

混合確定與隨機需求下捷運車廂檢修 長期人力供給規劃之研究¹

THE MIXED DETERMINISTIC AND STOCHASTIC DEMAND MODELS FOR MASS RAPID TRANSIT CARRIAGE MAINTENANCE SHIFT SETTING AND MANPOWER SUPPLY PLANNING IN LONG-TERM OPERATIONS

顏上堯 Shangyao Yan²
陳佳宏 Chia-Hung Chen³
葉宗昇 Tsung-Sheng Yeh⁴

(95 年 10 月 25 日收稿，95 年 12 月 25 日第一次修改，97 年 2 月 25 日定稿)

摘 要

本研究以捷運檢修工廠之立場，考量實際營運時人力需求之隨機變動及人力資源的彈性管理策略，針對長期規劃上不同之限制條件，發展兩個混合確定與隨機需求之人力供給排班模式。此等模式皆可定式為混合整數規劃問題，屬 NP-hard 問題，因此本研究利用問題分解策略，並結合 CPLEX 數學規劃軟體，發展啟發解法，以有效的求解模式。此外，為評估實務作法與混合需求隨機性排班模式在隨機環境中之績效，本研究另發展一模擬評估方法。最後為測試本研究模式與求解方法的實用績效，本研究以國內一捷運檢修工廠為例，進行範例測試與分析，結果甚佳，顯示本研究所構建之模式與求解方法應可為未來實

-
1. 本研究承行政院國家科學委員會專題研究補助 (計畫編號：NSC-95-2211-E-008-164)，特此致謝。
 2. 國立中央大學講座教授 (聯絡地址：32001 桃園縣中壢市中大路 300 號中央大學土木工程學系；聯絡電話：03-4227151 分機：34141；E-mail：t320002@cc.ncu.edu.tw)。
 3. 樹德科技大學運籌管理學系助理教授。
 4. 國立中央大學土木工程學系碩士。

務捷運車廂維修人力供給規劃之參考。

關鍵詞：捷運車廂檢修；人力供給；隨機需求；混合整數規劃問題；啟發解法

ABSTRACT

In this research, based on the MRT plant perspective we develop two mixed deterministic and stochastic demand manpower supply planning models for MRT plant long-term operations. These models are formulated as mixed integer programs that are characterized as NP-hard. We employ problem decomposition techniques, coupled with a CPLEX mathematical programming solver, to develop heuristics that can efficiently solve the problems. To evaluate the models and the method used in current practice in actual operations, we develop a simulation-based evaluation method as well. Finally, we perform a case study using real operating data from a Taiwan MRT maintenance plant. The preliminary results are good, showing that the models could be useful for planning carriage maintenance manpower supply.

Key Words: Carriage maintenance; Manpower supply; Stochastic demands; Mixed integer program; Heuristic

一、緒 論

隨著臺北捷運通車以來，平均日運量達百萬人次，在如此繁忙的營運上，如何確保運行之安全，則顯得格外重要。其中，捷運車廂的檢修，對捷運的行駛安全與可使用列車數有直接的影響。良好的捷運車廂維修計畫能在有限的時間內正確無誤地完成修護工作，確保捷運能安全地行駛，更可維持營運的順暢。因此，如何適時地安排車廂進廠檢修，維修人力的供給規劃扮演著關鍵的角色。

一般捷運公司於維修人力供給規劃上，可依據規劃時程分為長期與短期規劃。就長期規劃而言，人力供給可根據公司營運狀況進行適當的調整，並可依據公司未來之營運目標決定人員規模，在人力的供給上較具彈性。而就短期規劃而言，人力供給則以公司現有的人力規模為基礎進行下個週期之規劃，因此短期規劃能提供的人力有限，必須考量人力供給的上限問題。此外，短期之維修人力供給規劃除需考量公司現階段之營運狀況外，亦需考量長期之維修人力供給規劃的結果。因此，一良好之長期維修人力供給規劃除可幫助捷運公司達成其營運目標外，更可提供短期維修人力供給規劃時之參考，進而有效提升公司營運的績效。

目前捷運公司於車廂維修方面分為預防檢修與故障檢修兩部門，預防檢修負責捷運車廂的日檢、雙週檢、月檢、半年檢、年檢與三年檢等定期檢修；故障檢修則為車廂發生故障時之臨時修護作業。因此，故障檢修容易受到突發事件之干擾，導致需求量呈不穩定的

變動。然目前國內實務的人力排班方式上，乃根據排班人員經驗，並依照平均的車廂維修需求，分兩部門進行維修人力排班。其中預防檢修與故障檢修每日分別固定 3 個與 2 個值勤開始時點數，且各值勤時點之班次的工作時數皆為 8 小時，每修護單位皆為 6 人一小班⁵。此種排班方式缺乏彈性，可能導致所制定的修護人力供給，無法配合實際所需的檢修需求，而造成供需不均衡的現象。另外，不同的故障與各級的定期修護項目之工作內容所需的修護人力與工作時數並不相同，而固定值勤開始時點數與工作時數下所制定的人力班次表則缺乏彈性，可能無法有效地配合檢修需求。綜合而言，目前捷運公司的作法同時缺乏考量故障檢修需求的不確定性以及人力資源的彈性化安排，容易造成人力的浪費或不足，此不僅增加營運成本，更降低整體維修人力工作績效。因此我們若能考量隨機需求發展一檢修人力供給規劃模式，則除可有效的運用人力資源外，更可以解決隨機需求擾動之問題，有效地幫助捷運公司規劃未來之人力供給。

綜合上述，本研究以總人力供給成本最小化為目標，除同時考量確定性之預防檢修需求及隨機性之故障檢修需求外，並結合彈性的人力資源與捷運公司未來之營運政策，加入隨機規劃 (stochastic programming) 的觀點，構建符合實際營運的長期混合需求隨機性排班模式，以期幫助業者有效規劃維修人力排程與班次表。上述問題在以往的捷運維修人力排程問題研究中，皆未發現有類似的探討。此外，由於此等模式為線性混合整數規劃問題，屬 NP-hard 問題。在求解上，問題規模會隨著隨機事件數的增多而增加，求解將愈不易，難以在有限的時間內求得最佳解。因此，本研究利用問題分解策略，配合數學規劃軟體，發展啟發解法以有效率地求解隨機模式。最後，為評估實務作法與混合需求隨機性模式在隨機環境中之績效，本研究亦發展一模擬評估方法。

為適當降低問題的複雜性，本研究針對實際營運時一般經常性發生的需求擾動因素進行探討，但對於其他較不常發生但擾動程度較嚴重或擾動時間較長之意外事件 (如地震、員工罷工等) 等，一般難以在規劃中事先預留緩衝資源以解決 (因為如此將大幅的降低規劃解的品質)，而須在營運中進行調整，而此調整 (基於規劃解) 屬另一即時營運調整問題，與本研究的規劃問題不同，應屬本研究之下游問題，可為本研究後續之研究課題。另外，捷運公司維修人員的供給規劃主要分為三階段。第一階段：根據各捷運車廂預訂進行的各項檢修項目，計算出檢修計劃班表，並依此班表計算各天各時段的檢修人力需求。第二階段：檢修工廠根據第一階段之檢修計劃班表及人力需求，進行各值勤班次檢修人員的供給規劃。第三階段：根據檢修人員供給規劃的結果進行檢修人員指派。其中，第一階段的問題係統計資料並計算出檢修計劃班表及人力需求，問題簡單、易於處理。至於第二階段與第三階段則皆牽涉複雜的組合最佳化分析，目前尚無商用軟體或模式以輔助業者進行規劃。此外，由於第三階段之工作係依據第二階段之規劃結果進行人員指派，因此如何規劃一良好之人員供給規劃以輔助業者進行人員指派，實為一重要之課題，故本研究主要著重於第二階段進行研究。至於第三階段之人員指派問題屬本研究後續之問題，因此本研究

5. 傳統上，一值勤開始時點存在一班次，故值勤開始時點數即為班次數。

暫不納入考量。本文其餘內容如下：第二節回顧國內外相關文獻，第三節建立數學模式並發展適合之求解方法及模擬評估方法，第四節進行範例測試與結果分析，第五節提出結論與建議。

二、文獻回顧

雖然目前針對捷運修護人力的排班文獻不多，但捷運列車與其他領域的人員排班問題研究則頗多。因此，本節首先簡要回顧捷運列車排班之相關文獻，其次回顧人員排班與人力資源彈性制度等相關文獻，最後回顧隨機規劃之相關文獻，以為本研究之參考。

2.1 捷運列車排班相關文獻

目前關於捷運列車排班之相關研究，包括捷運車廂維修排程訂定、捷運列車運行時刻表、捷運系統站務人員及捷運司機人員排班等。其中，捷運司機人員與站務人員排班將於後續捷運人員排班文獻中回顧，而其他研究則簡介代表性的文獻如下：

在捷運車廂維修排程方面，Striskandarajah 等人^[1]針對香港捷運 (Hong Kong Transit Railway Corporation；MTRC) 在滿足機廠維修車輛的限制下，進行車廂重級維修排程規劃，並利用基因演算法 (genetic algorithm) 進行求解，求解效果良好。張仲銓^[2]曾針對臺北捷運之高運量維修機廠，進行捷運車廂預防檢修之排程規劃。該研究建立一個可行的車廂維修排程模式，並以基因演算法進行求解。研究結果發現在能兼顧成本及維修品質下，求出之排程結果所需要的成本確實較現行的人工排程為少。另外，在捷運列車排班方面，游雅惠^[3]以「臺北捷運淡水—新店線」為對象，運用變數產生法 (column generation method)，求解合適的列車運行時刻表，以改善列車排班的績效。

2.2 人員排班相關文獻

近年來學術上相關人員排班的研究相當多，研究的對象層面亦相當廣。人員排班問題中，不論是組員排班問題或人員指派問題，一般多定式為零壹整數或混合整數規劃問題。此外，由以往的研究中發現，人力資源彈性管理觀念對於人力排班上有相當的助益，因此，本研究於人員相關排班文獻中，將依不同產業特性、不同排班方式的人員排班問題以及人力資源彈性等三部分進行探討。

(一) 不同產業特性人員排班問題

Beasley 與 Cao^[4]考量人員排班依產業的不同，將導致不同的排班規則、特性及求解方法，故依產業特性將人員排班問題分為三大類：航空公司人員排班、大眾運輸人員排班以及一般人員排班。因航空公司人員排班與大眾運輸人員排班頗為類似，且較一般人員排班

複雜，因此本研究僅介紹航空公司與大眾運輸人員排班的相關代表文獻如下：

在航空公司人員排班方面，由於航空公司的航線、人員以及機隊的數量都相當龐大，因此一般求解此類人員排班問題大多以下列之步驟進行：首先，以某種方法產生許多較佳的可行排班組合 (pairing 或 rotation)，然後依據此等排班組合，配合各公司之排班規定與法規限制，將人員排班問題以數學規劃的方法轉換成一數學模式，並進行求解最佳之排班組合。之後，以此排班組合並配合公司的人員休假及其他排班考量，構建一數學模式，以求解人員之指派。過去相關此排班問題的研究頗多，以下介紹部分代表性文獻：例如 Langerman 與 Ehlers^[5] 利用遺傳演算法，配合先進先出的方法求解航空公司人員排班問題，並發展一專家系統且結合 Q-learning 演算法以幫助求解該問題。Lučić 與 Teodorovic^[6] 將航空人員指派問題定式為多目標最佳化問題 (multi-objective optimization problem)，並以兩階段式之求解架構求解該問題。Yan 與 Tu^[7] 以網路流動方式建構空服員基本排班網路模式及空服員混合排班策略網路模式，求解空服員之組員行程組合。Yan 與 Chang^[8] 針對駕駛員的組員排班問題，建立一集合涵蓋問題模式，求解駕駛員之組員行程組合。Yan 等人^[9] 針對空服員排班問題，考量多基地、多艙等、混合機種等因素，建立 8 個整數規劃模式，求解單一組員的行程組合。此外，類似於求解排班組合的研究，Yan 等人^[10] 針對國內一國際航空公司之航機修護部門的實際營運，構建數個修護人力供給模式，並發展一分解式啟發式演算法以求解模式，並經實例測試後，發現其求解效率及結果頗佳。Yan 等人^[11] 針對國內一航空倉儲業的營運現況，構建數個貨運收貨人員的人力供給模式，並經實例測試發現效果良好。

大眾運輸的人員排班問題包括捷運系統司機員與站務員、公車駕駛員、鐵路運輸司機員等排班問題。為節省篇幅，在此僅介紹與本研究較相關之捷運人員排班代表文獻，例如盧宗成^[12] 針對臺北捷運公司的司機員排班問題，建構一集合分割 (set partitioning) 模式，並運用變數產生法求解，以提升排班的效率。另外，蘇昭明與張靖^[13] 探討捷運系統站務人員的排班特性，並參考航空公司人員排班之兩階段求解步驟，運用數學規劃方法，構建排班模式，以求解捷運人員的指派問題。其中第一階段模式在決定站務人員之上班日與休假日，第二階段則是決定站務人員上班日之上班時段。此等模式可定式為整數規劃問題，該研究以 1 場站、3 個站務員、30 天的排班問題進行實例測試，並利用 LINDO 套裝軟體進行求解。

(二) 不同排班方式之人員排班問題

除依產業特性區分外，Morris 與 Showalter^[14] 根據排班方式將人員排班問題分為三大類：值勤班次排班問題 (shift scheduling problem)、休假排班問題 (days-off scheduling problem) 及休假值勤排班問題 (tour scheduling problem)。值勤班次排班問題主要在求解一天之內各值勤班次的人員排班結果，其規劃的長度多為一日，主要是將各工作人員指派至合適的值勤排班中，所求解的結果為各工作人員須在一天什麼時段 (或班次) 進行工作。一般而言，此類問題所須進行規劃的班次多為事先規劃好或是固定的方式。例如 Lau^[15]

考慮班次變動時對人員排班問題限制的影響，將傳統班次指派問題 (shift assignment problem, SAP) 重新定式為一變動班次指派問題 (changing shift assignment problem, CSAP)，並發展一貪婪式演算法 (greedy algorithm) 以求解問題。

至於休假排班問題，則主要在求解人員的休假安排，亦即安排各人員的工作及休假期。而休假值勤排班問題則為同時考慮值勤班次規劃與休假安排。此兩部分問題與本研究問題不同，屬本研究下游之人員指派問題，因此不再詳述。

(三) 人力資源彈性制度

「勞動彈性化」的概念源自於 Atkinson^[16] 所設計的彈性組織，現今已廣為企業界應用以為人力資源之管理措施。Atkinson^[16] 將「彈性」分為三類：功能的彈性、數量的彈性與財務的彈性。羅奉文^[17] 指出勞動市場彈性化有四種類型：(1) 彈性的人事安排；(2) 數量彈性化；(3) 功能彈性化；與 (4) 報酬彈性化。工資報酬與工時投入具有關聯性，敘薪方式的不同會影響到工作時間的計算，因此報酬彈性化可藉由工資報酬內容的多樣化，使得工資報酬與工作績效能緊密結合。由於此部分主要在下游的人員指派中進行考量，與本研究問題不同，因此不再詳述。在參考上述二篇文獻後，以下僅針對彈性的人事安排、數量彈性化與功能彈性化舉代表性文獻說明如下：

在彈性的人事安排相關文獻方面，楊家雅^[18] 研究發現，現行之彈性工時制度若以核心時間的分段來區分，大多為一段核心時間制；若以員工選擇的幅度來區分，多為彈性班表、團體彈性時間制；若以處理期的長短來區分，則以彈性工作天居多。廖曜生^[19] 指出不考慮時間管制上之因素時，二段核心時間制有較高的上司及工作整體滿足度。吳嘉銘^[20] 指出彈性化工時制對於勞動力的參與具有正面的幫助。

在數量彈性方面，黃景泰^[21] 指出數量彈性的目標是使工作所需人員可以和雇用的人員數量互相匹配，避免公司受制於長期僱用的承諾而付出超過實際所需的人事成本，以達到降低人事成本的目的。扈克勛^[22] 指出數量上的彈性通常指企業在面臨產出需求的變動時，能適時改變勞動力數量（含工作人數與工作時數）與種類的供給潛能（capability）或管理能力，以使雇用的員工人數或工作時數在任何時刻都儘量能與實際需要的數目相等。Yan 等人^[10] 針對國內一國際航空公司之航機修護部門的實際營運，引用「彈性的人事安排」與「數量彈性化」兩種彈性策略，構建數個修護人力供給模式，並發展一分解式啟發式演算法以求解模式，經實例測試後，發現其求解效率及結果頗佳。Yan 等人^[11] 參考 Yan 等人^[10] 研究中的彈性策略後，針對本國的航空公司貨運收貨人員供給規劃問題，在彈性工時的部分，採用 4 小時到 12 小時等 9 種工作型態，使工時更具彈性。

最後在功能彈性化方面，Atkinson^[16] 認為功能的彈性是指員工可以在不同的活動和任務之間，迅速且順利地重新部署 (redeploy)。Blyton 與 Morris^[23] 認為功能彈性是指員工在執行某一範圍內的工作或任務時的可移動性 (mobility)、適應性 (adaptability)，或是以雇用具有多樣化技能的員工，以便能夠對工作需求的改變及技術的發展作出更快速的回應。

綜合上述，大眾運輸人員的排班與航空公司人員的排班類似，因此部分研究有使用航空公司人員排班的二階段求解步驟（組員排班組合與人員指派）以求解問題。另外，在人力資源的彈性上，以往研究在彈性的人事安排部分，大都以工時彈性的研究為主；在數量彈性上，則多以雇用短暫契約、臨時或兼職人員，使工作所需人員可以和雇用的人員數相匹配；最後於功能彈性上，大多探討當公司採用職能彈性策略對公司內部離職率與營運績效之影響。本研究考量大型捷運公司的人力規劃，並加入彈性人力資源策略，問題甚為複雜，故主要針對人力供給研究，至於下游的人員指派問題可為後續探討的課題。

2.3 隨機規劃之相關文獻

雖然以往相關捷運修護人力排班規劃的研究中，對於隨機規劃 (stochastic programming) 的探討較為缺乏，但在其他領域中，近年來已有不少研究針對隨機擾動的規劃進行探討。例如 Mulvey 與 Ruszczyński^[24] 發展一事件分解方法 (scenario decomposition method) 以求解大型之隨機規劃問題，並以財務規劃問題 (financial planning problem) 與航空貨物排程問題 (air freight scheduling problem) 為例，測試演算法之績效。Du 與 Hall^[25] 以軸輻路網為例，針對隨機性需求下之貨車車隊規劃問題進行研究。Yu 與 Ting^[26] 利用有效需求旅次運載模式概念，應用物件導向模擬技術，構建一需求反映旅次載運模式。Yan 等人^[27] 考量可能影響機門指派作業整體績效之因素，如靜態機門指派結果的好壞、班機到離延誤的影響及動態即時指派方式等，提出一套系統性的模擬架構，以幫助機場當局評估彈性緩衝時間及即時機門指派策略。

Kenyon 與 Morton^[28] 考量隨機車輛旅行時間與隨機需求下之隨機性車輛路徑問題，並發展一有效之求解演算法。List 等人^[29] 針對需求不確定下之車隊規劃問題，以風險降低為觀念，取代穩健最佳化中常用之平均值一變異數的方法，使未來車隊規劃更符合實際的營運需求。楊大輝等人^[30] 針對實際貨物運輸市場需求量具有季節性變動狀況，利用隨機數學規劃方法中的兩階段一固定修正隨機數學規劃模型，構建隨機性飛航網路規劃模式。Yan 等人^[31] 針對航空公司意外事件排程與營運擾動之相關性，透過模擬，探討在營運中有隨機誤差的情況下，如何調整此班表，以符合實際班機的調度與接續。Yan 等人^[32] 參考 Yan 與 Chen^[33] 之確定性需求城際客運排程模式，進一步修正此模式中之固定平均需求值為隨機需求值，並發展一以模擬為基礎之隨機最佳化啟發解法，以求解隨機性需求城際客運排程模式。

2.4 小結

綜合以上各節文獻回顧可知，至目前已有許多學者嘗試利用數學規劃方法求解最佳化的人員排班問題，以改善傳統的人工經驗排班方式。然而在捷運排班方面，大多針對捷運車廂、站務人員與司機員排班等相關課題研究，而尚未發現有探討捷運車廂修護人員的排班問題。本研究針對長期規劃之觀點，以相關的人力資源彈性概念，含彈性的工時長度、

值勤開始時點數與檢修小班人數等人力彈性策略，考量實際人員需求之確定與隨機狀況，構建兩個混合確定與隨機需求之捷運車廂檢修人力供給排班模式，期能幫助捷運業者在隨機環境中，有效地規劃最佳的值勤班次與人力配置。

三、模式構建與求解方法

實務上，目前捷運公司於維修人力供給規劃上係採用人工方式，依規劃人員的經驗完成維修人力供給排班作業。本研究透過與實務人員訪談的結果，發現雖然目前預防檢修與故障檢修每日分別固定為 3 個與 2 個值勤開始時點數，且各值勤時點之班次的工作時數皆為 8 小時，每修護單位皆為 6 人一小班，但規劃人員曾經嘗試以不同之值勤開始時點數 (2 到 6 個)、工作時數 (4 小時與 8 小時) 及修護單位人數 (每單位 3 至 6 人) 進行人力供給排班作業，然因此等規劃作業較為複雜，且目前人力供給尚為充足，因此該捷運公司仍維持固定的值勤開始時點數、工作時數及修護單位人數，但未來若人力供給吃緊時，則將考量引入此等彈性供給之作法。近年來，學術上有學者引用彈性策略進行人力供給規劃作業 (如 Yan 等人^[10-11])，發現其求解結果頗佳。

綜合上述，彈性策略應可以有效地應用人力，因此本研究在模式構建上除同時考量預防檢修之確定性人力需求與故障檢修之隨機性人力需求外，更進一步引入人力資源彈性的管理觀念，包括彈性值勤開始時點數、彈性檢修小班人數、及彈性工時長度等，以使模式在實務之應用上更具彈性。此外，傳統的人力規劃作法上，大多限制人力供給需滿足 (即大於或等於) 需求，因此常以較多的人力供給來避免人力不足的產生，而此作法容易造成規劃人力過剩，導致總成本過高。為更有效率的進行人力規劃，本研究除配合實務作業外，更加入多餘及不足人力的考量，使捷運公司在規劃過程中可先行了解各時點人力供需的情形，利於員工增聘或調派工作，以增加人力規劃上的彈性。在實務上，多餘人力雖然需負擔該人力的薪資成本，但是相對地多餘人力亦可適當的使用 (例如進行其他支援、進行職業訓練等)，對公司而言有其剩餘價值，因此本研究亦將多餘人力的剩餘價值納入考量。

綜合上述並參考相關業者的實際需求及意見後，本研究根據不同的人力供給策略，發展 2 個排班模式，即基本模式 (兩部門獨立排班，不互相支援) 及相互支援模式。由於隨機模式中需考量多次的隨機事件，而將造成問題規模龐大，因此我們利用問題分解策略，配合 CPLEX 數學規劃軟體，發展啟發解法，以有效地求解隨機模式。最後，為評估實務作法與兩隨機性排班模式在隨機環境中之績效，本研究另發展一模擬評估方法。以下分節說明混合需求隨機性排班模式、求解方法及模擬評估方法。

3.1 混合需求隨機性排班模式

本研究利用兩階段隨機規劃 (two-stage stochastic programming) 的概念定式數學模式。一般兩階段隨機規劃的作法，可將決策發生在隨機事件已知 (realization) 之先後，劃

分為第一階段與第二階段規劃，相對應之決策變數即稱為第一階段決策變數與第二階段決策變數。其意義為在第一階段之決策，需在隨機事件已知前就做好決定；而第二階段之決策，可在某一隨機事件已知後，再進行規劃。詳細之兩階段隨機規劃之概念與作法，可參考 Hagle 與 Sen^[34]、Birge 與 Louveaux^[35]或 Ruszczyński 與 Shapiro^[36]。根據此概念，並參考 Mulvey 與 Ruszczyński^[24]之模式，本研究之人員供給及班次開始時點的決策，必須在檢修工作開始前完成規劃。而當某一隨機需求狀況已知後，即可在此需求狀況下，求得在該需求狀況下之多餘或不足人力結果。因此本研究將第一階段規劃視為人員排班規劃，所對應之決策變數即為人員供給變數、班次變數及值勤開始時點變數；第二階段規劃為在各隨機需求狀況下之多餘或不足人力結果，所對應之決策變數即為多餘或不足人力變數。本節就模式基本假設、符號說明與數學定式等分別說明如下。

3.1.1 模式基本假設

為確保本研究各模式的架構合理且能符合實際之應用，茲提出下列幾點假設條件或已知之資料。

1. 規劃長度為一週。雖然捷運公司檢修人力的班表是以一個月為規劃週期，但是同一月份中，各週的預防檢修與故障檢修人力需求量分佈相差不大，人力供給類似，因此為方便模式構建及求解，本研究以一週為規劃長度。未來於實際運用時，若有需要下，本研究模式的規劃長度亦可延伸為一個月。
2. 由於故障檢修人力容易受到隨機事件之干擾，使需求量呈不穩定的變動，因此本研究考量一般故障檢修需求量之隨機擾動特性，使規劃結果能合乎現實營運情況。至於其他較不常發生但擾動程度較嚴重或擾動時間較長之意外事件（如地震、員工罷工等），一般難以在規劃中事先預留緩衝資源以解決（如此將大幅降低檢修能量），而須在即時營運中進行調整，屬即時階段之調整問題，故不納入本模式中考量。
3. 在規劃期間內，各天之值勤開始時點固定。目前捷運公司為能同時且有效地管理人員當班，並可簡便地進行人力供給規劃，因此將各天的值勤開始時點固定。本研究為符合實務上之需求，亦假設各天的值勤開始時點固定。換言之，若某時點為一班次之開始時點，則一週內各天於該時點才能開始執行此班次，且此值勤開始時點於一週內各天皆固定。
4. 不考慮人員工資的差異。實務上工作職位、學歷、與資歷等因素皆會影響員工工資的多寡，而此部分主要在下游的人員指派中考量，因此本研究不考慮人員工資的差異，只著重人力的供給。

3.1.2 符號說明

參數定義：

i : 第 i 天；

j, s : 第 j 時段與第 s 時點；

- ω : 第 ω 次隨機事件；
 Ω : 所有隨機事件的集合；
 q, r_q : 分別為第 q 種工時長度與第 q 種工時長度的時數 (單位為小時)；
 p, m_p : 分別為第 p 種人數小班與第 p 種人數小班的人員數；
 c_1, c_2 : 分別為預防檢修與故障檢修供給的平均單位人力一小時成本；
 c_3, c_5 : 分別為預防檢修與故障檢修多餘的單位人力一小時成本 (多餘人力可加強職業訓練或支援其他工作，而降低公司成本支出，故此成本為負值)；
 c_4, c_6 : 分別為預防檢修與故障檢修不足的單位人力一小時成本 (一般遇不足人力時，需臨時調度人員進行檢修，故其成本會高於 c_1 與 c_2)；
 pu, cu : 分別為預防檢修與故障檢修的值勤開始時點數上限值；
 pd_{ij} : 第 i 天第 j 時段之預防檢修需求人數；
 $cd_{ij}(\omega)$: 故障檢修在第 ω 次隨機事件下，第 i 天第 j 時段之需求人數；
 k_1 : 故障檢修部門支援預防檢修之人力折減係數，其值介於 0 至 1 (由於專長及能力的差異，故支援人力的工作效率可能較低)；
 k_2 : 預防檢修部門支援故障檢修之人力折減係數，其值介於 0 至 1；
 N : 所有時點或時段之集合 (0:00 ~ 23:59，代表一天 24 小時)；其中，一時段涵蓋二時點，例如時段 2 (即 $j = 2$) 涵蓋時點 2 ($s = 2$) 與時點 3 ($s = 3$)；
 C : 所有規劃期間的值勤日集合 (0 ~ 6, 0: 週日……6: 週六)；
 Q : 所有工時長度種類之集合；
 P : 所有小班種類之集合；
 B : 一極大值；
 H_{ijq} : 在第 q 種工時長度下，會包含第 i 天第 j 時段的班次其開始值勤時點之集合；
 $E()$: 各隨機人力需求狀況下之期望值。
變數定義：
 v_{ispq} : 表示第 i 天第 s 時點第 p 種人數小班第 q 種工時長度之預防檢修人力 (單位為小班數)；
 u_{ispq} : 表示第 i 天第 s 時點第 p 種人數小班第 q 種工時長度之故障檢修人力 (單位為小班數)；
 x_s : 預防檢修於第 s 時點開始值勤之存在變數，為零壹整數 (1 表示於第 s 時點有預防檢修的班次開始值勤，0 則無)；
 y_s : 故障檢修於第 s 時點開始值勤之存在變數，為零壹整數 (1 表示於第 s 時點有故障檢修的班次開始值勤，0 則無)；
 a_{ij}, b_{ij} : 分別為預防檢修在第 i 天第 j 時段多餘與不足的供給人力；

$\alpha_{ij}(\omega)$ ：在第 ω 次隨機事件下，故障檢修於第 i 天第 j 時段多餘的供給人力；

$c_5 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} \alpha_{ij}(\omega) \right)$ 為各隨機故障檢修人力需求狀況下多餘人力成本之期望值；

$\beta_{ij}(\omega)$ ：在第 ω 次隨機事件下，故障檢修於第 i 天第 j 時段不足的供給人力；

$c_6 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} \beta_{ij}(\omega) \right)$ 為各隨機故障檢修人力需求狀況下不足人力成本之期望值；

ps_{ij} ：第 i 天第 j 時段，預防檢修部門支援故障檢修之人數；

cs_{ij} ：第 i 天第 j 時段，故障檢修部門支援預防檢修之人數。

在 pu 與 cu 兩參數定義中，本研究參考目前捷運公司的作法，進而考量彈性工時長度與彈性檢修小班人數的作法，允許同一值勤開始時點可包含各種不同工作型態之班次。如圖 1 所示，本研究以三天、八個時點，說明值勤開始時點與其相關之不同工作型態班次。圖中班次 A、B、C、D 與 E 之值勤開始時點相同，皆為 1，班次 A 與 B、班次 C 與 D、及班次 E 則分別為星期日、一、及二，在時點 1 下開始值勤之不同工作型態之班次。由於本研究引入人力資源彈性的管理觀念，包含彈性值勤開始時點、彈性工時長度與彈性檢修小班人數等三種彈性化策略，使得人力供給規劃更具彈性，使人力供給結果可更有效的符合實務上各時點之需求。

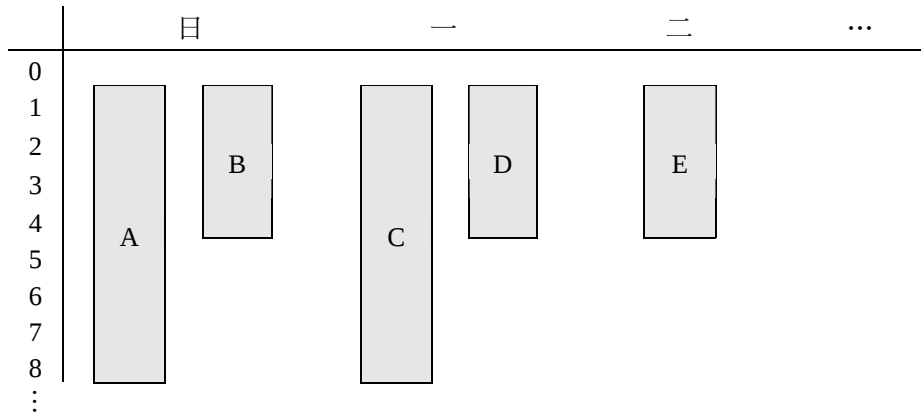


圖 1 值勤開始時點與相關之工作型態班次說明圖

另外， H_{ijq} 集合之設置目的，為表示人力供給班次與其涵蓋的工作時段關係，例如：當工時長度種類為 2 種（即 $Q = \{1, 2\}$ ），另假設 2 種工時長度（ $q = 1, q = 2$ ）之工作時數分別為 4 與 8 小時（即 $r_1 = 4, r_2 = 8$ ），以第 2 天（ $i = 2$ ）時段 6（ $j = 6$ ）為例，則有兩個 H_{ijq} 集合，分別為 H_{261} 與 H_{262} 。如圖 2 所示， H_{261} 表示工時長度為 4 小時且會包含第 2 天第 6 時

段之班次。假設 (2,3,1) 代表第 2 天第 3 時點開始之第 1 種工時班次，則 $H_{261} = \{(2,3,1), (2,4,1), (2,5,1), (2,6,1)\}$ 。同理， H_{262} 表示工時長度為 8 小時且會包含第 2 天第 6 時段之值勤班次，即 $H_{262} = \{(1,23,2), (2,0,2), (2,1,2), (2,2,2), (2,3,2), (2,4,2), (2,5,2), (2,6,2)\}$ 。

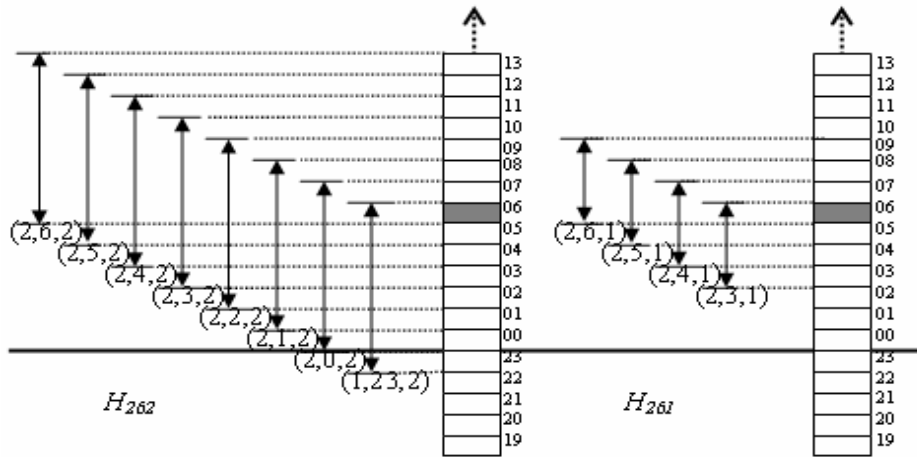


圖 2 班次集合說明圖

3.1.3 數學定式

本研究以捷運公司為立場，考量公司下一年度或預測未來的營運狀況進行事前之檢修人力規劃，以因應公司未來可能的變化。本研究考量捷運公司實務上之營運作法及相關之限制條件，發展 2 個混合需求隨機性排班模式（基本模式與相互支援模式），分別說明如下。

(一) 基本模式

在參考現行捷運公司檢修部門的營運後得知，雖然預防檢修與故障檢修兩部門的檢修人員具有相同的檢修資格，但是不同部門各自具有其檢修領域上的檢修能力以及熟練度，因此本研究在基本模式中，係參考目前捷運公司的作法，將預防檢修與故障檢修兩部門各別獨立進行人力排班，並以最小人力供給成本為目標，決策最佳的值勤開始時點數、各值勤開始時點、工時長度與小班人數等。此基本模式可定式如下：

$$\begin{aligned}
 \text{Min } z = & c_1 \times \sum_{i \in C} \sum_{s \in N} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} r_q \times m_p \times v_{is pq} + c_2 \times \sum_{i \in C} \sum_{s \in N} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} r_q \times m_p \times u_{is pq} \\
 & + c_3 \times \sum_{i \in C} \sum_{j \in N} a_{ij} + c_4 \times \sum_{i \in C} \sum_{j \in N} b_{ij} + c_5 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} \alpha_{ij}(\omega) \right) + c_6 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} \beta_{ij}(\omega) \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ST

$$\sum_{s \in N} x_s \leq pu \quad (2)$$

$$\sum_{s \in N} y_s \leq cu \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times v_{ispq} - a_{ij} + b_{ij} = pd_{ij} \quad \forall i \in C, \forall j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times u_{ispq} - \alpha_{ij}(\omega) + \beta_{ij}(\omega) = cd_{ij}(\omega) \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} v_{ispq} \leq Bx_s \quad \forall s \in N \quad (6)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} u_{ispq} \leq By_s \quad \forall s \in N \quad (7)$$

$$x_s = 0 \text{ or } 1 \quad \forall s \in N \quad (8)$$

$$y_s = 0 \text{ or } 1 \quad \forall s \in N \quad (9)$$

$$v_{ispq} \geq 0 \text{ \& } v_{ispq} \in I \quad \forall i \in C, \forall s \in N, \forall p \in P, \forall q \in Q \quad (10)$$

$$u_{ispq} \geq 0 \text{ \& } u_{ispq} \in I \quad \forall i \in C, \forall s \in N, \forall p \in P, \forall q \in Q \quad (11)$$

$$a_{ij} \geq 0 \text{ \& } b_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in C, \forall j \in N \quad (12)$$

$$a_{ij}(\omega) \geq 0 \text{ \& } \beta_{ij}(\omega) \geq 0 \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (13)$$

其中，目標式 (1) 為系統總人力供給成本最小化。本研究除考量各天各時段各種工時長度與各種人數小班之人力供給成本外，亦考量人力供給不足或多餘之成本。此目標式中，第一、二項分別為總預防檢修及總故障檢修人力供給成本，第三、四項分別為總預防檢修多餘及不足的人力成本、第五、六項分別為總故障檢修多餘及不足的人力成本期望值。限制式 (2) 與 (3) 分別為預防檢修及故障檢修最佳值勤開始時點數的上限限制式，即系統的最佳值勤開始時點數須小於或等於該上限。限制式 (4) 為預防檢修供需限制式，代表該天該時段所供給的檢修人力、扣除多餘的人力及加上不足的人力（二者應不同時大於 0），必須等於人力需求量。限制式 (5) 為考量故障檢修在各 ω 隨機事件下之人力供需限制式。限制式 (6) 與 (7) 分別為預防及故障檢修之班次存在限制式，即在第 s 時點有班次開始值勤時，該時點才能開始有人力供給。限制式 (8) 與 (9) 為值勤開始時點存在變數的零壹限制式。限制式 (10) 與 (11) 為各班次下，人力供給的非負及整數限制式。限制式 (12) 為預防檢修之多餘及不足人力的非負限制式。限制式 (13) 為各 ω 次隨機事件下故障檢修多餘及不足人力的

非負限制式⁶。

目前該公司因值勤開始時點數所引發的管理成本相較於人力成本而言，並不明顯，然而在其他公司的應用上，若不同的值勤開始時點數會明顯地引發不同的管理成本，則可修正目標函數 (1)，加入部分成本 $\sum_{s \in N} (h_s x_s + g_s y_s)$ ，以符合實際的營運情況。其中， h_s 與 g_s 分別為預防檢修與故障檢修第 s 時點開始的值勤班次成本。另外，當實務上如有政策考量，需限定值勤開始時點數必須大於或等於某一基本的值勤開始時點數時，則可於預防檢修與故障檢修值勤開始時點數上限限制式修改為 $pl \leq \sum_{s \in N} x_s \leq pu$ 與 $cl \leq \sum_{s \in N} y_s \leq cu$ 。其中 pl 與 cl 分別為預防檢修與故障檢修值勤開始時點數下限。加入此下限後，當最佳解的實際值勤開始時點數低於 pl 或 cl 時，為滿足此限制式，可能會造成求解結果的總值勤開始時點數等於 pl 或 cl ，但某些值勤開始時點卻無人力供給之虛擬班次產生。為避免此一情況，可修改班次存在限制式 (6) 與 (7)，如式 (14) 與 (15) 所示，其中各 λ 表示最少班次組成人數，為一大於 0 的值，如此將可避免產生虛擬班次。

$$\lambda x_s \leq \sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} v_{ispq} \leq Bx_s \quad \forall s \in N \quad (14)$$

$$\lambda y_s \leq \sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} u_{ispq} \leq By_s \quad \forall s \in N \quad (15)$$

(二) 相互支援模式

實務上，預防檢修與故障檢修兩部門的工作性質具有部分的替代性，因此本研究在相互支援模式中，除考量兩部門各別獨立排班外，更進一步允許預防檢修與故障檢修兩部門間可相互支援，以增加檢修人員之調度彈性。然而，由於不同部門的檢修人員在支援其他部門時，其熟練程度與維修能力上有所差異，因此本研究在此模式中對支援的人力乘以一人力折減係數，使其更符合實務的情況，而業者可依據實際作業適當地調整此人力折減係數。另外，各檢修部門在支援其他部門的人力上，必須受限於該檢修部門所能提供之總人力。在數學定式上，本模式係以基本模式為基礎，修改預防檢修與故障檢修之供需限制式，並增加額外支援的人力限制式。以下僅列出本模式與基本模式不同之處，至於其餘請參考 3.1.3 節 (一) 之內容。

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times v_{ispq} - ps_{ij} + k_1 \times cs_{ij} - a_{ij} + b_{ij} = pd_{ij} \quad \forall i \in C, \forall j \in N \quad (16)$$

6. 請注意，基於限制式 (4) 與 (5) 及 v_{ispq} 、 u_{ispq} 、 pd_{ij} 與 $cd_{ij}(\omega)$ 之整數特性， a_{ij} 、 b_{ij} 、 $\alpha_{ij}(\omega)$ 、 $\beta_{ij}(\omega)$ 的結果自然為整數。

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times u_{is pq} - cs_{ij} + k_2 \times ps_{ij} - \alpha_{ij}(\omega) + \beta_{ij}(\omega) \\ = cd_{ij}(\omega) \end{aligned} \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (17)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times v_{is pq} \geq ps_{ij} \quad \forall i \in C, \forall j \in N \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times u_{is pq} \geq cs_{ij} \quad \forall i \in C, \forall j \in N \quad (19)$$

$$ps_{ij} \geq 0 \quad \& \quad ps_{ij} \in I \quad \forall i \in C, \forall j \in N \quad (20)$$

$$cs_{ij} \geq 0 \quad \& \quad cs_{ij} \in I \quad \forall i \in C, \forall j \in N \quad (21)$$

其中，限制式 (16) 為包括支援人力之預防檢修供需限制式，與基本模式不同處在於，必須考量其他部門之支援人數，例如限制式 (16) 中預防檢修的人力供給須扣除支援至故障檢修的人力 (ps_{ij})，並加上從故障檢修部門來支援的人力 (須乘上一折減係數，即 $k_1 \times cs_{ij}$)。限制式 (17) 為各 ω 隨機事件下之包括支援人力之故障檢修人力供需限制式。限制式 (18) 為預防檢修支援故障檢修人力限制式，即預防檢修之總供給人數必須大於或等於預防檢修的支援人力。限制式 (19) 為故障檢修支援預防檢修人力限制式，即故障檢修之總供給人數必須大於或等於故障檢修的支援人力。限制式 (20) 與 (21) 為各支援人力的非負及整數限制式。

此模式與上述基本模式皆有解，即當 x_s 與 y_s 皆為 0 時 (表示完全沒有正常人力供給)，各天 i 各時段 j 之預防檢修與故障檢修需求量，仍可以臨時人力供給以滿足需求，亦即 $b_{ij} = pd_{ij}$ 與 $\beta_{ij}(\omega) = cd_{ij}(\omega)$ ，因此二模式皆至少存在一可行解。另外，此二模式的目標式為總人力成本最小化，而由於二目標式中各項的係數及變數皆為非負值，因此二目標值至少為零，亦即此二目標值有界 (bounded)。綜合模式的可行性及有界性，此二模式皆存在最佳解。

3.2 模式求解

本研究所構建之隨機性規劃模式，可定式為混合整數規劃問題，屬 NP-hard 的問題^[37]，且變數與限制式數量會隨求解的隨機事件數增多而增加，求解將越不易，難以在有限的時間內有效率地求得最佳的人力供給解。因此，本研究利用問題分解策略，配合 CPLEX 數學規劃軟體，發展一隨機規劃啟發解法，以有效求解模式。為方便求解，本研究將原隨機規劃模式定式成一修正模式，以說明求解方法。本小節僅以較複雜的相互支援模式為例說明此啟發解法，至於基本模式可以類似的方法求解。

我們將相互支援模式的預防檢修與故障檢修之人員供給變數、支援人力變數及班次變數，分別轉換為各 ω 個隨機狀況下規劃的預防檢修與故障檢修人員供給量、支援人數及班

次變數，並於模式中增加非預期限制式 (nonanticipativity constraint)。除與先前模式定義相同之參數及變數外，茲定義新增的參數及變數如下：

- $a_{ij}(\omega), b_{ij}(\omega)$: 分別表示在第 ω 次隨機事件下，故障檢修於第 i 天第 j 時段多餘與不足的供給人力；
- $v_{ispq}(\omega), u_{ispq}(\omega)$: 分別表示在第 ω 次隨機事件下，第 p 種人數小班與第 q 種工時長度之值勤組合，在第 i 天第 s 時點開始值勤之預防檢修與故障檢修人力 (單位為小班數)；
- $ps_{ij}(\omega), cs_{ij}(\omega)$: 分別表示在第 ω 次隨機事件下，第 i 天第 j 時段預防檢修支援故障檢修之人數，以及故障檢修支援預防檢修之人數；
- $x_s(\omega), y_s(\omega)$: 分別表示在第 ω 次隨機事件下，預防檢修與故障檢修於第 s 時點開始值勤之存在變數，為零壹整數 (1 表示於第 s 時點有預防檢修 (或故障檢修) 的班次開始值勤，0 則無)；

修正後之相互支援模式數學式如下：

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & c_1 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{s \in N} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} r_q \times m_p \times v_{ispq}(\omega) \right) + c_2 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{s \in N} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} r_q \times m_p \times u_{ispq}(\omega) \right) \\ & + c_3 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} a_{ij}(\omega) \right) + c_4 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} b_{ij}(\omega) \right) \\ & + c_5 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} \alpha_{ij}(\omega) \right) + c_6 \times E \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} \beta_{ij}(\omega) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

ST

$$\sum_{s \in N} x_s(\omega) \leq pu \quad \forall \omega \in \Omega \quad (23)$$

$$\sum_{s \in N} y_s(\omega) \leq cu \quad \forall \omega \in \Omega \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times v_{ispq}(\omega) - ps_{ij}(\omega) + k_1 \times cs_{ij}(\omega) - pd_{ij} - a_{ij}(\omega) + b_{ij}(\omega) = 0 \\ \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times u_{ispq}(\omega) - cs_{ij}(\omega) + k_2 \times ps_{ij}(\omega) - cd_{ij}(\omega) - \alpha_{ij}(\omega) + \beta_{ij}(\omega) = 0 \\ \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (26)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times u_{ispq}(\omega) \geq cs_{ij}(\omega) \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (27)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in H_{ijq}} m_p \times v_{ispq}(\omega) \geq ps_{ij}(\omega) \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (28)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} v_{ispq}(\omega) \leq Bx_s(\omega) \quad \forall s \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (29)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} u_{ispq}(\omega) \leq By_s(\omega) \quad \forall s \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (30)$$

$$v_{ispq}(\omega_1) = v_{ispq}(\omega_2) \quad \omega_1, \omega_2 \in \Omega, \omega_1 \neq \omega_2 \quad (31)$$

$$u_{ispq}(\omega_1) = u_{ispq}(\omega_2) \quad \omega_1, \omega_2 \in \Omega, \omega_1 \neq \omega_2 \quad (32)$$

$$ps_{ij}(\omega_1) = ps_{ij}(\omega_2) \quad \omega_1, \omega_2 \in \Omega, \omega_1 \neq \omega_2 \quad (33)$$

$$cs_{ij}(\omega_1) = cs_{ij}(\omega_2) \quad \omega_1, \omega_2 \in \Omega, \omega_1 \neq \omega_2 \quad (34)$$

$$x_s(\omega_1) = x_s(\omega_2) \quad \omega_1, \omega_2 \in \Omega, \omega_1 \neq \omega_2 \quad (35)$$

$$y_s(\omega_1) = y_s(\omega_2) \quad \omega_1, \omega_2 \in \Omega, \omega_1 \neq \omega_2 \quad (36)$$

$$x_s(\omega) = 0 \text{ or } 1 \quad \forall s \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (37)$$

$$y_s(\omega) = 0 \text{ or } 1 \quad \forall s \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (38)$$

$$v_{ispq}(\omega) \geq 0 \text{ \& } v_{ispq}(\omega) \in I \quad \forall i \in C, \forall s \in N, \forall p \in P, \forall q \in Q, \forall \omega \in \Omega \quad (39)$$

$$u_{ispq}(\omega) \geq 0 \text{ \& } u_{ispq}(\omega) \in I \quad \forall i \in C, \forall s \in N, \forall p \in P, \forall q \in Q, \forall \omega \in \Omega \quad (40)$$

$$ps_{ij}(\omega) \geq 0 \text{ \& } ps_{ij}(\omega) \in I \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (41)$$

$$cs_{ij}(\omega) \geq 0 \text{ \& } cs_{ij}(\omega) \in I \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (42)$$

$$a_{ij}(\omega) \geq 0 \text{ \& } b_{ij}(\omega) \geq 0 \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (43)$$

$$\alpha_{ij}(\omega) \geq 0 \text{ \& } \beta_{ij}(\omega) \geq 0 \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (44)$$

在原來的隨機規劃模式中，雖然考量故障檢修需求量在各隨機事件的隨機擾動情形，但是模式最終之目的，在規劃出一週人力供給的確定結果。此修正模式中，原 v_{ispq} 、 u_{ispq} 、 ps_{ij} 、 cs_{ij} 、 x_s 與 y_s 變數已修改為相關 ω 次隨機事件下之變數，因此若未限制不同隨機事件下之變數值，則此修正模式規劃結果將有 $|\Omega|$ 週（總模擬週數）之人力規劃結果。為避免此不合理結果，我們在此修正模式中額外增加了 6 條非預期限制式（式 (31) 至 (36)），以限制各變數在各 ω 次隨機事件下須相等之條件，如此模式將與原模式相同，可規劃出一週人力供給的結果。若鬆弛此等非預期限制式，則此鬆弛模式所求的解為原模式之下限解。

基於上述，此啟發解法的設計如下：首先鬆弛非預期限制式及整數限制式，並將此鬆弛問題分解為 $|\Omega|$ 個確定性需求排班子問題，再求解各個子問題。之後，統計各隨機狀況下之值勤開始時點數，以出現次數最多的值勤開始時點數作為挑選標準，進而挑選出預防檢修與故障檢修之值勤開始時點數，然後再以相同方法挑選預防檢修與故障檢修之各值勤開始時點，唯一不同之處為此兩部門之各值勤開始時點係透過重複求解，挑選並固定部分值勤開始時點，直到所有值勤開始時點皆已確定為止。最後將得到的值勤開始時點數及值勤開始時點代入原始的相互支援模式，求解其餘的人力供給。簡言之，此啟發解法將原隨機規劃問題分為兩階段依序求解，第一階段為尋找值勤開始時點數及各值勤開始時點。第二階段是將第一階段之結果固定並代入原始模式中求解⁷。此啟發解法的具體步驟如下：

- 步驟 0：輸入模式資料，包括值勤開始時點數挑選標準、值勤開始時點數上限、工時長度、小班人數、支援人力折減係數、成本資料及人力需求分佈等。
- 步驟 1：在符合機率分配函數下，利用隨機抽樣方式產生 M 週各天各時段之需求量，並鬆弛修正後的混合需求隨機性排班模式中 (31) 至 (36) 等 6 條非預期限制式及 (39) 至 (42) 等 4 條整數限制式，將此鬆弛問題分解為 M 個確定性需求排班子問題。
- 步驟 2：令 $m = 1$ 。 m 為計次模擬週數。
- 步驟 3：將各天各時段預防檢修平均需求量與第 m 週之各天各時段故障檢修人員需求量，代入子問題並求解。可得預防檢修與故障檢修值勤開始時點數及各值勤開始時點。
- 步驟 4： m 是否達預定模擬週數 M ？若是，則進行步驟 5；否則， $m = m + 1$ ，回到步驟 3。
- 步驟 5：統計所有模擬週數中出現次數最多的預防檢修與故障檢修值勤開始時點數，並選取為預防檢修值勤開始時點數 P 與故障檢修值勤開始時點數 Q 。
- 步驟 6：令 $p = 0, q = 0$ 。 p 與 q 分別為已固定的預防檢修與故障檢修值勤開始時點數。
- 步驟 7：令 $m = 1$ 。 m 為計次模擬週數。
- 步驟 8：將先前求得的值勤開始時點數 P 與 Q 代入第 m 週子問題進行求解，記錄在此值勤開始時點數下之各值勤開始時點。若已有固定的值勤開始時點，則固定 p 個與 q 個值勤開始時點，求解剩餘 $P-p$ 與 $Q-q$ 的值勤開始時點。
- 步驟 9： m 是否達預定模擬週數 M ？若是，則進行步驟 10；否則， $m = m + 1$ ，並回到步驟 8。
- 步驟 10：統計各週數據中的開始時點，並固定累積出現次數最多的值勤開始時點。
- 步驟 11：固定的值勤開始時點數 p 與 q 是否等於最佳值勤開始時點數 P 與 Q ？若是，則進行步驟 12；否則， $p = p + 1, q = q + 1$ ，並回到步驟 7。

7. 此啟發解法至少可找到一可行解，即尋找值勤開始時點數及各值勤開始時點後，即使完全沒有正常人力供給，各模擬週中各天各時段之預防檢修與故障檢修需求量，亦可以臨時人力供給以滿足，因此此啟發解法可求得可行解。

步驟 12：將固定後的預防檢修與故障檢修值勤開始時點數及各值勤開始時點，代入原始相互支援模式中進行求解，以求得班次表及人力供給。

3.3 模擬評估方法

為評估實務作法與混合需求隨機性排班模式在隨機環境中之績效及差異，本研究利用模擬技巧發展一評估方法。此方法乃透過模擬隨機產生多週的故障檢修需求量，加上預防檢修的平均人力需求量，在給定規劃結果之班次表與人力供給（含支援人力）下，計算每週的總成本，其中包括多餘人力及不足人力之供給成本。最後，綜合多週的結果，計算各模式規劃結果下所需花費的總成本。此評估方法的具體步驟如下：

步驟 0：輸入模式資料，包括給定值勤開始時點數、值勤開始時點、班次表人力供給、各種人力供給成本、及相關參數資料。

步驟 1：在符合機率分配函數下，隨機產生多週各時段的故障檢修人力需求量。至於預防檢修則以平均的人力需求量作為此模擬評估之需求量。

步驟 2：令 $m = 1$ 。 m 為計次模擬週數。

步驟 3：將第 m 週之隨機需求量資料代入實務規劃與兩混合需求隨機性排班模式之解中，計算此供給規劃下之總成本、多餘及不足的人力。

步驟 4： m 是否達模擬次數 M ？若是，則進行步驟 5；否則， $m = m + 1$ ，回到步驟 3。

步驟 5：統計並計算系統總成本、多餘及不足人力，並進行比較分析。

四、範例測試

為測試本研究模式於實際應用之績效，本研究以一國內大眾捷運公司之營運為例，進行模式測試及分析。本研究在 Microsoft Windows 之作業平臺下，以 Visual Studio C++ 6.0 撰寫 C 語言程式，並結合 CPLEX 8.1 數學規劃軟體進行模式構建與求解，於 INTEL P4 2G，1Gb RAM 之個人電腦進行運算。

4.1 資料輸入分析

由於此捷運公司之人力需求資料取得不易，因此本研究參考實務之人力供給方式，進行適當之假設與修正，計算出預防檢修與故障檢修之人力需求數量，以為測試之輸入。由於故障檢修為車廂發生故障時之臨時修護作業，容易受到突發事件之干擾，使需求量呈現不穩定的變動，因此在故障檢修部分，本研究根據與實務人員訪談的結果，假設故障檢修人力需求分佈服從一截斷式常態分配 (truncated normal distribution)，並在此分配下依據各天各時點之平均值及標準差，利用電腦亂數技巧，隨機產生本研究所需之各天各時點故障

檢修人力需求量⁸。未來業者在使用此模式時，仍需以實際的需求型態為輸入，然此假設並不影響模式之架構。

至於成本方面，本研究模式中考量人力供給一小時成本、多餘人力一小時成本與不足人力一小時成本等三種成本。由於長期規劃中人員的投資與聘用可根據市場狀況與營運考量決定人員規模，其人員規劃較短期規劃具彈性，因此在每單位供給人力一小時成本的設定上，我們以時薪作為參考值，將 c_1, c_2 定為 100，表示人員的成本屬於尚未投入之成本。另外，長期規劃下，公司對於多餘人力可有相關的處理措施，例如可調派至其他部門支援或加強職業訓練等，以避免多餘人力的浪費，故每單位多餘的人力仍具有剩餘價值，因此我們將 c_3, c_5 定為 -50，表示長期規劃之多餘人力仍可適當的應用以節省人力成本。至於不足人力方面，雖然在長期考量下，業者已知未來將有臨時調度或加班的情形發生，但是臨時調度或加班仍需付出額外的成本，較正常薪資成本為高，因此我們將每單位不足人力一小時成本 (c_4, c_6) 定為 200。實務上，影響人力成本的因素眾多 (如工作資歷、學歷、職位等)，且以上三種成本資料屬公司的機密資料，取得不易，因此本研究經訪談實務界人員後，適當的假設此等成本值以為模式測試之輸入。未來業者在使用此模式時，仍需依實際的成本資料為之。至於其他相關的參數，本研究則依據實務之作法或建議設定之，分別為每修護單位小班人數可由 3 到 6 人所組成、工時長度可分為 4 小時 (半職) 與 8 小時 (全職) 兩種、值勤開始時點數上限為 6 個。此外，在相互支援模式中，本研究進一步允許預防與故障檢修兩部門間可相互支援，以增加檢修人員間之調度彈性，但考量不同部門檢修人員支援其他部門之熟練程度與維修能力之差異，故設折減係數為小於 1 的數值。實務上，故障檢修人員所學習的檢修項目與技能可能略高於預防檢修。因此，本研究將故障檢修支援預防檢修的人力折減係數 (k_1) 設為 0.9，預防支援故障檢修的人力折減係數 (k_2) 設為 0.8。以上兩係數，業者可依實務之需要而修正。

4.2 測試結果與分析

在隨機環境下，隨著問題特性的不同，可反映事件母體 (Ω) 的隨機事件數 (M) 亦可能不同。此隨機事件數 (M) 對於求解之穩定性、代表性及求解效率有相當的影響。雖然隨著隨機事件數 (M) 的增加，解的穩定性將增加 (即解愈能反映事件母體)，但問題的規模將愈趨於龐大，求解時間亦將大幅增加。因此，為能兼顧解之穩定性及求解效率，本研究在測試模式前先決定一有效的隨機事件數 (M)。緣此，本研究直接利用 CPLEX 軟體 (收斂參數 MIPGAP 設定為 1%) 從模擬週數 30 週開始進行測試，發現基本模式從 30 週增加至 70 週 (10 週為間格) 時，各二方案間有 29 至 58 個時點之人力供給結果不同，其人力供給量相差介於 1 至 3 (人力一小時)，求解時間由 5.38 秒增加至 33.75 秒；從 70 週增加至 80 週時，人力供給結果差異幅度雖較少，但仍有 13 個時點之人力供給結果不同，其人力供

8. 透過產生之亂數及需求分配函數之轉換，所得的人力需求分佈將類似截斷式常態分配。

給量相差介於 1 至 2 (人力一小時)，求解時間則由 33.75 秒增加至 69.63 秒；從 80 週增加至 90 週時，人力供給結果僅有 2 個時點不同，且此兩時點之人力供給量各僅相差 1 (人力一小時)，求解時間則由 69.63 秒增加至 199.93 秒。而相互支援模式從 30 週增加至 70 週時，各二方案間有 33 至 67 個時點之人力供給結果不同，其人力供給量相差介於 2 至 3 (人力一小時)，求解時間由 1283.59 秒增加至 17596.67 秒；從 70 週增加至 80 週時，有 16 個時點之人力供給結果不同，其人力供給量相差介於 1 至 2 (人力一小時)，求解時間由 17596.67 增加至 24953.68 秒；從 80 週增加至 90 週時，人力供給結果僅有 1 個時點不同，該時點之人力供給量亦僅相差 1 (人力一小時)，求解時間則由 24953.68 秒增加至 35632.17 秒。綜上所述，本研究發現兩排班模式皆在超過 80 週後所求得的人力供給結果的變化不大，但所需之求解時間卻大幅增加。因此，為方便測試，本研究的隨機需求模擬週數設定為 80 週。然而，未來在模式的實際應用上，業者仍需依其實際測試以決定適當之隨機事件數 (M)。最後，為評估本研究模式與實務規劃於實際營運之績效，本研究利用 3.3 節之模擬評估方法，比較二者在模擬 80 週隨機需求下之績效。

4.2.1 啟發解法績效評估

為初步評估啟發解法的求解績效，本研究分別以啟發解法與直接利用 CPLEX 軟體求解等兩種方式進行比較。另外本研究亦進一步縮小問題規模求得最佳解，以比較啟發解法所求得之近似最佳解與真實最佳解之差距。

為避免直接利用 CPLEX 軟體求解的時間過長，本研究設定 6 小時 (21600 秒) 為最長的求解時間，並將 CPLEX 收斂參數 MIPGAP 設定為 1% 進行求解。另外，啟發解法在 CPLEX 軟體的 MIPGAP 參數設定可分為二個階段：第一階段為尋找固定值勤開始時點數及值勤開始時點。第二階段是將固定後的值勤開始時點數與值勤開始時點代入原始模式中求解。為使測試公平起見，在求解此二階段中各模式時，MIPGAP 皆設為 1%。

由表 1 可知，基本模式的啟發解法目標值稍較 CPLEX 直接求解差 (相差 2218，約 1%)，且求解時間上亦較直接求解慢，其原因為基本模式中預防檢修與故障檢修兩部門並非 24 小時皆有需求量，且此兩部門各別獨立排班，排班組合較少求解容易，因此，CPLEX 直接求解有較佳之求解結果。而在相互支援模式中，由於考量兩部門人力可相互支援，可能之排班組合大幅增加，造成直接求解無法在容許之最大求解時間內，將收斂誤差降至 1% 以內，故啟發解法目標值與求解時間上均較 CPLEX 直接求解為佳。其中，啟發解法之目標值比 CPLEX 直接求解減少 5550.25 (約 2.65%)。而在求解時間上，CPLEX 直接求解時間為啟發解法的 27 倍。因此，在相互支援模式測試結果中，啟發解法不僅可大幅縮短求解時間，更可於有限時間內，比直接利用 CPLEX 求得更好的人力規劃結果。

由上述求解效率結果可知，本研究所構建之相互支援模式規模太大，難以直接利用 CPLEX 求得最佳解。因此，在求解品質比較上，本節將原規劃週期一週，縮減為一天進行人力規劃，以比較啟發解法所求得之近似最佳解與真實最佳解之差距。測試結果如表 2 所示，兩排班模式之啟發解法目標值均稍比最佳解差：在基本模式中，啟發解目標值稍較最

佳解差 236.875 (約 0.67%)，而在相互支援模式中，啟發解目標值稍較最佳解差 220.755 (約 0.63%)，但運算時間可大幅減少 21501 秒 (約 98.55%)。

表 1 求解效率結果

Model	啟發解法		CPLEX 直接求解	
	目標值 (元)	時間 (秒)	目標值 (元)	時間 (秒)
基本模式	204,743.75	118.11	202,525	69.63
相互支援模式	203,791.25	800.41	209,341.5	21,600

表 2 求解品質結果

Model	啟發解法		CPLEX 直接求解	
	目標值 (元)	時間 (秒)	目標值 (元)	時間 (秒)
基本模式	35,598.75	20.22	35,361.875	6.11
相互支援模式	35,423.625	316.09	35,202.875	21,817.70

綜合上述，由測試結果發現，雖基本模式啟發解法求解時間比 CPLEX 直接求解時間長，但仍能在一短時間內求得一不錯的近似最佳解。而相互支援模式則不僅可大幅縮短求解時間，更可於有限時間內比 CPLEX 直接求解求得更好的解，顯示此啟發解之求解效率良好。另外，本研究啟發解法之目標值相差於最佳解的幅度甚小 (皆小於 1%)，因此除可有效提升求解效率外，亦有可能維持一定的求解品質。有鑑於此，為了有效測試本研究問題，之後我們皆以此啟發解法求解二模式。

4.2.2 結果與分析

本研究除求解兩混合需求隨機性排班模式外，為有效比較實務規劃與本研究模式之差異，本研究更進一步參考實務作法進行規劃，以得實務規劃之結果。另外，為比較本研究模式與實務規劃之實際營運績效差異，本研究利用 3.3 節之模擬評估方法，比較兩者在模擬 80 週隨機需求下之績效。實務上，捷運公司之維修排班多採取人力供給必須大於或等於人力需求來因應，且未將多餘人力的附加價值納入考量，但為便於與本研究模式進行比較，因此本研究於求得實務規劃結果後利用人工方式比對各時點之供給與需求之差異 (即多餘人力)，最後利用人工方式計算此多餘人力之成本，並納入於目標值內，以維持比較之公平性。值得注意的是，本研究構建之兩混合需求隨機性排班模式皆利用 3.2 節之啟發解法進行求解，由於此啟發解法在尋找值勤開始時點數及各值勤開始時點後，利用 CPLEX 所求解出的下限解並非原始問題之下限，因此，本研究鬆弛各模式所有整數限制，只保留值勤班次開始時點存在變數之 0-1 變數 (即 x_s 、 y_s)，並以 CPLEX 求解，作為各模式之下

限解。

結果如表3所示，在混合需求隨機性排班模式方面，相互支援模式之目標值(203791.25)較基本模式(204743.75)為佳，兩者目標值相差952.5，相差幅度約為0.47%。在總人力供給方面，相互支援模式(1952)比基本模式(1964)減少12，相差幅度約為0.61%。由此可知，相互支援模式可較有效使用人力，減少人力閒置。而在支援人力方面，相互支援模式可利用預防檢修部門之多餘人力以支援故障檢修部門，因此預防檢修支援故障檢修之人力明顯高於故障檢修支援預防檢修之人力，以因應故障檢修需求量之不確定性。在總班次數方面，基本模式之預防檢修部門總班次數為48班，故障檢修部門總班次數為37班，而相互支援模式之預防檢修部門總班次數為33班，故障檢修部門總班次數為29班，二者均較基本模式少，此亦顯示相互支援模式可在較少班次下較有效地使用人力。此外，本研究更進一步探討各值勤開始時點之班次數與彈性小時班次數運用之結果，發現兩模式均能有效地運用人力資源彈性化策略，有效地規劃人力，以符合實際之要求。為節省篇幅，表3僅列出部分結果，讀者若需更詳細之數據與分析，則可與作者聯繫。在求解時間方面，此兩模式執行時間均能在14分鐘內求解完畢，且收斂間距皆能在3%內，效率頗佳。另外在實務規劃方面，本研究以模擬80週隨機需求之平均資料，利用實務作法進行規劃，求得目標值為208,140.50，總人力供給數為2,280，其含21班預防檢修人力及14班故障檢修人力。

由上述結果發現，基本模式與相互支援模式之目標值，皆較實務規劃結果為佳，此兩模式目標值分別減少3,396.75與4,349.25，改善幅度分別為1.63% $\left(=\left|\frac{204743.75-208140.50}{208140.50}\right|\right)$ 與2.09% $\left(=\left|\frac{203791.25-208140.50}{208140.50}\right|\right)$ ，表示導入相關的人力彈性制度及系統最佳化人力供給作法可為業者節省人事成本。在人力供給方面，由多餘及不足的人力可發現基本模式與相互支援模式的人力供給失衡量（等於多餘及不足的人力）分別較實務規劃結果減少150.62 $(=(217+180.19)-(75+88.88+29+53.69))$ 與181.32 $(=(217+180.19)-(48.7+89.63+38.3+39.24))$ 。由此可知，實務規劃以固定的值勤開始時點數、值勤開始時點、小班人數與工時長度，導致人力規劃上缺乏彈性，將造成人力浪費。而本研究模式以系統最佳化為主，並導入人力資源彈性化概念，除可有效幫助捷運公司達成其營運目標外，更可幫助捷運公司有效規劃人力供給，進而有效提升公司營運的績效。雖然本研究模式的排班結果在初期的應用上，可能會增加排班人員與值勤人員之認知複雜度，但是在實行一段時間之後，排班人員與值勤人員將逐漸熟悉此排班方式，因此此等問題將逐漸減少。

由於上述之結果並未評估二模式與實務規劃之實際營運績效差異，因此本研究利用3.3節發展之模擬評估方法，比較三者模擬80週隨機需求下之營運績效。在評估階段中，由於班次表及各週內各天各時段之人力供給量（含支援人力）已經固定，故僅需針對80週隨機需求求解其餘變數，之後再將各週需求下所求得之各項成本、故障檢修之多餘與不足人力結果加總平均。至於預防檢修多餘與不足人力的需求則因不具隨機特性，故其結果與規劃結果相同，不再贅述。此評估結果如表4所示，因實務規劃於人力規劃上缺乏彈性，

表 3 測試結果

求解結果	實務規劃		混合需求隨機性排班模式					
			基本模式			相互支援模式		
	預防	故障	預防	故障		預防	故障	
目標值 (元)	208,140.50		204,743.75			203,791.25		
下限解 (元)	NA		200,862.25			198,115.66		
GAP (%)***	NA		1.93			2.86		
求解時間 (秒)	NA		118.11			800.41		
人力需求 (人力一小時)	866	1016.81	866	1016.81		866	1016.81	
人力供給 (人力一小時)	1083	1197	912	1052		896	1056	
多餘人力 (人力一小時)	217*	180.19*	75	88.88		48.7	89.63	
不足人力 (人力一小時)	0**	0**	29	53.69		38.3	39.24	
支援人力 (人力一小時)	NA	NA	0	0		34	16	
總人力需求 (人力一小時)	1,882.81		1,882.81			1,882.81		
總人力供給 (人力一小時)	2,280		1,964			1,952		
值勤開始時點數	3	2	6	6		5****	3****	
總班次數	21	14	48	37		33	39	
4 小時班次數	0	21	0	14	34	14	20	17
8 小時班次數	0	14	34	14	20	17	14	19
值勤開始時點	09	10	23	07	15	02	03	09
						07	08	11
						00	02	03
						09	10	
						06	07	15
各值勤開始時點之班次數	7	7	7	7	7	2	4	10
						13	1	8
						7	2	4
						14	11	7
						1	7	7
						9	11	
						1	15	13

註：* 實務規劃並無多餘人力的附加功用，為求比較之公平性，本研究透過人工計算多餘的人力。

** 實務上，捷運公司之人力供給規劃上大多採取人力供給大於或等於需求的作法，故不足人力為 0。

*** GAP 為各模式之目標值與下限解（鬆弛各模式所有整數限制並以 CPLEX 軟體求解所得）之差距（%）。

**** 以最佳化理論而言，當值勤開始時點數愈大，人力規劃將愈具彈性，但由表中發現，相互支援模式於值勤開始時點數上，並非皆選擇最大之值勤開始時點數上限（即 6），其原因在於預防檢修與故障檢修需求量並非 24 小時皆有需求量，因此，在人力規劃過程中，並非皆需選擇最大之值勤開始時點數。

故導致模擬評估出來的結果皆比二隨機性排班模式的結果差。在實務規劃與二隨機性模式的比較上，基本模式與相互支援模式總成本分別比實務規劃減少 8,649.12 與 9,532.25，改善幅度分別為

$$4.25\% \left(= \left| \frac{204804.38 - 213453.50}{203453.50} \right| \right) \text{ 與 } 4.69\% \left(= \left| \frac{203921.25 - 213453.50}{203453.50} \right| \right),$$

顯示相互支援模式效果較佳。此外，基本模式與相互支援模式及實務規劃之平均總成本（分別為 204,804.38、203,921.25 與 213,453.5），均較規劃階段之目標值（分別為 204,743.75、203,791.25 與 208,140.50）為大，顯示規劃成本常較為「樂觀」，而實際營運後的成本卻較高，原因在實際營運時，面臨的隨機事件需即時調整規劃值，以維持營運之可行性，而此調整將破壞原規劃之最佳化結果，進而導致系統績效之降低。

表 4 模擬評估結果

	平均總成本	故障檢修平均多餘人力	故障檢修平均不足人力
實 務 規 劃	213,453.50	183.25	27.33
基 本 模 式	204,804.38	89.41	54.13
相互支援模式	203,921.25	90.63	40.14

另外值得注意的是，由於模式中之各項參數輸入，可能會造成不同的規劃結果與績效表現。因此為掌握各參數對模式求解之影響程度，本研究針對各項對營運影響較大之參數進行敏感度分析。為節省篇幅，以下簡單說明部分結果，讀者若需更詳細之數據與分析，則可與作者聯繫。實際上故障檢修人力的需求量可能因未來捷運路線增加、捷運車廂車齡老化或各種意外事件發生之關係，導致有不同的需求量分配，因此本研究針對隨機需求分配之平均數與標準差等參數，分別進行敏感度分析。結果發現，隨著人力需求規模變大，目標值皆呈現增加的趨勢，如圖 3 所示。

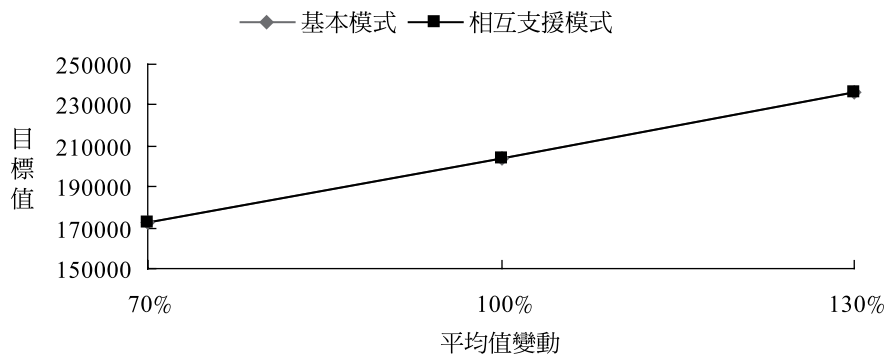


圖 3 平均數敏感度分析

另外，如圖 4 所示，由標準差敏感度分析發現，隨著標準差變動幅度增加，二模式目標值且均呈現些微增加的趨勢，但相較於平均值而言，其影響較不敏感。

綜合上述結果，在長期隨機規劃中，若需求量在實際營運中受到的人力需求規模或擾動性愈大時，則公司將付出更多的營運成本，以因應此人力需求規模與擾動的變化。

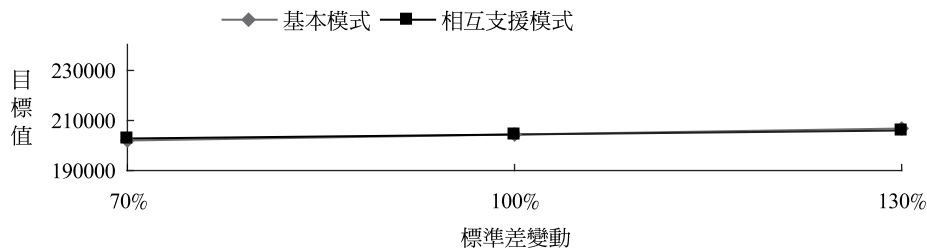


圖 4 標準差敏感度分析

五、結論與建議

本研究針對捷運公司檢修工廠之預防檢修與故障檢修人員進行人力規劃，除同時考量確定性之預防檢修需求及隨機性之故障檢修需求外，並結合人力資源的彈性管理策略，加入隨機規劃的觀點，構建兩個長期混合需求隨機性排班模式。本研究並透過一問題分解策略，配合數學規劃軟體，發展一啟發解法，以求解隨機規劃問題。為評估實務作法與二混合需求隨機性排班模式在隨機環境中之績效，本研究發展一模擬評估方法。最後測試結果發現，本研究發展之求解方法的求解品質與效率頗佳，皆能有效地求得各模式之近似最佳解。在規劃階段之結果發現，本研究所構建之兩個模式皆比實務規劃結果佳（改善幅度至少 1.66%），且兩個模式均能在 14 分鐘內求解完畢，顯示本研究模式可提供決策者於長期人力供給規劃上參考。此外，本研究更進一步比較兩模式發現，相互支援模式除可減少人力閒置，更可利用預防檢修之多餘人力支援故障檢修部門，以因應故障檢修需求量之不確定性。另外，在評估階段的測試中發現，二混合需求隨機性排班模式的結果皆較實務規劃的結果為佳，改善比率最少為 4.22%。綜合而言，本研究之模式、求解方法、及測試結果皆可提供為業界與學術界之參考。

本研究在設計上故障檢修人力需求的分佈，係依據與實務人員訪談的結果，假設其服從一截斷式常態分配，進行測試。未來業者在應用本研究模式時，應以實際的需求型態為輸入，以求得符合實務需要之人力供給規劃。此外，在捷運修護計畫流程中，本研究針對第二階段的人力供給進行研究，然完整之捷運修護流程尚包含有另兩階段，因此未來可進一步整合三階段，發展一整合排班架構，以更有效地規劃捷運公司的檢修人力。最後，本研究針對實際營運中經常性發生的擾動因素而導致的隨機性需求情況，進行人力規劃，至於其他較不常發生但擾動程度較嚴重之意外事件，例如地震、員工罷工等事件，則如何發展有效的營運調整模式，以幫助業者在即時營運中有效地調整人力，可為未來的研究課題。

參考文獻

1. Striskandarajah, C., Jardine, A. K. S., and Chan, C. K., "Maintenance Scheduling of Rolling Stock Using a Genetic Algorithm", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, 1998, pp. 1130-1145.
2. 張仲銓, 「基因演算法於捷運車廂維修排程之研究」, 輔仁大學管理研究所碩士論文, 民國九十二年。
3. 游雅惠, 「捷運列車排班問題之研究—以臺北捷運淡水—新店線為例」, 交通大學交通運輸研究所碩士論文, 民國八十九年。
4. Beasley, J. E. and Cao, B., "A Tree Search Algorithm for the Crew Scheduling Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 94, No. 3, 1996, pp. 517-526.
5. Langerman, J. J. and Ehlers, E. M., "Agent-based Airline Scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 33, No. 3-4, 1997, pp. 849-852.
6. Lučić, P. and Teodorovic, D., "Simulated Annealing for the Multiobjective Aircrew Rostering Problem", *Transportation Research*, Vol. 33A, 1999, pp. 19-45.
7. Yan, S. and Tu, Y. P., "A Network Model for Terminal Cabin Crew Scheduling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 140, No. 3, 2002, pp. 531-540.
8. Yan, S. and Chang, J. C., "Airline Cockpit Crew Scheduling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 136, No. 3, 2002, pp. 501-511.
9. Yan, S., Tang, T. T., and Tu, Y. P., "Optimal Construction of Airline Individual Crew Pairings", *Computers and Operations Research*, Vol. 29, 2002, pp. 341-363.
10. Yan, S., Yang, D. H., and Chen, S. H., "Airline Short-term Maintenance Manpower Supply Planning", *Transportation Research*, Vol. 38A, 2004, pp. 615-642.
11. Yan, S., Chen, C. H., and Chen, C. K., "Long-Term Manpower Supply Planning for Air Cargo Terminals", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 12, Issue 4, 2006, pp. 175-181.
12. 盧宗成, 「捷運司機員排班問題之研究—以臺北捷運公司為例」, 國立交通大學運輸工程與管理系碩士論文, 民國八十九年。
13. 蘇昭銘、張靖, 「捷運系統站務人員排班模式之研究」, 中華民國運輸學會第十三屆論文研討會論文集, 民國八十七年, 頁 613-622。
14. Morris, J. G. and Showalter, M. J., "Simple Approaches to Shift, Days-off and Tour Scheduling Problems", *Management Science*, Vol. 29, No. 8, 1983, pp. 942-950.
15. Lau, H. C., "On the Complexity of Manpower Shift Scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 23, No. 1, 1996, pp. 93-102.
16. Atkinson, J., "Manpower Strategies for Flexible Organizations", *Personnel Management*, Vol. 16, No. 8, 1984, pp. 28-31.
17. 羅奉文, 「勞動市場彈性化之研究—以部分工時為例」, 國立中央大學人力資源管理研究

所碩士論文，民國九十年。

18. 楊家雅，「彈性工時制度對員工工作滿意度及離職傾向之影響」，中國文化大學企業管理研究所碩士論文，民國八十一年。
19. 廖曜生，「彈性工時制度、個人屬性與工作特性、工作滿足、工作績效之關係研究－以國內電子業為例」，國立成功大學企業管理研究所碩士論文，民國八十七年。
20. 吳嘉銘，「彈性化工時與勞動參與率之研究」，中國文化大學勞工研究所碩士論文，民國九十年。
21. 黃景泰，「組織背景因素與組織規章對於企業人力彈性運用影響之研究」，國立中山大學企業管理學系碩士論文，民國八十八年。
22. 扈克勛，「醫院人力資源彈性之研究」，國立中山大學人力資源管理研究所碩士論文，民國八十九年。
23. Blyton, P. and Morris, J., "HRM and the Limits of Flexibility", Blyton, P. and Turnbull, P. Eds., *Reassessing Human Resource Management*, Sage Publication Ltd., London, 1992.
24. Mulvey, J. M. and Ruszczyński, A., "A New Scenario Decomposition Method for Large-scale Stochastic Optimization", *Operations Research*, Vol. 43, 1995, pp. 477-490.
25. Du, Y. and Hall, R., "Fleet Sizing and Empty Equipment Redistribution for Center-terminal Transportation Networks", *Management Science*, Vol. 43, 1997, pp. 145-157.
26. Yu, J. S. and Ting, K. L., "Application of Demand-responsive Trip-loading Simulation Model for the Evaluation of Transit Operation Schedules", *Transportation Planning Journal*, Vol. 27, No. 3, 1998, pp. 489-508.
27. Yan, S., Shieh, C., and Chen, M., "A Simulation Framework for Evaluating Airport Gate Assignments", *Transportation Research*, Vol. 36A, No. 10, 2002, pp. 885-898.
28. Kenyon, A. S. and Morton, D. P., "Stochastic Vehicle Routing with Random Travel Times", *Transportation Science*, Vol. 37, No. 1, 2003, pp. 69-82.
29. List, G. F., Wood, B., Nozick, L. K., Turnquist, M. A., Jones, D. A., Kjeldgaard, E. A., and Lawton, C. R., "Robust Optimization for Fleet Planning under Uncertainty", *Transportation Research*, Vol. 39E, 2003, pp. 209-227.
30. 楊大輝、李綺容、歐婉恬，「航空需求不確定下之軸輻式網路規劃」，中華民國運輸學會第20屆論文研討會論文集，民國九十四年，頁1213-1224。
31. Yan, S., Tang, C. H., and Shieh, C. N., "A Simulation Framework for Evaluating Airline Temporary Schedule Adjustments Following Incidents", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 28, No. 3, 2005, pp. 189-211.
32. Yan, S., Chi, C. J., and Tang, C. H., "Inter-city Bus Routing and Timetable Setting under Stochastic Demands", *Transportation Research*, Vol. 40A, 2006, pp. 572-586.
33. Yan, S. and Chen, H. L., "A Scheduling Model and a Solution Algorithm for Inter-city Bus Carriers", *Transportation Research*, Vol. 36A, 2002, pp. 805-825.
34. Higle, J. L. and Sen, S., *Stochastic Decomposition*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,

- 1996.
35. Birge, J. R. and Louveaux, F., *Introduction to Stochastic Programming*, Springer-Verlag, New York, 1997.
36. Ruszczyński, A. and Shapiro, A., *Stochastic Programming*, Elsevier, Amsterdam, 2003.
37. Garey, M. R. and Johnson, D. S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman, San Francisco, CA, 1979.

