

# 目錄

目錄.....	i
表目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究範圍與問題界定.....	3
1.3 研究內容與流程.....	8
第二章 文獻回顧.....	11
2.1 組員派遣問題文獻回顧.....	11
2.2 限制規劃文獻回顧.....	19
第三章 公平性組員派遣 CSP 限制建立.....	28
3.1 後艙組員派遣要求.....	28
3.2 組員派遣原則說明.....	32
3.3 公平性因素.....	34
第四章 公平性組員派遣限制規劃模式之建立.....	38
4.1 數學規劃與限制規劃之比較.....	38
4.2 公平性組員派遣限制規劃模式.....	40
4.2.1 變數結構之設計.....	41
4.2.2 資料輸入.....	45
4.2.3 搜尋策略與分階段指派方法.....	49
4.2.4 限制函數列式.....	51
第五章 實證分析測試.....	56
5.1 實驗設計.....	56
5.1.1 測試資料說明.....	56
5.1.2 各階段指派.....	57
5.2 測試結果與分析.....	61
5.3 不同屬性上限設定之結果分析.....	67
5.4 多重解分析.....	69
第六章 結論與建議.....	70
6.1 結論.....	70
6.2 建議.....	71
參考文獻.....	72
附件一.....	75

## 表目錄

表 2.1 組員派遣問題文獻比較 .....	12
表 2.2 分枝定限法求解步驟 .....	15
表 3.1 各機型飛航任務簽派空勤員額規定 .....	29
表 3.2 本研究公平性組員派遣 CSP 限制 .....	37
表 4.1 勤務組合指派列表之範例 .....	42
表 4.2 組員月行程班表之範例 .....	43
表 4.3 公平性屬性累積列表之範例 .....	44
表 4.4 既定行程資料範例 .....	46
表 4.5 待指派勤務組合資料範例 .....	46
表 4.6 公平屬性參數 .....	47
表 4.7 排班相關參數 .....	48
表 4.8 勤務組合分類 .....	50
表 4.9 本研究 CSP 限制條件 .....	51
表 5.1 本研究個案資料 .....	56
表 5.2 C 航空公司航點資料 .....	57
表 5.3 長勤務組合指派設計 .....	59
表 5.4 2 日勤務組合指派設計 .....	59
表 5.5 1 日勤務組合指派設計 .....	60
表 5.6 待命勤務組合指派設計 .....	60
表 5.7 總公平性成本 .....	61
表 5.8 四項屬性正規化平均偏差 .....	62
表 5.9 不同上限設定之結果比較 .....	68

## 圖目錄

圖 1.1 航空組員排班解題流程 .....	6
圖 1.2 勤務組合示意圖 .....	6
圖 1.3 組員排班示意圖 .....	7
圖 1.4 研究流程 .....	10
圖 2.1 組員派遣問題 GA 編碼 .....	17
圖 2.2 Arc Consistency 範例 .....	21
圖 2.3 回溯法-以 4-queens 為例 .....	23
圖 2.4 前向查核法-以 4-queens 為例 .....	24
圖 2.5 MAC 演算法-以 4-queens 為例 .....	25
圖 3.1 飛行加給與飛行時數關係圖 .....	31
圖 4.1 數學規劃與限制規劃解題架構之比較圖 .....	39
圖 4.2 後艙組員 CSP 求解概念圖 .....	40
圖 5.1 分階段指派執行流程 .....	58
圖 5.2 C 航 TAFB 圖 .....	63
圖 5.3 本研究 TAFB 圖 .....	63
圖 5.4 C 航 BH 圖 .....	64
圖 5.5 本研究 BH 圖 .....	64
圖 5.6 C 航 FL 圖 .....	65
圖 5.7 本研究 FL 圖 .....	65
圖 5.8 C 航 WD 圖 .....	66
圖 5.9 本研究 WD 圖 .....	66
圖 5.10 多重解分析圖 .....	69

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

近年來經濟發展迅速國民所得保持在一定水準之上，人們愈來愈重視生活品質，愈來愈多人有機會搭乘飛機到國外，航空業者需要提供全年無休的航程服務，對於航空公司來說，空服員是第一線與旅客直接接觸的人，藉由空服員能夠提供旅客貼心的服務，有助提升航空公司正面價值，因此空服員工作公平滿意也是航空公司排班重要的一環。空勤組員排班必須滿足營運所需之人力要求，除了符合各項飛航法規、工會規定與公司內部所訂定之飛時、工時、休時限制以外，也要盡量顧及空服人員對於工作量負荷公平的感受，尤其現在勞工意識抬頭，空服員對於飛行時間長短、飛行時段數多寡、偏好的休假安排或排班的實現日益重視。

航空產業中，空服組員成本極高僅次於航空器燃料成本，就佔了 15~20% 航空公司的營運成本[22]，燃料成本與飛行航程距離相關，在固定航次頻率下可視為一項固定成本，空服人員成本則主要與其飛行時數有關，為一項變動成本，故航空公司無不將致力於開發良好的排班系統降低人力成本。另一方面，航空運輸事業屬於服務業，空服人員的服務態度直接影響旅客對於航空公司的形象看法，以長遠的觀點來看，對於航空公司的收益也會有影響，因此，如果能夠有效的管理空服員的派遣，除了可以為航空公司省下大筆人事支出之外，公平的人員班表更助於空服人員士氣與滿意度的提升，進而增加服務品質帶來收益。

有關空服人員排班問題長久以來都深受學術界注意，航空排班問題被視為極為複雜解題難度高的組合搜尋問題（combinatorial search problems），所謂組合搜尋問題是指，這類問題的解通常可經由指派適當的值給問題變數並且要能夠滿足模式的限制式要求。組合搜尋問題的求解時間與搜尋空間具有很大關連，當問題規模很大時，解空間會變得很大，要找到多組可行解甚至是一組可行解是相當困難的，求解所需要耗費時間隨著問題規模成指數成長，另外，限制條件式愈多也會讓解空間變的不連續，增加搜尋的困難性，組合搜尋問題複雜度已被歸類為一種 NP-Hard 問題。求解航空排班問題即屬於問題複雜度高的組合化問題，實務上航空排班規模相當大，再加上法規對於工作時間、休息時間、休假規定，以及考慮組員工作公平等林林總總的限制，更加深了求解的難度。

1969 年學者 Arabeyre[2]等人開始針對航空組員排班進行研究分析，1983 年 Bodin[4]等人嘗試將航空組員排班問題分成「勤務組合問題」（Crew Pairing Problem）與「組員派遣問題」（Crew Rostering Problem）兩個子問題以降低解題之困難，不過兩個子問題個別還是屬於複雜度為 NP-Hard 之組合問題。「公平性組員派遣問題」由 Ryan and Day 首次（1997）[17]提出，即在飛航安全規定限制之外，也要盡量顧及組員工作量平均並盡可能滿足其偏好提升組員滿意度。

早期學術上求解複雜航空組員派遣排班問題，因為電腦運算速度不足，為了在合理時間內能求得可行解，多以簡單的指派演算法求解（如每日指派法、組員個別指派法），盡量考慮進組員個別偏好於模式中，不過由於缺乏整體觀點，也產生無可避免的不公平的指派結果。隨著電腦技術的發展，學術上開始利用數學規劃方法求解最佳解。1992 年 Ryan[16]首先提出了將組員排班問題視為集合分割問題（Set Partitioning Problem），公平性成為排班重要的目標，求解方法則以 0-1 整數規劃方法或啟發式方法來求解（如分枝定限法、變數產生法等），而近幾年學者也應用結合人工智慧的啟發式解法（如基因演算法），利用其智慧化的搜尋機制較有效率的產生可行解。

限制規劃（Constraint Programming，CP）為結合人工智慧（Artificial Intelligence，AI）與作業研究兩大領域而發展出來的方法，其一致性檢驗（Consistency）技術，可快速過濾不可行解，加速解空間之搜尋。此外，CP 對於限制條件的處理也相當有彈性，支援一般數學關係式及邏輯限制關係式，在處理條件限制的組合化問題上也相當有效率。組員派遣排班問題屬於一複雜之組合化問題，本研究認為限制規劃方法應相當適合於求解航空組員派遣問題上。

本研究求解工作量平均指派之公平班表，一方面使空服組員工作勞逸平均，另一方面也能節省航空公司飛行加給成本之付出。將組員派遣問題列式為限制滿足問題，除了飛安考量以外，並將許多好、壞班公平性因素納入排班考量（像是組員飛行時間、早晚班班次、休息日...），提升空服組員之士氣與滿意度，以 CP 方法，有效率地產生組員月勤務班表，提供給排班規劃人員更具彈性的排班選擇。

## 1.2 研究範圍與問題界定

一般而言完整的航空排班主要包含四個部分：

### (1) 航線班次設計 (Flight Schedule Design)

基於航空公司能夠獲取最大利益下，產生的具有起點、迄點的航班 (Flight Leg) 集合，亦即班次時間表。航空公司必須根據市場需求與航空公司本身能夠提供的航點服務來作規劃，並且能符合機型與人員接續的限制，目前大部分的航空公司仍以人工的方式進行。

### (2) 機隊指派 (Fleet Assignment)

機群指派是指將航空器指派到其適合服務的航班，根據各航班旅客人數需求決定該航班所需要的航空器機型，並且考量所需購買或租賃的機型數量。

### (3) 航空器維持路線排程 (Aircraft Maintenance Routing)

安排航空器輪替運作之時間排程，必須考慮飛機維修的時間要求，在符合安全考量下，以最大利益為目標。

### (4) 組員排班 (Crew Scheduling)

目的為產生出實際上航空公司營運的組員飛行時間表，指派符合資格的前艙與後艙空服人員值勤飛航任務。組員規劃過程又分為三個部分：

(a) 勤務組合排班 (Crew Pairing)：此階段目標為產生一組成本最小且涵蓋所有航段的可行勤務組合集合。

(b) 組員派遣 (Crew Assignment)：主要目的在於如何將上一階段所產生的可行勤務組合公平地指派給每個組員，並形成每一組員之行程班表。前艙人員依照不同機型需要不同技術資格的機師，依資格職等可分機隊總機長 (Chief Pilot)、教學機長 (Instructor Pilot)、正駕駛 (Captain)、巡航駕駛 (Cruise Captain)、副駕駛 (First Officer)、見習駕駛員 (Second Officer) 及飛航工程師 (Flight Engineering) 等不同階級。後艙組員分為座艙長及依不同艙等分為頭等艙、商務艙、經濟艙不同階級之空服員，其中座艙長資格階級最大可涵蓋所有後艙服務任務，經濟艙空服員資歷則最淺，一般僅指派服務經濟艙。

(c) 組員恢復 (Crew Recovery)：組員恢復是為了解決當航機臨時維修，或是受惡劣天氣影響造成航次班表擾動時，能夠及時調整組員行程，使得其餘航班工作能順利運行。

當組員排班規劃部門收到草航班規劃部門擬定之班次表 (leg) 後，首先將使用同一航空器、同一組空服員，或航班間組員沒有更換航空器之兩航班，接續成勤務 (duty)，避免排班時這些班次被分割。在一般班表不受擾動情況之下，航空公司針對組員排班部分分為「勤務組合產生」與「組員派遣」兩部分進行，航空組員排班問題之解題流程以圖 1.1 表示。

組員排班的第一階段為最小成本勤務組合 (pairing) 產生問題，係只要在符合所有排班限制條件之下，構建一組成本最小之勤務組合集合，並能涵蓋所有勤務段。一個勤務組合 (paring) 是指基地出發經過一至數個航程 (leg) 後回到同一個基地，空服員所服務的勤務集合即為一「勤務組合」(勤務組合示意圖如圖 1.2 所示)。空服員所值勤的最小工作單位為「勤務段」(duty) 由一至數個航程組合而成。

第二階段組員指派問題係指航空公司將一勤務期間 (通常是一個月) 的空勤組合派給駕駛艙 (通稱前艙) 與客艙 (通稱後艙) 組員，在考量各種排班限制及組員既定活動 (Skeleton activities) 和資格認證 (Certification) 下，產生每位組員之月勤務組合 (Line-of-Work, LoW) 班表。既定活動係指組員在排班之前已確定之活動，例如：年休、上課、會議、訓練、檢查等預定行程，在值勤班表指派之時，不可將勤務排入這些既定活動日期當中。完整組員排班示意圖如圖 1.3 所示。

航空公司實際上針對組員派遣之操作大概可分為標選系統 (Bidding System) 與公平排班系統 (Rostering System)，兩種方式介紹如下：

### (一) 標選系統

允許組員透過標選的方式來選擇自己偏好的勤務組合，組員月勤務班表之產生依據組員競標的結果分派，通常標選的順序以資深組員為優先滿足，又可分為班表標選與偏好標選兩種方式：

#### (1) 班表標選方式 (Bid-Lines)

排班規劃人員先以不具名的方式產生所有組員月勤務班表集合 (lines of work)，組員必須由建構好的月勤務班表集合中競選出一個當月行程，資深組員可以優先挑選自己偏好的勤務班表，組員班表指派即根據競標的結果，大部分北美航空公司多採用此種作法。

#### (2) 偏好標選方式 (Preferential Bidding) [7,8]

排班規劃人員將組員既定行程與個人偏好 (避免早班、偏好某一特定勤務組合或休假日) 納入考量，在最大化組員滿意偏好下，找出可涵蓋所有勤務組合的組員月勤務班表，一般以組員效用函數表示組員對於勤務組合的滿意程度，依據組員年資有不同偏好權重，因此，在最大化組員滿意度目標下，階級低的組員有可能被犧牲排不到滿意行程。例如澳洲航空公司 (Qantas Airline) 與加拿大航空公司 (Canada Airline) 的排班即採用偏好標選方式產生月勤務班表。

## （二）公平排班系統

組員月值勤班表透過排班規劃方式產生，一般考量總操作成本與工作量，目的為使組員飛行時數相當，工作負荷差異不致過大，以增加組員工作滿意度。歐洲航空公司多採行由排班方式產生組員月勤務班表。

一般所指的組員操作成本相當於組員薪資，空服員的薪資與飛行時數有關係，若是超出某一時數範圍，飛行加給便隨之大幅上調，故排班規劃人員以盡量平均空服組員的飛行時數，一方面減少因逾時飛行必須多付出的加班成本，二來也考量到組員工作勞逸程度之公平。

由上述標選系統與公平性排班系統比較可發現，「標選系統」可由組員自行提出其個人偏好之行程選擇，得以滿足組員對於特定勤務組合實現的期望，但一般多以階級高低為滿足偏好的順序，較易發生低階級組員選不到滿意的行程的情形。而「公平性排班系統」主要考慮組員的工作量平均，使飛行時數、早班勤務、休息與休假能夠盡量一致勞逸程度平均。

本研究以組員排班之

第二階段-組員派遣部分為命題範圍，並以組員之工作勞逸平均產生公平性月勤務班表為目標。組員派遣問題本身需要考量的限制條件即相當複雜，公平性排班更牽涉到了個別組員的行程偏好、休假偏好...等因素，其問題構建複雜性更高，使得公平性排班系統難以有效率求解，本研究希望藉由「限制規劃」善於求解高限制化問題的優點，求解後艙組員派遣之限制滿足問題。

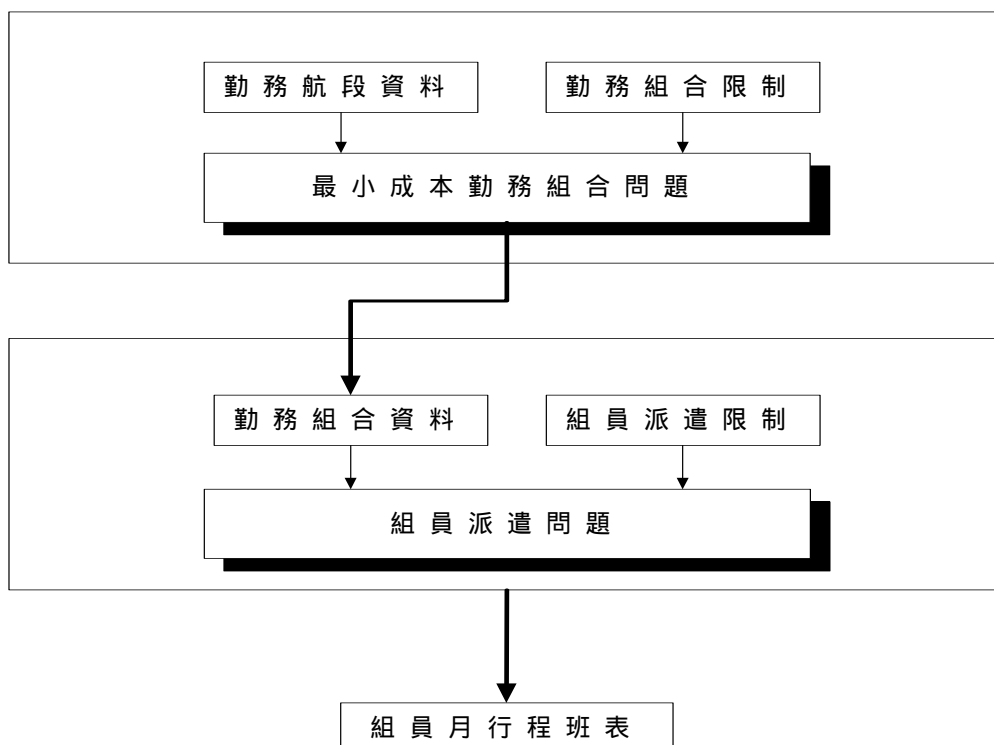


圖 1.1 航空組員排班解題流程

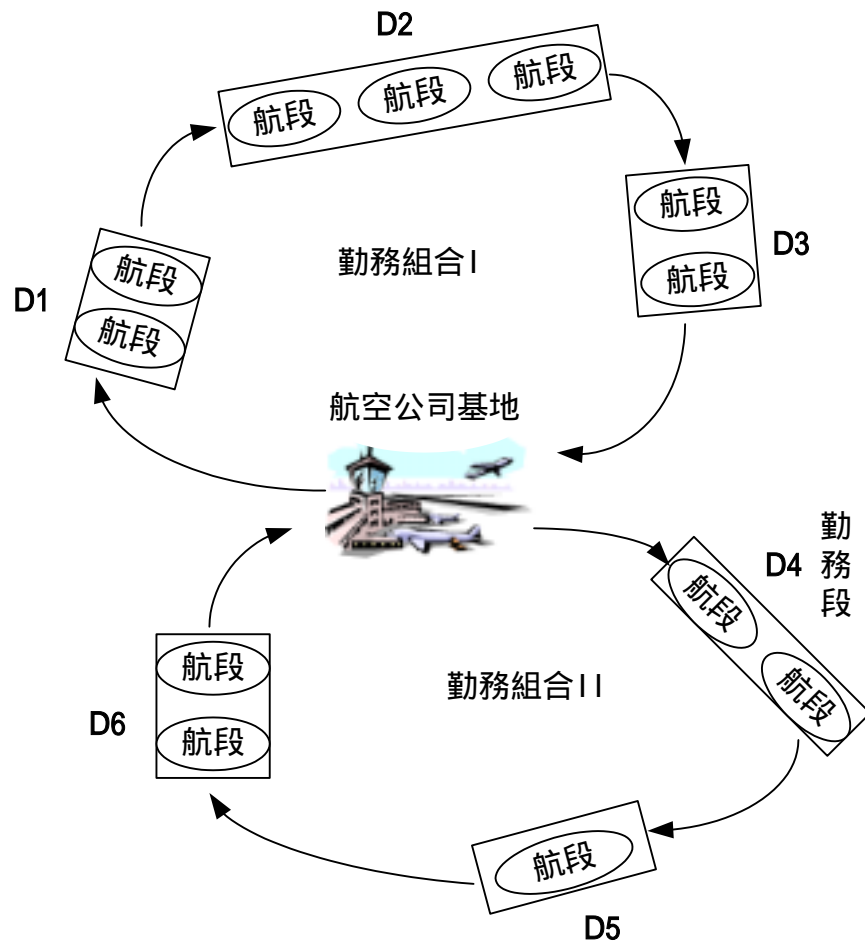


圖 1.2 勤務組合示意圖

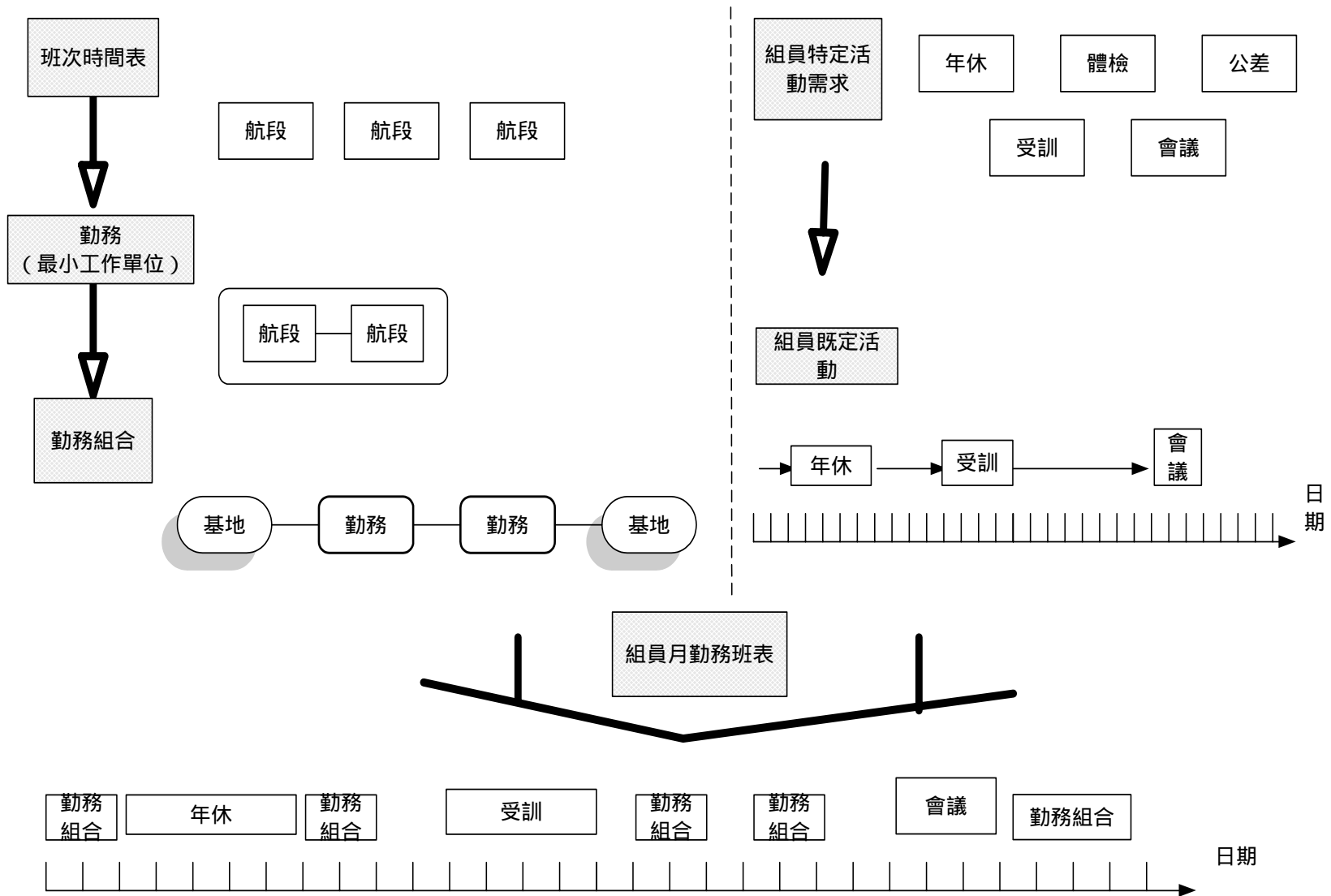


圖 1.3 組員排班示意圖

(資料來源：[23])

### 1.3 研究內容與流程

本研究在假設已知最小成本勤務組合情況下，進行組員排班後一階段「組員派遣」的工作，並以國內某航空公司（以下簡稱 C 航）國際航線後艙座艙長之排班作為研究對象，目標為產生具公平性合法可行之後艙組員月勤務班表。

本研究之公平性後艙組員派遣模式，將組員派遣問題視作限制滿足問題求解，事先排入個別組員待命任務、會議、訓練、休假、事假等既定行程後，在本研究訂定之限制規則之下，以限制規劃模式進行組員個別班表求解。

首先將組員派遣問題視作一限制滿足問題（Constraint Satisfaction Problem, CSP），在限制式建立方面，分為嚴格的「硬」限制（hard constraints）以及彈性「軟」限制（soft constraints）兩部分。飛航法規與航空公司為了保障空服人員工作安全而訂定之飛時、休時、工時限制規定，視作限制滿足問題中之硬限制式。此外，本研究納入飛行時間的公平、飛行航段數的公平、差旅時間的公平、工作天數的公平、早晚班指派的公平、待命任務指派的公平、長勤務後休息日的安排、特定航點次數的公平等幾項組員工作公平因素，以上這些考量構成 CSP 的軟限制。

其中有關公平性衡量指標之選取，本研究選取工作時間、飛航時間、飛行航段、工作天數四項衡量指標，控制每位組員公平屬性累積值必須不大於某一上限設定，使得每位組員之間工作負荷盡量均等，並以組員實際工作狀況與整體平均的偏差百分比作為衡量標準。測試例題採用陳立欣研究[25]中 C 航空公司一個月座艙長派遣資料，作為本研究測試例題來源。本研究 CP 模式求得之班表結果將與 C 航原始班表進行比較驗證，並提出研究結論與後續工作之建議。

本研究之流程與執行步驟如圖 1.4 所示，茲說明如下：

1. 航空組員派遣問題相關文獻之回顧：回顧航空組員派遣問題相關文獻，蒐集個案排班現況資料並做整理。
2. 排班規則限制與公平性成本之建立：整理航空公司組員派遣之排班規則，作為 CSP 嚴格限制規定，並考量實際上影響航空排班之公平因素，建構出本研究公平性彈性限制式。另一方面，選取差旅時間、飛航時數、飛行航段數、工作天數四項公平排班指標，用以評估排班結果之好壞。
3. 限制滿足問題之建立：依據公平性組員排班限制，將組員派遣問題構建成限制滿足問題。
4. 公平性排班限制規劃模式之構建：根據本研究定義之組員派遣 CSP 問題，撰寫限制規劃語言構建本研究 CP 模式。
5. 實驗設計：建立不同公平性指標上限之 CP 模組，設定其範圍參數。
6. 導入個案執行測試：以 ILog OPL 進行 實際個案之公平性組員排班限制規劃模式求解。
7. 結果分析：針對測試結果加以驗證分析，作為模式調整及班表產生的依據。
8. 班表產生：建立個別組員月勤務組員班表。
9. 結論與建議：提出本研究具體結論，並對後續研究工作提出建議。

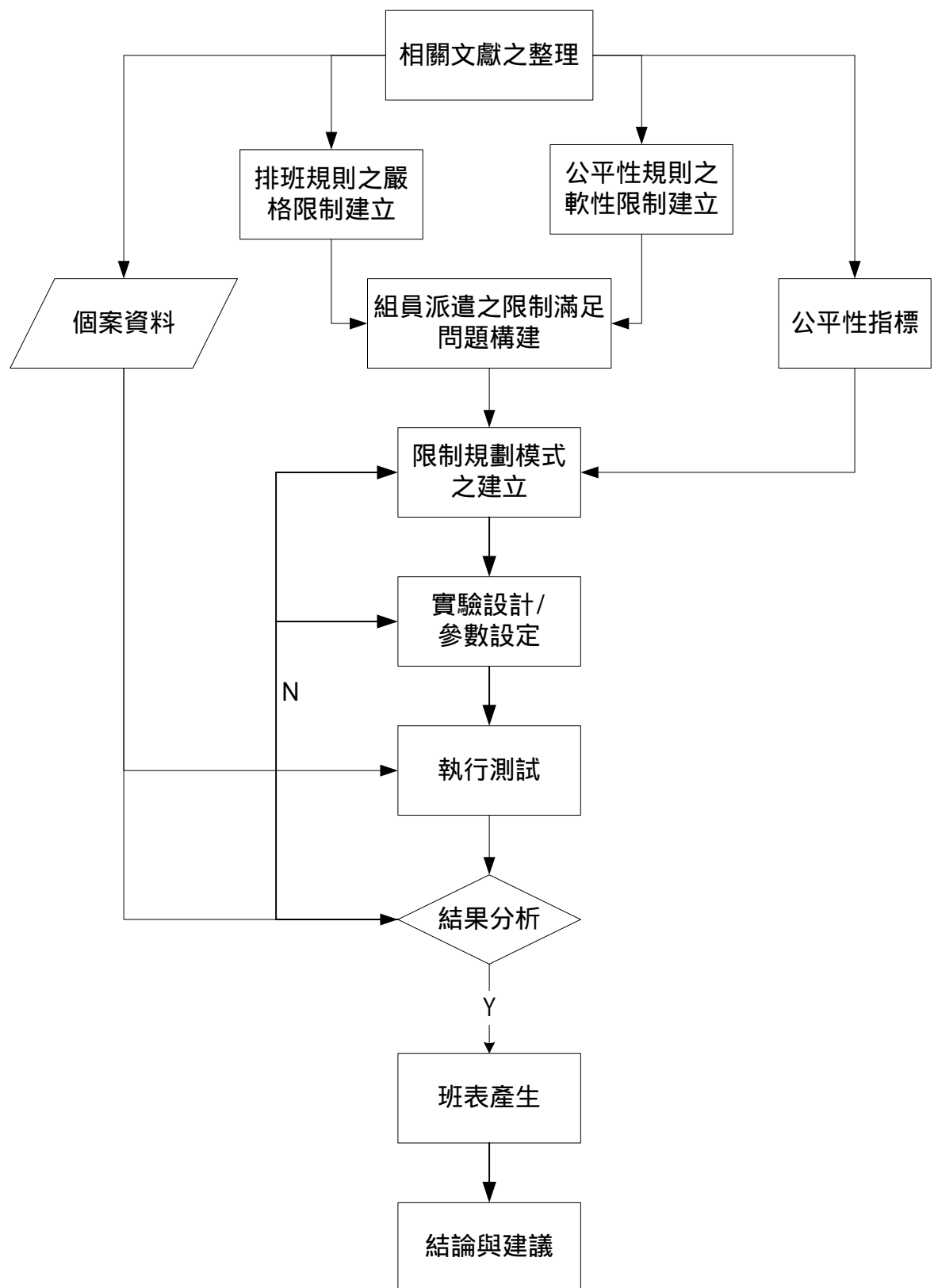


圖 1.4 研究流程

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 組員派遣問題文獻回顧

過去 30、40 年來學術界對於組員派遣排班問題有相當多的文獻研究，也累積不少成果，以問題之求解目標來分，可分為最大化組員滿意度與最小化操作成本兩種問題型態，兩種方法的目標不一樣所採用的方法也不盡相同。最大化組員滿意度為目標，一般是以組員是否能夠指派到所偏好的勤務組合，來表示其滿意度，而不同的階級有不同的偏好權重。最小化操作成本則以達到公平派遣為目標，使組員工作負荷量平均且公平，一般操作成本會與飛行時數相關。有關航空組員派遣問題之文獻簡單整理列表如表 2.1：

歸納以往學者所用來解決組員派遣問題的方法大概可分為三類：一為早期發展之較簡單的演算法類型，二為一般化集合分割數學規劃模式，利用作業研究方法求解或啟發式之方法，也是目前文獻中最多探討過的方法，三為其他模式的解法，如將組員派遣問題模式化為多元商品流量問題或是近幾年來才開始發展的限制規劃模式。各類方法探討如下：

#### 一、設計演算法

求解航空組員派遣排班問題，因為限制複雜極為困難，解決的方式通常是透過啟發式解法來求得可行解，在 1980 左右期間，因為電腦的運算速度還不太能夠解決航空排班的複雜問題，因此，在此時期文獻上為要在合理時間內求出大規模組員派遣問題而發展的啟發式解法大概有以下四種方式：

##### (1) 優先指派法 (High-priority) [11,13]

每一組員具有不同之優先衡量指標權重，通常設計較資深組員有較大的權重值，其偏好行程為優先滿足之對象，近年來也有學者建構「優先考慮函數」評估組員指派的優先次序，然後將最優先的勤務組合指派給最優先指派的組員。(Glanert 1984, Marchettini 1980)

此方法的缺點是優先衡量指標難以量化，此外，針對個別排班問題勤務組合優先次序也會不同，依相關的資源限制而有所不同優先程度，在應用上較缺乏彈性。

##### (2) 每日指派法 (Day-by-Day) [15,6,21,19]

指派方法為指派起始日為第一日勤務組合給可值勤之組員，然後指派起使日為第二日之勤務組合，如此反覆至再無法指派給任一組員勤務或是到當月勤務組合指派完為止 (Nicoletti 1975, Buhr 1978, Tingley 1979, Sarra 1988)。求解步驟如下：

表 2.1 組員派遣問題文獻比較

問題型態	目標	學者(年份)	考量因素	求解方法	敘述與分析
標選系統	以資深組員優先滿足下，盡量滿足組員之標選	Byrne (1988)	組員標選勤務組合與休假偏好	個別組員分配	階級愈低之組員愈難指派到其偏好的勤務組合
		Gamache et al. (1998)	組員標選勤務組合與休假偏好		
		Glanert (1984)	飛行時數、工作天數	優先指派	難以用一般化程序求解  在某一程度的滿意度內，也盡量提高低階級組員的滿意
		Rouse (2001)	組員標選勤務組合與休假偏好		
公平排班系統	以最小化總操作成本或考量組員工作負荷平均，盡可能滿足組員偏好及特定的行程，或最小化未指派之勤務組合（相當於最大飛行時數限制下，最大化工時）	Dusan&Panta (1999)	飛行小時旅費	每日分配	愈後面天數愈難指派，可能有剩餘的勤務組合未被指派
		Antosik (1978)	飛行時數		
		Buhr (1978)	飛行時數、工作天數		
		Ryan (1992)	組員之偏好、形成勞逸、薪資滿意度相當	0-1 數學規劃求解一般化集合分割問題	僅列舉有限之候選行程，對解的品質有影響
		Ryan&Day (1997)	組員之偏好、形成勞逸、薪資滿意度相當		
		Gamache&Soumis (1998)	剩餘未指派之勤務組合時間最小	變數產生法求解一般化集合分割問題	變數產生子問題之路網節線維度為待指派勤務組合平方，不適用大規模問題
		Cappanera & Gallo (2001)		0-1 數學規劃求解受限多元商品流量問題	每一組員視為一商品，其月勤務班表即為網路中滿足所有限制之可行路徑
		Walid (2001)	組員偏好行程實現與否、操作成本	基因演算法	兩階段準則之求解，先求出組員最大滿意度，再進一步以 GA 求解最小操作成本之月行程
		陳立欣 (2002)	差旅時間、飛行航段數、飛行時間、休假日	分階段指派啟發式方法求解一般化集合分割問題	窮舉所有候選勤務組合後，分長勤務、中勤務、短勤務三階段指派。

資料來源：本研究整理

Step 1：選取所有起始排班期間第一日之勤務組合。

Step 2：將上述之勤務組合指派給組員，但需要注意當日指派的結果與先前已指派勤務組合不得違反任何規定。

Step 3：選取次日之勤務組合。

Step 4：重覆 Step 2。

每日指派法的缺點為無法預測未來指派時可能產生的問題，例如旅遊旺季期間需要較多的組員人力，但卻可能出現人力不足的窘況。

### （3）個別組員指派法（Pilot-by-Pilot）[14,7]

勤務班表由一個組員接著一個組員指派給勤務的方式產生，一旦組員之月勤務班表產生之後便不再變更，直到所有組員皆指派完畢，通常指派的順序是由組員資歷而定，年資愈高愈先指派（Moore et al. 1978, Byrne 1988）。

個別組員指派法最大的缺點在於，愈到後面指派的組員其候選行程愈少，造成不公平的情形，另外，也有可能產生最後剩餘的勤務組合無人可派的問題。

### （4）每日指派與個別組員指派混合法（Day-by-Day and Pilot-by-Pilot）[1]

基於改善每日指派法與個別指派法容易造成分配不均的缺點，提出混合兩者的指派方法，其構想為先根據每日指派法建立起始解，每位組原先盡量指派給勤務，然後再利用組員個別指派法來減少分配不均的情況（Antosik 1978）。

透過上述四種簡單的啟發式指派方法，優點是可以很容易就得求組員月值勤班表，對於排班規劃人員來說也是易於執行，不過也可能會有小部分的勤務組合未被指派的情況發生，此時便需要另外透過人工手動方式做班表調整，此外，上述四種啟發式解法最主要的缺點在於其求解方式並不是以整體觀點作為考量，容易造成指派人力分配不足、公平性落差很大、成本太高的缺點，且在實際應用上也較缺乏彈性，應用在另一家航空公司可能就無法運作。

## 二、一般化集合分割數學規劃模式

有鑑於以往組員派遣均採取以組員觀點考量，造成指派不均的情況，研究學者也漸漸開始採用以整個排班系統的觀點解題的數學規劃方式求解航空組員派遣問題。通常將組員排班問題模式化為集合分割問題（Set Partitioning Problem），目標是經由給定變數（ $x$ ）0 或 1 的值以求得最小總成本  $z$ ，數學定式如下：

$$\min z = c^T x$$

$$Ax = b, \quad x_i = 0 \text{ or } 1$$

其中  $A$  矩陣為一個 0-1 矩陣，可分成

$$A = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 & U_3 & \dots & U_p \\ L_1 & L_2 & L_3 & \dots & L_p \end{bmatrix}$$

假設有  $p$  個組員， $t$  個勤務組合，整個  $A$  矩陣的大小有  $(p+t) \times \sum_{i=1}^p n_i$

$U_i = e_i e^T$  是一個  $p \times n_i$  的矩陣，其中  $e_i$  為第  $i$  個單位向量且  $e^T = (1, 1, \dots, 1)$

$L_i$  則是由每位組員的候選行程所形成，每位組員的候選行程數有  $n_i$  個，

其中  $l_{jk} = 1$  代表第  $i$  個組員的第  $k$  個候選行程中，有包含第  $j$  個勤務組合，若為 0 則相反。

右手邊的  $b$  為  $(p+t) \times 1$  的矩陣， $b_i = 1$  當  $i = 1, \dots, p$ ， $b_{p+i} = r_i$  當  $i = 1, \dots, t$ ，

$r_i$  為第  $i$  個勤務組合所需要的組員人數。

文獻上求解上述 0-1 整數規劃問題，方法為利用分枝定限法（Branch and Bound Approach）或分枝切面法（Branch and Cut Approach）求得最佳解。若是問題規模太大，難在合理時間求出最佳解，也有研究文獻採用變數產生法，一次只對一小部分變數（勤務組合候選行程）求解，透過主問題與子問題的對偶關係，找出對目標有貢獻的變數，避免因為變數太多而找不出解的情況。另外，針對大規模問題也有學者利用分階段求解的啟發式方法[23,25]求解，將可能造成解題瓶頸的變數（如長勤務組合）先丟入模式求解，求出的結果當作下一階段已知條件，再丟入另一部份變數。以下介紹文獻上用來求解組員派遣問題 0-1 整數規劃的方法：

### (1) 分枝定限法 (Branch-and-Bound Method)

分枝定限法概念為找出較大的下限值，減少上、下限差距以增加收斂速度，包括節點選擇、分枝、定限、解決等步驟。各步驟內容如表 2.2 所示。

表 2.2 分枝定限法求解步驟

節點選擇 (Node Selection)	在分枝限定法過程中，可能有許多未能求得整數之分枝端點，如何從這些未選節點當中擇一繼續進行求解工作即為節點選擇，節點選擇機制有最佳目標搜尋 (Best-Bound Search)、深度搜尋 (Depth-First Search)、廣度搜尋 (Breadth-First Search)、隨機搜尋 (Random Search) 等方式。
分枝 (Branch)	當處理二元變數時，最簡單的方式就是將合理解集合固定一個變數值 $x$ ，將原本問題分割為 $x_1 = 0$ 及 $x_1 = 1$ 的兩個子問題，以分枝樹來看，即針對 $x_1$ 變數產生了兩個分枝。
定限 (Bound)	對每一個子問題，找出其線性放鬆後之最佳解即為該子問題之鬆弛解。對於整數規劃而言，通常鬆弛解即為放鬆掉整數限制後之最佳解。
解決 (Fathoming)	當一個子問題被解決之後即可不再考慮，而分枝限定法即是透過解決所有分枝端點找到問題最佳解，其有三種方式可以被解決：1. 子問題為最佳解為整數解、2. 子問題為不可行解、3. 子問題之最佳解較目前暫時最佳解 (Incumbent) 差。

### (2) 分枝切面法 (Branch-and-Cut Method)

分枝切面法可視為分枝限定法與切面法的結合，根據 Young (1968) 的定義，分枝切面法是在計算分枝端點前嘗試加入新的有效不等式 (Valid Equation)，用以縮小放鬆整數限制後的可行解範圍，加快求解速度。對一個極小化問題而言，其最佳解之上限通常是以暫時可行解中最好的一點來表示，而下限解則以一個放鬆的不可行解來代表。

### (3) 變數產生法 (Column Generation)

變數產生法其求解主要概念為將原來大規模的主問題分為受限制主問題與子問題兩部分，主要是利用線性規劃中的對偶理論 (Dual Theory) 將受限主問題與子問題串連起來。其運作方法為先透過人工方式或啟發式解法求得一組可行解，然後放鬆受限制主問題並求得一組對應每個限制式的對偶變數向量，將此組對偶變數向量丟入子問題，利用對偶理論找出對受限主問題具有貢獻之新變數並加入受限主問題中，如此經由受限主問題與子問題互動，逐步改善受限主問題 LP 最佳解。

學者 Ederosiers (1999) [9] 以變數產生法求解組員派遣問題，以 Simplex 方法求解線性放鬆之一般化集合涵蓋主問題（目前勤務組合（columns）的集合），並計算其對應對偶變數之值以找出（price out）對目前主問題最有貢獻之新的可行勤務組合（new column）。子問題則為一受限制最短路徑網路問題，對於每一位組員來說都有一其對應之特定網路，網路中可行路徑（path）表示該組員的候選勤務組合，經由主問題給定的對偶變數值計算出的路徑成本即為主問題中勤務組合的 reduced cost，當所有的子問題被解決以後，具有 negative reduced cost 的勤務組合便加入主問題之中。

#### （4） 分階段指派啟發式解法

由於一般化集合分割求解過程中，首先必須產生每個組員的所有可能候選行程，在排入既定行程之後，還必須符合法規條件的限制，才能產生合法可行的組員月勤務班表，每個組員實際上指派的可能候選行程相當龐大，以某航空公司實際資料 1275 個勤務組合指派給 169 為組員為例，每位組員可能候選行程將達  $C_{21}^{31} \times 41^8 \cong 3.54 \times 10^{20}$  這麼多種可能候選行程[25]，整個排班問題若要求得最佳解將會花費相當多時間且沒有效率，因此韓復華、翁偉棟與韓復華、陳立欣[23,25]提出了「分階段指派啟發式」解法。其概念為將勤務組合分為長勤務、中勤務以及短勤務三類進行指派，在列舉所有組員可能候選行程之後，先將指派最為困難可能造成瓶頸的長勤務行程先指派，陸續在進行中勤務與短勤務行程的指派，目的是分階段後每一階段所要指派的勤務組合數量減少很多，可大規模的降低集合涵蓋模式的問題變數。

分階段指派的方法為一啟發式解法，雖然對於解的品質會產生若干程度的影響，但是在陳立欣研究當中，加入了公平性的考量，以差旅時間、飛行航段數、飛航時間、休假日四個指標為公平性指標，使所有組員的工作量在這四個考量中距離平均值的總差距最小，使組員工作負荷盡量平均，大體上皆能滿意其指派到的行程。

### 三、其他模式

#### (1) 商品流量網路模式

除了將組員派遣問題模式化為一般化集合分割數學規劃模式以外，有部分學者也將組員派遣問題模式化成 0-1 受限多元商品流量 (0-1 Multicommodity Flow Problem with additional constraints) 網路模式問題 [8]，其概念為將每位組員視做一項商品，節點表示勤務組合，節線表示兩勤務組合間之限制，限制包含了一位組員最大工作時數或服務時數、兩個休息之間的最大工作天數限制或是一個月休假日天數...等排班規則，因此網路中的一條路徑 (path) 表示組員之可行月勤務班表，其求解的目標為最小化未指派之勤務組合，相當於求解在最大飛行時數上限下，最大化組員的工作時數。實際上應用多商品流量模式於組員派遣問題時，對每一家航空公司而言，都有不同問題規模與限制，因此排班網路也不盡相同，在應用上較缺乏彈性。

#### (2) 人工智慧方法

學者 Walid[22]將組員派遣問題以雙準則 (bi-criterion) 方法求解，第一階段目標為最大化組員滿意度，以類似個別組員指派之貪心法則 (Greedy Heuristics) 求得最大滿意度之組員月勤務班表，第二階段則為操作成本最小化之問題，作者利用基因演算法的原理，一條染色體表示一組組員月勤務班表，上面一段基因表示一個勤務組合 (數字代表哪一位組員指派到該勤務組合，其示意圖如下)，透過選取染色體複製、交配的過程產生總操作成本較小之月勤務班表，此外，其突變機制除了產生更多樣的月勤務班表以外，作者將公平指派的觀念納入其中，作法為將所有組員分為工作負荷量大及工作負荷量小的兩群，當突變機制啟動之時，以隨機的方式決定突變的基因  $k$  (哪一個勤務組合)，並將原本被指派該勤務組合之組員  $x$  以另一位組員  $y$  取代 ( $y$  由工作負荷量小之組員群中選出，必須不與  $k$  產生限制衝突)。應用此一解法於 75 組員與 275 個待指派勤務組合問題中，結果發現對於工作量平均與操作成本均有改善。

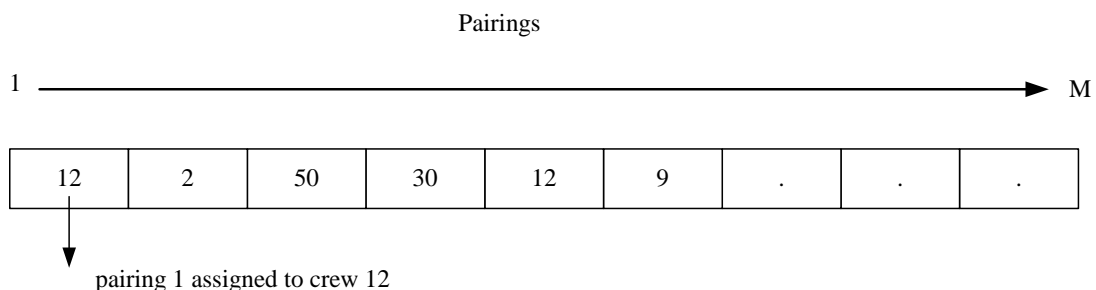


圖 2.1 組員派遣問題 GA 編碼

自 1990 年以來，AI 人工智慧領域開始蓬勃發展，主要是利用其搜尋技術，更有效率地進行解空間搜尋。傳統作業研究方法解題過程中，常會面臨落入區域最佳解（Local Optimal）的困境，人工智慧方法則提供許多跳脫區域解機制，例如：模擬退火法利用機率概念，以一微小的機率控制跳離搜尋機制，基因演算法則以微小的突變機率，有助於產生差異較大之個體。目前運用人工智慧方法於組員派遣問題求解文獻資料仍不多，也是最近兩三年來才有相關的文獻出現，綜觀目前以人工智慧方法求解排班問題之文獻，以基因演算法 (Genetic Algorithms, GA) 之應用為多。基因演算法發展源於人類基因遺傳機制，仿效生物界中物競天擇的自然進化法則，產生適應力強的下一代，其方法係透過基因複製、交配與適配值計算後留取較好的染色體的方法產生更好的下一代，並透過突變機制避免落入區域解的陷阱。

### （3）限制規劃模式

最近幾年來也有學者開始利用限制規劃模式[20]求解組員派遣問題，將組員派遣問題等現實生活中相當複雜的組合化問題，視為限制滿足問題（Constraint Satisfaction Problem, CSP），透過限制規劃推衍搜尋機制（CP propagation mechanism）能夠盡早的刪減掉不一致（inconsistency）的變數空間，增進空間搜尋效率。學者 Sellmann[20]指出限制規劃模式相較於純粹數學模式方法而言，在求解初期很快便可以求得可行解，研究中以一個實際組員派遣問題，說明限制規劃方式結合數學規劃變數產生方法，很快就得到一個還不錯的可行解，以此可行解當作變數產生法的初始解，可改善規模太大變數產生法較不具效率的問題。不過文獻中對於僅提出限制規劃用於求解組員派遣的概念，如何執行細節並未深入探討。本研究即採用限制規劃方法解決組員派遣問題，關於限制規劃方法於後一節作深入的介紹。

## 2.2 限制規劃文獻回顧

限制規劃 (Constraint Programming, CP) 是一種空間搜尋技術，緣起主要來自電腦科學 (Computer Science) 在人工智慧領域 (Artificial Intelligence, AI) 的發展，根據學者 Brailsford 等人[5]對限制規劃的定義「運用電腦程式發展的模式化語言，讓使用者能簡單輕易地描述限制滿足問題，並透過精緻的電腦演算法有效率地求解限制滿足問題」。

從限制規劃的定義看來，很明顯具有兩項特性：空間搜尋能力與限制條件之處理，這是因為限制規劃為一種二層式的求解架構，一層為描述限制滿足問題的限制式元件，另一層為求解限制滿足問題的程式求解元件，兩者特性介紹如下：

### 1. 限制式元件 (Constraint Component)

提供一套親和之模式化語言，讓使用者能輕易地宣告變數與限制式，對於實務問題上多種限制式（如：logical constraint、arithmetic constraint、cardinality constraint、all-different constraint、atmost constraint 等）皆有其對應的限制式元件，以供使用者針對問題進行模式化 (modeling) 動作，對於問題描述的功能較以往數學規劃更強大。

### 2. 程式求解元件 (Programming Component)

包含了限制式系統邏輯推理元件及空間搜尋元件。CP 中用以推理限制滿足問題所構成的限制式系統，主要是針對變數值域與限制式之間的一致性檢驗技術 (Consistency Checking Techniques) 與限制式推衍機制 (Constraint Propagation)。另一方面，搜尋元件最基本的演算法為換枝檢驗法 (Backtracking, BT)，基於 BT 而發展出來更具效率的搜尋演算法有前向查核法 (Forward Checking) 及 MAC 演算法。

簡單而言，限制規劃就是應用電腦演算法之執行來求解限制滿足問題，這些電腦演算法最早是在邏輯語言（如：Prolog）中所設計，但是傳統語言中的邏輯程序 (logical solution procedure) 並不能有效率地處理限制的關係，因此，便逐漸發展出一些針對求解限制滿足問題的限制式邏輯語言 (Constraint Logical Programming)，像是 CHIP 語言 (Constraint Handling in PROLOG) 便是由 Prolog 修改而來，利用限制式與限制式之間的關係來加速求解效率。近年來隨著電腦科技為解決實務問題而發展的物件導向概念日漸盛行，限制式邏輯語言也開發出具有物件導向式的限制規劃程式庫，常見的有 ILOG 公司的 Sover (C++)、Scheduler (C++)、Jsolver (Java) 以及 COSYTECH 的 CHIPv5 (C++)。

以下便就限制滿足問題、限制規劃搜尋技巧與限制規劃求解 CSP 限制滿足問題之經驗法則作進一步說明：

## 一、限制滿足問題 ( Constraint Satisfaction Problem , CSP )

所謂限制滿足問題是由一群變數 ( variables ) 與限制 ( constraints ) 所構成，「在給定一組決策變數  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、各決策變數相對應之有限值域  $D=\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 、一組限制式  $C=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  條件下，尋找滿足各項限制式之一組或多組可行解」[5]，其中， $n$  表示決策變數之個數， $m$  表示限制式之個數，有限值域具有上、下限值為每一變數可能值所構成之集合。從 CSP 定義來看，包含了變數、有限值域、限制式三個部分，一般即以  $(C, X, D)$  來描述一個 CSP 問題：

1. 變數：CSP 中有多個變數  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，這些變數構成的集合為  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。
2. 有限值域：CSP 中每一個變數都有其可能值  $d_1, d_2, \dots, d_k$ ，每一個可能值所構成的集合為該變數之值域  $D_i=\{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ ，各變數值域集合所構成之有限值域為  $D=\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ ，值域中的值不一定是數值型態，可以是其他型態，如：字串...
3. 限制式：CSP 中的限制式是用來描述變數之間的關係。CSP 當中的限制式可能影響任意個變數，若某個限制式剛好影響所有的變數，稱該限制式具有 arity 的性質，若 CSP 中的限制都只影響兩個變數，稱之為二元限制式 ( binary constraint )。

在問題的本質上，限制滿足問題不同於最佳化問題，其求解目的在於求得一組或多組可行解，而所謂的可行解是指「每一個變數  $x_i$  從其對應值域  $D_i$  中挑選出一個值  $d_i$ ，能夠滿足所有限制式。每個變數的值所構成的集合  $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  即為可行解」。Brailsford[5]等學者指出，在 CSP 中通常會尋找幾種不同的解答：

1. 只要有解即可，CSP 求解可能出現多組解，但是只要其中任何一個即可滿足需求。
2. 所有的解，亦即找出 CSP 中所有的可行解。
3. 最佳解：許多人常常誤解 CSP 問題並非求解最佳解，但可透過加入目標限制式，用以評估多個可行解，以獲得最符合需求的解。

## 二、限制規劃空間搜尋技巧

限制規劃中的求解搜尋機制，是由一致性檢驗技術及空間搜尋演算法所構成，其運作技巧是在每個分支節點，利用一致性檢驗技術，減少可行解的搜尋空間。所謂一致性檢驗技術是指，假設有兩個變數  $X_i$  與  $X_j$ ，對所有  $a \in D_i$  ( $X_i$  之值域) 及  $b \in D_j$  ( $X_j$  之值域) 而言，若  $X_i = a$  時， $X_j$  均能從其值域中找到一個  $b$  值，使其滿足所有限制式，則稱一條具有方向性的節線  $\langle X_i, X_j \rangle$  一致 (Consistent)，否則稱做不一致 (Inconsistent)。一致性檢驗技術的目的在於盡可能地刪減變數之值域，使其最後剩下的值域能夠具備一致性。

一致性檢驗技術包括：節點一致性 (Node Consistency)、節線一致性 (Arc Consistency)、界限一致性 (Bounds Consistency)、一般化之一致性 (Generalized Consistency) 四種技術。不同的一致性檢驗技術複雜度皆不同，愈簡單的一致性檢驗技術所需花費的運算時間愈短，每一種一致性檢驗技術有其優點及應用時機。茲以一二元限制式 (Binary Constraint) 之 Arc Consistency 技術為範例 (圖 2.2) 介紹如下：

圖中，(a) 假設  $x_1$ 、 $x_2$  兩個變數其值域分別為  $\{1,2,3,4,5\}$ 、 $\{1,2,3,4,5\}$ ， $x_1$  與  $x_2$  存在一個限制式  $x_1 < x_2 - 2$ ，(b) 對於  $\langle x_1, x_2 \rangle$  這個方向限制節線來說，對於每個  $x_1$  可能的值代入限制式中檢驗發現  $x_1$  值域中 3、4、5 三個值無法滿足  $\langle x_1, x_2 \rangle$  之 arc consistency，因此變數  $x_1$  便刪減成  $\{1,2\}$ ，反之，(c) 對於  $\langle x_2, x_1 \rangle$  方向限制節線而言， $x_2$  可能的值代入限制式中發現  $x_2$  值域中 1、2、3 無法滿足限制式，便刪掉  $x_2$  不可行之值， $x_1$  與  $x_2$  值域  $\{1,2\}$ 、 $\{4,5\}$  便為使  $\langle x_1, x_2 \rangle$  與  $\langle x_2, x_1 \rangle$  均符合 arc consistent 的值域。

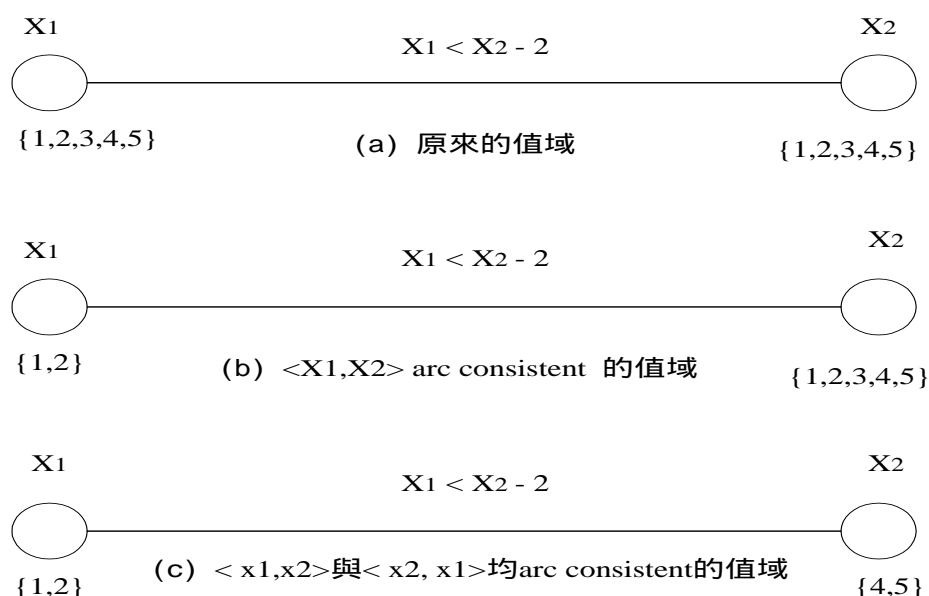


圖 2.2 Arc Consistency 範例

(資料來源：[5])

限制規劃之搜尋演算法主要有三：回溯法（Back Checking）、前向查核法（Forward Checking）以及 MAC 演算法。回溯法之搜尋概念很簡單，故效率較差實際上應用並不多見，前向查核法與 MAC 演算法均使用一致性檢驗技術作為搜尋機制核心。

此三種演算法均是以樹狀結構（Tree）表示目前搜尋狀態，樹狀結構的每一節點可視為解的一部份（partial solution），在每一個節點中，若有些變數的值已經決定（由上一層父節點而決定），這些變數稱做「過去變數」（past variable），目前正在考慮的變數稱做「現在變數」（current variable），節點中尚未決定值之變數稱為「未來變數」（future variable），這些變數的值可容後再決定。樹狀結構中的分支（branch）代表變數其他可能值，在搜尋過程中選定分支決定變數的值之後，演算法會從未來變數值域中刪減掉與目前變數值域不一致的值，當未來變數值域中的值被刪減成空（empty）時，該節點的狀態稱之死巷節點（deadend node），不得再進行分支。

以上三種演算法主要差異在於其處理未來變數的方式，茲以一個 4-queens 的限制滿足問題說明回溯法、前向查核法與 MAC 算法空間搜尋推衍之過程（如圖 2.3、圖 2.4、圖 2.5 所示）。

4-queens 為 N-queens 問題之一種範例，N-queens 為一種棋盤遊戲，遊戲規則為在  $N \times N$  的棋盤中必須放入  $N$  個 queens，擺棋規則必須符合：

1. 同一列不能出現兩個 queens
2. 同一行不能出現兩個 queens
3. 任一對角線不能出現兩個 queens

### (1) 回溯法 (Back Checking)

回溯法之搜尋架構類似於數學規劃中定限分支法，在搜尋過程中，一次固定一變數之值，如此層層搜尋下去，直至所有變數皆指派有值。在回溯法當中，目前變數所指定之值會與目前的部分解 (current partial solution) 進行比對，若有不一致之情形使得問題無解，則必須回到上一個狀態重新搜尋而不必再進行分支。

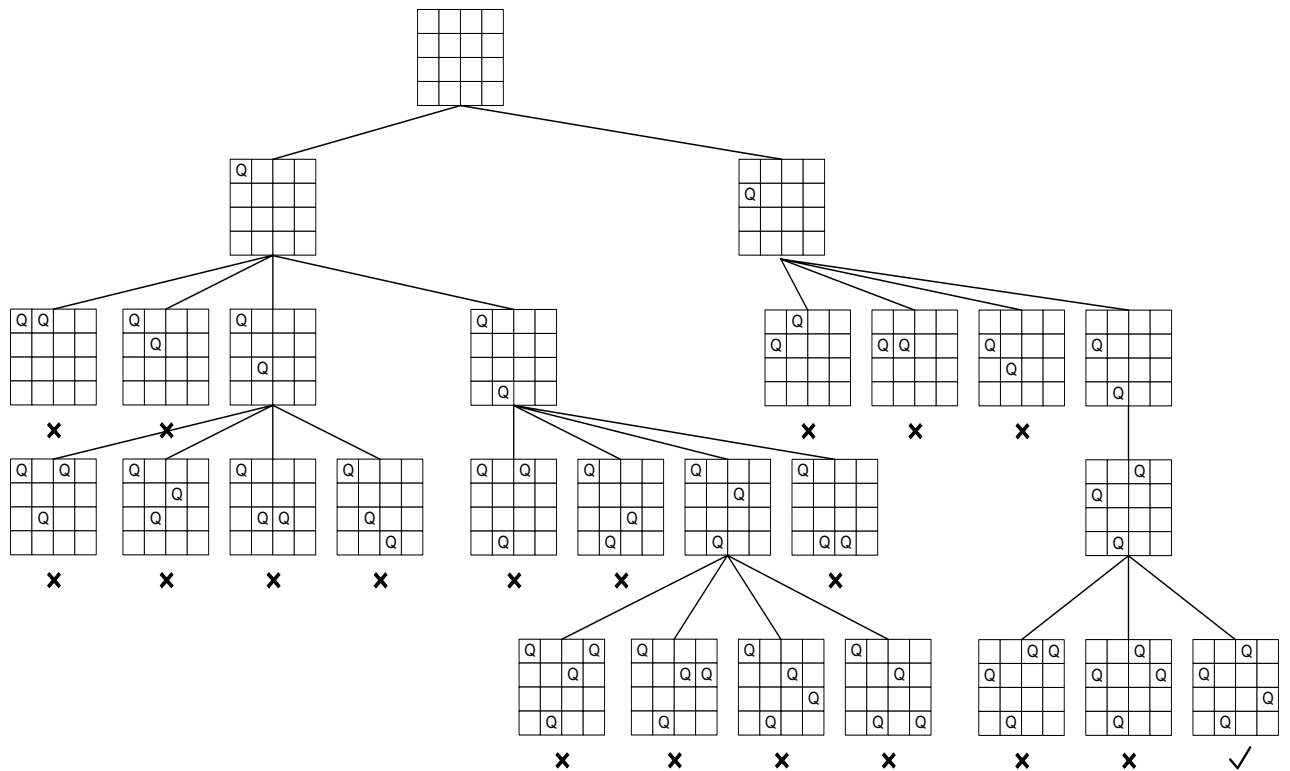


圖 2.3 回溯法-以 4-queens 為例

## (2) 前向查核法 (Forward Checking)

前向查核法是由 Haralick 與 Elliott 兩位學者於 1980 所提出[12]，可視為回溯法結合一致性檢驗技術之搜尋演算法，在回溯法中，搜尋僅考慮目前變數與過去變數是否能一致，而前向查核法則還將未來變數納入考慮範圍，在每個搜尋節點中前向查核演算法會根據目前變數與過去變數的值，對未來變數值域進行一致性檢驗，刪減未來變數不可行之值域（暫時刪除），好處在於當未來變數的值域成空時，馬上就知道目前這一組部分解（partial solution）已經導致無解，演算法回到上一個分支節點時所有變數的狀態必須馬上回復到原來的狀態（亦即剛剛被暫時刪減的變數值域重新加入變數值域中），而在回溯法中，則必須要等到搜尋到未來變數時才知道這一部份解是否會導致無解，前向查核法這樣的特性可使整個搜尋過程少掉許多不必要的分支，加快求解速度。

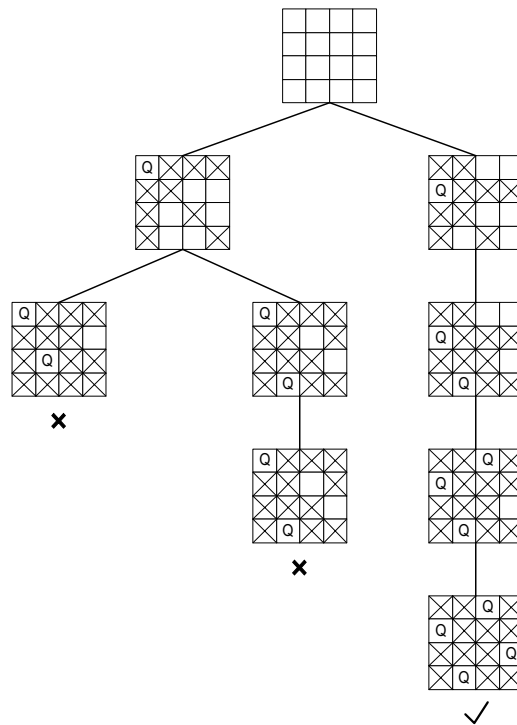


圖 2.4 前向查核法—以 4-queens 為例

### (3) MAC 演算法 (Maintaining Arc Consistency)

MAC 演算法是由 Sabin 與 Freuder 兩位學者在 1994 年提出[18]，基本上是延續前向查核法的搜尋機制，以一致性檢驗技術為核心，不同之處在於，MAC 方法中加入考慮未來變數之間的一致性狀況的考量，亦即考量未來變數對其他未來變數的影響。MAC 演算法深一層的推理機制，在每一節點便考慮了許多未來可能出現的結果，預先排除不可能的分支搜尋，理論上 MAC 搜尋法會比前向查核法更具效率。MAC 推衍未來變數間相互影響關係之運作，在經過值域比對之後會給予被過濾掉的未來變數一個標記。若某個未來變數所剩之值域當中已無任何值能夠與另一個未來變數滿足一致性（不滿足限制），此時便給予後者標記「1」。而若某個未來變數所剩值域中，扣除標記為 1 的值之後，不論出現何值，將會與另一個未來變數之值發生衝突，則將後者標記為「2」。以此類推。

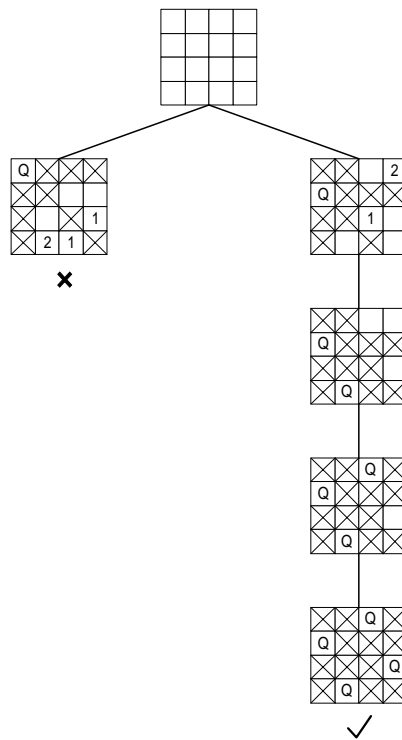


圖 2.5 MAC 演算法—以 4-queens 為例

### 三、限制規劃求解 CSP 之經驗法則

限制規劃之空間搜尋演算法以樹狀結構來表示解空間狀態，基於此，決策變數初始化順序與決策變數值域初始化順序的搜尋策略會影響空間搜尋演算法的執行效率。這些搜尋策略的決定並無任何的規定與不變準則，因為對於一個 CSP 問題而言，並不能保證怎樣的變數初始化順序與變數值域初始化順序方式會最有效率，但是文獻中還是有學者指出事實上是存在一些基本原則與經驗法則可供參考。

#### （一）決策變數初始化順序（Variable Ordering）

在一個 CSP 問題中存在許多決策變數  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，決策變數初始化順序指的是如何決定這些決策變數初始化順序，Brailsford 等[5]學者指出選擇變數初始化順序有兩種方式：靜態決策變數初始化與動態決策變數初始化。靜態又稱為確定性（Deterministic）意謂在進行空間搜尋時，決策變數初始化順序已決定好，並依此順序進行搜尋樹的分枝。而動態決策變數初始化順序的方法是指，以目前變數的狀態在依循某項原則之下，作為選擇下一個決策變數做初始化進行分支。不過動態順序的方法並不適用於回溯演算法當中。因為回溯演算法僅與過去變數及目前變數有關，並無足夠資訊可供未來變數初始化的決定。

如何選擇決策變數初始化 Haralick 與 Elliott[12]兩位學者提出兩個經驗法則作為參考。這些經驗法則就是在 CSP 求解的過程當中應優先選擇值域較少的變數或是受限制最多的變數作為初始化決策變數。也稱之為最先失敗原則（fail-first principle）。

#### （二）決策變數值域初始化順序（Value Ordering）

對於一個 CSP 問題搜尋而言，有效的決策變數值域初始化的能夠使得搜尋過程盡量避免遇到死巷（deadend）而必須回溯（backtracking）的狀況。亦分為靜態及動態兩種決策變數值域初始化順序兩種方法。靜態順序指在進行決策變數初始化的過程中，如何從變數值域中挑選一個值出來是事先就已決定好。而動態順序的方法是在空間搜尋的過程中，依據某項準則動態地決定該如何從值域中挑選一個值給初始化的決策變數。目前文獻上皆以最先成功原則（succeed-first principle）作為參考原則。意謂在挑選決策變數值之值時，應該從最有可能造成 CSP 有解的值挑選。不過對求解最佳化問題或無任何解之 CSP 問題而言，因為必須要搜尋完整個解空間才能找到最佳解及確定此問題無解；因此，不管使用任何的決策變數值域順序方法，對於整體搜尋效率並無影響。

另外，關於 CSP 描述問題的方法也有一些基本法則。通常將一個問題描述構建成 CSP 模式求解，方法是適當的設計 CSP 問題的變數結構，並且建構變數與變數之間的限制條件來描述此限制滿足問題。描述一個 CSP 問題的限制可能有很多種方法，不過通常以最簡單的二元限制式來表示為佳，因為 arc consistency 具有二元限制的特性，MAC 演算法也一次也僅能處理二元限制。

Brailsford 等[5]學者提出在建構變數結構的想法為，盡量考慮以較少的決策變數、較大的值域代替較多變數、較少值域的設計作為建構變數結構的原則，如此可以減少整個解空間區域，通常也可以較快求得可行解。

限制規劃在人工智慧領域已被廣泛的討論，但是對於大部分作業研究領域研究學者來說來是相當地陌生，傳統作業研究方法多針對最佳化問題發展出許多有效數學規劃方法，但是實務上許多問題並不是刻意追求最佳化的答案，而是以滿足所有的限制條件為目標，像是一些組合化問題便是如此，基於此，限制規劃方法也逐漸受到作業研究領域學者的注意，近來有愈來愈多研究應用限制規劃方法求解，並且都有不錯的成效，這些問題包括：設備位置、生產排程、汽車生產線管理、商品分割、路線規劃問題、班表設計以及排班等相關問題。

近兩年國內已有學者開始投入限制規劃應用並有初步的成果，包含：陳伯榮[26]利用限制規劃語言構建投資組合決策系統，應用在低風險、高報酬投資決策特性下，投資報酬績效確能有效提升；王國琛[27]以限制規劃結合數學規劃方法求解大型後艙組員排班問題，例題測試結果皆優於文獻結果；葉杰榮[24]應用限制規劃為核心建構即時排課決策支援系統，提供排課複雜問題之解決方案。

### 第三章 公平性組員派遣 CSP 限制建立

本章將探討後艙組員派遣之原則，首先說明空服員空勤任務派遣時航空公司及組員對於排班的要求，在此考慮之下，組員派遣原則可分為兩部份，一為符合休時、飛時、工時之工作安全規則，另一為考量組員勞逸負擔之工作公平規則，依這些考量建立本研究公平性組員派遣各項 CSP 限制。

#### 3.1 後艙組員派遣要求

組員派遣問題即是在假設已知最小成本勤務組合的條件之下，求解符合飛時、工時、休時限制，以及盡量滿足公平性考量的組員月行程班表。本研究以 C 航空公司座艙長派遣作為研究對象，C 航空公司排班的要求主要有以下四點目標：

##### (1) 符合規定

為確保航班飛行時能夠有足夠的人力，以及組員值勤時有充沛的精神，民航法規、工會規定或是航空公司都會訂定各項工作安全規則，防止因組員疲累而導致的意外發生。這些規定包含限制每一種機型所需之最少服勤空服組員人數，空服人員的階級、機型、艙等資格、性別、語言的限制，以及空服員值勤的工作時數、飛行時數、休息時數等等。

航空法規「航空器飛航作業管理規則」第一百七十條文規定：航空器載客座位數為二十人至五十人時，應派遣一名以上之客艙組員，載客座位數為五十一人至一百人時，應派遣二名以上之客艙組員，於每增加載客座位數五十人時，增派一名以上之客艙組員。依旅客人數多寡有最低派遣員額的設定，不同機型也各有不同標準員額設定（各機型飛航任務簽派空勤員額規定如表 3.1 所示）。另外，按各艙等座位數分配，會安排具有各艙等資格不同人數之空服人員，以 C 航為例，艙等資格人數比例-頭等艙：商務艙：經濟艙為 1：1：2。一般說來，每一架飛機後艙會配置一名座艙長管理所有後艙空服組員。

除了人數限制之外，也需注意組員是否有符合特定機型及艙等資格的要求。針對這兩點而言，前艙組員與後艙組員有較大的區別，前艙組員為航空機師，接受不同機型飛行訓練的機師，即會限制其可飛行的機型種類，前艙組員通常會固定服勤特定機型，以免經常更換機型而增加不熟悉的操作風險，前艙人員派遣也不需考慮到艙等資格的問題，故以排班的複雜度來說會較後艙組員派遣簡單。後艙組員在機型限制的考量上也是要經過各類機型訓練才可服勤，不過後艙組員多會被安排接受所有機型值勤訓練，因此一般後艙組員皆能夠服務所有機型。

後艙組員艙等資格可分為經濟艙（Y）、商務艙（C）、頭等艙（F）三類。新進後艙組員由經濟艙開始服勤，經過訓練與經驗累積之後才可服務商務艙乃至頭等艙，艙等資格的限制為，具有較高之艙等資格可以含括服務較低之艙等，反之則不行，亦即經濟艙僅能服務於經濟艙，而當有遇有人力不足情況時，具有頭等艙資格的組員可支援商務艙或是經濟艙之人力。在後艙組員的職位角色方面，依年資階級可分為空服長、座艙長、空服教師、空服員、試用空服員五種階級，前面三種階級職位可統稱為座艙長，其性別與服務機型種類不限，後兩者統稱為空服員，服務艙等分為 F、C、Y 三類，一般艙組員只要接受過兩階段的訓練所有機型皆可服勤，有些航空公司也會規定一架飛機上至少需要多少男性空服員，以 C 航空公司來說，為了減少成本與配合旅客的需求，除了台北、高雄兩個基地以外，目前在新加坡、曼谷、東京三個外站也設有基地，在上述五處基地皆有空服員，滿足除了國語、英語以外馬來語、泰語、日語旅客的需求，而座艙長僅在台北、高雄兩處基地有配置。

表 3.1 各機型飛航任務簽派空勤員額規定

機型	空服組員標準員額		空服組員 最低派遣
	國際線	國內線	
747-400	19	12	依旅客人數決定 最低派遣人數 20~50：1 員 51~100：2 員 101~150：3 員 151~200：4 員 201~250：5 員 251~300：6 員 301~350：7 員 351~400：8 員 401~450：9 員 超過此部分，依此類推
747-SP	13	8	
747-200	16	11	
MD-11	13	8	
A300-600R	12	7	
A300-B4	12	7	
737-400	5	4	

## (2) 控制成本

航空公司人力成本的支出佔總支出約 20%，為僅次於燃料成本的一大營運支出，而一旦航空公司的航班班表確定燃料成本也大致固定，因此從成本控制的角度來看，排班結果的好壞就與航空公司成本支出有很大關連。組員排班成本最相關的就是組員的報酬支出，可從組員的薪資結構分析，空服人員的薪資包含四個部份：

- a.基本薪：基本薪與組員的年資有關，等級職位愈高基本薪資愈高。
- b.零費：為組員出差其間在外的交通、通信等零用金，亦依年資高低有所不同。
- c.飛行加給：以 C 航空公司為例分為兩個部份計算，每個月保障組員的飛行時數為 60 小時，以每小時 200 元計算亦即每月組員每月的保障薪資為 1 萬 2 千元，平均每天有 2 小時的飛行加給，每個月超過 60 小時的飛行時數時飛行加給也會增加，計算方式為：60 70 小時之間，每小時為 375 元；76 小時以上每小時為 600 元；此外，空載時組員飛行加給以相對飛行時數一半計算。此外，當組員被派與地面任務之時，若被指派的任務為會議、訓練...等對公司具有產值的活動之時，會給予 2 小時的飛行加給，也就是說假設某組員被派與參加一天會議的任務，則該組員這個月的其他 29 天只要再指派 58 小時的飛行任務即可，若被派與的任務為不支薪勤務如：待命任務、休假日、報到前後時間...等，則不給予飛行加給。
- d.餐旅費：包含組員在外出差期間的住宿費與餐旅零用金，旅宿費依各地消費水準而異，而餐旅費則依差旅時間計算，飛行國外每小時給予 2 塊美金補助；國內則為 36 元台幣。

上述四項當中，前兩項基本薪資與零費皆是根據組員的年資計算發給，屬於固定薪資，而後兩項飛行加給與餐旅費，則視組員飛行時數與差旅時間而定。對航空公司而言一旦最小成本勤務組合產生之後，公司所支出之飛行成本、空載成本、外宿成本應為固定的最小成本，故在組員派遣階段，影響變動薪資的差異最主要為來自飛行加給的部份，當組員超出 60 小時的月保障飛行時數後，航空公司所要付出的逾時飛行成本會大幅增加，因此，組員派遣主要考量的目標為平均分配飛行時數，平均化組員的飛行時數一方面可以使組員的勞逸程度較為平均，另一方面也可以降低航空公司成本支出。

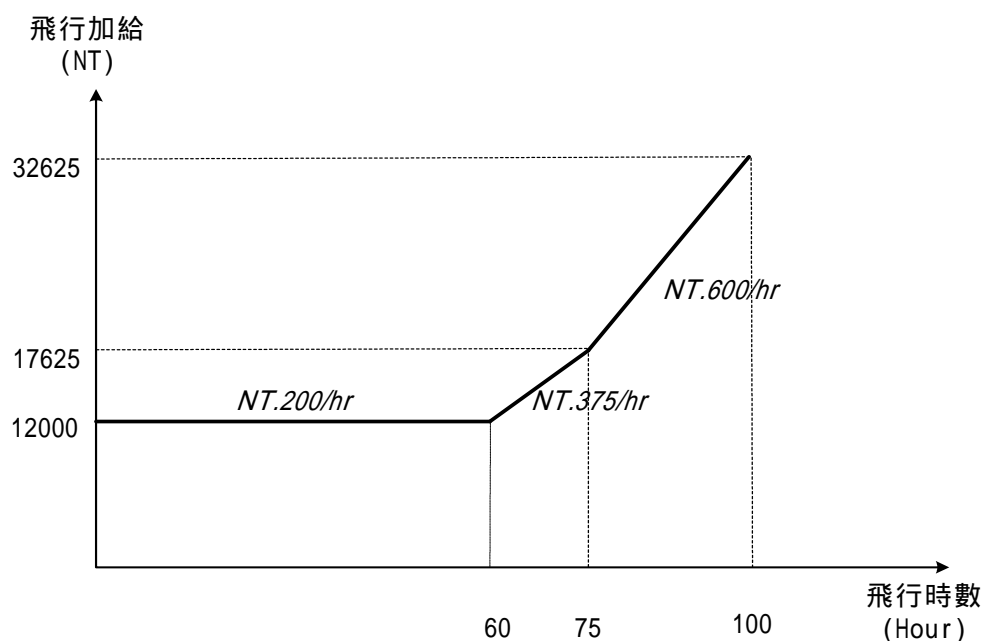


圖 3.1 飛行加給與飛行時數關係圖

### (3) 公平分配

從上述第(2)點中可以瞭解平均分配飛行時間是組員派遣中最主要的考量，除此之外，工作天數與休息天數的安排直接影響組員疲勞程度，也是派遣時需要公平考量的因素。勤務組合接續之工作與休息時間限制，在產生勤務組合時業已考慮，因此在組員派遣階段多考量組員一個月的總工作天數與休息天數，C 航規定每個月必須有 6 天的保證休假日，另外，在實際派遣長勤務時，為體恤組員值勤長勤務組合數天的辛勞，也會在長勤務之後安排 1~2 日的休假，讓組員有充分的時間休息恢復體力再回到崗位。

### (4) 追求品質

航空運輸屬於服務業的範疇，空服人員則是航空公司與顧客接觸的第一線人員，空服員的士氣就會影響其服務品質，提升士氣則必須盡量考量到除了工時、飛時、休時以外空服組員所在意的因素，這些因素包括場站次數、起落次數、長短班搭配、早晚班、勤務組合之間隔、外站住宿、組員特定航點班次喜好...等等。

### 3.2 組員派遣原則說明

航空公司對於工時、飛時、休時的派遣規定，主要來自民航法、公司派遣規定、團體協約以及工會的考量。民航法規「航空器飛航作業管理規則」中第 33、34、35、252 條文（附件一）針對飛航組員之飛航時間上限與航班間隔組員休息時間有明文規定，而以航空公司的角度來看，當然希望能以最少的人力達成任務需求，以 C 航空公司來說，便會規定每個月每位組員最少的飛行時數，航空公司為有效率利用人力在考量法規、工會及團體的協調之下，會訂定一套工時、飛時、休時的派遣原則作為組員派遣依據，根據 C 航空公司「空服員作業手冊-空服員派遣原則」，空服組員派遣原則如下：

#### （一）各項時間定義

工作時間、飛行時間、休息時間的定義如下：

- （1）工作時間：包含三種時間。一為空服組員值勤每次空勤任務之時間（即為差旅時間 TAFB），計算標準自報到起至報離為止，報離皆是落地後加 1 小時，報到時間國內航線與國外航線略有不同，國內航線首次任務需於起飛前 60 分鐘報到（非首次任務為 45 分鐘前），國外航線需於起飛前 140 分鐘報到（12：00 17：00 起飛之航班需在提早 10 分鐘；如遇連續假日則要提早 20 分鐘）。二為待命時間，待命時間並不算薪資。三為因公務需執行之非空勤任務之時間，例如會議、訓練等任務。
- （2）飛行時間-飛機起飛前起動至落地後落地關車之時間，空服組員之飛行加給時數即依此計算。
- （3）休息時間：前次任務工作時間結束至下次任務工作時間開始之間隔時間。

#### （二）作業內容

- （1）飛行時間與工作時間之限制：
  1. 連續 24 時內，工作時間應不超過 14 小時，飛行時間應不超過 9 小時。惟單趟落地（直飛）航次可酌予延長，但需保留客位或床位不得少於組員數 1/2 供組員休息。
  2. 工作時間超過 12 小時，則休息時間不得低於 24 小時。
  3. 工作時間超過 8 小時，不到 12 小時，休息時間不得低於 12 小時。
  4. 工作時間 8 小時以內，休息時間不得低於 8 小時。
  5. 班機因天災事變或突發事件得延長工作時間，但應於延長開始後 24 小時內通知工會，延長之工作時間得於事後予以適當之休息時間。

(2) 一般原則：

1. 每月飛行時數以 70 小時為原則，不得超過 100 小時。(保證飛行時數 60 小時)。
2. 每月工作時數不得超過 190 小時。
3. 每月必需給予國內保證休假日 6 日。
  - a. 個人因事病請假，組員派遣中心得依次取銷與其請假日數相等之保證休假日。
  - b. 保證休假日如經當事人同意得予派遣任務，但其受影響之日數須於次月補足之。
  - c. 待命日因任務派遣致影響保證休假日，其受影響之日數須於次月補足之。
4. 每年總休假日男性不得低於 68 日，女性不得低於 69 日。
5. 每次任務起降次數，國際線不得超過 4 次，國內線不得超過 8 次。

從上述「作業內容」要點當中，說明了 C 航空公司考慮飛時、工時、休時限制而訂定的排班原則，其中有關飛行時間與工作時間限制的第 1~5 點以及一般原則內的第 5 點，是排班第一階段求解「最小勤務組合」即已列入考慮的條件限制，或為班表臨時變動下的派遣原則並非一般常態原則，以上 6 點均不列入本研究限制規則當中。另外，在本研究當中求解的期間訂為一個月，因此一般原則中第 4 點所規定之每年總休假日限制在此亦不予考慮。

### 3.3 公平性因素

在符合法規面對於工時、飛時、休時的基本限制之下，組員最在意的就是工作量的公平，飛行時數、休息天數的公平分配會讓組員有較為平均的工作量負荷，而在相當的飛行時數下，值勤的勤務組合任務也有好班、壞班之分，一般而言組員所謂的好班、壞班會與組員值勤的飛行時間（Block Hour）、搭機時間（Dead Head Time）、差旅時間（Time Away from Base）、起落次數（Take Off and Landing）、以及組員個人的喜好這些因素有關。以下便就影響組員派遣之公平因素進一步說明：

#### （一）飛航時間（Block Hour，BH）

「飛航時間-Block Hour」係指航空班表上預定之起飛至預定到達目的地之時間，即為航空時刻表上各航班的時間。前一節中說明飛行加給為組員最為在意要求公平的項目，飛行加給是根據實際組員的飛行時間計算而得，然而尚未起飛之前實際的飛行時間是不得而知的，兩者的關係式約為  $BH=1.1*(Fly\ Hour)$ ，因此，在排班上飛行時數的考量是以「飛航時間-BH」為衡量項目。

#### （二）飛行航段數（Flight Legs，FL）

航空器一次起飛與降落為一個航段，在一個勤務組合當中可包含一至數個航段（C 航空公司規定一個勤務組合最多包含 4 個航段為限），對於後艙組員而言均不喜歡太多航段，因為組員必須處理旅客上、下機事宜，在旅客下機後也必須做清潔整理的雜事，愈多航段表示組員的工作負荷也會愈多，因此組員會希望指派的勤務組合包含愈少的航段。

#### （三）差旅時間（Time Away From Base，TAFB）

其定義為空服員每次值勤空勤任務之時間，自空服員報到起飛至值勤數個勤務後回到同一基地報離之期間。差旅時間愈長表示組員在外的時間愈長（C 航空公司限制一個勤務組合最長涵蓋 15 天差旅時間），對許多人來說並不喜歡長時間在外。

#### （四）工作天數（休假天數）

工作天數多寡相當於休假日多寡，為組員極為重視的一項公平指標，一般每月會給予每位組員 6 天的保證休假日，以保障組員休息的權益，以 C 航而言平均每位組員每月約有十多天的休假日，因此每位組員休假天數的公平也是排班必要考量的公平因素。

#### （五）工作時間

工作時間包含空勤任務、待命任務以及非空勤任務（會議、訓練...）三種時間，工作時間為組員付出勞力時間相關，在 C 航空服員手冊中規定一個月組員之工作時數不得超過 190 小時。

#### （六）特定航點的次數

對於空服員來說相當的飛行小數之下不同飛航點工量也會有所不同，而在心理感受與壓力也不盡相同，例如以 C 航空公司一日的短班台北-東京、台北-福岡、台北-名古屋來說，飛行時數差異不大，不過一般組員會較喜歡台北-福岡而不喜歡台北-東京的航班，而同樣是飛美國線，舊金山的旅客可能就較飛洛杉磯的旅客受歡迎，組員一般較喜歡飛舊金山的航班，對於特定航點的分配，組員也希望盡量能夠平均分配，不要有單一組員一個月之內就飛同一個航點數次。

#### （七）待命任務

為避免班機調度臨時需要人力支援或是臨時有組員生病請假無法值勤，航空公司在進行排班時會安排待命任務的預留人力，以 C 航空公司後艙座艙長而言，待命人數的配置是以每日必須安排 4 人待命，待命任務的時段分為兩種各為 12 小時，一班是 00：00 12：00，一班是 12：00 24：00，各時段人數均為 2 人，座艙長為在家待命，因為待命任務屬於不支薪時數，組員也不喜歡太多的待命任務，在待命任務的分配上也要盡量公平。

#### （八）早晚班搭配

所謂的早晚班是指晚上 10:00 以後或是清晨 6:00 之前起飛的空勤任務，飛機起飛之前一小時組員必須完成報到，亦即組員從家裡出發的時間可能會在清晨時分，造成組員相當不便且會耗費較多精力，因此，在指派勤務組合之時也要盡量考慮早晚班的搭配次數。

#### （九）長勤務後的休假安排

長勤務對空服組員來說必須花費更多的心力與精神，航空公司所謂的長勤務一般指的是越洋線的航班任務，這些勤務差旅時間往往為 4、5 天以上，組員必須長時間在外也必須克服不同地區的時差對於生理的影響，因此相對地，值勤長勤務的組員會需要較多的時間休息恢復體力，也希望在值勤長勤務之後能夠安排一段足夠的時間休息，觀察航空公司實際的排班對於差旅時間達 3 天以上的勤務會給予 1 天的保證休假，而如果長達 5 以上的長勤務則會給予 2 日的保證休息日。

## （十）組員個人喜好

另一項影響組員對於勤務公平認同程度的因素為組員個人喜好，月勤務組合中是否包含組員喜愛的勤務組合像是某些特定航點的旅遊班，或是在休假日的安排上是否能配合到組員生日、特別的紀念日，組員個人的喜好勤務組合的安排與休假日的安排會影響其滿意度，也會影響組員對於行程派遣公平性的感受，但是有關於組員個人喜好因人而異，也較難以客觀的方式衡量其滿意程度，因此在本研究當中並不將組員個人喜好納入模式考量當中。

整體而言，本研究所考慮之公平係指工作負荷均勻分配，故在本研究中僅考慮得以客觀衡量之因素，除了每位組員工作負荷盡量平均，對於特殊較累的勤務組合指派也適當給予休假安排或數量限制。至於組員個別偏好與喜好，多為主觀感受難以衡量，在本研究中便不予考慮。另外，本研究當中並沒有工作時數因素納入限制，一方面是由於此項資料難以取得，另一方面以每日 8 小時工作時間計算，扣除 6 天的保證休假日其餘 24 天組員必須都安排工作才會超出每月 190 小時的工作時間限制，依照本研究方法並不可能排出這樣的結果，因此，在本研究當中便不再考量工作時間這項因素。

在本研究當中考慮的公平性因素有以下幾點：飛行時間的公平、飛行航段數的公平、差旅時間的公平、工作天數的公平、早晚班指派的公平、待命任務指派的公平、長勤務後休假日的安排、特定航點次數的公平。如何達到勤務組合指派上述公平的幾項公平目標，在本研究當中所採用的方式為限定每位組員公平屬性累積上限以及利用指派的技巧來達成，以下詳述之。

飛行航段數、差旅時間、工作天數為每一個勤務組合包含的屬性項目，因此當指派工作結束每位組員的三項屬性累積值便可得知。為了達到組員在這三項屬性上的公平，本研究中先計算所有待指派的勤務組合四項屬性的總和，再除以指派組員的人數，如此可得到的三個屬性平均每位組員的大概需要被指派的累積值。本研究以「屬性平均值+某個設定的百分比」之設定，來控制每位組員三項公平屬性最多累積的上限。

飛航時數攸關組員飛航加給為最主要組員在意的項目，但在本研究當中並不以設定指派上限的方法，做為飛航時數分配公平的手段，而是以限制規劃搜尋策略來達成。其概念為每次進行勤務組合指派時，將以目前最少飛航時數累積者為優先指派對象，平均分配每位組員的飛行時數。

早晚班指派的公平，大部分的早晚班勤務組合都是屬於越洋勤務，而且屬於早晚班的勤務組合並不多，以 C 航空公司一個月的勤務資料來看，早晚班勤務組合的個數約 100 多個，平均一位座艙長分配到小於 1 個的早晚班勤務組合，因此，在本研究當中早晚班的指派公平以每位組員（座艙長）不超過一個早晚班勤務組合為限。

待命任務指派的公平，待命任務佔所有勤務組合的比例並不高，C 航空公司座艙長共 169 位，而總共的待命任務一天需要 4 人一個月大約為 120 個待命任務，平均一位組員亦指派小於 1 個待命任務，因此，在本研究當中待命任務的指派也是以最多一位組員指派到 1 個為限。

在長勤務後的休假安排上，參考實務上排班方式在本研究中 3 天以上的勤務會給予 1 天的保證休假，而如果長達 5 天以上的長勤務則會給予 2 日的保證休息日。

特定航點次數的公平指派方面，一個月的所有多個勤務組合當中並非每個勤務組合都不一樣，這些勤務組合有的是每天固定飛行的航班有些是每週一航班次、...，因此在 1200 多個勤務組合當中，其實有許多航班是相同的空勤任務。這些勤務組合所包含的航點、航段皆相同，而實際上這當中只有 124 種不同的勤務組合，以每天都飛行的勤務組合來看一個月大概有 30 個勤務組合待指派，而座艙長的人數有一百多人，因此在特定航點的次數指派公平上，本研究採取的指派方式是避免相同的勤務組合指派給同一位組員來控制。

整理本研究公平性組員派遣 CSP 所考量各項規則如下表所示：

表 3.2 本研究公平性組員派遣 CSP 限制

一、飛航時間的公平	累積飛行時數較少者優先指派（搜尋策略）
二、飛行航段數的公平	設上限 $\text{MaxFL}$ （平均值 + 可容忍差距）
三、差旅時間的公平	設上限 $\text{MaxTAFB}$ （平均值 + 可容忍差距）
四、工作天數的公平	設上限 $\text{MaxWD} = \text{Min}\{\text{平均值} + \text{可容忍差距}, 25 \text{ 天}\}$
五、早晚搭配的公平	每位組員不得指派超過一個的早晚班勤務組合
六、待命任務的公平	每位組員不得指派超過一個的待命任務
七、長勤務後休假安排	天數大於 3 日以上長勤務之後安排一天休假，5 日以上安排兩天
八、特定航點次數的限制	相同行程勤務組合不指派給同一位組員

## 第四章 公平性組員派遣限制規劃模式之建立

本章將建立本研究公平性組員派遣限制規劃模式。本研究將航空後艙組員派遣問題視為限制滿足問題，前一章所建立之各項派遣限制，以 OPL 限制規劃語言進行限制函數列式，建構 CP 模式來求解此一 CSP 問題。首先便就限制規劃方法論與數學規劃方法作一比較。

### 4.1 數學規劃與限制規劃之比較

數學規劃與限制規劃皆為可用於求解組合搜尋問題的方法，但此兩種方法的求解架構思維模式卻不盡相同。數學規劃的方法是根據數學理論的角度來求解，方法論的重心在於「運用歸類組合最佳化問題的種類並研究各類型問題的特性，提出相關數學理論來求解各類型組合最佳化問題」，以組員派遣問題來說，通常以一般化集合分割數學規劃模式求解；相反地，限制規劃方法是從電腦求解與電腦演算法的角度出發，其方法論重心在於「運用電腦語言與電腦演算法，使電腦能瞭解並能系統化地、有效率地求解組合化問題」。

數學規劃方法是以求解最佳解為目標，其基本架構由目標式及限制式條件構成，根據不同問題型態以不同數學理論模式化問題（MP Formulation），設定成本函數  $C$ 、限制式矩陣  $A$  與可用（需求）資源  $B$ ，而當實際上求解規模過大時會加入啟發式解法於數學規劃求解當中，以便在可容忍的時間範圍內求得品質還不錯的可行解。作業研究領域自二次世界大戰以來的發展至今已有數十年的研究成果，對於各種結構性的問題的求解都有相當紮實的數學理論基礎，對於解空間大且連續的問題而言，作業研究方法大都能提供不錯的求解成效。

而限制規劃是求解限制滿足問題的一種方法，求解目標為找到滿足所有限制的可行解即可，和數學規劃不同的是，限制規劃並無具體的模式架構而必須依問題型態而定，限制規劃模式架構主要包含以下三個部分：

1. 定義變數結構

使用者必須根據解題的目的定義適當的變數結構，變數結構的設計會影響可行解搜尋空間的大小。

2. 限制式寫法

運用限制規劃語言建構出描述限制滿足問題之限制式寫法，限制寫法並沒有一定方式，建構好的限制寫法可幫助搜尋加快。

3. 搜尋策略

由於限制規劃方法目的並不是求得一個最佳解而是求出滿足使用者要求的可行解，限制規劃往往很快便能求出一個可行解，但是針對大規模問題而言，由於解空間相當大如果再加上嚴苛的限制式，就算只要找到一個可行解也相當不容易，因此，為有效增加限制規

劃的求解效率，使用者可透過自訂「搜尋策略」方式決定初始變數的順序以及初始變數給值的順序，針對不同問題特性訂定不同的搜尋策略，聰明的搜尋與給值方法不僅可以加速解空間搜尋時間也可以提升搜尋到之可行解品質。但對於最佳化問題而言，最佳解必須找尋過所有可行解空間後才能確定，訂定搜尋策略便無效果。

數學規劃方法與限制規劃方法各有其適用的問題型態，對於可行解空間大且連續限制程度低的問題而言，文獻上建議以傳統作業研究數學規劃之方法較佳，而對於可行解空間斷斷續續限制程度高的問題（排課問題、班表設計問題、排班問題...）而言，以限制規劃方法求解通常會有較佳成效。

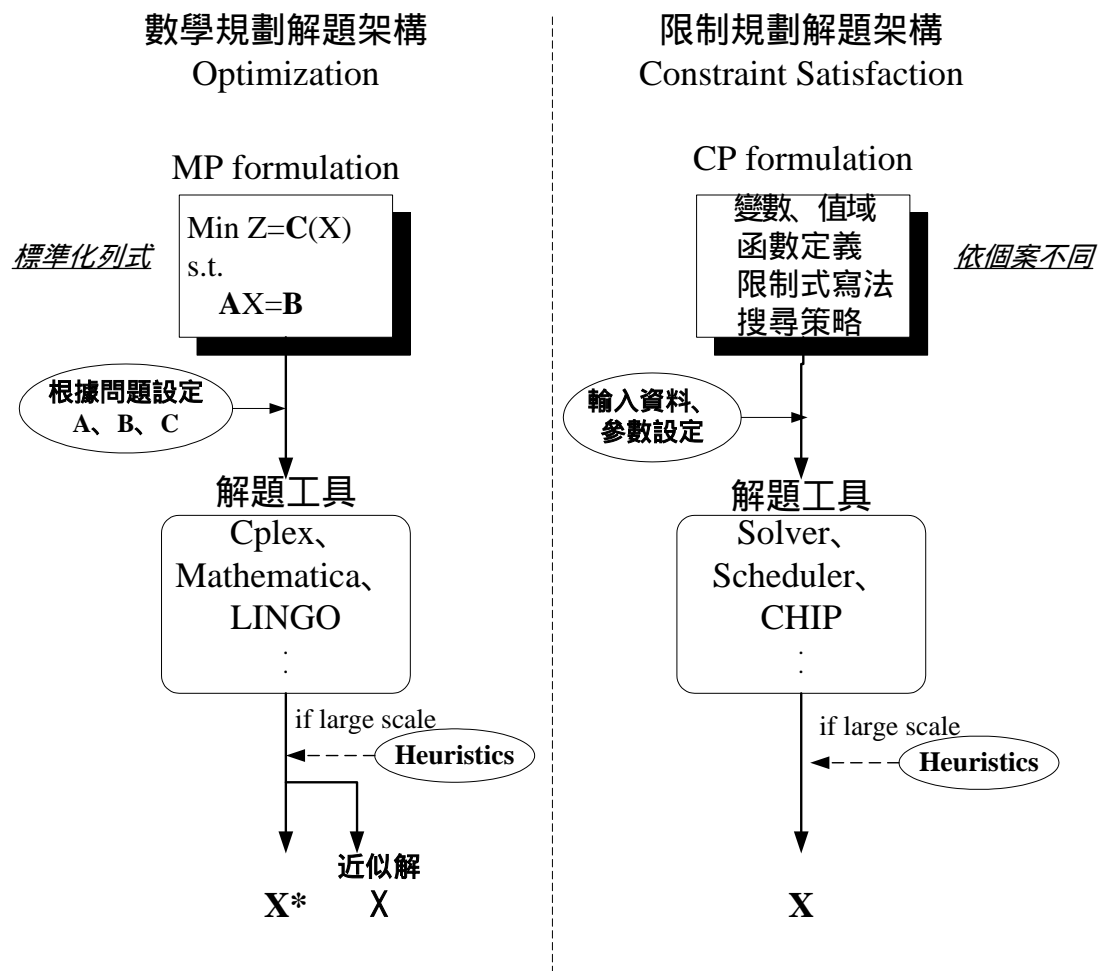


圖 4.1 數學規劃與限制規劃解題架構之比較圖

## 4.2 公平性組員派遣限制規劃模式

本研究公平性組員派遣 CSP 之求解架構如下圖 4.2 所示。輸入資料包含設定參數資料、勤務組合資料，再加入各項派遣規則構成組員派遣 CSP 模式，利用限制規劃方法求解，而預定得到的結果為「勤務組合指派結果」、「組員月行程班表」、「四項屬性累積值」三項結果。勤務組合指派結果紀錄每一個勤務組合指派給哪一位組員來值勤，而從組員月行程班表便可得知組員一個月的值勤行程，四項屬性累積值在此指的是每位組員月行程中差旅時間、飛航時數、飛行航段數與工作天數個別的累積的四項值，透本研究將以此四項屬性累積值作為衡量派遣結果的好壞。

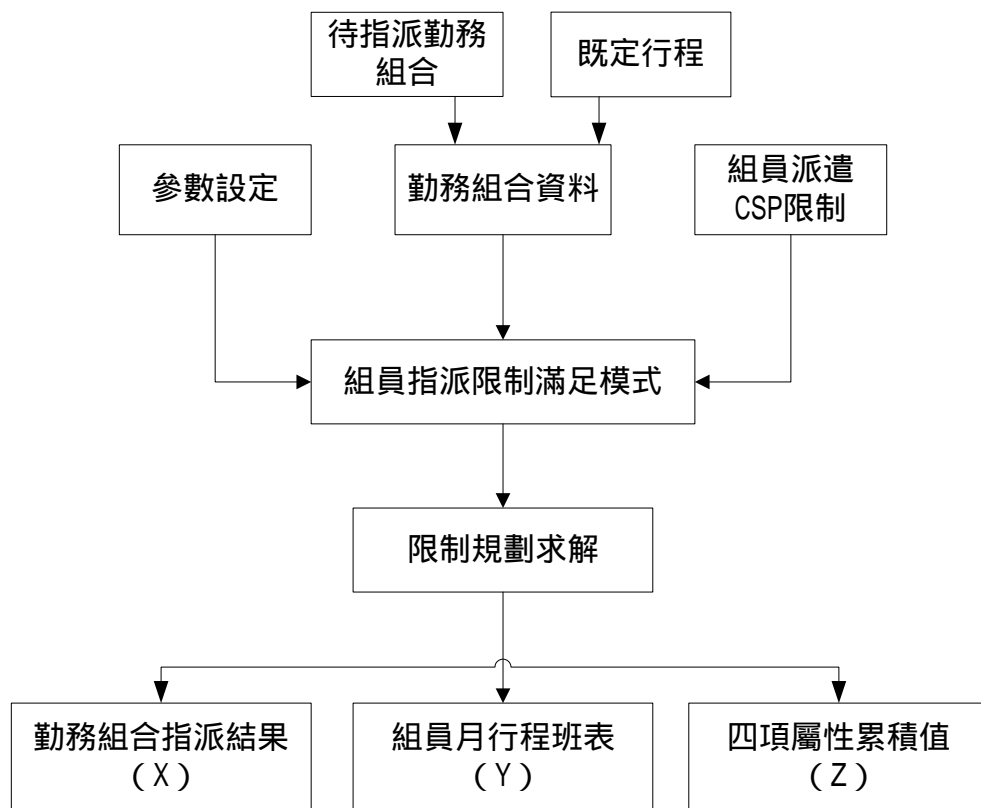


圖 4.2 後艙組員 CSP 求解概念圖

本研究以限制規劃方法來求解組員派遣限制滿足問題，前一節中討論過限制規劃方法並無一定之架構模式，必須根據問題特性設計變數、撰寫限制語法、設定搜尋策略，資料的輸入也需經過適當的設計處理，這也是限制規劃最困難最關鍵的步驟，以下章節便針對本研究如何構建公平性組員派遣問題之限制規劃模式作詳細之說明。

#### 4.2.1 變數結構之設計

首先是問題變數設計方面，本研究的目的是要得到「勤務組合指派結果」、「組員月行程班表」、「四項屬性累積值」三項結果，對應此三項目標，本研究設計之問題變數有 X、Y、Z 三個變數。

X 變數表示各個勤務組合指派給哪個的組員，X 之變數結構用 X[Pairing] 表示，為一一維陣列結構，Pairing 表示勤務組合的個數，變數 X 之值域為所有組員集合。Y 為每位組員一個月所指派到的勤務組合行程，記錄了每一位組員既定行程、所指派到的勤務組合起迄日期以及休假日狀況，以 Y[Crew,Day] 的二維陣列來表示，變數 Y 之值域為所有勤務組合集合，第一維度 Crew 表示組員人數，第二維度 Day 表示一個月的日期數為 31 或 30。變數 Z 為紀錄每位組員工作時間 (TAFB)、飛航時間 (BH)、飛航航段數 (FL)、工作天數 (WD) 四項屬性之累積值，以 Z[Crew,4] 的 Crew 人數 x 4 的二維矩陣表示，第二維度 1、2、3、4 分別表示 TAFB、BH、FL、WD 屬性，變數 Z 之值域為 0~M (很大的自然數)。

變數結構	變數解釋	變數個數	變數值域
X[Pairing] (一維陣列)	勤務組合指派結果	1456 (勤務組合個數)	1 169 (組員)
Y[Crew,Day] (二維陣列)	組員月行程班表	5239 (組員 x 天數)	0 1457 (勤務組合)
Z[Crew,4] (二維陣列)	TAFB、BH、FL、WD 四項屬性累積值	676 (組員 x 4)	0 M (自然數)

(一) 勤務組合指派列表 X[Pairing]

X[Pairing]在本研究當中除了包含所有待指派勤務組合、既定任務以外，為了表示沒有指派勤務以及勤務結束的狀況，本研究增加了兩個勤務組合來表示，Pairing 的編號方面 0 表示 dummy 勤務，1 表示結尾勤務或是長勤務後之休假情形。以 C 航空公司為例，2~183 表示所有組員的上個月 182 個既定任務（亦即 X[2]~X[183]的值已固定），184~1457 才是表示真正待指派的 1274 個勤務組合。本研究勤務組合指派列表之設計如表 4.1 所示。[註：既定任務個數以及待指派勤務組合個數隨不同個案在編號上也會不同]

表 4.1 勤務組合指派列表之範例

勤務種類	勤務編號	指派組員
Dummy 勤務	<u>0</u>	無固定
結尾勤務	<u>1</u>	無固定
既定勤務 (182 個)	<u>2</u>	10
	.	.
	.	.
	<u>183</u>	63
待指派勤務 組合 (1274 個)	<u>184</u>	50
	<u>185</u>	33
	.	.
	.	.
	<u>1457</u>	50

說明

1. 勤務組合列表以 X[Pairing]表示個勤務組合指派的組員，若[184]=50 表示第 184 勤務組合指派給第 50 號組員。
2. 實際需要指派的勤務為 184~1457 共 1274 個勤務，0 表示 dummy 勤務，1 表示勤務結尾，2~183 表示各種既定行程（訓練、會議、跨越勤務...）為固定指派組員。

## (二) 組員班表 Y[Crew,Day]

組員一個月之月行程班表以 Y[Crew,Day]來表示，Y 的值表示各種勤務，由此可知變數 X[Pairing]與變數 Y[Crew,Day]彼此會存在關連，當某個待指派 Pairing i 指派給某個組員 j 時，則在組員 j 的行程班表 Paring 的開始日那天給值 i 來表示 Pairing i 指派給了組員 j，為了方便起見在 Pairing 結束日的那一天也給值 1 來表示這個 Pairing 在這一天結束。組員班表之範例如表 4.2 所示：

表 4.2 組員月行程班表之範例

日期 組員	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	.....	<u>30</u>	<u>31</u>
<u>1</u>	3	0	1	1 <sup>**</sup>	0	0	.....	0	0
<u>2</u>	0	0	150	0	0	1	.....	0	0
<u>3</u>	160 <sup>*</sup>	0	0	0	0	1	.....	0	0
<u>4</u>	0	0	0	0	0	0	.....	0	4
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<u>168</u>	182	1	0	0	45	1	.....	0	0
<u>169</u>	0	0	0	189 <sup>***</sup>	0	0	.....	0	0

### 說明

1. 勤務組合 m(假設起迄日分別為 x,y)指派給組員 n，則在組員 n 的第 x 天給值 m，第 y 天給值 1 表示結束。例如 ( <sup>\*</sup> )：上圖中 pairing160 起飛日為 1 號返回日為 6 號，當勤務組合 160 指派給 3 號組員時，3 號組員班表上 1 號的值是 160 而 6 號為 1 表示勤務結束日。
2. 當組員被指派長勤務組合 (3 日以上) 時，任務結束之安排休假以 1 表示，如：勤務組合 3 為三天之勤務，在其結束日後 (亦即 4 號) 安排一天之休假以 1 表示，例如 ( <sup>\*\*</sup> )。
3. 當勤務組合的起迄日為同一天或是為 31 日起飛之勤務，則無 1 之結束符號。例如 ( <sup>\*\*\*</sup> )：上圖中一天的勤務組合 189 指派給 169 號組員，則 169 號組員班表的 4 日那天值記為 189。

### (三) 組員四項屬性列表 Z[Crew,4]

變數 Z 表示每位組員所有指派到的勤務組合四項屬性的累積值，組員屬性列表是為了衡量排班公平性需要的資料，這四項屬性為即為本研究用以組員工作量公平的指標，方法為針對每一項屬性從組員的屬性列表當中加總每位組員與平均值的差值再除以組員總人數，如此便可得知平均一位組員某項屬性與平均值的偏差的程度。以 TAFB 公平性衡量方法為例：（式中，N 表示組員人數。）

$$\text{TAFB 正規化平均偏差率} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|TAFB_i - \overline{TAFB}|}{\overline{TAFB}} * 100\% \right)}{N}$$

表 4.3 公平性屬性累積列表之範例

屬性 組員	<u>TAFB</u>	<u>BH</u>	<u>FL</u>	<u>WD</u>
<u>1</u>	5500	4000	13	15
<u>2</u>				
.				
.				
.				
<u>169</u>				

#### 說明

1. 公平性屬性列表以 Z[Crew,4]表示。
2. 四項屬性值包含「既定行程」以及「指派的勤務組合」之累積值，例如：1 號組員四項累積值分別表示工作時間 5500 分鐘、飛行時間 4000 分鐘、航段數 13 個、工作天數 15 天。

#### 4.2.2 資料輸入

##### (一) 勤務組合資料

後艙組員派遣 CSP 模式中所需之輸入資料為勤務組合資料以及跨月屬性累積資料，Pairing 資料包括既定任務資料（表 4.4）以及待指派勤務組合（表 4.5）。每一個勤務組合資料包含勤務的種類、勤務編號、勤務起飛日、勤務結束日、飛航時間、差旅時間、航段數、為早晚班或待命任務等八項屬性，每一筆勤務組合以<crew,id,startDate,endDate,BH,TAFB,FL,DN>表示。[註：Pairing 所包含的工作天數可以用  $\text{endDate} - \text{startDate} + 1$  計算出，在此便不必記錄此項屬性]。

勤務種類	Trip 編號	出發日	返回日	飛航時間	差旅時間	航段數	早晚班或待命
crew	id	startDate	endDate	BH	TAFB	FL	DN

Pairing 的各項屬性資料說明如下：

1. crew：0 表示為待指派之勤務，不為 0 之自然數則表示為既定行程，該數值表示要指派給哪一位組員。
2. id：表示待勤務組合的編號或既定行程的種類（訓練、會議...）。待指派之勤務組合若為相同行程（Trip）則 id 值一樣，其值即為 C 航空公司給予的行程編號，例如每日飛台北-香港-新加坡-台北的 Pairing 其 id 編號皆為 3145。在本研究當中既定行程的 id 編號以 2~12 之數值表示各種既定行程如：跨月既定行程、訓練、年假、會議...等行程。
3. startDate：其值表示 Pairing 的起飛日期。
4. endDate：其值表示勤務組合的結束日期。要注意的是本研究中求的是一個月的行程，但是有許多 Pairing 為跨月勤務雖然起飛日在當月但是返航日卻是下個月的日期，因此，必須修改這些 Pairing 的結束日為 31 日，當某位組員被指派到這種跨月行程時，超過當月的部份即當作該組員下個月的既定行程。
5. BH、TAFB、FL 表示勤務組合飛航時間、工作時間、航段數之值。跨月任務的這三項屬性算法也是以 31 日晚上 12:00 做為分界點，在此之前的 BH、TAFB、FL 才計算，超過的部份就當作下個月的既定行程的屬性累積。
6. DN：表示勤務組合是否為早晚班或待命勤務，是為 1 否為 0。由於座艙長為在家待命，待命勤務並無早晚班之別，因此不會發生一個勤務組合同時為早晚班勤務又是待命勤務的情況發生。

跨月屬性累積資料與之前所提到的  $Z[\text{Crew},4]$  變數結構一樣，本研究以  $\text{acc}[\text{Crew},4]$  表示每位組員既定行程四項屬性的累積值，變數  $Z$  為每位組員四項屬性累積值，在計算上包含已指派之  $\text{acc}[\text{Crew},4]$  加上後來指派給組員的 Piring 屬性的累計。

表 4.4 既定行程資料範例

Pairing	指派組員	Trip 編號	出發日	返回日	飛航時間	差旅時間	航段數	早晚班或待命
i	crew	id	startDate	endDate	BH	TAFB	FL	DN
2	142	11	1	14	0	0	0	0
3	31	11	1	10	0	0	0	0
4	116	11	1	6	0	0	0	0
5	116	10	14	14	0	0	0	0
6	116	3	27	29	0	0	0	0

說明

1. 勤務組合  $2 < i < 183$  表示 182 個既定行程資料，在此僅列出 5 項為例。既定行程為固定指派組員之勤務組合，故 crew 屬性為不為 0 之自然數表示指派給哪位組員。
2. 既定行程 BH、TAFB、FL 屬性均記為 0，因為在既定行程屬性累積 acc[Crew,4] 已計算每位組員所有既定行程的 TAFB、BH、FL、WD 累積值，為避免在計算組員屬性累積值時重複計算，在既定行程資料中便不需要這三項屬性的紀錄。

表 4.5 待指派勤務組合資料範例

Pairing	指派組員	Trip 編號	出發日	返回日	飛航時間	差旅時間	航段數	早晚班或待命
i	crew	id	StartDate	endDate	BH	TAFB	FL	DN
184	0	3083	14	26	1830	16820	4	1
185	0	3083	7	19	1830	16820	4	1
186	0	3083	21	31	1325	14815	3	1
187	0	3082	24	31	990	10385	2	1
188	0	3061	19	25	1325	8970	4	0
189	0	3061	12	18	1325	8970	4	0

說明

1. 勤務組合  $184 < i < 1458$  表示待指派的勤務組合，crew 值設定為 0。
2. 相同飛航任務 Pairing id 編號會相同，如：第 188 勤務組合及第 189 勤務組合為不同天但一樣的任務。
3. 跨月勤務組合必須修改其結束日為當月的最後一天，如：id 編號 3088 為 13 天之勤務組合，第 186 及 187 勤務組合均為跨月任務，更改其結束日為 31 日（大月為 31，小月為 30，二月為 28）。

## （二）相關參數設定

後艙組員 CSP 模式相關參數包含「公平屬性參數」、「排班相關參數」，以表 4.6、表 4.7 說明之。

公平屬性參數是指與每位組員每月差旅時間、飛行航段數及工作時間累積上限相關之設定值，由於本研究採取依照飛航時數累積較小者優先指派策略已能達到公平指派的目的，因此飛航時數此項屬性累積便不考慮設定上限。在本研究當中，所謂公平即為將工作平均分派給組員使其工作負擔平均，而可知所有勤務組合之屬性累積值總和應為固定，也就是說在某位組員減少的部分便會在其他組員增加，因此，本研究僅以設定適當上限方法即可以達到平均分派的目的。

屬性累積上限值以 MaxTAFB、MaxFL、MaxWD 表示，此上限值的決定是根據事先計算指派完畢後平均每位組員指派到的屬性累積值加上自訂某個可容許百分比範圍而定，以差旅時間為例，假設平均每位組員應指派的差旅時間累積 ave\_TAFB 為 6400 分鐘，而自訂的容許差異程度 toTAFB 為 30%，則 MaxTAFB 即表示最大可容許的累積差旅時間為  $6400 \times (1 + 30\%) = 8320$  分鐘。

表 4.6 公平屬性參數

公平屬性參數	參數說明
ave_TAFB	平均每位組員須指派到之 TAFB 累積值
ave_FL	平均每位組員須指派到之 FL 累積值
ave_WD	平均每位組員須指派到之 WD 累積值
toTAFB	TAFB 可容許之差距（百分比）
toBH	BH 可容許之差距（百分比）
toFL	FL 可容許之差距（百分比）
toWD	WD 可容許之差距（百分比）
MaxTAFB	TAFB 的上限 $\text{ave\_TAFB}(1 + \text{toTAFB}\%)$
MaxFL	FL 的上限 $\text{ave\_FL}(1 + \text{toFL}\%)$
MaxWD	WD 的上限 $\text{Min}\{25 \text{ 天}, \text{ave\_WD}(1 + \text{toWD}\%)\}$

表 4.7 排班相關參數

排班相關參數	參數說明
nbCrew	組員人數
nbPairing	勤務組合數（既定、待指派、dummy、結尾）
T	跨月勤務行程個數
S	表示從第幾個勤務組合開始需要指派（待指派勤務組合）
M	待命勤務及早晚班勤務組合最多指派的個數

### （三）既定行程屬性累積

既定行程屬性累積列表格式與四項屬性累積列表相同以 `acc[Crew,4]`，紀錄上個月組員既定行程（或是上個階段指派之結果）累積之 TAFB、BH、FL、WD 四項屬性值。

#### 4.2.3 搜尋策略與分階段指派方法

先前提到雖然 CSP 問題的解只要滿足所有限制規則即可，但如問題規模很大或是條件複雜的情況下，單純找出一個可行解也可能需要花費相當多時間，因此，適當地在求解搜尋過程中設定搜尋策略是必要的，除了能夠減少搜尋時間之外，也往往能夠求解較佳的可行解。另外，為增進求解效率，本研究採取「分階段指派」啟發方法，將勤務組合指派分為 3 日以上勤務、2 日勤務、1 日勤務以及待命勤務四個階段進行。

##### (一) 限制規劃搜尋策略

限制滿足問題的求解空間可以一樹狀結構視之，其搜尋過程主要與「變數初始化順序」( Variable Ordering ) 以及「變數值域初始化順序」( Value Ordering ) 有關，本研究求解組員派遣限制滿足問題之 variable ordering 與 value ordering 設計如下說明：

##### (1) Variable Ordering

在本研究當中所謂的決策變數是指  $X[\text{Pairing}]$  而言，這是因為如果知道了哪一個勤務組合指派給哪一個組員之後，便可對應出某一個組員所有指派到的勤務組合以及該組員四項屬性的累積值，亦即  $Y[\text{Crew}, \text{Day}]$  與  $Z[\text{Crew}, 4]$  兩個變數都可以經由  $X[\text{Pairing}]$  得到，因此，在本研究當中主要的決策變數順序便是指勤務組合如何指派的順序。

關於決策變數  $X$  的初始化順序，本研究是依各個勤務組合所包含的工作天數決定，愈多天數的勤務組合愈先指派，指派的原則為先指派工作天數較長的勤務組合再進行短天數的勤務組合指派。以先排長班再排短班的方式也是實際航空公司在排班時常採用的方法，因為則可以較可減少在指派的過程中勤務組合發生 overlap 的情況，如果先排入短班再排長班，在排長班之時，由於長班跨越較多天數容易與已排好之短班發生 overlap，此時搜尋必須回溯 ( backtrack ) 重新再尋找其他可能排入的時間，也較有可能發生找不到長班可排入的時間造成無解，這也符合文獻上所謂的變數初始順序「最先失敗原則」。

##### (2) Value Ordering

而所謂的變數值域指的是  $X$  的值域亦即所有的組員，值域的初始化順序便是指該從哪一位組員開始指派給勤務組合的順序，在本研究當中是以目前具有最小飛航時數累積者最為優先指派的組員，亦即在每一次進行勤務組合指派時，便會計算每一位組員的累積飛航時數，以飛航時數累積由小至大的順序作為此次指派挑選的優先順序，由此可知在本研究當中 value ordering 的順序是採取動態指派的搜尋策略，隨時根據目前指派的結果作為決定下一次選取哪一位組員，這樣的指派原則能夠達到本研究想要平均分配飛航時數的目的，也符合了文獻上變數值域初始順序「最先成功原則」。

## （二）分階段指派方法

組員派遣問題為高度限制化組合搜尋問題，實務上空服組員人數可能多達百人，待指派的勤務組合數量超過千個，派遣問題將變得很大難以求解。航空公司實際上求解組員派遣問題時，常會以不同類型的指派方式幫助減少問題規模。本研究將後艙組員派遣問題視為一個 CSP 問題求解，求解目的在於，在有限時間之內找到滿足模式限制的組員月行程班表，因此，在本研究當中採取「分階段指派」的方式來增加求解效率。雖然分階段指派方式減少了每一次求解問題的規模，卻也同時犧牲了多種組合行程指派可能，不過由於本研究是以 CSP 問題來模式，只要適當的設定每一階段公平屬性上限（例如：平均值+30%定為上限），在滿足一般飛時、工時、休時規定以及公平規則之下，亦可求出合法又具公平性的組員月行程。

本研究勤務組合分階段指派方法以勤務組合之「工作天數」區分，四個階段分別為 3 日以上、2 日、1 日以及待命勤務組合指派。本研究以 3 日以上、2 日、1 日以及待命勤務作為區分，除了天數的考量外，還考量長、短班排班的難易度每一階段選擇適當的數量，（本研究勤務組合分類如表 4.8 所示），依據不同的個案可設計不同的分法，分的階段數也可以不同。

表 4.8 勤務組合分類

指派階段	第一階段	第二階段	第三階段	第四階段
工作天數	3 日以上勤務組合	2 日勤務組合	1 日勤務組合	待命勤務
數量	283	328	542	121

#### 4.2.4 限制函數列式

限制規劃方法最主要的核心便是以限制規劃語言撰寫符合問題條件限制式，本研究以 OPL 語言進行限制式撰寫。對一個限制規劃問題而言，條件限制並無先後順序之別，可行解必須同時滿足所有限制條件。

後艙組員派遣 CSP 問題限制除了考慮一般工時、飛時、休時規則以及本研究考量的各項公平限制以外，尚必須加入使 CSP 得以求出可行解的限制，例如：必須限制兩個飛航時間重疊的勤務組合（overlap）不得指派給同一組員。本研究組員派遣 CSP 限制條件如表 4.9 所示。

表 4.9 本研究 CSP 限制條件

一、既定勤務限制	既定勤務在 X、Y 變數列表之表示
二、指派勤務組合限制	指派勤務在 X、Y 變數列表之表示
三、飛行航段數的公平	設上限 $\text{MaxFL} (\text{ave\_FL} + \text{toFL})$
四、差旅時間的公平	設上限 $\text{MaxTAFB} (\text{ave\_TAFB} + \text{toTAFB})$
五、工作天數的公平	設上限 $\text{MaxWD} = \text{Min}\{\text{ave\_WD} + \text{toWD}, 25 \text{ 天}\}$
六、早晚搭配的公平	每位組員不得指派超過一個的早晚班勤務組合
七、待命任務的公平	每位組員不得指派超過一個的待命任務
八、長勤務後休假安排	天數大於 3 日以上長勤務之後安排一天休假，5 日以上安排兩天
九、特定航點次數的限制	相同行程勤務組合不指派給同一位組員
十、勤務組合 overlap 限制	兩個 overlap 之勤務組合不指派給同一組員
十一、屬性值累積	累加每位組員既定行程及指派勤務之 TAFB、BH、FL、WD 四項屬性值。
十二、搜尋策略	最小累積時數（或工作天數）優先指派策略

本研究利用限制規劃語言 OPL 語法撰寫後艙組員 CSP 之問題限制，以下便就本研究限制函數列式作一說明：

#### 載入既定（跨月及上階段已指派）行程

當 Pairing  $j$  的  $\langle \text{crew} \rangle$  屬性為非 0 之自然數（表示為既定行程），則  $j$  必須指派給 crew 組員，且在 crew 的時間班表中  $j$  的起飛日給值  $\text{Pairing}[j].\text{id}$ （或  $j$ ），在結束日給值 1。[註： $\text{Pairing}[j].\text{id}$  表示從 Pairing  $j$  中取出  $\langle \text{id} \rangle$  的值]

```
forall(j in Pairing: pairing[j].skel<>0 & j<=T)
Y[pairing[j].skel,pairing[j].startDate]= pairing[j].id & X[j]=pairing[j].skel;

forall(j in Pairing: pairing[j].skel<>0 & j>T)
Y[pairing[j].skel,pairing[j].startDate]=j & X[j]=pairing[j].skel;

forall(j in Pairing: pairing[j].skel<>0 & pairing[j].startDate<>pairing[j].endDate)
Y[pairing[j].skel,pairing[j].endDate]= 1;
```

#### 待指派勤務組合限制

對所有大於等於  $S$  的勤務組合（待指派），若 Pairing  $i$  指派給了 Crew  $j$ ，則在 Crew 的時間班表中  $i$  的起飛日那天給值  $i$ ，在結束日給值 1。

```
forall(i in Pairing:i>=S , j in Crew )
X[i]=j => Y[j,pairing[i].startDate]=i ;

forall(i in Pairing: i>S & pairing[i].startDate<>pairing[i].endDate , j in Crew )
X[i]=j => Y[j,pairing[i].endDate]= 1 ;
```

#### overlap 的 Pairing 不可指派給同一組員

兩個勤務組合（假設 Pairing  $i > \text{Pairing } j$ ）發生 overlap 有以下四種情況：

Pairing	案例 I	案例 II	案例 III	案例 IV
i	-----	-----	-----	-----
j	-----	----	-----	-----

這四種情況都滿足第一個 Pairing 的起飛日在第二個 Pairing 結束之前，而且第一個 Pairing 的結束日在第二個 Pairing 起飛日之後。因此，任意兩個勤務組合  $i$ 、 $j$  發生 overlap 時，若  $i$  指派給了組員  $p$ ，則  $j$  不可再指派給組員  $p$ 。

```
forall(p in Crew, ordered i,j in Pairing:i>1 & j>S & pairing[i].startDate <
pairing[j].endDate & pairing[i].endDate > pairing[j].startDate)

X[i]=p => X[j]<>p;
```

### 長勤務組合後休假安排

如果勤務組合包含之天數超過 3 天以上，則該勤務結束之後一天安排 1 日休假，如果超過 5 天以上則勤務結束之後二天再安排 1 日休假。

```
forall(i in Pairing: i>183 & pairing[i].endDate<31 & pairing[i].endDate-
pairing[i].startDate>1, j in Crew )
X[i]=j => Y[j, pairing[i].endDate+1]= 1 ;

forall(i in Pairing: i>183 & pairing[i].endDate<30 & pairing[i].endDate-
pairing[i].startDate>3 , j in Crew )
X[i]=j => Y[j, pairing[i].endDate+2]= 1 ;
```

### 每月組員工作時間 TAFB 限制

在 CP 模式當中滿足這項限制式的概念是，對所有組員 i 找出所有指派給該組員的 Pairing j 並累積 pairing[j].TAFB 值，此值加上既定勤務的 TAFB 累積 acc[i,1]後必須落在小於 MaxTAFB。

由於 TAFB 是既定勤務或是已指派勤務組合的累積值 acc[i,1]加上此一階段勤務組合 TAFB 屬性累加的結果，有可能既定勤務的部分即以超過此階段所設定之 TAFB 上限 MaxTAFB，因此，對於那些 a[i,1]累積值已超過上限的組員，此階段即不再指派給予勤務組合。

```
forall(i in Crew:acc[i,1]<MaxTAFB)
sum(j in Pairing:j>S) pairing[j].TAFB*(X[j]=i)+acc[i,1] <=MaxTAFB;

forall(i in Crew, j in Pairing:j>S)
acc[i,1]>MaxTAFB => X[j]<>i;
```

### 每月組員航段數 FL 限制

對於每位組員 i 找出所有指派給該組員的 Pairing j 並累積每個 pairing[j].FL 屬性值，此值加上既定勤務的 FL 累積值 acc[i,3]必須小於 MaxFL，而對於 acc[i,3]大於 MaxFL 的組員此階段將不再給指派勤務組合。

```
forall(i in Crew:acc[i,3]<MaxFL)
sum(j in Pairing:j>S) pairing[j].FL*(X[j]=i)+acc[i,3] <=MaxFL;

forall(i in Crew, j in Pairing:j>S)
acc[i,3]>MaxFL => X[j]<>i;
```

### 每月組員工作天數 WD 限制

對於每位組員  $i$  找出所有指派給該組員的 Pairing  $j$  並累積每個 pairing[j].WD 值，此值加上既定勤務的 WD 累積值  $acc[i,4]$  必須落在小於 MaxWD。另外，關於 MaxWD 上限值的決定，由於 C 航空公司規定每個月必須至少有 6 天的保證休假日，故最大的工作天數為 25 天，MaxWD 必須以  $\text{Min}\{25 \text{ 天}, \text{ave\_WD}(1+\text{toBH}\%)\}$  決定。

```
forall(i in Crew:acc[i,4]<MaxWD)
sum(j in Pairing:j>S) (pairing[j].endDate-pairing[j].startDate+1)*(X[j]=i)+acc[i,4]
<=MaxWD;
forall(i in Crew, j in Pairing:j>S)
acc[i,4]>MaxWD => X[j]<>i;
```

### 早晚班（待命）勤務指派限制

對於每位組員  $i$  找出所有指派給該組員的 Pairing  $j$  並累積每個 pairing[j].DN 屬性值，此值不得大於所設定之每位組員最多指派到的待命勤務或早晚班勤務數量  $M$ 。

```
forall(i in Crew)
sum(j in Pairing:j>S) pairing[j].DN*(X[j]=i) <=M ;
```

### 相同 Trip 不指派給同一位組員

對於任意兩個  $\langle id \rangle$  屬性相同（表示為相同 Trip 行程）的勤務組合 Pairing  $i$ 、Pairing  $j$ ，若 Pairing  $i$  指派給組員  $p$ ，則 Pairing  $j$  不得再指派給組員  $p$ 。

```
forall(p in Crew, ordered i,j in Pairing:i>S & j>S & pairing[i].id=pairing[j].id)
X[i]=p => X[j]<>p;
```

## 屬性值累積

TAFB、BH、FL 及 WD 四項公平屬性累積值 Z 算法為對每位組員累計各組員被指派的勤務組合的四項累積值再加上既定行程的累積值。

```
//TAFB
forall(i in Crew)
Z[i,2]= sum(j in Pairing) pairing[j].TAFB*(X[j]=i) +acc[i ,1] ;

//BH
forall(i in Crew)
Z[i,1]= sum(j in Pairing) pairing[j].BH*(X[j]=i) +acc[ i ,2];

//FL
forall(i in Crew)
Z[i,3]= sum(j in Pairing) pairing[j].FL*(X[j]=i) +acc[i ,3];

//WD
forall(i in Crew)
Z[i,4]= sum(j in Pairing) (pairing[j].endDate - pairing[j].startDate)*(X[j]=i) +acc[ i ,4] ;
```

## 以最小累積飛行時數為優先之搜尋策略

雖然 C 航空公司以每月每位組員的飛行時數大於 60 小時為指派原則，不過觀察 C 航實際的指派結果，許多組員由於年休或其他會議行程過多，雖然這些對公司具有產值的活動會給予 2 小時飛行加給，但是還是無法達到每月指派最少 60 小時的要求，因此，在本研究當中並不特別設定飛行時數指派的下限值，依照本研究以最小飛行時數者優先指派的搜尋策略，飛行時數不足者即會有較多機會指派到勤務組合。

```
search{
  forall(i in Pairing:i>S)
    tryall(j in Crew ordered by increasing dmin(Z[j,2]))
      X[i]=j;
};
```

## 第五章 實證分析測試

### 5.1 實驗設計

#### 5.1.1 測試資料說明

本研究測試例題資料來源為陳立欣碩士論文[25]整理之 C 航空公司 2001 年 12 月組員及班表資料，研究對象為台北基地之座艙長派遣，座艙長之勤務組合指派需求為每一勤務組合需指派一名座艙長服勤，個案相關資料如表 5.1 所示：

表 5.1 本研究個案資料

資料來源	C 航空公司 2001 年 12 月份勤務組合及班表資料
組員階級	座艙長
基地屬性	台北基地
航線種類	國際線為主（歐洲、亞洲、美洲、大洋洲）
組員人數	169 人
待指派勤務組合個數	1274 個
既定行程個數 （本研究整理）	182 個
每一勤務組合 所需座艙長人數	1 人

C 航空公司在台北、高雄、東京、曼谷、新加坡五地設有基地，而座艙長僅有台北、高雄兩地有配置，航線種類以國際線為主，由於高雄座艙長人數不多需要台北基地支援，因此，部分勤務組合包含自台北飛高雄國內航段，國內航線的僅作為接駁人力支援之用，C 航空公司航點包含 20 個國家 40 個目的地（C 航空公司航點資料如表 5.2 所示）。

表 5.2 C 航空公司航點資料

歐洲	阿姆斯特丹、法蘭克福、羅馬、盧森堡*、曼徹斯特*
亞洲	東京、福岡、名古屋、琉球、香港、曼谷、普吉島、雅加達、棉蘭、峇里島、河內**、胡志明市、吉隆坡、檳城、新加坡、阿布達比、德里、可倫坡*、馬尼拉
美洲	安格拉治、檀香山、洛杉磯、紐約、舊金山、芝加哥*、達拉斯*、邁阿密*、亞特蘭大*、溫哥華、西雅圖*、納許維爾*
大洋洲	雪梨、關島
國內	台北、高雄
註：* 只有貨運業務之航點〔9〕、**與他航合營〔1〕	

資料來源：[28]

### 5.1.2 各階段指派

本研究執行測試環境為 Windows 2000 作業系統、1.6G Hz 處理器速度，求解工具為 OPL Studio3.0。執行過程分成 3 日以上勤務組合、2 日勤務組合、1 日勤務組合及待命勤務四個階段進行指派，每一階段限制規劃模式皆為相同，限制式之使用依各階段資料特性略有有所不同，TAFB、FL、WD 三項公平屬性參數之設定可依使用者自行定義，根據實際班表觀察結果本研究僅以「平均值 + 30%」之合理假設作為上限值設定，除此之外各階段必須符合早晚班搭配公平、待命任務分配公平、長勤務後安排休假、相同勤務行程不指派給同一組員等規定，並採取最小飛行時數者優先指派之搜尋策略。

每一階段勤務組合資料皆包含「既定行程資料」(S)與「待指派勤務資料」(P)，經過限制規劃執行之後，將產生勤務指派結果(X)、組員行程班表(Y)與組員屬性累積表(Z)，這些結果在下一階段指派時將被視作既定行程資料輸入。當四個階段皆執行求解完畢之後，將可得到組員整個月的行程班表以及班表評估結果，為本研究最終之結果輸出。分階段指派執行流程圖如圖 5.1 所示。

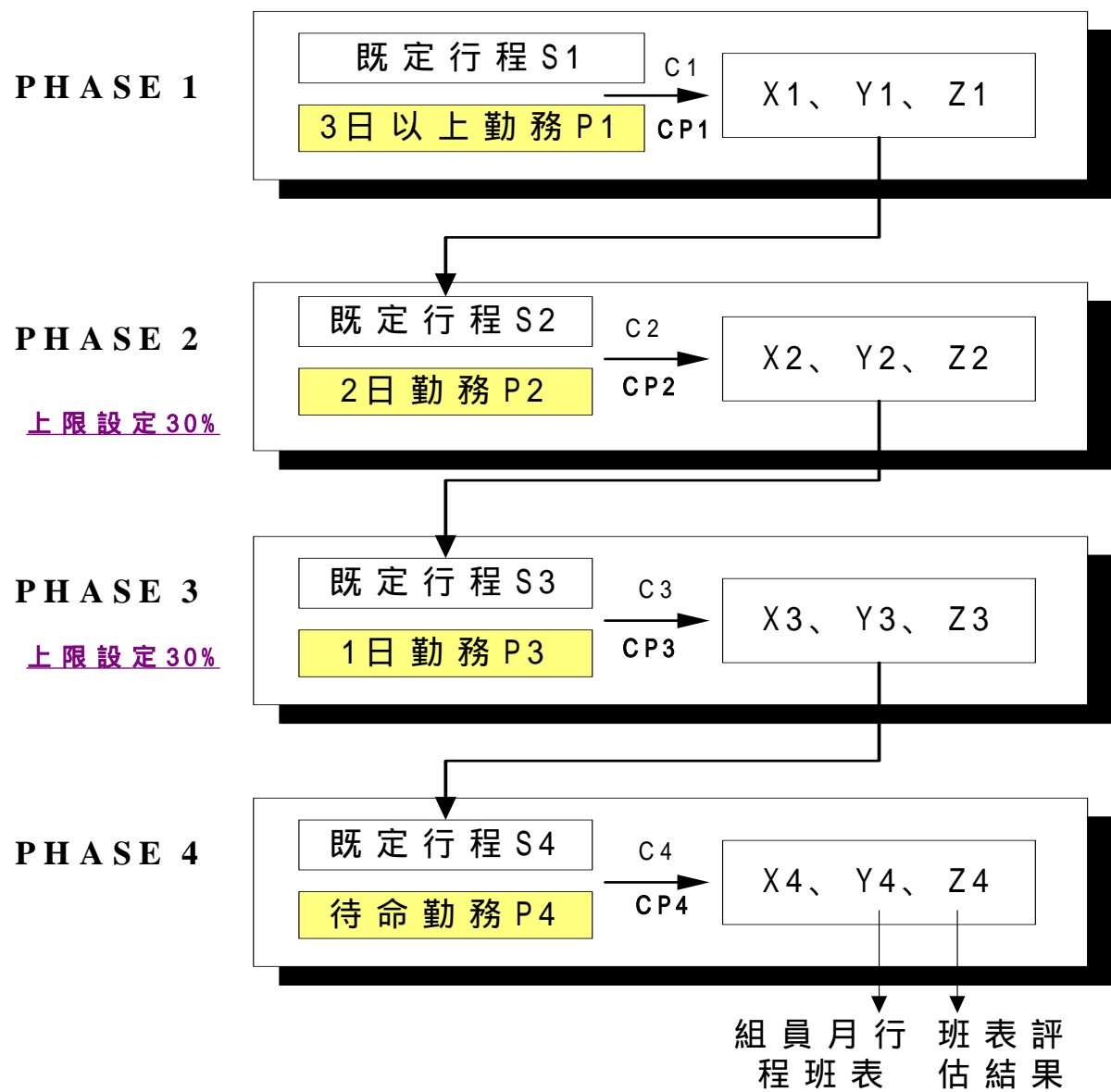


圖 5.1 分階段指派執行流程

### （一）長勤務組合指派

首先進行 3 日以上 283 個長勤務組合指派，此階段各項輸入參數設定如表 5.3 所示，由於 3 日以上長勤務組合包含 3~14 天不等的勤務行程，各項屬性差距甚大，因此在此階段並不設 TAFB、FL、WD 之上限，而僅依飛行時數最小者指派優先之搜尋策略達到盡量公平分派的目的。

表 5.3 長勤務組合指派設計

參數	參數說明	參數設定值
nbCrew	組員人數	169
nbPairing	勤務組合數	$183+283=466$
S	表示從第幾個勤務組合後開始需要指派（待指派勤務組合）	183
M	每位組員早晚班勤務組合最多指派的個數	1
MaxTAFB	TAFB 的上限	不設限
MaxFL	FL 的上限	不設限
MaxWD	WD 的上限	不設限
飛行時數最小者優先之指派搜尋策略		
OPL Studio 求解時間：138 sec		

### （二）2 日勤務組合指派

第二階段 2 日勤務組合指派相關參數設定如下表所示：

表 5.4 2 日勤務組合指派設計

參數	參數說明	參數設定值
nbCrew	組員人數	169
nbPairing	勤務組合數	$466+328=794$
S	表示從第幾個勤務組合後開始需要指派（待指派勤務組合）	466
M	每位組員早晚班勤務組合最多指派的個數	1
MaxTAFB	TAFB 的上限	16160
MaxFL	FL 的上限	15
MaxWD	WD 的上限	12
飛行時數最小者優先之指派搜尋策略		
OPL Studio 求解時間：259 sec		

### (三) 1 日勤務組合指派

第三階段 1 日勤務組合指派相關參數設定如下表所示：

表 5.5 1 日勤務組合指派設計

參數	參數說明	參數設定值
nbCrew	組員人數	169
nbPairing	勤務組合數	794+542=1336
S	表示從第幾個勤務組合後開始需要指派（待指派勤務組合）	794
M	每位組員早晚班勤務組合最多指派的個數	1
MaxTAFB	TAFB 的上限	18250
MaxFL	FL 的上限	22
MaxWD	WD 的上限	16
飛行時數最小者優先之指派搜尋策略		
OPL Studio 求解時間：582 sec		

### (四) 待命勤務組合指派

最後部分是待命勤務的指派，座艙長待命勤務為在家待命因此並不給予飛行加給而僅計算工作時間，故在待命勤務指派階段本研究並不以飛行時數作為指派依據而是以累積工作天數最小者為優先指派，並且限制每位組員最多指派到一個待命勤務，相關設定參數如下表所示。

表 5.6 待命勤務組合指派設計

參數	參數說明	參數設定值
nbCrew	組員人數	169
nbPairing	勤務組合數	1336+121=1457
S	表示從第幾個勤務組合後開始需要指派（待指派勤務組合）	1336
M	每位組員待命勤務最多指派的個數	1
MaxTAFB	TAFB 的上限	-
MaxFL	FL 的上限	-
MaxWD	WD 的上限	-
工作天數最小者優先指派搜尋策略		
OPL Studio 求解時間：215 sec		

## 5.2 測試結果與分析

總公平性成本衡量方法為將組員差旅時間（TAFB）、飛行時數（BH）、航段數（FL）、休假日（DO，相當於工作天數 WD），四項屬性正規化偏差值乘以個別權重加總，公式如下：

$$\text{總公平性成本} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} \left( \frac{|TAFB_{ij} - \overline{TAFB}|}{\overline{TAFB}} \times W_t + \frac{|FL_{ij} - \overline{FL}|}{\overline{FL}} \times W_f + \frac{|BH_{ij} - \overline{BH}|}{\overline{BH}} \times W_b + \frac{|DO_{ij} - \overline{DO}|}{\overline{DO}} \times W_d \right) \times X_{ij}$$

其中， $X_{ij}$  表示勤務組合  $j$  是否指派給組員  $i$ ，是為 1 否為 0。上述四項屬性權重採用陳立欣（2002）訪談 C 航座艙長問卷回收結果： $W_t=7, W_f=7, W_b=9, W_d=8$ 。

DO 屬性代表休假日相當於本研究工作天數 WD 之涵意，本研究組員 DO 的計算為 31 天扣除 6 天保證休假日再扣除工作天數 WD 即為每位組員的 DO 值。總公平成本如下表所示：

表 5.7 總公平性成本

	總公平性成本	TAFB	BH	FL	DO
C 航空公司	956.20	216.00	112.82	234.01	393.14
陳立欣	717.00	109.32	58.93	133.60	415.14
改進比率	25.02%	49.44%	47.77%	42.91%	-5.60%
本研究	604.96	157.86	88.79	182.00	176.31
改進比率	36.73%	26.98%	21.30%	22.23%	55.15%

從表中看出，本研究限制規劃模式求解結果較陳立欣以分階段指派一般化集合分割模式在總公平性成本結果來的低，更是比 C 航空公司員排班結果改善 36.7%，證明本研究確能達到 TAFB、BH、FL、WD 四項屬性分配平均成效。

此外，雖然本研究 TAFB、BH、FL 的改善並不如陳立欣學姐的結果，但是差異並不是很大，本研究此三項屬性表現結果並均較原始班表改善了 20% 以上，尤其在 DO（WD）的表現上更是顯現出本研究以最小飛行時數優先指派策略，同時加上適當設定了 TAFB、FL、WD 上限，使得 TAFB、BH、FL、WD 四項屬性均能分配平均，不會產生為了平均分配飛行時數而犧牲工作天數（休假日）的情況，而使得在以總公平成本考量下本研究表現較為優異，顯示出整體而言本研究可得到較公平之組員月行程班表。

而以組員一個月之累積 TAFB、BH、FL、WD 四項屬性個別來看，衡量方法為計算組員四項屬性正規化平均偏差百分比，計算公式如下（式中，n 表示組員人數）：

$$\begin{aligned} \text{TAFB 正規化平均偏差百分比} &= \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|TAFB_i - \overline{TAFB}|}{\overline{TAFB}} * 100 \% \right)}{N} \\ \text{BH 正規化平均偏差百分比} &= \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|BH_i - \overline{BH}|}{\overline{BH}} * 100 \% \right)}{N} \\ \text{FL 正規化平均偏差百分比} &= \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|FL_i - \overline{FL}|}{\overline{FL}} * 100 \% \right)}{N} \\ \text{WD 正規化平均偏差百分比} &= \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|WD_i - \overline{WD}|}{\overline{WD}} * 100 \% \right)}{N} \end{aligned}$$

表 5.8 四項屬性正規化平均偏差

	TAFB	BH	FL	WD
C 航班表	18%	7%	20%	29%
本研究	13%	6%	15%	9%
改善幅度	5%	1%	5%	20%

從上表可看出本研究四項屬性表現皆較 C 航原班表好，四個屬性的正規化平均偏差均較小，表示本研究所求得之組員月行程班表較為公平。TAFB、FL、WD 均控制在設定的 30% 範圍內，在休假日上的表現較 C 航好很多。而且 BH 平均差距僅有 6% 較原班表改善了 1%。組員飛行加給主要與飛行時數相關，逾時飛行航空公司必須支付更多飛行加給，因此，平均飛行時數不僅使組員工作負荷平均，也可以避免某些組員有太多飛行加給增加航空公司成本付出。本研究求解之班表與 C 航原始班表比較，飛行加給成本分別為 2836917（元）、2854706（元），本研究改善 0.6%，顯示本研究所求解之班表不僅較為公平，更能改善公司成本支出。

以下繪圖比較 C 航原班表與本研究之結果在 TAFB、BH、FL、WD 的表現：

(1) 差旅時間 TAFB 之比較

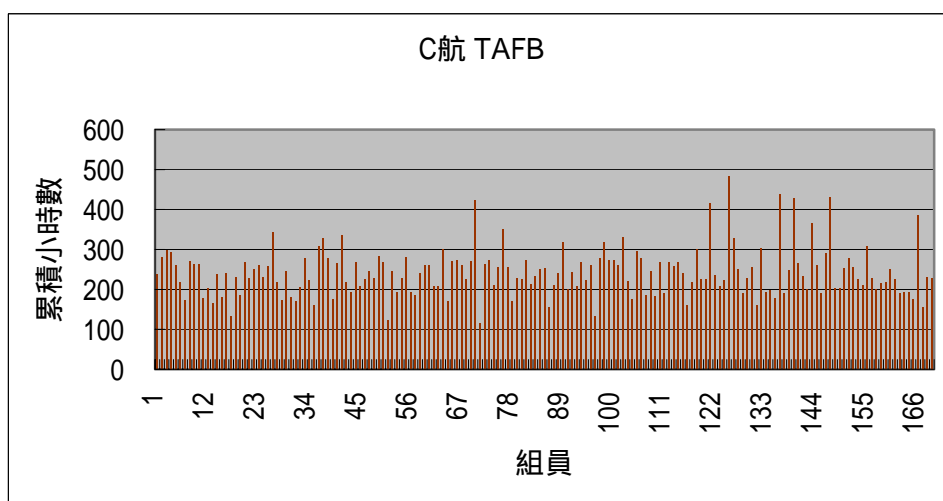


圖 5.2 C 航 TAFB 圖

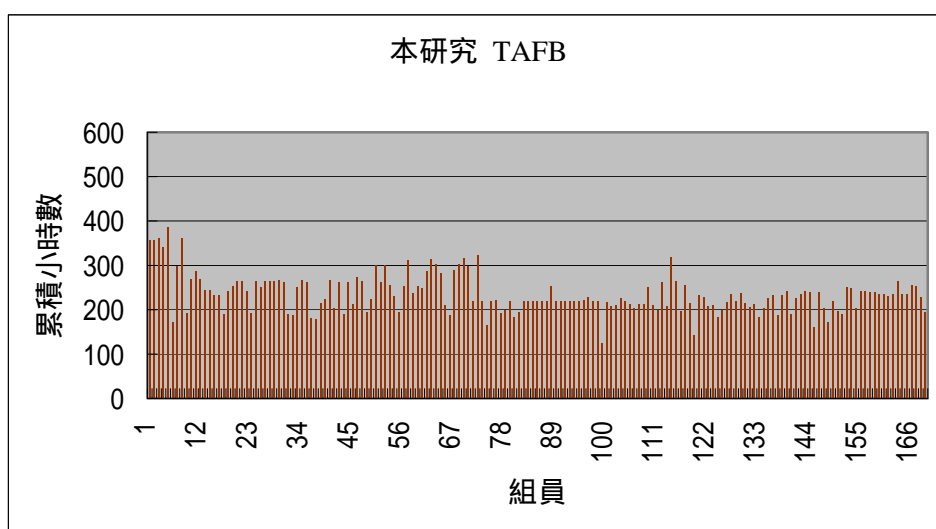


圖 5.3 本研究 TAFB 圖

(2) 飛行時數 BH 之比較

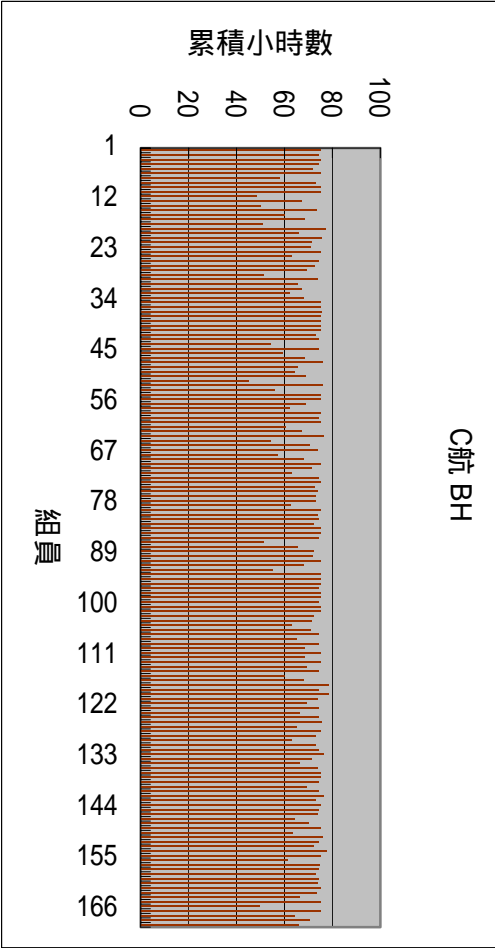


圖 5.4 C 航 BH 圖

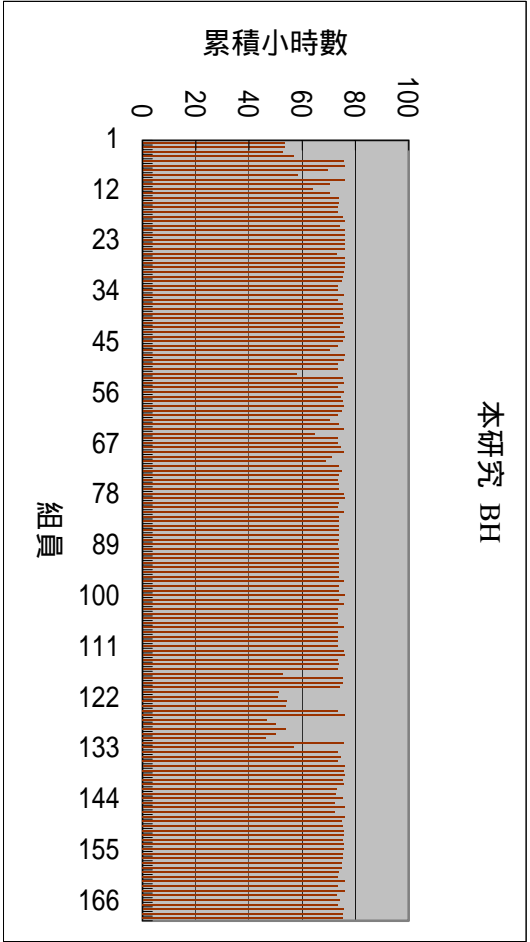


圖 5.5 本研究 BH 圖

(3) 飛行航段數 FL 之比較

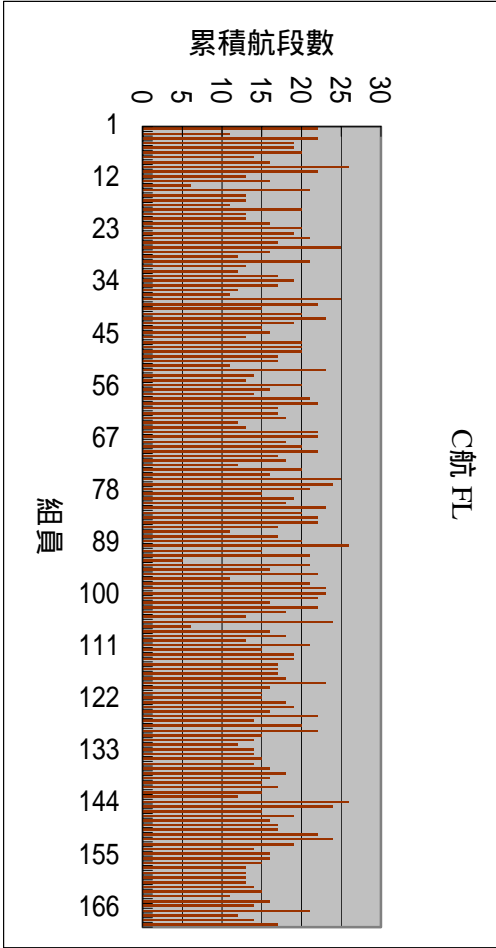


圖 5.6 C 航 FL 圖

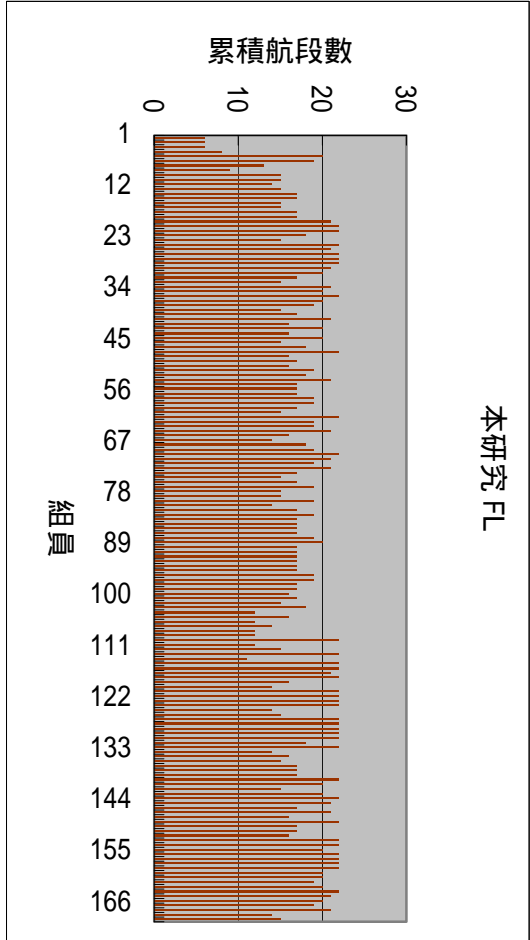


圖 5.7 本研究 FL 圖

(4) 工作天數 WD 之比較

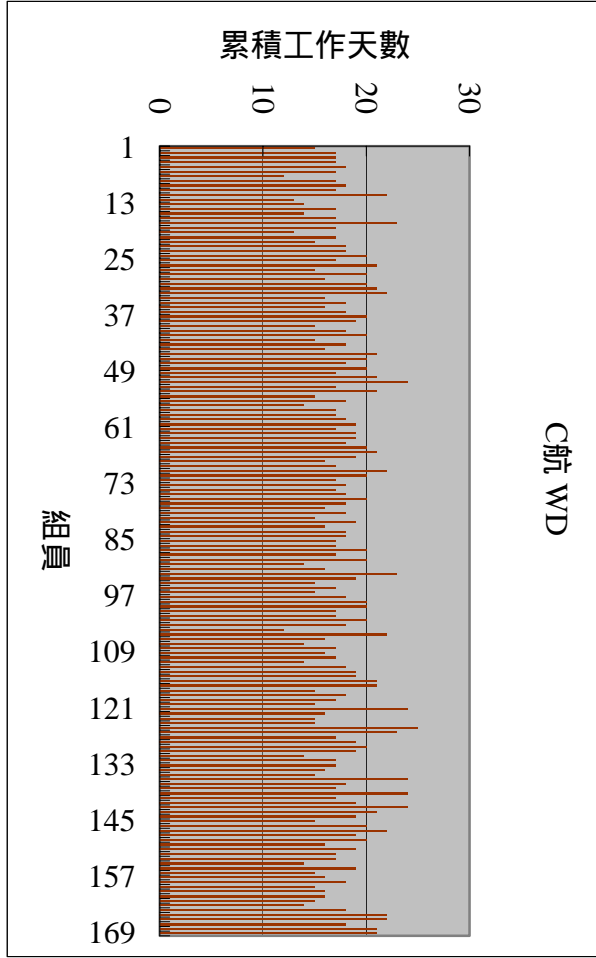


圖 5.8 C 航 WD 圖

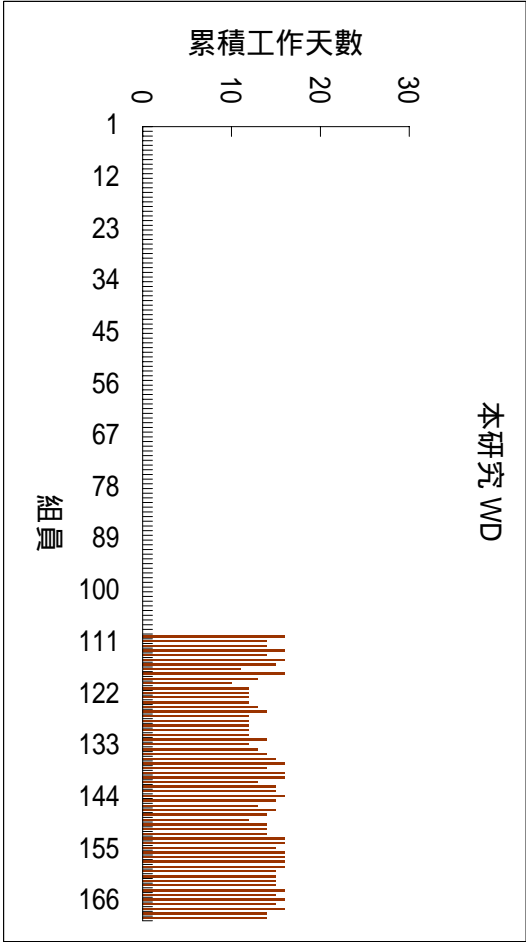


圖 5.9 本研究 WD 圖

### 5.3 不同屬性上限設定之結果分析

本節將進行不同屬性上限設定之下，對於組員派遣結果影響的分析。由於組員最在意之公平項目為飛行時數，故在此本研究仍是採用最小飛行時數優先指派的搜尋略，而先前本研究假設 TAFB、FL、WD 上限以「平均值 + 30%」設定，乃是觀察原始班表結果而設定之合理範圍，在本節中將分別以放寬上限範圍至 40%與減縮至 20%的上限設定，來探究對不同緊鬆範圍限定對於派遣結果的影響。

第一階段長勤務指派由於各個勤務組合屬性相異較大（3 日至 14 日長短不一的長勤務），在此一樣並不設上限而僅依照最小飛行時數優先指派搜尋策略，使勤務組合能夠盡量分散指派，而從第二階段之後（2 日的勤務組合指派、1 日勤務組合指派），才開始設定 20%及 40%的 TAFB、FL、WD 上限。

限制滿足問題的可行解，必須是在滿足所有條件限制下才能找到，一旦上限範圍設定過於緊縮，會使得可行解搜尋變得困難並有可能根本找不到可行解。在本研究進行 20%上限設定求解過程中，便發現第二階段 2 日勤務組合指派設定 20%上限結果並無法求解到任何可行解，此時，先行放鬆屬性上限為 30%，而待第三階段 1 日勤務組合求解時才以 20%作為上限設定，如此並不會影響最初要求的結果，因為在指派過程中後一個階段的設定便會調整前一個階段指派結果。只不過先寬後緊的設定有可能會造成最後階段指派時屬性累積小的組員被迫要接受更多短勤務組合，在本研究當中並沒有考慮短勤務組合過多所造成的不公平，事實上這是可能是需要避免的指派結果。

本研究不同屬性上限設定之結果比較如表 5.10 所示，從表中可發現幾項結論：

#### 1. BH 表現均佳

從不同 TAFB、FL、WD 上限設定所得結果中，再次驗證本研究以最小飛行時數優先指派之搜尋策略，確實能使 BH 在四項屬性表現上得到最佳的結果。另外，當其他三項屬性上限範圍設定愈寬鬆時，BH 的表現會更好，表示當其他屬性要求不那麼嚴格時，可使最小飛行時數優先指派之策略執行更徹底。

#### 2. 上限範圍愈小總公平性成本愈小

當 TAFB、FL、WD 的上限範圍設定愈小，表示每位組員三項屬性的差異要愈小，結果使得最後總公平性成本也會愈小。從本研究測試結果可知即使上限設定為平均值+40%之差異，總公平性成本為 671 依然較原始班表（956）與陳立欣學姐（717）之結果為佳，顯示本研究以限制規劃求解公平性組員派遣問題確實能得到更公平的組員月行程班表。

### 3. 上限範圍愈小求解時間愈長

在此僅列出第三階段求解時間，因為 20%設定的求解在第二階段必須放寬範圍，故以第三階段之求解在相同指派勤務組合下，計算上限屬性設定分別為 20%、30%、40%的總求解時間為比較基準。結果可發現當上限範圍設定愈小求解時間也會愈大，表示班表公平與求解時間彼此是存在抵換的關係。

表 5.9 不同上限設定之結果比較

屬性 上限設定	TAFB	BH	FL	WD	第三階段求解時間(sec)	總公平性成本
20%	11%	6%	14%	6%	637	459.34
30% (原設定)	13%	6%	15%	9%	603	604.96
40%	16%	4%	16%	18%	505	670.57

## 5.4 多重解分析

本研究中將航空組員派遣視作限制滿足問題求解，亦即滿足所有限制即為問題可行解，具有多重可行解性質。應用 OPL 限制規劃軟體求解，當第一組可行解求解出之後，下一個可行解求解只要改變組員間之勤務組合指派而仍滿足所有限制即可，多重解很快便能產生。

以下以平均值+20%為上限之設定，進行第 1~3 階段勤務組合指派（不含待命任務），探討先後求解出之可行解與排班公平性的關係。測試結果如下圖 5.10 所示：

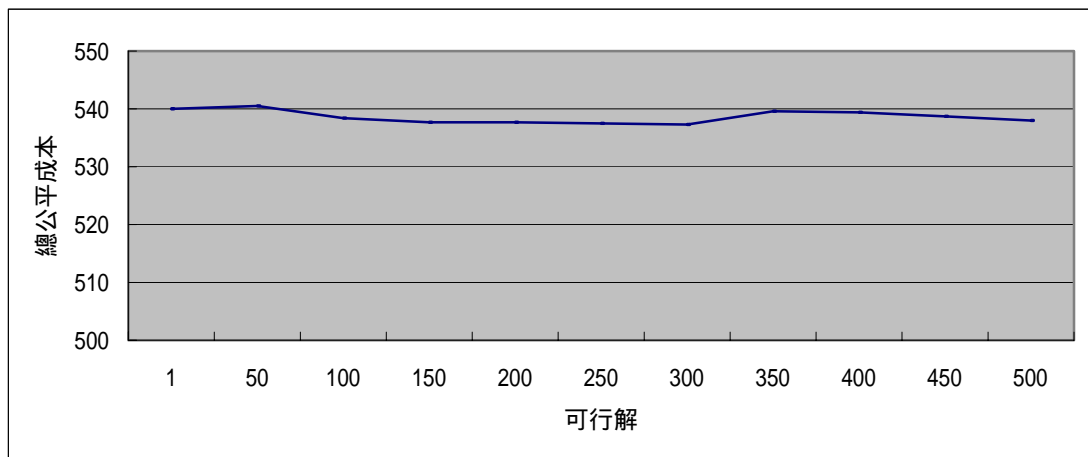


圖 5.10 多重解分析圖

由於組員派遣問題為對稱性組合問題，任兩勤務組合交換便可產生多組相似對稱解，上千個勤務組合交換組合之下可知組員排班問題可行解數量極大，求解耗費的記憶容量非常可觀，本研究在處理器速度 1.6G、記憶體容量 1G 的電腦測試環境中求解一次最多求解出 2000 多組可行解，平均 0.6 秒便能找到下一組可行解。上圖所示為前 500 組可行解之公平總成本情況，從圖中可看出總公平性成本線在前 500 組可行解中幾乎維持一定，總公平成本最大值與最小值分別為 540.5、537.5，表示在產生可行解過程中每一次交換的勤務組合都不會造成公平成本太多變動，雖然從本研究多重解測試當中並不能明顯看出可行解先後順序的品質優劣，不過由於本研究採取累積最小飛行時數者優先指派之搜尋策略，可推測愈早求出之可行解其飛行時數差異愈有可能愈小，而從本研究多重解測試結果看出，在公平成本相當情況下即有很多的可行班表可供排班人員更具彈性的選擇。

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

近年來隨著生活進步，人性化的排班公平項目愈來愈受到重視，但目前航空公司排班系統所排出之組員班表，仍以最小成本為主要考量目標。如何在不增加太多成本之下，納入更多人性化排班考量，就是現行組員排班系統可以改進的空間，亦即本研究提出之組員派遣限制規劃模式核心價值所在。

傳統上求解航空組員派遣問題，多半架構於數學規劃之基礎上，以「最小化飛行時數成本」為解題目標。然而，面臨現實生活複雜問題，數學規劃方法常必須簡化問題限制，和實際情況產生偏差。本研究以限制規劃方法求解組員派遣問題，限制規劃模式具有修改容易之彈性，對於實務上應用時常需要增刪修改限制而言很方便。本研究所發展之模式考量了實際航空排班安全之硬性限制之外，在本研究當中加入了更多公平性限制，而這些公平限制可根據航空公司需求訂定不同參數或以不同搜尋策略求解。另外，限制滿足問題具有多重解特性，本研究模式在不改變太多公平成本之下，很快速地便能找到其他替代班表，使得模式應用更有彈性更能貼近實務排班需要。

限制規劃方法為近幾年才開始發展的求解方法，目前應用限制規劃求解各類組合化問題之文獻已愈來愈多，但目前應用在組員派遣問題的求解上，尚僅於概念性的提示。本研究為國內首篇嘗試以限制規劃方法來求解公平性組員派遣問題的研究論文，經過無數嘗試，終於成功建立求解公平性組員派遣的 CP 模式，並將此公開於文中與讀者分享，希望給後續研究及實務應用作為參考。歸納本研究具體之研究成果如下所述：

1. 研究方法論之創新：突破傳統以 MP-based 的方法論，改以 CSP 問題列式組員派遣問題，建構限制規劃模式求解，達到實務上派遣重視工作量均分之要求，並比文獻研究考量更多好壞班公平因素，本研究方法模式更具實用彈性。
2. 班表結果之公平：經過 C 航空公司 2001 年 12 月空服座艙長派遣例題測試，差旅時間、飛航時數、飛行航段數、工作天數四項屬性之正規化平均偏差率均較原始班表小，總公平性成本亦改善達 36.7%，公平性的整體績效較佳。而四項屬性以不同上限範圍設定之分析結果，本研究總公平性成本皆仍較原始班表小，顯示出本研究發展之空服組員派遣限制規劃模式確能有效求解公平之組員月行程班表。
3. 模式求解的效率：本研究之 CP 模式在 PC 平台下分四階段執行，總共約 20 分鐘完成航空公司全球航線 169 位座艙長，1274 個 1 日至 14 日長短不同的勤務組合的月行程，總共約 20 分鐘便能求解所有勤務組合指派結果。當第一個月行程班表產生之後，平均 0.6 秒便能產生下一組可行解，如此之效率，在實務應用上，必能提供排班人員更彈性的選擇，大幅提昇系統決策支援的功能。

## 6.2 建議

本研究所提出之空服座艙長派遣限制規劃模式確實能求解合法且具公平之月行程班表，然而本研究結果離實務應用仍有可改善之空間，經過本研究實證分析後，提出以下建議以為後續研究之參考：

1. 在本研究當中 TAFB、FL、WD 之上限範圍設定，由於相關資訊無從得知方便起見均假設為相同，然而實際上可根據使用者的要求設定不同之上限，另外，不同階段求解上限之設定亦可不同，仍須視使用者求解目的而訂定之。
2. 排班是需要連續的考量，本研究模式僅就一個月的期間求解組員班表，僅考量這一個月內的工作量分派公平，並沒有考慮前一個月組員勞逸情況在進行當月班表求解時加以調整使其公平，建議往後之研究可以將此納入考量。
3. 本研究之公平性係指盡量工作均分以及客觀的公平指派原則，然而實務上個別組員對於特定勤務或是休假日是否實現也是其在意的項目，後續之研究亦可朝如何結合工作公平及偏好實現使派遣結果更為人性化。
4. 本研究僅就派遣問題中最簡單的型態-單一基地座艙長之排班進行研究，而實際上組員派遣型態更為多樣，可擴充考慮不同基地之組員派遣或是不同階級組員之派遣，文獻當中也有學者開始提出以不同技能需求（如：語言、調酒、護理...）之組員派遣模式。
5. 針對大規模組員派遣問題而言，依目前電腦技術仍無法達到一次完成求解，必須分為若干階段進行，然而進行下個階段求解之前必須先將上一階段求解結果紀錄更新，目前本研究是以手動進行更改，建議可以撰寫 OPL script 程式自動串起數個流程。另外，建議未來亦可將本研究結果發展一套決策支援系統，提供排班人員更方便的應用。

## 參考文獻

1. Antosik, J. L., "Automatic Monthly Crew Assignment: A New Approach," *AGIFORS Symposium Proceedings*, Vol. 18, 1978.
2. Arabeyre, J., F. Fearnley, C. Steiger, and W. Teather, "The Airline Crew Scheduling Problem: A Survey," *Transportation Science*, Vol.3, pp.140-163, 1969.
3. Barnhart, C., E.L. Johnson, R. Anbil, and L. Hatay, "A Column Generation Technique for the Long-haul Crew Assignment Problem," *Optimization in industry*, Vol.2, pp.7-23, 1994.
4. Bodin, L., B. Golden, A. Assad, and M. Ball, "Routing and Scheduling of Vehicles and Crews --- The State of the Art," *Computer & Operation Research*, Vol.10, No.2, Ch.3.3.3, pp.125-127, 1983.
5. Brailsford, S.C., C.N. Potts, and B.M. Smith, "Constraint Satisfaction Problems : Algorithms and Applications," *European Journal of Operation Research* 119, 557-581, 1999.
6. Buhr, J., "Four methods for monthly crew assignment- a comparison of efficiency," *AGIFORS Symposium Proceedings*, Vol.18, pp.403-430, 1978.
7. Byrne, J., "A Preferential Bidding System for Technical Aircrew," *AGIFORS Symposium Proceedings*, Vol.28, pp.87-99, 1988.
8. Cappanera, P., G. Gallo, "On The Airline Crew Rostering Problem," Technical Report: TR-01-08, Oct. 2001.
9. Desrosiers, J., M. Gamache, F. Soumis, and G. Marquis, "A Column Generation Approach for Large-scale Aircrew Rostering Problems," *Operations Research*, Vol.47, No.2, March-April, 1999.
10. Gamache, M., F. Soumis, D. Villeneuve, J. Desrosiers, and E. Gelinas, "The Preferential Bidding System At Air Canada," *Transportation Science*, Vol.32, pp.246-255, 1998.
11. Glanert, W., "A Timetable Approach to the Assignment of Pilots to Rotations", *AGIFORS Symposium Proceeding*, Vol.24, pp.369-391, 1984.
12. Haralick, R. and G. Elliott, "Increasing Tree Search Efficiency for Constraint Satisfaction Problems," *Artificial Intelligence*, Vol.14, pp.263-313, 1980.

13. Marchettini, F., "Automatic Monthly Cabin Crew Rostering Procedure", *AGIFORS Symposium Proceedings*, Vol.18, pp.343-361, 1978.
14. Moore, R., J. Evans, and H. Noo, "Computerized Tailored Blocking," *AGIFORS Symposium Proceedings*, Vol.18, pp.343-361, 1978.
15. Nicoletti, B., "Automatic Crew Rostering", *Transportation Science*, Vol.9, pp.33-42, 1975.
16. Ryan, D.M., "The Solution of Massive Generalized Set Partitioning Problems in Aircrew Rostering," *Journal of Operation Research Society*, Vol.43, No.5, pp.459-495, 1992.
17. Ryan, D.M. and P.R. Day, "Flight Attendant Rostering for Short-Haul Airline Operations," *Operations Research*, Vol. 45, No. 5, pp. 649-661, 1997.
18. Sabin D., and E. C. Freuder, "Contradicting conventional wisdom in Constraint Satisfaction," In: *Cohn. A.G. (ED.). proceedings of European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-94)*. Wiley, Chichester, UK, pp.125-129, 1994.
19. Sarra, D., "The automatic assignment model," *AGIFORS Symposium Proceedings*, Vol.28, pp.23-37, 1988.
20. Sellmann, M., K. Zervoudakis, P. Stamatopoulos, and T. Fahle, "Integrating Direct CP Search and CP-based Column Generation for the Airline Crew Assignment Problem," In *proceedings of 2<sup>nd</sup> International Workshop on Integration of AI and OR Techniques in Combinatorial Optimization Problems (CP-AI-OR-00')*, pp.163-170, 2000.
21. Tingley, G.A., "Still another solution method for the monthly aircrew assignment problem," *AGIFORS Symposium Proceedings*, Vol.19, pp.143-203, 1979.
22. Walid El Moudani, "A Bi-Criterion Approach for the Airlines Crew Rostering Problem," *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, 2001.
23. 翁偉棟, (指導教授：韓復華), 「空勤組員公平性排班模式之研究」, 國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文, 中華民國八十八年六月。
24. 葉杰榮, (指導老師：許蒞彥), 「應用 Constraint Satisfaction Programming 方法來探討即時排課問題」, 國立高雄第一科技大學碩士論文, 中華民國九十一年二月。

25. 陳立欣，（指導教授：韓復華），「考慮公平性排班之後艙組員派遣模式-以座艙長為例」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，中華民國九十一年六月。
26. 陳伯榮，（指導老師：韓復華、陳安斌），「以限制規劃程式建構投資組員決策支援系統之研究」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，中華民國九十一年六月。
27. 王國琛，（指導老師：韓復華），「結合限制規劃與數學規劃求解大型後艙空勤組員排班問題」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，中華民國九十一年六月。
28. 中華航空公司網頁 <http://www.china-airlines.com/ch/index.htm>

## 附件一

民航法規「[航空器飛航作業管理規則](#)」中有關飛航組員排班之相關條文規定

中華民國八十九年九月二十八日交通部交航發字第八九五七號令訂定

中華民國九十年三月三十日交航發九十字義第 0 0 0 一七號令修正

中華民國九十一年十月三日交航發字第 九一 B 一一八號令修正發布

### 第三十三條

飛航組員之飛航時間限度如下：

一、標準飛航組員之飛航時間限度如下：

（一）連續二十四小時內，國內航線其飛航時間不得超過八小時，於任務完畢後應給予連續十小時以上之休息。國際航線其飛航時間不得超過十小時，如國際航線飛航時間未超過八小時，於任務完畢後應給予連續十小時以上之休息，如國際航線飛航時間超過八小時，於任務完畢後應給予連續十八小時以上之休息。如國內航線及國際航線混合簽派時，其飛航時間不得超過八小時，於任務完畢後應給予連續十小時以上之休息。

（二）連續七日內，應給予連續二十四小時之休息。但以標準飛航組員派遣者，其連續七天內之總飛航時間不得超過三十二小時。

二、加強飛航組員之飛航時間限度如下：

（一）連續二十四小時之內，於備有睡眠設備之航空器，飛航時間不得超過十六小時；於未備有睡眠設備之航空器，應於客艙內備有休息座位，飛航時間不得超過十二小時。如飛航時間超過十小時但少於十二小時，任務完畢後，應給予連續十八小時以上之休息。如飛航時間超過十二小時，任務完畢後，應給予連續二十四小時以上之休息。

（二）連續七天內，應給予連續二十四小時之休息。

三、雙飛航組員之飛航時間限度如下：

（一）連續二十四小時內，於備有睡眠設備之航空器，飛航時間不得超過十八小時。如飛航時間超過十六小時，任務完畢後，應給予連續二十二小時以上之休息。未超過十六小時，任務完畢後，應給予連續十八小時以上之休息。

（二）連續二十四小時內，於未備有睡眠設備之航空器，應於客艙內備有休息座位，飛航時間不得超過十二小時，任務完畢後，應給予連續十八小時以上之休息。

（三）連續七日內，應給予連續二十四小時之休息。

飛航組員飛航兩地之時間差如於六小時以上，且在不同時區超過四十八小時停留者，於任務完畢返回基地後至少於四十八小時內，航空器使用人不得再派遣任何飛航任務。但再派遣之目的地為前一停留地或與前一停留地時間差在三小時以內者，不在此限。

飛航組員飛航時間於每一個月內，其總飛航時間不得超過一百小時；於每一年內，其總飛航時間不得超過一千小時。

### **第三十四條**

飛航組員之執勤時間限度如下：

- 一、標準飛航組員：國內航線一次可連續執勤十二小時，國際航線一次可連續執勤十四小時。
- 二、加強飛航組員：一次可連續執勤十八小時。
- 三、雙飛航組員：一次可連續執勤二十四小時。

### **第三十五條**

固定翼航空器飛航組員於執勤時間限度內，除飛航訓練外，其起飛降落次數不得超過下列規定：

- 一、國際航線：不得超過六次。
- 二、國內航線：不得超過十二次。但飛航時間均短於二十分鐘者，其起飛降落次數最多得增加四次。

### **第二百五十二條**

飛航組員飛航時間限度：

- 一、連續二十四小時內，其飛航時間不得超過八小時，且於任務完畢後，應至少給予連續十小時之休息。
- 二、連續七日內，應給予連續二十四小時之休息。
- 三、連續七日內，總飛航時間不得超過三十二小時。
- 四、每一個月內，總飛航時間不得超過一百小時。
- 五、每一年內，總飛航時間不得超過一千小時。