

機場模擬模式之建立與跑道容量分析

DEVELOPING AN AIRPORT SIMULATION MODEL AND RUNWAY CAPACITY ANALYSIS

戴佐敏 Melody D. M. Dai¹

劉仲祥 Jong-Shyang Liou²

李昀諭 Yun-Yu Li³

(92 年 3 月 21 日收稿，92 年 6 月 10 日修改，93 年 6 月 28 日定稿)

摘 要

本研究目的在於建立一機場模擬模式，針對航機於機場運作進行探討。所構建之模式係以節點與節線架構空邊路網，整個系統主程式包含航機產生、登機門、後推、滑行道、跑道管理、到場、接續等七個模組，以處理航機產生於停機坪、指派使用登機門、滑行、使用跑道起降與橫越等不同事件。本研究以中正機場與松山機場實際運作進行模式之驗證，驗證指標為離、到場延滯、後推延滯、起飛等候延滯、抵達節點時間間距等五項，上述指標皆通過統計之平均值檢定，顯示本模式可適當反映實際運作。此外並針對中正機場與松山機場進行容量分析。結果顯示，於目前運作下，中正與松山機場終極跑道容量每小時分別約為 72 架與 40 架；倘若中正機場兩跑道可獨立運作且外在環境無任何限制時，則終極跑道容量理想值約為 80 架／小時。

關鍵詞：機場模擬；機場容量；延滯

-
1. 國立成功大學交通管理科學研究所副教授（聯絡地址：701 臺南市大學路 1 號成功大學交通管理科學研究所）。
 2. 國立成功大學交通管理科學研究所博士候選人。
 3. 國立成功大學交通管理科學研究所碩士。

ABSTRACT

This study develops an airport simulation model for analyzing the performance of airport operations. This model includes seven modules, i.e., Trip Generation, Gate Assignment, Push Back, Taxiway Maneuvering, Runways Utilization Management, Approaching, and Banking. This model simulates the aircraft ground operations in great detail. Thus, it can provide very detailed information about the performances of runways, taxiways, and gates.

A very comprehensive validation test is conducted for this model. The validation criteria include arrival delay distribution, departure delay distribution, push back delay distribution, inter-arrival time distribution, and taxing time distribution. A thorough statistic test is conducted for both mean and probability distribution for each validation criteria. All results show this model works satisfactorily.

This model is applied to analyze the capacity for CKS Airport and Sung Shan Airport respectively. The ultimate runway capacity of CKS Airport is 72 operations per hour currently and could be improved to 80 operations per hour when its two parallel runways operate independently and in ideal conditions. Sung Shan Airport can have at most 40 operations per hour currently.

Key Words: Airport simulation; Airport capacity; Delay

一、前言

臺灣在實施開放天空政策之後，航空公司紛紛成立，各機場之離到場班次有大幅度的成長，航空旅次需求也逐漸增加。然而臺灣地狹多山，目前民用、軍用或軍民合用之機場總共有二十五座，其中多數位於臺灣西半部，因此西半部各主要機場與鄰近空中交通繁忙。雖然目前各主要機場之容量尚未飽和，但主要機場之起降航班多，未來若航班再增加，機場容量可能漸趨飽和，在尖峰時段便容易產生離到場航機的延誤，此種壅塞之現象勢必成為未來航空運輸發展瓶頸。由於環保與財務方面的問題，機場的新建或擴建所遭遇阻力增加，因此機場及空域運作績效之提升，有賴更好之規劃與管理策略。而規劃與管理策略之研擬與評估，必須有一適當的分析工具，才能深入進行各方案績效探討，以選擇最適方案以提升機場及空域整體運作效率。

機場及空域運作績效分析方法一般較常使用的有分析法與模擬法等，其中又以模擬法最為廣泛使用。國外各先進國家，大多已自行構建模擬模式，以進行空域運作績效分析，例如 SDAT (sector design analysis tool)、TMAC、FLOWSIM、TAAM (total airspace & airport modeller)、SIMMOD 等^[1]，其中又以 SIMMOD 之功能最為強大。

SIMMOD 模式^[2]可分析機場及空域整體系統之運作，並提供多種功能與彈性。此模式為一隨機、事件掃描之模擬模式，所有的處理都是依據事件排程表 (event schedule list) 來進行，利用一些使用者定義的隨機變數來表現出現實世界中航班間的各種運作。在空間

的處理上，為一節點、節線之路網型態，此一模擬模式分為機場路網與空域路網兩個不同群體。機場路網包括登機門、離場等候點、跑道、滑行道之節點節線；空域路網則包括固定通報點、空中等候線，航機匯流分流點以及空域空邊交界點。輸入資料包含空域、空邊與事件三大部分，惟其所需輸入之資料量相當龐大，故在資料蒐集與輸入需要花費相當多的人力與時間。而輸出資料包含地面延滯與地面旅行時間、空中延滯與空中旅行時間、跑道需求、總模擬班次、起飛流率、到達流率與登機門使用率等。

SIMMOD 模式係國外長時期研究，並針對當地之特性加以發展，在應用上未必適用於國內狀況，且其原始程式碼不易取得。考量未來航空之規劃、管理、使用將為民航運輸發展之瓶頸，國內實有必要及早建立在此方面研發能量及技術，因此遂有 ANS (air network simulation)^[3] 模擬模式之發展。

ANS 係國內在此方面研究初次之嘗試，用以模擬航機於終端管制區域之運作。此模式為一事件掃描、微觀之模擬模式，所有事件之處理，均以事件排程表為依據。此模式雖為終端管制區域模擬模式，但具有模擬由起飛機場停機坪至降落機場停機坪之飛航過程的功能。此模式以節線、節點之網路型態，作為空間之處理方式，所定義之節點包括：停機坪節點、跑道入口點、跑道出口點、離場交管點、到場交管點、進場點、國際線航機進入點以及國際線航機離開點等。此模式主要以運行時間分配來推進航機，系統中包含七個模組處理不同事件，分別為航機產生模組、起飛等候模組、跑道管理模組、脫離跑道模組、離場模組、進場模組與接續班機模組。輸入資料包含終端管制區域路網結構、機型資料庫、定期航線班表、航機離到場程序、航機運行時間資料、隔離時間資料、地面航機數量資料等。輸出資料包含機場起飛航機平均等候時間、跑道入口點、起飛等候線平均等候長度、及最大等候長度、跑道使用率、單位時間起降架次等。然 ANS 僅針對終端管制區域航機運作建立一模擬模式之雛型，並未對空邊的運作詳盡探討，尤其在其航機於節線上之推進，係以現行各機型之運作時間為依據。

由於 ANS 為國內在此空域模擬方面研究初次之嘗試，因此功能未臻完善，其與 SIMMOD 模式之比較如表 1 所示。然而發展一套功能完整之空域模擬模式需將航機在運作過程中所有可能發生之情形加以考量，此一工作量十分龐大，實非一蹴可幾，因此較為可行之方法為分成數個子系統分階段發展，並逐步擴充其功能。

因此為發展一套符合國內運作特性之模擬模式，以作為規劃與分析國內機場與空域之基礎，本研究乃以 ANS 模式為基礎，進一步擴充其功能，並期望具備以下功能：

1. 在模式研發之過程中此一技術逐步於國內紮根，建立此方面之研究能量。
2. 針對航機於機場內之運作為細部模擬，包括航機產生、登機門選擇與占用、航機後推、跑道選擇、滑行路徑選擇、滑行道衝突、跑道占用、接續班機等。
3. 以距離除以速度求算航機運作時間。由於 ANS 以現行各機型之運作時間為依據，因此僅能對所蒐集之情況加以重現，無法表現一些特殊狀況或未觀察到之情形；而以距離除以速度求算航機運作時間之方式，藉由設定航機合理之運作速度，在模擬過程中，即可

根據當時狀況，控制航機之速度，因此可增進模擬模式之預測性及涵蓋性。

4. 分析機場跑道容量，可供管制人員實施流量管理之參考。
5. 預留功能擴充之彈性。本研究所發展之模擬模式係以 Visual C++ 程式撰寫，在程式發展時即採用物件導向方式撰寫，因此未來研究人員認為有任何值得探討的行為，均可對現有的模擬模式中進行修改。例如可對流量管理、地面等候策略等課題進行研擬，並利用模擬模式作為測試的介面；或可將航路上詳細運作之部分加以擴充，將航機於空域運作之情形加以考量，以開發一較完整的空邊及空域模擬模式。

表 1 SIMMOD 與 ANS 之比較

模 式	SIMMOD	ANS
功 能	分析機場及空域整體系統之運作	分析終端管制區域航機運作
研發地區	美國	國人自行研發
輸入資料	1. 空域檔—航機、機場、節線、節點、管制程序與航路等。 2. 空邊檔—節線、節點、航空公司、座標、離場等候線、登機門、跑道、滑行道與滑行路徑等。 3. 外生事件檔—到場航機、離場航機、管制程序與航機運作追蹤指令等。 4. 空域附加檔—流量管制、延滯分配、交通量儀控、航路變換、席位等。 5. 空邊附加檔—滑行路徑變換、擁擠區域、滑行路徑成本、等候區、空邊節線連結、航機後推、後推時間分布、等候登機門區域等。	1. 終端管制區域路網結構 2. 機型資料 3. 定期航線班表 4. 航機離到場程序 5. 航機運行時間資料 6. 隔離時間資料 7. 地面航機數量資料
輸出資料	1. 地面延滯 2. 地面旅行時間 3. 空中延滯 4. 空中旅行時間 5. 跑道需求 6. 總模擬班次 7. 起飛流率 8. 到達流率 9. 登機門使用率 10. 動畫	1. 機場起飛航機平均等候時間 2. 起飛等候線平均等候長度 3. 起飛等候線最大等候長度 4. 跑道使用率 5. 單位時間起降架次
優 點	1. 可提供使用者多種輸出結果以便進行各項分析 2. 提供新機場興建的預測評估 3. 提供良好之動畫圖形	1. 可提供使用者多種輸出結果以便進行各項分析 2. 針對臺灣飛航特性所建立之微觀模擬模式
缺 點	1. 輸入資料相當龐大，屬於勞力密集的工作 2. 模式相當敏感 3. 使用者需經過相當的訓練才能上手	1. 僅對終端管制區域提供分析，航機推進方式簡略。 2. 未對空邊的運作詳細探討 3. 航機於節線上之推進，以現行各機型之運作時間為依據

二、現況分析

2.1 機場空邊設施

中正機場為臺灣地區最大之國際機場，所服務的機型以重型廣體噴射客機為主，目前第一航站區分為南機坪與北機坪，共有 43 席停機坪位可供使用，其中 21 席為供客運使用，另有 14 席貨機坪供貨運使用以及 8 席接駁機坪。而新啟用的第二期航站部分，目前於南機坪有 10 席客機機坪與 7 席接駁機坪，未來北機坪部分完工後，將再增加 10 席客機機坪。跑道方面計有三條平行跑道，兩條主跑道與一條備用跑道，分別是 05L/23R 跑道、05R/23L 跑道與 06/24 跑道，其中 05R/23L 跑道為備用跑道。

滑行道系統部分共計有與主跑道平行的四條平行滑行道（含備用跑道）、05L/23R 跑道上五條快速滑行道出口、06/24 跑道上四條快速滑行道出口、跑道端各有兩條旁越滑行道、兩條南北橫交滑行道及數條南北向的其他滑行道。有關機場空邊設施之布設請參見表 2 以及圖 1。

表 2 中正機場空邊設施^[4]

跑道			停機坪		滑行道	
跑道號碼	跑道長度 (公尺)	起降 機型	編號	數目	型態	數目
05L/23R	3,660*60	B-747	1-11(客運)	11	平行滑行道(包含備用跑道)	4
05R/23L(備用)	2,752*45	MD-11	12-22(客運)	11	快速滑行道	5(05L/23R 跑道)
06/24	3,350*60		601-608(客運)	8	快速滑行道	4(06/24 跑道)
			503-512(貨運)	10	跑道端的旁越滑行道	2
			514-515(貨運)	2	南北橫交滑行道	2
					南北向的其他滑行道	數條

松山機場目前僅提供國內航線服務，航線遍及國內各中大型機場，為國內最繁忙的機場之一，所服務的機型包括各式中大型航機及小型航機。機坪部分共有 42 席，分別位於南機坪與北機坪，南機坪有 15 席，北機坪有 27 席。松山機場計有一條 10/28 跑道，跑道長度為 2,605 公尺。

滑行道系統部分包括：有東西兩條滑行道、東西兩條快速滑行道與中央連絡道。有關機場空邊設施之布設請參見表 3 以及圖 2。

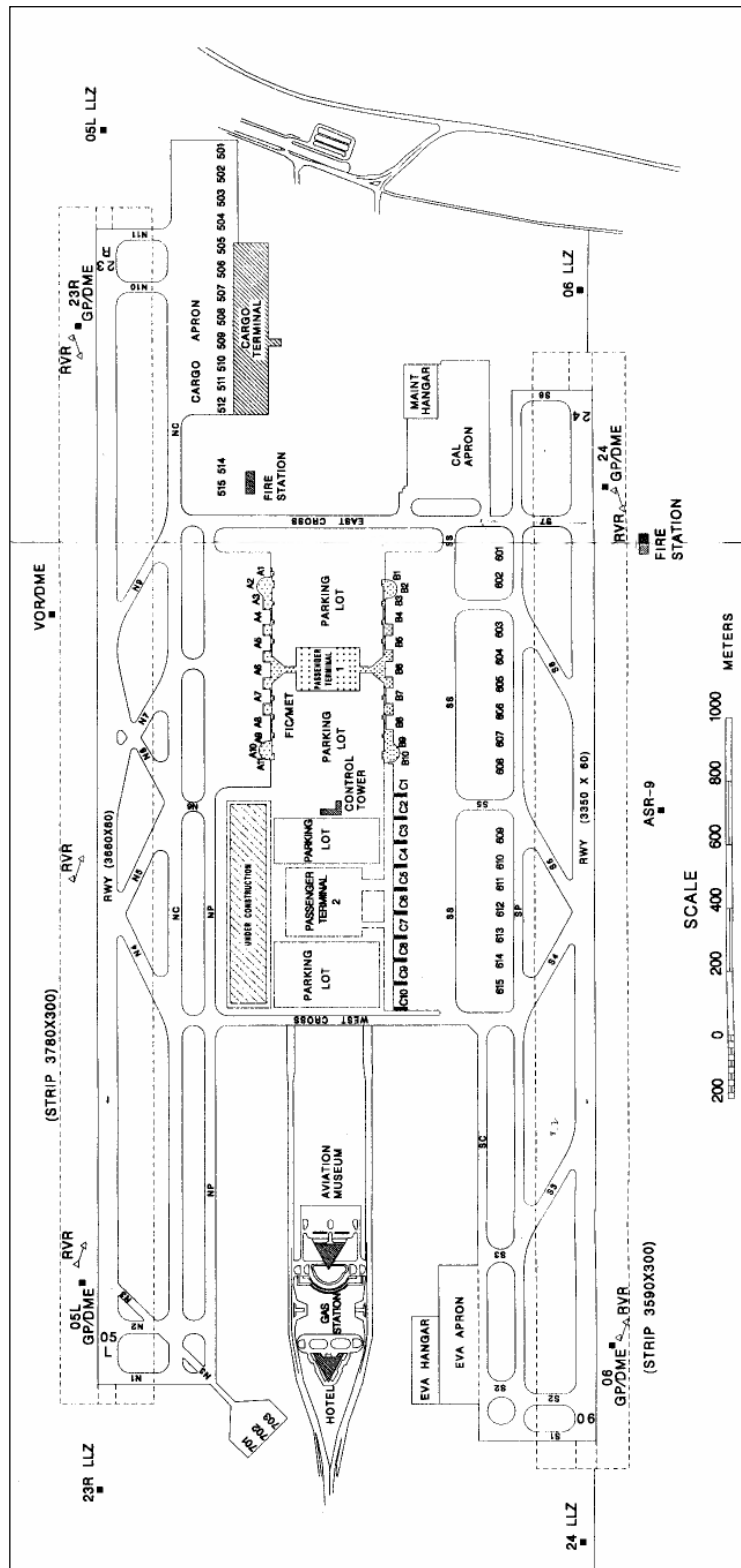


圖 1 中正機場布設圖

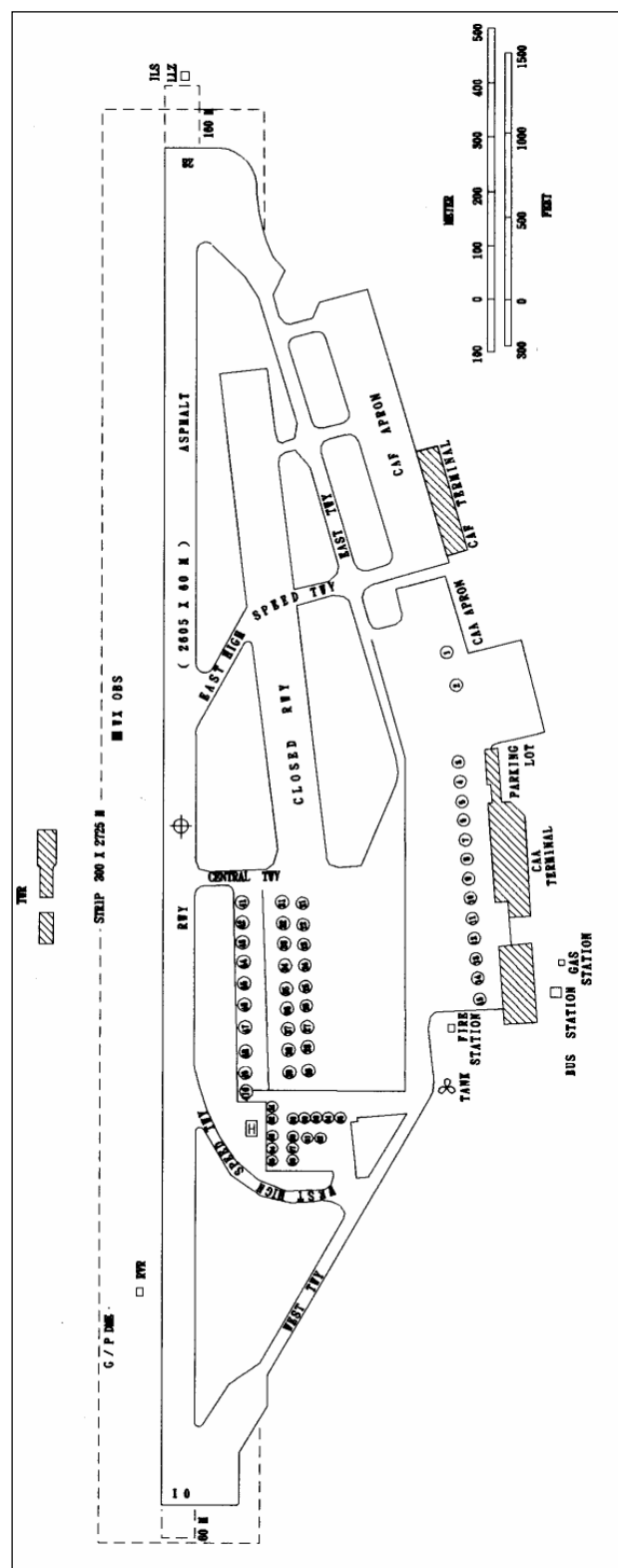


圖 2 松山機場布設圖

表 3 松山機場空邊設施^[4]

跑道			停機坪		滑行道	
跑道號碼	跑道長度 (公尺)	起降機型	編號	數目	型態	數目
10/28	2,605*60	B767/757	1-15	15	東西向滑行道	2
		A321	21-29	9	快速滑行道	2
		MD82/90	31-39	9	中央連絡道	1
		ATR72	41-49	9		
		FK50 DH8				

2.2 機場隔離管制作業

2.2.1 到場航機

當到場航機進入最後進場點時，塔臺管制員必須確定跑道頭以及跑道並無任何航機。因此，根據飛航管制程序 (air traffic control procedures, ATP)^[5] 規定，到場航機需於前一航機已落地並脫離跑道，或前一航機已起飛並通過跑道末端時，方可取得進場許可。而前後航機之隔離必須避免機尾亂流現象。其中考量機尾亂流情形隔離標準整理如表 4。

表 4 機尾亂流情形隔離標準

單位：海涅

後行航機 前行航機	重型機	大型機	小型機
	重型機	大型機	小型機
重型機	4	6	6
大型機	3	3	4
小型機	3	3	3

此外臺北飛航情報區飛航指南 (Aeronautic Information Publication Taipei Flight Information Region)^[4] 規亦明確規定，當航機進入外信標臺 (outer marker) (即最後進場點，final approach point) 時，管制員必須先確認跑道清除，即前一進場航機必須已滑離跑道，或者前一離場航機已起飛，否則該進場航機必須進行誤失進場。

然而有時基於管制目的，將兩前後進場航機保持一較大之隔離，以便於順利放行離場航機，通常此一隔離較安全因素所保持之隔離為大。目前松山機場連續兩架進場航機最小隔離約為 2 分鐘，中正機場連續兩架進場航機最小隔離約為 3 分鐘。

2.2.2 離場航機

為確保使用同一跑道之離場航機與前一架離場或進場航機之間的隔離，根據 ATP 規定，前一離場航機起飛並通過跑道末端或已轉彎無任何衝突，以及前一進場航機已脫離跑道，方可取得離場許可。

然離場隔離亦會因當時航機種類、速度、爬升率、機場地理位置、天候情況等諸多因素影響，根據訪談得知目前松山機場之航管人員所使用之放行基本原則為：

1. 前後兩架離場航機起飛後，飛行軌跡立即分歧時，兩者隔離至少 1 分鐘。
2. 前後兩架離場航機起飛後，飛行軌跡相同時，兩者隔離至少 3 分鐘。

航管人員即依據上述原則，配合當時各種情況予以調整，不過隔離時間不得小於所規定之原則。另外，目前中正機場之航管人員所使用的放行基本原則為 3 分鐘，並且以基本放行前提下，配合當時各種情況予以調整。

2.2.3 小結

AIP 之標準離到場程序與 ATP 之標準隔離規定，係一標準規範，為航管人員管制之原則；於實際管制作業時，航管人員可考量實際狀況，以此規範為原則作彈性之應用。因此本研究以 AIP、ATP 為基礎，再配合以訪談資料，對中正與松山兩機場之離到場情形進行整理，以作為模式運作邏輯之參考。

三、模式建立

本節說明機場模擬模式之構建程序，首先介紹模擬模式之構建流程，其次說明航機路網結構與航機推進過程，最後介紹系統主程式並說明各事件處理模擬模組。

3.1 模式構建流程

為建立模擬模式，首先須對所欲研究範圍內航機運作狀況進行了解，以決定路網型態與邏輯。本章將建立本研究之路網結構，其次根據航機運作情形，構建數個模擬模組，每一模組透過事件產生及資料庫索引之間的互動，進行航機運作模擬。接著進行蒐集各模組所需的資料，包括：長期班表、管制條、機場地面運行時間及航機性能等資料，以建立模式所需之資料庫。

3.2 輸入資料

模擬模式所需輸入之資料可概分為班表航機屬性資料、路網資料與運作資料三類，共計十六個資料檔，其簡要說明如表 5 所示。一般而言，模擬模式若欲進行越詳細的模擬，

相對上需提供較細部的資料供程式判讀，由於 SIMMOD 可對空邊及空域進行相當細部之模擬，故需相當多的輸入資料，其資料檔如表 1 所示。其中空域附加檔與空邊附加檔為選擇性 (optional) 輸入之檔案，因此若僅執行基本功能，需輸入 19 個檔案；若欲執行所有功能，則需輸入 32 個檔案。而本研究所發展之模擬模式主要著重於航機在機場內部的運作，故所需資料設定較 SIMMOD 少。

表 5 輸入資料檔

	資料檔	功能說明
班表航機	班表資料檔	定義各航空公司之班表資訊及班機使用登機門、跑道、滑行路徑等資訊
	航機分類資料檔	針對所有航空器，依其機型大小進行分類
	航機屬性資料檔	定義各機型所需之起飛、降落長度及其所需之地勤時間
路網資料	空邊路網資料檔	建立模式運作所需之路網資料
	登機門資料檔	建立各機場之登機門及其屬性
	空邊節線資料檔	建立空邊各機場之節線及相關資料，包括節線長度、方向、類型等資料
運作資料	航機地面滑行路徑資料檔	建立空邊機場滑行路徑之資料
	跑道出口資料檔	建立各機場可使用之跑道出口
	航空公司使用跑道出口政策資料檔	建立各航空公司在各機場空邊慣用之跑道出口
	空邊運作速度資料檔	定義航機在空邊節線上運作速度與發生機率
	後推延滯資料檔	定義航機於後推時間之延滯分配
	各機場離場程序資料檔	建立各機場使用離場程序之資料
	各機場離場程序群組資料檔	將各機場所用離場程序依起飛後之方向分類
	隔離標準資料檔	定義前後航機因離到場程序或機型分類所需的隔離標準
	前一日停放航機數資料檔	設定前一日各航空公司於各機場所停放之重型機、大型機與小型機的航機數
	到場跑道隔離資料檔	設定到場航機使用同跑道或不同跑道（中正）所需之與前機隔離距離

(一) 班表航機屬性資料

班表航機屬性資料中包含班表資料檔、航機屬性資料檔以及航機分類資料檔等。

1. 班表資料檔

模式開始模擬時由此資料檔產生航機，因此本資料檔需定義班表中各航機之性質，包含班機之呼號、起迄點、起迄時間、使用之登機門、跑道、滑行路徑等資訊。

2. 機型分類資料檔

此資料檔目的為將所有航空器，依其特性進行分類。FAA 之機型分類標準係將航機依重量分為 A、B、C、D 四類，其中 A 型飛機與 B 型飛機之差別在於前者為單一發動機，本研究考量較少有 A 型飛機於國內運作，且其運作特性相似，因此本研究將之歸為同一類，故本研究之機型分類共計三種：小型飛機、大型飛機及重型飛機，如表 6 所示。其中中正機場以重型飛機為主，而松山機場則為大型飛機與小型飛機混合使用。

表 6 機型分類表

FAA 機型分類	本研究之分類	飛機類型	重量限制	機型種類
A 型飛機	小型機	輕型單發動機飛機	5,700 公斤以下	ATR、BN2A、D228、DH8、F50、SAAB340
B 型飛機		輕型雙發動機飛機	5,700 公斤以下	
C 型飛機	大型機	大型飛機	5,700 公斤～136,000 公斤	F100、A310、A320、A321、B737、B757、MD80、MD83、MD90
D 型飛機	重型機	重型飛機	136,000 公斤以上	A300、A330、A340、B747、B767、B777、MD11

3. 航機屬性資料檔

機型分類資料檔之目的在於將個別的機種（例如 B737、A320…等）依其特性加以分類，而航機屬性資料檔之目的在於設定小型機、大型機、重型機之運作特性，包括所需之起飛、降落長度以及地勤時間。為避免重複輸入，因此本研究將此二個資料分別建置。

(二) 路網相關資料

路網資料用以描述空邊布設的型態。路網建立的原則是先建構空邊必要的節點，依節點之間的相互關係連成節線，再將節線組合成為航機運作的路徑。在安排操作上，可根據機場的布設，依格式建立空邊路網資料檔以及登機門資料檔，而空邊節線資料檔則把空邊各節點依其相關性將各節點間連結成線，完成空邊路網的架構。

1. 空邊路網資料檔

本資料檔主要目的在建立模式模擬時所需之路網，因此本研究將研究範圍內之節點依不同之終端管制區域、機場等建立運作之路網，資料檔中包含之節點型態包含登機門節點、跑道節點、滑行道節點等。

2. 登機門資料檔

本資料檔建立各機場登機門之資料。因登機門在設計時即有適用機型的考量，且在實際運作上，航空公司有其慣用之登機門，因此本研究在登機門資料檔內針對各機場登機門其慣用之航空公司及登機門之適用機型加以設定，作為模擬模式內選擇使用登機門之依據。

3. 空邊節線資料檔

此資料檔將各機場之跑道、滑行道、登機門等節點，依其地理位置及彼此間的相關性，分別連結為節線，用以表達航機運作。例如：登機門至滑行道節點相連的節線代表航機後推；滑行道節點組成之節線表示航機滑行；滑行道節點至跑道的連線表示航機等候起飛；滑行道節點至橫越跑道點表示航機準備穿越跑道；跑道至滑行道節點的連線表示降落航機離開跑道；滑行道節點至登機門的連線表示航機停靠登機門。

此資料檔設定各節線之起迄點、長度、方向性、型態（即為上述六種之一）以及容量等資訊。

(三) 運作相關資料

運作相關之資料包括航機地面滑行路徑資料檔、跑道出口資料檔、航空公司使用跑道出口政策資料檔、空邊運作速度資料檔、後推延滯資料檔、各機場離場程序資料檔、各機場離場程序分類資料檔、隔離標準資料檔、前一日停放航機數資料檔等，分別輸入航機在地面運作時所需之相關資料，如滑行路徑、滑行時間、使用之離場程序、落地後使用之跑道出口等。

1. 航機地面滑行路徑資料檔

在空邊路網確定之後，接著建立航機於地面滑行之路徑資料，此資料檔建立航機在空邊機場滑行時可預設使用之滑行路徑。

2. 跑道出口資料檔

此資料檔之目的在於提供航機於落地時可選擇不同之跑道出口脫離跑道，因此本資料檔建立各機場可使用之跑道出口及此出口的相關資訊，包含此出口與落地起點或跑道終端的距離、此出口相鄰之節點與節線等資訊。

3. 航空公司使用跑道出口政策資料檔

因各航空公司可能因慣用登機門位置的不同，而傾向於使用離登機門最近的跑道出口，以期使滑行距離儘可能減少。航空公司亦可能為了安全因素，而要求使用全跑道脫離，為模擬此狀況，本研究建立此資料檔，設定各航空公司在各機場空邊慣用之跑道出口。

4. 空邊運作速度資料檔

考慮各航機在空邊節線之運作速度不同，因此在資料分析上，本研究將各種機型在各節線上的運作速度加以整理，並求算各速度之發生機率，在模擬過程可隨機決定各航機之運作速度。此資料檔即定義航機在空邊節線上運作速度與發生機率。圖 3 為松山機場大型機進場滑行之速度分布情形。

5. 後推延滯資料檔

本資料檔目的在計算航機後推之延滯，為更符合實際運作並提供不同模擬方式，本資料檔於設計便考慮以不同之分配方式計算航機後推延滯之時間，包含常態分配、指數分配、伽瑪分配與經驗法則 (empirical distribution) 等四種不同方式。使用者可根據需要，

選擇適當的分配，用以表示航機後推延滯。例如實際後推延滯呈現常態分配，則選用常態分配；亦可利用實際觀察所得之後推延滯分布，此即上述所謂之經驗法則。

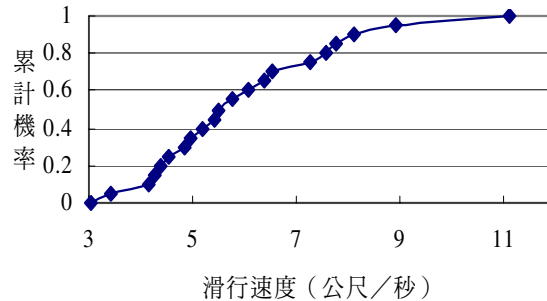


圖 3 松山機場大型機進場滑行之速度分布

至於後推時間與離場時間之差異，本研究於松山機場、中正機場實際觀察，記錄各班次實際後推時間，而後將資料以起迄機場以及機型加以分類，比較實際後推時間與班表預計離場時間之差異。本研究將各機場之資料一一比對之後，建立各航線各機型後推差異時間分配型態資料庫，於模擬過程中以隨機方式產生時間差異。圖 4 為臺北－臺南航線之大型機於松山機場後推延滯之分布情形，其餘航線與機型之資料與圖 4 雷同，故不再贅述。此處所謂之後推時間差異為實際後推時間－預計離場時間，因此符號為正，表示實際後推時間較預計離場時間晚，表示班機在後推之前已發生延誤，而符號為負，表示實際後推時間較預計離場時間早。

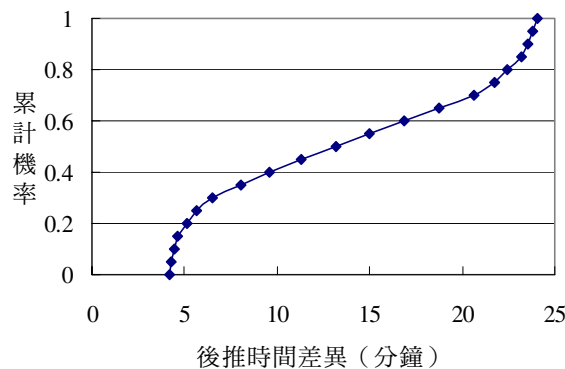


圖 4 臺北－臺南航線（大型機）於松山機場後推延滯之分布情形

6. 各機場離場程序資料庫

為更確實模擬航機自跑道起飛後依不同離場程序加入不同航路之狀況，本資料庫建立各機場所使用離場程序之機率分配，模式將依機場及使用跑道之不同並考慮離場程序之機

率分配，選擇採用不同之離場程序。

7. 各機場離場程序群組資料檔

本資料檔考慮不同離場程序間使用之隔離不盡相同，因此將各機場使用之離場程序依起飛後航行之方向分類。

8. 隔離標準資料檔

因不同離場程序間使用之隔離不盡相同，因此在將各離場程序分類後建立此資料檔，目的在於定義前後航機因不同離場程序或機型分類所需的隔離標準。

9. 前一日停放航機數資料檔

此資料檔設定前一日各航空公司於各機場所停放之重型機、大型機與小型機的航機數，此資料檔可作為航機產生之依據。

10. 到場跑道隔離資料檔

此資料檔設定前後到場航機使用同跑道，或使用不同跑道但跑道間非獨立運作所需之隔離距離。

3.3 航機路網結構與運作邏輯

航機在機場運作所使用的設施稱為空邊設施，航機於空邊所進行的活動包含進場航機由最後進場點降落至機場並滑行至登機門停靠，以及離場航機由登機門後推、滑行至跑道並起飛脫離跑道等，所使用的設施包括跑道、滑行道、登機門與停機坪。

根據航機於空邊所使用的設施，定義空邊網路節點，包括：最後進場點、跑道節點、離場等候點、橫越跑道等候點、滑行道節點、登機門節點、登機門等候點與停機坪節點等，茲說明如下，有關路網結構請參見圖 5。

- (一) 最後進場點：進入空邊的第一個節點，該節點一次僅容一架航機進入，航機在此開始占用跑道資源。
- (二) 跑道節點：以節點形式代表實際跑道，其中節點屬性包括跑道長度、出口位置與節點容量，該節點一次僅容一架航機進入。
- (三) 離場等候點：控制航機使用跑道起飛的節點，設置在跑道節點前。
- (四) 橫越跑道等候點：控制航機橫越跑道的節點，設置在跑道節點前。
- (五) 滑行道節點：以節點形式代表滑行道與滑行道或其他設施的交會點。
- (六) 登機門節點：登機門為航機產生後所停放的位置，以節點形式代表實際登機門，其中節點屬性包括所屬航空公司、可停放機型與容量。
- (七) 登機門等候點：當航機無登機門可使用時，於此點等候。
- (八) 停機坪節點：存放暫時閒置不用之航機，為一虛擬的節點。

節線則連接二個相鄰的節點，代表航機正在進行的活動，而依航機活動的不同，可分為四種節線，包括滑行道節線、進場節線、離場節線、飛行節線。滑行道節線為停機坪節點至登機門節點、一滑行道節點至另一個滑行道節點、或滑行道節點至離場等候點，表示

航機在地面之滑行動作；進場節線連接最後進場點與跑道，表示航機正在降落；離場節線連接跑道與離場交管點，代表航機正在起飛；飛行節線則為空域節點至最後進場點間的節線，表示航機正在空中飛行。節線之屬性包括長度、航機運作速度限制、容量、以及方向性等。

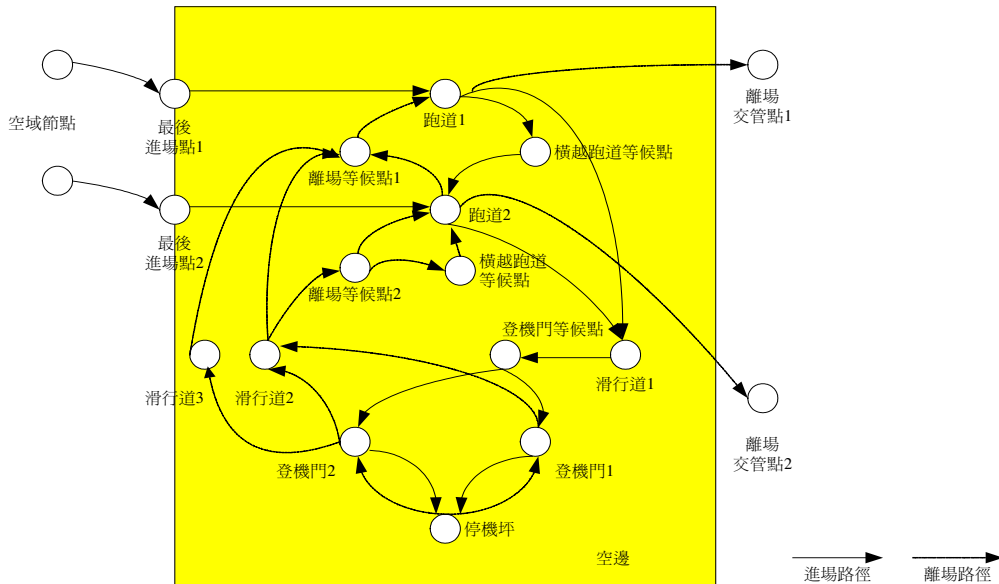


圖 5 航機飛行路網結構示意圖

航機於機場之運作過程說明如下：

航機產生於機場停機坪，本研究根據班表航機預計離場時間、地勤作業時間、當時是否有航機可供派遣與考量隨機性延滯等，決定其航機產生。

航機產生後，決定其使用之登機門，登機門指派方式可事先指定或根據登機門屬性、航機機型來決定。若指定登機門無法使用，可選擇等候使用原指定登機門或尋找其他可用登機門；若沒有任何空閒且適用之登機門，則航機需進行等候。

在決定其使用之登機門後，便占用登機門進行地勤作業，而地勤作業時間乃根據機型大小決定。當完成地勤作業後，航機後推之前，會根據航機機型、跑道長度、跑道可服務機型等因素，選擇起飛跑道；在班表資料中可事先指定起飛滑行路徑，若無指定起飛路徑，則以起迄點（登機門—跑道）間，根據最短滑行路徑原則決定其起飛滑行路徑。若決定使用的登機門和跑道與班表原指定的登機門和跑道不同，則該指定起飛滑行路徑將被取消，以新指派的起飛滑行路徑為準。

當航機前往目的地跑道，其中若需橫越跑道，則等待跑道閒置後再橫越跑道；當航機滑行至離場等候點時，確認跑道是否閒置，與前一架離場航機保持足夠隔離，且能於下一航機進場前脫離跑道時，等候起飛之航機即取得跑道使用權，而推進至跑道節點。當航機

占用跑道準備離場時，根據所需之起飛滾行長度，推算何時脫離跑道，而航機脫離跑道後隨即至空域節點。航機在滑行道或跑道系統中，各節線滑行或滾行時間係以節線長度除以航機滑行或滾行速度求得，而航機滑行或滾行速度已考量隨機因素。

航機於到場交管點準備進場時，選擇降落所使用的跑道，此跑道可事先指定或由模式決定。當判斷此進場航機與前一進場航機保持足夠隔離，且預估此進場航機至最後進場點，跑道可淨空時，此進場航機即可向最後進場點推進，並取得進場許可而獲得跑道使用權。若航機無法進場，則進行空中等候或取消任務折返原機場。航機進場飛行時間係依據實際資料分析其統計分布，模擬過程中以隨機方式得到。

航機進場時，根據航機滾行所需之距離，決定使用跑道出口與計算脫離跑道時間，同時指派登機門。登機門的指派，可事先指定或由模式依據登機門容量與安排情形進行指派。脫離跑道後即釋放跑道資源，此時直接進入滑行道系統，或者航機脫離跑道後需橫越鄰近跑道，則於脫離跑道後，加入橫越跑道等候點，等待跑道淨空後再橫越跑道進入滑行道系統。

爾後航機依照指定之滑行路徑或選擇一最短路徑，前往目的地登機門。航機進入登機門占用，完成地勤作業後，方可供下一飛行任務之派遣。

3.4 系統主程式

本模擬模式以 Visual C++ 程式語言撰寫，其系統主程式流程如圖 6 所示，各模組之功能則如表 7 所示，各模組之詳細流程請見附錄。

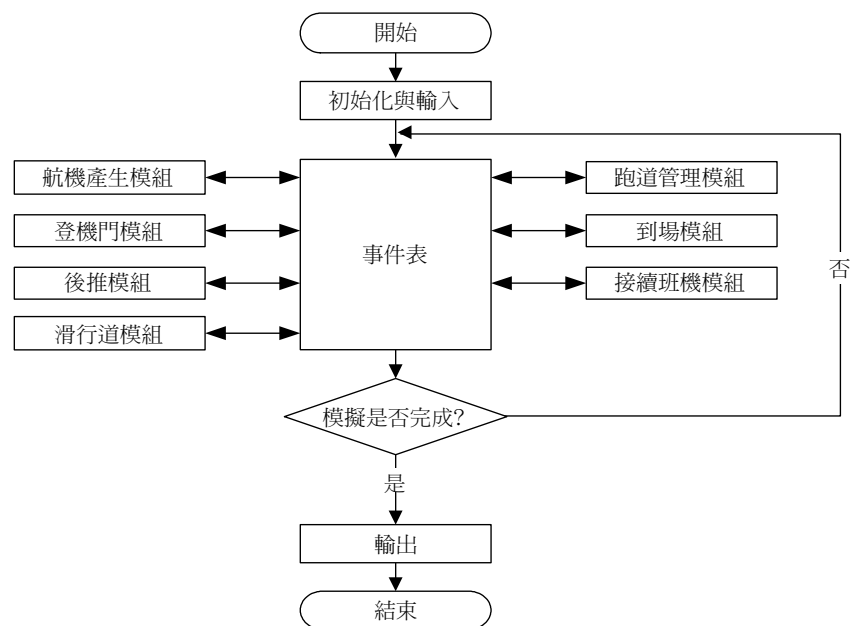


圖 6 系統主程式流程圖

表 7 各模組功能簡表

模 組	模組功能與特性	
航機產生模組 (圖 11)	- 產生航機班次 - 航班產生時間 - 機場是否開放 - 是否有航機可供派遣 - 選擇空邊模擬詳細程度	
登機門模組 (圖 12)	- 登機門指派 - 事先指定或由模式選擇 - 是否可以其他登機門替代 - 登機門屬性 - 安排航機產生下一事件 - 離場航機—後推事件 - 到場航機—接續班機事件 - 登機門資源釋放	
後推模組 (圖 13-15)	- 產生滑行事件 - 決定航機使用之跑道 - 事先指定或由模式選擇 (找尋使用跑道副程式，圖 14) - 是否可以其他跑道替代 - 決定滑行路徑 - 事先指定或由模式選擇 (最短滑行路徑副程式，圖 15) - 登機門資源之再指派或釋放	
滑行道模組 (圖 16)	- 依下一節點型態安排航機下一事件 - 登機門節點—登機門事件 - 滑行道節點—滑行事件 - 跑道起點—離場事件 - 跑道出入口—橫越事件 - 滑行道資源之再指派或釋放	
跑道管理模組 (圖 17-22)	進場事件 副程式 (圖 18、 15、19)	- 決定跑道出口 - 事先指定或由模式選擇 - 決定登機門 - 事先指定或由模式選擇 (最短滑行路徑副程式，圖 15) - 決定滑行路徑 - 事先指定或由模式選擇 (登機門指派副程式，圖 19) - 安排航機產生下一事件 - 滑行事件 - 跑道資源的釋放
跑道管理模組 (圖 17-22)	離場事件 副程式 (圖 20)	- 是否可使用跑道離場 - 跑道閒置時間 - 與前一離場航機隔離是否足夠 - 是否能於下一航機進場前脫離跑道 - 跑道資源的釋放 - 跑道頭離場等候節點資源再指派或釋放 - 產生航機下一事件
	橫越事件 副程式 (圖 21)	- 是否可橫越跑道 - 跑道是否閒置 - 是否能於下一航機進場前脫離跑道

表 7 各模組功能簡表 (續)

模 組	模組功能與特性	
		2. 跑道資源的釋放 3. 跑道橫越節點資源再指派或釋放 4. 產生航機下一事件
	閒置事件 副程式 (圖 22)	1. 跑道資源之指派 • 先到先服務 • 是否能於下一航機進場前脫離跑道
到場模組 (圖 23)	1. 處理所有抵達到場交管點之到場航機 • 跑道是否可用 • 航機可否進入最後進場點 2. 產生進場事件或進行空中等候	
接續班機模組 (圖 24)	1. 接續班機旅次產生 • 航機可用時間 • 依據班表隨機之旅次產生時間 2. 產生登機門事件	

四、模式驗證

本研究構建完成之模擬模式經過模式確認，確定無語法及邏輯之錯誤後，尚必須通過模式驗證 (validation)。所謂模式驗證，即在相同的運作條件下，比較實際蒐集之系統運作資料與模擬模式之結果，若兩者之數值相符合，則表示模式具有適當描述實際現象之能力，才能進一步分析各種情境下之運作情形。以下說明進行模式驗證時，驗證指標之決定、驗證資料來源、驗證方式及最後驗證之結果。

4.1 驗證指標

一般探討空域或空邊運作效率，常以延滯作為評估指標；延滯時間之長短會影響航機實際起降時間，反映機場運作效率。本研究以離場延滯、到場延滯、離場等候點等候時間與後推延滯等項目作為驗證指標，另外增加抵達滑行道節點之時間間隔 (inter-arrival time)，以評估航機地面運作情形。

所謂離場延滯，定義為航機實際離場時間與預計離場時間之差異；到場延滯，定義為航機實際到場時間與預計到場時間之差異；起飛等候點等候時間，定義為航機抵達跑道頭時間與開始滾行時間之差異；後推延滯，定義為航機實際後推時間與預計後推時間之差異；抵達滑行道節點之時間間隔，定義為前後航機通過某滑行道節點之時間間隔。故本研究採用驗證指標包含：(一) 離場延滯分配；(二) 到場延滯分配；(三) 起飛等候點等候時間分配；(四) 後推延滯分配；(五) 抵達滑行道節點之時間間隔分配。

4.2 驗證資料來源

本研究係以松山與中正機場為驗證對象。而驗證資料蒐集方面，主要係以管制條與現地觀察得知。離、到場延滯分配驗證部分，資料來源如下：

- (一) 民國 89 年 8 月 24 日中正機場與 8 月 25 日松山機場全日之管制條。
- (二) 民國 89 年 8 月國際航線班機時刻表與國內聯合班機時刻表。

至於起飛等候點等候時間分配、後推延滯分配與抵達滑行道節點之時間間隔分配等驗證部分，則採：

- (一) 民國 89 年 8 月 24 日 (12:00~18:00) 中正機場之現地觀察資料。
- (二) 民國 89 年 8 月 25 日 (12:00~16:00) 松山機場之現地觀察資料。

4.3 驗證結果

本研究針對松山機場與中正機場之航機運作個別進行 30 次模擬，將模擬所得之平均結果與實際蒐集資料，以平均值檢定檢核模式之執行結果是否能夠反映真實情況。

平均值檢定係本研究針對各項延滯指標，分別求得模擬結果與實際觀察之均數，判斷兩者均數是否相等之統計檢定。

本研究選擇之顯著水準 α 為 0.05，其檢定結果整理如表 8 與表 9。松山與中正機場兩者各項驗證指標之 P 值皆大於顯著水準，即各項驗證指標之模擬平均值與實際平均值可視為相同，故此部分通過驗證。

由表 8 與表 9 之結果顯示，各項驗證指標之 P 值皆大於顯著水準，因此在統計上模擬之平均值與實際平均值可視為相同。然而，進一步探究各指標平均值之差異百分比，可發現部分指標之差異較大，如表 10 所示。

表 8 松山機場平均值檢定結果

	離場延滯		到場延滯		離場等候點 等候時間		後推延滯		滑行道抵達 時間間隔		滑行時間 ^{註 1}	
	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
模擬	25.12	11.64	25.91	22.26	5.43	2.97	13.76	11.22	4.21	4.01	6.41	1.91
實際	22.30	12.33	26.74	24.43	4.68	2.46	13.59	11.51	4.20	5.59	6.60	2.45
P 值	0.21		0.86		0.11		0.94		0.99		0.65	
顯著 水準	0.05											

註 1：由於資料蒐集之故，此為航機於某段滑行道之滑行時間。

表 9 中正機場平均值檢定結果

	離場延滯		到場延滯		離場等候點 等候時間		後推延滯		滑行道抵達 時間間隔		滑行時間 ^{註1}	
	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
模擬	19.9	8.79	22.71	18.84	1.18	0.99	11.31	8.75	5.67	5.57	7.9	1.22
實際	20.06	11.81	19.21	17.48	1.03	0.98	11.05	9.48	6.45	5.16	7.37	2.35
P 值	0.95		0.43		0.52		0.92		0.57		0.73	
顯著 水準	0.05											

註 1：由於資料蒐集之故，此為航機於某段滑行道之滑行時間。

表 10 模擬之平均值與實際平均值之差異百分比

	離場延滯	到場延滯	離場等候點 等候時間	後推延滯	滑行道 抵達時間 間隔	滑行時間
相關之模組	航機產生模 組、登機門 模組、滑行 道模組、跑 道管理模組	航機產生模 組、登機門 模組、滑行 道模組、跑 道管理模組	航機產生模 組、登機門 模組、滑行 道模組、跑 道管理模組	航機產生模組 、登機門模組	滑行道 模組	滑行道模組
松山機場	12.65%	-3.10%	16.03%	1.25%	0.24%	-2.88%
中正機場	-0.80%	18.22%	14.56%	2.35%	-12.09%	7.19%

註 1：差異百分比 = (模擬－實際)／實際。

其中兩機場之後推延滯之差異百分比在 5% 以下，表示航機產生模組與登機門模組之模擬結果相當良好；而滑行道抵達時間間隔與滑行時間，松山機場之差異百分比在 5% 之內，而中正機場之差異較大，此乃由於中正機場之滑行道路徑有較多選擇，因此航機實際滑行路徑可能與模擬指派之路徑不同，因而造成滑行時間有所差異，而松山機場之滑行路徑較為簡單，因此模擬值與實際值相當接近；至於離場延滯、到場延滯、離場等候點等候時間，則呈現較大的差異。

由上述之觀察可知，航機產生模組及登機門模組之模擬功能相當良好；而滑行道模組在滑行路徑較多選擇時，其模擬結果較不準確，表示在選擇滑行路徑之邏輯仍有改善空間；至於航機離到場延滯部分之誤差，因航機產生模組、登機門模組所產生的誤差很小，因此可推定其誤差主要來自於跑道管理模組，故未來可對跑道管理模組進行進一步的改善。

五、跑道容量分析

本節主要針對中正機場兩平行跑道不同運作方式以及松山機場現況運作方式，進行跑道容量分析，各項分析每種情境均模擬 30 次。模擬係在 CPU 為 AMD 1.2G 之個人電腦執行，模擬一次約可在 5 分鐘內完成。

5.1 跑道容量分析

跑道容量會受到許多因素的影響，包含各種機型混合比、天候狀況、飛航管制作業、跑道系統之布設等。以下首先針對中正機場進行跑道容量分析，其次將模擬結果與 FAA 所訂的跑道容量表做一比較，最後再與松山機場跑道容量進行比較。

(一) 中正機場

觀察目前中正機場所使用之機型，重型機與大型機之比例約 70：30，而目前中正機場雖擁有兩條平行跑道，但現階段之航管作業仍以視同單一跑道之方式，其離、到場之放行作業原則係到場航機前後隔離為 3 分鐘，離場航機前後隔離亦為 3 分鐘。

針對中正機場目前跑道運作方式進行跑道容量分析，本研究首先假設：維持目前機型混合比，離到場航機比為 50：50，天候條件一切正常。此外，並假設數種運量情境，包含原班表運量，以及增加原班表之 100%、200%、300% 與 400% 等四種情境，以觀察於不同班表運量下，中正機場跑道單位時間起降架次數與延滯情形。

在班表設計方面，乃根據目前班表尖峰時段航機分布情形，以時間間距 (inter-arrival time) 方式產生班表，時間間距已考慮隨機因素，即某一航班產生時間為前一航班產生時間加上一時間間距。當欲增加班表運量時，便縮短平均時間間距，而平均每單位時間之產生班次數便增加。各增幅比率之班表完成後，便進行模擬。輸出結果採每 5 分鐘為一單位時段統計起降架次數，並蒐集連續 12 個單位時段 (1 小時) 起降架次總和。由於模擬之初，系統尚未穩定，因此必須有一段熱機時間 (warmup period)，使系統有足夠時間達穩定狀態 (steady-state)，所以資料必須於系統穩定之後方可採用^[6]。依據各種不同班表運量與起降架次數及延滯情形，整理如表 11 與圖 7、圖 8。

當運量持續增加，其單位小時起降架次數隨之增加，惟增加幅度逐漸減少，而運量增幅於 300% 之後，起降次數成長開始漸趨穩定，約 72 架次／小時，因此可推估此數值為終極跑道容量。此外，當運量增加，延滯時間亦隨之增加。而跑道容量之定義有兩種，一為上述之終極跑道容量，即單位時間內且連續需求下，跑道所能服務之最大起降架次數；另一種係指在可忍受之延滯條件下，跑道於每單位時間內所能供航機起降之最大數量，一般而言，可忍受延滯原則採 4 分鐘^[7]。若以此原則判斷，可推得其跑道容量為所對應之運量增幅介於 100% 至 200%，其可忍受延滯下跑道容量約為 60 架次／小時。

表 11 不同運量下中正機場跑道使用與延滯情形

班表運量增幅百分比	0%	100%	200%	300%	400%
平均每小時起降架次數	20	45	63	71	72
平均起飛延滯時間 (分)	0.48	1.52	4.35	61.75	87.39

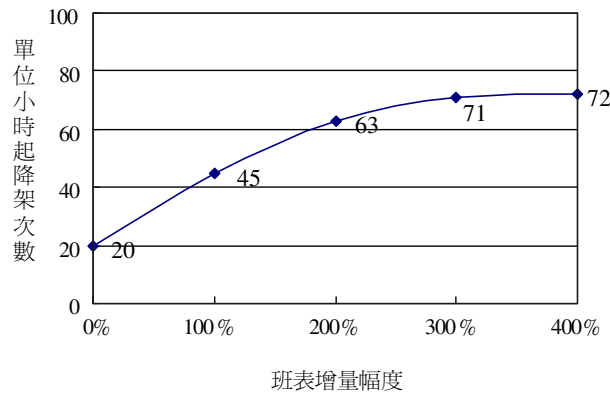


圖 7 不同運量下中正機場跑道起降架次數

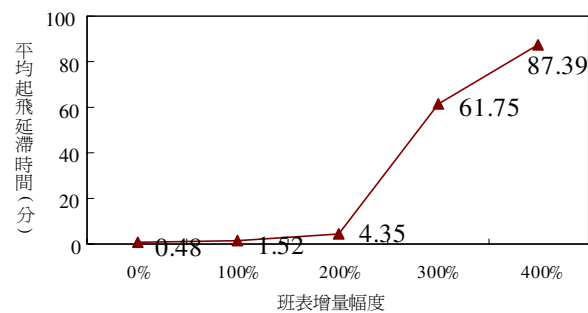


圖 8 不同運量下中正機場跑道延滯情形

假設中正機場兩平行跑道可以分別獨立運作，探討其終極跑道容量。根據 ATP 規範之離、到場放行原則，重、大型機於前一重型機之後到場，其前後航機隔離分別為 2 分鐘、3 分鐘；重、大型機於前一大型機之後到場，其前後航機隔離皆為 1.5 分鐘；離場航機為考量機尾亂流，前後機則有 2 分鐘之隔離。

同樣以上述方式產生班表，包含原班表運量，以及增加原班表之 100%、200%、300% 與 400% 等四種情境，觀察跑道於獨立運作，不同班表運量下，中正機場跑道單位時間起降架次數與延滯情形。由圖 9 得知，當兩平行跑道分別獨立運作時，單位時間起降架次數隨運量增加而增加，當運量增幅介於至 300% 之後，起降次數成長趨於平緩穩定，約 80

架次／小時，此為其終極跑道容量。圖 10 顯示運量增加，延滯時間亦隨之增加，若以 4 分鐘可容忍延滯原則下，所對應之運量增幅於 100% ~ 200% 左右，而所得跑道容量約 70 架次／小時。因此，倘若未來中正機場航行需求量增加，而兩平行跑道可獨立運作，便可提升目前跑道容量以滿足未來之需求。

表 12 不同運量下中正機場跑道使用與延滯情形（跑道獨立運作）

班表運量增幅百分比	0%	100%	200%	300%	400%
平均每小時起降架次數	20	45	70	77	80
平均起飛延滯時間 (分)	0.50	1.63	6.06	298.06	327.81

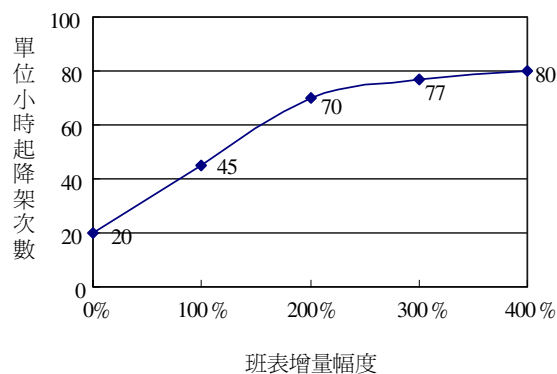


圖 9 不同運量下中正機場跑道起降架次數（跑道獨立運作）

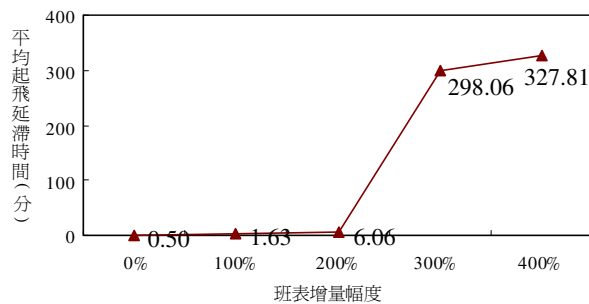


圖 10 不同運量下中正機場跑道延滯情形（跑道獨立運作）

(二) 與其他容量分析方法之比較

根據中正兩平行跑道可獨立運作之假設，模擬所得結果之跑道容量約為 80 架次／小時。以下採用查表法^[8,9]以推估中正機場跑道容量，與模擬結果做一比較。

FAA 針對不同跑道系統之布設、不同天候狀況與機型混合比，制訂一跑道容量表以估算單位小時容量與年服務架次數。此方法適用於長程規劃最初跑道容量之估算參考，且所推估之跑道容量為理想值。而運用查表方法估算跑道容量必須基於下列假設：

1. 飛航空域足以容納所有航機之飛行需求。
2. 具有雷達管制設備，且至少有一跑道設有儀降系統。
3. 有足夠之滑行道可供航機迅速駛至或離開跑道系統。
4. 連續起降作業 (Touch-and-Go Operation) 之比率在 50% 以下，其值依機型混合比而定。

FAA 將機型分為 A、B、C、D 四類，機型混合指數用以表示該機場內運作航機混合情形，指數愈大，表示大型或重型航機愈多，其公示如下：

$$\text{混合指數 (\%)} = \text{C 型飛機之百分比} + \text{D 型飛機之百分比} \times 3$$

因此應用查表法，推估中正機場兩跑道獨立運作之跑道容量如下：

目前中正機場使用之重、大型機比例為 70：30，其機型混合指數為 240%。比對 FAA 跑道容量表，其機型混合指數最高僅探討至 180%，此時中正機場在儀器飛航管制作業 (IFR) 下之容量為 99 架次／小時。因此根據此表使用外插法估算機型混合指數為 260% 時之跑道容量約為 94 架次／小時，推算結果與模擬所得結果有些許差異。產生差異原因在於使用查表法，其中假設機場有足夠之滑行道可供飛機迅速駛至或離開跑道系統，航機並不會有額外占用跑道的時間，但實際上中正機場跑道出口之布設並非如此。其模擬結果為 80 架次／小時，即平均每條跑道容量約 40 架次／小時，雖與查表法所得結果差異甚大，但此容量仍偏高，亦可視為一理想值。

由於實際運作並非能達到完全理想狀態，會受到諸多因素影響，例如目前中正機場兩跑道之現有標準儀器離場程序均為起飛後保持跑道航向，並無分歧角；但根據 ATP 規定，於平行跑道同時作業之航機，其起飛航道需至少有 30 度之分歧角。未來若要實施兩平行跑道獨立作業，則需修改儀器離場程序，使兩跑道起飛之航機可立即取得 30 度之分歧角。

至於其他影響因素亦包含席位容量不足而限制航機進出空域，必須於機場地面等候或延後近場交管時間，造成跑道容量減少；機場周圍地形與噪音限制的影響，必須調整離到場程序、隔離時間，使得跑道容量受影響；航管人員單位時間內所能管制之航機數，亦會影響跑道容量的多寡。因此，在探討中正機場兩平行跑道可獨立運作時，實際跑道容量會小於理想值，然而模擬所得結果僅屬一理想值，可作為一參考依據。

(三) 松山機場

本研究更進一步探討松山機場跑道容量，同樣假設維持其目前機型混合比，即大、小型機比例約 60：40，離到場航機比為 50：50，天候條件一切正常，並依據目前隔離作業標準，連續進場隔離 2 分鐘，連續離場隔離依前後不同儀器離場程序類別需 1 分鐘或 3 分鐘，而班表設計方面亦根據先前原則產生。模擬所得結果如表 13，發現班表運量增幅約 40%，可達到其終極跑道容量約為 42 架次／小時，顯示目前松山機場運量已接近飽和狀態。

韓復華等^[10]利用 SIMMOD 模式推估松山機場跑道容量，分析結果顯示松山機場每小時的跑道運作容量為 45 架之起降組合，該研究之結果與本研究推算之終極跑道容量 42 架次／小時略有不同，然差異並不大，產生差異可能的原因包括：

1. 推測方法不同：該研究採用 Gilbo 容量推估模式，以繪製起降架次之容量曲線的方式，推估松山機場跑道容量，此與本研究採用的方式不同。
2. 模擬次數不同：該研究以 10 次模擬的結果推估容量，而本研究以 30 次模擬結果加以分析。

表 13 不同運量下松山機場跑道使用情形

班表運量增幅百分比	0%	20%	40%	60%	80%	100%
平均每小時起降架次數	36	39	40	41	41	41
平均起飛延滯時間 (分)	9.18	38.87	51	56.72	108.27	471.11

六、結論與建議

6.1 結論

- (一) 本研究所構建之機場模擬模式，可針對航機於機場內之運作，進行詳細之模擬，可處理的航機運作包括航機產生、登機門選擇與占用、航機後推、跑道選擇、滑行路徑選擇、滑行道衝突、跑道占用、接續班機等。其中登機門選擇與占用、跑道選擇、滑行路徑選擇、滑行道衝突為新增功能，較 ANS 模式可進行更細部之模擬。
- (二) 本研究之航機推進邏輯改以距離除以速度求得旅行時間，此與 ANS 模式以現行各機型之運作時間作為航機於節線推進之依據有所不同。此項改進將使模擬模式具有較佳之預測功能。
- (三) 在模式驗證方面，所選取之驗證指標為離場延滯、到場延滯、離場等候點等候時間、後推延滯、抵達滑行道節點之時間間隔等五項。經統計檢定，p 值皆大於 5% 之顯著水準，模擬與實際觀察兩者之均數可視為相等，因此本模式應能適切反映真實運作情況。
- (四) 分析中正機場跑道容量，以目前兩平行跑道無法獨立運作之情形，運量增至原來的 300% 之後，可推得其終極跑道容量約為 70 架次／小時；若採 4 分鐘可容忍延滯原則，推得跑道容量約為 60 架次／小時左右。倘若兩平行跑道可分別獨立運作，則跑道容量較目前運作情形明顯提升許多，約為 80 架次／小時，為一理想值。

6.2 建議

- (一) 本研究雖已建立一機場模擬模式，並經驗證後可適切反映真實情況下航機之運作。然而侷限於時間與資料有限，仍可從以下數方面加強其功能之完整性：
1. 本模式提供航機橫越跑道之功能，然而礙於觀察資料取得不易，因此無法針對此功能進行驗證，建議未來可加入此部分之驗證，更加提升模式之完整性。
 2. 本模式對於航機之處理，離場航機離場後，加入離場交管點後結束事件，而到場航機一開始產生於到場交管點，因此兩者並未考慮航機於航路運作情況。未來可將模式擴充至空域部分之模擬，考量空域容量對機場運作的影響，更加完整探討航機運作之情形。
 3. 本模式未對非正常情況進行探討，未來可增加天氣變化以及其他意外事件的探討。
 4. 對於軍機活動之情況，本模式並未加以考量，建議未來可就此部分強化模式功能，以探討軍機於空域影響民航機運作之情況。
- (二) 中正機場運作分析部分，目前兩跑道係屬相依運作，考量未來旅運需求量增加，可就兩平行跑道分別獨立運作方式配合航管作業方式加以分析，更進一步探討其運作績效。
- (三) 有關機場地面交通部分，當未來運量增加，機場地面交通量增加，可就此部分進行路網指派、地面等候策略等相關之研究。

參考文獻

1. Odoni, A. R., *Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts*, 1997, pp. 23-48.
2. CACI Products Company, *SIMMOD: The Airport and Airspace Simulation Model, User's Manual/Animation*, March 1991.
3. 交通部，終端管制區域模擬模式之建立—以臺北終端管制區域為例，中華民國八十八年六月。
4. 交通部民用航空局，臺北飛航情報區飛航指南 (Aeronautical Information Publication Taipei Flight Information Region, AIP Taipei FIR)，民國八十八年二月。
5. 民用航空局及空軍總司令部，飛航管制程序 (Air Traffic Control Procedure, ATP)，民國八十九年五月。
6. Law, A. M. and Kelton, W. D., *Simulation Modeling and Analysis*, Second Edition, McGraw-Hill International Editions, 1991.
7. Ashford, N. and Wright, P. H., *Airport Engineering*, 1992, pp. 185-207.
8. Federal Aviation Administration, *Airport Capacity and Delay Advisory Circular*, September

- 1983.
9. 周義華，**運輸工程**，鼎漢國際工程顧問股份有限公司，民國八十二年八月，頁 481-485。
10. 韓復華、郭權鋒、戚文豪，「應用模擬模式推估松山機場容量之分析」，**民航季刊**，第四卷，第一期，民國九十一年，頁 51-74。

附錄 模組流程圖

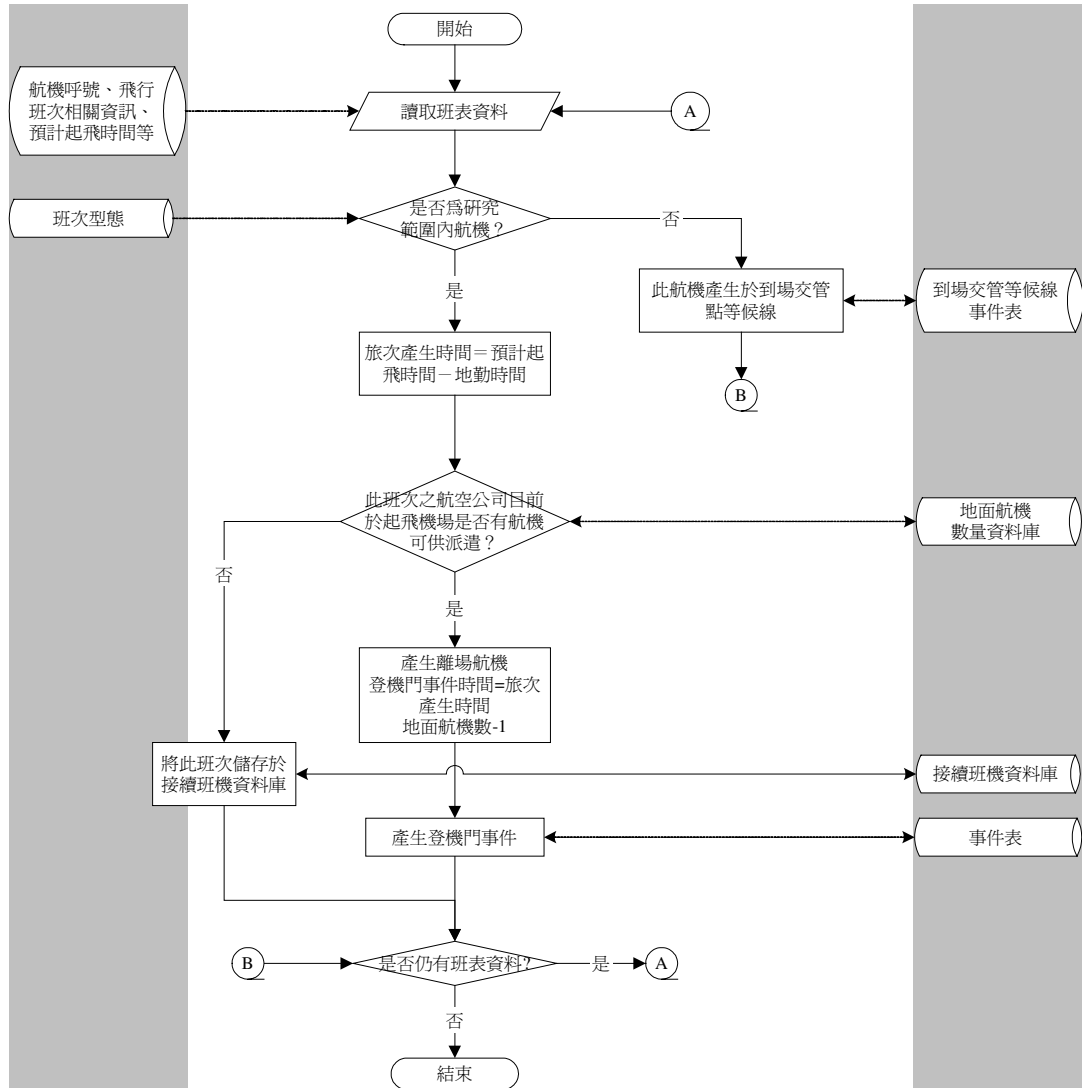


圖 11 航機產生模組流程圖

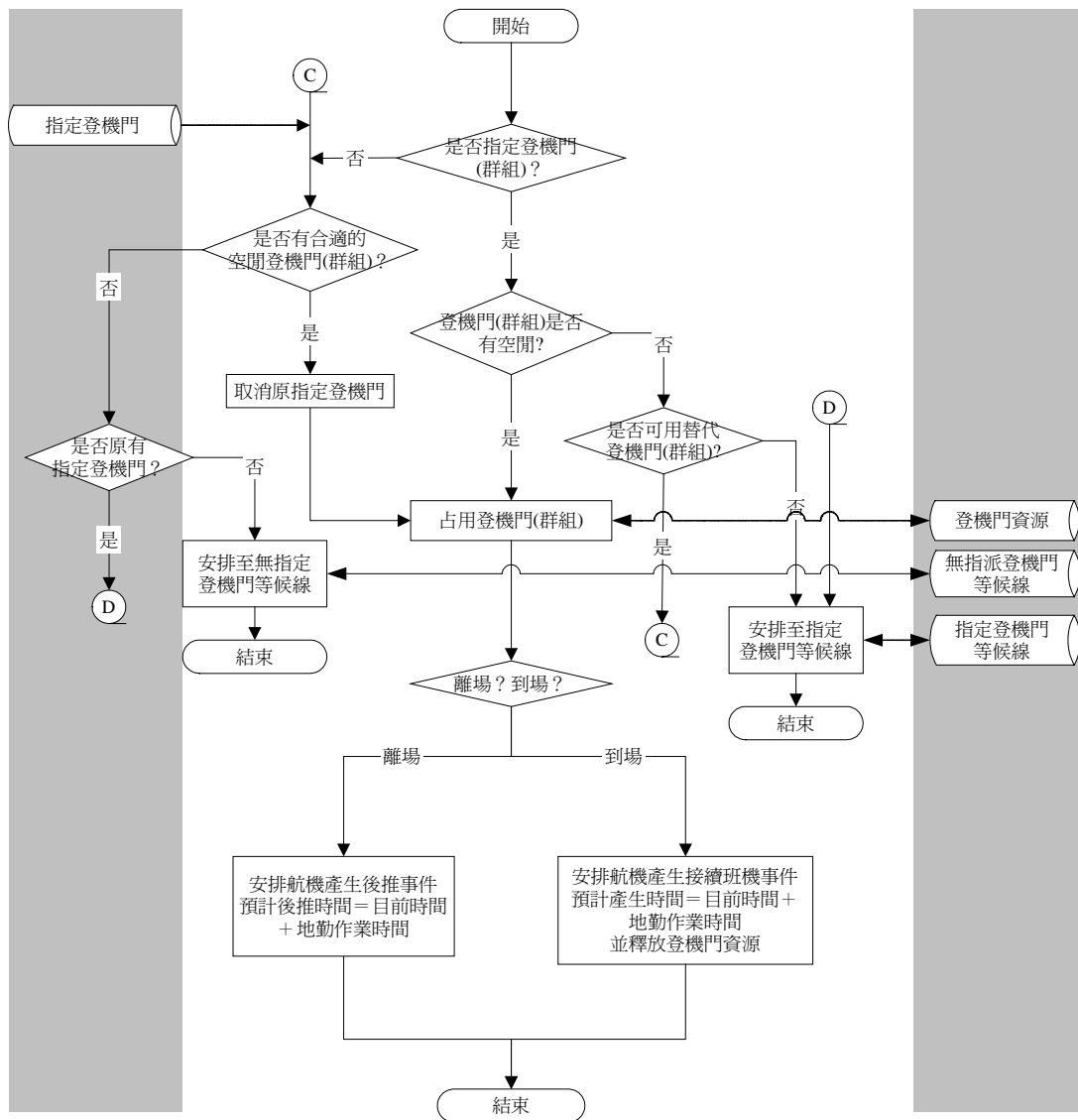


圖 12 登機門模組流程圖

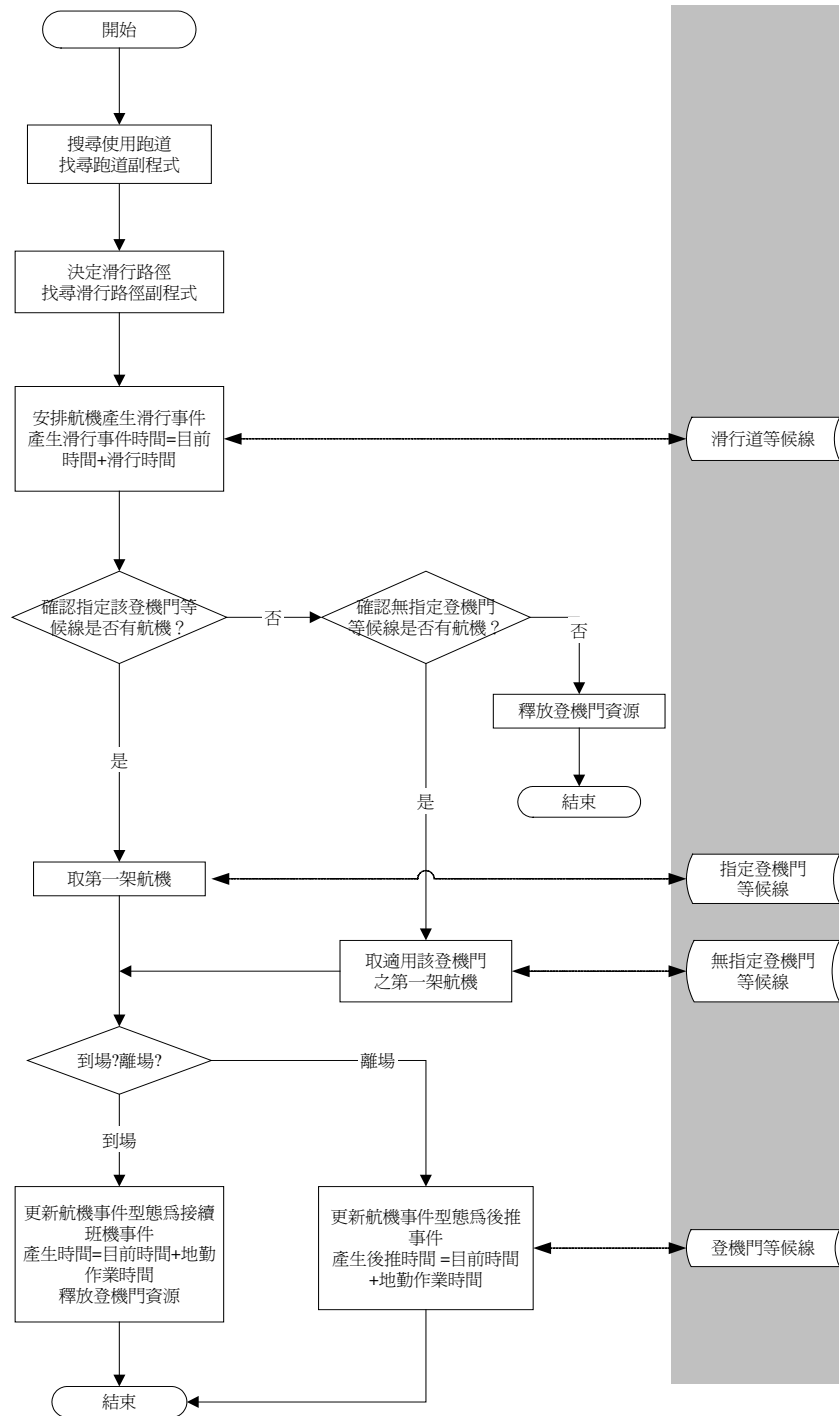


圖 13 後推模組流程圖

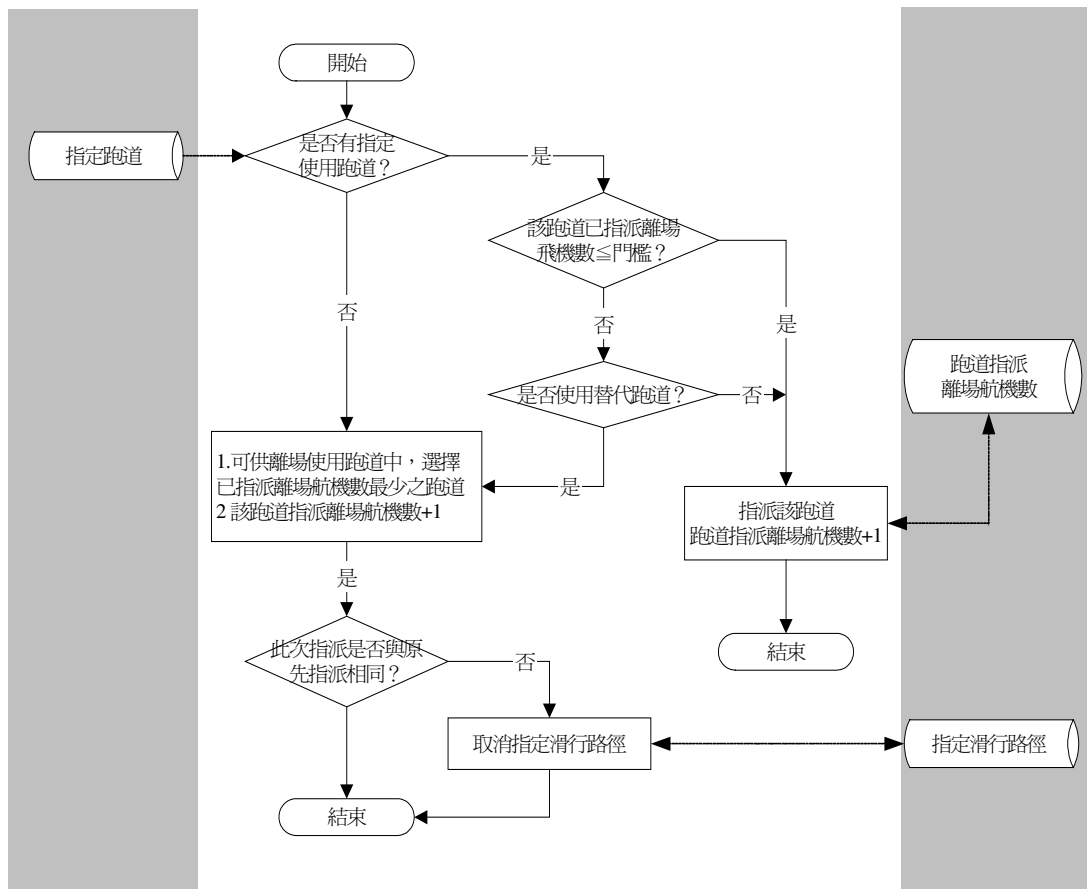


圖 14 找尋使用跑道副程式流程圖

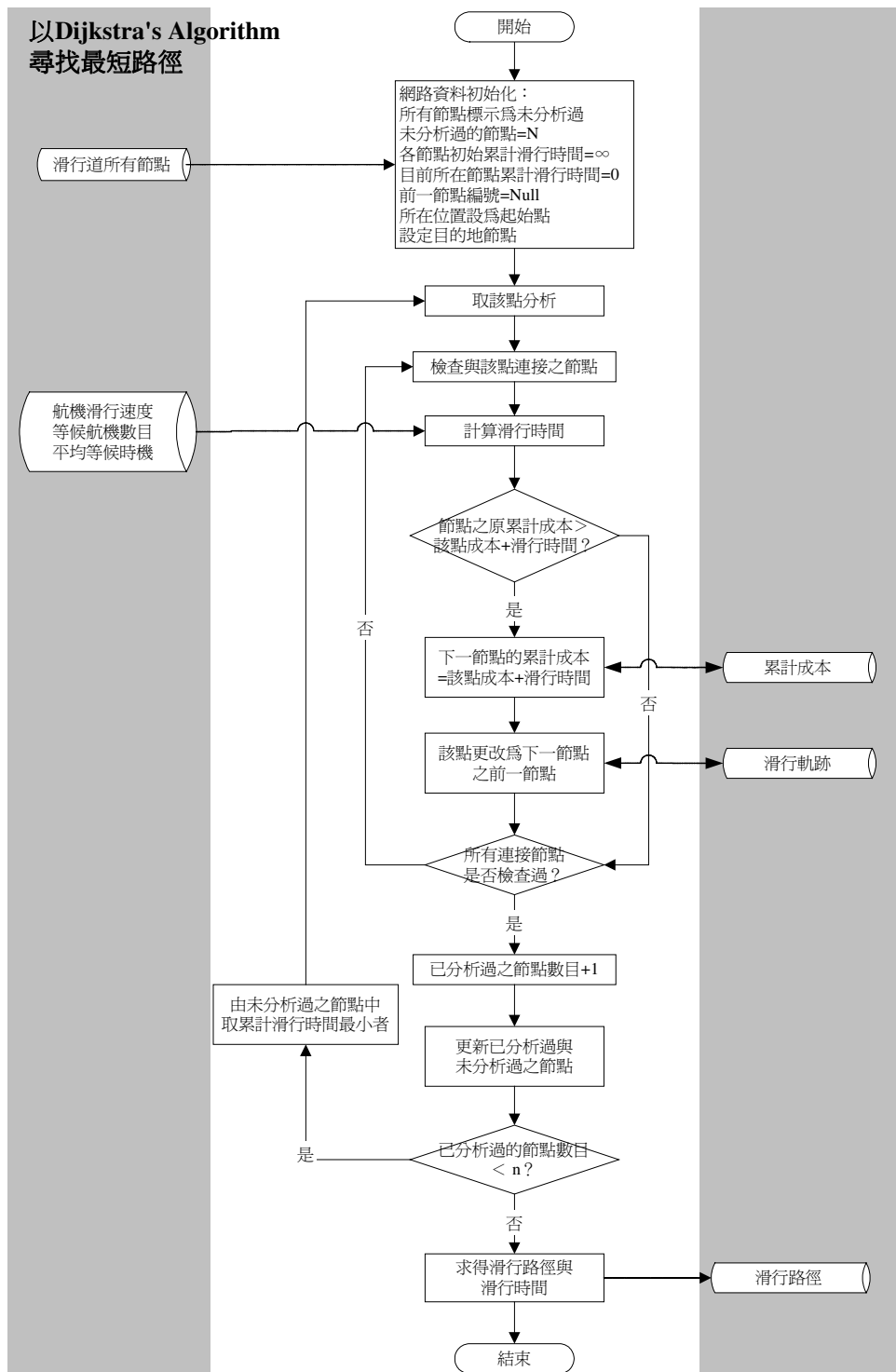


圖 15 最短滑行路徑副程式流程圖

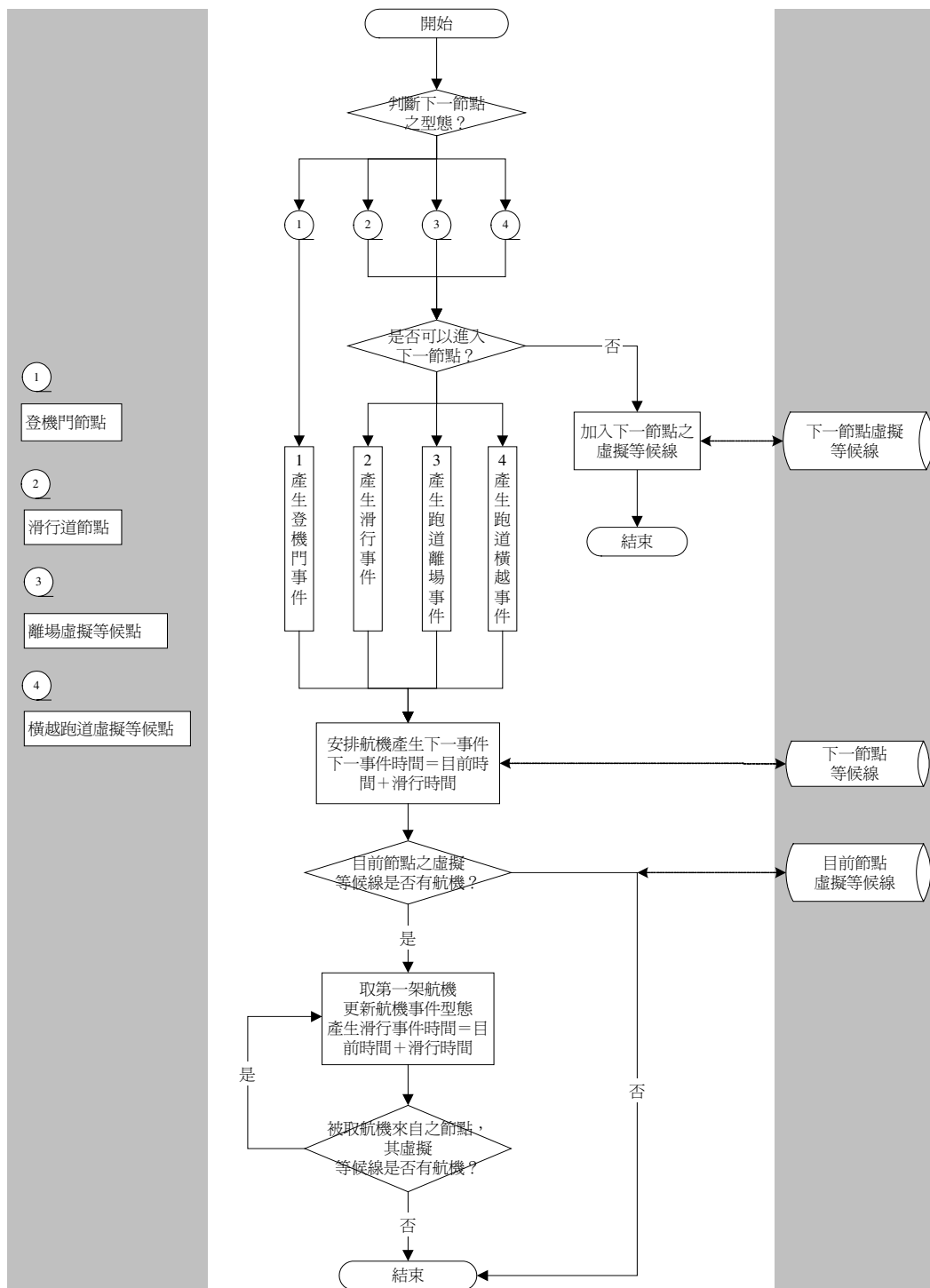


圖 16 滑行道模組流程圖

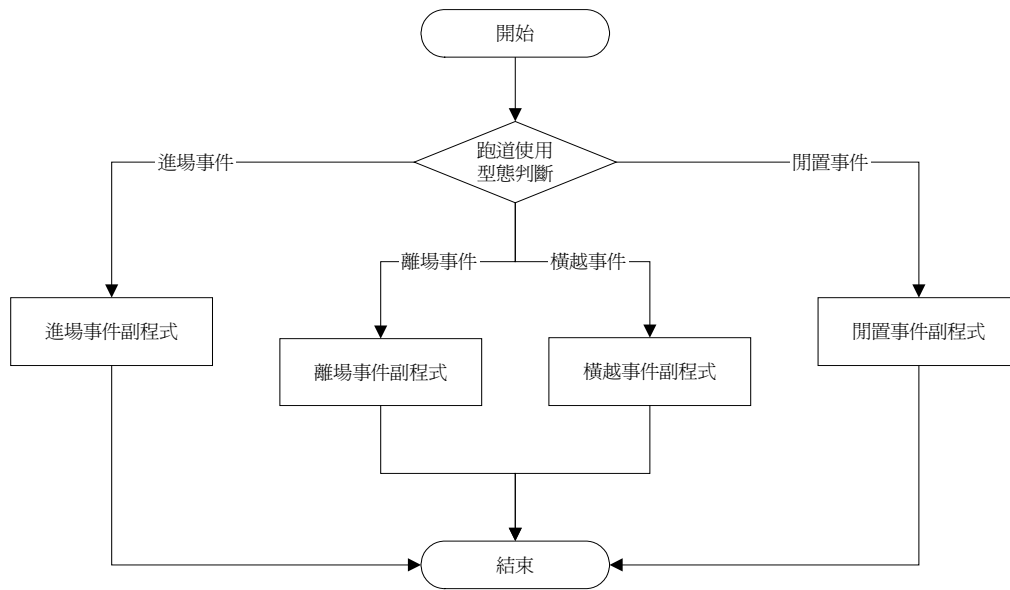


圖 17 跑道管理模組流程圖

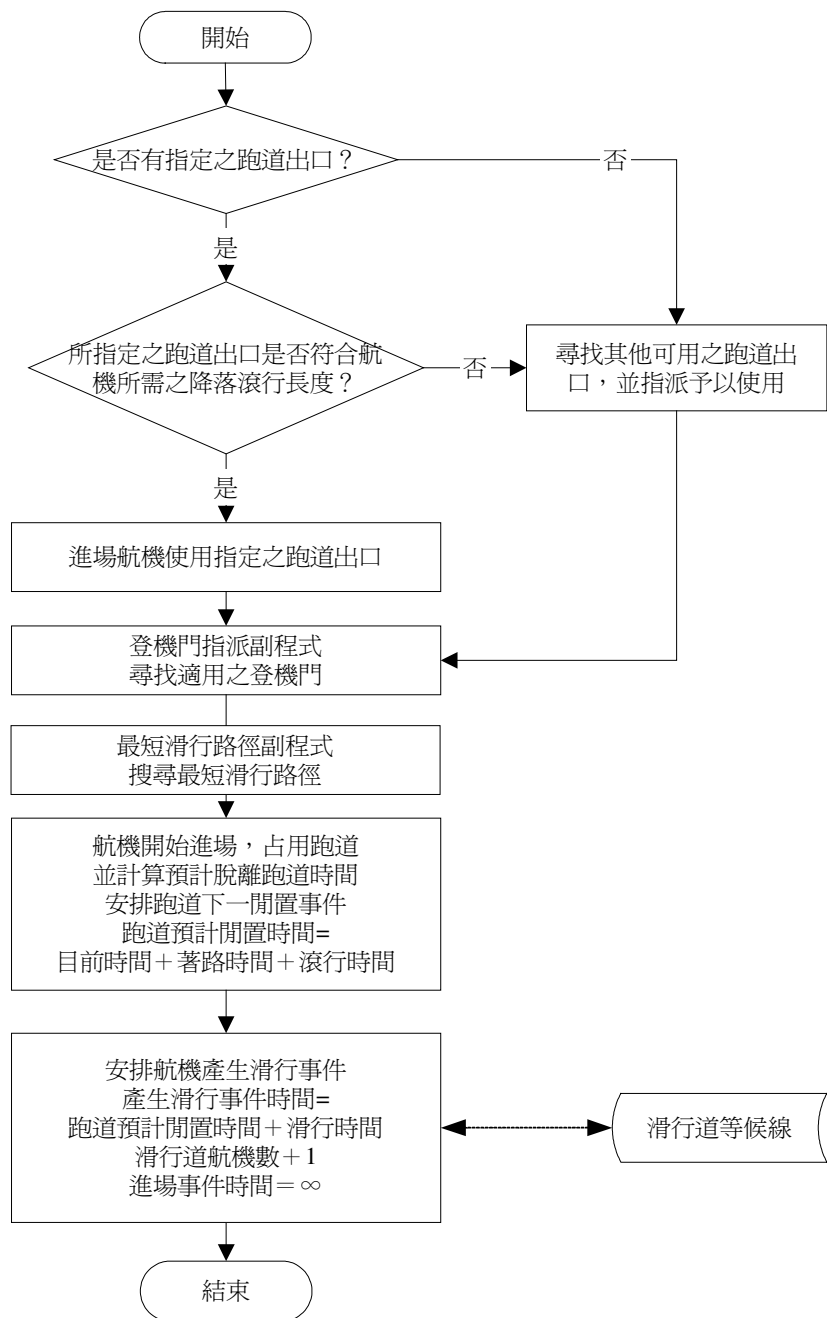


圖 18 進場事件副程式流程圖

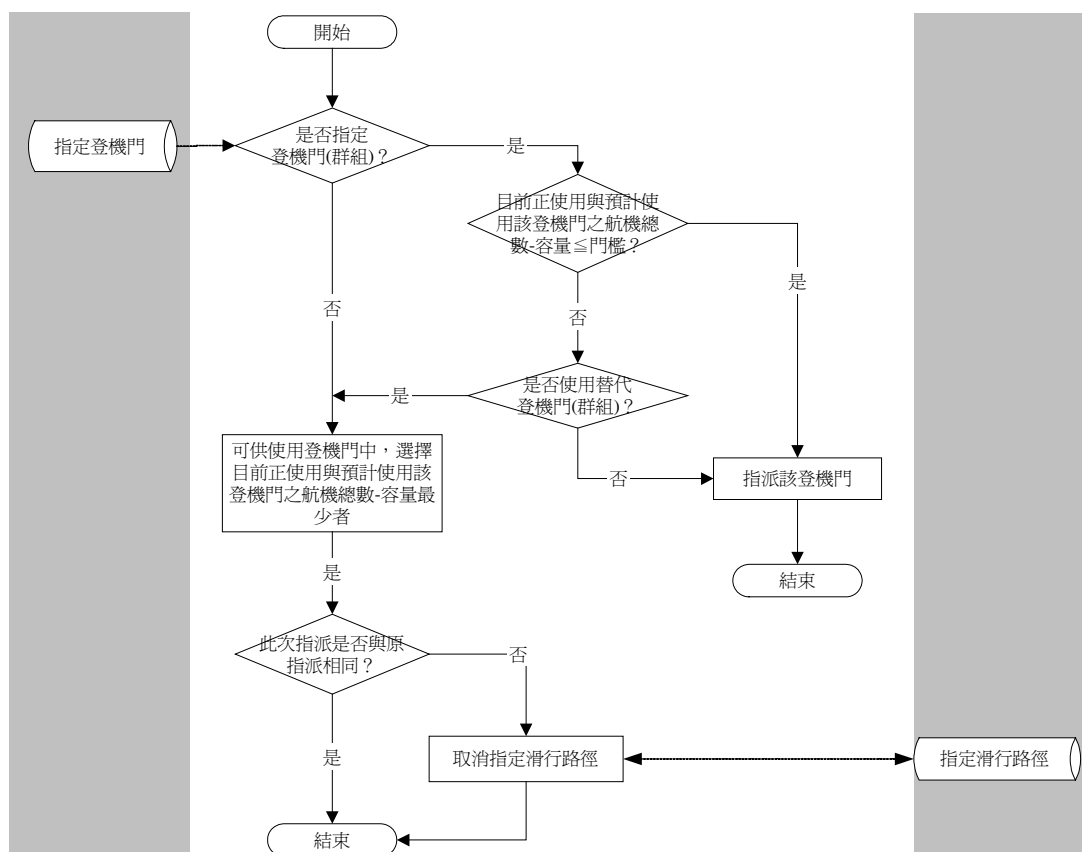


圖 19 登機門指派副程式流程圖

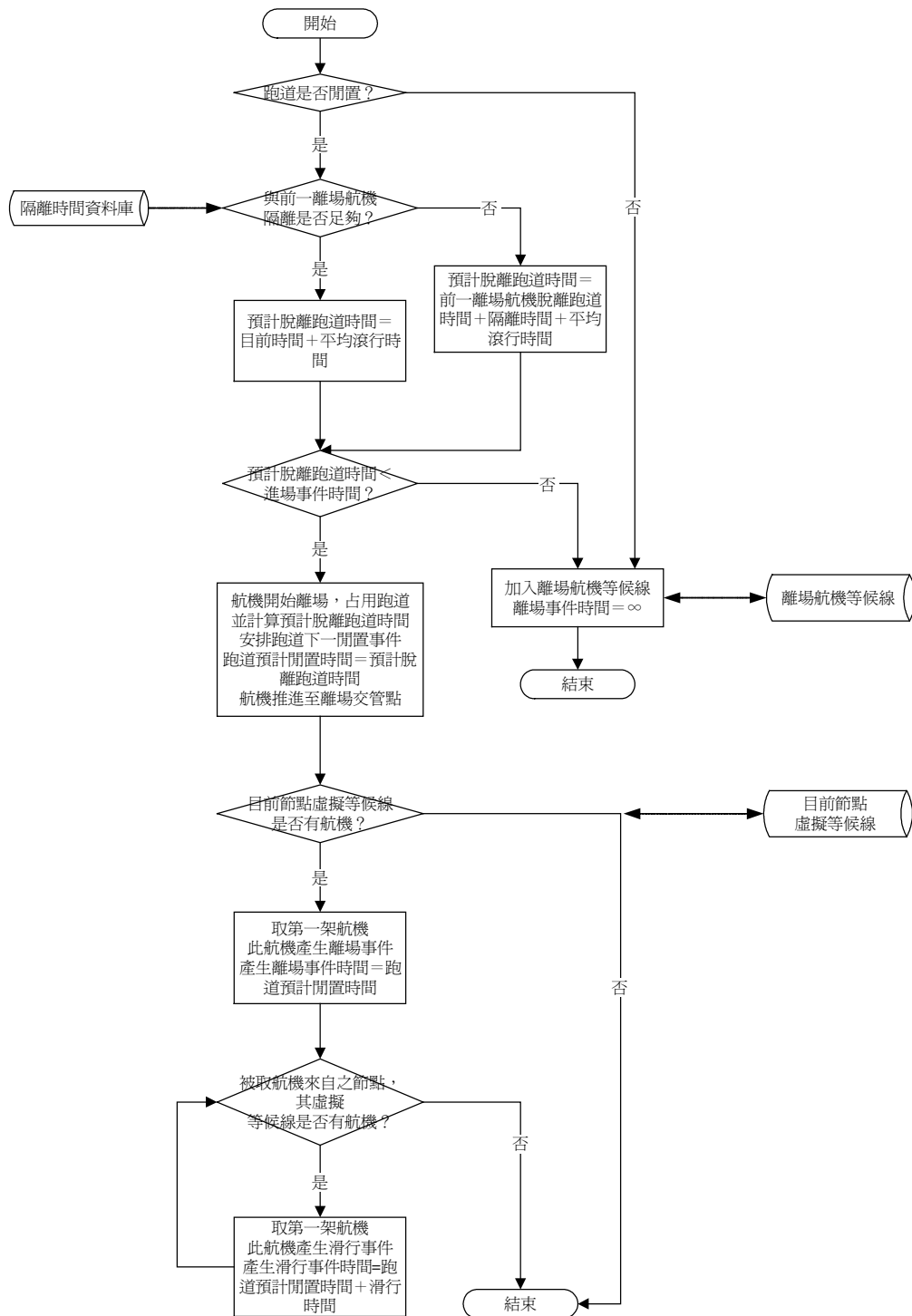


圖 20 離場事件副程式流程圖

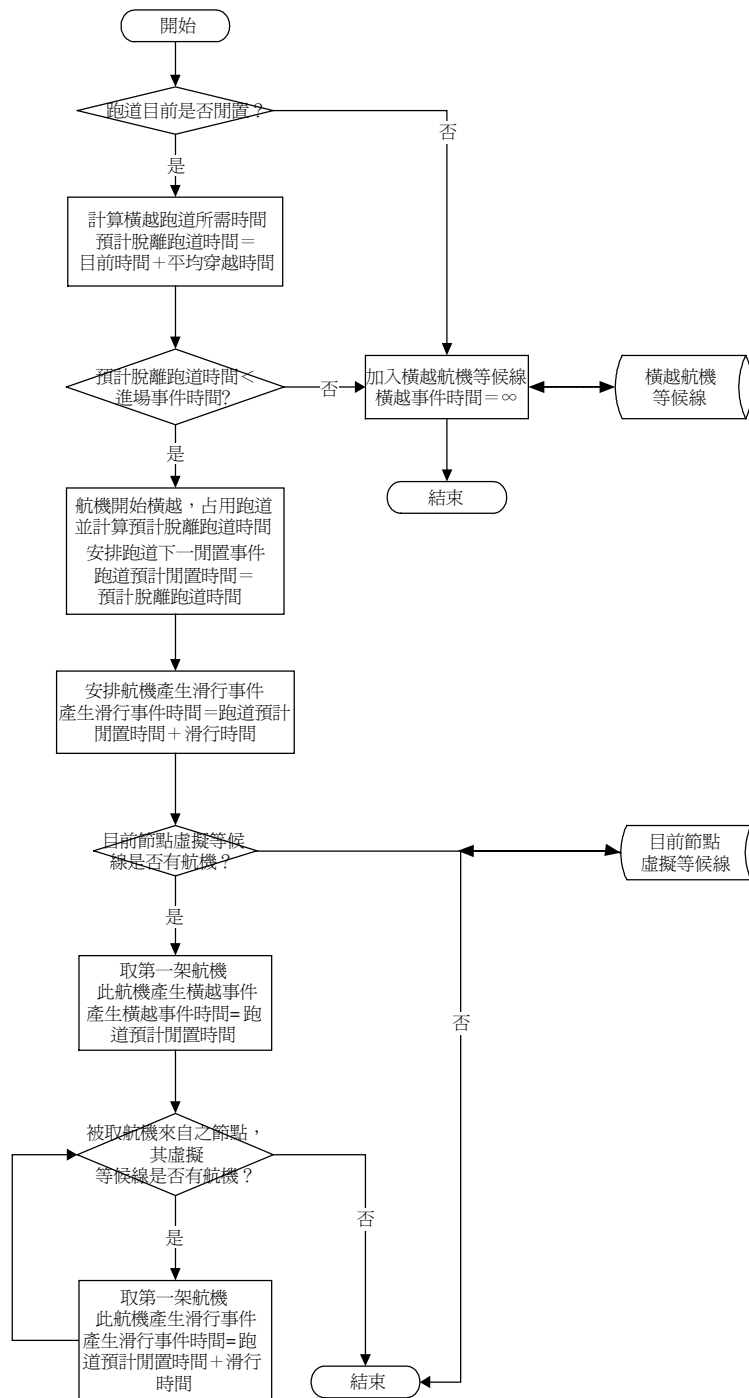
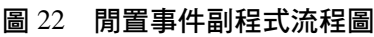


圖 21 橫越事件副程式流程圖



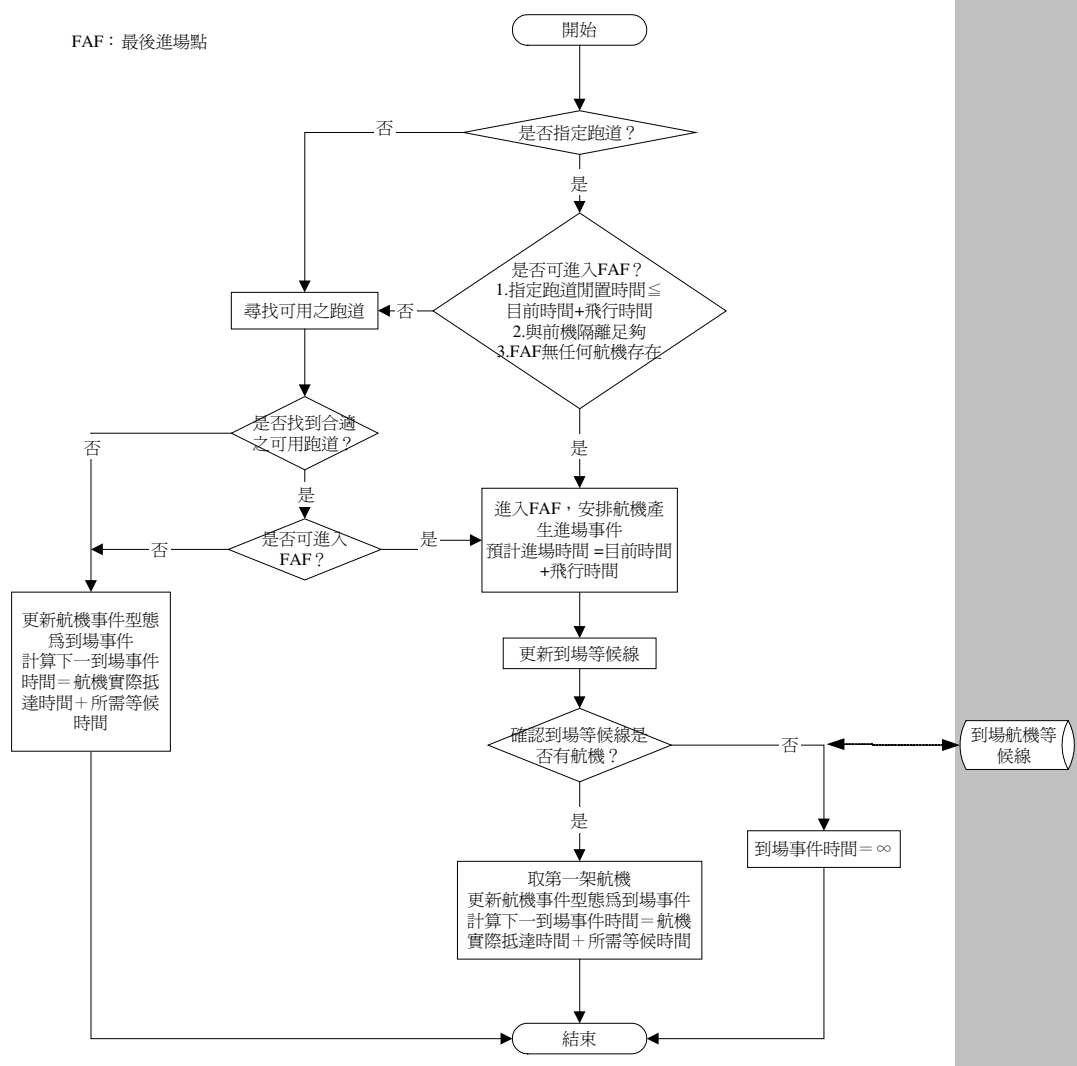


圖 23 到場模組流程圖

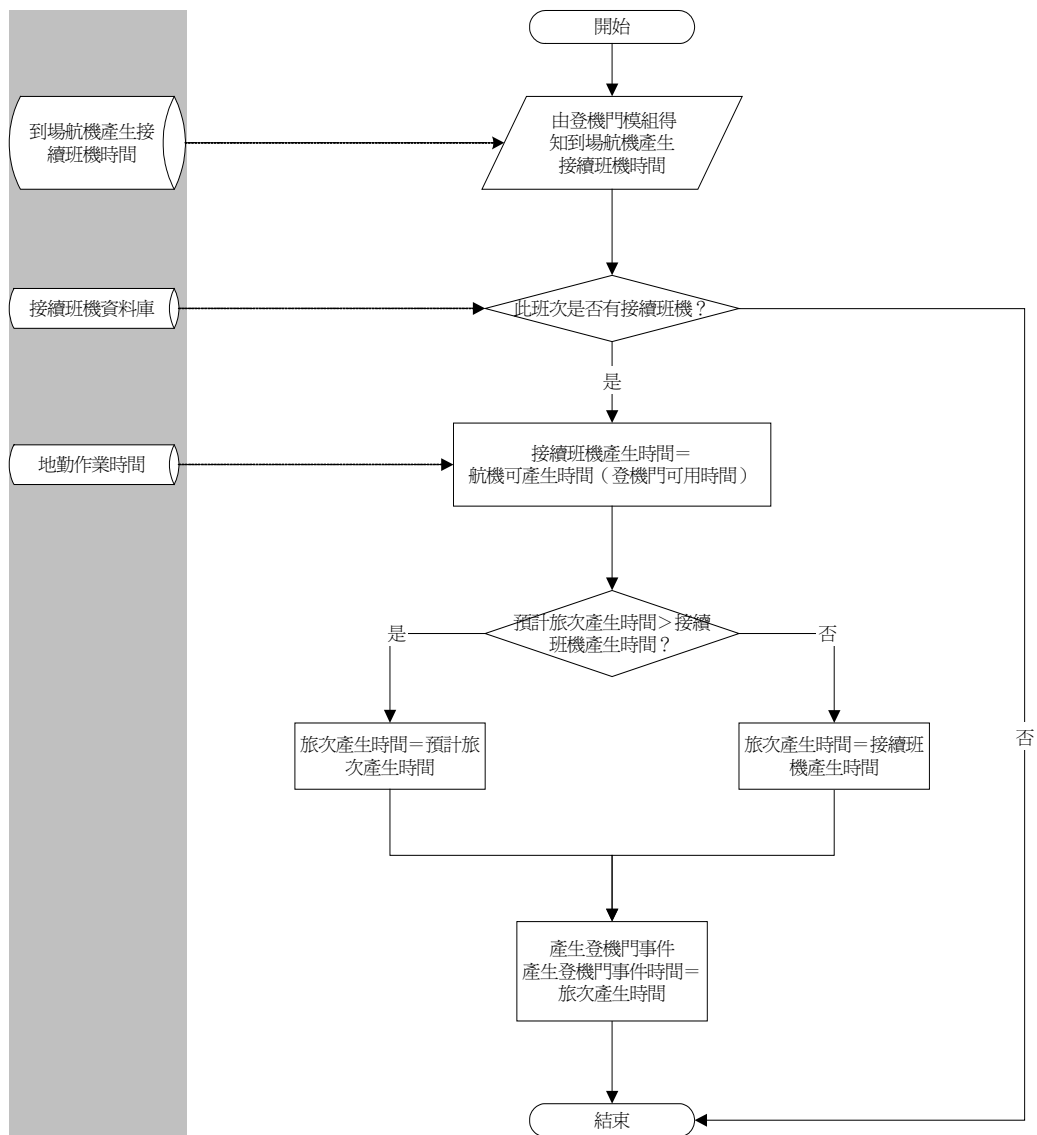


圖 24 接續班機模組流程圖