

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

高速公路可變速限聯合匝道儀控最佳化模式

An Optimization Model of Coordinated VSL and Ramp Metering
Control on Freeway

張鈞凱

Chun-Kai Chang

指導教授：許添本 博士

Advisor: Tien-Pen Hsu, Ph.D.

中華民國 103 年 6 月

June, 2014

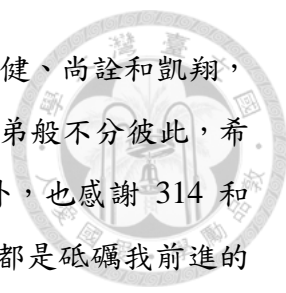
誌謝



現在是凌晨 2 點 46 分，我獨自一人坐在 114 裡，沉浸在屬於自己的回憶。隨著八月份的到來，我在台大兩年的研究所生涯也一步步接近尾聲了，回想這兩年來的種種，有歡笑有淚水、有失落有感動，或許，人生無法重來，但如果有機會讓我的研究所生涯再重頭來過的話，我想我唯一不會改變的決定，便是選擇許添本老師作為我的指導教授。

老師除了授予我們交通領域專業知識外，更是我們的心靈導師，在寫論文的這段時間裡，常常會因為遇到瓶頸或困難而感到挫折，甚至，曾經有一度想要放棄的念頭，但每每與老師討論完後都能安定心情，繼續提起動力努力研究。我想老師之於我，就像是 Phil Jackson 教練之於 Michael Jordan 一樣重要吧！如果沒有 Phil Jackson 教練，Michael Jordan 可能無法成為籃球界的一代巨星；如果沒有許老師，我可能無法完成這篇論文。雖然，我可能無法像 Michael Jordan 一樣曾為交通界的一代巨星，但在往後的日子裡，我一定會秉持著老師的教誨，並以老師為榜樣，繼續向前邁進。另外，本篇論文的完成要特別感謝胡守任老師以及邱裕鈞老師兩位口試委員，兩位老師所提出的寶貴建議與指教，都使的本篇論文能更臻完整。

而在研究所的這兩年內，同時也認識許多前輩與同學。首先，感謝宗軒學長引領我進入交通控制領域的大門，在與學長共同做計畫案的日子裡，從學長身上學到許多關於撰寫報告的技巧，儘管跟學長相處的時間短短不到一年，但學長對於我的照顧，我定將銘記在心。另外，感謝伊嵐學姐這一路走來的互相扶持，雖然一直沒有機會在學姐的領導下做計畫案，但每當深夜在 114 裡，看見學姐仍在自己的工作崗位上努力不懈，便能體會學姐對於研究的態度與熱誠，儘管學姐總是因計畫案和相關事宜忙得分身乏術，但在我們寫論文遇到問題時，都還是很有耐心地給予我們適時的幫助，希望在未來的日子裡能有幸遇到像妳一樣的主管。最後，要感謝鄒政修學長與江宜穎學姐兩位研究高速公路控制的前輩，政修學長的研究高度一直是我所追求的目標，幾次與學長談論車流理論與控制概念，均讓我獲益匪淺；而宜穎學姐辛苦校估的國五模擬路網也讓我受益良多，如果不是妳留下 VISSIM 資料檔讓我仔細鑽研，我也無法完成本篇論文。



接著感謝一起打拼的其餘許家五帥，包括：家豪、昱辰、凱健、尚詮和凱翔，雖然，你們一直推寵我為「許家六帥」之首，但我想我們就像兄弟般不分彼此，希望在往後的日子裡我們還是可以一直維持著這樣的好感情。另外，也感謝 314 和 316 的碩二夥伴們，大家對於交通專業知識的熱情與渴望，一直都是砥礪我前進的最佳動力。而許家的各位學弟妹：唯倫、顏愉、于鴻以及郁冠，感謝你們這一年來的幫助，尤其是唯倫學妹，在我寫論文的這段時間裡，常常需要接受我一些不合理的要求，辛苦妳了。

最後，我要感謝我的爸媽，謝謝你們包容我這麼長時間在外求學，雖然只是透過電話簡單地噓寒問暖，但我總是能感受到你們最真心的思念與鼓勵，而你們在經濟上給予的援助，讓我在心理與生理上都能夠無後顧之憂地度過研究生涯，真的很感謝你們。

鈞凱 謹誌

2014/07/29 於土木系館 114 交通工程實驗室

摘要



隨著私人車輛持有率和使用率不斷增加，造成交通量迅速成長，在尖峰時段或連續假日高速公路往往會發生大範圍及長時間的壅塞，甚至回堵至地方道路而造成全面性的壅塞。這些壅塞將導致高速公路運作的效率降低，也帶來了龐大的社會成本。因此，為提升高速公路的使用效率以及減少社會成本，有必要採取相關的交通控制措施以維持車流的穩定。

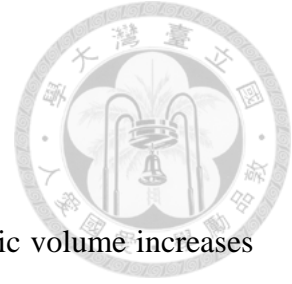
本研究以國道五號北上路段為例，根據車輛偵測器資料分析研究範圍內之壅塞特性，由分析結果可知，國道五號北上路段壅塞範圍大多集中於雪山隧道，且車流速率於五分鐘內即會由 90km/hr 降至 10km/hr，具有劇變現象。因此，本研究透過數學規劃法建構一套可變速限聯合匝道儀控最佳化模式，希望利用可變速限之特性控制車流以漸變的方式進入雪山隧道，並搭配上遊匝道連鎖控制，以減緩或避免雪山隧道壅塞產生。研究中並以離散型二階巨觀車流模式-METANET 為基礎，發展一套適用於國道五號北上路段之巨觀車流模式，本研究將之稱為「METANET 長隧道模式」。

然而，最佳化模式因參數校估不易以及求解速率過慢等特性，使之難以運用在線上控制中，為克服上述問題，本研究利用類神經網路建構預測模式，以預測最佳化模式之輸入參數，並透過啟發式演算法提升最佳化模式之求解效率，以達到線上控制之目的。

為評估模式之控制績效，本研究利用微觀模擬軟體 VISSIM 繪製國道五號北上路段之模擬路網，並透過驗證程序確認模擬路網之真實性，最後，以 VISSIM 外掛程式 VisVap 將最佳化模式求解結果應用至模擬路網中，模擬結果顯示，在控制後主線旅行時間與雪山隧道總通過量均有顯著的改善，顯示本研究所研擬之控制模式能有效提升國道五號北上路段之使用效率。

關鍵字：可變速限、匝道儀控、數學規劃、適應性控制。

ABSTRACT



With the growth of private car holding rate and usage rate, traffic volume increases rapidly, huge scope and long-time congestion happens in the peak hour or on long vacations on freeway, the congestion also blocked back to local roads which cause entirely congestion. The efficient of freeway reduced and social cost increased due to congestion, in order to raise the efficient and reduce social cost, it is necessary to adopt relative traffic control strategy to maintain the stability of traffic flow.

The research takes north bound of freeway No. 5 as an example. First of all, to analysis the congestion characteristics in the research scope by the data from vehicle detector. It is known that the congestion segment is focused on HsuehShan tunnel, and car velocity reduced from 90km/hr to 10km/hr in 5 minutes, which is the catastrophe phenomena. As a result, this research construct a optimal model of coordinated VSL(Variable Speed Limit) and ramp metering by mathematical program, to control traffic flow entering HsuehShan tunnel with gradually speed reduction by the characteristic of VSL, also coordinate with upstream ramp interlocked control, to mitigate or even prevent from the congestion of HsuehShan tunnel. This model also based on discrete second order macroscope traffic flow model - METANET to develop a macroscope traffic flow model witch fits the north bound segment of freeway No. 5, which is named "METANET long tunnel model" by this research.

However, due to the difficulty of parameter calibration and slow solving rate of optimal model, it is unrealistic to be used in online control. In order to overcome this difficulty, Artificial neural network is used to construct the prediction model and predict the input parameters of optimal model, also heuristic algorithm is used to enhance the

solving rate, with the combination to reach the goal of online control.

In order to assess the performance of this model, microscope simulation software - VISSIM is used to sketch the network of the northbound of freeway No. 5, the validation process is taken to confirm the reality of simulation network. Finally, the plug-in software VisVap is been used to apply the result optimal model into simulation model. The result indicated that the mainline travel time and total throughput of HsuehShan tunnel increased significantly after control, which indicate the usage rate of northbound of freeway No. 5 is enhanced effectively by the control model in this research.

Key words: Variable Speed Limit, Ramp Metering, Mathematical Program, Traffic-Responsive Control.

目錄



摘要	i
ABSTRACT	iv
目錄	vi
圖目錄	ix
表目錄	xii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	2
1.2 研究目的	3
1.3 研究範圍	4
1.4 研究流程與內容	5
第二章 文獻回顧	8
2.1 可變速限控制	8
2.2 匝道儀控	15
2.2.1 獨立型	15
2.2.2 連鎖合作型	20
2.2.3 連鎖競爭型	22
2.2.4 整合型	27
2.3 可變速限聯合匝道儀控	34
2.4 控制演算法小結	39
2.5 巨觀車流模式	40



2.5.1	車流基礎構圖	41
2.5.2	一階巨觀車流模式	44
2.5.3	二階巨觀車流模式	48
2.6	車流模式小結	54
第三章	現況分析	58
3.1	時空圖分析	58
3.2	容量分析	60
3.3	基礎構圖分析	61
3.4	速率變化圖分析	63
第四章	可變速限聯合匝道儀控最佳化模式	65
4.1	METANET 模式	65
4.1.1	路段切分	66
4.1.2	建立各路段期望速率與密度關係式	68
4.1.3	決定各路段格位數	69
4.1.4	參數校估	71
4.2	METANET 長隧道模式	79
4.2.1	參數校估	79
4.3	最佳化模式	84
第五章	預測模式	90
5.1	速率預測模式	91
5.2	密度預測模式	93
5.3	流量預測模式	94

5.3.1	上匝道流量.....	95
5.3.2	下匝道流量.....	96
5.3.3	上下游邊界流量.....	97
第六章	模擬平台建構.....	98
6.1	路網驗證.....	98
第七章	模式應用與案例分析.....	100
7.1	即時求解架構.....	100
7.2	績效評估.....	105
7.2.1	主線績效.....	106
7.2.2	匝道績效.....	109
第八章	結論與建議.....	113
8.1	結論.....	113
8.2	建議.....	114
	參考文獻.....	115
	附錄一.....	123
	附錄二.....	126
	附錄三.....	128
	附錄四.....	135



圖目錄



圖 1-1	國道五號高速公路區位圖	2
圖 1-2	國道五號北上路段高乘載管制實施前後之速率時空圖	3
圖 1-3	研究流程圖	7
圖 2-1	荷蘭 A20 高速公路可變速率控制設施	8
圖 2-2	不同控制速限對車流之影響[89]	12
圖 2-3	各類匝道儀控演算法之分類圖	15
圖 2-4	分區演算法控制示意圖	16
圖 2-5	整體適應性匝道儀控模式可調整參數示意圖	26
圖 2-6	模糊邏輯演算法輸入參數示意圖	29
圖 2-7	類神經網路整合型儀控流程圖	33
圖 2-8	巨觀車流模式分類圖	41
圖 3-1	國道五號北上路段週五至週一速率時空圖	58
圖 3-2	國道五號北上路段壅塞時段速率時空圖	59
圖 3-3	國道五號北上路段全線流率變化圖	61
圖 3-4	基礎構圖資料蒐集點示意圖	62
圖 3-5	不同路段流量佔有率分布圖	63
圖 3-6	速率變化分析圖	64
圖 4-1	METANET 模式建構流程圖	65
圖 4-2	SPSS 群集分析結果	67
圖 4-3	METANET 車流模式路段切分示意圖	68

圖 4-4	METANET 車流模式各路段和格位切分示意圖	70
圖 4-5	基因演算法流程圖	75
圖 4-6	METANET 模式參數校估之流量 MAPE 圖	78
圖 4-7	METANET 模式參數校估之速率 MAPE 圖	78
圖 4-8	METANET 長隧道模式參數校估之流量 MAPE 圖	83
圖 4-9	METANET 長隧道模式參數校估之速率 MAPE 圖	84
圖 5-1	速率預測模式之類神經網路架構	92
圖 5-2	上游邊界速率預測驗證之 MAPE 圖	92
圖 5-3	密度預測模式之類神經網路架構	93
圖 5-4	下游邊界密度預測驗證之 MAPE 圖	94
圖 5-5	流量預測模式之類神經網路架構	95
圖 5-6	上匝道流量預測驗證之 MAPE 圖	95
圖 5-7	上下游邊界流量預測驗證之 MAPE 圖	97
圖 6-1	VISSIM 路網驗證之流量 MAPE 圖	99
圖 6-2	VISSIM 路網驗證之速率 MAPE 圖	99
圖 7-1	滾動平面法求解架構	101
圖 7-2	模擬即時求解流程圖	102
圖 7-3	各上匝道之儀控率(RM)	103
圖 7-4	國道五號控制前後速率變化圖	105
圖 7-5	主線控制前後平均旅行時間差異表(非壅塞時段)	106
圖 7-6	主線控制前後平均旅行時間差異表(壅塞時段)	107
圖 7-7	雪山隧道控制前後各時段通過量圖	108

圖 7-8	匝道控制前後平均延滯時間差異圖(非壅塞時段).....	109
圖 7-9	匝道控制前後平均延滯時間差異圖(壅塞時段).....	110
圖 7-10	匝道控制前後平均等候長度差異圖(非壅塞時段).....	111
圖 7-11	匝道控制前後平均等候長度差異圖(壅塞時段).....	112

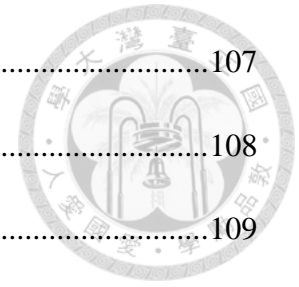


表目錄



表 1-1	國道五號北上路段交流道及收費站之里程位置.....	5
表 2-1	控制速限準則表.....	13
表 2-2	Chu and Xu 基因演算法輸入參數與範圍.....	18
表 2-3	Chu and Xu 基因演算法最佳化參數與範圍.....	19
表 2-4	Papageorgiou 不同控制策略下 BP 路網績效比較(1).....	19
表 2-5	Papageorgiou 不同控制策略下 BP 路網績效比較(2).....	32
表 2-6	速率控制模式決策表.....	38
表 2-7	單階段速率-密度關係式.....	43
表 2-8	多階段速率-密度關係式.....	43
表 3-1	可變速限標誌佈設位置.....	60
表 4-1	各路段期望速率-密度關係式.....	69
表 4-2	各路段格位最小長度限制.....	70
表 4-3	METANET 模式最佳參數組.....	77
表 4-4	MAPE 評估標準.....	77
表 4-5	METANET 長隧道模式最佳參數組.....	82
表 5-1	類神經網路預測模式相關設定.....	91
表 5-2	下匝道流量預測成對樣本 T 檢定.....	96
表 6-1	VISSIM 模擬路網各路段駕駛者行為參數設定值.....	98
表 7-1	各控制位置之控制速限(VMS).....	104
表 7-2	主線控制前後平均旅行時間差異表(非壅塞時段).....	106

表 7-3	主線控制前後平均旅行時間差異表(壅塞時段).....	107
表 7-4	雪山隧道控制前後各時段通過量表.....	108
表 7-5	匝道控制前後平均延滯時間差異表(非壅塞時段).....	109
表 7-6	匝道控制前後平均延滯時間差異表(壅塞時段).....	110
表 7-7	匝道控制前後平均等候長度差異表(非壅塞時段).....	111
表 7-8	匝道控制前後平均等候長度差異表(壅塞時段).....	112



第一章 緒論



近年來隨著經濟發展及汽車工業的發達，使得私人車輛持有率及使用率逐漸上升，道路尖峰時段時常發生嚴重之壅塞現象，而長時段的壅塞不僅帶給駕駛人不便，更會造成空氣汙染、噪音汙染等環境問題。因此，避免壅塞產生、提升道路服務水準為近幾年交通相關部門所致力之研究課題，為了因應壅塞問題所擬定的改善措施，大致可依類別的不同分為規劃層面措施和管理層面措施。

在規劃層面中，政府可藉由增加供給或減少需求等相關措施以提升道路之服務品質，其中，增加供給的策略包含硬體設備之提升，如：新闢替代道路或增加現有路線車道數等方式以增加運輸績效；而減少需求的策略則包含：推廣大眾運輸、抵制私人運具持有率增加之手段以減少行駛於道路上之車輛數。然而，規劃層面之改善措施往往是針對未來的社會環境所擬定，需要花費大量的時間及金錢方能完成，因此，為解決現存路網壅塞問題仍需透過妥善管理技巧以導引旅行者之駕駛行為，藉此達到路網各路段容量均能充分被利用之目的。

台灣目前高速公路之交通管理措施大致包含：匝道儀控、高乘載管制和旅行時間發佈等。理論上，透過上述管理策略即可使高速公路車流維持在道路容量以下，然而，當車流在接近容量時容易因激進駕駛行為，如：變化車道、緊急煞車，而產生衝擊波(Shock wave)效應，進而影響後方車流運行並造成壅塞的發生。可變速限控制(Variable speed limit, VSL)為目前實行於歐洲各國與美國之高速公路控制策略，此策略最早於歐洲荷蘭實行，其目的為促進車流之均質性，以增進交通安全，而後應用於歐洲其他國家與美國，適用於天氣條件差、路段幾何變化大或路段之瓶頸點，可增進行車安全、提高道路績效及將低對於環境之負面影響。利用高速公路主線之可變速限(Variable speed limit)標誌採取適當的速限控制，將有助於減少主線壅塞的發生。因此，本研究希望以國道五號北上路段為例，發展一套可供實務運用的可變速限聯合匝道儀控控制系統，藉此避免該路段之壅塞發生。

本研究第一章說明研究目的及研究範圍；第二章回顧可變速限、匝道儀控、可變速限聯合匝道儀控和巨觀車流模式之相關文獻；在第三章中，本研究透過國道五號北上路段之現況分析確立控制系統各項設定；第四章說明可變速限聯合匝道儀控之最佳化模式；第五章建構預測模式以預測最佳化模式中各個輸入參數值；第六

章及第七章說明本模式之即時求解架構並以微觀模擬軟體 VISSIM 及其外掛程式 VisVap 評估控制績效，最後，第八章提出本研究之結論。



1.1 研究背景與動機

國道五號-蔣渭水高速公路北起與國道三號相接之南港系統交流道，往南行經 5 座隧道，包含：南港隧道、石碇隧道、烏塗隧道、彭山隧道以及雪山隧道，其中雪山隧道介於新北市坪林區與宜蘭縣頭城鎮之間，全長 12.9 公里，使原先耗時超過 1 小時之車程縮短為 10 多分鐘，大幅縮短台北都會區至礁溪宜蘭城鎮的旅行時間。由台北到宜蘭也由兩個多小時，大幅縮短為三十幾分鐘。然而，在便利的高速公路系統建置完成後，自 2006 年 6 月 16 日通車以來，國道五號高速公路不但誘發了台北宜蘭間的潛在旅遊旅次，更吸引原先使用台 9 與台 2 縣之用路旅次，加上長上坡路段、收費站路段與長隧道路段等瓶頸的影響下，導致每逢周休假期即出現交通壅塞的問題。



圖 1-1 國道五號高速公路區位圖

目前國道五號的交通控制方式主要是以實施匝道儀控(Ramp metering)與高乘載管制(High occupancy vehicle, HOV)為主，其中匝道儀控是採用人工下達儀控指令的方式進行，而高乘載管制是從 2012 年 9 月 16 日起開始常態實施，規定每週日下午 2 點至 8 點於國道五號北上路段之頭城、宜蘭、羅東及蘇澳等四個交流道同步實施，小客車需載滿 3 人才可使用國道五號。雖然自從實施高承載管制之後，在降低使用量的情況下，確實減少了國道五號壅塞的時段及範圍，然而，雪山隧道北上路段在週休假期仍會發生嚴重的壅塞，如圖 1-2 所示，此外，隨著台北宜蘭間旅次逐年增加，僅利用高乘載管制並不能有效地解決根本問題，據此引發本研究之動機。

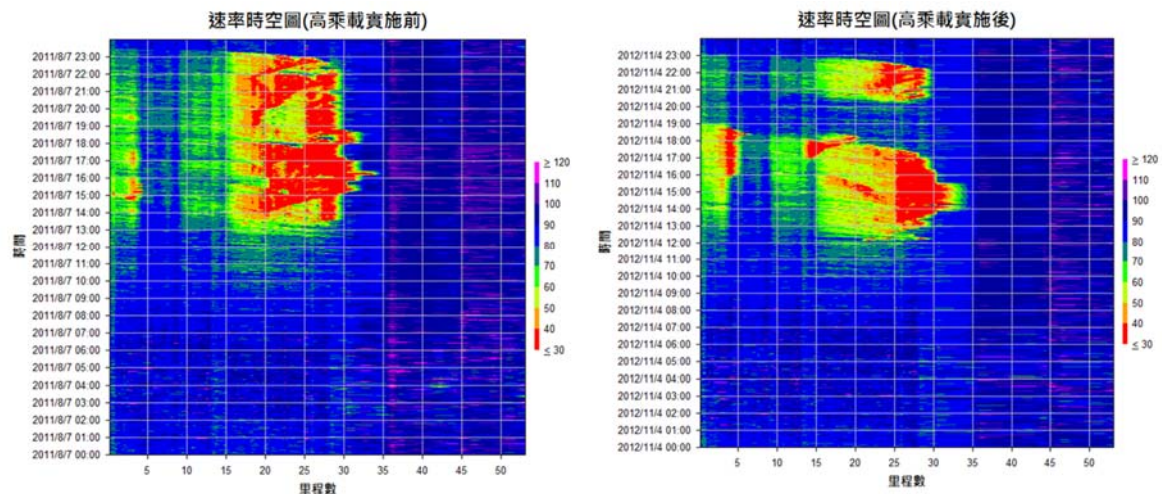


圖 1-2 國道五號北上路段高乘載管制實施前後之速率時空圖

1.2 研究目的

目前高速公路控制大多著重於匝道儀控(Ramp metering)與高乘載收費車道(High occupancy toll, HOT)之研究，有關於可變速限控制之研究近幾年方受到世界各國所重視，然而，為確保系統之強健性(Robust)目前實施的可變速限演算法均係以簡單的邏輯判斷進行求解，無法確保其所得之控制速限為系統最佳解。本研究希望提出一套可變速限聯合匝道儀控之最佳化模式供實務所用，然而，最佳化模式往往因求解速率過慢而無法進行線上運作，因此為克服此缺點，本研究須建立一套預測模式以預測最佳化模式中各參數之輸入值，並利用啟發式演算法進行求解以提升模式之求解速率。



研究目的可分為以下 6 點：

1. 找尋合適之高速公路壅塞地點，分析其車流特性並探討可變速限標誌擺放之位置。
2. 透過文獻回顧，了解匝道儀控和可變速限控制的內容及效果，並選擇適用於研究範圍之演算法。
3. 發展適用於研究範圍之巨觀車流模式，並以完整的參數校估與驗證流程驗證此模式是否能合理地模擬實際的車流情形。
4. 運用該車流模式構建可變速限聯合匝道儀控之最佳化模式，並透過啟發式演算法求解各控制位置之最佳速限及儀控率。
5. 以類神經網路(Artificial neural network, ANN)建構預測模式，預測最佳化模式中各個輸入參數值，使最佳化模式能線上求解，供實務所用。
6. 將最佳化模式所計算之最佳速限及儀控率以適應性號誌軟體 VisVap 外掛於微觀模擬軟體 VISSIM 中，藉此評估本研究模式對於模擬路網壅塞改善的績效，以確立本研究於實務上的可用性。

1.3 研究範圍

本研究欲針對高速公路建立可變速限聯合匝道儀控最佳化模型，並以國道 5 號北上路段作為研究對象，利用沿線佈設之偵測器資料進行分析，了解主線路段壅塞影響的空間與時間範圍，並針對該範圍進行控制。國道 5 號北上路段，自蘇澳交流道起至南港系統交流道止，總長共計 54.3 公里。共設置 6 個交流道(蘇澳、羅東、宜蘭、頭城、坪林、石碇)、1 個系統交流道(南港系統)、1 個收費站(頭城)和 1 個服務區(石碇服務區)，各設施之里程位置詳見表 1-1 所示。另外，國道五號北上路段目前共裝設有 96 支車輛偵測器，包含主線 85 支、入口匝道 6 支與出口匝道 5 支，各車輛偵測器里程位置與相關資料可參閱附錄一。

本研究不考慮主線路廊範圍中其他交流道的替代路徑導引策略，也不考慮地方道路號誌與車流對主線出口及入口匝道的影響，僅單純地考慮入口匝道匯入車流以及可變速限對於駕駛者的影響。另外，本研究假設控制時段內都會執行可變速限與匝道儀控，不設定啟動與關閉儀控的時間點及門檻值；而如何將儀控率轉換成號誌時制，以及號誌時制設定對於車流變化的影響則不在本研究討論範圍。

表 1-1 國道五號北上路段交流道及收費站之里程位置

名稱	里程位置
南港系統交流道	0K+000
石碇交流道	4K+004
石碇服務區	4K+450
坪林交流道	14K+583
頭城交流道	29K+843
頭城收費站	30K+000
宜蘭交流道	35K+868
羅東交流道	45K+162
蘇澳交流道	54K+080

1.4 研究流程與內容

圖 1-3 為本研究之流程圖，說明如下：

一、研究目的與內容確立

利用車輛偵測器之數據分析國道 5 號北上路段的交通問題，藉此確立研究方向與目的，進而訂定問題的假設及限制，作為本研究之基礎。

二、文獻蒐集回顧

蒐集各種高速公路可變速限和可變速限聯合匝道儀控之演算法，並針對其理論基礎、數學模式進行了解；另外，由於最佳化模式須以巨觀車流模式做為基礎，故有必要針對巨觀車流模式進行全方位且深入的理解分析，並在考慮模式對於車流之描述能力、參數校估、模式驗證及求解的難易度後，決定最適合本研究應用的車流模式。

三、以實際路網資料確立控制範圍

根據車輛偵測器之資料分析，判斷國道 5 號北上路段壅塞的空間與時間範圍，進而依照壅塞分析確認控制範圍、硬體設備佈設位置以及控制時階的單位長度。

四、最佳化模式構建

根據文獻回顧的結果，選取適當的車流模式，並針對研究對象的交通與

路網特性進行適當的修改，發展適用於本研究範圍的巨觀車流模式，接著，透過參數校估和模式驗證等步驟，確認車流模式描述車流行為的能力，最後，以數學規劃法建構最佳化模式。



五、預測模式構建

根據最佳化模式中所需輸入之參數建構對應的預測模式，並透過模式驗證確認其預測能力，最後，將最佳化模式與預測模式結合以研擬一套即時求解架構供實務運用。

六、模式績效評估

本研究以微觀模擬軟體 VISSIM 建構研究對象之模擬路網，並透過驗證程序確保模擬路網能重現真實車流的特性與壅塞變化。在完成模擬路網的驗證後，將最佳化模式按照即時求解流程以 VISSIM 之外掛軟體 VisVap 應用於模擬路網中。最後，依適當之評估指標比較控制前後之績效。

七、結論與建議

總結研究成果，並提出結論與建議作為後續研究的參考。

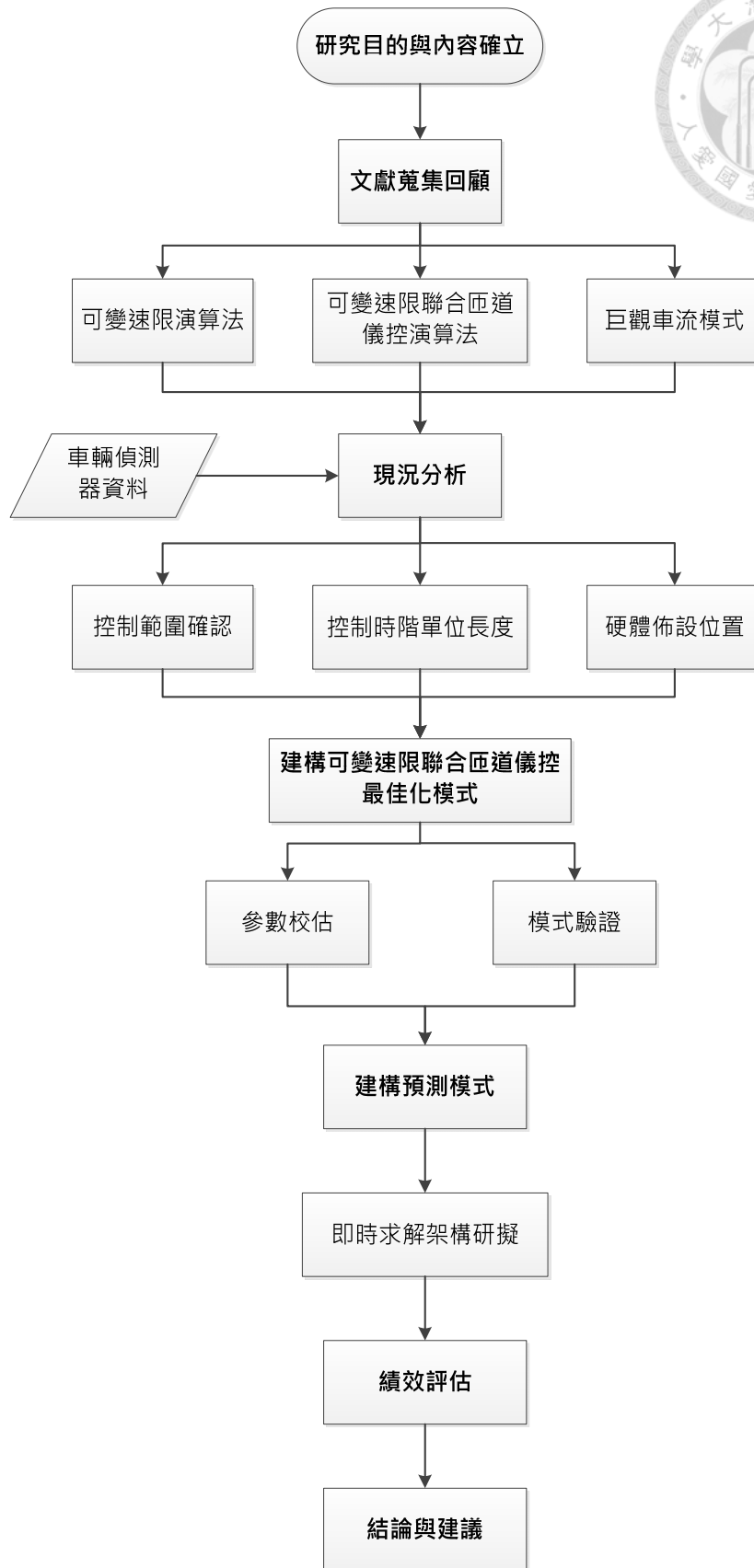


圖 1-3 研究流程圖

第二章 文獻回顧



本章節主要回顧可變速限控制、匝道儀控、可變速限聯合匝道儀控以及巨觀車流模式之相關文獻，並分成以下幾部分進行討論。第 2.1 節說明各國可變速限系統以及各類可變速限演算法；第 2.2 節說明各類匝道儀控演算法；第 2.3 節說明各類可變速限聯合匝道儀控演算法；第 2.4 節分析各類控制演算法之優缺點；第 2.5 節說明各類巨觀車流模式；第 2.6 節分析各類車流模式之優缺點。

2.1 可變速限控制

目前已實施的可變速限控制系統依執法方式的不同，可分為法規強制執行或建議行駛速率兩大類。強制執行速限控制者如美國 I-270 州際高速公路上針對八個壅塞地點實施之可變速限控制[72]；建議行駛速率者如實行於荷蘭 A4,A13,A16,A20 高速公路上之可變速限控制[55]，以及實行於瑞典斯德哥爾摩之 E4 高速公路[89]等。各國可變速限控制系統之硬體佈設方式亦有所不同，荷蘭 A20 高速公路於控制路段上每 500 公尺佈設一組車輛偵測器，可回傳每分鐘車流平均速率與流量，並以每 500 公尺或 1000 公尺為依據佈設可變速限標誌[94]，其設備佈設原則如圖 2-1 所示；瑞典斯德哥爾摩 E4 高速公路則於主線每 300 至 500 公尺佈設一門架，並於門架上設置可變速限標誌以及微波偵測器[89]。

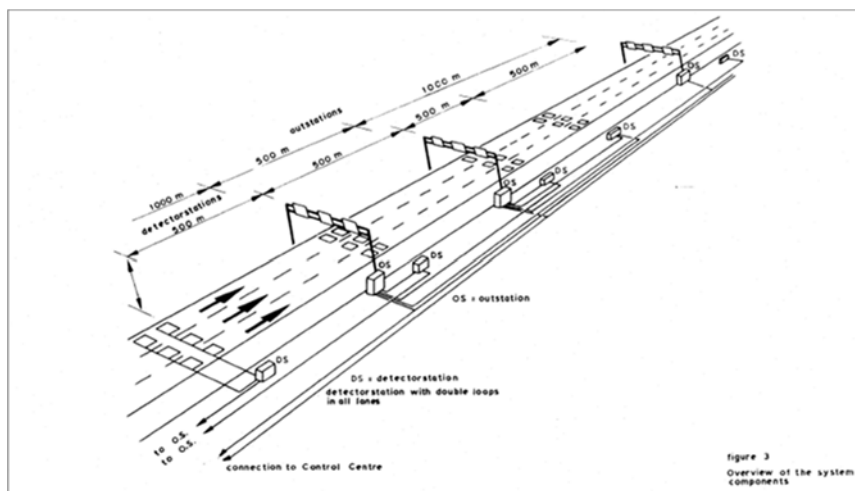


圖 2-1 荷蘭 A20 高速公路可變速率控制設施



依據控制目的的不同，可變速限演算法可分為以下兩類：

一、增進行車安全

交通事故或異常天候狀況所引發的非重現性壅塞 (Non-recurrent congestion)，將導致部分路段密度急速上升，此時，車輛為角逐道路中可用的空間，將產生許多擾動(例如：緊急煞車、變換車道等)。此擾動將造成車輛速率變異數上升，進而增加肇事發生之機率。

可變速限使的管理者可在不同情境下，提醒駕駛者最佳行駛速率，進而消彌車輛間速率變異、提升車速同質性，以增進行車安全。而依此控制目的所發展之可變速限演算法，通常會將控制速限訂在臨界速率之上。

二、提升使用效率

早期可變速限實施目的大多為增進行車安全，然而，近年來研究則著重利用可變速限之特性，控制車流以漸變速率的方式接近壅塞地點，藉此減緩或避免尖峰時段所產生之重現性壅塞(Recurrent congestion)，進而提升道路使用效率，因此，亦有部分學者將此類可變速限演算法稱為漸變速限控制。

以下為可變速限演算法之文獻回顧：

Hegyí *et al.*[23][24][26]於 2002 年至 2007 年間發表一系列以提升道路使用效率為控制目的之可變速限研究，其以 Papageorgiou 所提出之巨觀車流模式 METANET 為基礎，透過式(2.1)將可變速限對於車流速率的影響加入模式中，並限制控制速限前後時階跳動幅度不得超過 10kph，以避免駕駛者因速限急遽變化而造成安全上的疑慮，最後，在最小化路網旅行時間的目標下，建構可變速限最佳化模式。然而，在動態控制系統中，時階 $k+1$ 之車流狀態將受到時階 k 控制速限的影響，因此，Hegyí *et al.* 以 MPC(Model predictive control)為架構，將時階 k 的控制速限對於車流造成之影響回饋至車流模式中，藉此重新計算時階 $k+1$ 之最佳控制速限，以達到動態控制之目的。

$$V(\rho_{m,i}(k)) = \min \left[(1 + \alpha)v_{ctrl,m,i}(k), v_{free,m} \exp \left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}} \right)^{a_m} \right] \right] \quad (2.1)$$

其中， $\rho_{m,i}(k)$ ：在時階 k 內，路段 m 格位 i 之密度；

$V(\rho_{m,i}(k))$ ：在時階 k 內，路段 m 格位 i 密度所對應之期望速率；

$v_{ctrl,m,i}(k)$ ：在時階 k 內，路段 m 格位 i 之控制速限；

$v_{free,m}$ ：路段 m 之自由車流速率；

$\rho_{crit,m}$ ：路段 m 之臨界密度；

a_m ：路段 m 期望速率與密度關係式之參數；

α ：違反速限的因子，即期望速率高於控制速限的車輛比例。

Chang *et al.*[71][91]發展一套適用於高速公路施工區之可變速限演算法，藉此提升高速公路施工路段之行車效率。其將施工區視為瓶頸路段，並利用流量守恆定理計算施工區之車流密度，如式(2.2)所示，在假設密度不會因控制速限而有所改變的前提下，計算施工區之控制速限，如式(2.3)所示，最後，透過線性遞減的方式計算施工區上游各路段之控制速限，如式(2.4)所示。此演算法可控制進入施工區之流量維持在該路段臨界流量之下，避免衝擊波產生以減少壅塞範圍。

$$d_1(k) = d_1(k-1) + \frac{q_0(k) - q_1(k)}{L_1} \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

$$v_1(k) = q^c(k) / d_1(k) \quad (2.3)$$

$$v_i(k) = v_1(k) + \frac{u_n(k) - v_1(k)}{n-1} \cdot (i-1) \quad (2.4)$$

其中， $d_1(k)$ ：在時階 k 內，施工路段之密度；

$q_0(k)$ ：在時階 k 內，離開施工路段之流率；



$q_1(k)$ ：在時階 k 內，由上游進入施工路段之流率；

L_1 ：施工路段之長度；

Δt ：控制時階之單位長度；

$q^f(k)$ ：在時階 k 內，施工路段之臨界流率；

$v_1(k)$ ：在時階 k 內，施工路段之控制速限；

$v_i(k)$ ：在時階 k 內，第 i 個上游路段之控制速限；

$u_n(k)$ ：在時階 k 內，最上游路段 n 之控制速限；。

Jun-Seok and Cheol[66]以高速公路直線路段為研究範圍，並假設可變速限可強制控制上游車流速率，維持上游車流之密度，藉此提升壅塞路段之行車效率。該研究以LWR車流模式為基礎，並修正模式中之速率密度關係式，重新定義速率和密度間的關係，最後，在最低控制速限的限制下，以最大化路網中的車輛數和最小化上游路段的壅塞程度為目標，求解各控制位置之最佳速限。藉由模擬實驗得知，實施可變速限控制後，壅塞路段之流量和容量關係(V/C)、車輛速率變異(TSV)、總花費時間(TTS)、總旅行距離(TTD)和系統平均速率(SAS)等績效均有顯著之改善，因此，Jun-Seok and Cheo認為若能強制性的控制車輛的速率，可變速限系統是可用來減少路網之壅塞程度。

Carlson *et al.*[93]以巨觀車流模式METANET作為基礎，建構一套可變速限最佳化模式。Papamichail *et al.*認為速限除了對於速率有影響外，更會改變該路段之車流基礎構圖，如圖2-2所示，因此，透過式(2.5)、式(2.6)、式(2.7)和式(2.8)即可將速限對於車流的影響加入模式中，最後，在最小化主線旅行時間和控制速限前後時階差異之目標下，以最佳化求解工具—AMOC(Advanced Motorway Optimal Control)求解各控制時階之最佳解。在模擬不同車流狀態後得知，可變速限在流量高的情境下可有效的降低路網旅行時間，另外，此研究認為若欲以最佳化模式進行線上即時控制，需針對車流模式中之輸入變數(Input variable)進行預測，以避免控制速限並非當前時段最佳控制速限。

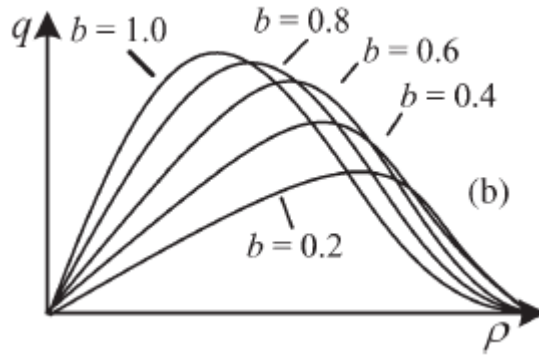


圖 2-2 不同控制速限對車流之影響[93]

$$V(\rho_{m,i}(k), b_m(k)) = v_{f,m}[b_m(k)] \times \exp \left[-\frac{1}{a_m[b_m(k)]} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}[b_m(k)]} \right)^{a_m[b_m(k)]} \right] \quad (2.5)$$

$$v_{f,m}[b_m(k)] = v_{f,m}^* b_m(k) \quad (2.6)$$

$$\rho_{cr,m}[b_m(k)] = \rho_{cr,m}^* \{1 + A_m[1 - b_m(k)]\} \quad (2.7)$$

$$a_m[b_m(k)] = a_m^* [E_m - (E_m - 1)b_m(k)] \quad (2.8)$$

其中， $\rho_{m,i}(k)$ ：在時階 k 內，路段 m 格位 i 之密度；

$b_m(k)$ ：在時階 k 內，路段 m 之控制速率，其值介於 $0 \sim 1$ 之間；

$V(\rho_{m,i}(k), b_m(k))$ ：在時階 k 內，路段 m 格位 i 之期望速率；

$v_{f,m}[b_m(k)]$ ：在時階 k 內，路段 m 不同速限所對應之自由車流速率；

$a_m[b_m(k)]$ ：在時階 k 內，路段 m 不同速限所對應之期望速率與密度關係式參數；

$\rho_{cr,m}[b_m(k)]$ ：在時階 k 內，路段 m 不同速限所對應之臨界密度；

$v_{f,m}^*$ ：路段 m 無速限控制之自由車流速率；

$\rho_{cr,m}^*$ ：路段 m 無速限控制之臨界密度；



a_m^* ：路段 m 無速限控制之期望速率與密度關係式參數；

A_m ：速限對路段 m 臨界密度影響之參數；

E_m ：速限對路段 m 期望速率與密度關係式參數影響之參數。

Hegy *et al.*[27][28][29]於 2008 年至 2010 年間提出一套以衝擊波理論推估壅塞範圍，藉此計算控制速限之演算法，並稱之為 SPECIALIST。其文章指出目前雖有許多演算法用以計算控制速限，但大多數的演算法因計算複雜或參數校估不易，使之難以實際運用，而 SPECIALIST 演算法中的各個參數均具有明確物理意義，此特性將可確保該演算法在線上運作時具有良好之強健性(Robust)。2009 年 9 月至 2010 年 2 月間，荷蘭 Dutch A12 高速公路控制系統，實際運用此套演算法進行可變速限的控制，結果顯示此套演算法大約可減少 80% 因衝擊波所引發之壅塞案例。

吳健生[6]針對可變速限控制系統進行全方面的探討，並以德國可變速限控制系統作為參考，設計出一套適用於國內車流之可變速限控制系統準則，其中包含：速限標誌佈設準則和速限決定方式等。速限標誌佈設準則：在交通壅塞路段，每隔 1000 至 2000 公尺設置可變速限標誌一座，並可視需求將此間距酌予縮減，但最小不應低於 200 公尺；速限決定方式：如表 2-1 所示，當流率小於 2300 pcu/hr/lane 或平均速率大於 70 km/hr，最高速限維持在法定 100km/hr 之標準。若流率介於 2300 ~2500 pcu hr/lane 之間或平均速率介於 50 ~70 km/hr 之間，則施以 80km/hr 之速限。當流率高達 2500 pcu/hr/lane 以上或平均速率低於 50 km/hr 時，則調降最高速限至 60 km/hr。

表 2-1 控制速限準則表

	控制速限		
	100 km/hr	80 km/hr	60 km/hr
流率 (pcu/hr/lane)	$q < 2300$	$2300 < q < 2500$	$2500 < q$
速率 (km/hr)	$70 < v$	$50 < v < 70$	$v < 50$



林柏辰[8]針對高速公路主線因事件導致容量降低的狀況，提出一套以基因模糊邏輯控制（Genetic-Fuzzy Logic Controller, GFLC）為基礎的模式，能在異常交通狀況下找出最佳化的可變速限控制模式。其主要目標分別為流量及安全性最大化，第一個目標—流量最大化，意指在控制期間通過之總車輛數為最大；第二個目標—安全性最大化，意指著碰撞危險度最小化，利用包含著流量標準差、事故前後的占有率、流量的數學模式來求得最佳化。而控制模式邏輯及評估績效則採用一階巨觀車流模式中的格位傳送模式（Cell Transmission Model, CTM）。此研究先確認修正過的 CTM 模式可以完整的模擬實際交通行為，再以國道一號的自由流、壅塞車流和車道封閉三種不同交通情形加以模擬及驗證，結果顯示修正後的 CTM 模式能夠精準的預測下游的交通流量。最後，將 GFLC 求出的控制速限放入模擬內，利用不同的評估指標評估其模式之可行性，結果顯示此研究提出的控制模式可降低碰撞危險度及減少總旅行時間。

盧彥聰[17]以巨觀車流模式為概念，建立一套能在瓶頸路段壅塞狀況下求解控制速限之最佳化模式，其主要目標為使控制範圍內之總通過量最大化，由於其模式限制控制速限需由上游路段向下游路段遞減，故在其研究中將可變速限控制稱之為漸變速限控制。此研究以國道五號作為研究對象，由於國道五號北上雪山隧道路段之各項行車管制措施，導致雪山隧道之容量降低形成瓶頸路段，故以可變速率控制期能降低衝擊波之影響。不過由於實際路網控制範圍包含了頭城交流道及頭城收費站，但因為收費站本身之影響將使得車流行為較難準確描述，此研究為能使模式能精確應用，故將實際路網簡化，假設頭城收費站不存在進行模式驗證。經 VISSIM 軟體模擬之結果，控制範圍內之總通過量增加了 19.5%，平均旅行時間減少了 8.44%，顯示此模式的確可改善高速公路之績效。

江宜穎[3]發展一套適用於國道五號北上路段之可變速限控制模式，為使模式能實際應用，其透過門檻值訂定之方式將車流分成不同狀態，並分別對不同車流狀態擬定對應之控制策略。在完成 VISSIM 模擬路網參數校估及模式驗證等步驟後，其透過 VISSIM 附加軟體 VisVap 將可變速限控制模式應用至 VISSIM 模擬路網中，結果顯示透過可變速限控制大約可減少雪山隧道 15 至 30 分鐘之壅塞。



2.2 匝道儀控

本研究首先回顧較常見之獨立型交通感應儀控模式，接著回顧連鎖型及整合型交通感應儀控模式之相關文獻。圖 2-3 為參考 Zhang[87] 等人彙整各類型匝道儀控演算法(Algorithm)，而 Bogenberger and May[70] 針對各類控制演算法的實施地區、實施背景與經驗，以及控制法則等有詳細完整之介紹，本研究針對其中控制法則的部分摘述如後，並分析各控制法則的關鍵因素與模式不足之處。

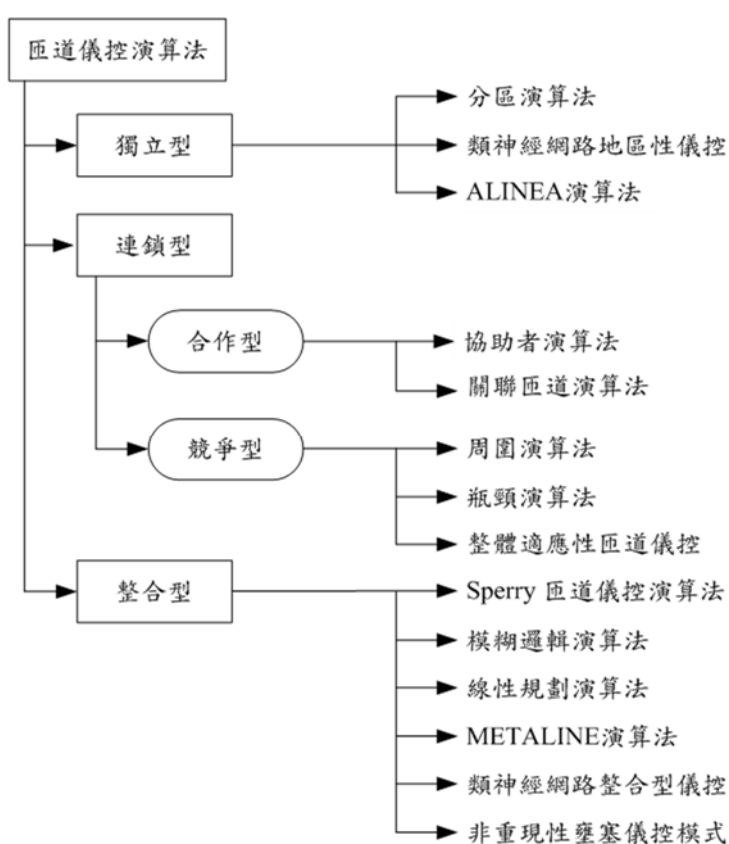
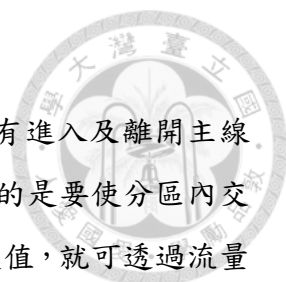


圖 2-3 各類匝道儀控演算法之分類圖

2.2.1 獨立型

一、分區演算法

其控制法則將高速公路同一方向每大約 3 至 6 英哩長的區域定義為一儀控分區。分區之上游端通常為自由車流區域；下游端則通常為一交通瓶頸處，其流量與容量之比值通常最高。每一分區可能包括數個儀控入口匝道、出口匝道，也可能有



一個以上未實施儀控的入口匝道。

其基本概念是將進入及離開各分區的交通量予以平衡。所有進入及離開主線或匝道的交通量以 30 秒為一週期來量測。平衡交通量的主要目的是要使分區內交通密度維持在一固定的水平下，而依據分區內此固定的交通密度值，就可透過流量守恆的方式計算出允許進入的交通量大小，即為此演算法的儀控率。分區演算法式(2.9)所示：

$$[A + U + M + F = X + B + S] \quad (2.9)$$

其中，A：主線上游交通量(量測值)；

U：未實施儀控的入口匝道的總交通量(量測值)；

M：實施儀控的匝道的總交通量(控制值)；

F：實施儀控的系統匝道的總交通量(控制值)；

X：出口匝道的總交通量(量測值)；

B：主線下游瓶頸容量(常數，通常為每小時每車道 2200pcu)；

S：允許進入分區的交通總量(主線下游剩餘容量)。

其控制概念如圖 2-4 所示：

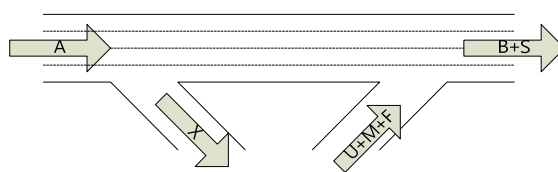


圖 2-4 分區演算法控制示意圖

令 S 為 0 並重新整理式(2.9)，匝道最大可進入分區的交通量為：

$$[M + F = (X + B) - (A + U)] \quad (2.10)$$

此控制法則實施時通常會儲存歷史交通量資料，以在偵測器發生故障時，可

隨時參考取用。匝道及系統匝道的儀控率可再依據(M+F)的值與匝道個別因素加以計算。匝道個別因素係由管理者事先針對每一個儀控匝道加以設定，這些設定會決定各匝道的相對優先性，以利各匝道進行交通量的分配。同時每一儀控匝道會有 6 個不同的儀控率，從無儀控到週期 24 秒；綠燈長度均固定設為 1.3 秒，黃燈長度則固定為 0.7 秒，以類似查表的方式實施儀控率。

此控制法則也偵測分區內各路段的佔有率，以了解其因事故、天候及施工等因素所致之壅塞及等候長度。基於每一路段所量測的佔有率，分區內的儀控率可再依該路段之交通狀態進行調整。

本研究認為應用此模式的關鍵因素如下：

1. 需要適當的劃分高速公路上的每個分區(Zone)。
2. 需要透過歷史資料估計瓶頸地區的容量。
3. 需要能夠精確的量測流出與流入分區的交通量。
4. 匝道優先程度參數須小心微調，以呼應實際地方交通與高速公路特性。

而此模式的劣勢如以下所述：

1. 分區演算法採用基本需求容量法為其控制法則，其控制目標為交通量，但由車流基本圖形中可知，不同密度下可能有相同之交通量，因此，分區演算法在交通量判斷上可能會與實際情況產生落差，須依據密度或佔有率對其進行修正。
2. 無法考慮交通流之動態特性，例如當各匝道流量產生消長時，若無法及時調整優先程度的參數將使得控制效率不佳；主線下游發生事故等非重現性壅塞時，B 的值會急遽下降，若未進行調整，則分區演算法也無法做出反應，使得控制績效不佳。
3. 儀控率的實施仍採用查表的方式，在執行儀控時較沒有彈性與效率。

二、ALINEA 演算法

Papageorgiou[82]依據自動控制回饋(Feedback)性質提出 ALINEA 控制策略，其控制方式考量主線下游的佔有率及上一時階的儀控率作為下一時階儀控率設定的基礎。每間隔一段時間 T(通常設定為 20 秒至 60 秒間)，系統即會將上一時階內的平均交通流量及佔有率輸入模式中(反饋規則)，重新計算下一時階的儀控率。由於各時階的儀控率會與上一時段的儀控率有關，因此，計算所得的儀控率不會突然變

化太大，即具有穩定(Smoothing)效果。ALINEA 演算法公式如下：

$$r(k) = r(k-1) + K_R [\hat{O} - O_{out}(k)] \quad (2.11)$$



其中， k ：第 k 個時段；

$r(k)$ ：第 k 時段之儀控率(veh/hr)；

\hat{O} ：欲控制的目標佔有率值，須事先設定；

O_{out} ：該匝道位置之主線下游之佔有率值，偵測器通常在匝道口下游 40 公尺處；

K_R ：設定的參數，在 Papageorgiou[83]的研究中顯示，將 K_R

設定為 70(km/hr)就可以在各種情況下得到相當好的結果。

本研究認為應用 ALINEA 獨立型演算法的關鍵因素如下：

1. ALINEA 為穩健(Robust)的演算法，而且控制邏輯簡單，便於實施，同時要考量的參數僅有控制增益(Control Gain) K_R 與目標佔有率。控制增益為自動控制理論中之概念；為了產生一閉迴路系統，須利用前一狀態變數對下一狀態變數進行反饋，此控制增益即為反饋大小之調節器。

在 Chu and Yang[73]中，以基因演算法來最佳化 ALINEA 的運作參數，這些基因演算法最佳化的參數包括控制增益 K_R 、目標佔有率、控制時階的長短與下游偵測器擺設位置等四個，參數與其範圍整理如下表 2-2：

表 2-2 Chu and Xu 基因演算法輸入參數與範圍

Parameter	Range
Regulator K_R	10~300
Desired Occupancy	10%~40%
Update cycle of metering rate	10~300sec
Location of downstream detector	0~600m

基因演算法的世代中會產生由這四種參數組合而成的族群，最後收斂出來的最佳化結果如下表 2-3：

表 2-3 Chu and Xu 基因演算法最佳化參數與範圍

Parameter	Range
Regulator K_R	70~200
Desired Occupancy	19~21% or 30~31%
Update cycle of metering rate	30~60 sec
Location of downstream detector	120~140 m

其中可發現最佳化後的控制增益 K_R 與先前 Papageorgiou 研究中所建議的值相同，可見系統績效對於 K_R 的變動並不敏感，都能產生不錯的結果；而在目標佔有率的設定方面，基因演算法最佳化的結果顯示當 ALINEA 匝道儀控模式將目標佔有率設定在 19~21% 與 30~31% 兩個範圍內時控制的績效最好，其中 19~21% 的部份可由下游偵測器的佔有率與流量作圖得知，當佔有率在 20% 時主線通過的流量最大；在 30~31% 的部分則顯示 ALINEA 模式在密度較高時也能有不錯的控制績效，同樣利用下游偵測器的佔有率與流量作圖可發現，當佔有率到達 30% 時，ALINEA 可保持主線流量，使其僅低於最大流量的 20%；但當佔有率超過 30%，主線可通過流量就大幅降低。

在 Papageorgiou[83] 中，ALINEA 儀控模式被應用在巴黎的 Boulevard Périphérique 大道上，Papageorgiou 等人以主線總旅行時間(Total Travel Time; TTT)、匝道總等候時間(Total Waiting Time; TWT)、總花費時間(Total Time Spent; TTS = TTT + TWT)、總旅行距離(Total Travel Distance; TTD)、平均速度(Mean Speed; MS = TTS/TTD)與平均壅塞延時(Mean Congestion Duration; MCD)做為評估指標，並與其他控制策略比較如下表 2-4：

表 2-4 Papageorgiou 不同控制策略下 BP 路網績效比較(1)

Control Strategy	TTS		TTD		MS		MCD	
	Veh·h	%change	veh·km	%change	Km/h	%change	min	%change
No Control	421	-	16463	-	39	-	108	-
ALINEA	354	-15.9	16980	3.1	48	23.1	53	-50.9
Demand-Capacity	407	-3.3	15143	-8.0	37	-5.1	108	0
Occupancy	438	0.4	15673	-4.8	36	-7.7	103	-4.6

由上表可知，ALINEA 相較於未控制與其他儀控方法，在各項指標中幾乎都能使交通狀況得到明顯改善。

而本研究分析此模式的劣勢如下：

1. ALINEA 模式並沒有直接考慮匝道等候車隊溢流(queue spillback)的現象，而是另外加入判斷邏輯，以非自動的方式在匝道發生溢流(spillback)時切換至限制性較低的儀控率，暫時性的允許更多車輛進入主線。
2. 當發生嚴重堵塞時不容易平衡匝道等候車隊與高速公路壅塞。

2.2.2 連鎖合作型

合作型匝道儀控演算法的運作原理是在計算完主線各處上匝道的儀控率後，再以系統全域的資訊來對儀控率進行調整與控制，以防止特定瓶頸路段的壅塞與某些重點匝道的車輛回堵。但是，此種方法在執行特定匝道儀控率的調整時仍然是以一種點對點的方式(Ad hoc manner)進行，並未考慮調整後對於其他匝道與主線會帶來何種影響，因此容易造成交通流的不穩定。

一、協助者演算法(HELPER ramp algorithm)

此演算法之控制法則包括一個地區性儀控演算法以及一個中央連鎖運作的中心，中央連鎖運作中心有權限能隨時改變各地區性儀控的儀控指令。在地區性控制機制方面，每一個儀控匝道會依其上游主線佔有率狀況自 6 個儀控率中選擇一個來實施；而在中央連鎖控制層級方面，其匝道分類模式會先將控制範圍內的所有匝道歸類為嚴重與不嚴重的。當某一匝道已被歸類為嚴重，則連鎖式的演算法會立即接手(Override)，開始進行上游匝道的控制。若某一匝道連續三個儀控週期均被歸類為嚴重，則中央電腦會一次降低上游一個匝道一個等級的儀控率。如果該匝道仍是歸類為嚴重，則此過程會降低再上游一個匝道一個等級的儀控率，直到問題解決或本群組匝道均已被降低儀控率為止。如果該群組匝道均已被降低儀控率，但該匝道仍屬嚴重時，則開始降低上游下一個群組匝道的儀控率。這種連鎖式的控制狀態會持續進行，直到所有匝道均回歸為非嚴重狀態後，各匝道再以被接手的順序相反的方式，以一週期一個匝道的速度回覆為地區性控制。

此模式應用之關鍵因素如下：

1. 這種兩層式的結構讓協助者演算法在各種狀況下都有不錯的處理能力與

彈性；當壅塞不嚴重時，地區性的儀控率就能夠先進行控制，當壅塞情況蔓延時，中央連鎖儀控的機制能將控制權收回並以整體系統的角度進行儀控率的調整。

2. 經過修正後協助者演算法也能考慮公車優先與高乘載車輛(HOV)等特別的狀況。
3. 協助者演算法在控制者無法取得精確的交通流模式與 O-D 資訊時都還能穩健的運作。

此模式的劣勢如下：

1. 協助者演算法在地區性儀控層中仍然有使用查表來決定儀控率，因此在地區性儀控上較沒有彈性。

二、關聯匝道演算法(Linked-Ramp algorithm)

此演算法之控制法則以需求－容量理論為基礎，每一個影響路段的上游匝道及主線之容量係利用歷史資料加以推估；各匝道的容量未必相同，必須考慮匝道需求、匝道儲車空間及候車回堵衝擊等因素，再加以調整。而各匝道的容量則訂為其最大儀控率之限制；最小儀控率係利用同一實體限制(如匝道儲車空間、需求及候車回堵衝擊等因素)，再加以設定。主線各路段的流量資料則利用主線歷史尖峰時段流量及最小匝道儀控率流量加以推估。而此一流量資料則作為各路段之目標流率。

此控制法同時使用一個 16 等級的儀控率系統，自上述之最小及最大儀控率間呈線性分布。藉由各匝道上游地點偵測到的流量，並對照前述 16 等級的表來決定各匝道的儀控率，關聯匝道演算法如式(2.12)所示：

$$[\text{Metering Rate} = \text{Target Flow Rate} - \text{Upstream Flow Rate}] \quad (2.12)$$

其中，Metering Rate：儀控率。

Target Flow Rate：尖峰期間主線最大流量。

Upstream Flow Rate：主線上游流量。



此模式應用之關鍵因素：

1. 區域內的匝道相互鏈結，當某一匝道降至其最低三級的儀控率時，上游的相鄰匝道也開始降至相同等級或更低的儀控率，並逐步向上推移，直到儀控率恢復初始值或壅塞解除為止。

此模式應用上之劣勢：

1. 實際決定各匝道儀控率時仍須與以佔有率偵測所得之儀控率比較，以較小者實施。否則會造成主線越壅塞，通過流量已開始下降了演算法還放寬儀控使越多車輛進主線。
2. 儀控率的實施仍然是以查表的方式處理，在儀控上較沒有彈性。

2.2.3 連鎖競爭型

連鎖競爭型演算法的運作原理是同時進行兩組儀控率的運算，分別考慮區域或者全域的交通情況，而兩組之中儀控率較小者(More restrictive one)會被選為實際儀控率。其餘包括防止車輛回堵或其他限制會再依據此選中的儀控率來進行調整。

一、周圍演算法(Compass algorithm)

此系統可以人工方式進行儀控，自 17 種不同儀控率中加以選取使用，其週期長度為 0 至 15 秒。此系統也可以進行自動整合式交通感應儀控。在此一模組下，控制演算法依據高速公路全線交通流量及各匝道之地區性交通狀況選擇一儀控率實施。周圍演算法中自動整合式儀控的四大主要元素如下：

(一) 控制分區

即某一點下游影響區域內的同一方向高速公路路段。控制分區的目的在決定各入口匝道的儀控策略，以及將個別匝道分群加以整合。

(二) 控制期間

系統何時觸動或解除自動儀控控制。有五個不同的指令會指派給儀控器。指令 0 為所有匝道號誌均設定綠燈；指令 1 為主線即時偵測流量資料超過最低交通量或佔有率門檻值時，啟動一個匝道儀控器；指令 2 為所有入口匝道均可以進行整合型匝道儀控；指令 3 為當主線交通流量降低，佔有率也下降時，關閉一個匝道儀控器；指令 4 為所有匝道可以一天預設的時制進行儀控。



(三) 控制理論

儀控率每 30 秒計算一次。衡量之決策變數有三，分別為匯入處主線佔有率、下游主線佔有率與上游主線佔有率，最後利用查表法決定匝道的儀控率。該表內包括匯入處及下游佔有率門檻值及上游交通量，以及其對應的離線最佳儀控率。若已測得的交通量資料查表得數個儀控率，則選擇最嚴格者實施。

(四) 等候車隊調整

若匝道偵測器所測得的佔有率超過其門檻值，該匝道的儀控率會提高一等級並加以維持，直到測得佔有率又低於門檻值為止。

此模式應用上的劣勢在於其仍須使用查表法，並且以離線方式決定儀控率。

二、瓶頸演算法(Bottleneck algorithm)

瓶頸演算法一般係用每一個匝道的地區性偵測器反應資料，如上游佔有率及瓶頸資料，計算出地區性儀控率及瓶頸儀控率。而該匝道會選擇此兩種儀控率中較低者加以實施。在地區性層級方面，控制人員先利用歷史資料確定每一匝道主線上游接近容量時的流量—佔有率大略關係。地區性儀控率則設定為預估容量減去即時上游交通量後的剩餘容量值。

當以下狀況發生時，將觸動整合層級的瓶頸演算法：

1. 下游瓶頸端路段的佔有率超過一事先設定門檻值。
2. 上游分區或影響區域內的瓶頸已開始積蓄車輛。

之後，此演算法以集中指派方式降低匝道的儀控率，減少瓶頸路段影響區域內的匝道車輛進入主線。當選擇地區性儀控率及瓶頸儀控率兩者中儀控率較低者後，此控制法則會再依據各匝道的偵測器資料及實體狀況進行調整。而每個匝道都有等候線偵測器(Queue Occupancy)與匝道入口處的等候線偵測(Advance Queue Occupancy)以避免匝道車輛回堵至地方道路。當某些匝道的佔有率超過某一門檻值達一段時間時，儀控率會提高以紓解匝道進入主線的需求。同時此演算法有將高乘載免候車道納入考慮，但因高乘載免候車道通常不實施儀控，故高乘載免候車道的調整係用以處理進入高速公路的儀控車輛與實際車輛數量間之差距。

在瓶頸演算法計算公式方面，地區性儀控率以百分比佔有率法(Percent occupancy algorithm)計算，如式(2.13)所示：

$$[r(k) = k_1 - k_2 O_{in}(k-1)] \quad (2.13)$$



其中， k_1 ：路段容量；

k_2 ：基礎構圖中非壅塞部份之斜率，即自由車流速率；

O_{in} ：主線上游佔有率。

滿足自動儀控觸動條件後，演算法會計算瓶頸路段之儀控率應該減少的值，如式(2.14)所示：

$$[U_{i(t+1)} = (q_{IN_{it}} + q_{ON_{it}} - q_{OUT_{it}} + q_{OFF_{it}})] \quad (2.14)$$

其中， $U_{i(t+1)}$ ：儀控率於下一時段需減少的量；

$q_{IN_{it}}$ ：由主線進入區段之流量；

$q_{ON_{it}}$ ：由匝道進入區段之流量；

$q_{OUT_{it}}$ ：由主線流出區段之流量；

$q_{OFF_{it}}$ ：由匝道流出區段之流量。

將式(2.14)應減少的儀控率以權重的方式分配，再計算出影響範圍內各匝道之 BMRR(Bottleneck Metering Rate Reduction)即各匝道儀控率應該減少的量，如式(2.15)所示：

$$[BMRR_{ji(t+1)} = U_{i(t+1)} \times \frac{WF_j}{\sum_j (WF_j)}] \quad (2.15)$$

其中， WF_j ：上匝道之權重。

求得 BMRR 後就能很容易計算出各匝道之 BMR(Bottleneck Metering Rate)即實際儀控值，其公式如式(2.16)所示：

$$[\text{BMR}_{ji(t+1)} = q_{\text{on}_{ji}} \times \text{BMRR}_{ji(t+1)}] \quad (2.16)$$



瓶頸演算法具有數種內部調整機制(包括根據下游瓶頸狀況，減少進入主線之交通量及根據匝道等候線調整儀控率)，故可稱為全美最成熟的匝道儀控演算法。

而參考文獻後，Zhang[87]提出可以採用更穩健(Robust)的地區控制策略如ALINEA 來取代原本瓶頸演算法的地區儀控率計算方式，Zhang[56]的研究以ALINEA 取代原本瓶頸演算法之地區性儀控策略後，也獲得比瓶頸演算法更好的績效。同時若可獲得即時的 O-D 資訊，則流量減少的權重可依照現況 O-D 資訊即時調整之。

三、整體適應性匝道儀控(System Wide Adaptive Ramp Metering, SWARM)[96]

整體適應性匝道儀控系統由兩種獨立的演算法所組成，在每個時階中分別進行運算，並取其中較小之儀控率來實施。SWARM1 是一種能夠進行預測及整體系統分配的演算法；而 SWARM2 是一種較為傳統的區域式儀控系統。

SWARM1 演算法的運作係採用車流密度作為控制參數，其目標為控制每一路段之即時密度均低於預先設定的飽和密度。在資料取得方面，利用前一偵測時段所測得的資料(非歷史資料)並採用線性迴歸與卡曼濾波方法預測未來每一偵測站每個偵測時段的密度趨勢。接著模式能透過預測去計算代表未來某段時間的一個可調整參數(Tcrit)，從此參數的計算中可得知未來可能會超過的密度。由圖 2-5 可以知道，X 方向為時間軸，Y 方向是密度值，紅色線段為每 30 秒偵測器測得的密度值，而 SWARM1 模式的自動預測會依照此密度上升的趨勢進行預測，由途中可知在一定時間後密度值將會超過飽和密度，而為了延後此一趨勢，SWARM1 模式必須對主線進行匝道儀控，使主線密度上升的趨勢趨緩，此段延後的時間便是整體適應性匝道儀控模式的可調整參數(Tcrit)。

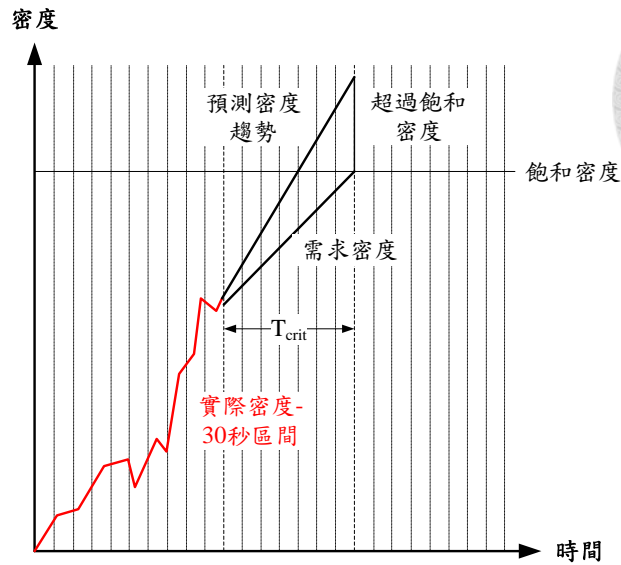


圖 2-5 整體適應性匝道儀控模式可調整參數示意圖

SWARM1 演算法如式(2.17)所示，每個偵測器的目標控制密度：

$$[\text{Required Density} = (\text{Current Density}) - \left(\frac{\text{Excess Density}}{T_{\text{crit}}}\right)] \quad (2.17)$$

之後模式會計算出每個偵測器要達到的流量縮減量，如式(2.18)所示：

$$[\text{Volume Reduction} = (\text{Local Density} - \text{Required Density}) \times (\# \text{ of Lanes}) \times (\text{Distance to next Station})] \quad (2.18)$$

由式(2.18)可知，對於每個偵測器而言，會產生流量增加或流量縮減兩種結果，這些值會被分配至上游之匝道，而每個匝道會有一個權重值，此權重是依據各匝道的需求、路段容量等因素來決定。最後以最大的流量縮減量與預先設定的各種限制(例如匝道等候車隊長度)來共同決定各匝道的儀控率。

在 SWARM2 方面，儀控率之計算是依據匝道上游偵測器偵測到的車間距(可轉換為密度)來決定，並使用密度與流量間的線性轉換來決定儀控率，因此 SWARM2 是藉由保持主線適當的車間距來維持流量穩定。

上述兩模式會分別計算出儀控率，在每個控制時間間隔下，模式會由 SWARM1 及 SWARM2 中選擇儀控率較小者實施，而在選擇之前必須先設定最大儀控率及最



小儀控率，以避免有儀控率過高或過低之情形。

除了儀控演算法本身的運算外，SWARM 亦整合了故障管理與資料促進系統，來將歷史資料趨勢與偵測器資料比對，以確認故障及消除資料干擾的功能。因為 SWARM 需要預測未來密度的走勢，此模式的關鍵因素在於好的預測模式是。同時與大部分模式相通，若是有精確的 O-D 資訊則模式的績效會更顯著；另外，在模式應用須注意的地方也是因為其具備預測的功能，故好的預測模式能夠讓壅塞在產生前就被消除；但不好的預測模式會誤判情勢，無謂縮小儀控率的結果可能導致此模式產生比其他演算法更差的結果。

2.2.4 整合型

整合型匝道儀控方法有清楚的控制目標連結到其控制行動，目標式通常是控制整體系統的旅行時間或者通過量。決定儀控率的方法通常是在最佳化目標式的同時考慮各種系統限制，例如匝道最大容量、瓶頸路段容量等。這一類的演算法很受歡迎，因為它們都有堅實的(Robust)理論基礎，且具有處理各種儀控型態或模式限制的能力。不過這類模式不可避免的在邏輯上更為複雜，並需要更多的運算時間，模式績效表現受輸入資料的品質與核心使用的交通流模式所影響。

一、Sperry 匝道儀控演算法(Sperry ramp metering algorithm)

此演算法界定下列兩種入口匝道管制模組：

1. 非限制性儀控：當匝道候車回堵偵測器測得車輛回堵至地方道路，儀控率將會持續提高直到回堵消失。
2. 限制性儀控：當主線交通狀況及匝道回堵均未發生時，限制性儀控則是預設的管制方式。限制性儀控模組利用一自動整合型交通感應儀控機制，且允許系統營運者進行設定調整。

此演算法基本上是一個需求—容量關係式，目標是使高速公路延車公里最大化，並考量匝道間流量分配的公平性。系統依照車行方向將高速公路路段分為數個控制分區，每個分區由至少一個以上實施儀控匝道的入口匝道及出口匝道所組成，一個分區最多可包含十個儀控匝道。

此演算法利用入口及出口匝道的偵測器所測得交通量資料當作輸入資料，並且事先界定每一個主線偵測站的容量。這些匝道交通量資料經調整與插補後作



為下一個控制時段的交通需求。

控制由高速公路路段分區中最下游的匝道開始，儀控率之決定為主線容量減去預期的主線需求，並與該匝道事先設定的最低儀控率進行比較，選擇兩者中較大者實施。此一程序重覆以一次一個匝道的方式往上游持續進行。

此控制法則也具有下列特質：

1. 若某一匝道儀控率係以人工方式改設時，Sperry 系統會在該分區內自動依照比例調整上游匝道儀控率。
2. 任何時候計算所得的儀控率均較實際需求為低，以提高主線服務水準。
3. 此控制法則可以調整不同匝道的預期需求因子，以因應因使用資訊可變標誌(CMS)而導致的預期車輛數改變。
4. 引進持續狀態(Continuous staging)觀念，即壅塞現象須持續一段時間，才進行儀控率的調整，以便更精確地依據下游匝道預測所得流量執行儀控率，此方法可避免演算法因預測失準而過早執行太大的限制性儀控率。

由以上演算法的敘述可以得知，演算法的關鍵因素在於精確估計主線的容量與精確量測進出口匝道的交通量，以進行流量容量控制。

此模式的缺點也在計算時僅使用流量及容量資料，並未使用佔有率、密度或速率等作為測量或控制變數。因此，若不進行進一步的判斷與修正，容易誤判交通情況而採取錯誤的儀控措施。

二、模糊邏輯演算法(Fuzzy logic algorithm)

此演算法之控制目標係最大化總行駛距離，最小化總行駛時間及車輛延滯，而且維持可接受的匝道等候線長度。演算法分為兩個層級運作，並提供地區性及下游瓶頸儀控率兩種選擇。

此控制法則使用七個以 20 秒為週期所量測的偵測器資料作為輸入(主線下游佔有率、主線下游速率、匯入處佔有率、匯入處速率、主線上游佔有率、等候偵測器佔有率、回堵偵測器佔有率)，如圖 2-6 所示。

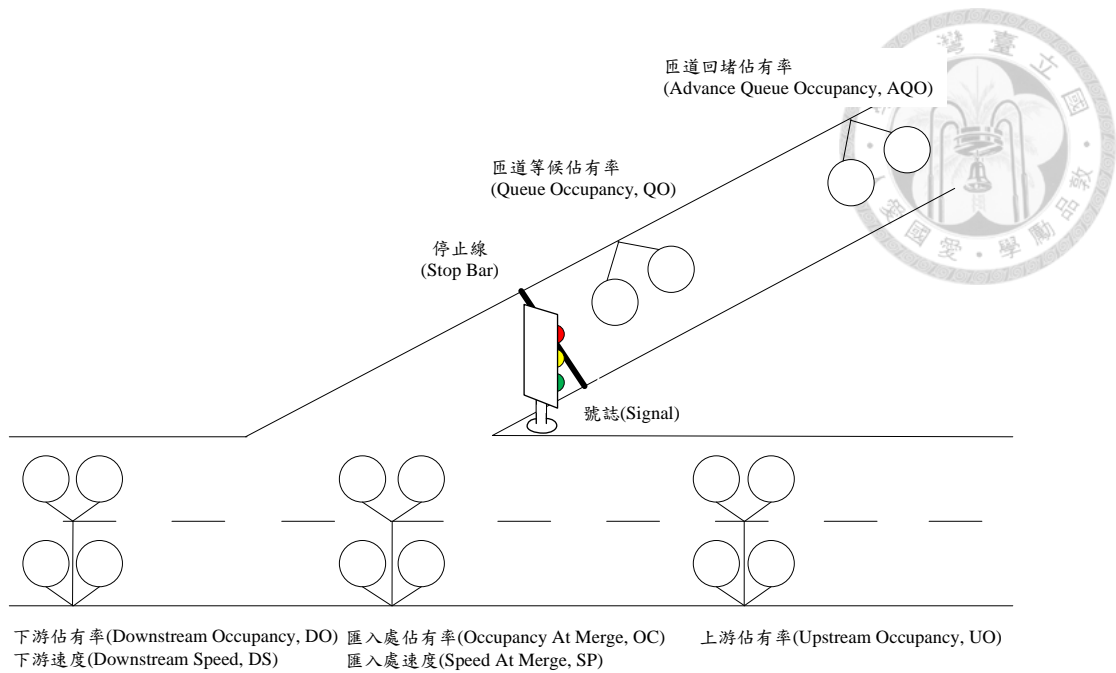


圖 2-6 模糊邏輯演算法輸入參數示意圖

模糊邏輯過程使用這些明確偵測資料，再依其值對應至五等級的語意變數(模糊化)：非常小、小、普通、大，以及非常大—並計算各等級之隸屬度。這些模糊化的輸入資料透過規則庫 (IF-THEN 規則) 或一組語意規則，決定最後的控制行動。例如，下列可以是一個給定儀控率的規則：[IF 非常小 AND 瓶頸 THEN 高儀控率]。這些規則的語意控制行動最後以解模糊化的方法，產生明確的儀控率。

控制法則以模糊集合理論為基礎設計，用以克服現有傳統匝道儀控系統的一些限制，且模糊邏輯理論能夠用來求解互相衝突的目標式，例如想要同時最小化匝道等候車隊與最大化主線通過量。由美國華盛頓大學利用 FRESIM 的模擬評估結果及西雅圖 I-5 路廊的示範計畫，模糊控制器顯現出很好的適用性，能夠避免嚴重壅塞，並智慧地平衡目標式的衝突，且具備調校容易的優點。

使用模糊邏輯模式的關鍵因素如下：

1. 此模式以類似人類思考的方式求解問題答案，因此類似專家系統，需要轉換實地知識(Empirical knowledge)成為模糊語意規則。
2. 主要的工作在於調整語意規則與構建隸屬函數上。

此模式呈現出來的績效非常良好，但仍有一些細節要注意：

1. 地區性控制策略所需之語意規則不多，但若要進行整個系統的控制，就需



要構建複雜的規則庫。

2. 要發展一套語意規則一致，且包含所有控制目標之模式並不容易。
3. 需花費很長的時間來調校語意跟隸屬函數，但又僅適用於調校時的那幾套交通狀況，當不同交通狀況發生時，績效就不會像之前一樣好。

三、線性規劃演算法(Linear Programming Algorithm)

此控制法則應用於日本神戶地區的 Hanshin 高速公路，其以線性規劃方程式為基礎，在一些限制條件下，求取目標函數值之最大或最小。此法則需要非常詳盡的資料蒐集系統，即在主線及所有進出口匝道上均密集佈設偵測器。此控制法則使用即時及事先界定的系統變數，及一些可調整的參數及各匝道權重，進行儀控率之求解。雖然方程式較為複雜，但可以很方便地利用現成的數學規劃套裝軟體加以求解。

關於此演算法的操作步驟如下：

1. 將兩兩匝道(i)間之高速公路加以分段(h)。
2. 每路段所測得之速率(Yh)可用以即時計算因壅塞而導致的容量縮減量，並找到該路段的即時容量(Ch)。
3. 由匝道候車偵測器所測得的候車長度(Ni)，並利用匝道回堵偵測器及歷史起迄資料用以量測或界定匝道容量(Di)。這些數值以交通量方式表之。
4. 依各匝道的儲車容量界定其所容許的最長等候線長度(Li)。
5. 利用歷史起迄資料，事先為各匝道界定一可調整的影響因子(Qhi)。此因子乃是一權重，用以加權匝道 i 在主線下游路段(h)的剩餘交通量。
6. 每一匝道用一事先設定的可調整權重因子(A)代表其允許進入交通量的重要性。用以代表不同匝道之優先偏好。
7. 各匝道的進入交通量以 Ui 表之。

線性規劃演算法公式之目標函數如式(2.19)所示：

$$[Z=(A_1 * U_1)+(A_2 * U_2)+...+(A_i * U_i)] \quad (2.19)$$

其限制式如下：

(各路段容量限制)

$$[(Q_{min} * U_1)+(Q_{1h} * U_1)+(Q_{2h} * U_2)+...+(Q_{ih} * U_i) \leq Ch], \forall_h \quad (2.20)$$



(匝道需求加匝道候車必須大於或等於匝道流率)

$$[0 \leq U_i \leq N_i + D_i], \forall_i \quad (2.21)$$

(匝道候車加匝道需求減匝道流率必須小於最大候車長度限制)

$$[N_i + D_i - U_i \leq L_i], \forall_i \quad (2.22)$$

(儀控率的上下限限制)

$$[U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}], \forall_i \quad (2.23)$$

此模式的關鍵因素在於：

1. 極大化匝道流量的權重，使用者依照其所認定個別匝道的重要性自行調整匝道權重。
2. 可計算即時路段容量，使得此方法論在擁擠的道路狀況下也能應用。

在此模式的注意事項方面：

1. 此方法論的績效非常依賴精確的 O-D 資訊與偵測器資訊。
2. 在計算匝道儀控率時都忽略旅行時間對交通流量造成的變化。

四、METALINE 演算法(METALINE algorithm)

METALINE 為 ALINEA 的整合一般化模型(使用多個數值或向量取代單一數值)，而各匝道儀控率透過計算 METALINE 控制下各主線路段所量測到佔有率的變化來決定。METALINE 之儀控率計算如式(2.24)所示：

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{r}(k-1) - \mathbf{K}_1[\mathbf{o}(k) - \mathbf{o}(k-1)] - \mathbf{K}_2[\mathbf{O}(k) - \hat{\mathbf{O}}(k)] \quad (2.24)$$

其中， $\mathbf{r} : [r_1 \dots r_m]^T$ 為 m 個可控制匝道之儀控率的向量(在時段 k 或 $k-1$)，此為控制值；

k ：目前時段；

$\mathbf{o} : [o_1 \dots o_n]^T$ 為 n 個主線同一方向路段的佔有率向量(在整個路段內的所有佔有率)，此為測量值；

$\mathbf{O} : [O_1 \dots O_m]^T$ 為 m 個主線下游的佔有率向量，通常緊鄰在主線上匝道的下游處，因此 \mathbf{O} 為 \mathbf{o} 的子集合，且有 m 個(用以計算上匝道路



段儀控率，與 ALINEA 中的 O 效果相同)；

$\hat{O} : [\hat{O}_1 \dots \hat{O}_m]^T$ 為主線下游的容量佔有率預設值，(佔有率必須控制在預設值之下，與 ALINEA 中的 \hat{O} 效果相同)；

$K_1 \in R^{m \times n}$ 、 $K_2 \in R^{n \times n}$ ：如同 ALINEA 中的 K_R ，為匝道權重因子。

METALINE 模式應用的關鍵因素在於適當的選取控制矩陣 K_1 與 K_2 ，其中 K_1 拿來調整 θ 矩陣中每個匝道位置對不同偵測器的佔有率的敏感度；而 K_2 拿來調整主線上匝道下游處的偵測器在每次儀控中對儀控率的貢獻；最後則如同 ALINEA 演算法，要適當的選取各主線上匝道下游的目標佔有率矩陣。

Papageorgiou[83]同樣在巴黎的 Boulevard Périphérique 大道上將 ALINEA 與 METALINE 儀控演算法進行比較，選定的評估指標包括 TTS、TTD 與 MS，而儀控結果如下表 2-5 所示：

表 2-5 Papageorgiou 不同控制策略下 BP 路網績效比較(2)

Control Strategy	TTS		TTD		MS	
	Veh·h	%change	veh·km	%change	Km/h	%change
No Control	3819	-	95489	-	25	-
ALINEA	3621	-5.2	96786	1.4	26.7	6.8
METALINE	3637	-4.8	95391	-0.1	26.2	4.8

Papageorgiou 由上表與其他模擬結果做出以下結論：METALINE 在處理非重現性壅塞時(例如無預警的事故)績效會比 ALINEA 更好；但在一般情況下，兩者的控制績效是差不多的。

由 ALINEA 與 METALINE 儀控模式的回顧與分析可以得出這種以自動控制理論為基礎的模式具備以下特性：

1. 簡單性：都僅需要一條方程式，需要校估的參數也非常少(只有控制增益 K_R 與目標佔有率)，而不需要其他的轉換、門檻值或其他複雜的技巧。
2. 轉移性：由於方程式簡單且參數少，在實務的應用非常簡單，目前已經在法國 Boulevard Périphérique 大道與 A10 WEST 快速道路實際運作與執行，而且使用的參數 K_R 都相同，證明參數對於儀控績效非常不敏感，因此



泛用性很高。

3. 運作成本低：只要一個主線上匝道下游處的偵測器就可以執行。
4. 有效性：在 ALINEA 與 METALINE 回顧的表格中都可以發現控制績效與未控制或其他儀控方式相比下有明顯的提升。
5. 有彈性：預設的目標佔有率值可以隨著交通情況的不同而改變，提升應用的空間。

五、類神經網路整合型儀控(Coordinated metering using artificial neural networks)

[48]此演算法的控制法則建立於具備學習能力的人工智慧網路上(ANN)。其使用 FREQ10PC 車流模式來獲得初始儀控計畫，再輸入倒傳遞類神經網路方法中訓練。此模式將路段系統切分為控制區域，並使用區域中匝道的資料當作模式的輸入(input)，這些資料包括匝道上下游之 V/C 比值與各匝道等候線長度等等。

關於此模式更多的敘述如下：

各匝道之儀控率主要受到主線匝道附近量測到的 V/C 比值影響，只有部分是受區域中其他交通狀況影響。此網路由數個子系統組成，每個子系統便控制一個入口匝道，並透過隱藏層與其它子系統連結。這代表了此方法論中的連鎖元素，圖 2-7 即為此模式運作的流程圖。

至於此模式的缺點在於使用車流模擬模式來獲得初始儀控計畫，因此損失了類神經網路的適應性學習能力，應使用實際觀測的資料作為初始值輸入。

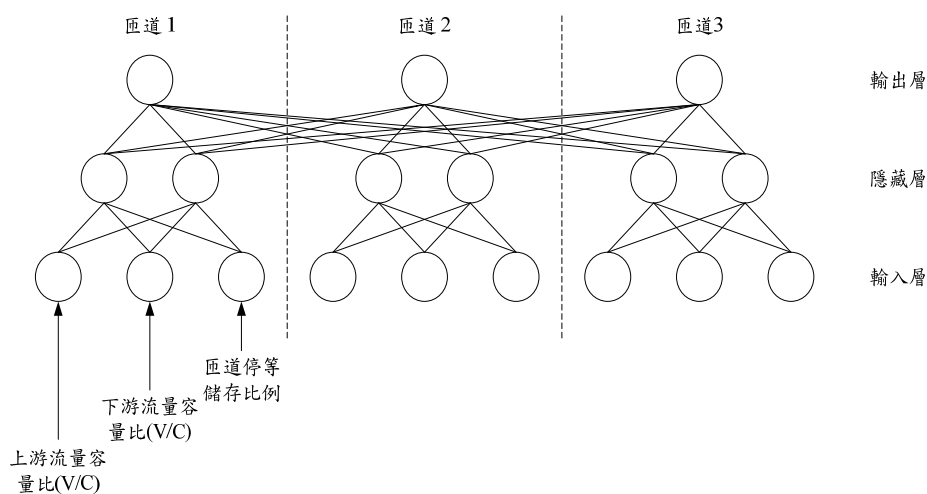


圖 2-7 類神經網路整合型儀控流程圖

六、非重現性壅塞儀控模式(Metering model for non-recurrent congestion)

由 Chang[51]發展的儀控演算法，以最佳化模式求解儀控率，同時具備動態交通流模型來描述交通流的變化；目標式為最大化通過量，限制式由流量守恆方程式組成，同時能夠預測瓶頸區段容量縮減，並透過卡門濾波器與 ARMA 模式來預測未來需求，最後使用連續線性規劃來求解，獲得即時儀控率。

此模式在 Zhang[87]的研究中給予很高的評價，因其考慮了相當多的因素，但 Zhang 等人亦提出可以改進的方向，包括此演算法中之容量縮減因子為給定且固定，與現實情況不符，應有辦法找出不同事件下不同的容量折減因子。同時，此演算法中未直接考慮匝道溢流的資訊，因其認為要使主線通過量最大又要最小化匝道等候車隊是互相矛盾的控制目標，需要進行整體路廊的控制才有辦法達到。

2.3 可變速限聯合匝道儀控

上匝道匯入處是高速公路經常形成瓶頸的路段，因上匝道為高速公路系統與地方道路系統的交接點，必須承接來自兩系統的車流，匝道儀控即是從上匝道車流管理的角度來進行控制的方式，而可變速限控制則是從高速公路主線控制的角度進行的，但彼此均只從單一區域的角度進行控制。近幾年來，越來越多的學者發現若只作區域控制很難達到適當的效果，所以有必要將控制提升至路網層級進行整合控制，於是就有了主線可變速限聯合匝道儀控的模式產生。其主要的概念即為當匝道儀控無法預防擁擠發生時，可變速限控制可以降低進入瓶頸路段的流量藉此幫助上匝道車流匯入主線[25]。

可變速限聯合匝道儀控演算法如下所示：

A. Alessandri *et al.*[21]的研究以 Papageorgiou 所提出之二階巨觀車流模式 METANET 模擬高速公路車流行為，並透過式(2.25)、式(2.26)、式(2.27)、式(2.28)和式(2.29)，描述可變速限以及匝道儀控對於車流造成之影響，在最大化路段流量的目標下，透過包威爾法(Powell's method)求解各控制位置之最佳控制速限及儀控率。經模擬結果顯示，路網的總通過量、密度及平均旅行時間等績效在控制後均有明顯的改善。



$$V[\rho_i(t), b_i(t)] = v_{free} b_i(t) \left\{ 1 - \left[\frac{\rho_i(t)}{\rho_{max}} \right]^{L[3-2b_i(t)]} \right\}^M \quad (2.25)$$

$$r_i(t) \leq d_i(t) + \frac{l_i(t)}{\Delta t} \quad (2.26)$$

$$l_i(t+1) = l_i(t) + \Delta t [d_i(t) - r_i(t)] \quad (2.27)$$

$$l_i(t) \leq l_{i,max} \quad (2.28)$$

$$r_{i,min} \leq r_i(t) \leq r_{i,max} \quad (2.29)$$

其中， $V[\rho_i(t), b_i(t)]$ ：在時階 t 內，格位 i 之期望速率；

v_{free} ：自由車流速率；

$b_i(t)$ ：在時階 t 內，格位 i 之控制速率，其值介於 0~1 之間；

$\rho_i(t)$ ：在時階 t 內，格位 i 之密度；

ρ_{max} ：壅塞密度；

$r_i(t)$ ：在時階 t 內，格位 i 之儀控率；

$d_i(t)$ ：在時階 t 內，位於格位 i 上匝道之需求流量；

$l_i(t)$ ：格位 i 上匝道之壅塞長度(Queue length)；

$l_{i,max}$ ：格位 i 上匝道最大所能提供之壅塞長度(Queue length)；

$r_{i,max}$ ：格位 i 上匝道之最大儀控率限制；

$r_{i,min}$ ：格位 i 上匝道之最小儀控率限制；

$L \cdot M$ ：格位 i 期望速率與密度關係式之參數；

Δt ：巨觀車流模式的單位時階長度。

Heygi *et al.*[25]將先前的可變速限控制研究[23][24][26]加以延伸，同樣以 MPC

之架構對最佳化模式進行動態求解。此研究強調透過可變速限聯合匝道儀控可增加臨界密度的範圍，進而避免或延遲車流崩潰(Break-down)的狀況發生。在最佳化模式的建構上，此研究以 METANET 車流模式為基礎，加入了控制速限對於上匝道車流和主線車流的影響，在最小化總旅行時間、儀控率變化和控制速率變化之目標下，進行儀控率及控制速率的求解，此研究的目標式設定，可避免太過頻繁的儀控率或速限變化發生。模擬結果顯示可變速限聯合匝道儀控模式比無控制時總旅行時間減少了 14.3%。

Papamichail *et al.*[60]以 Carlson *et al.*[93]之研究為基礎，加上匝道儀控對於車流的影響，如式(2.30)、式(2.31)、式(2.32)、式(2.33)和式(2.34)所示，建構了可變速限聯合匝道儀控之最佳化模式。值得一提的是，此研究除主線車流外，亦考慮上匝道路段之車流，故其目標式除了最小化主線旅行時間、儀控率變動幅度和控制速限變動幅度外，更增加了匝道之等候時間，以避免上匝道車流因匝道儀控而回堵至地方道路上，如式(2.35)所示。

$$q_o(k) = r_o(k) \hat{q}_o(k) \quad (2.30)$$

$$\hat{q}_o(k) = \min \left\{ \hat{q}_{o,1}(k), \hat{q}_{o,2}(k) \right\} \quad (2.31)$$

$$\hat{q}_{o,1}(k) = d_o(k) + w_o(k)/T \quad (2.32)$$

$$\hat{q}_{o,2}(k) = Q_o \min \left\{ 1, \frac{\rho_{max} - \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{max} - \rho_{cr,\mu}} \right\} \quad (2.33)$$

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T[d_o(k) - q_o(k)] \quad (2.34)$$

其中， $q_o(k)$ ：在時階 k 內，由上匝道進入主線之流量；

$r_o(k)$ ：在時階 k 內之儀控率；

$\hat{q}_o(k)$ ：無匝道儀控時，在時階 k 內上匝道可進入主線之流量；



$\hat{q}_{o,1}(k)$ ：非壅塞時，上匝道可進入主線之流量；

$\hat{q}_{o,2}(k)$ ：壅塞時，上匝道可進入主線之流量；

$d_o(k)$ ：在時階 k 內，上匝道之需求流量；

$w_o(k)$ ：在時階 k 內，上匝道之等候車隊長度；

Q_o ：上匝道最大可進入主線之流量(上匝道容量)；

ρ_{max} ：主線路段之壅塞密度；

$\rho_{\mu,1}(k)$ ：主線路段 μ 格位 1 之密度；

$\rho_{\alpha,\mu}$ ：主線路段 μ 之臨界密度；

T ：巨觀車流模式的單位時階長度。

$$\begin{aligned} \min J = & T \sum_k \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + T \sum_k \sum_o w_o(k) + T \sum_k \sum_o \alpha_f [r_o(k) - r_o(k-1)]^2 \\ & + T \sum_k \sum_m \alpha_b [b_m(k) - b_m(k-1)]^2 + T \sum_k \sum_o \alpha_w [\max\{0, w_o(k) - w_{max,o}\}]^2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

其中， $T \sum_k \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m$ ：主線路段總旅行時間；

$T \sum_k \sum_o w_o(k)$ ：匝道總等候時間；

$T \sum_k \sum_o \alpha_f [r_o(k) - r_o(k-1)]^2$ ：前後時階儀控率總差異；

$T \sum_k \sum_m \alpha_b [b_m(k) - b_m(k-1)]^2$ ：前後時階控制速限總差異；

$T \sum_k \sum_o \alpha_w [\max\{0, w_o(k) - w_{max,o}\}]^2$ ：大於匝道可容忍等候時間之總時間。

黃崇宇[15]以國道五號為研究對象，以情境模擬的方式，嘗試建立匝道儀控與可變速限控制模式。雖然，國道五號北上路段之壅塞影響範圍，以頭城交流道最為

嚴重，但由於頭城交流道上游會受到頭城收費站的影響，可能會影響可變速限控制模式之運作，故此研究最後以石碇交流道為模式驗證的地點。

在模擬實驗的部分，此研究針對不同流量情境、不同的匝道儀控率與不同的速率控制值分別進行實驗，最後得到速率控制模式決策表如表 2-6。此模式之應用為在控制週期內主線偵測器收集主線流量、下游佔有率以及匝道匯入量回傳給 ALINEA 匝道儀控模式與速率控制模式，ALINEA 模式根據上一控制週期內之匝道匯入量與下游佔有率決定下一控制週期之匝道儀控率，再將此儀控率傳送給速率控制模式，作為下一控制週期之匝道匯入量，而控制速限則依據上游之流量與下一時段之匝道儀控率，透過查表所得。

表 2-6 速率控制模式決策表

匝道匯入量(veh/hr) \ 主線流量(veh/hr)	100~500	500~1000	1000~1500
<3000	---	---	---
3000~3500	---	---	60 km/hr
3500~4000	---	70 km/hr	60 km/hr
4000~4500	70 km/hr	70 km/hr	60 km/hr
4500~5000	70 km/hr	70 km/hr	60 km/hr

薛博元[19]提出應用於國道五號北上壅塞路段之可變速限與匝道協控最佳化模式，該模式的特色是先透過 ALINEA 演算法計算各匝道儀控率，接著，在各匝道儀控率已知之情況下，藉由盧彥聰[17]所提出之可變速限演算法，計算各控制位置之控制速率。研究結論顯示透過 VISSIM 模擬路網之評估，在進行可變速限與匝道儀控後，主線總通過量增加 4.2%、平均旅行時間減少 10.78%、平均延滯時間減少 18.58%；上匝道總通過量增加 8.31%、平均旅行時間減少 11.47%、平均延滯時間減少 16.96%、平均等候車隊長度減少 25.19%、最大等候車隊長度減少 24.15%，因此，利用可變速限聯合匝道儀控應可減緩國道五號北上路段之壅塞問題。



2.4 控制演算法小結

由上述文獻回顧可知，透過可變速限或可變速限聯合匝道儀控之控制，確實可有效減緩高速公路之壅塞問題，然而，各類控制模式均有其優缺點和應用上的限制，因此，本研究以模式演算法的類型作為分類依據，將控制模式分為最佳化控制模式和非最佳化控制模式兩類，並分別針對各類模式進行優缺點分析。

1. 最佳化控制模式

- 優點：

- (1) 透過最佳化之過程，可確保控制速限和儀控率為整體系統之最佳解。
- (2) 根據控制目的的不同可設定不同之目標式，增加模式在應用上的彈性。

- 缺點：

- (1) 模式參數無實際之物理意義，校估不易。
- (2) 求解時間過長，增加模式在即時運作上的困難。

2. 非最佳化控制模式：

- 優點：

- (1) 計算方便，易於線上的即時運作。
- (2) 參數大多具有物理意義，易於校估。

- 缺點：

- (1) 無法確保模式所得之控制速限與儀控率為整體系統之最佳解。

為確保模式之控制速限和儀控率為系統最佳解，本研究將以數學規劃法建構可變速限聯合匝道儀控之最佳化模式，然而，如上所述，最佳化控制模式因參數校估不易和求解速度過慢等缺點，將不利於即時控制。

為使最佳化控制模式可於線上即時運作，本研究首先將參數校估視為最佳化之過程，離線求解控制模式中所需參數，另外，透過啟發式演算法減少控制模式之求解時間，最後，針對最佳化控制模式中所需之輸入變數，建構相對應之預測模式，以達到即時控制之目的。

在建構最佳化控制模式時，首先須針對控制範圍建構對應之車流模式，其目的

是希望透過數學方程式的方式，描述控制範圍內之車流行為；其次，須建構另一組數學方程式，描述可變速限與匝道儀控對車流造成的影響；最後，在滿足上述方程式的限制下，即可以最大化通過量、最小化旅行時間、最小化速率變異...作為目標，求解各控制位置之最佳化控制速限及儀控率。此種以車流模式作為基礎，建構最佳化控制模式的方式，稱為「模式基礎控制法」(Model-based control approach)。

2.5 巨觀車流模式

車流模式的相關研究大略起源於迄今 60 年前，Lighthill 和 Whitham 將車輛在車流中的運行過程視為粒子在流體中的運動，並依此提出第一個以數學方程式描述車輛運行的車流模式，在此之後，便有許多交通工程師投入於車流模式的發展及研究中。而經過多年的發展，目前的車流模式大致可依其描述車流動態特性的精細程度(Level-of-detail)分為巨觀(Macroscopic)、中觀(Mesosopic)和微觀(Microscopic)車流模式。

微觀及中觀車流模式中每一台車輛的運行過程均需以各自的方程式描述，而當模式中的車輛數增加時其運算時間將大幅的上升，另外，由於微觀及中觀車流模式缺乏輸入變數與輸出變數間的直接關係，因此，若欲以模式基礎控制法(Model-based control approach)建構最佳化控制模式，便僅能以巨觀車流模式作為控制模式中的基礎車流模式，本研究以下將針對巨觀車流模式的原理及特性進行探討。

巨觀車流模式是以群體變數(Aggregate Variables)描述車流的運行過程，其將車輛運行視為一種流動現象，在車流中的每一車輛無法單獨判別。這些群體變數包括：流率、密度和速率，至於個別車輛的行為例如：車道變換、超車等，通常不會明確的表現出來。[95]巨觀車流模式在分類上主要可依其模式中偏微分方程式的數目分為一階巨觀車流模式和二階巨觀車流模式，另外，又可依模式中的變數型態將其細分為連續型模式(Continuous model)或離散型模式(Discrete model)，其分類如圖 2-8 所示。

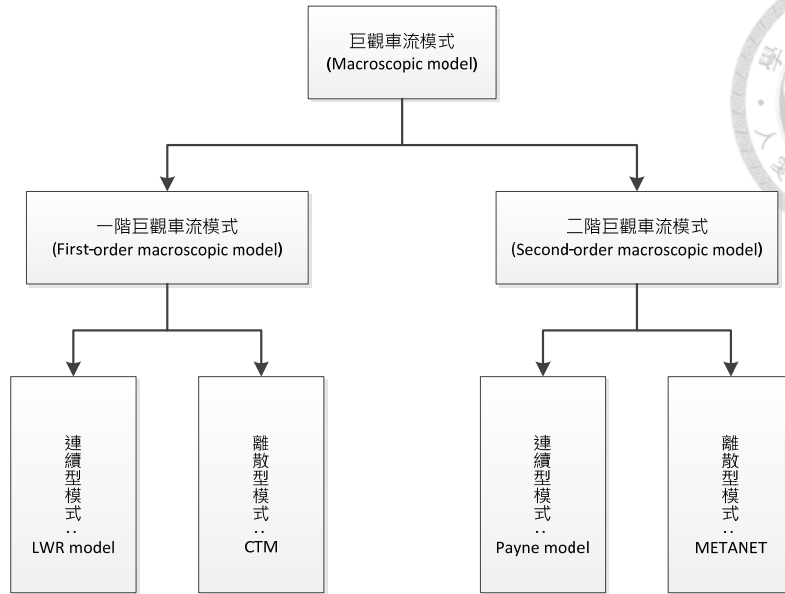


圖 2-8 巨觀車流模式分類圖

2.5.1 車流基礎構圖

車流基礎構圖是發展巨觀車流模式過程中不可或缺的一部分，其係將流率、密度和速率三個群體變數兩兩分成一組以期找出彼此之間的關係。

Greenshields[34]首先藉由實地觀測的資料適配出速率-密度的關係式如式(2.36)所示，另外，其利用流體動力學中的連續定理 $q = kv$ ，以式(2.36)為基礎推導出流率-速率的關係式，如式(2.37)所示。在其研究中指出，由於密度和速率呈線性關係，故在速率-密度車流基礎構圖中只需要兩個點就可以決定這個關係式。先不論 1935 年 Greenshields 使用這種分析方法所下的結論是否適當，在很長的一段時間中他的密度速率線性理論仍被廣泛地接受。

$$V = v^f \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho^m} \right) \quad (2.36)$$

$$Q = \rho^j \times \left(v - \frac{v^2}{v^f} \right) \quad (2.37)$$



其中， V ：期望速率(km/hr)；

v^f ：自由車流速率(km/hr)；

ρ ：密度(veh/km)；

ρ^n ：壅塞密度(veh/km)；

Q ：期望流率(veh/hr)；

v ：速率(km/hr)。

透過 Greenshields 的研究，我們可將速率視為密度的函數，同時透過連續定理 $q = kv$ 的轉換我們亦可將流率視為密度或速率的函數，故 Gerlough and Huber (1975) 認為，一旦確立了速率-密度的關係式，則流率-速率的關係式就能從中推導出來，因此往後的研究方向都投注在速率-密度關係式的研究上，而流率-速率關係式就只是前者推導後附帶的成果[88]。

關於 Greenshields 理論的主要批評在於他只用七個觀測資料點去適配速率-密度關係式，而在這七個觀測點當中又有六個觀測點是位於自由車流區域，僅有一個觀測點是位於擁擠區域，故其關係式僅在某一特定的車流狀態下方能有較佳的表現，無法確認在自由車流與擁擠車流交接的臨界處能否完整描述真實車流不連續的狀態。同時 Duncan (1979)也提出，將速率-密度關係式以 $q = kv$ 轉換得到的流率-速率關係式與實際量測得到的流率-速率關係圖有相當程度的誤差(Biased)。由以上的批評顯示密度與速率間的關係可能不只是單純的線性關係，因此後續又有許多學者根據實地觀測資料提出不同的速率-密度關係式，例如 Greenberg(1959)提出密度與速度呈現指數關係等。[88]此類無論車流為自由車流狀態或擁擠狀態均以單一方程式描述的關係式，稱之為單階段(Single-regime)關係式，其特性與適用範圍如表 2-7 所示。

表 2-7 單階段速率-密度關係式

發展者	模式	適用範圍及特色
Greenshields	$V = v^f \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho^m}\right)$	速度與密度為線性關係
Greenberg	$V = v^c \times \ln\left(\frac{\rho^m}{\rho}\right)$	適用於擁擠車流
Underwood	$V = v^f \times e^{-\frac{\rho}{\rho^c}}$	適用於低密度車流
Northwestern University	$V = v^f \times e^{-0.5\left(\frac{\rho}{\rho^c}\right)^2}$	在高密度車流呈現凹形， 在低密度車流呈現凸形
Drew	$V = v^f \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho^m}\right)^{\frac{n+1}{2}}$	以 Greenshields 模式為基礎推導出

除了單階段關係式外，根據觀測資料的不同，也開始有二階段(Two-regime)、三階段(Three-regime)及多階段(Multi-regime)關係式的發展，如表 2- 8 所示，這些關係式通常根據車流密度大小分成自由車流與擁擠車流二階段，或再增設過渡車流形成三階段關係式。

表 2-8 多階段速率-密度關係式

模式	自由車流區段	過渡區段	擁擠區段
Edie	$V = 54.9 \times e^{-\frac{\rho}{163.9}}, \rho \leq 50$	-	$V = 26.8 \times \ln\left(\frac{162.5}{\rho}\right), \rho > 50$
兩階段線性關係式	$V = 60.9 - 0.515\rho, \rho \leq 65$	-	$V = 40 - 0.265\rho, \rho > 65$
修正 Greenberge 關係式	$V = 48, \rho \leq 35$	-	$V = 32 \times \ln\left(\frac{145.5}{\rho}\right), \rho > 35$
三階段線性關係式	$V = 50 - 0.098\rho, \rho \leq 40$	$V = 81.4 - 0.913\rho,$ $40 < \rho \leq 65$	$V = 40 - 0.265\rho, \rho > 65$

Drake et al (1967)使用了新的觀測資料來測試包括 Greenshields、Greenberg 等在內的 7 個不同單階段速率-密度關係式，觀測資料取自芝加哥的 Eisenhower Expressway 共 1224 筆 1 分鐘資料，這些資料包括：流量、時間平均速率和佔有率，而密度則藉由流量與時間平均速率轉換得知，接著，其利用統計抽樣的方式將資料點均勻分布在密度軸上並進行 7 個不同關係式的曲線適配。Drake (1967)希望在比較這些方法後，選出一個關係式能在估計車流基礎參數時提供最佳的結果。在其研究中指出，Edie 的非連續指數方程式(結合 Greenberg(1959)與 Underwood(1961)的轉置指數曲線) 所估計的車流基礎參數最佳，其 R^2 值是 7 個模式中第 2 低的，同時具有最低的標準差[88]。

2.5.2 一階巨觀車流模式

連續型巨觀車流模式是利用偏微分方程式來描述群體變數的動態變化，其模式的自變數為位置 x 和時間點 t ，依變數為密度 $\rho = \rho(x, t)$ 、流率 $q = q(x, t)$ 和速率 $V = V(x, t)$ 。其中，密度 $\rho = \rho(x, t)$ 表示在時間點 t 路段 $[x, x + dx)$ 中的期望車輛數，流率 $q = q(x, t)$ 表示在時段 $[t, t + dt)$ 內通過位置 x 的期望車輛數，而速率 $V = V(x, t)$ 則表示在時段 $[t, t + dt)$ 內路段 $[x, x + dx)$ 中的車輛期望速率。

假設上述變數均為時間和空間的可微函數，則根據連續定理可得式(2.38)：

$$q(x, t) = \rho(x, t)V(x, t) \quad (2.38)$$

另外，根據流量守恆定理可推導出式(2.39)：

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (2.39)$$

式(2.39)表示在時段 $[t, t + dt)$ 內路段 $[x, x + dx)$ 中的車輛變動數是由位置 x 處的流率 $q(x, t)$ 和位置 $x + dx$ 處的流率 $q(x + dx, t)$ 所決定。然而若路段 $[x, x + dx)$ 間存在

滲流(Sink)或湧泉(Source)則可將式(2.39)改寫為式(2.40)：

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = g(x,t) \quad (2.40)$$



其中， $g = g(x,t)$ 為車輛增加(減少)率，表示在時段 $[t, t + dt)$ 內路段 $[x, x + dx)$ 中因滲流或湧泉所造成車輛增加(減少)量[88]。

式(2.38)和式(2.39)為連續型巨觀車流模式的基礎架構，然而在這當中的未知變數共有三個(密度 ρ 、流率 q 和速率 V)，但卻只有兩組方程式，故要完整描述車流的動態變化，尚需一組額外的方程式加以協助。

首先，Lighthill-Whitham-Richards 以 Greenshields 的車流基礎關係式描述速率 V ，如式(2.36)所示，並結合式(2.38)和式(2.39)提出了流體動力學模式(Kinematic wave model, KWM)，此模式又可稱為 LWR 模式。

不過，由於 LWR 模式無法產生連續唯一解(Unique continuous solution，因此，我們會以特性曲線(Characteristic curve)的方式求得此模式的廣義解(Generalized solution)，其做法為給定所有車流起始條件，並計算每股車流所產生的特性曲線。然而，在車流發生跳躍狀態時，兩條斜率不同的特性曲線將會交會並產生兩個不同的密度特性值，但這在物理學上是不可能的(一個位置應該只有一個密度值)，所以這之間存在的差異是因為衝擊波的形成，此時特性曲線消失，在各個特性曲線之交會處可連出衝擊波線段，其所代表的就是上游與下游間流量、密度或速度不連續的現象。而衝擊波的波速則可在 Rankine-Hugoniot conditions 下計算[95]。Rankine-Hugoniot conditions 中提到，衝擊波速 w 乘上被衝擊波線段分隔的上下游密度變化 $(\rho_d - \rho_u)$ 等於上下游流量的變化 $(q_d - q_u)$ ，如式(2.41)所示。

$$w = \frac{q_d - q_u}{\rho_d - \rho_u} \quad (2.41)$$

利用特性曲線的方式雖可求得 LWR 模式的廣義解，但其並非連續解，因此，

LWR 模式在實際運用上會以計算熵(Entropy)或黏性解(Viscosity solution)的方式求取其唯一廣義且可行解(Unique generalized and physically feasible solution)。

雖然利用上述方式可決定 LWR 模式的解析解(Analytical solution)，但其方法在應用上仍是非常麻煩，因此，後續有許多學者企圖以數值分析(Numerical analysis)的方式離散化連續型模式以建立其對應的離散型模式，然而，在此須要注意的是利用數值分析方式所建構的離散型模式是否保留原先連續型模式的重要特性；此外，當連續型模式的解非唯一時(例如：一階巨觀模式)，其利用數值分析所得到的近似解是否可行。

Daganzo[43]對 LWR 模式中的空間及時間兩個自變數進行離散並提出了著名的格位傳遞模式(Cells-Transmission Model, CTM)，其作法是將路段(Link)切分成數個格位(Cell)而時間則以時階的方式表達，同時，格位與時階的長度皆必須滿足 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)法則，如式(2.42)所示，其代表車輛在單位時階內行進的距離不能超過格位的長度[39][40][97]，在完成格位的切分後其模式便可以式(2.43)和式(2.44)描述車流的動態變化過程。

$$\Delta \geq T \times v^f \quad (2.42)$$

其中， Δ ：格位長度(km)；

v^f ：平均自由車流速率(km/hr)；

T ：單位時階長度(hr)。

式(2.43)表示下一時階格位*i*之車輛數等於本時階格位*i*之車輛數加上進入格位*i*之淨車輛數，其為式(2.39)離散後之結果；式(2.44)表示由格位*i*進入格位*i+1*之車輛數，是由可離開格位*i*的車輛數和格位*i+1*可進入的車輛數所決定，當格位*i+1*為非壅塞狀態，格位*i*將以其最大可離開車輛數進入格位*i+1*中，當格位*i+1*為壅塞狀態，格位*i+1*僅可提供目前所剩餘之空間供格位*i*進入，其為近似式(2.36)和式(2.38)的離散方程式。



$$n_i(k+1) = n_i(k) + y_{i-1}(k) - y_i(k) \quad (2.43)$$

$$y_i = \min\{n_{i-1}(t), Q_i(t), N_i(t) - n_i(t)\} \quad (2.44)$$

其中， $n_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之車輛數(veh)；

$y_i(k)$ ：在時階 k 中，由格位 i 進入格位 $i+1$ 之車輛數(veh)；

$Q_i(t)$ ：格位 i 之臨界流量(veh)；

$N_i(t)$ ：格位 i 之最大可接受車輛數(veh)。

Daganzo[44]在考量壅塞車流會因衝擊波而產生等候車隊後修正了其模式，修正部分如式(2.45)所示。

$$y_i = \min\left\{n_{i-1}(t), Q_i(t), \frac{w}{v^f} [N_i(t) - n_i(t)]\right\} \quad (2.45)$$

其中， $n_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之車輛數(veh)；

$y_i(k)$ ：在時階 k 中，由格位 i 進入格位 $i+1$ 之車輛數(veh)；

$Q_i(t)$ ：格位 i 之臨界流量(veh)；

$N_i(t)$ ：格位 i 之最大可接受車輛數(veh)；

w ：衝擊波速率(km/hr)；

v^f ：自由車流速率(km/hr)；

當車流陷入壅塞時將產生衝擊波，而其波速應比自由車流速率慢幾倍，因此，車流在陷入壅塞後將會有等候車隊蔓延的情形，而式(2.45)即是將此情況考慮至模式中並以 $\frac{w}{v^f}$ 描述車流受衝擊波之影響而產生等候車隊蔓延之情形。

Lebacque[40]以數值分析中的 Godunov scheme 對 LWR 模式進行求解，其結果發現 Daganzo 所提出的 CTM 模式為 Godunov 解中的一個特殊案例



2.5.3 二階巨觀車流模式

在一階 LWR 類型的模式發展後，描述車流動態變化的巨觀車流模式便越來越興盛，而且不僅僅是集中在理論上的發展，以應用為導向的研究也越來越多[84]。1955 年所發展的一階 LWR 模式也在 1971 年由 Payne[53]進行修正，在 Payne 的模式中捨棄了一階模式以 Greenshields 的速率-密度關係式描述速率變化的方程式，而是另外增加了一條描述速率變化的偏微分方程式，由於其模式含有兩條偏微分方程式，故 Payne 模式又稱為二階巨觀車流模式。二階模式的發展克服了一些一階模式已知的缺陷，並增進模式描述高速公路車流狀況的精確度。

Payne 模式主要還是以式(2.38)和式(2.39)為基礎，並透過以下對微觀跟車理論進行泰勒展開式的推導獲得一條描述速率變化的偏微分方程式，如式(2.50)所示，將式(2.50)結合式(2.38)和式(2.39)後即可獲得 Payne 模式。

考慮一條簡單跟車方程式，並進行推導如下：

$$v(x(t+T), t+T) = V(\rho(x+D, t)) \quad (2.46)$$

其中， $x(t)$ ：在時間點 t 時車輛的所在位置(m)；

$v(x, t)$ ：在時間點 t 位置 x 處車輛的速率(km/hr)；

$V(\rho(x, t))$ ：在時間點 t 位置 x 處的密度所對應的期望速率(km/hr)；

T ：駕駛者反應時間(s)；

D ：本車與前車所保持的淨間距(m)。

式(2.46)表示駕駛者會逐漸調整行車速率直到與期望速率相同，期望速率為密度的函數，透過外在交通狀況與密度的變化對駕駛者產生影響，使得駕駛者必須在

加速至自由車流速度或減速間進行權衡。

Payne 將式(2.46)等號左右兩邊以泰勒展開式分解並忽略高階項，得到：

$$v(x(t+T), t+T) \approx v(x, t) + Tv(x, t) \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} + T \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.47)$$

$$V(\rho(x+D, t)) \approx V(\rho(x, t)) + D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \frac{dV(\rho(x, t))}{d\rho} \quad (2.48)$$

由於車間距(D)為密度的倒數($1/\rho$)，故將式(2.48)中的 D 以 $1/\rho$ 取代後得到：

$$V(\rho(x, t)) + D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \frac{dV(\rho(x, t))}{d\rho} = V(\rho(x, t)) + \frac{\partial \rho(x, t)}{\rho \partial x} \frac{dV(\rho(x, t))}{d\rho} \quad (2.49)$$

將式(2.47)和式(2.49)一起代回式(2.46)中後同除以 T 和移項整理，並假設 $-\frac{dV(\rho(x, t))}{Td\rho}$ 等於參數 \mathcal{L} 即可得到 Payne 模式中描述速率變化的偏微分方程式，如式(2.50)所示。

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = \frac{[V(\rho(x, t)) - v(x, t)]}{T} - v(x, t) \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} - \frac{v}{\rho(x, t)} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \quad (2.50)$$

其中， \mathcal{L} 為 Payne 模式所引入的新參數， $v = -\frac{dV(\rho(x, t))}{Td\rho}$ ，描述密度上升時，駕駛者的減速率；為一駕駛者預期心態係數，用於反映路段上的駕駛者會受到下游路段交通狀況的影響，即下游路段若較駕駛者所在路段更為擁擠，則駕駛者減速的程度由此參數表示[14]，並假設駕駛者減速率與密度 ρ 和期望速率 V 呈指數關係。

Payne 以鬆弛項(Relaxation)、傳導項(Convection)和預測項(Anticipation)解釋其速率偏微分方程式所隱含的物理意義：

$\frac{[V(\rho(x, t)) - v(x, t)]}{T}$ 為鬆弛項，描述車流內速率逐漸向期望速率靠攏的傾向。

$v(x,t) \frac{\partial v(x,t)}{\partial x}$ 為傳導項，描述由上游進入的車輛對於平均速率造成的影響。

$\frac{v}{\rho(x,t)} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x}$ 為預測項，描述車流將會依下游的密度變化改變其速率。

如同一階連續型模式一樣，二階連續型的 Payne 模式在應用上亦非常麻煩，故後續也有許多學者，如：Van Maarseveen(1982)、Kotsialos(1999)、Lyrintzis(1994) 和 Liu(1998)，以數值分析(Numerical analysis)的方式離散化 Payne 模式並建立其對應的離散型模式，而其中最為著名的二階連續型模式即為 Papageorgiou(1989)所提出的 METANET 模式。

Papageorgiou[79]修正 Payne 模式後提出離散型二階車流模式 METANET，如式(2.51)~式(2.59)所示，同時，其利用該模式模擬巴黎環狀大道(Boulevard peripherique)的匝道路段，結果顯示 METANET 模式可明顯表現出匝道路段因車流交織作用而產生的壅塞情形；Papageorgiou[80]改進 METANET 模式使其能描述車流因車道縮減而產生的壅塞情形，如式(2.60)和式(2.61)所示，另外，由於道路幾何設計的不同將造成車流行為的改變，故在 METANET 模式中需以幾何設計將道路區分成多個路段，並設定各路段的車流參數(臨界密度 ρ^f 、自由車流速率 v^f)以描述各路段不同的車流行為。

式(2.51)和式(2.52)為 METANET 模式普通格位的密度和速率變化方程式，其中，式(2.51)為流量守恆方程式(式(2.39))離散後的結果；另外，由於 Payne 模式在密度為 0 時，速率方程式(式(2.50))的預測項 $\frac{v}{\rho(x,t)} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x}$ 將會趨近於無窮大，故

Papageorgiou[79]以參數 κ 對該式提出修正並離散後得到式(2.52)。

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{\Delta} [q_{i-1}(k) - q_i(k)] \quad (2.51)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} [V_i(k) - v_i(k)] + \frac{T \cdot \zeta}{\Delta} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{vT [\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)]}{\tau \Delta [\rho_i(k) + \kappa]} \quad (2.52)$$



其中， $\rho_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之密度(veh/km)；

$v_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之速率(km/hr)；

$q_i(k)$ ：在時階 k 中，由格位 i 進入格位 $i+1$ 之流率(veh/hr)；

$V_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之期望速率(km/hr)；

T ：單位時階長度(s)；

Δ ：格位長度(m)；

τ 、 ζ 、 ι 、 κ ：METANET 模式參數。

式(2.53)~式(2.56)為 METANET 模式上、下匝道格位的密度和速率變化方程式，其中，式(2.53)和式(2.55)為流量守恆方程式(式(2.40))離散後的結果；另外，由於 Payne 模式無法描述上下匝道車流對於主線車流所造成的速率影響，故 Papageorgiou[79]假設上匝道流率 $r = r(x, t)$ 以速率 v_{on} 在位置 x 處進入主線，而上匝道車流速率 $v_{on} \leq v$ ，因此，Payne 模式的速率方程式在上匝道處需加入 $\frac{r(x, t)}{\rho(x, t)} \cdot [v_{on}(x, t) - v(x, t)]$ 以描述上匝道車流對於主線車流速率的影響，假設 $v_{on}(x, t) = \delta_{on} \cdot v(x, t)$ 且 $\delta_{on} = \delta_{on} - 1$ 並進行離散後即可得到式(2.54)，而下匝道格位之速率方程式同理。

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{\Delta} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k)] \quad (2.53)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} [V_i(k) - v_i(k)] + \frac{T \cdot \zeta}{\Delta} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{vT [\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)]}{\tau \Delta [\rho_i(k) + \kappa]} - \frac{\delta_{on} T \cdot v_i(k) r_i(k)}{\Delta [\rho_i(k) + \kappa]} \quad (2.54)$$

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{\Delta} [q_{i-1}(k) - q_i(k) - s_i(k)] \quad (2.55)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} [V_i(k) - v_i(k)] + \frac{T \cdot \zeta}{\Delta} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{vT [\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)]}{\tau \Delta [\rho_i(k) + \kappa]} - \frac{\delta_{off} T \cdot v_i(k) s_i(k)}{\Delta [\rho_i(k) + \kappa]} \quad (2.56)$$



其中， $\rho_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之密度(veh/km)；

$v_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之速率(km/hr)；

$q_i(k)$ ：在時階 k 中，由格位 i 進入格位 $i+1$ 之流率(veh/hr)；

$V_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之期望速率(km/hr)；

$r_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 上匝道之流率(veh/hr)；

$s_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 下匝道之流率(veh/hr)；

T ：單位時階長度(s)；

Δ ：格位長度(m)；

τ 、 ζ 、 λ 、 κ 、 δ^{on} 、 δ^{off} ：METANET 模式參數。

式(2.57)為流體動力學連續定理(式(2.38))離散後之結果；式(2.58)表示格位 i 與格位 $i+1$ 間的流率為格位 i 流率與格位 $i+1$ 流率的加權平均，其權重 α 為所需校估之參數；式(2.59)為 METANET 模式中期望速率與密度之關係式。

$$Q_i(k) = \rho_i(k) \cdot v_i(k) \quad (2.57)$$

$$q_i(k) = \alpha \cdot Q_i(k) + (1 - \alpha) \cdot Q_{i+1}(k) \quad (2.58)$$

$$V_i(k) = v^f \exp \left[-\frac{1}{\beta} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho^c} \right)^\beta \right] \quad (2.59)$$

其中， $Q_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之流率(veh/hr)；

$\rho_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之密度(veh/km)；

$v_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之速率(km/hr)；

$q_i(k)$ ：在時階 k 中，由格位 i 進入格位 $i+1$ 之流率(veh/hr)；



$V_i(k)$ ：在時階 k 中，格位 i 之期望速率(km/hr)；

v^f ：自由車流速率(km/hr)；

ρ^c ：臨界密度(km/hr)；

β ：期望速率-密度關係式之參數；

α ：METANET 模式參數。

式(2.60)和式(2.61)為 METANET 模式車道縮減格位的密度和速率變化方程式，由於車道縮減導致車輛變換車道(Lane changing)的行為與上匝道車流所造成的車流行為類似，故 Papageorgiou 假設進入車道縮減處之流率為 $(\frac{\lambda_{i,j} - \lambda_{i+1,j}}{\lambda_{i,j}} q_{i,j}(k))$ ，並將之帶入式(2.54)中的最後一項取代 $r_i(k)$ 得到 $\frac{\phi \cdot T}{\Delta_j [\rho_{i,j}(k) + \kappa]} \frac{\lambda_{i,j} - \lambda_{i+1,j}}{\lambda_{i,j}} q_{i,j}(k) v_{i,j}(k)$ ，接著，將 $q_{i,j}(k)$ 以連續定理 $q = kv$ 帶入即可獲得 $\frac{\phi T}{\Delta_j} \frac{\lambda_{i,j} - \lambda_{i+1,j}}{\lambda_{i,j}} [v_{i,j}(k)]^2$ ，然而，Papageorgiou 認為車道縮減導致車輛變換車道的行為在壅塞狀態下會更明顯，故其以臨界密度與目前格位密度的比值 $\frac{\rho_{i,j}(k)}{\rho_j^c}$ 調整 $\frac{\phi T}{\Delta_j} \frac{\lambda_{i,j} - \lambda_{i+1,j}}{\lambda_{i,j}} [v_{i,j}(k)]^2$ 對於速率造成的影響。

$$\rho_{i,j}(k+1) = \rho_{i,j}(k) + \frac{T}{\Delta_j} \left[q_{i-1,j}(k) - \left(\frac{\lambda_{i,j} - \lambda_{i+1,j}}{\lambda_{i,j}} \right) q_{i,j}(k) \right] \quad (2.60)$$

$$v_{i,j}(k+1) = v_{i,j}(k) + \frac{T}{\tau} [V_{i,j}(k) - v_{i,j}(k)] + \frac{T \cdot \zeta}{\Delta_j} v_{i,j}(k) [v_{i-1,j}(k) - v_{i,j}(k)] - \frac{vT [\rho_{i+1,j}(k) - \rho_{i,j}(k)]}{\tau \Delta_j [\rho_{i,j}(k) + \kappa]} - \frac{\phi T (\lambda_{i,j} - \lambda_{i+1,j}) \rho_{i,j}(k)}{\Delta_j \lambda_{i,j} \rho_j^c} [v_{i,j}(k)]^2 \quad (2.61)$$

其中， $\rho_{i,j}(k)$ ：在時階 k 路段 j 中，格位 i 之密度(veh/km)；

$v_{i,j}(k)$ ：在時階 k 路段 j 中，格位 i 之速率(km/hr)；



$V_{i,j}(k)$ ：在時階 k 路段 j 中，格位 i 之期望速率(km/hr)；

ρ_j^c ：路段 j 之臨界密度(veh/km)；

Δ_j ：路段 j 之格位長度(m)；

$\lambda_{i,j}$ ：在路段 j 中，格位 i 之車道數；

τ 、 ζ 、 ι 、 κ 、 ϕ ：METANET 模式參數。

2.6 車流模式小結

然而，在建構最佳化模式時，究竟該以何種車流模式做為最佳化模式中，描述車流變化的方程式呢？這個問題還沒有定論，因為兩派各有支持者，關於哪一種模式較為合理也出現相當多的爭論，其中，一階巨觀模式的支持者以 Daganzo 等人為主，其在 1994 年的文獻中[46]直接指出二階模式有邏輯上的缺陷，以二階模式描述的車流現象有不合理且不真實的情況發生；二階巨觀模式一派則有 Papageorgiou 等人支持，其中 Papageorgiou 於 1998 年的文獻中[84]回應各種對於二階模式的批評，並認為當時所發表關於巨觀模式的驗證仍過少，而且多半都是二階模式有較完整的驗證，在精確度上也是二階模式具有較好的驗證結果。

以下列舉了一階巨觀車流模式的缺點[84][95]：

首先，一階模式中最關鍵的簡化在於其假設車輛在 t 時段下 x 點的平均速度 $v(x,t)$ 會依據模式中 $v(x,t)=V(\rho(x,t))$ 的關係式直接按照密度進行調整，但真實世界中，車輛應該會有加減速的動作使其耗費一些時間由原速度逐漸遞減或遞增至均衡速度 $V(\rho(x,t))$ 。以這樣的關係式模擬車流則在某些場合下會使得其中的車輛產生異常大的加速度或減速度，特別當有衝擊波產生時，可能會有無限大的減速度出現；另外一個例子則發生在一階模式描述車輛以車隊的方式移動時，在真實世界中，車隊的尾端會有擴散(Dispersion)的現象，但一階模式因為整個車隊都要符合 $v(x,t)=V(\rho(x,t))$ 的關係式，使得車隊尾端的車輛較真實車輛有較高的平均速率，因此，車隊在圖形上看會較真實情況更為聚合，而沒有漸漸發散的現象。

再來是前面有提到跳躍狀況(Jump condition)造成一階模式在衝擊波產生處密

度發生不連續的情況；在真實交通狀況中衝擊波應該是平滑的向後或向前擴散，但一階模式 $v(x,t)=V(\rho(x,t))$ 的關係式造成衝擊波形成時，速率的急遽變化使密度無法保持一致，造成不平滑現象。在二階模式中，Payne 以傳導項解決這個問題。

第三點則是由 Treiterer and Myers[67]所發現交通流的遲滯現象 (Traffic Hysteresis)，即車輛所保持的平均車間距會隨著車輛越靠近壅塞區而漸漸變小。這種遲滯現象一階模式也無法描述，但在 Payne 的模式中，由於其速率方程式是由簡單跟車模式推導而來，模式中隱含這種間距的參數，Zhang[57]中證實了 Payne 的模式能夠描述交通流中的遲滯現象。

最後，Kerner *et al.*[35]發現在道路上駕駛者在追求自己的期望速度時，會同時受到其他鄰近車輛的影響而減速。這兩項行為會互相競爭，而 Kerner 等人在其研究中發現，在某些特殊情況下，由於這種車隊中駕駛人加減速不一致的行為，容易在道路中沒有瓶頸路段的情況下引起自發性的隨機壅塞，又稱為幽靈壅塞(Phantom jams)[36]。一階模式無法描述交通繁忙時任何小小的擾動都可能被放大導致車流崩潰(Crash)落入壅塞的現象，自然也無法描述幽靈壅塞的現象。而 Payne(1971)發現在某些情況下，其模式能夠呈現一些不穩定的現象，即在某些密度區間中，Payne 的模式並不是完全穩定的(Metastable)，在此區域中，任何密度微小的變化都有可能造成密度的增加，使車流產生走走停停的現象或者幽靈壅塞。

在二階模式缺點的部分，早期當 Payne 類型的模式發展尚未完善時，主要的批評在於模式對於車道縮減與上匝道區的描述力弱，績效不佳。不過這些在 Cremer(1986)與 Papageorgiou[80][81]中透過模式的延伸與方程式的增加而有明顯改善。

最主要的批評則來自 Daganzo[46]。Daganzo 認為進一步以二階模式將車流類比為流體動量粒子是沒有必要的，因為他認為車流中的車輛與氣體或流體中的粒子仍有根本上的不同：

異向性(Anisotropy)：氣體或流體中的粒子會接受其上游或下游的粒子刺激(Stimuli)而做出反應，但車流中的人車單元主要是對於其下游交通狀況作出反應，而不是對於四面八方的刺激都做出反應。

人格特性：舉例來說，氣體或流體中若有較慢速的粒子存在，則速度較快的粒子會推動慢速的粒子加速前進；但車流中的慢車卻不完全會受快車影響，主要與駕駛人特性有關，而人格特性有很大一部份是不會被交通環境所影響的。

Daganzo 更進一步引用 Del Castillo(1994)的文獻，若以與一階模式相同的特性曲線法求解 Payne 模式會發現，Payne 模式所得的波速(特性曲線斜率)將高於其所模擬車流的平均速率，表示波速的資訊傳遞得比車輛本身還快，未來的車流狀況是由還沒發生的事決定。Daganzo 認為這一點就足以認定二階模式有邏輯上的謬誤。但 Papageorgiou[84]認為，平均速率是由車流內所有車輛，將車速平均而得，而特性曲線則是每輛車都有一條，若此車之車速大於車流內的平均速率，則承載此車資訊的波速自然會大於平均速率；Papageorgiou 更進一步指出車流的不穩定與其他動態現象的變化都是來自於這種車流內車輛不均質(速率不同)的結果。

另外的批評來自於 Daganzo 認為，二階模式將衝擊波加以平滑(一階模式在衝擊波發生處有跳躍狀況)，卻有可能造成不合常理的現象。首先，其以最簡單的方法消除衝擊波的影響，即在密度與流率關係式中加入一個擴散項(Diffusion term)：

$$q(x,t) = Q(\rho(x,t)) - \mu \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.62)$$

或改寫為：

$$v(x,t) = V(\rho(x,t)) - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.63)$$

其中， μ 為一個恆正的常數，則當密度隨著距離急遽上升時，是有可能使流率或速率產生負值的，而這明顯違反了人類的經驗法則。而 Papageorgiou 則以此式無異於下式回應：

$$q(x,t) = \max \left[0, Q(\rho(x,t)) - \mu \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] \quad (2.64)$$

綜觀以上所述，不論一階或二階模式均具有各自的缺陷，而 Papageorgiou[84]也認為，在車流理論中，唯一恆常不變的真理就只有流量守恆定律和連續流體定律

所推導出的方程式，其他方程式都只是以類比的角度或近似的方式得到；換句話說，這些方程式一定都不完美(Not self-evident)，我們唯一能做的就是正確且有效的使用這些模式，並且在後續的離散化(時間與空間的切割)、參數校估與模式驗證上投入更多心力以確保模式有足夠的描述力。

本研究在考量如何將控制速限對車流之影響於模式中描述後，決定採用對車流速率變化有較多描述之二階模式 METANET，作為本研究最佳化模型中之基礎車流模式。

第三章 現況分析



本研究欲透過現況分析得知國道五號北上路段之車流特性，進而確認控制範圍、可變速限標誌位置和控制模式單位控制時階之長度。

3.1 時空圖分析

為探討國道五號北上路段壅塞發生之範圍及時段，本研究利用國道五號北上路段車輛偵測器之資料繪製速率時空圖，分析之日期為 2011/8/5(五)至 2011/8/8(一)，其運輸需求包含通勤日以及週休假日，如圖 3-1 所示。

由圖 3-1 可知在週一以及週五之通勤日，國道五號北上路段全線平均速率大多大於 70kp/hr，無顯著壅塞發生，而在週休假日時段，則明顯產生長時段與大範圍之壅塞。壅塞時段約由週日中午 12 時至午夜 12 時，長達 12 小時；壅塞範圍則約由里程數 15.000K 處至里程數 32.000K 處，包含了雪山隧道路段(里程數 15.179K~里程數 28.134K)。

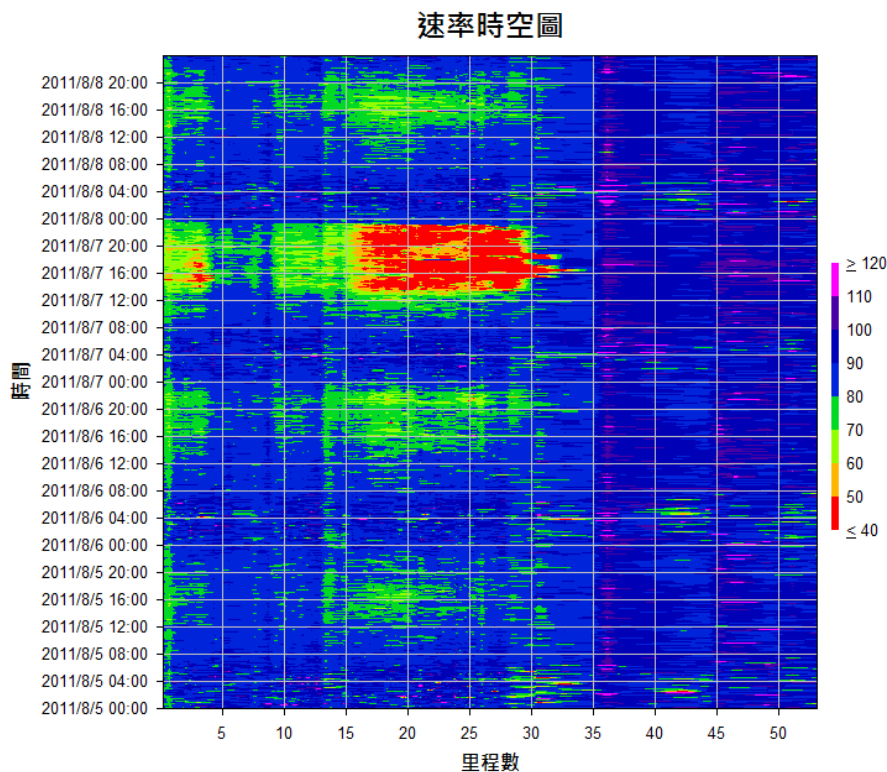


圖 3-1 國道五號北上路段週五至週一速率時空圖

為完整了解國道五號北上路段週日之詳細壅塞情形，本研究以 2011/08/07 (日)10:00 至 2011/08/07(日) 24:00 之車輛偵測器資料繪製速率時空圖，如圖 3-2 所示，由圖 3-2 可知壅塞約在 12:30 由雪隧南口產生，然壅塞情形尚未明顯，直至 13:30 後，壅塞由雪隧南口分別向上下游蔓延，並於 16:00 達到最大壅塞範圍；另由圖 3-2 可發現在里程數 20.000K 處亦為一瓶頸點，車流於 19:00 至 22:00 間速率皆有降低之情形發生。里程數 20.000K 約為駕駛者通過隧道 2/3 長度處，高瑛穗[9]曾對駕駛行駛雪山隧道全線之車速進行研究，並發現未受其他車輛影響之單一車輛，於通過雪山隧道中後段後即有車速減緩之情形，可能原因為在長隧道內單調、封閉狀態下造成之駕駛倦怠情形，其結論與本研究觀察時空圖之情形相同。

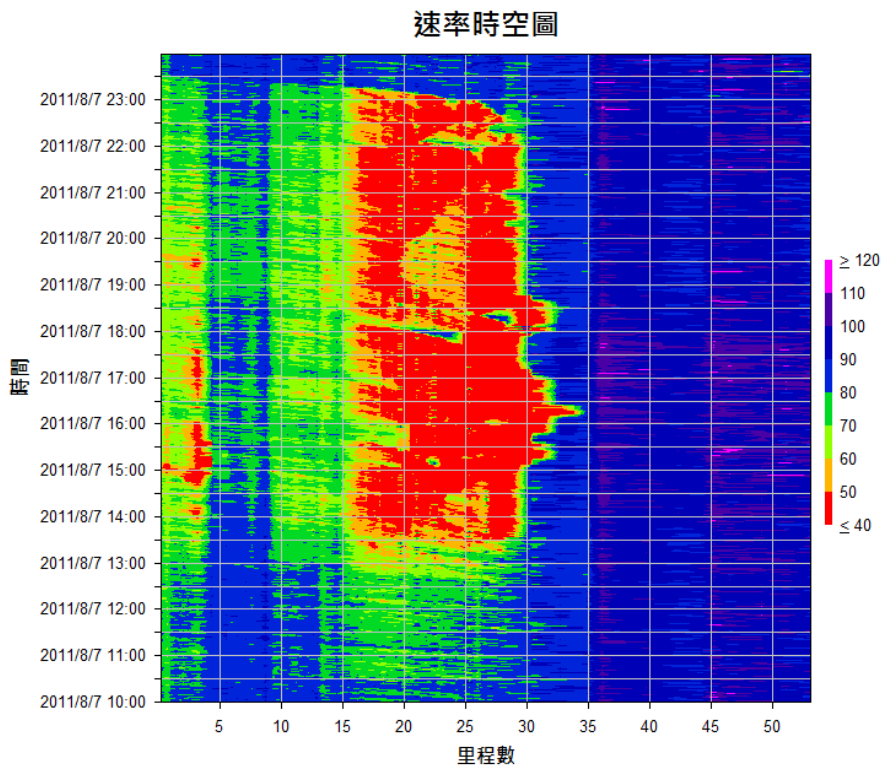


圖 3-2 國道五號北上路段壅塞時段速率時空圖

針對國道五號北上路段之壅塞狀況，本研究將控制範圍設定為蘇澳上匝道(里程數 53.715K)至坪林下匝道(里程數 14.720K)之間，其目的是希望透過壅塞範圍上游各匝道(頭城上匝道、宜蘭上匝道和羅東上匝道)聯合可變速限的控制，維持進入壅塞路段之流量，進而避免壅塞之產生，因此，本研究擬定可變速限標誌由壅塞產生處(里程數 28.300K)開始佈設，並根據國外系統之佈設方式向上游每 500

公尺佈設一支可變速限標誌，直至壅塞最大範圍處(里程數 31.800K)，共佈設八支可變速限標誌，其佈設位置之里程數如所示。



表 3-1 可變速限標誌佈設位置

編號	里程數
VMS_8	28.300K
VMS_7	28.800K
VMS_6	29.300K
VMS_5	29.800K
VMS_4	30.300K
VMS_3	30.800K
VMS_2	31.300K
VMS_1	31.800K

3.2 容量分析

為進一步分析國道五號北上路段之流率變化與容量，本研究以 2011/08/05 (五) 至 2011/08/08 號(一)之車輛偵測器資料，繪製北上全線流率變化圖，如圖 3- 3 所示。其中四條實線分別為最大小時流量、最大五分鐘流量、壅塞時段最小小時流量與壅塞時段最小五分鐘流量，壅塞時段之定義為該時段速率低於 40kph，若某偵測器全天皆無壅塞時段，則以相鄰偵測器之壅塞時段取代。另外，虛線則代表容量估計值，該數值是依據 2011 年公路容量手冊[1]計算而得。

由圖 3- 3 可發現宜蘭上匝道(35.760K)上游之四條實線最大間距低於 1000(veh/hr)，表示非壅塞時段與壅塞時段之流率相近，車流穩定；頭城上匝道(29.843K)下游接近雪隧南口處，四條實線最大間距約 3000(veh/hr)，顯示非壅塞時段與壅塞時段之流率差異大，此外，此處之最大小時流量值超過容量估計值，表示車流需求有超過供給的現象；在雪山隧道中段處(20.412K)，四條實線最大間距又

縮小至 1200(veh/hr)，車流趨於穩定；而在雪山隧道北口下游處，四條實線最大間距皆無較大變化，均在 2000(veh/hr)左右，表示車流保持穩定。

簡言之，北上路段壅塞與非壅塞之流率差距最大為 3000(veh/hr)，發生於雪隧南口處。另外值得一提的是雪山隧道內容量約為雙車道 2500(veh/hr)，與一般高速公路容量單車道 2300(veh/hr)；雙車道 4600(veh/hr)差異甚大。

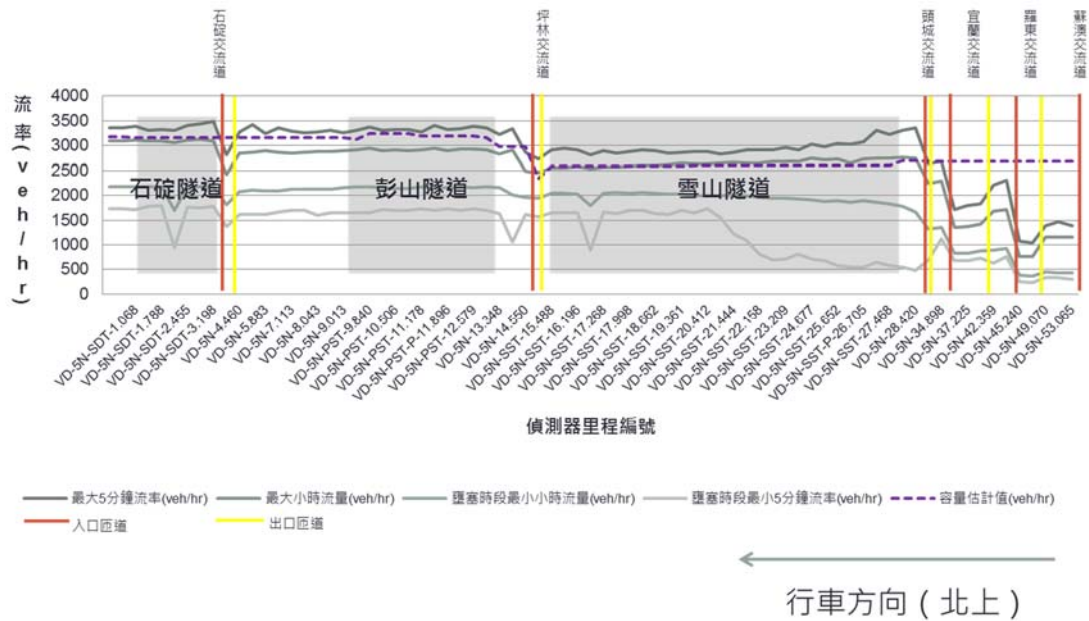


圖 3-3 國道五號北上路段全線流率變化圖

3.3 基礎構圖分析

根據上述分析可知國道五號北上一般路段與雪山隧道路段具有不同之車流巨觀特性，因此，本研究以 2011/08/07(日)12:00 至 2011/08/08(一)02:00 車輛偵測器資料，繪製國道五號北上一般路段(30.551K)、雪隧南口(28.420K)、雪隧前段(26.300K)、雪隧中段(20.412K)與雪隧後段(15.488K)等五處之車流基礎構圖，進而探討不同路段之車流巨觀特性，如圖 3-5 所示，另外，車輛偵測器位置可參考圖 3-4 所示。

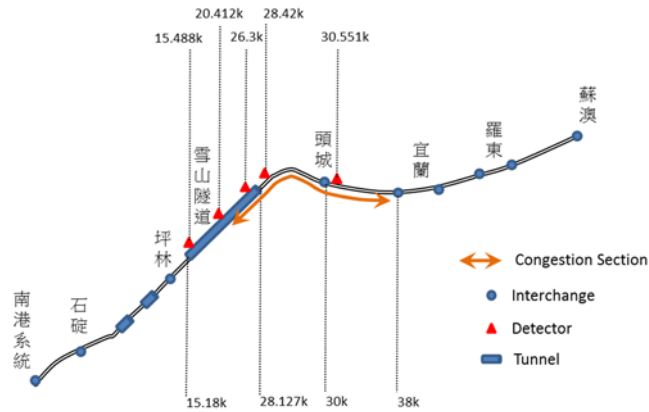
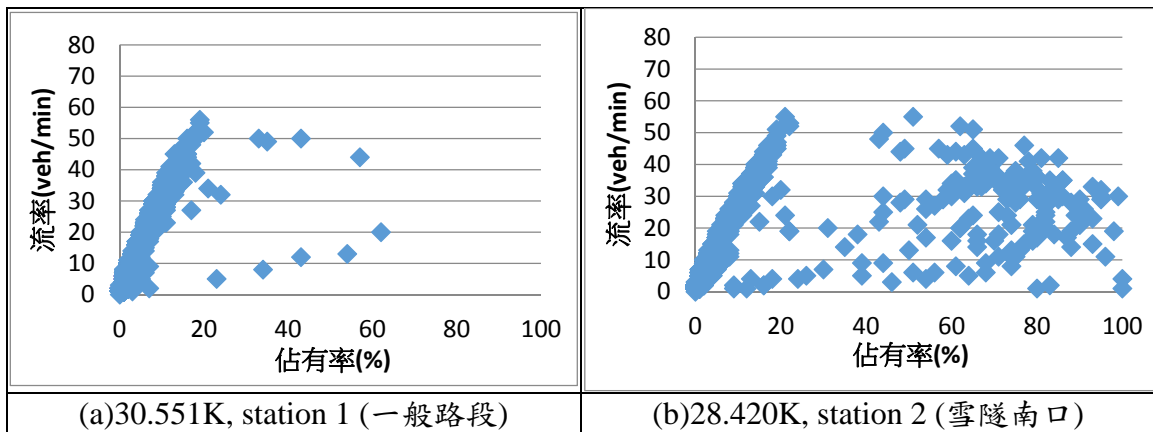


圖 3-4 基礎構圖資料蒐集點示意圖

由圖 3-5 可見國道五號一般路段(30.551K)最大通過量約 1800veh/hr/lane，臨界佔有率約 20%；雪隧南口(28.420K)最大通過量約 1650veh/hr/lane，臨界佔有率約 22%；雪隧前段和中段之最大通過量約 1800veh/hr/lane，臨界佔有率約 30%；而雪隧後段則無壅塞產生。另外，由圖 3-5 中可知雪隧南口(28.420k)在非壅塞車流與壅塞車流間有明顯不連續之現象，其佔有率約由 20%驟增至 40%，具有明顯不連續之劇變特性，在隧道前段和中段處非壅塞車流與壅塞車流則無不連續之現象。

根據上述基礎構圖分析可知，國道五號除了一般路段與雪山隧道路段車流特性不同外，雪山隧道內部依位置的不同亦有不同之車流特性。



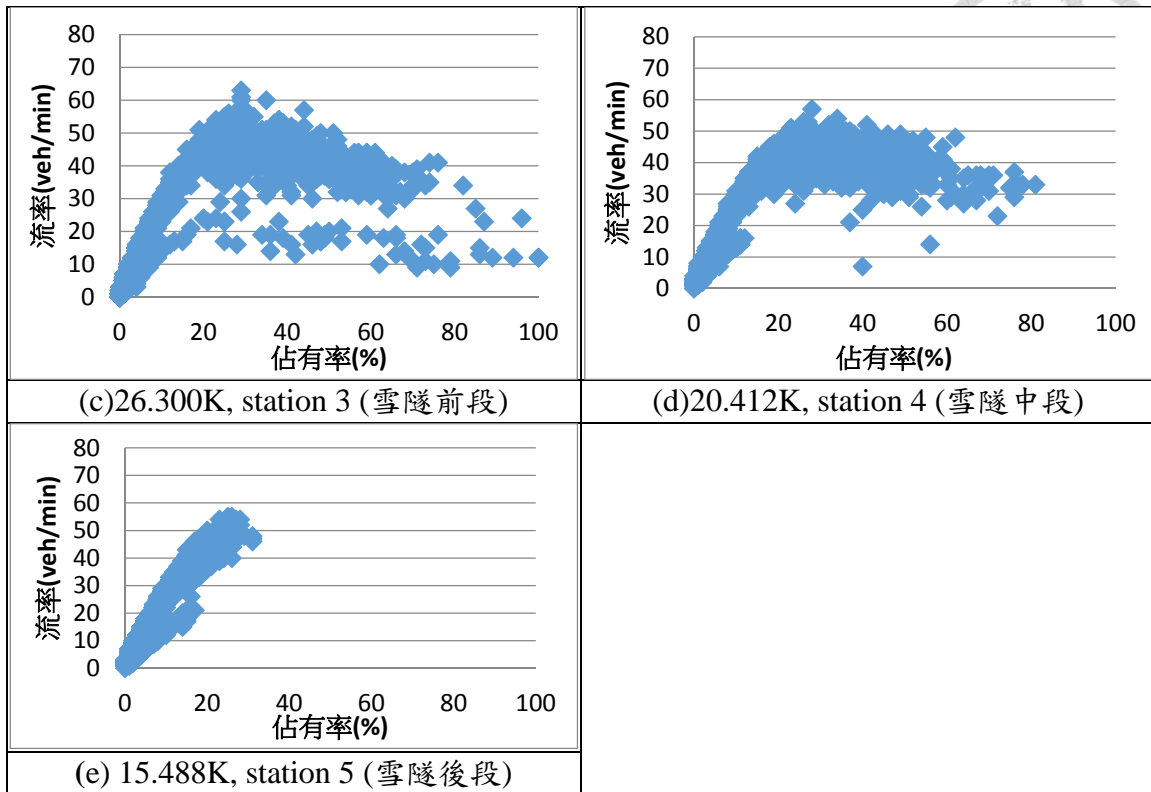


圖 3-5 不同路段流量佔有率分布圖

3.4 速率變化圖分析

本節針對國道五號雪山隧道南口及其上游之車輛偵測器資料，進行速率變化圖分析，以了解雪隧南口壅塞向上游蔓延之過程，並加以確認可變速限控制的實施頻率。由 3.1 節時空圖分析可知，雪隧南口上游最大壅塞範圍約在里程數 32.000K 處，因此，本研究以 28.420K、30.100K、32.743K 和 34.898K 四處之車輛偵測器資料，進行速率變化圖分析，如圖 3-6 所示。

圖 3-6 中的橫軸為時間，由 2011/08/07(日)12:00 至 2011/08/08(一)00:00。透過圖 3-6 可知雪隧南口之偵測器(28.420K)為最早發生壅塞之地點，約於 2011/08/07(日)13:30 即出現速率下降至 30km/hr 至 40km/hr 之情形，且速率下降情形快速發生，約在 5 分鐘內由 75km/hr 下降至 35km/hr，呈劇變現象；而其上游約 1.7 公里處之車流(30.100K)，約在 2011/08/07(日)15:00 發生壅塞，速率於 5 分鐘內由 80km/hr 下降至 20km/hr；而 30.100K 上游約 1.6 公里處之車流(32.743K)，約在 2011/08/07(日)16:10 發生壅塞情形，速率於 5 分鐘內由 90km/hr 降至 10km/hr；另外，32.743K 上游之車流(34.898K)則無壅塞產生之現象。

透過上述分析可知，雪隧南口向上游蔓延之壅塞，約在 5 分鐘內便會造成車流由非壅塞陷入壅塞，因此，為因應此處車流急速陷入壅塞之特性，本研究將可變速限控制之頻率設為 1 分鐘。換言之，此套控制系統每分鐘便會針對控制範圍內之車流特性，計算最佳之控制速率並加以實施，另外，本研究將匝道儀控之控制頻率設為 5 分鐘。

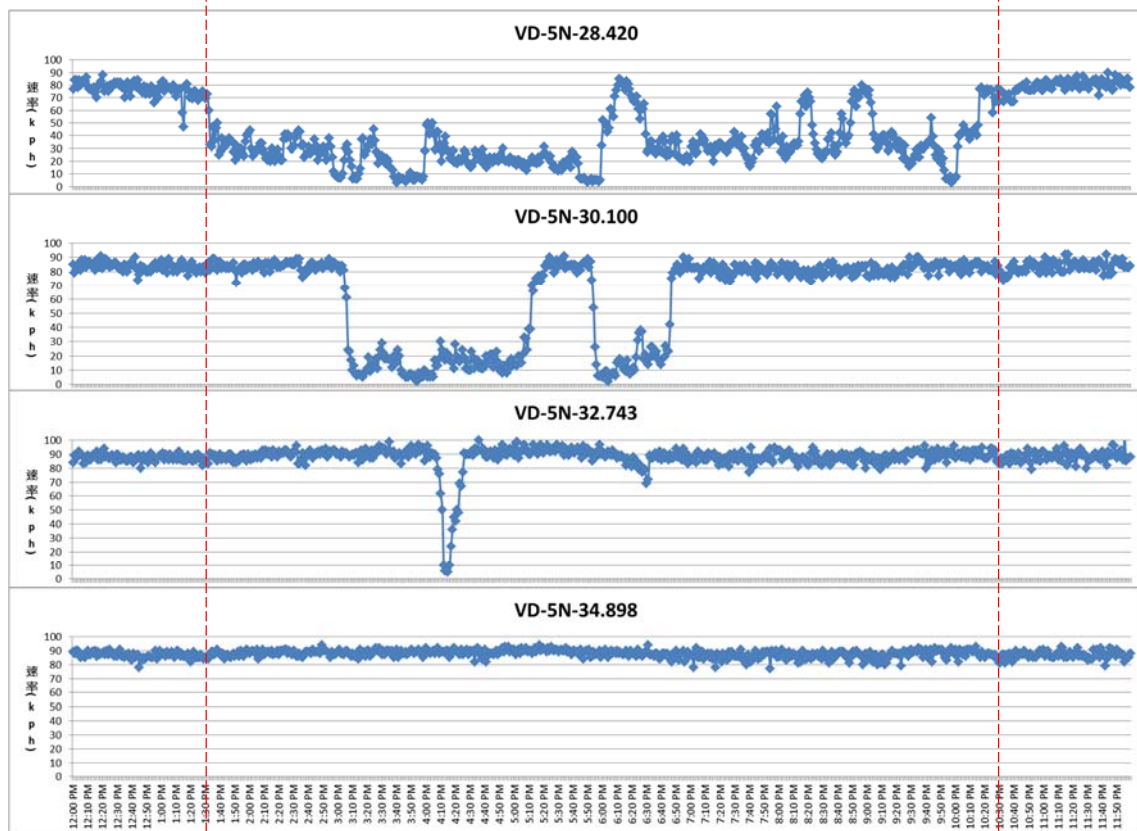


圖 3-6 速率變化分析圖

第四章 可變速限聯合匝道儀控最佳化模式

在建構最佳化模式求解控制速限及儀控率前，須先建構控制範圍內之車流模式，其目的是希望以數學方程式的形式描述控制範圍內之車流行為，其次，須建構另一組數學方程式，描述可變速限與匝道儀控對車流造成的影響，最後，在滿足上述方程式的限制下，即可透過最佳化求解演算法，計算控制時段內各控制時階的最佳儀控率和控制速限。

透過 2.4 節巨觀車流模式文獻回顧可知，二階巨觀車流模式對於車流速率變化有較多的描述，因此，在考量如何描述控制速限對於車流之影響後，本研究選用二階巨觀車流模式中的 METANET 模式作為最佳化模型中之車流模式。

4.1 METANET 模式

建構 METANET 模式之流程如圖 4-1 所示，以下將對各步驟進行詳細說明。

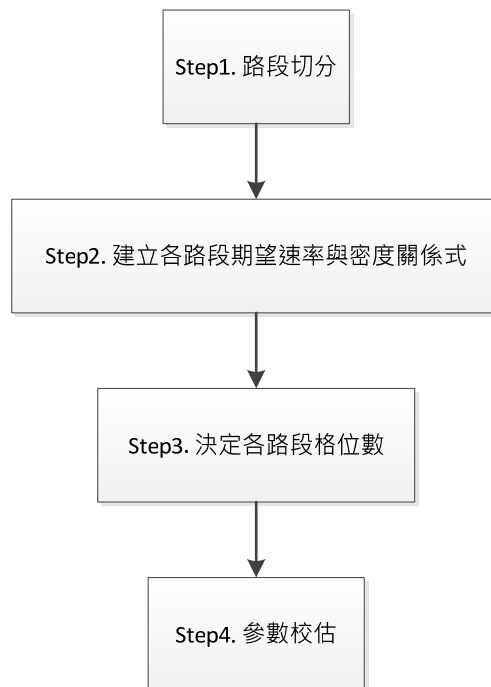


圖 4-1 METANET 模式建構流程圖



4.1.1 路段切分

路段切分是為了區分具有不同車流特性的路段，而 Papageorgiou(1990)認為當道路幾何特性發生變化時車流特性便會隨之改變，故當道路有匯合(Junction)、上匝道(On-ramp)或下匝道(Off-ramp)出現時上下游必須切分成不同路段，此法雖然看似合理，但由 3.3 節之基礎構圖分析可知，雪山隧道內部雖無出現匯合、上匝道或下匝道，其車流特性卻有明顯的不同，故若以此法作為路段切分的依據將無法有效地區分本研究範圍內之各路段，因此，本研究將利用統計分析中的群集分析法(Cluster analysis)作為路段切分之依據。

群集分析(Cluster analysis)係將資料中性質相近的資料點歸類成同一群，主要分成三個步驟，以下將詳細說明之。

步驟一：由距離矩陣(近似矩陣)找出最接近的兩個群組，並將此二個群組合併成一個新的群組。

步驟二：計算此一群組到其他群組的距離，更新距離矩陣(近似矩陣)。

步驟三：重複執行步驟一及步驟二，直到將所有資料皆分組完畢。

群集分析主要有兩大種方法，分別為階層族群法(Hierarchical clustering method)及非階層族群法(Nonhierarchical clustering method)，其中階層族群法又分兩種，其一為凝聚法(Agglomerative method)，另外則為分裂法(Partitioning clustering method)。凝聚法係將每一個資料點視為一個各別族群，找到最近的族群並合併之，由 n 個族群逐步合併，最終成為一個族群；分裂法則先將所有的資料點視為同一族群，逐步將資料點分成 n 個族群。非階層族群法主要為 K-Means Method，其主要的特色為於分群之前，必須先指定分群的數量。本研究視研究範圍內各車輛偵測器為各別資料點，將相同車流特性的路段合併，故採用階層族群法中的凝聚法。凝聚法中又有幾種分群方法，簡單連結法(Single linkage method)、完全連結法(Complete linkage method)、平均連結法(Average linkage method)及華德最小變異法(Ward's minimum variance method)，不同的分群方法主要差別為距離矩陣的計算方法不同，本研究採用華德最小變異法。

本研究首先將 2013/03/17(日)之車輛偵測器流量和速率資料進行整理並以公路

容量手冊中之公式將佔有率資料轉換為密度後，於 SPSS 統計軟體分析進行群集分析的求解作業，求解結果如圖 4-2 所示。

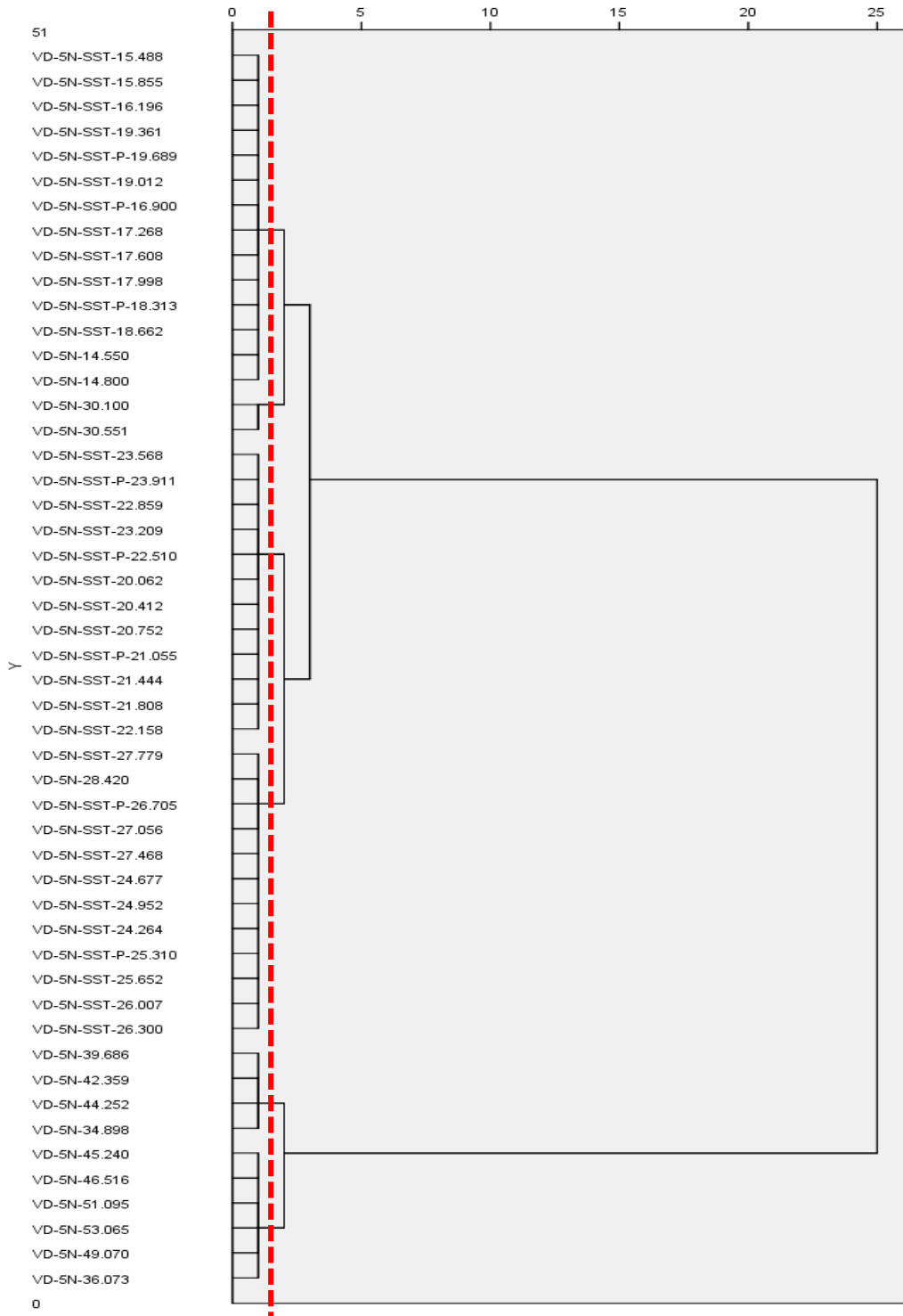


圖 4-2 SPSS 群集分析結果

本研究依車流特性將蘇澳上匝道(53.050K)至坪林下匝道(14.550K)切分成六個

不同路段，其示意圖如圖 4-3 所示。

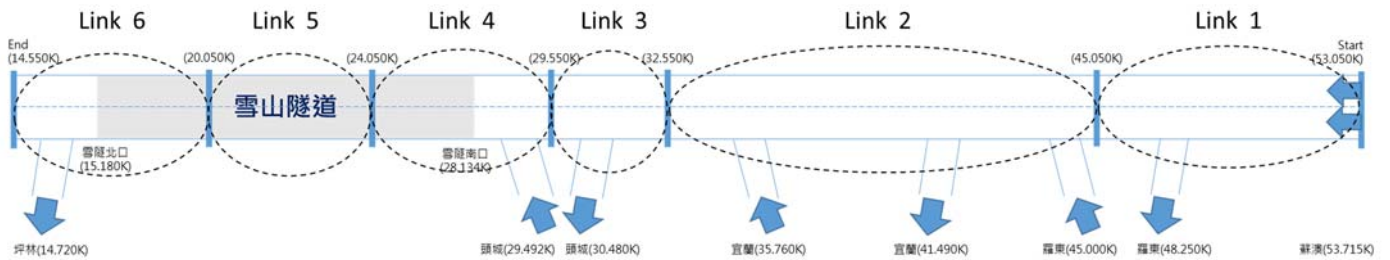


圖 4-3 METANET 車流模式路段切分示意圖

4.1.2 建立各路段期望速率與密度關係式

透過群集分析將蘇澳上匝道至坪林下匝道切分成六個不同的路段後，須以期望速率和密度關係式描述各路段間差異對車流造成的影響，而在 METANET 模式中是將期望速率和密度假設為指數關係，如式(2.59)所示，藉由校估式(2.59)中各路段的臨界密度 ρ^c 、自由車流速率 v^f 和 β 後即可將式(2.59)代入 METANET 模式中進行應用。

本研究首先將 2013/03/17(日)各車輛偵測器佔有率資料以公路容量手冊中之公式轉換為密度，接著，對每支車輛偵測器進行式(2.59)之校估，其校估結果如附錄二所示，最後，選取該路段中具有最高 R^2 的車輛偵測器作為該路段臨界密度 ρ^c 、自由車流速率 v^f 和 β 的校估結果，然而，由於路段 1 和路段 2 均無壅塞產生故其參數校估結果皆不理想 ($R^2 < 0.5$)，因此，本研究將路段 1 和路段 2 之參數校估結果以路段 3 取代，而各路段的期望速率與密度關係式如表 4-1 所示。

表 4-1 各路段期望速率-密度關係式

	期望速率-密度關係式
Link1	$V = 87.11 \cdot e^{-\frac{1}{2}(\rho/82.78)^2}$
Link2	$V = 87.11 \cdot e^{-\frac{1}{2}(\rho/82.78)^2}$
Link3	$V = 87.11 \cdot e^{-\frac{1}{2}(\rho/82.78)^2}$
Link4	$V = 91.24 \cdot e^{-\frac{1}{1.715}(\rho/75.57)^{1.715}}$
Link5	$V = 95.19 \cdot e^{-\frac{1}{1.349}(\rho/67.15)^{1.349}}$
Link6	$V = 92.31 \cdot e^{-\frac{1}{1.419}(\rho/67.73)^{1.419}}$

4.1.3 決定各路段格位數

在完成各路段的期望數率與密度關係式校估後，需將各路段切分成數個格位以便進行 METANET 模式的模擬，而各路段之格位長度須滿足 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)法則，如式(2.42)所示，Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)法則為有限差分(Finite differences)的一種方式，其可確保車輛在單位時間內的最大行駛距離不會超過格位長度，使離散型的 METANET 模式保有連續型模式之特性。

本研究所使用之 METANET 模式單位時階長度(T)為 20 秒，將 4.1.2 節校估出之各路段自由車流速率帶入式(2.42)中後，即可求得各路段格位長度的最小限制，如表 4-2 所示。

表 4-2 各路段格位最小長度限制

	格位長度限制
Link1	$\Delta_1 \geq \left(\frac{20}{3600}\right) \times 87.11 = 484(m)$
Link2	$\Delta_2 \geq \left(\frac{20}{3600}\right) \times 87.11 = 484(m)$
Link3	$\Delta_3 \geq \left(\frac{20}{3600}\right) \times 87.11 = 484(m)$
Link4	$\Delta_4 \geq \left(\frac{20}{3600}\right) \times 91.24 = 507(m)$
Link5	$\Delta_5 \geq \left(\frac{20}{3600}\right) \times 95.19 = 529(m)$
Link6	$\Delta_6 \geq \left(\frac{20}{3600}\right) \times 92.31 = 513(m)$

透過表 4-2 可知路段 1、路段 2 和路段 3 之格位長度最少須為 484 公尺，路段 4 之格位長度最少須為 507 公尺，路段 5 之格位長度最少須為 529 公尺，路段 6 之格位長度最少須為 513 公尺；然而，為了模式計算上的方便，本研究將各路段的格位長度均設為 500 公尺，並依此長度將路段 1 切分成 16 個格位、路段 2 切分成 25 個格位、路段 3 切分成 6 個格位、路段 4 切分成 11 個格位、路段 5 切分成 8 個格位、路段 6 切分成 11 個格位，如圖 4-4 所示，其中，橘色格位為下匝道所在之格位、紅色格位為上匝道所在之格位、藍色邊框格位為普通格位、黑色邊框格位為偵測器所在之格位。

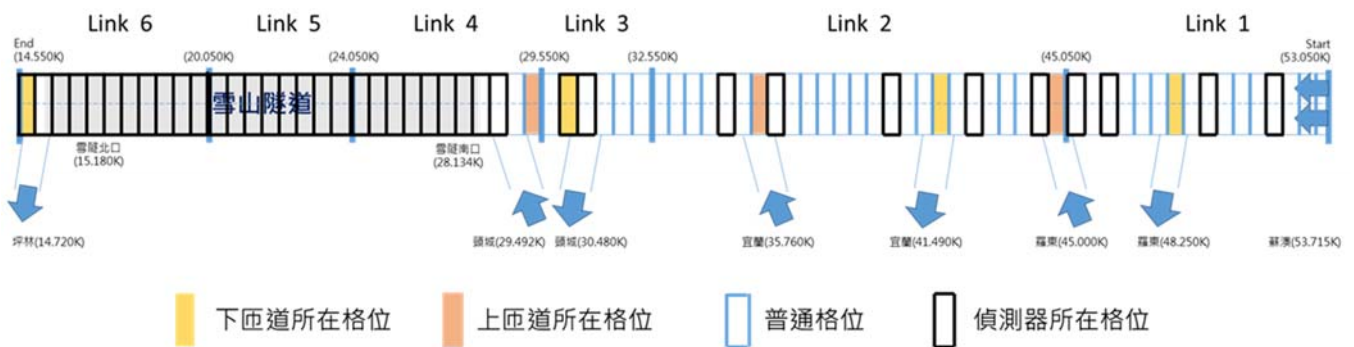


圖 4-4 METANET 車流模式各路段和格位切分示意圖



4.1.4 參數校估

除了道路幾何的改變會影響車流特性，駕駛者行為的改變亦會產生不同的車流特性，因此，參數校估的目的是為了確保車流模式能反映出研究範圍內之駕駛者行為；而由於本研究範圍無車道縮減發生，故在校估 METANET 模式時僅需考慮 α 、 τ 、 ζ 、 λ 、 κ 、 δ^{on} 和 δ^{off} 等七個參數，此七個參數為 METANET 模式中的全域參數(Global parameter)，其數值並不會因路段的不同而有所不同。然而，透過文獻回顧可知參數 κ 的設定是為了避免預測項在密度為 0 時趨於無限大，因此參數 κ 的值不具有任何物理意義，另外，任何 κ 值對於預測項之影響皆可藉由調整參數 λ 、 δ^{on} 或 δ^{off} 進行補償(Compensated)，故 Papageorgiou(1988)將參數 κ 的值訂為 40(veh/hr)。

如上所述參數校估的目的是為了使模式能反映出真實車流的特性，因此，我們可將參數校估視為最佳化的過程，所需校估的參數組為控制變數(Decision variable)，而目標則是希望能最小化真實車流狀態與車流模式狀態的差異，故本研究將 METANET 模式的參數校估以最佳化模式表示，如下所示。

Sets

J：路段編號的集合。

I_j ， $\forall j \in \mathbf{J}$ ：在路段 j 中所有格位的編號集合。

CELL：格位的集合。

DCELL：車輛偵測器所在格位的集合； $\mathbf{DCELL} \subseteq \mathbf{CELL}$ 。

UPCELL：上游邊界虛擬格位的集合。

LOWCELL：下游邊界虛擬格位的集合。

K：METANET 模式時階的集合。

C：參數校估時階的集合； $\mathbf{C} \subseteq \mathbf{K}$ 。

Parameters

$r_{i,j}^d(k)$ ， $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$ ：在時階 k ，格位 (i, j) 中上匝道車輛偵測器測得流率

，若該格位不含上匝道則其值為 0。

$s_{i,j}^d(k)$ ， $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$ ：在時階 k ，格位 (i, j) 中下匝道車輛偵測器測得流率

，若該格位不含下匝道則其值為 0。



- $Q_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{DCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 中車輛偵測器測得流率。
- $v_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{DCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 中車輛偵測器測得速率。
- $upq_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{UPCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 上游邊界車輛偵測器測得流率。
- $upv_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{UPCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 上游邊界車輛偵測器測得速率。
- $lowq_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{LOWCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 下游邊界車輛偵測器測得流率。
- $low\rho_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{LOWCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 下游邊界車輛偵測器測得密度。
- v_j^f , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之自由車流速率。
- ρ_j^c , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之臨界密度。
- Δ_j , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之格位長度。
- β_j , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 期望速率-密度關係式之參數。
- T : METANET 模式單位時階之長度。

Variables

- $V_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 期望速率。
- $Q_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 流率。
- $\rho_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 密度。
- $v_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 速率。
- $q_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由格位 (i, j) 進入格位 $(i+1, j)$ 流率。
- $R_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由上匝道進入格位 (i, j) 流率。
- $S_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由下匝道離開格位 (i, j) 流率。
- α 、 τ 、 ζ 、 v 、 δ^{on} 、 δ^{off} : METANET 模式參數。

Objective Function

$$\min \sum_{k \in \mathbf{C}} \sum_{i,j \in \mathbf{DCELL}} \left[v_{i,j}^d(k) - v_{i,j}(k) \right]^2 + \sum_{k \in \mathbf{C}} \sum_{i,j \in \mathbf{DCELL}} \left[Q_{i,j}^d(k) - Q_{i,j}(k) \right]^2 \quad (4.1)$$

Constraints(模擬時間內虛擬格位狀態)

$$q_{i,j}(k) = upq_{i,j}^d(k) , \forall i, j \in \mathbf{UPCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.2)$$



$$v_{i,j}(k) = upv_{i,j}^d(k) , \forall i, j \in \mathbf{UPCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.3)$$

$$Q_{i,j}(k) = lowq_{i,j}^d(k) , \forall i, j \in \mathbf{LOWCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.4)$$

$$\rho_{i,j}(k) = low\rho_{i,j}^d(k) , \forall i, j \in \mathbf{LOWCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.5)$$

Constraints(模擬時間內上下匝道流率)

$$R_{i,j}(k) = r_{i,j}^d(k) , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.6)$$

$$S_{i,j}(k) = s_{i,j}^d(k) , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.7)$$

Constraints(格位初始狀態)

$$\rho_{i,j}(1) = 0 , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \quad (4.8)$$

$$v_{i,j}(1) = 0 , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \quad (4.9)$$

Constraints(模擬過程)

$$Q_{i,j}(k) = \rho_{i,j}(k) \cdot v_{i,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.10)$$

$$q_{i,j}(k) = \alpha \cdot Q_{i,j}(k) + (1 - \alpha) \cdot Q_{i+1,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.11)$$

$$\rho_{i,j}(k+1) = \rho_{i,j}(k) + \frac{T}{\Delta_j} \left[q_{i-1,j}(k) - q_{i,j}(k) + R_{i,j}(k) - S_{i,j}(k) \right] , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.12)$$

$$v_{i,j}(k+1) = v_{i,j}(k) + \frac{T}{\tau} \left[V_{i,j}(k) - v_{i,j}(k) \right] + \frac{T \cdot \zeta}{\Delta_j} v_{i,j}(k) \left[v_{i-1,j}(k) - v_{i,j}(k) \right] - \frac{v \cdot T \left[\rho_{i+1,j}(k) - \rho_{i,j}(k) \right]}{\tau \cdot \Delta_j \left[\rho_{i,j}(k) + 40 \right]} - \frac{\delta^{on} T \cdot v_{i,j}(k) \cdot R_{i,j}(k)}{\Delta_j \left[\rho_{i,j}(k) + 40 \right]} - \frac{\delta^{off} T \cdot v_{i,j}(k) \cdot S_{i,j}(k)}{\Delta_j \left[\rho_{i,j}(k) + 40 \right]} , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.13)$$

$$V_{i,j}(k) = v_j^f \cdot \exp \left[-\frac{1}{\beta_j} \left(\frac{\rho_{i,j}(k)}{\rho_j^c} \right)^{\beta_j} \right] , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.14)$$

$$\text{IF } \rho_{i,j}(k) \leq 0 \text{ THEN } \rho_{i,j}(k) = 0 , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.15)$$

$$\text{IF } v_{i,j}(k) \leq 0 \text{ THEN } v_{i,j}(k) = 0 , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.16)$$

本研究選擇 2013/03/17(日) 12 點至 14 點車流由非壅塞陷入壅塞的時段作為模式參數校估的時段，並將模式的單位時階長度(T)設為 20 秒，故兩小時的校估時段共可分為 360 個時階，不過由於車輛偵測器的資料為每分鐘一筆，因此，本研究

假設車輛偵測器每分鐘的流量資料符合均勻分配，並將之除以 3 換算成 20 秒之時間單位，然而，在利用 METANET 模式進行模擬時需得知各格位的初始($k=1$)速率和密度，方能透過模式的方程式進行模擬，但在實際應用上並非每個格位均佈有車輛偵測器，故我們無法得知所有格位的初始速率和密度，因此，本研究以校估時段前 30 分鐘(11 點 30 分至 12 點)作為暖機時間，並將各格位的初始密度和速率設為 0，如式(4.8)和式(4.9)所示，此意味著在 11 點 30 分的時候本研究範圍內並無任何車輛，接著，透過式(4.2)和式(4.6)的計算車輛將會由最上游邊界和上匝道處不斷進入本研究範圍中，但透過式(4.4)和式(4.7)的計算車輛亦會由最下游邊界和下匝道處不斷離開，此將可能造成該格位無車輛存在但卻有車輛離開之情形，此情形不但符合常理更會使模式出現嚴重的錯誤(例：密度小於 0 速率或小於 0)，因此，本研究透過式(4.15)和式(4.16)的判斷避免了此情況的發生，經過暖機時間的計算後即可得到 12 點($k=91$)所有格位的速率和密度狀態，而為了避免暖機時段造成參數校估的偏誤，故本研究在目標式中僅考慮參數校估時段($k=91 \sim 450$)模式模擬結果與偵測器資料間的差異，METANET 模式參數校估最佳化模式的詳細說明如下：

目標式(4.1)：最小化參數校估時段($k=91 \sim 450$)，METANET 模式與車輛偵測器之流量、速率差異平方和。

上游邊界限制式(4.2)、(4.3)：METANET 模式需得知上游邊界虛擬格位的速率($v_{0,1}$)和進入流率($q_{0,1}$)方能計算最上游格位的速率($v_{1,1}$)和密度($\rho_{1,1}$)，此限制式將上游邊界偵測器測得的速率($upv_{i,j}^d$)和流率($upq_{i,j}^d$)代入 $v_{0,1}$ 和 $q_{0,1}$ 中。

下游邊界限制式(4.4)、(4.5)：METANET 模式需得知下游邊界虛擬格位的密度($\rho_{12,6}$)和流率($Q_{12,6}$)方能計算最下游格位的速率($v_{11,6}$)及離開流率($q_{11,6}$)，此限制式將下游邊界偵測器測得的密度($low\rho_{i,j}^d$)和流率($lowq_{i,j}^d$)代入 $\rho_{12,6}$ 和 $Q_{12,6}$ 中。

上、下匝道限制式(4.6)、(4.7)：經由上匝道進入主線之車流流率等於上匝道車輛偵測器測得之流率，經由下匝道離開主線之車流流率等於下匝道車輛偵測器測得之流率。

格位初始值限制式(4.8)、(4.9)：將所有格位之初始密度和速率設為 0 以表示在暖機時段的一開始研究範圍內並無存在任何車輛。

METANET 模式限制式(4.10)~(4.16)：所有格位需遵守連續定理；格位間的流

率須遵守 METANET 模式的推進流率方程式；所有格位的密度需遵守 METANET 模式的密度變化方程式；所有格位的速率需遵守 METANET 模式的速率變化方程式；所有格位的期望速率須遵守 METANET 模式的期望速率方程式；若無車輛存在但卻有車輛離開，則藉由 METANET 模式方程式的運算，該格位之密度和速率將小於 0，但實際上該格位並無存在任何車輛，故所有格位均需遵守式(4.15)和式(4.16)以避免造成模式錯誤(特別是在暖機時段)。

本研究之參數校估最佳化模式為非線性模式(Nonlinear model)，故需使用啟發式演算法方能對此問題進行求解，而本研究使用之啟發式演算法為基因演算法，流程如圖 4-5 所示。

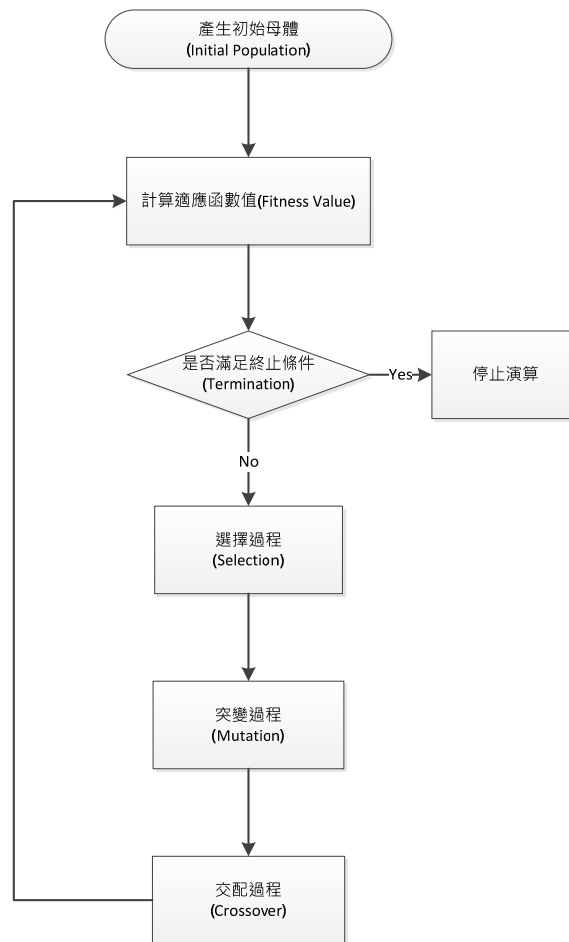


圖 4-5 基因演算法流程圖

步驟一(產生初始母體)：在基因演算法中，母體是由數個染色體所組成的，而染色體又是由數個基因所構成。以本研究為例，所需校估的參數共有 6 個，故每個參數為 1 個基因，而此 6 個參數(基因)的組合稱為染色體。本研究將初始母體大小設為 20，亦即母體中含有 20 組染色體，而其中一組染色體為 Papageorgiou[79]所校估之參數組，剩餘的 19 組染色體則由亂數產生。

步驟二(計算適應函數值)：在產生母體後，需計算母體中各組染色體之適應函數值，而本研究之適應函數亦即最佳化模式中的目標式。

步驟三(是否滿足終止條件)：在基因演算法中需設立終止條件，若滿足終止條件則可視演算法已搜尋到問題的最佳解(參數組)，而終止條件的設定取決於計算時間以及最佳解的精確程度。越寬鬆的終止條件可減少計算時間，然而，最佳解的精確度將降低，反之亦然。本研究所設定的終止條件為：(1)迭代次數達到 500 次、(2)最佳適應函數值經過 200 次迭代無變化，若符合其中之一即是滿足終止條件。

步驟四(複製過程)：若無滿足演算終止條件，基因演算法將會進入複製過程，此步驟的目的為產生新一世代的母體；為使此演算法能往較佳的方向進行搜尋求解，本研究以一般基因演算法複製過程中常見的輪盤法進行染色體(參數組)的複製，其是利用各組染色體對應之適應函數分割輪盤上的面積，若該組染色體(參數組)具有較佳之適應函數值，則在輪盤上佔有的面積也越大，因此被挑選至新一世代母體中的機率也相對地增加。

步驟五(交配過程)：交配過程是將複製的染色體(參數組)進行兩兩交配，以產生另外兩組新的染色體(參數組)，其常見的交配型式包含：單點交配、兩點交配和遮罩交配；而本研究所使用的交配型式為兩點交配，其是在複製的染色體(參數組)中隨機地取兩個基因(參數)進行交換。

步驟六(突變過程)：突變過程為隨機地選取一組或多組染色體(參數組)並且隨機地選擇其中一個基因(參數)進行突變以改變其數值，突變的目的為降低基因演算法陷入區域最佳解(Local optimum)的機率，而突變發生的機率可由突變率所控制，一般基因演算法之突變率大多設定在 0.05~0.1 之間；而本研究所設定之突變率為 0.08。

利用基因演算法求解所得的 METANET 模式最佳參數組如表 4-3 所示：

表 4-3 METANET 模式最佳參數組

	α	τ	ζ	ν	δ_{on}	δ_{off}	目標式
數值	1	0.62	0.15	2.4	0.08	0	781135.58

本研究採用平均絕對誤差百分比(Mean absolute percentage error, MAPE)作為參數校估結果的評估指標，其計算公式如式(4.17)所示，由於 MAPE 不受測量值與預估值單位與大小之影響，故能夠客觀的獲得估計值與實際值間之差異程度，而 MAPE 之相關評估標準如表 4-4 所示。

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (4.17)$$

其中， N ：評估樣本數量；

A_t ：第 t 個評估樣本之實際值；

F ：第 t 個評估樣本之估計值。

表 4-4 MAPE 評估標準

MAPE(%)	說明
<10	高準確的預測
10~20	優良的預測
20~50	合理的預測
>50	不準確的預測

透過圖 4-6 可知雪山隧道南口以北之流量 MAPE 值均在 10% 左右，為優良之校估結果，然而，流量 MAPE 值由雪隧隧道南口向南逐漸增加，在 45.240K 處達到最大值約 30%，探究其原因可發現國道五號北上路段之車輛旅次目的地大多為台北都會區，路段之流量將隨著通過的上匝道數而逐漸增加，此現象將造成上游路段(蘇澳上匝道至頭城上匝道間)之流量非常稀少，每分鐘通過之車輛數幾乎皆於 20 輛以內，因此造成誤差值增大之原因。

透過圖 4-7 可知速率 MAPE 值大多介於 5%~20%，屬於優良之校估結果，然而，在雪山隧道中段(21.808K)和雪山隧道南口前(30.010K)速率 MAPE 值卻突然驟增，其值分別為 25%和 55%，探究其原因可發現雪山隧道南口和雪山隧道中段處車流皆有急遽陷入壅塞的情形發生，換言之，本研究校估之參數雖可模擬車流由非壅塞陷入壅塞，但卻無法表現出雪山隧道南口及雪山隧道中段車流速率急遽下降之現象，因此，本研究將對 METANET 模式提出修正，以期能描述出雪山隧道車流急遽陷入壅塞之現象。

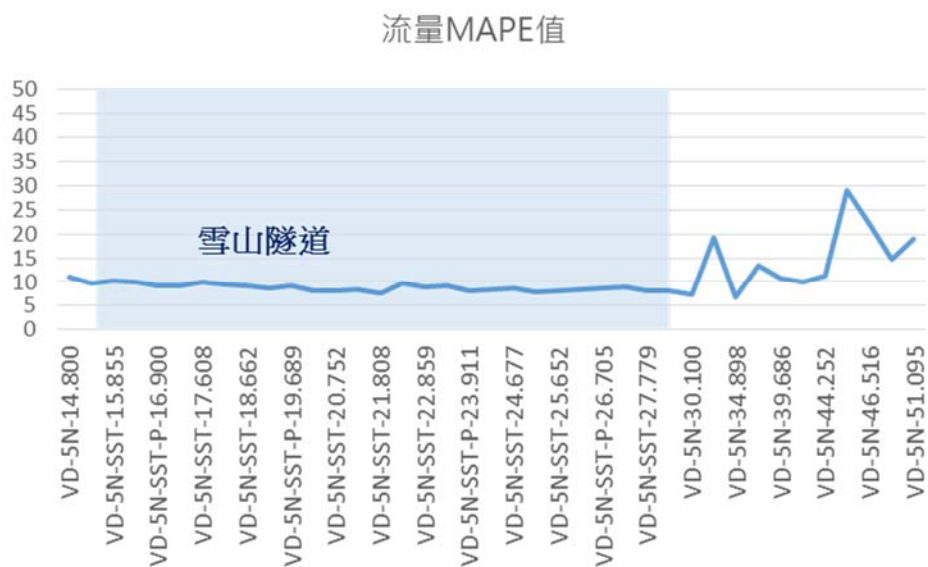


圖 4-6 METANET 模式參數校估之流量 MAPE 圖



圖 4-7 METANET 模式參數校估之速率 MAPE 圖



4.2 METANET 長隧道模式

由於 METANET 模式無法描述雪隧南口及雪隧中段車流速率急遽下降之特性，故本研究以 METANET 模式為基礎加以修正，發展適用於國道五號雪山隧道之車流模式，本研究將此模式稱之為 METANET 長隧道模式。

藉由 3.2 節容量分析可知，雪隧南口之容量低於上游一般路段的容量，而雪隧中段之容量亦低於雪隧南口的容量，因此，本研究修正 METANET 模式中描述車道縮減之方程式，如式(2.61)所示，以臨界流率取代車道縮減方程式中的車道數，並希望透過此修正表現出雪隧南口與雪隧中段因容量降低對於速率造成之影響；此外，本研究認為 METANET 模式中的全域參數 α 、 τ 、 ζ 、 ι 、 δ^{on} 和 δ^{off} 數值，可因路段的不同而改變，故本研究修正原始 METANET 模式之參數設定，使模式中之參數數值可依路段變化而有所不同。

4.2.1 參數校估

METANET 長隧道模式參數校估之最佳化模式如下所示，其中， α_j 、 τ_j 、 ζ_j 、 v_j 、 δ_j^{on} 、 δ_j^{off} 和 ϕ_j 為模式參數，其數值可依路段的不同而有所不同，另外，本研究以參數 $\omega_{i,j}$ 判斷該格位是否為容量縮減格位，並透過式(4.30)描述容量縮減對於車流速率造成的影響。

Sets

J：路段編號的集合。

I_j， $\forall j \in \mathbf{J}$ ：在路段 j 中所有格位的編號集合。

CELL：格位的集合。

DCELL：車輛偵測器所在格位的集合；**DCELL** \subseteq **CELL**。

CACELL：容量縮減格位的集合；**CACELL** \subseteq **CELL**。

UPCELL：上游邊界虛擬格位的集合。

LOWCELL：下游邊界虛擬格位的集合。

K：METANET 長隧道模式時階的集合。



\mathbf{C} : 參數校估時階的集合； $\mathbf{C} \subseteq \mathbf{K}$ 。

Parameters

$r_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 中上匝道車輛偵測器測得流率
, 若該格位不含上匝道則其值為 0。

$s_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 中下匝道車輛偵測器測得流率
, 若該格位不含下匝道則其值為 0。

$Q_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{DCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 中車輛偵測器測得流率。

$v_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{DCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 中車輛偵測器測得速率。

$upq_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{UPCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 上游邊界車輛偵測器測得流率。

$upv_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{UPCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 上游邊界車輛偵測器測得速率。

$lowq_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{LOWCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 下游邊界車輛偵測器測得流率。

$low\rho_{i,j}^d(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{LOWCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 下游邊界車輛偵測器測得密度。

v_j^f , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之自由車流速率。

ρ_j^c , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之臨界密度。

$Q_{i,j}^c$, $\forall i, j \in \mathbf{CACELL}$: 容量縮減格位 (i, j) 之臨界流率。

$\omega_{i,j}$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$: 指標參數, $\begin{cases} 1 & \text{格位}(i, j) \text{為容量縮減格位} \\ 0 & \text{格位}(i, j) \text{非容量縮減格位} \end{cases}$

Δ_j , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之格位長度。

β_j , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 期望速率-密度關係式之參數。

T : METANET 長隧道模式單位時階之長度。

Variables

$V_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 期望速率。

$Q_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 流率。

$\rho_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 密度。

$v_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 速率。

$q_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由格位 (i, j) 進入

格位 $(i+1, j)$ 流率。

$R_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由上匝道進入格位 (i, j) 流率。

$S_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由下匝道離開格位 (i, j) 流率。

α_j 、 τ_j 、 ζ_j 、 v_j 、 δ_j^{on} 、 δ_j^{off} 、 ϕ_j : 路段 j 之 METANET 長隧道模式參數。



Objective Function

$$\min \sum_{k \in \mathbf{C}} \sum_{i, j \in \mathbf{DCELL}} \left[v_{i,j}^d(k) - v_{i,j}(k) \right]^2 + \sum_{k \in \mathbf{C}} \sum_{i, j \in \mathbf{DCELL}} \left[Q_{i,j}^d k - Q_{i,j} k \right]^2 \quad (4.18)$$

Constraints(模擬時間內虛擬格位狀態)

$$q_{i,j}(k) = up q_{i,j}^d(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{UPCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.19)$$

$$v_{i,j}(k) = up v_{i,j}^d(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{UPCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.20)$$

$$Q_{i,j}(k) = low q_{i,j}^d(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{LOWCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.21)$$

$$\rho_{i,j}(k) = low \rho_{i,j}^d(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{LOWCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.22)$$

Constraints(模擬時間內上下匝道流率)

$$R_{i,j}(k) = r_{i,j}^d(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.23)$$

$$S_{i,j}(k) = s_{i,j}^d(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.24)$$

Constraints(格位初始狀態)

$$\rho_{i,j}(1) = 0, \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \quad (4.25)$$

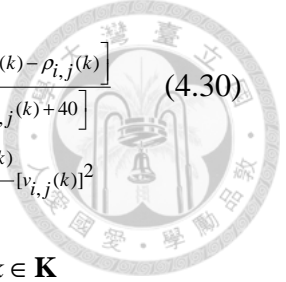
$$v_{i,j}(1) = 0, \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \quad (4.26)$$

Constraints(模擬過程)

$$Q_{i,j}(k) = \rho_{i,j}(k) \cdot v_{i,j}(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.27)$$

$$q_{i,j}(k) = \alpha_j \cdot Q_{i,j}(k) + (1 - \alpha_j) \cdot Q_{i+1,j}(k), \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.28)$$

$$\rho_{i,j}(k+1) = \rho_{i,j}(k) + \frac{T}{\Delta_j} \left[q_{i-1,j}(k) - q_{i,j}(k) + R_{i,j}(k) - S_{i,j}(k) \right] \quad (4.29)$$



$$v_{i,j}(k+1) = v_{i,j}(k) + \frac{T}{\tau_j} [V_{i,j}(k) - v_{i,j}(k)] + \frac{T \cdot \zeta_j}{\Delta_j} v_{i,j}(k) [v_{i-1,j}(k) - v_{i,j}(k)] - \frac{v_j \cdot T [\rho_{i+1,j}(k) - \rho_{i,j}(k)]}{\tau_j \cdot \Delta_j [\rho_{i,j}(k) + 40]} \quad (4.30)$$

$$- \frac{\delta_j^{on} T \cdot v_{i,j}(k) \cdot R_{i,j}(k)}{\Delta_j [\rho_{i,j}(k) + 40]} - \frac{\delta_j^{off} T \cdot v_{i,j}(k) \cdot S_{i,j}(k)}{\Delta_j [\rho_{i,j}(k) + 40]} - \omega_{i,j} \times \frac{\phi_j T (Q_{i-1,j}^c - Q_{i,j}^c) Q_{i,j}(k)}{\Delta_j \cdot Q_{i-1,j}^c \cdot Q_j^c} [v_{i,j}(k)]^2$$

, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$

$$V_{i,j}(k) = v_j^f \cdot \exp \left[-\frac{1}{\beta_j} \left(\frac{\rho_{i,j}(k)}{\rho_j^c} \right)^{\beta_j} \right], \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.31)$$

$$\text{IF } \rho_{i,j}(k) \leq 0 \text{ THEN } \rho_{i,j}(k) = 0, \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.32)$$

$$\text{IF } v_{i,j}(k) \leq 0 \text{ THEN } v_{i,j}(k) = 0, \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.33)$$

METANET 長隧道模式參數校估時段與 METANET 模式之校估時段一致，均為 2013/03/17(日) 12 點至 14 點，另外，模式中各項基礎設定(例：路段與格位切分方式、期望速率與密度關係式參數以及模式單位時階長度)亦與原始 METANET 模式相同，最後，本研究利用基因演算法求解 METANET 長隧道模式之最佳參數組，求解結果如表 4-5 所示。

表 4-5 METANET 長隧道模式最佳參數組

	α	τ	ζ	ι	δ^{on}	δ^{off}	ϕ	目標式
Link1	0.99	0.22	0.49	0.76	-	0.19	-	596229.91
Link2	0.98	0.18	0.77	0.80	0.42	0.22	-	
Link3	0.99	0.02	0.90	0.24	-	0.42	-	
Link4	0.99	0.04	0.80	27.22	0.23	-	2.00	
Link5	0.99	0.02	0.41	2.96	-	-	0.74	
Link6	0.91	0.11	0.85	0.05	-	0.06	-	

將表 4-5 之最佳參數組帶入 METANET 長隧道模式後，即可得知校估時段內各格位之速率及流率變化，接著，本研究以 MAPE 值作為衡量指標，評估模式推估值與實際值之差異，MAPE 值計算公式如式(4.17)所示。

圖 4-8 為 METANET 長隧道模式參數校估之流量 MAPE 圖，由圖中可知雪山

隧道南口以北之流量 MAPE 值均在 10% 左右，另外，由於雪隧南口上游路段(蘇澳上匝道至頭城上匝道間)之實際流量非常稀少，故依式(4.17)計算後將造成流量 MAPE 值由雪隧南口向上游漸增之現象，最大值在 45.240K 處將達到 30%，但依據 MAPE 之評估方式其仍屬於合理之校估結果。

圖 4-9 為 METANET 長隧道模式參數校估之速率 MAPE 圖，由圖中可知不論在一般路段、雪隧南口、雪隧中段或雪隧後段，其速率 MAPE 值均可維持在 5%~20% 之間，屬於優良之校估結果。

比較 METANET 模式與 METANET 長隧道模式之校估結果可知，在流量方面，兩個模式之推估能力差異不大，均可使流量 MAPE 維持在 30% 之下，屬於合理之推估結果；而在速率推估方面，由於原始的 METANET 模式無法描述雪隧南口與雪隧中段速率急速下降之特性，因此，其所推估之速率 MAPE 值在此兩處分別高達 25% 與 55%，然而，由 METANET 長隧道模式之推估結果可知，其所推估之速率 MAPE 值均可維持在 20% 以下，屬於優良之推估結果，因此，與原始 METANET 模式相比，本研究所提出之 METANET 長隧道模式對於雪隧南口與雪隧中段速率急速下降之特性，有較佳之描述能力。

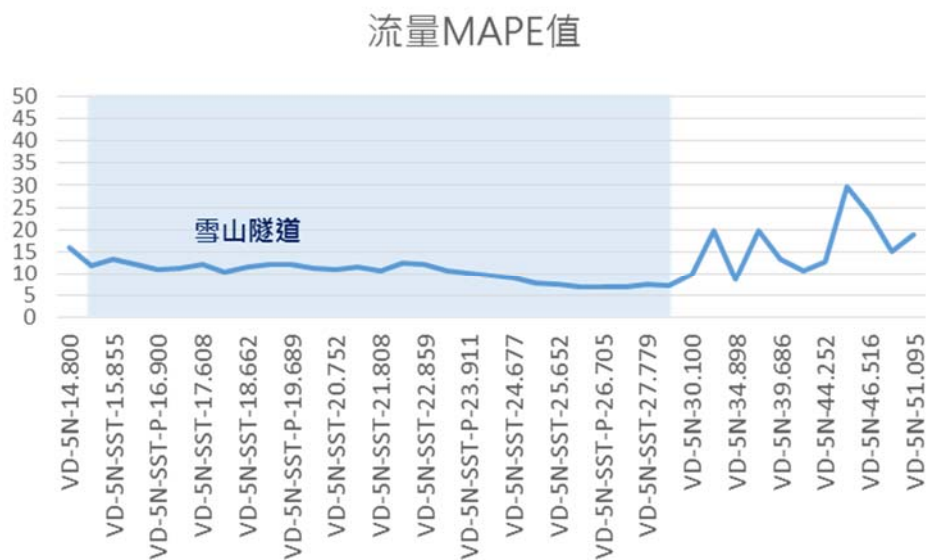


圖 4-8 METANET 長隧道模式參數校估之流量 MAPE 圖

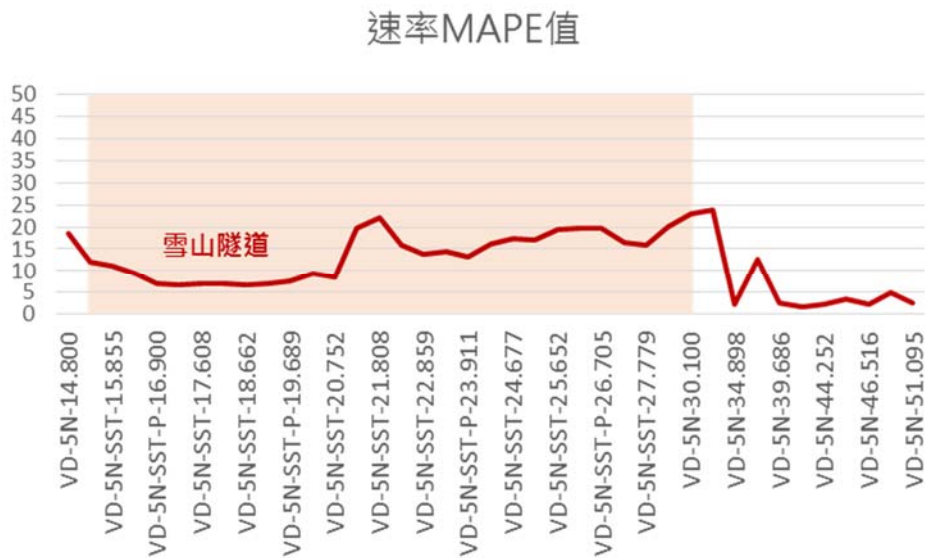


圖 4-9 METANET 長隧道模式參數校估之速率 MAPE 圖

4.3 最佳化模式

在完成控制範圍之巨觀車流模式之建構後，尚須一組數學方程式描述可變速限與匝道儀控對車流造成之影響，如此一來，即可在滿足上述方程式之限制下，以控制目的為目標，求解各時階之最佳控制速限與儀控率。

本研究假設速限為自由狀態下車流的期望速率，因此，透過式(4.48)即可將控制速限對於車流造成之影響加入模式中；另外，在匝道儀控方面，若上匝道之需求流率小於儀控率，則匝道上所有車輛均可順利進入主線，反之，若上匝道之需求流率大於儀控率，則匝道上之車輛將以匝道所顯示的儀控率進入主線，因此，透過式(4.44)和(4.45)即可將匝道儀控對於車流造成之影響加入模式中。

本研究之控制目的是避免雪山隧道陷入壅塞狀態，因此，最大化雪山隧道(目標路段)總流量為本研究最佳化模式之目標式，此目標式的設定是希望雪山隧道可保持在最大流量的狀態下運行，以提升控制路段的使用效率。

最後，本研究以式(4.51)和式(4.52)限制了速限在空間及時間上的變化幅度，避免過於劇烈地速限變化影響駕駛者的行車安全。

結合上述各方程式後，本研究提出之可變速限聯合匝道儀控最佳化模式如下所示。



Sets

J : 路段編號的集合。

I_j , $\forall j \in \mathbf{J}$: 在路段 j 中所有格位的編號集合。

CELL : 格位的集合。

CACELL : 容量縮減格位的集合 ; $\mathbf{CACELL} \subseteq \mathbf{CELL}$ 。

VSLCELL : VSL 號誌所在格位的集合 ; $\mathbf{VSLCELL} \subseteq \mathbf{CELL}$ 。

OBCELL : 目標格位的集合。 $\mathbf{OBCELL} \subseteq \mathbf{CELL}$ 。

UPCELL : 上游邊界虛擬格位的集合。

LOWCELL : 下游邊界虛擬格位的集合。

K : METANET 長隧道模式時階的集合。

Parameters

$r_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 之上匝道需求流率, 若該格位不含上匝道則其值為 0。

$s_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 之下匝道需求流率, 若該格位不含下匝道則其值為 0。

$upq_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{UPCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 上游邊界虛擬格位 (i, j) 之流率。

$upv_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{UPCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 上游邊界虛擬格位 (i, j) 之速率。

$lowq_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{LOWCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 下游邊界虛擬格位 (i, j) 之流率。

$low\rho_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{LOWCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 下游邊界虛擬格位 (i, j) 之密度。

$\rho_{i,j}^d$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 格位 (i, j) 中車輛偵測器測得之密度。

$v_{i,j}^d$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 格位 (i, j) 中車輛偵測器測得之速率。

c^{\max} : 匝道最大儀控率。

c^{\min} : 匝道最小儀控率。

vsl^{\max} : 可變速限之最高速限。

vsl^{\min} : 可變速限之最低速限。

vsl^{space} : 可變速限前後控制格位之最大速限差。

vsl^{time} : 可變速限前後控制時階之最大速限差。



v_j^f , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之自由車流速率。

ρ_j^c , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之臨界密度。

$Q_{i,j}^c$, $\forall i, j \in \mathbf{CACELL}$: 容量縮減格位 (i, j) 之臨界流率。

$\omega_{i,j}$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$: 指標變數(indicator variable) , $\begin{cases} 1 & \text{格位}(i, j) \text{ 為容量縮減格位} \\ 0 & \text{格位}(i, j) \text{ 非容量縮減格位} \end{cases}$

Δ_j , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 之格位長度。

β_j , $\forall j \in \mathbf{J}$: 路段 j 期望速率-密度關係式之參數。

T : METANET 長隧道模式單位時階之長度。

α_j 、 τ_j 、 ζ_j 、 ν_j 、 δ_j^{on} 、 δ_j^{off} 、 ϕ_j : 路段 j 之 METANET 長隧道模式參數。

Variables

$V_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 期望速率。

$Q_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 流率。

$\rho_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 密度。

$v_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 格位 (i, j) 速率。

$q_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL} \cup \mathbf{LOWELL} \cup \mathbf{UPELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由格位 (i, j) 進入
格位 $(i+1, j)$ 流率。

$R_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由上匝道進入格位 (i, j) 流率。

$S_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k , 由下匝道離開格位 (i, j) 流率。

$C_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{CELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k 時, 格位 (i, j) 之最佳儀控率
，若該格位不含上匝道則其值為 0。

$VSL_{i,j}(k)$, $\forall i, j \in \mathbf{VSLCELL}$ and $\forall k \in \mathbf{K}$: 在時階 k 時, 可變速限控制位置 (i, j) 之最佳速限。

Objective Function

$$\max \sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{i, j \in \mathbf{OBCELL}} Q_{i,j}(k) \quad (4.34)$$

Constraints(模擬時間內虛擬格位狀態)

$$q_{i,j}(k) = upq_{i,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{UPCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.35)$$



$$v_{i,j}(k) = upv_{i,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{UPCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.36)$$

$$Q_{i,j}(k) = lowq_{i,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{LOWCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.37)$$

$$\rho_{i,j}(k) = low\rho_{i,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{LOWCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.38)$$

Constraints(模擬時間內下匝道流率)

$$S_{i,j}(k) = s_{i,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.39)$$

Constraints(格位初始狀態)

$$\rho_{i,j}(1) = \rho_{i,j}^d , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \quad (4.40)$$

$$v_{i,j}(1) = v_{i,j}^d , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \quad (4.41)$$

Constraints(模擬過程)

$$Q_{i,j}(k) = \rho_{i,j}(k) \cdot v_{i,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.42)$$

$$q_{i,j}(k) = \alpha_j \cdot Q_{i,j}(k) + (1 - \alpha_j) \cdot Q_{i+1,j}(k) , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.43)$$

$$\rho_{i,j}(k+1) = \rho_{i,j}(k) + \frac{T}{\Delta_j} \left[q_{i-1,j}(k) - q_{i,j}(k) + R_{i,j}(k) - S_{i,j}(k) \right] , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.44)$$

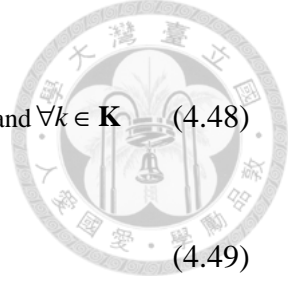
$$R_{i,j}(k) = \min \left[r_{i,j}(k), C_{i,j}(k) \right] , \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.45)$$

$$v_{i,j}(k+1) = v_{i,j}(k) + \frac{T}{\tau_j} \left[V_{i,j}(k) - v_{i,j}(k) \right] + \frac{T \cdot \zeta_j}{\Delta_j} v_{i,j}(k) \left[v_{i-1,j}(k) - v_{i,j}(k) \right] - \frac{v_j \cdot T \left[\rho_{i+1,j}(k) - \rho_{i,j}(k) \right]}{\tau_j \cdot \Delta_j \left[\rho_{i,j}(k) + 40 \right]} \quad (4.46)$$

$$- \frac{\delta_j^{on} T \cdot v_{i,j}(k) \cdot R_{i,j}(k)}{\Delta_j \left[\rho_{i,j}(k) + 40 \right]} - \frac{\delta_j^{off} T \cdot v_{i,j}(k) \cdot S_{i,j}(k)}{\Delta_j \left[\rho_{i,j}(k) + 40 \right]} - \alpha_{i,j} \times \frac{\phi_j T (Q_{i-1,j}^c - Q_{i,j}^c) Q_{i,j}(k)}{\Delta_j \cdot Q_{i-1,j}^c \cdot Q_j^c} [v_{i,j}(k)]^2$$

$$, \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K}$$

$$V_{i,j}(k) = v_j^f \cdot \exp \left[- \frac{1}{\beta_j} \left(\frac{\rho_{i,j}(k)}{\rho_j^c} \right)^{\beta_j} \right] , \forall i, j \in \mathbf{CELL} - \mathbf{VSLCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.47)$$



$$V_{i,j}(k) = VSL_{i,j}(k) \cdot \exp \left[-\frac{1}{\beta_j} \left(\frac{\rho_{i,j}(k)}{\rho_j^c} \right)^{\beta_j} \right], \quad \forall i, j \in \mathbf{VSLCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.48)$$

$$c^{\min} \leq C_{i,j}(k) \leq c^{\max}, \quad \forall i, j \in \mathbf{CELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.49)$$

$$vsl^{\min} \leq VSL_{i,j}(k) \leq vsl^{\max}, \quad \forall i, j \in \mathbf{VSLCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.50)$$

$$-vsl^{\text{space}} \leq VSL_{i+1,j}(k) - VSL_{i,j}(k) \leq 0, \quad \forall i, j \in \mathbf{VSLCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.51)$$

$$-vsl^{\text{time}} \leq VSL_{i,j}(k+1) - VSL_{i,j}(k) \leq vsl^{\text{time}}, \quad \forall i, j \in \mathbf{VSLCELL} \text{ and } \forall k \in \mathbf{K} \quad (4.52)$$

目標式(4.34)：最大化雪山隧道總流量，使隧道中的車流能維持在最大流量。

上游邊界限制式(4.35)、(4.36)：需得知上游邊界虛擬格位的速率($v_{0,1}$)和進入流率($q_{0,1}$)方能計算最上游格位的速率($v_{1,1}$)和密度($\rho_{1,1}$)，此限制式將上游邊界之速率($upv_{i,j}$)和流率($upq_{i,j}$)帶入 $v_{0,1}$ 和 $q_{0,1}$ 中。

下游邊界限制式(4.37)、(4.38)：需得知下游邊界虛擬格位的密度($\rho_{12,6}$)和流率($Q_{12,6}$)方能計算最下游格位的速率($v_{11,6}$)及離開流率($q_{11,6}$)，此限制式將下游邊界之密度($low\rho_{i,j}$)和流率($lowq_{i,j}$)代入 $\rho_{12,6}$ 和 $Q_{12,6}$ 中。

下匝道限制式(4.39)：經由下匝道離開主線之車流流率等於下匝道需求流率。

格位初始狀態限制式(4.40)、(4.41)：將車輛偵測器資料作為所有格位之初始密度和速率。

METANET 長隧道模式限制式(4.42)~(4.48)：METANET 長隧道車流模式之方程式，其中，式(4.44)和式(4.45)用以描述匝道儀控對車流造成的影響，而式(4.48)則用以描述可變速限對車流造成的影響。

儀控率限制式(4.49)：儀控率上下限的限制，其中，最小儀控率的設定可避免匝道等候長度過長的情形發生，進而減少匝道儀控對地方道路車流的影響，另外，最大儀控率的設定則是為了確保匝道儀控的執行。

可變速限限制式(4.50)~(4.52)：式(4.50)為控制速限的上下限限制，其中，最低

速限的設定是為了避免因過低的速限，而造成駕駛者的行車困擾，另外，最高速限則為目前國道五號法定速限；式(4.51)為控制速限空間變化的限制，首先，此限制式確保速限能由最上游之控制位置向下游遞減，進而控制車輛以漸變之方式進入雪山隧道，避免壅塞的蔓延或產生，此外，透過參數 vsl^{space} 之設定可限制速限在前後位置的變動幅度，進而確保駕駛者的行車安全；式(4.52)為控制速限時間變化的限制，此限制式以參數 vsl^{time} 限制了速限在前後時階的變動幅度，進而確保駕駛者能以適當的加減速調整行車速率。

第五章 預測模式



在完成可變速限聯合匝道儀控最佳化模式之建構後，即可將模式所需參數輸入至模式中，並透過最佳化演算法求解各時階最佳控制速限和儀控率。然而，在即時控制中，模式所需之參數僅可利用車輛偵測器資料作為輸入，而車輛偵測器資料屬於已發生之車流狀態，因此，透過上述方式求得之速限與儀控率為已發生時段的最佳解，若以此速限與儀控率對未來車流進行控制，將可能造成錯誤的控制結果，進而降低路網使用效率。

為避免上述問題發生，本研究針對最佳化模式中的輸入參數分別建構對應之預測模式，並利用預測模式之預測結果作為最佳化模式之輸入參數，如此一來，即可預先對未來車流狀態進行最佳化求解，以確保模式所求得之速限與儀控率為未來車流狀態之最佳解。

最佳化模式之輸入參數包含：上游邊界流率與速率、下游邊界流率與密度以及各上下匝道之需求流率，故本研究利用類神經網路分別建構速率預測模式、密度預測模式和流量預測模式，以預測最佳化模式所需之輸入參數。

類神經網路(Artificial neural network, ANN)模式是仿造人類生物神經系統所建構而成的模式，普遍應用在預測與分類問題上，透過類神經網路模式的應用能解決許多複雜的非線性問題。在預測相關課題上，最常使用的類神經網路模式為多層感知器(Multi-layer perceptron)，其架構主要分成以下三部分：

1. 輸入層：表示網路的輸入變數，透過轉換函數可將輸入變數傳遞至網路內部的隱藏層。
2. 隱藏層：輸入變數間的交互影響皆在隱藏層中進行，隱藏層數量與各層中的節點數量係根據研究問題的大小而定。
3. 輸出層：表示網路的輸出變數，其是將隱藏層的計算結果透過轉換函數傳遞至輸出層。

本研究將類神經網路預測模式所需之輸入變數分成兩大類，第一類為預測時段之歷史資料，其目的是希望透過歷史資料找出預測值(輸出變數)之變化趨勢，第二類則是預測時段當天之車輛偵測器資料，其目的是希望模式能依據當前之車流狀態進行預測值(輸出變數)的調整，以提升模式整體之預測能力，而輸出變數則設

定為預測時段之預測值，最後，為節省運算時間，本研究將隱藏層數目設為 1，並以輸入層與輸出層變數個數之總和除以二，作為此層的節點數目，其他相關設定如表 5-1 所示。

為確保模式之預測結果能符合實際車流狀態，本研究首先將車輛偵測器資料分為訓練組與驗證組兩類，並透過訓練組資料進行模式的訓練(參數校估)，在完成模式訓練後，以驗證組資料進行模式之驗證，藉此評估模式之預測能力。

表 5-1 類神經網路預測模式相關設定

網路相關設定	設定值
輸入層節點數	7
隱藏層數	1
隱藏層節點數	4
輸出層節點數	1
隱藏層轉換函數	正切雙彎曲轉換函數($a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$)
輸出層轉換函數	線性轉換函數($a = n$)
學習演算法	擬牛頓演算法
設定訓練次數	5000 次
設定績效目標	10^{-6}

5.1 速率預測模式

速率預測模式之網路架構如圖 5-1 所示，其中，第一個輸入變數(兩週前 t 時段之速率)與第二個輸入變數(一週前 t 時段之速率)是為了找出預測時段 t 之速率變化趨勢，另外，由於本研究將儀控率調整頻率設為 5 分鐘，故預測模式之輸入變數僅可利用 t-6 時段前之資料，以反映當前車流狀態。

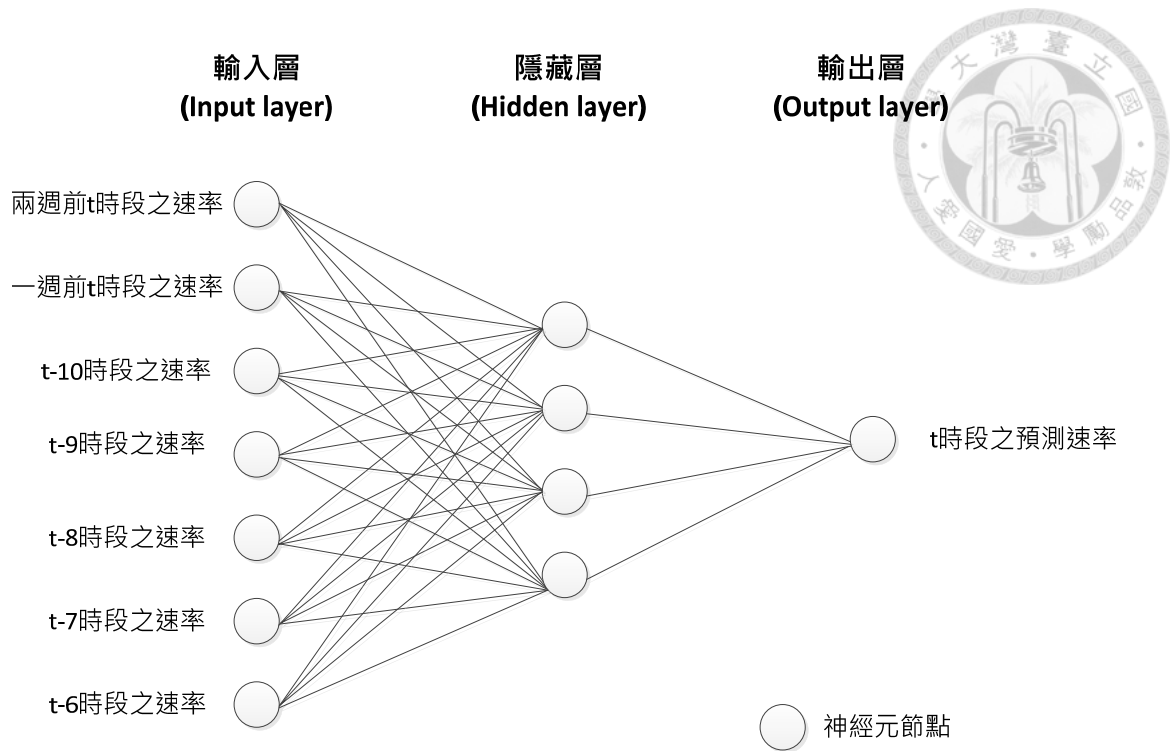


圖 5-1 速率預測模式之類神經網路架構

本研究以 2013/03/03 12:30~13:30、2013/03/10 12:30~13:30 和 2013/03/17 12:10~12:24 資料進行速率預測模式之訓練，並利用 2013/03/10 12:30~13:30、2013/03/17 12:30~13:30 和 2013/03/24 12:10~12:24 資料進行速率預測模式之驗證，驗證結果圖 5-2 如所示，由圖中可知，利用類神經網路預測上游邊界之速率 MAPE 值為 3.39%，屬於優良之預測結果。

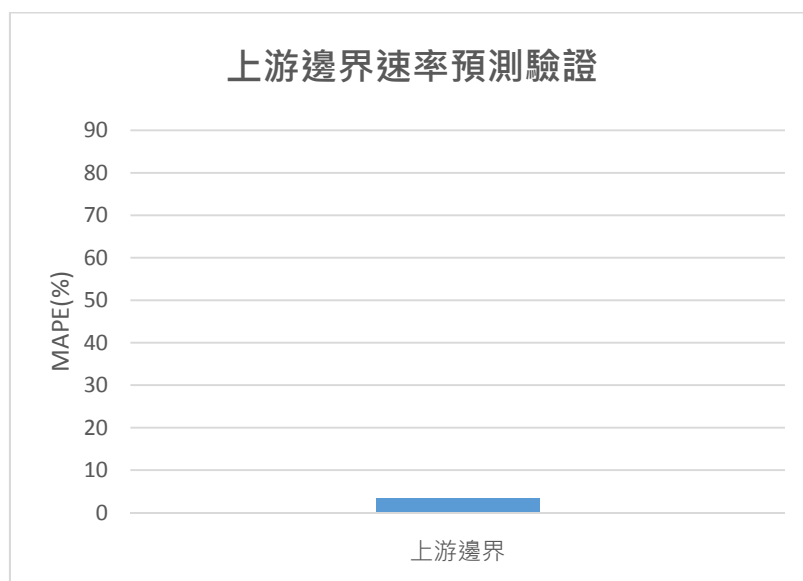


圖 5-2 上游邊界速率預測驗證之 MAPE 圖



5.2 密度預測模式

密度預測模式之網路架構如圖 5-3 所示，其中，第一個輸入變數(兩週前 t 時段之密度)與第二個輸入變數(一週前 t 時段之密度)是為找出預測時段 t 之密度變化趨勢，另外，t-6 時段至 t-10 時段之密度資料，是為了反映當前車流狀態所始使用之輸入變數。

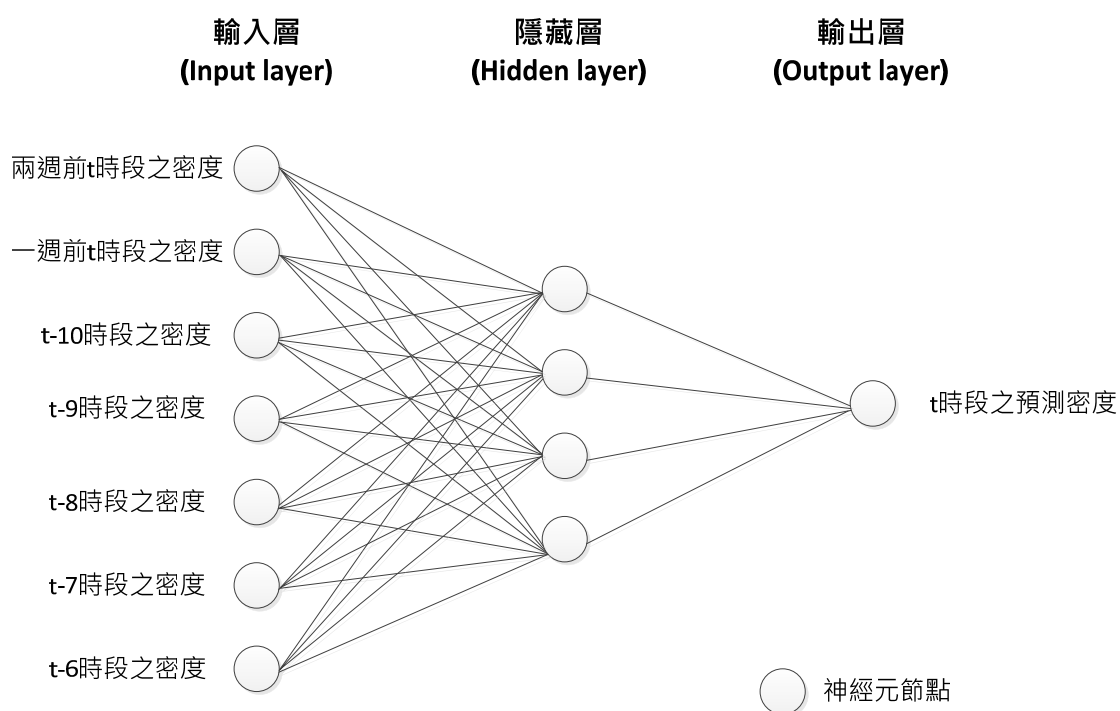


圖 5-3 密度預測模式之類神經網路架構

本研究以 2013/03/03 12:30~13:30、2013/03/10 12:30~13:30 和 2013/03/17 12:10~12:24 資料進行密度預測模式之訓練，並利用 2013/03/10 12:30~13:30、2013/03/17 12:30~13:30 和 2013/03/24 12:10~12:24 資料進行密度預測模式之驗證，驗證結果如圖 5-4 所示，由圖中可知，利用類神經網路預測下游邊界之密度 MAPE 值為 16.02%，屬於優良之預測結果。

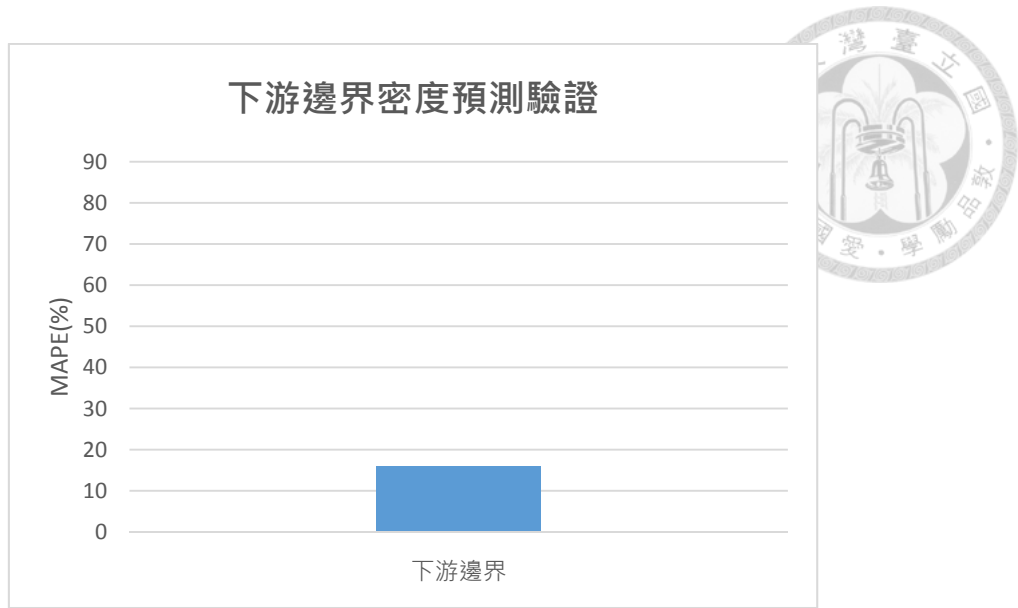


圖 5-4 下游邊界密度預測驗證之 MAPE 圖

5.3 流量預測模式

流量預測模式之網路架構如圖 5-5 所示，其中，第一個輸入變數(兩週前 t 時段之流量)與第二個輸入變數(一週前 t 時段之流量)是為找出預測時段 t 之流量變化趨勢，另外， $t-6$ 時段至 $t-10$ 時段之流量資料，是為了反映當前車流狀態所始使用之輸入變數。

本研究以 2013/03/03 12:30~13:30、2013/03/10 12:30~13:30 和 2013/03/17 12:10~12:24 資料進行流量預測模式之訓練，並利用 2013/03/10 12:30~13:30、2013/03/17 12:30~13:30 和 2013/03/24 12:10~12:24 資料進行流量預測模式之驗證，驗證結果可分為上匝道、下匝道和上下游邊界流量三部分進行探討。

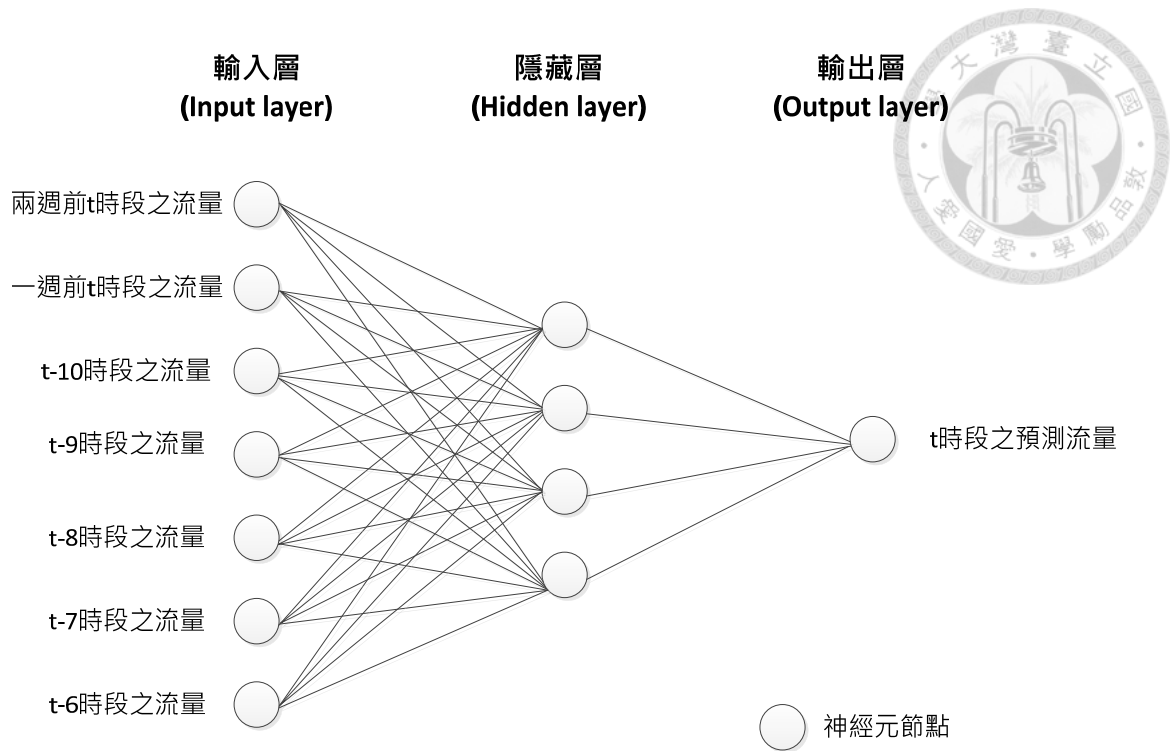


圖 5-5 流量預測模式之類神經網路架構

5.3.1 上匝道流量

各上匝道流量預測之驗證結果如圖 5-6 所示，其中，頭城上匝道之流量 MAPE 值為 12.40%，宜蘭上匝道之流量 MAPE 值為 14.34%，羅東上匝道之流量 MAPE 值則為 15.08%，由 MAPE 值之衡量標準可知，其皆屬於優良之預測結果。

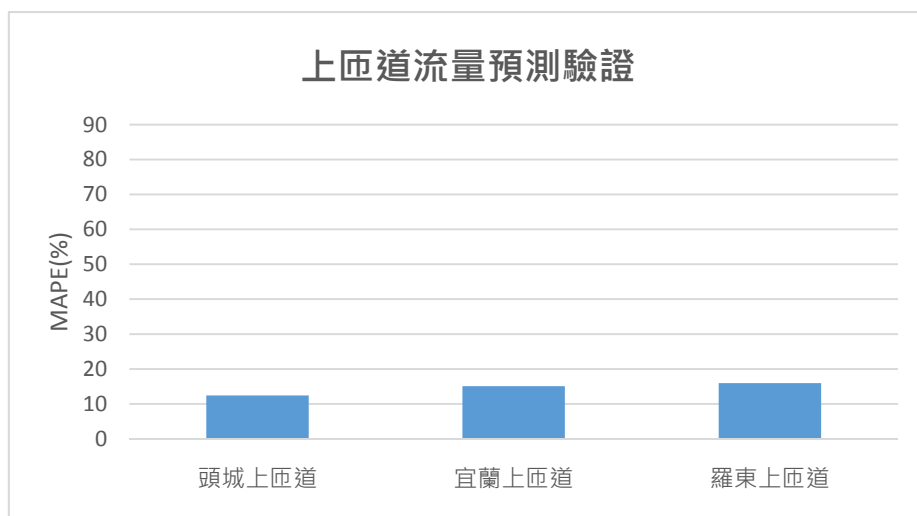


圖 5-6 上匝道流量預測驗證之 MAPE 圖



5.3.2 下匝道流量

由於雪隧南口上游各下匝道之實際流量非常稀少，經常發生每分鐘內無車輛通過之情形，因此，若以MAPE值做為衡量指標，誤差值將趨近於無窮大，故本研究選用成對樣本T檢定以檢定下匝道流量預測值與實際值之績效，檢定結果如表5-2所示。

由成對樣本T檢定之p-value可知，在95%之信賴水準下，各下匝道流量之實際值與預測值無顯著差異，因此，無法拒絕下匝道流量實際值等於預測值之虛無假設。

表5-2 下匝道流量預測成對樣本T檢定

	成對變數差異				t	顯著性 (雙尾)
	平均數	標準差	差異的 95% 信賴區間			
			下界	上界		
成對 1 羅東下匝道實際值 - 羅東下匝道預測值	-.01317	1.26975	-.24669	.22036	-.112	.911
成對 2 宜蘭下匝道實際值 - 宜蘭下匝道預測值	-.05041	1.41530	-.31070	.20989	-.384	.702
成對 3 頭城下匝道實際值 - 頭城下匝道預測值	.00482	.87139	-.15544	.16508	.060	.953
成對 4 坪林下匝道實際值 - 坪林下匝道預測值	-.01036	.56690	-.11462	.09390	-.197	.844



5.3.3 上下游邊界流量

上下游邊界流量預測之驗證結果如圖 5-7 所示，其中，上游邊界之流量 MAPE 值為 16.95%，下游邊界之流量 MAPE 值則為 14.19%，由 MAPE 值之衡量標準可知，其皆屬於優良之預測結果。

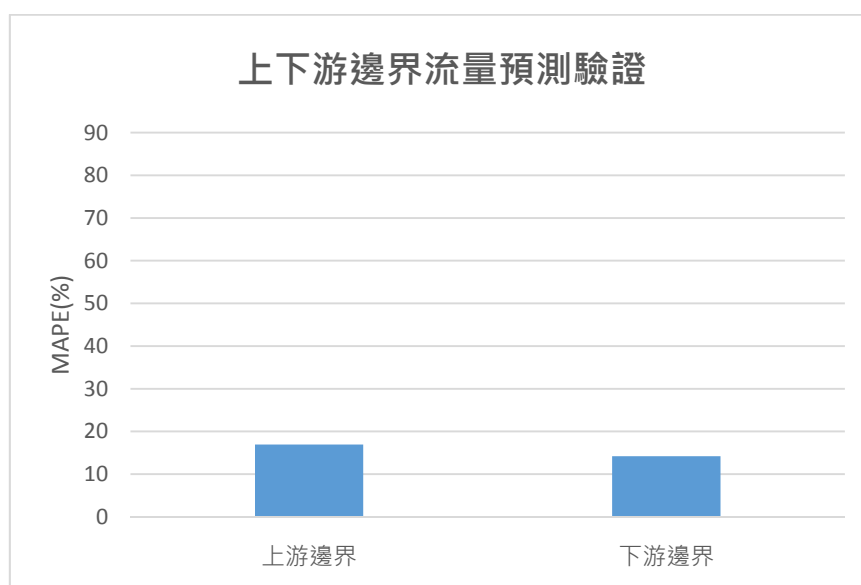


圖 5-7 上下游邊界流量預測驗證之 MAPE 圖

第六章 模擬平台建構



為評估最佳化模式之控制績效，本研究以微觀模擬軟體 VISSIM 建構研究範圍內之模擬路網，並參考江宜穎[3]之研究設定模擬路網中各路段之駕駛者行為參數，如表 6-1 所示。在完成路網建構和參數設定等步驟後，尚需針對模擬路網進行驗證，以確認其是否能反映真實車流之特性，驗證結果如 6.1 節所示。

表 6-1 VISSIM 模擬路網各路段駕駛者行為參數設定值

路段	參數	設定值
一般路段	CC0	1.5
	CC1	0.9
	CC2	4
	CC7	0.25
雪隧前段	CC0	2.83
	CC1	1.99
	CC2	1.11
	CC7	0.71
雪隧中段	CC0	1.48
	CC1	2.43
	CC2	2.75
	CC7	0.86
雪隧末段	CC0	2.6
	CC1	2.89
	CC2	2.3
	CC7	0.06
石碇隧道	CC0	2.22
	CC1	1.76
	CC2	3.06
	CC7	0.2

6.1 路網驗證

本研究以 2013/03/017(日)之車流資料進行模擬路網之驗證，並選用 MAPE 值作為驗證之衡量指標。

圖 6-1 為 VISSIM 路網驗證之流量 MAPE 圖，由圖中可知全線流量 MAPE 值



均在 5% 至 20% 之間，未有 MAPE 值過大之情形，屬於優良的推估結果。另外，圖 6-2 為 VISSIM 路網驗證之速率 MAPE 圖，由圖中可知一般路段之速率 MAPE 值均在 5%~20% 之間，而雪山隧道路段和石碇隧道路段之速率 MAPE 值在介於 15%~30% 之間，屬於合理的推估結果。

由驗證結果可知，本研究所建構之模擬路網可合理表現出真實車流之運行過程，因此，我們可將控制模式應用於模擬路網中以評估控制模式之績效。

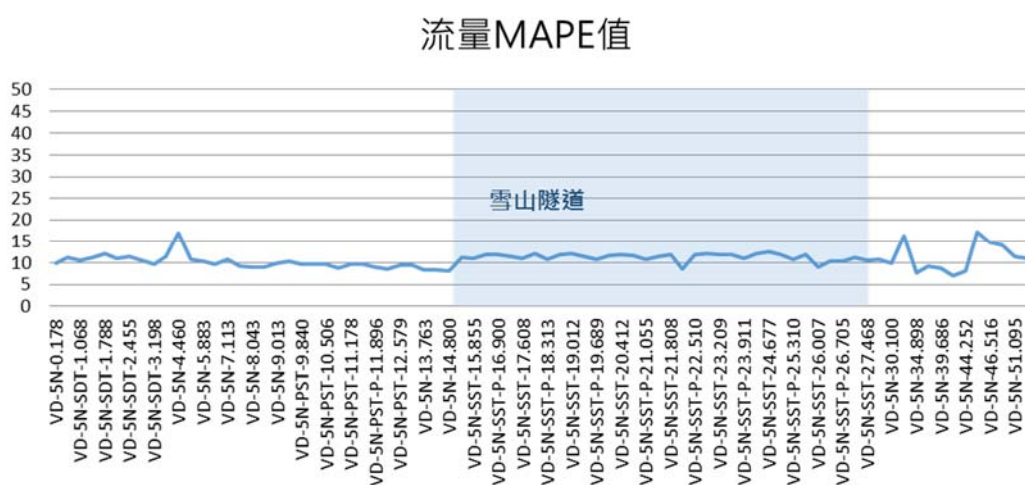


圖 6-1 VISSIM 路網驗證之流量 MAPE 圖

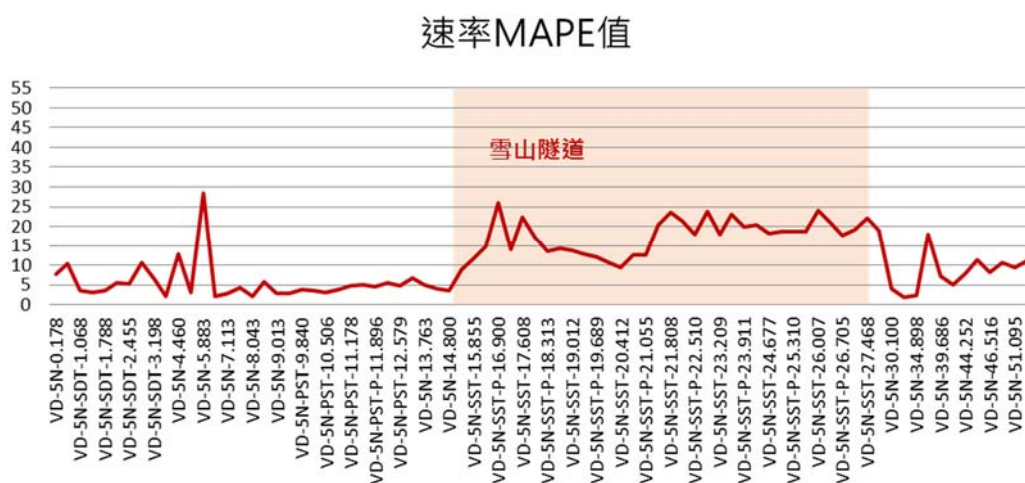


圖 6-2 VISSIM 路網驗證之速率 MAPE 圖

第七章 模式應用與案例分析



本研究選用 2013/03/17 12:30~13:30 車流由非壅塞陷入壅塞之時段作為控制時段，並利用滾動平面法(Rolling horizon)之求解流程研擬本研究控制模式的即時求解架構，如 7.1 節所示，最後，以即時求解架構配合 VISSIM 外掛軟體 VisVap 對模擬路網進行動態控制，評估本研究所提出之控制模式在壅塞時段和非壅塞時段對路網造成的影響，其結果如 7.2 節所示。

7.1 即時求解架構

圖 7-1 為滾動平面法之求解架構，由於本研究所建構之預測模式可根據車輛偵測器資料預測五分鐘後車流模式所需之輸入參數，因此，在控制開啟的五分鐘前，最佳化模式即可求解出第一個控制時段的最佳速限及儀控率，接著，在控制開啟的四分鐘前，預測模式將依據當前偵測器資料重新更新輸入變數之預測值，因此，最佳化模式將求解出第一個控制時段的另一組最佳解以及第二個控制時段的第一組最佳解，依此類推，在控制開啟前一分鐘，將有五組不同的最佳速限及儀控率供第一個控制時段選擇。本研究以加權平均法求取此五組速限與儀控率之平均數，在越接近控制時段所求得的速限與儀控率將具有較大之權重，如式(7.1)和式(7.3)所示，最後，利用四捨五入進位的方式挑選實際顯示之控制速限，如式(7.2)，例如：速限之加權平均數為 83.5(km/hr)，則實際顯示之控制速限為 80(km/hr)，而實際實施之儀控率計算方式亦為同理，如式(7.4)所示。

利用上述方式即可依據車輛偵測器資料不斷計算各控制時階之速限與儀控率，且由於車流模式在越接近資料輸入時間點的推估值將越準確，因此，透過加權平均法可合理的將不同時段所計算出的最佳速限與儀控率加以整合，以達到將最佳化模式運用於即時控制中之目的。

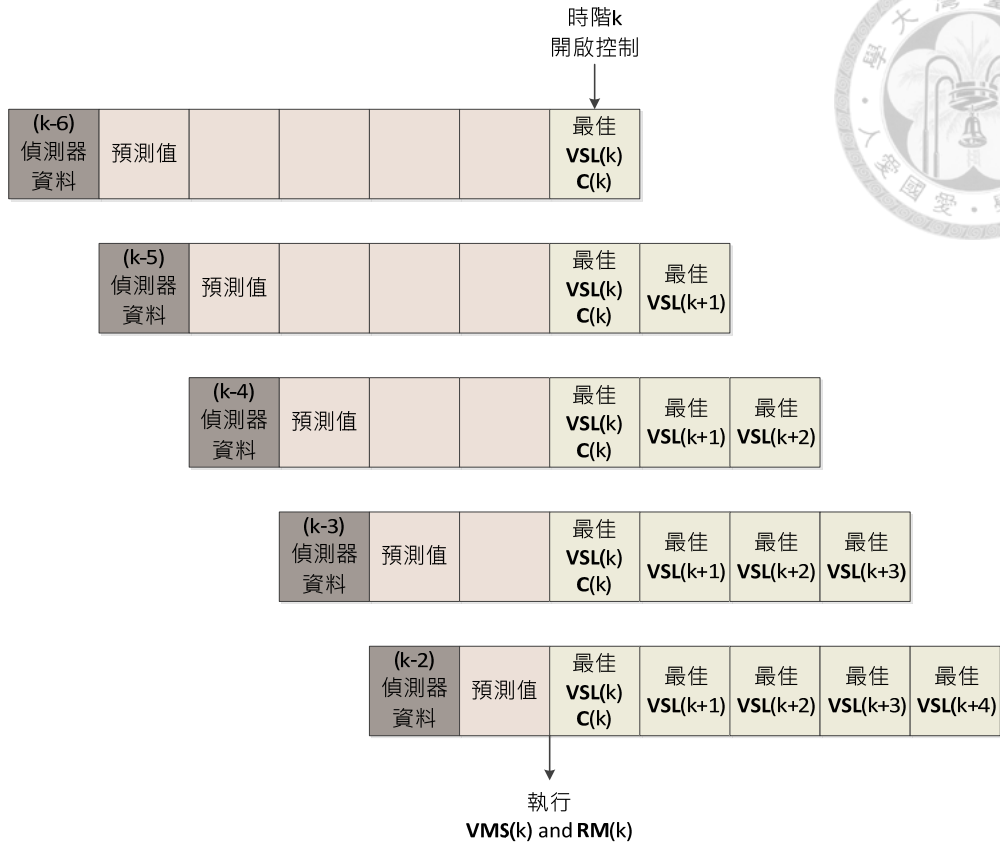


圖 7-1 滾動平面法求解架構

$$\overline{VSL}(k) = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i \times VSL(k)_i}{\sum_{i=1}^5 w_i} \quad (7.1)$$

$$VMS(k) = \left[\frac{\overline{VSL}(k)}{10} + 0.5 \right] \times 10 \quad (7.2)$$

$$\overline{C}(k) = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i \times C(k)_i}{\sum_{i=1}^5 w_i} \quad (7.3)$$

$$RM(k) = \left[\frac{\overline{C}(k)}{100} + 0.5 \right] \times 100 \quad (7.4)$$

本研究的模擬即時求解流程如圖 7-2 所示，在模擬系統開始進行模擬後，每 300 秒輸出一次車輛偵測器資料，在獲取一筆資料的同時便立即將此筆資料輸入至預測模式與最佳化模式中，以求取五分鐘後之最佳速限與儀控率，同時，利用上述滾動平滑法之架構不斷計算下一個控制時階所需顯示之控制速限與儀控率，最後，參照高工局所提供之「儀控時制對應表」，如附錄四所示，將儀控率轉換為號誌時制計畫，並利用 VisVap 將此號誌時制計畫與速限輸入至模擬路網中，進行模擬路網之動態控制。

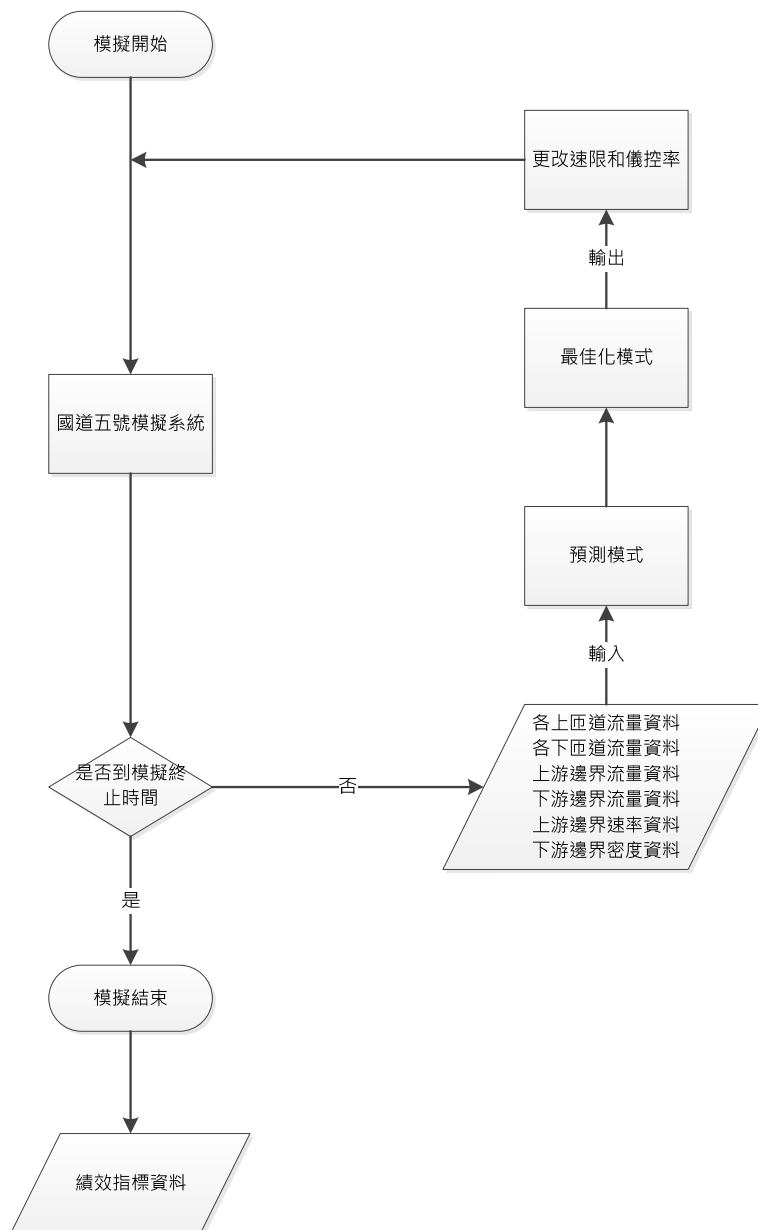
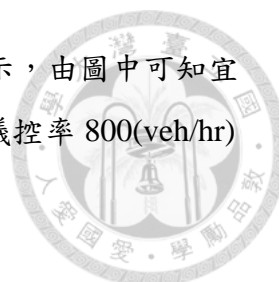


圖 7-2 模擬即時求解流程圖



藉由上述動態控制流程所求得之各匝道儀控率如圖 7-3 所示，由圖中可知宜蘭與羅東上匝道具有較嚴格之儀控率，在部分時段甚至以最小儀控率 800(veh/hr) 進行控制，而蘇澳上匝道之儀控率則最為寬鬆，大多維持在 1000(veh/hr)~1200(veh/hr) 之間。

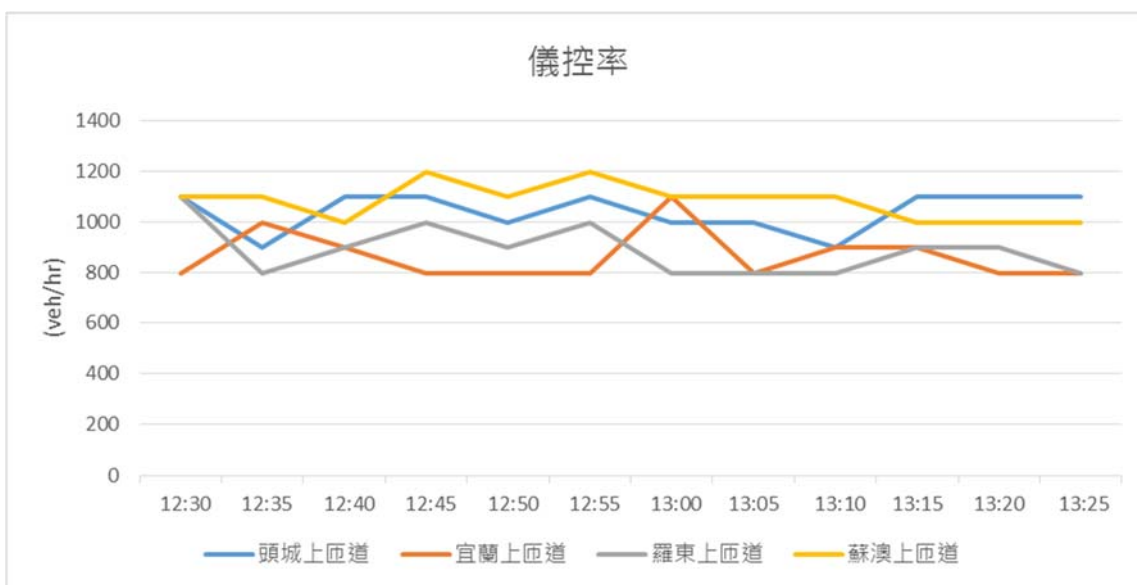


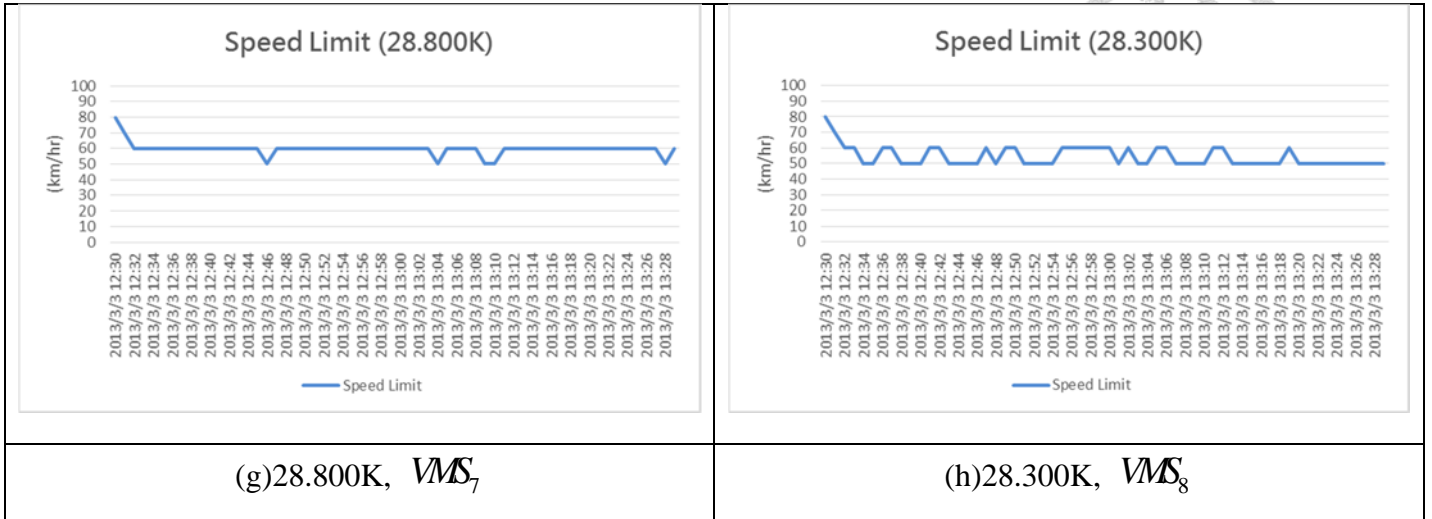
圖 7-3 各上匝道之儀控率(RM)

各控制位置之速限如表 7-1 所示，由圖中可知第一個可變速限標誌(31.800K)之速限均維持在 80(km/hr)~90(km/hr)之間，第二個可變速限標誌(31.300K)之速限在控制後 2 分鐘即降至 80(km/hr)，此後除部分時段速限曾降至 70(km/hr)，其餘時段便一直以速限 80(km/hr)進行控制，第三個和第四個可變速限標誌(30.800K、30.300K)之速限則大多維持在速限 70(km/hr)進行控制，第五個可變速限標誌(29.800K)之速限則維持在 60(km/hr)~70(km/hr)之間，第六個和第七個可變速限標誌(29.300K、28.800K)則大多以速限 60(km/hr)進行控制，最後，第八個可變速限標誌(28.300K)之速限則大多維持在 60(km/hr)~50(km/hr)之間。



表 7-1 各控制位置之控制速限(VMS)

<p>Speed Limit (31.800K)</p>	<p>Speed Limit (31.300K)</p>
<p>(a)31.800K, VMS_1</p>	<p>(b)31.300K, VMS_2</p>
<p>Speed Limit (30.800K)</p>	<p>Speed Limit (30.300K)</p>
<p>(c)30.800K, VMS_3</p>	<p>(d)30.300K, VMS_4</p>
<p>Speed Limit (29.800K)</p>	<p>Speed Limit (29.300K)</p>
<p>(e)29.800K, VMS_5</p>	<p>(f)29.300K, VMS_6</p>



7.2 績效評估

圖 7-4 為控制前後 VISSIM 模擬路網之 3D 速率時空圖，由圖中可知在進行控制前，雪山隧道於 13:00 後速率便會下降至 40(km/hr) 以下，呈現壅塞狀態，然而，在進行控制後，雪山隧道大致能保持在 40(km/hr) 以上之行車速率，顯示本研究之控制模式能有效減緩雪山隧道之壅塞，並提升國道五號北上路段之使用效率。

在下述小節中，本研究將針對不同時段之控制績效進行分析，以了解控制模式在非壅塞時段和壅塞時段對道路造成之影響，此外，由於匝道儀控可能造成上匝道車流之壅塞，不當的儀控率設定甚至可能導致上匝道車隊溢流，降低地方道路之使用效率，因此，本研究針對控制前與控制後之匝道進行績效評估，以了解本研究之匝道儀控對各匝道造成的影響。

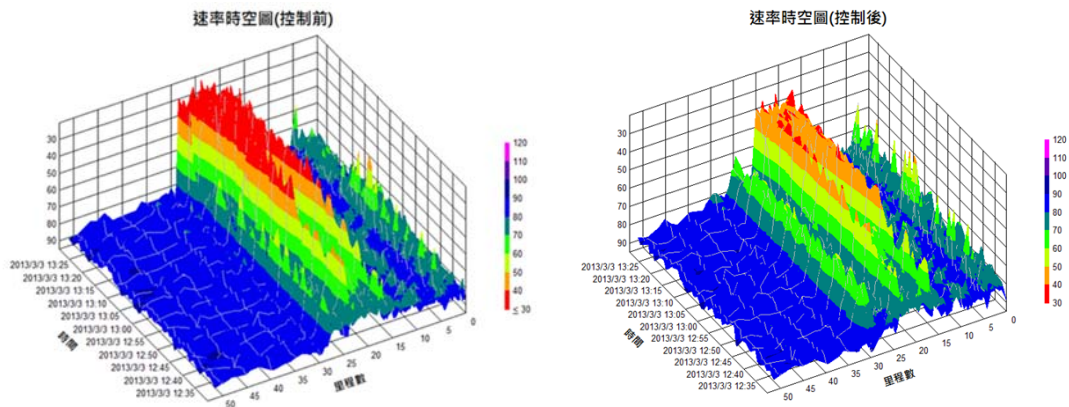


圖 7-4 國道五號控制前後速率變化圖



7.2.1 主線績效

圖 7- 5 和表 7- 2 為非壅塞時段(12:30~12:50)各路段在控制前後之平均旅行時間

。其中，頭城上匝道至雪隧北口之距離為 14.44 公里；宜蘭上匝道至雪隧北口之距離為 20.3 公里；羅東至雪隧北口之距離為 29.6 公里；蘇澳上匝道至雪隧北口之距離為 38.7 公里。

由表 7- 2 可知，在進行控制後，各路段於非壅塞時段之平均旅行時間將些微上升。其中，頭城上匝道至雪隧北口之旅行時間增加 9.6 秒；宜蘭上匝道至雪隧北口之旅行時間增加 3.2 秒；羅東上匝道至雪隧北口之旅行時間增加 2.9 秒；蘇澳上匝道至雪隧北口之旅行時間增加 6.5 秒。

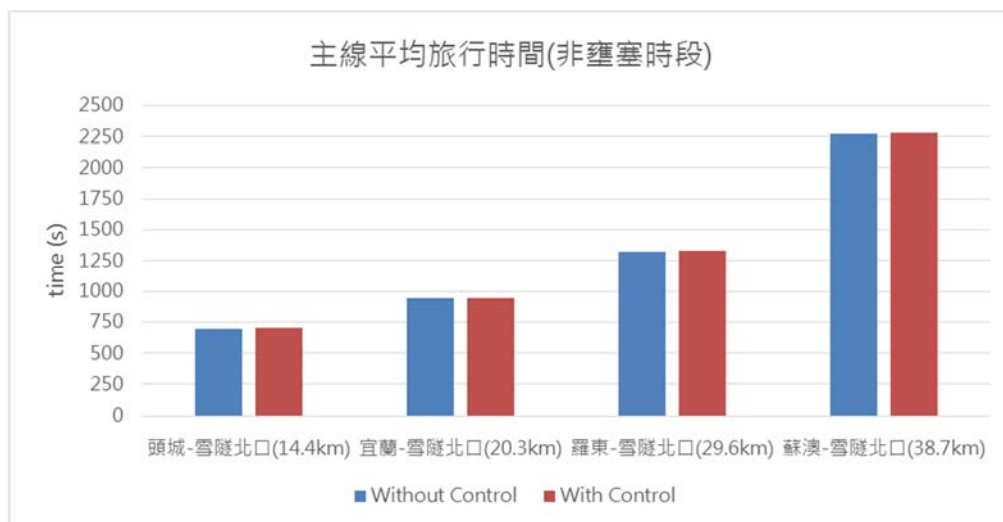


圖 7- 5 主線控制前後平均旅行時間差異表(非壅塞時段)

表 7- 2 主線控制前後平均旅行時間差異表(非壅塞時段)

	Without Control 非壅塞時段(s)	With Control, 非壅塞時段(s)	差異 (%)
頭城-雪隧北口 (14.4km)	696.23	705.88	+1.39
宜蘭-雪隧北口 (20.3km)	942.89s	946.61	+0.39
羅東-雪隧北口 (29.6km)	1325.33s	1328.25	+0.22

蘇澳-雪隧北口 (38.7km)	2273.23s	2279.70	+0.28
---------------------	----------	---------	-------

圖 7-6 和表 7-3 為壅塞時段(12:50~13:30)各路段在控制前後之平均旅行時間。其中，頭城上匝道至雪隧北口之距離為 14.44 公里；宜蘭上匝道至雪隧北口之距離為 20.3 公里；羅東至雪隧北口之距離為 29.6 公里；蘇澳上匝道至雪隧北口之距離為 38.7 公里。

由表 7-3 可知，在進行控制後，各路段於壅塞時段之平均旅行時間將大幅減少。其中，頭城上匝道至雪隧北口之旅行時間減少 89.5 秒；宜蘭上匝道至雪隧北口之旅行時間減少 75.4 秒；羅東上匝道至雪隧北口之旅行時間減少 63.6 秒；蘇澳上匝道至雪隧北口之旅行時間減少 50.1 秒。

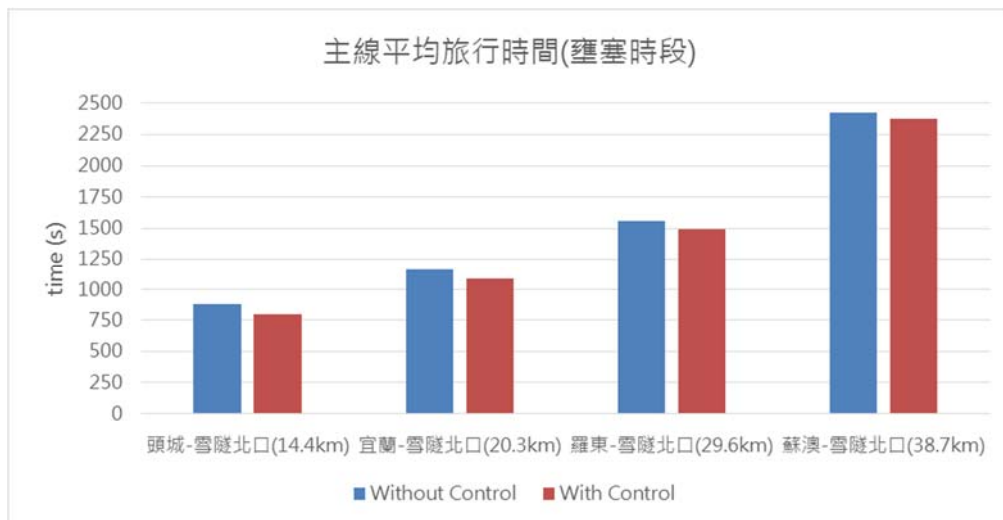


圖 7-6 主線控制前後平均旅行時間差異表(壅塞時段)

表 7-3 主線控制前後平均旅行時間差異表(壅塞時段)

	Without Control 壅塞時段(s)	With Control, 壅塞時段(s)	差異 (%)
頭城-雪隧北口 (14.4km)	885.62	796.16	-10.10
宜蘭-雪隧北口 (20.3km)	1163.47	1088.09	-6.48
羅東-雪隧北口 (29.6km)	1555.27	1491.67	-4.09

蘇澳-雪隧北口 (38.7km)	2423.15	2373.04	-2.07
---------------------	---------	---------	-------

圖 7-7 和表 7-4 為雪山隧道在不同時段下之通過量。由表 7-4 可知，在非壅塞時段，雪山隧道控制前之通過量為 631 輛，控制後則為 587 輛，共計減少了 44 輛；另外，在壅塞時段，雪山隧道控制前之通過量為 1425 輛，控制後則為 1680 輛，共計增加了 255 輛，因此，在整個控制時段內，可變速限聯合匝道儀控可增加雪山隧道通過量共 211 輛。

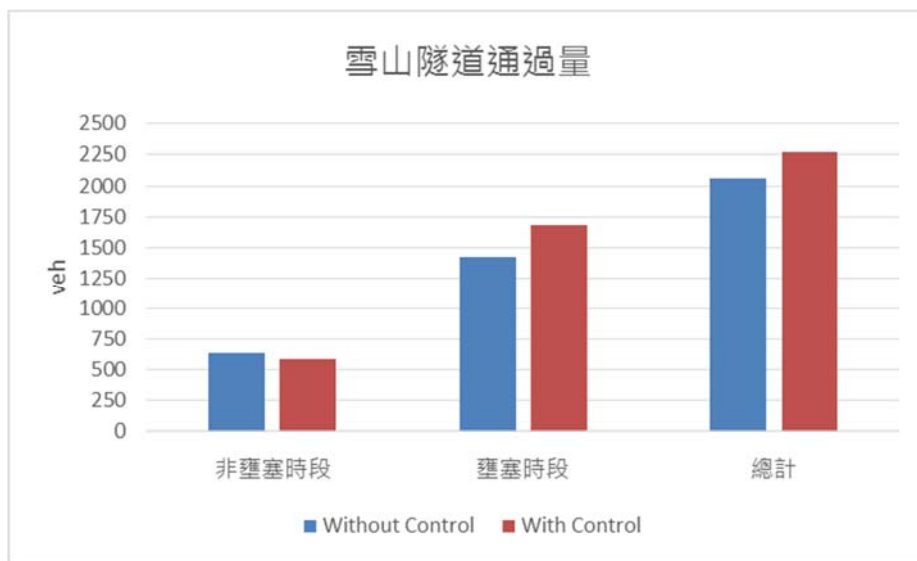


圖 7-7 雪山隧道控制前後各時段通過量圖

表 7-4 雪山隧道控制前後各時段通過量表

	Without Control (veh)	With Control (veh)	差異 (%)
非壅塞時段	631	587	-6.97
壅塞時段	1425	1680	+17.89
總計	2056	2267	+10.26

本研究之控制目的為最大化雪山隧道總流量，因此，由上述主線績效可知，雪山隧道在發生壅塞前，控制系統即開始進行預防性之控制，以維持進入雪山隧道之流量，故非壅塞時段在控制後，主線旅行時間與雪山隧道通過量皆有些微的下降，然而，此預先控制可避免雪山隧道陷入壅塞，因此，原先的壅塞時段在控制後，主線旅行時間與雪山隧道通過量均獲得顯著的改善。



7.2.2 匝道績效

為避免上匝道車流因匝道儀控而溢流至地方道路，本研究另外針對上匝道路段進行控制績效之評估，選用的績效指標分別為旅行時間延滯和等候車隊長度。

圖 7- 8 和表 7- 5 為非壅塞時段(12:30~12:50)各匝道在控制前後之平均延滯時間，由表 7-5 可知，在非壅塞時段，頭城上匝道控制前之平均延滯時間為 2.43 秒，控制後則為 5.46 秒，共計增加了 3.03 秒；宜蘭上匝道控制前之平均延滯時間為 2.64 秒，控制後則為 8.83 秒，共計增加了 6.19 秒；羅東上匝道控制前之平均延滯時間為 1.62 秒，控制後則為 8.95 秒，共計增加了 7.33 秒；蘇澳上匝道控制前之平均延滯時間為 0.69 秒，控制後則為 8.32 秒，共計增加了 7.63 秒。

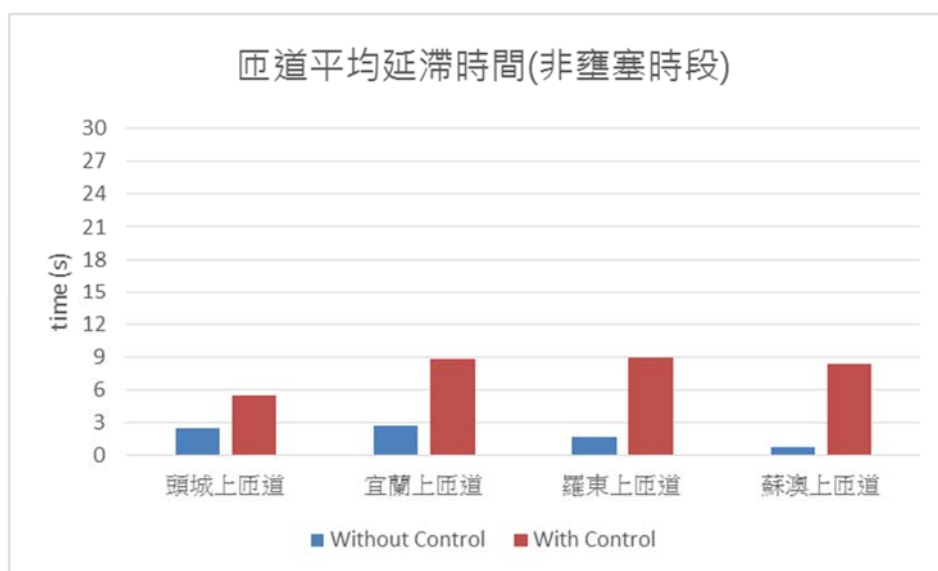


圖 7- 8 匝道控制前後平均延滯時間差異圖(非壅塞時段)

表 7- 5 匝道控制前後平均延滯時間差異表(非壅塞時段)

	Without Control 非壅塞時段(s)	With Control, 非壅塞時段(s)	差異 (%)
頭城上匝道	2.43	5.46	+124.71
宜蘭上匝道	2.64	8.83	+234.23
羅東上匝道	1.62	8.95	+452.94
蘇澳上匝道	0.69	8.32	+1097.26

圖 7-9 和表 7-6 為壅塞時段(12:50~13:30)各匝道在控制前後之平均延滯時間，由表 7-6 可知，在壅塞時段，頭城上匝道控制前之平均延滯時間為 2.18 秒，控制後則為 5.79 秒，共計增加了 3.61 秒；宜蘭上匝道控制前之平均延滯時間為 1.71 秒，控制後則為 13.42 秒，共計增加了 11.71 秒；羅東上匝道控制前之平均延滯時間為 1.58 秒，控制後則為 27.19 秒，共計增加了 25.61 秒；蘇澳上匝道控制前之平均延滯時間為 0.92 秒，控制後則為 9.52 秒，共計增加了 8.60 秒。

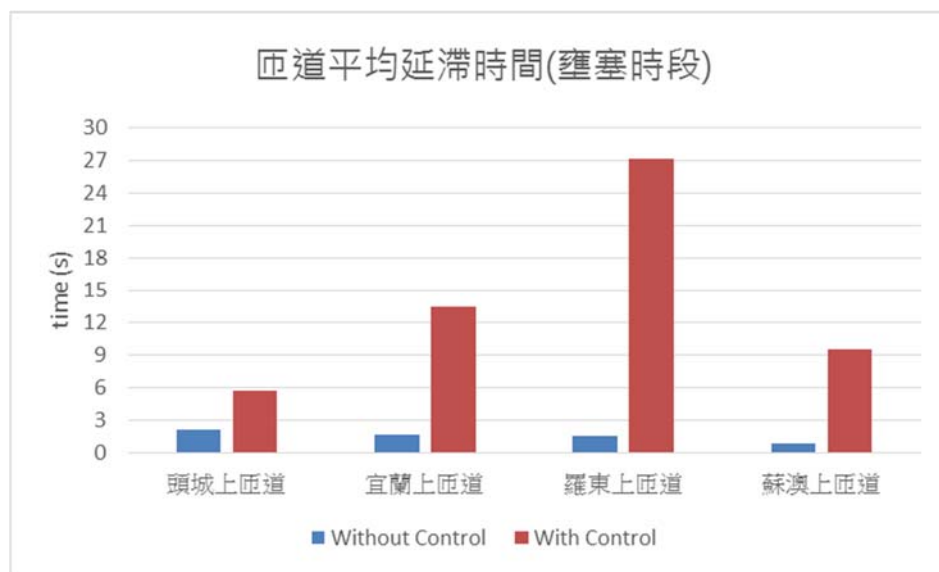


圖 7-9 匝道控制前後平均延滯時間差異圖(壅塞時段)

表 7-6 匝道控制前後平均延滯時間差異表(壅塞時段)

	Without Control 壅塞時段(s)	With Control, 壅塞時段(s)	差異 (%)
頭城上匝道	2.18	5.79	+165.02
宜蘭上匝道	1.71	13.42	+688.40
羅東上匝道	1.58	27.19	+1621.43
蘇澳上匝道	0.92	9.52	+939.50

圖 7-10 和表 7-7 為非壅塞時段(12:30~12:50)各匝道在控制前後之平均等候車隊長度，由表 7-7 可知，在非壅塞時段，頭城上匝道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 0.5 公尺，共計增加了 0.5 公尺；宜蘭上匝道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 3.85 公尺，共計增加了 3.85 公尺；羅東上匝



道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 5.2 公尺，共計增加了 5.2 公尺；蘇澳上匝道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 4.5 公尺，共計增加了 4.5 公尺。



圖 7-10 匝道控制前後平均等候長度差異圖(非壅塞時段)

表 7-7 匝道控制前後平均等候長度差異表(非壅塞時段)

	Without Control 非壅塞時段(m)	With Control, 非壅塞時段(m)	差異 (%)
頭城上匝道	0	0.5	-
宜蘭上匝道	0	3.85	-
羅東上匝道	0	5.2	-
蘇澳上匝道	0	4.5	-

圖 7-11 和表 7-8 為壅塞時段(12:50~13:30)各匝道在控制前後之平均等候車隊長度，由表 7-8 可知，在壅塞時段，頭城上匝道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 0.78 公尺，共計增加了 0.78 公尺；宜蘭上匝道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 9.18 公尺，共計增加了 9.18 公尺；羅東上匝道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 46.43 公尺，共計增加了 46.43 公尺；蘇澳上匝道控制前之平均等候車隊長度為 0 公尺，控制後則為 5.53 公尺，共計增加了 5.53 公尺。

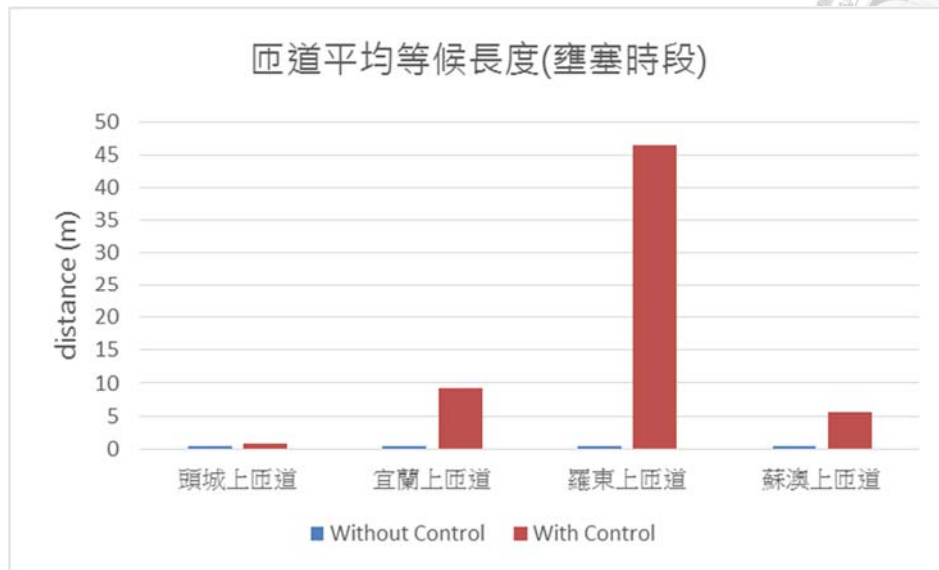


圖 7-11 匝道控制前後平均等候長度差異圖(壅塞時段)

表 7-8 匝道控制前後平均等候長度差異表(壅塞時段)

	Without Control 非壅塞時段(m)	With Control, 非壅塞時段(m)	差異 (%)
頭城上匝道	0	0.78	-
宜蘭上匝道	0	9.18	-
羅東上匝道	0	46.43	-
蘇澳上匝道	0	5.53	-

由上述績效分析可知，雪山隧道在發生壅塞前，各匝道之儀控率設定均較為寬鬆，匝道儀控對上匝道車流造成的影響較小，然而，隨著上匝道需求的增加，可變速限已無法有效控制雪山隧道的進入流量，因此，儀控率的設定漸趨嚴格，此情形導致上匝道車流延滯增加，但由於本研究在最佳化模式中設定了最小儀控率的限制，故匝道等候車隊將不會溢流至地方道路，有效避免匝道儀控對地方道路造成的影響。

第八章 結論與建議



8.1 結論

1. 由速率時空圖分析可知，國道五號北上路段壅塞時段為週日中午 12 時至翌日凌晨 12 時，壅塞範圍為雪山隧道路段，因此，本研究將可變速限標誌佈設於雪隧上游，並透過各匝道之連鎖控制，以減緩雪山隧道壅塞。
2. 由速率變化圖分析可知雪山隧道車流具有速率急遽下降之特性，因此，本研究將可變速限標誌的變換頻率設為 1 分鐘，以即時反映車流狀態。
3. 本研究以基因演算法求解 METANET 模式最佳參數組，由校估結果可知，METANET 模式無法描述出雪隧南口與雪隧中段車流速率急遽下降之特性。
4. 本研究以 METANET 模式為基礎，發展一套適用於雪山隧道的車流模式，稱之為「METANET 長隧道模式」。由校估結果可知，METANET 長隧道模式可有效表現出雪隧路段車流速率急速下降之特性。
5. 本研究以 METANET 長隧道模式為基礎，發展一套適用於國道五號北上路段之可變速限聯合匝道儀控最佳化模式。
6. 為使最佳化模式能進行即時控制，本研究利用類神經網路建構預測模式，以預測最佳化模式之輸入參數，由驗證結果可知，類神經網路可有效預測最佳化模式所需參數。
7. 本研究以滾動平面法研擬最佳化模式即時求解流程，並透過 VISSIM 外掛軟體 VisVap 將最佳化模式求解結果應用至模擬路網中，以達到動態控制之目的。
8. 由 VISSIM 模擬結果可知，可變速限聯合匝道儀控可有效避免雪山隧道壅塞，進而降低主線旅行時間，提升國道五號北上路段之使用效率。

8.2 建議


1. 車輛偵測器可能因故障、通訊傳輸錯誤、電纜失竊等眾多因素，導致資料出現漏損或不合理之現象。因此，在進行線上控制時，需發展一套即時的資料差補演算法，以改善現有車輛偵測器資料缺失，進而作為後續控制模式之輸入基礎。
2. 由於國內目前尚無實施可變速限，因此，本研究僅能以假設的方式描述可變速限對車流之影響。未來若實施可變速限控制後，可進一步地將資料進行分析，歸納出可變速限實際對車流造成之影響，進而調整最佳化模式中的可變速限方程式，以提升最佳解品質。
3. 本研究僅利用高速公路上車輛偵測器資料作為類神經網路之輸入變數，未來可考慮納入地方道路偵測器資料，以提升模式之預測品質。
4. 目前匝道儀控的號誌時制乃是透過查詢「匝道儀控時制計畫表」的方式，將所欲實施之儀控率轉換為號誌時制計畫。故在後續研究中除了可以檢討時制計畫表的時制外，亦可進一步比較利用「號誌時制」與採用「一綠燈一車輛」的號誌控制方式對主線車流之影響。
5. 本研究未探討控制模式之啟動時機，因此，建議未來能針對此問題進行深入研究，以確立在不同車流狀態下，可變速限、匝道儀控或可變速限聯合匝道儀控等不同控制方式之啟動時機。

參考文獻



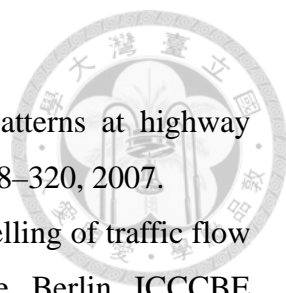
- [1] 交通部運輸研究所，「二〇〇一年台灣地區公路容量手冊」，民國 90。
- [2] 交通部運輸研究所，「公路路網交控及資訊系統架構設計與建置準則」，民國 99 年。
- [3] 江宜穎，「高速公路壅塞模擬與主線速率漸變控制模式之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 102 年。
- [4] 李彥明，「高速公路速率控制系統之研究」，中央大學土木工程研究所碩士論文，民國 83 年。
- [5] 李訓明，「高速公路主線車流控制策略」，成功大學交通管理研究所碩士論文，民國 84 年。
- [6] 吳健生，「高速公路主線主流車流控制策略之研究」，運輸學刊，第九卷，第一期，第 1-22 頁，民國 85 年。
- [7] 卓訓榮、傅昱瑄、陳豐榮，「車流動力學模式」，運輸計劃季刊，第三十七卷，第一期，第 109-138 頁，民國 97 年。
- [8] 林柏辰，「異常交通狀況下之高速公路基因模糊邏輯速限控制模式」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 98 年。
- [9] 高瑛穗，「雪山隧道行車特性分析」，中央大學土木工程研究所碩士論文，民國 98 年。
- [10] 許添本、簡正銓，「匝道儀控密度穩定法之研發」，運輸計劃季刊，第三十卷，第二期，第 275-302 頁，民國 90 年。
- [11] 許添本、吳佳紋、謝宗軒、林育瑞，「高速公路車輛偵測器數據之灰預測插補」，中華民國運輸學會 99 年年會暨學術論文國際研討會，民國 99 年。
- [12] 許添本、盧彥聰、林育瑞，「高速公路速限漸變控制策略之研究」，中華民國運輸學會 99 年年會暨學術論文國際研討會，民國 99 年。
- [13] 許添本、林育瑞，「鄰近長隧道入口壅塞車流劇變特性分析」，中華民國運輸

學會 100 年年會暨學術論文國際研討會，民國 100 年。

- 
- [14] 張堂賢、莊國欽，「非線性系統於高快速道路整合匝道儀控之研究」，運輸計劃季刊，第三十三卷，第四期，第 673-698 頁，民國 93 年。
- [15] 黃崇宇，「高速公路匝道儀控與速率控制協控模式之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 99 年。
- [16] 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」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 101 年。
- [17] 盧彥聰，「高速公路主線速率漸變控制策略之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 99 年。
- [18] 鄭凱錡，「高速公路連鎖式匝道儀控模式之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 99 年。
- [19] 薛博元，「高速公路速率控制與匝道儀控最佳化協控模式之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 100 年。
- [20] 蘇士縝，「隧道路段跟車模擬模式與駕駛特性之研究」，臺灣大學土木工程學研究所學位論文，民國 97 年。
- [21] A. Alessandri, A. Di Febbraro, A. Ferrara and E. Punta, “Optimal control of freeways via speed signalling and ramp metering,” Control Engineering Practice, pp. 771–780, 1998.
- [22] A.D. May, “Traffic Flow Fundamentals,” New Jersey, Prentice-Hall Inc, 1990.
- [23] A. Hegyi, B. De Schutter and J. Hellendoorn, “Shock wave elimination/reduction by optimal coordination of variable speed limits,” Intelligent Transportation Systems, pp. 225–230, 2002.
- [24] A. Hegyi, B. De Schutter and J. Hellendoorn, “Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves,” Intelligent Transportation Systems, pp. 102–112, 2002.
- [25] A. Heygi, B. De Schutter, H. Hellendoorn, “Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed control”, Transportation Research Part C, Vol. 13, No. 3, pp. 185–209, 2005.
- [26] A. Hegyi, M. Burger, B. De Schutter, J. Hellendoorn and T.J.J. van den Boom, “Towards a practical application of model predictive control to suppress shock

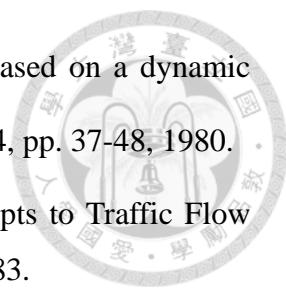
- waves on freeways,” Proceedings of the European Control Conference 2007, pp. 1764–1771, 2007.
- [27] A. Hegyi, S.P. Hoogendoorn, M. Schreuder and H. Stoelhorst, “SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory,” Intelligent Transportation Systems, pp. 827–832, 2008.
- [28] A. Hegyi, S.P. Hoogendoorn, M. Schreuder and H. Stoelhorst, “The expected effectivity of the dynamic speed limit algorithm SPECIALIST - A field data evaluation method,” Proceedings of the European Control Conference 2009, pp. 1770–1775, 2009.
- [29] A. Hegyi, S.P. Hoogendoorn, “Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways - Field test results of the SPECIALIST algorithm,” Intelligent Transportation Systems, pp. 519–524, 2010.
- [30] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavlis and F. Middelham, “Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET,” Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, pp. 282–292, 2002.
- [31] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, M. Mangeas, and H. Haj-Salem, “Coordinated and integrated control of motorway networks via nonlinear optimal control,” Transportation Research Part C, Vol. 10, pp. 65–84, 2002.
- [32] A. Kotsialos, M. Papageorgiou and F. Middelham, “Local and optimal coordinated ramp metering for freeway networks,” Intelligent Transportation System, Vol. 9, No. 4, pp.187–203, 2005.
- [33] A. Messmer, M. Papageorgiou, “METANET: a macroscopic simulation program for motorway networks,” Traffic Engineering and Control, Vol. 31, pp. 466–470, 1990.
- [34] B. Greenshields, “A study of traffic capacity,” Highway Research Board, Vol. 14, pp. 448–477, 1935.
- [35] B. Kerner, H. Kirschfink and H. Rehborn “Method for the automatic monitoring of traffic including the analysis of back-up dynamics,” 1996.
- [36] B. Kerner, “Theory of congested traffic flow: self organization without bottlenecks,” Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 147–172, 1999.
- [37] B.S. Kerner, “Probabilistic nature of breakdown phenomenon and onramp metering in three-phase traffic theory,” Control in Transportation Systems, Vol. 11, pp. 273–


278, 2006.

- 
- [38] B.S. Kerner, “Control of spatiotemporal congested traffic patterns at highway bottlenecks,” *Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, pp. 308–320, 2007.
- [39] C. Buisson, J.P. Lebacque and J.B. Lesort, “Macroscopic modelling of traffic flow and assignment in mixed networks,” *Proceedings of the Berlin ICCCB Conference*, 1995.
- [40] C. Buisson, J.P. Lebacque and J.B. Lesort, “STRADA, a discretized macroscopic model of vehicular traffic flow in complex networks based on the Godunov scheme,” *Proceedings of the CESA '96 IEEE Conference*, 1996.
- [41] C. Buisson, J.P. Lebacque, J.B. Lesort and H. Mongeot, “The STRADA model for dynamic assignment,” *Proceedings of the ITS Conference*, 1996.
- [42] C. Daganzo, “The cell transmission model Part I: A simple dynamic representation of highway traffic”, 1993.
- [43] C. Daganzo, “The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory,” *Transportation Research Part B*, Vol. 28, No. 4, pp.269 – 287, 1994.
- [44] C. Daganzo, “The Cell Transmission Model Part II: Network Traffic,” *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 2, pp.79–93, 1995.
- [45] C. Daganzo, “A finite difference approximation of the kinematic wave model of traffic flow,” *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 4 pp.261–276, 1995.
- [46] C. Daganzo, “Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow,” *Transportation Research Part B*, Vol. 29, pp. 277–286, 1995.
- [47] C. Daganzo, “A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex boundary conditions,” *Transportation Research Part B*, Vol. 39, No. 2, pp. 187–196, 2005.
- [48] C.H. Wei, K.Y. Wu, “Applying an artificial neural network model to freeway ramp metering control,” *Transportation Planning Journal*, Vol. 25 No. 3, 1996.
- [49] G.F. Newell, “A simplified theory of kinematic waves in highway traffic. Part I: general theory. Part II: queuing at freeway bottlenecks. Part III: multideestination flows,” *Transportation Research Part B*, Vol. 27, No. 4, pp. 281–313, 1993.
- [50] G.L. Chang, P. Ho and C. Wei, “A dynamic system-optimum control model for commuting traffic corridors,” *Transportation Research Part C*, Vol 1, No.1, pp. 3–

- 22, 1993.
- [51] G.L. Chang, J. Wu and S.L. Cohen, “Integrated real-time ramp metering model for nonrecurrent congestions: framework and preliminary results,” *Transportation Research Record*, No.1446, pp. 56–65, 1994.
- [52] H.M. Zhang, S.G. Ritchie, “Freeway ramp metering using artificial neural networks,” *Transportation Research C*, Vol. 5, No. 5, pp. 273–286, 1997.
- [53] H. Payne, “Models of freeway traffic and control,” *Mathematical Models of Public Systems*, Vol. 1, pp. 51–61, 1971.
- [54] H. Payne, “FREEFLO: A macroscopic simulation model of freeway traffic,” *Transportation Research Record*, Vol. 722, pp. 68–77, 1979.
- [55] H. Remeijn, “The dutch motorway control and signalling system. Rijkswaterstaat,” *Traffic Engineering Division, TXR-S 131*, pp. 103–150, 1984.
- [56] H. Zhang, S.G. Ritchie and W.W. Recker, “Some general results on the optimal ramp control problem,” *Transpn Research PartC*, Vol. 4, No.2, pp. 51–69, 1996.
- [57] H. Zhang, W.W. Recker, “On optimal freeway ramp control policies for traffic corridors,” *Transportation Research B*, Vol. 33, No. 6, pp. 471–436, 1999.
- [58] H. Zhang, W. Lin, “Some recent developments in traffic flow theory,” *Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 548–553, 2001.
- [59] H. Zhang, S.G. Ritchie and R. Jayakrishnan, “Coordinated traffic-responsive ramp control via nonlinear state feedback,” *Transportation Research Part C*, Vol. 9, No. 5, pp. 337–352, 2001.
- [60] I. Papamichail, K. Kampitaki, M. Papageorgiou and A. Messmer, “Integrated ramp metering and variable speed limit control of motorway traffic flow,” *Proceedings of the 17th International Federation of Automatic Control World Congress*, pp. 14084–14089, 2008.
- [61] J. Lebacque, “Semi-macroscopic simulation of urban traffic,” *Proceedings of the International AMSE Conference Modelling and Simulation*, Vol. 4, pp. 273–292, 1984.
- [62] J. Lebacque, “The Godunov scheme and what it means for first order traffic flow models,” *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1996.
- [63] J. Lebacque, “Intersection modeling, application to macroscopic network traffic flow modeling and traffic management,” *Proceedings of the Traffic and Granular*

- Flow, pp. 261–278, 2003.
- [64] J. Lebacque, M. Khoshyaran, “First-order macroscopic traffic flow models: intersection modeling, network modeling”. Mahmassani, pp. 365–386, 2005.
- [65] J. Laval, C. Daganzo, “Lane-changing in traffic streams,” *Transportation Research Part B*, Vol. 40, No. 3, pp. 251–264, 2006.
- [66] J.-S. OH, C. OH, “Dynamic speed control strategy for freeway traffic congestion management,” *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 595–607, 2005.
- [67] J. Treiterer, J.A. Myers, “The Hysteresis Phenomenon in traffic flow,” *Proceedings of the Transportation and Traffic Theory*, pp. 13–38, 1974.
- [68] J. Wu, G.L. Chang, “An integrated optimal control and algorithm for commuting corridors,” *International Transactions on Operational Research*, Vol. 6, pp. 39–55, 1999.
- [69] J. Wu, “Continuous kinematic wave models of merging traffic flow,” *Transportation Research Part B*, Vol.44, pp. 1084–1103, 2010.
- [70] K. Bogenberger, A.D. May, “Advanced coordinated traffic responsive ramp metering strategies,” Berkeley, 1999.
- [71] K.P. Kang, G.L. Chang and N. Zou1, “Optimal dynamic speed limit control for highway work zone operations,” *Transportation Research Record*, pp. 77–84, 2004.
- [72] Kianfar, Jalil, and Carlos Sun, “Operational analysis of a freeway variable speed limit system-case study of deployment in Missouri,” *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, No. 13, 2013.
- [73] L. Chu, X. Yang, “Optimization of the ALINEA Ramp-metering Control Using Genetic Algorithm with Micro-simulation,” *Proceedings of the 2003 TRB Board*, 2003.
- [74] L. Zhang, D. Levinson, “Optimal Freeway Ramp Control without Origin-Destination Information,” *Transportation Research part B*, Vol. 38, No. 10, pp. 869-887, 2004.
- [75] M. Lighthill, J. Witham, “On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long crowded roads,” *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 229, No. 1178, pp. 317–345, 1955.
- [76] M. Cremer, M. Papageorgiou, “Parameter identification for a traffic flow model,” *Automatica*, Vol. 17, No. 6, pp. 837-843. 1981.

- 
- [77] M. Papageorgiou, “A new approach to time-of-day control based on a dynamic freeway traffic model,” *Transportation Research Part B*, Vol. 14, pp. 37-48, 1980.
- [78] M. Papageorgiou, “Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control,” Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1983.
- [79] M. Papageorgiou, J. Bloesville and H. Haj-Salem, “Macroscopic modelling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris,” *Transportation Research Part B*, Vol. 23, pp.29–47, 1989.
- [80] M. Papageorgiou, J.M. Blossville and H. Hadj-Salem, “Modeling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Périphérique in Paris: Part I: Modeling,” *Transportation Research Part A*, Vol. 24, pp. 345–359, 1990.
- [81] M. Papageorgiou, H. Haj-Salem and J. Bloesville, “Modeling and real time control of traffic flow on the southern part of the Boulevard Peripherique in Paris: Part II: Coordinated on-ramp metering,” *Transportation Research Part A*, Vol. 24, pp. 361–370, 1990.
- [82] M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem and J.-M. Blossville, “ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering,” *Transportation Research Record*, No. 1320, pp. 58–64, 1991.
- [83] M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem and F. Middelham, “ALINEA local ramp metering -summary of field results,” *Transportation Research Record*, Vol. 1603, 1997.
- [84] M. Papageorgiou, “Some remarks on macroscopic traffic flow modelling,” *Transpn Research PartA*, Vol. 32, pp. 323–329, 1998.
- [85] M. Papageorgiou, A. Kotsialos, “Freeway ramp metering: an overview,” *Intelligent Transportation Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 271–281, 2002.
- [86] M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos and I. Papamichail, “Effects of variable speed limits on motorway traffic flow,” *Transportation Research Record*, No. 2047, pp. 37-48, 2008.
- [87] M. Zhang, T. Kim, X. Nie and W. Jin, “Evaluation of On-ramp Control Algorithms,” September 2001.
- [88] N.H. Gartner, C.J. Messer, A.K. Rathi, “Revised monograph on traffic flow theory,” *Transportation Research Board*, FHWA, 2000.
- [89] Nissan, Albania, and Haris N. Koutsopoulosb, “Evaluation of the impact of

- 
- advisory variable speed limits on motorway capacity and level of service,”
Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol. 16, pp. 100–109, 2011.
- [90] P. Richards, “Shock waves on highways,” *Operations Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 42–51, 1956.
- [91] P.W. Lin, K.P. Kang and G.L. Chang, “Exploring the effectiveness of variable speed Limit controls on highway work-zone operations,” *Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–14, 2004.
- [92] R. Ansorge, “What does the entropy condition mean in traffic flow theory?”
Transportation Research Part B, Vol. 24, pp. 133–143, 1990.
- [93] R.C. Carlson, I. Papamichail and M. Papageorgiou, “Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits,”
Intelligent Transportation Systems, Vol. 12, No.4 , pp. 1261–1276, 2011.
- [94] Stef. Smulders, “Control of freeway traffic flow by variable speed signs,”
Transportation Research Part B, Vol. 24, pp. 111–132, 1990.
- [95] S. Hoogendoorn, P. Bovy, “State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling,”
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I, pp. 283–303, 2001.
- [96] S. Ahn, R.L. Bertini, B. Auffray, J.H. Ross and O. Eshel, “Evaluating the Benefits of a System-Wide Adaptive Ramp-Metering Strategy in Portland, Oregon,”
Transportation Research Record, Vol. 2012, pp.47-56, 2007.
- [97] W.L. Jin, H.M. Zhang, “On the distribution schemes for determining flows through a merge,” *Transportation Research Part B*, Vol. 37, pp. 521–540, 2003.

附錄一

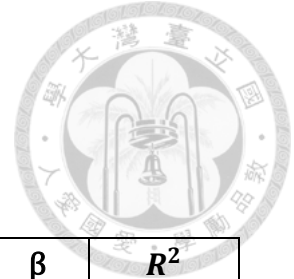


路段	設備編號(VDID)	偵測型式	位置
南港系統-石碇	VD-5N-0.178	環路線圈式	主線
南港系統-石碇	VD-5N-0.706	環路線圈式	主線
南港系統-石碇	VD-5N-SDT-1.068	環路線圈式	石碇隧道
南港系統-石碇	VD-5N-SDT-1.435	環路線圈式	石碇隧道
南港系統-石碇	VD-5N-SDT-1.788	環路線圈式	石碇隧道
南港系統-石碇	VD-5N-SDT-2.068	路側式(微波)	石碇隧道
南港系統-石碇	VD-5N-SDT-2.455	環路線圈式	石碇隧道
南港系統-石碇	VD-5N-SDT-2.849	環路線圈式	石碇隧道
南港系統-石碇	VD-5N-SDT-3.198	環路線圈式	石碇隧道
石碇交流道	VD-5N-SDIC-I-4.044	環路線圈式	入口匝道
石碇交流道	VD-5N-4.400	環路線圈式	主線
石碇交流道	VD-5N-SDIC-O-4.455	路側式(微波)	出口匝道
石碇-坪林	VD-5N-4.460	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-5.523	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-5.883	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-6.413	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-7.113	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-7.636	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-8.043	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-8.703	路側式(微波)	主線
石碇-坪林	VD-5N-9.013	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-PST-9.373	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-9.840	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-10.147	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-10.506	路側式(微波)	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-P-10.866	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-11.178	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-11.555	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-P-11.896	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-12.238	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-12.579	路側式(微波)	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-PST-12.922	環路線圈式	彭山隧道
石碇-坪林	VD-5N-13.348	環路線圈式	主線
石碇-坪林	VD-5N-13.763	環路線圈式	主線

石碇-坪林	VD-5N-14.550	環路線圈式	主線
坪林交流道	VD-5N-PLIC-I-14.583	環路線圈式	入口匝道
坪林交流道	VD-5N-PLIC-O-14.683	環路線圈式	出口匝道
坪林-頭城	VD-5N-14.800	環路線圈式	主線
坪林-頭城	VD-5N-SST-15.488	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-15.855	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-16.196	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-16.570	路側式(微波)	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-16.900	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-17.268	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-17.608	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-17.998	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-18.313	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-18.662	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-19.012	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-19.361	路側式(微波)	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-19.689	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-20.062	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-20.412	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-20.752	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-21.055	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-21.444	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-21.808	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-22.158	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-22.510	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-22.859	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-23.209	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-23.568	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-23.911	路側式(微波)	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-24.264	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-24.677	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-24.952	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-25.310	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-25.652	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-26.007	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-26.300	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-P-26.705	路側式(微波)	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-27.056	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-27.468	環路線圈式	雪山隧道
坪林-頭城	VD-5N-SST-27.779	路側式(微波)	雪山隧道

坪林-頭城	VD-5N-28.420	環路線圈式	主線
頭城交流道	VD-5N-TCIC-I-29.843	環路線圈式	入口匝道
頭城交流道	VD-5N-30.100	環路線圈式	主線
頭城交流道	VD-5N-TCIC-O-30.407	環路線圈式	出口匝道
頭城-宜蘭	VD-5N-30.551	環路線圈式	主線
頭城-宜蘭	VD-5N-32.743	環路線圈式	主線
頭城-宜蘭	VD-5N-34.898	環路線圈式	主線
宜蘭交流道	VD-5N-YLIC-I-35.868	環路線圈式	入口匝道
宜蘭交流道	VD-5N-36.073	環路線圈式	主線
宜蘭交流道	VD-5N-37.225	路側式(微波)	主線
宜蘭交流道	VD-5N-39.686	環路線圈式	主線
宜蘭交流道	VD-5N-YLIC-O-41.370	環路線圈式	出口匝道
宜蘭-羅東	VD-5N-42.359	環路線圈式	主線
宜蘭-羅東	VD-5N-44.252	環路線圈式	主線
羅東交流道	VD-5N-LDIC-I-45.162	環路線圈式	入口匝道
羅東交流道	VD-5N-45.240	環路線圈式	主線
羅東交流道	VD-5N-46.516	路側式(微波)	主線
羅東交流道	VD-5N-LDIC-O-48.130	環路線圈式	RMS 主線 VD
羅東-蘇澳	VD-5N-49.070	環路線圈式	主線
羅東-蘇澳	VD-5N-51.095	環路線圈式	主線
羅東-蘇澳	VD-5N-53.065	路側式(微波)	主線
蘇澳交流道	VD-5N-SAIC-I-54.080	路側式(微波)	機場系統-內壢

附錄二



	設備編號(VDID)	v^f (km/hr)	ρ^c (veh/km/2lane)	β	R^2
Link1	VD-5N-45.240	99.78	3827	2	1.43E-06
	VD-5N-46.516	96.5	286.7	2	3.68E-05
	VD-5N-49.070	100.2	140.1	1.313	0.03425
	VD-5N-51.095	95.07	1994	2	2.31E-06
	VD-5N-53.065	92.99	7675	2	7.33E-07
Link2	VD-5N-34.898	88.73	65.12	3.623	0.4073
	VD-5N-36.073	107.4	104.6	2	0.04973
	VD-5N-39.686	95.55	113.8	2	0.03458
	VD-5N-42.359	93.89	98.29	2	0.1566
	VD-5N-44.252	97.07	73.31	2	0.1895
Link3	VD-5N-30.100	87.11	82.78	2	0.8116
	VD-5N-30.551	89.28	81.43	2.061	0.7305
Link4	VD-5N-SST-24.264	93.15	70.32	1.416	0.8767
	VD-5N-SST-24.677	95.94	72.41	1.345	0.8573
	VD-5N-SST-24.952	93.29	68.32	1.503	0.8559
	VD-5N-SST-P-25.310	99.02	71.3	1.218	0.878
	VD-5N-SST-25.652	95.19	71.81	1.343	0.8722
	VD-5N-SST-26.007	89.7	68.79	1.534	0.8741
	VD-5N-SST-26.300	95.3	67.96	1.443	0.8031
	VD-5N-SST-P-26.705	93.29	55.95	1.83	0.866
	VD-5N-SST-27.056	91.74	58.59	1.879	0.8602
	VD-5N-SST-27.468	91.88	60.04	1.859	0.9107
	VD-5N-SST-27.779	88.09	64.82	2.114	0.9576
	VD-5N-28.420	91.24	75.57	1.715	0.971
Link5	VD-5N-SST-20.062	94.55	68.65	1.322	0.8933
	VD-5N-SST-20.412	92.36	65.34	1.442	0.8911
	VD-5N-SST-20.752	91.63	62.38	1.539	0.8938
	VD-5N-SST-P-21.055	89.72	63.5	1.506	0.9049
	VD-5N-SST-21.444	95.19	67.15	1.349	0.9499
	VD-5N-SST-21.808	97.02	69.09	1.28	0.9449
	VD-5N-SST-22.158	100.6	72.14	1.259	0.9405

	VD-5N-SST-P-22.510	96.8	68.08	1.272	0.9176
	VD-5N-SST-22.859	93.73	68.39	1.408	0.943
	VD-5N-SST-23.209	95.37	70.28	1.325	0.9224
	VD-5N-SST-23.568	97.04	70.25	1.302	0.921
	VD-5N-SST-P-23.911	95.67	65.9	1.364	0.8955
Link6	VD-5N-14.550	89.81	113	1.507	0.5709
	VD-5N-14.800	83.85	66.27	2.375	0.6557
	VD-5N-SST-15.488	87.07	59.26	2.015	0.8131
	VD-5N-SST-15.855	89.73	60.83	1.79	0.8602
	VD-5N-SST-16.196	87.88	61.08	1.837	0.8457
	VD-5N-SST-P-16.900	91.45	61.83	1.549	0.8697
	VD-5N-SST-17.268	92.31	67.73	1.419	0.8729
	VD-5N-SST-17.608	94.22	68.35	1.371	0.8566
	VD-5N-SST-17.998	95.91	73.28	1.252	0.8438
	VD-5N-SST-P-18.313	93.39	67.31	1.355	0.8435
	VD-5N-SST-18.662	96.54	74.34	1.236	0.8466
	VD-5N-SST-19.012	97.99	83.68	1.111	0.8435
	VD-5N-SST-19.361	101.2	81.04	1.082	0.86
VD-5N-SST-P-19.689	97.24	67.6	1.259	0.8642	

附錄三



時階	頭城	宜蘭	羅東	蘇澳	VSL1					VSL2					VSL3					VSL4					VSL5					VSL6					VSL7					VSL8					Fitness value										
	442	1395	1399	880	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	158954
	1278	408	438	815	-	-	-	90	89	-	-	-	90	90	-	-	-	90	90	-	-	-	90	90	-	-	-	90	90	-	-	-	90	90	-	-	-	90	90	-	-	-	90	90	-	-	-	90	90	306066					
	853	462	1248	1035	-	-	80	60	40	-	-	87	67	47	-	-	90	74	67	-	-	90	75	73	-	-	90	76	75	-	-	90	79	75	-	-	90	83	86	-	-	90	84	89	469902										
	1122	716	1395	1327	-	86	72	64	44	-	89	78	66	50	-	90	84	70	59	-	90	85	80	64	-	90	85	83	72	-	90	90	88	75	-	90	90	90	85	-	90	90	90	90	655326										
	1145	1188	1049	1109	72	69	53	53	40	77	73	62	57	48	79	76	67	58	50	79	77	70	63	61	85	78	81	65	63	85	78	83	69	66	88	80	88	86	66	89	84	89	87	69	859426										
1	1100	800	1100	1100	80					80					90					90					90					90					90					-															
	876	626	767	915	69	54	49	58	41	69	55	52	65	52	74	58	57	73	63	75	58	59	79	65	75	62	66	79	65	82	62	68	79	72	86	70	71	83	73	90	90	88	84	86	801483										
2	-				70					70					80					80					80					80					90					90					-										
	1084	755	997	1227	61	58	41	58	54	63	59	47	59	58	67	60	49	63	64	70	63	52	68	64	70	63	57	69	70	78	67	67	70	71	78	82	71	73	78	88	89	71	87	82	795139										
3	-				60					60					70					70					70					80					80					90					-										
	637	702	614	972	70	63	51	47	40	76	65	60	54	44	77	65	64	60	46	79	66	74	62	61	80	73	76	64	61	82	74	76	70	68	88	78	76	76	73	89	81	76	83	83	822454										
4	-				60					60					60					70					70					70					80					90					-										
	796	1175	1099	1227	53	54	68	54	57	56	60	68	56	59	64	63	68	56	66	64	63	70	56	67	66	63	71	56	68	66	64	73	56	72	73	67	76	61	80	80	74	81	75	89	839641										
5	-				50					60					60					60					70					70					70					80					-										
	1026	1257	673	1021	48	55	50	50	43	49	66	53	62	49	50	67	55	66	53	60	74	60	68	54	61	78	70	72	55	76	82	72	75	58	87	89	75	76	64	89	89	82	88	81	863553										
6	900	1000	800	1100	50					60					60					70					70					70					80					80					-										
	972	868	691	948	61	68	56	52	47	61	69	57	58	48	62	69	57	68	56	69	69	70	68	56	70	72	75	74	67	71	72	76	77	67	71	73	80	83	69	72	74	88	85	75	857382										

7	-				60					60					60					70					70					70					80					80					-
	971	1079	1007	1141	62	44	48	46	56	64	55	55	51	56	72	56	60	56	61	78	59	66	57	62	81	64	72	61	66	83	66	79	62	72	84	69	86	69	82	88	83	88	85	90	917829
8	-				60					60					60					70					70					70					80					80					-
	1047	1006	996	1022	62	46	48	50	55	68	51	64	52	58	71	57	73	60	61	76	57	74	62	62	84	65	75	67	67	85	67	78	67	81	87	70	86	69	89	90	88	90	89	90	914639
9	-				50					60					60					70					70					80					80					90					-
	1329	700	889	1060	58	54	57	45	45	62	55	63	62	50	65	59	64	67	55	66	62	68	73	57	72	64	76	73	66	73	67	76	76	66	78	81	76	79	73	89	85	77	83	78	917742
10	-				50					60					60					60					70					70					80					90					-
	1150	923	992	937	46	62	58	56	47	56	63	58	58	47	60	63	60	61	50	61	69	61	62	53	71	71	63	63	64	71	71	66	64	67	75	75	77	68	77	82	75	82	74	85	858109
11	1100	900	900	1000	50					60					60					60					70					70					80					80					-
	1009	754	741	1148	61	61	49	55	51	70	64	59	59	53	75	64	59	61	58	77	72	59	63	61	77	73	60	67	68	79	75	61	73	69	81	81	73	73	75	90	89	85	78	88	856598
12	-				60					60					70					70					70					70					80					80					-
	1155	590	943	1171	69	52	43	57	62	70	64	54	59	64	71	67	56	66	67	73	67	57	67	67	75	68	61	76	68	76	70	73	84	68	77	81	81	86	68	77	81	84	87	75	873032
13	-				60					60					70					70					70					70					80					80					-
	1162	703	810	1169	48	60	54	47	53	65	60	60	53	61	74	63	62	65	66	75	65	66	68	68	76	65	76	69	69	77	70	77	70	71	79	77	79	86	73	85	83	85	87	87	868713
14	-				50					60					70					70					70					70					80					80					-
	1083	781	1047	1131	57	52	49	59	41	59	60	49	59	43	63	66	53	68	59	67	69	61	70	60	70	70	68	81	61	72	75	69	83	68	72	82	71	83	73	73	83	72	86	86	906713
15	-				50					60					60					60					70					70					80					80					-
	1071	832	1162	1176	49	46	55	66	53	53	51	55	66	59	54	56	55	67	67	57	61	58	68	68	57	65	60	68	68	69	65	71	69	69	70	66	73	70	69	85	70	86	79	85	945451
16	1100	800	1000	1200	50					60					60					60					70					70					80					80					-
	951	1291	999	1165	47	56	51	60	60	50	61	59	67	60	56	61	66	68	60	62	64	67	71	63	63	66	67	74	63	69	68	68	75	63	77	67	70	75	65	78	67	83	77	65	925139
17	-				50					50					60					60					70					70					70					80					-

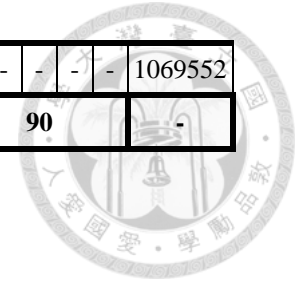
	819	660	522	1052	64	59	48	45	54	66	70	55	61	60	71	70	57	69	60	74	71	59	73	63	74	71	62	73	64	74	71	64	76	66	76	71	73	77	71	79	72	74	80	72	910355
18	-				60				60				60				70				70				70				70				80				-								
	808	954	1211	1030	52	60	68	60	53	58	61	69	60	54	61	62	69	60	54	73	63	70	60	63	74	70	71	66	70	76	74	71	68	77	76	81	72	69	85	86	83	79	82	90	948959
19	-				50				60				70				70				70				70				70				80				-								
	1143	686	1040	1192	64	47	55	63	44	69	56	55	65	59	70	63	56	73	59	71	71	58	73	59	71	71	69	75	71	74	85	74	77	71	74	86	77	77	73	86	90	86	82	81	982981
20	-				60				60				60				70				70				70				80				80				-								
	1141	685	854	1033	65	60	42	48	56	65	62	47	58	64	65	66	56	63	65	65	69	57	64	66	65	73	57	70	66	65	74	58	70	73	76	75	58	77	87	84	81	70	87	89	966591
21	1000	800	900	1100	60				60				70				70				70				70				80				80				-								
	797	1043	1063	1186	49	56	52	46	52	56	60	57	52	56	57	71	66	53	62	62	77	68	61	67	68	84	73	61	72	81	88	77	61	72	81	88	79	66	73	88	89	80	82	74	985618
22	-				50				60				60				60				70				80				80				80				-								
	1114	1236	867	1088	59	49	67	51	44	66	49	68	62	48	70	54	68	62	50	71	65	68	63	56	73	70	68	67	66	73	70	80	67	69	74	70	81	71	75	82	70	89	75	76	1022330
23	-				50				60				70				70				70				70				80				80				-								
	833	964	1295	1257	61	47	62	44	47	62	66	63	53	50	63	67	64	55	54	63	71	68	59	55	72	71	69	71	61	75	82	70	72	72	84	88	78	82	75	89	89	83	88	78	1061393
24	-				50				60				60				60				70				70				80				80				-								
	1164	551	1149	1216	49	63	66	49	56	56	68	67	52	60	59	75	69	57	66	62	75	74	60	66	65	80	74	60	69	65	81	76	62	76	73	83	80	82	78	82	86	88	82	89	1037202
25	-				50				60				60				70				70				70				80				90				-								
	1266	742	807	1258	57	61	55	57	51	60	65	64	66	61	60	66	69	66	74	77	68	69	83	77	77	70	73	83	79	85	70	73	84	81	88	74	75	87	81	90	75	85	87	88	1028183
26	1100	800	1000	1200	60				60				70				70				70				80				80				80				-								
	816	859	461	1157	66	64	46	47	57	67	64	46	50	62	68	64	46	51	63	68	64	59	55	68	68	64	66	55	69	68	69	69	58	71	70	74	69	66	73	79	75	79	77	81	1044751
27	-				60				60				60				70				70				70				80				80				-								
	895	1042	734	1033	61	62	51	46	53	68	63	51	51	66	70	63	53	51	66	76	71	56	56	67	86	71	59	61	81	89	79	70	64	82	89	79	74	68	84	90	88	78	71	89	1054414

28	-				60					60					70					70					70					80					80					80					-
	1232	1166	851	1039	55	55	62	62	53	58	55	65	62	61	62	57	65	63	64	65	65	67	74	70	67	67	72	77	71	83	69	76	80	74	87	75	85	81	83	90	87	90	84	90	1072921
29	-				60					60					60					70					70					80					80					90					-
	910	907	703	1303	62	62	51	41	59	66	65	53	47	63	67	68	59	52	65	69	68	64	59	65	71	69	69	73	65	73	76	73	73	66	75	82	76	85	67	75	85	77	85	68	1063658
30	-				60					60					60					70					70					70					80					-					
	1096	1181	1035	1129	52	51	57	52	42	52	59	69	59	49	53	64	69	60	54	65	74	71	67	60	70	74	85	69	70	71	77	85	85	72	78	85	85	86	78	90	88	86	89	83	1078386
31	1000	1100	800	1100	60					60					60					70					70					70					80					90					-
	1057	864	824	973	54	60	53	50	65	58	67	57	60	69	60	69	61	64	71	64	74	70	65	72	66	76	73	66	75	68	77	76	72	78	74	78	76	74	84	75	84	77	85	88	1054375
32	-				50					60					60					70					70					70					80					80					-
	961	637	817	943	61	55	45	50	52	61	63	49	54	56	63	64	59	54	58	65	69	61	62	61	67	74	68	65	68	73	79	74	69	70	75	87	82	76	70	78	88	86	79	83	1069583
33	-				60					60					60					70					70					80					80					80					-
	1015	723	513	1211	51	50	68	58	40	58	65	71	68	49	61	65	74	70	50	64	82	77	71	51	67	85	82	77	59	85	87	82	77	76	90	88	83	82	76	90	90	85	86	78	1041461
34	-				50					60					60					70					70					80					80					90					-
	960	1125	763	1039	43	58	57	51	50	47	58	59	59	62	54	59	61	66	63	66	60	64	71	70	68	63	66	72	71	80	66	66	74	72	83	70	79	78	75	88	74	84	86	88	1040608
35	-				50					50					60					70					70					80					80					90					-
	1080	619	1086	1187	60	64	53	45	42	60	64	60	48	48	60	66	63	61	53	60	66	63	61	60	61	72	65	63	67	66	77	69	63	72	72	80	70	69	83	88	85	73	74	87	1076321
36	1000	800	800	1100	60					60					60					60					70					70					80					80					-
	794	850	1150	863	50	53	47	42	40	52	56	62	48	56	59	59	68	67	68	63	63	70	69	70	68	76	72	72	75	79	83	78	73	75	85	87	78	83	88	90	90	81	88	88	1044756
37	-				60					60					60					60					70					80					80					90					-
	964	889	556	1173	59	53	53	56	41	60	55	58	59	45	63	55	58	63	63	66	57	61	66	75	69	61	63	70	75	74	76	65	75	77	78	85	82	88	77	86	90	87	90	85	1017792
38	-				50					60					60					60					70					80					80					80					-

	1069	652	687	1250	60	61	46	54	56	63	63	57	66	57	67	66	57	67	58	75	68	67	67	60	79	71	67	68	61	80	75	75	69	61	82	77	85	70	70	86	84	86	75	79	975258
39	-				50				60				60				70				70				80				80				80				-								
	961	1143	595	902	44	48	60	40	46	47	53	62	56	47	48	53	65	57	56	57	61	65	64	62	58	65	72	66	66	75	68	75	76	68	83	71	76	76	71	85	80	76	89	74	982851
40	-				50				50				60				60				60				70				80				90				-								
	844	940	1086	1040	51	62	53	52	41	51	64	56	53	45	63	69	56	54	52	66	73	60	58	53	69	73	60	59	54	73	76	60	64	57	78	80	72	64	58	82	89	76	77	62	961402
41	900	900	800	1100	50				50				60				70				70				70				80				80				-								
	964	882	1224	1022	62	68	62	44	47	65	71	65	55	49	65	78	69	55	49	68	79	70	59	58	69	82	72	63	63	73	83	74	70	67	80	85	78	80	87	81	88	82	87	90	971675
42	-				60				60				70				70				70				70				80				80				-								
	1343	981	495	879	61	48	51	45	49	62	66	52	57	67	71	68	57	60	75	74	68	59	63	78	83	70	68	65	84	84	72	70	67	84	84	73	74	78	84	88	80	81	87	87	951567
43	-				60				60				70				70				70				80				80				90				-								
	1047	1009	574	1320	44	52	59	55	54	58	55	70	56	54	63	60	73	62	60	65	64	75	70	71	67	67	75	71	72	76	68	77	72	74	78	71	81	76	80	87	77	82	83	86	1005917
44	-				50				60				60				70				70				70				70				80				-								
	1185	939	905	1011	64	44	52	40	42	71	52	53	46	57	71	59	53	58	60	73	63	54	59	66	78	67	56	63	70	80	68	59	63	72	83	71	74	79	72	88	84	90	90	80	1014064
45	-				50				60				60				60				70				70				80				80				-								
	1047	923	1107	970	55	63	73	54	43	66	67	73	59	47	66	71	74	64	50	66	74	75	66	57	68	77	75	66	58	76	79	75	73	59	81	80	77	73	66	86	84	80	75	77	1072005
46	1100	900	900	1000	50				60				60				70				70				70				80				90				-								
	694	1101	716	1183	43	59	56	65	45	48	61	58	65	56	53	63	75	66	58	55	64	75	68	59	71	64	75	70	61	71	67	78	70	69	72	83	82	74	74	76	88	84	85	80	1028585
47	-				50				60				60				60				70				70				80				80				-								
	1154	745	1169	1070	47	53	61	47	47	47	57	63	57	52	55	57	64	59	57	59	62	69	59	62	63	71	75	59	66	64	71	77	63	70	72	78	77	68	77	75	84	82	87	80	1078393
48	-				50				60				60				60				70				70				80				80				-								
	1330	1226	887	993	55	46	51	42	42	60	48	54	55	47	66	59	67	60	55	69	59	72	63	67	72	61	76	72	67	77	70	79	77	69	79	72	82	79	75	82	81	87	87	79	1073879

49	-				50					60					60					70					70					70					80					80					-
	1172	734	587	1072	64	64	47	57	50	64	67	59	61	53	67	69	62	61	56	67	69	62	69	59	71	71	62	75	59	78	71	62	77	61	79	72	82	79	62	81	87	89	79	69	1080604
50	-				60					60					60					70					70					80					80					-					
	924	612	967	975	48	58	49	51	40	49	61	63	51	43	53	67	64	55	63	55	70	64	56	71	56	72	67	75	73	64	72	69	78	82	75	80	69	79	84	79	83	78	83	90	1107671
51	1100	800	900	1000	50					60					60					70					70					80					-										
	933	825	825	1050	53	61	58	52	44	57	63	60	63	60	59	66	66	70	72	72	67	77	72	74	77	68	85	73	78	77	73	87	75	82	89	75	88	77	83	90	82	89	80	88	1121242
52	-				50					60					60					70					70					70					80					90					-
	1009	894	1225	937	51	50	62	45	42	56	66	64	48	52	71	74	69	50	56	73	75	70	50	58	74	75	71	52	63	75	77	80	68	71	80	77	87	78	74	83	84	90	83	77	1070294
53	-				50					60					70					70					70					80					80					-					
	1001	683	754	903	52	41	47	42	43	56	60	54	51	50	56	64	64	51	57	56	70	70	62	59	58	70	70	67	61	72	79	71	70	75	73	81	75	74	76	85	88	76	76	83	1084207
54	-				50					60					60					70					70					80					80					80					-
	998	863	1002	991	60	55	64	45	49	60	60	69	54	58	62	60	69	54	66	62	66	71	57	67	65	67	71	58	69	75	70	74	70	70	81	78	83	71	72	82	81	87	71	72	1082734
55	-				50					60					70					70					70					80					80					90					-
	1171	641	605	1097	62	45	52	40	40	80	64	55	41	40	83	70	64	45	45	90	71	66	54	54	90	79	71	72	59	90	83	85	82	62	90	88	87	83	81	90	90	90	90	90	1069153
56	1100	800	800	1000	50					60					70					70					70					80					80					80					-
	-	-	-	-	54	46	59	62	-	63	55	62	62	-	66	56	63	68	-	75	58	68	68	-	77	58	73	68	-	81	63	77	73	-	86	67	78	78	-	87	68	84	82	-	1103567
57	-				50					60					70					70					70					80					80					90					-
	-	-	-	-	63	45	59	-	-	66	48	64	-	-	72	55	66	-	-	78	66	72	-	-	79	67	74	-	-	84	67	84	-	-	90	74	89	-	-	90	90	90	-	-	1097526
58	-				50					60					60					70					70					80					80					80					-
	-	-	-	-	50	48	-	-	-	58	60	-	-	-	65	64	-	-	-	71	69	-	-	-	74	85	-	-	-	74	86	-	-	-	80	90	-	-	-	85	90	-	-	-	1102607
59	-				50					50					60					70					70					70					80					90					-

	-	-	-	-	53	-	-	-	-	53	-	-	-	-	57	-	-	-	-	63	-	-	-	-	71	-	-	-	-	81	-	-	-	-	88	-	-	-	-	90	-	-	-	-	1069552
60	-				50				60				60				70				70				80				90				90				-								



附錄四

匝道儀控時制計畫表(單車道)



編號	控制功能	儀控率	綠燈時間	黃燈時間	紅燈時間
0	長紅	-	-	-	ALL
1	儀控率	100	4	3	65
2	儀控率	200	7	3	44
3	儀控率	300	10	3	35
4	儀控率	400	10	3	23
5	儀控率	500	10	3	16
6	儀控率	600	10	3	11
7	儀控率	700	10	3	8
8	儀控率	800	13	3	7
9	儀控率	900	15	3	6
10	儀控率	1000	19	3	6
11	儀控率	1100	24	3	6
12	儀控率	1200	27	3	6
13	儀控率	1300	31	3	6
14	儀控率	1400	41	3	6
15	儀控率	1500	48	3	6
16	儀控率	1600	51	3	6
17	儀控率	1700	54	3	6
18	儀控率	1800	56	3	6
19	儀控率	1900	59	3	6
20	儀控率	2000	63	3	6
21	儀控率	350	2	3	15
22	儀控率	450	2	3	11
23	儀控率	550	2	3	8
24	儀控率	650	4	3	10
25	儀控率	750	4	3	7
26	儀控率	850	4	3	6
27	儀控率	950	4	3	4
28	儀控率	1050	4	3	3
29	長綠	2	ALL	-	-
30	閃黃	3	-	FLASH	-
31	停止顯示	4	-	-	-
32	儀控率	220	15	3	99
33	儀控率	300	15	3	65
34	儀控率	400	15	3	45
35	儀控率	500	15	3	32
36	儀控率	600	15	3	24
37	儀控率	720	15	3	18
38	儀控率	800	15	3	14

匝道儀控時制計畫表(雙車道)：蘇澳

編號	控制功能	儀控率	綠燈時間	黃燈時間	紅燈時間
0	長紅	-	-	-	ALL
1	儀控率	100	2	3	67
2	儀控率	200	4	3	65
3	儀控率	300	4	3	41
4	儀控率	400	4	3	29
5	儀控率	500	7	3	33
6	儀控率	600	10	3	35
7	儀控率	700	10	3	28
8	儀控率	800	10	3	23
9	儀控率	900	10	3	19
10	儀控率	1000	10	3	16
11	儀控率	1100	13	3	17
12	儀控率	1200	13	3	14
13	儀控率	1300	13	3	12
14	儀控率	1400	13	3	13
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29	長綠	2	ALL	-	-
30	閃黃	3	-	FLASH	-
31	停止顯示	4	-	-	-