

國立交通大學
運輸與物流管理學系

博士論文

No. 005

需求擾動對軸輻航空貨運網路設計影響之研究

The Impact of Demand Fluctuations on
Hub-and-spoke Air Cargo Network Design

研究生：王志青

指導教授：許巧鶯

中華民國一〇三年六月

需求擾動對軸輻航空貨運網路設計影響之研究

The Impact of Demand Fluctuations on
Hub-and-spoke Air Cargo Network Design

研 究 生：王志青
指導教授：許巧鶯教授

Student : Chih-Ching Wang
Advisor : Prof. Chaug-Ing Hsu

國 立 交 通 大 學
運 輸 與 物 流 管 理 學 系
博 士 論 文

A Dissertation
Submitted to Department of Transportation and Logistics Management
College of Management
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy
in
Logistics Management

June 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇三年六月

國立交通大學

博碩士論文紙本論文暨全文電子檔著作權授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學運輸與物流管理學系
組，102學年度第2學期取得博士學位之論文。

論文題目：需求擾動對軸輻航空貨運網路設計影響之研究
指導教授：許巧鶯

一、紙本論文著作權授權

■ 同意立即公開

本人依著作權法第15條第2項第3款之規定(採推定原則即預設圖書館得公開上架閱覽)，同意將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學圖書館得以紙本收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

□ 不同意立即公開

□1. 本論文為本人向經濟部智慧局申請專利的附件之一，申請文號為：

，請將論文延至____年____月____日公開。

□2. 本論文已投稿期刊並待審核中，請將論文延至____年____月____日公開。

說明：配合教育部函(100年7月1日臺高(二)字第1000108377號)，紙本不公開期限以5年為限

二、論文全文電子檔著作權授權

■ 同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學、台灣聯合大學系統圖書館與國家圖書館；基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、光碟或數位化等各種方法收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行線上檢索、閱覽、下載或列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：	
本校及台灣聯合大學系統區域網路	■ 立即公開
校外網際網路	■ 中華民國 104 年 6 月 29 日公開
國家圖書館	■ 中華民國 104 年 6 月 29 日公開

研究生：王 志 青 (親筆簽名)

指導教授：許 巧 鶯 (親筆簽名)

中華民國 103 年 6 月 29 日

需求擾動對軸輻航空貨運網路設計影響之研究

研究生:王志青

指導教授:許巧鶯 教授

國立交通大學運輸與物流管理學系博士班

摘要

航空網路設計攸關航空公司的營運績效及競爭力，而軸輻航空貨運網路系統因能發揮規模經濟效果，廣為航空公司所採用，其中轉運中心因可帶動航空及相關產業的發展，向來為全球各主要機場追求的目標。然現實世界存在季節性、區域消長等各種需求擾動因素，而這些市場的波動均會對航空網路設計，甚至轉運中心的選擇等長期策略產生影響，航空公司對相關衝擊應預為評估及因應。

鑑於以往大部分軸輻航空網路研究所採用的數學規劃模式不易反映該系統具有規模經濟的特性，本研究採解析性方法，藉由構建物流成本函數，以成本最小化為目標進行軸輻航空貨運網路設計。本研究建立之模式可反映貨物時間價值、機型、貨運量、起迄點與轉運中心的相對位置對物流成本的影響，更可觀察規模經濟在軸輻航空網路中所發揮的關鍵效果。另本研究模式可就需求擾動對航空網路設計中機型、班次及運送路線的影響事先進行可靠度評估，研究結果顯示各航線因運量、航程，以及可供選擇之機型，在機型、班次的可靠度上會有很大的差異。另軸輻航空貨運網路因將貨物合併於主要航線上運送，其貨運量波動可能更為劇烈，最適機型、班次需調整之機會也隨之增加。

本研究亦透過三種不同情境的模擬，探討亞太地區因區域經濟消長對航空網路設計，甚至對轉運中心選擇產生之影響，研究結果發現一機場欲發展成為轉運中心，其地理位置比其當地運量扮演更關鍵的角色。原本香港具有不錯的地理位置，但在大陸空運市場逐漸崛起的情況下，整體亞太空運市場分佈稍微向北方偏移，首爾與上海相對於其他亞太各國主要機場受惠更大，更具有發展成為區域轉運中心的競爭優勢。

關鍵字：軸輻網路系統、航空網路設計、可靠度評估、需求擾動、規模經濟、區域發展

The Impact of Demand Fluctuations on Hub-and-spoke Air Cargo Network Design

Student : Chih-Ching Wang

Advisor: Prof. Chaug-Ing Hsu

Department of Transportation and Logistics Management
National Chiao Tung University

Abstract

Airline network design is crucial to an airline's operation performance and competition. A hub-and-spoke air cargo network system is widely used by airlines for its effect on economies of scale. And the establishment of air transport hub, seen as an engine for growth, has always been an end goal for major airport worldwide for the development of aviation related industries. However, in reality, there are all sorts of fluctuations with seasonal and regional features which affect airline network design and even the long-term strategic choices of air transport hub. Airlines should evaluate and prepare themselves on relevant impacts in advance.

This research develops an analytic model by formulating and minimizing the logistics costs to design the hub-and-spoke air cargo network of an airline, instead of using a mathematical programming model, commonly adopted in previous studies, which may not present the feature of economies of scale clearly. The model in this research is capable of reflecting the impacts of cargo time value, aircraft type, cargo flow, relative locations between O/D points and air transport hub on logistics costs. And it plays key effects on the observation of economies of scale on hub-and-spoke air network. Besides, through the model, we can also evaluate the impacts of demand fluctuation on the reliability of aircraft types, flight frequencies and routes. In addition, because of the consolidation effect on major route of hub-and-spoke air cargo network, the fluctuations of cargo flows may be quite severe and the chance of adjusting its optimal aircraft types and flight frequencies may increase as well.

This research also designs three scenarios to study the impacts of regional economic development in Asia-Pacific region on air network design and even the development of air transport hub, the result in this research turns out that geographical location play more crucial role on the local traffic flows for an airport, if it is going to develop as an air transport hub. Therefore, Seoul and Shanghai benefit the most to become a regional air transport hub among major airports in the Asia-Pacific region, due to the rise of Mainland China shifting the air transport market share northwardly.

Key words: hub-and-spoke network, air network design, reliability evaluation, demand fluctuation, economies of scale, regional development

誌謝

時光飛逝，重回學校就讀博士班已歷時十二年，我自嘲是有史以來修業時間最久的博士。家庭成員，從新婚小倆口到現在已有三個小孩；工作上，從承辦科員到現在已歷練數個不同職務。生活重心的轉移曾讓我不只一次想放棄學業，幸好有恩師許巧鶯教授的包容、鼓勵及不斷地指導，讓我能順利完成人生的另一項大事。而攻讀博士最大的收穫是學習恩師嚴謹的治學態度及清晰的研究思路，這是當時再回到學校進修的初衷，更是一輩子的功課，學生銘記在心，在此，謹致上最誠摯的敬意與謝忱。

感謝論文口試委員臺灣海洋大學顏進儒教授、長榮大學陳春益教授、本校馮正民教授及任維廉教授，在百忙中撥冗並於口試期間詳盡審查，賜予諸多寶貴意見及殷切指正，使本論文更臻完善。進修期間承蒙張新立教授、韓復華教授、陳光華教授、吳水威副教授、吳宗修副教授、王晉元副教授、謝尚行副教授、高凱副教授、張隆憲副教授於專業上的教導及論文研討時給予鼓勵，謹致上誠摯的感謝。

對於曾在研究室共同奮鬥的夥伴們，清成學長、慧潔於期刊投稿上的建議，郁哲在學校相關行政事務的協助與安排，還有幼屏學姐、剛伯、佳紋、耀慶、憲梅、維婷…等，你們鼓勵讓我在研究過程中不會感到孤單，更是完成學業的一大助力。此外，還要特別感謝中華航空公司李明城協理，接受我在航空貨運實務方面的請益，並協助提供相關資料，讓論文內容更加充實。

能夠利用公餘時間在職進修，要特別感謝民航局及臺北國際航空站各位長官的提攜及同仁們在工作上的協助。尤其是民航局黃主任秘書麗君對於在職進修的支持，佩育、敏郁對於英文寫作上用字遣詞的建議，在此特予誌謝。

最後要感謝一路上陪伴的家人。母親在家庭瑣事上的全力協助與支援、岳父及岳母的鼓勵、太太珮瑛的默默付出與包容，讓我無後顧之憂，還有可愛的三個小天使，你們是我繼續前進的最大動力。謹將此論文獻給我最愛的家人。

王志青 謹誌

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	vii
符號說明.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	6
1.3 研究範圍	8
1.4 研究架構與流程	10
第二章 文獻回顧	15
2.1 軸輻航空網路	15
2.2 成本函數及運送路線	17
2.3 擾動因素及可靠評估	18
2.4 綜合評析	20
第三章 航空貨運網路設計模式	22
3.1 航空貨運成本函數	22
3.1.1 直接運送成本	24
3.1.2 轉運成本	29
3.2 運送路線選擇	31
第四章 需求擾動及可靠度評估	38
4.1 需求擾動對航空網路設計之影響	38

4.2 航空網路設計之調整	41
第五章 範例分析	45
5.1 航空網路設計	50
5.2 可靠度評估	57
5.3 區域經濟消長之影響	65
第六章 結論與建議	73
6.1 結論.....	73
6.2 建議.....	77
參考文獻.....	80
簡歷	85

圖目錄

圖 1 2010 至 2012 年全球航空貨運市場波動情形	3
圖 2 本研究探討之軸輻航空網路架構	10
圖 3 研究架構圖	13
圖 4 研究流程圖	14
圖 5 飛機酬載與航程之關係圖	27
圖 6 貨運量與成本函數關係圖	33
圖 7 路線選擇之臨界線示意圖	36
圖 8 可靠度示意圖	40
圖 9 範例航空公司航點分佈圖	46
圖 10 最適機型選擇結果分佈圖	51
圖 11 亞太各機場—安哥拉治航線之路線選擇臨界線分佈圖	53

表目錄

表 1	各型飛機之酬載、航程及營運成本參數	47
表 2	各航線之里程數	48
表 3	各航線貨運量	49
表 4	以台北作為亞太區域轉運中心之運量指派結果	55
表 5	以台北作為亞太區域轉運中心所設計航空網路之機型選擇 ...	56
表 6	以台北作為亞太區域轉運中心所設計航空網路之班次配置 ...	56
表 7	各航線維持原網路設計機型為最適之臨界運量彙整表	61
表 8	各航線維持原網路設計班次為最適之臨界運量彙整表	62
表 9	各航線機型可靠度彙整表	63
表 10	各航線班次可靠度彙整表	64
表 11	2009 及 2010 年各航點航空貨運成長率	70
表 12	三種情境下選擇不同機場作為亞太轉運中心之相關績效指標	71
表 13	三種情境下選擇不同機場作為亞太轉運中之相關績效指標排 序.....	72

符號說明

- q_{mn} : 每週起點(m)到迄點(n)的貨運需求量(磅)
- Q_{mh} : 每週在航線 m-h 運送的總貨運量(磅)
- T_i : 機型 i 的場站使用費(\$)
- f_i : 機型 i 平均單位距離的營運成本(\$/英里)
- w : 貨物計費重量與實際重量的平均比例
- r : 單位計費重量之每週倉儲成本(\$/磅)
- V_i : 以機型 i 運送的最適載運量(磅)
- U_i : 機型 i 在特定飛航距離下的酬載上限。
- v_i : 不考慮飛機酬載上限情況下的理想載運量(磅)
- d_{mn} : 航線 m-n 的飛行距離(英里)
- P_a : 飛機在航程 R_a 之酬載，亦為飛機之酬載上限
- P_b : 飛機在航程 R_b 之酬載
- P : 單位貨物的價值(\$/磅)
- R : 貨物存放一週之存貨成本占貨物價值的比例
- τ : 飛機在起飛及降落時所需的時間(週)
- τ' : 平均每英里所需的飛行時間(週)
- g_1 : 貨物的盤櫃作業成本(\$/磅)
- g_2 : 貨物的裝卸作業成本(\$/磅)
- e^h : 貨物平均在轉運中心(h)增加的等待時間(週)
- α : 單位貨物在航線 h-n 上的邊際成本(\$/磅)
- $C_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$: 航線 m-n 貨物的直接運送成本(\$)
- $AC_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$: 航線 m-n 單位貨物的平均運送成本(\$)
- $MC_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$: 航線 m-n 貨物的邊際運送成本(\$)

$C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, Q_{hn}, d_{mh}, d_{hn})$: 航線 m-n 貨物的轉運成本(\$)

$\overline{Q_{mh}}$: 當航線 m-n 直接運送與轉運之成本相等時，在航線 m-h 上的
臨界運量

$\overline{q_{mn}^u}$: 航線 m-n 上的臨界運量，大於此運量即會選擇直接運送路線

$\overline{q_{mn}^l}$: 航線 m-n 上的臨界運量，小於此運量即會選擇轉運路線

q_{mn}^t : 航線 m-n 第 t 週的貨運需求量(磅/週)

$\overline{q_{mn}^0}$: 對於以 q_{mn}^0 所設計之航空網路設計，可維持最適化的上界運量

$\underline{q_{mn}^0}$: 對於以 q_{mn}^0 所設計之航空網路設計，可維持最適化的下界運量

S_{mn} : 航線 m-n 面對各種可能影響貨運需求狀態之集合

SC_{mn}^0 : 航線 m-n 以需求量 q_{mn}^0 進行規劃之航空網路設計（機型、班次
及運送路線）

$R_{mn}(q_{mn}^t | q_{mn}^0)$: 航線 m-n 以需求量 q_{mn}^0 規劃的航空網路設計在第 t 週之可
靠度

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

在全球化的趨勢下，各國透過國際專業分工及貿易活動，彼此互通有無，以更有效率的方式滿足各地民眾的需求為其常態，舉例而言，蘋果公司的 iPhone 4 產品在美國設計，觸控面板、記憶體晶片、電源供應、加速器、陀螺儀等重要零組件分別在韓國、德國、法國、日本製造，原物料更是來自其他國家，並在中國大陸組裝，完成後再銷往世界各國。此一模式不但造就部分區域、國家的經濟發展，也帶動及影響國際航空貨運市場。

航空運輸原本即是因應經濟、貿易活動發展而存在，航空公司根據航空貨運市場需求，進行航空網路設計(包含機型、班次、運送路線等)，以最具成本效益的方式運送貨物，支援此一國際貿易體系的發展。Antoniou[1] 及 Hansen[2]曾在研究中指出航空公司的經濟性來自承載率、飛航距離與飛機大小。航空公司的航空網路設計，則會反映出這些關鍵因素，以強化自身的競爭能力。

在航空貨運網路的設計上，1978 年美國國內解除航空管制後，軸輻航空網路(hub-and-spoke network)即被部分航空公司採用，在航網規模固定的情況下，透過設置轉運中心(hub)，將次要航線運量改經由轉運中心轉運，藉以減少次要航線數量，將運量集中在主要航線上，並使用較大機型、提高飛機的承載率，甚至增加班次，以發揮經濟規模的效果，進而降低運送成本。此外，隨著航網規模擴大，主要航線上匯集的運量越多，規模經濟效果也越明顯，讓平均運送成本進一步降低，因此亦具有範疇經濟的現象。尤其在航空貨運方面，因貨物不會因轉運而感到不適的特性，更容易透過轉運的方式來處理，故採用軸輻航空貨運網路的

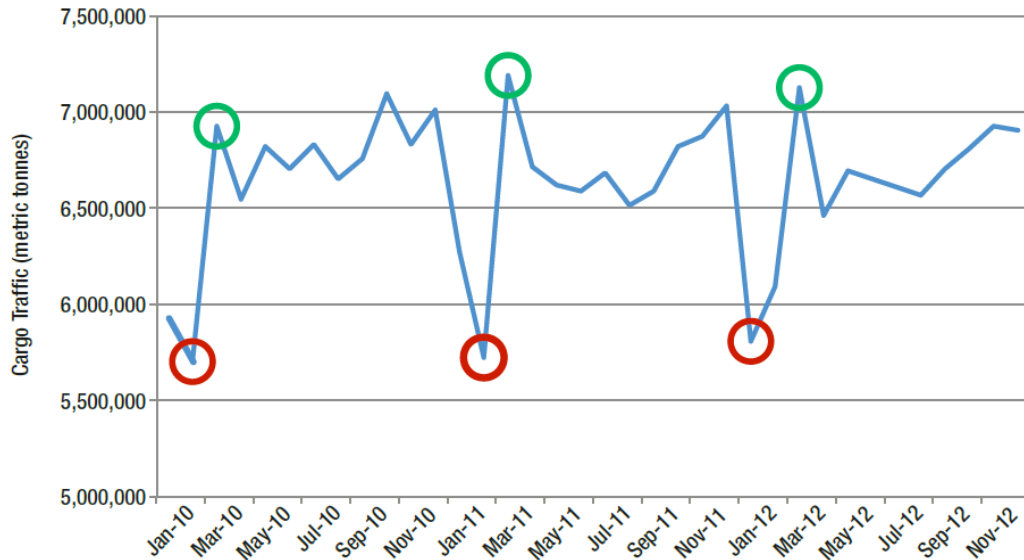
情形更是明顯，例如美商聯邦快遞(FedEx)、優比速(UPS)等國際航空貨運公司在亞太等各大區域均設有轉運中心。對於採用軸輻航空貨運網路系統的航空公司，其網路設計並非一成不變，將視各航線之貨運量、貨物時間價值、起迄點與轉運中心之相對位置等，選擇不同機型以及是否透過轉運中心運送貨物。

實務上，航空公司的班表分為夏季班表及冬季班表，且必須在實施前完成機場時間帶的協調及確認，因此在數個月前即須針對未來之市場需求進行預測並完成班表規劃，故通常係以各航線之平均貨物需求量進行規劃。然無可避免地，季節因素、景氣循環、地區經濟消長以及大型商展活動，均可能造成各航線貨運需求量正常或不正常之擾動。國際機場協會(Airports Council International, ACI) [3]統計 2010 年至 2012 年全球航空貨運市場變化情形如圖 1，圖中顯示航空貨運量每個月都有不同程度的波動，更有季節因素影響，國際機場協會指出每年年初的航空運量大幅波動即受到中國農曆年影響所致。

當需求量受到各種擾動因素影響而產生波動時，對於以平均需求量進行設計之航空網路未必仍為最佳選擇，可能有調整之需要。而軸輻航空網路系統之特性是以系統性觀點對各航線統籌進行規劃，故當一航線本身貨運需求雖未有大幅變動，卻可能因其他航線之需求擾動，進而影響該航線貨物之運送方式，此為採用軸輻航空貨運網路系統之航空公司需特別注意。

當航空公司完成其航空網路設計時，面對未來市場的不確定性，應該要有一套評估機制，去評估未來在面對相關市場擾動時，航空網路設計是否會受到影響，在何種擾動程度下需要調整，調整航空網路設計中的哪些組成因子?而過去探討軸輻航空

網路的研究多著重在轉運中心位置選擇及其網路設計，未再進一步探討需求擾動對軸輻航空網路設計之影響或評估其可靠度。



資料來源:國際機場協會(ACI)2012 年年報

圖 1 2010至2012年全球航空貨運市場波動情形

根據 Kasarda and Green[4]、Zhang et al[5]等學者的研究，一地區的航空貨運市場與其國內生產毛額(GDP)呈現高度正相關，因此各區域經濟活動的消長對空運需求影響甚大，且可視為空運市場的擾動因素之一。2008 年全球金融海嘯導致經濟發展出現成長趨緩甚至衰退的情形，相較之下，亞洲新興國家除了面對經濟衰退能較快復甦外，且能維持較高的成長率，儼然成為世界經濟主要成長動力之一，尤其中國大陸自 2003 年起，連續 5 年 GDP 維持在 10%以上的高成長，並於 2010 年正式超越日本成為世界第二大經濟體。即便目前中國大陸政府進行經濟結構調整，不再一味追求經濟成長率，但每年仍有 7.5%以上的經濟成長，在全球各經濟體中仍是不可多得。

反映在空運市場上，依據國際機場協會(ACI)的統計，亞太地區已是全球航空貨運量最高的區域，且仍持續增加中。另依波音公司 2013 年的預測，2013 年至 2032 年間全球航空貨運市場將維持每年 5% 的成長率，而亞太地區的年平均成長率為 5.8%，中國大陸更高達 6.9%。

即便在亞太地區最大經濟體中國大陸內部，同樣存在沿海、內陸區域經濟發展速度變化的情形，隨著中國大陸強調區域平衡發展以及將經濟成長動力逐漸由外銷轉為內需市場的政策下，世界知名企業諸如惠普、宏碁、鴻海均已陸續於成都、重慶等地設立生產據點，相關城市出口至歐美的貨運量亦隨之成長。且因各機場時間帶取得通常採歷史優先權原則，對於具有發展潛力的區域，航空公司宜儘早布局並進行市場開發及經營，爰在進行航空網路設計時，應將區域消長因素納入考量。例如各國航空公司均積極想飛航大陸重要航點，以獲取中國大陸經濟發展所帶來的空運市場，但即便中國大陸不斷地興建、擴建機場，現階段因民航所能使用的空域十分有限，航班仍無法大幅增加，致無法開闢相關航線或增加班次，形成進入障礙。航空公司若能較早進入此一空運市場，在取得機場時間帶上佔有優勢，則能參與此一空運市場的經營。

區域經濟消長不但會讓既有航空網路中各航線需求量產生變化，短期內航空公司在既有的航網結構下進行班次、機型或運送路線的調整；劇烈的區域消長則可能導致航空公司於航網中的增加或減少部分航點，長期而言，更可能導致航空公司對其航網中的轉運中心進行重置，此時航網結構的變化會導致航空網路設計產生很大的改變。

此外，因航空產業與經濟發展息息相關，一個國家主要機場的發展更常被視為經濟發展的櫥窗，近來年中國大陸、韓國、新加坡、香港、馬來西亞、泰國等亞太各國均積極投資於主要機場之擴建或新建計畫，致力於發展成為區域轉運中心，期望藉此帶動相關產業及經濟發展。台灣於 1990 年代亦曾推動亞太營運中心計畫，其中即包含將桃園國際機場發展成為亞太轉運中心，當時臺灣與中國大陸間因政治因素未能直航，兩岸間之客、貨被迫透過第三地轉運，在與中國大陸這個亞太地區最大空運市場無法直航的情況下，該計畫並無成功推動之可能。惟兩岸已自 2008 年開始實施空運直航，且班次、航點持續擴增，至 2011 年中國大陸開放之兩岸貨運直航航點增至 6 個（上海浦東、廣州、南京、重慶、廈門、福州），於 2013 年再增加天津、鄭州及寧波 3 個航點。隨著兩岸經貿發展，未來大陸航點、班次可望持續增加，不但可提供兩岸貨物的直接運送服務，對於桃園國際機場欲發展成為區域轉運中心之政策應有助益。

然不論是兩岸直航或是各國大力興建機場擴充運能，應只是相關機場發展成為轉運中心的先決條件，但一機場能否真正成為區域轉運中心，仍應回歸至該機場在航空網路中所扮演之角色，這與其地理位置及區域經濟發展息息相關。

綜上所述，航空網路設計對於航空公司的營運績效至為重要，實務上統計數據顯示航空貨運市場的波動為不可避免之現象，且可預期地將對航空公司的網路設計產生影響。惟以往相關文獻多著重於轉運中心位置選擇及航空網路設計進行最適化問題求解，未進一步探討最適化航空網路設計在面臨市場需求擾動下可能產生之影響；且相關研究對於軸輻航空貨運網路規模經濟的特性通常未深入探討，亦無法透過模式觀察軸輻航空網路中各

航線間網路設計的互動，然其規模經濟效果的發揮與航空網路中各航線間的互動關係卻是軸輻航空網路系統被採用的關鍵。是以，本研究擬以此為研究課題，分析航空市場需求擾動對軸輻航空貨運網路設計的影響，進一步評估航空公司網路設計的可靠度。此外，亦希望能客觀分析區域經濟發展如何對航空貨運網路設計及轉運中心的選擇產生影響。

1.2 研究目的

軸輻航空貨運網路之所以廣為全球性的航空公司採用，主要是因為其航網中的航點甚多，若於每個起迄航點間均建立直飛航線，在運量較少的航線上，會導致單位貨物的平均運送成本太高及運送週期太長的問題，若改透過轉運中心轉運，則可將其貨物集中於少數主要航線上運送，使用較大型航機或提升承載率，甚至增加班次，以發揮規模經濟的效果，降低運送成本。因此探討軸輻航空貨運網路設計時，宜先就成本函數進行分析，再進一步探討如何藉由機型、班次、運送路線的選擇降低航空網路的總運送成本，以建構軸輻航空貨運網路的運作模式，並進行航空網路設計。

航空網路設計為航空公司營運的核心問題，然需求擾動一直存在於現實世界中，且必然會對航空公司所設計之航空網路產生影響。而當原本最佳化的航空網路設計受到各種需求擾動因素影響，可能不再是最佳的網路設計，此時航空公司可能需進行調整。然航空公司在進行網路設計時，相關資源(例如機隊、機組員、維修計畫等)必須配合進行安排，當面臨航空網路設計需重新調整時，相關資源的配置亦須配合調整，可能因此付出龐大的調整成本，若相關資源無法支援，甚至無法進行航空網路設計的

調整，因此航空公司在設計其航空網路時，應考慮需求擾動所造成之影響，並事先進行可靠度評估，以瞭解未來航空網路設計需面臨調整的可能性，並預為因應。

另有志於發展成為區域轉運中心的機場，都會以自己為核心劃出一套航空網絡，強調其地理位置的優越性，桃園國際機場亦以距亞太各主要機場平均飛行時間最短，做為發展成為亞太轉運中心的主要論訴基礎。而當區域經濟發展導致空運市場版塊產生移動，長期來說，航空公司確實有可能進行轉運中心的重置，以因應市場需求並降低總運送成本。本研究將嘗試以不同機場做為亞太轉運中心進行網路設計，並比較其成本優勢，以作為客觀判斷之參考。

綜上所述，為探討市場需求擾動對軸輻航空貨運網路設計所產生之衝擊，有別於以往大部分研究建立航空網路設計數學規劃模式，本研究將構建一套解析性模式，透過分析貨物運送過程中所發生的各項成本，建立物流成本函數(Logistics Cost Function)，並在總成本最小化目標下，探討一家採用軸輻航空貨運網路系統營運的航空公司如何安排各航線使用適當的機型、班次及運送路線，以設計其航空網路，並分析相關需求擾動對於航空網路設計之影響，進行可靠度分析。此外，利用本研究所構建之模式，嘗試在不同經濟發展及航網規模情境下，以亞太地區不同機場作為區域轉運中心進行航空網路設計模擬，藉由運送成本的比較，以瞭解經濟發展及轉運中心選擇對航空網路設計的影響，其研究成果可作為航空公司網路設計及營運規劃之參考。

茲將本研究之具體研究目的說明如下：

- 1.分析航空貨物在運送過程中相關作業及所發生的成本，諸如運

輸成本、存貨成本、貨物處理(打盤、裝櫃等)成本、倉儲成本等各項成本，並據以建立整體物流成本函數。藉由不同運送路線物流成本的比較，決定各航線貨物之運送路線，據以構建其航空網路設計。另深入觀察航空網路設計中之機型、班次、運送路線與物流成本間之關係，以及規模經濟效果對航空網路設計之影響。

- 2.探討需求擾動對於軸輻航空貨運網路系統之影響，瞭解原本設計的機型、班次及運送路線是否需配合調整，並針對航空公司事先設計的航空網路進行可靠度分析。透過可靠度分析，可瞭解原本設計之航空網路在面臨市場需求擾動情況下，仍為最適之機率，此一結果可作為航空公司進行網路設計之參考。
- 3.以亞太地區不同機場作為該區域轉運中心的情況下，經由相關績效指標的比較，分析以何者作為轉運中心較具優勢，並可透過情境之設計，觀察區域經濟消長對於航空網路設計之影響，其結果可做為航空公司選擇轉運中心及進行網路設計之參考。

1.3 研究範圍

本研究採解析性方法建立模式，目的在透過成本函數的分析及建立，了解航空網路設計的組成因子(班次、機型及運送路線)在成本函數中所扮演的角色，除藉以建立最適的航空網路設計，並據以探討當運量發生變化時，如何透過班次、機型及運送路線對物流成本造成影響，進而對原先所設計航空網路產生衝擊。此外，亦將透過物流成本的變化，了解軸輻航空貨運網路中各航線的微妙互動關係。為利觀察及瞭解各航線間的互動關係，因此在特定軸輻航空貨運網路架構下進行問題探討。

軸輻航空網路系統的架構可因實際需要而加以變化，本研究

所探討之軸輻航空網路如圖 2 所示，航空公司在每個區域均設置一個轉運中心，在各區域轉運中心已選定，及沒有航權與班次限制的假設下，由一區域內的各機場(spoke m)運送至其他區域轉運中心(hub n)的貨物，可採直接運送($m \rightarrow n$)或透過該區域內的轉運中心(h)轉運($m \rightarrow h \rightarrow n$)。本研究將在上述網路結構下，先分析貨物運送過程中發生的物流成本函數及航空網路設計之決策，並探討在面臨各種需求擾動因素時，對於航空網路設計之影響。

航空公司之營運班表包含機型、班次、飛航路線及在各機場之起降時間，本研究之航空網路設計係在轉運中心及各航點已知的情況下，決定各航線最適的機型、班次及飛航路線，並不涉及飛機於各機場之起降時間，航空公司可依據本研究獲致的成果，再依據航空器之營運規範(如地停時間)及各機場可提供之時間帶予以調整。

而在適用的對象上，本研究是以全貨運的航空公司為對象進行分析，該航空公司所使用的機型均為全貨機。以目前市場上航網擴及全球的航空公司多為整合型航空貨運公司，例如美商聯邦快遞(FedEx)、優比速(UPS)公司，而實務上該等航空公司也確實採用軸輻航空貨運網路提供服務。

現實世界會對航空網路設計造成影響的擾動因素很多，本研究僅探討需求擾動部分，包含常態性的季節性運量波動、區域經濟消長，以及舉辦大型展覽活動（如世界博覽會）等特殊事件前後所造成的運量變化。除了市場需求面擾動外，供給面亦有不確定性，例如之前因冰島火山爆發，導致歐洲地區航班暫停一段時間、機場或航空公司員工罷工亦會影響航班運作。供給面的擾動甚至可能造成全部或部分航空網路無法運作，此一部分並不在本

研究之探討之範圍。

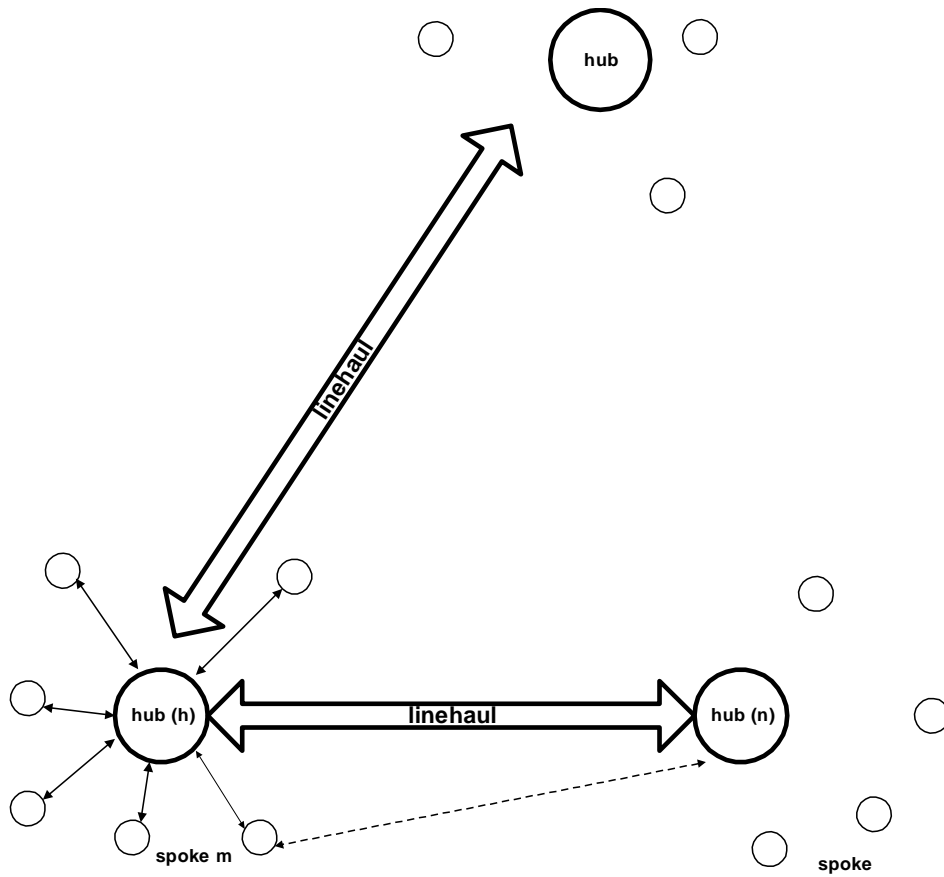


圖2 本研究探討之軸輻航空網路架構

1.4 研究架構與流程

本研究之研究架構如圖 3 所示，中間區塊為航空公司之航空網路設計模式，航空公司根據市場運量需求預測及本身可運用之機隊、機組員及維修計畫等資源，在總物流成本最小化的目標下，決定各航線所使用之機型、班次及運送路線。然在面對需求擾動因素下，對原來以總物流成本最小化所設計出來的航空網路

可能已非最適航空網路，我們將分析在特定貨運量波動程度下的可靠度，亦即原設計航空網路仍維持最適化之機率。若原航空網路設計已非最適化，則航空公司可衡量航空網路的調整成本及效益，決定是否予以調整。而通常調整成本會與航空公司機隊、機組員及維修計畫有關，而調整效益，除了可以用最小的物流成本運送貨物外，可更避免在運量增加情況下，原航空網路設計無法完全運送貨物，所造成之市場流失。

面對各航線的運量需求擾動，短期航空公司會在既有的航網結構下調整班次、機型或運送路線加以因應；但若區域經濟消長導致市場變化太大，或涉及航網中航點的增加或減少，長期可能導致航空公司進行轉運中心的重置，此時航網結構已有所改變，對於航空網路設計會造成更大的影響。

為了達到預期之研究目的及成果，本研究之研究流程如圖 4 所示，茲詳細說明如下：

1. 確定研究目的及範圍

首先，觀察航空貨運市場確實存在需求擾動之現象，並分析軸輻航空貨運網路之特性，以了解擾動因素對航空貨運網路可能產生之影響。另透過文獻回顧，了解過去在此一領域之相關研究，以確立本研究之課題及範圍，並定位本研究在學術及實務應用上之價值及貢獻。

2. 推導航空貨物之物流成本函數

航空貨運不同於客運，在於貨物沒有轉運的不適，因此航空公司可以物流成本為主要考量進行航空網路設計。另軸輻航空貨運網路的特色即是藉由運量合併運送，達到規模經濟效果以降低物流成本，因此物流成本函數在軸輻航空貨運網路中扮演關鍵角色。

因此將針對航空貨物的物流成本進行詳細分析，並構建物流成本函數。

3.航空貨運網路設計

航空公司在預測各航線貨運需求後，在總物流成本最小化的目標下，將各航線的貨物以最適機型、班次及運送路線運送，此時則完成其航空網路設計。

4.需求擾動分析

探討需求擾動對於航空網路之影響，包含可能對班次、機型及運送路線的影響。

5.可靠度評估

分析在面對需求擾動因素下，原本以總物流成本最小化所設計之航空網路是否仍為最佳，並進行航空網路的可靠度評估，以瞭解在各種不同波動程度下，原來所設計航空網路仍可維持最佳的機率。

6.範例分析

最後蒐集相關數據進行範例分析，以驗證模式的可操作性。本研究將以一採用軸輻航空貨運網路系統營運的航空公司在亞太地區的網路設計進行範例分析。除針對轉運中心固定的情況下進行網路設計及可靠度分析外，並將模擬在各種運量需求情境下以不同機場作為區域轉運中進行網路設計，以瞭解區域經濟發展對航空貨運網路設計之影響。

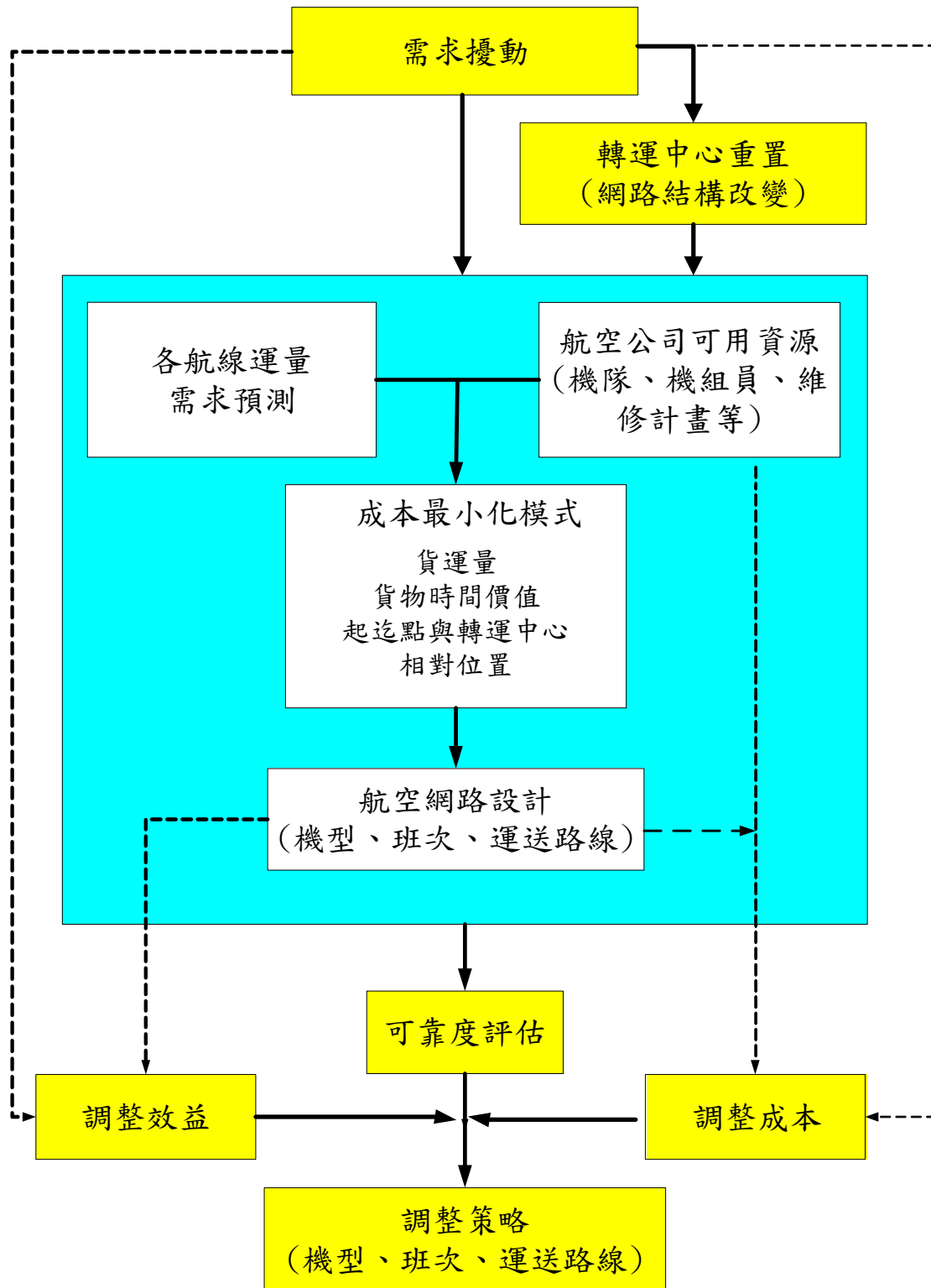


圖3 研究架構圖

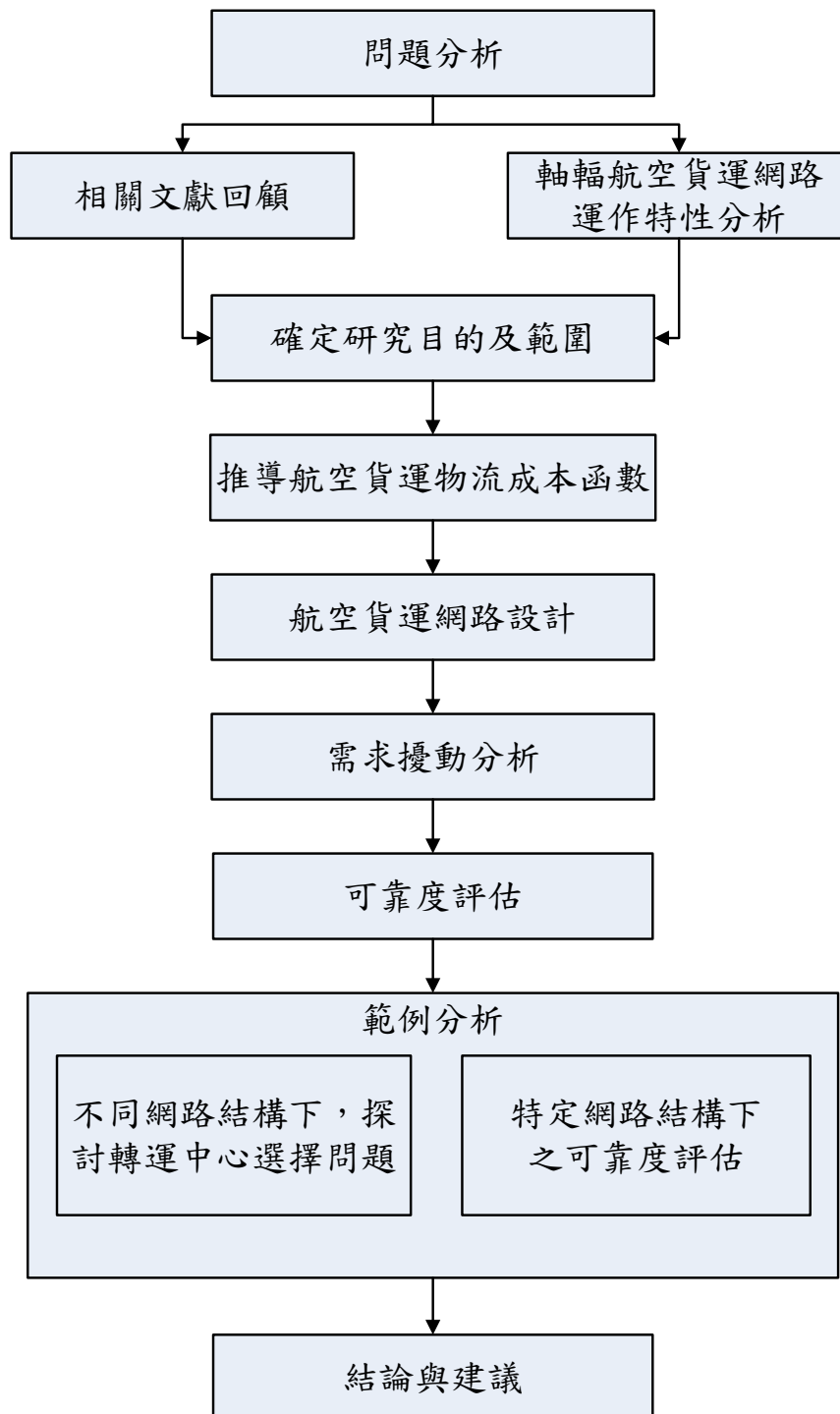


圖4 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章針對與本研究主題相關之文獻進行回顧，以下就軸輻航空網路、成本函數及運送路線選擇、擾動因素與可靠度評估等三方面之文獻分述如下。

2.1 軸輻航空網路

探討軸輻網路系統的文獻十分豐富，其中多數是探討轉運中心位置選擇問題，O’Kelly[6]分析在一個 hub 及兩個 hub 的網路系統中，如何以運輸成本的大小選擇其轉運中心位置。後續 O’Kelly[7]又將設置轉運中心的成本納入考量，以決定軸輻網路系統中的最適轉運中心數目。另外 O’Kelly and Miller[8]分析單一轉運中心位置的選擇問題時，將目標式以決策理論中的大中取小原則表示，並介紹各種已經發展的解法。Aykin[9]進一步考慮運送服務可採一次轉運、二次轉運及直接運送等型態，探討轉運中心位置及運送路線問題。O’Kelly and Bryan[10]指出相關軸輻網路系統研究中單位貨物運送成本與運量間獨立的假設並不恰當，會因此計算出不正確的運送成本並導致錯選轉運中心，因此將運量合併所呈現的規模經濟特性納入模式，探討轉運中心位置，以更符合實際狀況；該研究並未針對成本函數進行深入分析，而係依主要航線上的運量等級予以單位貨物運送成本不同程度的折減因子，讓運量與單位貨物運送成本具互動關係。Elhedhli and Hu[11]在研究中指出軸輻網路系統除了在主要幹道上因集中運送具有規模經濟效果外，亦可能因匯集過多運量於轉運中心而產生擁擠成本，因此同時考量兩種效果進行網路設計。Alumur and Kara[12]則回顧 100 篇以上的軸輻網路系統轉運中心位置的文獻，將以往建立的模式進行整理、分類，其歸納西元 2000 年

以前的研究多著重在問題描述及模式建立，西元 2000 年以後的研究則是集中在求解方法的探索，並建議未來可針對真實生活中的問題進行探討。

軸輻網路系統應用在航空方面，Chan and Ponder[13]、Chestler[14]係以敘述性的方式分析各種航空貨運服務之特性及軸輻航空網路在航空貨運的應用。Hall[15]對隔夜送達(overnight)的航空貨運網路進行研究，考慮時間窗(time windows)的因素，分析飛機到達型態、貨物分類對航空網路的影響。而 Kuby[16]觀察聯邦快遞(FedEx)的航空貨運網路，發現並非每個 spoke 機場都直接飛往轉運中心，所以加入支線與多次起降(stopover)的情況分析，並建立 0-1 整數數學規劃模式。另楊大輝、蕭凱陽、李綺容 [17]針對直航與轉運並存的軸輻航空貨運網路，建立混合整數規劃模式，考慮轉運站數量及容量限制求解最適網路，但其對於軸輻航空貨運路網之規模經濟特性仍僅以外生參數予以處理，尚未能清楚突顯網路設計與規模經濟之關係。Lin et al.[18]在探討航空快遞服務的網路設計時，則是認為實務上航空貨運網路有透過轉運中心轉運、沿途起降及起迄點間直接運送三種服務型態，在承諾的送達時間限制內，以運輸成本及貨物處理成本最小化進行網路設計，惟在模式中仍不易清楚察覺規模經濟的效果。

在轉運中心選擇的實證研究及營運績效方面，Oktal and Ozger[19] 利用其他研究建立的混合整數數學規劃模式，同樣以成本最小化為目標，在增加相關限制條件後，以土耳其航空貨運市場資料進行分析，該研究指出飛機的航程、飛行成本、機場跑道可用性及當地貨運市場持續成長，為影響航空公司選擇轉運中心的關鍵因素。Lin and Hong[20]則是利用資料包絡分析法評估

全球 20 個機場的營運績效，研究發現機場營運效率與機場的所有權形式及規模並無明顯關係；相對地，一個機場是否為轉運中心、機場的地理區位及當地國家的經濟成長率，與該機場的營運效率相關性較高。另 Kim and Park[21]針對航空貨運網路中，轉運中心班機的時間集中情形建立航網的連結度指標，認為連結度除了考量轉運中心的班機銜接品質外，亦應將直接運送與轉運的時間的比較結果納入，而轉運時間即為轉運航線兩個航段的飛行時間加上在轉運中心停等的時間，該研究並以仁川機場為例進行說明。

2.2 成本函數及運送路線

在航空網路的文獻中很多是探討客運的，但客運與貨運的成本有很大的差異，本研究是以航空貨運為主題，故有必要了解貨運作業特性，俾據以建構航空貨運成本函數。茲將相關文獻說明如下：

Hall[22]在理想網路下比較四種不同運送路線的效果，轉運站(terminal)與節線(link)數越少，表示貨物的集中度越高，所以在研究中以路網中的轉運站與節線數評估四種運送策略的效率並不直接計算其運送成本，該研究並討論各種運送策略所適用的網路型態。

另 Hall[23]在另一研究探討貨運的運送路線選擇，以運輸成本加上存貨成本做為貨物的總運送成本，並證明運送成本函數為凹函數，即邊際成本隨著運量增加而下降，具有規模經濟的特性。該研究並提出臨界運量的概念，以此作為選擇運送路線之指標，但在該研究中，轉運站所服務的都是來自各地的轉運貨物，但航空貨運網路的轉運中心所服務的通常包含轉運與當地貨

物，且當地貨運市場對於一機場能否成為轉運中心通常扮演極為關鍵角色。

Daganzo[24]整理相關的貨物配送研究，書中將配送成本分為與距離相關的移動成本(motion)及與時間相關的持有成本(holding)，移動成本又分為運輸成本及處理成本，持有成本則可分為及等待成本。此外該書亦針對各種配送情形建立數學模式。

2.3 擾動因素及可靠評估

由於上述文獻並未考量需求不確定或其他擾動因素對系統產生之影響，而本研究欲探討需求擾動因素對軸輻航空貨運網路之影響，故針對相關文獻予以回顧。

考量區域經濟消長對航空貨運市場影響甚巨，亦為常見的擾動因素，另本研究將探討亞太地區航空網路設計及轉運中心選擇問題，因此針對經濟發展與航空貨運市場關係及亞太地區機場及航空網路之研究進行回顧。Kasarda and Green[3] 在探討航空貨運於經濟發展所扮演角色的研究中，指出有 95 個國家 1980 到 2000 年間的資料顯示航空貨運量與 GDP 及每人 GDP 具有高度相關，以 GDP 及每人 GDP 預測航空貨運量準確度高達九成以上。Zhang et al.[4]分析中國大陸機場網絡之發展，發現中國大陸客貨運量與 GDP 係呈現線性關係，但隨著時間呈現指數型態之成長，且具明顯的季節波動。Hui et al.[25]分析中國大陸航空貨運發展，認為國際線以北京、上海及香港機場為三個主要對外機場，且當時上海及北京均尚未有足夠之運量，而存在共生關係，其中上海較有潛力獨自成為一空運中心。Rimmer[26]透過比較 1995 年與 1998 年之運量變化，分析 1997 亞洲金融危機對於東南亞航空運量分布之改變，發現此一區域機場出現南消北長之現

象，並提出區域內如能達成多邊航空協議，將有助於航空公司強化其軸輻航空網絡並因此獲益。

而在都市交通方面，Sanso and Milot[27] 考量都市運輸網路可能發生交通事故等特殊事件，並評估發生交通事故時之路網運作績效，以及提供用路人之資訊對路網運作績效之影響。Du and Nicholson[28]則是考量交通系統具有運作效能下降特性，例如發生地震、洪水、交通事故等事件均會造成系統效能下降，因此該研究考慮旅運需求可彈性變化的情況下建立一套模式，並進行系統效能下降時的敏感度分析。Siu and Lo[29]則是考量面對交通狀況不確定情況下，建立一套解釋及模擬通勤者在一定旅行時間限制內的所採取具習慣性的路線選擇模式。

在物流配送問題方面，Haughton and Stenger[30]考量各配送點之需求具隨機特性因而可能造成配送短缺、不足之情形，並探討各種需求狀態下，不同策略（無作為、預留配送緩衝量、最佳化）對運輸、存貨、資訊成本之影響。

另在航空網路設計方面，Hsu and Wen[31]針對現實航空市場所存在需求波動現象，探討航空客運網路設計在面臨需求擾動情況下之可靠度分析。Hsu and Eie[32]則是針對航空燃油價格波動對航空網路設計的影響進行研究，評估一航線在以原設計機型、班次營運的收益足以支應油價波動增加的成本為條件，評估其可靠度。另 Wu[33]則是探討因作業延滯在航空網路中所產生的遞延效果，並指出航空公司在網路設計時應考慮可能產生的干擾以強化班表的可靠度。

Yang[34]認為現實世界中航空貨運需求具有季節性變化，雖轉運中心並不致於隨著貨運量的波動而在短期內改變，但運送路

線則可配合調整，因此發展了一個二階的模式來描述在需求變動下的轉運中心位置及網路設計問題。並以臺灣及大陸 10 個經濟交流活動較頻繁的城市所構建的航空網路，以及高中低三種運量情境進行範例分析。

Alumur et al.[35]認為網路中轉運中心的選擇屬於長期性的策略性規劃問題，相關的數據及參數必須事先預估，因此具有不確定性。該研究建立的數學規劃模式可處理設置一個或多個轉運中心問題，先從轉運中心設置成本及運量需求不確定的情況導入，並說明該模式可擴展應用至其他因素亦為不確定情況下的轉運中心選擇問題。

2.4 綜合評析

整體而言，以往探討軸輻航空網路系統的文獻很多，絕大多數研究將問題建構為數學規劃模式，再利用演算法針對複雜的問題求解。該數學規劃模式除了容許數個轉運中心存在，讓各航線可進行直接運送、一次轉運或沿途多次起降等路線安排，包含轉運中心位置選擇及各航線的網路設計等問題亦可一併解決。雖然相關研究所建立的數學規劃模式可處理甚為龐大、複雜的網路系統問題，然對於航空貨運的物流成本函數並未深入分析，對於軸輻網路系統最重要的規模經濟特性常以外生參數表達，因此較難以觀察運量變化對物流成本、運送路線所產生的影響。另外，經濟發展與航空貨運市場呈高度正相關是相關文獻一致認同的，因此新興經濟體的崛起將會透過空運市場的改變，對航空貨運網路設計產生巨大衝擊。而除了區域的經濟消長外，尚有其他需求擾動及網路系統本身的不確定因素均可能對航空貨運網路設計產生影響，但對此深入探討的文獻並不多見。

因此，有別於以往大部分研究，本研究將以解析性方法，透過航空貨運物流成本函數的分析，據以進行航空網路設計，進而分析航空貨運網路設計之可靠度。此外，亦將以近期成長較快的亞太空運市場為案例，瞭解區域經濟消長對於軸輻航空貨運網路之影響，以作為航空公司設計其軸輻航空貨運網路及選擇轉運中心之參考。

第三章 航空貨運網路設計模式

本研究的軸輻航空貨運網路架構是航空公司於全球各大區域均設有一個轉運中心，在各區域轉運中心已知的情況下，一區域內各機場至其他區域轉運中心的航線可選擇直接運送或透過區域內的轉運中心運送。整個航空網路則在總運送成本最小化的目標下，經由各航線選擇最適的機型、班次及飛航路線，完成軸輻航空網路貨運網路設計。

許巧鶯與王志青[36]曾探討一航空公司在使用軸輻航空貨運網路情況下之直接及轉運路線選擇問題，透過直接運送與轉運路線之運送成本比較，決定一航線貨物的運送路線。鑒於該研究探討之航空網路架構與本研究相同，其所建立的解析性模式能反映軸輻航空網路系統規模經濟的特性，讓航空網路設計內涵更為透明，有助於觀察本研究所要探討的需求擾動對航空網路設計的影響，爰參考該研究所建立之模式進行航空網路設計，茲將其模式內容概述如下。

3.1 航空貨運成本函數

貨運的路線選擇不同於客運主要是因為貨物沒有偏好、感受上的問題，且其屬性較單純，所以在選擇運送路線時，航空公司主要是以運送成本作為考慮。若某一航空網路設計能使航空公司以低成本且快速地運送貨物，即為航空公司較佳的選擇。所以在分析航空網路設計前，應先對貨物運送的成本函數進行分析。

航空貨運成本與客運有所不同，本研究考慮貨物運送過程中所發生的整體物流成本(logistics costs)包括運輸成本、處理成本、存貨成本及倉儲成本四部分。其中運輸成本、處理成本與倉

儲成本為航空公司在提供運送服務的過程中所承擔，故此三項成本的大小將直接影響到使用機型、運送頻率及路線選擇等營運策略。而由貨主承擔的存貨成本表面上雖不直接影響航空公司的營運策略，但航空貨運市場來自貨主的委託運送，且所有的成本最後均會轉嫁給貨主，若考慮市場需求面的因素，由貨主所承擔的存貨成本亦應同時考慮。本研究考慮之運送成本較為完整，所得的成本函數應較能反映市場的需求。以下則針對各項成本加以說明：

1.運輸成本：

運輸成本表示運送過程中使用飛機所發生的成本，主要包括機場使用費與飛機營運成本。各機場對於機場使用費的收費標準不同，大致上包括降落費、停留費、地勤場地設備使用費、安全服務費……等，機場使用費通常與飛機大小、重量有直接的關係。飛機營運成本包括飛行成本(油料成本、飛行組員費用等)、飛機的維修成本及折舊或租金成本等，一般而言，除了與機型相關，亦與飛行距離呈正向的關係。綜上所述，貨物的運輸成本會受貨運量、飛機大小、承載率、飛航距離的影響。當需要被運送的貨物量大時，可使用較大型的飛機及提高承載率，因而降低單位貨物運輸成本；在運送距離方面，運輸成本則會隨著運送距離增長而增加，但單位距離之運輸成本則會隨距離增加而遞減。

2.處理成本：

貨物處理成本在航空運輸中主要是指地勤費用，本研究將貨物處理成本分為盤櫃作業成本及裝卸作業成本。航空貨運的貨物在運送過程中，為避免貨物受到損害及作業上的方便，通常是以盤、櫃的方式保存，所以貨物在起點時需予以打盤、裝櫃

(build-up)，到達目的地後，又需拆盤、櫃(break down)的作業，在此這些作業成本統稱為盤櫃作業成本，而裝卸作業成本是指飛機飛抵機場後或起飛前，將這些裝有貨物的盤櫃裝卸飛機的成本。盤櫃作業(打盤、裝櫃及拆盤櫃)容易使貨物受到損害而且成本頗高，而本研究探討的航空網路，其迄點的數目並不多，因此假設轉運貨物在起點機場已經依照其目的地加以分類並打盤裝櫃，在轉運中心盡量避免這些打盤、拆盤的工作。所以轉運貨物在起點機場的貨物處理成本包括了盤櫃處理成本與裝卸作業成本，而在轉運中心轉運時只包括了裝卸成本。以上這些貨物處理成本假設與貨物處理量成正比。

3.存貨成本：

存貨成本表示貨物在運送過程中由於不能被使用、出售的價值損失或所需負擔的機會成本，與貨物量、貨物價值和存貨時間有正向關係。

4.倉儲成本：

貨物在機場等待被運送的時間必須存放在機場的倉庫內，而倉庫的租金成本與貨物量及儲存時間呈正向關係。

3.1.1直接運送成本

假設航線 $m-n$ 每週的貨運需求量为 q_{mn} ，亦即每週有 q_{mn} 的航空貨物需從起點(m)運送至迄點(n)，而航線 $m-n$ 的飛行距離為 d_{mn} ，每次運送量為 V 。因為每次的運送量與航程會受到機型的限制，況且不同機型的營運成本也不同，所以飛機機型的選用會影響成本函數。將茲航線 $m-n$ 貨物採直接運送的各項成本說明如下：

1.運輸成本：機場使用費通常以飛機的起飛重量為計費基礎，在

此以 T_i 表示機型 i 的機場使用費。另外，飛機的平均單位距離營運成本雖與飛行距離相關，但各機型通常有其特定的營運航程，在其營運航程內假設飛機營運成本與距離成正比，令機型 i 平均每單位距離的營運成本為 f_i ，所以每次運送的運輸成本為 $T_i + f_i d_{mn}$ 。因運送頻率為 q_{mn}/V ，所以其在每週的運輸成本為 $(T_i + f_i d_{mn})q_{mn}/V$ 。

2. 貨物處理成本：假設每單位貨物的盤櫃作業處理費為 g_1 ，而裝卸作業費為 g_2 ，因此貨物處理成本為 $q_{mn}(g_1 + g_2)$ 。
3. 存貨成本：存貨成本與貨物量、貨物時間價值及存貨時間成正比。令單位貨物的價值為 P ，且貨物存放一週之存貨成本占貨物價值的比例為 R ， PR 則可表示貨物的時間價值。在存貨時間方面，包括貨物在機場的等待被運送時間與飛行時間。目前一般的中、長程飛機之飛行速度差異不大且各種飛機在起降時所需的時間幾乎都相同，故在此假設各種機型在起降時所需時間為 τ ，單位距離的飛行時間為 τ' ，因此 $PRq_{mn}(\tau + \tau'd_{mn})$ 為飛行途中所發生的存貨成本。另假設貨物的到達率為均勻分配，貨物在機場平均等待被運送時間為二分之一個運送週期 $(V/2q_{mn})$ ，因此貨物在起點等待被運送的存貨成本為 $PRV/2$ ($PRV/2 = q_{mn}.PR.V/2q_{mn}$)。
4. 倉儲成本：航空貨物的倉儲成本會與貨物量呈正向關係，在實務運作上，航空貨運站在計算倉儲費用除了重量外，也與體積有關，其計費是以實際重量及材積重量兩者取其大者作為收費重量，也就是收費重量 = MAX（實際重量，材積重量）。在國際航空運輸協會(International Air Transport Association, IATA)發行的“The Air Cargo Tariff Manual”[37]中提及材積重量可以用 1 英磅等於立方英吋/166 進行換算。一般而言，會採用航空

運輸的貨物通常為特定貨種，因此可透過觀察，瞭解收費重量與實際重量的比例關係。為了反映真實情況，本研究引入參數 w 表示收費重量與實際重量的平均比例，另以 r 為每收費重量貨物存放機場倉庫一週需要之倉儲費用， wr 則為每單位重量貨物一週的倉儲成本。而每週的倉儲成本則為 $w.r.V/2$ ，其計算方式與在機場等待被運送的存貨成本相同。

至於迄點的存貨成本，由於牽涉到迄點機場的聯外交通或其它因素，在本研究中並不加以探討。此外，成本函數的構建主要是為了比較轉運路線與直接運送路線的成本高低，故在構建成本函數時，原則上只需將兩種運送路線不同的部分予以考慮即可，成本相同的部分，可省略不用納入成本函數中。而不管採直接運送或轉運路線，均包含此項成本，其對兩種運送路線的成本比較結果並無影響，所以無須將迄點的存貨成本納入成本函數中。另外，不同機場有不同的收費標準，故實際上， T_i 應因不同機場而異。然因為不管選擇直接運送或轉運路線，物流成本均會包含起、迄點的機場使用費；而且由於機場使用費占整體物流成本的比例不高，故為簡化表達與分析，以 T_i 表示機型 i 的機場使用費，而簡化 T_i 對應不同機場而異之事實。

綜合以上之分析，直接運送之物流成本 $C_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$ 可以表示為式(1)

$$C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) = (T_i + f_i d_{mn})q_{mn}/V + q_{mn}(g_1 + g_2) + PRq_{mn}(\tau + \tau' d_{mn}) + (PR + wr)V/2 \quad (1)$$

由物流成本函數可知，每次載運量會影響運送週期與頻率，進而影響運輸成本、存貨成本與倉儲成本，所以必須求出最佳的載運量。但飛機載運量會受限於其酬載(payload)，即飛機機型會透過載運量進而影響物流成本。所以，為了節省成本，必須使用

適當的機型來運送貨物，最適機型即表示在特定的距離、貨運量條件下，使用該種機型運送可使物流成本最小。如果在一般 EOQ 模式中，可令 $C_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$ 對 V 的一階導數為零，而求得最佳的載運量。

$$V_i = \sqrt{\frac{2(T_i + f_i d_{mn})q_{mn}}{(PR + wr)}} \quad (2)$$

因為每次載運量與機型有關，故後續文中以 V_i 表示。因為 T_i 及 f_i 會隨機型變動，且每種機型的酬載限制又與飛行距離有關，所以在求解最適運量時不同於一般 EOQ 模式，可依下列步驟求之，而最適機型也可同時求得。

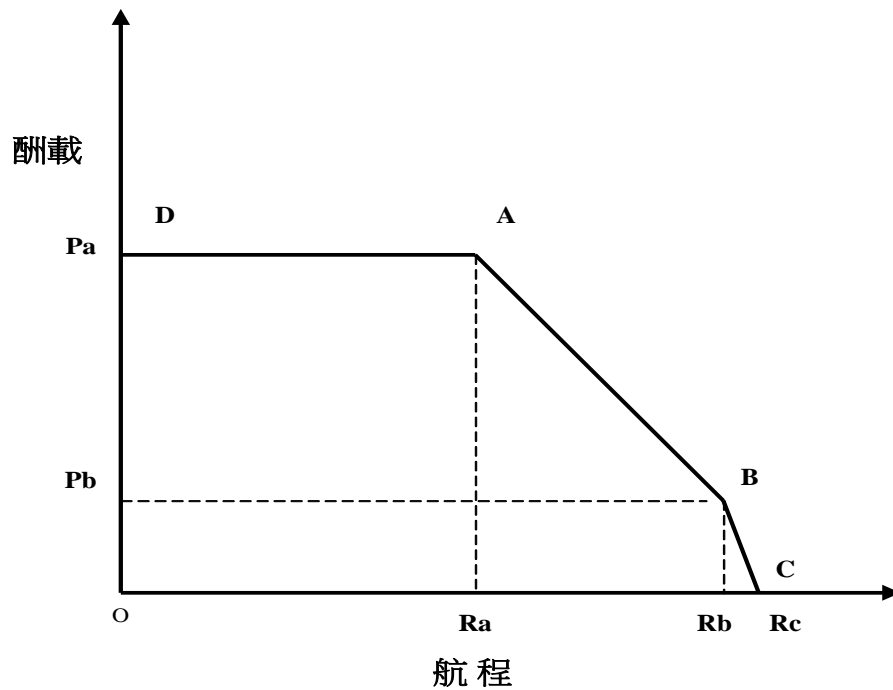


圖5 飛機酬載與航程之關係圖

step 1 :

求出各型飛機在飛行距離 d_{mn} 時的酬載。Horonjeff and McKelvey[38]在其著作中指出飛機的酬載(Payload)有其上限且通常與航程(Range)呈反向變動，其關係如圖 5 所示，所以飛機的酬載會受到飛行距離的限制。因為各類型飛機在設計上都有航程的限制，所以飛機通常有其特定的營運航程範圍，假設一般飛機只會用於飛航距離小於 R_b 的航線(只考慮圖 5 中 DAB 線段，因為 BC 線段是屬於極不經濟的情況)，令 U_i 為機型 i 在飛航距離 d_{mn} 下的最大酬載。則

$$U_i = \begin{cases} P_a & d_{mn} \leq R_a \\ P_a - (d_{mn} - R_a) \times (P_a - P_b) / (R_b - R_a) & R_a < d_{mn} < R_b \end{cases} \quad (3)$$

step 2 :

若航線 m-n 的距離 d_{mn} 小於機型 i 的 R_b ，表示該航線可採用機型 i 來飛行，在不考慮飛機酬載限制的情況下，對該機型求出其理想

$$\text{運量 } v_i, \quad v_i = \sqrt{\frac{2(T_i + f_i d_{mn})q_{mn}}{(PR + wr)}}。$$

step 3 :

找出每種機型的實際運量 V_i 。檢視 v_i 是否在機型 i 的酬載範圍內，若理想運量 v_i 小於酬載上限($v_i < U_i$)，則實際運量即為該機型的理想運量 v_i ($V_i = v_i$)，若 v_i 超過酬載上限(U_i)，則以機型 i 的酬載上限為實際的運量($V_i = U_i$)，亦即 $V_i = \min(U_i, v_i)$ 。

由於每次的載運量受飛機酬載的限制，所以物流成本函數可由式(1)表為式(4)。

$$C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) = \begin{cases} \sqrt{2(T_i + f_i d_{mn})q_{mn}}(PR + wr) + q_{mn}(g_1 + g_2) + PRq_{mn}(\tau + \tau' d_{mn}) & V_i < U_i \\ (T_i + f_i d_{mn})q_{mn} / U_i + q_{mn}(g_1 + g_2) + PRq_{mn}(\tau + \tau' d_{mn}) + (PR + wr)U_i / 2 & V_i = U_i \end{cases} \quad (4)$$

step 4 :

計算每種機型的物流成本 $C_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$ ，並比較其大小，選擇物流成本最小者，相對之機型即為最適機型。

由貨物之總物流成本函數式(4)可推導得到每單位貨物的平均物流成本 $AC_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$ 及邊際物流成本 $MC_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$ 分別如式(5)、式(6)所示。

$$AC_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) = \begin{cases} \sqrt{2(T_i + f_i d_{mn})(PR + wr)/q_{mn}} + g_1 + g_2 + PR(\tau + \tau' d_{mn}) & V_i < U_i \\ (T_i + f_i d_{mn})/U_i + g_1 + g_2 + PR(\tau + \tau' d_{mn}) + (PR + wr)U_i/2q_{mn} & V_i = U_i \end{cases} \quad (5)$$

$$MC_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) = \begin{cases} \sqrt{(T_i + f_i d_{mn})(PR + wr)/2q_{mn}} + g_1 + g_2 + PR(\tau + \tau' d_{mn}) & V_i < U_i \\ (T_i + f_i d_{mn})/U_i + g_1 + g_2 + PR(\tau + \tau' d_{mn}) & V_i = U_i \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)的函數形式得知，單位貨物的平均物流成本會隨著貨運量(q_{mn})之增加逐漸下降而具有規模經濟的效果。由式(6)亦可得知：如果當該航線貨運量大到每次的載運量都足以使飛機滿載($V_i = U_i$)，則所增加的每單位貨物只需負擔 $(T_i + f_i d_{mn})/U_i + g_1 + g_2 + PR(\tau + \tau' d_{mn})$ 的邊際成本。而在各參數已知的情況下，邊際成本為一常數。

3.1.2 轉運成本

一般而言，採取轉運的方式通常會使飛行距離及飛行時間增加，故直覺上可能會增加運輸成本與存貨成本，且多了一次起降亦增加了在機場的降落費及處理成本。但由於轉運中心有將貨物集中運送的功能，促使貨物的運送達到規模經濟的效果或使等待運送時間減少而降低運輸成本及存貨成本，亦可能吸引航空公司採取轉運方式運送貨物，所以貨物仍有可能經由轉運中心轉運。另外，貨物是否透過轉運中心轉運，亦與轉運中心的作業效率有關，所以在考慮轉運成本時，本研究亦將轉運中心的作業效率納

入分析。

若上述航線 m-n 上的貨物經由轉運中心(h)運送，可將此轉運路線分為起點至轉運中心與轉運中心至迄點兩航段來考慮。先考慮起點(m)至轉運中心(h)這一航段，假設每週總共有 Q_{mh} 的貨運量在此一航段被運送，這些貨物包含了以 m 為起點，以轉運中心(h)為迄點及欲透過轉運中心(h)轉運至其他目的地的貨物。如同直接運送之成本函數，所有貨物在這個航段所發生的運輸成本可以 $(T_i + f_i d_{mh})Q_{mh}/V_i$ 表示，貨物處理成本為 $Q_{mh}(g_1 + g_2)$ ，飛行期間的存貨成本為 $PRQ_{mh}(\tau + \tau' d_{mh})$ ，而以 $(PR + wr)V_i/2$ 表示貨物在起點(m)等待被運送時所發生的存貨成本與倉儲成本。因此每週將 Q_{mh} 的貨物量從起點(m)運至轉運中心(h)的總物流成本 $C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh})$ 則如式(7)。

$$C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) = (T_i + f_i d_{mh})Q_{mh}/V_i + Q_{mh}(g_1 + g_2) + PRQ_{mh}(\tau + \tau' d_{mh}) + (PR + wr)V_i/2 \quad (7)$$

但因實際上從起點(m)運至迄點(n)的貨物只有 q_{mn} ， $Q_{mh} - q_{mn}$ 是航線 m-h 上在未加入航線 m-n 轉運貨物 q_{mn} 前，原本即有的貨運量，不管航線 m-n 的貨物是否透過轉運中心(h)轉運， $Q_{mh} - q_{mn}$ 均會於此一航段上運送。而航線 m-n 的貨物 q_{mn} 於此一航段所需負擔的轉運成本應為加入 q_{mn} 後所增加的物流成本 $C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh} - q_{mn}, d_{mh})$ 。

另在轉運中心(h)至迄點(n)的航段上，其成本函數的形式與前述起點(m)至轉運中心(h)航段是相同的，假設此一航段上的總貨物量為 Q_{hn} ，可以 $(T_j + f_j d_{hn})Q_{hn}/V_j$ 表示該航段上的運輸成本；而在貨物處理成本部分，則是考量在轉運中心不再重新拆盤、打盤，僅計算其裝卸盤櫃的作業成本，故以 $Q_{hn}g_2$ 表示之；至於飛行期間的存貨成本則為 $PRQ_{hn}(\tau + \tau' d_{hn})$ 。另外，考量轉運中心可能

因擁擠、航班安排等相關作業效率問題，致飛機無法順利銜接而造成等待時間的增加，在此以 e^h 表示因轉運中心(h)作業效率使貨物平均在轉運中心增加的等待時間，因此在轉運中心發生的存貨成本與倉儲成本為 $(PR + wr)V_j / 2 + (PR + wr)Q_{hn}e^h$ 。綜上，將 Q_{hn} 的貨物量從轉運中心(h)運至迄點(n)的總物流成本 $C_{hn}(Q_{hn}, d_{hn})$ 可以式(8)表示之。

$$C_{hn}(Q_{hn}, d_{hn}) = (T_j + f_j d_{hn})Q_{hn} / V_j + Q_{hn}g_2 + PRQ_{hn}(\tau + \tau' d_{hn}) + (PR + wr)V_j / 2 + (PR + wr)Q_{hn}e^h \quad (8)$$

同理，航線 m-n 的貨物 q_{mn} 在轉運中心(h)至迄點(n)航段上所需負擔的轉運成本可表示成 $C_{hn}(Q_{hn}, d_{hn}) - C_{hn}(Q_{hn} - q_{mn}, d_{hn})$ 。因為轉運路線兩航段的成本函數 $C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh})$ 及 $C_{hn}(Q_{hn}, d_{hn})$ 均為凹函數，即物流成本的增加率隨著運送量 Q_{mh} 、 Q_{hn} 的增加而呈遞減現象。以航線 m-h 為例，同樣是增加 q_{mn} 的貨運量，隨著總運量 Q_{mh} 的增加， q_{mn} 在此航線上所需負擔的轉運成本 $C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh} - q_{mn}, d_{mh})$ 會逐漸下降，此為規模經濟的效果所致，也是一航線會選擇透過轉運中心轉運的原因所在。

綜合起點至轉運中心與轉運中心至迄點兩航段的轉運成本，航線 m-n 選擇透過轉運中心運送的物流成本 $C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, Q_{hn}, d_{mh}, d_{hn})$ 可以數學式表示如下：

$$C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, Q_{hn}, d_{mh}, d_{hn}) = C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh} - q_{mn}, d_{mh}) + C_{hn}(Q_{hn}, d_{hn}) - C_{hn}(Q_{hn} - q_{mn}, d_{hn}) \quad (9)$$

3.2 運送路線選擇

在完成直接運送與轉運路線之成本函數後，可由兩運送路線的成本比較結果作為路線選擇的決策依據；若式(10)成立，此時轉運成本小於直接運送成本，則航線 m-n 的貨物 q_{mn} 會經由轉運中心轉運；反之，則採直接運送路線。

$$C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, Q_{hn}, d_{mh}, d_{hn}) < C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) \quad (10)$$

在本研究所探討的航空網路架構，航線的迄點為另一區域的轉運中心，如圖 1 所示。亦即，若將轉運航線以兩段航線表示，從轉運中心至迄點的航段是屬於兩個轉運中心間的連結，因為轉運中心有集中貨物運送的功能，所以假設這航線上的貨物量很大，且其規模經濟的程度足以讓單位貨物的邊際成本為一常數。前述成本函數的分析中，可由式(6)可推論在轉運中心至迄點之航段，若運量大到足以使飛機滿載($V_i = U_i$)時，此邊際成本即為 $(T_i + f_i d_{hn})/U_i + g_2 + PR(\tau + \tau d_{hn}) + (PR + wr)e^h$ 。

若式(9)中的 m 點表示 spoke(m)，n 點表示 hub(n)，在規模經濟的假設下，貨物 q_{mn} 在航段 h-n 所需負擔的物流成本可表示為 $C_{hn}(Q_{hn}, d_{hn}) - C_{hn}(Q_{hn} - q_{mn}, d_{hn}) = \alpha q_{mn}$ 。其中 α 即等於上述的邊際運送成本 $(T_i + f_i d_{hn})/U_i + g_2 + PR(\tau + \tau d_{hn}) + (PR + wr)e^h$ ，因此轉運成本式(9)可表示為式(11)：

$$C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, d_{mh}, d_{hn}) = C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh} - q_{mn}, d_{mh}) + \alpha q_{mn} \quad (11)$$

因此若式(12)成立，則航線 m-n 即會選擇轉運路線。

$$C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh} - q_{mn}, d_{mh}) < C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) - \alpha q_{mn} \quad (12)$$

本研究是以直接運送與轉運兩路線物流成本的大小決定一航線之運送路線，觀察式(12)，不等式右邊為直接運送成本 $C_{mn}(q_{mn}, d_{mn})$ 減去轉運路線中轉運中心至迄點航段運送成本 αq_{mn} ，這兩項成本的計算較為容易，可直接求算。而不等式左邊為轉運路線中起點至轉運中心航段的運送成本 $C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh} - q_{mn}, d_{mh})$ ，因為受到該航線上原有運量的影

響，計算上較為複雜，因此在探討運送路線時，將著重於此一成本的分析。因為成本函數 $C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh})$ 為凹函數，以圖形表示如圖 6；圖 6 顯示貨物 q_{mn} (圖中之 ΔQ_{mh}) 在起點至轉運中心此一航段所需負擔的轉運成本 $C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh} - q_{mn}, d_{mh})$ (圖中之 $\Delta C_{mh}(Q_{mh}, d_{mh})$) 會隨著此航段的總運量 Q_{mh} 的增加而降低。

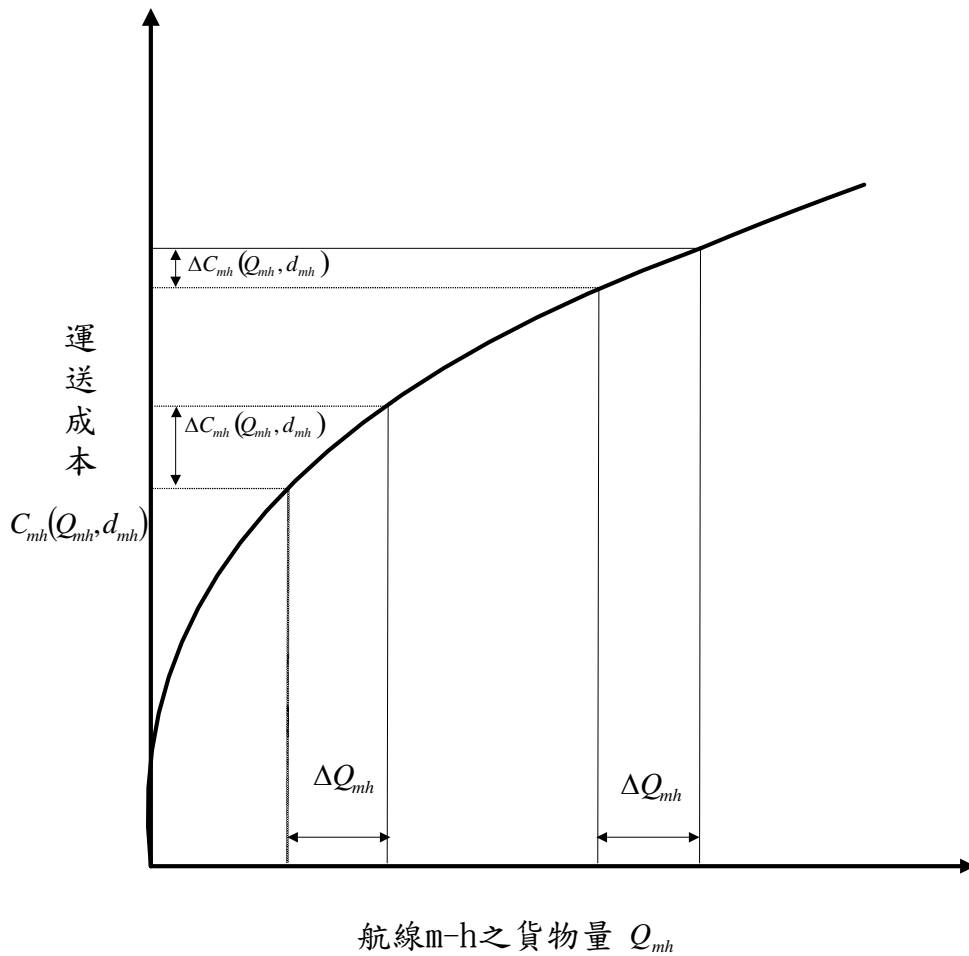


圖6 貨運量與成本函數關係圖

因此 Q_{mh} 的大小會透過影響轉運成本進而影響路線選擇的決策。若存在一 $\overline{Q_{mh}}$ 使式(13)成立，

$$C_{mh}(\overline{Q_{mh}}, d_{mh}) - C_{mh}(\overline{Q_{mh}} - q_{mn}, d_{mh}) = C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) - \alpha q_{mn} \quad (13)$$

則 $\overline{Q_{mh}}$ 可定義為一臨界運量，亦即當航線 m-n 選擇轉運路線後，起點至轉運中心航線的運量等於臨界運量 $\overline{Q_{mh}}$ 時，轉運成本會等於直接運送成本。而隨著該航線運量的增加，使 $Q_{mh} \geq \overline{Q_{mh}}$ 時，轉運成本即會小於直接運送成本，即下式會成立，

$$C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, Q_{hn}, d_{mh}, d_{hn}) \leq C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) \quad (14)$$

在此狀況下，航線 m-n 之貨運也因此宜選擇轉運路線運送；反之，當 Q_{mh} 小於臨界運量 $\overline{Q_{mh}}$ ，則直接運送將是較佳的選擇。

因 $(\overline{Q_{mh}} - q_{mn}) + q_{mn} = \overline{Q_{mh}}$ ，故 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 、 $\overline{Q_{mh}}$ 與 q_{mn} 是相對應的，即當 q_{mn} 已知時，可以 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 表示 $\overline{Q_{mh}}$ 。另一方面因 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 表示加入轉運貨物 q_{mn} 前航線 m-h 之臨界運量，而加入轉運貨物 q_{mn} 前航線 m-h 之運量 $Q_{mh} - q_{mn}$ 在模式中為已知，故可依其是否大於或小於 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ ，判斷航線 m-n 之貨物是否選擇轉運路線。若針對各 q_{mn} 求出其相對的臨界運量 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ ，並將所有 $(q_{mn}, \overline{Q_{mh}} - q_{mn})$ 的軌跡畫出，可得一臨界線如圖 7 所示。當 $(q_{mn}, Q_{mh} - q_{mn})$ 落在臨界線左上方，表示航線 m-n 會選擇轉運路線，因為此時 m-h 航線的運量大於使航線 m-n 可轉運的臨界運量，轉運成本因此較低。反之，若 $(q_{mn}, Q_{mh} - q_{mn})$ 落在臨界線右下方的區域，即表示航線 m-n 會選擇直接運送。

由上述的推論，可得知當加入轉運貨物前航線 m-h 的運量越大，有助於轉運成本的降低，越有利於航線 m-n 選擇轉運路線，但亦有可能加入轉運貨物前航線 m-h 的運量雖然很大，而轉運成本卻仍然大於直接運送成本，尤其是隨著航線 m-n 的運量 q_{mn} 的增加，直接運送也漸漸因規模經濟的效果而降低成本，此時選擇

轉運路線的條件是 $Q_{mh} - q_{mn}$ 也需隨之增加以降低轉運成本，所以圖 6 中 q_{mn} 與 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 會有正向的關係。而當航線 m-n 的貨運量 q_{mn} 大於某一程度後，就一定會選擇直接運送。另一方面，若航線 m-n 的貨運量 q_{mn} 太少，使直接運送成本太高，此時即使加入轉運貨物前航線 m-h 的運量很少，航線 m-n 亦一定會選擇轉運路線，因此並非對於所有 q_{mn} 都有一個對應的 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 。由上述之分析，隱含部分航線存在 q_{mn} 的上、下兩臨界運量 $\overline{q_{mn}^u}$ 、 $\overline{q_{mn}^l}$ ，當航線 m-n 的貨運量 q_{mn} 大於上臨界運量 $\overline{q_{mn}^u}$ 時，式(15)即成立，表示航線 m-n 會選擇直接運送。

$$C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, Q_{hn}, d_{mh}, d_{hn}) > C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) \quad (15)$$

而當 q_{mn} 小於下臨界運量 $\overline{q_{mn}^l}$ 時，表示航線 m-n 的貨運量太少，不適合採直接運送路線，所以式(16)成立。

$$C_{mn}^h(q_{mn}, Q_{mh}, Q_{hn}, d_{mh}, d_{hn}) < C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) \quad (16)$$

整合上述之分析， $\overline{q_{mn}^u}$ 、 $\overline{q_{mn}^l}$ 、 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 的大小在路線選擇決策上具有重要的意義，判斷航線 m-n 是否該轉運時，其依據為：

$q_{mn} > \overline{q_{mn}^u}$ ，則應選擇直接運送；

$q_{mn} < \overline{q_{mn}^l}$ ，則應選擇轉運路線；

$\overline{q_{mn}^l} \leq q_{mn} \leq \overline{q_{mn}^u}$ 時，轉運與否，才需視 $Q_{mh} - q_{mn}$ 是否大於 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 。

因此 $\overline{q_{mn}^u}$ 、 $\overline{q_{mn}^l}$ 、 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 的大小也就代表航線 m-n 是否容易透過轉運中心轉運，其之間的關係如圖 7 所示，臨界線左上方為選擇轉運路線之區域，右下方則為選擇直接運送之區域。 $\overline{q_{mn}^u}$ 、 $\overline{q_{mn}^l}$ 越大表示航線 m-n 越容易透過轉運(由圖 7 中觀察得知， $\overline{q_{mn}^u}$ 、 $\overline{q_{mn}^l}$ 越大，臨界線左上方區域隨之變大)，其大小主要是受到該航線

起迄點與轉運中心之間相對地理位置的影響。而 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 越大則表示越不容易選擇轉運，其大小除了與距離因素有關，亦受到航線 m-n 的貨運量 q_{mn} 的影響。

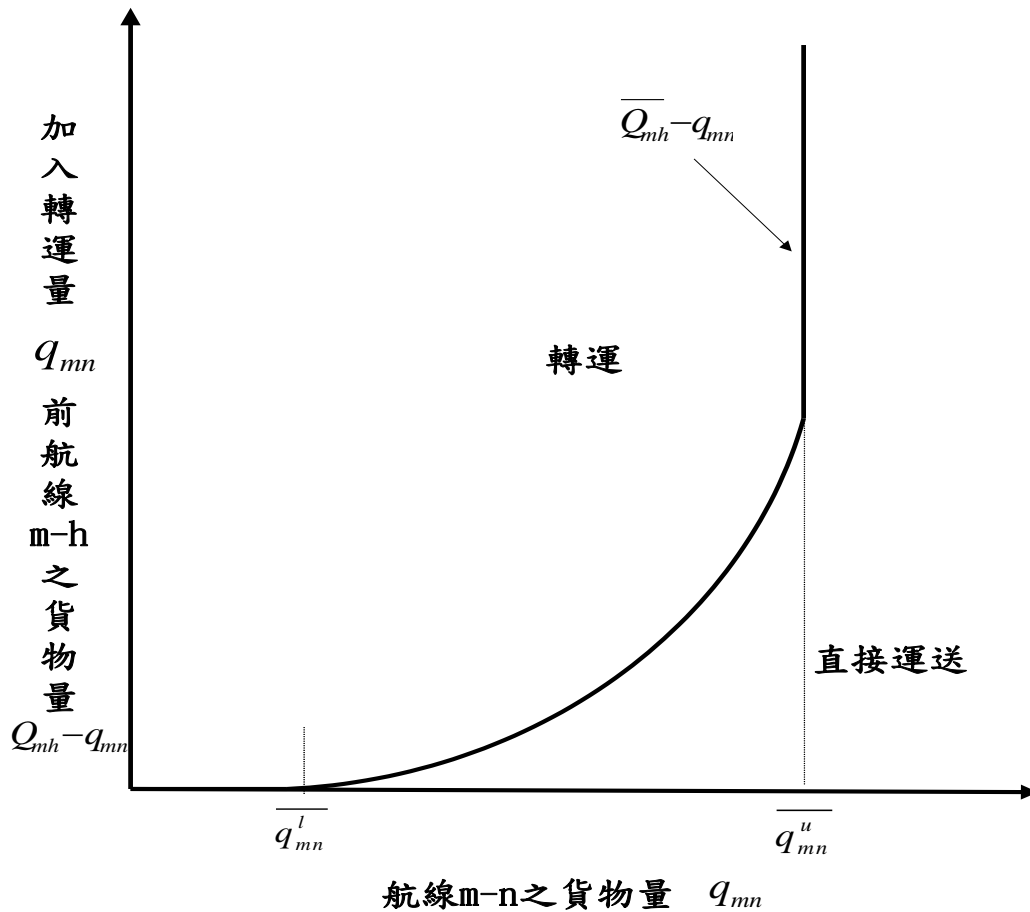


圖7 路線選擇之臨界線示意圖

以上分析係未將班次限定為整數，物流成本函數將隨著運量的改變呈現連續之變化，以便於清楚看出運量與物流成本間之關係，如考量實際狀況班次為整數之情形，並限制必須將所有貨物運送完畢，故運送班次以大於 q_{mn}/V_i 之小整數 $\lceil q_{mn}/V_i \rceil$ 予以取代，因此運送成本函數式(1)則應改寫如下。

$$C_{mn}(q_{mn}, d_{mn}) = (T_i + f_i d_{mn}) \lceil q_{mn} / V_i \rceil + q_{mn} (g_1 + g_2) + PR q_{mn} (\tau + \tau d_{mn}) + (PR + wr) q_{mn} \lceil V_i / q_{mn} \rceil / 2 \quad (17)$$

惟加入此限制條件後，圖 6 及圖 7 的圖形不再如此平順，物流成本將隨著運量的改變而呈現鋸齒狀的變化。

第四章 需求擾動及可靠度評估

第三章之物流成本函數及航空網路設計(機型、班次、運送路線)模式係在各航線的需求量已知的情況下進行分析及推導，實務上，航空公司亦需參考市場需求調查結果，以一組預估需求量進行最適化的航空網路設計。然即便未發生任何突發事件，每週、每月之貨運需求量都有所不同，更有季節性等因素導致貨運需求大幅波動。本章將分析當需求產生擾動現象，是否會對原本以預估需求量所規劃的最適航空網路設計結果產生影響，並進一步就航空網路設計仍可維持最適化狀態的機率，進行可靠度評估。對於可靠度不高的航空網路設計，航空公司即應事先就未來執行時可能面臨調整預作規劃及準備，因此本章亦就將航空網路設計之調整所需考慮之因素進行初步探討。

4.1 需求擾動對航空網路設計之影響

考量實務上各航線的需求會受到各種因素影響產生波動情形而具有不確定性，因此假設航線 m-n 第 t 週的貨運需求為一隨機變數 q_{mn}^t 。

考慮貨運需求為隨機變數的情況下，其物流成本及單位貨物平均物流成本 $C_{mn}(q_{mn}^t, d_{mn})$ 及 $AC_{mn}(q_{mn}^t, d_{mn})$ 可依第三章推導數學式改寫為式(18)及式(19)

$$C_{mn}(q_{mn}^t, d_{mn}) = \begin{cases} \sqrt{2(T_i + f_i d_{mn}) q_{mn}^t (PR + wr)} + q_{mn}^t (g_1 + g_2) + PR q_{mn}^t (\tau + \tau' d_{mn}) & V_i < U_i \\ (T_i + f_i d_{mn}) q_{mn}^t / U_i + q_{mn}^t (g_1 + g_2) + PR q_{mn}^t (\tau + \tau' d_{mn}) + (PR + wr) U_i / 2 & V_i = U_i \end{cases} \quad (18)$$

$$AC_{mn}(q_{mn}^t, d_{mn}) = \begin{cases} \sqrt{2(T_i + f_i d_{mn}) (PR + wr) / q_{mn}^t} + g_1 + g_2 + PR(\tau + \tau' d_{mn}) & V_i < U_i \\ (T_i + f_i d_{mn}) / U_i + g_1 + g_2 + PR(\tau + \tau' d_{mn}) + (PR + wr) U_i / 2 q_{mn}^t & V_i = U_i \end{cases} \quad (19)$$

當貨運量減少，仍以原有航空網路設計運送貨物將造成承載率下降，導致單位貨物之平均運輸成本過高（倉儲成本、存貨成本維持不變）；但若減少班次，單位貨物之平均運輸成本或可無需大幅增加，但存貨成本、倉儲成本則需相對增加；另外，如果可採用較小型飛機，而維持其班次，或許為另一種可行之選擇。而當貨運量增加，若航空公司的機隊及機組員的調度沒有問題，則可增加其班次或改以大型飛機運送，對於單位貨物平均物流成本應可降低。而不論貨運量之變化係增加或減少，其幅度應超過某一範圍方有調整航空網路設計之需要，否則可能僅影響其承載率。

由以上之分析得知，並非當貨運量變動時，最適的航空網路設計均需予以調整，假設航線 m-n 係以一特定貨運量 q_{mn}^0 進行規劃而得到一組航空網路設計 SC_{mn}^0 ，應存在 $\underline{q_{mn}^0}$ 及 $\overline{q_{mn}^0}$ ，當 $\underline{q_{mn}^0} \leq q_{mn}^t \leq \overline{q_{mn}^0}$ ，表示貨運需求變動幅度不大，無須進行 SC_{mn}^0 之調整，亦即事先所規劃之航空網路設計是具成本效益且合適的。而當 $q_{mn}^t < \underline{q_{mn}^0}$ 或 $q_{mn}^t > \overline{q_{mn}^0}$ 時，表示貨運需求變化幅度過大，原先所規劃之航空網路設計 SC_{mn}^0 下的物流成本已非相對最低，存在另一航空網路設計 SC_{mn}^t 可使物流成本更低，故可藉由調整航空網路設計來降低物流成本。

在本研究中，將航空網路設計之可靠度定義為在未來一段期間內，面臨各種需求擾動，事先所規劃之機型、班次、飛航路線仍可維持在物流成本相對最低之機率。

依上述定義，航線 m-n 原先以平均需求量 q_{mn}^0 設計的航空網

路在第 t 週表之可靠度可以式(20)表示，若以圖形表示則如圖 8。

$$R_{mn}(q_{mn}^t | q_{mn}^0) = \Pr(\underline{q_{mn}^0} \leq q_{mn}^t \leq \overline{q_{mn}^0}) \quad (20)$$

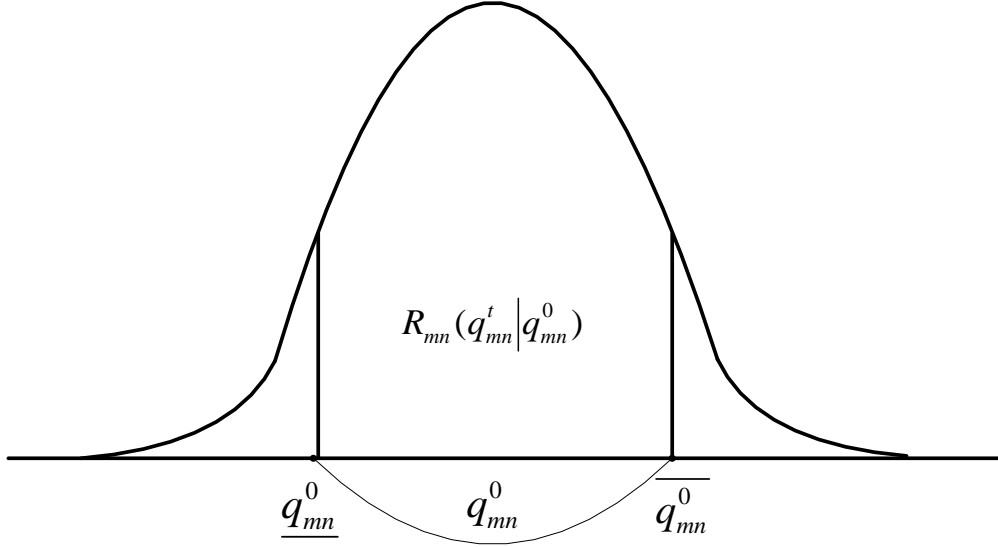


圖8 可靠度示意圖

一航線貨運需求量受到季節性等因素影響而有所波動，仍屬可預期的正常現象，但市場同時可能面臨一些偶發的特殊事件影響，例如大型國際展覽、戰爭、罷工前後，均可能使貨運需求大幅變化，進而對最適航空網路設計造成改變，且事件的嚴重性對於航空公司能否調整航空網路設計加以因應均有所影響。

假設 S_{mn} 為航線 m - n 所面對各種可能影響貨運需求狀態之集合，令 $S_{mn} = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_w\}$ ， s_0 表示未發生需求擾動事件之狀態，其餘狀態 s_1, s_2, \dots, s_w 則代表各種發生需求擾動事件之狀態，而航線 m - n 處於 s_i 狀態的貨運需求量可以 $q_{mn}^t | s_i$ 表示之。

另假設在第 t 週發生 s_i 狀態的機率為 $\Pr(s_i)$ ， $\sum_{i=0}^w \Pr(s_i) = 1$ ，在考

慮各種需求擾動事件發生情況下，航線 m-n 第 t 週之貨運需求量則以期望值表示 $q_{mn}^t = \sum_{i=0}^w q_{mn}^t | s_i \Pr(s_i)$ ，而原先以平均貨運需求量所完成規劃的航空網路設計之可靠度為：

$$R_{mn}(q_{mn}^t | q_{mn}^0) = \sum_{i=0}^w R_{mn}(q_{mn}^t | q_{mn}^0, s_i) \Pr(s_i) \quad (21)$$

4.2 航空網路設計之調整

可靠度低的航空網路設計即表示有較高的機率不能以最低的物流成本營運，而當原航空網路設計並非物流成本最低的航空網路設計時，航空公司應考慮是否進行調整。然調整航空網路設計雖能降低物流成本，但因必須配合進行飛機調度、機組人員重新派遣，將產生調整成本，故對於貨運市場的波動，是否採取調整措施，應視調整效益及調整成本而定。

一般而言，調整效益可視為調整航空網路設計後所因此降低的物流成本，即 $C_{mn}(q_{mn}^t, d_{mn}, SC_{mn}^0) - C_{mn}(q_{mn}^t, d_{mn}, SC_{mn}^t)$ 。至於調整成本則相對複雜，如果貨運需求減少，航空公司會考量減少班次或改以小型機運送，長期的貨運市場衰退則可能導致航空公司將飛機出租、出售或封存。而當貨運需求增加時，航空公司理應增加班次或改以較大型飛機運送，惟增加班次或調整機型需考慮現有機隊、機組人員、維修計畫是否得以執行調整後的勤務及對其他航線是否造成影響等因素。若航空公司有多餘運能，尚可適時依需求增加班次或調整機型且不致影響其他航線；但若航空公司本身機隊運能不足，則調整某一航線之機型或增加班次將會影響其他航線，調整成本可能極高。對於貨運市場的成長，航空公司短期內可在運能足以因應的狀況下進行班機調度，長期則可能以租機、購機、與其他航空公司策略聯盟等方式因應。

比較調整效益與調整成本，當調整效益大於調整成本，調整航空網路設計措施具有效益；反之，雖事前以平均需求量規劃之航空網路設計並非最佳，但因調整措施不具效益性，則無調整之必要。惟當 $q_{mn}^t > \overline{q_{mn}^0}$ 而卻不予調整時，航線 m-n 第 t 週之貨物可能無法在當週被運送，部分貨物可能轉而由其他航空公司運送，因而影響該公司之市場佔有率。由此亦可知道航空網路設計的重要性，一旦航空網路完成設計，相關資源如機隊、機組員、維修計畫亦隨之安排，如需進行調整，則需付出相當成本，故航空公司事先對於運量之預測與掌握也就顯得格外重要。

尤其當航空公司係採軸輻航空貨運網路系統營運，航線 m-n 之貨物可選擇直接運送或透過轉運中心(h)轉運。根據第 3.1 節之分析，因航線 h-n 屬於兩個空運中心間的連結，假設航線 h-n 上的貨運量大到足以讓飛機滿載，其邊際成本接近一常數，故該航線貨運量擾動可能造成該航線的班次增減，但對該航線上的平均單位貨物物流成本影響應不大。但航線 m-h 及航線 m-n 貨運量之變化，卻可能因物流成本的變化導致運送路線的改變。

考量航線 m-h 及航線 m-n 貨運量為隨機變數，轉運成本可以由式(11)改寫為式(22)。藉由直接運送成本式（18）與轉運成本式(22)之比較，決定航線 m-n 之貨物是否透過轉運中心轉運。

$$C_{mn}^h(q_{mn}^t, Q_{mh}^t, d_{mh}, d_{hn}) = C_{mh}(Q_{mh}^t, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh}^t - q_{mn}^t, d_{mh}) + \alpha q_{mn}^t \quad (22)$$

當式(23)成立，航線 m-n 之貨物即會選擇透過轉運中心轉運。

$$C_{mh}(Q_{mh}^t, d_{mh}) - C_{mh}(Q_{mh}^t - q_{mn}^t, d_{mh}) < C_{mn}(q_{mn}^t, d_{mn}) - \alpha q_{mn}^t \quad (23)$$

所以當航線 m-h 及航線 m-n 之貨運量 Q_{mh}^t 及 q_{mn}^t 因需求擾動因

素影響而變化，不但可能改變航線 m-h 及航線 m-n 之機型及班次，亦可能因此造成航線 m-n 直接運送與轉運成本變化，而改變運送路線。尤其當 Q_{mh}^i 在臨界運量 $\overline{Q_{mh}}$ 附近，或者 q_{mn}^i 在 $\overline{q_{mn}^u}$ 、 $\overline{q_{mn}^l}$ 附近，其貨運量之變化均可能導致運送路線之調整。而影響所及，可能並非單一航線而已，例如航線 m-h 的貨運量原本小於 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ ，致航線 m-n 的貨物採直接運送，但若因需求擾動事件導致航線 m-h 貨運量大於 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ ，則航線 m-n 可能選擇透過轉運中心(h)轉運。當航線 m-n 選擇透過轉運中心(h)轉運，致使航線 m-h 貨運量再次增加，可能因而改變航線 m-h 的平均物流成本，甚至影響另一以 m 為起點但採直接運送之航線改而選擇透過轉運中心(h)轉運。

此外，需求擾動因素通常並非發生於單一航線，而係同時發生於數條航線上，考量航空公司係採軸輻航空貨運網路營運，航線 m-h 的貨運量，除了包含以 m 為起點，以 h 為迄點之貨運量，亦包含以 m 為起點，非以 h 為迄點，但卻透過轉運中心(h)轉運之航線貨運量，當各航線貨運量受到擾動因素而有所波動時，航線 m-h 因係整併數個航線之貨運量，其波動幅度將更形加劇。假設航線 m-h 共整併 k 條航線的貨運量，該航線貨運量變異數可以下式表示之。

$$\sigma^2(Q_{mh}) = \sigma^2\left(\sum_{i=1}^k q_{mi}\right) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \sigma(q_{mi}, q_{mj}) = \sum_{i=1}^k \sigma^2(q_{mi}) + \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^k \sigma(q_{mi}, q_{mj}) \quad (24)$$

航線 m-h 運量之變異數，除了加總 k 條在此航線合併運送的貨運量變異數外，另需加上 k 條航線貨運量間的共變數，若 k 條航線貨運量非獨立關係，其共變數即不為零。尤其航空貨運市場通常與經濟景氣呈高度正相關，若因經濟景氣所造成的運量波

動，通常各航線普遍會受到影響，彼此並非獨立，且為同方向之波動，亦即各航線貨運量的共變數為正值。此時，航線 m-h 因整併 k 條航線，其運量的變異數除了是 k 條航線運量變異數的加總外，會再進一步擴大。

第五章 範例分析

本研究在第三章、第四章已針對所欲探討的問題進行分析並據以建立解析性模式，為了解模式實際運作情形及驗證其合理性，本章將進行範例分析。茲將範例中航空公司所營運之航網、相關參數及情境說明如下。

本研究假設一航空公司採用軸輻航空貨運網路營運，在亞太、北美、歐洲、紐澳地區各設置一個門戶機場做為該區域的轉運中心，在 5.1 及 5.2 節中，先假設該航空公司以台北作為亞太地區的轉運中心，另以安哥拉治、阿姆斯特丹、雪梨為北美、歐洲與紐澳地區的門戶機場，以此航網結構進行本研究航空網路設計，並進行可靠度評估。另考量區域的經濟消長不但會造成市場波動，長期可能導致航空公司重新評估其轉運中心之選定，為瞭解各機場發展成為轉運中心的潛力及優勢，在 5.3 節中讓該航空公司可從台北、香港、首爾、上海、東京等航點中選擇一個做為亞太地區轉運中心，並設計不同情境，以瞭解區域消長對航空網路設計的影響。

至於航空公司在亞太地區的航點，除了各國主要機場外，考量大陸經濟快速發展，各國航空公司均欲參與此一空運市場的營運，且兩岸已自 2008 年開始空運直航，爰將部分中國大陸機場納入，因此假設該航空公司在亞太地區共有 15 個航點。亞太地區各航點運往安哥拉治、阿姆斯特丹、雪梨的貨物，可選擇直接運送或透過亞太地區之轉運中心轉運(如圖 9)。



圖9 範例航空公司航點分佈圖

有關該航空公司所使用之機型，經參考國際上各航空公司普遍使用之貨運機型，假設使用的飛機類型有六種，各機型之名稱、其航程（ R_a 、 R_b ）與酬載（ P_a 、 P_b ）關係、營運成本參數如表 1 所示；其營運航空網路中各航線里程數如表 2；各起、迄點間的貨運量，則是參考 2009 年亞太各航點空運出口至美國、歐洲、澳洲地區之海關統計資料及中國民航局公布之統計資料，並以該航空公司佔市場運量 3 成進行假設，該航空公司於各航點間貨運量如表 3。至於模式中其他參數，則是參考相關資料假設為：

$$P = 20 \text{ \$/磅}$$

$$R = 0.02$$

$$w = 1.2$$

$$r = 0.25 \text{ \$/磅-週}$$

$$g_1 = 0.02 \text{ \$/磅}$$

$$g_2 = 0.1 \text{ \$/磅}$$

$$e^h = 0.024 \text{ 週(4 小時)}$$

$$\tau = 0.0033452 \text{ 週(0.562 小時)}$$

$$\tau' = 0.000010629 \text{ 週(時速=560 英里)}$$

表 1 各型飛機之酬載、航程及營運成本參數

機型	Pa (磅)	Ra (英里)	Pb (磅)	Rb (英里)	Ti (\\$)	fi (\\$)
B-727-200F	65,015	1,830	58,406	2,071	868	14.10
B-757-200F	72,210	3,340	60,000	4,260	1,008	14.46
DC-10-10F	135,300	2,014	45,973	5,639	1,781	28.15
DC-10-30F	177,400	3,913	97,835	6,421	2,545	32.11
MD-11F	190,753	3,758	81,000	7,710	2,660	24.83
B-747-400F	248,300	5,118	152,090	7,715	3,658	36.34

註：1. 各種機型之 Pa、Pb、Ra、Rb，所代表意義如圖 5 所示，資料來源：Boeing Commercial Airplane Group。

2. 機場使用費 Ti，以各機型在臺灣桃園機場之各種場站使用費計算之。fi 則是參考國際民航組織 2000 年 ICAO ALLPIRG/Advisory Group work report 推估。

表 2 各航線之里程數

單位：英里

FROM TO	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北		501	904	419	1,355	518	198	140	500	962	2,367	2,017	730	2,000	1,544
香港	501		1,281	779	1,841	73	308	429	734	683	2,024	1,580	712	1,592	1,046
首爾	904	1,281		507	785	1,253	1,014	885	569	1,273	3,265	2,861	1,616	2,868	2,266
上海	419	779	507		1,117	757	508	379	185	926	2,760	2,358	1,149	2,361	1,792
東京	1,355	1,841	785	1,117		1,838	1,534	1,413	1,261	2,016	3,627	3,361	1,895	3,327	2,884
安哥拉治	4,672	5,073	3,794	4,300	3,426	5,040	4,805	4,675	4,345	4,876	7,031	6,651	5,307	6,661	5,998
阿姆斯特丹	5,865	5,760	5,313	5,535	5,788	5,687	5,788	5,739	5,387	5,081	7,051	6,358	6,468	6,529	5,701
雪梨	4,523	4,591	5,178	4,883	4,863	4,664	4,582	4,642	5,015	5,267	3,427	4,089	3,888	3,909	4,683

表 3 各航線貨運量

單位：磅/週

FROM TO	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北		212,232	216,654	107,388	696,840	3,567	10,532	2,257	8,397	450	74,455	70,488	77,879	58,041	155,902
香港	663,399		317,796	321,487	1,389,129	1,204	45,212	2,865	9,588	819	137,161	349,988	264,974	457,260	679,740
首爾	164,867	358,077		108,739	670,748	5,622	13,620	3,908	7,722	926	37,432	57,820	41,858	74,215	80,422
上海	284,663	37,483	181,322		626,690	486,386	216,884	60,867	0	171,108	42,685	182,886	200,171	66,113	397,964
東京	51,049	2,767	26,118	37,138		5,905	3,063	1,613	225	225	26,974	29,617	15,519	9,599	40,203
安哥拉治	977,864	193,076	873,860	1,567,816	2,566,468	41,163	70,976	15,660	90,964	7,100	399,542	686,795	281,877	426,147	733,593
阿姆斯特丹	1,228,736	866,567	1,602,504	1,839,540	1,924,644	79,711	115,009	46,154	170,954	13,012	318,632	510,327	177,644	362,662	955,952
雪梨	54,708	6,707	67,858	140,468	71,314	21,619	8,527	3,684	9,095	661	60,441	173,830	22,207	123,959	105,962

註：1.各航點間貨運量係參考 2009 年亞太主要航點空運出口至美國、歐洲、澳洲地區之海關統計資料(資料來源 Seabury 資料庫)，中國大陸

內部航線則是參考中國民航局公布之統計資料。

2.以範例中的航空公司佔該航線運量 3 成進行假設。

5.1 航空網路設計

首先，本研究先以台北做為亞太地區之轉運中心進行模擬，透過模式的運作，我們可求得在各種運量及距離下的最適機型、各航線選擇直接運送或轉運的臨界運量，並進行各航線的運量指派，亦即完成航空網路設計，包含各航線之機型、班次及運送路線。

在本研究中，各航線所採用的機型即是考慮各航線運量、距離條件下，使總物流成本最低的機型。根據第 3.1 節求解最適機型的演算步驟，可求得在不同運量、距離下之最適機型，茲將各種不同運量、距離下的最適機型選擇結果以圖形表示如圖 10。圖中顯示各類機型在特定運量及距離範圍內具有營運成本優勢，在應用上，只要知道一航線之距離與運量資料，即可很容易地從圖中了解該航線的最適機型。基本上，隨著運量的增加，會採用較大的機型運送，此即為規模經濟的效果；另外飛機通常都有其特定的營運範圍，實務上，飛行距離盡量不超過飛機的 R_b (見圖 5)。因為飛行距離超過 R_b 後，隨著距離的增加會影響其酬載，也因此會使運送成本快速增加，所以當航線距離若超過某一範圍後，就會被航程更遠的機型所取代。本研究所獲致的結果十分合理，航空公司可依此模式納入更多可供選擇機型，作為機隊規劃上的參考。

進一步考慮該航空公司從亞太各機場至北美門戶機場安哥拉治的航線是否透過台北轉運。從第 3.3 節的分析中，可瞭解航線 $m-n$ 運量 q_{mn} ，可能在航線 $m-h$ 上會有一個對應的臨界運量 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ ，當航線 $m-h$ 的運量大於此一臨界運量，航線 $m-n$ 的運量 q_{mn} 即會選擇透過轉運中心(h)轉運。隨著航線 $m-n$ 的運量 q_{mn}

增加，航線 m-h 上的臨界運量 $\overline{Q_{mh}} - q_{mn}$ 也會增加。將每一條航線各個臨界點 $(q_{mn}, \overline{Q_{mh}} - q_{mn})$ 的軌跡描繪出來，即可得到每一條航線運送路線選擇的臨界線如圖 11。當運量 $(q_{mn}, \overline{Q_{mh}} - q_{mn})$ 落在臨界線左上方的區域，即會選擇轉運路線，反之，臨界線右下方則是會選擇直接運送的區域。由圖 11 臨界線的分佈，可直接看出各航線的路線選擇情形。在其他航線運量不變的情況下，可透過觀察某一航線臨界線的分布位置，瞭解運量改變對運送路線選擇的影響。

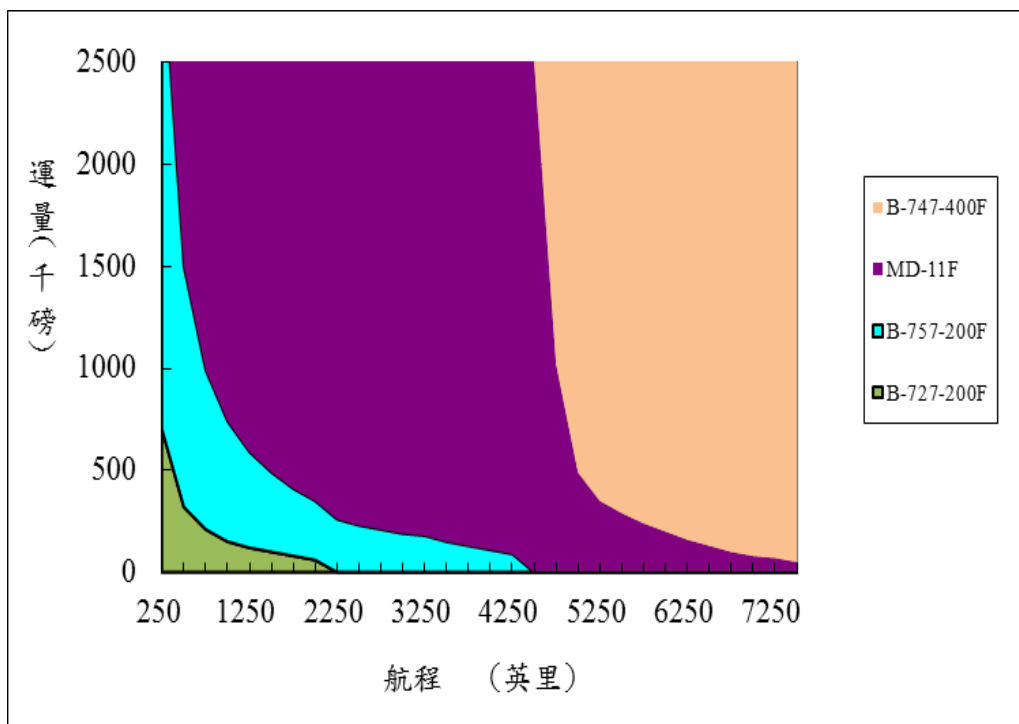


圖 10 最適機型選擇結果分佈圖

因各航線起、迄機場與台北的相對位置不同，所以在選擇運送路線時，即使起點至迄點及起點至轉運中心的運量 $(q_{mn}, \overline{Q_{mh}} - q_{mn})$ 皆相同，路線選擇亦會不同。藉由各航線運送路線選擇臨界線的分佈，可充分反映其起迄點與轉運中心的相對位

置。觀察臨界線的分布，可瞭解在不考慮運量的情況下，影響一條航線是否透過區域轉運中心運送主要有二個原因，分別為航線的航程遠近及轉運路線的迂迴度。

在圖 11 中，曼谷、新加坡、雅加達、吉隆坡等航點則因為直飛安哥拉治的航程太遠，搭配圖 10 的機型選擇亦可得知，該等航線亦僅能選用 B-747-400F 機型，且程遠已超過表 1 中該機型的 Ra 值，開始影響飛機的酬載量，致直接運送成本較高，故均選擇轉運路線，其臨界線也因此落在橫座標上而不易察覺，至於其他航點到安哥拉治航線，因直飛距離較短，直接運送成本不致太高，可視轉運路線的迂迴度決定運送路線。惟當未來航空公司可使用 B747-8F 等航程更遠之航機時，其直接運送成本可能降低，屆時臨界線的位置則會產生變化。

另外，香港、廣州、上海、南京四個航點與台北間的距離均約為 500 英里，亦即若選擇透過台北轉運，轉運路線距離相當；若選擇直飛安哥拉治，其航程亦未大於 B-747-400F 機型的 Ra 值，亦不至因航程因素而影響酬載，但從圖 11 可以清楚看出香港、廣州比較容易選擇轉運路線(臨界線貼近橫軸)，而上海、南京則較容易選擇直接運送，主要即是因為上海、南京至安哥拉治航線，如透過台北轉運，路線較為迂迴所致。

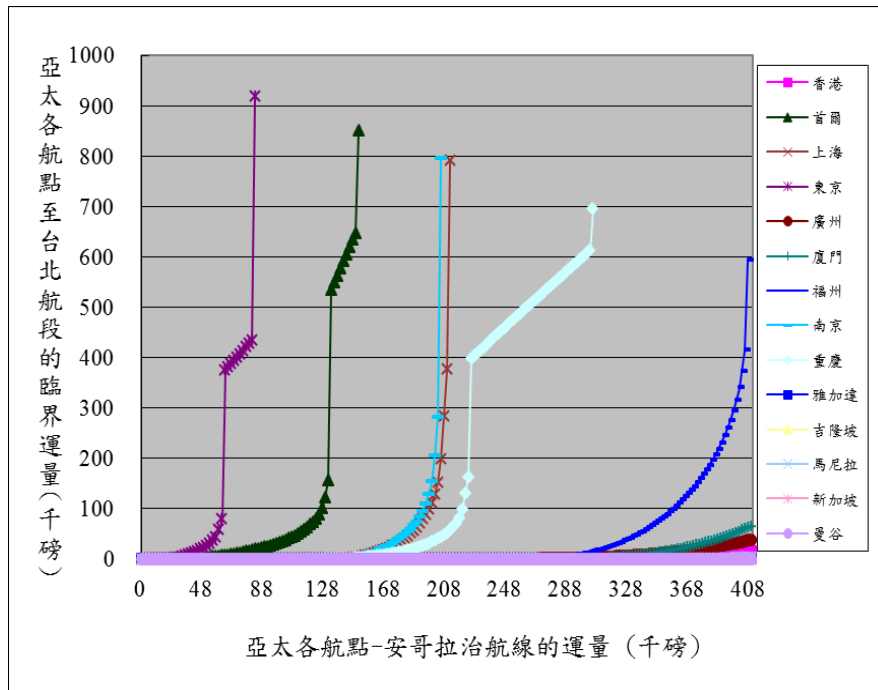


圖11 亞太各機場－安哥拉治航線之路線選擇臨界線分佈圖

由於路線選擇的臨界線分佈主要係反映起、迄機場與轉運中心的相對位置，因此如果是評估亞太各機場至阿姆斯特丹、雪梨航線是否透過台北轉運，因各機場的相對位置不同，所畫出之臨界線也會有很大的差異。

經以本研究第三章模式進行航空運量指派，所得結果如表4。表中沒有運量的航線表示已選擇透過台北轉運，其貨物會併入起點至台北航線及台北至迄點航線，此即各航線的路線選擇結果，另各航線的最適機型選擇如表5，而應配置的最適班次如表6。以香港-安哥拉治航線為例說明，該航線每週貨運量為193,076磅時，物流成本最小之運送策略應採透過台北轉運，而香港-台北航線上之運量則因為匯集原本香港-台北、香港-安哥拉治及香港-雪梨之運量，每週貨運量提高為412,015磅，該航線採用B-757-200F機型，飛航每週6班。而上海-安哥拉治航線，因透

過台北轉運之航路較為迂迴，且該航線貨運量夠大，因此會選擇直接運送；但鄰近上海的南京，則因為貨運量較少，選擇透過台北轉運會是較適合的運送路線。

另外，從模式的運作過程中亦可發現因航網規模擴大，導致部份航線運送路線改變，亦即對航空網路設計產生影響。以吉隆坡-阿姆斯特丹航線為例，若不考量吉隆坡-安哥拉治航線的存在，則吉隆坡-阿姆斯特丹航線的轉運路線成本係高於直接運送成本，而會選擇直接運送。但將吉隆坡-安哥拉治航線納入航網整體考量後，因吉隆坡-安哥拉治航線會選擇轉運路線，致吉隆坡-台北航段運量增加，且因邊際成本遞減，讓吉隆坡-阿姆斯特丹航線透過台北轉運的成本降低，導致轉運成本小於直接運送成本，而使其最終改採轉運路線，而吉隆坡-台北航段上，也就匯集吉隆坡運至台北、安哥拉治、阿姆斯特丹等三個目的地的運量。

上述運送路線選擇案例，即為軸輻航空貨運網路系統中各航線的運量及路線選擇結果會彼此影響，且具有規模經濟及範疇經濟效果的最佳寫照，而以往採取數學規劃模式探討航空網路設計的文獻，並無法觀察這種航空網路中各航線間的互動關係。

表 4 以台北作為亞太區域轉運中心之運量指派結果

單位：磅/週

FROM TO	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北	-	412,015	284,512	247,856	768,154	146,060	205,044	67,755	279,310	21,223	853,070	1,267,610	559,607	846,850	995,457
安哥拉治	3,924,757	-	873,860	1,567,816	2,566,468	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
阿姆斯特丹	3,022,841	866,567	1,602,504	1,839,540	1,924,644	-	-	-	-	-	-	-	-	-	955,952
雪梨	573,251	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	173,830	-	123,959	-

註：表內數據為運量指派結果，表中沒有運量的航線表示已選擇透過台北轉運。其運量會併入起點至台北航線及台北至迄點航線。

表 5 以台北作為亞太區域轉運中心所設計航空網路之機型選擇

FROM TO	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北	-	B-757	B-757	B-727	MD-11	B-727	B-727	B-727	B-757	B-727	MD-11	MD-11	B-727	MD-11	MD-11
安哥拉治	B-747	-	MD-11	MD-11	MD-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
阿姆斯特丹	B-747	B-747	B-747	B-747	B-747	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MD-11
雪梨	MD-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MD-11	-	B-757	-

表 6 以台北作為亞太區域轉運中心所設計航空網路之班次配置

單位：班/週

FROM TO	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北	-	6	4	4	5	3	5	3	4	1	5	7	8	5	6
安哥拉治	16	-	5	9	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
阿姆斯特丹	14	4	7	8	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
雪梨	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	2	-

5.2 可靠度評估

本研究 5.1 節中係在各航線運量給定的情況下進行航空網路設計，惟現實世界中，航空市場波動在所難免。當市場需求發生擾動時，其最適航空網路設計可能隨之變化，航空公司除了在發生市場擾動時加以調整因應外，更應在完成航空網路設計時，即事先針對市場可能的擾動，就航空網路設計的可靠度加以評估分析。

本節將以 5.1 節最適航空網路設計結果（如表 4、5、6）為基礎進行可靠度評估。表中每一條航線都是以最適的班次、機型進行運送，依 4.1 節之分析，我們可以計算出各航線維持原設計機型及班次為最適狀態的上、下臨界運量如表 7 及表 8。當運量波動程度介於其上、下臨界運量範圍內。原設計之最適機型、班次仍會維持不變，因此原先航空網路設計機型、班次的可靠度即為運量波動介於該上、下臨界運量範圍的機率。表中部分航線如果沒有上或下臨界運量，表示即便運量增加或減少幅度再大，也不會改變班次或機型，例如表 7 中的台北-安哥拉治、台北-阿姆斯特丹航線，已使用可供選擇的最大機型 B-747-400F 飛航，因此即便運量再增加，亦不會改變機型，因此無上臨界運量；同理廣州-台北等部分航線，因運量少且航程不遠，係使用最小機型 B-727-200F 飛航，運量再少也無更小機型可供選擇，故無下臨界運量。而表 8 中的重慶-台北航線，因運量少，每週僅飛航一個班次，除非運量降至 0，否則班次不會再減少。

實務上各航線的貨運需求會因季節性或其他市場因素影響而有波動情形，且各航線的波動幅度可能不同，在此僅為呈現需求波動對航空網路設計產生的影響，並計算其可靠度，因而簡化

問題，假設各航線的貨運需求量均呈變異係數(Coefficient of Variation)10%的常態分配，即各航線需求量的標準差為平均需求量的十分之一，以代表各航線需求的波動程度，且假設各航線間的需求波動彼此獨立。以表 3 各航線相關數據進行說明，若表 3 中資料為各航線需求量的平均值，以香港-台北航線為例，該航線平均需求量為每週 212,232 磅，而標準差 21,223 磅則可表示該航線需求量波動大小。經過最適航空網路設計，表 4 內數據為運量指派後各航線的實際運量的平均水準，仍呈現常態分配，但此時在香港-台北航線上，因匯集香港-台北、香港-安哥拉治及香港-雪梨三條航線的運量，故平均運量為每週 412,015 磅，此時代表該航線運量波動大小的標準差則增為 28,699 磅。此一現象說明在軸輻航空貨運網路中，即便各航線需求量彼此獨立，透過合併運送後，主要航線上的波動量亦會增加。

我們可透過表 7 中維持最適機型的上、下兩臨界運量的累積機率分配差，求得在此種運量波動狀態下，原設計機型維持最適之機率如表 9，亦即本研究所定義的機型可靠度。同理，亦可求得各航線班次可靠度如表 10。

在機型可靠度評估部份，如搭配最適機型選擇分布(圖 10)進行觀察，可更清楚瞭解各航線機型可靠度的高低。因為飛機在設計時通常有其特定的營運範圍，以香港-台北航線為例，係使用 B-757-200F 飛航，從圖 10 最適機型選擇分布中可以發現，在本研究假設的參數下，B-757-200F 佔有營運優勢的範圍不大，故當運量有較大幅度地增加或減少，即容易落到 MD-11F 或 B-727-200F 的範圍，因此該航線的機型可靠度僅有 55%。另從圖 10 中亦可發現運量較大且航程較遠的航線都會選擇 MD-11F 或 B-747-400F 機型，且該兩種機型佔有優勢的範圍甚大，因此有

別於運量波動稍大即會對班次產生影響，許多航線運量波動必須大到一定程度才會對最適機型產生影響，以台北-阿姆斯特丹航線為例，其最適機型為最大機型 B-747-400F，且只要運量不低於每週 925,669 英磅，該航線的最適機型都是 B-747-400F，因此在本研究假設的這種運量波動程度下，其機型可靠度為 100%。至於首爾-阿姆斯特丹航線，其最適機型為 MD-11F，在此種運量波動下，亦不會導致最適機型改變。

而在班次可靠度評估部分，同樣以香港-台北航線為例進行說明，經運量指派後，該航線的平均運量為每週 412,015 磅，如果該航線運量波動介於 361,049 磅與 433,261 磅之間，原規劃每週 6 班仍會是最適班次，如果運量變化超出該範圍，最適班次即會產生變化。而在上述波動幅度之假設下，該航線每週 6 班次維持最適的機率為 73%。另外台北-安哥拉治航線班次之可靠度則只有 34%。相關數據顯示，運量愈大之航線，班次可靠度越低，主要係因其運量大，即便在相同的變異係數下，運量變化亦較大，班次改變的機會當然也隨之增加。復以，軸輻航空網路系統主要就是藉由合併運送展現其規模經濟效果，因此會造成主要航線上運量及波動量增加，故更需適時調整班次。此一結果可印證在現實世界中航空公司常於熱門航線飛航加班機，而冷門航線通常僅能維持基本班次。

歸納上述結果，在相同的運量波動下，同一航線的機型、班次可靠度可能會有很大差異。一般而言，最適班次會配合運量波動而隨之調整，但機型則需視是否有更適合的機型可供選擇而定。對於兩個轉運中心間的洲際航線而言，因總運量較區域航線多，運量的波動自然較大，故班次可靠度可能較低。然在機型可靠度上，則因洲際航線可供選擇的機型相對有限，故可靠度會比

短程的區域航線來的高。

以上機型、班次的可靠度是在各航線需求呈變異係數 10% 常態分配且彼此獨立情況下所試算出來之結果，惟實際市場上的波動可能更甚於此。另航空貨運市場與經濟景氣具有高度正向關係，若是因景氣循環所造成市場波動，各航線市場需求應會普遍受到影響而且呈現同方向的變動，則班次、航機的可靠度應會再降低。此外，各航線需求量變異係數可能不同，我們亦可以參考各航線實際情形，賦予不同的需求波動程度，以求得更符合實際狀況的可靠度。

表 7 各航線維持原網路設計機型為最適之臨界運量彙整表

單位：磅/週

FROM TO		台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北	上	-	433,261	288,842	260,062	-	195,046	715,166	73,081	288,842	41,235	-	-	577,681	-	-
	下	-	390,089	260,060	-	577,680	-	-	-	260,060	-	288,840	433,260	520,119	433,260	577,679
安哥 拉治	上	-	-	-	1,932,710	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	下	3,803,505	-	248,300	1,241,500	248,300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
阿姆斯特 特丹	上	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	957,552
	下	925,669	810,925	1,475,682	1,414,030	1,343,768	-	-	-	-	-	-	-	-	-	906,806
雪梨	上	678,033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	181,562	-	129,317	-
	下	248,299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	124,538	-	87,677	-

註：各航線的運量波動如介於表中上、下臨界運量之間，則表示原使用機型仍為最適機型，無須調整。

表 8 各航線維持原網路設計班次為最適之臨界運量彙整表

單位：磅/週

FROM TO		台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北	上	-	433,261	288,842	288,842	953,766	216,632	261,416	77,857	288,842	42,625	953,766	1,335,272	577,681	953,766	1,144,519
	下	-	361,049	216,630	181,716	763,012	97,122	167,304	34,655	211,834	-	763,012	1,144,518	505,469	763,012	953,765
安哥 拉治	上	3,972,801	-	948,768	1,581,308	2,670,544	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	下	3,803,505	-	759,012	1,405,606	2,479,788	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
阿姆斯特 特丹	上	3,088,767	898,065	1,687,532	1,862,814	2,011,310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	957,552
	下	2,868,139	810,925	1,475,682	1,629,960	1,787,830	-	-	-	-	-	-	-	-	-	906,806
雪梨	上	678,033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	181,562	-	129,317	-
	下	508,523	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	87,677	-

註：各航線的運量波動如介於表中上、下臨界運量之間，則表示原飛航班次仍為最適班次，無須增加或減少班次。

表 9 各航線機型可靠度彙整表

FROM TO	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北		0.55	0.43	0.76	1.00	1.00	1.00	0.86	0.53	1.00	1.00	1.00	0.58	1.00	1.00
安哥拉治	0.78		1.00	0.97	1.00										
阿姆斯特丹	1.00	0.74	0.79	0.99	1.00										0.20
雪梨	1.00											0.67		0.67	

註：表中數值為各航線運量在變異係數 10%的波動下，原使用機型仍維持最適狀態的機率。

表 10 各航線班次可靠度彙整表

FROM TO	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷
台北		0.73	0.57	0.99	0.53	1.00	1.00	0.98	0.69	1.00	0.93	0.71	0.64	0.90	0.68
安哥拉治	0.34		0.71	0.38	0.29										
阿姆斯特丹	0.53	0.38	0.49	0.42	0.44										0.20
雪梨	0.99											0.67		0.67	

註：表中數值為各航線運量在變異係數 10% 的波動下，原飛航班次數仍維持最適狀態的機率。

5.3 區域經濟消長之影響

5.1 節及 5.2 節係在航空公司已選定台北作為亞太地區轉運中心的情況下進行航空網路設計，並進行可靠度分析。而從 ACI 公佈之各機場 2009 年及 2010 年航空貨運成長率資料（如表 11），我們發現各機場航空貨運成長率有很大差異，2009 年因受全球金融海嘯影響，中國大陸以外之航點均呈現負成長，而中國大陸除上海與世界各國連結度較高受到衝擊外，其餘航點均尚能呈現正成長。此外，2010 年各機場運量雖多較前一年度成長，但成長幅度仍有很大差異。

考量未來區域經濟消長導致市場需求變化情形仍將持續，為瞭解區域發展對航空公司航空網路設計之影響，本節設計了以下三種情境，且在每一種情境中航空公司可以從台北、香港、首爾、上海或東京中擇一作為區域轉運中心進行航空網路設計的模擬，並透過總物流成本等指標的比較，瞭解在各種情境下，採用何種航空網路設計最具成本效益，藉此評估選擇哪一機場作為轉運中心最具優勢，亦了解各機場發展成為區域轉運中心的潛力。

情境 1：考量中國大陸各地區在近幾年快速成長，事實上除了表 3 中之兩岸貨運通航航點外，另深圳、北京、成都等其他城市經濟亦快速發展，產生許多航空貨運需求，本範例中並無法將大陸城市一一納入。但為瞭解航空網路納入大陸航點前後所產生之影響，情境 1 係以表 3 為基礎，但將廣州、廈門、福州、南京及重慶等航點移除，可藉由增加航點前後的比較，觀察大陸各地在經濟逐漸發展並納入航空公司之航網後，對航空網路設計之影響。

情境 2：以情境 1 為基礎，考慮加入廣州、廈門、福州、南京及重慶等航點對航空網路設計之影響，各航線運量如表 3。

情境 3：參考表 11 中 2010 年各航點貨運量成長率，調整各航線的貨運量假設，例如台北-安哥拉治航線運量，係以表 3 運量為基礎，乘以台北及安哥拉治兩航點 2010 年平均貨運成長率。

本研究在上述三種情境下，模擬航空公司使用台北、香港、首爾、上海及東京作為區域轉運中心之網路設計結果，並就轉運中心之集運量、轉運量及總物流成本等指標進行觀察。其中集運量係指透過轉運中心運送之貨運量，包含以轉運中心為起迄點的貨運量加上透過轉運中心轉運之貨運量($\sum_m q_{mh} + \sum_n q_{hn}$)。另在物流成本的比較中，考量各機場至區域轉運中心貨運量(q_{mh})不同，為了讓選擇不同機場作為轉運中心有相同的比較基礎，故在總物流成本的比較上，僅計算亞太地區各機場運往北美、歐洲、澳洲貨物($\sum_{m,n} q_{mn} + \sum_n q_{hn}$)以最適航空網路設計運送的物流成本，不含原本各機場至區域轉運中心貨物($\sum_m q_{mh}$)的物流成本。茲將三種情境的相關指標數據彙整如表 12，另為便於觀察比較，將各項指標績效排序整理如表 13。

在情境 1 下，就集運量及轉運量而言，以東京作為轉運中心最多、香港次之；而在總物流成本的比較上，由低至高依序為香港、首爾、上海、東京、台北。綜合分析，在五個候選轉運中心裏，東京當地貨運市場最大，因規模經濟效果吸引較多轉運貨物，致以東京為轉運中心時的轉運量最大。另香港因地理位置關係，有較多亞太機場運往雪梨的航線會選擇透過香港轉運，但因運往雪梨的貨物並不多，故轉運量仍次於東京，但總物流成本已是五個候選轉運中心最低。而此時透過台北轉運的貨運量雖與上

海及首爾相當，但因相對地理位置關係，亞太各機場透過台北轉運至安哥拉治、阿姆斯特丹的航路較為迂迴，且上海及首爾的當地貨運量較多，故總物流成本高於上海及首爾。而在此一情境下的首爾及上海，所吸引的轉運量雖不多，但因具有不錯的地理位置，及當地貨物量頗多具有規模經濟的效果，總物流成本僅略高於香港。

在情境 2 中，以不同機場作為區域轉運中心吸引貨物轉運情形與情境 1 相仿，但轉運量及總物流成本的比較上產生了一點變化。情境 2 中加入了廣州、廈門、福州、南京及重慶等航點，但這些航點的貨物量都不多，幾乎都會選擇透過轉運中心運送。此時香港所吸引的轉運量已超越東京，但對在三個目的地門戶機場中的安哥拉治及阿姆斯特丹而言，本情境新增的中國大陸航點透過香港轉運則較迂迴，故香港的總物流成本已高於上海及首爾。從總物流成本的比較上，增加這些中國大陸航點，對位於鄰近且轉運路線較不迂迴的上海、首爾顯然具有相對優勢，在此情境中選擇兩機場作為區域轉運中心的總物流成本已低於其他機場，上海最低，首爾次之。

在情境 3 中，隨著各航線運量較情境 2 增加，因直接運送的平均物流成本隨運量增加而逐漸降低，致部份航線改選擇直接運送，但整體的轉運量仍較情境 2 高。此時若以上海、首爾為區域轉運中心，則更加能發揮其競爭優勢，所吸引的轉運貨物已高於其他機場，當然在總物流成本部分亦優於其他機場。

綜合上述 3 個情境的分析比較，茲將相關重要發現及推論歸納如下

1. 轉運中心轉運量及總物流成本間之關係

因各航線運量不同，故轉運航線數多不代表轉運量一定多，另因各轉運中心地理區位不同，轉運量多亦不代表在總物流成本具有絕對優勢。情境 2 中，香港的轉運量最大，但總物流成本並非最低。在本範例中亞太各機場運往安哥拉治、阿姆斯特丹的運量明顯高於運往雪梨的運量，該等航線對總物流成本具有較大的影響力，也就是在地理位置上，如透過區域轉運中心轉運至安哥拉治、阿姆斯特丹的路線較不迂迴，在轉運中心的選擇上，具有較大的優勢，上海及首爾機場即是因地理位置關係，故在三個情境中都相對具有競爭力。

2. 中國大陸的崛起對於上海、首爾發展成為轉運中心助益相對較大
觀察目前中國大陸的經濟發展，許多省份的經濟能力甚至大於某些國家，未來如經濟情勢持續發展，在航空公司的航網中納入更多大陸機場，或大陸機場運量持續成長，整體亞太地區的航空市場的分布將會朝北方稍微偏移，而在發展成為亞太區域轉運中心上，以本研究比較的五個轉運中心及相關條件下，上海及首爾將受惠較大。

3. 地理區位效果優於當地貨運市場

一機場的當地空運市場及地理區位，對於其能否發展成為轉運中心均有影響。龐大的當地市場有助於規模經濟的達成，進而降低物流成本；而良好的地理位置，能更貼近航空市場，或讓轉運路線迂迴程度降低，亦能降低轉運物流成本、吸引轉運貨物。在本研究的範例分析中發現，地理區位的影響力更勝於當地貨運市場。

4. 台灣與中國大陸間的空運發展

台灣在 1990 年代曾以台北與亞太各國主要機場的平均飛行時間最短為利基，推動台灣桃園機場發展成為亞太轉運中心，台灣位

居東南亞及東北亞交界，戰略位置的確重要，但如納入許多大陸機場後，其平均飛行時間可能不再是最短。此外，如再考慮目的地機場，在本範例中透過台北轉運的迂迴度亦未明顯優於其他區域轉運中心。但另一方面，從本範例情境 1 及情境 2 的數據比較中可看出在納入大陸航點後，台北的確可吸引更多航線透過其轉運，對於發展成為區域轉運中心確有幫助。若未來台北與大陸通航航點持續增加，而中國大陸對首爾、東京等其他機場未持續開放，將增加選擇以台北為區域轉運中心的相對優勢。尤其對於原本即以台北為營運基地的中華及長榮航空公司，更有助於其市場的拓展及航網的完整性，並提升營運績效。

5. 區域經濟發展對航空網路設計的影響

透過以上各種情境的分析比較，我們可以瞭解區域經濟成長或運量變化確實會對於航空網路設計造成影響，甚至是轉運中心之選擇。轉運中心的改變，涉及航網結構的調整，整個航空網路設計自然完全不同。通常轉運中心的設置是屬於航空公司中長期的航網規劃，一旦設置後，短期內並不宜更動，因此在選擇設置轉運中心時應掌握市場脈動詳加評估。航空公司可透過各種情境的設計，模擬未來市場可能發生狀況，以做出符合市場發展趨勢的決策。

表 11 2009 及 2010 年各航點航空貨運成長率

航點	台北	香港	首爾	上海	東京	廣州	廈門	福州	南京	重慶	雅加達	吉隆坡	馬尼拉	新加坡	曼谷	安哥拉治	阿姆斯特丹	雪梨
2009 年 成長率(%)	-9	-7.5	-4.6	-2.3	-11.8	39.3	0.3	7.1	6.6	16.1	-8.1	-9.9	-0.8	-11.9	-10.9	-15	-17.8	-1.1
2010 年 成長率(%)	30.1	23.2	16.1	26.9	17.1	19.8	25.3	23.1	17.1	5.2	17.3	15.4	21.4	10.9	25.4	36.6	16.8	6.2

註：資料來源：2009 年、2010 年 ACI World Airport Traffic Report 及 Key Highlights 2009,2010 of Sydney airport[39、40]。

表 12 三種情境下選擇不同機場作為亞太轉運中心之相關績效指標

情境 1					
轉運中心	台北	香港	首爾	上海	東京
集運量(磅/週)	7, 925, 671	10, 055, 078	8, 119, 734	9, 476, 525	12, 195, 137
轉運量(磅/週)	3, 994, 484	4, 544, 136	3, 981, 334	3, 908, 724	4, 593, 080
總物流成本(\$)	20, 228, 561	20, 049, 667	20, 051, 806	20, 066, 880	20, 080, 868
情境 2					
轉運中心	台北	香港	首爾	上海	東京
集運量(磅/週)	8, 645, 163	12, 197, 365	8, 845, 821	11, 106, 059	12, 858, 776
轉運量(磅/週)	4, 688, 773	5, 238, 425	4, 675, 623	4, 603, 013	5, 116, 415
總物流成本(\$)	21, 156, 736	20, 964, 055	20, 936, 442	20, 897, 380	21, 047, 899
情境 3					
轉運中心	台北	香港	首爾	上海	東京
集運量(磅/週)	10, 587, 550	12, 346, 254	10, 627, 081	13, 810, 061	14, 435, 765
轉運量(磅/週)	5, 589, 942	5, 396, 080	5, 656, 382	5, 690, 795	5, 039, 362
總物流成本(\$)	25, 613, 968	25, 539, 921	25, 318, 984	25, 321, 965	25, 477, 804

註：1.集運量：透過轉運中心運送之貨物量，包含以轉運中心為起迄點貨物量加上透過轉運中心轉運之貨物量($\sum_m q_{mh} + \sum_n q_{hn}$)。

2.轉運量：亞太地區其他機場運往美國、歐洲、澳洲貨物，透過區域轉運中心轉運之貨物量($\sum_n q_{hn} - \sum_n q_{hn}$)。

3.總物流成本：亞太地區各機場運往美國、歐洲、澳洲貨物選擇最運佳送路線之物流成本（不含各機場至區域轉運中心貨物物流成本）。

表 13 三種情境下選擇不同機場作為亞太轉運中之相關績效指標排序

	情境 1					情境 2					情境 3				
	台北	香港	首爾	上海	東京	台北	香港	首爾	上海	東京	台北	香港	首爾	上海	東京
集運量由大至小排序	5	2	4	3	1	5	2	4	3	1	5	3	4	2	1
轉運量由大至小排序	3	2	4	5	1	3	1	4	5	2	3	4	2	1	5
總物流成本由小至大排序	5	1	2	3	4	5	3	2	1	4	5	4	1	2	3

第六章 結論與建議

航空網路設計對於航空公司的營運績效及競爭力具有關鍵影響，甚至關乎機隊採購等長期的重大投資。但現實世界存在各種需求擾動情形，短期上，航空需求隨著季節因素、經濟發展而波動是市場的常態，長期而言，新興經濟體的崛起、區域消長也都會造成航空市場分佈的變化，而這些運量變化均會對航空公司的航空網路設計產生影響，航空公司應對所產生的衝擊預為評估。本研究對此課題發展一套解析性模式，先就軸輻航空貨運網路設計建構模式，再就需求擾動對航空貨運網路設計的影響進行可靠度評估，並探討區域消長對航空網路設計，甚至對轉運中心選擇的影響。相關研究結果可作為航空公司在規劃軸輻航空貨運網路設計及運作之參考。

6.1 結論

整體而言，由本研究發展之模式可清楚了解軸輻航空貨運網路之運作特性，以及需求擾動對軸輻航空網路設計之影響，並可事先進行可靠度評估。在模式的建構上，有別於大部分軸輻航空貨運網路研究透過建立數學規劃模式求解最適航網路設計，本研究採解析性方法，先從軸輻航空貨運網路的運作模式及物流成本的分析著手。物流成本函數可反映貨物時間價值、機型、貨運量、起迄點與轉運中心相對位置對物流成本的影響，清楚觀察相關條件改變對航空網路設計造成的細微變化，更可發現規模經濟在軸輻航空貨運網路中所發揮的關鍵效果。謹將本研究具體結論及重要發現歸納整理如下：

1. 本研究藉由總物流成本最小化，決定各航線最適的機型、班次及運送路線，形成完整的軸輻航空貨運網路設計。從本研究建

構的模式及演算步驟，不需太複雜的計算即可發現貨運量、起迄點與轉運中心相對位置、貨物時間價值在航空貨運路線選擇中所扮演的重要角色。

2. 在機型的選擇上，本研究透過幾個簡單演算步驟求解最適機型，藉由將各種運量、距離的最適機型選擇結果予以圖形化，可清楚看出各種機型適合之營運範圍。另本研究推導出的運送路線選擇臨界線，其分佈可反映起迄機場與轉運中心的相對地理位置，可清楚觀察在特定迂迴度與運量下，所應採取的路線選擇決策。
3. 在軸輻航空貨運網路設計中，可藉由將貨物集中於主要航線上運送而發揮其規模經濟的效果，從本研究模式及範例分析中發現，部分航線確實會因為其他航線選擇轉運路線，導致轉運成本降低而加入轉運的行列。因此，在不考慮擁擠成本情況下，隨著航空公司的航網越完整，整體航線數增加，主要航線上匯集的運量越多，航網中各航線彼此影響的機會也會增加。而以往相關研究，則相對較不易觀察這種各航線間的互動關係。
4. 空運市場的波動在所難免，當市場需求改變時，原本的航空網路設計可能已非最佳化，且航空網路設計的調整涉及機隊調度、機組員派遣、維修計畫等規劃，其調整成本可能甚高。若不調整則可能面臨貨運市場的流失，導致營運績效的減損，因此航空公司應就航空網路設計的可靠度進行評估及瞭解，並對空運市場進行預測及研判，俾即早規劃相關資源的配置，以因應市場變化。而本研究所發展的模式不但針對最適航空網路設計求解，並可針對各航線運量在特定波動程度下進行可靠度評估，其結果可作為航空公司營運之參考。

5. 從範例分析中得知，當市場需求產生波動時，對於機型、班次及運送路線之可靠度會有不同影響。例如兩個空運中心間的航線，距離遠、運量大，可選用的機型相對有限，其機型可靠度高，但在班次方面，則會因運量變化較大，導致班次可靠度不高。然在區域內各機場至區域轉運中心的航線上，距離相對較短，可選用機型空間相對較大，故機型的可靠度則較兩個轉運中心間的航線低。
6. 由於航空貨運市場深受景氣影響，若因經濟景氣導致需求變化，通常各航線都會普遍會受到影響且呈現同方向的波動，而軸輻航空貨運網路具有集中貨物運送之特性，因此貨運量的波動可能更為劇烈，亦即最適機型、班次需調整之機會更高，因此採取軸輻航空網路營運的航空公司，對於機隊運能規劃應更為彈性，以因應各種突發之變化。
7. 一機場能否被航空公司選為轉運中心，其當地空運市場大小及機場的地理區位都是重要的考量因素。龐大的當地市場有助於發揮規模經濟效果，進而降低物流成本；而良好的地理區位，能更貼近航空市場，或讓轉運路線迂迴程度降低，亦能降低轉運成本、吸引轉運貨物。從本研究的範例分析發現，地理區位的影響力更勝於當地貨運市場。
8. 1997年東南亞金融危機及2008年全球金融海嘯均產生區域消長的效果，在全球化的過程中，新興經濟體不斷崛起，亦對空運市場產生轉移或改變，對於航空網路設計，甚至轉運中心的選定都會造成影響。本研究透過不同情境設計，並以亞太地區不同機場作為區域的轉運中心進行模擬，發現香港原本具有不錯的地理優勢，在吸引貨物至該地轉運及總物流成本都有很好的

表現；但隨著中國大陸經濟發展，整個亞太地區空運市場分佈稍微往北偏移，在本研究範例分析所比較的五個機場中，上海及首爾機場因貼近新興的空運市場，在發展成為亞太轉運中心上受惠較大。而在真實世界亦有類似案例能呼應此一模擬結果，原本美商聯邦快遞(FedEx)、優比速(UPS)兩公司均將亞太地區的轉運中心設於菲律賓(蘇比克、克拉克)，但目前已分別移往中國大陸的廣州及深圳，這應與中國大陸市場快速發展，因此該兩公司將轉運中心遷移至更貼近市場的機場，以利航空網路能更有效率的運作有關。本研究是從一機場的運量及地理位置分析其發展成為轉運中心的優勢，當然實務上除了這兩個重要的因素外，航空公司在評估轉運中心的位置時，亦會同時考量其他因素，例如各機場為吸引航空公司設置轉運中心所提供的資源條件、各機場的作業效率及容量擴充性、以及在該機場是否有其他航空公司競爭者，此均可能影響航空公司選擇轉運中心的決策。這可能也是聯邦快遞(FedEx)、優比速(UPS)當初會選擇將亞太轉運中心設置於菲律賓的原因。

9. 台北位居東北亞與東南亞交界，戰略位置重要，但若將中國大陸各機場納入航網，則台北並非位於亞太各機場的核心，亞太各機場如透過台北轉運至北美或歐洲，其運送路線迂迴程度亦非最小。兩岸直航確實能幫助台北吸引較多的轉運貨物，若在本研究航權無特殊限制條件下，這僅讓台北與其他亞太機場站在同一立足點。但實務上，因中國大陸並非對各國完全開放空運市場，如中國大陸開放直航台北之航點多於其他亞太機場，對於台北發展成為亞太轉運中心則會有較大幫助。
10. 整體而言，中國大陸等新興經濟體的崛起確實對整體空運市場帶來成長，即便中國大陸崛起對於其他機場發展成為轉運中心

的助益或許大於台北，但兩岸直航確實也已為台北帶來更多轉運貨物，讓經營此一市場的航空公司擴大市場及航網。未來如台北欲發展成為亞太轉運中心，仍需觀察市場變化，並儘早與具成長潛力的國家地區建立航空網路。

6.2 建議

本研究為了專注於探討軸輻航空貨運網路的特性及需求擾動對軸輻航空貨運網路設計的影響，因此在研究範圍做了一些界定及假設，惟實際上航空網路設計有許多變型及限制，後續研究應可放寬或限縮相關條件，以更貼近現實世界所面臨的航空網路設計問題，強化模式的應用性，也更符合航空公司的需求。另本研究的範例分析主要係為了驗證模式的可操作性，僅針對特定需求波動程度進行可靠度評估，並在三種情境下，比較五個機場作為亞太地區轉運中心的優勢，然在真實世界中可能發生各種狀況，例如：貨運市場的波動可能更為劇烈且各航線均不相同，未來中國大陸發展可能趨緩，而東南亞各國的發展或許會增速，且尚有其他機場可供選擇作為轉運中心，故可在各種不同情境下進行模擬，以瞭解相關條件改變，對航空網路設計的影響。謹就後續研究可繼續探討的課題，提出下列建議：

1. 軸輻航空網路型態假設的放寬

從本研究所建構的解析性模式，可清楚觀察一航線運量增加所產生的規模經濟效果，及對軸輻航空貨運網路設計產生的影響。但為便於分析，在研究範圍中敘明航空公司所採取的軸輻航空貨運網路型態是在各區域中設置一轉運中心，貨物由區域內的主要機場(spoke m)運送至其他區域的轉運中心(hub n)，可採直接運送(m→n)或透過區域內的轉運中心(h)進行一次轉運

($m \rightarrow h \rightarrow n$)。實務上，航空公司的航網設計可能更為彈性，許多研究也已在航網中納入支線及多次起降(stopover)的情況，但所建立的模式多為數學規劃模式。未來相關研究可嘗試結合兩種模式的優點，或以本研究為基礎，放寬軸輻航空網路架構假設。

2. 航權限制的影響

本研究係在沒有航權限制的假設下進行各種情境的模擬比較，雖航權自由化是發展的趨勢，但至少現階段還是有一些限制，例如中國大陸對各國開放的航點、班次均不同。後續可利用本研究建立之模式，增加不同航權開放程度的情境，讓模擬結果更貼近實際狀況。

3. 考慮機場擁擠成本或作業效率

在軸輻航空網路中，雖可透過運量合併運送發揮規模經濟的效果，進而降低物流成本，但也可能因此產生擁擠成本；另各機場作業效率不同，亦可能影響其發展成為轉運中心的競爭力。本研究已考慮此一問題，並於模式中納入轉運中心作業效率的參數，未來可再深入探討其與運量間的關係，或增加模擬的情境，以突顯各機場作業效率差異所產生之影響。

4. 航空網路設計調整成本之反應

航空公司面臨需求擾動時，調整航空網路設計的成本受到本身機隊、飛航組員、維修計畫等因素影響極大。在本研究之模式中，各航線之營運機型係從現有機隊中選擇最適機型，因此在實際應用上，可對機隊能量（各種機型可飛航之時數）予以限制，當一航線若無最適機型可供選用時，只能選用成本次佳的機型飛航，此時，調整成本則受限於機隊能量而提高，可透過此一方式反應調整成本。未來相關研究可針對航空網路調整成本進行深入分析，以作為航空公司採取因應策略的參考。

5. 擾動因素的深入探討

本研究著重在航空貨運需求面變化對航空網路設計之影響，惟現實世界的擾動因素甚多，亦有許多是來自供給面的衝擊，例如機場或航空公司員工罷工、火山爆發等事件影響航班運作，進而對部分航空網路造成影響，惟此類衝擊通常無法預測，航空公司僅能被迫調整航空網路設計以為因應。未來相關研究可繼續探討供給面擾動對航空網路設計之影響。

參考文獻

- [1]Antoniou, A., “Economies of scale in the airline industry: The evidence revisited”, Logistics and Transportation Review, Vol. 27, No. 2, pp. 159-184, 1991.
- [2]Hansen, M., “Airline competition in a hub-dominated environment: An application of noncooperative game theory”, Transportation Research-B, Vol. 24, No. 1, pp. 27-43, 1990.
- [3] World Airport Traffic Report-2012, Airport Council International World Headquarter, 2013.
- [4]Kasarda, J.D. and Green, J.D. ”Air cargo as an economic development engine: A note on opportunities and constraints”, Journal of Air Transport Management, Vol. 11, 459–462, 2005.
- [5]Zhang J, Cao, X.B., Du W.B. and Cai K. Q., “Evolution of Chinese airport network”, Physica A, Vol.389, No. 18, pp.3922–3931, 2010.
- [6]O’Kelly, M.E., “The location of interacting hub facilities”. Transportation Science, Vol. 20, No. 2, pp. 92-105, 1986.
- [7]O’Kelly, M.E., “Hub facility location with fixed costs”, Papers in Regional Science, Vol. 71, No. 3, pp.293-306, 1992.
- [8]O’Kelly, M.E. and Miller, H.J., “The hub network design problem: A review and synthesis”, Journal of Transport Geography, Vol. 2, No. 1, pp.31-40, 1994.
- [9]Aykin,T., “ The hub location and routing problem”, European Journal of Operational Research, Vol. 83, No. 1, pp.200-219, 1995.
- [10] O’Kelly, M.E. and Bryan, D.L., “Hub location with flow economics of scale”, Transportation Research-B, Vol. 32, No. 8, pp.605-616, 1998.

- [11] Elhedhli, S. and Hu, F.X., “Hub-and-spoke network design with congestion”, Computers & Operations Research, Vol. 32, No. 6, pp.1615-1632, 2005.
- [12] Alumur, S. and Kara, B.Y., “Network hub location problems: The state of the art”, European Journal of Operational Research, Vol. 190, No. 1, pp.1-21, 2008.
- [13] Chan, Y. and Ponder, R.J., “The small package air cargo industry in the United States: A review of the federal express experience”, Transportation Research-A, Vol. 13, No. 4, pp. 221-229, 1979.
- [14] Chestler, L., “Overnight air express: Spatial pattern, competition and the future in small package delivery services”, Transportation Quarterly, Vol. 39, No. 1, pp.59-71, 1985..
- [15] Hall, R.W., “Configuration of an overnight package air network”, Transportation Research-A, Vol. 23, No. 2 pp139-149,1989.
- [16] Kuby, M.J. and Gray, R.G., “The hub network design problem with stopovers and feeders: The case of federal express”, Transportation Research-A, Vol. 27, No. 1, pp.1-12, 1993.
- [17] 楊大輝、蕭凱陽、李綺容，「考量直航轉運並行之軸輻式航空網路模型」，運輸計劃季刊，第三十三卷第四期，民國九十三年，頁603-624。
- [18] Lin, C.C., Lin, Y.J. and Lin, D.Y., “The economic effects of center-to-center directs on hub-and-spoke networks for air express common carriers”, Journal of Air Transport Management, Vol. 9, No. 4, pp. 255-265, 2003.
- [19] Oktal, H. and Ozger, A., “Hub location in air cargo transportation: A case study”, Journal of Air Transport Management, Vol. 27, pp. 1-4,

2013.

- [20] Lin, L.C. and Hong, C.H., “Operational performance evaluation of international major airports: An application of data envelopment analysis”, Journal of Air Transport Management, Vol. 12, No. 6, pp. 342-351, 2006.
- [21] Kim, J.Y. and Park, Y., “Connectivity analysis of transshipments at a cargo hub airport”, Journal of Air Transport Management, Vol. 18, No. 1, pp. 12-15, 2012.
- [22] Hall, R.W., “Comparison of Strategies for Routing Shipments Through Transportation Terminals”, Transportation Research-A, Vol. 21, No. 6, pp. 421-429, 1987.
- [23] Hall, R.W., “Direct versus terminal cargo routing on a network with concave costs”, Transportation Research-B, Vol. 21, No. 4, pp. 287-298, 1987.
- [24] Daganzo, C.F., Logistics system analysis. Springer-Verlag Press, Berlin, Heidelberg, 1991.
- [25] Hui, G.W.L., Hui, Y.V. and Zhang, A., “Analyzing China’s air cargo flows and data”, Journal of Air Transport Management, Vol.10, No. 2, pp. 125–135, 2004.
- [26] Rimmer, P.J., “Effects of the Asian Crisis on the geography of Southeast Asia’s air traffic”, Journal of Transport Geography, Vol.8, No. 2, pp. 83-97, 2000.
- [27] Sanso, B. and Milot, L., “Performability of a congested urban transportation network when accident information is available”, Transportation Science, Vol.33, No. 1, pp. 68-79, 1999.
- [28] Du, Z.P. and Nicholson, A., “Degradable transportation systems:

- Sensitivity and reliability analysis”, Transportation Research-B, Vol. 31, No. 3, pp. 225-237, 1997.
- [29]Siu, B.W.Y. and Lo, H.K., “Doubly uncertain transportation network: Degradable capacity and stochastic demand”, European Journal of Operational Research, Vol.191, No.1, pp.166-181, 2008.
- [30]Haughton, M.A. and Stenger, A.J., “Comparing strategies for addressing delivery shortages in stochastic demand settings”, Transportation Research-E, Vol.35, No.1, pp.25-41, 1999.
- [31]Hsu, C.I. and Wen, Y.H., “Reliability evaluation for airline network design in response to fluctuation in passenger demand”, Omega Vol.30, No.3, pp 197-213, 2002.
- [32] Hsu, C.I. and Eie, W.Y., “Airline network design and adjustment in response to fluctuation in jet fuel prices”, Mathematical and Computer Modelling, Vol.58, No.11-12, pp 1791-1803, 2013.
- [33]Wu, C.L., “ Inherent delays and operational reliability of airline schedules”, Journal of Air Transport Management, Vol.11, No.4, pp 273–282, 2005.
- [34]Yang, T. H., “Stochastic air freight hub location and flight routes planning”, Applied Mathematical Modelling, Vol.33, No.12, pp 4424–4430, 2009.
- [35]Alumur, S.A., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F., “Hub location under uncertainty”, Transportation Research Part B, Vol.46, , No.4 pp 529–543, 2012.
- [36]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，第二十六卷，第一期。民國八十六年，頁 95-118。
- [37]The Air Cargo Tariff Manual, International Air Transport Association,


2012.

[38]Horonjeff, R., and McKelvey, F.X., *Planning and Design of Airports*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2002.

[39] World Airport Traffic Report-2009, Airports Council International World Headquarter, 2010.

[40] World Airport Traffic Report-2010, Airports Council International World Headquarter, 2011.

簡歷

姓名	王 志 青		
生日	61 年 8 月 31 日		
住址	新北市三重區環河北路三段 518 號 4 樓		
聯絡電話	0936-889910		
學歷	83 年 6 月	交通大學運輸工程與管理學系學士	
	85 年 6 月	交通大學交通運輸研究所碩士	
	103 年 6 月	交通大學運輸與物流管理學系博士	
經歷	87 年 7 月- 88 年 10 月	臺北市交通管制工程處工程員	
	88 年 10 月- 100 年 7 月	交通部民用航空局科員、專員、技正、科長	
	100 年 7 月- 102 年 6 月	交通部民用航空局臺北國際航空站組長	
	102 年 7 月 迄今	交通部民用航空局副組長	
著作	國外期刊		
	Chaug-Ing Hsu and <u>Chih-Ching Wang</u> , 2013, “Reliability Analysis of Network Design for a Hub-and-Spoke Air Cargo Network”, International Journal of Logistics Research and Applications, Vol. 16, No. 4, pp.257–276 (SSCI)		
	國內期刊		
	許巧鶯、 <u>王志青</u> ，「軸輻航空貨運網路之直接與轉運路線選擇」，運輸計劃季刊，第二十六卷，第一期，95-118頁，民國八十六年。(TSSCI)		
	國外研討會		
	Chaug-Ing Hsu and <u>Chih-Ching Wang</u> , 2011. “The Impact of Asia Pacific Regional Development on Airline Cargo Network Design”, Paper presented at the 58th Annual North American Meetings of the Regional Science Association International and the 2nd Conference of the Regional Science Association of the Americas, Miami, U.S.A., November 9-12, 2011.		