

運輸計劃

季刊

第四十四卷 第一期

中華民國一〇四年三月三十日出版

(本卷共計四期，預定出版時間為一〇四年三月三十日、
六月三十日、九月三十日及十二月三十日)

TRANSPORTATION PLANNING JOURNAL

Quarterly, Vol. 44, No. 1

March 30, 2015

(Publish dates for Vol. 44: March 30, June
30, September 30, and December 30,
2015)

本季刊內容不代表本所意見

The views expressed in the Journal are not necessarily those
of the Institute of Transportation.

目錄 Table of Contents

以空間型構法則及步行導向理念檢視 TOD 區內土地使用配置的合理性	
..... 李家儂、謝翊楷	1
Using Space Syntax and Pedestrian-Oriented Design Concepts to Examine the Rationality of the Land Use Configuration of Tod Districts	
..... Chia-Nung Li and Yi-Kai Hsieh	
多準則決策模式於運輸政策制定之應用—以花蓮為例	25
Transportation Policy Making Using MCDM Model: The Case of Hualien	
..... Shih-Yao Kuo and Shu-Chuan Chen	
考慮護運風險下保全運鈔車路線與排程模式暨演算法之研究	
..... 顏上堯、盧宗成、徐鶴倫	45
A Model with an Algorithm for Cash Transportation Vehicle Routing and Scheduling Problems Considering Conveyance Risks	
..... Shang-Yao Yan, Chung-Cheng Lu and Guan-Lun Hsu	
連續流車流模式的有限差分近似解法	69
On the Approximation of Finite Difference Methods for Continuum Traffic Flow Models.....	
..... Shu-Keng Hsu and Yu-Chiun Chiou	

以空間型構法則及步行導向理念檢視 TOD 區內土地使用配置的合理性¹

USING SPACE SYNTAX AND PEDESTRIAN-ORIENTED DESIGN CONCEPTS TO EXAMINE THE RATIONALITY OF THE LAND USE CONFIGURATION OF TOD DISTRICTS

李家儂 Chia-Nung Li²

謝翊楷 Yi-Kai Hsieh³

(102 年 12 月 9 日收稿，103 年 3 月 26 日第 1 次修改，103 年 6 月 16 日第 2 次修改，
103 年 7 月 22 日第 3 次修改，104 年 3 月 10 日定稿)

摘 要

從近年來臺灣發展 TOD 的過程觀之，係以提升大眾運輸旅次為主要規劃手段，尚停留在規劃者的想法，並未考量民眾的需求。此外，對於 TOD 相關研究，仍多屬實證模型，尚缺乏理論基礎結合，使得 TOD 的研究沒有適地性，其理念的合理性也尚待討論。因此，如何調適既有的 TOD 理念，使其具有適地性、合理性及理論基礎，以塑造出友善的步行生活環境，成為臺灣發展 TOD 都市的首要課題。本研究將以「新板特區」為研究對象，應用「空間型構法則」之理論與步行導向設計理念為基礎，分析 TOD 步行環境與周圍土地使用配置之合理性，並以理論的觀點，檢視捷運場站周圍土地使用該如何調整，以符合當地之步行環境，進而落實 TOD 發展成效。本研究發現，TOD 區內步行環境的便捷度與距離場站之遠近並非正比，

-
1. 本文承蒙兩位匿名審查委員惠賜寶貴意見，及科技部專題研究計畫 (NSC 102-2410-H-034 -041-) 補助部分研究經費，特此致謝。
 2. 中國文化大學土地資源學系副教授 (聯絡地址：11114 臺北市陽明山華岡路 55 號 中國文化大學土地資源學系；E-mail：ljin@mail.pccu.edu.tw；電話：02-28610511 Ext. 31434)，本文通訊作者。
 3. 中國文化大學建築及都市設計學系博士班研究生。

且新板特區土地使用配置強弱與步行路網便捷值高低並不相同，而傳統 TOD 規劃思維存在著隱憂，透過空間型構與步行導向規劃思維的結合，則能使臺灣 TOD 發展跳脫傳統且單調的規劃方式，進而將土地使用規劃與步行路網之特性進一步整合，讓 TOD 規劃能更具適地性與合理性，並在規劃過程中具有理論與實務的基礎。

關鍵詞：大眾運輸導向發展；步行導向理念；空間型構；土地使用；交通運輸

ABSTRACT

Taiwan's transit-oriented development (TOD) in recent years has been based on increasing public transit ridership as its main planning tool, and this planning remains confined to the planners' thinking without taking the public's needs into consideration. Moreover, studies on TOD are mostly attached to empirical modeling without much support from a theoretical foundation; as a result, these TOD studies are not location-based and the rationality of their ideas has yet to be recognized. Therefore, how to appropriately adapt existing TOD ideas by injecting them with locality, rationality and a theoretical foundation to shape friendly pedestrian living environments has become the foremost issue to be discussed in Taiwan's TOD. This study takes the "New Banqiao Special District (NBSD)" as its subject, and applies the theory of "space syntax" and pedestrian-oriented design concepts as foundations to analyze the rationality of the TOD walking environment and the rationality of the land use configuration in the surrounding areas. Finally, theoretical points of views are taken to examine how the lands around MRT stations should be used so as to match up with the local walking environments for the realization of effective TOD. The results from this study reveal that the convenience of the walking environment within the TOD areas is not directly proportional to the distance from the MRT stations. Furthermore, the intensity of the land use configuration in the NBSD does not correspond to the convenience of the walking network. While traditional TOD thinking is troubled with hidden concerns, the combination of space syntax and pedestrian-oriented thinking will lead Taiwan's TOD to break the shackles of traditional monotonous planning methods and further help integrate land use planning with the characteristics of walking networks, allowing TOD planning to be more appropriately location-based and rational and providing both theoretical and practical foundations for the planning process.

Key Words: *Transit-oriented development; Pedestrian-oriented concept; Space syntax; land use; Transportation*

一、研究背景

隨著二氧化碳的大量排放，導致全球暖化、氣候異常與能源短缺等問題日益嚴重，世界各國逐漸意識到潛在危機，美國於 1990 年初期從新都市主義理念，發展出「大眾運輸導向發展 (transit-oriented development, 簡稱 TOD)」的規劃設計理念^[1]。發展至今，TOD 已成為土地使用與交通運輸整合的新都市模式^[2]，並經由諸多實證案例指出 TOD 發展能帶來諸多成效。因此，在「都市成長降溫 (growing cooler)」與「綠茶法案 (Green TEA)」的引導下，美國企圖將都市「導回」永續發展的願景，至今已經有超過 100 個美國城市企圖將其城市規劃成 TOD 模式，並超過 4,000 個 TOD 土地使用規劃⁴，可見 TOD 的概念已然成為都市規劃的新潮流。

從國外對於 TOD 的研究能發現，其發展基礎係建立在民眾願意改變運具選擇，進而使用步行搭乘大眾運輸，其中，TOD 不斷強調如何提升大眾運輸旅次與降低私人運具，乃因其所能衍生的眾多效益，需要透過民眾步行以支持效益的延續。倘若民眾僅使用私人運具在都市中快速移動，那麼就只是被動地在片斷而不連續的都市地理中朝著目的地邁進，此時都市空間本身也將失去吸引力。因此，若長期對於步行環境與步行路網的忽視，將使得人們在移動的過程中，只想快速穿過這個都市空間，而不想停留與注意這塊空間，對於周遭環境變化也就漠不關心，自然也就無法促進經濟活絡，更無法達到 TOD 發展之理念，屆時私人運具之使用所帶來的方便性雖能減少物理上的距離限制，但卻也大為減少了人與人之間的互動機會，而增加人們心理上的距離。緣此，如何塑造出良好的步行環境，成為都市發展與落實 TOD 理念的首要議題。

從近年來臺灣發展 TOD 的過程觀之，其傳統 TOD 規劃僅強調放射狀之土地使用規劃，而將距離捷運場站 300 公尺內之土地提高使用密度，然後逐漸降低土地使用密度，以刺激民眾集中到中心地區活動，並藉此提升大眾運輸旅次；卻忽略了民眾移動的方式與過程是需要連貫的考量，導致多數人仍然使用私人運具前往捷運場站或放棄選擇使用大眾運輸運具。然而，此方法乃單方面的提高土地使用強度，即認定會影響民眾步行意願，尚停留在規劃者的想法，並未考量民眾步行的真正需求。如土地使用密度較高的地區，但周圍步行環境狹窄不易通行，反而大為降低民眾前往之意願，換言之，當前 TOD 發展的限制，並未著重空間的吸引力與步行友善的空間營造^[3]。而當前國內 TOD 之相關研究多屬實證模型的關聯性，尚缺乏理論基礎，亦僅停留在評估地區的規劃是否符合 TOD 發展理念與面向，但對於 TOD 區周圍的土地使用該如何配置，然而與步行環境相整合以及如何實際操作才能將 TOD 發展成效加以落實的研究仍有欠缺。導致當前臺灣 TOD 區內之土地使用配置，取決於距離車站 300 公尺或 500 公尺的空間距離因素，進而衍生出許多土地發展的議題。

4. Ewing, R., "Induced Transportation Operating Costs. In R. Burchell et al., Calculating the Transportation Cost Impacts of New Development: Literature Review", *Related to Procedures National Cooperative Highway Research Program Project*, 08-59, 2007, pp. 83-104.

本研究將以空間型構法則及人行為導向的觀點來探討 TOD 區內土地使用配置規劃，進而從人的流動過程中將民眾對於都市的體會轉變為連貫的認知，使人與空間產生關係與認同感，藉此改變民眾對於運具的使用習慣，並影響人們與空間的互動方式，以改變臺灣既有的 TOD 發展模式，反以步行環境為主要依據，探討場站周圍的最適土地使用配置，以塑造出更便於步行的生活環境，以及更有效率的土地使用，據此，本文分段探討如下：(1)文獻回顧；(2)研究設計；(3)實例研究分析；(4)結果討論；(5)結論與建議。

二、文獻回顧

2.1 空間型構法則 (space syntax) 之理論

在空間型構法則的概念中，空間的組成與所有空間彼此的關係，是其探討的重點。在此所謂的組成，是指一種空間模式或空間型構，探討的方向著重在各個空間同時存在的「關係」，而在都市研究中，要談論許多同時存在的空間相當困難，因其包含過多的局部空間。因此，英國倫敦大學建築學院的 Hillier 於 1984 年提出空間型構法則之理論與一系列的分析方法，其主要目的係將空間型態具體化的呈現，並從中發展出可以量化空間元素的數值；其主要研究方法係以拓樸學為基礎發展出一系列的量測變數，包含：連接值 (connectivity)、控制值 (control value)、深度值 (depth value)、集成度 (integration) 中的地區便捷值 (local integration)、全區便捷值 (global integration) 等變數，並透過圖示，利用拓樸學 (topology) 的概念，以進行空間剖析。此拓樸概念只涉及各種空間關係的次序，而與空間的方向、大小、形態、距離等無關，所分析的是路網所形成的空間，而非基地本身，其研究特點係以空間的主體性為主要考量，並強調路網特性，而非僅將路網結構當成距離變數，且著重於分析人流和車流與空間的邏輯關係。

空間型構法則所觀察的活動模式，不同於一般城市交通規劃模型中所模擬的步行活動，而是由城市格網結構所決定的「自然運動」(natural movement)，其概念有利於觀察空間的結構對運動本身所產生的微妙影響，可更好地預測人們在空間中看似複雜和隨機的聚集狀態^[4]。換言之，空間型構理論認為，空間的結構是產生步行模式與活動之起源，或許在步行活動影響因素中非占最大比例，但卻是產生步行活動模式的最初原因，如楊滔^[5]認為，城市空間型態會影響人流與車流，而人流與車流又導致城市用地功能的變化與分布，更進而影響人們社會經濟活動的改變，最後產生城市空間型態的演變，其中城市整體拓樸關係是關鍵，而 Yang^[6]亦認為，拓樸結構本身對人口構成與演變具有相當之影響。其差異在於傳統模式認為，吸引民眾外出的是距離與不同性質的土地使用；空間型構理論則認為，是由城市街道所形成的網絡型態所造成。但 TOD 發展在最適步行範圍 (半徑 500 公尺) 的劃分下，其距離因素相對較不是影響步行意願的主要原因。由以上空間型構的理論特點可得知，其理論基礎雖然忽略了距離、長度與規模等因素，但也因而突顯出路網結構所形成的都市空間，並有助於將其視為主體研究對象，而使其更確切地觀察與反應出人的群聚與流動等現象。

2.1.1 空間分割之軸線法

任何一個都市系統都是由兩部分組成，及空間物體與自由空間。空間物體主要是建築物，而自由空間是指由空間中物體隔開的人可以在其中自由活動的空間。自由空間具有連續性，即從任何一點可以到達空間的任何其它點。根據都市環境的自由空間所呈現的情況，一般採用所謂的軸線方法^[7]。它的基本原則是：首先劃分一條最長的軸線來代表一條街道，然後劃第二長的軸線與第一條相交，直到整個自由空間或者街道網由一系列線連接，形成軸線圖。而軸線圖是由最少數目的最長直線組成，這也確保了軸線地圖具有都市型態的代表性。

2.1.2 視覺空間之整合度

就圖示理論本質上而言，是一種探討純粹關係的理論。在表達複雜關係的圖示中，被連繫的物體是「節點」，其之間的關係為「連接線」。如圖 1(a)，在相對深度圖（稱為 j 圖）中，選擇一個節點作為整個圖的根節點，並且按照其它點到達根節點所必須通過的最少節點數，而將它們分層放置在根節點上。通過這種方式看待圖解，即可以看出各節點之間的關係，以及其在整體節點中之重要程度^[8-10]。

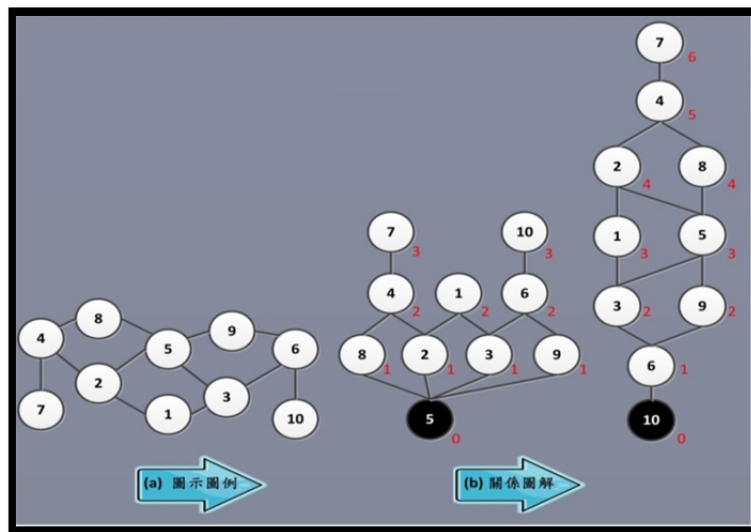


圖 1 相對深對圖

在圖 1 中，(b)左邊的 j 圖從根部到頂點的距離較淺，代表人到達該節點是較方便的，並不需要通過很多節點即可達到目的地；右邊的 j 圖較深，代表人要到達目的地需經過許多其它地方，故該節點又被稱為孤立點^[7]。若將兩張 j 圖視為同一個簡單平面的兩個不同視角，便可拿來進行建築與都市的研究。如圖 2(a)。以圖 2(b)為例，若選擇一個空間作為圖示的根節點（黑色），以 0 標記；對於相隔一個節點的 4 個空間，給其值為 1。而在兩步

之外的 3 個空間與在 3 步之外的兩個空間將之加總，到黑色根空間的步數總合為 16。以此類推圖 c 之總步數為 30^[7,8]。

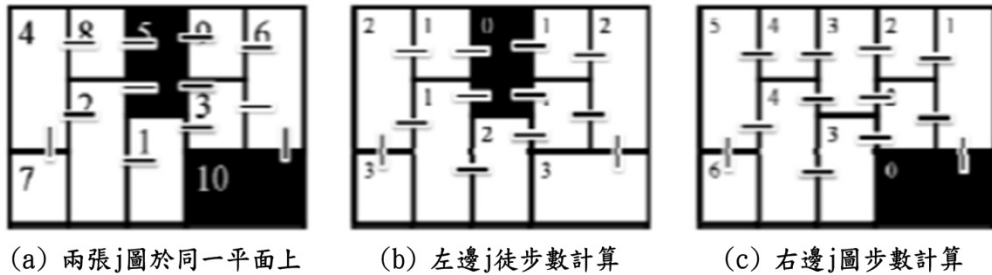


圖 2 建築及都市相對深度圖

在此基礎上進行數學計算，即可得到複合空間中之「整合度」。空間的整合度越低，代表由此空間到達任意的另一空間就越困難。若根據其計算結果，將空間依梯度上色，即紅色的最大值至藍色的最小值，將可清楚地在此視覺上顯示空間整合度之關係^[7-9]，如圖 3。

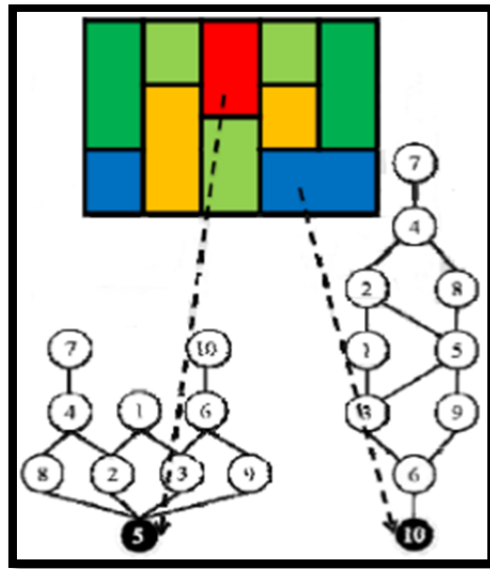


圖 3 視覺上顯示空間整合度之關係示意圖

2.2 空間型構法則 (space syntax) 之實證與應用

根據空間型構法則之理論，路網系統是由自然型態與都市組織共同形塑出來的，可被視為單一旦連續的空間系統，而這個系統可被區分成幾個因素，像是路網選擇的分析、利

用地圖及圖解 (graph) 上的資料來發現空間中的相互影響關連與連結性等。其中，Hillier^[10] 研究指出，在空間型構中一個主要的方法就是運用圖解，亦即各式各樣的點 (vertices) 在軸線圖 (axial map) 上構成各種趨勢所呈現出來的圖，在此圖解中，街道扮演著點的角色並由此看出街道之間的關聯性。而 Penn 等人^[11] 在主要的研究中顯示，路網彼此的連結性與土地利用有正相關存在，即一路段被使用的頻率越高，該路段的通勤者使用該地與密度也會越高。然而，Hillier 等人^[8] 綜合實證分析後發現，空間型構法則可被運用在各種規模的公共空間上，同時在不同城市間的分析結果又是能互相比較的，且近來的研究顯示最適當的距離規模應該是鄉村層級、都市的一區或是大部分的地方等級市鎮。此外，Turner^[12] 研究認為，使用空間關聯的中心點 (centrality) 會比點與點間的連接更能預測人類移動行為，即中心線街道路網 (centre-line street network) 會比傳統軸向圖更能預測移動行為；而 Nenci^[13] 研究指出，其基本要呈現的系統不同，所以空間型構法則是可以跟運輸模型互相比較的。

近年來國外許多新興之規劃地區皆採用空間型構法則 (space syntax) 之理論方法為主要規劃依據，如 Hillier 等人^[14] 將理論應用於阿拉伯的吉達 (Jeddah) 城市中，以改善城中村的現象，其研究發現此現象係因長久以來該地區的對外連結性較差，而逐漸受到其他地區的經濟排斥與隔離所形成。此外，Anna⁵ 將理論應用於英國的諾丁漢 (Nottingham) 的舊廣場，其研究分析人行動線後指出，廣場中央的障礙物有礙於通行，因此有 78% 的步行民眾會繞過廣場的中心地帶，其改善方法為透過廣場空間的重新佈局，以提升廣場的可及性，使民眾可以在廣場中任意的穿越到其他空間。而 Tim⁶ 也將理論應用於英國倫敦的步行路網，其研究發現，雖然每個人在行走時會選擇出自己的路線，但這些選擇將會形成穩定的模式。其它如 Peponis 與 Wineman^[15] 以美國亞特蘭市為證實地區，證實空間型構法可解釋都市中各種不同地區之行人與車輛之移動；Hillier 與 Shu^[16] 則將其應用於都市中犯罪地點之分布，該研究利用空間型構法的各指標與犯罪率進行比對，其結果顯示地區連結性與犯罪率成明顯之反比。

從以上實證案例可知，空間型構法則主要在於分析路網的形式，其所分析的對象不是地塊本身，而是環繞地塊的道路廣場空間。其中，陳嘉茹^[7] 研究認為此與其它以地塊作為分析單元的都市分析方法有本質上的區別；而 Enström 與 Netzell^[17] 則提出其與傳統重力模式之差異，在於重力模式只考量從一個設施的位置到另一個設施的位置；Turner^[12] 更認為，使用空間關聯的中心點 (centrality) 會比點與點間的連接更能預測人類移動行為，亦即中心線街道路網 (centre-line street network) 會比傳統軸向圖更能預測移動行為。由此可見，空間型構法考量了整體都市地區的路網結構，並考量了特定道路與其它所有道路的關

5. Anna Rose, "City Scans: Measuring the Effects of Urban Networks", Harvard GSD, 2011.

6. Tim Stonor, "Valuing the Public Realm: The Importance of Spatial Networks", City of Cambridge Community Development Department, 2010.

連性，且納入了人的經驗與選擇。換言之，空間型構法則係將以往物理距離的可及性研究轉變為以道路路網的拓樸可及性為研究基礎。

2.3 新都市主義之 TOD 發展與步行環境及土地使用

當今城市多以 TOD 發展模式來調整都市型態的內部結構特徵，如 Belzer 與 Autler^[18] 所提出的 5D 發展元素，亦成為一套可行的設計準則，以此適應日益增長的旅遊需求與增加可及性 (accessibility)。其中，Rahul^[19] 以丹佛 (Denver) 為例，探討都市化原因發現，丹佛在 1997-2010 期間利用軌道運輸系統以及高密度 (high-density)、高混合使用發展 (mixed-use development) 之 TOD 特徵，提高了丹佛城市化平均密度。然而，陳慧君^[20] 認為 TOD 和以往都市規劃思維不同，TOD 由永續發展和智慧成長出發，以高效率之大眾運輸系統作為都市發展主軸，具備美學和都市設計、多元且高強度之土地使用，以塑造出密集且宜居的都市空間發展結構，但需在捷運興建期間，同時調整站區土地開發模式，建立都市景觀意象，活絡都市機能帶來經濟效益，讓周邊人行步道符合更加人性化，引導民眾居住、商業購物之可及性提高，以便降低私人運具使用。

而 Alpkokin 與 Ergun^[21] 以伊斯坦布爾 (Istanbul) 為例，發現 TOD 帶給該州長期潛在的土地開發模式，TOD 不僅提升該地區的可及性，更帶動新住宅區之土地開發機會，同時也提升土地價值。如王曉原與蘇躍江^[22] 認為城市土地開發的最終目的在於促進土地資源最適當配置並達成經濟價值，在 TOD 規劃模式下，可以使有效土地資源達到有效利用，避免造成土地浪費與交通擁擠，利用 TOD 和土地使用整合，提升運輸系統吸引力和使用率。因此，可以透過大眾捷運建設將城市規劃、土地使用和 TOD 緊密結合，以避免城市無秩序蔓延，以便建立綠色、高效率、經濟性之綜合交通系統，促使都市可持續和諧發展。其中，李家儂與羅健文^[23] 發現，行人步行至捷運車站空間的步道連續性和捷運車站周邊休閒或零售活動機會有助於提高大眾捷運的搭乘次數，但需以 TOD 之可及性設計原則、提升行人空間步行環境品質，繼而刺激大眾捷運搭乘率。

Wey 和 Chiu^[24] 亦認為，TOD 已經成為改善步行環境，減少使用非機動車輛，以減少污染排放，增進民眾身心健康之方案之一。Frank 等人^[25] 研究則顯示，居住在步行環境的社區中，只要步行或搭乘大眾運輸 2-3 次以上，將可減少汽車使用達 58%。Jun 等人^[26] 以保護 (protection)、舒適 (comfort)、享受 (enjoyment) 作為評估指標發現，低於三分之一認為行走在人行道上安全的，其街道連結性 (street connectivity) 和混合土地使用 (land use mix) 因素也會影響居民步行意願，且居住於步行和騎自行車之社區中，可以降低汽車使用，交通擁擠問題可以獲得改善，有助於建立更多密集的混合土地發展。Al-Azzawi 與 Raeside^[27] 研究亦發現，當階梯變陡或步行者年齡增高時，行人步行速度會變慢，且影響步行的重要因素包含不同層次的人行道設計、服務水準、路面坡度、護欄、運輸車站等。綜合上述 TOD 發展與步行環境及土地使用等相關文獻，能發現 TOD 設計係透過人行環境

的不斷改善，並結合周邊土地使用規劃，進而帶來整體都市的發展效益。

三、研究設計

本研究將以空間型構法則之理論為基礎，並運用其相關公式分析 TOD 區內的步行便捷程度，進而探討 TOD 環境中人的流動與周圍土地使用配置的關係，企圖從此過程中了解 TOD 既有的發展模式是否能符合 TOD 發展理念，並從其理論觀點，即愈便捷人群愈易群聚，而土地使用強度應配合提高以符合需求，以期營造出更為友善的 TOD 環境。據此，本文將以板橋車站為實例研究，討論在空間型構的理論基礎下，新板特區的土地使用規劃是否符合民眾步行的需求，進而檢討現行 TOD 規劃是否合理。以下將進行空間量測變數與研究限制說明。

3.1 空間量測變數

空間型構法則之理論係基於軸線法的應用，即都市道路系統可導出相對應的连接圖，以圖 4 為例，將分割的每一部分作為圖的節點，故圖的连接取決於每一部分之間是否相交，據此分析路網間的關連性與便捷性。

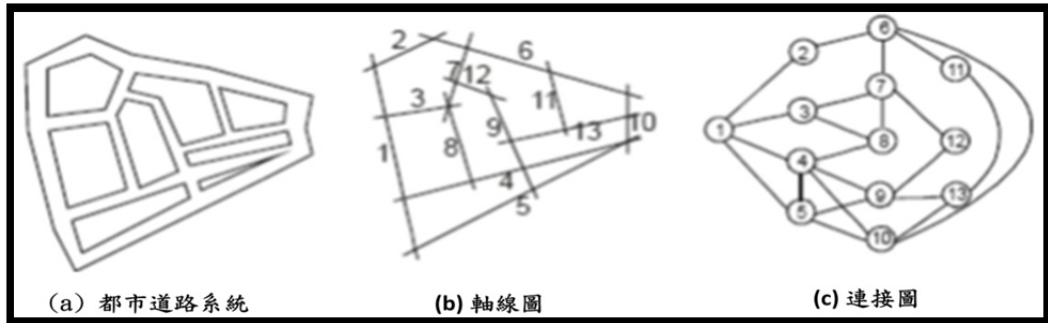


圖 4 軸線地圖與連接圖之轉換示意圖

將都市道路系統圖，轉換成連接圖後，即可導出一系列空間分析參數，如連接值 (connectivity)、控制值 (control value)、深度值 (dept)、平均相對深度值 (mean dept)、全區便捷值 (global)、地區便捷值 (local) 等。其公式與參數說明整理如下表 1 所示。

3.2 研究限制

空間型構法則之特點，雖然有助於進行空間主體化研究，但亦能發現其本身不能完全說明路網中行人或車輛分佈或運動模式的真實模擬，原因是省略某些要素 (如距離、土地價格、就業人口密度、土地使用性質的分布等) 的拓撲空間結構與步行活動之間相關關係

表 1 空間型構法則分析參數說明表

變數名稱	公式	代表意義	變數說明
連接值 (connectivity)	$C_i = k$	k = 與 (i) 點直接連接的點數目。為一條直線與其他直線相交之節點數。	數值越高，代表可與之直接連通的空間越多，可及性越強。
控制值 (control value)	$Ctrl_i = \sum_{j=1}^k \frac{1}{C_j}$	與 (i) 點直接連接的點， i 到 j 之連接值的倒數總和。表該直線與其他直線直接連接的連接值之倒數總和。	表示該點對鄰點之控制程度，其值由鄰點而來。數值越高表該空間對鄰接空間之控制度高；可視為控制鄰點進出之數值。
深度值 (dept)	$D_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}$	d_{ij} 為 i 點到 j 點的最短路徑。為該點所居位置的可及性。	為一中間參數；可對兩不同路網之深度進行比較。
平均 相對深度值 (mean dept)	$MD_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{n-1}$	n =點的個數。為該點所居位置的可及性之比較值。	為一中間參數；可對兩不同路網之平均深度進行比較。
全區便捷值 (global)	$RA_i = \frac{2(MD_i - 1)}{n - 2}$	值越小，代表該空間具位於系統中較便捷之位置，且該空間與整個系統具較高的整合性。	考量某空間與其他所有空間的關係（有別於連接度、控制值僅考慮相鄰之空間）；數值越大表該空間在整體空間系統中所處之位置越便捷、公共性越高，相對被造訪的機會也越多。
	$RR A_i = \frac{RA_i}{D_i}$	透過 D_i 之標準化，處理當系統中空間個數增加時，平均深度相對減少，使不同大小系統無法比較之問題。	
	$D_i = \frac{2\{n[\log_2((n+2)/3-1)+1]\}}{[(n-1)(n-2)]}$	用於標準化集成度。	
	$R_i = \frac{1}{RR A_i}$	表示該點居「整體性」系統中之可及程度。數值越大，表示該系統之便捷性越高。	
地區便捷值 (local)	以三步距離計算深度，再代入 MD 與 RA 公式中	表示該點居「地方性」系統中之可及程度。數值越大，表示該地區之便捷性越高。	其計算方法與全區便捷值類似。差異為以「3 步之距離」（即連接圖中相隔 3 個節點）為計算範圍。

資料來源：陳嘉茹^[7]、本研究整理。

的描述，但步行行為的進行，因受體力的影響仍會有所限制，需慎選研究對象與劃設研究範圍，如該區域路網結構若較為鬆散，則其分析結果將趨於接近；而過陡、顛簸、狹窄不易通行等道路均需斟酌排除等，其研究限制說明如下：

1. 距離因素、長度因素

雖然 TOD 發展在最適步行範圍（半徑 500 公尺）的劃分下，其距離因素相對較不是影響步行意願的主要原因，但仍有邊際效應的問題存在，因此在研究範圍之劃設，一般則以對象區域為圓心，步行 30 鐘的距離為半徑（約 1600 公尺）作為研究區域。

2. 體力因素

一般步行行為容易受個體體力限制所影響，尤其對於弱勢族群而言（如高齡者、婦女、孩童等）其影響更為明顯，因此在設定研究對象時，較適合以一般民眾或通用性原則為主，本研究已將體力因素納入後續研究建議。

3. 物理因素（道路寬度、坡度）

民眾步行行為與選擇，除受上述兩項因素影響外，更容易受到道路物理特性（如道路寬度、坡度等）所影響。因此，研究區域之邊界宜選取對行人自由活動阻隔效應明顯的限界，如河流、寬度較大的幹道等^[28]，以避免造成分析結果與民眾經驗及認知產生落差。

3.3 研究內容與流程

臺灣路網發展存在著許多細小街道，且多為住家出入型巷道，係屬於在地居民日常生活中經常使用之街道類型，以民眾步行角度而言，若將其忽略則容易與民眾步行選擇產生落差；此外，臺灣都市目前仍較無完善且連貫的步行路網規劃，而導致人車爭道等現象，因此天橋、地下道等設施，即成為民眾步行選擇上的重要考量。本文不僅運用空間型構法則之特點，並將民眾步行過程中經常使用卻常受到忽略的人行路網（天橋、地下道、人行穿越道等），加以納入路網結構中考量，進而體現以步行導向理念來檢視 TOD 區內土地使用配置的合理性。礙於人行路網資料收集不易，本研究係透過實地勘察找出天橋、地下道、細小街道，以及人行穿越道（如廣場穿越性質道路）等，以進行軸線圖與連接圖轉換。研究流程示意如圖 5，其說明如下。

1. 研究範圍界定

本研究以板橋站半徑 500 公尺為研究範圍，雖然步行選擇受到移動距離與道路長度所影響，但在 TOD 發展最適步行範圍（半徑 500 公尺）的劃分下，其距離因素相對較不是影響步行意願的主要原因，且 TOD 發展影響範圍一般為 400-800 公尺（步行約 10-15 分鐘）與研究限制相契合。

2. 實例分析

本研究以新板特區為研究對象，該地區採用 TOD 設計特徵為發展理念，係屬四鐵共構之交通轉運類型，在土地使用方面則強調住商混合發展之特性，而步行路網之發展則相當成熟且道路類型具多樣化，以此作為實例研究對象將有其參考價值。

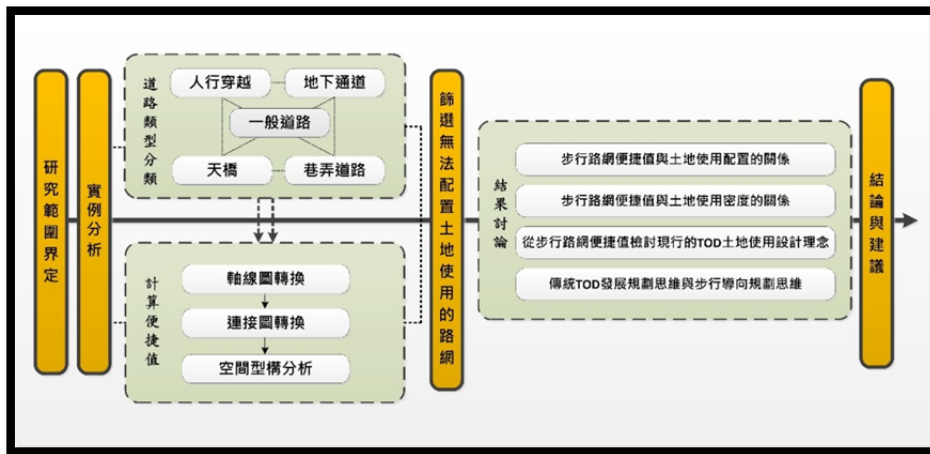


圖 5 研究流程示意圖

一般空間型構法則的運用，較多用於探討單一類型的路網結構，如步行路網中的平面道路，由於新版特區可供步行之道路為複合類型，且廣泛受到民眾所使用，因此本研究在建構軸線圖時，即依據不同路網類型進行分類，其中包含一般道路、人行穿越道路（廣場穿越性質）、天橋、巷弄道路、地下通道等 5 種類型，以利後續研究探討。

本研究運用空間量測變數，以分析路網之間的相對便捷值；首先，採用軸線法進行新板特區空間分割，以將路網結構轉換成軸線圖，其基本原則為劃一條最長的軸線來代表一條街道，然後劃第二長的軸線與第一條相交，直至街道路網成為一系列線的連接，係由最少數目的最長直線所組成，接著從軸線圖則可導出相對應的連接圖（共 39 個分析單元），再依據此連接圖便可進行一連串的空間量測變數分析。

3. 篩選無法配置土地使用的路網

本文旨在探討 TOD 區內土地使用配置的合理性，而天橋、地下道、細小街道（如防火巷、細小巷弄）與廣場穿越性質等道路，則無法呈現本文欲探討之主題，因將細小街道加入探討，不僅會使街廓產生過多切割與零碎等問題，更會讓後續無法依據分析結果來檢討現況土地使用的合理性，且在未來土地使用規劃配置時，勢必會呈現出許多細小的規劃單元，而不符合發展效益。因此，依據步行道路進行分類並加以篩選，若該地區之細小街道過多，則建議以一個分析單元代表，且在進行土地使用配置的合理性檢討時，亦建議僅挑選「一般道路」為討論對象。

4. 結果討論

經由篩選與分析後，本研究將討論如下幾個 TOD 規劃議題，如：步行路網便捷值與土地使用配置之關係、步行路網便捷值與土地使用密度之關係、檢討傳統之 TOD 步行導向之規劃思維。

四、實例研究分析

本研究以新板特區為研究對象，並以場站周圍 500 公尺範圍內之步行路網與土地使用為研究範圍，如圖 6 (紅線部分)，但為保路網結構之完整性，將以圖 6 (黑線部分) 為分析單元。首先，將路網結構轉換成軸線圖，共可分為 39 個分析單元 (如圖 7)，一般道路為 1 至 20 單元，其餘為 21 至 39 單元，其中單元 1 之路段名稱為縣民大道，係車站主要出入口，因此以該單元為根節點加以計算 (如圖 8)，最後，透過連接圖進行新板特區的空間型構相關分析，其相關空間量化分析結果，請詳見附表 1。

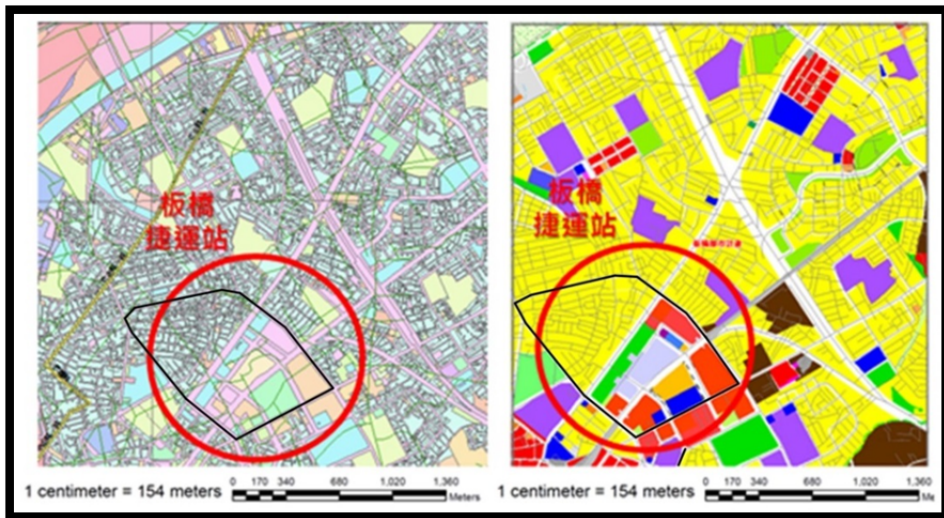


圖 6 板橋捷運站 500 公尺範圍之步行路網與土地使用現況圖

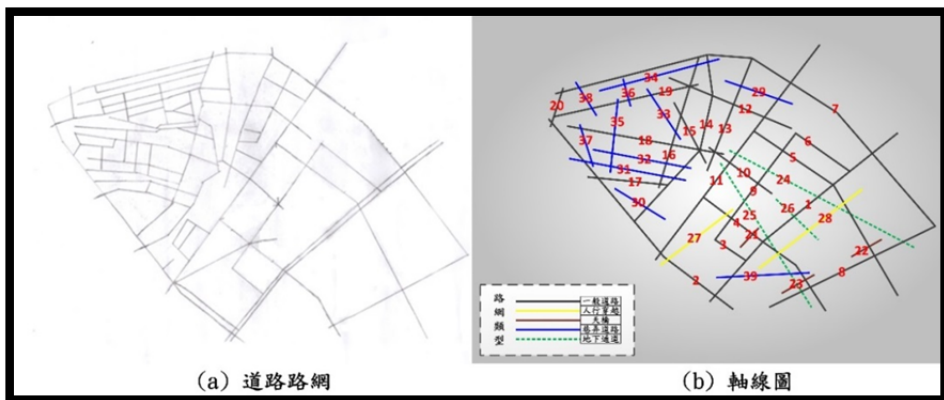


圖 7 道路路網與軸線轉換圖

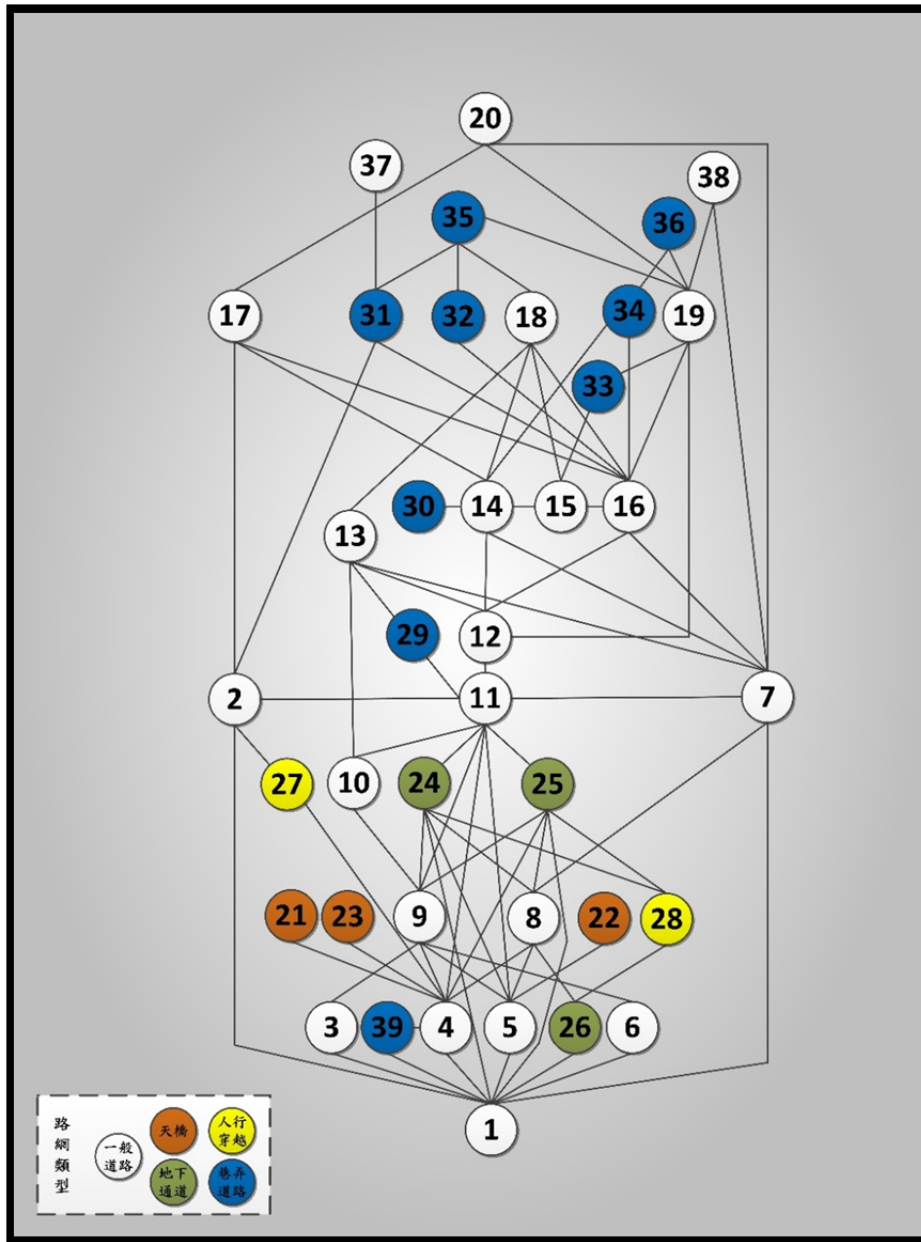


圖 8 連接圖

本研究以步行路網的結構特性做為空間可及性分析資料，板橋站 500 公尺範圍內之步行路網結構可劃分為 39 個分析單元，其中地區便捷值最大值為 4.58496，最小值為 2.92415，平均值為 3.42688；路網連接值最大值為 10，最小值為 1，平均值為 4.35897；路網控制值最大值為 3.8873，最小值為 0.1，平均值為 1，其分析數據統計整理如表 2。

表 2 空間量測變數結果統計表

路網空間特性	分析單元	最大值	最小值	平均值
連接 (connectivity)	39	10	1	4.35897
控制值 (control value)	39	3.88730	0.1	1
地區便捷 (local)	39	4.58496	2.92415	3.42688

五、結果討論

依據本研究實證分析所產出之結果，僅討論一般道路 (分析單元 21 至 39)，進一步將其研究數據與軸線圖結合，並依其空間整合度、路網特性與板橋都市計畫之平均法定容積率，進行場站周邊土地使用配置討論，其分析結果彙整如下表 3 所示。

表 3 路網空間分析結果表

範圍	單元	連接值	平均法定容積率 (%)	地區相對便捷值 (R_3)	路名
300m	①	10	500	4.58496	縣民大道二段
	③	2	450	2.92415	縣民大道二段至站前路 (短程客運站)
	④	10	400	4.57823	新府路
	⑤	7	450	3.88456	新站路
	⑥	2	450	2.92415	站前路 (長程客運站)
	⑨	7	500	4.29665	站前路
	⑩	3	450	3.09992	站前路至文化路一段
	⑪	9	450	4.43550	文化路一段
平均	8	6.25	456.25	3.84102	300 公尺範圍內
500m	②	5	400	3.76986	民權路
	⑦	8	400	4.54639	漢森東路、漢森西路、國光路
	⑧	6	270	3.75208	中山路一段
	⑫	5	300	4.08989	光正街、建國街
	⑬	5	300	3.44592	光正街至光正街 45 巷
	⑭	7	300	3.88771	公館街
	⑮	4	300	3.44828	復興街至民權路 202 巷
	⑯	9	300	4.21169	國光路至民權路 260 巷
	⑰	4	300	3.29610	民權路 260 巷 9 弄
	⑱	6	300	3.90856	民權路 202 巷 13 弄至民權路 302 巷
	⑲	7	300	3.82654	建國街
	⑳	3	300	3.16731	中正路
平均	12	5.75	314.16	3.77919	300 公尺範圍外

本研究先以 300 公尺為範圍，檢視板橋車站平均法定容積之配置，其呈現出容積配置係以車站為核心，隨著距離逐漸遞減，即越接近車站容積越高，而此為傳統 TOD 規劃手段，即刺激民眾集中到車站地區活動，並藉此提升大眾運輸旅次。但是，依據本研究實例分析所得之結果 (如圖 9)，發現對民眾步行需求與整體路網結構而言，並非越接近車站越便利，如分析單元 3、6 其位於 300 公尺範圍內且鄰近車站，但其地區便捷值卻僅呈現出 2.924，比在 500 公尺範圍外的單元 20 更為不便，但其平均法定容積卻高達 450%，若以此傳統規劃手段發展，雖然實際物理空間距離較短，但是步行難度卻提高且步行時間增長，僅係以規劃者角度而忽略民眾步行需求，勢必降低民眾步行意願，轉而改用非大眾運輸工具。

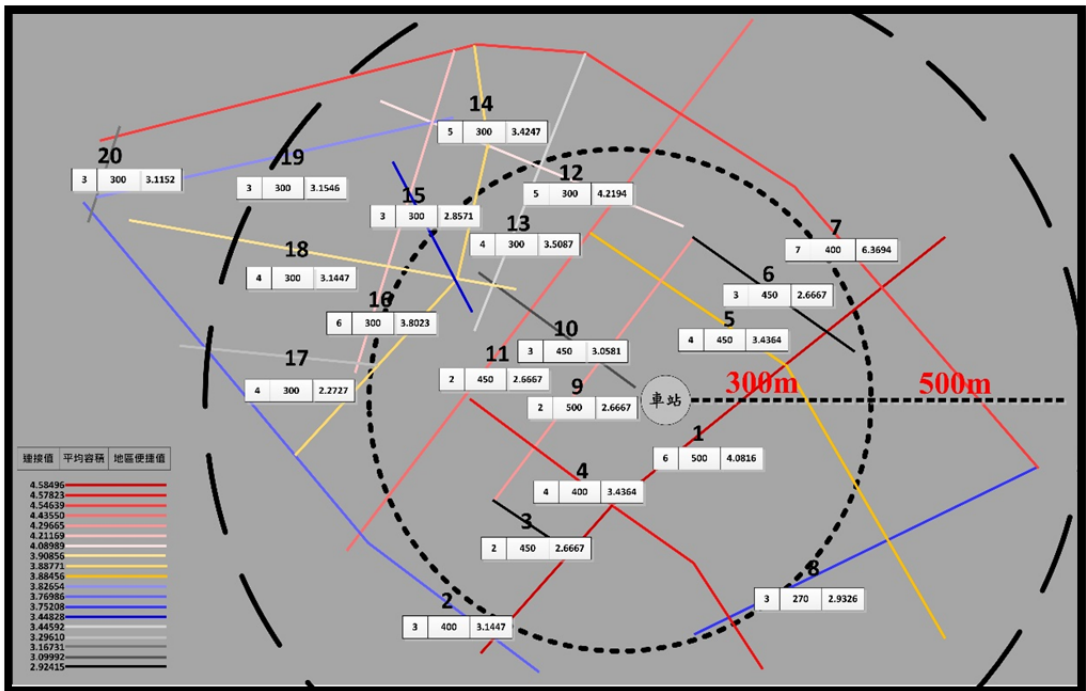


圖 9 路網空間整合示意圖

此外，進一步將 20 個分析單元，依其地區便捷值由低至高排列，並檢視其平均法定容積，亦發現在整體路網結構中，較為不便的單元 3、6 與單元 10 之平均法定容積皆高於相對較為便捷之單元 13、16 與單元 12 (如圖 9)，此現象顯示出傳統 TOD 規劃手段的不適地性，即以距離作為土地使用配置的衡量依據，但卻忽略了整體路網結構與民眾步行的便捷程度，而使土地使用配置在步行不易到達的位置上，不僅造成各種資源的浪費，未來更無法確切落實 TOD 發展理念。綜合上述分析結果，本研究得到 4 點發現，如以下小節說明。

5.1 步行路網便捷性與場站土地使用配置的關係

由圖 10 顯示，該路網系統中屬主要道路的單元 1 (縣民大道)：連接值為 10、地區便捷值為 4.585，在整體路網結構中其便捷程度最高，其次為單元 4 (新府路) 與單元 7 (漢森東路、漢森西路、國光路)，其中單元 1 又與單元 7 僅有一步之遙；連接值與控制值最低的路段則為市區公車與客運進出的單元 3 與單元 6。而在位於車站西側出入口的單元 4，因具有地下道、天橋、廣場穿越道路等相連結，而有最高的控制值 3.887。由此分析結果可得知，場站設置之位置處於整體路網中較為便捷與高可及性之地點，且與其他路線有良好的連接。因此，該 TOD 環境適合民眾步行前往搭乘大眾運輸，但公車轉乘系統之場站位置，卻設置在步行較不適前往之路段上。

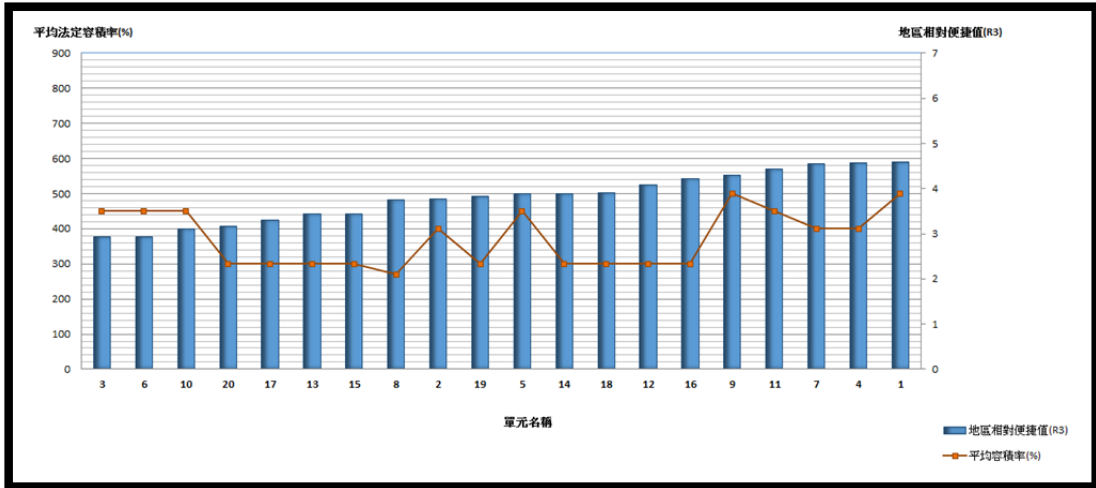


圖 10 地區便捷值與平均法定容積疊合分析圖

5.2 步行路網便捷值與土地使用密度的關係

板橋站 400 ~ 500 公尺範圍之土地使用，以住宅區面積為主，但因早於車站之設置，且在早期未妥善規劃的情況下，導致路網較為破碎不完整，而呈現面狀的發展，使該地區之住商混合比例較低，也因此步行路網之分布較為密集，計算後之地區便捷值則分散於各住宅區內，使之在空間型態分布上，仍以步行道路為主，並呈現該地區之控制值高於車站核心。而 200 ~ 300 公尺之範圍，則為高密度發展的商業區與高級住宅區，但依本研究分析，該範圍之步行道路於整體路網中之便捷值卻較為不足，如單元 3、6 與單元 8。此外，車站基地 100 公尺範圍內多為綠化之開放空間，且車行道路較少，便捷值較高，但卻呈現發展程度較低的現象。

5.3 從步行路網便捷值檢討現行的 TOD 土地使用設計理念

從板橋站 500 公尺範圍內之土地使用現況可看出，當前商業多集中於便捷值較低之單元 8 (中山路一段) 發展，如圖 11。雖然此土地使用配置能產生步行誘因，使民眾因為消費需求而移動到該地區，進而提升大眾運輸之旅次；但礙於相對便捷性不佳，易降低民眾前往消費之意願，或造成民眾選擇私人機動運具前往之機會提高，反與 TOD 理念背道而馳。然而，若以空間型構法則之理論，並依據分析之結果作為土地使用配置之參考，則能充分考量路網特性，且以整體之角度，反應到民眾個體之步行需求。因此，應提高具較高相對便捷值的單元 11 (文化路一段) 與單元 12 (光正街) 之商業發展，並提高土地使用密度，亦能藉此加強該 TOD 環境之土地混合使用與高密度發展等設計特徵；此外，單元 16 之相對便捷值雖居中，但卻具有較高之連接值與控制值 (2.218)，且地理位置位於住宅區內，可設置為公園綠地等公共開放空間，以調節土地使用之豐富度。而單元 20 雖距離車站核心最遠，其相對便捷值甚至比單元 3、6、10 等路段都還要高，且與單元 7 僅一步之遙，可見從該路段前往至捷運場站尚屬便捷，可提高該地區之土地使用強度，並多設置公車轉乘系統，以接駁民眾至捷運場站，而該路線較不複雜之特性，則利於市區公車行駛，並能藉此減少能源消耗、降低交通擁擠等。



圖 11 土地使用分區現況圖

5.4 傳統 TOD 發展規劃思維與步行導向規劃思維

TOD 雖然提供一套可行的設計準則，但對規劃者而言，卻僅能以此 TOD 理念為基礎來監控 TOD 的發展，如此在人口密集以及寸土寸金的臺北都會區，即使無所作為亦能輕易達到 TOD 的設計準則，以至產生有捷運建設就等於 TOD 發展的謬思，但該如何在實際規劃過程中，妥善考量與適宜地配置其代表內涵，如在步行可及的土地開發範圍內 (distance)，該在何處提高土地使用強度 (density)，又該在何處加強土地混合使用程度 (diversity)，又該如何檢視其行人步行前往該土地使用配置時是否順暢 (design) 等，則缺乏可操作的理論基礎，因而促使 TOD 發展與規劃僅能以距離 (destination) 為主要衡量基準。

如從傳統 TOD 規劃思維 (如圖 12) 中，可看出其規劃手段僅強調放射狀之土地使用規劃，而將距離捷運場站 300 公尺內之土地提高使用密度，然後逐漸降低土地使用密度，使其成為發展核心，以刺激民眾集中到中心地區活動，卻也忽略了民眾移動的方式與過程，其周圍土地使用在利益最大化的配置下，且不考量民眾步行過程是否便捷與順暢，已導致多數人仍然使用私人運具前往捷運場站或放棄選擇使用大眾運輸運具等現象。

再從步行導向規劃思維 (如圖 13) 中，便能發現明顯不同之處，其土地使用配置不僅具有理論基礎，更能透過一連串的空間量測變數加以進行分析，使其在土地使用配置過程中能考量民眾移動過程，並能依據便捷值的高低來決定發展強弱，可見空間型構法則係能提供不同於以往的規劃思維。綜上所述，其傳統 TOD 規劃思維存在著隱憂，而步行導向規劃思維，能使臺灣 TOD 發展跳脫傳統且單調的規劃方式，進而使 TOD 規劃能更具適地性與合理性。

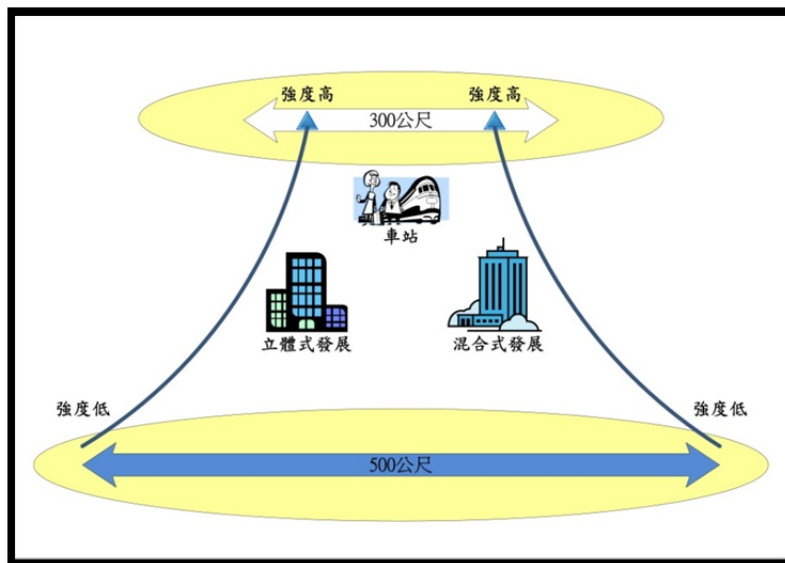


圖 12 傳統 TOD 規劃思維

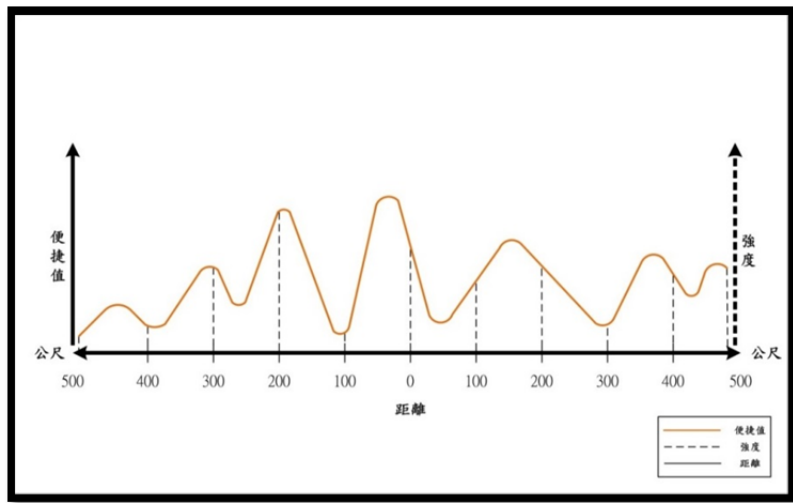


圖 13 步行導向規劃思維

六、結論與後續研究建議

臺灣發展 TOD 的過程是以需求導向為主，因此捷運場站周圍之商業與人口密度或許呈現出較密集之發展趨勢，但周圍汽車道路路網可能雜亂的穿越與分布其中，使其步行環境可能呈現出越靠近捷運場站越不便捷之情形。若以傳統之規劃手段，將無法了解都市路網中人的流動、群聚與土地使用配置間的關係，更無法從中分析環境現狀與人之間的關連性，以至無法在微妙的關係間建置出適宜的空間布局，且極易與使用現況及民眾認知產生落差。然而，臺灣以往用於分析都市的空間模型較多基於物理距離的可及性研究，如以車站為中心，其影響範圍為周邊 400 ~ 800 公尺；若依照此觀念加以分析，大眾運輸場站的前、後站之直線距離相同，土地使用與經濟發展規模亦需雷同，但觀臺灣都市發展，卻經常受到鐵路或大眾運輸場站的阻隔，而使得前站與後站之發展規模呈現出極大之落差，究其因可發現其差異主要係受到道路密度的影響所至，一面之道路往往四通八達；而另一面則可能僅設置地下道連結，導致兩區發展產生差異，實與臺灣都市現況發展不符。本研究透過空間型構法則的概念，探討板橋車站周邊 TOD 土地使用規劃的適宜性，依據其實證結果，提出如下 3 點結論，以及後續研究建議。

6.1 結論

1. 步行環境之便捷度與距離場站之遠近並非絕對

依據本研究之實證分析結果，距離較遠於捷運場站之單元 16 與 20 的相對便捷值為 4.2117 與 3.1673，皆較便捷於 300 公尺範圍內之距離捷運場站較近的單元 3、6 與 10 之相

對便捷值 2.9241 與 3.0999。由此可見，步行環境之便捷度與距離場站之遠近並非絕對，若僅以 TOD 傳統之規劃手段，即 300 公尺範圍內提高土地使用強度，隨後逐漸降低之手段，此土地使用之配置，將無法把路網特性與民眾步行需求納入考量，將無法落實 TOD 與步行導向結合之發展理念。

2. 新板特區土地使用配置強弱與步行路網便捷值高低不相同

依據本研究分析結果與新板特區土地使用現況配置相比較，顯示出位於 TOD 發展區 300 公尺範圍內，且鄰近捷運場站的分析單元 3、6 與單元 10，其地區便捷值僅呈現出 2.92415 與 3.0992，相較於 300 公尺範圍外的分析單元皆更為不便捷，而平均法定容積卻高達 450%。此外，在 300 公尺範圍外的單元 8、12 與單元 16，在整體路網結構中則具有較高的便捷值，但其土地使用配置強度卻極為低落；因此，從本研究成果顯示出，新板特區當前土地使用規劃配置現況，因尚未將步行路網結構與特性納入考量，而不符合一般民眾步行選擇與需求。

3. 傳統 TOD 規劃思維與步行導向規劃思維

臺灣 TOD 發展多數仍以需求導向為主，並不像國外較為重視先前規劃，因此臺灣 TOD 發展更需將路網結構充分納入考量，如國外路網較朝向棋盤式發展，對於民眾步行而言，其路徑選擇較為單純，且道路之間的相互影響也較為平均，因而距離才會成為主要影響因素。但臺灣 TOD 發展卻任由現況恣意發展，而到達一定發展規模後才開始規劃捷運場站，此時道路已形成諸多巷道且街廓也相當細碎，若僅以傳統 TOD 規劃思維，將忽略了民眾步行選擇，如天橋、地下道等因素皆為傳統 TOD 思維以及一般重力模型所無法考量。

從本文實證結果可發現，空間型構法則與其一連串空間量測變數，係能適用於 TOD 區內步行路網分析，進而跳脫距離限制，反以路網結構本身特性為依據，而呈現出有別於以往規劃思維，其分析結果不僅能提供規劃者進行土地使用配置之參考，更能在審視大眾運輸發展是否符合 TOD 設計準則的同時，提供一套可操作的方法與理論基礎，並有助於規劃單位從步行者的角度出發，進而探討民眾步行與周圍環境的關係，以符合 TOD 發展理念以及人行導向都市設計。若以空間型構法則之分析結果進行土地使用配置，其 TOD 區發展較能充分考量民眾步行之便捷程度而進行合理性的調整；此外，更能依據空間便捷值的高低來規劃不同土地使用發展強弱，使其在規劃過程中能依據不同的路網特性加以調整，進而讓 TOD 區的土地使用能更具適地性。

6.2 後續研究建議

本研究著重於檢視 TOD 區土地使用配置之合理性，後續研究將續以空間型構法則為 TOD 發展之操作理論基礎，並應用分析網絡程序法 (analytic network process) 以探討影響步行之物理特徵與環境特徵 (如距離、坡度、規模等)；接著應用階層線性模型 (hierarchical

linear model) 以探討步行環境對於弱勢族群 (如高齡者、婦女、孩童等) 的身心影響，以期減少研究限制並充分考量民眾步行需求。最後應用多目標規劃方法建構出以步行為導向的土地使用規劃模式，以人行為導向的都市設計為目標，在有限的土地、社會、交通資源限制下，建立出以步行為導向的土地使用規劃模式及量化配置。

參考文獻

1. Cervero, R., and Landis, J., "Twenty Years of the Bay Area Rapid Transit System: Land Use and Development Impacts", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, Issue 4, 1997, pp. 309-333.
2. Renne, J. and Newman, P., "Facilitating the Financing and Development of Smart Growth", *Transportation Quarterly*, Vol. 56, No.2, 2002, pp. 23-32.
3. Dittmar, H. and Ohland, G., *The New Transit Town: Best Practices in Transit-Oriented Development*, Island Press, New York, Washington, DC, 2004.
4. Penn, A., Hanson, J., Grajewski, T., and Xu, J., "Natural Movement: Or Configuration and Attraction in Urban Pedestrian Movement", *Environment and Planning B*, Vol. 20, No.1, 1993, pp. 29-66.
5. 楊滔，「空間句法：從圖論的角度看中微觀城市形態」，*國外城市規劃*，第 21 卷，第 3 期，民國 95 年，頁 48-52。
6. Yang, T., "Impacts of Large Scale Development: Does Space Make a Difference?", *Proceedings of the Fifth Space Syntax Symposium*, Technological University of Delft, Holland, 2005, pp. 1-23.
7. 陳嘉茹，「以空間型構法則與階層線性模式探討交通路網結構對都市商業型態影響之研究」，成功大學都市計畫研究所碩士論文，民國 97 年。
8. Hillier, B., Turner, A., Yang, T., and Park, H., "Metric and topo-geometric properties of urban street networks: some convergences, divergences and new results", *Proceedings of 6th Symposium of Space Syntax*, Istanbul, Turkey, 2007, pp. 1-21.
9. 黃書偉，「土地混合使用空間型態量測與其影響因素之研究」，成功大學都市計畫研究所博士論文，民國 97 年。
10. Hillier, B., "The Hidden Geometry of Deformed Grids: Or, Why Space Syntax Works, When It Looks as Though It Shouldn't", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 26, No. 2, 1999, pp. 169-191.
11. Penn, A., Hillier, B., Banister, D., and Xu, J., "Configurational Modelling of Urban Movement Network", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 25, No.1, 1998, pp. 59-84.
12. Turner, A., "From Axial to Road-Centre Lines: A New Representation for Space Syntax and a New Model of Route Choice for Transport Network Analysis", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 34, No.3, 2007, pp. 539-555.
13. Nenci, A. and Troffa, R., "Integrating Space Syntax in Wayfinding Analysis", In: Holscher,

- C., Dalton, R. C., and Turner, A. (Eds.), *Space Syntax and Spatial Cognition*, University of Bremen, Bremen, Germany, 2007, pp. 181-184.
14. Hillier, B., Karimi, K., and Stonor, T., "Using Space Syntax to Regenerate the Historic Centre of Jeddah", *Proceedings of the UIA World Congress, Tools for Governance*, 2008.
 15. Peponis, J. and Wineman, J., "The Spatial Structure of Environment and Behavior: Space Syntax", *Handbook of Environmental Psychology*, 2002, pp. 271-292.
 16. Hillier, B. and Shu, C. F., "Crime and Urban Layout: The Need for Evidence Secure Foundations", *Key Issues in Crime Prevention, Crime Reduction And Community Safety*, In Ballintyne, S., Pease, K., and McLaren, V. (Eds.), Institute for Public Policy Research, London, 2000, pp. 224-248.
 17. Enström, R. and Netzell, O., "Can Space Syntax Help Us in Understanding the Intraurban Office Rent Pattern? Accessibility and Rents in Downtown Stockholm", *Real Estate Finan Econ*, Vol. 36, 2008, pp. 289-305.
 18. Belzer, D. and Aulter, G., *Transit-Oriented Development: Moving from Rhetoric to Reality*, The Brookings Institution Center on Urban and Metropolitan Policy and The Great American Station Foundation, Washington, DC, 2002.
 19. Rahul, T., "Economic Impact of Non-Motorized Transportation in Indian Cities", *Research in Transportation Economics*, Vol. 38, issue 1, 2013, pp. 22-34.
 20. 陳慧君, 「永續發展與成長管理之體現—從港鐵東湧線審視機場捷運線之 TOD 發展策略」, *土地問題研究季刊*, 第 11 卷, 第 3 期, 民國 101 年, 頁 38-59。
 21. Alpkokin, P. and Ergun, M., "Istanbul Metrobüs: First Intercontinental Bus Rapid Transit", *Journal of Transport Geography*, Vol. 24, 2012, pp. 58-66.
 22. 王曉原、蘇躍江, 「基於 TOD 模式的城市土地利用研究」, *山東理工大學學報 (自然科學版)*, 第 24 卷, 第 2 期, 民國 99 年, 頁 1-6。
 23. 李家儂、羅健文, 「大眾運輸導向發展設計概念中步行可及性與大眾捷運系統旅次關係之初探」, *都市交通*, 第 20 卷, 第 4 期, 民國 95 年, 頁 1-14。
 24. Wey, W. M. and Chiu, Y. H., "Assessing the Walkability of Pedestrian Environment under the Transit-Oriented Development", *Habitat International*, Vol. 38, 2013, pp. 106-118.
 25. Frank, L. D., Schmid, T. L., Sallis, J. F., Chapman, J. and Saelens, B. E., "Linking Objectively Measured Physical Activity with Objectively Measured Urban Form: Findings from SMARTAQ", *American Journal of Preventive Medicine*, Vol. 28, Issue 2, Supplement 2, 2010, pp. 117-125.
 26. Jun, M. J., Kim, J. I., Kwon, J. H., and Jeong, J. E., "The Effects of High-Density Suburban Development on Commuter Mode Choices in Seoul, Korea", *Cities*, Vol. 31, 2013, pp. 230-238.
 27. Al-Azzawi, M. and Raeside, R., "Modeling Pedestrian Walking Speeds on Sidewalks", *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 133, No.3, 2007, pp. 211-219.
 28. 傅搏峰、吳嬌蓉、陳小鴻, 「空間句法及其在城市交通研究領域的應用」, *國外城市規劃*, 第 24 卷, 第 1 期, 民國 98 年, 頁 79-83。

附表 1 空間量測變數分析總表

單元	連接值	控制值	三步深度 (D)	平均相對 深度 (MD)	標準化 集成度 (D_n)	RA_i	$RR A_i$	地區相對 便捷值 (R_3)
1	10	2.73452	73	2.027778	0.26928	0.05873	0.21810	4.58496
2	5	1.21111	81	2.250000	0.26928	0.07143	0.26526	3.76986
3	2	0.24286	64	2.461538	0.34190	0.11692	0.34198	2.92415
4	10	3.88730	57	1.965517	0.31574	0.06897	0.21842	4.57823
5	7	1.88730	62	2.137931	0.31574	0.08128	0.25743	3.88456
6	2	0.24286	64	2.461538	0.34190	0.11692	0.34198	2.92415
7	8	1.66508	78	2.052632	0.25869	0.05690	0.21995	4.54639
8	6	1.03452	76	2.235294	0.28090	0.07487	0.26652	3.75208
9	7	1.90952	45	1.956522	0.37362	0.08696	0.23274	4.29665
10	3	0.45397	79	2.468750	0.29374	0.09476	0.32259	3.09992
11	9	1.93452	79	2.078947	0.25869	0.05832	0.22545	4.43550
12	5	0.70794	75	2.142857	0.27495	0.06723	0.24451	4.08989
13	5	1.32500	77	2.333333	0.28716	0.08333	0.2902	3.44592
14	7	2.32500	72	2.181818	0.28716	0.07386	0.25722	3.88771
15	4	0.92063	53	2.208333	0.36232	0.10507	0.29000	3.44828
16	9	2.21786	69	2.090909	0.28716	0.06818	0.23743	4.21169
17	4	0.78730	79	2.393939	0.28716	0.08712	0.30339	3.29610
18	6	1.45397	52	2.080000	0.35177	0.09000	0.25585	3.90856
19	7	2.39444	60	2.142857	0.32394	0.08466	0.26133	3.82654
20	3	0.51786	78	2.437500	0.29374	0.09274	0.31573	3.16731
21	1	0.10000	49	2.450000	0.41303	0.15263	0.36954	2.70608
22	1	0.14286	46	2.555556	0.44519	0.18301	0.41107	2.43265
23	1	0.10000	49	2.450000	0.41303	0.15263	0.36954	2.70608
24	6	0.86349	63	2.172414	0.31574	0.08374	0.26523	3.77031
25	6	0.82063	61	2.103448	0.31574	0.07882	0.24963	4.00595
26	3	0.46667	60	2.400000	0.35177	0.11667	0.33166	3.01518
27	2	0.30000	66	2.444444	0.33264	0.11111	0.33402	2.99379
28	5	0.90952	44	2.095238	0.39887	0.10952	0.27459	3.64182
29	2	0.31111	77	2.566667	0.30800	0.10805	0.35080	2.85063
30	1	0.14286	52	2.600000	0.41303	0.16842	0.40777	2.45238
31	4	1.06111	77	2.40625	0.29374	0.09073	0.30886	3.23769
32	2	0.36111	51	2.428571	0.39887	0.14286	0.35816	2.79206
33	2	0.39286	45	2.368421	0.42842	0.15205	0.3549	2.81767
34	3	0.75397	51	2.318182	0.38577	0.12554	0.32543	3.07285
35	4	1.05952	53	2.208333	0.36232	0.10507	0.29000	3.44828
36	2	0.47619	43	2.388889	0.44519	0.16340	0.36703	2.72457
37	2	0.41667	53	2.52381	0.39887	0.15238	0.38204	2.61756
38	2	0.26786	78	2.516129	0.30068	0.10108	0.33616	2.97480
39	2	0.20000	65	2.321429	0.32394	0.09788	0.30217	3.30944

多準則決策模式於運輸政策制定之 應用—以花蓮為例

TRANSPORTATION POLICY MAKING USING MCDM MODEL: THE CASE OF HUALIEN

郭仕堯 Shih-Yao Kuo¹
陳淑娟 Shu-Chuan Chen²

(102 年 6 月 11 日收稿，102 年 8 月 30 日第 1 次修改，
103 年 5 月 23 日第 2 次修改，104 年 3 月 12 日定稿)

摘 要

本研究旨在應用多準則決策模式(MCDM)進行運輸政策決策過程之評估，進而檢驗運輸政策各種準則之間的相依關係。以決策實驗室分析法(DEMATEL)建立影響關係圖(IRM)與網路關係圖(NRM)，探討影響運輸政策決策之因果關係。再以分析網路程序法(ANP)取得準則之權重，接著以最佳化妥協解方法(VIKOR)找出最佳運輸模式。以花蓮對外交通為例，實證結果顯示此模式可有效處理複雜問題，辨識其因果關係，評估準則之優先順序，進而挑選出最佳妥協解。

關鍵詞：運輸政策；多準則決策模式；決策實驗室分析法；分析網路程序法；最佳化妥協解方法

-
1. Associate Professor, Department of Air Transportation Management, Aletheia University (Address: 70-11 Pei-Shih-Liao Matou, Tainan 721, Taiwan. Tel.: 06-5703100 x6017; fax: 06- 5700545; E-mail: aerogenic@gmail.com).
 2. Assistant Professor, Department of Air Transportation Management, Aletheia University (Address: 70-11 Pei-Shih-Liao Matou, Tainan 721, Taiwan. Tel.: 06-5703100 x7435; fax: 06- 5703834; E-mail: geniechen2006@gmail.com).

ABSTRACT

The purpose of this study is to propose a transport policy decision-making process using a MCDM (multiple criteria decision-making) model to examine the dependent relationships among variable criteria of transport policies. DEMATEL (decision-making trial and evaluation laboratory) is employed to construct the IRM (impact relation map) and NRM (network relation map), which illustrate the influential network of the transport policy decision-making model. ANP (analytic network process) is adopted to evaluate the weights of criteria. VIKOR is then used to select the best transport mode. The case of Hualien is demonstrated and the empirical results reveal the proposed model is powerful and effective to identify the influential network, priority of criteria, and select the best compromise solution to a complicated problem.

Key Words: *Transport policy; MCDM; DEMATEL; ANP; VIKOR*

I. INTRODUCTION

Taiwan lies off the southeastern coast of mainland Asia. Hualien County, Taiwan's biggest county, borders the Pacific Ocean to the east and is hemmed in by the Central Range to the west. In 1590, Portuguese sailors passed by the eastern coast of Taiwan and were moved by the grandeur and then named it "Formosa" (beautiful island). Today, Hualien has become one of Taiwan's main travel destinations for local and international visitors^[1].

In addition to the Central Cross-Island Highway (Provincial Highway No. 8), another road that offers considerable attractions for the tourists is the Suao-Hualien Highway (Provincial Highway No. 9), which starts at Suao, Yilan and ends at Hualien^[2]. The 20-kilometer section between Chongde and Heping is the most spectacular part of the route, as highway winds its way between the cliffs that rise to more than a thousand meters.

Both landform and geological structure mean that Suao-Hualien Highway is often affected by landslides caused by typhoons, heavy rain, and earthquakes. In order to provide a safer route, in 2002 the Executive Yuan approved plans to build a new "Suao-Hualien National Freeway" to improve the relatively poor infrastructure of Hualien area. However, this project has now been suspended after it failed to pass an environmental impact evaluation^[3]. In 2010, the Executive Yuan approved the "Suao-Hualien Highway mountain sections improvement plan" to replace some dangerous sections of the original highway. By avoiding geologically fragile sections, the initiative is expected to increase both the safety and carrying capacity of the highway, and reduce the journey time^[4].

Travel north of Hualien now relies on the Suao-Hualien highway and the northern line railway. While the island-wide railway network, including western, eastern, northern, and

southern lines, is often very popular for passengers^[5], it is difficult to get train tickets during the holidays and weekends. In addition, the flight capacities between Hualien and Taipei are relatively limited^[6]. From 1975 to 1983, passenger shipping had traveled between Hualien and Keelung, but this was often affected by typhoons in the summer and the monsoons in the winter. Moreover, with the operation of the northern line railway in 1980, the number of passengers going by sea declined very quickly, and this service was eventually discontinued^[7].

In addition to the Central Cross-Island Highway and Suao-Hualien Highway, the Hsuehshan Tunnel through the Hsuehshan Range is another important infrastructure connecting the eastern and northern sections of Taiwan. The total length of the tunnel is 12.9 km, making it the second longest road tunnel in East Asia and the fifth in the world^[8]. While excavating the tunnel, engineers encountered serious geological problems, like fractured rocks and massive inflows of water, which caused severe delays to the project. Since 2006, Chiang Wei-Shui Memorial Freeway (National Freeway No. 5) has connected Taipei City to northeastern Yilan County, cutting the journey time from two hours to half an hour. One of the key aims of constructing the tunnel and freeway was to connect the western plain of Taiwan, where 95% of the population lives, to the eastern coast, and mitigate the problem of unbalanced development.

The construction of transport infrastructure is usually welcomed by the local governments in Taiwan, due to the benefits with regard to greater convenience and growth in the local economy, tourism industry, and employment rate. However, environmental protection must be taken into consideration when such projects are proposed, and if mistakes are made then this can lead to considerable waste with regard to time and money. This makes transport policy decision-making a particularly difficult task.

In summary, a country's transport infrastructure is closely connected to its economy, society, environment, and politics. The question thus arises as to whether it is possible to develop a systematic and scientific decision support system to consider the various conflicting factors associated with transport policies, and to find an optimal compromise solution. This study aims to provide a MCDM (multiple criteria decision-making) transport policy decision-making model by investigating the case of Hualien. The results of this work demonstrate that the proposed model is able to identify the influential network, priority of criteria, and select the best compromise solution for a complicated transport policy problem.

The remainder of this paper is structured as follows. Section 2 summarizes transport policy decision-making in Taiwan and some important previous research regarding transport policy decision-making. Section 3 reviews the basic concepts of the DEMATEL (decision-making trial and evaluation laboratory), ANP (analytic network process), and VIKOR approaches. An empirical case of Hualien is illustrated to show the usefulness of the proposed model in Section 4, and the results of this empirical study are discussed in Section 5. Finally, the conclusions of

this work are drawn in Section 6.

II. REVIEW OF TRANSPORT POLICY DECISION-MAKING

Public policy decision-making may be regarded as the process by which a government translates its political vision into projects and actions to achieve desired outcomes in the real world. Many techniques are available which can assist with in this process, such as Political System Theory^[9], the Garbage Can Model^[10], and Rough Sets Theory^[11].

In Taiwan, the Institute of Transportation (IOT) serves as a think tank for the Ministry of Transportation and Communications (MOTC), and has helped in the development and completion of many major projects. It not only carries out the horizontally integrated policy coordination for MOTC, but also provides vertical implementation with regard to technical support and supervision^[12].

The various departments of the Executive Yuan in Taiwan are staffed by many experts and scholars, and most cabinet members have doctoral degrees. On the other hand, Taiwanese society is highly democratized, with two major parties that campaign to win public office at all levels of the system. In other words, the Taiwanese political system has two conflicting characteristics: elitism and populism. Moreover, the content in which policies have to be developed is becoming increasingly complicated, uncertain and unpredictable, and key issues, such as transport infrastructure, economic development, social security, and environmental protection, are connected and cannot be tackled easily by the specific departments acting alone.

Although several traditional approaches have been proposed for solving public policy decision-making problems, different techniques may yield different results for the same problem. Recently, the MCDM method has been presented as a way to aggregate individual judgments into a group judgment, and it has become a very active area of research. However, relatively few studies have devoted to examine transport policy decision-making.

Yedla and Shrestha^[13] examined the impact of including various qualitative criteria for the selection of alternative transportation options in Delhi. Three alternative transport options: two-wheelers, cars and buses were prioritized based on six different criteria: energy saving potential, emission reduction potential, cost of operation, availability of technology, adaptability of the option, and barriers to implementation. Integrated quantitative and qualitative criteria gave contrasting results as compared to those obtained from the conventional quantitative and qualitative approaches, which can explain the reasons for failure of many potential alternative urban transport options.

Tudela et al.^[14] compared the outcome of cost benefit analysis and a multi-criteria method

when applied to a transport project. The results showed that the outcome of the multi-criteria method was different to the one from the cost benefit analysis, but it matched the final decision made by the authority. These two earlier studies show that it is possible to improve transport policy decision-making by using an MCDM model.

MCDM ^[15] has also been proved for its usefulness in many fields, such as economy, management and engineering. The DEMATEL technique, which originates from the Geneva Research Centre of the Battelle Memorial Institute, is widely used to investigate and solve complicated problems ^[16], and is particularly useful for visualizing the structure of complicated causal relationships with matrices and digraphs. DEMATEL has recently attracted more attention in Japan and Taiwan, and has been widely applied in many contexts, including transportation ^[17], tourism ^[18], and many other industries ^[19, 20]. The ANP method ^[21] is an extension of the AHP approach ^[22], which is used to overcome the problem of interdependence and feedback between criteria ^[23]. The VIKOR method was developed to determine the compromise ranking list with the given weights for multi-criteria optimization of complicated systems ^[24]. It focuses on ranking and selecting from a set of alternatives in the presence of conflicting criteria ^[25]. This compromise ranking algorithm introduces the multi-criteria ranking index based on a measure of closeness to the ideal solution ^[26]. The normalized value in the VIKOR method does not depend on the evaluation unit of a criterion function, whereas the ones by vector normalization in the TOPSIS method may depend on the evaluation unit ^[25].

DEMATEL and ANP were adopted to efficaciously investigate the intertwined effects ^[27,28], while ANP and VIKOR were adopted to select a restaurant location ^[29]. In addition, DEMATEL, ANP and VIKOR were applied to select an outsourcing provider ^[30] and improve tourism policy implementation ^[18]. Accordingly, this study proposes a transport policy decision-making process using a MCDM approach to examine the dependent relationships among various transport-related criteria. DEMATEL is employed to construct IRM (impact relation map) and NRM (network relation map), which illustrate the influential network of the transport policy decision-making model. Besides, ANP is used to evaluate the weights of criteria, while VIKOR is applied to select the best transport mode.

Yeh et al. ^[31] stated that transportation projects do not follow a united process in Taiwan. In their study, four dimensions: namely economy, society, environment, and policy, were measured by 24 attributes extracted from previous studies that reviewed the contextual aspects of Taiwan's transport policies.

However, too many criteria may dramatically increase the difficulty of completing the DEMATEL and ANP questionnaires, as the number of questions produced by pairwise comparisons is proportional to the square of the number of criteria. In addition, the influential network of a model with too many criteria may become too complicated to analyze. After

investigating the content of criteria, some criteria may be combined into a single criterion. For example, the following seven attributes were included in economy dimension: local economic development, tourism development, employment opportunity, investment cost, maintenance cost, transport cost, and travel time ^[31]. It seems that the first three criteria, namely local economic development, tourism development, employment opportunity may be combined in a single criterion as “economic development”. The last four criteria (i.e., investment cost, maintenance cost, transport cost, travel time) may be combined in a single criterion as “eligible cost”.

Therefore, in this work 24 attributes are condensed to eight criteria, as follows: (1) economic development: local economic development, tourism development, and employment opportunities; (2) eligible cost: eligible investment, maintenance, and transport cost, and reasonable travel time; (3) equity & justice: resident rights, balanced development, and mass transport; (4) social security: safety, reliability, accessibility, and disaster reduction; (5) environmental protection: ecological and natural resources protection (6) energy efficiency & carbon reduction: green transport, pollution prevention, and sustainable development; (7) political climate: the aims of the government, pressure groups, and public opinion; (8) feasibility & execution: engineering technology, feasibility, laws and regulations. This set of criteria provides the current research with an overall evaluation system that will facilitate further prioritization using the techniques of DEMATEL, ANP, and VIKOR for the four transport modes, as follows: (1) Highway: Suao-Hualien Highway mountain sections improvement plan; (2) Rail: Taipei-Yilan Direct Railway, extra carriages; (3) Marine: High speed ferry among Keelung, Wushih, Yilan, Suao, Yilan, and Hualien; (4) Air: increasing Taipei-Hualien flights, launching Taoyuan-Hualien flights.

III. MCDM MODEL: DEMATEL, ANP, AND VIKOR

3.1 The DEMATEL approach

The DEMATEL approach can be summarized as follows:

Step 1: Obtain the direct influence matrix $[A]$ based on scores given by experts.

The experts are asked to indicate the direct effect they believe that each factor i exerts on each factor j using an integer scale ranging from 0, 1, 2, 3, and 4, with 0 meaning “no influence” and 4 “a very high influence”. Each element of the direct influence matrix $[A]$ is the average of the same elements in the different matrices of the respondents.

Step 2: Calculate the initial influence matrix $[D]$.

The initial influence matrix $[D]$ is obtained by normalizing the direct influence matrix

$[A]$ as

$$[D] = \frac{1}{k} [A] \quad (1)$$

$$\text{where } k = \text{Max} \left(\text{Max}_i \sum_{j=1}^n A_{ij}, \text{Max}_j \sum_{i=1}^n A_{ij} \right)$$

Step 3: Derive the total influence matrix $[T]$.

As $0 \leq D_{ij} < 1$ and $\lim_{m \rightarrow \infty} [D]^m = [0]$, the total influence matrix $[T]$ can be obtained as

$$\begin{aligned} [T] &= [D] + [D]^2 + [D]^3 + \dots + [D]^m \\ &= [D]([I] + [D] + [D]^2 + \dots + [D]^{m-1})([I] - [D])([I] - [D])^{-1} \\ &= [D]([I] - [D]^m)([I] - [D])^{-1} \\ &= [D]([I] - [D])^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

where $[I]$ denotes the identity matrix.

Step 4: Calculate the sum of rows $\{r\}$ and the sum of columns $\{c\}$.

$$\{r\} = \left[\sum_{j=1}^n T_{ij} \right] \quad (3)$$

$$\{c\} = \left[\sum_{i=1}^n T_{ij} \right]^T \quad (4)$$

where r_i shows the sum of direct and indirect effects of factor i on the other factors, c_i shows the sum of direct and indirect effects that factor i has received from the other factors. Furthermore, $r_i + c_i$ shows the impact level (the strength of influences given and received) that factor i has with regard to the problem. If the relation level $(r_i - c_i)$ is positive, then factor i is affecting other factors, otherwise it is being influenced by them.

Step 5: Construct the IRM and NRM.

To reduce the complexity of the IRM, a threshold value for the influence level may be decided by the decision maker or based on the opinions of experts. Only elements whose influence level in the matrix $[T]$ are higher than the threshold value are chosen and converted into the IRM^[27].

There is another way to construct the NRM without the threshold value and using single-headed arrows to represent the impact direction^[18], in which the net influential impact in

the network flow may be expressed as

If $T_{ij} > T_{ji}$, the flow is drawn from factor i to factor j .

If $T_{ij} < T_{ji}$, the flow is drawn from factor j to factor i .

3.2 The ANP method

The ANP method can be summarized as follows:

Step 1: Obtain the unweighted supermatrix $[\bar{w}]$ based on scores given by experts.

The initial step of the ANP is to compare the criteria in the entire system to form a supermatrix through pairwise comparisons. The relative importance is determined using a scale of 1–9 representing equal importance to extreme importance^[23].

Step 2: Derive the weighted supermatrix $[w]$.

After forming the unweighted supermatrix $[\bar{w}]$, the weighted supermatrix $[w]$ is derived by transforming all the columns sum to unity exactly.

Step 3: Compute the weight of each criterion.

The weighted supermatrix is raised to limiting powers to calculate the overall priorities. Each row of the limit supermatrix represents the weight of each criterion.

$$\lim_{m \rightarrow \infty} [w]^m \quad (5)$$

3.3 The VIKOR method

The VIKOR method can be summarized as follows:

Step 1: Obtain the evaluation matrix $[f]$ based on scores given by experts.

The experts are asked to indicate the evaluation of the i th criterion function and j th alternative using an integer scale ranging from 1, 2, 3, 4, and 5, with 1 meaning “strongly disagree” and 5 “strongly agree”.

Step 2: Determine the best f_i^* and the worst f_i^- values of all criteria.

If the i th criterion function represents a benefit then:

$$f_i^* = \max_j f_{ij} \quad (6)$$

$$f_i^- = \min_j f_{ij} \quad (7)$$

If the i th criterion function represents a cost then:

$$f_i^* = \min_j f_{ij} \quad (8)$$

$$f_i^- = \max_j f_{ij} \quad (9)$$

Step 3: Compute the distance from each alternative to the positive ideal solution.

$$S_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (10)$$

$$R_j = \max_i X_{ij} \quad (11)$$

where $X_{ij} = w_i(f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)$, w_i represents weights of criteria, S_j is the distance of the j th alternative achievement to the positive ideal solution, and R_j implies the maximal regret of each alternative.

Step 4: Compute the index value Q_j .

$$Q_j = \nu(S_j - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - \nu)(R_j - R^*) / (R^- - R^*) \quad (12)$$

where $S^* = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^* = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$, and ν is the weight of the decision-making strategy, representing the majority of criteria. In Eq. (12), when $\nu = 1$, it represents a decision-making process that can use the strategy of maximum group utility. On the other hand, when $\nu = 0$, it represents a decision-making process that can use the strategy of minimum individual regret. The best alternative is the one with the minimum value of Q_j .

IV. EMPIRICAL RESULTS

4.1 Measuring the relationships by DEMATEL

For the purpose of remaining independent and neutral, professors who teach in transportation, tourism, economy, and ecology related departments, and who have carried out related research, were invited to score the relationships among the eight criteria. Twenty-four questionnaires were distributed and 16 valid samples were returned, representing a 67% return rate. The average direct influence matrix $[A]$ is an 8×8 matrix obtained by pairwise comparisons in terms of influences and directions between the eight criteria, as shown in Table 1.

Table 1 The direct influence matrix $[A]$

Criteria	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
C_1	0	1.6875	2.6875	1.5	2.875	3.125	1.5625	3
C_2	3	0	2.1875	1.1875	1.3125	1.5625	1.4375	2.9375
C_3	2.5625	2.4375	0	3.0625	1.625	1.5625	3.0625	2.6875
C_4	1.75	1.625	3.1875	0	1.125	1.0625	2.5	1.8125
C_5	2.5625	2.625	2.5625	2.4375	0	3.375	2.625	2.5625
C_6	2.5	2.8125	2.125	1.1875	3.25	0	1.3125	2.5
C_7	2.875	2.6875	2.875	3	2.6875	2.625	0	2.875
C_8	2.75	3	2.5	2.625	2.5	2.5	2.625	0

The normalized initial influence matrix $[D]$ is obtained through Eq. 1. The total influence matrix $[T]$ is then derived by using Eq. 2 (Table 2).

Table 2 The total influence matrix $[T]$

Criteria	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
C_1	0.6393	0.6845	0.7579	0.6131	0.6865	0.7102	0.6213	0.7846
C_2	0.6716	0.506	0.6365	0.5129	0.5318	0.5539	0.5276	0.6799
C_3	0.7649	0.7212	0.6521	0.6892	0.6389	0.6503	0.693	0.7825
C_4	0.5989	0.5631	0.6597	0.4432	0.5016	0.5098	0.5587	0.6118
C_5	0.826	0.7881	0.8252	0.7107	0.6181	0.7805	0.7237	0.8396
C_6	0.7237	0.7012	0.7048	0.5726	0.6737	0.5458	0.5838	0.7354
C_7	0.8663	0.816	0.8675	0.7596	0.7608	0.7744	0.6322	0.8806
C_8	0.8232	0.7922	0.8131	0.7102	0.7197	0.7352	0.7156	0.7138

Note: Numbers *in bold* denote that they are higher than the threshold value of 0.655.

Using Eqs. 3 and 4, the influences given to and received by each factor are shown in Table 3. The $r_i + c_i$ values represent the total influence levels. The $r_i - c_i$ values represent net influence levels where positive values indicate that the factor will influence other factors more than other ones influence it. The impact level of the eight criteria can be prioritized as Feasibility & Execution (C_8) > Equity & Justice (C_3) > Political Climate (C_7) > Economic Development (C_1) > Environmental Protection (C_5) > Energy Efficiency & Carbon Reduction (C_6) > Eligible Cost (C_2) > Social Security (C_4) based on the $r_i + c_i$ values. Based on the $r_i - c_i$ values, Political Climate (C_7) and Environmental Protection (C_5) are net causes, whereas the others are

net receivers. It is worth noting that the vertical coordinates (-0.0052 and -0.0191) of the two points, Feasibility & Execution (C8) and Energy Efficiency & Carbon Reduction (C6), are both close to zero.

Table 3 The results of the criteria analysis

Criteria	r_i	c_i	$r_i + c_i$	$r_i - c_i$
Economic Development (C ₁)	5.4973	5.9139	11.4113 (4)	-0.4166 (6)
Eligible Cost (C ₂)	4.6203	5.5723	10.1925 (7)	-0.9520 (8)
Equity & Justice (C ₃)	5.5921	5.9167	11.5088 (2)	-0.3246 (5)
Social Security (C ₄)	4.4469	5.0116	9.4585 (8)	-0.5647 (7)
Environmental Protection (C ₅)	6.1118	5.1311	11.2429 (5)	0.9807 (2)
Energy Eff. & Carbon Red. (C₆)	5.2410	5.2601	10.5011 (6)	-0.0191 (4)
Political Climate (C₇)	6.3574	5.0559	11.4133 (3)	1.3015 (1)
Feasibility & Execution (C₈)	6.0230	6.0282	12.0513 (1)	-0.0052 (3)

Note: The numbers in parentheses denote rankings.

The IRM can be drawn based on the matrix $[T]$. However, there is a need to simplify the causal relationships by setting a threshold value to filter insignificant ones. For this reason, discussions were carried out with the respondents, and a consensus was reached on a threshold value of 0.655, which was deemed as the most appropriate one to acquire a suitable relationship. Based on this threshold value, the IRM of the DEMATEL method is obtained and shown in Fig. 1. The elements of matrix $[T]$ exceeding the threshold value (0.655) are shown in bold in Table 2.

The net influential impact in network flow ^[18] is shown in Table 4, and the NRM is obtained and shown in Fig. 2. In fact, the net influential impact in the NRM may also be determined by comparing the vertical coordinates of the criteria. The upper criteria in the NRM affect the lower ones. The only exception is the relation between Feasibility & Execution (C8) and Energy Efficiency & Carbon Reduction (C6), as their vertical coordinates are very close to each other. The double-headed arrows are then replaced by single-headed ones, and the 40 relations (12 single arrow lines and 14 double arrow lines) of the IRM can be simplified to 28 relations (28 single arrow lines) of the NRM. It is interesting to note that the IRM does not show the three lines between C1 and C4, C6 and C4, C4 and C2, but indicates the feedback of C8. Although the number of the arrows is reduced significantly in the NRM, the criteria are intertwined with the others in this complicated relationship.

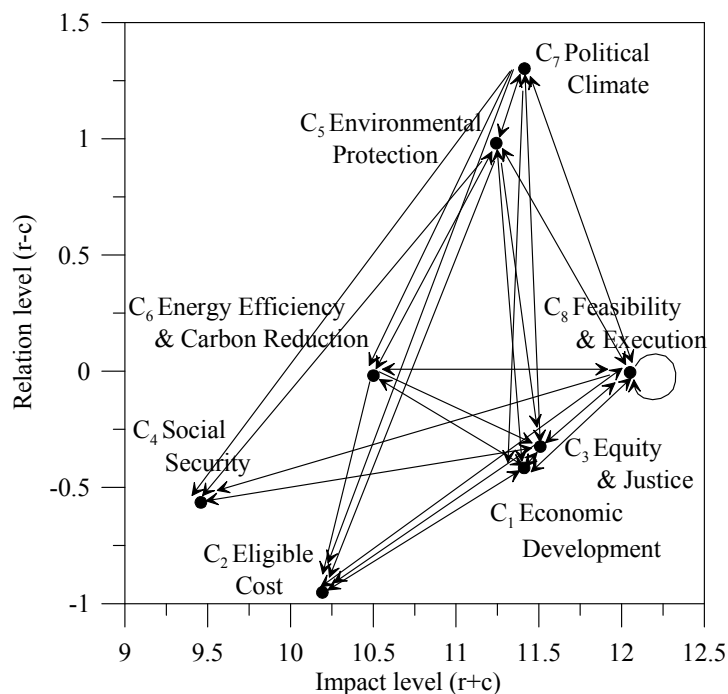


Fig. 1 Impact relation map (the threshold value = 0.655)

Table 4 The net influential impact in network flow

Criteria	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₁	-	0.0128	-	0.0142	-	-	-	-
C ₂	-	-	-	-	-	-	-	-
C ₃	0.007	0.0847	-	0.0295	-	-	-	-
C ₄	-	0.0502	-	-	-	-	-	-
C ₅	0.1395	0.2563	0.1863	0.2091	-	0.1068	-	0.1199
C ₆	0.0136	0.1473	0.0545	0.0628	-	-	-	0.0002
C ₇	0.245	0.2884	0.1745	0.2009	0.0371	0.1907	-	0.165
C ₈	0.0386	0.1123	0.0306	0.0985	-	-	-	-

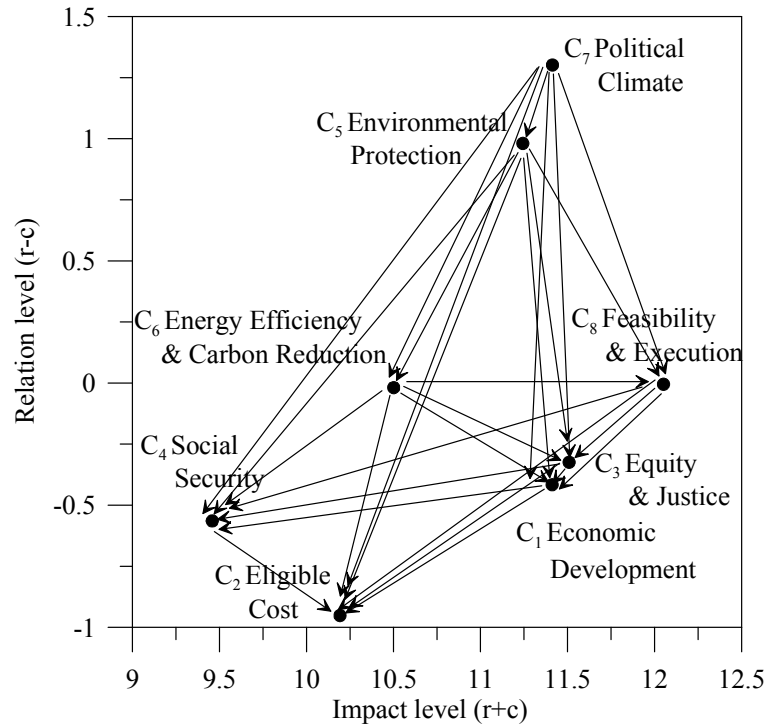


Fig. 2 Network relation map

4.2 Deriving the weights of criteria by ANP

After the DEMATEL, which confirms the structure of the relationships among the criteria of the evaluating systems, ANP is adopted to form an unweighted supermatrix (Table 5) through pair-wise comparisons. The limiting power of the weighted supermatrix is obtained until a steady-state condition is reached (Table 6). Each row represents the weight of each criterion. As shown in Table 6, the top three priorities in the evaluating systems are: Social Security (C4) (16.98%), Environmental Protection (C5) (16.13%), and Equity & Justice (C3) (15.19%).

Table 5 The unweighted supermatrix \bar{w}

Criteria	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₁	1	3.849	1.8427	1.3183	1.9079	2.4382	5.1339	2.9083
C ₂	0.8462	1	1.2621	1.0685	0.998	1.2188	3.0148	1.8142
C ₃	2.6652	2.3438	1	1.6131	1.9625	2.9792	4.2049	2.9673
C ₄	2.487	3.7104	1.4861	1	2.5984	3.2329	5.0729	4.1979
C ₅	3.524	3.8385	1.7309	1.5022	1	2.6875	4.2882	3.1632
C ₆	2.1027	1.901	1.258	1.1714	0.6715	1	2.9757	2.4065
C ₇	0.6315	1.3604	1.1891	0.5805	1.3385	1.4784	1	1.3374
C ₈	0.9625	2.3943	1.575	0.7601	1.4627	2.1943	3.9444	1

Table 6 The limit supermatrix matrix $\lim_{n \rightarrow \infty} [w]^n$

Criteria	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₁	0.1452	0.1452	0.1452	0.1452	0.1452	0.1452	0.1452	0.1452
C ₂	0.0881	0.0881	0.0881	0.0881	0.0881	0.0881	0.0881	0.0881
C ₃	0.1519	0.1519	0.1519	0.1519	0.1519	0.1519	0.1519	0.1519
C ₄	0.1698	0.1698	0.1698	0.1698	0.1698	0.1698	0.1698	0.1698
C ₅	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613
C ₆	0.1040	0.1040	0.1040	0.1040	0.1040	0.1040	0.1040	0.1040
C ₇	0.0758	0.0758	0.0758	0.0758	0.0758	0.0758	0.0758	0.0758
C ₈	0.1039	0.1039	0.1039	0.1039	0.1039	0.1039	0.1039	0.1039

4.3 Selecting the best transport mode by VIKOR

After the weights of the evaluating systems are determined, the selection of transport mode is further illustrated based on the VIKOR method. The performance score for each transport mode, and the results of the VIKOR and traditional simple additive weight (SAW) method are shown in Table 7. Rail has the highest scores in seven criteria, and highway has the highest in only one. On the other hand, air transport has the lowest scores in five criteria, while marine transport and highway have the lowest scores in two criteria. The scores in Environmental Protection (C5) and Energy Efficiency & Carbon Reduction (C6) are less than three for highway, which thus does not reach the threshold value for these criteria. The same is true for air transport in Eligible Cost (C2), Environmental Protection (C5), and Energy Efficiency & Carbon Reduction (C6).

S_j , R_j , and Q_j values may be calculated using Eqs. 10-12, and rail holds the lowest Q_j values. Since Q_j represents the gap between the alternative and ideal solutions, a smaller Q_j value is desirable. As may be expected, rail contains the smallest gap (0) according to a VIKOR analysis for three cases ($\nu=1, 0.5$, and 0), while rail also holds the highest value (4.0866) based on the SAW method. The ranks of the overall scores of the four transport modes were found to be Rail \succ Highway \succ Marine \succ Air, where A \succ B represents that A is preferred over B.

Table 7 The results of the VIKOR and SAW analyses

Criteria	Weights	Highway	Rail	Marine	Air
Economic Development (C_1)	0.1452 (4)	3.9375	4	3.375	3.25
Eligible Cost (C_2)	0.0881 (7)	3.8125	4.1875	3.5625	2.9375
Equity & Justice (C_3)	0.1519 (3)	3.625	4	3.25	3.0625
Social Security (C_4)	0.1698 (1)	3.375	4.4375	3.25	3.25
Environmental Protection (C_5)	0.1613 (2)	2.75	3.9375	3.1875	2.9375
Energy Eff. & Carbon Red. (C_6)	0.1040 (5)	2.9375	4.375	3.375	2.6875
Political Climate (C_7)	0.0758 (8)	3.625	3.5625	3.0625	3.125
Feasibility & Execution (C_8)	0.1039 (6)	3.4375	4	3.5	3.5625
S_j		0.6014	0.0088	0.7868	0.9424
R_j		0.1597	0.0088	0.1630	0.1630
VIKOR (Q_j) $\nu=1$ $\nu=0.5$ $\nu=0$		0.6383(2)	0(1)	0.8342(3)	1 (4)
		0.7928(2)	0(1)	0.9171(3)	1 (4)
		0.9473(2)	0(1)	1(3)	1 (3)
SAW		3.4123(2)	4.0866(1)	3.3104(3)	3.1081(4)

Note: The numbers in parentheses denote rankings, and those *in bold* denote f_i^* .

V. DISCUSSION

The proposed MCDM model provides a systemic analytic model for the selection of transport mode based on the gap from the ideal solution. This model can simultaneously consider the strategy of maximum group utility (S_j) and minimum individual regret (R_j) while quantifying many subjective judgments, which is necessary for the evaluation of different alternative transport modes. The empirical results indicate that the ranks of the overall scores of the four candidates were found to be Rail \succ Highway \succ Marine \succ Air. Rail beats other transport mode in most criteria, except for Political Climate (C_7).

The local government has claimed that the residents of Hualien need a safe way home (by construct a new national freeway). This appeal successfully attracted attention and put political pressure on the Executive Yuan. However, the weight of Political Climate (C_7) is the lowest, and the scores of highway and rail are very close. In addition, rail beats highway in other seven criteria, even in Social Security (C_4), which is an important criterion with the highest weight.

Therefore, rail is the best transport mode between Hualien and Yilan based on the proposed MCDM model. That also explains why the new “Suao-Hualien National Freeway” project was temporarily suspended by the Executive Yuan. After all, some sections of Central Cross-Island Highway and Southern Cross-Island Highway are often damaged and closed, as they run through exceedingly rugged and unstable terrain. The experience of the Hsuehshan Tunnel construction also made the government more cautious when making transport policy decision.

Some have argued that marine transport could be a good alternative, and that the new national freeway could be replaced by a “blue highway”. However, based on the relatively low scores of marine transport, this mode may be served as a back-up. In addition, air transport is not an appropriate mode, and its innate disadvantages meant that it had the lowest scores for five criteria.

In summary, rail is the best choice as it has the smallest gap according to a VIKOR analysis for three cases ($\nu=1, 0.5$, and 0). No matter what the ν value is, the ranking of the transport modes is the same. It is interest to note that the values of Q_j decrease as ν increases for the highway and marine modes. That means these two modes are more likely to be adopted if the strategy of maximum group utility is used. Unlike the ranking of traditional SAW is different from the one of VIKOR in the study by Liou and Chuang^[30], the ranking of SAW is exactly the same as the one of VIKOR for the three cases in this study. It seems that simple SAW may be still a feasible and reliable approach although elaborate VIKOR is available.

If the “Taipei-Yilan Direct Railway” between Taipei and Yilan is constructed, and railway electrification between Hualien and Taitung is accomplished to increase the operating speed, the benefits of rail may be further increased. Moreover, not only people living in Hualien would benefit from this, but also the rest of the population of Taiwan, as well as tourists from home and abroad. It is believed that rail may be a particularly good tourism and transport mode with regard to overcoming the traffic jams in the Hsuehshan Tunnel on holidays, and vulnerability of original Suao-Hualien Highway. Moreover, the highway mode is the second best choice, and thus the authorities should regard this as an acceptable alternative mode.

The case of Hualien examined in this work demonstrates the possibility of solving a complicated problem and finding the best compromise solution using the proposed MCDM model. The experts’ opinions were collected and a group decision-making process was carried out systematically, with a qualitative approach replaced by a quantitative one. Moreover, a single aspect evaluation is improved by adopting a multiple criteria decision-making approach, thus overcoming time-consuming and fruitless discussions. Consequently, the two conflicting characteristics of Taiwanese politics, elitism and populism, can coexist productively. Based on the empirical results of this work, the authorities are advised to make more efforts to communicate with the public to make them realize the advantages of rail transport, as it is

believed that they will respond better to reasoned explanations than to orders or arguments.

As seen in Table 3, the impact level of the eight criteria can be prioritized as Feasibility & Execution (C8) > Equity & Justice (C3) > Political Climate (C7) > Economic Development (C1) > Environmental Protection (C5) > Energy Efficiency & Carbon Reduction (C6) > Eligible Cost (C2) > Social Security (C4). The relationships among the eight criteria can be prioritized as Political Climate (C7) > Environmental Protection (C5) > Feasibility & Execution (C8) > Energy Efficiency & Carbon Reduction (C6) > Equity & Justice (C3) > Economic Development (C1) > Social Security (C4) > Eligible Cost (C2).

From Table 7, the importance of the eight criteria can be sorted as Social Security (C4) > Environmental Protection (C5) > Equity & Justice (C3) > Economic Development (C1) > Energy Efficiency & Carbon Reduction (C6) > Feasibility & Execution (C8) > Eligible Cost (C2) > Political Climate (C7). However, these results do not necessarily imply that one should pay less attention to Political Climate (C7) and Feasibility & Execution (C8). In fact, Table 3 indicates that Political Climate (C7) has the highest degree of $(r_i - c_i)$, which shows that it will influence the other criteria more than it is influenced by them. On the other hand, Feasibility & Execution (C8) has the highest value $(r_i + c_i)$, which means it will affect other criteria and will also be significantly affected by them. The ranks of the impact level based on the $r_i + c_i$ values are different from those of importance based on the weights. The proposed hybrid model demonstrates that it is capable of handling the various interdependencies in the complicated relationships among the various criteria.

A comparison of the results of IRM and NRM (Fig. 1 and Fig. 2) is both interesting and meaningful. IRM may provide a clear picture for the loop of interdependence and feedback between criteria, while NRM may provide a clear vision of the direction of influence. It thus seems that both the IRM and NRM provide an overview of this complicated problem.

VI. CONCLUSIONS

A MCDM method has been employed in this work to examine the dependent relationships among the various criteria together with DEMATEL, ANP, and VIKOR. The case of Hualien is used to illustrate this approach, and the empirical results reveal the proposed model is both powerful and effective with regard to identifying the influential network and priority of criteria, and thus select the best compromise solution for a complicated problem. Political Climate (C7) and Environmental Protection (C5) are the causes (starting points). Feasibility & Execution (C8), Equity & Justice (C3), and Political Climate (C7) are the top three criteria with the strongest influences given and received. Social Security (C4), Environmental Protection (C5), and Equity & Justice (C3) are the top three priorities with the highest weights. Rail is the best choice among

the four transport modes. The MCDM model provides a simple decision support system to solve complicated problems that are involved with many different departments or units in the real word, such as developing a transport policy in the case of Hualien.

Despite the efficacy of the proposing MCDM approach, the limitations of the current work suggest some directions for future research. This study was limited to a Taiwanese context using a sample of specific experts, and thus the findings may not be directly applicable to other extents. Larger and more diverse groups of samples are thus suggested to enhance the robustness of the proposed method in the following study. For example, the construction of an island-wide freeway network may be an interesting issue for future research by taking national defense into consideration. In addition, the combinations of transport modes (e.g. rail and highway, marine and highway) may be the alternatives in order to examine the policy of Ministry of Transportation and Communications. The evaluation criteria used in this work were selected from a review of the literature on public policy making, especially in transport domain, and other methodologies, such as in-depth interviews or the Delphi method, may be applied to seek other effective criteria.

REFERENCES

1. Tourism Bureau, MOTC, "Discover Taiwan, Suao-Hualien Highway", <http://eng.taiwan.net.tw/>, 2012.
2. Directorate General of Highways, MOTC, "Highway Networks", <http://www.thb.gov.tw/>, 2012.
3. Environment Protection Administration, "Environment Impact Analysis", <http://www.epa.gov.tw/>, 2012.
4. Ministry of Transportation and Communications, "Transportation Policy", <http://www.motc.gov.tw/>, 2012.
5. Taiwan Railways Administration, MOTC, "Railway Network", <http://www.railway.gov.tw/>, 2012.
6. Civil Aeronautics Administration, MOTC, "Hualien Airport", <http://www.caa.gov.tw/>, 2012.
7. Maritime and Port Bureau, MOTC, "Hualien Ship, Passenger Volume", <http://www.motcmpb.gov.tw/>, 2012.
8. Taiwan Area National Freeway Bureau, MOTC, "Freeway Networks", <http://www.freeway.gov.tw/>, 2012.
9. Easton, D., *The Political System: An Inquiry into the State of Political Science*, Alfred A. Knopf, New York, 1953.
10. Cohen, M. D., March, J. G., and Olsen, J. P., "A Garbage Can Model of Organizational Choice", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 17, 1972, pp. 1-26.

11. Pawlak, Z., *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 1991.
12. Institute of Transportation, MOTC, "Suao-Hualien Highway", <http://www.iot.gov.tw/>, 2012.
13. Yedla, S. and Shrestha, R. M., "Multi-Criteria Approach for the Selection of Alternative Options for Environmentally Sustainable Transport System in Delhi", *Transportation Research Part A*, Vol. 37, No. 8, 2003, pp. 717-729.
14. Tudela, A., Akiki, N., and Cisternas, R., "Comparing the Output of Cost Benefit and Multi-Criteria Analysis: An Application to Urban Transport Investments", *Transportation Research Part A*, Vol. 40, No. 5, 2006, pp. 414-423.
15. Zeleny, M., *Multiple Criteria Decision Making*, Mc-Graw-Hill, New York, 1982.
16. Tzeng, G. H., Chiang, C. H., and Li, C. W., "Evaluating Intertwined Effects in E-learning Programs: A Novel Hybrid MCDM Model Based on Factor Analysis and DEMATEL", *Expert Systems with Applications*, Vol. 32, No. 4, 2007, pp. 1028-1044.
17. Liou, J. J. H., Yen, L., and Tzeng, G. H., "Building an Effective Safety Management System for Airlines", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 14, No. 1, 2008, pp. 20-26.
18. Liu, C. H., Tzeng, G. H., and Lee, M. H., "Improving Tourism Policy Implementation – The Use of Hybrid MCDM Model", *Tourism Management*, Vol. 33, No. 2, 2012, pp. 413-426.
19. Shieh, J. I., Wu, H. H., and Huang, K. K., "A DEMATEL Method in Identifying Key Success Factors of Hospital Service Quality", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 23, No. 3, 2010, pp. 277-282.
20. Wei, P. L., Huang, J. H., Tzeng, G. H., and Wu, S. I., "Causal Modeling of Web-Advertising Effects by Improving SEM Based on DEMATEL Technique", *International Journal of Information Technology & Decision Making*, Vol. 9, No. 5, 2010, pp. 799-829.
21. Saaty, T. L., "Fundamentals of the Analytic Network Process", The International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kobe, Japan, 1999.
22. Saaty, T. L., *Decision Making with Dependence and Feedback: Analytic Network Process*, RWS Publications, Pittsburgh, 1996.
23. Huang, J. J., Tzeng, G. H., and Ong, C. S., "Multidimensional Data in Multidimensional Scaling Using the Analytic Network Process", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 26, No. 6, 2005, pp. 755-767.
24. Opricovic, S., *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1998.
25. Opricovic, S. and Tzeng, G. H., "Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS", *European Journal of Operation Research*, Vol. 156, No. 2, 2004, pp. 445-455.
26. Opricovic, S. and Tzeng, G. H., "Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods", *European Journal of Operational Research*, Vol. 178, No. 2, 2007, pp. 514-529.
27. Liou, J. J. H., Tzeng, G. H., and Chang, H. C., "Airline Safety Measurement Using a Hybrid Model", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 13, No. 4, 2007, pp. 243-249.
28. Hsu, Y. L., Li, W. C., and Chen, K. W., "Structuring Critical Success Factors of Airline

- Safety Management System Using a Hybrid Model”, *Transportation Research Part E*, Vol. 46, No. 2, 2010, pp. 222-235.
29. Tzeng, G. H., Teng, M. H., Chen, J. J., and Opricovic, S., “Multicriteria Selection for a Restaurant Location in Taipei”, *International Journal of Hospitality Management*, Vol. 21, No. 2, 2002, pp. 171-187.
30. Liou, J. J. H. and Chuang, Y. T., “Developing a Hybrid Multi-Criteria Model for Selection of Outsourcing Providers”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 5, 2010, pp. 3755-3761.
31. Yeh, M. S., Hsiao, Y. L., and Liu, H. H., “An Study on Different Decision-Making Models Applying for Transportation Policy Using Su-Hau Highway as an Example”, International Conference and Annual Meeting of Chinese Institute of Transportation, Taoyuan, Taiwan, 2009.

考慮護運風險下保全運鈔車路線與 排程模式暨演算法之研究¹

A MODEL WITH AN ALGORITHM FOR CASH TRANSPORTATION VEHICLE ROUTING AND SCHEDULING PROBLEMS CONSIDERING CONVEYANCE RISKS

顏上堯 Shang-Yao Yan²

盧宗成 Chung-Cheng Lu³

徐鶴倫 Guan-Lun Hsu⁴

(102 年 12 月 2 日收稿，103 年 3 月 31 日第 1 次修改，104 年 3 月 15 日定稿)

摘 要

為協助保全業者規劃有效且安全的運鈔車路線與排程，本研究應用時空網路流動技巧，描述運鈔車在需求點間之時空移動情形，以建立營運成本與風險成本最小化之運鈔車路線與排程模式。研究中由具運鈔經驗的專家協助建立風險因素層級架構，採用層級分析法決定各項風險因素權重，再配合各項風險因素估計值，計算風險成本，並將其反映在所建立的模式中。由於此模式可定式為多元商品網路流動問題，屬 NP-hard，因此本研究發展一啟發式演算法以有效地求解模式。為評估模式及演算法之實用績效，本研究根據國內一家保全公司的營運資料產生測試範例並進行求解與分析。

-
1. 本研究承科技部專題計畫(MOST-101-2221-E-008-098-MY2)補助，特此致謝。作者亦感謝二位審查委員提供寶貴的修正意見，使本文更為嚴謹。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授。
 3. 國立臺北科技大學工業工程與管理系教授 (聯絡地址：106 臺北市忠孝東路 3 段 1 號 臺北科技大學工業工程與管理系；E-mail：jasoncclu@gmail.com)。
 4. 國立中央大學土木工程學系碩士。

此外，本研究亦將求解結果與文獻中所發展之運鈔車路線與排程模式結果比較，測試結果顯示本研究之模式優於過去文獻中之模式，應可為實務應用之參考。

關鍵詞：運鈔車；車輛路線與排程；風險成本；時空網路；多元商品網路流動問題

ABSTRACT

This research utilizes the time-space network flow technique to describe the potential movements of cash transportation vehicles among all demand points in the time and space dimensions and develops a cash transportation vehicle routing and scheduling model which minimizes both operating cost and risk cost in order to help security carriers plan efficient and safe cash conveyance routes and schedules. The Analytical Hierarchy Process method is employed to determine the weights of a set of risk factors identified by cash transportation experts. The risk cost of cash transportation, which is computed based on the weights and the estimates of those risk factors, is then incorporated into the proposed model. Because the model can be formulated as a multi-commodity network flow problem, which is characterized as NP-hard, this study develops a heuristic to efficiently solve the model. The model and algorithm are solved and analyzed using a problem instance generated from operational data provided by a domestic security carrier. We also compare our model results with the results of a model presented in the literature. The case study results demonstrate that our model with a solution algorithm outperforms the previous model and could be a useful reference for security carriers in actual practice..

Key Words: *Cash transportation vehicle, Vehicle routing and scheduling, Risk cost, Time-space network, Multiple commodity network flow problem*

一、前言

臺灣自 1989 年開放民間設立新銀行，統計至 2013 年，屬於臺灣本國之銀行共計有 40 家，而外國銀行則有 30 家，若包含郵局、縣市鄉鎮農漁會、合作社等，則臺灣至少有近百家的金融機構。這些金融機構為了便利民眾取款，近年來開始於便利商店、超級市場、大賣場、醫院、車站等地區設置提款機。然而，數量龐大的銀行及其各地分行與提款機卻也增加了現金運輸的需求。一般金融機構通常將運鈔作業委外交由保全公司負責，但是大量且頻繁的現金運輸需求可能會導致現金護運過程中遭遇搶劫的風險提高。例如從 2000 年至 2013 年期間，國內運鈔車在護運作業過程中遭遇搶劫事件就高達 30 件之多（資料來源：內政部警政署）。

雖然各家保全公司皆致力於提升運鈔人員的素質與運鈔車的裝備，以減少運鈔車遇搶的損失，但是透過改善運鈔車護運路線與排程規劃來降低營運成本與護運作業過程遭搶的風險，卻是相對缺乏重視的一個重要環節；目前大多數的保全公司仍是根據經驗法則，以人工方式決定護運路線與排程，較缺乏效率，且未完整考慮護運過程中的各種風險因素。為了提供保全業者在每日運鈔車護運路線與排程規劃之決策參考，本研究將針對保全運鈔車路線與排程最佳化問題發展數學規劃模式與求解演算法，模式中之最佳化目標除了運鈔作業的固定與變動成本外，亦將考慮護運過程中之各種可能的風險因素與其風險成本。

目前文獻中有關運鈔車護運路線與排程問題的相關研究很少。江文毅^[1]運用多目標決策路網模式，考慮不同需求點所面臨環境條件之差異，產生可行駛之路網資訊與禁止使用之道路資訊，從而規劃出最適的行駛路線，使得保全公司管理者於每次護運保全之任務中，可以隨時決定不同之行駛路線。為了避免規劃之護運作業路線與之前的路線有過高的重複性，而被歹徒掌握護運路線進行搶劫，Yan 等人^[2]提出具有時空相似度限制之運鈔車路線與排程模式，使當日規劃之路線能與先前所規劃之路線與抵達服務需求點的時間有所差異，以提升運鈔車護運作業的安全性。Yan 等人^[3]延伸 Yan 等人^[2]之模式以考量隨機旅行時間，並提出啟發式演算法求解隨機最佳化模式。雖然上述的文獻藉由時空相似度之限制能夠降低護運路線之重複性，但卻無法整體反映其它可能影響護運作業之風險因素；實務上，運鈔車護運過程作業之安全性受許多外在環境因素所影響，例如：紅綠燈數量、區域人口密度與安全作業區等。因此，為了能夠有效反映運鈔車護運過程的各項風險因素，本研究提出將路段 (link) 風險成本量化，並納入所發展模式的目標函數中進行求解。類似的方法曾被應用於危險物品運送 (hazardous materials transportation) 路線問題的相關研究中 (如 Erkut 與 Verter^[4]；Erkut 等人^[5])。在評估危險物品運送的風險時，通常必須決定危險物品在路段運送時發生意外或是逸散的機率 (probabilities)，以及發生意外或是逸散的後果 (consequences)，再將此風險評估的結果量化為路段風險成本，以求解總風險成本最低的危險物品運送路線。

本研究從保全業者之立場，以系統成本最小化為目標，利用時空網路流動技巧，以零壹整數流動方式定式各運鈔車於時空中之移動，再考量各服務需求點僅被服務一次與節點流量守恆限制式，建立運鈔車路線與排程最佳化模式。值得一提的是，時空網路流動之技巧已被廣泛應用於許多不同領域，例如 Yan 與 Chen^[6]利用多重時空網路描述人旅次流動與車輛流動，並以此構建一整合旅次需求與班次供給之長途客運業者車隊排程模式；Yan 與 Tseng^[7]建構多重時空網路來描述人旅次流動與飛機流動，再以數學規劃方法構建一直接整合旅次需求與航次供給之多機種多停靠飛航排程模式；Kliwer 等人^[8]利用時空網路流動技巧發展多場站、多車輛型態之公車排程模；Yan 與 Chen^[9]利用時空網路流動技巧，考量航空客運業者的聯盟行為，發展數個飛航排程模式及求解演算法。

不同於以往相關文獻中藉由時空相似度限制來避免產生重複性過高之運鈔車路線，以降低護運過程中遇搶的風險，本研究將護運過程中的風險透過成本的方式反映在所建立的模式中，藉由模式求解，得到營運成本與風險成本最低的運鈔車路線與排程。在風險成本

估計方面，本研究首先分析運鈔車護運作業的各項風險因素，經由訪談具護運經驗之人員、保險人員與運輸領域之學者建構護運作業風險因素層級架構。由於該層級架構複雜，需要以一具系統性、科學性的方法來評估層級架構中的各項風險因素，故本研究透過專家問卷調查，利用多準則決策分析法中的層級分析法 (analytical hierarchy process, AHP) 計算運護運作業風險因素層級架構中兩個主要構面（護運路段風險與滯留作業風險）下各項風險因素的之權重，且由決策分析相關文獻與護運作業環境之現況，發展護運作業各項風險因素之估計方法。接下來，將各項風險因素權重值與風險因素估計值相乘後加總，得到風險效用值，再以風險管理理論中之方法將風險效用值量化為風險成本，納入本研究所建構之運鈔車路線與排程模式中之成本項中，求解兼顧營運成本與風險成本的運鈔車護運路線與排程規劃。

本研究所建立之運鈔車路線與排程模式為一多元商品 (multi-commodity) 整數網路流動問題，屬於 NP-hard 問題 (Garey 與 Johnson^[10])。當面臨大型實務問題時，難以在合理時間內求得精確解 (exact solutions)，因此本研究發展啟發式解法並配合數學規劃軟體 CPLEX 加以求解。為了評估模式與演算法之實用績效，本研究根據國內一保全公司（簡稱為 S 保全公司）在中壢服務區的營運資料產生測試範例並進行求解與分析；此外，亦將求解結果與文獻中所發展之運鈔車路線與排程模式 (Yan 等人^[2]) 之結果比較，探討考慮時空相似度限制之模式與考慮路段風險成本之模式兩種不同模式的差異。

本文的架構如下。第二節介紹運鈔車車流時空網路與運鈔車路線與排程最佳化模式，第三節描述運鈔車護運作業風險評估層級架構，利用層級分析法決定風險因素權重，以及風險效用與風險成本計算方式，第四節介紹本研究所發展之啟發式演算法，第五節展示實際範例測試結果，以及與文獻中運鈔車路線與排程模式比較之結果，第六節提出本研究之結論與建議。

二、保全運鈔車路線與排程模式

本研究從保全公司運鈔車護運路線規劃決策者的觀點，運用時空網路流動技巧與數學規劃方法建立運鈔車護運路線與排程模式。此數學規劃模式考慮運鈔車在確定性旅行時間的情況下，以系統成本最小化為目標，除了考量運鈔車護運作業之營運成本外，亦考慮經過評估之護運風險成本。本節分別描述運鈔車路線與排程模式之基本假設、時空網路架構與數學模式。

2.1 模式基本假設

為便於模式之構建與界定模式使用上的限制，本研究對運鈔車路線與排程模式作以下的基本假設。

1. 保全公司以系統成本最小化為目標

系統成本考量運鈔車護運作業之固定成本、變動成本與風險成本。固定成本包括薪資成本、裝備與耗材成本及其他雜項成本。變動成本是運鈔車之移動成本，包括油料成本及維修與折舊成本。風險成本反映行駛於護運路段之風險與在服務需求點作業滯留之風險；風險之評估與風險成本計算將於第三節中加以說明。上述之固定成本、變動成本與風險成本皆可依保全公司決策單位之需求與實際道路之情況進行調整。

2. 各服務需求點之位置、作業時間及服務時窗已知且固定

在實際營運中，保全公司決策單位於營運規劃前一日事先得知當日現金護運之地點、作業時間及時窗，用於指派運鈔車護運作業路線與其所服務之需求點，故本研究假設各服務需求點之位置、作業時間及服務時窗為已知之固定值。

3. 運鈔車在各路段行駛時間已知且固定

運鈔車在任兩個服務需求點間的路段旅行時間可以由歷史資料估計得知（實務上一般取平均值），故假設運鈔車在各路段行駛時間已知且固定，不考慮隨機旅行時間。

4. 每一條護運作業路線僅由一輛運鈔車進行護運作業服務

護運作業之路線由保全公司之決策單位指派運鈔車進行服務，每輛運鈔車皆有各自之服務需求點與行駛路線，且服務需求點不得重複，因此本研究假設每一條護運作業路線由一輛運鈔車進行護運作業服務。

5. 車隊規模已知

本研究假設運鈔車之車隊規模為已知；實務上，保全公司運鈔車的數量依各地營業所負責之服務地區範圍大小與服務需求點的多寡而有所不同。

6. 不考慮保全人員於運鈔車護運作業時之午餐時間

實務上，保全人員於運鈔車護運作業時皆於服務完指派之服務需求點後直接返回地區營業所，若遇中午吃飯時間則輪流於運鈔車內用餐，故本研究不考慮保全人員於運鈔車護運作業時之中午吃飯時間。

7. 不考慮保全人員監守自盜之事件發生

運鈔車搶案發生之情況大致上可分為行駛過程遇搶、在服務需求點滯留作業時遇搶、保全公司人員監守自盜等；本研究不考慮保全人員監守自盜之事件。

2.2 運鈔車車流時空網路

本研究運鈔車路線與排程時空網路之設計如圖 1 所示 (Yan 等人^[2])，共有 N 層時空網路 (N 為車隊規模)，每一層網路用來描述一輛運鈔車在時空中之移動，橫軸代表各服務需求點之空間分佈，而縱軸為時間軸，其時間軸長度為運鈔車護運總分析時間，每一節點間距為 10 分鐘 (數值實驗結果顯示，若為 5 分鐘會大幅度增加模式之規模，若為 15 分鐘則會使求解精確度降低；決策單位未來使用此模式時，可權衡求解精確度與效率，依實際需求情況進行調整)。

時空網路中包含節點及節線二要素。節點代表某一服務需求點於某一時間之時空點，節點上之供給及需求量分別代表進入或流出此節點的車輛數。節點可區分為發車節點、匯集節點及服務需求點之節點 3 種。發車節點與匯集節點為運鈔車護運作業之起迄點，代表地區總行。實務上，運鈔車從發車節點出發進行相關護運任務，護運任務結束後隨即返回匯集節點。服務需求點則為保全公司有需求之客戶端 (如銀行、提款機、簽訂契約之公司行號等)。由於運鈔車之路線是以發車節點為起站，故將發車節點之供給量車輛數設定為 1，於營運結束後返回至匯集節點，故將匯集節點之需求量車輛數設定為 1，其餘服務需求節點皆屬於轉運點，並無供給及需求量。時空網路中之節線代表兩時空點間車輛之流動，節線流量代表通過該節線之車輛數，節線又可細分為發車節線、旅行節線、匯集節線、滯留節線與不服務節線，分別說明如下。

1. 發車節線

此類節線連接發車節點 (地區總行) 與服務需求點。節線流量上限為 1，下限為 0。此類節線成本包括運鈔車固定成本，從地區總行至各服務需求點間之移動成本 (變動成本)，再加上風險成本 (護運路段與滯留作業風險成本)。

2. 旅行節線

此類節線連接兩個不同服務需求點的時空點，表示車輛於不同服務需求點間之移動情形。節線流量上限為 1，下限為 0。節線時間包含運鈔車旅行時間與滯留作業完成時間，節線成本為運鈔車於服務需求點間之移動成本與風險成本。當運鈔車流過服務需求點時，表示此區之護運作業已完成。

3. 匯集節線

此類節線連接服務需求點與匯集節點 (地區總行)。節線流量上限為 1，下限為 0。此類節線成本包括運鈔車從服務需求點回到地區總行間之移動成本與風險成本。

4. 滯留節線

此類節線連接同一個服務需求點在不同時間之時空點，表示運鈔車在某一服務需求點等待服務時間窗開始而停留一段時間。節線流量上限為 1，下限為 0。節線成本為運鈔車停留在該服務需求點之風險成本。

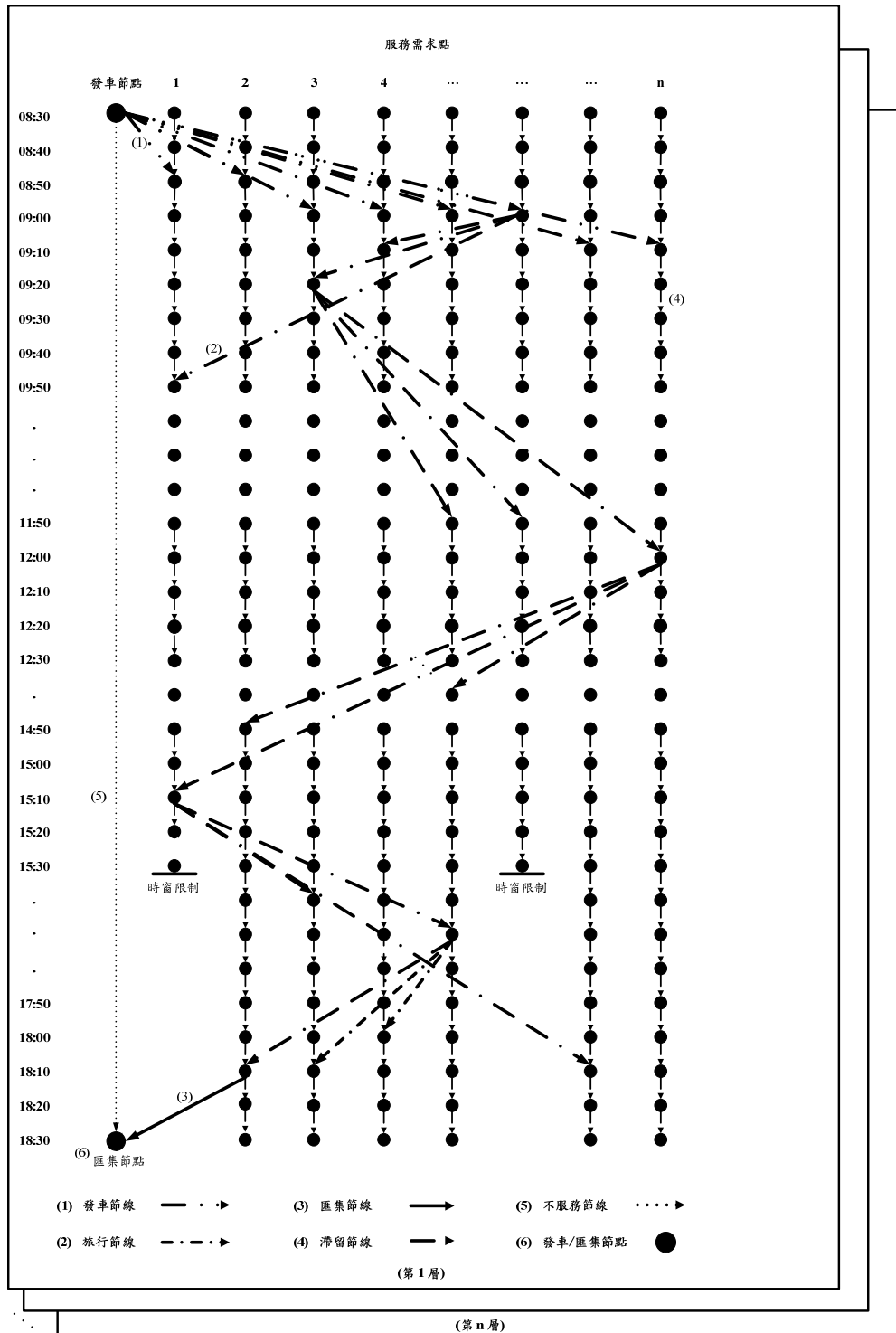


圖 1 運鈔車路線與排程時空網路圖

5. 不服務節線

此類節線連接同一層網路中之發車節點與匯集節點，用以判斷該層網路中是否有運鈔車流入，節線流量上限為 1，下限為 0；若節線流量為 1，表示該層網路無運鈔車流入（即此運鈔車不進行服務），若節線流量為 0，表示該層有運鈔車流入。此類節線成本為 0。

2.3 運鈔車路線與排程模式

1. 符號說明

集合

SP^n 第 n 層網路中所有節點之集合。

SK^n 第 n 層網路中所有節線之集合。

W_d^n 第 n 層網路中所有進入服務需求點 d 的節線（包含發車節線、旅行節線與匯集節線）之集合。

D 所有服務需求點之集合。

N 所有車流網路層之集合。

參數

p_{ij}^n 第 n 層網路中節線 (i, j) 之成本。

q_i^n 第 n 層網路中節點 i 之供給或需求量。

變數

x_{ij}^n 第 n 層網路中節線 (i, j) 之流量。

2. 數學模式

$$\text{Minimize } \sum_{n \in N} \sum_{(i,j) \in SK^n} p_{ij}^n x_{ij}^n \quad (1)$$

限制式

$$\sum_{j \in SP^n} x_{ij}^n - \sum_{k \in SP^n} x_{ki}^n = q_i^n, \quad i \in SP^n, n \in N \quad (2)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{(i,j) \in W_d^n} x_{ij}^n = 1, \quad \forall d \in D, \quad (3)$$

$$x_{ij}^n = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, j \in SP^n, n \in N. \quad (4)$$

此運鈔車護運路線與排程模式為一多元商品整數網路流動問題，目標式 (1) 為最小化護運之總成本，包括固定成本、變動成本與風險成本，而路線成本 P_{ij}^n 可以下式表示：

$$P_{ij}^n = FC_{ij}^n + VC_{ij}^n + TC_{ij}^n \quad (5)$$

其中， FC_{ij}^n 、 VC_{ij}^n 、 TC_{ij}^n 分別表示第 n 層網路中節線 (i, j) 的固定成本、變動成本與風險成本。在運鈔車車流時空網路中，發車節線成本包括固定成本、變動成本與風險成本，旅行節線成本則包括變動成本與風險成本。風險成本的計算將於第 3 節中說明。限制式 (2) 為車流網路中節點之流量守恆限制式，限制式 (3) 表示任一服務需求點恰被服務一次，限制式 (4) 為零壹變數之限制式。

三、運鈔車護運作業風險評估與風險成本計算

本研究根據文獻回顧與專家訪談結果構建運鈔車護運作業時所面臨之風險因素層級構面，再藉由訪問具運鈔車護運作業經驗之人員、保險人員與交通運輸領域之學者，完成專家問卷調查，利用 Saaty^[11] 提出的層級分析法決定運鈔車護運過程之風險因素權重值，並利用效用估計法得到護運作業各項風險因素之估計值，最後，以風險管理中之機率統計法量化出各項風險因素之風險成本；所得到之風險成本將用於前一節所述之運鈔車護運作業排程模式中。

3.1 運鈔車護運作業風險評估架構

本研究透過回顧運鈔車護運作業之相關文獻及訪問保全公司決策單位的結果，彙整出在護運作業上所面臨之風險因素以作為評估準則，此評估準則之層級架構如圖 2 所示，分成兩個構面：護運路段風險與滯留作業風險，與 8 項評估準則。本研究針對所構建之層級構面設計出專家問卷，專家問卷發放的對象包括保全／保險公司運鈔車路線規劃人員、具有(當地)運鈔車護運實際經驗人員(保全員)、以及交通領域學者，這些專家除了非常了解當地各護運路段之道路與風險狀況外，對於運鈔車滯留作業的各種風險亦相當熟悉，因此能夠對於各種風險因素給予適當的權重。經整理問卷回收結果與統計分析後，利用層級分析法計算出各層級要素間之相對重要性，以作為護運作業中各項風險因素的權重值 (Forman 與 Gass^[12])。由 AHP 法所求得之權重的適用期間可由保全公司的決策者所決定，若是運鈔車護運作業風險因素估計值有所調整，則可以重新發放專家問卷，再利用 AHP 法求得新的一組權重值，代入模式中重新求解運鈔車路線。

(一) 護運路段風險

是指派運鈔車行駛在路段上之風險因素，此構面共包括紅綠燈數量、路段反應時間、路段人口密度、路段重複性、運送距離等 5 項風險因素。

1. 紅綠燈數量：運鈔車在停等時遭受搶劫之風險相對高於行駛狀況下，故當運鈔車越常處於紅燈停等狀況，被搶劫之風險也較高。

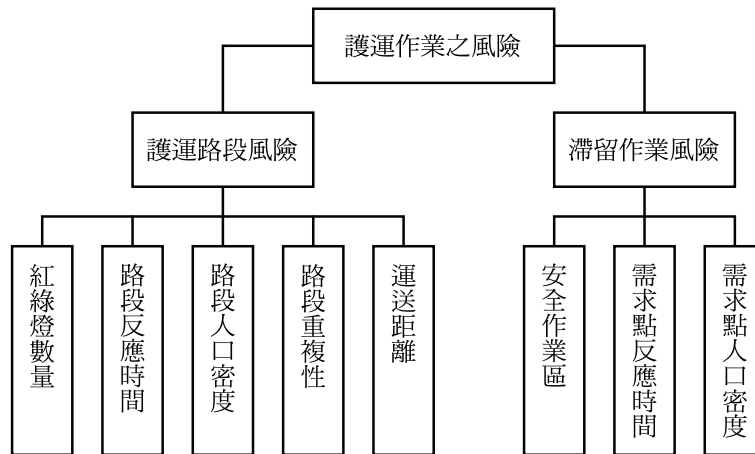


圖 2 運鈔車護運作業風險評估架構圖

2. 路段反應時間：指運鈔車行駛過程中若遭遇到歹徒搶劫，而警方收到報案，派遣警力到達案發現場之反應時間，通常反應時間越長，風險越高。
3. 路段人口密度：指運鈔車行駛路段上所經過區域之人口密度，本研究以里作為區域人口密度單位；當運鈔車行經路段之區域人口密度越低，通常表示此路段較偏僻，風險越高。
4. 路段重複性：指當日規劃之運鈔車護運路段與前一天（不包含周末假日）所規劃路段之路段重複程度。當路段重複性越高時，越容易被歹徒掌握路線，遭受搶劫的風險越高。
5. 運送距離：運鈔車行駛至各服務需求點間之路段距離；當運送距離越長，運鈔車在行駛過程中遭遇搶劫之風險越高。

（二）滯留作業風險

指運鈔車抵達服務需求點後開始進行作業至作業完畢離開這段時間之風險，此構面包括安全作業區、需求點反應時間、需求點人口密度等 3 項風險因素。

1. 安全作業區：如果服務需求點設有安全作業區，運鈔人員在滯留作業時與外人有所隔離，其安全性相對高於無安全作業區。
2. 需求點反應時間：指服務需求點若遭遇歹徒搶劫，當警方收到報案，派遣警力到達案發現場之反應時間。
3. 需求點人口密度：指服務需求點所在區域之人口密度，本研究以里作為區域人口密度單位；當服務需求點所在位置之區域人口密度越低，通常表示其周圍環境越偏僻，風險越高。

3.2 風險因素權重值

本研究設計問卷，請受訪之專家將上述兩構面下的各層級要素進行兩因素間之重要性

比較。評估尺度可分為 5 個等級，分別為同等重要、稍重要、頗重要、極重要、絕對重要，其衡量值分別為 1、3、5、7、9；問卷詳細內容請參閱徐鶴倫^[13]。本研究訪查回收 25 份專家問卷（包括保險公司人員 5 份、具有運鈔護運經驗人員 10 份、交通運輸領域相關學者 10 份），刪除填答不完整的問卷後，利用統計軟體對每份問卷進行各層級的一致性檢定，若通過 AHP 之一致性檢定則為有效問卷，反之，則為無效問卷。經過一致性檢定後，共計有 13 份有效問卷，有效問卷數占總發放問卷數的 52%，包括保險公司專家 2 份、具運鈔護運經驗專家 5 份、交通運輸學者專家 6 份。關於 AHP 的樣本數，文獻中並沒有相關標準可供參考，但就一般的應用而言，專家問卷數量約在 10 到 20 份之間 (Satty^[14])，本研究的有效問卷數有 13 份，應在合理的範圍內。

接著以此 13 份有效問卷，計算出層級要素與整體層級之權重。分析結果如表 1 所示，在第一層級中護運路段風險構面權重值 0.56，滯留作業風險構面權重值 0.44，可見專家認為運鈔車進行護運作業受護運路段風險因素影響之程度高於滯留作業風險因素。在第二層級中，受訪者認為護運路段風險構面中最重要之風險因素為路段反應時間 (0.37)，其次依序為運送距離 (0.22)、路段重複性 (0.18)、路段人口密度 (0.13) 以及紅綠燈數量 (0.10)；在滯留作業風險構面的風險因素中以安全作業區 (0.58) 為最重要，其次為需求點反應時間 (0.26)、需求點人口密度 (0.16)。將第一層級構面之相對權重值與第二層級風險因素之相對權重值相乘可得到整體權重值，在 8 項要素準則中，以滯留作業風險構面的安全作業區 (0.26) 為相對最重要的要素，而紅綠燈數量 (0.06) 的相對重要性最低。

表 1 護運作業之風險因素權重值

構面	權重值	準則要素	個別權重值	排序	整體權重值	排序
護運路段風險	0.56	紅綠燈數量	0.10	5	0.06	8
		路段反應時間	0.37	1	0.21	2
		路段人口密度	0.13	4	0.07	6
		路段重複性	0.18	3	0.10	5
		運送距離	0.22	2	0.12	3
滯留作業風險	0.44	安全作業區	0.58	1	0.26	1
		需求點反應時間	0.26	2	0.11	4
		需求點人口密度	0.16	3	0.07	7

3.3 風險因素評估

本小節說明兩大構面下各項風險因素之評估方法。

(一) 護運路段風險構面

1. 紅綠燈數量：風險評估函數如下：

$$0 \leq \frac{TLQ}{TLQ_{MAX}} \leq 1, \quad (6)$$

其中， TLQ_{MAX} 為運鈔車行駛於各服務需求點間之護運路段所會經過的最大紅綠燈數量， TLQ 則為運鈔車行駛於某護運路段上所經過的紅綠燈數量。

2. 路段反應時間：風險評估函數如下：

$$0 \leq \frac{Pt + Rt}{Pt + Rt_{MAX}} \leq 1, \quad (7)$$

其中， Pt 為受理報案單位調派警力之時間， Rt 為派遣警力至案發地點之平均時間，估計方法為該護運路段起點至迄點每間隔 500 公尺設一評估點，計算出每一評估點發生搶案時，當地分局派遣警力抵達現場處理之時間，加總後除以評估點個數即為平均時間，而 Rt_{MAX} 為所有護運路段中，受理報案單位派遣警力至案發地點之最大平均時間。

3. 路段人口密度：依人口密度的多寡分為 4 個風險等級，並將風險等級正規化，計算出區域人口密度之風險估計值，如表 2 所示。

表 2 區域人口密度之風險估計值

人口密度 (人/km2)	風險等級	風險估計值
1000 以下	4	1
1001~5000	3	0.75
5001~10000	2	0.5
10001 以上	1	0.25

而路段人口密度估計值計算如下：

$$AU = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n}, \quad (8)$$

其中， A_i 為護運路段中經過某一區域 i 之人口密度風險估計值， n 為運鈔車所經過之區域數量。

4. 路段重複性：本研究將當日所規劃路線排程之每一護運路段與前一日之各護運路段進行比對。首先根據兩個互相比較的路段的起迄服務需求點是否相同來決定路段空間相似度 ε 值，若兩路段起迄點皆相同，則 $\varepsilon = 1$ ，若僅有起點或迄點相同，則 $\varepsilon = 0.5$ ，若起迄點皆不相同，則 $\varepsilon = 0$ 。接著，根據兩路段抵達迄點服務需求點的時間差來決定（抵達）時

間相似度 β 值，例如抵達時間差在小於 30 分鐘，則 $\beta = 1$ ，30 分鐘以上但不到 60 分鐘，則 $\beta = 0.75$ ，60 分鐘以上但不到 90 分鐘，則 $\beta = 0.5$ ，90 分鐘以上，則 $\beta = 0.25$ 。最後，再將所得到的空間相似度估計值與時間相似度估計值相乘，計算出路段重複性之風險估計值。

5. 運送距離：風險估計函數如下：

$$0 \leq \frac{D}{D_{MAX}} \leq 1, \quad (9)$$

其中， D_{MAX} 為運鈔車行駛於各服務需求點間之最大運送距離， D 為某運護路段之運送距離。

(二) 滯留作業風險構面

1. 安全作業區：若服務需求點沒有提供與非相關運鈔人員隔離之安全作業區，則此區域風險估計值為 1；反之，此區域風險估計值為 0。

2. 需求點反應時間：風險評估函數如下：

$$0 \leq \frac{Pt + Rt}{Pt + Rt_{MAX}} \leq 1, \quad (10)$$

其中， Pt 為受理報案調派警力作業時間， Rt 為派遣警力至某案發地點之時間， Rt_{MAX} 為派遣警力到所有服務需求點（案發地點）中之最大時間。

3. 需求點人口密度：參考表 2，依人口密度的多寡分為 4 個風險等級，並計算出區域人口密度之風險估計值。

3.4 運鈔車護運路段風險成本

將每項風險因素權重值（3.2 節）與其風險因素估計值（3.3 節）相乘後，再全部加總，即可得到每個路段的風險效用估計值，如以下公式所示。

$$TU_{ij}^n = TR_{ij}^n + TP_{ij}^n = \sum_a W_{ij}^{n,a} R_{ij}^{n,a} + \sum_b W_{ij}^{n,b} P_{ij}^{n,b} \quad (11)$$

其中，

TU_{ij}^n ：第 n 層網路中節線 (i, j) 護運作業風險因素之效用值。

TR_{ij}^n ：第 n 層網路中節線 (i, j) 護運路段風險因素之效用值。

TP_{ij}^n ：第 n 層網路中節線 (i, j) 滯留作業風險因素之效用值。

$W_{ij}^{n,a}$ ：第 n 層網路中節線 (i, j) 之第 a 項護運路段風險因素之權重值。

$W_{ij}^{n,b}$: 第 n 層網路中節線 (i,j) 之第 b 項作業滯留風險因素之權重值。

$R_{ij}^{n,a}$: 第 n 層網路中節線 (i,j) 之第 a 項護運路段風險因素之估計值。

$P_{ij}^{n,b}$: 第 n 層網路中節線 (i,j) 之第 b 項作業滯留風險因素之估計值。

接下來參考風險管理中風險成本之概念，利用以下公式量化風險效用值為風險成本：

$$TC_{ij}^n = TU_{ij}^n \times \frac{LM \times MS}{T_q}, \quad (12)$$

其中，

TC_{ij}^n : 第 n 層網路中節線 (i,j) 護運作業風險因素之風險成本。

LM : 運鈔車路線規劃地區平均每年運鈔車被歹徒搶劫之總金額。

MS : 保全公司在規劃地區運鈔護運作業市場上占有率。

T_q : 保全公司在規劃地區平均每年服務旅次數。

本研究參考危險物品運送 (Erkut 等人^[5])、專案風險成本評估 (Carbone 與 Tippet^[15])、飛航安全風險管理 (Lee^[16]) 等相關文獻，將風險成本定義為風險發生的可能性 (possibility) 與風險的影響程度 (Impact) 的乘積。在式 (12) 中，參考前述文獻中應用模糊理論的方法，將等號右邊第一項的風險效用值視為風險發生的可能性，第二項為保全公司平均每趟運鈔車護運作業可能被搶劫的金額，作為影響程度，兩項相乘即為等號左邊的風險成本。經由式 (12) 計算所得之風險成本 TC_{ij}^n 將包含於式 (1) 中的節線成本 p_{ij}^n 中，作為第二節中所述保全運鈔車路線與排程模式的主要輸入資料之一。值得一提的是，本研究為簡化模式構建，故以 AHP 配合風險效用值轉換成機率方式以估計風險成本，未來亦可以其他方式來估計風險成本，而此可為未來的研究方向。

四、求解演算法

本研究之運鈔車護運路線與排程模式為一多元商品整數網路流量問題，屬於 NP-Hard 問題 (Garey 與 Johnson^[10])，當面臨大規模的實務問題時，難以在合理內使用套裝最佳化軟體 (例如 CPLEX) 求得精確解 (exact solutions)，故本研究依問題特性結合數學規劃軟體 CPLEX 發展一個啟發解法，以有效率地求解問題。此啟發解法將問題以切割時空網路時段長度與車流時空網路層數的方式縮小網路規模；在時段長度方面，將原本總時間長度分割為數個階段之方式，以分階段增加時段方式進行求解；時空網路層數方面，則先採用部分車輛進行求解，減少車流時空網路層數，並分階段增加車輛，直到所有服務需求點皆服務完成以及車輛數已達車隊規模時，即可求得啟發解。

本研究參考張佑堉^[17] 與 Yan 等人^[2] 的作法，將問題從時間軸分成三階段求解，也就是將原問題之完整時空網路依照預先選定的各階段的時段長度分割為 3 個小型時空網路，

依序在此 3 個時空網路上，每階段逐步增加車輛數以求解運鈔車路線與排程問題，求解某一階段之問題時須納入之前各階段的求解結果，直至三階段完成（所有服務需求點皆被服務），得到一個啟發解。演算法之詳細步驟說明如下。

步驟 1：設定資料參數

1. 決策者將時空網路從時間軸（平均）分割為三階段，設定各階段時空網路長度。
2. 設定每階段欲使用之車輛數。先用 CPLEX 求得第一階段的最佳解，以此最佳解中所使用之車輛數作為第一階段問題之車隊規模；第二階段問題之車隊規模設定為大於或等於第一階段之車輛數，第三階段問題則是以保全公司之總車輛數作為車隊規模進行求解。
3. 設定每階段問題中需服務之服務需求點數。最簡單的方法是將總服務需求點數除以 3，均分到三個階段的時空網路中；也可以觀察前面階段之模式的細部解，知道運鈔車在各階段已服務完成之服務需求點數，剩餘未完成之需求點作為之後各階段須服務之服務需求點。

步驟 2：建立第一階段車流時空網路並求解

1. 依前一步驟所設定的時間長度、使用車輛數與服務需求點數切割與構建出第一階段問題的時空網路。第一階段時空網路時間長度原為 8：30 至 11：40，於該時段內之所有發車節線、旅行節線、滯留節線及不服務節線均須建立，但其中於 11：20 出發之車輛最晚到達下一服務需求點的時間 12：00，因此網路長度將延長至 12：00。
2. 以 CPLEX 求解第一階段時空網路之運鈔車路線與排程問題。

步驟 3：建立第二階段車流時空網路並求解

1. 依步驟一所設定之時間長度、使用車輛數與服務需求點數切割與構建出第二階段問題的時空網路，第二階段時空網路時間長度為 8：30 至 15：00。
2. 讀入第一階段問題之求解結果，將所得之車輛路線與排程結果納入，亦即在第二階段問題中有一部分的運鈔車路線與排程是給定的。
3. 以 CPLEX 求解第二階段時空網路之運鈔車路線與排程問題。

步驟 4：建立第三階段車流時空網路並進行求解

1. 依步驟一所設定之時間長度、使用車輛數與服務需求點數切割與構建出第三階段問題的時空網路，第三階段時空網路時間長度為 8：30 至 18：30。
2. 讀入第一與第二階段問題之求解結果，將所得之車輛路線與排程結果納入，也就是在第三階段問題中有一部分的運鈔車路線與排程是給定的。
3. 以 CPLEX 第三階段時空網路之運鈔車路線與排程問題。

步驟 5：輸出所得之啟發解。

五、數值測試與分析

5.1 測試資料與參數

本研究參考吳銘偉^[18]與張佑璿^[17]以國內 S 保全公司之中壢服務區作為數值測試範例，相關測試資料包括運鈔車車隊規模 (5 輛)、服務需求點數目 (40 點) 及相關資料 (旅行時間、作業時間、服務時間窗)、護運作業成本資料 (固定與變動成本)，以及過去 1 週 (不包含假日) 的運鈔車路線資料等。在時空網路參數設定方面，因為車隊規模為 5 輛，故時空網路有 5 層，每層中以 8：30 至下午 18：30 為運鈔車護運作業排程規劃時間，時空網路節點間之時距為 10 分鐘。在此設定下之問題規模如表 3 所示：

表 3 運鈔車護運作業排程模式之問題規模

網路規模	
運鈔車護運作業排程時空網路個數	5
運鈔車護運作業排程時空網路節點數	12,202
運鈔車護運作業排程時空網路節線數	424,415
數學式規模	
變數個數	424,415
流量守恆限制式	12,202
額外限制式	40
零壹限制式	424,415

本文第二節中所述之時空網路的節線成本包含固定成本、變動成本與風險成本三大項。本研究透過訪談 S 保全公司運鈔車營運部門經理，蒐集相關營運資料，將運鈔車護運作業之固定成本分為薪資成本、裝備與耗材成本與其他雜項成本。在保全人員薪資方面，平均時薪為 180 元，每輛運鈔車護運作業時需 4 名保全人員進行護運作業服務，每天工作時間為 10 個小時；裝備與耗材成本方面，如表 4 所示，各保全裝備與耗材平均使用年限為 3 年，平均每天攤提約 800 元，所以固定成本為每輛車 8,000 元／每日。運鈔車護運作業之變動成本分為油料成本、維修與折舊成本。油料成本方面，95 無鉛汽油每公升 30 元，每輛運鈔車一公升可行駛 10 公里，運鈔車平均時速 30 公里。由於本研究以 10 分鐘為一時點，經換算後油耗成本為每分鐘 1.5 元，維修折舊成本資料由業者提供，每分鐘 3.5 元，所以變動成本為每車每分鐘 5 元。

表 4 保全裝備與耗材之成本

裝備與耗材	價格 (元/個)
防彈背心	20,000
車用 GPS	17,000
運鈔袋 (箱)	10,000
電擊棒 (槍)	5,000
對講機	4,000
甩棍	1,000
S 腰帶	400
鋼盔	200

在風險成本估算方面，風險因素權重值參考表 1。本研究的數值測試資料乃是以 S 保全公司中壢服務區的實際資料為基礎，除了少部分資料因為牽涉到保全公司的商業機密無法以真實資料進行測試，必須根據現況或是訪談保全公司決策者進行合理的假設，對於大部分的相關數據均盡可能採用實際資料進行測試。在護運路段風險估計方面，由於無法取得實際運鈔車的路線與抵達時間，因此在護運路段風險估計方面，參考保全業者的實務經驗，紅綠燈數量計算為假設運鈔車平均每行駛 100 公尺會通過 1 個紅綠燈；在路段反應時間上，派遣單位調派警力之作業時間設為 5 分鐘，派遣單位派遣警力至案發地點之時間，則設以 30 公里/小時作為警車於市區執勤作業之平均行駛速率去推估抵達案發地點之時間；路段人口密度之風險估計值參考表 2；路段重複性之估計值參閱 3.3 節所述之評估方式；運送距離估計值以中壢服務區中任意兩服務需求點最大護運距離，估計值設為 1，其餘護運距離依其相對比例，以決定各自估計值。在滯留作業風險方面，在安全作業區部分，當服務需求點為銀行，估計值設為 1，其餘皆設為 0；反應時間與人口密度風險估計方式與前述護運路段風險估計方式相同。

將所得之風險因素權重值與估計值代入式 (11) 求得風險效用估計值，再將此效用值代入式 (12) 求得風險成本。理論上，在式 (12) 中應該使用中壢地區的平均每年被搶劫金額與保全公司市占率資料。但是，在實務操作上，由於受限於商業機密與樣本數不足等原因，針對某一特定地區之平均每年運鈔車被搶劫之總金額、保全公司之市占率等資料非常不易取得。為了處理此一資料取得上的限制，本研究基於模式測試的出發點，且為了突顯運鈔車被搶劫的嚴重性，在數值測試中以臺灣地區過去 10 年平均每年運鈔車被搶劫金額來代替測試地區平均每年運鈔車被搶劫金額 ($LM = 9,000$ 萬)；此外，假設各地區保全公司市占率均勻且一致，使用臺灣地區的市占率資料來近似測試地區的保全公司市占率 ($MS = 50\%$)，以及 S 保全公司平均每年服務旅次 $T_q = 2,500$ 。將上述這些參數代入式 (12) 可得每趟服務旅次之風險成本約為 72 元。未來在實際應用本模式時，決策者可依當地的特性及本身確切的成本參數，精確地估算模式中相關的成本值，以使決策結果更為準確。

5.2 模式驗證

為了驗證第二節中所述之運鈔車路線與排程模式的正確性，本研究先進行小範例測試，將 S 保全公司中壢服務區的原始資料中選取 1 輛運鈔車與 10 個服務需求點（包含 1 個銀行）進行測試。營運時間為 8:30 至 15:10，10 分鐘為 1 時點，共 41 個時點，銀行之服務時窗為 8:30 至 12:30。因為問題規模較小，可由 CPLEX 軟體求得運鈔車路線與排程模式的最佳解，求解結果如表 5，細部解呈現於圖 3。此結果可以簡單的排列組合計算而驗證其正確性。

表 5 小範例測試之結果

運鈔車編號	1
服務需求點數	10
運鈔車護運作業之總時間 (分)	390
服務需求點之平均旅行加作業時間 (分)	39
運鈔車護運作業之系統成本 (元)	9,981
服務需求點之平均系統成本 (元)	998.1
運鈔車護運作業之風險成本 (元)	411
服務需求點之平均風險成本 (元)	41.1
運鈔車護運作業之營運成本 (元)	9,540
服務需求點之平均營運成本 (元)	954

5.2 實際範例求解結果

由於實際範例問題規模太大 (表 3)，無法在合理時間內 (例如 12 小時) 求得精確解，因此本研究利用第四節所述之啟發式演算法求解，以 C++ 電腦語言撰寫程式，結合 CPLEX 11.0 Callable Library 提供的 Solver，並於 INTEL (R) Core (TM) i7-2600CPU@3.40GHz、4.0GB 記憶體之個人電腦上執行運算。以啟發式演算法求解時，將 1 日的 61 個時點分成三階段，第一階段時點 1 至時點 20、第二階段時點 1 至時點 40 與第三階段時點 1 至時點 61，設定總求解時間限制為 1 小時，各階段上、下限之差距 (Gap, CPLEX 內部收斂間距參數) 設定為 1%。

本研究測試結果如表 6 所示，其中啟發解之目標值為 31,585 元。此目標值包含運鈔車護運作業之固定成本、變動成本與風險成本；求解時間為 87.23 秒 (Gap 小於 0.0001%)。若使用 CPLEX 求解，須使用 64,258.93 秒求得精確解，目標值為 31,483 元。啟發解與精確解之目標值間距為 0.32% ($= (31,585 - 31,363) / 31,363 \times 100\%$)，表示本研究之啟發式解法效果頗佳，可求得良好的近似最佳解，亦可大幅縮短求解時間。表 7 為範例測試之細部解結果表，結果顯示僅需使用 3 輛運鈔車即可服務所有服務需求點，各服務需求點平均的

旅行時間與作業時間加總皆在 40 分鐘以內，降低運鈔車於護運過程中遭遇搶劫的風險。在考慮系統成本最小化情況下，各輛運鈔車平均服務一需求點之風險成本約為 40 元，此成本為運鈔車在服務一個需求點時，受風險因素影響所產生之額外成本。

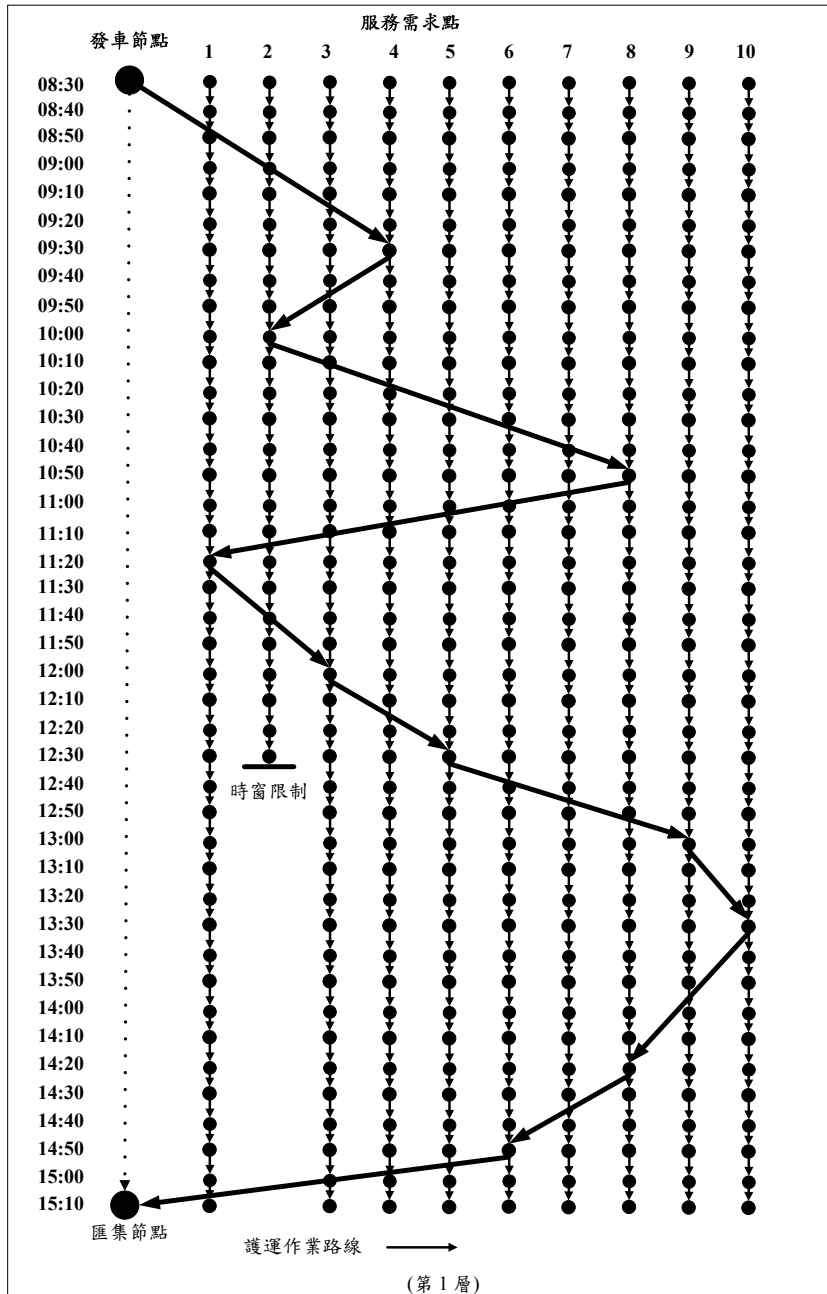


圖 3 小範例測試之細部解

表 6 運鈔車路線與排程模式之實際範例求解結果

啟發解目標值 (元)	31,585
啟發解求解時間 (秒)	87.23
CPLEX 最佳解目標值 (元)	31,483
CPLEX 最佳解求解時間 (秒)	64,258.93
啟發解與 CPLEX 最佳解之間距 (%)	0.32

表 7 運鈔車路線與排程模式之實際範例細部結果

運鈔車編號	1	2	3
服務需求點數	12	14	14
運鈔車護運作業之總時間 (分)	410	490	530
服務需求點之平均旅行與作業時間 (分)	34.17	35.00	37.86
運鈔車護運作業之系統成本 (元)	10,226	10,634	10,725
服務需求點之平均系統成本 (元)	852.17	759.57	766.07
運鈔車護運作業之風險成本 (元)	466	564	575
服務需求點之平均風險成本 (元)	38.33	40.29	41.07
運鈔車護運作業之營運成本 (元)	9760	10070	10150
服務需求點之平均營運成本 (元)	813.33	719.29	725.00

5.3 不同模式間之分析比較

為了比較本研究建立的模式與文獻中之模式，本研究針對以下 3 個運鈔車路線與排程模式進行實際範例之測試求解。

模式 1：本研究建立之考慮護運風險之運鈔車路線與排程模式；

模式 2：Yan 等人^[2]發展之具時空相似度限制之運鈔車護路線與排程模式；

模式 3：Yan 等人^[2]發展之模式，但不考慮時空相似度之限制。

模式 1 並無時空相似度之限制，而是將護運路段之重複性納入風險成本中考量；模式 2 則是以時空相似度作為限制，避免每日規劃護運之路線與過去的路線相似性過高，但是並未考慮其他風險因素與風險成本。模式 1 與模式 2 的另外一個差異點在於：模式一是將規劃路線與前 1 日之路線進行比較以估計路段重複性風險（也就是路段重複性風險因素的權重值與估計值僅考慮規劃路線與前 1 日之路線），而模式 2 中的時空相似度限制是比較規劃路線與之前 5 日之路線（每輛車可能有 5 條不同路線）。為了在相同的基礎上比較兩模式，本研究修改路段重複性風險因素估計值與層級分析法計算之路段重複性風險因素權重值，考慮規劃路線與之前 5 天路線的重複性，根據式 (11) 與式 (12) 分別重新計算風險效用值與風險成本，並將更新的風險成本代入模式一中重新求解。

上述 3 個模式之範例求解結果如表 8 所示。首先，3 個模式的最佳解 (CPLEX) 與啟

發解間目標值的差距皆小於 0.65%，可見啟發式演算法具有良好的求解品質，而且啟發式演算法可以大量減少求解運算時間。值得一提的是，與模式 2 相比，在無時空相似度限制時，模式 1 與模式 3 之最佳解與啟發解的求解時間皆明顯比模式 2 求解時間短，可知時空相似度之限制雖能增加規劃路線之變化性，但也因此增添模式求解上的困難。

模式 1 相較於模式 2 與模式 3 多考慮護運作業風險因素量化成的風險成本，所以其最佳解與啟發解目標值皆大於另外兩個模式求解之目標值；但模式 1 能夠將實際護運作業過程中風險因素之影響有系統地納入考慮，得到兼顧效率與安全的運鈔車路線與排程規劃。若將模式 2 與模式 3 求解結果之路線以模式 1 的方式計算其風險成本與營運成本，則從表 8 得知模式 1 相較於另外兩個模式多考量護運作業風險因素量化成的風險成本，故其風險成本 (1,452) 最低；模式 2 雖有時空相似度限制，但所規劃路線卻可能選擇其他風險影響性較高的路線，而其風險成本甚至大於模式 3。模式 3 既沒有時空相似度的限制，也不考慮護運作業風險成本。雖然此種作法較模式 1 與模式 2 簡單易求解，且最佳解目標值 29,830 元也較另外兩種模式低，但是此模式只考慮效率（營運成本 30,000，在 3 個模式中最低），忽略運鈔車護運作業之安全性（風險成本 1,529，在 3 個模式中最高），無法滿足實務上保全業者的需求。

表 8 3 種模式求解之結果比較

模 式	模式 1	模式 2	模式 3
啟發解系統成本 (元)	31492	31,599	31,516
風險成本 (元)	1,452	1,529	1,516
營運成本 (元)	30,040	30,070	30,000
啟發解求解時間 (秒)	86.73	178	83.82
CPLEX 最佳解目標值 (元)	31,299	29,880	29,830
CPLEX 最佳解求解時間 (秒)	62,623.84	147,682.62	66,217.34
啟發解與 CPLEX 最佳解之間距 (%)	0.61	0.64	0.57

接下來本研究以模式 2 來評估模式 1 範例測試結果。Yan 等人^[2]定義兩條路線（節線）抵達某一需求點的時間差門檻值 β （分鐘），以判斷節線的相似度；當兩條節線抵達某一需求點的時間差小於 β ，則此兩條節線為相似節線。假設 $\beta = 20$ 且前 1 日運鈔車抵達需求點 A 之時間為 9:20 分，如果規劃路線抵達需求點 A 之時間為 9:20 前後 20 分鐘內 (9:00-9:40)，則視為相似節線。另外，Yan 等人^[2]定義時空相似度限制 δ 值 ($0 \leq \delta \leq 1$)，如果相似節線數與前 1 日運鈔車路線節線數（不包括匯集節線）的比值大於 δ ，則判定當日規劃路線違反時空相似度限制。假設 $\delta = 0.2$ 且當日所規劃之路線只須與前 1 日之路線進行比較，前 1 日路線包含 9 條節線，當日規劃路線包含 7 條節線，但有 4 條相似節線，則兩日路線的時空相似度為 $4/9 = 0.44$ ，且 $0.44 > \delta$ ，故當日之規劃路線違反時空相似度限制，在模式

2 中將視為不可行。

上述時空相似度之定義可延伸至與之前數日路線互相比較，其作法為在與不同日的路線進行比較時，給予不同的 β 與 δ 值。本研究參考 Yan 等人^[2] 與前 5 日的路線進行比較，針對與之前 1、2、3、4、5 日路線比較的 β 值分別為 60、50、40、30、20 分鐘， δ 值分別為 0.20、0.40、0.60、0.80、0.90。

在此時空相似度之設定下，模式 1 與模式 2 之個別車輛規劃路線與前 5 日護運路線互相比對之時空相似度值如表 9 所示。模式 1 中個別車輛分別比對前 5 天之行駛路線，其時空相似度值皆遠低於預設之限制；以編號 1 車輛為例，由於前 1 日有 3 輛運鈔車進行護運作業，因此編號 1 車輛與前 1 日的 3 條護運路線互相比較之時空相似度值分別為 0、0、0，皆滿足限制值 0.20。此外，在本測試範例中，模式 1 得到的路線時空相似度值大多都小於模式 2 得到的時空相似度值，可知模式 1 不但考慮較多的風險因素，而且其將路線重複性風險因素之風險成本納入路線成本的作法同樣也能夠避免護運路線重複的情形。

表 9 不同模式中個別車輛分別比對前五日護運路線之時空相似度值

模式 1 車輛編號	個別車輛分別比對前 5 天之行駛路線實際時空相似度值				
	前 1 日	前 2 日	前 3 日	前 4 日	前 5 日
1	0, 0, 0	0, 0.13, 0	0, 0, 0.17	0, 0, 0.13	0, 0.14, 0
2	0, 0, 0	0.31, 0.13, 0	0, 0.13, 0	0.17, 0, 0	0.17, 0.14, 0
3	0, 0.13, 0.15	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0.33, 0, 0.29
模式 2 車輛編號					
	前 1 日	前 2 日	前 3 日	前 4 日	前 5 日
1	0, 0.13, 0.14	0.14, 0.13, 0.15	0, 0.13, 0	0, 0, 0	0.31, 0.13, 0
2	0, 0.13, 0	0.29, 0.25, 0	0.29, 0, 0.15	0.15, 0.14, 0	0, 0.13, 0
3	0.15, 0.13, 0	0.14, 0, 0.31	0, 0, 0.15	0, 0.14, 0.13	0.15, 0.13, 0

六、結論與建議

本研究利用時空網路流動技巧，從保全業者之立場，建立以系統成本最小化為目標之運鈔車路線與排程最佳化模式，模式中定義之系統成本包括營運成本（固定與變動成本）以及風險成本。不同於以往相關文獻中藉由時空相似度限制來避免產生重複性過高之運鈔車路線，以降低護運過程中遇搶的風險，本研究將護運過程中的風險透過成本的方式反映在所建立的模式中，藉由模式求解，得到營運成本與風險成本最低的運鈔車路線與排程。為了估計護運作業的在風險成本，本研究建構護運作業風險因素層級架構，此架構包含護運路段風險與滯留作業風險兩大構面，每一構面下又有各項風險因素，這些風險因素的權重則是透過專家問卷調查，利用層級分析法來計算。將各項風險因素權重值與風險因素估

計值相乘後加總，得到風險效用值，再量化為風險成本，納入本研究所建構之運鈔車路線與排程模式中之系統成本中，求解兼顧營運成本與風險成本的運鈔車護運路線與排程規劃。

由於本研究運鈔車路線與排程模式屬於 NP-hard，當面臨大型實務問題時，難以在合理時間內求得精確最佳解 (exact solutions)，因此本研究發展啟發式解法並配合數學規劃軟體 CPLEX 加以求解。為了評估模式與演算法之實用績效，本研究參考吳銘偉^[18]與張佑璿^[17]的作法，根據國內一保全公司（簡稱為 S 保全公司）在中壢服務區的營運資料產生測試範例並進行求解。求解結果發現啟發解與精確解之目標值間距為 0.32%，表示本研究之啟發式解法可求得良好的近似最佳解，也可大幅縮短求解時間。此外，本研究亦將求解結果與文獻中所發展之運鈔車路線與排程模式 (Yan 等人^[2]) 之結果比較，探討考慮時空相似度限制之模式與考慮路段風險成本之模式兩類不同模式的差異。比較結果發現：(1) 考慮時空相似度限制之模式求解時間較長，顯示時空相似度之限制雖能增加規劃路線之變化性，但也因此增添模式求解上的困難；(2) 考慮路段風險成本之模式其風險成本較低；(3) 考慮路段風險成本之模式將路線重複性之風險成本納入路線成本的作法同樣也能夠避免護運路線重複的情形。因此，本研究中將路段風險成本納入目標函數求解的作法，在實務應用上較優於過去僅考慮護運路線重複性之模式。

有關未來研究方向之建議如下。本研究運用層級分析法計算護運作業風險中各風險因素的權重值，再將風險因素權重值與估計值量化為風險成本，此種風險評估之作法會因受訪者填寫問卷時過於主觀或是對議題不甚了解，而造成判斷偏差，影響風險評估結果，未來相關研究可嘗試使用其它方法來進行護運作業之風險評估。此外，本研究假設各服務需求點間之旅行時間為一固定值，但實務上旅行時間會有擾動與依時性之情形發生，建議後續研究可嘗試透過隨機規劃模式，考量旅行時間之隨機性，始能更加符合現實狀況之模式。營運成本與風險成本可能是兩項衝突的目標，為了探討兩者間可能的抵換 (tradeoff) 關係，在後續研究中，可以多目標規劃模式求解，得到一組非支配解 (non-dominated solutions)，提供保全業者規劃運鈔車護運路線時之決策參考。最後，本研究所發展的啟發式演算法將原本問題切割成數個階段的小問題來縮短求解時間，未來相關研究可嘗試應用先進的巨集啟發式演算法 (例如模擬退火法、蟻群演算法等等) 來進行求解。

參考文獻

1. 江文毅，「運鈔車護運路線決策支援系統建立之研究」，華梵大學工業管理學系碩士論文，民國 90 年。
2. Yan, S., Wang, S. S., and Wu, M. W., "A Model with a Solution Algorithm for the Cash Transportation Vehicle Routing and Scheduling Problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 2, 2012, pp.464-473.
3. Yan, S., Wang, S. S., and Chang, Y. H., "Cash Transportation Vehicle Routing and

- Scheduling under Stochastic Travel Times”, *Engineering Optimization*, DOI:10.1080/0305215X.2013.768240, 2013.
4. Erkut, E. and Verter, V., “Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials”, *Operations Research*, Vol. 46, No. 5, 1998, pp.625-642.
 5. Erkut, E., Tjandra, S. A., and Verter, V., “Hazardous Materials Transportation”, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 14, 2007, pp. 539-621.
 6. Yan, S. and Chen, H. L., “A Scheduling Model and a Solution Algorithm for Inter-City Bus Carriers”, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 9, 2002, pp. 805-825.
 7. Yan, S. and Tseng, C. H., “A Passenger Demand Based Model for Airline Flight Scheduling and Fleet Routing”, *Computers & Operations Research*, Vol. 29, No. 11, 2002, pp. 1559-1581.
 8. Kliwer, N., Mellouli, T., and Suhl, L., “A Time-Space Network Based Exact Optimization Model for Multi-Depot Bus Scheduling”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, No. 3, 2006, pp. 1616-1627.
 9. Yan, S. and Chen, C. H., “Coordinated Flight Scheduling Models for Allied Airlines”, *Transportation Research Part C*, Vol. 15, No. 4, 2007, pp. 246-264.
 10. Garey, M. R. and Johnson, D. S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman, San Francisco, CA, 1979.
 11. Saaty, T. L., *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*, RWS Publications, Pittsburgh, PA, 1990.
 12. Forman, E. H. and Gass, S. I., “The Analytical Hierarchy Process-An Exposition”, *Operations Research*, Vol. 49, No. 4, 2001, pp. 469-487.
 13. 徐鶴齡, 「保全公司運鈔車護運作業風險評估暨排程規劃之研究」, 國立中央大學土木工程學系碩士論文, 民國 102 年。
 14. Satty, T. L., “Decision Making with the Analytical Hierarchy Process”, *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2008, pp. 83-98.
 15. Carbone, T. A. and Tippet, D. D., “Project Risk Management Using the Project Risk FMEA”, *Engineering Management Journal*, Vol. 16, No. 4, 2004, pp. 25-35.
 16. Lee, W. K., “Risk Assessment Modeling in Aviation Safety Management”, *Air Transport Management*, Vol. 12, 2006, pp. 267-273.
 17. 張佑璿, 「隨機旅行時間下保全公司運鈔車護運作業排程規劃之研究」, 國立中央大學土木工程系碩士論文, 民國 100 年。
 18. 吳銘偉, 「保全公司運鈔車護運作業排程規劃之研究」, 國立中央大學土木工程系碩士論文, 民國 99 年。

連續流車流模式的有限差分近似解法

ON THE APPROXIMATION OF FINITE DIFFERENCE METHODS FOR CONTINUUM TRAFFIC FLOW MODELS

許書耕 Shu-Keng Hsu¹
邱裕鈞 Yu-Chiun Chiou²

(103 年 1 月 8 日收稿，103 年 8 月 5 日第 1 次修改，104 年 3 月 15 日定稿)

摘 要

連續流車流模式屬雙曲線型偏微分方程式，求解不易，因此，一般多藉由有限差分法加以近似求解。本研究以均勻到達車流碰上停等車隊產生向上游回溯衝擊波，以及停等車隊起動向下游疏解等兩個嚴苛的交通狀況為例，進行多種有限差分方法在不同階等連續流模式的適用性評比。結果發現，Lax-F 有限差分法無論是針對一階準線性連續流模式（即 LWR 模式）或高階連續流模式，均能獲致與解析解最為相近的近似解，而且安定性與收斂性亦佳，適用性最佳。此與以往國內外研究略有不同，主要係因以往研究所研析的交通案例均侷限於非壅塞交通狀態及 Payne 模式本身缺陷所致。

關鍵詞：連續流模式；LWR 模式；雙曲線型偏微分方程式；有限差分法

ABSTRACT

Because continuum traffic flow models are described by hyperbolic partial differential equations and the exact solutions to the models are difficult to derive analytically, finite difference methods are commonly used to approximate the

-
1. 中原大學土木系兼任副教授，交通部運輸研究所運輸工程組組長（地址：臺北市敦化北路 240 號 9 樓 交通部運輸研究所；E-mail：keng@iot.gov.tw；Tel：(02)2349-6820）。
 2. 國立交通大學運輸與物流管理學系教授。

solutions. In this paper, the fitness of several finite difference methods under different continuum flow models is assessed in two extreme traffic conditions, a backward shock wave formed by a uniform arrival flow encountering a stopped flow and a forward shock wave formed by a discharging flow. The results show that the Lax-F method can obtain good approximations for both the first-order quasi-linear continuum model (i.e., the LWR model) and the high-order continuum flow model with good stability and convergence. This finding is different from previous domestic and foreign studies primarily because past studies examined only traffic cases with uncongested traffic conditions and because of the drawbacks of the Payne model itself.

Key Words: *Continuum traffic flow models; LWR model; Hyperbolic partial differential equations; Finite difference methods.*

一、前言

連續流車流模式 (continuum traffic flow model)，不論是簡單 (一階準線性) 連續流模式 (simple continuum model; first order model; LWR model) 或高階連續流模式 (high order model)，均屬雙曲線型 (hyperbolic type) 偏微分式 (partial differential equations, PDE)，只有少數狀況下方可獲得解析解 (exact analytic solutions)，其他則必須藉由有限差分式 (finite difference equations, FDE) 加以近似求解，方能進行模式特性或個案應用之評析。

國內外相關研究曾列舉出可用於連續流模式的多種有限差分法，並用以解析各種交通案例。惟所採用的有限差分法大多不適用於近似求解高階連續流模式，而且所設計的交通案例亦多有問題，例如，所探討的交通狀況過於侷限 (僅限於非壅塞車流)，以及所設定的車流狀況為數學上可能但實務上不允許 (例如允許車流向後退) 等，均需要再予以審慎評析檢驗。

由於簡單連續流模式為高階連續流模式的一種特例，因此，適用於近似求解高階連續流的有限差分法，必須先通過簡單連續流模式的適用性檢驗。基此，本研究乃按由簡至繁之順序，透過嚴苛的交通案例設計，先回顧評析適用一階線性與準線性 (簡單) 連續流模式的差分方法，再針對適用於簡單連續流模式的有限差分法，評析其對高階連續流模式的適用性。

二、有限差分方法重點回顧

2.1 差分原理與有效差分的條件

LeVeque^[1]以一簡例說明有限差分如何近似求解微分方程式，亦藉以說明近似解的準確性 (the order of accuracy)。

令 $u(x)$ 表一個可微分的單變數函數， x_0 為一特定點。現欲以有限差分法，以 x_0 週邊有限點的 u 值來近似求解 $u'(x_0)$ ，則可選擇下列方式：

$$D_+u(x_0) \equiv \frac{u(x_0 + h) - u(x_0)}{h} \quad (1)$$

其中， h 表一極小值。值得注意的是， $D_+u(x_0)$ 實際上係 $u(x)$ 曲線上連接 x_0 與 x_0+h 兩點的弦線斜率，如圖 1 所示。

式(1)只評估了 $x \geq x_0$ 的部分，係對 $u'(x_0)$ 的單邊近似 (one-sided approximation)。同理，亦可採用另一種單邊近似方式：

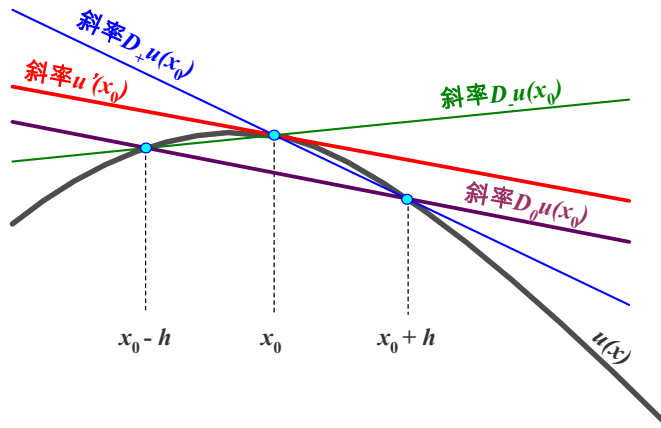
$$D_-u(x_0) \equiv \frac{u(x_0) - u(x_0 - h)}{h} \quad (2)$$

上述這兩種近似方式對 $u'(x_0)$ 均僅有一階準確 (a first order accurate)，其誤差約與 h 的大小成比例。

另一種是所謂的中心近似 (centered approximation)，即：

$$D_0u(x_0) \equiv \frac{u(x_0 + h) - u(x_0 - h)}{2h} = \frac{1}{2}(D_+u(x_0) + D_-u(x_0)) \quad (3)$$

式(3)係 $u(x)$ 曲線上連接 x_0-h 與 x_0+h 兩點弦線的斜率，亦係前述兩種單邊近似的平均。而由圖 1 可看出，中心近似的斜率更接近 $u'(x_0)$ ，較任何一種單邊近似要來得精確。事實上，這種方式有二階準確 (a second order accurate)，其誤差約與 h^2 的大小成比例，當 h 很小時，二階的誤差會較一階小很多。



資料來源：LeVeque^[1]。

圖 1 單變數函數差分近似範例

連續流模式係包含時間與空間兩變數的偏微分方程式，其設定變數微量值的作法係將微分解的時空離散化，一般係切割成網格狀，如圖 2 所示。惟在求解連續流模式時，並非只是將變數及其導函數轉換成離散型即可，對於雙曲線型者特別是如此，這類模式即便起始資料很平順，亦可能產生不連續解，甚或產生衝擊波（波方向甚而可能與車流方向相反），而衝擊波的存在，尤其當網格切割得愈來愈細時，對發展有效的有限差分近似解將是一大挑戰。

Zhang^[2]指出，任何有效的數值近似均應滿足以下 3 個條件：

- (1) 一致性 (consistency)： h, b 愈細，有限差分式就愈接近原始偏微分式；
- (2) 安定性 (stability)：有限差分產生的誤差，不會隨時間增加而增加；
- (3) 收斂性 (convergence)： h, b 愈趨近 0，有限差分的極限解會愈趨近原始偏微分式的正確值。

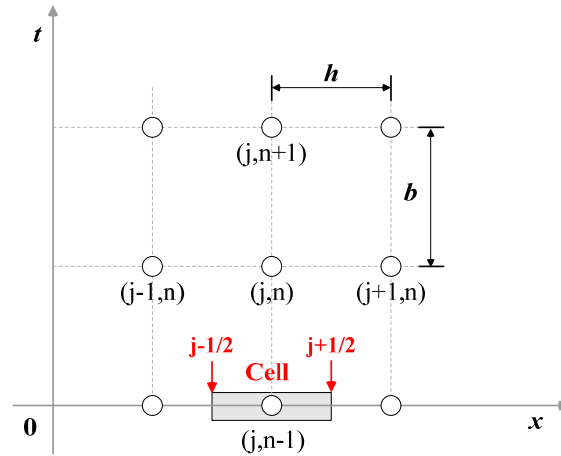


圖 2 有限差分的時空座標網格狀切割

Zhang^[2]說明，有一種特殊的雙曲線偏微分方程式，稱為守恒型 (conservation form)，其有限差分式特別能符合上述 3 個條件。此種特殊的守恒型，可寫成：

$$U_t + F(U)_x = R(U) \quad (4)$$

如為一階連續流模式的黎曼問題 (Riemann problem)，則上式可進一步寫成 $U_t + F(U)_x = 0$ 。這種守恒型雙曲線偏微分式可以發展出具守恒性的有限差分近似法，其優點是可以確保衝擊波速的計算正確。而一個有限差分式能具守恒性，須能寫成：

$$\frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} + \frac{\tilde{F}(U_{j+1}^n, U_j^n) - \tilde{F}(U_j^n, U_{j-1}^n)}{\Delta x} = \tilde{R}(U_{j+1}^n, U_j^n, U_{j-1}^n) \quad (5)$$

其中， \tilde{F} 稱為數值通量 (numerical flux)，而對車流而言，如 U 表密度，且流量係密度的函數，則上式所謂的數值通量 \tilde{F} ，即係車流的流率 (flow rate)。 \tilde{R} 為車流產生項，適用於有進出孔道的路段，如係封閉路段，該項可剔除 (等式右側為 0)。

當一有限差分式係守恆型式時，其一致性的條件就特別簡單，只要其數值通量函數滿足下式：

$$\tilde{F}(U, U) = F(U) \quad (6)$$

亦即原由兩不同位置的 U 值 (例如 U_{j+1} , U_j ，或 U_j , U_{j-1}) 來決定的數值通量 \tilde{F} ，如代入同一位置 (即代入 U_j , U_j)，其值會等於該位置 (U_j) 的原理論通量 F 。

一個具一致性的有限差分式，如滿足某特定的安定性條件，且係線性時 (大部分非線性者亦同)，必滿足收斂性 (LeVeque^[1])。此安定性條件係由 Courant、Friedrichs 與 Lewy 等 3 人所提出，一般稱為 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 條件，定義如下：

CFL 條件：一數值分析法只有當其數值解的應變數值域 (numerical domain of dependence) 包含偏微分式應變數的真值域 (the true domain of dependence of the PDE)，方會收斂 (LeVeque^[1])。

CFL 條件中所謂偏微分式應變數的值域，對一階連續流模式而言即是指其特性根曲線的軌跡，即其車波與衝擊波在單位時間傳遞的長度；而數值解的應變數值域則是指利用有限差分法所選取網格 (grid) 單位的大小。由條件內涵知，滿足 CFL 條件實際的作法係對時空座標做適當的切割 (LeVeque^[1])，而對於具守恆型的連續流模式而言，其須滿足的 CFL 條件係時空格位前進的速度 (cell advance speed)，亦即 $\Delta x / \Delta t = h/b$ ，須不小於最大特性根速 λ 的絕對值，即：

$$\max \left| \frac{b}{h} \lambda_i \right| \leq 1, i = 1, \dots, n \quad (7)$$

雖然上述安定性條件並未證明亦適用於非線性系統，惟由實際應用經驗得知，許多非線性系統確亦適用。

由以上說明知，欲求得連續流模式有效的數值近似，必須找出能符合一致性、安定性與收斂性條件的數值通量函數 (numerical flux function)。

2.2 有限差分法

在實務應用上，有限差分法可分為顯式法 (explicit method)、隱式法 (implicit method) 及克雷格－尼克森法 (Crank-Nicolson methods) 三大類。顯式有限差分法在計算 $t+1$ 時間某空間點的密度值時，可參考 t 或 t 之前的密度值加以逐步推算 (backward difference)，直到整個定義域的值都求得為止，其方法類似遞迴的觀念，較為簡單易懂。隱式法則是參考 $t+1$ 或 $t+1$ 之後的密度值加以逐步推算 (forward difference)。克雷格－尼克森法則取顯式

法及隱式法的平均。由於雙曲線型偏微分式一般多以顯式法求解，故本研究僅針對顯式法來討論。

在顯式法中，各種數值通量函數依所取網格點的不同，係分為 FTFS (forward in time-forward in space)、FTBS (forward in time-backward in space)、FTCS (forward in time-centered in space)、Lax-Friedrichs (簡稱 Lax-F)、Lax-Wendroff (簡稱 Lax-W)、Leapfrog，以及 Beam-Warming 等方法 (周志忠^[3])。

考慮一階準線性連續流模式，如下所示：

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{dQ(k)}{dk} \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

上式可改寫為 FTFS 有限差分式，其步驟如下：

$$\text{Forward in time : } \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} \approx \frac{k(x,t+\Delta t) - k(x,t)}{\Delta t} \quad (9)$$

$$\text{Forward in space : } \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} \approx \frac{k(x+\Delta x,t) - k(x,t)}{\Delta x} \quad (10)$$

將上二式代入式(8)中，則可得到 FTFS 差分式 (其他差分式同理可得)：

$$\frac{k(x,t+\Delta t) - k(x,t)}{\Delta t} + \frac{dQ(k)}{dk} \frac{k(x+\Delta x,t) - k(x,t)}{\Delta x} = 0 \quad (11)$$

接下來係切割解空間，選取 $\Delta t=b$ ， $\Delta x=h$ ，並定義每個格點為：

$$\begin{aligned} x_j &= jh, & j &= 0, 1, 2, \dots \\ t_n &= nb, & n &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

則上式的 FTFS 差分式可改寫為：

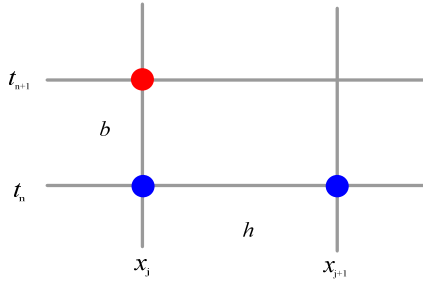
$$\frac{k(x_j, t_{n+1}) - k(x_j, t_n)}{b} + \frac{dQ(k)}{dk} \frac{k(x_{j+1}, t_n) - k(x_j, t_n)}{h} = 0 \quad (12)$$

再定義 $k_j^n = k(x_j, t_n)$ ，化簡整理式(12)，可得 FTFS 有限差分法之遞迴公式，如式(13)：

$$k_j^{n+1} = k_j^n - \frac{b}{h} \frac{dQ(k)}{dk} \cdot (k_{j+1}^n - k_j^n) \quad (13)$$

透過此一遞迴公式及模式的起始條件 (initial conditions) 與邊界條件 (boundary conditions)，便可以一層層地計算出任何時間與地點的密度值。

由式(13)不難看出，FTFS 有限差分在計算 k_j^{n+1} 的值時必須參考 k_{j+1}^n 及 k_j^n ，其參考格點的選取如圖 3 所示。



資料來源：周志忠^[3]。

圖 3 FTFS 有限差分法的格點選取

如係一階線性連續流模式，可令 $dQ/dk=A$ (A 為常數)，則依前述方法可推導得一階線性連續流模式之各種顯式有限差分方法 (周志忠^[3])。FTFS、FTBS、FTCS、Lax-F、Lax-W、Leapfrog，以及 Beam-Warming 等之格點選擇、有限差分式及其收斂條件，如表 1 所示。

表 1 一階線性連續流模式各顯式有限差分式及其收斂條件

有限差分法	格點選擇	有限差分式	CFL 收斂條件
FTFS		$k_j^{n+1} = k_j^n - A \cdot \frac{b}{h} (k_{j+1}^n - k_j^n)$	$A < 0, \left \frac{b}{h} A \right \leq 1$
FTBS		$k_j^{n+1} = k_j^n - A \cdot \frac{b}{h} (k_j^n - k_{j-1}^n)$	$A > 0, \left \frac{b}{h} A \right \leq 1$
FTCS		$k_j^{n+1} = k_j^n - A \cdot \frac{b}{2h} (k_{j+1}^n - k_{j-1}^n)$	unstable
Lax-F		$k_j^{n+1} = (k_{j+1}^n + k_{j-1}^n)/2 - A \cdot \frac{b}{2h} (k_{j+1}^n - k_{j-1}^n)$	$\left \frac{b}{h} A \right \leq 1$
Lax-W		$k_j^{n+1} = k_j^n - A \cdot \frac{b}{2h} (k_{j+1}^n - k_{j-1}^n) + \frac{A^2}{2} \frac{b^2}{h^2} (k_{j+1}^n - 2k_j^n + k_{j-1}^n)$	$\left \frac{b}{h} A \right \leq 1$
Leapfrog		$k_j^{n+1} = k_j^{n-1} - A \cdot \frac{b}{h} (k_{j+1}^n - k_{j-1}^n)$	$\left \frac{b}{h} A \right \leq 1$
Beam-Warming		$k_j^{n+1} = k_j^n - A \cdot \frac{b}{2h} (3k_j^n - 4k_{j-1}^n + k_{j-2}^n) + \frac{A^2}{2} \frac{b^2}{h^2} (k_j^n - 2k_{j-1}^n + k_{j-2}^n)$	$0 \leq \frac{b}{h} A \leq 2$

資料來源：周志忠^[3]。

由於線性連續流模式的特性根曲線斜率固定為 A ，故每一時空的 CFL 收斂條件均應為

$\left| \frac{b}{h} A \right| \leq 1$ ，惟部分差分法另有外加的特殊條件方會收斂。

三、一階連續流模式有限差分法之應用與評析

周志忠^[3]曾針對一階線性與準線性連續流模式，在不同車流起始條件與邊界條件下，以各種有限差分法求其近似解，再與解析解比較，從而選出較好的有限差分法。該研究將起始條件分為連續與不連續兩種狀況，本研究僅回顧評析其中較具挑戰性的、不連續的狀況。

3.1 一階線性連續流模式之有限差分模擬

周志忠^[3]假設一階線性連續流模式的波速 A 固定為 30 公里／小時，起始條件為一不連續函數，邊界條件則為連續函數，其方程式如下（參閱圖 4）：

$$\text{一階線性連續流模式：} \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + 30 \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = 0$$

$$\text{起始條件：} k(x,0) = \begin{cases} 70 & (\text{車／公里}); \text{ 當 } 0 \leq x \leq 15 \text{ (公里)} \\ 0 & (\text{車／公里}); \text{ 當 } 15 < x \leq 30 \text{ (公里)} \end{cases}$$

$$\text{邊界條件：} k(0,t) = 100 - 30 \exp(t)$$

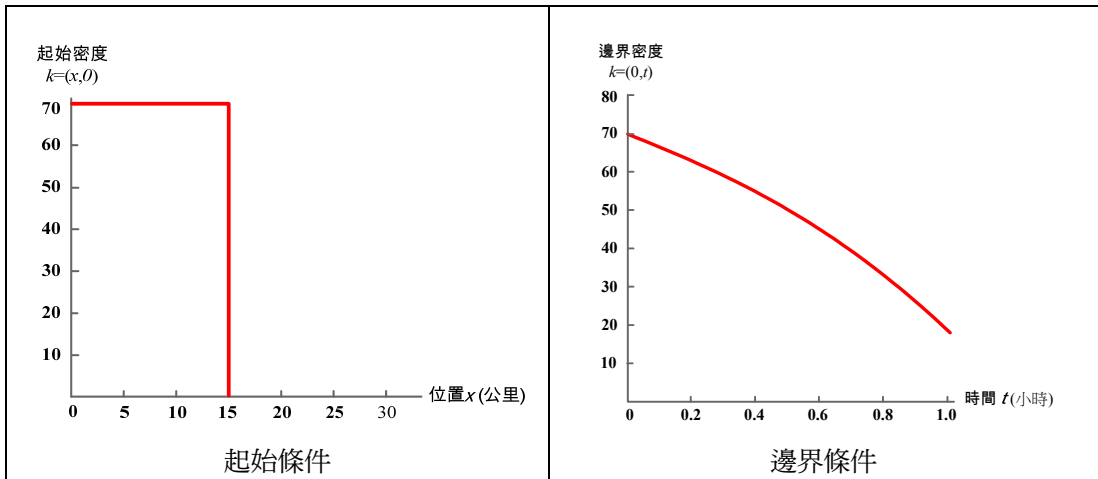


圖 4 一階線性連續流問題起始條件不連續範例

值得說明者，上式的起始條件規範 $t = 0$ 時位於 0~15 公里有一停等車隊，其前方（下

游) 無車。 $t > 0$ 以後，車隊將向下游疏散，連續流模式將可展現類似號誌控制交岔路口綠燈始亮時車隊的起動疏散狀況；邊界條件則規範位於車隊尾部 ($x = 0$) 的密度在 $t > 0$ 以後係隨時間而降低，此相當於令車隊尾部在 $t > 0$ 以後係向上游倒車後退，數學上雖可以如此設定，但實務上並不允許發生。

解析解：

周志忠^[3] 由特性根曲線的斜率 ($A=30$ 公里／小時) 即為波速，求算出解析解如下所示：

當 $x - 30 \times t < 0$ 時， $k(x, t) = 100 - 30 \times \exp(t - x/30)$ 車／公里

當 $0 \leq x - 30 \times t \leq 15$ 時， $k(x, t) = 70$ 車／公里

當 $15 < x - 30 \times t \leq 30$ 時， $k(x, t) = 0$ 車／公里

數值近似解：

為瞭解各差分法與 CFL 收斂條件間的關係，周志忠^[3] 以下列不同時空切割比來分析比較其與解析解間的誤差： $(A = 30$ 公里／小時；單位： Δx 為公里； Δt 為小時)

切割比小於 A ： $(\Delta t / \Delta x) \times A = 0.50$ ， $\Delta x = 0.6$ ， $\Delta t = 0.010$ ($\Delta x / \Delta t = 60$ 公里／小時)

切割比等於 A ： $(\Delta t / \Delta x) \times A = 1.00$ ， $\Delta x = 0.6$ ， $\Delta t = 0.020$ ($\Delta x / \Delta t = 30$ 公里／小時)

切割比大於 A ： $(\Delta t / \Delta x) \times A = 1.25$ ， $\Delta x = 0.6$ ， $\Delta t = 0.025$ ($\Delta x / \Delta t = 24$ 公里／小時)

切割比小於、等於及大於 A 的 3 種模擬結果與解析解的誤差評比如表 2 所示。由表可以看出，在求解起始條件為不連續函數的線性偏微分式，各類有限差分法只要滿足 CFL 條件，其數值解都會收斂、安定且與解析解十分近似。惟各個有限差分法在不同的切割比下，會產生下列模擬結果：

1. 當切割比恰等於 A (即 $\Delta x / \Delta t = A$)，即恰滿足 CFL 條件時，其模擬結果最近似解析解；
2. 當切割比大於 A 時 ($\Delta x / \Delta t < A$)，不滿足 CFL 條件，誤差會隨時間增加而擴大；
3. 當切割比小於 A 時 ($\Delta x / \Delta t > A$)，雖滿足 CFL 條件，但數值解在密度不連續的地方會有震盪的情形發生，致誤差反較恰為相等時大。例如 $A=30$ 公里／小時，則 $\Delta x = 0.6$ 公里， $\Delta t = 0.02$ 小時 ($\Delta x / \Delta t = 30$ 公里／小時) 恰符合 CFL 條件，而 $\Delta x = 0.6$ 公里， $\Delta t = 0.01$ 小時 ($\Delta x / \Delta t = 60$ 公里／小時) 亦符合 CFL 條件且時空切割比前者更細，但其近似解的精確度反而不如前者。

表 2 起始條件為不連續函數各有限差分法的誤差評比

切割比	差分方法	密度最大誤差	密度平均誤差	收斂	條件
小 於 A	1.FTFS	3.9×10^{30}	7.6×10^{27}	$A < 0, (b/h) \times A \leq 1$	不滿足
	2.FTBS	35.000027	1.475966	$A > 0, (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	3.FTCS	374477.4375	12434.767578	unstable	不滿足
	4.Leapfrog	52.500004	4.269337	$ (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	5.Lax-F	40.468750	2.753543	$ (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	6.Lax-W	45.530106	1.424144	$ (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	7.Beam-Warming	38.381233	1.025928	$0 \leq (b/h) \times A \leq 2$	滿足
等 於 A	1.FTFS	3.0×10^{24}	1.4×10^{22}	$A < 0, (b/h) \times A \leq 1$	不滿足
	2.FTBS	0.000198	0.000001	$A > 0, (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	3.FTCS	205847344	3406368.50	unstable	不滿足
	4.Leapfrog	0.000202	0.000080	$ (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	5.Lax-F	0.000008	0.000001	$ (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	6.Lax-W	0.000389	0.000003	$ (b/h) \times A \leq 1$	滿足
	7.Beam-Warming	0.000175	0.000015	$0 \leq (b/h) \times A \leq 2$	滿足
大 於 A	1.FTFS	2.7×10^{22}	1.4×10^{20}	$A < 0, (b/h) \times A \leq 1$	不滿足
	2.FTBS	2474090.0	26358.465	$A > 0, (b/h) \times A \leq 1$	不滿足
	3.FTCS	1.0×10^9	13715596	unstable	不滿足
	4.Leapfrog	2.5×10^{12}	3.7×10^{10}	$ (b/h) \times A \leq 1$	不滿足
	5.Lax-F	14066.5	324.57	$ (b/h) \times A \leq 1$	不滿足
	6.Lax-W	4.4×10^{14}	2.9×10^{11}	$ (b/h) \times A \leq 1$	不滿足
	7.Beam-Warming	59.062500	1.026638	$0 \leq (b/h) \times A \leq 2$	滿足

資料來源：周志忠^[3]。

基於表 2 的分析結果，周志忠^[3] 確定 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 這 3 個差分法較佳，可供後續一階準線性連續流模式的求解之用。FTBS 法雖然其求得的結果亦十分理想，惟其 CFL 收斂條件另有波速為正的要求，而一階準線性連續流模式的波可能向前傳遞（波速為正）亦可能向後傳遞（波速為負），致 FTBS 對其並不適用。此外，Beam-Warming 法的近似結果並不比 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 法差，然未被周志忠^[3] 建議選用，該研究亦未說明其原因。事實上，周志忠^[3] 未說明的是 Beam-Warming 法的收斂條件為 $0 \leq (b/h) \times A \leq 2$ ，因 b/h 均正，所以 A 須大於 0，亦即與 FTBS 法 CFL 收斂條件的額外要求相同，均有波速須為正的限制，只是周志忠^[3] 的範例其波速恰為正，致 Beam-Warming 法在表 2 中為滿足收斂條件。簡言之，Beam-Warming 法亦不適用後續一階準線性連續流模式的近似求解，其原因與 FTBS 法同。

3.2 一階準線性連續流模式之有限差分模擬

經上述分析比較後，周志忠^[3]選出 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 等 3 個差分法，進行一階準線性模式的有限差分模擬並作比較，本研究加以回顧評析之。所謂的一階準線性連續流模式即是一般所稱的 LWR (Lighthill-Whitham-Richards) 模式。

1. 一階準線性連續流模式之有限差分式

一階準線性連續流(LWR)模式係由流體守恆式與表現車流特性的 $q = ku$ 關係式等兩公式組成。其流體守恆式如式 (14) 所示：

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

上式中的流量 $q(x,t)$ 與密度 $k(x,t)$ 間不是線性關係，例如周志忠^[3]以 Greenshields 車流模式設定 $q = ku$ 關係式，如式 (15) 所示，式中的 u_f 表自由流速度 (free flow speed)，而為免與差分式下標混淆，原壅塞密度 (jam density) k_j 特改寫成 k_{jam} 。

$$q(k) = u_f \times \left(1 - \frac{k}{k_{jam}}\right) \times k \quad (15)$$

將式 (15) 的 q - k 關係式代入式 (14) 中，可得到滿足 Greenshields 車流模式的一階準線性連續流模式，如式 (16) 所示。

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + u_f \left(1 - \frac{2k}{k_{jam}}\right) \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

在已知 $q = ku$ 關係下，求解式 (16) 一個式子，即可同時求得任一時間與空間的 q, k, u 值，這是 LWR 模式被稱為簡單連續流模式的原因。

欲近似求解上述 LWR 模式，可將之轉換成有限差分式。而以 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 差分法來模擬式 (16) 時，其 CFL 收斂條件皆為：

$$\left| \frac{\Delta t}{\Delta x} \times \left[u_f \times \left(1 - \frac{2k}{k_{jam}}\right) \right] \right| \leq 1 \quad (17)$$

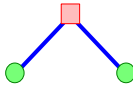
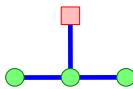
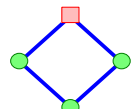
在式 (17) 中，密度值 (k) 係隨時間、位置而不同，致其 CFL 收斂條件會隨之改變，這會對有限差分法切割比的選取造成困擾。因此，實務上通常將式 (17) 改為一個跟密度值無關的收斂條件，如式(18)所示。

$$\left| \frac{\Delta t}{\Delta x} \times u_f \right| \leq 1 \quad (18)$$

式 (18) 的由來，主要係因 $(1-2k/k_{jam})$ 的絕對值小於等於 1 (對 Greenshields 模式而言)，故所有滿足式 (18) 的切割比 $\Delta t/\Delta x$ ，必滿足式 (17) 的收斂條件。事實上，對以 Greenshields 車流模式建立的一階準線性連續流模式而言，其最大波速，不論是車波或衝擊波，均小於等於 u_f ，因而滿足式 (18)，其連續流車波在 Δt 的行駛距離必落在在 Δx 內。

周志忠^[3] 依前述方法，推導得 LWR 模式適用的 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 等 3 種差分法，其格點選擇及有限差分式如表 3 所示。

表 3 3 種顯式有限差分法求解 LWR 連續流模式之方程式

有限差分法	格點選擇	有限差分式
Lax-F		$k_j^{n+1} = \frac{(k_{j+1}^n + k_{j-1}^n)}{2} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(u_f \times \left(1 - \frac{k_{j+1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j+1}^n - u_f \times \left(1 - \frac{k_{j-1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j-1}^n \right)$
Lax-W		$k_j^{n+1} = k_j^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(u_f \left(1 - \frac{k_{j+1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j+1}^n - u_f \left(1 - \frac{k_{j-1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j-1}^n \right) + \frac{1}{2} \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \left(u_f \left(1 - \frac{2k_j^n}{k_{jam}} \right) \right) \times \left\{ u_f \left(1 - \frac{k_{j+1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j+1}^n - 2u_f \left(1 - \frac{k_j^n}{k_{jam}} \right) \times k_j^n + u_f \left(1 - \frac{k_{j-1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j-1}^n \right\}$
Leapfrog		$k_j^{n+1} = k_j^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(u_f \times \left(1 - \frac{k_{j+1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j+1}^n - u_f \times \left(1 - \frac{k_{j-1}^n}{k_{jam}} \right) \times k_{j-1}^n \right)$

資料來源：周志忠^[3]。

2. 起始條件為不連續函數的模擬

周志忠^[3] 採與前例相同的條件 (起始與邊界條件如圖 4 所示)，以 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 等 3 種差分法來進行 LWR 模式的有限差分模擬。其設定自由車流速度 $u_f = 120$ 公里／小時，壅塞密度 $k_{jam} = 200$ 車／公里，並將 x 軸以 $\Delta x = 1$ 公里切割，將 t 軸以 $\Delta t = 1/120$ 小時切割，即 $\Delta x/\Delta t = 120$ 公里／小時 $= u_f$ ，使其切割比恰滿足 CFL 收斂條件。

周志忠^[3] 對所設計案例並未求得 LWR 模式的解析解，其近似解獲得的模擬結果，Lax-F 法密度的變化與事前的預測十分吻合，且明顯較為平滑；但 Lax-W 法在部分路段密度會先增後減，並發生最高密度值超過起始值的不合理狀況 (前方無車，密度應漸減)；Leapfrog 法則有震盪、不安定的情形發生，且最高密度亦超過起始值，結果更無法令人滿意。

3.3 一階準線性連續流模式的嚴苛交通案例模擬分析

由前節的回顧知，周志忠^[3]針對一階線性連續流模式，以各有限差分法進行模擬比較，從中評定出 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 等 3 種差分法較佳。其後針對一階準線性連續流模式（即 LWR 模式），以該 3 種較佳的差分法進行模擬分析，獲得 Lax-F 法最佳、Lax-W 法會發生局部不合理狀況、Leapfrog 法會發生不當震盪情形等的成果，殊屬難得。惟該研究所模擬的車流情境並不符實際（允許停止車隊倒車後退），亦未接受逆向衝擊波案例的嚴苛考驗，研析上略嫌不足。

基於以上考量，本研究針對 LWR 模式，以均勻到達流碰上停等車隊產生向上游回溯衝擊波，及長停等車隊起動向下游疏解等兩嚴苛的交通案例，進行補充分析，並儘可能求出解析解。至於採用的差分法，則援用周志忠^[3]的研究成果，僅考慮 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 等 3 種。

模擬的各項設定統一說明如下：LWR 模式係採用 Greenshields 的 $q = ku$ 關係式，其參數亦以接近實際交通狀況的方式設定，分別為自由流速度 $u_f = 80$ 公里／小時，壅塞密度 $k_{jam} = 120$ 車／公里（ $q_{max} = 2400$ 車／小時）。有限差分的時空切割，則均係將 x 軸以 $\Delta x = 1$ 公里切割，將 t 軸以 $\Delta t = 1/80$ 小時切割，即 $\Delta x / \Delta t = 80$ 公里／小時 $= u_f$ ，使其切割比恰滿足 CFL 收斂條件，由周志忠^[3]的分析知，此種切割方式可獲得最精確的近似結果。值得說明的是，周志忠^[3]設定 $\Delta t = 1/120$ 小時、自由流速度 120 公里／小時，似較符合高速公路車流行為。而本文在設計測試案例時，旨在探討號誌控制下，車輛停等及疏解之車流行為，故令 $\Delta t = 1/80$ 小時、自由流速度 $= 80$ 公里／小時，以符合平面道路（郊區公路）之行駛條件。因此，若研究者希望能搭配號誌時制，進行車流模擬，以避免在同一時階中發生時相轉移之情形，則等比例調降 Δx 及 Δt 即可。例如，可設定 $\Delta x = 1/3$ 公里及 $\Delta t = 1/240$ 小時 $= 15$ 秒，則自由流速度仍是 80 公里／小時，亦仍符合 CFL 收斂條件。

1. 產生向上游回溯衝擊波的有限差分模擬

考慮一均勻到達流碰上停等車隊產生向上游回溯衝擊波的問題。LWR 連續流模式，及不連續的起始條件與連續的邊界條件(如圖 5 所示)，分別設定如下：

$$\text{LWR 連續流模式: } \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + u_f \left(1 - \frac{2k}{k_{jam}} \right) \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = 0$$

$$\text{起始條件: } k(x,0) = \begin{cases} 30 & (\text{車/公里}); \quad \text{當 } 0 \leq x \leq 30 \quad (\text{公里}) \\ 120 & (\text{車/公里}); \quad \text{當 } 30 < x \leq 40 \quad (\text{公里}) \end{cases}$$

$$\text{邊界條件: } k(0,t) = 30 \text{ 車/公里, } k(40,t) = 120 \text{ 車/公里}$$

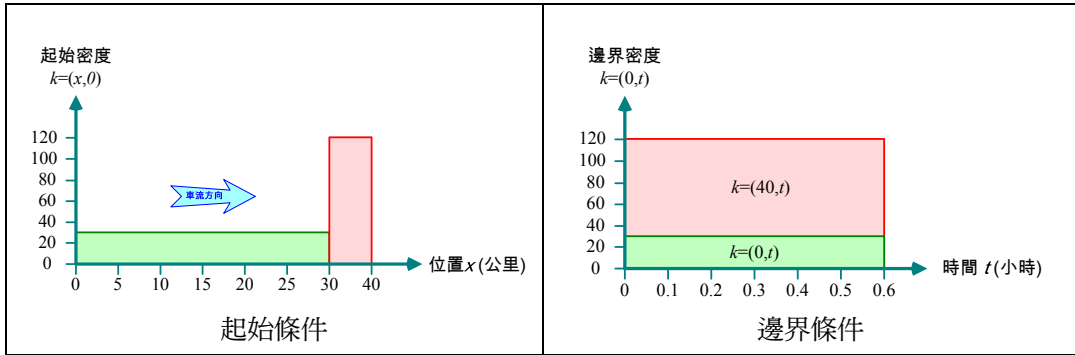


圖 5 LWR 連續流模式產生向上游回溯衝擊波的起始與邊界條件

解析解：

$$\text{Greenshields 車流模式：} q = ku = u_f k \left(1 - \frac{k}{k_{jam}} \right)$$

代入 $k = 30$ ，得 $q = 80 \times 30 \left(1 - \frac{30}{120} \right) = 1800$ ；代入 $k = 120$ ，得 $q = 0$ 。依 Lighthill 與 Whitman^[4] 的衝擊波公式，可得向上游回溯的衝擊波速為：

$$c_{lr} = \frac{q(k_r) - q(k_l)}{k_r - k_l} = \frac{0 - 1800}{120 - 30} = -20 \text{ 公里/小時}$$

亦即，解析解為：

$$k(x, t) = 120, \quad x \geq 30 - 20t$$

$$k(x, t) = 30, \quad x < 30 - 20t$$

數值近似解：

Leapfrog 法模擬結果如圖 6 所示。其在模擬不久即出現振盪，且隨時間增加而愈來愈大，呈現不安定的狀態。亦因為振盪不斷擴大，因此圖 6 僅呈現模擬 0~20/80 小時以內的狀況。

Lax-W 及 Lax-F 等 2 種有限差分法所模擬的密度在時空上的變化情形如圖 7 所示，由圖知：

- (1) Lax-W 及 Lax-F 兩法均能模擬出向上游回溯衝擊波。與解析解比較知，Lax-W 法的衝擊波速明顯過小（參閱鳥瞰圖）。例如經 1 小時（ $t = 80$ ），Lax-W 法模擬的衝擊波尾端僅由第 30 公里處向上游回溯至第 20 公里處，而由解析解知，此種狀態下的向上游回溯衝擊波，其波速為 -20 公里/小時，亦即經 1 小時，衝擊波的尾端應向上游回溯至第 10 公里處，Lax-W 法模擬出來的衝擊波速只有解析解的一半；

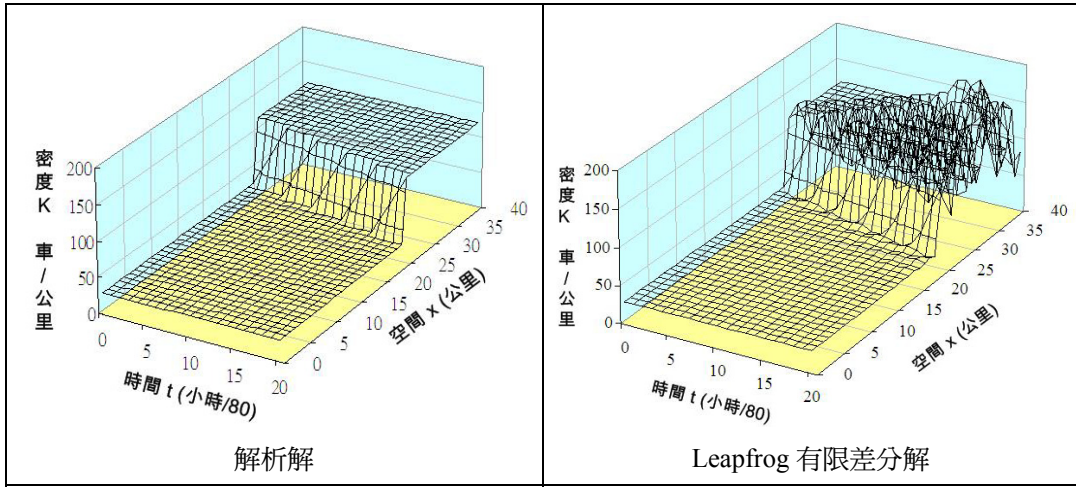


圖 6 Leapfrog 模擬 LWR 模式向後衝擊波的結果 (側面圖)

(2) Lax-F 法模擬結果與解析解一致。經 1 小時模擬，其向上游回溯衝擊波尾端亦由第 30 公里處向上游回溯至第 10 公里處，與解析解同。而由鳥瞰圖進一步比較 Lax-F 法與解析解的模擬結果知，二者明顯不同的是解析解的衝擊波沒有寬度，而 Lax-F 法則有寬度。惟必須說明者，並非 Lax-F 法比 LWR 理論模式更能反映駕駛者接近停等車隊的減速行為，使整體車流在衝擊波處呈現較符實際的漸變狀態，而是 Δx 、 Δt 切割不夠精細，致衝擊波行至某時空格位時，其密度需在 Δx 內平均而被平滑化所致。簡言之，任何有限差分法均不可能改良或改變原偏微分式的物理意義，有限差分法能作到的，最多只是儘可能的相似，如此而已。

2. 長停等車隊起動疏解的有限差分模擬

可以測試 LWR 連續流模式特性的另一個嚴苛的交通案例，即長停等車隊起動向下游疏解的行為。Zhang^[2] 指出 LWR 模式的解析解不是衝擊波 (shock wave)，便是稀釋波 (rarefaction wave)。本案例即是模擬極端的稀釋波狀況，相當於號誌路口停等車隊在燈號由紅燈變為綠燈時瞬間起動向下游疏解的現象。

本問題的起始條件與邊界條件如圖 8 所示，設定如下：

$$\text{LWR 連續流模式: } \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + u_f \left(1 - \frac{2k}{k_{jam}} \right) \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = 0$$

$$\text{起始條件: } k(x,0) = \begin{cases} 120 & (\text{車/公里}); \quad \text{當 } 0 \leq x \leq 20 \quad (\text{公里}) \\ 0 & (\text{車公/公里}); \quad \text{當 } 20 < x \leq 40 \quad (\text{公里}) \end{cases}$$

$$\text{邊界條件: } k(0,t) = 120 \text{ 車/公里 (壅塞密度)}$$

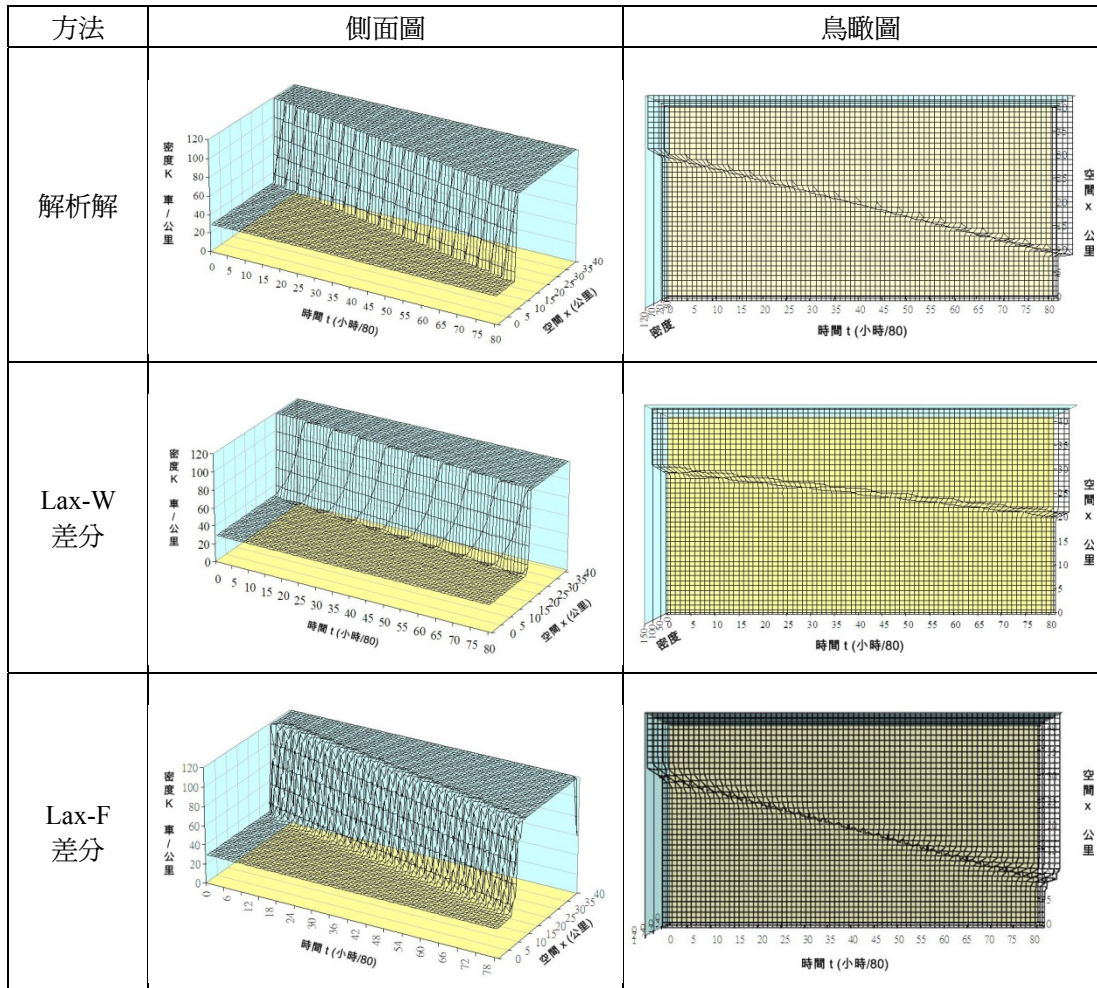


圖 7 Lax-W 及 Lax-F 法模擬 LWR 模式向上游回溯衝擊波的結果

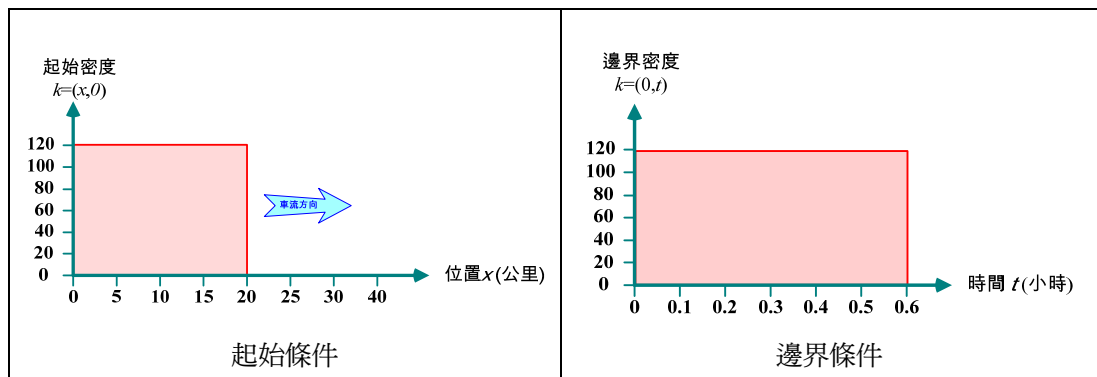


圖 8 LWR 連續流模式產生向前稀釋波的起始與邊界條件

值得說明者，本研究設計的案例與前述周志忠^[3]所舉的案例有相似的地方，亦有不同。相似處係起始條件的設定（均為停止的等候車隊），不同處則在於邊界條件的設定，本研究係令 $x=0$ 處恆維持壅塞密度，因密度不變，因此車隊尾部不會為降低密度而產生向上游倒車後退的狀況，符合實際。

解析解：

本案例周志忠^[3]並未求得解析解。如依 Lighthill 與 Whitman^[4]的衝擊波理論，要求得 LWR 模式稀釋波的解析解會相當困難。惟依 $q = ku$ 關係式並採用 Greenshields 車流模式，則其解析解將與 Richards^[5]的紙上剪力圖法所獲得者會完全相同。基此，本研究以 Richards^[5]的紙上剪力圖法來求算稀釋波的解析解，如圖 9 所示。圖中顯示 $t = 0$ 時，明渠因水閘門阻檔已達滿水位 ($d = 1$)， $t > 0$ 瞬間（水閘門打開瞬間），明渠水流會以自由流的速度（圖中 $e = u_f$ ）同時向前及向後發出起動波（圖中斜虛線），而在原水閘門處（相當於號誌路口停等車隊前緣的停止線處），其水位恆維持為 $d = 1/2$ （相當於密度 $= k_{jam}/2$ ），表示該處在水流向下游宣洩時係以最大流率 q_{max} 流動（直到車隊尾端經過）。亦即，其解析解為：

$$\begin{aligned} k(x,t) &= [1 - (x-20)/(u_f \times t)] \times k_{jam}/2, & u_f \times t - 20 \leq x \leq u_f \times t + 20 \\ k(x,t) &= 120, & x < u_f \times t - 20 \\ k(x,t) &= 0, & u_f \times t + 20 < x \end{aligned}$$

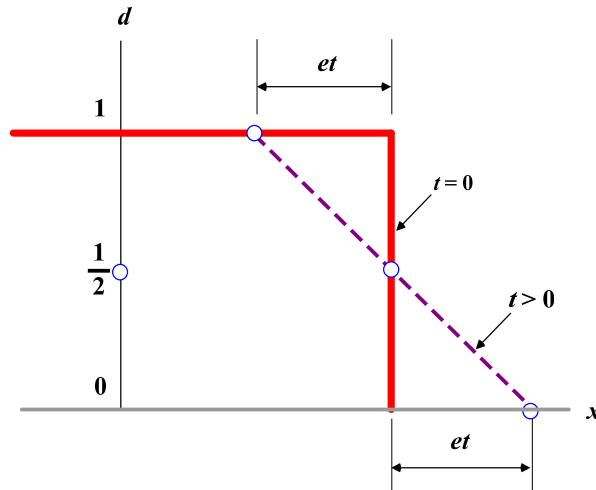


圖 9 Richards 紙上剪力圖的起動模化

數值近似解：

本案例經模擬發現，Leapfrog 及 Lax-W 兩種有限差分法的模擬結果不是誤差過大，便

是不安定，與周志忠^[3]的案例分析結果類似，故不再討論。Lax-F 有限差分法的模擬結果，密度在時空上的變化情形如圖 10 所示。由圖知，Lax-F 有限差分法對稀釋波的近似解與解析解相符，確可作為一階準線性連續流模式的近似解法，甚而可推廣用於高階連續流模式的近似解。

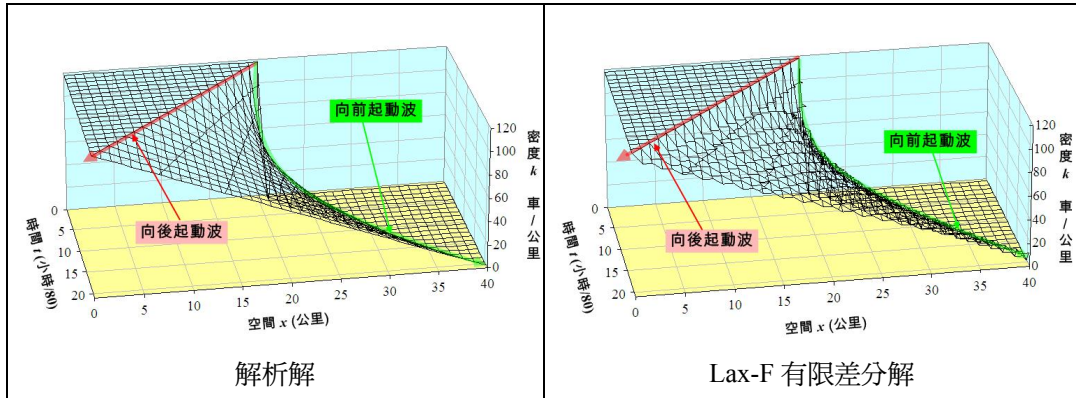


圖 10 Lax-F 模擬 LWR 模式向前起動稀釋波的模擬結果

四、高階連續流模式有限差分法之評析與發展

周志忠^[3]與莊國欽^[6]均曾提出用於高階連續流模式的有限差分方法，經本研究比較發現二者均係直接援用 Payne^[7]對其高階連續流模式 (Payne^[8]) 提出的有限差分式，僅內容稍有不同，本研究加以回顧評析之，並提出適用於高階連續流模式的有限差分式。為求簡化，本節各公式中， $q(x,t)$, $k(x,t)$, $u(x,t)$, $u_e(x,t)$ 均寫成 q, k, u, u_e 。

4.1 Payne 高階連續流模式與有限差分式

連續流模式在 Lighthill 與 Whitham^[4]提出一階準線性連續流模式後，一直未有新的發展，直到 Payne 於 1971 年提出高階連續流模式^[8]，1979 年更提出該模式的有限差分式^[7]，方開啟其後數 10 年的大量研究。國內對此課題亦有相關研究，本節一併回顧並評析之。

1. Payne 高階連續流模式

Payne^[8] 高階連續流模式如式(19)所示：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (19a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{\tau} - \frac{\mu}{\tau k} \frac{\partial k}{\partial x} \quad (19b)$$

$$q = k \times u \quad (19c)$$

其中： $u_e = u_e(k)$ 表均衡車速（為 k 的函數）； τ 為鬆弛時間； μ 為預期係數，公式為：

$$\mu = -\frac{1}{2} \frac{du_e}{dk} \quad (19d)$$

由式 (19) 知，高階連續流模式係由流體守恆式、加速度公式及車流模式 ($q = ku$) 聯立組成。其中，加速度公式一般稱為動量公式 (momentum equations)。經差分近似與整理後，上述 3 式可以密度、速度、流率等 3 個差分式展現。

值得說明者，LWR 模式係由密度及流率兩公式聯立組成，惟其兩公式中的速度皆須為均衡速度 ($u = u_e(k)$)，高階連續流模式的速度則不然 ($u \neq u_e(k)$)。除此不同外，LWR 模式代入 $q = ku_e$ 後，聯立式可整合成一個公式，只需求解一個密度變數，即可解得速度 ($u = u_e(k)$) 與流率 ($q = ku_e(k)$)；高階連續流模式則至少須聯立解出密度與速度兩式 (其 $u \neq u_e(k)$ ，為非均衡值)，流率則可藉恆等式 $q = ku$ 決定。

2. Payne 高階連續流模式的有限差分式

周志忠^[3] 與莊國欽^[6] 均援用 Payne^[7] 高階連續流模式的有限差分式，以模擬分析其案例，本節摘述如下：

(1) 周志忠^[3]

Payne^[7] 提出的差分方程組如下，周志忠^[3] 係直接援用之：

$$\begin{cases} k_j^{n+1} = k_j^n + \frac{\Delta t}{l_j \Delta x_j} (l_{j-1} q_j^{n+1} - l_j q_{j+1}^{n+1} + f_j^{ON, n+1} - f_j^{OFF, n+1}) \\ u_j^{n+1} = u_j^n - \Delta t \left\{ u_j^n \left[\frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{\Delta x_j} \right] + \frac{1}{\tau_j} \left[u_j^n - u_e(k_j^n) + \frac{\mu_j}{k_j^n} \frac{k_{j+1}^n - k_j^n}{\Delta x_j} \right] \right\} \\ q_{j+1}^{n+1} = k_j^n u_j^n \end{cases} \quad (20)$$

其中： l_j : 表在路段上第 j 區的车道數目

Δx_j : 表路段上第 j 區的道路長度

k_j^n : 表當時間為 $t_0 + n\Delta t$ 時，路段上第 j 區的平均密度

u_j^n : 表當時間為 $t_0 + n\Delta t$ 時，路段上第 j 區的空間平均速度

q_j^n : 表在 $[t_0 + (n-1)\Delta t, t_0 + n\Delta t]$ 時間區間內，通過 x_j 點的流量

$f_j^{ON,n}$: 表在 $[t_0+(n-1)\Delta t, t_0+n\Delta t]$ 時間區間內, 車輛在 x_j 點的上匝道流量

$f_j^{OFF,n}$: 表在 $[t_0+(n-1)\Delta t, t_0+n\Delta t]$ 時間區間內, 車輛在 x_j 點的下匝道流量

如令為單車道路段, 所有空間的切割寬度均同, 即 $\Delta x = \Delta x_j$, 且無流入與流源 (為封閉路段, $f_j^{ON}, f_j^{OFF} = 0$), 各 x_j 的 τ, μ 均同 (為常數), 並將流量 $q = ku$ 代入密度公式, 則上式可改寫成:

$$k_j^{n+1} = k_j^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (k_{j-1}^n u_{j-1}^n - k_j^n u_j^n) \quad (21a)$$

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [u_j^n (u_j^n - u_{j-1}^n)] - \frac{\Delta t}{\tau} [u_j^n - u_e(k_j^n)] - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\mu}{\tau} \frac{k_{j+1}^n - k_j^n}{k_j^n} \quad (21b)$$

$$q_j^{n+1} = k_{j-1}^n \times u_{j-1}^n \quad (21c)$$

(2) 莊國欽^[6]

莊國欽^[6] 對高階連續流模式所採用的有限差分式為:

$$k_j^{n+1} = k_j^n + \Delta t \frac{q_j^{n+1} - q_{j+1}^{n+1}}{n_j(x_{j+1} - x_j)} + \Delta t \frac{r_j^{n+1} - s_j^{n+1}}{n_j(x_{j+1} - x_j)} \quad (22a)$$

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \Delta t \frac{u_j^n (u_j^n - u_{j-1}^n)}{(x_{j+1} - x_{j-1})/2} - \frac{\Delta t}{\tau} [u_j^n - u_e(k_j^n)] - \mu \frac{\Delta t}{\tau} \frac{k_{j+1}^n - k_j^n}{k_j^n (x_{j+2} - x_j)} \quad (22b)$$

$$q_j^{n+1} = n_{j-1} \times k_{j-1}^n \times u_{j-1}^n \quad (22c)$$

其中: n_j = 路段上第 j 區的车道數, 其餘變數與式 (20) 同

同樣的, 如令為無流入與流源 ($r, s = 0$) 的單車道路段 ($n_j = 1$), 所有空間的切割寬度均同, 即 $\Delta x = (x_{j+2} - x_j)/2 = (x_{j+1} - x_{j-1})/2 = x_{j+1} - x_j$, 並將式 (22c) 代入式 (22a), 則式 (22) 可改寫成:

$$k_j^{n+1} = k_j^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_{j-1}^n k_{j-1}^n - u_j^n k_j^n) \quad (23a)$$

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [u_j^n (u_j^n - u_{j-1}^n)] - \frac{\Delta t}{\tau} [u_j^n - u_e(k_j^n)] - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\mu}{2\tau} \frac{k_{j+1}^n - k_j^n}{k_j^n} \quad (23b)$$

$$q_j^{n+1} = k_{j-1}^n \times u_{j-1}^n \quad (23c)$$

3. 評論

比較周志忠^[3]與莊國欽^[6]的有限差分式可發現，該兩研究均係直接援用 Payne^[7]的有限差分式。例如密度、流率公式二者完全相同；速度公式除右側最後一項的分母二者不同外，其餘亦均相同。莊國欽^[6]的有限差分式在該項多除以 2 而周志忠^[2]則無，惟查式 (19b) 原 Payne^[8]高階連續流模式，該項看不出有多除以 2 的理由。將多除以 2 的作法取消後，二者的速度公式即完全相同。

了解 Payne^[7]、周志忠^[3]與莊國欽^[6]三研究的有限差分式係完全相同後，如再進一步分析，可發現該有限差分法有嚴重的問題。比較表 1 知，式 (21a) 及式 (23a) 的密度差分式係屬 FTBS 法 (k_j^{n+1} 參考 k_j^n, k_{j-1}^n)，速度差分式係屬 FTCS 法 (u_j^{n+1} 參考 $u_{j+1}^n, u_j^n, u_{j-1}^n$)，流率公式則類似 FTBS 法但更為簡化 (q_j^{n+1} 參考 q_{j-1}^n)。而由前節周志忠^[3]的分析說明與模擬結果知，FTCS 法根本就不安定，FTBS 法須滿足波速為正的條件方會收斂，而 LWR 連續流模式的車波可能向前傳遞 (波速為正) 亦可能向後傳遞 (波速為負)，致 FTBS 不適用。

為能確定 FTBS 法不適用連續流的差分近似，本研究特再針對 LWR 模式產生向上游回溯衝擊波的狀況，以 FTBS 法進行模擬，結果模擬僅進行少數個 Δt ，在車隊尾端 (衝擊波界面) 所經之處即發生嚴重且振幅甚大的振盪，可確定 FTBS 法對 LWR 模式不適用。

由於高階連續流模式包含 LWR 模式，因此一個不適用於 LWR 模式的有限差分法，竟能用於高階模式而不發生任何問題，實在不合理。本研究推測，這恐係相關研究在應用時設定的模擬環境根本不會產生車波為負或衝擊波所致。經查周志忠^[3]的研究，在採 Greenshields 車流模式，並設 k_{jam} 為 200 車／公里下，其模擬的兩種狀態均設定起始密度為 50 車／公里；再查莊國欽^[6]的研究，其分析中山高速公路臺北都會區路段及建國南北路 4 種情境，所設定的密度均低於其定義的每車道 $k_{jam} = 120$ 車／公里的一半。此兩研究模擬的車流均係處於車波均為正的低密度狀況，致其有限差分式採用 FTBS 法並沒有出現問題。

經由以上的分析知，FTBS 及 FTCS 兩有限差分法對 LWR 模式不適用，而高階連續流模式均包含 LWR 模式，當然亦不適合採用 FTBS 及 FTCS 法。國內相關研究一時不查，遂援用過去 Payne^[7]的錯誤作法，實有待改進。

4.2 高階連續流模式的 Lax-F 有限差分式

由 4.1 節的分析知，高階連續流模式不能採 FTBS 及 FTCS 有限差分法；由 3.3 節的分析知，本研究已確認 Lax-F 有限差分法對 LWR 模式有甚佳的表現。基此，本研究以 Lax-F 法取代過去誤用的 FTBS、FTCS 法來近似求解高階連續流模式。

由於高階連續流模式過於複雜，甚難獲得解析解，故僅能藉有限差分的近似解來加以評析，惟此種結果混合了高階連續流模式與有限差分式二者的特性，致案例分析如出現不

合理的現象，可能並非採用的有限差分法不適用，而係原連續流模式本身的缺陷使然。基此，對於有限差分法近似的對象，本研究除沿用 Payne^[8] 高階連續流模式外，特加入 Zhang^[9] 模式來加以對比。

高階連續流模式的差分式係包含密度、速度與流率等三式的聯立式。由於各種高階連續流模式的密度公式與流率公式均相同，故本研究僅在速度公式時才區分 Payne^[8] 及 Zhang^[9] 模式。茲分述如下：

密度：

$$\text{流體守恆式：} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (24a)$$

$$\text{Lax-F 差分式：} k_j^{n+1} = \frac{(k_{j+1}^n + k_{j-1}^n)}{2} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (u_{j+1}^n k_{j+1}^n - u_{j-1}^n k_{j-1}^n) \quad (24b)$$

流率：

$$\text{車流模式：} q = k \times u \quad (25a)$$

$$\text{Lax-F 差分式：} q_j^{n+1} = u_j^{n+1} \times k_j^{n+1} \quad (25b)$$

速度：

Payne^[8] 模式 (即將式 (19d) 代入 (19b)) 與 Zhang^[9] 模式分別如下式：

$$\text{Payne}^{[8]} \text{ 模式：} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{\tau} - \frac{1}{\tau k} \left(-\frac{1}{2} \frac{du_e(k)}{dk} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \quad (26a)$$

$$\text{Zhang}^{[9]} \text{ 模式：} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{\tau} - k \left(\frac{du_e(k)}{dk} \right)^2 \frac{\partial k}{\partial x} \quad (26b)$$

Payne^[8] 模式與 Zhang^[9] 模式的速度差分式如下：

Payne^[8] 模式的 Lax-F 速度差分式：

$$\begin{aligned} u_j^{n+1} = & \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2} \\ & + \frac{\Delta t}{\tau} \left[\frac{u_e(k_{j+1}^n) + u_e(k_{j-1}^n)}{2} - \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} \right] \end{aligned}$$

$$-\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{(-w)}{2\tau} \frac{2}{k_{j+1}^n + k_{j-1}^n} \frac{k_{j+1}^n - k_{j-1}^n}{2} \quad (27a)$$

Zhang^[9] 模式的 Lax-F 速度差分式：

$$\begin{aligned} u_j^{n+1} = & \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2} \\ & + \frac{\Delta t}{\tau} \left[\frac{u_e(k_{j+1}^n) + u_e(k_{j-1}^n)}{2} - \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} \right] \\ & - \frac{\Delta t}{\Delta x} \times w^2 \times \frac{k_{j+1}^n + k_{j-1}^n}{2} \frac{k_{j+1}^n - k_{j-1}^n}{2} \end{aligned} \quad (27b)$$

其中， u_e 表均衡車速， u_f 表自由流車速， τ 為鬆弛時間， $w = du_e/dk$ 。

值得說明者，式 (24b) 與表 3 中 LWR 模式的 Lax-F 有限差分式並不相同，式 (24b) 右側第二項中的 u (含 u_{j+1} 與 u_{j-1})，在表 3 中係直接代入 $u_e = u_f(1-k/k_{jam})$ ，而對高階連續流模式而言，其模化的車流一般係處於非均衡狀態，達均衡反而是特例，致速度通常不是均衡速度，因而式 (24b) 係代入非均衡速度 u 。事實上，高階連續流每一時空格位的速度與密度值，係分由式 (24b) 的 u 與式 (27a,b) 的 k 兩公式相互參考求取，無法如 LWR 模式般，一個公式即可求得所有 q, k, u 值。

比較式 (24) 至式 (27) 與式 (19) 知，採 Lax-F 有限差分 (暫忽略時間上標 n)，本研究係建議原偏微分式中，凡 k, u, q 均分別近似成 $(k_{j+1} + k_{j-1})/2$ 、 $(u_{j+1} + u_{j-1})/2$ 、 $(u_{j+1}k_{j+1} + u_{j-1}k_{j-1})/2$ ，凡 $\partial k, \partial u, \partial q$ 均分別近似成 $(k_{j+1} - k_{j-1})/2$ 、 $(u_{j+1} - u_{j-1})/2$ 、 $(u_{j+1}k_{j+1} - u_{j-1}k_{j-1})/2$ 。

4.3 高階連續流模式的 Lax-F 有限差分模擬

為了解 Lax-F 有限差分法是否適用高階連續流模式的近似解，本研究依第三節的作法，分別模擬車流產生向上游回溯衝擊波的狀況，及長停等車隊起動向下游疏解的狀況，並與 LWR 模式的解析解及差分近似解作比較。

1. 參數與模擬環境設定

為利於比較，本研究統一設定各參數及模擬環境如下：

- (1) 均衡車速係採 Greenshields 的模式，即 $u_e = u_f(1 - k/k_{jam})$ ，其參數分別為：自由流速度 $u_f = 80$ 公里/小時，壅塞密度 $k_{jam} = 120$ 車/公里 (可計算得 $q_{max} = 2400$ 車/小時)；

- (2) 有限差分的時空切割，均係將 x 軸以 $\Delta x = 1$ 公里切割，將 t 軸以 $\Delta t = 1/80$ 小時切割，即 $\Delta x / \Delta t = 80$ 公里／小時 $= u_f$ ，使其切割比滿足 CFL 收斂條件；
- (3) 參數 $w = du_e/dk = -u_f/k_{jam} = -80/120 = -2/3$ 公里²／(車－小時)；
- (4) 參數 τ 沿用周志忠^[3]的作法，即 $\tau = k_\tau \Delta x$ ，且令 $k_\tau = 46$ 秒／公尺，相當於 78 公里／小時的倒數，本研究因設定 $u_f = 80$ 公里／小時，故令 $k_\tau = 45$ 秒／公尺，又因本研究設定 $\Delta x = 1$ 公里，故 $\tau = k_\tau \Delta x = 45$ 秒 $= 1/80$ 小時 $= \Delta t$ 。

依上述設定，Payne^[8] 與 Zhang^[9] 高階連續流模式的速度差分式可大幅簡化（單位均以公里、小時計）如下：

Payne^[8] 模式簡化後的速度差分式：

$$u_j^{n+1} = \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} - \frac{(u_{j+1}^n)^2 - (u_{j-1}^n)^2}{320} + \left[\frac{u_e(k_{j+1}^n) + u_e(k_{j-1}^n)}{2} - \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} \right] - \frac{1}{3} \frac{k_{j+1}^n - k_{j-1}^n}{k_{j+1}^n + k_{j-1}^n} \quad (28a)$$

Zhang^[9] 模式簡化後的速度差分式：

$$u_j^{n+1} = \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} - \frac{(u_{j+1}^n)^2 - (u_{j-1}^n)^2}{320} + \left[\frac{u_e(k_{j+1}^n) + u_e(k_{j-1}^n)}{2} - \frac{u_{j+1}^n + u_{j-1}^n}{2} \right] - \frac{(k_{j+1}^n)^2 - (k_{j-1}^n)^2}{720} \quad (28b)$$

2. 產生向上游回溯衝擊波的有限差分模擬

本問題係均勻到達車流碰上停等車隊產生向上游回溯衝擊波的狀況，其起始條件與邊界條件同圖 5，設定如下：

$$\begin{aligned} \text{起始條件：} \quad k(x,0) &= \begin{cases} 120 & (\text{車／公里})；\text{當 } x \geq 30 \text{ (公里)} \\ 30 & (\text{車／公里})；\text{當 } x < 30 \text{ (公里)} \end{cases} \\ u(x,0) &= \begin{cases} 0 & (\text{公里／小時})；\text{當 } x \geq 30 \text{ (公里)} \\ 60 & (\text{公里／小時})；\text{當 } x < 30 \text{ (公里)} \end{cases} \\ q(x,0) &= \begin{cases} 0 & (\text{車／小時})；\text{當 } x \geq 30 \text{ (公里)} \\ 1800 & (\text{車／小時})；\text{當 } x < 30 \text{ (公里)} \end{cases} \end{aligned}$$

邊界條件： $k(0,t) = 30$ 車／公里， $u(0,t) = 60$ 公里／小時， $q(0,t) = 1800$ 車／小時

本問題模擬 80 個 Δt (1 小時)，為利比較，本研究同樣以 LWR 模式的解析解及 Lax-F 有限差分近似解為基準，比較兩高階連續流模式的 Lax-F 近似解，如圖 11 所示。由圖知，Payne^[8] 模式在模化向上游回溯衝擊波的狀況時會在衝擊波界面處明顯發生振盪，模擬過程中亦發生密度與流率大於最大值，及速度出現負值等狀況；Zhang^[9] 模式表現甚佳，不但沒有出現明顯振盪，與 LWR 模式差分近似的結果相當接近，最大的不同處在於車流停止範圍，包括起始前原即停止的車隊內部及之後被回溯衝擊波掃過的上游路段，Zhang^[9] 模式會不斷出現些微擾動，LWR 模式則不會。

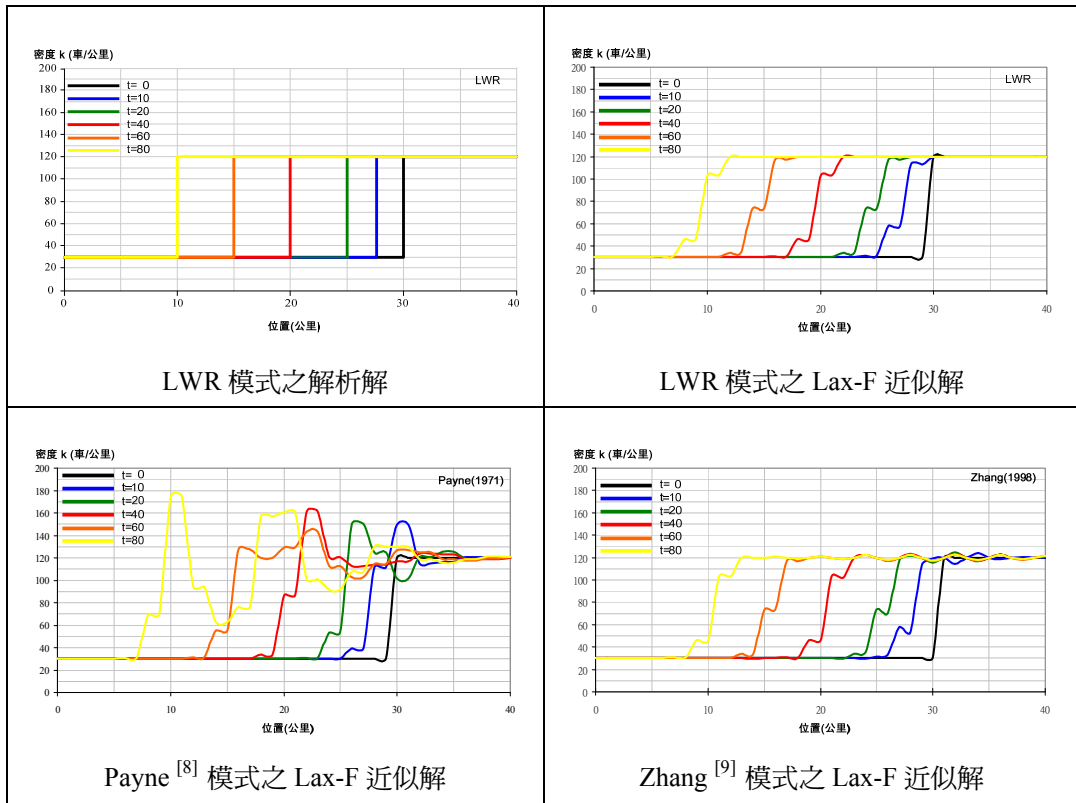


圖 11 高階連續流模式產生向上游回溯衝擊波的模擬結果

3. 長停等車隊起動向下游疏散的有限差分模擬

本問題係長停等車隊起動向下游疏散的狀況，其起始條件與邊界條件可參照圖 8，設定如下：

$$\text{起始條件： } k(x,0) = \begin{cases} 120 & (\text{車/公里}); \text{ 當 } x \leq 50 \text{ (公里)} \\ 0 & (\text{車/公里}); \text{ 當 } x > 50 \text{ (公里)} \end{cases}$$

$$u(x,0) = \begin{cases} 0 & (\text{公里/小時}); \text{ 當 } x \leq 50 \text{ (公里)} \\ 80 & (\text{公里/小時}); \text{ 當 } x > 50 \text{ (公里)} \end{cases}$$

$$q(x,0) = \begin{cases} 0 & (\text{車/小時}); \text{ 當 } x \leq 50 \text{ (公里)} \\ 0 & (\text{車/小時}); \text{ 當 } x > 50 \text{ (公里)} \end{cases}$$

邊界條件： $k(0,t) = 120$ 車/公里， $u(0,t) = 0$ 公里/小時， $q(0,t) = 0$ 車/小時

本問題計模擬 50 個 Δt (5/8 小時)，為利比較，本研究同樣以 LWR 模式的解析解及 Lax-F 差分近似解為基準，比較兩高階連續流模式的 Lax-F 近似解，如圖 12 所示。由圖知，Payne^[8] 模式在向前（下游）疏解時出現大幅滾動式振盪；向後起動波並非呈解析解（紙上剪力圖）的直線，而是曲線。惟在原停等車隊前緣處，起動後其密度維持 $k_{jam}/2$ 不變，與解析解同；

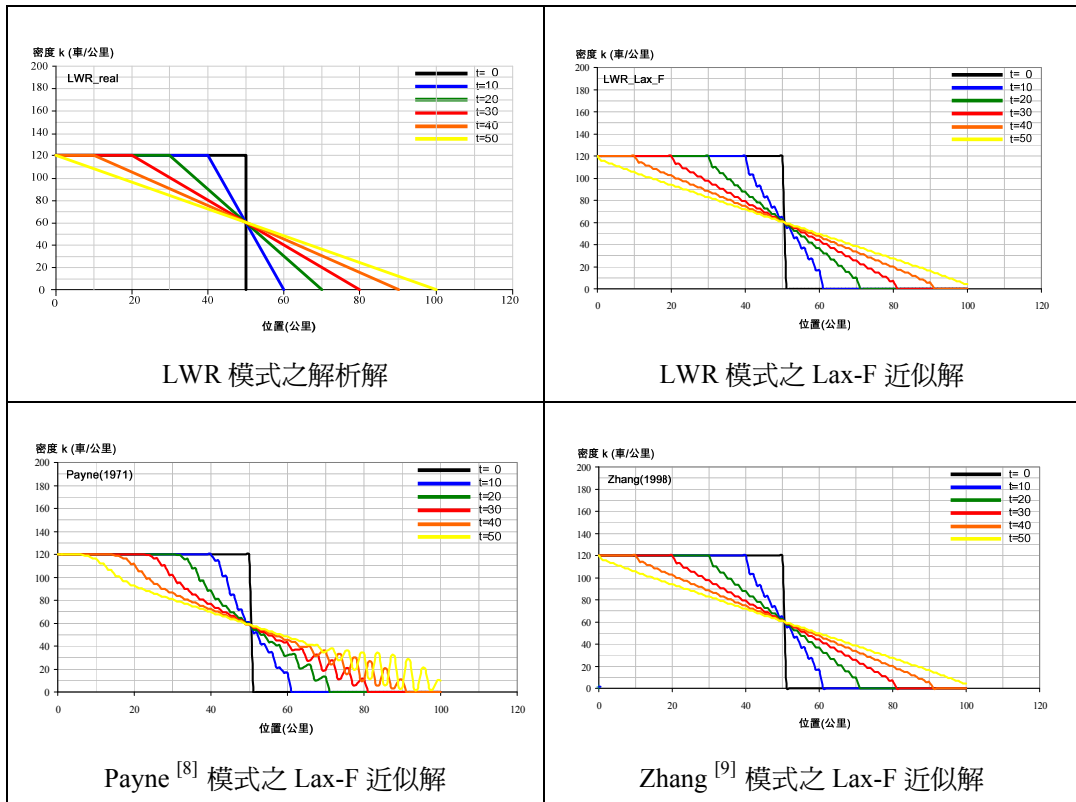


圖 12 高階連續流模式長停等車隊起動向前疏解的模擬結果

Zhang^[9] 模式停等車隊起動疏解行為，差分近似的結果出乎意料的與 LWR 模式的差分近似結果完全相同（不只圖形，連數值亦完全相同），包括其向上下游的起動波均為直線，且在原停等車隊前緣處，起動後其密度亦維持 $k_{jam}/2$ 不變等。Zhang^[9] 雖曾說明該模式在車流達均衡時可完全退化成 LWR 模式，惟並未提及該模式的停等車隊起動疏解行為會與 LWR 模式完全相同，此為本研究的重大發現，亦充份說明本研究提出 Lax-F 差分法，確適用高階連續流模式。

五、結論與建議

連續流車流模式係雙曲線型偏微分方程式，應用上一般係藉有限差分法以近似求解之，其顯式有限差分法計有 FTFS、FTBS、FTCS、Lax-F、Lax-W、Leapfrog 及 Beam-Warming 等。周志忠^[3] 以各種差分法對一階線性連續流模式進行模擬評析，結果發現只有 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 等 3 法較佳。FTBS 法與 Beam-Warming 法雖在個案模擬上表現尚佳，惟因須滿足波速為正的 CFL 收斂條件，故對車波可能向前或向後傳遞（波速為正或負）的一階準線性連續流模式（LWR 模式）並不適用。本研究延續此方面的研究，進行各種有限差分方法在一階及高階連續流模式的適用性比較，分別獲致以下結論：

（一）一階準線性連續流

本研究以 Lax-F、Lax-W 及 Leapfrog 等 3 種差分方法，以會產生向上游回溯衝擊波及長停等車隊起動向下游疏解等嚴苛的交通案例，針對一階準線性連續流（LWR）模式進行深入分析，結果發現 Lax-W 及 Leapfrog 兩種有限差分法不是誤差過大就是不安定，並不適用；而 Lax-F 有限差分法與解析解相當吻合，其差分近似結果，衝擊波尾端向上游回溯與解析解幾乎完全相同，車隊起動向前疏解亦相當接近解析解，說明 Lax-F 有限差分法確實適用於 LWR 模式。

（二）高階連續流模式

1. 國內外相關研究錯用高階連續流模式的有限差分法：國外 Payne^[7] 針對其 1971 年建立的高階連續流模式曾提出有限差分式；國內周志忠^[3] 與莊國欽^[6] 曾直接援用 Payne^[7] 的有限差分式進行案例分析。該三研究採用的有限差分式，其密度差分式係屬 FTBS 法，速度差分式係屬 FTCS 法，流率差分式則類似 FTBS 法但較為簡化。而經周志忠^[3] 分析已確知，FTCS 法即便是最簡單的一階線性連續流模式已不適用，更遑論一階準線性連續流模式（即 LWR 模式）；FTBS 法因須滿足波速為正的條件方會收斂，而 LWR 模式的波速為正或負均有可能，致 FTBS 法對 LWR 模式亦不適用。亦即，FTBS 及 FTCS 有限差分法更不適用於高階連續流模式。國內相關研究在應用時因設定的模擬環境均侷限為非壅塞交通，根本不會產生波速為負或衝擊波的狀況，使模擬沒有出現明顯振盪的不安

定結果，以致一時不查，逕援用過去 Payne^[7] 的錯誤作法而不自知，實宜更加謹慎。

2. 提出適用於高階連續流模式的有限差分式：以有限差分式來近似及模擬偏微分方程式，其結果同時混合二者的特性，單由模擬結果來判定有限差分法的適用與否，極可能會產生誤判。本研究採用兩種安排來避免誤判，即以 LWR 模式的解析解與其有限差分近似解作為比較基準，以及採不只一個高階連續流模式同時進行比較。經以 Lax-F 法取代過去誤用的 FTBS 及 FTCS 法，進行 Payne^[8] 與 Zhang^[9] 兩高階連續流模式的模擬比較，結果發現：

- (1) Payne^[8] 模式以 Lax-F 有限差分式模擬向上游回溯衝擊波的狀況時會在衝擊波界面處明顯發生振盪，且會發生密度與流率大於最大值，及速度出現負值等不合理現象；模擬停等車隊起動向下游疏解時則出現大幅滾動式振盪，且向後起動波係呈曲線而非應有的直線。惟這些不合理現象均源自 Payne^[8] 模式本身特性所使然，並非 Lax-F 有限差分法所造成。但如僅做此項分析，在未掌握 Payne^[8] 模式特性前，可能會誤以為係有限差分法表現不佳所致。
- (2) Zhang^[9] 模式以 Lax-F 有限差分式模擬向上游回溯衝擊波的狀況時沒有出現明顯振盪，與 LWR 模式的模擬結果相當接近；其停等車隊起動向下游疏解的差分模擬結果出乎意料的與 LWR 模式的差分模擬結果完全相同（不只圖形，連數值亦完全相同），此一特性居然連 Zhang^[9] 自己亦未提及。
- (3) 高階連續流的有限差分式係一組聯立方程式，其每一時空的密度與速度值需在密度與速度兩差分式間相互對照來加以求算；LWR 模式則只需一個差分式即可求得每一時空的密度與速度值。此兩種連續流模式有限差分式的基本結構明顯不同，但 Zhang^[9] 模式模擬停等車隊起動向下游疏解的結果竟完全相同，模擬向上游回溯衝擊波的結果亦相當接近，此點除說明 Zhang^[9] 模式之優良特性外，更證明 Lax-F 有限差分法，確實適用於高階連續流模式的近似解方法。

本研究雖已研發出高階連續流模式有效的差分近似解法，惟限於時間，仍有許多後續工作值得繼續進行，包括：

1. 關於高階連續流模式 Lax-F 有限差分式的作法：本研究針對高階連續流模式提出 Lax-F 有限差分法，其特色是，不論密度公式或速度公式均採完全相同的 Lax-F 法架構，亦即係偏微分項者，其差分式均為 $(U_{j+1}-U_{j-1})/2$ 的型式，係變數項者，其差分式均為 $(U_{j+1}+U_{j-1})/2$ 的型式，流率公式則直接以恆等式設定 $(q^{n+1}=k^{n+1}\times u^{n+1})$ 。這些作法狀似微不足道，卻深深影響近似差分式的安定與合理，建議相關研究採用。
2. 關於有限差分式的參數設定：本研究對高階連續流模式鬆弛時間 τ ，係沿用周志忠^[3] 的作法，再稍作修改而設定為 $\tau = \Delta t$ 。由於本研究在有限差分模擬時設定的 $\Delta t = 1/80$ 小時 = 45 秒，如此長的鬆弛時間，是否合理，實值得再深入探究。建議後續研究嘗試改變參數 τ 的設定值，進行比較分析。

3. 關於高階連續流模式的選用：由 Payne^[8] 與 Zhang^[9] 兩高階連續流模式的個案模擬分析知，不同的高階連續流模式特性差異甚大。事實上高階連續流模式自 Payne^[8] 首度提出後，歷經數 10 年的改良發展，已有許多不同的版本或模型。建議後續可利用 Lax-F 有限差分法，針對各種高階連續流模式，不論是原型或改良的，進行廣泛的模擬分析，以了解各模式的特性，以供相關研究擇優採用。
4. 關於交通案例的選用：為避免因交通個案設計不當（侷限於非壅塞交通），致誤用有限差分法，甚而誤用不良的高階連續流模式而不自知。本研究建議，任何評析車流模式特性的研究，均應包含「會產生向上游回溯衝擊波」的案例，這種會令車流由行進狀態轉變為停止狀態的嚴苛交通案例，可作為評析車流模式良窳的共通基準。
5. 差分方法之基本精神是利用自身格點及相鄰空間格點在此一時階之密度值，用以近似求解該格點下一時階之密度值。本文探討之 7 種方法中，恰僅 Lax-F 方法完全不參考自身格點，而僅參考空間前後兩格點之密度值。其表現卻又是 7 種方法中最好者。推測其原因可能是因為車流之空間連續特性所致。空間某一格點之密度值應與前後兩空間格點間具有密不可分的關係。但密度值瞬時萬變，若參考該格點此一時階之密度值，反而降低其績效。不過，真正原因為何仍有待後續研究進一步加以研析。
6. 後續研究若希望能搭配號誌時制進行車流模擬，並避免在同一時階內發生號誌時相轉移之情形，則可等比例調降 Δx 及 Δt ，以符合當地自由流速度及 CFL 收斂條件。

參考文獻

1. LeVeque, R. J., *Finite Difference Methods for Differential Equations*, University of Washington, Washington, DC, 2005.
2. Zhang, H. M., "Continuum Flow Models", *Revised Chapter 5 in Revised Monograph on Traffic Flow Theory*, United States Department of Transportation Federal Highway Administration, 2012.
3. 周志忠，「車流波動方程式數值解法之研究」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 86 年。
4. Lighthill, M. J. and Whitham, G. B., "On Kinematics Waves II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Road", *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 229, 1955, pp. 317-345.
5. Richards, P. I., "Shock Waves on the Highway", *Operations Research*, Vol. 4, No.1, 1956, pp. 42-51.
6. 莊國欽，「非線性控制於高、快速道路整合匝道儀控之研究」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 90 年。
7. Payne, H. J., "FREFLO : A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic", *Transportation Research Record*, No. 722, 1979, pp. 68-77.
8. Payne, H. J., "Models of Freeway Traffic and Control", *Simulation Council Proc.* 28, Vol. 1,

1971, pp. 51-61.

9. Zhang, H. M., "A Theory of Nonequilibrium Traffic Flow", *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No.7, 1998, pp. 485-498.

運輸計劃季刊稿約

- 一、本刊歡迎國內外有關運輸之工程、經濟、規劃、管理、資訊等未經刊登於其他刊物之中、英文研究論著；已刊登者，雖使用語文不同、題目更改、或內文經改寫，均不接受投稿。已於國內外會議發表之論文，不論有無收錄於其會議資料中，除經大幅修改者外，均請作者提附該會議主辦者之同意書，並於論文中加註說明。論文如屬接受公私機關團體委託研究出版之報告書之全文或一部分或經重新編稿者，作者應提附該委託單位之同意書，並於論文中加註說明。交通部運輸研究所同仁擬投稿件如屬所內已結案或未結案之計畫者，應依照本所出版品管理作業要點第十一條之規定辦理。凡由本刊主動邀稿者，不受上述各項限制。
- 二、為便於一次刊出，來稿以二萬五千字為限，其中應包括三百字以內之摘要一篇及三至五個關鍵詞，並請註明姓名、身分證字號、戶籍地址、服務單位、職稱、聯絡地址及電話。
- 三、中文稿之題目、作者姓名、摘要及關鍵詞均請附英文。文稿中需註釋處，請標明上標無括號序碼，並請從題目、作者介紹開始，往下連續編號，再於引註當頁下方加橫線排印註釋。文稿中之數學式，函數請排正體字，變數請排斜體字。圖及表中之中文字請排細明體，英文字請排 Times New Roman 體，圖原則上不加框，表之框線均採細線。
- 四、參考文獻請按出現序排列，文稿中提及時請標明上標加括號序碼，參考文獻必須是文稿所引用者始得列入，且參考文獻內容必須依本刊規定格式完整無缺列入。參考文獻中，英文之逗點、句點均採英國式排於引號外。本刊參考文獻編排規定格式及範例如下：
 - 1.期刊論文：作者姓名（姓在前名在後），論文篇名，期刊名稱，卷期，出版日期，起迄頁碼。
中文例：林楨家、李家儂，「用於都市地區活動分布之灰色 TOD 規劃模式」，**運輸計劃季刊**，第 34 卷，第 1 期，民國 94 年，頁 63-91。
英文例：Cervero, R. and Kockelman, K., "Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design", *Transportation Research A*, Vol. 2, No. 3, 1997, pp.199-219.
 - 2.圖書單行本：作者姓名，書名，版次（無則免列），出版社，出版地，出版日期。
中文例：黃芳銘，**結構方程模式：理論與應用**，第 5 版，五南圖書出版股份有限公司，臺北，民國 96 年。
英文例：Nunnally, J. C., *Psychometric Theory*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1978.
 - 3.研討會論文：作者姓名，論文篇名，研討會/論文集名稱，冊別（無則免列），舉辦單位，出版日期，起迄頁碼。
中文例：溫傑華、藍武王、趙國婷，「國道客運車輛下層設置座位或臥鋪接受之研究」，中華民國運輸學會第 16 屆學術論文研討會論文集，第 1 冊，中華民國運輸學會，民國 90 年，頁 221-230。
英文例：Eberhart, R. C. and Kennedy, J., "Particle Swarm Optimization", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. IV, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995, pp.1942-1948.
 - 4.博、碩士論文：作者姓名，論文名稱，學校系所，出版日期。
範 例：陳勝智，「以大眾運輸導向發展理念進行車站地區都市再發展之探討」，成功大學都市計劃研究所碩士論文，民國 90 年。
 - 5.政府出版圖書/規範：政府機關名，圖書/規範名，出版日期。
範 例：交通部統計處，**中華民國交通統計年鑑**，民國 94 年。
 - 6.網頁資料：作者姓名/網頁機關名，文章篇名/連結主題名，網址，網頁下載日期。
範 例：交通部運輸研究所，「全國路況資訊中心」，<http://e-traffic.iot.gov.tw/>，民國 97 年。
 - 7.與以上所列文獻格式不同者，請改以註解方式列出。
- 五、來稿請備一式三份，打印清楚；照片、圖片請附寄原本，凡無法清晰辨認及製版者，恕不接受；並請提供 Microsoft Word 97（含以上）版本可讀檔案格式之電子檔。
- 六、運輸計劃季刊編輯室對來稿在不變更其論點之原則下有刪改權；其他刊物如需轉載，應同時徵得作者及本所同意，並註明出處。
- 七、來稿請附本刊保證及授權書寄：10548 臺北市敦化北路 240 號 6 樓 交通部運輸研究所運輸計劃季刊編輯室。

Transportation Planning Journal Quarterly GUIDELINES FOR THE SUBMISSION OF PAPERS

1. The Journal welcomes the submission of previously unpublished research papers from all countries, which are related to engineering, economics, planning, management, and information processing of transportation systems. Previously published papers, even if published in a different language, with a different title, or modified contents, will not be accepted. Unless drastically revised since conference presentation, papers which have been previously presented in domestic or international conferences, regardless of whether they had been included in the conference proceedings or not, must be submitted with a letter of consent from the conference organizer, and such a presentation must be duly noted in the paper itself. Papers which duplicate or contain portions of study reports of research projects, edited versions thereof, or funded by government agencies or private organizations, should be submitted with a letter of consent from the funding agency, and this must be duly noted in the paper itself. Papers submitted by the staff of the IOT should comply with its "Guidelines for Publications". The above terms do not apply to invited papers and articles.
2. The length of submitted papers should not exceed 25,000 characters/words, and should include an abstract of no more than 300 characters/words, as well as 3 to 5 key words, and the author's name and position, institution, contact address, and telephone number.
3. Papers written in Chinese should also carry an English version of the abstract, including the title of the paper, the name of the author, and key words of the paper. Notes should be numbered consecutively in the order in which they first appear in the text and should be started with the title and the introduction of the author(s). References listed should be limited to all those mentioned and quoted in the text, and should be numbered consecutively in the order in which they have been mentioned in the text. The Times New Roman font should be used for the English version. Print all the mathematical equations and functions. And variables should be typed in italics.
4. The guidelines of reference formats are as follows:
 - (1) Journal: authors (beginning with the last name), article title, journal title, volume number, publish date, and page numbers.
 - (2) Book: authors, book title, edition number, publisher, place of publication, publish date.
 - (3) Conference paper: authors, paper title, conference title, sponsor, publish date, and page numbers.
 - (4) Doctoral dissertation or master thesis: author, title of the dissertation/thesis, department, college, and publish date.
 - (5) Government publication: government authority, name of the publication, and publish date.
 - (6) Web page: author or authority, article title or related link, URL, date of downloading.
5. Papers should be submitted with three copies of manuscript typed in a clearly legible form and an electronic file accessible by the Microsoft Word 97 (and above). All graphs and photographs should be submitted in originals. No illegible submissions will be accepted.
6. The Editor's Office of the Transportation Planning Journal Quarterly (TPJ Quarterly) reserves the right to edit and make any changes to the submitted papers, provided that such editing changes do not alter the paper's original content. The TPJ Quarterly reserves the copyright on all of its published papers, and all reproductions of such papers must receive a prior permission of the author and this journal, and meanwhile indicate the sources.
7. All submissions should be sent to the following address:

The Editor's Office
Transportation Planning Journal Quarterly
Institute of Transportation
6F., No. 240, Dunhua N. Rd.,
Taipei City 10548, Taiwan (R.O.C.)

保證及授權書

茲保證本人著作「
符合運輸計劃季刊稿約之規定，刊登後並授權中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）得以重製、公開傳輸、散佈方式利用本著作，且得授權第三人為相同之利用，並同意得提供予其他資料庫進行刊載及相同之利用，本人並承諾對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）或其再授權利用之人不行使著作權。本人保證本著作無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情事負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此肇致之損害負賠償責任。本人承諾本著作經貴刊刊登後，不再以同一稿件，或將題目更改，或將內容改編，轉投其他國內、外刊物登載，如有違反，同意貴所得公布本人姓名並永不再接受本人投稿。此致
中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）
立保證及授權書人（所有作者均請簽章，姓名後註明身分證字號）：

中 華 民 國 年 月 日

LETTER OF GUARANTEE

This letter serves to guarantee that my paper entitled ' _____', conforms to the "Guidelines for the Submission of Papers" of the Transportation Planning Journal Quarterly, and that I hereby authorize the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) and any third party to reproduce、public transmission、distribution my paper. I also agree my paper could be exchanged to the other database and to abandon the author's copyright to the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) and users from the database. I guarantee that I did not infringe upon the copyright of the paper of any other person. If I violated this rule, I should take on the responsibility for compensation to the author and to the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) accordingly. I guarantee that once this paper is published in the TPJ Journal, I will not make redundant or duplicate publication (i.e., submission of the same article, or with a different title, or modified content) to other journals or periodicals in the Republic of China or any other countries. I agree that in the event of any violation of the stated terms on my part, the IOT may announce my name in public and shall reject all my papers afterwards.

This guarantee is provided to the Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications.

Signature (both author's and co-authors'):

Date: _____

運輸計劃季刊

TRANSPORTATION PLANNING JOURNAL

中華民國六十年十一月創刊

發行人：林信得

審查者：運輸計劃季刊審查委員會

編輯者：運輸計劃季刊編輯指導會

召集人：林信得

編輯委員：張家祝 曹壽民 馮正民 林大煜 黃德治 曾國雄 吳榮貴 顏上堯

主編：曹瑞和

副主編：廖美容

編輯：洪銘揚

出版者：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號 6 樓

網址：www.iot.gov.tw (中文版>圖書服務>運輸計劃季刊)(本書同時登載於本所網站)

電話：(02)23496882

印刷所：萬達打字印刷有限公司

地址：106 臺北市新生南路 3 段 84-1 號 2 樓

電話：(02)23639367・23627718

本期印製 920 冊

經銷處：國家書店

104 臺北市松江路 209 號 1 樓・電話：(02)26579211

五南文化廣場

400 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

交通部運輸研究所運輸資訊組

電話：(02)23496880

每冊售價 100 元

中華郵政臺北誌字第 420 號執照登記為雜誌交寄

截至 104 年 3 月 20 日運輸計劃季刊稿件處理統計：審查及修改中 18 件，待刊登 8 件。

本刊參與科技部人文社會科學研究中心「補助期刊審查專書書稿」業務，並因應 TSSCI 資料庫建置需求，授權科技部人文社會科學研究中心進行期刊論文之中英文摘要與全文數位化、重製等加值流程，以電子形式透過單機、網際網路、無線網路或其他公開傳輸方式，提供用戶進行檢索、瀏覽、下載、傳輸、列印等行為。

Publisher：Transportation Planning Journal Quarterly

Editors：Editorial Board of Transportation Planning Journal Quarterly

Chairman：Mr. Lin, Shinn-Der

Address：Institute of Transportation

Ministry of Transportation and Communications

6F., No. 240, Dunhua N. Rd.,

Taipei City 10548, Taiwan (R.O.C.)