運輸計劃季刊
第四十七卷 第二期
民國一〇七年六月
頁 97～頁 120

Transportation Planning Journal
Vo1. 47 No. 2
June 2018
PP. 97～120

飛航管制員排班最佳化之研究

OPTIMAL SHIFT SCHEDULING FOR AIR TRAFFIC CONTROLLERS

顏上堯 Shangyao Yan [1]
陳俊穎 Chun-Ying Chen [2]
張庭瑄 Ting-Hsuan Chang [3]

(107 年 1 月 11 日收稿，107 年 3 月 27 日第 1 次修改，107 年 5 月 25 日第 2 次修改，107 年 6 月 10 日第 3 次修改，107 年 6 月 25 日定稿)

摘 要

本研究基於航管單位之立場，考量飛航管制人員執勤產生之疲勞感，以最平均化每位飛航管制員工作總時數為目標，並滿足實務方面限制為前提下，利用數學規劃方法及網路流動技巧，分別構建線性及非線性系統性飛航管制員人力排班模式。在求解上，線性模式以數學規劃軟體 CPLEX 進行求解，並作為求解非線性模式的輔助工具，而非線性模式則是以線性模式為基礎，利用疲勞管理軟體 (fatigue audit interdyne, FAID) 及數學規劃軟體 CPLEX，並透過適應性調整的方式發展一非線性求解方法。最後，本研究以國內某航管單位的營運資料為例進行測試分析，結果良好，顯示本研究模式可提供為決策單位作為飛航管制員人力排班規劃之參考。

關鍵詞： 飛航管制員；人力排班；疲勞；最佳化；網路流動技巧

1. 國立中央大學土木工程學系教授。
2. 開南大學空運管理學系副教授 (聯絡地址：33857 桃園市蘆竹區開南路 1 號 開南大學空運管理學系；電話：03-3412500#6032；E-mail：cychen@mail.knu.edu.tw)。
3. 國立中央大學土木工程學系碩士。

ABSTRACT

In this study, based on the perspective of airport control units, we adopt the mathematical programming method and the network flow technique to develop two shift scheduling models, respectively, linear and non-linear., coupled with real operating constraints. The models are aimed to average working hours of all controllers while satisfying the real operating constraints, taking into account the fatigue of airport traffic controllers (ATCOs) generated on duty. As a supporting tool for solving the non-linear model, the linear model is directly solved by using the mathematical programming solver, CPLEX. To solve the nonlinear model, a solution algorithm is developed, based on the linear model, by using the Fatigue Audit InterDyne (FAID), coupled with the use of the CPLEX and an adaptive parameter setting rule. Finally, Numerical tests are performed using the work shift data associated with an Air Traffic Control unit in Taiwan. The test results are good showing that the models and the solution algorithm could be useful references for practices.

Key Words: *Air traffic controllers (ATCOs); Crew scheduling; Fatigue; Optimization; Network flow technique*

一、緒　論

隨著全球經濟與貿易的發展，航空運量大幅成長，航空運輸成為重要的交通工具之一。在偌大的航運量下，飛航安全更為不可輕忽之重要課題。在飛航安全中，飛航管制員之專業能力的良窳將影響整體飛安績效。依據我國民用航空法第 2 及第 41 條法規，「飛航管制」(air traffic control，ATC) 為飛航管制機構為防止航空器間、航空器與障礙物間於航空站跑、滑道滑行時之碰撞及加速飛航流量，並保持有序飛航所提供之服務。飛航管制員所提供之飛航服務可分為飛航情報及飛航管制兩類，其中針對飛航管制之類別，王孝輝[1]將其整理為機場管制 (airport control)、終端管制 (terminal approach control) 及區域管制 (area control) 等 3 種不同管制階段，每一管制階段都有專業管制人員引導航空器。

飛航管制員在飛航管制作業中須隨時準確掌握飛航相關情報，並適當地給予飛機飛航導引，不容許任何作業疏失，因此飛航管制員身心理皆須承受相對於一般工作者更大的壓力，易造成身體疲勞之狀態。過去，陳秋蓉等人 [2] 曾透過各種測量工具來觀察飛航管制人員的生理疲勞、自覺疲勞症狀以及相關環境因子。該研究建議，由於航管人員工作的特殊性，可於工作中安排適當休息時間或針對排班與工作量給予適當的分配，使航管人員之工作疲勞減至最低。郭仲偉等人 [3] 曾針對臺灣航管員工作壓力進行探討，研究結果顯示臺灣航管員工作壓力大多來自於「環境因素」與「角色衝突」。Cabon [4] 認為疲勞是航空安全的主要風險，而「疲勞」被定義為生物恢復休息的本能慾望，就像飢餓和乾渴，為正常生理狀態之一，不能抑制，因此須考慮事先預防或是減輕其影響，以避免發生飛安事件。

澳洲南澳大學 (University of South Australia) 的睡眠研究中心 (The Centre for Sleep Research, CFSR) 設有睡眠與認知神經行為表現實驗室，進行相關主題的研究，如睡眠與清醒的生理行為表現、排班工作對個人生理與精神的影響、疲勞模式、疲勞與排班工作管理、人員班表設計等 (Roach 等人 [5])。CFSR 將疲勞模式發展為電腦程式，稱為 FAID (Fatigue Audit InterDyne ™)，為一考慮工作時數和休息時間之數學演算法軟體，通過輸入工作日期、工作班別開始及結束時間等班表資訊得到相關疲勞值，其目的是讓決策者能有效評估該班表。柯國川 [6] 曾以工作量和疲勞狀態為變數建立疲勞函數，並和疲勞管理軟體 FAID 進行比較。Dawson 等人 [7] 曾針對疲勞模型的構建以及當前組織使用疲勞模型的現況進行探討，該研究指出 FAID 在實驗室與實務應用上均被得到驗證，已經實際應用在輪班與延長工時疲勞值的估計，並作為管理疲勞相關風險的決策支持工具 (decision-support tool)。在國內部分，陳奕霖 [8] 亦曾考量飛航管制員之執勤時數、休息時數及工作班別建立疲勞值之計算函式，並以該函式為基礎建立一個管制員指派模式用於北部飛航服務園區。此函式與 FAID 不同，主要在值勤日班、夜班之疲勞值計算以及連續值勤日及休假日的累積疲勞值計算不同。

此外，雖然過去已有相當多學者針對各類人員排班問題進行相關研究，例如：Yan 與 Chang [9] 曾發展網路模式及演算法以求解民航駕駛員的排班問題，Yan 與 Tu [10] 曾利用網路技巧發展模式及演算法以處理空服員混合策略排班問題，Vaidyanathan 等人 [11] 曾針對北美鐵路人員排班問題，利用整數規劃技巧及網路方法，發展網路流動模型求解問題。Steinzen 等人 [12] 曾發展整數規劃模式，求解多場站之大眾交通運輸工具整合車輛調度與人力排班問題，劉政軒 [13] 曾發展模式以求解軸輻式貨運網路之駕駛排班問題。然而，以往較少發現有考量人員疲勞度排班之相關文獻。另外，參考以往文獻，發現網路模式應用於求解各領域之排班排程問題上已有相當良好的成效，例如 Yan 與 Chang [9] 及 Yan 與 Tu [10] 。

我國飛航管制員為 24 小時輪班制，且每月的基本工作時數為 162 小時，但近年來航勤量大增，管制員月平均工作時數超過 200 小時已是常態。實務上，國內飛航管制員之排班大多仰賴人工方式規劃，較無考量管制員之勞役度。此作法可能會造成管制員間勞役不均的問題，嚴重者更可能影響飛航安全。緣此，本研究基於航管單位之立場，考量飛航管制人員執勤產生之疲勞感，以最平均化每位飛航管制員工作總時數為目標，並滿足實務方面限制為前提下，利用數學規劃方法及網路流動技巧，分別構建線性及非線性系統性飛航管制員人力排班模式。在求解上，線性模式以 C++程式語言配合數學規劃軟體 CPLEX 進行求解，而非線性模式以線性模式為基礎，利用疲勞管理軟體 FAID 計算疲勞值並且搭配 C++程式語言及數學規劃軟體 CPLEX，發展一非線性求解方法。最後，為驗證模式之實用性，本研究以國內某航管單位的營運資料為例進行測試分析，期望透過系統性的規劃，能有效地協助決策單位規劃飛航管制員之人力排班。本文後續內容如下：第二節建構飛航管制員人力排班模式，第三節進行範例測試與分析，第四節提出結論與建議。

二、模式構建

本研究針對疲勞值的計算方式，將問題分為線性疲勞勤務問題及非線性疲勞勤務問題，並分別發展為線性疲勞值模式及非線性疲勞值模式。在應用上，非線性模式較能反映實際管制員的疲勞行為，至於線性模式僅為求解非線性模式之一輔助工具，亦即透過一連續地修正線性疲勞值與求解線性模式，以求解非線性模式。值得一提的是，對線性模式而言，只有在各班別疲勞值數據可精確地獲得之前提下，線性模式才可實用，否則所求得的結果極可能不切實際。因為各班別的精確疲勞值實際上難以事先得知，因此本研究在應用線性模式以輔助非線性模式的求解上，是先透過 FAID 軟體協助，並以簡單的平均值估算各班別的初始疲勞值，以進行第一回合線性模式之求解。之後，再以此解並利用 FAID 重新評估並適當地調整各班別的疲勞值，進行下一回合線性模式之求解。最後重複此程序直到收斂的標準後停止求解。關於問題描述、線性疲勞勤務模式架構及非線性疲勞勤務模式架構分別說明於後。

2.1 問題描述

經本研究實地訪談後發現，目前飛航管制員之排班仍仰賴人工方式規劃，其人工排班原則須滿足，日班不能連續執勤超過 12 小時、夜班執勤完畢後須休息 12 小時以上。此外，不同身份別可執勤之席位不同。管制員依身份不同分為督導及一般管制員，其工作班別的指派也有所差異。在實務上，督導可執勤督導及一般管制員之席位，而一般管制員則不可執勤督導席位。

為適當簡化模式的發展與界定模式的使用限制，本研究參考陳奕霖 [8] 之研究以及實務上人工排班原則後，擬定下列基本假設或已知條件：

1. 完整的管制員排班問題除必須考量本研究所考量的因素 (含疲勞度、公平性等等) 外，尚需考量人員的特休、年資、偏好、每月排班時數上限及其他相關人員的因素。由於完整的管制員排班問題相當複雜，難以建構一有效的模式以完全符合實務的條件，因此學術上一般可將此複雜問題分成兩階段問題求解，一為人力排班問題，另一為人員指派問題。例如文獻上一般空組員的排班問題可分成兩階段問題，一為組合產生問題 (pairing problem)，另一為人員指派問題 (rostering problem) (Yan 與 Tu [10])。本研究的問題屬第一階段的人力排班問題，只分成兩類人力 (督導及一般管制員)，尚未加入個別人員特性之考量，主要是針對各類人力 (督導及一般管制員) 及人數，考量疲勞度、公平性及本研究其他所考量的因素外，將每人的勤務組成可行的勤務組合 (pairing)，以為第二階段人員指派的輸入。由於實務上每星期每人的排班日數最多三至四日，因此二星期間可有相當的休假間隔，在疲勞度的計算上，二星期間透過適當的連接，可使下一星期初始的疲勞度歸零，因此在考量求解的效率下，可類似空服員之組合產生問題，以一星期為週期來產生各類人力的勤務組合。之後在第二階段人員指派問題中，考量四星期 (接近一

個月) 及各人員的特休、年資、偏好、每月排班時數上限及其他相關人員的因素、及每位人員在週期間之疲勞值轉換計算，將現有人員指派至各星期可行的勤務組合 (或可加上後最佳化調整以更符合實務條件)。本研究範圍界定在第一階段，至於未來可針對第二階段問題發展適當的模式及演算法，以進行有效的人員指派。

2. 本研究為增進實務上人力調度之靈活性及求解的效率，允許各班的人力可大於需求人數，多餘之人力則視為待命班。配合此待命班的設計，在實務的運作上，待命班人員仍需依規定上班，但可提供管理單位自由調度使用。在疲勞值的設定上，由於待命班人員亦可能被調度支援臨時休假人員之席位，因此本研究假設其上班的負荷與管制席相同。至於人員被安排至待命班之公平性方面，未來則可在第二階段人員指派問題上，加以考量，使得所有人的待命班數量儘量平均。
3. 規劃期為一個星期。由於每位管制員每月基本班別時數為 162 小時，為模式使用方便，本研究以一星期為規劃期，每位管制員一星期之基本班別時數約為 40.5 小時，若規劃完成後無法滿足此條件者，則決策者可指派其他人力支援之工作或進行人力資源之調整。
4. 不考慮同一天，同一執勤時間內，不同席位間互相調派之情形。實務上若發生此情況，係屬即時調整的問題，不在本研究規劃之範疇內。
5. 管制員各班別值勤時間、班別時數、需求人數及總人數為給定。
6. 因天候不佳、意外事故等而使得人力需求及規模有所變動之突發狀況，此類即時性問題，不在本研究規劃之範疇內。
7. 在線性疲勞勤務模式，每個工作班別之疲勞值為給定之固定值，且各班別之疲勞值為獨立不相互影響。線性疲勞勤務模式的假設，在實務上較不常見，雖較不符實務，但此模式可輔助求解非線性模式 (後述於第 2.4 節)。至於非疲勞勤務模式，本研究利用澳洲南澳大學研究中心以疲勞模式開發之數學演算法軟體 FAID (Roach 等人 [5])，作為本模式計算疲勞值之方式。相較於線性模式，非線性模式比較符合實務行為。

2.2 線性疲勞勤務模式架構

2.2.1 人員排班網路

本研究利用網路流動來表示規劃期內管制員在班別間轉換之情形，如圖 1 所示。一層網路代表一位管制員的排班情形，縱軸代表時間之延續，其長度為排班規劃期，可依規劃者需要而訂定。考量實務上管制員排班作業，網路時間的間距設為 1 天。橫軸代表管制員工作班別。其中班別 1 至班別 s，用來表示督導管制員之班別；班別 s+1 至班別 s+n，用來表示一般管制員之班別。要特別說明的是，本研究利用網路之型態將管制員指派到各個班別，以滿足其需求人數。由於具督導身分管制員可以指派至督導及一般管制員席位，因此在用來表示督導身分管制員之第 1 層至第 k 層網路中，橫軸部分具有班別 1 至班別 s+n。而用來表示一般身分管制員之第 k+1 層至第 k+m 層網路中，橫軸部分則僅有班別 s+1 至班別 s+n。

此外，節點與節線為本網路之兩大要素，節點代表某一天的班別狀態，節線代表管制員在兩個班別間之接續情形，若兩班別間為可接續，則於兩點間構建節線；若否，則兩節點間無節線連接。每一條節線的流量為一零壹整數，用來表示該管制員於該時間點是否有該排班。以下詳細說明節點與節線之設計。

(一) 節點

本研究之網路中，節點共分為 3 種型態：起點、迄點及工作班別節點，如圖 1 所示。起點為每層網路中最上方之獨立節點，為一虛擬節點，與各班別 (對應一席位) 第一個節點相連，用來表示規劃開始。此外，就網路流動而言，起點為供給點，其供給量為 1。迄點為每層網路中最下方之獨立節點，與各班別最後一個節點相連。迄點亦為一虛擬節點，用來表示規劃結束。就網路流動而言，迄點為需求點，其需求量為 1。至於工作班別節點則用來表示各天之各工作班別，就網路流動而言，均屬轉運點。值得注意的是，起點及迄點可視為一虛擬班別，此等虛擬班別的班別時數及疲勞值皆為 0。

(二) 節線

節線用來表示某位管制員不同班別間的接續情況。本研究之網路中，節線共分為兩種型態：排班節線與結束節線等，詳細說明如下：

1. 排班節線

此類節線除了第一天的時點是與起點相連接，用來表示排班開始及第一個時點的指派外，往後之時點為不同班別間之連接線，用來表示管制員在不同班別間 (亦指不同席位間) 的接續。值得一提的是，此節線依照實務上班別之間是否為可接續關係來構建，例如節點 1 對應為夜班，則連接之下一節點 2 只能為夜班或休假班，不能連接其他班別之節點。當排班節線流量為 1，表示該管制員在此二天將以該二班別的接續方式排班，流量為 0，代表該管制員在此二天不以該二班別的接續方式排班。此類節線的屬性含有管制員於該二班別之前一班別之班別時數及疲勞值 (在確定性模式假設為一固定值)。

2. 結束節線

此類節線係從各班別最後一個節點連接至終點之節線，為虛擬節線，代表該管制員完成規劃期間內的值勤所有班別後，最後從某班別結束該規劃之排班。相同於排班節線，此類節線的屬性亦含有管制員於該班別之班別時數及疲勞值，但二者皆為 0。

要特別說明的是，將實務問題模式化為數學模式具有多種形式 (alternative formulations)，而本研究模式乃是藉由網路流動技巧構建數學規劃模式，主要動機為透過文獻回顧後發現，過去已有許多研究將網路模式應用於求解排班排程問題上，且已有相當良好的成效。例如，Chen 等人 [14] 曾提到類似此網路模式，因為基於有效率的網路結構上，藉由此網路模式，可將問題定式為 non-strongly NP-hard，不似傳統的零壹整數規劃模式，一般將問題定式為 strongly NP-hard，如此可提升求解的效率。過去網路模式在人員排班問

題的應用上，多是使用在民航駕駛員、空服員或司機員等具有空間移動的人員排班問題。對於不具空間移動的人員排班問題上較為少見，更未曾發現有學者將其應用於飛航管制員的排班上，因此，本研究模式應具有創意。值得一提的是，不論是否以網路為架構之數學模式，當班別或人員數量增加時，問題規模均會增加，若問題規模大到難以直接藉由數學最佳化軟體求解時，則需發展啟發式演算法，而此可作為未來的研究方向之一。

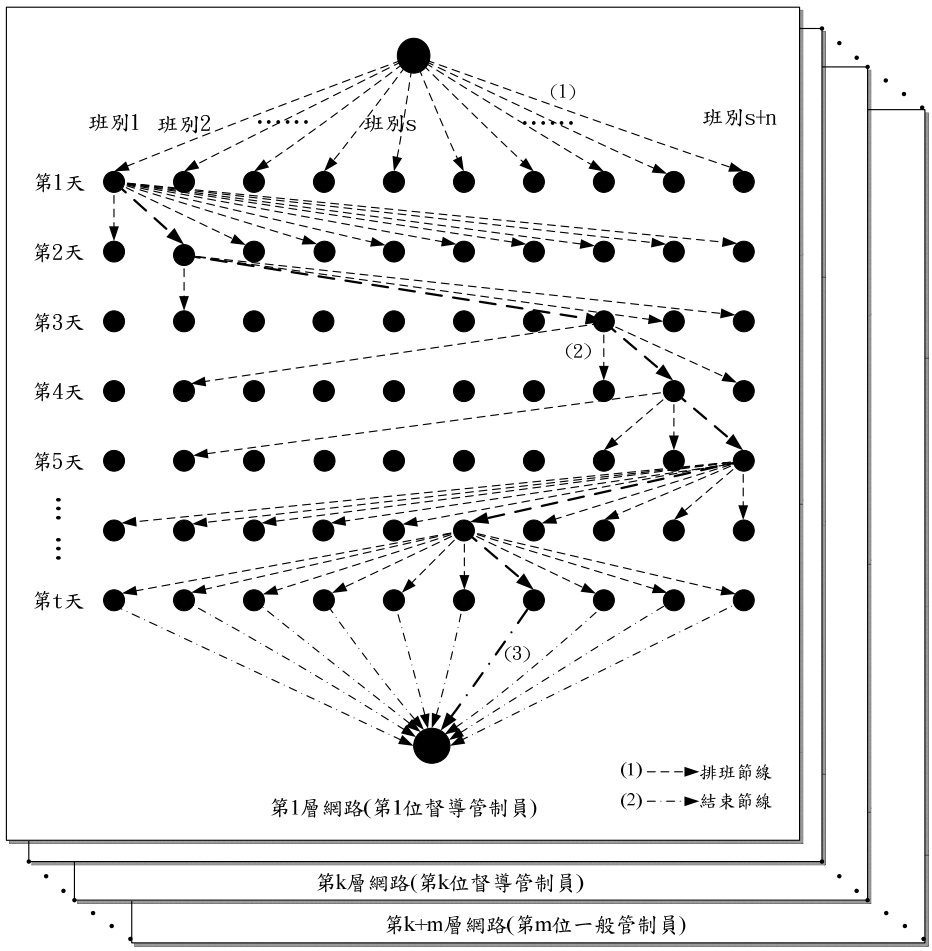

圖 1　人員排班網路圖

2.2.2 符號說明與數學定式

以下為模式之符號說明：

決策變數：

x_{ij}^k　第 k 層網路中節線 (i, j) 的流量，其值為 1 代表接續執勤節點 i 及 j 之所代表之班別；否則其值為 0。

U　所有管制人員中排班時數最高者。

L　所有管制人員中排班時數最低者。

集合定義：

T^k　第 k 層網路中所有轉運點的集合。

S^k　第 k 層網路中供給點的集合。

D^k　第 k 層網路中需求點的集合。

A^k　第 k 層網路中所有節線的集合。

A_{ds}^k　第 k 層網路中第 d 天第 s 班之節點出發的節線集合

M_s　包括第 s 班的網路集合

K　所有管制人員的集合。

D　所有天數的集合。

SW　所有工作班的集合。

SV　休假班之班別集合。

參數定義：

P_{ds}　第 d 天第 s 班的需求人數。

f_{ij}^k　第 k 層網路中飛航管制員在對應節點 i 之班別的疲勞值。

h_{ij}^k　第 k 層網路中飛航管制員在對應節點 i 之班別的班別時數。

F　每位管制人員於規劃期間之疲勞容忍值。

ε　一極小正值。

目標式：

$$Min\ Z = U - L + \varepsilon \cdot U \tag{1}$$

限制式：

$$\sum_{ij \in A^k} h_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \le U \quad ,\forall k \in K \tag{2}$$

$$\sum_{ij \in A^k} h_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \ge L \quad ,\forall k \in K \tag{3}$$

$$\sum_{\forall j} x_{ij}^k - \sum_{\forall s} x_{si}^k = 0 \quad ,\forall i \in T^k,\ k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{\forall j} x_{ij}^k = 1 \quad ,\forall i \in S^k,\ k \in K \tag{5}$$

$$\sum_{\forall s} x_{si}^k = 1 \quad ,\forall i \in D^k,\ k \in K \tag{6}$$

$$\sum_{k \in M_s} \sum_{ij \in A_{ds}^k} x_{ij}^k \ge P_{ds} \quad ,\forall d \in D, s \in SW \tag{7}$$

$$\sum_{k \in M_s} \sum_{ij \in A_{ds}^k} x_{ij}^k \le P_{ds} \quad ,\forall d \in D, s \in SV \tag{8}$$

$$\sum_{ij} f_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \le F \quad ,\forall\ k \in K \tag{9}$$

$$x_{ij}^k = 0 \vee 1 \quad ,\forall ij \in A^k,\ k \in K \tag{10}$$

目標式 (1) 為最高工作總時數管制員之上班總時數 (U) 與最低工作總時數管制員之上班總時數 (L) 兩者差異最小，代表各管制員的上班總時數差距極小化，目標在使所管制員的上班時數平均化，以為公平之排班。注意目標式中加入$\varepsilon \cdot U$一項之設計，是避免在解集合中有兩個以上的均衡解，而求得較高上班時數的均衡解。因為ε很小，所以不會明顯影響所得的目標值。決策者在求解後，可將目標值中刪除此項之值。限制式 (2) 為每位管制員上班累積時數不高於管制員中上班累積時數最高者。限制式 (3) 為每位管制員上班累積時數不低於管制員中上班累積時數最低者。限制式 (4)、(5)、(6) 皆為每層網路中各節點 (包含轉運點、供給點及需求點等) 流量守恆限制式。限制式 (7) 為各工作班別之上班人數須滿足其需求人數限制，在一般情況下，該班別之上班人數應與需求人數相等，而本研究為增進實務上人力調度之靈活性及求解的效率，允許各班的人力可大於需求人數，多餘之人力則視為待命班。此等「待命班」在實務上的確未放入管制勤務排班，然此班之建立，在實務面可使排班更為彈性，容易配合模式目標追求所有人力的值勤公平性。另外在數學面亦可放鬆限制式 (7)，讓上班人數滿足需求人數即可 (即限制式 (7) 的關係式為大於或等於)，可使模式限制條件相對寬鬆，擴大可行解區域，除有利於提升模式求解效率外，亦可望降低目標值 (即使管制員的上班時數更平均)，以提升公平性效果。限制式 (8) 為休假班之上班人數不可超過休假人數之限制。本研究經過多次測試後發現，增加此限制式可以有效地割除非可行解區域，提升求解效率，大幅縮短求解時間，故增加此有效的限制 (effectgive cut)。限制式 (9) 為每位管制人員工作累積之疲勞值不能大於疲勞容忍值。式中$f_{i,j}^{k}$值是代表飛航管制員在對應節點 i 之班別的疲勞值。由於疲勞值是一較難量化數值，因此本研究藉由 FAID 軟體單獨計算值勤各班別平均所產生的疲勞值，相同班別之$f_{i,j}^{k}$值為一固定值，並不會因為前時段為值班或休息而受到影響。至於 FAID 軟體詳細作法如第 3.1.2 節所述。限制式 (10) 為網路節線之流量僅可為 0 或 1。最後，此線性模式屬整數線性規劃問題，因為實務問題規模不大，所以可透過數學規劃軟體 CPLEX 直接求最佳解。

值得一提的是，在經實務訪談後發現，目前排班方式是在滿足督導席位之需求人數後，混合督導與一般管制員同時進行排班，如此可使排班更靈活，各管制員間之疲勞度更為平均，因此本研究模式也採用此做法。至於在未來若有管制單位期望督導盡量避免執勤一般管制員之席位，則可針對目標式進行修正，在做法上，可將代表督導值勤一般管制員席位之節線變數加上一懲罰值，並置於目標式中。如此，在目標成本最小化為的情況下，一般管制員席位將會優先安排非督導員執勤。

2.3 非線性疲勞勤務模式架構

非線性模式的網路設計與線性模式的網路相同，其數學式與線性模式相似，說明如下：

目標式：$Min \;\; Z = U - L$ (11)

限制式：$\sum_{ij} f(x_{ij}^{k}) \le F, \; \forall \; k \in K$ (12)

及限制式(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)、(10)。

目標式 (11) 表示最平均化管制員上班總時數。因為非線性模式屬整數非線性規劃問題，無法以 CPLEX 直接求解，需另發展啟發解法求解，為顯示理論之目標，所以不再加入在原線性模式配合求解之$\varepsilon \cdot U$一項。限制式 (12) 類似於線性模式之限制式 (9)，是用來表示為每位管制人員工作累積之疲勞值不能大於疲勞容忍值，其中之差異在於限制式左端是以函數型態表示。一般人們對於疲勞值的感受應是以非線性的累積方式，而不是單純以線性的累加方式，換言之，值勤時段的疲勞值會因為前一個值勤班別 (日班、夜班或休息) 而產生不同影響，因此理論上函式 $f(x_{i,j}^{k})$ 應為一非線性函數。該函式數值之獲得方式目前是藉由 FAID 軟體計算所得之，詳細作法如第 3.1.2 節所述。值得一提的是，目前無法得知 FAID 軟體中疲勞函式之詳細定式 (亦有可能不是一固定式子，而式一系列的計算方式)，未來若有疲勞值相關計算之數學函式，或甚至有直接針對飛航管制員疲勞計算之數學函式，則可直接帶入此限制式，可使模式更接近實際狀況。至於其他限制的意義則與上述線性模式相同。

2.4 非線性模式求解方法

過去柯國川 [6] 曾藉由澳洲南澳大學研究中心所開發之軟體 FAID 評估管制員之疲勞值，因此本研究在計算疲勞值亦採用該軟體。要特別說明的是，疲勞管理軟體 FAID 僅可就值勤時段以及班別之接續因子考量所產生之疲勞值，並無法因工作量 (航班數)、勤務內容 (不同機台) 或職位差別 (督導或一般管制員) 之不同，而產生不同的疲勞值。對考量相關因素後所產生之數學函式確實值得探討，故未來研究可針對飛航管制員 (分別督導及一般管制員) 之疲勞值發展數學函式，以更符合實務應用之需要。目前實務上，管理單位可適度將工作量較高或較繁重之勤務內容給予較高之人力需求，或藉由薪資結構來彌補勞役不均的差異。

由於疲勞函式並非為一固定式，本研究難以直接應用最佳化演算法直接求解此非線性模式，因此本研究乃應用線性模式搭配 C++程式語言與數學規劃軟體 CPLEX，發展一啟發式演算法，如圖 2 所示。該演算法之求解架構除考量求解時間，亦會以非線性模式之目標式為求解方向，以求近似最佳解。詳細的求解步驟如下所述：

步驟 0.為評估求解之績效，本研究首先設計兩個評估指標，分別為差異值與違反數，說明如下：

(1) 差異值：計算每位管制員於線性模式所求解之疲勞值，及其結果對應於疲勞管理軟體 FAID 所計算之疲勞值，並累加每位管制員兩者之差的平方後再取平方根，以數學式表示如下：

$$D = \sqrt{\sum_i (A_i - B_i)^2} \tag{13}$$

其中　D： 差異值

A_i：第i位管制員於規劃期內線性模式求解之疲勞值

B_i：第i位管制員於規劃期內線性模式求解結果對應於軟體求解之疲勞值

(2) 違反數：在規劃期間內，模式求解結果對應於軟體求解之疲勞值高於疲勞容忍值的管制員人數。舉例來說，假設一範例之疲勞容忍值為 80，將模式求解結果輸入疲勞管理軟體 FAID 計算後，發現有 3 位管制員之疲勞值大於 80，則此範例之違反數為 3。

步驟 1.先利用 FAID 粗估各班別之疲勞值，並代入線性模式求解，將所求得之排班結果透過 FAID 計算其疲勞值，並取各班別值勤後產生之最大疲勞值作為線性模式中各班別之疲勞初始值f_{ij}^{k}。透過此作法可修正線性模式參數 f_{ij}^{k}。

步驟 2.此步驟主要用於降低差異值。考量休假後疲勞感下降，因此配合線性模式之應用，茲將休假班疲勞值設為一負值，如此可有效地降低差異值。

步驟 3.此步驟主要用於降低違反數。考量夜班以及需求人數較高之班別其疲勞值較一般班別高，因此配合線性模式之應用，藉由調高夜班或需求人數較多之班別的疲勞值以降低違反數。

步驟 4.適當微調休假班 (透過步驟 2) 與各班別 (透過步驟 3) 之疲勞值，可降低差異值和違反數，若違反數為零且目標值與管制員中最高班別時數之比例未超過 25%，則求解結束；若否，則進入步驟 5；

步驟 5.判斷是否已求解 10 回合，若是則進入步驟 6；若否則返回步驟 2。

步驟 6.在既有的答案中挑選違反數較少之求解結果進行後最佳化 (post-optimization) 即微調違反者之班表，使違反數降為零。

要特別說明的是，在本模式中限制式 (7) 是人力需求限制，用來限制所有班別須滿足其最低人力需求，但求解結果在某些班別可能提供比最低需求更多之人力，在此本研究將此情況稱為待命班。而待命班可能會造成違反數增加，因此本研究在每一步驟求解結束後，藉由檢查違反者之班表是否含有可刪除之待命班，判斷是否能消除違反數；若能將違反數消除至 0，則可視為調整完畢，並記錄其求解結果；若否，則放棄其解，持續進入下一步驟求解，最後可依規劃者需求從記錄結果中挑選較適合之求解結果。此外，由於非線性求解過程較為複雜，在降低差異值與違反數的過程中，同時亦會造成目標值惡化。因此，本研究所提出之演算法是透過適應性調整的方式，檢視各步驟之求解結果後，進行參數調整。期望解由此機制以提升求解品質。值得一提的是，本研究經多次測試，發現在調整違反數減少至的過程中，目標值極易惡化，若能調整一可行解 (違反數為 0) 之目標值與最高班別時數之比例在 25%以內甚不容易，因此在步驟 4 中判斷目標值與管制員中最高班別時數之比例未超過 25%時，即結束運算，代表已找到不錯的近似解。

三、範例測試

本節參考陳奕霖 [8] 提出國內北部飛航服務園區某航管單位之相關班表資料測試實際

應用時之績效。本研究以 Microsoft Windows 7 之 32 位元作業系統為平台，以 Dev C++ 軟體做為開發環境，並結合 CPLEX12.6 數學規劃軟體進行模式求解，於處理器為 Intel (R) Core (TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz，4.00 GB RAM 之個人電腦上執行演算作業。

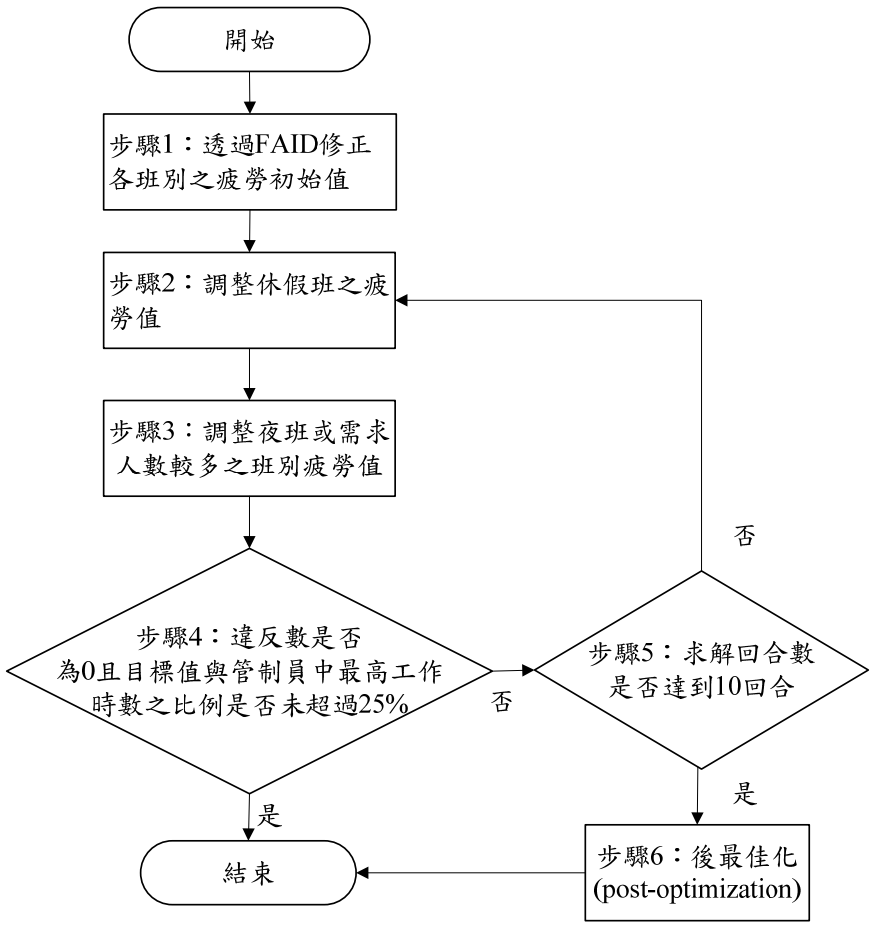

圖 2　求解流程圖

3.1 資料輸入

本研究以國內北部飛航服務園區某航管單位作為研究範圍，規劃長度為 7 天，網路之時點間距為 1 天，管制員人數設定部分假設為：督導管制員為 20 人，一般管制員為 40 人，以及飛航管制員總人數為 60 人，疲勞容忍值為 80，目標式中一極小值設定為 0.001。值得一提的是，本研究是大致的假設人力與實務的人力不全相同，所以本研究的測試僅能說是類實務的測試，用以初步評估模式的效果。未來本研究模式若要在實務上使用時，建議以精確資料再進行測試。班表相關資料和疲勞值資料，茲說明如後。

3.1.1 班表相關資料

在班表相關資料方面，本研究參考陳奕霖 [8] 整理並適當縮減之班表，其可細分為各工作班別之席位、需求人數、班別時數及執勤時間，詳細說明如表 1，班別時數包含休息時間 1 小時，因此工作時數並不會超過 12 小時。

表 1　航管單位班表

班別	席位	需求人數	班別時數	席位執勤時間
班 1	督導席日班	1	11	0800-1900
班 2	督導席夜班	1	13	1900-0800
班 3	一般管制席日班	5	12	0700-1900
班 4	一般管制席日班	7	11	0800-1900
班 5	一般管制席日班	2	12	0800-2000
班 6	一般管制席日班	1	10	0900-1900
班 7	一般管制席日班	2	12	0900-2100
夜 8	一般管制席夜班	7	13	1900-0800
夜 9	一般管制席夜班	1	11	2000-0700
休	休假班	33	0	-

資料來源：陳奕霖 [8]。

3.1.2 疲勞值資料

FAID 軟體之使用方式是輸入每天值班時間，即可獲得計算期間每天所產生之累加疲勞值。本研究線性模式疲勞值之計算方式為假設一星期每天皆固定上同一工作班別，並將該班別之執勤時間輸入疲勞管理軟體 FAID，藉此可求得一星期每天所累積之疲勞值，而本研究班別之疲勞值則是以每天增加量之平均值假設為該班別之疲勞值，以為線性模式 (求解非線性模式之第一回合) 各班別的初始疲勞值。

至於每週疲勞容忍值之設定，過去柯國川[6]曾藉由疲勞管理軟體 FAID 以不同值班情境進行測試，並歸納出五個疲勞程度與數值範圍：(1) 標準 (0-40)，(2) 中度 (40-80)，(3) 高度 (80-100)，(4) 非常高度 (100-120)，(5) 極端 (120+)。本研究為避免飛航管制員產生高度疲勞，因此將一星期工作之疲勞容忍值 (上限) 假設為 80。

3.2 測試結果分析

本小節分別針對線性模式與非線性模式之測試結果進行說明。值得一提的是，本小節線性模式的測試結果說明及與非線性模式的測試結果的比較上，本研究在線性模式中各班

別的疲勞值，是先透過 FAID 軟體協助並以簡單的平均值估算，以為求解非線性模式各班別之初始疲勞值，初步的線性模式結果雖可能不實際，但可為比較二模式及人工排班結果的參考用。

3.2.1 線性模式

本研究線性模式之求解結果如表 2 所示。在 23,842 個變數與 4,010 條限制式的問題規模下，共耗費求解時間為 3,580.41 秒，目標值為 0.047，管制員中最高與最低上班時數差異值 (為實際目標值) 為 0，所有管制員之上班時數均為 47 小時，為最平均之情況。若將其人員數與上班時數相乘可發現，所有管制員一週總上班時數為 2,820 小時。但若將每日 9 班別且累計一週需求人數與班別時數後之總時數為 2,247 小時。此現象 (兩者間差距) 即為第 2.1 節所提及之「待命班」，為滿足各管制員的上班總時數差距極小化，求解結果在某些班別可能提供比最低需求更多之人力。

表 2　線性模式之求解結果

項目	數值
變數	23,842
限制式	4,010
模式目標值	0.047
上班時數最高與最低差異值 (U-L)	0
求解時間 (秒)	3,580.41
管制員中最高上班時數 (U)	47
管制員中最低上班時數 (L)	47

此外，因為此求解出之人員排班規劃結果內容頗為龐大，因此僅以其中 10 位管制員之排班結果示意，如表 3 所示。值得一提的是，人員編號 2 於星期六值勤班別為「夜 9」，值勤時間為 2000-0700，於星期日值勤班別為「班 2」，值勤時間為 1900-0800，雖然為連續兩個夜班，但兩者間隔為 12 小時，符合相關法規規定，因此出現此排班結果。此排班結果的確可能會使得管制員疲勞值加速增加，而線性模式之疲勞值是依各班別疲勞值以線性累加的方式計算，難以呈現因連續排夜班所而造成疲勞值呈非線性增加的情況。此情況亦為本研究發展非線性模式之動機。值得一提的是，若實務有規定不可排連續夜班之條件，則本研究線性及非線性模式可適當修訂，以滿足此條件，作法上可將連續夜班之間的排班節線移除，即可避免此連續排夜班的情況發生。此亦表示本研究二模式具有彈性，可以因應實務的不同規定而有效地修訂模式，以滿足實務條件。

表 3　線性模式求解所得 10 位管制員之排班結果

人員編號 / 時間	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
星期一	夜 9	休	班 1	休	班 4	休	班 5	班 7	休	休
星期二	休	休	休	班 7	休	班 1	休	夜 9	休	班 3
星期三	休	休	休	班 7	班 1	班 7	班 3	休	班 4	班 3
星期四	班 2	班 7	班 3	班 1	班 5	班 4	休	班 3	班 3	夜 8
星期五	休	班 4	夜 9	休	休	班 2	班 3	休	夜 8	休
星期六	班 3	夜 9	班 2	休	夜 8	休	班 1	休	休	休
星期日	班 1	班 2	休	班 3	休	休	休	班 7	夜 9	班 6
上班時數	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
疲勞值	68	64	68	45	57	55	51	54	68	60

3.2.2 非線性模式

本研究非線性模式之求解結果如表 3 所示。耗費求解時間為 16,871.04 秒，目標值為 10，換言之，即指在所有管制員中上班時數最高與最低者之差異為 10 小時，其中管制員中最高上班時數為 45 小時，最低上班時數為 35 小時。本研究亦挑選其中 10 位管制員之排班結果示意，如表 5 所示。此外，若詳細觀察兩模式之細部解，可發現在線性模式排班結果中 (如表 3)，人員 1 其一週班表為夜 9、休、休、班 2、休、班 3 與班 1，共計安排 4 個班，其中夜 9 為夜班，班 2 為督導席夜班。在非線性模式排班結果中 (如表 5)，人員 1 其一週班表為班 6、休、休、夜 8、班 2、休與休，共計安排 3 個班，其中夜 8 為夜班，班 2 為督導席夜班。細部觀察班別順序，線性模式於週一上完夜班後即休息兩天，週四上完夜班後又可休息一天，爾後連上兩天日班。反觀非線性模式於週一上完日班後休息兩天，

表 4　非線性模式之求解結果

項目	求解結果
模式目標值	10
上班時數最高與最低差異值 (U-L)	10
管制員中最高上班時數 (U)	45
管制員中最低上班時數 (L)	35
求解時間 (秒)	16,871.04

週三及週四連上兩天夜班，爾後休息兩天。由排班順序可發現，雖然線性模式中人員 1 共上 4 個班。但該人員值勤一次夜班後即獲得兩天休息，才再次值勤夜班，因此疲勞值有效下降。而非線性模式顯示該人員在週四與週五連續值勤兩天夜班，其疲勞值累加更明顯。因此產生線性模式安排 4 個班別所產生之疲勞值低於非線性模式安排 3 個班別的情況。由此亦可發現，疲勞值之計算方式不應單純僅考量班別數量，亦應考量 (日、夜) 班別間的接續方式，如此較能真實反應人員上班後之疲勞感。

表 5　非線性模式求解所得 10 位管制員之排班結果

人員編號 / 時間	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
星期一	班 6	休	夜 8	班 3	休	休	班 6	休	休	休
星期二	休	休	休	夜 8	休	休	休	休	休	休
星期三	休	班 3	班 3	休	班 5	休	休	班 3	休	班 2
星期四	夜 8	夜 8	休	休	班 3	班 2	休	休	班 4	休
星期五	班 2	休	休	休	夜 8	休	夜 8	休	休	班 1
星期六	休	休	休	班 4	休	班 4	休	班 4	班 4	班 5
星期日	休	班 1	班 4	休	休	班 3	班 2	夜 8	夜 8	休
上班時數	36	36	36	36	37	36	36	36	35	36
疲勞值	79	37	23	28	77	52	67	67	69	45

3.2.3 測試結果分析

本研究透過文獻回顧發現，在過去僅有陳奕霖 [8] 是在考量疲勞管理的基礎下進行飛航管制員排班的研究，但由於本研究採用 FAID 的疲勞值計算方式與陳奕霖[8]所建立之疲勞值計算函式不同，且本研究亦額外考量並設計「待命班」，立基點及問題皆與陳奕霖 [8] 不同，兩者間實難以進行結果比較，因此本研究分別針對線性模式、非線性模式以及人工排班進行測試，彙整如表 6 所示。另外，本文所謂的人工排班結果，並非透過實務資料所獲得之實務班表，而是參考人工排班原則下，依據本研究所給定的資料所製作之排班結果，用以初步評估模式的效果。觀察三種不同方法之測試結果發現，其中以線性模式結果之上班時數為最平均 (每位管制員上班時數皆相同)，但其規劃結果有 16 位管制員違反非線性疲勞容忍值 (為真正的疲勞容忍值)，理論上為不可行解。而非線性模式之求解結果顯示，所有管制員皆滿足非線性疲勞容忍值，理論上為可行解。人工排班結果之管制員上班時數為三者中最不平均，且有 1 位管制員甚至違反線性疲勞容忍值，有 18 位管制員違反非線性疲勞容忍值，理論上為不可行解。由此測試結果可知，非線性模式之求解結果明顯較線性模式及人工排班可行，而線性模式與人工排班結果皆不可行，只是線性模式的違反

度較人工排班為小。值得一提的是，本研究課題屬規劃問題，可以事先提早求解，因此求解時間在各方法的效果比較上不是主要的因素。另外，線性模式的結果中每位管制員一週排 4 班，較非線性模式的結果中每位管制員一週排 3 班為多，其原因為雖然排班結果已滿足各班別需求人數 (限制式(7))，但為追求最高工時與最低工時差異最小，因此，部分管制員產生一些待命班 (共計 51 個人次)，但刪除此等待命班後，仍有部分管制員違反非線性疲勞容忍值，仍為不可行解。值得一提的是，由於線性模式在疲勞值的設計上，係基於單純的線性獨立假設，可能與實務行為有所差異，因此雖求得的解較非線性模式解不可行，但此模式可輔助非線性模式之求解，故在理論與實務上仍有其功能及意義。

表 6　測試結果

項目	線性模式 求解結果	非線性模式 求解結果	人工排班結果
模式目標值	0.047	10	-
上班時數最高與最低差異值 (U-L)	0	10	22
管制員中最高上班時數 (U)	47	45	52
管制員中最低上班時數 (L)	47	35	30
求解時間 (秒)	3580.41	16871.04	-
違反線性疲勞容忍值之人數	0	-	1
違反非線性疲勞容忍值之人數	16	0	18

3.3 敏感度分析

由於模式中各項輸入資料，在數值不同的情形下，可能造成不同的規劃結果與績效，故為評估輸入數值的不同對於模式之影響，本研究針對線性模式與非線性模式之參數進行敏感度分析。另外，為提升求解效率，本研究在各敏感度分析中設定模式求解時間限制為 3,600 秒。

3.3.1 疲勞容忍值之敏感度分析

疲勞容忍值為管制員排班之一重要因素，本研究針對疲勞容忍值分別以線性模式及非線性模式進行敏感度分析，並觀察其變化。以線性模式探討疲勞容忍值對於求解結果的影響，其結果如表 7 所示。隨著疲勞容忍值數值降低，管制員上班時數最高與最低差異值有增加之趨勢，例如當減少 20%時，管制員上班時數最高與最低者之差異值增加至 1 小時。本研究持續降低其疲勞容忍值，直到減少到 37.5%時，發現模式無可行解，即疲勞容忍值過低以致於無法找到可能解以滿足各工作班別之需求人數。至於當疲勞容忍值數值增加

時，管制員上班時數變化幅度不大，亦管制員之上班時數已達到最平均之情形。

表 7　疲勞容忍值變動下之線性模式求解結果

疲勞容忍值				
變化比例	62.50%	80%	100%	120%
模式目標值	Infeasible	1.047	0.047	0.047
上班時數最高與最低差異值		1	0	0
管制員中最高上班時數 (U)		47	47	47
管制員中最低上班時數 (L)		46	47	47
求解時間 (秒)		2466.67	3580.41	2886.56

以非線性模式探討疲勞容忍值對於求解結果的影響，如表 8 所示。其結果顯示當疲勞容忍值減少 20%，其管制員上班時數較不均勻，且求解過程中發現反覆調整每階段之疲勞初始值，仍無法大幅降低違反數，則進入後最佳化 (post-optimization) 階段，藉由人工方式調整違反者之班表。而當疲勞容忍值提升 20%，其管制員上班時數為最平均之狀態，且可藉由刪除待命班將違反數降至為 0。

表 8　疲勞容忍值變動下之非線性模式求解結果

疲勞容忍值				
變化比例	62.50%	80%	100%	120%
模式目標值	Infeasible	21	10	0
上班時數最高與最低差異值		21	10	0
管制員中最高上班時數 (U)		45	45	47
管制員中最低上班時數 (L)		24	35	47
求解時間 (秒)		13065.09	16871.04	2886.56

觀察兩模式之求解結果，發現當疲勞容忍值變動時，線性模式結果受疲勞容忍值變動幅度之影響較小，較能反應實務作業之非線性模式結果受疲勞容忍值變動幅度之影響則較大。

3.3.2 飛航管制人員總人數之敏感度分析

由於飛航管制人員數量可能會影響管制員排班結果，故本研究針對飛航管制人員數分別以線性模式及非線性模式進行敏感度分析，將督導與一般管制員人數按照比例增加及減少，並觀察其變化。要特別說明的是，一般用人單位在規劃供給人力時所需要考量的因素

眾多，例如：每日需求人數、備用人力、人員資歷或資格、人員薪資、…等等，因此，一般而言，單位需求人數與班表規劃並不會同時處理，且人員班表規劃多是在可用人數已知的情況下進行。所以此敏感度分析主要目的是用於瞭解不同可用人數變化對於求解結果的影響，並無法單純藉此提供用人單位之適當人數建議。

線性模式求解結果如表 9 所示，當管制員總人數減少 20%，管制員上班時數較不均勻，差異為 1 小時，而將總人數減少 40%，發現無可行解；而當總人數增加 20%時，每位管制員之上班時數皆減少 12 小時，差異值為 0，可見飛航管制員總人數提升，除可維持排班的公平性外，亦將有助於降低管制員之上班時數。

表 9　飛航管制員總人數變動下之線性模式求解結果

飛航管制員總人數				
變化比例	60%	80%	100%	120%
模式目標值	Infeasible	1.048	0.047	0.035
上班時數最高與最低差異值		1	0	0
管制員中最高上班時數 (U)		48	47	35
管制員中最低上班時數 (L)		47	47	35
求解時間 (秒)		2401.11	3580.41	1854.23

至於非線性模式的求解結果如表 10 所示，當總人數減少 20%，其管制員班別時數較不均勻，而總人數增加 20%，管制員上班時數呈現最平均之狀態且上班時數亦降低，表示在充足的人力資源下，較容易達到排班公平性且能降低每位管制員之上班時數。

觀察兩模式之求解結果，發現當飛航管制員總人數減少時，不論在線性或非線性模式管制員最高與最低上班時數之差異值均有增加，而在飛航管制員總人數增加時，線性模式與非線性之求解結果相似，顯示管制員上班時數呈現平均之狀態且上班時數降低。

表 10　飛航管制員總人數變動下之非線性模式求解結果

飛航管制員總人數			
變化比例	80%	100%	120%
模式目標值	11	10	0
上班時數最高與最低差異值	11	10	0
管制員中最高上班時數 (U)	48	45	35
管制員中最低上班時數 (L)	37	35	35
求解時間 (秒)	7254.58	16871.04	1854.23

3.4 方案分析

本節針對日班與夜班工作感受度之間的差異性進行方案設計，評估日夜班在給定不同的權重下，管制員排班結果的變化，提供決策者未來應用模式時之參考。為進行此方案分析，本研究修訂原模式，將原線性模式限制式 (1)及(2) 修訂如式 (15)及(16) 所示，主要是增加一變數 (a_s) 代表第 s 個班別的權重，並以最平均化加權後之上班時數為目標。

$$\sum_{ij\in A^k} a_s \cdot h_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \le U \ ,\forall k \in K \tag{15}$$

$$\sum_{ij\in A^k} a_s \cdot h_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \ge L \ ,\forall k \in K \tag{16}$$

線性模式求解結果如表 11 所示，若以夜班為日班之 1.5 倍權重求解，模式目標值為 2.5535，加權後之最高與最低上班時數差異值為 2.5 小時，所有管制員中最高加權上班時數為 53.5 小時，最低加權上班時數為 51 小時。在此求解結果下，若計算其所對應之非線性疲勞值，發現有 6 人違反非線性疲勞容忍值。若以夜班為日班之 2 倍權重求解，模式目標值為 1.060，加權後之最高與最低上班時數差異值為 1 小時，所有管制員中最高加權上班時數為 60 小時，最低加權上班時數為 59 小時。在此求解結果下，若計算其所對應之非線性疲勞值，發現有 5 人違反非線性疲勞容忍值。

表 11　線性模式於不同權重下之求解結果

線性模式			
權重 (日班：夜班)	1 ： 1	1 ： 1.5	1 ： 2
模式目標值	0.047	2.5535	1.060
加權上班時數最高與最低差異值	0	2.5	1
管制員中最高加權上班時數 (U)	47	53.5	60
管制員中最低加權上班時數 (L)	47	51	59
求解時間 (秒)	3580.41	3438.81	3600
違反非線性疲勞容忍值之人數	16	6	5

為了解不同權重下排班的細部變化，本研究挑選加權班別時數最高與最低之管制員後，其餘隨機選取，共列舉 10 位管制員於規劃期間內之排班結果，如表 12 及表 13 所示。結果發現大部分管制員在一個星期中若沒有夜班，平均會休假 2 天，包含其他班別共計 5 個工作班。若有 1 個夜班，平均會休假 3 天，包含其他班別共計 4 個工作班。若有 2 個夜班，平均會休假 4 天，包含其他班別共計 3 個工作班。此等結果驗證，在感受上夜班較日班為重或累，所以安排的夜班數在折抵日班數相對較多。

表 12　線性模式在 1：1.5 之權重求解出 10 位管制員之班表

人員編號 / 時間	3	7	12	18	22	23	24	29	56	57
星期一	休	休	休	夜 8	班 6	班 3	班 7	班 3	休	夜 8
星期二	班 4	班 4	班 3	休	休	休	班 4	班 4	休	夜 8
星期三	班 4	休	休	休	休	夜 8	休	夜 8	班 4	休
星期四	休	班 3	班 4	休	休	休	夜 9	休	班 6	休
星期五	休	休	班 2	班 4	班 4	休	休	休	班 6	班 5
星期六	班 1	班 1	休	班 5	班 5	夜 8	休	休	班 6	休
星期日	班 2	夜 8	班 1	班 4	夜 8	休	班 3	班 4	班 7	休
加權班別時數	52.5	53.5	53.5	53.5	52.5	51	51.5	53.5	53	51
實際班別時數	46	47	47	47	46	38	46	47	53	38

表 13　線性模式在 1：2 之權重求解出 10 位管制員之班表

人員編號 / 時間	2	5	6	21	23	27	34	48	53	59
星期一	休	休	休	班 6	夜 8	班 4	班 7	夜 8	夜 9	班 3
星期二	休	休	班 1	班 3	休	班 4	休	休	休	班 3
星期三	班 6	班 1	班 7	夜 8	休	休	休	休	休	班 5
星期四	班 7	班 3	班 3	休	班 5	休	夜 8	休	班 4	休
星期五	班 5	休	班 7	休	班 4	夜 8	休	班 4	休	班 7
星期六	休	班 1	班 5	休	班 6	休	休	夜 9	夜 8	休
星期日	班 2	夜 8	休	班 4	休	班 4	夜 9	休	休	班 3
加權班別時數	60	60	59	59	59	59	60	59	59	60
實際班別時數	47	47	59	46	46	46	36	35	35	60

若以非線性模式求解，其結果如表 14 所示。若以夜班為日班之 1.5 倍權重求解，則模式目標值為 13，所有管制員中最高加權上班時數為 53.5 小時，最低加權上班時數為 40.5 小時。若以夜班為日班之 2 倍權重求解，則模式目標值為 12，所有管制員中最高加權上班時數為 60 小時，最低加權上班時數為 48 小時。

表 14　非線性模式於不同權重下之求解結果

非線性模式			
權重 (日班：夜班)	1 ： 1	1 ： 1.5	1 ： 2
模式目標值	10	13	12
加權上班時數最高與最低差異值	10	13	12
管制員中最高加權上班時數 (U)	45	53.5	60
管制員中最低加權上班時數 (L)	35	40.5	48
求解時間 (秒)	16871.04	3438.81	3600

為觀察兩範例之求解結果，本研究挑選加權上班時數最高與最低之管制員後，其餘隨機選取，共列舉 10 位管制員於規劃期間內之排班結果，如表 15 及表 16 所示。結果發現大部分管制員一星期 3 個日班、1 個夜班、休假 3 日，少部分管制員工作 1 個日班、2 個夜班、休假 4 日或 5 個日班、休假 2 日。

四、結論與建議

本研究以飛航管制單位之立場，應用網路流動技巧配合數學規劃方法，構建一個線性與一個非線性飛航管制人員排班規劃模式，該等模式與過去研究最大之差異為本研究將管制員執勤時所產生之疲勞感與公平性納入排班考量。其他結論與建議條列歸納如下：

表 15　非線性模式在 1：1.5 之權重求解出 10 位管制員之班表

人員編號 / 時間	7	11	12	21	22	35	42	47	56	60
星期一	休	班 3	休	班 3	班 6	休	班 5	休	休	夜 8
星期二	班 4	夜 8	班 3	夜 9	休	夜 8	班 4	班 3	休	休
星期三	休	休	休	休	夜 8	休	夜 9	班 3	班 4	班 4
星期四	班 3	夜 8	班 4	班 3	休	休	休	休	班 6	班 4
星期五	休	休	班 2	休	班 4	班 5	休	夜 9	班 6	休
星期六	班 1	休	休	班 4	班 5	休	休	休	班 6	班 4
星期日	夜 8	休	班 1	休	休	夜 8	班 3	休	班 7	休
加權班別時數	53.5	51	53.5	51.5	52.5	51	51.5	40.5	53	52.5
實際班別時數	47	38	47	46	46	38	46	35	53	46

表 16　非線性模式在 1：2 之權重求解出 10 位管制員之班表

人員編號 / 時間	2	11	17	23	27	35	47	48	53	59
星期一	休	休	休	夜 8	班 4	休	休	夜 8	夜 9	班 3
星期二	休	班 3	班 3	休	班 4	休	休	休	休	班 3
星期三	班 6	休	休	休	休	班 4	夜 8	休	休	班 5
星期四	班 7	班 2	休	班 5	休	休	夜 9	休	班 4	休
星期五	班 5	休	班 4	班 4	班 8	夜 8	休	班 4	休	班 7
星期六	休	休	班 2	班 6	休	休	休	夜 9	夜 8	休
星期日	班 2	夜 9	休	休	班 4	夜 9	休	休	休	班 3
加權班別時數	60	60	49	59	59	59	48	59	59	60
實際班別時數	47	36	36	46	46	35	24	35	35	60

1. 本研究利用疲勞管理軟體 FAID 先計算出各班別之疲勞固定值，再以 C++程式語言配合 CPLEX 數學規劃軟體求解線性模式；至於非線性模式之求解，則是參考線性模式求解結果，重新計算模式之疲勞初始值，並發展啟發解法以求解。
2. 為初步評估此等模式之績效，本研究以國內北部飛航服務園區某航管單位的排班作業為例，進行範例測試，並針對疲勞容忍值與飛航管制員總人數進行敏感度分析，以瞭解此等參數值調整對於模式結果之影響。
3. 本研究亦針對管制員執勤日班與夜班之感受度的差異性進行方案分析。此等測試結果顯示本研究之模式具有良好的運用效果，應可作為飛航管制單位排班之參考。
4. 未來的研究方向，可考量將問題規模擴大，例如增長規劃時間，或擴大規劃範圍以涵蓋多個相關單位。
5. 本研究發展之非線性模式，因目前缺乏具體的疲勞值數學函式，所以是應用現有疲勞管理軟體 FAID 以重複估算疲勞值，在定式上較不完整，求解上亦較欠缺效率，故未來研究可發展一計算疲勞值之數學函式，並同時發展一有效的求解演算法，更符合實務應用之需要。

參考文獻

1. 王孝輝，**飛航管制簡介**，民用航空局民航人員訓練所，臺北，民國 91 年。
2. 陳秋蓉、毛義方、陳美蓮，**航管人員工作與生理疲勞負荷調查研究**，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，臺北，民國 94 年。
3. 郭仲偉、湯美玲、葉鈺菁、呂婉甄，「臺灣航管員工作壓力之探討」，2011 年海峽兩

岸觀光旅遊研討會，民國 100 年。

4. Cabon, P., “Fatigue in Air Traffic Control”, *Hindsight*, Vol. 13, 2011, pp. 55-59.
5. Roach, G. D., Fletcher, A., and Dawson, D., “A Model to Predict Work-Related Fatigue Based on Hours of Work”, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol. 75, No. 3, 2004, pp. A61-A69.
6. 柯國川，「利用整數規劃法求解航管人員排班問題」，成功大學航空太空工程學系碩士論文，民國 99 年。
7. Dawson, D., Noy, Y. I., Härmä, M., Åkerstedt, T., and Belenky, G., “Modelling Fatigue and the Use of Fatigue Models in Work Settings”, *Accident Analysis & Prevention*, Vol., 43, No. 2, 2011, pp. 549-564.
8. 陳奕霖，「北部飛航服務園區管制員指派模式之研究」，長榮大學航運管理研究所碩士論文，民國 103 年。
9. Yan, S. and Chang, J. C., “Airline Cockpit Crew Scheduling”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 136, No. 3, 2002, pp. 501-511.
10. Yan, S. and Tu, Y. P., “A Network Model for Airline Cabin Crew Scheduling”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 140, No. 3, 2002, pp. 531-540.
11. Vaidyanathan, B., Jha, K. C., and Ahuja, R. K., “Multicommodity Network Flow Approach to the Railroad Crew-Scheduling Problem”, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 51, No. 3, 2007, pp. 325-344.
12. Steinzen, I., Gintner, V., Suhl, L., and Kliewer, N., “A Time-Space Network Approach for the Integrated Vehicle and Crew-Scheduling Problem with Multiple Depots”, *Transportation Science*, Vol. 44, No. 3, 2010, pp. 367-382.
13. 劉政軒，「軸輻式貨運網路之駕駛排班問題」，臺灣科技大學工業管理系碩士論文，民國 103 年。
14. Chen, M., Yan, S., Wang, S. S., and Liu, C. L., “A Generalized Network Flow Model for the Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows”, *Engineering Optimization*, Vol. 47, Issue 2, 2015, pp. 165-183.