

國立交通大學
運輸科技與管理學系碩士班

碩士論文

因應燃油價格變動之航空網路航線機型與頻次規劃
Airline Network Design and Adjustment in Response to Fluctuation
in Jet Fuel Price



研究生：余惟茵

指導教授：許巧鶯 教授

中華民國九十八年六月

因應燃油價格變動之航空網路航線機型與頻次規劃
Airline Network Design and Adjustment in Response to Fluctuation
in Jet Fuel Price

研究生：余惟茵

Student : Wei-Yin Eie

指導教授：許巧鶯

Advisor : Chaug-Ing Hsu

國立交通大學
運輸科技與管理學系
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation Technology and Management

College of Management

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Transportation Technology and Management

June 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

因應燃油價格變動之航空網路航線機型與頻次規劃

研究生：余惟茵

指導教授：許巧鶯 教授

國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班

摘要

航空業營運深受外在環境影響，容易因為社經環境之變動蒙受巨額損失，其中由於燃油成本佔航空公司營運成本相當大的比例，但國際油價容易受到國際局勢、油產國聯合減產或是匯率波動等因素之影響，具有極大之不確定性，使航空公司對於燃油成本之控制更形困難。實務上航空公司透過減班、取消航線等方式降低成本因應油價上升之衝擊。透過航空網路設計規劃，航空公司可於規劃期間，評估其機隊組成與航線旅運量，規劃適當之機型頻次以滿足旅運量需求。過去關於航空網路規劃問題之研究極少討論營運成本之不確定性對於航空公司規劃航線機型頻次之影響。關於油價變動之研究，過去則多就經濟與金融層面進行探討，少有研究就航機之燃油價格與航空網路成本進行分析。本研究即針對航空燃油價格特性深入探討，並分析航空公司如何因應燃油價格變動進行航空網路規劃最適之航線機型頻次。

本研究以航空公司客運之營運成本組成結構為基礎，建立航空網路規劃模式，在營運成本最小化之目標式下，求解網路之航線機型與頻次。進而考慮燃油價格之變動為航空公司難以預測與控制之不確定性因素，以區間分析的概念分析燃油歷史價格特性，假設燃油價格在不同區間之下呈現常態分配的情形，以作為計算各航線可靠度之參數，本研究定義可靠度為初始規劃機型頻次下，航空公司可維持航油成本收支損益平衡之機率，並且建構可靠度模式。在求解網路規劃模式之後，針對各航線規劃之機型頻次，以可靠度模式評估其規劃在油價變動下維持其燃油成本損益平衡之機率，做為航空公司因應航空燃油之變動決策是否進行調整策略之依據，並假設不同情境下之調整策略，如因應燃油價格變動與需求變動重新規劃、加入新型航機重新規劃、引入實際旅運需求變化量，經由放鬆限制式重新規劃航線與頻次，同時評估期調整成本與懲罰值，提供航空業者因應不確定性因素下之評估及決策方法，減少外在因素影響下之營運虧損。

本研究透過範例分析進行模式之求解與操作，並以 2007 年與 2008 年之航機燃油價格與旅運量進行實證分析，研究結果顯示，本研究模式在航線規劃上選擇轉機航線，各航線偏向選擇直接成本較低之機種，模式具有決策最小成本之規劃功能，以多種機型規劃後，機型選擇符合目前航機之設計與採用趨勢。本研究分析航機燃油歷史價格在不同油價區間下，其分佈具有常態分配之特性。根據範例分析，當油價發生異常上升情形則航線之可靠度下降，油價異常下降則造成可靠度上升，再權衡懲罰值與調整成本進行決策是否調整，結果顯示，置換航機後之可靠度評估則顯示使用新型航機具有提高頻次、節省燃油成本之效果，承載率高之長程航線採轉機航線較具有節省燃油成本之效益，並提高短程航線之承載率與服務頻次。綜合上述，航空公司可衡量本身機隊條件、各航線特性與燃油價格特性，規劃決策最適之航線、機型與頻次，以降低燃油成本對營運之衝擊。

關鍵字：航空燃油價格，航空網路設計，可靠度評估

Airline Network Design and Adjustment in Response to Fluctuation in Jet Fuel Price

Student: Wei-Yin Eie

Advisor: Dr. Chaug-Ing Hsu

Department of Transportation Technology and Management
National Chiao Tung University

Abstract

Airlines face the severe challenge of jet fuel price uncertainty because of the difficulties in controlling the fuel cost. When the fuel price is raised in an escalating rate, airlines might adjust their network operations such as decreasing flight frequency or cancelling routes with markedly negative profit. With the airline network design, carriers can determine the appropriate aircraft types and flight frequency for each route to meet the passenger demand. Though a number of studies have discussed the network design problem considering the uncertainty of passenger demand, few of those dealt with fuel price. This study develops a series of models to determine the aircraft types and flight frequencies on individual routes, and evaluate the reliability of the proposed network planning under the fluctuation in jet fuel price. Furthermore, the adjustment and decision-making method is provided to decide whether to adjust flight frequencies or remain the initial planning in response to fuel price fluctuation.

Airline network design model is used to determine the types of aircraft and flight frequencies on individual routes with the objective of minimizing airline network operation costs. To evaluate the reliability in airline network, the study further assumes historic data of fuel prices can be classified into distinct intervals within each of which there exists a normal distribution. The fuel-price intervals and distributions have been calibrated and used as critical parameters for reliability evaluation. In this study, the reliability of individual routes are based on whether revenues from flights with initially proposed flight frequencies and aircraft can accommodate for variations in jet fuel expenditure. We define the reliability as the probability that the proposed flight frequencies will operate in an at least break-even condition under future fuel price fluctuation. This study further provides a number of adjustment methods to adjust the unreliable network under different situations. We examine the influence of fuel price and passenger demand on the reliability of airline network using sensitivity analysis. The adjustments include changes in flight frequency and exiting aircraft and the purchase of new fuel-efficient aircraft.

Two case studies are presented to examine the feasibility of the models. The first case uses the forecasting demand and fuel price to evaluate the reliability of network in response to future uncertainty. The results provide adjustment suggestions in dealing with a combination of passenger demand and fuel price with varying fluctuation rates. The second case uses the real data of an international carrier in Taiwan as an example to illustrate how to deal with turbulent fuel price and economic situation in 2007 and 2008. The results show

the critical load factors for unreliable routes, which enable airlines easily identify routes to adjust flight frequency and/or aircraft, thereby reducing the expected losses during the fuel price fluctuation periods. In sum, the results of the study provide ways to enhance the commercial airline network design in response to future uncertainty of jet fuel price and improve the decision-making of network planning and adjustment.

Key words: *Jet fuel price; Airline network design; Reliability evaluation*



誌 謝

在新竹吹風的日子，不知不覺已經兩年了，從一開始的不習慣到接受與怡然自得，漂亮的洋傘被吹壞也不再氣急敗壞，我想，自己跟初踏入這個校園的時候，已經是大不相同了。因為得到許多人的幫助，才得以成長，其中最感謝的就是指導教授許巧鶯老師。老師耐心的指引與建議是我在摸索研究的路上最為仰賴的明燈，嚴厲的指正讓我戒除了逃避的惡習，不吝惜的給予鼓勵與肯定則帶回我失去的自信心，使我得以持續追求自己的夢想。因為有高凱老師的照顧，擔任經濟助教的兩年真的是樂在工作中，也謝謝姚銘忠老師對我的關心與提拔，任維廉老師與黃寬丞老師的問候總讓學生倍感溫馨，感謝系上的所有的老師，帶領我們徜徉在運輸的學海之中。論文撰寫期間，特別感謝北交馮正民老師、黃寬丞老師細心審閱以及口試時給予諸多意見，讓我的論文能夠更加進步。另外也感謝交大電控所的董蘭榮老師提供工作機會，讓生活更加充實。

十樓的溫馨許 Lab 是兩年來的生活重心，這期間感受到慧潔學姐持續對我們付出關懷與照顧，在我跟可靠度搏鬥的時候給了很大的助力，小宏學長、耀慶學長讓整個實驗室得以順利的運轉，溫柔賢慧的佳紋學姐是我的支柱，與美珠學姐的共同腦力激盪總是很有收穫，兩位博二的學姐憲梅、維婷不但是學業上的好榜樣，能像好朋友一樣的相處真的很開心，碩一時的好鄰居法筑學姐、熱愛慢跑的維真學姐以及同樣來自成大的律昇學長，兩位幫實驗室帶來新氣象的帥氣學弟坤耀跟宜霖，以及聰明可愛的子萱在兩年間共患難、一路相互鼓勵，因為有你們，我更喜歡許 Lab 了。謝謝大家在研究的旅途上與我同甘共苦，並且分享生活中的點點滴滴。

感謝好姐妹們，可愛乙庭、體貼怡安、俏麗千榆，研究所有緣作伙的伶潔、小嵐、明翰、家銘學長以及其他許多沒有點到名的同學們與我度過許多歡樂時光，因為有在海外的怡璿、育倫幫我找資料，研究才得以順利進行，感謝 SOC Lab 的伙伴們這一年半以來的包容，還有一輩子的好友馥宇，時常邀我去高雄玩，紓解了很多的壓力。感謝球是圓的在我離開成大以後仍三不五時的嘴砲關心，以及申請成績單的幫忙與回台南的招待。

最後我要感謝我最愛的家人們，爸爸對於研究與教學的熱誠一直是我的典範，辛苦工作讓全家人過好日子，媽媽長久以來的細心照顧，讓家中洋溢著幸福與溫暖，有可愛的小優當我的出氣筒跟好玩伴，生活有趣多了，讓我總是捨不得離開家。還有在台北的親人們，最親愛的阿媽，已經到天上的阿公，還有諸多長輩們對我的照顧與支持，時常讓舅舅們請吃東西，參加阿姨們的母姐會，給阿燕舅媽請看電影吃喝玩樂，家人永遠是我最強而有力的後援與啦啦隊。還有帥氣乖巧的何品毅，既然我們已經達成共識，那就一起好好努力吧！

余惟茵 謹誌
2009.7 新竹交大

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iv
目錄	v
表目錄	vii
圖目錄	ix
符號說明	xi
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	5
1.3 研究範圍	6
1.4 研究流程與架構	7
第二章 文獻回顧	11
2.1 航空成本分析	12
2.1.1 航空營運成本	12
2.1.2 航空燃油成本以及燃油使用	14
2.1.3 機場使用費成本分析	15
2.2 航空網路設計規劃	18
2.3 可靠度應用於網路規劃之研究探討	20
2.3.1 可靠度之相關文獻探討	20
2.3.2 應用可靠度探討路網之研究	21
2.4 小結	24
第三章 模式構建	25
3.1 航空網路設計	25
3.2 航空網路營運成本函數	26
3.3 航空網路航線機型頻次規劃模式	28
3.4 航空網路可靠度評估模式	29

3.4.1 航空燃油價格區間分析與機率分配.....	28
3.4.2 航空燃油價格變動之下之航空網路可靠度.....	31
3.5 航空公司對航機頻次之調整決策.....	35
3.5.1 燃油價格變動下之航空營運成本.....	35
3.5.2 航空公司因應策略之假設情境.....	36
第四章 範例分析.....	40
4.1 航空網路航線機型頻次規劃求解.....	40
4.2 航空燃油價格區間分析與機率分配.....	47
4.3 航空網路可靠度分析.....	54
4.4 假設情境與航空公司之因應策略.....	58
第五章 實證分析.....	74
5.1 航空網路規劃.....	76
5.2 可靠度評估.....	79
5.2.1 以 2008 年油價變動為例評估可靠度.....	79
5.2.2 以 2007 年油價變動為例評估可靠度.....	86
5.3 航空公司調整網路航線機型頻次策略分析.....	89
5.3.1 2008 年調整策略分析.....	90
5.3.2 2007 年調整策略分析.....	96
第六章 結論與建議.....	98
6.1 結論.....	98
6.2 建議.....	101
參考文獻.....	102
附錄.....	105

表目錄

表 2.1	法蘭克福機場噪音起降噪音收費標準	16
表 2.2	史基浦機場之航機噪音分類	17
表 2.3	史基浦機場根據航機噪音分類所收取之噪音費用	17
表 2.4	重要研究主題之文獻回顧整理	23
表 4.1	C 航空公司網路之航線設定	41
表 4.2	C 航機公司機隊狀態	41
表 4.3	各航段之候選機型以及預設承載率	41
表 4.4	各機場之機場使用費	42
表 4.5	C 航空公司各航線交通流量預測	43
表 4.6	各航段 b_k 成本輸入參數	44
表 4.7	各航段候選航機之油量	45
表 4.8	初始航線機型頻次規劃結果	45
表 4.9	燃油價格分佈區間分類表	54
表 4.10	各航段於油價正常變動下之可靠度	55
表 4.11	台北-洛杉磯航線假設之油價異常上升情境相關資料	56
表 4.12	台北-洛杉磯航線因應油價變動之可靠度評估結果	56
表 4.13	台北-洛杉磯航線假設之油價異常下降情境相關資料	57
表 4.14	台北-洛杉磯航線因應油價下降之可靠度評估結果	57
表 4.15	情境一重新規劃結果	58
表 4.16	客運燃油附加費徵收標準	59
表 4.17	新增候選航機資料	64
表 4.18	各航線之新增候選機型與預設承載率	64
表 4.19	新候選航機營運成本輸入參數	65
表 4.20	新候選航機之機場使用費	65
表 4.21	加入新機型後重新規劃結果	66
表 4.22	燃油價格敏感度與營運成本變化	67
表 4.23	航空網路直航航線重新規劃機型組合與可靠度評估	69
表 4.24	航空網路轉機航段重新規劃機型組合與可靠度評估	71
表 5.1	根據 2008 年旅運需求量之網路模式規劃結果	77
表 5.2	根據 2007 年旅運需求量之網路模式規劃結果	78
表 5.3	2008 年可靠度計算參數	81
表 5.4	2008 年正常油價變動下之航線可靠度	81
表 5.5	2008 年油價異常情形之航線可靠度評估	82
表 5.6	2008 年全年之可靠度評估結果	83
表 5.7	2007 年可靠度計算參數	87

表 5.8	2007 年正常油價變動下之可靠度	87
表 5.9	2007 年油價異常情形下之航線可靠度評估	87
表 5.10	2007 年全年之可靠度評估結果	88
表 5.11	2008 年四月台北-東京與台北-洛杉磯調整決策	91
表 5.12	2008 年六月台北-東京與台北-洛杉磯調整決策	93
表 5.13	2008 年七月台北-東京與台北-洛杉磯調整決策	94
表 5.14	2008 年四月台北-曼谷航線調整決策	95
表 5.15	2007 年十月台北-東京與台北-洛杉磯航線重新規劃	96



圖目錄

圖 1.1 航空燃油歷年波動圖	2
圖 1.2 研究架構圖	8
圖 1.3 整體研究流程圖	10
圖 2.1 航機營運成本分類	13
圖 3.1 歷年航機燃油價格分佈圖	26
圖 4.1 最高油價間直方圖	47
圖 4.2 最高油價區間之適配性檢定圖	48
圖 4.3 高油價區間直方圖	48
圖 4.4 高油價區間之適配性檢定圖	49
圖 4.5 次高油價間直方圖	49
圖 4.6 次高油價區間之適配性檢定圖	50
圖 4.7 次高油價區間累積機率密度圖	50
圖 4.8 中等油價區間直方圖	51
圖 4.9 中等油價區間之適配性檢定圖	51
圖 4.10 低油價區間之直方圖	52
圖 4.11 低油價之適配性檢定圖	52
圖 4.12 最低油價區間之直方圖	53
圖 4.13 最低油價之適配性檢定圖	53
圖 4.14 初始規劃燃油價格下之可靠度機率圖	55
圖 4.15 需求變動下之懲罰值與調整成本關係圖	60
圖 4.16 需求上升與油價上升 10% 至 40% 之懲罰成本與調整成本關係圖	62
圖 4.17 需求上升與油價上升 50% 至 100% 之懲罰成本與調整成本關係圖	62
圖 4.18 需求下降與油價上升 10% 至 50% 之懲罰成本與調整成本關係圖	63
圖 4.19 需求下降與油價上升 60% 至 100% 之懲罰成本與調整成本關係圖	63
圖 4.20 機型重新規劃造成之總成本變動	68
圖 4.21 台北-洛杉磯航線不同機型之承載率與燃油成本關係圖	70
圖 4.22 台北-法蘭克福航線不同機型之承載率與燃油成本關係圖	70
圖 4.23 台北-東京不同機型之承載率與燃油成本關係圖	72
圖 4.24 東京-檀香山不同機型之承載率與燃油成本關係圖	72
圖 4.25 台北-曼谷不同機型之承載率與燃油成本關係圖	73
圖 4.26 曼谷-阿姆斯特丹不同機型之承載率與燃油成本關係圖	73
圖 5.1 歷年西德州原油每月價格波動情形	74
圖 5.2 2007 年航空公司各航線旅運量變化	75
圖 5.3 2008 年航空公司各航線旅運量變化	75
圖 5.4 2008 年航空燃油價格異常情況示意圖	80

圖 5.5 C 航空公司 2008 年前三季營運成本	85
圖 5.6 C 航空公司 2008 年前三季營業淨利	85
圖 5.7 2007 年航空燃油價格異常情況示意圖	86
圖 5.8 面臨燃油價格變動航線可行調整策略示意圖	90
圖 5.9 2008 年四月台北-洛杉磯航線改為轉機之懲罰成本與調整成本變化圖	92
圖 5.10 2008 年六月台北-洛杉磯航線改為轉機之懲罰成本與調整成本變化圖	93
圖 5.11 2008 年七月台北-洛杉磯航線改為轉機之懲罰成本與調整成本變化圖	94
圖 5.12 2008 年四月台北-曼谷航線調整頻次之懲罰成本與調整成本變化圖	95
圖 5.13 2007 年十月台北-東京航線調整頻次之懲罰成本與調整成本變化圖	97
圖 5.14 2007 年十月台北-洛杉磯航線調整頻次之懲罰成本與調整成本變化圖	97



符號說明

N	航空網路中所有節點之集合
A	航空網路中所有航段之集合
i	航空網路當中，航機起飛之任一機場
j	航空網路當中，航機降落之任一機場
a	機場 i 至機場 j 之間的航線
P	航空網路中所有航線之集合
p	航空公司網路中的任一候選航線
k	航空公司機隊中之航線候選機型
f_a	機場 i 與機場 j 之間航段 a 之每月頻次，為所有機型飛行於航線 p 之頻次總和
f_{pk}	使用 k 型航機飛行航線 p 之每月班機頻次
δ_a^p	二元變數，當航線 p 經過航段 a 則 $\delta_a^p = 1$ ，否則為 0
Q_a	每月經過航段 a 之旅運量
Q_{pk}	每月搭乘航機 k 航行航線 p 之旅運量
\bar{O}^t	航空網路初始規劃所預測之單月航空燃油價格
H_{ak}	機型 k 飛行航段 a 單趟之油量
$c_a^F(f_a)$	所有航行於航段 a 之頻次所產生之燃油成本加總
$c_a^b(f_a)$	所有航行於航段 a 之頻次所耗費的維修成本與機組人員費用加總
b_{ak}	單一機型 k 頻次飛行航段 a 所需耗費之維修成本與機組人員費用
f_{ak}	使用機型 k 航行航段 a 之每月頻次
c_{jk}^L	機型 k 降落 j 機場所支付的降落費
c_{jk}^E	機型 k 降落 j 機場所支付的環境收費，其中包含噪音以及引擎廢氣排放費
$c_{jk}^\pi(f_{ak})$	使用機型 k 航行航段 a 並降落於機場 j 之頻次所產生的機場使用費
$C_a^D(f_a)$	航空公司航行航段 a 之直接成本
w_a	航空公司於航段 a 載運一位旅客所產成的平均間接營運成本

$C_a^l(Q_a)$	航空公司於航段 a 所產生之間接營運成本
β_a	航段 a 的承載率
m_k	k 型航機之座位數
u_k	機型 k 的最大利用率，即單架航機 k 每天最大飛行時數
Y_k	航空公司機隊中機型 k 的總架數
τ_p	τ_p 為班機在航線 p 之單趟航程所需之飛行時間
t	規劃年之月份
\tilde{O}^t	每個月航空燃油價格之隨機變數
O^t	每個月航空燃油價格之實際值
I	規劃年月份之集合
Ω	隨機航空燃油價格之實際值 O^t 的樣本空間
x	航空燃油歷史價格
X	燃油價格區間
s_y	發生燃油價格變動之事件
U	所有燃油價格正常與異常變動之事件集合
$C_a^{F,pax}$	飛行航段 a 之乘客所負擔之燃油成本
g_{ak}	每位航空旅客於航段 a 航程中搭乘機型 k 所負擔之燃油成本
C_a^*	由航空公司所支付航段 a 之總燃油成本與其由旅客收入所回收之燃油成本之間的成本比值
\bar{R}_a	航段 a 燃油成本於初始規劃油價之下的可靠度
\bar{R}	航空網路於初始規劃油價之下的可靠度
t_y^*	在規劃年間，異常情況 s_y 之發生時間
\tilde{v}_y	歷程(duration)，即 s_y 所延續之時間長度，單位為月份
v_y^q	\tilde{v}_y 的實際值
p_q	歷程發生之機率



\tilde{O}_{yq}^t	當異常情形 s_y 發生，持續 v_y^q 的隨機燃油價格
I_q^y	異常情況 s_y 持續發生於整體航空網路中，屬於異常情況發生區間的月份集合
I_q^0	屬於正常情況 s_0 的月份集合
I^{0+}	正常情形 s_0 之下，燃油價格屬於高峰期的月份集合
I^{0-}	正常情形 s_0 之下，燃油價格屬於峰谷期的月份集合
\hat{t}	規劃年需要調整航空網路之月份的集合
\tilde{t}	因應燃油價格需要調整航空網路之月份
\bar{O}^t	航空公司所預期之特定月份 t 的燃油價格水準
\bar{O}_{yq}^t	預期在 t 月會發生異常情形 s_y 的燃油價格
$f_{\bar{p}k}^t$	受調整月份 t 在重新規劃油價之下所規劃之航線機型頻次
$C_{\bar{p}}^t$	因應航空燃油價格變動產生之機型頻次調整成本
$\theta_{\bar{p}k}^t$	受到每一架機型 k 航機在調整之月份 t 飛行航線 \bar{p} 的調整成本
C_a^{tax}	各航段上每位旅客被增收之燃油附加稅

一、 緒論

1.1 研究背景與動機

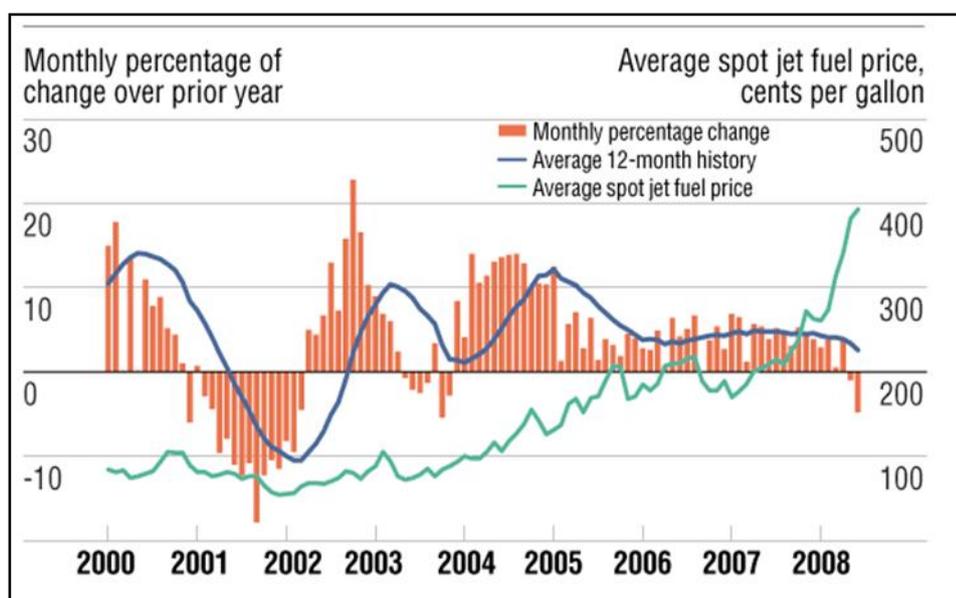
近年來航空產業面臨了許多困境，在全球歷經了 2001 年的 911 事件，造成航空業的低潮期，直接的對於航空運輸在安全性以及營運上產生衝擊。在後 911 時期，儘管亞洲地區近年因為貿易興盛而呈現運量成長的情況，但在 2008 年下半年，因為國際上之眾多因素，造成全球經濟急速下滑，因此在整體環境而言，航空業當中，尤其是航空公司，因為營運成本的提升與旅客需求量的減少，面臨營運困難與虧損的情形。由於運輸屬於衍生性需求，因此當景氣不佳時，運輸需求也會隨之減少，航空公司為了改善經營困境，透過不同的營運策略希望將損失降至最低。許多航空公司進行了購併或是聯盟的方式，重新整合航空市場，也有航空公司採取不斷減班，取消航線或是使用共用班號的模式，或是提高票價，對於旅客加收行李費用，來維持收支平衡。這些現象顯示了航空業的不景氣不僅讓業者與航空業從業人員損失，也讓使用航空的旅運者之權益受到損害。

以航空客運市場的角度來看，航空公司主要之營收來自於票價的收入，因此旅客承載率對於營運的客機十分重要。然而旅運量卻容易受到一些因素而影響，例如經濟不景氣、票價上升以及恰逢旅遊淡季等因素。如果航空公司希望能夠收支平衡甚至產生盈利，除了可利用行銷廣告、票價折扣優惠、會員累計哩程制度等方式吸引客源，在成本方面因為是屬於航空公司營運之基本開銷，並且班機營運成本複雜且高昂，因此對於成本的控制相形更加重要，而其中航空燃油成本佔航空公司營運成本之中極大的比例，往往由於油價的變動，業者為了因應成本，會對於票價做調整，航空之官方管理單位也會對於燃油附加稅做調整的動作，因此油價可說對於班機票價與燃油附加稅的升降影響極大。當油價提升，票價或稅率也隨之上漲，如此一來可能造成旅客對於航空旅行之需求降低，尤其對於非商務旅行的國際旅客，例如進行觀光旅遊，可能降低其出國之意願，造成航班的承載率過低，無法反映航空公司之營運成本。當油價或是稅率調降時，則旅客可能著眼於機票降價，而增加航空旅行的意願。

因此航空燃油價格對於航空公司營運上之影響極大並且隨著國際原油市場之價格而變動，然而國際油價卻容易受到國際局勢、匯率波動或是產油國家動向等影響，使得國際油價趨勢極不穩定，航空公司因此難以控制其燃料成本。為了減緩國際油價對航空營運成本的影響，航空公司常透過與世界主要石油供應商簽訂長期合約，目的在於取得更大的油價折扣，並且可以期貨工具來避免風險(長榮航空，2005)。

近年來國際油價受到國際趨勢之影響，產生很大的震盪。根據經濟部能源局(2008)分析，通常國際原油價格會在夏季與冬季各有一波高峰期，這主要是由於夏季屬於北美旅遊之旺季，因此造成燃油之需求量大增，冬季之需求高峰則來自於熱燃油的需求而帶動整體油價的上漲。其分析 2007 年之油價走勢，雖然沒有發生重大戰爭以及政治事件，卻自 2007 年八月起，油價急速上升，至 2007 年 11 月 21 日達到每桶 99.29 之高價位，年初與年底之月均價則是相差了每桶 37.39 美元，漲幅高達 68.79%。

2008 年的油價趨勢比起 2007 年則是呈現了更大幅度的改變，根據台經院產經資料庫(2008)所統計，在 2008 年上半年，呈現大幅上漲的現象，比起 2007 年之同期表現，漲幅更高達 75.06%。然而到了 2008 年下半年，卻受到美國次級房貸風暴蔓延、全球經濟與國際貿易衰退影響，各產業之需求皆呈現衰退趨勢，國際油價也順勢下跌，至 2009 年國際原油價格已回跌到每桶四五十美元左右之水準，油價變動幅度之大，漲跌歷程之迅速，前所未見，更令航空業者感到恐慌。圖 1.1 顯示 2000 年以來的航空燃油價格變化，整體航機油價呈現上漲的趨勢。同時，可看出歷年每月的油價變動百分比(直方圖部分)，自 2004 年起，皆呈現正成長的狀態，因此，對航空公司而言，燃油成本的比重逐年增加。一般而言，燃油成本約佔航空公司總營運成本的三成左右，但根據台經院(2009)調查，在 2008 年，燃油成本約佔國籍航空公司五成左右之營運成本，造成航空公司蒙受虧損。



資料來源：波音公司

圖 1.1 航空燃油歷年波動圖

根據中華航空九十七年度之年報顯示，該年整體營收為新台幣 1,252 億元，較九十六年度減少 1.4%，同時由於國際油價高漲，造成全年油價支出高達新台幣 673 億 3220 萬餘元，比九十六年度增加了 26%，國際油價回穩之後，受到全球金融海嘯衝擊，因此稅後虧損達新台幣 323 億 5140 萬元。長榮航空之營收統計則顯示其九十七年度營收為新台幣 931 億元，較前一年減少 2.63%。

當國際油價提升時，航空公司可能就面臨了成本提高與虧損的危機，在實務上，航空公司通常會因應此情形而有一些應對方式。對於航空公司而言，如果因應油價成本而提升票價或是加收行李附加費用，可能會因此讓旅客不滿造成顧客的流失，轉移至其他還未漲票價之航空公司購買機票，或是直接取消旅程。若是航空公司不願調升票價，常見的因應措施，就是減少承載率較低的班次、取消較為冷門的航線或是調整航班機型等。以 2008 年來說，由於上半年的國際油價上升幅度極大，突破每桶百元美元以上之價格，讓航空公司之燃油成本提升至營運成本之四到五成左右，為了因應成本之提升，航空公司不得不調整其營運策略，主要透過對於機隊的重新編排以及航線之調整，另外對於旅客而言，則是面臨了票價與燃油附加費之上漲。具體航空公司縮減機隊或航班的例子有：中華航空於 2008 年下半年推行「火鳳凰計畫」，透過航網結構串連與提升運價，實施各項節油措施，並實施自願無薪休假，此計劃的推行效益為 45 億元。美國的西北航空計畫於 2008 年的最後三個月停飛 14 架波音 757 航機以及空中巴士噴射機，並且進行縮減 9.5% 國內及國際航班。國籍航空公司也在 2008 六月因應高油價而調整航線，例如華航客貨運減少了將近 150 個班次，並且對於績效較佳的航線如法蘭克福、峇里島等，採用大型航機來滿足需求。對於績效不佳的航線則僅少航班並且採用較小型客機。也有航空公司找尋其他替代方案來節省，例如日本航空公司發現，只要改變航機的降落方式，便可以達到省油的效果，由於傳統的降落方式是飛機不斷反覆平行飛行與下降，過程中會消耗大量燃油，而日航新採取之降落方式則是讓飛機由一萬公尺高空直接滑翔至低空，平均每趟飛行可以省下約 675 公斤之燃油，並且減少 2090 公斤的二氧化碳。另外，根據 Time 於 2008 年二月的報導，航空業也積極尋找替代燃油的資源，例如維京(Virgin)航空進行使用生質能(biofuel)之波音 747 航機試飛。

以上例子舉出實務上航空公司如何因應油價上升所採取之因應措施，然而若以航空網路的觀點出發，則隨著原油價格的攀升與變動，直接衝擊了大量使用燃油之航空公司營運成本。為了節省成本，航空公司可能採取之行動包含對於航線、機型與頻次的調整，例如提高承載率以及降低頻次。當頻次減少時，便可能採取較大之航機來載運旅客，如此一來，燃油成本對於座位之效應在於，當航空公司因應油價上升，使用座位成本較低

的大型客機，或是因為承載率下降，業者即將原本該頻次的大型客機改採用較小型客機，來提高承載率。另外航空公司不只因應需求量調整機型，也可透過採用較為省油的機型達到節省燃油成本之目的。而在航線上的調整，則例如將航線取消、航線的合併，由原本的直航改為須要轉機的航線，這些航線上的調整都是希望能達到節省成本的效果，並且提高承載率。

由以上背景可以了解到，航空業營運深受外在環境之影響，然而航空運輸投入資金十分龐大，因此容易因為社經環境之變動而蒙受巨大的損失，由於航空成本控制不易，其中又以燃油成本最高且不確定性最大，因此若是分析油價漲價對於航空營運成本的衝擊，能夠使航空公司衡量其供給與需求情形，規劃適當的航線與頻次，選用符合需求之機型來服務旅客，使整體航空網路之績效提升。目前航機製造商研發新型客機，皆強調較過去同型機種節省燃油。例如波音 777 航機即強調其在燃油效益(Fuel-Efficient)上較其競爭對手空中巴士 A340 系列還要好。其中，B777-300ER 較 A340-600 節省 21%的燃油消耗，而 B777-200ER 則較 A340-300 節省 11%的燃油(波音公司，2009)。

本研究著眼於燃油成本對於航空公司所造成的對於營運成本之不確定性，欲透過航空路網規劃設計規劃在目標營運成本最小化的最適航線機型以及頻次，並且進一步分析航空公司燃油成本受到國際油價變動影響之下航空網路能夠維持其系統可靠度的機率，再以可靠度計算結果，對於不可靠之航線分析航空公司因應成本變動，對於航空路網機型以及頻次的調整，判別是否有調整之必要，再進一步分析路網調整之影響。在模式的建構部分，引進可靠度工程之概念，透過航空網路之設計規劃與可靠度分析，了解在國際油價影響燃油成本變動之下，航空網路系統如何維持其服務水準。詳述其觀念，主要著眼於系統之不確定性因素所發生之機率，以及不確定因素對於系統所造成的影響程度，藉由可靠度的分析，了解在國際油價變動之下，航空公司規劃航空網路的因應策略。

過去研究對於航空網路設計已有相當的發展，但是多是以作業研究方法來建立以及探討如何對於航線機型或是頻次做規劃，例如 Teodorovic et al. (1994)、Hsu & Wen(2005)等，曾對於航空網路航線、頻次與機型規劃問題建構模式並且分析相關問題。Milan Janic(2003)、Hsu & Lin(2005)則將航空網路規劃問題，考量航空外部性成本內部化，探討機場政策或是環境限制下之路網分析。針對網路規劃中的不確定因素研究則有考慮短期空運旅客的變動對於航空市場的影響，Hsu & Wen(2002)進行航空公司在旅客需求變動下之網路規劃可靠度評估。首先分析航空運量之短期波動，以隨機性規劃模式為基礎，視短期航空旅運量為隨機變數，在此變數的波動下分析航空網路規劃之可靠度。研究方

法首先構建航空公司之網路規劃模式，規劃其航線、機型以及頻次，再以機率性限制式評估其規劃之航線、機型以及頻次能否在短期運量隨機變動之下，維持其成本效益以及服務水準的可靠度。Fan et al.(2008)則考量路網中受到天災或人為因素損害之運輸設施，如何規劃分配有效資源來翻修或是重建路網中之運輸設施，然而尚未有文獻針對航空燃油成本、油價影響航空路網規劃設計調整之相關探討，因此本研究將先針對國際油價對於航空公司以及旅客需求量進行探討，並且以灰色預測模式預測未來之旅運量，再建立航空成本函數，以航空公司營運成本最小化為目標，規劃航空網路之最適航線頻次與機型，並且評估在國際油價以及航空燃油價格變動之下，分析航空網路之可靠度，再藉由所得結果進一步假設在不同情境之下，評估航空公司因應國際油價變動之後，如何調整其航線、頻次以及機型，提供航空業營運策略上之建議以及參考。

1.2 研究目的

由於影響航空市場的因素很多，容易受到國家景氣或是全球經濟趨勢所影響，因此航空需求變動量極大，造成航空公司成本控制十分困難，一方面必須承受燃油成本、匯率、社經環境等波動的影響，另一面也必須承受機場單位對於公司所收取的必要之規費以及使用費，當航空公司無法避免這些營運時必須付出的成本，就必須由其他方式或是提出相關營運策略來使得營運最佳化或是避免虧損的情形，因此本研究首先以航空客運業為研究對象，希望站在航空公司營運路網成本最小化的情況下，引入可靠度概念評估航空網路系統中的不確定因素對於系統之影響程度，了解在航空公司因應航空燃油成本變動之下，如何因應並且對於路網之航線、頻次以及機型進行調整，達到節省成本之效果。綜合以上背景與動機，可以整理出下列主要之研究目的：

1. 回顧關於航空路網的相關文獻，了解航空成本之組成與特性、航空市場管理以及航空路網的建立與規劃，並進一步對於航空市場經營現況以及時事做資料蒐集與整理，釐清現在實務上亟待解決與操作的問題。參考航空相關文獻，確立研究之流程與架構，以及研究之價值。
2. 以航空公司直接與間接營運成本組成結構為基礎，建立航空網路規劃模式，模式考量旅客服務成本、機場使用費與環境徵收費以及航機營運之相關成本如維修、機組人員費用與燃油成本，在目標營運成本最小化之目標式之下，求解最適之航線機型與頻次。

3. 針對航空網路規劃模式求解之結果，引入可靠度之概念，分析航空網路之可靠度，做為航空公司因應不確定性因素是否進行調整策略之依據。本研究所考慮之不確定性因素以航空燃油之變動為主，分析不同油價變動之下航空路網之可靠度。
4. 參考實務上之航空公司因應油價上漲策略，假設不同情境之下航空公司可能實行之長短期因應策略，重新規劃油價變動之下之航空網路機型頻次。進一步探討在網路重新規劃後，各項成本如旅客服務成本、燃油成本、機場使用費、航機維修等相關費用之變動情形，並且計算其調整成本以決策航空公司是否執行調整策略或是維持原本規劃。
5. 以特定航空客運業者為例，蒐集模式之主要參變數之實際資料，或是對於難以取得之成本資料進行合理之假設進行範例分析。透過本研究架構之航空網路規劃模式了解各項成本的改變對於航空業者在各航線、機型以及頻次規劃之影響。本研究成果期能提供航空業者因應不確定因素下之評估以及決策方法，減少外在因素影響下之營運虧損。



1.3 研究範圍

本研究範圍以航空客運為主，研究之對象包含了航空網路中的航空公司、國際機場以及航空公司於航線中之旅運需求量。首先釐清航空公司之營運成本結構，包含了航空直接營運成本如燃油成本、機場使用費、機組人員費用、航機維修成本與折舊費用，航空間接成本則包含了行銷、旅客服務費用以及管理費用等。需求面為航線中選擇使用目標航空公司之旅客，以灰預測模式以民航局歷史資料進行預測。

為驗證模式之可操作性，本研究蒐集真實數據或進行合理假設，進行航空公司範例分析。範例分析研究對象以一家提供國際航線客運服務之國籍航空公司為主，航空網路航線皆以桃園國際機場為起點機場，飛往東京、曼谷、洛杉磯、法蘭克福、阿姆斯特丹以及檀香山等航線。其中台北至檀香山以及台北至阿姆斯特丹兩條航線具有直飛以及轉機航線，前者之中停站為東京成田機場，後者則為泰國曼谷機場，依據網路規劃模式決策使用直達或是轉機航線。

本研究針對航空公司之燃油成本對於歷史航空燃油價格詳加分析，並且模擬油價變動情況進行網路規劃，進一步對於規劃求解結果進行可靠度之評估，再針對各航線評估結果為不可靠之月份，假設不同情境探討航空公司面對燃油成本衝擊時所採取的措施。在

模式上的操作上僅限於航空路網中的航線、頻次以及機型的調整情形，並未考量現實中的一些營運策略，例如加收行李附加費或是減低航機載重方式等。

航空網路規劃結果，以機率概念透過可靠度的評估，可以分析航空燃油成本如何影響航空網路的營運，了解在航空網路之油價成本變動之下，航空網路仍然可以維持系統可靠度的機率。其中引入可靠度工程的觀念，評估國際油價變動對於航空網路系統影響之程度，首先假設國際油價為隨機變數，由於國際油價將直接影響到航空公司之燃油成本，因此研究中假設一個航空燃油成本因子來評估在國際油價變動之下，航空網路維持其可靠度的機率。

可靠度的評估結果，再針對呈現不可靠情形之月份、航線進行航空網路機型頻次之調整，依據其重新規劃頻次結果，計算調整航線機型頻次之調整成本以及懲罰值，以決定是否調整。本研究模擬航空公司因應油價變動之下可行之調整策略，假設航空公司面對短期油價變動之下，因應當期燃油價格調整航空路網航線頻次機型之情形，或是燃油價格與旅運需求雙重變動之下之網路調整，並就長期規劃策略上，引入新型航機進行規劃，再依不同情境下所造成之航空營運成本變動懲罰值與調整成本，決策是否因應調整。



1.4 研究流程與架構

本研究觀察目前社經發展與全球航空產業趨勢，概述目前航空產業所面臨之問題與困境，主要著眼於國際油價與航空燃油價格變動對於航空業所帶來之衝擊以及影響。並就目前趨勢所關注的議題與學術文獻做回顧，首先針對航空成本之組成分析以建立航空網路規劃模式，並且著重於國際油價上升造成航空燃油成本漲幅之影響，以及航空公司因應燃油成本變動而對航空網路進行的調整情形，透過數學規劃模式，求解營運成本最小之下的最適航線機型頻次規劃，並且評估其可靠度。後續評估初始規劃結果之可靠度，模擬不同情境下，當油價變動時，在其他航空公司支出費用不變的情況之下，航空公司對於航線、頻次以及機型的規劃與調整。研究架構圖如下所示：

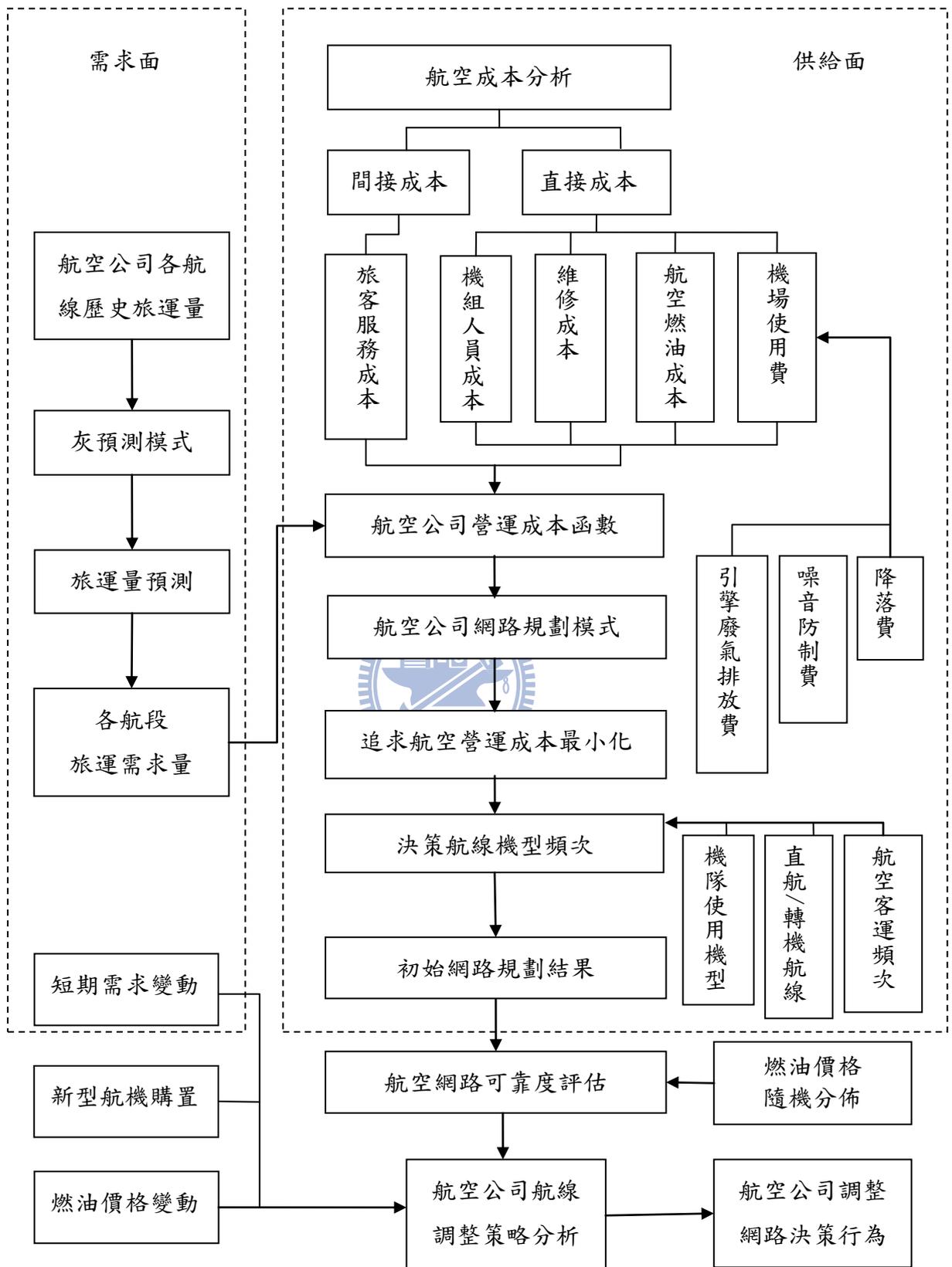


圖 1.2 研究架構圖

為進行航空網路規劃決策出航線機型以及頻次，首先建立航空營運成本函數，並且對投入之參變數蒐集相關數據或做合理之假設，其中航空旅運量部分，本研究需求之預測沿用 Hsu & Wen (2000)以灰色理論為基礎應用於航空網路之灰色預測模式，預測起迄對城市中旅客對於航空公司之需求流量。投入之初始燃油價格也同樣使用灰預測模式求得。接著探討航空公司以成本最小化之營運目標之下，對於航線所規劃之機型與頻次必須滿足旅客需求量，在此限制下規劃最適航線頻次以及機型。由於航空網路規劃屬於中長程之規劃，因此首先本研究投入相關油價以及需求量之預測值，得到模式之初始化之頻次規劃結果，再藉由可靠度評估航空網路在燃油價格變動之下維持其營運效率的機率，並分析不同情境之下，航空網路系統受到成本變動之影響以及因應之策略，最後評估其成本變動以及調整成本決策是否執行調整策略。

整體研究之流程如下圖 1.3 所示，首先建立研究背景與動機之後，定義問題並且針對相關議題蒐集相關研究學術文獻以及實務上的資料，強化議題之重要性與貢獻。透過文獻回顧與理論學習之過程，擬訂研究方法並且界定研究範圍，定義並假設模式中之重要參數，建立航空公司以營運成本最小化為目標規劃航線機型與頻次模式以及可靠度模式並且假設不同情境之下，航空公司因應網路規劃與可靠度評估結果，進行因應與調整之策略設定與分析，為驗證模式與研究方法可行性，收集實際資料並對於難以取得之數據進行合理假設，相關變數與參數使用模式進行實證以及敏感度分析的操作，並由規劃結果分析航空公司因應國際油價變動之調整策略，對於航空業面對網路不確定性因素的調整方針提出結論與建議。

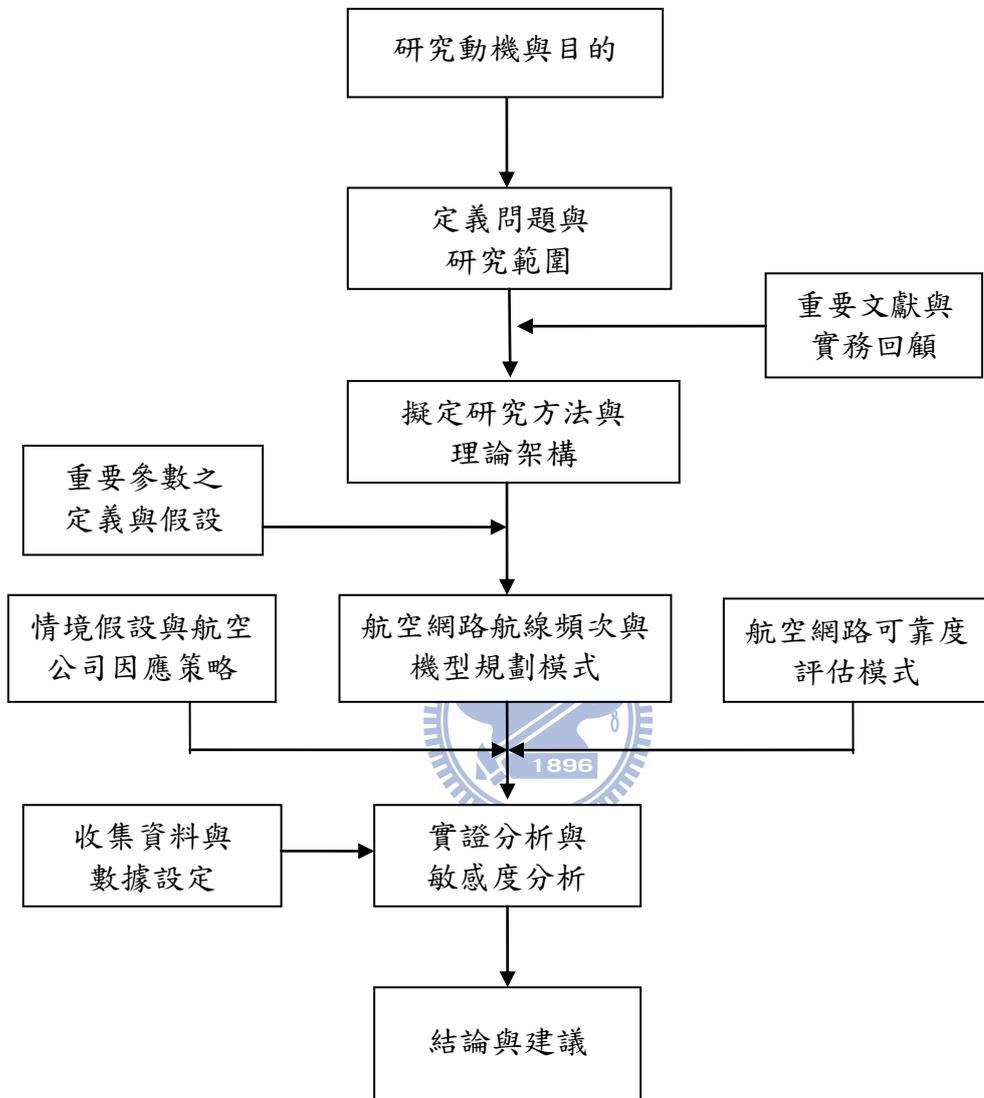


圖 1.3 整體研究流程圖

二、 文獻回顧

本研究主要探討單一航空公司面臨受到國際油價影響造成之航空燃油價格變動，對於航空公司網路航線機型頻次所造成之影響。研究首先建立航空公司營運成本函數，並且以數學規劃求解航空公司目標營運成本最小化之下，決策其航空網路之最適機型以及頻次。再模擬當航空燃油價格變動時，計算不同月份之燃油價格影響下，航空網路之可靠度。因此在本章將回顧相關之研究文獻，對於航空公司營運成本組成結構、航空網路規劃以及可靠度觀念進行了解，做為本研究架構模式與求解之參考依據。

為建構航空公司營運成本函數做為求解數學規劃問題之目標式，本研究主要參考 Hsu & Lin(2005)之研究，該研究在航空公司成本方面，主要分成直接成本與間接成本兩大部分，直接成本主要包含機場使用費、燃油成本、航機維修租借成本與機組人員費用。間接成本主要為航空旅客搭乘航機所產生之旅客服務成本。該研究考慮國際機場之噪音管制措施影響下，航空公司之因應策略，將機場使用費細分為降落費以及噪音徵收費。機場收費影響航空公司營運成本，並且為機場之主要收益來源，本研究中考量目前國際機場除了收取基本之航機降落費，航機噪音，部分國際機場尚針對引擎排放汙染造成之外部性成本向航空公司徵收環境收費，因此在本章將就機場使用費特性探討部分國際機場之相關政策措施。

本研究主要探討國際燃油對於航空公司網路之燃油成本影響，因此針對國際原油、運輸業對於燃油能源之使用以及航空燃油特性進行相關文獻回顧，了解燃油成本對於航空業之影響。

為評估在燃油價格變動之下之航空網路可靠度，本研究主要參考 Hsu & Wen (2002)之研究，該研究首先定義可靠度之意義，並且評估航空路網受到需求變動之頻次可靠度。過去研究應用可靠度概念分析網路問題多在於探討網路中之不確定性因素如氣候、災害等問題，尚無針對不確定性之成本項目探討之研究。因此本研究將參考研究文獻建立燃油成本為隨機變數下之可靠度模式進行分析。

在本章文獻回顧中，2.1 節首先討論航空公司之成本組成，主要考慮營運成本之分類、機場使用費之組成與航空燃油成本特性蒐集相關文獻探討，2.2 節探討網路規劃問題之相關研究，2.3 節回顧關於可靠度之相關文獻研究以及應用可靠度解決網路規劃問題之文獻，最後將彙整重要文獻主題與其重要研究結果，於 2.4 節進行綜合討論並且歸納小結。

2.1 航空公司成本分析

航空客運具有不可儲存之特性，然而其成本結構複雜，造成航空公司成本控制不易，因此為航空公司營運之重要議題。本節首先探討航空營運成本之組成，主要分為直接營運成本以及間接營運成本，並且呼應本研究之主題，將燃油成本個別提出深入討論運輸能源的使用以及其特性，另外也因應航機營運與燃油使用所造成之社會環境成本結合部份國際機場之政策進行回顧。機場收費政策之討論同時為後續網路規劃求解之成本項目輸入值的重要依據。不同之營運成本將可能影響航空公司網路規劃時，對於航線、機型的選擇，因此了解航空成本項目的各項特性，將有助於理解與分析後續模式求解之規劃結果。

2.1.1 航空營運成本

根據國際民航組織(ICAO, 1992)對於航空成本的分類，主要將營運成本分成兩大類，分別是直接營運成本以及間接營運成本：

1. 直接營運成本

- 
- (1) 飛行營運成本：機組人員薪資、燃油成本、機場使用費、保險及租賃成本。
 - (2) 維修零件成本：維修人員薪資、零件消耗、維修管理。
 - (3) 折舊與償債成本：飛行、地勤設備以及額外折舊。

2. 間接營運成本

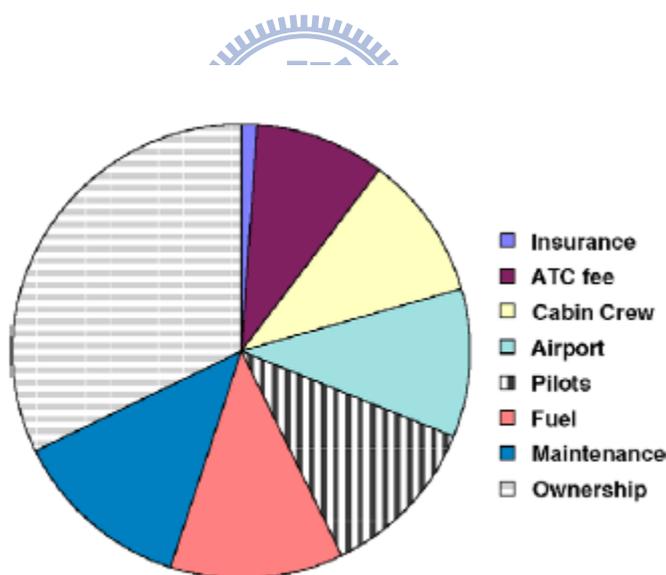
- (1) 場站與地勤成本：機場櫃檯營運成本、停機費用、維修以及場站費。
- (2) 旅客服務成本：對於航程中之旅客所提供的服務成本。
- (3) 票務、銷售以及行銷成本：銷售業務成本、廣告費、銷售佣金等成本。
- (4) 一般管理成本：一般性的運輸服務成本支出，例如財務會計之管理以及營運行政管理之費用。
- (5) 其他營運成本

Hannu et al(1997)定義了航空營運中可能減少成本的影響要素，並且衡量減少不同成

本所產生的影響。研究認為機隊的組成結構、航線網路、航空公司政策以及工作守則是影響間接營運成本的要素，也決定了不同航空公司之間的總成本差異。其中對於中小型之業者，若是將供給運量集中於特定短程、中程或是長程將可以節省成本，另外，航空公司如果擁有較為一致的機隊結構以及比較彈性的工作守則，將可以獲取更多的利益。

Wu & Caves (2000)調查航機排程與航機在機場運轉效率之間的關係，預期在系統營運成本最小化之下能夠維持排程的服務水準。對於航機營運成本、旅客延滯成本以及航機排程之時間機會成本調查後，應用數學模式考慮隨機選擇排程之下的模擬航機運轉情形。

Swan & Adler (2006)之研究主要在於評估以及建立客運航機之營運成本函數。其模式之構建立基於三十年來大小相近之不同機種設計，建立模式來表達航機的設計通則以及設計趨勢。其成本函數之重要變數為航機之航程以及座位數。該研究所分類之單一航機的成本要素包含飛行員、機組人員費用、燃油、航機與引擎維修、持有成本(ownership cost)等，成本項目之分類以及營運成本項目所佔比例如下圖所示：



資料來源：Swan & Adler (2006)

圖 2.1 航機營運成本分類

根據 IATA(2009)指出，所有航機皆具有損益平衡之承載率(break-even load factor)，代表航空公司所售出之座位數百分比所得之收入能夠涵蓋其成本。航空公司損益平衡承載率依據不同航空公司之收入以及成本而不相同，一般而言，較高成本將使得損益平衡之承載率提高，而高票價則有相反之影響。依據近年航空客運營運情形觀察，由於高油

價以及低費率之影響，使得近年之損益平衡承載率在 80% 左右，因此航空公司營運與規劃也盡量使其承載率能夠接近此值。對航空公司而言，多售出一或二個座位將代表其能夠獲益或是損失的差異。

2.1.2 航空燃油成本以及燃油之使用

Hayashi and Trapani (1987) 的研究檢視航空能源成本(energy cost)在決定票價與旅客服務水準所扮演的決策角色。該研究強調其重要性在於能源價格之變動會影響對於燃油高度使用之航線的獲益，並且影響某些航空市場的容量。另外，能源價格對於解除管制之後的航空市場服務也十分重要。研究發現當航空燃油成本上升時，將會減少城市起迄對所提供之容量，意即增加燃油之價格可能對於票價或是頻次產生影響，在短期上如果航空公司飛行頻次與費率成反向關係，結果顯示燃油價格上升則頻次減少。整體而言，能源成本的增加將會降低容量(capacity)，減少旅客需求，提高承載率。

Holloway(2003)分析航空產業中之燃油成本驅力，包含航空業者之機隊年齡以及用油效率、航空燃油之國際市場價格、網路設計、地區性市場之價格壓力以及業者網路中的機場因素。其中網路設計主要是由於燃油成本在總成本中佔有極大的比率。地區性市場之價格壓力則是因為區域性的油價變動具有季節性。機場因素則例如不同供給者之間的競爭以及稅率等。

運輸能源主要仰賴燃油發揮效能，超過 95% 的動力運輸需要使用石油，並且需求量超過全球石油產量的一半，因此原油的供給一直是個國際政策的驅力，對於石油的增產是廣為討論的議題。當常用的石油供應耗盡時，便只能選擇一些較低等級的石油供應商，所提供的原油價格較高，並且對於環境汙染的影響較大。因此，當油價上升的時候，將使得運輸產業與其他需要使用原油的工業如塑膠業、肥料與製藥業等產生衝突 (Woodcock et. al, 2007)。

Cortes et al. (2008) 的研究提供了整合運輸以及能源的研究方法。其基礎來自於一個目標導向的模式能夠定義並且模擬運輸活動，包含城際運輸以及城內運輸，來計算廢氣的排放以及能源的消耗。其方法分析運輸對於環境之影響，並且提供了預測未來政策執行的改善成效。

由於石油為運輸重要之動力來源，因此油價的變動對於運輸成本佔有重要地位，廖慧珠(2008)分析油價上漲之因素，基本面之因素包含了美元匯率、全球石油需求以及產油國之供給等因素，其中美元匯率為影響油價之主要因素，因為原油買賣皆以美金計價，

然而中東石油出口國之民生用品多為歐洲進口，所以為了平衡其收支，當美元相對於歐元貶值的時候，油價就會上漲。另外，全球石油之需求成長則是由於巴西、印度、俄羅斯、中國等國之經濟明顯成長，石油消費大增，迅速帶動全球的石油需求量成長。其他因素包含：非 OPEC 之產量低於預期的產量、OPEC 因為產能限制無法即時生產以及油品市場煉製產能短缺。在技術面以及消息面因素則是因為國際間金融的炒作與財務操作國際原油市場，加上許多產油國家多屬政權國情動盪之國家，造成有心人士操弄原油市場，放出負面消息，藉此拉高國際油價。

著眼於國際油價的機制複雜，運輸營運者往往難以控制其燃油成本，在燃料管理的策略十分重要。Abdelghany et al.(2005)即建立了對於航空公司最佳燃油成本管理策略之模式。此模式能夠決定給訂航線的機場所能裝載之最佳燃油量。其數學規劃的目標式在於節省成本以及為取得低油價而在機場裝過量的燃油兩者之間的權衡，其中必須考慮航機載運過量燃油之額外的燃油成本以及維修成本。實證考慮不同的油價情境以及不同航機之營運條件，使用模式檢視現有燃油管理策略之潛在利益或是限制。

運輸燃油的使用也造成環境相關問題。分析運輸業對於全球暖化方面的影響，由運輸動力能源所產生的廢氣，也成為全球溫室效應的原因之一。與公路運輸比起來，航空業較無大量與直接的影響。但是根據 2001 年 IPCC 組織(Intergovernmental Panel on Climate Change)之估計，航空業約造成 3.5% 人為溫室效應，並且到了 2050 年的時候，數字將會增加到 15%。由於航空產業對於氣候暖化之較大影響是屬於短期，因此更顯出控制航空產業排放汙染之重要性(Woodcock et. al, 2007)。

2.1.3 機場使用費成本分析

機場使用費為機場供航空公司起降運作並且進行營運的場所所收取之相關費用，與航機運作相關，隨著起降次數收取的費用主要為降落費(landing fee)。然而近年來航空業開始注重運輸之永續發展，其中環境與社會對於業界的關注造成了航空產業成長嚴格的限制，由於航空業所造成的外部性成本帶給環境以及社會極大的負擔，因此現在普遍認為航空業所造成之外部性成本應該要由航空業以及其使用者支付其費用(EC 1999, 2002)。航空外部性成本包含了噪音、廢氣排放、土地使用、飛航意外以及擁擠等，其中來自於民航機最主要造成的外部性成本就是噪音以及引擎的廢氣排放，噪音對於機場鄰近居民與社群有很大的影響，例如噪音干擾造成居民健康與睡眠影響。而航機引擎所排放的廢氣更是對影響到區域以及全球環境造成全面性的影響，例如人類健康、動植物生態系統、氣候等。Lu & Morrell(2006)曾針對不同規模之國際機場，評估航空外部性成本造成機場

增加之社會成本。主要探討航機噪音與引擎排放汙染(emission)所造成之社會成本。研究中建立一套針對不同大小的機場計算環境社會成本的模式，以歐洲六家國際機場為範例進行分析，實證顯示倫敦希斯洛機場因為擁有最多班次起降，因此社會成本最高。

機場除了向航空公司收取航機起降的降落費，以及提供維修場站、登機門以及櫃檯之場地租用之外，目前也有機場因應環境之外部性成本，對於航空公司航機徵收噪音收費以及廢氣排放費用。根據波音公司統計，目前在全球 643 個國際機場中，有 129 間機場實施噪音收費政策，對於廢氣排放收取費用的有 14 家機場，並且全部集中於歐洲，以下就機場管理層面，整理目前國際機場對環境汙染所採行之政策與措施：

1. 德國法蘭克福機場 (Frankfurt Airport, FRA)

法蘭克福機場由 Fraport AG 集團所管理，為德國最大之國際機場，員工人數接近七千人，2008 年之旅運量為 5350 萬人次，班機頻次為 486,000 次，每天起降之航班超過 1,250 架次。法蘭克福機場所徵收之降落費，由航機之最大起飛重量(Maximum Take-off Mass, MTOW)決定。機場另針對廢氣排放費用(Emission Surcharge)，進行試辦以航機廢氣排放為基礎之降落費(Emission-based Landing Fees)。此政策之推行源自德國政府的三年期計畫，自 2007 年 9 月 28 日起，將廢氣排放收費加入降落費當中，對法蘭克福與慕尼黑之機場起降航班，收取每公斤氮氧化物 3 歐元的費用，並自 2008 年 1 月 28 日起全面實施。噪音收費部分，機場依照 ICAO 附約 16/3、16/4 對於機型之分類，對不同類型之航機收費，其徵收標準由表 2.2 所示：

表 2.1 法蘭克福機場起降噪音收費標準

噪音分類	LAZ(dB(A))	機型舉例	費用(€)
0	~ 68.9	Helicopters/ B712/ B737-600	0
1	69.0~71.9	A320/ B737-300/ B737-500/ B737-700/B737-800	12
2	72.0~74.9	A300/ A310/ A321/ B737-400/ B 767	31
3	75.0~77.9	A330/ A340/ A380/ B 777	75
4	78.0~80.9	B 747-400/ DC-10	270
5	81.0~83.9	B 747-100/ B 747-200/ B 747-300	610
6	84.0~86.9	--	6,750
7	87.0~	IL 76/ AN 124	14,250

資料來源：德國法蘭克福機場與本研究整理

2. 荷蘭阿姆斯特丹史基浦機場(Schiphol Airport)

機場首先將噪音分類(如表 2.2)，制訂噪音收費標準，其收費標準則有兩種依據，一是根據噪音量來收費(如表 2.3)，另外還針對日夜不同時間來收費，對於當地晚間十一點到凌晨六點之起飛航機收噪音費，除了依照上表之分類標準外，尚加收 50%。同時段(11:00pm~6:00am)之降落班機則加收 27% 的費用。其中機型分類為 MCC3 之航機，於晚上 11:00 到凌晨 6:00 之間起降，除了前面所提的計費方式外，尚還要加收 50% 的額外收費。

表 2.2 史基浦機場之航機噪音分類

噪音分類	分類標準
- noise category MCC3:	$0 \geq \Delta\text{EPNdB} > -5$ (Marginally Compliant Chapter 3)
- noise category A:	$-5 \geq \Delta\text{EPNdB} > -9$ (relatively noisy aircraft);
- noise category B:	$-9 \geq \Delta\text{EPNdB} > -18$ (average noise producing aircraft);
- noise category C:	$\geq \text{EPNdB} \leq -18$ (relatively-low-noise aircraft).

資料來源：荷蘭史基浦機場與本研究整理

表 2.4 史基浦機場根據航機噪音分類收取之噪音費用

噪音分類	收費標準
- noise category MCC3:	basic compensation increased by 40% for each landing or take-off
- noise category A:	basic compensation increased by 40% for each landing or take-off
- noise category B:	basic compensation applies for each landing or take-off
- noise category C:	basic compensation reduced by 15% for each landing or take-off

資料來源：荷蘭史基浦機場與本研究整理

3. 台灣桃園國際機場

我國之桃園國際機場之噪音收費是以附加的方式，於機場使用費中收取。其收費標準由航機每架次最大起飛重量(MTOW)、噪音量(Effective perceived noise level, EPNdB)來決定，其計算方式為 $(\text{TWD } 17 * \text{MTOW}) + (\text{TWD } 95.00 * (\text{EPNdB} - 73))$ 。其中噪音量 EPNdB 為起飛時引起之噪音。

4. 日本東京成田機場(Narita International Airport)

成田機場自 2005 年 10 月 1 日起徵收噪音費用，並且對於國際航機與國內航機有不同之收費標準。其收費包含於降落費當中。

2.2 網路規劃問題之研究探討

Teodorovic et al. (1994)考慮航空運量之不確定性，以模糊集合理論為基礎，建構航空網路設計規劃之模式，考慮航空之營運成本、旅客成本以及航線決定最適頻次。Wojahn (2001)所架構之航空網路模式，在於決策經濟密度之下的最小航空成本的特性。航空網路受到的限制為軸輻城市中的軸心城市完全與其他城市連接，而衛星城市則只能指派給單一個軸心城市。在此成本最小化之網路中，混合了點對點以及單一軸新城市網路。

Hsu & Wen(2003)曾在供需互動的架構之下，考慮旅客對於航空公司以及航線的選擇行為，進而分析航空公司客運網路的航線機型頻次規劃。研究目的主要在於求解供需互動收斂之下的航空公司最適航線以及班機頻次。

黃鵬先(2004)的研究討論航空公司乾/濕租策略之機隊規劃，考慮如何因應景氣循環，最適化航空公司之機隊規劃。其規劃分成兩部分，一為單一航空公司在加入航空聯盟之前決策購買新機、淘汰舊型航機、新租航機或停租舊航機等四項決策，另外也考慮兩家航空公司結盟協議互相租借航機之互動情形進行航線之機隊規劃決策。經過實證分析發現兩家航空公司結盟後之成本小於結盟之前的成本，另外以敏感度分析了解不同決策對於航機持有時程所產生之效益，提供航空營運者進行機隊規劃時之參考。

Hsu & Wen(2005)指出，航空網路之設計規劃屬於中長期之規劃工作，航空公司規劃結果將會影響航空公司之營業收入與服務水準。過去文獻對於多以確定性解析模式及數學規劃最適法。Hsu & Wen 則針對不確定性以及互相權衡之決策環境，以灰色理論方法應用，構建航空網路設計模式。

Matsumoto (2007)的研究檢視了亞洲以及歐美之國際旅客運量以及貨運量，以及世界主要城市之空運流量密度，運用了基本的重力模式計算 GDP、人口、距離以及數個虛擬變數。其結果顯示許多城市皆致力於強化其空運系統成為軸心城市的地位。

Fan et al. (2008)的研究主題考慮運輸路網的不確定性，以及風險發生的機率，以二階段隨機規劃模式(two-stage stochastic programming model)，規劃如何分配有限的資源來翻修(retrofit)或是重建運輸系統當中，受到天災或是人為因素而造成損害之運輸設施。

過去研究也曾結合航空網路與環境議題做探討，Janic (2003)透過模式建立評估航空網路在營運以及經濟、環境上的績效。其建立之網路模式能決定路網中的班機數，在營

運安全與環境限制下求取利潤最大化。研究實證發現噪音與空氣汙染限額會顯著影響機場績效。

Hsu & Lin (2005)則是透過航空公司航線頻次與機型規劃模式與機場噪音收費管制方案評估模式，分析不同噪音收費管制對航空公司航線網路的配置和成本的影響。其研究指出航空公司可透過調整期航線頻次機型組合，因應機場收費制度，並驗證出部分機場噪音量確實會因為班機頻次減少而使得噪音。該研究以追求航空公司目標成本最小化之下，決策最適航線以及機型頻次，並且評估因應國際機場噪音管制與收費政策下，航空公司如何因應機場收費配置其網路規劃。其所建構之模式如下：

$$\begin{aligned} \min TC = & \sum_i \sum_j w_{ij} Q_{ij} + \sum_k \sum_j \sum_i f_{ij}^k (LD_j^k + NU_j^k) \\ & + \sum_i \sum_j \sum_r \sum_s \sum_p \sum_k f_{rsp}^k \delta_{ij}^{rsp} [\beta_{ij} d_{ij} (P_r f_k + b^k)] \end{aligned} \quad (2-1)$$

上式為考慮航空公司須滿足旅客需求的情況下最小化其直接成本與間接成本之目標式，表示航空公司網路之營運成本。在此營運成本目標式的函數中，包含航空公司之各項營運成本，分成直接營業成本與間接營運成本。

直接營運成本指的是與飛行相關之成本，其建構模式考慮機場使用費中的降落費 LD_j^k 以及噪音徵收費用 NU_j^k ，與距離 d_{ij} 相關則有燃油成本 $P_r f_k$ ，即油價 P_r 乘上使用機型 k 之耗油量 f_k ，加上維修、折舊、租借成本與機組人員費用之總和 b^k 。整體航空公司所必須承擔之網路直接營運成本函數為：

$$\begin{aligned} DOC = & \sum_k \sum_j \sum_i f_{ij}^k (LD_j^k + NU_j^k) \\ & + \sum_i \sum_j \sum_r \sum_s \sum_p \sum_k f_{rsp}^k \delta_{ij}^{rsp} [\beta_{ij} d_{ij} (P_r f_k + b^k)] \end{aligned} \quad (2-2)$$

間接成本函數則為航空公司在各節線上的總運量 Q_{ij} 與載運一位旅客在節線上所產生之間接成本 w_{ij} ，包含旅客服務費用等，其函數可表示如下：

$$IOC = \sum_i \sum_j w_{ij} Q_{ij} \quad (2-3)$$

透過模式求解可得出在航空公司目標營運成本最小化之下之航線機型頻次，並且進一步分析不同國際機場對航空公司收取噪音費用對於航空公司營運規劃之影響，提供航空公司因應不同機場管制措施之參考，另外也就機場角度提供機場營運者在管制噪音策略上之依據。

廖姍青(2006)的研究考量個別產業之選擇行為，衡量產業結構變化，並且分析總體市場的需求量，構建供需互動之下的航線頻次規劃模式，用以探討航空業者所制定之最佳單位基本運費與航線頻次。其研究結果顯示當運送航距較短時，貨主比較注重運費因素，然而在長程之航線上，由於運送距離與所需時間較長，因此貨主會比較注重貨物之存貨成本。研究比較運用灰預測模式預測之總需求量，發現研究所構建之模式求解之需求預測量較為準確，可做為航空貨運業者決策航線運費以及班次之參考。

2.3 可靠度應用於網路規劃之研究探討



本研究中，可靠度的觀念將應用於評估航空公司所規劃的航空網路航線機型頻次，在國際油價以及航空燃油成本變動之下，航空公司的燃油收支成本可維持平衡之機率，為航空公司是否因應油價變動調整其初始規劃之網路頻次的重要決策依據。本節主要分為兩部分，首先回顧可靠度與可靠度工程的起源與發展，並且探討關於可靠度之相關研究文獻，再針對本研究之航空網路規劃問題，整理過去曾將可靠度概念應用於網路規劃研究加以歸納，做為本研究模式構建以及實例分析之重要依據。

2.3.1 可靠度之相關文獻探討

李乾銘(2002)定義工程上之可靠度為「任何製成品在訂定的操作使用環境條件下，在設定的時間內，完成其設計功能任務，無任何故障或失效產生的機率稱之為可靠度。」，至於如何分析失效的機率則必須透過資料蒐集，分析、計算數學模式的選擇與模式驗證，進一步透過模式分析以及計算資料，而後設計可靠度之檢驗測試。將可靠度加以量化之數學工具則為統計學。可靠度與機率概念有密切關係，Wolstenholme(1999)指出，可靠度(reliability)通常表示一機器設備構成要素(component)或系統在特定時間能滿足營運的機率。可靠度函數的構建，首先令 T 為一連續隨機變數，表現生命週期特性，而系統失

效的時間具有機率密度函數(probability density function) $f(t)$ ，假設 T 非負數，並且定義其量測之起始點與範圍(scale)，一特定之 T 實際值為 t ，則其分配函數(distribution function)可表示為：

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u)du. \quad (2-4)$$

$F(t)$ 描述當 t 增加時，所累積失效的機率，根據定義，當 $t=0$ ， $F(t)$ 為 0，當 t 趨近於無線大，則 $F(t)$ 趨近於 1。 $f(t)$ 則為 $F(t)$ 之微分，由式(2-4)表示：

$$f(t) = \frac{d}{dt}[F(t)], \quad \text{denoted } F'(t). \quad (2-5)$$

可靠度函數 $R(t)$ 為 1 扣除系統失效的機率，由式(2-6)表示：

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (2-6)$$

2.3.2 應用可靠度探討路網規劃之研究

本研究主要參考 Hsu & Wen(2003)之研究建立可靠度模式，並且假設情境討論航空公司在不同情形下針對不可靠的航空網路決策是否調整之因應策略。該研究主要將可靠度的概念運用於航空網路設計，建立決策各航線頻次之網路模式，再評估在正常或異常之航空需求衰退之下，航空路網之可靠度，並提供調整頻次的方法。其研究首先定義可靠度為網路規劃模式所得之航機初始頻次(initial proposed flight frequencies)能夠在未來短期 OD 起迄對旅客需求產生衰退時，能夠保持有效營運之機率，並藉由掌握航空網路中起迄城市需求旅運量發生異常(abnormal)情形發生之機率以及異常情況發生之機率，分析航空公司是否因應此情況調整其頻次。路網設計給定其起迄對旅客流量需求，航空公司供給量以及不同機型之調整頻次，決策飛機頻次，在滿足需求之限制之下，最小化運輸之成本以及旅客旅行成本。所求解得使用 q 型航機航行 rsp 航線之初始化頻次 \bar{N}_{rspq} ，透過可靠度模式評估在航空旅運量為隨機變數 \tilde{f}_{rs}^t 之下，起迄對頻次之可靠度。

研究假設單一起迄對每月之航機承載率為評估初始頻次可靠度之重要因子，其定義在需求量為隨機變數 \tilde{f}_{rs}^t 影響之下承載率 $l_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t)$ 為：

$$l_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t) = \frac{\tilde{f}_{rs}^t}{\sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rspq}} \quad (2-7)$$

其中初始規劃頻次 \bar{N}_{rspq} 與機型 q 之座位數 n_q 為定值。研究假設航空公司可接受之最大承載率上限值 \bar{l}_{rs} 接近 100%，尚可收支平衡之最低忍受承載率下限值為 l_{rs} ，旅運量 \tilde{f}_{rs}^t 必須使得其承載率 $l_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t)$ 界於上限值與下限值之間，若高於上限值則航空公司可能因供給不足、超出其服務容量而造成服務水準下降，旅客權益損失，另一方面，若低於下限值則可能造成航空公司空位過多，造成虧損的情形。因此當 \tilde{f}_{rs}^t 落在 $l_{rs} \leq l_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t) \leq \bar{l}_{rs}$ 之範圍內，則初始規劃頻次為可靠，超出此範圍則為不可靠。進一步計算航空網路頻次為可靠的機率為：

$$\begin{aligned} R_{rs}(\tilde{f}_{rs}^t) &= \Pr \left[l_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rspq} \leq \tilde{f}_{rs}^t \leq \bar{l}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rspq} \right] \\ &= \Phi \left(\frac{\bar{l}_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rspq} - \tilde{f}_{rs}^t}{\sigma(\tilde{f}_{rs}^t)} \right) - \Phi \left(\frac{l_{rs} \sum_p \sum_q n_q \bar{N}_{rspq} - \tilde{f}_{rs}^t}{\sigma(\tilde{f}_{rs}^t)} \right) \end{aligned} \quad (2-8)$$

Li & Tsukaguchi (2003)研究急救護車輛(emergency vehicles)在大型災害發生過後，進入高人口密度地區的路線。該研究使用 ANR(the Accessible Node Rate)為指標，評估當地街道網路的可靠度。評估對象為神戶市的 Nada Ward 在地震過後受到的損害，利用 ANR 評估重新規劃之路線，提升了當地街道網路之可靠度。同時為檢驗 ANR 是否能夠分析其他城市之可靠度，因此透過 Beppu City 的案例，分析當該市受到同等級地震損害，系統對於交通網路的評估改善能力，研究顯示 ANR 廣泛應用於各地區。

Taniguchi & Yamada (2003)的研究，建立結合機率性車輛路線以及時間窗排程的模式，進行動態的交通模擬。機率性模式包含旅行時間的不確定性，應用該模式於道路網路，可使貨運業者減少成本，並且減少二氧化碳的排出，提升整體的環境品質。

Lam et al. (2008)使用 novel 交通指派模式，同時考慮路網中之需求以及供給的不確定性。這些不確定性主要來自於路網的氣候條件。其架構網路中的節線之旅行時間函數來了解這些不確定性之影響。此模式提供旅運者在平均以及不確定的隨機旅行時間以及氣象預測上做路徑選擇，同時並考慮在路網的隨機交通情況下之旅運需求彈性。

Bruni et al. (2009)運用機率限制理論，建立企業專案(business project)的排程方法。研究中考慮商業計畫規劃其間的不確定性活動，以及活動的歷程(duration)，將這些活動視為間斷性隨機變數。該研究所建立的方法能夠取得排程總時間(makespan)的資訊，用以評估初始最適化模式的可靠度。

表 2.4 重要研究主題之文獻回顧整理

研究類型	文獻作者	研究主題	重要結果
航空網路頻次	Hsu & Wen,2003	考慮供需互動來解決航空網路規劃問題。	修正航班頻次規劃模式，在模式中考量供需互動情形。提供航空公司決定頻次與票價的決策工具。
航空網路與環境績效	Milan Janic, 2003	透過模式建立評估航空網路在營運以及經濟、環境上的績效。	決定路網中的班機數，在營運安全與環境限制下求取利潤最大化。實證發現噪音與空氣汙染限額會顯著影響機場績效。
航空路網規劃與機場噪音收費	Hsu & Lin, 2005	透過航空公司航線頻次與機型規劃模式與機場噪音收費管制方案評估模式，分析不同噪音收費管制對航空公司航線網路的配置和成本的影響。	航空公司可透過調整期航線頻次機型組合，因應機場收費制度，並驗證出部分機場噪音量確實會因為班機頻次減少而使得噪音減少。
航空網路可靠性評估	Hsu & Wen,2002	考慮在旅客需求下降時之航空網路設計。研究主要在於提供航空規劃者有效的可靠性量度工具。	研究結果發現經過可靠度評估並且重新調整航空網路之後，其調整之總成本小於不調整之成本與損失和，航空公司因應旅運需求量變動調整航線頻次將獲取更多利益。
道路可靠度評估	Taniguchi & Yamada,2003	建立結合機率性車輛路線以及時間窗排程的模式，進行動態的交通模擬。	實證結果顯示模式的應用可使貨運業者減少運輸成本與旅行時間成本，並減少二氧化碳的排出。

2.4 小結

1. 航空業客運業營運之主要挑戰在於需求不確定性以及需求之多樣性。航空客運需求受到外在因素影響，例如經濟景氣以及國際局勢等。另外，由於運輸服務具有不可儲存之特性，旅運需求與航班承載率關係到航空公司之收益。因此相關研究探討航空公司之服務供給與旅運需求之供需互動關係，有助於航空公司中長程之營運規劃，考慮需求變動之下如何規劃航線，並且選擇適當機型進行排班。
2. 航空客運業者之營運成本主要可分類為直接成本與間接成本，由於組成結構之複雜使得成本控制困難，並且受到外在環境變動而影響。例如燃油成本由於受到國際原油市場影響，而機場使用費則是各個機場制訂不同之收費標準，近年由於環保意識抬頭，航機起降之噪音以及航空燃油的使用所造成的廢氣排放汙染受到部分機場所重視，進而對於這些產生之外部性成本進行收費，成為航空公司營運上的成本增加。
3. 航空網路的規劃可提供航空公司因應整體經營環境與成本，決策其航線，機型與頻次，透過路網的調整得到最適的規劃。當規劃路網時，必須先考量到需求量以及供給之間的關係，進而選擇適當之機型，並且做頻次的決策。
4. 受到全球經濟情勢發展，能源的問題越來越重要，由於燃油成本佔有航空公司營運成本極大部分，因此航空公司針對油價上漲在實務上有許多因應措施。但過去少有航空方面的文獻特別針對航空油價對於航空營運成本之衝擊做探討。
5. 路網中之不確定性因素過去研究曾探討需求量之變動以及受到氣候等因素所影響，然而對於路網之中航空燃油價格之變動特性少有探討，尤其在路網之可靠度評估，多以陸運為主，研究如災害或旅行時間的不確定性，對於運輸營運成本之不確定性則尚未被探討。因此本研究擬於航空網路規劃議題上，參考 Hsu & Lin (2005)之航空網路規劃模式，建立航空公司營運成本函數以及數學規劃之目標式與限制式，求解航空網路之最適航線機型頻次，並且參考 Hsu & Wen (2002)建立航空網路之可靠度模式，進一步評估航空網路規劃模式求解之初始規劃結果。再參考航空公司實務之營運情形，假設不同營運情境之下航空公司因應調整策略。

三、 模式構建

本研究之主要目的在於了解航空客運業者面臨外在環境之國際油價影響，如何建立以及規劃其航空網路，並且模擬在規劃初始頻次之後，如何因應調整航空網路機型頻次，以減少航空公司之營運支出。本章 3.1 小節首先對航空公司之航空網路設計定義航空網路節點與節線之集合，以及航空網路中的航線、機型、頻次與旅運量。3.2 節考慮航空公司航線營運之主要成本項目，包含直接成本以及間接成本，建立航空公司營運成本函數。3.3 節架構航空公司網路規劃模式，其目標為營運成本最小，並且在滿足限制式條件之下，求解各航線航段之最適機型頻次。3.4 節建立可靠度模式，評估燃油價格變動下，航空公司網路能維持損益平衡的機率，當估計結果為不可靠時，航空公司可針對燃油價格異常的月份，進行航空網路航線頻次之調整，以減少燃油價格變動所造成之營運成本損失，因此 3.5 小節假設不同情境與策略，提供航空公司決策是否因應燃油價格變動調整航空網路之方法。

3.1 航空網路設計問題



考慮一航空公司之航空網路為 $G(N, A)$ ， N 為網路中所有節點之集合， A 為網路中所有航段之集合。本研究所定義之網路節點為航空公司營運航線所使用之機場，令航空網路當中航機起飛之任一機場為 i ，航機降落之任一機場為 j ，則 $i, j \in N$ 。機場 i 至機場 j 之間的航線為 a ， $a \in A$ 。在網路航線的設定上，令 P 為航空網路中所有航線之集合，航空公司網路中的任一候選航線為 p ， $p \in P$ 。

本研究所架構之航空網路設計問題，根據 Teodorovic(1994)以及 Hsu & Lin(2005)，將其定義為規劃航空公司之航線網路，航線之使用機型以及班機之頻次。令航空公司機隊中之航線候選機型為 k ； f_a 為機場 i 與機場 j 之間航段 a 之每月頻次，此頻次為所有機型航機飛行於航線 p 之頻次總和，由式子(3-1)表示。此模式之主要決策變數為 f_{pk} ，意即使用 k 型航機飛行航線 p 之每月班機頻次。其中 δ_a^p 為二元變數 (Binary Variable)，當航線 p 經過航段 a ，則 $\delta_a^p = 1$ ，如果航線 p 並沒有經過航段 a ，則 $\delta_a^p = 0$ ，如式(3-2)所表示。一般而言，航線規劃考慮直航以及轉機之航線，相同起迄點之航線可能經過不同航段，例如台北-檀香山航線，若為直航，則所經過航段為桃園機場至檀香山機場，若為轉機航線，中停站為日本東京的成田機場，則此轉機航線經過兩個航段，分別為桃園機場至成田機場，以及成田機場至檀香山機場。

$$f_a = \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} \quad (3-1)$$

$$\delta_a^p = \begin{cases} 1, & \text{航線 } p \text{ 經過航段 } a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-2)$$

航空公司網路中之旅運量為選擇搭乘此航空公司由機場 i 至機場 j 的旅客數量，定義每月經過航段 a 之旅運量為 Q_a ，每月搭乘航機 k 航行航線 p 之旅運量為 Q_{pk} ，則 Q_a 等於經過航段 a 的所有航線之加總旅運量，因此 $Q_a = \sum_p \sum_k \delta_a^p Q_{pk}$ 。

為簡化航空網路求解過程，突顯在國際油價與航空燃油價格變動之下，燃油成本對於航空網路營運成本之影響，本研究假設航空公司網路當中之旅運需求為外生變數。然而，實際上旅客需求與航空公司航班頻次之間存在供需互動的關係：當旅客選擇航空公司時，主要依據航空公司所提供之航班頻次、票價以及旅行時間等做為決策的依據，而航空公司在設計規劃航空網路時，也會考慮航線之旅客需求，提供最有效益之服務供給，由於航空客運市場之主要收入來自於票價，因此旅運需求與航機承載率關係到航空公司之營運收益，在規劃未來之航空網路時，必須事先預測旅運需求用以規劃適當的供給。由於本研究假設需求為外生，因此在旅運量之預測，引用民航局所提供之航空公司於各航段的歷史運量資料，使用灰色預測方法，所得之預測旅運量為航空網路之外生變數。根據 Hsu & Wen(2000)之預測模式架構，預測起迄對運量之年度運量，再將所求得之預測值轉化成平均每月交通量，所得結果將做為下一階段航空網路設計的投入資料(input data)。灰預測模式之說明詳見附錄 A。總言之，本研究先不考慮不同時間之需求變動情形，意即假設需求旅運量不改變，此為需求無彈性之情況，後續路網模式之求解並不考慮供需互動之情形。

3.2 航空公司網路營運成本函數

本研究定義之航空公司直接營運成本主要包含機場使用費、燃油成本以及維修成本與機組人員費用。令 \bar{O}^t 為航空網路初始規劃所預測之單月航空燃油價格，單位為 cents per gallon。此油價預測值將依據新加坡航空燃油(Monthly Singapore Kerosene-Type Jet Fuel Spot Price FOB)之歷史資料，以灰預測模式進行預測，代入航空網路規劃模式中求解。

令 H_{ak} 為機型 k 飛行航段 a 單趟之用油量，其單位為加侖，則機型 k 飛行航段 a 所需之單趟燃油成本為燃油價格 \bar{O}^t 與用油量 H_{ak} 之乘積。航段 a 之燃油成本支出 $c_a^F(f_a)$ 為所有

航行於航段 a 之頻次所產生之燃油成本加總。因此 $c_a^F(f_a)$ 可用下式(3-3)表示：

$$\begin{aligned} c_a^F(f_a) &= \sum_k f_a (\bar{O}^t \cdot H_{ak}) \\ &= \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} (\bar{O}^t \cdot H_{ak}) \end{aligned} \quad (3-3)$$

$c_a^b(f_a)$ 為所有航行於航段 a 之頻次所耗費的維修成本與機組人員費用加總；令單一機型 k 頻次飛行航段 a 所需耗費之維修成本與機組人員費用為 b_{ak} ，則：

$$c_a^b(f_a) = \sum_k f_a \cdot b_{ak} \quad (3-4)$$

直接營運成本中，航空公司給付機場之機場使用費為降落費用、噪音費用與廢氣排放費用之加總，費用取決於降落 j 機場之航機大小，因此令使用機型 k 航行航段 a 之每月頻次為 f_{ak} ， $f_{ak} = \sum_p \delta_a^p f_{pk}$ ， c_{jk}^L 為機型 k 降落 j 機場所支付的降落費， c_{jk}^E 為機型 k 降落 j 機場所支付的环境收費，其中包含噪音以及引擎廢氣排放費。則使用機型 k 航行航段 a 並降落於機場 j 之頻次所產生的機場使用費以 $c_{jk}^\pi(f_{ak})$ 表示，如式(3-5)：

$$c_{jk}^\pi(f_{ak}) = f_{ak} (c_{jk}^L + c_{jk}^E) \quad (3-5)$$

則航空公司航行航段 a 之直接成本 $C_a^D(f_a)$ 為：

$$\begin{aligned} C_a^D(f_a) &= \sum_k c_{jk}^\pi(f_{ak}) + c_a^b(f_a) + c_a^F(f_a) \\ &= \sum_k f_{ak} (c_{jk}^L + c_{jk}^E) + \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} (\bar{O}^t \cdot H_{ak}) + \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} b_{ak} \\ &= \sum_k \sum_p \delta_a^p f_{pk} (c_{jk}^L + c_{jk}^E) + \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} (\bar{O}^t \cdot H_{ak} + b_{ak}) \\ &= \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} (c_{jk}^L + c_{jk}^E + \bar{O}^t \cdot H_{ak} + b_{ak}) \end{aligned} \quad (3-6)$$

航空公司之間接營運成本包含場站與地勤，旅客服務費用，一般管理費用以及廣告行銷費等，本研究則定義為航空公司之服務旅客成本，根據 Kanafani and Ghoborial(1982)之研究，設航空公司於航段 a 載運一位旅客所產成的平均間接營運成本為 w_a ，則航空公司於航段 a 所產生之間接營運成本 $C_a^I(Q_a)$ 為：

$$C_a^I(Q_a) = w_a Q_a \quad (3-7)$$

3.3 航空網路航線機型頻次規劃模式

在規劃航空公司之航線頻次以及機型時，必須先假設航空公司所提供之航線供給量必須滿足航線旅客需求量，因此根據 Teodorovic(1983)與 Hsu & Lin(2005)之研究，將航段 a 的承載率定義為 β_a ， m_k 為 k 型航機之座位數，則航段 a 的承載率可以表示為：

$$\beta_a = \frac{Q_a}{\sum_k m_k f_{ak}} \quad (3-8)$$

考慮到各種機型的數目限制，設 u_k 為機型 k 的最大利用率，本研究定義為單架航機每天最大飛行時數。而 Y_k 為航空公司機隊中機型 k 的總架數， τ_p 為班機在航線 p 之單趟航程所需之飛行時間，則對於所有機型必須要滿足 $\sum_p \tau_p f_{pk} \leq u_k Y_k$ 。

本模式欲求取航空營運成本最小化，因此目標式為直接營運成本加上間接營運成本之總成本最小化，主要決策變數為使用機型 k 航行航線 p 之頻次 f_{pk} ，綜合以上之討論，本研究所建構之航空公司網路規劃模式如下，式(3-9a)-式(3-9e)：

P1 :

$$\text{Min} \quad C = \sum_{a \in A} [C_a^I(Q_a) + C_a^D(f_a)] \quad (3-9a)$$

$$\text{Subject to} \quad \beta_a \sum_k m_k f_{ak} \geq Q_a, \quad \forall a \quad (3-9b)$$

$$\sum_p \tau_p f_{pk} \leq u_k Y_k \quad \forall k \quad (3-9c)$$

$$f_a = \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk}, \quad \forall a \quad (3-9d)$$

$$\text{all } f_a, f_{pk}, Q_a \geq 0 \text{ and integer} \quad (3-9e)$$

限制式當中，(3-9b)代表每月航空公司在航段 a 所提供的座位數必須滿足每月之旅運量；(3-9c)如前所述，對於所有機型航班數目限制，班機航行航線 p 單趟所需之時間 τ_p 與頻次 f_{pk} 之乘積，即單日所有航機之總飛行時數，不能大於其機隊之最大利用率與總架數之乘積。(3-9d)表示航段 a 之頻次為所有航線之班機經過航段 a 的頻次。並且航段 a 之頻次 f_a 、使用機型 k 航行航線 p 之頻次 f_{pk} 與航段 a 之旅運量 Q_a 皆為非負整數。

3.4 航空網路可靠度評估模式

本節建立之可靠度模式，主要目的在於評估當初始規劃網路面臨外在環境影響，造成航空燃油成本變動，航空公司之燃油成本可維持損益平衡之機率。首先分析航空燃油價格之機率密度與分配之特性，再建立可靠度模式計算航空燃油價格變動下之航空網路可靠度。

3.4.1 航空燃油價格區間分析與機率分配

在前面的網路規劃模式中，本研究定義了 \bar{O}^t 為航空網路初始規劃所預測之單月航空燃油價格，其單位為 cents per gallon。此油價預測值依據新加坡航空燃油 (Monthly Singapore Kerosene-Type Jet Fuel Spot Price FOB) 之歷史資料，以灰預測模式進行預測。 H_{ak} 為機型 k 飛行航段 a 單趟之用油量，其單位為加侖，則機型 k 飛行航段 a 所需之單趟燃油成本為燃油價格 \bar{O}^t 與用油量 H_{ak} 之乘積。航段 a 之燃油成本支出 c_a^F 為所有航行於航段 a 之頻次所產生之燃油成本加總： $c_a^F(f_a) = \sum_k f_a(\bar{O}^t \cdot H_{ak})$ 。

航空公司之燃油成本受到國際油價波動而有所變動，當油價上漲幅度過大，燃油成本增加，造成航空公司營運成本上升，航空公司可能因此付出比預期還要大的成本。因此，對航空公司的網路規劃，燃油成本可視為一項不確定性因素。因此進行可靠度評估之前，必須先針對航空燃油價格以機率概念進行討論。

本研究假設航空燃油價格為航空公司不可控制之隨機變數，當航空公司進行一年期的航空網路頻次規劃時，如果以月為單位，則此規劃年包含 12 個隨機之燃油價格。本研究定義 \tilde{O}^t 為代表每個月航空燃油價格之隨機變數， O^t 為其實際值，t 為規劃年之月份， $t = 1, 2, 3, \dots, 12$ ， I 為 12 個月份之集合， $I \equiv \{1, 2, \dots, 12\}$ ，因此 $t \in I$ 。

為了解航空燃油價格之分佈特性，本研究觀察美國能源局所提供，自 1986 年 6 月至 2008 年之新加坡航空燃油價格資料，將價格資料以 Minitab15.0 軟體進行分析，得其直

方圖顯示航空燃油價格之分佈密度，如圖 3.1 所示。本研究根據機率理論，定義航空燃油價格之機率空間(probability space)。根據 Romano & Siegel(1986)探討機率空間之特性，令隨機航空燃油價格之實際值 O^t 的樣本空間為 Ω ，其機率空間為 $(\Omega, \mathbf{F}, \mathbf{P})$ ， σ -field \mathbf{F} 為樣本空間 Ω 的子集合(subset)，這些子集合為描述燃油價格變動情況之事件(events)， \mathbf{P} 為機率測度(probability measure)。則 Ω 之總體機率為 $\mathbf{P}(\Omega) = 1$ 。

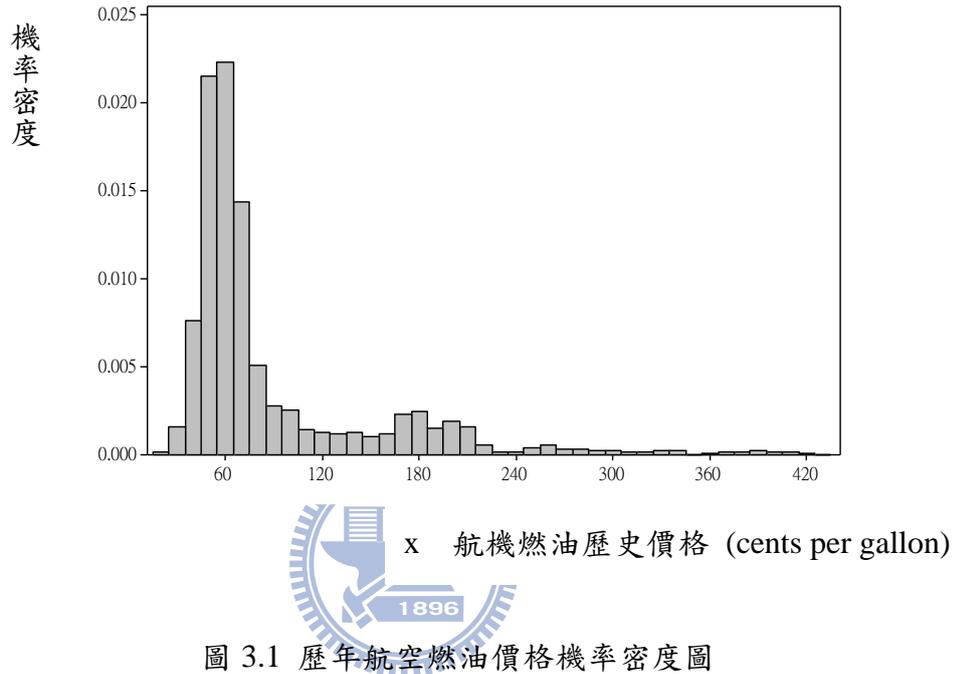


圖 3.1 歷年航空燃油價格機率密度圖

本研究假設隨機燃油價格 \tilde{O}^t 在一特定價格區間(interval)下，呈現常態分配的分佈情形，因此，本研究應用區間分析(Interval Analysis)的概念，分析航空燃油歷史資料，建立航機歷史燃油價格呈現常態分配之價格區間。區間分析之模式架構，根據 Moore & Bierbaum(1979)，定義一個區間為一組實數(real numbers)之封閉(closed)範圍。令實數 x 為航空燃油歷史價格，其終點(endpoints)燃油價格為 \underline{x}^* 、 \overline{x}^* ，因此 \underline{x}^* 為此區間之下限值， \overline{x}^* 為此區間之上限值。則燃油歷史價格之區間可表示為式(3-10)：

$$[\underline{x}^*, \overline{x}^*] = \{x: \underline{x}^* \leq x \leq \overline{x}^*\} \quad (3-10)$$

假設 X 為一個燃油價格區間，此區間之終點(endpoints)為 \underline{X} 與 \overline{X} ， $\underline{X} \leq \overline{X}$ 。此油價區間為一維(one-dimensional)之封閉(closed)向量，表示為：

$$X = [\underline{X}, \overline{X}], \quad X \in \mathbb{R} \quad (3-11)$$

若 x 位於區間 X ，其關係可表示為式(3-12)：

$$\underline{X} \leq x \leq \bar{X}, \quad x \in X \quad (3-12)$$

本研究假設單一區間內之燃油歷史價格具有常態分配之特性，其平均數為 μ ，標準差為 σ ，表示為 $x \sim N(\mu, \sigma)$ ，當隨機燃油價格 $\bar{O}^t = x$ ，則 \bar{O}^t 位於區間 X 內，其常態分配表示為 $\bar{O}^t \sim N(\mu, \sigma)$ 。任一油價區間在樣本空間 Ω 的發生機率可表示為： $P(\underline{X} \leq x \leq \bar{X})$ ， $x \in X$ 。

假設燃油歷史價格含有 n 個區間 ($n=1, 2, \dots, \gamma$)，因此，經由式(3-11)、(3-12)改寫，可得不同油價區間 X_n 與區間內之燃油歷史價格 x_n 之關係：

$$X_n = [\underline{X}_n, \bar{X}_n], \quad X_n \in \mathbb{R} \quad (3-13)$$

$$\underline{X} \leq x_n \leq \bar{X}, \quad x_n \in X_n \quad (3-14)$$

根據區間分析可得航空網路之初始規劃航空燃油價格 \bar{O}^t 所對應之燃油價格區間，當隨機燃油價格 \bar{O}^t 與 \bar{O}^t 位於同一區間，則燃油價格屬於正常情況下之燃油變動。

考慮外在環境影響，造成航空網路規劃年之燃油價格擾動，本研究定義發生燃油價格變動之情況為事件 s_y ($y=0, 1, \dots, Z$)， Z 可顯示異常情況的數量。令 U 表示所有燃油價格正常與異常變動之事件集合， $U \equiv \{s_0, s_1, s_2, s_3, \dots, s_z\}$ ，令 $\Pr(s_y)$ 為規劃年情況 s_y 發生之機率，($y=0, 1, 2, \dots, z$)，則其中 $\Pr(s_y) \geq 0$ ， $\sum_{y=0}^z \Pr(s_y) = 1$ 。

當隨機燃油價格位於其他區間範圍而非 \bar{O}^t 所屬之油價區間內，則表示燃油價格發生異常的變動，燃油成本在正常或異常情況下擁有不同之常態分配參數。航空公司欲計算航空網路之可靠度時，首先必須掌握預測油價所對應之常態分配參數，並以此參數計算航空網路可靠度，所得之機率即為正常油價變動之下之航空網路頻次可靠度。當預期發生異常情況時，此時燃油價格不再位於初始規劃油價之區間，因此擁有不同之常態分配參數。

3.4.2 航空燃油價格變動下之航空網路可靠度

為建立一個指標了解燃油價格變動所影響之航空網路可靠度，本研究首先分析航空燃油成本的相關成本項目，航空公司使用飛行航段 a 所支付的燃油成本為 $c_a^F = f_a(\bar{O}^t \cdot H_{ak})$ ，假設航空公司規劃初期可根據其燃油成本設定應該向旅客收取多少費用以平衡燃油成本的支出，令 $c_a^{F, \text{pax}}$ 為飛行航段 a 之乘客所負擔之燃油成本，即航空公司經由票價收入所回收之燃油成本。本研究假設一燃油成本收益因子 g_{ak} ，即每位航空旅客於

航段 a 航程中搭乘機型 k 所負擔之燃油成本，因此 $c_a^{F,pax} = \sum_k Q_a \cdot g_{ak}$ 。

假設由航空公司所支付航段 a 之總燃油成本與其由旅客收入所回收之燃油成本之間的成本比值為 C_a^* ，則：

$$C_a^* = \frac{c_a^F}{c_a^{F,pax}} = \frac{f_a(\bar{O}^t \cdot H_{ak})}{Q_a \cdot g_{ak}} = \frac{\sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk}(\bar{O}^t \cdot H_{ak})}{\sum_p \sum_k \delta_a^p Q_{pk} \cdot g_{ak}} \quad (3-15)$$

可靠度的評估步驟於航空網路規劃模式求解之後展開，上一節航空網路求解結果為航空公司之初始規劃，並且已決策出航空網路最低成本之下的航線、機型與頻次組合。為評估可靠度，本研究依據式(3-15)假設一航行航段 a 所耗用之隨機燃油成本因子做為評估可靠度的準則：

$$C_a^*(\tilde{O}^t) = \frac{\tilde{O}^t \cdot \sum_k \bar{f}_a H_{ak}}{\sum_k Q_a \cdot \bar{g}_{ak}} \quad (3-16)$$

其中 \bar{f}_a 為規劃模式之初始頻次，由於 $C_a^*(\tilde{O}^t)$ 是一個比值，當 $C_a^*(\tilde{O}^t) = 1$ 的時候，表示航空公司所付出的燃油成本以及旅客所負擔的燃油成本相等，向旅客收取之收入恰好可以支付航空公司的燃油成本，因此達到收支平衡(break-even)。如果 $C_a^*(\tilde{O}^t) > 1$ ，代表旅客所承擔之燃油成本並不足以支付航空公司所付出之燃油成本，航空公司將自行承擔多出的燃油成本，若 $C_a^*(\tilde{O}^t) \leq 1$ ，則代表航空公司尚有獲利的空間。

$C_a^*(\tilde{O}^t)$ 具有一上限值 \bar{C}_a^* ，為航空公司最大可所能接受之成本比例，在此情形下航空公司才可以收支平衡(break-even)甚至而獲利，一旦超出了上限值，航空公司將可能產生虧損之情形。為得到航空公司規劃時所預設之 \bar{g}_{ak} 值，令 $C_a^*(\bar{O}^t) = 1$ ，由 $\bar{g}_{ak} = \frac{f_a(\bar{O}^t \cdot H_{ak})}{Q_a}$ 求出 \bar{g}_{ak} 的值，假設前提在於假設航空公司掌握預測油價之後，在規劃時期制訂票價時，即考慮燃油成本的支出能夠透過旅客收益達到收支平衡。當 $C_a^*(\tilde{O}^t) \leq \bar{C}_a^*$ ，則航段 a 之機型頻次規劃為可靠，超出此範圍則為不可靠。示意圖如圖 3.2 所示：

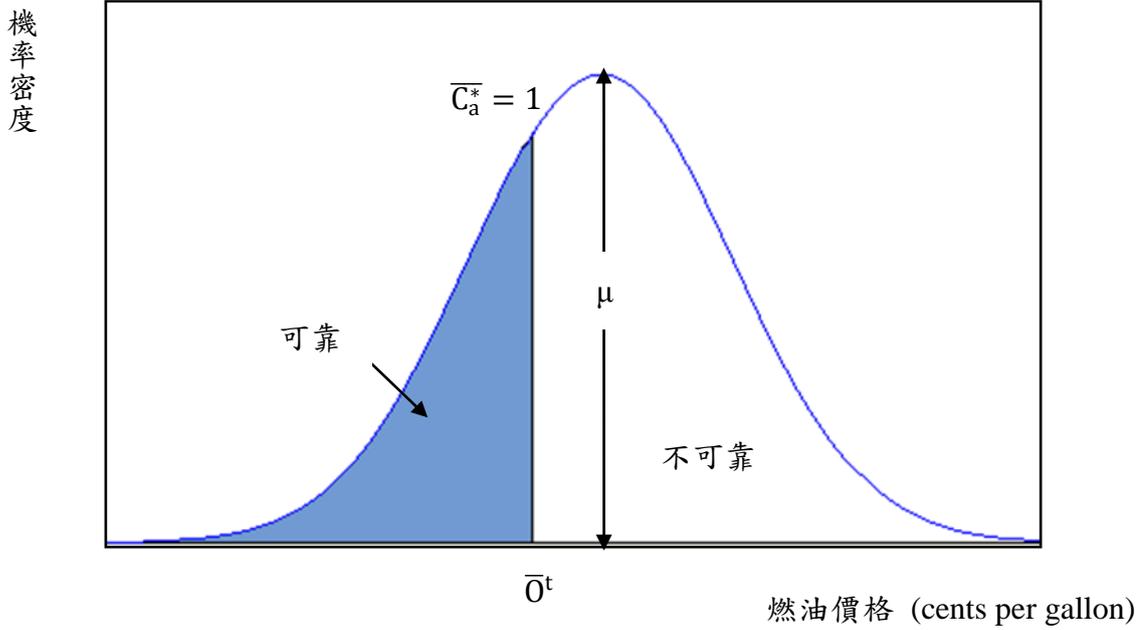


圖 3.2 可靠度機率密度示意圖

因此本研究定義航段 a 為可靠的機率為 $R_a(\tilde{O}^t)$ ，由圖 3.2，此機率即為圖中常態分配陰影區的面積。藉由常態分配之累積密度函數求得，如下式所示：

$$R_a(\tilde{O}^t) = \Pr \left[\tilde{O}^t \leq \bar{C}_a^* \left(\frac{\sum_k Q_a \cdot \bar{g}_{ak}}{\sum_k \bar{f}_a H_{ak}} \right) \right] = \Phi \left(\frac{\bar{C}_a^* \left(\frac{\sum_k Q_a \cdot \bar{g}_{ak}}{\sum_k \bar{f}_a H_{ak}} \right) - \mu}{\sigma} \right) \quad (3-17)$$

$\Phi(z)$ 為標準常態分配之累積密度函數， $\Phi(z) = \int_{-\infty}^z (1/\sqrt{2\pi}) e^{-\omega^2/2} d\omega$ 。根據式(3-16)，當燃油成本比值大於上限值，代表油價上漲過高，造成航空公司虧損。本研究將藉由可靠度模式評估的結果進一步分析航空公司的成本損失情形。航空公司預期規劃年每個月之油價 \tilde{O}^t 與 \bar{O}^t 位於同一油價區間內，為正常油價變動的情況。此時，航段 a 燃油成本於初始規劃油價之下的可靠度為 $R_a(\bar{O}^t)$ 。令規畫年中，油價屬於正常情況之月份 t_0 有 h 個，則各航段於油價正常月份之平均可靠度 \bar{R}_a 為：

$$\bar{R}_a = \sum_{t_0=1}^h \frac{1}{h} R_a(\bar{O}^t) \quad (3-18)$$

現在考慮當外在環境變化，例如：戰爭、油價炒作、經濟發展、油品需求量大增…等，因而造成某一特定時期的燃油價格出現異常上升或是下降的變動，因為異常的事件發生，造成此時燃油價格所在區間並非初始規劃油價之區間，其常態分配參數也因此改變。由於燃油價格受到整體經濟環境之影響，因此航空網路的所有航線皆受影響，因此

油價異常的事件發生於整體航空網路當中，而非只是特定航線受到影響。

令 \mathbf{U} 表示在規劃年中所有燃油價格變動情況的組合， $\mathbf{U} \equiv \{s_0, s_2, s_3, \dots, s_z\}$ ， s_0 為燃油價格正常情況， $s_1, s_2, s_3, \dots, s_z$ 代表各個明顯的油價異常情況，以 z 標示不同異常情況的事件數量。令 $\Pr(s_y)$ 為規劃年情況 s_y 發生之機率 $\Pr(s_y) \geq 0$ ， $\sum_{i=0}^z \Pr(s_y) = 1$ ， $y = 0, 1, 2, \dots, z$ 。

本研究依據 Hsu & Wen(2003)，假設在規劃年間，異常情況 s_y 之發生時間為 t_y^* ，其歷程(duration)，即 s_y 所延續之時間長度，則以 \tilde{v}_y 表示，單位為月份。假設 \tilde{v}_y 為有限之間斷隨機分配： $\{(v_y^q, p_q), q = 1, \dots, v\}$ ($p_q > 0, \forall q$)，其中 v_y^q 為 \tilde{v}_y 的實際值，而 p_q 為其機率。令 I_q^y 表示異常情況 s_y 持續發生於整體航空網路中，屬於異常情況發生區間的月份集合，給定所發生的歷程 v_y^q ，由式(3-19)可以看出 I_q^y 與時間 t 之間的關係：

$$I_q^y \equiv \{t | [t_y^*] \leq t < [t_y^* + v_y^q]\} \quad (3-19)$$

I_q^0 即代表屬於正常情況 s_0 的月份集合，因此 $I_q^0 \equiv I - I_q^y$ 。在異常情況 s_y ，燃油價格發生異常的持續時間為 v_y^q ，此時航空燃油為隨機變數 $\tilde{O}_{yq}^t, \forall t \in I_q^y$ 。

對於在異常情況 s_y 的可靠度，可以運用式子(3-17)，計算當異常情形 s_y 發生，持續 v_y^q 的燃油價格 \tilde{O}_{yq}^t 影響之下的可靠度，即 $R_a(\tilde{O}_{yq}^t)$ 。由於 \tilde{v}_y 為隨機變數，因此 \tilde{O}_{yq}^t 的分佈、時間區間 $[[t_y^*], [t_y^* + v_y^q]]$ 以及 $R(\tilde{O}_{yq}^t)$ 會隨著 \tilde{v}_y 的實際值 v_y^q 所改變。在此情形之下，在規劃年的全年可靠度 $\bar{R}_{a|s_y}$ 即可用下式來表示：

$$\bar{R}_{a|s_y} = \sum_{q=1}^v \frac{1}{12} p_q \left[\sum_{t \in I_q^y} R_a(\tilde{O}_{yq}^t) + \sum_{t \in I_q^0} R_a(\tilde{O}^t) \right] \quad (3-20)$$

因此，本研究所評估在正常以及不正常之油價變動之下的可靠度即為：

$$E[R_a] = \sum_{y=1}^z \bar{R}_{a|s_y} \Pr(s_y) + \bar{R}_a \Pr(s_0) \quad (3-21)$$

3.5 航空公司對航機頻次之調整決策

本研究假設不同情境之下，航空公司根據前面計算各航線於規劃年之可靠度，決策是否因應燃油價格調整網路規劃。如果航空網路之相對可靠度高，代表該月份的燃油價格變動之下航空路網維持可靠之機率較大。但是若觀察發現航線網路具有低可靠度的特性，代表在燃油價格的變動之下，此網路規劃之初始規劃頻次難以維持其可靠度，意即容易發生虧損之情形，航空公司就必須考慮因應航空燃油價格之變動調整期航線機型以及頻次。本研究所假設情境主要分為三類，分別是針對初始規劃結果不可靠之月份，以當月之期望油價進行網路頻次與機型之調整；航空公司也可考慮直接進行減班，放棄部分旅運量，在此情境下航空公司之供給將無法滿足全部需求量；以上兩種情況為航空公司因應短期變動之調整策略，另一種假設情境則考慮長期之調整策略，即航空公司考量未來油價趨勢，購置較為省油之新型航機，重新規劃航空網路。本研究並且針對不同情境之特性，建立其懲罰值與調整成本模式，做為航空公司決策是否調整之依據。

3.5.1 燃油價格變動下之航空營運成本

本研究假設需求為固定值，若只考慮正常的燃油價格變動，可以直接觀察到燃油價格的高峰 (peaks) 以及峰谷 (valleys)。假設在航空路網中， I^{0+} 為正常情形 s_0 之下，燃油價格屬於高峰期的月份集合， I^{0-} 為正常情形 s_0 之下，燃油價格屬於峰谷期的月份集合，當月份 $t \in I^{0+}$ 的情況之下以及 $t \in I^{0-}$ ，航空燃油變動會對航空網路之營運成本產生影響。另外，在異常情形 s_y 發生，即 $t \in I_q^y$ 的情況之下，航空網路之營運成本可能產生較大幅度之成本變動。這些因為燃油價格變動而造成航空公司營運成本與規劃之初始成本不同的月份，由 $\mathbf{t} \equiv \{I^{0-} \cup I^{0+} \cup I_q^y, \forall y\}$ 代表規劃年需要調整航空網路之月份的集合。

當國際油價變動時，可以透過式(3-9a)進一步分析油價變動時之航空公司營運成本的變動值，令 O^t 為每月燃油價格實際值 ($t=1,2,\dots,12$)，則當月總成本的變動量如下式所示：

$$\Delta C = \sum_a w_a Q_a + \sum_a \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} [c_{jk}^L + c_{jk}^E + (O^t - \bar{O}^t) H_{ak} + b_{ak}] \quad (3-22)$$

將 $f_a = \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk}$ ，與 $\beta_a = \frac{Q_a}{\sum_k m_k f_{ak}}$ 二式帶入，可將式(3-22)化為式(3-23)：

$$\Delta C = \sum_a \sum_k w_a \beta_a m_k f_{ak} + \sum_a f_a [c_{jk}^L + c_{jk}^E + (O^t - \bar{O}^t) H_{ak} + b_{ak}] \quad (3-23)$$

此小節模式主要在於評估航線機型頻次改變下所造成之總營運成本變動，透過模式求解，可獲得在燃油價格成本變動之後，航空公司在目標成本最小化之下之總營運成本。以下則考慮不同情境假設，進行航空公司調整其航空網路之策略以及執行決策。

3.5.2 航空公司因應策略之假設情境

此小節探討不同情境之下，航空公司可採用之調整策略，例如投入新燃油價格變數，重新規劃航空網路頻次，檢視航空網路規劃是否因油價變動而改變機型頻次組合，或是考慮在不同油價與需求變動組合下，重新航空網路規劃之機型頻次，最後考慮航空公司加入新機隊之航空網路頻次重新規劃，並建立懲罰值模式與調整成本比較，決策是否執行調整策略。

1. 假設情境一

航空公司面臨燃油價格變動，並且在此燃油價格 O^t 之下，該月之航空路網可靠度低於初始規劃網路之可靠度，表示航空公司之營運成本因為受 O^t 影響而超出預期支出。此情境在於探討規劃期間航空公司預期規劃年各月份之燃油價格，檢視在不同燃油價格影響之下，航空網路之規劃是否受到油價影響而改變其機型頻次組合，並且評估在不同燃油價格影響下，航空公司之營運成本變動，以及探討航空公司因應變動之可能行動與策略。因此航空網路中，重新規劃的是班機頻次以及所使用的機型，航線則維持初始規劃之決策，不再改變，設定航線為初始規劃航線而不重新規劃，主要考量本研究之設定目標為營運成本最小，由於在實務上，對航空公司而言可降低大量成本的做法，就是直接取消營運情況較差的航線，航線取消雖然節省了航空公司大量之營運成本，但同時也會造成航空公司之服務水準下降，旅客量流失，喪失競爭力，因此本研究不考慮航線取消的情形，僅就各航線之機型與頻次組合進行情境分析。

令 \bar{O}^t 為航空公司所預期之特定月份 t 的燃油價格水準； \bar{O}_{yq}^t 為預期在 t 月($t \in I_q^y$)會發生異常情形 s_y 的燃油價格，預期 s_y 情形下，此燃油價格之持續時間為其歷程 \tilde{v}_y ，由於 \tilde{v}_y 為隨機變數，因此 \bar{O}_{yq}^t 會隨著其實際值 v_y^q 的發生機率 p_q 所改變。在因應燃油價格需要調整航空網路之月份 t ($t \in \mathbf{t}$)，令 $O'(t)$ 為調整之燃油價格，當調整月份屬正常變動情形，且燃油價格處於高峰期，即 $t \in I^{0+}$ ，則 $O'(t)$ 為所有 $t \in I^{0+}$ 之預期燃油價格集合平均，其中 $\text{average}_{t, t \in I^{0+}}\{\bar{O}^t\}$ 為所有 $t \in I^{0+}$ 的集合之 \bar{O}^t 平均數。同理， $\text{average}_{t, t \in I^{0-}}\{\bar{O}^t\}$ 為所有 $x \in I^{0-}$ 的集合之 \bar{O}^t 平均數可求得屬於 $t \in I^{0-}$ 之預期油價集合，並由平均數決定 $O'(t)$ 。當

$t \in I_q^y$ ， $O'(t)$ 由異常情況的預期油價 \bar{O}_{yq}^t 乘上異常情況之歷程發生機率，
 $\text{average}_{x,x \in I_q^y} \{\bar{O}_{yq}^t\}$ 為時間區間 $[t_y^*] \leq x < [t_y^* + v_y^q]$ 之下的所有 t 月份之 \bar{O}_{yq}^t 的平均數，如
 下(3-24)所表示：

$$O'(t) = \begin{cases} \text{average}_{t,t \in I^{0+}} \{\bar{O}^t\}, & \text{if } t \in I^{0+}, \\ \text{average}_{t,t \in I^{0-}} \{\bar{O}^t\}, & \text{if } t \in I^{0-}, \\ \sum_{q=1}^v p_q \times \text{average}_{t,t \in I_q^y} \{\bar{O}_{yq}^t\}, & \text{if } t \in I_q^y, \end{cases} \quad (3-24)$$

對於網路中受不同燃油價格影響而需要被調整之月份，以 $O'(t)$ 為燃油價格投入參數，
 以下列之網路模式 P2 求解，檢視在燃油成本變動，其他條件不變之下，航空網路之機
 型頻次組合是否產生變動：

P2：

$$\text{Min}_{f_{pk}^t} \quad C = \sum_a w_a Q_a + \sum_a \sum_p \sum_k \delta_a^{\bar{p}} f_{\bar{p}k}^t [c_{jk}^L + c_{jk}^E + O'(t)H_{ak} + b_{ak}] \quad (3-25a)$$

$$\text{Subject to} \quad \beta_a \sum_k m_k f_{ak} \geq Q_a, \quad \forall a \quad (3-25b)$$

$$\sum_{\bar{p}} \tau_{\bar{p}} f_{\bar{p}k}^t \leq u_k Y_k, \quad \forall k \quad (3-25c)$$

$$f_a = \sum_{\bar{p}} \sum_k \delta_a^{\bar{p}} f_{\bar{p}k}^t, \quad \forall a \quad (3-25d)$$

$$\text{all } f_a, f_{\bar{p}k}^t, Q_a \geq 0 \text{ and integer} \quad (3-25e)$$

$f_{\bar{p}k}^t$ 為受調整月份 t 在重新規劃油價 $O'(t)$ 所規劃之航線機型頻次，若重新規劃結果顯示
 航線 \bar{p} 的機型頻次 $f_{\bar{p}k}^t = \bar{f}_{\bar{p}k}$ ，代表該航線之機型頻次規劃不受燃油價格影響；若航線 \bar{p} 的
 機型頻次 $f_{\bar{p}k}^t \neq \bar{f}_{\bar{p}k}$ ，代表該航線之機型頻次受到油價變動而改變。當機型頻次變動，可
 能造成相關飛行成本變動，本研究依據 Hsu & Wen(2002) 建立航線因應航空燃油價格變
 動產生之機型頻次調整成本 $C_{\bar{p}}^t$ ，假設在調整月份 t ，航線 \bar{p} 重新規劃機型頻次之調整成本
 由式(3-26)所示：

$$C_{\bar{p}}^t = \sum_p \sum_k \theta_{\bar{p}k}^t |\bar{f}_{\bar{p}k} - f_{\bar{p}k}^t| \quad (3-26)$$

其中 $\theta_{\bar{p}k}^t$ 為受到每一架機型 k 航機在調整之月份 t 飛行航線 \bar{p} 的調整成本，即每更動一

架航機之變動直接成本。

航空公司如果不因應燃油價格變動，意即不採用 P2 之重新規劃結果，而維持原本之航線頻次規劃，則維持初始機型頻次規劃所增加之燃油成本即為航空公司之懲罰值 $\hat{P}_t(O^t)$ ，如式 3-27 所示。當調整成本較小，則航空公司可決策進行調整策略。當燃油價格 O^t 大於或等於初始規劃油價 \bar{O}^t ，則不進行調整。另外，在實務上，當油價攀升時，政府單位會根據油價調整燃油附加稅，航空公司會透過調整燃油附加稅來彌補燃油成本損失，因此航空公司依據各航段上每位旅客被增收之燃油附加稅 c_a^{tax} ，在油價上升情形下，航空公司之航空網路營運成本，可獲得 $\sum_a Q_a c_a^{\text{tax}}$ 的燃油附加費用彌補損失。

$$\hat{P}_t(O^t) = \begin{cases} \sum_a \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} (O^t - \bar{O}^t) H_{ak}, & \text{if } O^t \geq \bar{O}^t \\ 0, & \text{if } O^t \leq \bar{O}^t \end{cases} \quad (3-27)$$

2. 假設情境二

航空公司根據初始規劃結果以及對於景氣的預測與評估，同時考慮油價變動以及需求變動，此時航空公司必須滿足旅運量 Q'_a 。

P3 :

$$\text{Min}_{f_{pk}^t} C = \sum_a w_a Q'_a + \sum_a \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk}^t [c_{jk}^L + c_{jk}^E + O'(t) H_{ak} + b_{ak}] \quad (3-28a)$$

$$\text{Subject to} \quad \beta_a \sum_k m_k f_{ak} \geq Q'_a, \quad \forall a \quad (3-28b)$$

$$\sum_p \tau_p f_{pk}^t \leq u_k Y_k \quad \forall k \quad (3-28c)$$

$$f'_a = \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk}^t, \quad \forall a \quad (3-28d)$$

$$\text{all } f_a, f_{pk}^t, Q'_a \geq 0 \text{ and integer} \quad (3-28e)$$

航空公司必須以重新規劃結果評估頻次調整成本 C_p^t 以及燃油價格與運量變動時卻不進行調整所產生之懲罰值 $\hat{P}_2(O^t)$ 、 $\hat{P}_2(Q'_a)$ ，決策是否執行調整其網路頻次。由於旅運量之變動可能為增加或是減少，當旅運量上升時，班次增加，航空公司所付出之旅客服務成本也隨之上升；當旅運量減少，其懲罰值為航空公司未因應需求下降所造成之多餘支出成本。懲罰值如下所表示：

$$\hat{P}_2(O^t) = \begin{cases} \sum_a \sum_p \sum_k \delta_a^p f_{pk} (O^t - \bar{O}^t) H_{ak}, & \text{if } O^t \geq \bar{O}^t \\ 0, & \text{if } O^t \leq \bar{O}^t \end{cases} \quad (3-29)$$

$$\hat{P}_2(Q'_a) = \begin{cases} \sum_a C_a^l(Q_a) \cdot [(Q'_a - \bar{Q}_a)/\bar{Q}_a] + \sum_a C_a^D(f'_a - f_a), & \text{if } Q'_a \geq \bar{Q}_a \\ \sum_a C_a^l(Q_a) \cdot [(\bar{Q}_a - Q'_a)/\bar{Q}_a] + \sum_a C_a^D(f_a - f'_a), & \text{if } Q'_a \leq \bar{Q}_a \end{cases} \quad (3-30)$$

以上兩種假設情境為航空公司面臨短期油價變動之下的因應調整策略，而以下情境假設則站在長期規劃之觀點，假設航空公司考量購置新型航機，由於新型航機多強調較過去同型機種省油，因此透過長期觀點分析在高油價時代，省油航機對於航空公司營運策略上之影響力。

3. 假設情境三

航空公司面臨油價變動之不確定性，在航空網路模式中加入新候選航機的相關參變數進行規劃。由於在實務上，航機製造業者的航機設計方向，目前皆強調航機的燃油使用效益以及環保效益，使用省油航機，對航空公司而言，長期下來可節省許多燃油成本。實務上，由於購置新型航機之成本高昂，在新航機的選擇上，須同時考量購置航機的成本與長期可節省之燃油費用決策是否購置新型航機，另外，對於舊有機隊，也必須考慮其年限以及汰舊時程，評估是否有引進新航機之必要性。加入新航機進行規劃求解，首先透過蒐集實務資料，增加航空網路模式之候選機型，並且搜集新加入之候選機型的相關參數。依據新航機特性，指派為特定航線之候選航機，在其他成本項目與需求量不變的情況下，進行航空網路模式規劃求解(式(3-9a)-(3-9e))。規劃結果依各航段的機型頻次組合變化，逐一探討並且比較不同航機之燃油成本，同時計算該航段之可靠度 \bar{R}_a ，評估若改用不同航機是否具有提升可靠度的效果。

四、 範例分析

本研究之範例分析對象為國籍航空公司 C，研究範圍選擇該公司提供客運服務之六條起迄對航線，分別為：台北-東京、台北-洛杉磯、台北-法蘭克福、台北-檀香山、台北-曼谷、台北-阿姆斯特丹，建立航空公司營運網路進行探討。

本章 4.1 節先進行航空網路模式之規劃求解，以月份為單位規劃一整年之航空網路。規劃年之燃油價格以及旅運需求量先行預測，並且搜集其他相關變數資料，規劃航空公司目標營運成本最小化之下的航線機型頻次組合。4.2 節對於初始規劃之航線機型頻次，計算整體路網在航空燃油價格變動影響下的可靠度，即航空網路面臨航空燃油價格變動，能維持燃油成本損益平衡之機率。根據可靠度計算結果，針對可靠度相對較低的月份，於 4.3 節分析航空公司的因應燃油價格變動之調整規劃與營運策略，並假設不同情境，依據情境討論航空公司之可能因應方法，例如，在短期減少運量或改變使用機型、調整票價，長期的觀點則例如考慮購置新型航機等，本研究透過分析不同假設情境，進行重新規劃與敏感度分析，並討論航空公司之決策行為。



4.1 航空網路航線機型頻次規劃求解

在範例分析中，假設以台北為起點城市，其他城市為迄點城市，其中由台北飛往檀香山的航線，可選擇台北直飛檀香山，或是台北出發，中間停東京成田機場，再轉往檀香山。台北飛阿姆斯特丹則是可選擇直飛或是轉機，所有候選航線如表 4.1 所示。根據 C 航空公司之實際資料，該公司之客運機隊規模為：13 架波音 B747-400 客機、11 架波音 B737-800 客機、6 架空中巴士 A340-300 以及 17 架空中巴士 A330-300。本研究考量航空網路中之航程與飛行小時，由於機型 B737-800 屬於短程小型飛機，不列為候選機型。因此本研究所設定之航線網路具有三種候選機型：B747-400、A340-300 以及 A330-300。各機型之架數、座位數、航機利用率為航空網路模式中之參數，影響網路模式之限制；最大起飛重量則與機場降落費、環境收費之收取相關(如表 4.2)。由於航機之耗油量，為計算燃油成本之重要參數，初步比較候選機型的耗油率，以 A340 最高。

本研究考慮各航段旅運量、航距、飛行時間，選定航線中各個航段可選擇之機型。同時，依據民航局提供之實際數據以及歷史資料，預設各航段之承載率，如表 4.3 所示。彙總以上各項資料後，做為 C 航空公司網路規劃模式之輸入值(inputs)。

表 4.1 C 航空公司網路之航線設定

候選航線(p)	航程距離(公里)	飛行時間(小時)
台北-東京	2278	3
台北-洛杉磯	10901	12
台北-法蘭克福	9378	13.45
台北-檀香山	8474	8.75
台北-東京-檀香山	8292	11.25
台北-曼谷	2527	4
台北-曼谷-阿姆斯特丹	9153	16.33
台北-阿姆斯特丹	11680	17.66

資料來源：民航局、C 航空公司，本研究整理

表 4.2 C 航機公司機隊狀態

機型 k	機型*	航機架數 Y_k	最大起飛 重量 (kg)	座位數* m_k	航機利用率 u_k (hr/day)	耗油量**	
						liter/seat- km	Gallon/ hr
1	B747-400	13	396,890	397	10	0.035	3230
2	A340-300	6	276,500	276	10	0.039	N/A
3	A330-300	17	230,000	313	10	0.035	N/A

資料來源：*C 航空公司；**波音公司、空中巴士；本研究整理。

表 4.3 各航段之候選機型以及預設承載率

航段	候選機型	預設承載率(%)
台北-東京	A340-300, A330-300	0.77
台北-洛杉磯	B747-400	0.88
台北-法蘭克福	B747-400	0.82
台北-檀香山	B747-400, A330-300	0.75
東京-檀香山	A330-300, B747-400	0.75
台北-曼谷	A340-300, A330-300	0.76
台北-阿姆斯特丹	B747-400	0.75
曼谷-阿姆斯特丹	B747-400	0.77

各機場之機場使用費，主要參照 IATA 之機場收費手冊(Airport and AirNavigation Charges Manual)所整理之各國機場收費方式計算降落費，並且依據 2.1.3 節所歸納之機場收費政策，對應本研究設定之航段以及候選機型，分別計算出各機場對於不同機型所收取之降落費、噪音費以及廢氣排放費(Emission Charges)。機場使用費為上述三項費用之加總，如表 4.4 所示，其中有徵收噪音費之國際機場包含台灣之桃園國際機場、日本東京成田機場、德國法蘭克福機場以及荷蘭阿姆斯特丹之史基浦機場。此外，德國法蘭克福機場尚有加收引擎廢氣排放費用(Emission Charges)。若機場並沒有徵收噪音收費或是引擎廢氣排放費用，表格中則以 None 表示。由表 4.4 可初步比較同級航機所收取之機場使用費，以東京成田機場之收費最高。

航空網路模式中的需求量輸入資料，根據民航局民國 90 年至 96 年之國際航線旅運量統計，可取得 C 航空公司於候選航線之歷年旅運量，此數據透過 Matlab 軟體求解灰預測之 G(1,1)模型，對於各航線進行規劃年之運量預測。所求之年預測運量再換算成平均每月之旅運量。由於民航局所提供之統計資料僅包含由台北起飛之航班資訊，因此使用上述方法所求之航線需求量分別為台北-東京、台北-洛杉磯、台北-法蘭克福、台北-檀香山、台北-曼谷等直航航線。

另外，中停站機場之航空公司旅運量與轉機航線之旅運量因為數據難以取得，本研究根據過去研究以及實際資料進行合理假設，針對台北-東京-檀香山航線，根據美國夏威夷觀光局(Hawaii Tourism Authority)提供之旅運資料假設，台北-曼谷-阿姆斯特丹航線以及曼谷-阿姆斯特丹則依據 Hsu & Wen (2003)之數據假設。表 4.5 即顯示範例航空公司網路之年度預測流量以及月預測流量。

本研究為簡化模式計算之複雜度，強調燃油價格變動對於整體航空公司網路營運成本的影響，因此研究中首先將航空需求假設為定值，也就是不考慮需求因應景氣循環或是淡旺季之變動，因此在航空網路規劃模式中暫不討論供需互動之情形。

表 4.4 各機場之機場使用費

機場	機型	降落費	環境收費		機場使用費
			噪音收費	排放費	
台北	B747-400	\$2,826	282	None	\$3,108
	A340-300	\$1,959	145	None	\$2,104
	A330-300	\$1,505	122	None	\$1,627
東京	A340-300	\$6,864	已包含在降落費當中	None	\$6,864
	A330-300	\$5,709		None	\$5,709
洛杉磯	B747-400	\$1,556	None	None	\$1,556
法蘭克福	B747-400	\$814	\$346	\$218	\$1,378
檀香山	B747-400	\$1,215	None	None	\$1,215
	A330-300	\$787	None	None	\$787
曼谷	A340-300	\$968	None	None	\$968
	A330-300	\$794	None	None	\$794
阿姆斯特丹	B747-400	\$2,986	已包含在降落費當中	None	\$2,986

單位：美元

表 4.5 C 航空公司各航線交通流量預測

航線/航段	年度預測流量	月預測流量
台北-東京	380350	31696
台北-洛杉磯	267530	22295
台北-法蘭克福	77949	6496
台北-檀香山	34732	2895
台北-東京-檀香山	103217	8601
東京-檀香山	57633	4803
台北-曼谷	369300	30775
台北-曼谷-阿姆斯特丹	108642	9054
曼谷-阿姆斯特丹	18868	1572

單位：人次

在各航段之直接成本方面，由於飛行航段 a 所需耗費之維修成本、機組人員費用與航段之距離、飛行時間有直接關係，相關實際數據多屬於航空公司商業機密，有取得上之困難，因此本研究根據美國航空運輸協會 ATA (Air Transport Association) 所公佈之成本指標 (Passenger Airline Cost Index) 進行估算。根據指標，旅客服務成本包含提供服務、食物飲料以及其他專業服務所加總之成本指標為每一有效座位里程 1.73 美分 (cents per ASM)。而航空公司所支付的維修成本、折舊成本、租借成本與機組人員費用的成本指標，維修成本與飛行時數相關，其成本指標為 0.19 美分 (cents per ASM)，對於不同航段，必須與其他成本分開計算後再加總，機組人員成本與航機配置人數相關，其指標為 2.96 美分 (cents per ASM)，並且假設一般國際航線班機配置 10 位機組人員。其餘運輸相關之費用成本指標加總則為 2.3 美分 (cents per ASM)。根據上述成本指標所計算出之結果整理成表 4.6。航空公司之燃油使用部分，本研究主要關注於各型航機飛行航段 a 所耗用之燃油成本，根據候選航機製造商提供的機型實際數據，以各候選航機之耗油率參數，對應各航線、航段飛行小時、航程距離與候選航機座位數，計算出各航段之候選機型航行該航段 (單趟旅程) 所需消耗之燃油量，以加侖為單位，如表 4.7。若非該航段之候選機型則不予計算其成本及用油量，在表中以 N/A 表示。

燃油價格與表 4.7 之各候選航機用油量相乘，即可得出該航機之單趟航程燃油成本。將上述計算之各項成本參數代入航空網路規劃模式中求解，即可得出航空公司規劃之航線機型頻次結果，由表 4.8 所示。

表 4.6 各航段 b_k 成本輸入參數

航段	候選機型 b_k 成本		
	B747-400 (k1)	A340-300 (k2)	A330-300 (k3)
台北-東京	N/A	\$7,131	\$7,887
台北-洛杉磯	\$56,991	N/A	N/A
台北-法蘭克福	\$45,809	N/A	N/A
台北-檀香山	\$37,988	N/A	\$29,715
東京-檀香山	\$18,625	N/A	\$14,569
台北-曼谷	N/A	\$8,111	\$8,972
台北-阿姆斯特丹	\$52,358	N/A	N/A
曼谷-阿姆斯特丹	\$30,730	N/A	N/A

單位：美元

表 4.7 各航段候選航機之油量

航段	航機用油量 H_{ak}		
	B747-400 (k1)	A340-300 (k2)	A330-300 (k3)
台北-東京	N/A	6,478	6,466
台北-洛杉磯	38,760	N/A	N/A
台北-法蘭克福	43,444	N/A	N/A
台北-檀香山	28,263	N/A	24,054
東京-檀香山	23,418	N/A	11,794
台北-曼谷	N/A	7,186	7,173
台北-阿姆斯特丹	57,042	N/A	N/A
曼谷-阿姆斯特丹	39,826	18,841	18,808

單位：加侖

表 4.8 初始航線機型頻次規劃結果

航線	使用機型	規劃頻次(One-way)
台北-東京	A340-300	0
	A330-300	144
台北-洛杉磯	B747-400	64
台北-法蘭克福	B747-400	20
台北-檀香山	B747-400	0
	A330-300	0
台北-東京-檀香山 (由東京起飛頻次)	B747-400	0
	A330-300	33
台北-曼谷	A340-300	4
	A330-300	164
台北-曼谷-阿姆斯特丹 (由曼谷起飛頻次)	B747-400	35
台北-阿姆斯特丹	B747-400	0
航空公司初始規劃之總營運成本(美元)		\$36,135,372

由航空網路規劃模式求解得台北-東京選擇 A330-300 機型，每月規劃 144 頻次，台北-洛杉磯有 64 個頻次，台北至法蘭克福有 20 個頻次，台北至曼谷則有 A340-300 機型飛 4 個頻次，A330-300 有 164 個頻次。總體航空網路之營運成本為\$36,135,372 美元。就短程航線規劃分析，由初始規劃結果可發現，對於短程的航線，如曼谷與東京之候選機型有 A340-300 與 A330-300，其中台北-東京航線全面採用 A330-300 機型，共 144 個頻次，台北曼谷則規劃 A340-300 機型有四個頻次，A330-300 有 164 個頻次。分析其主要原因，可能在於 A330-300 具有較高之載運量，座位數高於 A340-300 並且耗油量於 A340-300，因此在短程航線，航空公司偏向選用座位數多並且較為省油之機型。由東京至檀香山之航線則是選擇 A330-300 載運旅客，原因在於 747-400 的營運成本較高，因此偏向使用小型航機。而在航線的選擇上，台北-檀香山以及台北-阿姆斯特丹皆採用轉機航線而不規劃直飛航線，以節省營運成本，加上可吸收中停站之旅客，增加轉機航線在旅客收入上之效益。因此在台北-東京-檀香山航線的旅客，會在台北搭乘 A330-300 航機前往東京，在中停站航空公司可吸收由東京欲前往檀香山的旅客，每月之頻次為 33 班。台北-阿姆斯特丹航線則是旅客首先經由台北-曼谷航段搭乘 A330-300 或是 A340-300 航機，在曼谷轉搭乘 B747-400 前往阿姆斯特丹，每月有 35 個頻次。進一步分析航空公司選擇直航或轉機航線以及機型選擇之間的成本差別，解釋規劃結果：台北-檀香山航線，若選擇以 B747-400 直航，其單程之直接成本為\$121,483 美元，以 A330-300 直航，直接成本則為\$100,480 美元。若選擇轉機，以 A330-300 航機行駛台北-東京-檀香山航線，單趟之直接成本為\$82,176 美元。主要原因在於直接成本與飛行距離相關，由於台北直飛檀香山航距為 8474 公里，台北-東京-檀香山之航距較小，為 8292 公里，因此採用轉機航線可節省直接營運成本的支出。而台北-曼谷航線，若採用 B747-400 直航，其單趟直接成本為\$215,286 美元，若以 A340-300 接駁台北-曼谷航段再改搭乘 B747-400 前往阿姆斯特丹，則直接成本為\$153,029 美元，以 A330-300 航行台北-曼谷航段再改搭 B747-400 前往阿姆斯特丹，則單趟之直接成本為\$154,135。與台北-東京航線之情況相同，台北-阿姆斯特丹之直航航距大於轉機航距，直航之航距為 11680 公里，而轉機航距則是 9153 公里，由於直接成本受到航距之影響，因此轉機航線較直航航線可節省較多之直接成本。因此透過初始規劃之結果可得知，在滿足需求之下航空公司為求取營運成本最小化，會捨直飛航線而採取轉機，爭取更多的旅客，在本範例中，以台北阿姆斯特丹航線為例，轉機航程較直飛距離為短，這些原因都促使航空公司採取轉機方式經營航線。根據表 4.8 所得之初始網路規劃結果，將進一步進行燃油價格之可靠度分析，評估在燃油價格變動之下，航空路網維持可靠之機率。下一節先針對航空燃油分佈特性做常態分配之假設與適配性檢定，做為可靠度計算之參數依據。

4.2 航空燃油價格區間分析與機率分配

根據本研究中之模式設定，當油價在正常或異常情形下擁有不同之常態分配參數。因此，航空公司欲計算航線網路之可靠度時，必須考慮預測油價所對應之常態分配參數，以此參數所計算的可靠度值，即為正常油價變動之下之航空網路頻次可靠度。當預期發生異常情況時，由於燃油價格擁有不同之常態分佈參數，透過本節之分析歸納，對於特定月份之航空燃油價格，可得到其所對應之油價區間，進行後續可靠度分析。本研究以美國能源局取得之航空燃油歷史資料：自 1986 年 6 月至 2008 年 12 月之新加坡航空燃油價格(Singapore Kerosene-Type Jet Fuel Spot Price FOB (Cents per Gallon))，繪製直方圖(圖 3.1)觀察其分配情形，將航空燃油價格由價格最高排序至最低，檢驗在不同價格區間之內之樣本是否具有常態分配的特性。本研究依據燃油樣本母體中，油價發生的頻次，將燃油價格分成六個區間，區間內之樣本呈現常態分配的情形。為了解本研究對燃油價格分佈假設之合理性，透過適配性檢定，在 95% 之信賴區間下，由於 p 值皆大於 0.05，證實各區間之燃油價格分配有常態分佈的特性。以下逐一探討航空燃油區間之分佈情形。根據燃油價格高低，大致上可分成六個區間，分別為最高油價區、高油價區、次高油價區、中等油價區、低油價區、最低油價區。在各區間內皆存在常態分佈的特性。所使用之統計分析軟體為 Minitab 15.0。

1. 最高油價區間

最高油價區間屬於總體燃油價格分佈之最右端，當價格界於每加侖 357.05 與 432.50 美分(cents per gallon)時，油價呈現依常態分配，平均值為每加侖 392.42 美分(cents per gallon)，標準差為 16.34，經過適配性檢定，由機率圖(Probability Plot)以及 p 值($p=0.861>0.05$)判定此分佈屬於常態分配。此區間之直方圖與機率圖如下所示：

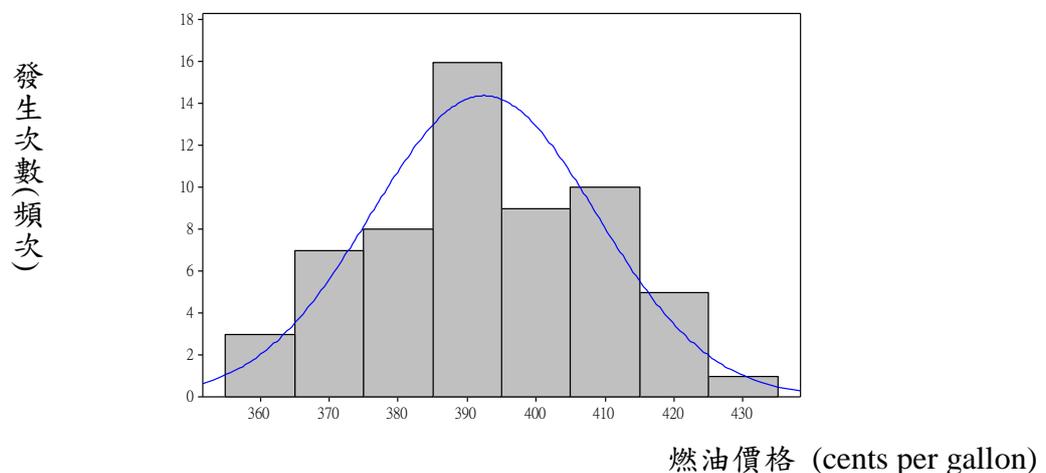


圖 4.1 最高油價區間直方圖

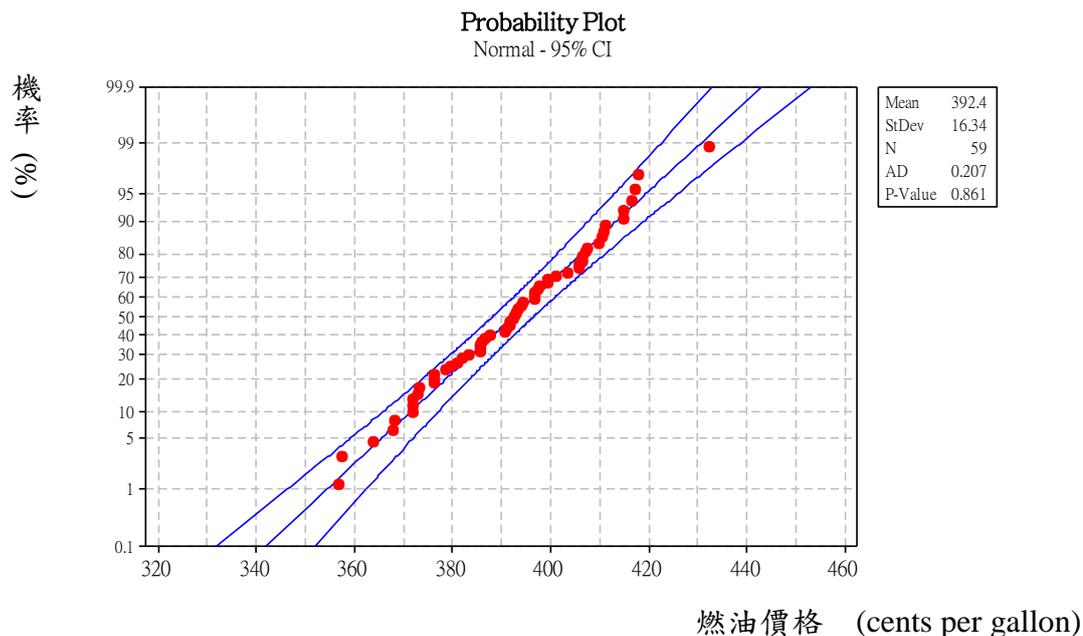


圖 4.2 最高油價區間之適配性檢定

2. 高油價區間

高油價區間屬於總體燃油價格分佈(圖3)的右端，此區間之油價次於最高油價區間，當航空燃油價格界於每加侖 310.02 與 354.50 美分 (cents per gallon)時，油價呈現依常態分佈，其平均值為每加侖 329.30 美分，標準差為 11.30，經過適配性檢定，由機率圖以及 p 值($p=0.155>0.05$)判定此分佈屬於常態分配。此區間之直方圖與機率圖如下所示：

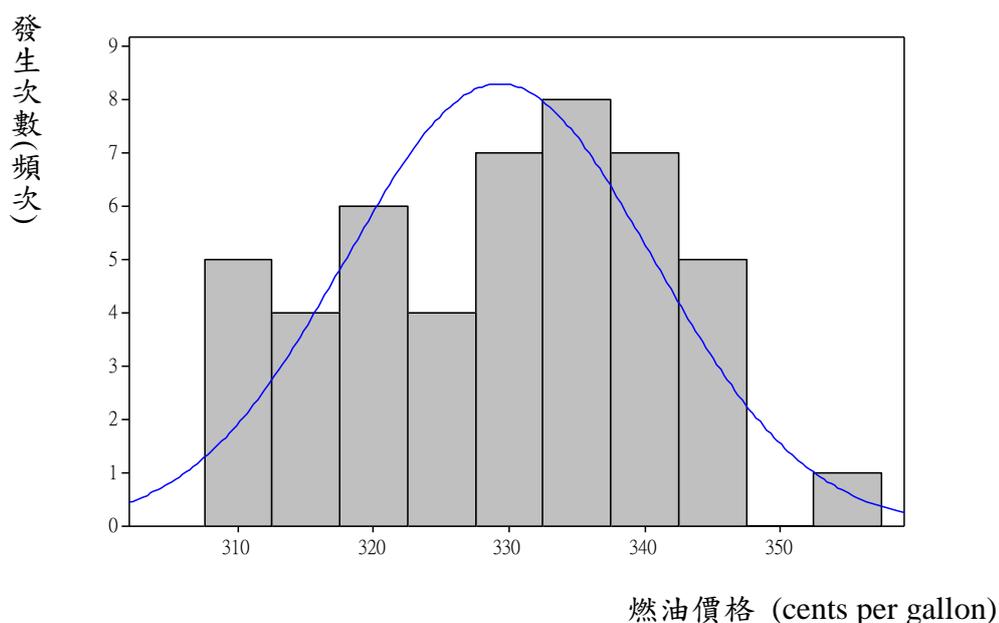


圖 4.3 高油價區間直方圖

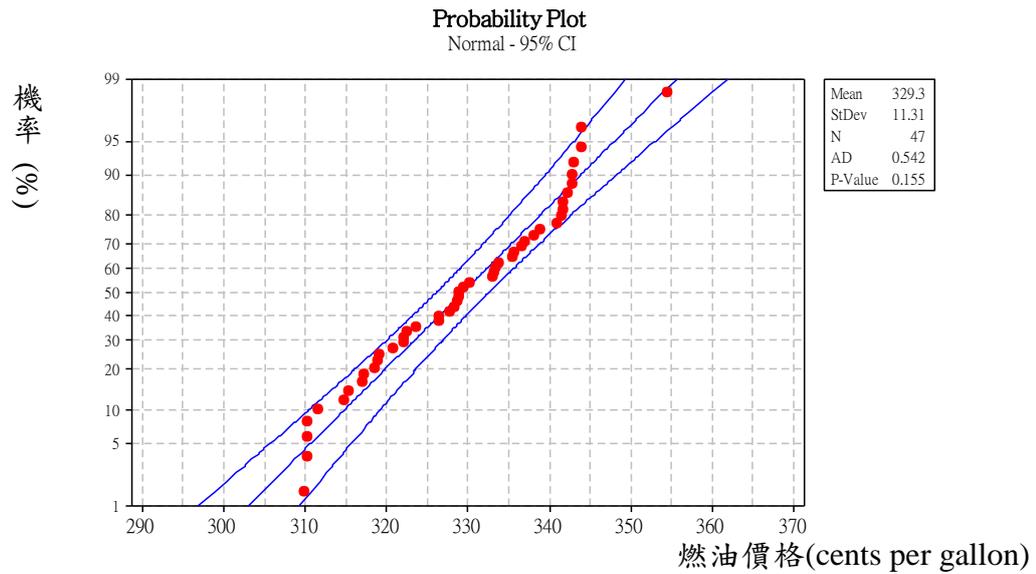


圖 4.4 高油價區間適配性檢定

3. 次高油價區間

次高油價區間之油價低於次高油價區間，當航空燃油價格界於每加侖 230.36 與 307.52 美分時，油價呈現依常態分佈，其平均值為每加侖 266.70 美分，標準差為 18.20，本研究範例分析之初始頻次規劃投入之燃油價格參數，即屬於此常態分佈下之隨機變數，經過適配性檢定，由機率圖以及 p 值($p=0.078 > 0.05$)判定此分佈屬於常態分配。此區間之直方圖與機率圖如下所示：

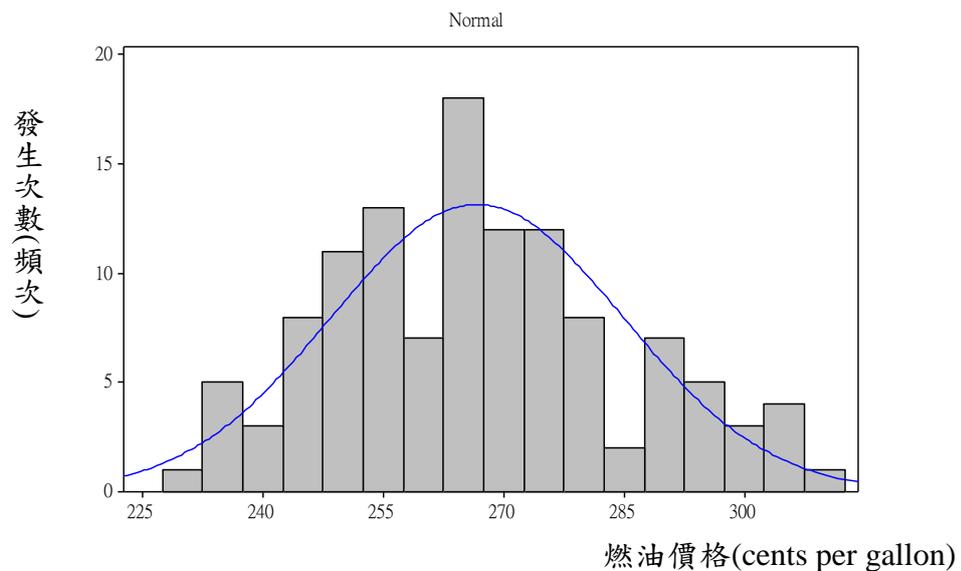


圖 4.5 次高油價區之直方圖

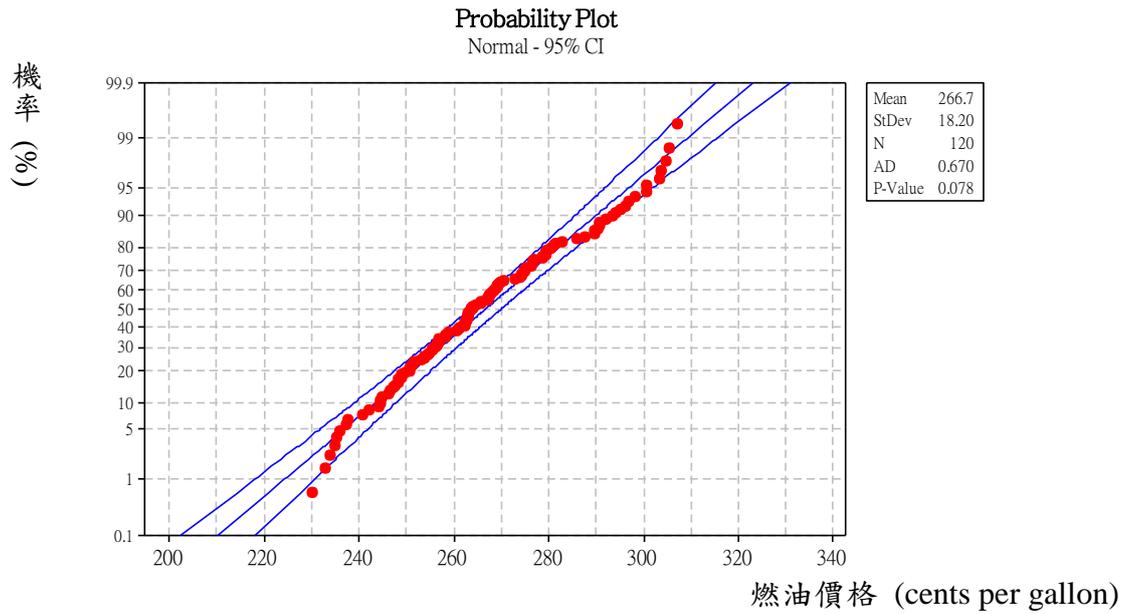


圖 4.6 次高油價區之適配性檢定

可靠度的評估與初始規劃之燃油密切相關，根據式(3-17)，可靠度的機率值由其累積密度函數求得，因此，由累積密度機率圖，可看出規劃價格與其對應之累積密度機率。

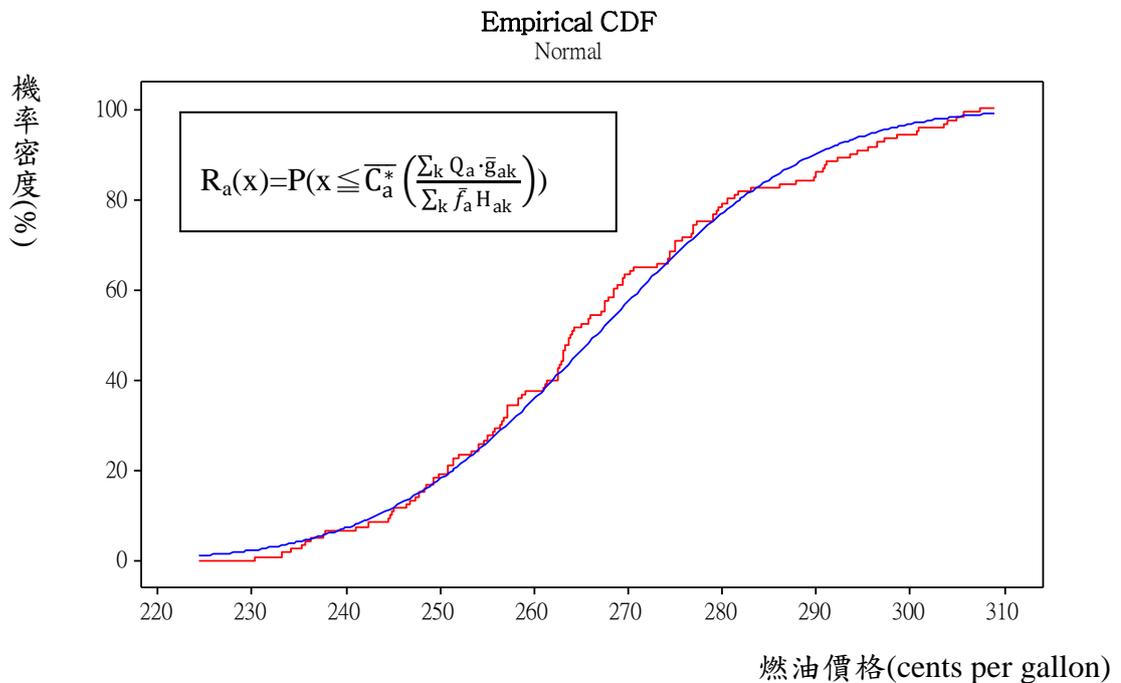


圖 4.7 次高油價區間累積機率密度圖

4. 中等油價區間

當航空燃油價格界於每加侖 154.01 至 230.25 美分時為中等油價區間，油價呈現依常態分佈，其平均值為每加侖 187.30 美分，標準差為 18.66，經過適配性檢定，由機率圖以及 p 值($p=0.469>0.05$)判定此分佈屬於常態分配。由於燃油價格越低，樣本數越多，造成檢定上 p 值太小，因此由此區以下之燃油價格皆使用月資料進行分析，此區之上的燃油價格為求較多樣本數，使用日資料分析。此區間之直方圖與機率圖如下所示：

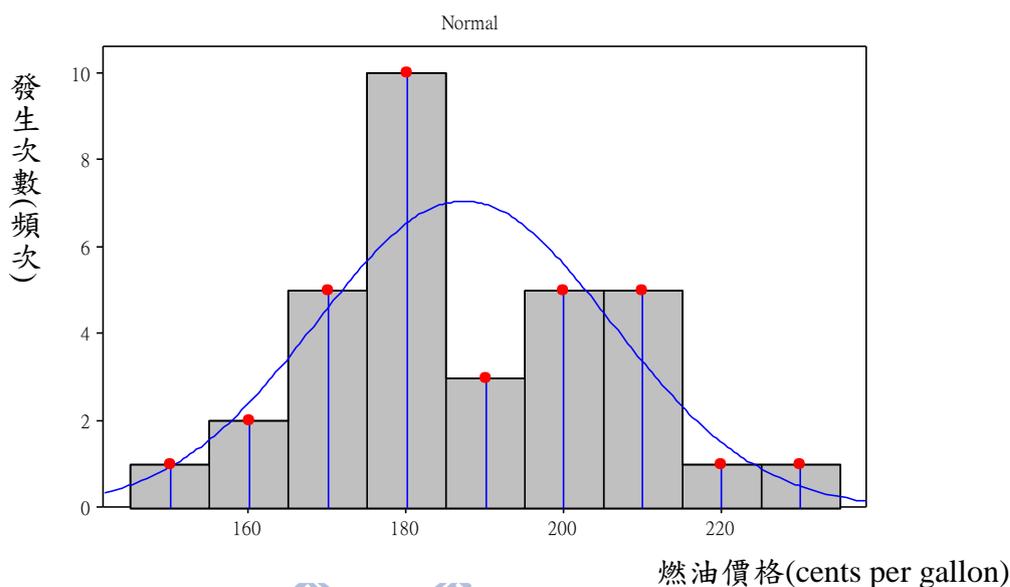


圖 4.8 中等油價區間之直方圖

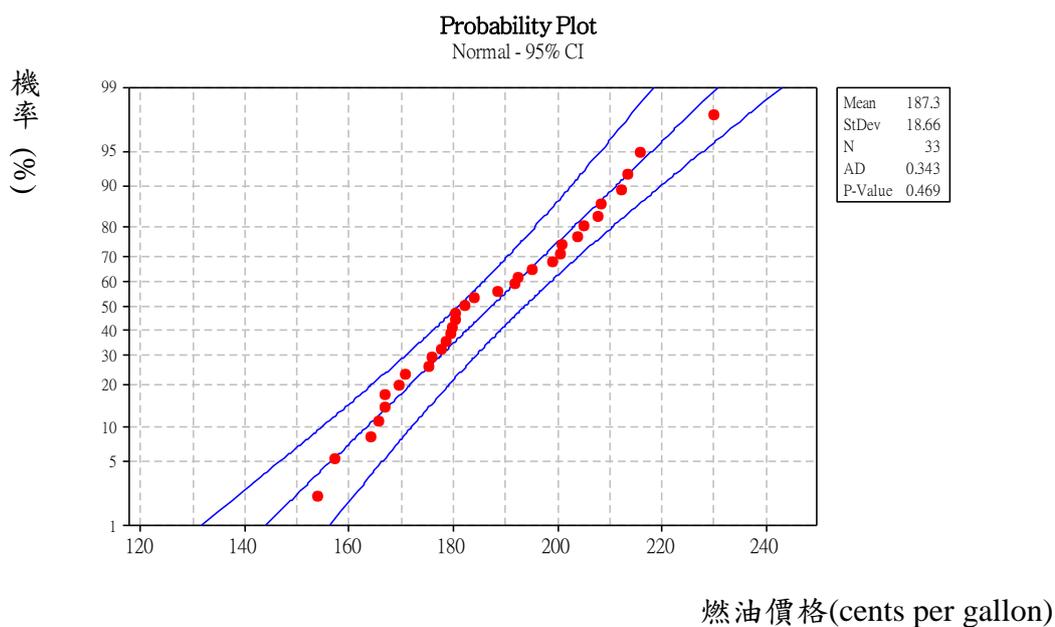


圖 4.9 中等油價之適配性檢定

5. 低油價區間

燃油價格界於每加侖 90.56 至 154.01 美分時為低油價區間，油價呈現依常態分配，其平均值為每加侖 118.0 美分，標準差為 20.44，經過適配性檢定，由機率圖以及 p 值 ($p=0.108>0.05$)，判別此區間之燃油分佈屬於常態分配。由於燃油價格越低，樣本數越多，造成檢定上 p 值太小，因此由此區以下之燃油價格皆使用月資料進行分析，此區之上的燃油價格為求較多樣本數，使用日資料分析。此區間之直方圖與機率圖如下所示：

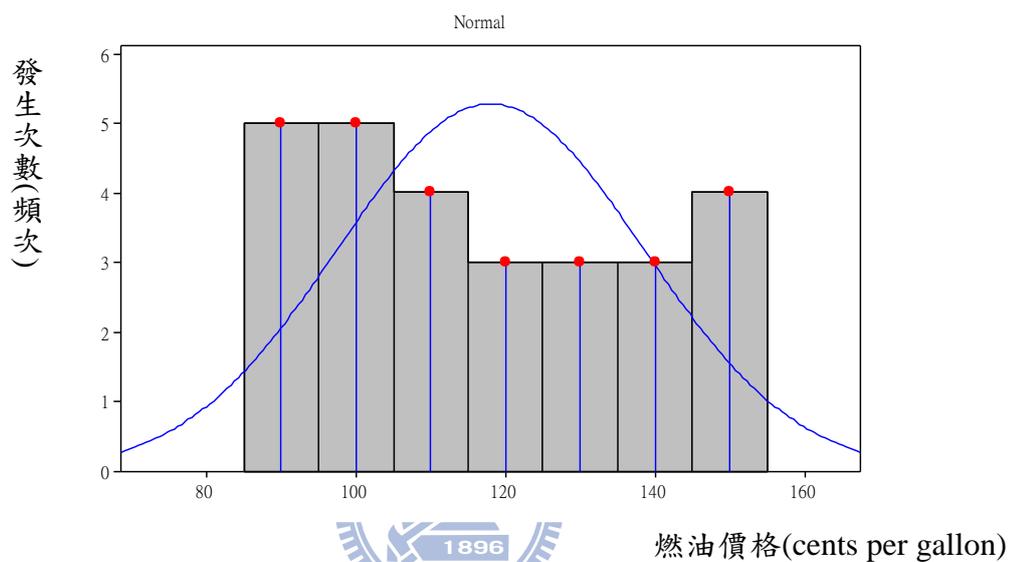


圖 4.10 低油價區間之直方圖

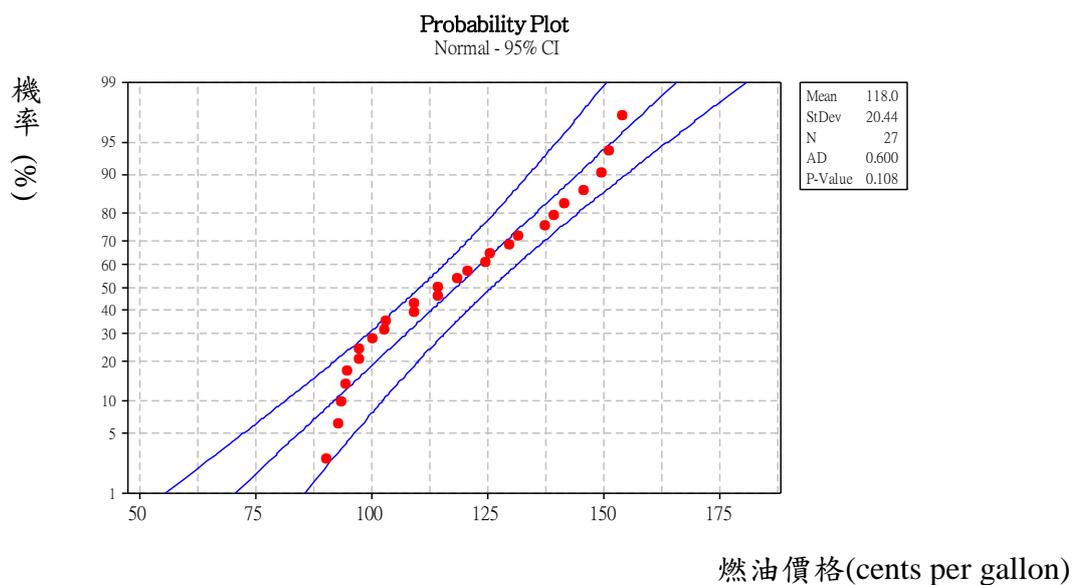


圖 4.11 低油價之適配性檢定

6. 最低油價區間

最低油價區間屬於總體燃油價格分佈的最左端，為歷年燃油價格累積樣本最多之區域，當航空燃油價格界於每加侖 20.40 與 90.56 美分時，油價呈現依常態分配，其平均值為每加侖 58.69 美分，標準差為 12.31，經過適配性檢定，由機率圖以及 p 值 ($p=0.072>0.05$) 判定此分佈屬於常態分配。此區間之直方圖與機率圖如下所示：

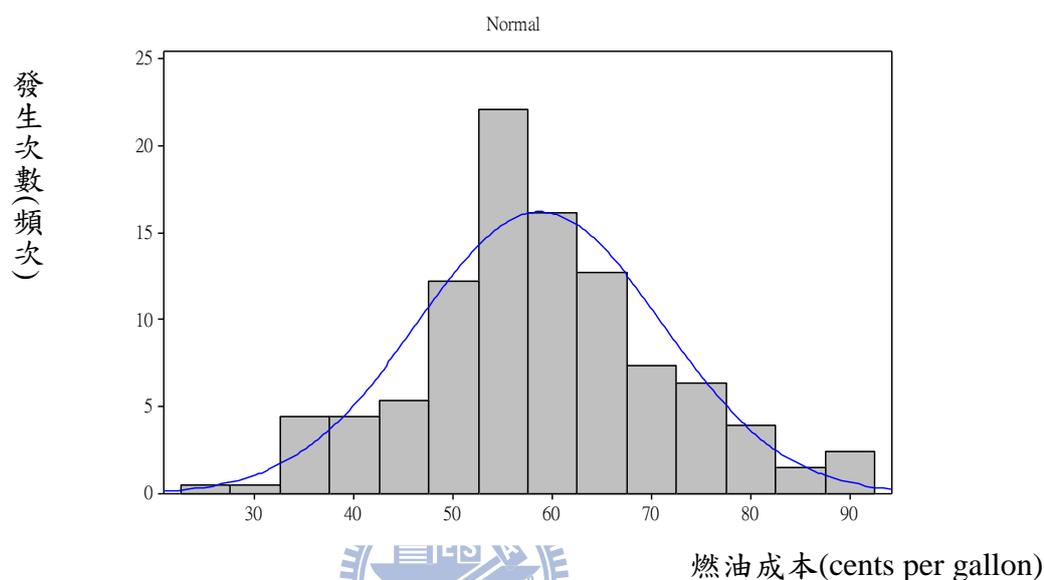


圖 4.12 最低油價區間之直方圖

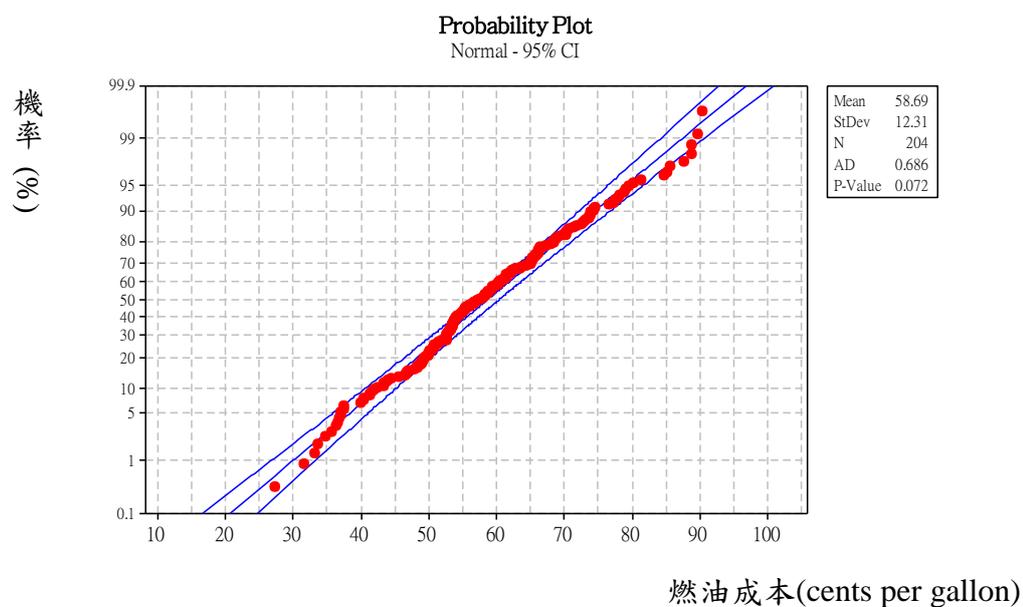


圖 4.13 最低油價之適配性檢定

彙總以上燃油價格分析，並且依據油價由低至高重新排序，整理成表 4.9，進行可靠度評估時，即可由表 4.9 先查出規劃網路之燃油價格參數屬於哪一區間分配之變數，以其所對應之平均值以及標準差，進行可靠度評估。油價發生機率由單一區間樣本數除以母體樣本數求得。

表 4.9 燃油價格區間分類表

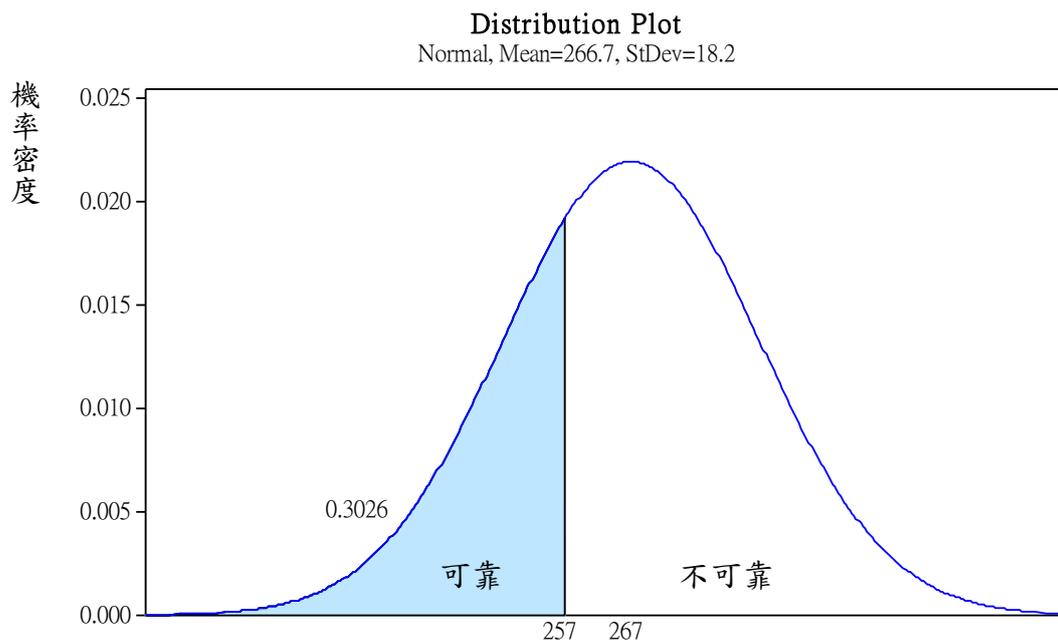
X_n	分類	區間	$\bar{O}^t \sim N(\mu, \sigma)$	燃油價格 發生機率	適配性檢定 (p 值>0.05)
1	最低油價	[27.40, 90.56]	N(58.69, 12.31)	0.746	0.072
2	低油價	[90.56, 154.01]	N(118.0, 20.44)	0.096	0.108
3	中等油價	[154.01, 230.25]	N(187.3, 18.66)	0.117	0.469
4	次高油價	[230.36, 307.52]	N(266.70, 18.20)	0.023	0.078
5	高油價	[310.02, 354.50]	N(329.30, 11.30)	0.008	0.155
6	最高油價	[357.05, 432.50]	N(392.42, 16.34)	0.010	0.861

單位：美分/加侖(cents per gallon)

4.3 情境假設與航空網路可靠度分析

本研究主要目的在於探討航空公司面臨油價變動時，如何藉由調整航空網路之機型航線頻次達到降低成本的效果。透過本研究所建立之可靠度模式，可評估航線是否需要調整。

網路模式中所投入之規劃油價為每加侖 257.29 美分，位於區間[230.36, 307.52]，所屬常態分配為 N(266.70, 18.20)，燃油價格落於此區間的機率為 0.023，航空公司可預期，在燃油成本因子 $C_a^*(\bar{O}^t) = 1$ 的情況，燃油價格於區間[230.36, 307.52]內之變動，為正常情況 s_0 下的油價變動。因此油價正常情況下之可靠度 \bar{R} ，由式 3-17 與 3-18 求出航空網路規劃為可靠之機率為 0.3026，機率分佈圖如圖 4.15 所示。經由可靠度評估，航空公司可預期燃油成本在正常變動情況下，能夠損益平衡之機率為 30.26%。



燃油價格 (cents per gallon)

圖 4.14 初始規劃燃油價格下之可靠度機率圖

對於可靠度的評估，進一步計算在不同上限值($C_a^* = 0.9, 0.95, 1$)，各航段的可靠度 \bar{R}_a 變化情形，如表(4.10)所示，上限值為 0.9，則各航線可靠度約為 0.026，當上限值提升為 0.95，可靠度為 0.11，上限值為 1，則可靠度為 0.302 左右，個別航線之可靠度差異不大。當可靠度評估顯示某月份之可靠度低於初始規劃之可靠度(0.3026)，則航空網路需考慮重新規劃，以降低燃油成本變動所造成之衝擊。

表 4.10 各航段於油價正常變動下之可靠度

航段	\bar{R}_a		
	$\bar{C}_a^*=0.9$	$\bar{C}_a^*=0.95$	$\bar{C}_a^*=1$
TPE-NRT	0.02670	0.11031	0.30220
TPE-LAX	0.02676	0.11049	0.30255
TPE-FRA	0.02673	0.11042	0.30241
NRT-HNL	0.02674	0.11044	0.30245
BKK-AMS	0.02669	0.11027	0.30213
TPE-BKK	0.02674	0.11044	0.30245

以下分兩部分進行探討燃油價格發生異常情況下之可靠度變化。首先以單一航線為例，假設一異常情況 s_1 發生時，依其發生時間、持續時間(歷程)，以及發生的機率，評估單一異常情況下，可靠度如何變化。

1. 單一異常事件發生之可靠度評估

(1) 油價異常上升情形：

以台北至洛杉磯航線為例，假設於七月、八月(由七月五日至八月底)，由於油品需求量大增，造成油價異常上漲，七月份平均油價為每加侖 320.93 美分，八月則漲為每加侖 360.24 美分，異常事件發生的起始點 $t_1^*=7.129$ ，於七月初起歷經一個月，燃油價格變動由初始預設之油價區間[230.36, 307.52]，改變為區間[310.02, 354.50]，歷時 31 天，若油價持續上漲，歷經 57 天後，燃油價格變動區間為[357.05, 432.50]，此情境之相關資料列於表 4.11。由表 4.11 之參數與式(3-20)，可求出異常情形下之可靠度 \bar{R}_{s_1} 為 0.27733，則該航線因應此燃油價格上升情境下的可靠度評估結果，如表 4.12 所示：

表 4.11 台北-洛杉磯航線假設之油價異常上升情境相關資料

異常油價分佈		
油價異常月份 $t_1^*=7.129$	s_1 發生歷程與機率	
		$v_1^1 = 1(31 \text{ 天})$ $p_1=0.6$
July	N(266.70, 18.20)	N(266.70, 18.20)
Aug	N(329.30, 11.30)	N(392.42, 16.34)

表 4.12 台北-洛杉磯航線因應油價變動之可靠度評估結果

可接受最高 上限值	規劃年之全年可靠度 $E[R_a]$			
	$\Pr(s_1)=0.6$	$\Pr(s_1)=0.7$	$\Pr(s_1)=0.8$	$\Pr(s_1)=0.9$
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.16455	0.18752	0.21048	0.23345
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.19804	0.21263	0.22723	0.24182
$\bar{C}_a^*=1$	0.27487	0.27025	0.26564	0.26103

由表 4.12 可看出，一旦發生油價異常上升事件的情形下，全年的可靠度變化，在上限值為 1 時，初始規劃之航線可靠度為 0.30255，但是由於油價上漲的緣故，因此造成可靠度降低，若預期此異常事件發生的機率為 0.6，則全年的航線可靠度降為 0.27487，隨異常情形發生之機率越高，則可靠度越低。然而，在上限值為 0.9 與 0.95 的情形下，由於原本之可靠度低於 \bar{R}_{s_1} ，因此異常情況發生機率越高，反而提高其可靠度，但可靠度仍相對較低。

(2) 油價異常下降情形：

台北-洛杉磯航線為例，假設於規劃年間，發生一油價異常下降的情況，於十一月時，燃油需求量下降，因此由十一月十日起油價下跌，持續到十二月，此情境之假設資料如表 4.13，則該航線因應此燃油價格下降情境下的可靠度評估結果，如表 4.14 所示。由單一航線面臨燃油價格變動之可靠度評估，當異常情形為油價異常上升時，該航線之可靠度降低，並且隨著異常情況發生機率越高，可靠度越低，航空公司容易虧損的機率就越高。當航線於規劃年中可能面臨一油價異常下降的情況，則反而造成可靠度的提升，主要是由於航空公司高估規劃年之油價水準，因此實際之燃油支出將會小於預期投入之成本。

表 4.13 台北-洛杉磯航線假設之油價異常下降情境相關資料

異常油價分佈			
油價異常月份 $t_1^*=11.3$	s_1 發生歷程與機率		
		$v_1^1 = 0.5(15 \text{ 天})$ $p_1=0.8$	$v_1^2 = 1.5(45 \text{ 天})$ $p_2=0.15$
Nov	N(266.70, 18.20)	N(266.70, 18.20)	N(266.70, 18.20)
Dec	N(187.3, 18.66)	N(118.0, 20.44)	N(58.69, 12.31)

表 4.14 台北-洛杉磯航線因應油價下降之可靠度評估結果

可接受最高 上限值	規劃年之全年可靠度 $E[R_a]$			
	$\Pr(s_1)=0.6$	$\Pr(s_1)=0.7$	$\Pr(s_1)=0.8$	$\Pr(s_1)=0.9$
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.30516	0.30560	0.30603	0.30647
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.30532	0.30578	0.30624	0.30670
$\bar{C}_a^*=1$	0.30534	0.30580	0.30627	0.30673

4.4 航空公司之因應策略

本節探討航空公司面臨燃油價格變動，如何藉由調整航空網路航線頻次及其他策略，降低營運成本之損失。以下分別針對不同假設情境進行探討。航空公司可透過可靠度評估，針對預期油價可能造成可靠度低的月份，即早調整因應，以降低虧損。

1. 情境一：針對高油價月份重新規劃網路機型頻次

由上一節可靠度評估結果，受高油價影響的月份，根據 3.5 節建立之模式，依據情況 s_1 重新規劃機型頻次，針對需要調整之月份 $t \equiv \{7, 8\}$ ，進行重新規劃(表 4.19)。

表 4.15 情境一重新規劃結果

航段	使用機型	初始規劃頻次	油價異常上升情境
			s_1 $O'(t) = 366.167$
TPE-NRT	A340-300	0	0
	A330-300	144	144
TPE-LAX	B747-400	64	64
TPE-FRA	B747-400	20	20
TPE-HNL	B747-400	0	0
	A330-300	0	0
NRT-HNL	B747-400	0	0
	A330-300	33	33
TPE-BKK	A340-300	4	4
	A330-300	164	164
BKK-AMS	B747-400	35	35
TPE-AMS	B747-400	0	0
總成本		\$36,135,372	\$44,049,479
預期懲罰值(+)			\$6,342,560
燃油變動成本(+)			\$7,914,107
燃油附加稅差(-)			\$1,571,547

單位：美元

由重新規劃之結果發現，在其他參數不變之情況之下，隨著不同油價調整網路頻次，航線機型以及頻次的選擇並沒有任何的改變，這主要是由於航空網路規劃原本就考慮為成本最小化，因此初始規劃結果已經為最小成本之下的航空網路航線機型頻次組合，即使燃油成本上升，航空公司在滿足旅運量的限制下，難以更動其頻次機型。另一原因，在於航空公司可選用機型有限，若一開始即已經選用較為省油之航機，則重新規劃結果仍然會維持一樣，不會改變機型之組合。另外，由於航空旅客享有之票價為規劃初期決定之價格，將會造成航空網路之可靠度更低，因此，若航空公司欲彌補燃油成本上升造成之損失(即懲罰值)，必須透過票價之調整以及燃油附加稅之增收，彌補因為燃油價格上升而多出的成本。

燃油附加稅的計算根據民航局之燃油附加稅徵收標準(如表 4.20)，在 s_0 情況下，短程燃油附加稅為 22.5 美元，長程附加稅為 58.5 美元，七月則漲為短程 30 美元與長程 78 美元，其差額分別乘上旅客人數，短程旅客共 47115 人，長程旅客共 62471 人，加總之後得到與初始規劃之燃油附加差額 1,571,547 美元，此為燃油成本上升時，所增加額外之收益，預期懲罰值為燃油價格變動所增加之燃油成本扣除燃油附加稅差額，因此 s_1 所產生的預期懲罰值為 6,342,560 美元，為航空公司在此情況之下單月所增加之成本。

表 4.16 客運燃油附加費徵收標準

級距	標準	燃油附加費調漲情形
1	中油牌告價(以下簡稱中油)<40 美元	不徵收
2	40 美元<中油<50 美元	短程 5 美元，長程 13 美元
3	50 美元<中油<60 美元	短程 7.5 美元，長程 19.5 美元
4	60 美元<中油<70 美元	短程 10 美元，長程 26 美元
5	70 美元<中油<80 美元	短程 12.5 美元，長程 32.5 美元
6	80 美元<中油<90 美元	短程 15 美元，長程 39 美元
7	90 美元<中油<100 美元	短程 17.5 美元，長程 45.5 美元
8	100 美元<中油<110 美元	短程 20 美元，長程 52 美元
9	110 美元<中油<120 美元	短程 22.5 美元，長程 58.5 美元

單位：每桶/美元。

資料來源：台經院產經資料庫，2007 年 12 月。

註：「中油」指中油之航空燃油牌告價。

2. 情境二：考慮需求量之變動重新規劃

初始之規劃頻次假設需求為固定，但實際旅運量應反映淡旺季呈現波動情形，當旅運量變動時，也可能造成航空公司因應需求之變動而調整航空機型頻次。延續上一情境所求得之結果，航空網路之頻次機型規劃受到旅運量的限制，即使在高油價的情形下，如果需求不變，則機型頻次並不會改變，造成網路之燃油成本上升。由於國際客運航線之旅運量受到許多因素影響，因此難以界定其與油價的直接關係，則航空公司若要因應油價上升情形調整航空網路頻次，需同時考慮需求的變化，決策是否調整機型頻次。若只看需求與調整成本之間的關係，如下圖所示，需求變動懲罰值由式(3-30)求得。當變動比例為 1，即燃油價格為初始規劃油價(每加侖 257.29 美分)，不具懲罰值。圖 4.15 可分為兩部分探討，第一部分為需求下降，即比例小於 1，需求變動懲罰值與調整成本成反比關係，兩者相交於比例 0.4 與 0.5 之間，因此在需求減少的情形下，如果需求減少幅度少於 0.5(即變動比例為 0.5 至 1 之間)，尚可因應需求變動來調整機型頻次組合，可獲得較高的利益，當需求僅剩原本之一半以下，則由於調整成本大於懲罰值，加上此時需求過低，即使因應需求變動調整也不具利益。此外，由於在油價下降的情形下，燃油價格變動其懲罰值為 0(式 3-29)，因此可直接比較調整成本與需求變動懲罰值，決策是否調整機型頻次。

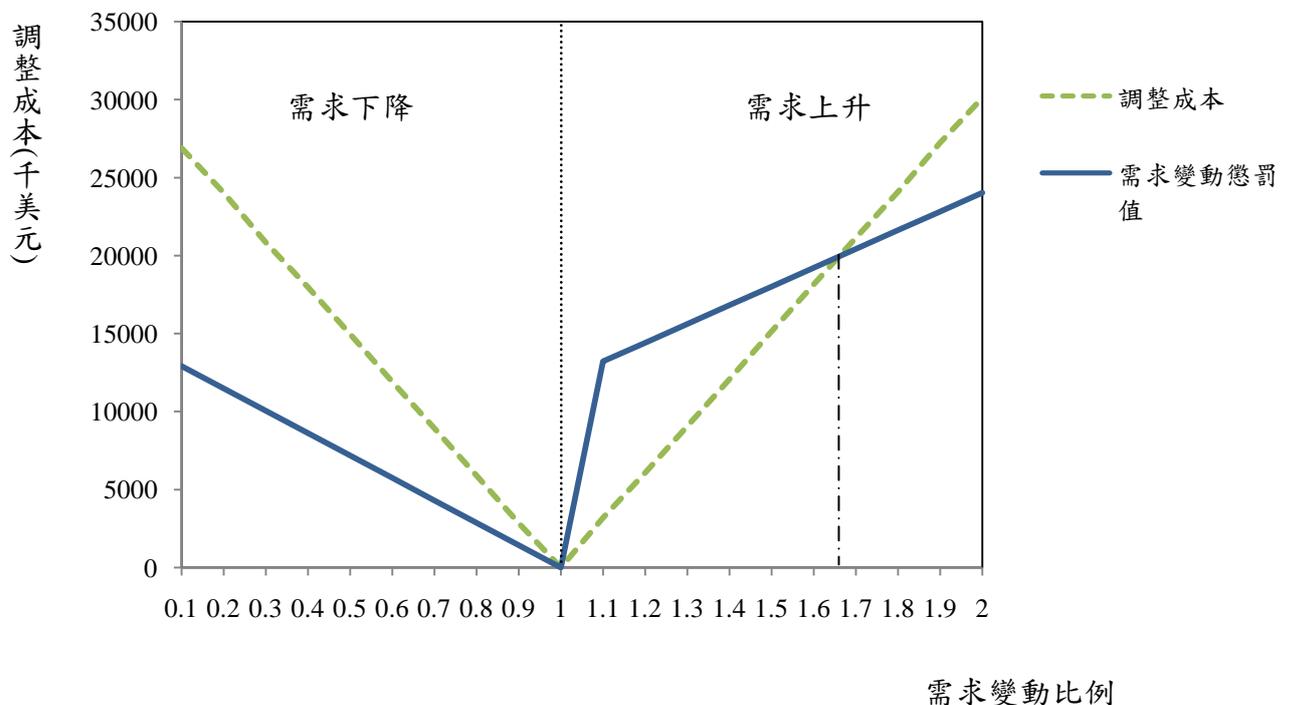


圖 4.15 需求變動下之懲罰值與調整成本關係圖

航空公司是否決策調整，由其懲罰值與調整成本決定，當調整成本小於懲罰值，則進行調整，若由圖 4.15，在油價沒有變動的情形下，如果需求下降，因應調整之調整成本大於需求變動懲罰值，因此不予調整，以免造成營運空轉或其他閒置成本，當需求增加率在七成以內，即變動比率小於 1.7，此時調整成本小於懲罰值，航空公司可因應需求變動調整機型頻次，可獲取較多之利益。然而，當需求成長超過七成，則調整成本大於需求變動懲罰值，因此即使需求上升也不調整航線頻次，以免造成服務水準降低。以下考慮在燃油價格以及需求同時變動時，懲罰值與調整成本之間的關係。由於油價上升時，會產生懲罰值(式 3-29)，懲罰值為油價變動懲罰值與需求變動懲罰值之加總，當懲罰值大於調整成本則可決策進行頻次機型之調整，當懲罰值小於調整成本，則不予調整。以下就兩種油價與需求變動情形，分別探討：

(1) 油價上升，需求上升：

在需求上升的情況下，需求越高，則調整成本越高，同時，比對燃油價格提升 10%、20%、30% 以及 40% 所產生之懲罰成本，當燃油價格提升 10% 時，需求變動比例在 1.8 以下，則懲罰成本大於調整成本，可因應油價與需求之變動調整，當需求超過 1.8 時，由於調整成本已大於懲罰值，航空公司將不予調整機型頻次。當燃油價格提升 20%，則需求比例超過 1.9 時不予調整。燃油價格上升 30% 至 40% 之間，則在需求變動比例 2 以下皆可因應油價與需求變動調整。當燃油價格上升 40% 以上，此時無論需求上升的比例為何，調整成本均小於懲罰值，在此情形下，航空公司可決策調整機型頻次。(圖 4.16、圖 4.17)

(2) 油價上升，需求下降：

在需求減少的情況下，若不調整機型頻次，將會造成航空公司承載率過低，所產生的調整成本隨需求下降越多，調整成本越大。當航空公司因應油價上升與需求下降時，比對圖 4.18 與 4.19，可決策是否進行調整，例如當燃油價格上升 40%，此時在需求比例高於 0.5，則調整機型頻次可獲取較高的利益，當需求只剩原本之五成以下，則因為調整成本過高，航空公司應另行考慮如取消航線等方案，否則航線之需求太低，只會造成更大的虧損。當燃油價格漲幅超過 60%，則無論需求減少量為何，懲罰值皆大於調整成本，航空公司應立即因應油價上漲情形調整航空網路機型頻次。

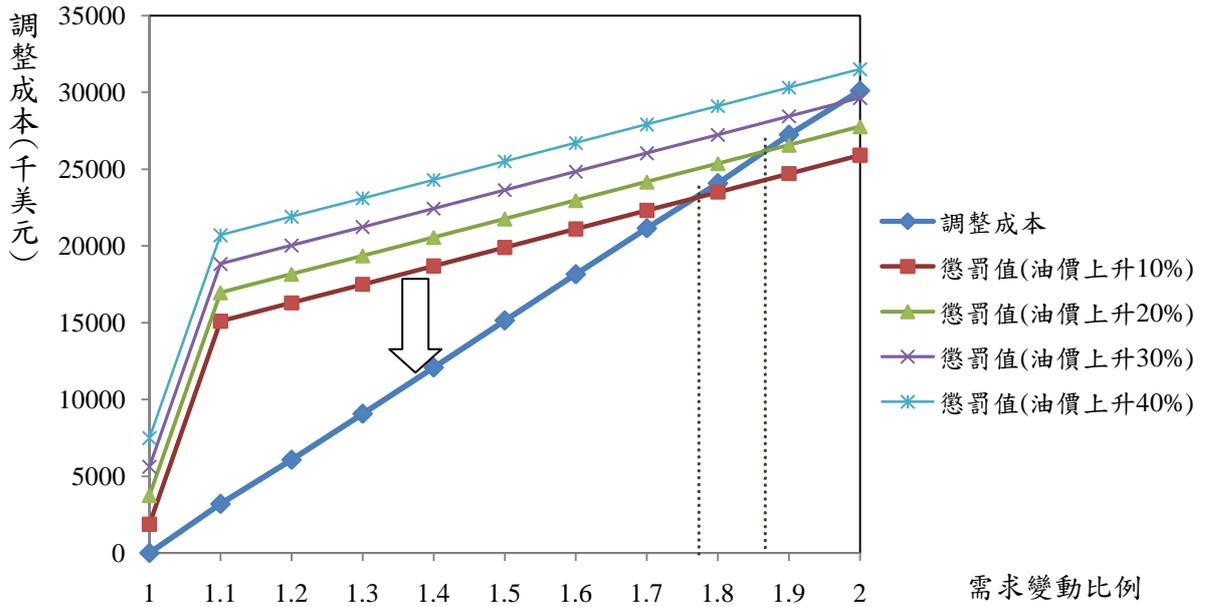


圖 4.16 需求上升與油價上升 10% 至 40% 之懲罰成本與調整成本關係圖

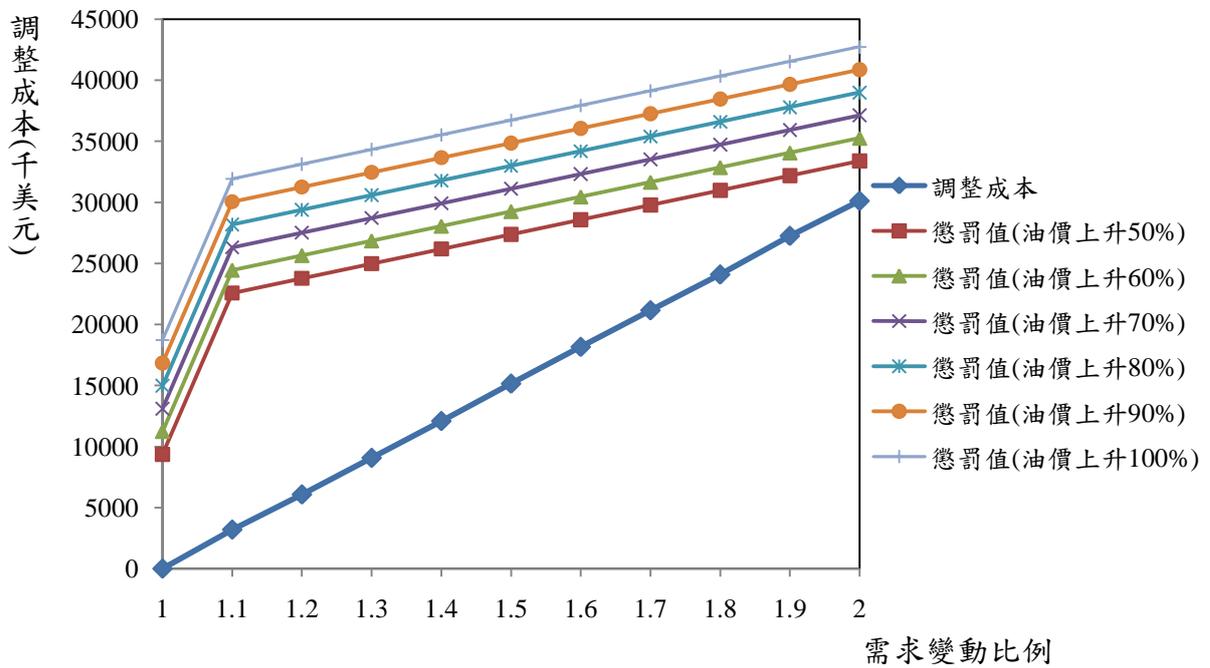


圖 4.17 需求上升與油價上升 50% 至 100% 之懲罰成本與調整成本關係圖

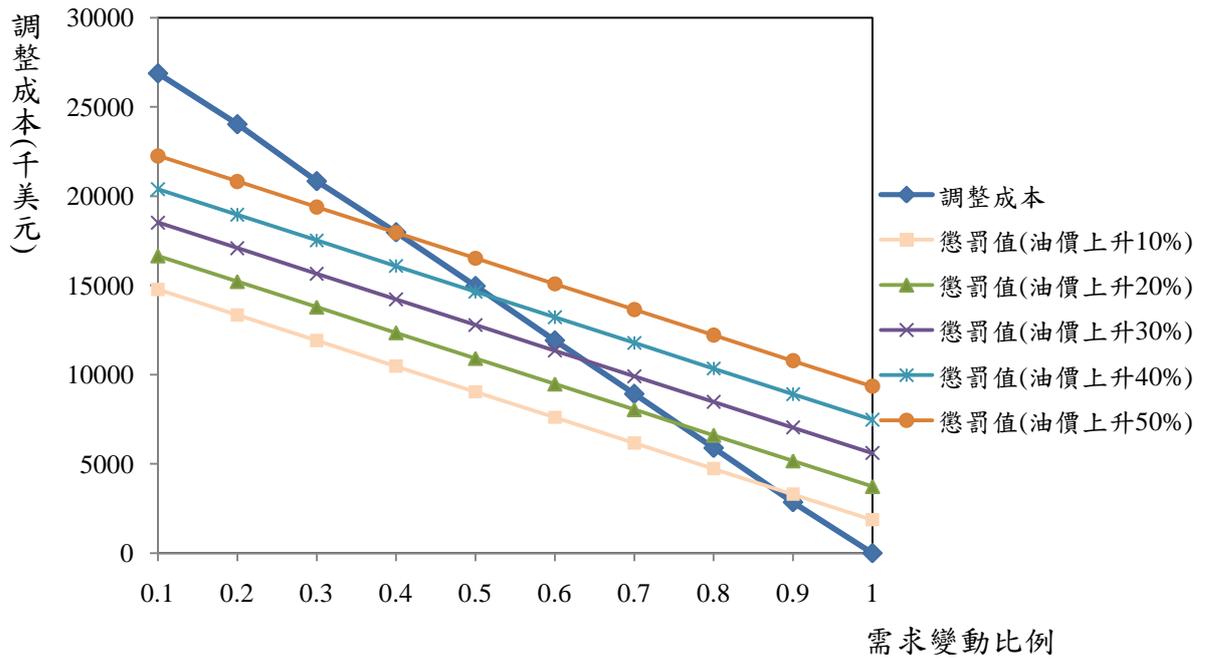


圖 4.18 需求下降與油價上升 10% 至 50% 之懲罰成本與調整成本關係圖

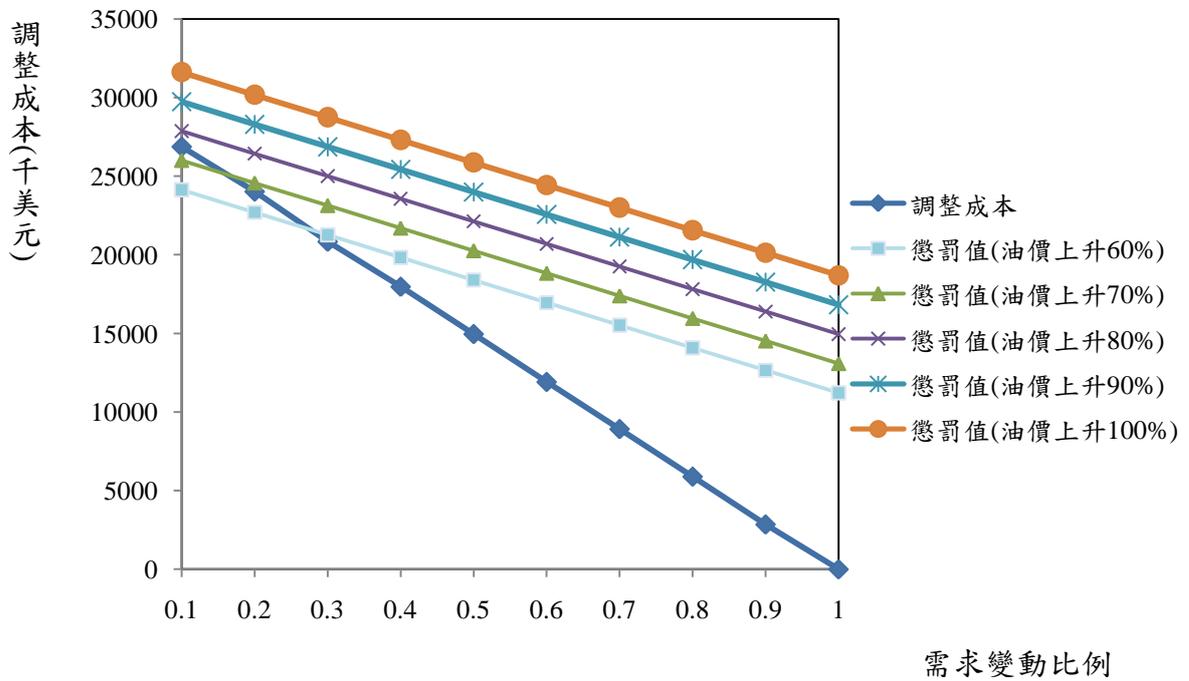


圖 4.19 需求下降與油價上升 60% 至 100% 之懲罰成本與調整成本關係圖

3. 情境三：航空公司考慮購置新型省油航機

目前航機的設計導向十分注重航機的省油性，此情境即在於探討航空公司擴增機隊之機種，希望透過調整機型，節省營運成本，因此於機隊中加入新機型進行網路規劃。本研究欲以航空網路規劃結果，進一步討論在未來重環保、高油價趨勢下，航空公司偏好選用何種機型，新納入規劃之候選航機包含主要競爭對手為 A340-300 之 B777-300ER、目前客運最大機種 A380 以及波音公司之 B787 Dreamliner，分成服務短程之 B787-3 及可服務長程旅次之 B787-9。相關新型航機之資料與模式參數彙整如表 4.25-4.28 所示。

表 4.17 新增候選航機資料

k	機型	架數 Y_k	MTOW (kg)	座位 數 m_k	利用率 u_k (hr/day)	耗油量		售價 (百萬美元)
						liter/seat- km	Gallon/ hr	
4	B777-300ER	10	351,534	365	10	N/A	2422.5	257.0 - 286.5
5	A380-800	5	560,000	555	10	0.030	N/A	317.2- 337.5
6	B787-9 Dreamliner	5	244,940	290	10	0.028	N/A	150.0- 155.5
7	B787-3 Dreamliner	10	165,100	290	10	0.028	N/A	194.0- 205.5

資料來源：波音公司、空中巴士，本研究整理

表 4.18 各航線之新增候選機型與預設承載率

航段	新增候選機型	預設承載率(%)
台北-東京	B777-300ER, B787-3	0.77
台北-洛杉磯	B777-300ER, A380-800	0.88
台北-法蘭克福	B777-300ER, A380-800	0.82
台北-檀香山	B777-300ER, B787-9	0.75
東京-檀香山	B777-300ER, B787-9	0.75
台北-曼谷	B777-300ER, B787-3	0.76
台北-阿姆斯特丹	A380-800, B787-9	0.75
曼谷-阿姆斯特丹	B777-300ER, B787-9	0.77

表 4.19 新候選航機 b_k 成本項目輸入參數

航段	B777-300ER	A380	B787-9	B787-3
台北-東京	\$11,784	N/A	N/A	\$9,445
台北-洛杉磯	\$56,378	\$84,726	N/A	N/A
台北-法蘭克福	\$48,513	\$72,906	N/A	N/A
台北-檀香山	\$43,837	N/A	\$35,136	N/A
東京-檀香山	\$33,277	N/A	\$26,672	N/A
台北-曼谷	\$13,071	N/A	N/A	\$10,476
台北-阿姆斯特丹	\$60,419	\$90,800	\$48,427	N/A
曼谷-阿姆斯特丹	\$33,755	N/A	\$27,500	N/A

單位：美元

表 4.20 新候選航機之機場使用費

城市	機型	機場使用費(美元)
東京 NRT	B777-300ER	\$6,864
	B787-3 Dreamliner	\$3,869
洛杉磯 LAX	B777-300ER	\$868
	A380-800	\$1,287
法蘭克福 FRA	B777-300ER	\$1,019
	A380-800	\$1,479
檀香山 HNL	B777-300ER	\$1,093
	B787-9 Dreamliner	\$820
曼谷 BKK	B777-300ER	\$1,589
	B787-3 Dreamliner	\$902
阿姆斯特丹 AMS	A380-800	\$3,216
	B777-300ER	\$2,055
	B787-9 Dreamliner	\$1,002

加入新型航機之網路規劃除了加入新型航機之相關參數外，其他重要參數如燃油價格以及旅運量皆與初始規劃相同，航空網路航線頻次規劃結果如下所示：

表 4.21 加入新機型後重新規劃結果

航線	使用機型	規劃頻次
台北-東京	A340-300	0
	A330-300	0
	B777-300ER	0
	B787-3	155
台北-洛杉磯	B747-400	0
	B777-300ER	68
	A380	1
台北-法蘭克福	B747-400	0
	B777-300ER	2
	A380	13
台北-檀香山	B747-400	0
	A330-300	0
	B777-300ER	0
台北-東京-檀香山 (由東京起飛頻次)	B747-400	0
	A330-300	31
	B777-300ER	0
	B787-9	2
台北-曼谷	A340-300	0
	A330-300	0
	B777-300ER	0
	B787-3	181
台北-曼谷-阿姆斯特丹 (由曼谷起飛頻次)	B777-300ER	0
	B787-9	48
台北-阿姆斯特丹	B747-400	0
	B777-300ER	0
	A380	0
	B787-9	0
總成本(美元)		\$30,093,182

經由加入新型航機之規劃結果顯示，在旅運量以及燃油價格不變(如初始規劃)的情況下，航空公司在機型的選擇上偏好選用新型航機：台北-東京以 B787-3 飛 155 個頻次；台北-洛杉磯則有 68 個頻次採 B777-300ER，1 個頻次採 A380；台北-法蘭克福有 2 個 B777-300ER 班次，13 班 A380 班次；東京-檀香山航段仍有 31 個班次維持採用 A330-300，2 個班次採用 B787-9；台北-曼谷全部採用 B787-3，頻次增加為 181 班；曼谷-阿姆斯特丹則有 48 個 B787-9 航班。整體規劃之營運成本為 \$30,093,182 美元，小於初始規劃之營運成本。顯示若航空公司具有較多航機可供各航線選用時，航空公司將偏好選擇新型之省油航機，在機型的大小則偏好選擇中小型航機如 B777-300ER、B787。以下將初始規劃油價每加侖 257.29 美分之比例為設定為 1 進行敏感度分析，並且藉由敏感度分析檢視航空營運成本依燃油價格變動之情形：

表 4.22 燃油價格敏感度與營運成本變化

航空燃油敏感度		總營運成本(美元)		總營運成本變動幅度
規劃油價	調整比值	加入新航機規劃	原機型規劃	
77.187	0.3	\$21,038,885	\$23,043,951	-8.70%
102.916	0.4	\$22,333,235	\$24,914,154	-10.36%
128.645	0.5	\$23,627,585	\$26,784,357	-11.79%
154.374	0.6	\$24,921,936	\$28,654,560	-13.03%
180.103	0.7	\$26,216,286	\$30,524,763	-14.11%
205.832	0.8	\$27,508,981	\$32,394,966	-15.08%
231.561	0.9	\$28,801,082	\$34,265,169	-15.95%
257.290	1	\$30,093,182	\$36,135,372	-16.72%
283.019	1.1	\$31,373,043	\$38,005,574	-17.45%
308.748	1.2	\$32,639,720	\$39,875,778	-18.15%
334.477	1.3	\$33,906,396	\$41,745,980	-18.78%
360.206	1.4	\$35,173,073	\$43,616,183	-19.36%
385.935	1.5	\$36,439,749	\$45,486,386	-19.89%
411.664	1.6	\$37,715,348	\$47,356,589	-20.36%
437.393	1.7	\$38,978,311	\$49,226,792	-20.82%
463.122	1.8	\$40,241,274	\$51,096,995	-21.25%

油價單位：美分/加侖。

情境一的分析，發現當燃油價格上升，而其他成本與機型沒有改變的情況下，航線機型頻次並不會改變。然而加入新型候選航機之後，機型頻次組合改變，造成航線之頻次有所不同，由敏感度分析，比較原規劃之營運成本與加入新機型重新規劃之後的成本，發現隨燃油價格越高，營運成本降低的幅度越大，航空公司若預期未來油價趨勢為持續上漲，重新規劃機型頻次組合可具有較高之效益。由圖 4.19 可看出營運成本隨油價上漲之趨勢。

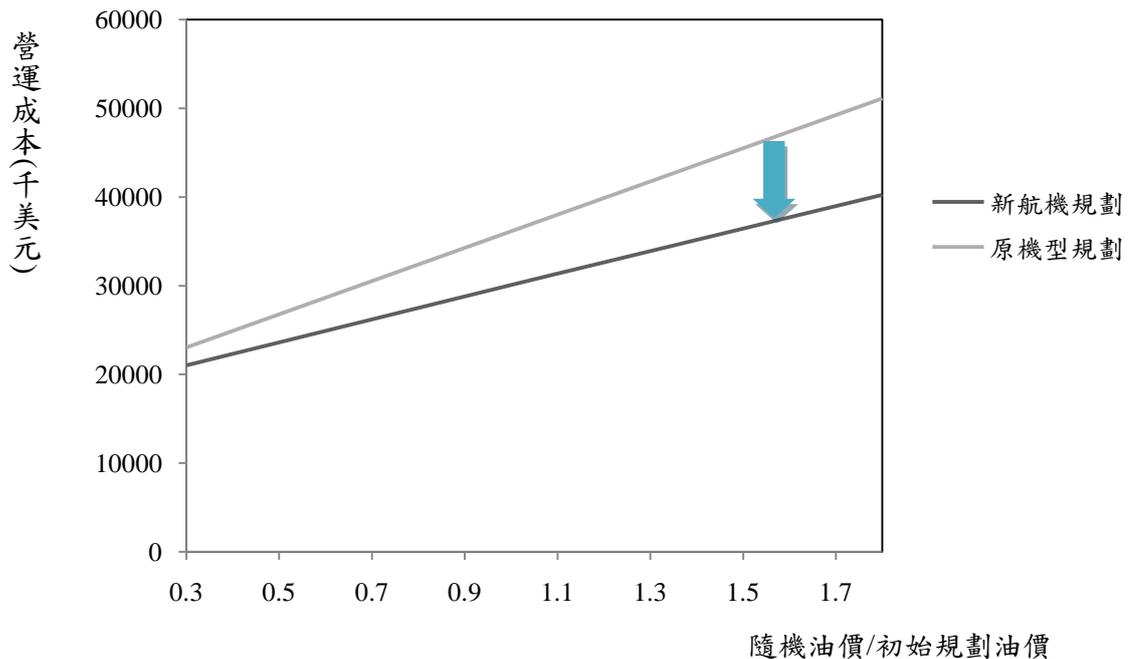


圖 4.20 機型重新規劃造成之總成本變動

前面之航空網路機型頻次之探討，考慮整體網路在不同情境之下的規劃情形。現針對各別航線之規劃進行討論，比較在原規劃機型與加入新候選機型之後，各航段的機型選擇以及頻次是否改變，進一步，針對改變機型頻次選擇之航線，重新估計其可靠度，以評估航機的選擇是否影響航空公司之燃油成本效益。表 4.31 彙整台北-洛杉磯航線與台北-法蘭克福航線，經由重新規劃機型頻次之後可靠度的變化。台北-洛杉磯航線的頻次由每月 64 個頻次增加到 69 個頻次，置換機型以後，在上限值為 1 的情況下，可靠度由 0.30255 提升到 0.99617，上限值為 0.95 時，可靠度由原本的 0.11049 提升至 0.96412。台北-法蘭克福經由機型頻次重新規劃之後，由原本每月 20 個班次，降低為每月 15 個班次，其中包含 13 班 A380 與 2 班的 B777-300ER，可靠度經由機型組合的改變，皆趨近於 1，代表在其他成本項目不變的情形下，採用新航機具有較大之效益。並且比較兩條航線上航機的選擇，由於法蘭克福航線航程較長，比起洛杉磯，更傾向選用大型航機

載運旅客。

對於航線機型在不同承載率之下的單位座位燃油成本進行分析，由圖 4.21、4.22 可看出承載率與單位座位燃油成本之關係，以台北-洛杉磯航線而言，單位座位之燃油成本，以 B777-300ER 最低，其次為 A380，B747-400 最高，因此對台北-洛杉磯航線使用 B777-300ER 最具有成本效益，在重新規劃後之機型頻次以但是對台北-法蘭克福航線而言，以 A380 效益最高。表 4.32 顯示台北-東京、東京-檀香山、台北-曼谷、曼谷-阿姆斯特丹等航段，在加入新候選航機規劃之後的可靠度變化，在置換新航機後，可靠度皆接近於 1 或等於 1。就台北-東京航段而言，由於 B787-3 之單位座位耗油成本遠低於其他兩種候選機種，因此使用該機型可節省較多之燃油成本。東京-檀香山航線而言，雖然使用 B787-9 最為節省燃油成本，然而由於飛機的飛行小時限制，因此 B787-9 機型多被指派飛曼谷-阿姆斯特丹航線，因此仍以原本之 A330-300 機型為主，然而比較各候選機型，A330-300 並非最具有燃油效益的航機，可能原因在於其機型較小，其他的成本相對較小，因此從整體營運成本評估，仍規劃以 A330-300 航行該航線為主。台北-曼谷與曼谷-法蘭克福航線重新規劃後改採用 B787-9 機型，具有較高之燃油成本效益，尤其當需求量下降，使用該機型可較其他機型減少燃油成本的損失。(圖 4.23-4.26)

表 4.23 航空網路直航航線重新規劃機型組合與可靠度評估

台北-洛杉磯航線				
機型選擇		原機型規劃	加入新機型後規劃	
		B747-400	B777-300ER	A380
頻次		64	68	1
可靠度 \bar{R}_a	$\bar{C}_a^*=0.9$	0.02676	0.21260	
	$\bar{C}_a^*=0.95$	0.11049	0.96412	
	$\bar{C}_a^*=1$	0.30255	0.99617	
台北-法蘭克福航線				
機型選擇		原機型規劃	加入新機型後規劃	
		B747-400	B777-300ER	A380
頻次		20	2	13
可靠度 \bar{R}_a	$\bar{C}_a^*=0.9$	0.02673	0.99991	
	$\bar{C}_a^*=0.95$	0.11049	0.99999	
	$\bar{C}_a^*=1$	0.30255	1	

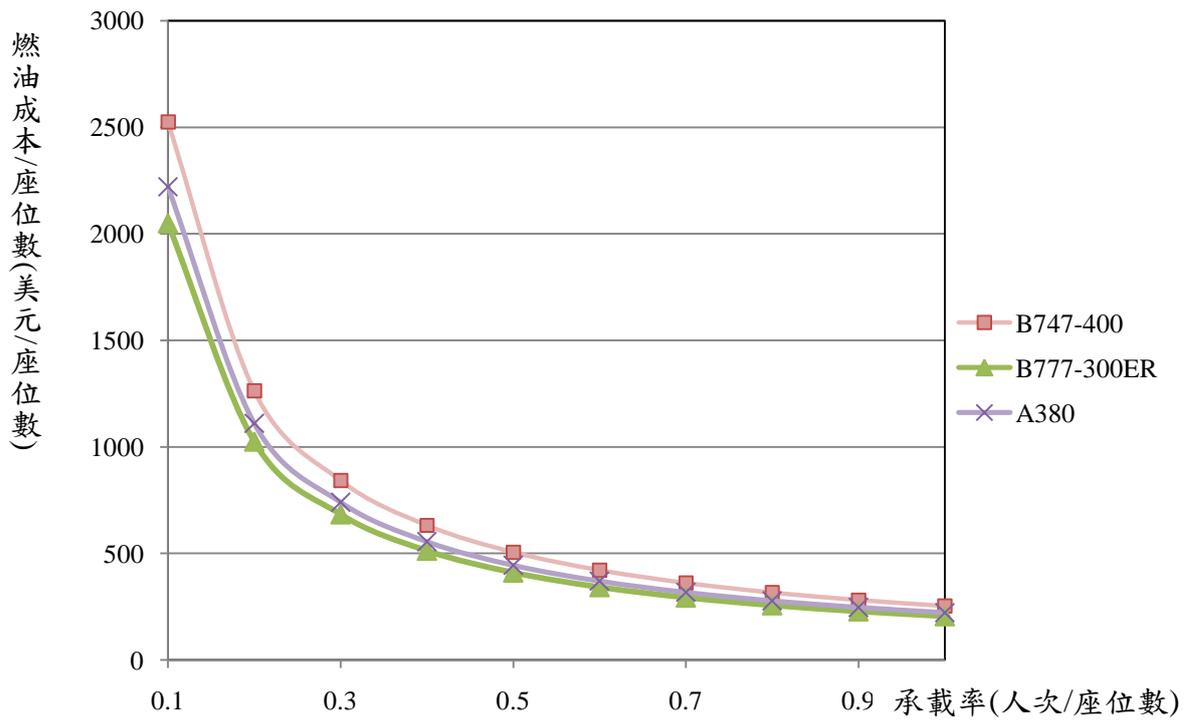


圖 4.21 台北-洛杉磯航線不同機型之承載率與燃油成本關係圖

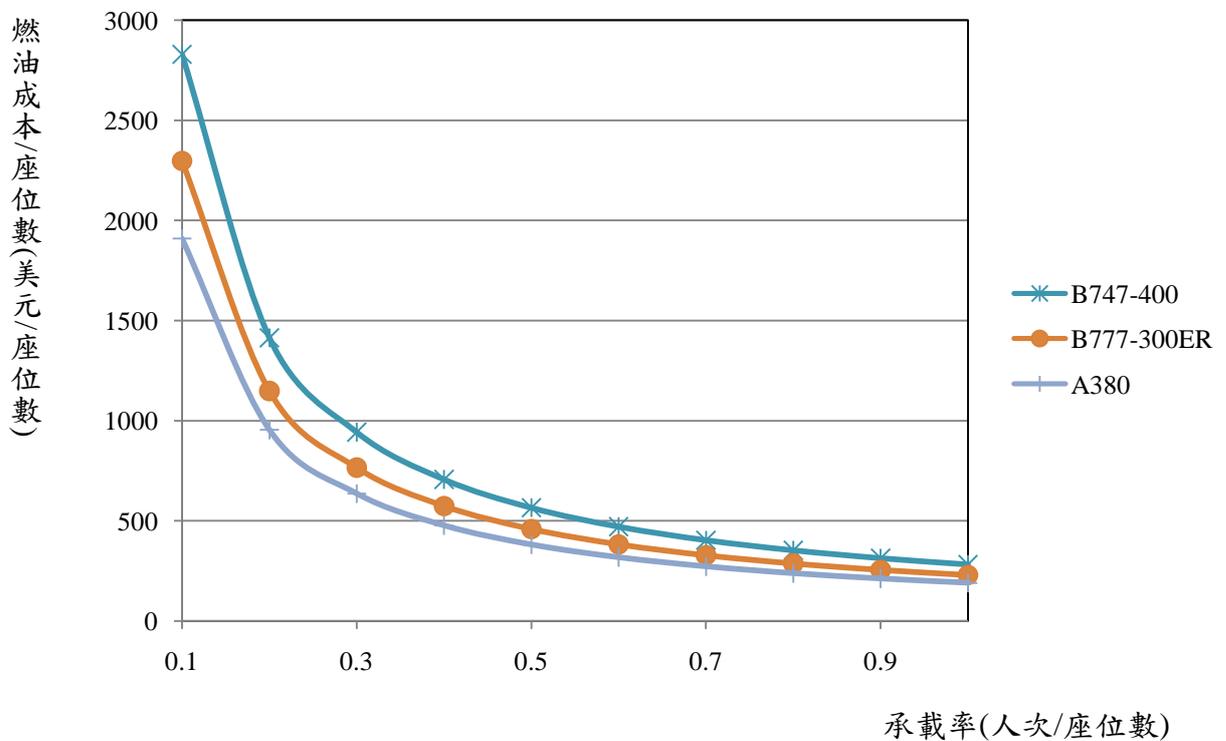


圖 4.22 台北-法蘭克福航線不同機型之承載率與燃油成本關係圖

表 4.24 航空網路轉機航段重新規劃機型組合與可靠度評估

台北-東京航段					
機型選擇		原機型規劃		加入新機型後規劃	
		A330		B787-3	
頻次		144		155	
可靠度 \bar{R}_a	$\bar{C}_a^*=0.9$	0.02670		0.999982	
	$\bar{C}_a^*=0.95$	0.11031		1	
	$\bar{C}_a^*=1$	0.30255		1	
東京-檀香山航段					
機型選擇		原機型規劃		加入新機型後規劃	
		A330-300		A330-300	B787-9
頻次		33		31	2
可靠度 \bar{R}_a	$\bar{C}_a^*=0.9$	0.02674		1	
	$\bar{C}_a^*=0.95$	0.11044		1	
	$\bar{C}_a^*=1$	0.30245		1	
台北-曼谷航段					
機型選擇		原機型規劃		加入新機型後規劃	
		A340-300	A330-300	B787-3	
頻次		4	164	181	
可靠度 \bar{R}_a	$\bar{C}_a^*=0.9$	0.02674		0.99998	
	$\bar{C}_a^*=0.95$	0.11044		0.99999	
	$\bar{C}_a^*=1$	0.30245		1	
曼谷-阿姆斯特丹航線					
機型選擇		原機型規劃		加入新機型後規劃	
		B747-400		B787-9	
頻次		38		48	
可靠度 \bar{R}_a	$\bar{C}_a^*=0.9$	0.02669		1	
	$\bar{C}_a^*=0.95$	0.11027		1	
	$\bar{C}_a^*=1$	0.30213		1	

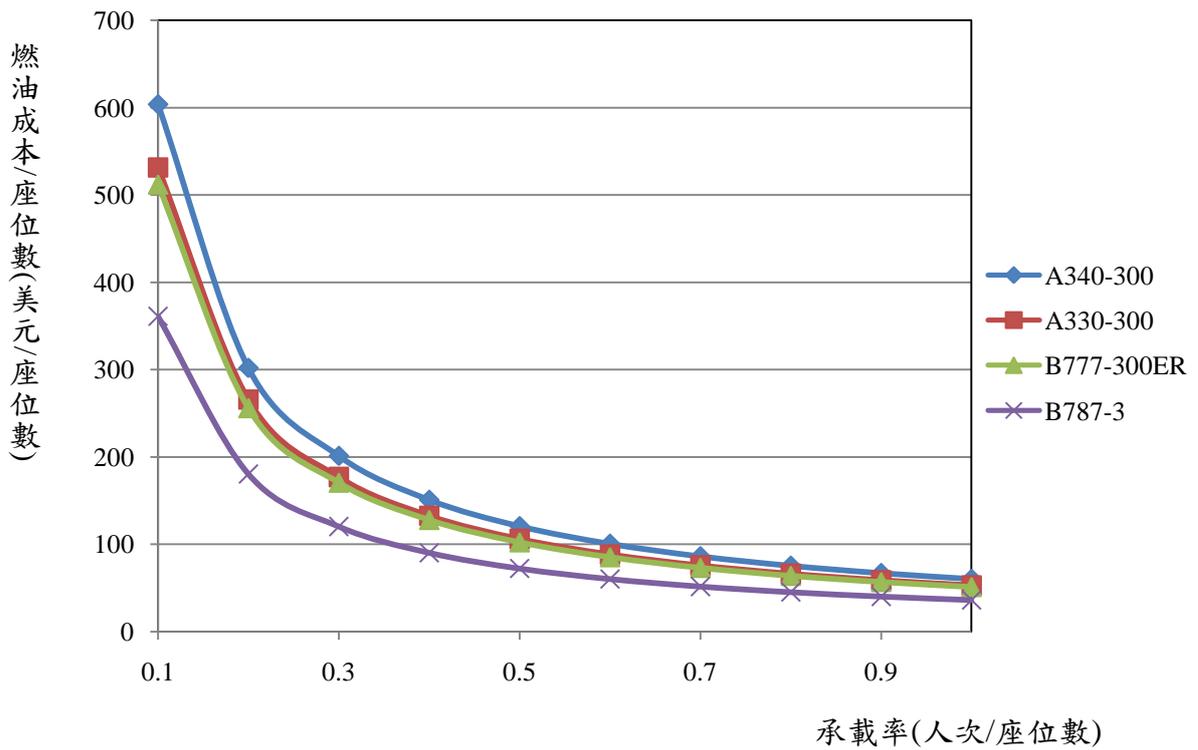


圖 4.23 台北-東京不同機型之承載率與燃油成本關係圖

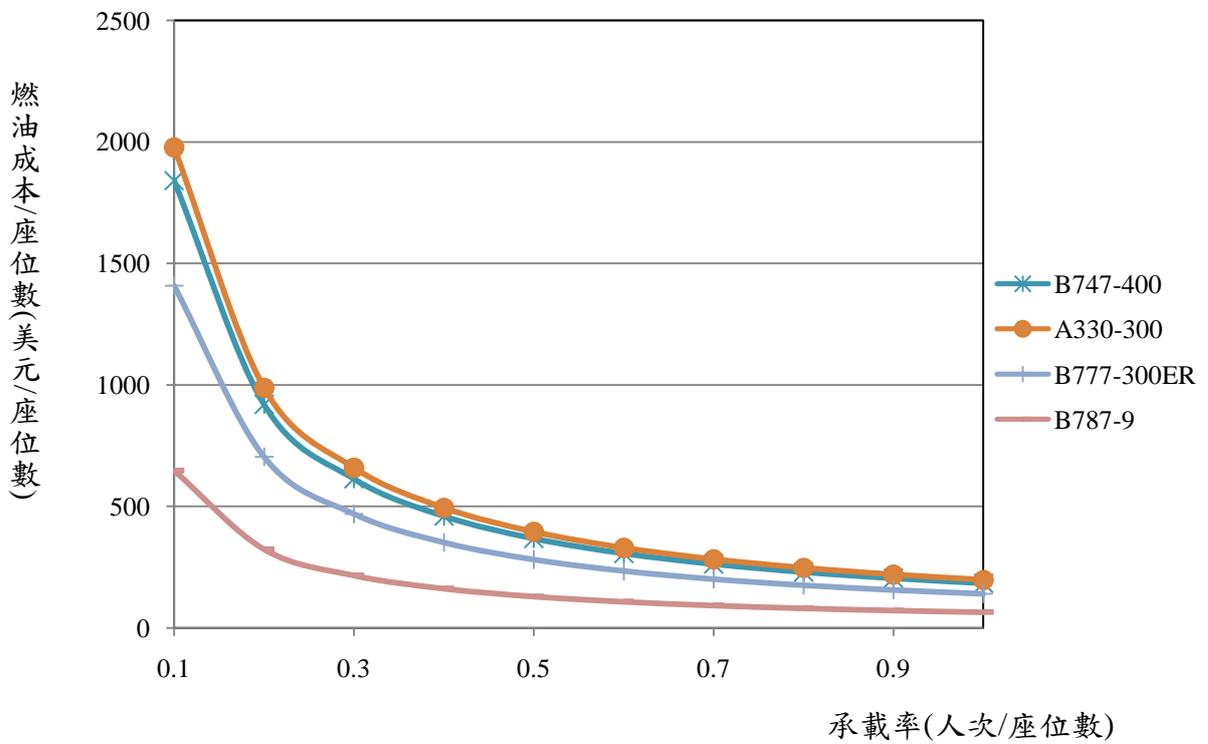


圖 4.24 東京-檀香山不同機型之承載率與燃油成本關係圖

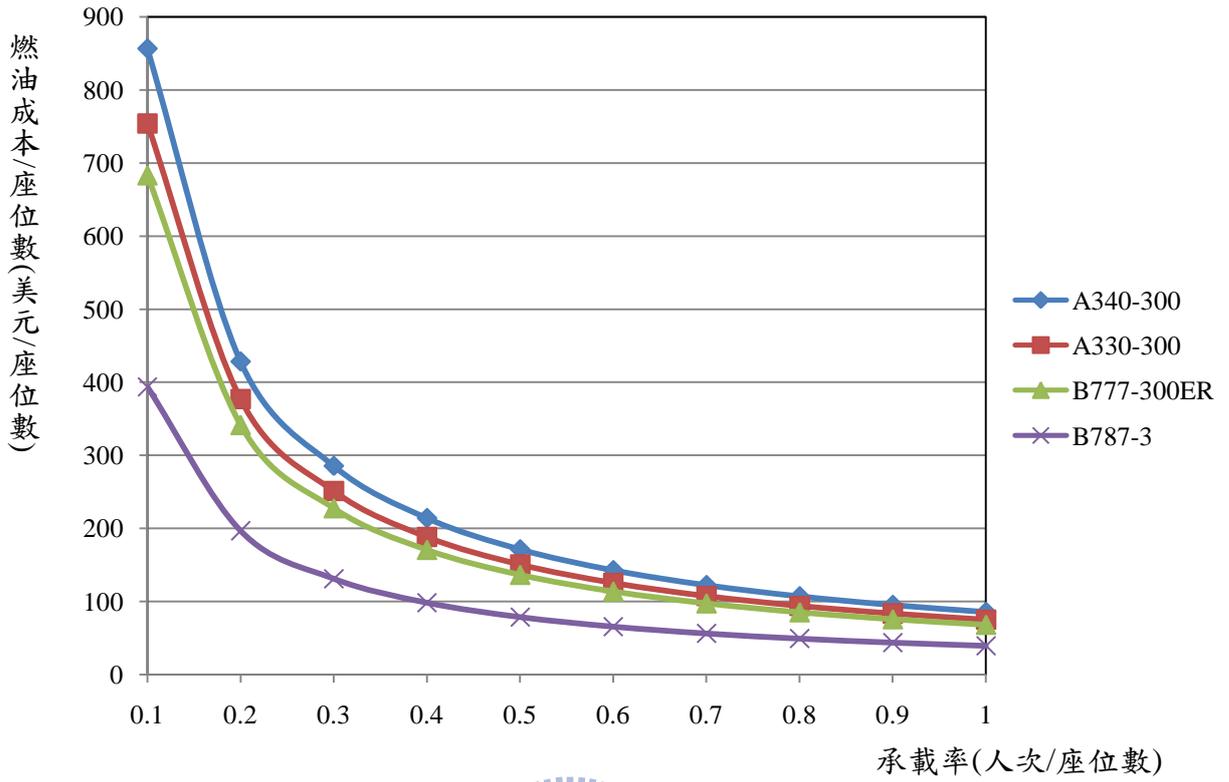


圖 4.25 台北-曼谷不同機型之承載率與燃油成本關係圖

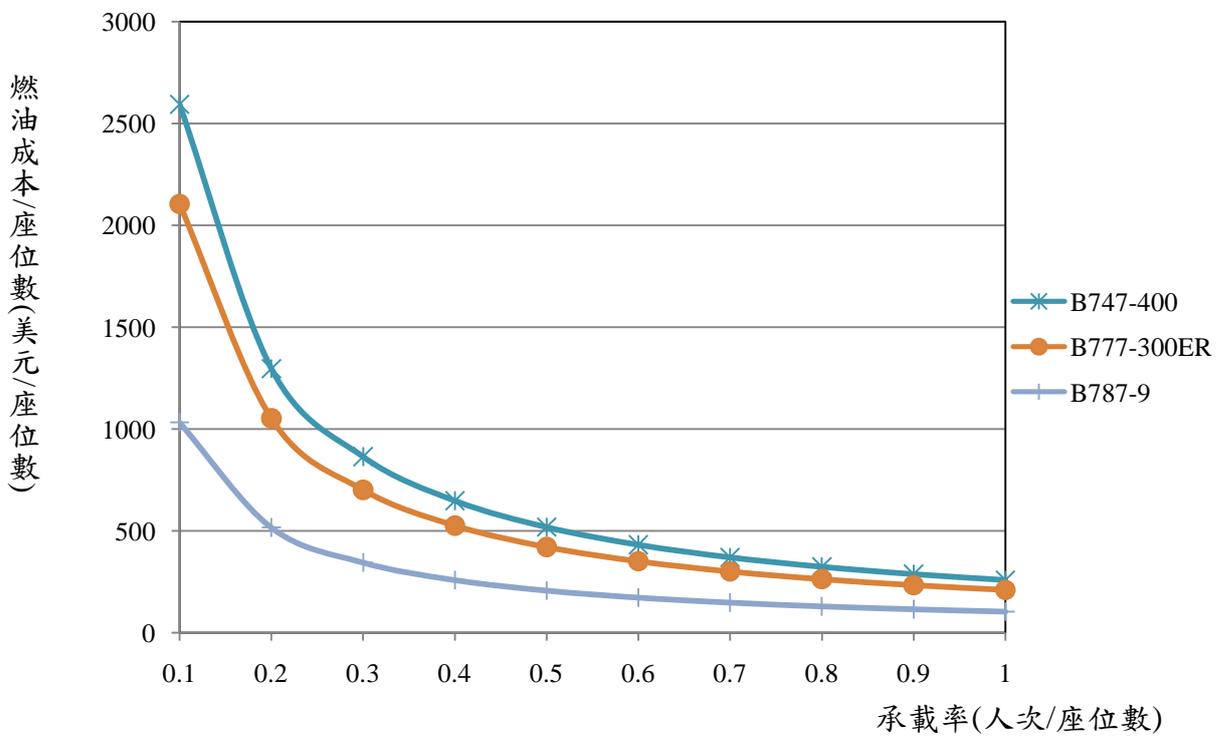
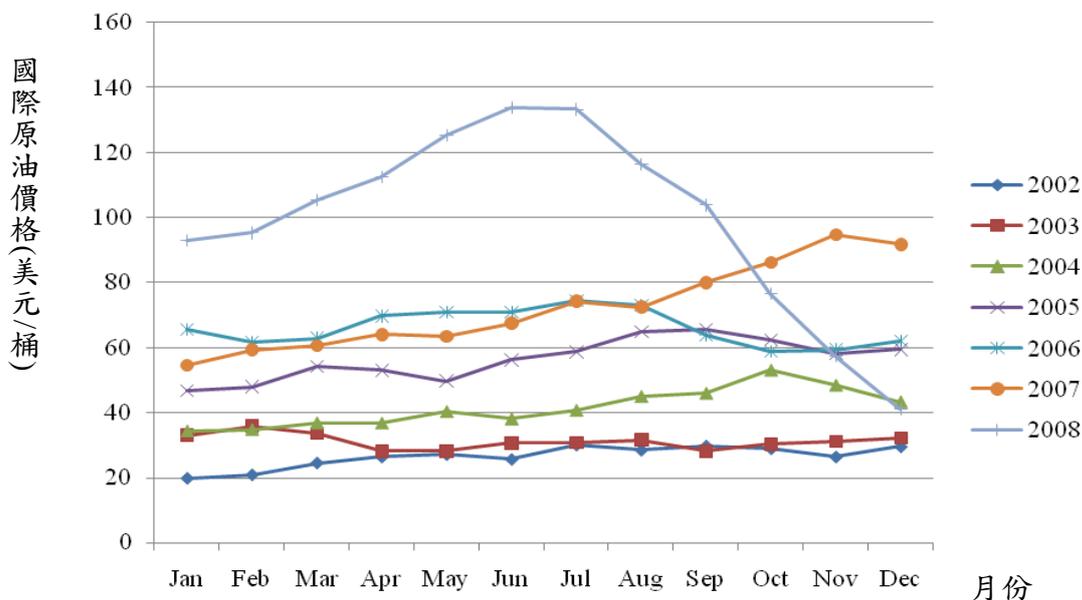


圖 4.26 曼谷-阿姆斯特丹不同機型之承載率與燃油成本關係圖

五、實證分析

根據美國國家能源局所提供之 2002 年 1 月至 2008 年 12 月國際油價資料(Monthly F.O.B. (Free on Board) Spot Price of West Texas Intermediate (WTI) Crude Oil)，分析每一年國際原油價格之波動情形，如圖 5.1 所示，可看出 2002 年至 2008 年之間，整體呈現油價上漲的趨勢，然各年國際油價的變動幅度並沒有一定之規律，例如 2002、2003 年各月之間油價變動幅度不大，2004、2005、2007 年各月之油價呈現向上的趨勢，2006、2008 年則是於六至八月為油價高峰。尤其當航空公司面臨如 2008 年之原油變動情形，將對其營運成本產生很大之影響，燃油成本控制更顯得重要。同時，透過前面之範例分析所討論，燃油價格變動對於航空網路之機型頻次改變影響不大，即航空網路頻次不易隨燃油價格變動而改變，主要影響因素仍在於需求量的變化，根據航空網路模式，即使油價再高，航空公司於航線所提供之頻次仍必須滿足需求。圖 5.2-5.3 為 C 航空公司五條直航航線(台北-東京、台北-洛杉磯、台北-法蘭克福、台北-檀香山、台北-曼谷)於 2007 年與 2008 年之每月旅運量變化，台北-法蘭克福、台北-檀香山航線由於運量較小，全年之旅運量波動幅度較小，然而其他航線則隨旅遊淡旺季或外在環境因素，呈現較大之波動。因此本研究以 2008 年、2007 年之油價與需求變動為實證分析之對象，探討油價變動時之航空網路規劃以及可靠度評估。



資料來源：美國能源局，本研究整理

圖 5.1 歷年西德州原油每月價格波動情形

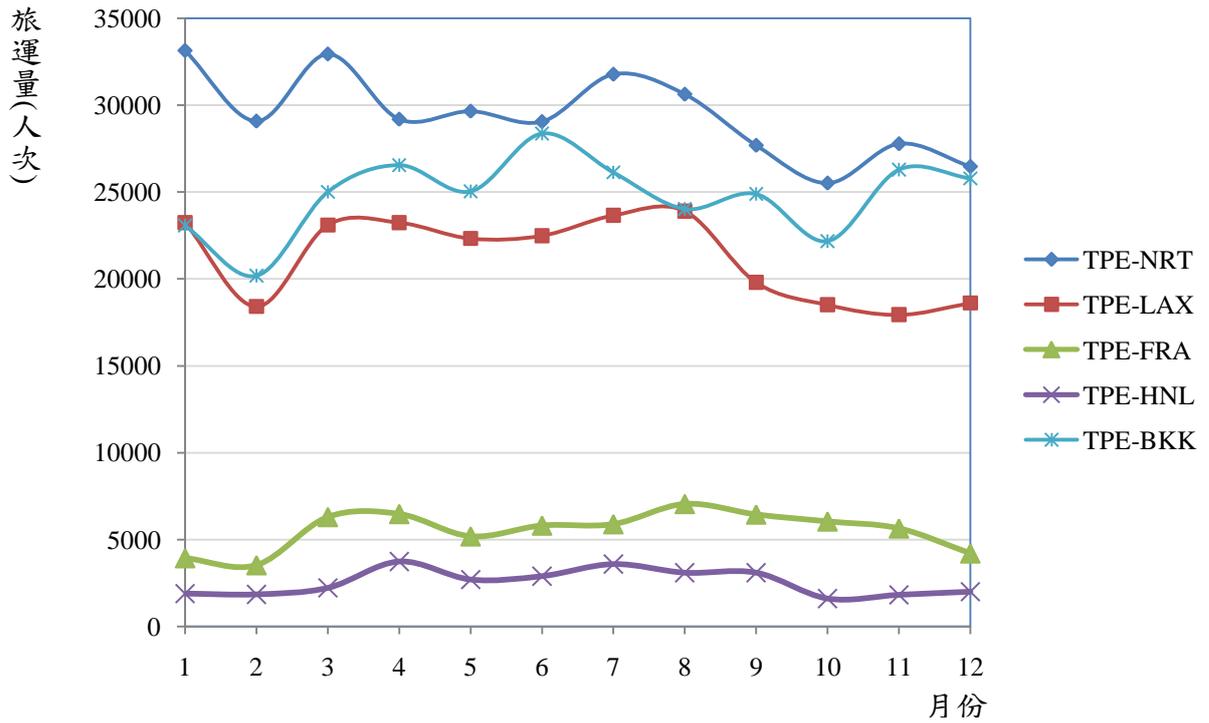


圖 5.2 2007 年航空公司各航線旅運量變化

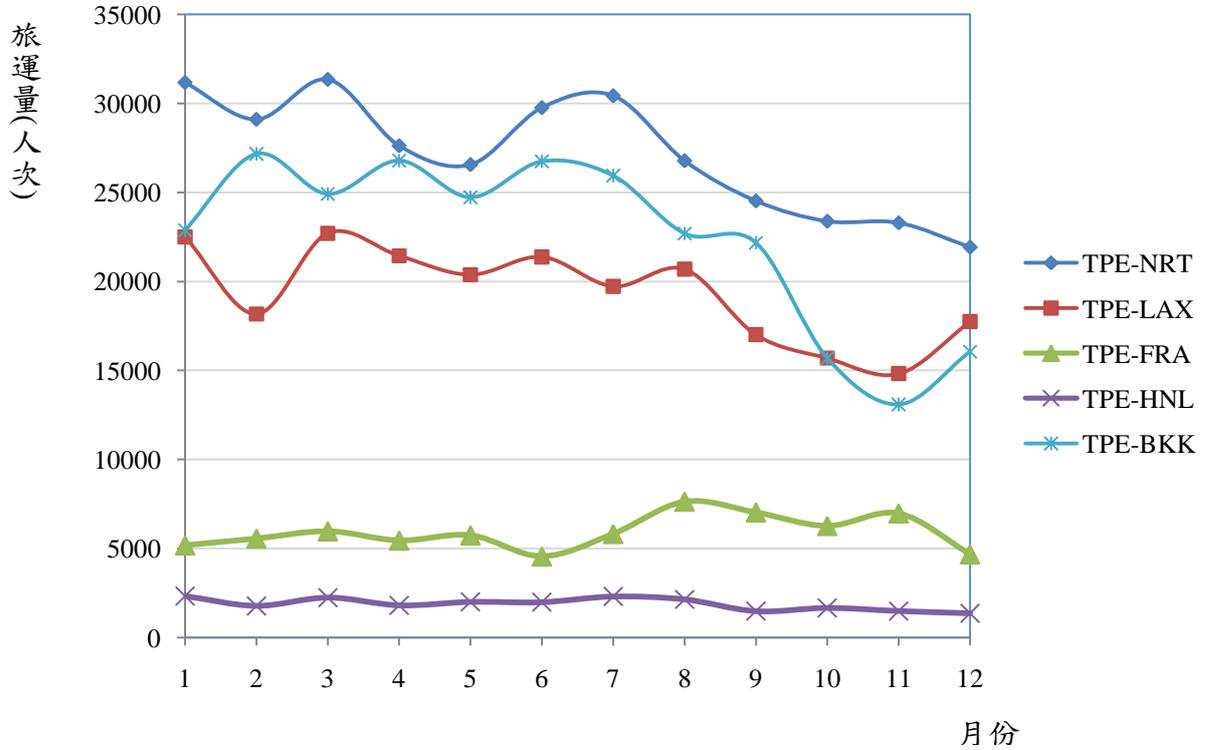


圖 5.3 2008 年航空公司各航線旅運量變化

5.1 航空網路規劃

本研究根據實際資料驗證模式之可行性。航空網路規劃根據民航局 2007 年、2008 年之民航統計月報，取得五條直航航線：以台北為起點，飛往東京、洛杉磯、法蘭克福、檀香山、曼谷等地之航線，其每月旅運量、承載率以及飛行頻次資料進行驗證。前一節之範例分析，由於轉機航線資料無法取得，因此本節依據民航局實際資料，僅就直航航線探討。候選機型依據航空公司實際營運各航線所使用之機型進行規劃，規劃頻次可與附錄 B 相對照。

依據實際承載率以及旅運量，經由本研究航空網路模式可規劃出每月之機型頻次，其中台北-東京航線規劃頻次略高於實際值，主要在於規劃機型皆為 A330-300，實際上則是 B747-400 與 A330-300 皆有使用，由於 A330-300 之座位數較少，因此規劃頻次會略高於實際頻次。台北-洛杉磯航線則大致與實際頻次相符合，台北-法蘭克福航線略低於實際頻次，然而規劃頻次仍可滿足當月旅運量。台北-檀香山航線由於規劃結果偏向選擇 B747-400 機型，因此規劃頻次略少於實際頻次，依各月份運量不同差異在一至二個頻次左右。台北-曼谷航線實際上有三種機型航行，規劃結果以 A330-300 為主，並未使用 B747-400，使得規劃頻次略高於實際值。由於官方統計之頻次並沒有按機型分類，而本研究之網路模式規劃結果與實際值差異不大，顯示模式依據旅運量以及承載率規劃頻次可符合現實情況。航空公司依據本研究網路規劃模式，於 2008 年、2007 年之初始規劃頻次如表 5.1、5.2 所示。

表 5.1 根據 2008 年旅運需求量之網路模式規劃結果

上半年規劃結果							
航段	使用機型	頻次(One-way)					
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
TPE-NRT	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	0	0	0	0	0	0
	A330	120	120	121	102	106	105
TPE-LAX	B747	61	59	63	60	63	61
TPE-FRA	B747	19	17	18	15	17	15
TPE-HNL	B747	6	4	5	4	4	4
	A330	1	2	2	2	3	3
TPE-BKK	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	1	6	2	1	0	2
	A330	108	114	117	110	107	104
規劃總成本		\$25461301	\$25105825	\$27769809	\$27418302	\$30642002	\$30509252
下半年規劃結果							
航段	使用機型	規劃頻次(One-way)					
		7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
TPE-NRT	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	0	0	0	0	0	0
	A330	116	111	102	109	110	115
TPE-LAX	B747	54	55	50	52	48	63
TPE-FRA	B747	23	23	22	22	24	22
TPE-HNL	B747	4	4	5	4	5	4
	A330	3	3	1	3	2	2
TPE-BKK	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	6	3	1	4	4	1
	A330	104	105	98	83	82	96
規劃總成本		\$31558893	\$28270637	\$23992753	\$2058955	\$18699175	\$18873144

單位：美元

表 5.2 根據 2007 年旅運需求量之網路模式規劃結果

上半年規劃結果							
航段	使用 機型	頻次(One-way)					
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
TPE-NRT	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	0	0	0	0	0	0
	A330	128	123	121	120	124	120
TPE-LAX	B747	62	57	62	62	63	61
TPE-FRA	B747	14	14	19	19	19	19
TPE-HNL	B747	4	5	7	13	9	7
	A330	2	1	0	0	1	2
TPE-BKK	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	2	3	2	0	4	3
	A330	108	86	112	116	110	108
規劃總成本		\$20618029	\$18954967	\$22352068	\$23803055	\$23470556	\$23237388
下半年規劃結果							
航段	使用 機型	規劃頻次(One-way)					
		7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
TPE-NRT	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	0	0	0	0	0	0
	A330	138	122	115	118	119	120
TPE-LAX	B747	63	63	60	62	61	62
TPE-FRA	B747	19	19	19	18	16	16
TPE-HNL	B747	9	10	8	5	5	4
	A330	1	0	2	1	2	3
TPE-BKK	B747	0	0	0	0	0	0
	A340	6	3	7	4	0	4
	A330	123	110	116	107	122	123
規劃總成本		\$25304290	\$24066309	\$23877521	\$23609748	\$25542037	\$25281650

單位：美元

5.2 可靠度評估

根據上一小節網路模式規劃結果，以及 2007 年至 2008 年之燃油價格，進行各月份之可靠度評估，並且針對不可靠的月份探討如何重新規劃與執行調整策略。

5.2.1 以 2008 年油價變動為例評估可靠度

現由 2008 年的油價情形，探討燃油價格發生異常時的可靠度。圖 5.4 為 2008 年新加坡航空燃油價格之變動情形，對照圖 4.27 可知燃油價格之變動受國際油價影響。根據台灣經濟研究院(2008)對於 2009 年之石油業景氣趨勢調查報告，指出 2008 上半年油價上漲受到去年爆發之美國次級房貸持續影響，並由於美元貶值，造成人為炒作，投機行為造成油價的泡沫化。2008 下半年美國國會立法限制投機炒作行為，並且增產原油，使得需求減緩，加上八九月時美國金融市場發生危機，十一月日本統計該國之經濟成長率呈現負值，這些負面消息以及全球經濟不景氣的影響，造成油價下跌。因此本研究模擬 2008 年發生兩個異常情事件，對各航線進行可靠度分析。討論 2008 年之燃油價格變化，一月至四月初(四月二日)皆位於區間 $[230.36, 307.52]$ 之內，僅三月十四日、三月十七日與三月二十八日突破每加侖 307.52 美分，但是由四月三日起，油價突破每加侖 307.52 美分，為該年度首件油價發生異常之事件 s_1 ，發生時間 $t_1^* = 4.1$ (月)，油價一開始落於區間 $[310.02, 354.50]$ ，並且維持在此區間至五月八日，持續時間為 36 天，因此 $v_1^1 = 1.191$ (月)。五月九日起，油價落於 $[357.05, 432.50]$ ，並且持續到七月十六日達到油價最高峰，歷程 $v_1^2 = 3.219$ (月)， s_1 事件之月份之集合為 $I^1 = \{4, 5, 6, 7\}$ 。七月十七日($t_2^* = 7.548$ 月)起油價下降，為事件 s_2 ，油價仍位於區間 $[357.05, 432.50]$ ，歷程 $v_2^1 = 0.612$ (月)，八月五日油價開始落於區間 $[310.02, 354.50]$ ，並持續至八月二十九日(0.77 個月)，歷程 $v_2^2 = 1.382$ (月)。 s_2 事件之月份之集合為 $I^2 = \{7, 8\}$ 。八月三十日起，油價回跌至區間 $[230.36, 307.52]$ ，與初始規劃預測油價相同，因此屬於正常狀態 s_0 。事件 s_3 的發生在於油價持續下跌，十月十日開始($t_3^* = 10.333$ 月)油價下降至區間 $[154.01, 230.25]$ ，歷程 v_3^1 為 1.709 個月，至十二月一日。十二月二日油價持續下跌至區間 $[90.56, 154.01]$ ，至 2008 結束為 0.935 個月，因此歷程 v_3^2 為 2.644。圖 4.30 顯示 2008 年之正常情形、異常事件與時間、油價之關係：燃油價格於四月初發生事件 s_1 ，持續至七月中，七月中起油價下跌，為異常事件 s_2 ，八月底恢復正常情況 s_0 ，十月初油價持續滑落至年底結束，為事件 s_3 。不同虛線與雙箭頭之間標示不同的區間(表 4.9)變動情形。

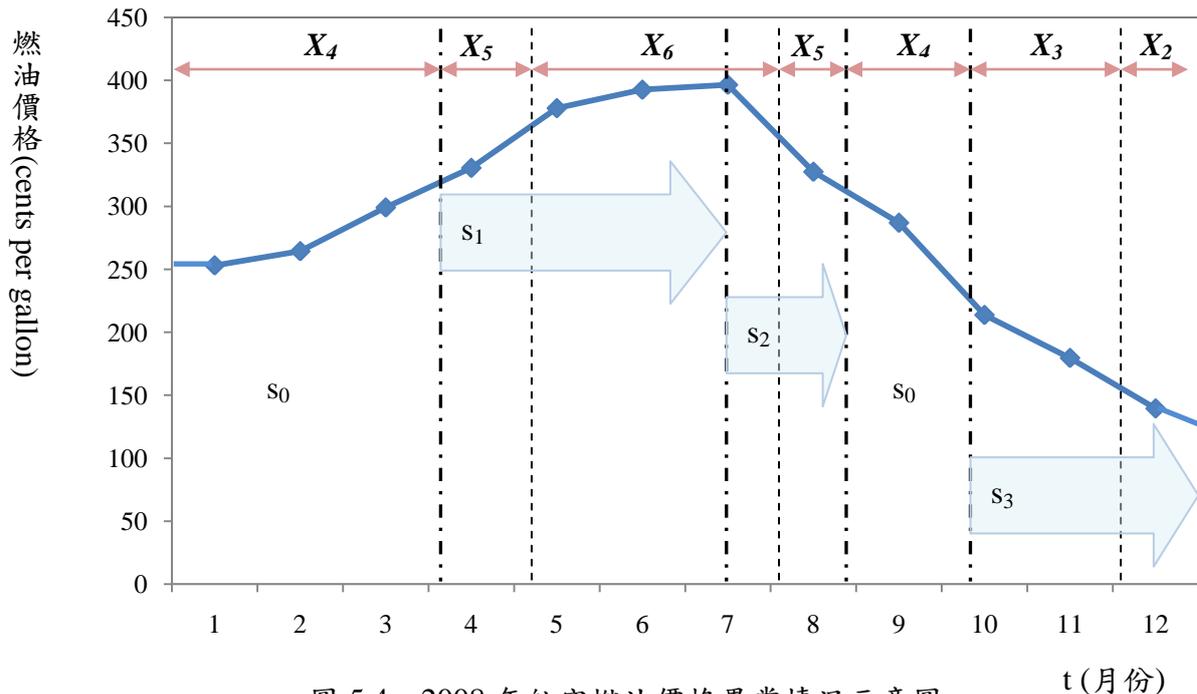


圖 5.4 2008 年航空燃油價格異常情況示意圖

根據表 5.3 之參數，可由式(3-19)計算異常情況 s_1 、 s_2 、 s_3 之各航線可靠度(表 5.4-5.5)，並且進一步由式(3-20)得到各航線全年之可靠度，如表 5.6，並且假設異常情況之發生機率為 0.6、0.7、0.8、0.9，以探討在不同機率之下的可靠度變化。

探討 2008 年燃油價格變動下之可靠度，除了台北-檀香山航線之外，對於其他航線，異常情形發生機率越高，則可靠度越高。此情形的發生，主要在於 2008 年的油價在上半年與下半年出現極大的變化，因此如果考慮 s_1 、 s_2 的情形，由於油價上升，則可靠度低於初始規劃之可靠度(\bar{R}_a)。但是下半年由於油價下降，比航空公司預期還要低，航空公司高估其燃油成本，油價下降反而替航空公司節省燃油成本，同時，由於航空公司尚未採取因應油價調整票價之措施，因此可靠度提升。因此，在預期規劃年之燃油價格變動情況下，由於油價上升，則可靠度降低，油價下降則可靠度會上升，兩者有相互抵消的關係，因此 2008 年網路，反而異常情況發生機率越高，則可靠度越高，可見下半年度油價的急速下降，也造成很大的影響。在五月至八月，各月份之可靠度極低，在這樣的油價水準下，航空公司幾乎不太可能獲利。十月之後，因為油價快速下降，使得可靠度極高，主要在轉嫁於乘客之燃油成本是以初始規劃之高價決定，因此當油價滑落降低了航空公司虧損之風險。結果如表 5.4 至 5.6 所示。根據每月之燃油價格， s_1 、 s_2 事件的發生造成各航線之可靠度降低，尤其以台北-東京、台北-洛杉磯以及台北-曼谷這三條航線之可靠度相對較低。因此本研究將針對這些可靠度相對較低之航線，進行調整策略之分析。

表 5.3 2008 年可靠度計算參數

異常油價分佈		
油價異常月份 $t_1^*=4.1$	s_1 發生歷程與機率	
	$v_1^1 = 1.191$ $p_1 = 0.27$	$v_1^2 = 4.405$ $p_2 = 0.73$
Apr	N(329.30, 11.30)	N(329.30, 11.30)
May	N(392.42, 16.34)	N(392.42, 16.34)
Jun	-	N(392.42, 16.34)
Jul	-	N(392.42, 16.34)
油價異常月份 $t_2^*=7.548$	s_2 發生歷程與機率	
	$v_2^1 = 0.612$ $p_1 = 0.44$	$v_2^2 = 1.382$ $p_2 = 0.56$
Jul	N(392.42, 16.34)	N(392.42, 16.34)
Aug	N(329.30, 11.30)	N(329.30, 11.30)
油價異常月份 $t_3^*=10.333$	s_3 發生歷程與機率	
	$v_3^1 = 1.709$ $p_1 = 0.65$	$v_3^2 = 2.644$ $p_2 = 0.35$
Oct	N(187.3, 18.66)	N(187.3, 18.66)
Nov	N(187.3, 18.66)	N(187.3, 18.66)
Dec	N(187.3, 18.66)	N(118.0, 20.44)

表 5.4 2008 年正常油價變動下之航線可靠度

航段	\bar{R}_a		
	$\bar{C}_a^*=1$	$\bar{C}_a^*=0.95$	$\bar{C}_a^*=0.90$
TPE-NRT	0.13169	0.04034	0.00840
TPE-LAX	0.10107	0.03036	0.00619
TPE-FRA	0.78900	0.68885	0.54074
TPE-HNL	0.60789	0.42556	0.30676
TPE-BKK	0.06396	0.01999	0.00424

表 5.5 2008 年油價異常情形之航線可靠度評估

TPE-NRT			
可接受最高上限值	$\bar{R}_{a s_1}$	$\bar{R}_{a s_2}$	$\bar{R}_{a s_3}$
$\bar{C}_a^*=1$	0.04468	0.04468	0.15296
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.01457	0.01457	0.10832
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.00323	0.00323	0.07763
TPE-LAX			
可接受最高上限值	$\bar{R}_{a s_1}$	$\bar{R}_{a s_2}$	$\bar{R}_{a s_3}$
$\bar{C}_a^*=1$	0.03006	0.03006	0.14079
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.00903	0.00903	0.10666
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.00184	0.00184	0.08078
TPE-FRA			
可接受最高上限值	$\bar{R}_{a s_1}$	$\bar{R}_{a s_2}$	$\bar{R}_{a s_3}$
$\bar{C}_a^*=1$	0.25001	0.23597	0.35575
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.20918	0.20488	0.32591
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.16056	0.16033	0.28117
TPE-HNL			
可接受最高上限值	$\bar{R}_{a s_1}$	$\bar{R}_{a s_2}$	$\bar{R}_{a s_3}$
$\bar{C}_a^*=1$	0.15359	0.14599	0.24914
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.07205	0.07126	0.16492
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.02362	0.02360	0.10552
TPE-BKK			
可接受最高上限值	$\bar{R}_{a s_1}$	$\bar{R}_{a s_2}$	$\bar{R}_{a s_3}$
$\bar{C}_a^*=1$	0.02366	0.02366	0.08576
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.00700	0.00700	0.06318
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.00142	0.00142	0.04800

表 5.6 2008 年全年之可靠度評估結果

全年可靠度 $E[R_a]$				
TPE-NRT	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.19807	0.20913	0.22019	0.23126
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.09861	0.10832	0.11804	0.12775
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.05382	0.06139	0.06896	0.07653
TPE-LAX	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.16097	0.17096	0.18094	0.19093
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.08697	0.09641	0.10584	0.11528
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.05316	0.06098	0.06881	0.07664
TPE-FRA	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.82063	0.82590	0.83117	0.83645
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.71952	0.72464	0.72975	0.73486
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.57754	0.58367	0.58980	0.59593
TPE-HNL	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.57239	0.56648	0.56056	0.55464
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.35516	0.34343	0.33170	0.31997
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.21435	0.19895	0.18355	0.16814
TPE-BKK	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.10543	0.11235	0.11926	0.12617
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.05431	0.06003	0.06575	0.07147
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.03221	0.03687	0.04153	0.04619

由表 5.6 可看出在事件 s_1 、 s_2 、 s_3 影響之下，各航線之全年可靠度。在燃油成本收支比值為 1 的情形下，台北-東京航線之可靠度大約在 20% 至 23% 之間，隨異常事件發生機率越高，則可靠度約略上升，主要原因在於 s_3 是屬於油價下降的狀態，使得全體的可靠度提升，因此當異常情況的發生機率越高，則可靠度比年初規劃的可靠度還高。就單一事件的影響度， s_3 情況下之可靠度為 0.15296，高於油價於正常變動之下的可靠度 (0.15023)。其他航線之可靠度評估也呈現相同的情況。

比較各航線之可靠度，以台北-法蘭克福航線最高，其他由高至低為台北-檀香山航線、台北-東京航線、台北-洛杉磯航線，可靠度最低的航線則為台北-曼谷航線。由於 2008 年在油價變動大的情形，已經對於航空公司之成本支出造成很大的影響，加上曼谷之承載率較其他航線為低，雖然旅運量高，但是空位率過高。對照圖 5.3 之全年旅運量變化，台北-法蘭克福與台北-檀香山航線皆屬於長途航程，運量少但是各月份旅運量波動較小的航線。而其他三條航線則是屬於旅運需求高，且運量波動大的航線。其中台北-洛杉磯航線屬於高承載率的航線，可靠度卻很低，可能造成的原因在於航線屬於長途航線，飛機本身於航程中使用的燃油量高，耗油量大，當燃油價格提升時，對於成本支出的影響極大。

實證上在 2008 年航空業確實因為燃油成本的提升造成營運之虧損，圖 5.5 顯示 C 航空公司 2008 年每季之營運成本，第二季與第三季為本研究模擬之事件 s_1 、 s_2 發生時間，第四季則為 s_3 事件發生時間。第一季與第二季的差異極大，恰可反映燃油上升所造成之成本提高，第三季則較第二季成本降低，可靠度的評估結果也顯示在 s_1 、 s_2 情況下，各航線之可靠度最低。第四季之營運成本則近於第一季。圖 5.6 則是 C 航空公司 2008 年之營業淨利，前三季皆呈現虧損的情形，並以第二季為最高，第一季與第四季之成本支出相似，然而第四季之虧損卻少於第一季，以可靠度評估結果對照，在 s_3 情況下之可靠度高於 s_0 之可靠度，實際營運成本與虧損趨勢符合油價趨勢所造成之衝擊。

單位：新台幣(千元)

C航空公司 2008年營運成本

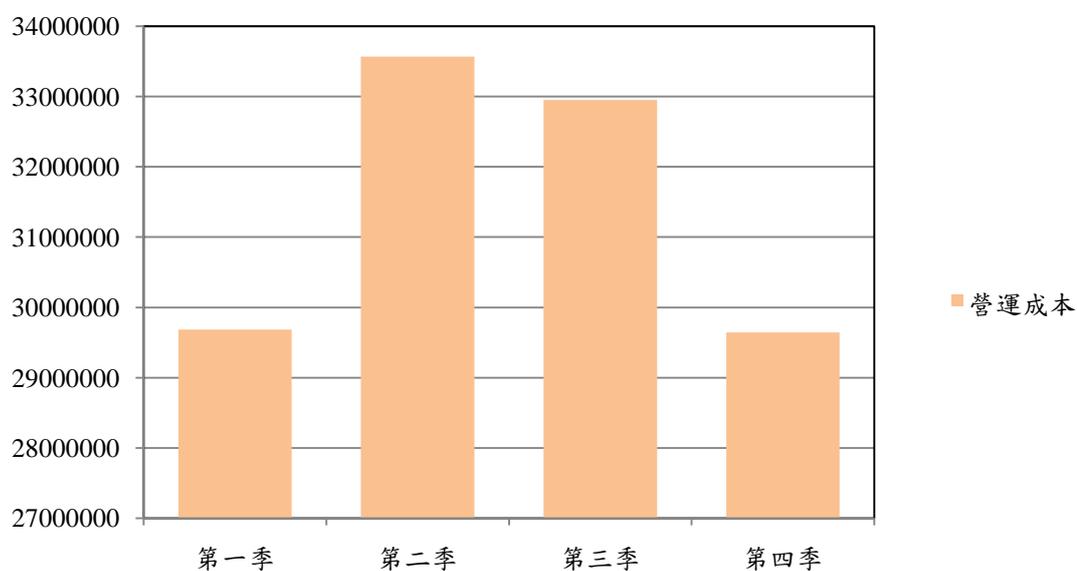


圖 5.5 C 航空公司 2008 年前三季營運成本

單位：新台幣(千元)

C航空公司 2008年營業淨利(虧損)

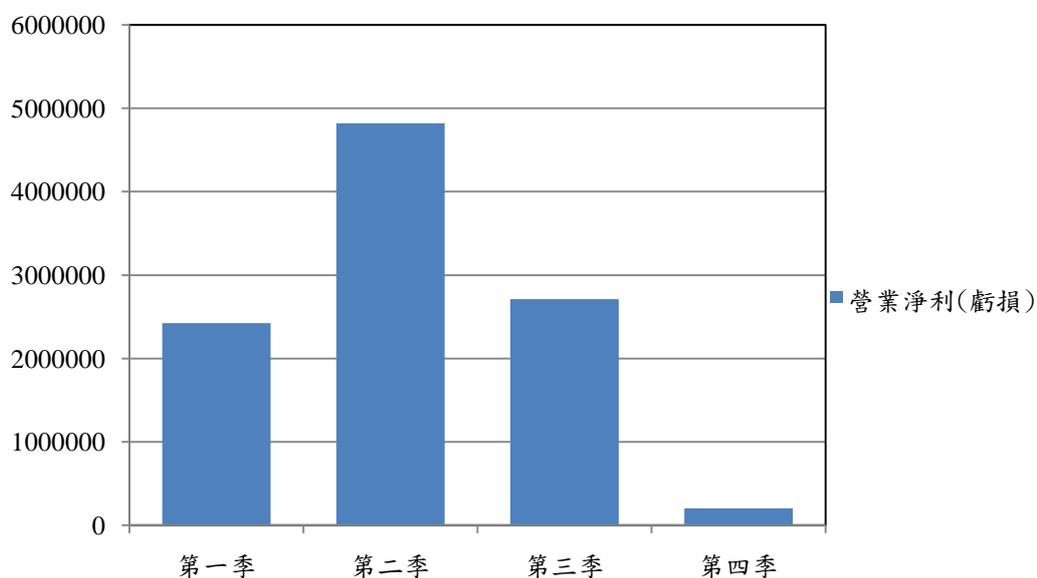


圖 5.6 C 航空公司 2008 年前三季營業淨利

5.2.2 以 2007 年油價變動為例評估可靠度

現根據 2007 年之燃油價格趨勢以及 5.1 節所得之網路規劃模式結果，進行航空網路之各航線可靠度評估。首先分析 2007 年之航空燃油價格趨勢，該年之燃油價格呈現逐月上升的趨勢，主要影響因素包含了美國次級房貸風暴的影響、金磚四國對於原油的高度需求，加上產油國生產量減少等因素，皆為 2007 年油價上升的重要影響因素。一月份之燃油價格為 165.99 cents per gallon，直到十月，燃油價格雖然逐漸上升，但根據本研究之燃油價格分佈，仍屬於同一區間 X_3 ，介於油價 154.01 至 230.25 cents per gallon 之間，燃油價格於十月十六日達到 234.29 cents per gallon，直到十二月底，燃油價格均分佈於區間 X_4 ，為事件 s_1 ，起始時間 t_1^* 為 10.484 月，歷時 77 天，即歷程 v_1^1 為 2.516 個月(圖 5.7)。

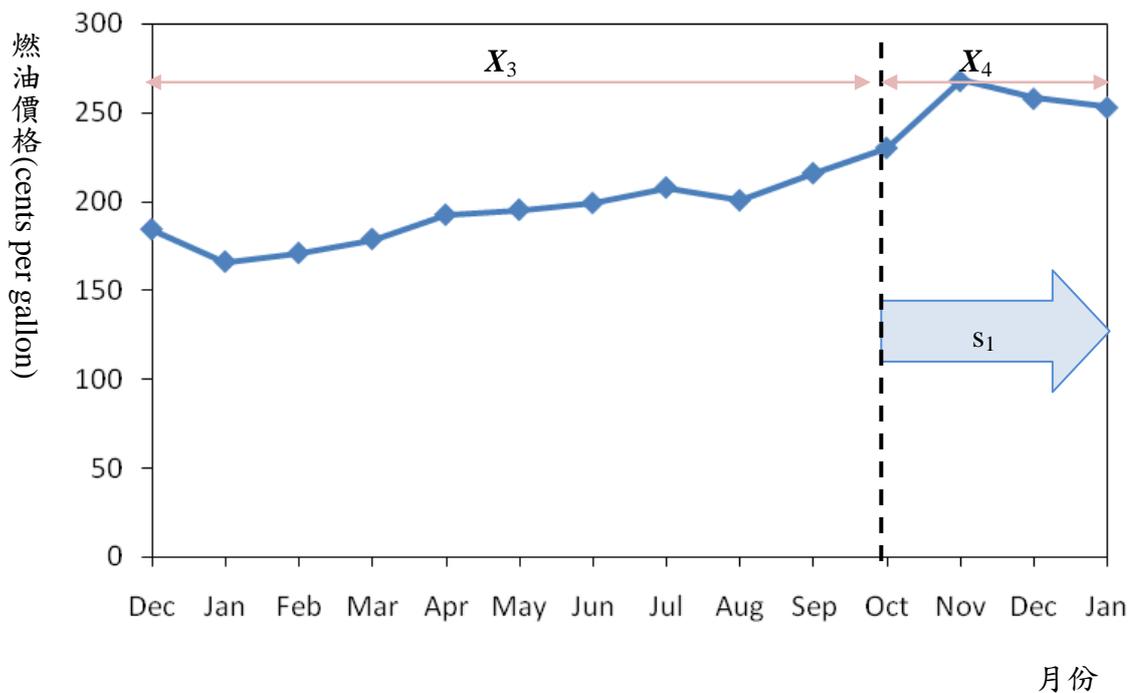


圖 5.7 2007 年航空燃油價格異常情況示意圖

根據油價特性可歸納出可靠度之估計參數如表 5.7 所示。由此表與 2007 年規劃頻次結果，可計算出 2007 年之可靠度(表 5.8-5.10)。由表 5.8 顯示，若以 2007 年一月之油價為初始規劃油價，在其所屬區間內，可維持收益平衡之機率，以台北-東京航線與台北-洛杉磯航線為最低，不到百分之十。進一步，計算其受到異常事件 s_1 影響之下的可靠度，並且彙整結果於表 5.9。

表 5.7 2007 年可靠度計算參數

異常油價分佈	
油價異常月份 $t_2^*=10.333$	s_1 發生歷程與機率
Oct	N(187.30, 18.66)
Nov	N(266.70, 18.20)
Dec	N(266.70, 18.20)

表 5.8 2007 年正常油價變動下之可靠度

航段	\bar{R}_a		
	$\bar{C}_a^*=1$	$\bar{C}_a^*=0.95$	$\bar{C}_a^*=0.90$
TPE-NRT	0.04507	0.01866	0.00661
TPE-LAX	0.09675	0.04322	0.01634
TPE-FRA	0.78901	0.76891	0.74011
TPE-HNL	0.76283	0.72452	0.68843
TPE-BKK	0.36625	0.22972	0.12425

表 5.9 2007 年油價異常情形下之航線可靠度評估

航段	$\bar{R}_{a s_1}$		
	$\bar{C}_a^*=1$	$\bar{C}_a^*=0.95$	$\bar{C}_a^*=0.90$
TPE-NRT	0.03562	0.01475	0.00523
TPE-LAX	0.07646	0.03416	0.01292
TPE-FRA	0.64003	0.61281	0.58602
TPE-HNL	0.60289	0.57261	0.54409
TPE-BKK	0.28946	0.18155	0.09820

表 5.10 2007 年全年之可靠度評估結果

全年可靠度 $E[R_a]$				
TPE-NRT	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.03940	0.03845	0.03751	0.03656
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.01631	0.01592	0.01553	0.01514
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.00578	0.00564	0.00551	0.00537
TPE-LAX	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.08458	0.08255	0.08052	0.07849
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.03778	0.03688	0.03597	0.03507
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.01429	0.01394	0.01360	0.01326
TPE-FRA	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.69962	0.68472	0.66983	0.65493
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.67525	0.65964	0.64403	0.62842
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.64766	0.63225	0.61684	0.60143
TPE-HNL	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.66686	0.65087	0.63487	0.61888
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.63338	0.61818	0.60299	0.58780
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.60182	0.58739	0.57295	0.55852
TPE-BKK	$\Pr(s_y)=0.6$	$\Pr(s_y)=0.7$	$\Pr(s_y)=0.8$	$\Pr(s_y)=0.9$
$\bar{C}_a^*=1$	0.32017	0.31250	0.30482	0.29714
$\bar{C}_a^*=0.95$	0.20082	0.19600	0.19119	0.18637
$\bar{C}_a^*=0.9$	0.10862	0.10601	0.10341	0.10080

根據 2007 年之可靠度計算結果，由於只有單一油價上升事件的發生，因此當異常情況發生的機率越高，則航線之可靠度呈現遞減的情形。以上限值為 1 而言，其中可靠度最低的為台北-東京航線，可靠度介於 0.036 至 0.039 之間，台北-洛杉磯航線也同樣呈現可靠度極低的情形僅 0.08 左右。可靠度較高之航線則包含台北-法蘭克福、台北-檀香山等全年旅運需求波動小之長途航線，顯示運量穩定之航線較容易維持其可靠度。台北-曼谷航線之可靠度則隨發生機率，可靠度維持在 0.29 至 0.30 之間。因此對於 2007 年而言，優先需要調整的航線為台北-東京航線以及台北-洛杉磯航線。下一節將針對本節可靠度評估結果，進行調整策略之分析。

5.3 航空公司調整網路航線機型頻次策略分析

前一節求出 2008 年以及 2007 年之各航線可靠度，進一步，本研究希望能夠分析，運用何種方法或是策略來調整航空網路航線頻次，可降低航空公司因為燃油價格上升所造成之虧損情形。第四章之求解結果為航空公司在規畫未來年之航空網路頻次，以預測值評估可能發生的油價異常情形與可靠度機率，因此調整方式可視未來預期之旅運量變化與油價變動，根據調整成本與懲罰值進行調整。本節之策略分析與前一節之主要差異在於，2007 與 2008 年之旅運量為已知，歷史頻次也隨月份的之不同而有所變動，例如在寒暑假的旅遊旺季，頻次就會增加，淡季時頻次就會減少。因此本節著重在於討論以當時每月之旅運量與初始頻次規畫情形，透過哪些方式，例如改變航線、減班、置換航機等方式，可幫助航空公司節省多少的成本，為本節所欲了解的重點。本節共分成兩小節，分別對於 2008 年以及 2007 年，需要調整之月份，重新規劃其航線頻次機型，檢視透過調整策略之後，是否能降低燃油成本上升之衝擊。

針對各航線之特性，本研究將航空公司面臨燃油價格變動時，可行之調整策略與各航線特性加以分類，一般而言，當燃油價格上升至一定程度，政府單位(即民用航空局)會公佈調整燃油附加稅的公告，旅客購買機票時，依據航程長短支付航空公司燃油附加稅，為最直接可彌補航空公司費用的之方法。另外，提升票價也可降低航空公司的損失，然而航空票價的變動受到許多外在因素影響，不一定全部都與燃油價格變動有關，因此此節之調整策略不予討論票價的調整。本研究之重點在於如何因應油價變動，調整航空網路之航線、機型以及頻次，例如原本採用直航的航線改採用轉機、採用較具有燃油效益之航機或是降低頻次以提升承載率。由於航空客運具有不可儲存之特性，由前一章的討論我們已知，在承載率越低的情形下，使用省油航機的效益越高，承載率越高，各航機之相對座位燃油成本則較為相近，另外，前一章之網路規劃已知，在航空成本最小化之目標下，針對直航或轉機的航線決策中，航空公司會選擇以轉機航線載運旅客，本章所討論之航線以直航的實際資料為主，在調整策略上，可考慮對於長程之不可靠航線，改採用轉機方式，檢視是否具有節省成本之效益。

以上討論之相關可行調整策略，依據航線特性，可歸納如下圖所示，根據本章之網路規劃結果以及可靠度評估，針對不可靠之航線，進行調整策略之分析。

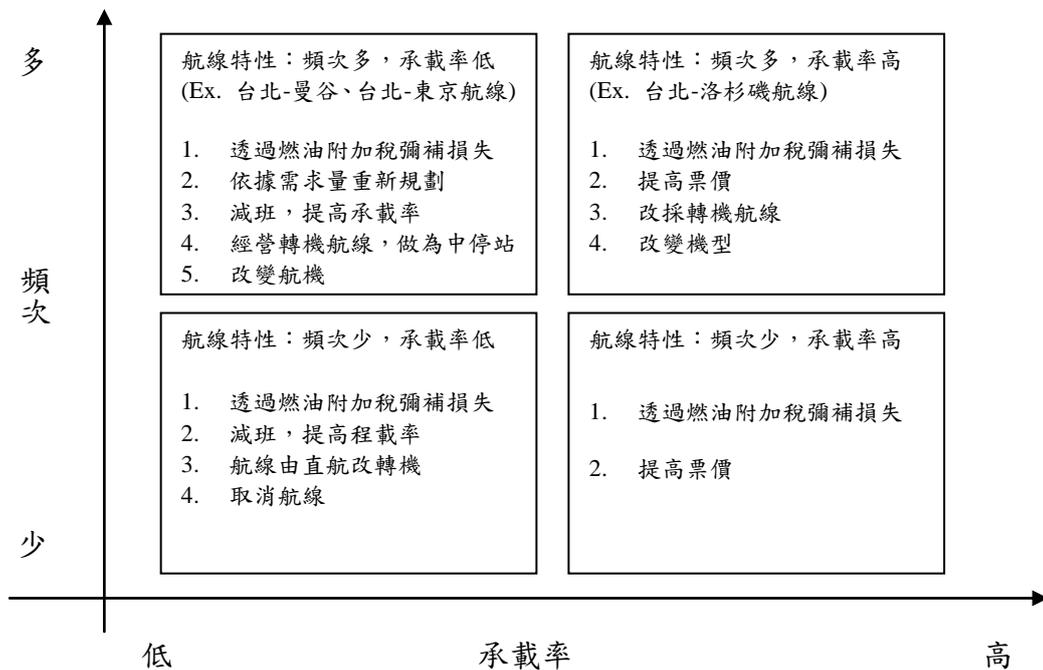


圖 5.8 面臨燃油價格變動航線可行調整策略示意圖



5.3.1 2008 年調整策略分析

2008 年各航線的表現，以台北-東京、台北-洛杉磯以及台北-曼谷航線較為不可靠，代表航空公司營運這幾條航線，當油價變動時，航線虧損的機率較高。因此針對其高油價的月份{4, 5, 6, 7, 8}進行機型頻次之調整。由於需求為已知，分析此三條航線，皆屬於旅運需求高之航線，其中台北-曼谷為短程航線，頻次多，但是承載率卻不高，台北-東京航線於高油價月份之承載率則尚維持在八成左右，台北-東京航線全年平均承載率為 78.257%，而台北-曼谷航線則為 68.29%。台北-洛杉磯航線屬於承載率較高之航線，全年平均承載率達 85.69%。因此對於台北-曼谷航線，可藉由提高承載率，降低班次的方式調整機型頻次，台北-洛杉磯航線則可能由於航程較長，航機耗油量較大，造成油價變動下之可靠度較低，此時可考慮改為轉機航線，中停站為東京成田機場，進行航段頻次的調整。而台北-東京航線，可配合台北-洛杉磯的轉機旅客，提高其承載率以及流量。

1. 台北-東京航線與台北-洛杉磯航線

這兩條航線在高油價之月份，仍保持高旅運量與承載率，因此，為節省燃油成本，將台北-洛杉磯航線改為台北-東京-洛杉磯航線，對於至洛杉磯的旅客，所搭乘之台北-東京航段航機，將包含只搭至東京的旅客，因此在台北-東京航段之航機，因為吸收了台北-洛杉磯之旅運量，可提高航線之承載率，但是卻會增加台北-東京之頻次造成調整成本的產生，因此必須權衡其懲罰值(即不應調整所造成之損失)與調整成本，決策是否調整。由四月份之調整結果，若洛杉磯航線改為轉機航線，東京-洛杉磯航段仍維持原本之 60 個頻次，當前往洛杉磯的旅運量造成台北-東京航段之承載率提升至 90%，此時航空公司必須規劃 175 個班次來載運所有的旅客，增加 73 個班次之調整成本大於其懲罰值，因此不予調整，同理，測試在承載率 95%、98%、100% 之下的頻次規劃，當承載率高於 98%，此時懲罰值大於調整成本，調整洛杉磯航線改用轉機、台北-東京航線之頻次增班，在不超過 58 班的情況下，對航空公司而言具有節省成本之效益。表 5.11 之調整決策結果，可用圖 5.9 看出調整成本與懲罰成本之間的變化，兩條線之交點約於承載率 97.5% 之處，當承載率超過 97.5%，則航空公司即可決策調整，由航空網路規劃模式，透過調整承載率之限制，可得出航空公司所需重新規劃之頻次。

表 5.11 2008 年四月台北-東京與台北-洛杉磯調整決策

四月							
航段	初始規劃機型/頻次		調整頻次				
	航機承載率	86.5%	86.5%	90%	95%	98%	100%
TPE-NRT	B747-400	0	0	0	0	0	0
	A330-300	102	182	175	165	160	157
TPE-LAX	B747-400	60	0	0	0	0	0
NRT-LAX	B747-400	0	60	60	60	60	60
懲罰值(美元)			\$148,037	\$408,702	\$781,080	\$967,269	\$1,078,982
調整成本(美元)			\$12,69,760	\$1,158,656	\$999,936	\$920,576	\$872,960
決策				不調整	不調整	調整	調整

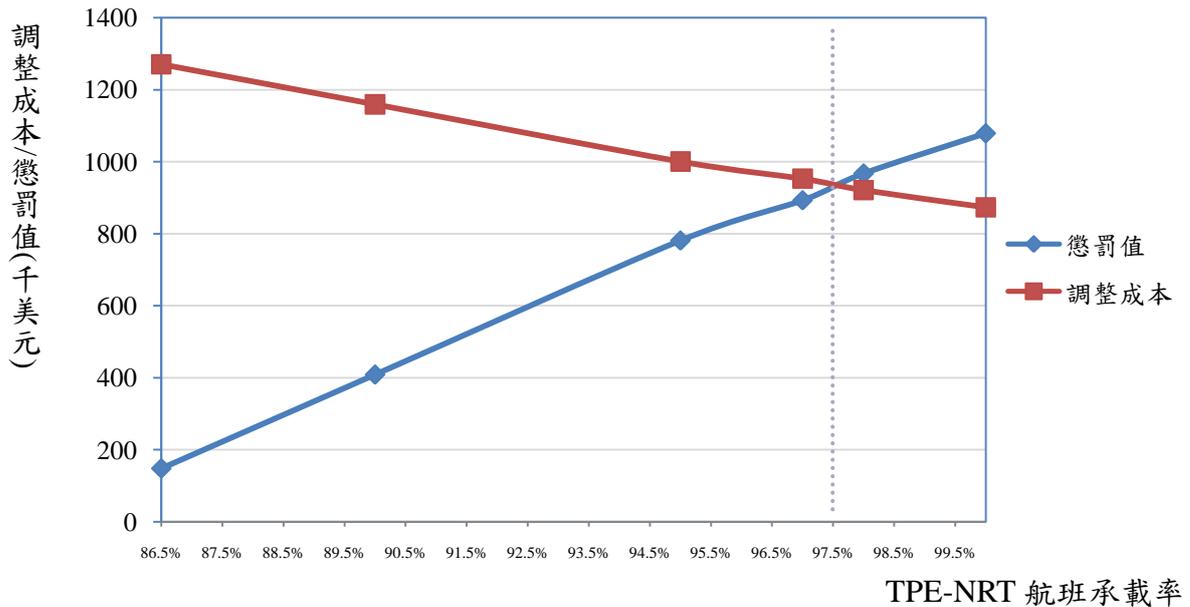


圖 5.9 2008 年四月台北-洛杉磯航線改為轉機之懲罰成本與調整成本變化圖

假設航空公司改用轉機航線後，台北-東京航線提供 160 個班次，即每月提供 50080 個座位數，此供給量已足夠提供五月運量需求，因此五月可維持與四月之頻次規劃，在此情形下，航空公司除了透過轉機航線提高承載率以及節省燃油成本的支出，又由於延續四月份之規劃，就不具備調整成本，六月則由於旅運量提升，四月之頻次規劃已無法滿足需求量，因此針對六月旅運重新規劃，檢視調整策略是否具有節省成本之效果。根據表 5.12 與圖 5.10，六月之調整，必須在承載率提高至 99% 與 100% 之間，即頻次為 165、164 班，才能使得懲罰值小於調整成本，當航空頻次改為台北-東京每月 165 班或是每月 164 班，並由東京每月往洛杉磯 61 班，此頻次規畫提供台北-東京 51332 至 51645 個座位數，已足夠供給七八月份之旅運需求，然而七月與八月之台北-洛杉磯航線，因運量減少，原規劃分別為 54 班與 55 班，若以六月之規劃頻次營運，將造成往洛杉磯航線多出約 10 個班次的空位數，這主要是由於七八月恰好屬於國人暑期之旅遊旺季，因此台北-洛杉磯航線之承載率皆為九成以上，高於六月份的 89.7%，因此可以較少班次營運航線。同時，七月恰好為燃油價格最高的時候，此時對於航空網路之調整更為重要。七月份之航線頻次調整，若維持原承載率而只改變航線的話，將造成航線之營運成本高於初始規劃成本，造成 \$56,223 美元之額外虧損，並且多出 \$1,206,272 美元之調整成本。主要原因在於七月油價為高點，因此增加航班反而造成燃油成本之負擔。由圖 5.11 可看出航空公司增班應低於 53 班，確保台北-東京航線 95% 以上之承載率，此時懲罰值小於調整成本，調整航班頻次才具有效益。另外，七月之重新調整頻次規劃已可滿足八月份之旅運量，加上八月油價已開始下滑，因此七月之調整可延用至八月，不再另行調整。

表 5.12 2008 年六月台北-東京與台北-洛杉磯調整決策

六月						
航段	初始規劃機型/頻次		調整頻次			
TPE-NRT	航機承載率	90.8%	90.8%	95%	98%	100%
	B747-400	0	0	0	0	0
	A330-300	105	180	172	167	164
TPE-LAX	B747-400	61	0	0	0	0
NRT-LAX	B747-400	0	61	61	61	61
懲罰值(美元)			\$373,618	\$703,623	\$909,876	\$1,033,628
調整成本(美元)			\$1,190,400	\$1,063,424	\$984,064	\$936,448
決策			不調整	不調整	不調整	調整

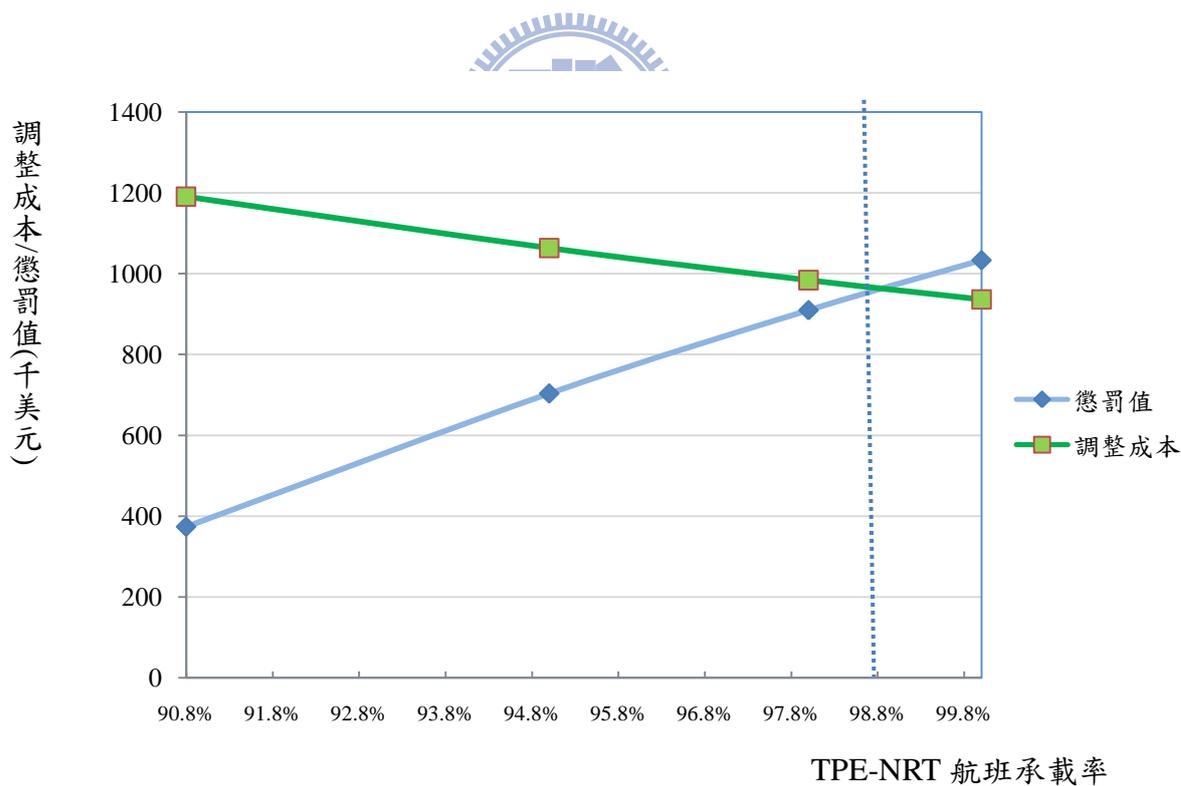


圖 5.10 2008 年六月台北-洛杉磯航線改為轉機之懲罰成本與調整成本變化圖

表 5.13 2008 年七月台北-東京與台北-洛杉磯調整決策

七月						
航段	初始規劃機型/頻次		調整頻次			
TPE-NRT	航機承載率	83.8%	85%	90%	95%	100%
	B747-400	0	0	0	0	0
	A330-300	116	189	178	169	161
TPE-LAX	B747-400	54	0	0	0	0
NRT-LAX	B747-400	0	54	54	54	54
懲罰值(美元)			\$68,286	\$524,816	\$898,341	\$1,230,364
調整成本(美元)			\$1,158,656	\$984,064	\$841,216	\$714,240
決策			不調整	不調整	調整	調整

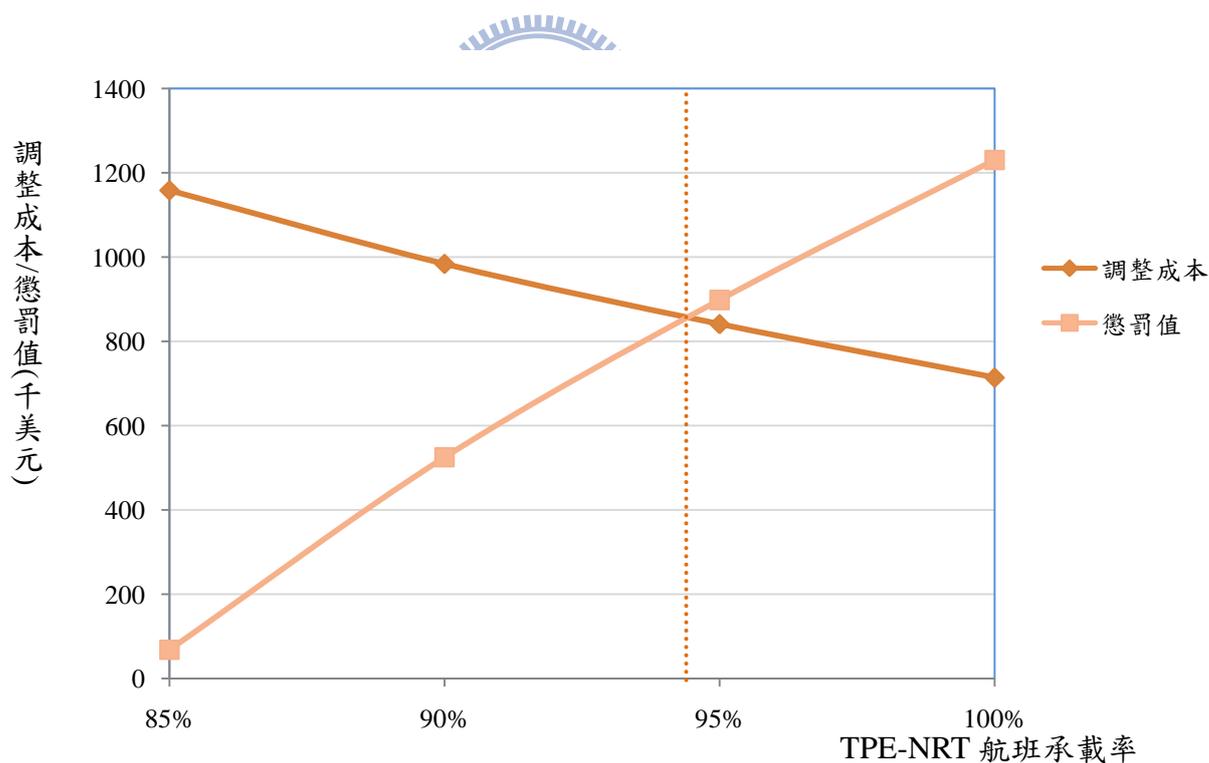


圖 5.11 2008 年七月台北-洛杉磯航線改為轉機之懲罰成本與調整成本變化圖

2. 台北-曼谷航線

以曼谷航線而言，可靠度低的原因，主要在於其平均每月航班之承載率都不是很高，約在六七成左右，因此在高油價的月份，本研究以減少航線班次檢視頻次調整時，調整成本與懲罰值的關係，根據調整結果，調整承載率在 80% 以上，懲罰值皆大於調整成本，當航班減至 107 班，即減少一個 A340-300 班次，以及 3 班 A330-300 航班，承載率可達 80%，當承載率欲提升至 85% 時，減少至每月 101 班，同時在機型的組合上也有所改變，規劃調整結果如表 5.14 與圖 5.12 所示。同時四月規劃頻次已可滿足四到八月之需求量。

表 5.14 2008 年四月台北-曼谷航線調整決策

四月							
航段	初始規劃機型/頻次		調整頻次				
TPE-BKK	航機承載率	77.2%	80%	85%	90%	95%	100%
	B747-400	0	0	0	0	0	0
	A340-300	1	0	2	7	7	3
	A330-300	110	107	99	89	84	83
懲罰值(美元)			\$142,929	\$359,664	\$543,820	\$722,661	\$897,251
調整成本(美元)			\$47,158	\$118,448	\$319,146	\$379,476	\$358,662
決策			調整	調整	調整	調整	調整

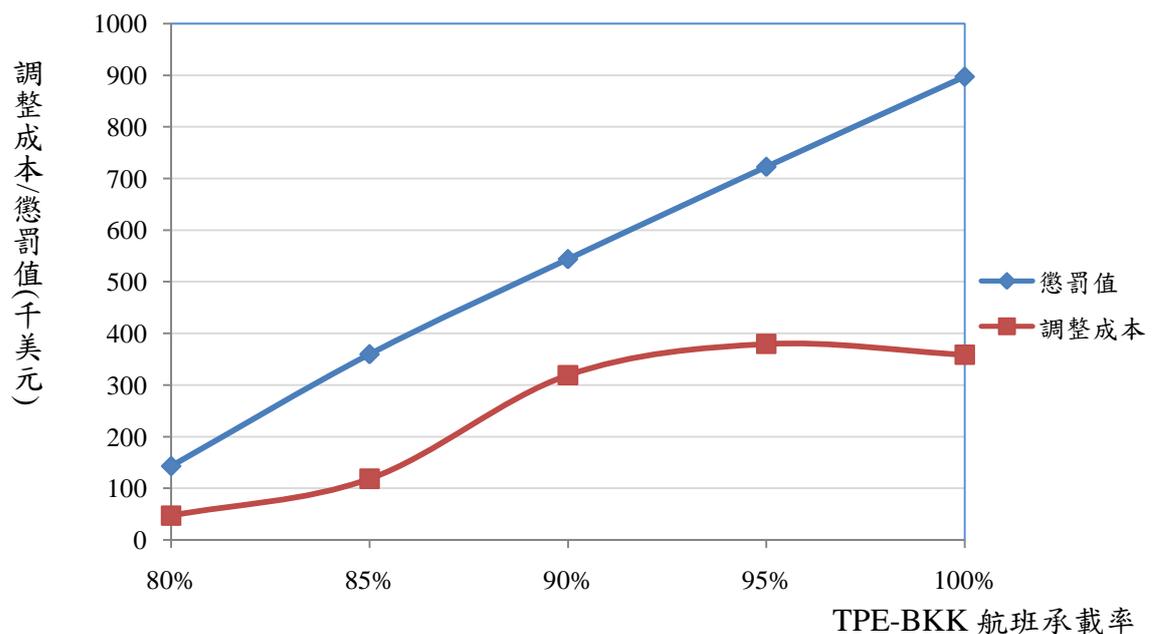


圖 5.12 2008 年四月台北-曼谷航線調整頻次之懲罰成本與調整成本變化圖

5.3.2 2007 年調整策略分析

2007 年，以台北-東京與台北-洛杉磯航線較為不可靠，因此透過航空網路規劃重新調整該航線於高油價月份之航線機型頻次。因此調整月份為十月、十一月以及十二月(第四季)。2007 年台北-洛杉磯航線之平均承載率為 88.03%，台北-東京航線之承載率為 77.38%，當油價上升的時期，即十至十二月，這兩條航現之旅運需求以及承載率也下降許多，尤其以台北-洛杉磯航線，原本之承載率可達八九成，但是在第四季的時候，承載率降到約 75% 左右，在實際的頻次規劃上，台北-東京航線在第四季之頻次已較其他月份減少，因此承載率與其他月份差異不大，但是在台北-洛杉磯航線則由於頻次並沒有因應運量降低而調整，造成承載率下降幅度較大。各航線的調整，以減班提升承載率進行探討，至於調整航線，由於此時期台北-洛杉磯航線之旅運量並不高，因此在不改變動台北-洛杉磯承載率限制下，調整為轉機航線台北-東京-洛杉磯航線其規劃成本皆大於原本之營運成本，在此情形下，調整航線並不適合。直航航線的調整，假設在其他航線頻次不更動之情形下，僅調整單條航線之承載率，檢視在其懲罰成本與調整成本，在不同頻次規劃之下的變化，以決策應調整幾個班次最為適合。重新規劃結果如下表。調整成本與懲罰值之關係由圖 5.13、5.14 表示。

表 5.15 2007 年十月台北-東京與台北-洛杉磯航線重新規劃

十月						
航段	初始規劃機型/頻次		調整頻次			
TPE-NRT	航機承載率	69.2%	70%	80%	90%	100%
	B747-400	0	0	0	0	0
	A330-300	118	117	102	91	82
	懲罰值(美元)		\$30,760	\$492,163	\$830,525	\$1,107,367
	調整成本(美元)		\$15,872	\$253,952	\$428,544	\$571,392
	決策		調整	調整	調整	調整
TPE-LAX	航機承載率	76.4%	80%	85%	90%	100%
	B747-400	62	59	55	52	47
	懲罰值(美元)		\$455,861	\$1,041,661	\$1,519,538	\$2,279,308
	調整成本(美元)		\$188,127	\$438,963	\$627,090	\$2,947,323
	決策		調整	調整	調整	不調整

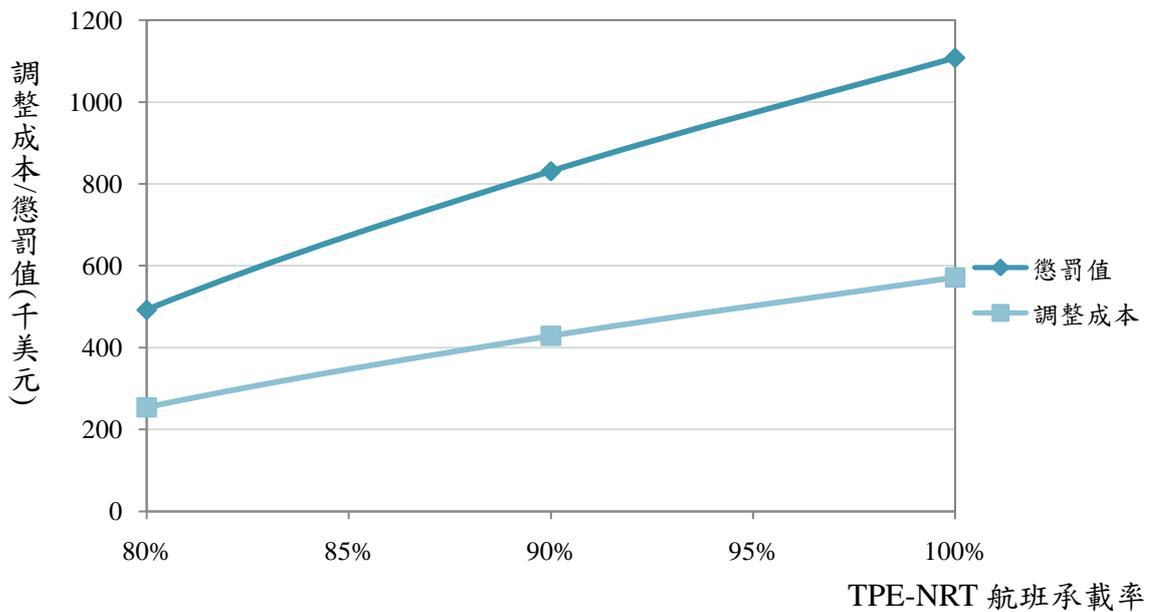


圖 5.13 2007 年十月台北-東京航線調整頻次之懲罰成本與調整成本變化圖

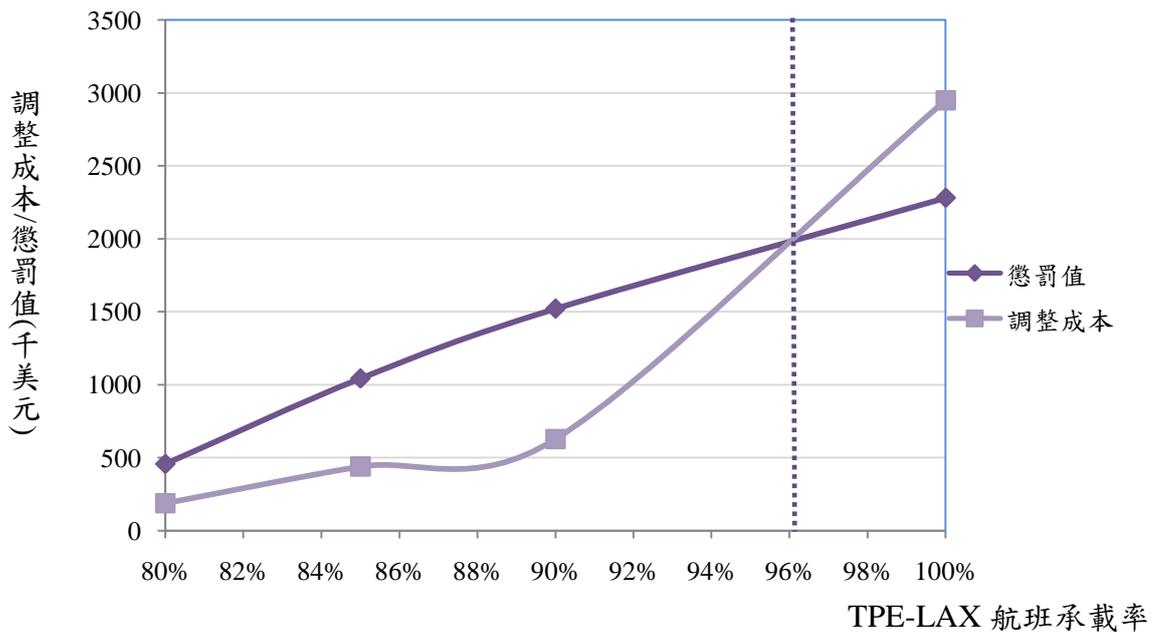


圖 5.14 2007 年十月台北-洛杉磯航線調整頻次之懲罰成本與調整成本變化圖

由圖 5.13，可知調整承載率限制，對於台北-東京航線而言，無論減少多少班次，其調整成本皆小於懲罰值，因此可決策進行減班以降低成本的損失。但是對於台北-洛杉磯航線而言，由於採用的是成本較高之 B747-400 航機，因此當航空公司欲提高承載率超過 96%(頻次為 49 班)，則調整成本過大，不宜調整頻次。即減班不可超過 13 班，以免造成航機閒置或是服務水準下降的情形。

六、 結論與建議

6.1 結論

近年來航空客運市場受到外在經濟因素影響，造成旅運量的下降與燃油成本上升，對航空公司而言，如何在需求量萎縮的情形下，達到收支上的損益平衡，以不同的方式減低其成本的支出，實為現今航空公司所面臨的重要課題。對航空業者而言，佔總成本將近五成左右之燃油成本支出，成為航空業者沉重之成本負擔，且運輸具有不可儲存之特性，因此當航空公司進行航班規劃時，如何有效的組合與規劃其航線機型頻次，選擇適當的航線、機型，並且配合旅運需求規劃頻次，避免因外在因素造成成本的虧損，為航空業者亟待解決之問題。

本研究所建立之航空網路模式，可決策出在目標成本最小化之下的最適航線、機型以及頻次。進一步，考量燃油價格之不確定性，建構可靠度模式，評估初始規劃之燃油價格與機型頻次影響之下，航空網路航線之燃油成本可達到損益平衡之機率，本研究以區間分析之概念，將燃油價格做區隔，取得可靠度之評估參數。根據網路規劃與可靠度評估結果，針對高油價所造成之不可靠之規劃月份，進行航空網路之重新規劃與調整，檢視不同調整方式對於航空公司節省成本之效果。本研究首先架構一航空網路進行範例分析，並且將需求視為外生變數，旅運量與規劃油價以預測值進行規劃。根據航空網路規劃之結果，模擬燃油價格之變動下，航線可靠度的變化。進一步假設不同情境之下，航空公司可行之調整策略，包含整體網路之重新調整，以及新航機之配置，屬於中長期之規劃與因應策略。本研究並引入台灣國籍航空於 2007 年與 2008 年之實際旅運量、承載率，以及每月之燃油價格，以實際例子進行模式之操作，並針對不可靠之航線，在航線機型及頻次上重新規劃，提供短期面臨外部不確定性因素之因應方法。綜合以上研究分析，本研究之結論如下：

1. 根據航空網路模式之初始化規劃結果，在滿足需求量之限制之下，考量成本最小時，模式規劃使用耗油量較低的機種，並且在航線規劃上選擇轉機航線。因此在本研究所規劃，前往檀香山與阿姆斯特丹的航線，皆選擇轉機航線。採用轉機航線較具有效益的原因在於這兩條航線之航程，轉機里程皆小於直航里程，由於直接成本與飛行時間與距離有直接影響，因此透過中停站縮短航程，可減少飛行成本的支出，同時，於中停站可載運更多旅客，增加航線之旅運量與收入。可見本模式具有規劃最

小營運成本下之航線機型頻次規劃功能。

2. 航空網路屬於中長程規劃，當網路面臨短期性變動可能造成航空公司營運上之影響，本研究建立之可靠度評估方法，提供航空公司針對不確定性因素，評估規劃網路之營運效益，並且即時因應不可靠之航空網路規劃決策是否進行調整。根據可靠度評估之結果，在規劃年當中，當油價發生異常上升的情形時，可靠度比原規劃估計之可靠度還低，當油價發生異常下降的情形，則反而可提升航線之可靠度。因此油價上升時，航空公司之燃油成本能達到損益平衡之機率下降，油價下降時，航空公司可達到損益平衡之機率則上升。
3. 根據範例分析之情境一規劃結果，當燃油價格上升之情形下，航空網路規劃頻次與機型為滿足需求量，在需求固定之情況下，並不會在機型或是頻次上有所改變，主要原因在於，航空網路受到必須滿足需求量之限制，因此即使油價攀升，在未放鬆承載率限制以及需求變動不便的情形下，網路規劃頻次不會改變，加上，初始規劃中，即以最小成本為目標，初始規劃結果以選擇最經濟之航線與機型規劃，因此即使燃油成本上升，航空公司可用機型選擇有限，因此機型頻次難以變動。因此航空燃油價格之變動造成營運成本整體上升。
4. 本研究考慮不同燃油價格與需求變動的情形，調整初始規劃之需求比例，規劃結果顯示，在燃油價格沒有變動，而需求下降時，無論需求下降比例為何，重新規劃航空網路之調整成本皆小於懲罰值，因此需求下降，航空公司應因應需求量調整其機型頻次，而需求上升的情形，由於需求與調整成本成正比關係，隨需求上升比率越高，調整航空網路越不具有效益。根據不同比例之需求以及燃油價格變化，本研究建立懲罰值與調整成本變化之決策圖，藉由圖中懲罰值與調整成本之變化，可決定航空公司於不同油價與需求組合下之調整決策。
5. 範例分析中加入新型航機規劃重新規劃，檢視在較多機型選擇之下，模式所決策之最適機型，在航線或航段之機型配置，規畫結果在各航段之機型配置上，新加入之候選航機較舊有規劃航機具有節省燃油之效益，因此重新規劃後之航線機型頻次組合具有較低之營運成本，並且透過燃油價格敏感度分析，當燃油價格越高，有採用新航機之網路規劃可節省較原機型規劃更多之成本支出。當航空公司置換航機之後，在運量、承載率與旅客負擔燃油成本等條件不變之下，確實可提升航線之可靠度。所有航段經置換航機後，由於耗油量降低，可靠度皆提升至九成以上。

6. 分析各航線上不同機型在不同承載率之下，單位座位之燃油成本，當承載率越高，各航機之間的單位座位燃油成本差距越小，然而當承載率較低時，則選擇省油航機可具有較大之效益。因此，航空公司對於承載率較高且穩定的航段，較不需要因應燃油成本置換航機，因為置換航機，單位座位所能節省之燃油成本並不大，然而，對於承載率極低的航線，應優先置換機隊組合，節省直接成本的支出。
7. 根據 2007 年與 2008 年之旅運實際數據規劃，並且進行可靠度評估，結果顯示，於 2008 年，旅運量波動較大，頻次多之航線，如台北-東京與台北-曼谷航線，可靠度較低；規劃頻次少，且各月之間旅運量波動較小之航線如台北-檀香山與台北-法蘭克福航線，可維持較高之可靠度。台北-洛杉磯屬於高運量之長途航線，由於燃油成本支出較大，則呈現相對較為不可靠的情形。
8. 不可靠之航線重新規劃，針對不同航線特性，放鬆原有模式之限制式，可重新求解規劃之頻次。當長程且承載率高之航線為不可靠，可擇短程航線做為轉機之中停站，一方面提升短程航段之承載率，同時降低長程航線之成本。針對頻次多，承載率低之航線，在放鬆承載率限制式後，對於不同承載率之下所規劃的頻次，權衡其調整成本與懲罰值，可決策出適當之調整頻次。
9. 探討 2008 年之調整規劃，於高油價月份調整台北-東京、台北-曼谷與台北洛杉磯航線之機型頻次。由於台北-洛杉磯之承載率高，因此台北-東京與台北-洛杉磯航線可重新規劃航線，以東京為中停站之台北-東京-洛杉磯航線，具有節省營運成本之效益，同時，提升台北-東京航段之旅運量。台北-曼谷航線則以放鬆承載率限制之方式，進行減班之調整，對於台北-曼谷航線而言，減班以提高承載率，其懲罰值皆大於調整成本，可見實際規劃之台北-曼谷航線頻次過多，造成空位率過高，應進行較大規模之減班措施減少成本的支出。
10. 2007 年的調整，根據可靠度評估結果，以台北-東京與台北-洛杉磯兩條航線較低，但由於台北-洛杉磯航線之承載率不夠高，在不調整台北-洛杉磯航線之承載率限制下，此時採用轉機航線並無法節省營運成本，因此兩條航線個別以放鬆承載率限制的方式，進行減班之調整。台北-東京航線經過減班策略，具有節省成本之效益，台北-洛杉磯航線則由於飛行成本較高，若減班過多，將造成調整成本大於懲罰值的情形。
11. 本研究運用區間分析概念，分析歷史油價之特性，解釋在不同油價區間下，具有常

態分配之特性，並得出各油價區間之發生機率，分析結果為進行本研究可靠度評估之重要參數。本研究所建構之可靠度模式，有助於航空公司預測未來之油價時，評估未來燃油價格對於燃油成本支出的影響。同時，根據本研究可靠度模式，在規劃初期，航空公司依據其規劃頻次、預期油價與旅運量，可評估應由旅客承擔燃油成本之比例，有助航空公司制訂票價之參考。

12. 本研究所探討之調整策略，以調整航線、機型與頻次為主，因此重新規劃後，航空公司仍可滿足需求量，降低燃油價格上升所造成之成本支出。同時，本研究分析多種航空客機機種於不同航段上之使用效益，有助航空公司未來購置航機，以及規劃各航線、航段機型時之參考。

6.2 建議

1. 本研究視旅運需求為外生變數，以簡化航空網路模式之複雜度，並未考慮供需互動之情形，未來研究可以供互動情形進行航空網路規劃，配合燃油價格之變動，決策航空網路之最適航線、機型與頻次組合。另外，本研究航空網路模式僅考慮單向航程，即以台北為起點，前往各國家城市機場之頻次，後續研究可探討雙向頻次之頻次規劃，同時，由於航機於國際機場加油，其燃油價格依各國國情與機場政策而有差異，若詳加考慮因加油地點不同所造成之燃油價格差異，可更符合現況。
2. 根據航空網路規劃結果，B747-400 航機相較於其他中小型客機，較不具有節省成本之效益，未來當航空公司依據航機使用年限汰換機型，並且引入新航機於機隊時，應衡量該航機之購置或租賃價格、航機省油率、長期折舊等成本，選擇以及配置最適航機。
3. 本研究航空網路規劃目標式為成本最小，並未考慮旅運收入與票價，後續研究可以利潤最大化為目標，探討在燃油價格變動之下，航空網路之獲利情形，進一步討論如何因應燃油價格，調整航空網路以降低虧損程度。同時本研究未將可靠度模式內部化，結合航空網路模式，為未來可行之研究方向。
4. 本研究假設客機為純客機，在航線之頻次規劃上，並沒有考慮貨運的部份，實務上，航空公司機隊組合包含了客運與貨運，部分客運客機也具備貨運之功能，然而貨運的營運也造成航空公司燃油成本的支出，然而其他成本支出可能不同於航空客運，因此後續研究可就貨運部分進行探討。

參考文獻

1. 交通部民用航空局，民航統計月報，民國96年1月至民國97年12月。
2. 張有恆著，現代運輸學，華泰文化，民國94年。
3. 張有恆著，運輸經濟學，華泰文化，民國95年。
4. 李乾銘著，可靠度技術的執行與策略，財團法人中衛發展中心，民國91年。
5. 黃鵬先，「航空公司乾/濕租策略聯盟之機隊規劃」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國93年。
6. 楊昌喬著，可靠度工程，新文京開發出版股份有限公司，民國96年。
7. 廖慧珠，國際高油價之原油與可能之後續發展，經濟前瞻，民國94年。
8. 廖颯青，「航空貨運公司航線市場分析與頻次規劃研究」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國95年。
9. Aboosedra, S. & Baghestani, H., (2004), "On the Predictive Accuracy of the Crude Oil Futures Prices," *Energy Policy*, Vol. 32, pp.1389-1393.
10. Askari, H. and Krichene, N., (2008), "Oil Price Dynamics (2002-2006)," *Energy Economics*, Vol.30, pp.2134-2153.
11. Abdelghanya, K., Abdelghanyb, A., Rainab, S., (2005), "A Model for the Airlines' Fuel Management Strategies," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 11, pp.199 – 206.
12. Brueckner, J. K. and Girvin, R., (2008), "Airport Noise Regulation, Airline Service Quality, and Social Welfare," *Transportation Research Part B*, Vol. 42, pp.19-37.
13. Cortes, C. E., Vargas, L. S., Corvalan, R. M., (2008), "A Simulation Platform for Computing Energy Consumption and Emissions in Transportation Networks", *Transportation Research Part D*, Vol.13, pp.413-427.
14. Hayashi, P. M., and Trapani, J. M., (1987), "The Impact on Energy Cost on Domestic Airline Passenger Travel," *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 21, pp. 73-86.
15. Holloway, H., Straight and Level: Practical Airline Economics , 2nd Edition, ASHGATE, 2003.
16. 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.

17. 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.
18. Hsu, C. I. and Wen, Y. H., (2003), "Determining Flight Frequencies on an Airline Network with Demand-Supply Interactions," *Transportation Research-E*, Vol. 39, No.6, pp. 417-441.
19. Hsu, C. I. and Lin, P. H., (2005), "Performance Assessment for Airport Noise Charge Policies and Airline Network Adjustment Response," *Transportation Research Part D*, Vol. 10, pp.281-304.
20. Joseph, P. R., Andrew, F. S., Counterexamples in Probability And Statistics, CRC Press, 1986.
21. Janic, M., (2003). "Modelling Operational, Economic and Environmental Performance of an Air Transport Network," *Transportation Research D*, Vol. 8, pp. 415-432.
22. Kanafani, A. and Ghobrial, A., (1982), "Aircraft Evaluation in Air Network Planning," *Transportation Engineering Journal of ASCE*, Vol. 108, pp. 282-300.
23. Lam, W., Hu, S., Sumalee, A., (2008) "Modeling Impacts of Adverse Weather Conditions on a Road Network with Uncertainties in Demand and Supply" *Transportation Research Part B*, Vol. 42, pp. 890-910.
24. Lin, C. C. and Chen, S. S., (2008), "An Integral Constrained Generalized Hub-and –Spoke Network Design Problem," *Transportation Research Part E*, Vol. 44, pp.986-1003.
25. Linda, C. W., Reliability Modelling: A Statistical Approach, CHAPMAN & HALL/CRC, 1999.
26. Liu, C., Fan, Y., Ordonez, F., (2009) , "A Two-stage Stochastic Programming Model for Transportation Network," *Computer & Operations Research*, Vol.36, pp.1582-1590.
27. Lu, C. and Morrell, P., (2006), "Determination and Application of Environmental Costs at Different Sized Airports – Aircraft and Engine Emissions," *Transport*, Vol. 33, pp. 45-61.
28. Maria, E. B., Francesca, G., Erika, P., (2009), "Evaluating project completion time in project networks with discrete random activity durations", *Computer Operations Research*, Vol. 36, pp. 2716-2722.

29. Matsumoto, H., (2007), "International Air Network Structures and Air Traffic Density of World Cities," Transportation Research Part E, Vol. 43, pp. 269-282.
30. Michael, G.H. B. & Yasunori, I., The Network Reliability of Transport - Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability, PERGAMON, 2003.
31. Morrell, P., (2008), "The Potential for European Aviation CO2 Emissions Reduction through the Use of Larger Jet Aircraft," Journal of Air Transport Management, 1 - 7, in press.
32. Nomura, K., (2003), "Managing Risks in Airline Industry," Japan and the World Economy, 15 pp. 469-479.
33. Ramón, E. M. & Fritz, B., Methods and applications of interval analysis, 2nd Edition, SIAM, 1979.
34. 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.
35. Teodorovic, D., (1983), "Flight Frequency Determination," Journal of Transportation Engineering, Vol. 109, No. 5, pp. 747-757.
36. William M. S. and Nicole A., (2006), "Aircraft Trip Cost Parameters: A Function of Stage Length and Seat Capacity," Transportation Research Part E, Vol. 42, pp. 105-115.
37. Wojahn, O. W., (2001), "Airline Network Structure and the Gravity Model," Transportation Research Part E, Vol. 37, pp.267-279.
38. Woodcock, J., Banister, D., Edwards, P., Prentice, A. M., Roberts, I., (2007). "Energy and Transport," The Lancet, Vol.370, No. 9592, pp. 1078-1088.
39. Wu, C. L. and Caves, R. E., (2000), "Aircraft Operational Costs and Turnaround Efficiency at Airports" Journal of Air Transport Management, Vol. 6, pp. 201-208.
40. 經濟部能源局，<<http://www.tier.org.tw/>>
41. 美國能源部，<<http://www.eia.doe.gov/>>
42. 波音公司，<<http://www.boeing.com/>>
43. Airbus, <<http://www.airbus.com/en/>>
44. 中華航空公司，<<http://www.china-airlines.com/ch/index.htm>>
45. 長榮航空公司，<<http://www.evaair.com/html/b2c/chinese/>>
46. 台經院產經資料庫，<http://tie.tier.org.tw/tie/index.jsp?data_base_id=DB001>

航線起迄對城市之旅客需求量預測

本研究使用灰色系統預測模式 GM(1, 1) 對於目標航空公司起迄對運量做預測，並且由 Matlab 軟體進行求解。灰預測之原理在於將原始數據累加之後成為新的數據。G(1,1) 模式為時間序列預測模式，令 \hat{Q}_{rs} 為起迄對航線之年度旅運量預測值，假設給定之航空起迄對 r-s 航線之原始年度交通流量為 $Q_{rs}^{(0)}$ ，n 代表 n 筆觀測之年數：

$$Q_{rs}^{(0)} = (Q_{rs}^{(0)}(1), \dots, Q_{rs}^{(0)}(n)) \quad (1)$$

將原始旅客量數據進行累加生成數之運算，得到旅客量累加生成數據序列：

$$Q_{rs}^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k Q_{rs}^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

其中

$$Q_{rs}^{(1)}(k) = \sum_{t=1}^k Q_{rs}^{(0)}(t), k = 2, 3, \dots, n \text{ 且 } Q_{rs}^{(1)}(1) = Q_{rs}^{(0)}(1)$$

GM(1,1) 模式可以 $Q_{rs}^{(0)}$ 的微分方程式構建：

$$\frac{dQ_{rs}^{(1)}}{dk} + u_1 Q_{rs}^{(1)} = u_2 \quad (3)$$

$$\frac{dQ_{rs}^{(1)}}{dk} = \lim_{\Delta k \rightarrow 0} (Q_{rs}^{(1)}(k + \Delta k) - Q_{rs}^{(1)}(k)) / (\Delta k) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta Q_{rs}^{(1)}}{\Delta k} = Q_{rs}^{(1)}(k + 1) - Q_{rs}^{(1)}(k) \quad (5)$$

以最小平方法估計 u_1, u_2 ：

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(Q_{rs}^{(1)}(1) + Q_{rs}^{(1)}(2)), & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(Q_{rs}^{(1)}(n-1) + Q_{rs}^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$y = [Q_{rs}^{(0)}(2), Q_{rs}^{(0)}(3), \dots, Q_{rs}^{(0)}(n)]^T \quad (8)$$

求出 \hat{u}_1, \hat{u}_2 ，以累減生成 IAGO 還原得時間序列預測模式。

$$\hat{Q}_{rs}^{(1)}(k) = \left(Q_{rs}^{(0)}(1) - \frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} \right) (1 - e^{\hat{u}_1}) e^{\hat{u}_1(k-1)}, \quad k=2,3,\dots \quad (9)$$

其中 $k=1, \hat{Q}_{rs}^{(0)}(1) = Q_{rs}^{(0)}(1)$ ；

$\hat{Q}_{rs}^{(0)} = [\hat{Q}_{rs}^{(0)}(1), \hat{Q}_{rs}^{(0)}(2), \dots, \hat{Q}_{rs}^{(0)}(n), \hat{Q}_{rs}^{(0)}(n+1), \dots]$ 即求出未來預測值。預測出之旅運量為一年的旅次，因此單月之旅運預測平均值為 $\bar{Q}_{rs} = \hat{Q}_{rs}^{(0)}/12$ 。



附錄二

中華航空 96 年度、97 年度每月承載率與頻次資料

		航段	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
		承載率(%)	2007	TPE-NRT	86.6	76	87.1	78	76.6	77.9	73.6	80.7	77.5	69
TPE-LAX	94.4			82.7	95.3	95.9	90.6	94.3	96	97	83.1	76	75	76
TPE-FRA	71.1			67.1	87.7	88.7	69.5	80.9	82	94.6	89.7	88	93	69
TPE-HNL	86.4			83.5	80.3	73.3	69.7	87.2	92.7	86	82.2	72.5	73	80
TPE-BKK	67.4			64.7	70.3	73.2	70.5	82	65.1	68.2	73.2	64.1	69	65.2
2008	TPE-NRT		83.2	78.1	84.8	86.5	80.3	90.8	83.8	77.4	77	69	68	61
	TPE-LAX		91.4	78.9	92.2	90	82.6	89.7	93.7	96.4	87.3	77	78	71
	TPE-FRA		85.3	82.7	94	94	90	78.7	66.5	83.7	84.2	75	76	54
	TPE-HNL		89.6	80.7	82.1	82	80.5	80	92.9	86.3	67	67	60	62
	TPE-BKK		67.2	72.8	71.5	77.2	74.5	80.9	75.9	67.4	71.7	58	49	53
頻次	2007	TPE-NRT	98	98	98	96	99	96	110	98	92	94	95	97
		TPE-LAX	62	56	61	61	62	60	62	62	60	61	60	62
		TPE-FRA	20	19	26	26	27	26	26	27	26	25	22	22
		TPE-HNL	8	8	10	29	19	12	14	13	12	8	9	9
		TPE-BKK	107	98	106	103	106	103	137	106	102	105	133	137
	2008	TPE-NRT	97	97	97	94	100	97	105	97	94	99	94	97
		TPE-LAX	62	58	62	60	62	60	53	54	49	51	48	63
		TPE-FRA	22	23	23	21	23	21	22	23	21	21	23	22
		TPE-HNL	9	8	9	8	9	9	9	9	8	9	9	8
		TPE-BKK	106	132	108	103	106	102	105	106	96	106	85	97