門之時間。其中，y 表示兩航機間隔之起飛序號。
$T_{i,a}^b$	區塊等候下，第 i 架起飛航機由機門開始滑行的時間
$T_{i-k,d}^b$	區塊等候下，第 i-k 架起飛航機進入跑道的時間。其中，k 表示航管單位指派至跑道旁停等區之航機數。
$T_{i,h}^b$	區塊等候下，第 i 架起飛航機滑行至跑道旁停等的時間
$T_{i,d}^b$	區塊等候下，第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,d'}^b$	區塊等候下，未考量降落航班之影響時，第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,d''}^b$	區塊等候下，考量第 i 架起飛航機前降落航班 j 之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,d'''}^b$	區塊等候下，考量第 i 架起飛航機前降落航班 j，與第 i 架起飛航機後降落航班 j+1 之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,ed'}^b$	區塊等候下，當第 i 架起飛航機抵達跑道時間超過第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間時。未考量降落航班之影響時，第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,ed''}^b$	區塊等候下，當第 i 架起飛航機抵達跑道時間超過第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間時。考量第 i 架起飛航機前降落航班 j 之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$T_{i,ed'''}^b$	區塊等候下，當第 i 架起飛航機抵達跑道時間超過第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間時。考量第 i 架起飛航機前降落航班 j，與第 i 架起飛航機後降落航班 j+1 之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道之時間
$t_{i,st}$	考量第 i-1 架起飛航機與第 i 架起飛航機於機門停等之相對後，第 i 架起飛航班與第 i-1 架航班之滑行時距(分鐘)
$t_{i,m}$	第 i 架起飛航機由機門滑行至跑道旁停等區的時長(分鐘)
$t_{i,r}$	第 i 架起飛航機佔用跑道起飛之時長(分鐘)

符號說明

符 號	意 義
$t_{i,sd}$	航機連續起飛時，第 $i-1$ 架起飛航機進入跑道後，第 i 架起飛航機於跑道旁停等之時長(分鐘)
$t_{j,r}$	降落航班 j 佔用跑道降落之時長(分鐘)
t_{sa}	起飛航機進入跑道前，與降落航機應維持之隔離時長，為固定值(分鐘)
$t_{i,w}$	接續第 i 架起飛航機後，停靠相同機門之後續航班於該機門作業之時長(分鐘)
$t_{i,h}^b$	區塊等候下，第 i 架起飛航機於跑道旁停等之時長(分鐘)
$t_{i,a}$	連續指派下，第 i 架起飛航機於機門的停等時長(分鐘)
$t_{i,a}^b$	區塊等候下，第 i 架起飛航機停等於機門之時長(分鐘)
$t_{i,e'}^b$	區塊等候下，未考量降落航班之影響前，因第 i 架起飛航機無法接續第 $i-1$ 架航機後進入跑道，進而造成跑道空滯之時長(分鐘)
$t_{i,e}^b$	區塊等候下，考量降落航班影響後，因第 i 架起飛航機無法接續第 $i-1$ 架航機後進入跑道，進而造成跑道空滯之時長(分鐘)
$t_{i,e''}^b$	區塊等候下，考量降落航班影響後，介於第 $i-1$ 架與第 i 架起飛航機間，降落航機佔用跑道之時長；以及因第 i 架起飛航機無法接續第 $i-1$ 架航機後進入跑道，進而造成跑道空滯之時長(分鐘)
$t_{i,j,r}$	區塊等候下，介於第 $i-1$ 架與第 i 架起飛航機間，降落航機佔用跑道的時長(分鐘)

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

近年來，由於中東戰事頻繁及美國風災(颶風卡崔納)對原油產地之影響，造成石油供給量起伏不定；加上中、美兩國大量進口石油的影響，在供需無法平衡之情況下，國際油價遂有逐年上漲之趨勢，進而導致全球民航業自 2002 年起航空燃油成本佔總成本之比例亦逐年增加(圖 1.1)。隨著燃油成本的逐年增加，航空公司除了財務負擔增加外，油價波動更連帶影響整體營運及未來規劃，如美國達美(Delta)、西北(Northwest)等航空公司即因為無法承擔油價遽增帶來的龐大財務負擔，於 2005 年相繼提出破產保護之請求。另外，根據國際航空運輸協會(IATA)對全球航空公司營運狀況的預估，2005 年全球航空業損失約 74 億美元，其中近五分之一，超過 14 億美元的損失歸咎於油價上漲所致。有鑒於此，世界國際航空組織、機場及航空公司無不致力於各項技術之研發及營運管理策略之擬定，如改善機場延滯管理、增加航機起降之流暢等，企圖增加航機燃油使用效率，降低燃油成本支出(Airline Business, 2004.10)。

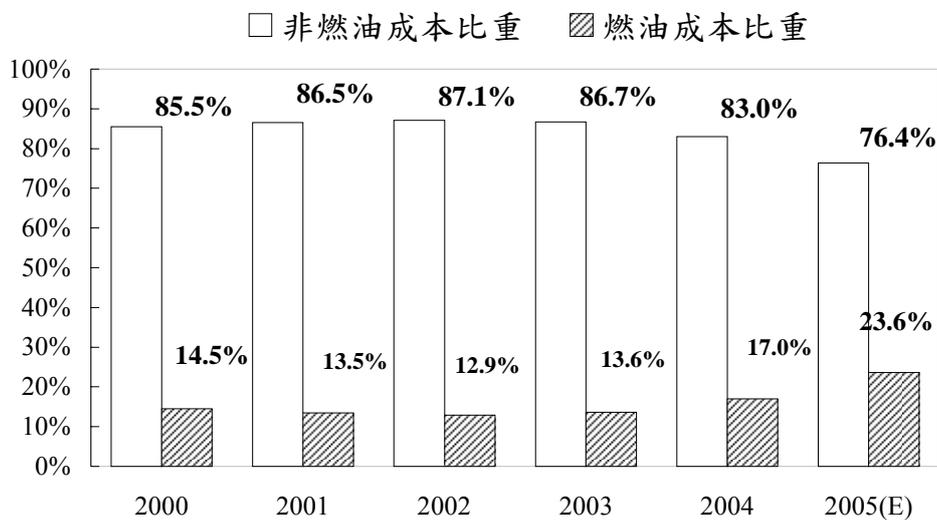


圖 1.1 全球民航業燃油成本比重變化圖

資料來源：台灣經濟研究院產經資料庫

有關航空公司成本結構之研究，顯示航機的燃油成本主要與石油單價及航機燃油消耗量有關；又影響後者之因素包含航空公司航網安排及使用機型之燃油效率。其中，航網安排又與服務機場之擁擠狀況程度息息相關(吳貞瑩，民 92)。然而有關機場空側流量及航機延滯管理之研究，多針對機場容量不足以致擁擠之情

境，以航機於起點機場之地面延滯成本較航機於目的機場之空中延滯成本低；及航機地面停等較空中停等安全為由，依據目的機場之擁擠程度及航機延滯成本探討航機於空側地面之停等時長(Andreatta and Romain-Jacur, 1987； Terrab and Odoni, 1993)，鮮少針對機場空側地面航機之停等策略進行分析。另外，也有研究由航機滑行安全間距、進出機坪時間、機場空側設施幾何佈設以及航機滑行道路網等方面，探討擁擠機場中，不同機型之航機滑行延滯以及使用跑道之順序問題，期以增加跑道容量，降低機場擁擠發生之影響(Cheng, 1998； Soomer et al., 2004； Atkin et al., 2004)；部分研究則利用模擬方法預測、評估機場操作環境改變時航機起降延滯之影響，作為機場空側流量管理策略改善之參考(Atack, 1978；劉仲祥, 民 93；汪進財等人, 民 94)。綜上，可知機場延滯管理策略中，航管單位多傾向將航機延滯於機場空側，以減緩目的機場之擁擠程度並降低航機於空中等待之成本。

在延滯航機於空側運行之研究，則以降低機場擁擠時間為目的之探討居多，針對起飛延滯之航機其考量多以儘快指派延滯航機至跑道旁停等為優。而此一指派航機至跑道旁停等之作法，對面臨航空燃油價格不斷上漲的航空公司而言，無疑是增加其營運成本之負擔。過去有關航空燃油成本之研究，多在探討航空公司如何在機場間的燃油價差與航機載重之權衡取捨關係中，擬定單一航機於不同機場及航線下之最適載油量(Stroup and Wollmer, 1992； Zouein et al., 2002； Abdelghany et al., 2005)，鮮少以系統化之觀點及機場管理單位之角度，探討機場擁擠發生時，起飛延滯航機於空側不同區域之燃油成本及衍生成本，如跑道旁停等之燃油成本及佔用機門停機坪之成本。一般而言，隨著機場延滯發生時段及航機起降需求量之不同，機場管理單位應可視機場擁擠狀況，於考量延滯航機滑行時間之條件下，指派航機於機門停機坪停等，降低航機於跑道旁之燃油損耗，以紓緩燃油成本成對航空公司產生之衝擊。以上對急呼降低航空燃油損耗之航空業而言，機場管理單位在面臨機場不同延滯情況下，如何有效指派延滯航機於空側不同位置停等，以降低航機燃油成本實為一必要且重要之議題。

機場空側航機使用跑道起降具有等候排隊之特性，而當機場因外在因素而引發航機起飛延滯時，管理單位為有效提高跑道使用率，多以指派起飛航機至停等區等待之作法，更增加了航機停燃油成本的支出。觀察一般都市交通同樣也存在相似之排隊等候現象，如得來速的購餐車隊、停車場外的排隊車輛，其中以得來速的例子最為明顯。得來速係速食店提供之免下車購餐方式，餐廳通常設置有特定車道提供顧客車輛停等及緩慢前進，當車輛行經點餐處時則由餐廳人員幫忙點餐及收費，隨後即前往車道出口取餐。然而，在尖峰時等待點餐之車輛所形成的冗長隊伍，不只造成車輛等候時間延長，同時，車輛亦因等候期間引擎保持在轉動狀態之故，導致車隊產生無謂之燃油損耗。有鑒於此，Dougherty(1997)提出「區塊等候(Block Queue)」之概念，將停等區域分為主動區(Active Section)與被動區

(Passive Section)，前者車輛保持引擎轉動，後者則關閉引擎，等到主動區淨空後再前往接受服務。該研究以最小化燃油損耗為目的，分析被動區車輛引擎啟動衍生之額外成本，以及整體車隊閒置成本(Idle Cost) 節省之效益，建構其燃油損耗率模式，再透過最適化方法解得主動區最適車輛數，並確實有效降低車隊之燃油損耗。由於延滯車隊分區等候之概念，與機場空側地面航機停等區域之幾何佈設十分相似，故本研究擬針對擁擠機場之起飛延滯航機，採取分別指派至跑道旁及機門停等之作法。而後以機場管理者之角度，考量起降航機跑道使用率及機門使用狀況，分析航機於各種狀態之燃油損耗，以解析性方法，針對機場空側起飛延滯管理進行深入探討，以利機場管理當局及航空公司，在面臨航機起飛延滯時能瞭解可能造成之影響，進而輔助管理單位擬定延滯時的管理策略。

1.2 研究目的

以往研究航機延滯之因素與影響，多以延滯時間探討，鮮少以航機操作之燃油成本加入探討。本研究目的即引入燃油損耗概念，並藉由機航機分區停等方式，模擬跑道旁停等航機數量改變時，空側地面所有航班之延滯起飛情況，期能反應不同延滯管理策略對起飛延滯航機燃油成本增加之現象，並建議機場管理當局適當之因應策略以降低延滯之衝擊。在航機延滯等候部分，本研究擬以Dougherty(1997)提出的區塊等候概念為基礎，分析此一概念下各區航機之燃油損耗，繼而與機場跑道使用率及航機使用機門特性一併考量，以維持機場空側航機起飛流暢為目標，求解航機於空側各區如跑道旁停等區及機門停機坪之最適停等時距，以最小化機場之延滯成本。故本研究之具體目標分述如下：

1. 探討區塊等候於交通問題之應用特性。Dougherty(1997)分析車輛引擎之燃油損耗情形及延滯車隊所具有之等候特性，提出區塊等候概念並予以應用在延滯車隊燃油損耗管理。本研究擬針對此概念進行探討以深入瞭解區塊等候之應用特性，並分析延滯車隊與機場擁擠航機之異同以擬定研究進行方向。
2. 航機擁擠造成機場容量不足乃機場長久以來面臨之嚴重問題，過去專家學者針對此一領域之研究相當廣泛。本研究透過蒐集與回顧相關文獻以釐清目前機場空側航機延滯之相關問題，並深入瞭解航機起飛過程於實務操作上亟待探討之課題。
3. 構建航機佔用機門成本函數。機場擁擠造成航機起飛延滯時，航機停等時間超過班表預定時間而佔用機門，導致後續航機無法使用機門而致使機場營收損失之機會成本即為機門佔用成本。本研究擬構建航機佔用機門之成本函數，於機場擁擠之情況下與跑道空滯成本函數同時考量，以求算航機於空側

各區之最適停時間及停等位置。

4. 構建跑道空滯成本函數。在避免燃油損耗之條件下，為瞭解航機由停機坪滑行至跑道旁停等區之接續關係，本研究擬構建跑道空滯成本函數，並透過區塊等候下延滯航班移動的模擬結果，分析及評估停機坪航機之滑行時距與跑道旁停等區航機之停等時距之權衡取捨關係。
5. 分析航機擁擠發生時空側航機之移動特性。航機受限於機場空側地面空間之幾何配置，無法形成冗長之等候機隊，僅能分散至空側各區停等如跑道旁停等區、機門停機坪、遠端停機坪，本研究擬考量跑道空滯成本及佔用機門成本之變化，分析跑道旁停等區及機門停機坪之最適航機數量。
6. 擬定航機起飛延滯管理策略。本研究擬綜合考量各區之航機燃油損耗、航機佔用機門成本及跑道空滯成本，以空側各區之最適航機數為決策變數，並以最小化總成本為目標，透過評估的方式求解各區最適航機數。
7. 以中正國際機場航空站為範例，驗證本研究之模式應用性，並由所得結果，瞭解應用區塊等候下之航機燃油損耗，並與未使用前航機之燃油損耗之差異。
8. 敏感度分析。藉由延長航機等候時間，增加機場擁擠程度的方式進行敏感度分析，以探討重要參變數變動對起飛航機延滯管理之影響。

1.3 研究範圍

本研究探討機場發生延滯的時候，依據航機在機場空側地面不同區域停等，需要考量的燃油損耗及各項成本模式。繼而，以降低航機起飛前之燃油損耗、維持機場空側航機起飛程序運作流暢及避免發生跑道空滯為目標，分析機場發生延滯時空側各區之最適航機數量。而本研究定義的空側區域，以航機停等時是否啟動引擎之狀態可分為被動區與主動區，其中，被動區包括機門停機坪、滑行道、遠端停機坪，該區航機關閉引擎倚靠地面供電系統維持航機電力及空調設備之運轉，等待機場管理單位之指示再啟動引擎滑行至主動區；而主動區包括跑道旁停等區及跑道，該區航機保持引擎轉動以便隨時進入跑道起飛，如圖 1.2 所示。

延滯發生時，起飛延滯之航機雖可於機門停機坪停等以節省燃油損耗，但機場管理單位仍可能在考量各機門之使用率。分析機門被佔用時，航機獲得之燃油節省效益以及機場營收損失之機會成本以決定是否指派航機停等於機門停機坪。

本研究定義滑行道功能僅提供航機於停機坪與跑道之間滑行使用，航機於此滑行原本即須一定之燃油消耗，故本研究未將此時航機損耗之燃油成本納入考量。但航機於滑行道滑行之時距，往往在航機起飛前的時間裡佔了相當大的比例，因此其影響層面亦甚為廣泛。對航機而言，滑行之時距的長短對航機的燃油損耗有一定的影響；而就機場管理單位而言，該單位須詳細掌握空側各航機的滑行之時間，藉此安排各航機使用跑道起飛的順序，以維持機場空側各項勤務的正常運作，更重要的是提高跑道使用率，避免跑道空滯之情況發生。故本研究分析起飛延滯航機滑行之時距，亦需考量機場跑道使用率，予以決定航管單位指派至跑道旁停等之最適航機數。

跑道旁停等區主要為提供起飛航機停等，等待進入跑道準備起飛，而由於起降航機間需保持特定安全間距之相關規定，故航機需於此等待跑道淨空之時長隨航機於跑道之起降密集度而有所增減。另外，就機場空側之實務觀察，通常航機停等於此具有引擎開啟後便不再關閉引擎的使用特性，因此跑道旁停等區內的航機只能將引擎調整至最低的運作狀態停等，故本研究於成本函數構建時，分析航機利用跑道旁停等區之停等特性，以建構該區航機之燃油損耗函數。

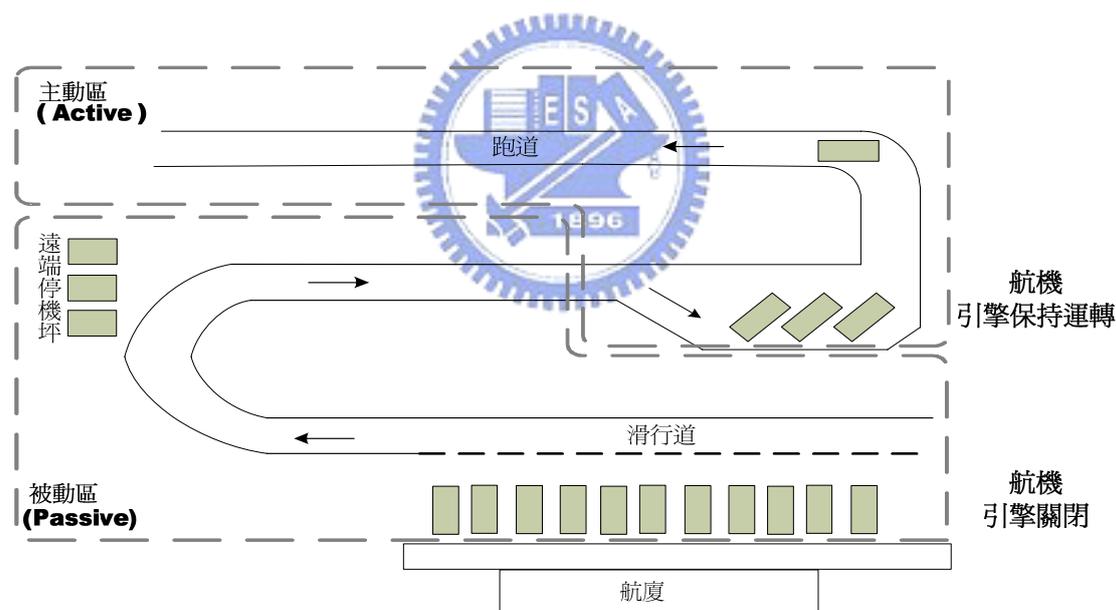


圖 1.2 研究範圍

1.4 研究流程與架構

本研究首先針對研究問題作深入瞭解，透過相關學術文獻以確定本研究之研究背景、動機，及定位本研究學術與實務應用之價值與貢獻。另外，針對航機實務操作之燃油損耗資料進行蒐集與分析。而後透過研究範圍之界定及研究方法之擬定，建構區塊等候下各停等區航機之燃油損耗函數，並深入探討航機於空側各區停等所衍生之佔用機門及跑道空滯成本，以構建其相關成本函數，將上述航機燃油損耗、航機佔用機門及跑道空滯成本綜合考量，以機場管理單位之觀點擬定延滯管理策略。藉由實例分析及主要參變數之敏感度分析，以驗證本研究所構建模式之合理性。本研究之研究流程如圖 1.3 所示。

圖 1.4 為研究架構圖，本研究擬以起飛延滯航機為對象，以不同延滯程度之機場為背景，應用區塊等候概念模擬機場空側擁擠發生時，起飛航機面臨之各種狀態，如關閉引擎於停機坪停等、滑行於滑行道、及保持引擎轉動於跑道旁停等。分析航機燃油損耗及衍生之相關成本，藉此構建區塊等候下航機於空側各區的成本函數。進而以航機燃油成本、佔用機門衍生的成本及跑道空滯成本，總延滯成本最小化為目標，透過數學最適化方式求解航管單位應指派至跑道旁之最適航機數。於區塊等候概念之分析，本研究擬參考區塊等候(Block Queue)基本定義(Dougherty, 1997)，依據不同區域之起飛航機狀態將機場空側分為主動區(Active Queue)與被動區(Passive Queue)，隨後參照航機於機場之實務狀況對各區予以定義。主動區航機保持引擎轉動準備進入跑道起飛，如跑道旁停等區；被動區航機則倚靠地面供電系統等待啟動引擎準備進入主動區之指示，如遠端停機坪及機門停機坪，目的在避免多餘之燃油損耗。根據區塊等候概念對機場空側之定義，進行各區航機之燃油損耗模式及相關成本構建，以瞭解航機於空側各區不同狀態下之燃油損耗情形。另外，本研究考量航機燃油損耗與其於各區之停等時距關係存在直接關係，故擬考慮跑道旁停等區航機數對航機停等時距之影響，藉以分析跑道旁停等區航機之停等時距分別與跑道空滯及航機佔用機門之權衡取捨關係，而後，求解不同延滯程度下，航管單位實施區塊等候時應採取之策略。於跑道旁停等區航機停等時距與跑道空滯之探討，本研究著眼於航機利用跑道起飛之連續性，藉由跑道旁停等區航機停等時距及停機坪航機滑行時距大小之比較以瞭解航機之接續關係，以分析航機及機場因跑道旁停等區航機數變化所導致之燃油損耗及跑道空滯成本。

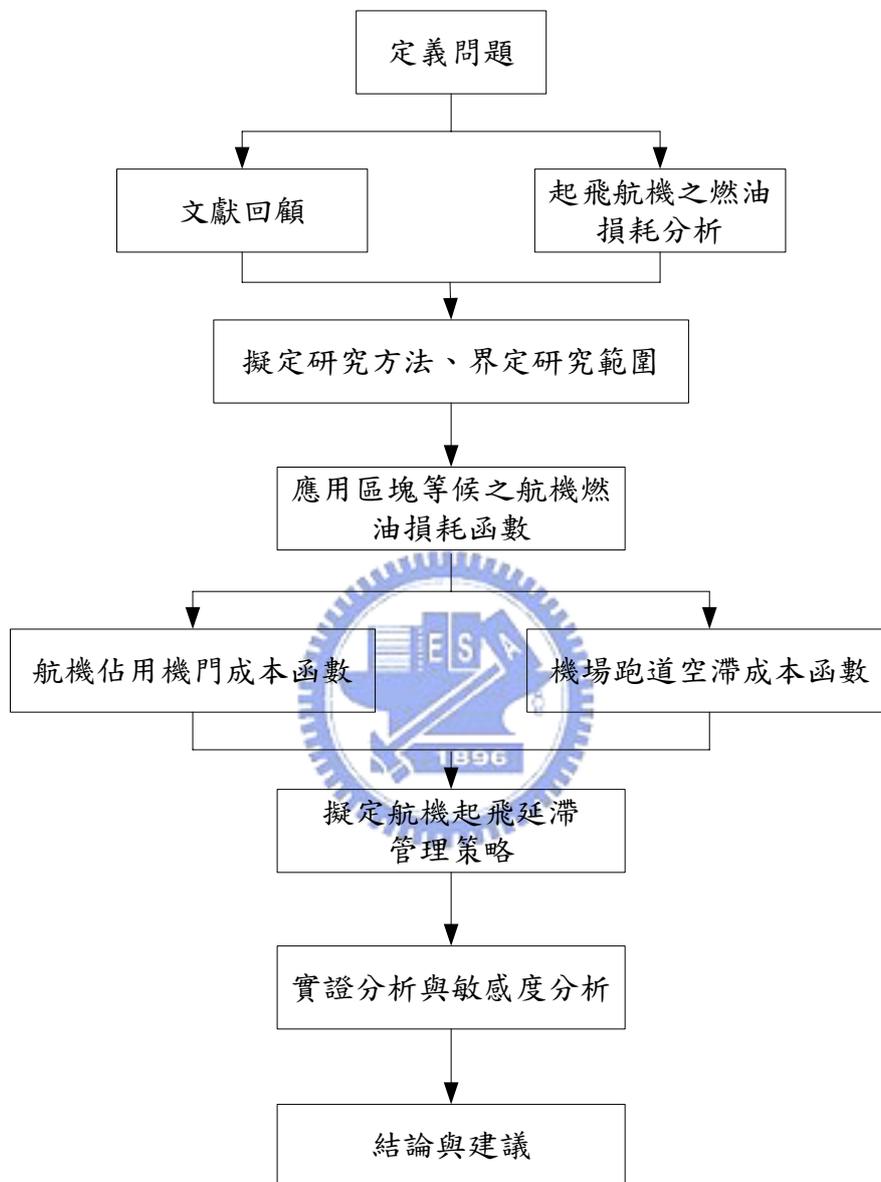


圖 1.3 研究流程圖

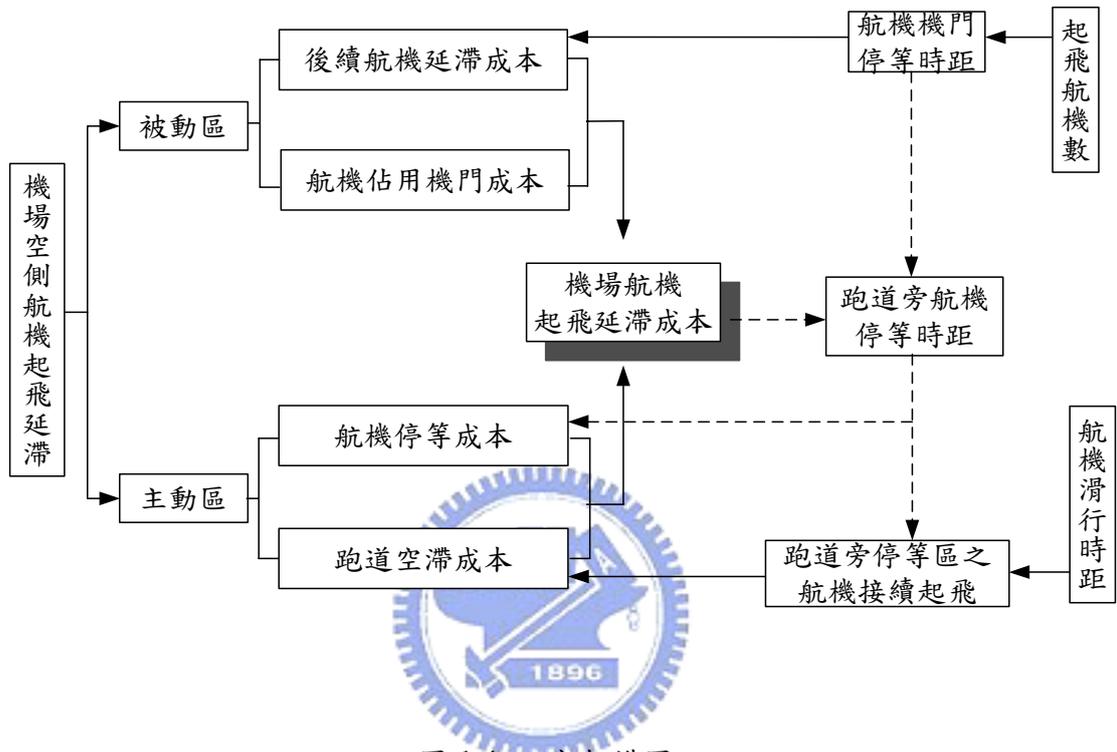


圖 1.4 研究架構圖

第二章 文獻回顧

本研究以機場空側地面起飛延滯航機為研究對象，應用區塊等候概念探討航機於空側各區不同狀態之燃油損耗，同時，以機場跑道使用連續性及航機佔用機門成本之變化探討跑道旁停等區航機數之影響，目的在瞭解機場空側起飛航機之燃油損耗與起飛延滯之關係，而後針對機場管理單對提出航機起飛延滯管理之建議。本章將回顧區塊等候之特性及其應用。另一方面，考量到以往航機延滯相關研究多以延滯時間探討，鮮少以航機操作之燃油成本加入探討，故航空運輸相關之延滯研究亦為文獻回顧之重點。於機門指派之研究多以旅客步行距離最小化為考量，雖然可供參考之部分略顯不足，但是為完整建構機門佔用成本模式，本研究亦將同時進行回顧，藉此瞭解航機於機門之狀態。因此，本研究文獻回顧分為五部分：2.1 節區塊等候之應用；2.2 節流量管理之研究；2.3 節航空延滯之分析；2.4 節機門指派之研究；2.5 節航機移動及其相關研究；2.6 節空側相關研究，以下分別逐一介紹。

2.1 區塊等候之應用



以往應用等候理論於控制管理車隊延滯之研究，大多著重於減少車隊等待時間或駕駛者時間價值損失，鮮少以節約能源的觀念加入探討。該研究採用之區塊等候(Block Queue)概念，最初僅為描述渡輪載客過程中，關閉引擎以節省燃料損耗的行為。隨後，專家學者透過研究觀察，發現車隊延滯所導致的燃油損耗問題具有類似的特性，因此，漸漸將區塊等候概念應用於車隊延滯與節省燃油相關課題之研究。

Dougherty (1997)研究指出得來速及停車系統所衍生之車隊延滯，容易使車輛產生無謂的燃油損耗，因此，提出區塊等候(Block Queue)之概念，以車隊燃油損耗率最小化為目標，進行模式推導與驗證。該研究探討之區塊等候，係以車輛引擎是否需要關閉為分隔條件，將車隊停等區域分為主動區(Active Queue)與被動區(Passive Queue)，如圖 2.1 所示。主動區之車輛保持引擎轉動緩慢駛進服務區內；位於被動區之車輛則關閉引擎原地等待，待主動區內車隊均已接受服務紓解後，被動區車輛才啟動引擎以等速駛進主動區，直到主動區再次停滿車輛，被動區車輛亦再次關閉引擎於原地等待。因此，車輛在被動區之燃油損耗主要為引擎啟動及車輛移動所導致，而主動區車輛之燃油損耗為引擎閒置所產生，下列關係式為單一車輛於等候車隊之燃油損耗量。由此關係式可知，車輛於被動區之引擎啟動次數與主動區之引擎閒置成本存在一權衡取捨關係，而影響兩者之關鍵因素即為主動區之車隊容量，主動區可容納的車輛數愈多表示車輛停等時距愈長，意謂車輛引擎閒置之燃油損耗量愈多；而另一方面則表示被動區車輛進入主動區

之前的引擎啟動次數愈少，因此，車輛用於啟動引擎之燃油損耗量相對減少。至於車輛移動之燃油損耗量則可透過平均車長與主動區車輛數之換算，得知被動區車輛移動之距離，進而可推算車輛移動所耗費之燃油損耗量。

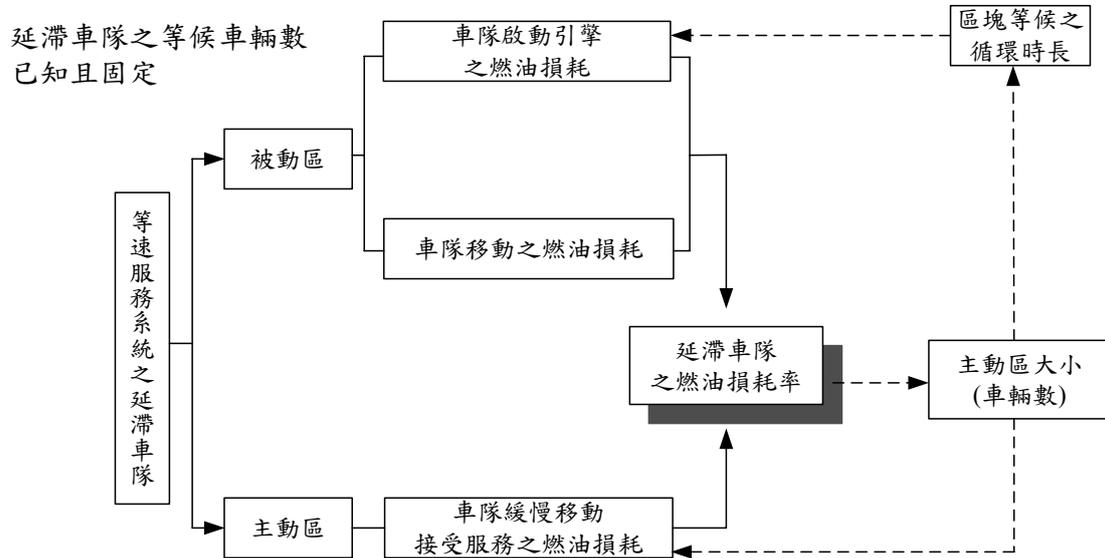


圖 2.1 都市延滯車隊區塊等候架構圖

單一車輛之燃油損耗量

$$= [\text{被動區燃油損耗量}] + [\text{主動區燃油損耗量}]$$

$$= [(\text{引擎啟動次數} \times \text{燃油損耗量}) + (\text{車輛移動之燃油損耗量})] + [\text{引擎閒置之燃油損耗量}]$$

該研究在模式推導部分，首先分析並定義引擎燃油損耗相關之變數及參數，包括被動區平均停等車輛數(車隊長度)、主動區車輛數、平均車輛長度、車輛通過服務設施之時距、車輛引擎停等之燃油損耗率、車輛啟動引擎所需之燃油量以及車隊行進速率。並以主動區車輛數為決策變數構建被動區及主動區各別車隊的燃油損耗率。

於被動區部分，利用平均停等車輛數與車輛啟動引擎所需之燃油損耗量之乘積，獲得被動區車隊啟動引擎之燃油損耗量。另外，以主動區車輛數以及平均車輛長度之乘積代表被動區車輛向前移動的距離，隨後，將移動距離除以車隊移動速度即為車隊向前移動的時距。由於該研究假設車輛移動時的引擎燃油損耗率與停等時的燃油損耗率相同，因此，將上述計算獲得之車隊移動時距乘以引擎燃油損耗率及平均停等車輛數即為被動區車隊移動之燃油損耗量。而該研究又以主動區車隊接受完服務之時距為研究時距，即主動區車輛數乘以車輛通過服務設施之時距。進一步，將被動區車隊之燃油損耗量除以主動區車隊所須之時距即為被動

區車隊之燃油損耗率。

於主動區部分，該研究假設主動區車隊於服務期間，車輛引擎有一半的時間處於閒置狀態，因此主動區車隊之燃油損耗率即為 $1/2$ 主動區車輛數乘以引擎燃油損耗率之值。

繼而，將主動區與被動區之燃油損耗率加總，即為等候車隊之燃油損耗率，再以數學最適化方式求解燃油損耗率模式，即可得知最適區塊大小(Block Size)，該區塊大小係指燃油損耗率最小時的最適主動區車輛數。研究結果顯示最適區塊大小與被動區平均停等車輛數以及車輛引擎啟動需要的燃油損耗量成正向關係；與車輛通過服務設施之時距及引擎燃油損耗率成負相關。

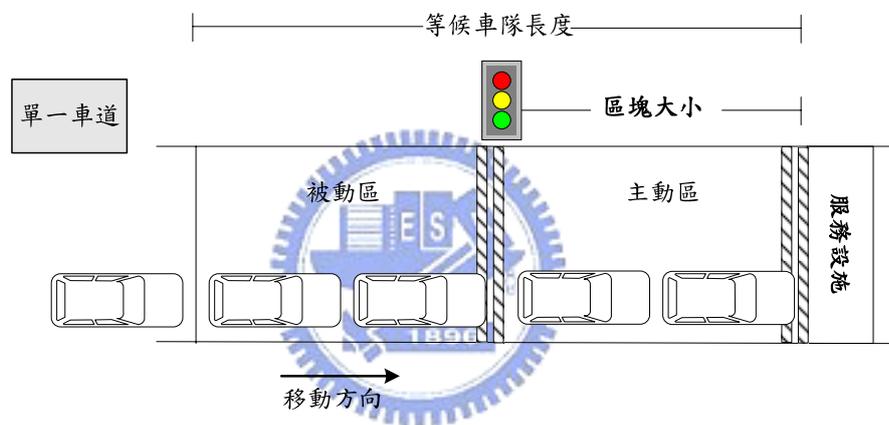


圖 2.2 區塊等候概念示意圖

隨後，Reilly and Berglin (2004)根據 Dougherty 提出的區塊等候概念，利用等候理論(Queuing Theory)構建等候車輛之數量，並加以考量車輛駕駛者之服從率，該服從率係指被動區車隊中願意關閉引擎等待指示之駕駛者比率。其研究方法，仍以 Dougherty 建立之燃油損耗率最小化模式為基礎，修改及定義相關變數，進行模式推導及求解。研究結果顯示駕駛者服從意願與燃油損耗呈現正向關係，並且將等候理論推導的車隊長度代入燃油損耗模式，藉由數學最適化方法可求得燃油損耗達到最小化時，主動區大小(Block Size)之最適條件。

小結

歸納上述文獻以及機場航機延滯特性之觀察，可知機場航機利用跑道起飛之過程與都市車隊通過慢速服務系統之型態相當，即服務對象使用服務設施具有等候之特性。其次，機場設施之幾何設計與區塊等候中區塊之基本定義十分相似，於車隊延滯系統中，區塊等候概念主要將車隊停等區域分為主動區與被動區，兩

區之差別在於車輛位於前區其引擎便保持轉動，車輛位於後者則關閉引擎等待指示；於本研究探討之航機起飛延滯過程中，一般而言，航機停等區域包括停機坪及跑道旁停等區，其中，停等於停機坪之航機，可藉由外部電力提供航機停等時機上設備所需之電力，此時航機也是處於引擎關閉之狀態，而停等於跑道旁的航機，由於已準備進入跑道起飛，其引擎則維持於運轉之狀態。

另外，Dougherty 研究中將等候區域分為主動區與被動區之方式，雖可節省車隊之燃油損耗，但是，當被動區車隊欲前往主動區時，則必須重新啟動引擎，進而衍生額外的燃油成本。因此，學者假設延滯車隊長度已知之情況下，以燃油損耗最小為目標，求解主動區之最適大小。

本研究於探討航機起飛延滯則是以燃油損耗之觀點切入，考量航機至跑道旁停等將增加燃油成本的特性，進而考慮將航機停於停機坪以降低燃油成本。雖然航機於停機坪停等可節省燃油成本，但航機由停機坪須經由滑行道才可滑行至跑道旁，而航機滑行通常需耗費一定之時間，且該時間亦隨航機停等位置與跑道之相對位置而有所不同，倘若機場未指派航機於跑道旁停等，則可能發生跑道可供航機起飛之時段，航機卻因為滑行時間無法接續而使跑道空滯的現象，造成機場跑道容量損失，故如何在維持航機起降流暢之前提，考量航空管制之相關規定，同時有效降低航機燃油損耗即為本研究探討之主軸。故本研究與 Dougherty 提出之區塊等候異同處，即在於本研究引用其分區節省燃油損耗之概念，於研究方法上則以航機於機場空側地面之操作特性為考量。

2.2 流量管理之研究

有關流量管理之研究始於地面航機等候策略最佳化模式之探討，主張將航機延滯於起始機場之空側地面，所耗費之延滯成本較航機於目標機場空中等候之延滯成本來的低，並且從安全之觀點來看亦以航機地面延滯為較佳之策略。Andreatta and Romain-Jacur(1987)針對機場容量之隨機性進行探討，考量單一時段、單一機場之地面等候策略與航機之降落優先順序問題，構建靜態確定機率性模式，其決策變數為航機是否進行地面等候。該研究假設航機進場順序為已知；機場容量之隨機變數之機率值為已知且不隨時間改變；所有降落航機之降落時間皆相同，並假設所有空中等候之飛機均可在下一時段降落。該研究建構一航機延誤成本之模式以判斷尚未起飛之航機是否需作地面等候，其演算過程是以動態規劃演算法求解之。Terrab and Odoni(1993)考量機場容量具隨機特性，構建機場之靜態隨機模式，以指派個別航機之降落時段。該研究僅考慮機場之容量限制而不考慮空域容量，假設航班的飛行時間及班表均已知。研究構建之靜態隨機性模式中機場容量依時間之變化而有所改變，並以期望之總延誤成本為目標函數。

於航機起降最適安排方面，汪進財等人(民國 86)藉由分析不同航機起降型態所對應之航機隔離間距，及蒐集實際機場資航機起降時間資料，在考慮機場現況等因素後，運用數學規劃方式求解最佳之航機型態組合及相對應之機場容量。

汪進財與吳世偉(民 94)針對機場天氣異常事件，推估航機延誤模式，並藉由 SIMMOD 模擬軟體，構建所欲探討之機場空域(Airspace)及空側(Airside)系統，作為該研究驗證模式之工具，藉此衡量機場天氣狀況不佳，造成機場起降方向改變或機場被迫關閉時，各機場間相關航機延誤之情形。透過模擬預測結果與實際值之比較，亦顯示其延誤模式具有良好之預測效果。劉仲祥(民 93)根據國內航空運輸特性，建立可接收即時資訊之飛航流量管理系統與 ANS 模擬軟體整合，以預測多機場、多時段之流量與容量，並據此建議各機場之起飛額度。

2.3 航空延滯分析

本研究為探討應用區塊理論於機場延滯管理之影響，在以往航空系統運作延滯的研究上，多偏向以旅客時間價值或航機準時抵達與否探討此一課題。本研究將回顧航空延滯相關文獻，針對機場延滯發生的原因以及延滯處理的方式作分析。

Chung and Nyakman (1996)認為旅客登機經過的飛航安全檢驗程序相當繁瑣且容易使旅客發生排隊的情況，進而造成航機延誤起飛。有鑒於此，為提高旅客出境的效率，該研究蒐集旅客出境的相關資料，包括旅客群抵達目的地之時間間距、抵達之旅客群規模等相關資料，以旅客的時間成本為計算單位，經過資料配適(Fitting)、模式構建及校估等，利用 SIMAN IV 模擬軟體，模擬美國 Greater Pittsburgh 國際機場的旅客出境流程，進一步將模擬得到的資料進行分析。

Chung and Sodeinde (2000)探討機場陸側旅客出境程序時，部分櫃臺報到之細項作業可同時進行，以增加出境旅客報到之效率。該研究針對旅客出境過程進行分析，建議出境流程中設置不同數量的過磅儀器，將等待報到的排隊旅客，分散至其他行李過磅的隊伍。進而，減少旅客等候時間，同時，亦增加航空公司出境作業的服務效率。該研究以大陸航空公司(Continental Airline)為實證對象，觀察其旅客報到流程，針對作業流程裡容易發生旅客等候的部分，提出改善方案，且經由範例測試與證實結果，顯示採用改善方案後旅客報到流程獲得顯著改善。

Nombela et al. (2004)指出過去研究，對於機場延滯情形的產生，認為除了不可抗力之因素所導致的情況之外，如天氣、航機故障，多為機場容量不足所致。而該研究指出航機延滯之發生，乃因機場與航空公司為了將班表排程最大化，並

且認為機場航機延滯雖然與車輛延滯情形類似，然前方車輛之延滯對後續車輛的影響較輕微，繼而提出機場航機延滯，具有溢出現象(Spill Over)的概念，即航機延滯之影響會有累積效果，致使後續表訂之起降航機陸續受到影響。依據研究觀察結果顯示當航機延滯所造成之溢出現象甚為嚴重時，將使機場尖峰時間產生之延滯持續甚久，產生機場擁擠費徵收不公。

許巧鶯和許乃文(民 93)針對機場航站大廈之出境作業流程之延滯擴散進行探討，分析出境作業延滯發生之原因與特性，如不同作業服務類型、作業間接續影響關係，並以等候理論為基礎，構建作業等候模型與延滯時間推估模式，而後，利用標籤校正演算法求算出境作業流程上航班之作業時間，再構建延滯成本函數，探討旅客、作業單位、航空公司與航站等產生之延滯成本。進一步，以中正國際機場出境作業流程為例進行範例分析，證實研究之模式可有效推估航站出境作業延滯擴散影響範圍與成本。研究結果顯示作業接續關係為延滯擴散影響之關鍵，當兩作業為非直接進入式關係，可藉由空間緩衝作用紓解上游延滯對下由作業之擴散影響。另外，透過研究提出之控制方案可降低延滯擴散影響，如出境流程中發生設備故障導致延滯時，以增加作業櫃臺方案成本改善效益為最優。

Janić (2005)以等候理論構建解析性模式探討延滯對軸輻機場產生的影響。該研究回顧各航空公司容易遇到之延滯問題，探討航空公司預防及解決延滯的措施，並進行研究之相關假設以構建解析性模式。其模式構建假設軸輻機場為等候理論中的服務設施，抵達的航機為到達的準備接受服務的對象(Arrival)，起飛航機為已接受服務並準備離開對象(Departure)，航機於抵達至離開的時間，即軸輻機場服務的服務時間。該研究構建的模式包含四個部分，機隊抵達時間、機隊於機場停留的時間、機隊離開時間及航機延滯時間；採用單位時間換算航機的延滯成本，並以 Lufthansa 的 Frankfurt 機場進行模式驗證。

Golaszewski (2002)認為機場發生航機延滯肇因於機場空間之不當配置及相關法條之不當制訂，因此藉由分析歐洲與美國機場飛航管制系統之績效，指出歐洲的機場管理當局採用時間帶分配，使機場空側各空間、設施可被充分利用，進一步來有效控制航機數量。美國的飛航管制單位則傾向於將航機流量控制於機場飽和容量上下，透過 FAA 等組織之研究資料顯示，近年來全美多數機場之延滯現象日趨嚴重，然各機場飛航管制系統之效率卻沒有明顯改善。有鑒於此，FAA 建議飛航管制單可透過新興科技以改善跑道容量為近程目標，其改善方案包括降低航機飛行高度之間距、縮短航機間渦流的緩衝時間、減少航機佔用跑道時間。

Abdelghany et al. (2004) 構建一班機延滯預測模式，分析航空公司因班機延滯抵達，對後續航飛航任務之影響。該研究詳細探討機組人員值勤之時間規範，及有限的飛航設備對航空公司班機排班之影響，一般而言，航空公司為增加利潤，通常對設備資源之利用予以最大化，因此將機組人員及設備之使用時間予以密集安排。當航機未如班表預定時間抵達目的地時，航空公司後續航機為等待飛航任務所必要之機組人員或設備，即必須面臨延滯起飛窘境。而該研究構建之預測模式，可分析機組人員、設備對後續航機飛行任務之影響範圍，並提供航空公司適當之飛航資源分配計畫。

Hansen (2002) 利用微觀模式針對跑道作業以確定性等候模式探討航機延滯抵達與對其他航機的影響，探討較常忽略之航機於跑道上的時程延滯(Schedule Delay)，考量降落航機應保持之安全間距及機場跑道容量構建航機延滯模式，該研究並以蒐集實際資料進行實證分析，其結果顯示短程高密度航班造成的等候延滯，較其節省的時程延滯時間高出許多，認為應該取消這類航機並以大型航機取代之。

2.4 機門指派之研究

機場空側於尖峰時間，往往因航機起降需求量超過機場機門容量，容易發生起降航機佔用機門的情形，而航機佔用機門的影響除了增加機場管理單位負擔外，另外對後續使用相同機門之航空公司及搭機旅客所造成之延滯影響更為嚴重。因此，近年來有關機場機門之學術研究，多以機門最適指派為探討方向。

Cheng (1998) 分析航機進出機門停機坪的兩種方式，即僅靠航機動力自行進入與後退(Power-In, Power-Out)與航機自行進入而由拖引機輔助後退(Power-In, Push-Out)。當機場起降航機增加時，滑行道上行之航機容易受到進出機坪之航機影響，導致機場發生航機擁擠、航空公司班機延誤起降之情形。機場管理單位為了有效降低航機進出機門停機坪所發生，因此於航機進出停機坪間引入緩衝時間，該時間包括航機進出停機坪的操作時間以及航機的延滯的時間。然而，緩衝時間的長短往往容易受到機場空側地勤作業的不確定性的影響，以致機場登機門的使用率亦無法有效掌握。有鑒於上述問題的衍生，該研究回顧過去機場空側相關研究，其中多數研究均以模擬法進行機場空側航機機門指派問題。另外，該研究觀察機場航機使用機門之現象，具有網路節點的概念。因此，以網路模式構建機場管理單位指派登機門之解析性模式並以模擬法驗證。之後，將航機進出機門停機坪所衍生的滑行道衝突引入機門指派模式探討。進一步，提出改善的方案，藉由降低滑行道航機衝突事件的發生。

許巧鶯和郭淑婷(民 86)考量跑道、航站及航空公司機門配置，以旅客步行距離及飛機滑行距離之加權平均最小為目標，以解析性模式分別構建於三種不同型式之航站下，入境、出境及轉機旅客之步行距離以及飛機滑行距離之計算方法，建立航空公司之最適機門配置位置之數學規劃模式，並採用模擬降溫法(Simulated Annealing)求解航空公司之機門配置位置，進一步分析模式之主要參變數改變時對機門配置位置的影響。

汪進財和盧清泉(民 83)蒐集中正國際機場機坪轉運之相關數據，利用統計歸納之方法，分析中正機場機坪使用狀況、拖機時機與停機位更動三方面之表現，認為管理當局若能針對班機起降時刻加以示當調整，輔以動態機門指派作業方式，並提昇地勤調派與作業能力，則機場容量有提昇之空間。

2.5 航機移動及其相關研究

機場管理單位基於有效利用跑道容量之前提下，常傾向將起飛航機指派至跑道旁停等區進等待，然航空安全管制以及跑道旁停等區容量等因素之限制，使得航機於滑行道之滑行狀態亦有所限制。Soomer et al.(2004)針對機場空側滑行道上航機產生延滯之原因進行探討，以機場管理單位之觀點，在航空安全管制之條件下，規劃各航機於滑行道上移動之最適時間。該研究利用網路節點概念描述起降航機於滑行道移動之情形，將滑行道交叉口及兩交叉口間的距離，分別以節點、節線之方式表現，並以機場管理單位預估之降落航機抵達時間及起飛航機起飛時間為限制，考量航機於滑行道發生延滯之情形，分析其延滯特性，繼而構建各航機之滑行時間模式。進一步，以減緩航機滑行過程之延滯時間為目標，透過水平滾動演算法及數學軟體之應用，求算各航機於滑行道上不同位置之最適時間。研究以機場之實際資料代入模式中驗證，結果顯示航機滑行之時間大幅縮短，並有效將航機延滯之影響均勻分散至各航機滑行時間，使每一架航機幾乎可依照航空公司之預定班表起降。

機場空側航機滑行之連續性與列車之排班問題有其相似性，Ghoseiri et al.(2004)以網路節點之概念探討客運列車之排班問題，詳細定義列車及車站於網路問題具有之特性，分別構建列車燃油損耗模式及總旅客旅行時間模式。於列車燃油損耗方面，探討列車行使受到各項阻力影響因而產生之燃油損耗，其阻力包括鋼輪滾動阻力、空氣阻力、摩擦力、坡度阻力等，將上述因素綜合考慮即求得列車燃油損耗。於旅客旅行時間方面，分析列車到站後上下車旅客人數之改變，繼而掌握列車於不同起迄點之間，乘車旅客之人數變化，繼而求算總旅行時間之長短。另外，該研究考量車站規模不同，容納之停靠列車數亦有所差異，並分析列車於相同路徑，同向或反向行駛所面臨之各種情況，進一步歸納出列車行駛應

遵守之限制，如車站間列車之行駛時間限制、列車停靠時間限制、列車到離站時間限制，研究並同時考慮列車行駛安全及列車連續行進之限制。而該研究以降低燃油損耗及縮短旅客旅行時間為目標，將構建之模式透過柏瑞圖最適化方法(Pareto Frontier)求解滿足鐵路經營者及乘車旅客需求下之最適列車排班。

2.6 空側相關研究

許巧鶯和張文和(民 87)以集中式航空客運場站為研究範圍，針對前列式(Linear)、指狀長堤式(Pier Fingers)、平行島式長堤式(Parallel Remote Piers)及遠端衛星式(Remote Circular Satellites)四種形式之航站，綜合考量航空站營建單位、航空公司和地勤業者等成本，以解析性方法詳細建構起迄及轉機旅客平均步行距離之計算公式，另外，並建構旅客於川堂各機門間移動之樓地板面積及機場空側航機進出停機坪滑行之相關面積公式。利用個別指標及灰色聚類二種方法，評選出符合給定目標年運輸需求之最適航站概念式設計。研究結果顯示四種航站中以線型前列式與島式長堤式為較適之航站配置選擇。

機場跑道時間帶分配及緩衝時間之訂定對航空公司航班之規劃存有直接的關連。Cao and Kanafani(2000)針對單一航空公司，探討航機排班與跑道時間帶(Runway Time Slot)之關係。透過跑道時間帶改變而使航空公司重新排班(Re-scheduling)，考量旅客依時需求(Time Dependent Demand)及航機操作成本之影響進行最適排班，比較航空公司重新排班前、後之收益變化。進一步，分析跑道不同時間帶對特定航空公司之價值。Wu and Caves(2000)以降低航機緩衝時間(Buffer Time)及維持航空公司班表準點性為目標，針對班表準點性與航機歸航(Aircraft Turnaround)效率進行分析比較。該研究考量不同機型所需之航機操作暨地勤服務成本、旅客延滯成本以及航空公司制訂緩衝時間之機會成本，構建航機歸航成本模式，並根據 ICAO 之航空公司財務資料，分別模擬美國國內航線及長、短航程下，不同準點性之航機歸航過程，分析緩衝時間與班機延滯抵達之關係。結果顯示多數航空公司會視各航線之載客率，對特定班機之緩衝時間予以斟酌，藉此增加航空公司營收利潤並維持航空公司準點性。

Wu and Caves (2002)針對過去航站交通管理相關議題進行分析並予以分類，將所有機場空側、陸側之議題歸納整理為交通量管理及機場航廈兩部分，再以回顧相關文獻之方法探討說明各議題之發展現況。前者探討之議題包括航空交通量管理和機場空域管理；後者則回顧機場容量、空側設施與航機地勤服務之相關研究。研究結果指出，在空域交通指派日趨完善的環境下，改善航機於空側地面之操作效率，對交通逐年增加的航空運輸而言具有直接的影響，其中尤以歸航班機受到的影響最顯著。另外，藉由上述各議題之研究彙整，該研究認為後續航

空運輸之研究可將交通量管理、航機地面操作及路線規劃之議題予以整合應用，以達到航空系統最佳化的目標。

小結

綜合以上機場航機延滯特性的觀察，可知機場航機利用跑道起飛之過程與都市車隊通過慢速服務系統時均具有等候之特性。然以往探討機場擁擠對起飛航機影響之研究，多針對航機之延滯決策作探討，鮮少研究針對航機於機場空側地面不同狀態延滯之成本，及其造成之延滯效應進行評估。而本研究擬將區塊等候經適當修正，模擬航管單位指派不同數量之航機，停等於跑道旁之情境以瞭解航機在機門停機坪與跑道旁延滯時產生之影響為何。此外相關研究亦顯示機場擁擠受航空管制相當之影響，故本研究亦將納入航機滑行之相關規定以符合航管之實際情況。



表 2.1 航機作業分析研究特性與方法

範圍	作者	研究主題	研究對象	研究方法	特點與內容
區塊等候之應用	Dougherty (1997)	區塊等候概念之探討與應用	都市交通之延滯車隊	解析性方法	分析區塊等候特性，並應用概念於都市交通車隊延滯現象之探討，進行模式構建及實例驗證
	Reilly and Berglin (2004)	區塊等候與等候理論之結合	都市交通之延滯車隊	解析性方法、等候理論	利用等候理論求解等候車隊之長度，於區塊等候概念下構建車隊延滯模式進行實例驗證
航空延滯分析	Chung and Nyakman (1996)	航站安檢作業對機場之影響	入境旅客	統計分析	針對入境旅客安全檢驗程序進行資料蒐集與分析，進一步，以迴歸模式解釋航機延滯影響
	Nombela et al. (2004)	機場延滯之隱含成本	機場、航空公司	模擬	針對機場延滯累積現象深入探討，並進行模擬以分析對航機延滯之影響
	許乃文(民 93)	機場航站作業延滯擴散	航站作業出境流程	確定性等候理論	以確定性等候理論建立出境作業延滯時間模式，分析其延滯影響範圍，提出適當之延滯控制策略
	Hansen (2002)	航機抵達延滯	航機、航空公司	確定性等候模式	探討班機抵達延滯造成後續航機延滯之影響，建議航空公司以大型航取代小型航機之航線
	Abdelghany et al. (2004)	班機延滯	航空公司	模擬	構建預測模式，分析機組人員及飛航設備延滯抵達，對飛航任務之影響

資料來源：本研究歸納整理

表 2.1 航機作業分析研究特性與方法(續)

範圍	作者	研究主題	研究對象	研究方法	特點與內容
機門指派之研究	Cheng (1998)	機門及滑行道路徑之最佳指派	進出滑行道之航機	網路節點、模擬	構建航機進出停機坪之解析性模式，模擬航機進出滑行道之情形，分析其最適指派原則
	許巧鶯和郭淑婷(民 86)	機門最適配置位置	旅客、航空公司	解析性方法	於不同型式航站下，構建出、入境及轉機旅客之步行距離模式，以模擬降溫法求解最適機門位置
航機移動及其相關研究	Soomer et al. (2004)	滑行道上航機延滯特性分析	航機、機場空側	模擬	以網路節點方式構建航機滑行時間模式，並利用水平滾動演算法，求解航機最適滑行時間
	Ghoseiri et al. (2004)	客運列車最適排班與縮短旅客旅行時間	旅客、客運列車、車站容量	多目標分析	考量列車行駛成本及旅客旅行時間，利用網路節點之方式構建列車行駛模式，以柏瑞圖最適化求解列車之最適排班
空側相關研究	張文和(民 87)	最適航站設計	航空客運場站	解析性方法	構建出、入境及轉機旅客之步行模式，另計算航機滑行面積，以個別指標及灰色聚類法，評選最佳方案
	Cao and Kanafani (2000)	跑道時間帶價值	航空公司、跑道時間帶	模擬、統計分析	以模擬分析方法針對跑道時間帶價值進行分析
	Wu and Caves (2000)	班表準點性、航機歸航成本	旅客、航機、航空公司	模擬	構建航機歸航模式，以模擬方法分析緩衝時間之影響
	Wu and Caves (2002)	航站交通管理之研究發展	航空管制系統、機場	回顧機場航站研究	以回顧相關文獻之方式探討說明航站管制系統之發展現況

資料來源：本研究歸納整理

第三章 區塊等候下航機起飛過程之模擬

本研究假設航機起飛以先到先服務為原則，其比較基準以各航班關閉艙門之時間為主；並假設起飛航機均經由相同路徑滑行至跑道旁。因此，當機場擁擠發生時，航管單位為了避免各航班預定停靠之機門被前機佔用，將採續指派起飛航班至跑道旁停等之方式避免「航機超時佔用機門」情況發生。然而，此一策略將造成大量起飛航機於跑道旁排隊，增加航機的燃油損耗。除了因航管單位之指派策略會造成航機停等於跑道旁，另外由相關航管規定可知，降落航班具有跑道優先降落權，故降落航機進入規定之降落門檻距離時，為維持跑道淨空起飛航機亦須在跑道旁停等。此外，當機場擁擠狀況擴散時，後續起飛之航班因「航機間」與「機門間」延誤型態之擴散，連帶地將影響該航班於機場空側地面停等時長變化。瞭解起飛航機因連續指派策略導致航機燃油成本增加的因素後，本研究遂應用區塊等候概念於擁擠機場中，分析將起飛航機分區停等時，航管單位指派不同數量航機至跑道旁停等區等待，起飛航班可能面臨之情況，同時，將降落航班之因素納入考量，進一步整合為航管單位實施區塊等候之決策流程。

3.1 連續指派之航機燃油損耗

一般而言，機場管理單位為提高機門使用率，傾向將起飛延滯航機指派至跑道旁停等，對面臨燃油上漲的航空公司來說是一件相當大的負擔。之所以會造成航機燃油成本負擔，是由於當機場擁擠時，起飛航機即使滑行至跑道旁仍須等待該航機之前的其他航機起飛，然而，基於安全及效率之考量，航管單位通常會規定起飛航機於跑道旁停等時保持引擎啟動之狀態。因此，在航機引擎燃油損耗相關參數不變的前提下，航機燃油成本主要與其停等於跑道旁之時間長度成正相關。航機停等時長可經由航機進入跑道的時間 $T_{i,d}$ 與航機抵達跑道旁停等區之時間 $T_{i,h}$ 相減得知，將其乘上航機單位時間燃油損耗價格 $C_{i,f}$ 即為航機等候起飛時所消耗之燃油成本。假設因機場擁擠而起飛延滯之航機 i 共有 n 架，則航機的燃油損耗成本可以式(3-1)表示。其中，本研究定義「 i 」為起飛延滯航班進入跑道起飛之順序，亦即起飛延滯航班之序號，實務上航管單位在安排航機起飛順序乃依照各航班申請起飛許可之時間為主，而各航班申請起飛許可之程序又在航機關閉艙門之後，故本研究針對各航班，「 i 」值的判斷以航機關閉艙門的時間為比較基準。

$$FC = \sum_{i=1}^n (T_{i,d} - T_{i,h}) \times C_{i,f} \quad (3-1)$$

雖然機場管理單位傾向連續指派航機至跑道旁停等，但是在飛航安全管制之限制下，航管單位指派航機前往停機坪待命時，仍須考量航機滑行的安全間距。另外，航機於機場空側地面移動時間之計算亦考量個別航機滑行至跑道之距離，以反應航機停等相對位置對航機間滑行安全間距之影響。為了簡化航機複雜之滑行過程，本研究除了假設航管單位指派延滯航機至跑道旁停等之過程服從先到先服務之原則之外；亦假設航機由停機坪後推，進入滑行道後，均以相同滑行路徑前往跑道旁待命。綜合上述航機滑行參數之假設，當機場延滯發生，於 T_o 時間有 n 架起飛延滯航機於機門停機坪停等，令機場指派第 1 架航機於 T_o 時間從機門停機坪開使滑行。則後續航機的連續指派時間可根據航機滑行安全間距與航機滑行距離的計算而得，其計算式如式(3-2)所示。

$$T_{i,a} = T_{i-1,a} + t_{i,st} \quad (3-2)$$

$T_{i-1,a}$ 表示 T_o 時間於機門停機坪延滯之 n 架航機中的第 $i-1$ 架航機，由停機坪開始前往跑道之時間；而 $t_{i,st}$ 則為第 i 架航機與第 $i-1$ 架航機之滑行安全隔離時長，由於該時長須考量航機滑行安全間距 ($S_{i-1,i}$) 與前後滑行航機停等之相對位置 ($L_i - L_{i-1}$)，故其計算如式(3-3)所示。

$$t_{i,st} = \frac{S_{i-1,i} - (L_i - L_{i-1})}{v} \quad (3-3)$$

上式， $S_{i-1,i}$ 為第 i 架航機與第 $i-1$ 架航機之間的滑行安全間距， L_i 為第 i 架航機滑行至跑道的距離， v 為機場管理單位規定之航機滑行速度，通常航機於空側滑行時均保持此速度。當 $t_{i,st} > 0$ ，表示第 $i-1$ 架航機由機門開始滑行 $t_{i,st}$ 分鐘後，第 i 架航機始可由機門開始滑行；相反地，若 $t_{i,st} < 0$ ，則表示第 i 架航機若要緊接於第 $i-1$ 架航機之後滑行至跑道旁，則須比第 $i-1$ 架航機提早 $t_{i,st}$ 分鐘由機門開始滑行。

求得延滯航機由機門出發之時間後，再將航機出發時間加上航機的滑行時距即可獲得航機滑行至跑道旁停等區的時間。令第 i 架航機由機門停機坪出發的時間為 $T_{i,a}$ ，其滑行時長為 $t_{i,m}$ ，則第 i 架航機滑行至跑道旁之時間 $T_{i,h}$ 為：

$$T_{i,h} = T_{i,a} + t_{i,m} \quad (3-4)$$

其中，航機滑行時長 $t_{i,m}$ 可由第 i 架航機滑行至跑道旁停等區之距離除以航機滑行速度而得。另外，在考量起飛航機可連續起飛的假設下，第 i 架航機進入跑道的時間可藉由第 $i-1$ 架航機進入跑道之時間 $T_{i-1,d}$ ，加上第 $i-1$ 架航機佔用跑道的時長 $t_{i-1,r}$ ，以及第 i 架航機於航管限制下與第 $i-1$ 架航機應保持的隔離時長 $t_{i,sd}$ ，即可得知第 i 架航機於連續起飛時可進入跑道之最早時間，如式(3-5)。

$$T_{i,d'} = T_{i-1,d} + t_{i-1,r} + t_{i,sd} \quad (3-5)$$

3.2 降落航班的影響

本研究主要由降落航班具有跑道優先權以及起降航班隔離標準之觀點考量降落航班對跑道空滯之影響，考慮起飛航機抵達跑道旁卻必須停等的情況，並藉由調整跑道旁停等區容量的方式，評估整體機場延滯成本最小時，航管單位指派至跑道旁停等之最適航機數量。在實務上，當機場跑道處於降落航班密集，且降落航班之隔離標準僅維持飛航管制程序規定之 3 海浬時，容易因為 3 海浬也是進場航機進入最終進場階段，跑道必須淨空的標準，將使得起飛航班必須停等在跑道旁。

本研究計算航機於跑道旁停等之時長，是以航機進入跑道之時間與航機抵達跑道旁的時間相減而得。為估算降落航機佔用跑道時，起飛航機可進入跑道的時間，遂以航機起降隔離標準(表 3.1)進行起飛航機因降落航機佔用跑道而停等之時長邏輯推導。其中，由交通部運研所之台灣地區國際機場作業效率之研究(民 82)，可知中正國際機場起飛航機佔用跑道的平均時間為 57 秒；而降落航機佔用跑道的平均時間則為 60 秒。又依據民航局之飛航管制程序(民 89)可知，起飛(降落)航機於降落(起飛)航機離開跑道後，無須額外之隔離即可進入跑道。惟需考慮之航機起降隔離，是為了避免航機連續起飛之過程中，後機受機尾亂流影響時，航管單位在頒發後續航機之起飛許可前，須予以維持適當之隔離，該隔離依飛航管制程序之規定應視前後航機之機型組合而判定。

表 3.1 不同起降型態下航機起飛之隔離標準

起降型態	機型組合	隔離標準
起飛-降落	任何機型	起飛航機進入跑道的時間，與降落航機抵達跑道之時間，至少間隔 2 分鐘
連續起飛	接續重型航機之後	前機起飛後，後機至少於跑道旁停等區等待 2 分鐘
	接續大型、小型航機之後	前機起飛後，後機至少於跑道旁停等區等待 1 分鐘
降落-起飛	任何機型	降落航機離開跑道後，起飛航機即可進入跑道
備註：起飛航機佔用跑道之時長為 57 秒 降落航機佔用跑道之時長為 60 秒		

資料來源：台灣地區國際機場作業效率之研究(民 82)、飛航管制程序(民 89)

依上述起降航機使用跑道之隔離條件分析，並假設降落航機抵達跑道之時間

已知，則可透過以下步驟推導起飛航機在降落航機影響下進入跑道的時間：

Step 1. 由第 $i-1$ 架航機進入跑道之時間 $T_{i-1,d}$ ，加上其佔用跑道的時長 $t_{i-1,r}$ 以及與第 i 架航機應維持之隔離標準 $t_{i,sd}$ ，即可得第 i 架起飛航機尚未考慮降落航班佔用跑道時，可接續第 $i-1$ 架航機進入跑道之最早時間，即 $T_{i,d'} = T_{i-1,d} + t_{i-1,r} + t_{i,sd}$ 。

Step 2. 判斷「經由第 $i-1$ 架航機之進入跑道時間，預估之第 i 架航機進入跑道時間($T_{i,d'}$)」是否會與降落航機使用跑道之時間產生衝突。以第 i 架航機進入跑道之預估時間($T_{i,d'}$)為依據，選擇抵達跑道頭時間比該時間($T_{i,d'}$)早且最接近該時間之第 j 架降落航機為比較對象。藉由降落航機抵達跑道頭之時間($T_{j,r}$)加上降落航機佔用跑道之時長($t_{j,r}$)可得第 j 架降落航機離開跑道之時間($T_{j,e}$)。由於第 j 架降落航機抵達跑道之時間比第 i 架航機進入跑道之預估時間早，因此，若第 j 架降落航機離開跑道之時間也比第 i 架航機進入跑道之預估時間早，即 $T_{j,e} < T_{i,d'}$ 表示經由第 $i-1$ 架起飛航機預估之第 i 架航機進入跑道時間，不會與降落航機使用跑道之時間發生衝突。然而，若 $T_{j,e} \geq T_{i,d'}$ 則表示第 i 架航機進入跑道之預估時間與降落航機使用跑道之時間產生衝突；根據飛航管制程序之規定，起飛航機須等待降落航機離開跑道後，才能夠進入跑道起飛，故第 i 架航機可進入跑道的預估時間須延長至第 j 架降落航機離開跑道之時間。綜上，連續指派下，考量第 i 架起飛航機前降落航機之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道時間($T_{i,d''}$)可表示如下：

$$T_{i,d''} = \begin{cases} T_{i,d'} & \text{if } T_{j,e} < T_{i,d'} \\ T_{j,e} & \text{if } T_{j,e} \geq T_{i,d'} \end{cases} \quad (3-6)$$

Step 3. 根據飛航管制程序之規定，當起飛航班進入跑道時間與即將降落航班抵達跑道時間間隔一安全間距之情況下，航管單位始可頒發飛行許可予起飛航班。據此，本研究須以 Step2 求得之第 i 架航機可進入跑道之預估時間($T_{i,d''}$)，判斷第 i 架航機進入跑道起飛之過程，是否會受到「即將降落」航班之影響。承 Step2 之分析，第 j 架降落航機為第 i 架航機進入跑道之預估時間前，抵達跑道之最後一架航班；又本研究假設第 j 架與第 $j+1$ 架降落航機為先後降落於該跑道之航班，故第 i 架航機進入跑道之預估時間($T_{i,d''}$)會比第 $j+1$ 架降落航機抵達跑道之時間($T_{j+1,r}$)來的早。將第 $j+1$ 架降落航機抵達跑道的時間($T_{j+1,r}$)減去起降航機應維持之安全間距(t_{sa})，即可得知第 $j+1$ 架降落航機準備降落之門檻時間($T_{j+1,a}$)，繼而，與 Step2 求得之第 i 架航機進入跑道之預估時間進行比較，即可判斷是否須

延後第 i 架航機進入跑道之預估時間。當 $T_{i,d''} < T_{j+1,a}$ 表示第 i 架航機與降落航機間存在一安全間距，故第 i 架航機進入跑道之預估時間即為 Step2 所求得之結果；相反地，當 $T_{i,d''} \geq T_{j+1,a}$ 時在降落航班具有跑道優先使用權之情況下，則第 i 架航機進入跑道之預估時間須延後至第 $j+1$ 架降落航機離開跑道的時間 $T_{j+1,e}$ 。綜上，在連續指派下，綜合考量第 i 架起飛航機前後降落航機之影響後，第 i 架起飛航機進入跑道時間 ($T_{i,d''}$) 可表示如下：

$$T_{i,d''} = \begin{cases} T_{i,d''} & \text{if } T_{i,d''} < T_{j+1,a} \\ T_{j+1,e} & \text{if } T_{i,d''} \geq T_{j+1,a} \end{cases} \quad (3-7)$$

Step 4. 若 Step3 計算之第 i 架航機進入跑道之預估時間與 Step2 相同，亦即 $T_{i,d''} = T_{i,d''}$ ，則第 i 架航機進入跑道之預估時間為 $T_{i,d''}$ ；若 $T_{i,d''} = T_{j+1,e}$ 僅表示第 i 架航機之預估進入跑道時間延後至第 $j+1$ 架降落航機離開跑道之時間 $T_{j+1,e}$ ，至於是否與後續即將降落之航機維持足夠的安全間距則仍屬未知，故在此情況下，須將 Step2 求得之 $T_{i,d''}^b$ 令為 $T_{j+1,e}$ ，並將原本比較之第 j 架與第 $j+1$ 架航機，修正為第 $j+1$ 架與第 $j+2$ 架航機之後，重覆 Step3 的求解流程，直到 $T_{i,d''} = T_{i,d''}$ ，確定航機起飛之過程不會受到降落航機之影響為止。

Step 5. 由 Step1 至 Step4 得，在航管單位實施連續指派起飛延滯航機至跑道旁停等區停等下，考量降落航班因素後，第 i 架航機進入跑道之預估時間即為 $T_{i,d''}$ 。

此外，透過 Soomer 等人(2004)針對機場滑行道系統進行之航機指派研究，可知航機滑行指派屬於一網路型態問題，然航機滑行路徑並非本研究探討之主軸，為簡化考慮該部分，本研究假設降落航班與起飛航班於滑行過程不會產生衝突，也就是降落航班與起飛航班的滑行路徑是分開且獨立的。

3.3 延滯擴散衍生之起飛延滯航班

本研究定義「起飛延滯航班」係指起飛過程中須在跑道旁停等之航班。因此，除了因外在因素如機場暫時關閉，導致起飛航班關艙時間超過表定起飛時間的延滯航機外，尚包括後續於表定起飛時間由機門出發，但仍須在跑道旁停等的航班。換言之，機場受到外在因素影響發生擁擠並於 T_0 時間導致 n 架起飛航機於機門停等時，雖然機場管理單位可藉由僅考量滑行安全間距的方式，將起飛延滯航機連續指派至跑道旁停等，繼而紓解航機於機門之擁擠狀況，然礙於跑道容量

及航機起降隔離標準的限制，起飛延滯航機極易在跑道旁形成延滯隊伍，以致後續航班於表定起飛時間關閉艙門的起飛航機受其影響亦須在跑道旁停等。假設機場管理單位將 n 架因為機場關閉而延滯起飛的航機指派至跑道旁停等之後，造成 n' 架準時關閉艙門之起飛航班也在 n 架航班後，必須在跑道旁停等區停等。雖然 n' 架並非於 T_0 時間即延滯於機門停機坪的起飛航班，但是礙於起飛順序的安排，當 n 架航班中有任何一架起飛航班尚未離開機坪，則 n' 架後續起飛航班即使依表定起飛時間關閉艙門，也無法從機門停機坪出發。

而後續延誤之 n' 架航班依延滯形式之不同，可分為因「班機間」關連性延滯之航班，以及班機間「在機門」產生推擠性延滯之航班。根據許巧鶯等人(民 92)所定義之班機間關連性誤點，係指航空公司指派相同一架航機連續之飛航任務，即航機抵達迄點機場後隨即進行下一班次的飛航任務，因此，當航班抵達迄點機場的時間延誤時，將連帶導致下一班次起始時間的延誤。就相同航機接任連續飛航任務的性質來看，與本研究假設航機滑行路徑相同時，相鄰起飛順序之航班延誤性質相似，故取其概念應用於本研究並令後續起飛之 n' 架航班中產生延誤之相鄰起飛順序航班為此類航班。符合此延誤特性之航班，其「由機門出發時間」的決定主要以「維持滑行安全間距的時間」($T_{i-1,a} + t_{i,st}$)與「表定關艙時間」($T_{i,c}$)兩者中較晚者，作為關連性延誤航班由機門出發的時間，如式(3-8)。

$$T_{i,a} = \text{Max}\{T_{i-1,a} + t_{i,st}, T_{i,c}\} \quad (3-8)$$

而班機間「在機門」所產生的推擠性誤點則係針對使用相同機門的前後航班而言，當前一航班產生誤點，延後使用機門的時間，導致後一架航班無法依照既定的時間停靠該機門時，即為航機間在機門產生的推擠性誤點(許巧鶯等人, 民 92)。本研究引用此定義，並以 n' 架航班中符合此一延誤特性之航班為在機門產生推擠性延滯之航班。由於後一架航班使用機門的時間與前一架航班離開機門的時間存在相依關係，一般而言，航機停靠機門的時間以表定停靠時間($T_{i-y,g}$)為準，然而當停靠相同機門之前一架航班離開機門的時間($T_{i-y,a}$)超過後一架航班的表定停靠時間即 $T_{i-y,a} > T_{i-y,g}$ ，則後一架航機可停靠機門的時間須視前一架航機離開機門的時間而定。其次，將後一架航機停靠機門的時間，加上後一架航機的作業時長($t_{i,w}$)即為後一架航機由機門出發的時間。該類型延誤航班由機門出發的時間除了須考量相同機門之前一架航班離開機門的時間外，另一方面，亦須考慮前後起飛航機之間的滑行安全間距，才可得知航班維持滑行安全間距後由機門出發的時間。進一步，將前述兩時間進行比較，並選擇較晚者作為機門推擠延誤航班由機門出發的時間。

$$T_{i,a} = \text{Max}\{T_{i-1,a} + t_{i,st}, \text{Max}(T_{i-y,g}, T_{i-y,a}) + t_{i,w}\} \quad (3-9)$$

上式中 $T_{i-y,g}$ 為第 i 架航機接續第 $i-y$ 架航機之後，「表定」停靠相同機門的時間；其中， y 為第 i 架航機與前一架停靠相同機門之第 $i-y$ 架航機所間隔的起飛航機數； $T_{i-y,a}$ 則為第 $i-y$ 架航機離開機門的時間；而 $t_{i,w}$ 為第 i 架航機使用機門的時長，該時長為後續航機滑行至該機門其作業所需時長之和。

3.4 區塊等候下航機於空側地面之移動

為了降低航機於跑道旁停等之燃油損耗本研究擬引用 Dougherty(1997)提出之區塊等候概念於起飛航機停等指派上。該概念之目的也是為了降低運具燃油損耗，其主要是將運具等待之區域分為主動區(Active Section)與被動區(Passive Section)，位於前區之運具，其具有不斷消耗燃油之特性；而位於後區之運具，則必須關閉運具的引擎以達到降低燃油損耗之效益；當前區運具均接受服務並離開後，後區之運具才啟動引擎並且移動至前區。

以機場空側地面系統來看，由於一般機場空側地面之停等區域分為跑道旁停等區與機門停機坪及遠端停機坪。航機位於各區的燃油損耗特性與區塊等候概念的定義十分相似，當航機位於機門停機坪(被動區)即關閉引擎；航機於跑道旁停等區(主動區)一般則保持啟動引擎轉動，隨時準備進入跑道。本研究即引用此一概念並擬構建區塊等候下，機場管理單位為降低航機燃油成本須額外考量之成本。

本研究於區塊等候方法之應用上與 Dougherty(1997)應用於都市車隊之方法相異處，在於被動區航機滑行至主動區之時間點。Dougherty(1997)於都市車隊延滯之區塊等候主要是以主動區車隊是否均已離開，作為被動區車隊移動至主動區之判別條件，該作法乃因應車隊延滯系統特性，為降低燃油損耗而提出之。然而，當引入區塊等候於機場延滯系統作為指派航機停等之方式時，就機場空側延滯系統而言，應先考慮的問題乃是跑道是否有空滯之疑慮，由於機場空側之機門停機坪與跑道旁停等區之間存在著滑行道系統，航機移動至跑道旁通常須耗費相當之時間，且航機間亦須考量滑行安全間距。若應用區塊等候於機場空側，仍以主動區完全淨空作為被動區延滯航機移動之判別條件，航機在滑行道系統與安全間距之影響下，勢必將使跑道發生嚴重之空滯情形，造成機場營收之損失。故本研究為降低航機燃油成本，且避免跑道空滯過於頻繁，遂提出區塊等候下，延滯航機由機門停機坪出發的時間，應以「跑道旁停等區機位空滯的時間」作為判別，也就是當航管單位決定指派 k 架航機至停等區停等，且第 $i-k$ 架航機於 $T_{i-k,d}^b$ 時間進

入跑道起飛時，則航機 i 由機門停機坪出發的時間亦為 $T_{i-k,d}^b$ 時間，如下所示。式中上標 b 表示該值為區塊等候下所求得。

$$T_{i,a}^b = T_{i-k,d}^b \quad (3-10)$$

又根據連續指派航機停等之分析可知，航機由機門停機坪出發之時間須考量其與前機相隔之安全間距。故將式(3-2)與式(3-10)合併成式(3-11)，即為區塊等候下，延滯航機由機門停機坪出發之時間。

$$T_{i,a}^b = \text{Max}\{T_{i-1,a}^b + t_{i,st}, T_{i-k,d}^b\} \quad (3-11)$$

故當第 i 架航機的出發時間為 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$ 時，表示跑道旁停等區已有閒置機位可供後續航機進入，但由於第 i 架航機尚未與前機保持足夠的安全間距，因此，第 i 架航機必須停等於機門停機坪；相反地，當出發時間為 $T_{i-k,d}^b$ ，意謂第 i 架航機雖然已經沒有滑行安全間距之顧慮，但是，跑道旁停等區尚未有閒置的機位可供航機停等，若提早前往跑道旁停等區則可能發生沒有機位停等之窘境。

依據前述之分析，在假設跑道僅供航機連續起飛之假設情境下，機場管理單位若連續指派起飛航機至跑道旁停等區停等，一般而言，由於航機起飛隔離間距與航機滑行安全間距，對航機停等於跑道之時長存在互補關係，雖可降低航機於跑道旁停等之時長。然而，起飛航機之間所須維持的隔離間距往往較航機間應保持的滑行安全間距來的長，故多數起飛航機仍須停等於跑道旁待命，進而造成航機燃油成本之增加。有鑒於此，本研究採用區塊等候之目的在於藉由停等區航機指派數量之改變，以控制航機於跑道旁之停等時長，進而達到節省燃油成本之效益，故定義航機由機門停機坪出發的時間為跑道旁停等區機位空出的時間($T_{i-k,d}^b$)與前機保持安全間距之出發時間($T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$)，兩者中選擇較晚者，即式(3-11)。

在跑道僅供航機連續起飛之假設前提下，航機可進入跑道之最早時間($T_{i,d}^b$)可經由前機進入跑道的時間($T_{i-1,d}^b$)，加上前機佔用跑道之時長($t_{i-1,r}$)及前後航機起飛隔離間距($t_{i,st}$)求得；而起飛航機抵達跑道旁的時間($T_{i,h}^b$)則可藉由區塊等候下航機由機門停機坪出發之時間($T_{i,a}^b$)加上航機滑行時長($t_{i,m}$)而得。將航機可進入跑道之最早時間減去航機抵達跑道旁的時間，即可判斷該機於航管單位實施區塊等候指派 k 架航機至跑道旁停等區時，在跑道旁停等之時長(或造成跑道空滯之時長)。而上述時長依航機抵達跑道旁時間與航機可進入跑道時間之異同，造成航機於跑道旁停等(或跑道空滯)之狀況可分為以下三種情形。圖 3.1~3.4 之時間軸下方第一列時間點由左而右，分別表示第 $i-1$ 架航機由機門出發之時間、抵達跑道旁停等區之時間以及進入跑道的時間；第二列為第 $i-1$ 架航機與第 i 架航

機維持足夠滑行安全間距之時間，以及區塊等候下航管單位指派 k 架航機至跑道旁停等時，第 i 架航機由機門開始出發的時間；第三列則為第 i 架航機由機門出發之時間、抵達跑道旁停等區之時間以及進入跑道的時間。

- (1) 當航機可進入跑道之時間($T_{i,d'}^b$)超過航機抵達跑道之時間($T_{i,h}^b$)時，依航機由機門出發時間的不同，其停等於跑道旁之時長有以下 2 種情況。如圖 3.1 所示，當第 i-k 架航機於區塊等候下「進入跑道之時間」 $T_{i-k,d}^b$ ，比經由第 i-1 架航機推估之第 i 架航機「由機門出發時間」 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$ 來的晚時，在降低航機於跑道旁停等燃油損耗之目標下，本研究定義航機由機門出發時間應以上述兩時間中較晚者為主。因此，第 i 架航機由機門停機坪出發的時間 $T_{i,a}^b$ 即為 $T_{i-k,d}^b$ ，又第 i 架航機的滑行時長為 $t_{i,m}$ ，故可知第 i 架航機滑行至跑道旁停等區之時間 $T_{i,h}^b$ 為：

$$T_{i,h}^b = T_{i-k,d}^b + t_{i,m}, \quad \text{if } T_{i-k,d}^b > T_{i-1,a}^b + t_{i,st} \quad (3-12)$$

而第 i 架航機進入跑道的時間，在考量航機起飛後產生之渦漩氣流影響下，第 i 架航機必須等待第 i-1 架航機起飛並間隔足夠之隔離間距後才可進入跑道起飛，故藉由第 i-1 架航機之滑行、停等、起飛時長，及起飛隔離間距等參數可推估未考量降落航機影響前，第 i 架航機可進入跑道之最早時間 $T_{i,d'}^b$ 為：

$$T_{i,d'}^b = (T_{i-1,a}^b + t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b) + t_{i-1,r} + t_{i,sd} \quad (3-13)$$

根據第 i 架起飛航機可進入跑道之時間，式(3-13)；及其滑行至跑道旁停等區之時間，式(3-12)。可知第 i 架起飛航機於航管單位指派 k 架航機至跑道旁停等之情形下，停等於跑道旁之時長 $t_{i,h}^b$ 為：

$$\begin{aligned} t_{i,h}^b &= T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b \\ &= (T_{i-1,a}^b + t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd}) - (T_{i-k,d}^b + t_{i,m}) \\ &= (T_{i-1,a}^b - T_{i-k,d}^b) + (t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd} - t_{i,m}) \\ &\text{if } T_{i-k,d}^b > T_{i-1,a}^b + t_{i,st} \end{aligned} \quad (3-14)$$

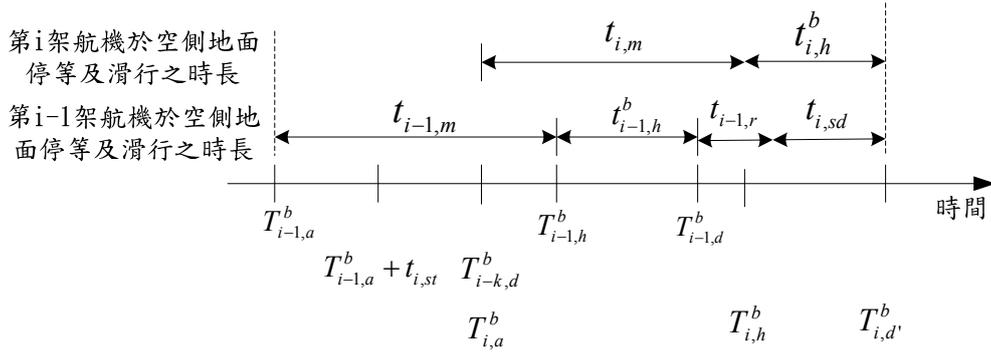


圖 3.1 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b > 0$ 且 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st} < T_{i-k,d}^b$ ，第 i 架航機之等候示意圖

當航機可進入跑道之時間($T_{i,d'}^b$)超過航機抵達跑道之時間($T_{i,h}^b$)時，第 i 架航機於跑道旁停等之另一情況，如圖 3.2 所示。當經由第 $i-1$ 架航機推估之第 i 架航機由機門出發時間，比第 $i-k$ 航機進入跑道之時間來的晚，則第 i 架航機由機門出發的時間即為 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$ ，其中 $t_{i,st}$ 為第 i 架航機與第 $i-1$ 架航機應保持之滑行安全間距。綜上，第 i 架航機滑行至跑道旁的時間 $T_{i,h}^b$ 為：

$$T_{i,h}^b = T_{i-1,a}^b + t_{i,st} + t_{i,m}, \quad \text{if } T_{i-1,a}^b + t_{i,st} \geq T_{i-k,d}^b \quad (3-15)$$

而在第 $i-1$ 架航機滑行及起飛相關參數未改變的情況下，所推估之第 i 架航機可進入跑道之時間與式(3-13)相同，透過式(3-13)與式(3-15)可得第 i 架航機於跑道旁停等之時長 $t_{i,h}^b$ 為：

$$\begin{aligned} t_{i,h}^b &= T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b \\ &= (T_{i-1,a}^b + t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd}) - (T_{i-1,a}^b + t_{i,st} + t_{i,m}) \\ &= t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd} - t_{i,st} - t_{i,m} \\ &\text{if } T_{i-1,a}^b + t_{i,st} \geq T_{i-k,d}^b \end{aligned} \quad (3-16)$$

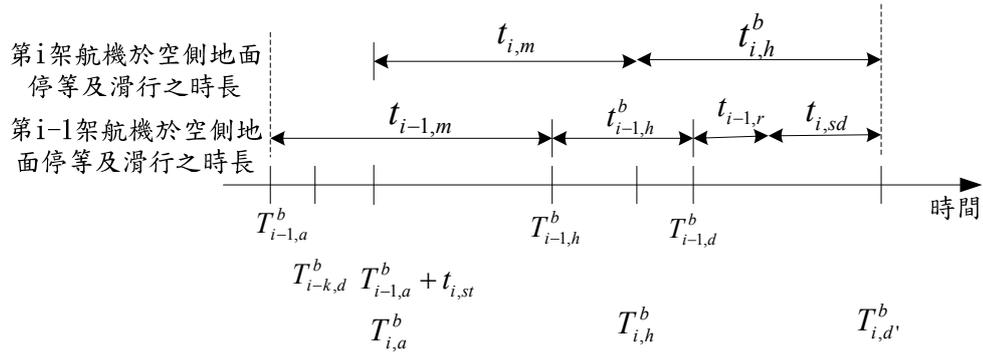


圖 3.2 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b > 0$ 且 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st} \geq T_{i-k,d}^b$ ，第 i 架航機之等候示意圖

(2) 當航機可進入跑道之時間($T_{i,d'}^b$)與航機抵達跑道之時間($T_{i,h}^b$)相同時，如圖 3.3 所示。當第 $i-k$ 架航機的進入跑道的時間 $T_{i-k,d}^b$ 超過由第 $i-1$ 架航機推估之第 i 架航機出發時間 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$ ，表示第 i 架航機由機門出發的時間為 $T_{i-k,d}^b$ 。又，當該時間加上第 i 架航機滑行時長後所得之第 i 架航機抵達跑道時間，與經由第 $i-1$ 架推估之第 i 架航機進入跑道之時間相等時，即表示第 i 架航機由機門停機坪滑行至跑道時，第 $i-1$ 架航機已經起飛並與第 i 架航機之間距恰好等於航機連續起飛之隔離標準，因此，第 i 架航機在無須停等之情況下便可進入跑道起飛，故第 i 架航機之跑道旁停等時長 $t_{i,h}^b$ 為 0。

$$\begin{aligned}
 t_{i,h}^b &= T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b \\
 &= (T_{i-1,a}^b + t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd}) - (T_{i-k,d}^b + t_{i,m}) \\
 &= (T_{i-1,a}^b - T_{i-k,d}^b) + (t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd} - t_{i,m}) \\
 &= 0 \\
 &\text{if } T_{i-k,d}^b > T_{i-1,a}^b + t_{i,st}
 \end{aligned} \tag{3-17}$$

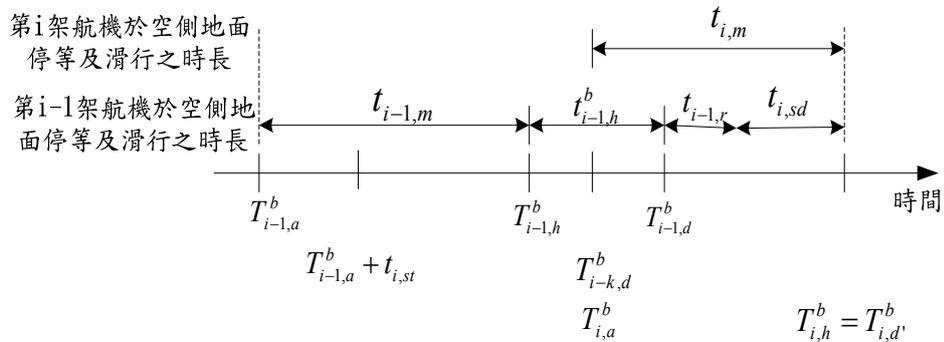


圖 3.3 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b = 0$ ，第 i 架航機之等候示意圖

(3) 當航機抵達跑道之時間($T_{i,h}^b$)超過航機可進入跑道之時間($T_{i,d'}^b$)時，如圖 3.4 所示。承(2)之分析，若經由第 $i-k$ 架航機進入跑道時間推得之第 i 架航機由機門出發時間，加上第 i 架航機滑行時長所得之抵達跑道旁時間，超過由第 $i-1$ 架航機推估之第 i 架航機進入跑道時間，則表示第 i 架航機於區塊等候下，為等待跑道旁停等區機位空出而停等於機門停機坪，以致無法於航機接續起飛之最適時間出發，造成機場跑道發生空滯的現象。由式(3-13)與式(3-15)合併計算，得跑道空滯的時長 $t_{i,e}^b$ 為：

$$\begin{aligned} t_{i,e}^b &= T_{i,h}^b - T_{i,d'}^b \\ &= (T_{i-k,d}^b + t_{i,m}) - (T_{i-1,a}^b + t_{i-1,m} + t_{i-1,h}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd}) \quad (3-18) \\ &= (T_{i-k,d}^b - T_{i-1,a}^b) + (t_{i,m} - t_{i-1,m} - t_{i-1,h}^b - t_{i-1,r} - t_{i,sd}) \end{aligned}$$

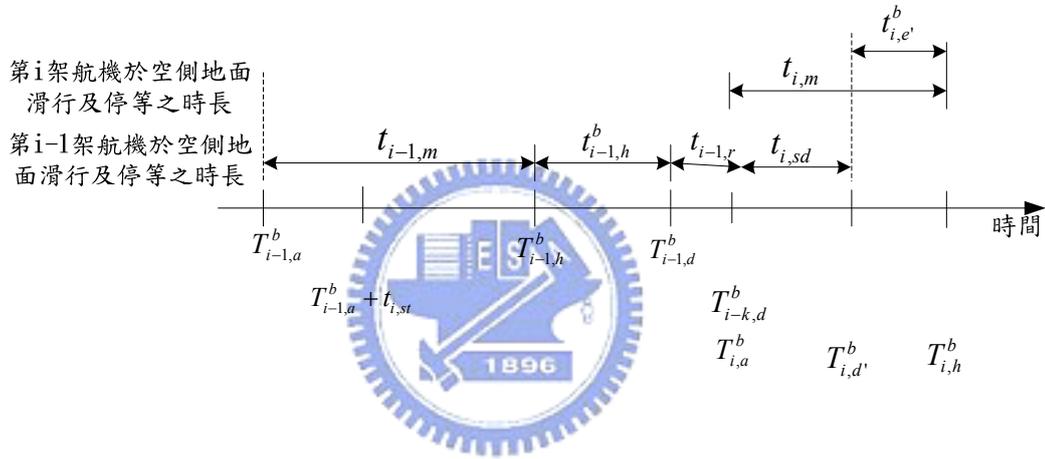


圖 3.4 當 $T_{i,d'}^b - T_{i,h}^b < 0$ ，第 i 架航機之等候示意圖

綜合上述航機抵達跑道時間與航機進入跑道時間關係之分析可知，當停等區航機指派數量(k)增加，而航機空側地面滑行參數均不變時，則對應於各航機之出發時間 $T_{i-k,d}^b$ 將隨之提早，使得航機出發時間選擇 $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$ 之比例將提高，進而使延滯航機於跑道旁的停等時長趨近於採用連續指派之結果，而航機燃油成本之節省效益亦大幅下降。相反地，停等區航機指派數量少，則機場跑道空滯頻率將增加，以致於跑道的使用率降低。

3.5 區塊等候下，起飛延滯航機抵達跑道後，進入跑道時間之估算

有別連續指派下，起飛航機在跑道旁等候進入跑道之情況；區塊等候下，後續航機由機門停機坪出發的時間，主要與航管單位指派起飛航機至跑道旁停等之數量直接有關，而與降落航機的多寡存在間接關係。謂之有直接有關者，係指航

管單位若指派較多航機至跑道旁停等，則航機離開機門停機坪的時間相較於指派數量少之情境將有所提早；而降落航機之間接影響則是基於飛航管制上降落航班具有優先降落之規定，所以降落航班愈多即表示起飛航機進入跑道的時間則必須延後，造成停等區無閒置機位而連帶後續航班由機門出發的時間也必須延後。

與連續指派相異處尚包括起飛航機進入跑道時間之估算部分。連續指派下，由於起飛航機均於跑道旁等候，進入跑道之過程處於排隊之狀態，因此，後續航班進入跑道的時間均可藉由前一架航班進入跑道起飛的時間而推估。然而，在區塊等候下，跑道旁停等區航機指派數量過少時，將發生後續航班由機門滑行至跑道之距離太遠，無法接續進入跑道起飛形成跑道空滯的狀況。當發生上述情形時，意謂透過前一架航機推估，所得到的後一架航機進入跑道時間，便無法用來模擬航機起飛情境；取而代之，是利用後一架航機滑行至跑道的時間，考量降落航班之影響後，才可求得後一架航機進入跑道時間。故區塊等候下，起飛航機「進入跑道之時間」演算步驟可根據後續航機滑行至跑道旁停等區之時間($T_{i,h}^b$)，超過進入跑道之預估時間(T_{i,d^m}^b)與否，分為下列兩種求解過程：

(1) 當起飛航機於「進入跑道之預估時間」前，抵達跑道旁(即 $T_{i,h}^b \leq T_{i,d^m}^b$)

Step 1. 由第 i-1 架航機進入跑道之時間 $T_{i-1,d}^b$ ，加上其佔用跑道的時長 $t_{i-1,r}$ 以及與第 i 架航機應維持之隔離標準 $t_{i,sd}$ ，即可得知航管單位實施區塊等候，第 i 架起飛航機尚未考慮降落航班佔用跑道之影響時，可接續第 i-1 架航機進入跑道之最早時間，即 $T_{i,d'}^b = T_{i-1,d}^b + t_{i-1,r} + t_{i,sd}$ 。

Step 2. 判斷「經由第 i-1 架航機之進入跑道時間，預估之第 i 架航機進入跑道時間($T_{i,d'}^b$)」是否會與降落航機使用跑道之時間產生衝突。以第 i 架航機進入跑道之預估時間($T_{i,d'}^b$)為依據，選擇抵達跑道頭時間比該時間($T_{i,d'}^b$)早且最接近該時間之第 j 架降落航機為比較對象。藉由降落航機抵達跑道頭之時間($T_{j,r}$)加上降落航機佔用跑道之時長($t_{j,r}$)可得降落航班離開跑道之時間($T_{j,e}$)。由於第 j 架降落航機之抵達時間比第 i 架航機進入跑道之預估時間早，因此，若第 j 架降落航機離開跑道之時間也比第 i 架航機進入跑道之預估時間早，即 $T_{j,e} < T_{i,d'}^b$ 表示經由第 i-1 架起飛航機預估之第 i 架航機進入跑道時間，不會與第 j 架降落航機使用跑道之時間發生衝突。然而，若 $T_{j,e} \geq T_{i,d'}^b$ 則表示第 i 架航機進入跑道之預估時間與第 j 架降落航機降落於跑道上之時間產生衝突，又根據飛航管制程序之規定，起飛航機須等待降落航機離開跑道後，才能夠進入跑道起飛，故第 i 架航機可進入跑道的預估時間須延長至第 j 架降落航機離開跑道之時間。綜上，區塊等候下，考量第 i 架起飛航機前降落航機之影響，所得之第 i 架起飛

航機進入跑道時間($T_{i,d''}^b$)可表示如下：

$$T_{i,d''}^b = \begin{cases} T_{i,d'}^b & \text{if } T_{j,e} < T_{i,d'}^b \\ T_{j,e} & \text{if } T_{j,e} \geq T_{i,d'}^b \end{cases} \quad (3-19)$$

Step 3. 依飛航管制程序之規定，當起飛航班進入跑道時間與即將降落航班抵達跑道時間間隔一安全間距之情況下，航管單位始可頒發飛行許可予起飛航班。據此，本研究須根據 Step2 求得之第 i 架起飛航機可進入跑道時間($T_{i,d''}^b$)，判斷第 i 架起飛航機由該時間進入跑道起飛之過程，是否會受到即將降落之航班影響。承 Step2 之分析，第 j 架降落航機為第 i 架航機進入跑道之預估時間前，抵達跑道之最後一架航機；又本研究假設第 j 架與第 j+1 架降落航機為先後降落於該跑道之航班，故第 i 架航機進入跑道之預估時間($T_{i,d''}^b$)會比第 j+1 架降落航機抵達跑道之時間($T_{j+1,r}$)來的早。將第 j+1 架降落航機抵達跑道的時間($T_{j+1,r}$)減去起降航班之安全間距(t_{sa})得第 j+1 架降落航機之降落門檻時間($T_{j+1,a}$)後，與 Step2 求得預估之進入跑道時間進行比較即可判斷是否須延後第 i 架起飛航班之預估進入跑道時間。當 $T_{i,d''}^b < T_{j+1,a}$ 表示第 i 架起飛航機與降落航班存在一安全間距，故第 i 架起飛航機之預估進入跑道時間即為 Step2 所求得之結果；相反地，當 $T_{i,d''}^b \geq T_{j+1,a}$ 時在降落航班具有跑道優先使用權之情況下，則第 i 架起飛航機之預估進入跑道時間須延後至第 j+1 架降落航機離開跑道的時間 $T_{j+1,e}$ 。綜上，在區塊等候下，綜合考量第 i 架起飛航機前後降落航機之影響後，第 i 架起飛航機進入跑道時間($T_{i,d''}^b$)可表示如下：

$$T_{i,d''}^b = \begin{cases} T_{i,d''}^b & \text{if } T_{i,d''}^b < T_{j+1,a} \\ T_{j+1,e} & \text{if } T_{i,d''}^b \geq T_{j+1,a} \end{cases} \quad (3-20)$$

Step 4. 若 Step3 計算之第 i 架航機進入跑道之預估時間與 Step 2 相同，亦即 $T_{i,d''}^b = T_{i,d''}^b$ ，則第 i 架航機進入跑道之預估時間為 $T_{i,d''}^b$ ；若 $T_{i,d''}^b = T_{j+1,e}$ 僅表示第 i 架航機之預估進入跑道時間延後至 $T_{j+1,e}$ ，至於是否與後續即將降落之航班維持足夠的安全間距則仍屬未知，故在此情況下，須將 Step2 求得之 $T_{i,d''}^b$ 令為 $T_{j+1,e}$ ，並將原本比較之第 j 架與第 j+1 架航機，修正為第 j+1 架與第 j+2 架航機之後，重覆 Step3 的求解流程，直到 $T_{i,d''}^b = T_{i,d''}^b$ ，確定航機起飛之過程不會受到降落航機之影響為止。

Step 5. 由 Step1 至 Step4 得，在航管單位實施區塊等候策略，指派起飛延滯航機至跑道旁停等區停等，並考量降落航班因素後，第 i 架航機進入跑道之預估時間即為 $T_{i,d''}^b$ 。

(2) 當起飛航機無法於「進入跑道之預估時間」前，抵達跑道旁(即 $T_{i,h}^b > T_{i,d^m}^b$)

Step 1. 當起飛延滯航機滑行至跑道之時間超過經由前一架起飛航機推得之「進入跑道之預估時間」時，令第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間與該航機抵達跑道旁停等區的時間相同，即 $T_{i,ed'}^b = T_{i,h}^b$ 。

Step 2. 判斷「第 i 架航機進入跑道之預估時間($T_{i,ed'}^b$)」是否會與降落航機使用跑道之時間產生衝突。以第 i 架航機進入跑道旁的預估時間($T_{i,ed'}^b$)為依據，選擇抵達跑道頭時間比該時間($T_{i,ed'}^b$)早且最接近該時間之第 j 架降落航機為比較對象。藉由降落航機抵達跑道頭之時間($T_{j,r}$)加上其佔用跑道之時長($t_{j,r}$)可得降落航機離開跑道之時間($T_{j,e}$)。由於第 j 架降落航機之抵達時間比第 i 架起飛航機進入跑道的預估時間早，第 i 架起飛航機必須等 j 架降落航機離開跑道後，才可進入跑道。因此，若第 j 架降落航機離開跑道之時間比第 i 架起飛航機進入跑道的預估時間早即 $T_{j,e} < T_{i,ed'}^b$ ，表示第 i 架起飛航機進入跑道之時間，不會與降落航機使用跑道之時間發生衝突。若 $T_{j,e} \geq T_{i,ed'}^b$ ，則表示第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間與第 j 架降落航機降落於跑道上之時間產生衝突，根據飛航管制程序中起飛航機須等待降落航機離開跑道後，才能夠進入跑道起飛之規定，因此，第 i 架起飛航機進入跑道的時間須延長至第 j 架降落航機離開跑道之時間。綜上，區塊等候下，考量第 i 架起飛航機前降落航機之影響，所得之第 i 架起飛航機進入跑道時間($T_{i,ed''}^b$)可表示如下：

$$T_{i,ed''}^b = \begin{cases} T_{i,ed'}^b & \text{if } T_{j,e} < T_{i,ed'}^b \\ T_{j,e} & \text{if } T_{j,e} \geq T_{i,ed'}^b \end{cases} \quad (3-21)$$

Step 3. 根據飛航管制程序之規定，起飛航班進入跑道之時間至少須與即將降落航班之抵達跑道時間間隔一安全間距，航管單位才可頒發飛行許可予起飛航班。因此，本研究須根據 Step2 求得之第 i 架起飛航機進入跑道時間($T_{i,ed''}^b$)，判斷第 i 架起飛航機進入跑道起飛之過程，是否會受到即將降落之航班影響。承 Step2 之分析，可知第 j 架降落航機為第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間前，抵達跑道之最後一架降落航機；又第 j 架與第 $j+1$ 架航機為先後降落於該跑道之航班，故第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間($T_{i,ed''}^b$)會比第 $j+1$ 架降落航機抵達跑道之時間($T_{j+1,r}$)來的早。將第 $j+1$ 架降落航機抵達跑道的時間($T_{j+1,r}$)減去起降航班之安全間距(t_{sa})得第 $j+1$ 架降落航機之降落門檻時間($T_{j+1,a}$)後，與 Step2 求得之進入跑道時間進行比較即可判斷是否須延後第 i 架起飛航班進入跑道之時間。當

$T_{i,ed}^b < T_{j+1,a}$ 表示第 i 架起飛航機與即將降落之航班存在一安全間距，故第 i 架起飛航機進入跑道之時間即為 Step2 所求得之結果；相反地，當 $T_{i,ed}^b \geq T_{j+1,a}$ 時在降落航班具有跑道優先使用權之情況下，則第 i 架起飛航機進入跑道之時間須延後至第 $j+1$ 架降落航機離開跑道的時間 $T_{j+1,e}$ 。綜上，在區塊等候下，綜合考量第 i 架起飛航機前後降落航機之影響後，第 i 架起飛航機進入跑道時間 ($T_{i,ed}^b$) 可表示如下：

$$T_{i,ed}^b = \begin{cases} T_{i,ed}^b & \text{if } T_{i,ed}^b < T_{j+1,a} \\ T_{j+1,e} & \text{if } T_{i,ed}^b \geq T_{j+1,a} \end{cases} \quad (3-22)$$

Step 4. 若 Step3 計算之第 i 架起飛航機進入跑道時間與 Step2 相同，亦即 $T_{i,ed}^b = T_{i,ed}^b$ ，則第 i 架起飛航機的進入跑道時間為 $T_{i,ed}^b$ ；若 $T_{i,ed}^b = T_{j+1,e}$ 僅表示第 i 架起飛航機進入跑道之預估時間延後至 $T_{j+1,e}$ ，至於是否與後續降落航班維持安全的間距仍屬未知，故在此情況下，須將 Step2 求得之起飛航機預估進入跑道之時間 $T_{i,ed}^b$ 令為 $T_{j+1,e}$ ，並將原本比較之第 j 架與第 $j+1$ 架航機，修正為第 $j+1$ 架與第 $j+2$ 架航機之後，重覆 Step3 的求解流程，直到 $T_{i,ed}^b = T_{i,ed}^b$ ，確定航機起飛之過程不會受到降落航機之影響為止。

Step 5. 由 Step1 至 Step4 得，在航管單位實施區塊等候策略，指派起飛延滯航機至跑道旁停等區停等，並考量降落航班因素後，第 i 架航機進入跑道之預估時間即為 $T_{i,ed}^b$ 。

根據上述航機滑行至跑道時間之探討可知，區塊等候下，擁擠機場中起飛延滯航機，實際進入跑道之時間除了與前一航機之起飛時間有關外，另外，也與該時段降落航機之降落密集度有關。而起飛航機進入跑道的時間則可以下表示之。

$$T_{i,d}^b = \begin{cases} T_{i,d}^b & \text{if } T_{i,h}^b \leq T_{i,d}^b \\ T_{i,ed}^b & \text{if } T_{i,h}^b > T_{i,d}^b \end{cases} \quad (3-23)$$

3.6 區塊等候下，起飛航機空側移動之模擬

經由 3.5 節航機移動過程之分析可知，區塊等候下航機出發時間之決策是以維持安全間距之滑行時間與機位空滯時間相互比較後，選擇較晚發生者以降低航機於跑道旁停等區之停等時長，進而降低航機燃油成本。而起飛航機抵達跑道旁時仍須視降落航班佔用跑道的情况，才能夠推估航機進入跑道的時間。假設機場擁擠發生之 T_0 時間，跑道旁停等區呈現空滯狀態，在引入區塊等候概念後，令

航管單位指派 k 架航機跑道旁停等區停等。而 T_o 時間停等於機門停機坪之 N 架起飛延滯航機中，因跑道旁停等區初始假設為無航機停等之狀態，所以第 1 架至第 k 架航機於區塊等候下比較之機位空滯時間均為 T_o 時間，如下式：

$$T_{i,a}^b = \text{Max}\{T_{i-1,a}^b + t_{i,st}, T_o\} \text{ for } i \in 1 \sim k \quad (3-24)$$

其中， T_o 遠早於各航機為維持安全間距之滑行時間，故區塊等候下第 1 架至第 k 架航機由機門停機坪出發之時間僅須考量前後航機的滑行安全間距，換言之，其模擬結果與機場管理單位連續指派航機至跑道旁相同。直到第 k+1 架航機，才開始比較維持安全間距之滑行時間與停等區機位空滯時間，取較晚者作為航機由機門開始滑行的時間，即式(3-11)。

圖 3.5 為本研究模擬航管單位於區塊等候下，指派 k 架航機至跑道旁停等區之停等過程中，起飛延滯航班「由機門開始滑行時間」及「進入跑道時間」之決策流程圖。以延滯起飛之第 i 架航機為例，指派第 i 架航機由機門停機坪出發前，須先確認實施該指派數量時，跑道旁停等區有無閒置之停等機位；確定有閒置之停等機位，並考量第 i 架航機與第 i-1 架航機維持足夠滑行間距後，得第 i 架航機由機門開始滑行的時間；而後，經由第 i 架航機滑行至跑道旁的距離與滑行速度換算得到的航機滑行時長，並與航機由機門出發之時間相加即為航機滑行至跑道旁的時間。至此，為第 i 架航機由機門開始滑行時間之決策流程。

承上，得知第 i 架航機滑行至跑道旁之時間後，經由考量第 i-1 架航機進入跑道時間與降落航班佔用跑道時長之影響，即可得知第 i 架航機進入跑道之時間。而，當區塊等候下，因跑道旁停等區航機指派數量太少以致於第 i 架航機滑行至跑道之時間，超過接續第 i-1 架航機之後可進入跑道之時間時，第 i 架航機進入跑道的時間則須檢視第 i 架航機滑行至跑道之時間及降落航班資訊後重新估算。最後，經由模擬所求算出之第 i 架航機「進入跑道的時間」，將分別作為第 i+k 架航機由機門開始滑行時間之參考值，以及第 i+1 架航機接續 i 架航機後可進入跑道時間之推算參考值。

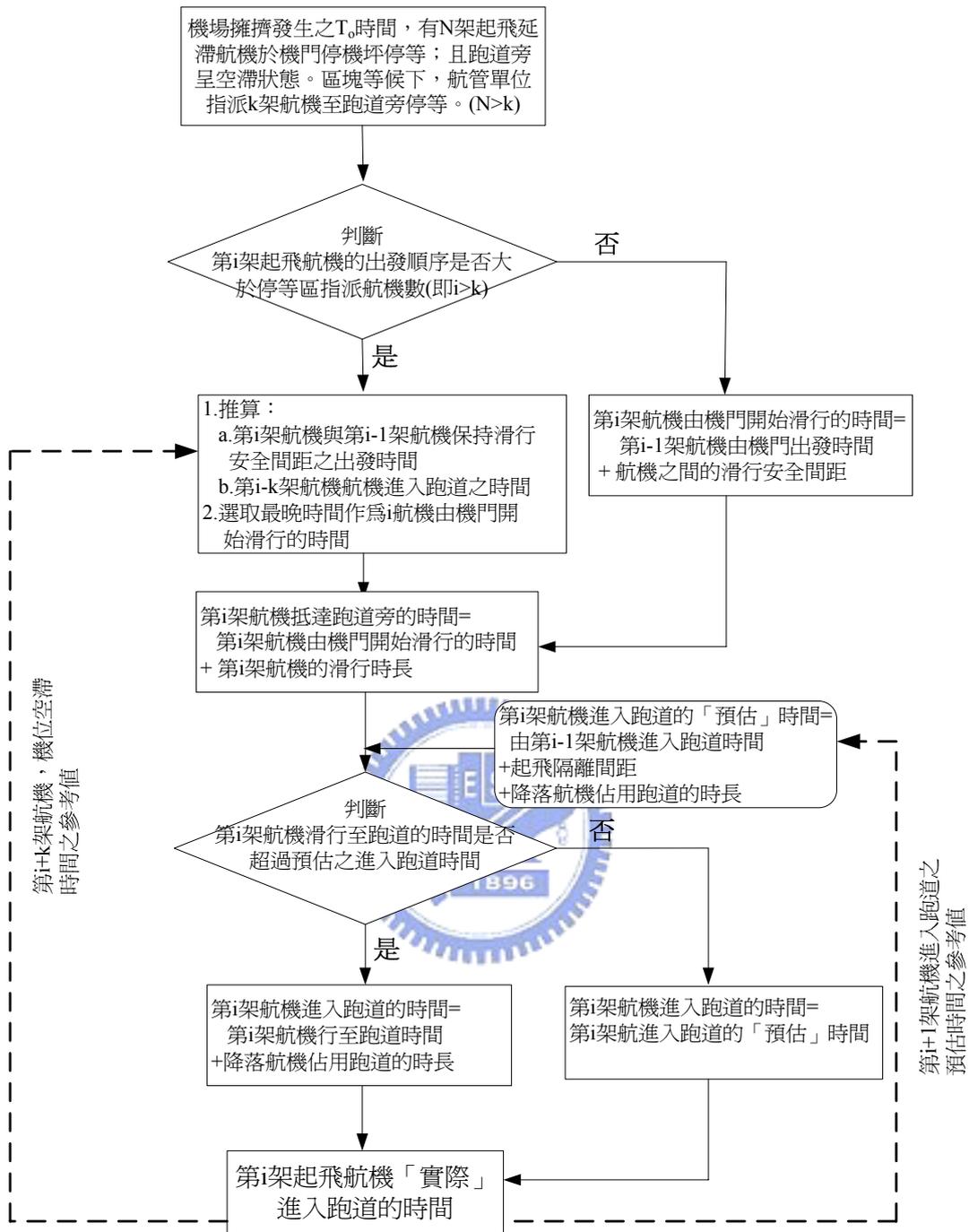


圖 3.5 區塊等候下航機起飛過程各時間之決策流程

3.7 成本函數構建

為改善航機燃油成本而提出之區塊等候概念，應用於機場空側模擬時乃利用跑道旁停等區之等候機位設定以及航機由機門停機坪出發時間之定義，以控制起飛航機於跑道旁停等之時長。根據起飛延滯航機空側滯留時長關係可知，航機的機門停等時長與跑道旁停等時長存在此消彼長關係，換言之，欲藉由降低航機於跑道旁停等時長而改善航機燃油損耗之過程，航機於機門之停等時長將隨之增加，進而對機場、航空公司衍生額外的成本。又衍生成本依影響對象之不同可分為旅客延滯時間成本、營運單位延滯成本以及航空公司成本三項。茲將延長航機機門停等時長衍生之額外成本說明於下：

旅客延滯時間成本

一般而言，機場管理單位於航機起飛前一天會依照航空公司提供之飛航任務執行班表，規劃個別航機使用機門的時間。本研究為降低航機於跑道旁停等時長，欲藉降低跑道旁停等區機位數進而增加航機之機門停等時長之作法，將造成航機出發時間的延後，連帶地，後續航機登機作業時間延後之機會亦將相對提升，進而耽誤旅客之出發時間衍生旅客延滯成本。令延滯機隊中的第 i 架航機於區塊等候下由機門停機坪出發之時間為 $T_{i,a}^b$ ，後續航機使用相同機門之時間為 $T_{i,g}$ ，可知後續航機之延滯時長為 $Max\{0, T_{i,a}^b - T_{i,g}\}$ ；又假設後續航機可搭載 P_i 位旅客；航班乘載率為 r_i ，旅客平均時間價值為 V ，則區塊等候下第 i 架航機因機門停等時長增加，造成停靠相同機門之後續航班旅客延滯登機之時間成本 PC_i 為：

$$PC_i = Max\{0, (T_{i,a}^b - T_{i,g}) \cdot r_i \cdot P_i \cdot V\} \quad (4-1)$$

營運單位延滯成本

當機場管理單位實施區塊等候，延長航機之機門停等時長時，除了將影響機場航務機關人員之調配安排外；在機場跑道使用方面，亦會因為航機出發時間的變異而可能造成跑道空滯情況。本研究將上述成本視為採行區塊等候，於機場管理單位衍生之營運單位延滯成本，包含了地勤人員之超時作業成本與跑道空滯成本。茲將成本函數說明如下：

航機於機門停機坪停等時，機場航務單位與地勤作業公司均須派員從旁協助並處理航機進出機坪以及相關之地面勤務，當航機離開機坪之時間延後意謂該班

機仍然停靠原定的機門，將造成後續班機起降之延誤，並且增加機場作業人員的工作量，此即為地勤人員之超時作業成本。令第 i 架航機停等於機坪時，其地勤作業所須之基本人員數為 G_i 人，每位作業員每小時超時作業薪資為 S ；又區塊等候下，第 i 架航機於機門停等之時長為 $t_{i,a}^b$ ，而機場採取連續指派下，第 i 架航機於機門的停等時長為 $t_{i,a}$ 。故機場管理單位因第 i 架航機滑行時間延後所衍生之超時作業工時成本 GC_i 為：

$$GC_i = \text{Max}\{0, (t_{i,a}^b - t_{i,a}) \cdot G_i \cdot S\} \quad (4-2)$$

本研究定義跑道空滯係指跑道可供航機起飛之際，後續航機無法即時進入起飛，導致跑道空滯之時長，進而衍生跑道空滯成本。令經由航機起飛模擬過程得第 i 架航機與第 $i-1$ 架航機在區塊等候下進入跑道之時間分別為 $T_{i,d}^b$ 與 $T_{i-1,d}^b$ ；第 $i-1$ 架航機佔用跑道的時長為 $t_{i-1,r}$ 且第 $i-1$ 架航機起飛後與第 i 架航機之起飛隔離間距為 $t_{i,sd}$ ，則在尚未考慮降落航班佔用跑道之影響下，第 i 架航機造成的跑道空滯時長為 $t_{i,e}^b$ ，如式(4-3)所示。

$$t_{i,e}^b = (T_{i,d}^b - T_{i-1,d}^b) - (t_{i-1,r} + t_{i,sd}) \quad (4-3)$$

又根據航管單位對降落航班採行之跑道淨空原則，以及本研究針對跑道空滯時長之定義可知，當前一架起飛航機進入跑道，後續航機滑行至跑道前(即介於 $T_{i,d}^b$ 與 $T_{i-1,d}^b$)，若有降落航機於此期間佔用跑道，則跑道空滯的時長須扣除降落航機使用跑道的時長。由於 3.2 節航機起飛模擬過程求得之航機進入跑道時間，已考量了降落航機的影響，故對第 i 架起飛航機造成之跑道空滯時長，產生影響之降落航機，其降落後離開跑道的時間必定介於第 i 架航機進入跑道之前($T_{i,d}^b$)，以及第 $i-1$ 架航機進入跑道之後($T_{i-1,d}^b$)；且降落航機佔用跑道的時長為降落航機進入降落門檻距離至離開跑道之時段即式(4-4)，式中， $t_{i,j,r}$ 表示介於第 $i-1$ 架與第 i 架起飛航機之間，降落航機佔用跑道之總時長； $T_{j,a}$ 為第 j 架降落航機通過降落門檻的時間， $T_{j,e}$ 為第 j 架降落航機離開跑道的時間， $T_{j,a} - T_{j,e}$ 則表示第 j 架降落航機佔用跑道的時長。將式(4-4)與式(4-3)合併即為航管單位實施區塊等候指派，並考量起降航機佔用跑道影響後，第 i 架起飛航機無法接續進入跑道，而導致跑道空滯的時長，亦即式(4-5)。

$$t_{i,j,r} = \sum_j (T_{j,a} - T_{j,e}) \quad \text{for } j \in \{T_{i-1,d}^b < T_{j,e} < T_{i,d}^b\} \quad (4-4)$$

$$t_{i,e}^b = (T_{i,d}^b - T_{i-1,d}^b) - (t_{i-1,r} + t_{i,sd}) - t_{i,j,r} \quad (4-5)$$

令跑道的時間價值為 R ，則跑道空滯成本 RC_i 為：

$$RC_i = \text{Max}\{0, t_{i,e}^b \cdot R\} \quad (4-6)$$

航空公司延滯成本

當機場管理單位指派航機待命的方式由連續指派改為區塊等候時，雖然航機在跑道旁停等時長之改變，直接地也改變了航機燃油損耗之情況；卻相對延長了航機於機門之停等時長，增加航機於機門停等之額外成本，如航機停等之燃油成本及航機於機門停機坪之地面空調與外部供電成本。

航機停等之燃油成本該成本主要為航機抵達跑道旁之時間，比該航機可使用跑道之時間來得早所致。其計算式大致與式(3-1)相同，惟單位時間燃油成本價格為航機引擎燃油損耗率 α_i 乘上單位燃油價格 F 所得；另外，由於區塊等候下，當航機抵達跑道之時間超過航機最早起飛時間時，則可能發生不需停等於跑道旁，即可進入跑道起飛之情況。綜上，當第 i 架航機抵達跑道旁之時間為 $T_{i,h}^b$ ，進入跑道之時間為 $T_{i,d}^b$ ，則航機停等之燃油成本 FC_i 為：

$$FC_i = \text{Max}\{0, (T_{i,d}^b - T_{i,h}^b) \cdot \alpha_i \cdot F\} \quad (4-7)$$

航機處於機門停機坪時，其航機之引擎處於關閉狀態，為提供機上空調、電力之需，航空公司須請求機場航務單位給予外部電力支援，亦即地面空調與外部供電成本。假設供電設備單位時間之收費為 E ，又第 i 架航機因區塊等候而增加之機門停等時長，與地勤人員超時工作之時長相同，則第 i 架航機之地面空調與外部供電成本 EC_i 為：

$$EC_i = \text{Max}\{0, (t_{i,a}^b - t_{i,a}) \cdot E\} \quad (4-8)$$

第四章、範例分析

本研究以中正國際機場之南機坪空側地面為參考，模擬機場航機擁擠情況以進行範例分析。首先，以機場管理單位採連續指派方式進行起飛延滯航機之指派，以瞭解尚未引入區塊等候指派之航機燃油損耗情形；隨後，再以區塊等候下航機指派方式之結果與前者進行比較及分析。於範例分析上，將以機場空側航機移動研究相關文獻與本研究調查所得之資料為依據進行設定；成本資料蒐集，由於部分航機空側作業成本屬航空公司業務機密，成本資料不易取得，故一些成本資料在不失一般性之前提與假設下進行合理推估。透過對所構建模式之求解結果，說明本模式之操作方法及在實務上之應用性，並藉由對模式中重要成本參數進行敏感度分析，以及探討空側相關參數變動對跑道旁停等區容量之影響。本範例分析運用試算表軟體 Excel 2003 構建延滯航班空側移動及停等模型，以求解航機起飛延滯時間與相關延滯成本。

4.1 基本參變數設定

在資料蒐集方面，本範例分析需蒐集之資料可分為兩部分。第一，航機相關資料包含航機基本資料與影響燃油損耗之因素，以及航機空側移動之相關參數；航機燃油損耗參數之蒐集本研究擬參考國際民航組織(ICAO)之引擎噴射物測試報告，設定本研究探討機型之燃油損耗參數；於空側相關參數部分，則透過現場觀察並參考中正國際機場空側相關研究文獻之資料為依據進行設定，另於起降航班使用跑道之基本規定則參考表 3.1 之數據。第二，航機延長停等於機門之相關成本資料，包括旅客時間價值、超時作業之工時成本、跑道時間價值、地面空調與外部供電設備使用費等，由於部分資料涉及業務機密，故在範例分析上，本研究透過對營運單位之電話訪談及合理之假設下進行設定。於求算跑道時間價方面，本研究參考中正國際機場之營運統計以及民航局統計資料，得知民國 94 年機場之降落費營收為 42 億 4 千萬元，進出中正國際機場之客運航機佔總起降架次之 79.53%，而客運航機中又有 39% 是經由 06/24 跑道起降，經換算，機場因客運航機起降 06/24 跑道，而每天收取之降落費約為 358 萬元，另由航機起降班表亦可發現客運航機經由跑道起降之時間集中於 7:00 至 23:59，故經由估計可知 06/24 跑道每分鐘之時間價值約為 3,421 元。

於航機地面空調與外部供電成本之計算部分。機場提供之服務類型依設備使用數量可分為單線服務與雙線服務，而起飛延滯航班選擇何項地勤服務服務之依據，本研究擬以乘載旅客數是否超過 200 人為標準。當搭乘該航班之旅客人數超過此標準便採雙線服務，低於此標準之航班則採單線服務；另外由於民航局「使用航空站飛行場助航設備及相關設施收費標準」規定之「飛機供電設備使用費」與「機艙空調機使用費」均以元/小時為計費方式，而本研究考量之成本計算單

位則為元/分鐘，因此，透過時間單位轉換後即為本研究之「航機地面空調與外部供電成本」。

表 4.1 範例相關參數值

項目	數值	符號	資料來源
航機滑行安全距離(公尺)	60	$S_{i-1,i}$	場訪查現
航機滑行速度(海哩/小時)	10	v	吳世偉，民 93
旅客單位時間價值(元/分鐘)	2	V_i	許巧鶯等人，民 92
基本地勤人員數(人/架)	5	G_i	現場訪查
超時作業薪資(元/小時)	300	S	許巧鶯等人，民 92
跑道時間價值(元/分鐘)	3421	R	中正國際機場營運分析
航空燃油價格(元/公升)	21.8	F	中國石油(民國 94 年 5 月)
地面空調與外部供電成本(元/分鐘)	128(雙線) 107(單線)	E	民航局

資料來源：本研究整理

4.2 範例說明

歷年來，機場由於天候因素而暫時關閉之案例時有所聞，對 1 月至 3 月之中正國際機場而言，更是如此。本研究採民國 94 年 2 月 16 日之中正國際機場南機坪起降航班資訊為分析。當日早上中正機場因濃霧籠罩，能見度低於 06/24(南跑道)之航機起降標準。因此，機場被迫暫時關閉長達 65 分鐘，其關閉時間為 8:00 至 9:05。雖然機場暫時關閉，以致表定起飛航班於機門停機坪等待，但航空公司仍然能夠繼續進行旅客登機與行李裝載作業，其目的是為了方便起飛延滯航班於機場跑道再次開放時，可隨時接受塔台的指揮滑行至跑道準備起飛。而受影響之航班資訊如表 4.2 所示，其中，班表所標示之表定起飛時間係指航班關艙時間。

由於中正機場國際航班之起降以連續起飛與連續降落為主，且當日班表 8:00 至 10:00 僅有一架菲航 PR869 自馬尼拉至台北之航班，原訂於 8:45 抵達南機坪。經此資訊可知，中正機場於 9:05 分開放 06/24 跑道供航機起降時，受濃霧影響而延滯起飛之航班，在航管單位之規劃下可連續使用 06 跑道起飛。

表 4.2 受機場暫時關閉影響之起飛航班資訊

起飛順序 <i>i</i>	表定起飛 時間	班次	機門	機型	座位數	飛機分類	航機延 誤類型
1	08:00	KA489	C3	A330-300	294	重型	因機場關閉而延誤
2	08:00	MH69	B1	B737-400	386	大型	
3	08:00	EF306	C1	B757-200	207	大型	
4	08:00	NX505	B3	A321	179	大型	
5	08:00	NW70	B5	B747-400	386	重型	
6	08:15	NX501	C10	A319	122	大型	
7	08:20	BR851	C7	B747-400	386	重型	
8	08:30	TG631	B9	A330-300	294	重型	
9	08:30	BR211	C4	B747-400	386	重型	
10	08:35	CX407	B8	B777-300	386	重型	
11	08:40	EG218	B7	B747-200	416	重型	
12	09:20	NX617	B2	A321	179	大型	關連性 延誤
13	09:20	TG637	B4	A330-300	294	重型	
14	09:25	CX471	B6	B777-300	386	重型	
15	09:30	BR865	C5	A330-200	252	重型	推擠性 延誤
16	09:33	GE351	B1	A320-200	150	大型	
17	09:35	BR271	C8	A330-200	252	重型	關連性 延誤
18	09:38	AE837	C1	B737-800	168	大型	推擠性 延誤
19	09:45	NX501	C10	A319	122	大型	
20	09:50	BR227	C3	B747-400	386	重型	
21	09:55	PR897	B3	A330-300	294	重型	

資料來源：中正國際機場航班表(民國 94 年 2 月 16 日)

另外，依照中正機場航務組根據各航空公司前一日擬定之班表，排定各航機使用機門之時間，在沒有任何延滯因素的干擾下，使用相同機門之前後航班本應具有足夠的緩衝時間。然而，在當日早上機場暫時關閉的影響下，原本應該於 8:00 至 9:00 之間起飛的 11 架航班，必須停等於機門。因此，當機場於 9:05 開放跑道供航機起降時，部分起飛延滯航班停等於機門之時間，已超過航務組安排後續航班停靠機門的時間，而受此影響的航班包括預定停靠 B1 機門之 GE351、C1 機門之 AE837、B5 機門之 CX403 及 C10 機門之 NX619 班次；另外

7 架延滯航班離開機門的時間亦與後續航班表定停靠機門之時間十分接近。後續航機表定使用各機門之時間如表 4.3 所示。

表 4.3 後續航班停靠機門之資訊

表定起飛/ 抵達時間	班次	目的地/ 出發地	機門	機型	停靠機門 時間	乘載率 r_i	座位數 P_i
09:50	BR227	吉隆坡	C3	B747-400	09:10	74.5%	386
09:20	GE351	澳門	B1	A320-200	08:40	77.8%	150
09:10	AE837	仰光	C1	B737-800	08:30	58.5%	168
09:55	PR897	馬尼拉	B3	A330-300	09:15	73.7%	294
09:35	CX403	香港	B5	A340-300	08:55	73.1%	287
09:25	NX619	澳門	C10	A319	08:45	77.8%	122
10:00	BR1122	青森	C7	A330-200	09:20	71.5%	252
10:10	EG200	東京	B9	B747-300	09:30	72.7%	400
10:20	BR116	札幌	C4	A330-200	09:40	77.7%	252
13:20	CX450	東京	B8	B747-400	12:40	72.7%	386
10:10	CX469	香港	B7	B777-300	09:30	73.1%	386
10:10	GE353	澳門	B2	A321	09:30	77.8%	179
10:40	NX625	澳門	B4	A321	10:00	77.8%	179
11:00*	CX530	香港	B6	A330-200	11:00	71.9%	150
11:15*	KA486	香港	C5	A330-200	11:15	71.9%	150
11:00	EF302	濟州	B1	MD83	10:20	57.0%	172
12:55*	EL2111	名古屋	C8	B737-700	12:55	63.3%	149
15:05*	BR802	澳門	C1	B747-400	15:05	77.6%	386
13:40*	BR808	澳門	C10	MD90	13:40	77.6%	152
10:50*	BR76	曼谷	C3	B747-400	10:50	77.2%	386
11:50	NX605	澳門	B3	A321	11:10	77.8%	179

資料來源：中正國際機場航班表(民國 94 年 2 月 16)、民航局統計資料(民國 92 年)

「*」：降落航班

由南機坪出發，欲使用 06 跑道起飛之各航機，須由拖機後推至編號 SS 之滑行道後，再由航機滑行經編號 WC、SP 之滑行道後，再轉入 S1 滑行道準備進入跑道起飛。其中，隨著停等機門之不同，航機滑行至跑道旁的距離也有所差異，進而將影響各航班接續進入跑道的時間，而各航班經由不同機門滑行至跑道旁停等區的距離如表 4.4 所示；另外，當航班停等機門編號為 C5R 或 B1R，則表示該航班停等於南機坪之遠端(接駁)機坪，由於機場航務單位將航機指派至遠端停機坪停等時，均以固定之機門編號為標示(如 C5R、B1R)，礙於難以明確知曉航班停於接駁機坪之位置，故本研究以航機由不同接駁機坪滑行至 06 跑道之平均滑行距離，代表航機於接駁機坪滑行至 06 跑道之距離。

表 4.4 中正國際機場南機坪，各機門至 06 跑道旁停等區之距離

機門編號	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1
路徑長度	2300	2365	2430	2495	2560	2625	2690	2755	2820	2885
機門編號	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
路徑長度	1650	1715	1780	1845	1910	1975	2040	2105	2170	2235
機門編號	C5R	B1R								
路徑長度	1880	2880								
備註	單位：公尺									

資料來源：台北飛航情報區飛航指南(民國 90 年 11 月)

4.3 機場管理單位連續指派之分析

當機場受到不同因素導致機場空側地面擁擠時，本研究所建議之區塊等候是否能夠達到降低機場延滯成本，應以機場航管單位以連續指派航機至跑道旁停等，起飛延滯航班衍生之延滯成本為比較之基準，進行比較後才可得知不同停等區容量下，採行區塊等候之效益是否存在。

4.3.1 連續指派下航機移動情況

當機場 06/24 跑道再次開放時，假設機場管制台擬使後續航班可於表定時間使用機門之情況下，以連續指派之方式指揮延滯航班至跑道旁停等。其指派之原則即為航機間須保持一滑行安全間距，以及航機起飛之後所須之隔離標準，當航班抵達跑道旁，如遇前機尚未起飛或起飛後未與該機保持足夠之隔離間距，則該航班就必須在跑道旁等待。各延滯航機從機門停機坪開始滑行的時間、抵達跑道旁的時間以及進入跑道的時間如下表所示。另各航機的滑行時長，以及與前一架起飛航機所保持之間距亦於表 4.5 中附註。

表中所提「時間」部分，「表定起飛時間」係指航機關艙時間；「可滑行時間」係指與前機保持滑行安全間距後，可開始滑行的時間；「由機門出發的時間」係指拖機已經將起飛航機後推至滑行道之後，航機可自行滑行之時間；「抵達跑道旁的時間」係指起飛航機由滑行狀態改變為停等狀態的時間；「進入跑道的時間」係指起飛航機結束停等，可進入跑道起飛的時間。至於「時長」部分，「與前一架航機之間距」係指該航機為了與前機保持安全間距必須在機門停機坪停等的時長，其正值表示前機從機門出發時，須在機門停機坪停等的時長；負值則表示該航機可較前一架起飛機提早由機門停機坪出發的時長。「滑行時長」則為該航機由機門後推至滑行道後，滑行至跑道旁所須的時長。「與前機之起飛隔離間距」則為該航機與前一架起飛機在航空管制下應符合之隔離標準。

由於機場航機停等之相對距離變異甚大，因此航機由機門停機坪開始滑行的時間並非一定按照其起飛順序而安排之。由表 4.5 可知，機場 06/24 跑道於 9：

05 開放航機起降後，當 KA489 班次於 9：05 開始滑行時，由於第 2 架起飛之 MH69 班次滑行距離比 KA489 班次來的遠，且兩航機的相對距離已經超過滑行安全間距 60 公尺之限制，故 MH69 班次於 9：02 左右便開始滑行，其滑行時間比 KA489 班次早 2.4 分鐘。而由第 4 架與第 5 架起飛航機之先後滑行關係，則可發現當 NX505 班次於 9:04 左右開始滑行時，起飛順序在其之後的 NW70 班次，滑行至跑道之距離比 NX505 班次還近 130 公尺，且為了保持航機滑行之安全間距 60 公尺，在航機以每小時 10 海浬固定速度滑行之情況下，NW70 班次至少須在機門等待 NX505 班次滑行 0.63 分鐘後，才能在遵守航機滑行間距限制之情況下，緊接於 NX505 班次之後滑行。



表 4.5 連續指派下各航班之空側移動時間 (9:05, $T_{1,a}=0$)

起飛順序 i	班次	機門 g	由該機門 出發之滑 行距離 (公尺) L_i	與前一架航機 的間距(分鐘) $t_{i,st}$	由機門出發 的時間 (分鐘) $T_{i,a}$	滑行時長 (分鐘) $t_{i,m}$	抵達跑道旁 的時間 (分鐘) $T_{i,h}$	進入跑道 的時間 (分鐘) $T_{i,d}$	與前機之起飛隔 離間距(分鐘) $t_{i-1,r} + t_{i,sd}$
1	KA489	C3	2105	0.00	0.00	7.02	7.02	7.02	-
2	MH69	B1	2885	-2.40	-2.40	9.62	7.22	9.97	2.95
3	EF306	C1	2235	2.37	-0.03	7.45	7.42	11.92	1.95
4	NX505	B3	2755	-1.53	-1.57	9.18	7.62	13.87	1.95
5	NW70	B5	2625	0.63	-0.93	8.75	7.82	15.82	1.95
6	NX501	C10	1650	3.45	2.52	5.50	8.02	18.77	2.95
7	BR851	C7	1845	-0.45	2.07	6.15	8.22	20.72	1.95
8	TG631	B9	2365	-1.53	0.53	7.88	8.42	23.67	2.95
9	BR211	C4	2040	1.28	1.82	6.80	8.62	26.62	2.95
10	CX407	B8	2430	-1.10	0.72	8.10	8.82	29.57	2.95
11	EG218	B7	2495	5.00	5.72	8.32	14.03	32.52	2.95

資料來源：本研究結果

表 4.5 連續指派下之航班空側移動時間(續) (9:05, $T_{1,a}=0$)

起飛順序 i	班次	機門 g	第 i 架航機由機門滑行至跑道之距離(公尺) L_i	與前一架航機的間距(分鐘) $t_{i,st}$	表定起飛時間(分鐘)	可滑行之最早時間(分鐘)	滑行時長(分鐘) $t_{i,m}$	抵達跑道旁的時間(分鐘) $T_{i,h}$	進入跑道的時間(分鐘) $T_{i,d}$	與前機之起飛隔離間距(分鐘) $t_{i-1,r} + t_{i,sd}$
					由機門出發的時間(分鐘) $T_{i,a}$					
12	NX617	B2	2820	-0.88	15.00	2.83	9.40	24.40	35.47	2.95
					15.00					
13	TG637	B4	2690	0.63	15.00	15.63	8.97	24.60	37.42	1.95
					15.63					
14	CX471	B6	2560	0.63	20.00	16.27	8.53	28.53	40.37	2.95
					20.00					
15	BR865	C5	1975	2.15	25.00	22.15	6.58	31.58	43.32	2.95
					25.00					
16	GE351	B1	2885	-2.83	28.00	22.17	9.62	37.62	46.27	2.95
					28.00					

資料來源：本研究結果

表 4.5 連續指派下之航班空側移動時間(續) (9:05, $T_{1,a}=0$)

起飛順序 i	班次	機門 g	第 i 架航機由機門滑行至跑道之距離(公尺) L_i	與前一架航機的間距(分鐘) $t_{i,st}$	表定起飛時間(分鐘)	可滑行之最早時間(分鐘)	滑行時長(分鐘) $t_{i,m}$	抵達跑道旁的時間(分鐘) $T_{i,h}$	進入跑道的時間(分鐘) $T_{i,d}$	與前機之起飛隔離間距(分鐘) $t_{i-1,r} + t_{i,sd}$
					由機門出發的時間(分鐘) $T_{i,a}$					
17	BR271	C8	1780	3.88	30.00	31.88	5.93	37.82	48.22	1.95
					31.88					
18	AE837	C1	2235	-1.32	33.00	30.57	7.45	40.45	51.17	2.95
					33.00					
19	NX501	C10	1650	2.15	40.00	35.15	5.50	45.50	53.12	1.95
					40.00					
20	BR227	C3	2105	-1.32	45.00	38.68	7.02	52.02	55.07	1.95
					45.00					
21	PR897	B3	2755	-1.97	50.00	43.03	9.18	59.18	59.18	2.95
					50.00					

資料來源：本研究結果

表 4.5 所代表之各航班移動情形可由圖 4.1、4.8 說明之。圖 4.1 橫軸為延滯航班，其順序依照航機起飛順序由左而又排列；縱軸則表示時間， $t=0$ 即為機場開放的時間 9:05。圖上「航班由機門出發時間」曲線呈現第 1~11 架起飛航班，在時間上航班起飛順序與空間上航班滑行距離、滑行安全間距相互影響之結果；第 12~20 架航班則是受到延滯影響，即便於表定起飛時間關閉艙門，準時從機門停機坪滑行至跑道卻仍須在跑旁停等的「關連性延誤」或「推擠性延誤」航班。其中，除了第 13 架與第 17 架航班因為滑行安全距離不足須延後由機門出發時間，其他航班均依照原訂的表定起飛時間由機門出發。

圖 4.2 之橫軸表示各起飛延滯航班，縱軸則表示各航班因機場擁擠而空側地面停等之時長。該圖顯示機場跑道開放後，連續指派下各航班於機場空側地面之機門停等時長及跑道旁停等時長；其中，跑道旁停等時長又可分為等待前機進入跑道時長與因起飛隔離限制而必須等待的時長。由該圖可知，因機場關閉而延誤之起飛航班，在連續指派下於跑道旁排隊之趨勢，以第 11 架起飛航班於跑道旁等待 18 分鐘為最久。而後續之起飛航班即關連性延誤航班與推擠性延誤航班，由於航機之間，表定起飛時間之間距較長，降低了航機起飛率，因此亦減少了後續航班於跑道旁停等的時長。



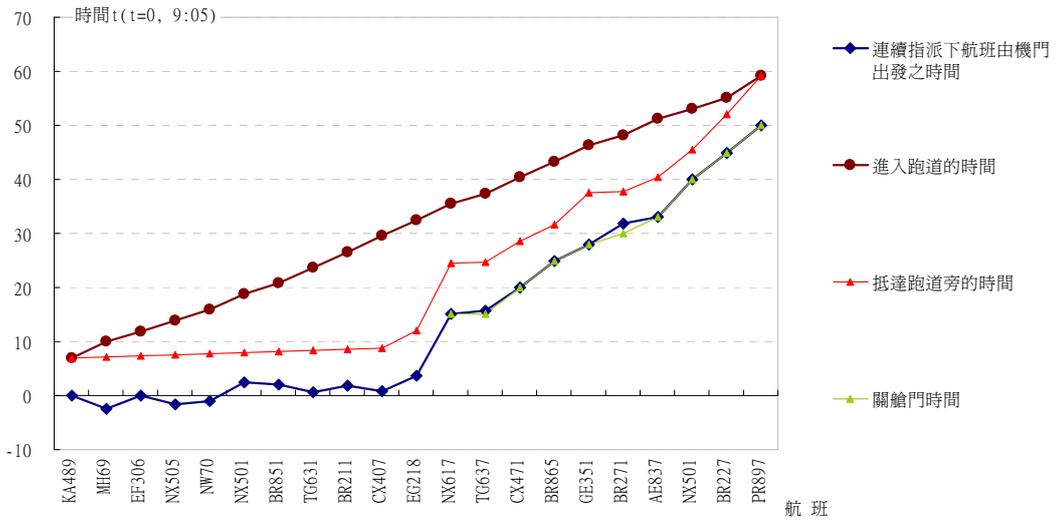


圖 4.1 連續指派下各航班移動時間比較

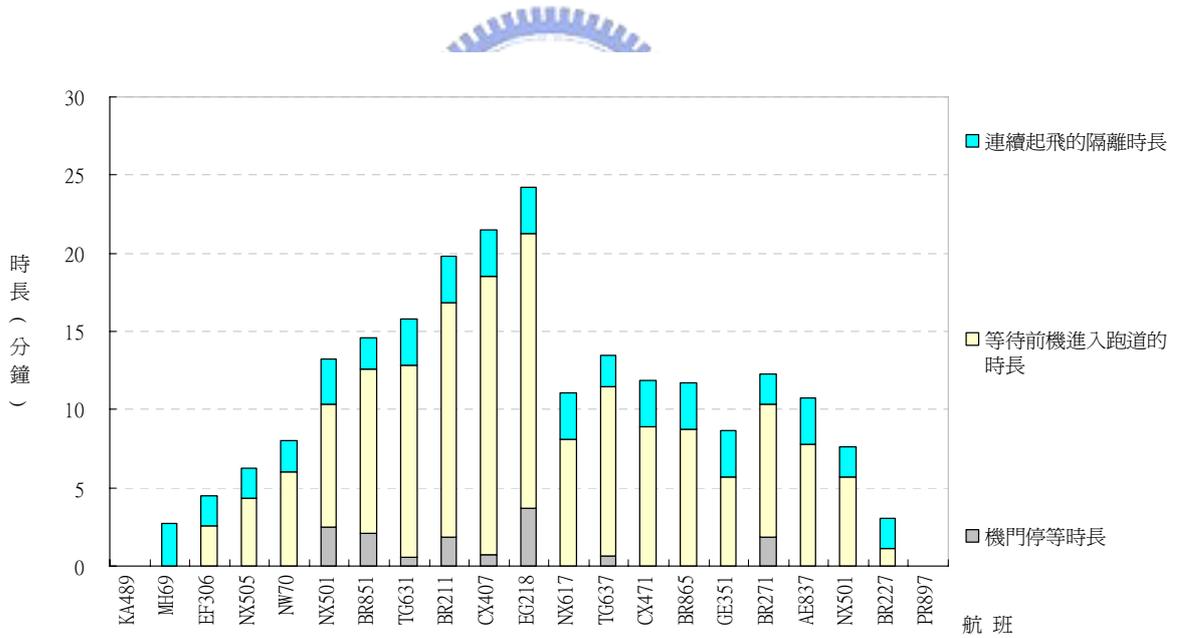


圖 4.2 連續指派下各航班之空側地面停等時長

4.3.2 連續指派下航機燃油成本

因跑道暫時關閉導致起飛延滯之各航班，在航管單位採取連續指派方式下，可於 06 跑道重新開放後的 5.72 分鐘內將所有起飛航班指派至跑道旁停等，且由於 8:00 至 10:00 之間僅一架降落航班之故，延滯航班在塔台管制員之規劃下亦可連續起飛。然而，在航機起飛隔離標準之影響下，20 架延滯起飛之航班中除了 KA489 班次(第 1 架起飛航班)無須在跑道旁停等，其他所有班次在塔台之安排下則必須在跑道旁待命。

而航機燃油成本之計算方式是以航機停等於跑道旁耗費之燃油損耗量乘上燃油價格所得之，即式(32)。另外，表 4.6 各航班之燃油成本為本研究根據各航班機型，參考 ICAO 之引擎噴射物含量分析表，所求得之各航班停等時單位時間燃油損耗量，與各航班之跑道旁停等時長相乘之結果。

將燃油成本與航機停等時長之關係作進一步分析，則可以圖 4.3 說明之。圖 4.3 之橫軸顯示各起飛延滯航班，左邊縱軸表示航機的燃油成本，右邊縱軸則表示各航班於跑道旁停等之時長，長條圖為各航班的燃油成本，各航班對應於曲線上之各點則為該航班於跑道旁的停等時長。該圖顯示除了航機停等於跑道旁的時長對航機燃油成本有所影響外，各航班機型之差異對航機燃油成本亦有所影響。此一結果之呈現是由於延滯航班中大型航機(Large)與重型航機(Heavy)引擎配備之差異。就單具引擎之比較來看，重型航機每分鐘平均燃油損耗率約為大型航機之 3 倍，以 NW70 航班(第 5 架)與 NX501 航班(第 6 架)為例，雖然 NW70 航班停等於跑道旁之時長較 NX501 航班來的短，但 NW70 航班為重型航機，其引擎之燃油損耗率比 NX501 航班來的大，因此，形成航班雖然較早出發，但燃油成本仍比後續航機高的現象。

另外，同樣以重型航機作比較，則可發現航機引擎數差異也會對各航班燃油成本產生極大的影響，以 BR211 航班(第 9 架)與 CX407 航班(第 10 架)為例，兩架航班均為重型航機，且就單一具引擎之燃油損耗率來看，其損耗亦無差異，惟 BR211 航班之引擎數為 CX407 航班之 2 倍，意謂在相同之停等時長下，其燃油損耗較 CX407 航班來的多。因此，儘管 BR211 航班之停等時間比 CX407 航班少 2.75 分鐘，但在引擎數較多之影響下，其燃油成本卻比 CX407 航班多了 12,423 元。

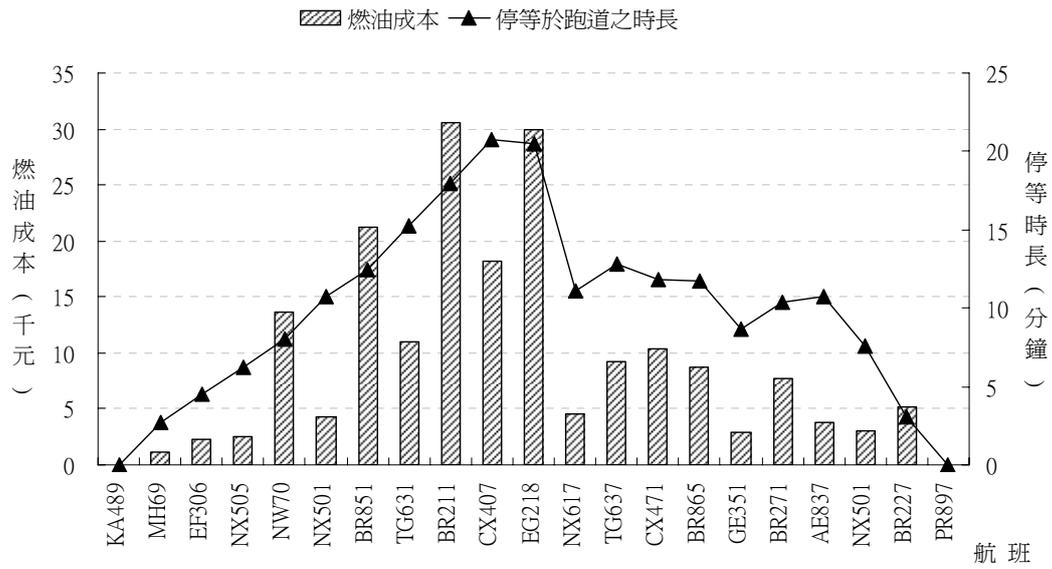


圖 4.3 連續指派下各航班於跑道旁停等之燃油成本及停等時長



表 4.6 連續指派下起飛航機燃油成本

起飛順序	班次	停等於跑道旁的 時長(分鐘) $t_{i,h}$	機型	單具引擎燃 油損耗率(公斤/秒)	引擎數 (具)	航機燃油損耗率 (公升/分鐘) ^a α_i	燃油成本 (元) ^b FC_i
1	KA489	0.00	A330-300	0.221	2	33.2	0
2	MH69	2.75	B737-400	0.124	2	18.6	1,115
3	EF306	4.50	B757-200	0.152	2	22.8	2,237
4	NX505	6.25	A321	0.124	2	18.6	2,534
5	NW70	8.00	B747-400	0.26	4	78.0	13,603
6	NX501	10.75	A319	0.124	2	18.6	4,359
7	BR851	12.50	B747-400	0.26	4	78.0	21,255
8	TG631	15.25	A330-300	0.221	2	33.2	11,021
9	BR211	18.00	B747-400	0.26	4	78.0	30,607
10	CX407	20.75	B777-300	0.268	2	40.2	18,184
11	EG218	20.48	B747-200	0.224	4	67.2	30,007

資料來源：本研究結果。a. 航空燃油(Jet A)1 公升 = 0.8 公斤；b. 每公升航空燃油(Jet A)為 21.8 元(新台幣)

表 4.6 連續指派下起飛航機燃油成本(續)

起飛順序	班次	停等於跑道旁的 時長(分鐘) $t_{i,h}$	機型	單具引擎燃 油損耗率(公斤/秒)	引擎數 (具)	航機燃油損耗率 (公升/分鐘) ^a a_i	燃油成本 (元) FC_i
12	NX617	11.07	A321	0.124	2	18.6	4,487
13	TG637	12.82	A330-300	0.221	2	33.2	9,262
14	CX471	11.83	B777-300	0.268	2	40.2	10,370
15	BR865	11.73	A330-200	0.227	2	34.1	8,710
16	GE351	8.65	A320-200	0.104	2	15.6	2,942
17	BR271	10.40	A330-200	0.227	2	34.1	7,720
18	AE837	10.72	B737-800	0.109	2	16.4	3,820
19	NX501	7.62	A319	0.124	2	18.6	3,088
20	BR227	3.05	B747-400	0.26	4	78.0	5,186
21	PR897	0.00	A330-300	0.221	2	33.2	0
總計							190,508

資料來源：本研究結果。a. 航空燃油(Jet A)1 公升 = 0.8 公斤；b. 每公升航空燃油(Jet A)為 21.8 元(新台幣)

4.3.3 連續指派下後續航班機門停靠時間之分析

一般而言，各航班於機門停靠之時間，通常為中正機場航務組依據各航空公司給予之航班起降時間，進行適當安排所訂定。將本研究取得之航班延誤資訊進一步整理成表 4.8 可發現，當機場於 9:05 開放跑道供航機起降時，有 4 架航班由機門開始滑行的時間，已超過航務組安排後續航班停靠相同機門之時間，該停靠時間係指後續航班在機門執行飛航前各項地勤作業及旅客登機之起始時間，本研究假設表定起飛時間前 40 分鐘即為各航班之停靠時間。而其他延滯航班停等於機門之時間則尚未超過後續航班停靠機門之時間，後續航班停靠機門的時間如表 4.3 之「停靠機門時間」所示。

針對上述情況，若機場管理單位並未重新安排 4 架機門停靠時間被延誤之航班，停靠至機場空側其它空置機門；又或是航空公司為避免登機作業變動對旅客造成之不便，因此不願臨時改變既定之停機位。則此 4 架航班可停靠機門之最早時間即為前一班停靠相同機門航班之離開時間。對起飛延滯航班而言，所謂最早離開機門的時間便是在機場塔台實施航機連續指派策略，將航班均指派至跑道旁停等時才會發生，亦即表 4.5 之「航班由機門出發的時間」。故 4 架停靠機門時間被延滯之航班於跑道重新開放後，最早可停靠機門的時間如表 4.7 所示。

表 4.7 機門停靠時間被延誤之航班，可停靠機門之最早時間(9:05, $T_{1,a}=0$)

起飛順序 i	班次 (前)	機門	班次 (後)	前一航班離開機門的時間 $T_{i,a}$
2	MH69	B1	GE351	-2.40
3	EF306	C1	AE837	-0.03
5	NW70	B5	CX403	-0.93
6	NX501	C10	NX619	2.52

資料來源：本研究結果

歸納連續指派下，起飛延滯航班由機門出發之時間與後續航班停靠機門時間之關係，可以圖 4.4 表示，該圖橫軸代表各航班，縱軸表示時間，圖中曲線所對應之時間為起飛延滯航班於跑道開放後，塔台以連續指派方式規劃各航班離開機門之時間，而長條圖所對應的時間則為後續航班停靠該機門的時間。由圖 4.4 可知，因機場關閉而延誤之 11 架起飛延滯航班於 06/24 跑道重新開放航機起降後的 6 分鐘內，均離開機門停機坪。而對停靠相同機門之後續航班而言，除了表 4.7 的 4 架後續航班因前機無法依照航務組安排之停靠時間準時於機門停等外，其餘後續航班停靠機門之時間均不會因機場暫時關閉而有所影響。

另外，由班表資訊與圖 4.4 亦可知推擠性延誤航班與前一架停靠相同機門航機之關係如表 4.9，以 GE351 航班(第 16 架)為例，該航班與 MH69(第 2 架)停靠相同之機門，且該航班預定於機門停靠 40 分鐘，然而，當 MH69 航班離開機門後，GE351 航班實際停靠在機門的時長為 30.4 分鐘，故該航班離開機門的時間

即為 MH69 航班離開機門的時間 9:03 加上 GE351 實際在機門停等的時長，得知 GE351 航班離開機門時間為 9:33。

表 4.9 推擠性延誤航班停靠機門資訊

起飛順序 i	班次 (前)	機門	起飛順序 i	班次 (後)	後續航班表定停靠機門時長(分鐘)	後續航班實際停靠機門時長(分鐘)
2	MH69	B1	16	GE351	40	30.4
3	EF306	C1	18	AE837	40	33.0
6	NX501	C10	19	NX501	40	37.5
1	KA489	C3	20	BR227	40	40

資料來源：本研究結果

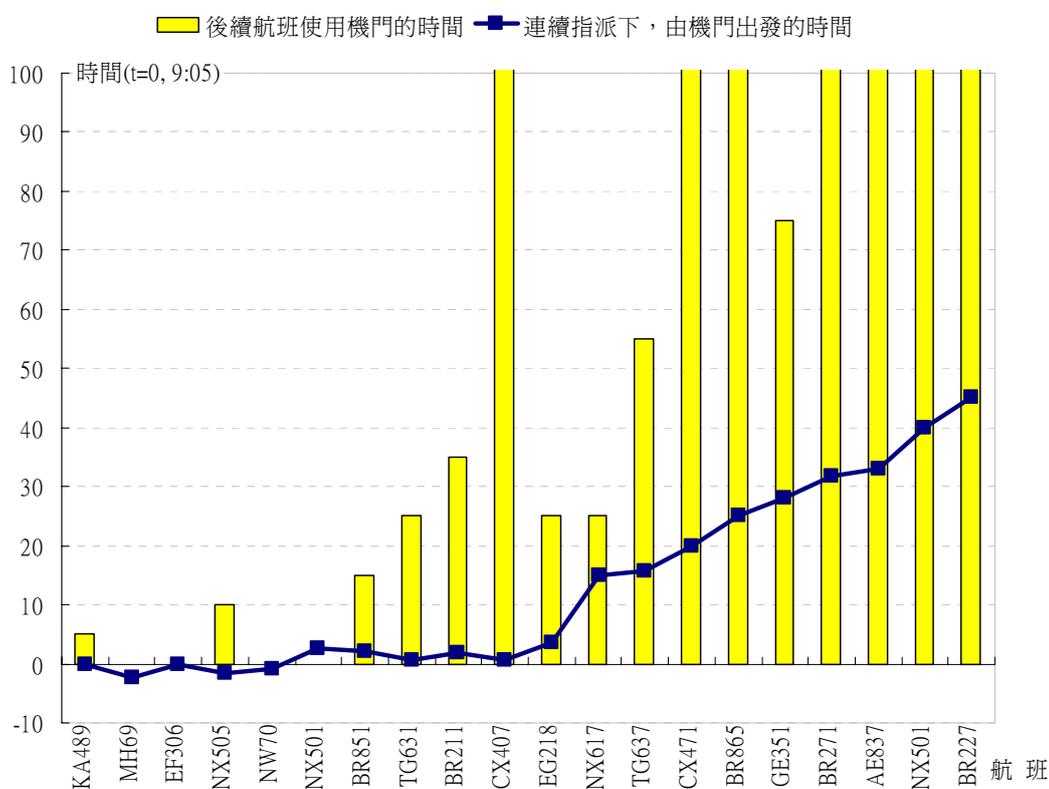


圖 4.4 連續指派下各航班離開機門時間與後續航班停靠機門時間

表 4.8 連續指派下停靠相同機門之後續航機被延滯的時長 (9:05, $T_{1,a}=0$)

班次	機門	後續航機預定 停靠機門時間	跑道開放 時間	後續航班停靠 機門之時間 (分鐘) $T_{i,g}$	前一航班離開 機門的時間 (分鐘) $T_{i,a}$	後續航班停靠相同 機門被延誤的時長 (分鐘) $T_{i,a} - T_{i,g}$
BR227	C3	09:10	09:05	5	0.00	-5.00
GE351	B1	08:40	09:05	-	-2.40	-
AE837	C1	08:30	09:05	-	-0.03	-
PR897	B3	09:15	09:05	10	-1.57	-11.57
CX403	B5	08:55	09:05	-	-0.93	-
NX619	C10	08:45	09:05	-	2.52	-
BR1122	C7	09:20	09:05	15	2.07	-12.93
EG200	B9	09:30	09:05	25	0.53	-24.47
BR116	C4	09:40	09:05	35	1.82	-33.18
CX450	B8	12:40	09:05	215	0.72	-214.28
CX469	B7	09:30	09:05	25	5.72	-19.28

資料來源：本研究結果

表 4.8 連續指派下停靠相同機門之後續航機被延滯的時長(續)

班次	機門	後續航機預定 停靠機門時間	跑道開放 時間	後續航班停靠 機門之時間 (分鐘) $T_{i,g}$	前一航班離開機 門的時間 (分鐘) $T_{i,a}$	後續航班停靠相同 機門被延誤的時長 (分鐘) $T_{i,a} - T_{i,g}$
GE353	B2	09:30	09:05	25	15.00	-10.00
NX625	B4	10:00	09:05	55	15.63	-39.37
CX530	B6	11:00	09:05	115	20.00	-95.00
KA486	C5	11:15	09:05	130	25.00	-105.00
EF302	B1	10:20	09:05	75	28.00	-47.00
EL2111	C8	12:55	09:05	230	31.88	-198.12
BR802	C1	15:05	09:05	360	33.00	-327.00
BR808	C10	13:40	09:05	275	40.00	-235.00
BR76	C3	10:50	09:05	105	45.00	-60.00
NX605	B3	11:10	09:05	125	50.00	-75.00

資料來源：本研究結果

綜上，中正國際機場於民國 94 年 2 月 16 日 8:00 至 9:05，因濃霧而暫時關閉機場以致該時段各航班之起降延誤，並造成機場南機坪共計 20 架起飛航班受到影響。當機場跑道再次開放航機起降時，機場塔台若採取連續將延滯航班指派至跑道旁停等，則整體延滯航班損耗之燃油成本為 190,508 元；另外，就停靠相同機門之後續航班所受到的影響來看，在塔台實施此一指派方式下，除了 4 架航班因機場關閉時間已超過表定停靠機門時間外，其他航班均可依照表定時間停靠於機門，進行旅客登機及行李裝卸等地勤作業。

4.4 區塊等候下航機燃油損耗

根據 5.3 節之分析可知，機場塔台若在跑道開放後，指揮各航班連續滑行至跑道旁停等，將造成各航班無謂之燃油損耗。又依據各航班後續航機停靠機門時間之分析結果，以及航機燃油損耗與其他衍生成本之損益關係，本研究遂提出將起飛延滯航班停等於機門停機坪之概念，並引用 3.6 節所構建之區塊等候下航機移動模型，代入範例中求算起飛延滯航機於航管單位採取不同指派策略時，各航班於空側移動之時間，藉此計算起飛延滯航機之燃油成本及衍生成本。以評估此一機場擁擠狀況下，航管單位應指派至跑道旁停等之最適航機數。

4.4.1 區塊等候下航機移動情況

本研究先以航管單位指派 1 架航班至跑道旁停等之模擬過程進行說明之，利用研究構建之時間模式計算範例中各航班於空側移動及停等之時間，其結果如表 4.10 所示。各航班由機門開始滑行之時間，是以對應該航班之停等區空滯時間與安全間距下航機滑行時間比較後，取較晚者為之；航班進入跑道之時間，則是以航班抵達跑道時間與起降隔離下航班可進入跑之最早時間相互比較後，取較晚者為之。以範例中 MH69 航班為例，該航班為第 2 架起飛之延滯航班，在遵守滑行安全間距下，該航班應該比 KA489 航班(第 1 架起飛航班)提早 2.4 分鐘開始滑行。然而，在航管單位僅指派 1 架航機至跑道旁停等之情況下(即停等區僅供 1 架航機停等)，MH69 航班須等到 KA489 航班進入跑道後，才可由機門停機坪滑行至跑道，換言之，MH69 航班須在 KA489 航班進入跑道後，也就是離開停機坪 7 分鐘後，才能接續由機門停機坪出發。而經由計算可得知 MH69 航班滑行至跑道之時間(16.6 分鐘)已超過塔台允許其起飛之時間(9.6 分鐘)，故僅指派 1 架航機至跑道旁停等時，機場跑道將因為 MH69 航班無法接續於 KA489 航班進入而發生 6.66 分鐘的空滯。

表 4.10 區塊等候下指派 1 架航機至跑道旁停等時，各航班之空側移動時間 (9:05, $T_{1,a}^b=0$)

起飛順序 i	班次	機門 g	與前一架航機 的間距(分鐘) $t_{i,st}$	等待停等區 空置的時間 (分鐘) $T_{i-k,d}^b$	可滑行之 最早時間 (分鐘) $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$	滑行時長(分鐘) $t_{i,m}$	抵達跑道旁 的時間(分鐘) $T_{i,h}^b$	可進入跑 道的最早 時間 (分鐘) $T_{i,d}^b$	與前機之起飛隔 離間距(分鐘) $t_{i-1,r} + t_{i,sd}$
				由機門出發之時間(分鐘) $T_{i,a}^b$			進入跑道之時間(分鐘)		
1	KA489	C3	0.00	-	0.00	7.02	7.02	7.02	-
				0.00			7.02		
2	MH69	B1	-2.40	7.02	-2.40	9.62	16.63	9.97	2.95
				7.02			16.63		
3	EF306	C1	2.37	16.63	9.39	7.45	24.08	18.58	1.95
				16.63			24.08		
4	NX505	B3	-1.53	24.08	15.10	9.18	33.27	26.03	2.95
				24.08			33.27		
5	NW70	B5	0.63	33.27	24.72	8.75	42.02	35.22	2.95
				33.27			42.02		
6	NX501	C10	3.45	42.02	36.72	5.50	47.52	44.97	1.95
				42.02			47.52		
7	BR851	C7	-0.45	47.52	41.57	6.15	53.67	49.47	2.95
				47.52			53.67		

資料來源：本研究結果

表 4.10 區塊等候下指派 1 架航機至跑道旁停等時，各航班之空側移動時間(續) (9:05, $T_{1,a}^b=0$)

起飛順序 i	班次	機門 g	與前一架航機 的間距(分鐘) $t_{i,st}$	等待停等區 空置的時間 (分鐘) $T_{i-k,d}^b$	可滑行之 最早時間 (分鐘) $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$	滑行時長(分鐘) $t_{i,m}$	抵達跑道旁 的時間(分鐘) $T_{i,h}^b$	可進入跑 道的最早 時間 (分鐘) $T_{i,d}^b$	起飛隔離 間距(分鐘) $t_{i-1,r} + t_{i,sd}$
				由機門出發之時間(分鐘) $T_{i,a}^b$			進入跑道之時間		
8	TG631	B9	-1.53	53.67	45.98	7.88	61.55	56.62	2.95
				53.67			61.55		
9	BR211	C4	1.28	61.55	54.95	6.80	68.35	64.50	2.95
				61.55			68.35		
10	CX407	B8	-1.10	68.35	60.45	8.10	76.45	71.30	2.95
				68.35			76.45		
11	EG218	B7	3.00	76.45	71.35	8.32	84.77	79.40	2.95
				76.45			84.77		
12	NX617	B2	-0.88	84.77	75.57	9.40	94.17	87.72	1.95
				84.77			94.17		
13	TG637	B4	0.63	94.17	85.40	8.97	103.13	96.12	2.95
				94.17			103.13		
14	CX471	B6	0.63	103.13	94.80	8.53	111.67	106.08	2.95
				103.13			111.67		

資料來源：本研究結果

表 4.10 區塊等候下指派 1 架航機至跑道旁停等時，各航班之空側移動時間 (9:05, $T_{1,a}^b=0$)

起飛順序 i	班次	機門 g	與前一架航機 的間距(分鐘) $t_{i,st}$	等待停等區 空置的時間 (分鐘) $T_{i-k,d}^b$	可滑行之 最早時間 (分鐘) $T_{i-1,a}^b + t_{i,st}$	滑行時長(分鐘) $t_{i,m}$	抵達跑道旁 的時間(分鐘) $T_{i,h}^b$	可進入跑 道的最早 時間 (分鐘) $T_{i,d}^b$	起飛隔離 間距(分鐘) $t_{i-1,r} + t_{i,sd}$
				由機門出發之時間(分鐘) $T_{i,a}^b$			進入跑道之時間		
15	BR865	C5	2.15	111.67	105.28	6.58	118.25	114.62	2.95
				111.67			118.25		
16	GE351	B1	-3.48	124.18	114.77	9.62	133.80	127.13	1.95
				124.18			133.80		
17	BR271	C8	0.85	118.25	112.52	5.93	124.18	121.20	2.95
				118.25			124.18		
18	AE837	C1	-0.23	140.82	133.57	7.45	148.27	143.77	1.95
				140.82			148.27		
19	NX501	C10	2.15	148.27	142.97	5.50	153.77	150.22	1.95
				148.27			153.77		
20	BR227	C3	2.80	133.80	126.98	7.02	140.82	135.75	2.95
				133.80			140.82		

資料來源：本研究結果

為瞭解應用區塊等候指派與連續指派下，對各起飛延滯航班之影響，本研究將表 4.10 繪製成圖 4.5。該圖是以區塊等候指派下各航班由機門出發之時間、連續指派下各航班由機門出發之時間以及後續航班停靠機門時間作比較；橫軸表示起飛延滯之航班及其起飛順序，縱軸則表示時間。長條圖所對應之時間為後續航班表定停靠機門之時間，而長條圖涵蓋之各點可解釋為，該延滯航班不會造成後續航班停靠機門之延誤。以 EF306 航班為例，該航機為第 3 架起飛航班，當中正機場 06 跑道於 9:05 開放時，若機場塔台採連續指派方式指揮各航班，則 EF306 航班將於 9:05 左右由機門停機坪開始滑行；若塔台以區塊等候為指派原則又僅指派 1 架航機至跑道旁停等，則 EF306 航班由機門開始滑行的時間便由 9:05 延後至 9:22。連帶受到影響的還包括，接續 EF306 航班之後停靠相同機門之 AE837 航班，依據 5.3.3 節之分析，AE837 航班在連續指派下可停靠機門之最早時間為 9:05，然而在區塊等候下受到 EF306 航班延後滑行之影響，AE837 航班停靠機門時間亦延後至 9:22。

而觀察 NX505 航班(第 4 架)滑行時間延後對後續停靠該機門航班之影響，則可發現在連續指派方式下 NX505 航班並不會延誤 PR897 航班停靠相同機門之時間；然而在停等區僅供 1 架航機停等之情況下，NX505 航班之滑行時間已超過 PR897 航班停靠機門之表定時間，進而使得 PR897 航班停靠機門之時間延誤 14 分鐘左右。

至於 CX407 航班(第 10 架)，則因為後續停靠相同機門之 CX450 航班，其表定停靠機門時間為 12:40，與跑道重新開放之時間間隔 215 分鐘。意謂 CX407 航班只要在 12:40 前離開機門停機坪，均不會造成 CX450 航班延誤停靠機門的情況。因此，在 CX407 航班延出發時長 68.3 分鐘遠小於 215 分鐘之情況下，CX450 航班並不會受到影響。

屬於關連性延誤之 NX617(第 12 架)、TG637(第 13 架)、CX471(第 14 架)、BR865(第 15 架)、BR271(第 17 架)起飛航班，在連續指派下原本與停靠相同機門之後續航班具有足夠之緩衝時間，但是在停等區僅容納 1 架航機停等時，所有關連性延誤航班在機門停等的時間亦有明顯增加的趨勢，以致發生延誤後續航班停靠機門的情況，如接續第 NX617、TG637 之後的航班。

區塊等候下，航管單位僅指派 1 架航機至跑道旁停等之策略，對推擠性延誤航班的影響尤其明顯。由於推擠性航班停靠機門時間乃接續前一架停靠相同機門的航班之後，當前一架起飛航班由機門出發時間延後而超過後續航班表定停靠機門時間時，則推擠性延誤航班停靠機門時間延後的機率也就隨之增加；又因為後續航班起飛順序以航班關艙時間為判別條件之故，前機愈早離開機門則推擠性延誤航班便愈早停靠機門，在此種接續特性影響下，亦使得推擠性航班由機門出發的順序隨之改變。以表 4.11 中的 AE837(第 18 架)與 BR227 航班(第 20 架)為例，連續指派下，AE837 航班接續於第 3 架航班之後停靠相同機門，接續停靠的時間為 9:05，地勤暨航務作業時長為 33 分鐘，因此關艙時間為 9:38；BR227 航班則

在表定停靠時間 9:10 停靠機門，地勤暨航務作業時長為 40 分鐘，關艙時間為 9:50，故連續指派下 AE837 航班的起飛順序在 BR227 航班之前。然而，停等區僅容納 1 架航班時，第 3 架航班離開機門的時間因停等區容量不足而必須在 9:21 才能由機門停機坪出發，意謂 AE837(第 18 架)航班可停靠機門的時間也被延後，而在地勤暨航務作業時長不變之假設下該航班關閉艙門的時間延後至 9:54；但是對 BR227 航班而言，由於前一架航班(第 1 架)離開機門的時間並未逾時，所以該航班仍然於表定的 9:10 停靠機門並在 9:50 關閉艙門，因此，在區塊等候下 BR227 航班的起飛順序反而在 AE837 之前。

表 4.11 區塊等候下指派 1 架航機至跑道旁停等時，對推擠性延誤航班之影響

航班	連續指派下			區塊等候下，僅指派 1 架航機至停等區		
	停靠時間	關艙時間	起飛順序	停靠時間	關艙時間	起飛順序
AE837	9:05	9:38	18	9:21	9:54:	19
NX501	9:07	9:44	19	9:47	10:24	20
BR227	9:10	9:50	20	9:10	9:50	18

資料來源：本研究結果

在區塊等候下航班由機門出發的時間直接受航管單位指派航機至跑道旁停等數量之影響，圖 4.6 顯示當停等區僅指派 1 架航機停等時，受到航機滑行時間定義之影響，各航班均停等於機門停機坪。其中，「因機場關閉而延誤之航班」(第 1~11 架)與「航機間關連性延誤航班」(第 12~15 及 17 架)在機門停等的時長，跟各航班的起飛順序成正向關係；而「機門間推擠性延誤航班」的停等時長則與停靠相同機門之前機由機門出發的時間有關，即前機愈早離開機門則推擠性延誤航停靠機門的時間也愈早，在起飛順序變化甚微的情況下機門停等時長也愈長(第 16、18、20 架)；反之，若停靠相同機門之前機離開機門的時間愈晚，則後機停靠時間亦相對延後，在起飛順序無所變化的情況下，相較於相同延誤性質的航班而言，其停等時間則相對較短(第 19 架)。

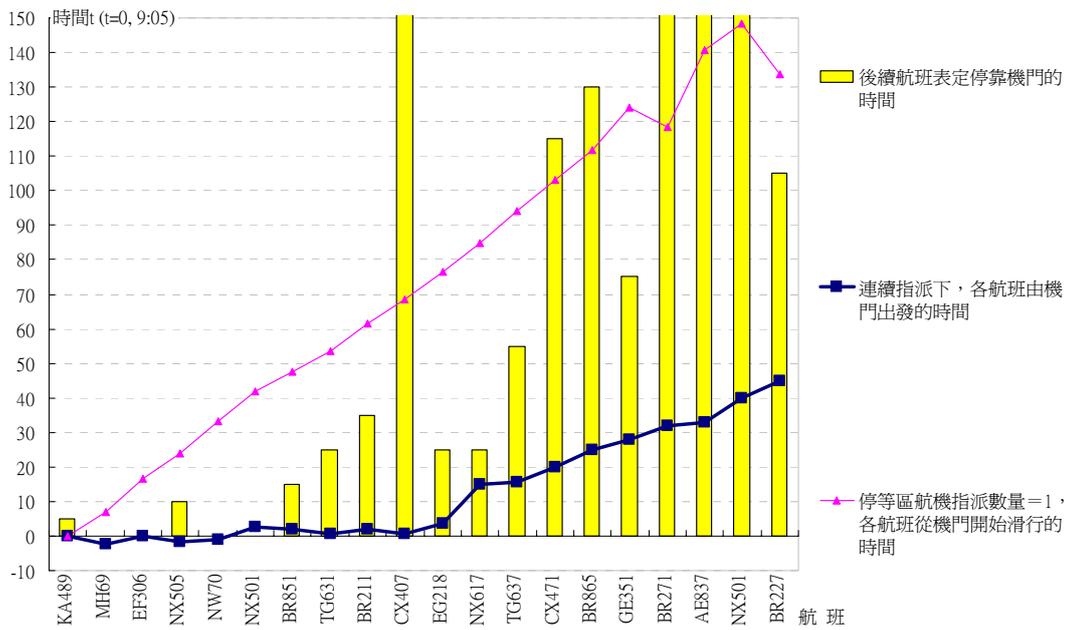


圖 4.5 連續指派與區塊等候下停等區指派 1 架航機，各航班滑行時間之比較



圖 4.6 區塊等候下停等區指派 1 架航機時，各航班於空側地面停等之時長

透過以停等區僅指派 1 架航機停等為例，進行說明以及數據含意解釋後，本研究遂以增加停等區航機指派數量之方式，模擬 94 年 2 月 16 日中正機場南機坪，因濃霧而起飛延滯之 20 架航班於機場空側起飛過程之移動及停等狀態。本研究將跑道旁停等區之航機指派數量由 1 架逐漸增加至 9 架，所求得之結果經整理可由圖 4.7 表示之，該圖橫軸表示各航班，縱軸則表示時間。由此圖可發現隨著停等區容量不斷增加，各航班從機門開始滑行的時間有趨近於塔台實施連續指派之趨勢。當僅指派 1 架航機至跑道旁停等時，因機場關閉而延誤之 11 架起飛航班中除了 KA489(第 1 架)與 CX407 航班(第 10 架)外，其他航班均造成後續航班停靠機門之時間延誤，而隨著跑道旁停等區指派航機數增加，此種延誤後續航班機門停靠時間的情況便逐漸改善，直到航機指派數量達到 6 架以上後即不再發生。而關連性延誤航班方面(第 12~15 及 17 架)，則是在航機指派數超過 8 架航機時，其出發時間便與連續指派求算之結果相同。至於推擠性延誤航班(第 16、18~20 架)起飛順序改變的情況，在航管單位指派 5 架以上航機至跑道旁停等後，才與連續指派之起飛順序相同；並且在停等區可容納 8 架航機時，各航班機門出發的時間與連續指派下相同。

圖 4.8、5.9 則為區塊等候下改變停等區航機指派數量時，各航班分別在機門停機坪以及跑道旁之停等時長變化，此二圖之橫軸為航管單位實施區塊等候時，指派至跑道旁停等區之航機數；依照航班起飛順序排列之長條圖則反應此一指派策略下，起飛延滯航班於不同區域停等的時長。圖 4.8 顯示隨著航機指派數量增加，航機停等於機門的情形亦隨之減少，且各航班於機門停等的時長也逐漸縮短。由於本研究定義之航機停等區域僅為機門與跑道旁，因此，隨著停等區指派航機數的增加，航機停等於跑道之情況與航機停等於機門的情況恰為相反，圖 4.9 即顯示指派至跑道旁停等之航機數愈多，則航機停等數量及航機停等時長亦隨之增加。

在航機滑行至跑道之時長大於起飛隔離標準，且降落航班較少之情況下，指派愈少航機至跑道旁停等，則發生起飛航班來不及接續進入跑道之頻率愈高，如圖 4.10。該圖橫軸為航管單位實施區塊等候時，指派至跑道旁停等區之航機數，縱軸為跑道空滯的時長，而依照航班起飛順序排列之長條圖則代表起飛延滯航班於此指派策略下造成跑道空滯的時長。由圖顯示跑道空滯現象隨停等區航機指派數量的增加而減少。另一方面，停等區航機指派數量愈少，航班停等於機門之時長愈長，則後續停靠相同機門之航班被延誤的機會及時長也將隨之增加如圖 4.11。該圖橫軸之解釋與圖 4.10 相同，縱軸部分則代表停靠相同機門之後續航班被耽誤之時長，而依照航班起飛順序排列之長條圖則代表起飛延滯航班於此指派策略下延誤後續航班停靠機門的時長。該圖亦顯示被延誤之後續航班數及其延誤時長，因停等區指派數量增加，使得前一架離開機門時間提早之故而與跑道容量成負向之關係。觀察圖 4.10、5.11 可發現，於本範例中，航管單位於區塊等候下，

指派 4 架以上的航機至跑道旁停等時時，各起飛延滯航班離開機門的時間均不會延誤停靠相同機門之後續航班延後停靠機門，而跑道空滯的現象亦不會發生。



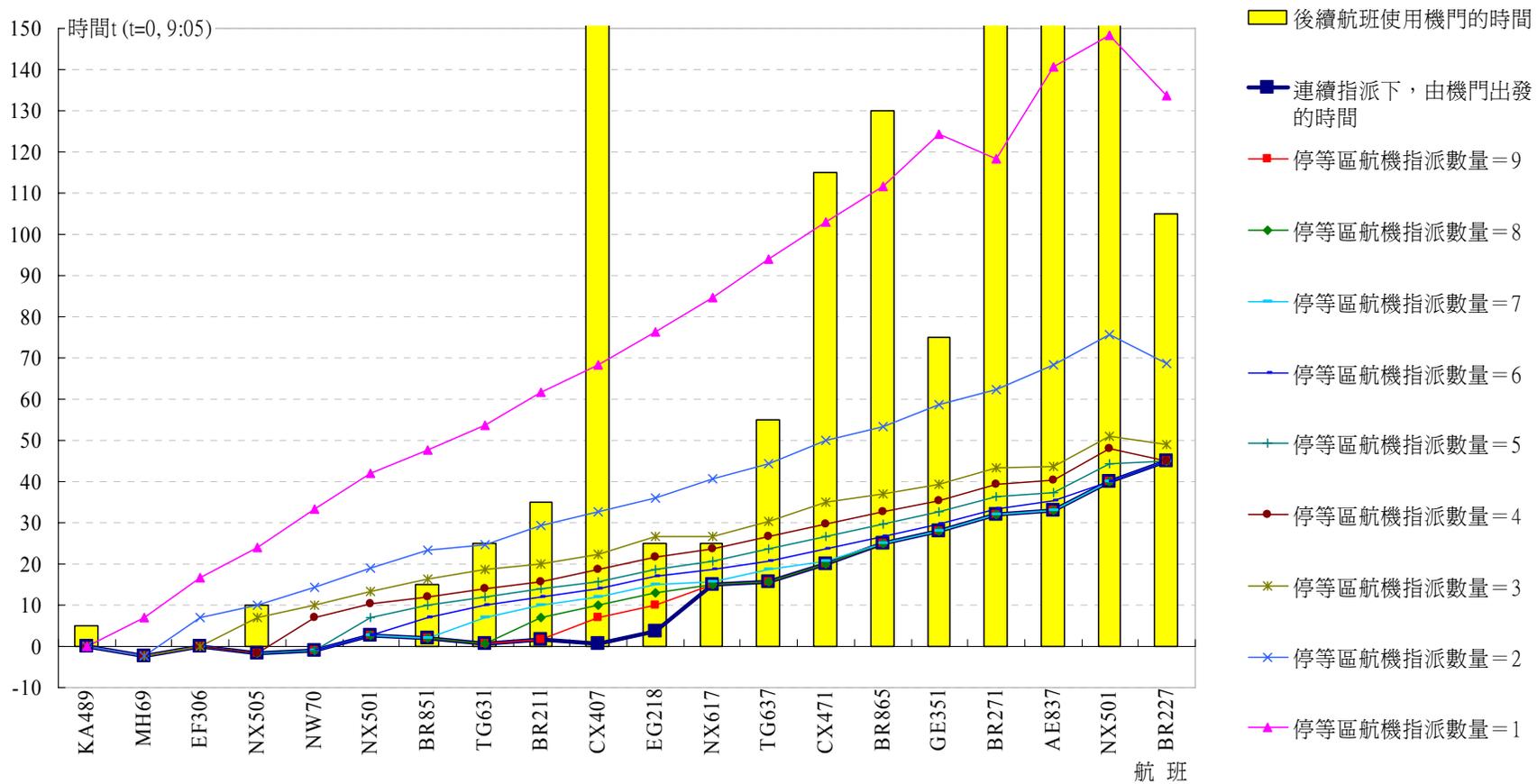


圖 4.7 不同指派量下各航班由機門開始滑行之時間比較

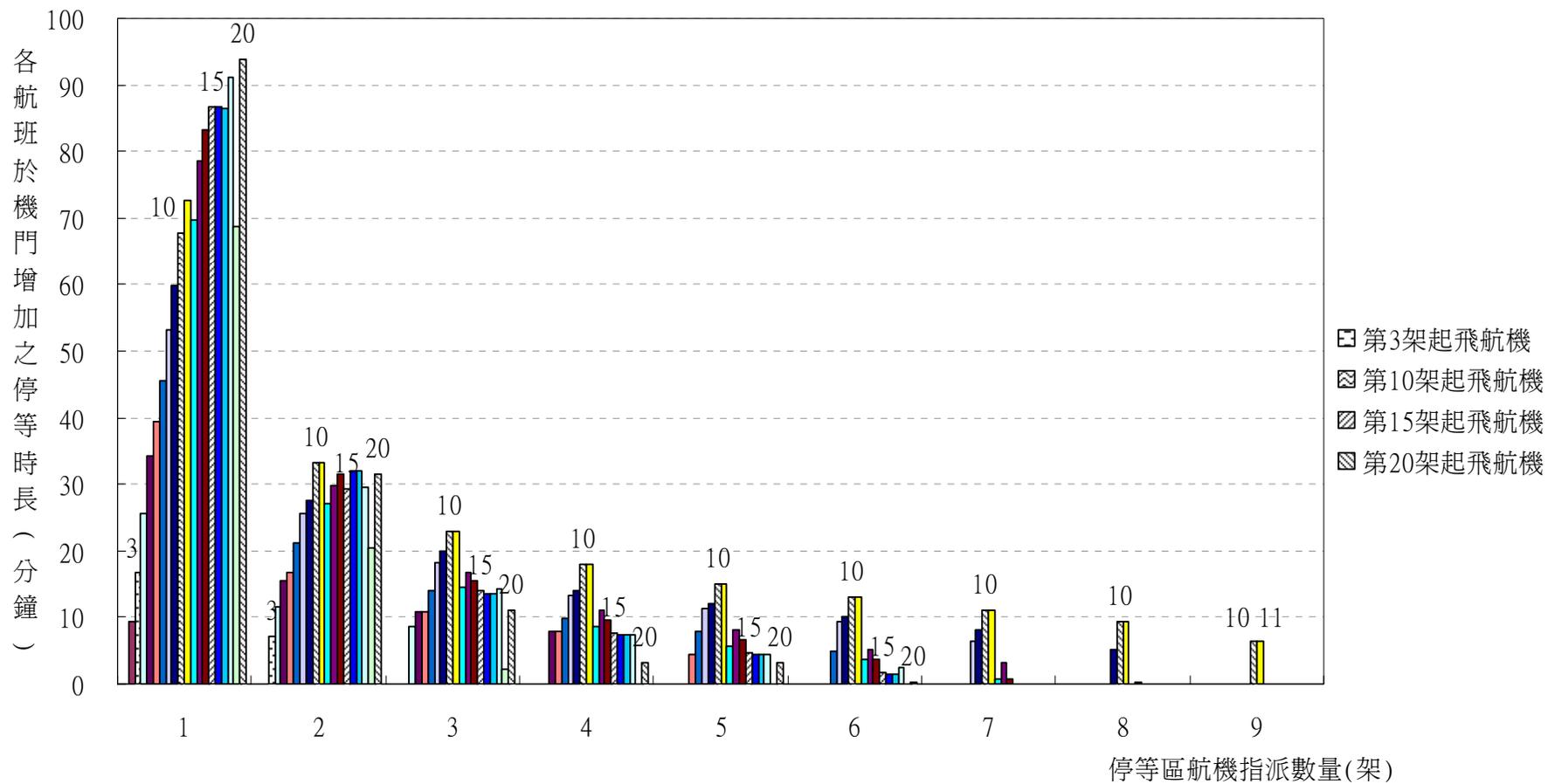


圖 4.8 區塊等候下各航班於機門額外停等之時長

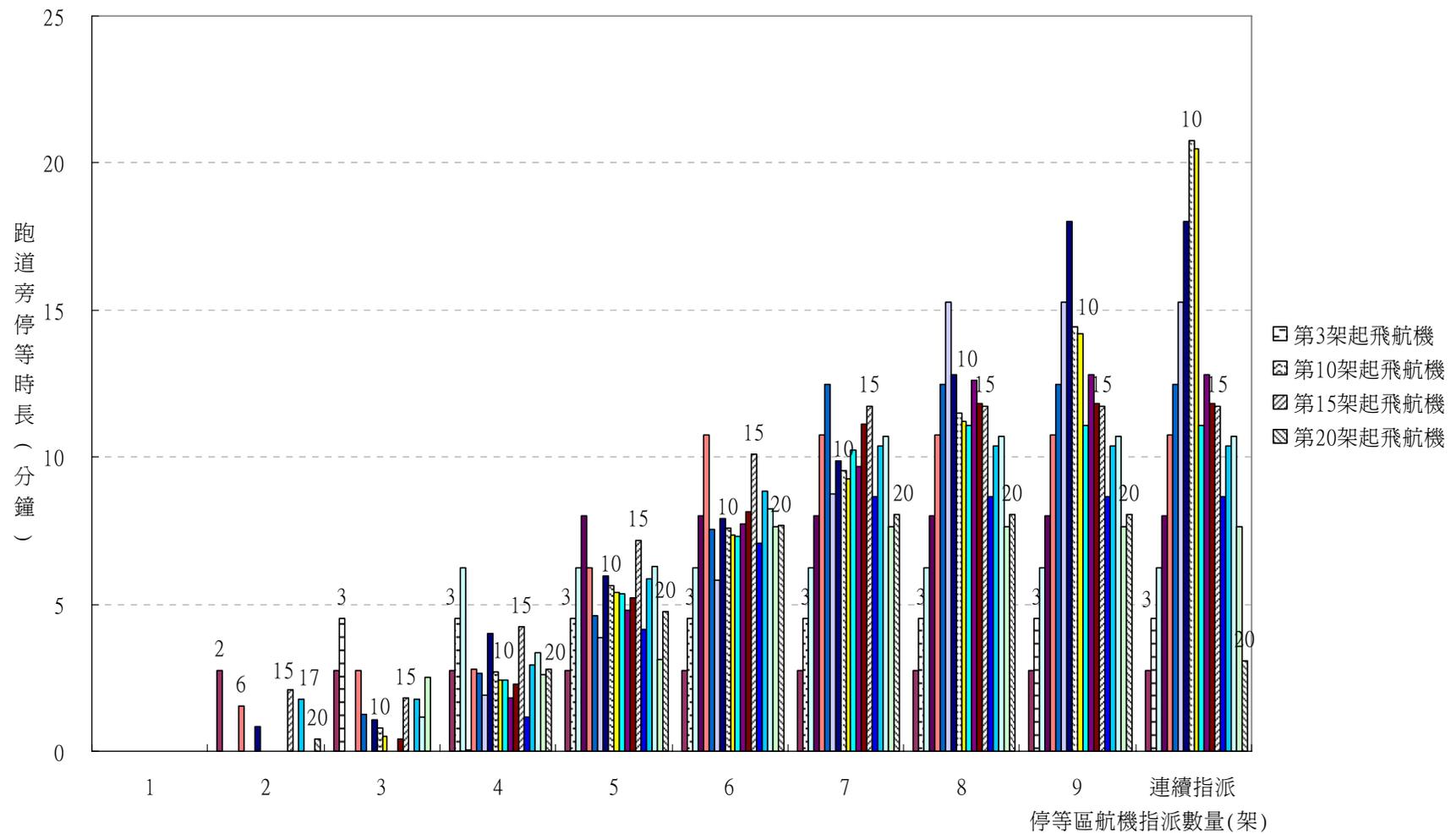


圖 4.9 區塊等候下各航班於跑道旁停等之時長

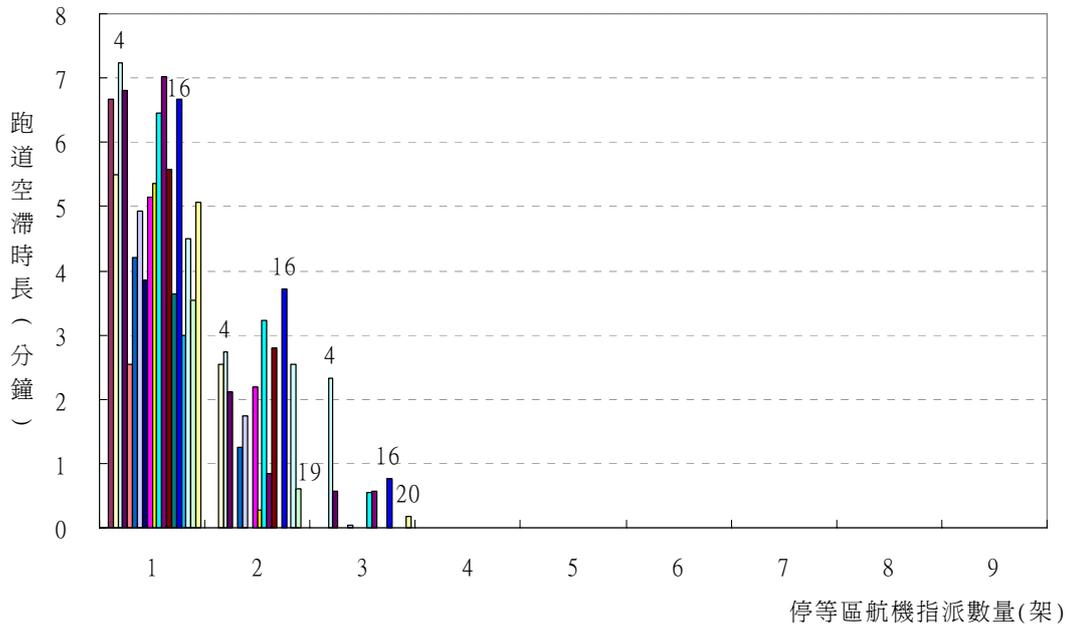


圖 4.10 區塊等候下各航班因無法接續進入跑道以致於跑道空滯的時長

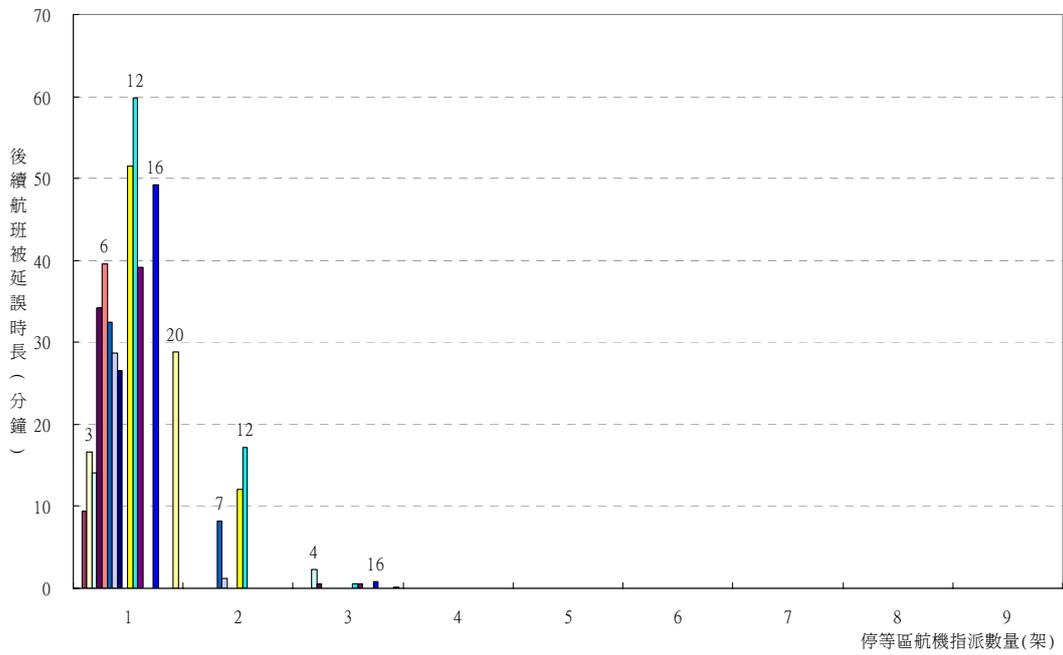


圖 4.11 區塊等候下停靠相同機門之後續航班被延誤的時長

4.4.2 區塊等候下航機燃油成本及衍生成本

承前一節之分析，可知隨著區塊等候下航管單位指派航機至跑道旁停等數量之改變，各航班之機門停等時長、跑道旁停等時長，以及造成跑道空滯之時長、延誤後續航班停靠機門之時長亦有所增減；又航機於空側地面不同區域延誤，單位時間造成的延誤成本差距甚大，如圖 4.12 所示。故本研究進一步以第四章構建的航班延滯相關成本函數，求算停等區容量改變下，機場管理單位實施區塊等候之成本，其結果如表 4.12 所示，將此一結果與連續指派下總延滯成本(即航機燃油成本)比較可以反應實施區塊等候之改善效益，而改善效益之分析可透過區塊等候下航機燃油節省效益除以連續指派下航機燃油成本之方式得之，即式 (34)。

$$UOB(\%) = \frac{\left(\sum_{i=1}^N FC_i - \sum_{i=1}^N FC_i^b \right) - \sum_{i=1}^N (PC_i^b + GC_i^b + RC_i^b + EC_i^b)}{\sum_{i=1}^N FC_i} \quad (34)$$

圖 4.13 顯示航管單位於跑道旁停等區之指派航機數改變時，區塊等候效益之變動，該圖橫軸之解釋同圖 4.10，而圖中各點則為跑道旁停等區指派特定航機數時，實施區塊等候之效益。由圖 4.13 與表 4.12 可知，航管單位於本範例「機場關閉再開放」之擁擠機場，實施區塊等候時航管單位指派航機至跑道旁停等之最適數量為 4 架航機，在此指派下航機燃油成本與機場延滯成本為 61,520 元，比航管單位實施連續指派之航機燃油成本節省了 128,988 元，改善效益達 68%。

又為深入瞭解區塊等候下，指派至跑道旁之航機數改變時，旅客、機場管理單位以及航空公司延滯成本之變化趨勢，本研究將表 4.12 之數據彙整為圖 4.14、21。圖 4.14 為表示區塊等候下，航管單位指派不同數量之航機至跑道旁停等時，各項成本之比例變化。圖 4.15 為區塊等候下，於跑道旁停等區指派不同數量航機停等時，產生的延滯成本，而長條圖之不同區段表示各項延滯成本之大小。由圖 4.14 可知隨跑道旁停等航機數的增加，旅客延滯成本、跑道空滯成本以及航機於機門停等之成本均逐漸減少，直到只剩下地勤人員超時作業與航機地面空調與外部電源成本 2 項。而延滯成本改變的趨勢可依航管單位指派至跑道旁停等之航機數漸增之過程說明。

1. 當航管單位僅指派 1~2 架航機至跑道旁停等時，延滯成本中以航機延滯出發所衍生成本為主，其中又以每分鐘 3,421 元之跑道空滯成本最高。而經由跑道空滯時長(圖 4.10)之分析可知隨著停等區指派航機數的增加，跑道空滯發生的時長呈現大幅減少的趨勢，故總延滯成本亦明顯下降(圖 4.15)。
2. 當停等區航機指派數量增加至 3 架時，由於各航班從機門停機坪滑行至跑道的同時，跑道旁停等之航機亦進入跑道起飛，降低了航機於跑

道旁停等的時長；且因為滑行至跑道旁停等的航機數增加，亦間接地降低跑道空滯的頻率，所以由圖 4.15 可知航管單位指派 3 架航機停等於跑道旁產生的總延滯成本比指派 2 架來的少。惟航機於區塊等候下停等於機門停機坪的時長仍比連續指派來的長，故延滯成本中航機的地面空調與外部電源成本與地勤人員作業超時成本，佔總延滯成本之比例呈現增加的趨勢。

3. 停等區航機指派數量的增加除了造成航機在跑道旁的停等時長增加外，也間接降低跑道空滯頻率，進而對整體延滯成本產生影響。然而圖 4.15 中停等區指派航機數為 3 架、4 架之結果，僅能反應機場實施區塊等候時，採取此二種不同數量指派所產生的延滯成本相異甚微。而進一步，由圖 4.14 之結果則可發現，航管單位指派 4 架航機至跑道旁停等時，總延滯成本中 60% 以上均為航機燃油成本；且後續航班停靠機門時間延誤及跑道空滯之狀況均不再發生。
4. 當指派至跑道旁停等航機數超過 4 架以上時，航管單位能夠很快地將起飛航機指派至跑道旁停等，避免航機在機門停機坪停等太久的情況，使得延誤後續航班停靠相同機門以及跑道空滯現象的發生不再發生。且航機地面空調與外部電源、地勤人員超時作業成本所佔之比例航機也因為航機在機門停等時長之減少而降低。惟航機的燃油損耗成本比例與停等於跑道旁之航機數量成正向關係，使得航機燃油成本佔總延滯成本之比例逐漸增加。

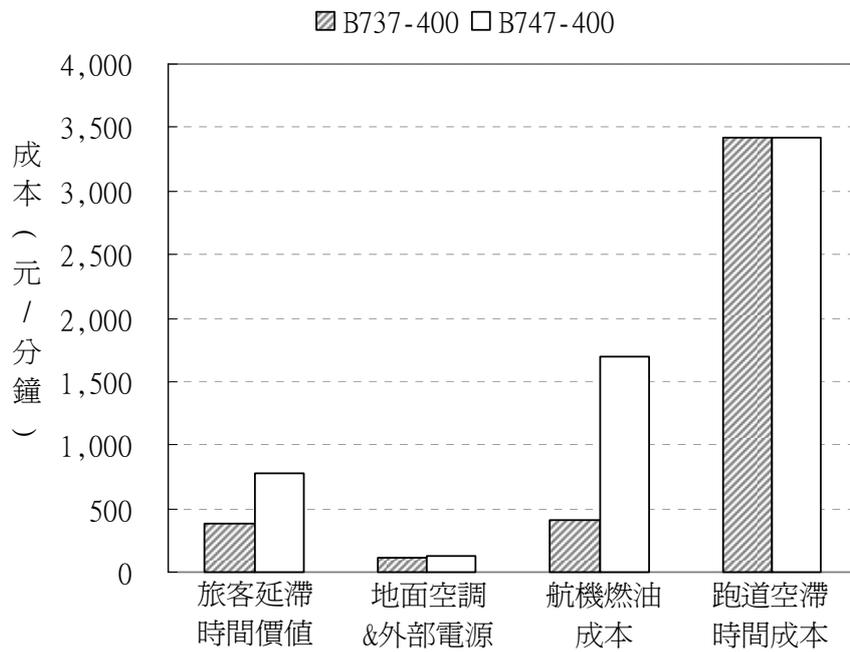


圖 4.12 區塊等候下大型航機與重型航機之成本比較

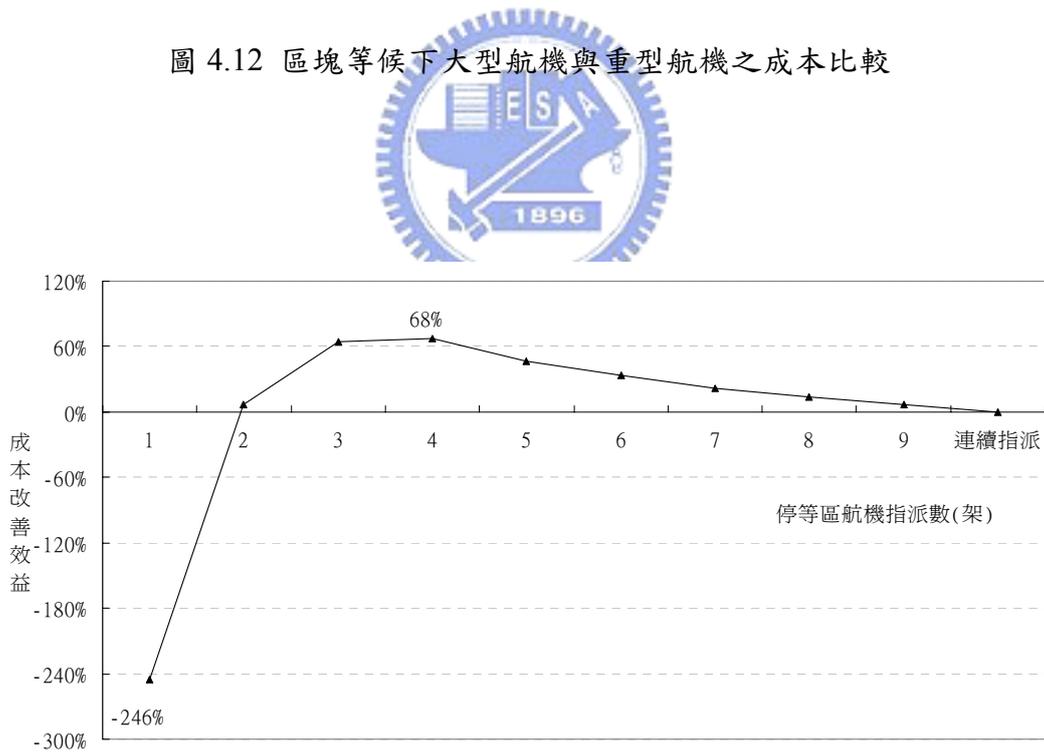


圖 4.13 區塊等候下總成本之改善效益

表 4.12 連續指派與區塊等候之成本比較

停等區航機 數量 延滯成本	1	2	3	4	5	6	7	8	9	連續指派	趨勢
旅客延滯時間成本	158,455	15,199	2,610	-	-	-	-	-	-	-	↘
超時作業工時成本	29,102	11,259	5,967	3,705	2,610	1,763	1,043	597	315	-	↘
跑道空滯成本	334,232	90,942	17,048	-	-	-	-	-	-	-	↘
航機燃油成本	-	6,754	14,382	39,850	85,581	115,122	142,518	159,876	175,758	190,508	↗
地面空調及 外部供電成本	136,544	53,220	28,579	17,965	12,750	8,781	5,312	3,052	1,610	-	↘
總成本(元)	658,332	177,373	68,586	61,520	100,941	125,666	148,873	163,526	177,683	190,508	先↘，後↗
區塊等候效益(元)	-467,824	13,135	121,922	128,988	89,567	64,842	41,635	26,982	12,825	-	-
成本改善效益(%)	-246%	7%	64%	68%	47%	34%	22%	14%	7%	0%	-

資料來源：本研究結果

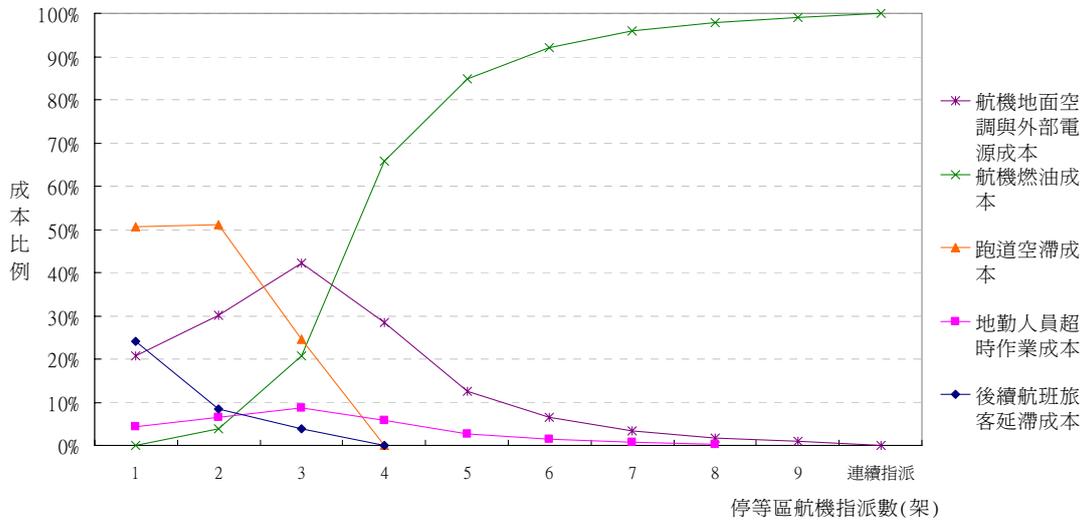


圖 4.14 區塊等候下各項衍生成本之比例

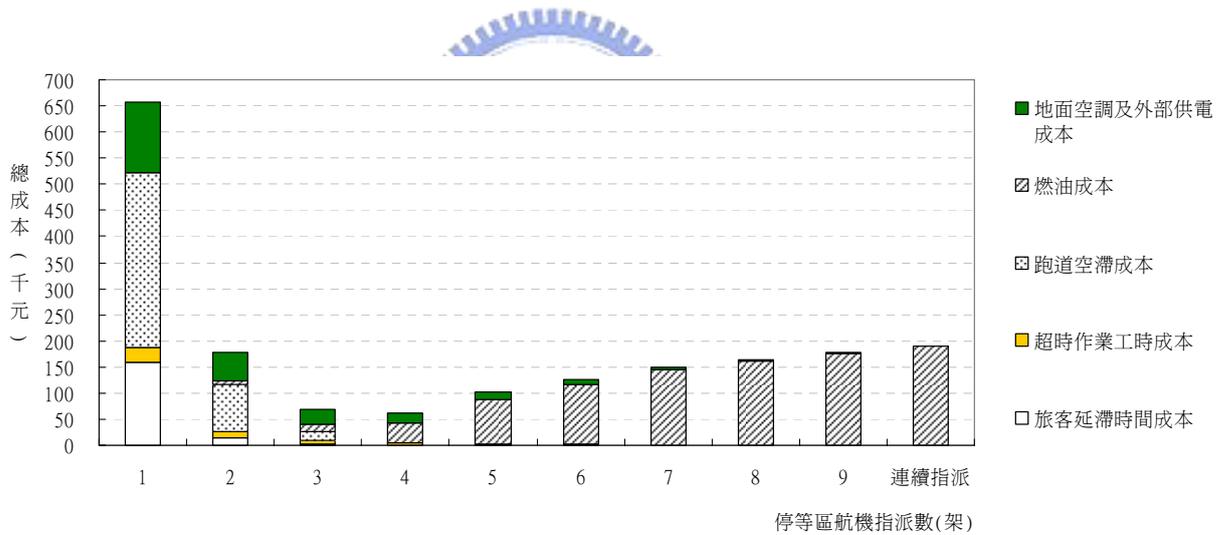


圖 4.15 連續指派與區塊等候之延滯成本比較

4.5 敏感度分析-延長機場關閉時長

當機場因天候因素暫時關閉時，氣象及航管單位在飛航安全考量下須視詭譎多變之氣候變化狀況，評估是否適合航機起降再行宣布機場開放時間，若天氣狀況持續未見好轉，則機場開放時間將再行延後。而延後機場開放時間造成大量起飛航班延滯，一旦機場再度開放後，將使地勤作業更加繁忙及機門使用調度困難加劇，形成停機坪與場站設施不足之窘境而致使機場擁擠情況更加嚴重。為瞭解上述情況對區塊等候指派方式產生之影響，本研究遂以「機場關閉再開放」範例之分析資料，試圖透過增加機場關閉時長 15 分鐘及 30 分鐘的方式改變機場擁擠狀態，並由模擬起飛延滯航班於空側地面的移動及停等之結果計算各項延滯成本，以解釋區塊等候指派在不同機場擁擠狀況下之變化。

關閉時長增加對各項成本的影響

由表 4.13 不同延誤類型之航機數量變化以及表 4.13 各航班起飛順序之改變可知，延後機場開放時間之主要影響有二項。一為延滯航機中「關連性延誤航班」轉變為「因機場關閉而延誤航班」。即未延後機場開放時間前，機門停機坪原有 5 架關連性延誤航班，然而在機場開放時間延後的影響下，以致部分關連性延誤航班無法於表定由機門出發的時間離開機門，以致這類航班的延誤類型由關連性延誤轉變為因機場關閉而延誤。

表 4.14 則說明延後機場開放時間的另一個影響，即航班起飛順序的改變。結果顯示在原關閉時長之影響下，推擠性延誤之 GE351 航班之起飛順序在 BR271 航班之前。然而在機場開放時間延後的影響下，GE351 航班因停靠相同機門時間延後，使其關艙時間亦延後；而 BR271 航班表定關艙時間則為改變，進而造成兩航班之起飛順序對調之情形。

由於不同延誤類型航班於機門停機坪之停等時長計算方式，以及航機出發順序的改變都將導致相關航班延滯成本亦有所變動，本研究進一步將各項成本因機場開放時間延後產生的變化以圖 4.16~28 呈現。

表 4.13 不同關閉時長下各延誤類型之航機數

航機延誤類型 延長機場關閉時長	因機場關閉而 延誤	關連性延誤	推擠性延誤
原關閉時長	11	5	4
延長 15 分鐘	13	3	4
延長 30 分鐘	16	0	4

資料來源：本研究結果

表 4.14 不同關閉時長下航班之起飛順序

機場開放時間 \ 航班	GE351			BR271		
	關艙時間	起飛順序	延誤類型	關艙時間	起飛順序	延誤類型
9:05	9:33	16	推擠性	9:35	17	關連性
9:20	9:48	17	推擠性	9:35	16	關連性
9:35	10:03	17	推擠性	-	16	因機場關閉而延誤

資料來源：本研究結果

後續航班旅客延滯時間成本：

由圖 4.16 可知機場開放時間延後，造成停靠相同機門之前後航機之緩衝時間縮短時，區塊等候下延滯成本的增加幅度與航機指派數量呈負向關係，即指派愈多航班至跑道旁停等，則愈少停靠相同機門之後續航班會因前機佔用機門而延後停靠機門。而比較兩延滯情境呈現之趨勢亦可說明該項成本與機場開放時間呈正向關係，即機場關閉愈久則後續航班旅客延滯成本愈大。

地勤人員超時作業工時成本與航機地面空調與外部電源成本：

此二項成本跟機場開放後，航機分別於連續指派與區塊等候下之機門停等時長差值有關。由圖 4.17 與圖 4.19 可知，模擬兩機場開放時間延後情境所造成之成本變動幅度幾乎相同，且此結果並不會隨航管單位指派容量而改變。顯示延後機場開放時間，並不會直接影響地勤人員超時作業工時成本與航機地面空調與外部電源成本。然延後機場開放時間造成部分關連性延誤航班轉變成因機場關閉而延誤航班，增加了該航班於機門停機坪停等的時長，以致地勤人員及航班成本的增加。

跑道空滯成本：

該成本與航機起飛率直接相關，由圖 4.18 顯示，在分析對象及航機起降環境不變之情況下，航管單位以不同指派容量實施區塊等候的結果均顯示指派容量愈小跑道空滯成本愈高，而後隨著指派容量的增加，跑道空滯現象便不再發生。此外，由曲線重疊之趨勢來看，可知機場關閉時間對跑道空滯成本並無明顯之影響。

航機燃油成本：

由本節分析機場延後開放時間造成航機起飛順序以及航班延誤類型的結果可知，關連性延誤航班轉變為因機場關閉而延誤航班之後，航班於機場空側地面停等的時間增加，連帶也增加了此延誤類型之航機在跑道旁停等的時長，圖 4.20 反應延後機場開放時間將造成關連性延誤航班燃油成本增加，且其增加幅度與航

管單位指派至跑道旁停等之航機數量成正向關係。

總延滯成本

經由上述各項成本於機場開放時間延後影響下之分析，可知當機場開放時間延後導致機場擁擠度增加時，後續航班旅客延滯時間成本之增加幅度最為明顯；地勤人員超時作業工時成本、航機地面空調與外部電源成本及航機燃油成本，則因為關連性延誤航班轉變為因機場關閉而延誤航班，機門停機坪與跑道旁停等時長延長之故亦有所增加，其中，航機燃油成本之增加幅度又與航管單位指派容量呈正向關係。各項成本惟跑道空滯成本不因機場開放時間延後而產生變化。本研究將兩機場開放時間情境之總延滯成本與依照預定時間開放機場計算之成本彙整成圖 4.21 與圖 4.22，由圖可知，對本範例「機場關閉再開放」之機場擁擠情況而言，在機場開放時間延後 30 分鐘之內，航管單位實施區塊等候指派航機至跑道旁停等之最適數量為 4 架航機，所得到的燃油節省效益最佳(圖 4.21)。然而，就燃油節省效益來看，卻顯示機場愈擁擠，最適指派容量下之區塊等候改善效益有逐漸降低的趨勢(圖 4.22)。

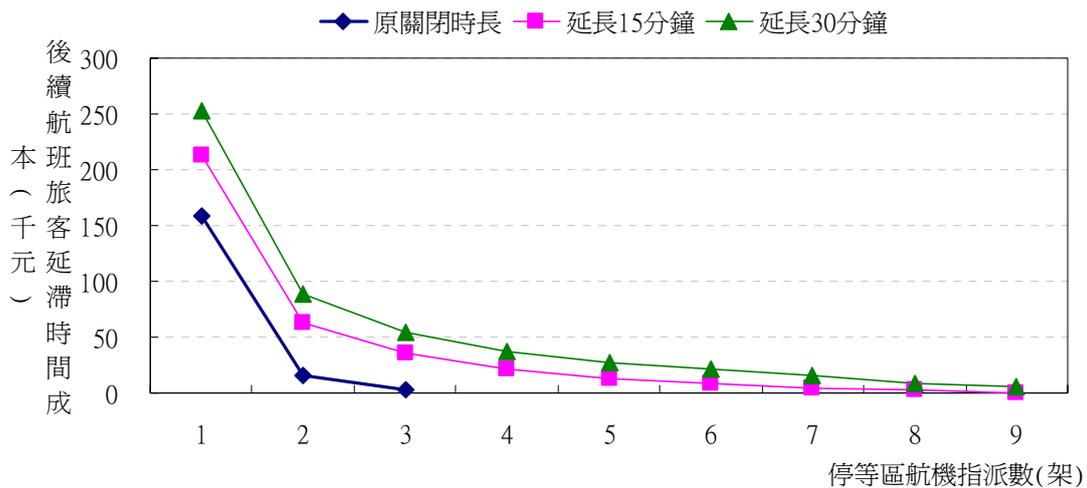


圖 4.16 後續航班旅客延滯時間成本

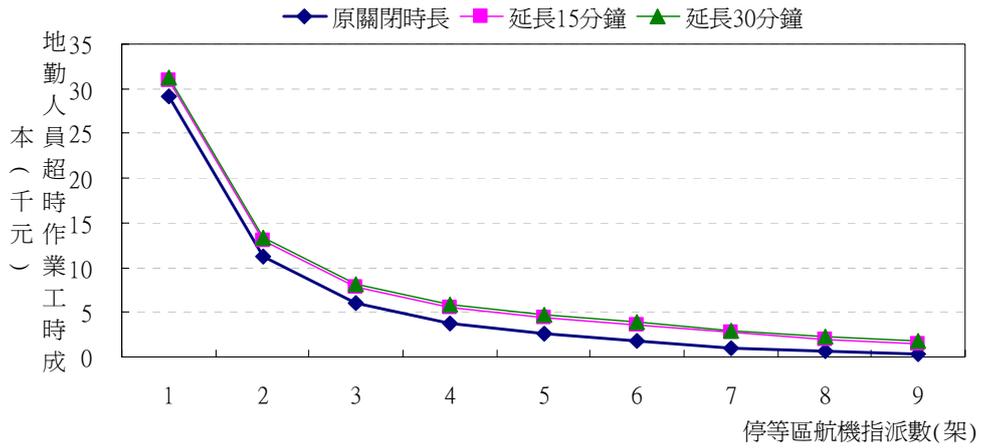


圖 4.17 地勤人員超時作業工時成本

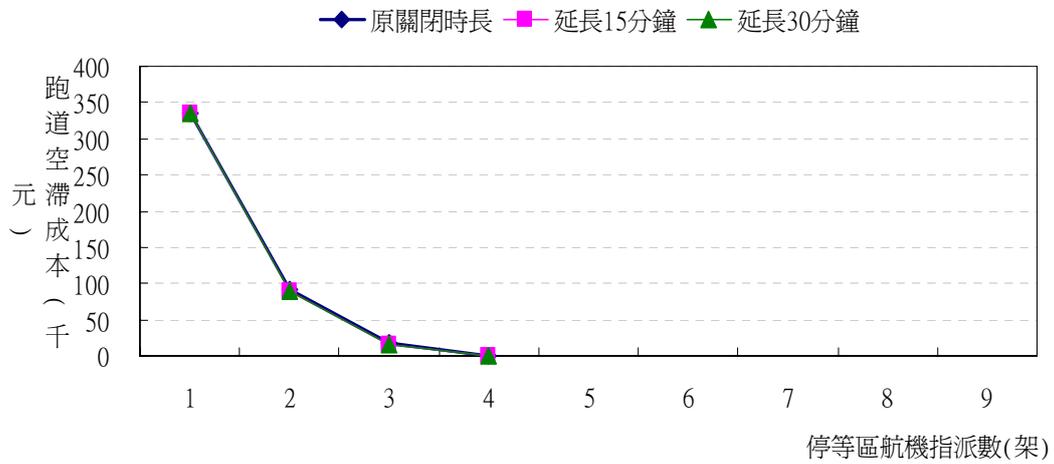


圖 4.18 跑道空滯成本

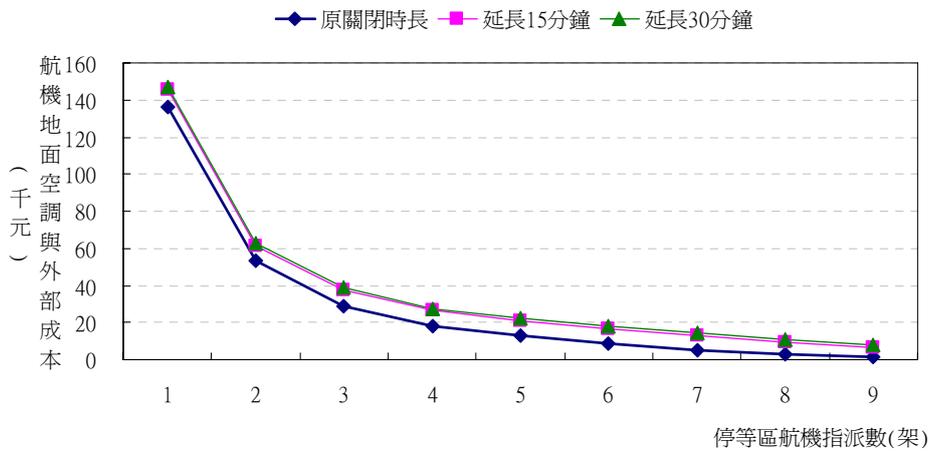


圖 4.19 航機地面空調與外部電源成本

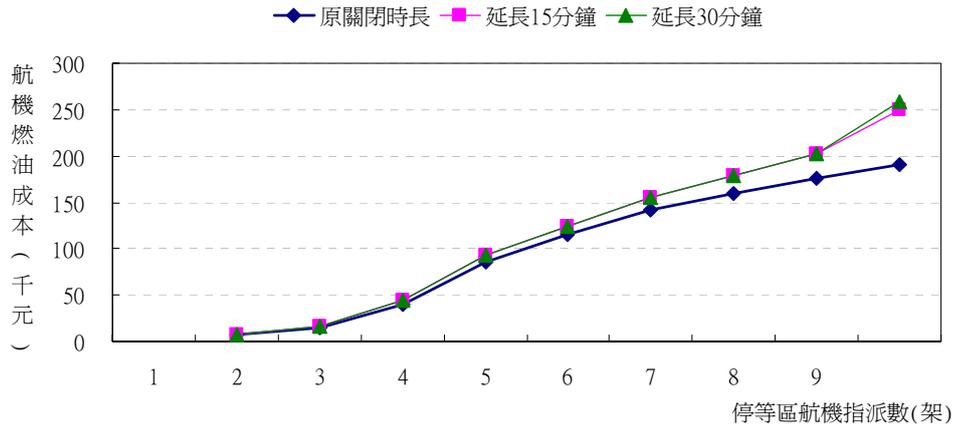


圖 4.20 航機燃油成本

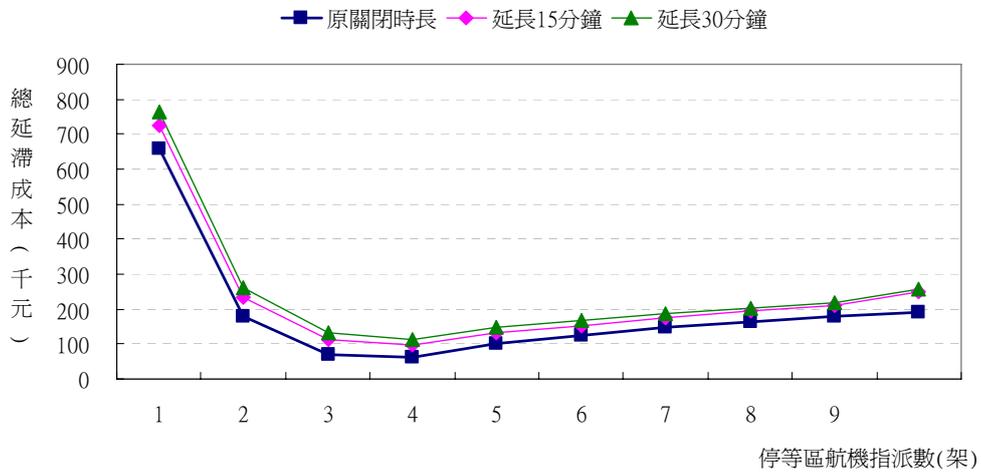


圖 4.21 總延滯成本

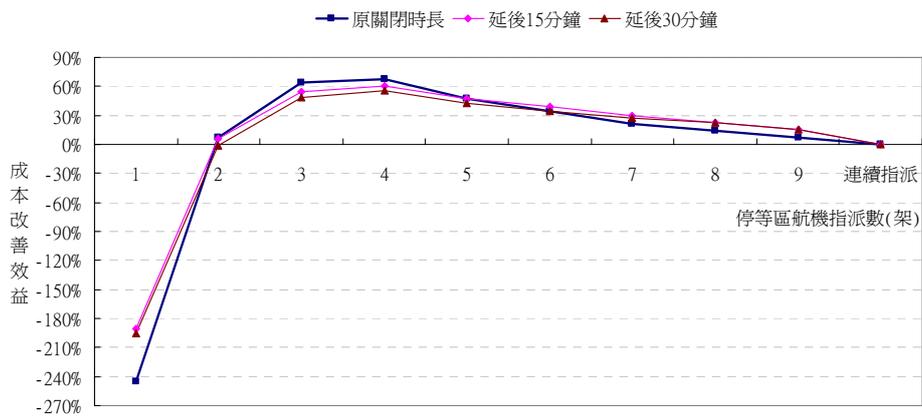


圖 4.22 成本改善效益

第五章 結論與建議

過去有關機場擁擠導致航機起降延滯之研究，大多以成本及安全為由建議航管單位將起飛航機延滯於機場空側地面，並集中於航機地面延滯策略之應用進行探討。然實務上當機場擁擠時，機場航管單位常傾向將起飛航機指派至跑道旁停等，造成起飛航機於跑道旁停等徒增燃油損耗之情形。有鑒於此，本研究將 Dougherty(1997)為降低都市擁擠車隊燃油損耗，而提出之區塊等候概念，經考量航機起降於跑道特性後進行修正，而後應用於擁擠機場起飛航機指派之評估，以檢視航管單位於機場擁擠情境實施區塊等候之效益。在假設機場空側航機滑行速度固定且相同，以及航機滑行路徑相同之情況下，參考飛航管制程序相關規定，並考量起降航班之影響後，模擬區塊等候下航機由機門滑行至跑道之起飛過程。以機場擁擠情境進行範例分析，藉由模擬起飛航班於區塊等候下於機場空側的延滯狀況，計算所有航機之燃油成本及延滯衍生之相關成本；並與機場管理單位實施連續指派時僅考量航機燃油成本之數據進行比較。綜合前面各章分析，以下提出本研究之結論與建議。

5.1 結論

- 
1. 由本研究針對航機滑行過程之分析可知，航機滑行安全間距與其停等於跑道旁之時長存在互補關係。即在各航班於空側地面停滯時長已知情況下，航管單位採連續指派起飛航班至跑道旁停等時，前後起飛航機滑行安全間距愈大，則後續航機於機門停等之時長將增加，進而縮短其停等於跑道旁之時長。
 2. 過去尚未有研究評估機場擁擠時，航管單位指派至跑道旁之最適航機數，而本研究在蒐集特定機場之擁擠情境資料後，模擬不同指派策略下之航機起飛延滯狀況，藉以評估特定機場擁擠情境下，航管單位若實施區塊等候之停等區最適指派容量。透過本研究範例分析之結果可知，當航管單位指派至跑道旁停等之航機太少(如 1~2 架)，除了使得航機因滑行距離太遠而無法接續進入跑道，造成跑道空滯狀況外；若正逢機場機門使用率較高之時段，延滯航機停等於機門停機坪之時間愈長，則後續航班旅客被耽誤之時間愈長。隨著航管單位指派至跑道旁停等航機數增加，跑道空滯現象及後續行耽誤狀況將不復存在，但是，航機於跑道旁停等時長則隨之而增加。
 3. 從範例分析中航機連續起飛之模擬結果可知，當中正機場航管單位實施區塊等候時，跑道空滯現象及後續航班延誤停靠的狀況，均在航管單位指派 4 架以上航機至跑道旁停等時即不再發生。由此現象顯示機場擁擠時，航管單位欲避免跑道空滯或航機佔用機門較久形成之機場空側營運效率不佳狀況發生時，至多只須維持 4 架航機在跑道旁停等區等待即可。

4. 本研究之例分析結果顯示當機場擁擠發生，中正機場航管單位採連續指派起飛航機至跑道旁停等之策略時，航機於跑道旁停等損耗之燃油成本達 190,508 元。相較連續指派策略之結果，當航管單位採行最佳之區塊等候策略時，航機於跑道旁停等之燃油成本僅為 39,850 元，並且因採行區塊等候策略所衍生之成本為 21,670 元，較連續指派策略節省 128,988 元，成本改善效益為 68%。上述結果可供機場航管單位面臨相似之機場擁擠情境時，進行起飛航機延滯指派策略之參考。
5. 本研究敏感度分析是藉由延後機場開放時間，增加機場擁擠度之方式進行探討。研究結果顯示隨著機場擁擠度的逐漸增加，起飛航機於機場空側地面停等時長亦隨之增加，使得地勤人員超時作業工時成本、航機地面空調與外部電源成本及航機燃油成本均增加，導致航管單位實施區塊等候之效益降低。
6. 本研究引用區塊等候之概念，以航機於跑道旁停等之燃油成本為比較基準，分析起飛航機之起飛過程，考量延長航機之機門停等時長時，後續相關航班以及機場經營管理單位衍生之額外成本，以及參考航機起飛規範。進而建立一套評估區塊等候指派效益之流程，供航管單位參考面臨機場擁擠情境時決策最適之跑道旁停等區指派航機數。未來亦可藉由航機起飛過程相關參數之修正，針對其他擁擠機場進行最適指派策略之評估。

5.2 建議

1. 範例分析部分，本研究假設停靠相同機門之航機仍舊依照既定班表運行，而不會有臨時取消航班、更換機門進行作業，以減少後機延誤成本之情況。然而，實務上，航空公司因飛航成本以及機隊運用的考量，在機場關閉較久時有可能採取相關措施應變。建議後續延伸研究能將航空公司可能採行之應變策略予以考量，增加區塊等候下決停等區航機指派數量之彈性。
2. 由區塊等候下航管單位僅指派 1~2 架航機至跑道旁停等區的延滯情況，可知機場管理單位紓解機場擁擠的時長，為機場實施連續指派時的 2 倍。然本研究僅考慮連續指派下起飛延誤航班之情況，並未考量指派策略造成延滯擴散之影響，因此，在延滯擴散層面仍存在探討之空間，建議後續研究可透過起飛班表以及延滯擴散之推估結果進行比較，延伸區塊等候之探討致使其更加完善。
3. 本研究於成本分析部分視擁擠機場中機場管理者、各航空公司以及旅客為受到區塊等候影響之整體，因此於成本考量方面未以三者之觀點評估航機延滯於機門之影響，建議後續研究可依三者之觀點，進行適當之權重分配以探討區塊等候對上述三者之損益。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，「台灣地區國際機場作業效率之研究」，民國八十二年。
2. 交通部民用航空局，飛航管制程序，民國八十九年五月。
3. 汪進財、盧清泉，「中正機場機坪運轉分析」，*運輸*，第 25 期，1-22 頁，民國八十三年九月。
4. 汪進財、韓復華及李穗玲，「松山機場跑道容量推估」，*運輸學刊*，第 10 卷，第四期，113-126 頁，民國八十六年。
5. 汪進財、吳世偉，「即時事件導向之航機延誤預測模式」，*運輸學刊*，第 17 卷，第四期，335-358 頁，民國九十四年。
6. 吳貞瑩，「國籍航空公司成本結構之研究」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國九十二年六月。
7. 吳世偉，「航機延誤擴散之預測-SIMMOD 模擬模式之應用分析」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國九十三年六月。
8. 許巧鶯、郭淑婷，「平行跑道與不同航站布設下之最適航空公司機門位置」，*運輸計劃季刊*，第 26 卷，第四期，639-668 頁，民國八十六年。
9. 許巧鶯、鍾惠存及黃惠如，「航空公司班機誤點延滯擴散與控制之研究」，*運輸計劃季刊*，第 32 卷，第三期，447-478 頁，民國九十二年九月。
10. 許乃文，「機場航站大廈出境作業流程延滯擴散及控制之研究」，交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國九十三年六月。
11. 張文和，「集中型航空客運場站配置設計之研究」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十七年六月。
12. 劉仲祥，「即時飛航流量管理系統之建立與管理策略研擬」，成功大學交通管理科學研究所博士論文，民國九十三年七月。
13. Abdelghany, K.F., Shah, S.S., Raina, S. and Abdelghany, A.F., "A Model for Projecting Flight Delays During Irregular Operation Conditions," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 10, pp.385-394, 2004.
14. Abdelghany, K., Abdelghany, A. and Raina, S., "A Model for the Airlines' Fuel Management Strategies," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 11, pp.199-206, 2005.
15. Andreatta, G., and Romanin-Jacur, G., "Aircraft Flow Management under Congestion," *Transportation Science*, Vol. 21, No. 4, pp.249-253, 1987.
16. Atkin, J., Burke, E., Greenwood, J. and Reeson, D., "A Meta-Heuristic Approach to Aircraft Departure Scheduling at London Heathrow Airport." 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, San Diego, California, 2004.
17. Cao, J. M. and Kanafani, A., "The Value of Runway Time Slots for Airlines," *European Journal of Operational Research*, Vol. 126, pp. 491-500, 2000.

18. Cheng, Y., "Solving Push-Out Conflicts in Apron Taxiways of Airports by A Network-based Simulation," *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 351-369, 1998.
19. Chung, C.A. and Nyakman, H., "Operation of Airport Security Checkpoints under Increased Threat Conditions," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp. 264-269, 1996.
20. Chung, C.A. and Sodeinde, T., "Simultaneous Service Approach for Reducing Air Passenger Queue Time," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 1, pp. 85-88, 2000.
21. Dougherty, M., "A Block Queueing System for Slow Moving Traffic," *Transportation Research Part D*, Vol. 2, pp. 259-270, 1997.
22. Ghoseiri, K., Szidarovszky, F. and Asgharpour, M. J., "A Multi-Objective Train Scheduling Model and Solution", *Transportation Research Part: B*, Vol. 38, pp.927-952, 2004.
23. Golaszewski, R., "Reforming Air Traffic Control : An Assessment from The American Perspective," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 8, pp.3-11, 2002.
24. Hansen, M., "Micro-Level Analysis of Airport Delay Externalities Using Dterministic Queueing Models: A Case Study," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 8, pp.73-87, 2002.
25. Horonjeff, R. and McKelvey, F.X., *Planning and Design of Airports*, McGraw-Hill, Boston, 2002.
26. Janić, M., "Modeling the Large Scale Disruptions of An Airline Network," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 249-260, 2005.
27. Nombela, G., de Rus, G. and Betancor, O., "Internalizing Airport Congestion", *Utilities Policy*, Vol. 12, pp. 323-331, 2004.
28. Reilly, C.H. and Berglin, J., "An Enhanced Model for Minimizing Fuel Consumption under Block-Queueing in A Drive-Through Service System," *Transportation Research Part D*, Vol. 9, pp. 221-228, 2004.
29. Soomer M.J., Smeltink, J.W., de Waal, P.R. and van der Mei, R.D., "An Optimisation Model for Airport Taxi Scheduling." *Operations Research 2004*, Annual International Conference of The German Operations Research Society, Tiburg, Netherlands, 2004.
30. Stroup, J.S. and Wollmer, R.D., "A Fuel Management Model for the Airline Industry," *Operations Research*, Vol. 40, No. 2, pp.229-237, 1992.
31. Terrab, M. and Odoni, A.R., "Strategic Flow Management for Air Traffic Control," *Operations Research*, Vol. 41, No. 1, pp.139-153, 1993.
32. Wu, G.L. and Caves, R.E., "Aircraft Operational Costs and Turnaround

- Efficiency at Airports,” *Journal of Air Transport Management*, Vol. 6, pp.201-208, 2000.
33. Wu, G.L. and Caves, R.E., “Research Review of Air Traffic Management,” *Transport Reviews*, Vol. 22, No. 1, pp.115-132, 2002.
 34. Yu, G., *Operations Research in The Airline Industry*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
 35. Zouein, P.P., Abillama, W.R. and Tohme, E., “A Multiple Period Capacitated Inventory Model for Airline Fuel Management : A Case Study,” *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No. 4, pp.379-386, 2002.

