

國立交通大學
運輸科技與管理學系
碩士論文

因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法

A study of flight schedule perturbation resulting from
multi-airport temporary closure

研 究 生：王思文

指導教授：王晉元

中 華 民 國 九 十 五 年 七 月

因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法

A Study of flight schedule perturbation resulting from
multi-airport temporary closure

研 究 生：王思文

Student：Shih-Wen Wang

指導教授：王晉元

Advisor：Jin-Yuan Wang

國立交通大學
運輸科技與管理學系
碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute 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

July 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年七月

國立交通大學

博碩士論文全文電子檔著作權授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學運輸科技與管理學系 _____ 組，94 學年度第 _____ 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法
指導教授：王晉元

☒ 同意

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

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

本校及台灣聯合大學系統區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開

☒ 全文電子檔送交國家圖書館

授權人：王思文

親筆簽名：_____

中華民國 _____ 年 _____ 月 _____ 日

國立交通大學

博碩士紙本論文著作權授權書

(提供授權人裝訂於全文電子檔授權書之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學運輸科技與管理學系 _____ 組，94 學年度第 _____ 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法
指導教授：王晉元

■ 同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學圖書館得以紙本收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

本論文為本人向經濟部智慧局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：_____，請將論文延至 _____ 年 _____ 月 _____ 日再公開。

授權人：王思文

親筆簽名：_____

中華民國 _____ 年 _____ 月 _____ 日

國家圖書館 博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文本校授權書之後)

ID:GT009332506

本授權書所授權之論文為授權人在國立交通大學運輸科技與管理學系 94 學年度第__學期取得碩士學位之論文。

論文題目：因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法

指導教授：王晉元

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

※ 讀者基於非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人：王思文

親筆簽名：_____

民國 年 月 日

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 運輸科技與管理學系 碩士班 王思文 君

所提論文 因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法

合於碩士資格水準、業經本委員會評審認可。

口試委員：

張靖
元啓之

顏上堯

指導教授：

元啓之

系主任：

許巧雲

教授

中華民國九十五年 月 日

因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法

學生：王思文

指導教授：王晉元

國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班

摘 要

航空公司營運上隨時都可能面臨許多的不確定因素導致機場關閉，使得航空公司無法按照既定的飛航時間表提供服務，致使乘客抱怨，降低服務水準。因此，如何有效地調度可用飛機來解決擾動班次，降低營運損失，實乃當前業者所普遍關切之課題。

本研究的目的是改進傳統實務的作法，考慮飛機總量數目之限制，發展一因應多機場關閉的飛航排程方法。當面臨如天候之不可抗拒因素時，即啟動即時排程模式，考量受影響的班次，並依照當時可用之飛機產生調度方案供調度者參考。在調度模式中，本研究將即時排程問題轉換成一集合分割的問題，並發展一以變數產生法（Column Generation）為基礎的演算法來產生可行的調度方案。在調度方案的產生上，將子問題設計成一最短路徑問題，利用各節點之成本、對偶值、延遲成本、取消成本求解最短路徑，所得之最短路徑即為一可行之排程方案。

為測試模式的可行性與正確性，本研究模擬各種班表情境，作實例測試與修正。實務上航空業者可以針對其調度方案與考量之不同，設定較合適之可調參數值，以求系統能符合業者的需求。結果顯示，不論是針對機場關閉時間長短，或是延遲方案間隔時間長短，均能夠透過本研究之演算方法，得到一個因應機場關閉之適當排程方案；且與窮舉法比較，透過本方法求得的解之目標值與窮舉法之最佳解目標值無異。

關鍵字：飛航擾動排程，集合分割問題，變數產生法

A Study of Flight Schedule Perturbation Resulting From Multi-airport Temporary Closure

Student : Shih-Wen Wang

Advisor : Jin-Yuan Wang

Department of Transportation Technology and Management

National Chiao Tung University

Abstract

Keeping the announced or pre-established schedule is an important factor to guarantee service quality and operation efficiency of an airline company. Mechanical failures and bad weather conditions usually cause perturbation of schedule and result in additional costs. The purpose of this study is to develop a flight schedule adjustment model and a solution algorithm to address these issues.

A set partition based model with side constraints is proposed for this purpose. The number of available aircrafts in each depot is considered in this model. A column generation based algorithm is developed to solve this model. The value of dual variable of each constraint is assigned as the arc cost in the sub-problem network. Label Correcting Method is adopted to solve the shortest path problem in the associated sub-problem network.

We use simulation data and various scenarios to evaluate the robust of our model and efficiency of the solution method. The testing results indicate that the proposed model and algorithm are sound and promising.

Keywords: Flight Perturbation Scheduling, Column Generation, Set-Partition Problem.

誌 謝

本論文得以順利完成，首先要感謝王晉元老師的指導與鼓勵。在論文撰寫的過程中，每當學生遭遇挫折，老師均不辭辛勞的諄諄教誨並適時的給予協助。除了在研究與課業上，老師更是生活中的心靈導師，亦給予相當多寶貴的意見以及經驗的分享傳承，師恩浩大，點點滴滴的感謝在心中，謹此致上最深的敬意與謝意。

在論文口試期間，感謝中央大學土木系 顏上堯老師與中華大學運管系 張靖老師在論文進行過程中給予相當多寶貴的意見以及指導，最後在論文口試時惠賜卓見及不吝指正，使本論文更臻完備；在論文進度審查期間，也承系上 韓復華老師、黃寬丞老師費心審閱並給予學生寶貴意見。

兩年研究生的生活，感謝實驗室的戰友小粉紅信翔、小紅帽 dozo、小朋友嘉英與阿魯巴王子瑞豐陪我度過這段日子，在求學過程中一起熬夜討論、寫程式、以及生活上互相鼓勵與扶持。而實驗室的學長學姊大師兄至康、小松、東凌、宏勳、彥佑、hoho、怡君；以及學弟妹文誠、詩敏、至浩、韻佳在生活上的互相照顧，最重要的是打嘴砲功夫的互相切磋，以及 meeting 結束後的美食兵團、口試前的瑪莉歐大作戰，讓我在研究生的生涯增添了許多的樂趣。

感謝室友立弘、岳德、資科系冠華的彼此打氣與勉勵。還有家族中的好弟妹 webber、之音、子萱、筱嵐、弘義，以及充實我大學四年與碩士班兩年生活當中的社團夥伴與師長，諮商中心文昭姊、慈濟師姑師伯們、新竹區的慈青夥伴們…，在苦悶操煩的研究過程中，大大地舒解了壓力。

更要感謝家人的支持與關心，爸爸媽媽給予我生活上無憂慮的照顧與支持，讓我得以全心全力的投入在學校的工作。還有女友憲梅，從大學二年級認識到現在，生活上的點滴分享，讓我更有信心與勇氣去接受每一個挑戰。誠心的感謝在這段日子的所有人事物，也與大家一同分享論文完成的喜悅，感謝大家。

王思文

新竹交大
2006/7/5

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌 謝	iii
目 錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範圍.....	2
1.4 研究方法與流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 航空業者因應排程程序.....	4
2.2 因應意外事件發生之排程相關文獻.....	5
2.3 小結.....	8
第三章 模式建立與求解方法.....	9
3.1 飛航時空網路與參數設定.....	9
3.1.1 基本時空網路圖與定義求解範圍.....	9
3.1.2 節點與節線之修正.....	11
3.2 變數產生法.....	13
3.3 變數產生法在航班擾動問題之應用.....	16
3.3.1 建構主問題模式.....	16
3.3.2 產生主問題之起始變數與求解主問題.....	17
3.3.3 建構子問題.....	18
3.3.4 建構子問題範例.....	22
3.3.5 求解子問題.....	24
3.3.6 變數產生之停止條件.....	24
3.3.7 求得整數解.....	24
3.4 演算範例.....	24

第四章 範例測試.....	30
4.1 測試例題.....	30
4.2 單一機場關閉.....	31
4.2.1 機場關閉時間長短之測試.....	31
4.2.2 延遲方案之間隔時間長短之測試.....	33
4.2.3 小結.....	36
4.3 多機場同時關閉.....	36
4.3.1 機場關閉時間長短之測試.....	36
4.3.2 延遲方案之間隔時間長短之測試.....	39
4.3.3 小結.....	41
第五章 結論與建議.....	43
5.1 結論.....	43
5.2 建議.....	43
參考文獻.....	45
簡 歷	47

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	3
圖 2-1 實務上因應意外事件排程之流程	4
圖 3-1 基本時空網路圖	9
圖 3-2 時空網路求解範圍示意圖	11
圖 3-3 航班節點修正示意圖	12
圖 3-4 修正後飛航時空網路圖	13
圖 3-5 變數產生法求解流程	15
圖 3-6 起始可行變數(任務)示意圖	18
圖 3-7 子問題網路示意圖	19
圖 3-8 子問題航班方案示意圖	23
圖 3-9 航空班表範例示意圖	25
圖 3-10 求解範圍與可能執行方案示意圖	26

表目錄

表 3-1 子問題節線成本設定	21
表 3-2 子問題範例班表	22
表 3-3 子問題範例班表相關參數設定	22
表 3-4 子問題航班方案節點設定表	22
表 3-5 子問題節線設定表	23
表 3-6 範例問題相關參數設定	25
表 3-7 範例問題求解結果(1).....	27
表 3-8 子問題網路成本矩陣(1).....	27
表 3-9 範例問題求解結果(2).....	28
表 3-10 子問題網路成本矩陣(2).....	28
表 3-11 範例問題求解結果(3).....	29
表 3-12 子問題網路成本矩陣(3).....	29
表 4-1 測試範例班表—A 航空公司	30
表 4-2 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間短).....	32
表 4-3 單一機場關閉測試範例結果(機場關閉時間短).....	32
表 4-4 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間長).....	33
表 4-5 單一機場關閉測試範例結果(機場關閉時間長).....	33
表 4-6 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間短).....	34
表 4-7 單一機場關閉測試範例結果(間隔時間短).....	35
表 4-8 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間長).....	35
表 4-9 單一機場關閉測試範例結果(間隔時間長).....	36
表 4-10 多機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間短).....	37
表 4-11 多機場關閉測試範例結果(機場關閉時間短).....	38
表 4-12 多機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間長).....	38
表 4-13 多機場關閉測試範例結果(機場關閉時間長).....	39
表 4-14 多機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間短).....	40
表 4-15 多機場關閉測試範例結果(間隔時間短).....	40
表 4-16 多機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間長).....	41
表 4-17 多機場關閉測試範例結果(間隔時間長).....	41

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

自民國七〇年代以來，我國航空市場受到航空解除管制的世界潮流帶動下，已經不再受限於少數幾家航空公司所獨占經營。在激烈的競爭環境中，航空公司勢必要針對提升營運效率及服務品質兩方面多加努力，如此才能鞏固其市場地位。然而，航空公司在營運上，隨時都可能面臨許多的不確定因素導致機場關閉，使得航空公司無法按照既定的飛航時間表提供服務，致使乘客抱怨，降低其服務水準。所以，當有外在變數造成飛航班次的擾動時，正是考驗航空公司的營運效率與服務品質的時刻。

茲以二〇〇五年七月至十月期間為例，東南亞地區共計有二十多個颱風[14]，其中海棠等六個颱風侵襲台灣；美洲地區於八月底更是接連兩個颶風，造成中美地區重創；由此可知，不論在世界各地，機場關閉的情況常會發生。尤其在台灣地區，每年夏秋兩季颱風發生頻仍，一旦風勢雨勢達到一定強度，則機場也必須關閉、停止班機起降，以確保安全。特別的是，台灣地形狹長的特性，往往會因為天氣的因素，造成區域性擾動的情況發生，使得兩個以上的機場同時關閉，停止班機起降。由此可見，在這許多造成飛航班表擾動的外在變數中，因機場關閉而導致航空公司無法按照既定班表服務旅客的情況經常發生，更可能會造成原飛航班表受到嚴重的干擾。

就實務上而言，目前國內航空公司之機隊排程及班表的產生流程，仍停留在傳統半人工排程的階段，以重複試誤的方式去獲得，由排程規劃部門根據維修、航務、營運、空服和地勤等五項因素考量，以人工規劃一可行班表及機隊排程，然後與各部門進行協調。若班表不可行，則再由規劃部門重新修正草擬班表並重新排程。此傳統的規劃方法不但費時且易延誤處理時間，調整出之排程也不一定是最佳的時刻表與飛航路線，更難以有效地處理較複雜之多機種、多場站飛航即時排程問題。

造成機場突然關閉的原因甚多且常會發生。機場一旦關閉，航空班次將被擾動，造成航空業者於營運上及服務上的困擾，且目前國內實務上的飛航排程仍停留在傳統半人工排程的階段；因此，一個具有高效率的排程模式及其解法，實為航空業者所需要。然而，過去的研究當中，皆僅限於單一機場暫時性關閉排程方

法的探討，因應多機場關閉的研究卻鮮少提及；故本研究將發展一因應多機場暫時性關閉之飛航排程方法，可幫助航空公司有效地處理擾動事件影響飛航排程之問題。

1.2 研究目的

本研究將以航空公司的立場為出發點，針對當多機場同時發生暫時性關閉之情況時，發展出一因應擾動的飛航排程方法，以減少擾動所帶來的損失，並且迅速地恢復至正常營運狀態，接續原先預定的航班。同時，亦根據這個模式的特殊架構，發展一套適當的求解演算方法，並進行相關的範例驗證，提出相關的研究結果。

1.3 研究範圍

由於航空公司之規模各有不同，其經營的航線與班次頻率亦有所差異，面臨意外事件而有不同的決策考量因素[15]。本研究將針對幾項重要因素進行規範，擬定本文所探討之範圍。

意外事件發生的原因是否為航空公司本身因素所造成的，將對旅客的認知及商譽的損失產生不同的影響。本研究僅著重在因天候因素造成機場關閉之即時排程部分，作為求解方法構建以及測試之主要考量。同時，實務上機場關閉時間可根據氣象局所提供之預報資料進行評估，故本研究將事件擾動的起始時間假設為已知條件。

飛航擾動排程需考量的飛機包含三種類型：(1)已經起飛，目前在空中即將前往關閉機場的班機；(2)尚未起飛，即將飛往關閉機場的班機；(3)目前困在關閉機場當中的班機。為簡化模式構建之複雜度，本研究僅針對尚未起飛且即將飛往關閉機場的班機，與目前困在關閉機場當中的班機探討，找出滿足關閉機場之可支配飛機數量總和的最合適的方案與班表，使得擾動所帶來的損失減至最小。

除此之外，受影響之飛機類型及數量、受影響班次旅客數多寡、班次頻率、班次班距與飛航距離等相關航線特性，更須加以考量的因素。本研究為簡化模式構建之複雜度，假設受影響之飛機為單一類型機種，且均為直達的航次；並且，僅考量受影響機場之飛機總量。同時，若受影響發生地點之重要性程度，會有不同之影響層面；故本研究假設所有機場為一般機場，彼此之間之重要性相等。

至於維修人員與機組人員排班之相關排程問題，就實務上而言，業者可於飛

航排程班表完成後，再由維修部門依據各飛機狀況，安排維修時間及地點；而機組人員排班則由於飛航人員服勤的規定甚多，在實務上業者則會交由相關部門來進行規劃，或再進行初擬與調整。因此，本研究為簡化模式構建與求解之複雜度，航空器的維修人員與機組人員排班問題，不納入本研究的考量當中。

1.4 研究方法與流程

本研究以時空網路(或稱動態網路，time-space network)為基礎，發展因應意外事件之即時飛航排程方法。然而，由於此類問題對於時效迫切要求甚鉅，對於求解方法之效率非常重要，故本研究將發展一個演算法來求解該問題。

本研究流程如圖 1-1 所示，首先界定研究範圍，繼而搜尋並回顧相關文獻與了解目前航空業者之作業型態。接者，建立意外事件擾動基本排程模式，並以此基本模式發展演算法。之後，本研究以一國內航空業者於全國國內部份航線為例，進行範例測試與分析。最後根據分析結果，提出結論以及建議。

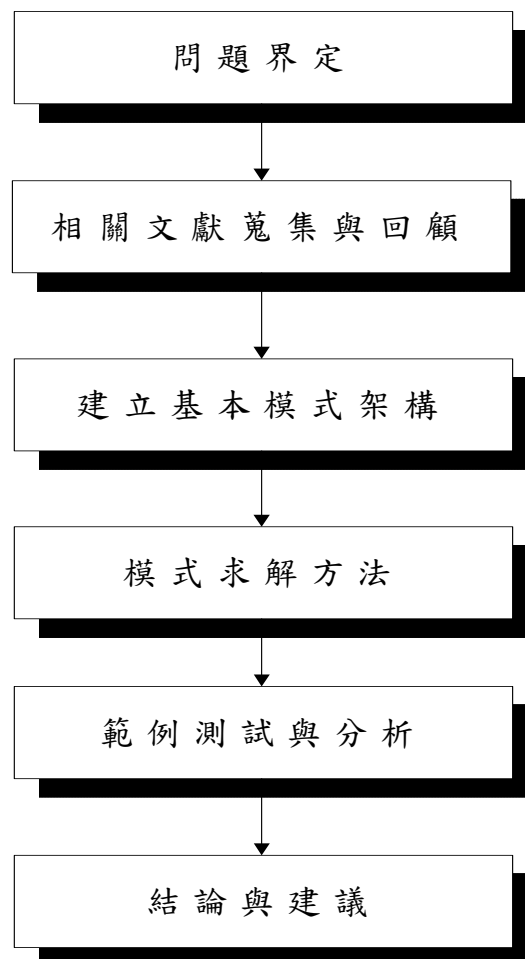


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章將針對因應意外事件發生之排程相關文獻，分別進行探討與回顧。首先探討目前實務上航空公司的因應策略，以及其考量的最佳化目標式；繼而回顧相關的文獻及其使用方法，最後整理與提出本章節之結語。

2.1 航空業者因應排程程序

實務上而言，航空公司為了因應機場暫時性關閉之意外事件發生，各自會有一套的規劃流程；不過就本質而言，均是大同小異的[7]。首先，各航空公司之聯管中心彙整資料，包含了原先的排班表、意外事件資訊及可支配的相關資源；再根據這些資料選擇因應的策略，擬定出一份飛航排程表，然後與各部門去協調排程。若排程不可行，則再由聯管中心進行重新擬定排程，直到滿意為止。如圖 2-1 所示。

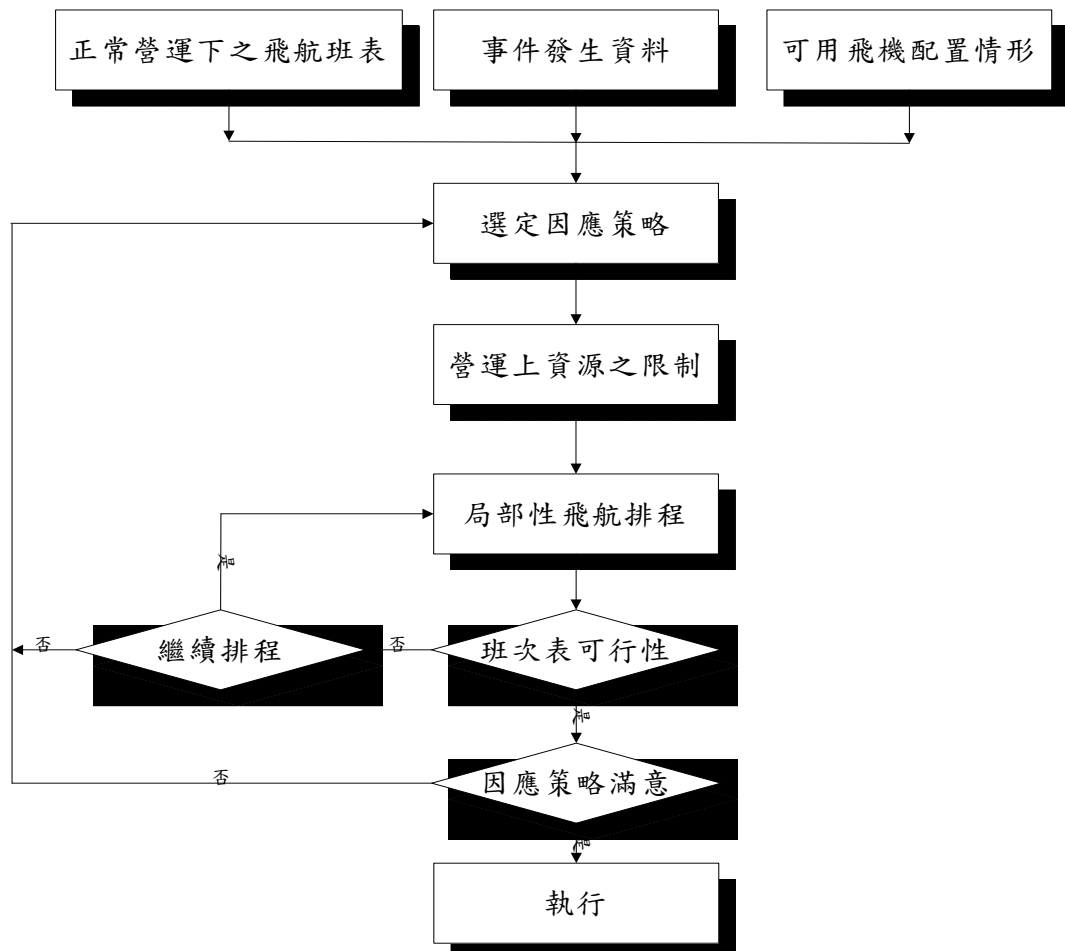


圖 2-1 實務上因應意外事件排程之流程[7]

因應策略部分，Teodorovic[11]則提出航空業者通常所採取的因應策略為：(1)取消部分航次，但不延遲起飛；(2)空渡(ferry)，即引入保留飛機加入排程中服務；(3)取消排程中所存在的航次，並延後部分航次；(4)設計一新的飛航排程，並不使用取消策略，但可接受延遲起飛的情況。同時，國內外對於意外事件發生時飛航即時排程問題的相關研究中，常利用數學模式來求解，其目標式隨著探討問題與因應策略之不同而略有差異，盧清泉[15]則大致歸納為下列四類：(1)以成本或損失最小為目標式；(2)以總旅客延滯最小為目標式；(3)以取消班次數最小為目標式；(4)以最短恢復正常運作時間為目標式。

因此，就文獻得知，自一九六〇年代開始，許多研究均紛紛投入到探討即時性排程的領域之中，整體的演變也可隨著因應策略而有所不同的求解方法。故以下將根據所使用因應策略及其求解方法而分別進行回顧。

2.2 因應意外事件發生之排程相關文獻

Jedlinsky(1967) [3]以時空網路為架構，針對事件發生時營運單位所提出的因應排程方案，將其轉換為最小成本循環網路流動問題(Minimum Cost Circulation Network Flow Problem)，然後採用 Out-of-Kilter 修正之演算法求解，選擇一較佳的方案。然而，此方法僅作範例測試，並未做實例應用，致使無法評估其實用可行性；同時，該方法求解之可行解區域相當狹隘，甚至可能為不可行方案。

Teodorovic and Guberinic(1984) [12]以總乘客延遲最小為目標，構建一系統性的調整排程模式，並以分枝定限法(Branch and Bound Method)求得在飛機短缺下的因應策略。此模式之求解方法雖可求解出最佳解，但其模式為一非線性整數規劃問題，當路網結構單純時則可以順利求得最佳解，一旦面臨複雜的路網結構或大型問題時，則求解甚為困難；相對地，則會因求解耗費時間過長，更無法達到即時性排程之實用價值。

Teodorovic(1985) [10]以飛機陸地停等時間最小為優先目標，探討因氣候因素導致機場關閉之機率問題，此問題以動態規劃法(Dynamic Programming Method)先求得在滿足最小飛機停等時間下之最少飛機數量，繼而求得滿足最小期望停等乘客數之班表。特別的是，該模式定義出一乘客因擾動受延誤影響之指標，可評估該飛航班表之受延誤影響指標值是否符合期望標準，進而求得更合適之規劃飛航班表。

Teodorovic and Stojkovic(1990) [13]以取消班次最少為優先目標，發展以動態規

劃法為基礎發展之啟發式解法來求得在飛機短缺下的因應策略。該演算法求解方法似最短路徑法，根據該目標值為基準作比較，若求得之數值較原先結果好時，則更新之。同時，若此問題其求得解非唯一解時，則選擇較少之取消乘客數之飛航策略。然而，此方法僅作範例測試，並未做實例應用，致使無法評估其實用可行性。

劉得昌(1993) [19]提出調派及滑移航次的觀念，並以 Levin(1969)單一幾種排程觀念，求得單一機種最小機隊數目下之排程，更利用動態規劃法求得各飛機巡航路線，此方法是以局部搜尋的方式來求得局部最佳解。然而，局部搜尋法對於起始解較為敏感，致使最後的結果可能較差，無法求得整個問題之最佳解，此為該方法不足之處。

Jarah et al.(1993) [2]以損失最小為目標，提出兩個含額外限制之最小成本網路流動模式(Multiple Network Flow Problem with Side Constraints)探討飛機不足時之排程策略。其中一個是以對調或延遲航次的方式，另一個則以對調或取消航次的方式。但是此研究於第一個模式仍僅局限於個別單一場站的分析，未能統合考慮所有場站的排程，更無法評估對下游場站的影響程度；並且，其無法提供調整至穩定點之時間長度。

Yan and Young(1996) [8]根據傳統之飛航即時排程流程圖，修正了飛航排程流程圖；同時以時空網路圖為架構，提出以拉式鬆弛法(Lagrangian Relaxation Method)結合網路簡捷法(Network Simplex Method)的演算法來求得飛機故障短缺下的因應策略，最後透過流量分解法(Flow Decomposition Method)得知各架飛機之航行路線。然而，該方法在求解過程中，可能會因為參數值設定不恰當，導致問題無法收斂之情況。

Yan and Yang(1996) [7]共提出四種策略模式，分別針對飛機故障短缺下，提出因應求解方法。其中，使用網路簡捷法求解取消航班的策略一，與結合取消航班或空渡的策略二；另則使用拉式鬆弛法暨次梯度法(Sub-gradient Method)求解結合取消或延遲航班的策略三，以及結合取消、延遲航班或空渡的策略四。然而，所提出的方法均僅能針對於小型或中型機隊作業，當操作於大型機隊時，則可能會發生求解困難之情況。

顏上堯及林忠機(1996) [20]將問題設計成多物品流量問題，提出三種因應機場突然暫時性關閉之策略模式，分別為(1)取消與空渡；(2)取消與延遲；(3)取消、延

遲與空渡。並且，分別透過拉式鬆弛法暨次梯度法與網路簡捷法求解，最後使用流量分解法來得知各飛機的飛航路線。

Luo and Yu(1997) [5]則是針對機場地面作業延遲部分，改善班機延誤超過十五分鐘之總架次數。該研究將問題構建成一整數問題，透過有效的不等式關係，減少整數變數的個數，最後採用啟發式解法來得到一個良好的可行解。然而，該求解方法無法得知問題求解的複雜度；此外，並針對於某特別形式之問題，設計出一多項式時間演算法。

Yan and Tu(1997) [9]針對多機種、多停靠的航班類型，提出因應飛機暫時短缺下的即時系統化排程策略。該研究將問題設計成多物品流量問題，透過拉式鬆弛法暨次梯度法與網路簡捷法來求解，同時納入了空渡、延遲與調整多停靠飛機成為直飛航線等策略。該問題設定擾動回復時間，期望能夠於最短時間內，回復到正常之飛航排程中。

Stojkovic and Soumis(2002) [6]將飛機排程、維修狀態與人員排班的概念結合，發展出一飛航排程模式，並且將問題轉化成一線性規劃模式，求得最佳解。惟獨該研究的特點在於將擾動時間的成本，設定為一加速度的概念，即停等愈久，相對地懲罰成本愈高，非一般概念之倍數成長。然而，該問題並非針對飛航的即時排程策略作一探討，其重點是在成本值更新之處。

劉方旗(1998)[18]針對市區公車排班以及即時機動調度問題，提出兩種求解方法；並且透過 GPS 訊號來得知公車的即時位置，估計車輛返回的旅行時間。在市區公車排班方面，作者將目標函數定義為客運公司之利潤，發展出單一班距及多班距兩種模式，首先找出最佳發車頻率，然後在最佳發車頻率中找最佳發車班距。在即時機動調度方面，發展一公車即時機動調度系統，系統當發現車輛無法在預定的時間回來執行下一個班次時，即啟動機動調度模式，產生調度方案供調度者參考。在模式中根據使用者給定之系統回復時間定義出機動調度路網，並將機動調度問題轉換成一集合分割的問題，同時發展一以變數產生法(Column Generation Method)為基礎的最佳化方法來產生可行之調度方案。

林家盛(2002)[17]主要為改進傳統客運業者的實務作法，考慮車輛數及其他資源之限制，發展一客運車輛機動調度系統，當發現車輛無法在預定的時間回來執行下一個任務時，即啟動機動調度模式，依照當時可用之車輛產生調度方案供調度者參考。在調度模式中，將機動調度問題轉換成一集合分割的問題，並發展一

以變數產生法為基礎的演算法來產生可行的調度方案。最後進行各種班表情境的模擬，以及實際案例的測試與修正。

2.3 小結

綜合上述，因應航空意外事件排程的文獻中，早期的研究多數以單一策略為考量，發展出適當的演算法，或是透過建構模擬模式，並且採用局部搜尋方法來求解。此方法最大的缺點在於：(1)若初始解設定得不恰當時，或是求得的初步解不適時，則會導致局部搜尋法無法求得最佳解；(2)僅採用單一策略為考量目標，無法綜合分析採用多種策略下，求得排程上的最佳策略。後來，多數學者均以系統最佳化的方式來解決即時排程的問題，並且能多重考量意外事件排程的策略。除此之外，公車客運的即時性調度也曾被大家廣泛研究，期望能夠妥善處理因尖峰時間造成班車延誤的狀況。求解方法上，則是包括了分枝定限法、動態規劃法、拉式鬆弛法、變數產生法與啟發式解法進行求解。

透過文獻回顧可得知，於多機場之飛航擾動排程研究相關文獻中，國內外仍鮮有所見。本研究將針對此類型之飛航擾動排程，提出一因應之飛航排程模式，發展適當的求解演算法，進而作更深入之探討。

第三章 模式建立與求解方法

本研究之重心在於當意外事件發生，導致機場暫時關閉時，能根據本研究所提出之排程方法，提供調度者做參考使用，以提升航空公司之整體營業效率。因此，在本章當中將針對所探討的問題作一個明確的定義，並且提出求解方法架構及模式。

3.1 飛航時空網路與參數設定

3.1.1 基本時空網路圖與定義求解範圍

由於時空網路較合於實際飛航時刻表的形式，不但更新資料容易，且易於增加考量其他相關因素；因此，我們可以將此一問題化成時空網路模式來進行研究。

圖 3-1 為基本時空網路圖，茲將網路中各元素所代表之意義說明如下：

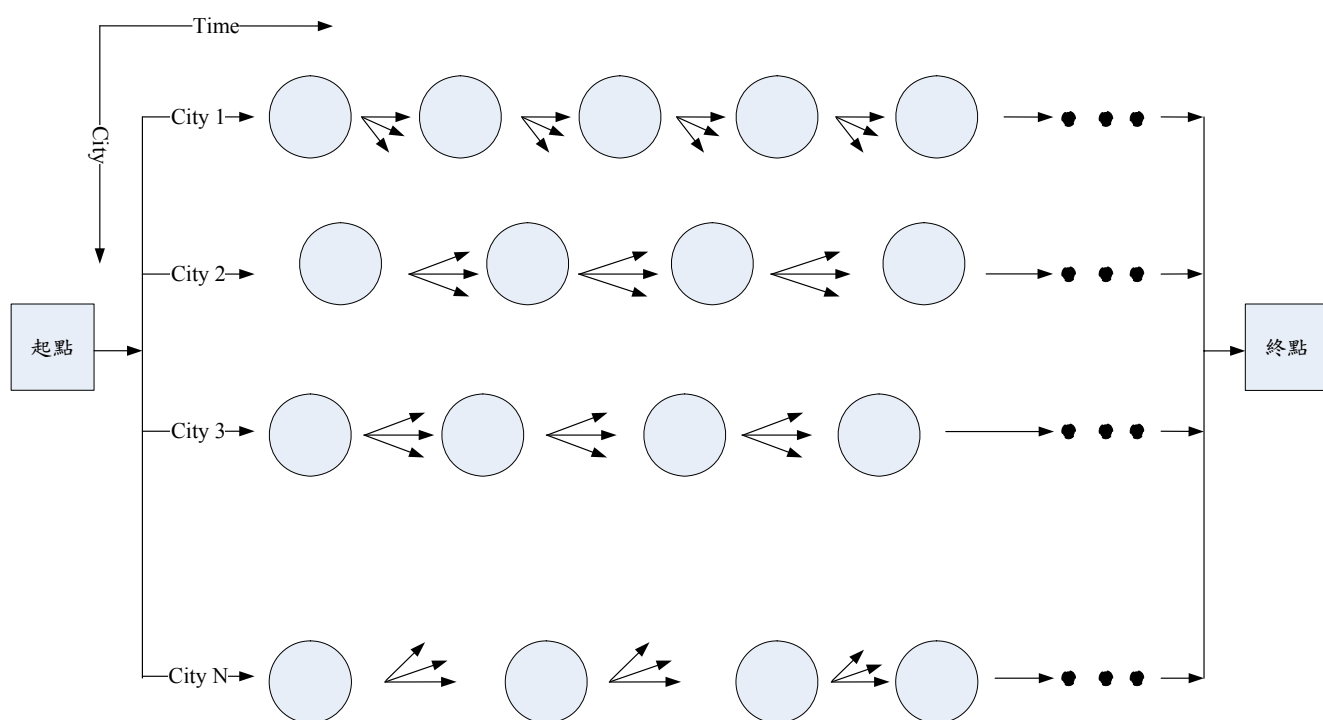


圖 3-1 基本時空網路圖

1. 橫軸：代表時間軸，表示本研究所考量之時間內的所有航班。
2. 縱軸：代表各航空站(城市)，本研究將所考量之航空站依序編號。
3. 起點(origin)：為一個虛擬點，代表營運時間開始(START)。虛擬起點之時間需設定早於機場關閉時點。

4. 終點(destination)：為一個虛擬點，代表營運時間結束(END)。虛擬迄點之時間需設定晚於班次穩定時點。
5. 航班方案節點(node)：在本研究當中，節點除了代表航班之外，另須參酌排程策略，衍伸出許多不同的可能執行方案，此一部份的修正，詳細說明於 3.1.2 小節中。
6. 節線(arc)：主要用以連接班次節點，有節線代表可行。在本研究當中，另須因應節點的修正，而產生適當的節線來相連，此一部份的修正，詳細說明於 3.1.2 小節中。
7. 任務路徑(duty path)：由可用連續節線所組合而成，其表示某飛機於一段時間內所執行的航班集合。

在基本時空網路圖中，隨著時間不斷向前推移，已經執行完的班次會自動從班次網路中刪除，時空網路之規模亦愈小；不過，當該擾動被啟動的時間愈早時，則路網的規模愈大。因此，為了達到即時回應擾動的排程方法需求，不可能對整個時空網路進行求解，我們另需定義擾動開始線(機場關閉時點)、擾動結束線(機場開放時點)與班次穩定線等三時點參數，該參數值可由調度者自行輸入。此三條線主要是界定出班次表中需要納入考量之路網範圍，使得求解時的路網規模縮小，並且能夠涵蓋所有可能被調度之班次，如圖 3-2 所示，虛線框的範圍即是所需要調度的路網範圍。茲將各時點之設定所代表之意義說明如下：

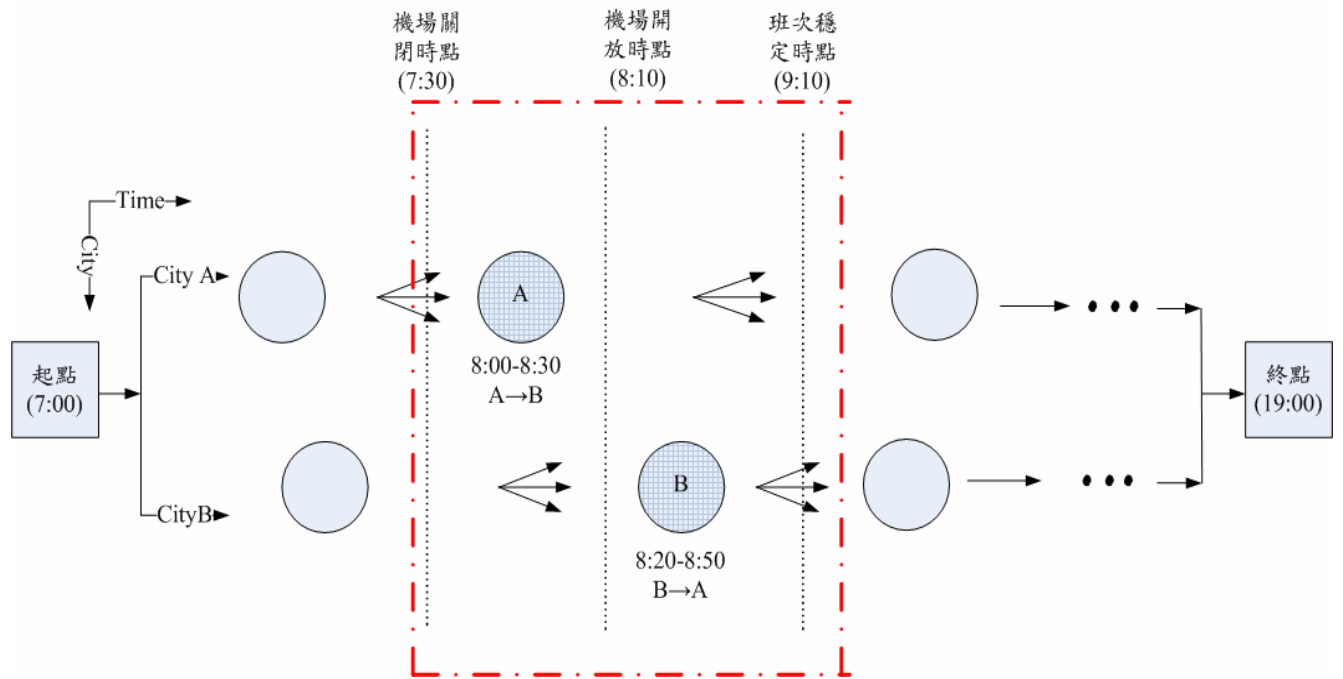


圖 3-2 時空網路求解範圍示意圖

1. 擾動開始線：擾動開始線為機場關閉的時間點，即為航空公司班表開始調整的時間。若航班調度者需要一小段時間來進行調整，則更可以設定該線時間為機場關閉時間點再加上此調整時間，為擾動開始線的時間。
2. 擾動結束線；當開始線之參數值確定後，對各航班方案而言，擾動開始線至終點之各航班皆可被視為調度路網之範疇；然而，為讓系統能夠於短時間內提供調度方案，我們必須對於路網之結束點的時間有所限制，以免調度路網過大，而花費太多運算時間。因此，本研究定義出擾動結束線，其功能在界定機場預期重新開放的時間，也就是擾動結束線之後的班次，又可接受適當的排程方案來進行。
3. 穩定線：穩定線之主要功能，在於表示該線之後的所有班次，皆可按照原先所預定之航班時間來進行。穩定線的計算是以擾動結束線之時間，加上最大容忍回復時間，而最大容忍時間值亦是由調度者輸入之參數之一。

3.1.2 節點與節線之修正

本小節當中，將針對本研究因應機場關閉所提出的排程方案，對於時空網路圖中的節點與節線作部份修正，分別說明如下：

1. 節點：每個班次皆有開始時間(ST)、結束時間(ET)與目的地(DEST)等屬

性，表示飛機必須在 ST 由該航空站出發，執行完所屬班次後，預計於 ET 到達 DEST 航空站，接續執行下一個班次點。

若航班點之出發時間，恰落在機場關閉時點與班次穩定時點之間，且其出發場站或是目的地場站亦為擾動場站時，則該航班點屬於本研究界定的求解範圍中。因此，為了表示該航班點之各種可能排程方案，除了代表原先預定的航班時間外，更納入了航班延遲節點或航班取消節點，如圖 3-3 所示。茲以圖 3-2 中虛線框內的點 A 與 B 為例，詳述如下：

(1). 航班點落在機場關閉時點與機場開放時點之間：如同 A 點

(8:00-8:30)，因此原先預訂航班出發時間(8:00)因機場關閉而無法執行任務，必需等到機場重新開放後(8:10)始能安排新的航班時間，但是為了能夠讓取消航班可與其它延遲航班相連接，因此取消航班之出發時間設定為機場開放時點減去整備時間(8:00)。故該點在修正後的網路中，則包含了各種延遲時間(若延遲間隔時間為 30 分鐘，則各延遲出發時間分別為 8:10、8:40、9:10)與取消航班(8:00)等方案。

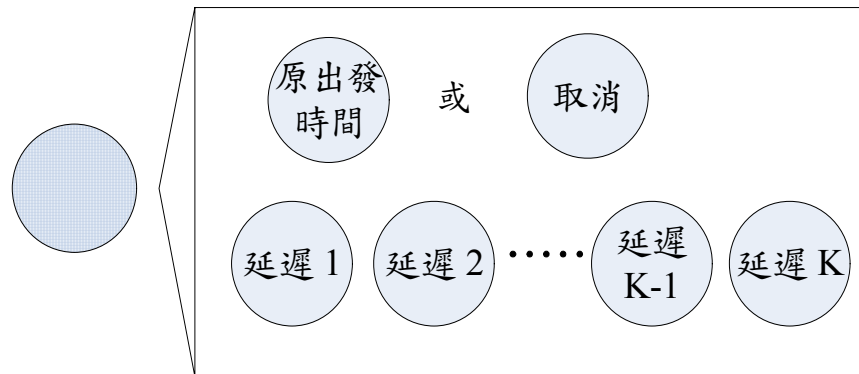


圖 3-3 航班節點修正示意圖

(2). 航班點落在機場開放時點與班次穩定時點之間：如同 B 點

(8:20-8:50)，即機場開放至班表穩定時間當中，若取消該航班時，則會引起乘客的不滿；但是，為了能夠盡量服務先前取消航班的旅客，可能會策略性的延遲部分航班。因此，除了包含原出發時間(8:20)外，也是包含了各種延遲時間(8:50)等方案。

由此可知，假設機場開放時點至班表穩定時間為 T ，延遲航班點 $K-1$ 與 K 的出發時間相差 t 分鐘，則得知每個航班點最多會有 $\lfloor \frac{T}{t} \rfloor + 1$ 種方案；但是，若延遲點 K 的出發時間超過班表穩定時間，則不納入考量。因此，圖 3-2 中的每一個航班點，會衍生出不同的航班點方案；圖 3-4 即為圖 3-2

修正後的飛航時空網路圖。

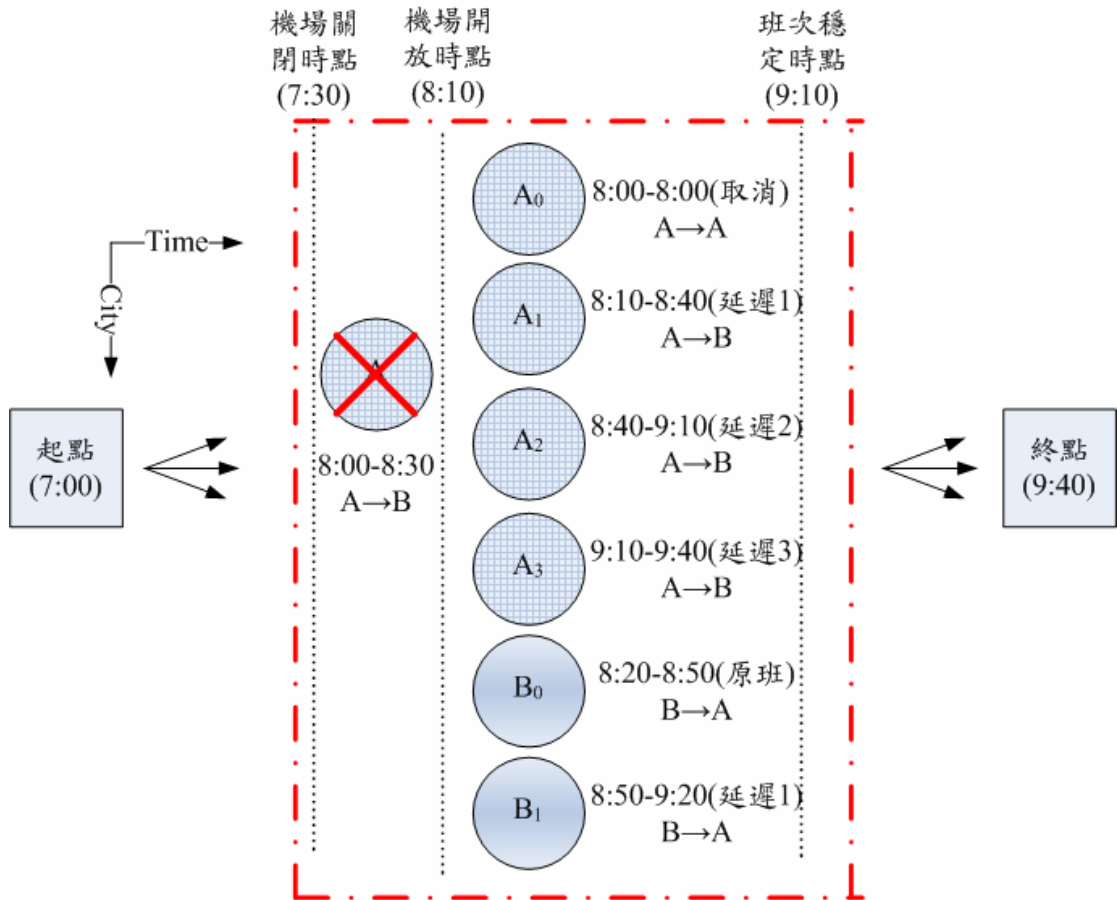


圖 3-4 修正後飛航時空網路圖

2. 節線：主要用以連接兩可相接的節點。連接條件說明如下：

- (1). 虛擬起點至各航班任務點均可相連。
- (2). 各航班任務點均可與虛擬迄點相連。
- (3). 各航班方案點 i 、 j 而言，若航班方案 i 之預期到達時間 ET_i + 整備時間 \leq 接續航班方案 j 之出發時間 ST_j ，且班次 i 的目的地與班次 j 的出發地相同，則該飛機執行 i 班次後可接著執行 j 班次；即兩方案點可以連接節線。

3.2 變數產生法

本研究將此問題以集合分割的模式來表示，所構建之數學模式為一整數規劃問題，若以傳統之分枝定限法來求解，因為該模式可能具有非常多的變數，則會有求解時間過長的缺點。因此，我們採用變數產生法來求解飛航擾動排程的問題。

在本節當中，將介紹變數產生法的基本觀念，繼而在 3.3 節中說明本研究將如何運用變數產生法求解航班擾動問題。

變數產生法是由 Dantzig and Wolfe[1]所提出的方法，所以又稱為 Dantzig-Wolfe Decomposition。其概念是利用線性規劃中的對偶理論(Dual Theory)來產生可改善目標值的變數(columns)，希望找到可能改善目標值的變數。

變數產生法常應用於求解具許多變數的線性規劃問題(Linear Programming Problems)，例如集合分割問題(Set Partition Problem)與集合涵蓋問題(Set Covering Problem)。以下就以集合分割問題之求解來說明變數產生法的應用概念，在此假設一個集合分割問題定式為：

$$\text{Minimize } \sum_{r \in R} c_r x_r \quad (3-1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{r \in R} a_{k,r} x_r = 1 \quad \forall k \in K \quad (3-2)$$

$$x_r \in \{0,1\} \quad r \in R \quad (3-3)$$

利用變數產生法將上述問題集合分割問題分為主問題(Primal Problem)與子問題(Sub Problem)。首先，放鬆(3-3)的整數限制式，使主問題成為線性規劃問題。然後針對主問題，以人工方式或啟發式解法找到一組包含起始可行解的變數；再利用簡捷法(Simplex Method)求解主問題目前所包含變數的最佳解，主問題之對偶問題(Dual Problem)如(3-4)所示，求得所對應的對偶變數(定義為 π_k)。

<p>(Primal)</p> $\begin{aligned} \text{Min. } & \sum_{r \in R} c_r x_r \\ \text{S.T. } & \sum_{r \in R} a_{k,r} x_r = 1 \quad \forall k \in K \\ & x_r \geq 0 \quad r \in R \end{aligned}$	<p>(Dual)</p> $\begin{aligned} \text{Max. } & \sum_{k \in K} \pi_k \\ \text{S.T. } & \sum_{k \in K} a_{k,r} \pi_k \leq c_r \\ & \pi_k \text{ free} \end{aligned} \quad (3-4)$
--	---

在子問題當中，通常將子問題構建為最短路徑問題(Shortest Path Problem)。將主問題得到的對偶變數值傳入子問題中，求解子問題期望以產生對主問題目標值有改善的變數(columns)，加入主問題中重新求解。重複以上的步驟，逐步改善主問題的解，直到無法再產生可改善目標值的變數為止，便得到最佳解。子問題求得的變數是否可以改善目標值，主要是依據對偶可行性(Dual feasibility)的觀念。由(3-4)式可知，如果其他尚未考慮的變數均滿足判別式 $c_r - \sum_{k \in K} a_{k,r} \pi_k \geq 0$ ，表示求得

最佳解，也就是這些尚未考慮的變數皆對主問題的目標值沒有改善。否則，我們繼續從尚未考慮的變數中尋找可使判別式 $c_r - \sum_{k \in K} a_{k,r} \pi_k < 0$ 成立的變數，以改善目標值的變數。如果主問題最後所得到的最佳解為整數解，則原集合分割問題的最佳解；若不為整數解，則採用分枝定限法以獲得整數解。其變數產生法整個求解流程如圖 3-5 所示。

變數產生法的優點在於，求解時僅考慮部分的變數，透過子問題來產生一些對主問題可改善目標值的變數，以增進求解的效率。不過，在整個求解過程當中，包含了數個關鍵議題，如圖 3-5 虛線框所示，包含構建主問題、產生足夠的起始變數、建構子問題，設定子問題節線成本與求解子問題等項目，我們將在後續的內容當中，介紹變數產生法是如何應用到航班擾動問題，並且分別介紹這些課題的求解方法。

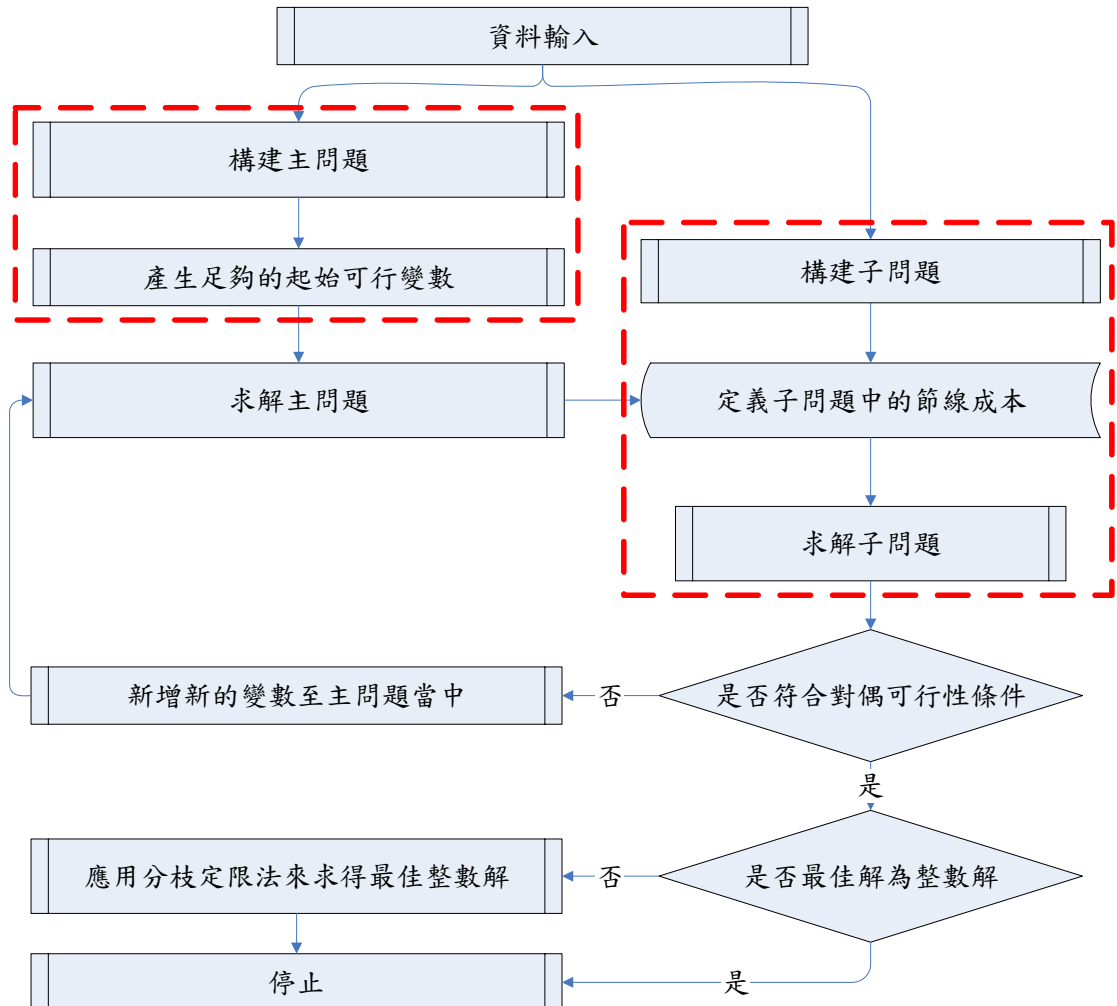


圖 3-5 變數產生法求解流程

3.3 變數產生法在航班擾動問題之應用

3.3.1 建構主問題模式

我們於 3.1.2 小節界定出路網求解範圍後，本研究即在此一路網範圍中求解出最佳的排程方案。我們將問題視為一集合分割的問題，在此路網中找出一組成本最小的任務集合，使得擾動排程路網中所有的班次皆被執行一次且只能一次。

茲以數學模式來更清楚的描述本研究飛航擾動排程之問題。首先，定義每個符號所代表的涵義：

f : 航班

F : 所有航班所成的集合； $f \in F$

ST_f : 航班 f 在班表中預定之出發時間

ET_f : 航班 f 在班表中預定執行完畢之時間

RT_f : 航班 f 之基本維護時間； $ET_f + RT_f \leq ST_{f+1}$

k : 航班 f 之任一出發時間方案

K_f : 航班 f 之不同出發時間方案的集合

d : 任務，在一個時間段內飛機所執行之航班 f_k^f 序列。如： $d_1 = \{f_2^1, f_0^3, f_1^2\}$

D : 所有任務之集合

c_d : 任務成本，在一個時間段內飛機所執行航班序列中的成本。

CL_d : 任務是否包含取消航班，若有則等於 1，反之則為 0。

N_F : 可支配飛機數量上限。 N_F 必須大於等於執行機場開放時間至班表穩定時間內所有航班的最小航空器數量。

S : 虛擬起點，代表營運時間的開始。

T : 虛擬迄點，代表營運時間的結束。

本研究的決策變數為 x_d ，表示任務路徑 d 是否有被選擇；若 $x_d = 1$ 表示在最佳解當中包含 x_d 。因此，我們可將問題之數學模式表示如下：

$$\text{Minimize } \sum_{d \in D} c_d x_d \quad (3-5)$$

$$\text{Subject to } \sum_d a_{id} x_d = 1 \quad i \in K_f, d \in D \quad (3-6)$$

$$\sum_{d \in D} -a_d x_d \geq -N_F \quad (3-7)$$

$$x_d \in \{0,1\} \quad (3-8)$$

目標式(3-5)在於最小化排程方案之總成本。限制式(3-6)表示最佳排程方案必須涵蓋路網當中的所有航班，且同一航班僅能由一任務所執行；若 x_d 任務採用 f 航班時，則 $a_{id}=1$ ；反之則為 0。限制式(3-7)表示最佳排程方案所需的航空器數量必須小於等於可支配的航空器總數量；若 d 為單一航班任務，且該航班恰為取消方案時(如：起點→A 航班點取消方案→終點)，則 $a_d = 0$ ；反之則為 1。我們可將主問題之對偶問題表示如下，將限制式(3-6)之對偶變數值設定為 π_i ，(3-7)之對偶變數值設定為 π_{N_F} ：

$$\text{Maximize } \sum_i \pi_i - \pi_{N_F} \cdot N_F \quad (3-9)$$

$$\text{Subject to } \sum_i a_{id} \pi_i - a_d \pi_{N_F} \leq c_d \quad i \in K_f, d \in D \quad (3-10)$$

$$\pi_i \text{ free}, \pi_{N_F} \geq 0 \quad (3-11)$$

3.3.2 產生主問題之起始變數與求解主問題

根據飛航時刻表，若原航班點出發時間落在機場關閉時點與機場開放時點之間，則採用單一航班取消任務，意即假設一架飛機僅執行一個班次，且該班次為取消航班方案；如 3-6 圖中起點經 A_0 至終點此任務。若原航班點出發時間落在機場開放時點與班次穩定時點之間，則採用原飛航時刻表的任務連接安排；如 3-6 圖中起點經 B_0 至終點此任務。由於取消航班任務不需飛機執行，且採用原飛航時刻表的任務連接安排必能符合可支配飛機數量限制(N_F 的下限值)，所以起始解也可以滿足限制式(3-7)。如此，這些變數即可構成起始的可行解，且利用簡捷法求解主問題目前所包含變數之最佳解，並得到此時對偶問題中的對偶變數值。

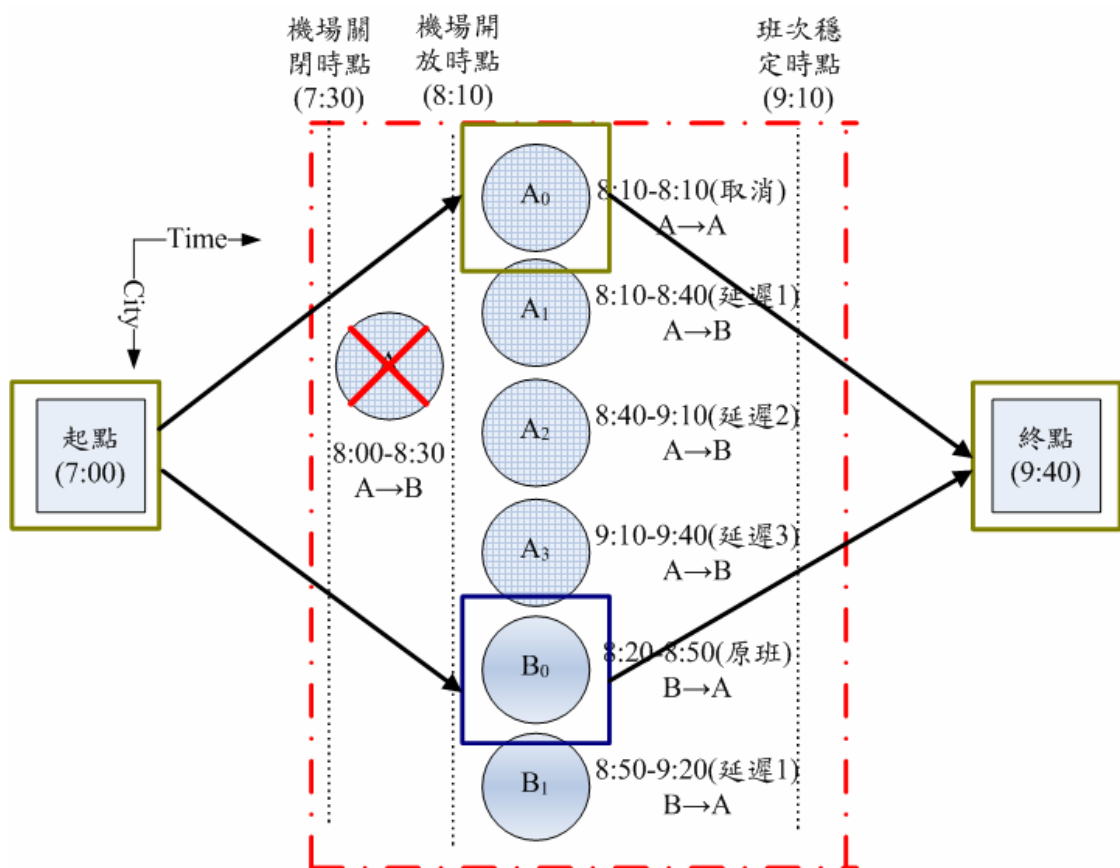


圖 3-6 起始可行變數(任務)示意圖

3.3.3 建構子問題

根據變數產生法的概念，透過子問題的構建來產生一些變數加入到主問題當中，以改善解的品質。因此，我們根據飛航時空網路構建出一個最短路徑問題模式，以找到改善主問題目標值之任務(變數，columns)。首先，我們定義出一個飛航排程的網路。節點包含了起點、終點與各航班方案點；並在節點之對應節線上指派適當的成本。以下即以圖 3-7 之網路示意圖來說明子問題。

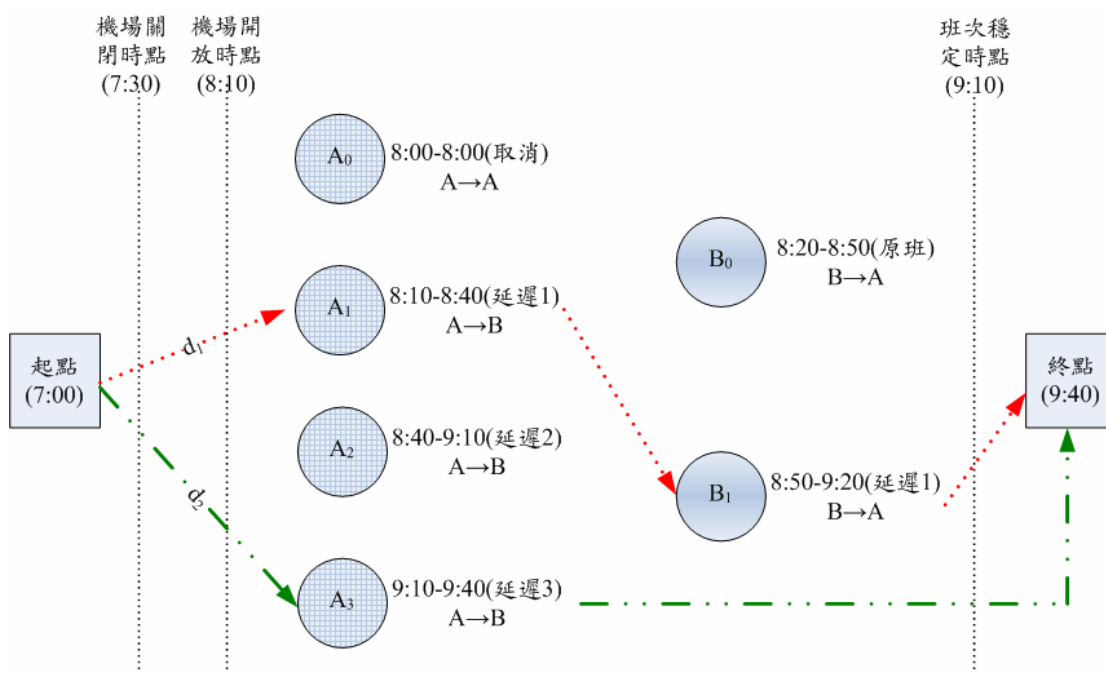


圖 3-7 子問題網路示意圖

假設圖 G 為整個網路， N 表示節點的集合， A 為節線的集合。因此， G 可以定義為 $G = (N, A)$ 。茲將其網路結構詳述如下：

1. 節點(Nodes)：

- (1). 節點 N 共可以分為：虛擬起點、虛擬迄點、各航班方案點(包含原先所安排的時間、延遲點、取消點)、迄點。
- (2). 虛擬起點表示求解網路的開始時間，其必須早於機場關閉時間；虛擬迄點表示求解網路的結束時間，其必須晚與班表穩定時間。參數值可由管理者自行設定。
- (3). 各航班方案點之時間設定可參考 3.1.2 小節所述。
- (4). 每一個航班節點會記錄個基本屬性：航班編號、航班開始時間、航班預計到達時間、航班出發場站編號、航班目的地場站編號。

2. 節線(Arcs)：

- (1). 節線 A 共可分為：起點到任何航班方案點、航班方案點至終點、航班點至航班點。
- (2). 其節點之間是否有節線相連以及節線的方向之原則，可參考 3.1.2 小節所述。

3. 節線成本(Cost)：

子問題即是在該路網中產生最短路徑，該路徑之成本為所經過的節線的成本加總；而每一條節線的成本設定必須滿足本研究之對偶問題的對偶可行性條件。假設 c_j 為第 j 個變數的影子價格(Shadow Price)，則

$$\begin{aligned} c_j &= c_d - \left(\sum_i a_{id} \pi_i - a_d \pi_{N_F} \right) = c_d - \sum_i a_{id} \pi_i + a_d \pi_{N_F} \\ &= \sum_i a_{id} c_{id} - \sum_i a_{id} \pi_i + a_d \pi_{N_F} = \sum_i a_{id} (c_{id} - \pi_i) + a_d \pi_{N_F} \end{aligned} \quad (3-12)$$

由(3-12)可知各節線之相關成本，必須將對偶變數值 π_i 與 π_{N_F} 適當地分配，相關設定分述如下：

- (1). 停滯成本：以 C_{idle} 表示，其為兩個連續的節點相隔的停滯成本。例如：節點 i 的到達時間為 ET_i ，節點 j 的出發時間為 ST_j ，則兩節點之停滯時間為 $ST_j - ET_i$ 。其主要是為了要避免在相同的任務路徑當中，包含了兩個停滯時間太長的連續節點。但是，若航班點到達時間超過虛擬迄點時間，與迄點之相連節線之成本設定為 0。
- (2). 延遲成本：以 D_j 表示，表示航班實際出發時間與原定班表時間的間隔。 $D_j = (\text{Actual}) ST_j - (\text{Initial Scheduled}) ST_j$ 。例如：當接續航班 j 不是依循原定的班表時間執行任務時，則會發生延遲，此時該航班與接續航班 j 的相連節線 (i, j) 成本則需加入 D_j 。
- (3). 取消成本：以 CL_j 表示，表示航班取消的懲罰成本。當接續航班 j 為取消航班任務時，此時該航班與接續航班 j 的節線 (i, j) 成本則需加入 CL_j 。
- (4). 對偶變數值：該值可分成兩部份，單一任務限制式(3-6)之對偶變數值 π_i ，與可支配飛機數量限制式(3-7)之對偶變數值 π_{N_F} 。詳述如下：
 - ①. 單一任務限制式(3-6)之對偶變數值(π_i)：由該式可知，同一航班僅能由一任務(方案)所執行。然而，該限制式可能會納入不同的執行方案，以圖 3-7 之 A 點為例，任務 d_1 採用 A_1 方案，任務 d_2 採用 A_3 方案。因此，我們設定求解子問題過程中，經過 A 航班點的各種方案點(如： A_1 或 A_3)均採用 A 航班點限制式的對偶值， π_A 。
 - ②. 可支配飛機數量限制式(3-7)之對偶變數值(π_{N_F})：由於該限制式

會直接影響航班方案的選擇，若忽略該限制式之對偶變數值，則會影響子問題的求解結果。同時，若 $a_d = 1$ 時，則表示採計該對偶變數值，若 $a_d = 0$ 則反之。因此，我們設定求解子問題過程中，若該航班點為取消點時，則該點與終點相連接之節線成本設定為 0；反之，若該航班點為一般任務點時，則該點與終點相連接之節線成本設定為 π_{N_F} 。

由於本研究之網路成本設定為節線成本，透過以上各項節點成本的構成元素，將構成子問題網路當中不同類型的節線所對應的成本值。表 3-1 中則顯示子問題中各種類型節線的對應成本。

表 3-1 子問題節線成本設定

類型	上游點(i)	下游點(j)	節線成本(c_{ij})
A	起點	航班點(原航班)	$-\pi_j$
B	起點	航班點(延遲)	$D_j - \pi_j$
C	起點	航班點(取消)	$CL - \pi_j$
D	航班點	航班點(原航班)	$T_{idle} - \pi_j$
E	航班點	航班點(延遲)	$T_{idle} + D_j - \pi_j$
F	航班點	航班點(取消)	$T_{idle} + CL - \pi_j$
G	航班點(取消)	迄點	0
H	航班點(非取消)	迄點	π_{N_F}

4. 任務路徑(Path)：

由以上所述的原則即可建立變數產生法的子問題網路結構。建立網路之後，可透過節點與節線之連接關係，找出一架飛機所需執行的任務路徑與成本。如圖 3-7 中，我們可以得知由起點至迄點的許多可行路徑，如

$$d_1 : S \rightarrow A1 \rightarrow B1 \rightarrow T$$

$$d_2 : S \rightarrow A3 \rightarrow T$$

而路徑的成本則為經過節線的成本總和， $\sum_{i,j \in V} c_{ij} - \sum_{j \in V} \pi_j$ ，其中 V 為此路徑經過節點所成的集合。然而，求解子問題係為了得知主問題對應之對偶問題的最佳解，期望改善主問題目標值的程度最大；此時，本研究所構建網路由 S 到 T 有許多的可能路徑(任務)供選擇，我們希望得知的是由 S 到 T 的最短路徑，求得之最短路徑即為對偶問題之最佳解。因此，子問題可視為最短路徑

問題，求解子問題所獲得的最短路徑即是一個可行的任務(變數，column)。

3.3.4 建構子問題範例

本節當中，將以一個小型範例說明子問題網路之構建過程。範例班表如表 3-2 所示：

表 3-2 子問題範例班表

編號	出發時間	預計到達時間	出發場站	目的場站
1	8:00	8:30	A	B
2	8:20	8:50	B	A

我們設定以下相關參數，如表 3-3 所述。透過相關參數設定，可以得到本研究問題之求解範圍，並且參照所設定的參數，加入各航班點的可能執行方案，如表 3-4、圖 3-8 所示。

表 3-3 子問題範例班表相關參數設定

參數名稱項目	設定值
機場關閉—重新開放時間	7:30 — 8:10
預設班表穩定時間	9:10
虛擬起點—迄點時間	7:00 — 9:30
取消航班成本	500
基本維修時間	10分鐘
延遲班次間隔時間	30分鐘
可支配飛機數量上限	2架

表 3-4 子問題航班方案節點設定表

編號	方案別	出發時間	預計到達時間	出發場站	目的場站	備註
1	原方案	8:00	8:30	A	B	不可行
1-1	取消(A ₀)	8:00	8:00	A	A	
1-2	延遲1(A ₁)	8:10	8:40	A	B	
1-3	延遲2(A ₂)	8:40	9:10	A	B	
1-4	延遲3(A ₃)	9:10	9:40	A	B	
2	原方案(B ₀)	8:20	8:50	B	A	可行
2-1	延遲1(B ₁)	8:50	9:20	B	A	

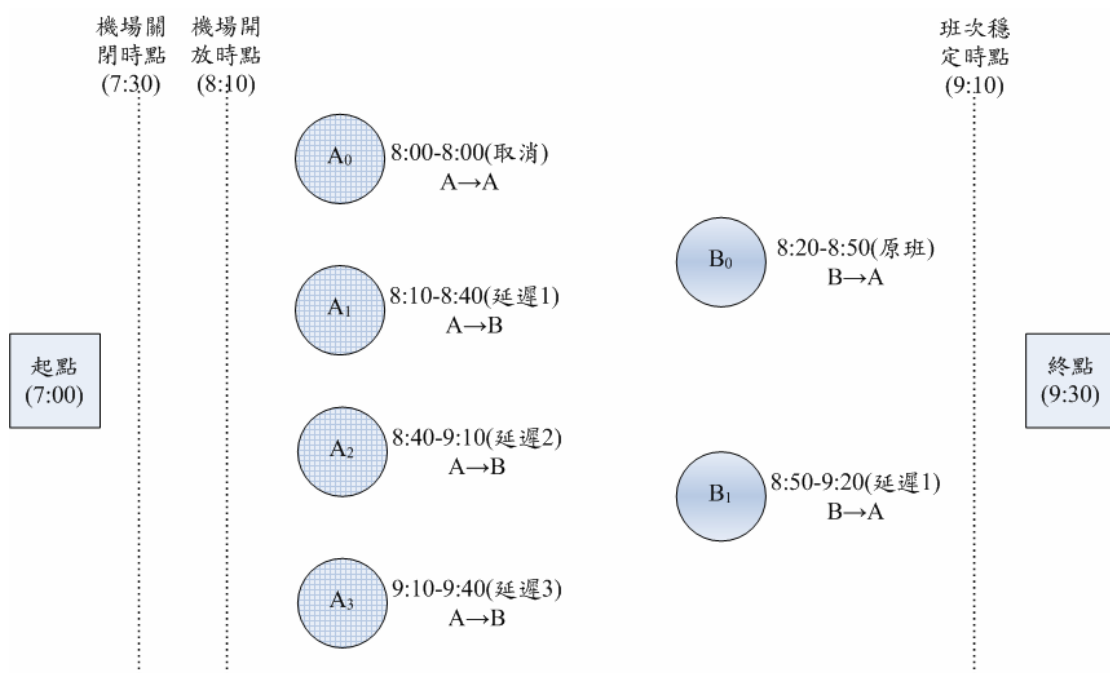


圖 3-8 子問題航班方案示意圖

透過節點之定義，我們可以設定節點之間的連接情況，以及各節線之對應成本。如表 3-5 所示。

表 3-5 子問題節線設定表

編號	節線起點	節線迄點	成本設定	成本值
1	S	A_0	$CL - \pi_j$	$500 - \pi_A$
2	S	A_1	$D_j - \pi_j$	$10 - \pi_A$
3	S	A_2	$D_j - \pi_j$	$40 - \pi_A$
4	S	A_3	$D_j - \pi_j$	$70 - \pi_A$
5	S	B_0	$-\pi_j$	$-\pi_B$
6	S	B_1	$D_j - \pi_j$	$30 - \pi_B$
7	A_0	T	T_{idle}	70
8	A_1	T	T_{idle}	50
9	A_2	T	T_{idle}	20
10	A_3	T	0	0
11	B_0	T	T_{idle}	40
12	B_1	T	T_{idle}	10
13	A_0	A_1	$T_{idle} + D_j - \pi_j$	$-\pi_A$
14	A_0	A_2	$T_{idle} + D_j - \pi_j$	$60 - \pi_A$
15	A_0	A_3	$T_{idle} + D_j - \pi_j$	$120 - \pi_A$
16	A_1	B_1	$T_{idle} + D_j - \pi_j$	$40 - \pi_B$
17	A_0	T	0	0

表 3-5 子問題節線設定表(續)

編號	節線起點	節線迄點	成本設定	成本值
18	A ₁	T	π_{N_F}	π_{N_F}
19	A ₂	T	π_{N_F}	π_{N_F}
20	A ₃	T	π_{N_F}	π_{N_F}
21	B ₀	T	π_{N_F}	π_{N_F}
22	B ₁	T	π_{N_F}	π_{N_F}

3.3.5 求解子問題

於節點、節線、成本矩陣構建完成後，開始求解子問題，即求解最短路徑。每一條最短路徑便為一任務。由於本研究所建構的路網節線成本可能會成為負值，當該值為負時表示若選取該點將改善主問題之目標值；因此，使用 Label Correcting Algorithm(Ford(1946), Moore(1957), Bellman(1958))之最短路徑演算法來求解子問題，找出對主問題目標值改善最大的任務組合。

3.3.6 變數產生之停止條件

求解子問題之最短路徑，若找到具有負值成本的變數，(以 3.3.5 演算法為例， $\text{Cost}(T) = c_d - \sum_i a_{id}\pi_i + a_d\pi_{N_F} < 0$)，表示該變數可改善主問題目標值成本；則將該變數加入至主問題模式當中，其係數則設定為 $\text{Cost}(T) + \sum_{j \in V} \pi_j - \pi_{N_F}$ 。但是，當子問題所求得的變數具有正值成本($c_d - \sum_i a_{id}\pi_i + a_d\pi_{N_F} \geq 0$)時，即可判定子問題已無法再找到可以改善主問題之變數，而此時主問題求得的解即為最佳解。

3.3.7 求得整數解

本研究利用變數產生法將主問題構建成一放鬆整數限制的集合分割問題，所求得的最佳解不一定為整數解。因此，利用求得最佳解的主問題模式，並加入 0-1 整數限制，然後利用分枝定限法求解，直到找到整數解為止。所找到的整數解便為一個可行的航班時刻表。

3.4 演算範例

本節當中，將以一個小型範例說明本研究應用變數產生法於航班受機場關閉擾動時，求解因應排程方法之求解過程。範例班表如圖 3-9 所示：

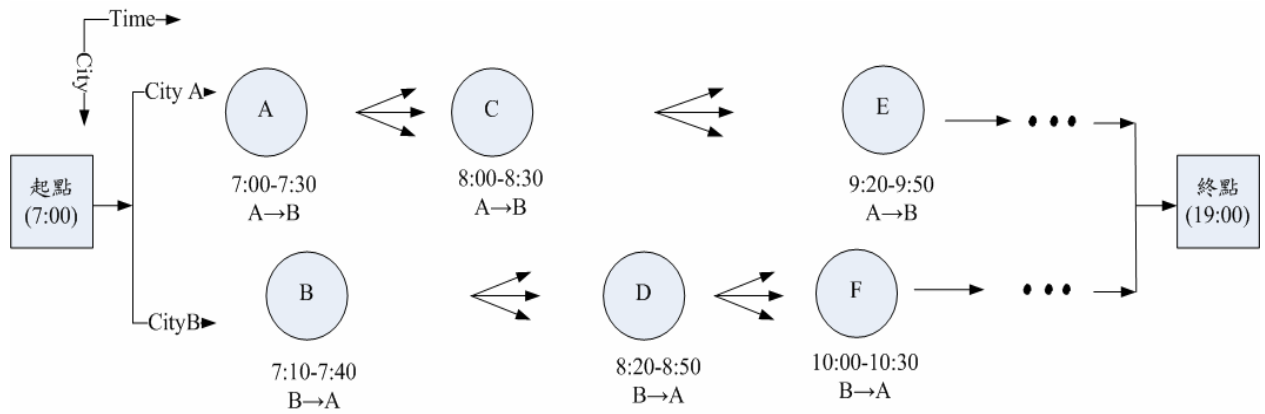


圖 3-9 航空班表範例示意圖

我們設定以下相關參數，如表 3-6 所述。透過相關參數設定，可以得到本研究問題之求解範圍，並且參照所設定的參數，加入各航班點的可能執行方案，如圖 3-10 所示。

表 3-6 範例問題相關參數設定

參數名稱項目	設定值
機場關閉－重新開放時間	7:30 — 8:10
預設班表穩定時間	9:10
虛擬起點－迄點時間	7:00 — 9:30
取消航班成本	500
基本維修時間	10分鐘
延遲班次間隔時間	30分鐘
可支配飛機數量上限	3架

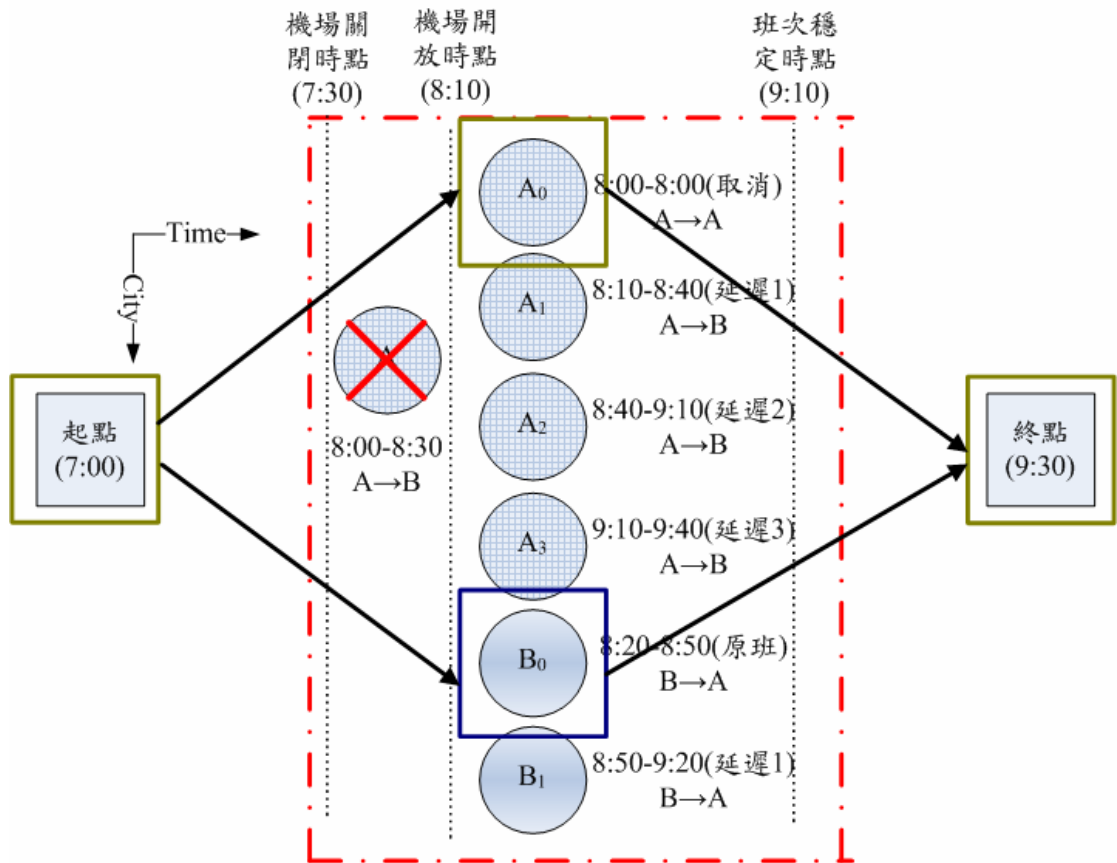


圖 3-10 求解範圍與可能執行方案示意圖

首先，我們設定初始可行變數。在可支配飛機數量限制下，我們假設一架飛機執行一個任務，即任務 x_1 僅執行 A_0 之取消航班方案($S \rightarrow A_0 \rightarrow T$)，任務 x_2 僅執行 B_0 之原航班方案($S \rightarrow B_0 \rightarrow T$)。而 x_1 任務之目標值係數為 500(取消成本)， x_2 任務則為 0。此時，我們可將問題之線性放鬆模式表示如下：

$$\text{Minimize } 500x_1 + 0x_2 \quad (3-9)$$

$$\text{Subject to } 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 = 1 \quad (\text{航班點 A}) \quad (3-10)$$

$$0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 = 1 \quad (\text{航班點 B}) \quad (3-11)$$

$$0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 \leq 3 \quad (\text{飛機數量上限}) \quad (3-12)$$

求得結果如表 3-7 所示，並進行子問題求解：

表 3-7 範例問題求解結果(1)

項目		數值
決策變數值	x_1	1
	x_2	1
限制式對偶變數值	(3-10)	500
	(3-11)	0
	(3-12)	0

Step1：經由表 3-7 可得子問題網路之成本矩陣值，如表 3-8 所示。

表 3-8 子問題網路成本矩陣(1)

成本	S	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	B ₀	B ₁	T
S	0	0	-490	-460	-430	0	30	∞
A ₀	∞	0	-480	-420	-360	∞	∞	0
A ₁	∞	∞	0	∞	∞	∞	40	0
A ₂	∞	∞	∞	0	∞	∞	∞	0
A ₃	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	0
B ₀	∞	∞	∞	∞	-410	0	∞	0
B ₁	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	0
T	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0

Step2：利用 Label Correcting Algorithm 求解子問題。 $\text{Cost}(T) = -490 < 0$ ，將此任務組合 $S \rightarrow A_1 \rightarrow T$ 加入至主問題數學模式中求解。更新後之數學模式表示如下，求得結果如表 3-9 所示。

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & 500x_1 + 0x_2 + 10x_3 \\ \text{Subject to} \quad & 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 = 1 \\ & 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 = 1 \\ & 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 \leq 3 \end{aligned}$$

表 3-9 範例問題求解結果(2)

項目		數值
決策變數值	x_1	0
	x_2	1
	x_3	1
限制式對偶變數值	(3-10)	500
	(3-11)	0
	(3-12)	0

Step3：經由表 3-9 可得子問題網路之成本矩陣值，如表 3-10 所示。

表 3-10 子問題網路成本矩陣(2)

成本	S	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	B ₀	B ₁	T
S	0	0	-490	-460	-430	0	30	∞
A ₀	∞	0	-480	-420	-360	∞	∞	0
A ₁	∞	∞	0	∞	∞	∞	40	0
A ₂	∞	∞	∞	0	∞	∞	∞	0
A ₃	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	0
B ₀	∞	∞	∞	∞	-410	0	∞	0
B ₁	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	0
T	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0

Step4：利用 Label Correcting Algorithm 求解子問題。Cost(T) = $-490 < 0$ ，將此任務組合 $S \rightarrow A_1 \rightarrow T$ 加入至主問題數學模式中求解。更新後之數學模式表示如下，求得結果如表 3-11 所示。

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & 500x_1 + 0x_2 + 10x_3 + 10x_4 \\ \text{Subject to} \quad & 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 + 1 \cdot x_4 = 1 \\ & 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 0 \cdot x_4 = 1 \\ & 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 + 1 \cdot x_4 \leq 3 \end{aligned}$$

表 3-11 範例問題求解結果(3)

項目		數值
決策變數值	x_1	0
	x_2	1
	x_3	1
	x_4	0
限制式對偶變數值	(3-10)	10
	(3-11)	0
	(3-12)	0

Step5：經由表 3-11 可得子問題網路之成本矩陣值，如表 3-12 所示。

表 3-12 子問題網路成本矩陣(3)

成本	S	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	B ₀	B ₁	T
S	0	490	0	30	60	0	30	∞
A ₀	∞	0	10	70	120	∞	∞	0
A ₁	∞	∞	0	∞	∞	∞	40	0
A ₂	∞	∞	∞	0	∞	∞	∞	0
A ₃	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	0
B ₀	∞	∞	∞	∞	80	0	∞	0
B ₁	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	0
T	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0

Step6：利用 Label Correcting Algorithm 求解子問題。Cost(T) \geq 0。因此，此問題已經得到一最佳解。

Step7：最佳解方案為 S \rightarrow A₁(8:10，延遲 10 分鐘)T、S \rightarrow B₀(8:20，原時間) \rightarrow T。
最佳解成本為 10。演算步驟結束！

第四章 範例測試

在本章當中，我們主要探討航班受機場關閉影響的因應排程方法，透過變數產生法求解實際問題之可行性與正確性。因此，我們採用國內 A 航空公司之班表做測試範例，分別針對單一機場關閉與多機場同時關閉之情況，以機場關閉時間長短、延遲方案之間隔時間長短等測試項目進行討論。

本研究使用 Microsoft Visual C++ 6.0 撰寫演算法，變數產生法中求解主問題之簡捷法，及求解整數解之分枝定限法則採用 CPLEX 6.0 函式庫所提供之求解功能。

4.1 測試例題

在本研究中所使用之測試例題乃是取自於易飛網之班表查詢網頁[16]，於 2006 年 4 月 25 日台北、花蓮、高雄之飛航班表；詳細班表如表 4-1 所示。我們將根據此班表，分別針對單一場站關閉、多場站同時關閉兩種情況，分別針對各情況來進行相關參數之測試與分析，以驗證本研究所發展的排程求解方法之可行性。

表 4-1 測試範例班表－A 航空公司

班次	起飛時間	到達時間	出發地	目的地
EF191	11:50	12:45	高雄	花蓮
EF192	10:20	11:15	花蓮	高雄
EF091	06:55	07:30	台北	花蓮
EF093	09:10	09:45	台北	花蓮
EF099	15:15	15:50	台北	花蓮
EF092	08:00	08:35	台北	花蓮
EF096	13:15	13:50	花蓮	台北
EF100	16:20	16:55	花蓮	台北
EF066	18:55	19:30	花蓮	台北
EF101	07:20	08:10	台北	高雄
EF103	08:25	09:15	台北	高雄
EF105	09:30	10:20	台北	高雄
EF107	11:00	11:50	台北	高雄
EF111	12:10	13:00	台北	高雄
EF113	13:35	14:25	台北	高雄
EF115	14:40	15:30	台北	高雄

表 4-1 測試範例班表－A 航空公司(續)

班次	起飛時間	到達時間	出發地	目的地
EF117	16:15	17:05	台北	高雄
EF119	17:05	17:55	台北	高雄
EF121	18:00	18:50	台北	高雄
EF1121	18:30	19:20	台北	高雄
EF123	20:00	20:50	台北	高雄
EF125	20:50	21:40	台北	高雄
EF102	07:00	07:50	高雄	台北
EF106	08:50	09:40	高雄	台北
EF108	09:45	10:35	高雄	台北
EF110	10:50	11:40	高雄	台北
EF112	12:20	13:10	高雄	台北
EF114	13:30	14:20	高雄	台北
EF116	14:55	15:45	高雄	台北
EF118	16:00	16:50	高雄	台北
EF122	17:35	18:25	高雄	台北
EF1122	18:30	19:20	高雄	台北
EF124	19:20	20:10	高雄	台北
EF1124	20:00	20:50	高雄	台北
EF126	21:15	22:05	高雄	台北

4.2 單一機場關閉

我們首先將針對上述班表，進行單一機場關閉的相關測試與分析。首先，我們設定關閉機場為台北，設計數種測試情境，由於班表回復時間為愈短愈好，且實務上通常有該公司之期望時間；因此，本研究僅分別針對機場關閉時間長段以及延遲方案之間隔時間長短來進行測試與結果分析。相關之測試如下所述：

4.2.1 機場關閉時間長短之測試

本測試當中，主要係針對機場關閉時間之長短來進行測試與說明。分別以關閉時間短、長兩種情況來分別測試，詳細測試環境參數與結果，分述如下：

1. 機場關閉時間短(1 小時)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為上午 11:00，預設班表穩定時間為下午 12:00。基

本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 5 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-2 所示：

表 4-2 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間短)

關閉時間	10:00-11:00
關閉場站	台北
班表穩定	12:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	5 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-3 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 2 個，經過求解過後，共有 2 個任務組合須執行，即需要兩架飛機來支援。

表 4-3 單一機場關閉測試範例結果(機場關閉時間短)

受影響航班點個數	2
子問題原航班點之最多考量方案個數	14
目標值	10
變數個數	4
所需飛機數量	2 架
窮舉法之最佳解目標值	10
求解任務組合	
1. EF107(11:00，原時間) 2. EF110(11:00，延 10 分)	

2. 機場關閉時間長(8 小時)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為下午 6:00，預設班表穩定時間為下午 7:00。基本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 5 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-4 所示：

表 4-4 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間長)

關閉時間	10:00-18:00
關閉場站	台北
班表穩定	19:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	5 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-5 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 20 個，經過求解過後，共有 10 個任務組合須執行，即需要十架飛機來支援。

表 4-5 單一機場關閉測試範例結果(機場關閉時間長)

受影響航班點個數	20
子問題原航班點之最多考量方案個數	14
目標值	3886
變數個數	52
所需飛機數量	10 架
窮舉法之最佳解目標值	3886
最佳解任務組合	
1. EF121(18:00，原時間) 2. EF110(17:50，取消) 3. EF122(18:00，延 25 分) → EF119(19:00，延 1 時 55 分) 4. EF118(18:00，延 2 時) → EF099(19:00，延 3 時 45 分) 5. EF116(18:00，延 3 時 5 分) → EF 117(19:00，延 2 時 45 分) 6. EF114(18:00，延 4 時 30 分) → EF 115(19:00，延 4 時 20 分) 7. EF096(18:00，延 4 時 45 分) → EF 113(18:45，延 5 時 10 分) 8. EF112(18:00，延 5 時 40 分) → EF 111(19:00，延 6 時 50 分) 9. EF065(18:00，延 10 分) → EF 066(18:55，原時間) 10. EF100(18:00，延 1 時 40 分) → EF 1121(18:45，延 15 分) 11. EF107(18:00，延 7 時) → EF 1122(19:00，延 30 分)	

4.2.2 延遲方案之間隔時間長短之測試

本測試當中，主要係針對延遲方案時間之長短來進行測試與說明。分別以

間隔時間短、長兩種情況來分別測試，詳細測試環境參數與結果，分述如下：

1. 間隔時間短(5 分鐘)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為上午 1:00，預設班表穩定時間為下午 2:00。基本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 5 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-6 所示：

表 4-6 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間短)

關閉時間	10:00-13:00
關閉場站	台北
班表穩定	14:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	5 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-7 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 7 個，經過求解過後，共有 7 個任務組合須執行，即需要七架飛機來支援。

表 4-7 單一機場關閉測試範例結果(間隔時間短)

受影響航班點個數	7
子問題原航班點之最多考量方案個數	14
目標值	340
變數個數	15
所需飛機數量	7 架
窮舉法之最佳解目標值	340
最佳解任務組合	
1. EF096(13:15，原時間) 2. EF113(13:35，原時間) 3. EF114(13:30，原時間) 4. EF110(13:00，延 2 時 10 分) 5. EF107(13:00，延 2 時) 6. EF112(13:00，延 40 分) 7. EF111(13:00，延 50 分)	

2. 間隔時間長(30 分鐘)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為下午 3:00，預設班表穩定時間為下午 4:00。基本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 30 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-8 所示：

表 4-8 單一機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間長)

關閉時間	10:00-13:00
關閉場站	台北
班表穩定	14:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	30 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-9 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 7 個，經過求解過後，共有 7 個任務組合須執行，即需要七架飛機來支援。

表 4-9 單一機場關閉測試範例結果(間隔時間長)

受影響航班點個數	7
子問題原航班點之最多考量方案個數	4
目標值	340
變數個數	15
所需飛機數量	7 架
窮舉法之最佳解目標值	340
最佳解任務組合	
1. EF096(13:15, 原時間) 2. EF113(13:35, 原時間) 3. EF114(13:30, 原時間) 4. EF110(13:00, 延 2 時 10 分) 5. EF107(13:00, 延 2 時) 6. EF112(13:00, 延 40 分) 7. EF111(13:00, 延 50 分)	

4.2.3 小結

透過上述之測試，可以發現不論是針對機場關閉時間長短，或是延遲方案間隔時間長短，均能夠透過本研究之演算方法，得到一個因應單一機場關閉之適當排程方案來因應；且與窮舉法比較，透過本方法求得的解之目標值與窮舉法之最佳解目標值無異。

在機場關閉時間長短的測試中，當關閉時間愈長時，相對考量之航班方案點會隨之增加，若可支配之飛機數量不變時，所需之飛機數量也會愈多，甚至可能必須取消部分航班。同時，在延遲方案間隔時間長短的測試中，當間隔時間愈短時，所能考量的執行方案也會隨著增加許多，航班飛機任務組合的長度也會增加，減少單一航班任務的情況發生。

4.3 多機場同時關閉

我們將針對上述班表，進行多機場同時關閉的相關測試與分析。首先，我們設定關閉機場為台北、高雄，設計數種測試情境，由於班表回復時間為愈短愈好，且實務上通常有該公司之期望時間；因此，本研究僅分別針對機場關閉時間長段以及延遲方案之間隔時間長短來進行測試與結果分析。相關之測試如下所述：

4.3.1 機場關閉時間長短之測試

本測試當中，主要係針對機場關閉時間之長短來進行測試與說明。分別以關閉時間短、長兩種情況來分別測試，詳細測試環境參數與結果，分述如下：

1. 機場關閉時間短(1 小時)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為上午 11:00，預設班表穩定時間為下午 12:00。基本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 5 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-10 所示：

表 4-10 多機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間短)

關閉時間	10:00-11:00
關閉場站	台北、高雄
班表穩定	12:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	5 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-11 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 4 個，經過求解過後，共有 4 個任務組合須執行，即需要四架飛機來支援。

表 4-11 多機場關閉測試範例結果(機場關閉時間短)

受影響航班點個數	4
子問題原航班點之最多考量方案個數	14
目標值	50
變數個數	8
所需飛機數量	4 架
窮舉法之最佳解目標值	50
最佳解任務組合	
1. EF191(11:50，原時間) 2. EF107(11:00，原時間) 3. EF110(11:00，延 10 分) 4. EF192(11:00，延 40 分)	

2. 機場關閉時間長(8 小時)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為下午 6:00，預設班表穩定時間為下午 7:00。基本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 5 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-12 所示：

表 4-12 多機場關閉測試範例之相關參數設定(機場關閉時間長)

關閉時間	10:00-18:00
關閉場站	台北、高雄
班表穩定	19:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	5 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-13 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 22 個，經過求解過後，共有 10 個任務組合須執行，即需要十架飛機來支援。

表 4-13 多機場關閉測試範例結果(機場關閉時間長)

受影響航班點個數	22
子問題原航班點之最多考量方案個數	14
目標值	4825
變數個數	53
所需飛機數量	10 架
窮舉法之最佳解目標值	4825
最佳解任務組合	
1. EF192(17:50，取消) 2. EF110(17:50，取消) 3. EF118(18:00，延 2 時) → EF099(19:00，延 3 時 45 分) 4. EF116(18:00，延 3 時 5 分) → EF117(19:00，延 2 時 45 分) 5. EF114(18:00，延 4 時 30 分) → EF 115(19:00，延 4 時 20 分) 6. EF096(18:00，延 4 時 45 分) → EF 113(18:45，延 5 時 10 分) 7. EF112(18:00，延 5 時 40 分) → EF111(19:00，延 6 時 50 分) 8. EF065(18:00，延 10 分) → EF 066(18:55，原時間) 9. EF107(18:00，延 7 時) → EF 191(19:00，延 7 時 10 分) 10. EF119(18:00，延 55 分) → EF 1122(19:00，延 30 分) 11. EF122(18:00，延 25 分) → EF 1121(19:00，延 30 分) 12. EF100(17:50，取消) → EF 121(18:45，延 45 分)	

4.3.2 延遲方案之間隔時間長短之測試

本測試當中，主要係針對延遲方案時間之長短來進行測試與說明。分別以間隔時間短、長兩種情況來分別測試，詳細測試環境參數與結果，分述如下：

1. 間隔時間短(5 分鐘)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為上午 1:00，預設班表穩定時間為下午 2:00。基本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 5 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-14 所示：

表 4-14 多機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間短)

關閉時間	10:00-13:00
關閉場站	台北、高雄
班表穩定	14:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	5 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-15 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 9 個，經過求解過後，共有 9 個任務組合須執行，即需要九架飛機來支援。

表 4-15 多機場關閉測試範例結果(間隔時間短)

受影響航班點個數	9
子問題原航班點之最多考量方案個數	14
目標值	570
變數個數	21
所需飛機數量	9 架
窮舉法之最佳解目標值	570
最佳解任務組合	
1. EF096(13:15，原時間) 2. EF113(13:35，原時間) 3. EF114(13:30，原時間) 4. EF191(13:00，延 1 時 10 分) 5. EF110(13:00，延 2 時 10 分) 6. EF192(13:00，延 2 時 40 分) 7. EF107(13:00，延 2 時) 8. EF111(13:00，延 50 分) 9. EF112(13:00，延 40 分)	

2. 間隔時間長(30 分鐘)：設定機場關閉時間設定為上午 10:00，預期機場重新開放時間設定為下午 3:00，預設班表穩定時間為下午 4:00。基本保養維修時間為 10 分鐘，設定延遲方案間隔時間為 30 分鐘，最多可支配飛機數量為 10 架。相關參數之設定如表 4-16 所示：

表 4-16 多機場關閉測試範例之相關參數設定(間隔時間長)

關閉時間	10:00-13:00
關閉場站	台北、高雄
班表穩定	14:00
維修時間	10 分鐘
延遲方案間隔時間	30 分鐘
可支配飛機數量	10 架
取消航班懲罰成本	500

根據前述相關參數設定後，經由本研究所設計之演算法求解結果如表 4-17 所示。求解結果顯示，原班表中受到影響的航班共有 9 個，經過求解過後，共有 9 個任務組合須執行，即需要九架飛機來支援。

表 4-17 多機場關閉測試範例結果(間隔時間長)

受影響航班點個數	9
子問題原航班點之最多考量方案個數	4
目標值	570
變數個數	21
所需飛機數量	9 架
窮舉法之最佳解目標值	570
最佳解任務組合	
1. EF096(13:15，原時間) 2. EF113(13:35，原時間) 3. EF114(13:00，延 40 分) 4. EF191(13:00，延 1 時 10 分) 5. EF110(13:00，延 2 時 10 分) 6. EF192(13:00，延 2 時 40 分) 7. EF107(13:00，延 2 時) 8. EF111(13:00，延 50 分) 9. EF112(13:00，延 40 分)	

4.3.3 小結

透過上述之測試，可以發現不論是針對機場關閉時間長短，或是延遲方案間隔時間長短，均能夠透過本研究之演算方法，得到一個因應單一機場關閉之適當排程方案來因應；且與窮舉法比較，透過本方法求得的解之目標值與窮舉

法之最佳解目標值無異。

在機場關閉時間長短的測試中，當關閉時間愈長時，相對考量之航班點會隨之增加；若可支配之飛機數量不變時，所需之飛機數量也會愈多，甚至可能必須取消部分航班。同時，在延遲方案間隔時間長短的測試中，當間隔時間愈短時，所能考量的執行方案也會隨著增加許多，航班飛機任務組合的長度也會增加，減少單一航班任務的情況發生。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究之目的在於以航空公司的立場為出發點，針對當多機場同時發生暫時性關閉之情況時，發展出一因應擾動的飛航排程方法，以減少擾動所帶來的損失，並且迅速地恢復至正常營運狀態，接續原先預定的航班。在排程模式建立方面，本研究將航空擾動排班問題建構為集合分割問題模式，並針對此模式設計一演算法求解航空擾動排班問題。求解演算法主要是透過變數產生法進行求解。

在變數產生法求解階段，為了能夠找到可行解與較好的整數解，我們將主問題定是為集合涵蓋問題放鬆整數限制之線性規劃問題，並以簡捷法加以求解，獲得每一個航班點的對偶變數值。另一方面，在我們的子問題的設計當中，我們根據飛航時空網路構建出一個本研究所需求解的範圍，並且修正節點與節線，將各種不同的排程方案納入其中，利用 Label Correcting Algorithm 進行求解。如此重複進行直到沒有新的可行任務產生為止。對於變數產生法所得之結果，如果為整數解則求解結束，否則以分枝定限法來求取整數解。

利用上述求解流程，本研究以 A 航空公司 2006 年 4 月 25 日之部份班表進行測試，結果顯示本研究所提出之求解方法，不論是在單一或是多機場關閉時，均能求得一滿足可支配飛機數量限制之排程方案，且與窮舉法之結果比較，所求得之目標值無異。

5.2 建議

在本研究中，雖然演算法求解結果能符合本研究之限制，但是對於研究成果而言，在完整性上仍稍有不足。首先，本研究是以航空公司的觀點來求解此問題，期望能夠透過不同方案的納入，妥善安排受擾動的航空站皆能以合適的排程方案來因應，提高服務品質。然而，目前許多航空公司之間均有形成同業結盟，彼此之間的航班接能夠相互支援，因此，此類問題也可以透過不同的角度來求分析求解，相對地，模式構建與求解方法將會隨之不同，往後的研究可以將此類型的問題，透過各種角度來進行分析求解。

本研究的求解過程中，因應機場的關閉情況，加入了取消航班、延遲航班等兩種排程策略。過去文獻當中，亦有學者提出空渡等不同的方法，建議往後的研

究中可加入不同的排程策略組合至模式當中，使得整體模式與求解方法更臻完備。

同時，在本研究之模式構建中，將班表求解範圍設定為固定之大小，未來可將機場開放時間點、班表穩定時間點設定為一變動之參數，以因應各種突發狀況，且能得到滿意解。最後，建議未來可納入機組人員與維修人員等相關排程，使得求解結果更能符合現實狀況之運作。

參考文獻

- [1] Dantzig, G. B., and P. Wolfe, “The decomposition algorithm for linear programming”, *Operations Research*, 8, pp.101-111. 1960.
- [2] Jarrah, A.I., Yu, G., Krishnamurthy, N. and Rakshit, A., “A decision support framework for airline flight cancellations and delays”, *Transportation Science*, Vol.27, No.3, August, pp.266-280, 1993.
- [3] Jedlinsky, D.C., “The effect of interruptions on airline schedule control”, Massachusetts Institute of Technology, August, 1967.
- [4] Larson, R. and A. Odoni, *Urban Operations Research*, Prentice Hall, 1981.
- [5] Luo, S., Yu, G., “On the airline schedule perturbation problem caused by the ground delay problem”, *Transportation Science*, Vol.31, No.4, November, pp.298-311, 1997.
- [6] Stojkovic, G., Soumis, F., Desrosiers, J., Solomon, M.M., “An optimization model for a real-time flight scheduling problem”, *Transportation Research Part A*, Vol.36, pp.779-788, 2002.
- [7] SY Yan, DH Yang, “A decision support framework for handling schedule perturbation”, *Transportation Research Part B*, Vol.30, No.6, pp.405-419, 1996.
- [8] SY Yan, HF Young, “A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling”, *Transportation Research Part A*, Vol.30, No.5, pp.279-298, 1996.
- [9] SY Yan, YP Tu, “Multifleet routing and multistop flight scheduling for schedule”, *Europe Journal of Operational Research*, Vol.103, pp.155-169, 1997.
- [10] Teodorovic, D., “A model for designing the meteorologically most reliable airline schedule”, *Europe Journal of Operational Research*, Vol.21, pp.156-164, 1985.
- [11] Teodorovic, D., *Airline Operation Research*, Gordon and Breach Science Publishers, 1988.
- [12] Teodorovic, D., Guberinic, S., “Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation”, *Europe Journal of Operational Research*, Vol.15, pp.178-182, 1984.
- [13] Teodorovic, D., Stojkovic, G., “Model for operational daily airline scheduling”,

Transportation planning and technology, Vol.14, pp.273-285, 1990.

- [14] 交通部中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/V5/index.htm>。
- [15] 汪進財、盧清泉，“臨時飛航事件班機調度因應策略之研究”，*運輸計畫季刊*，第二十五卷，第二期，255~288 頁，民國八十五年。
- [16] 易飛網，<http://www.ezfly.com/>。
- [17] 林家盛，“客運車輛機動調度演算法之研究”，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國九十二年六月。
- [18] 劉方旗，“市區公車排班與即時機動調度之研究—以新竹客運為例”，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十七年六月。
- [19] 劉得昌，“實用班機排程方法”，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十二年六月。
- [20] 顏上堯、林忠機，“因應機場突然且暫時性關閉之系統性飛航排程”，*運輸計畫季刊*，第二十五卷，第二期，289~316 頁，民國八十五年。

簡 歷



姓名：王思文

籍貫：台北市

出生日期：民國 71 年 05 月 10 日

聯絡地址：台北市文山區溪口街 107 巷 1 弄 3 號 2 樓

學 歷：

民國 95 年 6 月 國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班畢業

民國 93 年 6 月 國立交通大學運輸科技與管理學系畢業

民國 89 年 6 月 台北市立中正高級中學畢業

民國 86 年 6 月 台北市立景美國民中學畢業

民國 83 年 6 月 台北市立溪口國民小學畢業