

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 航空公司貨運網路之航線運量與頻次規劃之研究 The Study on Route Demand and Flight Frequency for Air Carrier Cargo Network

計畫類別：個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2416-H-009-033

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

計畫主持人：許巧鶯

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學運輸工程與管理學系

中華民國 90 年 8 月 1 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 航空公司貨運網路之航線運量與頻次規劃之研究

### The Study on Route Demand and Flight Frequency for Air Carrier Cargo Network

計畫編號：NSC 89-2416-H-009-033

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：許巧鶯(cihsu@cc.nctu.edu.tw) 國立交通大學運輸工程與管理學系

計畫參與人員：李俊勳、溫裕弘、黃惠如等

#### 一、中文摘要

航空貨運需求與貨運網路航線頻次、機型規劃及航空公司間之競爭有密切的供需互動關係。本研究針對國際航空公司航空貨運網路，分析航空公司在競爭環境下，因應需求變動及其他競爭航空公司之競爭策略與競爭行為，以規劃航空貨運航線之最適營運頻次與機型。就多對多航空網路型態，考慮航空公司經營環境、營運條件、競爭航空公司之競爭策略與行為、及貨主託運貨物特性，分析上述因素對航空公司在規劃航線頻次與機型時的影響。在需求面，考慮貨主之貨物起迄點、貨物價值、貨運量、託運時間、及運送航線，並以運輸成本與存貨成本總和最小為目標，構建貨主對運送方案選擇模式，以分析貨物特性、航空公司貨運航線機型與頻次規劃、及運送費率等的改變，對貨主於運送方案選擇的影響。繼而考慮競爭航空公司是否對目標航空公司貨運航線頻次與機型調整之反應下，分別構建航空公司航線頻次與機型規劃模式及航空公司貨運航線庫諾競爭模式，此二模式並分別與貨主對運送方案選擇模式整合，在供需互動架構下，以最大化利潤為目標，規劃目標航空公司於競爭航空公司採不同競爭策略與行為下之最適航線頻次與機型。最後以一航空公司之貨運網路為例驗證本模式在實際應用之可行性，並針對模式中重要變數進行敏感度分析。結果顯示，貨主的運輸成本與航空公司於各航線上規劃之營運機型、起迄機場距離有關；貨物若須經空運中心轉運，貨主可選擇空運中心與起、迄機場兩者間，距離差異最小的運送路線，以降低運輸成本；隨貨物時間價值增加，貨主傾向選擇直運路線以節省其存貨成本。此外，航空公司各貨運航線初始機型的規劃及運送費率訂價乘數的制訂，亦影響航空公司於競爭市場上利潤水準與市場佔有率的發展。

關鍵詞：供需互動、航空貨運、航空公司競爭、航空貨運網路設計

#### Abstract

The interactions among airline cargo demand, route flight frequency, and aircraft type are of such significance to necessitate using system analysis approach on airline cargo network problems. Past studies concerning airline network design, and flight frequency determination were mostly focused

on developing mathematical programming models, or aimed at designing solution algorithms for above models. Few studies integrated changes in cargo demand resulted from the competition between airlines into route flight frequency and aircraft type determination problems for airline cargo network. This study explores airline cargo demand and network design problem via constructing models based on the combination of network model and economic theory to reflect the close demand-supply interaction in a competitive air cargo market. This study develops a series of models for determining the optimum flight frequency and aircraft type on each of all routes operated by an air cargo carrier in a competitive environment. The demand-supply interaction model is composed of two submodels, which include a shipping alternative choice model for shippers and a route aircraft type and flight frequency planning model for airlines. The Cournot-based competition model that also takes demand-supply interaction into account is developed to estimate an object airline's response to the competition strategies of its competitors. The shipping alternative choice model assumes shippers with different demand characteristics choose the alternative with the least transportation and inventory costs among a choice set which comprises a variety of alternatives represented by competitive airline route services. The route aircraft type and flight frequency planning model is formulated using mathematical programming model by maximizing airlines' profits to determine the optimum aircraft type and flight frequency on each route under many-to-many demand pattern. The demand-supply interactions between air carriers and shippers are analyzed by integrating two submodels. The study also designs the solution algorithm to determine the optimal air cargo flight frequency and aircraft type on each of all routes. Finally, we illustrate a real airline cargo network and collect necessary data to prove the feasibility of the model and to show the significance of results. The results of this study point out key factors affecting shippers' choice behavior. Shippers are shown to prefer direct shipping routes when their freight value is raised. The location of hub will also affect the shippers' shipping alternative choices. Results in this study also show that competitive demand-supply interactions will converge on most routes.

Keywords: Demand-Supply Interaction, Air Cargo, Airline Competition, Air Cargo Network Design

#### 二、緣由與目的

近年來產業朝向全球化及跨國企業發展，使航空貨運需求增加，航空公司貨運部門也因而逐漸發展。此外，在加入WTO及政府積極推動台灣成為亞太營運中心下，國外航空公司之加入競爭，亦對原僅由少數業者經營的航線市

場造成衝擊。航線頻次規劃對航空公司而言為中長期規劃工作，規劃結果不僅影響航空公司營運成本，也影響其所提供之服務水準。航空公司航線頻次規劃與航線機型選擇為同時存在，航空公司選擇較大型航機或較低航線頻次，可減少其航機的飛行次數並降低營運成本，但因貨物等待適當航班運送時間拉長，造成貨主之存貨成本增加，降低航空公司的服務水準；反之，當航空公司選擇小型航機或較高航線頻次時，因貨物等待運送時間縮短，可降低貨主之存貨成本，提昇航空公司的服務水準，然而航空公司卻需承擔更高的營運成本以維持高航線頻次的營運。此外航空公司在規劃各航線之頻次、機型、及制訂各起迄間之運送費率時，除了考慮貨主對各航空公司貨運航線的選擇行為，亦需考慮市場上其他航空公司是否因應調整各自航空貨運網路各航線的頻次與機型，而造成該航空公司規劃之各貨運航線最適營運頻次與機型改變。因此，航空貨運需求與航空公司航線頻次供給之間存有密切之供需互動關係，故以系統的觀點分析、研究航空貨運網路實有其必要性。

過去有關航空網路的研究，在航空貨運部分主要為空運中心位置的選擇，如：[6][15][16]等，另外[13]則加入支線與多次降落的情況分析航空貨運網路，然因將問題以0-1整數規劃問題表示，故需較長的求解時間。一般航空網路設計問題定義為：已知一規劃時期之起迄對需求配置，設計航空公司航線網路與規劃航線班機頻次[11][12][18]。相關航空客運網路之航線班機頻次與機型規劃研究，則有[8][9][11][17][18]。文獻[11]同時進行航線班機頻次規劃與航線班機機型指派，規劃航空公司客運網路中各個航線不同機型之最適航線班機頻次。其中，將競爭性網路設計問題應用在航空運輸的文獻則較少，目前以應用在大眾運輸問題上為多，如[7][10]等。而[19]以一網路均衡模式，探討公車業者在營運路線的班次規劃與旅運者對公車路線選擇行為之間的互動關係。另外[14]曾利用競爭性網路設計問題探討運輸業者彼此之間的價格競爭對消費者的選擇、業者價格的制訂與運輸系統設計的影響。而[5]從規劃者觀點發展一以決策支援系統為基礎的模式，規劃貨運航線的頻次，然而卻並未考慮到貨主與航空公司之間的供需互動關係。有關航空貨運路線選擇方面，[1][4]則以解析性的方法，分別從航空公司與廠商的觀點，構建直運與轉運路線的成本函數，考慮貨物是否需要經過空運中心轉運或直運，然僅為多對一的網路型態。綜合上述，過去相關航空網路設計之研究，大多僅以數學規劃或

網路模式分析探討多對一或一對多之航空網路問題。本研究嘗試就多對多網路型態，構建一反應航空公司與貨主間供需互動之航空貨運網路航線班機頻次規劃模式。

本研究與過去研究最大的不同，除將競爭性網路設計問題應用在航空貨運上，亦同時考慮貨主對運送路線之選擇與貨物特性，將航空網路延伸為多對多的網路型態，並納入貨主與競爭航空公司間之供需互動。在需求面，貨主依貨物特性、價值、數量、託運時點與起迄點之不同，配合各航空公司規劃的航線頻次與費率，進行對航空公司航線選擇行為，經總計可得與各航空公司提供之頻次、費率、機型策略相關之貨運網路各航線與航段貨物需求運量。在供給面，考慮市場上其他競爭航空公司是否對目標航空公司調整各貨運航線頻次與機型之反應，分別構建航空公司貨運航線頻次與機型規劃模式及航空公司貨運航線庫諾競爭模式，依據貨主對航空公司航線選擇預估各航線航空貨運需求量，以最大化利潤為目標規劃最適航線頻次與最適機型。進一步在供需互動架構下，整合供需兩面子模式，分析貨主對各航空公司航線之運送方案選擇模式與航空公司航線頻次與機型規劃模式之間的互動關係。

### 三、結果與討論

本研究之架構主要由兩個子模式組成，一為貨主對運送方案選擇模式，另一為航空公司航線頻次與機型規劃模式。在貨主對運送方案選擇模式中，假設貨主依據各航空公司提供的航線運送費率與頻次，以其負擔的運輸成本與存貨成本總和最小為目標選擇最適的運送方案。就某一起迄機場對  $od$  而言，假設貨主所能選擇的可行運送方案之集合為  $U^{od}$ ，則貨主對各航空公司航線運送方案選擇模式為：

$$\text{Min}_{s, s', s'' \in U^{od}} \begin{cases} \mathbf{r}_s^{od} G_{wi}^{od} + IC_s \\ \mathbf{r}_{s'}^{od} G_{wi}^{od} + IC_{s'} \\ \mathbf{r}_{s''}^{od} G_{wi}^{od} + IC_{s''} \end{cases} \quad \forall w \in W, od \in OD, i \in I \quad (1)$$

其中下標  $s$ 、 $s'$  與  $s''$  分別表直運路線、沿途停靠與轉運路線三類運送方案，而； $\mathbf{r}_p^{od} G_{wi}^{od}$  為貨主  $w$  於時間點  $i$  從機場  $o$  運至機場  $d$  選擇以運送方案  $p$  運送貨運量為  $G_{wi}^{od}$  時之運輸成本，與使用機型  $h$  飛航一次固定成本 ( $T^h$ ) 與單位距離飛行費用 ( $I^h$ )、各航段預設酬載 ( $\bar{V}_a^h$ ) 與距離 ( $d_a$ )、航空公司定價乘數 ( $1+p_k$ ) 有關；而  $IC_s$ 、 $IC_{s'}$  與  $IC_{s''}$  分別為各類方案之存貨成本，與貨物價值 ( $P_w$ )、託運量、託運起迄點與託運時間有關，而不同航線運送方案除影響飛航時間，亦影響貨物在起點機場等待、於中途機場停留、及於轉運機場等待時間 ( $T_w, w, T_h$ )，而時間長短又與航空公

司規劃之航線頻次有關，進而影響貨主貨物運送之時間。從貨主對運送方案選擇模式可得知每一個貨主於特定時間上，在各起迄機場之間所選擇的最適航空公司航線運送方案，進一步總計各起迄對、各貨主及各時間點內之需求，可得各航空公司在各航線上，各航段的貨運流量。假設航空公司  $k$  於研究時間範圍  $I$ ，在航線  $l$  之航段  $a$  上的貨運流量為  $F_{la}^k$ ，則  $F_{la}^k$  為

$$F_{la}^k = \sum_{od \in OD} \sum_{w \in W} \sum_{s \in U^{od}} \sum_{i \in I} G_{wi}^{od} d_{sk}^{odwi} d_{sl}^a \quad (2)$$

其中，若  $d_{sk}^{odwi} = 1$  表示貨主  $w$  於時間  $i$  選擇的運送方案  $s$  是由航空公司  $k$  提供；若  $d_{sl}^a = 1$ ，表示航段  $a$  由運送方案  $s$  所使用的航線  $l$  經過。

在航空公司航線頻次與機型規劃模式，本研究分別考慮貨運市場上競爭航空公司是否會對航空公司貨運航線頻次與機型的調整有所回應，分別構建航空公司貨運航線頻次與機型規劃模式，以及航空公司貨運航線之庫諾競爭模式。本研究假設航空公司以利潤最大為目標，並考慮航空公司於規劃過程中所需考量的因素（如：航空公司可用機型）、及航空公司各貨運航線之起迄運量，規劃各貨運航線之最適營運機型與營運頻次。故航空公司航線頻次與機型規劃模式如式(3)至式(7)所示。

$$\text{Max} \sum_{l \in L^k} \sum_{a \in A} \sum_{h \in H} r_{la}^h F_{la}^k d_a^l y_l^h - \sum_{l \in L^k} \left[ \sum_{h \in H} (r^h + I^h d_a) d_a^l y_l^h \right] f_l \quad (3)$$

$$s.t. \sum_{h \in H} \text{Cap}_a^h f_l d_a^l y_l^h \geq F_{la}^k \quad \forall l \in L^k, a \in A^k \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H} y_l^h = 1 \quad \forall l \in L^k \quad (5)$$

$$y_l^h \in \text{Binary} \quad \forall l \in L^k, h \in H \quad (6)$$

$$f_l \geq 0 \quad \forall l \in L^k \quad (7)$$

其中，式(3)表航空公司以最大利潤為目標；式(4)表所規劃的航線頻次與所使用機型能夠提供足夠的運輸容量；式(5)表各航線僅使用一種機型；式(6)則利用二元變數表航線  $l$  是否使用機型  $h$  營運；最後，式(7)則限制模式所求出的航線頻次需大於或等於 0。因航線頻次與航線機型將影響航空公司在該航線的運輸容量是否符合貨主對該航線的需求，且亦進一步影響航空公司營運成本的高低，故航空公司航線頻次與機型規劃模式中的決策變數乃為決定各貨運航線營運頻次  $f_l$  及決定各貨運航線營運機型  $y_l^h$ 。

本研究提出以覆算為基礎之演算法：步驟 1. 首先以初始各航線頻次與機型代入貨主對運送方案選擇模式，步驟 2. 求解貨主對運送方案的最適決策，進而總計航空公司航線航段運量；步驟 3. 將各航線貨運量代入航空公司航線頻次與機型規劃模式，求解各航線的最適頻次與機型，以及新的利潤水準；步驟 4. 判斷航空

公司利潤是否已收斂，若是，則停止求解，反之將各航線新的航線頻次與機型，重新代入步驟 2 之貨主對運送方案選擇模式重新求解航空公司航線運量。

在航空公司貨運航線庫諾競爭模式中，假設在一寡佔競爭市場下，目標航空公司  $k$  與其他航空公司  $m, m \in \bar{K}$  在規劃過程中，均預期其他競爭航空公司各貨運航線頻次與機型暫不改變，在個別尋求利潤最大並滿足貨主對航空公司-航線貨運需求下，規劃各航空公司貨運航線最適頻次與機型。在競爭互動過程中，各航空公司將依序逐次調整其貨運航線頻次與機型，直到市場中各競爭航空公司之營運策略均不再變動，亦即各競爭航空公司規劃之貨運航線頻次、機型皆趨於一均衡解。航空公司貨運航線庫諾競爭模式之數學規劃式如下：

$$\text{Max} \sum_{l \in L^k} \sum_{a \in A} \sum_{h \in H} r_{la}^h F_{la}^k d_a^l y_l^h + \sum_{l \in L^{\bar{K}}} \left[ \sum_{h \in H} (r^h + I^h d_a) d_a^l y_l^h \right] f_l \quad (8)$$

$$\text{Max} \sum_{l \in L^m} \sum_{a \in A} \sum_{h \in H} r_{la}^h F_{la}^m d_a^l y_l^h + \sum_{l \in L^{\bar{K}}} \left[ \sum_{h \in H} (r^h + I^h d_a) d_a^l y_l^h \right] f_l \quad m \in \bar{K} \quad (9)$$

$$s.t. \sum_{h \in H} \text{Cap}_a^h f_l d_a^l y_l^h \geq F_{la}^k \quad l \in L^k, a \in A^k \quad (10)$$

$$\sum_{h \in H} \text{Cap}_a^h f_l d_a^l y_l^h \geq F_{la}^m \quad l \in L^m, a \in A^m, m \in \bar{K} \quad (11)$$

$$\sum_{h \in H} y_l^h = 1 \quad l \in L \quad (12)$$

$$y_l^h \in \text{Binary} \quad l \in L, h \in H \quad (13)$$

$$f_l \geq 0 \quad l \in L \quad (14)$$

由上述模式可得目標航空公司在競爭市場中因應其他航空公司對其航線頻次與機型規劃反應下，其航線頻次與機型規劃的調整。

進一步，亦提出航空公司貨運航線庫諾競爭模式之求解演算法：步驟 1. 收集市場中各航空公司之貨運航線頻次與機型主要參數初始值；步驟 2. 將各航空公司各貨運航線頻次與機型資訊代入貨主對航空公司-航線運送方案選擇模式，預估並總計各家航空公司各航線航段貨運量；步驟 3. 將預估之各家航空公司航線運量代入航空公司貨運航線庫諾競爭模式，求解目標航空公司在競爭對手現有航線頻次與機型決策下之最適航線頻次與機型規劃解，及在此次覆算之新利潤值；再者，依相同程序同時求解競爭航空公司對其目標航空公司航線頻次與機型規劃結果之反應；步驟 4. 判斷各家航空公司利潤值是否已達收斂，若是，則停止求解，反之將各航空公司航線頻次與機型，重新代入步驟 2 之貨主對航空公司-航線運送方案選擇模式中，重新求解各航空公司航線運量。

範例分析以一國籍航空公司國際貨運網路為對象，簡化分析擇以台北為起迄之航空貨運市場為範圍。範例分析中，多數航線皆可求得

均衡收斂之航線頻次與機型規劃組合。分析結果顯示貨主對航空公司-航線運送方案選擇行為受起迄點、貨物價值及航線機型影響；貨主所承擔的運輸成本與航空公司航線飛航機型、託運航程距離有關，隨貨主託運的距離愈長，貨主為降低所承擔之運輸成本愈趨於選擇以大型機型營運之航線；而隨著貨物時間價值增加，貨主則傾向選擇直運路線以節省存貨成本。航空公司則為達到規模經濟效益，以整合許多市場之貨運量而規劃包含中途停靠較迂迴之飛航路線，但同時卻搭配較高頻次，以降低貨物等待班機運送之存貨成本。從競爭互動與敏感度分析結果顯示，若航空公司航線初始規劃提供較低費率機型即有助取得較高市場佔有率追求更高利潤，再者，航空公司訂價乘數較競爭者為低時，因吸引運量增加而提高收益，增加利潤水準；但若持續降低訂價乘數，雖仍可提升運量，但無法提高航空公司利潤。而範例分析亦驗證航線貨運流量、機型與利潤水準變動關係影響模式均衡解之收斂。

#### 四、計劃成果自評

本研究內容符合原計劃所提內容，研究成果達成原計劃預期目標。本研究結果具體貢獻：將航空網路延伸為多對多的網路型態，整合競爭性網路設計問題於航空貨運上，亦同時考慮到於不同時間、起迄點、託運不同貨物價值貨運量之貨主對不同航空公司運送路線的選擇行為與總計航空公司航線航段運量，並納入貨主與航空公司之間的供需互動，構建航空公司貨運航線庫諾競爭模式，分析各競爭航空公司間機型、頻次、價格訂定與利潤水準及市場佔有率變化、消長互動情形。本研究發展競爭環境下之供需互動演算法能整合需求面貨主對運送方案選擇模式與供給面航空公司網路規劃模式，並求解同時滿足貨主追求運輸成本與存貨成本最小、航空公司追求最大利潤目標之供需互動均衡解。本研究在學術上可作為在航空貨運市場研究中，貨主對航空公司航線運送方案之選擇行為與運量分析、航空貨運網路設計問題在分析航空公司對各貨運航線班機頻次與機型規劃、及在航空貨運市場內航空公司競爭互動關係上之參考。在應用上可作為航空公司評估、預測航空貨運市場的工具與提供營運規劃之參考基礎。本研究各部分成果均將投稿學術期刊，目前航空貨運網路航線頻次與機型規劃部分已投稿國內學術期刊審查中[2]，而航空公司貨運航線競爭互動部分亦正整理投稿國際學術期刊中。本研究部分成果亦已於相關國內學術論文研討會中進行口頭發表報告(文獻[3])。

#### 五、參考文獻

- [1] 許巧鶯、王志青，「軸輻航空貨運網路之直接與轉運路線選擇」，*運輸計劃季刊*，第26卷，第1期，95-118頁，民國86年。
- [2] 許巧鶯、李俊勳，「航空公司貨運網路航線頻次與機型規劃之研究」，*中國土木水利工程學刊* (審查中)。
- [3] 許巧鶯、李俊勳，「航空公司貨運網路航線頻次規劃之研究」，*中華民國第四屆運輸網路研討會論文集*，12-29頁，民國88年10月。
- [4] 許巧鶯、蕭國洲，「廠商以航空貨運中心為轉運站之研究」，*運輸計劃季刊*，第26卷，第2期，213-244頁，民國87年。
- [5] Antes, J., Campen, L., Derigs, U., Titze, C., and Wolle, G.D., "SYNPOSE: a model-based decision support system for the evaluation of flight schedules for cargo airlines," *Decision Support System* 22, pp. 307-323, 1998.
- [6] Aykin, T., "On the location of hub facilities," *Transportation Science* 22(2), pp. 155-157, 1988.
- [7] Fernandez, E. and Marcotte, P., "Operators-users equilibrium model in a partially regulated transit system," *Transportation Science* 26(2), pp. 93-105, 1992.
- [8] Hansen, M., "Airline competition in a hub-dominated environment: an application of noncooperative game theory," *Transportation Research A* 24(1), pp. 27-43, 1990.
- [9] Hansen, M. and Kanafani, A., "Airline hubbing and airport economics in the pacific market," *Transportation Research A* 24(3), pp. 217-230, 1990.
- [10] Harker, P. T., "Private market participation in urban mass transportation: application of computable equilibrium models of network competition," *Transportation Science* 22(2), pp. 96-111, 1988.
- [11] Hsu, C. I. and Wen, Y. H., "Application of grey theory and multiobjective programming towards airline network design," *European Journal of Operational Research* 127(1), pp. 44-68, 2000.
- [12] Jaillet, P., Song, G., and Yu, G., "Airline network design and hub location problems," *Location Science* 4(3), pp. 195-212, 1996.
- [13] Kuby, M.J. and Gray, R.G., "The hub network design problem with stopovers and feeders: the case of federal express," *Transportation Research A* 27(1), pp. 1-12, 1993.
- [14] Lederer, P.J., "A competitive network design problem with pricing," *Transportation Science* 27(1), pp. 25-38, 1993.
- [15] O' Kelly, M.E., "The location of interacting hub facilities," *Transportation Science* 20(2), pp. 92-106, 1986.
- [16] O' Kelly, M.E., "Hub facility location with fixed costs," *Papers in Regional Science* 71(3), pp. 293-306, 1992.
- [17] Teodorovic, D. and Krccmar-Nozic, E., "Multicriteria model to determine flight frequencies on an airline network under competitive conditions," *Transportation Science* 23(1), pp. 14-25, 1989.
- [18] Teodorovic, D., Karlic, M., and Pavkovic, G., "The potential for using fuzzy set theory in airline network design," *Transportation Research B* 28(2), pp. 103-121, 1994.
- [19] Zubieta, L., "A network equilibrium model for oligopolistic competition in city bus services," *Transportation Research B* 32(6), pp. 413-422, 1998.