

以動態規劃模式探討機場航站大廈之 設施購置／汰換時程

SCHEDULING AIRPORT TERMINAL FACILITY PURCHASE AND REPLACEMENT USING DYNAMIC PROGRAMMING MODEL

許巧鶯 Chaug-Ing Hsu¹

趙清成 Ching-Cheng Chao²

(94年3月17日收稿，94年6月26日第一次修改，95年2月23日定稿)

摘 要

為掌握精確之設備購置／汰換時程，本研究綜合考量設備總成本、機場飛航安全、服務品質及財政收支等目標，應用動態規劃構建國際機場航站大廈出境多設施購置／汰換時程之決策模式。為反映各時程不同設備各項成本之變動，本研究依旅客量、設備可靠度及利用率，建立各設施之運轉、維護及延遲等成本函數。最後，以中正國際機場出境設施為實例分析，研究結果顯示機械類設備之維護成本隨可靠度降低而遞增之速度大於電子類，而作業時間較長之設備其故障延遲成本隨可靠度降低而遞增之速度大於作業時間較短者。當旅客量等於設備處理量，則報到及證照查驗櫃檯最佳使用年限分別為九年及八年，應用本研究構建之模式可降低機場營運成本，提升設施管理績效。

關鍵詞：國際機場；動態規劃；延遲成本；設備汰換

-
1. 國立交通大學運輸科技與管理學系教授（聯絡地址：300 新竹市大學路 1001 號交通大學運輸科技與管理學系；電話：03-5731672；E-mail：cihsu@cc.nctu.edu.tw）。
 2. 國立高雄海洋科技大學航運管理系助理教授。

ABSTRACT

In this study we formulated a dynamic programming model to determine the optimal facility purchase and replacement scheduling by considering facility renewal costs, aviation safety, passenger service level, and airport finance. Then, we constructed various cost functions on facility depreciation, operation, maintenance and delay for different facilities at different time stages. Time-dependent passenger volume, reliability, and utilization are considered to reflect variation in those costs due to time accumulation. Moreover, this study uses CKS International Airport as an example to demonstrate the application of the model. The results show that maintenance cost for mechanical equipment increases in a higher rate than that for electronic equipments as equipment reliability decreases. Besides, equipments of longer operating time also incur higher delay costs than those of shorter operating time, as equipment reliability lowers. The optimal service life of check-in and immigration counters are shown to be 9 and 8 years, respectively, for the same passenger flows. This study provides the airport authority with the optimal strategic decisions on the purchase and replacement of various facilities in terms of quantities and timing.

Key Words: *International airport; Dynamic programming; Delay cost; Facility replacement*

一、前 言

由於國際機場逐漸朝向企業化經營並注重營運管理績效，機場管理當局除致力於增加收入外，如何降低營運成本亦為重要課題。機場營運成本大致可分為設備折舊、運轉與維護費、人事費、委託服務費、噪音污染防治費及相關補助費。其中設備折舊、運轉及維護費占機場營運成本比率甚高，且設備處理能量攸關機場容量，能否維持穩定運轉將影響機場服務品質及飛航安全。近年來，因消費者權益日受重視與保護，加上美國 911 事件後航空公司營運陷入困境，未來因機場設施故障或容量不足而造成之班機延誤，其衍生之問題與責任將被探討及追究，故本研究將機場設備故障或處理量不足造成之延遲成本納入設備總成本中。另機場飛航安全及旅客服務品質攸關旅客對機場之需求，是機場管理者在追求降低成本時不可忽略之重要因素。因此，本研究將從機場管理者及使用者觀點來探討，以兼顧維持機場營運之整體目標。但如何掌握精確之設備購置／汰換時程十分重要，若太早進行可能產生投資浪費；而太晚可能導致設備容量不足或故障頻率增加，除降低服務品質及增加維修成本外，甚至造成班機延遲起飛或影響飛航安全。故如何購置／汰換航站大廈之設備勢必成為機場營運重要課題，惟過去有關此議題之研究並不多。

如何配合機場旅客運量之變動並考量財政收支及整體營運，適時購置／汰換各項設施以降低營運成本，減少其對旅客服務品質及機場營運之影響，須仰賴精確之時程規劃。本研究在確保機場飛航安全、維持旅客服務品質及機場財務健全之目標下，以研究週期內所有設備之折舊、運轉、維護、延遲及汰換損失等總成本最小化，構建設備購置／汰換時程

決策模式。為反映各時程不同設備各項成本之變動，本研究依各時程之旅客年運量、設備可靠度及利用率，建立各設施之運轉、維護及延遲等成本函數，依各成本函數可精確分析各類設備每項成本隨使用年齡與旅客量改變之變動情形。有關各時程之旅客年運量，本研究以灰色拓樸預測結合馬可夫鏈模式，預測旅客量之波動狀況及其配對發生機率，並應用機率性動態規劃數學模式求得各類設備整體最佳購置／汰換時程與數量。

本文第二節回顧與本研究相關之文獻，第三節簡述國際機場出境作業流程與旅客運量預測模式，第四節構建各項成本函數及設備購置／汰換時程動態規劃數學模式。第五節以中正國際機場出境主要設備為實例，驗證模式之可行性，第六節為綜合結論與建議。

二、相關文獻回顧

設備汰換時程之研究方法中，動態規劃數學模式最先由 Bellman^[1]於 1955 年提出，其主要重點為：「在一定時間長度內找出最佳決策，且所做決策因時間點不同而影響決策後之系統總成本，並將決策成本隨時間變動之特性充分表達」。動態規劃可分為確定性動態規劃問題 (deterministic dynamic programming) 與機率性動態規劃問題 (probabilistic dynamic programming)。在確定性動態規劃問題中，下一階段之狀態完全決定於目前階段之狀態與決策。而機率性動態規劃問題之下個階段狀態，卻不完全取決於現階段之狀態與決策，而是存在一組機率分配，依據這組機率分配，決定下個階段最可能發生之狀態及其相對成本。Hartman^[2]以機率性動態規劃數學模式之觀念，將設備利用率視為隨時間變動之變數，計算各種利用率對應之成本，並以設備年齡及累積使用情況為決策因子，決策單一設備最佳汰換時程。然相關文獻多以決策工廠生產設備之最佳汰換時程為研究主題，並以單一設備為主而未同時考慮多種設備之汰換情況，且主要著重於生產成本或產品不良率之分析。本研究除考量設備總成本外，亦兼顧機場飛航安全、服務品質及財政收支等目標，並應用機率性動態規劃觀念構建機場多設備購置／汰換時程決策模式。

設備維護保養過去在工業工程及機械工程領域之研究已有許多。Kercecioğlu^[3]將維護定義為：「使無故障之單元維持在可靠且安全之運轉狀態，並將故障單元恢復」。一般而言，設備維護可分為預防維護 (preventive maintenance) 及矯正維護 (corrective maintenance) 兩種類型，前者為使設備保持在正常狀態所作之計畫性維護；後者為當設備某一零件或部分系統功能故障後，為使其復原至正常狀態所採取之工作。回顧過去文獻^[4,5]，維護作業可區分為保養、修理及更換三種，其中保養為改善系統操作條件，即消除系統在使用過程中環境惡化現象，如消除震動、過熱及零件運動卡住等；修理是改善設備使用所產生之損傷，即恢復可靠度已退化之零組件以降低故障率；而更換係對故障無法修復或經多次維修已不具修理價值組件之更新。

有關設備維護方式可分為週期性與非週期性兩大類型，前者為在固定間隔時間實施預防維護，若在維護間隔中發生故障則進行修理，是目前產業界普遍採用之維護方式，如 Park

等人^[6]及 Tsai 等人^[7]等文獻。非週期性維護可約略分為故障極限政策 (failure limit policy)、順序預防維護政策 (sequential PM policy) 及維修極限政策 (repair limit policy) 等三類, 如 Jayabalan 與 Chaudhuri^[8]、Nakagawa^[9]及 Dedopoulos 與 Smeers^[10]等文獻。Canfield^[11]研究指出, 設備運轉會產生操作應力並使設備發生老化現象, 而瞬間故障率會隨設備老化而增加。Chan 與 Shaw^[12]指出設備經過預防維護後故障率會減少, 減少程度受設備年齡與預防維護次數影響。Sherif 與 Smith^[13]曾整理最佳維護政策之各種求解方法, 包括線性規劃、非線性規劃、動態規劃、Pontryagin 法之極大化原理、混合整數規劃法、決策理論、搜尋法、啟發式等八種。

有關交通運具運送遲到之損害賠償責任, 在華沙公約第十九條規定運送人對於乘客、行李或貨物之運送遲到所造成損害應負賠償責任, 但損害求償規定仍依當地法律為之。但並非對所有遲到都應由運送人負責, 例如, 運送人已採取一切措施來避免或因旅客過失所引起 (華沙公約第二十及二十一條)。因此, 除不可抗力之原因外, 運送人必須負起遲到之賠償責任, 包括假期損失及所造成之不便等。我國民法第六五四條規定, 旅客運送人對於旅客因運送所受之損害及運送所受之延遲應負責任; 另在民用航空法第九十一條第二項中規定, 乘客因航空器運送人之運送遲到而致損害者, 航空器運送人應負賠償之責。但航空器運送人能證明其遲到係因不可抗力之事由所致者, 除另有交易習慣者外, 以乘客因遲到而增加支出之必要費用為限。雖目前相關法令已規定運送人運送遲到之相關責任, 但因航空運輸在營運上所面臨之不確定因素較其他運輸工具多, 如天候、航管、機場設施、班機調度及班機機械維修等, 且前三者並非運送人造成, 故要如臺北捷運公司及臺灣鐵路公司, 訂定具體統一之賠償標準, 有實務上之困難。但近年來消費者權益日受重視與保護, 未來因機場設施故障或管理疏失造成之班機延誤, 將被重視及追究相關責任。故本研究將機場設備故障及設備處理量不足造成之延遲成本, 納入設施購置及汰換時程之決策模式中。

研究期程內各時程之旅客運量為影響設備購置/汰換時程之重要變數, 過去有關航空運量預測相關之研究, 其主要方法為多元迴歸模式與時間序列模式。Horonjeff 與 Mckelvey^[14]回顧過去有關航空客運量預測之文獻, 將其使用方法歸納為四類, 第一類為判斷預測法 (forecasting by judgment), 即利用專家判斷 (professional judgment), 針對未來經濟發展趨勢做出判斷並且修正預測需求量。第二類為趨勢投影及推測法 (trend projection and extrapolation), 應用線性推測、指數推測、Logistics 曲線推測及 Gompertz 曲線推測等推測型態, 以統計方法分析旅客需求量之趨勢。第三類方法為市場分析法 (market analysis methods), 主要分析旅客社經特性對旅運需求量之影響, 以市場占有率模式預測區域性航空運量, 或運用市場定義模式以旅客特性區分市場, 藉此預測該市場之運量。最後一類方法為計量經濟法 (econometric modeling method), 此法在航空運量預測中最常被運用, 計量經濟為運用多元迴歸分析法, 配合過去旅客量資料, 了解影響旅客需求量之因素彼此間關係, 藉以預測未來需求量。

過去有關臺灣地區國際航空旅客需求預測之研究, 交通部運輸研究所委託荷蘭機場顧

問公司^[15]以各國國內生產毛額、相對匯率及代表政經事件之虛擬變數，分別建立各國往來臺灣之旅客運量預測模式。許巧鶯、溫裕弘^[16]將灰色理論應用於航空客運量預測，運用 GM(1, 1) 時間數列預測模式及多變量 GM(1, N) 系統預測模式，證實以灰色模式建構之國際航空客運量預測模式，確實比傳統使用迴歸分析模式與 ARIMA 模式較具解釋及預測能力。而田自力^[17]以灰色拓樸預測結合馬可夫鏈預測模式對國民所得 (GNP) 作預測，結果顯示先以灰色預測模式對研究對象作預測，再以馬可夫鏈模式校正，將提高最後預測結果之準確度。Hsu 與 Wen^[18]先以灰色預測模式求得越太平洋航空客運量之變化趨勢，並結合馬爾可夫殘差修正模式，以提升 GM(1, 1) 時間數列預測模式之精確度。

綜上所述，由於影響國際機場旅客需求之外在因素複雜，且設備在各時程所採行之最佳購置／汰換決策受旅客量影響甚鉅，為能精確預測未來各時程之旅客需求量，本研究先以灰色拓樸預測求出旅客運量之變化趨勢，再結合馬可夫鏈模式預測旅客需求量之波動狀況及其配對發生機率。此外，為能充分表達動態時間延續觀念及時間遞迴之長期規劃需求，本研究採用機率性動態數學規劃模式，構建機場多設備購置／汰換時程規劃模式。

三、國際機場出境作業流程與旅客運量預測模式

3.1 國際機場出境作業流程

機場航站大廈為提供旅運者改變搭乘運具及等候航機之場所，在各種航空場站中以國際機場最為複雜，原因不僅由於飛機操作特性，更因受「國際旅行手續」限制所致。因此，航站大廈除具備售票、報到及登機等一般場所所需功能外，尚包括海關檢驗、證照查驗、旅客與行李安全檢查及檢疫等作業。有關國際機場出境作業系統，可分為旅客與行李兩部分，其流程及主要使用設施如圖 1 所示。

在各作業流程中，若設備發生故障或處理容量不足，輕者將造成部分旅客等候時間增加，嚴重者可能導致班機延遲起飛。但不同設備故障所影響之旅客人數及產生之延遲成本均不相同，故需分別探討。例如當報到作業、證照查驗或安全檢查之設備發生故障，有時僅會造成旅客等候辦手續時間增加，並不影響班機正常起飛時間，但部分較晚抵達機場之旅客可能因等候辦手續時間增加，而無足夠時間從事商業活動，導致機場特許費收入減少；若登機設備發生故障，因旅客於登機前已完成各項活動，故對旅客之活動影響不大，惟可能造成班機延遲起飛增加旅客等候之時間成本，而嚴重者可能延誤旅客後續行程。在行李處理設施方面，因行李在完成託運手續後，其處理作業即與旅客流程分開，故在輸送、分檢或裝機過程若發生設備故障而造成作業延誤，只要最後一件上機之行李能在班機起飛前完成，將不會對旅客產生任何影響。另外，當證照查驗、安全檢查或行李分檢之設備故障，因該設備為所有旅客共用，故可能影響該時段所有班機；但其他各班機單獨使用之設備，除非故障時間過長導致延滯擴散，否則僅影響該班機旅客。因此，國際機場航站大廈出境各流程設備故障影響之範圍及產生之延遲成本並不相同，分別如表 1 所示。

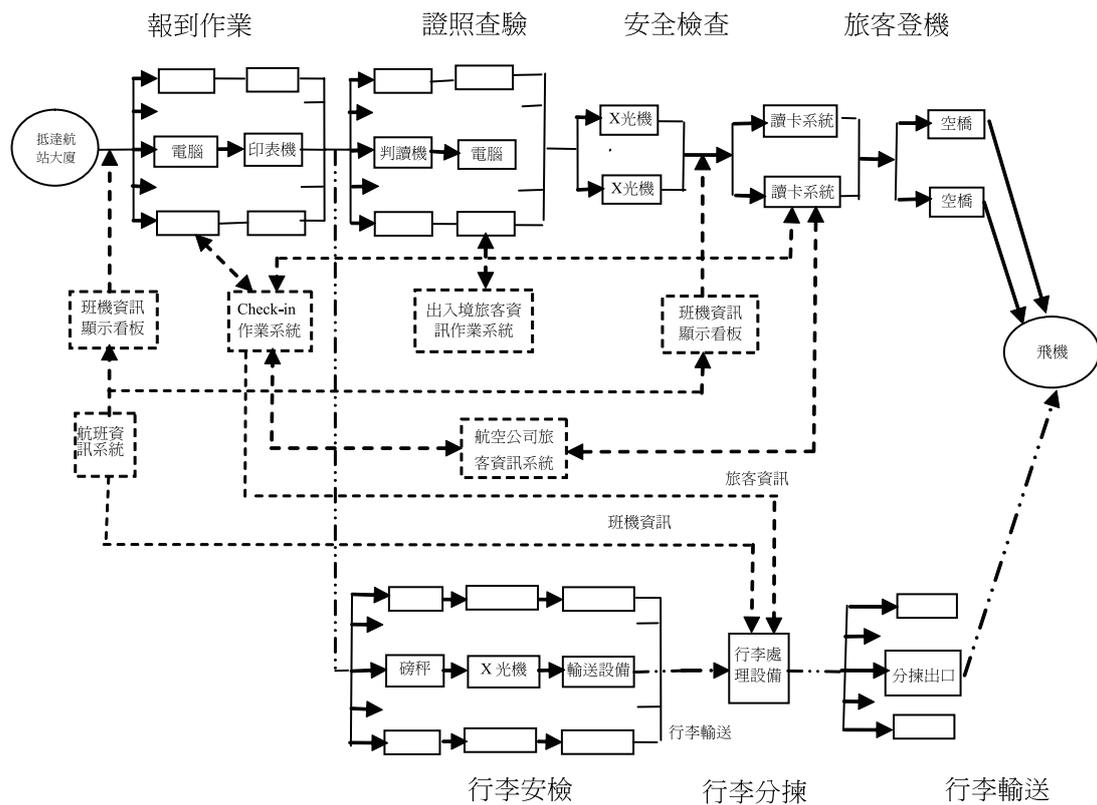


圖 1 國際機場出境旅客及行李作業流程與使用設施

表 1 國際機場航站大廈出境各流程設備故障影響之範圍及結果

流程名稱	影響範圍	影響結果	說明
報到作業	單一班機	旅客等候甚至延遲起飛	1. 部分旅客可能因等候辦手續而無時間從事其他活動。 2. 若最後一位旅客登機時間超過表訂起飛時間，將造成班機延遲起飛。
證照查驗	所有班機	旅客等候甚至延遲起飛	
安全檢查	所有班機	旅客等候甚至延遲起飛	若最後一件行李（一位旅客）裝（登）機時間超過表訂起飛時間，將造成班機延遲起飛，否則對旅客並無影響。
旅客登機	單一班機	班機延遲起飛或無影響	
行李安檢	單一班機	班機延遲起飛或無影響	
行李分揀	所有班機	班機延遲起飛或無影響	
行李裝機	單一班機	班機延遲起飛或無影響	

資料來源：本研究整理。

3.2 旅客運量預測模式

為能精確預測機場未來旅客運量，本研究先以灰色拓樸預測求出旅客需求量之變化趨勢，再結合馬可夫鏈轉移機率分析以提高灰色拓樸預測之精確度。灰色預測理論不直接對

原始數列建構預測模式，而將原始數列以累加生成 (accumulated generating operation, AGO) 運算構建模式，並將離散不規則之原始運量數據，經累加生成運算後產生之指數規律數據，建立微分方程並以最小平方求解，再以累減生成 (inverse accumulated generating operation, IAGO) 方式還原，構建灰色 GM(1, 1) 數列預測模式。其預測之操作過程如下^[19]：

1. 取得一二維平面上之數列 $X^{(0)}$ ，數列中每個 X 軸座標都有相對之 Y 軸座標值，在 Y 軸取數個固定參考值 ξ_i ，並找出對應每個固定參考值 ξ_i 之 X 軸座標。
2. 在每個固定參考值將對應到一組有 i 個 X 軸座標值之集合 $W_i^{(0)}$ ，對每組 X 軸座標集合 $W_i^{(0)}$ 進行累加生成 (AGO)，可得一新生成數列 $W_i^{(1)}$ ，並對每組新生成數列 $W_i^{(1)}$ 做 GM(1,1) 建模。
3. 對生成建模所得之模式做累減生成 (IAGO) 得到預測模式，先前所取得的每個固定參考值都會有一個預測模式，運用累減生成所產生之預測模式，找出對應 Y 軸座標為固定參考值 ξ_i 時 X 軸預測座標值，這些 X 軸預測座標值會形成一個集合。
4. 將所有對應 Y 軸固定參考值 ξ_i 之 X 軸預測座標值，在二維空間中連結成一條曲線 $\hat{X}^{(1)}$ ，這條曲線即為拓撲預測曲線。

馬可夫鏈預測對象為隨機變化之動態系統，其理論基礎為馬可夫過程。一個 n 階馬可夫鏈乃由 n 個狀態集合及一組轉移機率所決定，該過程在每一時刻只能處於一個狀態，而根據不同時刻各個狀態間之轉移機率可預測此系統未來之變化，即由過去不同時刻及狀態間之轉移機率，預測該系統未來時刻所處狀態及每個狀態可能發生機率。由於狀態間之轉移機率反映了各種隨機因素影響程度，故馬可夫鏈可處理數據隨機性之問題。有關本研究馬可夫鏈預測模型之操作步驟如下：

(一) 狀態劃分

以灰色拓撲預測所建立之 $\hat{W}_i^{(0)}$ 模型在時刻 i 所預測之結果為中心點，並取 $\hat{W}_i^{(0)}$ 適當之百分比作為每個時刻各個狀態上下界，將灰色拓撲預測模型中每個時刻劃分成不同狀態。若將每個時刻各個相同狀態邊界連結起來，則可得出近似平行於灰色拓撲預測模式之函數曲線，而每兩條相鄰曲線間之區域構成了一個狀態區間，依此狀態區間判定每個時刻之灰色拓撲預測結果所處之狀態。

(二) 建立狀態轉移機率矩陣

令狀態轉移機率 $p_{ab}^{(m)} = \frac{M_{ab}^{(m)}}{M_a}$ ，其中 $p_{ab}^{(m)}$ 表示由狀態 a 經 m 步轉移到狀態 b 之機率，

$M_{ab}^{(m)}$ 為狀態 a 經 m 步轉移到狀態 b 之次數， M_a 則為狀態 a 出現之次數，則狀態轉移機率矩陣可表示為：

$$R^{(m)} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(m)}, p_{12}^{(m)}, \dots, p_{1k}^{(m)} \\ p_{21}^{(m)}, p_{22}^{(m)}, \dots, p_{2k}^{(m)} \\ \dots \\ p_{k1}^{(m)}, p_{k2}^{(m)}, \dots, p_{kk}^{(m)} \end{bmatrix}$$

(三) 利用轉移機率矩陣製作預測表

選取離預測時刻最近之 r 個時刻，按照距離預測時刻由近到遠，定義對應之轉移步數為 $1, 2, \dots, r$ 。在各轉移步數所對應之矩陣中，取各起始狀態所對應之列向量，組成新轉移機率矩陣，對新轉移機率矩陣之行向量求總和，總和最大之行所對應狀態便是預測時刻之狀態。

(四) 推算預測值

在第三個步驟決定了數列在未來時刻之轉移狀態後，就可確定該狀態區間之上界與下界，而最可能預測值即為該區間之中點，即該區間上界與下界之平均值。

本研究在實例分析時將應用灰色理論之拓樸預測，運用 GM(1, 1) 模式進行研究期程內各時程旅客量之預測，而兩相鄰時程間，預期旅客需求量之波動狀況配對發生之機率，將由灰色拓樸預測模式配合馬可夫鏈機率轉移模式求得。

四、模式構建

因設備故障率會隨設備使用年齡及使用情形變動，且設備故障對旅客作業影響程度與設備利用率有關，在機場啟用之初或設備剛購置時，當旅客運量未達設備最大處理容量前，若設備故障數量小於備用設備量時，該故障並不影響機場正常運作。但如在設備處理量不足時發生設備故障，則對旅客作業之影響將雪上加霜。為避免設備過早於堪用階段進行汰換或太早購置造成投資浪費，及太晚購置／汰換導致延遲成本增加，降低旅客服務品質甚而影響機場營運，本研究建構之設備購置／汰換時程決策模式，除最小化研究時程所有設備之折舊、運轉、維護、延遲及汰換損失等總成本外，並綜合考量機場飛航安全、服務品質及財政收支等因素。另因國際機場旅客運量受經濟景氣及各種因素影響而逐年變動，為能反映每個時程不同旅客量及設備故障率對各項成本產生之影響，本研究應用機率性動態規劃觀念構建數學模式，且整體考量以求得研究期程內各類設備每一時程之最佳決策方案及購置／汰換數量。

4.1 設備總成本

在機場營運成本中與設備有關者為設備折舊、運轉、維護、延遲成本及設備汰換損失

成本等。通常設備可靠度隨使用年齡增加而遞減，導致運轉、維護成本及故障衍生之延遲成本逐年提高，但設備折舊成本將隨使用年限增加而降低。若設備汰換後之殘值低於購置成本減已攤提之折舊，將會產生汰換損失。因此，本研究將分析各項成本與設備使用年限及旅客量變動之關係，並構建數學函數。

4.1.1 設備折舊及運轉成本

設備會隨時間老化且有使用年限，其價值通常隨使用時間增加而遞減，依成本分攤及會計帳務處理原則，在使用期間應逐年提列設備折舊成本。若以 C_{fit}^s 表示已使用 t 年之 f 類設備第 i 年之折舊成本，其計算式為：

$$C_{fit}^s = Z_{fit} X_t^{ge} \quad (1)$$

其中， Z_{fit} 為第 i 年已使用 t 年之 f 類設備最初設置成本， X_t^{ge} 代表年利率為 g 且預定可使用年限為 e 年時，在考量設備達使用年限所剩之殘值後，第 t 年之資產回收因子乘數。

隨著技術創新與資訊科技快速發展，新型設備可能因高度自動化而大幅降低運轉成本或維護成本，致提前將未達預期使用年限或設置成本尚未全部攤提之舊設備汰換，此將會產生設備汰換之損失成本。但是否提前及應於何時汰換設備，則須比較新舊設備之折舊、運轉、維護、故障延遲成本及舊設備汰換損失等整體成本。若以 C_{fit}^r 表示已使用 t 年之 f 類設備於第 i 年進行汰換之損失成本，其計算式為：

$$C_{fit}^r = I_{fit} [Z_{fit} (1 - \sum_{t=1} X_t^{ge}) - A_{fit}] \quad (2)$$

其中， I_{fit} 代表汰換因子為一二元變數，若已使用 t 年之 f 類設備於第 i 年進行汰換則為 1，否則為 0。 A_{fit} 表示已使用 t 年之 f 類設備於第 i 年之剩餘殘值。

設備運轉成本主要包括操作人力與運轉所需之能源及相關材料，其中操作人力與設備自動化程度有關，而設備運轉所需能源及相關材料將隨設備使用年齡而增加。隨著科技之進步及不斷研發結果，新型設備之運轉成本有日益降低之趨勢。本研究將設備運轉成本分為固定成本及受處理量影響之變動成本兩部分，若以 C_{fit}^o 表示已使用 t 年之 f 類設備第 i 年之運轉成本，其計算式為：

$$C_{fit}^o = K_{fit} + \alpha_{fit} N_i \frac{N_{fit}}{N_{fi}} \quad (3)$$

其中， K_{fit} 及 α_{fit} 分別為已使用 t 年之 f 類設備第 i 年之固定運轉成本及單位變動成本。例如，行李安全檢查之 X 光機在運轉時必須有一定之操作人員，此操作人力即為固定成本；但其主要耗材 X 光頭在使用一定次數後即需汰換，屬隨處理量變動之成本。而 N_i 、 N_{fi} 及 N_{fit} 分別為第 i 年之旅客量、 f 類設備年總處理量及已使用 t 年之 f 類設備年處理量。若各

種不同使用年齡之設備其使用率相同，則已使用 t 年之 f 類設備第 i 年旅客實際處理量為

$$N_i \frac{N_{fit}}{N_{fi}}, \text{ 其中 } N_{fi} = \sum_t N_{fit}。$$

4.1.2 設備維護成本

國際機場航站大廈之設備眾多，其故障原因一般可歸納為：人員疏失或不正常操作所產生，此乃人為因素，可藉由管理及加強人員教育訓練來避免；其次為系統設計或品質不良造成，經由技術面改善可使系統維持正常運轉；最後為設備使用產生老化所造成之故障，必須靠保養維修或更換方式來改善。回顧過去文獻^[6-10]，設備維護考慮之成本因素包含預防維護成本、預防置換成本、矯正成本以及最小修復成本等。其建構之維護成本模型多以維護間隔或維護次數作為決策變數，並以最小化總維護成本為目標函數求得最佳維護政策。本研究將設備維護成本分為例行預防保養成本及故障修理成本兩部分，前者與設備年齡及使用率有關，後者視故障頻率及故障損壞程度而定，通常為設備可靠度之函數。若以 C_{fit}^m 表示已使用 t 年之 f 類設備，採最佳維護政策下第 i 年之維護成本，其計算式為：

$$C_{fit}^m = [(\beta_f + \delta_f t) \frac{N_i}{N_{fi}} + (1 - R_{fit}(t)) \phi_f] F_{fit} \quad (4)$$

其中， β_f 為 f 類設備在正常使用頻率下，單一設備第一年所需例行預防保養成本，其大小與設備最初設置成本、設備屬性及其運轉環境有關。 δ_f 為每一 f 類設備隨使用年齡每增加一年所需增加之例行預防保養成本。若各種不同年齡之設備平均使用，則 f 類設備第 i 年之使用率為 $\frac{N_i}{N_{fi}}$ ，若 $\frac{N_i}{N_{fi}}$ 大於 1 表示已超負荷使用，而 ϕ 為每一 f 類設備隨可靠度變動之故障修理成本。因此， $[(\beta_f + \delta_f t) \frac{N_i}{N_{fi}}] F_{fit}$ 及 $[(1 - R_{fit}(t)) \phi_f] F_{fit}$ 分別代表例行預防保養成本及故障修理成本，而 F_{fit} 及 $R_{fit}(t)$ 分別為使用 t 年之 f 類設備第 i 年數量（規模）及可靠度。

有關設備可靠度受設備已使用年齡／正常可使用年限、操作維護保養狀態、氣候及是否經常超負荷使用等外在環境影響。因韋伯模式可將設備可靠度隨使用時間變動之特性充分表達，藉由該模式之形狀參數及尺度參數，可反映設備可靠度受內部結構及外在環境影響情形。因此，韋伯模式普遍受到各領域高度認同作為統計分析或描述可靠度及評估壽命，如在機械、化工、醫學及電子產業等。因機場航站大廈多屬機械或電子類設備，故本研究式 (4) 設備可靠度以韋伯模式表示^[20, 21]，其數學式如下：

$$R(t) = \exp\{-[\ln(\lambda t + 1)]^{b+1}\}, \text{ for } b \geq 0, \lambda > 0, t \geq 0$$

其中， b 為形狀參數，決定其機率密度函數之形狀。 λ 為尺度參數，與平均壽命有關。當 $b < 1$ 時，可靠度隨時間增加而增加；當 $b = 1$ 時，可靠度為一定值，不隨時間變化；當 $b > 1$ 時，可靠度隨時間增加而減少。

4.1.3 延遲成本

造成班機延遲起飛之原因有許多，包括天候不佳、機械故障及地勤作業延誤等。其中地勤作業延誤可能是因設備故障或設備處理量不足所引起，其責任應歸屬於機場管理當局，故未適時購置／汰換設備可能造成設備容量不足或故障頻率增加而產生延遲成本。但如果機場已提供足夠之設備處理容量，而因作業單位所派工作人員數量不足造成之延誤，其責任歸屬於作業單位。例如，旅客報到作業係由航空公司辦理，當機場已設置足夠之報到櫃檯，但航空公司因人力不足而產生之作業延誤並不包含在本研究之設備延遲成本。依我國民用航空乘客與航空器運送人糾紛調處辦法第三條規定，運送人確定航空器無法依表訂時間起程，使國內航線延遲十五分鐘以上、國際航線延遲三十分鐘以上者或變更航線、起降地點時，應即向乘客詳實說明原因及處理方式；而第四條規定，運送人因運送延遲或變更航線或起降地點，致影響旅客權益者，應視實際情況並斟酌旅客需要，適時免費提供下列服務：(一) 必要之資訊；(二) 必要之飲食或膳宿；(三) 必要之禦寒或醫藥急救之物品；(四) 必要之轉機或其他交通工具。綜上所述，本研究將延遲成本分為班機延遲起飛賠償旅客之等候時間成本，還有補償旅客用餐及住宿與行程延誤等費用。若以 D_{fit}^d 表示已使用 t 年之 f 類旅客設備第 i 年之延遲成本，其計算式為：

$$D_{fit}^d = \begin{cases} 0 & , \text{if } \max \{T_i^p, T_i^b\} < t' \\ N_i \theta_{fit} (W_{fit}^d V + \frac{W_{fit}^d}{\sum_f \sum_t W_{fit}^d} r_i^m s^m V') & , \text{if } t' \leq \max \{T_i^p, T_i^b\} < t'' \\ N_i \theta_{fit} [(1 - r_i^n s^n) W_{fit}^d V + \frac{W_{fit}^d}{\sum_f \sum_t W_{fit}^d} (r_i^m s^m V' + r_i^n s^n V'')] & , \text{if } t'' \leq \max \{T_i^p, T_i^b\} \end{cases} \quad (5)$$

其中， θ_{fit} 為已使用 t 年之 f 類設備第 i 年在營運時段處於故障狀態之時間比率，其計算式如式(8)。而 $N_i \theta_{fit}$ 表示已使用 t 年之 f 類設備第 i 年因故障或處理量不足，造成班機延誤之旅客總人數。 W_{fit}^d 為第 i 年班機延遲起飛時間中，屬已使用 t 年之 f 類設備故障所造成之延遲時間，其計算式如式(9)。 r_i^m 及 r_i^n 分別為第 i 年用餐及深夜時段旅客人數占所有旅客量之比率， s^m 及 s^n 分別為用餐及深夜時段占機場營運時間之比率。 V 、 V' 及 V'' 分別為賠償每位旅客每分鐘之等候時間成本、用餐及住宿與行程延誤費用，而 t' 及 t'' 分別為因班機延遲起飛而需補償旅客等候時間成本與用餐費用，及賠償旅客住宿與行程延誤損失之時間門檻。一般而言，在賠償旅客住宿與行程延誤之費用中已包含旅客等候時間成本，當班機延遲時間超過 t'' 時，在計算賠償旅客等候時間成本之總人數時，應扣除需賠償旅客住宿與行程延誤費之人數，即 $N_i \theta_{fit} r_i^n s^n$ ，故賠償旅客等候時間成本之總人數可表示為 $N_i \theta_{fit} (1 - r_i^n s^n)$ 。

因班機須等所有旅客登機及所有行李裝載始可起飛，故班機延遲起飛時間取最後旅客登機及最後行李裝載中延遲較大者，即 $\max\{T_i^p, T_i^b\}$ 。其中， T_i^p 及 T_i^b 分別為最後上機旅客及最後裝機行李之延誤時間，計算式分別如下：

$$T_i^p = \sum_{f^p} P_{f^p i} + \sum_{f^p} W_{f^p i} - t_0 \quad (6a)$$

$$T_i^b = \sum_{f^b} P_{f^b i} + \sum_{f^b} W_{f^b i} - t_0 \quad (6b)$$

其中， $P_{f^p i}$ 及 $P_{f^b i}$ 分別為第 i 年 f^p 類設備旅客作業（含步行）及 f^b 類行李處理（含運送）平均時間，其大小與設備性能與自動化程度有關， t_0 為最後一位旅客到達報到櫃檯時間距班機表訂起飛時間。而 $W_{f^p i}$ 及 $W_{f^b i}$ 分別為 f^p 類旅客作業或 f^b 類行李處理設備第 i 年因該設備故障或處理量不足，導致每位旅客平均增加之等候時間，其計算方式如式(7)。

因尖離峰各時段旅客量不同，然為能反映旅客實際等候時間，本研究在計算設備故障或處理量不足造成之旅客等候時間時，係採用小時旅客量。有關已使用 t 年之 f 類設備第 i 年因該設備故障或處理量不足導致每位旅客平均增加之等候時間 W_{fit} 計算方式如下：

$$W_{fit} = \begin{cases} 0 & , \text{if } N_i^* < (N_{fi}^* - \theta_{fit} N_{fit}^*) \\ \left(\frac{N_i^*}{N_{fi}^* - \theta_{fit} N_{fit}^*} - 1 \right) P_{fi} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta_{fit} = a_f [1 - R_{fit}(t)] \quad (8)$$

其中 N_i^* 、 N_{fi}^* 及 N_{fit}^* 分別為第 i 年每小時旅客量、 f 類設備每小時處理量及已使用 t 年之設備每小時處理量， θ_{fit} 為已使用 t 年之 f 類設備第 i 年在營運時段處於故障狀態之時間比率。當 $N_i^* \leq (N_{fi}^* - \theta_{fit} N_{fit}^*)$ 表示在第 i 年時，已使用 t 年之 f 類設備故障並不會造成旅客等候，因 f 類設備扣除已使用 t 年故障部分之處理量 $\theta_{fit} N_{fit}^*$ 後，其每小時之處理量 $(N_{fi}^* - \theta_{fit} N_{fit}^*)$ 仍大於每小時旅客量，此表示備用設備之處理量足以替代故障設備，故不會造成旅客等候。若 $N_i^* > (N_{fi}^* - \theta_{fit} N_{fit}^*)$ 表示第 i 年每小時旅客量已超過 f 類設備每小時可處理量，旅客平均等候時間可依等候理論公式由設備不足率 $\left(\frac{N_i^*}{N_{fi}^* - \theta_{fit} N_{fit}^*} - 1 \right)$ 乘以作業

時間 P_{fi} 求得，即 $W_{fit} = \left(\frac{N_i^*}{N_{fi}^* - \theta_{fit} N_{fit}^*} - 1 \right) P_{fi}$ 。 a_f 為 f 類設備故障修復所需時間占運轉時

間之比率，其大小主要與設備複雜度、精密度及零組件價格有關。通常複雜及精密度高之設備從尋找故障原因到零組件拆解、修理、校正、安裝及測試等所需時間，均遠大於普通設備。當設備零組件價格便宜，若修理所需時間太長則直接以備品更換，但為降低存貨成本，價格高之零組件未必有備品，故設備故障修復時間相對較長。

由於航空公司在班機起飛與旅客結束報到之間均預留作業緩衝時間，故班機延遲起飛時間小於旅客辦手續或各項行李作業總等候時間，故第 i 年班機延遲起飛時間中，屬已使用 t 年之 f 類設備故障所造成之班機延遲時間 $W_{f^p}^d$ ，將依各類設備所造成旅客等候時間比率分攤，而不同使用年齡之設備，再依該設備故障所減少之旅客處理量比率計算。由於旅客作業及行李處理為兩獨立並聯之流程，故造成班機延遲起飛之責任全部歸屬於旅客作業及行李處理兩者延遲時間較大者，若以 $W_{f^p}^d$ 及 $W_{f^b}^d$ 分別表示第 i 年已使用 t 年之 f^p 類旅客作業及 f^b 行李處理設備故障所造成之班機延遲時間，其計算式為：

$$W_{f^p}^d = \begin{cases} 0 & , \text{if } T_i^p < T_i^b \\ \frac{\theta_{f^p} N_{f^p} N_{f^p}}{\sum_t \theta_{f^p} N_{f^p}} \frac{N_{f^p}}{\sum_{f^p} W_{f^p}} T_i^p & , \text{if } T_i^p \geq T_i^b \end{cases} \quad (9a)$$

$$W_{f^b}^d = \begin{cases} 0 & , \text{if } T_i^b < T_i^p \\ \frac{\theta_{f^b} N_{f^b} N_{f^b}}{\sum_t \theta_{f^b} N_{f^b}} \frac{N_{f^b}}{\sum_{f^b} W_{f^b}} T_i^b & , \text{if } T_i^b \geq T_i^p \end{cases} \quad (9b)$$

其中， $\theta_{f^p} N_{f^p} N_{f^p}$ 及 $\theta_{f^b} N_{f^b} N_{f^b}$ 分別表示 f^p 類旅客作業或 f^b 類行李處理設備第 i 年因故障所減少之旅客處理量。由於班機延遲起飛之責任全部歸屬於旅客作業及行李處理兩者延遲時間較大者，若第 i 年所有旅客作業延遲時間 T_i^p 大於所有行李處理延遲時間 T_i^b ，則班機延遲時間為 T_i^p ，各類行李處理設備 f^b 故障所應分攤之班機延遲時間 $W_{f^b}^d$ 為 0，而班機延遲起飛時間全部歸屬於旅客作業設備。有關 f^p 類旅客作業設備造成之班機延遲時間，可

依旅客在該類設備等候時間 W_{f^p} 佔所有旅客作業設備總等候時間 $\sum_{f^p} W_{f^p}$ 之比率 $\frac{W_{f^p}}{\sum_{f^p} W_{f^p}}$

分攤，而不同使用年齡之旅客作業設備，再依各年齡設備故障所減少之旅客處理量

$\theta_{f^p} N_{f^p} N_{f^p}$ 佔該類旅客作業設備所有年齡總處理量 $\sum_t \theta_{f^p} N_{f^p} N_{f^p}$ 之比率 $\frac{\theta_{f^p} N_{f^p} N_{f^p}}{\sum_t \theta_{f^p} N_{f^p} N_{f^p}}$ 計

算，如式(9a)。反之，若第 i 年旅客作業延遲時間 T_i^p 小於行李處理延遲時間 T_i^b ，則班機延遲時間為 T_i^b ，各類旅客作業設備 f^p 故障所造成之班機延遲時間 $W_{f^p}^d$ 為 0，而各類行李處理設備 f^b 故障所應分攤之班機延遲時間 $W_{f^b}^d$ 計算方法如式(9b)。

4.2 機場飛航安全、旅客服務品質及財政收支

由於機場間相互競爭日益激烈，機場經營者除須降低營運成本外，確保旅客飛航安全更為重要。一個機場能否成為航空轉運中心 (hub)，除需具備良好之地理位置，機場服務

品質亦為重要因素。有鑑於機場已逐漸朝向財務自主之企業化經營，故本研究構建之設施購置／汰換時程決策模式，除最小化設備總成本外，尚需兼顧機場飛航安全、旅客服務品質及財政收支均衡等目標。

雖然精密之助導航設備及良好之跑滑道可提高飛機起降安全，而旅客行李安全檢查可預防旅客託運或攜帶危險物品。但隨著恐怖攻擊武器（含生化武器）發展日益精密，機場各類安全檢查設備亦不斷創新以增加鑑別度。為確保機場飛航安全，與飛航安全有關之設備應維持在一定可靠度以上，當可靠度降至該水準時即進行汰換，如下式所示：

$$R_{f^*it} \geq r_{f^*}^{\min} \quad (10)$$

其中， R_{f^*it} 為已使用 t 年與飛航安全有關之 f^* 類設備第 i 年之可靠度， $r_{f^*}^{\min}$ 為與飛航安全有關之 f^* 類設備可允許之可靠度下限。藉由(10)式可確保與飛航安全有關之設備可靠度高於特定水準，否則就無條件進行汰換。

機場航站大廈設備若發生故障或處理量不足時，將使旅客等候辦手續時間增加，因出境旅客受登機時間之限制，且登機前須完成報到作業（含行李託運）、證照查驗及安全檢查。因此，當上述設備故障或處理量不足時，可能導致部分較晚抵達機場之旅客，因等候辦手續而無剩餘時間可從事其他活動，且產生擔心無法準時登機之心理壓力，即使班機能準時起飛，但旅客從事其他活動之時間已相對減少，將使旅客對機場留下服務品質不佳之印象。為使旅客辦手續時間維持在一特定水準以上³，以提升機場之競爭力，本研究將設備故障或處理量不足衍生之旅客等候辦手續總時間，限制在一上限值以下，以確保旅客服務品質，如(11)式所示。當設備故障或處理量不足嚴重時可能導致班機延遲起飛，除增加旅客等候時間成本外，甚至造成轉機旅客無法銜接下一航程之班機，對航空運轉中心之機場而言，若班機經常延遲起飛將降低航空公司班機及旅客選擇至該機場轉機之意願。因此，本研究將班機延遲起飛時間設定一上限值，以確保機場班機起飛之準點率，如(12)式所示。

$$\sum_{f^p} W_{f^p i} \leq t^w \quad (11)$$

$$\max \{T_i^p, T_i^b\} \leq t^d \quad (12)$$

其中， t^w 及 t^d 分別為因設備故障或處理量不足，旅客等候辦手續及班機延遲起飛之時間上限。因班機須等所有旅客完成登機及所有行李完成裝載始可起飛，故延遲起飛時間取旅客登機及行李裝載延遲時間較大者。

國際機場建造成本龐大，完工啟用後始有營運收入，隨著旅客量增加或使用達某一年限後需陸續辦理設備購置／汰換。藉由本研究構建之決策模式，可供機場管理者事先做好

3. 國際航空運輸協會 (IATA)、英國機場管理局 (British Airports Authority)、歐洲各機場及加拿大運輸部門對機場旅客航站大廈所訂各項公共設施之空間及服務時間標準^[22]。

財政規劃，提撥部分營運收入作為每個時程設備購置／汰換所需經費。當機場之財務無法提供設備最佳購置／汰換時程所需資本支出時，本研究將限制與飛航安全無關之各項設備，於該時程購置／汰換總金額不得超過機場當年度可用之最大支出金額，但與飛航安全有關之設備則優先汰換且無此限制，在兼顧飛航安全並避免因財務危機而影響機場營運之前提下，重新規劃滿足機場財務狀況之最適設備購置／汰換時程，其限制式表示如下：

$$\sum_{f^{**}=1}^{k-k^*} Z_{f^{**}i0} \leq M_i - \sum_{f^*=1}^{k^*} Z_{f^*i0} \quad (13)$$

其中， Z_{fj0} 為第 i 年 f 類設備之新購成本， f^* 及 k^* 分別為與飛航安全有關之設備及種類數， f^{**} 為與飛航安全無關之設備， M_i 為第 i 年受限於機場財務狀況可用於設備購置／汰換之最大支出金額， $\sum_{f^*=1}^{k^*} Z_{f^*i0}$ 為第 i 年與飛航安全有關之設備總設置成本。

4.3 設備購置／汰換時程動態規劃模式

本研究應用灰色理論之拓撲預測，對機場未來旅客量進行預測，預測結果與實際旅客量可能出現三種波動情況，分別為往上波動、無波動及往下波動三種情形。令 w 為灰色拓撲預測之旅客量與實際旅客量波動情況，並以 $w = 1, 2, 3$ 分別表示上述三種情況。當 $w = 1$ 時表示高估了未來旅客量，此時未來旅客量為灰色拓撲預測值往下調整；當 $w = 2$ 時表示準確預估了未來旅客量，灰色拓撲預測值等於未來旅客量，故不會出現預期旅客量波動情形；當 $w = 3$ 時表示低估了未來旅客量，故灰色拓撲預測所得之旅客量要往上調整才能反映未來旅客量。令兩相鄰時程預期旅客量之波動情況配對可能發生機率為 p_i^w ，此機率表示當前一時程 $i-1$ 所發生之預期旅客量波動情況 w 已確定是往下波動、無波動或往上波動其中之一種情形時，而本時程預測旅客量之三種波動情況 $w = 1, 2, 3$ 發生機率，該機率總和為 0 且會因為所處時程不同及預測旅客量波動情形不同而有所變化。

本研究各時程之設備集合為機場在該時程所擁有之設備，取決於上一時程原先所擁有之設備數量，加上一時程所作之決策，且將一個時程轉移到下一個時程之機率分配組合，定義為機場現有時程設備數量在下一時程為超過、滿足或低於預測需求量之機率。機場管理者在時程 i 依灰色拓撲預測之旅客量作設備購置／汰換決策後，於時程 $i+1$ 時因應實際所發生之不同景氣狀況與需求水準，機場所提供之設備容量與未來旅客需求量配合上，極可能對應發生上述三種不同情況。若以 C_i^w 表示這三種情況分別對應之成本，其中狀態一為預測旅客量波動情況為往下，即 $w = 1$ ，因預測旅客量超出未來實際旅客量，表示機場依預期測客量所規劃之設備容量會大於未來旅客需求，此時所對應之預測旅客量波動情況機率為 p_i^1 ，除產生設備閒置外，其對應成本 C_i^1 將造成設備維護及折舊成本增加。情況二為預測旅客量無波動之情況，即 $w = 2$ ，表示預測旅客量與未來旅客量相符合，因此機場

規劃之設備容量恰能配合未來旅客需求，此時所對應之預測旅客量波動情況機率為 p_i^2 ，其成本 C_i^2 為最適成本。情況三是預測旅客量往上波動之情況，即 $w = 3$ ，將會出現預測旅客量小於未來旅客量，機場依其預測旅客量所規劃之設備容量將無法滿足未來旅客需求，此時所對應之預測旅客需求波動情況機率為 p_i^3 ，除設備不足產生旅客擁擠外，其對應成本 C_i^3 將造成延遲成本增加。

令 $C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)$ 表示在時程 i 起始時， f 類設備集合為 S_{fi} ，在該時程對應前一時程之預期旅客量波動情況為 w 時，選擇設備購置／汰換決策集合 d_{fi}^w 後，時程 i 結束時之期望成本。而 $C_{fi}^*(S_{fi})$ 則表示在時程 i ，對應前一時程之預期旅客量波動情況為 w 之設備購置／汰換決策集合 d_{fi}^w 下 $C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)$ 之最小值。因此時程 i 之期望成本 $C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)$ 與最期望成本 $C_{fi}^*(S_{fi})$ 之關係可表示為：

$$C_{fi}^*(S_{fi}) = \min_{d_{fi}^w} C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w) \quad (14)$$

本研究將設備購置／汰換決策集合分為維持不變、增購設備及汰換設備等三種，(14)式表示在每類設備購置／汰換決策集合 d_{fi}^w 下， $C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)$ 之最小值即為 $C_{fi}^*(S_{fi})$ 之值。而 $C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)$ 之值如下式所示：

$$C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w) = \sum_{w=1}^3 p_{fi}^w [C_{fi}^w + C_{fi+1}^*(S_{fi+1})] \quad (15)$$

上式表示 $C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)$ 為在時程 i 時，當對應前一時程預期旅客需求量之波動情況 w 已確定是往上波動、無波動或往下波動時，這時程可能發生預期旅客需求量三種波動情況之機率為 p_{fi}^w 下， f 類設備所對應之期望成本 C_{fi}^w 。在時程 i 配合三種可能發生之預期旅客需求量波動情況機率 p_{fi}^w ，乘上每個預期旅客量之波動情況所對應之成本 C_{fi}^w 與下一個時程 $i+1$ 之最期望成本 $C_{fi+1}^*(S_{fi+1})$ ，再將時程 i 中三種旅客需求可能波動狀況所對應之成本加總，即為在時程 i 之期望成本 $C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)$ ，如圖 2 所示。式(15)存有動態遞迴觀念，在每個時程 i 作出決策後，下一個時程 $i+1$ 可能發生預期旅客需求量之三種波動情況，都會有其相對之狀況發生機率 p_{fi+1}^{w+1} 與成本 C_{fi+1}^{w+1} ，而此成本 C_{fi+1}^{w+1} 會受到時程 i 之決策集合 d_{fi}^w 所影響，如此兩個時程相互影響的關係，就形成階段間之遞迴效應。

本研究綜合考量機場飛航安全、旅客服務品質及財政收支等因素，以研究期程內所有設備總期望成本最小化為目標，建構機場航站大廈出境主要設施購置／汰換時程之決策模式，其數學式之表示方法如下：

$$\min \sum_{i=0}^T \sum_{f=1}^k \min_{d_{fi}} \{C_{fi}(S_{fi}, d_{fi}^w)\} = \min \sum_{i=0}^T \sum_{f=1}^k \min_{d_{fi}} \left\{ \sum_{w=1}^3 p_{fi}^w [C_{fi}^w + C_{fi+1}^*(S_{fi+1})] \right\} \quad (16)$$

s.t.

$$S_{fi+1} = S_{fi} + C_{fi}^w, \quad i = 0, \dots, T; \quad f = 1, \dots, k \quad (17)$$

$$C_{fi}^w = \sum_t C_{fit}^{ws} + C_{fit}^{w0} + C_{fit}^{wm} + C_{fit}^{wd} \quad (18)$$

$$R_{f^*it} \geq r_{f^*}^{\min} \quad (19)$$

$$\sum_{f^p} W_{f^p i} \leq t^w \quad (20)$$

$$\max \{T_i^p, T_i^b\} \leq t^d \quad (21)$$

上述設備購置／汰換決策模式中，(16) 式為最小化所有設備期望總成本之目標式，(19) 式為將與飛航安全有關之設備在進行購置／汰換決策時，必須將可靠度維持在一特定水準以上，以確保機場飛航安全。(20) 及 (21) 式將旅客辦手續之總等候時間及班機延誤起飛時間限制在旅客可接受範圍，以確保機場服務品質。

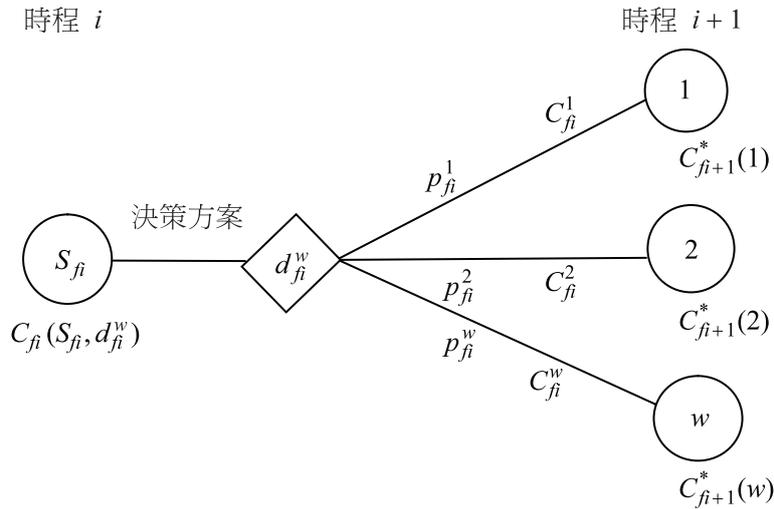


圖 2 以機率性動態規劃計算 f 類設備期望成本之示意圖

五、實例驗證

為驗證本研究所構建國際機場航站大廈出境主要設施購置／汰換時程決策模式之可行性，本節以中正國際機場報到櫃檯、證照查驗、安全檢查及登機空橋等四類設備為實例，其中報到櫃檯之設備包括磅秤、電腦及印表機；證照查驗包含護照判讀機及電腦設備；安全檢查包括 X 光機及搜身儀器；而登機空橋則包含登機證讀卡機及空橋設備。且將研究期

程 (T) 設為 15 年，並以民國九十三年為起始年 (即 $i = 0$)。有關各類設備相關參變數資料如表 2 所列，其中 α_{fit} 為已使用 t 年之 f 類設備第 i 年運轉單位變動成本，主要為運轉所需能源及相關材料，本研究是由設備製造商提供之材料與能源消耗表及中正國際機場實際運轉結果推估；而 δ_f 、 ϕ_f 分別為 f 類設備隨使用年齡每增加一年所需增加之例行性預防保養成本及隨可靠度變動之故障修理成本，本研究是依據設備製造商建議之零組件更換時間表，及分析中正國際機場歷年維修保養與故障修理成本所得； α_f 為 f 類設備故障修復所需時間占運轉時間比率，本研究由設備操作手冊中維修標準作業程序及中正國際機場歷年各設備實際維修紀錄估算。另為簡化分析，本研究於實例驗證時假設如下：

1. 本研究以硬體設備為主，不考慮程式軟體所產生之故障。
2. 起始年 (即 $i = 0$) 各類設備均為新購置 (即已使用年限為 0)，且各時程購置之同類設備價格及性能均相同。
3. 當決策為汰換舊設備時，同一使用年限者全數汰換。
4. 設備汰換可於當年度內完成，且可銜接使用不會發生中斷。

表 2 實例驗證基本資料

設備種類 (f)	設置成本 (Z_f^*)	e	α_f^{**}	β_f^*	δ_f^*	λ_f^*	ϕ_f^*	α_f
報到櫃檯	6,000	8	5	192	12	1,560	1,500	5
證照查驗	150	8	0.02	4.8	0.3	39	37.5	5
安全檢查	5,000	10	0.015	160	10	1,275	1,250	5
登機空橋	10,000	20	0.06	320	20	550	500	2

資料來源：本研究整理。*：單位為新臺幣千元；**：單位為新臺幣元。

5.1 研究期程旅客運量預測

本研究依據 3.2 節灰色拓樸預測模式之操作步驟，以中正國際機場民國八十二年至九十二年之出境旅客運量為歷史資料進行預測，並將預測結果結合馬可夫鏈預測模式，以旅客量預測結果為中心值 (X)，由中心值取 5% 之差值分為上中下三個狀態，再利用這三種狀態為預測旅客量上下波動之三個情況。若以 A1、A2、A3 及 A4 表示這三種狀態之邊界值，這四個邊界值與中心值之關係如下：

$$A1 = A2 \times (1-0.05)$$

$$A2 = X \times (1-0.025)$$

$$A3 = X \times (1+0.025)$$

$$A4 = A3 \times (1+0.05)$$

其中，邊界 A1 與 A2 之間為狀態 1，表示預測之旅客需求量有高估情形；A2 與 A3 之間為

狀態 2，表示預測結果相當準確無波動；而 A3 與 A4 之間為狀態 3，表示預測結果低估了旅客實際需求。由本研究所做灰色拓樸預測結果，配合上式所求得之各狀態邊界值，經與實際旅客運量對照，即可得知實際旅客量所對應之狀態，如表 3 所示。

將表 3 之狀態利用 3.2 節之馬可夫鏈轉移機率矩陣計算公式，可得到轉移機率矩陣表，並預測未來旅客運量落在各狀態之機率，表 4 為研究期程內各時程各狀態旅客運量預測中心值及可能落在各狀態之機率。根據本研究九十三年灰色拓樸預測之出境旅客量 8451994 人與實際旅客量 8856289 人比較，誤差值為 4.56%，若再結合馬可夫鏈預測模式所得之預測值則為 8659279，誤差值僅 2.23%，顯示本研究預測模式之準確性。有關尖峰時段小時旅客量推估，根據交通部民用航空局在民國八十九年委託亞聯工程顧問公司調查結果^[23]，中正國際機場尖峰小時出境旅客人數約為全天出境總人數之 19%。

5.2 研究結果

本研究針對不同種類設備，在每一時程所採取之購置／汰換決策方案包括維持不變、增購及汰換三種。在確保機場飛航安全及維持旅客服務品質之目標下，本研究以最小化研究期程內所有設備總期望成本，決策各類設備最佳購置／汰換時程。依據本研究對各時程預測之旅客量及第四節構建之模式，可求得各類設備在各階段之最佳決策方案及各類設備集合如表 5 所示，其中在研究起始年 ($i=0$ ，即民國九十三年) 時報到櫃檯、證照查驗、

表 3 預測旅客運量狀態劃分及對應結果

年份	實際值	預測值	誤差%	A1	A2	A3	A4	狀態
82	5544466	5544466	-	5135562	5405854	5683078	5967232	2
83	5792899	6330665	9.28	5863778	6172398	6488931	6813378	1
84	6297863	6516288	3.46	6035712	6353381	6679196	7013155	1
85	6802615	6707355	-1.40	6212687	6539671	6875039	7218791	2
86	7106126	6904024	-2.84	6394852	6731423	7076624	7430455	3
87	6906880	7106459	2.88	6582358	6928798	7284120	7648326	1
88	7495591	7314830	-2.41	6775361	7131959	7497701	7872586	2
89	8340063	7529311	-9.72	6974024	7341078	7717544	8103421	3
90	8271054	7750081	-6.29	7178512	7556329	7943833	8341024	3
91	8507429	7977324	-6.23	7388996	7777890	8176757	8585594	3
92	6803464	8211230	20.7*	7605651	8005949	8416510	8837336	1

資料來源：本研究結果。*：九十二年因 SARS 造成實際旅客量驟減，導致預測值偏高。

表 4 各時程各狀態旅客運量預測中心值及可能落在各狀態之機率

研究 期程	年份	各狀態旅客運量預測中心值			落在各狀態之機率		
		狀態 1	狀態 2	狀態 3	狀態 1	狀態 2	狀態 3
0	93	8034677	8451994	8879876	0.28	0.17	0.55
1	94	8270265	8699818	9140246	0.17	0.14	0.69
2	95	8512760	8954909	9408251	0.36	0.06	0.58
3	96	8762366	9217479	9684114	0.45	0.11	0.44
4	97	9019290	9487748	9968065	0.42	0.22	0.36
5	98	9283748	9765942	10260342	0.14	0.17	0.69
6	99	9555960	10052292	10561190	0.30	0.06	0.64
7	100	9836154	10347039	10870858	0.42	0.11	0.47
8	101	10124564	10650429	11189607	0.50	0.17	0.33
9	102	10421430	10962714	11517701	0.42	0.22	0.36
10	103	10727000	11284156	11855416	0.14	0.17	0.69
11	104	11041531	11625022	12203033	0.28	0.17	0.55
12	105	11365283	11955591	12560843	0.42	0.11	0.47
13	106	11698529	12306145	12929144	0.50	0.16	0.34
14	107	12041546	12666978	13308244	0.42	0.22	0.36

資料來源：本研究結果。

表 5 研究期程內各時程各類設備最佳決策方案及設備集合

時程 (i)	設備種類 (f)	最佳決策方案	設備集合
0 九 十 三 年	報到櫃檯	8 _{1,0,0}	8 _{1,0,0}
	證照查驗	35 _{2,0,0}	35 _{2,0,0}
	安全檢查	4 _{3,0,0}	4 _{3,0,0}
	登機空橋	25 _{4,0,0}	25 _{4,0,0}
1 九 十 四 年	報到櫃檯	1 _{1,0,0}	8 _{1,1,1} , 1 _{1,1,0}
	證照查驗		35 _{2,1,1}
	安全檢查		4 _{3,1,1}
	登機空橋		25 _{4,1,1}
2 九 十 五 年	報到櫃檯		8 _{1,2,2} , 1 _{1,2,1}
	證照查驗	2 _{2,2,0}	35 _{2,2,2} , 2 _{2,2,0}
	安全檢查	1 _{3,2,0}	4 _{3,2,2} , 1 _{3,2,0}
	登機空橋	2 _{4,2,0}	25 _{4,2,2} , 2 _{4,2,0}

表 5 研究期程內各時程各類設備最佳決策方案及設備集合 (續)

時程 (i)	設備種類 (f)	最佳決策方案	設備集合
3 九十六年	報到櫃檯		8 _{1,3,3} , 1 _{1,3,2}
	證照查驗		35 _{2,3,3} , 2 _{2,3,1}
	安全檢查		4 _{3,3,3} , 1 _{3,3,1}
	登機空橋		25 _{4,3,3} , 2 _{4,3,1}
4 九十七年	報到櫃檯		8 _{1,4,4} , 1 _{1,4,3}
	證照查驗	3 _{2,4,0}	35 _{2,4,4} , 2 _{2,4,2} , 3 _{2,4,0}
	安全檢查		4 _{3,4,4} , 1 _{3,4,2}
	登機空橋	1 _{4,4,0}	25 _{4,4,4} , 2 _{4,4,2} , 1 _{4,4,0}
5 九十八年	報到櫃檯	1 _{1,5,0}	8 _{1,5,5} , 1 _{1,5,4} , 1 _{1,5,0}
	證照查驗	2 _{2,5,0}	35 _{2,5,5} , 2 _{2,5,3} , 3 _{2,5,1} , 2 _{2,5,0}
	安全檢查		4 _{3,5,5} , 1 _{3,5,3}
	登機空橋		25 _{4,5,5} , 2 _{4,5,3} , 1 _{4,5,1}
6 九十九年	報到櫃檯		8 _{1,6,6} , 1 _{1,6,5} , 1 _{1,6,1}
	證照查驗		35 _{2,6,6} , 2 _{2,6,4} , 3 _{2,6,2} , 2 _{2,6,1}
	安全檢查	1 _{3,6,0}	4 _{3,6,6} , 1 _{3,6,4} , 1 _{3,6,0}
	登機空橋	2 _{4,6,0}	25 _{4,6,6} , 2 _{4,6,4} , 1 _{4,6,2} , 2 _{4,6,0}
7 一〇〇年	報到櫃檯		8 _{1,7,7} , 1 _{1,7,6} , 1 _{1,7,2}
	證照查驗	2 _{2,7,0}	35 _{2,7,7} , 2 _{2,7,5} , 3 _{2,7,3} , 2 _{2,7,2} , 2 _{2,7,0}
	安全檢查		4 _{3,7,7} , 1 _{3,7,5} , 1 _{3,7,1}
	登機空橋		25 _{4,7,7} , 2 _{4,7,5} , 1 _{4,7,3} , 2 _{4,7,1}
8 一〇一年	報到櫃檯	1 _{1,8,0}	8 _{1,8,8} , 1 _{1,8,7} , 1 _{1,8,3} , 1 _{1,8,0}
	證照查驗	-35 _{2,8,8} , 35 _{2,8,0}	2 _{2,8,6} , 3 _{2,8,4} , 2 _{2,8,3} , 2 _{2,8,1} , 35 _{2,8,0}
	安全檢查		4 _{3,8,8} , 1 _{3,8,6} , 1 _{3,8,2}
	登機空橋	2 _{4,8,0}	25 _{4,8,8} , 2 _{4,8,6} , 1 _{4,8,4} , 2 _{4,8,2} , 2 _{4,8,0}
9 一〇二年	報到櫃檯	-8 _{1,9,9} , 8 _{1,9,0}	1 _{1,9,8} , 1 _{1,9,4} , 1 _{1,9,1} , 8 _{1,9,0}
	證照查驗		2 _{2,9,7} , 3 _{2,9,5} , 2 _{2,9,4} , 2 _{2,9,2} , 35 _{2,8,1}
	安全檢查		4 _{3,9,9} , 1 _{3,9,7} , 1 _{3,9,3}
	登機空橋		25 _{4,9,9} , 2 _{4,9,7} , 1 _{4,9,5} , 2 _{4,9,3} , 2 _{4,9,1}
10 一〇三年	報到櫃檯	-1 _{1,10,9} , 1 _{1,10,0}	1 _{1,10,5} , 1 _{1,10,2} , 8 _{1,10,1} , 1 _{1,10,0}
	證照查驗	-2 _{2,10,8} , 5 _{2,10,0}	3 _{2,10,6} , 2 _{2,10,5} , 2 _{2,10,3} , 35 _{2,10,2} , 5 _{2,10,0}
	安全檢查	1 _{3,10,0}	4 _{3,10,10} , 1 _{3,10,8} , 1 _{3,10,4} , 1 _{3,10,0}
	登機空橋	2 _{4,10,0}	25 _{4,10,10} , 2 _{4,10,8} , 1 _{4,10,6} , 2 _{4,10,4} , 2 _{4,10,2} , 2 _{4,10,0}

表 5 研究期程內各時程各類設備最佳決策方案及設備集合 (續)

時程 (i)	設備種類 (f)	最佳決策方案	設備集合
11 一〇四年	報到櫃檯		$1_{1,11,6}, 1_{1,11,3}, 8_{1,11,2}, 1_{1,11,1}$
	證照查驗	$2_{2,11,0}$	$3_{2,11,7}, 2_{2,11,6}, 2_{2,11,4}, 35_{2,11,3}, 5_{2,11,1}, 2_{2,11,0}$
	安全檢查	$-4_{3,11,11}, 3_{3,11,0}$	$1_{3,11,9}, 1_{3,11,5}, 1_{3,11,1}, 3_{3,11,0}$
	登機空橋		$25_{4,11,11}, 2_{4,11,9}, 1_{4,11,7}, 2_{4,11,5}, 2_{4,11,3}, 2_{4,11,1}$
12 一〇五年	報到櫃檯	$1_{1,12,0}$	$1_{1,12,7}, 1_{1,12,4}, 8_{1,12,3}, 1_{1,12,2}, 1_{1,12,0}$
	證照查驗	$-3_{2,12,8}, 5_{2,12,0}$	$2_{2,12,7}, 2_{2,12,5}, 35_{2,12,4}, 5_{2,12,2}, 2_{2,12,1}, 5_{2,12,0}$
	安全檢查	$-1_{3,12,10}, 1_{3,12,0}$	$1_{3,12,6}, 1_{3,12,2}, 3_{3,12,1}, 1_{3,12,0}$
	登機空橋	$2_{4,12,0}$	$25_{4,12,12}, 2_{4,12,10}, 1_{4,12,8}, 2_{4,12,6}, 2_{4,12,2}, 2_{4,12,0}$
13 一〇六年	報到櫃檯		$1_{1,13,5}, 1_{1,13,5}, 8_{1,13,3}, 1_{1,13,1}$
	證照查驗	$-2_{2,13,8}, 4_{2,13,0}$	$2_{2,13,6}, 35_{2,13,5}, 5_{2,13,3}, 2_{2,13,2}, 5_{2,13,1}, 4_{2,13,0}$
	安全檢查		$1_{3,13,7}, 1_{3,13,3}, 3_{3,13,2}, 1_{3,13,1}$
	登機空橋	$3_{4,13,0}$	$25_{4,13,13}, 2_{4,13,11}, 1_{4,13,9}, 2_{4,13,7}, 2_{4,13,5}, 2_{4,13,1}$
14 一〇七年	報到櫃檯	$-1_{1,14,9}, 1_{1,14,0}$	$1_{1,14,6}, 8_{1,14,5}, 1_{1,14,4}, 1_{1,14,2}, 1_{1,14,0}$
	證照查驗	$2_{2,14,0}$	$2_{2,14,7}, 35_{2,14,6}, 5_{2,14,4}, 2_{2,14,3}, 5_{2,14,2}, 4_{2,14,1}$
	安全檢查	$1_{3,14,0}$	$1_{3,14,8}, 1_{3,14,4}, 3_{3,14,3}, 1_{3,14,2}, 1_{3,14,0}$
	登機空橋		$25_{4,14,14}, 2_{4,14,12}, 1_{4,14,10}, 2_{4,14,8}, 2_{4,14,4}, 2_{4,14,2}$

資料來源：本研究結果。

註：1. 設備集合中 $F_{f,i,t}$ 表示在時程 i 已使用 t 年之 f 類設備數量為 F 。

2. 最佳決策方案為 $F_{f,i,0}$ 表示在時程 i 購置數量 F 之 f 類設備，而 $-F_{f,i,0}$ 代表在時程 i 淘汰了 F 個已使用 t 年之 f 類設備，空白則表示維持不變。

安全檢查及登機空橋最佳設置數量分別為 8、35、4 及 25。以民國一〇一年 (即 $i=8$) 為例，報到櫃檯之最佳決策方案為增購 1 個，即 $\{1_{1,8,0}\}$ ，原有報到櫃檯之使用年齡增加 1 年，其使用年齡分別由上年度 (即 $i=7$) 之 7、6 及 2 變為 8、7 及 3，故設備集合由原有之 $\{8_{1,7,7}, 1_{1,7,6}, 1_{1,7,2}\}$ 變為 $\{8_{1,8,8}, 1_{1,8,7}, 1_{1,8,3}, 1_{1,8,0}\}$ ；而證照查驗設備之最佳決策方案為將原有已使用 8 年之 35 個櫃檯汰換更新，故在該年度之設備集合中，原有 35 個使用 8 年之證照查驗櫃檯變為使用年齡 0，即 $\{35_{2,8,0}\}$ ；在安全檢查方面之最佳決策為維持不變；而登機空橋之最佳決策方案為增購 2 座，即 $\{2_{4,8,0}\}$ 。

因設備維護成本及故障延遲成本將隨使用年齡增加而遞增，對單一設備而言，當故障率高於某一水準，導致維護成本及延遲成本大於購置新設備所需折舊成本及汰換舊設備之損失時，則須進行汰換。以報到櫃檯及證照查驗為例，在旅客量固定時，當使用年齡分別超過九年及八年後，因舊設備之總成本已大於採用新設備之總成本，故須進行汰換，如圖 3 所示。因此，各階段不同設備之決策將隨旅客量及設備使用年齡變動。

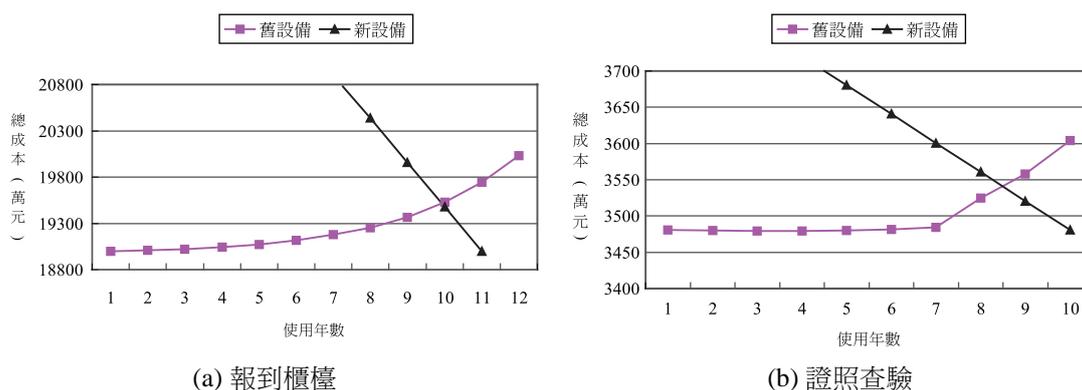


圖 3 新舊設備在各使用年數總成本之比較

在研究期程內依上述決策方案進行購置／汰換，將使各類設備產生之總期望成本達到最小為 5,412,266,388 元，較中正國際機場現行採用一次整批購置／汰換所需設備總成本 5,620,119,756 元，可降低 3.7% 之成本，如圖 4 所示。研究期程內各時程在不同狀態產生之設備成本及總期望成本如表 6 所示。因設備維護成本及故障延遲成本隨設備可靠度降低而遞增，但各類設備遞增之速度不同。研究結果顯示，故障延遲成本遞增速度與設備所需作業時間成正比，其中以報到櫃檯最大，證照查驗次之，而安全檢查最小，如圖 5 所示。另維護成本隨可靠度降低而遞增之速度與設備之屬性有關，由實例驗證結果顯示，機械類之安全檢查設備遞增速大於電子類之報到櫃檯，如圖 6 所示。

本研究考慮利率因素，故設備折舊成本隨使用年限增加而遞減，折舊成本之大小與設備購置成本與使用年限有關。因設備維護及延遲成本依使用年齡逐年增加，且新舊設備之操作運轉成本亦不相同，當旅客運量及設備可靠度隨著時間變動時，舊設備與新設備之間存在一置換臨界成本，因此各類設備最適汰換年限需綜合考量各項成本之變動情形。如圖 7 所示，當旅客運量等於設備處理量且旅客時間價值為每分鐘 5 元時，報到櫃檯及證照查驗最佳使用年限分別為 9 年及 8 年，但各項設備最佳使用年限將隨旅客時間價值增加而遞減。以報到櫃檯為例，當旅客時間價值增加為每分鐘 6 至 9 元時，最佳使用年限將減為 8 年；若時間價值降為每分鐘 2 至 3 元時，最佳使用年限將提高至 10 年。

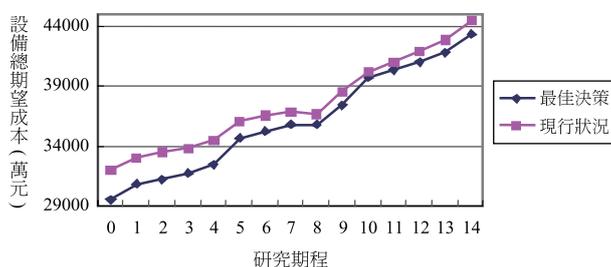


圖 4 研究期程各時程本研究最佳決策與現行狀況設備總期望成本之比較

表 6 研究期程各時程在不同狀態產生之設備成本及總期望成本

研究期程	年份	各狀態設備成本 (發生機率)			總期望成本 (單位：元)
		狀態 1	狀態 2	狀態 3	
0	93	279173254 (0.28)	291792496 (0.17)	306008710 (0.55)	296,078,026
1	94	286948112 (0.17)	299975849 (0.14)	316690960 (0.69)	309,294,560
2	95	296122820 (0.36)	309436076 (0.06)	323126295 (0.58)	312,583,631
3	96	303396236 (0.45)	317242937 (0.11)	332134970 (0.44)	317,564,416
4	97	311662451 (0.42)	326006452 (0.22)	341183861 (0.36)	325,445,839
5	98	320271893 (0.14)	335386826 (0.17)	354908459 (0.69)	346,740,662
6	99	331320730 (0.30)	346648865 (0.06)	362964581 (0.64)	352,492,482
7	100	340869715 (0.42)	355874998 (0.11)	374502486 (0.47)	358,327,699
8	101	344614047 (0.50)	361001566 (0.17)	377850157 (0.33)	358,367,841
9	102	357722544 (0.42)	374895338 (0.22)	393236603 (0.36)	374,285,620
10	103	368644091 (0.14)	385701923 (0.17)	404993957 (0.69)	396,625,330
11	104	378151906 (0.28)	397040912 (0.17)	417777422 (0.55)	403,157,071
12	105	390330338 (0.42)	408955455 (0.11)	429006028 (0.47)	410,556,676
13	106	400452093 (0.50)	420573275 (0.16)	441417063 (0.34)	417,599,572
14	107	413227620 (0.42)	434076093 (0.22)	455818395 (0.36)	433,146,963

資料來源：本研究結果。

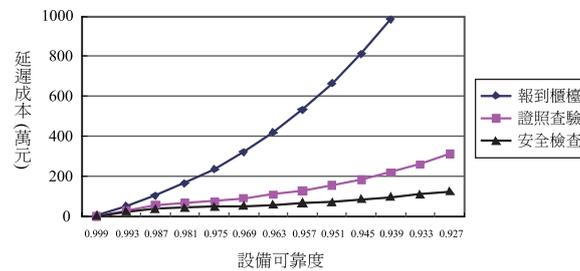


圖 5 不同設備之故障延遲成本隨可靠度變動情形

為探討設備設置數量與各項成本之變動情形，本研究進一步以報到櫃檯為例，假設出境旅客量固定每年 900 萬人次，當櫃檯設置數量分別為不足 (7 個)、最適 (8 個) 及過多 (9 個) 時各項成本之變動。如圖 8 所示，其中設置數量不足時雖折舊及維護成本較低，但其產生之延遲成本遠大於最適設置數量，故總成本仍大於最適數量者。若設置數量過多雖可降低延遲成本，但相對將增加折舊及維護成本，因前者降低金額少於後者增加之成本，故仍以最適設置數量之總成本最低。

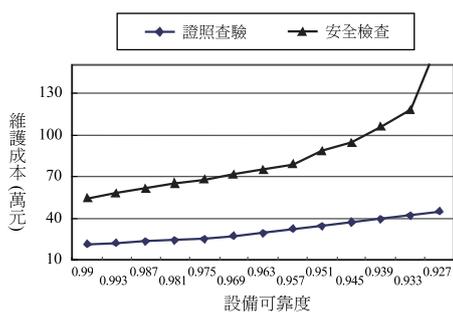


圖 6 不同設備之維護成本隨可靠度變動情形

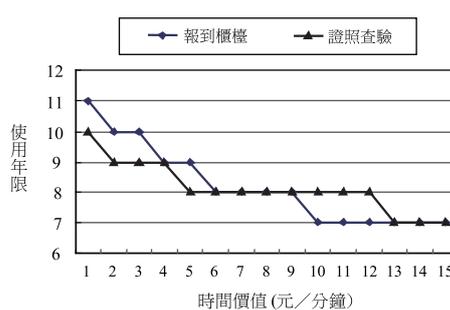
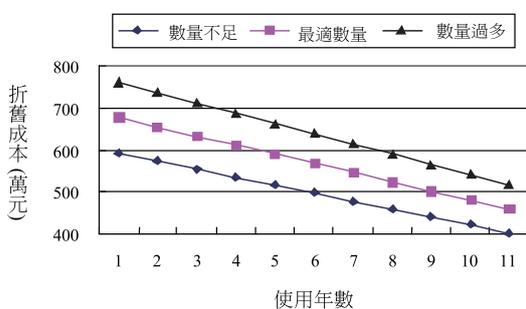
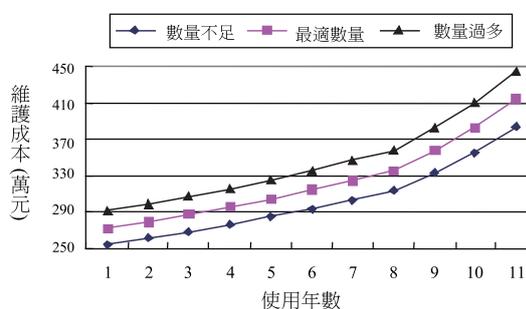


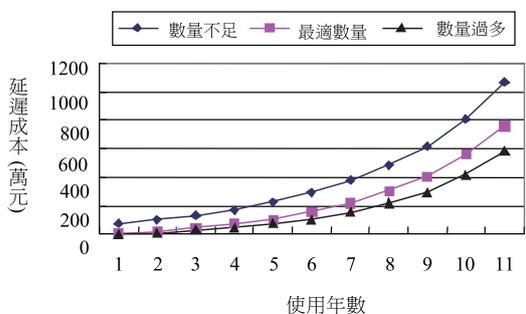
圖 7 最佳使用年限隨時間價值變動情形



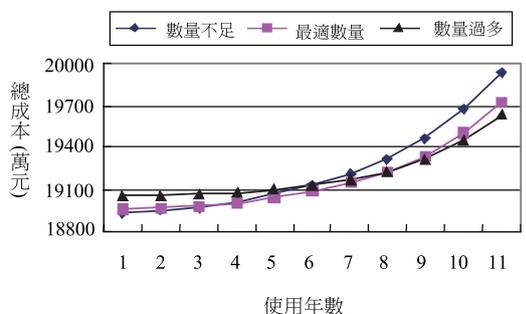
(a) 折舊成本



(b) 維護成本



(c) 延遲成本



(d) 總成本

圖 8 不同報到櫃檯數量於各使用階段對各項成本之影響

六、結 論

1. 本研究綜合考量設備總成本、機場飛航安全、服務品質及財政收支等目標，並應用動態規劃構建國際機場航站大廈出境多設施購置／汰換時程之決策模式。為反映各階段不同設備各項成本之變動，本研究依各階段之旅客運量、設備可靠度及利用率，構建國際機場出境各主要設施之運轉、維護及延遲等成本函數。其中，運轉成本包括與設備自動化程度有關之操作成本及隨處理量變動之能源與材料費用。而維護成本可分為例行預防保養成本及故障修理成本，前者與設備年齡及使用頻率有關，後者則受設備故障頻率及嚴重性影響為可靠度之函數。藉由延遲等成本函數可分析各項設備發生故障或處理容量不足時，旅客等候時間成本及班機延遲起飛賠償旅客用餐、住宿及行程延誤費用。根據上述成本函數可精確分析各項成本隨設備使用年限與旅客量之變動情形，並求得各類設備最佳設置數量及汰換時間。
2. 本研究以灰色拓樸預測結合馬可夫鏈模式，預測中正國際機場各時程出境旅客量，並以出境報到櫃檯、證照查驗、旅客安檢、行李處理及旅客登機等設施為實例分析，驗證模式之可行性，並進行敏感度分析。研究結果顯示，因各類設備之維護及延遲成本函數並不相同，其中機械類設備之維護成本隨可靠度降低而遞增之速度大於電子類設備。另作業時間較長之設備，其故障延遲成本隨可靠度降低而遞增之速度，大於作業時間較短者。對單一設備而言，當故障率高於某一水準，導致維護成本及延遲成本大於購置新設備所需折舊成本及汰換舊設備之損失時，則須進行汰換，若不考慮旅客運量變動且旅客時間價值為每分鐘五元時，報到及證照查驗櫃檯最佳使用年限分別為九年及八年，但各項設備最適使用年限將隨旅客時間價值增加而遞減。
3. 有關設備增購之最佳時程及其數量以使用效益最大化為原則，使用效益即該設備加入營運期間所減少之延遲及運轉成本扣除該設備之折舊及維護成本，故購置時間及數量取決於研究期程內各時程旅客運量之變動情形。若設置數量不足時，雖折舊及維護成本較低，但其產生之延遲成本遠大於最適設置數量；若設置數量過多，雖可降低延遲成本，但相對將增加折舊及維修成本，因降低之延遲成本少於折舊及維護成本增加之金額，故仍以最適設置數量之總成本為最低。
4. 應用本研究構建之模式，可精確掌握各類設備最佳購置／汰換時程及數量，以降低機場營運成本及提升旅客服務品質，並提供機場經營者事先做好財務規劃。隨著科技與資訊應用不斷創新，各項設備發展日新月異，而本研究假設各時程購置之同類設備價格及性能均相同，無法反映同一時程同類設備之差異性，如新型設備雖價格較高，然因技術進步產生之效益，如自動化減少操作人力、節省運轉能源或增加處理速度等。建議未來可進一步考量不同時程購置之同類設備，其設置成本及性能之差異性，探討技術創新對設備購置／汰換時程之影響。

參考文獻

1. Bellman, R., "Equipment Replacement Policy", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 3, No. 3, 1995, pp. 133-136.
2. Hartman, J. C., "An Economic Replacement Model with Probabilistic Asset Utilization", *IIE Transactions*, Vol. 33, No.9, 2001, pp.717-727.
3. Kercecioglu, D., *Maintainability, Availability, & Operational Readiness Engineering*, Prentice Hall PTR, 1995.
4. MIL-STD-2173, *Reliability Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft Weapons Systems and Support Equipment*, 1986, pp. 21-23.
5. Lam, Y., "An Optimal Maintenance Model Using a Number of Different Actions", *Microelectronics and Reliability*, Vol. 37, No. 4, 1997, pp. 615-622.
6. Park, D. H., Jung, G. M., and Yum, J. K., "Cost Minimization for Periodic Maintenance Policy of a System Subject to Slow Degradation", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 68, No. 2, 2000, pp. 105-112.
7. Tsai, Y. T., Wang, K. S., and Teng, H. Y., "Optimizing Preventive Maintenance for Mechanical Components Using Genetic Algorithms", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 74, No. 1, 2001, pp. 89-97.
8. Jayabalan, V. and Chaudhuri, D., "Optimal Maintenance—Replacement Policy under Imperfect Maintenance", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 36, No. 2, 1992, pp. 165-169.
9. Nakagawa, T., "Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 37, No. 3, 1988, pp. 295-298.
10. Dedopoulos, I. T. and Smeers, Y., "An Age Reduction Approach for Finite Horizon Optimization of Preventive Maintenance for Single Units Subject to Random Failures", *Computers Ind. Engng*, Vol. 34, No. 3, 1998, pp. 643-654.
11. Canfield, R. V., "Cost Optimization of Periodic Preventive Maintenance", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-35, No. 1, 1986, pp. 78-81.
12. Chan, J. K. and Shaw, L., "Modeling Repairable Systems with Failure Rates that Depend on Age and Maintenance", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 42, No. 4, 1993, pp. 566-571.
13. Sherif, Y. S. and Smith, M. L., "Optimal Maintenance Models for Systems Subject to Failure – A Review", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 28, No. 1, 1981, pp. 47-74.
14. Horonjeff, R. and Mckelvey, X., *Planning and Design of Airports*, McGraw-Hill Inc., New York, 1994.
15. 交通部運輸研究所委託荷蘭機場顧問公司 (NACO) 辦理，中正國際機場主計畫修訂規劃報告，民國八十二年。
16. 許巧鶯、溫裕弘，「臺灣地區國際航空客運量之預測—灰色預測模式之應用」，*運輸計劃季刊*，第二十六卷，第三期，民國八十六年，頁 525-556。

17. 田自力，「灰色理論在預測與決策之研究」，國立成功大學機械工程研究所博士論文，民國八十四年。
18. Hsu, C. I. and Wen, Y. H., "Improved Grey Prediction Models for the Trans-Pacific Air Passenger Market", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 22, 1998, pp. 87-107.
19. 鄧聚龍，**灰色系統基本方法**，華中理工大學，中國武漢，西元 1985 年。
20. Smith, R. M. and Bain, L. J., "An Exponential Power Life-testing Distribution", *Communications in Statistics*, Vol. 4, No. 5, 1975, pp. 469-481.
21. Dhillon, B. S., "Life Distributions", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-30, No. 5, 1981, pp. 457-459.
22. Ashford, N., Hawkins, N., O'leary, M., Bennetts, D., and Ginity, P. M., "Passenger Behavior and Design of Airport Terminal", *Transportation Research Record* 588, 1976.
23. 亞聯工程顧問公司，「中正國際機場整體規劃暨第一期發展計畫」，交通部民用航空局委託研究，頁 5-31 ~ 5-33，民國八十九年。