

國立陽明交通大學

運輸與物流管理學系碩士班

碩士論文

Department of Transportation and Logistics Management

National Yang Ming Chiao Tung University

Master Thesis

長幹道之號誌連鎖模式：整合路口分群與續進

Signal Coordination Models for Long Arterials :  
Integrating Intersection Grouping and Progression

研究生：鄭丞皓(Cheng, Cheng-Hao)

指導教授：邱裕鈞(Chiou, Yu-Chiun)

中華民國一一〇年七月

July, 2021

長幹道之號誌連鎖模式：整合路口分群與續進

Signal Coordination Models for Long Arterials :  
Integrating Intersection Grouping and Progression

研究生：鄭丞皓 Student：Cheng-Hao Cheng

指導教授：邱裕鈞 博士 Advisor：Dr. Yu-Chiun Chiou

國立陽明交通大學

運輸與物流管理學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management  
College of Management

National Yang Ming Chiao Tung University in partial Fulfillment of the  
Requirements for the Degree of

Master

in

Traffic and Transportation

July 2021

Taiwan, Republic of China

中華民國 一一〇年七月

## 誌謝

感謝指導教授邱裕鈞教授，於研究上給予極度自由的研究探索與支持，論文撰寫過程中高度的信任。在武漢肺炎肆虐台灣之際，仍撥空予學生線上討論論文，使研究更趨完整，無論於課堂中或論文討論，均令我在研究所求學期間獲益匪淺。

感謝口試委員林良泰教授、胡守任教授，於論文口試期間悉心審閱，惠予學生許多寶貴的修正建議，論文選題與兩位老師過去學位論文題目相關，除了感到萬分榮幸，也從與老師們相互討論過程中，獲得許多額外的啟發。

感謝淡江陳菟蕙教授、鍾智林教授，於大學期間給予學生學習上及人生規劃上之建議，若沒有老師們的鼓勵，恐無法進入交大運管就讀。

感謝景翊科技莊菁菁小姐協助申請 VISSIM 學術版憑證，及圖書館潘志瑋先生協助排除 VISSIM 安裝及使用等設備技術問題，有兩位的熱心協助，論文車流模擬部分才得以順利進行。

感謝邱 lab 的同窗，一起煩惱每次 meeting 要報什麼，討論彼此的進度並互相勉勵，有大家的資訊交換我們才能一起順利畢業，同時感謝博士班銓勳學長、佑星學長如此照顧大家，在遇到研究問題時，總是能適時地把我們拉出不知所措的泥沼。

感謝所有同學，兩年的日子裡共同創造的回憶，研究室共同的生活點滴，學術上的討論、言不及義的閒扯、抱佛腳趕死線的革命情感、百吃不厭的全家友善時光、每晚準時開賽的北交棒球賽、專題研討完的 driftwood 買醉兼八卦大會.....，有大家的共同砥礪與陪伴，使兩年的研究生活變得絢麗多彩、回味無窮。

感謝女朋友給予無限的支持與鼓勵，在自我懷疑或焦慮的時候，總是這麼有耐心，堅定的告訴我一切都會好，猶如大洋中的浮木，讓我得以緊抓著持續朝目標前進。

感謝家人於繁忙的研究生活中，包容我每日晚歸，雖然常無法將生活中的忙碌一言以蔽之分享給你們，但總是給予我得以自由探索學問最堅實的後盾。

於北交的研究生涯一晃眼匆匆結束，得之於人者太多，出之於己者太少，誌謝免有疏漏，容我將感謝放心裡。期許自己未來保持初衷，盡力而為。

鄭丞皓 於臺北郵局

2021 年 7 月

# 長幹道之號誌連鎖模式：整合路口分群與續進

研究生：鄭丞皓

指導教授：邱裕鈞

國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士班

## 摘要

幹道續進之號誌控制方法長久以來被視為可有效改善幹道車流運作效率的方法之一，其可依據不同控制目標，分為最大綠燈帶寬法及最小負效用法（延滯）兩大類。與最小負效用法相比，最大綠燈帶寬法旨在提供幹道雙向車流最大的綠燈帶寬，提高續進及減少停等，與用路人之期望一致，故常被交通主管機關所採用。然而，隨著幹道長度增加伴隨著路口數量的增加，最大綠燈帶寬法常面臨無法同時替幹道雙向設計有效之號誌時制計畫，或設計出之綠燈帶寬過窄導致利用效率不足的問題。由於連鎖路口數及綠燈帶寬間存有權衡關係，當連鎖路口數愈多，綠燈帶寬易遭壓縮；但太少連鎖路口，則幹道整體連鎖續進效果便不佳。因此，如何將長幹道號誌化路口進行最佳化之路口分群，以利綠燈帶寬之求解，實為一重要課題。

基此，本研究以 MaxBand 模式為基礎，提出一個混合整數規劃模式，以同時進行長幹道路口群組劃分及最大綠燈帶寬設計之最佳化。此外，考量車流在兩路口間之運行會發生明顯之車流擴散行為，進而衝擊號誌連鎖之成效，若未能納入模式，可能造成求解之最大綠燈帶過於樂觀之不合理結果。因此，本模式也將車流擴散行為納入。為驗證本研究所提模式之有效性，以新北市新台五路 13 個號誌化路口之道路幾何及交通資料為例，進行路口分群及最大綠燈帶之求解，並與傳統之 MaxBand 模式比較，再利用車流微觀模擬軟體 VISSIM 進行績效評比。

結果顯示，本研究所求解之路口分群與時制計畫，將路口分為 4 群，每群由 3 至 4 個路口所組成，其綠燈帶效率可達 56%，高於主觀分群+MaxBand 及 MaxBandLA 模式。而透過車流模擬軟體之評估結果，在高、中、低交通需求情境下，本模式可減少 4.1%~11.0% 平均延滯時間、減少 8.8%~10.5% 平均停車次數，同時提高 1.7%~4% 平均旅行速率，足見本模式之有效性。

**關鍵字：**號誌連鎖、最大綠燈帶、長幹道、車流擴散、混合整數規劃。

# Signal Coordination Models for Long Arterials: Integrating Intersection Grouping and Progression

Student: Cheng, Cheng-Hao

Advisor: Chiou, Yu-Chiun

Department of Transportation and Logistics management  
National Yang Ming Chiao Tung University

## Abstract

Signal progression control has long been viewed as an effective strategy to improve traffic operation efficiency along a long arterial, which can be divided into two categories: Bandwidth-based models and Negative Utility-based (Delay-based) models. Compared with the delay-based models, the bandwidth-based models, aiming at providing a maximal green bandwidth for traffics in both directions along an arterial so as to increase progression and reduce stopping probability, are widely adopted by transportation authority since the core logic of the Bandwidth models meets the driver's expectation better. However, as the number of intersections along an arterial increases, the bandwidth-based method becomes more difficult to generate an effective bandwidth which allows traffic entering the arterial not able to fully utilize the progression band. A trade-off exists between the number of intersections and the green bandwidth. The more intersections in coordination, the bandwidth may be shorter. But fewer intersections in coordination, the progression along the arterial would be poorer. Hence, how to optimally decompose the intersections along the arterial into several subsystems for better signal progression is a critical issue.

To tackle this issue, this study proposes a mixed integer programming model to optimally decompose a long arterial with several signalized intersections into groups and determine the maximum bandwidths of each group simultaneously. Additionally, to acknowledge the traffic dispersion behaviors along two consecutive intersections jeopardizing the effectiveness of progression, the proposed model also accommodates the traffic dispersion behaviors. To validate the performance of the proposed model, a case study on Xintai 5th Road with 13 signalized intersections in New Taipei City is conducted. Comparisons with traditional traditional system partition methods are performed and evaluated by the microscopic traffic simulation software, VISSIM.

The results of the proposed model show that a total of four groups are formed, each of which has three to four intersections, and the bandwidth efficiency reaches 56%, which is higher than those of the Maxband model grouped by several empirical system partition variables and

the MaxbandLA model. The simulation results consistently show that the proposed model has 4.1%~11.0% lower average delay, 8.8%~10.5% fewer number of stops, as well as 1.7%~4.0% higher average travel speed, suggesting the performance and applicability of the proposed model is satisfied.

**Keywords:** Signal progression, Maximum bandwidth, Long arterial, Traffic dispersion, Mixed integer programming.

# 目錄

|          |               |      |
|----------|---------------|------|
| 誌謝       | .....         | i    |
| 摘要       | .....         | ii   |
| Abstract | .....         | iii  |
| 目錄       | .....         | v    |
| 圖目錄      | .....         | vii  |
| 表目錄      | .....         | viii |
| 第一章      | 緒論.....       | 1    |
| 1.1      | 研究背景與動機 ..... | 1    |
| 1.2      | 研究目的 .....    | 2    |
| 1.3      | 研究流程與內容 ..... | 3    |
| 第二章      | 文獻回顧.....     | 6    |
| 2.1      | 幹道號誌控制 .....  | 6    |
| 2.1.1    | 最大綠燈帶寬法.....  | 6    |
| 2.1.2    | 最小負效用法 .....  | 12   |
| 2.2      | 幹道群組劃分 .....  | 18   |
| 2.3      | 車流擴散模式 .....  | 22   |
| 2.4      | 小結.....       | 25   |
| 第三章      | 模式建構.....     | 26   |
| 3.1      | 模式架構.....     | 26   |
| 3.2      | 數學模式.....     | 29   |
| 3.2.1    | 模式參數與變數.....  | 29   |

|      |                          |    |
|------|--------------------------|----|
|      | 3.2.2 目標式 .....          | 30 |
|      | 3.2.3 限制式 .....          | 30 |
|      | 3.2.4 模式總覽 .....         | 33 |
| 第四章  | 實例驗證 .....               | 35 |
| 4.1  | 資料蒐集 .....               | 35 |
| 4.2  | 模式求解結果 .....             | 38 |
|      | 4.2.1 參數設定 .....         | 38 |
|      | 4.2.2 模式求解 .....         | 39 |
| 4.3  | 模式比較 .....               | 41 |
|      | 4.3.1 模擬平台說明：VISSIM..... | 41 |
|      | 4.3.2 比較模式說明 .....       | 41 |
|      | 4.3.3 模式比較分析 .....       | 46 |
| 4.4  | 敏感度分析 .....              | 51 |
| 4.5  | 小結.....                  | 53 |
| 第五章  | 結論與建議 .....              | 55 |
| 5.1  | 主要研究貢獻 .....             | 55 |
| 5.2  | 結論.....                  | 55 |
| 5.3  | 後續研究建議 .....             | 57 |
| 參考文獻 | .....                    | 58 |

## 圖目錄

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 圖 1.3.1 研究流程圖 .....                             | 5  |
| 圖 2.1.1 MaxBand、MultiBand、AM-Band 綠燈帶時空圖比較..... | 8  |
| 圖 2.1.2 OD-Band 設計起迄對路徑與綠燈帶時空圖 .....            | 10 |
| 圖 2.1.3 PBand 重疊時相與輪放時相之候選時相順序 .....            | 11 |
| 圖 2.1.4 Liu and Chang (2011) 幹道車流行經過程 .....     | 12 |
| 圖 2.1.5 汽機車混合車流幹道號誌控制最佳化模組 .....                | 13 |
| 圖 2.2.1 連鎖路口增加之綠燈帶時空圖比較 .....                   | 18 |
| 圖 2.3.1 Robertson 擴散模式最佳配適參數校估結果 .....          | 23 |
| 圖 3.1.1 MaxBand 綠燈帶寬時空圖 .....                   | 28 |
| 圖 3.1.2 綠燈左轉情境及變數 .....                         | 28 |
| 圖 4.1.1 實例驗證場域範圍 .....                          | 36 |
| 圖 4.2.1 模式求解分群結果 .....                          | 39 |
| 圖 4.3.1 主觀分群準則路口群組劃分結果 .....                    | 42 |

## 表目錄

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 表 2.1.1 幹道號誌控制方法彙整表 .....       | 15 |
| 表 4.1.1 實例驗證場域路口 .....          | 36 |
| 表 4.1.2 各路口距離及交通量資訊 .....       | 37 |
| 表 4.2.1 實例驗證時比計算結果 .....        | 38 |
| 表 4.2.2 模式求解號誌時制計畫 .....        | 40 |
| 表 4.3.1 主觀分群準則群組劃分之號誌時制計畫 ..... | 43 |
| 表 4.3.2 MaxBandLA 號誌時制計畫 .....  | 45 |
| 表 4.3.3 實例驗證路網模擬結果比較 .....      | 48 |
| 表 4.3.4 實例驗證幹道方向模擬結果比較.....     | 50 |
| 表 4.4.1 不同交通需求之績效指標比較 .....     | 52 |

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

幹道號誌續進長久以來被視為解決交通壅塞、提高幹道運作效率的有效方法之一，然而隨著幹道長度與路口數的增加，傳統的多路口號誌續進設計方法可能無法同時替幹道雙向設計出足夠的綠燈帶寬。基此，該如何有效率的進行幹道系統分群亦同時兼顧幹道車流運作效率始為一重要課題。

隨著都市商業活動的日益興盛及國民所得的提升，民眾對於私人運具的需求提高，往往帶給都會區內原有道路系統龐大的壓力，形成交通壅塞。交通壅塞不僅造成交通事故的增加，也產生多餘的能源、時間成本損失與汙染問題，尤其以都會區的幹道系統最為嚴重。於地狹人稠的台灣，欲增加更多道路面積解決塞車問題不僅所費不貲且相當耗時，興建基礎建設顯然並非解決交通壅塞問題的高性價比選擇。相較之下，透過調整交通號誌提高整體道路運作效率，不受成本高昂和土地空間的限制，為一低成本且能於短期內改善都會區道路壅塞問題的手段之一。幹道系統負責連結都會區與郊區或直接貫穿都市內部，其尖離峰特性明顯且沿線多為號誌化路口，若各路口號誌時制計畫獨立設計，不僅增加車輛停等次數與旅行時間，也因為頻繁加減速增加額外的能源消耗。故在直進車輛占多數的幹道中，希望能夠透過多路口號誌連鎖設計，使車輛在行駛過程中以穩定速率續進，增加幹道運作效率。

傳統的綠燈帶寬續進設計方法在面臨幹道路口數量增加時，常面臨無法同時替幹道雙向設計綠燈帶寬，或設計出之綠燈帶寬過窄導致利用效率不足的問題。為維持整體幹道運作效率，交通工程師須先將幹道針對其幾何條件進行路口主觀分群，再根據分群結果替各子分群設計出獨立的綠燈帶寬。然而先分群再替各子分群設計綠燈帶寬，將無法確保產出之號誌時制計畫結果為最佳或仍有改進空間，且無法逐一驗證各種分群結果之時制計畫績效差異，當幹道交通情況改變時，號誌時制是否得以滿足當地交通需求亦不得而知。此外，傳統綠燈帶寬續進設計方法均假設車輛於路段中呈現相等自由車流速率前進，然而在實際車流運行過程中，並非所有車輛均會依照其自由車流速率行駛，當模式應用於實際生活中，常因為車輛行駛特性及延滯，造成車輛不易完整利用計算出之綠燈帶。

為兼顧幹道分群及續進效率，本研究提出以長幹道為目標之號誌分群及連鎖整合設

計，納入車隊擴散之考量，得以同時獲得分群結果及號誌時制計畫，並成功證明兩者整合設計之必要性。以往此類研究多半忽略號誌時相、車輛行駛特性等，其模式仍有改善空間，故本研究回顧相關多路口號誌控制文獻、幹道路口分群文獻及車流擴散文獻，將車流擴散行為納入幹道號誌分群及續進設計中，並蒐集實際道路幾何及車流資料，以數學規劃方法建立一最佳化模式，求解不同道路幾何條件及交通需求下之幹道分群結果與號誌時制計畫，期能增加長幹道車流運作效率，供未來幹道連鎖號誌設計之參考。

## 1.2 研究目的

綜上所述，本研究欲探討幹道路口數量增加時，傳統最大化綠燈續進帶模式無法提供有效率的綠燈帶寬之問題。預計透過幹道分群及續進整合設計模式，最佳化幹道運作之效率，同時須確保該模式應用於實際道路中，依然保持其有效性與合理性。

本研究之目的條列如下：

1. 建構長幹道號誌連鎖模式，同時考量號誌分群及續進最佳化，並納入車隊擴散模式，以獲得最佳分群結果及各子分群號誌時制計畫。
2. 透過車流微觀模擬軟體，以實際道路交通資料，驗證提出模式之合理性及控制績效。
3. 比較主觀分群、過往分群及續進整合設計方法及本研究所提出之最佳分群之號誌控制績效，供未來設計長幹道號誌時制計畫之參考。
4. 透過敏感度分析檢視本研究模式於不同交通需求下之模擬績效。

### 1.3 研究流程與內容

本研究旨在發展一長幹道號誌連鎖模式，同時考量路口分群及續進，以車流微觀模擬軟體透過實際道路資料驗證模式績效後，與主觀分群及過往分群及續進整合設計模式進行比較，並觀察不同道路情境對於模式績效之影響，以作未來號誌設計參考之用。本研究之研究流程如圖 1.3.1，其內容詳列如下：

#### 1. 確立研究主題

根據研究背景與動機、研究目的釐清問題，為解決長幹道路口增加導致傳統最大綠燈帶寬設計方法無法同時替幹道雙向提供有效綠燈帶寬的問題，以數學規劃方法建立幹道號誌分群與續進整合最佳化模式，並確定本研究之研究假設、研究範疇、研究內容、驗證方式與流程。

#### 2. 文獻回顧

本研究進行相關研究之文獻回顧與整理，主要分為幹道號誌控制方法、長幹道群組劃分方法與車流擴散模式三部分。在幹道號誌設計方法部分，主要回顧「最大綠燈帶寬設計法」及「最小負效用設計法」兩類幹道號誌設計方法之濫觴；於長幹道群組劃分方法部分，針對主觀分群準則與分群及續進整合設計之方法回顧；而車流擴散模式部分，回顧Pacey、Robertson兩人發展之車流擴散模式及車流擴散模式於幹道連鎖號誌之應用，整理各文獻之異同及可供參考之特點，以利後續研究工作順利進行。

#### 3. 模式構建

本研究擬以混合整數線性規劃建立幹道分群及續進整合最佳化模式。以最大化幹道系統綠燈帶寬為目標，希望於模式中求解各子分群綠燈帶寬、各子分群號誌週期時間、分群變數及各路口左轉早開、遲閉變數等。

#### 4. 實例驗證

為檢視本研究模式是否得於實際道路環境中，設計出更有效率之號誌時制計畫，本研究蒐集實際幹道交通量資料及幾何資料，輸入模式求得分群結果及各子分群綠燈帶寬等變數，驗證模式產出結果是否符合預期。

接著，經由校估車流微觀模擬軟體之參數並於內建立模擬環境，檢驗該模式於實際路網中之運行績效。實際路網將分別模擬三種模式之績效結果，分別為主觀分群後再設

計續進方法、過往分群及續進整合設計模式及本研究提出之模式，蒐集三種不同模式之路網績效結果以利後續評比。

## 5. 模式比較

整理前步驟模擬之三種號誌時制計畫，針對平均車輛延滯時間、平均車輛停等次數、平均行駛速率、綠燈帶效率等績效指標，分別檢視路網及幹道之模擬績效，比較分群方法之差異對於幹道運作效率之影響，討論整合模式實例應用之結果。

## 6. 敏感度分析

以往最大綠燈帶寬號誌設計方法經許多研究證實得以替實際交通環境設計符合需求之號誌時制計畫。然而，由於最大綠燈帶寬號誌設計方法之輸入為透過幹道及支道流量之比例計算出之時比，當流量以等比例放大或縮小時，可能導致求出之號誌時制計畫相同，車流受到路段長度、容量影響，產生向後傳遞之衝擊波或造成溢流，影響幹道運作效率，故本節將以等比例放大及縮小實例驗證流量，以檢視不同號誌時制設計方法，面臨不同交通需求情境之結果，以利提出後續結論及改善建議。

## 7. 結論與建議

依據前述模式比較及情境分析步驟，總結本研究之成果，並詳列本研究之限制，提出未來研究可發展方向，作為後續相關模式之參考。

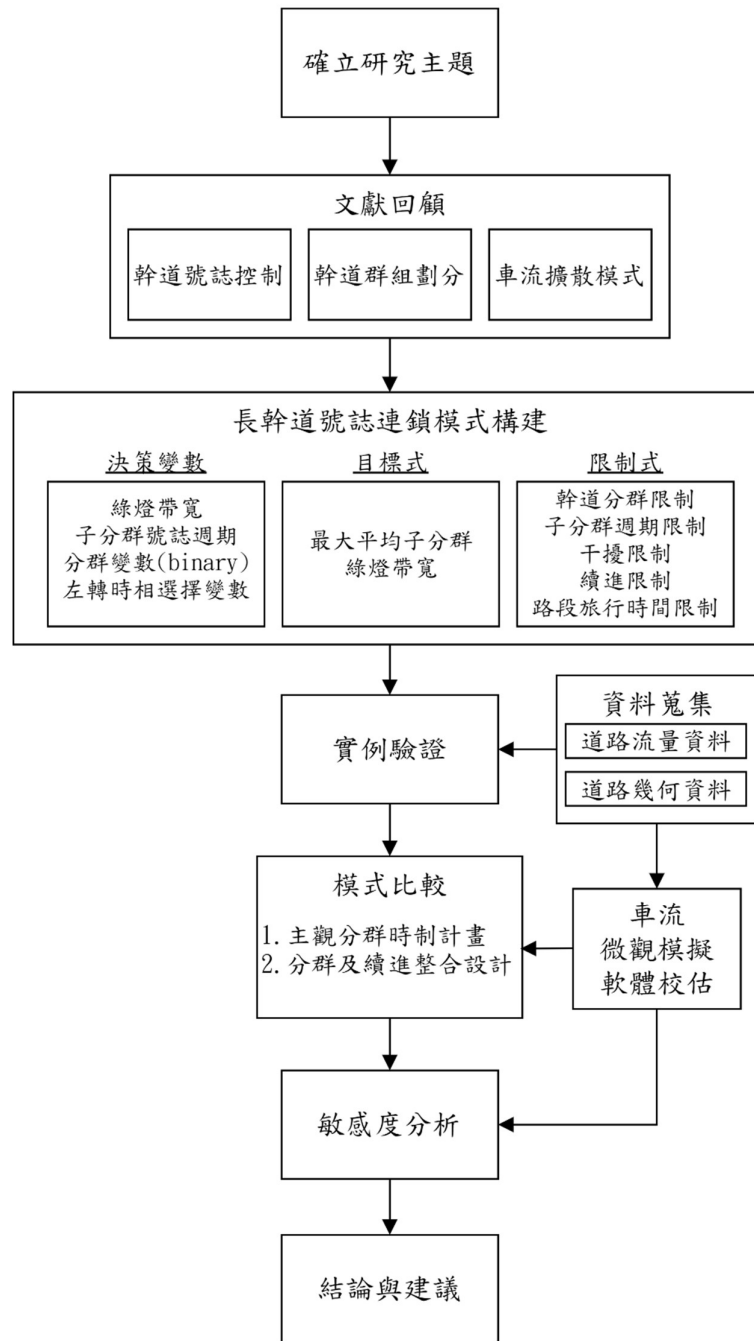


圖 1.3.1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

本研究之文獻回顧將分為三部分。第一部分針對幹道號誌控制設計方法進行回顧，其中又分為最大綠燈帶寬法與最小負效用法兩類，針對過去不同的幹道續進設計概念進行統整；第二部分針對幹道群組劃分方法進行回顧，針對不同的群組劃分指標與方法進行回顧，包含幹道連鎖分群指標和幹道分群及續進整合設計模式之回顧；第三部分針對車流擴散模式進行回顧，整理過往文獻重點，以利後續研究工作之參考。

### 2.1 幹道號誌控制

本節回顧幹道號誌控制設計方法之濫觴，幹道號誌設計與獨立路口號誌設計相比較為複雜，其原因在於幹道號誌設計除了考量各路口之流量、容量外，尚須考慮與上下游路口之配合設計，最佳化幹道車輛行進效率。根據以往研究，幹道號誌設計依設計準則與方法之差異，大致可分為最大綠燈帶寬法及最小負效用法兩大類，其細節將於本節詳述。

#### 2.1.1 最大綠燈帶寬法

最大綠燈帶寬法旨在尋找整條幹道雙向綠燈帶寬和最大，使綠燈帶寬內之行駛車輛得以續進整條幹道系統，其假設為幹道內所有路口之週期長度一致，以時差方式創造綠燈帶寬。本設計法之優點在於所需輸入資料較少，且使用時空圖表現較為直覺，對駕駛者而言，由於此方法為設計最大續進，故較符合駕駛直覺。

Little et al. (1966) 最早以混合整數線性規劃模式設計幹道號誌續進，利用數學模式表示車流時空圖，以最大化綠燈帶寬為目標函數，計算幹道上之綠燈帶寬時間及時差。該模式假設幹道內所有路口為固定的共同週期、時相順序，且幹道雙向之綠燈帶寬度須相等，較不符合實際道路於尖峰時段之車流型態。

Little et al. (1981) 改良 1964 年提出之綠燈帶寬時空圖設計，並將該模式命名為 MaxBand，也是往後多數綠燈帶寬設計法之參考模式。此方法之特別之處在於改良先前模式中之週期時間彈性，使模式能於給定範圍內求得幹道各路口最佳共同週期；此外，亦放鬆各路口時相順序需固定之假設，利用分隔幹道雙向紅燈時間，解決實務號誌時制設計中早開、遲閉的問題。另外，MaxBand 模式將目標式分別計算幹道雙向綠燈帶寬度，能夠接受使用者給定不同方向綠燈帶寬度之權重，替車流量較大方向設計較寬之綠燈帶，

滿足幹道尖峰時段之車流特性。然而，MaxBand 模式之限制在於，該方法假設所有車輛以期望續進速率沿著幹道每個方向前進，並依整條幹道提供一致的綠燈帶寬，故在設計綠燈帶寬時，無法針對每個路段的實際流量與道路容量進行調整，設計出之綠燈續進帶寬亦無法符合不同路段的交通需求。

Tsay and Lin (1988) 考量 MaxBand 模式忽略路段車流運行行為之缺點，發展一綠燈帶最大及負效用最小下求解動態幹道號誌時制之模式，得以創造出鋸齒狀綠燈帶寬，將模式命名為 BANDTOP。該模式於最大化綠燈帶寬法中，將路段中受干擾車流納入考慮，推導新的停等延滯公式以推估交叉路口的延滯值，並取消以使用者自訂路口等候線消散時間之假設，改以路口流量調整車流等候線消散時間之計算。該研究透過台灣台南市四路口幹道進行模式驗證，其結果證明，BANDTOP 模式，得以獲得優於 MaxBand 及 PASSER II 之平均延滯及車輛停車次數。

Gartner et al. (1991) 基於 MaxBand 提出了一個新的幹道號誌續進設計方法，命名為 MultiBand。該模式之特點在於，得針對幹道雙向不同路段的交通情況，給予單獨加權計算出的綠燈續進帶寬，整體而言仍為一連續之綠燈續進帶，僅針對不同路段之綠燈帶寬度進行調整，以符合各路段實際交通需求，其主要改變為目標式的計算，如式 2-1、2-2。依 NETSIM 模擬美國紐奧良之實際幹道資料結果顯示，MultiBand 模式在不同次方之道路 V/C 值加權方法下的目標式計算結果，其平均延滯、平均停等次數、平均行駛速率、平均燃油效率均比 MaxBand 模式之結果來的佳，顯示以該模式設計出之幹道號誌，確實能增加整體幹道系統運作效率，惟相較於 MaxBand 模式，MultiBand 模式在應用於實際道路求解時，限制式數量較多且對於電腦運算的要求更高。

$$\text{MaxBand 目標式: } \quad \text{Max} \quad (b + k\bar{b}) \quad (2-1)$$

$$\text{MultiBand 目標式: } \quad \text{Max} \quad \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i b_i + \bar{a}_i \bar{b}_i) \quad (2-2)$$

Zhang et al. (2015) 開發了一個非對稱的綠燈續進帶寬最佳化模型，稱作 AM-Band。由於在 MultiBand 模型中，調整不同路段之綠燈帶寬時，以中心線為參考點往兩旁等量調整，其結果為生成一對稱的、依不同路段流量調整大小的綠燈帶寬。而 AM-Band 放鬆此一限制，將原先 MultiBand 模型之綠燈帶寬  $b_i$  拆解為  $b'_i$  和  $b''_i$ ，所設計出之綠燈帶寬不必依照先前模式之假設，得不以綠燈帶寬起始邊線為參考基準，調整目標式為最大化每路口的  $b'_i$  和  $b''_i$  綠燈帶寬總和，故使用 AM-Band 求解出之綠燈帶，能夠更有效的運用路口剩餘的綠燈時間。

$$\text{MultiBand 目標式: } \quad \text{Max} \quad \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i b_i + \bar{a}_i \bar{b}_i) \quad (2-3)$$

$$\text{AM-Band 目標式: } \quad \text{Max} \quad \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} [a_i (b'_i + b''_i) + \bar{a}_i (\bar{b}'_i + \bar{b}''_i)] \quad (2-4)$$

經過 AIMSUN 軟體進行模擬驗證績效，透過兩個不同的實驗情境分別比較 MaxBand、MultiBand 與 AM-Band 的平均延滯時間、平均停車次數、平均密度、平均行駛速率、平均停等時間。結果顯示，AM-Band 與 MultiBand 在各項表現上均優於傳統的 MaxBand 模型，而 AM-Band 在各項績效指標中，儘管幅度不大仍呈現略優於 MultiBand 的結果。以變異數來看，AM-Band 的變異數在此三項績效指標中均小於 MultiBand，顯示 AM-Band 能提供幹道一個穩定且略優於 MultiBand 的綠燈帶寬最大化模型。然而，多路口幹道應用 AM-Band 設計出之綠燈續進帶寬秒數於文章中並無清楚描述，部分路段於時空圖上來看綠燈帶寬可能過窄，應用於實際路網中可能產生僅有少數車輛得以續進的問題。三模式綠燈續進帶時空圖差異如圖 2.1.1 所示。

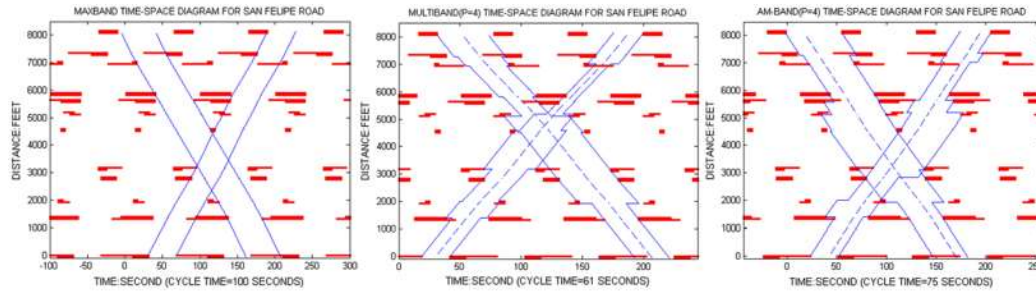


圖 2.1.1 MaxBand、MultiBand、AM-Band 綠燈帶時空圖比較

資料來源：Zhang et al. (2015)

上述三種幹道號誌設計方法之目的，均試圖沿著幹道雙向提供足夠的綠燈續進帶寬，對於幹道上之直進車輛而言，沿著幹道方向持續行駛效率為最佳。然而設計幹道綠燈續進帶時，若忽略沿線支道車流與轉向交通量，將造成整體幹道系統效率降低。尤其在某些支道轉向量較大的路口，若忽略支道轉進幹道行駛車輛之交通需求，將造成系統內多數車輛延滯時間增加，故有部分研究在已知幹道起迄資訊的情況下，替不同起迄對設計綠燈帶寬。

Arsava et al. (2014) 以 MaxBand 模式為基礎，提出了一個基於交通 OD 資訊下的幹道號誌續進模式，旨在替每個流量顯著的起迄對創造續進帶，故又將此模式命名為 OD-

Band。對於許多現實道路而言，自支道轉向進入幹道再轉出的交通量對於幹道績效至關重要，故該研究發展一套混合整數線性規劃模式以 CPLEX 求解，並將結果與 Synchro 和 TRANSYT-7F 相比。該研究使用 AIMSUN 模擬三個模式於幹道上面對不同交通需求情境之績效，結果顯示當支道轉向車流大於幹道直進車流時，OD-Band 的平均延滯時間與平均旅行時間明顯較佳；當此需求降低或消失時，依交通量變化程度，並無任一模式之績效指標特別優異。原因在於提供轉向進入幹道之交通量更大的綠燈帶寬，通常表示會減少幹道原本的續進寬帶。分析結果亦顯示，與 Synchro 和 TRANSYT-7F 相比，OD-Band 模式由於考量替某一起迄對車流設計專屬綠燈帶，故其幹道綠燈帶寬相比其他兩模式較小。

Arsava et al. (2016) 進一步提出改良之 OD-Band 模式，修改自 Arsava et al. (2014) 提出之模式，改良後之 OD-Band 與先前模式之差異如下：(1) 考量入幹道上所有可能進入、通過的起迄對，而非先前僅針對單一車流量較大之起迄對，如圖 2.1.2 所示；(2) 先前模式僅採用給定之時相順序進行最佳化，改良後之模式得以針對幹道上每一路口之時相順序進行最佳化調整，以四種情境之時相順序擇優；(3) 前一模式僅以 V/C 值作為權重，而改良後 OD-Band 在綠燈帶寬最大化過程中，納入該起迄對流量通過之路段數與流量大小進行權重，如此一來通過較多路口之起迄對交通量將會獲得較高的權重值，在計算時被視為較需考量增加綠燈帶寬度之起迄對。經過 AIMSUN 模擬 MaxBand、MultiBand 與 OD-Band 三種幹道續進模式，比較旅行時間、延滯時間、停等次數、平均行駛速率、抵達終點車輛數等績效指標，結果顯示 OD-Band 表現最佳。而其他兩方法若在不考慮車道排隊的情況，則可能因為實際幹道上的車隊排隊過長、紓解困難，影響通過交通量之效率。結果顯示改良後 OD-Band 能提供更符合交通需求的綠燈帶寬。

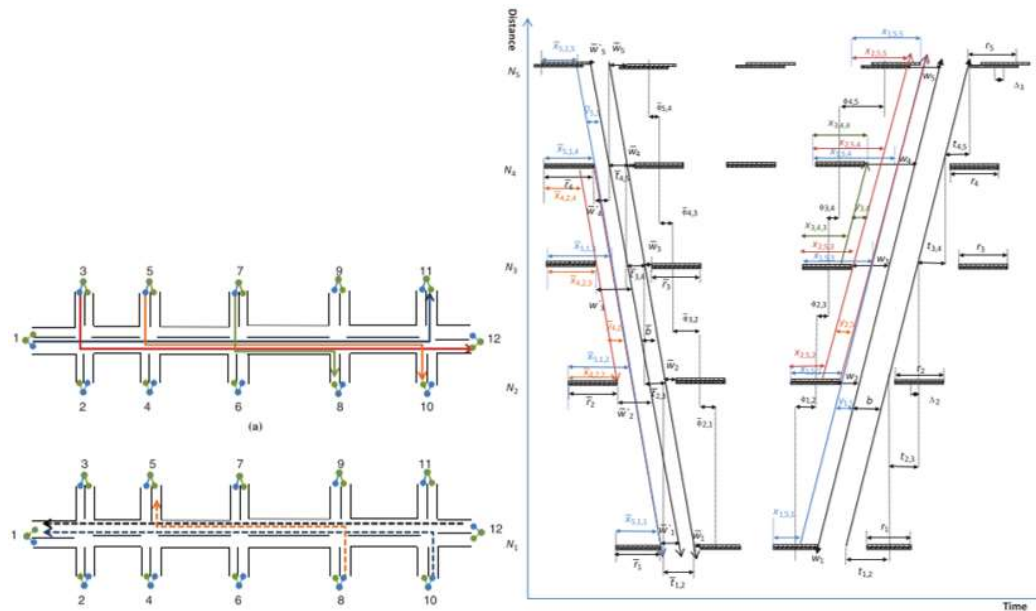


圖 2.1.2 OD-Band 設計起迄對路徑與綠燈帶時空圖

資料來源：Arsava et al. (2016)

Yang et al. (2015) 考慮幹道壅塞及號誌設計造成的車輛溢流，透過台灣新竹縣竹北市連接高速公路與地方道路之幹道，針對不同通過幹道路徑之起迄對提出了三種多路徑幹道續進模型，替大量進入/離開高速公路之多個流量較大的起迄對提供續進帶，以改善 MaxBand 模式僅最大化幹道直進車輛效率之問題。該研究提出了三個模式，第一個模式目的在最佳化幹道時差，在給定時相順序下，利用起迄對資料生成續進帶，透過重新描述 MaxBand 模式中的循環整數限制式，替每個起迄對創造續進帶。第二個模式改善第一個模式，透過將每個路口之時相順序選擇作為決策變數，同時最佳化各路口之時相選擇與路口時差，透過路口時差的調整，增加幹道間起迄對續進帶的寬度。第三個模式改善第二個模式中多個起迄對會在綠燈帶時間內彼此相互競爭之特性，得自動選擇最佳之車流量大的起迄對數量，忽略少數車流量相對小之起迄對，以分配較多綠燈時間予特定起迄對。

在績效驗證部分，該研究首先透過情境設定，比較所提出之三個不同模式，在六個假設路口中，模式三無論在平均起迄對延滯、平均車輛停等次數與平均行駛速率等績效指標均明顯優於其他兩模式。接著透過實際路網資料，調查出該幹道之五個重要起迄對，模擬比較該研究提出之模式三與(1)只設計幹道直進續進之 MaxBand、(2)替幹道上重要

起迄對設計續進帶之 MaxBand、(3)TRANSYT-7F 模式。結果顯示，模式三在平均延滯、平均停等次數、平均速率均優於其他模式，顯示在車流量大且轉向起迄對明顯之幹道中，模式三能夠針對不同起迄對設計適合於該幹道交通特性之幹道續進模型。

Jing et al. (2020) 考量 MaxBand 與 MultiBand 模式在設計路口時相順序時，僅考慮採用重疊時相(overlapping phase)以幹道兩向搭配早開、遲閉創造出四種情境，而無法考慮輪放時相(split phase)情境，發展一種設計幹道號誌續進時考量重疊時相與輪放時相，最佳化時相順序與時差的幹道雙向號誌續進模式，命名為 Pband。該模式以 MultiBand 模式為基礎，以混合整數非線性規劃構建模式並引入數個二元變數，將候選的四種重疊時相情境與六種輪放時相情境明確描述，如圖 2.1.3 所示。透過中國浙江省嘉興市的五個路口幹道進行資料蒐集與驗證，分別針對不同續進週期與不同交通需求大小的情境，比較 Pband 與 MultiBand 兩模式之差異。結果顯示，除了續進週期 96 秒的情境外，在 104~144 秒的續進週期中，Pband 在總綠燈帶寬、平均延滯時間、平均停等次數等績效指標，均優於 MultiBand 模式；在不同交通流量大小的部分，無論是何種交通需求，Pband 模式之績效指標均優於傳統的 MultiBand 模式，顯示 Pband 與傳統幹道號誌續進模式相比，能夠提供更有彈性的路口時相順序選擇，並透過同時最佳化時相順序與時差，提升幹道運作效率。

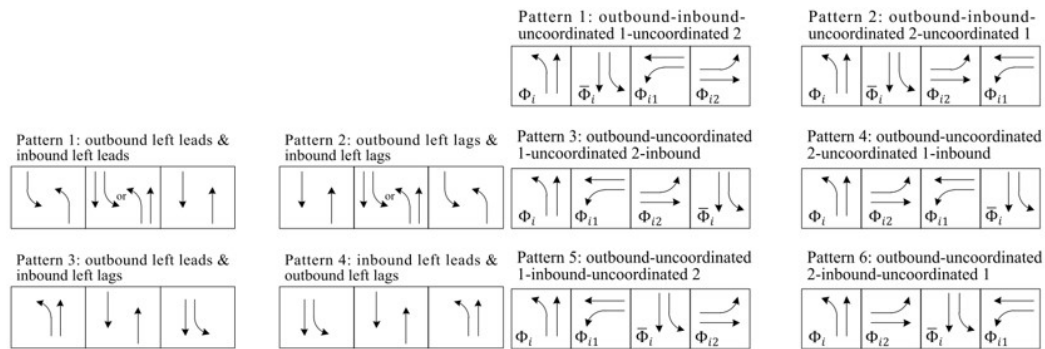


圖 2.1.3 P-Band 重疊時相與輪放時相之候選時相順序

資料來源：Jing et al. (2020)

### 2.1.2 最小負效用法

最小負效用法之設計理念在於，使幹道系統內某負效用之績效指標達到最小，而此負效用則由設計者依其設計目標自行訂定。一般而言，負效用泛指延滯時間、停等次數、燃油消耗、汙染等方面。本設計法之優點在於，能夠確保所設計出之時制計畫使系統內之某一績效指標達到最小，而非僅著重於幹道車流續進上。

Robertson (1969) 利用時間掃描法(Time-Scan Method)，從巨觀角度設計目標為最小化負效用之號誌最佳化模式 TRANSYT，該模式求解採用爬山尋優法，求解系統內延滯及停等次數最小之可行解，其具有模擬、最適時制設計及評估之功能，適用於都市中獨立路口、幹道及路網時制設計。而後經由多次改良，最終經美國聯邦公路總署及佛羅里達州立大學合作，發展 TRANSYT-7F 版本，於路網交通控制領域被廣為使用。

Liu and Chang (2011) 考量大部分既存的幹道號誌設計模式都還是無法應付續進帶被大量轉彎車輛破壞的情況，且最大綠燈帶設計模式無法解決轉向量過多且等候的問題，設計一套考量路口經常性等候回堵或車道壅塞之幹道號誌最佳化模式。該模式以最小幹道旅行時間為目標，將車流行進過程分為車流進入、車輛到達、等候、併入車道、車流離開與流量守恒六個部分，以數學式模化各階段之車流行為並納入模式限制式中，如圖 2.1.4。此模式中明確地模擬了幹道路口共用車道之車道群組上的等候狀況，並透過需求限制式、號誌設定等來模擬並計算鄰近路口間之動態回堵等候狀況。在此篇研究中，作者透過模擬一上下游共四路口的幹道，在不同的需求下利用基因演算法求解，並與 TRANSYT-7F 進行比較。比較結果顯示，該模式之系統總等候時間優於 TRANSYT-7F。

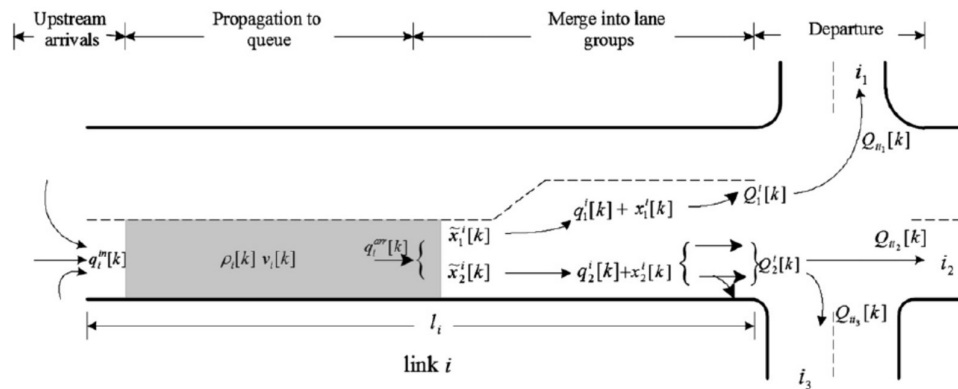


圖 2.1.4 Liu and Chang (2011) 幹道車流行進過程

資料來源:Liu and Chang (2011)

Lan and Chang (2016) 考量機車在許多開發中國家的重要性日益增加，以往針對幹道號誌續進之研究，多半著重於純汽車車流的續進，較少考慮混流的情況，故提出一種基於模擬混流行為的號誌最佳化模式。該模式提出的方法包含了兩個部分，第一部分為巨觀模擬，將汽機車混流之行進過程依車種特性不同，分為車道選擇、加速與減速、加入紅燈停等車隊、綠燈紓解，針對不同階段的行為進行模化，並考量入機車鑽行、左轉車道溢流等情況，以最小總交通延滯時間為目標，據以計算每個路口的週期長度與綠燈時比，如圖 2.1.5；第二部分為號誌最佳化，以第一部分所得結果利用啟發式解法搜尋最佳號誌時制計畫與幹道時差。模式驗證結果顯示，在純汽車車流的情況下，該模式與 TRANSYT-7F 形成之週期長度、平均旅行時間與支道平均延滯差異甚小；與 MaxBand 和 TRANSYT-7F 兩個模式相比，所得之綠燈帶寬差異不大，惟最大綠燈帶寬依不同交通需求，各模式互有優缺；在混流情境下，較短路段中的兩個號誌時差會依機車車流大小遞減，較長路段中的號誌時差會依機車車流大小遞增。由於機車有較快的起步能力，卻有較慢的平均行駛速率，若在設計幹道號誌連鎖時，疏於考慮機車之行駛特性，可能設計出較無效率的時差，在較短的街廓中機車已追上下游路口之停等車隊，下游路口卻仍為紅燈，造成車輛溢流問題。

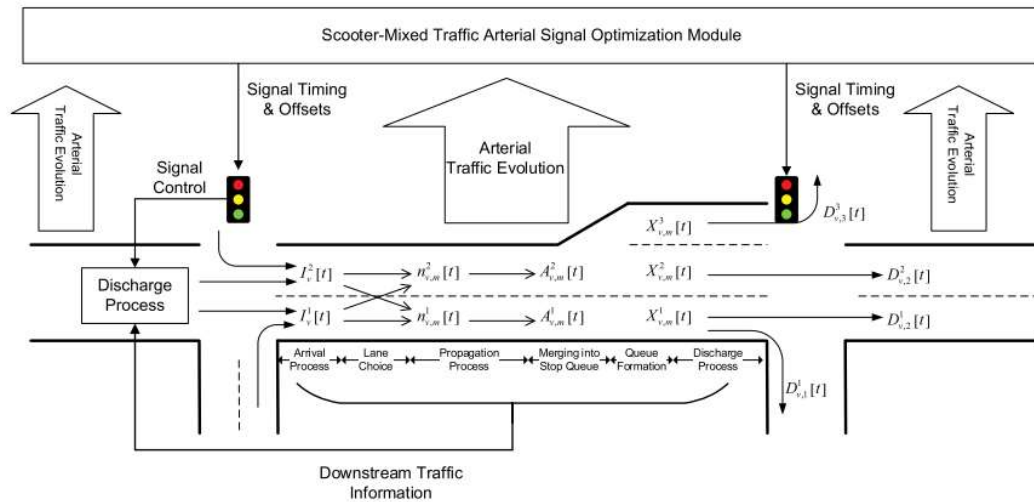


圖 2.1.5 汽機車混合車流幹道號誌控制最佳化模組

資料來源:Lan and Chang (2016)

Christofa et al. (2016) 提出了一種即時號誌控制方法，以最小化系統個人延滯的觀點，設計最佳化幹道號誌時制計畫。該方法利用即時交通資訊，透過混合整數線性規劃，

明確地考慮了小汽車與公車之乘客佔有率，因此得以提供公車較優先之號誌，最大程度減少旅客延滯時間以保障多數人權益。此外，模式中亦納入公車時刻表營運之考慮，由於大眾運輸車輛須遵照時刻表抵達各站，其可靠度為維持大眾運輸服務水準之重點，故透過給予額外的權重降低公車延滯時間。該透過美國加州四個路口的幹道進行實驗設計驗證模式，並與 TRANSYT-7F 進行比較，經過 AIMSUN 模擬結果顯示，該模式與傳統號誌設計方法相比，確實可以減少系統內個人延滯，該模式亦能有效替公車提供優先權，而成功降低公車行駛延滯，提高公車可靠度。

本節有關幹道號誌設計方法之參考文獻彙整如表 2.1.1。

表 2.1.1 幹道號誌控制方法彙整表

| 作者(年份)                | 設計目標        | 求解方法           | 比較模式                  | 比較績效指標                                            | 車流模擬軟體               |
|-----------------------|-------------|----------------|-----------------------|---------------------------------------------------|----------------------|
| Little et al. (1981)  | 最大綠燈帶寬      | 混合整數線性規劃(MILP) | 無                     | 無                                                 | NETSIM               |
| Tsay and Lin (1988)   | 最大綠燈帶寬+最小延滯 | 混合整數線性規劃(MILP) | MaxBand<br>PASSER II  | 平均延滯<br>平均停車次數                                    | NETSIM<br>TRANSYT-7F |
| Gartner et al. (1991) | 最大綠燈帶寬      | 混合整數線性規劃(MILP) | MaxBand               | 平均延滯<br>平均停車次數<br>平均速率<br>平均燃油消耗                  | NETSIM               |
| Zhang et al. (2015)   | 最大綠燈帶寬      | 混合整數線性規劃(MILP) | MaxBand<br>MultiBand  | 平均延滯<br>平均停車次數<br>平均停等時間<br>平均速率                  | AIMSUN               |
| Arsava et al. (2014)  | 最大綠燈帶寬      | 混合整數線性規劃(MILP) | TRANSYT-7F<br>Synchro | 每路徑旅行時間<br>雙向綠燈帶寬度                                | AIMSUN               |
| Arsava et al. (2016)  | 最大綠燈帶寬      | 混合整數線性規劃(MILP) | MaxBand<br>MultiBand  | 平均延滯<br>平均停車次數<br>平均停等時間<br>平均速率<br>相同需求下，離開系統車輛數 | AIMSUN               |

| 作者(年份)                  | 設計目標            | 求解方法                       | 比較模式                                 | 比較績效指標                                        | 車流模擬軟體 |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|
| Yang et al. (2015)      | 最大綠燈帶寬          | 混合整數線性規劃(MILP)             | MaxBand-1<br>MaxBand-2<br>TRANSYT-7F | 平均延滯<br>平均停等次數<br>平均速率                        | VISSIM |
| Jing et al. (2020)      | 最大綠燈帶寬          | 混合整數非線性規劃(MINLP)           | MultiBand<br>Conditional PBand       | 總綠燈帶寬<br>平均延滯<br>平均停車次數<br>CPI(延滯+10×停車次數)    | VISSIM |
| Robertson (1969)        | 最小系統績效指標(延滯+停等) | 爬山尋優法                      | 無                                    | 車輛延滯<br>車輛停等<br>能源消耗                          | 無      |
| Liu and Chang (2011)    | 最小旅行時間          | 基因演算法(GA)                  | TRANSYT-7F                           | 總延滯<br>總排隊時間<br>總路口通過流量                       | CORSIM |
| Lan and Chang (2016)    | 最小幹道車流延滯        | 雙層規劃(Bi-level programming) | MaxBand<br>TRANSYT-7F                | 路口週期長度<br>幹道旅行時間<br>平均延滯<br>平均支道延滯<br>雙向綠燈帶寬度 | CORSIM |
| Christofa et al. (2016) | 最小系統內個人延滯       | 混合整數線性規劃(MILP)             | TRANSYT-7F                           | 小客車人均延滯<br>公車人均延滯<br>系統人均延滯                   | AIMSUN |

| 作者(年份) | 設計目標   | 求解方法           | 比較模式                        | 比較績效指標                          | 車流模擬軟體 |
|--------|--------|----------------|-----------------------------|---------------------------------|--------|
| 本研究模式  | 最大綠燈帶寬 | 混合整數線性規劃(MILP) | 主觀分群準則+MaxBand<br>MaxBandLA | 平均延滯<br>平均停等次數<br>平均速率<br>綠燈帶效率 | VISSIM |

資料來源：本研究整理

## 2.2 幹道群組劃分

本節將回顧幹道群組劃分方法，針對不同的群組劃分指標與方法，以及幹道分群及續進整合設計模式之相關文獻進行彙整。

替幹道中的多路口設計綠燈續進帶被視為一種能有效增加幹道運作效率的做法，然而當幹道中的路口數量增加時，若要獲得良好的續進帶寬便會更加困難。如圖 2.2.1 所示，於該場域以傳統號誌續進模式替幹道五個路口設計號誌續進時，可提供幹道雙向足夠的綠燈續進帶寬，然而一旦欲連鎖之路口數目增加至七個路口，傳統號誌續進模式將無法同時替兩個方向設計足夠的綠燈帶寬。過窄的綠燈帶寬在實務應用上，可能促使交通流量無法通過路口，或因為駕駛者行為、車輛特性、當地交通狀況等造成的車速變動，使得車輛容易離開續進帶，而達不到原先預期的結果，因此，有必要將幹道系統內的多路口分解為許多子分群。

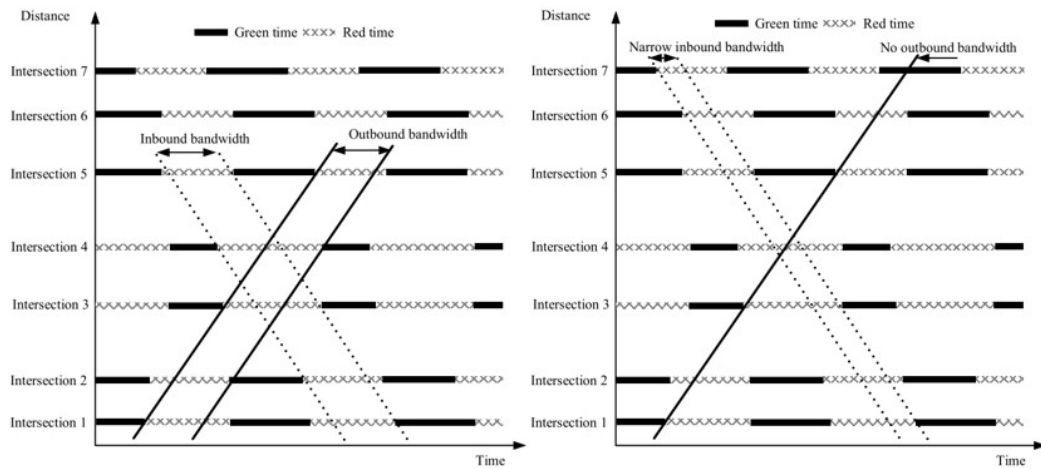


圖 2.2.1 連鎖路口增加之綠燈帶時空圖比較

資料來源：Hao et al. (2018)

林良泰 (1993) 提出號誌群組劃分原則，以邏輯性程序分析準則，透過路口屬性資料與路段屬性資料決定號誌群組之劃分。路口屬性資料包含某時相之流動數、路口時相數、某時相所使用之車道數總和等等，其目的在於判斷瓶頸路口；而路段屬性資料包含臨界路段長度、基本車流參數、車流流動方向、路口環境因素與車流方向等五項，為相鄰路段是否劃分為同一群組內之重要依據。該方法由逐步回歸方式建構號誌連鎖臨界路

段長度模式，由於該回歸模式納入車隊長度與車隊百分比考慮，故更加符合實際交通狀況，接著再以「續進可能值」概念進行各號誌群組間時差逐秒微調，求得各種時差組合之總續進可能值最大。

交通部運輸研究所 (2006) 建議以兩階段、三準則標準化路口群組劃分之作業程序。第一階段之路口群組劃分以鄰近路段獨立化準則、臨界路段長度準則以及車流管制方式與幾何路型等三項準則為依據。鄰近路段獨立化準則係指檢測車輛到達路口型態，以決定相鄰路口間之運作關係，然而檢測車輛到達路口型態所需資料及成本十分可觀，故該研究建議若實務上經費及時間有限，可以後兩準則替代之；臨界路段長度準則依據臨界路段長度進行群組劃分，其臨界路段長度建議以 300~600 公尺為原則，當兩路口距離大於臨界路段長度，則不宜將兩路口劃為同一群組中，實際採用之臨界路段長度由工程人員依經驗判斷；於車流管制方式與幾何路型方面，當道路幾何特性或車流方向有明顯改變時，則一般建議不將相鄰路口劃入同一群組。第二階段群組劃分中，則是依據第一階段劃分結果，進一步檢視各群組中所包含之路口數量是否過大，以致影響後續號誌時制設計結果。

Hook and Albers (1999) 建議將相鄰間距小於 0.8 公里之兩路口，在設計連鎖時組合為同一子分群，相鄰間距大於 1.6 公里之兩路口則拆分為不同子分群。而針對相鄰間距 0.8 公里至 1.6 公里間之兩路口，作者提出三種不同的決定幹道號誌分群方法，針對此三種分群方法之說明如下：

### 1. Coupling Index (*CI*)

此分群方法原理取自牛頓萬有引力定律，認為兩個物體之間的吸引力與質量成正比，與距離平方成反比。*CI* 為一可用來計算幹道中各兩相鄰路口間是否該連鎖之指標，其計算公式如下：

$$CI = \frac{V}{D^2} \quad (2-5)$$

在公式中，*V* 指的是交通流量，而 *D* 指的是路口間之距離。越高的 *CI* 值通常代表該路口應該與相鄰路口實施連鎖，然而，此方法沒有一個固定的 *CI* 值參照標準，作為路口是否該連鎖之依據，必須透過計算整條幹道路口之數值大小，選擇相對需要實施連鎖之路口。

### 2. Strength of Attraction (*SoA*)

SoA指標之概念為相鄰兩路口間是否該實施號誌連鎖之必要性，其納入了車輛干擾、路段交通量、行駛速率、相鄰路口間距離考慮。其公式如下：

$$SoA = I \times V \times (S/D)^2 \quad (2-6)$$

在公式中， $V$ 為路段交通流量， $S$ 為路段行駛速率， $D$ 為路口間相鄰距離。而根據 Hook and Albers (1999)所建議， $I$ 為車隊行駛於路段中所受到的干擾，當路段中沒有停車行為時，可將干擾值( $I$ )設為 2；當路段中之停車方向為平行停車時，可將干擾值( $I$ )設為 1.5；當路段中之停車方向不平行於路段時，可將干擾值( $I$ )設為 1。與  $CI$  方法相同， $SoA$  並無一固定基準值決定路口間是否應該連鎖，而是透過計算出之數值大小，決定路口實施連鎖之優先性。

### 3. Coordinatability Factor ( $CF$ )

此方法為號誌時制設計商業軟體 Synchro 所採用，其計算為依據路段行駛時間、路段交通流量、兩路口相鄰距離、車隊大小、車輛隊列長度與號誌週期長度，其計算公式如下：

$$CF = \max(CF_1, CF_2) + A_p + A_v + A_c \quad (2-7)$$

在公式中， $CF_1$ 、 $CF_2$  分別代表旅行時間  $CF$  與單位長度車流量  $CF$ ，取其一之最大值後，再加入群組調整因子( $A_p$ )、流量調整因子( $A_v$ )、週期長度調整因子( $A_c$ )，得到最後的  $CF$  值。相比前兩個分群方法，此指標納入了號誌週期長度與車輛隊列長度進行調整。然而此指標之計算由於在 Synchro 程式內進行，計算時依據不同的交通情況給予不同的調整因子，又調整因子為程式依據實務計算經驗決定，故在應用上靈活度較低，計算過程亦較不透明，在設計幹道號誌時可能無法據此達成最佳化。

Fan et al. (2011) 透過德州泰勒市之實際幹道資料，比較 Hook and Albers (1999) 提出之三種不同的幹道號誌分群方法，經過模擬結果顯示，此三種幹道系統分群方法在任何交通需求情境下，分群結果僅有些微差異， $SoA$  方法相較於其他兩種方法，由於考慮因素較多，故對實際交通情況較敏感有較大的變化性，然而多數情境下三種分群方法提出之結果相同。

Tian and Urbanik (2007) 為了處理長幹道尖離峰雙向交通需求差異甚大的問題，利用啟發式方法，旨在提供一個基於系統分解技術的號誌時制計畫。該方法將幹道系統劃分為數個子系統，每個子系統中具有三至五個路口，將每個子系統都經過最佳化程序，

設計出最大的綠燈帶寬效率後，通過適當調整各子系統間之時差，可以形成幹道單向上最大的續進帶寬，先將交通需求較高方向之綠燈帶寬最大化後，再搜尋低交通需求方向的最佳部分帶寬。使用 CORSIM 軟體，比較 PASSER-II 模式結果顯示，此方法確實能夠幹道雙向之綠燈帶寬效率，改善停等次數、旅行時間等績效指標。

Wu et al. (2012) 提出一個在幹道群組劃分下追求最大綠燈帶寬的號誌連鎖方法，利用比較路口直進、轉向之交通流量，對幹道中的多路口進行分群，以創造最大綠燈帶寬達成號誌連鎖並使車輛得以續進。此方法比較每個子分群中所有可能情況所產生的綠燈帶寬，開發 BOTSD 演算法以獲得最佳的綠燈帶寬，並繪製綠燈帶時空圖。在案例研究中，為每個可能的子分群計算有效和最佳綠燈帶寬後，可以使用該研究所提出之方法，獲得每個可能的子分群和綠燈帶寬之組合。透過比較每個可能子分群的平均延滯時間與綠燈續進帶寬的結果顯示，基於最大綠燈帶寬設計之號誌時制計畫通常優於基於最小化延滯設計之號誌時制計畫。此外，通過該研究提出之方法獲得的號誌時制計畫，其績效比通過 Synchro 6.0 和 Messer 演算法獲得之結果來得佳。

Zhang et al. (2016) 為解決長幹道號誌續進問題，提出 MaxBandLA 模式，為最早提出之整合設計模式，以解決長幹道無法直接使用傳統號誌續進模型的問題。該模式得同時處理長幹道分群且最佳化號誌續進，為最早提出之整合設計模式。透過 SimTraffic 模擬之結果顯示，MaxBandLA 模式與 Synchro 相比路口分群結果較佳，在分群後確實可以提供幹道雙向足夠的綠燈帶寬供車輛續進行駛，然而，比較平均延滯、平均停等次數與平均行駛速率可以發現，MaxBandLA 模式儘管能提供幹道車輛較大的續進降低的平均延滯時間，卻因為其綠燈帶寬較大使得整體路網中的平均延滯反而增加，在三項績效指標中，平均延滯與平均行駛速率均為 Synchro 表現較佳，MaxBandLA 模式則在平均停等次數表現較好。然而，此模式設計出之綠燈帶寬為同一子分群內兩方向同寬，並未考慮各方向、各路段之流量大小，故模式仍有改善空間。此外，該模式假設路口均為簡單二時相，較不符合實際道路情況。

Hao et al. (2018) 提出一個能將長幹道中的多個路口分群並同時最佳化號誌續進之模型，提供每一子分群足夠的綠燈帶寬，以解決長幹道中無法直接使用傳統號誌續進模型的問題。該研究之目標式除了最大化雙向綠燈帶寬外，亦考量最小化路口分群數與斷點路口交通量。在限制式部分，除了 MaxBand 模式所囊括的干擾限制式、循環整數限制式與綠燈帶寬限制式外，為了達成最小化路口分群，加入了幹道分解限制式及子分群綠燈時比限制式。經美國聖地牙哥實際幹道資料驗證，該模式將擁有 15 個路口之幹道，

分為三個子分群，並針對每個子分群給予不同的綠燈帶寬，與 Synchro 提出之時制計畫相比，幹道平均延滯、平均停等次數、平均速率均較佳，且使用 MaxBand 模式並無法同時達成提供 15 路口雙向綠燈帶寬，故該研究提出之模式同時將長幹道路路口分群與設計綠燈帶寬有效，適合用於未知幹道車輛起迄對資料時，設計幹道號誌時制計畫使用。然而，此模式於計算時，須事先給定號誌週期時間與時比，無法經由模式計算出最佳週期與時比，且模式假設所有車輛均沿幹道持續行駛，較不符合現實生活之交通行為。

## 2.3 車流擴散模式

在 MaxBand 及 MultiBand 模式中，均假設車輛於路段中行駛速率一致，然而在現實生活中，車輛自上游停止線綠燈始亮起，以類似車隊形式運行，每輛車之車輛性能、行駛速率及行為軌跡並不相同，車輛於路段中之間距將逐漸增加，導致車隊擴散，且該擴散現象將隨路段長度增加而增加。若車隊擴散模式得以透過車隊大小、行駛速度、車隊內速度分配等重要變數，正確描述車流由上游行駛至下游之行為，將使模式更貼近於真實交通狀況，以預測抵達車隊之流量及時間，有助於交通控制。一般而言，Pacey 及 Robertson 兩人發展之擴散模式被證實可用以描述車隊擴散行為。

Pacey (1956) 以車輛動力學為基礎，發展車輛個體速率差異之擴散模式。假設車隊擴散現象僅與車輛個體性能間之差異有關，而與車輛加減速無關，當車輛於綠燈始亮時開始行駛，會依不同車輛間之速度差異逐漸擴散，且車隊中各車輛於路段間之旅行時間成常態分佈。該模式推導之旅行時間分布函數如下所示：

$$g(T) = \frac{d}{T^2 S \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(d/T - \bar{V})^2}{2S^2}} \quad (2-8)$$

其中， $T$  為旅行時間， $d$  為上游停止線至下游路段某定點之距離， $\bar{V}$  為車流平均旅行速率， $S$  為不同車輛行駛速率之標準差。

Robertson (1969) 使用迭代的方法解釋車隊擴散行為，為 Pacey 擴散模式之離散版本，其不同之處在於假設車輛行駛時間為幾何分布。該模式主要以車隊擴散因子( $\alpha$ )及旅行時間因子( $\beta$ )兩變數為基礎，表示車隊擴散及車隊在路段中行駛時間如下：

$$q_2^{i+T} = F_n \times q_1^i + (1 - F_n) \times q_2^{i+T-1} \quad (2-9)$$

$$F_n = \frac{1}{1 + T_a \alpha \beta} \quad (2-10)$$

$$T = \beta T_a \quad (2-11)$$

其中， $q_2^{i+T}$  為對任一時階  $i$ ，預測經  $T$  時間後之路段下游抵達車隊流量， $q_1^i$  為第  $t$  時階上游出發車隊流量， $T_a$  為平均路段旅行時間(以時階數為單位)， $n$  為模擬時階數， $F_n$  為平滑因子。由模式可知，該模式上階段之狀態會影響下階段狀態，每時階  $t$  的下游抵達交通量取決於上由路口出發之流量，而時階  $t$  為一給定時間間隔，故須使用迭代方式以預測下游交通量。

在 Robertson 擴散模式中，車隊擴散程度由  $\alpha$  及  $\beta$  決定，此二值介於 0 與 1 之間，若  $\alpha=0$ ， $\beta=1$  表示車隊無擴散現象；而  $\alpha=1$ ， $\beta=1$  則表示該車隊完全擴散，故此二參數之校估為模式準確性之關鍵，然而，此二參數受到路面坡度、曲率、交通量、交通組成、車道數等因素干擾，並無廣泛適用之參數值，在 TRANSYT-7F 中以固定  $\beta$  值為 0.8 的方式校估  $\alpha$  為 0.35。與 Pacey 擴散模式相比，Robertson 模式由於模式較為精簡，更易於計算，因此適合應用於較大研究區域之號誌最佳化，被用於許多號誌設計軟體中，如：TRANSYT、SCOOT、SATURN 等。

Farzaneh (2005) 整理校估  $\alpha$  及  $\beta$  值之文獻，各文獻之校估值見圖 2.3.1。多數研究均以最佳配適方法校估參數，且其參數校估值受道路及交通狀況而變化，在中心商業區以外之道路校估值較低，而中心商業區內之校估值受車流量、車流轉向量及是否有路邊停車影響。

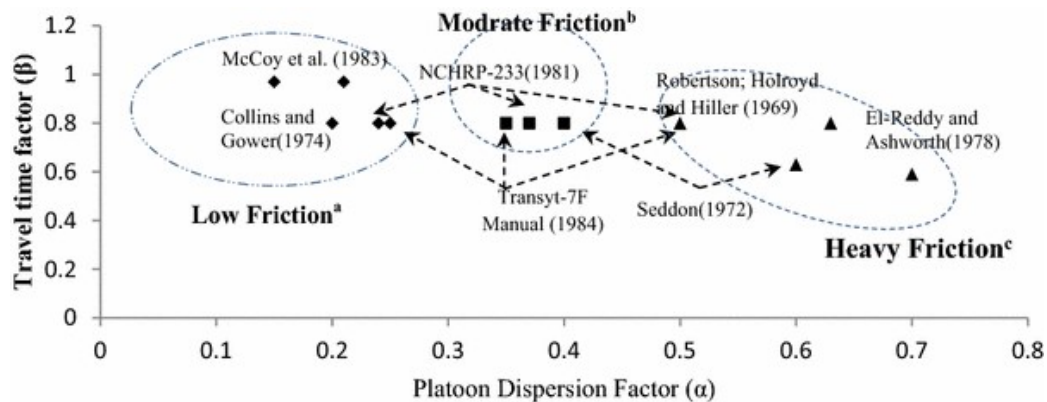


圖 2.3.1 Robertson 擴散模式最佳配適參數校估結果

資料來源：Farzaneh (2005)

馮惠蓮 (1986) 調查國內車流擴散現象，在無公車及轉向車輛影響程度不大之路段，

以統計檢定分析及最佳配適方法分別校估汽、機車之車隊擴散模式參數，汽車之 $\alpha=0.3$ ， $\beta=0.77$ ，機車之 $\alpha=0.44$ ， $\beta=0.73$ 。

胡守任 (1991) 以行駛時間變異數與平均數之比值代表 Robertson 擴散模式之 $\alpha$ 值，發展一套國內混合車流車隊擴散模式。經過實例驗證，證實 Robertson 擴散模式能有效預測國內混合車流車隊擴散行為，比較 TRANSYT-7F 及 SIGOP-III 兩者之擴散模式及該模式，發現 TRANSYT-7F 之擴散模式預設之 $\alpha$ 值大體能有效推估混合車流車隊擴散型態，其結果與所提出之擴散模式相近，而 SIGOP-III 擴散模式則有低估之情形。

Lu et al. (2008) 以 MaxBand 模式為基礎，結合車隊擴散模式擴充為 MaxBand-Dispersion 模式，調整 MaxBand 模式中對於路段旅行時間之限制式，將車流運作導入於幹道號誌控制模式中。

Cho et al. (2019) 考量高速公路匝道匯入幹道之高轉向量特性，以 Yang (2015) 模式為基礎，引入車流擴散及車流消散時間變數，放鬆車輛以自由車流速率行駛之假設，將車流運作行為加入模式中進一步擴充多路徑最大綠燈帶寬模式。該模式所引用之車隊擴散模式為 Robertson 擴散模式，其 F 值之計算採用 $\alpha\beta=0.35$ 。經新竹竹北市國道一號下匝道路段實證分析，該模式之績效結果相較過去模式可改善約 40%，驗證其提出之擴充多路徑最大綠燈帶寬模式於實際可行且結果較佳。

## 2.4 小結

回顧以上幹道號誌設計方法，可以得知一般在設計幹道連鎖號誌時，使用數學規劃方式，以設計目標為目標式，並將現實考量納入限制式。在設計方法上可大致分為最大綠燈帶寬法與最小負效用法，其中最大綠燈帶寬法有所需輸入資料少、對車輛駕駛較直覺等優點。根據 Yang (2001) 應用最大綠燈帶寬法與最小負效用法，於堪薩斯州勞倫斯市一處擁有九個路口之幹道實驗，結果顯示基於最大綠燈帶寬之設計方法在多數情況下優於最小負效用法。對於最小負效用法來說，其主要目的為提供系統最小負效用，綠燈帶寬僅為隨之而來的副產品，以現實道路考量來說，若其設計出之幹道號誌時制計畫沒有提供一個好的續進，通常也不被交通主管機關所採用，故本研究以最大綠燈帶寬法為設計目標。

然而，在以上回顧的最大綠燈帶寬設計法中，其績效驗證場域多為三至六個路口的幹道系統，當路口數量增加時，將無法同時替幹道雙向設計綠燈帶寬，或設計出之綠燈帶寬無法滿足交通需求。由幹道群組劃分回顧中可知，以往的學者認為將幹道系統劃分為數個子系統分別設計綠燈續進帶，為此問題之解方，故提出了許多的幹道群組劃分準則，針對流量大小、道路幾何、速率等標準進行分群，企圖找出較佳之幹道號誌設計方法。

另一方面，亦有學者針對幹道號誌劃分及續進提出整合設計模式，初期多半以啟發式解法，試圖搜尋出較優之分群結果與號誌時制計畫，惟此類方法仍多為將分群與設計幹道續進分開之步驟，自 Zhang et al. (2016) 開始，試圖以整合模式同時處理幹道群組劃分與續進的問題，且其數學模式為混合整數線性規劃，得以保證在模式限制下所求出之分群結果為全域最佳解。

然而，於整合設計模式部分，無論是 Zhang et al. (2016) 或 Hao et al. (2018) 提出之模式均仍有改善空間，其多項假設與實際車流運作特性並不相符，此外，由於現實中交通需求較大之幹道，車輛左轉須面對較大量之對向直進車流，基於安全考量較少採用簡單二時相作為號誌時相選擇，故如何改善整合設計模式，將其納入更多考量以符合現實生活情況，增加其可用性與幹道行駛效率，為相當重要之課題，亦為本研究之目標。

### 第三章 模式建構

為解決傳統最大綠燈帶寬幹道號誌設計方法在面臨長幹道時，必須透過路口分群以考量續進之問題，本研究欲發展一幹道號誌分群及續進最佳化整合設計模式，以MaxBand 最大綠燈帶寬模式為基礎，建立混合整數線性規劃模式，同時處理分群並達到幹道系統綠燈帶寬最大化，期能相較以往設計出之整合模式，考慮更真實道路狀況，並得到全域最佳之結果。本章將說明長幹道路口分群及續進整合設計模式之決策變數、參數、目標式及限制式。

#### 3.1 模式架構

本研究之模式參考 Zhang et al. (2016) 模式內之分群假設及限制式，規範路口分群結果，其假設幹道系統中不存在任一路口之通過流量與其他路口、任一路段之路段長度與其他路段有明顯差異，且不考慮如道路曲率、是否有中央分隔島、路邊停車等其他道路幾何差異，並以 Little et al. (1981) 提出之 MaxBand 最大綠燈帶寬模式為基礎，設計幹道號誌時制計畫，希望能在分群結果下達到最大綠燈帶寬。以下說明該模式之建立邏輯：

$$Max \quad (b + k\bar{b}) \quad (3-1)$$

$$s. t. \quad (1 - k)\bar{b} \geq (1 - k)kb \quad (3-2)$$

$$\frac{1}{C_2} \leq Z \leq \frac{1}{C_1} \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} w_i + b \leq 1 - r_i \\ \overline{w_i} + \bar{b} \leq 1 - \bar{r_i} \end{cases} \quad \forall i \in (1, n) \quad (3-4)$$

$$\begin{cases} (d_i/f_i)z \leq t_i \leq (d_i/e_i)z \\ (d_i/\overline{f_i})z \leq \bar{t_i} \leq (d_i/\overline{e_i})z \end{cases} \quad \forall i \in (1, n - 1) \quad (3-5)$$

$$\begin{cases} (d_i/h_i)z \leq (d_i/d_{i+1}) - t_i \leq (d_i/g_i)z \\ (d_i/\overline{h_i})z \leq (d_i/\overline{d_{i+1}}) - \bar{t_i} \leq (d_i/\overline{g_i})z \end{cases} \quad \forall i \in (1, n - 2) \quad (3-6)$$

$$\begin{aligned} (w_i + \overline{w_i}) - (w_{i+1} + \overline{w_{i+1}}) + (t_i + \bar{t_i}) + \delta_i L_i - \overline{\delta_i L_i} - \delta_{i+1} L_{i+1} \\ + \overline{\delta_{i+1} L_{i+1}} - m_i = (r_{i+1} - r_i) \quad \forall i \in [1, I - 1] \end{aligned} \quad (3-7)$$

$$b, \bar{b}, z, w_i, \overline{w_i}, t_i, \bar{t_i} \geq 0, \quad m_i \text{ integer}, \quad \delta_i, \overline{\delta_i} \text{ zero/one variables}$$

其中， $k$ 為幹道方向權重因子，該值之計算為下行方向(inbound)直進車流量與上行方向(outbound)直進車流量之比值。 $b$ 為綠燈帶寬、 $z$ 為幹道號誌週期、 $w$ 為每路口紅燈結束至綠燈帶寬時間、 $t$ 為每個路段行駛時間、 $\delta_i, \bar{\delta}_i$ 為最佳化路口左轉早開、遲閉之順序，另符號 $\bar{\quad}$ 之有或無分別表示幹道之下行方向(inbound)、上行方向(outbound)。MaxBand 目標式以幹道系統雙向綠燈帶寬和最大為目標，並引入幹道方向權重因子調整雙向綠燈帶寬寬度。

式 3-2 為幹道方向綠燈帶寬調整限制式，以 $k$ 來調整幹道雙向綠燈帶寬之大小，當 $k < 1$ 時，滿足上行方向(outbound)較大之交通需求，此式即為 $\bar{b} \geq kb$ ；當 $k > 1$ 時，滿足下行方向(inbound)較大之交通需求，此式即為 $\bar{b} \leq kb$ 。

式 3-3 為幹道週期限制式，給定 $C_1$ 、 $C_2$ 為週期下界、上界，求得最佳週期。

式 3-4 確保綠燈帶僅通過可行的綠燈時間，而不侵占紅燈時間，見圖 3.1.1。

式 3-5、式 3-6 決定幹道雙向車輛續進速率以獲得各路段之旅行時間。

式 3-7 為循環整數限制式，其目的在於建立路口間為續進狀態的關係。以圖 3.1.1 為例，觀察 A 至 B 之關係式為：

$$\emptyset(h, i) + \bar{\emptyset}(h, i) + \Delta_h - \Delta_i = m(h, i) \quad (3-8)$$

其中 $\emptyset$ 為上行方向路口間時差(internode offset)， $\bar{\emptyset}$ 為下行方向路口間時差， $\Delta$ 則為路口內時差(intranode offset)。3-8 式表示兩路口關係呈幹道週期時間整數倍。

$$\emptyset(h, i) + \left(\frac{1}{2}\right) r_i + w_i + \tau_i = \left(\frac{1}{2}\right) r_h + w_h + t(h, i) \quad (3-9)$$

$$\bar{\emptyset}(h, i) + \left(\frac{1}{2}\right) r_i + \bar{w}_i = \left(\frac{1}{2}\right) \bar{r}_h + \bar{w}_h - \tau_i + \bar{t}(h, i) \quad (3-10)$$

圖中之 C 至 D、 $\bar{C}$ 至 $\bar{D}$ ，則可各自表示為 3-9、3-10 式，旨在建立路段旅行時間及兩路口時差之關係。

$$\Delta_i = \left(\frac{1}{2}\right) [(2\delta_i - 1)L_i - (2\bar{\delta}_i - 1)\bar{L}_i] \quad (3-11)$$

3-11 式表達路口內時差，由於需考慮綠燈左轉早開或遲閉，於計算時比階段需自綠燈時間內計算 $L_i$ 、 $\bar{L}_i$ ，代表各路口之左轉綠燈時比。故引入 $\delta_i$ 、 $\bar{\delta}_i$ 兩二維變數，表達四種時相設置中早開、遲閉的設計，見圖 3.1.2。

將 3-9、3-10、3-11 式代入 3-8 式後，即可得 3-7 循環整數限制式。

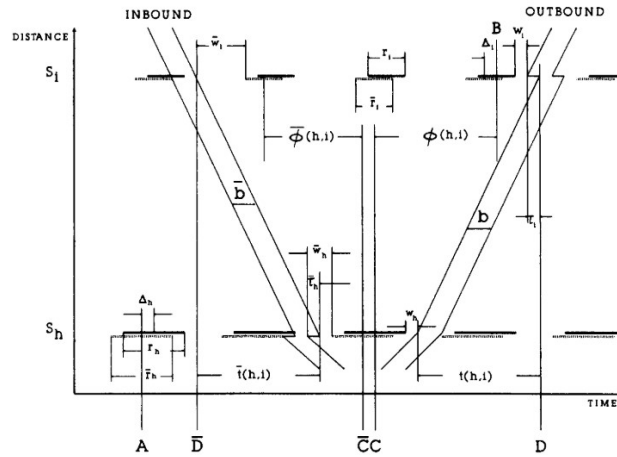


圖 3.1.1 MaxBand 綠燈帶寬時空圖

資料來源：Gartner et al. (1991)

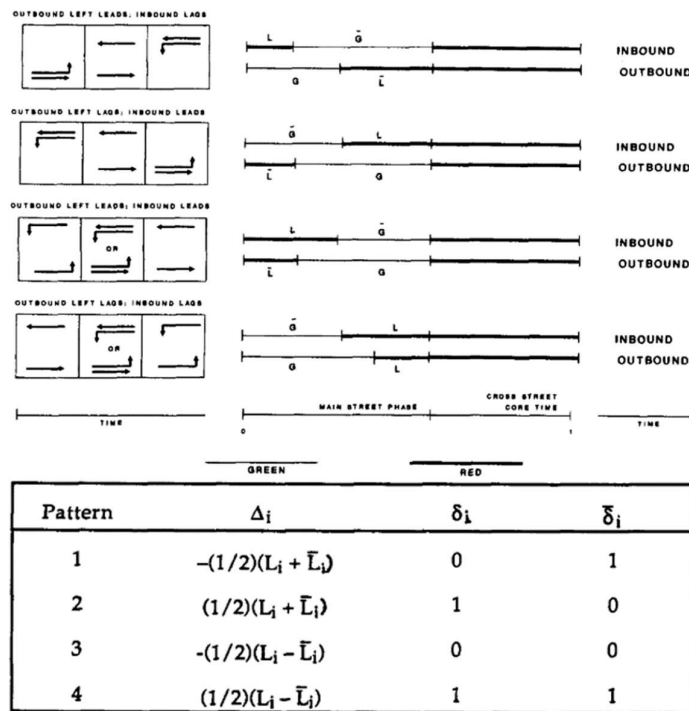


圖 3.1.2 綠燈左轉情境及變數

資料來源：Gartner et al. (1991)

## 3.2 數學模式

### 3.2.1 模式參數與變數

集合

|     |     |
|-----|-----|
| $I$ | 路口  |
| $J$ | 子分群 |

參數

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| $K$                           | 幹道方向權重因子                  |
| $J_1, J_2$                    | 子分群路口數下界/上界               |
| $C_1, C_2$                    | 週期時間下界/上界                 |
| $r_i$                         | 第 $i$ 路口紅燈時比              |
| $L_i(\overline{L_i})$         | 第 $i$ 路口上行(下行)左轉綠燈時比      |
| $t_f(\overline{t_f})$         | 上行(下行)方向路段車輛最短旅行時間        |
| $t_s(\overline{t_s})$         | 上行(下行)方向路段車輛最長旅行時間        |
| $V_{i,f}(\overline{V_{i,f}})$ | 上行(下行)方向第 $i$ 路段內車輛最高行駛速率 |
| $V_{i,s}(\overline{V_{i,s}})$ | 上行(下行)方向第 $i$ 路段內車輛最低行駛速率 |
| $d_i$                         | 第 $i$ 路口至第 $i+1$ 路口距離     |
| $F$                           | 緩和係數(smoothing factor)    |

主要決策變數

|                       |                                                                                                                   |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $b_j(\overline{b_j})$ | 第 $j$ 子分群上行(下行)綠燈帶寬                                                                                               |
| $x_j^i$               | $\begin{cases} 1, \text{當第} i \text{路口屬於第} j \text{子分群} \\ 0, \text{當第} i \text{路口不屬於第} j \text{子分群} \end{cases}$ |
| $y_j^i$               | $\begin{cases} 1, \text{當第} i \text{路段屬於第} j \text{子分群} \\ 0, \text{當第} i \text{路段不屬於第} j \text{子分群} \end{cases}$ |

輔助決策變數

|                                 |                                               |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| $Z_j$                           | 第 $j$ 子分群號誌週期倒數                               |
| $w_i(\overline{w_i})$           | 於第 $i$ 路口上行(下行)方向綠燈帶寬最左(右)端至最近紅燈時間最右(左)端之時間長度 |
| $t_i(\overline{t_i})$           | 由第 $i(i+1)$ 路口至第 $i+1(i)$ 路口車輛旅行時間            |
| $\delta_i(\overline{\delta_i})$ | 左轉方式二維變數                                      |
| $m_i$                           | 循環整數變數，表示第 $i$ 路口至第 $i+1$ 路口相差週期              |

### 3.2.2 目標式

本研究目標式同 MaxBand 之目標，為最大化綠燈帶寬。由於 MaxBand 模式中僅有雙向一組綠燈帶寬，而本研究經過分群後，會有  $J$  組綠燈帶寬，若直接加總恐影響分群結果，故透過平均方式，期能獲得整體幹道系統內平均綠燈帶寬最大。目標式呈現如下：

$$Max \sum_j \frac{b_j + K\bar{b}_j}{J} \quad (3-12)$$

### 3.2.3 限制式

本模式限制式羅列說明如下：

$$\sum_j x_j^i = 1 \quad \forall i \in [1, I] \quad (3-13)$$

式 3-13 限制每個路口  $i$ ，只能被分派到任意一個子分群  $j$  內。

$$J_1 \leq \sum_i x_j^i \leq J_2 \quad \forall j \in [1, J] \quad (3-14)$$

式 3-14 為了確保幹道在分群過程中，保有車輛行駛時之基本續進，同時避免因單一子分群路口數過多，導致綠燈帶寬過窄，限制最少一個子分群內路口數之上下界。

$$\sum_i y_j^i = \sum_i x_j^i - 1 \quad \forall j \in [1, J] \quad (3-15)$$

式 3-15 說明在每個子分群內，於該子分群內之路段數必定為屬於該子分群之路口數減一。本式可確保分群斷點落於路段中，且同一子分群內之路口順序為連續。

$$2 * y_j^i \leq (x_j^i + x_j^{i+1}) \leq 1 + y_j^i \quad \forall i \in [1, I-1], j \in [1, J] \quad (3-16)$$

式 3-16 同為限制分群結果限制式，整理兩種不同分群情況後而得。當一路段屬於一子分群時，連接該路段之前後路口皆應屬該子分群(若  $y_j^i = 1$ ，則  $x_j^i + x_j^{i+1} = 2$ )；反之，當一路段不屬於一子分群時，則連接該路段至少有一路口不屬於該子分群(若  $y_j^i = 0$ ，則  $x_j^i + x_j^{i+1} \leq 1$ )。

$$\bar{b}_j(1-K) \geq Kb_j(1-K) \quad \forall j \in [1, J] \quad (3-17)$$

式 3-17 同 MaxBand 模式之幹道方向綠燈帶寬調整限制式，以幹道方向權重因子  $K$

來調整幹道雙向綠燈帶寬之大小，其值計算為下行直行流量除以上行直行流量。

$$\frac{1}{C_2} \leq Z_j \leq \frac{1}{C_1} \quad \forall j \in [1, J] \quad (3-18)$$

式 3-18 為幹道週期限制式，規範每子分群之週期長度於上下界之內。

$$(w_i + b_j) - (1 - r_i) \leq M(1 - x_j^i) \quad \forall i \in [1, I], j \in [1, J] \quad (3-19)$$

$$(\overline{w}_i + \overline{b}_j) - (1 - r_i) \leq M(1 - x_j^i) \quad \forall i \in [1, I], j \in [1, J] \quad (3-20)$$

式 3-19、3-20 確保綠燈帶不侵犯紅燈時間。其表示意涵為

$$\text{綠燈帶寬未使用綠燈時間}(w_i) + \text{子分群綠燈帶寬}(b_j) \leq \text{可用綠燈時間}$$

旨在限制綠燈帶不大於週期時間減紅燈之剩餘時間，僅發生於路口存在該子分群綠燈帶寬通過時。若  $i$  路口不屬於  $j$  子分群時，此兩條限制式將小於極大值，不會產生效果。

$$t_i \geq M(y_j^i - 1) + \sum_{T_i=t_f}^{t_s} T_i F(1 - F)^{T_i - t_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I - 1], j \in [1, J] \quad (3-21)$$

$$t_i \leq M(1 - y_j^i) + \sum_{T_i=t_f}^{t_s} T_i F(1 - F)^{T_i - t_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I - 1], j \in [1, J] \quad (3-22)$$

$$\overline{t}_i \geq M(y_j^i - 1) + \sum_{T_i=\overline{t}_f}^{\overline{t}_s} T_i F(1 - F)^{T_i - \overline{t}_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I - 1], j \in [1, J] \quad (3-23)$$

$$\overline{t}_i \leq M(1 - y_j^i) + \sum_{T_i=\overline{t}_f}^{\overline{t}_s} T_i F(1 - F)^{T_i - \overline{t}_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I - 1], j \in [1, J] \quad (3-24)$$

式 3-21 至 3-24 改良 MaxBand 模式式 3-5、3-6，目的為決定幹道雙向各路段車輛續進速率，以獲得各路段之旅行時間。本研究將 Robertson 車隊擴散模式引入最大綠燈帶設計方法中，考量實際車流運作特性，該模式假設車隊中各車輛於路段旅行時間分配型態為幾何分配，對路段中旅行時間進行迭代運算。其中

$$F = \frac{1}{1 + 0.35T_i}$$

$$t_f = \frac{\text{路口距離}}{\text{最快車輛行駛速率}}$$

$$t_s = \frac{\text{路口距離}}{\text{最慢車輛行駛速率}}$$

本研究擴散模式 F 值計算採用  $\alpha\beta=0.35$ ，同 Robertson (1969) 及 Cho et al. (2019)。此四條限制式僅於子分群內之各路段間產生效果，斷點路段之旅行時間不屬於限制式限制範圍，故於車隊擴散模式前加入二維變數及極大值協助判斷該路段是否於子分群內。

$$\begin{aligned} M(y_j^i - 1) &\leq (w_i + \overline{w_i}) - (w_{i+1} + \overline{w_{i+1}}) + (t_i + \overline{t_i}) + \delta_i L_i - \overline{\delta_i L_i} \\ &\quad - \delta_{i+1} L_{i+1} + \overline{\delta_{i+1} L_{i+1}} - m_i - (r_i - r_{i+1}) \leq M(1 - y_j^i) \quad \forall i \\ &\quad \in [1, I - 1], j \in [1, J] \end{aligned} \quad (3-25)$$

式 3-25 為 MaxBand 模式中之循環整數限制式，目的在建立路口及路口間之連鎖關係，該限制式僅在子分群內發生作用而不在斷點發生效果，故於上下界加入考量路段是否於子分群內之二維變數判斷。

### 3.2.4 模式總覽

綜整模式目標式及限制式如下：

$$\begin{aligned}
Max \quad & \sum_j \frac{b_j + K\bar{b}_j}{J} \\
s.t. \quad & \sum_j x_j^i = 1 \quad \forall i \in [1, I] \\
& J_1 \leq \sum_i x_j^i \leq J_2 \quad \forall j \in [1, J] \\
& \sum_i y_j^i = \sum_i x_j^i - 1 \quad \forall j \in [1, J] \\
& 2 * y_j^i \leq (x_j^i + x_j^{i+1}) \leq 1 + y_j^i \quad \forall i \in [1, I-1], j \in [1, J] \\
& \bar{b}_j(1-K) \geq Kb_j(1-K) \quad \forall j \in [1, J] \\
& \frac{1}{C_2} \leq Z_j \leq \frac{1}{C_1} \quad \forall j \in [1, J] \\
& (w_i + b_j) - (1 - r_i) \leq M(1 - x_j^i) \quad \forall i \in [1, I], j \in [1, J] \\
& (\bar{w}_i + \bar{b}_j) - (1 - r_i) \leq M(1 - x_j^i) \quad \forall i \in [1, I], j \in [1, J] \\
& t_i \geq M(y_j^i - 1) + \sum_{T_i=t_f}^{t_s} T_i F(1-F)^{T_i-t_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I-1], j \in [1, J] \\
& t_i \leq M(1 - y_j^i) + \sum_{T_i=t_f}^{t_s} T_i F(1-F)^{T_i-t_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I-1], j \in [1, J] \\
& \bar{t}_i \geq M(y_j^i - 1) + \sum_{T_i=\bar{t}_f}^{\bar{t}_s} T_i F(1-F)^{T_i-\bar{t}_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I-1], j \in [1, J] \\
& \bar{t}_i \leq M(1 - y_j^i) + \sum_{T_i=\bar{t}_f}^{\bar{t}_s} T_i F(1-F)^{T_i-\bar{t}_f} Z_j \quad \forall i \in [1, I-1], j \in [1, J]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M(y_j^i - 1) &\leq (w_i + \overline{w_i}) - (w_{i+1} + \overline{w_{i+1}}) + (t_i + \overline{t_i}) + \delta_i L_i - \overline{\delta_i L_i} - \delta_{i+1} L_{i+1} \\
&\quad + \overline{\delta_{i+1} L_{i+1}} - m_i - (r_i - r_{i+1}) \leq M(1 - y_j^i) \quad \forall i \in [1, I - 1], j \\
&\in [1, J]
\end{aligned}$$

$m_i$ ：整數

$M$ ：極大值

$\delta_i, \overline{\delta_i}$ ：0/1 變數

$b_j, \overline{b_j}, w_i, \overline{w_i}, t_i, \overline{t_i} \geq 0$

## 第四章 實例驗證

為驗證模式求解是否如預期，本研究蒐集實際道路資料，套用前章發展之幹道號誌分群及續進最佳化模式，檢視求解結果合理性，並以車流微觀模擬軟體 VISSIM 檢驗模式於實際路網之績效。接著透過模擬比較本研究之模式與兩種不同主觀分群結果之車流績效結果，評比各模式之優劣及差異，以驗證模式並整理相關結果。

### 4.1 資料蒐集

本研究以新北市汐止區新台五路作為實例驗證場域，該幹道行經汐止市中心為該地區交通要道之一。本研究選定含十三號誌化路口之長幹道，做為實例驗證之範圍，如圖 4.1.1 及表 4.1.1。該幹道西向為進入台北市區方向，途經國道三號汐止交流道，且道路兩側商辦大樓及購物中心林立，可預期尖峰時段有大量通勤交通量造成道路壅塞。此外，由於該幹道負責連結台北市中心及汐止、七堵等衛星市鎮，亦為基隆地區往返台北之重要運輸走廊，尖峰時段常存在不同方向流量差異之特性，得藉由該需求方向性，驗證模式納入雙向交通需求比例調整綠燈帶寬之結果，更適宜做為本研究之驗證場域。

本研究考量該地交通特性，選擇平日下午尖峰時段作為資料蒐集時間，所需資料為驗證場域內幹、支道各路段車道配置、路口距離及各路口於尖峰小時內之轉向交通量。本研究以東向為模式上行方向(outbound)、西向為模式下行方向(inbound)，部分路口為丁字路口，經整理資料後發現，由於資料蒐集時間為下午尖峰，該幹道系統內東向交通需求較西向大( $K=0.75$ )，故預期模式結果將替流量較大之東向，設計出較大之綠燈帶寬。

幹道系統路口距離及各路口交通量需求見表 4.1.2。



圖 4.1.1 實例驗證場域範圍

表 4.1.1 實例驗證場域路口

| 編號 | 路口名稱         | 編號 | 路口名稱              |
|----|--------------|----|-------------------|
| 1  | 新台五路/遠東世界中心  | 8  | 新台五路/秀峰路          |
| 2  | 新台五路/東科大樓/遠雄 | 9  | 新台五路/福安街          |
| 3  | 新台五路/南興路     | 10 | 新台五路/新台五 2 段 41 巷 |
| 4  | 新台五路/連興街     | 11 | 新台五路/江山萬里社區       |
| 5  | 新台五路/青山路     | 12 | 新台五路/活力 double 社區 |
| 6  | 新台五路/新興路     | 13 | 新台五路/茄苳路          |
| 7  | 新台五路/仁愛路     |    |                   |

表 4.1.2 各路口距離及交通量資訊

| 路口編號 | 距離(m) | 東向<br>(Vehicles) |      |     | 西向<br>(Vehicles) |      |     | 南向<br>(Vehicles) |     |     | 北向<br>(Vehicles) |     |     |
|------|-------|------------------|------|-----|------------------|------|-----|------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|
|      |       | 左轉               | 直行   | 右轉  | 左轉               | 直行   | 右轉  | 左轉               | 直行  | 右轉  | 左轉               | 直行  | 右轉  |
| 1    | 320   | 56               | 2497 | —   | —                | 2071 | 28  | 231              | —   | 51  | —                | —   | —   |
| 2    | 246   | 196              | 2495 | 37  | 11               | 1710 | 104 | 84               | 4   | 102 | 287              | 62  | 144 |
| 3    | 156   | 6                | 2420 | 297 | 6                | 1485 | 199 | 236              | 104 | 141 | 199              | 95  | 125 |
| 4    | 217   | 286              | 2223 | 272 | 57               | 1484 | 28  | 43               | 158 | 74  | 132              | 127 | 44  |
| 5    | 140   | 53               | 2172 | 85  | 39               | 1487 | 33  | 59               | 116 | 37  | 45               | 110 | 31  |
| 6    | 219   | 217              | 2014 | 31  | 50               | 1526 | 80  | 277              | 133 | 17  | 16               | 105 | 83  |
| 7    | 101   | 2                | 2079 | 293 | 13               | 1518 | 16  | 17               | 58  | 12  | 126              | 101 | 19  |
| 8    | 234   | 193              | 1886 | 36  | 4                | 1498 | 9   | 267              | 68  | 35  | 14               | 114 | 17  |
| 9    | 147   | 181              | 1750 | 239 | 62               | 1450 | 80  | 54               | 43  | 14  | 47               | 93  | 33  |
| 10   | 544   | —                | 1824 | 13  | —                | 1556 | 22  | —                | —   | 36  | —                | —   | 41  |
| 11   | 360   | —                | 1854 | 11  | 4                | 1570 | —   | —                | —   | —   | 8                | —   | 34  |
| 12   | 356   | —                | 1879 | 9   | 6                | 1567 | —   | —                | —   | —   | 7                | —   | 13  |
| 13   | —     | 73               | 1819 | —   | —                | 1459 | 124 | 86               | —   | 114 | —                | —   | —   |

## 4.2 模式求解結果

### 4.2.1 參數設定

本研究之模型輸入為各時相時比，可直接輸入已知時比進行計算，或將交通流量資料先透過 Webster 時比公式進行資料前處理後，再進行模式計算。由於實際交通調查多僅獲得流量資訊，無法直接得知時比，故本研究須先將上述各路口通過交通量，透過 Webster 公式分別計算出各路口之合理時比，如表 4.2.1。

於模式求解參數設定，本研究將每子分群週期時間上下界設定 90 秒到 120 秒，每子分群路口數限制至少包含三個路口，車輛最快及最慢行駛速率設定為 16.67(公尺/秒)、9.72(公尺/秒)。

表 4.2.1 實例驗證時比計算結果

| 路口編號 | 紅燈<br>( $r_i$ ) | 東向       |               | 西向      |                     |
|------|-----------------|----------|---------------|---------|---------------------|
|      |                 | outbound |               | inbound |                     |
|      |                 | 綠燈直行     | 綠燈左轉( $L_i$ ) | 綠燈直行    | 綠燈左轉( $\bar{L}_i$ ) |
| 1    | 0.270           | 0.73     | 0.022         | 0.708   | 0                   |
| 2    | 0.311           | 0.686    | 0.057         | 0.632   | 0.003               |
| 3    | 0.336           | 0.662    | 0.003         | 0.661   | 0.002               |
| 4    | 0.318           | 0.666    | 0.128         | 0.554   | 0.016               |
| 5    | 0.219           | 0.768    | 0.033         | 0.748   | 0.013               |
| 6    | 0.402           | 0.585    | 0.089         | 0.509   | 0.013               |
| 7    | 0.252           | 0.744    | 0.063         | 0.685   | 0.004               |
| 8    | 0.430           | 0.569    | 0.065         | 0.505   | 0.001               |
| 9    | 0.232           | 0.744    | 0.104         | 0.664   | 0.024               |
| 10   | 0.200           | 0.8      | 0             | 0.8     | 0                   |
| 11   | 0.100           | 0.885    | 0             | 0.9     | 0.015               |
| 12   | 0.100           | 0.889    | 0             | 0.9     | 0.011               |
| 13   | 0.158           | 0.842    | 0.048         | 0.794   | 0                   |

### 4.2.2 模式求解

本模式為一混合整數線性規劃模式，使用 Python 語言，以 Gurobi Optimizer 作為求解平台進行最佳化，將上述交通流量資料換算為時比後，進入模式求解號誌時制計畫，其結果如表 4.2.2。

本研究之模式將此十三路口之幹道分為 4 個子分群，平均每子分群綠燈帶寬為 0.915 週期時間。第一子分群最佳週期時間為 90 秒，包含四個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間分別為 51 秒、30 秒；第二子分群最佳週期時間為 120 秒，包含三個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間分別為 72 秒、71 秒；第三子分群最佳週期時間為 120 秒，包含三個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間分別為 68 秒、56 秒；第四子分群最佳週期時間為 94 秒，包含三個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間分別為 78 秒、46 秒。

由結果可得知，模式成功將驗證場域內十三路口之長幹道分為 4 個子分群，分別替各群設計綠燈帶寬，此外，由於東向方向交通需求較西向大，觀察模式求解結果東向綠燈帶寬均大於西向，顯示本研究模式得以成功替流量需求較大方向設計較寬之綠燈帶寬，符合前述預期效果。

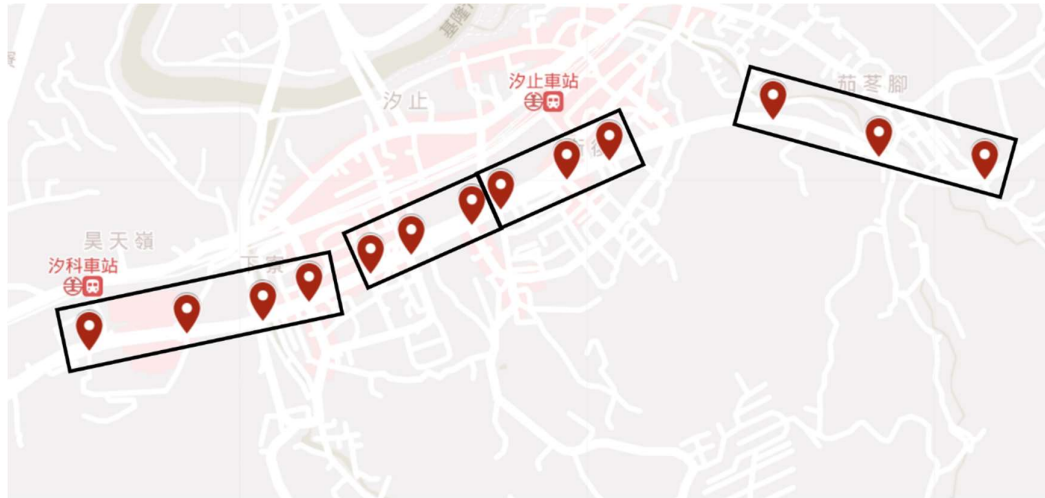


圖 4.2.1 模式求解分群結果

表 4.2.2 模式求解號誌時制計畫

| 子分群編號 | 週期時間(秒) | 路口編號 | 時差(秒) | 綠燈帶寬(秒) |    | 左轉早開<br>遲閉方式 |                       |
|-------|---------|------|-------|---------|----|--------------|-----------------------|
|       |         |      |       | 東向      | 西向 | $\delta_i$   | $\overline{\delta_i}$ |
| 1     | 90      | 1    | —     |         |    | 1            | 0                     |
|       |         | 2    | 33    | 51      | 30 | 0            | 1                     |
|       |         | 3    | 6     |         |    | 1            | 0                     |
|       |         | 4    | 11    |         |    | 1            | 1                     |
| 2     | 120     | 5    | —     |         |    | 0            | 1                     |
|       |         | 6    | 2     | 72      | 71 | 0            | 1                     |
|       |         | 7    | 5     |         |    | 1            | 0                     |
| 3     | 120     | 8    | —     |         |    | 0            | 1                     |
|       |         | 9    | 4     | 68      | 56 | 1            | 0                     |
|       |         | 10   | 8     |         |    | 0            | 0                     |
| 4     | 94      | 11   | —     |         |    | 0            | 0                     |
|       |         | 12   | 30    | 78      | 46 | 0            | 1                     |
|       |         | 13   | 19    |         |    | 1            | 0                     |

### 4.3 模式比較

欲檢驗提出之最佳化模式，是否較以往幹道路口分群之號誌設計方法，更能設計出較符合交通需求之號誌時制計畫，本研究將透過實際車流資料校估車流微觀模擬軟體 VISSIM 後，分別檢視不同號誌時制計畫下之車流運作績效表現。

#### 4.3.1 模擬平台說明：VISSIM

由於實務上欲透過直接調整道路號誌，檢視透過學術理論求得之號誌時制計畫應用於道路環境中之成效，既不切實際且耗費成本甚高，故交通工程師多半透過模擬軟體，進行初擬號誌時制計畫之驗證，其內含各種模仿交通實際現象之模型，得以經由電腦反覆運算，模擬實際道路之交通現象，其存在測試成本小且不直接影響道路效率、安全性等優點。

本研究採用 VISSIM 2021 作為車流微觀模擬平台，其為德國 PTV 公司開發之微觀車流模擬軟體，用以模擬及分析各種交通系統之實際運行情況。該軟體透過時間間隔，離散化每段時間內車流移動情形，並即時運算該時間段內所有車流動態，用以更新至下個模擬時間段內之車流狀態，如此反覆執行以獲得檢測器中之實際車流數據，其採用之駕駛行為模型為 Wiedemann 於 1974 年提出之生理—心理駕駛行為模型。由於模擬系統僅在其與真實交通情況相符時，才能忠實反應車流運作情形，故本研究首先進行模式參數校估，確認模擬環境下各路口進入流量、轉向量與實際路網資料之差異後遂進行模擬。

#### 4.3.2 比較模式說明

本研究預計針對兩種不同分群號誌時制計畫之結果，透過車流微觀模擬軟體，與本研究之模式進行結果比較。兩種不同號誌時制計畫分別為依主觀分群準則設計綠燈帶寬之模式以及 Zhang et al. (2016) 提出之分群及續進整合最佳化模式 MaxBandLA，其號誌時制計畫設計原則及結果將羅列如下：

### 1. 主觀分群準則分群後之綠燈帶寬模式

本研究之主觀分群結果參考新北市政府交通局提出之「新北市運輸走廊整合道路交通與多元資訊應用計畫」。為有效改善新北市重要通勤廊道之交通壅塞情形，該計畫分析汐止區新台五路路廊之重要路徑車流並重整路口號誌時制計畫，提高幹道運作效率。該案採用之幹道群組劃分方法參考交通部運輸研究所及林良泰 (1993) 對於群組劃分建議之原則，將其分為靜態準則疊圖分析及動態原則分析兩部分。

首先將各路口之靜態資料以疊圖方式，檢視臨界路段長度、車道數、道路幾何變化及車輛方向等，初步劃分基本群組；接著以基本群組為依據，檢視各路段服務水準、車流轉向比等車流動態資訊加以調整，決定最終群組劃分結果。確立號誌分群結果後，透過 MaxBand 模式替各子分群計算路口間時差，獲得各子分群之號誌時制計畫。

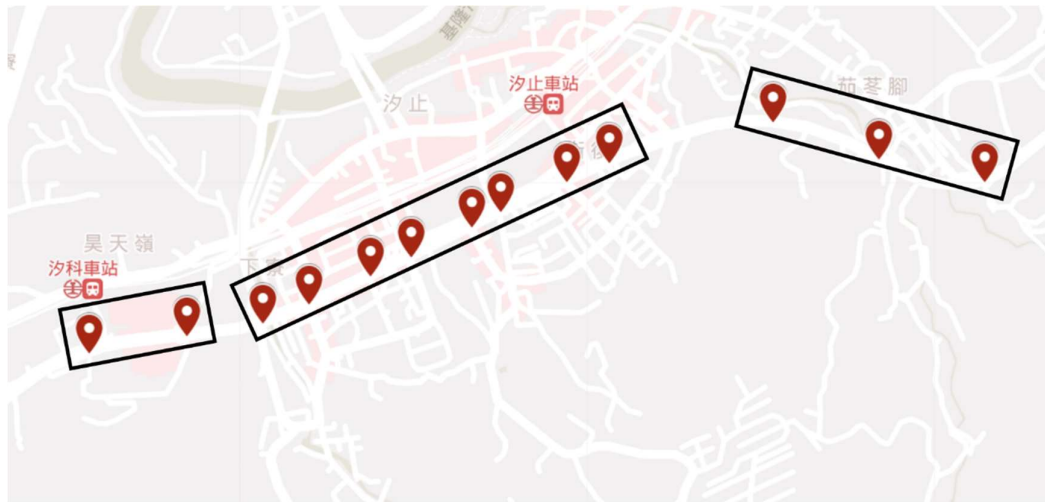


圖 4.3.1 主觀分群準則路口群組劃分結果

依據主觀分群準則之路口劃分結果如圖 4.3.1，該分群方法將驗證場域之幹道分為三個子分群，接著再分別替各子分群設計獨立之綠燈帶寬，設計出之各子分群綠燈帶寬如表 4.3.1。第一子分群最佳週期時間為 120 秒，包含兩個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間分別為 83 秒、56 秒；第二子分群最佳週期時間為 103 秒，包含八個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間分別為 56 秒、30 秒；第三子分群最佳週期時間為 90 秒，包含三個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間分別為 70 秒、46 秒。

表 4.3.1 主觀分群準則群組劃分之號誌時制計畫

| 子分群編號 | 週期時間(秒) | 路口編號 | 時差(秒) | 綠燈帶寬(秒) |    | 左轉早開<br>遲閉方式 |                       |
|-------|---------|------|-------|---------|----|--------------|-----------------------|
|       |         |      |       | 東向      | 西向 | $\delta_i$   | $\overline{\delta_i}$ |
| 1     | 120     | 1    | —     | 83      | 56 | 0            | 0                     |
|       |         | 2    | 17    |         |    | 1            | 0                     |
| 2     | 103     | 3    | —     | 56      | 30 | 1            | 0                     |
|       |         | 4    | 8     |         |    | 1            | 0                     |
|       |         | 5    | 31    |         |    | 0            | 1                     |
|       |         | 6    | 1     |         |    | 0            | 1                     |
|       |         | 7    | 102   |         |    | 1            | 0                     |
|       |         | 8    | 15    |         |    | 1            | 0                     |
|       |         | 9    | 4     |         |    | 1            | 0                     |
|       |         | 10   | 39    |         |    | 0            | 0                     |
| 3     | 90      | 11   | —     | 70      | 46 | 0            | 0                     |
|       |         | 12   | 33    |         |    | 0            | 1                     |
|       |         | 13   | 13    |         |    | 1            | 0                     |

## 2. MaxBandLA 模式

為解決長幹道號誌續進問題，Zhang et al. (2016) 提出 MaxBandLA 模式，該模式建立於 Little et al. (1966) 提出之 MILP 幹道號誌連鎖模式之上，透過設計二元變數，於混合整數線性規劃問題內決定群組劃分，得同時最佳化長幹道號誌分群及續進，確保模式最終結果，為最早提出之整合設計模式之一。該模式假設所有路口均為簡單二時相，且無差異甚大之路段長度及路口流量，其透過模擬結果證明該模式成功將長幹道進行群組劃分並最佳化路口續進，所獲得之號誌時制計畫優於 Synchro 設計之號誌時制計畫。

MaxBandLA 模式將驗證場域之幹道劃分為四個子分群，設計出之各子分群綠燈帶寬如表 4.3.2。第一子分群最佳週期時間為 91 秒，包含四個子路口，子分群雙向綠燈帶寬均為 38 秒；第二子分群最佳週期時間為 120 秒，包含三個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間均為 68 秒；第三子分群最佳週期時間為 120 秒，包含三個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間均為 59 秒；第四子分群最佳週期時間為 91 秒，包含三個路口，子分群雙向綠燈帶寬時間均為 58 秒。

由該模式求解結果可知，該模式旨在透過單一模式求解獲得分群結果，其產出之號誌時制計畫替幹道雙向設計等寬之綠燈帶，且計算出之各路口時差以週期時間或週期時間的一半為單位。此外，該模式假設各路口均為簡單二時相，故針對時相設計並無計算結果。

表 4.3.2 MaxBandLA 號誌時制計畫

| 子分群編號 | 週期時間(秒) | 路口編號 | 時差(秒) | 綠燈帶寬(秒) |    |
|-------|---------|------|-------|---------|----|
|       |         |      |       | 東向      | 西向 |
| 1     | 91      | 1    | —     |         |    |
|       |         | 2    | 46    | 38      | 38 |
|       |         | 3    | 0     |         |    |
|       |         | 4    | 0     |         |    |
| 2     | 120     | 5    | —     |         |    |
|       |         | 6    | 0     | 68      | 68 |
|       |         | 7    | 0     |         |    |
| 3     | 120     | 8    | —     |         |    |
|       |         | 9    | 0     | 59      | 59 |
|       |         | 10   | 0     |         |    |
| 4     | 91      | 11   | —     |         |    |
|       |         | 12   | 46    | 58      | 58 |
|       |         | 13   | 0     |         |    |

### 4.3.3 模式比較分析

模式比較將透過模擬，比較前述之依主觀分群、MaxBandLA 模式設計之號誌時制計畫與本研究提出模式之號誌時制計畫，並分別檢視路網、幹道方向模擬績效結果。車流模擬於 VISSIM 平台上進行，每次模擬時長為 4000 秒，其中前 400 秒為流量進入之預備時間，實際資料蒐集時間為 3600 秒。為克服模擬之隨機性，本研究針對每種號誌時制計畫模擬次數為 10 次，且採用共同組隨機種子，隨機種子以 42 至 87，每次增量 5 的方式進行模擬，以得平均績效結果。本研究模式比較之績效評估指標參考過往幹道號誌控制相關文獻，採用平均車輛延滯時間、平均車輛停車次數、平均車輛旅行速率及綠燈帶效率(Bandwidth Efficiency)等四項評估指標，以衡量各號誌時制計畫之結果好壞。

平均車輛延滯時間指的是每車輛行駛於期望路線中，因車流擾動、交通控制措施等因素，致使其抵達迄點時，實際行駛時間與該行駛起迄對採自由速率行駛所需之時間存在差異，該段時間差即為常用以作為評估指標之延滯時間，其中又可細分為運行延滯、固定延滯、行駛時間延滯等。由於模擬軟體內車流行為已被固定，故各時制計畫模擬時，運行延滯之差異較小，可透過該指標直接衡量號誌時制計畫對系統內車輛之延滯影響，在此以系統內每車輛平均延滯時間及行駛整條幹道之雙向車輛平均延滯做為績效評估指標。

平均車輛停車次數指的是行駛於期望路線中之車輛，因交通控制措施、交通壅塞、事故等原因，致使車輛完全停止於路段中之次數，其通常亦影響停等延滯，當該路口號誌週期較長，停等延滯將隨之增加。於最大綠燈帶模式中，由於目標為最大化綠燈帶寬，期望各車輛能達成較佳之續進，不必於幹道中停車過多次，故該指標亦適合用於比較最大綠燈帶模式間之號誌時制計畫好壞，並廣泛被採用於過往文獻中。在模式比較分析中，本研究以系統內每車車輛平均停車次數、行駛整條幹道之雙向車輛平均停車次數做為績效評估指標。

平均車輛旅行速率指的是車輛行駛於期望路線中，各車輛總旅行距離除以總旅行時間所得之值，於計算旅行時間時不排除考量車輛行駛、停等延滯，當行駛距離相同時，車輛旅行時間將直接影響平均車輛旅行速率之值，故亦有研究採用車輛旅行時間做為績效評估指標。本研究以系統內平均車輛旅行速率及行駛整條幹道之雙向車輛平均旅行速率做為績效評估指標。

綠燈帶效率定義為綠燈帶寬度及週期長度之比例，並以百分比方式表之。由於模式

產生之幹道總綠燈帶寬，將受號誌週期長度影響，無法直接透過比較總綠燈帶寬秒數做為評估最大綠燈帶寬模式好壞之指標，故改採最大綠燈帶寬模式產生之綠燈帶寬佔號誌週期之比例，其值越大表示該模式得以產生較大之綠燈帶寬。該值之計算係參考 Roess et al. (2011)交通工程一書中所提，其計算公式如下：

$$EFF_{BW} = \frac{BW}{C} * 100\% \quad (4-1)$$

其中， $EFF_{BW}$ 為綠燈帶效率， $BW$ 表示綠燈帶寬度， $C$ 則為週期時間長度。

實例驗證路網模擬結果如表 4.3.3，首先，於綠燈帶效率部分，本研究模式綠燈帶效率為三者中最佳(56%)，次之為依主觀分群準則設計之號誌時制計畫(55%)，MaxBandLA 則表現最差(53%)。

由路網模擬結果可得知，於平均車輛延滯部分，本研究模式表現為最佳，於幹道系統內每車輛平均延滯時間為 45.35 秒；次之為依 MaxBandLA 設計之號誌時制計畫(47.2 秒)，與本研究相比延滯時間增加約 4.1%；而依主觀分群準則設計之號誌時制計畫則表現最差(50.35 秒)，與本研究相比延滯時間增加約 11%。

於平均車輛停車次數部分，本研究模式表現最佳，於幹道系統內每車輛平均停車次數為 1.51 次；次之為依 MaxBandLA 設計之號誌時制計畫(1.65 次)，與本研究時制計畫相比停車次數增加約 8.8%；而依主觀分群準則設計之號誌時制計畫則表現最差(1.67 次)，與本研究相比停車次數增加約 10.5%。

於平均車輛行駛速率部分，本研究模式表現最佳，於幹道系統內每車輛平均行駛速率為 35.08 公里/小時；次之為依 MaxBandLA 設計之號誌時制計畫(34.47 公里/小時)，與本研究時制計畫相比行駛速率降低約 1.7%；而依主觀分群準則設計之號誌時制計畫則表現最差(33.67 公里/小時)，與本研究相比行駛速率降低約 4%。

表 4.3.3 實例驗證路網模擬結果比較

| MOE             | 本研究模式 |      | 主觀分群             |      | MaxBandLA        |      |
|-----------------|-------|------|------------------|------|------------------|------|
|                 | 平均數   | 標準差  | 平均數              | 標準差  | 平均數              | 標準差  |
| 平均系統車輛延滯(秒)     | 45.35 | 0.77 | 50.35<br>(+11%)  | 0.78 | 47.2<br>(+4.1%)  | 1.03 |
| 平均車輛停車次數(次)     | 1.51  | 0.03 | 1.67<br>(+10.5%) | 0.03 | 1.65<br>(+8.8%)  | 0.03 |
| 平均車輛行駛速率(公里/小時) | 35.08 | 0.23 | 33.67<br>(-4%)   | 0.22 | 34.47<br>(-1.7%) | 0.28 |
| 綠燈帶效率           | 56%   |      | 55%              |      | 53%              |      |

接著，檢視針對幹道方向車流之模擬績效結果，如表 4.3.4。由於本研究模式及主觀分群模式均針對交通需求較大之幹道方向提供較大之綠燈帶寬，故於表中可見交通需求較大之東向於兩模式中之績效指標結果均優於西向，而 MaxBandLA 模式針對幹道雙向提供之綠燈帶寬相等，以致其產出之幹道東、西向績效指標結果亦相差不大。然而，由標準差比較仍可發現，儘管東向產出之績效指標均較佳，因該方向交通需求較高，導致模擬結果差異較大。

於平均車輛延滯部分，本研究模式無論於東、西向表現均為最佳，於幹道方向每車輛平均延滯時間分別為 59.25 秒、70.37 秒，而交通需求較大的東向平均車輛延滯以依主觀分群準則設計之號誌時制計畫為次佳(60.29 秒)、MaxBandLA 最差(72.94 秒)，相比本研究模式分別增加 1.7%、23.1%延滯時間；交通需求較小的西向則以 MaxBandLA 模式為次佳(71.3 秒)、依主觀分群準則設計之號誌時制計畫最差(102.18 秒)，相比本研究模式分別增加 1.3%、45.2%延滯時間。

於平均車輛停車次數部分，本研究模式無論於東、西向表現均為最佳，於幹道方向每車輛平均停車次數分別為 1.95 次、2.15 次，而交通需求較大的東向平均車輛停車次數

以依主觀分群準則設計之號誌時制計畫為次佳(2.02 次)、MaxBandLA 最差(2.69 次)，相比本研究模式分別增加 3.6%、37.9%停車次數；交通需求較小的西向則以 MaxBandLA 模式為次佳(2.29 次)、依主觀分群準則設計之號誌時制計畫最差(3.29 次)，相比本研究模式分別增加 6.5%、53%停車次數。

於平均車輛行駛速率部分，交通需求較大的東向以本模式表現為最佳，於幹道方向平均車輛行駛速率為 13.2 公里/小時，依主觀分群準則設計之號誌時制計畫為次佳(13.12 公里/小時)，MaxBandLA 模式則最差(12.53 公里/小時)，相比本研究分別減少 0.6%、5.1% 平均行駛速率；交通需求較小的西向以 MaxBandLA 模式為最佳，幹道方向平均車輛行駛速率為 12.61 公里/小時，本研究模式為次佳(12.6 公里/小時)，依主觀分群準則設計之號誌時制計畫為最差(11.28 公里/小時)，相比本研究，MaxBandLA 增加約 0.08% 平均行駛速率，而依主觀分群準則獲得之號誌時制計畫減少約 10.5% 平均行駛速率。

表 4.3.4 實例驗證幹道方向模擬結果比較

| MOE             | 方向 | 本研究模式 |      | 主觀分群     |      | MaxBandLA |      |
|-----------------|----|-------|------|----------|------|-----------|------|
|                 |    | 平均數   | 標準差  | 平均數      | 標準差  | 平均數       | 標準差  |
| 平均系統車輛延滯(秒)     | 東向 | 59.25 | 2.49 | 60.29    | 3.08 | 72.94     | 3.66 |
|                 |    |       |      | (+1.7%)  |      | (+23.1%)  |      |
|                 | 西向 | 70.37 | 1.6  | 102.18   | 2.74 | 71.3      | 2.13 |
|                 |    |       |      | (+45.2%) |      | (+1.3%)   |      |
| 平均車輛停車次數(次)     | 東向 | 1.95  | 0.1  | 2.02     | 0.12 | 2.69      | 0.16 |
|                 |    |       |      | (+3.6%)  |      | (+37.9%)  |      |
|                 | 西向 | 2.15  | 0.08 | 3.29     | 0.11 | 2.29      | 0.09 |
|                 |    |       |      | (+53%)   |      | (+6.5%)   |      |
| 平均車輛行駛速率(公里/小時) | 東向 | 13.2  | 0.13 | 13.12    | 0.16 | 12.53     | 0.16 |
|                 |    |       |      | (-0.6%)  |      | (-5.1%)   |      |
|                 | 西向 | 12.6  | 0.08 | 11.28    | 0.11 | 12.61     | 0.11 |
|                 |    |       |      | (-10.5%) |      | (+0.08%)  |      |

#### 4.4 敏感度分析

由於最大綠燈帶寬號誌設計方法模式輸入，採用 Webster 時比公式，透過幹道及支道間流量比例、直行及左轉比例等，算出各路口相應之各方向時比長度。然而，透過該方法所計算出之時比僅反應各路口流量大小關係，無法真實表達實際交通需求情況，故本研究欲進行敏感度分析，檢驗各模式面對不同交通需求大小時，車流實際運作情形，同樣透過前述之績效指標加以評估各模式之結果。

本研究擬將交通需求分為高、中、低三程度，以現況交通需求為中級需求，分別增減各方向交通需求 50%，代表高、低程度之交通需求，且不超過假設之道路容量限制，透過車流微觀模擬軟體進行模擬。每次模擬時長同樣為 4000 秒，其中前 400 秒為流量進入之預備時間，實際資料蒐集時間為 3600 秒。針對每種交通需求模擬次數為 10 次，且採用共同組隨機種子，隨機種子以 42 至 87，每次模擬增量 5 的方式進行模擬，以獲得平均績效結果，其結果如表 4.4.1。

由表中可見，當交通需求越大，車輛延滯、車輛停車次數均隨之增加，而車輛旅行速率則減少，符合實際車流運作情形。當交通需求越大，車輛可能因變換車道、跟車行為等影響，使得各績效指標之標準差隨之增加，車流模擬結果較不穩定。將各績效指標分別比較可以發現，本研究模式平均系統車輛延滯表現最佳，於三種交通需求情境下分別為 97.54 秒、45.35 秒、32.74 秒，次之為 MaxBandLA 模式，依主觀分群準則設計之號誌時制計畫則表現最差，與其他兩種分群號誌設計方法相比，有更少的延滯時間；於平均停車次數，本研究於三種交通需求情境分別為 3.45 次、1.51 次、1.08 次，依舊表現最佳，MaxBandLA 模式於高交通需求情境下表現優於主觀分群，於中低交通需求下則劣於主觀分群設計之號誌時制計畫，表示車輛於本研究模式之號誌時制計畫下，得以順暢行駛於幹道中，減少中停次數；而觀察車輛系統內平均行駛速率，本研究模式於三種交通需求情境下分別獲得 24.53 公里/小時、35.08 公里/小時、39.28 公里/小時之模擬結果，表現最佳，次之為 MaxBandLA 模式，依主觀分群準則設計之號誌時制計畫則表現最差，顯示車輛於任一交通需求下，行駛於本模式號誌時制計畫下，其平均旅行速率較快。

敏感度分析結果顯示，本研究模式於各種交通需求情境下均表現優於依主觀分群準則及 MaxBandLA 模式設計之號誌時制計畫，交通需求改變依然能產出相比以往模式較佳之號誌時制計畫。

表 4.4.1 不同交通需求之績效指標比較

| MOE             | 交通需求 | 本研究模式 |      | 主觀分群   |      | MaxBandLA |      |
|-----------------|------|-------|------|--------|------|-----------|------|
|                 |      | 平均數   | 標準差  | 平均數    | 標準差  | 平均數       | 標準差  |
| 平均系統車輛延滯(秒)     | 高    | 97.54 | 1.87 | 105.19 | 1.72 | 99.43     | 2    |
|                 | 中    | 45.35 | 0.77 | 50.35  | 0.78 | 47.2      | 1.03 |
|                 | 低    | 32.74 | 0.53 | 36.46  | 0.46 | 34.77     | 0.42 |
| 平均車輛停車次數(次)     | 高    | 3.45  | 0.12 | 3.6    | 0.09 | 3.62      | 0.12 |
|                 | 中    | 1.51  | 0.03 | 1.67   | 0.03 | 1.65      | 0.03 |
|                 | 低    | 1.08  | 0.02 | 1.23   | 0.02 | 1.21      | 0.02 |
| 平均車輛行駛速率(公里/小時) | 高    | 24.53 | 0.29 | 23.49  | 0.2  | 24.22     | 0.25 |
|                 | 中    | 35.08 | 0.23 | 33.67  | 0.22 | 34.47     | 0.28 |
|                 | 低    | 39.28 | 0.17 | 37.84  | 0.11 | 38.33     | 0.15 |

## 4.5 小結

本章透過蒐集實際道路資料，利用模擬軟體 VISSIM，透過模擬比較依主觀分群準則、MaxBandLA 及本研究模式產出之號誌時制計畫，進而檢視不同模式產出之號誌時制計畫及路網、幹道方向模擬績效指標之差異。

由模式求解結果可知，本研究及依主觀分群準則分群並透過 MaxBand 模式設計之號誌時制計畫，均得以替幹道交通需求較大之方向設計較大之綠燈帶寬，MaxBandLA 則是替幹道雙向設計等寬之綠燈帶。其中，本研究模式之綠燈帶效率為 56%，略優於主觀分群準則之 55% 及 MaxBandLA 模式之 53%，表示若於同樣的號誌週期下，本研究模式能替幹道設計最大之綠燈帶寬，其次為主觀分群模式，MaxBandLA 模式設計出之綠燈帶寬最小。

由路網模擬結果來看，當幹道路口數過多，導致必須替幹道分群設計綠燈帶時，本研究提出之模式得以替長幹道設計出較以往方法更佳之號誌時制計畫。本研究模式平均系統內每車輛延滯時間為 45.35 秒，相比兩模式改善幅度分別約 4.1%、11%；本研究模式平均系統內每車輛停車次數為 1.51 次，相比兩模式改善幅度分別約 8.8%、10.5%；本研究模式平均系統內每車輛旅行速率為 35.08 公里/小時，相比兩模式改善幅度分別約 1.7%、4%。透過路網模擬結果可以發現，儘管 MaxBandLA 模式於幹道產生之綠燈帶效率最小，由於其將綠燈帶及分群結果共同考量，與使用主觀分群準則設計出之號誌時制計畫相比，其路網模擬結果仍較佳，故於設計長幹道號誌時制計畫時，使用分群及續進整合設計模式有其必要性。

由幹道方向模擬結果可知，本研究模式於幹道雙向之多數績效指標，均優於其他兩模式。本研究模式於幹道東、西向每車輛平均延滯時間分別為 59.25 秒、70.37 秒，均優於主觀分群準則設計之號誌時制計畫及 MaxBandLA 模式；於幹道東、西向每車輛平均停車次數本研究模式分別為 1.95 次、2.15 次，均優於主觀分群準則設計之號誌時制計畫以及 MaxBandLA 模式；於平均車輛行駛速率部分，交通需求較大的東向以本研究模式表現為最佳，於幹道方向平均車輛行駛速率為 13.2 公里/小時，優於依主觀分群準則設計之號誌時制計畫及 MaxBandLA 模式，而交通需求較小的西向以 MaxBandLA 模式為最佳，幹道方向平均車輛行駛速率為 12.61 公里/小時，優於本研究模式及依主觀分群準則設計之號誌時制計畫。由幹道方向模擬結果得知，本研究模式及依主觀分群準則設計之模式，針對交通需求較大方向，均給予較大之綠燈帶寬，故該方向之模擬結果較好，然而，若僅觀察交通需求較小之幹道方向，由於 MaxBandLA 未將交通需求較小之幹道

方向綠燈帶寬犧牲，故於平均停車次數、平均旅行速率表現較佳。

觀察敏感度分析，於平均系統車輛延滯部分，各模式面對三種交通需求表現一致，本研究模式表現最佳，次之為 MaxBandLA 模式，依主觀分群準則設計之號誌時制計畫則表現最差；於平均車輛停車次數部分，本研究之模式於任一交通需求大小下依舊表現最佳，MaxBandLA 模式於高交通需求情境下表現優於主觀分群，於中低交通需求下則劣於主觀分群設計之號誌時制計畫；於平均車輛行駛速率部分，各模式面對三種交通需求表現一致，本研究模式表現最佳，次之為 MaxBandLA 模式，依主觀分群準則設計之號誌時制計畫則表現最差。若透過觀察各模式之績效指標標準差可發現，同一績效指標於同一情境下，各模式之標準差差距甚小，其標準差只隨交通需求增加而變大，顯示當交通需求較高時，由於車流運行較不穩定，模擬結果相差較大。

綜合來看，本研究模式無論於路網運行績效、幹道方向運行績效均優於其他兩模式，且無論交通需求大或小，本研究模式均得以成功產出相比以往模式較佳之號誌時制計畫。依主觀分群準則、MaxBandLA 設計之號誌時制計畫，則各有利弊，若幹道雙向需求較一致時，使用 MaxBandLA 模式設計長幹道號誌時制計畫，將使該幹道路網獲得較佳之車流運行結果，當幹道雙向需求差異甚大時，依主觀分群準則設計之號誌時制計畫，得以替交通需求大之方向提供較大之綠燈帶寬，並獲得較好之績效。

## 第五章 結論與建議

### 5.1 主要研究貢獻

經文獻回顧可知，幹道號誌設計方法可初步以最大綠燈帶寬法及最小負效用法進行分類，其中最大綠燈帶寬法有輸入資料較少、對實際用路人行為較直覺等優點。此外，最大綠燈帶寬法相關研究多半以混合整數規劃進行模式建構，透過數學模式模化時空圖的方式，替幹道設計最大綠燈帶寬，並以車流模擬做為模式驗證方法，透過檢視車輛延滯、車輛停車次數、車輛旅行時間等，作為檢視模式好壞之績效指標。而過往幹道號誌設計方法之研究較少討論路口數過多問題，傳統上交通工程師根據自身經驗或道路條件，進行長幹道路口分群後，分別替各群設計該群號誌時制，然而該方法無法保證設計出之號誌時制計畫為最佳。後續亦有學者採用啟發式解法、分群及續進整合設計模式等，試圖解決該問題，惟同時考量分群及續進號誌時制計畫之研究數量較少且仍有改進空間。

本研究立基於過往研究，增加幹道號誌設計模式分群變數、限制，並納入車隊擴散模式調整對於車輛旅行時間估算之相關限制式，發展一長幹道分群及續進模式。於實務中，若面臨幹道路口數過多，導致傳統號誌設計方法無法直接進行求解時，本研究相較過往方法，得以同時考量長幹道之分群及續進，求解長幹道分群結果、各路口左轉早開、遲閉之選擇及路口間時差，並確保結果為最佳。

### 5.2 結論

由於過去許多文獻均探討幹道號誌設計方法，疏於考慮長幹道可能無法直接適用該方法，需透過分群設計幹道號誌問題，故本研究經過文獻回顧、模式建構及實例驗證後，可整理出以下結論：

1. 本研究以 MaxBand 模式為基礎，設計長幹道號誌設計方法，同時考量長幹道分群及最大綠燈帶寬，並考量車隊擴散行為，發展一混合整數線性規劃模式，可確保所得結果為最佳，經過實例驗證比較過往分群號誌設計方法，本研究產出之號誌時制計畫綠燈帶效率達 56%，高於其他分群號誌設計方法。
2. 於車流模擬軟體環境中，透過實例驗證資料，本研究相較其他號誌設計方法，於幹道系統內分別減少 4.1%、11% 平均車輛延滯時間、8.8%、10.5% 平均車輛停車次數及增

加 1.7%、4% 平均車輛旅行速率。於行駛整條幹道車流來看，本研究相較其他號誌設計方法，於幹道雙向平均車輛延滯時間減少約 1.3% 至 45.2%，幹道雙向平均車輛停車次數減少約 3.6% 至 53%，幹道雙向平均車輛行駛速率除與 MaxBandLA 西向相比外，增加約 0.6% 至 10.5%。無論以路網或幹道的角度來看，比較平均車輛延滯、平均車輛停車次數、平均旅行速率等績效指標，均優於過往模式。顯示當幹道路口數過多，不適用傳統幹道號誌設計方法而須替長幹道進行分群時，本研究所提出之方法適合用於獲得該長幹道最佳之號誌時制計畫。

3. 由路網模擬結果觀察，本研究模式及 MaxBandLA 模式相較依主觀分群設計之模式，延滯時間及停車次數均減少且行駛速率增加，顯示當幹道路口數過多需分群設計號誌時制計畫時，同時考量分群及續進之最佳化模式將優於依主觀分群準則設計之號誌時制計畫，可增加車流於長幹道之運作效率，故分群及續進整合號誌設計模式有其發展必要。

4. 經由敏感度分析得知，於時比相同情況下，比較平均車輛延滯、平均車輛停車次數、平均旅行速率，本研究均得以於三種交通需求情境下，獲得較佳之道路績效指標，結果均優於其他兩種分群號誌設計方法，顯示本研究模式於不同交通需求情境中，均得以獲得較佳之車流模擬結果。

5. 透過敏感度分析，發現在同樣號誌時制計畫下，當交通需求量較大時，所得模擬結果變異較高，相反當交通需求量較小時，所得模擬結果較穩定。

### 5.3 後續研究建議

1. 由於台灣道路環境存在大量機車於實際車流中，其存在綠燈起步較快、路段中行駛速率較慢、鑽車等駕駛特性，為此國內設置機車停等區、兩段式左轉等因應機車之交通控制措施，將進一步影響車隊擴散模式之校估及應用，如機車停等區之有無，將影響起步較快之機車是否位於車隊前方，當綠燈始亮時將增加車隊擴散係數等，故後續研究可探討如何考量汽機車混合車流行為於號誌設計相關研究及應用中。
2. 由於實例驗證資料為透過他案，僅獲得各路口車流轉向交通量資料，而車隊擴散模式應用中，擴散係數及旅行時間係數 $\alpha$ 、 $\beta$ 值之校估為一大關鍵，不同的路面坡度、曲率、交通量、交通組成、車道數等因素，均會影響擴散係數及旅行時間係數之值。本研究礙於研究時程及資料蒐集限制，並未將該校估過程納入，直接以先前研究校估之 $\alpha$ 、 $\beta$ 值進行計算。建議後續應用模式時，應先蒐集道路車流資訊，校估 $\alpha$ 、 $\beta$ 值，再計算長幹道號誌時制計畫，所得結果較能貼近實際車流運行情況，或可考慮透過 Robertson 模式以外的車流相關理論，作為估算車隊旅行時間的其他方法。
3. 國內都會人口密集區之街廓較短，若該路段之上下路口存在大量轉向車流，可能因此超過該路段容量產生溢流，進而影響綠燈帶續進效率，建議後續研究考量長幹道分群及續進問題時，將等候線、溢流等問題一併考慮。
4. 本研究單純考慮左轉之早開、遲閉，透過提供不受干擾之左轉時間提高左轉車流效率，然而於實務中，路口時相可能受轉向交通量、行人流量等影響，存在輪放時相、行人專用時相等較為複雜之情況，建議後續可一併考慮。
5. 本研究模式僅考慮有分群必要之長幹道情境，據此進行號誌設計模式之建構，無法判斷幹道分群與否。參閱過往文獻，亦鮮少文獻研究幹道分群與否之準則，意即當幹道路口數多於何值或幹道長度大於何值時，適合採取分群設計號誌為佳，可能為後續須進一步探討之課題。

## 參考文獻

1. 馮惠蓮 (1988). TRANSYT 中車隊擴散模式之建立及其應用於網路號誌時制設計之研究, 成功大學交通管理科學系.
2. 蔡輝昇 (1990). 交通控制—理論與實務, 生合成出版社.
3. 胡守任 (1991). 混合車流路段車隊擴散模式之研究, 臺灣大學土木工程學系.
4. 林良泰 (1993). 號誌群組與控制區域劃分之研究, 臺灣大學土木工程學系.
5. 何志宏等 (2001). 台灣地區先進交通管理系統(ATMS)中都市交通號誌控制邏輯標準化與系統建置標準作業程序之研究—一定時式/動態式控制邏輯標準化, 交通部運輸研究所.
6. 陳一昌等 (2007). 交通號誌時制重整計畫(I)—標準作業程序建立, 交通部運輸研究所.
7. Arsava, T., et al. (2016). "Arterial progression optimization using OD-BAND: case study and extensions." *Transportation Research Record* 2558(1): 1-10.
8. Arsava, T., et al. (2014). Arterial traffic signal coordination utilizing vehicular traffic origin-destination information. 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE.
9. Cho, H.-J., et al. (2019). "Path-based MAXBAND with green-split variables and traffic dispersion." *Transportmetrica B: Transport Dynamics* 7(1): 726-740.
10. Christofa, E., et al. (2016). "Arterial traffic signal optimization: A person-based approach." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 66: 27-47.
11. Fan, W., et al. (2011). "Arterial signal timing and coordination: sensitivity analyses, partition techniques, and performance comparisons." *Advances in Transportation Studies*(23).
12. Farzaneh, M. (2005). Modeling traffic dispersion, Virginia Tech.
13. Gartner, N. H., et al. (1991). "A multi-band approach to arterial traffic signal optimization." *Transportation Research Part B: Methodological* 25(1): 55-74.
14. Hao, W., et al. (2018). "Signal progression model for long arterial: intersection grouping and coordination." *IEEE Access* 6: 30128-30136.

15. Hook, D. and A. Albers (1999). Comparison of alternative methodologies to determine breakpoints in signal progression. *Transportation Frontiers for the Next Millennium: 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers* Institute of Transportation Engineers (ITE).
16. Jing, B., et al. (2020). "Pband: A General Signal Progression Model With Phase Optimization Along Urban Arterial." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
17. Lan, C.-L. and G.-L. Chang (2016). "Optimizing signals for arterials experiencing heavy mixed scooter-vehicle flows." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 72: 182-201.
18. Little, J. D. (1966). "The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming." *Operations Research* 14(4): 568-594.
19. Little, J. D., et al. (1981). "MAXBAND: A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks."
20. Liu, Y. and G.-L. Chang (2011). "An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19(1): 130-144.
21. Pacey, G. (1956). "The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal." *Road Research Laboratory Note RN/2665/GMP 1956*(1956): 36-50.
22. Robertson, D. I. (1969). "TRANSYT: a traffic network study tool."
23. Roess, R. P., Prassas, E. S., & McShane, W. R. (2011). *Traffic engineering*. (4th ed.) Prentice Hall.
24. Shoufeng, L., et al. (2008). Revised MAXBAND model for bandwidth optimization of traffic flow dispersion. 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, IEEE.
25. TANG, X., et al. (2016). "System Partition Method to Improve Signal Coordination in Urban Arterials." *Asian Transport Studies* 4(2): 366-378.
26. Tian, Z. and T. Urbanik (2007). "System partition technique to improve signal coordination and traffic progression." *Journal of Transportation Engineering* 133(2): 119-128.
27. Tsay, H. S., & Lin, L. T. (1988). NEW ALGORITHM FOR SOLVING THE

MAXIMUM PROGRESSION BANDWIDTH (WITH DISCUSSION AND CLOSURE)  
(No. 1194).

28. Wu, X., et al. (2012). "Bandwidth optimization of coordinated arterials based on group partition method." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 43: 232-244.
29. Yang, X., et al. (2015). "A multi-path progression model for synchronization of arterial traffic signals." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 53: 93-111.
30. Yang, X. K. (2001). "Comparison among computer packages in providing timing plans for Iowa arterial in Lawrence, Kansas." *Journal of Transportation Engineering* 127(4): 311-318.
31. Zhang, C., et al. (2015). "AM-band: an asymmetrical multi-band model for arterial traffic signal coordination." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 58: 515-531.
32. Zhang, L., et al. (2016). "Signal coordination models for long arterials and grid networks." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 71: 215-230.