

隨機進廠及維護時間下航機年度維護 排程調整最佳化之研究¹

OPTIMAL ADJUSTMENT OF ANNUAL AIRCRAFT MAINTENANCE SCHEDULE UNDER STOCHASTIC AIRCRAFT CHECK-IN AND MAINTENANCE TIMES

顏上堯 Shang-Yao Yan²

郭俊志 Jyun-Jhih Guo³

(102 年 2 月 6 日收稿，102 年 12 月 11 日第 1 次修改，103 年 7 月 30 日第 2 次修改，
104 年 5 月 30 日定稿)

摘 要

本研究基於航機維護工廠業者之立場，考量實務中航機的隨機進廠及維護時間、營運目標及相關的限制條件，建構一隨機進廠及維護時間下航機年度維護排程的調整模式。本模式可定式為一零壹整數規劃，為有效地求解實務大型的問題，本研究結合 CPLEX 數學規劃軟體發展一啟發解法。另外，本研究並發展一模擬方法以適當地評估隨機性與確定性規劃的停機排程在實際營運的績效。最後，為展示及評估此隨機規劃模式的實用績效，本研究以一國內航空公司所屬之航機維護工廠的實際維護資料為例，進行範例測試與分析。測試結果良好，顯示本研究隨機模式較確定性模式為佳，可為一穩健且有效的規劃工具，以輔助航機維護工廠業者在面

-
1. 本研究承科技部專題研究計畫之部分補助，謹此致謝。作者亦感謝審查委員提供之寶貴意見，使本文更為嚴謹。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授（聯絡地址：32001 桃園市中壢區五權里 2 鄰中大路 300 號中央大學土木工程學系；電話：03-4227151 轉 34141；E-mail：t320002@cc.ncu.edu.tw）。
 3. 國立中央大學土木工程學系博士（聯絡地址：32001 桃園市中壢區五權里 2 鄰中大路 300 號中央大學土木工程學系；電話：03-4227151 轉 34155；E-mail：y.943402010@gmail.com）。

臨實際營運中的隨機航機進廠及維護時間上，每年有效地重新調整航機進廠維護排程。

關鍵詞：航機維護工廠；年度排程調整；隨機事件；進廠及維護時間；零壹整數規劃；模擬評估

ABSTRACT

Based on aircraft maintenance providers, the present study attempted to develop an optimization model for the annual schedule adjustments of stochastic aircraft check-in by considering factual, aircraft check-in and maintenance times, operational objectives, and related constraints. The model is formulated as a zero-one integer program. To effectively solve large-scale practical problems, the researchers developed a heuristic with the use of the mathematical programming solver, CPLEX. In addition, a simulation-based evaluation method was developed to evaluate the performance of the schedules obtained from the stochastic and deterministic models. Finally, to demonstrate and evaluate the stochastic model in practice, a case study was conducted using the real-time operating data from a major aircraft maintenance center in Taiwan. The test results were extremely favorable, verifying the superiority of the stochastic model over the deterministic model. The proposed model is a robust and useful planning tool for aircraft maintenance centers to effectively adjust their annual aircraft maintenance schedules while focusing on stochastic aircraft check-in and maintenance times.

Key Words: *Aircraft maintenance center; Annual schedule adjustment; Stochastic event; Aircraft check-in and maintenance times; Zero-one integer program; Simulated evaluation*

一、緒 論

航機的維護與飛航安全息息相關，有了良好的維護才能讓航機維持在安全的狀態下飛行。時至今日，全球化的經濟環境加速了航運的發展，而各大航空公司亦面臨日益激烈的營運競爭。為了保持營運競爭力，首要目標是確認航機能持續且安全地飛行。為了達成此一目標，使每架航機在穩定且有效率的排程下，進廠執行預防性定期維護是非常重要的。由於航機預防性定期停機維護排程的規劃成效，對航次營運及整體維護系統運作有關鍵性影響。因此，如何在現有維護資源與需求條件下，找到有效率的排程規劃做法，進而規劃出能滿足營運過程實務運用的維護排程，使維護工作能穩定進行並提升營運績效，對於航機維護工廠而言是一相當重要的課題。

吳國賓^[1]曾指出國內航機預防性定期停機維護排程可分為長期、中期及短期排程等 3 種，其中長期排程主要是安排航機未來 5 年必須執行的大型定期維護工作；中期排程主要

是以長期排程及飛航季班表之規劃為基礎，再加入週間檢查的每月排程；短期排程主要是依中、長期排程結果，規劃 3 天內每日需進行之例行性維護工作。定期維護工作之等級大致可區分為 A、B、C、D-Check、Structure Check、Landing Gear Change、Painting 等（詳劉世德^[2]），其中週間檢查係指 A/B-Check 之一般性檢修保養，大型維護係指 C、D-Check 等較長天數維護。在規劃維護排程時，除依民航法^[3]等相關規定及航機維護計畫（aircraft maintenance program, AMP）外，尚需考量維護項目及內容、維護時間、進廠時窗、維護資源條件及營運配合等實務規劃需求。以往航機定期維護排程之研究，依模式目標不同可區分為成本、可用飛行時間與維護人力等 3 類。與成本相關者，例如 Tedone 與 Gray^[4]、顏上堯等人^[5]；與可用飛行時間相關者，例如 Radhika^[6]、劉世德^[2]、陳俊汝^[7]、Yan 等人^[8]、顏上堯等人^[9]；與維護人力相關者，例如吳國賓^[1]。由文獻可以看出，與可用飛行時間之相關研究較多，亦可顯示其在維護排程規劃上之重要性。

實務上航空公司在規劃定期維護排程時，為符合法規並避免影響營運航班調度，首先會規劃長期排程，確定各航機的大型維護作業。接著，再擬定飛航季班表。之後，再依序規劃定期維護之中期及短期排程。以往長期排程的研究大多採確定性規劃，且在設定與可用飛行時間相關之隨機進廠時窗及維護時間等測試值時，係採用平均值或固定值處理（如陳俊汝^[7]及 Yan 等人^[8]研究等）。由於長期排程之規劃期長達 5 年，造成原規劃排程在營運過程經常受隨機事件擾動而須不斷調整。因此，規劃人員每年必須於適當時間，開始檢視下 1 年規劃排程並做銜接調整。此調整為滾動式的年度調整，主要係以更新規劃後的 5 年長期排程為基礎，截取未來決策年度的更新排程，並依當年度已知營運變化更新排程需求參數，以人工方式逐步進行調整（詳顏上堯等人^[9]）。就數學規劃來說，由於以人工經驗處理長期排程僅屬一可行解，雖能運作但很難評估其成效之優劣。此外，以人工方式頻繁調整，除可能導致營運作業配合困難外，甚至可能影響航次營運及提高維護成本，使航機定期維護長期排程失去原本最佳化規劃的意義。因此，顏上堯等人^[9]發展一數學規劃模式，以有效地調整航機年度維護之長期排程。然而，其雖已考量最晚進廠日提前作為隨機擾動影響的適當緩衝，但實質上仍採確定性模式規劃，因此在實際營運中常容易受隨機的擾動事件影響，而大幅調整原規劃排程，導致實際排程績效的降低。值得說明的是，長期、中期及短期排程均屬於規劃階段，而人工即時調整則屬於營運階段。在實務上，由於長期排程在營運階段受隨機擾動後的即時調整，受限於公司決策優先、時效性、營運變化及地勤配合等因素考量，大多仍以人工經驗方式處理。因此，在規劃階段所完成的長期排程（不論是採確定性規劃或隨機性規劃作法），在模擬未來營運階段使用時，應採人工方式即時調整長期排程，以契合實務營運過程。

理論上，隨機性規劃在規劃過程中已考量未來營運的隨機擾動事件，因此其較確定性規劃更能如實反應實務上受隨機擾動的影響，進而規劃出更為穩健的排程。雖然以往在航機預防性定期維護的相關研究中，對於隨機擾動規劃的探討較缺乏，但在其他航空運輸相關領域中，已陸續有相關研究。例如 Yan 等人^[10]曾進行飛航排程隨機規劃問題之研究，以最大化營運利潤為目標，建構一隨機性需求之機隊飛航排程模式。楊大輝、李綺容^[11]

曾進行航空貨物運輸市場需求量隨季節性變動問題之研究，利用隨機規劃方法，建構隨機性飛航網路規劃模式，並整合為混合整數規劃問題以求解。Yan 等人^[12]曾探討隨機需求下航空貨運站收貨人員人力供給規劃問題，建立隨機性需求之航空貨物收貨人員排班模式。Yan 與 Tang^[13]曾進行隨機性擾動下機門指派規劃問題求解演算法之研究，發展一整合規劃與即時調整兩階段之求解架構。此外，非屬航空運輸領域中亦有對隨機擾動規劃進行探討之研究，如林益生^[14]、唐存寬^[15]、Kenyon 與 Morton^[16]、Yan 等人^[17]等，不在本節詳述其文獻內容，請讀者自行參考文獻。

由於隨機進廠及維護時間下的航機年度維護排程的調整規劃，在以往尚未發現有相關的隨機規劃文獻，且上述相關確定性規劃研究，均未如實反應長期排程在實際營運過程受隨機事件擾動影響，所引發的隨機進廠時窗、隨機維護時間及重新調整排程所需的成本。因此，本研究主要目的是針對航機維護長期排程中的年度調整問題，考量實際營運中經常性的航機隨機進廠時窗及維護時間，構建一有效率的調整模式及求解方法，以輔助維護工廠業者，每年有效地且穩健地重新調整航機進廠維護排程，進而提升航機維護的營運績效。數學上，此模式可定式為一零壹整數規劃問題，在應用於實務大型維護系統時，問題規模可能太大而難以在適當的時間內求解完成。因此，為有效地求解實際的大型問題，本研究利用重複機率選擇之避險技巧發展一啟發解法。另外，為評估本研究規劃排程在實際營運的績效，茲參考實務的人工調整作法，發展一模擬評估方法。

本文其餘的內容概要如下：第二節說明模式構建背景，第三節構建模式，第四節說明啟發解法及模擬評估方法，第五節以國內航空公司維護資料進行測試及分析，第六節提出結論與建議。

二、模式構建背景

由於文獻中以顏上堯等人^[9]研究 (模式簡稱 LMSYA_CM) 在航機年度維護排程的調整作法上較完整，因此本研究參考其確定性規劃架構做為模式構建之基礎。之後，透過與維護排程專業人員訪談並考量航機維護工廠的實務作業，延伸發展一隨機進廠及維護時間下航機年度維護長期排程調整之最佳化模式 (an optimization model for yearly adjustments of long-term maintenance schedule under stochastic aircraft check-in and maintenance times in the real world，以下簡稱 LMSYA_SM)。本節首先簡要說明 LMSYA_CM 之基本條件與假設、數學模式，以為 LMSYA_SM 構建之參考。

2.1 LMSYA_CM 基本條件與假設

1. 長期排程年度調整作業所需資料已知

此等資料係指在航空公司未來 5 年滾動式長期規劃策略更新後，截取決策年度 (指下一年度) 內應執行 C/D-Check 等級以上維護排程之調整時所需。其中包含所有應進廠之航

機編號、機型、項目、維護時距、維護時間、進廠時窗及維護資源等，並依 AMP 規定、維護紀錄及新的 5 年長期規劃結果篩選規劃資料。

2. 維護時間

維護時間估算是根據機型、項目、機齡、拆檢修報告等資訊，並參考 AMP 及過去經驗概估其平均值。

3. 進廠時窗

(1) 應進廠維護之期限已知

AMP 規定航機定期維護之週期（以下稱為維護時距），係指設定相鄰兩次維護間可使用的飛行小時（以下簡稱飛時）數或日曆天數（起降次數等不同基準亦可轉換成日曆天數），視何者先達到做為預估到期日基準。在實務上，航機應於規劃之進廠時窗（即最早及最晚進廠日間）內進廠維護，至遲不得超逾預估到期日。顏上堯等人^[9]曾說明在決策年度內航機進廠時窗之估算方法如(2)項說明。

(2) 最早進廠日及最晚進廠日之設定

一般而言，確定性規劃為了求得最大維護時距使用率（ P_L 值），會以預估到期日為最晚進廠日，但如此易造成資源規劃過緊，進而導致營運過程調整困難。因此，顏上堯等人^[9]曾以緩衝做法改善此問題。此外，該研究亦提及依民航通告維護計畫管理^[18]規定，當航機維護時距使用率達成一定標準（以下簡稱 RL 值，單位：%）時，可申請維護時距展延寬，並以此作為設定最小維護時距使用率（ P_E 值）之參考。由適當選擇 P_E 值與 P_L 值可轉換得到最早與最晚進廠日，並找出與維護時距（以日曆天計算為例）之關係式如下：

$$\text{最早進廠日} = \text{最晚進廠日} - (P_L - P_E) \times \text{維護時距}$$

4. 機庫數量及容量限制

顏上堯等人^[9]係以航機維護工廠所在航站之維護資源做維護排程規劃，由於各項維護必須在核可的維護廠棚內進行，因此機庫總數量設為固定。此外，單座廠棚內可能設有 2 座以上機庫，但每座機庫內僅容許有 1 架飛機（不細分大小型）在庫進行維護，因此，每日容許可在庫維護之最多數量視為固定已知。機庫適用機型或特殊維護項目會隨各航機維護工廠規劃而有不同，本項視為固定已知。

5. 維護人力限制

為簡化問題規模，假設每架航機維護工作需求 1 組維護人力且不考慮加班成本。實務上，各分項維護工作區之人力有限且需互相支援，以控制人事成本並滿足維護需求。因此在常態維護人力（亦即每日可執行維護之最多維護人力組數或航機架數）上可視為是固定已知。

6. 營運配合作業之限制，均視為固定且已知。進一步說明如下：

- (1) 為配合營運作業需求，在某些特定進廠時窗或機庫必須列入不可規劃或特定使用限制，包含機庫維修、契約客戶航機業務、跨年度維護、營運旺季等。

- (2) 實務上，同型航機不同時在機庫中進行大型定期維護，以避免影響同航線之營運調度。
7. 實務上，航機要達到 C/D-Check 以上需求之維護時距，可飛行之營運時間皆超逾 1 年，亦即決策年度內最多進廠維護 1 次。
 8. 假設每項維護作業均不可分割。
 9. 實務上與安全有關的 C/D-Check 以上需求之維護項目必須 1 次完成，否則會依法規遭受嚴重懲罰；而與安全無關的項目，是否分割成 2 次以上進廠，原則上在規劃期即應決定併入何種維護項目及內容再執行。若為臨時決策，則可併入短期排程考量。
 10. 以維護工廠所在航站之維護能量進行維護排程，不考慮外站之維護支援。

2.2 LMSYA_CM 數學定式

決策變數：

x_{ijk} ：表示自有或已訂契約客戶的第 i 架航機在第 j 天是否被指派至第 k 機庫進行維護？如果求解結果是指派，則為“1”，否則為“0”。

參數定義：

i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機。

j ：第 j 天進廠日。

k ：第 k 個維護機庫。

m_{ij} ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機在第 j 天進廠之維護時距使用率（單位：%）。

w_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機的座位數權重值。由於每架航機的維護時距使用率最大值均為 1，且在實務訪談時得知，政策上大航機的重要性優先於中小型機，中型機又優於小型機，因此為儘量符合實務的政策需求，以訂出合理的模式目標值，本研究參考 Yan 等人^[8]做法，以座位數最少之機型 Boeing 737-800 為基準，依各機型不同座位數之相對比值訂定各機型的權重值。

e_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機最早進廠日。

l_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機最晚進廠日（為到期日提前某些日數做為緩衝）。

r_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機進廠維護之維護時間（即停機維修天數）。

q_{sk} ：第 s 天第 k 個維護機庫因機庫大小或維護設備支援能力限制，最多可同時停放的航機總架數（不論大小機型均設為 1 架）。

p_s ：第 s 天所有的維護機庫因人力限制，最多可同時維護的航機總架數。

$p_s^{o_type}$ ：自有航機 o_type 同型機種第 s 天最多可停機維護的架數。

集合定義：

T ：決策年度內所有規劃天數。

- H_{is} : 第 i 架自有或已訂契約客戶航機涵蓋所有第 s 天 (含) 以前進廠日之集合。
 $H_{is} = \{j | j \leq s \leq j + r_i - 1\}$ 。
- I : 應於決策年度內進廠維護之自有及已訂契約客戶航機集合。
- I^o : 應於決策年度內進廠維護之自有航機集合。
- I^{cr} : 維護作業由決策前 1 年度跨越至決策年度或因政策需求特定維護時窗的自有及已訂契約客戶航機航機集合。
- S_i^{cr} : 自有及已訂契約客戶航機中, 第 i 架航機因維護排程跨越至決策年度或政策需求, 已排定機庫及進廠維護時窗之集合。
- K : 航機維護工廠內所有機庫之集合。
- IK : 因機型限制無法調整至機庫或無法使用機庫之自有及已訂契約客戶航機暨機庫集合。
- I^{o_type} : 屬於 o_type 機型之自有航機集合。
- TP^o : 自有航機之所有機型集合。

LMSYA_CM 可定式為一零壹整數規劃問題如下：

Maximize

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in T} \sum_{k \in K} m_{ij} \cdot w_i \cdot x_{ijk} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j=e_i}^{l_i} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in I; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in H_{is}} x_{ijk} \leq q_{sk}, \quad \forall k \in K, \forall s \in T; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in H_{is}} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq p_s, \quad \forall s \in T; \quad (4)$$

$$\sum_{(i,k) \in IK} \sum_{j=e_i}^{l_i} x_{ijk} = 0; \quad (5)$$

$$\sum_{(j,k) \in S_i^{cr}} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in I^{cr}; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I^{o_type}} \sum_{j \in H_{is}} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq P_s^{o_type}, \quad \forall o_type \in TP^o, \forall s \in T; \quad (7)$$

$$x_{ijk} = 1 \text{ or } 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in T, \forall k \in K; \quad (8)$$

目標式 (1) 表示所有自有及已訂契約客戶的航機維護時距使用值最大化；限制式 (2) 表示所有自有及已訂契約客戶的航機須在維護時距內維護限制：該研究在最早進廠日設定上，以過去數年度之維護時距使用率之平均值設定緩衝比例值，較預估到期日提前 1 緩衝天數；在最早進廠日之設定上，則先考量以能滿足航機可展延寬的基準做設定。若初始規劃結果造成營運階段無解時，則以小幅度逐步降低整體機隊之最小維護時距使用率（對應等於最早進廠日逐步提前）的做法，漸漸擴大進廠時窗，再重覆進行求解測試，直至模擬營運過程求解均有解為止，並取得初始規劃用之最早進廠日之設定參數（機隊整體最小維護時距使用率）；限制式 (3) 為個別機庫單日使用架數限制：代表在第 s 天，第 k 個維護機庫最多可停放的航機總架數不得超過 q_{sk} 架；限制式 (4) 為維護工廠單日維護人力限制：即第 s 天最多允許維護航機總架數為 p_s 架；限制式 (5) 為機庫有機型或使用限制；限制式 (6) 為考量跨越年度或政策需求已排特定時窗限制；限制式 (7) 為配合營運考量，同型機單日維護數量限制自有 o_type 機種，於第 s 天最多可停放的總架數不得超過 $p_s^{o_type}$ 架；限制式 (8) 為變數是零壹整數的限制式。

三、模式構建

本節首先說明隨機規劃模式 LMSYA_SM 之基本條件與假設、接著說明數學模式，最後說明模式之應用。

3.1 模式基本條件與假設

本研究 LMSYA_SM 是以隨機之進廠時窗及維護時間下，含不確定性懲罰值（因維護排程變動）之維護時距使用值最大化為目標。在 LMSYA_SM 構建上，利用排程規劃實務探討所得資訊做相關的假設。由於 LMSYA_SM 與 LMSYA_CM 均係處理類似的長期排程的年度調整問題，且主要著重於國內實務之營運。因此，顏上堯等人^[9] 研究中所考量的相關假設與條件也納入 LMSYA_SM 考量。至於其餘假設則與隨機的進廠時窗及維護時間相關，說明如下：

1. 維護時間及應進廠維護之期限已知

(1) 隨機維護時間之處理

以往實務上規劃維護排程所需用維護時間參數係取用經驗估計值，然而維護時間受到檢查與拆修結果、經驗、技巧能力、效率高低及零組件備妥與否等不確定性影響，即使是相同等級項目所需時間亦不一定相同。因此，本研究考量各航機之維護時間為具一機率分布之隨機值。值得說明的是，當維護時間增加，除了自身維護時距使用率減少外，可能會影響其他航機維護進廠維護作業。因此，本研究給予一適當之懲罰值（詳 3.2 數學定式 2.(2)

說明)。

(2) 隨機進廠時窗 (亦即隨機最早進廠日及最晚進廠日) 之處理

由於在計算基準日之後之剩餘可飛行日曆天數及剩餘飛時，會受隨機事件擾動 (如航次增減或順逆風飛行時間等不同) 而影響到期日，因此本研究考量到期日為具一機率分布之隨機值。為能在隨機環境下提高機隊維護時距使用率，本研究令最晚進廠日為預估到期日 (亦即 $P_L = 1$)，可得關係式如下：

$$\text{最早進廠日} = \text{最晚進廠日} - (1 - P_E) \times \text{維護時距}$$

由上式可知，當 P_E 值及維護時距不變，最早進廠日會隨著最晚進廠日受隨機擾動呈一定關係變化。因此，得知最晚進廠日之隨機值時，則可同時計算出最早進廠日之隨機值。此外，當預估最晚進廠日提前或排程受隨機擾動而使規劃進廠日早於預設之 P_L 值轉換日 (轉換日由 RL 值(%) 乘上維護時距後，再加上前次完工出廠日期可得到，以下簡稱此轉換日為 RLD) 時，會減少維護時距使用率或增加維護次數。因此，本研究各給予一適當之懲罰值 (詳 3.2 數學定式 2.(1) 及 2.(3) 說明)。

有鑑於此，排程單位應逐年建立規劃排程受隨機事件擾動後，各航機維護時間及進廠時窗估計值及實際值 (假設二者之差異值為隨機擾動值) 紀錄，之後轉換成不同隨機擾動值對應機率及累積機率密度函數圖，作為維護排程隨機規劃需用。規劃時，以隨機方式選取代表各航機受隨機事件擾動的隨機數值，並對照隨機擾動值累積機率密度函數圖，求得對應之維護時間及進廠時窗之隨機擾動值，再加上原估計或已知值，即可決定在各次隨機事件擾動下，各航機更新後的維護時間及進廠時窗數值。

2. 隨機維護時間及進廠時窗機率分布之假設與處理

一般而言，排程規劃參數受隨機擾動的影響可分為航班營運面及維護作業面。在航班營運方面，自有航機由以往的經驗資料可以得知隨機擾動值的機率分布，已訂契約客戶則需自行提供；在維護作業方面，契約客戶航機若在同一系統維護，其所受隨機事件擾動的機率分布理論上應與自有航機大致相同。此外，在維護資源受限制下，整體維護系統經長期磨合後，理論上機隊之隨機擾動值機率分布型態將漸趨穩定一致。因此，本研究假設契約客戶航機受隨機擾動影響與自有航機相同且已知。此外，為反映實際營運上可能出現的航機進廠日受擾動狀況，本研究透過專業排程人員之訪談資料，設定維護時間、最早及最晚進廠日受隨機事件擾動的機率分布型態。

依作者與一國籍大型航空公司航機維護工廠 (以下簡稱 F 廠) 專業排程人員之實務訪談資料內容，其僅能提供部分的邊界條件 (包含最晚進廠日提前或延後最多 4 日、維護日期最多增加 15 日或最多減少 9 日、大致 1~2 天的變動較常見，變動愈大機率可能愈小等)，並未建立完整的實際資料。因此，本研究參考訪談意見，設定維護時間之隨機擾動值約介於 +15 (增加 15 日) ~ -9 (減少 9 日) 間，進廠時窗之最晚進廠日之隨機擾動值則約介於 +4 (延後 4 日) ~ -4 (提前 4 日) 之間。本研究假設二者之隨機變數 (指隨機擾動值) 之機率分配型態為類似截斷式常態分配 (truncated normal distribution)，並轉成離散之機率分布。

其分布係以擾動值 -1 為最大機率，向增加（或延後）側及減少（或提前）側近似均勻逐步遞減，統計隨機擾動值累積機率後，據以求出隨機擾動值累積機率密度函數圖。此外，由3.1 模式基本條件與假設 1.(2) 說明可知，由於最早與最晚進廠日間有一定的比例關係且無足夠實務資料可供使用，因此為簡化模式，設二者的擾動值產生的範圍相同。值得說明的是，未來應用此模式時，各航機維護工廠應引用自有的維護紀錄及隨機擾動機率分布資料。

3. 隨機事件次數之設定

理論上，隨機事件擾動樣本次數愈多愈接近母體。因此，當模式最佳化目標值隨著隨機事件次數增加而逐漸收斂，亦即維護系統母體之最佳化目標值不再隨著隨機事件次數增加而有明顯的變化，則此隨機事件次數可適當地反應事件母體。為找出可適當地代表事件母體並在合理時間內得到收斂解之隨機事件次數，做為隨機規劃與模擬評估之用，本研究於後續範例測試章節求解不同隨機事件次數下之模式最佳化目標值，並做目標值收斂分析。

4. 機庫數量及容量限制

本研究暫不考量廠棚受外力毀損等較大但較少發生的隨機事件，以降低模式的複雜度及求解困難度。此等情況可考量為未來的後續延伸研究，以本研究為基礎，再修訂成更完整且更貼近實務之模式。

5. 維護人力限制

顏上堯、陳玉菁^[19]曾提及維護作業一般為每日3班人員輪班制，在實務上，為避免維護時間延長而影響後續航機進廠或航班營運，部分輪休人員可能需加班趕工。因此，本研究依勞基法考量，在加班及輪休限制下，僅容許1組人力加班4小時，並給予一適當之懲罰值（詳3.2 數學定式 2.(2) A 項說明）。

6. Letter Check 計畫、發動機翻修及起落架翻修時距3項之RL值設定相同，唯可依實務應用需求做調整。

3.2 數學定式

在數學定式前，我們除部分引用LMSYA_CM之相關變數與參數外，茲定義本研究LMSYA_SM另外所需之變數、參數與集合，並分成3部分說明如下：

1. 與LMSYA_CM相關且具隨機性變數部分：

ω : 第 ω 次隨機事件。

$m_{ij}(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機在第 j 天進廠之維護時距使用率（單位：%）。

$e_i(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機最早進廠日。

$l_i(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機最晚進廠日。

$r_i(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機進廠維護之維護時間（即停機維護天數）。

$H_{is}(\omega)$ ：第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機涵蓋所有第 s 天（含）以前進廠日之集合。若機庫於第 s 天有航機執行維護中，則該航機可能在第 s 天（不含）以前已進廠或第 s 天才進廠。

$$H_{is}(\omega) = \{j \mid j \leq s \leq j + r_i(\omega) - 1, s \in T\} \equiv \{j \mid s - r_i(\omega) + 1 \leq j \leq s, s \in T\}$$

2. 與 LMSYA_CM 不相關之參數與具隨機性變數部分（懲罰值）：

為使隨機規劃結果，在營運時能具穩健型功能，需儘量納入實務上排程運作考量。本研究 LMSYA_SM 其中一項作法，係參考實務上排程專業人員決策考量，對於違反模式限制或減少整體維護系統目標值的情況，給予適當懲罰。因為不同懲罰值的設計，使得 LMSYA_SM 在指派排程之決策上更加複雜。各項懲罰值之設定概要說明如下：

(1) 屬模式目標值之第 1 項懲罰值 $C_i^L(\omega)$ （最晚進廠日比原初始規劃提前所造成）

A. 最晚進廠日提前日數與增加長期維護次數間之假設與估算

若某型航機設定汰換時之預估機齡為 u_i 年，最晚進廠日平均每年提前維護日數為 d_i 天，以日平均飛時 f_i 小時換算，計為 $u_i \times f_i \times 365$ 飛時。另設 AMP 維護時距為 s_i 飛時、預估平均維護時距為 S_i 飛時，扣除剛交機使用及汰換當年不必再進行長天期維護，因此，理論上最經濟維護總次數為 $Q_i^{\min}$ ，可得：

$$\frac{u_i * f_i * 365}{S_i} - 1 = Q_i^{\min} \quad (9)$$

若在不更動同型航機維護順序的前提下，受隨機事件擾動後，維護單位對第 i 架航機所設定的最晚進廠日會造成維護時距提前，若航機汰換前，各年提前之維護時距累計後的平均值為 S_i ，則理論上提前結果所造成決策維護總次數為 Q_i ，可得：

$$\frac{u_i * f_i * 365}{S_i} - 1 = Q_i \quad (10)$$

由 (9) 及 (10) 可導出增加之次數為：

$$Q_i - Q_i^{\min} = \frac{S_i - S_i}{S_i * S_i} * (u_i * 365 * f_i)$$

令 $s_i - S_i = d_i * f_i$ ，則：

$$Q_i - Q_i^{\min} = \frac{f_i^2}{S_i * S_i} * (u_i * 365 * d_i) = \frac{f_i^2}{(S_i - d_i f_i) * S_i} * (u_i * 365 * d_i) \quad (11)$$

若維護次數增加 $Q_i - Q_i^{\min} = p$ ，則：

$$Q_i - Q_i^{\min} = p = \frac{f_i^2}{s_i * S_i} * (u_i * 365 * d_i) = \frac{f_i^2}{(s_i - d_i f_i) * S_i} * (u_i * 365 * d_i) \quad (12)$$

移項可得：

$$\begin{aligned} (u_i * 365 * f_i^2 + p s_i f_i) * d_i &= p s_i^2 \\ d_i &= \frac{p s_i^2}{(u_i * 365 * f_i^2 + p s_i f_i)} \end{aligned} \quad (13)$$

假設最晚進廠日平均提前日數 t_i ，可能會造成航機壽限內增加 1 次維護，則：

$$\begin{aligned} p &= 1, d_i = t_i \\ t_i &= \frac{s_i^2}{(u_i * 365 * f_i^2 + s_i f_i)} \end{aligned} \quad (14)$$

同理，若第 i 架航機 AMP 維護時距以日曆天 g_i 計，預估平均維護時距為 G_i 飛時，則(9)、(10)可修訂為：

$$\frac{u_i * 365}{g_i} - 1 = Q_i^{\min} \quad (15)$$

$$\frac{u_i * 365}{G_i} - 1 = Q_i \quad (16)$$

$$Q_i - Q_i^{\min} = \frac{u_i * 365 (g_i - G_i)}{G_i * g_i} = \frac{u_i * 365 * t_i}{(g_i - t_i) * g_i} \quad (17)$$

令 $Q_i - Q_i^{\min} = \frac{u_i * 365 * t_i}{(g_i - t_i) * g_i} = 1$ ，可得：

$$t_i = \frac{g_i^2}{g_i + u_i * 365} \quad (18)$$

B. 最晚進廠日提前所衍生懲罰值之設定

為清楚說明此懲罰值之參數設定過程，茲先以某架航機日平均飛時 15 小時、法定維護時距 5,000 飛時、除役機齡 30 年（依實務界訪談人員之建議，以不再飛行設定航機除役機齡）為例計算，在實例測試時仍以華航公司提供之各航機排程規劃用數據為依據。代入式 (14) 計算可知，若提前天數在 9.85 (取整數 10) ~ 19.7 (取整數 20) 天者，理論上會增加

1 次維護次數；相反地，若每次維護提前均在 $10 (= t_i)$ 天以下，並不會增加維護次數，唯當年度航機的最晚進廠日提前，仍會影響汰換前的總提前日數與維護次數。依上述，本研究假設維護次數增加量隨最晚進廠日提前天數而增加並為正比關係，為了方便說明，以第 i 架提前 t_i 天為維護次數會增加之臨界點，以提前達 t_i 天者，維護次數增加值設為 1，達 $2 t_i$ 天者，設為 2，....，依此類推。若第 i 架航機最晚進廠日提前天數為 d_i^l ，則維護次數增加值 $C(d_i^l)$ 之公式可依內插法推導如下：

$C(0) = 0, C(d_i^l), C(t_i) = 1$ ，由內插法可知，

$$\frac{C(d_i^l) - C(0)}{C(t_i) - C(0)} = \frac{d_i^l - 0}{t_i - 0} \Rightarrow \frac{C(d_i^l)}{1} = \frac{d_i^l}{t_i}$$

令 $C_i^L = C(d_i^l)$ ，故可求得第 i 架航機最晚進廠日提前 d_i^l 天時的維護次數增加值為：

$$C_i^L = \frac{d_i^l}{t_i} \quad (19)$$

本研究模式目標值為維護時距使用值最大化，是實際使用時間與維護時距的比值，故以維護次數增加值來設定懲罰值，在配合使用率尺度上，需要再設加權，加權值設定說明如后：

航機維護時距使用率設定為實際維護時距使用時間／維護時距，而最晚進廠日提前會增加維護次數，每增加 1 維護次數會增加 1 次維護時間。因此，換算第 i 架航機最晚進廠日每增加 1 次之目標懲罰值加權＝維護時間／維護時距。承上所述，設定在 ω 隨機事件下，若第 i 架航機的最晚進廠日提前 $d_i^L(\omega)$ 天，造成除役前總維護次數增加的懲罰值為：

$$C_i^L(\omega) = -\frac{d_i^L(\omega)}{t_i} * \frac{r_i(\omega)}{g_i}, \text{ 維護時距以日曆天計} \quad (20)$$

$$C_i^L(\omega) = -\frac{d_i^L(\omega)}{t_i} * \frac{r_i(\omega)}{(s_i/f_i)}, \text{ 維護時距以飛時計} \quad (21)$$

其中：

g_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機依 AMP 規定之維護時距（以日曆天計）。

s_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機依 AMP 規定之維護時距（以飛時計）。

f_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機日平均飛時。

u_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機設定汰換時之預估機齡（以年計）。

t_i ：第 i 架自有或已訂契約客戶航機提前進廠維護而不會增加除役前總維護次數的平均提前日數：

$$t_i = \frac{s_i^2}{(u_i * 365 * f_i^2 + s_i f_i)}, \text{以飛時計。} \quad t_i = \frac{g_i^2}{g_i + u_i * 365}, \text{以日曆天計。}$$

$d_i^L(\omega)$ ：第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機最晚進廠日比原初始規劃提前的天數。

(2) 屬模式目標值之第 2 項懲罰值 $C_i^R(\omega)$ (維護時間比原初始規劃增加所造成)

因維護時間受隨機擾動所衍生的懲罰值，主要朝三個層面考量：第一，航機維護時間送會各相關部門所增加的人力費用，是必須的優先做法，實務上無法縮減，與重新指派結果優劣無關。第二，航機維護時間增減所增減的維護費用，與其他航機重排結果優劣無關。第三，航機維護時間增減，可能會影響其他航機進廠的情形。但維護時間減少，在維護的初始規劃成本上不會有增加，反而有助於營運的調度。若維護時間增加，則有人力不足、機具不足及使用同棚廠後續其他航機如期或延後進廠的情形產生。在人力不足方面，可以工作優先順序、增加人力 (若屬 3 班制，可容許以 1 班人力加班 4 小時) 方式處理；在機具不足方面，實務上可用工作優先使用順序的方式調整以解決；在使用同棚廠後續其他航機如期或延後進廠方面，如果無機庫，則可先置於臨時機庫。若後續航機延後進廠，會有 2 種情況，一是受限於法定維護時距，無法續飛，影響營運；一是可以再飛，至可以進廠為止，但因季班表已排定，僅能用於臨時調度使用。由於實務上會儘量使應進廠維護航機如期進廠，若因維護時間增加而產生人力加班費用，則本研究在排程規劃上給予懲罰值，並就維護時間增加所衍生人力加班費用、估算結果與懲罰值設定二點進一步說明：

A. 維護時間增加所衍生的人力加班費用：

根據上述分析，當某架航機維護時間增加時，其他維護工作是否能順利進行，主要原因在人力的維護能量。實務上，為了避免使後續進廠航機維護時程受到影響或使已受到影響而調至臨時機庫的航機亦能如期出廠而不影響營運，維護單位人員會視工作順序及機具安排使用，調度人力或加班進行維護作業。

根據維護單位提供的資料分析，各航機工作計畫組可供抽調人力至臨時機庫協助維護的數量平均約占正常維護人力的一半 (視不同維護單位維護人力能量而有差異)。換句話說，在工作效率不變的條件下，臨時機庫工作量每日僅能完成平日作業量的一半。在不增加常態人力條件並顧及正常輪休下，維護工廠原則上會安排 1 組人力加班，以儘速完成維護時間增加的航機維護工作。承上所述，維護時間增加的航機維護工作小組，每日輪流加班 4 小時，依照現行勞基法相關規定，加班費的計算，前 2 小時為正常薪資的 1.33 倍，後 2 小時為正常薪資的 1.66 倍，每天加班不得逾 4 小時。故平均每小時增加薪資費用約為 1.5 倍，可求得每日費用增加比例為 $\frac{8*1+4*1.5}{8*1} - 1 = 0.75$ 。

B. 維護時間增加估算結果與懲罰值設定

本研究模式目標值為維護期限使用值，是實際使用時間與法定維護時距 (預定使用時間) 的比值再乘上航機座位數加權，故以增加的維護時間與預定維護時距的比值配合維護

期限使用率尺度來設定懲罰值加權。承上所述，設第 i 架航機原規劃維護時間 r_i ，維護費用為 Q_i ，若維護時間增加 Δr_i 天至第 j 天完成維護，則第 i 架航機損失了下年度的預定飛時或可使用日曆天數 Δr_i ，故給予懲罰值為：

$$C_i^1 = \frac{\Delta r_i}{g_i}, \text{ 其中 } g_i \text{ 為第 } i \text{ 架航機維護時距} \quad (22)$$

此外，在第 i 架航機延長維護期間，為避免影響原規劃後續進廠維護航機的出廠時程，每天加班人力（至第 i 架航機完成維護止，最多加班 Δr_i 天）所增加的後續航機維護費用提高為 1.75 倍，亦即在正常工率下，視為延長後續航機維護時間 $0.75 \Delta r_i$ ，給予懲罰值為：

$$C_i^2 = \frac{0.75 * \Delta r_i}{g_i}, \text{ 其中 } g_i \text{ 為第 } i \text{ 架航機維護時距} \quad (23)$$

故可設定在第 ω 隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機進廠維護後，因維護時間增加導致損失可用飛時（或相當於維護時距使用率）及造成人力調度加班的懲罰值為：

$$C_i^R(\omega) = -(C_i^1 + C_i^2) = -\frac{h * \Delta r_i(\omega)}{g_i}, \quad h = 1.75, \text{ (以日曆天計)} \quad (24)$$

$$C_i^R(\omega) = -(C_i^1 + C_i^2) = -\frac{h * \Delta r_i(\omega)}{(s_i / f_i)}, \quad h = 1.75, \text{ (以飛時計)} \quad (25)$$

其中：

$\Delta r_i(\omega)$ ：第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機進廠維護後，因維護時間較初始規劃維護時間增加之天數（視為加班天數）。

h ：航機維護時間每延長 1 天所造成的人力成本費用增加比例。

(3) 屬模式目標值之第 3 項懲罰值 $c_{ij}^{Ev}(\omega)$ (因規劃進廠日早於最早進廠日所造成)

因航機規劃進廠日提前並早於最早進廠日，所衍生無法展延寬維護時距的懲罰值。主要考量方向係依交通部民用航空局「民航通告」(維護計畫通告) 所述，Letter Check、發動機翻修及起落架翻修時距 3 類維護時距展延寬計畫，應事先備妥計畫細節含選定機號 (Letter Check 時距使用率要達 90% 以上) 或發動機序號 (發動機翻修時距使用率要達 95% 以上) 或起落架序號 (起落架翻修時距使用率要達 95% 以上)、作業時間、資料蒐集方式、製造廠家之建議、零組件拆檢報告 (為第 1、2 類 Product，含平均故障時距、TSN、TSO、故障導因、預防性措施、廠家建議)、結構檢查報告與分析 (限 Letter Check)、技術修改紀錄 (為延長使用壽命者應說明)、展寬值影響適航指令之說明與修正列表、不可展延之維護項目評估說明與列建議表 (限 Letter Check) 及民航局認為需要之其他資料，按民航局適航檢查員手冊規定之 5 階段檢定程序向民航局標準組提出申請。亦即在維持裝備之安全與可靠

度條件下，民航局同意翻修時距可展延寬，因此，航空公司維護單位為節省成本，通常依以往經驗將最早進廠日 $e_i(\omega)$ 設定約最晚進廠日維護日 ($l_i(\omega)$) -10% 法定維護時距，部份航機進廠維護日控制在最晚進廠日 ($l_i(\omega)$) -5% 法定維護時距內，並向民航局標準組提出維護時距展延寬。

通常排程人員規劃進廠日不早於最早進廠日，唯隨機事件發生後，調整之進廠日若不早於最早進廠日，可能有無解之情況產生（由模擬評估及實務訪談過程得知確實可能有此情況）。本研究為求規劃上有解，故設定在有條件下（即設懲罰值）做調整。此外，為了使部分航機能滿足維護時距展延寬計畫，以求節省維護成本並維持裝備之安全與可靠度，故設定規劃排程中，未於最早進廠日以後進廠者，即給予懲罰值。為了避免調整之進廠日提前太多，增加營運成本，並避免發生以某架航機維護時距使用值降低，來換取其他航機均滿足 RL 值之不合理指派應另給予適當限制。懲罰值設定說明如后：

本研究考量 3 個懲罰值設定基準，首先，維護時距使用率隨進廠日提早而降低，據以設定懲罰值之基本數值為維護時距使用值（各航機維護時距使用率乘以航機權重）之減少值並隨進廠日提早日數增加而增加；其次，依 F 廠專業排程人員經驗，若決策上無法避免早於最早進廠日，仍希望提早日數儘量降低，且規劃時亦須避免潛在可能產生不合理指派。因此，隨提早日數增加設定級距與門檻值，並給予不同懲罰值權重；最後，在客戶優先的考量下，設定契約客戶機之懲罰值為自有航機的 2 倍。第 i 架航機維護時距無法展延寬之懲罰值級距及門檻值設定舉例說明如下：當進廠日早於 $e_i(\omega)$ 日（可展延寬條件下的最早進廠日 (RLD)，第一級門檻值）且未早於 $A_i(\omega)$ 日（第二級門檻值，等於 $RLD - 5\% \times$ 維護時距），設定第 i 架航機懲罰值之權重等於 2；若早於 $A_i(\omega)$ 日且未早於 $B_i(\omega)$ 日（第三級門檻值， $RLD - 10\% \times$ 維護時距），設定第 i 架航機懲罰值之權重等於 4；若早於 $B_i(\omega)$ 日，設定第 i 架航機懲罰值之權重等於 8。此外，各契約客戶航機懲罰值之 1 至 3 級權重分別為 4、8 及 16。

承上所述，第 ω 次隨機事件擾動下，第 i 架航機早於 RLD 日進廠致無法展延寬所造成的懲罰值之設定說明如下：

(A) 若第 i 架航機的規劃進廠日提前至第 j 天，比 RLD 日提前且未逾 5% 維護時距，造成第一級距懲罰值 $c_{ij}^{E1}(\omega)$ ：

a. 屬自有航機第一級距懲罰值：

$$c_{ij}^{E1}(\omega) = -\frac{k_{1a}(d_i^{RL}(\omega) - j)}{g_i}, \text{ 以日曆天計。} \quad (26)$$

$k_{1a} = 2$ (自有航機第一級距懲罰權重)

$$c_{ij}^{E1}(\omega) = -\frac{k_{1a}(d_i^{RL}(\omega) - j)}{(s_i/f_i)}, \text{ 以飛時計。} \quad (27)$$

$k_{1a} = 2$ (自有航機第一級距懲罰權重)

b. 屬已訂契約客戶航機第一級距懲罰值：

$$c_{ij}^{E1}(\omega) = -\frac{k_{1b}(d_i^{RL}(\omega) - j)}{g_i}, \text{ 以日曆天計。} \quad (28)$$

$k_{1b} = 4$ (契約客戶機第一級距懲罰權重)

$$c_{ij}^{E1}(\omega) = -\frac{k_{1b}(d_i^{RL}(\omega) - j)}{(s_i/f_i)}, \text{ 以飛時計。} \quad (29)$$

$k_{1b} = 4$ (契約客戶機第一級距懲罰權重)

(B) 若第 i 架航機的規劃進廠日提前至第 j 天，比 RLD 日提前，提前日數超逾 5% 維護時距且未逾 10% 維護時距，造成第二級距懲罰值 $c_{ij}^{E2}(\omega)$ 為：

a. 屬自有航機第二級距懲罰值：

$$c_{ij}^{E2}(\omega) = -\frac{k_{1a}(5\% * g_i) + k_{2a}(d_i^{RL}(\omega) - 5\% * g_i - j)}{g_i}, \text{ 以日曆天計。} \quad (30)$$

$k_{1a} = 2$ (自有航機第一級距懲罰權重); $k_{2a} = 4$ (自有航機第二級距懲罰權重)

$$c_{ij}^{E2}(\omega) = -\frac{k_{1a}(5\% * (s_i/f_i)) + k_{2a}(d_i^{RL}(\omega) - 5\% * (s_i/f_i) - j)}{(s_i/f_i)}, \text{ 以飛時計。} \quad (31)$$

$k_{1a} = 2$ (自有航機第一級距懲罰權重); $k_{2a} = 4$ (自有航機第二級距懲罰權重)

b. 屬已訂契約客戶航機第二級距懲罰值：

$$c_{ij}^{E2}(\omega) = -\frac{k_{1b}(5\% * g_i) + k_{2b}(d_i^{RL}(\omega) - 5\% * g_i - j)}{g_i}, \text{ 以日曆天計。} \quad (32)$$

k_{1b} (契約客戶機第一級距懲罰權重) = 4; $k_{2b} = 8$ (契約客戶機第二級距懲罰權重)

$$c_{ij}^{E2}(\omega) = -\frac{k_{1b}(5\% * (s_i/f_i)) + k_{2b}(d_i^{RL}(\omega) - 5\% * (s_i/f_i) - j)}{(s_i/f_i)}, \text{ 以飛時計。} \quad (33)$$

k_{1b} (契約客戶機第一級距懲罰權重) = 4; $k_{2b} = 8$ (契約客戶機第二級距懲罰權重)

(C) 若第 i 架航機的規劃進廠日提前至第 j 天，比 RLD 日提前之日數超逾 10% 維護時距，造成第三級距懲罰值 $c_{ij}^{E3}(\omega)$ 為：

a. 屬自有航機第三級距懲罰值：

$$c_{ij}^{E3}(\omega) = -\frac{k_{1a}(5\% * g_i) + k_{2a}(5\% * g_i) + k_{3a}(d_i^{RL}(\omega) - 10\% * g_i - j)}{g_i}, \text{ 以日曆天計。} \quad (34)$$

$k_{1a} = 2$ (自有航機第一級距懲罰權重); k_{2a} (自有航機第二級距懲罰權重) = 4;

$k_{3a} = 8$ (自有航機第三級距懲罰權重)

$$c_{ij}^{E3}(\omega) = -\frac{k_{1a}(5\% * (s_i/f_i)) + k_{2a}(5\% * (s_i/f_i)) + k_{3a}(d_i^{RL}(\omega) - 10\% * (s_i/f_i) - j)}{(s_i/f_i)},$$

以飛時計。 (35)

$k_{1a} = 2$ (自有航機第一級距懲罰權重); k_{2a} (自有航機第二級距懲罰權重) = 4;

$k_{3a} = 8$ (自有航機第三級距懲罰權重)

b. 屬已訂契約客戶航機第三級距懲罰值：

$$c_{ij}^{E3}(\omega) = -\frac{k_{1b}(5\% * g_i) + k_{2b}(5\% * g_i) + k_{3b}(d_i^{RL}(\omega) - 10\% * g_i - j)}{g_i},$$

以日曆天計。 (36)

$k_{1b} = 4$ (契約客戶機第一級距懲罰權重); $k_{2b} = 8$ (契約客戶機第二級距懲罰權重);

$k_{3b} = 16$ (契約客戶機第三級距懲罰權重)

$$c_{ij}^{E3}(\omega) = -\frac{k_{1b}(5\% * (s_i/f_i)) + k_{2b}(5\% * (s_i/f_i)) + k_{3b}(d_i^{RL}(\omega) - 10\% * (s_i/f_i) - j)}{(s_i/f_i)},$$

以飛時計。 (37)

$k_{1b} = 4$ (契約客戶機第一級距懲罰權重); $k_{2b} = 8$ (契約客戶機第二級距懲罰權重);

$k_{3b} = 16$ (契約客戶機第三級距懲罰權重)

其中：

$c_{ij}^{Ev}(\omega)$ ：第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機在第 j 天規劃進廠，因早於 RLD 且落於第 v 級距時窗，所造成維護時距無法展延寬的懲罰值。本研究為避免在求解過程中，發生以某架航機維護時距使用值降至太低，來換取其他航機均滿足 RL 值之不合理情況，以及區分增加維護次數之影響程度，故共設定 3 個時窗級距 ($v = 1 \sim 3$) 與門檻值，並給予不同懲罰權重。此外，在爭取客戶業務的政策考量下，設定契約客戶機之各級懲罰權重值為自有航機的 2 倍 (詳郭俊志^[20])。

$d_i^{RL}(\omega)$ ：第 ω 次隨機事件下，第 i 架自有或已訂契約客戶航機之 RLD (以日曆天計)。

k_{va}/k_{vb} ： k_{va} ：自有航機規劃進廠日早於 RLD ，且屬第 v 級距時窗之第 v 級距懲罰值權重。

k_{vb} ：已訂契約客戶航機規劃進廠日早於 RLD ，且屬第 v 級距時窗之第 v 級距懲罰值權重。下標 a ：指進廠維護航機屬自有航機者；下標 b ：指進廠維護航機屬契約客戶航機者。 $v = 1 \sim 3$ ，各級距的時窗定義不同，其中第一級距時窗指早於 RLD 但未早於 $RLD - 5\% \times$ 維護時距；第二級距時窗指早於 $RLD - 5\% \times$ 維護時距，但未早於 $RLD - 10\% \times$ 維護時距；第三級距時窗指早於 $RLD - 10\% \times$ 維護時距等。

$\delta_{ij}^v(\omega)$ ：表示第 ω 次隨機事件下，第 i 架航機在第 j 天進廠時，是否會產生第 v 級距懲罰

值的關係係數 (共有 3 級, 即 $v = 1 \sim 3$)。若是則為 “1”, 否則為 “0”。注意, 當第 i 架航機在第 j 天進廠時, 最多只會產生其中 1 級距懲罰值。參考之後的集合定義, 此係數表示如下:

$$\sum_{v=1}^3 \delta_{ij}^v(\omega) = 1, \quad \delta_{ij}^v(\omega) = 0 \text{ or } 1; \quad \forall i \in I^{Ev}, \forall j \in T_i^{Ev};$$

$$\delta_{ij}^1(\omega) = 1, \forall j \in T_i^{E1}(\omega); \delta_{ij}^2(\omega) = 1, \forall j \in T_i^{E2}(\omega); \delta_{ij}^3(\omega) = 1, \forall j \in T_i^{E3}(\omega)。$$

3. 與 LMSYA_CM 不同之集合部分:

$I^L(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下, 最晚進廠日提前的所有自有及已訂契約客戶航機集合。

$I^R(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下, 維護時間延長的所有自有及已訂契約客戶航機集合。

$I^{Ev}(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下, 規劃進廠日早於 RLD , 且屬第 v 級距時窗之所有自有及已訂契約客戶航機集合。 $v = 1 \sim 3$ 。

$T_i^L(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下, 第 i 架自有或已訂契約客戶航機在最晚進廠日提前時 (即 $d_i^L(\omega) \geq 1$), 所有進廠時窗內的日期所構成的集合。

$$T_i^L(\omega) = \{j | e_i(\omega) \leq j \leq l_i(\omega)\} \cap \{j | d_i^L(\omega) \geq 1\}$$

$T_i^R(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下, 第 i 架自有或已訂契約客戶航機在維護時間增加時 (即 $\Delta r_i(\omega) \geq 1$), 所有進廠時窗內的日期所構成的集合。

$$T_i^R(\omega) = \{j | e_i(\omega) \leq j \leq l_i(\omega)\} \cap \{j | \Delta r_i(\omega) \geq 1\}$$

$T_i^{Ev}(\omega)$: 第 ω 次隨機事件下, 第 i 架自有或已訂契約客戶航機之進廠維護日, 早於 RLD 且屬第 v 級距時窗的所有日期所構成的集合。 $v = 1 \sim 3$, 各級距時窗的所有日期所構成的集合之計算方式不同, 如下所示:

$$T_i^{E1}(\omega) = \{j | 1 \leq j\} \cap \{j | d_i^{RL}(\omega) - 5\% * g_i \leq j < d_i^{RL}(\omega)\}, \text{ 以日曆天計。}$$

$$T_i^{E2}(\omega) = \{j | 1 \leq j\} \cap \{j | d_i^{RL}(\omega) - 10\% * g_i \leq j < d_i^{RL}(\omega) - 5\% * g_i\}, \text{ 以日曆天計。}$$

$$T_i^{E3}(\omega) = \{j | 1 \leq j < d_i^{RL}(\omega) - 10\% * g_i\}, \text{ 以日曆天計。}$$

$$T_i^{E1}(\omega) = \{j | 1 \leq j\} \cap \{j | d_i^{RL}(\omega) - 5\% * (s_i / f_i) \leq j < d_i^{RL}(\omega)\}, \text{ 以飛時計。}$$

$$T_i^{E2}(\omega) = \{j | 1 \leq j\} \cap \{j | d_i^{RL}(\omega) - 10\% * (s_i / f_i) \leq j < d_i^{RL}(\omega) - 5\% * (s_i / f_i)\}, \text{ 以飛時計。}$$

$$T_i^{E3}(\omega) = \{j | 1 \leq j < d_i^{RL}(\omega) - 10\% * (s_i / f_i)\}, \text{ 以飛時計。}$$

I_i^{line} : 因季節性熱門航線營運需求之機隊, 已排定熱門營運期間不可進廠之時窗與機庫的自有航機集合。

S_i^{line} : 自有航機中, 第 i 架航機因季節性熱門航線營運需求, 已排定熱門營運期間不可進廠之時窗與機庫之集合。

V : 計算航機規劃進廠日早於 RLD 之懲罰值的所有級距集合, 即 $V = \{1, 2, 3\}$ 。

Ω : 決策年度內所有隨機事件所構成的集合。

本研究 LMSYA_SM 可定式如下：

Maximize

$$E \left\{ \sum_{k \in K} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in T} w_i m_{ij}(\omega) x_{ijk} + \sum_{i \in I^L(\omega)} \sum_{j \in T_i^L(\omega)} w_i c_i^L(\omega) x_{ijk} + \sum_{i \in I^R(\omega)} \sum_{j \in T_i^R(\omega)} w_i c_i^R(\omega) x_{ijk} \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{v \in V} \sum_{i \in I^{Ev}(\omega)} \sum_{j \in T_i^{Ev}(\omega)} w_i \delta_{ij}^v(\omega) c_{ij}^{Ev}(\omega) x_{ijk} \right] \right\} \quad (38)$$

Subject to

$$\sum_{j=e_i(\omega)}^{l_i(\omega)} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in I, \forall \omega \in \Omega; \quad (39)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in H_{is}(\omega)} x_{ijk} \leq q_{sk}, \quad \forall k \in K, \forall s \in T, \forall \omega \in \Omega; \quad (40)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in H_{is}(\omega)} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq p_s, \quad \forall s \in T, \forall \omega \in \Omega; \quad (41)$$

$$\sum_{(i,k) \in IK} \sum_{j=e_i(\omega)}^{l_i(\omega)} x_{ijk} = 0, \quad \forall \omega \in \Omega; \quad (42)$$

$$\sum_{(j,k) \in S_i^{cr}} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in I; \quad (43)$$

$$\sum_{(j,k) \in S_i^{line}} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in I^{line}; \quad (44)$$

$$\sum_{i \in I^{o_type}} \sum_{j \in H_{is}(\omega)} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq P_s^{o_type}, \quad \forall o_type \in TP^o, \forall s \in T, \forall \omega \in \Omega; \quad (45)$$

$$x_{ijk} = 1 \text{ or } 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in T, \forall k \in K. \quad (46)$$

目標式 (38) 表示預期的機隊 (包含所有自有及已訂契約客戶) 維護時距使用值扣除懲罰值後之結果最大化，其中維護時距使用值等於所有應進廠航機之個別維護時距使用值 (即個別航機維護時距使用率 * 個別航機權重) 的總和，而 $E\{\}$ 表示模式目標之期望值。由於大小機型航機的重要性不同，故分別給予不同之權重值 w_i 。此外，目標式中受隨機擾動所產生之懲罰值共有 3 項。第 1 項係指航機最晚進廠日提前所衍生的懲罰值：由於最晚進廠日可能因航機使用平均飛時或起降次數等不符預估值而導致延後或提前，若為延後仍不可超逾其他規定到期限制，因而對航機壽命而言，減少維護次數機率不大。反之，若提前

則通常代表使用率提高，必然會增加維護次數，因此本研究對最晚進廠日提前給予懲罰值。第 2 項係指維護時間受隨機擾動而增加所衍生的懲罰值：實務上維修廠會盡量使應進廠維護航機均如期進廠與出廠，若某架航機維護時間較原規劃值減少，則對維修廠的長期排程而言，僅係增加了維護能量餘裕，並無損失。反之，若維護時間增加，則維護廠需調度人力加班以進行維護作業，以避免影響後續進廠航機維護時程，而此亦產生加班成本，因此本研究對維護時間的增加給予懲罰值。第 3 項係指航機規劃進廠日之指派結果若早於 RLD ，因維護時距無法展延寬所衍生的懲罰值：航機的指派進廠日若早於 RLD ，則代表航機維護的可靠度不佳，其仍必須按 AMP 規定之維護時距做定期維護。對航機壽命而言，因維護時距無法展延寬而導致平均維護的次數無法再減少。此外，平均維護次數亦會隨著指派進廠日早於 RLD 的差距增加而逐漸增加。因此，本研究對指派進廠日早於 RLD 的差距情況給予 3 類不同程度的懲罰值，此做法亦可避免求解偏差所導致的不合理指派（詳 $c_{ij}^{Ev}(\omega)$ 參數設定說明）。限制式 (39) 表示維護時距內維護限制：亦即在決策年度內，所有應進廠航機必須在隨機擾動下的進廠時窗（即最早 $(e_i(\omega))$ 及最晚 $(l_i(\omega))$ 進廠日之間）內進廠執行 1 次維護工作，本研究在最早及最晚進廠日之設定做法詳 3.1 節 1.(2) 說明。限制式 (40) 為個別機庫單日使用架數限制：考量在隨機擾動下，限制第 s 天在第 k 個維護機庫，最多可停放的航機總架數不得超過 q_{sk} 架，其中 q_{sk} 值依機庫大小或維護設備支援能力而定。限制式 (41) 為單日常態維護人力限制：考量維護人力是有限且為互相支援的作業型態，將維護工廠單日最多可提供之常態維護人力，轉換成第 s 天最多可容許維護之航機總架數為 p_s 架。此外，臨時性的航機維護需求，通常適用中期的臨時需求規劃，因此不納入本研究長期排程的調整規劃內。限制式 (42) 為機庫有機型或使用之限制：實務上限制某些機庫僅供特定機型或特殊維護作業使用，故在受隨機擾動下，機隊中不屬該類機型或該項作業均不得指派。此外，為提升客戶服務滿意度，在契約客戶進廠時窗受隨機擾動下，保留 1 適用該機型之機庫專屬其使用，使客戶航機均能符合 RL 值限制。限制式 (43) 為特定時窗限制：本研究考量在政策需求已排定或跨越年度維護之時窗與機庫不可再指派。限制式 (44) 為航線營運需求特定時窗限制，表示季節性熱門航線營運需求之部分自有機隊，對已排定熱門營運期間不可進廠之時窗與機庫不可指派之限制。值得說明的是， $LMSYA_CM$ 限制式 (6) 未考量其他未跨越年度或政策需求航機亦不可於特定時窗指派進廠，雖不影響實例測試結果，仍有需要於模式中劃分更清楚，因此，本研究將限制式 (6) 再細分為限制式 (43) 與 (44)。限制式 (45) 為自有同型機庫單日最多維護數量限制：為避免影響航運，限制自有航機屬同型 o_type 機種，在隨機擾動下，第 s 天最多可停機維護的架數不可超過 $p_s^{o_type}$ 架。因此，若設定 $p_s^{o_type} = 1$ 時，即意指各類同型自有航機之維護作業時窗均不能重疊。此外，對已訂契約客戶航機，在實務上並不做此項限制，以增加契約客戶機的維護業務。限制式 (46) 限制變數是零壹整數。

值得注意的是， $LMSYA_CM$ 採用平均的（或固定的）進廠時窗與維護時間。 $LMSYA_CM$ 除隨機進廠時窗、維護時間及懲罰值外，與本研究 $LMSYA_SM$ 類似。若令 $LMSYA_SM$ 中之所有隨機進廠時窗與維護時間均以平均值（或固定值）取代並移除懲罰

值，再設定維護時距使用率之緩衝值，即可簡化為 LMSYA_CM。換言之，LMSYA_CM 實際上為本研究 LMSYA_SM 之一特例。

LMSYA_CM 及 LMSYA_SM 均可定式為零壹整數規劃問題，屬 NP-hard 問題，其中 LMSYA_CM 模式之計算複雜度 (computational complexity) 為 $O(C_n^N)$ ， $N = |I| \times |T| \times |K|$ ， $n = |I|$ 。由 F 廠測試範例之實務作業資料得知，其問題規模約 63,820 個決策變數 (包含 109,500 個決策變數，再扣除 45,680 個已設定為 0 之決策變數) 及 4,451 條限制式，可直接利用 CPLEX 數學規劃軟體在短時間內求解。而本研究 LMSYA_SM 因考量隨機變數導致整個問題規模大幅增加，以 F 廠之測試範例而言，其問題規模約含 $63,820 \times \Omega$ 個決策變數 (包含單次隨機有 $109,500 \times \Omega$ 個決策變數，再扣除 $45,680 \times \Omega$ 個已設定為 0 之決策變數等於 $63,820 \times \Omega$ 個決策變數) 及 $4,451 \times \Omega$ 條限制式，若取 50 個隨機事件 (假設可反應母體的分佈)，則問題規模將達到 3,191,000 變數及 222,550 限制。以此等規模問題勢必無法以最佳化解法在合理時間內求得最佳解，故本研究發展一啟發解法以有效率地求解模式 (詳如第四節說明)。

3.3 模式應用

本研究參考顏上堯等人^[9]研究，建議於決策年度開始前約 3~6 個月，設定一適當的計算基準點，開始進行長期排程決策年度調整作業，流程說明如下：

1. 取得決策年度所有應進廠航機重新調整排程所需資料，以及進廠時窗及維護時間所對應的隨機擾動值機率分佈資料。
2. 依機率分佈以隨機方式取得進廠時窗及維護時間隨機值，連同其他規劃需求參數，於更新後輸入 LMSYA_SM。
3. 以本研究所發展之啟發解法，求解初始規劃最佳化排程。
4. 初始規劃最佳化排程送交維護工廠其他部門會審，並重複調整與求解作業至完成。
5. 該排程再交由營運單位進行營運可行性評估後，才完成年度調整作業並公布。

本研究 LMSYA_SM 具備契合實務隨機環境之穩健型規劃功能，所規劃之排程除有助於人工調整作業外，另連結 EXCEL 軟體可獲得機庫使用情況、可維護時窗空檔、每日應在庫維護、後續應進廠航機及可安排休假空檔等資訊供決策者使用。值得說明的是，若模式發生無解時，可放鬆部分限制 (例如容許同型航機維護可重疊數日、大型航機部分進廠時窗空檔容許小型航機使用、最早進廠日再提前以擴大進廠時窗等) 或調整輸入資料 (例如預估維護時間重新檢討等) 重新求解，此做法與顏上堯等人^[9]類似。

四、啟發解法及模擬評估方法

為有效率地求解 LMSYA_SM，本研究發展一啟發解法。另外，本節亦參考顏上堯等

人^[9]研究，發展一模擬評估方法，以評估 Yan 等人^[8]研究、顏上堯等人^[9]研究 (LMSYA_CM) 及本研究 LMSYA_SM 之模擬營運績效。值得說明的是，顏上堯等人^[9] (LMSYA_CM) 所發展之模擬評估方法，雖是採用模擬營運過程受隨機擾動影響進行績效評估，然而在規劃做法上，其亦是採用確定性規劃。

4.1 啟發解法

本研究利用風險規避觀念，針對排程受不同隨機事件擾動後之指派結果中，選擇重複出現機率較高者應較能契合隨機環境中承受隨機擾動之規劃解概念，發展有效率的啟發解法。作法說明如下：首先設定適當回合數及隨機事件次數，接著針對每回合中的每一個隨機事件，以 CPLEX 求解確定性規劃模式（簡稱確定性規劃），統計所有隨機事件的求解結果，並篩選各航機規劃進廠日出現機率達設定選取標準者。之後以加入額外限制式（如式 (47) 及相關參數說明）之方式，固定符合標準之航機進廠日並進行下一回合。重複此過程，直至達到設定之回合數為止。最後利用確定性規劃求解剩餘的航機之指派（含進廠日及機庫）。值得說明的是，最後一次的確定性規劃是以各航機平均的進廠時窗與維護時間為輸入（及一個平均事件），並利用 LMSYA_SM（加上式 (47) 以固定先前確定的航機指派）求解。此外，每一回合的隨機事件次數應需能反應母體，而此將在範例測試一節中進一步測試。

$$\sum_{(j,k) \in S_i^n} x_{ijk} = 1; \quad \forall i \in IF^n; \quad (47)$$

S_i^n ：第 n 回合隨機模擬下，自有及已訂契約客戶航機中，第 i 架航機因已達篩選標準，已固定機庫及進廠日之配對集合。

IF^n ：第 n 回合隨機模擬下，所有自有及已訂契約客戶航機已達篩選標準，並固定機庫及進廠日的航機集合。

至於回合數的設定上，一般當某回合挑選達標準的航機數量與之前數回合達標準之總數相比，少於一定比值時可設定終止，代表固定航機指派的數量已趨收斂；或者直接是以一容許求解時間內而設定一最大回合數為之。本研究參考上述二者作法，經事先的多次測試，考量航機指派的收斂情形，並參考最大可容許的求解時間，設定 1 回合數。未來各維護工廠在運用此啟發解法時，可視本身需求並參考前述二作法，以設定適當的回合數。此啟發解法之演算流程如圖 1 所示，具體步驟如下所述：

1. 首先輸入模式所需之各項參數資料。
2. 令 $r = 1$ 。 RN 為預定隨機事件數， $r = 1, 2, 3, \dots, RN$ 。
3. 利用隨機抽樣方式，依累積機率分布，產生各航機最早、最晚進廠日及維護時間之隨機值。
4. r 是否達預定隨機事件次數 RN ？若是，則進行步驟 5；否則， $r = r + 1$ ，並回步驟 3。

5. 令 $n = 1$ 。 N 為預定運算回合數， $n = 1, 2, 3, \dots, N$ 。
6. 令 $r = 1$ 。 RN 為預定隨機事件數， $r = 1, 2, 3, \dots, RN$ 。
7. 輸入第 r 次各航機最早、最晚進廠日及維護時間之隨機值，並求出長期排程年度重新調整之結果，記錄各航機進廠日排程、目標值及懲罰值。
8. r 是否達預定隨機事件次數 RN ? 若是，則進行步驟 9；否則， $r = r + 1$ ，並回步驟 7。
9. 統計第 n 回合所有隨機事件中，所求得之各航機進廠日之重複出現次數並累計比例。
10. 依設定之重複出現比例選取標準篩選進廠日。值得說明的是，本研究訂定一重複出現比例選取方式，主要是設定各回合重複出現比例之選取標準，篩選出的航機進廠日，做為下回合求解前已確定的航機進廠日。理論上個別回合設定之選取標準值愈低則可選出的航機指派數量愈多，各回合標準值依序由大至小逐步降低設定，且差異類似。
11. 統計此回合及之前各回合所累積已確定之航機指派，轉成已固定部份航機指派之額外限制式，並輸入下 1 回合求解。
12. n 是否達預定模擬回合數 $N - 1$? 若是，則進行步驟 13；否則， $n = n + 1$ ，並回步驟 6。
13. 最後，第 N 回合以確定性規劃方式執行 1 次求解，以求得全部航機規劃排程。

為適當地評估此啟發解法的績效，本研究設計一上限解，其作法是以啟發解法之第 1 回合，對每一個隨機事件，以 CPLEX 求解確定性規劃模式，再求所有目標值之平均值，此平均值即為 LMSYA_SM 之上限解。值得說明的是，以 CPLEX 求解各隨機事件下之確定性規劃模式所得的解，即所謂的 wait-and-see 解 (WS)，屬完全資訊解，故其解為原問題之上限解。至於原問題之解屬事前規劃解，即所謂的 here-and-now (HN) 解，且 $WS \geq HN$ (Birge 與 Louveaux^[21])。

4.2 模擬營運評估方法

以往以模擬評估方法測試模式之營運績效之相關文獻不少，但與本研究較相關者，為顏上堯等人^[9]。因此，本研究參考顏上堯等人^[9]研究，發展一模擬評估方法，以比較 LMSYA_SM、顏上堯等人^[9]與 Yan 等人^[8]研究所規劃的停機排程，在決策年度模擬營運階段運作的績效差異。茲說明此模擬評估方法如下：

1. 研究模式選取及比較基準設定

Yan 等人^[8]採用確定性規劃，考量維護期限使用率及客戶維護利潤最大化之雙目標模式，其在實務的營運目標與相關限制條件的設計較以往傳統確定性規劃較完整，但仍有限制契約客戶機進廠時窗不得指派作法而影響資源有效運用、未考量已指派契約客戶航機之排程調整 (模式中契約客戶機可不指派) 等問題。至於模式求解若遇無解，則給予一虛擬機庫或增加人力。此外，該模式未進行模擬評估，無法証實模式在實務隨機環境運用時的績效。顏上堯等人^[9]雖採用確定性規劃考量實務的營運目標與相關限制條件類似，然其利用將進廠期限提前一定比例 (維護廠經驗值) 的彈性緩衝機制，開始將營運階段會受隨機擾動的情況納入考量，且為更有效率利用資源，將契約客戶機視為自有航機般一起納入規

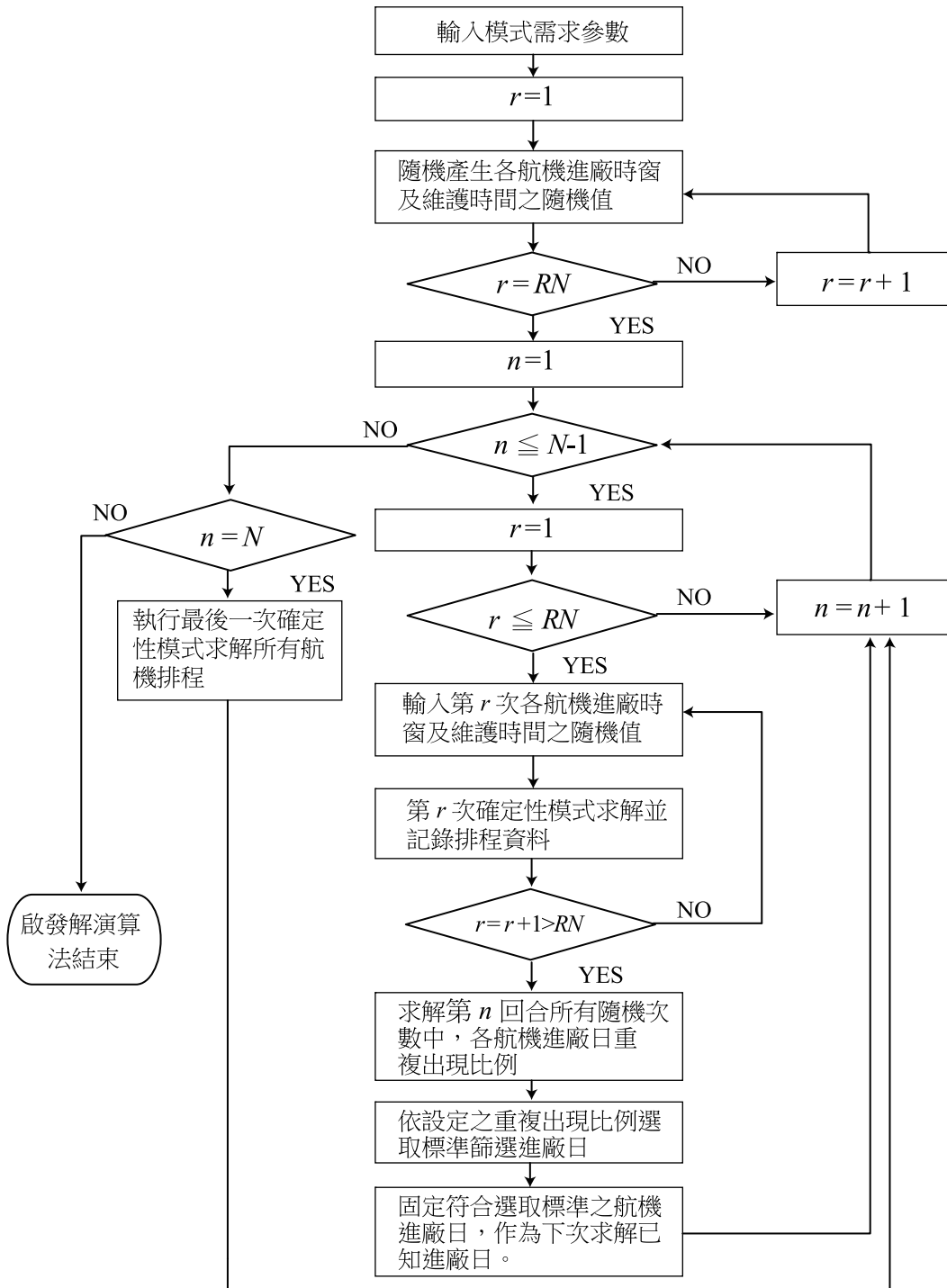


圖 1 本研究 LMSYA_SM 啟發解法之演算流程圖

劃，惟於其進廠時窗保留一機庫供使用。該研究在不增加機庫及人力下，為求模式一定有解，利用微調方式逐步擴大進廠時窗之最早進廠日；此外，該研究已進行模擬營運評估，以証實模式的績效。

為使 3 研究模式具相同的比較基準，必須深入了解目標式及限制式之差異後做適當的篩選與設定。首先，在目標值方面，由於僅比較自有航機維護使用值，而 Yan 等人^[8]研究為多目標式，包含第 1 目標式（為最大化自有航機維護使用值）及第 2 目標式（為最大化契約客戶航機維護利潤）。因此，截取其第 1 目標式。此外，由於 Yan 等人^[8]及顏上堯等人^[9]研究目標式未設懲罰值，故另加上與 LMSYA_SM 相同的懲罰值。其次，在限制式方面，由於 Yan 等人^[8]研究中，含有契約客戶機可增額的人力限制，應改為不可增額的人力限制。最後，僅考量契約客戶航機（不納入臨時客戶機）且須設定 3 模式之契約客戶航機於相同進廠日維護。

值得說明的是，部份航空公司為了提高維護利潤，已逐漸摒除自有航機維護空檔才承接臨時客戶機維護的做法，而轉向爭取定期維護客戶。因此，策略上必須以儘量爭取較佳之維護時距使用率等的做法，滿足客戶維護需求，以招攬客戶業務。為反應此需求，本研究除將已訂契約客戶機一併納入規劃外，另在目標值計算上亦納入已訂契約客戶。經由上述做法，3 模式在比較之基準上可視為相同。

2. Yan 等人^[8]及顏上堯等人^[9]研究模式修正後的求解

依上述比較基準分別修正 Yan 等人^[8]及顏上堯等人^[9]模式並求解，作法如下：首先執行 LMSYA_SM，並依所求隨機規劃解之契約客戶機排程，作為修正後之 Yan 等人^[8]及顏上堯等人^[9]模式中契約客戶機之預定排程，之後，再以 CPLEX 求解二研究之模式，以得剩餘自有航機排程。

3. 模擬 3 研究模式之規劃解在營運階段受隨機擾動與人工調整過程

模擬評估之隨機事件次數與隨機求解規劃設定相同。在設定每次隨機事件時，本研究會對機隊中的每架航機之進廠時窗及維護時間隨機產生一組新的值。理論上，對長期排程而言，一組隨機產生的進廠時窗及維護時間，是真實世界中所有隨機事件中的某個可能性組合，換言之，規劃排程可能已不同於實務營運的結果，因此需要適當地調整。此實務上人工調整步驟及經驗原則係參考顏上堯等人^[9]研究，主要係滿足進廠時窗、所有限制條件及目標值較高者優先指派之原則，概要說明如下：

- (1) 令 $m = 1$ 。 m 為計數值， M 為隨機事件總模擬次數。
- (2) 在符合已知次數累積機率分配函數下，以隨機方式產生各航機新的最早、最晚進廠日及維護時間。
- (3) 若原規劃進廠日超逾更新後最晚進廠日，應調整其至最晚進廠日。
- (4) 同規劃作法，選取第 m 次隨機事件下 LMSYA_SM 完成人工調整後之契約客戶機排程，做為 Yan 等人^[8]及顏上堯等人^[9]模式之契約客戶機已知排程。
- (5) 參考實務做法，以人工調整各航機進廠日均滿足所有限制，求得第 m 次隨機事件下

的新排程做為後續隨機擾動調整用。

(6) m 是否達模擬次數 M ? 若是，進行後續步驟 (7)，若否， $m = m + 1$ 回到步驟 (3)。

(7) 分別記錄 3 研究模式求解結果並統計各航機排程進廠日期、目標值及內部解等。

本研究參考顏上堯等人^[9]研究，以其所設計具檢核功能之人工調整 EXCEL 軟體資料庫，進行人工調整及時間計算。具體做法說明如下：「首先，輸入每次隨機事件隨機擾動值，電腦可自動計算更新之參數及限制條件，並自動檢核及顯示 60 架航機中不符限制條件者，約耗時 10 秒，此時間 3 模式均不納入比較。接著，開始人工調整排程起算時間，找出各航機顯示之不符合情況，並依實務上人工調整步驟及經驗原則，由年度末逐日往前，逐架比對所有不符限制條件之航機進廠時程與機庫並重新調整指派，直至電腦檢核均符合限制為止，並結算人工調整時間。

4. 評估模擬結果

由資料統計結果，比較、分析 3 研究模式之初始規劃解及模擬人工調整後解的差異。

五、範例測試及分析

本節首先以國內實務維護資料為測試範例，分析並設定模式參數資料；接著說明以相同範例測試 LMSYA_SM、Yan 等人^[8]模式及顏上堯等人^[9]模式之求解結果，並進行模擬評估與比較；最後進行敏感度及方案分析。

本研究以 Microsoft EXCEL 2010 軟體建立模式需求參數資料庫並轉換成 TXT 檔，經由 Microsoft Visual C++ 6.0 程式軟體結合 TXT 檔及 CPLEX 11.0 線性規劃軟體撰寫程式及求解，並採用 Microsoft Windows 7 作業系統、中央處理器 Intel Core i7 /2.70GHz 及記憶體為 8.00GB RAM 等電腦設備，以進行範例的測試與分析。

5.1 資料分析

本研究測試範例所需輸入資料簡要說明如下各點，其中除隨機進廠時窗及維護時間與懲罰值相關資料外，更深入的說明請參考顏上堯等人^[9]研究。

1. 維護規模

包括 60 架航機 (共 6 種機型) 及 5 座機庫，其中包含自有航機 52 架 (含 6 機型) 及契約客戶航機計有 8 架 (含 4 機型)。航機權重值是參考華航專業排程人員之建議，以與運量相關之座位數做航機權重設定考量，惟其他航空公司可視需求以其他方式設定其航機權重。在做法上，以座位數最少之 738 機型為 1，再依座位數相對比值訂定其餘機型權重。在模式應用時，規劃者可依其需求設定權重值。

2. 維護時距使用率計算所需資料

由測試資料中選取自計算基準日起各航機剩餘飛時數或日曆天數、每日平均飛時數、

維護時距、上次維護完工日期、最早及最晚進廠日、預估維護時間等參數，分別依飛時及日曆天來計算航機維護時距使用率。

3. 最早進廠日、最晚進廠日、維護時間及隨機擾動值資料

3 研究模式均設定進廠日應介於最早進廠日（對應等於最小維護時距使用率）及最晚進廠日（除顏上堯等人^[9]模式設定 97% 維護時距使用率外，其餘 2 研究模式對應等於預估到期日，即 100% 維護時距使用率）之間。

在營運過程之每次隨機事件發生後，對每架航機之最早、最晚進廠日及維護時間會產生擾動，其擾動值應可由以往維護系統每年度排程調整過程紀錄獲得。最晚進廠日及維護時間之隨機次數、隨機擾動值（單位為日）及機率分布如表 1 及表 2。值得說明的是，由 3.1 模式基本條件與假設 1.(2) 說明可知，由於最早與最晚進廠日間有一定的比例關係且無足夠實務資料可供使用，因此為簡化模式，設二者的擾動值產生的範圍相同。

表 1 最晚進廠日之隨機擾動值及累積機率資料表

項目名稱	提前				不變	延後			
隨機擾動值(日)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
機率值	0.018	0.036	0.073	0.436	0.127	0.182	0.073	0.036	0.018
累積機率值	0.018	0.055	0.127	0.564	0.691	0.873	0.945	0.982	1.000

表 2 維護時間之隨機擾動值及累積機率資料表

項目名稱	減少									
隨機擾動值(日)	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
機率值	0	0.007	0.013	0.020	0.020	0.026	0.039	0.052	0.078	0.261
累積機率值	0	0.007	0.020	0.039	0.059	0.085	0.124	0.176	0.255	0.516
項目名稱	不變	增加								
隨機擾動值(日)	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
機率值	0.111	0.078	0.078	0.052	0.039	0.026	0.020	0.020	0.013	0.007
累積機率值	0.627	0.706	0.784	0.837	0.876	0.902	0.922	0.941	0.954	0.961
增加										
隨機擾動值(日)	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16	+17	+18	+19
機率值	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0	0	0	0
累積機率值	0.967	0.974	0.980	0.987	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

在隨機事件次數設定上，本研究參考實務上作法，約於決策年度（下一年度）開始前 3~6 個月開始進行年度調整規劃並於決策年度開始前至少 1 週結束規劃（規劃期約 13 至 26 週）。因此在初始規劃時，本研究即考量專業排程訪談結果，設定每週約 1~2 次發生足以影響排程之隨機事件，即在調整規劃開始後至規劃結束前，約有 13~50 次（預估值）隨機事件發生。理論上，當隨機事件數量增加而目標值變化趨於收斂時，即認定隨機事件次數已可適當地代表母體。為檢驗隨機事件數的母體代表性，本研究先設定隨機事件數 110 次（大於 2 倍預估值）以進行數據之收斂測試。

為儘速求得模式目標值之收斂結果，因此本研究考量以 10 次為間隔，自 10 次至 110 次等 11 種隨機次數，進行平均目標值的收斂測試。結果如圖 2 及圖 3 所示，平均目標值之差異隨著隨機次數增加而逐漸縮小，而求解時間則逐漸增加。由圖 2 顯示，當隨機次數達 20 次即已漸趨收斂，代表 20 次以上的隨機次數已可適當地代表母體，但為保守起見並在考量合理時間內可得到收斂解，本研究設定 50 次隨機事件數以為隨機規劃與人工調整模擬評估之模擬次數。

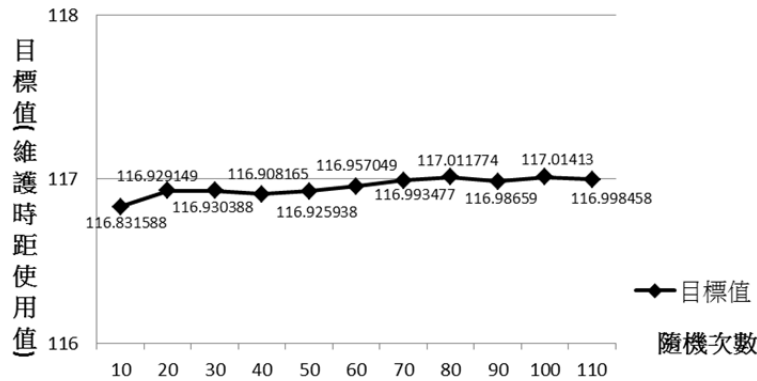


圖 2 本研究隨機規劃模式在不同隨機次數下求解之目標值

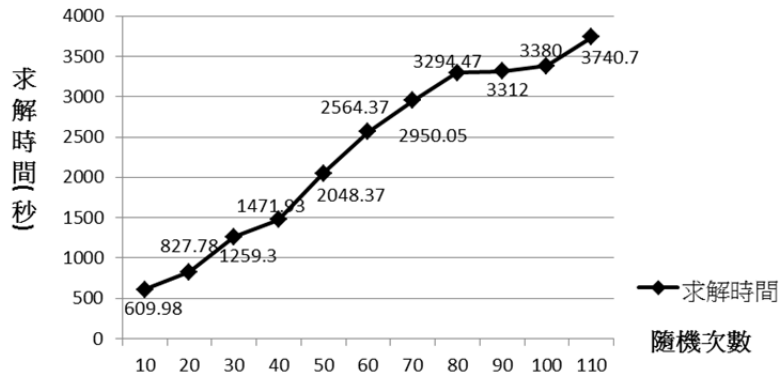


圖 3 本研究隨機規劃模式在不同隨機次數下之求解時間

為求隨機規劃及模擬測試時一定有解，本研究首先分別對 3 模式模擬測試 50 次隨機事件並求解。接著，若有無解情形發生，則由原設定 90%維護時距使用率（當最早進廠日符合 RL 值時），每次以小幅度（0.5%維護時距使用率）逐步減低最小維護時距使用率後，再進行求解，直至 50 次求解均有解為止。由於本研究在 50 次隨機模擬測試過程發現，當最早進廠日之設定降至 69.5%維護時距使用率時，3 研究模式均有解。因此，在隨機規劃時，茲設定最小維護時距使用率為 69.5%並轉換成最早進廠日。

值得說明的是，顏上堯等人^[9]模式以 97%維護時距使用率轉換最晚到期日，雖較 Yan 等人^[8]模式與 LMSYA_SM 設定的 100%維護時距使用率為緊，唯其在模擬人工調整時可超逾 97%並以 100%維護時距使用率為限制。此外，本研究是以模擬人工調整 50 次之最後結果進行 3 研究模式之績效評估，因此不影響模擬測試結果之公平性。

4. 懲罰值計算

本研究之 LMSYA_SM 目標式中共有 3 項懲罰值，懲罰值總和為 $c_i^L(\omega) + c_i^R(\omega) + c_{ij}^{Ev}(\omega)$ 。其中第 1 項 $c_i^L(\omega)$ 係指在第 ω 次隨機事件擾動下，第 i 架航機最晚進廠日提前 $d_i^L(\omega)$ 日之懲罰值為 $c_i^L(\omega) = -\frac{d_i^L(\omega)}{a_i} * \frac{r_i(\omega)}{(s_i/f_i)}$ （維護時距以飛時計）或 $c_i^L(\omega) = -\frac{d_i^L(\omega)}{a_i} * \frac{r_i(\omega)}{g_i}$ （維護時距以日曆天計）；第 2 項 $c_i^R(\omega)$ 係指在第 ω 次隨機事件擾動下，第 i 架航機維護時間增加 $\Delta r_i(\omega)$ 日之懲罰值為 $c_i^R(\omega) = -\frac{p^{ot} * \Delta r_i(\omega)}{g_i}$ （以日曆天計算）。

同理，以飛時計者，式中 g_i 改為 (s_i/f_i) ，其中 $p^{ot} = 1.75$ ；第 3 項 $c_{ij}^{Ev}(\omega)$ 係指在第 ω 次隨機事件擾動下，第 i 架航機規劃於第 j 天進廠，因早於 RLD 而衍生懲罰值，共設定 3 個時窗級距與門檻值並分別給予不同懲罰權重。若規劃進廠日落於第一級距時窗內則屬第一級距懲罰值（懲罰值等於第一級距懲罰權重（設為 2）×第一級距時窗內之提早日數／維護時距）；若規劃進廠日落於第二級距時窗內則屬第二級距懲罰值（懲罰值等於第一級距懲罰權重×第一級距時窗內之提早日數／維護時距+第二級距懲罰權重（設為 4）×第二級距時窗內之提早日數／維護時距）；若規劃進廠日落於第三級距時窗內則屬第三級距懲罰值（懲罰值等於第一級距懲罰權重×第一級距時窗內之提早日數／維護時距+第二級距懲罰權重×第二級距時窗內之提早日數／維護時距+第三級距懲罰權重（設為 8）×第三級距時窗內之提早日數／維護時距）。此外，在客戶優先的考量下，茲設定契約客戶機之各級距懲罰值為對應各級距自有航機懲罰值的 2 倍。

5. 機庫使用限制及適用機型資料

F 廠共有 5 個機庫，其中 1 號機庫僅供線上維護，2 號及 5 號機庫均可供各機型維護，3 號機庫不能維護 744、74Y 機型，4 號機庫僅供 744、74Y 機型維護。此外，須執行噴漆維護作業航機及派龍架大翻修者，僅能使用 5 號機庫。

6. 其他維護資源資料

(1) 常態人力維護限制

本研究引用 F 廠維護資料，設定每天執行定期維護人力最多可維護 3 架航機。

(2) 特定維護時窗限制

自有航機編號 1 至 4 號 744 歐美航線客機，在耶誕營運旺季不可進廠維護；此外，跨越年度的維護測試資料包含第 1 至第 10 天在 2 號機庫、第 1 至第 5 天在 3 號機庫及第 1 至第 14 天在 4 號機庫，以延續決策年度前一年度在庫工作。

綜合上述，相關參數之測試值及數值範圍詳如附錄之附表 1 至附表 3 所示。

5.2 測試及模擬結果評估分析

為控制本研究啟發解之求解時間於 70 分鐘內，在運算回合數的設定上，茲選取 2 回合及最終做 1 次確定性規劃求解。其中，第 1 回合選取標準值設為 0.6，第 2 回合設為 0.5。表 1 顯示在相同測試範例下，LMSYA_SM、顏上堯等人^[9]及 Yan 等人^[8]之求解結果，與對此 3 模式進行模擬 50 次人工調整的結果。進一步說明如下：

1. 在外部解方面

(1) 初始規劃目標值

表 3 中，3 模式之初始規劃目標值係指全部航機依個別模式做法指派進廠日所求得之最佳解目標值。其中，以 Yan 等人^[8]模式的目標值最大 (117.917333)，LMSYA_SM 次之 (116.906387)，顏上堯等人^[9]模式最小 (114.448491)。請注意，理論上一般確定規劃解表面上較隨機規劃解佳，但顏上堯等人^[9]模式目標值較 LMSYA_SM 小，其原因在顏上堯等人^[9]模式以 97%維護時距使用率轉換最晚到期日 (考量緩衝)，較 Yan 等人^[8]模式與 LMSYA_SM 設定的 100%維護時距使用率為緊。至於 LMSYA_SM 初始規劃排程之各決策變數的求解結果詳如附錄之附表 4 所示。

(2) 模擬 50 次人工調整後之平均目標值

由表 3 顯示，經過模擬 50 次人工調整後，LMSYA_SM 之平均目標值與機隊平均維護時距使用率分別為 117.200609 與 98.15%，顏上堯等人^[9]為 116.952742 與 98.03%及 Yan 等人^[8]為 114.607082 與 97.78%。由上述數據，可看出對整個機隊維護的目標值而言，LMSYA_SM > 顏上堯等人^[9] > Yan 等人^[8]。此外，由啟發解法求解 LMSYA_SM 所得之初始規劃目標值 116.906387 與上限解 116.925938 之差距為 0.02%，顯示啟發解效果良好。

在營運績效比較上，國內 F 航空公司以收益座位數×飛行距離 (公里) 來估算客運運量，並據以估計客運營運收入等於單位收益×RPK (=總收益座位數×總飛行公里數)。而飛行距離除可以用航線距離×航班次數計算外，亦可用總飛時 (=航機架數×平均維護時距×平均維護時距使用率)×航程平均時速做概估。因此，假設單位收益、收益座位數及航程平均時速數據持平，在航機架數及平均維護時距固定下，理論上營運收入與平均維護時距使用率成正相關；同理，貨運營收亦可有相同推論。由於航機維護時距使用率之高低亦可視為可營運飛行時數之多寡且上述說明亦可証實與營運收入成正相關，而在平均維護時

距使用率上，本研究 LMSYA_SM 亦較其他 2 模式分別提升近 0.37% 及 0.12%，因此若以 F 廠所屬航空公司機隊於 2006 年營運之平均維護時距使用率 97.5% 及當年度之客貨運營運收入約 1,200 億台幣保守估算（設平均維護時距使用率 100%），則對於整體客貨運營運收入之影響即分別超逾 4 億 4 仟萬及 1 億 4 仟萬台幣，顯示本研究 LMSYA_SM 對於航空公司營運應具有正面之助益。

(3) 求解時間

由表 3 中可看出，本研究 LMSYA_SM 在初始規劃之求解時間為 3985.74 秒，雖較 Yan 等人^[8] 模式及顏上堯等人^[9] 模式之求解時間 68.09 秒及 21.78 秒長，但本研究屬長期排程重新規劃問題，時間較不緊迫，因此求解時間不是主要考量，而此時間應屬可接受範圍。

(4) 人工調整排程時間

每次完成人工調整作業所需時間，係自模式參數資料更新，並開始人工調整排程起算，至 60 架航機調整結果均滿足各項限制為止。在經過模擬 50 次人工調整後，任一模式在各次隨機事件下，所需人工調整時間差異並不大，顯示實務上人工調整的步驟及經驗原則相當穩定。由表 3 中可看出，LMSYA_SM 之人工調整平均所需時間 < 50 分鐘，較 Yan 等人^[8] 模式之平均所需時間 120~240 分鐘大幅降低，而較顏上堯等人^[9] 模式 (< 60 分鐘) 稍低，顯示本研究 LMSYA_SM 的規劃解較彈性及穩健，可有效改善人工調整的效率。

2. 在內部解方面

(1) 航機維護系統可靠度

若規劃進廠日超逾 RLD，即顯示航機維護情況之可靠度不理想，表 3 中顯示，LMSYA_SM 規劃之排程經過模擬 50 次人工調整，在規劃進廠日早於 RLD 之數據上，包含平均架數、最多架數、達 1 架以上之次數、達 2 架以上之次數、達 3 架以上之次數、達 4 架以上之次數，分別為 0.7 架、3 架、25 次、8 次、2 次、0 次。而顏上堯等人^[9] 模式之求解結果則分別為 1.24 架、4 架、37 次、17 次、7 次、1 次及 Yan 等人^[8] 模式之求解結果分別為 1.52 架、5 架、48 次、18 次、7 次、2 次。由上述數據可以發現，對機隊維護的可靠度比較優劣順序為 LMSYA_SM > 顏上堯等人^[9] 模式 > Yan 等人^[8] 模式，顯示本研究發展的 LMSYA_SM 較能規劃可靠的航機維護排程。值得說明的是，LMSYA_SM 在啟發解求解過程是每經一回合即固定某些達標準的航機與機庫，因此降低部分時窗之可調整彈性，而導致表 3 中之初始規劃解有 1 架航機超逾 RLD，但此解在人工調整後仍然較其他 2 模式可靠。

以年度 LMSYA_SM 規劃結果經 50 次模擬後，規劃進廠日早於 RLD 之航機平均架數為 0.7 架而言，若航機壽限設定為 30 年，則 30 年內可能有 21 架次航機因規劃作法及人工調整因素而導致無法向民航局申請維護時距展延寬，其餘 2 模式則分別為 37.2 次及 45.6 次定期維護費用，差距多達 1.77 及 2.17 倍，顯示本研究 LMSYA_SM 的實務價值。

(2) 維護能量餘裕

由於本研究設定每日有 3 組常態維護人力及 5 座機庫，工作負荷包括 C/D Check 以上

表 3 50 次隨機規劃求解及 50 次模擬營運階段人工調整結果

求解結果	Yan 等人 ^[8] 模式 (傳統確定性模式)		顏上堯等人 ^[9] 模式 (確定性模式)		本研究 LMSYA_SM (隨機規劃模式)	
	初始 規劃	模擬營運 人工調整	初始 規劃	模擬營運 人工調整	初始 規劃	模擬營運 人工調整
初始規劃最佳目標值(1)*	117.917333	---	114.448491	---	116.906387	---
隨機規劃模式上限解(2)	---	---	---	---	116.925938	---
(1)與(2)之 GAP	---	---	---	---	0.02%	---
求解時間(秒)	68.09	---	21.78	---	3985.74	---
每次模擬人工調整 平均所需時間(單位：分鐘)	---	120 ~240	---	< 60	---	< 50
規劃進廠日早於 RLD**之航機架數	0	---	3	---	1	---
50 次模擬後，規劃進 廠日早於 RLD 之航 機平均架數	---	1.52	---	1.24	---	0.7
50 次模擬後，規劃進 廠日早於 RLD 之航 機最多架數	---	5	---	4	---	3
50 次模擬後，規劃進 廠日早於 RLD 達 1 架以上之模擬次數	---	48	---	37	---	25
50 次模擬後，規劃進 廠日早於 RLD 達 2 架以上之模擬次數	---	18	---	17	---	8
50 次模擬後，規劃進 廠日早於 RLD 達 3 架以上之模擬次數	---	7	---	7	---	2
50 次模擬後，規劃進 廠日早於 RLD 達 4 架以上之模擬次數	---	2	---	1	---	0
安排 0~1 組停機維 護人力之平均日數	---	33.5	---	35	---	36.1
模擬 50 次人工調整 平均目標值	---	114.607082	---	116.952742	---	117.200609
模擬 50 次人工調整 平均維護時距使用 率	---	97.78%	---	98.03%	---	98.15%

*： LMSYA_SM 之初始規劃最佳目標值 (1) 係由啟發解求得，其中在求解各子問題上，CPLEX 的收斂誤差設為 0，即皆求得最佳解。至於 Yan 等人^[8] 模式及顏上堯等人^[9] 模式皆求得最佳解。

**： RLD 設定為可以申請展延寬維護時距之最小維護時距使用率 (= 90%) 所轉換之規劃日。

---： 表中欄位註記“---”者，表示該欄位無此項數據。

長期排程作業 (需 1 組)、A/B Check 中期排程作業 (需保留 1 組)、持續維護中的自有或契約客戶機業務 (各需 1 組)。此外,在加班及輪休限制下,增加臨時維護業務必須再考量每日最多容許 1 組常態維護人力加班 4 小時,及剩餘機庫可能有適用的機型限制。因此,本研究參考顏上堯等人^[9]評估在儘量不加班原則下,當某日已規劃 0 組或 1 組常態人力執行長期排程之維護時,於中期排程規劃承接臨時客戶機維護業務較具可行性。由表 3 可看出,在 LMSYA_SM、顏上堯等人^[9]模式及 Yan 等人^[8]模式之模擬結果中,需求 0 組或 1 組常態維護人力的之平均日數,分別為 36.1 日、35 日及 33.5 日。因此,在有較多維護能量餘裕來承接臨時客戶機維護業務之優劣比較上,LMSYA_SM > 顏上堯等人^[9]模式 > Yan 等人^[8]模式,顯示本研究 LMSYA_SM 較能規劃具餘裕人力的航機維護排程。

(3) 進廠日及機庫指派差異分析

由 LMSYA_SM 初始規劃與模擬 50 次人工調整後之排程結果做差異比較後發現,自有及契約客戶航機在原規劃進廠日、機庫及二者均有更新指派的數量上,分別為 48 架及 8 架、12 架及 3 架、10 架及 3 架,人工調整後排程共延後 106 天及提前 31 天,合計延後 75 天;顏上堯等人^[9]模式則分別為 50 架及 8 架、34 架及 5 架、33 架及 5 架、人工調整後排程共延後 396 天及提前 31 天,合計延後 365 天;Yan 等人^[8]模式則分別為 45 架及 8 架、31 架及 4 架、28 架及 4 架,人工調整後排程共延後 24 天及提前 31 天,合計提前 7 天。分析上述之排程差異原因如下:由於顏上堯等人^[9]在初始規劃時採用最晚進廠日提前之緩衝作法,且部份規劃進廠日又於人工調整時可延後至預估到期日,導致其排程更新的數量自然較多,因此其他二模式無法直接與顏上堯等人^[9]模式比較,而只比較進廠時窗設定相同之 LMSYA_SM 及 Yan 等人^[8]模式。至於 LMSYA_SM 雖在初始規劃進廠日更新的指派數量較 Yan 等人^[8]模式稍多,然而在機庫更新的指派數量、進廠日及機庫均更新的指派數量 2 項均大幅減少。此外,在經模擬 50 次人工調整後, LMSYA_SM 在人工調整後的排程共可延後 75 天,而 Yan 等人^[8]模式則為提前 7 天,二者對目標值分別造成正反面影響,顯示 LMSYA_SM 規劃解較能配合受隨機擾動後的人工調整作業。

綜合上述 3 模式的比較分析結果,在模擬營運過程人工調整結果上,不論是外部解或是在內部解方面,均顯示本研究 LMSYA_SM 在營運過程績效最佳。

5.3 敏感度／方案分析

為觀察 LMSYA_SM 模式中數項重要參數值的變化對目標值的影響,本研究進行敏感度測試與分析。此外,本研究亦針對擴大機隊維護規模進行方案分析,以提供業者做長期規劃決策時之參考。

1. 敏感度分析

(1) 每日常態維護人力組數限制

由圖 4 可以看出,隨著每日人力組數上限由 3 組增加至 4 組,目標值由 116.906387 增加至 117.016263,增加 0.09%。且在第 4 組以後,目標值已不再隨人力增加而提高,皆為

固定值 117.016263，顯示目標值已受限於其他資源或條件。此結果亦顯示，以機隊規模相對於維護能量而言，超逾 4 組人力即屬多餘的人力資源。

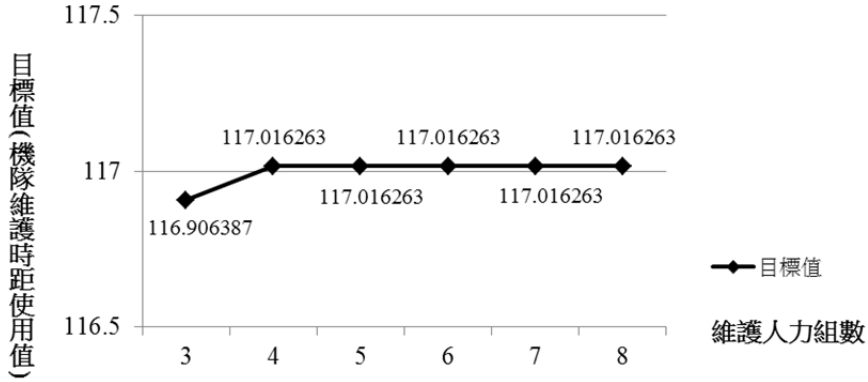


圖 4 每日常態維護人力組數變化對目標值影響

(2) 航機權重

本研究模式的目標函數為最大化，在最佳化求解過程時，會優先指派權重較大之航機。顏上堯等人^[9]曾提及機隊中機型加權值對目標值的影響，744/74Y 約為 744/74Y 以外之各機型的影響總和之 8 倍，單機影響則超逾 3.5 倍。因此，本研究針對機隊中之 744/74Y 型航機權重進行敏感度分析。由圖 5 顯示，隨著 744/74Y 機型航機權重值增加，LMSYA_SM 目標值亦隨著穩定增加，且 744/74Y 機型航機的指派不論在進廠日或機庫均有改變，此結果可供決策者設定航機權重時之參考。

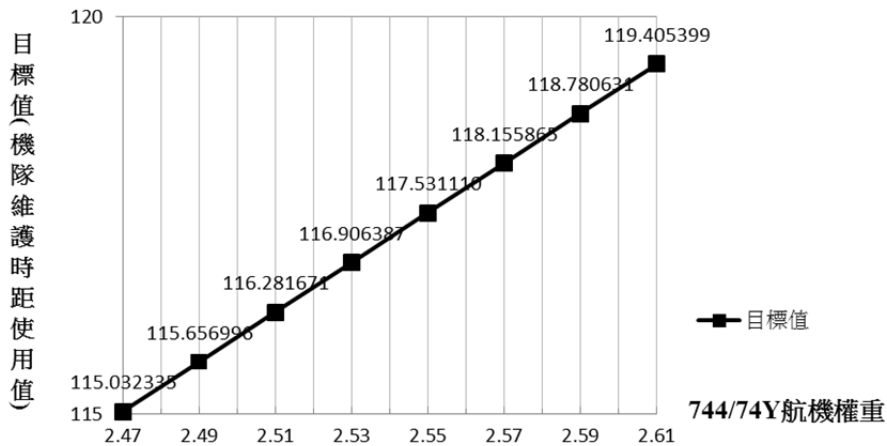


圖 5 744/74Y 系列航機權重值變化對目標值影響

(3) 每日自有同型航機停機維護架數限制

由圖 6 可以看出，隨著限制架數由原規劃 1 架增加至 2 架，目標值由 116.906387 增加至 117.327515，可增加 0.36%。且在增至 2 架以後，目標值已不再隨同型航機限制架數增加而提高，均為固定值 117.327515。換言之，以範例上維護規模來看，超逾 2 架應屬限制過鬆，目標值已受限於其他資源或條件，亦即若每日同型機限制架數增加至 3 架（含）以上，不但無法提高目標值，反而會對飛航營運造成負面影響。

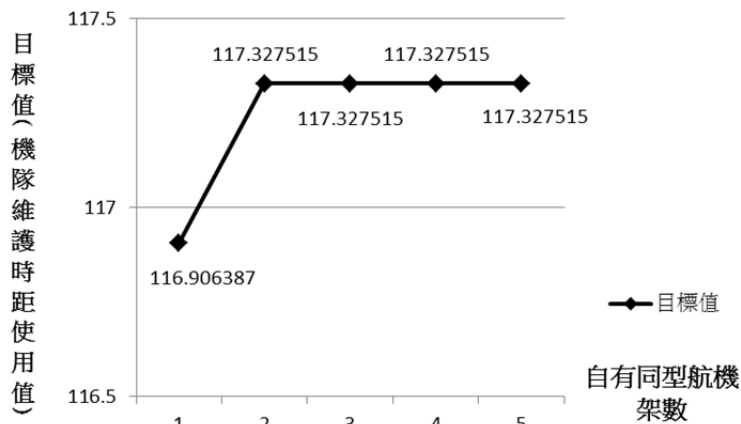


圖 6 每日自有同型航機停機架數限制變化對目標值影響

2. 方案分析

由於維護工廠之維護能量有限制，因此不同機型可容許增加的維護數量會有不同的變化。為避免新增自有航機維護業務影響其他已進行中的維護工作，有必要確認現有的維護能量餘裕尚能承接何種型態的維護業務，以作為未來採購新機或新增契約客戶機維護業務之參考。為簡化測試，本研究僅以自有機隊中對目標值加權的影響最大之 744 (客機)/74Y (貨機) 機型進行方案分析，並設定新增維護航機之參數資料與同機型之航機相同。值得一提的是，為避免因同型機限制而限縮航機架數規模，本研究在設定各同型機之上次完工日期時，均恰好錯開其維護時間間隔，以取得預估可增加維護之最多架數。本研究分別就自有之 744 客機以飛時計算到期日者 (以下簡稱 744 飛時客機)、74Y 貨機以飛時計算到期日者 (以下簡稱 74Y 飛時貨機)、744 客機以日曆天計算到期日者 (以下簡稱 744 日曆客機)、74Y 貨機以日曆天計算到期日者 (以下簡稱 74Y 日曆貨機) 4 種機型，再依全客機、客貨機混合及全貨機 3 種型態之擴大維護規模方案，進行分析，結果如表 4、表 5 及表 6 所示 (表中符號「---」代表無解)，並如下說明：

(1) 若設定增加的維護數量全為客機 (744 飛時客機或 744 日曆客機) 型態

由表 4 可以看出 2 種機型之組合結果，當增加之架數全屬 744 飛時客機機型時，最多僅達 2 架 (增加至第 3 架以後模式無解)；而全屬 744 日曆客機機型，則至多可增加 12 架

(增加至第 13 架以後模式無解)。由此可知，744 飛時客機的限制較 744 日曆客機為緊。

(2) 若設定增加的維護數量為客機 (744 飛時客機或 744 日曆客機) 及貨機 (74Y 飛時貨機或 74Y 日曆貨機) 之組合型態

由表 5 可以看出 4 種機型之組合結果：方案 6~21 屬 74Y 飛時貨機與 744 日曆客機組合之型態，當 74Y 飛時貨機由 1 架逐漸增加至 16 架 (增加至第 17 架以後模式無解) 時，744 日曆客機則由至多可增加 10 架降到至多 2 架。至於方案 23 屬 744 飛時客機與 74Y 飛時貨機與 74Y 日曆貨機組合之型態，當 744 飛時客機增加 1 架與 74Y 飛時貨機增加 1 架時，74Y 日曆貨機至多可增加 6 架。方案 24 同方案 23 之組合型態，當 744 飛時客機增加達 2 架 (增加至第 3 架以後模式無解) 與 74Y 飛時貨機增加 1 架時，74Y 日曆貨機至多可增加 1 架。由此可看出，提高 744 飛時客機的維護增加量，會令 74Y 飛時貨機及 74Y 日曆貨機 2 種組合的維護增加量均大幅縮減。

表 4 744 (全客機) 維護規模擴大方案

方案	增加各機型客機之維護架數組合		合計最多可增加架數	備註
	744 飛時客機架數 (以飛時計之機型)	744 日曆客機架數 (以日曆天計之機型)		
1	0	至多 12 架	12	有解
2	---	13	---	無解
3	1	至多 5 架	6	有解
4	2	至多 3 架	5	有解
5	3	---	---	無解

註：欄位中“---”表示測試結果為無解。

表 5 744/74Y (客貨機組合) 維護規模擴大方案

方案	增加各機型(客機+貨機)之維護架數組合				合計最多可增加架數	備註
	744 飛時客機架數	74Y 飛時貨機架數	744 日曆客機架數	74Y 日曆貨機架數		
6	0	1	至多 10 架	0	11	有解
7	0	2	至多 10 架	0	12	有解
8	0	3	至多 10 架	0	13	有解
9	0	4	至多 10 架	0	14	有解
10	0	5	至多 10 架	0	15	有解
11	0	6	至多 10 架	0	16	有解
12	0	7	至多 9 架	0	16	有解
13	0	8	至多 8 架	0	16	有解
14	0	9	至多 7 架	0	16	有解
15	0	10	至多 6 架	0	16	有解

表 5 744/74Y (客貨機組合) 維護規模擴大方案 (續)

方案	增加各機型(客機+貨機)之維護架數組合				合計最多可增加架數	備註
	744 飛時客機架數	74Y 飛時貨機架數	744 日曆客機架數	74Y 日曆貨機架數		
16	0	11	至多 6 架	0	17	有解
17	0	12	至多 6 架	0	18	有解
18	0	13	至多 6 架	0	19	有解
19	0	14	至多 5 架	0	19	有解
20	0	15	至多 4 架	0	19	有解
21	0	16	至多 2 架	0	18	有解
22	0	17	---	---	---	無解
23	1	1	0	至多 6 架	8	有解
24	2	1	0	1	4	有解
25	2	2	---	---	---	無解

註：欄位中“---”表示測試結果為無解。

(3) 若設定增加的維護數量全為貨機 (74Y 飛時貨機或 74Y 日曆貨機) 型態

由表 6 中方案 26~42 可以看出 2 種機型之組合結果：當 74Y 飛時貨機由 1 架至 16 架 (增加至第 17 架以後模式無解) 時，74Y 日曆貨機由至多 11 架降至 0 架。由此可看出，74Y 日曆貨機之增加維護數量限制較 74Y 飛時貨機稍緊。

綜上分析，自有航機中之 744 客機 (以飛時計算到期日者) 對擴大維護規模較其他機型之影響度為大，本研究對此經深入分析人工調整過程的資料，發現因該機型之架數佔機隊的 1/5，且各航機間之進廠時窗重疊之情形較其他機型高出許多，而導致進廠日受同型機不可同時在庫維護之限制較緊，故對機隊排程指派結果產生較關鍵的影響。此等結果可供決策者於規劃維護業務時參考。

表 6 74Y (全貨機) 維護規模擴大方案

方案	增加維護架數之機型組合 (全貨機)		合計最多可增加架數	備註
	74Y 飛時貨機 (以飛時計之機型)	74Y 日曆貨機 (以日曆天計之機型)		
26	0	至多 11 架	11	有解
27	1	至多 9 架	10	有解
28	2	至多 9 架	11	有解
29	3	至多 9 架	12	有解
30	4	至多 8 架	12	有解
31	5	至多 7 架	12	有解

表 6 74Y (全貨機) 維護規模擴大方案 (續)

方案	增加維護架數之機型組合 (全貨機)		合計最多 可增加架數	備註
	74Y 飛時貨機 (以飛時計之機型)	74Y 日曆貨機 (以日曆天計之機型)		
32	6	至多 7 架	13	有解
33	7	至多 3 架	10	有解
34	8	至多 4 架	12	有解
35	9	至多 4 架	13	有解
36	10	至多 4 架	14	有解
37	11	至多 4 架	15	有解
38	12	至多 2 架	14	有解
39	13	1 架	14	有解
40	14	1 架	15	有解
41	15	1 架	16	有解
42	16	0	16	有解
43	17	---	---	無解

註：欄位中“---”表示測試結果為無解。

六、結論與建議

本研究基於航機維護工廠業者之立場，考量實務上隨機進廠及維護時間，延伸、改良顏上堯等人^[9]的模式，建構一隨機進廠及維護時間下航機年度維護排程的調整模式 (LMSYA_SM)。在數學上，LMSYA_SM 可定式為一零壹整數規劃問題，以 F 廠實務維護資料而言 (包括 60 架航機 (共 6 種機型) 及 5 座機庫)，測試問題的規模甚大，最多達 3,191,000 個決策變數及 222,550 條限制式。為有效率地求解如此大型的實務問題，本研究應用風險規避的觀念，在受不同隨機事件擾動後之指派結果中，選擇重複出現機率以符合設定標準者之技巧，並結合 CPLEX 數學規劃軟體發展一啟發解法。此外，本研究模擬初始規劃解在營運階段受隨機擾動情形與人工調整過程，發展一模擬評估方法，以適當地評估隨機性與確定性規劃模式的求解結果在實際營運的績效。

為展示及評估 LMSYA_SM 的實用績效，本研究以 F 廠的實際維護資料為例，進行範例測試與分析。結果顯示針對大型實務的問題，本研究啟發解法可以在一合理的時間 (少於 70 分鐘) 內求解 LMSYA_SM，且最大誤差在 0.02% 以下，顯示啟發解效果良好。本研究並比較 LMSYA_SM、顏上堯等人^[9] 模式及 Yan 等人^[8] 模式的模擬營運績效，結果顯示，在外部解方面，以平均目標值與機隊平均維護時距使用率而言，LMSYA_SM (117.200609 與 98.15%) > 顏上堯等人^[9] 模式 (116.952742 與 98.03%) > Yan 等人^[8] 模式 (114.607082 與 97.78%)，顯示 LMSYA_SM 對於航空公司營運績效具有較佳之助益。另外，以每次人工調

整平均所需要的時間而言，LMSYA_SM (<50 分鐘)<顏上堯等人^[9] 模式 (<60 分鐘)<Yan 等人^[8] 模式 (120~240 分鐘)，顯示 LMSYA_SM 的規劃解較彈性及穩健，可有效地改善人工調整的效率。在內部解方面，以機隊維護的可靠度而言 (依規劃進廠日不早於 RLD 之平均架數等各項數據比較結果)，LMSYA_SM>顏上堯等人^[9] 模式>Yan 等人^[8] 模式；以維護能量餘裕能力而言 (指在維護能量餘裕之 0 組/1 組常態維護人力的之平均日數)，LMSYA_SM(36.1 日)>顏上堯等人^[9] 模式 (35 日)>Yan 等人^[8] 模式 (33.5 日)，亦顯示 LMSYA_SM 較能規劃具餘裕人力的排程。由此等結果顯示，不論是外部解或內部解，LMSYA_SM 所調整的長期排程，能使營運過程的實務人工調整運作更有效率且更穩健，並能減少航機壽限內的維護次數及增加營運可飛行時數，使航空公司整體營運獲得更佳的績效。

本研究亦針對 LMSYA_SM 模式中 3 項重要參數進行敏感度分析，結果顯示現況下超過 4 組人力即屬人力資源浪費，每日同型機限制架數超過 2 架即無法再提升維護時距使用率。另外，本研究針對自有機隊之 744 客機與 74Y 貨機各機型進行方案分析，結果發現 744 客機 (以飛時計算到期日者) 對擴大維護規模較其他機型之影響度為大。此等結果皆可提供決策者於規劃維護業務時之參考。綜合上述，本研究隨機模式較二確定性模式為佳，可為一穩健且有效的規劃工具，以輔助航機維護工廠業者在面臨實際營運中的隨機航機進廠及維護時間上，每年有效地重新調整航機進廠維護排程。最後，雖然本研究初步的測試結果顯示 LMSYA_SM 及啟發解法可運用在未來營運實務中，但在應用前，決策者宜對 LMSYA_SM 及啟發解法進行更多的測試，以瞭解其使用的特性及限制。

參考文獻

1. 吳國賓，「航機高階維護最佳化模組之開發」，國立成功大學航空太空工程學系碩士論文，民國 93 年。
2. 劉世德，「航空機隊維護計畫預測與排程規劃」，私立元智大學工業工程管理學系碩士論文，民國 91 年。
3. 交通部民用航空局，「01-01A 民用航空法/法令規範及手冊指引/民用航空法規彙編第 1 冊」，<http://www.caa.gov.tw/>，民國 101 年。
4. Tedone, M. and Gray, D. A., "Decision Support for Aircraft Overhaul Maintenance Planning", Proceedings of the 31st AGIFORS Symposium, AGIFORS, 1991, pp. 205-218.
5. 顏上堯、陳俊穎、袁瑞霞，「航機維護廠中期維護停機排程最佳化模式之研究」，運輸學刊，第 19 卷，第 2 期，民國 96 年，頁 121- 140。
6. Radhika, S., "Strategic Planning and Scheduling of Aircraft Heavy Maintenance at Delta Airlines", Proceedings of the 33rd AGIFORS Symposium, AGIFORS, 1993, pp. 151-168.
7. 陳俊汝，「機隊維護排程最佳化之研究」，國立成功大學航空太空工程學系碩士論文，民

國 92 年。

8. Yan, S., Chen, C. Y., and Yuan, J. H., “Long-term Aircraft Maintenance Scheduling for an Aircraft Maintenance Center: A Case Study”, *International Journal of Applied Management Science*, Vol. 1, No. 2, 2008, pp. 143-159.
9. 顏上堯、郭俊志、蕭妃晏，「航機維護工廠年度停機排程調整最佳化模式之研究」，**運輸計劃季刊**，第 41 卷，第 3 期，民國 101 年，頁 309 -342。
10. Yan, S., Tang, C. H., and Fu, T. C., “An Airline Scheduling Model and Solution Algorithms under Stochastic Demands”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, 2008, pp. 22-39.
11. 楊大輝、李綺容，「需求變動下之航空貨運網路規劃」，**運輸學刊**，第 19 卷，第 2 期，民國 96 年，頁 169-190。
12. Yan, S., Chen, C. H., and Chen, C. K., “Short-term Manpower Supplying under Stochastic Demands for Air Cargo Terminals”, *Transportation*, Vol. 35, No. 3, 2008, pp. 425-444.
13. Yan, S. and Tang, C. H., “A Heuristic Approach for Airport Gate Assignments for Stochastic Flight Delays”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 180, Issue 2, 2007, pp. 547-567.
14. 林益生，「隨機環境下多商品、多車種派車問題之研究」，中原大學工業工程研究所碩士論文，民國 87 年。
15. 唐存寬，「在顧客需求為隨機之假設下多種貨品儲運分配系統設計」，國防管理學院資源管理研究所碩士論文，民國 88 年。
16. Kenyon, A. and Morton, D. P., “Stochastic Vehicle Routing with Random Travel Times”, *Transportation Science*, No. 37, 2001, pp. 69-82.
17. Yan, S., Lin, H. C., and Jiang, X. Y., “A Planning Model with a Solution Algorithm for Ready Mixed Concrete Production and Truck Dispatching under Stochastic Travel Times”, *Engineering Optimization*, Vol. 44, Iss.4, 2012, pp. 427-447.
18. 交通部民用航空局，交通部民用航空局網站，「維護計畫管理 (編號：AC120-17) /民航通告/法令規範及手冊指引」，<http://www.caa.gov.tw/>，民國 101 年。
19. 顏上堯、陳玉菁，「純檢修資格航機維護人力供給模式之建立」，**運輸計劃季刊**，第 31 卷，第 4 期，民國 91 年，頁 817-829。
20. 郭俊志，「隨機進廠及維護時間下航機年度維護排程調整最佳化模式目標懲罰值之研究」，國立中央大學土木工程學系博士論文工作報告，民國 101 年。
21. Birge, J. R. and Louveaux, F., *Introduction to Stochastic Programming*, Springer-Verlag, New York, 1996.

附 錄

附表 1 相關參數的設定值及數值範圍 (自有航機_飛時計算)

程式所需參數輸入值												參數調整欄					
編號	機型	航機權重	剩餘飛時	維護時距	日平均飛時	剩餘飛時換算日曆天	上次維護完成日	維護時間	最早進廠日	最晚進廠日	進廠日最大提前天數	增維護次數懲罰加權	預估到期日	計算基準日	年度開始日	最小維護時距使用率	最大維護時距使用率
1	744	2.53	5000	5000	15.0	333	3572	47	153	255	10	0.0030	255	3470	3650	69.5%	100%
2	744	2.53	4250	5000	15.0	283	3420	12	1	103	10	0.0030	103	3470	3650	69.5%	100%
3	744	2.53	5000	5000	15.0	333	3476	12	57	159	10	0.0030	159	3470	3650	69.5%	100%
4	744	2.53	5000	5000	15.0	333	3523	12	104	206	10	0.0030	206	3470	3650	69.5%	100%
5	744	2.53	5000	5000	15.0	333	3541	12	122	224	10	0.0030	224	3470	3650	69.5%	100%
6	744	2.53	7500	7500	15.0	500	3485	14	183	335	22	0.0020	335	3470	3650	69.5%	100%
7	744	2.53	6380	7500	16.0	399	3400	8	76	219	20	0.0021	219	3470	3650	69.5%	100%
8	744	2.53	6460	7500	16.0	404	3405	8	81	224	20	0.0021	224	3470	3650	69.5%	100%
9	744	2.53	6924	7500	16.0	433	3434	8	110	253	20	0.0021	253	3470	3650	69.5%	100%
10	744	2.53	6620	7500	16.0	414	3415	8	91	234	20	0.0021	234	3470	3650	69.5%	100%
11	744	2.53	5000	5000	13.5	370	3484	15	91	204	12	0.0027	204	3470	3650	69.5%	100%
12	74Y	2.53	7500	7500	15.0	500	3515	9	213	365	22	0.0020	365	3470	3650	69.5%	100%
13	74Y	2.53	7500	7500	15.0	500	3502	7	200	352	22	0.0020	352	3470	3650	69.5%	100%
14	74Y	2.53	6750	7500	15.0	450	3420	9	118	270	22	0.0020	270	3470	3650	69.5%	100%
15	74Y	2.53	6435	7500	15.0	429	3399	9	97	249	22	0.0020	249	3470	3650	69.5%	100%
16	74Y	2.53	5640	7500	15.0	376	3346	9	44	196	22	0.0020	196	3470	3650	69.5%	100%
17	74Y	2.53	7440	7500	15.0	496	3466	12	164	316	22	0.0020	316	3470	3650	69.5%	100%
18	74Y	2.53	5790	7500	15.0	386	3356	12	54	206	22	0.0020	206	3470	3650	69.5%	100%
19	74Y	2.53	6030	7500	15.0	402	3372	8	70	222	22	0.0020	222	3470	3650	69.5%	100%
20	74Y	2.53	6525	7500	15.0	435	3405	8	103	255	22	0.0020	255	3470	3650	69.5%	100%
21	74Y	2.53	7335	7500	15.0	489	3459	7	157	309	22	0.0020	309	3470	3650	69.5%	100%
22	74Y	2.53	6945	7500	15.0	463	3433	7	131	283	22	0.0020	283	3470	3650	69.5%	100%
23	74Y	2.53	7500	7500	15.0	500	3504	7	202	354	22	0.0020	354	3470	3650	69.5%	100%

附表 2 相關參數的設定值及數值範圍 (自有航機_日曆天計算)

程式所需參數輸入值										參數調整欄				
編號	機型	航機權重	維護時距(日)	上次維護完成日	最早進廠日	最晚進廠日	維護時間	進廠日最大提前天數	增維護次數懲罰加權	預估到期日	計算基準日	年度開始日	最小維護時距使用率	最大維護時距使用率
24	744	2.53	548	3414	145	312	14	26	0.0018	312	3470	3650	69.5%	100%
25	744	2.53	548	3457	188	355	12	26	0.0018	355	3470	3650	69.5%	100%
26	744	2.53	549	3366	98	265	12	26	0.0018	265	3470	3650	69.5%	100%
27	74Y	2.53	531	3300	19	181	30	24	0.0019	181	3470	3650	69.5%	100%
28	74Y	2.53	500	3258	1	108	30	21	0.0020	108	3470	3650	69.5%	100%
29	74Y	2.53	546	3297	26	193	12	25	0.0018	193	3470	3650	69.5%	100%
30	74Y	2.53	549	3150	1	49	9	26	0.0018	49	3470	3650	69.5%	100%
31	333	1.67	549	3164	1	63	7	26	0.0018	63	3470	3650	69.5%	100%
32	333	1.67	547	3263	1	160	7	26	0.0018	160	3470	3650	69.5%	100%
33	333	1.67	548	3453	184	351	7	26	0.0018	351	3470	3650	69.5%	100%
34	333	1.67	549	3466	198	365	7	26	0.0018	365	3470	3650	69.5%	100%
35	AB6	1.72	457	3499	167	306	37	18	0.0022	306	3470	3650	69.5%	100%
36	AB6	1.72	457	3236	1	43	15	18	0.0022	43	3470	3650	69.5%	100%
37	738	1	364	3432	35	146	13	11	0.0027	146	3470	3650	69.5%	100%
38	738	1	365	3515	119	230	13	11	0.0027	230	3470	3650	69.5%	100%
39	738	1	365	3532	136	247	13	11	0.0027	247	3470	3650	69.5%	100%
40	738	1	365	3566	170	281	8	11	0.0027	281	3470	3650	69.5%	100%
41	738	1	365	3593	197	308	8	11	0.0027	308	3470	3650	69.5%	100%
42	738	1	365	3420	24	135	8	11	0.0027	135	3470	3650	69.5%	100%
43	738	1	365	3414	18	129	6	11	0.0027	129	3470	3650	69.5%	100%
44	738	1	365	3558	162	273	8	11	0.0027	273	3470	3650	69.5%	100%
45	738	1	365	3465	69	180	9	11	0.0027	180	3470	3650	69.5%	100%
46	738	1	365	3472	76	187	9	11	0.0027	187	3470	3650	69.5%	100%
47	738	1	365	3383	1	98	6	11	0.0027	98	3470	3650	69.5%	100%
48	738	1	365	3617	221	332	7	11	0.0027	332	3470	3650	69.5%	100%
49	343	1.66	455	3291	1	96	27	18	0.0022	96	3470	3650	69.5%	100%
50	343	1.66	455	3301	1	106	27	18	0.0022	106	3470	3650	69.5%	100%
51	343	1.66	455	3311	1	116	27	18	0.0022	116	3470	3650	69.5%	100%
52	343	1.66	457	3352	20	159	27	18	0.0022	159	3470	3650	69.5%	100%

附表 3 相關參數的設定值及數值範圍 (契約客戶航機_日曆天計算)

程式所需參數輸入值										參數調整欄				
編號	機型	航機權重	維護時距(日)	上次維護完成日	最早進廠日	最晚進廠日	維護時間	進廠日最大提前天數	增維護次數懲罰加權	預估到期日	計算基準日	年度開始日	最小維護時距使用率	最大維護時距使用率
53	744	2.53	540	3345	70	235	27	25	0.0019	235	3470	3650	69.5%	100%
54	74Y	2.53	540	3405	130	295	8	25	0.0019	295	3470	3650	69.5%	100%
55	AB6	1.72	450	3305	1	105	5	17	0.0022	105	3470	3650	69.5%	100%
56	AB6	1.72	450	3222	1	22	41	17	0.0022	22	3470	3650	69.5%	100%
57	AB6	1.72	450	3229	1	29	34	17	0.0022	29	3470	3650	69.5%	100%
58	AB6	1.72	450	3286	1	86	47	17	0.0022	86	3470	3650	69.5%	100%
59	343	1.66	450	3356	19	156	27	17	0.0022	156	3470	3650	69.5%	100%
60	343	1.66	450	3528	191	328	47	17	0.0022	328	3470	3650	69.5%	100%

附表 4 本研究隨機規劃排程年度調整模式 (LMSYA_SM) 之初始規劃排程

初始最佳化規劃排程								
自有航機以飛時管制			自有航機以日曆天管制			契約客戶航機以日曆天管制		
機號	進廠日	指派機庫	機號	進廠日	指派機庫	機號	進廠日	指派機庫
1	254	2	24	311	2	53	234	4
2	102	2	25	352	5	54	294	4
3	159	2	26	234	2	55	97	2
4	186	2	27	129	2	56	21	2
5	198	2	28	67	4	57	29	3
6	333	4	29	184	5	58	86	3
7	218	2	30	49	4	59	133	3
8	210	2	31	62	5	60	327	3
9	246	2	32	160	3	契約客戶航機以日曆天管制者， 為編號 53~60，共 8 架。		
10	226	2	33	345	5			
11	171	2	34	364	2			
12	364	4	35	306	5			
13	347	4	36	34	5			
14	266	5	37	144	5			
15	241	5	38	190	3			
16	196	5	39	228	5			
17	315	4	40	275	5			
18	206	5	41	303	2			
19	220	5	42	115	2			
20	250	5	43	123	2			
21	308	4	44	258	5			
22	283	5	45	172	3			
23	354	2	46	181	3			
自有航機以飛時管制者， 為編號 1~23，共 23 架。			47	80	5			
			48	326	2			
			49	89	5			
			50	62	2			
			51	116	5			
			52	157	5			
						自有航機以日曆天管制者， 為編號 24~52，共 29 架。		

