

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

不確定性環境下之航空公司網路設計、機隊動態規劃與策略
聯盟(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-009-049-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學運輸科技與管理學系

計畫主持人：許巧鶯

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 29 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中進度 報告

不確定性環境下之航空公司網路設計、機隊動態規劃與策略 聯盟

The Airline Network Design, Dynamic Fleet Planning and Strategic Alliance under Uncertain Environments

計畫編號：NSC 91-2211-E-009-049-

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：許巧鶯(cihsu@cc.nctu.edu.tw) 國立交通大學運輸科技與管
理學系

一、中文摘要

本研究構建一系列因應需求變動之航空公司網路規劃模式、因應景氣循環之航空公司機隊動態規劃模式、以及互動式聯盟航空公司之網路與機隊規劃模式，系統化分析反應航空旅運需求變動與景氣循環之航空公司網路與機隊規劃，及航空公司策略聯盟問題，本研究為分為三部份之兩年期研究計畫。第一部份構建旅運需求與經濟景氣預測模式，分析影響經濟波動與旅運需求變動之因素，構建灰色理論基礎之需求模式，以反應社經因素、景氣循環變動與市場需求間之動態關聯，以航空運量及景氣循環波形歷史資料推估未來可能之航線旅客需求量及經濟景氣波動情況。第二部分則針對隨機性旅運需求變動與景氣循環，應用隨機性規劃模式構建反應需求變動之航空公司網路設計模式，進行航空公司航線班機頻次規劃，並評估規劃之可靠度；另針對可能之短期運量波動，作規劃後之航線班機頻次因應調整。本研究並應用動態規劃模式構建反應景氣循環之航空公司機隊動態規劃模式，決策最適機隊機型組合，規劃最適航機新增/汰換與採購/租賃決策與時程。第三部份則為航空公司網路與機隊之策略聯盟規劃模式，構建互動式多目標模式，透過協商互動求解過程，分析航空公司於航線網路整合、共用班號、航機/人員/運輸容量相互承租之策略聯盟及協議上的協商互動過程，並在追求聯盟航空公司間均能滿意下，求解最適策略聯盟規劃。本研究於第一年期完成第一與第二部分之研究，而第二年期則著重於第三部份研究與整合應用。

最後，以實際航空公司相關資料作實證分析，以驗證本研究模式在實際應用上之可行性與模式發展之潛力。於航空網路設計之可靠度評估模式中，擇定 CAL 之 10 城市航點以進行範例研究，研究結果顯示，針對可能之短期運量波動作航線班機頻次調整後之總成本較低，顯示因應運量波動下若航空公司進一步對航線班機頻次作適當之因應調整將獲得更高之利益。在灰色拓撲預測配合馬可夫鏈轉移機率模式校估航空旅客需求量方面，則得到適配度很高的預測模式，且該模式的確能夠反映經濟景氣之循環。於航機採購/汰換時程動態規劃模式中，以國內一家國籍國際航空公司 A 航為對象進行實證分析，結果顯示航空公司之機隊航機購置/汰換時程會對航空公司之營運成本造成影響，而航空公司對未來所做的預測越準確，則其期望成本會較小。本研究第一年成果除可提供相關航空公司網路與機隊規劃研究之參考基礎外，亦可作為航空公司因應不確定性需求進行網路與機隊策略規劃之參考。

關鍵字：航空公司網路設計、機隊規劃、航空公司聯盟、不確定性環境

Abstract

This study develops passenger demand models, stochastic network design models, dynamic fleet planning models and interactive alliance models to systematically analyze airlines' decisions on network design and fleet planning in an uncertain environment, and to determine alliance strategies by taking bargaining interactions between alliance airlines into account. The two-year study includes three topics. First, the study examines the effects of socioeconomic characteristics

and the economic cycle on the variations of passenger demand for different city-pairs of an airline network. The grey-theory-based demand models proposed in this study includes the uncertain socioeconomic variables, thereby accounting for the dynamic aspects of demand changes fully. Then, an airline network design model on determining route flight frequencies and evaluating their reliability is developed by using chance constrained programming. This model will provide a priori adjustment of flight frequencies in response to passenger traffic fluctuations. Second, a fleet planning model for choosing aircraft types, deciding the time frame to replace, purchase/lease aircraft is developed by using dynamic programming. This dynamic fleet planning model takes the future trend of economic cycle into considerations, and determines the fleet composition, replacement, and purchase/lease decisions dynamically. Finally, this study will further analyze the airline alliance strategies by combining analytical approach, airline network design and dynamic fleet planning models. In the first year, we focus on the first two topics.

A case study with 10 selected cities served by the CAL network is performed. The results show that the total costs of the airline network in every adjustment month after performing adjustments will be less than those if no adjustments are performed. The flight frequency adjustments are shown to benefit the airline and provide flexibility for airline planners to determine responsive flight frequency plans on OD pairs with severe fluctuations. Then, an empirical example is provided to illustrate the application of the fleet planning model. Sensitive and scenario analyses are implemented to demonstrate the effects of variations in key variables on aircraft purchase and replace scheduling and total operation costs. The aircraft purchase and replace scheduling is shown to be significantly affected by aircraft purchase cost, lease cost, maintenance cost, and aircraft composition. Consequently, the results of the models developed in the first year not only provide basis on studies regarding airline network design, and fleet planning problems, but also shed light on decision-making on network design and fleet planning for airlines in a competitive and uncertain environment.

Keywords: Airline network design; Fleet planning; Airline alliance; Uncertain environment

二、前言

由於航空運輸需求對經濟循環(business cycle)具高度敏感性[26]，使經濟環境變化對航空產業極具影響。有別經濟循環對於其他產業之影響，航空產業承受景氣蕭條時之影響，反應在航空運輸需求之驟減上，分外地快速、敏感且持續，而景氣復甦後對航空運輸需求之恢復，雖較諸其他產業需求來得緩慢，然開始回復後航空運輸成長即相當快速[26]。2001年美國受到911恐怖事件之影響，航空市場之需求量一蹶不振，迫使航空公司裁減航班甚至裁撤航線，以因應市場景氣低靡。航空運輸需求受經濟循環、重大事件之高度影響，加以運輸的不可儲存性，使得旅運需求變動、經濟環境波動，成為航空公司在進行規劃時所面臨最具挑戰的不確定性因素。不確定性的決策環境使航空公司規劃問題更形複雜與困難。在競爭激烈的航空市場及多變的經貿環境中，航空公司如何因應不確定性的需求變動與競爭環境，進行航空公司航線網路設計與機隊規劃，以追求利潤最大、市場擴張與永續發展，實為航空公司最根本之基礎規劃與極重要之策略規劃。

航空公司於航線班機頻次、航班班表、機隊規劃結果通常為一段期間內定期營運作業之依據。而短期航空旅運運量的波動，將直接影響航空公司班機承載率與營收。航空公司依據所預測之未來運量進行中長期規劃，若短期運量遽增而超乎預期運量水準時，將可能造成旅客一票難求且班次延誤時間增加，而使航空公司服務水準降低，甚而流失旅客；然而，若短期運量驟減而不若預期水準，又將使航空公司班機承載率過低並可能蒙受虧損。再者，航空旅客需求與航空公司航線班機頻次供給之間存有密切之供需互動關係。因此，航空公司在網路設計之規劃階段上，如何掌握未來需求變動、景氣循環，並在考量市場佔有、營收利潤、營運成本效益之權衡規劃，以及在隨機性的短期需求變動下作因應調整，即為航空公司網路規劃重要之課題。

經濟景氣循環與航空公司機隊規劃決策亦具相當密切之關係，若航空公司能配合經濟景氣之循環，而進行機隊更新或淘汰之決策因應，將能夠讓航空公司之資金運用較靈活、資產利用率更高，進而創造更多利潤。另一方面，為因應詭譎多變與競爭激烈的經營環境，最近航空公司時興透過航空公司策略聯盟之建立，企圖藉此

增加營運效率、降低成本，且擴大營運市場，並達到擴張其飛航網路範圍。航空公司聯盟可提供給航空公司與旅客最主要的效益即在於聯盟網路航點涵蓋範圍之擴張及航線之延遠。國際航空公司聯盟能讓參與聯盟的航空公司擴張其航空網路與服務範圍，亦有利於航機利用率之提昇、增加營運效率。因此，配合有效之網路設計與機隊規劃之整體策略聯盟規劃，確為實現航空公司聯盟效益的不二法門[7]。

本研究著眼於因應不確定性環境、需求變動之航空網路與機隊規劃以及航空公司策略聯盟規劃，期能提供航空公司更具環境因應與決策彈性之規劃參考基礎。

三、文獻回顧

過去相關之航空公司規劃研究，在航空網路方面，或著重於經濟面分析（如：[15][16]）；或側重於作業研究/數學規劃模式之構建（如：[18][19][23]），這些文獻分析、探討不同研究重點之航空公司航線網路問題。上述文獻所採用的分析方法大多為解析性模式及確定性數學規劃最適法，或著重於一系列演算求解法之研究。而一般確定性數學規劃基礎之航空網路設計問題則多假設在已知的起迄對需求配置下，進行網路設計與航線規劃。然而，前述文獻均未針對不確定性參數、需求變動作探討，故在處理相關不確定性參數環境上，以及分析不確定性因素所衍生之需求變動，尚存有極大之研究空間。[26]應用模糊理論進行航空網路設計問題之研究，以模糊數作為起迄對航段運量、成本等不確定性參數之處理，利用模糊邏輯進行航線形態設計以及航線班機頻次規劃；[11]整合灰色預測（grey forecasting）、灰色聚類與多目標規劃法（multiobjective programming），預測航線運量、設計航線網路與規劃班機頻次，上述研究將航線運量參數作不確定性模糊數或灰數（grey number）之處理，然而，對於起迄點間、以及起迄旅次產生與吸引點之經濟景氣、社會經濟因素變動所衍生之需求變動、隨機性短期運量變動之影響等議題，則未加以分析，故在這些議題上實存有進一步探討之研究空間。

在機隊規劃方面，[2]應用模糊多準則決策方法，在兼顧航空公司、旅客與社會利益的前提下，遴選具代表性的質化與量化評估準則，進行機型選擇。而相關機隊指派問題多半採用數學規劃最適法，以時間窗(time window)觀念配合網路流量規劃求解機隊機型與旅客需求量配合問題（如：[9]）。[22]則以網路流量問題之動態規劃觀點，探討航空公司在多種機型組合之機隊情況下，如何配合不同時段不同航線的旅客需求量，將最適機型指派給各個航線。另外，在航機汰換策略研究上，[25]在考量經濟效益下，決定航機之最佳使用年限，而[14]則以最大化利潤為目標，在考慮最佳利用率的情況下探討機隊航機利用情況對購買新機和淘汰舊機之影響。機隊規劃中另一項重要的問題為決策機隊中航機購買與租賃之比率。機隊規劃與時間具高度相依性，航機的新增/汰換、採購/租賃決策均將影響航空公司長期的營運績效，現期的規劃結果是否能因應未來各期的景氣情形與需求水準，以及應於哪個時間點進行新增/汰換決策，將是機隊規劃重要的問題。然而，相關機隊規劃文獻較欠缺針對未來時區之不確定性景氣循環影響作探討，以及深入分析新購/汰換、採購/租賃決策時程的動態關係，在整合考慮未來不確定性環境下進行機隊動態規劃上，則存有研究空間與研究價值。

本研究嘗試整合應用隨機性網路規劃模式、動態規劃模式與互動式多目標規劃模式，進行一系列因應景氣循環、隨機性需求變動環境下之航空公司網路與機隊規劃以及航空公司策略聯盟規劃。於分析需求面、經濟面之不確定性及衍生之旅客需求變動分析上，擬應用隨機性規劃模式評估航空公司網路規劃結果在因應隨機性需求變動下之可靠度，並進行因應規劃調整。同時，分析景氣循環與需求波動，預測未來之旅運需求與景氣水準，將預測之經濟景氣波形切割為不同之決策時區，應用動態規劃模式規劃航空公司在各決策時區之最適之機隊組成與航機購置/汰換時程。

四、研究目的

本研究針對不確定性環境，探討與整合航空公司航線網路與機隊規劃及策略聯盟問題，分為三部份之兩年期研究計劃。第一部份構建旅運需求與經濟景氣預測模式，分析

影響經濟波動與旅運需求變動之因素，及以航空運量及景氣循環波形歷史資料推估未來可能之航線旅客需求量及經濟景氣波動情況。第二部分則針對隨機性旅運需求變動與景氣循環，構建隨機性航空公司網路規劃模式，及機隊規劃之動態規劃模式，規劃能因應不確定性環境之航空公司最適網路與機隊，並制定最佳機隊購置/汰換時程。第三部份則為航空公司於網路與機隊之策略聯盟規劃模式，構建互動式多目標模式，透過協商互動求解過程，分析航空公司於航線網路整合、共用班號、航機/人員/運輸容量相互承租之策略聯盟協議上的協商互動過程，並在追求聯盟航空公司間均能滿意下，求解最適策略聯盟規劃。本研究於第一年期完成第一與第二部分之研究，而第二年期則著重於第三部份研究與整合應用。

本研究系統化構建航空網路與機隊規劃模式，進行一系列因應隨機性環境、需求變動之航空網路與機隊規劃。本研究結合運輸經濟理論、網路模式理論、隨機機率理論，以相關數學規劃模式、解析性方法，構建航空網路設計模式及機隊規劃與航機採購/汰換時程模式。研究中擬以經濟理論、統計方法與灰色理論，分析需求面、經濟面之隨機性與衍生之不確定性旅客需求變動，並評估航空網路系統可靠度；同時從網路結構與成本效益概念，進行最適因應之重組。本研究構建之一系列因應隨機性環境下之網路與機隊規劃模式，提供航空公司規劃者在不確定性、複雜之多維決策空間中，進行網路設計、機隊規劃之參考依據，以輔助航空公司對整體網路系統與機隊作最佳之規劃與設計。

五、研究方法

於第一年之研究中，本研究首先針對研究範圍內城市對，構建因應經濟景氣循環之航空旅運需求函數及預測模式，需求模式中包含社會經濟環境不確定性並反應社會經濟因素與市場需求間之動態關聯，以分析社會經濟因素變動衍生之需求變動。經濟景氣循環航空運量預測模式則預測經濟景氣波形，並作為分劃機隊汰換規劃時程之基礎。再者，起迄對市場需求可藉市場佔有率轉化為航空公司之起迄對航線需求，進而可作為航空公司網路與機隊規劃模式之基礎輸入參數。本研究更進一步深入分析航空旅運量之短期波動，以隨機性規劃模式為基礎，將短期航空旅運量視為隨機變數，而在短期運量波動下，分析航空公司網路規劃結果之可靠度。

本研究建立包含社會經濟變數不確定性之起迄航線市場旅運需求模式，起迄對市場之社會經濟、政治經貿環境因素本身即具不確定性，而此經濟環境因素不確定性主要是發生在起迄兩端之旅次產生點與旅次吸引點上以及起迄點間之關係上。本研究更深入分析起迄節點與起迄對間節線之社會經濟不確定性以及所衍生之需求變化，也因此，起迄對需求可能因經濟面不對稱之影響，而呈需求量不對稱分佈或變化。在處理人口、社會經濟因素變動，所衍生需求變動上之不確定性質，本研究應用灰色模式構建航空旅運需求模式。此部份研究已於[3][4][10]研究中完成，茲簡述如下：

對任一起迄旅次(起點城市 r 、迄點城市 s) 航空市場，建立灰色 GM(1,N)起迄對總市場旅客需求模式為

$$F_{rs} = GM^{(1,N)}(\mathbf{E}_{rs}) \quad (1)$$

其中， F_{rs} 為 r - s 起迄旅次市場總旅客需求量；而 $\mathbf{E}_{rs} \in \square^n$ 為起迄對市場社會經濟變數向量，包括人口變數、所得、國民生產毛額與政經變動因素等； $GM^{(1,N)}$ 為灰色 GM(1,N)系統預測模式，模式建立過程可參考[4]。本研究航空旅運需求模式，即可藉由 GM(1,N) 模式中社經解釋變數與運量需求間之關聯狀態之動態描述，作為分析不確定性社經因素對航空旅運需求影響之基礎。

本研究於第一年之研究中，進一步應用灰色拓樸預測方法(Grey Topological Forecasting) [6] 進行經濟景氣循環之預測。其預測操作過程簡介如下：

1. 取得一二維平面上的數列 $X^{(0)}$ ，數列中每個 X 軸座標都有相對的 Y 軸座標，將所有點集合 $\{k, x^{(0)}(k)\}$ 在平面上繪製成一條曲線 $X^{(0)}$ 。在二維平面之 Y 軸上，擷取數個固定參考值 $'_i, i=1,2,\dots,m$ 。令數列 $X^{(0)}$ 中最大、最小值分別為 $\max X^{(0)}$ 、

$\min X^{(0)}$ ，則 $\min X^{(0)} \leq 'i \leq \max X^{(0)}$ 。

2. 找出對應每個固定參考值 $'i$ 之 X 軸座標，即

$'i: \{X^{(0)}\} \rightarrow \{m_i^{(0)}\}$ ，則 $m_i^{(0)}(k)$ 為水平線 $'i$ 與曲線 $X^{(0)}$ 相切的第 k 個座標值，因此所有 X 軸座標可形成一集合，為： $P: \{(m_i^{(0)}(k), 'i)\} \rightarrow \{m_i^{(0)}(k)\} k=1,2,\dots,n_i$ ，可知 $m_i^{(0)} = \{m_i^{(0)}(1), m_i^{(0)}(2), \dots, m_i^{(0)}(n_i)\}$

3. 每個固定參考值將對應到一組有 i 個 X 軸座

標值的集合 $W_i^{(0)}$ ，配合以上之座標集合，可表示為： $m_i^{(0)}(k) = W_i^{(0)}(k)$ ，而 $P(m_i^{(0)}(k), 'i) = W_i^{(0)}(k)$ ，即 $W_i^{(0)} = \{W_i^{(0)}(1), W_i^{(0)}(2), \dots, W_i^{(0)}(n_i)\}$ 。則 $W_i^{(0)}$ 表示一組 X 軸座標值集合，該組 X 座標值所對應到 Y 軸的值為固定參考值 $'i$ 。對每組 X 軸座標集合 $W_i^{(0)}$ 進行灰色 AGO(Accumulated Generating Operation) 累加生成，可得一新的生成數列 $W_i^{(1)}$ 。對每組新的生成數列 $W_i^{(1)}$ 構建 GM(1,1)，並得到預測值， $\hat{W}_i^{(0)}$ 。對於第 n_i+1 筆預測值 $\hat{W}_i^{(0)}(n_i+1)$ 與其相對應之 Y 軸座標固定值 $'i$ ，座標點可記為 $(\hat{W}_i^{(0)}(n_i+1), 'i)$ 。

4. 將所有對應 Y 軸固定參考值 $'i$ 的 X 軸預測

座標值在二維空間中連結成一條曲線 $\hat{X}^{(0)}$ ，這條曲線即為拓撲預測曲線，可記為： $\hat{X}^{(0)} = \{(\hat{W}_i^{(0)}(n_i+1), 'i) | i=1,2,\dots,m\}$ 。

灰色 GM(1,N) 與灰色拓撲預測模式屬於長期預測，可作為航空公司前期規劃之輸入參數。然而，航空運量之短期波動(如月運量、週運量甚至是日運量之波動)亦具有高度之不確定性。本研究以隨機性理論為基礎，處理航空旅運量之短期月運量波動，令起迄對 $r-s$ 月份 t 之航空旅運月運量為一隨機變數，定義為 \tilde{f}_{rs}^t ，並設定與估計 \tilde{f}_{rs}^t 之機率分配。為估計 \tilde{f}_{rs}^t 之機率分配，本研究假設在所有規劃年中，各年內之各月運量波動形態相似，故可以月運量歷史資料作為樣本資料，並將月運量值加以均值化，以求得各月運量相對於該年平均月運量 \bar{f}_{rs} 之比率值， f_{rs}^t / \bar{f}_{rs} 。令 $\mathcal{T}_{rs}^t = \tilde{f}_{rs}^t / \bar{f}_{rs}$ 為一隨機變數，可由歷史資料估算 \mathcal{T}_{rs}^t 之樣本平均值與標準差，令 \mathcal{T}_{rs}^t 可由平均值、標準差分別為 $\bar{\mathcal{T}}_{rs}^t$ 、 $t(\mathcal{T}_{rs}^t)$ 之常態分配來估計，假設一個月份中之月運量波動將呈現常態分配，亦即，若 $\tilde{f}_{rs}^t = \bar{f}_{rs} \mathcal{T}_{rs}^t$ ， \tilde{f}_{rs}^t 亦為常態分配，其平均值、標準差參數分別為 $\bar{f}_{rs} \bar{\mathcal{T}}_{rs}^t$ 、 $t(\tilde{f}_{rs}^t) = \bar{f}_{rs} t(\mathcal{T}_{rs}^t)$ 。

本研究以航空運量 GM(1,N) 系統預測模式為基礎，進行航空旅運量長期預測，作為航空公司中長期網路之輸入參數，並以景氣循環波形預測分析與馬可夫鏈狀態轉移機率模式為基礎進行機隊汰換/採購/租賃動態決策規劃；另運用上述隨機性處理來分析航空旅運量於短期之波動，進一步作為航空公司網路隨機性規劃模式之輸入參數。

在航空網路規劃模式上，本研究依循已發表之研究成果([4][11])。考慮航空旅運量之月運量波動為隨機變數，則航空網路規劃問題即成為隨機性規劃問題。繼而，本研究援引隨機性規劃問題之機率性限制式規劃(chance constrained programming)方法[5]，設計一可靠度衡量方法，評估航空公司網路規劃結果在因應短期運量波動下之效率。本研究首先構建航空公司航線網路規劃模式，規劃航線班機頻次與機型，再透過機率性限制式(chance constraints)評估所規劃之航線班機頻次在因應短期運量隨機性波動下是否仍能維持成本效益與服務水準之可靠度(reliability)。

令航空公司網路為 $G(N, A)$ ，其中 N 與 A 分別代表網路 G 之航點與航段集合。令 R ($R \subseteq N$) 為起點集合，而 S ($S \subseteq N$) 為迄點集合，且 $R \cap S \neq \emptyset$ 。任意起迄對 $r-s$ 可由航線集合 P_{rs} ($r \in R, s \in S$) 提供飛航服務。一國際航空公司之機隊組成一般具有許多機型，因此，航空公司網路規劃問題之主要決策變數即為航線班機頻次。令 N_{rspq} 為航空公司於起迄對 $r-s$ 間於航線 p ($p \in P_{rs}$) 以機型 q 航機飛航之每月航線班機頻次，而 Y_{aq} 為航段 a 以機型 q 航機飛航之每月航段班機頻次，且

$$Y_{aq} = \sum_{r,s} \sum_p U'_{a,p,q}{}^{r,s} N_{rspq}, \quad (2)$$

其中， $u'_{a,p,q}{}^{r,s} = \begin{cases} 1, & \text{if link } a \text{ is part of route } p \text{ served by type } q \text{ aircraft} \\ & \text{between OD pair } r-s; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$ 而令航空公司於起迄對 $r-s$

航線 p 承載之旅客運量為 f_{rsp} ，而於航段 a 承載之旅客運量為 f_a ，則

$$f_a = \sum_{r,s} \sum_p u'_{a,p,q}{}^{r,s} f_{rsp}, \quad (3)$$

其中， $u_{a,p}{}^{r,s} = \begin{cases} 1, & \text{if link } a \text{ is part of path } p \text{ between OD pair } r-s; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$

航空公司網路規劃模式以最小化航空公司營運成本與旅客旅行成本為目標，在航空公司營運成本方面，分為直接營運成本與間接營運成本。直接營運成本主要指航機之營運成本，包括飛行操作成本、人員費用、燃料費用、起降費用、維修與折舊等成本，與航機機型及航程有關；間接營運成本則為航空公司除了航機飛行成本外，另外之管理、旅客服務費用或機票促銷等之成本。令 C_a^{JA} 為航空公司總營運成本，即

$$C_a^{JA}(Y_{aq}) = \sum_q C_{aq}^D(Y_{aq}) + C_a^I(Y_{aq}), \quad (4)$$

其中， C_{aq}^D 為航空公司於航段 a 以機型 q 航機飛航營運之直接營運成本，而 C_a^I 則為航空公司於航段 a 之間接營運成本。旅客旅行成本則可分為旅客幹線飛行時間成本與班次延誤時間成本([12][17])。令 C_a^{TP} 為總旅客旅行成本，則

$$C_a^{TP}(Y_{aq}, N_{rspq}) = C_a^T(Y_{aq}) + C_a^S(N_{rspq}), \quad (5)$$

其中， C_a^T 為航段 a 上之總旅客幹線飛行時間成本， C_a^S 為旅客班次延誤時間成本。若輸入參數為各起迄對規劃年平均月運量 \bar{f}_{rs} ，則航空公司網路規劃模式如下：

$$\begin{aligned} \text{P1: } \min_{Y_{aq}, N_{rspq}} \sum_{a \in A} C_a^{JA}(Y_{aq}) + C_a^{TP}(Y_{aq}, N_{rspq}) = & \\ \sum_a \left[\sum_q (r_{aq} + s_{aq} d_a) Y_{aq} + c_h \sum_q n_q l_a Y_{aq} \right] + & \\ [c_f (r + \dots d_a + \Delta_a) \sum_q n_q l_a Y_{aq} + c_d \bar{f} \sum_{r,s} \sum_p S_{a,p}{}^{r,s} \left(\frac{\bar{T}}{\sum_q N_{rspq}} f_{rsp} \right)] & \end{aligned}$$

(6a)

$$\text{s.t. } \sum_q n_q l_a Y_{aq} - \sum \sum S_{a,p}{}^{r,s} f_{rsp} \geq 0 \quad \forall a \in A \quad (6b)$$

$$\sum_q f_{rsp} = \bar{f}_{rs} \quad \forall p \in P_{rs} \quad \forall (r,s) \quad (6c)$$

$$Y_{aq}^p = \sum \sum u'_{a,p,q}{}^{r,s} N_{rspq} \quad \forall a \in A \quad (6d)$$

$$\sum t_{aq} Y_{aq}^p \leq u_q U_q \quad \forall q \quad (6e)$$

$$Y_{aq}, N_{rspq} \geq 0 \text{ and integer; } f_{rsp} \geq 0 \quad (6f)$$

其中，式(6a)為目標式；式(6b)表提供之航段飛航容量大於等於航段旅客運量， n_q 為機型 q 航機座位數， l_a 為航段 a 之承載率；式(6c)定義起迄對中所有航線運量和須等於起迄對運量， \bar{f}_{rs} 為輸入參數，即起迄對 $r-s$ 之平均每月運量預測值；式(6e)為一機型之最大可利用率限制， t_{aq} 為機型 q 航機於航段 a 之飛航時間， u_q 為機型 q 航機之最大每月可利用率， U_q 為機隊機型 q 航機之總數，式(6f)令變數 Y_{aq} 與 N_{rspq} 需為非負整次，而 f_{rsp} 為非負數。

從上述航空網路設計模式(式(6a)-(6f))中，所規劃的航線班機頻次可視為平均每月班機頻次而均化季節性淡、旺季變化，然隨著月與月之間的短期旅運量波動，航線班機承載率將具變動與差異且影響航空公司營收。擬進一步在此規劃階段，考慮短期季節性或異常起迄運量波動，當短期運量驟降，將可能造成起迄航線之平均承載率過低而造成不規模經濟的情形，然而當短期運量突增時，旅客將可能承受高延

誤時間成本。

令 $l_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t)$ 為起迄對航線中因應運量 \tilde{f}_{rs}^t 之航線班機承載率函數，假設航空公司設定於起迄對航班之最小可接受承載率， \bar{l}_{rs} ，一般為航班之損益平衡水準，本研究依 [26] 之研究成果令 $\bar{l}_{rs}=55\%$ ；再者，若承載率近於 100% 時，表示短期運量遽增而產生超額需求的情形，旅客可能一票難求，因此令航空公司設定起迄對最大可接受承載率為 \bar{l}_{rs} 趨於 100%。依循機率性限制式之定義，本研究定義起迄對航線班機頻次之可靠度為，在所規劃之航線班機頻次上於短期旅運波動下，使其承載率在可接受範圍之機率，如下式所示：

$$R_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t) = \Pr\left[\bar{l}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rspq} \leq \tilde{f}_{rs}^t \leq \bar{l}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rspq}\right] \quad (7)$$

其中， $R_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t)$ 為在隨機性起迄對月運量 \tilde{f}_{rs}^t 波動下之起迄對航線班機頻次可靠度。本研究考慮未來規劃年中，異常狀態發生而衍生之需求變動，分析不同狀態發生機率、狀態持續時間的機率以估算可靠度。

另一方面，對一起迄對 $r-s$ ，若月份 t 之預期運量 \tilde{f}_{rs}^t 轉變為 f_{rs}^t ，且若 $f_{rs}^t \leq \tilde{f}_{rs}^t$ ，航空公司將因空座位引起收益損失，本研究簡化假設單位收益由平均成本來估算，此時航空公司期望損失可以 $C_{rs}^{TA} (l_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t) - l_{rs}(f_{rs}^t))$ 估算，其中， C_{rs}^{TA} 為起迄對 $r-s$ 之總營運成本。再者，若 $f_{rs}^t \geq \tilde{f}_{rs}^t$ ，旅客將多花費旅行成本，則以 $C_{rs}^{TP} \left[\frac{f_{rs}^t - \tilde{f}_{rs}^t}{\tilde{f}_{rs}^t} \right]$ 估算，其中， C_{rs}^{TP} 為起迄對 $r-s$ 之總旅客旅行時間成本。本研究引入一懲罰值函數 (penalty function)， $P(f_{rs}^t)$ ，表在月份 t 時對應起迄對運量 f_{rs}^t 下期望之航空公司利潤損失或旅客旅行成本增加，以下式估算：

$$P(f_{rs}^t) = \begin{cases} C_{rs}^{TA} (l_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t) - l_{rs}(f_{rs}^t)), & \text{if } f_{rs}^t \leq \tilde{f}_{rs}^t \\ C_{rs}^{TP} \left(\frac{f_{rs}^t - \tilde{f}_{rs}^t}{\tilde{f}_{rs}^t} \right), & \text{if } f_{rs}^t \geq \tilde{f}_{rs}^t \end{cases} \quad (8)$$

從可靠度分析結果，某些起迄對將預期被評判為相對低可靠度，於此，其航線班機頻次即須做調整。在這些被評估為相對不可靠之起迄對中，即可針對旺季、淡季月份，或異常狀態發生月份，依據淡、旺季期望運量水準、或異常驟增/劇減之期望運量值進行調整。對於須進行航線班機頻次調整之起迄對，估算調整運量，並將之代入式(6c)中，重新進行航空公司網路規劃之求解，即可得因應之航線班機頻次調整結果。進一步，若預期淡、旺季或異常運量將發生時，在預期發生月份，可比較航空公司進行航線班機頻次調整所須花費之成本與維持原規劃頻次在淡旺季或異常運量下衍生的航空公司利潤損失或旅客延誤成本增加(即懲罰值，式(8))，權衡調整抑或不調整之間的成本，作為是否進行因應調整之依據。

本研究繼而應用灰色理論之拓撲預測配合馬可夫鏈機率轉移模式進行對未來旅客需求量之預測與兩相鄰時區間的預測旅客需求量波動狀況，以長期機隊規劃的觀點構建航機採購/汰換時程動態規劃模式。假設 r 為航空公司所經營之一航線， $R(r \in R)$ 為經營航線集合，令 F_r^T 為應用灰色拓撲預測模式所預測航線 r 在時區 T 之旅客需求量， f_r^T 為航線 r 在時區 T 之預期旅客量經波動過後的未來旅客需求量。 w 為以灰色拓撲預測之旅客需求量的波動情況，分為航空公司高估($w=1$)、準確預測($w=2$)、低估($w=3$)未來的旅客需求量三種情況。

令每一時區為時區 T ，則可知 $T \in [1, n]$ ，令 F_r^T 為應用灰色拓撲預測模式所預測航線 r 在時區 T 之旅客需求量，則 $r \in R$ ， $T \in [1, n]$ 。而總預測期間之旅客需求量即為個別時區之旅客需求量的加總。另外令 f_r^T ， $r \in R$ ， $T \in [1, n]$ 為航線 r 在時區 T 之預期旅客量經波動過後的未來旅客需求量。本研究之主要決策變數為 N_{qtm}^{BT} 與 N_{qtm}^{LT} ，表示航空公司在時區 T 淘汰或取得機型為 q 之航機數目，其中 t 為可使用年限、 m 為累積飛航里程數指標、而上標 B 、 L 表該架航機之取得方式為購買(B)及租賃(L)。 N_{qtm}^{BT} ， $N_{qtm}^{LT} \in I$ ， N_{qtm}^{BT} 與 N_{qtm}^{LT} 屬於整數，其值若為正數，表示航空公司之決策為新購

或新租航機，其值為負數表示決策為淘汰或停租航機，若值為零則表示航空公司在該時區不做任何機隊航機更新決策。另 $q \in Y$ ， Y 為所有航機機型的集合。假設一架航機之可使用總年限為 y 年，則於任一時區 T ，航機之可使用年限 t 為總使用年限 y 扣除該架航機已使用之年數 i ，即 $t = y - i$ ，同時並假設航機之最大累積飛航哩程數指標為 G 。而在航空公司之現有機隊航機方面，本研究以 E_{qtm}^{BT} 及 E_{qtm}^{LT} 表示航空公司在時區 T 起始時，擁有由購買及租賃獲得之機型為 q 、而可使用年限為 t 、累積飛航哩程數指標為 m 之現有航機數目， $E_{qtm}^{BT}, E_{qtm}^{LT} \in \Gamma^+ \cup \{0\}$ ，屬於整數或零。

在此以 Q_q 表示一架機型為 q 之航機的容量，在時區 T 內累積的總飛航頻次為 K_{qtr}^T 次，航空公司在時區 T 內使用現有機隊營運航線 r 之容量 A_r^T 即可表示為：

$$A_r^T = \sum_q \sum_t \sum_m u_q^r (E_{qtm}^{BT} + E_{qtm}^{LT}) Q_q K_{qtr}^T \quad \forall r$$
其中 u_q^r 表示一 0/1 變數，若航空公司使用機型為 q 之航機飛行航線 r ，則 u_q^r 之值為 1，否則為 0。而航空公司為確保每條航線均至少會分配到某一機型之航機營運，因此 u_q^r 必須滿足條件式 $\sum_q u_q^r \geq 1 \quad \forall r$ 。

令 B_q^r 為使用機型為 q 之航機飛行航線 r 的單趟營運時間， u_{qtm}^T 為機型 q 航機在時區 T 內的可利用時間，因此在時區 T 內，航空公司所有機隊航機必須能夠滿足其所飛行航線之總營運時間，參考[12]的研究，以下式表示。

$$\sum_q \sum_t B_q^r K_{qtr}^T \leq \sum_q \sum_t \sum_m (E_{qtm}^{BT} + E_{qtm}^{LT}) u_{qtm}^T \quad \forall T, r$$

(9)

在本研究中，以 S_T 表示在時區 T 開始時的現有機隊狀況集合， d_T 為航空公司在時區 T 所做的機隊新增/汰換決策集合，則 $S_T = \{E_{qtm}^{BT}, E_{qtm}^{LT}, \forall q, t, m\}$ ， $d_T = \{N_{qtm}^{BT}, N_{qtm}^{LT}, \forall q, t, m\}$ 。而航空公司在時區 T 開始時的現有機隊狀況集合 S_T ，即為航空公司在前一時區 $T-1$ 開始時的機隊狀況 S_{T-1} ，加上在該時區所做之機隊新增/汰換決策 d_{T-1} 後的結果，其關係式為 $S_T = S_{T-1} + d_{T-1}$ 即 $E_{qtm}^{BT} = E_{qtm}^{BT-1} + N_{qtm}^{BT-1}$ 、 $E_{qtm}^{LT} = E_{qtm}^{LT-1} + N_{qtm}^{LT-1}$ 。

本模式中假設機票價格為外生變數，在滿足航空公司對未來所預測之旅客需求量的情況下，建構航空公司機隊數目規劃模式之目標為最小化航空公司營運成本。在直接營運成本方面，令 P_{qtm}^w 表示購買一架機型為 q 、可使用年限為 t 、累積飛航哩程數指標為 m 之航機的總成本， X_g^T 為當年利率為 g 時，在時區 T 之內的固定資產資本回收因子乘數，相乘即可得該架航機在時區 T 之折舊成本。若航空公司以租賃取得該架航機，則以 R_{qtm}^{Tdw} 表示租賃合約之總租賃期限為 d 年的航機租金，因此航空公司在時區 T 內花費在購買與租賃現有機隊航機之總成本為 $\sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{BT} P_{qtm}^w X_g^T + \sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{LT} R_{qtm}^{Tdw}$ 。維修成本方面，

以 V_{qtm}^T 表示單位航機之維修變動成本， M^T 表示機隊維修之總固定成本，因此航機維修總成本 $MC^T = \sum_q \sum_t \sum_m V_{qtm}^T (E_{qtm}^{BT} + E_{qtm}^{LT}) + M^T$ 。另以 b_{qr}^T 表示航機飛行航線 r 一趟所必須

付出之機場使用費、燃油成本、機組人員薪資與地勤作業成本，則直接營運成本 DOC_w^T 可表示為：

$$\begin{aligned} DOC_w^T = & \left(\sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{BT} P_{qtm}^w X_g^T \right. \\ & + \sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{LT} R_{qtm}^{Tdw} \left. \right) \\ & + \left[\sum_q \sum_t \sum_m V_{qtm}^T (E_{qtm}^{BT} + E_{qtm}^{LT}) + M^T \right] \\ & + \sum_r \sum_q \sum_t b_{qr}^T u_q^r K_{qtr}^T \end{aligned} \quad (10)$$

假設載運一位旅客的間接營運成本為 S_{qr} ，則總間接營運成本

$$IOC_w^T = \sum_r \sum_q \sum_t F_r^T u_q^r S_{qr} \quad , \quad 營運總成本 TC_w^T = DOC_w^T + IOC_w^T .$$

航空公司之決策成本包括新增/新租航機之購買/租賃成本，淘汰/停租舊航機之舊機殘值/違約成本。以 D_{qtm}^{Tw} 表示單位航機之市場殘值， Z_{qtm}^{Tew} 表示至合約租賃年限尚有 e 年

之單位航機違約成本，則航空公司決策產生之成本

$$\begin{aligned}
UC_w^T &= \sum_q \sum_t \sum_m r_{qtm}^{BT} N_{qtm}^{BT} P_{qtm}^W X_g^T \\
&+ \sum_q \sum_t \sum_m S_{qtm}^{LT} N_{qtm}^{LT} R_{qtm}^{Tdw} \\
&- \sum_q \sum_t \sum_m (1 - r_{qtm}^{BT}) | N_{qtm}^{BT} | D_{qtm}^{Tw} \\
&+ \sum_q \sum_t \sum_m (1 - S_{qtm}^{LT}) | N_{qtm}^{LT} | Z_{qtm}^{Tew}
\end{aligned} \tag{11}$$

其中 r_{qtm}^{BT} 與 S_{qtm}^{LT} 為虛變數，當 $N_{qtm}^{BT} / N_{qtm}^{LT}$ 大於 0 時， $r_{qtm}^{BT} / S_{qtm}^{LT}$ 之值為 1，否則為 0。

根據[21]的研究指出，租賃公司的期望租金收入必定大於同時期間購買航機之成本，依據上述之分析，構建航空公司決策購買或租賃航機之數量的判斷條件式，

$$\frac{\partial(\sum_{T=j}^{T=k} \sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{LT} R_{qtm}^{Tdw})}{\partial E_{qtm}^{LT}} N_{qtm}^{LT} > \frac{\partial(\sum_{T=j}^{T=k} \sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{BT} P_{qtm}^W X_g^T)}{\partial E_{qtm}^{BT}} N_{qtm}^{BT}$$

(12)

表航空公司在時區 j 至時區 k 之內，決策增加租賃航機數所產生之邊際成本將高於增加購買航機數所產生之邊際成本。

航機年資、累積飛航哩程數及航機利用率為三項影響決策航機淘汰或停租的主要因素，若該航機已達使用最高年限或最大可使用哩程數時，也會出現淘汰或停租該架航機的決策。因此航空公司決策淘汰或停租航機之條件式為 $W_{qtm}^T = [(\frac{\dot{t}}{y} X_1) \frac{m}{G} X_2] \quad \forall t', m$ 。 W_{qtm}^T 為決策是否淘汰或停租該架航機的判斷值，若其值為 0，則表示應淘汰該架航機。其中 X_1 與 X_2 為對應 $\frac{\dot{t}}{y}$ 及 $\frac{m}{G}$ 的虛變數，當 $\frac{\dot{t}}{y} (\frac{m}{G})$ 之值為 1 時，其相對應之虛變數 $X_1 (X_2)$ 值為 0，否則為 1。

令兩相鄰時區之預期旅客需求量的波動情況配對可能發生機率為 p_w^T ，表前一時區 $T-1$ 所發生之預期旅客需求量波動情況 w 已確定時，該時區 T 之預期旅客需求量波動情況發生之機率，隨時區及預期旅客需求量波動的不同而有所變化。本研究參考[12]之模式，以 C_w^T 分別表對應的成本， I_r^T 表示航空公司因於航線 r 運能不足而讓每位旅客因不便所增加的旅行成本， J_r^T 表因多餘產能而衍生的每位旅客收益損失，並引入一懲罰值函數

$$P_w^T(f_r^T) = \begin{cases} (F_r^T - f_r^T) J_r^T, & w=1 \\ 0, & \text{for } w=2 \\ (f_r^T - F_r^T) J_r^T. & w=3 \end{cases} \tag{13}$$

代表因實際經濟景氣狀況與預測旅客需求量配合狀況不同時所產生的懲罰值。當 $w=1$ 時，表航空公司高估了未來的旅客需求量，此時未來的旅客需求為灰色拓撲預測之旅客需求量往下調整；第二種情況為 $w=2$ ，表航空公司準確預估了未來的旅客量，因此以灰色拓撲預測所得到之航空旅客需求量正好等於未來的旅客需求量，故不會出現預期旅客需求量波動的情形；若當 $w=3$ 時，表示航空公司低估了未來的旅客需求量，故以灰色拓撲預測所得出的預期旅客需求量要往上調整才能反應未來的旅客需求量。另令 $C_T(S_T, d_T^w)$ 表示在時區 T 起始時，機隊狀況集合為 S_T ，選擇機隊新增/汰換決策集合 d_T^w 之後，時區 T 結束時的期望成本。而 $C_T^*(S_T) = \min C_T(S_T, d_T^w)$ 表在每個航機新增/汰換決策集合 d_T^w 下， $C_T(S_T, d_T^w)$ 的最小值即為 $C_T^*(S_T)$ 之值，由此可得 $C_T(S_T, d_T^w) = \sum p_w^T [C_w^T + C_{T+1}^*(S_{T+1})]$ ，此式即存有動態遞迴觀念。

因此本研究所建構之模式如下：

$$\min_T \sum_{d_T} \min\{C_T(S_T, d_T^w)\} =$$

$$\min \sum_T \min_{d_T} \left\{ \sum_{w=1}^3 p_w^T [C_w^T + C_{T+1}^* (S_{T+1})] \right\} \quad (14a)$$

$$\text{s.t.} \quad C_w^T = TC_w^T + UC_w^T + P_w^T (f_r^T) \quad (14b)$$

$$\sum_q \sum_t \sum_m u_q^r (E_{qtm}^{BT} + E_{qtm}^{LT}) Q_q K_{qtr}^T \geq F_r^T \quad \forall T, r \quad (14c)$$

$$\sum_q \sum_t B_q^r K_{qtr}^T \leq \sum_q \sum_t \sum_m (E_{qtm}^{BT} + E_{qtm}^{LT}) u_{qtm}^T \quad \forall T, r \quad (14d)$$

$$E_{qtm}^{BT} = E_{qtm}^{BT-1} + N_{qtm}^{BT-1}, \quad E_{qtm}^{LT} = E_{qtm}^{LT-1} + N_{qtm}^{LT-1} \quad (14e)$$

$$\frac{\partial \left(\sum_{T=j}^{T=k} \sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{LT} R_{qtm}^{Tdw} \right)}{\partial E_{qtm}^{LT}} N_{qtm}^{LT} \quad (14f)$$

$$> \frac{\partial \left(\sum_{T=j}^{T=k} \sum_q \sum_t \sum_m E_{qtm}^{BT} P_{qtm}^w X_g^T \right)}{\partial E_{qtm}^{BT}} N_{qtm}^{BT} \quad (14g)$$

$$\begin{cases} E_{qtm}^{BT} \geq N_{qtm}^{BT} & \text{If } N_{qtm}^{BT} < 0 \\ E_{qtm}^{LT} \geq N_{qtm}^{LT} & \text{If } N_{qtm}^{LT} < 0 \end{cases} \quad (14g)$$

$$N_{qtm}^{BT} \text{ and } N_{qtm}^{LT} \text{ are integers, } \forall q, t, m \quad (14h)$$

式(14a)表航空公司在時區 T 的最小期望成本總和，式(14b)為成本關係式，式(14c)為各時區於各航線之機隊容量需滿足預期旅客需求量，式(14d)表機隊航機可利用時間必須滿足營運航線的總飛行時間，式(14e)表各時區的機隊組成為該時區起始之現有機隊集合與機隊更新決策集合之關係，式(14f)為租賃與購買飛機數目決策式，式(14g)限制決策淘汰的航機數目不能超過其所擁有的航機數目，式(14h)為決策變數之整數限制式。

六、結果與討論

在應用灰色理論拓撲預測構建航空客運旅客需求量預測模式中，首先蒐集歷年來各主要航線之旅客需求量，運用灰色理論拓撲預測得出航空客運旅客需求量之預測波形結果，將此預測結果進行校估檢定，以驗證拓撲預測模式之可用性。所預測之航線為台北-洛杉磯、台北-舊金山等八條航線，以民國 82 年 6 月至民國 90 年 12 月間每年總旅客量為基礎資料，預測從民國 91 年 1 月至 98 年 12 月之旅客需求量資料。圖 1 為其中之一航線台北-洛杉磯之預測結果，研究結果顯示，此八條航線從民國 91 年至 98 年間之預測旅客需求量的確具有景氣循環趨勢，以地區性分別來看，北美航線如台北洛杉磯和台北-舊金山的經濟景氣循環狀況一致，而亞洲地區航線則有台北-東京、台北-香港和台北-曼谷的經濟景氣循環狀況一致。由此研究結果顯示以灰色拓撲預測對航空旅客需求量進行估計，模式具有一定之準確度，且預測結果的確表現出隨經濟景氣循環之特性。

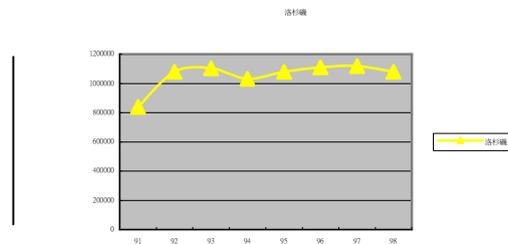


圖 1. 台北-洛杉磯航線年旅客需求量

另外，於驗證隨機性航空公司網路規劃模式之可行性方面，本研究以國內一國籍航空公司國際客運網路為對象進行範例分析。為簡化分析，擇定分析範圍為包括台北之 9 個城市對，假設機隊僅有 13 架 B747-400 型(394 座位)、12 架 A300 型(268 座位)客機進行未來西元 2003 年之航空網路設計規劃。本研究參考美國各航空公司機型營運成本資料估算，並依據[9]之調查推估旅客時間價值，平均旅客旅行時間價值為 23.15 \$/hr，旅

客班次延誤時間價值為 30.29 \$/hr。並依作者過去研究[11]之城市對運量預測為基礎，構建 P1 進行航空網路設計規劃。

本研究假設每個起迄對中歷年的正常月運量波動型態多為相似，(月運量波動起伏型態各年多互為相似)。本範例中，僅以過去 1996-1999 年間之各個台灣地區國際起迄航線出入境月運量資料為樣本，先將月運量值加以均值化，以求得各月運量相對於該年平均月運量之比率值 f'_{rs} / \bar{f}_{rs} ，令 $t'_{rs} = f'_{rs} / \bar{f}_{rs}$ 為一隨機變數，代表歷年月份 t 之比率值可能變動，而令 \bar{t}'_{rs} 為 t'_{rs} 之樣本平均值， $t(t'_{rs})$ 為其樣本標準差。在此範例分析中，本研究假設運量在月份 t 之可能變動呈樣本平均值 \bar{t}'_{rs} 、樣本標準差 $t(t'_{rs})$ 之常態分配。表三列示各月份各起迄對航線之近似 99.98% 信賴度區間之月運量相對平均值比率波動(i.e. interval $\bar{t}'_{rs} \pm 3.49 t(t'_{rs}) / \sqrt{6}$)。為進行可靠度評估，本研究首先假設每個起迄對中最低可接受承載率為 55%，即 $\underline{I}_{rs} = 0.55$ 。而最高可接受承載率則訂為 $\bar{I}_{rs} = 0.9, 0.95$ 或 1，以此進行數值實驗，以分析不同 \bar{I}_{rs} 值對可靠度結果之影響。首先假設所有起迄對均僅為正常月運量波動，並針對規劃年中每個月份各起迄對估算機率

$\Pr[\underline{I}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rs pq} / \bar{f}_{rs} \leq t'_{rs} \leq \bar{I}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rs pq} / \bar{f}_{rs}]$ ，此機率值用以估計月份 t 之 operating 機率，即 $\Pr[f'_{rs} | z(f'_{rs}) = 1]$ in month t. 則可靠度可依

$R_{rs}(f_{rs}) = \sum_{t=1}^{12} 1/12 \times \Pr[\underline{I}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rs pq} / \bar{f}_{rs} \leq t'_{rs} \leq \bar{I}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rs pq} / \bar{f}_{rs}]$ 計算。表 1 列出各起迄對航線在規劃年正常月運量波動下之可靠度。從表 1 中，航線 TPE-FRA, FRA-TPE and TPE-NYC 為相對較低可靠度。在本範例所引用的航空公司國際航線網路，因為大多數的起迄航線運量月份間波動高低值變異並非很嚴重到使規劃的航線班機頻次不可靠，而這些大多數起迄對航線具高可靠度。在上述這些評定為相對不可靠起迄對中 TPE-FRA, FRA-TPE and TPE-NYC，其旺季與淡季月份可得如下：

TPE-FRA: Traffic peak month: Jul.

Traffic valley months: Nov., Dec. and Jan.

FRA-TPE: Traffic peak month: Jul. and Aug.

Traffic valley months: Nov., Jan. and Mar.

TPE-NYC: Traffic peak interval: Jun., Jul., Aug. and Dec.

Traffic valley interval: Feb. and Mar.

表 1 因應 2003 年月運量正常波動下之航線班機頻次可靠度評估結果

OD pairs	Reliability (R_{rs})		
	Acceptable max. and min. load factors		
	$\underline{I}_{rs} = 0.9,$ $\bar{I}_{rs} = 0.55$	$\underline{I}_{rs} = 0.95,$ $\bar{I}_{rs} = 0.55$	$\underline{I}_{rs} = 1,$ $\bar{I}_{rs} = 0.55$
TPE-HKG	0.9863	0.9991	0.9997
TPE-TYO	0.9674	0.9900	0.9969
TPE-BKK	0.9422	0.9753	0.9830
TPE-SIN	0.9532	0.9891	0.9941
TPE-LAX	0.8902	0.9160	0.9264
TPE-SFO	0.9224	0.9463	0.9580
TPE-NYC	0.7650	0.7939	0.8077
TPE-FRA	0.6016	0.6244	0.6392
TPE-AMS	0.8494	0.8508	0.8509

本研究並分析一假設情境，假設於起迄對航線 TPE-TYO 因過年期間(from Jan. 15 to the middle of Feb.)具突增之旅運量發生，此假設情境之相關資料列於表 2。前述航線因應此運量突增情架下之可靠度評估結果，則列於表 3。綜上，可靠度較低而需進一步因應調整之月份，如下： $\mathbf{t} = \{I_{TPE-NYC}^{0+} \cup I_{TPE-NYC}^{0-} \cup I_{TPE-FRA}^{0+} \cup$

$I_{TPE-FRA}^{0-} \cup I_{TPE-AMS}^{0+} \cup I_{TPE-AMS}^{0-} \cup I_{TPE-TYO}^1\} = \{1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 12\}$ 。而各調整月份

中，需調整之起迄對航線如下：一月： $J^1 = \{TPE-TYO, TPE-FRA, TPE-AMS\}$ ，二月：

$J^2 = \{TPE-TYO, TPE-NYC\}$ ，三月： $J^3 = \{TPE-NYC, TPE-FRA\}$ ，六月： $J^6 = \{TPE-NYC\}$

七八月： $J^7 = J^8 = \{TPE-NYC, TPE-FRA, TPE-AMS\}$ ，十月： $J^{10} = \{TPE-NYC\}$ ，十一月： $J^{11} = \{TPE-FRA, TPE-AMS\}$ ，及十二月： $J^{12} = \{TPE-NYC, TPE-FRA, TPE-AMS\}$ 。再者，計算上述需調整起迄對航線於各調整月份之期望調整運量，並求解規劃模式，可得因應調整結果。

表 2 起迄對 TPE-TYO 假設之運量異常波動情境相關資料

Abnormal traffic distributions			
Abnormal months (from Jan. 25)	State occurrence duration		
	$\nu_1^1 = 0.5$ (15 days)	$\nu_1^2 = 0.73$ (22 days)	$\nu_1^3 = 0.93$ (28 days)
$\rho_1 = 0.5$	$\rho_2 = 0.3$	$\rho_3 = 0.2$	
$t_1^* = 0.806$			
Jan.	$M(45934, 4540)$	$M(45934, 4540)$	$M(45934, 4540)$
Feb.	$M(47466, 5125)$	$M(49444, 5330)$	$M(51421, 5535)$

表 3 因應 2003 年起迄對航線 TPE-TYO 假設運量異常波動下之航線班機頻次可靠度評估結果

Acceptable max. and min. load factors	Reliability over the planning year, $E[R_{rs}]$				
	$\Pr(s_1) = 0.6$	$\Pr(s_1) = 0.7$	$\Pr(s_1) = 0.8$	$\Pr(s_1) = 0.9$	
$\underline{l}_{rs} = 0.9, \overline{l}_{rs} = 0.55$	0.9168	0.9084	0.9000	0.8916	
$\underline{l}_{rs} = 0.95, \overline{l}_{rs} = 0.55$	0.9421	0.9426	0.9430	0.9435	
$\underline{l}_{rs} = 1, \overline{l}_{rs} = 0.55$	0.9706	0.9706	0.9706	0.9706	
Acceptable max. and min. load factors	Reliability in abnormal months				
	Month	$\Pr(s_1) = 0.6$	$\Pr(s_1) = 0.7$	$\Pr(s_1) = 0.8$	$\Pr(s_1) = 0.9$
$\underline{l}_{rs} = 0.9, \overline{l}_{rs} = 0.55$	Jan.	0.7639	0.7246	0.6853	0.6459
	Feb.	0.6296	0.5678	0.5061	0.4444
$\underline{l}_{rs} = 0.95, \overline{l}_{rs} = 0.55$	Jan.	0.8810	0.8611	0.8413	0.8214
	Feb.	0.7429	0.7000	0.6572	0.6143
$\underline{l}_{rs} = 1, \overline{l}_{rs} = 0.55$	Jan.	0.9537	0.9460	0.9383	0.9306
	Feb.	0.8460	0.8204	0.7947	0.7690

表 4 列出起迄對航線 TPE-NYC, TPE-FRA, TPE-AMS and TPE-TYO 之因應調整成本。表 4 亦列出調整之航線班機頻次對應之調整成本之期望懲罰值。表 4 顯示，因應調整成本均小於期望懲罰值，亦即，因應可能運量正常或異常波動下，對航線班機頻次進行調整確實可獲得較高之利益。

進一步，比較航空公司調整與否之總航線網路成本(包括調整後增加之成本以及不調整之相對損失成本)，來判別調整與否之效益。比較結果列於表 5。

表 4 因應月運量波動下之航線班機頻次調整規劃結果

TPE-NYC		Monthly flight frequencies (two-way)								
Routes	Aircraft	Initial proposed	Months							
			Feb.	Mar.	Jun.	Jul.	Aug.	Oct.	Dec.	
TPE-NYC	B747-400	0	0	0	0	0	0	0	0	
TPE-TYO-NYC	B747-400	20	17	17	23	23	23	17	23	
Adjustment costs (\$)			11400	11400	25000	25000	25000	11400	25000	
Expected penalty values (\$)			12720	12720	39487	39487	39487	12720	39487	
Judgement			Adjust							
TPE-FRA		Monthly flight frequencies (two-way)								
Routes	Aircraft	Initial proposed	Months							
			Jan.	Mar.	Jul.	Aug.	Nov.	Dec.		
TPE-FRA	B747-400	0	0	0	0	0	0	0		
TPE-BKK-FRA	B747-400	9	8	8	10	10	8	8		
Adjustment costs (\$)			3000	3000	7800	7800	3000	3000		
Expected penalty values (\$)			6687	6687	27691	27691	6687	6687		
Judgement			Adjust							
TPE-AMS		Monthly flight frequencies (two-way)								
Routes	Aircraft	Initial proposed	Months							
			Jan.	Jul.	Aug.	Nov.	Dec.			
TPE-AMS	B747-400	0	0	0	0	0	0			
TPE-BKK-AMS	B747-400	42	36	51	51	36	36			
Adjustment costs (\$)			2670	6078	6078	2670	2670			
Expected penalty values (\$)			2496	9126	9126	2496	2496			
Judgement			Adjust							
TPE-TYO		Monthly flight frequencies (two-way)								

Routes	Aircraft	Initial proposed	Months	
			Jan.	Feb.
TPE-TYO	B747-400	133	161	161
	A300	0	0	0
Adjustment costs (\$)			431088	431088
Expected penalty values (\$)			105392	105392
Judgement			Adjust	

表 5 起始航空網路規劃因應運量波動下調整或未調整比較結果

Routes	Aircraft	Initial proposed	Monthly flight frequencies (two-way)									
			Months									
			Jan.	Feb.	Mar.	Jun.	Jul.	Aug.	Oct.	Nov.	Dec.	
TPE-HKG	B747-400	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	
	A300	239	239	239	239	239	239	239	239	239	239	
TPE-TYO	B747-400	133	161	161	133	133	133	133	133	133	133	
	A300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TPE-BKK	B747-400	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	
	A300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TPE-SIN	B747-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	A300	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	
TPE-LAX	B747-400	41	41	41	41	41	41	41	41	41		
TPE-TYO-LAX	B747-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TPE-SFO	B747-400	21	21	21	21	21	21	21	21	21		
TPE-TYO-SFO	B747-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TPE-NYC	B747-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TPE-TYO-NYC	B747-400	20	20	17	17	23	23	23	17	20	23	
TPE-FRA	B747-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TPE-BKK-FRA	B747-400	9	8	9	8	9	10	10	9	8	8	
TPE-AMS	B747-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TPE-BKK-AMS	B747-400	42	36	42	42	42	51	51	42	36	36	

Initial objective function value +	4834423	4816210	4716566	4726066	4845238	4845238	4939908	4718551	4758179
Total expected penalty values (\$):									
Adjusted objective function value +	4728708	4788658	4693865	4722871	4844343	4844343	4681844	4672451	4672834
Total extra adjustment costs (\$):									

表 5 顯示，調整後之總成本小於不調整之成本與損失和，顯示因應運量波動下若航空公司進一步對航線班機頻次作適當之因應調整將獲得更高之利益。總言之，可靠度分析與因應調整可提供在航空網路設計後進一步之評估與分析，以因應不確定性之運量波動。此航線班機頻次調整可提供航空公司規劃者在面臨可能發生之正常/異常運量波動，進行因應調整策略之參考。

最後，於航機採購/汰換時程動態規劃模式中，本研究以國內一家國籍國際航空公司 A 航為對象進行實證分析，在旅客需求量預測方面，使用灰色拓撲預測建立旅客需求量預測模式，並配合馬可夫鏈轉移機率模式估算出預估旅客需求量不準確時，其值上下波動的機率，表 6 為其中之一台北-新加坡航線每年狀態轉移機率表。

表 6 台北-新加坡航線之每年狀態轉移機率

年份 (狀態)	台北-新加坡		
	落在各狀態的機率		
	1	2	3
91 (1)	0.47	0.23	0.30
92 (2)	0.23	0.60	0.17
93 (1)	0.58	0.14	0.28
94 (2)	0.22	0.45	0.33
95 (1)	0.50	0.31	0.20
96 (1)	0.47	0.28	0.25
97 (2)	0.36	0.50	0.14
98 (1)	0.58	0.14	0.28

將預測旅客需求量、經濟景氣循環變化機率值及機隊起始狀況代入本研究所構建之模式求解，最後可得到的資訊為 A 航空公司在最小化總期望成本下，其每個時區、不同經濟景氣循環時的新購、新租、淘汰或停租航機機型及數目。機率性動態規劃模式求解可以下列步驟說明

Step1: 由最後一個時區開始求解，在滿足預期旅客需求量之前提下，最小化該時區之三種預期旅客需求量的波動情況下的營運成本、機隊更新成本及懲罰值成本之總和，得一最佳解。

Step2: 將 Step1 之三種預期旅客需求量的波動情況下所得出之成本值作為前一個時區之

三種預期旅客需求量的波動情況之起始成本值，再加上這個時區之三種預期旅客需求量波動情況下所對應的個別成本，乘上波動情況發生機率。在滿足預期旅客需求量的前提之下，最小化該時區之三種預期旅客需求量波動情況下的營運成本、機隊更新成本及懲罰值成本之總和，可得一最佳解。

Step3: 重複 Step2，繼續往前一個時區求解，直到第一個時區求解完畢，整個模式即求解完成。而模式之最佳解即為第一個時區求解完畢時之機隊規劃結果及成本。

針對 A 航空公司其中八條航線、四種機型做機隊航機更新時程規劃的結果，決策期間為民國 91 年至 98 年，模式所求解出之這八年的航空公司總成本為 24396866000 美元。圖 2 為其中之一台北-洛杉磯航線機隊規劃總成本及兩個時區間的預測旅客需求量上下波動情形之發生機率。

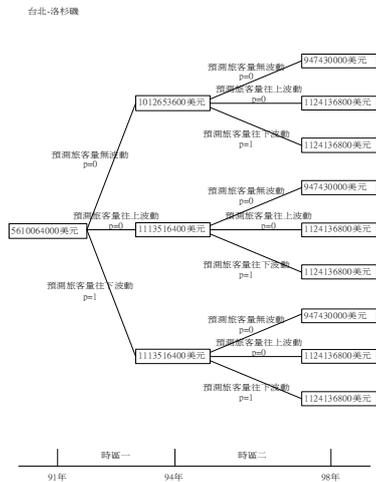


圖 2. 台北-洛杉磯各時區成本及原始機率

結果顯示該模式的確能夠反應航空公司在面對旅客需求量變化及經濟景氣波動時，對航空公司之成本及機隊航機規劃決策之影響，並同時顯示在每個時區之三種旅客需求量波動情況下，其所對應的發生機率及航空公司總成本。在不同年與經濟景氣循環情況下，各航線所擁有之航機數及使用航機容量的比率將會有所不同，為達到充分利用航機容量，故兩航線可能使用同一架航機營運，而就同一航線而言，也傾向於簡化機型，而以一種航機營運。另由本研究之灰色拓撲預測模式之結果可發現，航空旅客需求量的確存在經濟景氣狀況之波形變化，而以馬可夫鏈預測模式對灰色拓撲預測結果作校正及估計其預期旅客量的上下波動情況機率，將能夠提高灰色拓撲預測模式之預測精確度及擴大其應用範圍。

七、計畫成果自評

本研究內容符合原計畫所提內容，研究成果已達成原計畫預期第一年目標。本研究成果具體貢獻：(1)航空客運量與景氣循環波形預測結果將可預測航空市場運量、推估景氣變化對航空旅運需求之影響關係，預測結果進一步與其他統計預測方法比較，驗證模式準確度。本研究運量預測與景氣循環預測模式，可進一步作為其他產業市場分析與預測研究之參考。(2)航空公司隨機性網路規劃模式可在需求變動之考慮下，評估航空網路航線班機頻次規劃結果之可靠度，並透過航線班機頻次調整預先程序，規劃出各起迄對、因應淡旺季、異常狀況之航線班機頻次結果。本研究模式有別於過去相關研究在起迄對需求配置固定下構建之確定性航空網路規劃問題，規劃結果將能反應不確定性需求變動之影響，預期可提供較高之決策彈性。(3)航空公司機隊動態規劃模式，可讓航空公司在分析未來景氣發展可能趨勢下，規劃各時區機隊，決定新購/新租、淘汰/停租何種機型、架數、汰換時程，分析各種決策的成本與可能的後續影響。規劃成果可提供較具決策彈性之機隊規劃參考。在學術方面，本研究可提供相關航空公司運量預測、網路與機隊規劃問題與績效可靠度相關議題之參考；在實務方面，研究結果可提供航空公司在不確定性、複雜之多維決策空間中，進行整體網路與機隊規劃之決策支援，以作為航空

公司中、長期營運策略制定與短期營運規劃之參考基礎。此外，本研究第一年成果已接受發表於國際學術期刊一篇[12]、國際會議與期刊論文審查一篇[13]、國內研討會一篇[1]，而航空公司機隊動態規劃模式部分亦正整理投稿國際學術期刊中。

八、參考文獻

- [1] 許巧鶯、劉素妙、黃鵬先(2002)「航空公司策略聯盟之機隊規劃」，中華民國運輸學會第十七屆學術論文研討會論文集，873-882 頁，民國九十一年十一月。
- [2] 張有恆、楊弘道 (1996)「航空公司飛機型式選擇之研究」，運輸計畫季刊，第二十五卷第一期，頁 93-120，民國 85 年 3 月。
- [3] 許巧鶯、溫裕弘 (1997)「台灣地區國際航空客運量之預測—灰色預測模式之應用」，運輸計畫季刊，第二十六卷，第三期，525-556 頁，民國 86 年。
- [4] 許巧鶯 (1998)「航空運量預測與航空網路設計之研究—灰色理論之應用」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，民國 87 年 8 月。(NSC 87-2211-E-009-012)
- [5] Charnes, A. and Cooper, W. W. (1959) "Chance Constrained Programming," *Management Science*, Vol. 6, pp. 73-89.
- [6] Deng, J.(ed), Guo, H., Zhou, C., Meng, W., Xu, S., Xiong, J., Chen, M., Xu, X., Xiao, K., Zhang, Y., Shi, G., Wu, Z. and Zhang, J. (1988) *Essential Topics on Grey System: Theory and Application*, Huazhong University of Science and Technology, China Ocean Press, Beijing, China.
- [7] Dennis, N. (2000) "Scheduling Issues and Network Strategies for International Airline Alliances," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 6, pp. 75-85.
- [8] Furuichi, M. and Koppelman F. S. (1994) "An analysis of air travelers' departure airport and destination choice behavior," *Transportation Research A*, Vol. 28, pp. 187-195.
- [9] Hane, C. A., Barnhart, C., Johnson, E. L., Matsten, R. E., Nemhauser, G. L., and Sigismondi, G. (1995) "The Fleet Assignment Problem: Solving A Large-scale Integer Program," *Mathematical Programming*, Vol. 70, pp. 211-232.
- [10] Hsu, C. I. and Wen, Y. H. (1998) "Improved Grey Prediction Models for Trans-Pacific Air Passenger Market," *Transportation Planning and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 87-107.
- [11] Hsu, C. I. and Wen, Y. H. (2000) "Application of Grey Theory and Multiobjective Programming towards Airline Network Design," *European Journal of Operational Research*, Vol. 127, No. 1, pp. 44-68.
- [12] Hsu, C. I. and Wen, Y. H. (2002) "Reliability Evaluation for Airline Network Design in Response to Fluctuation in Passenger Demand," *Omega - The International Journal of Management Science*, Vol. 30, No. 3, pp.197-213.
- [13] Hsu, C. I. and Liu, S. M. (2003) "Predicting City-Pair Air Passenger Traffic Using Grey Topological Forecasting Model," accepted for EASTS Journal Review and presentation at the 5th EASTS CONFERENCE, Japan, Fukuoka, October 29-November 1, 2003.
- [14] Jin, D. and Kite-Powell, H. L. (2000) "Optimal fleet utilization and replacement," *Transportation Research Part E*, Vol. 36, pp. 3-20.
- [15] Kanafani, A. (1981) "Aircraft Technology and Network Structure in Short-haul Air Transportation," *Transportation Research*, Vol. 15A, pp. 305-314.
- [16] Kanafani, A. and Ghobrial, A. (1985) "Airline Hubbing—Some Implications for Airport Economics," *Transportation Research-A*, Vol. 19A, No. 1, pp. 15-27.
- [17] Kane, R. M. (1990) *Air Transportation*, IA: Kwndall/Hunt.
- [18] O'Kelly, M. E. (1986) "The Location of Interacting Hub Facilities," *Transportation Science*, Vol. 20, No. 2, pp.

92-106.

- [19] O'Kelly, M. E., Skorin-Kapov, D. and Skorin-Kapov, J. (1995) "Lower Bounds for the Hub Location Problem," *Management Science*, Vol. 41, pp. 713-721.
- [20] Oum, T. H. and Park, J. H. (1997) "Airline Alliances: Current Status, Policy Issues, and Future Directions," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 3 (3), pp. 133-144.
- [21] Oum, T. H., Zhang, A. and Zhang, Y. (2000) "Optimal Demand for Operating Lease of Aircraft," *Transportation Research Part B*, Vol. 34, pp. 17-29.
- [22] Powell, W. B. and Carvalho, T. A. (1997) "Dynamic Control of Multicommodity Fleet Management Problems," *European Journal of Operational Research*, Vol. 98, pp. 522-541.
- [23] Teodorovic, D. (1986) "Multi-Attribute Aircraft Choice for Airline Network," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 112, pp. 634-646.
- [24] Teodorovic, D., Kalic, M. and Pavkovic, G., (1994) "The Potential for Using Fuzzy Set Theory in Airline Network Design," *Transportation Research*, Vol. 28B, No. 2, pp. 103-121.
- [25] Van Hilten, O. (1991) "The Optimal Lifetime of Capital Equipment," *Journal of Economic Theory*, Vol. 55, pp. 449-454.
- [26] Wells, A. T. (1993) *Air Transportation: A Management Perspective*, Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.