

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

混合車流等候結構之號誌分流最佳化模式

A Study of Mixed Traffic Queuing Pattern on

Separated-Flow Signal Optimization Model

劉信宏

Liu, Hsin-Hung

指導教授：許添本 教授

Advisor : Hsu, Tien-Pen

中華民國 102 年 6 月

Jun. 2013



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

混合車流等候結構之號誌分流最佳化模式

A Study of Mixed Traffic Queuing Pattern on
Separated-Flow Signal Optimization Model

本論文係劉信宏君（學號 R00521501）在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 102 年 6 月 14 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

許添本

（指導教授）

邱裕鈞

胡守任

許添本

邱裕鈞

胡守任

系主任

呂良正

呂良正

（簽名）

摘要



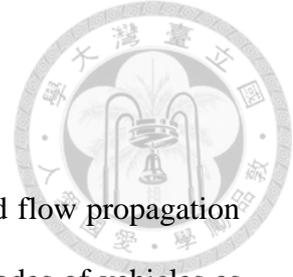
本研究考量混合車流路段推進與路口停等之等候結構行為，提出一套號誌分流最佳化方法。過去研究處理混合車流的問題，多數將不同車種以小客車當量標準計算號誌時制。此方法在穩定且同質的車流環境下具有一定分析能力，但無法呈現不同車種駕駛行為所造成的巨觀車流差異。為了克服此方法之缺點與改善混合車流號誌時制演算之準確性，本研究發展一套時間與空間分流之號誌最佳化方法，考量市區車流等候型態特性加以模式化，描述混合車流交互作用與號誌影響關係。本模式結合路口幾何設計、車流變化與號誌時制三大構面成為整合式號誌最佳化程序，藉由實際車流資料進行統計檢定，發現車流等候型態與車輛數、到達順序有關，相同型態可歸納為同一車道群組，不同路段等候型態亦存在差異。

本文最佳化模式分為兩階段，先針對混合車流道路幾何進行最佳化，再根據最佳的空間配置與車流變化調整號誌時制。現實社會中號誌的重整大多著重於時制的微調，而二階段的設計方法不僅使道路與車道空間利用更具彈性，也避免因車流變化導致道路工程頻繁的變遷。第一階段模式經由敏感度分析發現車道與機車待轉區配置隨著流量與車道數不同而有變化，無論對稱或非對稱路口皆適用。第二階段定義之混合車流等候型態可以表現不同汽車與機車停等與紓解的組合，並將差異反映在號誌最佳化結果中。

本研究以假設之涵蓋 4 個路口的路網進行測試，並將最佳化結果與號誌最佳化軟體 TRANSYT-7F 比較，並以微觀車流模擬軟體 VISSIM 進行績效評估。在不同流量情境下，低流量與中流量模式表現與 TRANSYT-7F 相似，部分路口汽車與機車平均延滯略有改善，高流量情況下則模式效果較不穩定。經由等候型態分析結果，本模式能呈現路口不同車道群等候線消長情形，對於混合車流號誌設計提供一套新的整合最佳化方法。

關鍵詞：混合車流、分流設計、等候型態、號誌最佳化模式、混合整數線性規劃

Abstract



This research focuses on signal control modeling under mixed flow propagation and queuing patterns. In the past, many studies treated different modes of vehicles as the same standards and converted them into passenger car units. Although such conversion may be valid for stable and homogeneous traffic flow, it can't reveal driving characteristics for different modes. To overcome such disadvantage and improve efficiency of mixed flow signal timing, this research develops a separated-flow signal optimization model with queuing patterns to describe the relationship between mixed traffic and signal timing. This model integrates geometric design, traffic variations and signal timing into its optimization procedures. According to queuing pattern statistical ratio test, we find out lanes with the same pattern can be classified as one group, but it related to number of mixed-flow vehicles and arriving sequences. The patterns differ from different road sections.

The model divided into two stages: The first stage is lane-based optimization method with mixed flow; the second stage adjusts signal timing plan through proposed queuing patterns based on mixed flow area propagation and discharge under first stage design. In reality, the traffic signal re-timing programs mostly focus on fine tuning current signal design. The proposed two stage model provide not only more flexible way in lane space use, but avoid traffic flow variation resulting in frequent traffic engineering works. Through sensitivity analysis, this research reveals the lane marking assignment will vary with traffic volume and maximum number of lanes, and this model is applicable in either symmetrical or asymmetrical junctions . The queuing patterns can represent different car and scooter queuing and discharging combinations and reflected in signal optimization model.

This research uses a test network with four intersections to study, and the result of proposed method will be compared to TRANSYT-7F. These optimal signal timing plans will be evaluated with VISSIM simulation tool and analyze its network performance. Through different flow scenarios, the performance of proposed model is similar to TRANSYT-7F in low or medium traffic demand, but it reduces when traffic volume is high. According to the results, this model considers the variation of mixed-flow queue in different lane groups, providing a new method in mixed-flow signal timing optimization.

Keywords: Mixed traffic, Separated-flow Design, Queuing pattern, Signal timing optimization, Mixed-Integer-Linear-Programming

誌謝



四方車馬流不盡，百般型態化無窮，
若問何者先通過？唯有紅綠爭其鋒。

本文的創作精神，在於突顯混合車流產生型態與號誌、車道之利用關係，結合號誌、車流與幾何配置三者之近代發展主流。在交通運輸研究領域，用路人的思考影響運具的行為，而行為須由適當的措施加以管理，考慮以人為主的相關設計元素，符合土木工程「civil」的涵義，建立一個有秩序、文明的制度，也是本文以號誌為研究出發點的立基。

本論文的完成，首先感謝指導教授許添本老師的耐心教導與提攜，從老師的身教與言教，我體會到的是一種凡事嚴謹、務求甚解的態度。感謝口試委員胡守任老師對於論文的建議，老師待我亦師亦友，在大學四年學習過程中，指導我專題研究與傳授厚實車流知識，讓我由外行逐漸進步，有能力進行研究，並懂得與實務結合，培養對交通正義的價值觀，老師不僅是我做研究的推手，更是啟蒙導師。感謝口試委員邱裕鈞老師的指教與修正，與老師的論答過程，發覺老師不僅脈絡清晰，提出的建議也讓論文更臻完備，使學生獲益良多。

在研究所修業期間，感謝張堂賢老師、張學孔老師、賴永成老師與陳柏華老師等多位師長的教導，張堂賢老師的「Traffic Game」概念，我認為有一天終會達成，實現「物聯網天下，隨意出英雄」的豪邁胸襟！感謝張學孔老師在運輸經濟與多項政策分析能力之教導，您的公共運輸「BMW」理論不僅實現低碳生活目標，也是未來都市發展轉型的重要因素。謝謝賴永成老師傳授軌道工程與營運相關知識與模式建立方法之培養，引發我對鐵路運輸研究的興趣，感謝陳柏華老師教導作業研究與軟體應用能力，為本研究程式撰寫奠下良好基礎。

研究過程中，感謝勝翔、彥向兩位學長對論文的啟發與傳授深厚的功力，使

我延續您們對號誌的研究，讓本論文得以順利完成。感謝國祐學長、伊嵐學姊在計畫案上的協助，讓我碩士生活不僅過得充實，也享有一起經歷過的愉快時光。謝謝育瑞、宗軒、谷琳三位學長、華琪學姊與我討論研究上碰到的難題，特別是人生經驗的分享；感謝家齊、健豪、小胖、契輝、政修、哲維學長等陪我度過鬱悶的研究時期，我永遠忘不了那些年一起打樂樂棒的日子。感謝計畫前期學弟凱健的協助，後期凱翔的幫忙，讓計畫順利進行，鈞凱、家豪、昱辰、尚詮學弟的加入，讓研究室增添不少歡笑。

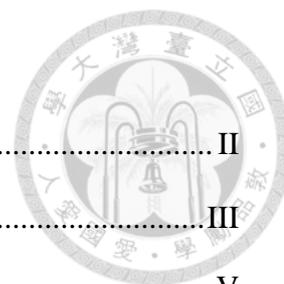
相逢自是有緣，謝謝交通組 100 級所有同學給我的美好回憶，承晏、奕辰、Joba、傑理與我組成的 iPhone 五劍客，兩年來我們講過的「垃圾話」可以寫長篇小說了，更重要的是彼此的鼓勵與扶持，沒有你們碩士生涯不會如此精采！謝謝好夥伴翔捷、俊評與我分享研究經驗，和你們討論使我永遠進步，很高興我們一起完成了許多不可能的任務，感謝軒宇、道中陪我聊天、一起出遊，學識淵博的哲勳、大學的好同學振宗、Carina、小隻、布丁、宜穎、品竹、琦茵與張家姊妹團，屬於我們的回憶太多了，只能在記憶相簿中慢慢回味，這些發生在土木館 312、314 與台大校園，生命中的不可或缺的成長足跡。兩年的生活雖短，並不代表結束，而是一輩子長存的友誼，是邁向精彩人生的開始！

最後，謝謝家人給我的支持與鼓勵，沒有您們我無法走到今天，在研究的過程中有許多取捨、掙扎，謝謝您們的包容，我想我已更成熟能將事事做到圓滿。另外，也謝謝助教室曉梅、組辦公室思文姊、114 邱先生行政事務上的協助，讓我在交通組的生活一切順利！「成功不是屬於第一個出發，而是最後一個倒下的人」，研究過程的所遇到的困難與辛苦無可避免，但堅持與勇敢是支持我繼續努力的兩大信念，更重要是以愉快的態度面對一切，僅將本論文獻給我摯愛的家人、朋友與師長們，謝謝你們！

劉信宏謹誌於交通工程實驗室

中華民國 102 年 7 月

目錄



摘要.....	II
Abstract.....	III
誌謝.....	V
圖目錄.....	IX
表目錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 研究目的.....	4
1.4 研究內容與範疇.....	5
1.5 研究方法.....	7
1.6 研究流程與架構.....	8
第二章 文獻回顧.....	11
2.1 號誌設計哲學.....	12
2.2 數學模式構建.....	24
2.3 車流傳導模式.....	35
2.4 道路幾何空間佈設.....	43
2.5 模式求解方法.....	50
第三章 都市車流資料調查與分析.....	59
3.1 資料蒐集方法.....	59
3.2 車流資料分析.....	62
3.3 等候結構統計推論.....	66
第四章 單一路口混合車流號誌最佳化模式.....	81
4.1 模式建立構想.....	81
4.2 模式變數說明.....	82



4.3 號誌設計限制式.....	84
4.4 車道控制限制式.....	87
4.5 流量指派限制式.....	96
4.6 分流號誌限制式.....	99
4.7 其他限制式.....	100
4.8 目標函數.....	102
第五章 路網動態車流號誌最佳化模式.....	103
5.1 巨觀車流模式.....	103
5.2 模式建立流程.....	104
5.3 面式車流理論.....	108
5.4 動態交通演變方程式.....	109
5.5 號誌最佳化模組.....	146
5.6 最佳化模組整合架構.....	148
第六章 參數校估與模式應用.....	151
6.1 參數校估與設定.....	151
6.2 模式應用.....	161
6.3 模式求解.....	164
6.4 號誌最佳化軟體 TRANSYT-7F 之使用.....	167
6.5 微觀車流模擬軟體 VISSIM 之使用.....	169
第七章 模式求解與敏感度分析.....	171
7.1 模式之敏感度分析.....	171
7.2 模式求解與確認.....	178
7.3 路網績效比較.....	198
第八章 結論與建議.....	201
8.1 結論.....	201
8.2 建議.....	203
參考文獻.....	205

圖目錄



圖 1-1：號誌分流概念與層面	4
圖 1-2：研究範圍與內容	5
圖 1-3：研究流程與架構圖	9
圖 2-1：號誌設計方法之演變	24
圖 2-2：CTM 之基本構圖	36
圖 2-3：無殘餘車隊之衝擊波構圖(a)；有殘餘車隊之衝擊波構圖(b)	40
圖 2-4：兩路口車隊溢流時，(a)延長現有紅燈時間；(b)產生新的週期	41
圖 3-1：新生南路靜態之交通工程資料	60
圖 3-2：羅斯福路動態之車流資料	60
圖 3-3：高樓錄影 DV 架設方式	61
圖 3-4：DV 網綁法	61
圖 3-5：資料調查與分析流程	62
圖 3-6：分車道等候結構關係圖	64
圖 3-7：快車道等候結構與型態先後關係	65
圖 3-8：混合車道等候結構與型態先後關係	66
圖 3-9：羅斯福路第一車道等候結構分析結果	67
圖 3-10：羅斯福路第二車道等候結構分析結果	67
圖 3-11：羅斯福路第三車道等候結構分析結果	68
圖 3-12：羅斯福路第四車道等候結構分析結果	68
圖 3-13：新生南路第一車道等候結構分析結果	70
圖 3-14：新生南路第二車道等候結構分析結果	70
圖 3-15：新生南路第三車道等候結構分析結果	71
圖 3-16：新生南路第四車道等候結構分析結果	71
圖 3-17：第一車道統計直方圖	74
圖 3-18：第二車道統計直方圖	74
圖 3-19：第三車道統計直方圖	74
圖 3-20：第四車道統計直方圖	75
圖 3-21：第一車道統計直方圖	75
圖 3-22：第二車道統計直方圖	75
圖 3-23：第三車道統計直方圖	75

圖 3-24：第四車道統計直方圖	76
圖 4-1：群組設計基礎之範例路口	82
圖 4-2：最小離開車道限制路口對稱範例	90
圖 4-3：最小離開車道限制路口不對稱範例	91
圖 4-4：相鄰車道流動衝突限制說明	93
圖 4-5：機車兩段式左轉待轉區設置準則	96
圖 4-6：相對流動安全限制說明	101
圖 4-7：路口車道對稱限制說明	102
圖 5-1：混合車流分車道路段演變過程	105
圖 5-2：第二階段動態交通演變模式流程圖	107
圖 5-3：快車道純汽車密度修正因子示意圖	117
圖 5-4：混合車道密度修正因子示意圖	117
圖 5-5：混合車道異質車流熵值示意圖	120
圖 5-6：路段推進速率與車流密度相位區分方法	122
圖 5-7：不同車道群推進公式參數表示法	123
圖 5-8：路段推進流程之變數交互關係	127
圖 5-9：汽、機車匯入車道群模式	129
圖 5-10：機車停等至紓解型態轉變說明	139
圖 5-11：汽車等候線與介面傳遞紓解軌跡圖	140
圖 5-12：鄰近路口混合車流等候型態分佈示意圖	142
圖 5-13：實際車流停等與紓解之等候型態演變說明	144
圖 5-14：最佳化模組整合與變數之關係圖	149
圖 5-15：混合車流號誌最佳化模組架構圖	149
圖 6-1：機車專用道寬度與容量關係圖	153
圖 6-2：機車啟動延滯調查值	154
圖 6-3：汽車啟動延滯調查值	154
圖 6-4：汽、機車紓解密度調查範圍	157
圖 6-5：汽、機車紓解之空間平均速度	158
圖 6-6：汽、機車之紓解密度	158
圖 6-7：左轉溢流參數調查地點	160
圖 6-8：左轉溢流下每週期快車道通過量	161
圖 6-9：第一階段路口背景條件說明	163
圖 6-10：第二階段路網應用條件說明	164

圖 6-11：MATLAB 之基因工具箱求解應用與最佳化參數擬定介面.....	166
圖 6-12：TRANSYT-7F 路網繪製圖.....	168
圖 6-13：TRANSYT-7F 車道配置與流量輸入介面.....	168
圖 6-14：微觀車流模擬軟體 VISSIM 之績效評估路網圖.....	170
圖 7-1：汽車流量與路口剩餘容量關係.....	172
圖 7-2：車道縮減與幾何配置、轉向標線之關係圖.....	174
圖 7-3：汽車轉向比與車道標線配置之關係圖.....	175
圖 7-4：非對稱路口車道與幾何配置.....	177
圖 7-5：第一階段號誌求解時制計畫.....	179
圖 7-6：高流量情境路網通過量與號誌最佳解.....	180
圖 7-7：高流量左轉車道等候型態與紓解累積圖.....	181
圖 7-8：高流量快車道等候型態與紓解累積圖.....	181
圖 7-9：高流量混合車道 M20 等候型態累積圖.....	182
圖 7-10：高流量混合車道 M30 等候型態累積圖.....	182
圖 7-11：高流量混合車道 M40 等候型態累積圖.....	183
圖 7-12：高流量混合車道 M90 紓解型態累積圖.....	184
圖 7-13：高流量混合車道實際等候車輛數累積圖.....	184
圖 7-14：中流量情境路網通過量與號誌最佳解.....	185
圖 7-15：中流量左轉車道等候型態與紓解累積圖.....	186
圖 7-16：中流量快車道等候型態與紓解累積圖.....	186
圖 7-17：中流量混合車道 M20 等候型態累積圖.....	187
圖 7-18：中流量混合車道 M30 等候型態累積圖.....	187
圖 7-19：中流量混合車道 M40 等候型態累積圖.....	188
圖 7-20：中流量混合車道 M90 紓解型態累積圖.....	188
圖 7-21：中流量混合車道實際等候車輛數累積圖.....	189
圖 7-22：低流量情境路網通過量與號誌最佳解.....	190
圖 7-23：低流量左轉車道等候型態與紓解累積圖.....	190
圖 7-24：低流量快車道等候型態與紓解累積圖.....	191
圖 7-25：低流量混合車道 M20 等候型態累積圖.....	191
圖 7-26：低流量混合車道 M30 等候型態累積圖.....	192
圖 7-27：低流量混合車道 M40 等候型態累積圖.....	192
圖 7-28：低流量混合車道 M90 紓解型態累積圖.....	193
圖 7-29：低流量混合車道實際等候車輛數累積圖.....	193

圖 7-30：低流量各路段混合車道密度修正因子數值變化	194
圖 7-31：中流量各路段混合車道密度修正因子數值變化	195
圖 7-32：高流量各路段混合車道密度修正因子數值變化	195
圖 7-33：低流量各路段混合車道佔有比例熵值變化	196
圖 7-34：中流量各路段混合車道佔有比例熵值變化	197
圖 7-35：高流量各路段混合車道佔有比例熵值變化	197
圖 7-36：不同流量情境下之週期長度比較	198

表目錄



表 2-1：數學規劃法與模擬基礎法最佳化之比較	34
表 2-2：都市車流傳遞模式之發展歷程與比較	43
表 2-3：機車左轉臨界衝突流量乘積準則	46
表 2-4：機車等候空間佈設方式與優缺點比較	48
表 2-5：基因演算法與例子群演算法之異同	56
表 2-6：號誌時制最佳化文獻之比較	57
表 3-1：分車種之等候型態定義	63
表 3-2：羅斯福路等候型態敘述統計	72
表 3-3：新生南路等候型態敘述統計	73
表 3-4：同一路段車道群停等型態比例檢定	78
表 3-5：不同路段車道群停等型態比例檢定	79
表 3-6：不同路段不同車道停等型態比例檢定	79
表 4-1：單一路口混合車流號誌模式變數說明	82
表 4-2：各方向車道對稱之最小離開車道數參數說明	90
表 4-3：各方向車道不對稱之最小離開車道數參數說明	92
表 4-4：相鄰車道流動衝突範例參數	93
表 4-5：機車兩段式左轉待轉區設置限制式	94
表 4-6：直行小汽車當量表	98
表 5-1：傳統車流與面式車流之差異比較	108
表 5-2：汽、機車之實體與靜態車長、車寬	109
表 6-1：不同車道群組之最小、擁擠密度門檻	157
表 6-2：混合車流之推進公式參數校估	160
表 6-3：基因工具箱相關參數設定	167
表 7-1：不同汽車需求量路口容量與待轉區設置變化	172
表 7-2：車道縮減與路口容量、幾何配置之關係	173
表 7-3：汽車轉向比與車道配置之變化	175
表 7-4：機車混合比與車道配置變化之關係	176
表 7-5：不對稱路口車道與機車待轉區配置情形	177
表 7-6：第一階段號誌求解結果	178
表 7-7：低流量本模式與 TRANSYT-7F 績效比較	199

表 7-8：中流量本模式與 TRANSYT-7F 績效比較.....199

表 7-9：高流量本模式與 TRANSYT-7F 績效比較.....200



第一章 緒論



1.1 研究背景

交通管理與經濟活動之發展密不可分，尤其是都市化地區車流較為集中，即時、動態與有效的交通管制策略儼然成為二十一世紀都市管理訴求。為了滿足不同用路人「行」的權利，兼具「效率」與「安全」的目標，交通管理單位藉由號誌控制路口不同方向之通行權，分配其路權時間，區隔衝突流動，達到促進交通安全與提升路口容量之目標。因此，如何有效分配路權給各方向之車流，同時不產生衝突與過大的延滯，尋求一套考量效率、安全、容量與平等之號誌時制計畫乃現代交通工程師責無旁貸之工作，也是都市設計必備條件之一。

台灣及多數東南亞國家道路混合車流情況明顯，尤其機車使用比例甚高。根據交通統計資料顯示，台灣機車登記數量高達 1,514 萬輛，自用小客車約 589 萬輛，大客車與大貨車總計約 19 萬輛，機車使用率佔整體車流組成約 68%【3】。有鑑於此，號誌時制之計算除了以小客車為基礎，機車更是不可或缺因素，必須審慎評估其對號誌控制的影響。機車具有機動性高、自由度大、向前滲透與橫向發展等駕駛特性，車流行為變異程度高，本身較難以掌握，同時與其他車種交互作用複雜。由於機車干擾程度大，駕駛行為又難以控制，不僅影響路段推進過程之速度，也影響路口紓解效率，更決定號誌時制計算結果之準確性。除此之外，當都市車流趨近於飽和或出現過飽和現象，車輛延滯快速增加，路口服務水準急遽降低，若現有定時號誌時制無法即時反應以有效紓解車潮，將使原有過飽和情況更加惡化。因此，號誌的功能必須由傳統的路權分配者角色，提升至因應車流變化而即時控制的層級，同時考慮各種交通組成，以及兼顧道路上不同用路人行之權利，以滿足效率、安全與公平之原則。



為了達成此一目標，配合政府推動「愛台十二項建設」之「智慧台灣」計畫，建構台灣智慧交通控制系統【4】，都市交控智慧化成為中央與地方政府合作之重點項目。都市幹道車流變異大，車輛到達與紓解較不規則，加上國內機車使用比例高，缺乏一套合理描述多車種之交通模式與號誌最佳化模式。隨著智慧型運輸系統(Intelligent Transportation Systems, ITS)與資訊科技之發展，號誌控制器可藉由車輛偵測器即時蒐集資料進行後端運算，達到動態、回授控制之目標，反應當今車流狀況。除了硬體的智慧化，內部模式也須更新以適應國內混合車流型態，提高模式的準確性，減少誤差來源以獲得更即時、準確的號誌時制計畫。

1.2 研究動機

基於國內缺乏一套適用於混合車流之號誌最佳化模式，本研究嘗試將汽車、機車甚至公車進行車道化與群組化，以不同推進模式描述，分別建立路口等候線累積與紓解型態，結合車道與幾何配置求解最佳號誌時制。傳統的號誌控制係由交通工程師蒐集現況車流資料後，以圖解法或臨界流動法找出路口各個方向之主要流動，再根據計算之最佳週期大小分配各時相之綠燈時比。此方法雖適用於未飽和車流或交通量低之路口，但部分條件下仍存在許多缺點。其一，當車流趨於飽和出現車道溢流情況時，既有模式對於延滯的推估較不準確，導致計算之週期過大，並無法有效紓解車潮；其二，模式對於車輛之到達與紓解假設其符合某種特定分配，實際上車流隨時間變化程度大，車輛彼此交互作用無法精準描述；其三，對於車種之處理，過去的研究多以小客車當量(Passenger Car Unit, PCU)將不同車種依條件轉換為小客車基礎，但當量值仍有許多問題亟須解決。若以機車為例，機車之駕駛行為與小客車不同，機械特性、車體大小、運動型態也與其他車種有明顯差異，將機車轉換為汽車當量僅有特定條件下成立。當道路流量增加、車流混合比高、車種組成複雜時，當量轉換容易失真導致誤差被放大。再者，受限於道路停等空間配置，機車需求高時具有向前滲透與橫向發展特性【48】【26】【80】，車輛等候空間之差異無法由小客車轉換加以呈現。由於上述各項原因，

現有模式對於號誌計算結果有明顯之誤差產生，也是本研究欲予以改進之處。

國外所發展的號誌控制模式多以汽車為主，較少考量汽、機車之混合車流特性建立模式，而國內雖引用國外車流模式加以修正，在機車或多車種的處理上仍以小客車當量轉換為主，解釋能力較為不足。此外，目前國際上廣泛使用之號誌最佳化軟體，如 SYNCHRO、TRANSYT-7F、TRANSYT 14 等，機車的部分仍難以描述，國內政府以及規劃單位在應用上無法針對不同車種交通量進行輸入，遷就於小汽車當量而導致號誌結果誤差，而路口機車停等區以及紓解過程之差異也無法在模式中呈現。有鑑於此，本研究致力於發展一套本土化車流推進與號誌模式，結合路口等候空間差異與考量分車種之紓解率，建立最佳化模式並求解多車種之最適綠燈時間，包含路網最佳週期與時差，以符合台灣混合車流環境。

國內號誌分流概念於 1990 年代開始探討，當時已考量機車等候空間佈置之差異對號誌時制之影響，建議將汽車與機車綠燈時間加以區分。號誌分流之層面包含空間與時間上的分流，在空間上將路段汽機車行駛空間車道化，並透過路口等候空間之佈置解決混合停等之問題；在時間上以不同時制區隔衝突之流動，發展新的時制計算方式【33】【5】。不過當時研究僅探討機車之分流設計，尚未納入機車兩段式左轉待停區或專用道，而研究範圍也以路口為主，尚未延伸至路段。本研究欲達到第三種分流層面，也就是顯示資訊上的分流，結合行駛、停等空間分流與紓解時間的分流，藉由共用號誌燈頭之不同流動顯示綠燈的差異區分各流動路權時間，其概念說明如圖 1-1 所示。

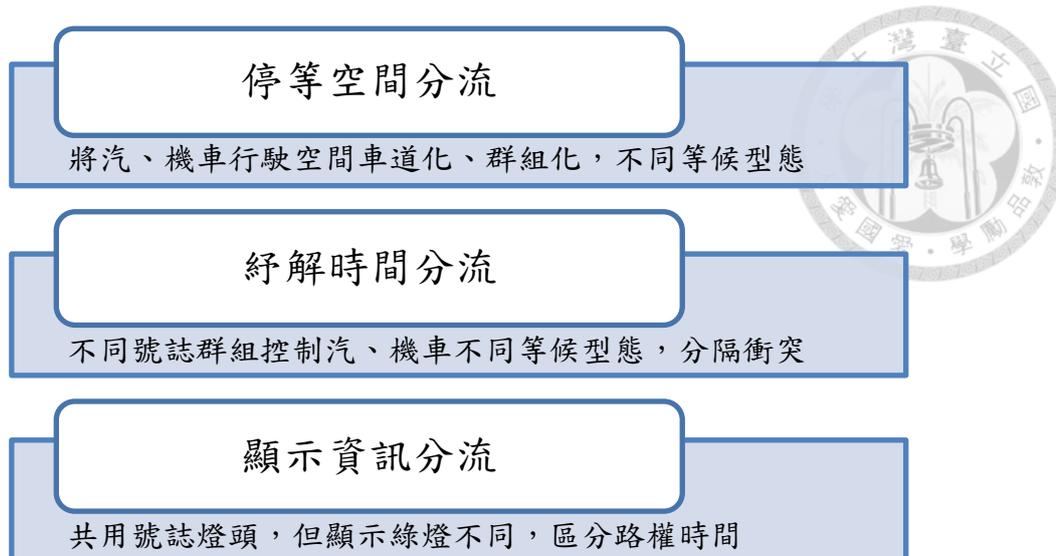


圖 1-1：號誌分流概念與層面

本研究所提出的顯示資訊分流，不僅整合了傳統時間與空間之分流，同時藉由不同號誌將用路人之路權時間分開，減少燈號轉換時或綠燈啟動可能造成的碰撞。此外，汽車與機車啟動延滯的差異也是影響路口績效高低的主要因素之一。根據調查，機車與汽車啟動延滯比較，前者較小且多為負值，且設有行人倒數計時器的路口，駕駛人提早啟動的比例更高【47】。為了避免提早啟動與行人衝突，以及不同車種啟動時間不一致，造成車輛彼此干擾影響路口服務水準，本研究期望以分流設計解決此一問題，不僅保障行人安全，減少路口碰撞發生機會，更可增進路口紓解效率。

1.3 研究目的

綜合整理上述國內混合車流環境、現有號誌設計之不足與車流模式之限制，本研究之車種分流號誌設計預期達到之目標如下條列：

1. 發展混合車流環境之號誌最佳化模式：基於車輛混流導致推進行與紓解過程的差異，本研究結合車道與道路幾何配置(包含車道數、機車待停區)、車流推進行模組與號誌模式，整合為「混合車流號誌最佳化模式」，其基本精神在於藉由號誌設計達到車流群組化、號誌獨立化之分流目標。

2. 基於汽、機車動態推進、停等與紓解的時間與空間差異，藉由實際車流資料歸納不同的車流型態，並轉換為以等候結構為基礎之數學方程式描述車流變化，以及對號誌時制輸出之影響。
3. 改善傳統混合車流模式缺陷：由於小客車當量轉換導致部分車流條件下誤差被放大的限制，造成號誌結果失真，本研究以分車種等候結構方程式，描述路口停等車輛隨時間等候線消長變化的情況，引入衝擊波傳遞模式並計算車輛動態之紓解量。
4. 號誌時制之績效評估：將號誌最佳化模式產生最佳化時制與號誌最佳化軟體產生之時制進行比較，探討不同流量情境下路網中各路口平均延滯、通過量與車隊長度之差異，提供交通管理單位未來實際應用之參考。

1.4 研究內容與範疇

本研究之探討範圍由路口延伸至路段，包含機車兩段式左轉待停區、機車停等區、鄰近路口段之進入車道、左轉彎、離開車道，並且將上、下游路段連結，擴充至路網以求解整體之號誌最佳時制計畫，以圖 1-2 表示。

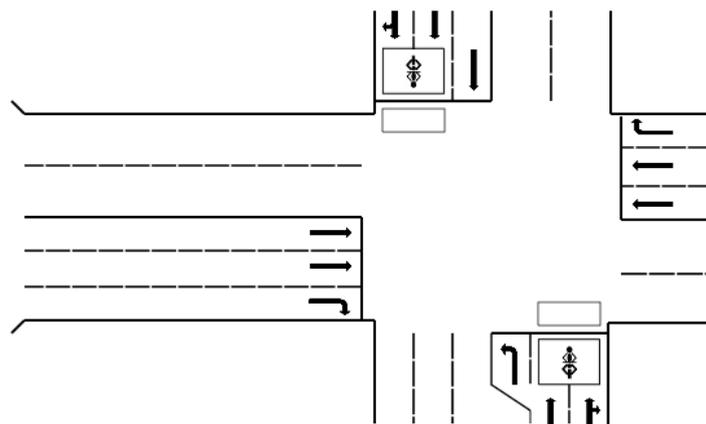


圖 1-2：研究範圍與內容

由於研究範圍以都市地區路網為主，市區道路普遍街廓長度較短，道路條件的限制加上路邊停車干擾、路口行人衝突，車流情況較不穩定，且車輛推進受號

誌影響程度大，車輛加、減速行為明顯，導致速度變異大，對路口容量與通過量影響甚鉅。因此，本研究之研究範圍除了市區道路各種停等空間配置、專用車道外，其內容更包括受號誌影響之路段與路口，以及車流與號誌之交互作用關係。

茲條列研究範圍與內容如以下所述：

1. 機車兩段式左轉待停區：一般都市幹道對於機車左轉管制策略可分為禁止左轉、允許左轉與保護左轉。其中保護左轉乃藉由號誌給予車流左轉保護時相以保障其路權時間，而允許左轉則包含機車可否直接左轉或兩段式左轉，依據路口橫向幾何條件與左轉衝突量大小決定是否設置機車待停區【22】。
2. 路口機車停等區：一般路口機車佈置方式須考慮三個因素：(1)紅燈時段機車等候線之安排；(2)綠燈時段車隊紓解之控制；(3)綠燈介間時間車隊行止之處理【26】。根據過去研究指出，路口機車等候佈置方式可分為機慢車專用道、直行機車專用道、路口加寬式、全功能型設計、路口封閉式與橫向等候線式等六種【48】。考量衝突嚴重性、交通適應性、同質性與一般性等指標進行篩選後，以混合停等方式、機車專用道與汽車等候線退縮三種為較可行之方案。本研究針對混合車道機車等候型式以汽車等候線退縮為探討對象，並進一步研究號誌分流之可行性。
3. 車道群組：車道之功能與型態可根據車輛路口轉向需求、使用車種限制區分為左轉專用道、快車道(禁行機車道)、慢車道(混合車道)、右轉專用道。本研究以車道群作為推進模式之基礎，其用意包含：(1)不同車道群車輛行為不同，影響推進之速率、密度與路口之紓解率；(2)車道群之交互作用關係，用以描述過飽和狀態停等車隊溢流對通過量之影響；(3)號誌控制器之連結，不同群組之流動受不同號誌控制，同一號誌可控制多個流動，建立以流動為基礎之最佳化模式。



除了探討上述幾何配置與車流、號誌關係之外，本研究將進一步分析各車道群與等候區綠燈紓解時間之差異，透過最佳化模式分配不同路權時間，同時維持路口容量之可靠度。由於不同車種在紓解行為上的差異，加上紓解過程中彼此干擾，不僅影響飽和紓解率，同時也隱含安全的疑慮。藉由號誌分流的精神，不同用路人在行駛空間上予以車道化，在車流運行上予以車種化，配合紓解時間以及綠燈顯示資訊的分流，達到理論上之路口最佳綠燈時比與週期，並討論實務上應用之可行性，避免駕駛人混淆，同時適應未飽和與過飽和型態之車流，並分析號誌分流對車流影響程度以作為後續施行的參考方向。

1.5 研究方法

根據國內汽、機車混合車流特性，配合號誌分流的層面與意義，考量過去號誌最佳化模式與國內、外車流模式之發展，本研究在號誌模式以群組基礎法(group-based method)取代傳統以時相為基礎方法(stage-based method)，將號誌之計算單位以流動(movement)為主，讓時制的產生更具彈性。車流推進方法則以動態交通演變模式(dynamic traffic evolution model)探討依時階(time-dependent)交通變化量，以及對匯入車道群組車流量、溢流數量、等候線長度與紓解量之影響，建構非線性之推進模式與等候結構方程式，計算每一個時階對號誌最佳化結果輸出的反應程度，稱之為「模擬法(simulation approach)」。有別於早期所發展之「數學規劃法(mathematical approach)」，此方法以靜態之交通量推算號誌時制，模擬法更具有動態交通之特性，反應依時階交通量之變化，包含車輛溢流、車道阻塞、推進速率差異、車種變化，以及隨時間變化之紓解率，使號誌結果更接近真實之車流情況。因此，本研究主要著重在混合車流交通演變模式的開發，配合號誌限制式與車道與等候空間限制建立一套適用於國內混合車流環境之號誌最佳化模式，不僅具有理論上之基礎，同時融合國、內外號誌控制與車流模式的發展，更兼具實務上之要求，是一項結合車流、號誌、道路實體與實務應用之本土化研究。

1.6 研究流程與架構

茲整理本研究之整體流程與架構如圖 1-3 表示。確立研究動機與目的後，根據過去號誌分流的研究，歸納研究範圍與內容，提出新的號誌分流意義，也就是結合時間、空間與資訊的分流架構。回顧國、內外關於號誌最佳化方法與巨觀車流模式，發現傳統以時相為基礎之設計較無彈性，無法針對不同車種、不同流動進行分析，因此以群組為基礎將車流分類，並以模擬法結合混合車流等候結構模式進行號誌時制最佳化，配合國內相關機車與混合車流等候空間佈設之文獻，納入最佳化模式。

確立模式後，將進行模式相關參數校估，並以實際案例進行分析與驗證，以符合國內車流環境與模式準確性。針對特定情境進行敏感度分析，最後提出結論與未來進一步研究、實際應用之建議。

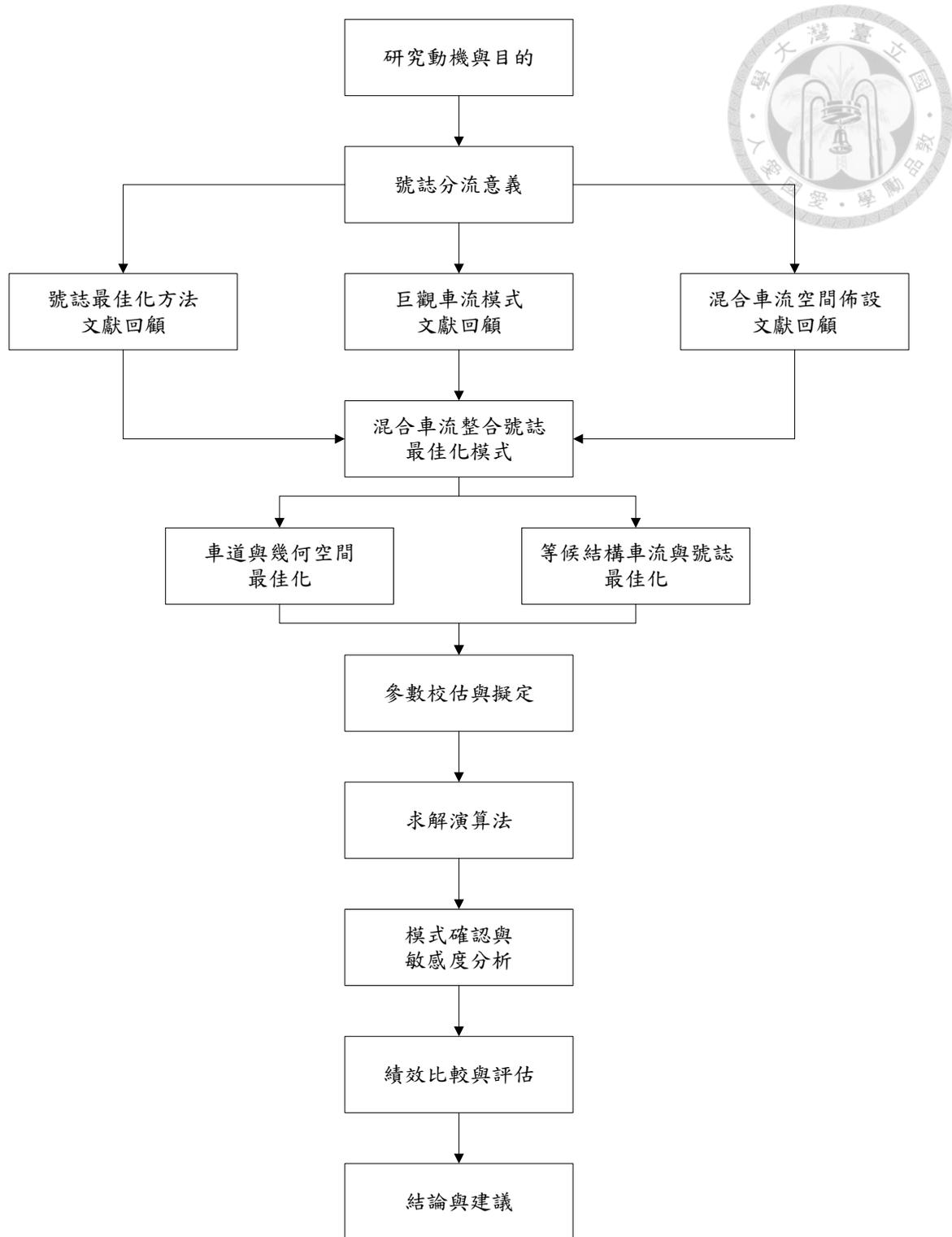


圖 1-3：研究流程與架構圖



第二章 文獻回顧



為了達成號誌分流控制目的，考慮不同車種到達、等候與紓解特性，以及車輛與車道、等候區之利用關係，本研究回顧國內外號誌時制設計相關文獻，包含號誌設計哲學、最佳化模式、等候空間佈設、巨觀車流模式、求解方法與軟體應用概念。號誌設計著重於路權的分配，也就是不同用路人「行」優先權、綠燈時間長短，根據分析的基礎而有不同設計方法。國外發展號誌設計較為成熟，國內相關研究加以延伸，納入機車或其他車流特性而成新的設計方法。隨著車流量增加、車種愈來愈複雜，規則式交通管理策略已不能應付路口各種流動交織的複雜行為，因此逐漸發展為交通「模式」加以描述，依據其車流複雜度決定模式的深度與廣度，同時不同控制目標、不同情境模式建構過程也有差異，造就今日多元化模式之發展。至於等候空間的配置主要參考國內相關研究，包含機車停等、待轉區、公車專用道、左轉彎、快車道、混合車道等，法規與道路幾何上的條件限制了部分車種的通行，導致模式適用性問題，也是本研究欲突破之處。號誌控制的基礎在於路口各種流動，而各流動乃是不同車種所組成，因此探究號誌設計的優劣必須檢視其背後之巨觀車流模式的準確性，車流與號誌實乃一體之兩面，車流的推進與紓解影響號誌結果，而號誌結果又反饋影響車流隨時間的變化。因此，許多研究以動態巨觀車流模式為基礎，配合號誌限制建構複合型最佳化模式以描述車流與號誌之交互作用。巨觀車流模式在發展上係由高速公路車流延伸至都市幹道；在內容上由穩定之流量、密度與速度等交通參數關係擴展至非穩定、多階段與不連續之車流，尤其都市地區路長較短，又受路口號誌影響，以傳統車流模式表示難免失真。至於此不連續之介面如何區分，讓車流得以成功推進又不失號誌之準確性，是本研究加以著墨之處。模式建立完成後，如何求解是另一個課題。求解結果必須滿足真實性，縮小與現實的差異，同時兼顧求解時間與成本效益，因此多轉為程式或以應用軟體進行求解，增加求解效率。本研究回顧相關線性與

非線性模式求解方法，比較其求解過程之概念與差異，作為混合車流號誌整合模式求解之參考。最後，為了方便應用與簡化號誌時制設計過程的複雜性，研究機構常將最佳化模式開發為套裝軟體供營運控制單位或研究使用，例如市面上常見之 TRANSYT-7F、TRANSYT 14 等號誌最佳化軟體。本研究將回顧其車流模式與求解方法之異同，汲取其經驗並作為本模式發展之參考。最後，藉由文獻回顧之各部分整理與內容之優缺點，歸納未來模式開發與研究內容的方向。

2.1 號誌設計哲學

號誌設計方法可分為 (1)時相基礎(stage-based)；(2)群組基礎(group-based)，前者顧名思義以時相作為號誌設計基礎，給定路口時相數與時相順序後求解，在求解過程中各流動種類與時相順序固定，僅最佳化每個之綠燈時間與週期，亦可給定時相矩陣(stage matrix)描述某一時相所對應之群組綠燈時間；後者則以各方向之流動(movement)為控制單元，將具有相同綠燈起始時間與長度的流動歸類為同一群組，不會形成時相，也無時相順序分別。群組基礎設計特色為最佳化後可自然求得時相而不需預先給定，在流動之處理上更具有彈性。

近年來的設計方法多朝向群組基礎為主，不須設定時相，最佳化範圍更廣泛，以綠燈起始與綠燈長度控制每一個流動路權時間，更可包含路網各路口時差之最佳化。具體而言，時相基礎是群組基礎的一項特例，當流動之綠燈起始與路燈長度變數相同即形成同一時相，不重複出現之時相形成一個週期，此方法對於重疊流動或綠燈早開(leading)、遲閉(lagging)的處理更加細膩。流動基礎藉由繼承函數(successor function)控制群組間彼此先後關係，該函數為二元變數所組成，區隔衝突流動(conflict movements)的綠燈時間，類似時相基礎方法將衝突流動劃分為不同時相。此外，群組基礎較適合處理不同車種獨立號誌之設計，此種狀態下將無明顯之時相存在，在不衝突之前提下進行多車種路權時間之最佳化，減少各時相間因號誌轉換導致損失時間的增加。

2.1.1 時相基礎

以時相為基礎的號誌設計可回溯至 Allsop 【52】，該研究以最小延滯 (minimizing delay) 為模式求解目標，假設規劃路口有 m 個時相， n 個方向，將各方向 (approach) 與時相 (stage) 建立時相矩陣 (stage matrix) 如下所示，由二元變數組成，各方向以介於 0 到 1 的綠燈時間 (λ) 控制。此兩者相乘即為各時相綠燈時間，必須滿足每個方向車流需求以及損失時間相關限制，其中最小延滯之目標式須帶入 Webster 延滯公式計算。由於目標函數為凸函數 (convex function)，可行區間為凸集合 (convex set)，形成一標準凸性規劃模式 (convex programming model) 進行求解。該研究將號誌求解結果與 Webster 方法所得的結果比較，在平均延滯低情況下，兩者週期與各時相綠燈時間差異不大，但 Allsop 的方法考慮額外延滯 (exceptional delay) 的發生，例如轉彎車輛造成路口阻塞情況，可藉由縮短週期降低延滯值，不過仍需要更多後續實地測試案例說明。

$$A_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Allsop 【53】進一步以最大路口保留容量 (maximum reserve capacity) 求解，將各時相之最佳綠燈時間與有效綠燈時間之差值定義為路口保留容量。當車輛到達率接近容量時，各時相綠燈時間會大於最小綠燈限制，且每個時相的路權時間由該時相之代表流動 (representative approach) 所決定，容量可表示為損失時間、週期與車道到達利用率之關係式。由於目標式為線性函數，限制式之可行解區間為凸集合，形成標準線性規劃模式 (linear programming model)，其對偶變數 (dual variables) 可用來分析路口改善某些條件後對於目標函數之影響。另外，剩餘變數 (slack variables) 可用來分析尚未完全利用之變數，增加或減少幅度對目標函數的影響，在交通上的意義為非臨界 (non-critical) 變數，例如非臨界流動 (non-critical

movement)之分析。

Lo 【83】採用格位傳遞模型(Cell Transmission Model, CTM)作為推進方法，有別於傳統給定車流量計算各時相之綠燈時間，將車流模式應用於號誌求解，更能反應車流變化對號誌影響程度。格位傳遞模式係 Daganzo 【62】所提出，將路段切分為許多同質的格位(homogeneous cells)，其基本構圖包含自由流斜率 v ，最大容量時斜率 o ，受限流斜率 w 。由此簡化的基本構圖可以得到車輛推進的關係式，首先決定一個格位的長度為自由速率下車輛在一個時階裡可以推進的距離，接著推進到下一個格位的實際流量則在需求量、格位對格位的容量、下游剩餘空間三者中取最小值。除了普通的格位外，另外包含路口端之號誌化格位，使其上游的格位之往下游的容量會受到號誌影響。由於車流量於格位間傳遞具有依時間動態推進過程，屬於模擬基礎(simulation-based)之最佳化方法，而模式中時相起始與結束時間是否為綠燈屬於條件判斷式(conditional constraint)，無法形成數學規劃法(mathematical-based)中一般同時存在限制式(simultaneous constraint)，因此該研究藉由三個二元變數分別判斷時相開始、時相結束且根據此二元變數適當分配流入號誌化格位之需求量，將模式等效轉換為二元混合整數規劃模型(binary mixed integer linear programming, BMILP)，其目標函數為延滯最小化，而延滯乃加總各時階某一格位之車輛數扣除流入下一格位之流量而得。本文也由單一路口之號誌最佳化擴展為兩路口續進，其結果顯示良好的號誌時制下少部分週期有續進，且延滯相較於定時控制有明顯降低趨勢。

Lo et al. 【84】同樣以格位傳遞模式為基礎建構號誌最佳化模式，不同於上一篇之作法，將非線性限制式以二元變數等效轉換，此法雖為可行，但一條件判斷式至少需要兩個以上二元變數，容易增加模式複雜度與求解困難。因此，該研究以基因演算法進行求解。其基本構圖同樣在需求、格位對格位之容量與下游格位可接受數量三者中取最小值作為實際推進量。除了一般的格位，本文亦考慮號誌化格位，如果下游為號誌化格位，則格位對格位之容量會受到號誌而改變。號

誌化路口僅考慮二時相，沒有損失時間，關於綠燈介間時間則予以簡化，幹道綠燈即為支道紅燈；幹道紅燈即為支道綠燈。為了應用基因演算法求解，分成路網(network-wide)與順序(sequential)，分別稱作：Net-GA 與 S-GA。Net-GA 層級較大，同時考慮整體路網所有路口之變數，包含各個路口綠燈與紅燈時間；而 S-GA 相對層級較低，一次僅針對個別路口相關變數進行最佳化。變數必須編碼轉換為基因(genes)組成染色體(chromosome)以利求解。該研究將 Net-GA 結果與 TRANSYT 比較，發現在執行時間(runtime)較短(10 分鐘)的情況下，壅塞情境表現比 TRANSYT 佳；非壅塞情境表現比 TRANSYT 差。不過若執行時間為 40 分鐘，則不論壅塞與否其績效皆比 TRANSYT 好。此外，考慮在週期長度可變的情境下，Net-GA 與 S-GA 比較後發現，Net-GA 在壅塞情境且初始佔有率高的情境表現較佳，其餘皆為 S-GA 表現較好。由此可見，該模式相較於 TRANSYT 更適用於模擬長時間之號誌最佳化，且路網層級之基因求解在車流接近過飽和或壅塞的情況下，考慮上、下游路口格位之停等車隊交互影響、延滯的累積，其結果比路口層級號誌最佳化更加適用。

2.1.2 群組基礎

有別於給定時相設計方法，Heydecker 與 Dudgeon【69】採用群組為基礎之變數，包含群組綠燈起始時間、群組綠燈長度、週期之倒數進行號誌最佳化，其中週期採用倒數，使模式可維持線性規劃(linear programming)、或是凸規劃(convex programming)之標準形式。該研究有三種目標式，此三種目標式所對應的限制式部分不相同。第一，以最小週期求解，即得到臨界週期(critical cycle)，當本路口與其他路口具有共同週期(common cycle)時，不得小於此共同週期，形成了線性規劃模式，使用單形法(simplex method)求解。第二，最大剩餘容量，也就是維持目前起訖流量多少放大倍率內，路口仍能維持未飽和狀態，同樣形成了線性規劃模式，以單形法求解。第三，最小總延滯，採用 Webster 延滯公式，由



於此公式為凸函數(convex function)使得該問題成為凸規劃(convex programming)之標準型，可以用 Zoutendijk 可行方向法求解。Zoutendijk 可行方向法為 Zoutendijk 於 1960 年所提出，適用於解非線性最佳化問題，Zoutendijk 法確保每一次迭代的每一步(step)，現行解皆在可行區間內。首要步驟為找搜尋最深方向(steepest descent direction)，也就是找尋使目標函數值下降幅度最大的新的可行解，給定最深方向後，計算可允許最大跨步值，若判斷最大跨步可改善現今目標函數值則移動至新的可行點；若最大跨步無法改善，則移動到維持同一目標值之位置，直至找尋不到最深方向即得到最佳解。為了維持初始值在可行區域(feasible region)內，須先用最大剩餘容量求解的值作為最小總延滯目標之初始狀態。該研究最後舉例，陳述群組為基礎方法所表現的特性，其所得的最佳解下可能時相結構不全，有的時相甚至只有 3 秒，有很大一部分的時間用作介間時間，從群組而言發現在介間時間仍保有一至二個群組仍維持綠燈，因此以時相的觀點無法得到群組為基礎的最佳解。

Gallivan 與 Heydecker 【65】進一步將號誌化路口流動轉換為圖論(graph theory)描述。過去二階段的設計方法不適用於實務操作，第一階段為考量車流與行人找出相容的流向集合；第二階段計算各號誌群最佳號誌時間(duration)。其中第一階段乃根據各流動之衝突關係建立衝突圖(conflict graph)，進而轉換為相容圖(compatibility graph)，再將無衝突的號誌群排序，給與最多的綠燈時間，產生控制排序(control sequence)。衝突圖的節點(vertices)表示各號誌群組，其節線(links)表示有衝突的群組關係，相容圖則相反。相容圖的各節點至少都可作為週期內的子圖，而各子圖必須呈現 clique 的情況，表示多個號誌群可同時擁有路權時間，在排序時應促使每個 clique 的節點連續出現，使其擁有的路權時間盡可能延續。該研究為快速求解，保留凸性規劃模式，在複數平面上建立最佳化邏輯，以 2π 表示整個週期，利用清道時間矩陣、組合序列結構解可行的 clique 順序，以每個號誌群綠燈起始時間(start of green)與綠燈持續時間(duration of green)為決策變數，

加入號誌群內最小時間限制，在最大化剩餘容量之下求解最佳時制。

Silcock【93】進一步區分流動與號誌群，以群組為基礎結合號誌化路口幾何設計，發展數學規劃模式。控制每個流動(stream)的參數包括平均到達率、飽和流率、最大飽和度、最大等候線長度；對於號誌群與路口則有最大、最小綠燈時間、週期與最小安全清道時間。為了分析不同變數對路口容量之影響，該研究以最大剩餘容量為目標函數，並進行多項敏感度分析，由於路口幾何設計與號誌控制有密切關聯，該研究指出飽和流率、最小安全清道時間與行人流動最小綠燈時間為影響路口幾何設計的關鍵，並輔以 SIGSIGN 分析上述參數改變對路口容量之敏感度，推導其目標函數變化量。該研究也分析了部分號誌設計軟體的最佳化技術，包含 OSCADY、LINSIG、SIDRA 以及 SIGSIGN。OSCADY、LINSIG 與 SIGSIGN 的目標函數為最大路口容量或最小路口延滯，而 SIDR 則以結合容量、延滯與車輛停等次數之績效函數作為目標。在最佳化方法上，OSCADY 使用線性與凸規劃求解最佳綠燈時間，而 LINSIG 與 SIDRA 則以複合式方法考慮群組各流動求解時相綠燈時間，LINSIG 以使用者介入(intervention)計算；SIDRA 則以演算法界定臨界流動。SIGSIGN 則直接求解各流動之綠燈時間。

隨著群組基礎之最佳化範圍由路口延伸至路網，Wong【98】探討大型路網最佳化問題，該研究以共同週期時間控制路網內各路口週期，而綠燈起始時間與綠燈長度則控制每個流動之路權時間。由於路網分析中各路口之時差也是重要的變數，但以群組為基礎的優點為時差已包含在控制變數中。其限制式包含週期限制、綠燈長度限制、清道時間限制(引入繼承函數區隔衝突號誌群組)與容量限制，確保流動不會大於可接受之最大飽和度。該研究進一步將上述限制式轉換為矩陣型式，以 A 表示各流動之衝突矩陣， Φ 為各流動控制變數(綠燈起始、綠燈長度)集合， b 為各限制式之參數，則可以建構一般化非線性規劃模式(nonlinear programming model)：

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad P(\bar{\Phi}) \\ & \text{s.t} \quad A \cdot \bar{\Phi} \geq \bar{b} \end{aligned}$$



其中 P 是欲求解之目標績效函數，此數學模式又可根據是否給定週期而有型態上差異。對於非線性規劃之求解，例如前面所提及之 Zoutendijk 可行方向法，該研究第一步驟找尋可改變之最深方向，也就是 gradient，找出可移動之可行方向後，第二步驟計算最大跨步，接著在不大於最大跨步之下找出目標函數改善最大之跨步，如此迭代搜尋直到最佳解為止。可利用 gradient 搜尋乃因為績效函數(P)可對控制變數(綠燈起始時間、綠燈長度)進行偏微分，但無法對週期偏微分，因此需使用平行搜尋法(parallel search)對於週期變化 ± 2 內之績效變化。該方法不易產生初始可行解，需透過 SIGSIGN 輔助，SIGSIGN 為群組基礎之號誌軟體，採用線性或凸規劃，產生路網所有可行的時相順序並排除部分不適用之時相順序，針對個別路口求解最小週期下之時制計畫，找尋臨界週期(critical cycle time)，並以特定週期下延滯最小或容量最大情況下之時制作為路網時制計畫同時必須滿足所有限制式成為初始可行解。找到初始可行解後，再進行時相順序與整體之最佳化。該非線性規劃模式以整數規劃方法求解，利用績效函數微分之近似表示法，以離散可行方向法搜尋局部最佳解，同時為了縮短求解時間，將整數規劃模式解構(decomposition)為更小的子模式(subprograms)。

2.1.3 群組整合車道基礎

號誌設計哲學的發展，由時相結構演變至群組為基礎，不僅在綠燈時間分配上更具彈性，同時能夠處理大型路網之時差最佳化，在求解上仰賴部分軟體協助以確保最佳解之品質與縮短求解時間。如同 Silcock【93】的研究指出，號誌化路口容量受到車流飽和流率、行人最小綠燈時間與清道時間影響甚大，顯示路口號誌化容量除了本身幾何配置外，良好的號誌時制設計也是維持容量的必要條件。由於號誌受車流影響，兩者相輔相成，為一體之兩面，車流量大小決定號誌時間

長短，而號誌時制又反饋影響車流量推進與紓解。車流之推進也受到路口車道配置的影響，例如專用道、共用車道(shared lane)或轉向限制影響路口服務水準，特別在過飽和或等候線溢流(spillover)的情況下，延滯快速累積，導致最佳化之週期過長或綠燈失效的問題，導致路口績效更加惡化。此外，若是多車種的情況下，車種間的複雜交互作用更讓車道利用難以掌握，而號誌也難以達到最佳化。

Lam et al.【79】開始探討路口車道利用與號誌時相之整合設計，同時考量行人流動，該研究之目標為最小化路口每個時相流動之最大流量與容量之總和。為了描述流動與車道之利用關係，須利用二元變數進行區隔，且隨著二元變數數目增加，求解時間呈現指數成長，必須分階段依序求解。該研究適用時不大於四個臨近方向(approach)之路口，其最佳化程序分為三步驟：第一，僅考慮純汽車流。汽車流動為決定路口時相長短的主要因素，將流動分成四種型態(patterns)：(1) 左轉、直行、右轉專用；(2) 左轉/直行共用、右轉專用；(3) 左轉專用、右轉/直行共用；(4) 左轉/直行/右轉共用。此步驟之目標除了最小化各時相流動之流容比，尚需加入特定流動於某時相獲得路權時間之二元變數(x)總和，將轉向流動轉成直行車當量數(tcu)並滿足流量守恆限制。藉由車道利用之型態變數(lane-use pattern variable)判斷各流動屬於哪一種型態後，可推導四種型態之相關流量限制式，選出每個臨近方向(approach)一種車道利用型態，同時必須確保離開之流動即將匯入之路段其離開車道數是足夠的。第二，加入行人流動，此步驟之目標函數由四個行人流動與四個方向之右轉流動二元變數所組成，需最大化可能允許之行人流動並盡量減少右轉衝突流動，其限制式為修正右轉/直行共用車道流量並符合右轉/直行共用車道流動與行人流動之衝突限制，不可同時存在於相同時相。第三步驟則重新分配時相順序，以涵蓋最多的汽車與行人流動，根據步驟二之時相順序給定每個時相獎勵值(reward)，根據時相順序而有大小之分，以二元變數控制時相 u 與時相 v 之發生前後關係，並最大化此兩者乘積，表示在此最佳時相順序下，各時相所能涵蓋之汽車與行人流動最多。最後，將現行之設計與整合式設計

以 TRANSYT-7F 求解後，發現平均延滯大幅下降約 73%，且停等次數也降低不少，行駛速率增加，各流動之飽和度也維持在 0.8 以下，顯示透過整合設計之最佳化方法不僅車道利用率增加，產生的號誌設計也有效改善路口之服務水準。

Wong 與 Wong 【99】延續 Lam et al. 的研究，發展單一路口車道配置與號誌時制聯合求解模式。Lam et al. 【79】的設計為階段式方法，該研究存在部分缺點。第一，該研究以每個時相各方向流率與飽和流率比例總和為目標，不一定求得最大容量之號誌時制，每個時相不同車道之飽和流率受轉向車流影響而有不同，並非定值，而行人綠燈時間在最佳化過程中常分配在較大的時相內，其優先權受到限制，更重要的是將汽車流與行人流動分開考慮較容易求得次佳解(sub-optimal results)。因此，Wong 與 Wong 發展一套整合車道配置與號誌時制設計之最佳化方法，以最大剩餘容量以及最小延滯為目標式，同時考慮車輛與行人流動，形成二元混合整數非線性規劃(Binary Integer Non-linear Programming, BMINLP)。該模式決策變數由二元變數(binary variables)與連續變數(continuous variables)所組成，二元變數包含某個車道是否允許特定流動通過的判斷變數，稱為允許流動(permitted movement)，另一項為繼承函數(successor function)，定義為兩相衝突的號誌群組彼此之先後關係。至於連續變數部分，除了過去群組基礎研究所採用的共同週期、流動綠燈起始時間與綠燈長度，尚加入欲最佳化之流量共同乘數(common flow multiplier)與車道號誌時間。由於本研究將流動與車道兩者分開，以二元變數控制兩者關係，傳統計算流動之綠燈時間，當某車道允許流動成立時，其對應之號誌時間也必須與流動相同，因此將其獨立為特定變數。根據上述之決策變數，模式相關限制式說明如下：(1) 流量守恆，特定臨近方向(approach)其各進入車道可通過之流量總和為該路段往下游路段需求與共同乘數之乘積，在需求固定情況下，共同乘數愈大表示允許通過各車道的流量愈多，也是模式主要目標之一。(2) 最小允許流動，為避免車道未利用情形，每個車道至少允許一種方向之流動。(3) 最大離開允許流動車道數，臨近路段之離開車道(exit lane)須滿足各

方向匯入之允許流動，大於或等於各方向之進入車道數(approaching lane)。(4) 相鄰車道允許流動衝突限制，若某流動允許由右側車道($k+1$ ， k 表示車道編號，最內側為 1)通過，則左側車道(k)往其順時針方向之流動皆構成衝突流動而無法通過，以此區隔互不相容之允許流動。(5)週期長度，需介於給定之最大與最小週期之間。(6) 車道號誌設定，若某車道允許兩種以上流動通行，基於安全考量必須由同一號誌群控制，因此其流動之號誌時間與車道號誌時間需一致。(7) 綠燈起始時間，該變數為介於 0 到 1 的數值，包含一般流動與行人流動。(8) 綠燈長度限制，同樣為介於 0 到 1 的數值，必須滿足一般流動與行人之最小綠燈時間。(9) 號誌顯示順序，以繼承函數描述兩衝突流動之號誌燈號先後關係，其二元變數總合為 1。(10) 清道時間，兩衝突之流動其後者之綠燈起始時間須滿足前者之綠燈時間與最小安全清道時間(黃燈與全紅時間)，行人流動亦是如此。(11) 禁止流動，若某車道不允許特定流動通過，則該車道沒有對應之流量，以二元變數控制。(12) 流動飽和度調整，由於車道流量分配係根據等候理論(queueing theory)，兩相鄰車道其所允許共同方向之流動飽和度需一致。(13)最大飽和度限制，調整後之飽和度不得大於設定之最大飽和度(一般為 0.9)，確保其未達飽和狀態。上述為車道配置與號誌整合設計重要限制式並加以回顧，後續研究將依此限制式為基礎加入適當等候區與幾何配置限制。之後，該研究以最大剩餘容量、最小週期時間與最小延滯三種不同目標進行求解。在最大剩餘容量下，若 $\mu < 1$ 表示路口有 $100(1-\mu)$ 百分比為過飽和，需求量超出可允許通過之流量；若 $\mu > 1$ 表示路口尚有 $100(\mu-1)$ 的剩餘容量。當 $\mu=1$ 時，在現有幾何條件下可維持營運之臨界週期時間，以最小週期求解。若是以最小延滯求解，則目標函數為非線性之延滯公式，形成 BMINLP，必須以 cutting plane 方式求解或線性搜尋演算法(heuristic line search algorithm)，後者考慮了問題本身的物理特性，將初始週期長度作為線性搜尋的參考，所得的週期時間較短。

Wong 與 Heydecker【100】進一步將離開車道數納入最佳化範疇，其變數組

成多了進入與離開車道數為整數，其餘與 Wong 與 Wong【99】研究相同。由於車道允許流動或繼承函數等二元變數亦屬於整數範圍，因此原有之 BMINLP 型式可轉變為整數規劃(integer programming, IP)模式，目標為最大路口剩餘容量，沒有非線性之延滯公式，以 MPL 求解。該研究假設四種情境測試，其進入車道數由四車道增加至七車道，其餘條件相同，發現隨著車道數增加，路口剩餘容量由過飽和增加至 88%，隨著允許流動增加，各方向需增加的離開車道數變多，在總車道數固定情況下，進入車道數縮減，部分轉向流動出現共用車道情形。為測試剩餘容量之敏感度，在最佳進入與離開車道配置之下，移除共用車道的剩餘容量較低，且任意改變任何方向的進入與離開車道數其容量也比不上最佳化之車道配置。

陳彥向【23】延續 Wong 與 Heydecker【100】的研究，將號誌化路口車輛第二離開層之車道配置與號誌時制整合設計。第二離開層是指車輛進入路口臨近路段之左轉彎、共用車道前的區域，由於這些路段存在短車道效應(short lane effect)，對號誌化路口容量影響甚大，為避免路口容量被高估情形必須審慎考量。該研究針對左轉或右轉彎之溢流與阻塞情形加以定義，由於溢流或阻塞乃根據其發生於轉彎或非轉彎車道，可總和為離開供給限制之短車道效應(OSCSLE)。將第一層之進入車道(entry lane)與第二層之路段車道(link lane)格位化，並以節點表示路口與兩層之交接地帶，此節點節線化方法於巨觀車流描述甚為常見。該研究進一步指出常被忽略之進入供給限制之短車道效應(ISCSLE)，並指出路段格位與進入車道格位有效綠燈與飽和流率之變化。該研究之貢獻之一乃將車道之飽和流率分段化(piece-wise)，更能精確計算每個車道在部分轉向比例未知下之飽和流率。該研究發現 Wong 與 Heydecker 等人求解最大剩餘容量之模式，其週期為最大週期，而該模式則提供各種較短之最佳週期，在車道配置上則突顯短車道效應對號誌時制的影響。其結果與 TRANSYT 14 比較，發現隨著週期增加，所最佳化之共同乘數與 TRANSYT 14 較為接近，而單一層的模式(single-layer model)共同

乘數逐漸變大。由於 TRANSYT 14 包含格位傳遞(CTM)等交通演變模式，CTM 每個格位有其基本構圖，須滿足相關限制計算推進量，而該研究在沒有動態推進模式情況下，僅以限制式規範流量之上界(upper bound)也能求得類似結果，為該研究另一項貢獻。

2.1.4 小結

回顧號誌設計哲學發展歷程，由時相結構基礎演變為以群組流動為基礎，不僅不需要給定時相數與時相順序，根據流動之號誌特性形成時相，更可延伸至路網時差最佳化，在設計上能處理之車流與行人流動更多。在目標式的選取上，從最小延滯、最小週期至最大化剩餘容量，不同目標對應之限制式組合不同，所形成的數學模式也不相同，包含線性規劃、凸規劃、混合整數非線性規劃、二元整數非線性規劃至整數規劃，自然求解方法也不盡相同。至於何種目標所解之號誌時制為最佳，端賴設計之準則要求，例如容量最大之最佳化時制可能週期也相對較長。在範疇上，由單一路口最佳化延伸至路網整體最佳時制，納入上、下游路口車隊交互影響之動態交通演變模式(如 CTM)使號誌更能反應車流的變化，甚至涵蓋過飽和車流的發生。在內容上，除了原有之號誌與流動關係，更加入車道配置整合最佳化，將幾何設計納入最佳化模式，考慮流動與車道之利用關係，由分段式最佳化程序進化為單一層之整合模式，甚至推廣為第二層之進出車道配置，不過尚未處理多車種之議題。隨著車種增加，車道限制與等候區的設立將使車道利用更為複雜，且車種交互關係亦難以精準模式化，須納入混合車流動態交通方程式加以描述。

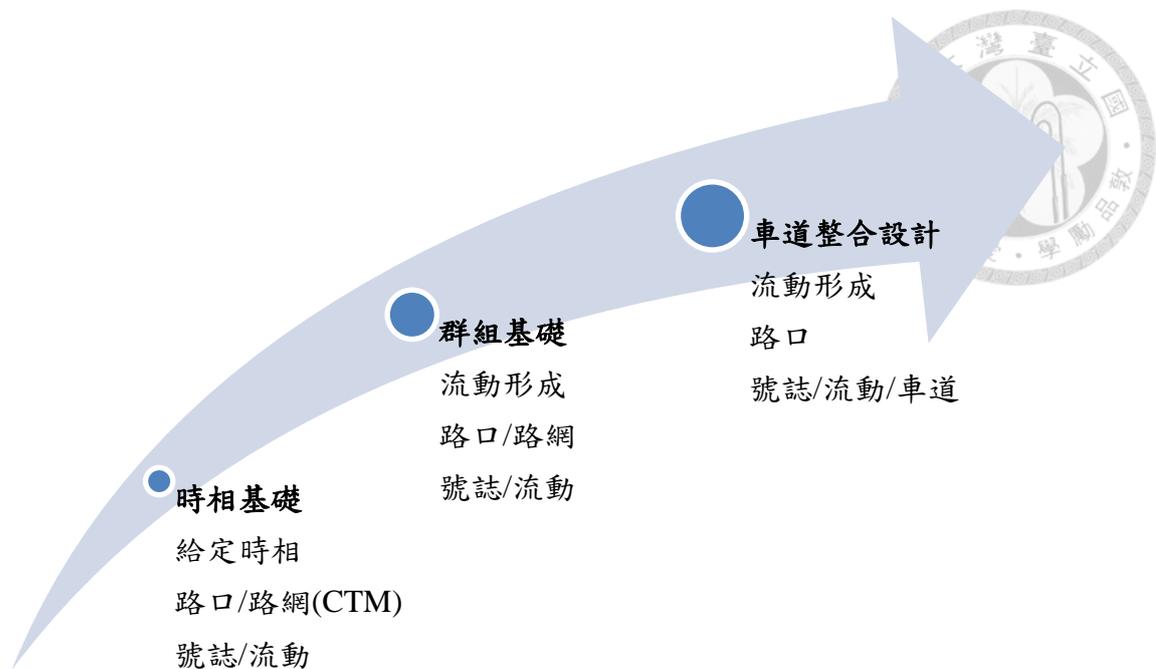


圖 2-1：號誌設計方法之演變

2.2 數學模式構建

為了描述現實的車流與號誌問題，模式化方法是一項有利的工具。數學模式乃將各種物理現象以量化的關係式呈現，描述彼此的關連，在特定目標下於可行解空間中尋求適當的解(solutions)。至於模式的精確度則依據規劃之要求或問題的複雜性而定，必要時以近似表示法或假設加以簡化。模式的組成包含欲求解的相關變數、固定的參數，兩者組合成各種限制式描述問題不同特性，形成解空間(solution space)，在可行解範圍內尋求一滿足目標之最佳或次佳的解。在號誌的應用上，首先必須界定欲規劃的範圍，設立求解的目標(objective)，如一般常見的最小路口延滯、最大總通過量、最小旅行與停等時間、最小週期與最大剩餘容量等，找出該目標下的影響變數(variables)。之後藉由實地調查，分析交通特性，並蒐集相關資料建立模式，形成模式的限制式(constraints)與輸入項目。模式建立後須進行確認(verification)，避免模式出錯，隨後進行相關參數校估(calibration)並以新的資料驗證(validation)模式與實際情況的差異，確保模式的準確性。對於號誌最佳化模式而言，主要數學模式分為數學規劃法(mathematical

programming-based method)與模擬基礎法(simulation-based method)，兩者模式組成略有不同，建構邏輯也有差異，影響求解方法也不同。以下 2.2.1 與 2.2.2 節將分別介紹，並回顧相關號誌研究內容，他們皆針對特定問題採用數學規劃法或模擬基礎法其中一種建立模式，並以適當方法求出最佳解。

2.2.1 數學規劃法

數學規劃法必須將問題轉成標準型式(standard form)，具有明確的目標(最大或最小化)、決策變數與相關限制式，例如線性規劃(LP)、非線性規劃(NLP)、凸規劃(convex programming)、混合整數非線性規劃(MINLP)、整數規劃(IP)等，其差異來自變數的種類、關係式與組合。規劃法的特色為求解速度快，可一次求解問題，而求解效率依據變數多寡與解空間大小而定。其缺點為對於部分條件簡化，模式精確度較差，尤其車與號誌問題乃是動態隨機的過程，規劃法較難呈現依時間之動態變化。2.1 節所回顧的研究例如 Allsop 【52】、Allsop 【53】、Heydecker 與 Dudgeon 【69】、Gallivan 與 Heydecker 【65】、Lo 【83】、Lam et al. 【79】、Wong 與 Heydecker 【100】、陳彥向 【23】等，無論其設計為時相結構或群組基礎，皆以數學規劃法建立模式，本節回顧國內相關規劃法之研究，加入機車等多車種議題，探討不同等候空間佈設對求解目標的影響。

國內由於混合車流關係，路口車道配置與國外不同，須加入機車停等區與兩段式左轉待停區之等候空間，馮輝昇 【33】針對各種可行之機車等候佈置方式進行探討，建立初步篩選之流程，以作為進行號誌設計之基礎。該研究建立一套以車輛數為單位之號誌設計方法，充分反應出汽機車混合流動之特性，並進一步將機車等候佈置方式與號誌設計方法結合，建構一套結合機車等候佈置方式之號誌設計流程，使交通工程人員根據此流程之運作，即可同時決定適當的機車等候佈置方式及號誌時相與時制計畫，提升路口之績效。而機車的等候佈置方式分別有：
(1) 混合停放方式；(2) 機車專用道；以及(3) 汽車等候線退縮三種，根據所探討

三種不同的佈置方式在應用上會產生的優、缺點，規劃在不同車道配置狀況下之路口機車等候佈置方式，歸納出各方案之車道空間規劃。該研究以一虛擬之路口進行測試，模式的測試過程主要分為：(1)輸入路口之幾何與交通量資料、(2)初步篩選路口機車等候佈置方式、(3)擬定管制策略、(4)建立衝突/非衝突與干擾矩陣、(5)設定綠燈介間時間及(6)結果分析等六大部分。

在模式測試中也針對小客車單位(pcu)進行號誌設計之求解結果，與車輛數進行號誌設計之求解結果加以比較，由分析之結果可歸納得到下列幾點結論：(1)以固定之小客車單位進行號誌設計時，隨著機車混合比或流量之增加，會產生高估機車流量影響程度之現象，使得模式求得之平均延滯及週期長度，均遠大於在相同交通量情況下以其他方式求得之結果。(2)以變動之小客車單位進行號誌設計時，在高機車混合比與流量情況下，會低估機車流量之影響程度。因此，隨著機車混合比與流量增加，模式所求得之平均延滯及週期長度的上升幅度並不顯著。(3)汽車等候線退縮之佈置方式，在機車混合比高以及流量大的情況下才有設置之效益，且隨著機車流量的增加，設置的效果愈顯著。(4)此研究並未針對設置機車專用道之情況進行分析、探討，但由上述分析的結果亦可判斷設置機車專用道的時機，在已採用汽車等候線退縮方式佈置情況下，若平均延滯仍然偏高，則在路口幾何條件允許之下應考慮設置機車專用道。

該研究對於機車飽和紓解率也作了一番探討，由於路口機車之紓解會受到右轉汽車與大型車嚴重干擾，因此該研究假設汽車以移動指數分配型態到達以及大型車以Poisson分配型態到達之條件下，利用數值模擬方法分別求算機車飽和疏解率之右轉汽車與大型車之折減因子，並建立右轉汽車折減因子與大型車折減因子之矩陣表，使其更精確估算在不同車流情況下之機車飽和疏解率。在號誌設計過程中，一般將流動分為衝突與不衝突兩種型態，但在實際狀況下，混合車流之汽、機車流動會有彼此干擾的情況出現。故該研究在設計號誌時，將各流動群間之關係分為衝突、非衝突與干擾三種型態，並建立衝突、非衝突與干擾流動之矩陣，

以充分反應汽車與機車混合流動之特性。最後經由敏感度分析的結果顯示，以固定小客車當量值進行號誌設計時，容易高估機車流量之影響程度；若以變動小客車當量進行號誌設計時，在機車流動大之情形下容易低估機車流量之影響程度；然而以車輛數進行之號誌設計，則較能適切地反應機車車流之影響程度。

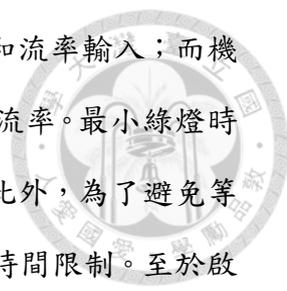
許添本【26】除了將流動群之關係分為衝突、不衝突與干擾三種型態，同時也將各車流所屬的車道類型加以區分，包含(1)快車道之純汽車流、(2)混合車道之汽車流、(3)等候線退縮涵蓋之混合車道汽車流、(4)等候線退縮涵蓋之快車道汽車流、(5)機車專用道之純機車流、(6)混合車道之機車流，以及(7)等候線退縮所涵蓋之混合車道機車流等七種。該研究嘗試在車輛均勻到達的條件下，以等候理論建立汽、機車延滯之解析解。該模式的限制式可分為六類：(1)週期長度限制、(2)有效綠燈時間限制、(3)有效紅燈長度限制、(4)起動延滯限制：機車混合比在混合車流情況下會因號誌時相與時制計畫不同而變動，汽車起動延滯也隨之改變。(4)損失時間限制：損失時間包含起動延滯與未被使用之黃燈時間，在等候線退縮的方式下，流動群的損失時間還包括通過等候線退縮距離的時間，可依汽車或機車、快車道或混合車道，是否為等候線退縮方式分為五種類型。(5)綠燈起始與結束時點之限制：假設每一流動群在一週期內僅有一綠燈時間，流動群綠燈起始與結束時點之時間差等於有效綠燈加損失時間長度。該研究擬定三種控制策略：(1)左轉策略、(2)紅燈右轉策略、(3)機車左轉策略執行號誌模式並進行績效評估，決定路口的機車等候佈置方式與時制計畫。

王義川【5】建立一套衝突少、效率高的號誌控制策略，將汽、機車進行時間、空間上的分流以符合臺灣本土的車流特性。由於國內混合車流情況普遍，汽、機車在混合車道中彼此互相干擾，不僅有安全上疑慮，同時也會降低路段或路口的運轉績效。傳統的號誌設計只考慮汽車的流動，根據每一個方向(approach)的臨界流動(critical movement)大小分配綠燈時間，但往往忽略了機車在流動中的混合比例，所計算的時制也容易產生誤差。因此，該研究在空間上以行駛空間車道



化(汽、機車專用道)的方式將路段中的汽機車進行分流；在時間上則考慮衝突的區隔設計一套分流式號誌設計方法。汽、機車由於車流行為的不同，號誌設計所需的參數也不同，若將兩者號誌設計分開，則汽、機車於路口通行與停等能較有規則地安排。該研究分流式號誌設計的定義為「設計一套將號誌化交叉口的號誌設計方法使得交叉口之行駛路權，能依車種及其車流型態在時間與空間上，加以適當的區隔，以提高交叉口服務水準」，其所包含的觀念有四：(1)時間與空間的分流：藉由幾何佈置來管制運行空間，以號誌時制來管制運行時間，使交叉口行車更有秩序，並減少衝突。而分流式號誌設計方法的意義乃希望能將車流行為全然不同的汽、機車，在號誌設計上作更嚴謹的考量，而非傳統上基於純化車種的理由所作的汽、機車號誌「同時設計」或「混合設計」。(2)加入安全的觀點：路口服務水準除一般的效率觀點外，近年來安全觀點逐漸被重視，而將汽、機車車流在空間與時間上作分流的意義，在於安全也是路口服務水準優劣的考量要素之一，對於汽、機車車流衝突的化解更有幫助。(3)汽、機車不同號誌設計參數：由於國內研究長期以來依賴國外成果太重，以致國內基礎研究薄弱，對於車流行為的探討多著重於混合車流，以至於在做號誌設計時，並未深入考量汽機車在車流行為上的差異。而透過分流式號誌設計方法，可以依據汽、機車的特性建立不同的號誌設計參數，以落實本土化的精神。(4)機車效率評估：在進行效率評估時，若以延滯及容量而言，傳統的方法評估的標準皆以小客車來衡量，而在臺灣都市之中，機車混合比較其他都市高，因此當量的轉換並不適當，而用分流式號誌設計方法將可以依車流形態(車種、轉向比)作個別效率的計算，或依需求合併計算。

數學規劃模式的建立，一般可分為輸入、模式與輸出三個部分。輸入程序包含相關參數的設定以及實際調查的資料，模式則是目標式、限制式的確立，至於輸出則包含汽、機車個別延滯與服務績效指標的揭露，以下先就模式重要之輸入參數作一說明。首先是飽和流率，由於該研究進行分流式號誌設計，因此不同流



動型態其飽和流率也不盡相同。汽車部分，經過實際調查將飽和流率輸入；而機車則根據車道寬度以及有無快慢分隔島進行迴歸分析得到飽和流率。最小綠燈時間除了考慮汽車紓解之外，尚包含行人安全通過路口之時間。此外，為了避免等候車隊長度大於街廓長度而溢流至下一路口，更加入最大紅燈時間限制。至於啟動延滯，根據調查，未達飽和前五輛車通過路口時間與達飽和後五輛車通過路口時間相減可得啟動延滯，至於機車則假設為0秒。該研究因為將汽、機車分流，因此定義了11種流動型態，依據車流型態(純車流或混合車流)與是否具有等候線退縮區分類，並且區分流動彼此為衝突、相容或混合車流彼此干擾三種類型，形成衝突矩陣。相關參數與限制設定後，該模式之目標式沿用馮輝昇【33】所推導之機車延滯公式(同樣適用於汽車)，考量路口是否有等候線退縮之佈設以GAMS軟體進行求解。該研究假設兩種不同的案例，案例一為禁止汽車左轉；案例二則允許汽車左轉，其中案例一又分為(1)專用道與分流式號誌設計、(2)專用道與等候待轉區加上分流式號誌設計、(3)混合車道與傳統號誌設計三種方案。由結果得知平均總延滯以混合車道型式較佳，若以機車延滯而言則分流式設計較佳，以汽車延滯則以混合車道型式較佳，但三個方案差異不大。由此可推論分流式設計有利於改善機車延滯，相對的會增加汽車延滯。至於路口總容量，經比較後發現分流式設計方法較高，但其汽車容量則低於混合車道設計；而分流式設計則有較高機車容量，可推論分流式設計將提高機車在路口之容量，且不同的設計將會造成路口汽、機車在容量上的消長。案例二因為加入了左轉汽車流導致衝突增加，週期變長且平均延滯也增加許多。

根據此篇研究，國內雖然尚未實行汽、機車分流式號誌，但其以衝突流動的觀念將汽、機車有效分流，不僅提升安全，改善機車平均延滯也增加路口機車容量。機車流量大時是否設計機車專用時相值得後續探討，更提供本研究建立多車種分流號誌基礎，擬定分流的條件與控制策略。

國內其他關於獨立路口號誌最佳化模式亦可參考邱大恭【17】與邱裕堂【18】研究，前者於模式中加入左轉保護時相之最佳化；後者以臨界流動法為基礎，建立週期與時比之號誌最佳化策略。



2.2.2 模擬法

相較於規劃法須有一定之標轉型式，模擬法除了特定目標外，其限制式組成較多元，包含許多條件判斷式。由於條件判斷無法輕易轉換為一般限制式，須藉由模擬的方式讓程式判斷該條件是否成立以進行下一步演算。相對之下，規劃法可一次求解；而模擬法須等到模擬完成後才進行求解。而模擬的過程是為了更精準描述問題動態依時間的變化，其通常涵蓋特定之巨觀車流模式(macroscopic traffic-flow model)更能反應號誌與車流之互動關係，準確度較高，但因為變數繁多導致求解速度較慢，常配合啟發式演算法(heuristic algorithm)求解。模擬法將巨觀車流模式模擬後結果作為號誌最佳化模式輸入項，稱為階段性求解，必要時變數須經過適當轉換，迭代(iteration)計算直到達收斂條件(stopping criteria)為止。因此，模擬法不保證求得全域最佳解(global optimal)，受限於求解時間與電腦資源(computer resources)，在特定條件尋求可接受之次佳或局部最佳解(local optimal)。

採用模擬法之研究，其背後主要目的乃處理車流不穩定狀態之號誌時制，或是大型路網中路口之間頻繁的車流交互作用。此不穩定狀態常見為過飽和(oversaturation)、車道阻隔(lane blockage)或車道溢流(lane spillback)。數學規劃法在限制式中須設定車道之最大可接受飽和度，避免延滯過大，而導致號誌週期過長，同時對於轉向流動之車道阻隔無法精確掌握，額外延滯時間增加；而模擬法具有車輛動態推進特質，在模式中較能處理車流過飽和問題。因此，以下回顧的文獻係針對過飽和問題建立模式，採用模擬法並以群組為計算號誌時制基礎。

Liu與Chang【81】將車流的互動關係納入考量，以模擬為基礎建立號誌最佳化模式。該研究提出一個包含動態車流方程式之模型，針對號誌最佳化以基因演算法(genetic algorithm, GA)求解。該研究將車輛動態演變過程分為六大步驟：(1)上游需求產生、(2)需求到達、(3)路段推進、(4)匯入車道群組、(5)離開路段、(6)流量守恆。上游需求量產生後，須與路段單位時間最大流量、儲車空間(storage space)與溢流至路段外的車輛數比較，計算單位時間之進入量。車輛依時階抵達路段後，於路段中推進採用DynaMIT模式。DynaMIT係MIT運輸科技實驗室(ITS Laboratory)Ben-Akiva等人所發展一套即時動態交通指派預測模型，用以預測交通到達、路徑指派與都市交通控制軟體。關於DynaMIT的詳細介紹可參考Ben-Akiva【56】所發表之文章，該研究所引用之DynaMIT推進方程式乃根據路段移動中的車輛數與可移動車道空間比例定義密度，並以此密度計算推進速率。速率推進可分為三個範圍(range)，大於擁擠密度以最小速率推進；小於最小速率以自由車流速率推進；介於兩者中間則根據推進方程式計算，唯獨模式的參數須以現地資料校估。該模式也是本研究車輛推進之基礎，加入機車混合作用而做了一番修正。本文主要貢獻在溢流方程式，該方程式定義溢流矩陣(ω)： k 時段車道群組 m' 對車道 m 的溢流影響變數，以此表達車道群間因車輛交互作用產生的阻隔關係。其他藉由上游需求、計算離開路段欲進入下游路段的潛在車輛數、車道群的車輛數之演變、溢流於車道群外車輛數、等候車隊長度方程式、路段內整體車輛守恆關係式、路段之剩餘儲車空間等描述車輛彼此的互動關係。其號誌最佳化目標式包括最小化總旅行時間與最大化總通過量，前者適用於未飽和情況，當判斷過飽和車流出現時則以最大通過量求解，求解方式採用基因演算法。基因演算法的基因為0至1之間的比例，須藉由變數轉換，最佳化基因包括各路口每個時相綠燈調整比例、共同週期與時差。在綠燈比例分配部分，在滿足各時相最小綠燈限制之下，先求共有多少綠燈秒數可分配，其分配的方式為：第一時相分配後，第二時相的調整比例為第一時相剩餘時間與某個比例乘積，第三時相分配扣除

第一時相與第二個時相分配後剩下時間的比例等，以此類推，若路口有 n 個時相則須 $n-1$ 個綠燈調整比例進行最佳化。該模式求解的結果與TRANSYT-7F比較，發現在中、低流量的情況下，在最小等候時間與最小延滯表現比TRANSYT-7F更佳，但最大通過車輛數較少，原因是損失時間占週期的比例高；在高流量的情況中，由於嚴重的溢流與車道阻塞，TRANSYT-7F產生較長的週期，卻也間接增加了下游路段擁擠的機會；反之該研究之模式產生相對準確與適當的週期，不僅等候時間較少且車輛通過數較大。

許勝翔【31】延續Liu與Chang【81】的模式，將機車以小汽車當量(PCE)轉換為小汽車當量數(PCU)納入巨觀車流推進模式，考量汽、機車彼此之交互關係，針對路口車道阻塞或溢流的過飽和情況予以改善，發展一套適用國內交通幾何特性、混合車流環境的號誌時制。該研究同樣將車流於路段動態推進分為六大步驟，其中上游需求須個別產生汽車與機車兩種流率，機車則根據不同車道寬度、混合比，以動態小汽車當量【43】轉換以符合現實情況，同時考量路段最大紓解率與剩餘儲車空間。至於汽車與機車於車道之分佈，該研究以簡化路網，包含一快車道與一混合車道，並假設三種情境進行說明，分別為機車數量(轉換為PCU後)與汽車數量之比值大於、等於、小於快車道混合車道的比例。一般駕駛者期望以較快速度通過路口，因此若某一車道等候長度較短，相對有較大的車道空間，較大的機率會移動至該車道，機車則僅限於混合車道無法行駛快車道。需求流率產生後，推算路段可推進之小客車當量數，而車輛通過數比例則以各車輛使用車道之狀態分配。匯入車道群組則考慮車道溢流對該車道或其他車道之影響，分為完全阻塞、部分阻塞或沒有阻塞，以矩陣型式進行計算，同時考量車道之可匯入空間之最小值。離開之車輛數則根據下游路段是否有剩餘儲車空間、車道限制進行指派，最後加入路段流量守恆之限制，確保輸入與輸出的車輛數一致。由於該研究對於車流推進行為描述較為完整，因此產生之時制計畫可靠度較高。在過飽和車流下，號誌控制的目標在於使車輛通過數最大，該研究以一虛擬路網測試，給定

不同流量、混合比與轉向比進行分析，將產生的時制與SYNCHRO比較並帶入VISSIM評估績效。隨著混合比增加，該模式對於機車有愈明顯的疏解績效，轉向比情境下同樣考慮溢流相關方程式，產生的績效也較SYNCHRO為佳。

良好的號誌時制設計須同時滿足未飽和與過飽和之情況，未飽和車流較為穩定，一般以數學規劃法即可求解；但過飽和車流對號誌影響較不規則難以掌握，須以模擬法進行動態演算後再求解號誌時制。國內張堂賢等學者亦針對過飽和號誌時制進行最佳化，其不採用模擬為基礎的模式，而是將獨立路口延滯與停等次數以狀態空間方程式(state-space equation)描述，其目標為最小績效指標(minimum performance index)並適當變形後，變成凸函數(convex programming)，較類似數學規劃法之作法(Chang and Lin, 2000)。Chang 與Sun【61】更進一步將獨立路口最佳化延伸至大型路網，採用樹狀搜尋的方式，先求解個別路口，將延滯最大之路口當作樞紐(pivot)，往鄰近下一層路口求解，並確認車隊抵達與時差的早晚，以不同等候圖推算延滯，直到過飽和情況獲得改善。此方法雖不以模擬為基礎，卻建立一套由路口至路網的演算機制。過飽和現象並非本研究主要探討課題，而是模式建立過程須納入過飽和車流特性，因此回顧相關文獻對於過飽和議題的處理方法，汲取其經驗，例如 Kim 與 Benekohal【74】考量號誌連鎖特性建立新的均勻延滯模式(uniform delay model)用以處理過飽和路口問題，Abu-Lebdeh 與 Benekohal【49】針對過飽和幹道建立號誌連鎖與等候車隊計算之研究，也是值得參考的著作。

2.2.3 綜合比較

無論數學規劃法或模擬法，其模式化目的皆為尋求合理描述號誌最佳化問題的方法，並求得適當的最佳解，數學規劃法求解速率較快；而模擬法模式精確度高，較能處理車流不穩定狀態以及車道配置的差異所造成的變化。本研究為發展一套適用混合車流之多車種號誌模式，結合車流推進、號誌控制與車道空間配置

三個層面，除了建立個別模式外，更將三者以適當的變數與函數連結成為整合式號誌設計(integrated signal design)。針對求解目標的不同，規劃法與模擬法可適當結合，扮演不同角色，例如車道配置最佳化可交由規劃法處理，因為巨觀而言車道或路口幾何空間配置不會隨著車流演進而劇烈變化，屬於靜態的最佳化；而車流以及車種彼此與號誌關係隨時間而有不同，特別是都市化路口及路段受干擾程度大，可發展動態之最佳化方法，藉由模擬描述實際車流行為，甚至發展為全動態(fully dynamic)或適應性控制(adaptive control)。茲整理兩者之比較如表2-1：

表 2-1：數學規劃法與模擬基礎法最佳化之比較

比較項目	數學規劃法 (mathematical programming)	模擬基礎法 (simulation-based)
變數種類	二元變數、整數或連續變數	二元變數、整數或連續變數 且依時間變化
模式構建	須轉換為標準型式 (standard form)	可容許條件判斷式存在 (必要時以二元變數解構 ¹)
求解方法	Simplex method、Zoutendijk、 branch & bound、cutting plane	爬山法、基因演算法(GA)、 模擬退火法(SA)
求解效率	較快，由限制式與 解空間大小決定	較慢，須迭代演算 直到收斂至最佳解
適用範圍	路口、幹道連鎖 (須輔以巨觀車流模式)	路口或大型路網之最佳化
車流條件	未飽和、具基本構圖模式 ² (過飽和)	未飽和 ³ 或過飽和

註解：¹例如Lo【83】之作法、²例如格位傳遞模式(CTM)、³尚未回顧到類似文獻
(資料來源：本研究整理)

2.3 車流傳導模式

誠如2.2.2節所述，模擬法之基礎在於動態反應車流變化之傳遞模式，模擬後再結合號誌最佳化模式求解。例如Lo【83】、Lo et al.【84】所採用之CTM模式，Liu與Chang【81】、許勝翔【31】將車流分階段演變，利用DynaMIT推進公式與車道溢流參數所建立之巨觀模式。以下各節將回顧CTM模式、DynaMIT推進公式、衝擊波基礎模式，比較其基本構圖(fundamental diagram)差異，並分析格位化與車道化模式之適用性，作為分析都市路網車流演變方法之參考理論。

2.3.1 格位傳遞模式

格位傳遞模式(以下簡稱CTM)係Daganzo於1994年提出【62】，以格位(cell)描述車輛於路段推進行為，由早期一階連續型車流模式(Lighthill-Whitham, 1955, Richards, 1956, L-W-R model)演變而來。L-W-R的模式適用於穩定之車流狀態，當車流發生跳躍現象(jump condition)時，一階模式無法反應車輛加、減速所造成密度的變化，也就是衝擊波(shock wave)產生時，車流密度不連續導致流量劇烈震盪。CTM將一階連續方程式有效離散化，以有限差分法(Finite Differential Method, FDM)將路段劃分為大小相同且同質的格位(homogeneous cells)，格位長度由車輛於單位時間自由車速推進距離而定。CTM可以處理初始條件(initial condition)與邊界狀態(boundary condition)的原因在於格位可推進的車流量受到上游格位傳遞量與下游格位可接受量之限制，兩者取其最小值，以此降低流量震盪幅度。關於CTM之一般基本構圖如圖2.2表示。單位時間之潛在傳遞流量除了自由速率(v)與密度(k)乘積之外，受到單位時間可傳遞之最大流量(q_{max})與以衝擊波速(w)可推進之剩餘密度限制。根據一階巨觀車流模型，流量(q)對距離(x)之偏微分等於密度(k)對時間(t)偏微分總和之負值(假設為封閉路段)，可推導此一般化基本構圖，如圖2-2。

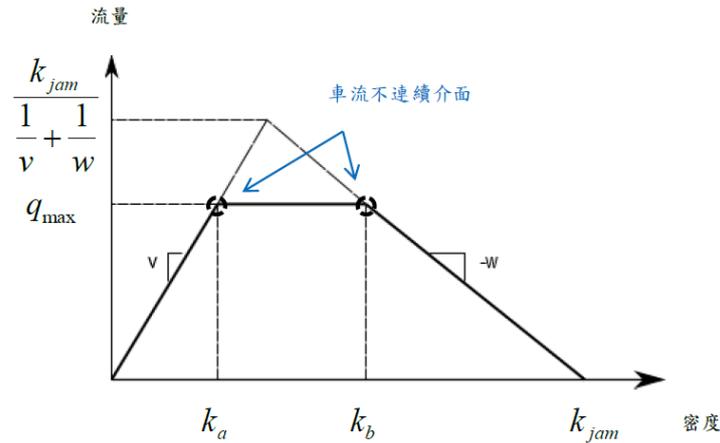


圖 2-2：CTM 之基本構圖

由於格位受車流干擾原因不同，並非每一個地方都等效，Daganzo【63】進一步將格位區分為一般、匯入與岔出三種型態，描述格位與格位之連結關係。一般格位單純只有一個進入連結(entry link)與離開連結(exit link)，匯入格位具有兩個進入和一個離開連結；反之岔出格位則是一個進入與兩個離開連結，同一格位不可同時存在匯入和岔出行為(也就是二對二關係)。自1994年以來，CTM的相關研究不勝枚舉，國、內外應用領域相當廣泛，例如號誌控制、高速公路匝道儀控、主線速限控制、交通量指派等，不同地方在使用上有相當條件，自然在應用時須適當轉型或加入限制關係。例如鄒政修【39】提出修改後CTM模式，其格位長度由不同自由車流速率決定，保留更大的彈性，並將其應用於高速公路匝道儀控。針對本研究號誌控制所談論的都市幹道，其車流特性與高、快速公路有很大的不同，市區車流受街廓長度與號誌影響，難以達到真正自由行駛速率，影響格位長度的計算；且都市幹道上有路邊停車、行人等干擾，巷道交織眾多，格位型態及關係複雜，自由車流速率、擁擠密度等參數須重新校估，而這些參數又受到混合車流的影響而有不同。過去研究皆針對純汽車流建立模式，尚未處理混合車流議題。國內謝志偉【45】曾建立混合車流格位傳遞模式(Mixed Traffic Cell Transmission Model, MCTM)並加以驗證，加入機車混流行為，建立兩種模式：其一參考上一格位汽車與機車混合比；其二以熵值(entropy)調整速率。該研究除

了將路段區分為數個格位外，進一步將格位細分為機車單位，描述汽、機車於格位間傳遞行為。兩種車在路段傳遞實存在三種競爭關係：(1)無競爭，兩車種之混合(機車以PCE轉換)流率與密度皆小於格位最大流率與密度，上游格位車輛數均可傳遞至下游格位。(2)最大流率競爭，兩車種之競爭關係由最大流率競爭函數(competitive function)所控制，隨著汽車數量增加，機車最大流率降低，若上游格位為單一車種，無其他車種競爭則以最大流率傳遞。(3)剩餘儲車空間競爭，當汽車與機車存在競爭關係，下游格位若達飽和，汽車無法傳遞，但實際上機車體積較小依然能由縫隙中鑽行至下游，因此將汽車與機車轉換為佔有格位數(汽車為6單位、機車為1單位)轉換為機車單位，引入擁擠指數描述實際推進行為，使結果更吻合。至於競爭函數的建立，汽車與機車以小客車當量(PCE)轉換，過去多數研究假設其為定值，實際上隨著汽、機車混合比不同，當量值應有所變化，傳統當量值係假設機車比例遠大於汽車所得的結果，但隨著汽車數量增加，兩車種影響程度變大，當量值應提高。當汽、機車密度趨於相同時，不同車種間干擾程度較大，導致各車種速率降低，最大流率因而減少。因此，該研究採用熵值(entropy)調整小客車當量，熵值根據 Bodjanova【58】指出一群組中元素分佈情形，當元素分佈均勻且出現機率相等時，熵值最大；反之出現機率不相等時熵值降低。該研究結合混合車流與熵值關係，將汽車、機車於路段佔有比率作為機率，計算混合車流的熵值，再將熵值調整變動小客車當量。根據其結果，熵值增加會提高機車對最大流率的競爭力，機車向前鑽行的行為更明顯，但將PCU轉換為機車時，熵值增加反而使機車數量減少。此套理論對於本研究建立汽、機車路段不同推進速率有異曲同工之妙，其目的乃是藉由熵值調整小客車當量數而推算最大流率，但本研究以面積車流方式計算分車種之推進速率，再根據混合車流密度推算依時階流率，同樣皆為處理混合車流推進問題。

2.3.2 二維車流模型

在混合車流模型發展歷程中，機車的問題一直是相關研究欲以突破的重點，探討如何適當加以模式化(formulation)，反應機車於混合車流中的穿梭特性。固定小汽車當量不適用部分車流條件，許多研究也思考修改為變動小汽車當量的方式。除了謝志偉【45】以熵值將汽、機車之佔有密度與流率之競爭關係納入考量外，Chandra 與Sikdar【59】引入佔有面積概念，將車輛速度與佔有面積的比值作為調整車輛之動態PCE。此方法適用車種不遵守車道限制的情況，尤其機車的行駛常有變換車道的情形，雖然無法將機車變換車道行為精準掌握，如微觀的車流模式，但巨觀而言以車輛佔有面積能合理反映此類變化。

許義宏【30】進一步將Chandra 與Sikdar【59】靜態的車體投影面積轉換成以動態車長與動態車寬之面積，為了方便實務上的應用，其動態車長假設為偵測長度(10公尺)加上靜態車長，而此動態車長除以速度即車輛之佔有時間，因此動態PCE可表示為動態車寬與車輛佔有時間乘積之比值。該研究雖說明了佔有面積於混合車流之可行性，但小汽車當量仍不足以反映真實車流狀況，因此將一維的(one-dimensional)巨觀車流流量、速度與密度關係式推廣為二維的(two-dimensional)方程式。密度重新定義為汽車與機車車輛數分別乘上佔有面積，在與路段長、寬面積的比例，在純汽車流的情況下，該二維車流密度可退化為傳統一維車流密度之定義(單為長度內車輛數)。不過，該研究具有假設限制，路段內的車流需保持穩定，且車輛維持同樣速率行駛，事實上市區路段汽、機車混合作用頻繁，二維車流密度也不見得與靜態佔有面積與汽、機車數量大小直接相關，影響車速也應有不同。車速與密度彼此互相影響，推進速率影響密度，而密度又反饋控制(feedback control)汽、機車的推進速率，應隨車流環境而動態變化。為了描述機車滲透作用，採用流體力學之滲透速率公式(Seepage Velocity Equation)，透過實地車流調查，發現車流滲透作用與前、後車速差成正比，當後車速率愈大，會傾向超車至前方，因此假設滲透受到前方車流密度與後車車體大小影響，定義

滲透強度(S)為單位時間內前後車的位置改變量，其滲透會受到前後車速差(ΔV)、前方車種面積(A_L)、超車車種面積(A_F)與後車之車速(V_F)等影響，以迴歸分析得到滲透強度方程式，其中後車的車速影響並不顯著，因此捨棄該變數。結果顯示，滲透強度與速差成正比，與前車面積大小三次方根成正比，且與後車面積三次方根成反比。由此可見，速差是影響車種是否向前變換之主要因素，而超車時又受限於前方車種面積大小阻擋以及本身超車空間之限制，滲透量而有不同。雖然該研究找出了車種面積與速差兩種關鍵因素，但其觀測路段僅10公尺，無法取得非觀測區的滲透現象，且滲透車輛取樣較少，影響結果與假設的誤差，同時不同路段校估得到的滲透強度方程式略有不同，參數也不一樣，在應用上缺乏一般化(*generalization*)的滲透關係式。此外，作者認為應進一步考量車道限制之群組化與密度修正之觀念，找出一般化之混合車流速度-密度關係式。

2.3.3 衝擊波構圖模式

號誌化路口最佳化模式必須因應過飽和車流的發生，而過飽和車流最明顯現象為車道阻隔與等候車隊溢流情形。許多關於過飽和車流紓解的研究指出路口車隊管理(*queue management*)策略是改善過飽和現象的關鍵，連帶影響號誌的有效性，如何精確模式化等候車隊的形成與消散是一大課題。不同於CTM將路段「格位化(*cell-based*)」之作法，Wu 與 Liu【101】提出以衝擊波為基本構圖的模式(*Shockwave Profile Model, SPM*)處理都市幹道車流擁擠問題。當擁擠車對形成時，其推進與紓解過程常常產生衝擊波之傳遞，造成密度的不連續而無法以L-W-R模式表示。CTM雖然將路段格位化，但格位大小與格位之同質(*homogeneous*)與否是一大挑戰，雖然格位大小可細分為更小的單位以考量每一部車的行為，卻增加了計算的負荷度。因此該研究選擇以區段為基礎(*section-based*)，不計算每一個小格位的密度，而是追蹤路口等候車隊尾端位置的變化，等候線乃是影響路口服務水準的關鍵，延滯也是由等候長度計算而來。該研究為了克服衝擊波產生處車流

不連續現象，將幹道之擁擠車流分為四種衝擊波描述，並針對過飽和車隊溢流時以延長現有號誌紅燈(extend a red phase)或產生新的週期處理(create new small cycle)。然而，為了更確實描述車流狀態變化，該研究引入三項假設：(1)車輛加入等候車隊前以自由速率行駛，(2)車隊紓解時以飽和流率紓解，不受下游路段擁擠影響，(3)等候線紓解之衝擊波波速為已知條件。根據上述假設，四種衝擊波定義如下，輔以圖2-3說明：

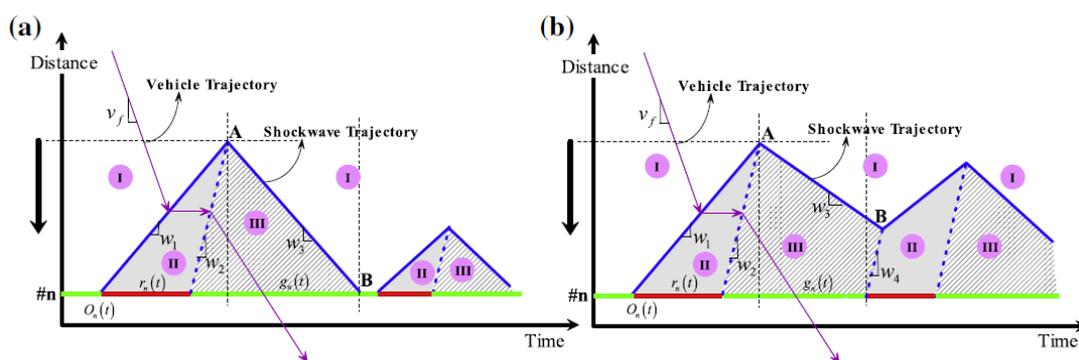
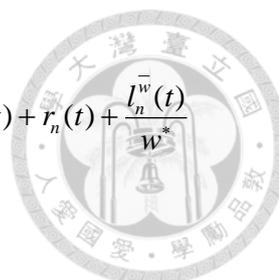


圖 2-3：無殘餘車隊之衝擊波構圖(a)；有殘餘車隊之衝擊波構圖(b)【101】

- (1) 等候衝擊波(queueing shockwave)：指紅燈始亮車輛開始停等之向後衝擊波。
- (2) 紓解衝擊波(discharge shockwave)：綠燈亮起車隊紓解之向後衝擊波。
- (3) 車隊離開波動(departure wave)：當等候(1)與紓解(2)兩衝擊波交會時形成一向前的離開衝擊波。
- (4) 車流壓縮波動(compression wave)：當紅燈結束，週期內尚有車輛未紓解完畢，則離開衝擊波與壓縮衝擊波形成殘餘車隊(residual queue)。

定義四種衝擊波類型之後，根據當下號誌狀態與衝擊波波前的位置可以計算其衝擊波波速(w)。 w_2 與 w_4 較容易計算，兩種衝擊波正好區隔了飽和與紓解與擁擠狀態，其波速 w 為飽和流率除以擁擠密度(jam density)與飽和密度(saturation density)的差值。 w_1 需根據車輛到達車隊尾端前之時間計算到達密度(arrival density)，再以此密度推算波速； w_3 則考量綠燈始亮後飽和流率降低所導致容量減少(capacity drop)情況，並非以自由車流速率離開。



$$w_1(t) = \begin{cases} \frac{-q_{n-1} \cdot \left(t - \frac{L_n - l_n^w(t)}{v_f} \right)}{\rho_j^n - q_{n-1} \cdot \left(t - \frac{L_n - l_n^w(t)}{v_f} \right) / v_f}, & \text{if } O_n(t) + \frac{\bar{l}_n^w(t)}{w^*} \leq t < O_n(t) + r_n(t) + \frac{\bar{l}_n^w(t)}{w^*} \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$$

$$w_2(t) = \begin{cases} -w^*, & \text{if } O_n(t) + r_n(t) \leq t < O_n(t) + r_n(t) + \frac{\bar{l}_n^w(t)}{w^*} \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$$

$$w_3(t) = \begin{cases} \frac{S^n - q_{n-1} \cdot \left(t - \frac{L_n - \bar{l}_n^w(t)}{v_f} \right)}{\rho_s^n - q_{n-1} \cdot \left(t - \frac{L_n - \bar{l}_n^w(t)}{v_f} \right) / v_f}, & \text{if } O_n(t) \leq t < O_n(t) + \frac{\bar{l}_n^w(t)}{w^*} \text{ or } O_n(t) + r_n(t) + \frac{\bar{l}_n^w(t)}{w^*} \leq t < O_n(t) + r_n(t) + g_n(t) \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$$

$$w_4(t) = \begin{cases} -w^*, & \text{if } O_n(t) \leq t < O_n(t) + \frac{\bar{l}_n^w(t)}{w^*} \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$$

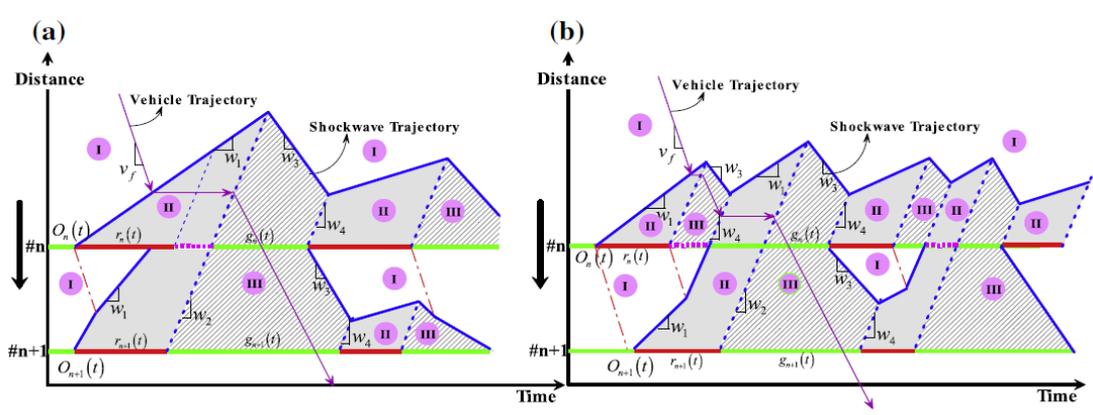


圖 2-4：兩路口車隊溢流時，(a)延長現有紅燈時間；(b)產生新的週期【101】

四種衝擊波僅存在特定時間內且週期性變化，當 w_4 與 w_3 交會產生 w_1 ，當 w_2 接觸 w_1 則消散，若無殘留車隊，則 w_1 起始時間為紅燈時間， w_2 為綠燈時間。 w_3 則存在於兩種區間，當 w_4 與 w_3 交會形成第一區間；若 w_4 不存在則無第一區間。第二區間開始於 w_2 向後傳遞至 w_1 ，直到週期結束，而 w_4 區間與 w_3 第一區間類似。根據衝擊波出現的先後狀態可以計算等候車隊依時間之消長，推算路段之離開量。對於下游路段車隊溢流之處理，該研究施行兩種策略：(1)延長現有紅燈直到紓解衝擊波(w_2)到達；或者(2)產生新的週期，當擁擠發生，壓縮衝擊波(w_4)向後傳

遞與離開衝擊波(w_3)交會產生新的等候衝擊波(w_1)，如圖2-4所示。該研究以包含兩個路口的小型路網進行測試，並與CTM比較，在模擬的角度CTM的格位愈小愈精確，藉由數值分析後發現SPM能準確指出測試路網中的瓶頸發生點的時間與等候車隊長度；CTM模式只能表示發生的範圍，而SPM的模式建立過程卻較為容易。

利用衝擊波基礎分析號誌化路口等候線形成與紓解過程，雖然較CTM直觀，模式建立變數也較少，但也存在許多限制。其一，該研究假設車輛到達等候線尾端(tail of queue)前以自由車流速率推進，事實上車輛受前方等候車隊影響，應會減速加入車陣。其二，該模式未討論混合車流之等候線形成，機車與汽車等候行為不同，汽車可有秩序排列；而機車則可多部並排甚至夾雜於車陣之中，難以掌握，必要時須以當輛進行轉換才能計算號誌時制，難免造成偏差。本研究基於SPM之精神，推導混合車流介面轉換時傳遞波速，類似衝擊波概念，同時加入機車的影響，建立計算分車種等候長度之模式。

2.3.4 研究之啟發

2.3節回顧號誌最佳化模式中常用之巨觀(macroscopic)或中觀(mesosopic)車流理論，包含引用最廣的CTM、衝擊波構圖之等候車隊模式、二維的佔有面積模式，整體而言可歸納出表2.2之發展過程與模式之優、缺點。總而言之，車流理論的發展由於多車種的議題而愈來愈細緻，雖不及微觀(microscopic)車流探究每一部車的狀態如此精細，卻在可接受誤差內達到一定的精確度，降低模式的複雜性與縮短求解時間，此為巨觀或中觀模式之主要精神。由於本研究之目的乃發展整合車流與號誌模式，車流的到達與紓解不僅影響路口通過量大小，更反映在號誌績效的好壞。因此，後續模式構想將按照表2-2之發展歷程，汲取各研究之長處並加以修正，建立二維、多車種、考量汽、機車之等候與紓解特性，建立以等候結構為基礎之巨觀車流模式。

表 2-2：都市車流傳遞模式之發展歷程與比較

研究項目	發展歷程	比較分析
研究範疇	由巨觀發展至中觀	考慮車輛的交互作用
車流狀態	由穩定加入非穩定	探討不連續介面之處理
分析基礎	由一維推廣為二維	車道化轉為佔有面積
涵蓋車種	純車種到混合車流	加入機車推進過程影響
研究內容	同質化轉為異質化	號誌影響、支道車流匯入
模式建立	格位化改為區段化	直接計算等候線之消長

(資料來源：本研究整理)

2.4 道路幾何空間佈設

由於本研究在空間上結合車道與等候空間最佳化，在車流組成上包含混合車流，因此本節針對混合車流特性、左轉車輛衝突與時相設計、機車待轉區設置準則、車道配置與號誌時制整合設計程序等進行回顧與比較，作為模式建構之參考。

2.4.1 混合車流特性

國內混合車流研究於1970年代發展相當蓬勃，隨著區域經濟的發展，人口逐漸往都市集中，機動車輛使用增加衍伸許多都市交通問題，其中機車的使用更是明顯。相關研究包含龍天立【48】、龍天立與鄭賜榮【40】、周義華與徐淵靜【19】、顏上堯【43】等。混合車流於路段推進之車輛交互作用關係難以掌握，但路口的停等與紓解行為卻深深影響號誌時制之計算。若能將此一特性詳細分析後納入模式中，則預期效果將比單純以純車流調整之模式更佳。此外，機車之駕駛特性明顯與汽車不同，造成兩者在巨觀上的行為也不同。機車結構較簡單，但駕駛行為較複雜。Sharp【91】曾推導機車穩定性與控制方程式，Weir與Zellner【97】提出4個自由度(degree of freedom)的機車與騎士系統分析機車翻覆、穿行、搖晃的

行為，Katayama等人【73】進一步將此系統推廣至6個自由度。國內張堂賢學者以8個自由度描述機車車身與騎士系統，描述機車受碰撞後運動狀態變化情形。該研究雖以機車事故分析為目的，卻也突顯機車駕駛決策複雜以及在混合車流環境的不穩定性。因此，有必要針對機車特性進行探討，茲整理相關研究之混合車流停等特性如以下各點：

1. 路口停等車隊之形成方式，汽車呈現規律性排列，少有並排的情況；但機車由於操作靈活、體積小，停等時具有群聚、向前集中、橫向發展特性，等候線之形成較不規則。
2. 市區道路一般外側為混合車道，路口機車的停等容易傾向外側車道停等，若有設置路肩，機車也會停等至路肩上。
3. 考量汽、機車的到達先後順序，若機車晚於汽車到達，除了向前集中外，機車會盡量停於汽車兩旁之空隙或往前鑽行至停等線前；若機車較早到達，除了向前停等於停止線，機車還可能在汽車列中排列，並非只停於兩旁。
4. 純汽車流情況下，汽車少有越線停等的違規發生；而在混合車流下，機車常違規超越停止線停等，連帶影響汽車也違規越線。
5. 若路口劃設機車兩段式左轉待轉區，機車容易違規越線至待轉區停車或停等於待轉區與車道停止線之間，若該路口具有行人穿越道則影響行人通行增加衝突風險。
6. 根據研究，道路寬度與汽、機車停等有密切關係。一般路寬僅足夠一輛汽車停等，機車則夾雜於兩旁縫隙或車隊之間排列停等，而排列方式根據汽車或公車的影響也略有不同(公車體積較大，車道橫向幾乎沒有足夠空間供機車停等，因此排列於車陣中機會較大)。

至於混合車流之紓解特性，不同於快車道純汽車流車輛有秩序的紓解，機車之紓解率由小漸大，然後逐漸下降趨於穩定，雖與汽車類似，但變化幅度較大。綜合而言可分為以下三點描述：

- 
1. 由於機車啟動速度較快，在綠燈開始前已有若干機車啟動，因此在綠燈前段機車佔用路面比例與紓解率較汽車高；到綠燈中期以後，機車紓解完畢，機車的佔用比例降低。若是以小客車當量轉換將無法突顯機車於不同綠燈時間之紓解差異。
 2. 混合車流紓解率隨著混合比大小而有不同，機車混合比較高時(60%~100%)，車流紓解較穩定，而綠燈亮前機車進入路口情形仍存在，機車量愈大提早啟動之趨勢愈明顯；機車量愈小則紓解過程之車輛數峰值變化愈不明顯，達飽和紓解後即穩定下降至綠燈結束。
 3. 第三種為停等位置的差異，若機車較晚於汽車到達於兩旁停等，則紓解時也趨於由縫隙中向前移動，較穩定；若機車混雜於汽車車隊中停等，則綠燈開始後尚有移動空間容易吸引其他機車鑽入紓解，降低混合車流紓解率。故機車紓解率在綠燈始亮時很大，不久後又變小，影響綠燈前段之紓解率。

2.4.2 左轉管制策略

針對機車左轉管制策略國內研究亦有探討，張家豪【37】建立左轉號誌時相設計與衝突預測模式，設立左轉時相安全準則；而陳柏君【22】則依據依分隔型態、橫向路口條件與衝突量建立機車左轉管制策略。現行機車左轉管制策略包含禁止左轉、允許左轉與保護左轉。其中保護左轉設有機車左轉保護時相，保障機車左轉之路權時間；而允許左轉又可分為直接左轉與兩段式左轉，此牽涉到兩段式左轉待停區設置與否的問題。在陳柏君的研究中，首先針對機車於交叉路口之衝突型態與肇事分析，檢討現有機車左轉缺失，發現機車直接左轉方式未明確標示，造成駕駛人強行併入內側車道與直行車流形成衝突，加上機車無適當停等空間，當機車量大時容易阻擋後方車流之行進。此外，機車車體小隨左轉汽車併行左轉，也容易與鄰向直行車發生衝突。若是兩段式左轉，左轉待轉區範圍常超出路口淨空標線或行人穿越道線，造成待轉機車與行人產生衝突，且尖峰時刻待轉區空間不足，機車有溢流至待轉區外現象，也降低待轉區後方停止線之約束力。

表 2-3：機車左轉臨界衝突流量乘積準則

車道數	2車道	3車道	4車道	5車道
臨界衝突量(輛/小時)	6.48×10^4	7.49×10^4	1.30×10^5	1.80×10^5

有鑑於上述現有左轉方式之缺點，該研究基於機車左轉衝突量大小與橫向路口條件，建立一套號誌化路口機車左轉管制方式設置準則。其判斷流程為：是否具有左轉保護時相，再判斷是否有快慢分隔，若有快慢分隔則根據橫向路口條件(車道數)訂定兩段式左轉或禁止左轉；無快慢分隔且未達臨界衝突條件，機車可直接左轉，否則為禁止左轉或兩段式左轉。具有左轉保護時相與快慢分隔情況下，劃設左轉待停區則可以直接左轉，否則根據橫向路口條件判斷兩段式左轉或禁止左轉；具有左轉保護而無快慢分隔下，則先判斷臨界衝突條件再依序決定是否可設機車待停區、是否滿足橫向衝突條件。綜合而言，其判斷準則的順序為：(1)左轉保護時相、(2)快慢分隔型態、(3)臨界衝突條件、(4)是否可設機車待轉區、(5)橫向路口條件。針對(3)臨界衝突條件如表2-3之數據。表2-3之衝突量門檻乃根據數值模擬結果，將機車實際併入內側車道經由調查取得臨界間距，輸入數值模擬模式中，並以所有情境最大之衝突量乘積作為臨界條件，此門檻隨車道數增加而逐漸提高。至於(5)橫向路口條件一般路口淨寬大於9公尺或不妨礙行人通過路口者即須設置機車待轉區。該研究也提出機車待轉區之深度與寬度設計標準，考量機車之靜態車長與淨空，深度最小為2.5公尺(一部機車)且每2公尺為單位依序增加。待轉區寬度則以3.2公尺為最小尺寸(一個車道四部機車)，1.6公尺為單位遞增，依序為4.8公尺、6.4公尺等，最寬以不妨礙轉向車流為原則，轉向車流包含內側左轉專用汽車與外側紅燈右轉車流。該研究提供路口車道與待轉區設置限制式相關參數的參考，根據衝突量與橫向路口車道數判斷是否設置機車待轉區。

張家豪【37】分析衡量交叉口安全性，建立左轉交通肇事與衝突預測模式並應用在左轉時相之設計。該研究首先界定左轉肇事四大影響因素：(1)交叉口幾



何設計、(2)交叉口交通特性、(3)交叉口管制策略、(4)交叉口環境條件建立一套多元迴規模式(數量化方法 I)預測左轉之衝突次數，並篩選相關影響因素。其中交叉口幾何包含車道數多寡(與左轉時相之關係)、分隔方式(中央分隔或快慢分隔)、轉彎半徑與視距大小，而交叉口交通特性包含車流量、車流組成、左轉轉向比與速度。若路口肇事率高，交叉口管制策略可藉由左轉保護時相或禁止左轉獲得改善，至於環境因素則包含白天或晚上、晴天或雨天等天候狀況。在進行因素篩選分析後，刪除左轉轉向比、速限等相關性大的變數，得到影響左轉衝突數的左轉流量與對向直行流量兩項關鍵要素並加以校估與驗證。結果發現隨著預測衝突次數增加，平均誤差變大，但皆維持在15%內，仍具有實用性。在左轉時向決定方面，根據蒐集得到的交通量資料計算各指標值，每個指標值再計算臨界值，建立績點指標值決定左轉時相型式。若績點指標 <1 則維持原來的允許左轉方式；若績點指標 ≥ 1 則根據對向直行車道數判斷，3車道以上設置左轉保護時相、1車道或2車道則考慮是否設置左轉保護時相。該研究雖從肇事分析角度出發，以左轉衝突量大小調整左轉管制方式，與陳柏君【22】考量同向衝突量與橫向路口條件略有不同，但可歸納相同結論：

- (1) 橫向車道數多寡為影響左轉管制方式的關鍵，車道數愈多左轉車通過路口衝突愈大，車流交織機會愈大，應採用保護左轉或兩段式左轉的方式，一般而言3車道以上需設置機車左轉待轉區。
- (2) 流量之影響，包含對向直行車輛數與左轉車流量，進一步定義衝突量大小。汽車可由內側左轉車道左轉，因此對向直行車多寡與左轉車輛衝突大小為影響因素；而機車僅必須由外側變換車道至內側左轉，需根據欲左轉之機車量與同向直行車衝突大小決定能否直接左轉。

2.4.3 等候空間與號誌整合設計

許添本等人【26】針對已使用之六種機車等候布置方式進行探討，包含機慢車專用道、直行機車專用道、路口加寬式、全功能型設計、路口封閉式與橫向等候線型式，根據其衝突嚴重性、交通適應性、一般性與同質性進行篩選，可歸納為三種可行方案：(1)混合停等方式、(2)機車專用道、以及(3)汽車等候線退縮三類，並逐一分析其優缺點整理如表2-4所示。該研究根據各方案之優缺點擬定初步篩選原則，首先判斷是否有右轉專用道，有右轉專用且等候退縮距離大於2.5公尺則三種型態皆可能存在，若無則刪去等候線退縮型式；反之沒有右轉專用道，等候線退縮距離不足2.5公尺採用混合車道，否則為其餘兩種型式。之後進行號誌時制設計並評估比較。

表 2-4：機車等候空間佈設方式與優缺點比較

車道型式	優點	缺點
混合車道	<ol style="list-style-type: none"> 1. 車道利用彈性高 2. 駕駛人操作自由 3. 較無公平性疑慮 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 車流衝突較嚴重 2. 右轉汽車與直行機車衝突 3. 路口容量降低
機車專用道	<ol style="list-style-type: none"> 1. 減少汽機車相互干擾 2. 機車之等候與紓解較安全 3. 容易設計機車獨立號誌 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 車道利用不均 2. 車流組成適應較差 3. 須配合右轉專用道設置 4. 路邊停車之干擾
等候線退縮	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提高車道使用效率 2. 降低右轉車與機車之衝突 3. 提高道路容量 4. 不須配合右轉專用道 5. 減少汽機車夾雜停等現象 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 增加汽車通過路口時間 2. 等候區入口形成瓶頸 3. 離峰時段等候區利用率低



本研究所發展之整合車道配置與號誌最佳化方法，鄭有欽【41】曾以系統化層級分析方式加以探討車道與時相兩者之關係，提出整合設計程序。首先在車道配置方案的選擇，包含禁止左轉與車道公平性原則。若左轉轉向比小於10%則禁止左轉，並以流率比(flow ratio)之變異數作為評估車道是否有效分配轉向車流之準則。第二為車道配置與時相之篩選原則，包含車道數、視距與流量三者，可針對不同車道配合不同左轉管制方式進行甄選。第三種為時相型態方案，包含總延滯與平均延滯原則。綜合以上三者，單一路口車道配置與號誌時制整合設計程序可簡單以下概述：

- (1) 單一鄰近路段之判斷：根據禁止轉向之考量列舉該方向可行方案，並以流率比進行公平性篩選。
- (2) 雙向鄰近路段之考量：考慮相向之兩鄰近路段，配合車道佈設列舉時相設計方案，並依對向車道數、視距與流量篩選。
- (3) 交叉路口整體性配合：列舉路口可行方案並決定時相順序，利用交通模擬軟體求算績效並依據延滯準則選取最佳方案。
- (4) 整合時制計畫之執行：判斷最佳方案之可行性，不可行則重新選擇最佳方案，若為可行則執行該時制計畫。

該研究以列舉與方案篩選原則評估最佳之車道配置與時制設計，而本研究則將相關篩選條件限制化發展一套最佳化模式並加以求解。根據其車道數準則，當對向之車道數大於3車道則須改為保護左轉型式，與上述回顧之研究不謀而合。當對向為一車道，左轉量與對向直行衝突量大於50,000(輛/小時)；或對向兩車道衝突量大於100,000(輛/小時)應將允許左轉改為左轉保護時相。該研究整體而言系統平均延滯改善幅度由-21.97%提升至-50.55%，速率則由14.96%增加至46.58%，可見考量車道配置之整合號誌設計程序為有效之方法，唯該研究未將機車納入分析範圍，未來模式將考量機車並發展為最佳化方法。

2.5 模式求解方法

根據 2.2 節所比較之數學規劃法與模擬法兩種數學模式，其模式變數、限制式組成不同，求解方法也不盡相同。數學規劃法具有標準型式，其模式為封閉型態(closed form)具有唯一最佳解，以解析性方法(analytical approaches)求解，例如文獻中常見的單行法(simplex method)、Zoutendijk 可行方向搜尋法、分支界定法(branch and bound)與切面法(cutting plane)等。模擬法因具有動態車流推進模式，其限制式組成具有不連續之決策與條件判斷式、非線性關係式，無法加以解構(decomposition)或線性化(linearization)須以數值方法(numerical approaches)求解，不保證求得全域最佳解(global optima)而在搜尋條件內解出可接受之局部最佳解(local optima)，如常用之基因演算法(genetic algorithm)、爬山搜尋法(hill-climbing)與模擬退火法(simulated annealing)。以下分章節回顧各種求解方法之異同，包含求解效率、使用限制等，作為模式求解之依據。

2.5.1 圖解法

早期號誌時制求解方法以張開國【36】應用圖解法(graphical method)求解號誌時制為代表。為了簡化數學模式繁複計算過程，在實務上更方便應用，圖解法須將時制計算公式轉換為圖形與表格，分為計算圖表法(nomography)與統計圖表法(statistical graph)，前者將公式中的變數配上適當的規尺模數(scale modulus)形成函數規尺(functional scale)，其平面幾何關係即為公式中各變數的關係；後者則利用最小平方法找出適當的曲線描述變數之間的關係。該研究以 Webster 延滯公式作為時制設計評估準則，車輛到達滿足卜瓦松分配(Poisson distribution)且飽和度不大 1 的情況下繪製飽和流量、最佳週期、綠燈時間等參數之對應關係。查閱圖表的基本程序如下：

- (1) 調查交叉口流量、飽和流量以及損失時間等基本資料。
- (2) 做基本流量調整。



- (3) 將調整後流量查表後得到這一次的最佳時制。
- (4) 將此次的最佳時制與前一次的最佳時制結果比較，若兩者不相等則繼續第(5)步驟，否則跳至第(6)步驟。
- (5) 更新此次時制為最佳結果，以此最佳時制重新查閱圖表，找出新的路口調整流量，回到第(3)步驟。
- (6) 當前後兩次查到的時制相等即不需再調整，此時週期長度為最適週期，綠燈時間為最佳綠燈時間，得到最佳時制，搜尋停止。

圖解法分析的相關圖表包含週期時間與總臨界路口流量、有效綠燈時比關係，有效綠燈時比與總臨界路口流量關係，兩者結合可查詢最佳週期，再查取綠燈時間基本圖形，接著修正飽和流量，以及黃燈時間、行人通過時間等附帶圖形。配合上述圖形，最佳時制設計須加上臨界流動搜尋圖、臨界流動計算表、臨界流動分析表、最佳時制計算表即可求得最佳時制。圖解方法雖提供一個便於應用、直觀的快速時制設計方法，但大量的圖表增加了搜尋過程的繁複，且需符合特定限制，事先調查資料眾多。隨著交通組成、道路幾何變化愈臻複雜，圖解法較不適合處理複雜的流動關係與多車種議題，模式化的研究過程有其必要性，不僅考量的因素更多，同時針對時制結果也方便進行測試與敏感度分析。

2.5.2 解析性方法

解析性方法根據數學模式不同而有適當之解法，例如一般作業研究常用之技術，線性規劃(LP)可用單行法(simplex method)求解，而單行法也是許多研究子問題(sub problem)之解法，例如 Allsop【52】、Heydecker 與 Dudgeon【69】、Gallivan 與 Heydecker【65】等。若模式為凸規劃(convex programming)則文獻中以 Zoutendijk 可行方向搜尋法為代表。當目標函數為凸函數(convex function)，Zoutendijk 找尋最深改進方向以及步距大小，逐步收斂至 Karush-Kuhn-Tucker 狀態(KKT conditions)並確保其為最佳解，例如 Heydecker 與 Dudgeon【69】與

Wong【98】之研究。



若數學模式具有其他離散變數形成混合整數規劃(MILP)之型式，則採用分支界定法(Branch and Bound)逐步搜尋較為合適。分支界定法為一樹狀結構，由上層的樹根(root)逐步往下延伸許多樹葉(nodes)，同一階級的樹葉集合為層狀(level)結構，表示變數不斷鬆弛(relaxation)與搜尋的過程。由於欲求解的變數為整數或二元變數，因此變數每鬆弛一次代表解空間不斷縮減，並評估新的目標函數值是否改善，若無則繼續往下層搜尋。每一個分支(sub-tree)演算至變數無法再鬆弛或其目標函數值已無改善空間。變數個數、種類愈多，通常往下延伸的分支結構愈大，求得最佳解的時間愈長，樹根(初始解)的品質將影響收斂時間。過去的研究多將求解分為兩階段，每一個樹葉(node)由單行法求解(LP)，接著決定其非基變數(non-basic variable or free variable)需鬆弛為更大或更小的值，判斷目標函數值的改變，例如 Lam et al.【79】、Wong and Wong【99】、Wong and Heydecker【100】的研究，他們的研究主問題採用分支界定法求解；子問題則以單行法求解。另一項整數規劃常用之求解方法為切面法(cutting plane method)，切面法先不考慮模式中整數限制式，將原問題以單行法求解，若求解後決策變數全為整數，則現行解(current solution)為最佳解；否則進入第二步驟。若僅有一個決策變數值不為整數，則將其對應之列方程式移項形成新的限制式，也就是在線性規劃可行區間內加入整數限制；若不為整數的決策變數不只一個，則考慮具有最大非負分數之決策變數所對應之列方程式形成整數限制式，加入原問題以對偶單行法求解。重覆上述步驟直到決策變數全為整數即為最佳解。文獻中亦有使用切面法求解之案例，例如 Wong and Wong【99】在其第三項求解目標：延滯最小化問題即採用此方法。

2.5.3 啟發式演算法

相較於解析方法求解速度快，可求得最佳解；模擬基礎之模式具有數值模擬之過程，須不斷迭代(iteration)演算以求得合適的解，雖然求解速度較慢，但可處理大量非線性關係式與多種變數。採用演算法求解之原因來自問題本身為 NP

Hard，此類問題隨著變數增加，複雜度大幅提升，難以採用解析方法求解。但隨著電腦科技的發展，愈來愈多求解效率高、具成本效益的演算法不斷開發，使得複雜問題可以適當求解。以下分別回顧一般常用之基因演算法、爬山搜尋法，以及 TRANSYT 軟體所使用之模擬退火法，其方法之邏輯不同、組成相異，自然求解效率與解的品質也不盡相同。

許多啟發式演算法(heuristic algorithms)乃觀察自然界動物行為與物種演化等自然法則發展而來，大致可分為三類：(1) Epigenesis；(2) Phylogeny；與(3) Ontogeny。Epigenesis 的發展須複雜而精細的結構進行試驗性學習，例如類神經網路(Artificial Neural Network, ANN)；Phylogeny 則是考慮物種競爭、適者生存的演化法則，至於 Ontogeny 例如基因演算法(GA)即屬於此類別。基因演算法根據物競天擇之原理，適應力強、表現優良的基因會保留至下一代，產生新的物種。在 GA 中，目標函數對應為適合度函數(fitness function)，其最大或最小適配值(fitness value)由組成基因決定，也就是一般數學模式中所謂決策變數。基因所組成的序列稱為染色體(chromosome)，即由一群欲最佳化之變數所組成，在號誌最佳化模式中變數多轉換為 0 至 1 的數值進行演算，而染色體也是迭代求解的基礎。GA 在執行運算前須確認母體(population)大小、欲產生的子代數目(offspring)，並依序執行四大機制：(1)複製(reproduction)、(2)選擇(selection)、(3) 交配(crossover)、(4)突變(mutation)。複製的過程係從母體中複製相同或更多數目之染色體形成樣本空間，再根據每一個染色體的適合度值決定其選擇進入交配的機率大小，例如一般常用之輪盤法(roulette wheel method)。而交配方式可分為單點交配(single-point crossover)、雙點交配(two-point crossover)與多點交配(multi-point crossover)。此三種方法無一定好壞，視染色體大小而定，多點交配雖增加基因組合多樣性，提高收斂機率，卻也造成了程式的負擔。交配完成後，系統存在一隨機機率控制某個基因發生突變，保留演化的特性，增加解的搜尋範圍，落入局部最佳解機率降低。以上便完成一次迭代，GA 淘汰表現較差的母代而產生新的

對目標函數貢獻高的子代，並不斷演算直到收斂條件為止。收斂條件包含最大迭代次數、最大模擬時間與最大適合度穩定數目。最大迭代次數表示演算至某個設定世代數(generations)即停止，以目前最好之適合度值所對應之染色體為最佳解，最大模擬時間為程式執行至設定演算時間即停止，最佳解之判斷如同最大迭代次數。當演算至某個世代後連續一定數目之世代數適合度值皆沒有改變，表示該函數已達收斂，並以其收斂之適合度值為最佳解。上述演化機制與求解條件皆可於套裝軟體中設定，方便針對求解結果進行敏感度分析，例如控制交配方式或選擇不同收斂條件分析對目標函數之影響。

爬山搜尋法(hill-climbing method)為非線性規劃求解方法之一，乃局部搜尋與求解快速之演算法，找到初始可行解後，爬山法逐步改變特定變數值的大小並評估目標函數的變化，若目標函數改善則以新的解取代舊有的解並以此為搜尋方向，直到目標函數不再改變。爬山法雖然應用容易，具有求解速度快、局部搜尋能力強之優勢，但缺點為容易陷入局部最佳解。收斂至全域最佳解或局部最佳解取決於初始可行解的位置，若初始可行解落於全域最佳解之局部搜尋範圍內，則求解真正最佳解的機率較大，否則爬山法缺乏一套機制使搜尋方向跳脫原來的範圍至另一個可行區間求解。有鑑於此，許多研究致力於改善此一限制，提出改良式(modified)方法或是複合式(hybrid)方法，例如林伯陽與陳鍾誠【14】設計爬山跳躍演算法(Hill Climbing with Jumping Strategy, HCJ)，隨著目標函數改良失敗次數增加，爬山法跳躍的步伐就愈大使其有機會脫離現有局部空間至另一個搜尋範圍。目前爬山搜尋法被廣泛應用在號誌時制最佳軟體上，例如 TRANSYT-7F 與 TRANSYT 14 皆提供此一方法供使用者選擇。

另一種與爬山法相同之單粒子演算法為模擬退火法(Simulated Annealing, SA)，模擬退火法(以下簡稱 SA)為 Kirkpatrick【75】效法自然界之物理現象，高溫時狀態空間中分子運動狀態自由變化，隨著溫度下降，也就是所謂退火過程，分子逐漸停留在不同狀態，最低溫時分子重新以一定結構排列。在 SA 中，退火

策略的好壞影響求解的品質，也就是控制每一個溫度停留時間與降溫的比例。SA 的目標函數對應為一能量函數(E)，系統計算當前的能量值與隨機改變系統組態後之能量值(E')，評估變動成功的機率作為判斷系統溫度是否改變。由於過去研究一次求解 SA 之最佳解較為困難，李世炳與鄒忠毅【9】提出導引模擬退火法 (Guided Simulated Annealing)，其研究中發現每次模擬中總是得到能量較高的次佳解，且這些次佳解中彼此具有關聯性。因此，該研究將這些次佳解進行統計分析，了解其可能出現範圍，並在下一代之搜尋中提高此範圍的機率，如此可找到能量更低的解。為了更快找到穩定之最佳解，該研究引入導引函數，也就是保留上一代有用的資訊導引下一代的搜尋過程。此方法具有兩項優勢：(1) 減少陷入局部最佳解的機會，引入導引函數使系統組態可在數個低能量曲面轉換；(2) 提高求解效率，藉由次佳解之可能範圍導引下一代之搜尋區間，減少其他搜尋空間並刪去不相關的自由度。

基因演算法與爬山法、模擬退火法之異同在於基因演算法屬於多粒子演算法，其產生之初始解為群集且藉由遺傳機制保留較佳的解，較不易落入局部最佳解空間。與 GA 類似之多粒子演算法為粒子群演算法(Particle Swarm Optimization, 以下簡稱 PSO)，由 Kennedy 與 Eberhart 於 1990 年代所提出【78】。所謂 PSO 的求解方法是觀察自然界動物群聚行為(魚群、鳥類)所發展的演算法，考量自身的歷史經驗與族群內其他個體的表现結果而決定尋求最佳解的方向。PSO 的求解邏輯為透過一群移動飛行的物種(每一群代表一個現階段的可行解)根據自己本身與這一代的表现，決定步進的方向與大小，逐漸搜尋全域最佳解(global optimum)的過程。PSO 尚在新興發展階段，文獻上也無應用 PSO 求解號誌時制最佳化問題，不過與 GA 同為多粒子演算法，表 2-5 整理兩者簡單之比較。

表 2-5：基因演算法與例子群演算法之異同

分析項目	基因演算法	粒子群演算法
運作邏輯	GA 包含了選擇、交配與突變三種演算過程，每一種有不同的發生機率，透過這些演算過程確保最佳解的品質與演化的方向。	PSO 並沒有特定的演算過程，透過調整權重 w 的大小控制其搜尋範圍，若 w 大則搜尋全域最佳解；較小的 w 則局部搜尋最佳解。
選擇方法	GA 選擇染色體存活的準則是根據每個染色體的適合度值，這是每個和演化相關的演算法中心思想。	PSO 並不採用選擇的概念，所有的粒子從迭代開始至結束都是族群成員。PSO 是唯一不採用適合度值作為演化方向的演算法。
交配機制	交配的行為來自隨機選擇的親代(parents)，透過基因物質交換產生子代，之後又與其他子代進行基因重組直到結束。	PSO 並沒有遺傳物質交換的機制，但每一個粒子會受其他鄰近粒子影響而改變軌跡。
交配過程	在 GA 迭代初期，進行交配的母體是隨機選擇，因此交配對演化方向影響大；然而逐漸收斂後，每個染色體的結構類似，因此交配的影響效果有限。	PSO 沒有特定的交配過程，但每個粒子下一次的步進方向是根據這一代的最佳位置而決定，如此逐漸移動至最佳解區域。
突變程序	透過突變的程序，GA 的染色體可以變換至問題範圍內的任何空間。但是某些突變必須變換至較遠的位置，當迭代末期母體逐漸收斂，平均適合度值提高，突變的染色體其適合度值較低不容易保存下來，因此影響效果有限。	PSO 的粒子群無法在一次迭代過程就到達問題範圍的任意空間，除非一開始設定最大的 velocity。只要迭代次數夠多，粒子就能任意遊走，相較於 GA 較為容易。

(資料來源：本研究整理)

本研究整理 2.1 與 2.2 節號誌設計與最佳化模式相關文獻摘要如表 2-6 所示，包含作者年分、研究範圍、設計哲學、模式建立與求解目標。

表 2-6：號誌時制最佳化文獻之比較

作者年份	研究範圍	模式建立	設計方法	求解目標
Allsop (1971)	路口	數學規劃法	時相基礎	最小延滯
Allsop (1972)	路口	數學規劃法	時相基礎	最大剩餘容量
Heydecker & Dudgeon (1987)	路口	數學規劃法	群組基礎	最小延滯 最大剩餘容量
Gallivan & Heydecker (1988)	路口	數學規劃法	群組基礎	最大剩餘容量
馮輝昇 (1995)	路口	數學規劃法	群組基礎	最小汽、機車延滯 最小週期長度
Wong (1996)	路網	數學規劃法	群組基礎	最小 P. I.*
王義川 (1996)	路口	數學規劃法	群組基礎	最小汽、機車延滯
Lam et al. (1997)	路口	數學規劃法	時相基礎*	最小流容比和
Silcock (1997)	路口	數學規劃法	群組基礎	最大剩餘容量
Lo (2001)	路網	數學規劃法	時相基礎	最小延滯
Lo et al. (2002)	路網	模擬法	時相基礎	最小延滯
Wong & Wong (2003)	路口	數學規劃法	群組基礎	最大剩餘容量 最小週期長度 最小延滯
Wong & Heydecker (2010)	路口	數學規劃法	群組基礎	最大剩餘容量
Liu & Chang (2010)	路網	模擬法	群組基礎	最小停等時間 最大通過車輛

作者年份	研究範圍	模式建立	設計方法	求解目標
許勝翔 (2011)	路網	模擬法	群組基礎	最小停等時間 最大通過車輛
陳彥向 (2012)	路口	數學規劃法	群組基礎	最大剩餘容量

(資料來源：本研究整理)

第三章 都市車流資料調查與分析



3.1 資料蒐集方法

由於本研究探討都市地區幹道號誌設計方法，因此資料蒐集以都市受號誌影響之汽、機車混合車流為主。都市車流干擾程度大，除了汽車車流外，路口的行人穿越、自行車專用設施會影響路口的車流紓解效率；路邊停車、公車進出站乘客服務、計程車隨招隨停之巡迴攬客型態、路旁建築出入口甚至巷道的車流對於路段車流的續進也有不同程度的干擾。不同路型、土地使用，甚至不同車道也存在差異，這些因素在資料蒐集過程即須加以考量並設法分析。本研究資料蒐集的內容包含兩大部分，一是靜態的道路標誌、標線與號誌等交通工程基本資料；二是汽、機車移動過程之動態資料。前者除非有重大改善工程之進行，例如地下管線開挖、號誌時制重整或車道拓寬工程，否則短期內不會隨時間改變，資料蒐集相對容易。至於車流資料則隨著時間動態改變，不同季節、時段具有週期性變化，例如上、下尖峰之重現性車流與進、出城之方向性車流。因此，車流資料的蒐集就必須考量模式建立使用之變數與交通參數，屬於特定條件與交通環境下資料分析工作。

為了具備系統化之描述，本研究整理資料蒐集之內容、方法、程序與後須分析敘述如下，並輔以實際車流圖片說明，以條列方式表示：

1. 資料蒐集內容：包含靜態之標誌、標線、號誌等交通工程相關設施，屬於模式基本資料輸入之依據，以圖 3-1 表示；動態資料則以汽車、機車於路段推進過程變化之車流為主，包括車輛之位移、速度，車隊之密度、通過量、混合比等，為模式變數種類與後續資料分析之重點，採用蒐集路段照片說明，如圖 3-2。
2. 資料調查方法：由於本研究模式採用固定時階(time step)之動態推進方法，因此需要逐秒追蹤混合車流之變化以汲取資料，此外，考量模式巨觀車流相關



圖 3-1：新生南路靜態之幾何佈設資料



圖 3-2：羅斯福路動態之車流資料

參數之限制，除了路段車隊群體之屬性資料，同時需要個別汽車、機車之物理特性資料，例如位移、速度等。基於上述的理由，本研究採用高樓攝影之調查方式，選定欲調查路段兩旁高樓大廈(至少 10 樓以上)之頂樓架設 DV 錄影機拍攝，若調查範圍較大，涵蓋上游路口、路段至下游路口，則以多台 DV 同時攝影，再將資料同步。採用高樓攝影可以俯視整體路段混合車流的變化，相較於一般路段或路口之平面攝影，其所調查的資料種類、空間有限，高樓攝影可以避免檔案繁多及誤差，使資料蒐集過程更有效率。除了資料處理上的好處，特定變數的蒐集，例如車隊的形成與紓解過程，也需透過高樓攝影才能得到。為了避免高樓攝影拍攝角度所造成畫面邊界車流資料的誤差，架設 DV 時須輔以童軍繩連結固定物體並盡量向外延伸，確保腳架不會隨風任意晃動造成誤差，同時鎖緊雲台與 DV 之螺絲保持錄影過程的安全性，如圖 3-3、圖 3-4 所示。

3. 調查所需器材：本研究需要之調查器材包含拍攝車流之 DV 錄影機，以及配備之腳架、電源線與廣角鏡，數量視調查範圍需求而定。為了方便流量蒐集，搭配車流計數器計算研究範圍單位時間之流量大小。
4. 資料後續處理：由於車流影帶是連續的過程，但分析時必須逐步觀察車流的變化，找出變異的因果關係，因此取樣時須切割為固定時隔的圖片並加以編號。本研究由巨觀的角度建立模式，因此時間間隔以 0.5 秒為單位劃分，間



圖 3-3：高樓錄影 DV 架設方式



圖 3-4：DV 網綁法

隔太小則增加電腦空間資源佔用與處理的負擔；間隔太大則無法呈現車輛的瞬時變化，容易忽略。在影片處理上採用開放、免費之播放軟體 KM player 3.4.059 版本進行影片播放與檔案切割，選取每一秒切割為兩張圖片(2 fps)並設定編號值，成為資料分析之母體。

5. 車流特性分析：切割完成的圖片需再匯入車輛點擊程式，選擇欲分析的圖片範圍編號，設定座標，並選取車輛基本特性參數，包含車種別、編號、車流行為，點擊符合需求之車輛參考點，依序觀察其隨時間之變化並將相關參數匯出至 Microsoft Excel 軟體進行後續資料分析。
6. 其它調查事項：除了上述 1~5 的調查主要工作外，進行車流調查前必須決定從事調查的時間與地點的篩選。時間區段根據欲調查的車流特性而定，例如上、下午尖峰或離峰之車流，此外天氣狀況也會影響車流影片的品質，雨天較不適合錄影，器材容易損壞且車流行為也不同，晴天陽光過於強烈也不適當，畫面光線過強會增加點車過程眼睛的疲勞與誤差，這些都是調查的經驗累積。另外，調查路段之遮蔽物愈少愈好，例如兩旁商家之招牌、行道樹，容易影響點車的進行，而路旁的干擾活動也以較少為佳。
7. 資料調查程序：資整理本研究資料蒐集、分析過程之流程如圖 3-5 表示。選定調查的內容與地點後，必須實際探訪其合適性，若不合適則根據篩選條件重新選擇調查地點。

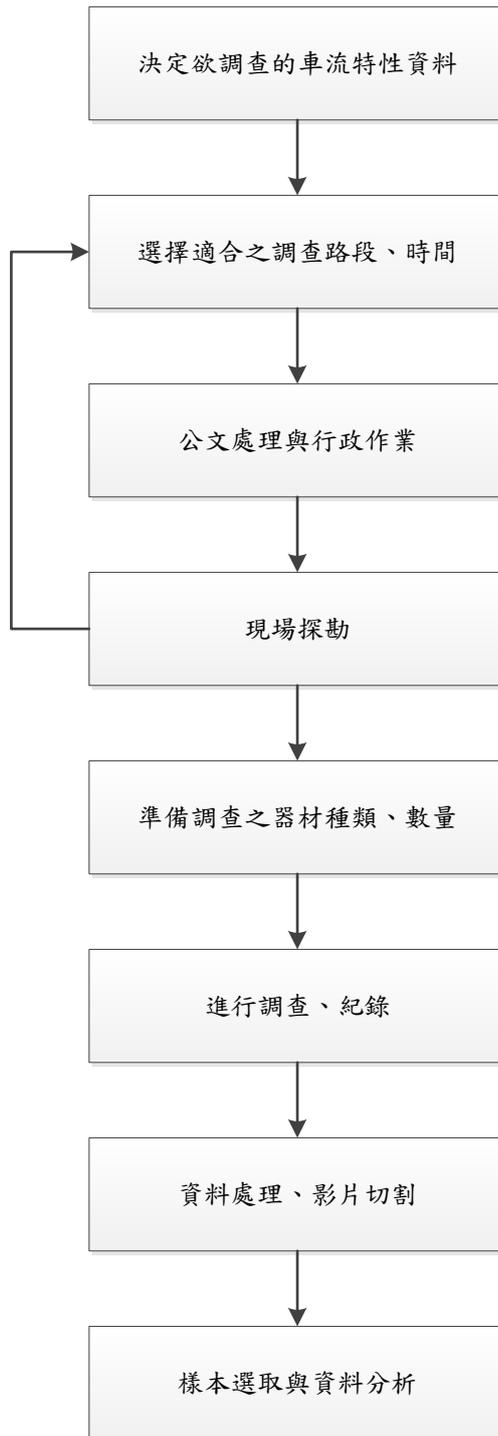


圖 3-5：資料調查與分析流程

3.2 車流資料分析

由於本研究著重於混合車流路段停等與紓解之交互關係建立模式，因此本節資料分析的重點也在於等候結構的形成與統計資料佐證。當車輛自產生於路段中

推進、匯入車道群後，接下來乃根據依時階不同車道、車種等候長度之消長，計算實際通過量，以進行綠燈時比分配與號誌最佳化。考量混合車流之影響，車輛由停等至紓解過程可根據不同型態(patterns)加以分析，以釐清車輛彼此的交互關係。本研究以等候結構(waiting patterns)描述汽車與機車由停等至紓解過程等候線之變化，推導交通演變方程式，此部分將於第五章詳細說明。3.2.1 節先定義等候結構之停等型態(stopping patterns)與移動型態(moving patterns)，並區分不同車道群。3.2.2 節介紹快車道、混合車道等候結構，3.2.3 節說明等候型態統計檢定分析結果。

3.2.1 等候型態定義

針對等候結構之停等與移動型態定義與說明如表 3-1 所示。其中停等與移動型態又可以區分為混合車道(M)、快車道(E)、公車專用道(B)，每一種型態根據紅燈至綠燈始亮出現先後關係依序編號，以 10 為單位，5 代表可能出現之次型態(sub-pattern)，預留之編號空間乃方便定義未來可能出現更多混合車流等候型態。本研究假設汽車停等時最小車頭距為 6.5 公尺，作為部分型態區分之依據。

表 3-1：分車種之等候型態定義

類別	定義	說明
停等型態 (Waiting Pattern)	停等型態(M10)	停等區內為純機車停等
	停等型態(M20)	汽車停等(6.5m)，機車仍可向前移動
	停等型態(M30)	汽、機車皆停等(6.5m)
	停等型態(M40)	汽、機車皆停等(>6.5m)
	停等型態(E20)	純汽車停等(6.5m)

類別	定義	說明
移動型態 (Moving Pattern)	移動型態(M70)	停等區內為純機車紓解
	移動型態(M80)	汽、機車皆為流動狀態，由上游進入
	移動型態(M90)	汽、機車皆為流動狀態，由下游離開
	移動型態(E80)	汽車流動狀態，由上游進入
	移動型態(E90)	汽車流動狀態，由下游離開

根據上述型態定義，對於左轉彎、快車道、混合車道可能出現之型態依時間排序如圖 3-6 所示，其中左轉彎與快車道型態相同，混合車道較為複雜。由於型態出現具有前後關係，又受到快車道、混合車道、機車待停區、混合比大小，號誌週期長短、內外側車道而有不同，除了理論上的基本構圖外，本研究也以羅斯福路與新生南路分別 4 車道之等候長度累積分佈圖初步加以驗證，確認各種型態出現之頻率、前後關係，作為未來建立模式之依據。

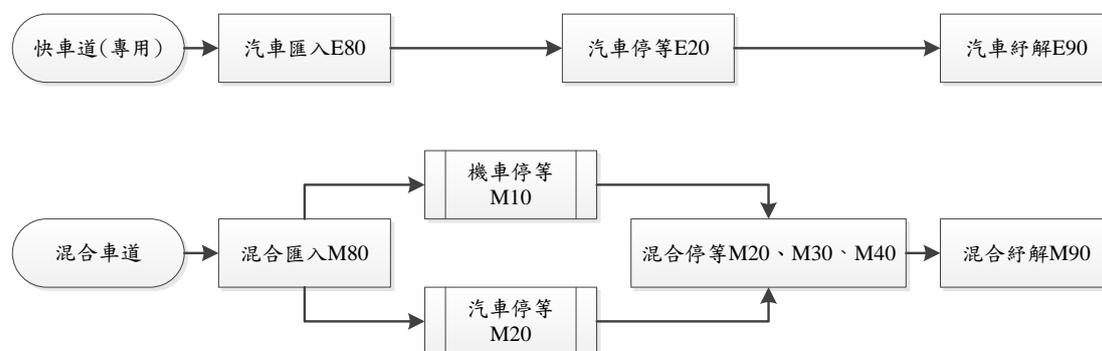


圖 3-6：分車道等候結構關係圖

3.2.2 車道群組之等候型態構圖

快車道為純汽車流，沒有機車與其他車種之干擾，因此等候結構較單純，僅分為上游汽車到達(E80)、停等(E20)與紓解(E90)三種型態，而型態出現大小則根據紅、綠燈時比決定，此種型態包含左轉車道之汽車，其基本構圖如圖 3-7 說明。

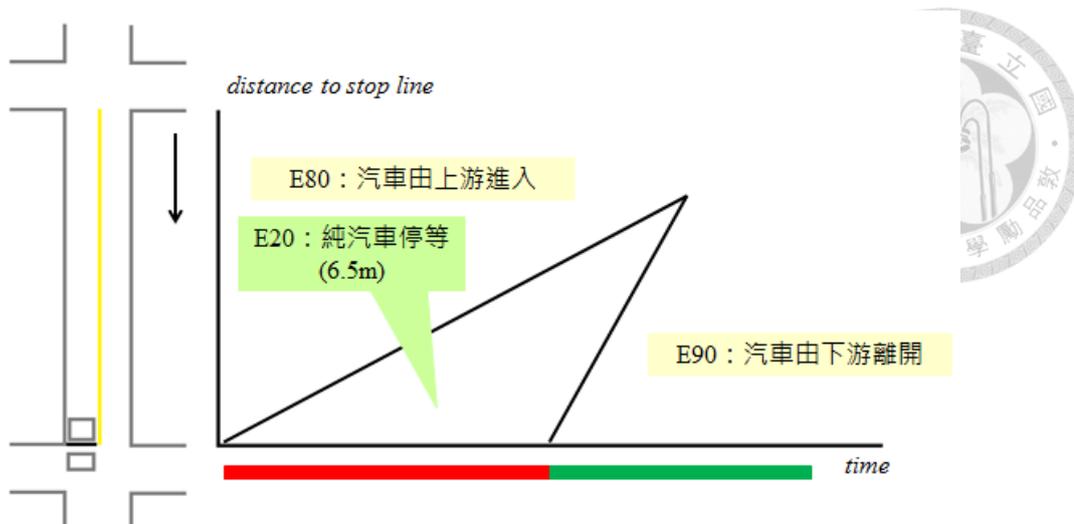


圖 3-7：快車道等候結構與型態先後關係

混合車道則由於車種組成複雜，加上前方機車停等區的影響，等候結構包含純汽車、純機車與汽機車交互型態。當紅燈亮起，上游到達之汽、機車(M80)，首先出現 M20 型態，表示汽車開始停等，後方到達之機車仍可繼續鑽行至停等區停等，此時汽車為最小停等間距(6.5 公尺)。之後汽車、機車完全停等，出現 M30 型態，M20 與 M30 具有前後關係，若機車數量愈多，則機車會在汽車之間或夾縫中停等，因此出現 M40 型態，此時汽車間距大於最小停等間距 6.5 公尺。隨著橫向綠燈開始，欲左轉之機車進入待停區待轉，以 M10 型態描述，若無機車待停區則不會出現此型態。當直行綠燈始亮，前方待停區之機車開始紓解，出現 M70 型態，之後混合車流一起往下游紓解，為 M90 型態。由於本研究並無特別考量公車型態，原因在於公車造成的混合車流型態與汽車類似，僅有車體較大，佔用道路面積較多，但機車同樣具有於公車兩旁鑽行之行為。混合車道等候型態詳細圖例如圖 3-8 所示。

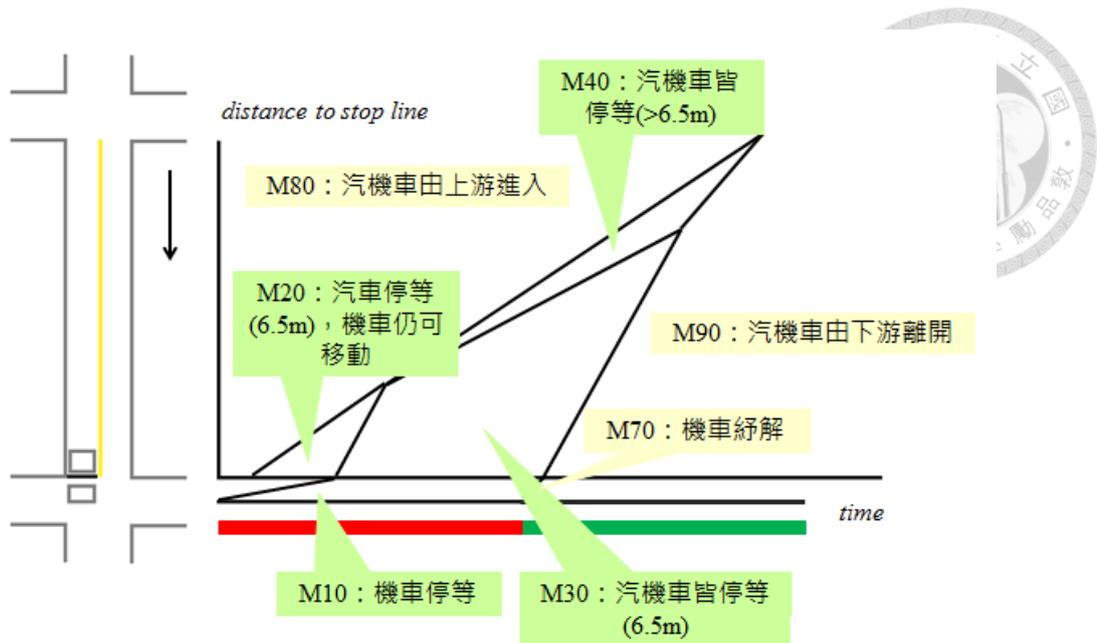


圖 3-8：混合車道等候結構與型態先後關係

3.2.2 節所描述之快車道與混合車道等候型態係理論上之基本構圖，實際車流行為與型態出現比例多寡則需以實際資料印證才具有說服力，第 3.3 節將說明實際車流資料統計結果，將連續之等候型態資料離散化(discretization)，計算固定時間內型態出現比例並進行檢定。

3.3 等候結構統計推論

第 3.2 節所論述的乃理論上等候線形成與紓解過程之推導，實際車流型態是否如此仍須以統計結果與假設檢定驗證。

3.3.1 羅斯福路等候結構

本研究首先以羅斯福路作為實證分析對象，根據四個車道(內側兩快車道、外側兩混合車道)之四個週期時間(約 12 分鐘)以車輛點值軟體觀察其等候線形成與紓解的時點，每 0.5 秒追蹤一次，每一個週期的車隊即為一個樣本。其中混合車道包含機車的等候線，觀察內容除了型態組成之外，還包含各個型態出現時間長短、先後順序與比例，作為後續建構等候結構模式之依據。

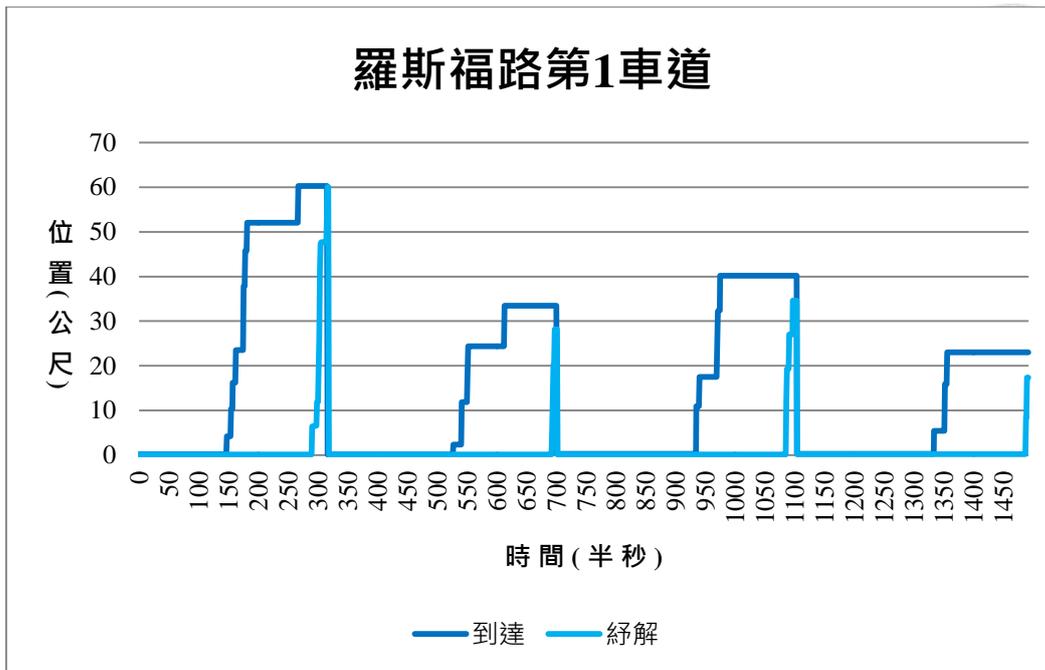


圖 3-9：羅斯福路第一車道等候結構分析結果

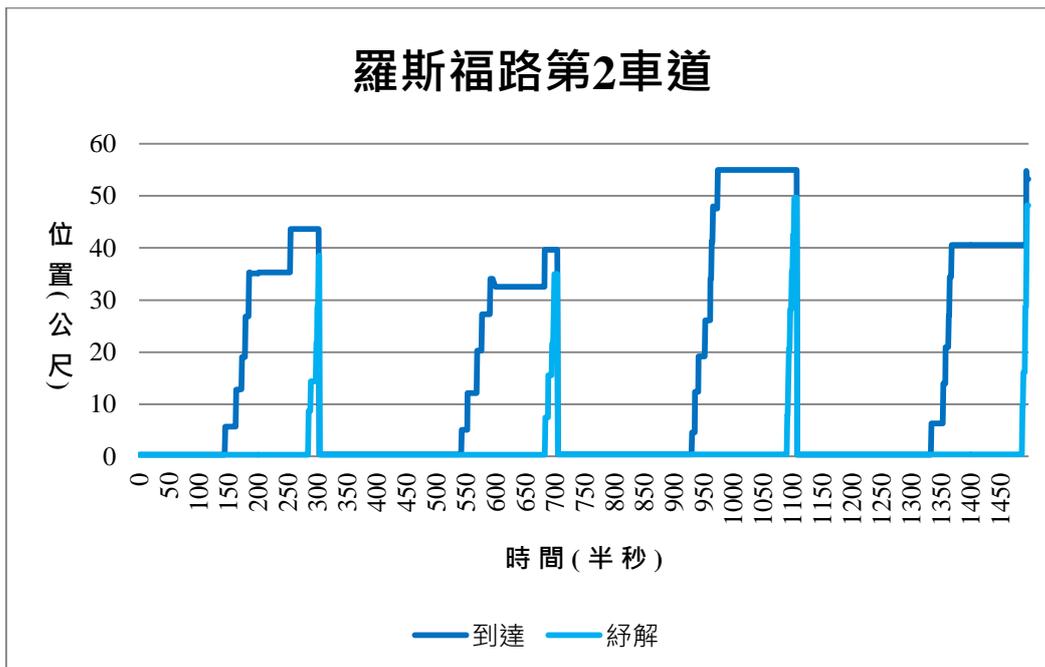


圖 3-10：羅斯福路第二車道等候結構分析結果

羅斯福路內側快車道之分析結果如圖 3-9 與圖 3-10 所示。其中縱軸的 0 公尺為停止線位置，車輛往下方行進，包含到達與紓解兩種等候線。等候線之長度受號誌紅燈時比與每週期車輛到達數量影響，最長至距停止線約 60 公尺，且

第二車道平均等候長度較長。至於紓解則觀察車輛啟動後依序等候線消散情形。就型態上而言，兩者同樣依序出現了 E80、E20、E90 三種型態。

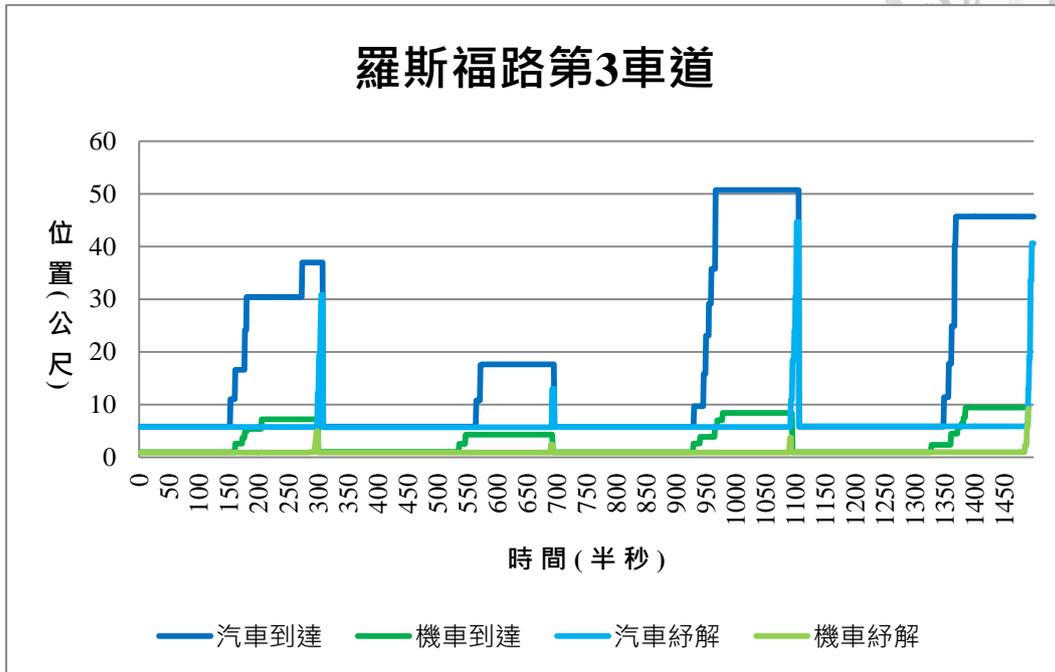


圖 3-11：羅斯福路第三車道等候結構分析結果

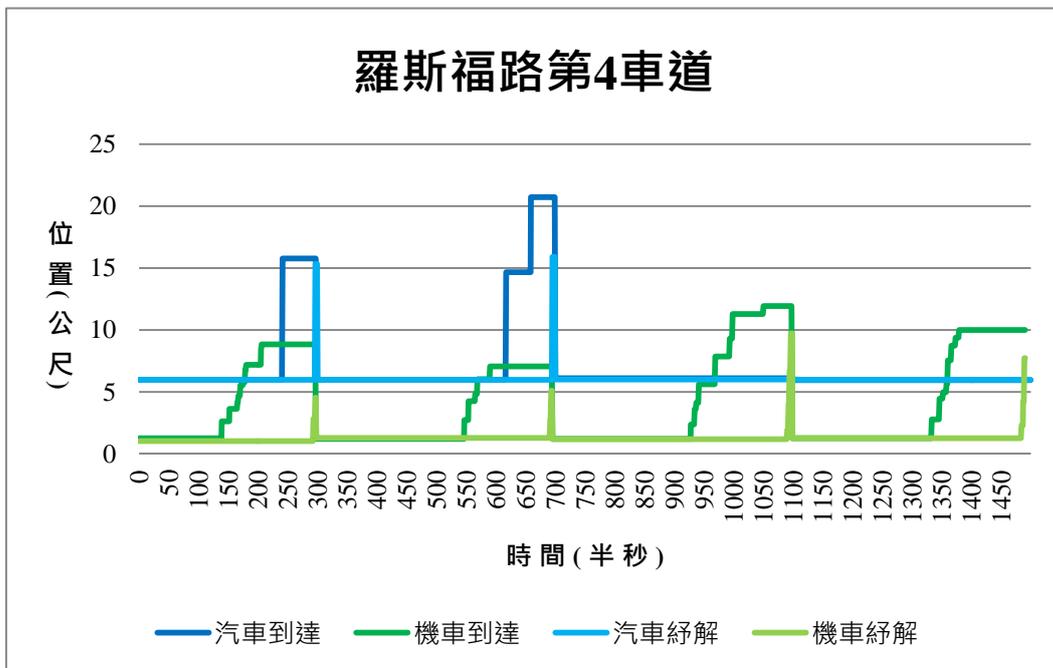


圖 3-12：羅斯福路第四車道等候結構分析結果

羅斯福路外側混合車道結果如圖 3-11 與圖 3-12 所示。由此兩圖可以得知外側車道受到機車干擾，等候型態、數量差異較大，除了汽車含包含機車之等候與紓解，且機車之等候與紓解明顯比汽車快速，且最外側車道之平均等候長度較第三車道短。第四車道後兩週期沒有汽車停等，因此僅出現機車的部分，出現型態包含 M10、M20、M30、M70、M80、M90，且沒有絕對的先後順序。

3.3.2 新生南路等候結構

為了減少特定路段造成的型態誤差與增加樣本數，本研究也採取新生南路同樣四車道(內側兩快車道、外側兩混合車道)配置下的等候結構資料。圖 3-13、圖 3-14 表示內側快車道之結果，相較於羅斯福路等候型態並無太大差異，唯有新生南路於調查時段流量較大，因此等候線長度較長(接近 70 公尺)，由圖中可明顯判斷，且四個週期等候長度變化較小。圖 3-15、圖 3-16 顯示外側混合車道的部分，兩者相對於快車道仍變異較大，可印證 3.2.1 節混合車道型態較快車道複雜之論點。以第三車道而言，新生南路汽、機車流量變化較大，機車等候線之累積較長，有機會出現 M40 之機車夾雜於汽車之間的等候型態；反觀羅斯福路機車變化較小，每週期的到達數量差異不大，型態種類較少。至於型態是否存在差異仍需藉由統計檢定加以推論。

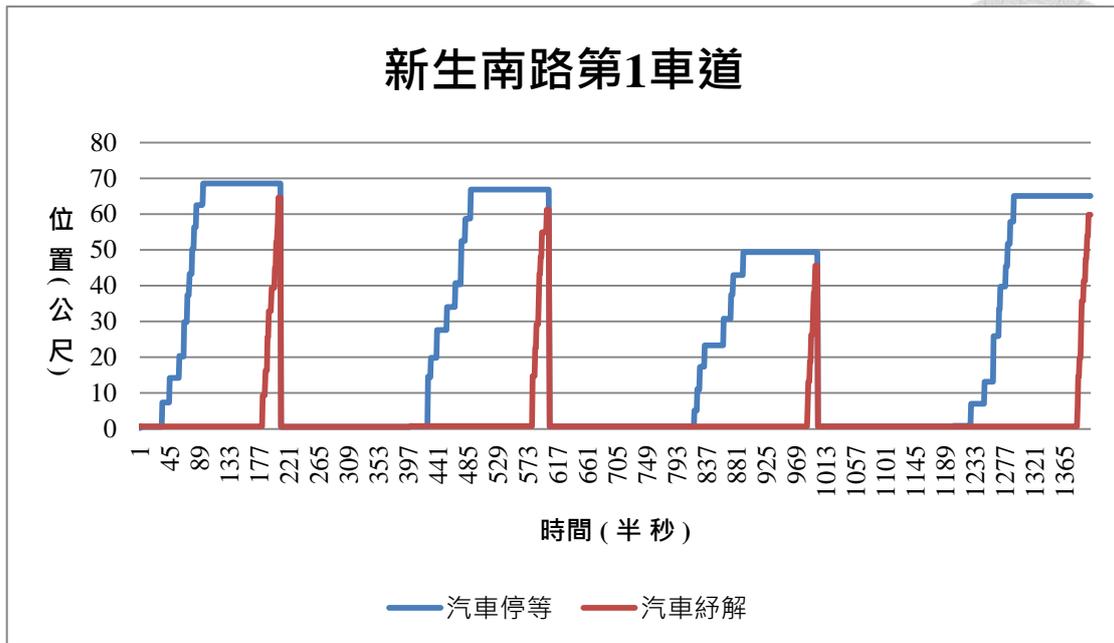


圖 3-13：新生南路第一車道等候結構分析結果

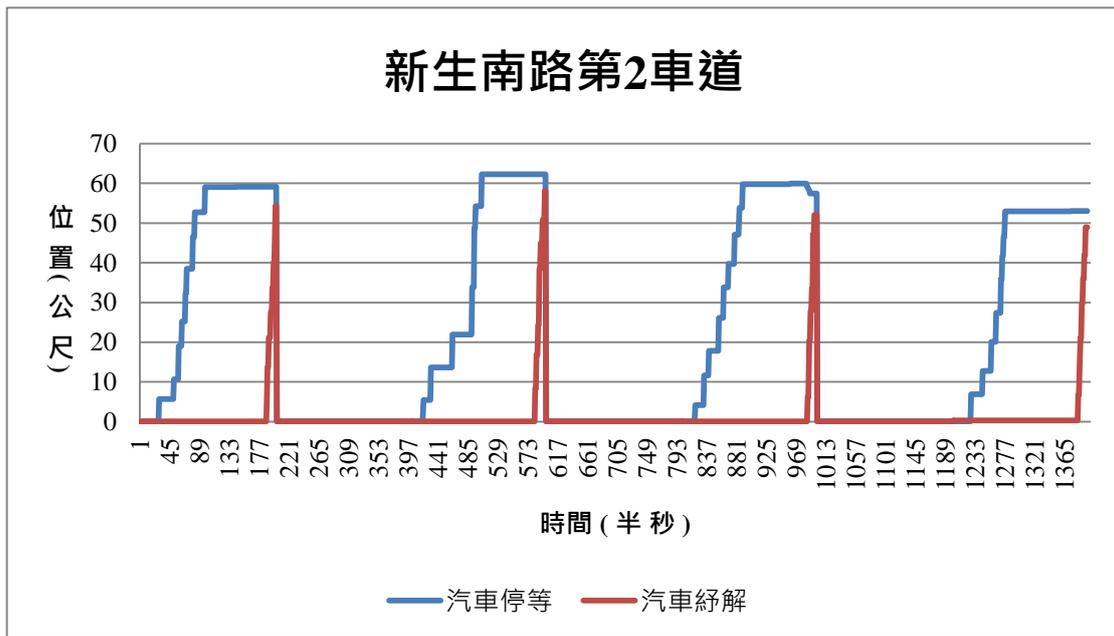


圖 3-14：新生南路第二車道等候結構分析結果

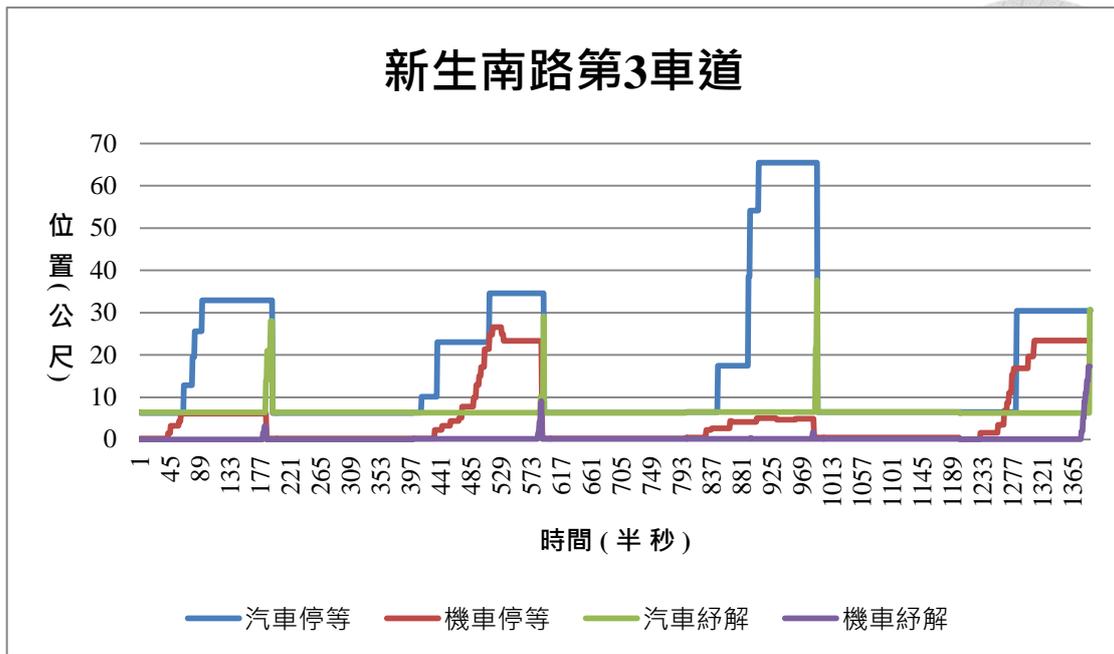


圖 3-15：新生南路第三車道等候結構分析結果

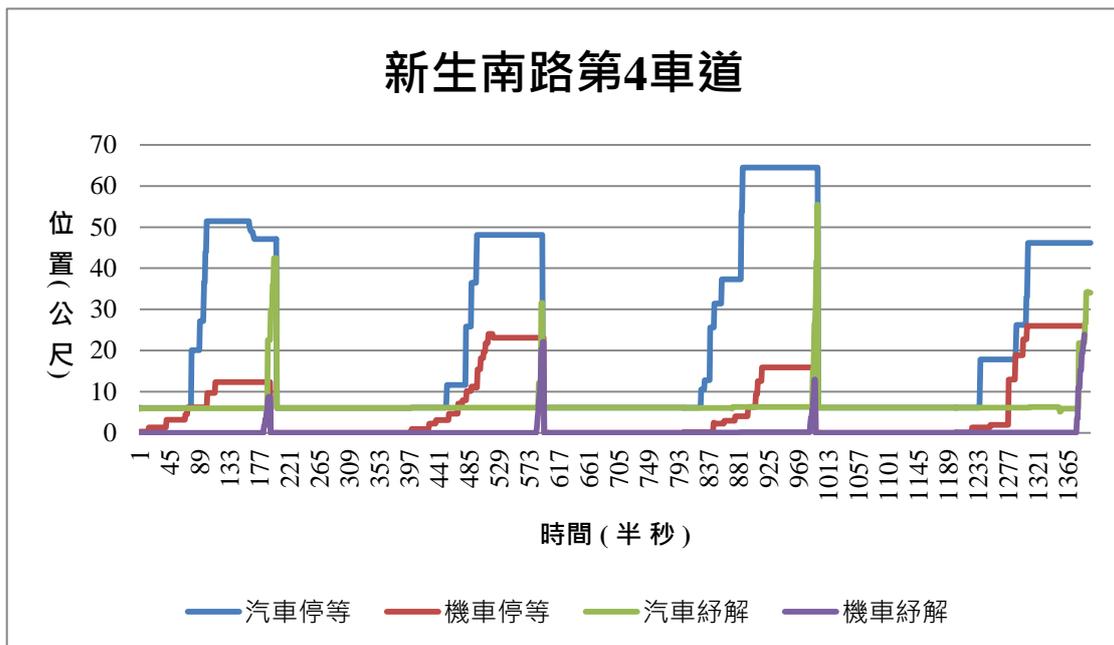


圖 3-16：新生南路第四車道等候結構分析結果

若以新生南路與羅斯福路最外側第四車道進行比較，則羅斯福路流量變化較大，原因在於調查範圍內最後兩個週期僅出現純機車停等之型態(M75)，沒有汽車到達；新生南路第四車道之汽車停等數量仍然較多，甚至多餘第三車道之等候

量。就汽、機車到達之順序而言，羅斯福路的車流機車等候線累積較早，汽車到達停止線的時間較晚；新生南路也呈現類似情況，但差異較小，相對而言 M20 的出現機率較大。由紓解的斷面分析，機車之紓解形態存在時間較短，符合機車紓解較快的一般現象，與機車向前集中與停等空間佈設有關。值得一提的是，此等候線時空圖僅追蹤車隊的縱向累積，無法呈現機車的橫向發展特性，也就是同樣等候長度可能不只涵蓋一部機車。由於機車沒有車道化概念，採用車道別為分析的基礎無法精準呈現週期內機車於路段之停等數量。因此，後續模式建構將採用面積車流(area traffic flow)的概念，打破汽、機車以輛為單位的分析基礎，轉換為佔有面積，除了彌補機車橫向發展解釋能力的不足，同時藉由等候型態描述汽、機車分流紓解之先後關係。

3.3.3 統計分析與比例檢定

根據 3.3.2 實際路段之等候型態資料，本研究先進行初步敘述統計。羅斯福路第一至第四車道型態敘述統計結果如表 3-2 所示。快車道部分沒有太大差異，停等與紓解型態約為 10:1 的比例，等候型態受號誌影響較大。混合車道除了號誌影響、內外車道與汽、機車混合比大小也有關係。最外側車道機車數量相對較大，M10(純機車停等)型態較多，相對 M20、M30(汽、機車皆停等)型態較第三車道少。

表 3-2：羅斯福路等候型態敘述統計

車道 型態	車道			
	第 1 車道	第 2 車道	第 3 車道	第 4 車道
M15	0	0	51	500
M20	0	0	38	6
E20	670	660	0	0

M30	0	0	575	134
M40	0	0	0	0
M75	0	0	14	23
M80	0	0	836	860
E80	822	837	0	0
M90	0	0	37	9
E90	60	68	0	0
總和	1,552	1,565	1,551	1,532

單位：0.5 秒

新生南路型態敘述統計結果如表 3-3 說明，在分析之週期、時比相同的情況下，最內側第一、第二車道之型態數量同樣沒有太大差異，E20 與 E80 的大小受號誌時比影響。由此推斷快車道之停等行為較為類似，無論其是否為最內側車道。第三與第四車道則無法判斷一定之等候型態規律，受限於號誌週期、時比，尤其車輛的順序反映在形態上的數量更為明顯。羅斯福路兩車道型態差異較大，原因是第四車道部分週期出現沒有汽車到達之情況，M15 比例較大，相對含有汽車之混合型態 M20、M30 比例減少。反之新生南路混合車道型態差異較小，車輛到達較為平均。

表 3-3：新生南路等候型態敘述統計

車道 型態	車道			
	第 1 車道	第 2 車道	第 3 車道	第 4 車道
M15	0	0	93	101
M20	0	0	260	244

E20	626	648	0	0
M30	0	0	260	206
M40	0	0	0	90
M75	0	0	24	16
M80	0	0	734	694
E80	690	691	0	0
M90	0	0	20	47
E90	87	59	0	0
總和	1,403	1,398	1,391	1,398

單位：0.5 秒

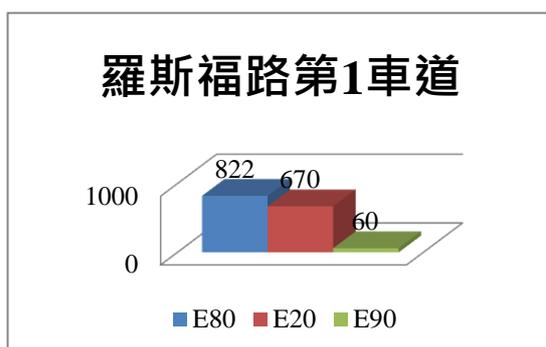


圖 3-17：第一車道統計直方圖

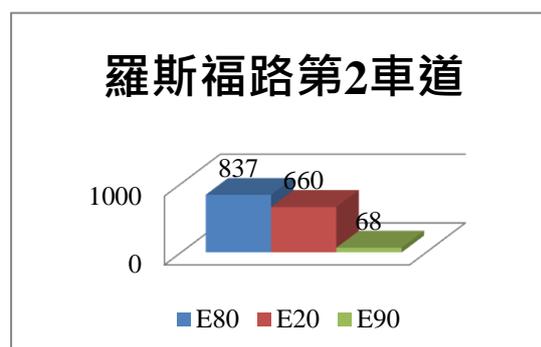


圖 3-18：第二車道統計直方圖

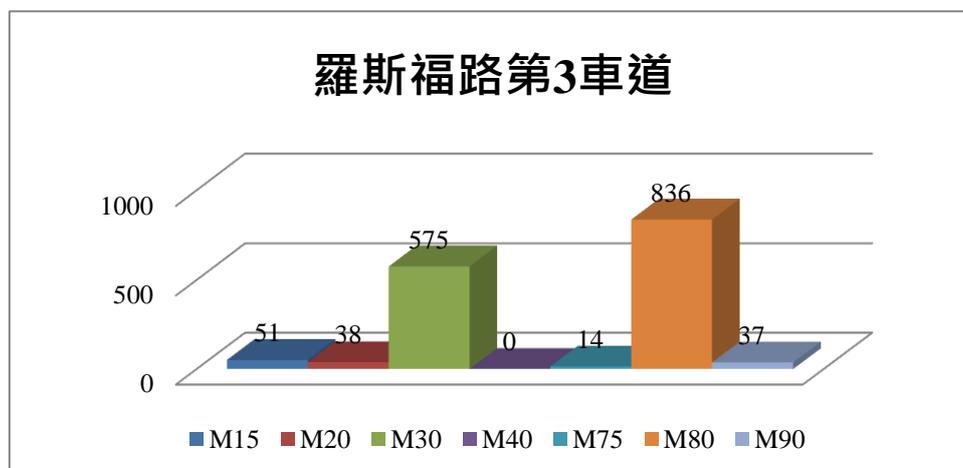


圖 3-19：第三車道統計直方圖

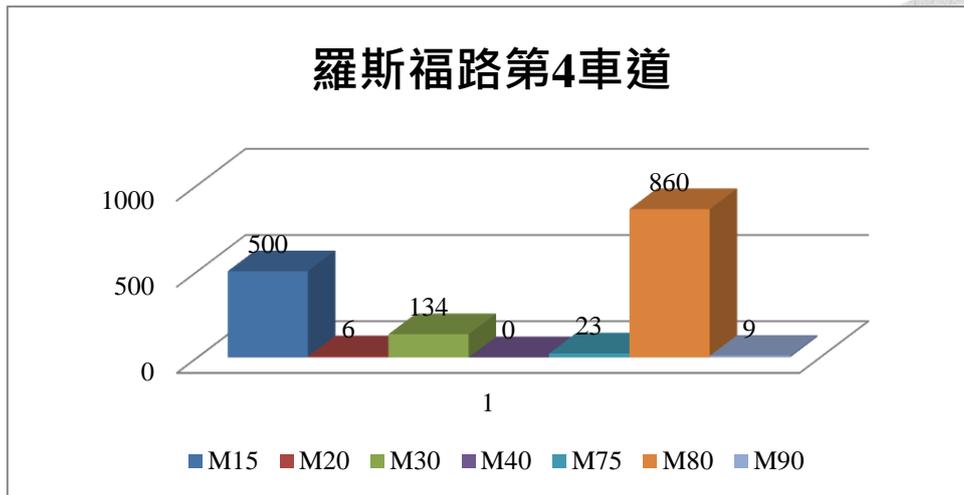


圖 3-20：第四車道統計直方圖

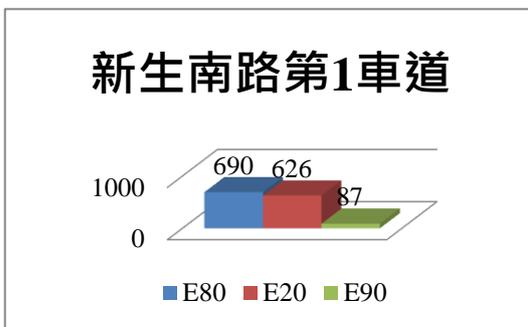


圖 3-21：第一車道統計直方圖

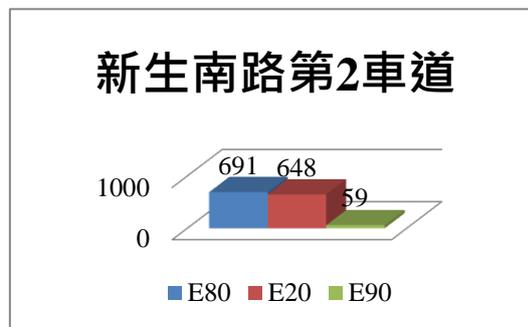


圖 3-22：第二車道統計直方圖

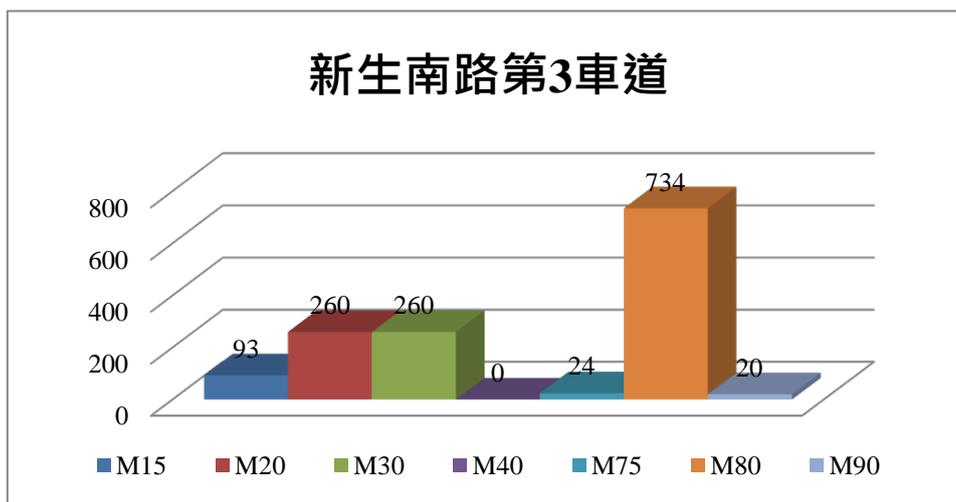


圖 3-23：第三車道統計直方圖

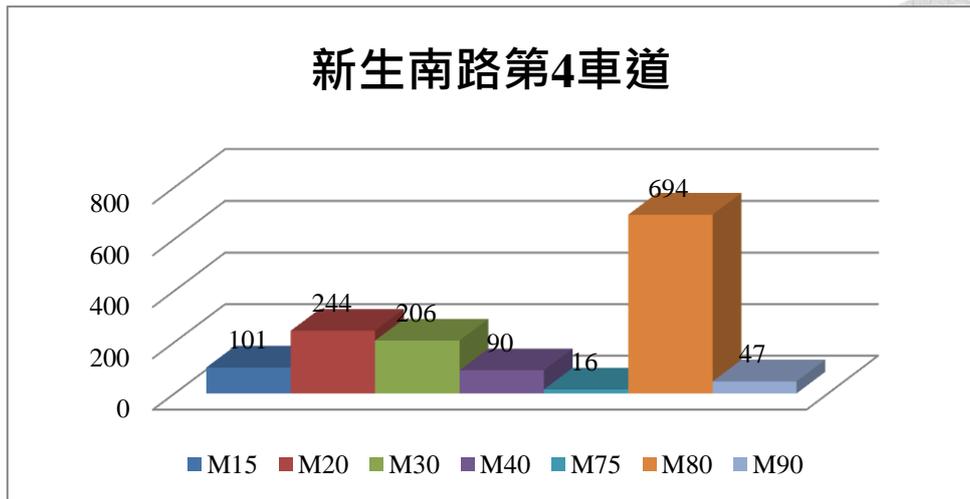


圖 3-24：第四車道統計直方圖

為了確認羅斯福路與新生南路兩個實際路段之車流等候結構是否存在差異，本研究將兩路段分車道個別等候型態進行兩母體之比例差(p_1-p_2)檢定(Ratio Testing)，在 95%的信賴水準下($\alpha=0.05$)，判斷不同情境的等候型態比例是否具有顯著差異。如同前面所論述，等候型態之種類、出現時間長短受到車道限制、車道寬、號誌時至週期、時比長短的影響，甚至混合車道型態具有車輛到達先後順序之型態因果關係，彼此具有相關性(correlation)，無法獨立個別檢定。本研究所進行的兩獨立樣本等候型態比例檢定包含下列兩個層面：

1. 車道群組基礎(lane group based)：檢定同一路段快車道(第一、第二車道)或混合車道(第三、第四車道)之停等與移動型態種類(queuing patterns)是否有顯著差異，作為劃分車道群組的依據。
2. 路段差異基礎(location variation based)：檢定兩不同路段快車道(第一、第二車道)或混合車道(第三、第四車道)之停等與移動型態比例大小(pattern ratio)是否具有顯著差異，檢驗等候結構是否隨著調查地點不同而改變。

使用比例檢定的統計推論前提是母體符合 Bernoulli 分配，就本研究而言，等候型態可以區分為停等型態與移動型態(包含匯入車隊與路口紓解)兩種，無論

屬於快車道或混合車道，其分配均相同。在兩母體 n_1 與 n_2 皆為大樣本($np > 5$)，95%信賴水準下($\alpha=0.05$)檢定兩母體之比例差異。



$$\begin{cases} X_1, X_2, \dots, X_{n_1} \sim B(p_1) \\ Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_2} \sim B(p_2) \end{cases}$$

其虛無假說(H_0)表示兩獨立母體之停等型態(或移動型態)比例沒有差異，對立假說(H_a)為兩獨立母體之停等型態(或移動型態)比例不相等，存在差異。

$$\begin{cases} H_0 : p_1 = p_2 \\ H_a : p_1 \neq p_2 \end{cases}$$

兩獨立母體之停等型態(或移動型態)比例差之檢定統計量為：

$$Z = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\hat{p}(1-\hat{p}) \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

其中 \hat{p} 乃是兩組比例之混合加權平均，其計算如下：

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} X_i + \sum_{i=1}^{n_2} Y_i}{n_1 + n_2} = \frac{n_1 \hat{p}_1 + n_2 \hat{p}_2}{n_1 + n_2}$$

3.3.3.1 情境一：相同路段同一群組不同車道停等型態比例差異檢定

這個情境針對同一樣本路段不同車道(快車道、混合車道)進行停等型態之檢定，在 $\alpha=0.05$ 下發現無論新生南路或羅斯福路，其快車道或混合車道彼此停等型態比例沒有顯著差異，均為接受 H_0 。顯示在週期、時比相同的情況下，同一路段快車道的停等型態不會因為出現在第一、第二車道而有差異，兩個車道比例相同，混合車道也呈現同樣的結果。由於混合車道之停等型態具有汽、機車到達

的先後關係，因此合併為該車道混合停等型態總和進行檢定。由此結果可以推論同一路段相同車道使用無論其車道數多寡，車輛行為類似，可以歸納為同一車道群組，而混合車道亦是如此。之後等候型態模式建立也是採用車道群為基礎，而非追蹤單一車道的變化，減少模式變數個數並增加求解速度。另外，停等型態(p)與移動型態($1-p$)兩者比例總合為 1，服從 Bernoulli 試驗，經過檢定後也會得到相同的結果，因此後續的情境僅比較停等型態的部分。

表 3-4：同一路段車道群停等型態比例檢定

情境一	P_1	P_2	P^*	$ Z $	$Z_{\alpha/2}$	檢定結果
新生南路快車道 (E20)	0.45	0.46	0.45	0.92	1.96	接受 H_0
羅斯福路快車道 (E20)	0.43	0.42	0.43	0.56	1.96	接受 H_0
新生南路混合車道 (M15+M20+M30+M40)	0.44	0.46	0.45	0.95	1.96	接受 H_0
羅斯福路混合車道 (M15+M20+M30+M40)	0.43	0.42	0.42	0.58	1.96	接受 H_0

3.3.3.2 情境二：不同路段相同車道群組停等型態比例差異檢定

情境二探討新生南路與羅斯福路兩個不同路段停等型態是否具有顯著差異，其結果如表 3-5。在 95% 信賴水準下，發現檢定統計量(Z)皆落在拒絕域，也就是路段地點對快車道或混合車道停等型態比例大小有顯著差異。此結果顯示不同路段由於週期與時比不同，車輛等候時間也不同，自然等候型態大小就存在差異。由羅斯福路等候結構分析發現，外側第四車道的型態變異較大，除了受號誌影響之外，汽、機車數量的變化與到達的先後順序造成部分型態比例過大或是 0 的狀況。

表 3-5：不同路段車道群停等型態比例檢定

情境二	P_1	P_2	P^*	$ Z $	$Z_{\alpha/2}$	檢定結果
兩路段快車道 (E20)	0.45	0.43	0.44	2.18	1.96	拒絕 H_0
兩路段慢車道 (M15+M20+M30+M40)	0.45	0.42	0.42	2.07	1.96	拒絕 H_0

3.3.3.3 情境三：不同路段不同車道停等型態比例差異檢定

為了進一步釐清不同路段相同車道位置之停等型態比例是否有差異，本研究進一步將車道別加以區分，如情境三之設計。表 3-6 顯示其比例檢定結果，發現第一與第三車道沒有顯著差異，第二與第四車道檢定後明顯落在拒絕區域。雖然停等比例相等與否受紅燈時比影響甚大，不過兩者沒有正比關係，紅燈愈長停等比例有愈大的趨勢，但型態數量仍是由車輛是否到達與抵達時間決定。不過可以確定的是不同路段至少存在停等與移動兩種型態，至於混合車道的型態具有交互關係，彼此也不滿足 Bernoulli 分配，無法藉由比例檢定方法驗證，後續章節將針對求解後之號誌結果確認混合型態數量的合理性與正確性。

表 3-6：不同路段不同車道停等型態比例檢定

情境三	P_1	P_2	P^*	$ Z $	$Z_{\alpha/2}$	檢定結果
兩路段第 1 車道 (E20)	0.45	0.43	0.44	0.79	1.96	接受 H_0
兩路段第 2 車道 (E20)	0.46	0.42	0.44	2.28	1.96	拒絕 H_0
兩路段第 3 車道 (M15+M20+M30+M40)	0.44	0.43	0.43	0.69	1.96	接受 H_0
兩路段第 4 車道 (M15+M20+M30+M40)	0.46	0.42	0.44	2.22	1.96	拒絕 H_0



第四章 單一路口混合車流號誌最佳化模式



4.1 模式建立構想

本研究之研究範圍係由單一路口延伸至路網整體，考量混合車流之交通組成，同時將路口車道與機車停等設施納入最佳化模式。延續 Wong and Wong【99】、Wong and Heydecker【100】的方法，模式中加入機車流量與分流設計概念，結合混合車流幾何空間配置與號誌時制最佳化，作為第二階段等候結構路網求解之基礎。在號誌設計上，本研究單一路口之號誌最佳化採用群組設計方法，沒有給定時相數與時相順序情況下，以個別車道獨立之車流為規劃單元，求解後將路權時間相同的流動劃分為同一時相，同時必須設定衝突流動的綠燈介間時間，避免衝突流動出現在同一時相，確保路口流動的安全性。此方法與時相為基礎的設計截然不同，時相法介間時間是以時相為區隔對象，雖然減少介間時間的參數個數與增加求解效率，但群組法保留更大的綠燈利用彈性。圖 4-1 為群組基礎號誌設計範例路口，可以看到不同方向的车道為獨立設計單位，相同轉向之車流歸納為同一車道群組。而在流動組成上，本研究將路段機車需求量納入模式，並修正不同車道流量分配比例。在車種處理上，本研究將路口左轉待停之機車視為獨立的流動，具有飽和紓解量與號誌相關限制，計算其可紓解的流量。過去的研究中並沒有特別考慮兩段式左轉機車的紓解，原因是機車加速到最大紓解速率的時間短，啟動延滯為零甚至是負值，不影響綠燈啟動時後方汽車的紓解率。但在機車數量眾多情形下，機車車隊群體的啟動延滯向後擴散，不僅影響汽車的紓解，而汽、機車同時啟動也具有安全上疑慮。因此，本研究特別將汽、機車啟動延滯差值納入模式，作為分流的基礎。在機車轉向決策方面，本研究也將機車兩段式左轉待停區決策邏輯轉換為模式條件限制式，由最佳化過程決定是否設置機車兩段式左轉待停區。以下章節將分別說明單一路口模式之號誌設計限制式、車道與幾何空間限制式、流動限制式、分流限制式與模式目標式。

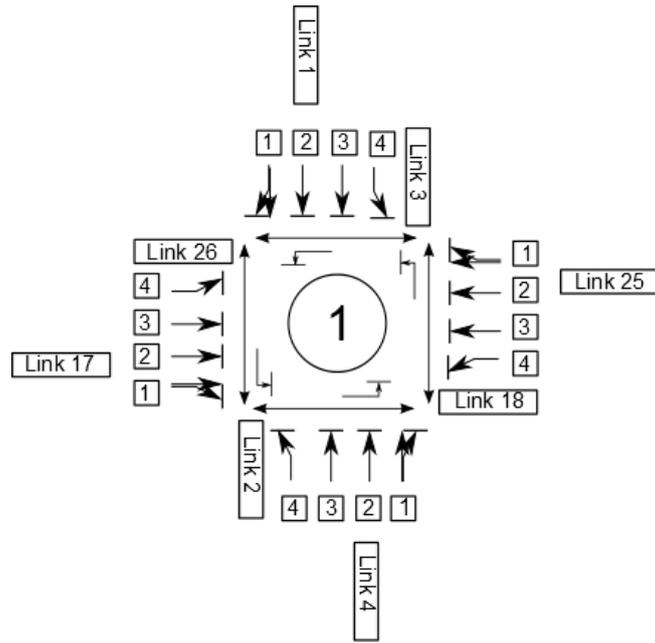


圖 4-1：群組設計基礎之範例路口

4.2 模式變數說明

本研究第一階段單一路口號誌最佳化模式結合車道與幾何配置群組、號誌群組與流動群組的關係，尚不考慮變數依時階之變化，建立混合整數規劃模式(Mixed Integer Programming Model, MIP)。4.2 節說明模式相關變數名稱、符號與意義，包含連續變數(continuous variables)、二元變數(binary variables)與整數變數(integer variables)三個種類。至於模式採用之參數值與各種組合之限制式、目標式關係將於後續章節說明，關於各項變數意義如表 4-1 所示。

表 4-1：單一路口混合車流號誌模式變數說明

變數符號	說明	種類
i	路段別編號	整數
j	流動別編號	整數

p	車道編號(由外側開始)	整數
m	路段編號(用於機車流動)	整數
k	機車兩段式左轉流動編號	整數
r	機車待轉區編號	整數
μ	路口之流量共同乘數	連續變數
μ^1	車道之流量乘數	連續變數
μ^2	待轉區之機車流量乘數	連續變數
ζ	週期長度	連續變數
$q_{i,j,p}^1$	第 i 路段 p 車道流動 j 的流量	連續變數
$q_{m,k,r}^2$	第 m 路段待轉區 r 直行之 k 流動流量	連續變數
$\theta_{i,j}^1$	轉向流動之綠燈起始時間	連續變數
$\theta_{m,k}^2$	兩段式左轉機車綠燈起始時間	連續變數
$\phi_{i,j}^1$	轉向流動之綠燈持續時間	連續變數
$\phi_{m,k}^2$	兩段式左轉機車綠燈持續時間	連續變數
$\Theta_{i,j}^1$	車道號誌綠燈起始時間	連續變數



$\Theta_{m,k}^2$	機車待轉區號誌綠燈起始時間	連續變數
$\Phi_{i,j}^1$	車道號誌綠燈持續時間	連續變數
$\Phi_{m,k}^2$	機車待轉區號誌綠燈持續時間	連續變數
$z_{i,j,n,o}^{1,s}$	車道流動之綠燈相對始亮時間	連續變數
$z_{i,j,n,o}^{1,e}$	車道流動之綠燈相對結束時間	連續變數
$z_{i,j,n,o}^{2,s}$	待轉區機車流動綠燈相對始亮時間	連續變數
$z_{i,j,n,o}^{2,e}$	待轉區機車流動綠燈相對結束時間	連續變數
$\varepsilon_{\Gamma(i,j)}$	離開車道數	整數
$\beta_{i,p}$	進入車道之判斷變數	二元變數
$\delta_{i,j,p}$	車道允許流動之判斷變數	二元變數
$\delta_{m,k,r}$	待轉區允許流動之判斷變數	二元變數
$\Omega_{i,j,n,o}^1$	車道衝突流動之繼承函數	二元變數
$\Omega_{m,k,y,u}^2$	待轉區衝突流動之繼承函數	二元變數



4.3 號誌設計限制式

在群組設計基礎上，各個車道為獨立的流動，以綠燈始點(start of green)與綠燈長度(duration of green)作為控制變數，衝突流動彼此具有介間時間區隔，以時

相結構歸納具有相同綠燈啟時間的流動為同一時相。另外，車道也具有號誌，目的是作為流動與車道分配之間的連結，車道號誌與流動號誌時間必須一致才具有流量通過。本研究之號誌限制式包含週期限制、綠燈始點限制、最小綠燈、清道時間、號誌顯示、時相結構限制與分流設計相關限制式。

4.3.1 週期長度限制：模式共同週期長度以倒數表示，變成介於 0 到 1 之間的數值，而長度需介於設定的最大週期倒數與最小週期倒數之間。以倒數表示的目的在於確保模式方程式的線性關係(linearity)。而最小週期(C_{min})設為 60 秒，最大週期(C_{max})設為 120 秒。

$$\frac{1}{C_{max}} \leq \zeta \leq \frac{1}{C_{min}}, \quad \zeta = 1/C \quad (4.1)$$

4.3.2 綠燈起始限制：由於號誌週期長度已轉換為倒數，因此對於車道汽車流動或兩段式機車左轉流動，其流動之綠燈啟動時間(start of green time)必須介於 0 至 1 的範圍之間，同樣為小於 1 的數值。

$$1 \geq \theta_{i,j}^1 \geq 0 \quad (4.2)$$

$$1 \geq \theta_{m,k}^2 \geq 0 \quad (4.3)$$

4.3.3 最小綠燈時間：每一個流動的最佳化之顯示綠燈時間(displayed green time)需大於設定之最小綠燈時間與週期倒數乘積。在車道流動部分，根據轉向不同與行人最小綠燈需求，左轉流動綠燈時間通常未包含行人綠燈時間，因此設定為 5 秒。直行與右轉流動之時相通常包含行人穿越路口時間，而行人最小綠燈設計須考量行人起步延滯、行人穿越道長度、步行速率及清道時間，假設步行速率一般採用 1.2 (公尺/秒)、起步延滯為 5 秒，根據交通工程手冊(交通部，2010)之建議不小於 15 秒為設計標準。至於兩段式左轉待停區之最小綠燈與直行、右轉的流

動相同，設定為 15 秒。

$$1 \geq \phi_{i,j}^1 \geq g_{i,j}^{1,\min} \cdot \zeta \quad (4.4)$$

$$1 \geq \phi_{m,k}^2 \geq g_{m,k}^{2,\min} \cdot \zeta \quad (4.5)$$



4.3.4 清道時間限制：由於群組基礎的清道時間並非以時相為區隔，而是每一個衝突流動之間都需有介間時間，因此模式中以矩陣方式設定相容(compatible)或衝突(conflict)流動之關係，前者為 0，後者為 1，建立衝突矩陣表。假設 Ψ 代表所有的號誌群組， Ψ_c 表示衝突流動集合，若流動群組 (i,j) 與 (n,o) 為衝突流動，則兩者不能同時亮綠燈，需相隔一段介間時間，當 (i,j) 綠燈結束後經過 $\omega_{(i,j,p)(n,o,s)}$ 清道時間後才能讓 (n,o) 綠燈開啟。反之若 (i,j) 與 (n,o) 為相容流動，表示兩者綠燈時間可以並行，不會影響彼此行進的安全，因此其介間時間為 0。至於兩段式左轉待轉區之機車也需建立與其他車道流動之衝突與相容關係，給定適當的介間時間。關於 (i,j) 與 (n,o) 的路權時間先後關係則採用二元繼承函數(successor function)表示。

$$\theta_{n,o}^1 + \Omega_{i,j,n,o}^1 + M \cdot (2 - \delta_{i,j,p} - \delta_{n,o,s}) \geq \theta_{i,j}^1 + \phi_{i,j}^1 + \omega_{(i,j,p)(n,o,s)} \cdot \zeta, \quad (4.6)$$

$$(i,j), (n,o) \in \Psi_c$$

$$\theta_{y,z}^2 + \Omega_{m,k,y,z}^2 + M \cdot (2 - \delta_{m,k,r} - \delta_{y,z,v}) \geq \theta_{m,k}^2 + \phi_{m,k}^2 + \omega_{(m,k,r)(y,z,v)} \cdot \zeta, \quad (4.7)$$

$$(m,k), (y,z) \in \Psi_c$$

4.3.5 號誌顯示時間：當兩個互相衝突的流動欲分配綠燈時間時，除了考慮清道時間，本研究以繼承函數(successor function) Ω 限制兩衝突號誌群組 (i,j) 與 (n,o) 之流動前後關係。若 (n,o) 為 (i,j) 的下一個群組則 $\Omega_{i,j,n,o}$ 為 1，否則為 0。若 (n,o) 為先獲得路權的群組，則 $\Omega_{n,o,i,j}$ 等於 1，反之亦然。

$$\Omega_{i,j,n,o}^1 + \Omega_{n,o,i,j}^1 = 1, \quad (i,j), (n,o) \in \Psi_C \quad (4.8)$$

4.3.6 時相結構限制：此限制式目的在控制 (i,j) 與 (n,o) 相隔多少時間內會有相同的綠燈顯示時間，以連續變數 z 表示，包含起始與終點。以 4.9 式為例，變數 z 顯示群組 (i,j) 與 (n,o) 綠燈起始的時間差，4.10 表示 (i,j) 綠燈結束後經過 z 時間 (n,o) 才開啟綠燈。對於 z 綠燈起始與結束相同的流動可強制形成同一時相，而兩段式左轉機車流動同樣具有綠燈始亮與長度的控制變數，因此也需要變數 z 規範其時相結構。

$$\theta_{i,j}^1 + z_{i,j,n,o}^{1,s} = \theta_{n,o}^1 \quad (4.9)$$

$$\theta_{i,j}^1 + \phi_{i,j}^1 + z_{i,j,n,o}^{1,e} = \theta_{n,o}^1 + \phi_{n,o}^1 \quad (4.10)$$

$$\theta_{m,k}^2 + z_{m,k,y,z}^{2,s} = \theta_{y,z}^2 \quad (4.11)$$

$$\theta_{m,k}^2 + \phi_{m,k}^2 + z_{m,k,y,z}^{2,e} = \theta_{y,z}^2 + \phi_{y,z}^2 \quad (4.12)$$

4.4 車道控制限制式

除了號誌相關限制式之外，單一路口號誌模式還包含車道與幾何空間配置的最佳化。車道群組是號誌與流動之間的連結，特定方向的流動能否通過路口除了號誌所賦予時間上的路權，還需空間上車道分配的允許。舉例而言，若第一車道(最內側)僅允許左轉流動通行，對於直行與右轉流動就只能經由其他車道通過，形成左轉專用道。藉由車道轉向配置最佳化設計，讓車道空間利用更富效率及正確性，同時避免流動之衝突性。

4.4.1 車道號誌限制式：本限制式為車道分配與號誌群組的主要關係式，當 (i,j) 流動允許由車道 p 通過時，車道號誌的綠燈起始時間與流動綠燈時間必須一致，表示流動時間與空間上的許可，而綠燈長度也需保持相同，當流動的路權時間結

束，車道號誌立即關閉不再允許流動通行。反之若 (i,j) 流動不允許由車道 p 通過時，車道 p 的號誌不需要與 (i,j) 相同，可鬆弛限制式至極大 (M) 或極小值 $(-M)$ 之範圍。至於車道與流動之允許關係以二元變數 δ 表達。

$$M \cdot (1 - \delta_{i,j,p}) \geq \Theta_{i,p}^1 - \theta_{i,j}^1 \geq -M \cdot (1 - \delta_{i,j,p}) \quad (4.13)$$

$$M \cdot (1 - \delta_{i,j,p}) \geq \Phi_{i,p}^1 - \phi_{i,j}^1 \geq -M \cdot (1 - \delta_{i,j,p}) \quad (4.14)$$

$$M \cdot (1 - \delta_{m,k,r}) \geq \Theta_{m,r}^2 - \theta_{m,k}^2 \geq -M \cdot (1 - \delta_{m,k,r}) \quad (4.15)$$

$$M \cdot (1 - \delta_{m,k,r}) \geq \Phi_{m,r}^2 - \phi_{m,k}^2 \geq -M \cdot (1 - \delta_{m,k,r}) \quad (4.16)$$

至於機車待轉區之號誌與幾何配置關係如同車道號誌之作法，如 4.15、4.16 式。

4.4.2 車道利用先後限制：由於本研究車道數也是最佳化變數之一，在不大於每一個方向(approach)所能分配的最大車道數限制下，進行進入車道(entry lane)與離開車道(exit lane)的數量最佳化。其中進入車道數乃根據該方向之流量需求與轉向分配決定，以求路口的剩餘容量最大，可通過流量最多。本研究設定之最大車道數為 19，編號由最內側車道開始，代表流動優先由第 1 車道開始判斷其通行條件。因此，車道之利用關係以二元變數 $\beta_{i,p}$ 表示，且內側車道數值一定大於外側車道，如 4.17 式。

$$\beta_{i,p} \geq \beta_{i,p+1} \quad (4.17)$$

4.4.3 車道流量指派限制：當 (i,j) 流動允許由車道 p 紓解時，其對應的車道必須是進入車道，才能進行流動指派。反之若車道 p 為進入車道，則 (i,j) 流動通行與否(0 或 1)則由其他車道與號誌限制式控制，此限制式僅保障流動通行之合理性。

$$\beta_{i,p} \geq \delta_{i,j,p} \quad (4.18)$$

4.4.4 進入車道數限制：由 4.4.3 可以明白進入車道與車道流動之關係，本組限制式進一步考慮其上界。若車道 p 允許一個或一個以上之流動 j 通行，則這些流動的 δ 總和必須大於進入車道變數 β ，也就是 β 滿足至少一種以上流動通行。相反地若車道 p 沒有任何流動通過，則該車道無法形成進入車道。

$$\sum_j \delta_{i,j,p} \geq \beta_{i,p} \quad (4.19)$$

4.4.5 離開車道數限制：除了進入車道數之限制，離開車道數為各個方向可分配之最大車道數量與進入車道數的差值，如 4.20 式。例如模式設定最大車道數目 (D) 為 8，若進入車道數為 5，則理論上剩餘 3 個車道應分配給由各方向匯入欲離開路口的車流。至於進入與離開車道的組合由最佳化過程決定，但原則是總和不得大於最大可分配之車道數。

$$D_i - \sum_p \beta_{i,p} = \varepsilon_{\Gamma(i,j)} \quad (4.20)$$

4.4.6 最小離開車道數：除了 4.4.5 限制各路段的進入與離開車道數總合為定值，路段 i 的離開車道數 $\varepsilon_{\Gamma(i,j)}$ 至少需大於由各方向欲匯入的允許流動數量，確保車流移動的連貫性，如 4.21 之限制式。為了進一步說明此限制式意義，以圖 4-2 作為簡單範例路口，而各方向的離開車道數判斷參數如表 4-2 的數值。根據此範例，該路口每一個方向至少包含五個流動，分佈在 4 個進入車道上，由於各方向車道配置相同且對稱，直行的流動有 3 個，因此每一個方向都配置包含 3 個離開車道以容納欲離開路口的車流。若是各方向進入車道不對稱之路口，如圖 4-3 之案例，此範例為 T 字形路口，各方向進入車道數、流動與離開車道數參數如表 4-3 所示。由路段 1 之直行流動判斷路段 3 至少須包含 2 個離開車道，且由路段 1 之左轉或路段 3 之右轉流動得知路段 2 至少涵蓋 1 個離開車道，而路段 1 的離開車道數由路段 3 的 3 個直行流動決定。由於機車待停區不影響離開車道數量之大小，此限制式暫不考慮機車流向。

$$\varepsilon_{\Gamma(i,j)} \geq \sum_{p=1}^{n_i} \delta_{i,j,p} \quad \forall i = 1, \dots, N_T; j = 1, \dots, N_T - 1 \quad (4.21)$$

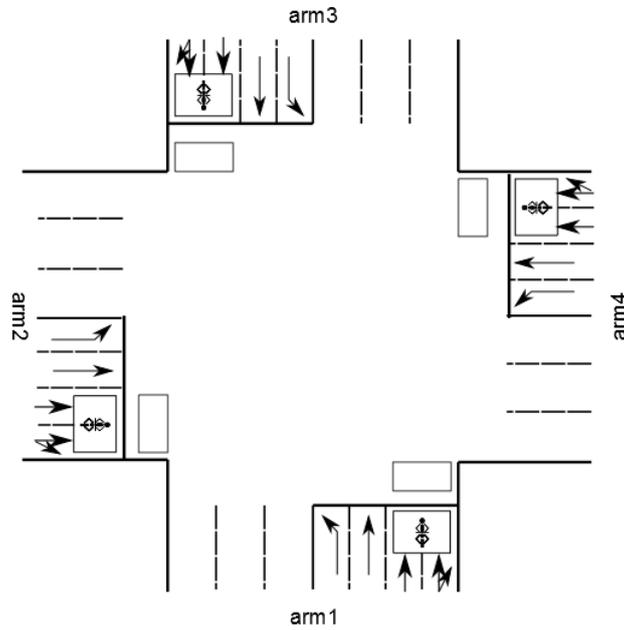


圖 4-2：最小離開車道限制路口對稱範例

表 4-2：各方向車道對稱之最小離開車道數參數說明

i	轉向 j	車道 p	$\delta_{i,j,p}$	$\sum \beta_{i,p}$	$\Gamma(i,j)$	$\varepsilon_{\Gamma(i,j)}$
1	1	1	1	4	2	≥ 1
1	2	2	1		3	$\geq 3^*$
1	2	3	1		3	
1	2	4	1		3	
1	3	4	1		4	≥ 1
2	1	1	1	4	3	≥ 1
2	2	2	1		4	$\geq 3^*$
2	2	3	1		4	
2	2	4	1		4	
2	3	4	1		1	≥ 1

3	1	1	1	4	4	≥ 1
3	2	2	1		1	
3	2	3	1		1	$\geq 3^*$
3	2	4	1		1	
3	3	4	1		2	≥ 1
4	1	1	1	4	1	≥ 1
4	2	2	1		2	$\geq 3^*$
4	2	3	1		2	
4	2	4	1		2	
4	3	4	1		3	≥ 1

*表示各方向至少離開車道數量

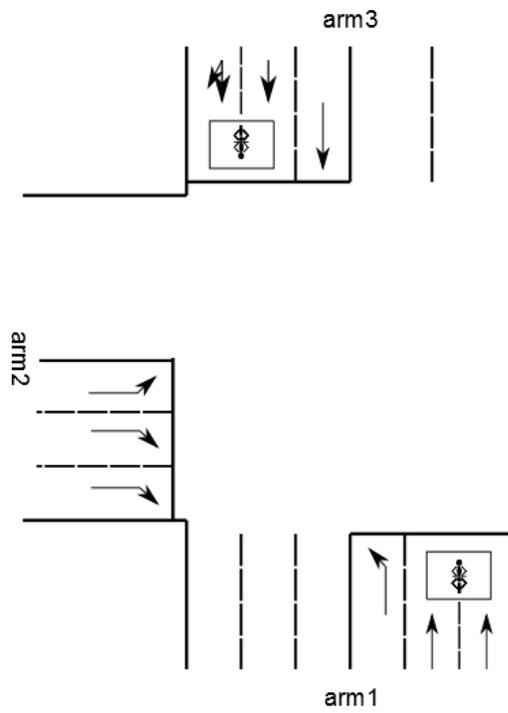


圖 4-3：最小離開車道限制路口不對稱範例

表 4-3：各方向車道不對稱之最小離開車道數參數說明

i	轉向 j	車道 p	$\delta_{i,j,p}$	$\sum \beta_{i,p}$	$\Gamma(i,j)$	$\varepsilon_{\Gamma(i,j)}$
1	1	1	1	3	2	$\geq 1^*$
1	2	2	1		3	$\geq 2^*$
1	2	3	1		3	$\geq 2^*$
2	1	1	1	3	3	≥ 1
2	3	2	1		1	≥ 2
2	3	3	1		1	≥ 2
3	2	1	1	3	1	$\geq 3^*$
3	2	2	1		1	
3	2	3	1		1	
3	3	3	1		2	≥ 1

4.4.7 跨越相鄰車道衝突限制：對於同一路段 i 右側車道 p 與左側車道 $p+1$ ，若流動 j 已經允許由右側車道 p 紓解，則基於安全考量，所有剩餘流動 $j+1, \dots, N_T-1$ 皆禁止遊車道 $p+1$ 通行。 N_T 為路段數(approaches)，本研究假設為 4，形成標準十字路口。例如，第一車道($p=1$)允許左轉流動($j=1$)通行，則第二車道的直行($j=2$)與右轉($j=3$)皆不允許通過，與第一車道之左轉流動形成衝突。詳細說明如圖 4-4 所示，而相關參數列出如表 4-4。

$$1 - \delta_{i,o,p+1} \geq \delta_{i,j,p} \geq \delta_{i,o,p+1} - 1 \quad \forall o \geq j+1 \quad (4.22)$$

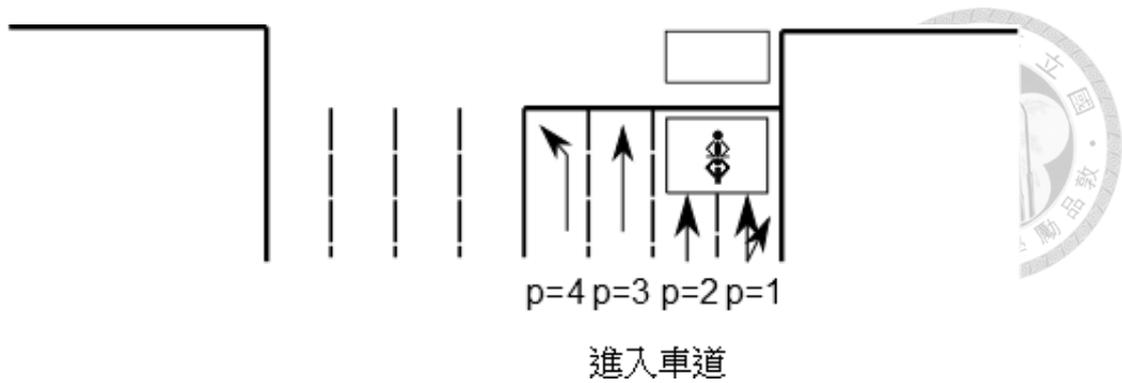


圖 4-4：相鄰車道流動衝突限制說明

表 4-4：相鄰車道流動衝突範例參數

路段 i	轉向 j	車道 p	車道配置 $\delta_{i,j,p}$	轉向 o	車道配置 $\delta_{i,o,p+1}$
1	1	1	0	2	0 或 1
				3	0 或 1
1	2	1	1	3	0
1	3	1	1	X	N.A.
1	1	2	0	2	0 或 1
				3	0 或 1
1	2	2	1	3	0
1	3	2	0	X	N.A.
1	1	3	0	2	0 或 1
				3	0 或 1
1	2	3	1	3	0
1	3	3	0	X	N.A.

根據 4.22 式我們可以定義相鄰車道流動的關係，每一個流動皆由左轉開始判斷。此處的相鄰車道流動限制不包含前方待紓解的機車，僅規範車道上之流動，假設後方車輛之轉向不受前方機車所影響。

4.4.8 機車兩段式左轉待停區設置限制：本研究延續陳柏君(1998)針對設置機車兩段式左轉待停區準則之研究，將機車左轉管制方式發展為模式限制式，包含直接左轉與兩段式左轉兩種管制方式，暫不考慮禁止左轉型態。本研究判斷是否設置機車待轉區方法為橫向路口條件以及左轉機車與直行右轉汽車衝突量乘積數值大小。其判斷流成為：若橫向車道數大於 3 車道，則強制機車必須兩段式左轉通過路口確保安全；若橫向車道數小於或等於 3 車道，則根據汽、機車衝突量大小而定，當衝突量大於設定之門檻值則需設置機車待轉區，機車須執行兩段式左轉通過路口，模式限制式如 4.23 式至 4.27 式所示。此限制式的發展邏輯如表 4-5 說明，當進入車道僅有 1 車道，則無論其機車左轉與直行/右轉汽車衝突量多寡，模式假設不必設置機車兩段左轉待停區， $\delta_{m,k,r}$ 等於 0；當進入車道數等於或大於 4 車道以上，則衝突量大小亦沒有形成限制條件，該方向須設置機車兩段式左轉待停區。若進入車道數屆 2 車道至 3 車道，則根據其衝突量門檻判斷是否設置。為了區分車道數對 $\delta_{m,k,r}$ 的影響，本研究分為下列三組情境說明：

表 4-5：機車兩段式左轉待轉區設置限制式

待轉區 $\delta_{m,k,r}$	$Q_{L,RT} < TL_2$	$TL_2 \leq Q_{L,RT} < TL_3$	$TL_3 \leq Q_{L,RT}$
$\sum \beta_{i,p} = 1$	0	0	0
$\sum \beta_{i,p} = 2$	0	1	1
$\sum \beta_{i,p} = 3$	0	0	1
$\sum \beta_{i,p} = 4$	1	1	1
$\sum \beta_{i,p} = 5$	1	1	1

4.4.8.1 情境一：若最大分配車道數為 3 車道或 3 車道以下，則進入車道數可能出現 1 車道或 2 車道情況(0 車道不可能出現，因為各方向至少包含 1 種流動)，模式限制式如 4.23 式與 4.24 式，當衝突量小於 2 車道的門檻值，則 $\delta_{m,k,r}$ 等於 0；當衝突量大於 2 車道的門檻值，則進入車道數與 $\delta_{m,k,r}$ 差值為 1。

$$\delta_{m,k,r} = 0, \quad \left(\sum_{j=j+1}^{j+2} Q_{i,j}^{vc} \right) \cdot Q_{i,j}^{mb} \leq TL^2 \quad (4.23)$$

$$\sum_p \beta_{i,p} - \delta_{m,k,r} = 1, \quad TL^2 \leq \left(\sum_{j=j+1}^{j+2} Q_{i,j}^{vc} \right) \cdot Q_{i,j}^{mb} \quad (4.24)$$

4.4.8.2 情境二：若最大分配車道數為 4 車道，則進入車道數可能出現 2 車道或 3 車道情況(4 車道不可能出現，因為各方向至少包含 1 個離開車道)，模式限制式除了 4.23 式，尚需加入限制式如 4.25 式與 4.26 式。當衝突量小於 2 車道的門檻值，則 $\delta_{m,k,r}$ 等於 0；當衝突量大於 3 車道的門檻值，則 $\delta_{m,k,r}$ 為 1；若衝突量介於兩門檻之間，則進入車道數與 $\delta_{m,k,r}$ 總和為 3。

$$\sum_p \beta_{i,p} + \delta_{m,k,r} = 3, \quad TL^2 \leq \left(\sum_{j=j+1}^{j+2} Q_{i,j}^{vc} \right) \cdot Q_{i,j}^{mb} \leq TL^3 \quad (4.25)$$

$$\delta_{m,k,r} = 1, \quad TL^3 \leq \left(\sum_{j=j+1}^{j+2} Q_{i,j}^{vc} \right) \cdot Q_{i,j}^{mb} \quad (4.26)$$

4.4.8.3 情境三：若最大分配車道數為 5 車道，則進入車道數可能出現 2 車道、3 車道或 4 車道，模式限制除了 4.26 式，需加入 4.27 式。當衝突量小於 2 車道的門檻值，則 $\delta_{m,k,r}$ 等於 0；當衝突量大於 3 車道的門檻值，則 $\delta_{m,k,r}$ 為 1；若衝突量介於兩門檻之間，則進入車道數與 $\delta_{m,k,r}$ 總和為 3。當車道數等於 4，則無論其衝突量大小皆要滿足 4.27 式。

$$\sum_p \beta_{i,p} - \delta_{m,k,r} \leq 3 \quad (4.27)$$

當最大車道數為 6 車道或 6 車道以上，4.27 不等式的右端值也依序加 1，直到最大可分配車道數 8 車道。隨著進入車道數增加，欲左轉的機車通過路口的相

對衝突愈大，因此愈需要設置兩段式左轉待停區。本研究整理兩段式左轉待停區設置準則流程如圖 4-5 表示。

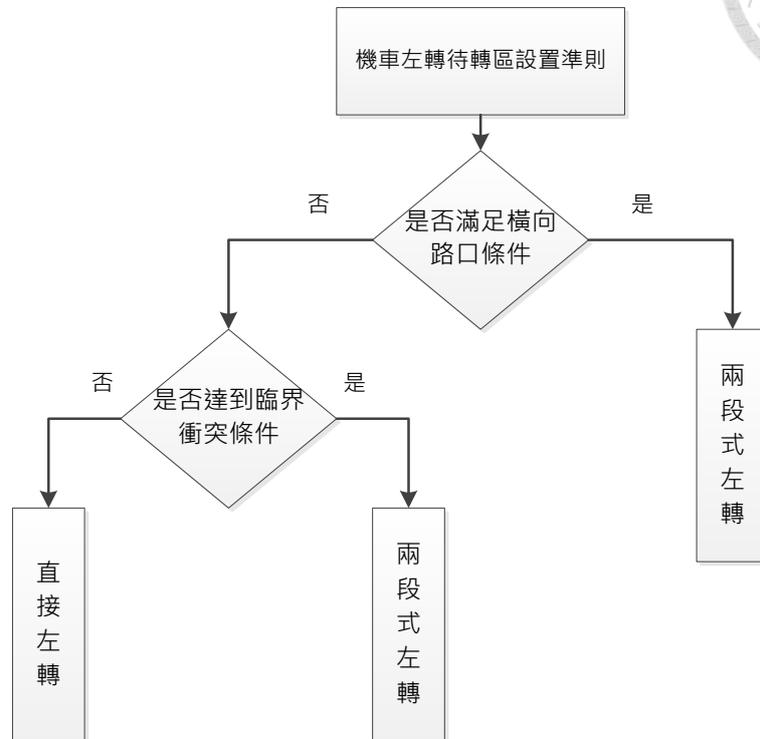


圖 4-5：機車兩段式左轉待轉區設置準則

4.5 流量指派限制式

4.2 與 4.3 節定義號誌群組與車道群組的關係，車道空間分配後藉由流量指派相關限制式決定各方向每一個車道、機車待停區單位時間可通過流量多寡。本研究為混合車流之最佳化模式，因此車道流量除了汽車之外，更加機車需求納入模式。由於第一階段單一路口模式不包含動態車流關係，在分流上僅處理前方兩段式左轉待停區之機車需求，考慮為獨立之流動，而原有車道上之機車則以靜態小客車當量(PCE)轉換為小汽車當量數。此做法的目的有兩個，一是維持模式為混合整數規劃型式，免去引入非線性的限制式導致無法求解；其次為避免第一階段模式過於複雜，同時包含號誌、車道與動態車流三種限制式。第一階段求解目的在於固定汽、機車需求量之下，先針對車道與幾何空間進行最佳化；第二階段

之路網模式再根據依時階汽、機車到達與紓解量之消長進行號誌時制微調。

第一階段流量指派模組包含流量守恆、允許流動限制、流量調整因子與流動最大飽和度限制，分別於以下小節說明。

4.5.1 流量守恆限制：流量守恆對象包含車道上的混合車流與兩段式左轉待停區之機車流。各方向汽車需求量與機車直行/右轉需求量(轉換為小客車當量數)必須等於單位時間內該方向車道流量之總和，如 4.28 式與 4.29 式。模式中車道流量以 q_1 表示，待轉區流量為 q_2 ，其對應之流量乘數(flow multiplier)分別是 μ_1 與 μ_2 。此流量乘數代表該車道最大可能指派之流量與需求量之比例，若此比例大於 1 ($\mu > 1$) 表示路口尚有剩餘容量(reserve capacity)，車流尚未達飽和狀態；若此比例小於或等於 1 ($\mu \leq 1$) 表示該路段車流已達飽和或過飽和狀態，路口沒有剩餘容量，必須盡快紓解車潮。4.28 式表示一般車道上之流量守恆， π 表示機車之小客車當量，而 4.29 式表示機車待停區之流量守恆限制，其中機車僅包含左轉的需求量，同樣以流量乘數(μ)描述待轉區機車指派與需求之比例關係。

$$\mu^1 \cdot (Q_{i,j}^{vc} + Q_{i,j}^{mb} \cdot \pi) = \sum_p q_{i,j,p}^1 \quad (4.28)$$

$$\mu^2 \cdot Q_{i,j}^{mb} = q_{m,k,r}^2, \quad \forall j=1, \quad m=i-1 \quad (4.29)$$

4.5.2 允許流動限制：此限制式描述車道利用與流量指派的關係。若車道 p 具有流量通過，前提是車道 p 需存在且該流動允許由該車道通行。換言之，若車道 p 禁止 (i,j) 流動通過，自然該車道不會出現指派的流量，該流動須由其它車道通行才會產生對應之流量大小。此概念寫成模式限制式如 4.30 式與 4.31 式，後者表示機車兩段式左轉待停區是否允許待轉機車通行，若模式根據機車待轉區判斷準則而沒有設置待轉區，自然也不會具有由待轉區紓解之機車流量。

$$M \cdot \delta_{i,j,p} \geq q_{i,j,p}^1 \geq 0 \quad (4.30)$$

$$M \cdot \delta_{m,k,r} \geq q_{m,k,r}^2 \geq 0 \quad (4.31)$$

4.32 式與 4.33 式目的為確認汽、機車需求量至少大於各方向車道數或機車待轉區，保證汽、機車混合車流需求能分配到足夠的車道上，而欲左轉的機車也具有待轉區的設置可以匯入。

$$M \cdot (Q_{i,j}^{vc} + Q_{i,j}^{mb} \cdot \pi) \geq \sum_p \delta_{i,j,p} \quad (4.32)$$

$$M \cdot Q_{i,j}^{mb} \geq \delta_{m,k,r}, \quad \forall j=1, \quad m=i-1 \quad (4.33)$$

4.5.3 允許流動限制：針對多車道的流量指派問題之處理，若相鄰的兩車道(a pair of adjacent lanes)具有相同的車道流向標線(lane marking)，或是具有同向的允許流動(permitted movements)，則根據等候理論(queueing theory)兩車道的流率會趨於平均，也就是飽和度相同。由於巨觀模式並未詳細考量每一部車的變換車道行為，因駕駛人不同而有所差異，但總體而言駕駛人會傾向最接近停止線或最快離開路口之車道進行紓解，尤其在車流未受重大干擾情況下，此假設應屬合理之推測。4.34 式表示(i,j)皆允許由車道 p 與 p+1 紓解，則根據上述假設，兩車道的流量因子(flow factor)應該相等。此處的流量僅探討一般車道的混合車流(q₁)，待轉區流量(q₂)沒有相鄰問題(不同方向)，因此不需調整。另外，τ_{ij} 表示直行汽車當量(through car unit, TCU)，目的是將不同轉向之車流轉換為直行方向之基礎以方便比較。本研究引用之直行汽車當量如表 4-6 表示，左轉為 1.5，右轉為 1.3。

$$M \cdot (2 - \delta_{i,j,p} - \delta_{i,j,p+1}) \geq \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_T-1} (q_{i,j,p}^1 \cdot \tau_{i,j})}{s_{i,p}} \right) - \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_T-1} (q_{i,j,p+1}^1 \cdot \tau_{i,j})}{s_{i,p+1}} \right) \geq -M \cdot (2 - \delta_{i,j,p} - \delta_{i,j,p+1}) \quad (4.34)$$

表 4-6：直行小汽車當量表

直行車當量(TCU)	左轉	直行	右轉
路段 i	1.5	1.0	1.3

4.5.4 最大飽和度限制：車道的飽和度可以表示為週期內到達之車輛數大小與飽和流率比值，在車道綠燈長度內之利用率，如 4.35 式，其中 $d_{i,p}$ 為車道 p 之最大飽和度，任何流動最大之通過量比例不得大於此最大飽和度。4.36 式為 4.35 式轉換後的結果，4.37 式限制機車待轉區之最大飽和度，本研究設定一般車道之最大飽和度為 0.90，機車待轉區的最大飽和度為 0.95。考量實際機車於待轉區停等時常有超出停等範圍之現象，且待轉區無停等空間時機車仍可在待轉區與行人穿越道標線或停止線之空間停等，因此採用此一數值。

$$\frac{y_{i,p}}{\Phi_{i,p} + e \cdot \zeta} \leq d_{i,p}, \quad y_{i,p} = \frac{\sum_{j=1}^{N_T-1} (q_{i,j,p}^1 \cdot \tau_{i,j})}{s_{i,p}} \quad (4.35)$$

$$d_{i,p}^1 \cdot s_{i,p}^1 (\Phi_{i,p}^1 + e \cdot \zeta) \geq \sum_{j=1}^{N_T-1} (q_{i,j,p}^1 \cdot \tau_{i,j}) \quad (4.36)$$

$$d_{m,r}^2 \cdot s_{m,r}^2 (\Phi_{m,r}^2 + e \cdot \zeta) \geq q_{m,k,r}^2 \quad (4.37)$$

4.6 分流號誌限制式

單一路口號誌模式除了上述三種號誌、車道與流動限制式，本研究加入分流號誌相關限制式。由於機車左轉待停區被視為獨立的流動群組，基於安全考量，兩段式左轉的機車紓解號誌需與直行車道號誌互相配合，避免形成衝突。另外，本研究以汽、機車啟動延滯作為分流基礎，兩者影響待轉區流動與直行車道的綠燈起始時間差異，詳細內容於 4.6.1 與 4.6.2 節敘述。

4.6.1 分流號誌限制式：一般車流紓解時，在綠燈前段至車流達飽和紓解前，綠燈未充分利用的時間稱為啟動延滯。由於機車與汽車的駕駛特性、加速性能不同，機車通常於綠燈始亮前即啟動，啟動延滯為 0 秒甚至負值，過去也有針對行人倒數計時器對汽、機車啟動延滯影響分析(蘇昭銘等人，2008)。汽車一般加速所需時間較長，啟動延滯較大，與機車明顯不同，特別是路口汽、機車混合紓解的情況下，汽、機車啟動延滯的差異，加上車輛彼此干擾，不僅在紓解時容易產生碰撞，增加肇事機率，此加速、減速過程也容易導致路口額外延滯(extra delay)的增

加。當前方停等區機車混合比較小，啟動延滯差異並不明顯；若機車混合比增加則啟動延滯差異影響更為明顯。因此，此分流限制式如 4.38 式表示，一般車道流動綠燈亮起時間須大於前方待轉區綠燈始亮時間加上兩者啟動延滯差值，此差異不僅考量機車的啟動延滯，同時減去汽車啟動延滯避免不必要的綠燈浪費。本研究根據錄影之新生南路與羅斯福路車流資料進行參數校估，得到機車啟動延滯值為 1.694 秒，汽車為 3.556 秒，詳細參數校估方法將於第六章說明。

$$\theta_{i,j}^1 \geq \theta_{m,k}^2 + (a_{m,k}^2 - a_{i,j}^1) \cdot \zeta \quad (4.38)$$

4.6.2 分流時相限制式：4.6.1 節說明汽、機車綠燈啟動時間的差異，而機車待轉區的綠燈結束時間也需與一般車道直行車流的綠燈時間一致，避免前方綠燈結束而後方車道綠燈仍然持續而導致車輛追撞情形，以 4.39 式表示。

$$\theta_{i,j}^1 + \phi_{i,j}^1 = \theta_{m,k}^2 + \phi_{m,k}^2, \quad j = 2 \quad (4.39)$$

4.7 其他限制式

其他相關限制式包含相對流動安全性限制與路口對稱限制式，屬於實務上幾何配置的安全議題，於模式車道最佳化後再進行調整，詳細說明如 4.7.1 與 4.7.2 說明。

4.7.1 相對流動安全限制：對於路段 i 車道 p 之直行流動而言，若該流動為允許流動，表示其對向對應之車道必須為離開車道以確保車輛可以安全通過路口。換言之，兩相對路段之進入與離開車道必須形成安全之鍵結關係，以 4.40 式表示。舉例說明，若第一路段($i=1$)的第一車道($p=1$)為進入車道，則對其直行流動($j=2$)而言，第三路段($i=3$)的第八車道($p=8$)不得為進入車道，讓第一路段的直行流動可以通行，限制其為離開車道，如圖 4-6 說明。對於第二、第三與第四車道也是相同道理，分別限制對向第七、第六、第五車道為離開車道。

$$1 - \beta_{\Gamma(i,J(j)),K(i,p)} \geq \delta_{i,J(j),p} \quad (4.40)$$

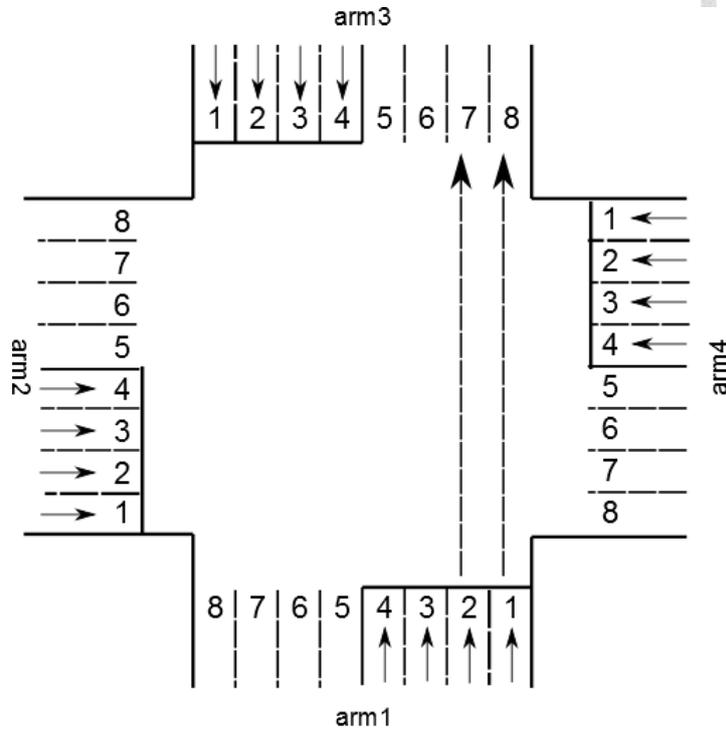


圖 4-6：相對流動安全限制說明

4.7.2 路口對稱限制：基於安全考量，相對之路段其中一方進入車道數不得大於對方之離開車道數，保障直行車流免於車道縮減而造成通過路口時車流的交織行為，增加車輛碰撞的機率。此限制式另一作用是讓兩相對路段其進入車道數與離開車道數比例趨於一致，使車道分佈較為對稱，避免路口幾何突然改變造成駕駛人不及反應發生危險，此為實務上之調整限制式，如 4.41 式表示。

$$\sum_p \beta_{i,p} \leq e_{\Gamma(i,j)}, \quad \forall i = 1, \dots, N_T, j = i + 2 \quad (4.41)$$

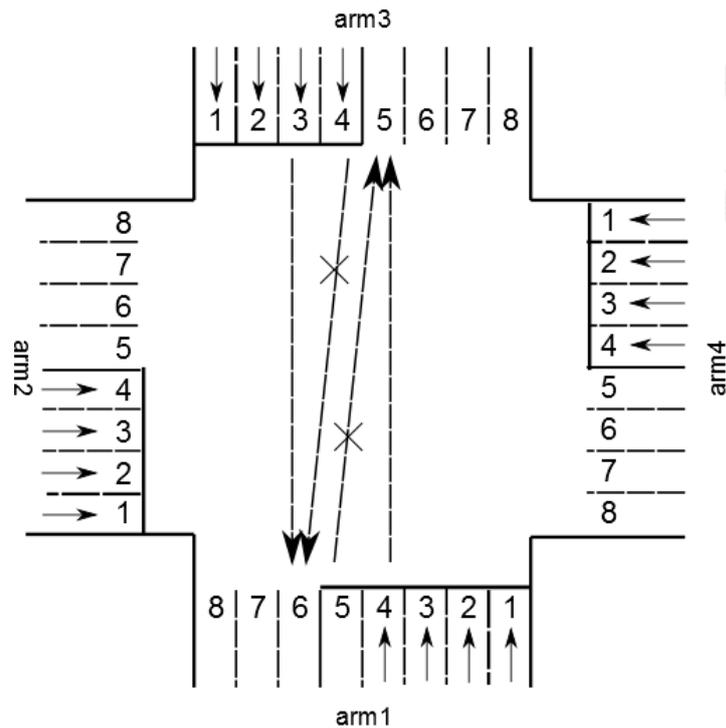


圖 4-7：路口車道對稱限制說明

4.8 目標函數

第一階段的單一路口模式以最大化路口剩餘容量(maximum reserve capacity)為目標進行求解。在以群組為基礎，將每一車道視為獨立流動的設計方法之下，以不大於車道最大飽和度為原則，各方向每一車道所能指派的最大流量總和決定路口容量大小。無論流量低或流量高的情境，此號誌時制乃根據路口容量最大而逐步收斂的結果，而非以延滯公式進行求解。在混合車流環境下，延滯的計算相對複雜，汽車與機車的延滯需分開處理，而套用 Webster 或 HCM 的延滯公式具有許多前提假設(車輛到達分配)，延滯的組成不盡相同，而採用的參數也不適用國內車流環境。

$$Max \quad \mu^+ = \mu^l \quad (4.42)$$

第五章 路網動態車流號誌最佳化模式



5.1 巨觀車流模式

車流的到達屬於隨機過程，而車輛彼此的互動關係容易放大為車隊群體的行為，形成特定的型態，這些型態不僅影響車道空間的利用、車輛的推進，更對號誌時間的準確性。尤其在混合車流環境下，車流干擾程度擴大，號誌時制無法反映真正的車流變化，當車流產生鉅變(catastrophe)時容易造成介面的不連續(phase discontinuous)，而這些不連續範圍往往是影響號誌時制演算的關鍵。因此，本研究延續 Liu and Chang(2011)的模式架構，加入混合車流元素，建立汽、機車由車輛產生、路段推進至群組紓解的動態交通方程式，描述車流依時階的變化行為。在車種處理上，本研究雖以分流概念建立模式，但在車流運動過程採用「混流推進，分流紓解」之想法，原因在於汽、機車於路段推進時行為較一致，可依不同車道限制建立群組，並以面積當量(area equivalent)轉換為相同推進基礎。在路口紓解上，由於汽、機車車隊形成方式不同，紓解過程也有時間先後差異，有別於過去研究僅考慮單位時間可紓解的「量」，本研究考量這些待紓解的量具有時間差異，而非一次紓解，將其推廣為二維平面群組化之紓解型態方程式以描述此現象。因此，本章模式的研究範圍由單一路口延伸至路網，考慮路段之間匯入與紓解的關係、流量守恆的限制進行路網整體號誌的最佳化。研究內容則以面積車流為基礎建立各個車流演變步驟(traffic evolution processes)之動態方程式，並將結果反映在號誌時制輸出上。

由於道路幾何空間屬於長期、靜態、變動性小之設計，車流乃短期、動態、瞬息萬變之狀態，兩者整合上必須分開處理。因此，本研究第一階段先根據汽、機車需求求解道路最佳幾何配置；第二階段在固定的幾何條件下，根據車流型態之變化決定號誌時制輸出結果。

5.2 模式建立流程

路網號誌最佳化模式具有路段與路段的車流交互關係，因此必須將車流演變過程根據其行為切分為範圍較小的內容以便追蹤。本研究之由上游路口、路段至下游路口的車輛運動過程可分為混合車流需求匯入、需求到達、群組推進、車道影響、等候型態產生、分車道紓解與流量守恆等七個步驟。

車輛由路網端點產生後，依時階進入端點路段(source link)，由需求匯入模組考量道路可容納空間決定汽、機車進入量。需求進入路段後，計算其到達量，並由群組推進模組規範汽、機車進入不同車道群(lane groups)。本研究將推進過程分為快車道與混合車道兩個群組，根據其速度與密度關係依時階的推進量，準備匯入目標車道。考量高流量下車隊的溢流與車道阻塞的過飽和現象，匯入車道流量需經由車道溢流影響模組修正實際可匯入量。此時階下的汽、機車匯入量具有其車隊密度與推進速率，依據此兩種交通參數計算形成停等型態的車隊長度。另外，混合車道的停等結構較為複雜，汽、機車車隊長度、到達先後順序影響型態的發生，由等候車隊模組決定每一個型態的車輛數。而車隊的紓解需由號誌時間判斷其路權，在綠燈時間內才具有車道紓解量。然而停等的車隊不一定能在單一週期內完全紓解，受到車隊長度、週期時間大小而有差異，因此本研究加入流動型態模組，推導以衝擊波為構圖之動態演變方程式，計算依時階由停等型態轉變為流動型態之待紓解車輛進入分車道紓解程序。上述六個步驟為單一路段內的車流演變流程，藉由流量守恆模組保障車輛進入下一路段時不會無故消失，維持車流的連續性。本研究的混合車流路段推進、車道影響、等候型態形成、分車種紓解過程說明以圖 5-1 表示。由此圖可以發現汽、機車根據快車道、混合車隊型態決定其欲匯入的目標車道，而各車道根據匯入量形成等後車隊，再根據不同車道依序紓解。本研究的車道群組分為三種：左轉彎、內側快車道與外側混合車道，每一個群組可能包含一個至多個車道。而機車左轉量則匯入兩段式左轉待停區待轉，與混合車道直行車流一起紓解。

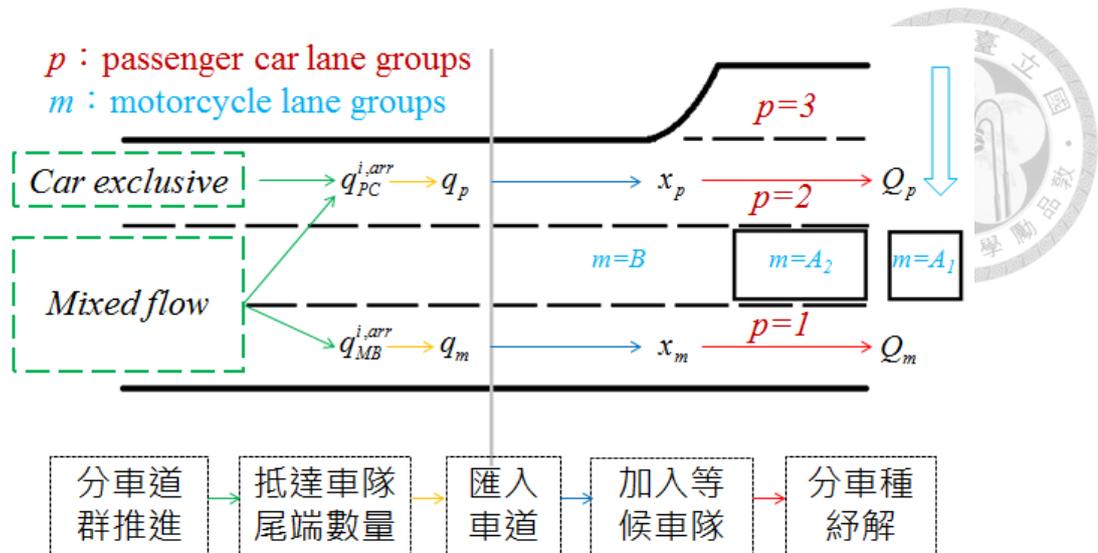


圖 5-1：混合車流分車道路段演變過程

根據圖 5-1，本模式將依時性(time-dependent)車流變化過程以及不同車道的推進數量的分為以下步驟說明：

1. 上游需求匯入：由端點分別產生汽、機車的需求量，此為模式的輸入項，可由交通調查資料而得或模式假設。而需求又分為端點進入需求(source link entry demand)與路段匯入需求(upstream entry demand)。
2. 需求到達：針對進入路段的汽車與機車數量以車輛實體面積轉換為混入的總面積，根據其需求來源分為端點流量到達與路段各方向流量到達。到達的汽、機車流量轉換為面積表示，準備進入群組推進模組。
3. 群組推進：由到達的總面積轉換為分車道的汽車與機車數，根據快車道與混合車道的推進公式計算通過量，不同佔有密度水平下以不同速率推進，再修正汽、機車的個別速率。基於車道面積與車種面積差異導致佔有率的誤差，本研究引入密度修正因子(density adjusted factor)，根據汽車數與機車數多寡調整因子大小。然而除了車輛數的影響，此因子隨著汽車依時階動態車長有所不同，在模式中也引入動態車長與車速的時間前後關係式進行計算，以符合實際混合車流情況。

- 
4. 車道影響：每一個時階匯入各車道群組的車輛數受限於車道儲車空間(lane storage space)與車道溢流(lane spillover)的情形，實際匯入量不完全等於需求量。本研究以車道溢流矩陣描述不同車道群之間車隊干擾程度，分為部分阻隔(partial block)與完全阻隔(absolute block)。部分阻隔則車流匯入量以固定比例折減，完全阻隔則匯入量為 0。
 5. 等候型態產生：各車道之汽、機車匯入後，由本研究定義之等候型態之上、下游關係形成等候車隊。快車道與混合車道型態種類、組成不同，主要分為停等型態(stopping pattern)與移動型態(moving pattern)。停等型態等候線之累積係由上游車隊的密度、速度推進所組成，而移動型態則根據由停等型態轉換的依時階啟動之車輛所決定。
 6. 分車道紓解：移動型態之汽、機車於綠燈時相由各車道群紓解，紓解量受限於移動車輛數大小、停等車輛多寡與不得大於車道最大紓解率，避免紓解速度過快。機車兩段式左轉待停區之機車同樣根據號誌時相依時間紓解。
 7. 流量守恆：由各路段紓解之車輛，必須保證其通過路口至下游路段，而下游路段若有殘餘車輛，上游匯入量須受到下游車道儲車空間限制。另外，上週期未紓解之停等車隊成為下一週期該路段的起始車輛數，前一時階車道溢流之車輛累積至下一時階的潛在匯入量，而停等於路網外之車輛需求則根據下一時階路段是否有剩餘儲車空間決定其進入與否。上述情況以連續車流之時間前後方程式處理，維持流量守恆。

根據上述 7 個步驟可以推算汽、機車於路段運動過程之車流變化，考量道路幾何空間、下游號誌影響、車種差異建立模式。另外，本研究進一步考慮車道化的差異，引進車道群組概念，將快車道與混合車道分開推進，再將通過量予以加總。此路段推進模式構想來自 DynaMIT【56】所使用之密度與速度方程式，將路段車輛區分為行駛中與停等車輛兩種不同型態(pattern)，並以移動中車輛與可

移動面積定義路段密度。此表示法不僅推進速率計算較為精準，減除停等車輛之誤差，同時把停等車輛對移動車輛影響納入模式，更接近現實車流狀況。除此之外，分車道建立模式也能克服台灣道路環境車種組成複雜、混流情形普遍的問題，預期對號誌時制輸出績效更佳。第二階段模式詳細運作流程如圖 5-2 所示。

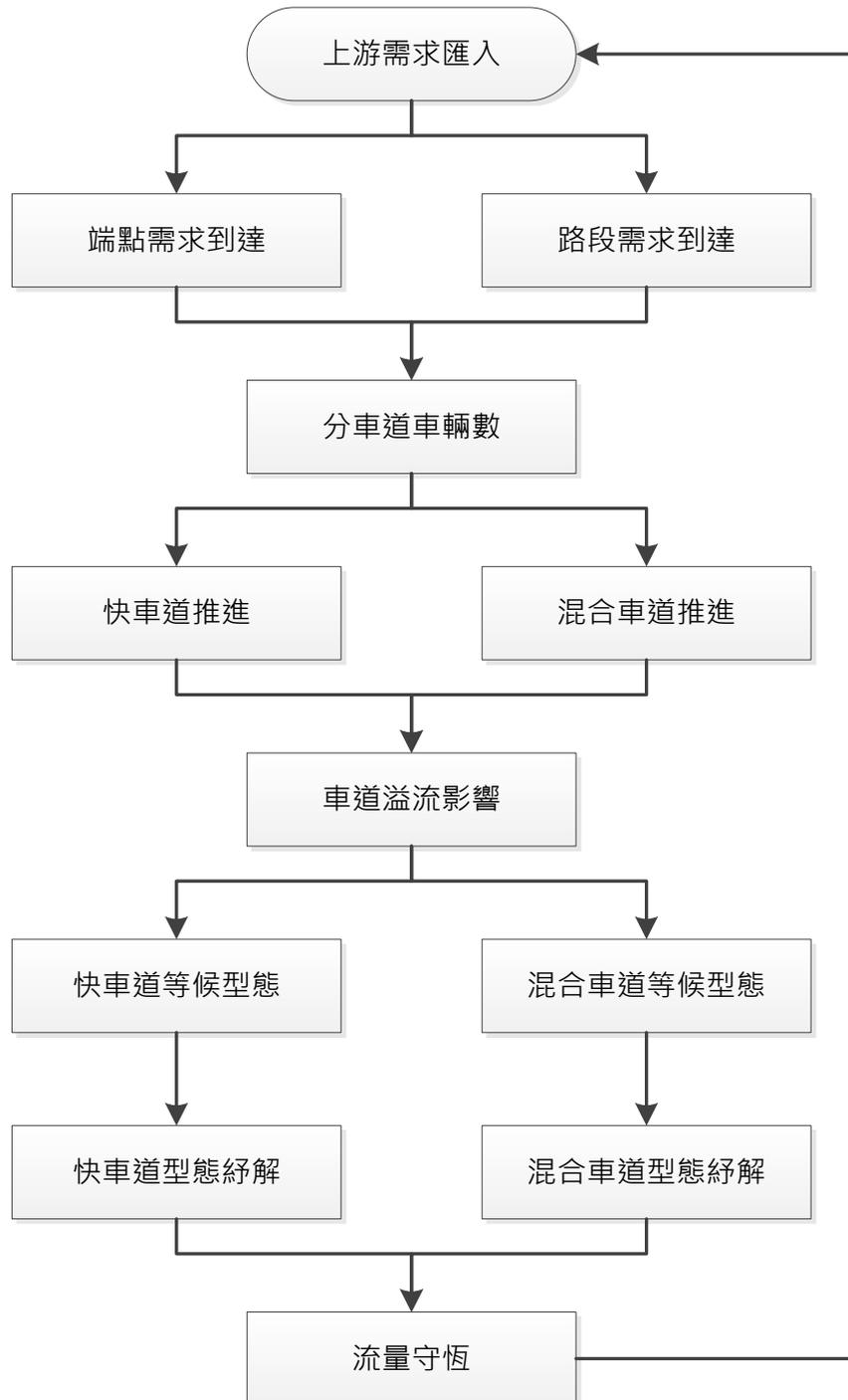


圖 5-2：第二階段動態交通演變模式流程圖

5.3 面式車流理論

為了描述混合車流於路段推進行為，使多車種的問題適用同一計算基礎，本研究以面式車流作為模式建立的準則。面式車流理論(Area traffic flow theory)乃將傳統「車輛」的觀念轉換為「面積」的方式表示，在空間上具有二維推進的概念，描述車輛於道路中運動行為。根據許勝翔【31】的研究，將機車轉換為小汽車當量數(PCU)所得到的號誌時制績效雖然較 Synchro 軟體輸出的結果佳，但 PCU 仍無法完全表達不同車種車輛的差異，特別是機車於車道之間鑽行與等候線不規則排列的行為，隨著機車混合比增加或流量趨於飽和與過飽和時差異尤其明顯。本研究提出一套適用國內混合車流路段推進行為的模式，採用面積取代傳統車流中以「輛(vehicle)」作為計算基礎的理論，其優點為避免將機車直接轉換為小汽車當量計算，當機車數量多時容易高估延滯而造成誤差。除此之外，動態面積更能突顯不同車輛佔用車道情形以及與路段推進速率間的交互關係。表 5-1 整理傳統車流理論與面式車流理論之異同作為後續建構模式的依據。

表 5-1：傳統車流與面式車流之差異比較

項目 \ 模式	傳統車流	面式車流
車輛表示	以「輛」為基礎	轉換為「面積」
車道概念	一輛車佔用一車道	改用面積，同一車道可包含汽車與機車
空間意義	僅有車輛長度的一維空間概念	包含不同車種長度、寬度的二維表示法
轉換基準	小客車當量(PCE)	不同車種實體面積的乘積
流量單位	輛/小時/車道	平方公尺/小時/公尺
密度計算	輛/公里	佔有比例

根據表 5-1，面式車流打破傳統車流與當量的概念，車輛不再個別計算而是轉換成面積成為一個集合，就物理意義而言面式車流更能表達車輛流動特性。為了方便不同車種面積換算，本研究對於汽車與機車實體與靜態車長、車寬之數值表示如表 5-2。此表為平均值，不考慮不同廠牌、容量之汽、機車實體差異。經計算後汽車平均實體面積為 7.65 平方公尺，機車為 1.30 平方公尺，作為模式的輸入參數。至於汽、機車的動態車長與動態車寬則根據推進速率決定，並非固定數值，此部分將於 5.4 節詳細模式說明。

表 5-2：汽、機車之實體與靜態車長、車寬

車種 車輛尺寸	汽車	機車
實體車長(公尺)	4.50	2.00
實體車寬(公尺)	1.70	0.65
靜態車長(公尺)	5.50	2.20
靜態車寬(公尺)	2.00	1.00

5.4 動態交通演變方程式

根據 5.2 節模式建立程序，結合面式車流理論可以描述單一車輛至車流群體的依時階變化型態，以動態方程式表示。本節依序說明上游需求產生與匯入、分車種到達、群組推進、車道影響關係、等候型態形成、分車道紓解與流量守恆等子模式(sub-models)，包含每一個模式的內容、方程式、符號代表意義與圖例說明。

5.4.1 上游需求匯入模式

車輛於路段行駛前需預先得知需求大小，才能決定依時階的進入量。本模式車輛需求分為端點需求與路段需求，包含汽車與機車，至於是否具有需求匯入端

賴欲分析路段是否連結需求產生點。本研究將汽車與機車需求量分開計算，同時考量路段前一時階等候進入路段需求、路段儲車空間限制，其計算式表示如 5.1 至 5.8 式。5.1 公式表示每一個時階實際可進入路網的汽車數，除了需求大小還需加上等候進入量，同時與汽車最大需求流率、路段儲車空間三者取最小值。機車的需求公式則如同 5.2 所示。至於汽、機車依時階等候車輛數則由 5.3 式、5.4 式決定，此兩式為時間前後關係式，上一時階未進入車輛保留至下一時階，加上下一時階的需求量減去已匯入的汽、機車數量。

$$IN_r^{PC}[k] = \min \left\{ D_r^{PC}[k] + \frac{wi_r^{PC}[k]}{t}, Q_i^{PCT,Max}, \frac{s_i[k]}{t} \right\} \quad (5.1)$$

$$IN_r^{MB}[k] = \min \left\{ D_r^{MB}[k] + \frac{wi_r^{MB}[k]}{t}, Q_i^{MB,Max}, \frac{s_i[k]}{t} \right\} \quad (5.2)$$

$$wi_r^{PC}[k+1] = wi_r^{PC}[k] + (D_r^{PC}[k] - IN_r^{PC}[k]) \cdot t \quad (5.3)$$

$$wi_r^{MB}[k+1] = wi_r^{MB}[k] + (D_r^{MB}[k] - IN_r^{MB}[k]) \cdot t \quad (5.4)$$

$IN_r^{PC}[k]$: 第 k 時階端點 r 的進入汽車數

$IN_r^{MB}[k]$: 第 k 時階端點 r 的進入機車數

$D_r^{PC}[k]$: 第 k 時階端點 r 的汽車需求量

$D_r^{MB}[k]$: 第 k 時階端點 r 的機車需求量

$wi_r^{PC}[k]$: 第 k 時階端點 r 的等候進入汽車量

$wi_r^{MB}[k]$: 第 k 時階端點 r 的等候進入機車量

$Q_i^{PCT,Max}$: 路段 i 直行汽車最大紓解率(輛/小時)

$Q_i^{MB,Max}$: 路段 i 機車最大紓解率(輛/小時)

$s_i[k]$: 第 k 時階路段 i 的最大儲車空間

由於 5.1 式與 5.2 式的路段儲車空間(s_i)須同時考量汽車與機車，延續 5.2 節所提出之面式車流理論，將此兩式合併計算，以汽、機車實體面積將兩者轉換為單位時間可匯入的總面積，如 5.5 式。5.6 式代表機車需求面積占總面積之比例大小。

$$INtext[k] = \min \left\{ \begin{array}{l} \left[D_r^{PC}[k] + \frac{wi_r^{PC}[k]}{t} \right] \cdot A^{PC} + \left[D_r^{MB}[k] + \frac{wi_r^{MB}[k]}{t} \right] \cdot A^{MB}, \\ Q_i^{PCT,Max} \cdot A^{PC} + Q_i^{MB,Max} \cdot A^{MB}, \\ \frac{s_i[k]}{t} \end{array} \right\} \quad (5.5)$$

$$MECIR[k] = \frac{\left(D_r^{MB}[k] + \frac{wi_r^{MB}[k]}{t} \right) \cdot A^{MB}}{\left(D_r^{PC}[k] + \frac{wi_r^{PC}[k]}{t} \right) \cdot A^{PC} + \left(D_r^{MB}[k] + \frac{wi_r^{MB}[k]}{t} \right) \cdot A^{MB}} \quad (5.6)$$

A^{PC} : 汽車實體面積(平方公尺)

A^{MB} : 機車實體面積(平方公尺)

$INtext[k]$: 第 k 時階端點 r 的可進入車種總面積(平方公尺)

$MECIR[k]$: 第 k 時階端點 r 的欲進入機車面積比例

由於機車只能匯入混合車道，因此先分配給機車需求面積，再將剩餘車到空間分配給汽車匯入量，再個別除上實體面積換為車輛單位。5.7 式與 5.8 式表示機車潛在進入量受到車道機車儲車空間限制。

$$IN_{r,pot}^{MB}[k] = \max \{ MNI - x_i^{MB}[k], 0 \} \quad (5.7)$$

$$MINP[k] = \min \left\{ INtext[k] \cdot MECIR[k] / A^{MB}, \frac{s_i[k]}{t} \cdot \frac{n_i^{Mix}}{n_i}, \frac{IN_{r,pot}^{MB}[k]}{t} \right\} \quad (5.8)$$

$IN_{r,pot}^{MB}[k]$: 第 k 時階端點 r 的潛在進入機車數

MNI : 機車最大儲車空間



NI : 汽車最大儲車空間

$x_i^{MB}[k]$: 第 k 時階段路段 i 的機車數量

$MINP[k]$: 第 k 時階段端點 r 實際可匯入機車數量

n_i^{Mix} : 路段 i 混合車道數

n_i^{Exc} : 路段 i 快車道數

n_i : 路段 i 總車道數

機車需求匯入後，汽車匯入量等於可匯入總面積扣除機車進入面積，將此面積除上汽車實體面積即為單位時間該路段可進入汽車數，如 5.9 式與 5.10 式。

$$IN_r^{MB}[k] = \max \{MINP[k], 0\} \quad (5.9)$$

$$IN_r^{PC}[k] = \frac{(IN_{text}[k] - IN_r^{MB}[k] \cdot A^{MB})}{A^{PC}} \quad (5.10)$$

$IN_r^{MB}[k]$: 第 k 時階段端點 r 的進入機車數

$IN_r^{PC}[k]$: 第 k 時階段端點 r 的進入汽車數

此模組加入車道空間與容量的限制可以確保模式端點不會產生需求過大情形，隨著模擬時間推進車輛逐漸分配進入路網，控制路網內車輛正常運行，同時適用於未飽和與過飽和的車流情況。

5.4.2 車輛需求到達模式

端點車輛需求產生後，根據實際進入路段汽、機車數量計算路段推進前的總數，分為端點到達量與路段到達量。端點到達量直接由需求產生點匯入加總，而路網內部路段到達則由各轉向流量的總合，以 5.11 式與 5.12 式表示。在模擬初始僅有由端點進入的流量，之後再根據轉向比決定每一部車的目標路徑而逐漸通過路網。



$$q_{i,source}^{in}[k] = (IN_r^{PC}[k] + IN_r^{MB}[k]) \cdot t \quad (5.11)$$

$$q_{i,internal}^{in}[k] = \sum_{j \in i^{-1}} (Q_{j,i}^{PC}[k] + Q_{j,i}^{MB}[k]) \cdot t \quad (5.12)$$

$q_{i,source}^{in}[k]$: 第 k 時階端點需求路段到達總車輛數

$q_{i,internal}^{in}[k]$: 第 k 時階路網內部路段到達總車輛數

$Q_{j,i}^{PC}[k]$: 第 k 時階由上游路段 j 匯入之轉向汽車數

$Q_{j,i}^{MB}[k]$: 第 k 時階由上游路段 j 匯入之轉向機車數

需求到達後需分配快車道與混合車道的汽、機車比例，快車道汽車數根據路段總汽車數與快車道數與總車道數比例乘積進行分配，其餘進入混合車道群組；機車則只能匯入混合車道，與混合車道之汽車成為該群組的推進基礎量。

$$N_i^{Exc}[k] = N_i^{PC}[k] \cdot \frac{n_i^{Exc}}{n_i^{Exc} + n_i^{Mix}} \quad (5.13)$$

$$N_i^{Mix}[k] = N_i^{PC}[k] - N_i^{Exc}[k] \quad (5.14)$$

$$MN_i^{Mix}[k] = N_i^{MB}[k] \quad (5.15)$$

$N_i^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道汽車數

$N_i^{Mix}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽車數

$MN_i^{Mix}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道機車數

$N_i^{PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 汽車總數

$N_i^{MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 機車總數

5.4.3 車道群組推進模式

本研究將車輛於路段推進行為以群組化區分，目的在於快車道與混合車道車輛組成不同，快車道屬於均質車流(homogeneous flow)，其推進方式可以一般速度與密度定義進行計算；然而混合車道具有汽、機車不同組成的異質車流(heterogeneous flow)特性，推進上較為困難。在許勝翔【31】的研究中，將 Liu 與 Chang【81】的模式修正為適用於混合車流的情況，利用小客車當量進行機車當量轉換。早期雖有使用動態小汽車當量描述不同混合比與不同流量狀態下，機車具有不同之小客車當量數之研究【43】，但該研究目前只進行至一定之混合比、一定流量範圍內，筆者認為應有其他因素影響機車的車流行為。當機車受到周遭車輛壓迫，機車傾向朝最大車道空間或最有利的行駛方向移動，其車速震盪變異較大，影響整體車隊推進速率。另外，機車於車道中的位置也會影響推進速率，若是未在汽車車隊前方則行駛速率較大；若是處於跟車行為或在兩車之夾縫中穿行則車速受到限制相對較低。此雖然屬於較微觀的論點，但巨觀而言，整體機車推進速率應有不同。本研究延續 DynaMIT 密度計算方法，定義研究路段可移動之空間，同時利用車輛單位面積的概念取代小客車當量，反應出機車的流動特性，將快車道與混合車道分開計算，以防止分車道紓解時，若機車流量較大會將機車車流分配至快車道進行紓解，不符合車道通行限制，故將車道群組分為快車道與混合車道兩種，汽、機車分別乘上實體面積，將其轉換為面積的概念。此處密度與傳統車流密度定義不同，不再以每車道單位距離車輛數為基礎，改以每單位面積被車輛佔有比例來描述，將線密度(linear density)轉換為面密度(area density)概念，是一個不具單位的比例。此比例計算方法如 5.16 式與 5.17 式，前者代表快車道汽車佔有比例之算法，根據汽車佔有快車道實體空間之比例(考量路段長、車道寬與車道數)，並以密度修正因子調整實際佔有面積大小。混合車道之計算方法類似快車道，但密度修正因子僅調整汽車部分，機車實體面積即佔有面積，避免重複修正造成佔有比例過大，影響車道密度的準確性。此密度表示方法可以

用來解決傳統車流分析方式較難以表達機車之部份。由於、汽機車之間不同的混合比，反應出不同的車流狀況，汽車具有車道化的概念，故有車隊的形成；而機車在路段推進時則會有於車隊中鑽行的行為，只受道路容量之影響。在混合比高情況下，機車由於數量較多，使得汽車的行駛速率下降，無法以自由行駛速率在路段作推進，故在混合車道的部分汽車實際佔有的面積就會隨著混合比的增加而減少，因此混合車道密度修正因子(γ^{Mix})之目的即修正混合車流實際所佔有之面積大小。

$$\rho_i^{Exc}[k] = \gamma_i^{Exc}[k] \cdot \frac{N_i^{Exc}[k] \cdot A^{PC}}{L_i \cdot a_i^{Exc} \cdot n_i^{Exc}} \quad (5.16)$$

$$\rho_i^{Mix}[k] = \frac{\gamma_i^{Mix}[k] \cdot N_i^{Mix}[k] \cdot A^{PC}}{L_i \cdot a_i^{Mix} \cdot n_i^{Mix}} + \frac{MN_i^{Mix}[k] \cdot A^{MB}}{L_i \cdot a_i^{Mix} \cdot n_i^{Mix}} \quad (5.17)$$

$\rho_i^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道汽車佔有比例

$\rho_i^{Mix}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽、機車佔有比例

$\gamma_i^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道密度修正因子

$\gamma_i^{Mix}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道密度修正因子

L_i : 路段 i 長度(公尺)

a_i^{Exc} : 路段 i 快車道寬度(公尺)

a_i^{Mix} : 路段 i 混合車道寬度(公尺)

5.18 式與 5.19 式的 γ^{Exc} 、 γ^{Mix} 為本研究定義之密度修正因子(density adjusting factors)，其意義在於修正汽車實際面積與佔有面積之差異，以及機車填入汽車間的空隙使修正幅度遞減的功用。 γ^{Exc} 在純車流僅受車道寬的影響，車道愈寬則 γ^{Exc} 值愈大，表示實際佔有面積愈大，一般市區快車道寬度以 3.0 公尺為標準，車長則定義為市區道路汽車擁擠密度之倒數，表示車頭距離；在混合車流下受到汽、

機車依時階車輛數多寡與道路寬度影響， γ^{Mix} 修正車輛實際所佔有之空間，隨著機車數量愈多，調整幅度愈小，表示汽車車輛周圍空隙已逐漸被機車填滿，佔有率趨近於 1。此調整項的優點在於反應機車在混合車道中無車道化的概念，縮減成以面積為單位，用以解決使用線密度較無法反應混合車道密度之缺陷。

$$\gamma_i^{Exc}[k] = \frac{a_i^{Exc} \cdot 1000}{\rho_{jam}^{PC} \cdot A^{PC}} \quad (5.18)$$

$$\gamma_i^{Mix}[k] = \frac{a_i^{Mix} \cdot \bar{l}[k] \cdot N_i^{Mix}[k]}{A^{PC} \cdot N_i^{Mix}[k] + A^{MB} \cdot MN_i^{Mix}[k]} \quad (5.19)$$

$\gamma_i^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道密度修正因子

$\gamma_i^{Mix}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道密度修正因子

ρ_{jam}^{PC} : 快車道之汽車擁擠密度(輛/公里)

$\bar{l}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽車動態車長(公尺)

快車道密度修正項之車長為汽車擁擠密度下的倒數，意謂車輛在擁擠密度下所佔有之長度，與車道寬度相乘後即為車輛所佔有之面積。若直接使用單位面積來表達車輛所佔有之面積會產生誤差，畢竟車輛之間不會完全緊貼著推進，車輛之間還是存在橫向與縱向之最小安全間距，故利用擁擠密度下車輛間距最小時的情況修正車輛面積，使其變為與周邊車輛具有最小橫向間距與最小縱向間距下所佔有面積，圖 5-3 為快車道純汽車密度修正因子之示意圖，圖中灰色部分即為汽車佔有面積大小。

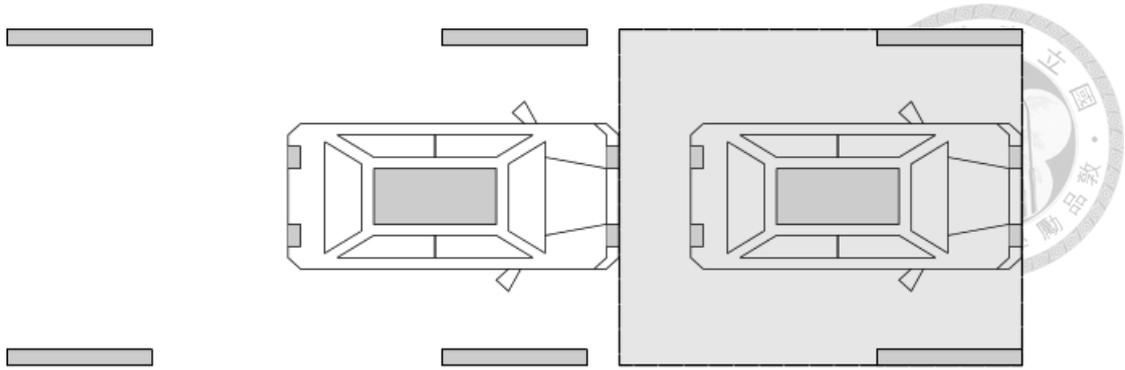


圖 5-3：快車道純汽車密度修正因子示意圖

混合車流環境下的密度修正因子除了車道寬的因素外，尚加入機車數量的影響，不再以擁擠密度下汽車佔有長度進行修正，而以汽車的動態車長作為實際佔有路段長度。動態車長的定義係車輛於不同速率下與前、後車的縱向影響範圍，其值大於靜態車長，與駕駛人反應時間有關，隨著速率愈快，動態車長愈長。當機車數量增多，代表機車填入汽車縱向與橫向間距的機率愈大，因此 γ^{Mix} 逐漸減少，直到混合車道擁擠密度之臨界點。圖 5-4 說明混合車道修正佔有密度之概念，如同灰色面積為修正之佔有比例，包含汽車與機車的影響。

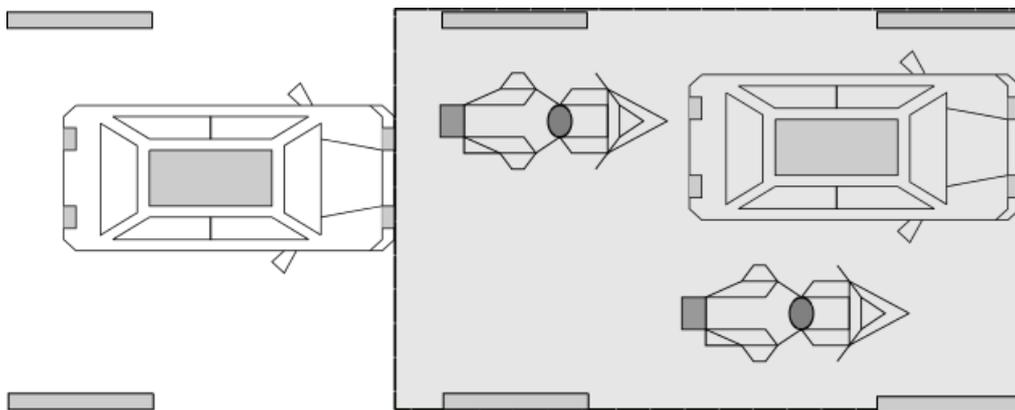


圖 5-4：混合車道密度修正因子示意圖

根據 5.18 式、5.19 式快車道與混合車道密度修正因子的定義，此修正項乃調整車輛佔有之外的車道剩餘面積，其值必須大於或等於 1。等於 1 的情況代表所有車輛完全佔有車道面積，沒有任何剩餘空隙，因此不需調整實體面積與佔有

面積差異。然而，在實際車流環境中發生密度修正因子等於 1 的情形機率很小，原因在於汽、機車於行駛與停等過程至少保留車輛的安全間距，不會產生車輛完全緊貼行駛狀況。在巨觀混合車流模式中，為了描述機車於車隊中鑽行、變換行向等行為，以汽車之平均實體面積為調整項之基礎，僅修正汽車於車道中行駛之動態佔有面積內可匯入的機車比例，不考慮機車行駛佔有面積可匯入機車的比例。根據上述概念，快車道與混合車道的佔有比例不得大於 1。換言之，汽、機車最大佔有比例即為車道空間，若比例大於 1 表示出現車輛重疊之情形，於現實車流中並不合理。有了上述的邊界條件(boundary conditions)，混合車道的佔有比例可進一步分為汽車佔有比例與機車佔有比例，如 5.20 與 5.21 式，根據當下混合車道中的汽車與機車比例分配佔有密度的大小。由於汽車與機車雖然都在混合車道中推進，同樣轉換為面積車流基礎，畢竟兩者仍然有不同的組成特性。因此，在佔有比例修正後，本研究仍將汽、機車佔有比例獨立分開，以便後續分車種的推進速率計算。

$$\rho_i^{Mix,MB}[k] = \rho_i^{Mix}[k] \cdot \frac{MN_i^{Mix}[k]}{N_i^{Mix}[k] + MN_i^{Mix}[k]} \quad (5.20)$$

$$\rho_i^{Mix,PC}[k] = \rho_i^{Mix}[k] \cdot \frac{N_i^{Mix}[k]}{N_i^{Mix}[k] + MN_i^{Mix}[k]} \quad (5.21)$$

根據本研究第二章所述以及參考邱裕鈞與謝志偉【45】之研究，本研究以熵值(entropy)調整機車推進速率的差異。Bodjanova【58】提出熵值概念，用以描述族群中組成單元的同質性與分佈情形，在均勻分佈情況下熵值最大，而分佈不均情況下熵值較小。熵值大小影響系統的穩定性(stability)。當系統調整幅度愈小表示系統愈趨於穩定，各組成元素的變異較小，短時間內不會有劇烈變化；當調整幅度愈大表示系統愈不均勻，各組成元素差異大導致系統狀態必須不斷修正。若將車流環境比喻為一個開放系統，汽車與機車為系統的組成元素，其個別於路段的佔有比例代表影響系統穩定性的亂度(chaos)。此處所定義的亂度與熵值意義不

同，亂度是只針對汽車或機車個別佔有比例而言，而熵值則是兩者佔有比例差異作用後的結果，屬於系統整體數值。若群組路段推進過程中，機車與汽車的佔有比例愈相近，表示機車混合比相對較大，於路段車隊中鑽行的機率增加，因此熵值增加，車流系統推進過程較不穩定；若汽車與機車佔有比例差異較大，熵值較小，但車流系統穩定與否必須分為兩種情況討論。第一，若汽車佔有比例較大，相對而言機車自由度仍然很高，因為路段機車數較少，機車騎士可以自由行於車隊中。第二，若機車佔有比例較大，此時路段中機車較多，機車騎士的自由度受到彼此干擾而降低，系統相對又趨於穩定，符合熵值較小的情況。應用熵值計算之一般式如 5.22。針對本研究所考量混合車流之汽車與機車佔有比例調整推進速率之熵值以 5.23 表示。該式將汽車與機車佔有比例分別對數化，與原有比例乘積加總後取負值，作為 k 時階路段混合車流影響下，路段推進熵值大小(H)。關於混合車道熵值之說明如圖 5-5 說明，其中黃色表示汽車佔有面積，綠色代表機車佔有面積。圖(a)汽車與機車佔有面積相等，熵值大，但路段較為擁擠， γ^{Mix} 小，機車推進速率受到限制；(b)汽車佔有面積為機車的 2 倍，熵值小， γ^{Mix} 相較於(a)略大；(c)汽車與機車佔有面積相等，熵值大，此時汽、機車皆較少， γ^{Mix} 相對較大，機車推進速率可調整空間較多。

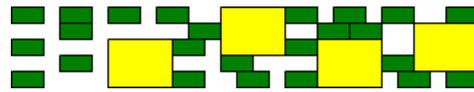
$$H(N,k) = -\sum_c \rho_i^c[k] \times \log \rho_i^c[k] \quad (5.22)$$

$$H(N,k) = -\left(\rho_i^{Mix,MB}[k] \times \log \rho_i^{Mix,MB}[k] + \rho_i^{Mix,PC}[k] \times \log \rho_i^{Mix,PC}[k]\right) \quad (5.23)$$

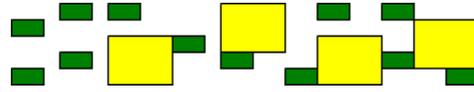
$H(N,k)$: 第 k 時階路段 i 混合車道異質車流熵值

$\rho_i^{Mix,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道機車佔有比例

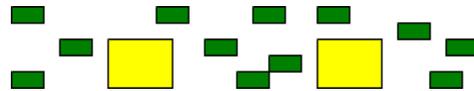
$\rho_i^{Mix,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽車佔有比例



(a) H 大, γ^{Mix} 小



(b) H 小, γ^{Mix} 小



(c) H 大, γ^{Mix} 大

圖 5-5：混合車道異質車流熵值示意圖

根據上述所定義之路段佔有密度，本研究延續 DynaMIT【56】、Liu and Chang【81】，以及許勝翔【31】等人的研究，進一步將其速度與密度方程式發展為面式車流理論下之路段速率推進方法。速度與密度關係式最早的研究包含 Greenshield (1935)、Greenberg (1959)、Edie (1961)等人以實際車流資料適配的模式，速率與密度基本上為反比與非線性關係，受限於車流樣本蒐集的多寡，每一個研究校估的參數與模式並不相同。本研究採用 DynaMIT 的相位區分方法，將路段推進速率依據最小密度(minimum density)、擁擠密度(jam density)兩個門檻分為三個區間。由於本研究以汽、機車佔有比率表達路段密度大小，此比例必須轉換為傳統單位距離最小密度與擁擠密度的定義。本研究將混合車道格位化以校估此兩門檻值，詳細校估方法將於第六章說明。有了上述兩個密度門檻，則路段推進速率計算方法根據車流密度範圍分為三個相位。當路段混合車流密度小於最小密度時，此時車流量較小，汽、機車以接近市區自由車流速率(free flow speed)於路段中推進；當混合車流密度大於擁擠密度時，流量已趨近飽和或過飽和，車

輛速率受到車道推進空間限制，僅能以最小速率(minimum speed)行駛。若車流密度介於最小密度與擁擠密度之間，則推進速率根據依時階車輛佔有比例的變化，以速率推進公式計算。關於快車道的汽車推進速率也分為三個區間，此時的最小密度與擁擠密度即以純汽車流所調查的數值作為門檻。快車道與混合車道推進速率計算如 5.24 與 5.25 式。快車道與混合車道推進速率相位區間與密度之關係圖以圖 5-6 表示，區間 1 代表密度小於最小密度情況，速率等於該車道自由車流速率；區間 2 密度介於最小與擁擠之間，速率以群組推進公式計算，屬於非線性關係式；區間 3 則是密度過大，以最小速率推進。

$$v_i^{Exc}[k] = \begin{cases} v_{i,Exc}^{free} & \text{if } \rho_i^{Exc}[k] < \rho^{\min} \\ v_{i,Exc}^{free} \cdot \left[1 - \left(\gamma_i^{Exc}[k] \cdot \frac{A^{PC} \cdot N_i^{Exc}[k]}{L_i \cdot a_i^{Exc} \cdot n_i^{Exc}} \right)^{\alpha_1} \right]^{\beta_1} & \text{if } \rho_i^{Exc}[k] \in [\rho^{\min}, \rho^{jam}] \\ v_{i,Exc}^{\min} & \text{if } \rho_i^{Exc}[k] > \rho^{jam} \end{cases} \quad (5.24)$$

$$v_i^{Mix}[k] = \begin{cases} v_{i,Mix}^{free} & \text{if } \rho_i^{Mix}[k] < \rho^{\min(\varphi)} \\ v_{i,Mix}^{free} \cdot \left[1 - \left(\gamma_i^{Mix}[k] \cdot \frac{A^{PC} \cdot N_i^{Mix}[k]}{L_i \cdot a_i^{Mix} \cdot n_i^{Mix}} + \frac{A^{MB} \cdot MN_i^{Mix}[k]}{L_i \cdot a_i^{Mix} \cdot n_i^{Mix}} \right)^{\alpha_2} \right]^{\beta_2} & \text{if } \rho_i^{Mix}[k] \in [\rho^{\min(\varphi)}, \rho^{jam(\varphi)}] \\ v_{i,Mix}^{\min} & \text{if } \rho_i^{Mix}[k] > \rho^{jam(\varphi)} \end{cases} \quad (5.25)$$

$\rho_i^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道車流密度(輛/公里)

$\rho_i^{Mix}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道車流密度(輛/公里)

ρ^{\min} : 快車道車流最小密度(輛/公里)

ρ^{jam} : 快車道車流擁擠密度(輛/公里)

$\rho^{\min(\varphi)}$: 混合車道車流最小密度(輛/公里)

$\rho^{jam(\varphi)}$: 混合車道車流擁擠密度(輛/公里)

$v_i^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道汽車推進速率(公里/小時)

$v_i^{Mix}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道車流推進速率(公里/小時)

$v_{i,Exc}^{free}$: 路段 i 快車道自由車流速率(公里/小時)



$v_{i,Exc}^{\min}$: 路段 i 快車道車流最小速率(公里/小時)

$v_{i,Mix}^{free}$: 路段 i 混合車道自由車流速率(公里/小時)

$v_{i,Mix}^{\min}$: 路段 i 混合車道車流最小速率(公里/小時)

α_1 : 快車道密度調整指數參數

α_2 : 混合車道密度調整指數參數

β_1 : 快車道速度-密度關係式指數項

β_2 : 混合車道速度-密度關係式指數項

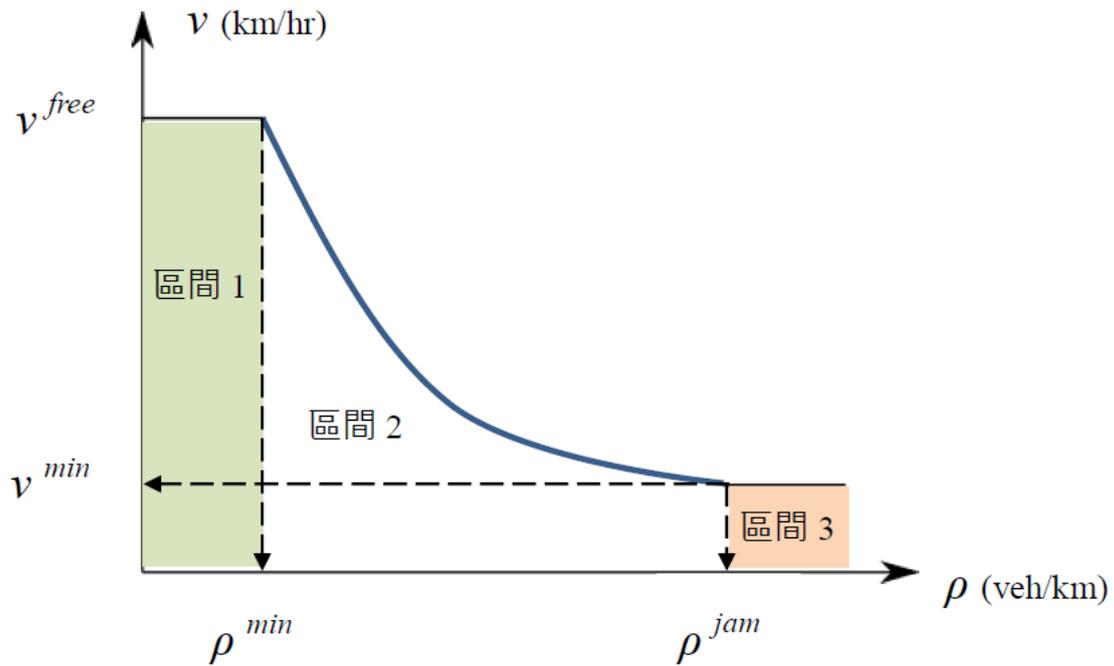


圖 5-6：路段推進速率與車流密度相位區分方法

由於快車道與混合車道車種組成不同，路段推進之車流行為也不同，反應在交通參數上的數值也不同。若將快車道與混合車道之速率與密度合併計算容易低估混合車道機車干擾情況，影響路段實際通過量。因此，本研究將快車道與混合車道分為兩種不同推進群組以圖 5-7 表示，內側快車道群組具有一組推進參數，而外側混合車道也有獨立推進參數。路段佔有比例之參數項也需要分開校估，此

速率與密度推進公式之指數項參考吳契輝【16】之研究，快車道 α_1 為 1.53， β_1 為 0.62；混合車道 α_2 為 1.51， β_2 為 2.25。該研究以市區快車道與混合車道實際車流資料，在理論推估與實際速率之平均絕對誤差值(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)屬於合理接受範圍下所校估的結果。

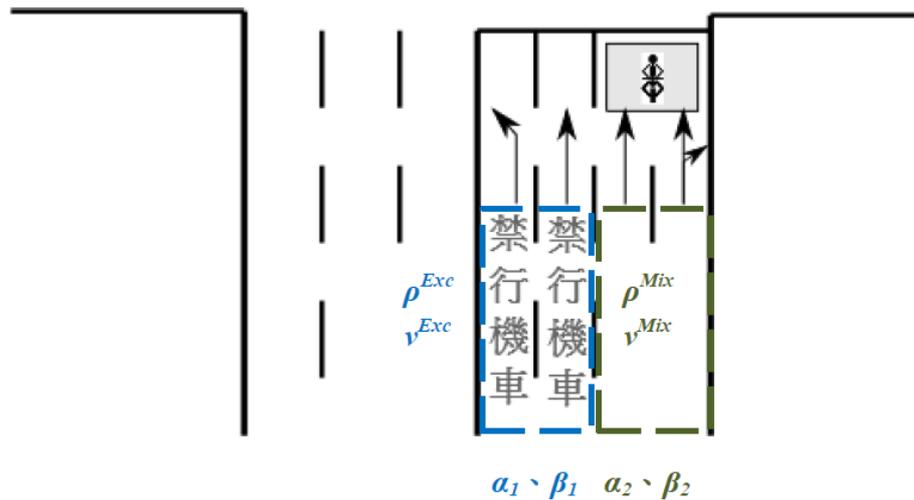


圖 5-7：不同車道群推進公式參數表示法

混合車道之車流根據上述速度與密度方程式推進後，可以計算每單位時間的車道通過量。雖然汽、機車在同一車道群組推進，但本研究於混合推進後進行分流處理，計算個別推進速率。車道群之推進速率乃汽、機車於當時車流環境下交互作用的均衡速率(equilibrium speed)，實際推進過程仍有差異，也是本研究定義車流熵值修正的目的。根據 5.23 式，混合車道汽車與機車的佔有比例差異經由對數相乘後得到表示車流異質程度的熵值，代表路段汽、機車佔有比例差異對車流擾動的影響，此擾動表現在個別推進速率上。然而，僅由熵值仍不足以判斷機車的推進速率修正幅度，若機車混合比高，但路段也呈現擁擠狀態，則機車之推進速率仍受到有限的車道空間影響而無法提升。機車的行駛的自由度須引入 5.19 式所定義之混合車道密度修正因子之作用，若 γ^{Mix} 愈大表示汽車須修正的佔有空間愈多，機車數量相對較少，因此在路段擁有相同汽車數之下，機車可以推進的

空間較大，受干擾程度小，期望推進速率應較快。在表達異質車流的熵值與機車自由度的密度修正因子兩種條件作用之下，混合車道機車於路段群組推進之速率可以表示為 5.26 式，決定路段混合車流整體推進速率後，再根據熵值(H)與密度修正因子(γ^{Mix})調整機車速率可增加之幅度。由於汽車具有車道概念，沒有機車於車輛縫隙中鑽行的行為，因此本研究假設其推進速率與原來藉由速率密度方程式計算之結果相同，不另行修正。

$$v_i^{Mix,MB}[k] = v_i^{Mix}[k] + \gamma_i^{Mix}[k] \cdot H(N, k) \quad (5.26)$$

$$v_i^{Mix,PC}[k] = v_i^{Mix}[k] \quad (5.27)$$

$v_i^{Mix,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道機車推進速率(公里/小時)

$v_i^{Mix,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽車推進速率(公里/小時)

路段均衡推進速率大小雖由密度因子進行修正，但修正之範圍長度也受到速率快慢的影響，原因在於動態車長($\bar{l}[k]$)之計算需考量後車的速度與駕駛人平均反應時間，如 5.28 式。第 k 時階混合車道汽車的動態車長除了汽車本身靜態車長(本研究採用 5.5 公尺)，加上後車之速率與駕駛人平均反應時間之乘積，而駕駛人平均反應時間假設為 1.0 秒。

$$\bar{l}[k] = l^{PC} + K \cdot \frac{v_i^{Mix}[k]}{3.6} \quad (5.28)$$

l^{PC} : 汽車靜態車長(公尺)

K : 駕駛人反應時間(秒)

由於推進速率與汽車動態車長具有時間前後關係，無法同時決定，動態車長

為推進速率作用下之結果，而動態車長影響密度修正範圍長度，對混合車道佔有比例與推進速率產生作用。為了表達動態車長與推進速率的時間前後關係，假設車流狀態短時間內未有大幅變化，前、後時階之平均速率差異不大，前一時階的平均推進速率影響下一時階的動態車長，而本時階動態車長決定推進速率，以此類推。因此，平均速率與動態車長之交互關係呈現一種遞迴變化(iteration)，顯示平均速率在模擬過程中依時性動態變化，以及動態車長與實際車流之交互關係。

本研究之動態車長與路段平均速率之遞迴關係如 5.29 式。系統模擬開始 $k=0$ 時，路網中尚無太多流量，車輛以自由車流速率推進，根據校估結果市區混合車道自由車流速率為 51.69(公里/小時)，而 $k=1$ 時的動態車長由上一時階平均推進速率所決定，一直到 $k=T$ 模擬時間結束為止。

$$\begin{aligned}
 k=0, \quad \bar{l}[k(0)] &= 5.5 + 1.0 \cdot \frac{v_i^{free}}{3.6} \\
 k=1, \quad \bar{l}[k(1)] &= 5.5 + 1.0 \cdot \frac{v_i^{Mix}[k(0)]}{3.6} \\
 &\vdots \\
 k=T, \quad \bar{l}[k(T)] &= 5.5 + 1.0 \cdot \frac{v_i^{Mix}[k(T-1)]}{3.6}
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

考量路段剩餘儲車空間限制，根據快車道與混合車道推進公式所計算之汽、機車通過量並非完全可匯入車道群組，有可能因前方車隊影響導致通過量降低。因此，快車道與混合車道的汽、機車到達量如 5.30、5.31 式表示，其中混合車道到達量轉換以面積為單位推進。本研究將路段推進過程寫成一般流程圖如圖 5-8。

$$q_{i,Exc}^{arr}[k] = \min \left[\rho_{i,real}^{Exc}[k] \cdot v_i^{Exc}[k] \cdot t, \max(N_i^{Exc}[k] - x_i^{Exc}[k] - x_i^{LExc}[k], 0) \right] \tag{5.30}$$

$$q_{i,Mix}^{arr}[k] = \min \left\{ \begin{aligned} &(\rho_{i,real}^{Mix,MB}[k] \cdot v_i^{Mix,MB}[k] \cdot A^{MB} + \rho_{i,real}^{Mix,PC}[k] \cdot v_i^{Mix,PC}[k] \cdot A^{PC}) \cdot t, \\ &\max[(N_i^{Mix}[k] - x_i^{Mix,PC}[k]) \cdot A^{PC} + (MN_i^{Mix}[k] - x_i^{Mix,MB}[k]) \cdot A^{MB}, 0] \end{aligned} \right\} \tag{5.31}$$



$q_{i,Exc}^{arr}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道汽車實際到達量(輛)

$q_{i,Mix}^{arr}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽、機車實際到達面積(平方公尺)

$\rho_{i,real}^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道實際車流密度(輛/公里)

$\rho_{i,real}^{Mix,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道機車實際車流密度(輛/公里)

$\rho_{i,real}^{Mix,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽車實際車流密度(輛/公里)

$x_i^{Exc}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道停等車輛數

$x_i^{LExc}[k]$: 第 k 時階路段 i 左轉車道停等車輛數

$x_i^{Mix,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道停等汽車數

$x_i^{Mix,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道停等機車數

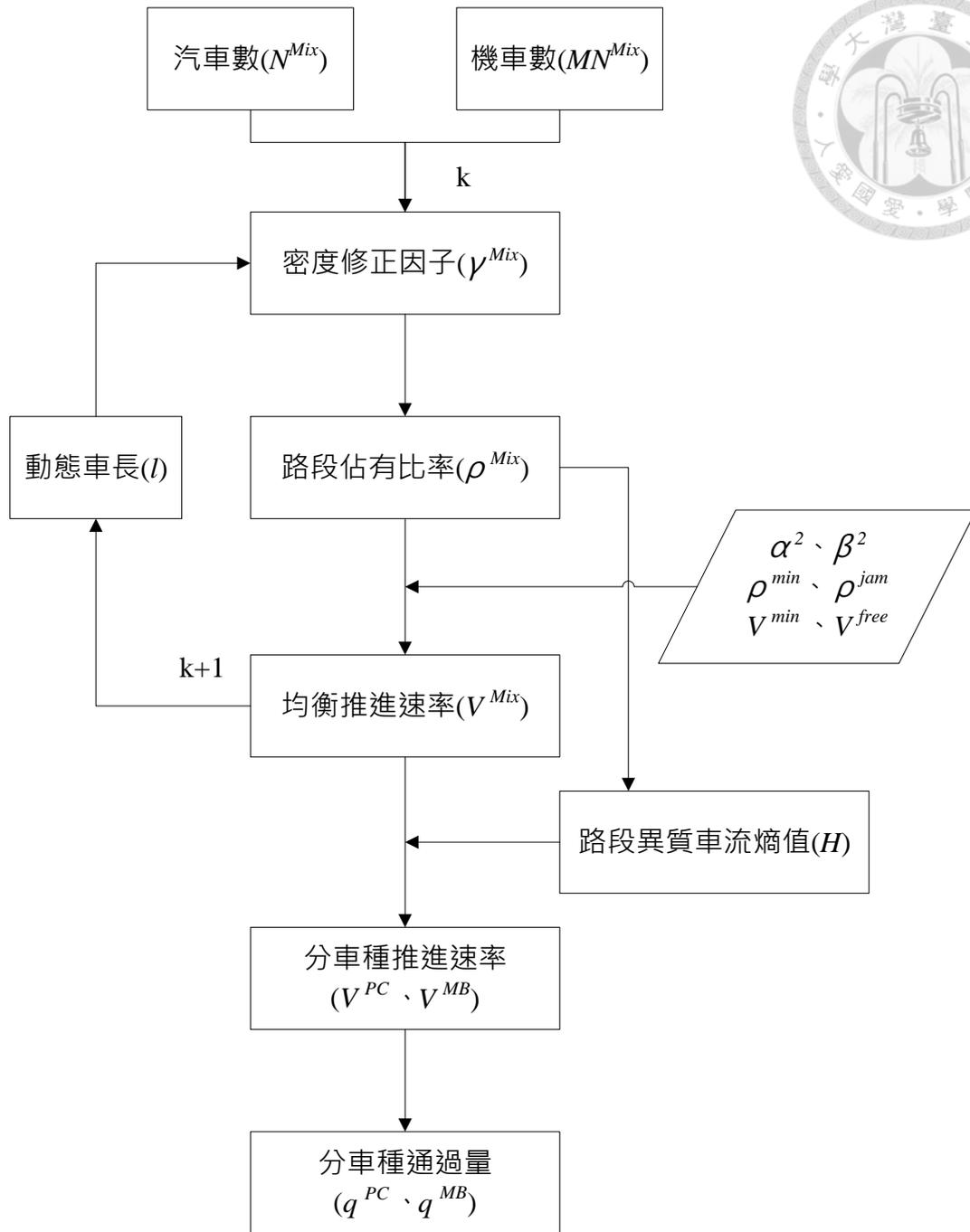


圖 5-8：路段推進流程之變數交互關係

5.4.4 車道溢流影響

車流於路段推進後，根據車道數與車道配置與車流之交互關係建立汽、機車匯入車道群模式。受到轉向比與車道剩餘空間影響，將抵達車隊尾端數量分配至不同車道群成為潛在通過量，其計算如 5.32 至 5.35 式所示。本研究車輛匯入模

式共分為三個群組，群組 1 代表混合車道、2 表示快車道、3 則代表左轉專用道，如圖 5-9 之說明。其中機車僅能匯入混合車道，不會出現群組 2、3 之潛在匯入量，而混合車道汽、機車的到達車隊尾端數量乃根據混合車道總體推進面積，依汽車與機車比例再除上個別車種面積而得。

$$q_{i,1}^{pot,PC}[k] = q_{i,Mix}^{arr,PC}[k] \cdot r_{ij}^{PC} \cdot A^{PC} + x_{i,1}^{-Mix,PC}[k] \quad (5.32)$$

$$q_{i,1}^{pot,MB}[k] = q_{i,Mix}^{arr,MB}[k] \cdot r_{ij}^{MB} \cdot A^{MB} + x_{i,1}^{-Mix,MB}[k] \quad (5.33)$$

$$q_{i,2}^{pot,PC}[k] = q_{i,Exc}^{arr,PC}[k] \cdot r_{ij}^{PC} \cdot A^{PC} + x_{i,2}^{-Exc,PC}[k] \quad (5.34)$$

$$q_{i,3}^{pot,PC}[k] = q_{i,LExc}^{arr,PC}[k] \cdot r_{ij}^{PC} \cdot A^{PC} + x_{i,3}^{-LExc,PC}[k] \quad (5.35)$$

$q_{i,1}^{pot,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道汽車潛在匯入量

$q_{i,1}^{pot,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道機車潛在匯入量

$q_{i,2}^{pot,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道汽車潛在匯入量

$q_{i,3}^{pot,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 左轉車道汽車潛在匯入量

r_{ij}^{PC} : 由路段 i 至下游路段 j 汽車轉向比

r_{ij}^{MB} : 由路段 i 至下游路段 j 機車轉向比

$x_{i,1}^{-Mix,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道溢流之汽車數

$x_{i,1}^{-Mix,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 混合車道溢流之機車數

$x_{i,2}^{-Exc,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 快車道溢流之汽車數

$x_{i,3}^{-LExc,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 左轉車道溢流之汽車數

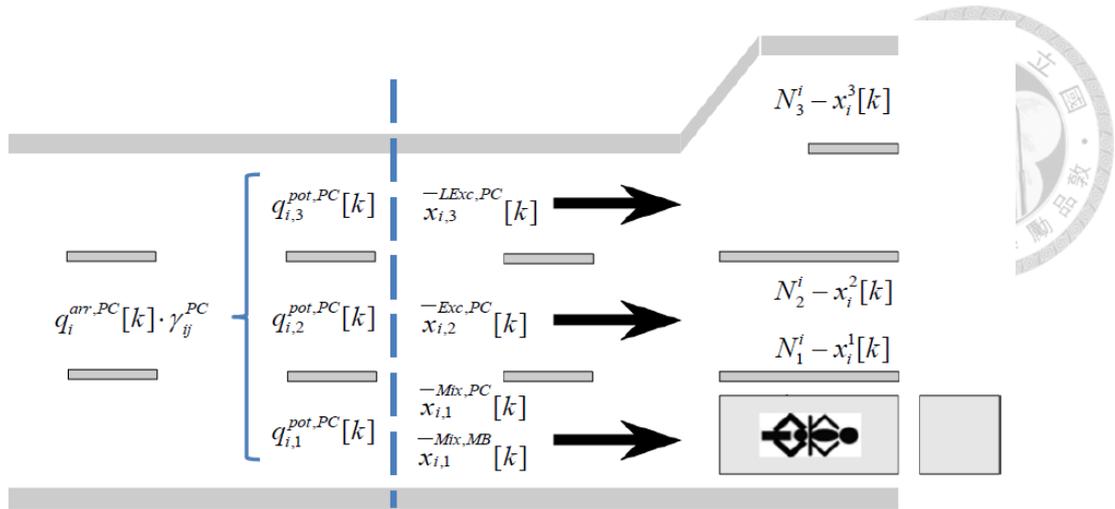


圖 5-9：汽、機車匯入車道群模式

根據圖 5-9，當車道群剩餘空間不足時，車流會有溢流情況發生，此時須考慮車道間或車道內彼此的影響建立溢流矩陣(spillback matrix)，分為部分阻隔(partial blockage)與完全阻隔(complete blockage)兩種情況。本研究將車道群分為左轉車道、快車道與混合車道三個群組，部分阻隔發生在左轉車輛溢流至執行快車道現象，此時部分左轉汽車占用直行快車道空間，導致部分欲直行由快車道通過之汽車需減速或變換車道，造成快車道(群組 2)通過率降低。而完全阻隔則發生在直行車道溢流導致左轉汽車無法匯入左轉車道，造成左轉車道(群組 3)無紓解量之情形。除此之外，各車道群溢流對本身影響為完全阻隔，也就是車輛無法再匯入該群組而等候車隊往上游累積。本研究假設跨越車道群組對彼此不產生影響，只與相鄰車道有關(例如群組 1 溢流與群組 3 沒有關聯)。根據上述定義，車道群之間的溢流關係可以建立 3x3 的溢流矩陣(three-dimensional spillback matrix)描述，0 表示沒有溢流影響，1 表示完全阻隔，車輛無法匯入車道群組，如 5.36 式表示。

$$\omega_{p',p}^i[k] = \begin{pmatrix} \omega_{3,3}^i[k] & \omega_{3,2}^i[k] & \omega_{3,1}^i[k] \\ \omega_{2,3}^i[k] & \omega_{2,2}^i[k] & \omega_{2,1}^i[k] \\ \omega_{1,3}^i[k] & \omega_{1,2}^i[k] & \omega_{1,1}^i[k] \end{pmatrix} \quad (5.36)$$

根據上述車道群關係定義，此溢流矩陣可改寫為 5.37 式，其中左轉車道對直行快車道之溢流部分阻隔，本研究以溢流參數(ϕ_{32})表達其影響程度，在左轉溢流佔有快車道空間多少比例下，直行汽車匯入之折減率。此一參數須由國內車流調查資料進行校估，詳細將於第六章說明。

$$\omega_{p',p}^i[k] = \begin{pmatrix} 1 & \phi_{32} \times \left(\frac{x_i^{LExc}[k] - N_3^i}{N_2^i} \right) & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.37)$$

加入溢流矩陣後，各車道群實際匯入量則是剩餘車道空間與潛在通過量經由溢流矩陣折減後之最小值，表示在車道利用與車流匯入交互影響下，各車道群欲加入等候車隊的數量，如 5.38 式表示。

$$q_p^i[k] = \min \left\{ \begin{array}{l} \max \{ N_p^i - x_i^p[k], 0 \} \\ q_{i,p}^{pot}[k] \cdot (1 - \omega_{p',p}^i[k]) \end{array} \right\}, p \vee p' = 1, 2, 3 \quad (5.38)$$

$\omega_{p',p}^i[k]$ ：第 k 時階路段 i 車道群組 p' 對群組 p 之溢流變數

$q_p^i[k]$ ：第 k 時階路段 i 車道群組 p 實際匯入量

5.4.5 等候型態演變

如同 3.2.1 節所定義的等候型態種類，本節推導車輛於路口等候線形成與疏解狀態方程式，在內容上分為快車道與混合車道討論，在種類上包含停等型態與紓解型態，對象涵蓋汽車與機車。根據等候理論之基礎，每一種等候型態具有不

同對應的依時間等候線消長之交通演變方程式。藉由此方程式計算分車種不同車道等候線長度，求解實際紓解量與號誌時制關係，以下章節將分別介紹停等型態(stopping pattern)與移動型態(moving pattern)推導過程，其中停等型態指汽、機車於路口等候紅燈時的行為，車輛為靜止狀態，後方移動型態之到達車流持續加入停等型態，等候線逐漸累積；當綠燈亮起，前方車隊開始轉為移動之紓解型態，依據車輛紓解速率決定轉移量多寡。而此型態轉移量決定路口通過量大小，影響號誌時制結果，因此分車種紓解模組是連結車流與號誌模組的重要一環，也是本研究欲以突破之處。本研究之等候型態編碼方式如同表 3-1，由 10 開始，以 10 為單位累加，前方英文字母代表所屬車道群組，先定義停等型態，再定義移動型態，其中 80 代表移動型態之車輛到達，90 表示移動型態車輛疏解。型態之間預留的編號範圍乃提供未來加入更多車種，以便新增更多型態。以下章節將由 10 開始，依序介紹快車道與混合車道之等候型態。

5.4.5.1 純機車停等(M10)：

當路口紅燈亮起，橫向車流欲左轉通過路口之機車需求藉由兩段式左轉匯入待停區內停等，為第一次通過路口。因此，在紅燈時間內，機車待轉區下一時階等候線長度乃由上一時階所到達的等候機車數，加上由上游橫向匯入的需求量，其方程式如 5.39 表示。等候線之累積使用巨觀車流群組密度與速率乘上單位時間，作為計算推進量的變數，不過待轉區內的機車停等位置較分散，並非規則型排列，通常具有群聚現象，由第一部機車停止後，後續到達之機車會在其附近停等，再逐步橫向擴散。另外，假設路口欲左轉的機車需求在橫向綠燈時間內皆能到達待轉區停等，且直行綠燈內也都能完全紓解，因此本研究將待轉區之機車流動簡化，左轉需求量即為等候數量，無等候線累積過程，綠燈亮起隨著直行方向車流紓解。

$$x_i^{M10,MB}[k+1] = x_i^{M10,MB}[k] + t \cdot \rho_i^{U(M10),MB}[k] \cdot v_i^{U(M10),MB}[k] - x_i^{M70,MB}[k] \quad (5.39)$$



- $x_i^{M10,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 機車待轉區等候需求量
- $\rho_i^{U(M10),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 機車待轉區上游橫向機車密度(輛/公里)
- $v_i^{U(M10),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 機車待轉區上游橫向機車速率(公里/小時)

5.4.5.2 汽車停等，機車向前鑽行(M20)：

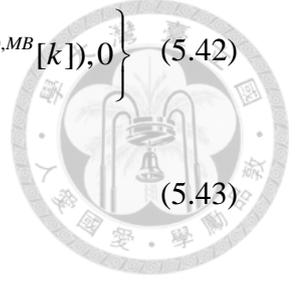
針對一般具有前方機車停等區設置的混合車道而言，汽車到達退縮之停止線開始停等時，後方到達之機車仍可向前匯入機車停等區停等。為了模式化停止線位置差異所造成等候起始點差異，本模式先計算依時階汽車等候線長度，表示由退縮停止線開始等候累積長度，再根據汽車等候線尾端位置變化量計算可容納之機車匯入量，引入流體力學之滲透率(seepage)想法，機車於停等車陣中穿行類似流體於孔隙中滲透概念，其滲透量多寡受到流量大小、孔隙半徑與流速之影響，套用在機車匯入停等區行為上，除了後方機車到達停等需求量，車隊排列之縫隙與機車通過速率、前方停等區空間等因素影響單位時間機車可匯入停等區停等數量多寡。此階段先計算汽車之等候數量，接著計算機車到達數量，扣除流入前方停等區的需求量成為新的機車等候數量。此一型態的汽車與機車等候線分別根據實係匯入混合車道群組的數量之密度與速度計算，如 5.40 至 5.43 式。匯入混合車道之車流密度等於汽、機車的匯入比例除上車道可移動空間，同時密度不得小於 0。此處的可移動空間為路段長度扣除前方等候車隊長度剩餘的空間。而匯入混合車道之車流速率等於路段推進分車種之推進速率，若前方車隊已逐漸溢流，車流推進速率降低，表示通過量減少，因此可匯入車道群的汽、機車數量也相對減少。

$$\rho_i^{U(M20),PC}[k] = \max \left\{ q_1^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,PC}[k] \cdot 1000}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} / (L_i - L_i^{M20,PC}[k]), 0 \right\} \quad (5.40)$$

$$v_i^{U(M20),PC}[k] = v_i^{Mix,PC}[k] \quad (5.41)$$

$$\rho_i^{U(M20),MB}[k] = \max \left\{ q_i^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,MB}[k] \cdot 1000}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} / (L_i - L_i^{M20,MB}[k]), 0 \right\} \quad (5.42)$$

$$v_i^{U(M20),MB}[k] = v_i^{Mix,MB}[k] \quad (5.43)$$



$\rho_i^{U(M20),PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態上游汽車密度(輛/公里)

$\rho_i^{U(M20),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態上游機車密度(輛/公里)

$v_i^{U(M20),PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態上游汽車速率(公里/小時)

$v_i^{U(M20),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態上游機車速率(公里/小時)

$L_i^{M20,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態汽車等候線長度(公尺)

$L_i^{M20,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態機車等候線長度(公尺)

有了匯入混合車道的汽、機車數量，停等結構 M20 之等候車隊累積方程式如 5.44 與 5.45 表示，5.44 式代表汽車累積方程式，5.45 式計算機車部分。

$$x_i^{M20,PC}[k+1] = x_i^{M20,PC}[k] + t \cdot \rho_i^{U(M20),PC}[k] \cdot v_i^{U(M20),PC}[k] - x_i^{M90,PC}[k] \quad (5.44)$$

$$x_i^{M20,MB}[k+1] = x_i^{M20,MB}[k] + t \cdot \rho_i^{U(M20),MB}[k] \cdot v_i^{U(M20),MB}[k] - x_i^{DM20,MB}[k] \quad (5.45)$$

$x_i^{M20,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態停等汽車數

$x_i^{M20,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態停等機車數

$x_i^{DM20,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M20 型態下游停等區等候機車數

然而 5.45 式所計算的並非完全 M20 機車的數量，有一部分先到達的機車會進入混合車道前方機車停等區停等，須扣除這一部分的移動量。關於機車停等區需求量計算採用 5.46 公式，停等區機車數量除了受限於後方到達之 M20 機車數量，其通過率因停等汽車之寬度影響而有所折減，而停等數量也不得超過可容納的最大停等空間。本研究假設機車停等區同一時間最多可供 30 部機車停等。

$$x_i^{DM20,MB}[k+1] = x_i^{DM20,MB}[k] + \min \left\{ \frac{x_i^{M20,MB}[k]}{W^{PC}}, A^{DM20,MB} - x_i^{DM20,MB}[k] \right\} \quad (5.46)$$

W^{PC} : 汽車實體車寬(公尺)

$A^{DM20,MB}$: 機車停等區之儲車空間(輛)

5.4.5.3 汽、機車皆停等，汽車保持最小間距(M30)：

此種型態為汽、機車皆成靜止狀態，汽車車隊之間沒有機車停等，因此汽車維持最小車頭距(6.5 公尺)。M30 常接續 M20 型態之後，當汽車已經停等，而前方機車也已不再流動，此時後方加入機車為移動狀態，先決定機車等候長度，再根據機車等候線尾端位置變化量計算汽車等候線長度。5.47 式與 5.48 式表示上游匯入車輛之密度與速度，再根據 5.49 式計算依時階 M30 等候型態累積數量。

$$\rho_i^{U(M30),MB}[k] = q_i^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,MB}[k] \cdot 1000}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} / (L_i - L_i^{M30,MB}[k]) \quad (5.47)$$

$$v_i^{U(M30),MB}[k] = v_i^{Mix,MB}[k] \quad (5.48)$$

$$x_i^{M30,MB}[k+1] = x_i^{M30,MB}[k] + t \cdot \rho_i^{U(M30),MB}[k] \cdot v_i^{U(M30),MB}[k] - x_i^{M90,MB}[k] \quad (5.49)$$

$\rho_i^{U(M30),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M30 型態上游機車密度(輛/公里)

$v_i^{U(M30),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M30 型態上游機車速率(公里/小時)



$L_i^{M30,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M30 型態機車等候線長度(公尺)

$x_i^{M30,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M30 型態停等機車數

有了機車的停等數，汽車等候線之累積根據每一時階機車車隊尾端位置變化量(Δl)推算可匯入汽車數，位置變化乃依據擁擠密度與上游車流密度差值計算而得，由於 M30 為汽、機車以最小間距停等型態，因此將機車位置變化量除上汽車擁擠密度之倒數(一部車停等長度)即為汽車停等量，如 5.50 式與 5.51 式。

$$\Delta l_i^{M30}[k] = \frac{t \cdot \rho_i^{U(M30),MB}[k] \cdot v_i^{U(M30),MB}[k]}{\rho_{jam}^{MB} - \rho_i^{U(M30),MB}[k]} \quad (5.50)$$

$$x_i^{M30,PC}[k+1] = x_i^{M30,PC}[k] + \frac{\Delta l_i^{M30}[k]}{\left(\frac{1}{\rho_{jam}^{PC}}\right)} - x_i^{M90,PC}[k] \quad (5.51)$$

$\Delta l_i^{M30}[k]$: 第 k 時階路段 i M30 型態車隊尾端位置變化量

ρ_{jam}^{MB} : 機車之擁擠密度(輛/公里)

ρ_{jam}^{PC} : 汽車之擁擠密度(輛/公里)

5.4.5.4 汽、機車皆停等，汽車間距大於最小間距(M40)：

當 M30 型態機車停等數量持續增加，前方停等區或兩側空間不足時，機車會在汽車車隊之間停等，造成部分汽車車頭距大於最小間距(6.5 公尺)。此種型態較容易出現於尖峰時段或外側車道，並非每一種路型都會出現。此時先考慮汽車等候長度，再根據依時階汽車等候線尾端位置變化量推斷可於車陣中夾雜停等之機車數量，決定機車等候線長度。

$$\rho_i^{U(M40),PC}[k] = q_1^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,PC}[k] \cdot 1000}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} / (L_i - L_i^{M40,PC}[k]) \quad (5.52)$$

$$v_i^{U(M40),PC}[k] = v_i^{Mix,PC}[k] \quad (5.53)$$

$$x_i^{M40,PC}[k+1] = x_i^{M40,PC}[k] + t \cdot \rho_i^{U(M40),PC}[k] \cdot v_i^{U(M40),PC}[k] - x_i^{M90,PC}[k] \quad (5.54)$$

$\rho_i^{U(M40),PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M40 型態上游汽車密度(輛/公里)

$v_i^{U(M40),PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M40 型態上游汽車速率(公里/小時)

$L_i^{M40,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M40 型態汽車等候線長度(公尺)

$x_i^{M40,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M40 型態停等汽車數

等候線尾端位置變化量如同 M30 之計算方法，不過 M40 型態先決定汽車等候長度，因此等候位置變化量以汽車為基礎。值得一提的是，M40 型態汽車並非以最小間距停等，車隊中間具有機車混合其中，因此停等間距大於 6.5 公尺，其機車長度須以當下上游匯入之機車密度倒數進行計算，如 5.56 式。

$$\Delta l_i^{M40}[k] = \frac{t \cdot \rho_i^{U(M40),PC}[k] \cdot v_i^{U(M40),PC}[k]}{\rho_{jam}^{PC} - \rho_i^{U(M40),PC}[k]} \quad (5.55)$$

$$x_i^{M40,MB}[k+1] = x_i^{M40,MB}[k] + \frac{\Delta l_i^{M40}[k]}{\left(\frac{1}{\rho_i^{U(M40),MB}[k]} \right)} - x_i^{M90,MB}[k] \quad (5.56)$$

$\Delta l_i^{M40}[k]$: 第 k 時階路段 i M40 型態車隊尾端位置變化量

$\rho_i^{U(M40),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M40 型態上游機車密度(輛/公里)

5.4.5.5 純汽車停等(E20) :

上述 M10、M20、M30、M40 為混合車道可能出現之停等型態，根據汽、機車之到達、停等方式而有所不同。快車道僅包含汽車一個車種，因此停等型態較

單純，沒有多車種混合議題，不必推算汽、機車等候線位置變化與可容納之停等量，快車道只出現 E20 一種停等型態。E20 型態同樣適用於左轉專用道之汽車，只不過本研究將不同轉向之汽車劃分為兩個群組(車道群 2、3)，但其等候型態組成是相同的。

$$\rho_i^{U(E20),PC}[k] = q_2^i[k] \cdot 1000 / (L_i - L_i^{E20,PC}[k]) \quad (5.57)$$

$$v_i^{U(E20),PC}[k] = v_{i,Exc}^{free} \quad (5.58)$$

$$x_i^{E20,PC}[k+1] = x_i^{E20,PC}[k] + t \cdot \rho_i^{U(E20),PC}[k] \cdot v_i^{U(E20),PC}[k] - x_i^{E90,PC}[k] \quad (5.59)$$

$\rho_i^{U(E20),PC}[k]$: 第 k 時階路段 i E20 型態上游汽車密度(輛/公里)

$v_i^{U(E20),PC}[k]$: 第 k 時階路段 i E20 型態上游汽車速率(公里/小時)

$L_i^{E20,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i E20 型態汽車等候線長度(公尺)

$x_i^{E20,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i E20 型態停等汽車數

5.4.5.6 純機車移動(M70) :

等候結構除了上述混合車道與快車道的停等型態，尚包含上游加入車隊之移動型態與綠燈時間內之紓解型態。根據 3.2.1 節之定義，加入車隊之移動型態(80)與停等型態(20)一起討論，明確描述汽、機車由匯入車道群後至停等型態形成的整體行為，維持車流的連貫性。此處的移動型態著重於綠燈亮起汽、機車準備往下游紓解之型態轉換過程。

移動型態 M70 對應停等型態 M10，探討機車待停區內純機車流之紓解。當綠燈始亮，前方待停區機車開始先紓解，紓解時需考慮上游型態(M10)之密度與介面傳播速率，計算依時階由停等型態轉變至移動型態的變化量，每一時階啟

動的機車才能通過，仍屬啟動階段的機車需等到完全啟動才配合號誌往下游紓解。因此，介面傳播速率大小影響依時階可移動機車數量，計算方法如 5.60 式，其介面速率受到 M10 機車密度與紓解速率影響，M10 為純機車之停等型態，密度可假設與機車擁擠密度相同；而紓解速率則如同 5.62 之計算式。

$$w^{M10-M70} = \frac{Q_i^{MB,Max}[k] \cdot v_{i,1}^{MB}[k]}{\rho_{i,1}^{M10,MB}[k] \cdot v_{i,1}^{MB}[k] - Q_i^{MB,Max}[k]} \quad (5.60)$$

$$\rho_{i,1}^{M10,MB} = \rho_{jam}^{MB} \quad (5.61)$$

$$v_{i,1}^{MB} = \frac{Q_i^{MB,Max}}{\rho_{jam}^{MB} - \rho_{sat}^{MB}} \quad (5.62)$$

$w^{M10-M70}$: 停等型態 M10 至移動型態 M70 之介面傳播速率(公里/小時)

$\rho_{i,1}^{M10,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M10 型態之機車車流密度(輛/公里)

$v_{i,1}^{MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M10 型態之機車紓解速率(公里/小時)

$Q_i^{MB,Max}[k]$: 第 k 時階路段 i 機車最大紓解率(輛/秒)

ρ_{sat}^{MB} : 機車之紓解密度(輛/公里)

在此介面速率下，每一時階往上游涵蓋之機車數量表示潛在通過路口的紓解量，以 5.63 式表示，同時為了維持 M70 型態的機車流量守恆關係，其依時階等候機車數的消長等於上一時階 M70 型態量加上由 M10 型態之轉移量，減去已紓解之實際機車數量，如 5.64 式。圖 5-10 說明機車由停等至移動的型態轉變過程。

$$\begin{aligned} w^{M10-M70} \cdot t \cdot \rho_{i,1}^{M10,MB}[k] &= \left(\frac{Q_i^{MB,Max}[k] \cdot v_{i,1}^{MB}[k]}{\rho_{i,1}^{M10,MB}[k] \cdot v_{i,1}^{MB}[k] - Q_i^{MB,Max}[k]} \right) \cdot t \cdot \rho_{i,1}^{M10,MB}[k] \\ &= \frac{Q_i^{MB,Max}[k] \cdot v_{i,1}^{MB}[k] \cdot t \cdot \rho_{i,1}^{M10,MB}[k]}{\rho_{i,1}^{M10,MB}[k] \cdot v_{i,1}^{MB}[k] - Q_i^{MB,Max}[k]} \quad (5.63) \end{aligned}$$

$$x_i^{M70,MB}[k+1] = x_i^{M70,MB}[k] + \left(\frac{Q_i^{MB,Max}[k] \cdot v_{i,l}^{MB}[k] \cdot t \cdot \rho_{i,l}^{M10,MB}[k]}{\rho_{i,l}^{M10,MB}[k] \cdot v_{i,l}^{MB}[k] - Q_i^{MB,Max}[k]} \right) - Q_{i,l}^{MB}[k] \quad (5.64)$$

$Q_{i,l}^{MB}[k]$: 第 k 時階路段 i 機車實際紓解率(輛/秒)

$x_i^{M70,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M70 型態機車數量

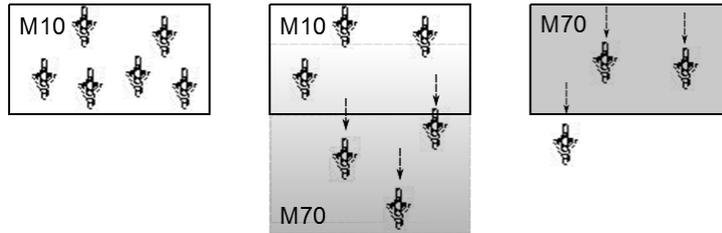


圖 5-10：機車停等至紓解型態轉變說明

本研究針對 M70 機車停等型態予以簡化，理論推導過程如 5.60 至 5.64 式，但實際上機車等候線之累積具有橫向發展特性，以介面速率之傳遞描述型態轉換可能較無效果，同時機車紓解速度快，此型態轉換時間可能很短，因此假設在綠燈第一秒 M10 型態即可完全轉換為 M70 型態紓解。

5.4.5.7 汽、機車一同往下游紓解(M90)：

在推導汽、機車混合型態 M90 之前，需先針對介面傳遞紓解理論進行說明。關於停等型態至移動型態介面傳播速率的推導如圖 5-11 所示。X 軸起點表示時間，Y 軸表示由停止線往上游累積之等候車隊長度，而曲線表示每一部汽車的軌跡(trajjectory)，每一部汽車有其紓解速率(V)，對於整體車隊有介面傳播速率(W)，類似一種向後之紓解衝擊波(discharge shockwave)。紓解衝擊波每一秒傳遞的範圍表示共有多少停等汽車可以紓解，直到此衝擊波到達車隊尾端。每一部車紓解過程包含介面速率傳播時間與啟動紓解時間，以灰色三角形構圖表示。三角形的底為汽車紓解量的倒數，高為汽車擁擠密度的倒數，因此可寫成 5.65 之關係式。根據 5.65 式，將其移項後可求出介面傳播速率與每一個時階型態轉

移量，如 5.66 式，而每一時階移動型態往上游之轉變量(Δd)等於介面傳遞速度與時階乘積，如 5.67 式。



$$\frac{1}{Q_{i,p}^{PC}} = \frac{1}{w \cdot \rho_{jam}^{PC}} + \frac{1}{v \cdot \rho_{jam}^{PC}} \quad (5.65)$$

$$w = \frac{Q_{i,p}^{PC} \cdot v}{v \cdot \rho_{jam}^{PC} - Q_{i,p}^{PC}} \quad (5.66)$$

$$\Delta d = w \cdot t \quad (5.67)$$

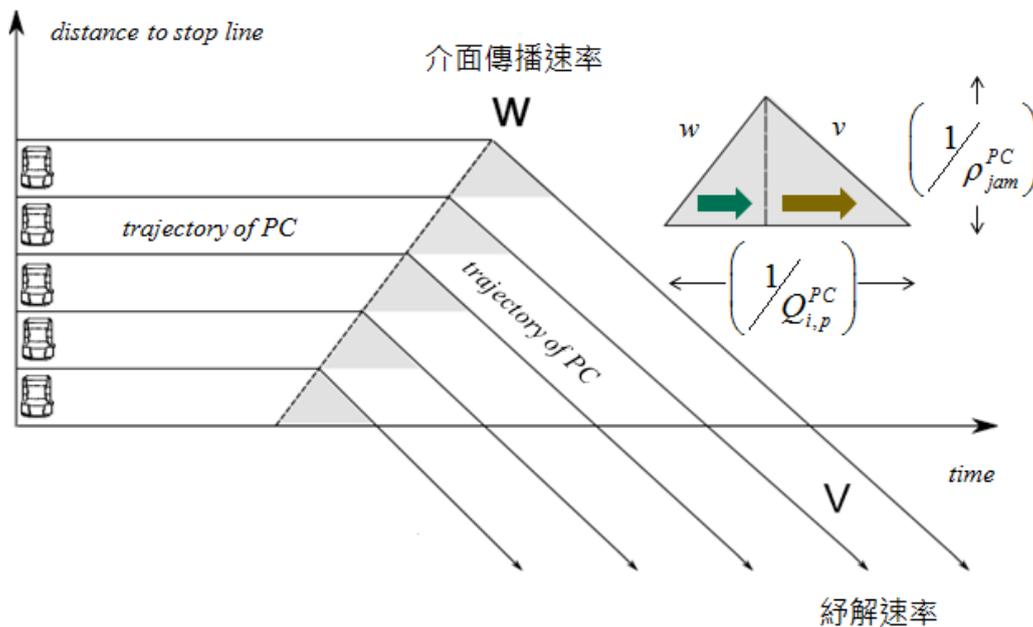


圖 5-11：汽車等候線與介面傳遞紓解軌跡圖

當 M70 之機車紓解完畢，移動型態 M90 表示汽車、機車一起往下游紓解之過程，無論巨觀車流中其組成之等候型態內部為均質(homogeneous)或異質(heterogeneous)，型態的轉變量須根據上游型態之密度計算介面傳播速率，可寫成 5.68 之一般式。若上游為純機車停等型態(M10)，則型態密度為機車擁擠密度；若上游為純汽車停等，型態密度等於汽車之擁擠密度；若上游為汽、機車共同組成之混合停等型態，則以該型態密度計算(M20、M30 或 M40)。因此，本研究推導得到移動型態一般式(general form)如 5.68 至 5.70 式。其中 5.69 先計

算移動型態內汽車等候數，再根據型態轉變量計算機車等候數變化，如 5.70。

$$w^{U(M90)-M90} = \frac{Q_{i,p}^{PC,Max}[k] \cdot v_{i,p}^{PC}[k]}{\rho_{i,p}^{U(M90),PC} \cdot v_{i,p}^{PC}[k] - Q_{i,p}^{PC,Max}[k]} \quad (5.68)$$



$$x_i^{M90,PC}[k+1] = x_i^{M90,PC}[k] + \left(\frac{Q_{i,p}^{PC,Max}[k] \cdot v_{i,p}^{PC}[k] \cdot t \cdot \rho_{i,p}^{U(M90),PC}}{\rho_{i,p}^{U(M90),PC} \cdot v_{i,p}^{PC}[k] - Q_{i,p}^{PC,Max}[k]} \right) - Q_{i,p}^{PC}[k] \quad (5.69)$$

$$x_i^{M90,MB}[k+1] = x_i^{M90,MB}[k] + \left(\frac{Q_{i,p}^{PC,Max}[k] \cdot v_{i,p}^{PC}[k] \cdot t \cdot \rho_{i,p}^{U(M90),PC}}{\rho_{i,p}^{U(M90),PC} \cdot v_{i,p}^{PC}[k] - Q_{i,p}^{PC,Max}[k]} \cdot \frac{x_i^{U(M90),MB}[k]}{x_i^{U(M90),PC}[k]} \right) - Q_{i,p}^{MB}[k] \quad (5.70)$$

$w^{U(M90)-M90}$: 由上游停等至移動型態 M90 之介面傳播速率(公里/小時)

$\rho_{i,p}^{U(M90),PC}$: 第 k 時階路段 i M90 上游型態之汽車車流密度(輛/公里)

$v_{i,p}^{PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M90 型態之汽車紓解速率(公里/小時)

$Q_{i,p}^{PC,Max}[k]$: 第 k 時階路段 i 群組 p 汽車最大紓解率(輛/秒)

$Q_{i,p}^{PC}[k]$: 第 k 時階路段 i 群組 p 汽車實際紓解率(輛/秒)

$x_i^{M90,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M90 型態移動汽車數量

$x_i^{M90,MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M90 型態移動機車數量

$x_i^{U(M90),PC}[k]$: 第 k 時階路段 i M90 上游型態汽車數量

$x_i^{U(M90),MB}[k]$: 第 k 時階路段 i M90 上游型態機車數量

5.4.5.8 純汽車移動(E90) :

上述移動型態一般式內容主要針對混合車道，關於快車道或左轉專用道汽車之移動型態，同樣根據上游停等型態(E20)的密度與介面傳播速率計算型態轉

變量。由於 E90 型態上游為純汽車之停等(E20)，因此密度為汽車之擁擠密度，沒有機車之移動型態出現，如 5.71 式，且紓解速率之計算如 5.73 式。

$$x_i^{E90,PC}[k+1] = x_i^{E90,PC}[k] + \left(\frac{Q_{i,p}^{PC,Max}[k] \cdot v_{i,p}^{PC}[k] \cdot t \cdot \rho_{i,p}^{U(E90),PC}}{\rho_{i,p}^{U(E90),PC} \cdot v_{i,p}^{PC}[k] - Q_{i,p}^{PC,Max}[k]} \right) - Q_{i,p}^{PC}[k] \quad (5.71)$$

$$\rho_{i,p}^{U(E90),PC} = \rho_{jam}^{PC} \quad (5.72)$$

$$v_{i,p}^{PC} = \frac{Q_i^{PCT,Max}}{\rho_{jam}^{PC} - \rho_{sat}^{PC}} \quad (5.73)$$

$\rho_{i,p}^{U(E90),PC}$: 第 k 時階路段 i E90 上游型態之汽車車流密度(輛/公里)

$v_{i,p}^{PC}[k]$: 第 k 時階路段 i E90 型態之汽車紓解速率(公里/小時)

$x_i^{E90,PC}[k]$: 第 k 時階路段 i E90 型態移動機車數量

ρ_{sat}^{PC} : 汽車之紓解密度(輛/公里)

本研究整體鄰近路口各種停等與紓解型態分佈之示意圖如圖 5-12 所示。此型態分佈尚無考慮出現前後之關係，僅以車道群進行區分。至於實際車流資料對照等候型態則如圖 5-13 表示。

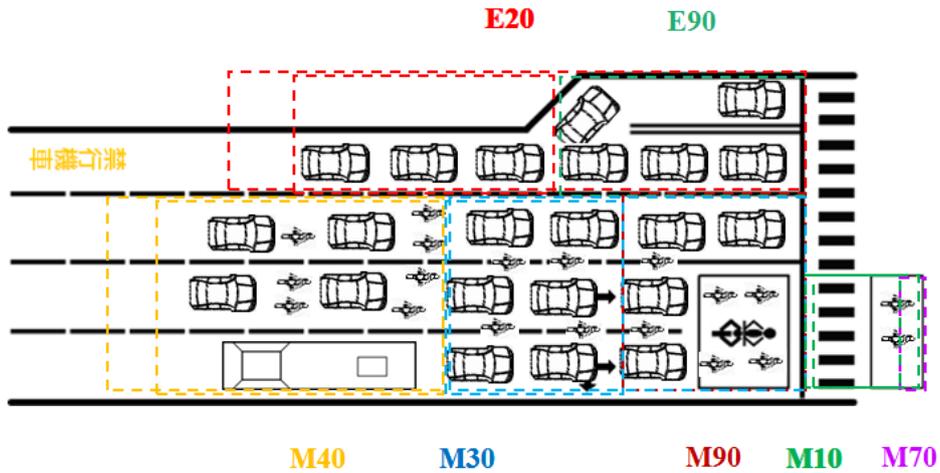
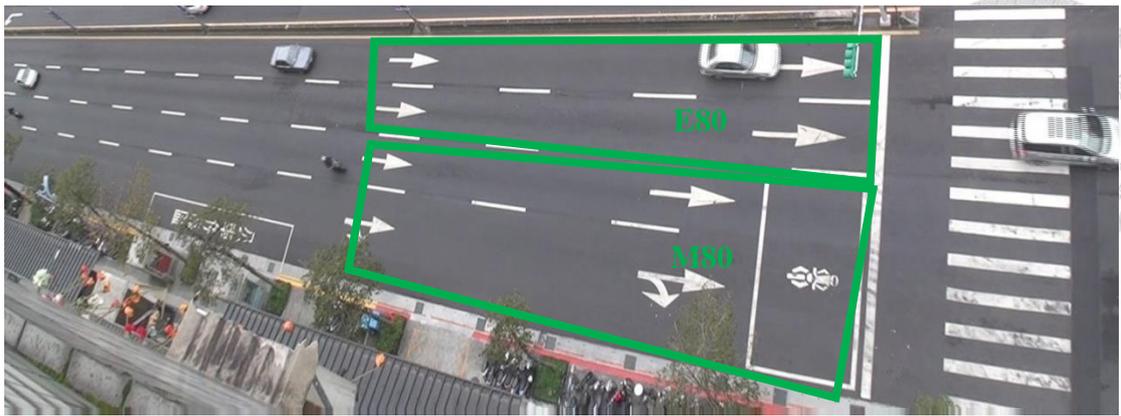
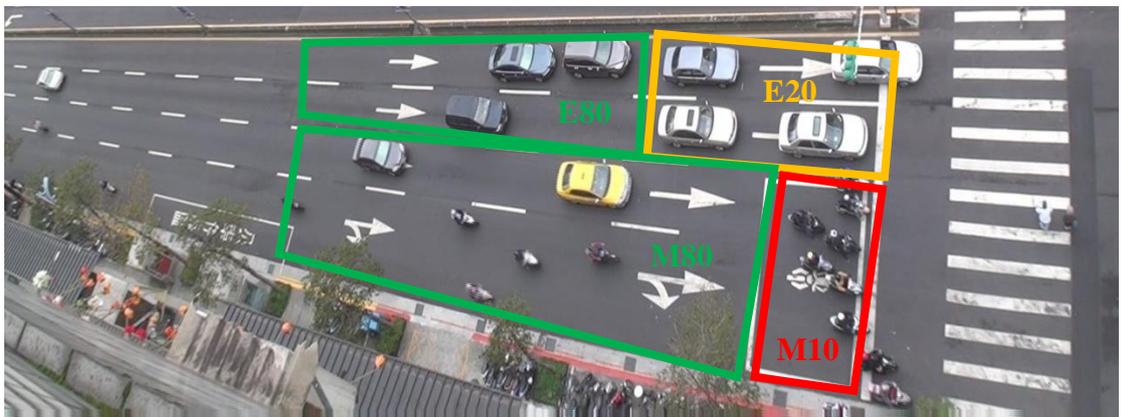


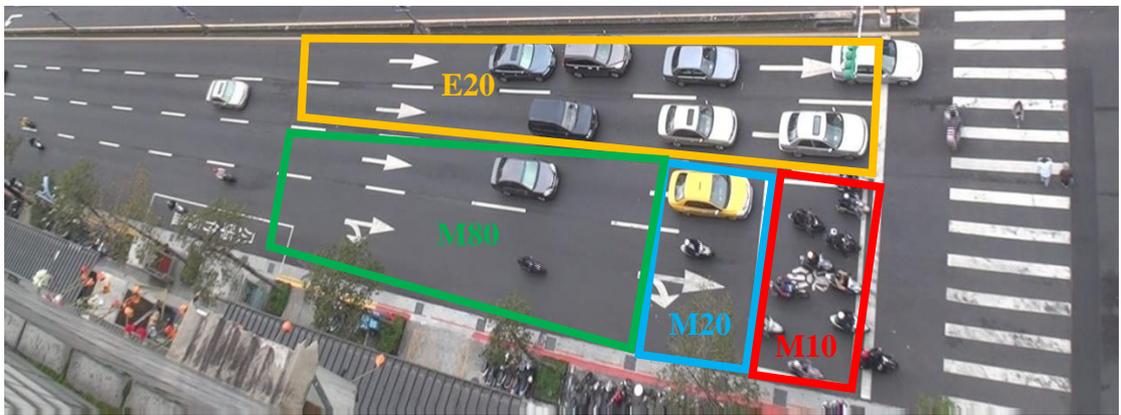
圖 5-12：鄰近路口混合車流等候型態分佈示意圖



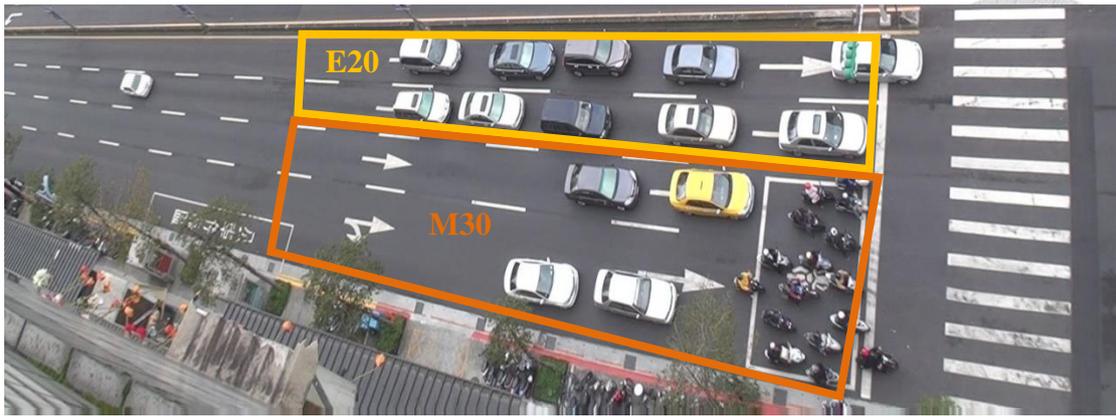
(a) 到達移動型態 80



(b) 介面轉換 80-20



(c) 停等型態 20



(d) 停等型態 30



(e) 介面轉換 30-90



(f) 紓解移動型態 90

圖 5-13：實際車流停等與紓解之等候型態演變說明

5.4.6 分車道紓解

根據上述 90 的移動紓解型態，模式車道群組的紓解量為該群組依時階最大紓解量與與 90 型態的車輛數兩者之最小值，以 5.74 式至 5.77 式表示。5.74 式代表左轉車道汽車紓解量，以此類推，而 5.77 表示混合車道機車紓解流量。根據此方程式可以計算路網各路段依時階離開車輛數。

$$Q_{i,3}^{PC}[k] = \min \{x_i^{LE90,PC}[k], Q_{i,3}^{PC,Max} \cdot g_o^z[k]\} \quad (5.74)$$

$$Q_{i,2}^{PC}[k] = \min \{x_i^{E90,PC}[k], Q_{i,2}^{PC,Max} \cdot g_o^z[k]\} \quad (5.75)$$

$$Q_{i,1}^{PC}[k] = \min \{x_i^{M90,PC}[k], Q_{i,1}^{PC,Max} \cdot g_o^z[k]\} \quad (5.76)$$

$$Q_{i,1}^{MB}[k] = \min \{x_i^{M90,MB}[k], Q_{i,1}^{MB,Max} \cdot g_o^z[k]\} \quad (5.77)$$

5.4.7 流量守恆

由於路網具有依時階輸入車輛與離開車輛數，各路段車輛須以時間前後關係式確保車流之流量守恆限制。流量守恆限制根據控制範圍大小個別定義，同一車道群組內的停等汽、機車數量、溢流車輛需要守恆，大至整體路段總車輛數也需要守恆。因此，第二階段之車輛守恆限制如以下方程式計算。個別車道群組下一時階停等數量為該時階停等量，加上該時階實際匯入量扣除紓解量的結果，端賴其由何種停等型態所組成。值得一提的是，混合車道採用車種面積匯入方式，須根據汽、機車的潛在匯入量分配進入比例，如 5.80 與 5.81 式。

$$x_{i,3}^{PC}[k+1] = x_{i,3}^{PC}[k] + q_3^i[k] - Q_{i,3}^{PC}[k] \quad (5.78)$$

$$x_{i,2}^{PC}[k+1] = x_{i,2}^{PC}[k] + q_2^i[k] - Q_{i,2}^{PC}[k] \quad (5.79)$$

$$x_{i,1}^{PC}[k+1] = x_{i,1}^{PC}[k] + q_1^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,PC}[k]}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} / A^{PC} - Q_{i,1}^{PC}[k] \quad (5.80)$$

$$x_{i,1}^{MB}[k+1] = x_{i,1}^{MB}[k] + q_1^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,MB}[k]}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} / A^{MB} - Q_{i,1}^{MB}[k] \quad (5.81)$$

至於車道溢流車隊部分，各群組下一時階溢流數量等於此時階已溢流在車道外數量，減除實際匯入量加上由路段推進的到達量，以 5.82 至 5.85 表示。其中混合車道的匯入量與到達量皆為面積表示，須以汽、機車比例換算為汽、機車車輛數。

$$\bar{x}_{i,3}^{LExc,PC}[k+1] = \bar{x}_{i,3}^{LExc,PC}[k] - q_3^i[k] + q_{i,Exc}^{arr}[k] \cdot r_{ij}^{PC} \quad (5.82)$$

$$\bar{x}_{i,2}^{Exc,PC}[k+1] = \bar{x}_{i,2}^{Exc,PC}[k] - q_2^i[k] + q_{i,Exc}^{arr}[k] \cdot r_{ij}^{PC} \quad (5.83)$$

$$\bar{x}_{i,1}^{Mix,PC}[k+1] = \bar{x}_{i,1}^{Mix,PC}[k] - \left(q_1^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,PC}[k]}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} + q_{i,Exc}^{arr}[k] \cdot \frac{\rho_{i,real}^{Mix,PC}[k]}{\rho_{i,real}^{Mix,PC}[k] + \rho_{i,real}^{Mix,MB}[k]} \cdot r_{ij}^{PC} \right) / A^{PC} \quad (5.84)$$

$$\bar{x}_{i,1}^{Mix,MB}[k+1] = \bar{x}_{i,1}^{Mix,MB}[k] - \left(q_1^i[k] \cdot \frac{q_{i,1}^{pot,MB}[k]}{q_{i,1}^{pot,PC}[k] + q_{i,1}^{pot,MB}[k]} + q_{i,Exc}^{arr}[k] \cdot \frac{\rho_{i,real}^{Mix,MB}[k]}{\rho_{i,real}^{Mix,PC}[k] + \rho_{i,real}^{Mix,MB}[k]} \cdot r_{ij}^{MB} \right) / A^{MB} \quad (5.85)$$

路段整體部分，依時階車輛數等於上游匯入減除往下游紓解的數量，將汽車與機車分開計算，如 5.86 與 5.87 式。而路段剩餘儲車空間則為最大儲車面積減除汽車與機車之佔有面積。

$$N_i^{PC}[k+1] = N_i^{PC}[k] + Q_{j,i}^{PC}[k] - Q_{i,j}^{PC}[k] \quad (5.86)$$

$$N_i^{MB}[k+1] = N_i^{MB}[k] + Q_{j,i}^{MB}[k] - Q_{i,j}^{MB}[k] \quad (5.87)$$

$$s_i[k+1] = NI - N_i^{PC}[k+1] \cdot A^{PC} - N_i^{MB}[k+1] \cdot A^{MB} \quad (5.88)$$

5.5 號誌最佳化模組

第二階段模式在於根據動態車流變化調整號誌最佳化輸出結果，而控制車流是否紓解之綠燈二元變數 g_o^z 為車流模組與號誌模組之連結。根據第一階段幾何配置與流動最佳化結果，各流動在求解後，相同綠燈起始時間者會形成時相結構，

由第二階段模式以時相為基礎進行綠燈時比、週期調整。因此，判斷特定流動之綠燈路權時間藉由 5.89 式進行計算。當模擬時階減去該路口時差後，再除以週期長，表示該時間屬於週期內哪一個時相，若屬於綠燈時相則 g_o^z 值為 1，可使其控制流動通行，反之若為紅燈時相則 g_o^z 值為 0，該流動無車輛紓解量。

$$g_o^z[k] = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{j=1}^{z-1} (G_{o,z} + I_{o,z}) < \text{mod}(k - \Delta_o, C) \leq \sum_{j=1}^{z-1} (G_{o,z} + I_{o,z}) + G_{o,z} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.89)$$

$g_o^z[k]$: 第 k 時階第 o 路口 z 時相是否綠燈之 0、1 變數

$G_{o,z}$: 第 o 路口 z 時相之綠燈時間長

$I_{o,z}$: 第 o 路口 z 時相之綠燈介間時間

C : 第二階段號誌週期長

Δ_o : 第 o 路口之時差

由於此號誌限制式為兩種決策之雙不等式結構，在模式應用上將其拆解為兩項條件判斷限制式，如 5.90 與 5.91 式。 η_o^z 、 $\eta_o'^z$ 為 k 時階未處於綠燈時相內之二元變數，若兩者其中一個為 1，則綠燈變數 g_o^z 等於 0，無法允許車輛通過。

$$\eta_o^z[k] = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{mod}(k - \Delta_o, C) \leq \sum_{j=1}^{z-1} (G_{o,z} + I_{o,z}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.90)$$

$$\eta_o'^z[k] = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{mod}(k - \Delta_o, C) > \sum_{j=1}^{z-1} (G_{o,z} + I_{o,z}) + G_{o,z} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.91)$$

$\eta_o^z[k]$: 第 k 時階第 o 路口 z 時相禁止通行之 0、1 變數

$\eta_o'^z[k]$: 第 k 時階第 o 路口 z 時相禁止通行之 0、1 變數

根據上述定義，本研究以號誌控制函數(signal control function)連結路口流動

與號誌群組的關係，以 5.92 式表示。該式代表第 i 路段第 p 個車道群組可由控制函數 SG 以第 o 路口第 z 時相進行控制，根據路段與群組多寡可以寫出 $i \times p$ 種組合。

$$(o, z) = SG[i, p] \quad (5.92)$$

除了綠燈時相之判斷限制式，模式之週期長度需介於最大與最小週期之間，如同第一階段之限制，以 5.93 式表示，而各個時相之綠燈時間須滿足最小綠燈限制，同時不得大於週期長度。另外，一完整週期由各時相綠燈時間與介間時間所組成，如 5.95 式。

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (5.93)$$

$$G_{o,z}^{\min} \leq G_{o,z} \leq C \quad (5.94)$$

$$\sum_z G_{o,z} + \sum_z I_{o,z} = C \quad (5.95)$$

至於各路口時差 Δ_o 至少大於 0 秒，表示與基準路口綠燈同亮，最大不得大於路網共同週期長度，以 5.96 式表示。

$$0 \leq \Delta_o < C \quad (5.96)$$

5.6 最佳化模組整合架構

本研究結合車流推進模組、號誌模組與車道幾何模組，並加入等候結構的概念，將動態車流與靜態路段/路口幾何配置結合納入最佳化模式，提出一套適用混合車流環境之號誌最佳化模式。此三者之關係與連結之變數如圖 5-14 所示。車流推進模組藉由二元變數(δ)判斷是否可由車道移動與紓解，同時透過號誌模組之控制函數(SG)控制不同需求之流動。車道與號誌則根據車道號誌限制(Θ 、 Φ)進行控制，當車道有允許流動才有對應之通行路權，且兩者綠燈時間需一致。藉

由上述相關變數與限制式將三者緊密結合並進行二階段求解。

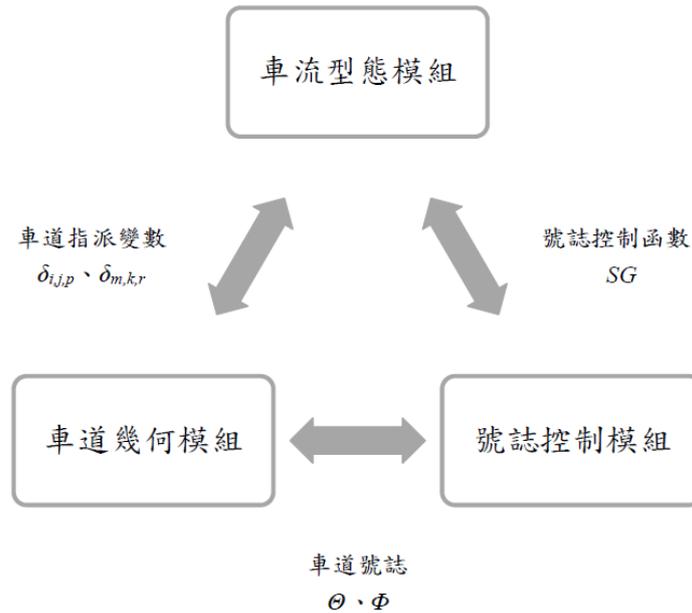


圖 5-14：最佳化模組整合與變數之關係圖

本研究之號誌最佳化模式架構如圖 5-15 之說明。整體模式可區分為車流推進模組、車道幾何模組、號誌控制模組與求解模組，車流推進模組包含不同車道之不同等候型態的車流，具動態演變特性；號誌模組涵蓋路網內各個路口不同號誌群，同一號誌群組可同時控制多個流動；車道群組則將靜態道路幾何條件予以最佳化找出符合車流狀況之車道配置，包含車道數與機車待停區。

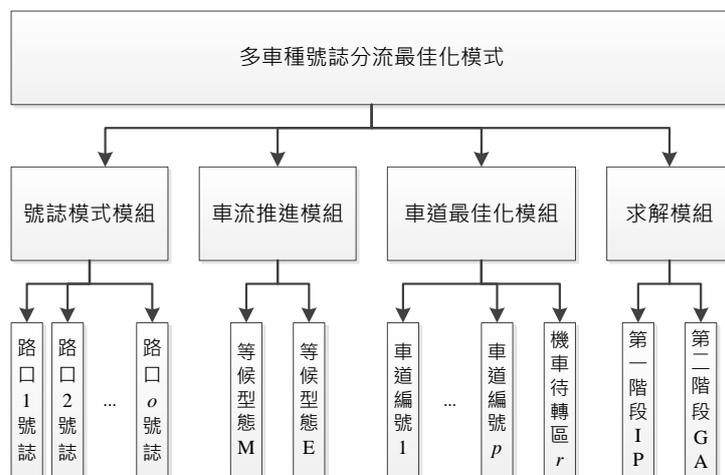


圖 5-15：混合車流號誌最佳化模組架構圖



第六章 參數校估與模式應用



根據單一路口混合車流號誌模式與路網動態模式，本研究亦針對模式相關使用參數進行校估動作。本研究所建立之混合車流號誌最佳化模式中，除依時性的車流變數外，尚包含非依時性之基本參數設定。這些參數形成模式的基本輸入條件、構建道路幾何背景資料、描述車流特性與規範號誌時制限制，應模式應用求解前須給定合理的數值。由於部分參數牽涉混合車流之作用，須以實際車流資料判斷參數值，在模式特定情境假設與合理範圍下，以求提高模式的精確度。因此，以下 6.1 節所校估的參數，將詳細說明參數意義、資料調查與校估方法，若是過去研究之結果，則說明本研究引用依據與參數使用時機。在模式應用上，將校估後的參數輸入模式後，進行第一階段單一路口與第二階段路網之號誌求解，再將第一階段的結果作為第二階段求解的輸入項，於 6.2 節詳細說明。

6.1 參數校估與設定

本研究之號誌最佳化模式係以混合車流為基礎構建，相關參數之擬定也須在混合車流環境下進行調查作設定，包含汽、機車啟動延滯、飽和流率、車道群組空間，以及混合車道推進之自由速率、最小速率，車道佔有空間之最小密度、擁擠密度，速率與密度方程式之指數項。本研究將依序說明第一階段與第二階段模式所使用之參數值。

6.1.1 汽、機車飽和流率

一般號誌計算方法針對個別車道流動會擬定相關條件下的飽和流率，而飽和流率大小影響車道綠燈時間的紓解效率，車道利用情形與號誌週期長短。由於單一路口號誌模式將機車兩段式左轉機車需求視為獨立流動，而非併入直行混合車道處理，因此在限制式形成過程需給予特定飽和流率。一般車道飽和流率受到車輛轉向比、道路線型、坡度、車道寬度與車種組成等影響，臺灣地區公路容量手

冊(2011)【1】年亦有飽和流率計算方法，不同環境下具有特別調整因子，修正飽和流率數值。由於待轉區僅有機車需求，其飽和流率主要受到待轉區域大小所影響。根據蔣靜宜【42】的研究，其調查台北市與新竹市共四處機車專用道之車流資料，建立機車飽和流率可用車道寬度之迴歸式如 6.1 所示。該迴歸方程式與 VISSIM 微觀模擬軟體所輸出之結果相近，可印證實務應用之可行性。

$$S = 2597.4W + 860.5 \quad (6.1)$$

交通部運輸研究所【2】亦針對機車專用道進行車流特性分析與容量探討，發現機車飽和流率隨著車道寬度增加，單位寬度之流率較低，速率卻較為趨於穩定；反之車道寬度較小，單位寬度流率較高，速率較低。該研究以中興橋、林森南路、西大路與沿海二路四處機車專用道資料為根據，繪製其個別速率、密度與流量關係圖，發現中興橋適配結果較為良好，並進一步以曲線配適法、間距法與極值法推估機車專用道容量，得到 3.0 公尺寬的機車速率與密度之迴歸結果如 6.2 式， R^2 為 0.2525。假設機車車流亦存在與汽車相同之 $Q=K \times V$ 關係，則將 V 代換後對 Q 一次微分，得到飽和流率下的密度，再代入原式得到 9,284(veh/hr)之飽和流率值。該研究最後發現以極值法推估之容量較為合理，避免高估，同時增加機車專用道寬度不一定能提高道路使用效率，提出機車專用道容量與車道寬度關係如圖 6-1 表示。根據此結果，本研究機車待轉區之飽和流率值設為 8,000(veh/hr) 進行計算。

$$V = 40.4182 - 0.0439 \times K \quad (6.2)$$

至於汽車部分，根據公路容量手冊之建議，利用直行汽車平均紓解間距 2 秒計算，直行車道之飽和流率為 1,800(veh/hr)，至於右轉流動則以 0.85 進行調整，因此右轉車道之最大紓解率為 1,530(veh/hr)，左轉無衝突情況下以 0.95 調整，最大紓解率為 1,710(veh/hr)。

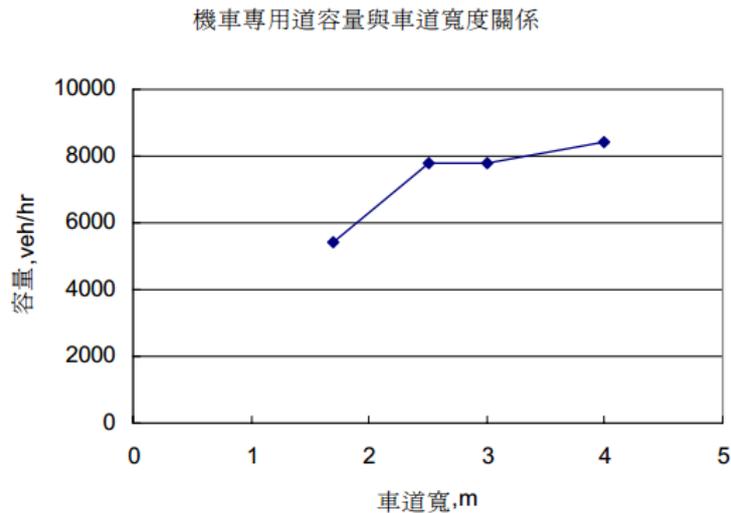


圖 6-1：機車專用道寬度與容量關係圖【2】

6.1.2 汽、機車啟動延滯

第四章曾探討汽、機車啟動延滯差異對路口車流紓解之影響，將此啟動延滯時間差納入模式限制式，作為機車與汽車分流號誌的基礎。本研究根據車流調查路段之資料，分析汽車與機車啟動時間的差異，汽車部分的啟動延滯調查對象為快車道之汽車，而機車部分則是混合車道停等區的機車，以第一部車啟動當作 0 秒，表示延滯為 0，量測接續啟動之車輛與第一部車的時間差，連續調查 12 個週期而得，並將汽、機車啟動延滯與車輛數作圖如圖 6-2 與圖 6-3。圖 6-2 表示機車啟動延滯，縱軸表示啟動車輛數，橫軸表示啟動延滯秒數，發現機車的啟動延滯多數集中在 3.0 秒之內，大於 3.0 秒的機車啟動大多受到車隊影響，啟動紓解量突然增大，最大為 5.0 秒，沒有特定統計分配。至於汽車啟動延滯部分，受到駕駛人反應時間與車輛等候位置影響，汽車啟動延滯較為分散，且部分週期特定延至下有啟動車輛突然增加之趨勢，顯示汽車並非完全跟著前車紓解，有比前車同時甚至提早啟動之現象，而機車具有橫向一起紓解特性，因此啟動車輛數有遞增而後減少的趨勢。總體而言，機車的啟動延滯平均為 1.694 秒，汽車的啟動延滯平均為 3.556 秒，兩者相差 1.862 秒。

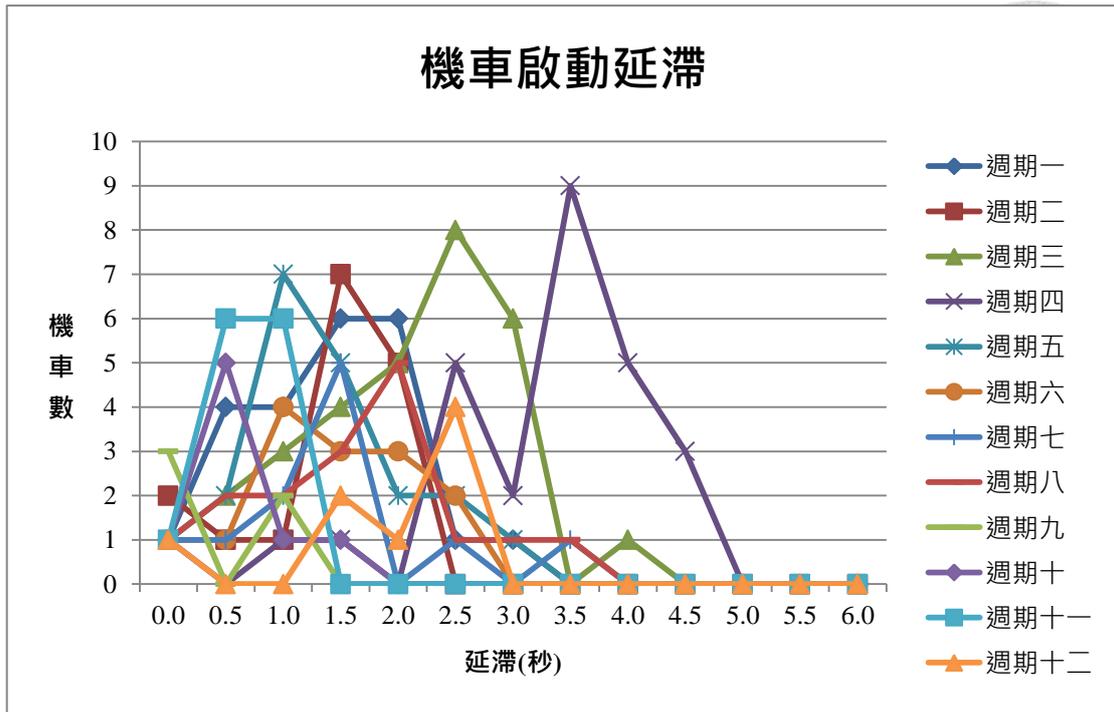


圖 6-2：機車啟動延滯調查值

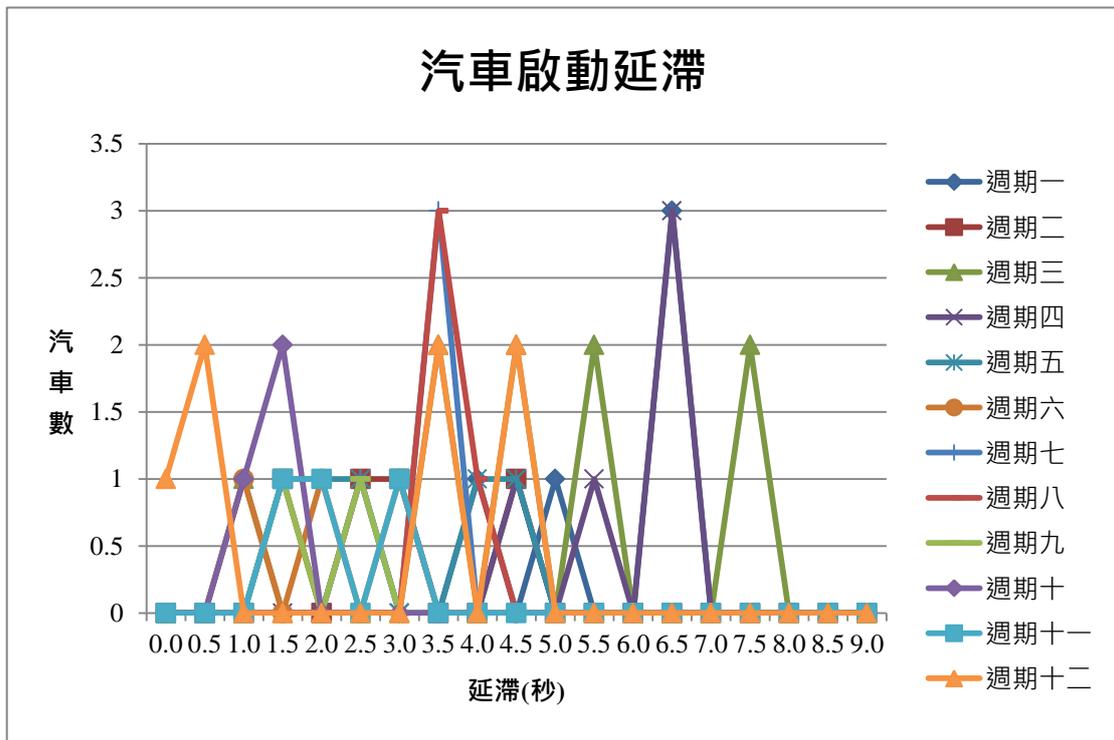


圖 6-3：汽車啟動延滯調查值

6.1.3 自由車流速率

根據交通部公佈之 2011 年臺灣地區公路容量手冊【1】，其中對於快車道與混合車道自由車流速率之推估，在不同車道位置、中央分隔方式與速限之下有不同計算公式。本研究於車流路段推進時將車道群分為快車道與混合車道，屬於標線分隔，假設市區道路速限為 50 (km/hr)，則快車道汽車自由車流推估方程式如 6.3 表示，其中 S 表示號誌化路口距離(公尺)。若以路口間距 300 公尺計算，則快車道之汽車自由速率為 51.17 (km/hr)。

$$V_1^{free} = 52.5 - \frac{3.28}{1 + e^{\frac{S-282.79}{44.51}}} \quad (6.3)$$

至於混合車道部分，分為混合車道之汽車與機車兩者討論，在速限 50 (km/hr)、左側標線分隔情況下，汽車與機車平均自由速率計算如 6.4 與 6.5 式。同樣路段長度 300 公尺下，混合車道汽車自由速率為 51.69 (km/hr)，機車為 51.18 (km/hr)。

$$V_2^{free,PC} = 56.9 - \frac{20.87}{1 + e^{\frac{S-162.49}{124.81}}} \quad (6.4)$$

$$V_2^{free,MB} = 56.3 - \frac{9.53}{1 + e^{\frac{S-311.4}{78.52}}} \quad (6.5)$$

6.1.4 車流最小速率

本研究之路段推進速率模式採用三階段方式計算，若路段密度小於車輛佔有最小密度，則車輛以上述自由車流速率推進；若路段車流已趨於飽和，佔有密度漸增，超過擁擠密度門檻，則車輛僅能以最小速率推進。模式中以最小速率 8 (km/hr)作為汽、機車擁擠狀態下保持穩定行駛的最小速率，大於擁擠密度之車流即以 8(km/hr)推進，直到密度變化至最小密度與擁擠密度兩門檻之間再以混合車流路段推進公式計算。

6.1.5 路段擁擠密度

快車道之路段擁擠密度，在汽車最小速率為 8 (km/hr)情況下，根據本研究第五章使用之動態車長計算方法，若汽車靜態車長為 5.5 公尺，駕駛人平均反應時間 1.0 秒，則最小推進速率下之汽車動態車長為 7.72 公尺，動車寬為 2.05 公尺。以此動態車長作為汽車的路段佔有長度，快車道汽車擁擠密度約為 130 (veh/km)。混合車道尚有機車之佔有空間，同樣以最小均衡推進速率 8 (km/hr)計算，機車的動態車長約為 4.42 公尺、動態車寬 1.02 公尺。以混合車道寬度 3.5 公尺推算，單位佔有面積下除了一輛汽車之佔有空間，尚可容量 2.48 輛機車，相當於機車的面積當量為 0.28 輛汽車。根據上述單位數值計算，混合車道的汽、機車混合擁擠密度約為 220 (veh/km)。

至於機車擁擠密度，本研究同樣以機車專用道校估之速率與密度關係 6.2 式計算，在最小速率 8 (km/hr)下代入公式推估，得到路段機車的擁擠密度為 738.46 (veh/km)。

6.1.6 路段最小密度

快車道汽車最小密度以汽車自由車流速率計算，根據 6.3 之公式，市區汽車路段推進自由速率為 51.17 (km/hr)，其動態車長為 19.71 公尺、動態車寬 2.29 公尺，在此條件下，市區幹道快車道的最小密度約為 50 (veh/km)。至於混合車道部分，機車在自由速率下，動態車長等於 16.41 公尺，車寬為 1.14 公尺。根據此單位佔有面積，扣除汽車部分，每單位尚能容納 1.27 輛機車，相當於面積當量 0.41 輛汽車。因此混合車道汽、機車混合最小車流密度為 76 (veh/km)。整理本研究推進模式之密度門檻如表 6-1 表示。

表 6-1：不同車道群組之最小、擁擠密度門檻

車道群 \ 密度門檻	最小密度(veh/km)	擁擠密度(veh/km)
快車道	50	130
混合車道	76	220

6.1.7 紓解密度

根據 5.4.5 節等候結構紓解模式，汽車與機車的路口紓解速率受到飽和紓解率、擁擠密度與紓解密度差值影響，並非完全以最大車流速率紓解。由於國內缺乏路口紓解密度之調查值，僅有探討汽、機車路口紓解流率之差異，本研究以實際車流資料校估汽車與機車路口紓解密度，作為模式輸入參數。由於紓解密度為出現在路口紓解的車流參數，以停止線往上游回推 30 公尺作為調查範圍，量測每一部車通過此路段的時間長度，計算其空間平均速度(space mean speed, SMS)。在此空間平均速度下，流量與速率的比值代表汽、機車紓解時的速度，關於此參數的測量方法如圖 6-4 所示。而空間平均速度之算法，乃將範圍長(D)除上各車輛通過時間之平均(t_i)，以 6.6 式表示， N 代表觀測的總車輛數。

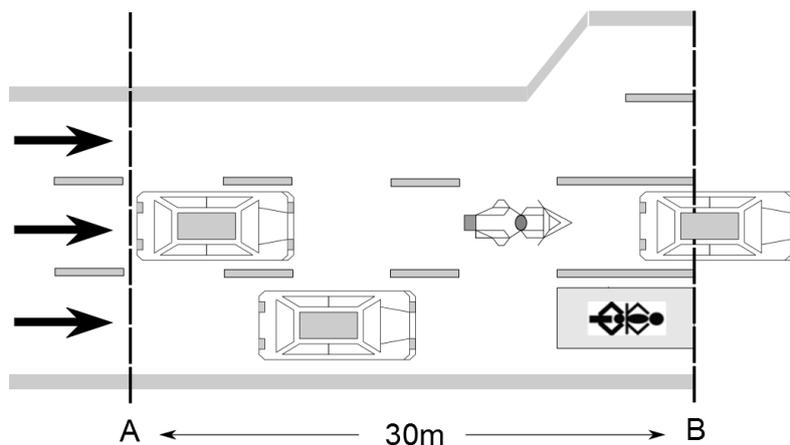


圖 6-4：汽、機車紓解密度調查範圍

$$\bar{u}_s = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_i t_i} \quad (6.6)$$



由於每週期到達之汽、機車數量不同，本研究將汽車與機車個別觀察之紓解過程時間平均速度與紓解密度繪製如圖 6-5 與圖 6-6。

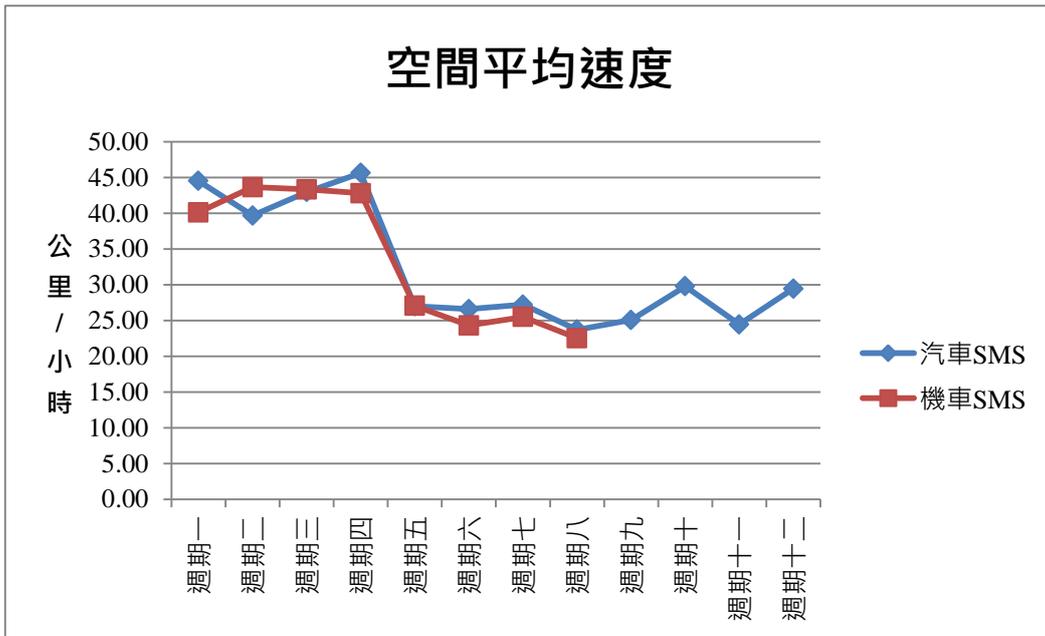


圖 6-5：汽、機車紓解之空間平均速度

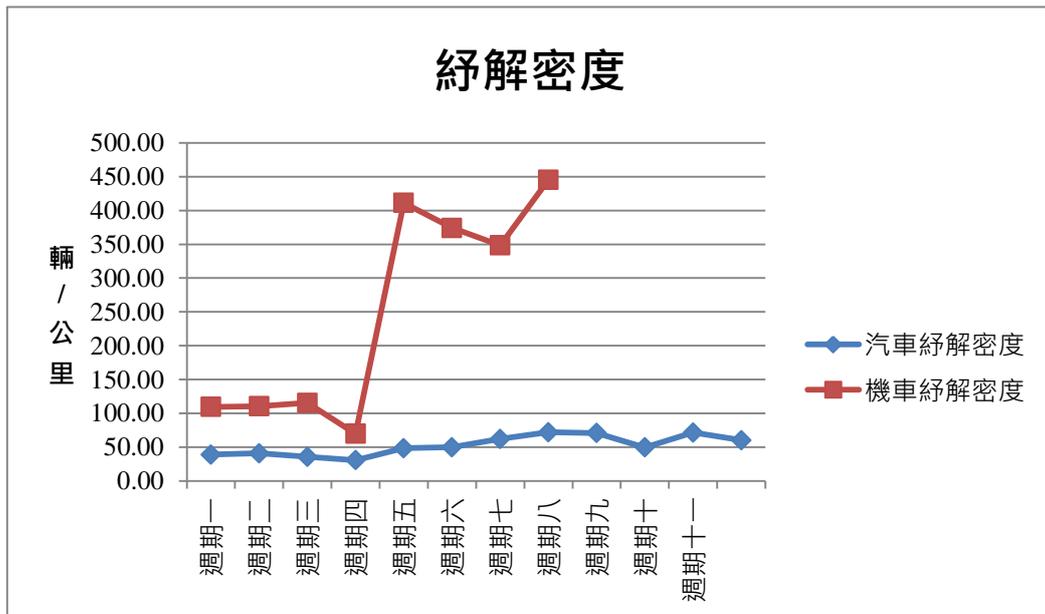


圖 6-6：汽、機車之紓解密度

由圖 6-5 與圖 6-6 可知汽車與機車的紓解空間平均速度差異不大，每一部車通過觀測範圍(A 點至 B 點)的時間幾乎相同，兩者以車隊方式往下游推進。而汽車的紓解密度差異較小，在每週期在 30 至 70 (veh/km)的範圍震盪，反而機車變化幅度較大，原因在於機車紓解過程較無規則，同車道可能存在多部機車一起通過停止線，而每週期的流量差異變化也會導致此一結果。平均而言，汽車的空間平均速率為 32.17(km/hr)，機車則是 33.67 (km/hr)，而汽、機車紓解密度，前者為 52.53 (veh/km)，後者是 248.12 (veh/km)。

6.1.8 路段幾何空間

在第二階段模式中，各車道群組需擬定最大車輛可儲放空間，以利過飽和限制式與流量守恆限制式之判斷，避免車輛無限累積而超過現實道路空間設計。由於本研究將車輛單位轉為面積，路段儲車空間也是以面積描述。車道群組的儲車面積受到路段長與車道寬限制，本研究假設快車道寬度 3.0 公尺，混合車道寬度 3.5 公尺，汽車的靜態車長 5.5 公尺，車寬為 2.0 公尺進行推估。各車道群組儲車空間之總和即為路段整體車輛儲存面積。機車的部分受限於車道限制，以混合車道空間與機車的靜態面積(長 2.2 公尺、寬 1.0 公尺)估計。

6.1.9 推進模式參數

本研究將市區路段車流推進分為三個密度區間計算，其中密度介於最大密度與擁擠密度之間採用密度與速度關係式估算推進速率。速度與密度函數並非傳統車流之線性關係，而是受到兩指數(α 、 β)影響的非線性方程式，應用時必須由國內車流資料進行校估。吳契輝【16】曾針對快車道與混合車道此兩組參數以羅斯福路與忠孝東路之車流資料校估，在絕對平方誤差百分比(MAPE)為合理預測範圍下，得到快車道與混合車道參數值如表 6-2 所示。對於 α 值快車道與混合車道較為近似，但混合車道 β 值明顯較快車道高出許多，顯示混合車道推進速率受密度影響變異幅度較大。

表 6-2：混合車流之推進公式參數校估

車道類型	α	β	MAPE
快車道	1.53	0.62	17%
混合車道	1.51	2.25	14%

6.1.10 左轉車道溢流參數

車道群組的通過量與匯入路口端車道之車輛數不一定相同，受到該車道儲車空間與溢流影響有所差異。本研究在路段推進過程分為快車道與混合車道，在路口端根據轉向需求與車種限制分成左轉車道、快車道與混合車道，以溢流矩陣定義彼此車道利用與車流匯入關係。若為完全阻隔則無匯入量， $\omega = 1$ ；如果沒有阻隔則通過車輛可完全匯入路口端車道， $\omega = 0$ 。其中左轉車道對快車道之溢流關係，本研究以溢流參數表示影響程度。根據 Liu and Chang【81】的研究，此參數值約為 0.18。由於國內缺乏此一參數之校估資料，而國外之車流環境也與國內相異，因此本研究以實際民生東路三段之車流調查資料進行校估，觀察數個週期下左轉彎溢流車輛對直行通過量之影響。該路段包含 2 個快車道、2 個混合車道，於近路口端設有左轉彎供左轉車輛通行。本研究以上午尖峰約 14 個週期的資料進行分析，分析方法如 6.7 式。



圖 6-7：左轉溢流參數調查地點（資料來源：Google Map）

$$q_2^i[k] = q_2^{i,pot}[k] \times \left[\phi_{32} \times \left(1 - \frac{x_3^i - N_3^i}{N_2^i} \right) \right] \quad (6.7)$$



根據 6.7 式，在左轉車道發生溢流情況下，快車道(車道群組 2)的實際通過量($q_2^i[k]$)等於無溢流下的潛在通過量($q_2^{i,pot}[k]$)與溢流參數(ϕ_{32})以及快車道被佔有剩餘空間之乘積。在民生東路上午尖峰連續 14 個週期觀測結果，左轉彎儲車空間(N_3^i)為 5 輛汽車，快車道(N_2^i)最多可容納 22 輛汽車，在無溢流產生的週期內平均通過量為 30 輛車，計算後得到平均溢流參數值為 0.9289。本研究進一步將此參數固定，隨著左轉彎停等車輛增加，實際通過量之變化，繪製如圖 6-8。由此圖發現在沒有溢流車輛之前，快車道可維持一定通過量，但開始出現溢流車輛後，其通過量開始遞減，直到最大儲車空間為止，通過量為 0。

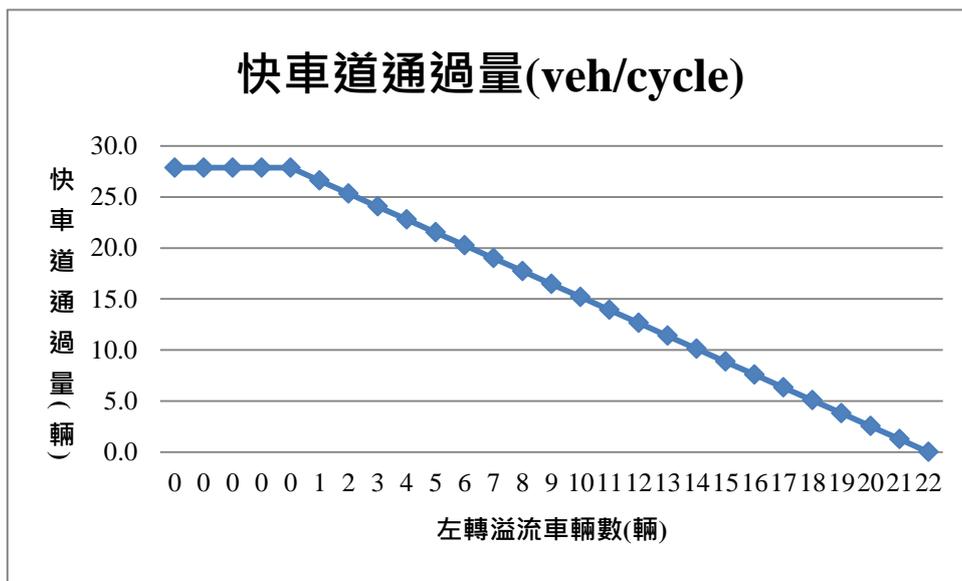


圖 6-8：左轉溢流下每週期快車道通過量

6.2 模式應用

經由相關參數校估與擬定後，可以進行第一階段單一路口模式與第二階段路網之號誌模式求解。第一階段模式主要針對進入車道、離開車道、機車待轉區、轉向標線等幾何配置進行求解，在合理週期長度下決定各流動的綠燈起始時間與綠燈長度。根據相容與衝突流動定義，具有相同綠燈變數的流動允許出現在同一

時相，作為第二階段時相求解的基礎。當固定之幾何配置決定後，將第一階段號誌結果作為第二階段的輸入項，考慮動態車流演變進行路網共同週期、各路口綠燈時比、時差之最佳化。一般而言道路車道數與待轉區並不會根據需求劇烈變化，受限於經費與頻繁施工造成的交通衝擊，多數的服務水準改善集中在號誌時制重整。有鑑於此，本研究特將幾何最佳化與號誌調整模式區分為兩階段模式，在既有道路條件最佳化後才進行綠燈時間的微調。以下各小節將說明第一階段與第二階段模式之應用求解程序。

6.2.1 第一階段模式應用背景條件

第一階段模式為 MIP 型式，在求解時需定義路口方向數(approaches)、最大指派車道數、待轉區、流動數，宣告欲求解變數與給定相關參數進行最佳化。針對上述項目條列方式說明：

1. 路口方向數：本研究以單一路口 4 個方向(approaches)之標準十字路口進行求解，北向(northbound)為方向 1 並順時針以此類推至方向 4。
2. 流動數：各方向包含左轉、直進與右轉三種流動，其中機車待轉區流動為直行方向，附屬於直進車流集合(sets)中成為次集合(subset)。
3. 最大指派車道數：受限於道路寬度影響，車道數不能無限增加，因此各方向最大指派車道數(包含進入車道與離開車道)之上界為 19 個，最佳化過程不得超過此一限制。
4. 機車待轉區：根據待轉區設置限制式，各方向可決策是否設置機車待轉區，路口整體而言待轉區數量最多為 4 個，最少為 0 個，包含於路口幾何配置大集中。

除了個別集合的內容，其餘各集合之間之關聯也須加以定義，作為模式限制式判斷執行與否的依據。關於第一階段的路口幾何設定條件如圖 6-9 所示。

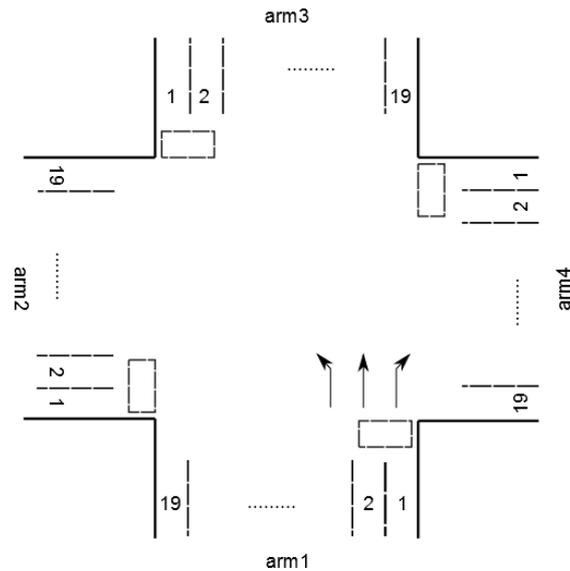


圖 6-9：第一階段路口背景條件說明

6.2.2 第二階段模式道路條件說明

第二階段路網應用背景如圖 6-10 所示。第二階段的輸入項乃根據第一階段結果而定，詳細如以下條列之說明。

1. 路口數：本測試路網涵蓋 1、2、3、4 共四個路口。
2. 車輛進入端點：包含 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 共 10 個車流需求產生點。
3. 端點進入車種：本研究包含機車與汽車 2 種車種，暫不考慮其他車輛。
4. 進入路段：連結端點之路段，為車輛進入路網的通道，涵蓋路段 1、4、5、8、9、12、13、16、17、22 共 10 個進入路段。
5. 離開路段：車輛離開控制路網的路徑，包含路段 2、3、6、7、10、11、14、15、21、26 同樣 10 個離開路段。
6. 內部路網：沒有連結車輛進入端點，也不屬於離開路網之路段，為路口之間的連結路徑，包含東向的路段 18、19、20 與西向的路段 23、24、25。

7. 車道數：第一階段最佳化之進入車道數為 4 個，離開車道數 4 個，其中 1 左轉專用道、1 快車道，以及外側 2 個混合車道，最外側混合車道為直行與右轉共用。
8. 機車待轉區：根據第一階段的結果，在橫向衝突數與衝突量限制下，各方向欲左轉的機車須至待轉區進行兩段式左轉，因此路口各方向皆設置有機車兩段式左轉待停區。
9. 流動數量：各路口之進入路段包含左轉彎、快車道與混合車道 3 個群組，路網共計 48 個車道群組。
10. 路段長度：第一階段並無針對路段長度設定，此階段以 300 公尺為預設值，其中左轉彎長度為 30 公尺，可容納 5 部左轉車。
11. 車道寬度：快車道為 3.0 公尺，混合車道採用 3.5 公尺。

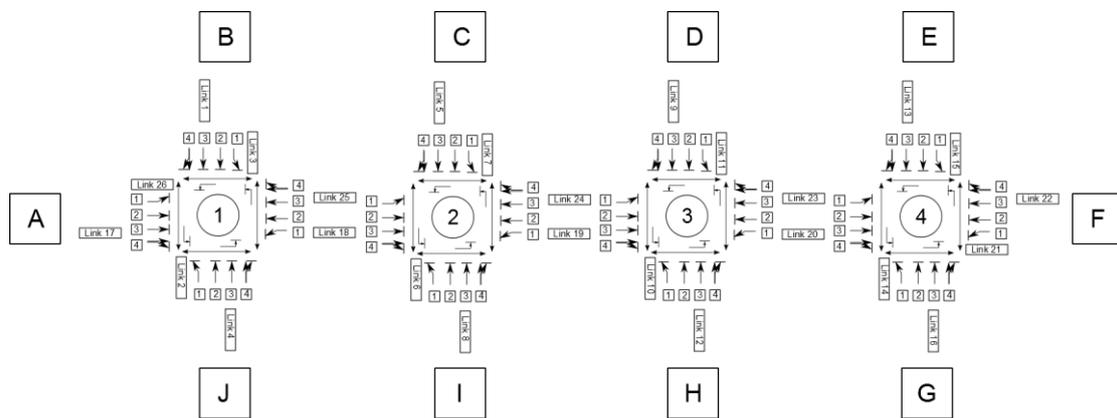


圖 6-10：第二階段路網應用條件說明

6.3 模式求解

在模式應用求解上，第一階段號誌模式屬於混合整數規劃型式，本研究以作業研究軟體 GAMS 23.2.1 版進行求解。GAMS 為 General Algebraic Modeling Systems 之縮寫，可支援線性規劃、混合整數規劃、非線性規劃、限制式非線性等數學模式之求解，藉由表格化資料載入、直觀之程式編碼進行變數定義與宣告



以及目標式與限制式之撰寫。針對第一階段號誌化路口方向數、車道數、流動種類、機車待轉區等集合(sets)之定義相當方便，未來也能進一步擴充與更新，且在模式線性限制式下可求得最佳解。唯第二階段路網號誌最佳化具有動態模擬之機制，模式中具有大量非線性限制式與條件判斷，須採用巨集之啟發式演算法求解與節省求解時間。關於啟發式演算法之應用相當廣泛，本研究以 MATLAB (R2009a)內建最佳化工具箱基因演算法進行求解。MATLAB 為適合大量矩陣運算之數值應用軟體，對於第二階段路網狀態變數可同時執行矩陣運算與元素之間的點運算。MATLAB 具有多樣化最佳化工具提供使用者運用，同時也有使用者自行撰寫程式之功能，可發展複合式求解演算法。另外，MATLAB 的變數視覺化功能讓使用者能隨時修正模式，確認變數之合理性，藉由偵錯工具找出語法出錯的程式。本研究第二階段模式具有時間先後之動態方程式，須以迴圈方式運算，同時根據不同條件判斷應該執行的程式碼，確保輸出結果的正確性。

MATLAB 之基因工具箱提供使用者互動式 GUI 介面，可根據模式需求設定限制式、變數上、下界與變數個數。使用者根據求解之需求與精細度選擇演算之機制與收斂條件。給定欲求解之目標函數名稱與設定條件後，MATLAB 會讀取程式編輯檔(M file)之程式與基因並套用工具箱之演算邏輯求解，輸出各個基因之最佳解與目標函數值(適合度值)。關於基因工具箱變數設定與求解參數選擇介面如圖 6-11 表示。

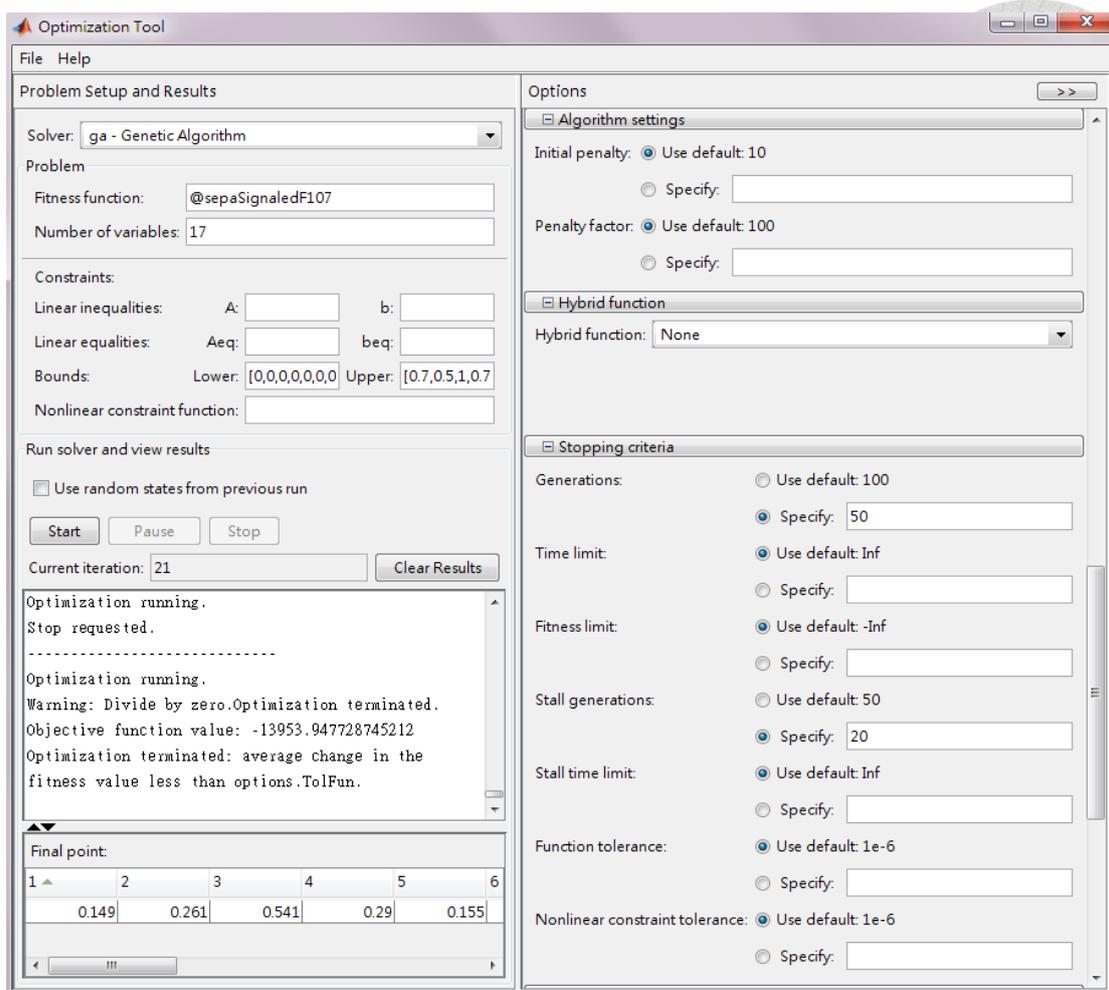
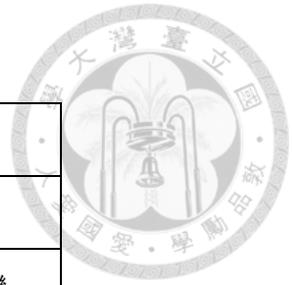


圖 6-11：MATLAB 之基因工具箱求解應用與最佳化參數擬定介面

關於本研究第二階段應用基因工具箱相關求解參數設定如表 6-3 所示。其中變數範圍根據第一階段號誌求解結果而有不同，控制基因之搜尋幅度以確保號誌結果輸出的合理性與減少迭代次數，同時將求解後最佳目標函數值、基因繪製二維圖形以利觀察迭代過程中目標函數的變化，以及與最佳解的差異。每次迭代母體大小假設為 10 個，藉由均勻隨機方式選擇交配，且設定 1% 的突變機率避免落入區域最佳解空間，維持解的歧異性。根據測試結果，幾乎所有情境在達到最大演化世代數前即已收斂，因此本研究設定最大迭代次數不超過 50 代，且停滯世代需維持 20 代以上才判斷收斂至最佳解，至於求解時間與停滯時間則不予設限。

表 6-3：基因工具箱相關參數設定

母體大小(population size)	10
適合度調整(fitness scaling)	隨機
染色體選擇(selection)	均勻隨機
交配機率(crossover fraction)	80%
交配型式(crossover)	單點
突變機率(mutation)	1%
最大演化世代數(generations)	50
停滯世代數(stall generations)	20
求解時間限制(time limit)	無限
停滯時間限制(stall time limit)	無限



6.4 號誌最佳化軟體 TRANSYT-7F 之使用

本研究為進一步分析號誌輸出結果之差異，以國際上廣泛使用之號誌最佳化軟體 TRANSYT-7F 進行比較。TRANSYT-7F 係由英國運輸實驗室(Transportation Research Laboratory, TRL)所開發之 TRANSYT 系列軟體發展而來可進行多路口週期、時比與時差之最佳化，目標函數為最小負效用指標，亦可針對最大續進機率(PROs)、最大通過量(Throughput)之目標進行分析【87】。TRANSYT-7F 求解演算法包含爬山搜尋法(hill climbing)與基因演算法，根據最佳化需求設定迭代條件，本研究以基因演算法進行求解。在車種處理上，本研究將機車流量轉換為小客車當輛數輸入軟體中，進行路網的週期、綠燈時比與路口時差最佳化。TRANSYT-7F 在應用上可分為幾個步驟，分別以條列式詳細說明。

1. 繪製路網(Map)：路口與路段分別以節點(node)與節線(link)方式表達，路口可設定基本幾何條件，路段則分為單向與雙向道，如圖 6-12 所示。

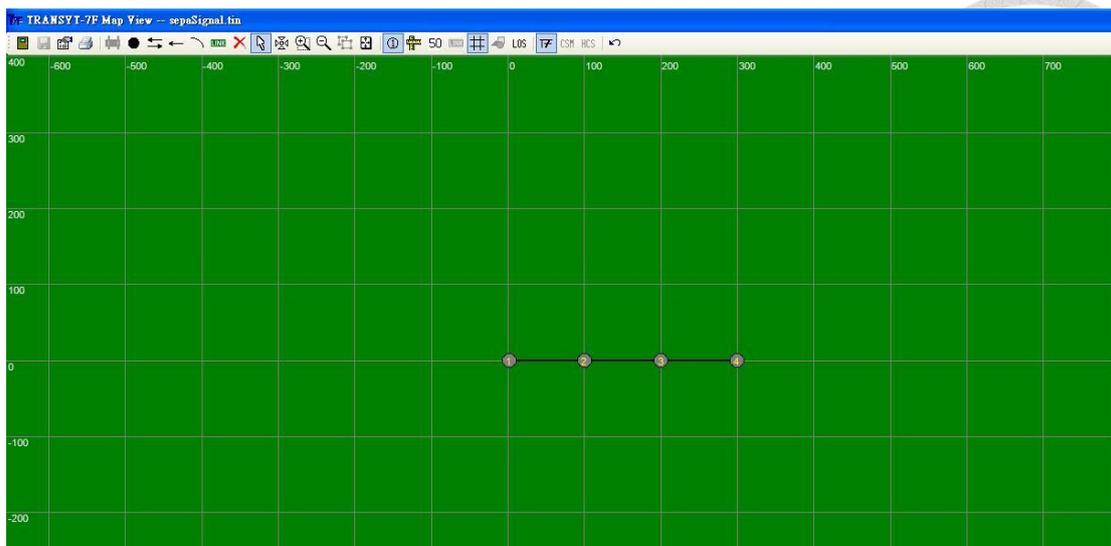


圖 6-12：TRANSYT-7F 路網繪製圖

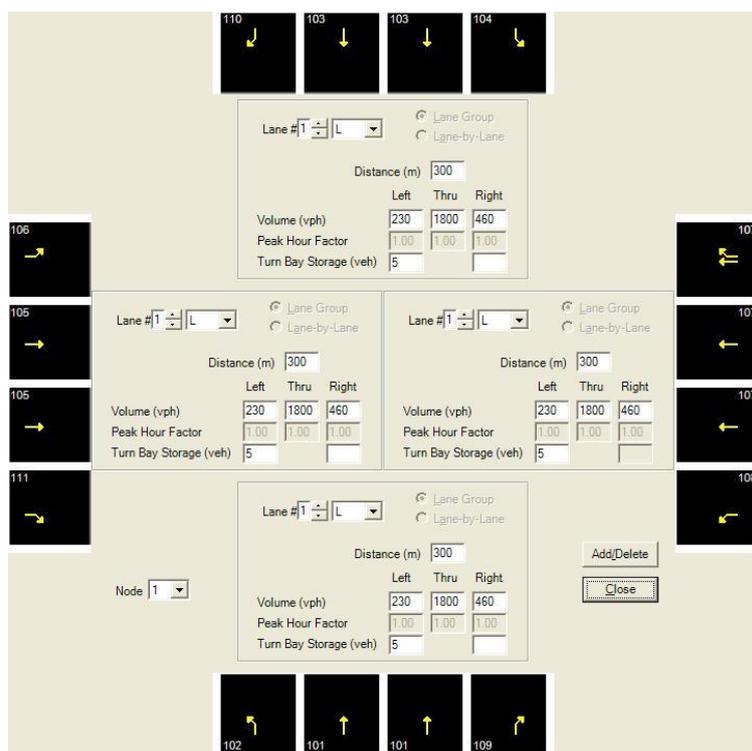


圖 6-13：TRANSYT-7F 車道配置與流量輸入介面

2. 車道配置(Lane)：針對路網中各路口設定各方向的轉向車道配置，包含左轉、直行、右轉流動，甚至共用車道(shared lane)設計。決定轉向流量後須給定各方向之轉向流量，以及與上游路口之路段長度(Distance)，如圖 6-13 表示。

- 
3. 交通量(Traffic)：此步驟檢核路口各方向流量輸入值是否正確，同時可調整各流動之飽和流率。
 4. 時相設計(Timing)：本階段為號誌設計部分，可分為定時與觸動控制。在定時控制基礎下，設定各路口的時相數、時相順序，以及各時相之允許流動。由於週期長度為初始預設值，根據此週期分配各時相綠燈時間，包含黃燈與全紅清道時間，同時綠燈時間須滿足最小綠燈限制。各路口之號誌也可設計為連鎖控制(coordinated control)，進行時差與時比最佳化。
 5. 飽和流率(Satflow)：設定各流向之基本飽和流率、車道數與車道寬度，若有重車比例、坡度與土地使用型態也可於此步驟作選擇及調整。
 6. 最佳化分析(Analysis)：設定最佳化之求解條件，包含欲最佳化之週期長度、時比與時差。求解方法分為爬山法與基因演算法，若為爬山法需給定週期尋之上、下界；基因演算法則給定起始週期長度、週期邊界條件與最大迭代世代數進行最佳化。績效函數(PI)包含上述之最小負效用指標、最大續進機率(PROs)、最大通過量(Throughput)等。
 7. 績效模擬(Simulation)：將最佳化之時制放入路網進行績效模擬，輸出各流動延滯、停等次數、等候長度與服務水準。對路網整體而言包含總延滯時間、總旅行時間、平均延滯時間、總停等次數與飽和度等，可分析號誌輸出結果之優劣。

6.5 微觀車流模擬軟體 VISSIM 之使用

本研究為了進一步比較模式與 TRANSYT-7F 輸出號誌之績效差異，以微觀車流模擬軟體 VISSIM 作為績效評估工具，比較兩者在路口平均車輛延滯與通過車輛數之大小。由於 VISSIM 可處理多車種之微觀模擬，尤其是機車部分可藉由參數調整以符合實際車流情況，同時可畫設機車停等區空間與機車兩段式左轉之

路徑(route)。關於 VISSIM 模擬之路網如圖 6-14 所示。有關 VISSIM 應用相關參數設定與功能以條列方式說明。

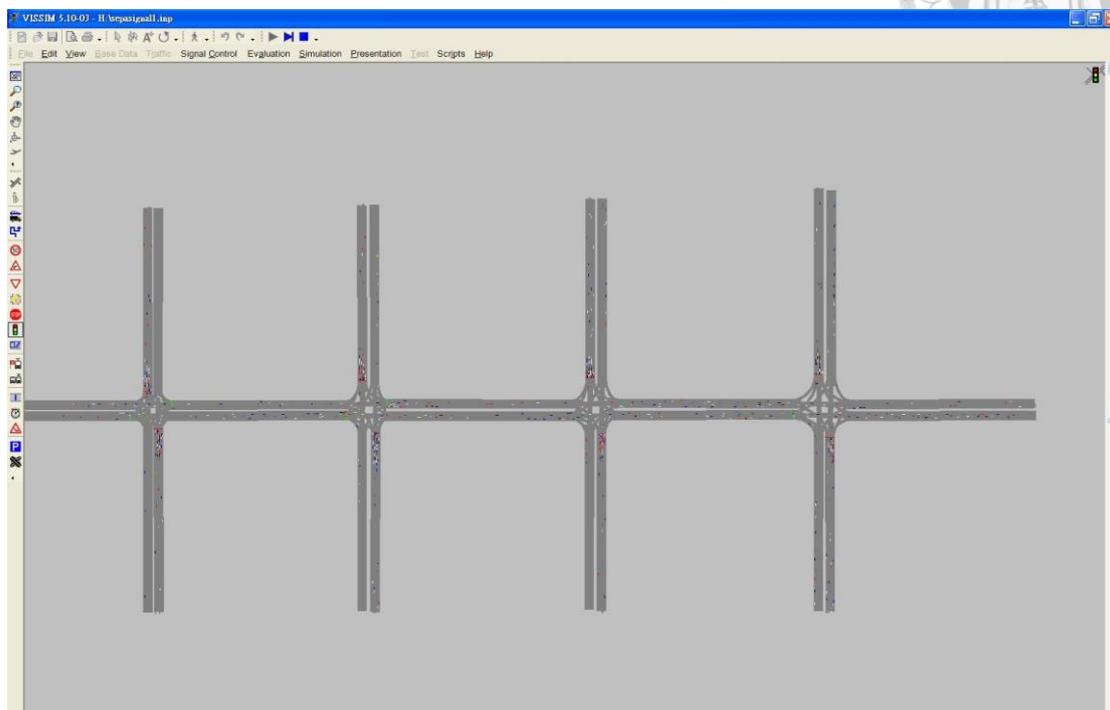


圖 6-14：微觀車流模擬軟體 VISSIM 之績效評估路網圖

1. 路網繪製(Link)：涵蓋模擬路網內所有路段與車道，設定車道數、路段長寬與方向，並連結(connect)各轉向的路段維持車流的續進。
2. 車輛產生(Vehicle Inputs)：設定路網車輛產生點與流量大小，定義各車種相關參數以進行模擬。
3. 設定路徑(Route)：給定各方向每一車種之轉向路徑、轉向交通量配合號誌時制通過路口。
4. 號誌時制(Signal)：先定義各模擬路口之號誌群組，再將模式與 TRANSYT-7F 產生之時誌計畫輸入模式，維持路口各方向車流路權之運作。
5. 績效評估(Evaluation)：選擇欲輸出的績效項目，本研究以路口、分車種平均車輛延滯與通過車輛數為指標，並開始進行模擬(simulation)。

第七章 模式求解與敏感度分析



7.1 模式之敏感度分析

針對第一階段單一路口混合車流號誌模式，本研究擬定不同流量、不同車道指派數量、轉向比與混合比之情境進行模式敏感度分析，測試不同環境下路口號誌、容量與幾何配置之變化。由於第一階段結果為第二階段求解之基礎，藉由參數變動測試模式輸出結果之合理性，使第二階段號誌調整的結果更為精準。以下各小節將詳細說明每一種情境之測試目的與參數變化情形。

7.1.1 流量情境

在車道配置固定情況下，不同汽車需求量大小影響路口剩餘容量之多寡，而容量乃決定路口車流是否發生過飽和與服務水準之因素。為了驗證此一結果，本研究在機車需求量固定下，擬定 5 種不同汽車流量情境測試路口容量、週期與機車待轉區設置與否的變化，結果如表 7-1 所示。由該表得知隨著汽車流量增加，路口一般車道之剩餘容量(μ_1)逐漸降低，甚至情境 4 與情境 5 之剩餘容量已小於 1，顯示路口逐漸達飽和狀態。機車待轉區的容量受限於機車左轉需求與直行車道號誌，剩餘容量無大幅改變，唯獨情境 1 與情境 2 因為機車衝突量未達門檻緣故，待轉區設置與否尚未確定，因此目標式中不納入機車待轉區剩餘容量(μ_2)之最大化。至於機車兩段式左轉待轉區的設置，由於所有情境之進入車道數皆為 4 個，符合橫向車道大於 3 車道之限制，因此各方向皆設有機車待轉區。路口週期大小皆為 120 秒，原因是本研究之目標式以容量最大化求解，因此無論未飽和或過飽和情境，週期長度皆收斂至模式設定之最大週期以滿足各車道指派流量最大之目標。後續情境分析將不在探討週期長度之變化，由第二階段模式根據車流等候型態之組成進行調整。

表 7-1：不同汽車需求量路口容量與待轉區設置變化

情境	N_T	Q^{PC}	μ_1	μ_2	C	$\delta_{m,k,r}$
1	8	210	2.870	0	120	(1,1,1,1)
2	8	630	1.611	0	120	(1,1,1,1)
3	8	1050	1.120	1.045	120	(1,1,1,1)
4	8	1680	0.762	1.045	120	(1,1,1,1)
5	8	2100	0.632	1.045	120	(1,1,1,1)

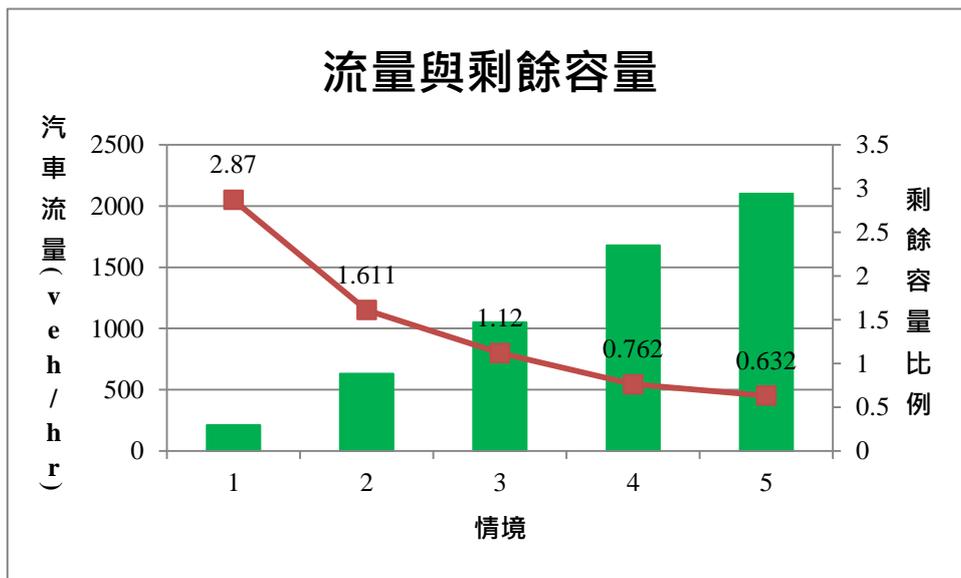


圖 7-1：汽車流量與路口剩餘容量關係

7.1.2 車道指派情境

當可指派之車道數變動時，模式最佳化之進入車道與離開車道組合會因此改變，影響路口容量與機車停等區之設計。本研究固定路口各方向汽車流量 735 (veh/hr)、機車需求 1,300 (veh/hr)情況下，逐步縮減最大可指派車道數，如表 7-2

表示。由該表發現隨著總車道數減少，可通過之流量降低，路口剩餘容量遞減，車道配置由對稱型態開始出現各方向不對稱之結果。對進入車道而言，部分右轉流動受限於車道指派而與直行流動形成共用車道，而離開車道數仍須滿足由各方向匯入之流動需求。在此汽、機車需求下，機車左轉衝突量介於 2 車道之門檻與 3 車道門檻之間，依據待轉區限制式決定各方向是否設置機車待轉區。當總車道數為 4，此時進入車道為 2 車道，衝突量大於門檻需設置待轉區，如情境 1 之結果。若總車道為 5，各方向進入車道不完全對稱，由於方向 2(東向)與方向 3(南向)僅有 2 車道，其個別機車待轉方向(方向 1 與方向 2)必須設有待轉區供機車兩段式左轉。情境 3 與情境 1 結果類似，只是進入車道變成 3 車道，未達衝突門檻不需設待轉區；情境 4 與情境 2 皆為非對稱車道設計，橫向衝突大的方向其下游待轉方向須設置待轉區。關於車道指派情境各方案的詳細車道配置如圖 7-2 所示。

表 7-2：車道縮減與路口容量、幾何配置之關係

情境	N_T	μ_1	C	$\delta_{m,k,r}$	$e_{\Gamma(i,j)}$	$\sum \beta_{i,p}$
1	4	0.727	120	(1,1,1,1)	(2,2,2,2)	(2,2,2,2)
2	5	0.727	120	(1,1,0,0)	(2,3,3,2)	(3,2,2,3)
3	6	1.235	120	(0,0,0,0)	(3,3,3,3)	(3,3,3,3)
4	7	1.235	120	(0,1,1,0)	(4,4,3,3)	(3,3,4,4)
5	8	1.611	120	(1,1,1,1)	(4,4,4,4)	(4,4,4,4)

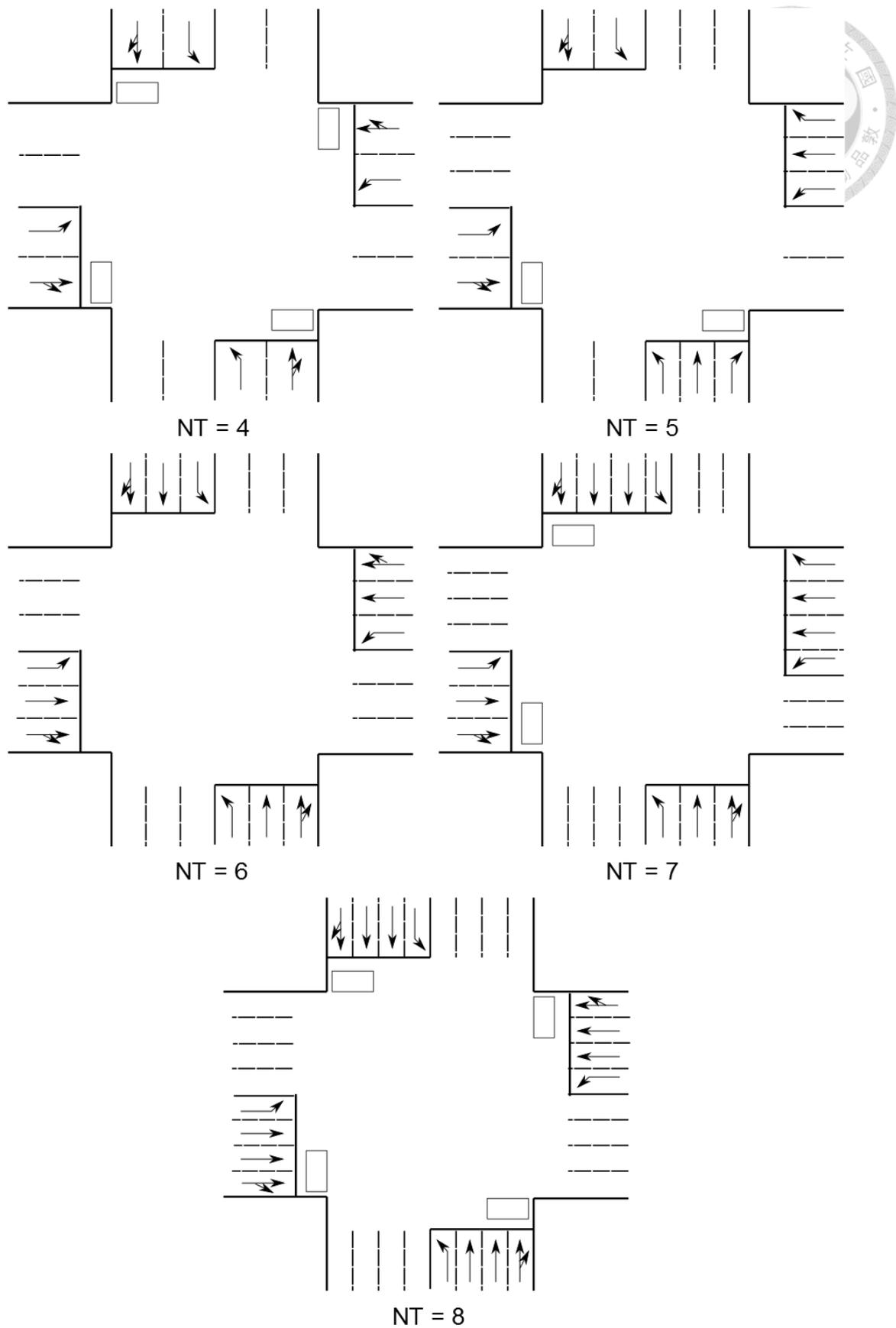


圖 7-2：車道縮減與幾何配置、轉向標線之關係圖

7.1.3 轉向比情境

本研究在固定車道數為 8 車道，各方向進入車道數皆為 4 車道情況下，改變汽車的轉向需求比例，觀察各方向車道配置的變化，如表 7-3 之結果。該表僅列出某一方向之配置情形，其餘方向皆相同。情境 1 汽車右轉量為 120 (veh/hr)，此時右轉流動與直行共用車道，隨著右轉需求增加至 170 (veh/hr)，原本共用之直行車道變為右轉專用道，此時路口剩餘容量降低，左轉車道仍維持 1 車道。情境 3 繼續增加左轉與右轉汽車比例，此時左轉增加為 2 個專用道，右轉與直行車道共用，路口剩餘容量略為減少。

表 7-3：汽車轉向比與車道配置之變化

情境	N_T	Q^{PC} (左轉：直行：右轉)	$\delta_{i,j,p}$ (左轉：直行：右轉)	μ_1
1	8	(60 : 450 : 120)	(1 : 3 : $\tilde{1}$)	1.611
2	8	(110 : 350 : 170)	(1 : 2 : 1)	1.489
3	8	(160 : 250 : 210)	(2 : 2 : $\tilde{1}$)	1.281

(~表示右轉與直行車道共用)

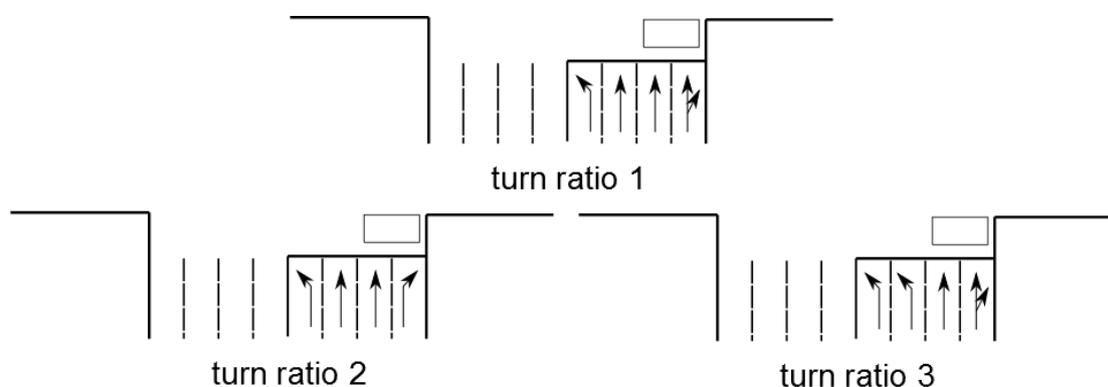


圖 7-3：汽車轉向比與車道標線配置之關係圖



7.1.4 混合比情境

固定路口各方向汽車流量為 1,050 (veh/hr)情況下，改變機車的混合比，逐步增加機車需求量觀察車道配置變化情形，發現右轉車道由共用變為專用車道，而總進入車道數不變情況下，路口容量仍然依序減少，顯示直行車輛可通過數量降低，但基於衝突限制各方向依舊需要設置機車待轉區，如表 7-4。

表 7-4：機車混合比與車道配置變化之關係

情境	N_T	Q^{MB} (左轉：直行：右轉)	$\delta_{i,j,p}$ (左轉：直行：右轉)	μ_1	$\delta_{m,k,r}$
1	8	(50 : 500 : 100)	(1 : 3 : $\tilde{1}$)	1.271	(1,1,1,1)
2	8	(100 : 750 : 200)	(1 : 2 : 1)	1.160	(1,1,1,1)
3	8	(200 : 1000 : 400)	(1 : 2 : 1)	1.042	(1,1,1,1)

7.1.5 非對稱路口情境

上述探討的情境分析皆針對路口各方向流量、車道指派為對稱情況下討論，本研究進一步將各方向指派車道數設定為不同進行最佳化，探討各方向車道配置的關係。現實環境中路口不一定皆由幹道或車道數一致的道路所組成，受限於路道面積與車流方向性差異，各方向之車道數可能出現不對稱情況。本研究進行表 7-5 兩種情境之討論，情境 1 為南北向 8 車道，東西向 7 車道情況下進行車道配置最佳化；情境 2 將情境 1 各縮減 1 指派車道觀察幾何配置的變化。結果發現情境 1 各方向離開車道數雖皆為 4 車道，但南北向各多了 1 條直行車道，右轉流動皆與直行共用車道。此時南北向機車左轉形成衝突，其下游方向(方向 2 與方向 4)需設置機車兩段左轉待轉區，路口尚有 39.8%的剩餘容量。情境 2 縮減 1 車道後，方向 3(南向)出現 4 個離開車道，其餘皆為 3 車道，而方向 1(北向)多了 1 條

直行車道，右轉流動仍皆維持共用車道。此時路口剩餘容量降為 23.5%，方向 4(西向)需設有機車待轉區供北向欲左轉的機車待轉。



表 7-5：不對稱路口車道與機車待轉區配置情形

情境	N_T	$e_{\Gamma(i,j)}$	$\delta_{i,j,p}$ (左轉：直行：右轉)	μ_1	$\delta_{m,k,r}$
1	(8,7,8,7)	(4,4,4,4)	(1 : 3 : $\tilde{1}$) (1 : 2 : $\tilde{1}$) (1 : 3 : $\tilde{1}$) (1 : 2 : $\tilde{1}$)	1.398	(0,1,0,1)
2	(7,6,7,6)	(3,3,4,3)	(1 : 3 : $\tilde{1}$) (1 : 2 : $\tilde{1}$) (1 : 2 : $\tilde{1}$) (1 : 2 : $\tilde{1}$)	1.235	(0,0,0,1)

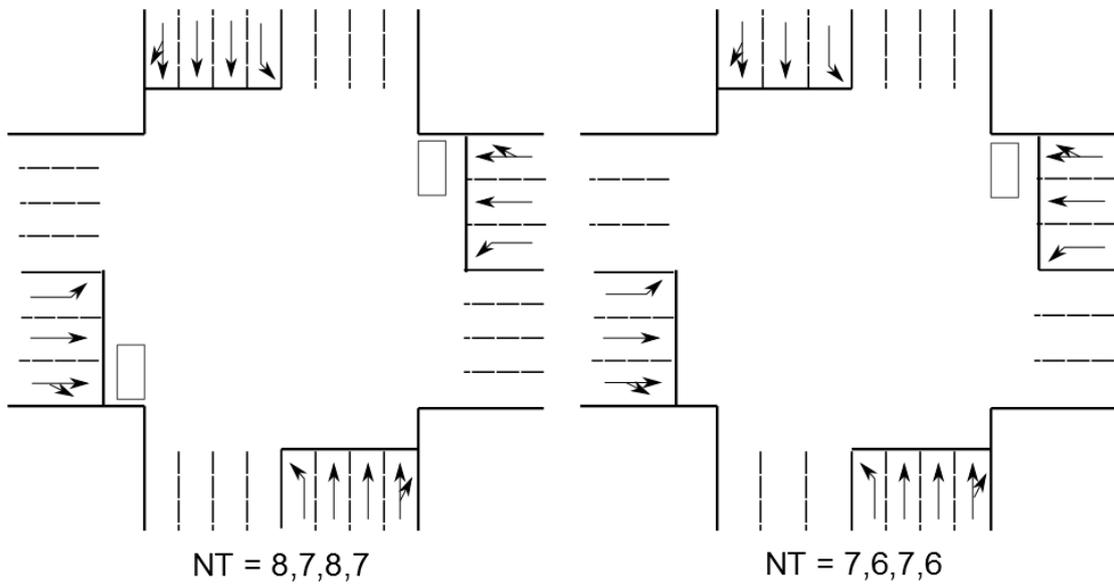


圖 7-4：非對稱路口車道與幾何配置

7.1.6 小結

由 7.1 結敏感度分析得知，車道會待轉區配置與流量、路幅空間有密切的關係，而車道數與車道標線的指派更影響路口容量的大小，連帶影響各流動的綠燈時間長短。此套模式可作為現況路口服務水準改善或新闢道路之參考，唯最佳化後仍需根據規劃路口之實際狀況微調，例如增設行人穿越道、自行車專用道或公車專用道等其餘用路人之專屬設施。另外，本研究也發現第一階段 MIP 模式求解時間，隨著可指派車道數(N_T)增加而遞增，但幅度不大，原因在於指派車道數多，車道轉向配置組合愈多，造成模式求解時間延長，而不對稱路口相較於對稱型路口需更多時間求得最佳化。第一階段求解結果將作為第二階段路網號誌的起始輸入項，在道路幾何配置確定情況下，針對混合車流之型態變化進行號誌時間的調整，以求路口通過量最大或延滯、旅行時間最小，求解結果將於 7.2 節說明。

7.2 模式求解與確認

藉由第一階段敏感度分析，將號誌時制輸出並放入第二階段模式求解，並將最佳化後相關變數值繪製圖表以確認模式結果的合理性。本研究針對第一階段三種不同流量情境進行第二階段求解，探討流量大小對模式輸出結果的影響。根據求解結果，3 種流量情境的進入車道階為 4 車道，且各方向皆設有機車兩段左轉待轉區，其號誌相關變數如表 7-6 顯示。經由變數轉換後，3 種情境之時相與時制計畫如圖 7-5 之說明。

表 7-6：第一階段號誌求解結果

情境	$\phi_{i,1}^1$	$\phi_{i,1}^1$	$\phi_{i,1}^1$	$\phi_{m,k}^2$	ζ
低流量	0.114	0.286	0.286	0.286	0.008
中流量	0.112	0.288	0.288	0.288	0.008
高流量	0.114	0.286	0.286	0.286	0.008

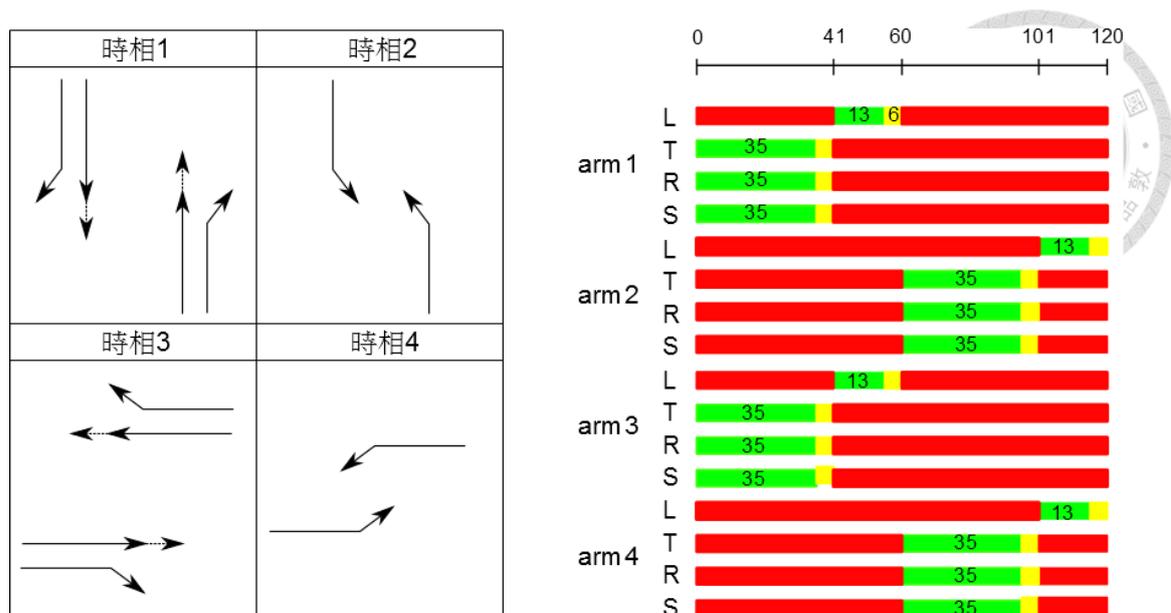


圖 7-5：第一階段號誌求解時制計畫

圖 7-5 左側為路口求解之時相組成與時相數，右側為各方向、各流動之實際號誌時間(L：左轉、T：直行、R：右轉、S：待轉區)。根據圖 7-5 的結果，在路口剩餘容量最大化情況下，無論流量大小，號誌化路口週期皆求解至最大週期 (maximum cycle length) 上界。分析其可能原因是綠燈秒數的分配並非以實際流量計算，而是以各車道可指派之最大通過量來定義路口容量，因此容量隨著週期增加而遞增。在衝突流動定義下，此 3 種案例都具有左轉保護時相，路口時相數為 4 個。不過各方向之綠燈時比維持固定比例，此比例可作為擬定第二階段以時相為基礎之可調整綠燈之上、下界。值得一提的是，機車左轉待轉區之分流號誌限制在容量最大化情況下，其綠燈始亮時間與直行車道相同，並無早開現象，因此第二階段將以各路口 4 個時相為基礎進行求解。

7.2.1 高流量情境

在汽車需求量 2,100 (veh/hr)，機車需求 1,300 (veh/hr) 的情境下進行路網號誌求解，其最大通過量與最佳解之基因變數值如圖 7-6 所示。由於此流量需求已超過路網可負荷之飽和容量，因此目標式以最大通過量求解，模擬時間為 3,600 秒，

發現路網總通過量為 18,962 (pcu/hr)，求解至第 23 代收斂至最佳解，而各代與最佳解之平均距離也呈現逐步收斂情況。

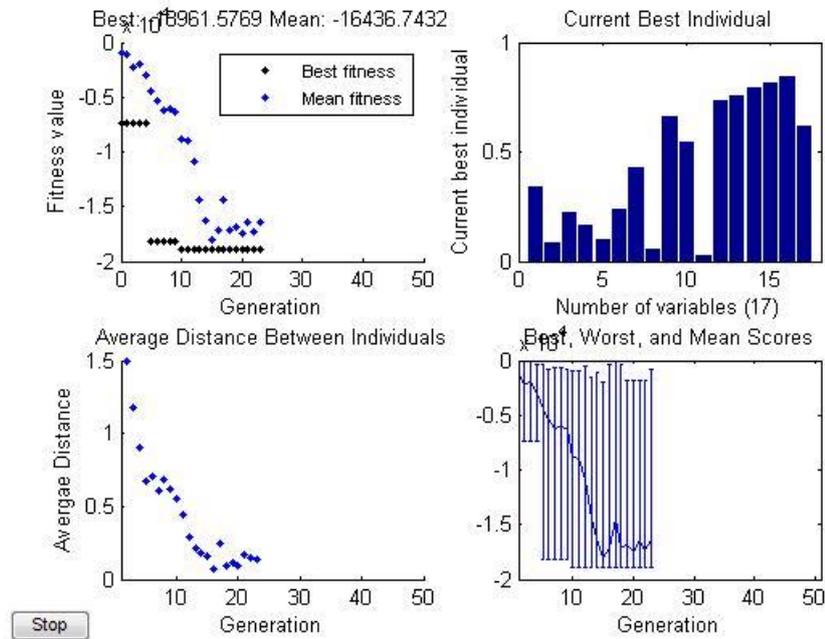


圖 7-6：高流量情境路網通過量與號誌最佳解

圖 7-7 為左轉車道各週期等候車隊累積(LE20)與移動紓解(LE90)情形，由此可發現左轉車隊長度已超過左轉車道儲車空間(30 公尺)，平均長度約 100 至 200 公尺，溢流至快車道，LE20 累積完後綠燈時間由 LE90 型態紓解，但紓解量小於停等量，累積至下一週期。快車道之等候線也呈現相同情況，但等候車隊長度較左轉車道長，且移動型態車輛數較多，在模擬 1,000 秒以後逐漸達到穩定。

混合車道的等候型態較多，因此本研究將停等 M20、M30、M40 型態與移動紓解 M90 型態分開討論。圖 7-9 顯示 M20 型態累積過程，汽車與機車分開計算，汽車等候線維持在 1,000 公尺至 2,000 公尺範圍，部分週期機車等候長度大於汽車，開始出現 M40 型態(圖 7-11)。當 M20 的汽、機車皆停等，且汽車等候線大於機車時，模式判斷進入 M30 型態，如圖 7-10 所示。該圖中汽車等候線明顯比機車等候線長，若機車等候線持續累積至大於汽車，則系統判斷進入 M40

狀態，如圖 7-11 的模擬時階 1,200、1,800、2,400、3,000 甚至 3,600 秒，這些時點機車等候線將比汽車長。

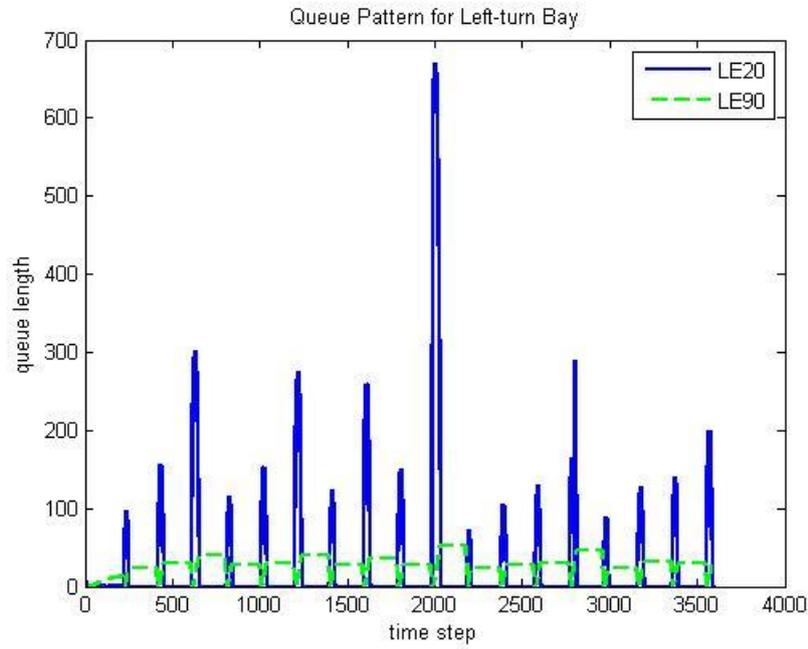


圖 7-7：高流量左轉車道等候型態與紓解累積圖

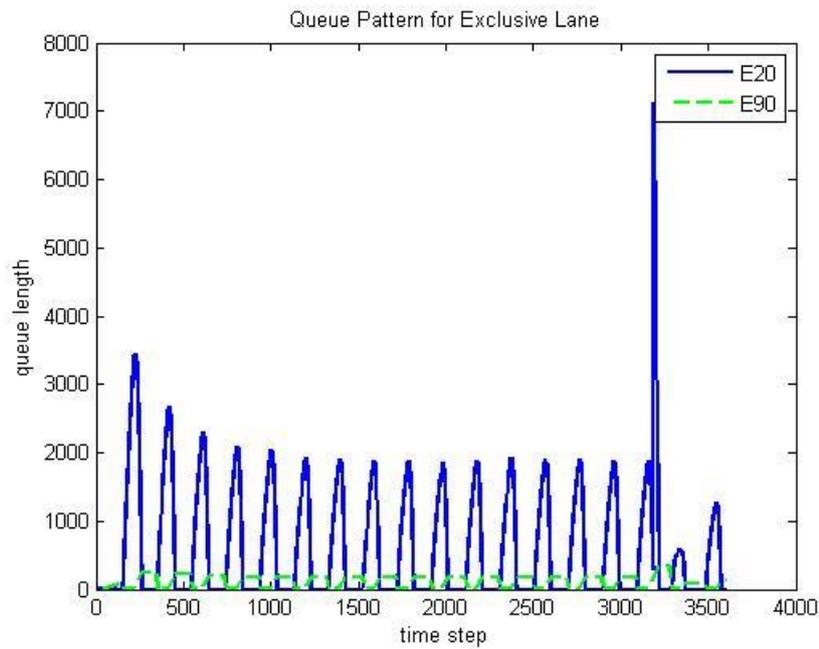


圖 7-8：高流量快車道等候型態與紓解累積圖

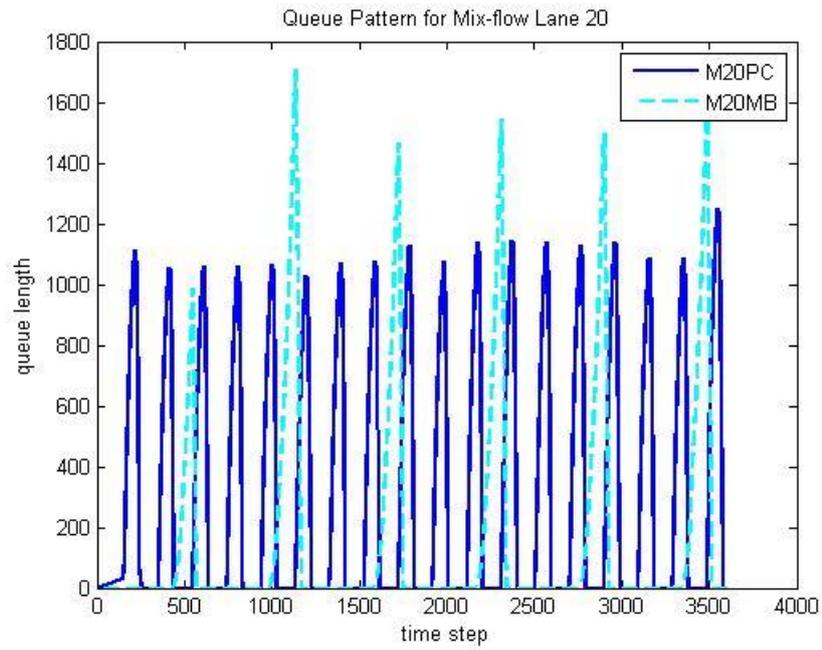


圖 7-9：高流量混合車道 M20 等候型態累積圖

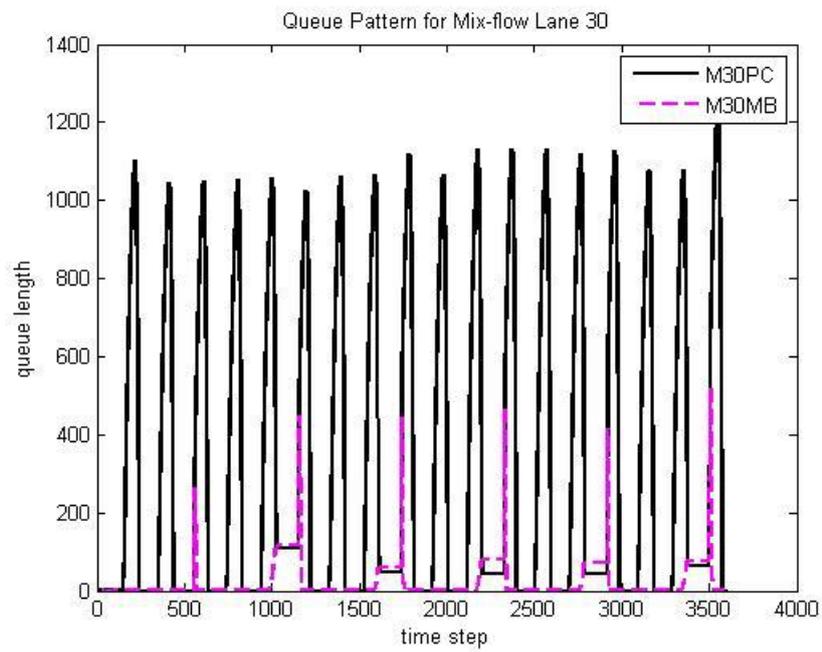


圖 7-10：高流量混合車道 M30 等候型態累積圖

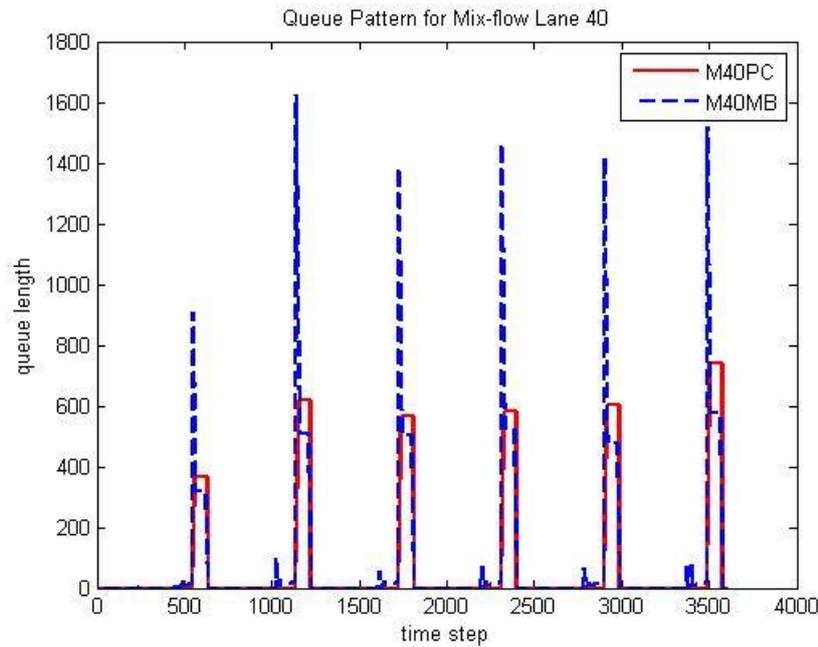


圖 7-11：高流量混合車道 M40 等候型態累積圖

至於紓解部分，M90 型態分佈基本上與最後一種 M40 型態類似，但是汽車紓解量同樣受到型態變化量之影響而無法完全紓解上游型態停等之汽車數量，而機車卻是根據每一時階紓解衝擊波傳遞距離內涵蓋多少機車比例而決定，若機車比例較大則可啟動之機車數量較多，如圖 7-12 所示。前述的型態乃將停等與可移動之汽、機車分開討論，並未探討路段混合車流實際等候數量。圖 7-13 描述將停等型態減去移動型態後路段依時階實際等候汽、機車數，藍色虛線代表左轉車道汽車等候數量、綠色為快車道，紅色則為混合車道。由該圖可以印證各車道群組等候線累積情形，且混合車道變異較大，在等候型態交互作用下，等候數量變化劇烈，尤其是機車車流部分。

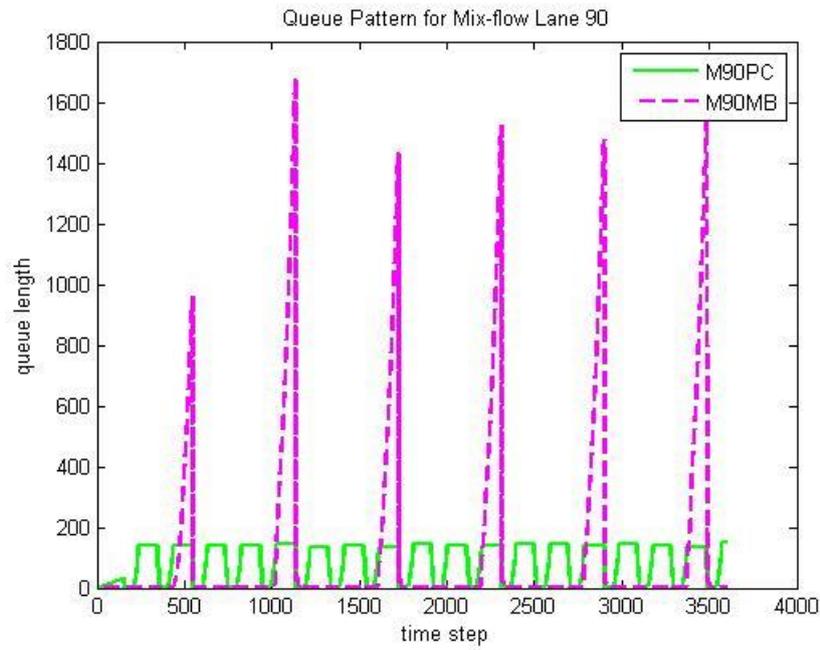


圖 7-12：高流量混合車道 M90 紓解型態累積圖

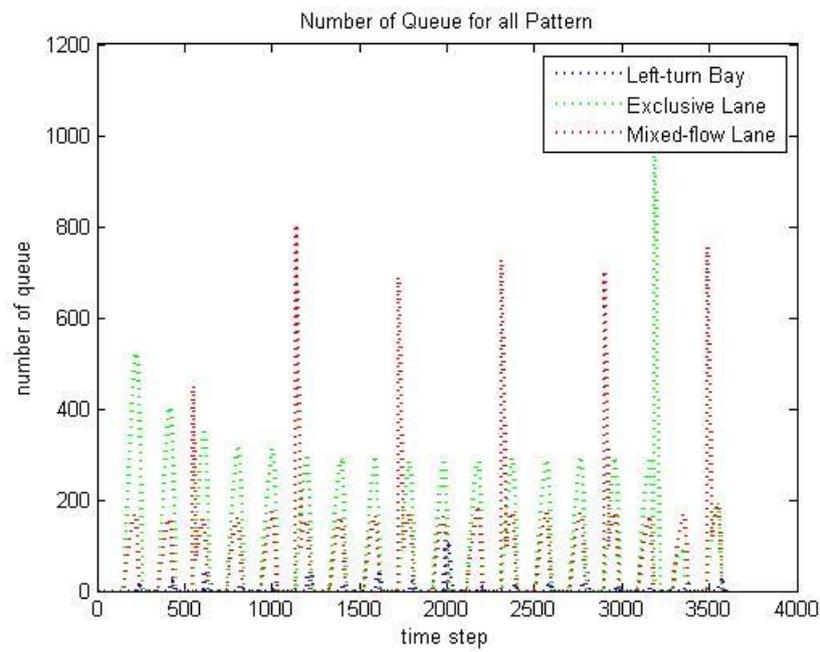


圖 7-13：高流量混合車道實際等候車輛數累積圖



7.2.2 中流量情境

中流量情境以汽車需求量 1,050(veh/hr)，機車需求 650 (veh/hr)的情況下進行分析，求解結果如圖 7-6 所示。此時通過量相較於高流量情境減少至 10,482 (pcu/hr)，迭代次數較多，到 30 代才達收斂條件，如圖 7-14。至於等候結構分析，由於流量為上一情境的 0.5 倍，因此所有車道群整體而言等候長度約降為原來高流量情境的一半。左轉車道與快車道其行為與上一情境類似，而由圖 7-17 發現汽車在中等流量下等候線累積速度減緩，但機車等候線變化仍大，部分週期出現機車等候線大於機車之狀況，因而出現 M40 型態。整體而言 M90 紓解型態與 M40 型態相配合，唯獨汽車型態轉換量仍受限於紓解衝擊波之傳遞速度，影響汽車紓解量。路段各群組汽、機車實際等候數量如同圖 7-21 所示。

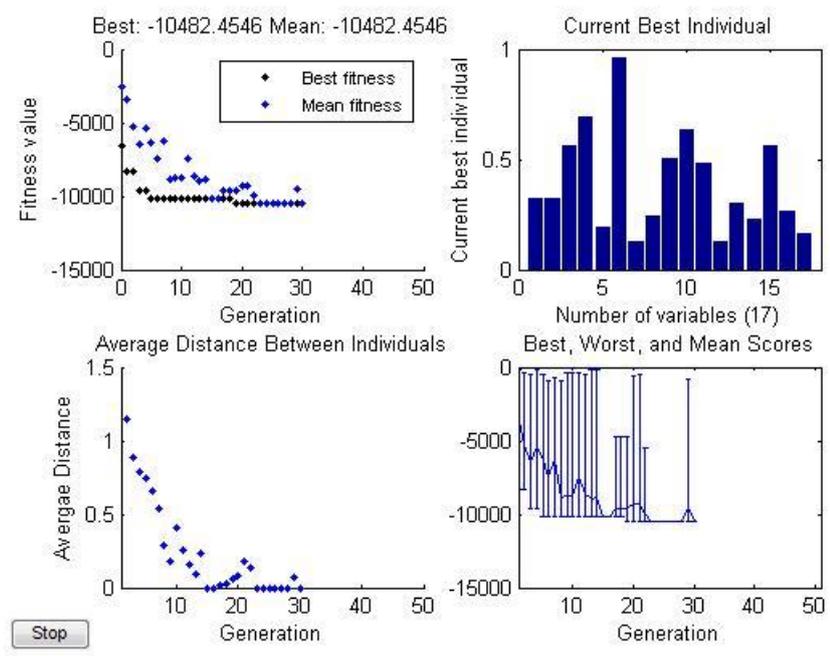


圖 7-14：中流量情境路網通過量與號誌最佳解

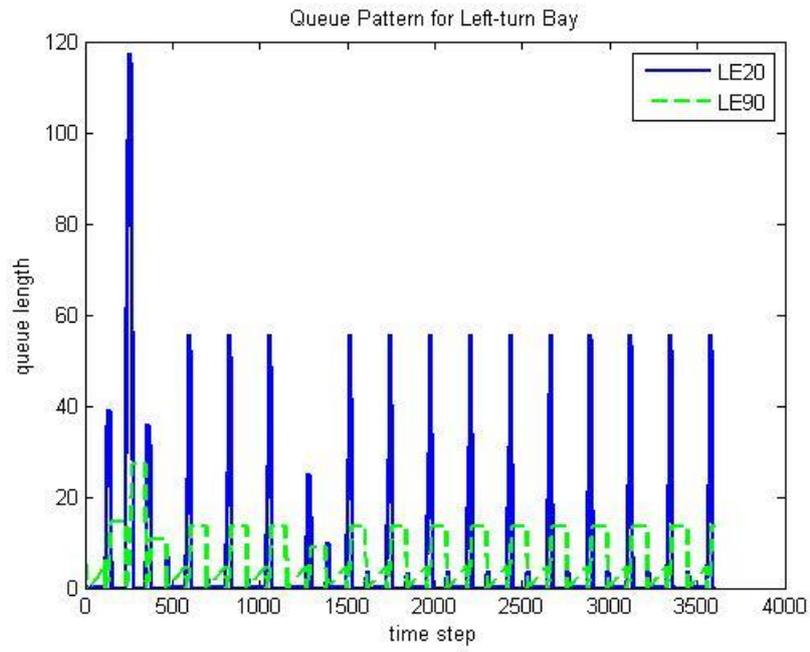


圖 7-15：中流量左轉車道等候型態與紓解累積圖

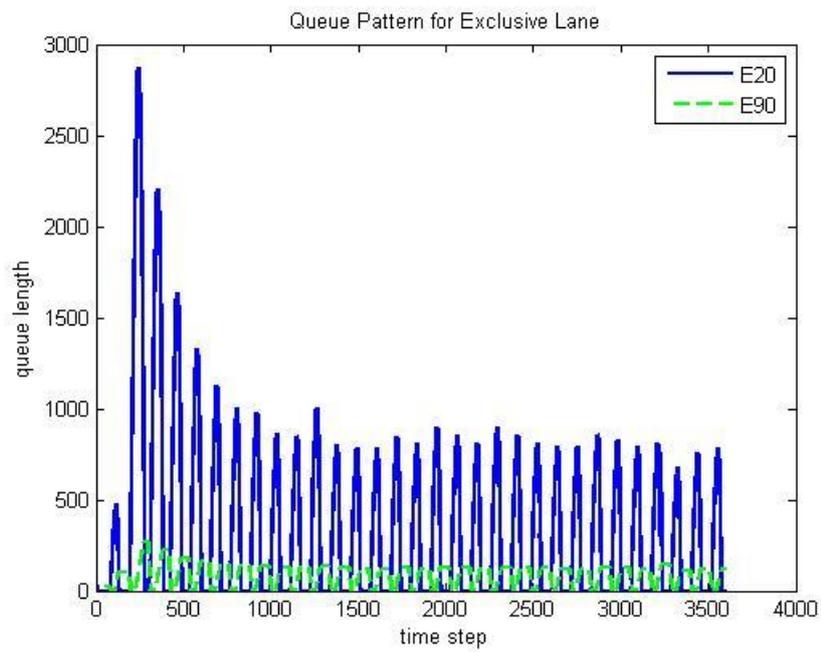


圖 7-16：中流量快車道等候型態與紓解累積圖

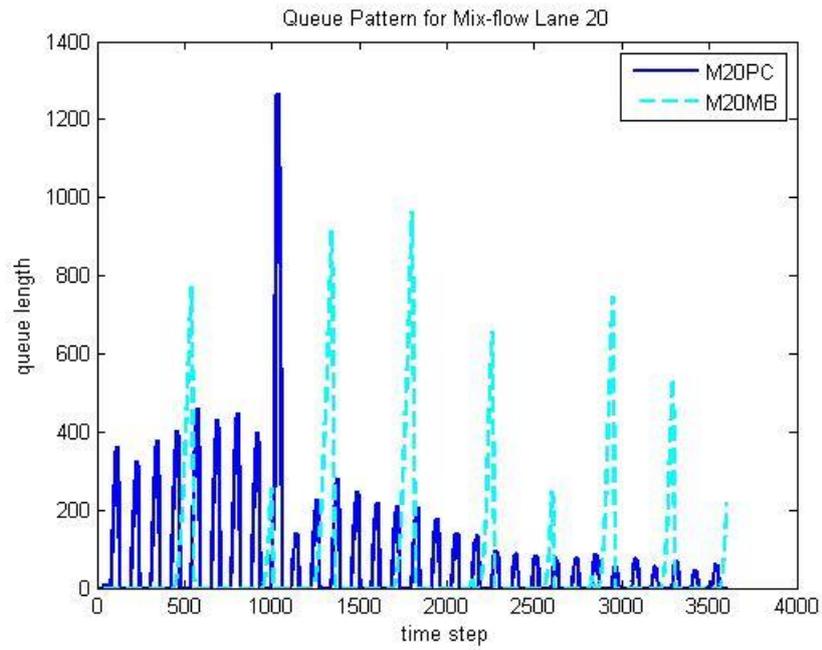


圖 7-17：中流量混合車道 M20 等候型態累積圖

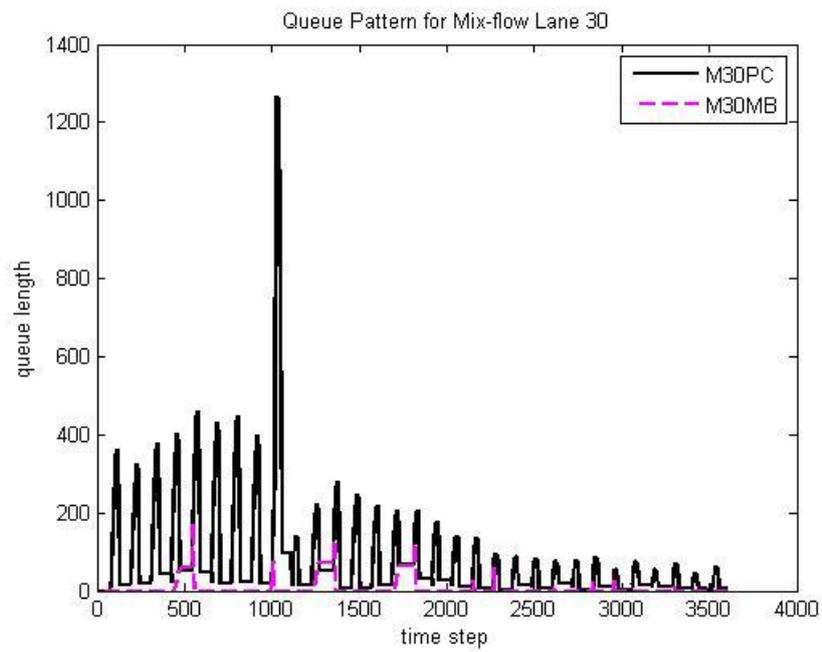


圖 7-18：中流量混合車道 M30 等候型態累積圖

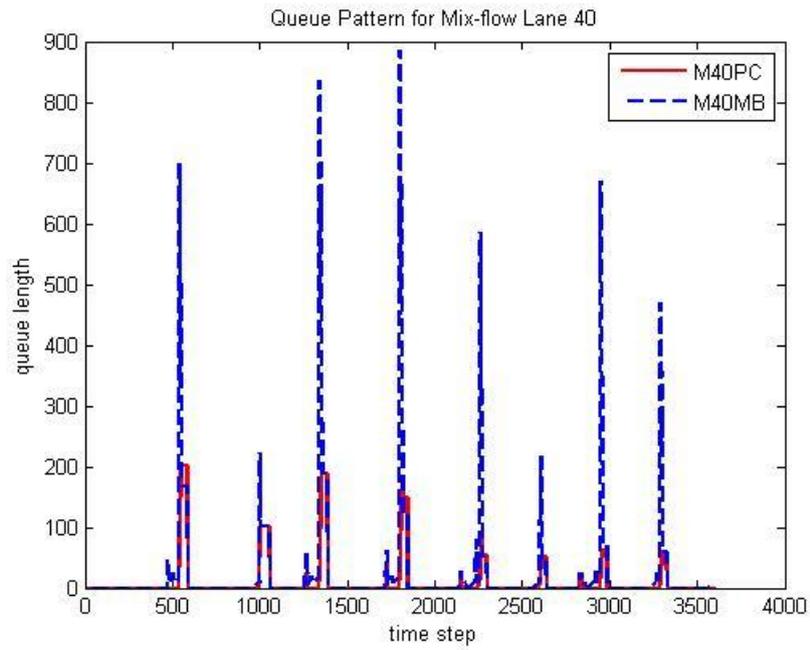


圖 7-19：中流量混合車道 M40 等候型態累積圖

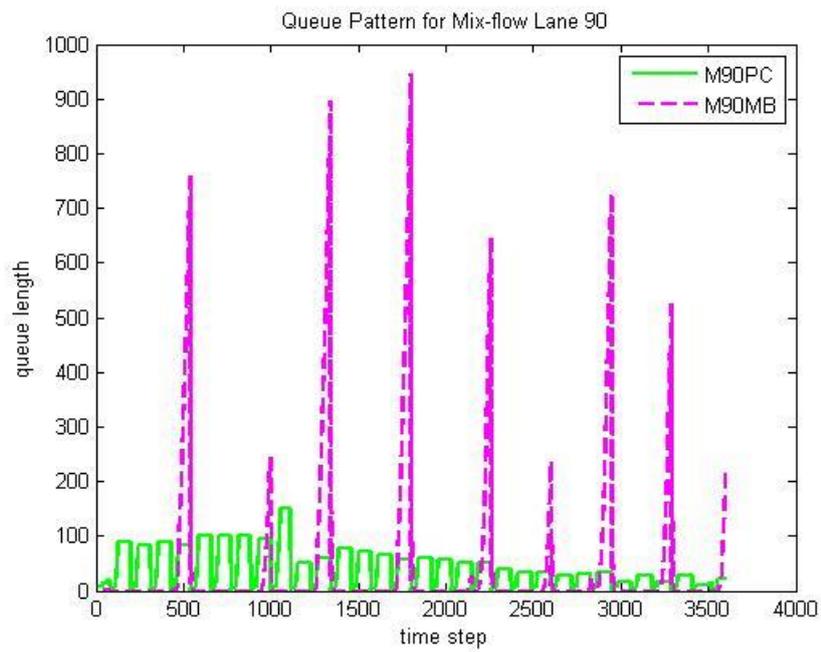


圖 7-20：中流量混合車道 M90 紓解型態累積圖

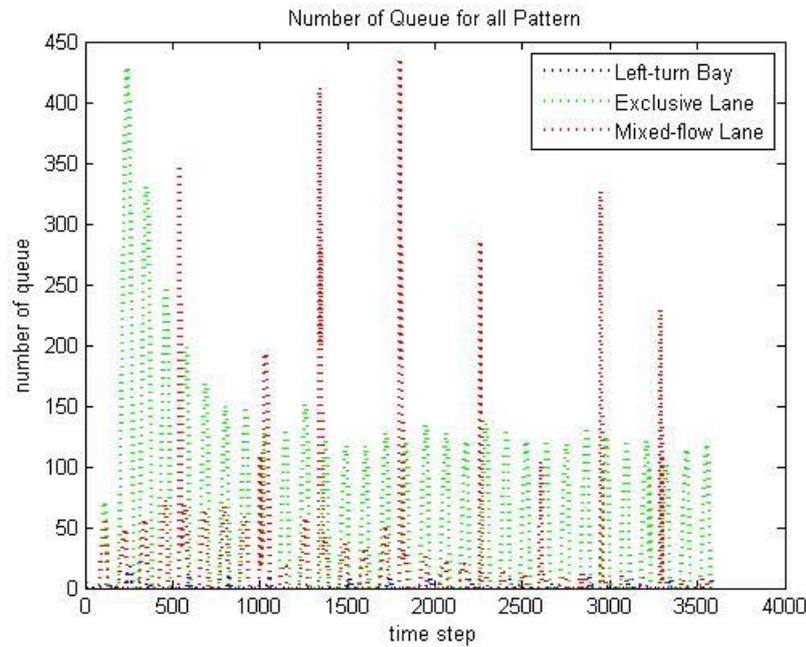


圖 7-21：中流量混合車道實際等候車輛數累積圖

7.2.3 低流量情境

隨著流量降低，汽車需求 630 (veh/hr)，機車流量 390 (veh/hr)，此時路網已由過飽和車流改善為未飽和狀態，若持續使用最大通過量為目標將導致路網通過量過大，週期過長造成號誌失真。因此本研究改以最小車輛旅行與等候時間為目標式，求解結果如圖 7-22。該目標函數值代表每秒停等與等候進入路網之車輛數 (pcu/sec)，經過演算 20 代後收斂。由於不再以等候線最小為目標求解，因此等候線累積較長，但汽車累積速度更為平均，如圖 7-22 至圖 7-29。在此情境下，出現 M40 型態的機率更為頻繁，顯示機車等候線容易大於汽車，而 M90 型態紓解平均紓解長度較中流量情境小，紓解效率較差。

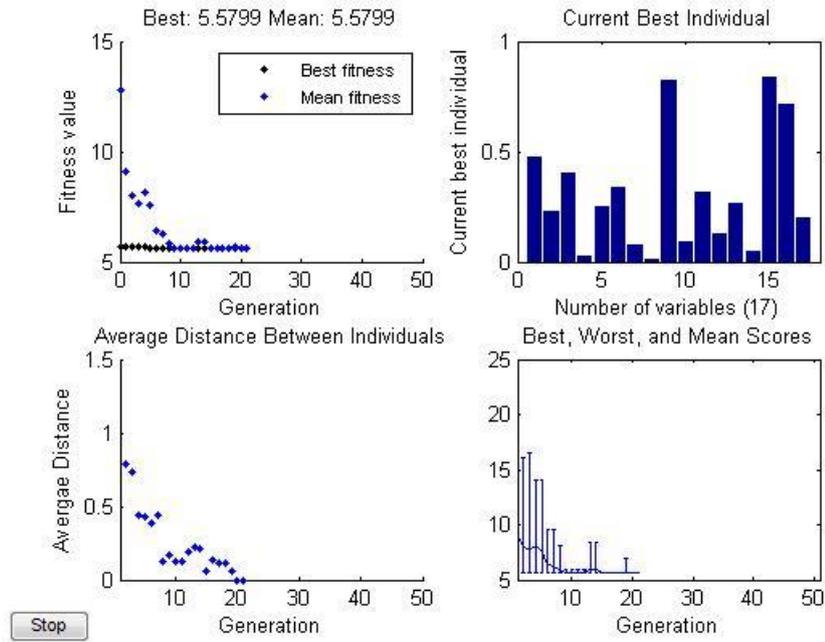


圖 7-22：低流量情境路網通過量與號誌最佳解

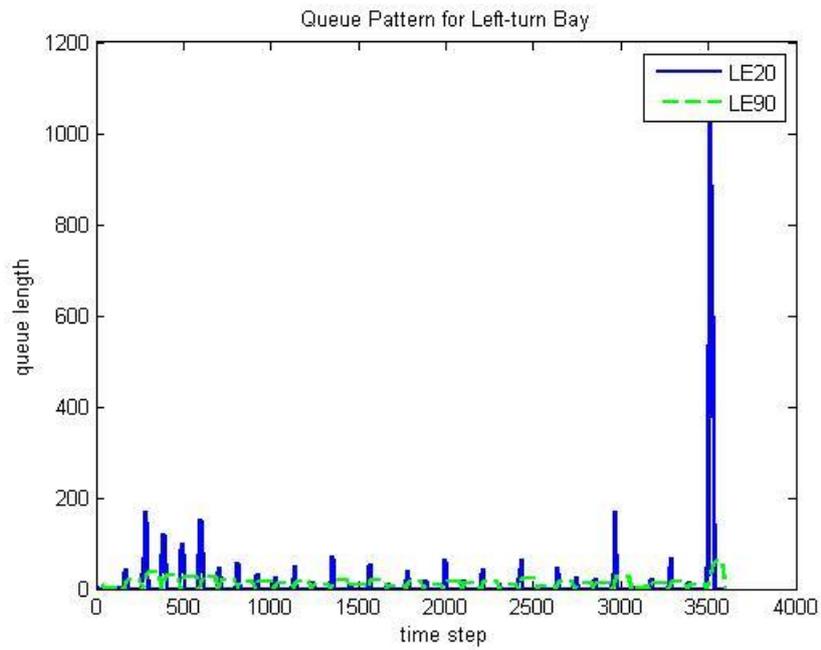


圖 7-23：低流量左轉車道等候型態與紓解累積圖

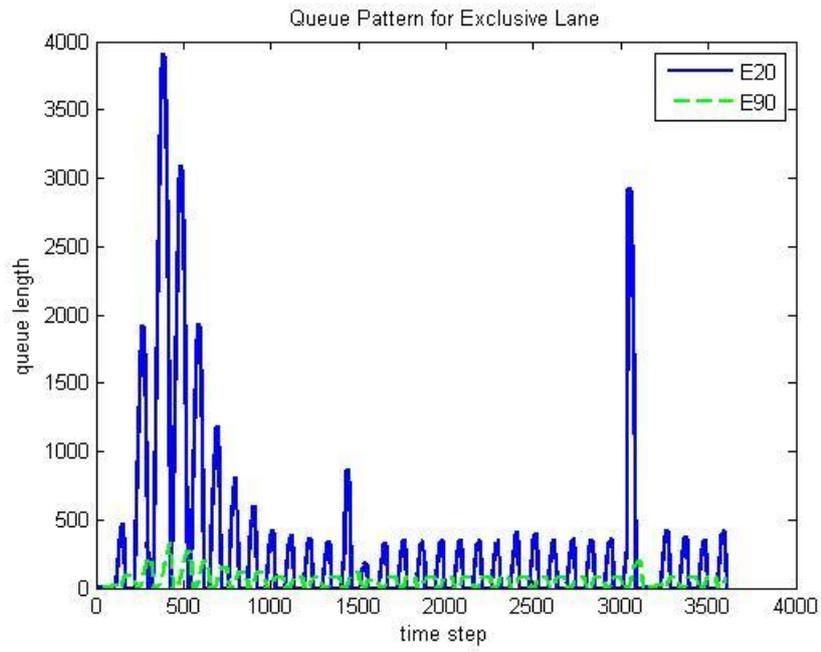


圖 7-24：低流量快車道等候型態與紓解累積圖

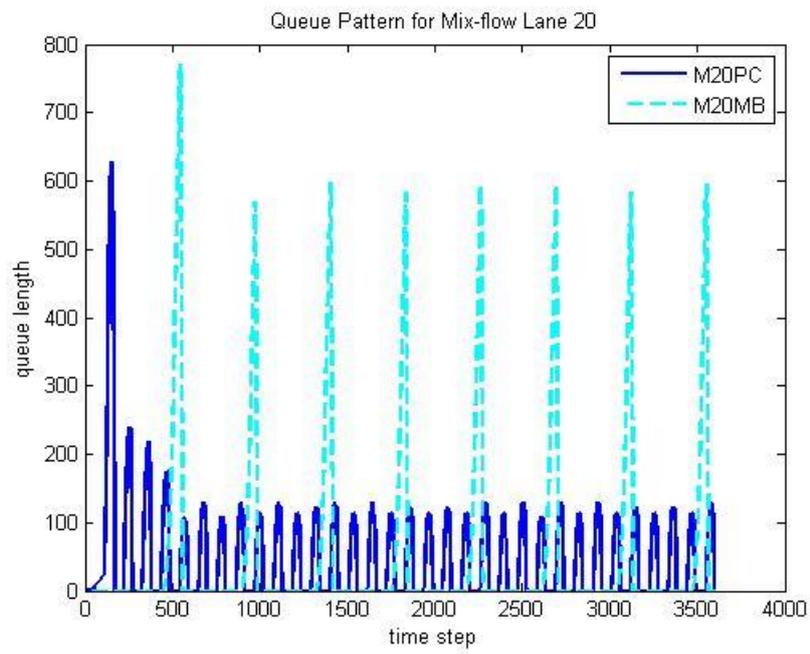


圖 7-25：低流量混合車道 M20 等候型態累積圖

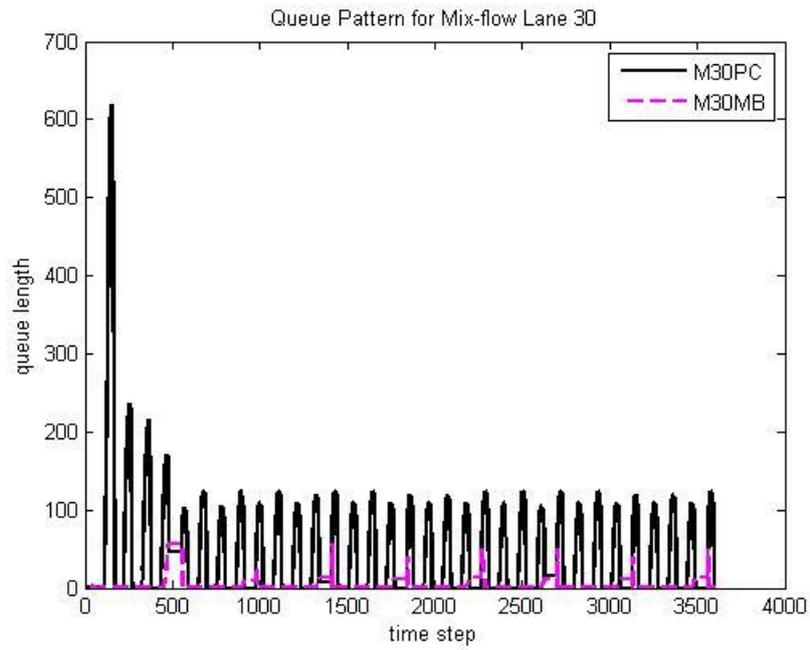


圖 7-26：低流量混合車道 M30 等候型態累積圖

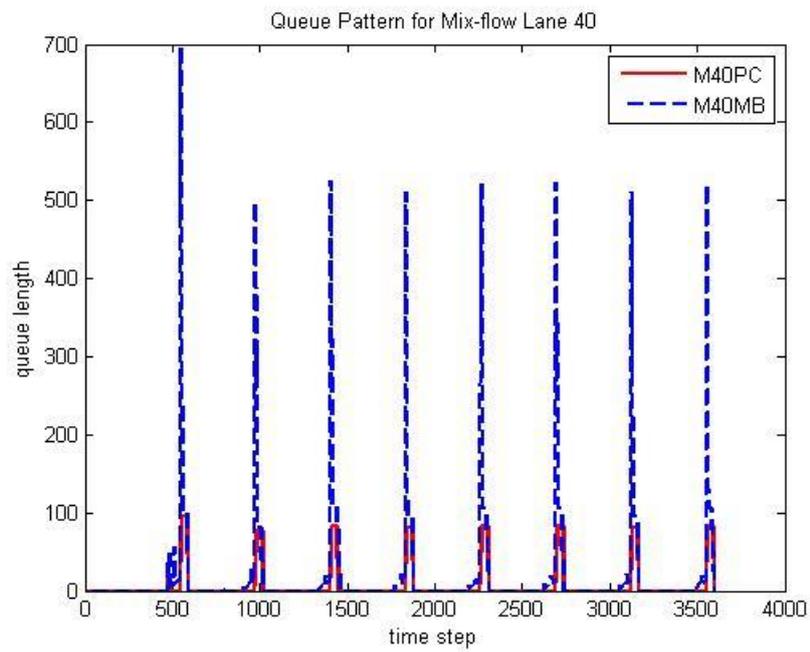


圖 7-27：低流量混合車道 M40 等候型態累積圖

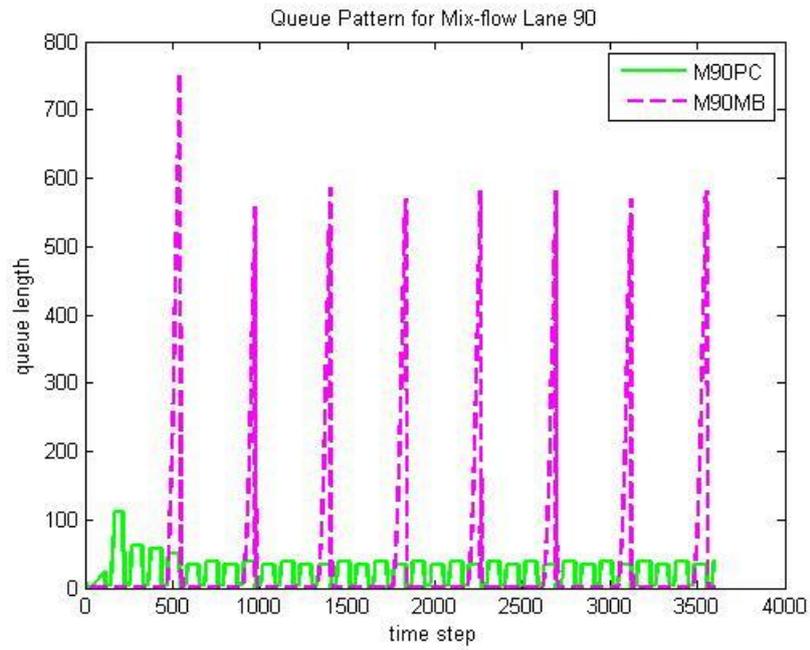


圖 7-28：低流量混合車道 M90 紓解型態累積圖

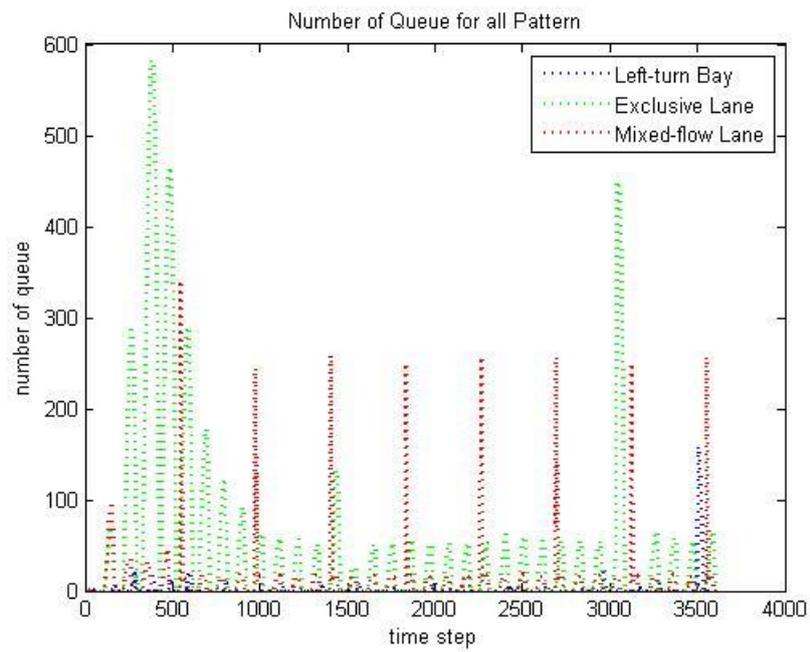


圖 7-29：低流量混合車道實際等候車輛數累積圖

7.2.4 路段推進變數之比較

除了各車道群組等候結構之依時階變化分析之外，本研究也將三種流量情境下路段推進過程密度修正因子與佔有密度熵值進行比較。圖 7-30 至 7-32 分別表示低流量到高流量各路段密度修正因子的變化，其中橫軸為路段編號；縱軸表示須修正的佔有面積大小。在低流量情況下，路段中行駛機車數量也相對較少，因此汽車周圍修正之佔有車道面積較大，約有 6 個路段 γ 值大於 8，顯示車道上汽車實體面積須修正 8 倍才為路段佔有面積；隨著流量遞增，機車數量變多，修正比例也逐漸下降，以中流量情境而言，平均 γ 值約介於 7 至 8 之間。在高流量環境下，車道空隙幾乎被機車所佔有，路段呈現擁擠狀態，此時 γ 值更小，剩下 4 個路段 γ 值大於 7。由混合車道 γ 值大小可以判斷路段壅塞情形，至於壅塞的汽車與機車組成比例則由熵值(H)範圍反映。

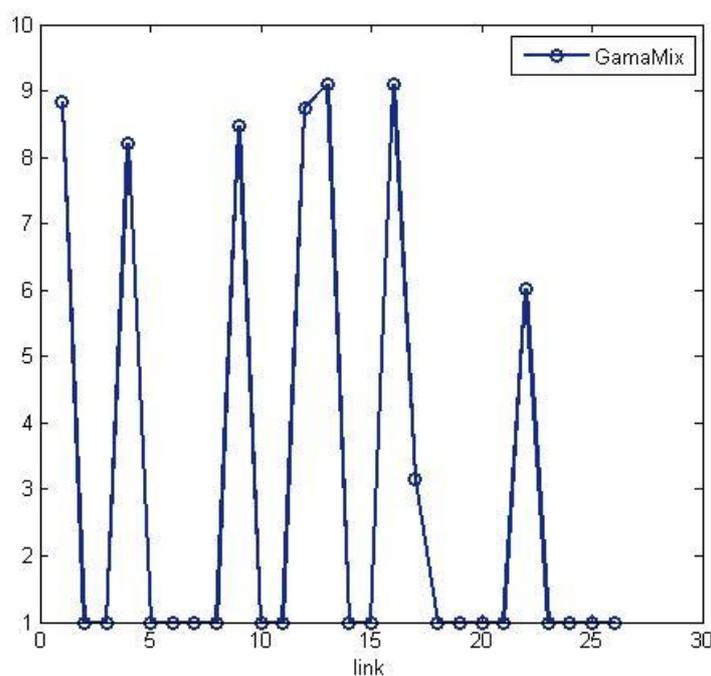


圖 7-30：低流量各路段混合車道密度修正因子數值變化

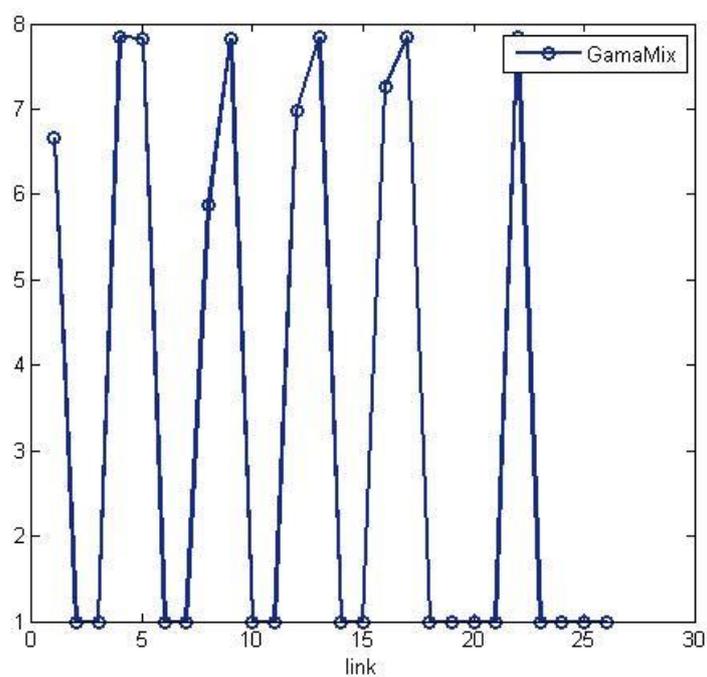


圖 7-31：中流量各路段混合車道密度修正因子數值變化

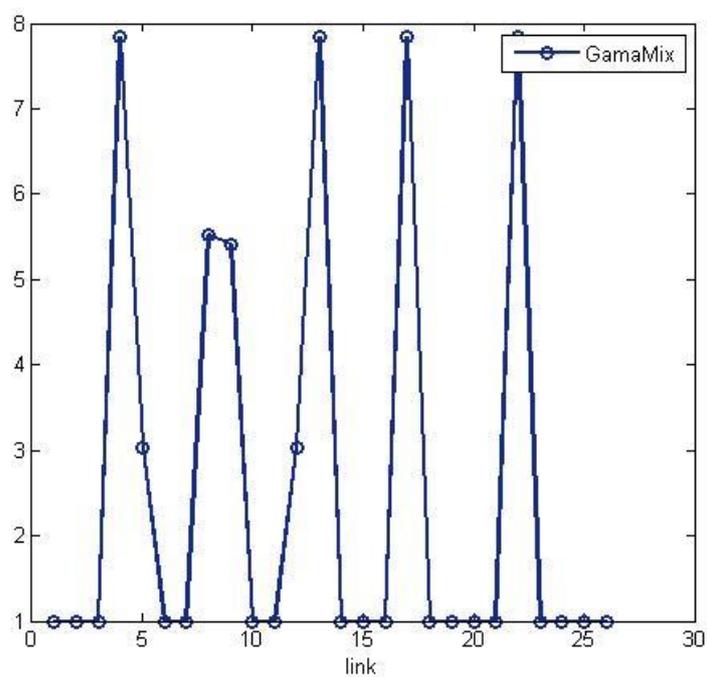


圖 7-32：高流量各路段混合車道密度修正因子數值變化

圖 7-33 至圖 7-35 代表低流量至高流量路段推進汽、機車佔有比例之熵值變化，熵值愈大表示汽、機車路段佔有比例愈趨於一致，混合車流愈容易達到均衡速率推進，不過仍需由路段可推進空間加以限制，調整汽、機車推進速率的變異。在流量低時，各路段的熵值普遍低於 0.25，此時汽、機車佔有比例差異大，加上路段中汽車數量較少， γ 值大，因此機車於車陣中加速鑽行的機會較大，推進速率大於汽車。隨著汽車與機車推進數量增加，路段空隙減少，汽、機車佔有比例逐漸相等，因此大部分熵值接近 0.3，機車可加速空間減少。在中等流量下，進入路段與離開路段的熵值差異較大，顯示進入路段已呈現擁擠達飽和，但離開路段車輛數仍偏低的情況。在高流量情境下，不僅車輛產生的進入路段車流達到飽和狀態，甚至離開路段的車輛也逐漸增多，熵值上升，路段汽、機車比例趨於一致。

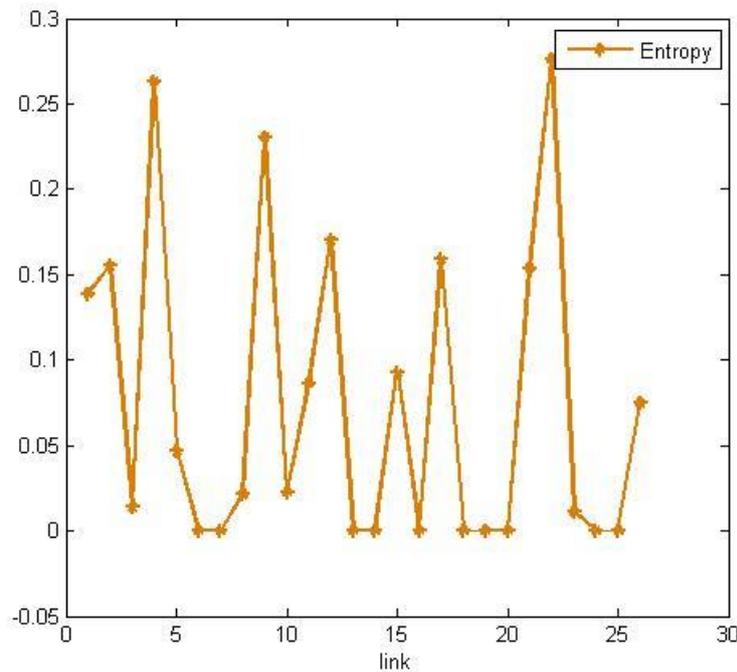


圖 7-33：低流量各路段混合車道佔有比例熵值變化

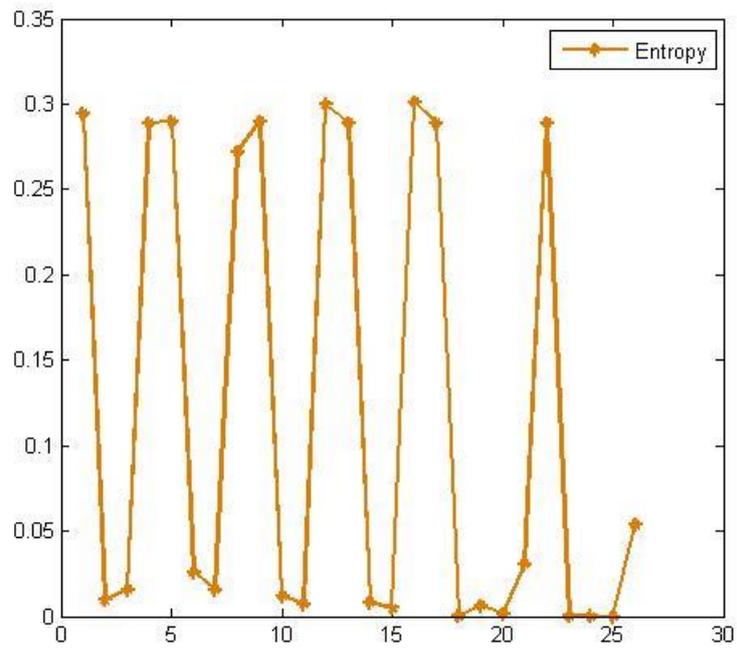


圖 7-34：中流量各路段混合車道佔有比例熵值變化

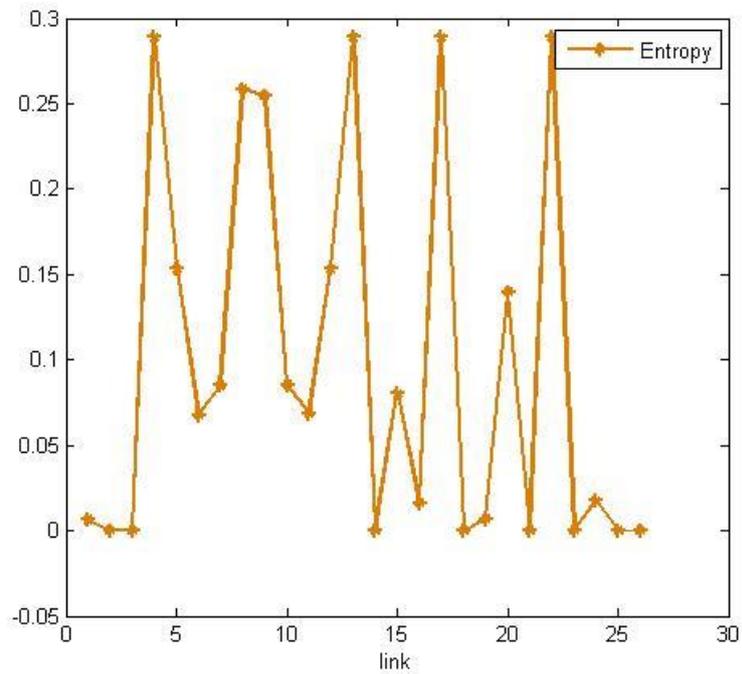


圖 7-35：高流量各路段混合車道佔有比例熵值變化

7.3 路網績效比較

本研究藉由 TRANSYT-7F 產生最佳號誌時制，並以微觀車流模擬軟體 VISSIM 評估路網中各路口平均車輛延滯、通過車輛數與等候長度。關於本模式與 TRANSYT-7F 最佳化之不同流量情境之週期長度如圖 7-36 所示。根據圖中結果，無論何種流量情境，本模式之週期長度較 TRANSYT-7F 短，隨著流量增加差異愈明顯。特別部分路口時相 1 與時相 3 綠燈時比差異較大，而左轉時比較低之情形，此時造成之結果皆於後續內容討論。3 種情境以 VISSIM 模擬後結果如表 7-6 至表 7-8 表示。

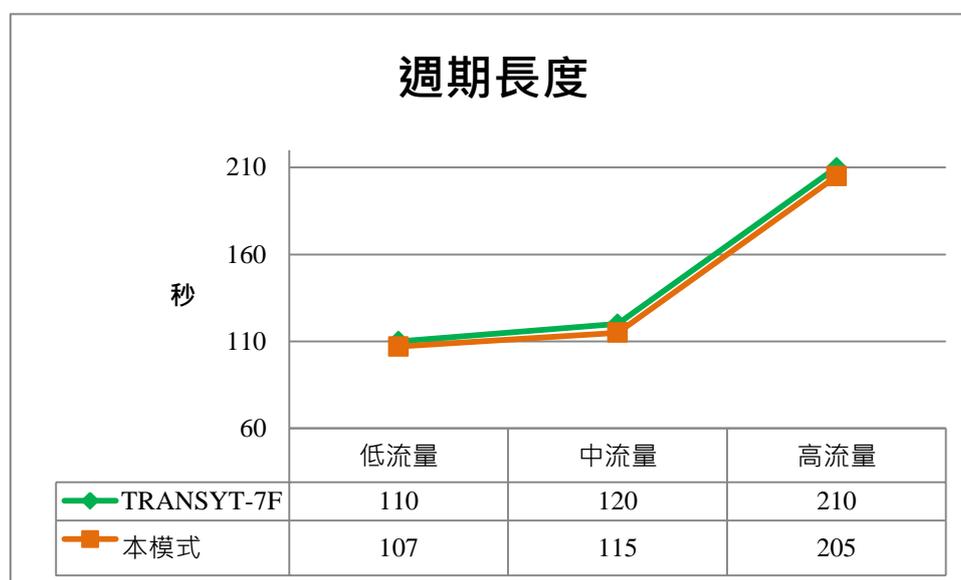


圖 7-36：不同流量情境下之週期長度比較

在低流量時，本模式路網整體車輛平均延滯為 28.5 (sec/veh)，TRANSYT-7F 平均延滯為 27.4 (sec/veh)，不過就個別路口而言，路口 1 汽車延滯較 TRANSYT-7F 小，改善幅度約 -11.1%，其中路口 1 與路口 3 機車延滯較小，改善幅度分別為 -10.5% 與 -0.7%。至於平均車隊長度分析，路口 1 車隊長度較小，其餘路口則偏大的情形。

表 7-7：低流量本模式與 TRANSYT-7F 績效比較

績效指標	路口 1		路口 2		路口 3		路口 4	
	T7F	Model	T7F	Model	T7F	Model	T7F	Model
平均汽車延滯 (sec/veh)	29.8	26.5	28	32.5	26.7	33.9	26.8	37.4
平均機車延滯 (sec/veh)	26.6	23.8	24.1	32.8	26.8	26.6	25.1	32.6
汽車通過數量(輛)	1,498	1,435	1,516	1,465	1,460	1,460	1,472	1,471
機車通過數量(輛)	796	768	835	791	892	877	859	848
平均車隊長度(m)	5.7	5.3	4.7	5.5	5.9	6.8	7.5	9.9

在中等流量情境下，各路口平均車輛延滯較流量低時大，其中路口 2 表現最好，汽車延滯改善-15.0%，機車延滯改善幅度為-24.4%。路口 4 的機車延滯時間也較 TRANSYT-7F 的時制表現佳，延滯減少 17.0%。在通過車輛數部分，本研究求解後路口 3 與路口 4 的機車通過數量增多，而路口 2 雖然汽、機車通過量較少，但平均等候長度 7.7 公尺較 TRANSYT-7F 之 9.6 公尺為佳。

表 7-8：中流量本模式與 TRANSYT-7F 績效比較

績效指標	路口 1		路口 2		路口 3		路口 4	
	T7F	Model	T7F	Model	T7F	Model	T7F	Model
平均汽車延滯 (sec/veh)	29.9	36.2	36.5	31	25.8	39.6	33.7	36.9
平均機車延滯 (sec/veh)	29.5	32.7	34	25.7	21.3	40	32.9	27.3

汽車通過數量(輛)	2,534	2,335	2,534	2,317	2,485	2,477	2,531	2,503
機車通過數量(輛)	1,375	1,327	1,419	1,383	1,508	1,525	1,458	1,466
平均車隊長度(m)	9.4	10	9.6	7.7	8.9	12.3	12.2	13.9

在流量過飽和情況下，模式表現差異較大，整體而言本模式產生的結果較 TRANSYT-7F 差，尤其路口 2 與路口 3 的汽車平均延滯較高。不過路口 1 機車平均延滯較小，改善幅度-8.9%，而路口 1 與路口 2 在過飽和時機車通過輛數較多。分析其原因，路口 2 與路口 3 因為左轉時相綠燈時間較小，導致左轉車隊溢流過長，影響直行車流通過量，因此車輛平均延滯較大。至於路口 1 與路口 2 雖然平均等候線較長，但機車鑽行能力強，較不受等候車隊影響，機車通過數量較多。

表 7-9：高流量本模式與 TRANSYT-7F 績效比較

績效指標	路口 1		路口 2		路口 3		路口 4	
	T7F	Model	T7F	Model	T7F	Model	T7F	Model
平均汽車延滯 (sec/veh)	57.3	66.5	49.5	62.5	55.9	79.3	50.3	54.6
平均機車延滯 (sec/veh)	49.3	44.9	37.9	57.4	42.4	51.4	41.2	43
汽車通過數量(輛)	4,942	4,713	5,010	4,880	5,010	4,870	5,058	4,941
機車通過數量(輛)	2,698	2,713	2,762	2,800	2,992	2,965	2,966	2,958
平均車隊長度(m)	35.2	42.5	27.9	34	33.6	58.1	32.6	35.7

第八章 結論與建議



本研究回顧國內、外關於號誌時制最佳化設計方法，以群組為基礎結合混合車流，提出二階段車道幾何配置、車流與號誌最佳化模式。藉由市區實際車流資料分析，發現混合車流由上游匯入至下游路口紓解過程，存在許多巨觀的車流型態，而本研究的目的之一就是將這些型態合理模式化，評估對號誌時制的影響。過去對混合車流的研究存在許多假設，並未詳細探討車輛於路段運動行為與群體之交通參數變化，忽略車流依時階改變對號誌的影響。而本研究定義了不同車道群組的車隊等候結構，經由統計檢定發現不同路段等候結構之組成與車輛到達與等候線形成方式有關，同一路段不同車道間亦存在差異，因此提出汽、機車分流式構想將汽車與機車的行為分開建立模式，形成空間上群組化、時間上分流化之整合模式。在單一路口模式，本研究加入混合車流停等空間最佳化元素，有別於傳統幾何配置已固定或準則式改善方案，最佳化模式提供號誌與道路空間利用更多的彈性，方便未來擴充至更多車種、用路人之號誌設計模式。在路網模擬上，本研究以模擬法建構汽、機車由車輛產生至路口紓解過程詳細的動態演變方程式，其核心思考在於以面積車流修正當量轉換方法之缺陷，採「既混流又分流」的型態方法描述汽、機車之路口等候與紓解行為。歸納本研究之研究發現與結論如 8.1 節條列式說明，並建議未來模式修正與應用方向於 8.2 節闡述。

8.1 結論

1. 本研究提出二階段號誌最佳化方法，第一階段整合車道與待轉區配置，以最大剩餘容量求解；第二階段根據前者號誌與流動結果，考量混合車流之等候型態差異進行路網共同週期、時比與時差最佳化，有效結合號誌、車流與幾何配置三大時制影響構面。

2. 經由實際分析新生南路與羅斯福路尖峰時段之車流，發現車流量大小與車種組成為影響等候結構組成之關鍵。透過樣本比例統計檢定結果，在 95%信賴水準下發現同一路段最內側第 1 車道與第 2 車道其停等型態與紓解型態比例相同，兩車道可合併為同一快車道群組。外側第 3 車道與第 4 車道為混合車道，由於混合車流之組成複雜且隨時間改變，兩車道等候比例並不相同，不同路段亦存在差異，不過大致上形成停等與紓解兩種主要型態，而停等之次型態與分車種流量大小、車道寬、等候線形成因素有關。
3. 藉由等候型態分析，推導等候結構之車流模式，由比例檢定得知相同停等比例的車道可歸類為同一群組，支持第二階段群組劃分之依據，且不同路段型態大小與車輛到達順序、時間有關，由本研究推導之動態方程式計算。
4. 本研究整合混合車流停等空間與號誌之交互關係，透過敏感度分析結果發現隨著流量增加，路口剩餘容量逐漸降低，若指派車道數逐漸減少，容量也遞減符合預期的結果。在路口轉向比變化過程中，左轉車流愈大，左轉專用車道數量愈多，同樣右轉比例增加，右轉流動由共用車道變為專用車道，顯示車道標線之配置符合轉向流量的需求。而本模式也適用於現實環境路口車道、流量不對稱之情境，根據路幅大小、流量多寡與衝突條件進行最佳路口幾何配置。
5. 第二階段以面積車流建立汽、機車動態交通演變行為，分為上游車輛產生、需求到達、群組推進、車道影響作用、等候型態產生、分車種紓解與流量守恆等 7 個中觀車流步驟，其中路段採用分群組推進，分別建立快車道與混合車道推進模式，並以密度修正因子取代傳統密度定義，修正混合車流實際道路佔有面積；以熵值描述車輛佔有比例之差異，作為調整汽、機車推進速率的基礎。在車道作用方面，本研究將溢流矩陣擴充為 3×3 的維度，描述更多車道群的溢流交互影響，充分描述汽、機車依時階動態變化特性。

- 
6. 在路口等候結構形成上，快車道之組成較為單純，車輛分為上游匯入、實際
 停等與下游紓解 3 種型態，而混合車道除了匯入與紓解之外，根據汽、機車
 等候線長度而形成不同停等型態。本研究推導每一種型態依時階的改變量與
 等候線消長的方程式，將平面車道之車流依時階、按順序紓解，避免紓解過
 快不符實際車流之情況。
 7. 本文以高、中、低 3 種不同流量求解，並與號誌最佳化軟體 TRANSYT-7F 輸
 出結果進行比較，以 VISSIM 模擬績效之差異，發現在流量中等或較低的情
 況下，模式績效表現與 TRANSYT-7F 差異不大，部分路口汽車延滯較小，機
 車延滯改善幅度大，平均等候長度減少。不過在過飽和情況下，模式表現較
 不穩定，部分路口左轉時相時比較小，導致左轉車隊溢流，影響直行通過量。
 但部分路口機車通過量較大，原因是直行/右轉綠燈時比較大，且機車體積小
 容易鑽行，較不受車隊影響所導致。未來需進一步探討模式求解收斂條件與
 左轉車流之處理以適用過飽和之情形。

8.2 建議

根據上述研究結論與模式未來發展方向，針對相關問題本研究擬定下列建議
事項供未來後續研究實務應用之參考。

1. 本研究僅探討混合車流汽車與機車部分，暫不考慮公車於路段之影響，實際
 上公車的假使行為明顯與汽、機車不同，其車道佔有面積較大，影響機車鑽
 行機會，同時路口啟動時間較長，影響紓解率。此外，公車進、出站行為對
 等候線之組成影響甚大，未來可考慮公車車種進一步分析。
2. 在等候結構的統計推論上，本研究雖定義了許多可能出現之等候型態，並藉
 由比例檢定分析其一致性，卻仍有部分型態尚未考慮周全，例如公車專用道
 或機車專用道之車流，其車流組成雖為同質，但流動型態卻截然不同，在群
 組化方法下須區分為不同車道群，發展不同紓解模式進行號誌求解。未來可

蒐集更多路段、不同路型(分隔方式、車道寬)的車流資料進行分析，找出更多型態的特性。

3. 本研究之混合車道停等型態不包含公車，但公車之停等位置影響混合車道等候線形成，需進一步推廣至公車的型態，特別是接近路口公車站對等候結構的影響。
4. 在單一路口模式部分，本研究雖以啟動延滯作為汽、機車分流的依據，卻在容量最大之目標下而沒有明顯之差異。不過本文提供機車路口等候空間配置一最佳化求解方向，未來可將機車待轉區之大小、深度進一步考量，甚至車道寬度也一併最佳化，使容量的計算更為精準。本模式也可擴充為路口更多用路人之號誌設計，例如行人專用號誌與自行車號誌，在考量效率與安全之雙重目標下設計多車種之最佳化時制，滿足不同用路人行的權利，讓號誌的設計更加有效率。

參考文獻



- [1] 交通部運輸研究所，2011 年臺灣地區公路容量手冊，民國 100 年 10 月。
- [2] 交通部運輸研究所，機車專用道車流特性與容量探討，民國 91 年 10 月。
- [3] 交通部統計查詢網，民國 101 年。
- [4] 行政院經濟建設委員會，愛台 12 建設總體計畫，民國 98 年 12 月。
- [5] 王義川，號誌化交叉口分流式號誌設計方法之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 84 年。
- [6] 古新全，高飽和下之續進路口數最大化模式研究，逢甲大學交通工程暨管理學系碩士論文，民國 98 年。
- [7] 朱松偉，左轉車道飽和流率之推估分析，國立臺灣大學土木工程研究所博士論文，民國 83 年。
- [8] 李建昌，幹道系統車道配置與時制計畫整合設計之研究，逢甲大學交通工程暨管理學系碩士論文，民國 91 年 8 月。
- [9] 李世炳、鄒忠毅，簡介導引模擬退火法及其應用，中央研究院物理雙月刊，廿四卷二期，頁 307-319，民國 91 年。
- [10] 林育瑞，利用類神經網路構建機車車流模式之研究，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國 91 年 6 月。
- [11] 林良泰、李建昌、許乃文，延滯最小化之幹道號誌時制設計研究，國際道路交通安全與執法研討會，民國 90 年。
- [12] 林良泰、黃華孫，幹道系統延滯最小下續進路口數最大化模式之研究，中華民國運輸學會學術論文國際研討會，民國 99 年。
- [13] 林昶禎，機車停等區對號誌化交叉路口的影響評估，中華技術季刊，民國 93 年。
- [14] 林伯陽、陳鍾誠，採用失敗後跳躍的策略以改良爬山演算法，第八屆離島資

訊技術與應用研討會，民國 98 年。

- 
- [15] 吳祚炯，混合車流特性調查分析及右轉車當量模擬之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 72 年 6 月。
- [16] 吳契輝，混合車流下路段車輛推進模式參數校估之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 101 年 7 月。
- [17] 邱大恭，獨立交叉路口號誌時制數學規劃模式之研究，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國 76 年。
- [18] 邱裕堂，號誌化交叉口時制設計策略之研究，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國 75 年。
- [19] 周義華、徐淵靜等，混合車流狀況下交叉路口交通特性之研究，國科會研究報告，民國 65 年。
- [20] 陳世泉，混合車流中機車駕駛行為之分析，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 82 年 6 月。
- [21] 陳惠國、邱裕鈞、朱致遠，交通工程，民國 99 年。
- [22] 陳柏君，號誌化交叉口機車左轉管制方式設置準則之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 87 年 6 月。
- [23] 陳彥向，具第二離開層之最佳化路口車道配置與號誌時制整合式設計，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 101 年 1 月。
- [24] 許添本，號誌化交叉口容量分析及應用之研究：臨界流動方法之發展，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 71 年。
- [25] 許添本、王義川，號誌化交叉口分流式號誌設計方法之研究，中華民國運輸年會論文集，民國 84 年。
- [26] 許添本，整合機車流動特性之號誌時制設計方法與路口機車等候空間布置方式之研究，國科會報告，民國 85 年。
- [27] 許添本，機車號誌設計方法與應用研究，國科會報告，民國 87 年。

- 
- [28] 許添本，多車種組合式模組化車流模擬模型之研究，國家科學委員會，民國 95 年。
- [29] 許添本，面式混合車流模式之構建與本土化交通模擬分析工具開發，國家科學委員會計畫案，民國 96 年。
- [30] 許義宏，巨觀混合車流模型構建之研究，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國 96 年 7 月。
- [31] 許勝翔，混合車流之過飽和路段號誌最佳化模式研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 100 年 6 月。
- [32] 黃國平，混合車流二維座標模擬模式之建立及驗證，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 72 年 6 月。
- [33] 馮輝昇，整合機車流動特性之號誌設計方法與等候佈置方式之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 84 年。
- [34] 孫將鈺，市區道路小汽車變換車道防撞警示系統之研究，中華民國運輸學會第二十一屆年會學術論文研討會，民國 94 年。
- [35] 蔡美蓉，格位轉換模式之實證 -以中山高速公路為例，逢甲大學交通工程暨管理學系碩士論文，民國 97 年 6 月。
- [36] 張開國，號誌最佳化時制設計之圖解方法，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 71 年。
- [37] 張家豪，交叉口左轉號誌時相設計安全準則之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 85 年 6 月。
- [38] 鄧竣夫，車輛防撞警示系統之動態門檻研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 94 年 6 月。
- [39] 鄒政修，發展巨觀混合推進模式於高速公路匝道儀控之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 101 年 7 月。
- [40] 鄭賜榮，混合車流狀況下交叉路口容量之研究，國立臺灣大學土木工程研究

所碩士論文，民國 65 年。

[41] 鄭有欽，路口車道配置與號誌時制設計整合之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 82 年。

[42] 蔣靜宜，機車專用道飽和流率探討與模擬參數校估之應用，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 92 年 6 月。

[43] 顏上堯，混合車流狀況下市區號誌交叉口車流運轉特性及容量參數研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 76 年。

[44] 謝勝隆，郊區公路自由車流速率推估模式之研究，中央警察大學交通管理研究所碩士論文，民國 92 年 6 月。

[45] 謝志偉，混合車流格位傳遞模式之建立與驗證，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 99 年 6 月。

[46] 劉峰佑，格位轉換模式應用於匝道儀控之研究，逢甲大學交通工程暨管理學系碩士論文，民國 98 年 7 月。

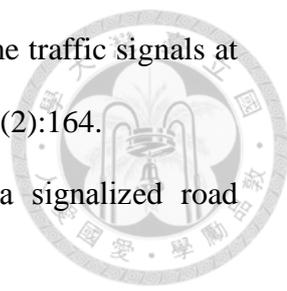
[47] 蘇昭銘、林芝嶸、唐婉玲、朱玉英，行人倒數計時器對汽機車駕駛行為之影響分析，道路交通安全與執法研討會，民國 97 年 10 月。

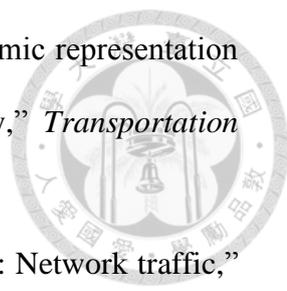
[48] 龍天立，混合車流交叉口交通管制方式及機車管制策略之研究，道安專案，民國 74 年。

[49] Abu-Lebdeh, G., & Benekohal, R.F. (1997). Development of traffic control and queue management procedures for oversaturated arterials. *Transportation Research Record No.1603*, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp.119-127.

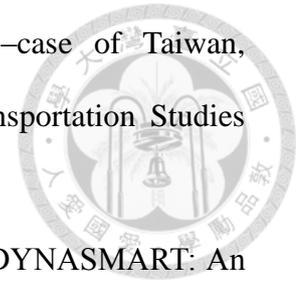
[50] Agent, K. R., Pigman, J. G., and Weber, J. M.(1980). "Evaluation of Speed Limits in Kentucky," *Transportation Research Record No.1640*, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp.57-64.

[51] Akcelik, R.(1981). "Traffic signals: capacity and timing analysis," Australian Road Research Board.

- 
- [52] Allsop, R. E. (1971). "Delay-minimizing settings for fixed-time traffic signals at a single road junction." *IMA Journal of Applied Mathematics* 8(2):164.
- [53] Allsop, R. E. (1972). "Estimating the traffic capacity of a signalized road junction." *Transportation Research/UK/* 6(3).
- [54] Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., Shetty, C.M. (2006). *Nonlinear programming: theory and algorithms*, Wiley.
- [55] Balakrishna, R., Antoniou, C., Koutsopoulos, H. N., Wen, Y., and Ben-Akiva, M. (2011). "Calibrating Speed-Density Functions for Mesoscopic Traffic Simulation," *75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory: Greenshields Symposium*, pp. 199-209.
- [56] Ben-Akiva, M. (1996). "Development of a Deployable Real-time Dynamic Traffic Assignment System", Task D Interim Report: Analytical Developments for DTASystem. MIT, Cambridge, MA.
- [57] Binning, J.C., Crabtree, M., Byrtenshaw, G. (2010). *Application Guide 65-TRANSYT-14 User Guide*, Transportation Research Laboratory.
- [58] Bodjanova, S. (1999). "Exploratory Analysis of Empirical Frequency Distributions Based on Partition Entropy," *Information Sciences*, Vol. 121, No. 1-2, pp. 135-147.
- [59] Chandra, S., and Sikdar, P. K. (2000). "Factors affecting PCU in mixed traffic on urban roads," *Road Transport Research*, Vol.9, pp. 40-50.
- [60] Chang, T. H. and J. T. Lin (2000). "Optimal signal timing for an oversaturated intersection," *Transportation Research Part B: Methodological* 34(6), pp. 471-491.
- [61] Chang, T. H. and G. Y. Sun (2004). "Modeling and optimization of an oversaturated signalized network," *Transportation Research Part B: Methodological* 38(8), pp. 687-707.

- 
- [62] Daganzo, C. F. (1994). "The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory," *Transportation Research Part B: Methodological* 28, pp. 269-287.
- [63] Daganzo, C. F. (1995). "The cell transmission model, part II : Network traffic," *Transportation Research Part B: Methodological* 29, pp. 79-93.
- [64] Dotoli, M., Fanti, M. P., and Meloni, C. (2003). "Real Time Optimization of Traffic Signal Control: Application to Coordinated Intersections," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference, Vol.4*, pp. 3288-3295.
- [65] Gallivan, S. and Heydecker, B. (1988). "Optimising the control performance of traffic signals at a single junction," *Transportation Research Part B: Methodological* 22(5), pp. 357-370.
- [66] Garner, N.H., Messer, C. J., and Rathi, A. (1975). "Traffic Flow Theory - A State-of-the-Art Report," *Transportation Research Board Special Report* 165.
- [67] Gibbens, R.J., and Saatchi, Y. (2008). "Data, modeling and inference in road traffic network," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 366, issue 1872, pp. 1907-1919.
- [68] Greenshields, B. D. (1935). "A study of traffic capacity," *HRB*, Vol.14, pp.448-477.
- [69] Heydecker, B. G. and Dudgeon, I. W. (1987). "Calculation of signal settings to minimise delay at a junction," *Proceedings 10th International Transportation and Traffic Theory Symposium, US, MIT, July*, pp. 159-178.
- [70] Harkey, D. L., Robertson, H. D., and Davis, S. E., (1990). "Assessment of Current Speed Zoning Criteria," *Transportation Research Record No.1281*, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp.40-50.
- [71] Hsu, T.P., Sadullah, A.F.M., Nguyen X. D. (2003). "A comparison study on

motorcycle traffic development in some Asian countries—case of Taiwan, Malaysia and Vietnam,” The Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS) International Cooperative Research Activity.

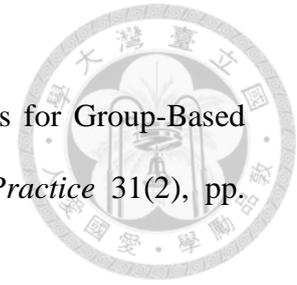


- [72] Jayakrishnan, R., Mahmassani, H. S., and Hu, T.Y. (1994). “DYNASMART: An Evaluation Tool for ATIS/ATMS in Urban Traffic Networks,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 2, No.3, pp. 129-147.
- [73] Katayama, T., Aoki, A. and Nishimi, T. (1988). “Control Behaviour of Motorcycle Riders,” *Vehicle System Dynamics*, Vol.17, pp. 211-229.
- [74] Kim, S., and Benekohal, R. (2011). ”Development and Validation of Arrival-Based Uniform Delay Models for Oversaturated Signalized Intersections,” *Journal of Transportation Engineering*, 137(1), pp. 64–73.
- [75] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P. (1983).” Optimization by Simulated Annealing,” *Science*, New Series, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.
- [76] Kotsialos, A., Papageorgiou, (2004). “Methodological Calibration of the Cell Transmission Model.” American Control Conference, Vol.1, pp.798-803.
- [77] Kotsialos, A., Papageorgiou, (2002). “Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 3(4), pp. 282-292.
- [78] Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995). “Particle Swarm Optimization,” Neural Networks, IEEE International Conference, Vol.4, pp.1942-1948.
- [79] Lam W., Poon, C.K. and Mung, K.S. (1997). “Integrated Model for Lane-Use and Signal-Phase Designs” *Journal of Transportation Engineering*, 123(2), pp. 114-122.
- [80] Lee, T. C. (2007). ”An Agent-Based Model to Simulate Motorcycle Behaviour in Mixed Traffic Flow,” PhD thesis, Imperial College London.
- [81] Liu, Y. and Chang, G. L. (2011). “An arterial signal optimization model for

- intersections experiencing queue spillback and lane blockage.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19(1), pp. 130-144.
- [82] Liu, Y., Chang, G.L., Yu, J., Ho, Y., and Rahwanji, S. (2008). “A Lane-group Based Macroscopic Model for Signalized Intersections Account for Shared Lanes and Blockages,” *Intelligent Transportation Systems, 11th International IEEE Conference*, pp. 639-644.
- [83] Lo, H.K. (2001). “A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plans,” *Transportation Science* 35(2), pp. 148-164.
- [84] Lo, H.K., Chang E., Chan, Y.C. (2001). “Dynamic Network Traffic Control,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 35(8), pp. 721-744.
- [85] Luke, S. (2009). “Essentials of Metaheuristics,” Lulu.
- [86] May, A. D. (1990). “Traffic Flow Fundamentals,” Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [87] McTrans. (2008). “TRANSYT-7F Users Guide,” University of Florida.
- [88] Mehta, M. (2001). “Design and Implementation of an Interface for the Integration of DynaMIT with the Traffic Management Center,” Massachusetts Institute of Technology.
- [89] Munoz, L., Sun, X., Gomes, G., Horowitz, R. (2004). “Methodological calibration of the cell transmission model,” *American Control Conference*, Vol.1, pp. 798-803.
- [90] Ponlathep, L., Masao, K., and Marc, M. (2011).” A New Multiobjective Signal Optimization for Oversaturated Networks,” *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions*, Vol.12, pp.967-976.
- [91] Sharp, R. S. (1971). “The stability and control of motorcycles,” *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 13, No. 5, pp. 316-329.
- [92] Salkin, H. M., Mathur, K. (1989). “Foundations of integer programming,”

North-Holland New York etc.

[93] Silcock, J. P. (1997).” Designing Signal-Controlled Junctions for Group-Based Operation,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 31(2), pp. 157-173.



[94] TRL software (undated), “Summary Version of OSCADY PRO Use Guide”.

[95] Tian, Z., and Xu, F. (2006). ”Modeling the Effects of Pedestrians on Intersection Capacity and Delay with Actuated Signal Control,” Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Capacity, Yokohama, Japan.

[96] Weise, T. (2009). “Global Optimization Algorithms: Theory and Application,” 2nd Edition.

[97] Weir, D.H., and Zellner, J.W. (1978). “Lateral-Directional Motorcycle Dynamics and Rider Control,” SAE Technical Paper 780304.

[98] Wong, S. (1996). “Group-based optimization of signal timings using the TRANSYT traffic model,” *Transportation Research Part B: Methodological* 30(3), pp. 217-244.

[99] Wong, C. and Wong, S. (2003). “Lane-based optimization of signal timings for isolated junctions,” *Transportation Research Part B: Methodological* 37(1), pp. 63-84.

[100] Wong, C. and Heydecker, B. (2010). “Optimal allocation of turns to lanes at an isolated signal-controlled junction,” *Transportation Research Part B: Methodological* 45(4), pp.667-681.

[101] Wu, X., and Liu, H. X. (2011).” A shockwave profile model for traffic flow on congested urban arterials,” *Transportation Research Part B: Methodological* 45(10), pp.1768-1786.

[102] Yang, Q., Koutsopoulos, H. N., and Ben-Akiva, M. E. (1997). “A Simulation Lab Oratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management

Systems,” *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 123, No. 4, pp. 283-289.



作者簡歷



姓 名：劉信宏

出 生 地：新北市

出生日期：民國 77 年 12 月 16 日

學 歷：

小學：新北市立文德國小

中學：新北市立板橋國中

高中：臺北市立成功高中

大學：國立成功大學交通管理科學系

研究所：國立臺灣大學土木工程所交通工程組 碩士

電子信箱：r00521501@ntu.edu.tw