

純檢修資格航機修護人力供給模式之建立¹

A MODEL FOR AIRCRAFT MAINTENANCE MANPOWER SUPPLY OF UNIFORM CERTIFICATES

顏上堯 Shangyao Yan²

陳玉菁 Yi-Jin Chen³

(90 年 11 月 1 日收稿，91 年 1 月 22 日修改，91 年 10 月 8 日定稿)

摘 要

對航空公司而言，如何使航機修護工作能有效率且確實，以確保航機在飛行中的安全，並能配合該公司營運飛航班表的準時起降，是一項重要的課題。傳統航空公司維修部門對於修護人員的排班上，係基於人工經驗，以簡單的排班及輪班規則進行修護人員的排班。此排班方式除費時外，往往無法與實際營運所需的修護需求相配合，易導致人力供需不均衡的現象。本研究針對純檢修資格的航機修護人力供給問題，構建一整數規劃模式，並運用 CPLEX 套裝數學規劃軟體求解模式，以期幫助航空公司的修護部門有效率地規劃修護人員之排班。最後，本研究以國內之一航空公司實際的修護資料為例，進行模式之測試與分析，初步結果顯示模式的效果良好。

關鍵詞：修護計畫；人力供給；純檢修資格；整數規劃問題

-
1. 本研究承國科會專題補助(NSC90-2211-E-008-046)，謹此致謝。作者感謝二位審查委員寶貴的修正意見，使本文更為完整與嚴謹。作者亦感謝陳宣宏先生幫助蒐集資料與校正文章。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授兼系主任(聯絡地址為 320 中壢市五權里中大路 300 號中央大學土木工程學系)。
 3. 國立中央大學土木工程學系碩士。

ABSTRACT

It is essential for airlines to efficiently perform aircraft maintenance in order to ensure aviation safety and punctuality. In tradition, the maintenance scheduling, based on staff's experiences, was performed using a simple rule, which is not only time-consuming but also ineffective. In particular, the resulting manpower supply does not easily meet the minimum requirements, possibly causing imbalance between supply and demand. In this research, we develop an integer programming model and use the mathematical programming solver, CPLEX to help airlines efficiently and effectively plan their aircraft maintenance schedules and manpower supplies of uniform certificates for examining a set of aircraft types. Finally, to evaluate the model developed in the research, we perform a case study using the operating data from a major Taiwan airline. The preliminary results show that the model could be useful.

Key Words: *Maintenance scheduling; Manpower supply; Uniform certificates; Integer programming*

一、緒 論

航空公司的維修部門是確保其航機能安全營運的關鍵部門。在維修部門中，航機的修護規劃，是相當重要的一環。良好的航機修護計畫不但可確保航機的飛行安全，更可使航空公司的飛航營運順暢。隨著營運航線及航機規模不斷的擴充下，航空公司對於航機之即時修護工作效率更為重視。因此，如何使航機修護工作能有效率且確實，以確保航機在飛行中的安全，並能配合該公司營運飛航班表的準時起降，對航空公司的維修部門而言，是一項重要且急迫的課題。

一般航空公司所需進行的停機線航機維修項目包括：飛行前檢修、過境檢修、每日檢修及各級的定期維修等項。其中各級的定期維修往往需要一至數日不等的時間，且飛機須停留在維修廠站中進行維修。此類的維修工作時程多以先行排定維修時間的方式，滯地進行維修。其他三項維修項目(為方便起見，以下簡稱為短期滯留修護項目)：飛行前檢修、過境檢修、每日檢修等工作，為每一航機於各航次起飛前或落地後所必須進行之修護項目。在進行短期滯留修護項目工作時，飛機多半停留於機門進行修護，其進行修護的時間較定期檢修的工作時間短(通常僅為 1 至 2 小時)，並且必須配合航機的飛航營運班次進行修護時間的安排。對於修護部門來說，每日需要執行短期滯留修護工作的實際線上工作量，不但會隨航空公司的營運航次數及航機數量增加而增加，且在修護工作的進行上，具有一定的修護時間限制及一定修護需求量的負

荷，故須配合各航機的飛航營運班次以及修護工廠的維修人員供給情形，以進行航機修護計畫的規劃。由於影響航機修護計畫的因素甚多，因此實務上，定期與短期滯留修護的工作一般分開規劃，以降低問題的複雜度。

另外，在修護人員的檢修資格上，修護人員可能具有一種或多種機型的檢修資格。因此在多機型修護人力的供給上，有分純檢修資格及混合檢修資格的人力供給方式。前者指將相同檢修資格的人力先分群，並將屬該群可維修機型之需求量累加，再規劃此群所需的人力。後者則混合不同群檢修資格的人力，規劃所有機型所需的修護需求人力。至於單機型的修護人力供給，因無需具多重機型檢修資格的人力，故可屬純檢修資格的人力供給問題。

在航空公司實務上，完整的短期滯留航機修護計畫，一般分為三部分進行規劃。第一部分：根據各航機的營運飛航班表與其預定之各項修護排程(包括各停機線航機維修項目：飛行前檢修、過境檢修、及每日檢修和各維修項目之順序關係)，求出各航機的修護計畫班表。第二部分：修護工廠方面，根據第一部分所得之各航機的修護班表，求得各天各時段各航機機型的修護需求，以進行各值勤班次(包含開始時點、可修護機型等資訊)及各值勤班次修護人力的供給規劃。第三部分：根據修護人力供給規劃的結果進行修護人員的指派工作，將符合各值勤班次條件的修護人員指派給該值勤班次。

目前一般航空公司的停機線修護部門，依據各航機的預定飛行班表和其所需進行之修護工作內容，可換算出停機線維修部門線上之修護需求量。修護工廠在各天各時段之修護需求量會因航機機型、可停留進行維修時間、待修護的工作內容及修護人力的單位需求不同而呈現變動的情形。以國內某一國際航空公司之航機維修部門的實際情形而言，目前修護人員的排班方式為每日固定三大班的人員輪班排班法。以此簡單及固定規則所制定的修護人力供給，常無法與實際營運航機所需的修護需求相配合，易形成人力供需不均衡的現象。例如在白天修護需求量較大時，修護人力便顯得不足，而在夜間維修需求量較小時，卻又造成人力的浪費，使得修護部門的修護效率受到影響。因此，航空公司為確保各航機的營運安全，且能提升修護人員的工作效率，對於航機的修護計畫確有必要進行一妥善完整的規劃。

在學術上，相關於維修三部分中，第一部分在國內已有相關的研究，如顏上堯、羅智騰^[1]、陳春益等^[2]及顏上堯、翁綵穗^[3]等。第三部分雖複雜(牽涉人員資格限制、休假及其他政策等因素)，但業界(如華航)已有商業軟體以輔助人員指派，故實務的處理較不困難。至於第二部分則牽涉複雜的組合最佳化分析，目前尚無商用軟體或模式輔助業者規劃值勤班次與人力。在實務上，目前仍以人工經驗方式進行排班規劃，其既費時，且不能確定績效。

因此，本研究的目的在針對短期滯留航機修護計畫中第二部分的純檢修資格航機修護人力供給問題，構建一整數規劃模式，以第一部分算出的修護需求量為輸入資料，並利用 CPLEX 數學規劃軟體求解，以期幫助航空公司的修護部門進行有效率的修護人員排班規劃，供第三部分修護人員指派之參考。本研究模式係以系統總修護人力浪費最小為目標，考量各時段之維修人力需求及其他相關限制，規劃最適的修護人員值勤班次數、各值勤班次的最佳開始時點及各值勤班次所需的修護供給人力。注意，本研究模式及後述分析所指的人力浪費量，是指本研究所求解之供給量與停機線上短期修護的需求量之間的差額，即多餘人力。雖然實務上航空業者可應用此等多餘人力支援其他修護作業(如定期維修工作)，以減少人員閒置。然而此等多餘人力，可能分布不符實際需要，因此是否能有效安排以支援其他修護作業，降低人力資源的浪費，則難以預期，有可能導致相當的人力浪費。因此，若於規劃時期即能有效率安排，則可減少此等多餘人力，使人力供給盡量與修護需求相符合，如此可望能幫助業者減少人力浪費。至於前述多餘人力的其他用途，屬於實務上業者另行調派之部分，不在本研究的考量內。

本研究模式除可應用於單機種檢修人力供給規劃，亦可應用於純檢修資格之多重機種檢修人力供給規劃。做法上，可事先將機種適當分群，再適當運用本研究模式分別規劃各群所需之修護人力，最後總和所有規劃人力。至於如何以混合檢修資格規劃多重機型修護需求人力的問題，預期將比純檢修資格的人力規劃問題複雜許多，本研究暫不考慮，其可為未來研究的課題。本文其餘架構如下：首先回顧國內外相關文獻，接著，構建模式，之後以國內一航空公司的營運資料為例，進行測試，最後提出結論及建議。

二、文獻回顧

人員排班的問題在學術上為一常見的問題類型，近年來相關的研究相當多，研究的對象層面也相當廣。人員排班問題中，不論是組員排班問題或是指派問題，一般多定式為零壹整數或混合整數規劃問題。此外，Bartholdi^[4]已證明人員排班問題為 NP-complete 問題，故針對大型問題而言，難以在合理的運算時間內求得最佳解。為了在短時間內有效率的找到一近似最佳解，一般多採用啟發式解法求解。

人員排班依產業的不同，其所需的排班規則或特性亦有不同，因而求解方法亦有差異。Beasley and Cao^[5]曾依產業特性將人員排班問題分為三大類：航空公司人員排班、大眾運輸人員排班以及一般人員排班。

1. 航空公司人員排班：

由於航空公司的航線、人員以及機隊的數量都相當龐大，因此，一般而言，求解此類人員排班問題大多以下列之步驟進行：首先，以某種方法產生許多較佳的可行排班組合(pairing)，然後依據前一步驟所獲得之排班組合，配合各公司之排班規定與法規限制，將人員排班問題以數學規劃的方法轉換成一數學規劃模式。最後，以一適當的演算法求解上述步驟所獲得之數學規劃模式。實務上航空公司組員排班問題甚為複雜，一般多定式為集合涵蓋問題(set covering problem, SCP)或是集合分割問題(set partitioning problem, SPP)以進行求解。而航空公司組員排班問題上較常見者為空服員排班問題，以下介紹部分代表性文獻。

顏上堯、林錦翌^[6]指出：在空服員排班問題的求解上一般分為二部分，首先，在已知飛航班次表、民航法規、工會限制以及公司內部人事管理原則的情況下，產生一組總成本最小、由航行勤務與休息時間組成以基地為起迄點的組員行程(pairing)。此階段稱為組員排班問題(crew scheduling problem)或組員行程產生問題(pairing generation problem)。然後根據所產生的空服員航班組合，進行組員指派的工作，決定組員的執勤班表，此階段稱為組員輪班或指派問題(crew rostering problem or crew assignment problem)。顏上堯、林錦翌亦發展一空服員排班組合最佳化模式，並利用變數產生法進行求解。其將模式分別建構為集合涵蓋以及最短路徑兩個問題，再利用單體法及 Label Correcting 演算法進行求解，以產生最小成本之組員行程組合。

此外，Yan and Chang^[7]曾針對駕駛員的組員排班問題，建立一集合涵蓋問題模式，並發展一變數產生法，求解駕駛員組員行程組合。Yan 等人^[8]曾針對空服員排班問題，並考量多基地、多艙等、混合機種等因素，建立 8 個整數規劃模式，並利用變數產生方式，發展有效的求解演算法，以求解空服員組員行程組合。杜宇平^[9]則是以網路流動方式建構空服員基本排班網路模式，研擬空服員混合排班策略網路模式，分別定式為含額外限制網路流動問題及多重貨物網路流動問題，並利用拉氏鬆弛法暨次梯度法、網路單體法以及其自行發展之啟發式解法求解。

在航空公司組員指派問題部分亦有學者進行研究，Ryan^[10]曾將航空公司組員指派問題定式為一集合分割問題以求解公平性的組員指派，並利用單體法與分枝界限法進行求解。Lučić and Teodorovic^[11]曾使用模糊集合理論進行航空公司組員的指派問題。構建一逐日指派啟發式解法(day-by-day heuristic method)，並以概似推論演算法(approximate reasoning algorithm)決定人員間指派的偏好強度，並以求得滿意解的求解架構替代求解最佳解。Lučić and Teodorovic^[12]曾將航空公司組員指派問題定式為多目標最佳化問題(multi-objective optimization problem)，並以一兩階段式求解架構進行求

解。第一階段以逐員指派啟發式解法(pilot-by-pilot heuristic algorithm)求解一初始解。第二階段再使用模擬退火法(Simulated Annealing, SA)針對初始解進行改善。Langerman and Ehlers^[13]利用遺傳演算法配合先進先出方法求解航空公司人員排班問題，並發展了一專家系統結合 Q-learning 演算法幫助求解該問題。

2. 大眾運輸人員排班：

屬於大眾運輸特性的人員排班問題如公車駕駛員、捷運系統站務員、司機員、或是鐵路運輸司機員等。其中，最常見的為公車駕駛員排班問題，而以鐵路組員排班的班次規劃較為複雜。由於此類大眾運輸人員排班問題與航空公司人員排班頗為類似，因此，部分研究亦使用上述航空公司人員排班的求解步驟作為程序。但是，由於一般公車業者的規模遠低於航空公司，故問題不如其複雜。因此，部分研究亦直接採用適當之演算法進行求解，而略過產生排班組合之步驟。

李治綱等^[14]曾將台鐵司機員排班分為組員排班(crew scheduling)與組員輪班(crew rostering)兩個階段。組員排班問題的部分，主要是針對所有需要執行服務的車次或班次進行規劃。以啟發式工作班產生方式將時刻表轉換成一組工作班後，利用一集合涵蓋問題以涵蓋時刻表中所有之乘務，最後以 LINDO 軟體求解出最佳的可行工作班組合。在組員輪班問題(亦屬組員指派問題)部分，則是轉化為推銷員旅行問題之網路模式，加上實務限制式後，求解每日每個工作人員的人員指派問題，完成最終的人員執勤排班。Caprara 等人^[15]曾將組員排班問題應用在鐵路運輸上，針對已知的列車班表，以最小化排班成本為目標，進行組員排班問題求解。其分別構建一集合涵蓋問題與一最小成本網路流動問題，再使用拉氏鬆弛法以及自行發展的 CFT (caprara-fischdti-toth) 啟發式演算法產生可行班次，並求解最佳的組員執勤排班結果。Higgins^[16]曾針對鐵路軌道的維修工作與維修人員的排班問題，在對原始列車營運班表的變動影響最小為目標下，考慮維修人員需求與維修工作的進行順序及預算限制，將問題定式為一多目標整數規劃問題，並利用 Tabu Search 啟發式解法，求解鐵路維修工作與維修人員配置及排班。

蘇昭銘、張靖^[17]曾透過對捷運系統站務人員排班特性的探討，運用數學規劃方法，構建兩階段的排班模式。第一階段模式在決定站務人員之上班日與休假日，第二階段則是決定站務人員上班日之上班時段。此等模式可定式為整數規劃問題，作者利用 LINDO 套裝軟體進行求解，並以 3 個站務員進行一個站 30 天的實例測試。

3. 一般人員排班：

一般人員排班則泛指上述二類人員以外之排班問題，諸如護士、作業人員、接線生或警察人員等排班皆屬於一般人員排班。不論在排班問題部分或是人員指派部分，

此類問題其排班的班次型態或休假規定大多為已知或固定，與航空公司人員排班問題的龐大程度相比，此類問題所需求解的問題規模較小也較單純，因此求解上，一般大多使用自行發展有效率的啟發式解法或其他適合的演算法直接求解。

Brusco 與 Jacobs^[18] 曾利用排除多餘變數法(eliminating redundant columns)求解以一般化集合涵蓋定式的連續性休假值勤排班問題。將部分規劃期間內勞力供給量為零的變數加以刪除，適當降低問題的規模，再求得最佳解。Brusco^[19] 曾針對集合涵蓋定式的休假值勤排班問題，提出對偶化全整數切面法(dual all-integer cutting plane)求解此問題。Alfares^[20] 曾以兩階段求解的方式，求解休假排班問題。在連續工作五日，連續休假兩日的休假排班規則下，規劃出可行的排班班次組合，第一階段利用已規劃好的排班班次組合，先求解出最小成本下所需的人員排班數量。第二階段則是以對偶變數求解法進行最小人力問題的求解，針對第一階段結果進行修正。在求解方式上，則是分別使用 ILP、BAR 以及 ALF 三種啟發式演算法進行求解與比較。

Beaumont^[21] 曾針對可使用電話呼叫，提供服務的產業(如計程車、巡邏員警、維修服務人員等)，利用事先蒐集統計所得之週期性(一週)的需求變化，以全職(8 小時)與半職(4 小時)的混合人員供給進行排班規劃。在滿足人員的工作時段與休息時間等限制，及最小化人力為目標下，針對值勤班次排班問題，構建為一混合整數規劃問題，並以 CPLEX 軟體進行最佳化求解。連志平^[22] 曾以「台灣省公路警察大隊」為實證對象，定式休假值勤排班問題為零壹整數規劃問題，並利用分枝界限法(branch-and-bound)進行求解並測試。李宇欣、楊承道^[23] 曾針對雙勤務人員(學校監考人員)的排班問題，構建為一個網路設計問題，並利用拉氏鬆弛法，配合網路相關演算法進行求解。

除了依產業特性區分外，Morris and Showalter^[24] 曾根據排班方式將人員排班問題分為三大類：值勤班次排班問題(shift scheduling problem)、休假排班問題(days-off scheduling problem)以及休假值勤排班問題(tour scheduling problem)，分別說明如下：

1. 值勤班次排班問題(Shift scheduling problem)

此類人員排班問題主要在求解一天之內各值勤班次的人員排班結果。其規劃的長度多僅為一日，主要是將各工作人員指派至合適的值勤排班中，所求解的結果為各工作人員須在一天什麼時段(或班次)進行工作。一般而言，此類問題所需進行規劃的班次多為事先規劃好或是固定的方式。Aykin^[25] 定式值勤班次排班問題為集合涵蓋問題，將 Bechtold and Jacobs 於 1990 年發表的模式作延伸，並與自己於 1996 年的發展的方法作比較。Lau^[26] 曾考慮人員排班問題排班排次變動時對人員排班問題限制的影響，將傳統班次指派問題(shift assignment problem, SAP)重新定式為一變動班次指派問

題(changing shift assignment problem, CSAP)，並針對此 CSAP 問題提出有效可行的貪婪式演算法(greedy algorithm)求解人員指派問題。

2. 休假排班問題(Days-off scheduling problem)

此類人員排班問題主要是求解工作人員的休假安排，亦即安排各工作人員的工作及休假日期。所規劃的長度多為一星期，在一週七日中，工作人員的工作日數一般少於規劃日數，可獲得基本的休假日數。由於各工作類型的休假日規定不盡相同，因此休假排班問題可針對各種不同的休假規定，如是否安排連續休假等，定式問題。Narasimhan^[27]曾針對僅有單一班次且工作人員執勤具階級性分類的休假排班問題，在滿足各等級的服務需求下，以各類工作人員最少數量為目標，求解一混合工作人員類別的休假排班問題。求解上，此研究發展一程序性求解演算法，逐步求解出各類別工作人員的最適休假規劃，並進一步進行各類別人員指派的求解。

3. 休假值勤排班問題(Tour scheduling problem)

此類問題須同時考慮值勤班次規劃與休假安排。依不同的工作型態特性，此類排班問題又可分為連續性與非連續性兩種排班問題。連續性排班問題是指每日 24 小時皆需進行排班規劃，即日與日之間的排班結果具有相連性。非連續性則是每日僅需進行部分時段的排班規劃。由於此類問題同時考慮上述兩種排班型態，問題規模通常較龐大，因此在求解上較為不易。Easton and Rossin^[28]曾針對休假值勤排班問題進行研究，並發展了一啟發解法改善了此類問題的初始解，此外，與其他研究不同之處，該研究提供了許多相同成本的方案，增加員工的滿足度。Brusco and Johns^[29]曾針對非連續性的員工休假值勤排班問題進行研究，指出該類問題之特性，並發展了一啟發解法，可有效率的求解此種問題。Bechtold 等人^[30]曾將此類排班問題相關研究之求解演算法利用統計方法做一比較，發現以線性規劃方法為基礎之啟發解法或以自行建構的方法求解效率均不錯。Brusco and Johns^[31]對於平衡多餘的員工做了相關研究，發展了一兩階段規劃方法，在維持低成本的條件下，將多餘的人力進行均衡，使各時點多餘員工之比例最低。王勇華^[32]曾以臺灣電信北區管理局「104」東區查號台的接線生排班為應用實例，求解休假值勤排班問題。此研究以數學規劃模式進行最佳班次組合之求解，以及個人值勤班表的指派。在人員排班問題方面，係定式為一集合涵蓋問題，作者利用自行發展的組合啟發式演算法 MEX，求解最佳班次組合。至於個人執勤班表的部分，則定式為一運輸問題，並利用 XMP 求解人員指派問題。

由上述文獻回顧中可知，在人員排班問題上已有許多學者針對不同的人員排班環境進行研究，並主要以數學規劃方法構建有效的數學規劃模式與求解方法。除了航空公司與大眾運輸的組員排班問題(crew scheduling)較需要針對所有可行班次進行班次

組合的規劃外，在一般人員排班問題上，其可行排班班次組合多為事先規劃或固定，以進行人員值勤、休假的排班規劃或是人員執勤與否的指派問題，而少見有針對值勤排班班次的安排方式進行規劃研究，亦即少見有如何根據各時段的服務需求進行最佳化值勤排班班次與人力的規劃。此外，以往在結合維修與排班或是航空公司人員排班等問題的研究上，針對航空公司修護人員的排班問題的相關研究甚為罕見。

三、模式建立

本研究針對純檢修資格航機修護人力供給的問題，考量服務需求量的變化，發展有效的模式，以進行值勤班次與人力最佳化的規劃，並求解最適當的排班供給量。本節首先說明航機修護規劃的實務作業，並提出合適之數學模式。

3.1 航機修護規劃實務作業

本研究參考國內一主要的航空公司(以下簡稱 C 航空公司)的營運，說明一般航空公司的完整停機線航機修護規劃架構，其可分為三大部分，如圖 1 所示。第一部分為產生各航機的修護計畫班表：依據各航機的營運飛航班表和飛航預期的修護工作及狀態，考慮各航機的修護需求，配合航機的航次規劃，求得包含航機修護需求規劃班表。

第二部分為修護人員的供給規劃：在已知航機修護規劃班表後，維修部門(修護工廠)根據各維修航機在班表上所規劃的可停留維修時間(包含航機的起飛時間、落地時間等)及各航機所需進行之修護工作內容項目，再依照不同之航機機型、所需進行的維修工作、可停留時間長度及所需之維修單位人力等資料，可求算出各航機在可進行維修時段內，進行一般即時修護所需的總人力需求單位(單位為小時人力)。接著修護工廠則再以時段為規劃單位，進行各時段機坪的修護需求量的計算，可求得各機型在機坪各時段的修護需求曲線，將各機型之修護需求加總，即為修護部門各時段之總修護需求量。

實務上，上述需求量的計算可就實際資料以一般統計方法求得。至於人力供給規劃的部分，則為一較困難且費時的規劃問題，必須滿足各航機機型在各時段中所需的修護需求量下，以總系統人力供給最有效率為目標，進行修護人力的供給規劃。

第三部分則為排班人員的指派問題：根據第二部分所規劃出的最佳值勤班次及各值勤班次的修護人力，再依照各修護員工的休假、工作時數、航機的修護資格限制等，及其他相關的工會限制與勞基法規定等，進行各值勤班次的人員指派的求解。

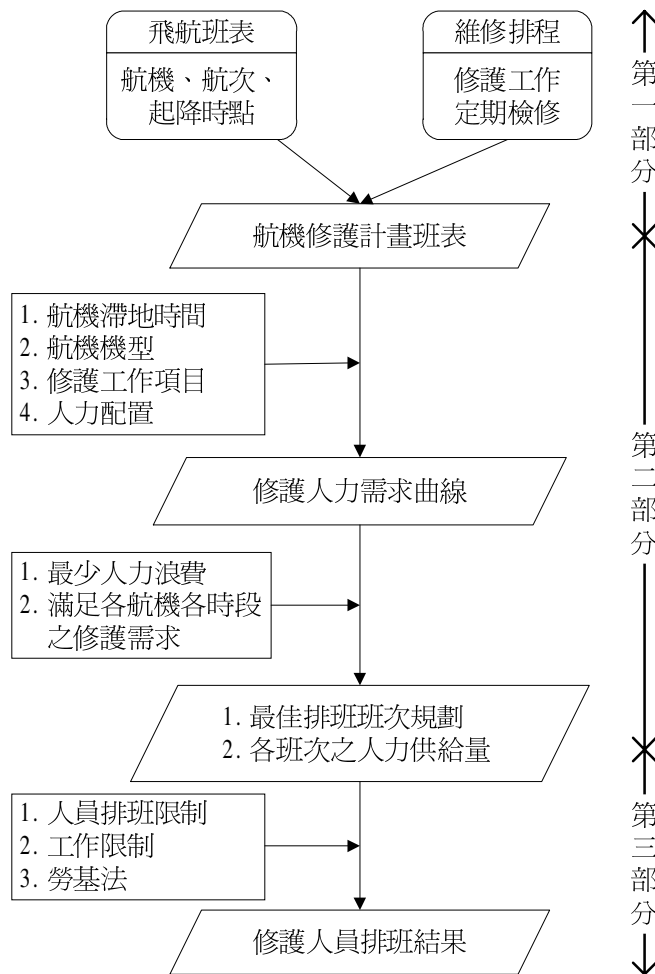


圖 1 航機維護規劃說明圖(本研究整理)

為方便研究，本研究以 C 航空公司為例，說明其航機維護工廠之停機線航機維護工作，以為後續模式構建之基礎。本研究主要以停機線上維護的三大項短期停留維護的工作部分進行維護人員供給規劃。分別為：preflight check (起飛前檢查)、transit check (轉機檢查)以及 daily check (過夜檢查)。preflight check 是指航機在執行一新航次起飛前的例行檢查，其多在航機起飛前一至二小時起，開始進行維護，必須在航機營運班表的起飛時點之前完成維護作業。transit check 與 daily check 則是在飛機執行完一航次，落地後馬上執行。transit check 是指該架航次連續執行兩個營運航次，中間在此航站進行滯地休息時所必須進行的例行檢查。daily check 則是指航機在今日已執行完其營運航次，將在維護工廠滯地過夜時，所進行的例行檢查。各工作因所需執行的維護

項目不同，其所需的工作時間並不相等。各機型在進行各項修護檢查時，所需的平均人力(man-hour)也不相同。因此需配合各航機的機型以及其所需進行的修護檢查類別，分別估算其修護需求量。

在進行停機線航機修護上，目前 C 航空公司的修護供給方式係以每日三個值勤班次進行人員排班。每個值勤班次提供數組修護小組，每個修護小組由一個組長配合 2~4 個組員進行航機修護。通常為一小組 4 人，但可視修護需求調動修護人員。在航機機型修護上的限制，則是視個人所具備的檢修資格而定，修護人員只要符合該航機機型檢修的資格，即可進行該航機機型的修護工作。由於目前的值勤班次數量與時點，並未配合修護工廠所需的修護需求加以規劃，因此易造成修護人員指派結果的無效率與人力浪費。

3.2 問題定式

本研究針對純檢修資格的修護人員分群規劃人力，並以 C 航空公司修護人力之供給規劃為例，以規劃期間內 C 航空公司航機修護規劃班表所換算出之修護需求曲線為輸入資料，將航機的修護以群組方式進行人力供給規劃。其中，規劃一群組航機的維修人力係假設此群維修人力皆具有檢修此群組中所有機型的資格。為確保本研究模式架構的合理與使用限制，在模式構建上，茲提出下列幾點假設條件或已知之資料：

1. 同一群組之所有修護人員對同一群組航機機型上，皆具有相同之檢修資格，即該群組所有修護人員均可維修該群組所有機型。已知各時段此群組機型之總修護需求量。
2. 修護群人力供給無上限。由於本研究為規劃未來修護人力之供給，此供給結果可提供業者作為人力編組或僱用之資訊，因此假設供給無上限。若考量有修護人力供給之上限，則模式須做適當的修正，此在模式構建後，再加以補充說明。
3. 本研究之修護需求量係針對航機修護班表所排定進行之停機線修護工作而言，不考慮臨時產生的維修需求。實務上，臨時產生之維修需求，一般是以備用修護人員進行臨時調度，不在本研究範圍內。
4. 由於一般航空公司航機班表多半以一星期為規劃週期，因此本研究之規劃長度配合班表之排定，以一週七天為模式之規劃長度。
5. 由於 C 航空公司修護工廠之人力配置以小班為單位，因此本研究模式之求解人力單位亦以小班為單位。本模式中假設每個小班的人數固定為 4 人。
6. 一週內各天之值勤班次開始時間相同。換言之，若時點 J 存在一值勤班次，則代表

規劃期間內於時點 J 皆存在此值勤班次，且此值勤班次開始時點於一週內各天皆固定。

7. 每天的總值勤班次數有上下限制。

8. 每值勤班次之工作時間固定為 8 小時。

本研究在參考 C 航空公司的實際意見後，定式(formulate)此修護人力供給規劃問題為一整數規劃問題。本研究模式係以系統觀點進行修護人員供給的規劃，使用的修護需求量為輸入資料，在系統總人力浪費最少化的目標、滿足規劃時段內各天各時段的修護需求量、以及一日排班總值勤班次的數量限制下，求解系統最佳化的值勤班次數、各值勤班次的最佳開始時點、及各值勤班次的人力供給結果。其數學規劃式如下：

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in W} \sum_{N \in i, s} (mv_{is} - d_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } l \leq \sum_{s \in N} x_s \leq u \quad (2)$$

$$m \sum_{i, s \in H_{ij}} v_{is} \geq d_{ij} \quad \forall i \in W, \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in W} v_{is} \leq Bx_s \quad \forall s \in N \quad (4)$$

$$x_s = 0 \text{ or } 1 \quad \forall s \in N \quad (5)$$

$$v_{is} \geq 0 \text{ and } v_{is} \in I \quad \forall i \in W, \forall j \in N \quad (6)$$

模式中之決策變數項之定義說明如下：

x_s ：第 s 值勤班次時點存在與否之變數。

$x_s \begin{cases} = 1, & \text{第 } s \text{ 時點為一班次開始時點，即第 } s \text{ 排班班次存在。} \\ = 0, & \text{第 } s \text{ 時點不為班次開始時點，即第 } s \text{ 排班班次不存在。} \end{cases}$

v_{is} ：第 i 天第 s 值勤班次所需之維修單位數(小班數)。

其餘符號與參數項說明如下：

Z ：系統總人力浪費量；

i ：第 i 天；

j ：第 j 時點；

s ：第 s 值勤班次開始時點；

W ：值勤班次日集合(0~6, 0:週日、1:週一、...、6:週六)；

N : 值勤班次開始時點集合(0 ~ 23, 代表一天 24 小時時點) ;

m : 最小修護單位, 即每小班之人數(假設 4 人) ;

d_{ij} : 第 i 天第 j 時點之總維修需求人數 ;

l : 總值勤班次下限值 ;

u : 總值勤班次上限值 ;

B : 一極大值 ;

H_{ij} : 第 i 天第 j 時點之值勤班次集合, 如式(7)所示, 說明如下 :

$$\text{if } \begin{cases} j=0 \sim 6 & H_{ij} = \{(i', s') \mid i' = (i+6) \bmod 7, 17+j \leq s' \leq 23\} \cup \{(i', j') \mid i' = i, 0 \leq s' \leq j\} \\ \text{others} & H_{ij} = \{(i', s') \mid j-7 \leq s' \leq j\} \end{cases} \quad \forall i \quad (7)$$

由於本研究假設各值勤班次的工作時間為 8 小時, 因此涵蓋各時段的開始工作時點集合可以先行求出, 如此, 可計算各值勤班次在各時段之總人力供給量。各時段之值勤班次集合主要可分為兩種情形, 一為值勤班次包含跨日之時段, 如圖 2 中值勤班次集合(b)與(c), 另一種則無, 如值勤班次集合(a)、(d)。圖中括號內之數字所代表的意義為(i, j), 即第 i 天第 j 時點之意。由各時段之值勤班次集合定義式中可看出, 時點 j 之值勤班次集合, 係包含前 8 個時段以內開始工作之值勤班次。以未含跨日之值勤班次集合(a)來說, 即第 6 天(星期六)第 23 時之值勤班次集合, 即包括該日由 16 時至 23 時之值勤班次在內, 共 8 個工作時段。在本研究之研究期間內未含跨日之值勤班次集合, 為每日時點 07 至時點 23 之間各時點, 如(a)、(d)所示。另一方面, 值勤班次集合包含跨日時段者, 如圖 2 中之(b)與(c)所示, 即為每日之時點 00 至時點 06 之間各時段。由於本研究之研究期間為一週七日, 由星期日開始至星期六結束, 因此除了星期六($i=6$)之跨日為星期日($i=0$)外, 其他各日之跨日可以下一工作日表示, 即第 $i+1$ 日。綜合上述, 包含第 i 天第 j 時點之值勤班次集合, 可如式(7)所示。

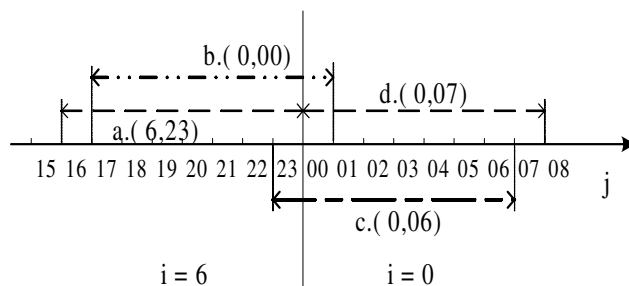


圖 2 值勤班次集合說明圖

目標函數(1)為總人力浪費的最小化，其中人力浪費是以各日各時段之人力供給量與其需求量之差額總和計算之。由於各值勤班次的工作時數皆固定為 8 小時、每個修護小班人數假設為 4 人，加上修護需求量為一常數，因此此目標值之意義相等於求解最少系統總修護人員供給量。限制式(2)為值勤班次數的上下限限制，即系統的最佳值勤班次數須介於總值勤班次的上下限值之間。若無此限制，則代表最佳值勤班次數將介於 0 到 24 之間(一天 24 小時)。此限制式提供值勤班次數之彈性調整作法，在實務上應用上，業者可依其需要，適當調整此上下限值。例如，業者若僅注重其人力的供給數量，則可適當提高上限值，允許較多的值勤班次數，以期降低總供給人力；若考量排班規劃及人員管理的方便，則可適當降低上限值，以避免造成太多的值勤班次數。至於下限值可提供一最小須排班的次數，以配合公司的管理作業等。限制式(3)為需求限制，即各天各時段之人力供給須滿足該時段之總修護需求量。限制式(4)為值勤班次存在關係，表示存在某值勤班次，始能在此值勤班次供給人力。限制式(5)為值勤班次變數的零壹限制。限制式(6)為修護人力供給變數的整數限制。

此模式的問題規模：在變數方面，若有 24 個時點，則將有 24 個班次變數、168 ($=7*24$)個修護人力供給變數，因此總變數有 192 個。至於限制式方面，限制式(2-2)有 2 條，限制式(2-3)有 168 ($=7*24$)條，限制式(2-4)有 24 條。故在不包括零壹與整數限制下，共有 194 ($=8*24+2$)條限制式。

值得注意的是，若在實務上班次已經固定，如 C 航空公司目前的三班制，而為一已知值，不欲改變時，則此人力規劃模式可適當修正如下：刪除變數 x_s 及限制式(2)與(7)，且修正值勤班次涵蓋集合 H_{ij} 為 A_{ij} ， A_{ij} 表示為現有存在於第 i 天第 j 時段的值勤班次集合。另外，本研究旨在規劃各修護群未來的人力，並假設各修護群人力無上限。未來若係針對現況人力進行排班規劃，則可加上一限制式， $\sum_{i \in W \in N} mv_{is} \leq P$ ，其中 P 為現況總人力，然後重新求解。若問題無解，則代表現況人力無法滿足目前需求。或者，更簡單的做法是，直接求解原模式，再比較模式輸出之總人力與現況總人力值，若前者較大，則亦代表問題無解。此時業者可適當減少需求量，或想辦法增加供給人力，或考量改變工作指派原則，如調整每班人數、聘用臨時人員、考量半日值工作方式或其他適當方法，以求得可行解。

本研究利用 CPLEX 5.0 數學規劃套裝軟體求解模式。CPLEX 軟體主要使用於求解線性最佳化問題(linear optimization problems)。由於本研究之模式為整數最佳化問題，因此在各模式的求解上，CPLEX 利用分枝界限法(branch-and-bound)，配合單體法(simplex method)以求取整數解。其做法係先以單體法求得線性最佳解，若線性最佳解

不為整數解時，則再透過變數值加以分割問題(分枝)，產生子問題，並針對分枝之子問題的求解、定界及捨棄，進行整數解的求取。最後，重複分割、產生、捨棄及求解子問題並定界，以求得最佳解(或近似最佳解)。值得一提的是，在分枝界限法的求解過程中，有二重要參數 Mipgap 與 Relobjdifference 之設定。Mipgap 所指的是目標值收斂容忍度，CPLEX 系統預設值為 0.0001。Relobjdifference 則是指各個子問題 cut off 的收斂容忍度，CPLEX 系統預設值為 0。此兩項參數，可就問題特性適當調整。例如為避免問題規模太大導致運算時間過長時，使用者可依其本身電腦設備及其面臨的問題特性，適時降低求解的精度，以求得在允許的誤差範圍下的整數解。

四、範例測試

本研究以 C 航空公司的航機修護班表為例，測試模式之績效。本研究係以 C 電腦程式語言為基礎，在個人電腦上撰寫求解所需之輸入執行檔，並結合 CPLEX 5.0 數學規劃套裝軟體進行求解。本研究以 Microsoft Windows 98 為作業平台，並利用 AMD K6-II 400，192 MB RAM 之個人電腦執行程式運算。

4.1 資料分析

本研究以 C 航空公司 2000 年 6 月 5 日至 2000 年 6 月 11 日之停機線短期滯留修護計畫班表(short term layover schedule)為原始資料，並向 C 航空公司取得此期間的航機修護需求量，另外以該公司實務上之經驗設定部分相關參數，進行測試。其主要資料說明如下：

根據 C 航空公司所提供的修護計畫班表資料，目前主要進行停機線上短期留滯修護的航機機型共有六種：A300-600R (簡稱 AB6)、B737-800 (B738)、B747-200 (B742)、B747-200F (B742F)、B747-400 (B744)以及 MD-11 (MD11)。此六種機型共有 51 架。就總系統(所有機型)而言，總共預定須進行 481 項修護工作，包括：preflight check (起飛前檢查)：146 項、transit check (轉機檢查)：152 項，以及 daily check (過夜檢查)183 項。

本研究取得研究期間內 C 航空公司已進行計算完成之各分機型與總計之各天各時段之修護需求量。由表 1 中可以看出，各航機機型的修護需求量大致與各機型所需進行的修護項目量成正比。主要原因為各機型之航機架數較多時，其預定之營運航次也愈多，則該機型所需進行的短期滯留修護項目亦隨之增多。但另一方面，由於修護需求量的計算過程中，各機型在進行各類修護工作時所需的平均修護人力並不相同，故修護需求量之計算結果因而有所不同，造成各機型之修護需求量與修護項目量並非完

全成正比。至於各機型的修護需求分布情形，主要會依各航機之營運航次的安排而呈現修護需求量具有高低峰之變化。各機型修護需求量皆以白天與晚間時段較高，大部分之機型在夜間時段(01 ~ 04 時)需求量較低，甚至為零。

本研究假設所有維修人員皆具資格以檢修所有機種，再經由上述資料整理及參數設定後，得到模式輸入資料，包括一週內各天各時段之總修護需求量、值勤班次數上下限、修護小班人員數、排班條件、各值勤班次工作時點集合等。

表 1 各航機機型修護需求量統計表

航機 機型	航機 數量	修護項目量(工作次/週)				修護需求量 (man-hour/week)
		Pre-flight check	Transit check	Daily check	小計	
AB6	12	55	66	55	176	1577
B738	10	60	30	61	151	2388
B742	1	5	6	5	16	226
B742F	11	9	4	17	30	558
B744	12	13	42	33	88	1218
MD11	4	4	4	12	20	265
總計	51	146	152	183	481	6232

資料來源：C 航空公司修護計畫班表(2000/6/5-2000/6/11)，本研究整理。

4.2 模式測試及結果分析

本研究的規劃週期為一週七天，每天 24 個時點。模式規模為 194 條限制式，192 個變數，其中有 24 個零壹變數，168 個整數變數。模式所使用的參數設定值包括：每修護小組為 4 個修護人員。系統值勤班次數下限為 3，至於值勤班次數的上限則以 3 至 12 分別設為參數依次進行求解。結果如表 2 所示。

由求解結果可看出，隨著值勤班次上限值的增加，可以發現模式求解結果的最佳值勤班次數亦隨之增加，且皆為值勤班次上限值，所求解得到的目標值也有越佳趨勢，即一週總人力供給的情形亦隨著值勤班次數的增加而呈現遞減的趨勢。表示值勤班次愈多，排班愈有彈性，績效愈佳。注意，人力供給的情形由值勤班次 3 的 381 小組一直下降至值勤班次 7 時的 336 小組，但由值勤班次 7 開始便停止下降的趨勢，而呈現維持在一週 336 小組數的水平情形。就實務上來看，業者若為了排班規劃順利及人員管理方便，則可能會儘量取較少值勤班次數來安排修護人力，但若就員工可選擇的彈性來看，則值勤班次數越多的彈性越大，對員工而言較佳。如前文模式限制式說明，本研究模式提供了值勤班次上下限值的機制，在應用上應具有相當之彈性，業者

於應用此模式時可依其需求自訂值勤班次上下限，以滿足其管理的需要。以此結果而言，假設為了排班規劃順利及人員管理方便，希望儘量取最少的值勤班次數，則每日 7 個值勤班次已為最佳解。此結果亦顯示，傳統的三班制的排班方式，若能適當放寬增加班次，則可降低排班所需的人數。

表 2 最佳化模式求解結果表

值勤班次設定		模式求解結果				
下限值	上限值	最佳值勤班次數	目標值 ¹	求解時間(秒)	求解回合數(Iterations) ²	求解節點數(Nodes) ³
3	3	3	381	12.36	15955	987
3	4	4	359	19.77	26893	1266
3	5	5	345	28.40	37053	2071
3	6	6	339	16.69	19409	1258
3	7	7	336	14.89	19233	1087
3	8	8	336	2.53	2264	133
3	9	9	336	2.25	2017	128
3	10	10	336	1.16	534	38
3	11	11	336	1.10	510	38
3	12	12	336	1.10	435	38

註：1.目標值為一週修護小組數。

2.CPLEX 使用單體法的運算 pivot 回合數。

3.CPLEX 使用分枝界限法求解之子問題數量。

另外，從數學面而言，當值勤班次數越多，其修護人員供給的可行解集合愈大，排班的彈性愈大，因此愈可以配合需求曲線，找出最少修護人力供給的組合結果。在求解時間上，各模式的求解時間，皆在 30 秒以內可求解完畢，顯示求解效率良好。

表 3 顯示各值勤班次範圍下所解出的值勤班次最佳開始時點。此結果顯然受修護需求曲線分布特性的影響，例如，由於需求曲線中的需求高峰約出現在 06 至 08、11 至 12 以及 19 至 24 三個時段，因此值勤班次的開始時點集中在下列時點：01、05、06、07、15、16、19、22 等時段。上列之值勤班次時點在 10 個不同的值勤班次求解結果下，至少出現 5 次以上。另外，當最佳值勤班次數增加時，一週所規劃的總值勤班次數也隨之增加，如最佳值勤班次數 3 時，一週總值勤班次數為 21，而最佳值勤班次數 12 時，一週總值勤班次數為 51，本研究將一週實際總值勤班次數與一週理論總值勤班次數(最佳值勤班次數*7)之比例稱為「值勤班次比例」，各值勤班次下之變化

情形亦整理於表 3 中。隨著值勤班次數的增加，一週實際人力供給的值勤班次數與一週理論總值勤班次的差額也逐漸增加。就人員供給的情形來看，當值勤班次數愈多時，人員供給量愈能配合修護需求曲線進行人力供給的配置，即在修護需求較高的值勤班次安排最適當的修護人力，其他排班時段的人力供給則較少，以減少人員供給的浪費。

表 3 各值勤班次開始時點結果表

最佳值勤班次數	一週總值勤班次數	值勤班次比例	各值勤班次開始時點													
3	21	1.00	04	12	19											
4	28	1.00	05	13	15	21										
5	35	1.00	06	07	15	17	22									
6	40	0.95	06	07	14	15	17	22								
7	45	0.92	05	06	07	15	16	20	23							
8	48	0.86	01	06	07	10	15	16	17	22						
9	50	0.79	01	05	06	07	10	15	16	18	19					
10	49	0.70	01	04	05	06	07	15	16	18	19	23				
11	51	0.66	01	04	05	06	07	15	16	18	19	22	23			
12	51	0.61	01	04	05	06	07	15	16	18	19	21	22	23		

表 4 顯示在各值勤班次下，一週各天修護供給的總修護人力小組數。由表 4 中可看出，當值勤班次數為 8 到 9 以及 10 到 12 這兩組範圍時，其一週各天的人力供給小組數相同，但二者各天的人員供給結果並不相同，由此可見此值勤班次規劃問題呈現有多重最佳解的情形。

表 5 則是將一週所求解出之修護人員供給換算成人力單位。其中，由於本模式假設每修護小組由 4 個修護人員所組成，因此一週總供給人力為小組數之 4 倍。其他，一週平均日人力則等於一週總人力數除以 7，而總人力浪費值則是將每個修護人力以每值勤班次工作 8 個小時計算所得的系統總修護人力供給量減去修護需求量(小時人力)的差額。由表 5 中可看出，值勤班次從 3 增至 7，每週的人員供給量相差近 180 人，每日相差近 26 人，由此可見適當的值勤班次數的規劃確可有效的減少人員的浪費。表 6 為值勤班次數 7 之一週各天各值勤班次下的修護人力供給結果。本研究根據表 6 的各值勤班次供給人力結果，並比較於各天各時段之修護需求量，可得各天各時段之人力浪費分布情形，如圖 3 所示。

表 4 各值勤班次之修護人員供給量結果表

值勤班次數	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	一週總計
3	55	47	61	58	47	57	56	381
4	50	47	57	55	46	52	52	359
5	47	47	57	50	44	52	48	345
6	47	44	57	50	44	49	48	339
7	49	43	55	51	43	45	50	336
8	47	44	57	50	44	46	48	336
9	47	44	57	50	44	46	48	336
10	49	39	59	51	43	45	50	336
11	49	39	59	51	43	45	50	336
12	49	39	59	51	43	45	50	336

註：修護人員供給量之單位為小組數。

表 5 各值勤班次供給人力統計表

排班數	一週總小組數	平均每日小組數	一週總人員數	平均每日人員數	一週總計人力浪費量 (man-hour)
3	381	54.42	1524	217.71	5960
4	359	51.28	1436	205.14	5256
5	345	49.28	1380	197.14	4808
6	339	48.42	1356	193.71	4616
7	336	48.00	1344	192.00	4520
8	336	48.00	1344	192.00	4520
9	336	48.00	1344	192.00	4520
10	336	48.00	1344	192.00	4520
11	336	48.00	1344	192.00	4520
12	336	48.00	1344	192.00	4520

表 6 排班排次 7 之修護人員供給結果

值勤班次編號	時點	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
1	05	6	0	12	5	2	5	5
2	06	1	3	0	3	3	2	1
3	07	6	7	4	5	6	7	5
4	15	18	9	5	8	9	9	7
5	16	3	9	22	0	0	6	17
6	20	9	10	9	26	20	14	11
7	23	6	5	3	4	3	2	4
一日總計		49	43	55	51	43	45	50

註：修護人員供給量單位為小組數。

由圖 3 中可看出，最佳化排班的結果顯示，人力供給曲線大致配合各時段之修護需求量之變化而變化。由於航機的修護需求量在晚間(20 ~ 23)為一需求量極大之高峰期，故人力供給亦在此時段呈現一高峰情形。另一方面，因為本研究假設各值勤班次需工作 8 小時，而由於部分時段的修護需求量並不高，但為配合前後時段之高峰需求而須提供較高之人力供給量，因此造成人力的浪費。如時段 09 ~ 10、16 ~ 19 及 01 ~ 04 等皆出現浪費人力超過修護需求人力的情況。特別是在凌晨 01 ~ 04 之時段，由於此時段內大部分的航機機型的需求量皆很低，甚至部分天數此時段之修護需求量为零，加上此時段之供給人力是由前晚之值勤班次(時點 20、23 之班次)所提供，而為滿足夜間時段 20 ~ 23 之高修護需求量下，因此造成凌晨 01 ~ 04 之時段的人力浪費情形特別嚴重。此人力浪費的分布結果與分析，可提供實務上參考，就其他參數如各值勤班次工作時數(如考量縮減八小時工作制等)、各班人數(減少一班四人制)等參數進行可行性研究與調整，以規劃更具效果之修護人員供給。

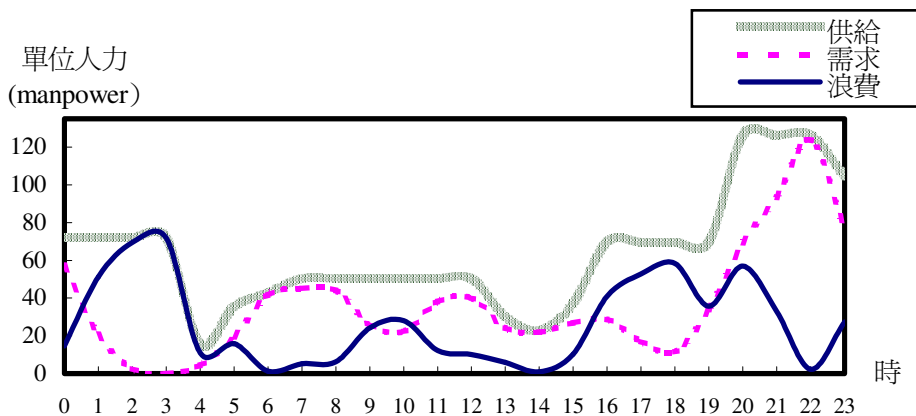


圖 3 值勤班次 7 之各時段人力浪費情形圖

五、結論與建議

鑑於以往在航空公司修護人員排班規劃的問題中，少有就人力供給部分進行研究，本研究針對純檢修資格航機修護人員的供給問題，利用數學規劃方法，以系統總人力浪費最小為目標，在符合各時段之修護需求下，構建一整數規劃模式，並利用 CPLEX 數學規劃軟體求解模式，以期幫助航空公司規劃最佳的修護人員排班與人力供給，提供下游人員指派之參考。

本研究以國內一航空公司之航機修護班表為例，使用其一週之航機修護需求量，

應用本研究所提出之模式進行範例測試。結果發現模式的求解效率甚佳，皆可在一分鐘內求得最佳解。顯示此修護人力供給模式應可幫助業者在實務上有效率規劃航機修護人力之供給。業者在使用此模式前，亦應多次測試模式或進行參數分析，以了解模式的使用限制。

本研究模式應可提供為一基本修護人力供給規劃模式，其未來可因應實務上的需要，進一步延伸、修正成更實用的模式。例如，實務上，雖然本模式可以分群方式規劃多機型的修護人力供給，但如何延伸本模式修正為混合檢修資格人力供給模式，以更有效求解多機型的人力供給規劃問題，可為未來繼續研究的課題。值得一提的是，實務上有些航空公司每修護小組的修護人員數可能可以變動，不一定為固定人數，因此未來可考量變動小組人數，修正模式，以改善修護人力供給。此外，在某些企業界已有半日職(工作四小時)的工作，以改善人力供給，因此若航空公司允許有半日值的排班方式，則如何考量以混合半日與全日職(工作八小時)的方式排班，以減少人力之浪費，可為未來研究的方向。另外，可否彈性分割員工的工時並適當加上補償的方式等，以降低公司人力的供給等做法，是否適用於航空公司的航機修護人力供給，值得為未來探討的課題。最後，本研究僅針對短期停留之修護需求量部分規劃，未來可進一步加入其他各級檢修之修護需求之考量，構建一整合修護人力供給模式。

參考文獻

1. 顏上堯、羅智騰，「因應預期性航具維修之系統性飛航排程」，中國土木水利工程學刊，第八卷第三期，民國八十五年，頁 447-456。
2. 陳春益、李宇欣、盧華安，「飛機調度與定期維修整合模式之研究」，運輸計劃季刊，第二十六卷第一期，民國八十六年，頁 69-94。
3. 顏上堯、翁綵穗，「季節轉換間緩衝期飛航排程之研究」，運輸計劃季刊，第三十卷第四期，民國九十年，頁 891-922。
4. Bartholdi, J. J., "A Guaranteed-accuracy Round-off Algorithm for Cyclic Scheduling and Set Covering", *Operations Research*, Vol. 29, 1981, pp. 501-510.
5. Beasley, J. E. and Cao, B., "A Tree Search Algorithm for the Crew Scheduling Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 94, No. 3, 1996, pp. 517-526.
6. 顏上堯、林錦翌，「空服員排班組合最佳化之研究」，中國土木水利工程學刊，第九卷第二期，民國八十六年，頁 303-314。
7. Yan, S. and Chang, J. C., "Airline Cockpit Crew Scheduling", *European Journal of*

- Operational Research*, Vol. 136, No. 3, 2002, pp. 501-511.
8. Yan, S., Tang, T. T., and Tu, Y. P., "Optimal Construction of Airline Individual Crew Pairings", *Computers and Operations Research*, Vol. 29, 2002, pp. 341-363.
 9. 杜宇平, 「空服員排班網路模式之研究」, 中央大學土木工程研究所博士論文, 民國八十九年。
 10. Ryan, D. M., "The Solution of Massive Generalized Set Partitioning Problem in Aircrew Rostering", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 43, 1992, pp. 459-467.
 11. Lučić, P. and Teodorovic, D., "Simulated Annealing for the Multiobjective Aircrew Rostering Problem", *Transportation Research A*, Vol. 33, 1999, pp. 19-45.
 12. Lučić, P. and Teodorovic, D., "A Fuzzy Set Theory Approach to the Aircrew Rostering Problem", *Fuzzy Set and System*, Vol. 95, 1998, pp. 261-271.
 13. Langerman, J. J. and Ehlers, E. M., "Agent-based Airline Scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 33, No. 3-4, 1997, pp. 849-852.
 14. 李治綱、陳朝輝、郭彥秀, 「台鐵司機員排班與輪班問題之研究」, 中華民國第五屆運輸網路研討會論文集, 民國八十九年, 頁 177-187。
 15. Caprera, A., Fischetti, M., Toth, P., Vigo, D., and Guida, P. L., "Algorithms for Railway Crew Management", *Mathematical Programming*, Vol. 79, 1997, pp. 125-141.
 16. Higgins, A., "Scheduling of Railway Track Maintenance Activities and Crews", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, 1998, pp. 1026-1033.
 17. 蘇昭銘、張靖, 「捷運系統站務人員排班模式之研究」, 中華民國運輸學會第十三屆論文研討會論文集, 民國八十七年, 頁 613-622。
 18. Brusco, M. J. and Jacobs, L. W., "Elimination Redundant Columns in Continuous Tour Scheduling Problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 111, 1998, pp. 518-525.
 19. Brusco, M. J., "Solving Personnel Tour Scheduling Problems Using the Dual All-integer Cutting Plane", *IIE Transaction*, Vol. 30, 1998, pp. 835-844.
 20. Alfares, H. K., "An Efficient Two-phase Algorithm For Cyclic Days-off Scheduling", *Computers Operational Research*, Vol. 25, No. 11, 1998, pp. 913-923.
 21. Beaumont, N., "Scheduling Staff Using Mixed Integer Programming", *European Journal of Operational Research*, Vol. 98, 1997, pp. 473-484.
 22. 連志平, 「警察人員排班問題之研究」, 交通大學土木工程研究所碩士論文, 民國八十七年。
 23. 李宇欣、楊承道, 「雙勤務人員排班問題」, 運輸計劃季刊, 第二十八卷第三期,

民國八十八年，頁 409-420。

24. Morris, J. G. and Showalter, M. J., “Simple Approaches to Shift, Days-off and Tour Scheduling Problems”, *Management Science*, Vol. 29, No. 8, 1983, pp. 942-950.
25. Aykin, T., “A Comparative Evaluation of Modeling Approaches to the Labor Shift Scheduling Problem”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 25, 2000, pp. 381-397.
26. Lau, H. C., “On the Complexity of Manpower Shift Scheduling”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 23, No. 1, 1996, pp. 93-102.
27. Narasimhan, R., “An Algorithm for Single Shift Scheduling of Hierarchical Workface”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 96, 1996, pp. 113-121.
28. Easton, F. F. and Rossin, D. F., “Equivalent Alternate Solutions for the Tour Scheduling Problem”, *Decision Sciences*, Vol. 22, 1991, pp. 985-1007.
29. Brusco, M. J. and Johns, T. R., “A Sequential Integer Programming Method for Discontinuous Labor Tour Scheduling”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 95, 1996, pp. 537-548.
30. Bechtold, S. E., Brusco, M. J., and Showalter, M. J., “A Comparative Evaluation of Labor Tour Scheduling Method”, *Decision Sciences*, Vol. 22, 1991, pp. 683-699.
31. Brusco, M. J. and Johns, T. R., “Improving the Dispersion of Surplus Labor in Personnel Scheduling Solutions”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 28, No. 4, 1998, pp. 745-754.
32. 王勇華，「人員排班問題啟發式解法之應用」，交通大學土木工程研究所碩士論文，民國八十二年。

