

隨機需求下多目標長途客運 排程模式之研究¹

A MULTIPLE-OBJECTIVE SCHEDULING MODEL FOR INTER-CITY BUS CARRIERS UNDER STOCHASTIC DEMANDS

顏上堯 Shangyao Yan²

齊志仁 Chin-Jen Chi³

湯慶輝 Chin-Hui Tang⁴

(93 年 4 月 7 日收稿，93 年 5 月 12 日修改，94 年 1 月 12 日定稿)

摘 要

以往學術界在長途客運的排程規劃上，大都基於確定性需求，簡化現實每日營運的隨機需求現象。另外實務上，長途客運業者的短期營運目標可能同時考量最大化營運利潤與市場占有率，並非如文獻上常見之單一營運目標。因此，本研究考量多營運目標及每日隨機需求之特性，利用網路流動技巧，構建一隨機性需求下多目標城際客運排程規劃模式，以期幫助業者有效的規劃季節車隊排程與班次表。此模式可定式為一多目標非線性混合整數規劃問題，本研究利用權重法與模擬技巧，發展一多目標隨機啟發解法以求解模式。為比較確定性與隨機性需求模式，在隨機營運環境中的績效優劣，本研究亦發展一模擬評估方法。最後，本研究以國內一長途客運公司的營運資

-
1. 本研究承行政院國家科學委員會專題研究補助 (NSC-92-2211-E-008-047)，特此致謝。作者亦感謝二位審查委員寶貴的修正意見，使本文更為完整與嚴謹。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授 (聯絡地址：320 中壢市五權里中大路 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碩士。
 4. 國立中央大學土木工程學系博士候選人。

料為例，進行範例測試，結果甚佳，顯示本研究模式與求解演算法應可為實務業者之參考。

關鍵詞：長途客運排程；隨機性需求；多目標；權重法；模擬

ABSTRACT

In the past, research scholars usually used deterministic passenger demands as input for inter-city bus scheduling, simplifying the stochastic disturbances of daily passenger demands in actual operations. In addition, inter-city bus carriers in practice may aim at maximizing both the operating profit and the market share in their short-term operations, instead of confining to a single objective which was usually adopted in the inter-city bus scheduling literature. Considering the multiple objective and stochastic demands in actual operations, we employed network flow techniques to construct a stochastic-demand multi-objective scheduling model, with the objectives of maximizing the operating profit and the number of passengers, to help inter-city bus carriers effectively plan their bus fleet routes and timetables in their short-term operations. The model is formulated as a multiple objective nonlinear mixed integer program. We used the weighting method and the simulation technique to develop a heuristic algorithm to solve the model. To compare the performance of the deterministic-demand and stochastic-demand scheduling models in actual operations, we developed a simulation-based evaluation method. Finally, we conducted a case study using real operating data from a major Taiwan inter-city bus carrier. The results indicated that the model and the solution algorithm could be useful for inter-city bus carriers.

Key Words: *Inter-city bus scheduling; Stochastic demand; Multiple objective; Weighting method; Simulation*

一、緒 論

長途客運排程規劃直接影響營運成本、盈利、服務品質及資源使用率。一般長途客運業者在擬定班次表及排程過程中，常以營運利潤最大化或市場占有率最大化為目標，並考慮市場需求狀況、旅客隨機需求的特性、旅次需求量及其分布、服務水準、車輛容量、行駛時間、車隊規模、季節因素、駕駛員排班、及維修限制等諸多複雜的因素。然而，目前國內業者大都透過人工經驗及反覆試誤的作法進行排程的規劃，過程不僅費時且缺乏系統性分析，其所得之班次表及車隊排程僅為一可行方案，並不保證為最佳之方案。

為改善實務上低效率的排程做法，Yan 和 Chen^[1]曾利用數學規劃方法，建構一確定性需求排程模式。然而，此研究假設旅客需求已知且固定，忽略現實每日營運之隨機需求現象，易造成求得之最佳化排程，與日常營運的隨機需求量不符，而降低原規劃結果的營運績效。另外，Yan 和 Chen^[1]的模式目標為營運利潤最大化，然實務上業者短期營運目

標可能同時兼顧營運利潤與市場占有率，如此以單一最大利潤的目標可能無法適當描述及反映真實之決策問題，進而使規劃結果與實務之營運情況有相當的差異。因此，若能考量多營運目標及每日隨機性需求之特性，發展一有效且合乎現實環境的長途客運排程模式，則可望能幫助國內長途客運業者有效提高營運績效，進而提升其服務水準與市場競爭力。

考量多營運目標及隨機性需求下之長途客運排程及班次表規劃，在過去尚未發現有相關文獻探討。有鑑於此，本研究以長途客運業者為立場，考量多營運目標及每日隨機需求之特性，發展一隨機性需求下多目標排程規劃模式及一有效的求解方法，以幫助業者有效規劃季節車隊排程與班次表。另外，我們並更進一步探討在多目標規劃下，利用確定性需求規劃所求得的非劣解 (non-dominated solution)，在實際營運中受隨機需求的擾動下，比較於隨機性需求規劃所求得的非劣解，其營運結果是否仍可維持非劣解，而此探討在以往學術界未曾發現有相關的研究。

值得注意的是，日常營運的道路旅行時間與車輛出發時間的延遲（例如因為熱機、行前檢查、加油及駕駛員遲到等），在實際營運中亦呈隨機性。一般業者在排程規劃上，通常在二班次間加上一適當的固定緩衝時間，以吸收實際營運時車輛之少量隨機到離延誤 (Yan 和 Chen^[1])，故本研究模式暫不考慮此等隨機因素。至於，對較大的隨機事件，如碰到不預期的嚴重交通壅塞、機器短時間的故障等，則難以固定之緩衝時間方式處理。為適當降低模式之複雜化與求解困難度，本研究暫不考量此等較大的隨機因素。此等因素可在未來以本研究模式為基礎，繼續延伸修正為更完整與實用之模式。另外，本研究以國內高速公路之一長途客運業者營運為例，而此業者在長途客運的排程上，未有考量接駁公車之聯合運送作業，因此本研究暫不納入接駁公車之考量。

本研究在模式之構建上，主要參考 Yan 和 Chen^[1]之排程模式，利用多重時空網路觀念，構建多層的人流網路與一車流網路，以定式旅客與車輛在時空中的流動狀況，並進而延伸、發展一隨機性需求排程模式。此模式可定式 (formulate) 為一多目標多重貨物隨機網路流動問題。本研究參考以往多目標規劃之求解方法，利用權重法 (the weighting method) 與模擬技巧，發展一多目標隨機規劃之啟發解法，以求解隨機性需求模式。另外，為比較此隨機需求模式與確定性需求模式在隨機環境中之績效優劣，本研究亦發展一模擬評估方法。

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，第四節以一國內長途客運公司營運資料為例，進行測試分析，第五節提出結論及未來可能研究的方向。

二、文獻回顧

本研究主要在探討隨機性因素對多目標長途客運排程排班規劃的影響，然而以往長途客運排程的相關研究中，此部分的探討甚為缺乏。因此，本節分別針對有關公路客運排程排班的設計規劃、多目標規劃與隨機規劃之相關研究，進行文獻回顧。

2.1 公路客運排程排班設計

有關公路客運排程排班的設計規劃，可依研究範圍之不同，區分為都市公車 (urban bus) 與長途客運 (inter-urban bus) 兩大類，前者文獻較多於後者。都市公車方面大致可分為路線設計、排班設計與路線暨排班設計三類。由於此等研究的問題特性與長途客運的排程問題頗不相同 (Yan 和 Chen^[1])，故本節不詳述各相關文獻內容。讀者可參考如 Jansson^[2]、Kocur 和 Hendrickson^[3]、Chua^[4]、Koutsopoulos 等人^[5]、Ceder 和 Wilson^[6]、van Nes 等人^[7]、周義華及張國揚^[8]、Ceder^[9]、Chang 和 Schonfeld^[10,11]、或 Pattnaik 等人^[12]等。

在長途運輸方面，Salzborn^[13]曾提出有關公車接駁的排班法則，其重點在於幹線與接駁系統間的配合，有關城際幹線系統主要在於求解起站與終站公車之派車時間，對於城際客運的路線設計及排班方面，則沒有進一步深入探討。韓復華^[14]曾考慮多站式路線排班，其假設車輛數量充裕及旅行時間固定，以政策班距、公車容量限制及服務水準等限制，求解最少之分派班次。謝長宏與王浩聰^[15]曾構建一多站多區間多派車點的長途客運系統模式，以求取客運系統營運成本和旅客等待成本的極小值。龍天立^[16]曾以圖解法與演算法推演班次安排，並比較區間車與直達車排班的條件與原則。Berkhout^[17]曾提出一結合人工與自動程序的結構性方法 (structure method) 進行班表之求解。陳武正等人^[18]曾從供給面角度，在既定的班次下，利用數學規劃與網路的觀念，建構排班模式及適宜的調度制度。藍武王、王丘明^[19]曾假設乘客以 Poisson 分配隨機抵達，分析城際客運乘客到達率固定以及隨機抵達狀況下之等候時間與車輛排班公式。藍武王、林祥生^[20,21]曾以解析性模式探討高速公路客運轉運接駁系統，分別比較分析直達方案、接駁方案、轉運方案於同質環境及異質環境下之實施效益。藍武王、邱裕鈞^[22]曾構建線性軸輻路網模式，整合區位選擇、路線規劃及排班設計等三層面問題。許書耕等人^[23]曾針對高速公路客運設置轉運站，形成線性軸輻路網，分別就區位、站數、路線及排班加以考量，進行轉運系統排程與排班問題求解。

由於上述研究的問題背景與方法，無法適用於本研究國內一長途客運業者的排程需要，因此 Yan 和 Chen^[1]基於此長途客運業者立場，依據給定的路權及相關營運限制，考量旅次轉運，以最小系統成本為目標，利用多重時空網路定式人旅次流動與車輛流動，構建一整合旅次需求與班次供給之車隊排程模式，以幫助此長途客運業者規劃排程。

2.2 多目標規劃

Hwang^[24]曾在多目標模式的求解方法上，依決策者偏好訊息進入求解過程之時機予以分類。Zeleny^[25]曾指出多目標在決策的過程中可同時考慮多個決策目標的數學規劃，重點在於當目標間有相互衝突時，讓決策者能有效地尋找有用之非劣解或可接受之妥協解。由於過去多目標規劃已被廣泛運用於各個領域之中，故僅回顧以下數篇與運輸相關之文獻。

顏上堯及王中瑞^[26]曾以最小運輸成本為主要目標，最小旅客轉機次數為次要目標，利用多目標決策方法與網路流動技巧，發展一多目標飛航網路路線及頻次規劃模式。沈進成^[27]曾從營運供給與需求兩方面，應用非線性規劃方法，建立大眾運輸營運計畫最佳化模式。楊博文^[28]曾針對配合大眾捷運系統之接運公車的營運計畫，同時考慮營運業者與使用者之立場，以使用者每日總旅行時間成本最小及營運者每日總營運成本最小為目標，建立一多目標規劃模式，以提升決策之多元性及真實性。林秀璘^[29]曾同時考慮營運者與使用者的立場，以營運者每日長期營運總成本最小化及使用者每日總旅行時間最小化為目標，並納入旅客需求量、旅客設計運量與車輛容量等參數之不確定性，建立模糊環境下之公車營運計畫多目標規劃模式。Yan 和 Huo^[30]曾利用零壹整數規劃方法，考量旅客步行距離及等候時間、延後航次、取消航次等因素，以及機門指派限制，構建一多目標機門指派模式。並利用權重法、變數產生法、分枝界限法、連續變化權重法，發展兩個有效率之求解演算法，求得數個非劣解，供決策者參考。

2.3 隨機規劃

雖然以往長途客運排程的相關研究中，對於隨機規劃的探討較為缺乏，但在其他運輸相關的領域中，已有研究針對隨機擾動之規劃進行探討。如：Mulvey 和 Ruszczynski^[31]曾發展一事件分解 (scenario decomposition method) 演算法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，進行演算法之績效測試。Du 和 Hall^[32]曾以軸輻路網為例，針對隨機性需求下之貨車車隊規劃問題進行研究。游俊雄與丁國樑^[33]曾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運載模式。顏上堯與謝宗男^[34]曾針對航空公司意外事件排程與營運擾動之相關性進行研究，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^[35]曾針對機門指派規劃與即時營運擾動間相關性進行研究，並擬定一套系統性的模擬程序，分析機門指派規劃作業受班機到離延誤的影響。值得注意的是，上述二研究僅對實際營運上擾動對原規劃班表或指派的影響進行探討，並沒有進一步求得隨機擾動下之最佳排程班表或機門指派。Kenyon 和 Morton^[36]曾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 (SVRP, stochastic vehicle routing problem)，並發展一有效之求解演算法。List

等人^[37]曾針對需求不確定下之車隊規劃問題，以風險降低 (risk-reduction) 為觀念，取代在穩健最佳化 (robust optimization) 中常用之平均值－變異數 (mean-variance) 的方法，使未來車隊規劃更符合實際的營運需求。值得注意的是，此研究中所構建之車隊規劃模式為一中長期規劃，並未考量短期營運擾動下之排程班表。

綜合以上文獻回顧可知，在長途客運的文獻中，同時考量多營運目標及隨機性需求特性的排程及班次表規劃，在過去尚無相關的探討。

三、模式構建與求解演算法設計

本研究以國內一長途客運業者為立場，考量多營運目標及每日隨機需求之特性，構建一隨機性需求下多目標客運排程模式。另外，我們亦利用多目標規劃的求解方法與模擬技巧，發展一多目標隨機規劃的求解方法。最後，為評估此模式在隨機世界中的營運績效，本研究發展一模擬評估方法。

3.1 隨機性需求下多目標排程模式

本研究利用多重時空網路技巧構建一隨機性需求下多目標長途客運排程模式。模式包含一車流時空網路與多重人流時空網路，以定式車隊與旅客在時空中的排程與輸送。此模式可定式為一多目標多重貨物隨機網路流動問題。本節說明模式之基本假設、車流時空網路與人流時空網路及模式之數學定式。

1. 模式基本假設

為確定模式使用之範圍及限制，本研究參考國內一長途客運業者的實務作業，茲假設或已知下面資料：

(1) 已知市場各起迄點之潛在需求分布

長途客運市場之需求調查一般甚為費時且費力，本研究囿於有限之資源，為方便模式化起見，假設旅客需求之分布型態已知。值得注意的是，業者在未來使用此模式時，可針對其實際的需求型態予以運用。

(2) 長途客運公司以最大利潤及最多載運旅客數為目標

根據與此業者的訪談得知，此公司的短程營運目標除在追求公司的最大利潤外，亦會爭取市場占有率。本研究假設長途客運公司在此二目標下進行車隊排程與班次表規劃。注意，若業者的營運目標為此二者之一，則可簡化本研究模式為單一目標式。

(3) 本研究針對單車種排程

長途客運公司的車隊可能含數個車種，為便於構建模式，本研究僅針對單車種進行模式構建。未來若要發展多車種排程模式，可以單車種排程模式為基礎，修正後文中單一車流時空網路為多層車流時空網路，並增加車種間的營運替代限制。

(4) 業者不考量旅客到離起迄場站之停等，但考量轉運的停等時間

城際客運為預定時刻班表之運輸，旅客一般依公布的班表時刻提前抵達起站，到達迄站後自行離開，一般業者在實際排程作業中通常不考慮旅客於起迄站之停等時間，僅考量轉運過程中的旅客停等時間 (Yan 和 Chen^[1])。本研究模式僅考量轉運過程中旅客的停等時間對系統的成本影響，不考量旅客在起迄站的等待時間。然若需考量起迄站的停等時間，則可適當修正後文中人流網路節線的成本。

(5) 駕駛員排班與車隊維修排程需優先配合車隊排程之結果

駕駛員服勤之規定甚多，其排班作業本身即為一個相當複雜的問題。車隊之定期維修排程亦可能影響車隊排程。然而，考量在實務作業上，一般人員排班與維修安排較車隊排程具彈性，如國內業者有後補駕駛員之設計以及利用夜間分段維修之策略，故實務上排程之順序大多以車隊排程優先處理，駕駛員與維修相關作業則盡量予以配合，不得已時才進行部分班次之微調 (Yan 和 Chen^[1])，此屬本研究排程規劃階段完成後之後續工作，故在本研究中暫不予考慮。

2. 車流時空網路

本研究利用時空網路定式車隊排程，車流為車輛流動之簡稱，用以表示車輛在時空中之運行。其中車流時空網路定式車隊在時空中之排程，如圖 1 所示。圖 1 中之橫軸代表各場站之「空間分布」；縱軸則表示排程作業之「時間延續」。本研究在車流網路的設計上，考量班表規劃之實務需求，網路之時程長度暫以「日」為週期長度。至於業者在未來使用此模式時可依其需要，延長以週為週期。

車流網路中包含有節點及節線二要素。節點代表一場站在一特定時間之時空點。節點上之供給、需求代表於此節點上進入或流出系統的车辆數。節線代表兩時空點間車輛之活動事件。節線流量代表該事件的车辆流動數量。節線又可細分為班次節線、停留節線與循環節線等三種，分別說明如下：

(1) 班次節線

班次節線用以表示車輛於不同場站間之流動，為場站間營運路徑，代表一可能班次。班次節線起點時間為發車時間，迄點時間為行駛時間加上停靠休息時間，亦可加入用以吸收誤點之緩衝時間，增加車輛營運彈性、發車準點率與服務水準。班次節線的頻率設計，依各起迄站間的尖離峰時段之不同，分別給予不同密集度的發車頻率。節線成本為行駛公里數乘以每公里之平均營運成本，節線流量上限為 1，代表該班次最多被服務 1 次；下限為 0，代表不被服務。

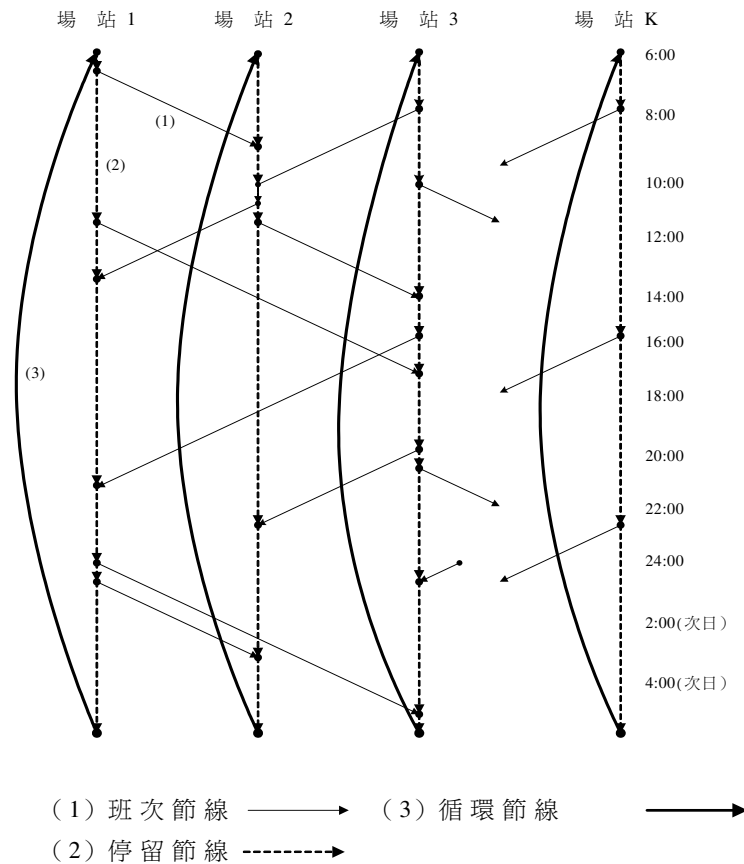


圖 1 車流時空網路示意圖

(2) 停留節線

停留節線用以表示車輛於場站的停留。此節線在車流網路中為同一場站向下遞延節線，用以表示車輛於場站一時窗中停留，其流量上限為場站可容納車輛的上限；下限為 0，表示車輛於該時窗不在此站停留。節線成本則為此時窗的停車費用。

(3) 循環節線

循環節線用以表示同一場站每一週期之循環連線節線，連接一個週期與次一週期之節線。其成本為一週期與次一週期間之停車費用，流量上下限的意義則與停留節線相同。至於時空網路之週期長度可依業者視實務需要調整，本研究之週期長度以一天為例。

3. 人流時空網路

本研究利用人流時空網路定式旅客在時空中的流動情形。人流為旅客流動的簡稱。本研究對每一旅客隨機需求狀況 (scenario) 下，每一起迄對需求構建一人流時空網路，如圖

2 所示。每一人流網路包含有節點及節線二要素。節點代表一場站在一特定時間之時空點，其節點設計方式與車流網路相同。由於旅客起迄需求係以節線方式設計，故各節點無供給或需求。節線代表兩時空點間車輛之活動事件。節線流量為代表該事件的旅客流動數量。節線又可細分為旅客流動節線、停留節線與旅次需求節線等三種，分別說明如下：

(1) 旅客流動節線

旅客流動節線用以表示旅客於不同場站間流動。為配合車流網路班次節線之起迄時間與空間，故旅客流動節線設計與車流網路班次節線相同。節線上限為車輛之座位數乘以各起迄對之規劃承載率；下限為 0，代表該時段並無輸送任何旅客。節線成本為該班次載送一個旅客的變動成本。

(2) 停留節線

停留節線用以表示旅客於同一場站的停留時間。此節線為同一場站向下遞延節線，用以表示旅客於場站中停留，其流量上限為場站可容納旅客的人數上限；下限為 0，表示無旅客在此站停留。若為起迄兩車站之停留節線則節線成本為零，其餘（為轉運站）節線成本為旅客轉運的單位等候時間成本。

(3) 旅次需求節線

為一連接起點、迄點車站之反時空方向節線，時間長度以起迄旅行時間長加上一規劃之旅客運送時窗，其流量表示一個起迄對（二個不同場站間）於該時窗內被服務之旅次數。旅次需求節線間隔之設計，可依業者其市場特性或本身需求之考量給予彈性設計，若規劃所面對之旅客對時間比較敏感，則可設計較小之時間間隔，如此一起迄需求必須在較小的時窗內完成運送；反之，若規劃所面對之旅客對時間較不敏感，則可設計較大之時間間隔，如此一起迄需求可在較大的時窗內完成運送。此節線成本為票價收入之負值（因本研究之數學模式之一目標式定式為系統成本最小化）。注意，此節線流量上限為在各旅客隨機需求狀況下，該旅次時窗內之旅客需求量，故為一隨機變數；下限為 0。經求解得節線流量代表在各隨機需求狀況下，該起迄對於其時窗內旅次之服務量，而節線上限之需求值與求解節線流量值之差額為該時窗內，各隨機需求狀況下未服務之旅次量。

4. 數學定式

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，可參閱 Hight 和 Sen^[38]、Birge 和 Louveaux^[39] 或 Ruszczyński 和 Shapiro^[40]。根據其概念，並參考 Mulvey 和 Ruszczyński^[31] 之模式，在本研究的規劃排程上，車隊排程須在旅客需求狀況已知前完成規劃。而當某一隨機需求狀況已知後，即可在其需求狀況下，進行人流旅次之規劃，求得在該需求狀況下之最小人流成本或最大服務人數。因此，本研究將第一階段

規劃視為車隊排程規劃，所對應之決策變數即為車流網路變數；第二階段規劃，為在各隨機需求狀況下之旅客流動情形，所對應之決策變數即為人流網路變數。

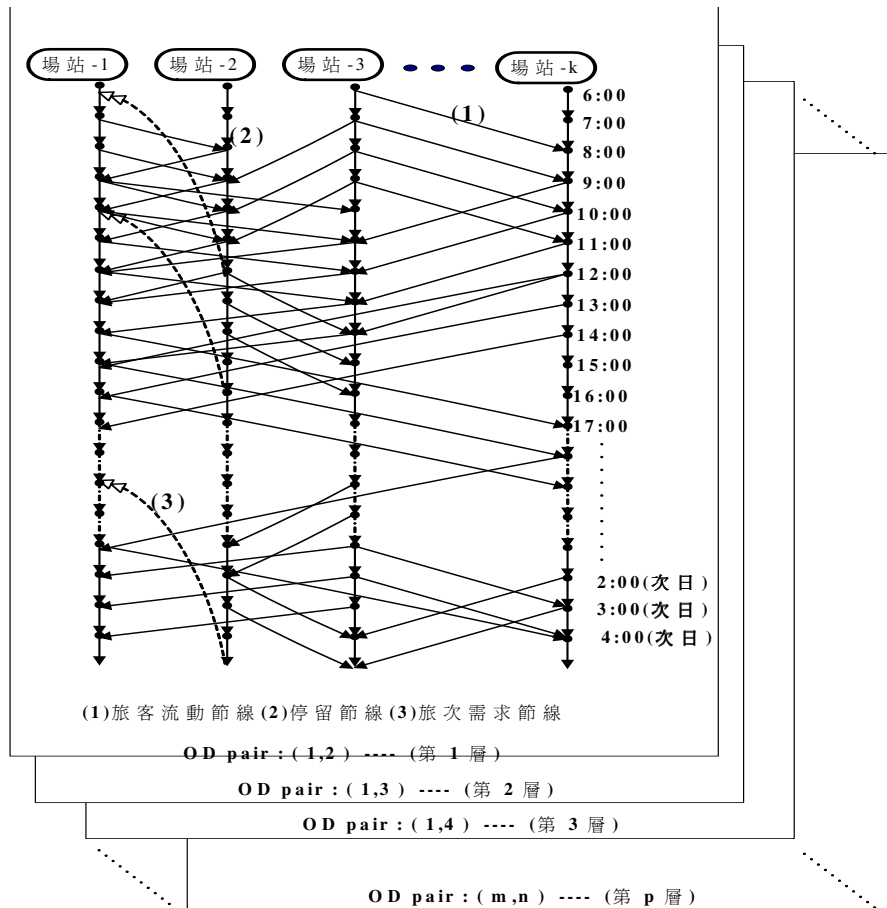


圖 2 人流時空網路示意圖

除車流與人流網路之基本限制條件外，在實務營運上對於排程及班次表須滿足下列二額外限制條件：一、車隊規模不可超過現有可用車輛數；二、旅客與車輛之承載限制。另外，本研究參考 Yan 和 Chen^[1]之作法，將人流網路之節線變數設為實數變數，此在現實規劃的問題上影響不大。由於本研究同時考量業者追求最小營運成本與最大服務人數之二目標，因此此模式可定式為一多目標多重貨物隨機網路流動問題。其相關之變數定義如下：

X_{ij} : 表示車流時空網路節線 (i, j) 之流量；

$Y_{ij}^d(\omega)$: 表示在第 ω 個隨機需求狀況下，第 d 層人流時空網路節線 (i, j) 之流量。

其餘參數定義如下：

- N, A ：分別表示車流網路中所有節點與節線之集合；
 C_{ij}, U_{ij} ：分別表示車流時空網路節線 (i, j) 之成本與上限；
 d, D ：分別表示第 d 層人流網路與所有人流網路之集合；
 T_{ij}^d ：表示第 d 層人流時空網路節線 (i, j) 之成本；
 Ω ：表示所有旅客隨機需求狀況 (或事件) 之集合；
 $H_{ij}^d(\omega)$ ：表示在第 ω 個隨機需求狀況下，第 d 層人流時空網路旅次需求節線 (i, j) 之上限 (即代表在第 ω 個隨機需求狀況下，第 d 個起迄對，於節線 (i, j) 時窗內之旅次需求)；
 U_{ij}^d ：表示第 d 層人流時空網路旅客流動與停留節線 (i, j) 之上限；
 Q^d, B^d ：分別表示第 d 層人流網路中所有節點與節線之集合；
 BS^d ：表示第 d 層人流網路中所有旅次需求節線之集合；
 BD^d ：表示第 d 層人流時空網路旅客流動與停留節線之集合；
 F ：表示可用的車輛數量；
 CF ：表示車流網路中所有循環節線之集合；
 SA ：表示車流網路中所有班次節線之集合；
 W_{ij} ：表示班次 (i, j) 的車輛規劃容量；
 E_ω ：表示各隨機旅客需求狀況下之期望值。其中， $E_\omega[\sum_{d \in D} \sum_{ij \in B^d} T_{ij}^d Y_{ij}^d(\omega)]$ 表示各隨機旅客需求狀況下人流成本之期望值， $E_\omega[\sum_{d \in D} \sum_{ij \in BS^d} Y_{ij}^d(\omega)]$ 表示各隨機旅客需求狀況下服務人數之期望值。

模式之數學式如下：

模式一：

$$\text{Min} \quad \sum_{ij \in A} C_{ij} X_{ij} + E_\omega[\sum_{d \in D} \sum_{ij \in B^d} T_{ij}^d Y_{ij}^d(\omega)] \quad (1)$$

$$\text{Max} \quad E_\omega[\sum_{d \in D} \sum_{ij \in BS^d} Y_{ij}^d(\omega)] \quad (2)$$

$$\text{S.T.} \quad \sum_{j \in N} X_{ij} - \sum_{k \in N} X_{ki} = 0 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{ij \in CF} X_{ij} \leq F \quad (4)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq U_{ij} \quad \forall ij \in A \quad (5)$$

$$\sum_{d \in D} Y_{ij}^d(\omega) \leq W_{ij} X_{ij} \quad \forall ij \in SA, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (6)$$

$$\sum_{j \in Q^d} Y_{ij}^d(\omega) - \sum_{k \in Q^d} Y_{ki}^d(\omega) = 0 \quad \forall i \in Q^d, \quad \forall d \in D, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (7)$$

$$0 \leq Y_{ij}^d(\omega) \leq H_{ij}^d(\omega) \quad \forall ij \in BS^d, \quad \forall d \in D, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (8)$$

$$0 \leq Y_{ij}^d(\omega) \leq U_{ij}^d \quad \forall ij \in BD^d, \quad \forall d \in D, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (9)$$

$$X_{ij} \in I \quad \forall ij \in A \quad (10)$$

目標式 (1) 為車流成本加上各隨機旅客需求狀況下人流成本之期望值，代表系統成本之期望值最小化，由於票價收入已以負成本代入，故此目標式亦等於利潤之期望值最大化。目標式 (2) 代表在各隨機旅客需求狀況下，服務人數期望值最大化。式 (3) 為車流網路之流量守恒限制式。式 (4) 表示所有使用的車輛數必須小於或等於可用的車輛數。式 (5) 為車流網路節線流量上、下限之限制。式 (6) 為旅客與車輛的承載限制，表示在各旅客隨機需求狀況下，對應於任一班次節線，各層人流時空網路上之旅客流動節線流量和，必須小於或等於對應之車流班次節線流量乘上該車輛規劃容量。式 (7) 為各旅客隨機需求狀況下，人流網路之流量守恒限制式。式 (8) 為各旅客隨機需求狀況之人流網路中，旅次需求節線流量上、下限之限制。式 (9) 為各旅客隨機需求狀況之人流網路中，旅客流動與停留節線上、下限之限制。式 (10) 為車流網路之整數限制。

值得一提的是，若實務上業者在某些營運路線上有最小服務班次數之限制時，則可加入下面之額外限制式：

$$\sum_{ij \in DA_{tw}} X_{ij} \geq L_{tw} \quad \forall tw \in G \quad (11)$$

其中：

DA_{tw} ：表示起迄場站 tw 間所有班次節線之集合；

L_{tw} ：表示起迄場站 tw 間所須達到之最小服務班次數；

G ：為所有起迄場站之集合。

另外值得注意的是，根據 Ruszczyński 和 Shapiro^[40] 所提的概念，我們可將車流變數 X_{ij} ，根據各隨機需求狀況予以劃分為 $X_{ij}(1), X_{ij}(2), \dots, X_{ij}(\omega)$ ，並於模式中增加非預期限制式 (nonanticipativity constraint)。亦即將原先之第一階段規劃之決策變數改寫為 $X_{ij}(\omega)$ ，以表示在第 ω 個隨機需求狀況下，車流時空網路節線 (i, j) 之流量。如此本研究之隨機模式可改寫如模式二所示。其中，限制式 (22) 即為非預期限制式，代表車流變數在各隨機需求狀況下皆須相等。值得一提的是，此模式之概念，為本研究後續所發展之多目標隨機啟發解法之基礎。

模式二：

$$\text{Min} \quad E_{\omega}[\sum_{ij \in A} C_{ij} X_{ij}(\omega) + \sum_{d \in D} \sum_{ij \in B^d} T_{ij}^d Y_{ij}^d(\omega)] \quad (12)$$

$$\text{Max} \quad E_{\omega}[\sum_{d \in D} \sum_{ij \in BS^d} Y_{ij}^d(\omega)] \quad (13)$$

$$\text{S.T.} \quad \sum_{j \in N} X_{ij}(\omega) - \sum_{k \in N} X_{ki}(\omega) = 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (14)$$

$$\sum_{ij \in CF} X_{ij}(\omega) \leq F \quad \forall \omega \in \Omega \quad (15)$$

$$0 \leq X_{ij}(\omega) \leq U_{ij} \quad \forall ij \in A, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (16)$$

$$\sum_{d \in D} Y_{ij}^d(\omega) \leq W_{ij} X_{ij}(\omega) \quad \forall ij \in SA, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (17)$$

$$\sum_{j \in Q^d} Y_{ij}^d(\omega) - \sum_{k \in Q^d} Y_{ki}^d(\omega) = 0 \quad \forall i \in Q^d, \quad \forall d \in D, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (18)$$

$$0 \leq Y_{ij}^d(\omega) \leq H_{ij}^d(\omega) \quad \forall ij \in BS^d, \quad \forall d \in D, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (19)$$

$$0 \leq Y_{ij}^d(\omega) \leq U_{ij}^d \quad \forall ij \in BD^d, \quad \forall d \in D, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (20)$$

$$X_{ij}(\omega) \in I \quad \forall ij \in A, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (21)$$

$$X_{ij}(\omega_1) = X_{ij}(\omega_2) \quad \forall ij \in A, \quad \omega_1, \omega_2 \in \Omega, \quad \omega_1 \neq \omega_2 \quad (22)$$

值得一提的是，此模式若欲運用於其他業者的營運，而其條件與本模式基本假設有部分差異時，則應進一步修正本模式。例如，若業者在實務上係以多車種為營運方式，而不同於本模式基本假設之第三點，則本研究模式應修正為多車種之排程規劃模式。其初步作法上，可將原單一車流時空網路修改為多重車流時空網路。其中一層車流時空網路，對應一車種，表示該車種車輛在時空中之運行。模式中車流變數 X_{ij} 需修改為 X_{ij}^m ，其餘的相關參數，如 C_{ij} 與 U_{ij} 亦需相對的修改為 C_{ij}^m 與 U_{ij}^m 等。其中， m 表示第 m 個車種。另外在數學式部分，需再加入車種間的營運替代限制，以模式二為例，即為 $\sum_{m \in M} X_{ij}^m(\omega) \leq 1$ ，代表任一班次最多可被一車種服務一次。目標式 (12) 亦需相對的修改為 $E_{\omega}[\sum_{ij \in A} C_{ij} X_{ij}^m(\omega) + \sum_{d \in D} \sum_{ij \in B^d} T_{ij}^d Y_{ij}^d(\omega)]$ 。至於其餘相關之限制式亦需相對的修正，其具體的作法可為未來的研究方向。

3.2 求解與模擬評估方法

本研究模式可定式為一多目標非線性混合整數規劃問題，屬於 NP-hard 問題。首先，本研究參考以往多目標規劃問題之求解方法，採用權重法將此多目標問題轉換為一單目標問題。之後，結合模擬技巧與數學規劃方法，發展一以模擬為基礎之多目標隨機啟發解法。茲分別說明如下：

1. 多目標問題求解方法

多目標規劃的求解方法甚多，大致上可依照決策者在決策過程中所扮演之角色歸納為四類 (Hwang^[24])。其中，權重法為多目標規劃中較基本的一種分析方法，在以往也被廣泛採用。因此，本研究參考 Yan 和 Huo^[30] 之作法，在求解方法上係利用權重法進行多目標問題之求解。至於其他可能合適的解法可作為後續的研究方向。

權重法之特性為在目標函數前設定一個權重，並將加權後的各個目標予以加總，使多目標規劃問題轉化成單目標規劃問題進行求解，再藉由權重的變動，求得數個非劣解集合以供決策者選擇。注意，各權重下單目標問題之最佳解，即為此多目標問題之一非劣解 (Yan 和 Huo^[30])。因此，針對目標式 (12) 與 (13) 本研究設定一權重向量 $\{\alpha, 1-\alpha\}$ ，另外，為統一兩目標式單位，本研究將最大服務旅客數目標式乘以一人數轉收益之當量值 k ，將原人數單位轉換成與另一目標式 (最小系統成本) 相同的單位。因此，上述兩目標式可合併為單一目標式如下：

$$\begin{aligned} \text{Min } \alpha \left(E_{\omega} \left[\sum_{ij \in A(\omega)} C_{ij} X_{ij}(\omega) + \sum_{d \in D(\omega)} \sum_{ij \in B^d(\omega)} T_{ij}^d Y_{ij}^d(\omega) \right] \right) \\ - (1-\alpha) k \left(E_{\omega} \left[\sum_{d(\omega) \in D(\omega)} \sum_{ij \in BS^d(\omega)} Y_{ij}^d(\omega) \right] \right) \end{aligned} \quad (23)$$

其中， α 為權重值， $0 \leq \alpha \leq 1$ 。 k 為人數轉收益之當量值。

值得一提的是，在轉換為單目標模式後，若鬆弛模式二中之非預期限制式，則可在給定的權重值下，利用確定性模式分別求解各隨機狀況下之最佳解。Birge 和 Louveaux^[39] 或 Ruszczyński 和 Shapiro^[40] 曾針對單目標模式證明出，對一最小化問題而言，隨機模式之最佳解，必定大於等於各隨機狀況下最佳解之平均值 (期望值)。因此，本研究在任一權重值下，各隨機狀況下最佳解之平均值可作為該權重下加權目標值之一下限解。

2. 隨機性需求排程模式求解

將上述多目標模式利用權重法轉換為單目標模式後，本研究利用模擬技巧發展一以模擬為基礎之隨機啟發解法。首先，我們隨機產生 S 組之旅客需求量，並根據模式二之概念，鬆弛模式二中之非預期限制式 (22)，如此即可將原先隨機規劃問題分解為 S 個確定性需求排程問題，並利用 CPLEX 數學規劃軟體求解各確定性需求排程問題之最佳解。注意，在

各權重值下，此 S 個隨機需求狀況下最佳解之平均值（期望值），可作為該權重值下目標值之下限解。之後，將各隨機狀況下最佳之車流結果，以受需求擾動較小之車輛班次為觀念，挑選受需求擾動狀況較小之部分班次。在挑選上，本研究主要是根據各隨機狀況之車流排程結果，統計車流網路上各班次（即車流網路中之班次節線）之重複出現的次數，若在 S 組中其出現次數超過預設的出現率時，則表示此班次較能夠承受隨機需求的擾動，故予以挑選。之後，固定前數回合中被挑選出之班次，再以原先各隨機狀況之需求量，分別求解各隨機狀況的車流結果。如此重複上述挑選過程，直到運算回合數超過預設的回合數後停止。最後，固定所有回合中被挑選之班次，再以此 S 組隨機狀況之平均需求量，利用確定性需求排程問題求解剩餘之班次。

為更清楚了解班次挑選之方式，茲舉一簡例說明如下：設有兩班次 A 與 B ，其在 30 個隨機需求狀況下出現的次數分別為 21 與 12 次。並假設出現率篩選標準為 50%。因為班次 A 的出現比率 70% ($= 21/30$) 超過預設的出現率 50%，所以我們確定班次 A 較能夠承受隨機需求的擾動並予以挑選。另一方面，由於班次 B 的出現率 40% ($= 12/30$) 低於預設的出現率 50%，因此我們不挑選班次 B 。注意，此預設的出現率與班次判定的方式，其主要目的在挑選出能夠承受隨機擾動之班次，於實際規劃時，業者可透過多次測試以設定一較佳之出現率及挑選方式，至於本研究設計之挑選機制，亦可做為一求解之參考。

此啟發解法的概念，係透過模擬技巧，篩選較能承受隨機需求擾動之班次，以符合實際營運的隨機擾動情形。若部分班次未達篩選標準而較難承受隨機需求之擾動（亦即在不同的隨機需求下，其解較不穩定），則利用各隨機狀況下之平均需求量求解此部分班次。具體而言，此啟發解法的設計觀念係將排程解受隨機擾動之影響性縮小班次範圍，以避免系統過大的擾動而降低營運績效。如此設計的原則，期能求得一更能承受隨機需求擾動之整體車隊排程及班次表。此啟發解之詳細步驟如下所示。

【步驟 0】：設定隨機需求狀況數 S 、運算回合數 M 、預設之出現率與權重值 α 。

【步驟 1】：輸入模式資料，內容包括時空網路資料（不含旅次需求量）、成本資料及車輛資料等。

【步驟 2】：隨機產生 S 組不同之旅次需求。並鬆弛模式二中的非預期限限制式 (22)，如此即可將原隨機規劃問題，分解為 S 個獨立的確定性需求排程問題，如模式三所示。

模式三

$$\text{Min } \alpha \left(\sum_{ij \in A} C_{ij} X_{ij} + \sum_{d \in D} \sum_{ij \in B^d} T_{ij}^d Y_{ij}^d \right) - (1 - \alpha) k \left(\sum_{d \in D} \sum_{ij \in BS^d} Y_{ij}^d \right) \quad (24)$$

$$\text{S.T. } \sum_{j \in N} X_{ij} - \sum_{k \in N} X_{ki} = 0 \quad \forall i \in N \quad (25)$$

$$\sum_{ij \in CF} X_{ij} \leq F \quad (26)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq U_{ij} \quad \forall ij \in A \quad (27)$$

$$\sum_{d \in D} Y_{ij}^d \leq W_{ij} X_{ij} \quad \forall ij \in SA \quad (28)$$

$$\sum_{j \in Q^d} Y_{ij}^d - \sum_{k \in Q^d} Y_{ki}^d = 0 \quad \forall i \in Q^d, \quad \forall d \in D \quad (29)$$

$$0 \leq Y_{ij}^d \leq U_{ij}^d \quad \forall ij \in B^d, \quad \forall d \in D \quad (30)$$

$$X_{ij} \in I \quad \forall ij \in A \quad (31)$$

【步驟 3】：令運算回合 $m = 1$ 。

【步驟 4】：令隨機狀況 $s = 1$ 。

【步驟 5】：將第 s 隨機需求狀況之需求量代入模式三中求解。

【步驟 6】：若 $s > S$ ，進行步驟 7；否則， $s = s + 1$ ，並回到步驟 5。

【步驟 7】：統計各班次於此 S 個隨機狀況下之出現次數，若其出現率大於預設的出現率，則挑選此班次。

【步驟 8】：若 $m > M$ ，則進行步驟 9。否則，固定之前所挑選之班次， $m = m + 1$ ，並回到步驟 4。

【步驟 9】：固定所有挑選之班次，並以此 S 個隨機需求狀況之平均需求，求解模式三，以求得剩餘之班次。計算上，可固定模式中所挑選之班次（車流變數值），即固定目標式 (24) 及限制式 (25)、(26)、(27)、(28)、(31) 之已挑選 X 變數（車流班次變數），重新求解問題即可。

【步驟 10】：利用單一車輛定線法 (Yan 和 Lin^[41])，求得各單一車輛行駛路線。

注意，為分析確定性需求與隨機性需求規劃之差異，本研究以上述 S 個隨機需求狀況之平均需求量求解步驟 2 中的模式三，求得在各權重下的確定性需求班表。

3. 模擬評估方法

為評估隨機性需求規劃與確定性需求規劃兩者之績效差異，本研究利用模擬技巧發展一評估方法。此評估方法，係隨機產生 D 日的旅客隨機需求。此 D 日之隨機需求與之前 S 隨機需求狀況中之旅次需求量不同。最後，將相同權重下的確定性需求與隨機性需求班表，以最佳化運送旅客的方式，分別求得兩班表每日之營運績效值，之後，綜合多日的營運績效值，以評估兩班表之營運績效差異。

此評估方法的步驟如下：

【步驟 0】：設定模擬評估日 D 。

- 【步驟 1】：輸入模式資料，內容包括給定的車流網路之排程班次節線（即同一權重下的確定性需求與隨機性需求班表）及相關成本資料（不包含旅次需求量）。
- 【步驟 2】：隨機產生 D 日之不同旅次需求。
- 【步驟 3】：令評估日 $d = 1$ 。
- 【步驟 4】：將求得的班表，以第 d 評估日之需求量，求解各人流網路最佳化運送方式。計算上，可固定模式三中車流的變數值，即固定目標式 (26) 及限制式 (27)、(28)、(29)、(30)、(33) 之 X 變數（車流變數），重新求解問題即可。
- 【步驟 5】：若 $d > D$ ，進行步驟 6；否則， $d = d + 1$ 並回到步驟 4。
- 【步驟 6】：統計 D 評估日下之求解結果，包括各權重下之平均使用車輛數、平均班次數、平均旅次服務率、平均目標績效值、平均利潤、與平均服務人數。

值得一提的是，在步驟 6 中， D 評估日之求解結果可代表確定性需求與隨機性需求規劃，在每日營運之績效表現。因此，本研究亦以 D 評估日之求解結果，探討在同一權重下，確定性需求規劃所得的非劣解，於每日營運中，比較於隨機性需求所規劃的解，其營運結果是否仍可維持非劣解。

四、實例測試

為測試隨機性需求排程模式於實際運用之績效，本研究以國內一長途客運業者之實際營運資料，進行模式測試及分析。本研究在 Microsoft Windows 之作業平台下，以 Visual Studio C++ 6.0 撰寫 C 程式語言，結合 CPLEX 7.1 最佳化軟體進行模式構建與求解，並於 INTEL P4 2G，1Gb RAM 之個人電腦執行運算。

4.1 資料輸入分析

本研究以國內 X 長途客運公司之客運班次表及其各路線等相關營運資料為依據，進行測試。此測試資料含場站、路線資料、車種、起迄旅客需求量資料、成本資料、票價資料及場站間行駛時間資料等。其中，成本、票價、營業車輛數及旅次服務量等資料皆參考齊志仁^[42]之資料，並做適當的假設及推估。在場站及路線資料方面，本研究根據 X 客運公司之八十七年十月營運概況表，該公司當時的行駛路線共有二十四條，其中九條屬於績優路線，十五條屬於通運路線。本次研究之對象以績優路線為主，就現況環境而言，不考慮最小服務班次數與各路線之單日行車次數上限限制。

本研究在場站選擇部分，由於測試對象與模式規模的考量，茲選取 X 公司較具代表性之五個主要城市，臺北、臺中、嘉義、臺南及高雄，及 6 條實際營運路線（12 條往返起迄場站路線），含臺北－臺中、臺北－嘉義、臺北－臺南、臺北－高雄、臺中－臺南與臺中－高雄等，進行測試分析。在路網之設計上，考量 X 客運於民國 90 年 8 月將臺中朝馬

站設置為轉運站，因此，本研究依照 X 公司現有之營運方式，假設旅客僅能於臺中站進行轉運選擇，而無法由其他場站進行轉運。注意，此作法不僅較符合現況之營運方式，亦能大幅縮減問題規模，降低求解的困難度。車隊規模方面，由於本研究僅針對五個場站十二條營運路線進行測試，並未考量所有營運路線，因此在車隊規模上係參考業者的營運現況，假設可用車輛數為 170 輛。在座位數量方面，分別有 33、35、37 座等三種。為求簡化起見，本研究將各廠牌之車輛視為單一車種，並假設其座位數為 35 座。在車輛行駛速率方面，於訪談後以平均 70 公里／時為假設之車輛平均行駛速率，並加上車輛休息時間 15 分鐘，進行估算各場站間之班次節線時間。

在旅次需求部分，其中旅客需求量之分布型態，由於一般客運公司並無詳細資料，礙於人力物力之限制，為便於測試，本研究假設旅次需求分布服從常態分配。注意，業者在未來使用此模式時，可針對實際的需求型態予以修正，其不影響模式之基本架構。另外，本研究在班次節線密度設計上以十五分鐘為一時點，但在旅次需求節線的設計上，考量的是以一小時為間隔之旅次需求量。由於此網路設計無法精確估計每十五分鐘之旅次需求量，因此我們引進車輛規劃容量觀念，以避免所需服務之旅次過於集中。模式中各營運路線之規劃容量皆以車容量數乘以承載率 0.6 為輸入值，對此規劃容量業者可依各路線之特性進行調整。另外，未來在能夠更精確估算旅次的需求下，亦可修正網路資料，增加旅次需求節線之密度與適當放大規劃容量，期能更精準地求解排程規劃問題。

4.2 測試結果分析

本研究經過多次測試後，發現隨機需求狀況數 (即 S) 與評估日 (即 D)，在超過 30 個後所求得之解與評估績效結果差距不大，但所需之求解時間卻大幅增加。因此，為方便測試，本研究的隨機需求狀況數與模擬評估日皆設定為 30。然而，此設定可依業者實際考量進行調整。另外，由於需求之產生含有隨機因子，單一的測試結果可能較不具代表性，因此本研究以 5 組測試例 (每組隨機產生 30 個不同隨機需求狀況與評估日) 進行測試分析。其次，在預設出現率上，經多次測試後，設定為 50%，即班次出現次數超過 50%，才進行挑選並固定。運算回合數部分，根據測試的經驗，設定為 1 回合。權重值部分，本研究分別以五種權重值進行測試，即 (1, 0)、(0.75, 0.25)、(0.5, 0.5)、(0.25, 0.75) 與 (0, 1)。至於其他的權重值，可於未來研究中進一步測試。另外，本研究根據與業者訪談結果，將人數轉收益之當量值 k 設為 244.8 元／人。

為評估本研究啟發解法之求解效果，在各權重值與測試例下，我們以 30 個隨機需求狀況下最佳解之平均值，作為該權重值與該測試例下之目標值下限解。茲定義下限解間距如下：

$$\text{下限解間距 (\%)} = |(\text{啟發解目標值} - \text{下限解目標值}) / \text{下限解目標值}| \quad (32)$$

注意，此下限解間距可用以衡量啟發解之最大可能誤差。測試結果如表 1 所示，在所有的權重值與測試例組合中，各下限解間距皆在 2% 以內，亦即各啟發解的最大可能誤差皆在 2% 以內。其中，在權重 (0.5, 0.5) 與測試例 5 下，下限解間距最小，其值約為 0.03%；

表 1 各權重下之測試結果

權重與測試例	下限解目標值 (元)	啟發解目標值 (元)	下限解間距 (%)	啟發解法求解時間 (秒)
(1, 0)				
1	-2342283.29	-2324766.33	0.75	4333.4
2	-2352207.69	-2329746.93	0.95	4195.9
3	-2347145.14	-2346197.42	0.04	4772.2
4	-2351792.93	-2348001.46	0.16	4379.1
5	-2344089.55	-2338190.56	0.25	4667.3
平均值	-2347503.72	-2337380.54	0.43	4469.6
(0.75, 0.25)				
1	-2332119.79	-2286154.31	1.97	4137.4
2	-2341959.98	-2317736.97	1.03	3989.6
3	-2333456.27	-2314428.20	0.82	4508.3
4	-2341466.14	-2297955.41	1.86	3950.8
5	-2331809.08	-2318673.57	0.56	4318.8
平均值	-2336162.25	-2306989.69	1.25	4181.0
(0.5, 0.5)				
1	-2308535.53	-2285168.79	1.01	4283.9
2	-2325016.88	-2316702.94	0.36	4080.7
3	-2314958.27	-2301769.56	0.57	4187.8
4	-2316878.03	-2288997.33	1.20	4117.4
5	-2309142.75	-2308463.38	0.03	4180.0
平均值	-2314906.29	-2300220.40	0.63	4170.0
(0.25, 0.75)				
1	-2293736.07	-2264342.66	1.28	3437.2
2	-2339793.30	-2308319.08	1.35	3672.4
3	-2322582.16	-2303705.86	0.81	3943.1
4	-2296079.04	-2289177.62	0.30	3623.4
5	-2294455.65	-2283390.08	0.48	3769.9
平均值	-2309329.24	-2289787.06	0.84	3689.2
(0, 1)				
1	-2376719.93	-2350572.21	1.10	842.2
2	-2374962.49	-2350893.23	1.01	712.1
3	-2371343.64	-2365031.73	0.27	779.1
4	-2372065.64	-2357734.73	0.60	859.1
5	-2368421.74	-2341340.31	1.14	899.4
平均值	-2372702.69	-2353114.44	0.83	818.4

當權重 (0.75, 0.25) 與測試例 1 時，下限解間距離最大，然亦僅有 1.97%。在各權重值的比較部分，權重 (1, 0) 下，其 5 組測試例之平均下限解間距最小，約為 0.43%；權重 (0.75, 0.25) 下，平均下限解間距最大，然亦僅約為 1.25%，代表在各權重值下，所求得之解均相當接近最佳解，亦顯示本研究所發展之啟發解法，在求解品質上效果甚佳。在求解時間方面，在權重 (0, 1) 與測試例 2 下所需時間最短，約為 12 分鐘；在權重 (1, 0) 與測試例 3 下所需最長，約 80 分鐘。在各權重值中，當權重值 (0, 1) 時，5 組測試例之平均求解時間最短，約為 12 分鐘；當權重值 (1, 0) 時，平均所需之求解時間最長，約為 75 分鐘。此等運算時間在處理規劃問題上相當有效率，顯示本研究發展的啟發解法應可為實務參考。

值得一提的是，雖然此測試結果顯示，本研究發展之啟發解法求解品質與效率甚佳。然而在實際運用時，業者仍須針對不同之權重值與測試例進行測試，以了解其使用之限制與範圍。若未能求得滿意的解時，則可適當的調整啟發解法中相關的機制，如出現率的設定與挑選班次之機制等，以求得滿意的解。若如此仍無法求得好的解時，則可參考本研究之啟發解法，進一步發展有效之隨機啟發解法，以提升求解品質。

4.3 評估比較結果分析

另外，為比較確定性需求模式與隨機性需求模式兩者之實際營運績效差異，本研究利用上述之模擬評估方法，比較兩者在 30 日隨機需求 (即 D) 下之績效。其中，在確定性班表部分，本研究分別以各組測試例所產生之 30 個隨機需求狀況 (即 S) 的平均需求量求解模式三，以得各組之確定性需求班表。比較結果如表 2 所示，表中數據皆是以確定性需求模式為基準進行比較。在計算上，其中使用車輛數差、班次數差及平均服務率差，是以隨機性模式之求解結果減去確定性模式之求解結果所得之差值。另外，目標值差、利潤目標值差與服務人數目標值差方面，皆為確定性需求與隨機性需求班表，以 30 日隨機需求評估後的比較結果，其中目標值差與利潤目標值差在權重為 (1, 0) 時相同，而目標值差與服務人數目標值差在權重為 (0, 1) 時相同，其計算方式分別如下所示：

目標值差 (%)

$$= (\text{隨機性需求班表下 30 個評估日之平均目標值} - \text{確定性需求班表下 30 個評估日之平均目標值}) / \text{確定性需求班表下 30 個評估日之平均目標值} \quad (33)$$

利潤目標值差 (%)

$$= (\text{隨機性需求班表下 30 個模擬日之平均利潤} - \text{確定性需求班表下 30 個評估日之平均利潤}) / \text{確定性需求班表下 30 個評估日之平均利潤} \quad (34)$$

服務人數目標值差 (%)

$$= (\text{隨機性需求班表下 30 個評估日之平均服務人數} - \text{確定性需求班表下 30 個評估日之平均服務人數}) / \text{確定性需求班表下 30 個評估日之平均服務人數} \quad (35)$$

在評估階段中，由於車流網路值已經固定，故僅需針對 30 日之旅次需求進行人流最佳化求解，因此各測試例均可快速求解。不管是針對確定性或隨機性班表，各測試例之模擬評估時間，皆在 1 分鐘內。由比較分析結果得知，在權重為 $(0.75, 0.25)$ 與 $(0, 1)$ (以單一最大服務人數為目標) 時，隨機性班表在 5 個測試例的目標值均較確定性班表為佳，其平均目標值差分別為 0.94% 及 0.55%。但由於以最大服務人數為目標 (即權重為 $(0, 1)$) 時，其目標式並無包含成本的考量，因此在求解的過程中傾向盡量使用資源，導致隨機性班表的使用車輛數與班次數，均明顯多於確定性班表。另外，當權重為 $(1, 0)$ 與 $(0.5, 0.5)$ 時，隨機性班表之目標值亦大多優於確定性班表，其平均目標值差分別為 0.91% 及 0.41%。而當權重為 $(0.25, 0.75)$ 時，我們發現隨機性班表的使用車輛數與班次數，在 5 組測試例中均少於確定性班表，其平均服務率亦低於確定性班表，進而使其目標值較確定性班表稍差，兩者的平均目標值差為 -0.21%，為此五權重中較為特殊的例子，然比較於其他權重值其差異亦較不明顯。

另外，我們進一步將各目標式單獨分別比較分析，發現利潤目標值在不同權重下，隨機模式評估所得之結果在 5 個測試例中大多較優於確定性模式。並且由 5 個測試例的平均值可看出，隨著利潤目標值的權重增加，其改善幅度有增大的情形，其平均值介於 0.17% 至 0.91% 間。至於在服務人數目標值部分，除當權重為 $(0.25, 0.75)$ 時，隨機性班表之服務人數在 5 個測試例中大多低於確定性班表 (其平均服務人數差為 -0.34%) 外，在其餘權重下，隨機性班表之服務人數明顯優於確定性班表，5 個測試例的平均值介於 0.55% 及 1.41% 之間。

最後，由表 2 可以發現，當權重值為 $(0.75, 0.25)$ 時，在 5 個測試例中，確定性需求規劃在利潤與服務人數目標值上均較隨機性需求規劃的解差 (為模擬營運結果)，顯示在此權重下，確定性規劃所得的非劣解，相較於隨機性規劃的解，均不再是非劣解，亦即此等確定性需求所規劃之非劣解實際上已失去意義。當權重值為 $(0.5, 0.5)$ 時，發現在測試例 3 與 4，隨機性需求規劃的解在兩目標值中均無法同時優於確定性需求規劃的解，顯示確定性規劃所得的非劣解，比較於隨機性規劃的解，在此兩測試例中仍可維持非劣解。此情形在權重值為 $(0.25, 0.75)$ 時更明顯，5 個測試例中，除測試例 1 外，確定性需求規劃所得的解，在其餘測試例中，相較於隨機性規劃皆可維持非劣解。由以上結果發現，當收益目標的權重增加 (即業者較重視收益目標) 時，可發現確定性需求規劃之非劣解，在營運後均不再是非劣解。而當服務人數目標的權重增加 (即業者較重視服務人數目標) 時，確定性需求規劃的非劣解，相較於隨機性需求規劃，仍可維持為非劣解的比率隨之增加。此結果亦顯示，確定性需求規劃之非劣解在營運後之實際結果不一定皆呈現原先預計之非劣解，有可能已經為較劣解 (inferior solution)，如 $(0.75, 0.25)$ 權重值之各測試結果。此結果可提醒決策者在面臨隨機世界時進行多目標規劃，應注意其原規劃的「非劣解」，在受實際營運之隨機因素干擾後，可能並非真正的非劣解。因此決策者在進行規劃時，可能並不一定要追求原規劃之「真正」非劣解，亦可求取「近似」非劣解 (其求解時間通常較求

非劣解為短) 以為決策, 此「近似」非劣解雖屬較劣解, 但與非劣解相差不遠, 在受隨機因素擾動後, 其結果亦可能變成為非劣解。決策者亦可同時求取非劣解及「近似」非劣解, 並一起納入決策之考量, 以更能維持決策結果在實際隨機營運環境之非劣解性。

表 2 各權重下評估比較結果

權重及 測試例	比較項目 (以確定性需求結果為基準)					
	使用車輛 數差 (輛)	班次數差 (班 ／日)	平均服務 率差 (%)	目標值差 (%)	收益目標 值差 (%)	服務人數目標 值差 (%)
(1, 0)						
1	4	10	0.48	-0.22	-0.22	-
2	6	16	0.86	0.34	0.34	-
3	6	6	1.42	1.69	1.69	-
4	7	12	1.67	1.64	1.64	-
5	2	14	1.74	1.09	1.09	-
平均值	5	11.60	1.23	0.91	0.91	-
(0.75, 0.25)						
1	8	13	1.24	0.76	0.53	1.46
2	7	27	1.53	0.70	0.34	1.81
3	6	10	0.82	0.59	0.47	0.96
4	1	11	1.14	1.09	1.01	1.35
5	2	9	1.27	1.53	1.55	1.49
平均值	4.80	14	1.20	0.94	0.78	1.41
(0.5, 0.5)						
1	4	2	0.77	0.66	0.42	0.90
2	4	16	1.27	1.31	1.12	1.50
3	3	8	-0.26	-0.61	-0.91	-0.31
4	4	14	0.31	-0.02	-0.40	0.37
5	0	-3	0.54	0.72	0.80	0.63
平均值	3	7.4	0.526	0.41	0.21	0.62
(0.25, 0.75)						
1	-21	-18	0.73	0.99	1.38	0.86
2	-16	-6	-0.53	-0.58	-0.48	-0.61
3	-9	-9	-0.05	0.06	0.40	-0.06
4	-31	-23	-0.59	-0.40	0.45	-0.68
5	-23	-16	-1.03	-1.12	-0.90	-1.19
平均值	-20	-14.4	-0.294	-0.21	0.17	-0.34
(0, 1)						
1	45	198	0.46	0.52	-	0.52
2	43	186	0.49	0.56	-	0.56
3	42	184	0.89	1.02	-	1.02
4	45	196	0.34	0.39	-	0.39
5	43	150	0.24	0.28	-	0.28
平均值	43.6	182.8	0.484	0.55	-	0.55

五、結論與建議

本研究以國內一長途客運業者為對象，考量多營運目標及隨機性需求特性，構建一隨機性需求下多目標長途客運排程模式。並以多目標求解方法中之權重法為基礎，透過模擬的技巧發展一啟發式解法進行求解。本研究並設計一模擬評估方法，以比較隨機性需求規劃與確定性需求規劃之差異。測試結果顯示，本研究發展之啟發解法的求解品質與效率甚佳。在評估階段比較發現，本研究所發展之隨機性需求規劃模式確實較已往以平均需求進行的確定性規劃為佳。另外，本研究亦發現確定性需求規劃之非劣解在營運後之實際結果不一定皆呈現原先預計之非劣解，有可能變成為較劣解。本研究模式、求解演算法、及測試結果，可望能提供國內長途客運業者與學術界參考。

最後本研究在實例測試部分主要以績優路線為對象，建議未來可加入通運路線，以考量業者所有之營運路線，並針對通運路線於模式中加入最小服務班次數之實務限制 (如式 (11))。此模式將含 24 條路線，其問題的規模及複雜度預期將大幅增加，可能造成求解上的困難，故未來可能需進一步改善或發展有效率的求解演算法，以求解模式。另外，本研究目前僅針對隨機需求擾動狀況進行探討，其餘隨機擾動事件如：車輛旅行時間、車輛的到離延誤等小規模擾動及事故、天候、罷工等因素造成之大規模擾動事件等，亦會對排程結果造成不定之影響。建議未來可進一步針對相關之擾動因素及不同擾動的程度進行探討。

參考文獻

1. Yan, S. and Chen, H., "A Scheduling Model and a Solution Algorithm for Inter-City Bus Carriers", *Transportation Research*, Vol. 36 A, 2002, pp. 805-825.
2. Jansson, J. O., "A Simple Bus Line Model for Optimization of Service Frequency and Bus Size", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 14, No. 1, 1980, pp. 53-80.
3. Kocur, G. and Hendrickson, C., "Design of Local Bus Service with Demand Equilibrium", *Transportation Science*, Vol. 16, 1982, pp. 149-170.
4. Chua, T. A., "The Planning of Urban Bus Routes and Frequencies: A Survey", *Transportation*, Vol. 12, 1984, pp. 147-172.
5. Koutsopoulos, H. N., Odoni, A. R., and Wilson, N. H. M., "Determination of Headways as a Function of Time Varying Characteristics on a Transit Network", in: *Computer Scheduling of Public Transport 2*, J.-M. Rousseau, Ed., Amsterdam, North-Holland, 1985, pp. 391-413.
6. Ceder, A. and Wilson, N. H. M., "Bus Network Design", *Transportation Research*, Vol. 20B, 1986, pp. 331-344.

7. van Nes, R., Hamerslag, R., and Immers, B. H., "Design of Public Transport Networks", *Transportation Research Record*, Vol. 1202, 1988, pp. 74-83.
8. 周義華、張國揚，「公車路網班次分派與車輛配置之研究」，**運輸計劃季刊**，第十八卷，第二期，民國七十八年，頁 223-254。
9. Ceder, A., "Transit Scheduling", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 25, 1991, pp. 137-160.
10. Chang, S. K. and Schonfeld, P. M., "Multiple Period Optimization of Bus Transit System", *Transportation Research*, Vol. 25B, 1991, pp. 453-478.
11. Chang, S. K. and Schonfeld, P. M., "Analytic Optimization Models for Comparing Convention and Subscription Feeder Bus Services", *Transportation Science*, Vol. 25, 1991, pp. 281-298.
12. Pattnaik, S. B., Mohan, S., and Tom, V. M., "Urban Bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 124, 1998, pp. 368-375.
13. Salzbom, F. J. M., "Scheduling Bus Systems with Interchanges", *Transportation Science*, Vol. 14, 1980, pp. 211-231.
14. 韓復華，「客運系統班次排定問題之理論與應用」，**運輸計劃季刊**，第七卷，第一期，民國六十七年，頁 17-37。
15. 謝長宏、王浩聰，「長途客運巴士時表研擬策略之推廣」，**運輸計劃季刊**，第七卷，第三期，民國六十七年，頁 99-115。
16. 龍天立，「客運普通及特殊班車班次安排原則與方法」，**運輸計劃季刊**，第九卷，第一期，民國六十九年，頁 23-30。
17. Berkhout, J., "Structure Method for Vehicle Scheduling", *Computer Scheduling of Public Transport*, Vol. 2, 1985, pp. 199-208.
18. 陳武正、黃書強、廖椿煜，「公路客運車輛排班調度制度之研究」，**運輸計劃季刊**，第十五卷，第一期，民國七十五年，頁 33-45。
19. 藍武王、王丘明，「城際客運之排班與乘客等待時間分析」，**交通運輸**，第十二期，民國七十九年，頁 81-91。
20. 藍武王、林祥生，「均質環境下城際客運服務策略之最佳化分析」，**運輸學刊**，第十卷，第三期，民國八十六年，頁 39-77。
21. 藍武王、林祥生，「異質環境下城際客運服務策略之最佳化分析」，**運輸學刊**，第十卷，第四期，民國八十六年，頁 21-58。
22. 藍武王、邱裕鈞，「線性軸輻路網接駁／轉運區位、路線與排班之規劃—遺傳演算法之應用」，**運輸計劃季刊**，第二十九卷，第三期，民國八十九年，頁 465-498。
23. 許書耕、陳茂南、邱裕鈞，「高速公路客運接駁轉運系統運轉規劃」，**運輸計劃季刊**，第二十七卷，第二期，民國八十七年，頁 315-338。
24. Hwang, C. L., *Multiple Objective Decision Making – Method and Application*, Springer-Verlag, New York, 1979.

25. Zeleny, M., *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw Hill, New York, 1982.
26. 顏上堯、王中瑞，「多目標飛航網路路線及頻次規劃」，*工業工程學刊*，第十三卷，第四期，民國八十五年，頁 307-316。
27. 沈進成，「公車系統營運計劃最佳化模式之研究」，國立成功大學交通管理研究所碩士論文，民國七十七年。
28. 楊博文，「配合大眾捷運系統之接運公車營運計劃整合之研究—分析數學法與多目標規劃法之應用」，國立成功大學交通管理研究所碩士論文，民國七十九年。
29. 林秀璘，「應用模糊多目標規劃法於公車營運計畫之研究」，國立成功大學交通管理研究所碩士論文，民國八十一年。
30. Yan, S. and Huo, C. M., "Optimization of Multiple Objective Gate Assignments", *Transportation Research*, Vol. 35 A, 2001, pp. 413-432.
31. Mulvey, J. M. and Ruszczyński, A., "A New Scenario Decomposition Method for Large-Scale Stochastic Optimization", *Operations Research*, Vol. 43, 1995, pp. 477-490.
32. Du, Y. and Hall, R., "Fleet Sizing and Empty Equipment Redistribution for Center-Terminal Transportation Networks", *Management Science*, Vol. 43, 1997, pp. 145-157.
33. 游俊雄、丁國樑，「需求反映旅次運載模擬模式應用於捷運營運班表之評估」，*運輸計劃季刊*，第二十七卷，第三期，民國八十七年，頁 489-508。
34. 顏上堯、謝宗男，「航空公司意外事件排程與營運擾動之研究」，*中華民國運輸學會第十五屆論文研討會論文集*，民國八十九年，頁 313-322。
35. Yan, S., Shieh, C., and Chen, M., "A Simulation Framework for Evaluating Airport Gate Assignments", *Transportation Research*, Vol. 36 A, 2002, pp. 885-898.
36. Kenyon, A. S. and Morton, D. P., "Stochastic Vehicle Routing with Random Travel Times", *Transportation Science*, Vol. 37, 2003, pp. 69-82.
37. 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. 39 E, 2003, pp. 209-227.
38. Hiple, J. L. and Sen, S., *Stochastic Decomposition*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
39. Birge, J. R. and Louveaux, F., *Introduction to Stochastic Programming*, Springer-Verlag, New York, 1997.
40. Ruszczyński, A. and Shapiro, A., *Stochastic Programming*, Elsevier, Amsterdam, 2003.
41. Yan, S. and Lin, C. G., "Airline Scheduling for the Temporary Closure of Airports", *Transportation Science*, Vol. 31, 1997, pp. 72-82.
42. 齊志仁，「隨機性需求下長途客運排程暨班次表設計規劃模式之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，民國九十二年。

