

國立交通大學

運輸科技與管理學系

碩士論文

公車路線適應式號誌時制模式之模擬

The Simulation of Adaptive Signal Control for
Transit Bus Routes



研 究 生：洪瑞禧

指導教授：卓訓榮 林貴璽 老師

中華民國九十四年一月

公車路線適應式號誌時制模式之模擬

The Simulation of Adaptive Signal Control for Transit Bus Routes

研 究 生：洪瑞禧

Students: Hong, Ruey-Shii

指導教授：卓訓榮

Advisor: Dr. Cho, Hsun-Jung

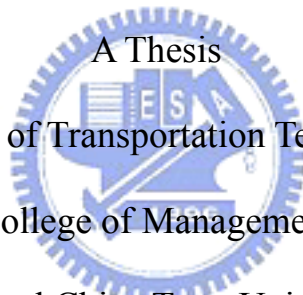
林貴璽

Dr. Lin, Guey-Shii

國立交通大學

運輸科技與管理學系

碩士論文



A Thesis

Submitted to Department of Transportation Technology & Management

College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Transportation Technology and Management

January 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十四年一月

公車路線適應式號誌時制模式之模擬

學生：洪瑞禧

指導教授：卓訓榮
林貴璽

國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班

摘要

都會地區由於現有捷運路權無法全面涵蓋旅次需求以及其他運具服務特性、高費率與停車等問題的限制，公車運輸有其無可取代的地位。實質上，公車運輸除了路網配置、服務與轉運機制的完整性外，尚須提昇營運路線的運輸效率，目前公車運輸效率大多透過即時班車調度與公車專用道等周邊設施來提升，即時班車調度於緊急調派時，大多須策略性脫班與過站不停等措施，公車專用道則成本高且地幅限制多，因此，號誌化路線控制會是較佳的方式，在 APTS 的環境下，號誌時制設計甚至應具備控制公車準點的功能，而非只強調優先；過去的文獻較少將公車優先號誌運用到控制路線準點的機能上，且號誌系統大多以觸動式為主，操作彈性較低且容易降低幹線車流的續進效率，甚至增加延誤時間，因此，建立一套兼顧應用彈性、設施成本與準點效果的號誌系統有其必要。

本研究對路口號誌時制設計的考量，係以號誌路網車流中的小客車與公車運行管制為基礎，由公車優先方式與適應式號誌策略等文獻的啟發之來建立系統架構，發展控制邏輯來構建模組模式，並由模擬結果進行分析，以掌握各種控制策略的績效與特性。本研究透過普松分配與隨機公車班距，於路線起點產生小客車與公車流動，由車隊擴散關係進行小客車流的路段移動，採用階層化觀念架構，將號誌控制分為路口控制階層與路線控制階層，前者具有執行與回復路口定時式號誌控制時制的機能，後者則具有適應式公車路線號誌時制調整的機能，最後透過班表控制或班距控制邏輯以彈性決定路口的控制型態；系統輸出績效則包括路口號誌控制績效與公車站位績效。

本研究模擬作業以一測試路網為例，依據控制邏輯與補償時相，界定五種測試方案，經由一系列模擬與分析來確認模式有效性，比較與歸納不同控制方案下的運行效果。

關鍵詞：公車優先號誌、適應式號誌、準點控制、路口控制、路線控制、班表控制、班距控制、補償時相

The Simulation of Adaptive Signal Control for Transit Bus Routes

Students: Hong, Ruey-Shii

Advisor: Dr. Cho, Hsun-Jung
Dr. Lin, Guey-Shii

Department of Transportation Technology and Management
National Chiao Tung University

ABSTRACT

It has been found that MRT right-of-way can not be widely spread out to fulfill all possible demand in modern metropolitan area. Also, due to some key problems, such as restrictive services, high rate of fee, low mobility during rush, and the parking space limitation for most of other modes, urban bus transit is getting more preferable to public users. In addition to a satisfactory the network layout, service frequency, and transferring system, bus transit may be required to enhance the operating efficiency along routes. This can be done mostly via the use of real time dispatching as well as bus exclusive ways. the former applies usually a timely stop-skipping treatment for emergent needs, the latter are greatly limited by roadway layout and usable space, and may even incur high setting cost. Therefore, an on-route signal control would be a better way to alleviate travel delay and upgrade level of service for roadway users during peaks. However, with APTS environment, such efficiency may not focus on preemption only. Instead, the adaptive signal system should be functioning with higher schedule adhesion capability. Unfortunately, very few of past research had worked on such an issue. Thus, it is necessary to develop a signal control model considering its practical flexibility, system cost, and control effectiveness.

This study is intended to develop a signal control model that is capable of evaluating some preset objective functions for efficiently controlling auto and bus movements on the existing transit network. A great deal of studies on bus priority control and signal timing design have been reviewed to inspire the signal system architecture and control logic. The model applies the Poisson distribution to generate auto and bus calls. Auto movements are propagated along each route using the platoon dispersion concept. The entire signal control structure is classified into two, i.e., local control level and route control level. With a pre-timed signal control basis, the former may perform any preset settings and switch back to the preset one as any of the adjusted timing for bus calls was done. The latter is designed for quickly adjusting control timing in response to any bus arrival calls. Finally, a schedule-based logic and a headway-based logic are separately associated with the adaptive signal control

structure for optimizing intersection output performance. The system output performance mainly includes intersection control performance as well as bus stop performance.

This study defined five test scenarios based on the timing control and phase compensation logic. With a simplified bus network, a series of simulation runs were conducted to verify the model efficiency and validity. The results from various scenarios were also compared and analyzed to reach some valuable conclusions.

Keywords: Signalized bus preemption, Adaptive signals, Schedule adhesion control, Local control level, Route control level, Schedule-based control, Headway-based control, Phase compensation.



誌謝

本論文得以完成，首先感激恩師 卓訓榮老師及 林貴璽老師的辛勤指導，卓老師在研究課題上的指導，提醒學生如何做好研究。林老師在研究方向及方法，隨時提供學生寶貴意見，並仔細逐字斧正學生疏漏之處，每當研究或生活遇到瓶頸時，能夠指點方向並鼓勵學生，使學生能夠克服困難。經由學習兩位老師的治學態度與做人處事態度，在生活與學術各方面的涵養，有了長足的進步與成長。

論文口試與審查期間，承蒙本所 吳水威教授與 吳宗修教授之撥冗細審，惠賜寶貴意見與殷切指正本論文之疏漏謬誤。論文研討期間承蒙本所陳光華老師、高凱老師詳加審閱。大學與研究所修學期間，感謝系上許巧鶯老師、陳光華老師、高凱老師、吳水威老師、韓復華老師、張隆憲老師、謝尚行老師、吳宗修老師、任維廉老師及郭秀貴老師給予學生課業上的指導，使學生能夠順利完成學業及研究，為此學生深感謝意。

此外，交大的求學期間中，感謝博士班學長黃銘崇、曾明德、徐立言、吳育婷學姊於 Lab 研究計畫的幫忙，亦感謝實驗室同學月貞、信豪於學業及生活上的討論及鼓勵，實驗室學弟郭佳、阿翔、勛傑、韻竹、永平在計畫上的負責與用心，皆讓我不論課業或研究計畫皆能處理妥當，讓我可以於學習中走的更順更穩。另外感謝好友家銘、家盛、大哥、小本、鵬先、元邵、阿 lan、阿貴、紋豪乃哥和所有運管 92 級的同學們，在課業的互相鼓勵，及生活的互相扶持，不論是出遊的娛樂假期或是熬夜苦拼的日子，都是許多難忘的回憶。感謝系上學弟小宇、立新，雖然偶爾會被你們吐槽，許多時候都不忘於學長苦悶之餘，找學長出去運動或遊玩。另外，感激系上助理秀蔭及幸榮在行政上的協助。在此謝謝所有曾經協助過我的人，感激各位之餘，並祝各位能順心如意。

最後，謹以此論文獻給偉大的父母及摯愛的家人，感謝父母多年來無微不至的照顧，妹妹給我的支持。在此，將此成果及榮耀，與你們及所有協助過我的人分享。

瑞禧 2005. 1. 29

于 風城交大

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iv
目錄	v
表目錄	vii
圖目錄	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究範圍與方法	3
1.3.1 研究範圍方面	3
1.3.2 研究方法	3
1.4 研究內容	4
1.5 研究流程	5
第二章 文獻回顧	7
2.1 號誌連鎖方式	7
2.1.1 定時式號誌時制	7
2.1.2 觸動式號誌時制	7
2.1.3 適應式號誌時制	8
2.2 適應性號誌控制策略發展	8
2.2.1 有循環週期之適應式號誌控制策略	9
2.2.2 獨立路口無循環週期之適應式控制策略	11
2.2.3 路網之適應式控制策略	18
2.2.4 小結	20
2.3 公車優先準點方式	21
2.3.1 綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷	21
2.3.2 時相忽略與補償策略	27
2.3.3 權重設計	28

2.3.4 小結.....	29
2.4 交通量預測.....	30
2.5 綜合評析.....	33
第三章 研究架構與方法.....	34
3.1 研究分析架構.....	34
3.2 模式基本假設.....	35
3.2.1 路網假設.....	36
3.2.2 車流假設.....	36
3.2.3 公車站位行為假設.....	36
3.3 研究邏輯.....	37
第四章 模式構建.....	41
4.1 定時號誌時制模組.....	42
4.2 號誌控制模組.....	43
4.3 交通狀態模組.....	45
4.4 公車優先模組.....	50
4.5 補償模組.....	53
4.6 績效函數模組.....	56
第五章 數值模擬與分析.....	59
5.1 測試路網相關設定.....	59
5.2 模擬方案設定.....	61
5.2 路口方案號誌運作.....	67
5.3 模擬績效.....	73
5.4.1 小客車流量與延誤成本關係.....	73
5.4.2 公車站位旅客抵達率與延誤成本關係.....	79
5.4.3 公車班距與延誤績效.....	85
5.3 本章小結.....	92
第六章 結論與建議.....	94
6.1 結論.....	94
6.2 建議.....	95
參考文獻.....	97

表目錄

表 2.1 SCOOT最佳化層級表	10
表 2.2 控制策略比較表	21
表 2.3 優先方案表	28
表 2.4 公車優先準點方式比較	30
表 2.5 影響 α_8 因子表	32
表 4.1 變數定義表	41
表 5.1 一般範例設定	60
表 5.2 號誌週期表	61
表 5.3 小客車流量-延誤時間表 (各方向流量水準 400vph)	74
表 5.4 小客車流量-延誤時間表 (各方向流量水準 500vph)	75
表 5.5 小客車流量-延誤時間表 (各方向流量水準 600vph)	76
表 5.6 小客車流量-延誤時間表 (各方向流量水準 700vph)	77
表 5.7 小客車流量-延誤時間表 (各方向流量水準 800vph)	78
表 5.8 流量水準-方案績效表	79
表 5.9 旅客抵達率-延誤時間表 (10 人/小時)	80
表 5.10 旅客抵達率-延誤時間表 (20 人/小時)	81
表 5.11 旅客抵達率-延誤時間表 (30 人/小時)	82
表 5.12 旅客抵達率-延誤時間表 (40 人/小時)	83
表 5.13 旅客抵達率-延誤時間表 (50 人/小時)	84
表 5.14 旅客抵達率-方案績效表	85
表 5.15 公車班距-延誤成本表 (1 分鐘班距)	87
表 5.16 公車班距-延誤成本表 (5 分鐘班距)	88
表 5.17 公車班距-延誤成本表 (10 分鐘班距)	89
表 5.18 公車班距-延誤成本表 (20 分鐘班距)	90
表 5.19 公車班距-延誤成本表 (30 分鐘班距)	91
表 5.20 公車班距-方案績效表	92

圖目錄

圖 1.1 示範公車路網圖	3
圖 1.2 研究流程圖	6
圖 2.1 觸動式連鎖時制示意圖	8
圖 2.2 MOVA車流預測示意圖	16
圖 2.3 滾動時程策略示意圖	18
圖 2.4 優先號誌策略圖	22
圖 3.1 系統分析架構圖	35
圖 3.2 路口示意圖	35
圖 3.3 系統流程圖	40
圖 4.1 定時號誌流程圖	43
圖 4.2 號誌模組流程圖	45
圖 4.3 車輛產生流程圖	47
圖 4.4 路段移動流程圖	48
圖 4.5 路口車隊計算流程圖	49
圖 4.6 路口控制階層公車優先模組流程圖	52
圖 4.7 路線控制階層公車優先模組流程圖	53
圖 4.8 綠燈延長週期變化圖	54
圖 4.9 紅燈縮短週期變化圖	54
圖 4.10 補償模組流程圖	56
圖 4.11 適應式控制績效流程圖	57
圖 4.12 系統績效流程圖	58
圖 5.1 測試路網圖	59
圖 5.2 方案一運作流程圖	62
圖 5.3 方案二運作流程圖	63
圖 5.4 方案三運作流程圖	64
圖 5.5 方案四運作流程圖	65
圖 5.6 方案五運作流程圖	66
圖 5.7 方案一號誌運作圖	67
圖 5.8 方案二號誌運作圖	68
圖 5.9 方案三號誌運作圖	69
圖 5.10 方案四號誌運作圖	70
圖 5.11 方案五號誌運作圖	71
圖 5.12 各方案公車通行時空圖	72
圖 5.13 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 400vph）	74
圖 5.14 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 600vph）	75
圖 5.15 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 600vph）	76

圖 5.16 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 700vph）	77
圖 5.17 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 800vph）	78
圖 5.18 流量水準-方案績效圖	79
圖 5.19 旅客抵達率-延誤時間圖（10 人/小時）	80
圖 5.20 旅客抵達率-延誤時間圖（20 人/小時）	81
圖 5.21 旅客抵達率-延誤時間圖（30 人/小時）	82
圖 5.22 旅客抵達率-延誤時間圖（40 人/小時）	83
圖 5.23 旅客抵達率-延誤時間圖（50 人/小時）	84
圖 5.24 旅客抵達率-方案績效圖	85
圖 5.25 公車班距-延誤成本圖（1 分鐘班距）	87
圖 5.26 公車班距-延誤成本圖（5 分鐘班距）	88
圖 5.27 公車班距-延誤成本圖（10 分鐘班距）	89
圖 5.28 公車班距-延誤成本圖（20 分鐘班距）	90
圖 5.29 公車班距-延誤成本圖（30 分鐘班距）	91
圖 5.30 公車班距-方案績效圖	92



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

都會區內由於現有捷運路權無法全面涵蓋、私有運具停車空間深受侷限、以及其他及戶運具高費率的考量等因素，公車運輸有其無可取代的地位。因此為增加公車營運的競爭力，除了考量健全路網配置與轉運機制的完整性之外，另一重要因素就是提升營運路線的相對運輸效率，以便吸引旅客於主要公車路線上，利用高速率（但也高成本）的運具執行高效率的運送作業。

一般而言，都會區在既有的路網配置與轉運機制之下，公車營運路線的運輸效率常取決「內部場站派車策略」與/或「外部路線控制策略」的配合，前者強調即時的班車動態資訊與彈性的排班調度；後者則以準點控制進而縮短公車在營運路線上的行車時間為重點，最常採用的策略包括（一）公車專用道或專用路線與周邊設施規劃，這需要輔以周延的配合措施（二）號誌化優先通行控制（signal priority control），由彈性調整路線的交通控制設施（如號誌時制），以因應不同的公車運行條件和需求。相較於公車專用道或等較為被動的路線控制方式，號誌化優先控制這種主動式的路線控制方式有助於達到準點的目標，並適度降低即時場站調度的複雜性。

由於一般定時式號誌控制並未能加入公車優先控制，而觸動式車輛優先號誌控制僅能依據預設狀況來運作，缺乏因應公車實際急切或舒緩程度的彈性，準點控制能力甚低是其最大缺點；其次，在公車營運資訊充足的前提下，現今的路線即時調度不論是班距式（Headway-based）或班表式（Schedule-based）控制多以站位管控的方式來穩定前、後班車的間距，調度過程常面臨到必須針對早到班車延長其停站等候時間，對晚到班車則進行緊急調派，甚至執行策略性脫班或過站不停等權宜措施，因此會遭遇到受站位乘客非議的狀況，而對公車營運的品質產生衝擊，若透過適應式號誌雖然能夠較彈性的處理公車急緩的狀況，但由於全適應式號誌控制會遭遇到時制變動頻繁，須不斷的進行運作，內部電腦易故障的情況，且以往研究均發現適應式號誌僅適用於中低流量的情況，因此當小客車流量高時，容易造成路口容量的損失而無法應付。

由上可知目前內部場站派車策略，在執行緊急調派時多以策略性脫班或過站不停等權宜措施，使站位乘客遭受額外損失，進而影響公車乘客的搭乘意願，若透過公車專用道等相關設施，除了成本高之外，亦須考量現有路幅與地形是否可搭配，在考量以上兩點的情況下，透過號誌控制可以花費較少成本，而達到路線

控制的需求，然而由於現今三種號誌系統都有其缺點存在，定時式控制無法進行優先控制，觸動式優先號誌的彈性卻又不佳，適應式號誌由於成本較高，且電腦運作頻繁，容易故障等因素，單用其中一套系統都無法滿足路線控制的需求，如何有效率的執行路線控制是現今公車優先號誌所必須探討的課題。

過去文獻多探討公車準點問題，較少探討公車路線準點控制，且號誌系統大多為單一系統，因此有鑑於公車路線上維持車流準點與服務準點的重要性，且此三套號誌系統皆有其缺點，本研究擬朝向結合定時式號誌時制與適應式號誌控制的優點，在成本考量下，同時能兼顧車流穩定運行與公車路線控制彈性，除了具備因應公車實際急切或舒緩程度的彈性與準點控制能力，亦能有效控制小客車車流穩定運行。在結合兩套號誌系統之下，本研究將以階層控制結構，發展一套即時性號誌化公車優先通行模式來配合公車路線的班距式與班表式控制邏輯，在路口階層控制採用定時式號誌控制，透過計算最小延滯週期及時比，使一般純小型車流狀況或具有公車運行的混合車流狀況下能穩定運行；在路線控制階層則以群組號誌連鎖的方式，引入班距控制與班表控制，並透過公車權重的設計，在適應式號誌控制策略中的最佳化績效函數值之下，執行公車路線準點控制，透過此階層控制的架構，使定時式號誌與適應式號誌結合，達到降低成本、增加路線控制彈性並具有穩定車流的目的。



1.2 研究目的

過去國內外對於公車號誌準點多以探討如何讓公車能於綠燈順利通行，較少探討公車站位乘客所較關心的準點性。另外以往的研究多以觸動式公車優先號誌作為公車準點號誌，無法有效的因應公車緩急程度的彈性，故本研究將透過定時式號誌與適應式號誌發展一階層控制架構，並針對準點性引入班距控制與班表控制。本研究的目的有以下三點：

1. 透過適應式號誌策略發展一階層控制架構，同時兼顧小客車以及公車的運行情況。
2. 輔助路線公車準點或多線公車競爭路權的決策。
3. 強化路線各站位對班表的定點能力，並評估與比較控制模式在公車運輸路網變動的交通環境下的績效與特性。

1.3 研究範圍與方法

1.3.1 研究範圍方面

本研究為探討適應式號誌在考量準點性下，對公車路線的影響，因此在範圍設定上，以包含公車運行的兩條十字交叉的主要幹道所形成的路網進行模擬，其中幹道上包含數個號誌路口，並有小客車運行於主要幹道與支道上（如圖 1.1 所示）。

於此路網中，公車產生於路線起點，小客車則產生於路線起點以及各路口的支道起點，公車產生之後運行於主要幹道上，小客車則運行於幹道與支道，並於路口進行號誌控制，因此整個研究包括了車輛產生、路段車流推進與路口號誌操作。

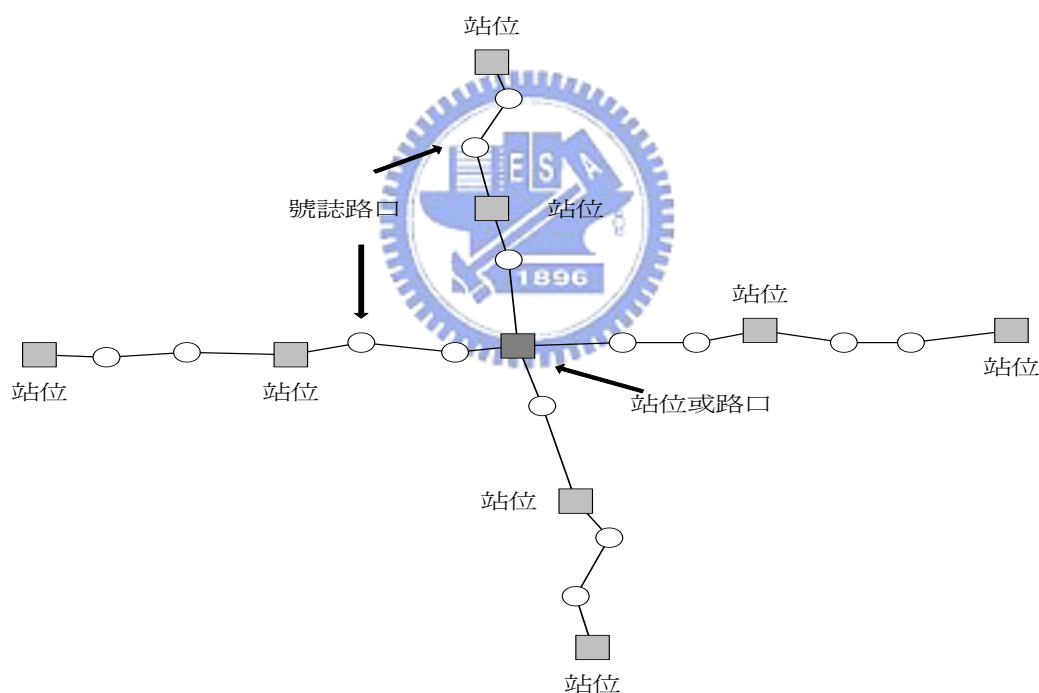


圖 1.1 示範公車路網圖

1.3.2 研究方法

號誌化路口設置方式有三類：第一種為定時號誌時制，由事前調查現場的交通需求，以離線方式依據各時段交通量，透過相關週期計算模式，或直接由號誌時制設計軟體計算最適時制；第二種為觸動式號誌時制，於路口臨近路段設置偵測器，依據是否有車輛通過偵測器的資訊，決定是否延長綠燈，綠燈長度是由起始綠燈長度（Initial Green Time）加上數個延長時段（Extension Period）所得；第

三種為適應式號誌時制，利用現場監控設備傳回現場交通資訊，以該時該地的交通流量預測未來的車流狀況，以求得最適的燈號變換。

本研究以公車準點作為考量，因此在路口號誌控制方面，僅需於公車有需求時，進行額外的控制，並不需要完全的適應式號誌控制，因此在號誌設計上，考量結合定時式號誌與適應式號誌的優點，採用階層式的控制架構，僅當公車有路線控制需求時，將平時小客車運行的定時式號誌時制，轉換為公車有路線控制需求時的適應式號誌時制，當公車無需求或已通過路口，則跳回原小客車運行的定時式號誌時制，因此路口號誌控制則可分為專為小客車運行的路口控制階層與在公車路線運行考量下的路線控制階層，路口號誌控制策略則在此兩階層中，根據班表控制與班距控制決定公車的需求與否來進行切換。

因此，定時式號誌的主要參數，如週期與各車流流動方向所分配的綠燈時間，係透過延滯最小的週期模式來計算。當公車通行時，則透過一判別邏輯來決定此公車是否有路線控制需求，當公車抵達路口的時間較原有預定時間過早或過晚，超過其容忍時間時，則判定該輛公車為有路線控制需求。當公車有路線控制需求時，給予其適當的權重，公車過早時給予負權重，公車過晚時給予正權重，並視其超過容忍間距的程度，設定為一單位或兩單位以上的權重，之後透過適應式號誌時制績效函數，使公車通行或停等，故整體路網的號誌時制會由定時式號誌時制加上適應式號誌時制。



1.4 研究內容

綜合上述各點，本研究之研究內容如下：

1. 了解各號誌之建立原則及公車優先準點策略的控制、執行現況，針對目前研究不足處加以分析比較，並界定本研究之範圍及目標。
2. 由文獻回顧中了解相關號誌連鎖方式，並回顧適應性號誌控制策略發展，探討其設計邏輯及限制；並藉由回顧公車優先準點方式，以了解其設計原則以及準點號誌的設計方式，另外回顧車隊擴散模式，了解車流於路段中的運行情況。
3. 研擬系統分析架構，發展車輛產生與路段車流運行的邏輯，並結合號誌控制以發展一套階層控制架構，並加入相關準點控制邏輯，分別處理無公車優先需求的路口控制階層與有公車優先需求的路線控制階層。
4. 掌握運作流程後，進行各模組的模式建立，訂定系統績效函數。

5. 根據控制策略的不同，分別訂定出各種比較的方案，經由模擬結果，了解各方案的號誌運作情形，以及各種方案的績效比較。
6. 針對模擬流程以及模擬方案績效提出結論，並提出相關改善建議供後續研究之延伸及改進。

1.5 研究流程

本研究之研究流程圖如圖 1.2 所示：



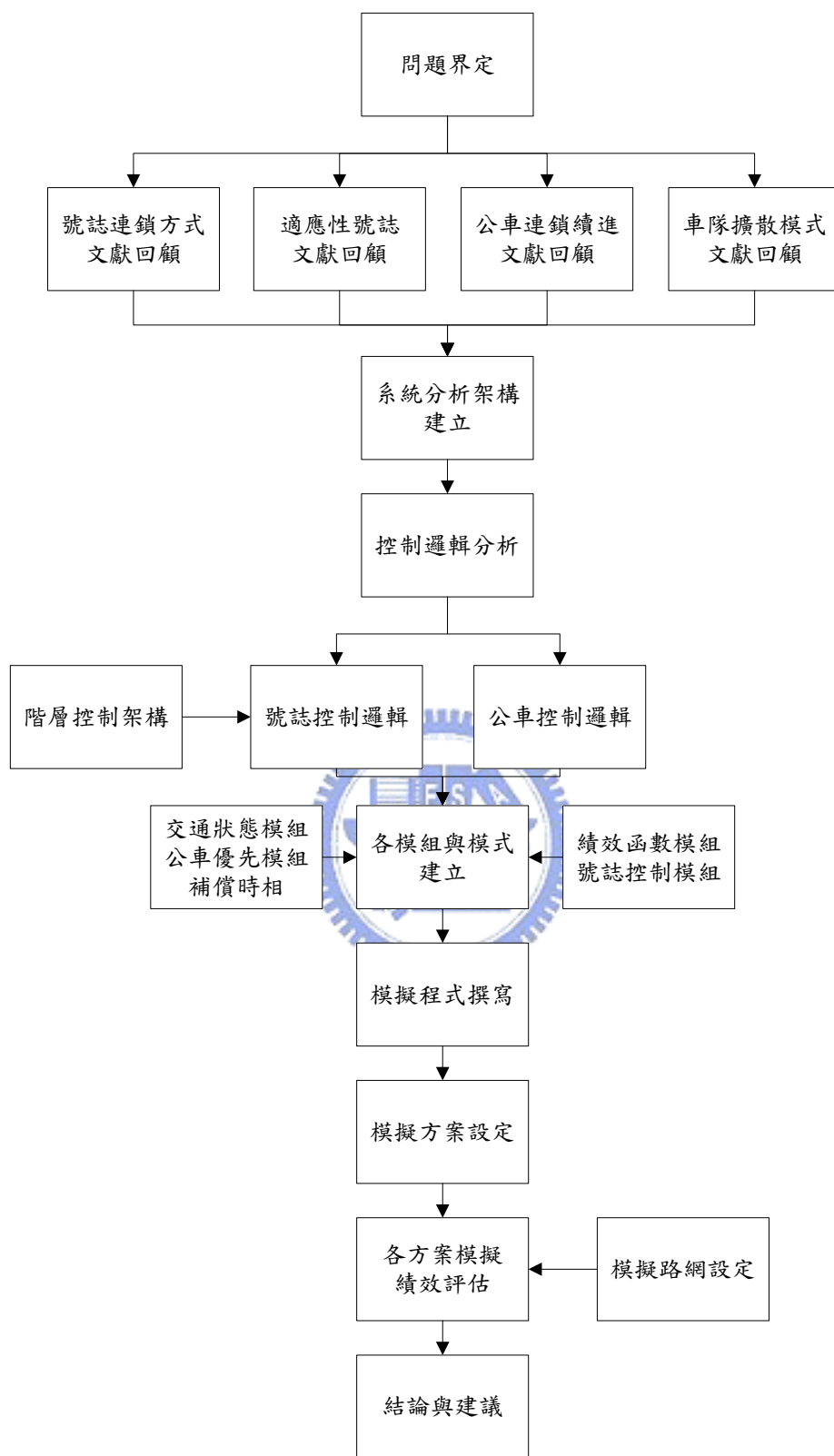


圖 1.2 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究回顧內容主要區分為 1) 號誌連鎖方式；2) 適應性號誌控制策略；3) 公車優先準點方式；4) 交通量預測四部分。

根據本研究之內容，首先藉由回顧不同號誌時制的連鎖方式，了解各種號誌其設計觀念，對於號誌連鎖有一整體概念之後，再參考與本研究有關之適應性號誌控制相關策略，分析各策略之優缺點，才得以選擇適當策略，並介紹現今公車優先準點應用的方法，大致上可分為綠燈延長紅燈縮短、補償策略與權重設計等三類，最後回顧有關交通量預測的文獻，以作為研究模式中車流運行的參考基準。

2.1 號誌連鎖方式

本節主要將各號誌系統處理連鎖方式作一整理，包括定時式號誌、觸動式號誌與適應式號誌。

2.1.1 定時式號誌時制[29]

連鎖控制時，每一路口須有一時相被指定為同步時相 (synchronized phase)。為達成連鎖之功能，各路口同步時相之綠燈時間必須保持一定之時差。訂定時差時可用某一路口同步時相綠燈開始之時間為基準點。從這基準點到任何一路口同步時相第一次綠燈開始的時間叫時差。此外，所有路口必須使用同樣之週期長度 (common cycle length)。但有時候某些連鎖路口之流量可能較其他路口之流量低得多，在此情形下，低流量路口之週期長度可減半。

2.1.2 觸動式號誌時制[29]

圖 2.1 中之 t_0 代表各路口共同週期之起點，如某一路口之連鎖時相之起點為 t_2 ，則 $t_2 - t_0$ 代表該路口號誌控制之時差 (offset)。連鎖時相進入綠燈時段後，觸動時相之車輛必須等連鎖時相之綠燈時段已到達一事先訂定之值時才能有機會得到綠燈。觸動控制利用一讓步點 (yield point) 以規定在一週期之那一瞬間才可中斷連鎖時相之綠燈以準備將綠燈交給觸動時相如連鎖時相在 t_3 終止，則該時相進入燈號變換時段，隨後在 t_4 時觸動時相進入綠燈時段。 $t_4 - t_3$ 等於連鎖時相之燈號變換時段。如在讓步點 t_3 之前觸動時相之偵測器沒被觸動，則連鎖時相之綠燈時段可超過 t_3 。在此情形下，如觸動時相之偵測器在 t_5 之前被觸動，則連鎖時相之綠燈時段立即終止而進入燈號轉換時段。 t_5 代表讓步終止點。如有車輛繼續延長綠燈，觸動時相之綠燈時段可持續到 t_1 ，在此瞬間，觸動時相之綠燈被強迫終止以便連鎖時相可在 t_2 時進入綠燈時段，所以 $t_2 - t_1$ 必須等於觸動時相之燈號變換時

段。如在 t_1 之前觸動時相沒車輛可延長綠燈則連鎖時相可在 t_2 之前進入綠燈時相。此外，因觸動時相之綠燈時段須滿足該時相之最短綠燈的需要，所以 t_1-t_5 必須最少等於連鎖時相之燈號變換時間及觸動時相最短綠燈之和。

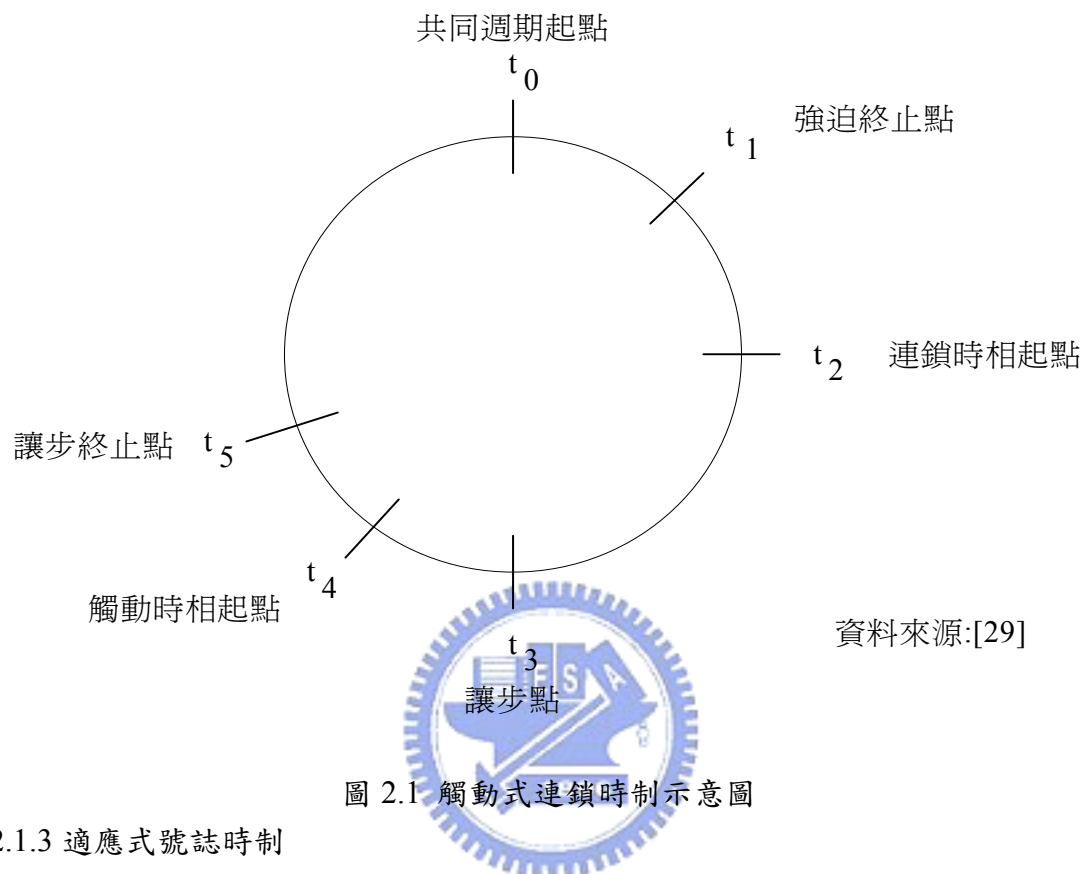


圖 2.1 觸動式連鎖時制示意圖

2.1.3 適應式號誌時制

由於適應式號誌並無共同週期，因此若要執行連鎖，僅能針對某特定車輛執行控制，透過權重與限制的方式，使某特定車輛能執行連鎖準點的作業。在 Mowatt 與 Brinckerhoff[17]的研究中則有探討附加高乘載權重的適應式號誌策略，利用附加權重的方式，給予高乘載車輛權重，使其績效函數決定決策時，因權重設計而使公車能順利通行。另外在吳育婷君[34]等人的研究中則是以適應式號誌搭配綠燈延長、紅燈切除的策略，給予高乘載優先通行，達到高乘載車輛準點的目的。

2.2 適應性號誌控制策略發展

以往對適應式控制策略的研究，可分為有循環週期的適應式號誌控制策略與非循環週期的適應式號誌控制策略。在有循環週期的適應式號誌控制策略中，比較著名的有 SCOOT 與 SCATS 兩種控制策略，而在非循環週期的適應式號誌控制

策略中，可分為單一路口與路網兩種系統。在獨立路口之控制策略裡面，分成二元選擇法與序列搜尋法，而在路網的控制策略裡面，則有 PROLYN 與 UTOPIA 兩種控制策略，以下則分別敘述各個策略。

2.2.1 有循環週期之適應式號誌控制策略

1. SCOOT[10]

SCOOT 為 Split,Cycle,Offset Optimization Technique 的簡稱，其為中央集權式控制系統，透過中央電腦與局部控制器來執行適應式控制。系統透過中央電腦來估計即時資料，預測交通變化與最佳化時制計畫使的適應控制更智慧化。

在系統交通方面，SCOOT 使用與 TRANSYT 相似的概念來發展預測即時號誌控制和提供短期或長期的交通資訊來做為系統衡量的依據。藉著上游偵測器的衡量來反覆的預測車隊、停等數與延誤，並將這些資訊存在一週期車流斷面圖（Cyclic Flow Profile, CFP）的表單裡，因此透過這些資訊就可以決定最佳的號誌連鎖時制計畫。此交通模式必須先設定好漂游速率與飽和流率，才能夠不斷的提供以垂直車隊概念下之車隊的變化情形。

在系統最佳化方面，最佳時制計畫主要透過三個參數來決定，分別為時比、時差與週期長度。

- (1) 綠燈時比最佳化方面，在每個狀態改變時，藉由車隊長度計算、擁擠衡量與最小綠燈的限制之下，來對綠燈長度做些許秒數的修正。
- (2) 時差最佳化方面，經由週期車流描述所存的資訊經由是否要修改時差，來估計其與相鄰的街道的績效指標（Performance Index, PI）的加總。最小的績效指標將會在一個子路網的路口執行以求能夠對整個路網達到一個近似全域最佳的時制計畫。
- (3) 週期長度最佳化方面，在子路網需要制定一個共同的週期長度，而為了符合特殊情況，則採用半個共同週期長度或是兩倍的共同週期長度。理想上，在一個子路網裡，任何的週期長度變化都會在兩分鐘半中完成，並且要確保能夠讓子路網中負載最重的路口能夠運作。

另外，在普通的情況下，系統已經結合了號誌時比、時差與週期長度最佳化，然而在 SCOOT 裡，由於某些特殊環境的限制下，必須能夠有設定最佳化的等級的彈性存在，而這些設定等級的調整可以經由預設或是 SCOOT 運行時更改（如表 2.2-1），根據不同的最佳化層級，決定需要進行何種操作，如層級 1 僅對號誌

時比執行最佳化操作，層級 4 則是針對號誌時比、時差與單一共同週期執行最佳化操作。

不過 SCOOT 仍有幾項缺點存在，首先由於偵測器擺設位置在距離停止線上游一段很遠的距離，要去假設其車輛的旅行時間，才能夠進行預測，另外，由於僅由中央電腦執行最佳化，會造成中央電腦負載過重，且局部控制器還要回傳資訊到中央電腦，因此很難發展一大規模的路網控制。

表 2.1 SCOOT 最佳化層級表

最佳化層級	最佳化操作（X=無，○=有）			
	號誌時比	時差	週期長度	
			單一週期	半週期或雙週期
0	X	X	X	X
1	○	X	X	X
2	X	○	X	X
3	○	○	X	X
4	○	○	○	X
5	○	○	X	○

資料來源：[10]

2. SCATS[14]

SCATS 為 Sydney Coordinated Adaptive Traffic System 的簡稱，其在控制方面，主要是利用中央電腦、地區電腦與局部控制器來處理整個路網的控制，中央電腦僅執行監控系統的績效與設施的狀態，而整個適應式控制策略就由地區電腦來處理。透過偵測器，以地區電腦去計算飽和度（Degree of Saturation，DS），來訂定控制策略，最後在交由局部控制器來執行。

在系統交通狀態方面，需求變化可以透過估計道路飽和程度的改變來得知。經由可用的總綠燈時間與可穿越停止線的足夠空間，這兩者的關係來計算飽和程度。

而在系統最佳化方面，將整個系統分成數個子系統，分別透過週期長度最佳、號誌分時最佳、內部時差（Offset）最佳與連鎖時差最佳來達到整個系統最佳。

- （1）週期長度最佳化方面，號誌長度的變化是基於前一個週期內能夠達到最高的飽和程度來衡量，且每次週期長度的變化範圍在六秒之內，藉由四組根據以往背景所預設的週期計畫來執行週期長度的變化，而在週期

的設定方面包括了以下幾點：設定最小與最大週期作為界限限制、定義一個中等週期長度必須能夠達到兩個方向良好的連鎖、設定一週期標準，當週期長度超過此標準必須能夠去增加指定的時相。

- (2) 號誌分時最佳化方面，在每個路口各有四組預設的分時計畫來回應週期長度的變化，而號誌分時計畫是以一條道路能夠達到最高的飽和程度來選定。
- (3) 內部時差最佳化方面，在子系統的各個路口都預設有五組內部時差的計畫，計畫一是只在週期長度最小時運作，計畫二是當週期長度在中等週期長度與中等週期長度加十秒的範圍內運作。而其餘三個計畫都是藉著車流來選擇其時差計畫。
- (4) 連鎖時差最佳化方面，是指在子系統之間的時差，相對於內部時差可稱為外部抵銷，同樣地各個子系統預設有五組外部時差計畫，而外部時差是以一個指定的路口為基準，來對此路口的相鄰子系統衡量連鎖的必要性，在每一個週期計算連鎖的利益然後與連鎖的標準比較來決定是否執行連鎖或是中斷連鎖。

不過由於 SCATS 僅利用上一週期的飽和程度來選擇一組週期與號誌分時，並未真正去對交通量做出預測，也就無法處理一些緊急車輛的情況，另外，由於偵測器是擺設在距離停止線上游不遠的地方，因此也就無法去掌握即時的車隊長度，然而最重要的是要應該如何去訂定適當的號誌分時計畫、時差計畫與週期長度。

3. 有循環週期之適應式號誌控制策略的限制：

- (1) 控制決策受到週期循環的限制。
- (2) 由於缺乏可靠的需求預測方法，系統僅能夠採取回應式的控制，而不是採取預設式的控制。

2.2.2 獨立路口無循環週期之適應式控制策略

在適應式控制策略中，為了能夠快速且即時的反應交通需求，因此控制觀念不再像是傳統的控制策略去考慮最佳的週期長度，號誌分時等等，而專注在如何能夠在非常短的時間需求變化下，找出最佳的控制序列。而在獨立路口之適應式控制策略裡，可分為二元選擇法與序列搜尋法，以下將分別討論之。

1. 二元選擇法 (Binary Choice)

在此種控制法下，首先將時間分為數個時間很短的時階，通常為幾秒一個時階，在每個時階僅考量是否要繼續開放綠燈，或是關掉綠燈轉換成紅燈，因此稱為二元選擇法。以下對二元選擇法中的 Miller 演算法、TOL 與 MOVA 法討論之。

(1) 米勒演算法[18]

將現有的號誌時制計畫改成以每兩秒一個時階來計算，每個時階都透過一個最佳化函數來評估淨利。在每個時階裡，藉著計算最佳化的淨利，來考慮是否立即關掉綠燈。當淨利是正值，即繼續延長另一個時階，然後再重新計算其淨利。

- I. 需求預測模式：利用上游的偵測器來提供未來十秒的抵達資訊。其中飽和流率與損失時間可以經由衡量校準得知，然而其他的數值例如，第 i 個時階預期抵達車輛數 (Δ_i) 與綠燈、紅燈時相預測的平均進入流量 (Q_G 與 Q_R)，則必須透過預測才能得到，其預測法則則透過以下描述之：
 - A. 第 i 個時階 Δ_i 的值是透過一連串的偵測器來預測一段 10 秒長的抵達車輛數。
 - B. 預測過程在一段給定的最小綠燈後才開始。
 - C. 當偵測器被佔用時， Δ_i 就假設跟飽和流率相等。
 - D. 平均進入流量 (Q_G 與 Q_R) 的值，可透過使用前一週期的數值預測或是利用指數分配預測。
- II. 系統最佳化模式：最佳化的控制法會以每兩秒當成一個時階來計算一次，對於每一個控制決策，會被用來作為改變號誌狀態或是延長現有的控制狀態從兩秒、四秒、六秒、八秒到十秒等等。

$$T = \Delta - Q_G \frac{1 - \frac{\Delta}{S_G}}{1 - \frac{Q_G}{S_G}} (A + R + L) - h \left(N + \sum_{i=1}^{k_i} Q_R \right)$$

(2.1)

其中：

h : 2 秒

k_i : 使 $\sum_i^{k_i} Q_R - \sum_{2+L/h}^{k_i} S_R \leq 0$ 成立的最小整數

Q_G : 在綠燈時相時的未來平均流量 (veh/2s)

Q_R : 在紅燈時相時的未來平均流量 (veh/2s)

S_G : 在綠燈時相的飽和流量 (veh/2s)

S_R : 在紅燈時相的飽和流量 (veh/2s)

A : 黃燈時相長度

R : 紅燈時相長度

L : 紅燈時相尾端的起動延誤

N : 紅燈時相的停等車隊數

$$\Delta = \text{Max} \left(\Delta_1, \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}, \dots, \frac{\Delta_1 + \dots + \Delta_5}{5} \right)$$

(2.2)

其中：

$\Delta_1, \dots, \Delta_5$ 是指在未來 5 個時階裡面，預期通過停止線的車輛數



當 $T < 0$ ，衡量是否立即改變號誌狀態，或是延長 $h, 2h, \dots, 5h$ 的時間會有較少的延誤。

此測試結果顯示 MI 跟預設時制號誌相比較之下，在一個中度擁擠的情況下，能夠節省每輛車 15% 的旅行時間，然而當交通量很小時，從偵測器到停止線的旅行時間則會相當極端。此外，由於 MI 並沒有將停等的車隊和最終的綠燈延長時間加進去考慮，下一個紅燈的延長時間並不合理。

(2) TOL 邏輯法 (Traffic optimization logic) [3]

由於之前 MI 並未對下一個紅燈延長時間加以考慮，因此在 TOL 就特別針對此問題加以改善。以下就系統最佳化與交通估計模式敘述之。

- I. 系統最佳化模式：經由最佳控制決策，藉著績效函數計算淨利，來決定是否延長另一個 h 秒，或者是立即關掉綠燈時相。

$$F_A = f_1 R_A K_A + f_2 K_A - f_1 h N_B - f_2 M_B \quad (2.3)$$

其中：

F_A ：將時相 A 延長 h 秒的淨利

f_1 ：每秒的延誤成本

R_A ：當時相 A 的綠燈關閉時，時相 A 下一個紅燈持續的時間

K_A ：當時相 A 的綠燈延長 h 秒時，在時相 A 可以通過路口的額外車輛

f_2 ：當車輛由完全停止到車輛的起動成本

N_B ：當時相 A 的綠燈延長 h 秒時，在時相 B 遭受延誤的車輛數

M_B ：當時相 A 的綠燈延長 h 秒時，在時相 B 被強制停止的車輛數，如果 F_A 為負值時，就立即關掉時相 A 的綠燈，轉變為紅燈

- II. 交通預測模式：在最佳化的過程中，有幾個因素需要估計，例如：
 R_A 、 K_A 、 N_B 和 M_B 。時相 A 的下一個紅燈持續時間是以時相 B 的綠燈持續時間必須能夠將其停等車隊完全消散。

(2.4)

$$R_A = Y_A + Y_B + \frac{N_B(0) + Y_B Q_B}{S_B} \frac{1}{1 - \frac{Q_B}{S_B}}$$

其中：

Y_A ：時相 A 號誌轉換的時間間隔

Y_B ：時相 B 號誌轉換的時間間隔

$N_B(0)$ ：在時相 B 的一條道路的停等車隊長度

Q_B ：時相 B 的平均車流量

S_B ：時相 B 的道路飽和流率

$N_B(0)$ 與 Q_B 由偵測器提供的資訊來決定，而 K_A 則基於偵測的抵達車輛數來預測，必須注意的是每個方向的抵達車輛是假設以通過一段長度 (L_A) 的均勻分配，以相同的速度 (V_A) 行駛。

(2.5)

$$K_A = \frac{N_A(0)hV_A}{L_A}$$

其中：

$N_A(0)$ ：在時相 A 一個方向裡行駛過一段距離 L_A 的車輛數

V_A : 時相 A 的平均車輛速率
 L_A : 一長串連續偵測器的長度

N_B 和 M_B 則透過以下模式來估計：

$$N_B = [N_B(0) + Y_B Q_B] \frac{1}{1 - \frac{Q_B}{S_B}} \quad (2.6)$$

$$M_B = h Q_B \quad (2.7)$$

TOL 經由測試結果顯示在中度擁擠的情況下，相對於觸動式控制策略能夠減少 25% 的車輛延誤。

(3) MOVA 控制系統[27]

MOVA 為 Microprocessor Optimized Vehicle Actuation 的簡稱，係針對單一路口最佳時制計畫的控制策略，其中有幾項特點：1. 針對過飽和的控制加以研究與執行；2. 將目標式改成最大化道路路口容量；3. 為了使號誌正確轉換，採用將綠燈提早結束的控制；4. 當交通狀況低於飽和流率時，抑制增加綠燈時間的趨勢，這些控制函數透過利用每個方向兩個偵測器的資訊來執行。以下則分別以系統最佳化模式與需求估計模式來討論。

- I. 系統最佳化模式：MOVA 的最佳化控制概念來自將觸動式與適應式號誌控制的內容結合。其最佳化程序包含了幾項重要的特點，像是最短綠燈的設計、最佳化的邏輯、最長綠燈的標準和對過飽和情況的回應策略都包含在最佳化程序裡面。
 - A. 最短綠燈的設計是為了確保車輛駕駛者與行人的安全，並且可以能夠使第一個偵測器到停止線所停等的車隊完全消散的綠燈時間。
 - B. 系統最佳化模式是當飽和車流結束後，以每 1 秒重複地觀察相關的連結道路，來衡量績效。
 - C. 最長綠燈是為了當車流量很大時，提供一最長的綠燈限制，以確保週期時間有上限。

D. 在過飽和情況下，MOVA 藉著持續地提供綠燈，以採取容量最大的控制，即使車流消散率比飽和流率小。

II. 需求預測模式：交通模式是藉著每個方向兩個偵測器來預測，一個在距離停止線上游 40 公尺處，一個在距離停止線上游 100 公尺處，來各自提供大約 3.5 秒與 8 秒的車輛漫游時間，車輛位置的預測與車輛的移動都是在假設自由車流與非車隊的狀況下來估計，車輛的漫游速率是以每 0.5 秒對應一個 box 來前進（如圖 2.2 所示）。

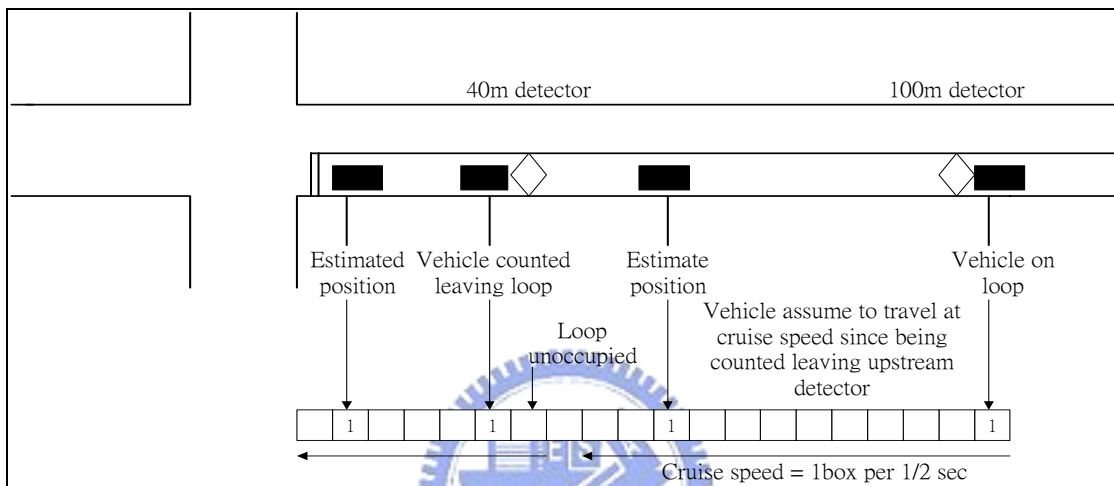


圖 2.2 MOVA 車流預測示意圖

資料來源：[27]

經由測試結果表示 MOVA 在大多數中度擁擠或是高度擁擠的情況下，可以減低 20%到 30%的車輛延誤。然而雖然藉由兩個偵測器的擺設改善了適應式號誌控制策略的缺點，但是對於低度擁擠、交通量很少時，適應式號誌可能比觸動式更差的缺點還是沒有改善。

(4) 二元選擇法的限制

- I. 系統對於最佳化時制計畫，僅考量一段非常短的時間間隔，因此不能確保能夠達到全域最佳解。
- II. 以同樣的抵達假設來估計即時的需求。
- III. 當低度擁擠、交通量很少時，適應式號誌的績效比觸動式號誌還差。
- IV. 當車輛抵達或車隊回堵到偵測器時，就不能夠以需求預測模式來估

計和結合。

- V. 除了 MOVA 以外，其餘的兩種控制方法當在一個高度擁擠的狀況下都不能夠以過飽和最佳化方式來回應。
- VI. 對於一條連續幾個路口的道路或是路網來說，很難以二元選擇法的概念去實行。

2. 序列搜尋法 (Sequencing approach)

(1) OPAC[8]

OPAC 為 Optimization Policies for Adaptive Control 的簡稱，係一種對個別的交通號誌，使其績效最佳化的一種線上的控制法，而績效最佳化可以是使總延誤最少、停等數最小等等，且僅受到最長綠燈及最短綠燈的限制，其模式主要包括兩部分。

- I. 需求預測模式：利用頭部所得到的抵達資訊，來預測後面尾部的抵達資訊，因此即可以得到整個控制時段的抵達資訊。
- II. 系統最佳化模式：將整個控制時段以每 k 個時階分成一個時段，一時階通常為數秒構成，而這個時段就可以稱為一控制時程 (Horizon)，由於最佳化是以整個控制時段來看，將可以實際從偵測器得到的車輛抵達資訊定為控制時段的頭部 (head)，其餘 $k-r$ 的部分定為控制時段的尾部 (tail)，而尾部的抵達資訊就以一個模式來估計。一個最佳化的決策會以整個控制時段來計算，然而僅有當決策產生在頭部時，才會被執行 (如圖 2.3)。主要操作步驟如下：

步驟 1：決定整個控制時段長度 k ，和頭部 r 。

步驟 2：收集頭部 r 的交通資料，和估計 $k-r$ 的交通資料。

步驟 3：對整個控制時段，利用限制化搜尋法找出可能的轉換點，以決定最佳的轉換策略。

步驟 4：僅執行頭部的最佳策略。

步驟 5：將控制時程向前移 r 個時階，且重複步驟 2-5。

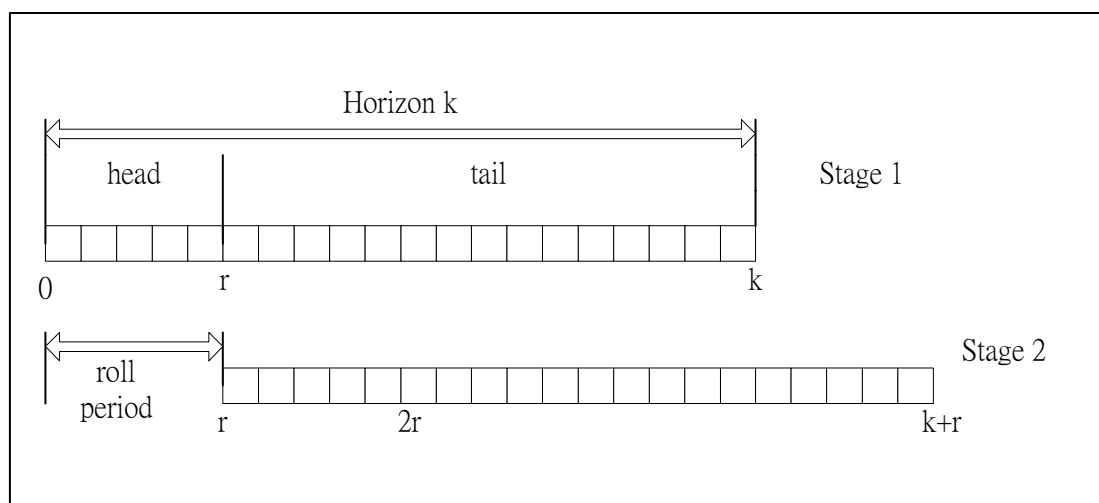


圖 2.3 滾動時程策略示意圖

資料來源：[8]

因為控制時程中有些決策點，會超出限制式所定的範圍，因此限制化搜尋法即利用此種特點，僅找出可能的決策點來執行最佳化，而限制式則以最小綠燈跟最大綠燈作為依據。

(2) OPAC 的限制：

- I. OPAC 在最佳化過程之中，需要用到未來的資訊，因此為了要得到整個控制時程的抵達資訊，在實際上是非常困難的。
- II. 限制化搜尋法雖然大幅的減低了運算的複雜性，然而這樣卻不能保證可以達到全域最佳解。

2.2.3 路網之適應式控制策略

本章節主要以幾個在路網適應式控制策略較有代表性的系統作為依據。由於路網的適應式控制策略較單一獨立路口的控制策略來的複雜的多，因此大多引進了一些不同的控制技術，以下就針對 PROLYN 與 UTOPIA 討論之。

1. PROLYN[9]

PROLYN 主要是為了在大規模的路網最佳化控制藉著結合水平滾動搜尋策略，找到非循環的設置。

- I. 需求預測模式：對於每個路段，利用上游車輛的衡量來預測下 16 個時階到達停止線的車輛，且透過偵測器擺設在離停止線上游 50 公尺處，可估計車隊長度，而車隊長度則是以垂直車隊模式來看。另外，每個路段的交通車流則是以模式化成間斷的狀態方程式。因此車隊狀態則為垂直車隊長度、抵達車輛數和離去容量組成。
- II. 系統最佳化模式：由於每個路段是利用上游車輛衡量來預測下 16 個時階，因此每個交叉路口都是以整個控制時段來最佳化，然而只有第一個時階會被用來做控制決策。最佳化的標準是最小化整個控制時段的總延誤和估計當此控制時段結束，某個狀態下的延誤。
 - A. 交叉路口層級：在最大綠燈及最小綠燈長度的限制，透過使用動態規劃使延誤最小化。
 - B. 路網層級：路網的連鎖最佳化是由另一分離的架構來控制，主要分成三個步驟，首先當路口的控制器完成整個控制時段的最佳化時，將此最佳控制時段的每個時階，模擬其路口的車輛離去資訊，其次將模擬所得的車輛離去資訊送到每個下游的路口控制器，最後在下個時階，利用此資訊達到比較佳的車輛抵達預測。

為了減低運算的複雜性，PRODYN 使用了線上模擬技術來提供了兩種層級的因素以便藉著單獨的計算局部最佳化的問題，來達到路網的適應控制。然而抵達的假設還是顯著的影響需求預測的結果。

2. UTOPIA[16]

UTOPIA 主要是透過大規模的分離層級的適應式控制系統來控制私人車輛與大眾運輸的運行。

- I. 需求預測模式：需求預測分為局部微觀與區域巨觀模式，局部觀測主要以每個進入的路段每 3 秒一個時階做路口需求估計。而區域觀測則主要為了要估計整個控制區域內的交通狀況，利用一個用來計數交通量的時間間斷模式，可以表現出每 3 分鐘的間隔資料。因此，即時的衡量是用來作為對於整個路網交通狀況的估計。
- II. 系統最佳化模式：最佳化過程分為路口層級與路網層級，並且各自由其系統的控制器操作。

- A. 局部控制器：路口層級的最佳化可以是單一路口或是定義的一塊小區域。控制時段的長度為 120 秒，而以每 3 秒為一個時階，每個控制決策的計算每 6 秒重複一次，控制決策只有在控制時段最初的 6 秒才會被執行。一個路口控制器都能夠利用一個函數來對其鄰近的路口狀態加以考慮，並且透過區域層級控制給定的限制式來最佳化。
- B. 路網控制器：路網的最佳化主要是根據每單位的平均速率與飽和流量來操作，而私人車輛的總旅行時間則被用來表現出路網的變動性，而以每 30 分鐘為一個控制時段來最佳化。路網的最佳化控制是用來產生路口層級的資訊和命令。

然而，從偵測器到路口的平均旅行時間的假設會直接影響到系統的預測和最佳化的績效。

2.2.4 小結

就以上相關文獻，都有一共同特點，就是其抵達的假設對整個模式而言，影響相當的大，對於有循環週期的適應式號誌控制而言（如表 2.2-2 所示），由於是根據當時的交通狀況，採用不同的控制週期，因此無牽涉到抵達的假設問題，然而這種系統就比較偏向於被動式的控制，而在二元選擇法方面，由於只考量未來的一段短時段，即使得知在未來車流很大或是有緊急車輛時，還是只會去計算下一個時階，所以當要以此概念去做一長串時間的最佳化或是路網最佳化時，都很困難；除此之外，其抵達的假設都是固定的，然而車輛的抵達應該隨著時間變化，而在序列法中的水平滾動搜尋法，則可以就抵達率的不同，而改變其抵達的狀況，且序列法由於可以針對未來一段可能產生的事件進行準備，因此較不會有短視的情形產生，至於路網控制裡面，整個路口架構還是以水平滾動搜尋為主，不同的是加進了兩個層級的技術，透過兩個層級的技術，可以分別就路口與路網作最佳化，能有效降低路網運算的程序。

表 2.2 控制策略比較表

控制策略	系統或模式	特性	比較
獨立路口有週期之適應性控制策略	SCATS	根據流量情形選擇一組	邏輯簡單、彈性低
	SCOOT	預設時制計畫	
獨立路口無週期之適應性控制策略	Miller 演算法	控制時段短，根據績效	邏輯簡單，彈性中等，但可能會導致短視情形
	TOL	考量此一短時段是否需	
	MOVA	要轉換路權	彈性高，但預測未來資訊不易。
	OPAC	控制時段較長，需預測未來資訊，就整個控制時段選擇最佳的號誌轉換點	
路網適應性控制策略	PRO Dyn	路口採用 OPAC 策略，	預測資訊不易，邏輯較難。
	UTOPIA	並加入兩個層級的技術控制整個路網	

資料來源：本研究整理

2.3 公車優先準點方式



關於公車優先準點的方法主要可分為 1) 綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷策略；2) 補償策略與時相忽略；3) 權重設計等方法，以下分別敘述之。

2.3.1 綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷

綠燈延長 (Green Extension)、紅燈切除 (Red Truncation) 與紅燈中斷 (Red Interrupting) 為一般較常採用的公車優先策略 (如圖 2.4 以有效綠燈、有效紅燈表示)，若公車於紅燈時相抵達，則可執行上面三種策略之一，綠燈延長為將公車方向的綠燈延長，以利公車通行；紅燈切除則是將公車方向的紅燈縮短，提早關閉衝突時相的綠燈，使公車通行；紅燈中斷則是於公車方向的紅燈中，插入一段綠燈時間使公車通行。此三種策略中，紅燈中斷策略常被忽略，主要是由於週期太短了，若在插入一段額外綠燈時段，其對於每個方向大約會增加 3 秒的黃燈時間，且由於號誌變換，易導致事故發生，所以紅燈中斷通常不予採用。採用此公車優先策略，通常能使路線上公車與小型車延誤降低 10% 至 15% 左右，然而對於其衝突路權的小型車則會有小幅的延誤增加。

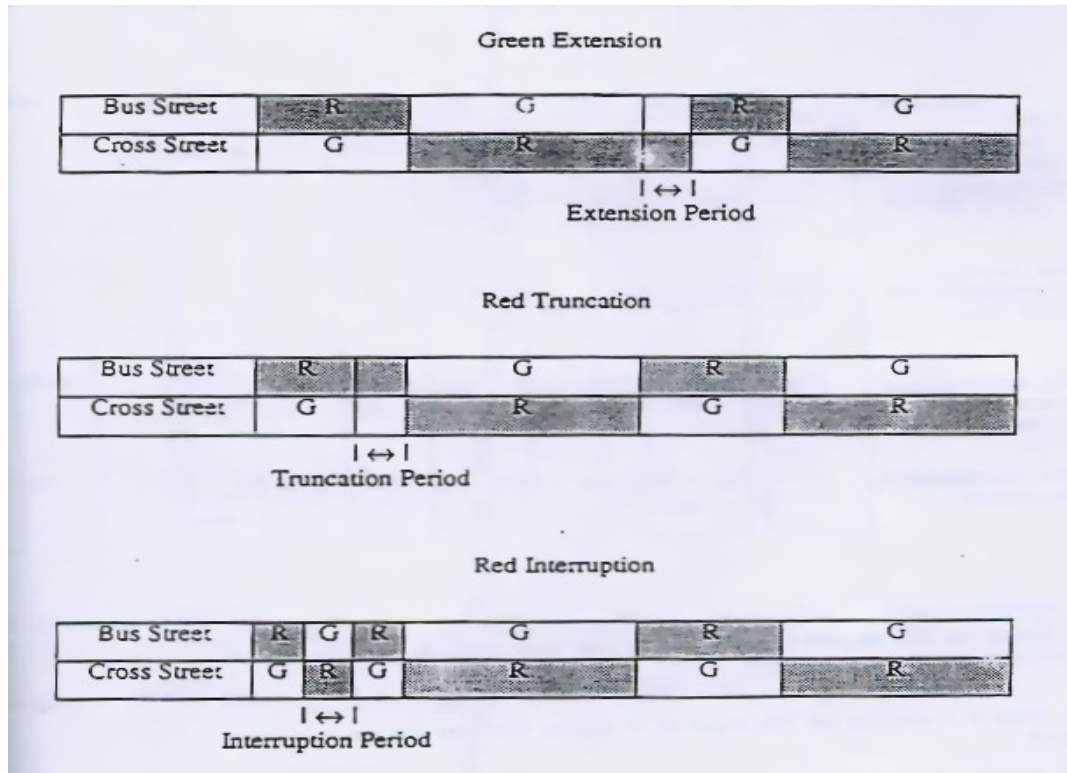


圖 2.4 優先號誌策略圖

資料來源：[25]

Seward 和 Taube[22]探討如何模化公車觸動號誌優先化的影響，本模式是以綠燈延長為基礎，而公車與其他車輛是以隨機的方式抵達。由於紅燈切除與紅燈介入較不具有效率，因此本模式採用綠燈延長的方式，另外由於本模式考量了行人與必須充分使橫向道路車輛能淨空的限制。研究結果顯示出路口若能夠配載兩個偵測器，則綠燈延長的方案就不需要全區域的電腦控制系統，另外就利本比而言，利本比約是 20 比 1，最後公車觸動優先化系統能夠增加一個路口的經濟效益。

Wattleworth、Courage 和 Wallace[11]則研究利用三種公車的優先策略組合，來評估公車的優先策略，三種優先策略為公車專用道、號誌優先策略與公車優先號誌系統。公車優先策略對於公車操作的影響，除了能夠成功的降低旅行時間與延誤外，任選其中兩種優先策略，能夠改善排班的延誤，而三種優先策略都考量的情況下，則與兩種優先策略改善的程度一樣。公車優先策略對於交通流動的影響，雖然也許會有一部分的反面效果，但根據以往的研究顯示出公車優先策略確實能夠帶來改善，也許是因為幹道有較重要的考量。研究結果顯示出優先策略確實能夠吸引小客車駕駛轉而搭乘大眾運輸，然而需要注意的是費率與路線必須小心建立，以使利潤能夠抵銷現實部分的操作成本。公車優先系統並不會使交通號誌有負面的影響。

Radwan 和 Hurley[1]透過巨觀模式來探討公車號誌優先對於延誤的影響，模式部分採用 Webster 的延誤方程式，而號誌優先策略分為四種，主要街道綠燈延長、橫向街道綠燈延長、主要街道紅燈切除與橫向街道紅燈切除，並根據紅燈的限制訂出多種方案來，再根據這些方案找出六種時間間隔來，然後依據 Poisson 分配來決定在這六種間隔中，沒有抵達的機率。結果顯示出在公車優先的情況下，在主要街道能夠減少 5%的小客車延誤，50%的公車延誤，而在橫向道路上小客車延誤會增加 23%的延誤，而公車會減少 8%的延誤。

Rouphail[20]利用 TRANSYT-7F 模式，分別評估數種公車優先策略，其中對於車輛和乘客的延誤計算方面，分別利用各種車輛的比例乘以各種車輛的乘載率累加之後，求得該路段的佔用率，在用此佔用率求得該路段的延誤。而各路段的速率則以各路段每小時的總車-哩除以每小時的總車-小時求得。結果顯示出在混合車流下，在實行公車號誌優先時，速率由 1.146mph 增加到 1.152mph，而在有專用道的情形下，速率由 4.82mph 增加到 6.397mph。

Sunkari、Beasley、Urbanik II 和 Fambro[24]利用權重的方式來比較優先號誌與非優先號誌的優劣，其中優先號誌採用的方式為綠燈延長與紅燈切除的方法，並利用 1985 年 HCM 的延誤方程式，結果顯示出模式會高估延誤 41%，而這差異可能是由於 HCM 的延誤方程式在高 V/C 值之下會高估延誤值，另一可能的原因觀察的延誤值在左轉時相會較預測的延誤來得高，而這是由於左轉時相有保護允許的操作，而模式裡並未考量到，因此會有高估的情形。

Alan 和 Khasnabis[4]採用了綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷三種優先的邏輯，而在其方法論方面，採用了兩種方式，第一種為利用平均抵達率、平均服務率與同時產生的抵達-服務，然後利用經由優先所得結果而修正的號誌時制計畫疊合在時率圖（抵達-服務率圖）上面來看其結果如何；第二種方法為利用微觀的模擬，其中服務率與抵達率是經由連續三個週期的車輛資料迴歸而得的，然後在依照修正後的號誌時制計畫（每連續三個週期修改一次）來看其結果。以上兩種方法的黃燈皆被考量成綠燈的一部分，然而由於在紅燈中斷部分，每次插入 10 秒的時段，並不是整段都當作綠燈，其中還包括了一部分的黃燈，而之所以特別考量紅燈中斷的部分是因為綠燈延長或紅燈切除都是綠燈或紅燈的延續，因此不須特別考量黃燈的部分，所以本篇作者在紅燈中斷的部分，多了一項時間調整的因素（0.65，表 10 秒的時間中，綠燈為 6.5 秒、黃燈 3.5 秒）。實驗結果顯示在大多數的情況下，優先策略均對於交通有助益，惟在低流量部分，方法一有可能導致負面的情況產生，就總體而言，方法一較適合於高流量的狀態，而方法二在中低流量部分比較有效益。

Khasnabis、Karnati 和 Rudraraju[25]採用了綠燈延長與紅燈切除兩種邏輯和不

補償的政策，然後採用 NETSIM 來作為模擬的模式，並採用了動畫模擬來追蹤公車在非優先與優先策略下的移動。在結果方面，由於優先與非優先策略的流量不一，因此根據兩者的流量，來校估優先策略的延誤值。在路線層級方面，主要方向延誤的減少與次要方向延誤的增加都是被預期的，而公車的旅行時間由 568 秒（非公車優先）降低到 501 秒（公車優先）；在路口層級方面，由 7 個路口與 10 個方案組合的矩陣，在全部 70 種方案下，大多數的方案延誤減少了約 0.04% 到 10.3%，然而要注意的是在少數方案延誤增加了從 0.1% 到 24.9%；在公車路線層級下，公車的旅行時間減少了 0.3% 到 13.5%。雖然對於支線的车辆會有延誤增加的情況，然而主線所減少的車輛與公車所減少的旅行時間所得的利潤均較支線增加的成本為多。

Koch、Chin 和 Smith[15]在探討優先策略對於輕軌捷運（LRT）的影響，其中將策略分為三種，第一種為不採取優先策略，類似於原先的定時號誌時制計畫，第二種為採取綠燈延長或紅燈切除的方式，而第三種為利用即時的績效評量來決定控制策略的方式。結果顯示出在第二種策略下，LRT 減少了大部分的延誤，然而在非 LRT 的部分，第一種策略與第三種策略分別增加了 10% 跟 17% 的延誤，就整體而言，第二種策略較第一種策略減少了 2% 的延誤，而較第三種策略增加了 6% 的延誤。

Ivanovic、Halterman、Yedlin 和 Childs[19]對於 LRT 優先的研究中將號誌優先化分成三種策略，簡單策略為當電車到達停止線時，是否要延長綠燈時相或是立即切換路權。複雜策略則包括在最大綠燈與最小綠燈限制下修改時制計畫以允許電車繼續前進，如電車在紅燈時相抵達，策略會讓橫向道路的车辆通過路口在切換路權給電車，若再綠燈時抵達，但是不能通過路口則會依橫向道路的車隊來決定是否延長或終止。綜合策略則是包含了以上兩種策略。模擬出來的結果，對整個路網而言，速度在早上尖峰與晚上尖峰增加了 21% 與 4%，延誤減少了 29% 與 8%。對於 LRT 而言，速度增加了 13% 與 3%，延誤減少了 31% 與 9%。

Khasnabis 和 Rudraraju[23]的研究中透過延長綠燈、紅燈切除和紅燈中斷來執行模擬過程，並採用 NETSIM 來模擬，執行過程中假如公車正好在綠燈時相抵達時，就不執行任何動作；若在紅燈時相抵達時，號誌時制計畫將會改變，增加一段不大於 10 秒的額外綠燈時段，以讓公車能夠順利通過路口，然而增加綠燈時段的方法只可能是延長綠燈或是切除紅燈，而不採用中斷紅燈，原因是在 70 秒週期實在是太短了，若採用中斷紅燈的方法，則勢必會對每個方向增加大概 5 秒的黃燈時間，所以中斷紅燈的方法就不予採用。當公車抵達路口時，會考量此公車是否需要及有資格被優先，當兩項都成立則給予優先。結果顯示公車在 7.5 分鐘、10 分鐘和 15 分鐘的班距下，在東西向主要道路的延誤都降低，而在南北向次要道路則有增加。對於路口而言，延誤降低了 0.2% 到 15.5%。對於整個路線而言，

主要道路減少的延誤都較次要道路增加的延誤來的多。在公車班距的比較下，在 10 分鐘的班距下，主要道路的延誤降低最多，但若整個考量的話，則以 7.5 分鐘班距為最佳。

顏贊峰[31]以台北市棋盤式公車為對象，針對公車優先號誌之設置進行研究，選擇無設站之交叉路口，利用主動式優先控制方法之延長綠燈時相時間、插入綠燈時相以及縮短紅燈時相時間三種方法，並以 C 語言程式進行模擬評估，分析實施公車優先號誌之績效。經由模擬之結果，幹道方向綠燈時間延長越長，公車停等次數以及行駛時間皆能減少越多。在綠燈延長 30 秒鐘時，已能減少 80% 以上的等候車輛以及 90% 以上的等候時間。而考慮整個路口的總效益而言，由於幹道方向交通量大，所能獲得的利益較大，因此可提高整個路口的效益。

李紹榆[32]探討智慧型全觸動號誌控制系統功能與需求設備，配置公車優先通行控制參數，並選用（1）延長綠燈時間、（2）切斷紅燈時間、（3）插入綠燈時間等主動式公車優先通行策略，構建「具公車專用道且近端設站」及「不具公車專用道且近端未設站」之公車優先通行控制模式。使系統能動態推估車流運行資訊，在合乎控制策略設定及即時運算下，藉由模糊控制理論，有效地處理公車優先通行控制問題；並提供一系統執行函數，使系統亦能依據的交通狀況，處理四面競爭公車，進行公車優先通行控制。同時，為進行系統評估選用微觀模擬軟體 CORSIM 來提供各種即時資料，並藉由程式語言 C++ 撰寫控制系統之電腦模擬評估程式，配合所構建之公車優先通行控制模式及控制系統的運作，評估比較各種流量特性組合下的執行成效。經由模擬之結果，智慧型全觸動號誌公車優先通行模式在各種流量狀況下，比不執行公車優先控制之成效佳，平均改善 7.3%~11.3% 的總乘客延滯，特別是在中高流量的交通狀況，其控制績效皆優於 CORSIM 的全觸動控制。

陳文粹[33]在配合公車專用道的近端設站的條件下，藉由公車優先號誌時制求解模式的構建，分析在台北市公車經營環境下，適合實施公車優先號誌的交通條件，分析項目包括公車本身的流量、其它車流流量、兩方向的公車流量差、公車專用道的使用型式（或公車離站方向）等。藉由以上相關變數敏感度分析得知影響公車優先號誌的決定關鍵在公車的流量，本研究所發展的求解模式可以做為綠燈擴張優先方式的求算，並且能依據不同方向離站公車數量、離站時點進行最佳化的求解，對於發展公車優先號誌提供一具有實質意義的方法。

吳育婷[34]以延長綠燈及中斷紅燈兩種方式建立公車優先號誌控制邏輯，再將控制邏輯寫入含有公車及小汽車的微觀車流模擬模式 MISSBUS（Microscope Simulations System for Bus）中加以模擬評估。在控制邏輯方面，本研究在優先層級上分為絕對優先與條件優先兩種，而這兩種優先層級都各有兩種控制策略，故

本研究共有四種公車優先號誌控制策略。而在控制對象的處理方面，本研究以 TOL 邏輯處理四面競爭的公車，並以由停站時間推估離站機率的方式處理近端設站的問題。在績效評估方面，本研究針對國內公車專用道的車流特性，分別探討在不同的路網交叉設計方式及設站方式下車流的績效，並以總乘客旅行時間為績效指標，分別就整體績效最佳、整體績效次佳、公車績效最佳等三目標進行分析，求取在各目標下各種車流量組合的最佳號誌控制策略。模擬結果顯示，若原來定時時制下週期較長者，實施公車優先號誌後車流績效改善較為明顯。

鄭雄飛[37]在公車專用道近端設站情況下，考慮公車車隊現象之優先號誌控制邏輯時，應用車輛「時-空軌跡圖」的概念，以統計方法建立機率模式，用以描述車流間距（headway）函數的性質，將公車車隊停站服務後，「未受前車阻擋」與「受前車阻擋」兩種可能情境納入模式中，進而推導出公車車隊站區需求時間（Departure Need Time, DNT）。而公車優先策略則採取「延長綠燈」、「切斷紅燈」與「延長綠燈結合切斷紅燈」三種策略。根據模擬結果顯示，在不同的小汽車流量與公車流量之組合下，分別對整體系統最佳與公車績效最佳進行分析，結果顯示公車優先號誌在大部分的情形下，可降低公車旅行時間。進一步比較公車車隊現象之公車優先號誌與未考慮公車車隊現象之優先號誌，結果顯示考慮公車車隊現象之公車優先號誌更有效的降低公車旅行時間，甚而整個路口績效改善也較為明顯。

謝有筆[38]研究改進現行台北市現行公車優先號誌，以期能提昇公車服務品質。因此，在過去的台北市公車優先號誌公車動態資訊系統的發展基礎下，本研究遴選代表性路口，進行現場調查和評估以了解現場的交通特性、車流狀況及公車的實際運行情形，發展一維和二維公車優先控制模式、控制參數組合與控制器等，以增加公車優先號誌之推廣和適用性。採用整合性公車優先通行策略（延長綠燈+切斷紅燈+補償機制）之一維和二維路口控制模式，可有效提昇公車的運行績效，透過各項主動式公車優先通控制策略的運用與控制模式中參數的調整，可使控制模式適用於不同條件的公車優先通行路口。經測試結果發現，就 285 公車而言，於一維路口，可改善停等延滯平均約 66.7%，改善停等百分比平均約 31.4%，改善乘客延滯平均約 66.5%，於二維路口，可改善停等延滯平均約 16.5%，改善停等百分比平均約 16.4%，改善乘客延滯平均約 25.3%。另以整體路口績效視之，於一維路口，可改善停等延滯平均約 3.91%，改善停等百分比平均約 13.5%，改善乘客延滯平均約 20.3%，於二維路口，則未有明顯的改善。

周志昇[39]研擬臺北市路口公車優先號誌設置準則，以進行公車優先號誌之路口評選，汰除沒有設置必要的路口。並就有設置需求的路口，視其條件，整合延長綠燈、切斷紅燈及插入綠燈等控制模式，確認路口所適用之控制模組。在「安全」與「效率」的原則下，根據路口評選作業流程及影響因子的決策方法，就路

口公車優先號誌需求程度、延滯情形、設備條件、路口型態、連鎖特性、單位延長時段、剩餘綠燈時間、績效評估及其他限制等擬定出九項不同的準則項目。績效評估方面使用都市交通模擬軟體 CORSIM，設計路口不同的交通流量條件進行模擬，離線評估執行優先號誌控制的績效。使得經由設置準則篩選出的路口，執行公車優先號誌控制，在路口總人延滯的評估指標上有正效益。

2.3.2 時相忽略與補償策略

第二種策略為時相忽略 (Phase Skipping) 與補償策略 (Compensation)，時相忽略策略為當公車抵達時，為了使公車容易通行，由正常的時相順序中，忽略一個或多個非公車優先時相；補償策略則是補償當執行綠燈延長、紅燈切除策略時，增加的非公車優先時相損失。惟以往的研究結果發現，採取補償策略有可能會導致延誤增加，因此並不常用，另外，時相忽略也與補償策略合併使用，惟效果不彰故不常用。

El-Reedy 和 Ashworth[26]利用 TRANSYT 模式來分別探討公車在不同的偵測環境下對績效的改變，其中 TRANSYT 裡面，必須輸入一平滑參數來表示車流的消散行為。對於公車的 control 策略分為三種，第一由於公車的偵測，會有遲閉或早開的情形，而第二種方法，則僅有遲閉的情形，第一種與第二種都不考量補償橫向道路的綠燈，第三種方法則是遲閉的情形，但會補償橫向道路的綠燈。結果顯示出，第一種方法與第二種方法在 Bus-TRANSYT 提共的固定時制下能夠改善績效，而第三種補償的方式則反而使績效比原來固定時制更差。

Al-Sahili 與 Taylor[13]測試幾種優先邏輯，包含綠燈延長、時相回復 (紅燈切除或早開)、時相忽略、補償或條件與非條件優先，將以上幾種邏輯重新組合成六種優先方案 (如表 2.3)，然後利用 NETSIM 裡的圖形與時間週期來模擬公車優先號誌。圖形介面是用來追蹤公車和號誌狀態，並且決定是否需要採取優先策略，然後定出號誌時制計畫，在將圖形介面與時間週期計畫結合來模擬公車優先號誌策略。結果顯示出就整個路網的績效而言，平均延誤以非優先為最低，方案 1 與 2 為優先策略中延誤最低的；就公车的平均旅行時間以方案四與方案五為最低，非優先為最高；就整個公車的路線延誤而言，以方案四為最低，方案六為最高；而對於共乘比率，當比率在 5% 以下，優先策略有較低的延誤，而當共乘率超過 10%，則以非優先策略有較低的延誤。

表 2.3 優先方案表

Base case	不優先
Case 1	綠燈延長、紅燈切除與不補償
Case 2	綠燈延長、紅燈切除與補償
Case 3	時相忽略與不補償
Case 4	時相忽略與補償
Case 5	選擇性計畫
Case 6	條件優先

資料來源：[13]

吳淵展[35]依公車到達交叉路口時間點，配合號誌時制最小綠燈時間與最長紅燈時間限制，研擬公車絕對優先號誌模式與補償性公車優先號誌模式；並以公車優先號誌模式加入路段等候線長度與路口損益值之判斷，而發展公車條件優先號誌模式。本研究以台北市南京東路與健康路交叉路口作為實例分析，經由模擬評估結果顯示公車絕對優先適用於幹道高流量；公車條件優先適用於幹道高流量與支道低流量；而公車補償優先則適用於支道高流量。透過分析可知，以路口績效作為公車優先號誌設置準則時，應以條件優先模式作為優先控制方式；而以公車停等延滯作為考量時，則應以補償性公車優先號誌作為優先控制方式。

2.3.3 權重設計

利用附加權重的方式，給予高乘載車輛權重，使其因高權重而能夠具有優先待遇而能順利通行路口，權重設計多以適應式號誌為主，因適應式號誌具有績效函數，可用來決定最佳決策以使公車通行。研究中顯示能此類方法能將公車的旅次時間降低約 10 至 20% 的延誤。

Mowatt 與 Brinckerhoff[17]的研究指出現今交通管理策略大都是以讓直進的車輛能夠大量的通過路口為主，而並非以路口最大通過人數作為基礎，如果能夠讓高乘載的公車獲得優先權，則能夠增加最大通過路口人數，當要架構這樣的系統，需要四個部分，公車本身需要搭載一個能提共公車資料的裝置，藉由天線來傳送資料，利用無線電發出訊號給公車，讓公車能夠傳送訊息給系統，以執行優先權的部分。而控制邏輯主要分成四項，首先是綠燈延長與紅燈切除，綠燈延長與紅燈切除分別是指公車在綠燈與紅燈到達時，將主要時相綠燈延長或次要時相紅燈切除，以使公車能夠順利通過路口的策略，其次為舉起策略，舉起策略則是指當有高乘載車輛觸動偵測器時，系統會將其餘相對時相的觸動給停住，以讓公車能夠通行路口，再其次為車隊跳躍，車隊的跳躍則是當高度擁擠時，系統會額外增加一條能夠讓高乘載車輛的車道，以讓高乘載車輛能夠越過擁擠的車隊而通過路口，最後則為附加高乘載權重的 OPAC 策略，利用附加權重的方式，給予高

乘載車輛權重，使其績效函數決定決策時，因權重關係而使公車能順利通行。

Chang、Vasudevan 和 Su[7]採用適應式號誌控制策略來執行公車優先作業，總共包括了三個模組，包含了交通狀態估計模組、號誌狀態模組與公車優先模組，其中為了執行公車優先，在其績效函數考量了乘客延誤、車輛延誤與排班延誤。結果顯示出就適應式號誌與觸動式號誌比較，觸動式號誌比適應式號誌在 500vphpl 與 1000vphpl 的情況下多了 10%到 15%和 40%到 45%的車隊長度。而就優先與非優先的情況下，在流量 300vphpl 與公車班距為 180 秒下，非優先的乘客延誤較優先的乘客延誤多了 80%到 90%，而當流量增加到 1000vphpl 時，非優先的延誤約較優先情況多了 1%到 10%。

李政聰[36]則研究在公車專用道設計及現有定時號誌系統下，發展幹道公車準點優先通行控制模式，提昇現行路段公車準點優先控制的功能及整體系統績效。在原先號誌連鎖之控制條件下，依公車運行特性及需求與準點時制條件等，融合被動式與主動式公車優先通行控制策略，考量旅客乘載權重調整因子，發展整體最佳化公車準點與微調公車準點之幹道公車優先控制模式，使系統在控制目標函數最佳化情況下，求解幹道公車優先準點通行問題。經由模擬實驗結果發現，因應不同公車流量與準點需求狀況，整體最佳化公車準點模式與微調公車準點模式在綠燈帶寬績效指標方面，平均分別增加 4.7%、8.7%；在系統總人延滯方面，則均減少 0.8%；顯示在原有號誌連鎖系統架構下，加入幹道公車準點通行控制，確可提昇系統整體控制績效，增進公車運作效率。

2.3.4 小結

以下就公車優先準點方式進行比較（如表 2.4 所示）。此幾種策略目前多以能減少公車延誤為主，較少考慮準點性的因素。若以準點性來考量，權重設計較能針對不同的情況加以因應，彈性較高，而綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷則在此方面略低。

表 2.4 公車優先準點方式比較

公車優先準點方式	特點	比較
綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷	當公車需要準點時，視情況給予公車時相延長、提早關閉衝突時相綠燈或插入一綠燈時相以使公車通過路口	彈性較低、邏輯簡單，以往研究多以此種策略為主
補償策略與時相忽略	將路權直接跳到公車時相，之後補償忽略時相損失的綠燈時間	效果不彰，鮮少運用
權重設計	給予公車優先權重，通常會搭配一績效函數衡量	彈性較高，惟邏輯較難，需搭配績效函數考量，權重的設計也需考慮

資料來源：本研究整理

2.4 交通量預測

1. 車隊擴散關係[30]

Robertson 發展之 TRANSYT 模式，採用極小化延滯，其基本假設有三：

- (1) 交通號誌之設置不影響流量及路線的使用。
- (2) 網路中所有號誌均為共同週期（Common Cycle）
- (3) 每個號誌其各時相所分配的有效綠燈（即時比）為已知。

該模式中之車隊擴散理論透過遞迴關係之形式來表現，應用非常簡單，即將車對擴散程度與路段之行車時間以函數式表示（如下式 2.8），此車隊擴散關係為遞迴式，即上階段之狀態會影響下階段狀態，流率隨時間之變化而變化，循環不已，TRANSYT-7F 即以此式之觀念描述整個車隊移動之行為。其中明顯的可看出預測交通流之擴散程度由參數 α 、 β 決定，若 $\alpha=0$ ， $\beta=1$ 表示路段上車隊並無擴散現象，而 $\alpha=1$ 、 $\beta=1$ 則表示車隊可完全擴散，故此二參數校估正確與否，與 TRANSYT-7F 模式之運作有相當密切的關係。

$$q'(i + \beta t) = Fq(i) + (1 - F)q'(i + \beta t - 1) \quad (2.8)$$

其中 $q'(i + \beta t)$ ：對任一時階 i ，經 βt 時間後，預測路段上某觀測站之車流流率。

$q(i)$ ：在時階 i ，通過路段上由停止線起始之車隊流率。

$q'(i + \beta t - 1)$ ：路段上某觀測站其 $q'(i + \beta t)$ 之前一時階的流率。

t ：路段上平均行車時間。

β ：行車時間係數，其值介於 0 與 1 之間。

F：緩和係數，其計算式為 $F = \frac{1}{1 + \alpha\beta t}$ 。

α ：擴散係數，其值介於 0 與 1 之間。

McCoy、Balderson、Hsueh、與 Mohaddes[21]的研究中提到由於 TRANSYT 計算延誤與停等與其時制計畫的效益性皆賴小隊分散模式的預測交通情況的能力，而校估小隊分散模式則包含了分散因子 α 與時間因子 β ，另外本篇將幹道種類分為兩方向各兩線道與四線道分離的情況，研究結果顯示在兩方向各兩線道的情况下， α 值與 β 值為 0.21 與 0.97，在四線道分離的情况下， α 值與 β 值為 0.15 與 0.97，因此在低摩擦的車流情況下，四線道分離的 α 會比兩方向各兩線道來的低，且較大的車隊會比較小的車隊來的分散。

Castle 與 Bonnaville[5]的研究中指出當車隊於號誌路口間路段上的小隊分散情形會降低號誌連鎖系統的效益，尤其當此路段較長時，降低的效益越明顯，因此本篇則針對校估小隊分散模式的參數來預測連鎖時制計畫的效益。根據敏感度分析結果發現 TRANSYT 的最佳化時制計畫對於小隊分散因子的改變為不敏感，然而這並不能說不同的 k 值對於下游的停等與延誤就不會產生顯著的差異，就一個相同的時制計畫而言，發現 k 值 50 會比 k 值 30 的延誤與停等多了 3.6%。最後根據測量的結果發現各路段之間的 k 值為 50，然後根據此值再與 TRANSYT 的最佳時制計畫模擬結果得整個路網可因號誌連鎖而使早晚延誤降低 10.8%與 10.1。

$$F = 1/[1+(k*t)/100] \quad (2.9)$$

其中，K 為常數。

Axhausen 與 Korling[12]的研究中提到，由於 Robertson 的小隊分散模式為 TRANSYT 的核心，然而由於 TRANSYT 的廣泛使用，對於根據不同交通狀況的模式校估僅有少數研究，因此本篇即探討不同交通狀況下因子值的設定。首先針對 α_8 設定對於績效的影響作敏感度分析，發現對於 α_8 值為 0.75、1.00、1.25 時差異不大，但是對於各路口與主要路口的時差變異卻相當大，主要是由於整體的績效評估會使個別的差異平均化導致，因此若對於單一路口來看，則可以發現錯誤的 α_8 值會導致大量額外的車隊停等，因此 TRANSYT/8 也將原來預設的 α_8 值 0.5 改成 α_8 值為 0.35，接著本篇收集了相關對於 α_8 的研究可發現在歐洲 α_8 的值普遍較低，而根據以往研究，本篇將影響 α_8 的因子歸納為線道數、斜率、路邊停車行為、行人穿越與停止線的流動五類，表 2.5 為其結果，然而這樣的結果不建議將 α_8 寫成此五種因子的函數，主要由於車輛間的交互行為太多，是很難去估計的，另外對於有無停車活動未來可改為有停車與無停車的數目，對於有無穿越行人可改為穿越行人群的數目，對於停止線的車流行為可改為飽和流率。

$$F = 1/[1 + (\alpha * t)], t = \beta * T$$

(2.10)

其中， α_8 為當 β 固定 0.8 的校估值。

表 2.5 影響 α_8 因子表

影響因子	程度	α_8 平均值
線道數	1	0.46
	2	0.29
坡度	上坡	0.48
	平坦	0.33
	下坡	0.34
停車活動	有	0.37
	無	0.37
行人穿越	有	0.53
	無	0.23
停止線的車流	擾動的	0.37
	平順的	0.38

資料來源：[12]

Lin、Cooke 和 Vijayakumar[6]研究中提到由於適應式號誌需要收集偵測器的資訊來決定時制計畫，然而在控制時段內，一開始的一段時間由於車輛僅僅剛觸動到偵測器，從偵測器到停止線仍有一段時間 t ，因此最佳化的控制是從控制時段開始的時間再加上一段 t 之後，才執行最佳化控制。由於要得知個別車輛之間的間距很難，大部分的做法採取預測一個時段內的車輛數。而預測的工具可分為三種，單指數平滑、雙指數平滑與平均間距等三種來考量，其中以單指數平滑是最理想的。然而即使是最理想的預測工具，也無法避免產生大的誤差。在適應式號誌裡，如果偵測器無法提供長達 25 秒的資訊，不如改採用 10 秒的資訊，會是較正確的做法。

Manar 和 Baass[2]則針對流量與外部干擾來校對 Robertson 的小隊分散關係中之平滑因素，以流量而言，當流量大約是飽和流量的一半時，平滑因素最大，若流量增多或減少時，則平滑因素遞減，當外部干擾越高時，平滑因素越高。

Wey 與 Jayakrishnan[28]的研究中指出由於以往針對路網交通號誌最佳化的函數並未包含車流模式，除了某些軟體採用模擬的方式如 SCOOT，其他僅僅只是使用點偵測器來預測抵達資訊來對單一路口最佳化，或者是以綠燈帶來最佳化。因此本篇研究以發展一套完整模式，包含路段間車輛的移動模式為研究目的，其中路段間車輛移動的模式採用 Robertson 的小隊分散模式，來整合入路網的最佳

化模式中。路網模式包括績效函數、車隊與號誌的限制式，其中在車輛抵達部分，利用上游路口總進入此上游路段之車隊透過 Robertson 的小隊分散模式來計算抵達下游路口的車輛數，然後在計算出停等車隊數，而在求解流程方面，則是採用路網多路口的線性規劃來求解問題。

2.5 綜合評析

1. 針對適應式號誌控制方式：由文獻中可發現，適應式號誌大致可分為兩類，有循環週期與無循環週期的適應式號誌控制策略，其中無循環週期的適應式號誌控制策略又可分為二元選擇法與序列搜尋法，由於本研究在探討公車優先通行，需要有較大的彈性來因應，因此在號誌策略的選擇上以無循環週期的適應式號誌控制策略為主，而就二元選擇法雖然其邏輯較簡單，但是無法顧及較長時段，因此本研究將以序列搜尋法之 OPAC 控制邏輯執行路線階層之號誌控制。另外，以往研究適應式號誌多以有效紅燈與有效綠燈作為模式建構之參數，然而此與一般實際道路情形有異，本研究擬採用紅燈、黃燈與綠燈參數來建構相關之模式，以符合現有號誌運作情況。
2. 針對公車優先準點方式：以往研究公車優先號誌多採用綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷等方法，且號誌系統多為觸動式號誌，而以較彈性的適應式號誌的研究，則仍屬於少數，雖然以往的研究大部分皆能夠使系統總成本降低，然而其考量的多以準點為主，即公車優先層級較一般小客車高，然而此法雖能有效降低公車之旅行時間，卻不能夠達成準點的目標，即使公車能夠降低行駛時間，對於乘客之效益亦有限，另外對於公車之優先僅能考量延長一段綠燈時間或縮短紅燈時間等進行處理，號誌本身缺乏對未來適當的預測性，而適應式號誌則由於策略本身具有預測未來一段時間的車流行為與績效函數的考量，因此具有因應公車實際急切或舒緩程度的彈性與準點控制能力，而不至於將多餘的通行路權全開放給公車行進方向，以減少橫向車輛所遭受之延誤，因此在考量準點性與路口延誤下，利用適應式號誌來探討公車路線控制之績效。
3. 以往研究公車準點多以單一觸動式或適應式控制作為整個路網的公車優先號誌，本研究將引入階層的架構，執行路網的公車準點作業，僅在公車有連鎖準點需求時，才執行路線層級策略的適應式號誌控制，否則則執行區域層級策略的定時式號誌控制。

第三章 研究架構與方法

3.1 研究分析架構

本研究整體的系統分析程序（如圖 3.1 所示），包括路線公車控制邏輯、號誌化路線控制與績效函數。路線公車控制邏輯系統引入班距控制與班表控制，當公車超過其容忍範圍時，設定權重以執行控制，班距控制在於控制前後兩公車之間的間距，而班表控制則是控制公車是否於預定的班表時間內抵達。號誌化路線控制則是引入階層架構，包括控制系統時制設定與時制組合方案以及相關號誌參數，控制系統為定時式號誌與適應式號誌系統，號誌控制方案則是路口階層、路線階層與補償時相的組合方案，號誌相關參數包括號誌狀態、變換決策、綠燈通行時間、飽和流率、車隊長度等。

系統參數主要包括路網結構、旅運需求、公車班次排程與路段旅行參數等，路網結構包括公車路線、站位位置、號誌路口位置（如前圖 1.1）與各路段長度等，旅運需求則是公車各站位公車乘客需求與小客車需求等，路段旅行參數則是小客車與公車在路段中運行的參數，小客車旅行參數包括車隊擴散係數、旅行時間係數和路段旅行時間，公車參數則是公車於路段中的平均旅行時間。

績效函數包括路口號誌績效與公車站位績效，路口號誌績效為計算路口控制階層與路線控制階層的績效，在路口控制階層時，僅計算小客車與公車延誤成本績效，路線控制階層則必須根據公車權重，考量公車路線的運行，依據績效函數選擇最佳的路線控制策略執行，站位績效則為公車站位乘客的等候成本績效。系統分析則須將路口號誌績效與公車站位績效加總，分析各方案下的績效高低，以決定在不同設定下適合的方案。因此，本研究在考量公車優先準點與在績效函數之下，求取最佳的控制方案，透過公車班表或班距控制邏輯，在路線控制階層下維持公車準點性，而在路口控制階層穩定小客車車流運行。

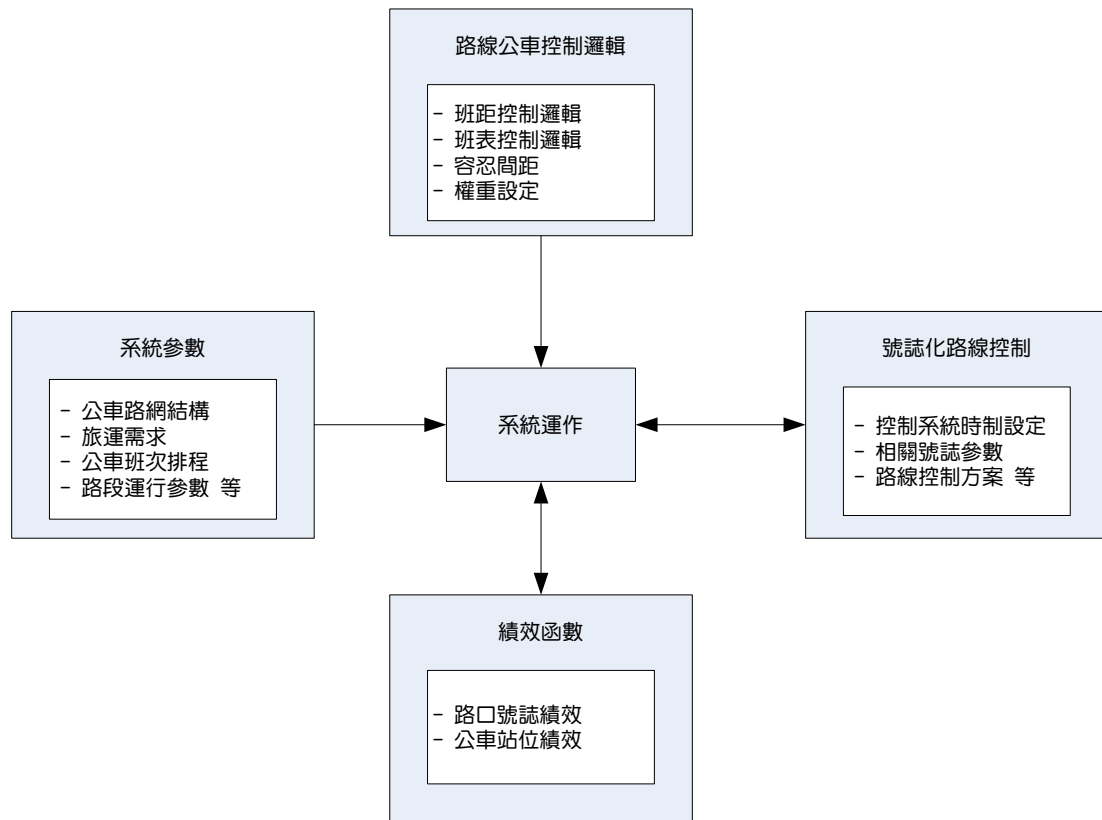


圖 3.1 系統分析架構圖

3.2 模式基本假設

欲執行路網公車路線控制，首先針對路網中之路段、路口、車流與公車站位定義，以下分為路網假設與車流假設（圖 3.2 為路口示意圖）。

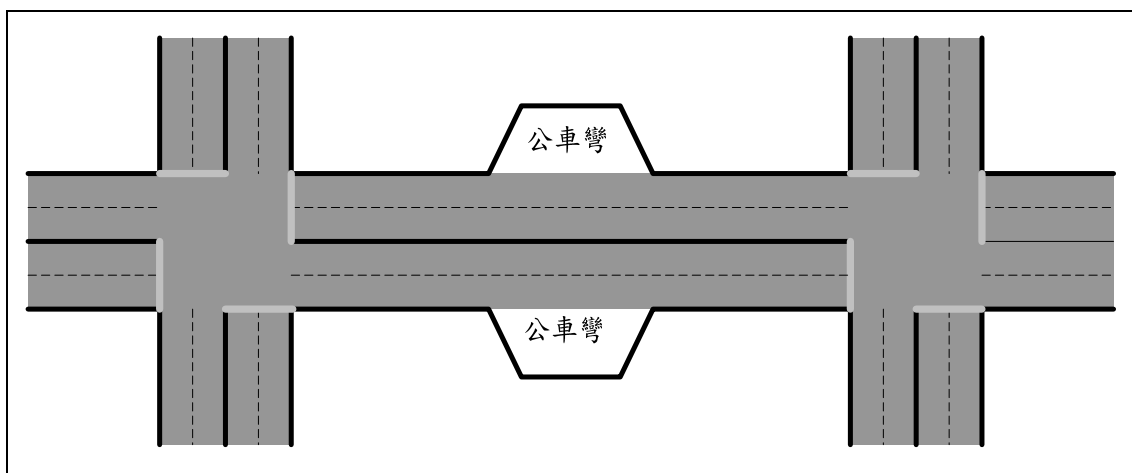


圖 3.2 路口示意圖

3.2.1 路網假設

1. 各路口共計四個臨近路段，各臨近路段包含兩車道，於每個路口進行號誌控制。
2. 為簡化路口號誌時相操作，各路口四個臨近路段僅有直進方向，其他轉向可由不重疊時相來處理，本研究暫不考量。
3. 路口定時式號誌依韋伯斯特（Webster）模式計算最佳延誤週期與時比；適應式號誌則依 OPAC 控制邏輯，決定時制計畫；補償週期則以紅燈停等車隊數加上綠燈抵達車輛數，依飽和流率消散計算補償週期的時間長度。
4. 在各個臨近路段無顯著坡度變化。
5. 路口與路段皆不考慮事故情形。

3.2.2 車流假設

1. 車流組成僅有小客車與公車，無計程車、重型車與機踏車。
2. 小客車於幹道與支道起點，依據普松分配 (poisson)，由每小時的小客車流量，產生每個時階的車輛數；公車於幹道起點，依據發車班距產生公車。
3. 小客車於路段上行進，引用 Robertson 的車隊擴散關係，公車旅行時間的推估則採用平均旅行時間微調。
4. 各臨近路段無小客車臨時停靠車輛。
5. 車隊累積採垂直堆疊計算，在路段夠長的情況下，不會產生回堵至上游路口之現象。
6. 路口車隊採用飽和流率消散，當公車位於車隊中時，必須等前方車輛消散，始可通行過路口。

3.2.3 公車站位行為假設

1. 公車站位於路段中間，並有公車彎可供停靠，公車於進離站時，假設其減速與加速的損失時間各為一時階。

2. 公車路線較短的情形下，公車於路線上僅搭載乘客，不考量乘客下車情形，公車容量足以搭載沿線各站位等候的乘客數。
3. 公車搭載旅客時，假設每三位乘客會導致公車停等一時階的時間。
4. 公車於離站時，依現實情況公車會自動併入小客車間距中，因此不考慮當車隊堵住車道時，無法順利進入車道的情形。
5. 公車站位的乘客抵達採用普松分配，依照乘客抵達率，估算每各時階抵達的乘客數。

3.3 研究邏輯

由文獻回顧可得本研究將採用兩階層的技術，分為路口控制階層與路線控制階層，當路口號誌控制為路口控制階層時，表示該號誌採用定時式號誌時制，當路口號誌為路線控制階層時，則該號誌採用適應式號誌時制，依照 OPAC 控制邏輯運作。號誌運作時，藉由班距排程控制或班表排程控制決定路線控制需求，當公車無路線控制需求時，採用路口控制階層，執行定時式號誌控制；當公車有路線控制需求時，則採用路線控制階層，執行適應式號誌控制，並藉由權重的設計執行公車優先號誌。由以上邏輯，本研究操作流程包括車輛產生、路段移動、路口號誌控制與系統績效計算（詳細流程圖如圖 3.3 所示）。

1. 車輛產生：包括小客車與公車，小客車部份，根據給定的需求，由各車輛產生起點，依照特定分配產生每個時階的車輛數；公車部份則依照班距或是班表的時間在公車路線起點產生公車。
2. 路段移動：路段上車輛的移動，可分為小客車與公車。

(1) 小客車部份

由於每個時階有從上游路口進入的車輛數，可藉由車隊擴散關係來推算，由於車隊中各車輛的速度不一，因此當該車流由路段起點行駛一段時間之後，速度快的車輛會跑在前頭，速度慢的車輛則在後頭，因此原本密集的車流，會逐漸平滑化。此關係主要由路段上游的進入流量，與此路段的旅行時間成倒數的分散因子，推得經過一段時間後下游路段的流量。其中此分散因子，即當旅行時間越長，此分散因子會越小，車隊分佈會愈平滑。

(2) 公車部份

由於公車為單輛，因此在推估路段移動上，難以利用車隊擴散關係來推算，因此公車路段移動時間，則分為路段中有無公車站牌兩種情形，當無公車站牌時，公車從上游路口出發抵達下游路口的時間，為根據預設速率推算，此預設速率較小客車為低，然後再藉由亂數取其平均旅行時間的前後一段範圍來決定，若有公車站牌，則須另外考量公車在站位上的行為，包括公車的停等載客時間與公車到離站的加減速行為，載客時間根據乘客的多寡，假設每三位須停等一時階的時間，而加減速的過程則假設各有一時階的損失時間。

3. 路口號誌控制：分為四部份，檢視路線控制需求、路口控制階層、路線控制階層與補償模組。

(1) 檢視路線控制需求

檢查各個路口的臨近路段上，是否有公車運行，並檢視是否在班距控制或班表控制容忍範圍內。在班距排程控制中，為使前、後每一班車通過路口時，維持一定的間距值，並對此間距的變動設定一容忍範圍，若某一班車無法在該容忍範圍通過路口，則須執行即時號誌路線控制，使該班車通過路口的時間能夠被拉回合理範圍內。在班表排程控制中，公車根據現有排班，經過每個路口的時間，取一段容忍範圍，若公車無法再容忍的時間範圍內通過路口，則須執行即時號誌路線控制，使公車於一連串路口控制下，其時間能夠被拉回合理的範圍。因此若公車預計通過路口的時間在容忍範圍內，則無路線控制需求，依路口控制階層，執行定時式號誌系統，則該公車僅被視為一輛小客車，不進行額外控制。若公車通過的時間不在容忍範圍內，則依路線控制階層，依其早到或晚到的情況，設定不同的權重，將公車逐步拉回容忍範圍內。

(2) 路口控制階層

對公車運輸路線上的任一個別號誌而言，當上、下游號誌臨近路段無任何公車運行或公車無路線控制需求時，針對小型車流執行定時式號誌控制，因此路口控制階層總成本可由加總全部的個別號誌延誤成本而得。

(3) 路線控制階層

對個別公車運輸路線而言，當產生路線控制需求時，任何公車所在位置上、下游若干號誌相互結合而形成群組，以便在號誌設計之下，提高公車準點的效益。路線上任一群組中的號誌均由前述路口控制階層中的個別號誌前後結合而成，而號誌群組內所包括的全部個別號誌將依據路線控制的策略方案執行最佳化。由於公車有路線控制需求，若為準點需求，則給予正權重，若為延遲需求，則給予負權重。當公車在一倍容忍範圍外、兩倍容忍範圍內時，權重為一單位，以此類推當公車位於 n 倍與 $n+1$ 倍容忍範圍內時，則權重設定為 n 單位。設定權重之後，再透過 OPAC 控制邏輯，由號誌狀態模組產生時制計畫，然後藉由交通狀態模組推算相關車隊長度等，最後經由績效函數計算此時制計畫之績效，循環此過程，訂出最佳路線控制時制計畫。

(4) 補償模組

由於路線控制階層，針對公車進行時制最佳化，勢必衝擊原有定時號誌時制，因此在執行路線控制階層之後，必須將時制計畫回復到定時時制，因此透過數個週期（本研究採用一週期）的補償後，迅速將其回復到原定時號誌時制，繼續執行路口控制階層。

4. 系統績效：結合路口績效與公車站位的績效，可得系統績效。

(1) 路口號誌績效

結合路口控制與路線控制階層的號誌時制計畫與路口績效，則可以產生整體路網的號誌時制計畫與全部路口的號誌績效。

(2) 公車站位績效

公車乘客抵達站位時間，依照普松分配，產生各時階抵達人數，於公車抵達站位時，計算乘客於站位上所等候之時間，公車於搭載完乘客即離站。將各站位上的乘客等候延誤績效加總，即可得公車站位績效。

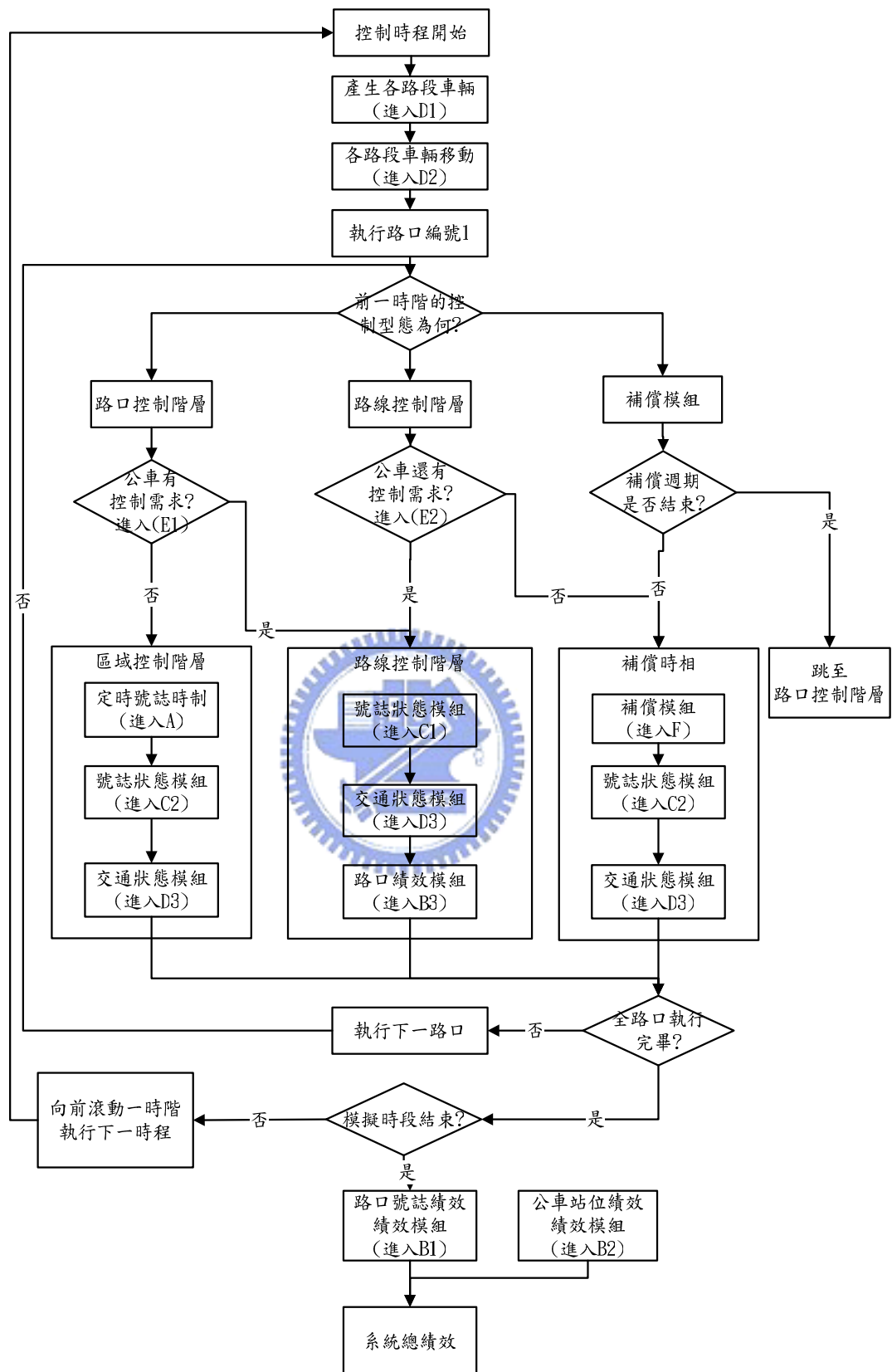


圖 3.3 系統流程圖

第四章 模式構建

本章將針對路口控制階層、路線控制階層與補償模組進行模式構建，共包括定時式號誌時制模組、績效模組、號誌控制模組、交通狀態模組、公車優先模組與補償模組，以下就各模組部份發展其模式，在模式發展前先定義模式中各項參數（變數定義表如表 4.1 所示）。

表 4.1 變數定義表

i	第 i 個路口
n	第 i 個路口之路口方向數
m	第 m 輛公車
P	第 P 個公車站位
k	時階編號
F	車隊緩和係數
α	擴散係數
β	行車時間係數
t	路段平均行車時間（時階）
j	公車行進方向, $j=1\sim n$
S_g	綠燈時的飽和流率（輛/時階），各路口設定相同
S_y	黃燈時的飽和流率（輛/時階），各路口設定相同
TD	路口車輛總延誤時間（時階）
TT	公車乘客總停等時間（時階）
G_{min}	最小綠燈長度（時階），各路口設定相同
G_{max}	最大綠燈長度（時階），各路口設定相同
$Te_{i,j}^m$	第 m 輛公車所接近之下游路口 i 的第 j 個方向的估計抵達時間（時階）
$Ts_{i,j}^m$	第 m 輛公車所接近之下游路口 i 的第 j 個方向的班表時間（時階）
H	發車班距（時階）
$H1$	容忍範圍（時階）
$Uma(k)$	表示在第 k 時階時，路口東西方向號誌狀態，0 為綠燈，1 表示為紅燈，-1 表示為黃燈
$Umi(k)$	表示在第 k 時階時，路口南北方向號誌狀態，0 為綠燈，1 表示為紅燈，-1 表示為黃燈
$E(k)$	表示在第 k 時階末端號誌的控制狀態，1 為轉換，0 為不轉換
$G(k)$	在第 k 時階累積通行的綠燈時間（時階）
$L(k)$	在第 k 個時階停等的車隊長度（輛）

Qout (k)	綠燈時在第 k 個時階離去的車輛數 (輛)
Qin (k)	第 k 個時階進入路段上游的車輛數 (輛)
Qs (k)	第 k 個時階抵達路口的車輛數 (輛)
Lp (k)	第 k 個時階，公車站位上等候的乘客數 (人)
LB (k)	第 k 時階的停等公車數 (輛)

4.1 定時號誌時制模組

路口控制階層採用定時式號誌控制，根據週期與各時相綠燈時比，可得綠燈時相長度，即可執行路口的定時控制（流程圖如圖 4.1 所示），比較綠燈時相與累積通行綠燈長度來決定是否切換綠燈。

1. 定時時制週期

定時時制週期採用韋伯斯特（Webster）最小延誤週期時制計算公式，其週期長度計算公式如下：

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - y_1 - y_2 - \dots - y_n} = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} \quad (4.1)$$

其中，

C_0 ：最佳週期長度（秒）

y_i ：在時相 i 內最大流量對飽和流量之比值， $i=1, \dots, n$

Y ： y_i 的總和

L ：每週期的全部損失時間（秒）

有效綠燈的計算可以用下式求得：

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{y_1}{y_2} \quad (4.2)$$

其中，

g_1 、 g_2 ：時相 1 與時相 2 的有效綠燈時間（秒）

y_1 、 y_2 ：時相 1 與時相 2 最大流量對飽和流量之比值

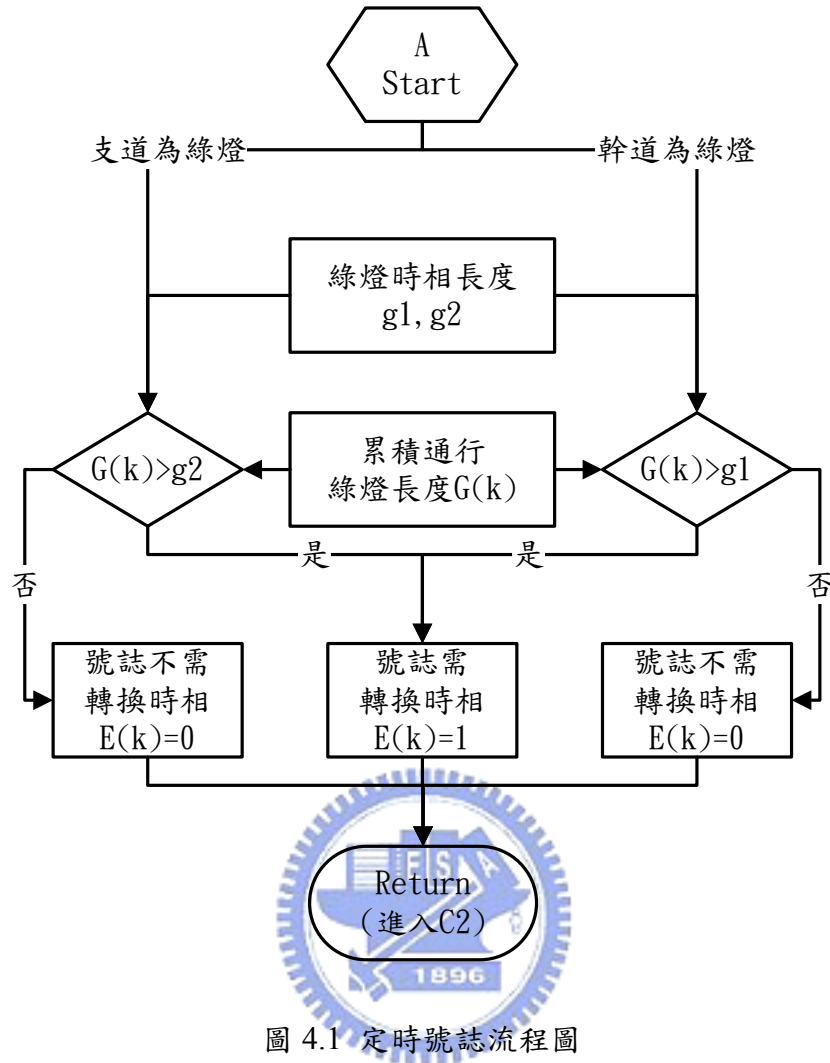


圖 4.1 定時號誌流程圖

4.2 號誌控制模組

號誌控制模組的作用為產生時制計畫，提供後續交通狀態模組之設定，本模組包括以下四項設定。當執行定時式號誌時，則由前小節定時式號誌時制計算出時相長度，透過本模組設定何時需轉換號誌；當執行適應式號誌時制時，則需要產生不同的時制計畫以計算其績效，選擇最佳之時制計畫，因此在號誌控制時段中，選定不同的號誌轉換點，透過計算累積綠燈時間來看是否介於最大綠燈與最小綠燈的限制，若不符此條件則重新選擇號誌轉換點，依此定出一套時制計畫(如圖 4.2)。

1. 號誌狀態

用於表示號誌的狀態，如綠燈、黃燈與紅燈，其邏輯式如公式 4.3 與 4.4，函數主要是考量前一時階的號誌狀態與轉換決策，以決定該時階的號誌狀態，在操作上必須先決定出 Uma 的號誌狀態，才能決定 Umi 的號誌狀態。

$$Uma(k) = Uma(k-1) - E(k-1) - 2 * \text{Min}\{0, Uma(k-1) * (1 - E(k-1))\} \quad (4.3)$$

$$Umi(k) = (1 - E(k))(1 - \text{Max}\{0, Uma(k)\}) + E(k) * (Umi(k-1) - Uma(k-1)) \quad (4.4)$$

2. 累積通行綠燈時間：在 k 時階時，累積通行的綠燈時間。

$$G(k) = [G(k-1) + 1] * [1 - U(k)^2] \quad (4.5)$$

3. 最小綠燈長度：除了能夠使駕駛者對於號誌轉換能夠安全反應外，也必須有足夠的長度來使平均的停等車隊消散，另外也為了能夠確保行人的安全而設定。

$$G(k) \geq G_{\min} \quad (4.6)$$

4. 最大綠燈長度：是為了能夠使控制策略能夠有效的處理過飽和的車流狀況而設定，也可因時段的不同而設定不同的最大綠燈長度。

$$G(k) \leq G_{\max} \quad (4.7)$$



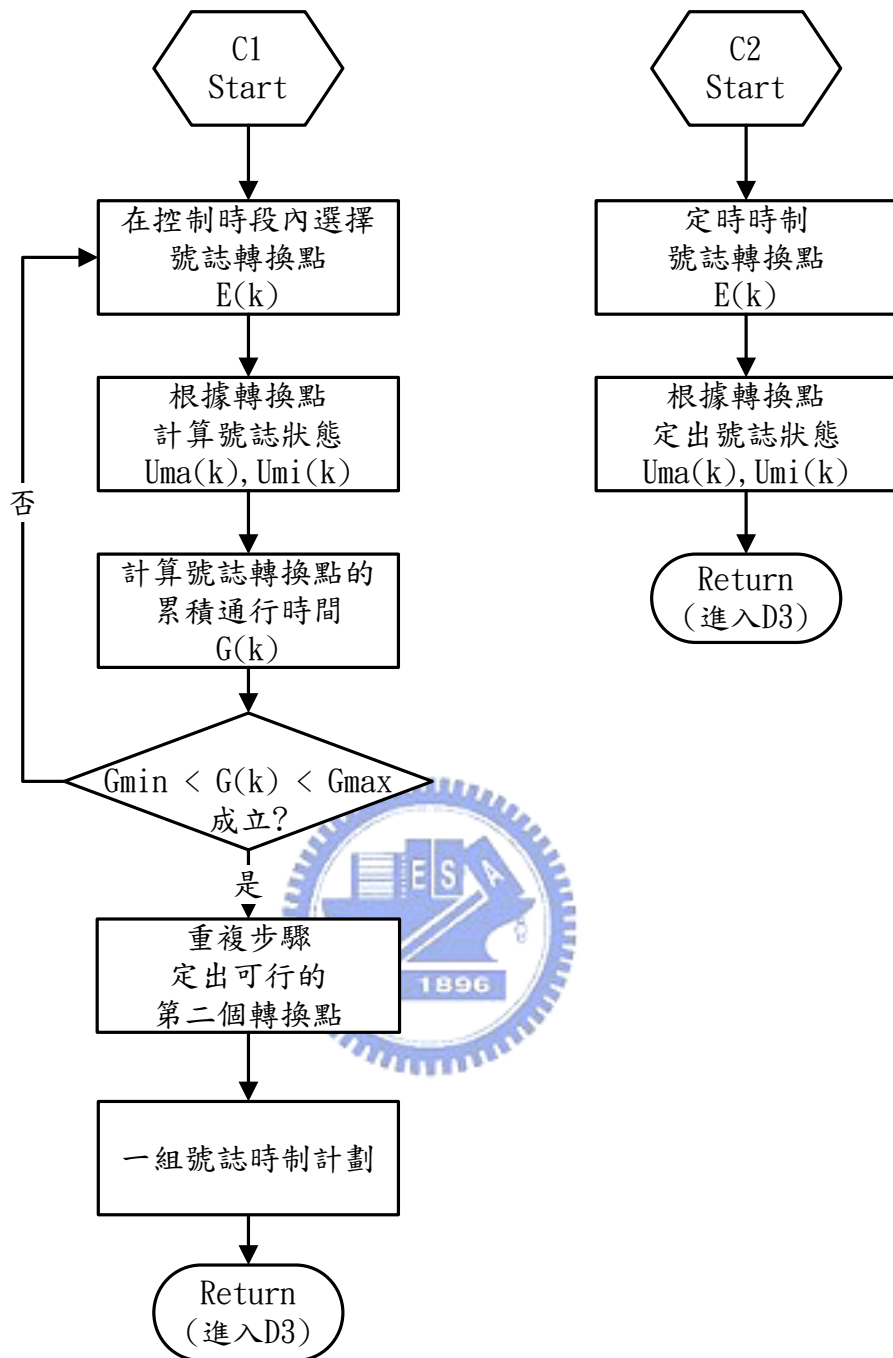


圖 4.2 號誌模組流程圖

4.3 交通狀態模組

本模組功能在於處理車流的產生與車隊的計算，以便提供績效模組計算績效之用，因此根據車輛產生與路段移動，可估計出抵達路口的車流量，再由號誌模組所產生的時制計畫，結合離去車輛估計，可以推得離去車輛數，最後經由車隊長度計算，即可得到該時階的車隊長度，而離去車輛數則可作為下一路口的上游

進入流量。

1. 車輛產生

小客車路線起始點的小客車產生採用特定分配輸入，產生的方法為透過計數性的分配模式，計算在單位時間內產生車輛數的機率分配，再透過亂數來決定產生車輛數為何，本研究中小客車的產生是採用普松（Poisson）分配，以平均流量值為參數，透過亂數來決定每時階的產生車輛數。公車產生則是由設定發車間距，每隔一段間距由公車路線起始點產生一輛公車（如圖 4.3-1 所示）。

2. 路段移動

小客車由各路口至下游路口的路段移動，引用 Robertson 發展的車隊擴散關係來推算，由路段上游之進入車輛數經由分散係數 F 推得經路段旅行時間 βt 之後抵達路口的車輛數，下式中的 i 為上游路口， i' 為下游路口，上游路口離去的車輛數，即等於下游路口通過路段上游停止線起始之車輛數，而下游路口經過 βt 時間的車輛抵達數則是該路口通過路段上游停止線起始之車輛數與下游路口之前一時階的抵達流量的函數。公車抵達時間的計算可分為有無經過公車站位兩種，當公車進入有公車站位的路段上游時，計算抵達站位的時間，計算方式則由路段長度除以公車平均速率所得之平均旅行時間，再依亂數取上下 0.5 倍平均旅行時間，即 0.5 倍至 1.5 倍的平均旅行時間，抵達路口的時間則是採用同樣方式，當路段中有公車站位時，則抵達路口時間為公車抵達站位的時間加上站位停等時間再加上從站位至路口的時間，至於公車於站位上的停等時間則以乘客數多寡，加上進站與離站的時間，進離站由於公車會有減速與加速的動作，因此這部份的損失時間，假設為一時階，乘客上車的時間則假設以每三位乘客為一時階，另外公車於離站時，由於依現實情況公車會自動插入車輛的間距中，因此不考慮當車隊堵住車道，公車無法順利進入車道的情況；若無站位則直接計算從整個路段的旅行時間（詳細流程如圖 4.3）。

$$Q_{in}^{i'}(k) = Q_{out}^i(k) \quad (4.8)$$

$$Q_{s}^{i'}(k + \beta t) = F Q_{in}^{i'}(k) + (1 - F) Q_{s}^{i'}(k + \beta t - 1) \quad (4.9)$$

$$F = \frac{1}{1 + \alpha \beta t} \quad (4.10)$$

3. 車輛離去預測

小客車假設每個時階車流離去以飽和流率消散來推估，若車隊長度不足飽和流率，則車輛離去數會等於當時之車隊長度，每時階離去的車輛數則可作為下個路口的上游進入流量。當有公車抵達時，或前一時階有公車停等時，需先紀錄公車前面共有幾輛小客車，當綠燈時，若公車前頭的車輛數小於每時階的飽和流率，則公車可以通過路口，若此時階除公車離去尚有其他車輛時，需將小客車的最大離去量減一，若無車輛則小客車的最大離去量為零；若公車前的車輛數大於每時階的小客車飽和流率，則公車必須停等，而公車前頭的小客車則可以飽和流率消散（如圖 4.4）。

$$Q_{out}(k) = \text{Min}\left\{\left(1 - U(k)^2\right) * S_g + \left(\text{Min}\{0, U(k)\}\right)^2 * S_y, Q_s(k) + L(k-1)\right\} \quad (4.11)$$

4. 車隊長度估計

為上一時階的車隊長度加上這時階的抵達車輛數再扣除離去的車輛數，由計算出來的車隊長度輸入績效函數則可得延誤績效(如圖 4.5)。

$$L(k) = \text{Max}\{L(k-1) + Q_s(k) - Q_{out}(k), 0\} \quad (4.12)$$

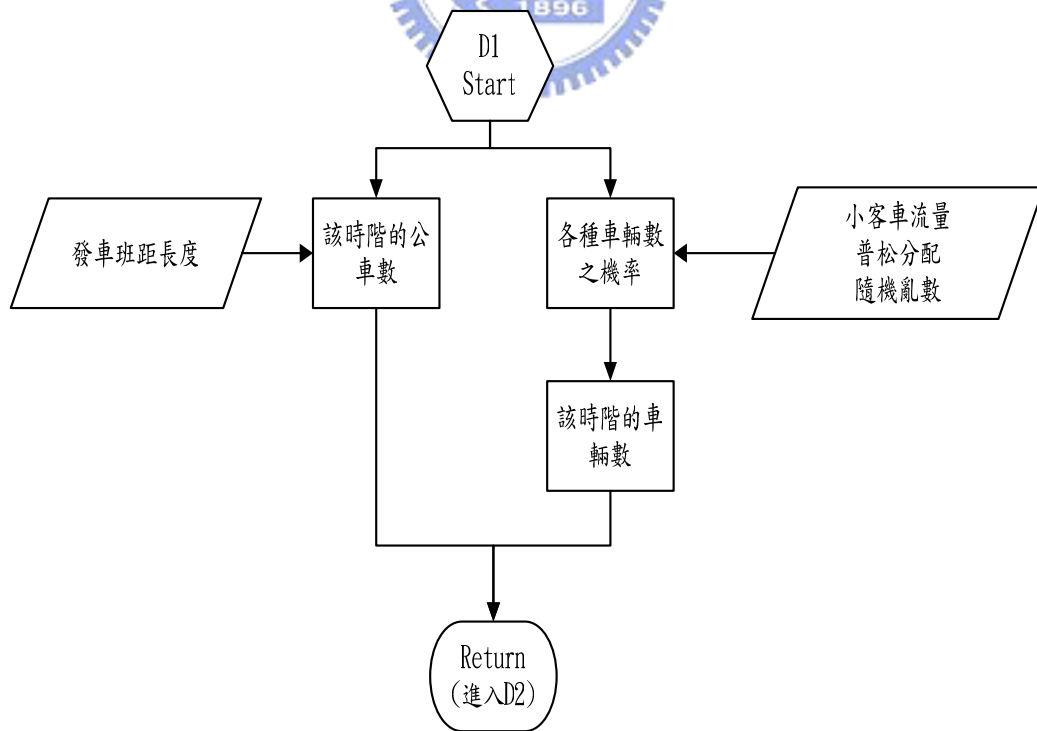


圖 4.3 車輛產生流程圖

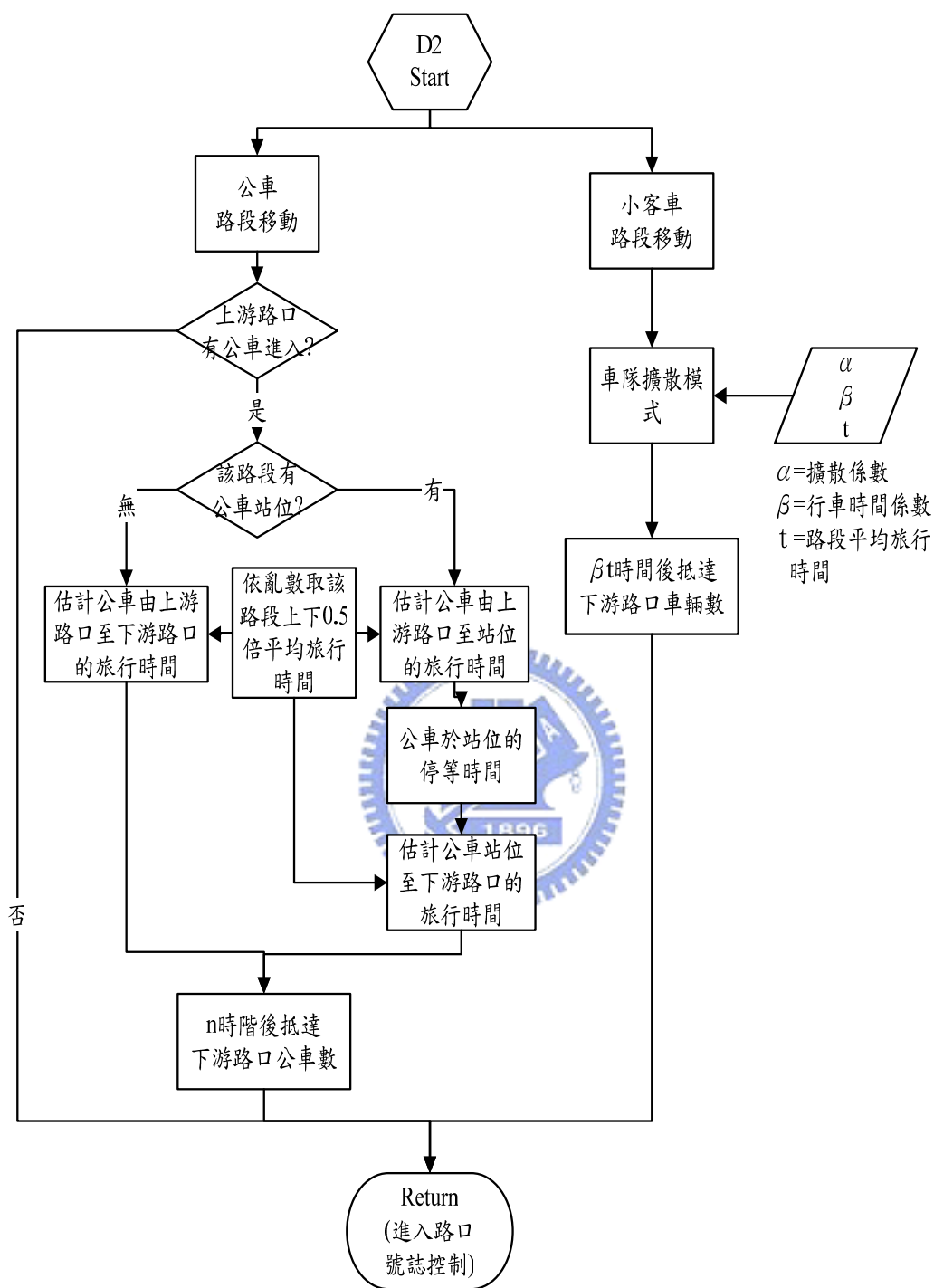


圖 4.4 路段移動流程圖

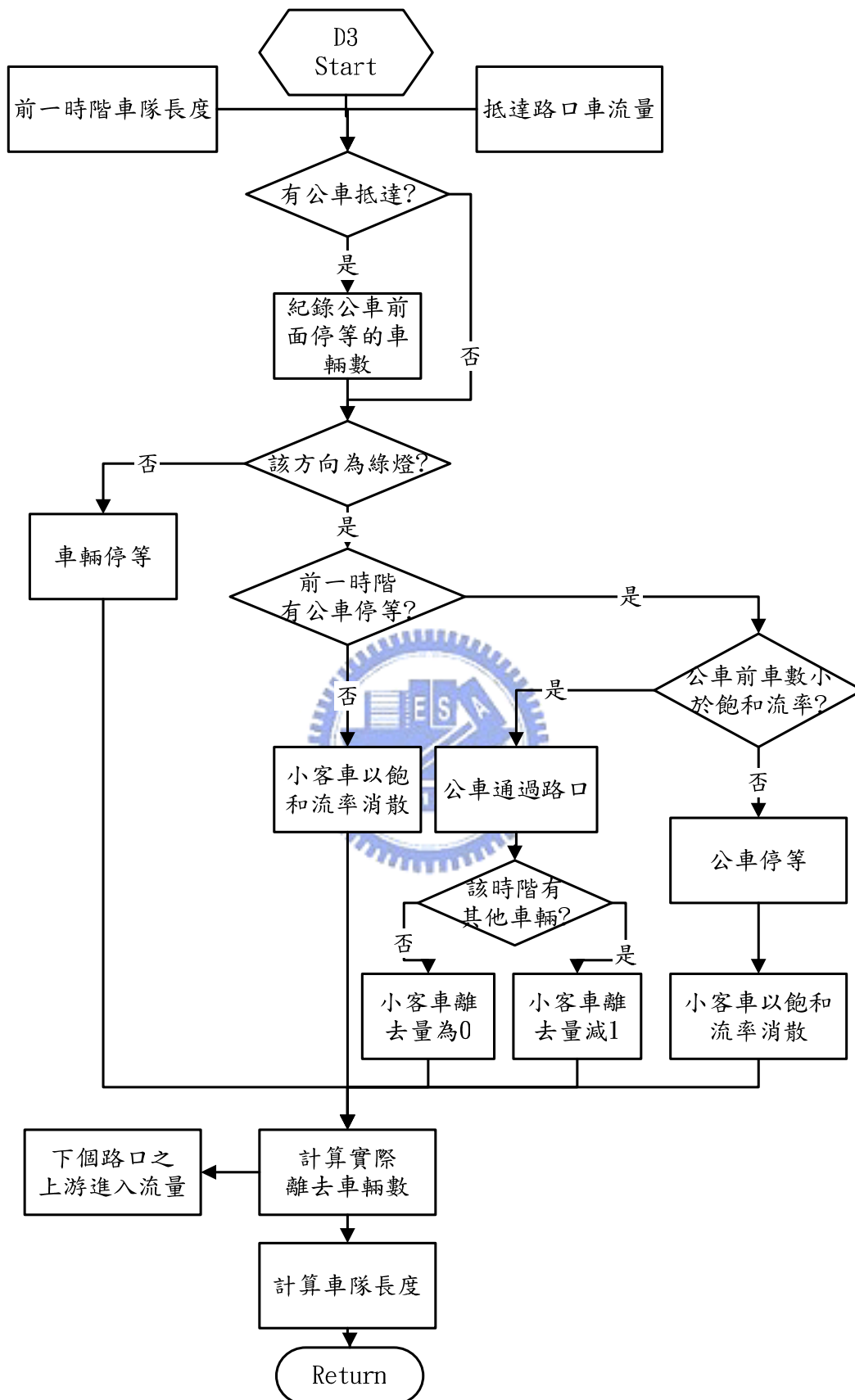


圖 4.5 路口車隊計算流程圖

4.4 公車優先模組

本模組功用在於決定公車是否有路線控制需求，並且當有路線控制需求時，給予適當的權重，來控制公車通行路口的時間。在路口控制階層時，考量路段上是否有公車運行，並當公車有需求時，根據權重設計賦予該公車特定的權重，隨後進入路線控制階層（詳細流程如圖 4.6），而在路線控制階層時，則考量公車是否已經通行過路口，或是考量公車是否已無控制需求，當公車通過或已無控制需求時，則進入補償時相（其流程如圖 4.7）。

1. 排程基礎：班距式排程控制與班表式排程控制等兩種控制邏輯。
2. 路線控制需求：分為班表式排程控制與班距式排程控制。

（1）班表式排程控制

當該輛公車抵達時間比其班表上預定時間加一段較大的容忍值的時間晚到時，表示需要讓此輛公車儘早通過路口，執行準點作業，即：

$$Te_{i,j}^m - (Ts_{i,j}^m + H_1) > 0 \quad (4.13)$$

當該輛公車班表上預定時間比其抵達時間加一段較大的容忍值的時間早到時，表示需要讓此輛公車在此路口停等，執行延誤作業，即：

$$(Ts_{i,j}^m - H_1) - Te_{i,j}^m > 0 \quad (4.14)$$

（2）班距式排程控制

當公車抵達時間與比上輛車抵達時間的差，較預定公車間距加一段較大的容忍值的時間為大時，表示需要讓此輛公車儘早通過路口，執行準點作業，即：

$$(Te_{i,j}^m - Te_{i,j}^{m-1}) - (H + H_1) > 0 \quad (4.15)$$

當公車抵達時間與比上輛車抵達時間的差，較預定公車間距減一段較大的容忍值的時間為小時，表示需要讓此輛公車在此路口停等，執行延誤作

業，即：

$$(H - H_1) - (Te_{i,j}^m - Te_{i,j}^{m-1}) > 0 \quad (4.16)$$

3. 權重設計

準點作業時，給予公車正權重，以利公車通行；延誤作業時，則給予公車負權重，使公車停等。至於權重大小則依其緊急的輕重來決定，當公車在一倍容忍範圍外、兩倍容忍範圍內時，權重為一單位，若介於兩倍與三倍容忍範圍內時，則權重設定為兩單位，以此推估若公車介於 n 倍與 $n+1$ 倍容忍範圍時，則其權重為 n 單位，此累進的權重設計主要是為了當公車有衝突時，能夠依績效函數來決定其通行路權的先後順序，權重單位則是以每單位 20 輛小客車，此單位的設定主要是以一台公車的人數 40 人，並假設每人之時間成本為小客車駕駛人之一半，因此得出每一單位為 20 輛小客車，不將此單位設定為大值的原因是當交通繁重時，使交通號誌不會完全變成公車絕對優先的情況。



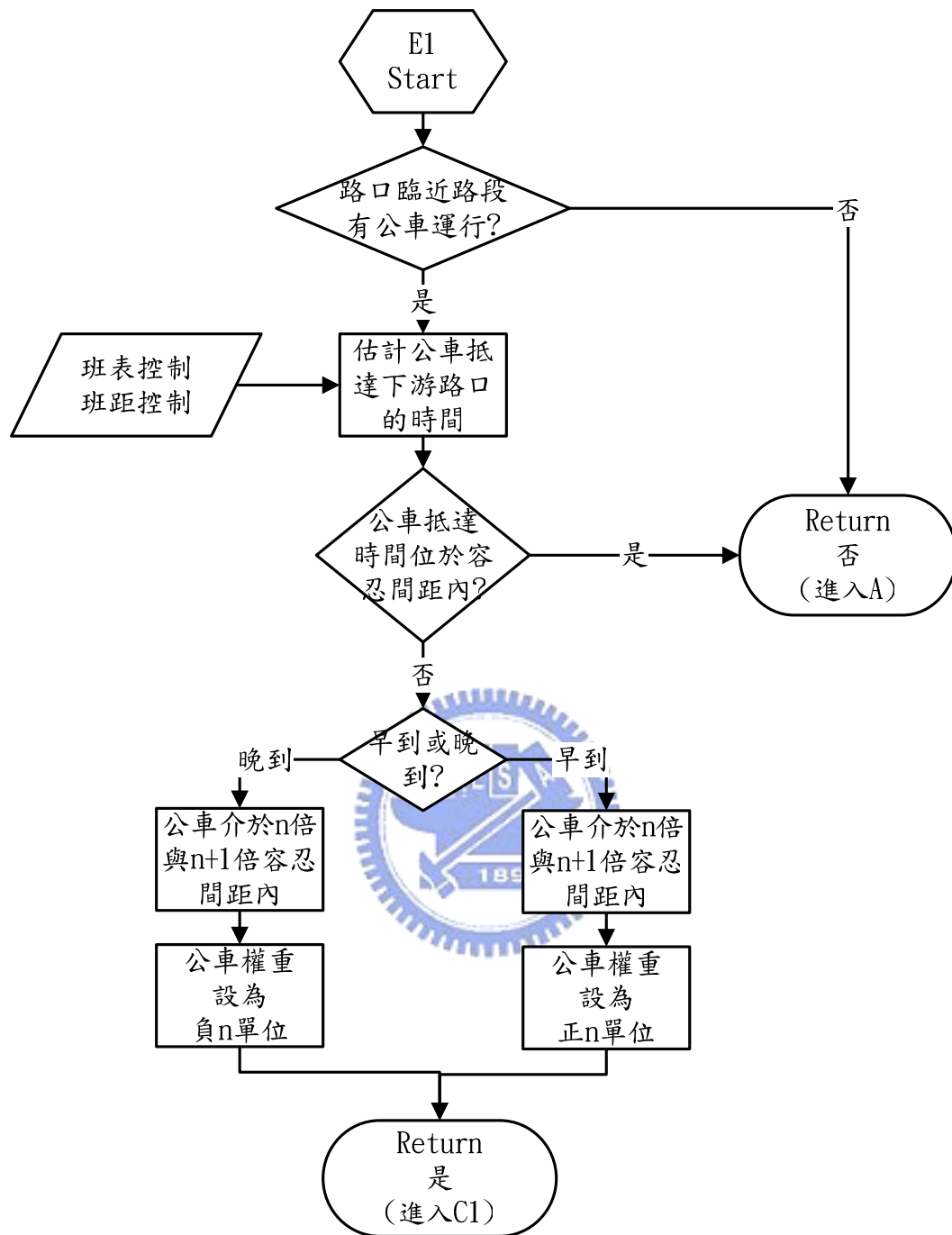


圖 4.6 路口控制階層公車優先模組流程圖

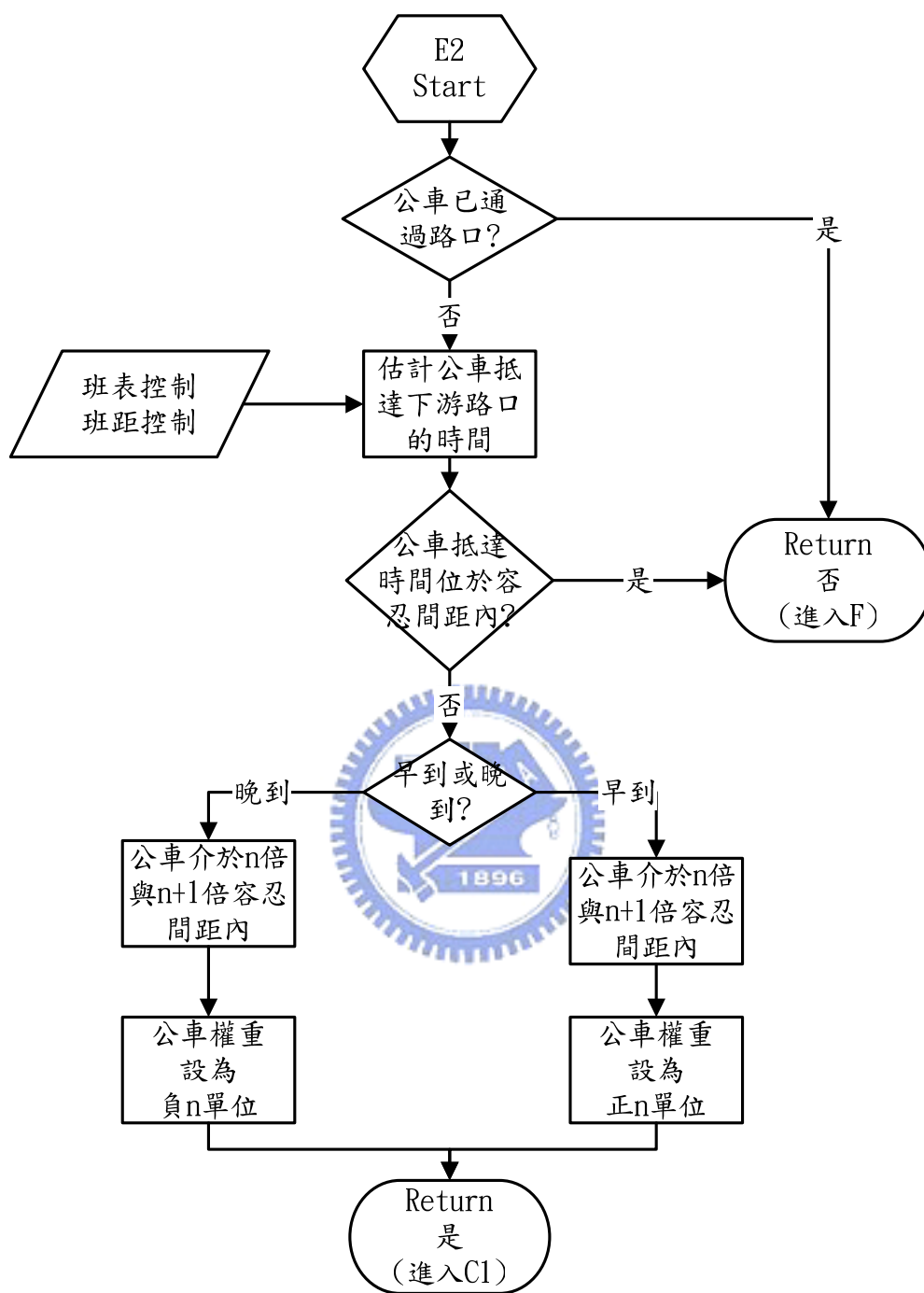


圖 4.7 路線控制階層公車優先模組流程圖

4.5 補償模組

本模組功能在於將針對公車最佳化之時制，逐步調整回定時時制，因此透過一段時間（一週期或兩週期）的補償後，迅速將其回復至定時式號誌時制，繼續

執行路口控制階層。

當號誌時制因公車最佳化產生變化，若要以車隊消散為基準，進行時相補償時，經過數個週期之後，號誌時制僅是在原號誌時制週期附近震盪（如圖 4.8 與 4.9 所示），以路口之兩方向流量各為 800veh/hr，飽和流量為 1800veh/hr，以車隊消散來計算週期，得出綠燈為 24 秒、紅燈為 30 秒，於第二週期進行綠燈延長或紅燈縮短，以車隊消散為基準時，週期長度變化會呈現此情形。然而考量車輛到達率並非固定，因此可透過一兩個週期補償，即將時制跳回原號誌時制。

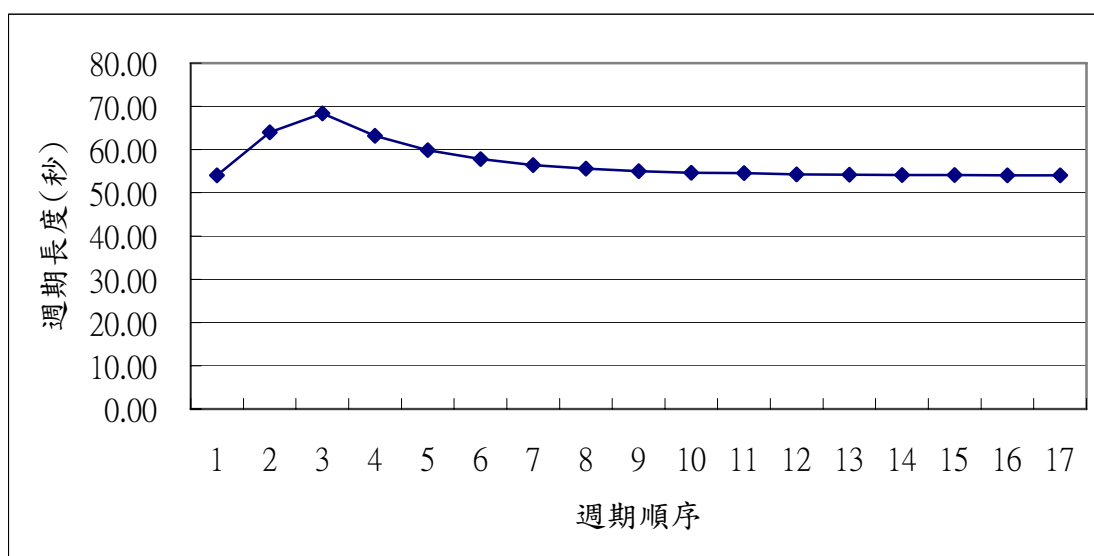


圖 4.8 綠燈延長週期變化圖

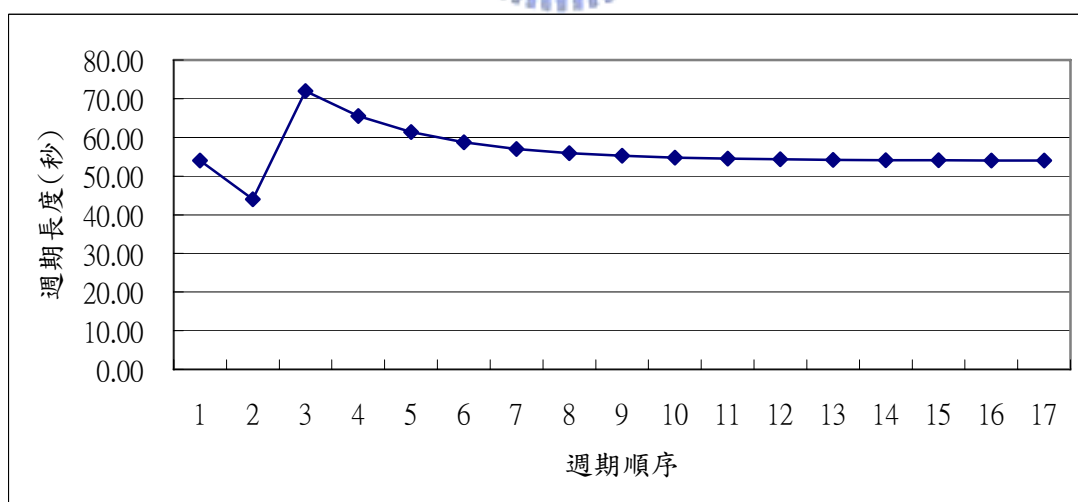


圖 4.9 紅燈縮短週期變化圖

當公車執行準點作業時，在適應式號誌時制結束時，計算非公車方向因紅燈所停等的車隊長度，再根據該方向的最大流量與飽和流量的比值與該方向的飽和流量，可計算出所需要補償的綠燈長度，當號誌執行完補償的綠燈時相後，再計

算另一方向的綠燈長度，而完成一整個補償週期，若需補償兩週期則再進行此迴圈一次，當補償的週期結束後，則跳回路口控制階層，若於補償週期間，有另一輛公車有路線控制需求，則忽略該公車，直至號誌時制回到路口控制階層。當公車執行延誤作業時，在適應式號誌時制結束時，則計算公車方向因紅燈所停等的車隊長度，然後如準點作業方式一樣，當補償的週期結束後，跳回路口控制階層（詳細流程如圖 4.10 所示）。

1. 補償週期長度

補償綠燈長度為消散現有車隊所需之最短時間，現有車隊長度包括前一週期紅燈結束時之車隊長度加上綠燈時進入之車輛數。

$$g'_i = \frac{L(k)}{(1 - y_i)S_{g,i}} \quad (4.17)$$

其中，

g'_i ：為 i 時相的補償綠燈長度

$L(k)$ ：為紅燈結束時之車隊長度

y_i ：在時相 i 內最大流量對飽和流量之比值

$S_{g,i}$ ：為時相 i 的綠燈飽和流量

補償紅燈長度則為補償綠燈長度加上時相損失時間，週期長度則為兩者相加。

$$r'_i = g'_i + L \quad (4.18)$$

其中，

r'_i ：為 i 時相的補償紅燈長度

g'_i ：為 i 時相的補償綠燈長度

L：每週期的全部損失時間（秒）

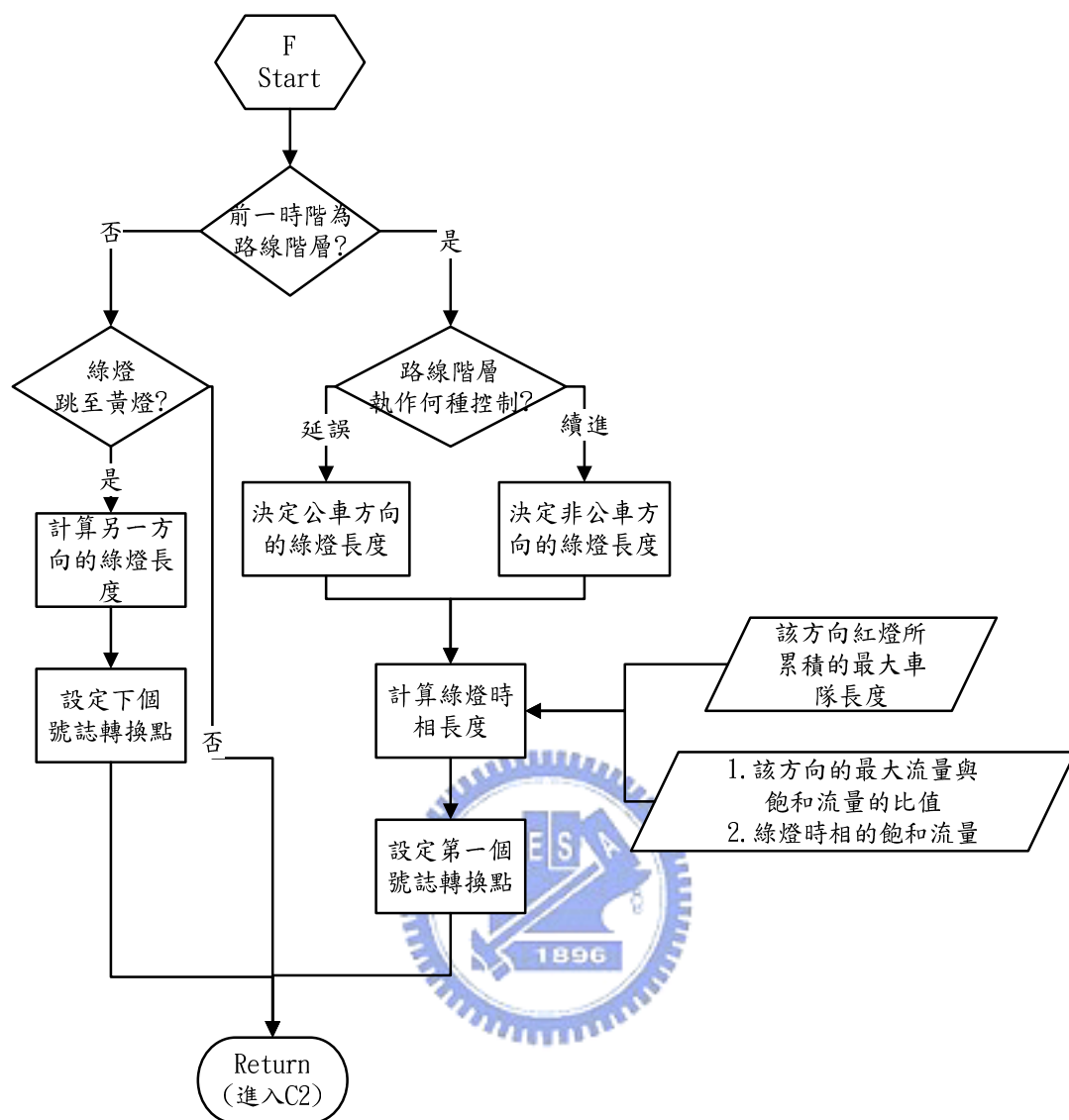


圖 4.10 補償模組流程圖

4.6 績效函數模組

績效模組包括兩部分，包括適應式號誌控制績效與系統績效，適應式號誌控制需透過績效函數決定當公車有路線控制需求時的最佳時制計畫，因此路口需額外加入公車權重控制公車的通行（流程如圖 4.11 所示）；整體系統績效，則包括計算車輛的停等延誤與公車站位乘客的停等延誤，車輛的停等延誤為計算每個路口每時階的停等車隊長度之加總，其中公車於路口停等時，則僅當一小客車計算，而公車站位乘客的延誤，則是計算乘客於公車站位所等候的時間長度（如圖 4.12 所示）。

1. 車輛總停等時間

$$TD = \sum_i \sum_n \sum_k L_{i,n}(k) + \sum_k \sum_m LB_m(k) \quad (4.19)$$

2. 公車乘客總等候時間

$$TT = \sum_P \sum_k L_p(k) \quad (4.20)$$

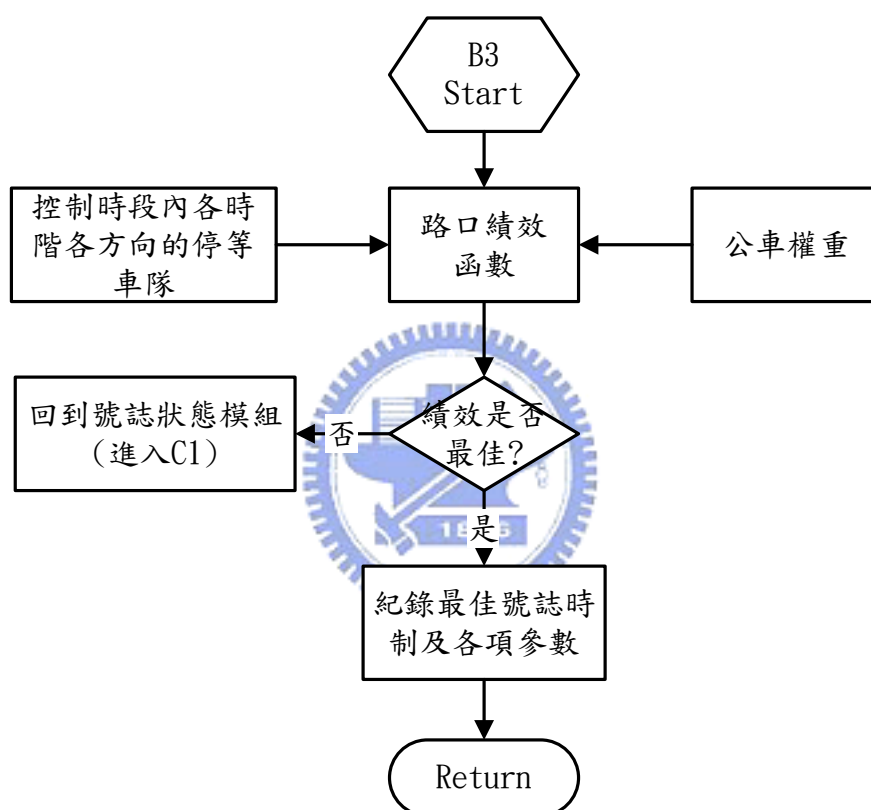


圖 4.11 適應式控制績效流程圖

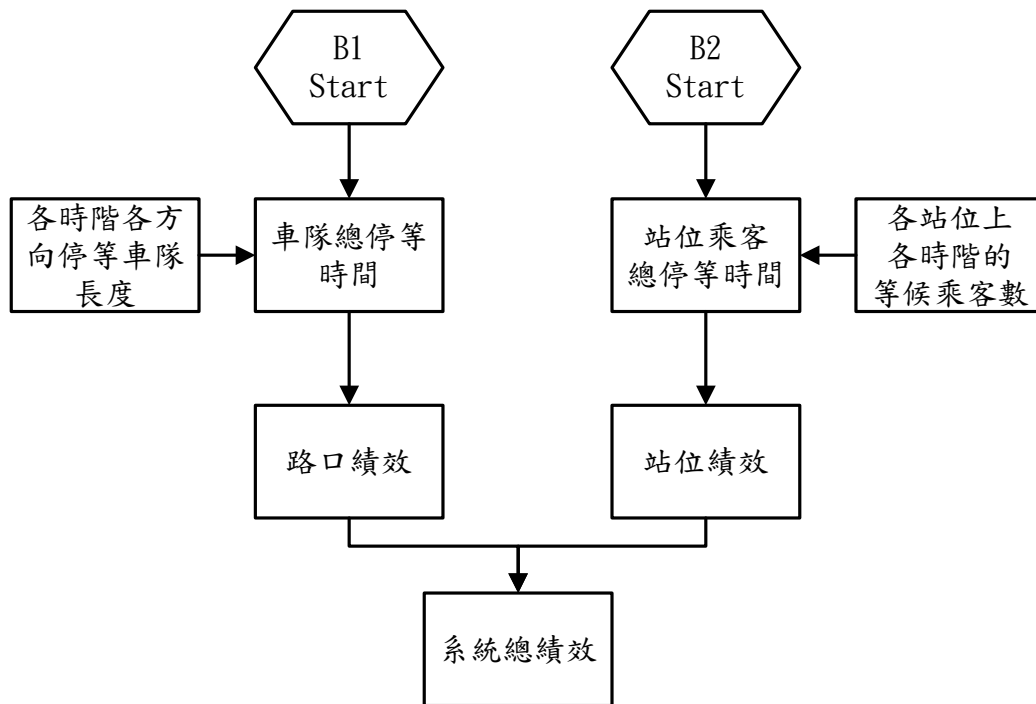


圖 4.12 系統績效流程圖



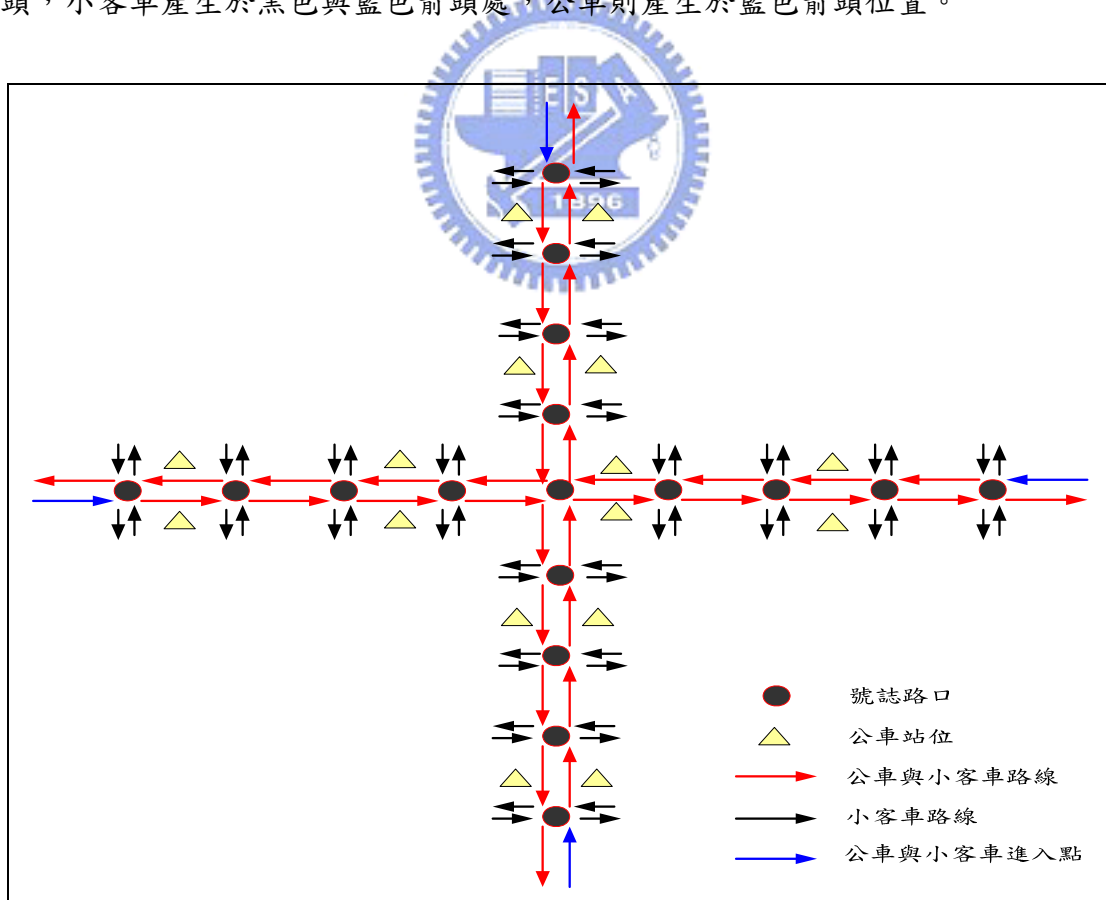
第五章 數值模擬與分析

本章將針對模擬測試路網說明、模擬方案設定、模擬績效測試與績效討論，其中模擬方案設定，本研究設立了五套方案進行模擬，在模擬績效測試方面，本研究將從三變數進行模擬測試，包括小客車流量、公車乘客抵達率與班距進行模擬測試。

5.1 測試路網相關設定

1. 路網配置圖

本研究之測試路網範圍（如圖 5.1 所示），包括 17 個號誌路口與 16 個公車站位，各路段長度 300 公尺，包含兩車道，公車站位位於路段中間 150 公尺處，其中公車運行於兩條主要幹道上，如紅色箭頭所示，小客車則運行於紅色與黑色箭頭，小客車產生於黑色與藍色箭頭處，公車則產生於藍色箭頭位置。



2. 模擬測試參數設定

模擬範例相關設定（如表 5.1 所示），整個模擬時段為四小時，由於模擬開始時，路網尚未有車輛運行，考量路網幹道長度，一小時的暖機時段足夠讓車輛由路線起點行駛至路線終點，因此前一小時為暖機時段，讓整個路網有車輛運行，後三小時則為控制時段，開始執行公車優先作業並收集資料以比較績效。

表 5.1 一般範例設定

控制時段	三小時
綠燈飽和流率 S_g	每車道 1800 輛/小時 (即 3 輛/時階, 各範例相同)
黃燈飽和流率 S_y	每車道 0 輛/小時 (即黃燈時段車輛不能通行, 各範例相同)
時階長度	3 秒 (各範例相同)
最大綠燈 G_{max}	不同流量下, 以該計算週期之兩倍綠燈時間為該值 (參考表 5.2)
最小綠燈 G_{min}	3 時階 (9 秒, 各範例相同)
小客車平均旅行速率	60 公里/小時 (各範例相同)
公車平均旅行速率	40 公里/小時 (各範例相同)
容忍間距 H	3 時階 (9 秒, 各範例相同)
擴散係數 α	0.5 (何志宏(1989), 各範例相同)
行車時間係數 β	0.8 (何志宏(1989), 各範例相同)

3. 號誌週期設定

模擬模式的定時式號誌時制設定，透過韋伯斯特的最小延誤週期公式可計算出不同單向流量水準之下的週期長度（如表 5.2 所示），幹道與支道各路段流量相同。

表 5.2 號誌週期表

幹道流量 (vph)	支道流量 (vph)	週期長度 (秒)	幹道綠燈 長度(秒)	支道綠燈 長度(秒)	週期損失 時間(秒)
800	800	126	60	60	6
700	700	66	30	30	6
600	600	42	18	18	6
500	500	30	12	12	6
400	400	24	9	9	6

5.2 模擬方案設定

根據號誌時制策略與公車優先控制策略之不同，本研究訂出以下五個方案進行模擬作業。

1. 方案 1

定時式號誌時制，路口號誌皆由定時式號誌控制，依照韋式(Webster)最佳延誤週期公式，計算好週期長度與綠燈時比（其流程如圖 5.2）。



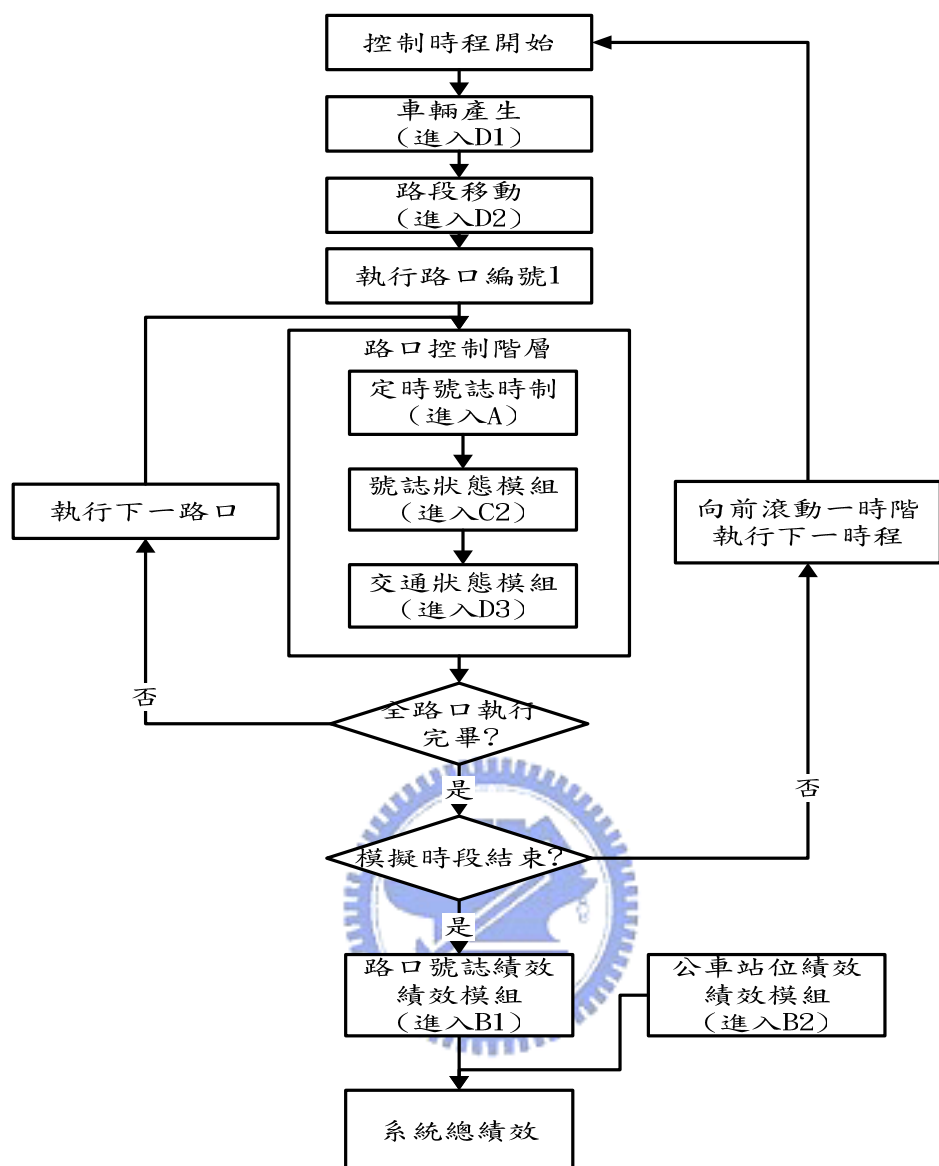


圖 5.2 方案一運作流程圖

2. 方案 2

班表控制適應式時制搭配定時式號誌時制、無補償時相。當公車抵達路口的時間沒有超過班表容忍間距時，執行定時式號誌控制，當公車抵達路口時間超過容忍間距時，執行適應式號誌控制，以讓公車儘速通過或延後通過路口，之後路口控制跳回定時式號誌控制（號誌變換流程如圖 5.3）。

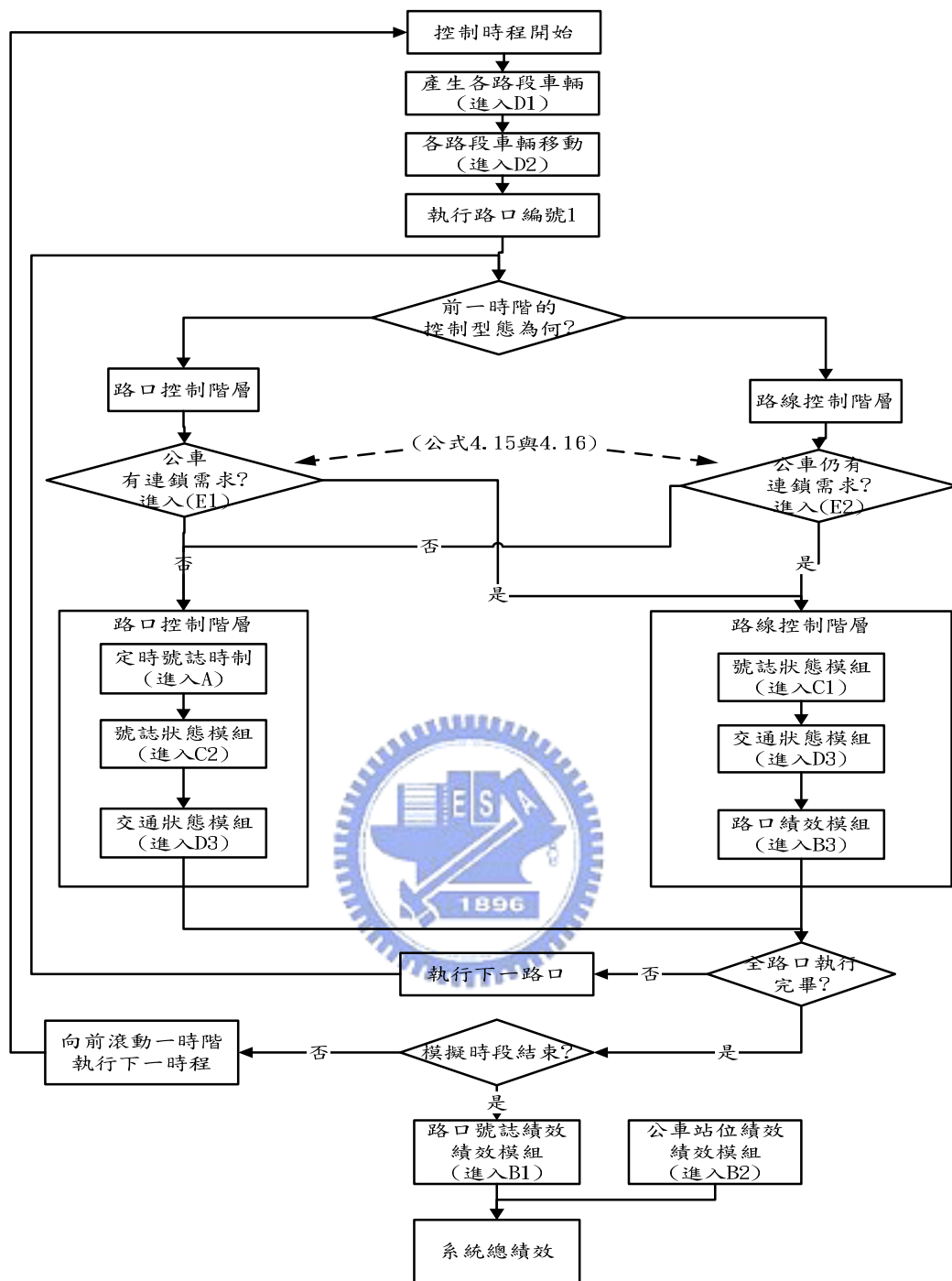


圖 5.3 方案二運作流程圖

(3) 方案 3

班表控制適應式時制搭配定時式號誌時制、有補償時相。與方案二大致相同，當執行完適應式號誌控制時，須執行補償模組以補償次要道路的通行路權（號誌變換流程如圖 5.4）。

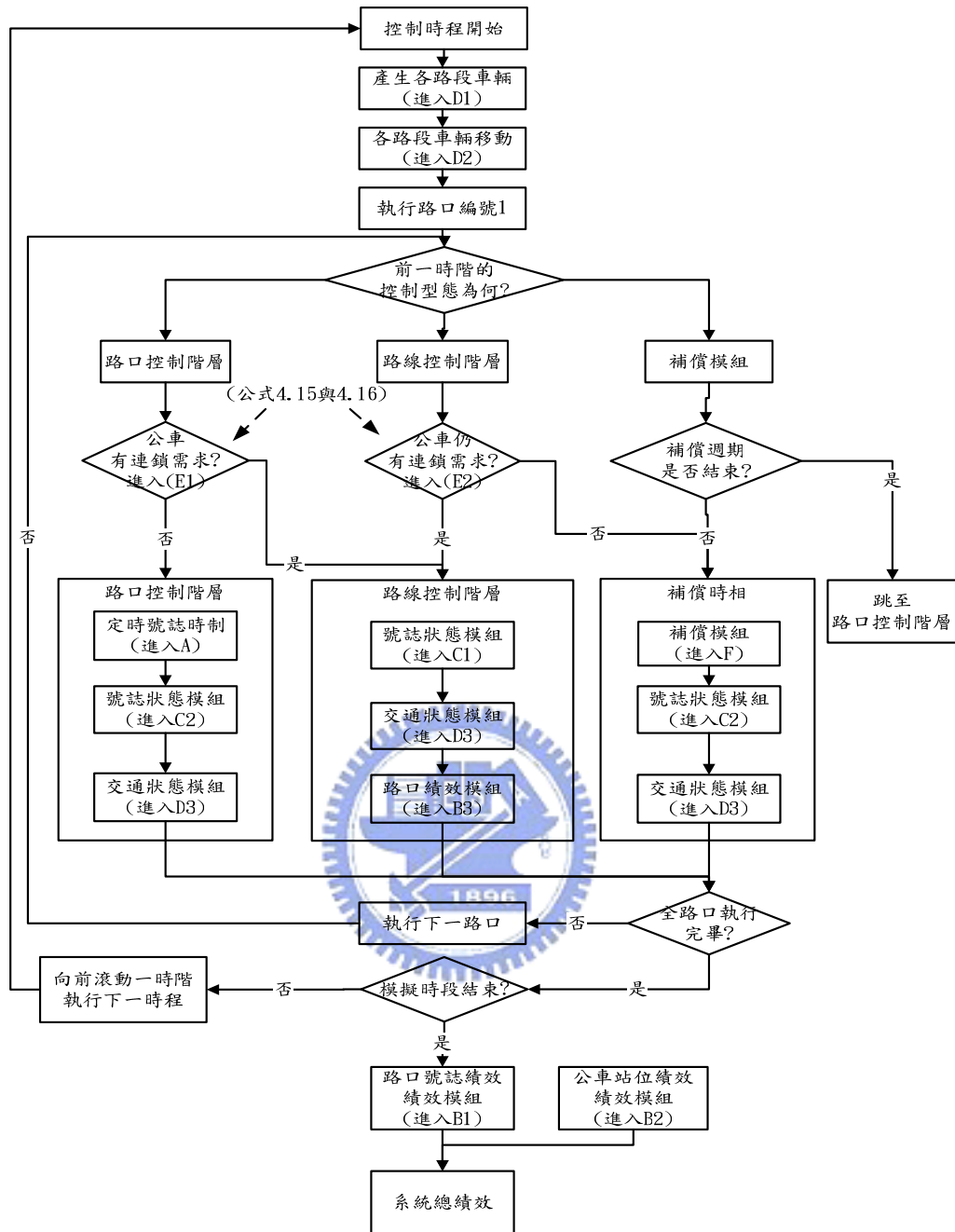


圖 5.4 方案三運作流程圖

(4) 方案 4

班距控制適應式時制搭配定時式號誌時制、無補償時相。當公車抵達路口的時間沒有超過前班公車與此班公车间距的容忍範圍時，執行定時式號誌控制，當公車抵達路口時間超過容忍範圍時，則執行適應式號誌控制，以讓公車儘速通過或延後通過路口，之後路口控制跳回定時式號誌控制（號誌變換流程如圖 5.5）。

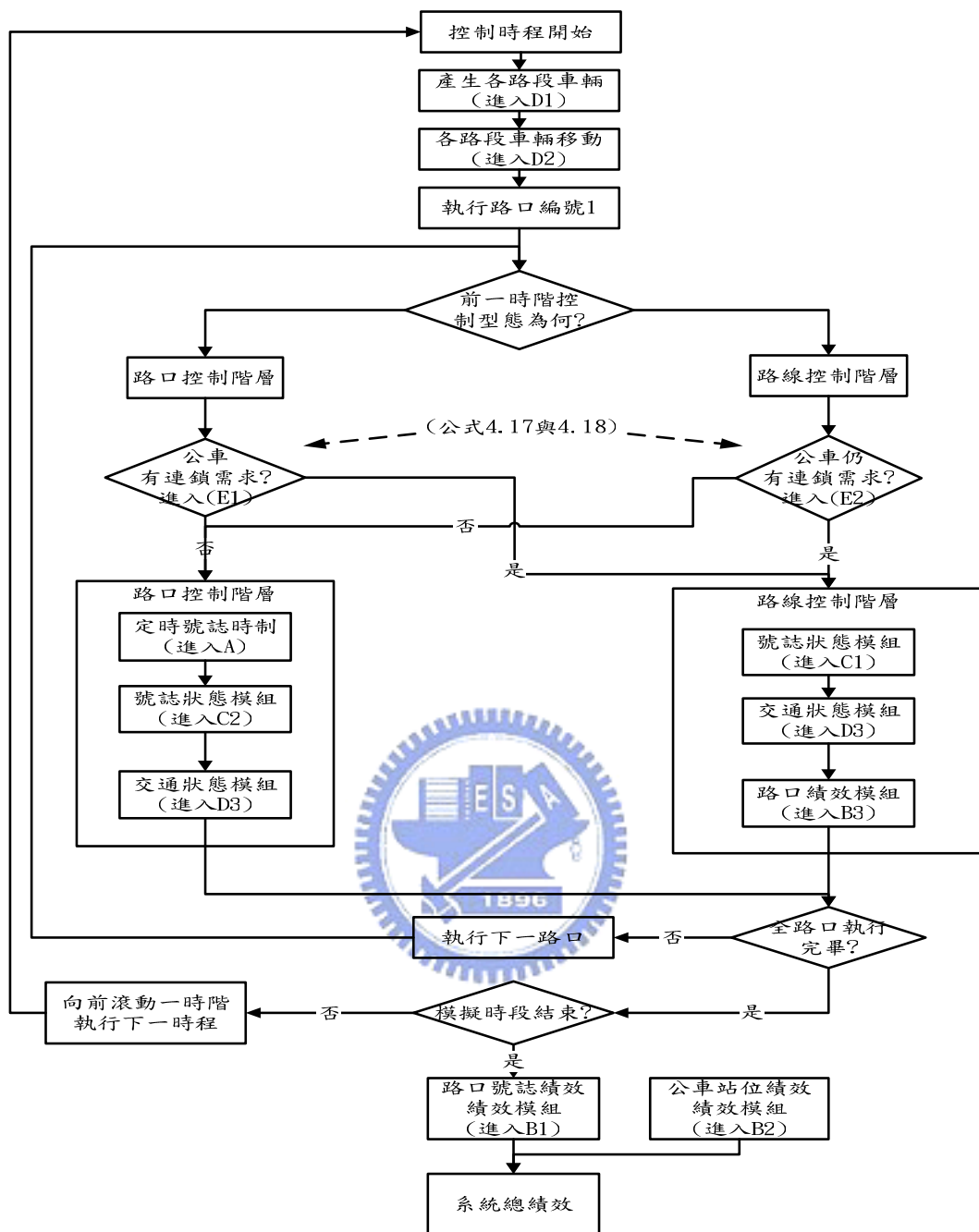


圖 5.5 方案四運作流程圖

- (5) 方案 5：班距控制適應式時制搭配定時式號誌時制、有補償時相。與方案四大致相同，當執行完適應式號誌控制時，須執行補償模組以補償次要道路的通行路權（號誌變換流程如圖 5.6）。

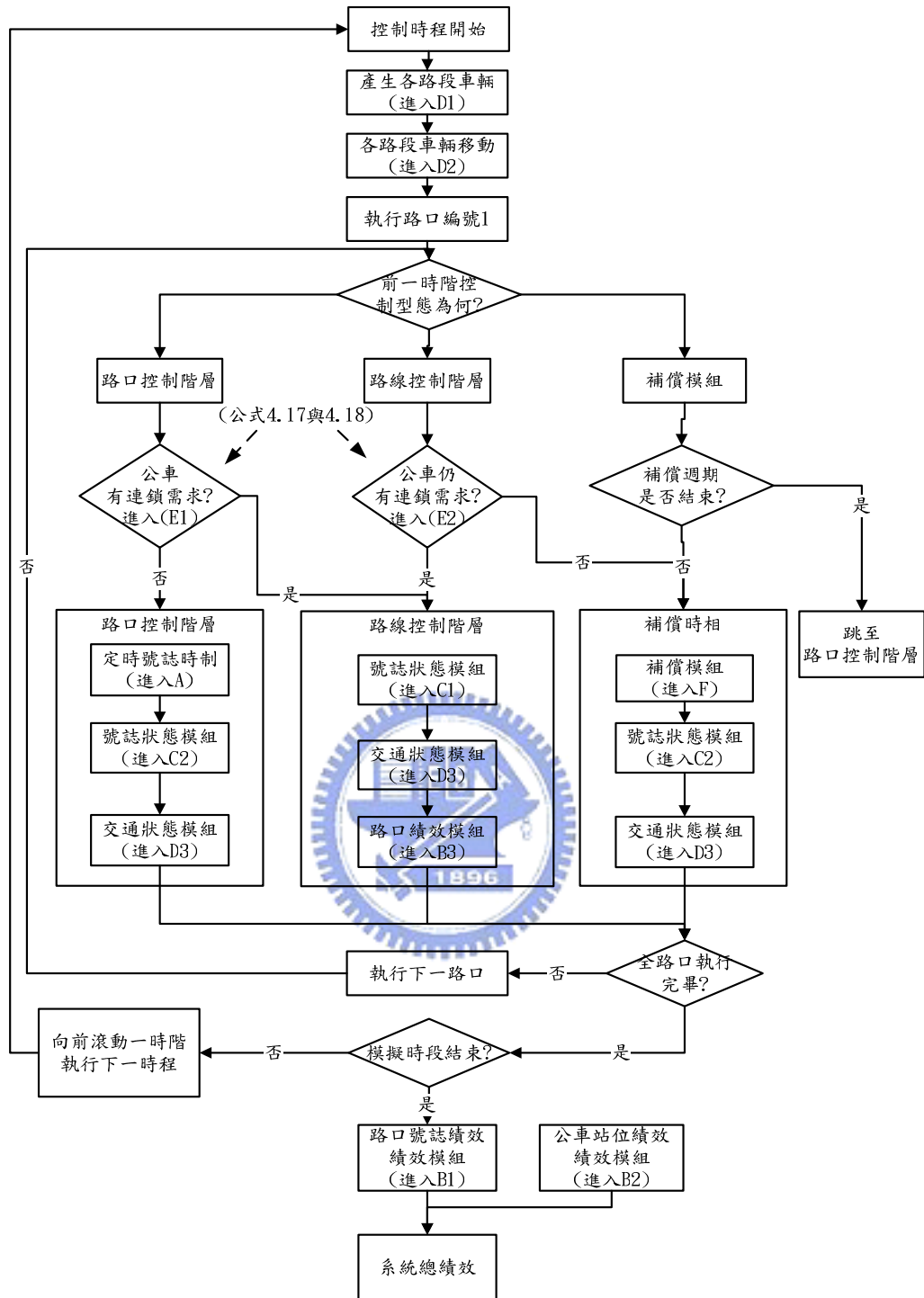


圖 5.6 方案五運作流程圖

5.2 路口方案號誌運作

以下將針對各個方案，當公車有需求時，模擬所得路口公車通行情形。由於號誌路口有四個臨近路段，以下各圖都僅表示其中一個臨近路段，某個特定時階公車與小客車的停等情況。本節範例是以每方向小客車車流量 600vph 時，公車班距為 1 分鐘（20 時階），週期長度為 42 秒，綠燈長度皆為 18 秒之設定，各圖中 L 代表小客車車隊長度，Lb 代表公車停等輛數，圖下方為號誌狀態，G 代表綠燈、Y 代表黃燈、R 代表紅燈，箭頭代表該時階有一輛公車抵達。

1. 方案 1：定時式號誌時制，公車於第 10、30 與 49 時階抵達路口（如圖 5.7，箭頭表示公車抵達），紅燈於第 8 時階開始，小客車車隊開始累積，而當第 10 時階公車抵達時，其前方有 3 輛小客車停等，且無法順利通行，因此等到第 15 時階時，號誌轉換回綠燈，車隊開始疏散，等公車前方車隊消散後，才於第 16 時階離去。若是公車剛好於綠燈抵達，如第 30 時階，由於其前方車隊尚有 7 輛，因此必須停等至第 33 時階才離去。由此可知，公車在定時式號誌時制下，時常因號誌而導致停等。

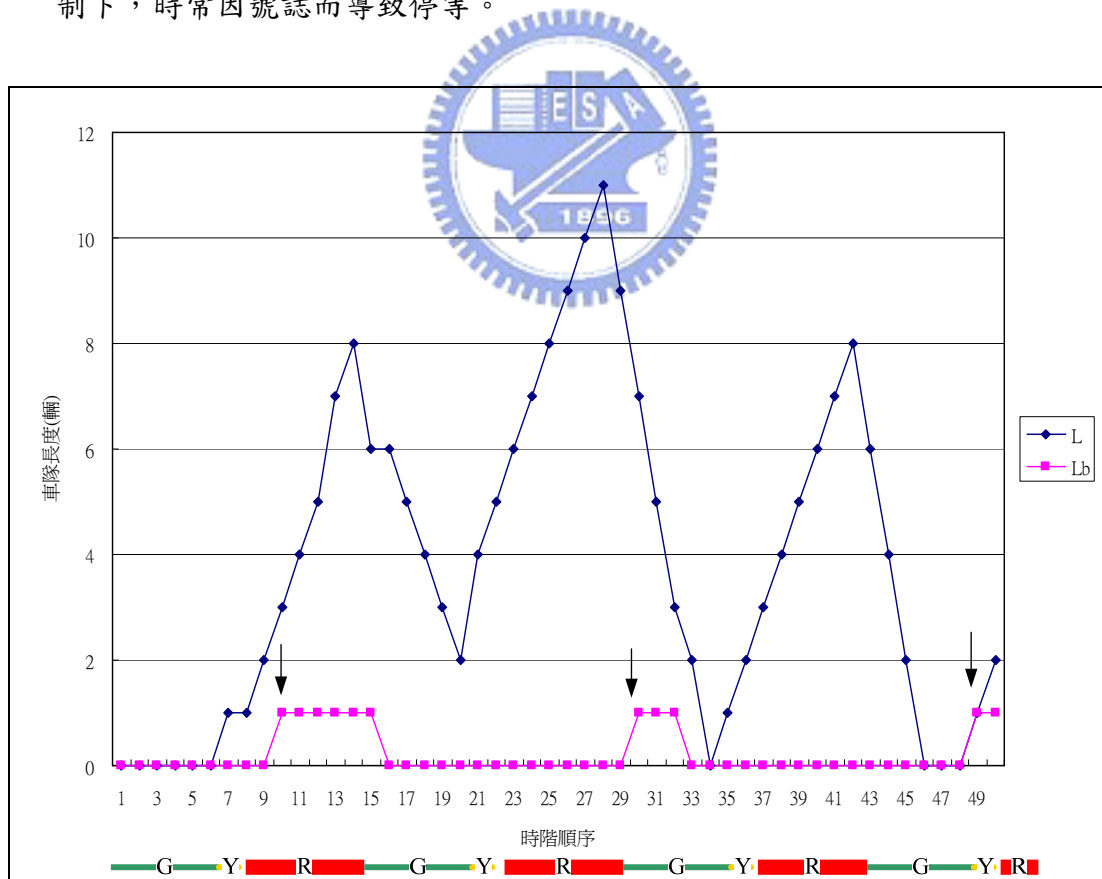


圖 5.7 方案一號誌運作圖

2. 方案 2：班表控制適應式時制搭配定時式號誌時制、無補償時相，公車於第 14、25 時階抵達（如圖 5.8），由於班表時間為第 10 與 30 時階，可發現當公車於第 14 時階抵達路口時，由於較容忍範圍第 13 時階晚，因此進入路線控制階層，適應式號誌縮短原有紅燈長度，由第 8 時階紅燈開始至第 11 時階紅燈結束，支道僅執行最小綠燈長度即切換時相，以使公車能於第 14 時階順利通行，之後切換回路口控制階層，而第二輛公車抵達路口時間為第 25 時階，較容忍範圍第 27 時階早到，因此適應式號誌將紅燈拉長，從第 19 時階至 25 時階為紅燈，使公車由第 25 時階停等至 29 時階才離去。由此可知，當公車於班表控制範圍外抵達時，號誌系統能夠即時縮短或延長綠燈，以使公車能調整回班表控制範圍內。

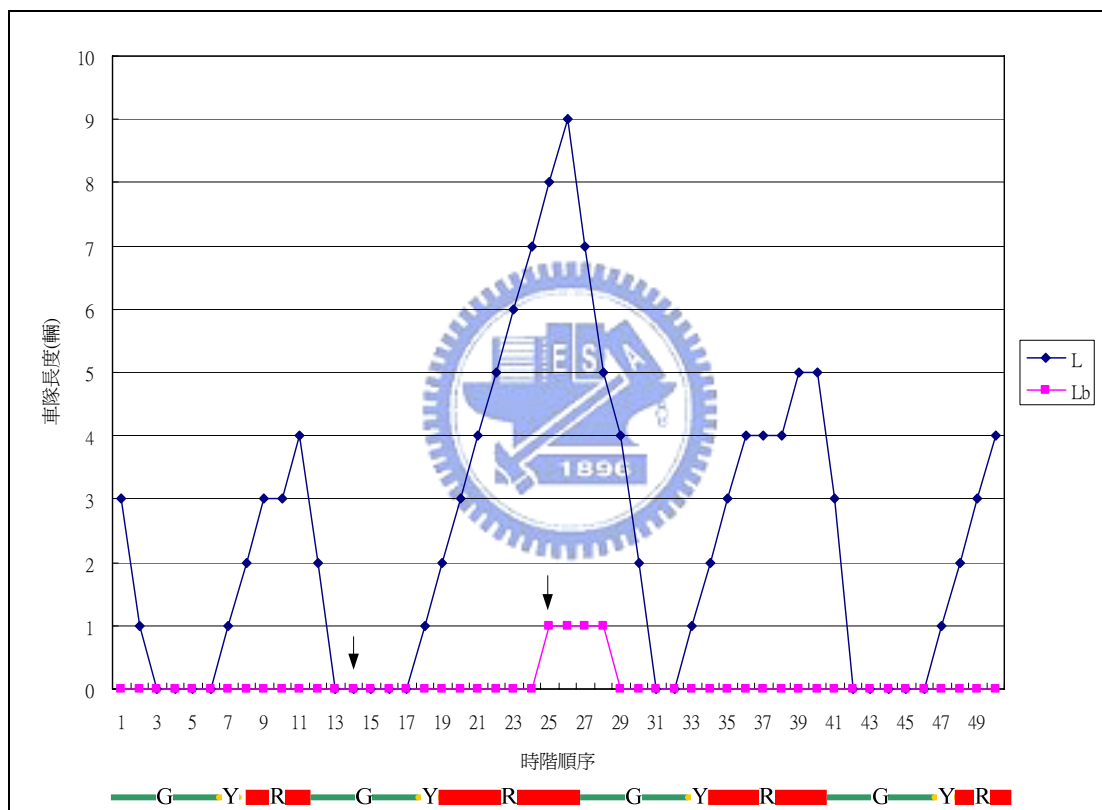


圖 5.8 方案二號誌運作圖

3. 方案 3：班表控制適應式時制搭配定時式號誌時制、有補償時相，與方案二類似，僅加入了補償時相。公車於第 14、25 時階抵達（如圖 5.9），由於較容忍範圍第 13 時階晚，因此進入路線控制階層，適應式號誌縮短原有紅燈長度，由第 8 時階紅燈開始至第 11 時階紅燈結束，支道僅執行最小綠燈長度即切換時相，以使公車能於第 14 時階順利通行，當公車通行過後，由於已滿足幹道最小綠燈的限制，立即進入補償時相，補償週期由第 16 時階至第 23 時階為支道補償綠燈時相，經黃燈切換後，由第 25 時階至第 32 時階為幹道補償綠燈時相，之後切換回路口控制階層，其中於第 25 時階時，第二輛公車於補償時相

內抵達，由於補償時相時，不再對其他公車進行控制，因此公車僅能等到補償時相結束，號誌才能重新接受其他公車的路線控制需求，也就是第 34 時階，下個綠燈開始時。由於此時幹道剛切換為綠燈，因此公車僅停等 2 時階後，於第 27 時階通過路口，相對於方案二的控制下，於第 29 時階通過，方案三會減少部份公車路線控制的彈性。

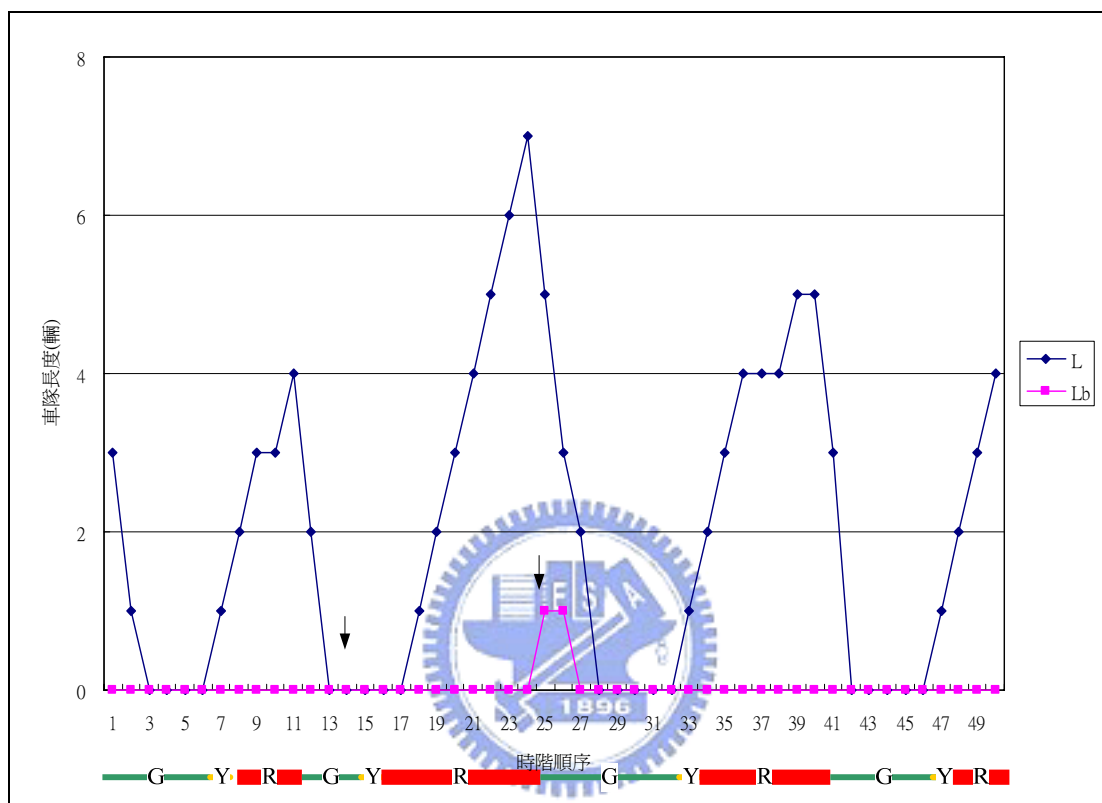


圖 5.9 方案三號誌運作圖

4. 方案 4: 班距控制適應式時制搭配定時式號誌時制、無補償時相，公車於第 14、25 時階抵達（如圖 5.10），由於第一輛公車與前輛公車間班距大於容忍範圍，因此進入路線控制階層，適應式號誌縮短原有紅燈長度，由第 8 時階紅燈開始至第 11 時階紅燈結束，支道僅執行最小綠燈長度即切換時相，以使公車能於第 14 時階順利通行，之後切換回路口控制階層，而當第二輛公車於第 25 時階抵達時，由於與第一輛公車間的班距過小，小於其容忍範圍，則號誌控制進入路線控制階層，適應式號誌執行紅燈延長，從第 19 時階至 27 時階，共 9 時階的紅燈時間，使公車停等直至班距的容忍範圍內，而於第 30 時階通過路口。與方案二比較可發現，當第二輛公車早到時，班距控制會導致該公車停等時間較長，以符合班距控制的容忍間距。

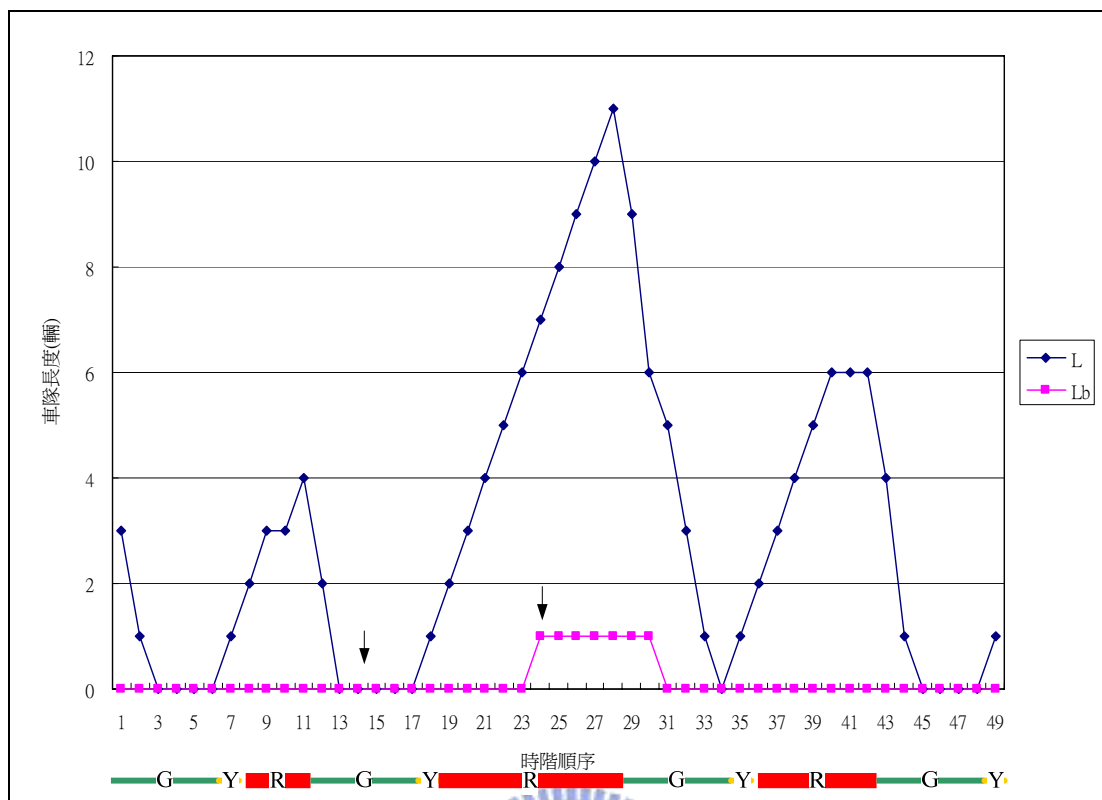


圖 5.10 方案四號誌運作圖

5. 方案 5: 班距控制適應式時制搭配定時式號誌時制、有補償時相，公車於第 14、25 時階抵達（如圖 5.11），由於第一輛公車與前輛公車間班距大於容忍範圍，因此進入路線控制階層，適應式號誌縮短原有紅燈長度，由第 8 時階紅燈開始至第 11 時階紅燈結束，支道僅執行最小綠燈長度即切換時相，以使公車能於第 14 時階順利通行，當公車通行過後，由於已滿足幹道最小綠燈的限制，立即進入補償時相，補償週期由第 16 時階至第 25 時階為支道補償綠燈時相，經黃燈時段後，由第 27 時階至第 35 時階為幹道補償綠燈時相，之後切換回路口控制階層，而當第二輛公車於第 25 時階補償時相內抵達時，同樣由於補償時相時，不再對其他公車進行控制，因此公車僅能等到補償時相結束，也就是第 37 時階下個綠燈開始時才能接受其他公車的路線控制需求，由於此時幹道剛切換為綠燈，因此公車僅停等 5 時階後，於第 29 時階通過路口。與方案四比較可知，由於補償時相，因此第二輛公車無法繼續停等，而提早離開路口，因此其維持班距的彈性較方案四差。

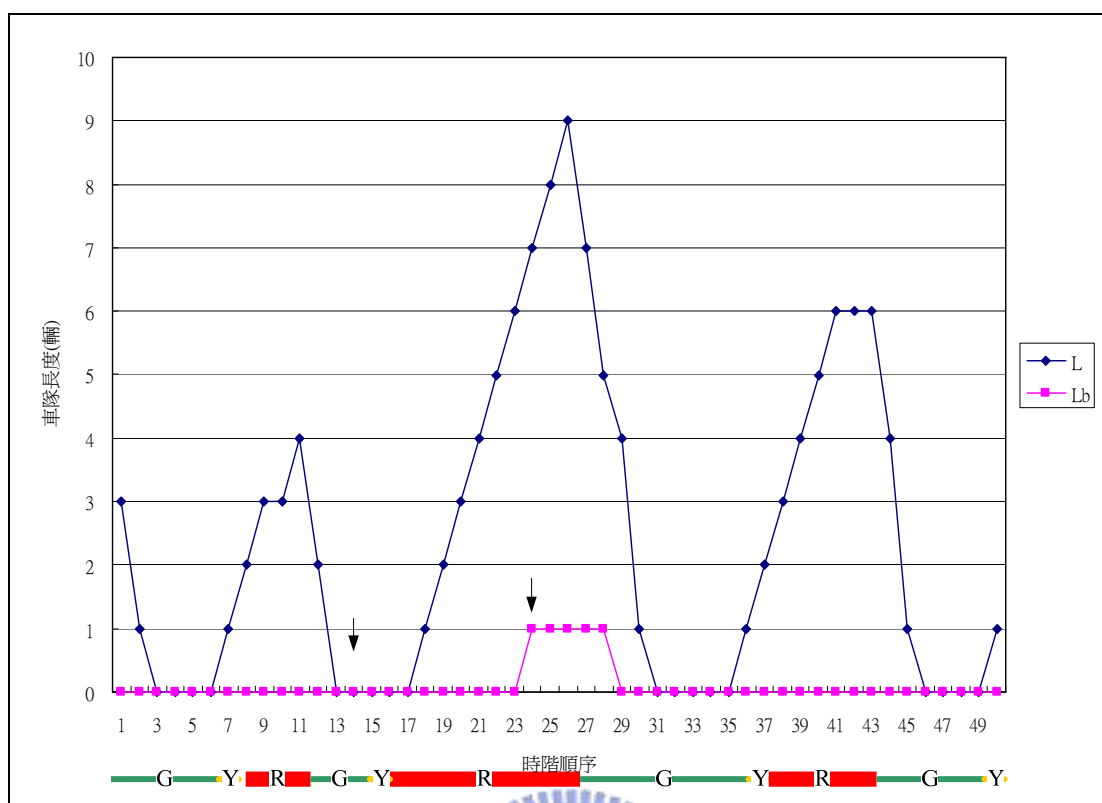


圖 5.11 方案五號誌運作圖

若經時空圖綜合比較可發現（如圖 5.12 所示），比較方案一、方案二與方案三，當公車於班表時間容忍範圍外抵達路口時，方案二可透過綠燈延長或紅燈縮短的方式，使公車準點或延誤，使其逐漸回到容忍範圍內，由於模擬過程中是以一時階、一時階的推進，因此當公車回到容忍範圍時，號誌控制會回復定時號誌，由於更新抵達車輛數，因此公車實際離去時間不會正好落在容忍範圍上。方案三雖也可透過綠燈延長或紅燈縮短的方式，使公車準點或延誤，但若前後兩班公車間間距太短，如發生一公車晚到、一公車早到的情形，則由於補償時相，會導致第二輛公車無法進行額外的控制，班表控制彈性會降低，至於方案一則無法進行額外控制。

比較方案一、方案四與方案五，當公車與前輛公車班距過大，超出容忍範圍時，方案四亦能透過綠燈延長或紅燈縮短的方式，使公車準點或延誤，使其逐漸回到容忍範圍內，但若前後兩班公車間距太短，如發生一公車晚到、一公車早到的情形，則在必須控制班距的情況下，會使後輛公車停等的時間變長許多。方案五雖也可透過綠燈延長或紅燈縮短的方式，使公車準點或延誤，但由於補償時相後面早到的公車則無法執行額外控制，班距控制的彈性會降低，而方案一同樣無法進行額外控制。

比較方案二與方案四，可知班表控制在容忍間距為獨立的情形，不受前後班

車影響，而班距控制則受前後車影響，容忍間距會變動，因此班距控制常導致較長的紅燈長度。比較方案三與方案五則發現，由於班距控制會有較長的紅燈長度，因此方案五的補償週期也會因需消散較多的停等車隊而產生較長的補償週期。

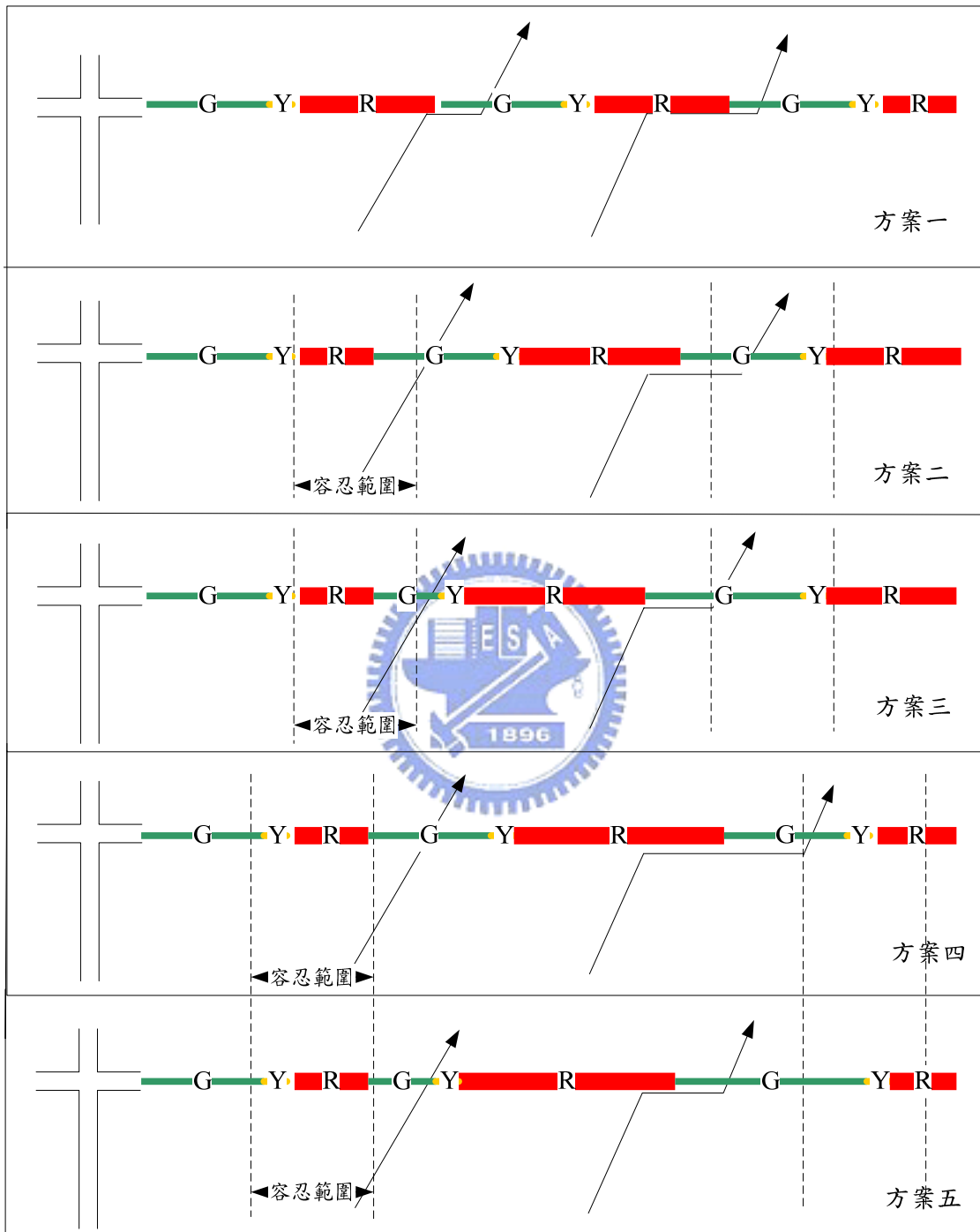


圖 5.12 各方案公車通行時空圖

5.3 模擬績效

以下將針對各個方案進行模擬路網績效的分析，分別對此五種方案進行小客車流量、公車班距與公車站位乘客的績效分析，方案參數設定採用表 5.1。

5.4.1 小客車流量與延誤成本關係

本小節將針對各路線起始點之進入路網的小客車流量，進行各方案的比較分析，流量水準由每方向 400vph 增加至 800vph，其他設定包括公車班距設定為 10 分鐘、公車站位乘客旅運需求為每站位 30 人/小時。

當各路線起始點之車輛產生的流量水準為 400vph 時（如表 5.3 與圖 5.13 所示），就路口延誤而言，方案一最低，其次為方案四與方案二，方案三與五最高；就站位延誤而言，方案四最低，方案五與方案二其次，方案三與方案一最低，因此就系統成本而言，方案四最低，方案一最高，由此可知當流量偏低時，路口的延誤方面，班距控制與班表控制績效相差不大，而公車站位績效則以班距控制能夠控制較佳的班距，使乘客的等候時間較平均，因此整體而言班距控制於流量低時會有較佳的績效。

當各路線起始點之車輛產生的流量水準為 500vph 時（如表 5.4 與圖 5.14 所示），路口延誤以方案一最低，方案五最高；站位延誤以方案二最低，方案一最高；整體而言，系統成本最低為方案二，方案四其次，方案五最高，顯示當流量逐漸增加時，公車在班表控制下，無論是站位延誤或是路口延誤皆較班距控制佳，其因為公車在中流量的情況下，較能夠依其班表在路線上行駛；班距控制則由於一旦公車因號誌的停等，導致延遲其抵達下一路口的時間，會連帶使後一班公車需要在班距的限制下繼續延遲，結果路口延誤增加。

當各路線起始點之車輛產生的流量水準為 600vph 時（如表 5.5 與圖 5.15 所示），與流量水準 500vph 時，相差不大，整體延誤仍是以方案二最低，其次為方案四，方案五最高。

當各路線起始點之車輛產生的流量水準為 700vph 時（如表 5.6 與圖 5.16 所示），當流量繼續增加時，整體延誤以方案二最低，方案一其次，方案五最高。由此可知當流量繼續增加時，雖然班表控制仍是績效最佳的方案，但是班距控制在中高流量時，在需要維持公車班距的前提下，路口延誤增加許多，導致整體系統延誤增加，班距控制相較於班表控制或純定時式號誌績效皆較差。

當各路線起始點之車輛產生的流量水準為 800vph 時（如表 5.7 與圖 5.17 所示），整體系統成本以方案一最佳，其次為方案二，方案五最高。因此在高流量的環境下，無論是班表控制或是班距控制，會因高流量，需維持控制的條件下，導致路口延誤增加，控制效果較差，而以不進行額外控制的定時式號誌時制績效最佳。

綜合以上流量模擬結果（如表 5.8 與圖 5.18），當低流量至高流量時，路口延誤成本增加幅度相當明顯，至於站位延誤方面增加幅度有限。當低流量時，班距控制相較於其他控制，會有較佳的系統績效，然而當中流量時，以班表控制會有較佳的績效，至於高流量時，班表控制與班距控制的績效均會降低，此時以定時式號誌時制會有較佳的績效。

表 5.3 小客車流量-延誤時間表（各方向流量水準 400vph）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	248582.2	173317.8	421900.0
方案二	258315.3	144431.5	402746.8
方案三	263131.4	148715.3	411846.7
方案四	253131.7	141228.0	394359.7
方案五	263717.3	141356.1	405073.4

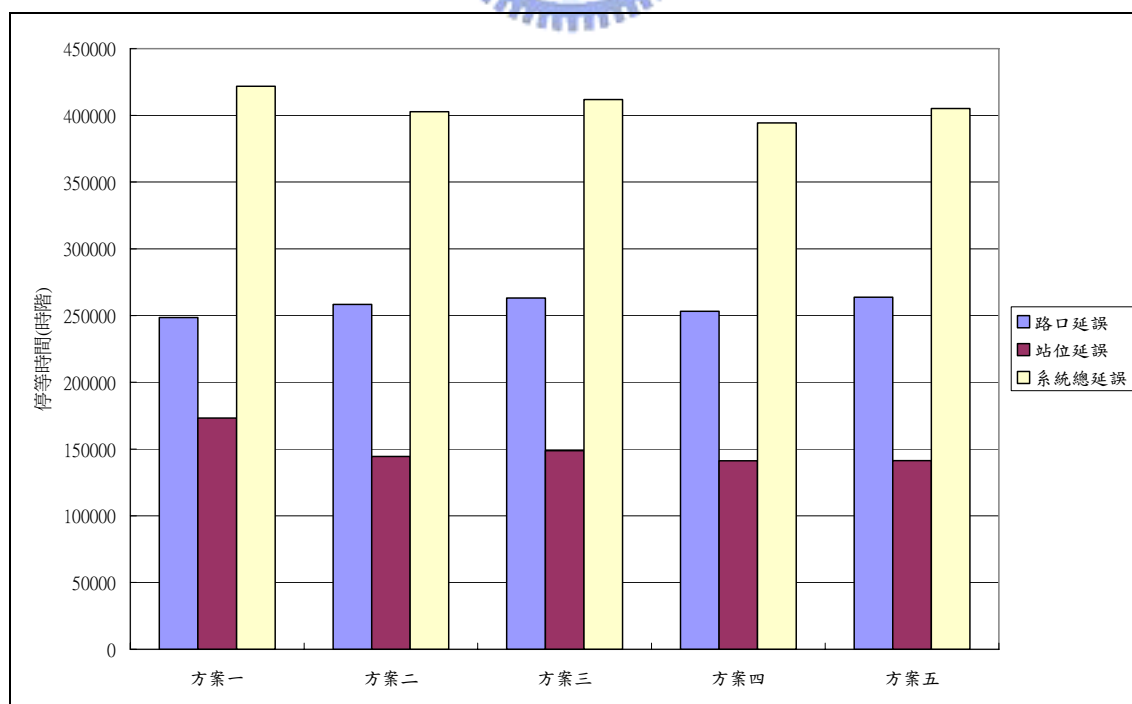


圖 5.13 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 400vph）

表 5.4 小客車流量-延誤時間表（各方向流量水準 500vph）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	348863.1	176784.2	525647.2
方案二	355575.9	147320.1	502896.0
方案三	371703.6	152119.4	523823.0
方案四	356416.0	152447.7	508863.7
方案五	374690.9	152210.1	526901.0

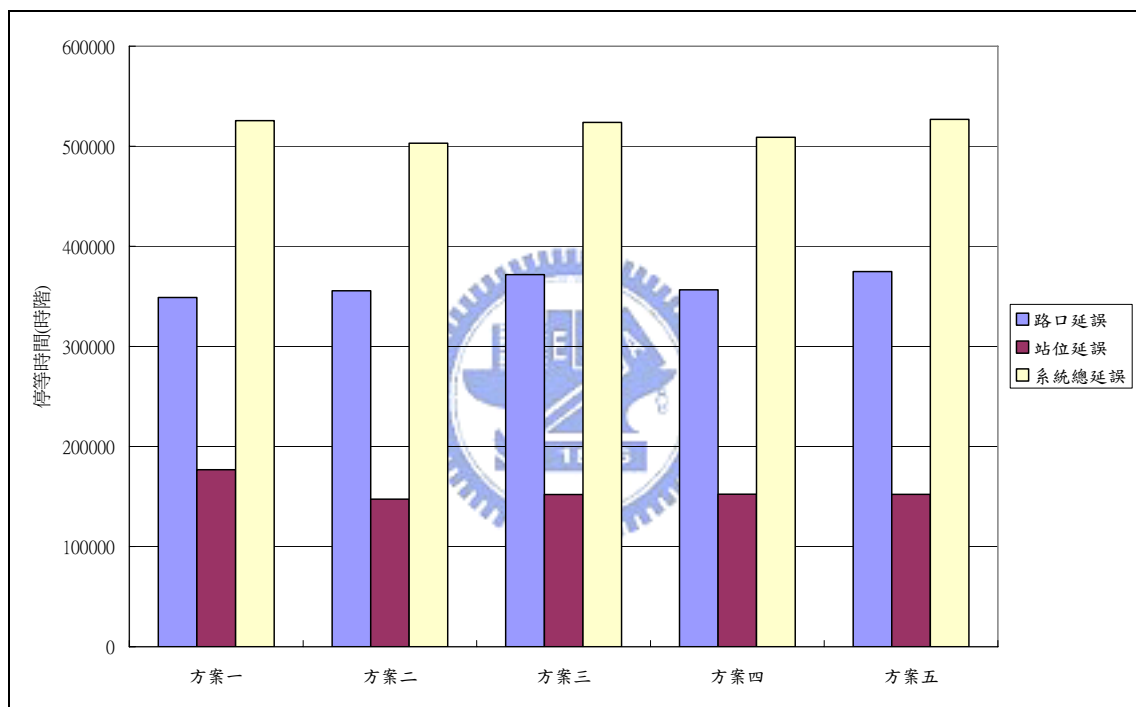


圖 5.14 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 600vph）

表 5.5 小客車流量-延誤時間表（各方向流量水準 600vph）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	525988.7	177889.1	703877.8
方案二	534204.3	154686.1	688890.4
方案三	536891.6	154557.2	691448.8
方案四	547635.6	158246.6	705882.2
方案五	557956.2	160770.6	718726.8

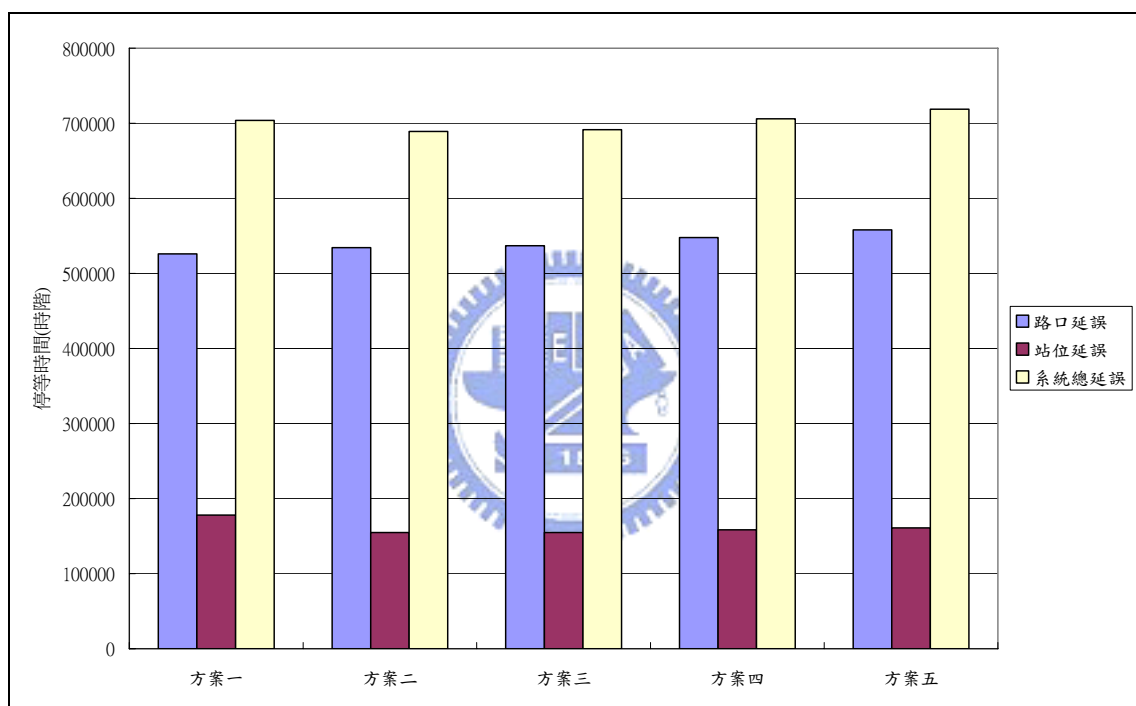


圖 5.15 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 600vph）

表 5.6 小客車流量-延誤時間表（各方向流量水準 700vph）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	800313.7	193976.4	994290.0
方案二	808088.7	170154.7	978243.4
方案三	841968.9	170298.3	1012267.2
方案四	824224.5	188195.7	1012420.3
方案五	852470.3	188290.0	1040760.3

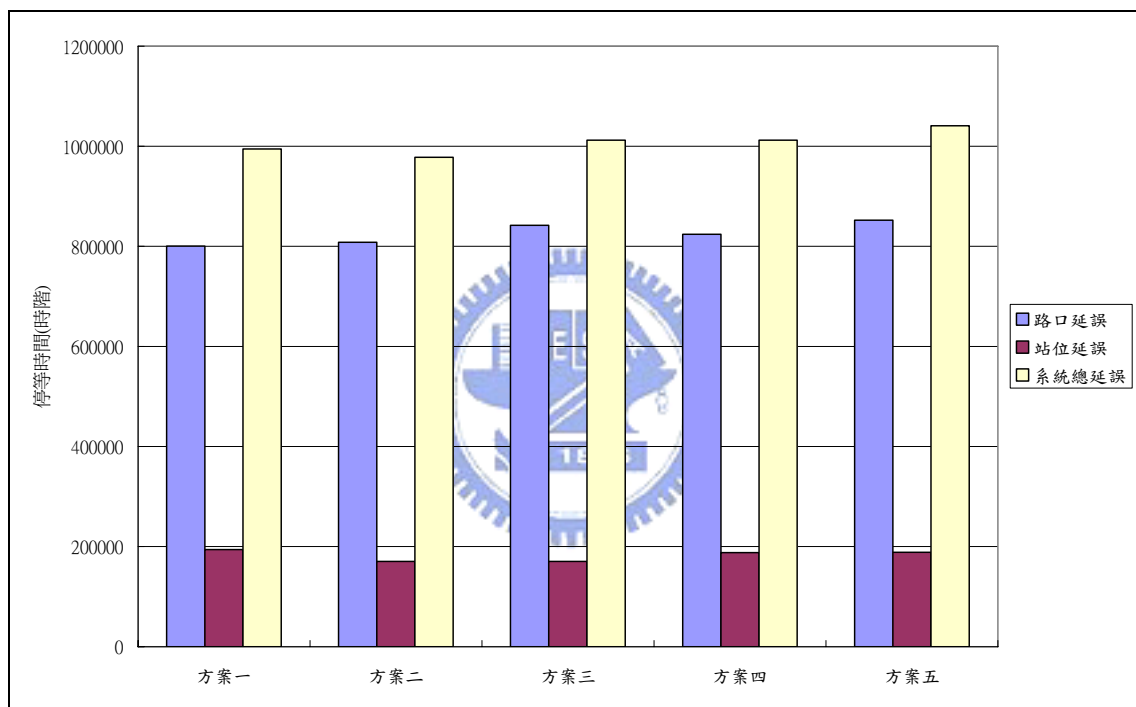


圖 5.16 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 700vph）

表 5.7 小客車流量-延誤時間表（各方向流量水準 800vph）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	1357929.0	205887.2	1563816.2
方案二	1399408.1	187170.2	1586578.3
方案三	1455498.5	184098.2	1639596.6
方案四	1403311.5	209103.7	1612415.3
方案五	1447521.2	205038.4	1652559.6

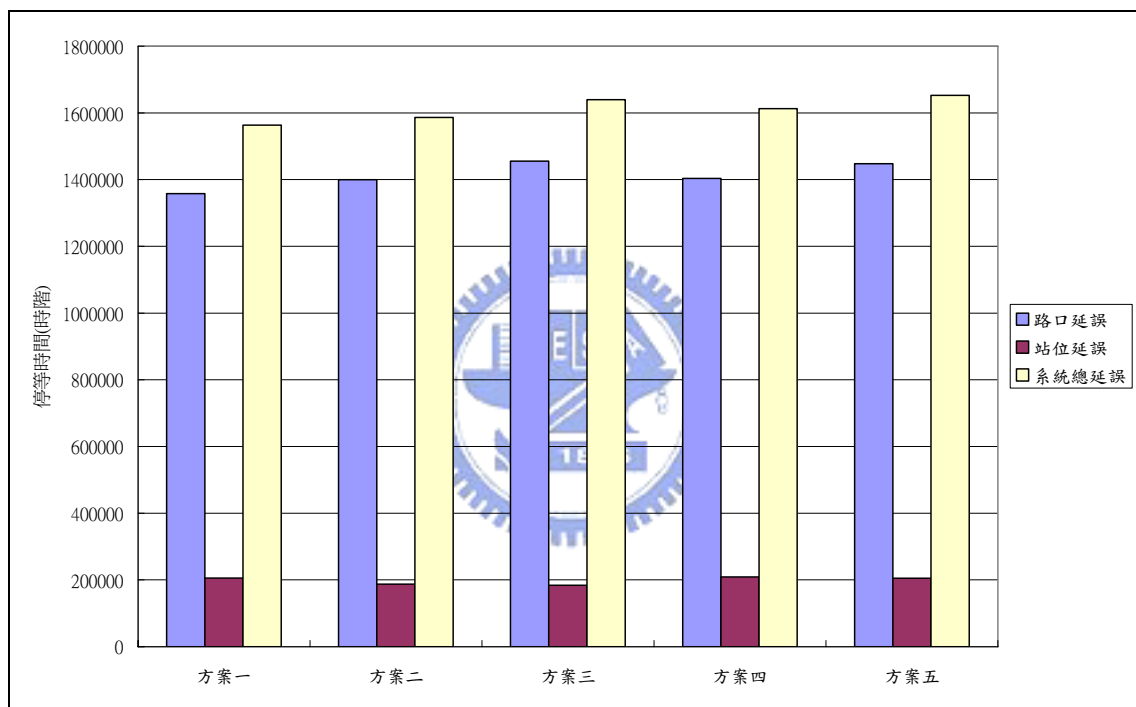


圖 5.17 小客車流量-延誤時間圖（各方向流量水準 800vph）

表 5.8 流量水準-方案績效表

流量水準 (vph)	最佳方案	路口延誤時間 (時階)	站位延誤時間 (時階)	系統延誤時間 (時階)
400	方案四	253131.7	141228	394359.7
500	方案二	355575.9	147320.1	502896
600	方案二	534204.3	154686.1	688890.4
700	方案二	808088.7	170154.7	978243.4
800	方案一	1357929	205887.2	1563816.2

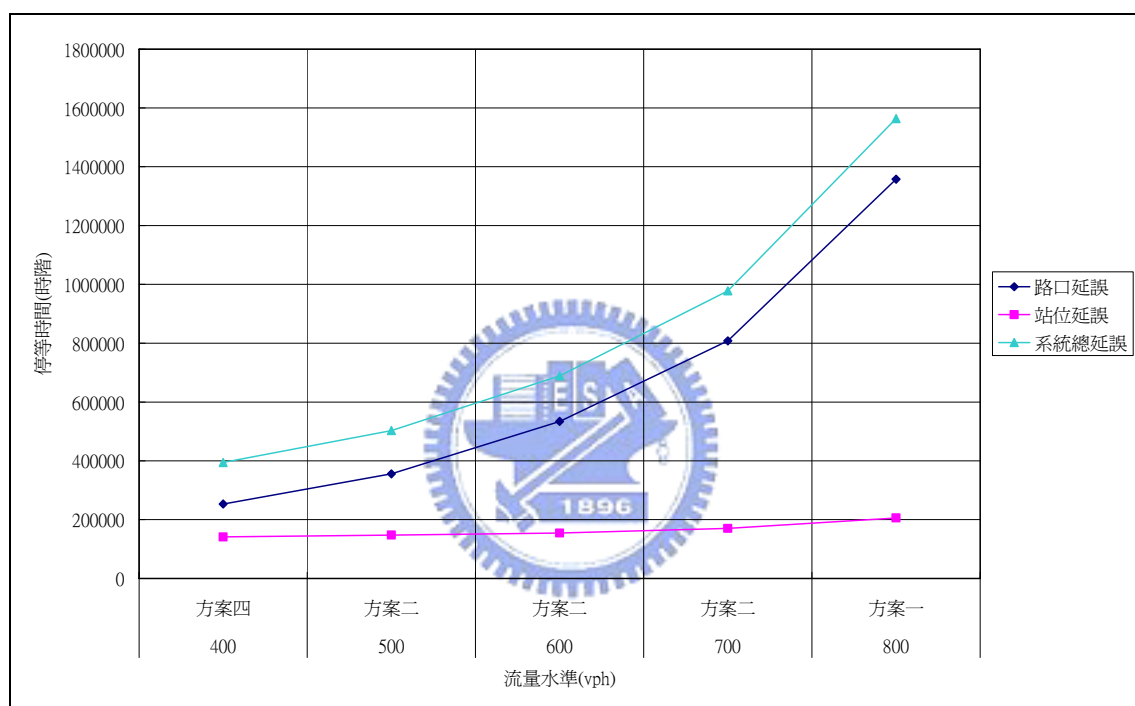


圖 5.18 流量水準-方案績效圖

5.4.2 公車站位旅客抵達率與延誤成本關係

本節將針對各公車站位的乘客抵達率，進行各方案的比較分析，乘客抵達率從每小時 10 人增加到 50 人，其他設定包括各路線起始點之小客車進入流量為中流量情形下各方向 600vph，公車班距設定為 10 分鐘。

當各公車站位乘客抵達率不高時（每小時 20 人以下，如表 5.9、表 5.10 與圖 5.19、圖 5.20 所示），由於站位延誤較低，因此以路口延誤為主，定時式號誌由於路口延誤較低，因此整體系統延誤績效較其他控制方案為佳，顯示當公車站位旅客需求較低時，無論是採用公車班距控制或班表控制，其績效不如採用定時式號誌時制。

當各公車站位乘客抵達率較高時（每小時 30 人以上，如表 5.11 至表 5.13，圖 5.21 至圖 5.23 所示），由於公車停等站位的時間較久，路口延誤增加，但幅度相對於站位延誤為小，班表控制在站位延誤成本上，相較於其他方案的效益為佳，因此總系統成本較佳，顯示當站位旅運需求大時，採用班表控制能夠獲得較高的效益。

綜合以上模擬結果（如表 5.14 與圖 5.24），當公車旅運需求增加時，雖會造成路口延誤些微增加，但由於站位延誤相對增加許多，因此若當公車乘客旅運需求不大時，採用班表控制或班距控制皆會增加額外的延誤，以採用定時式號誌較佳，而在公車乘客旅運需求較大時，則須針對公車路線控制，此時採用班表控制會較其他控制策略為佳。

表 5.9 旅客抵達率-延誤時間表（10 人/小時）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	525130.6	47991.7	573122.2
方案二	533779.5	47516.5	581296.0
方案三	541745.5	46862.8	588608.3
方案四	546358.1	48466.8	594824.9
方案五	549760.7	46344.0	596104.8

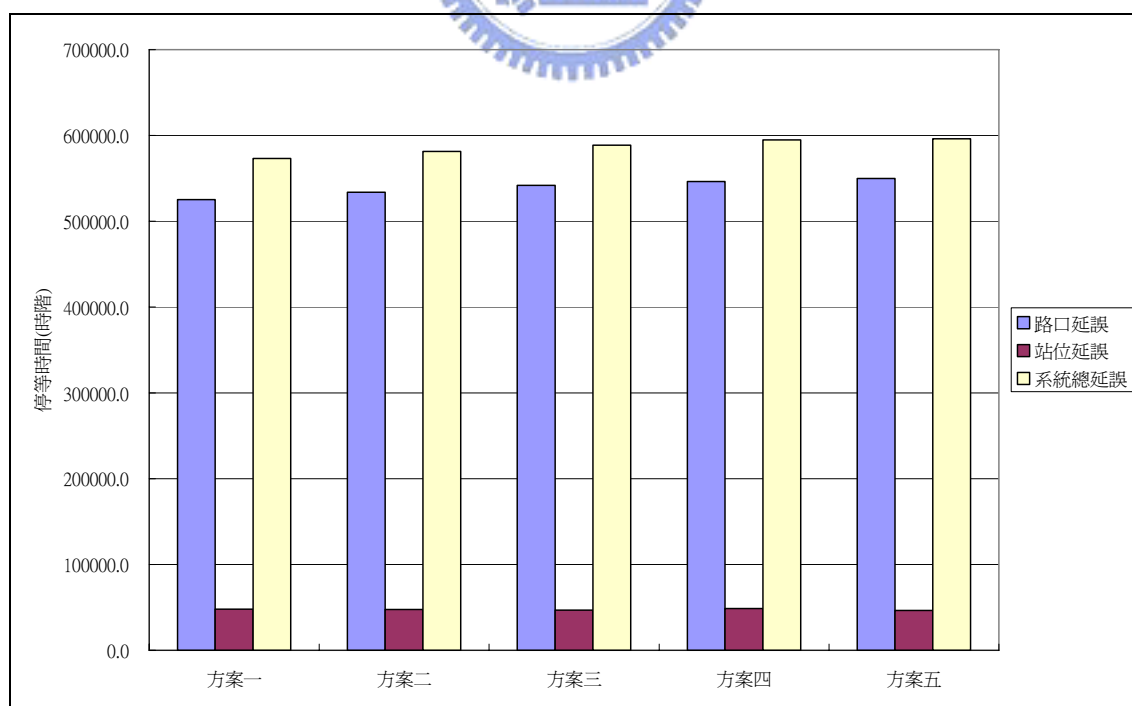


圖 5.19 旅客抵達率-延誤時間圖（10 人/小時）

表 5.10 旅客抵達率-延誤時間表 (20 人/小時)

	路口延誤時間 (時階)	站位延誤時間 (時階)	系統延誤時間 (時階)
方案一	527460.7	102460.8	629921.5
方案二	534883.3	97581.7	632465.0
方案三	542719.4	95168.4	637887.8
方案四	552379.0	99533.3	651912.3
方案五	556072.2	96170.2	652242.4

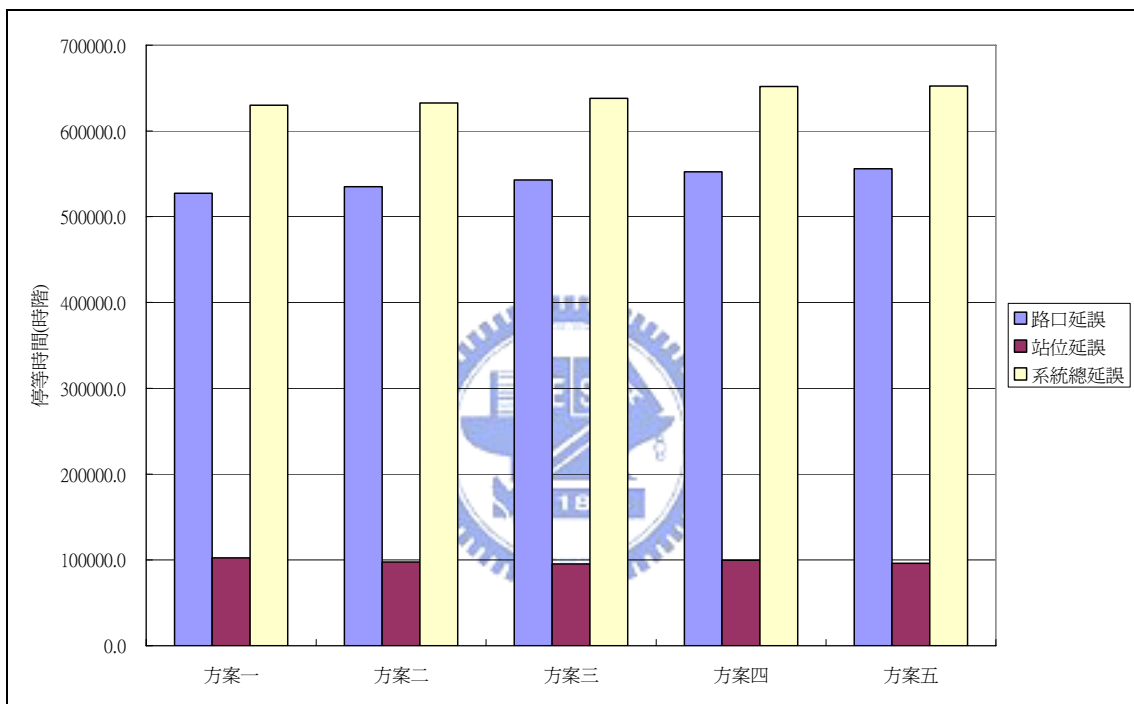


圖 5.20 旅客抵達率-延誤時間圖 (20 人/小時)

表 5.11 旅客抵達率-延誤時間表 (30 人/小時)

	路口延誤時間 (時階)	站位延誤時間 (時階)	系統總延誤時間 (時階)
方案一	525988.7	177889.1	703877.8
方案二	534204.3	154686.1	688890.4
方案三	556891.6	154557.2	711448.8
方案四	547635.6	158246.6	705882.2
方案五	557956.2	160770.6	718726.8

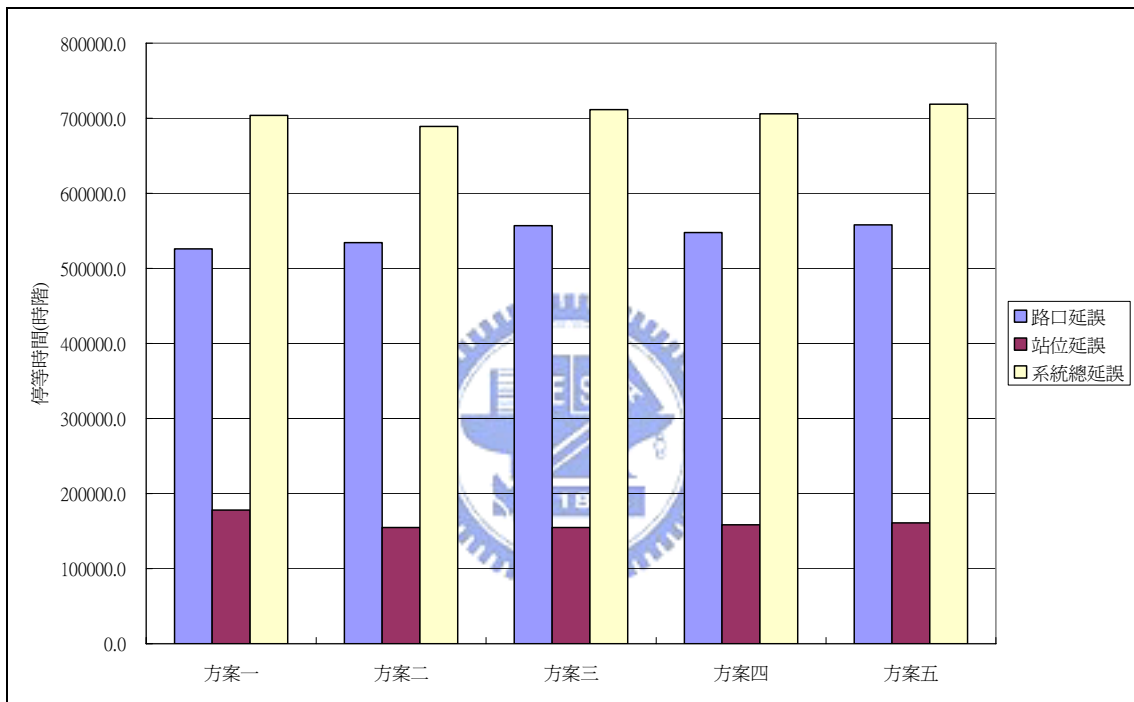


圖 5.21 旅客抵達率-延誤時間圖 (30 人/小時)

表 5.12 旅客抵達率-延誤時間表 (40 人/小時)

	路口延誤時間 (時階)	站位延誤時間 (時階)	系統總延誤時間 (時階)
方案一	529820.8	227899.4	757720.2
方案二	537022.8	194090.4	731113.2
方案三	545210.5	189928.0	735138.5
方案四	554170.4	195052.2	749222.6
方案五	558295.9	193195.3	751491.2

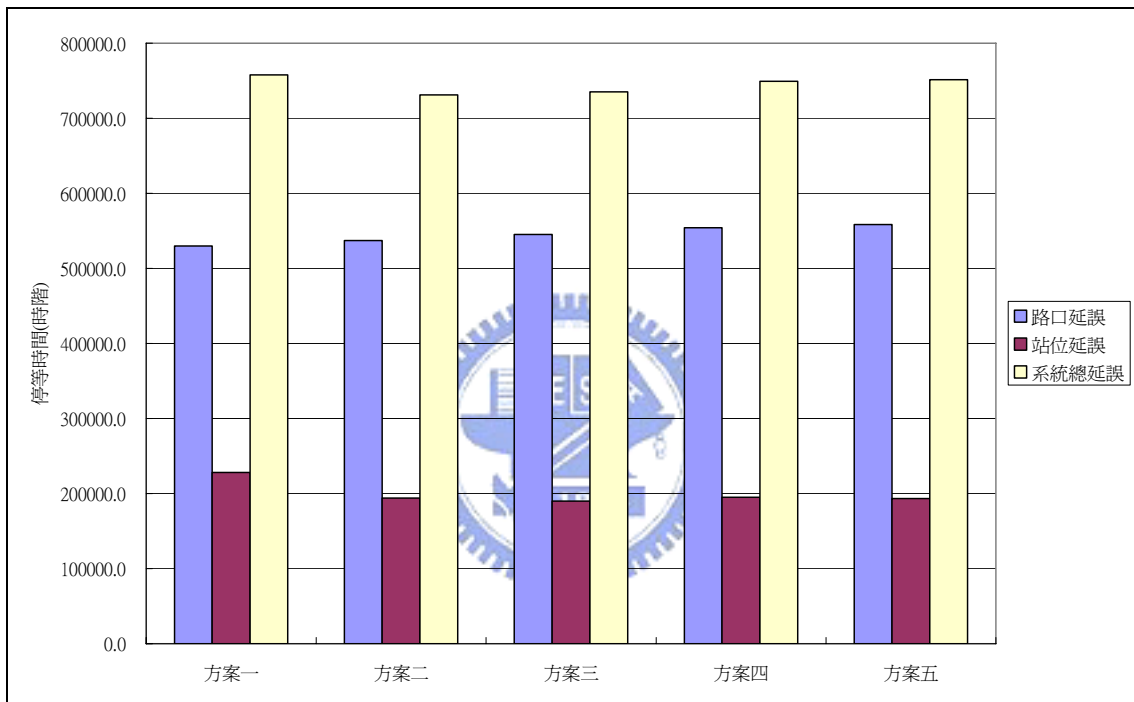


圖 5.22 旅客抵達率-延誤時間圖 (40 人/小時)

表 5.13 旅客抵達率-延誤時間表 (50 人/小時)

	路口延誤時間 (時階)	站位延誤時間 (時階)	系統總延誤時間 (時階)
方案一	520670.2	292374.9	813045.1
方案二	538616.8	247613.5	786230.3
方案三	547054.6	243782.1	790836.7
方案四	557841.5	249565.8	807407.3
方案五	563486.3	248808.0	812294.3

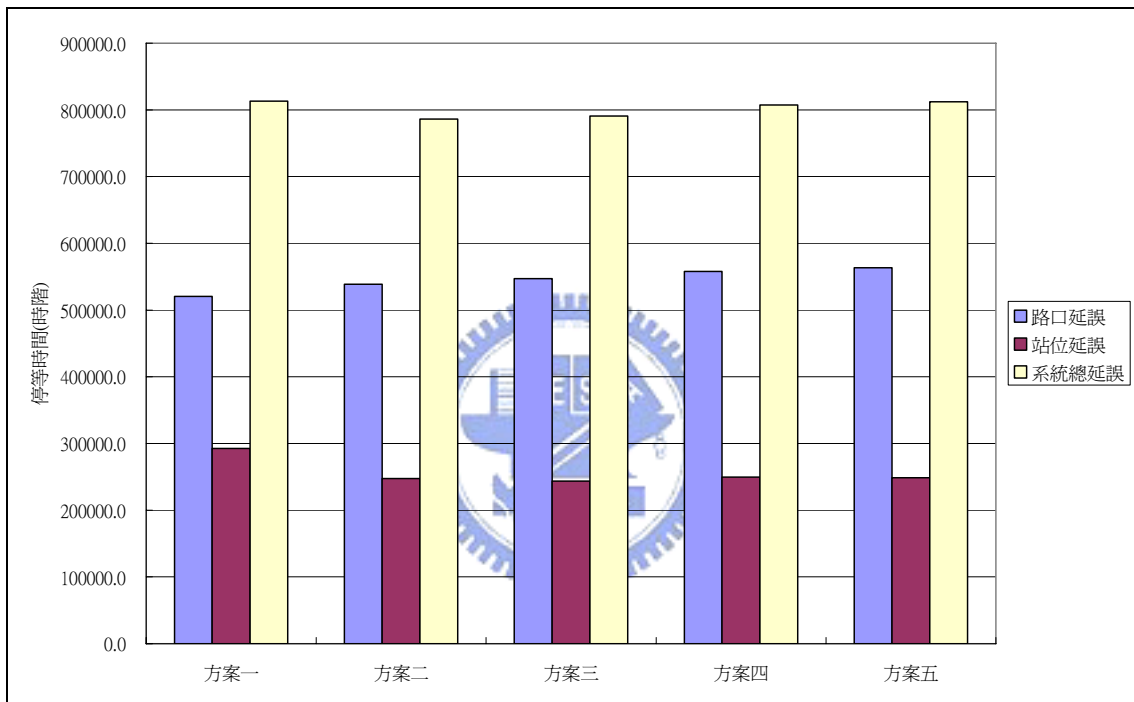


圖 5.23 旅客抵達率-延誤時間圖 (50 人/小時)

表 5.14 旅客抵達率-方案績效表

站位乘客抵達率 (人/小時)	最佳方案	路口延誤時間 (時階)	站位延誤時間 (時階)	系統總延誤時間 (時階)
10	方案一	525130.6	47991.7	573122.2
20	方案一	527460.7	102460.8	629921.5
30	方案二	534204.3	154686.1	688890.4
40	方案二	537022.8	194090.4	731113.2
50	方案二	538616.8	247613.5	786230.3

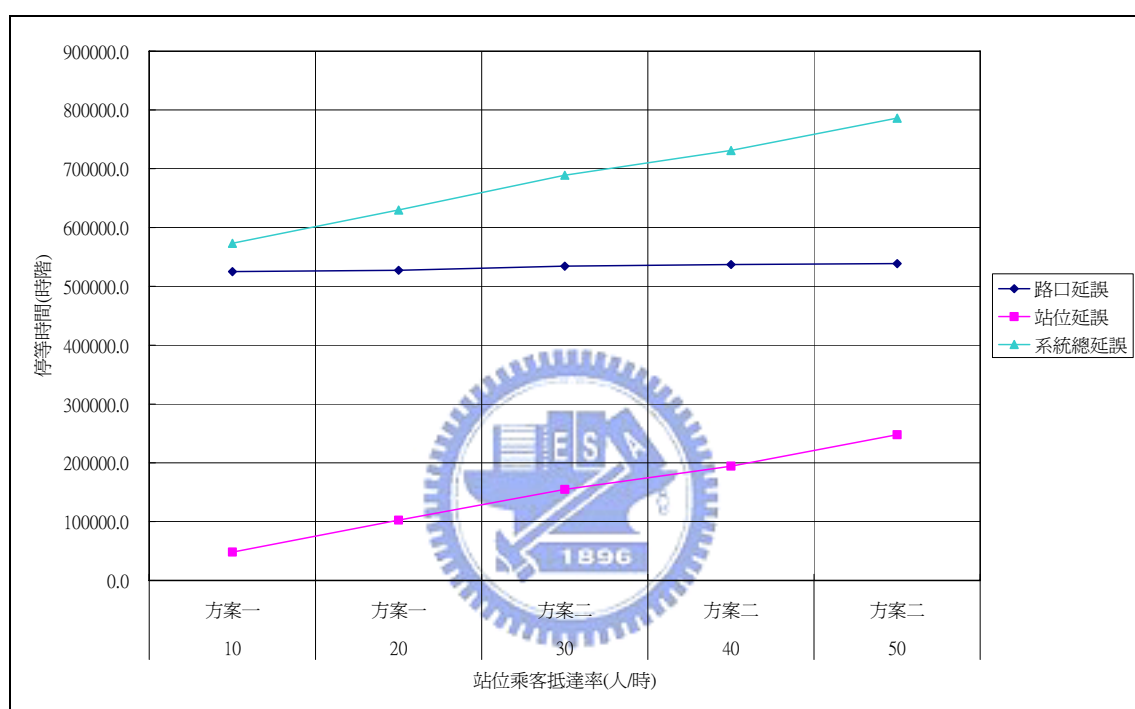


圖 5.24 旅客抵達率-方案績效圖

5.4.3 公車班距與延誤績效

本節將針對各路線起始點公車發車的班距進行變動，以分析比較各方案，公車班距由 1 分鐘增加至 30 分鐘，其他設定包括乘客抵達率 30 人/小時、各路線起始點之小客車進入流量為 600vph。

當公車班距為 1 分鐘時（如表 5.15 與圖 5.25），由於公車密集發車，站位延誤成本都偏低，然而由於公車過於密集，導致班表控制與班距控制在路口的號誌控制部份，時常需執行適應式優先號誌控制，之後再切換回補償時相與定時式號誌，其中又以班距控制執行更頻繁，且由於補償模組的作用，導致路口成本更高。因此在班距密集的情況下，路口延誤成本相對於站位延誤成本為高，就系統成本而言，以方案一最佳，方案二其次，方案五成本最高。

當公車班距為 5 分鐘時（如表 5.16 與圖 5.26），站位延誤成本增多，在路口延誤方面，由於班距減少，發車次數降低，路口需額外進行班表控制或班距控制的次數減少，因此路口的延誤成本相較於班距一分鐘時低，而站位的延誤成本則因班距拉長，導致站位延誤成本增加，就系統成本而言，方案二的延誤成本最低。

當公車班距為 10 分鐘至 20 分鐘時（如表 5.17、5.18 與圖 5.27、5.28），公車班距增大，站位延誤增加，但由於班次減少，導致站位延誤差異縮小，路口的延誤由於班次的減少，執行班表控制或班距控制的次數也相對減少，因此路口延誤降低，系統成本仍以方案二最低。當公車班距增長至 30 分鐘（如表 5.19 與圖 5.29），站位延誤的差值更小，主要考量以路口延誤為主，因此就五個方案而言，採用方案一較佳。

綜合來看（如表 5.20 與圖 5.30），當班距逐漸增加時，路口的延誤會逐漸減少，但站位延誤則增加許多，當班距相當小時，針對路口進行額外的班表或班距控制會導致路口延誤的增加，但是當班距相當大時，班表或班距控制策略的影響則相當有限，因此當班距小與班距大時，採用方案一是較好的方式，當班距介於中間時，則採用方案二較佳。



表 5.15 公車班距-延誤成本表（1 分鐘班距）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	535221.7	21578.6	556800.3
方案二	552874.9	18794.5	571669.4
方案三	588014.9	19562.8	607577.7
方案四	581051.1	19558.1	600609.3
方案五	590189.1	19054.9	609244.1

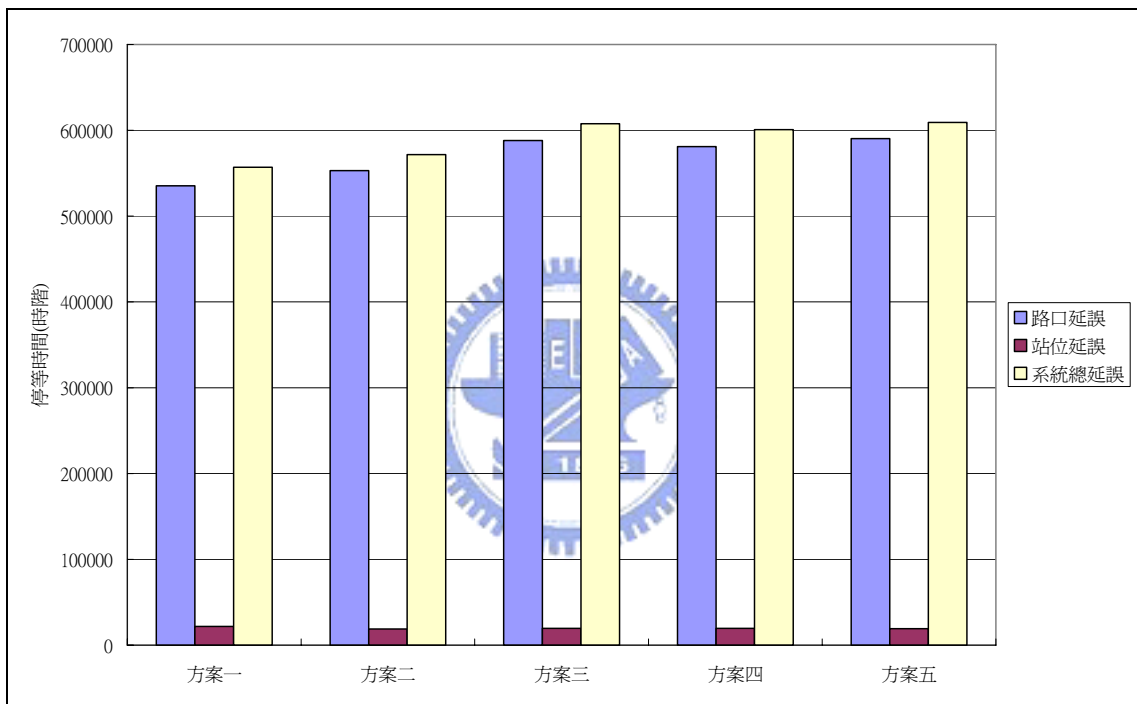


圖 5.25 公車班距-延誤成本圖（1 分鐘班距）

表 5.16 公車班距-延誤成本表（5 分鐘班距）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	531915.7	97158.7	629074.4
方案二	543186.4	83526.9	626713.3
方案三	562531.2	82036.2	644567.4
方案四	561301.9	79409.7	640711.6
方案五	579820.3	86718.5	666538.7

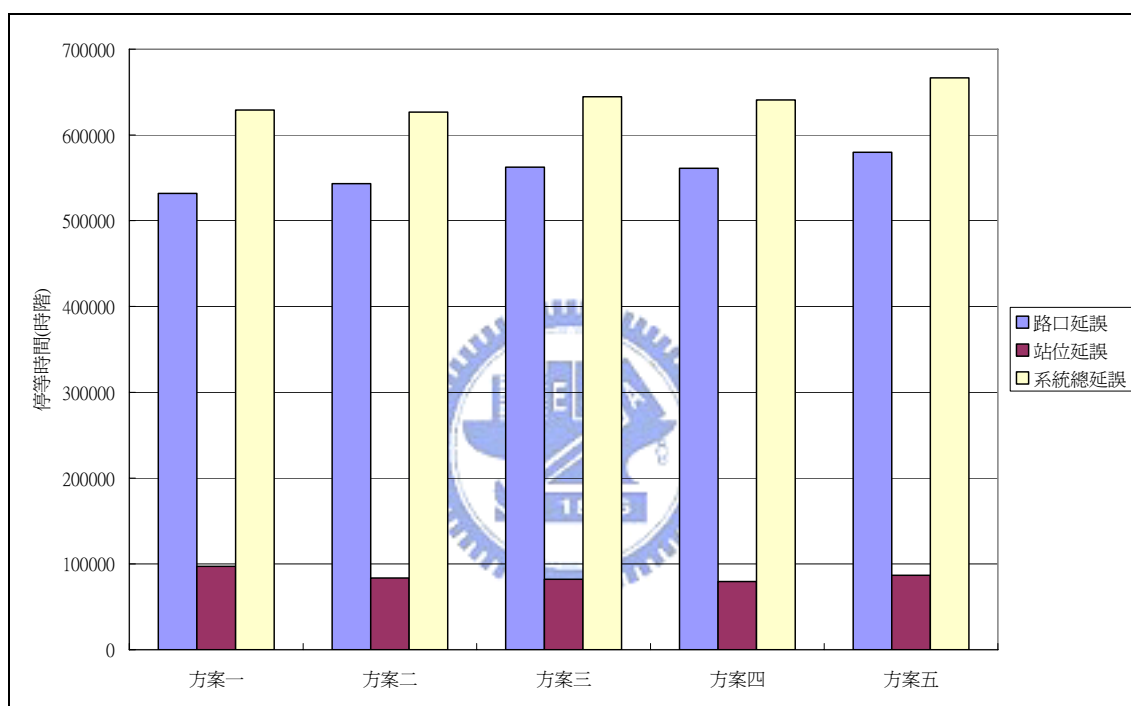


圖 5.26 公車班距-延誤成本圖（5 分鐘班距）

表 5.17 公車班距-延誤成本表（10 分鐘班距）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	525988.7	177889.1	703877.8
方案二	534204.3	154686.1	688890.4
方案三	556891.6	154557.2	711448.8
方案四	547635.6	158246.6	705882.2
方案五	557956.2	160770.6	718726.8

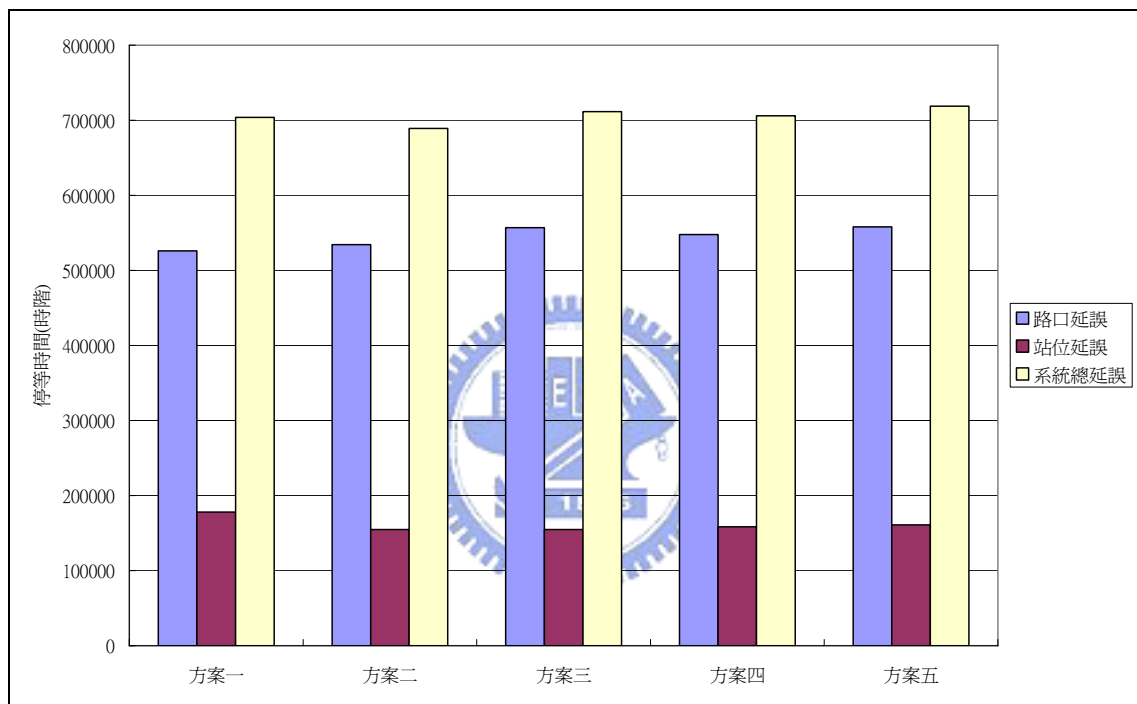


圖 5.27 公車班距-延誤成本圖（10 分鐘班距）

表 5.18 公車班距-延誤成本表（20 分鐘班距）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	519749.5	321598.6	841348.1
方案二	530179.1	301153.2	831332.3
方案三	554763.3	291648.7	846412.0
方案四	543104.2	301641.3	844745.6
方案五	554931.8	310398.5	865330.3

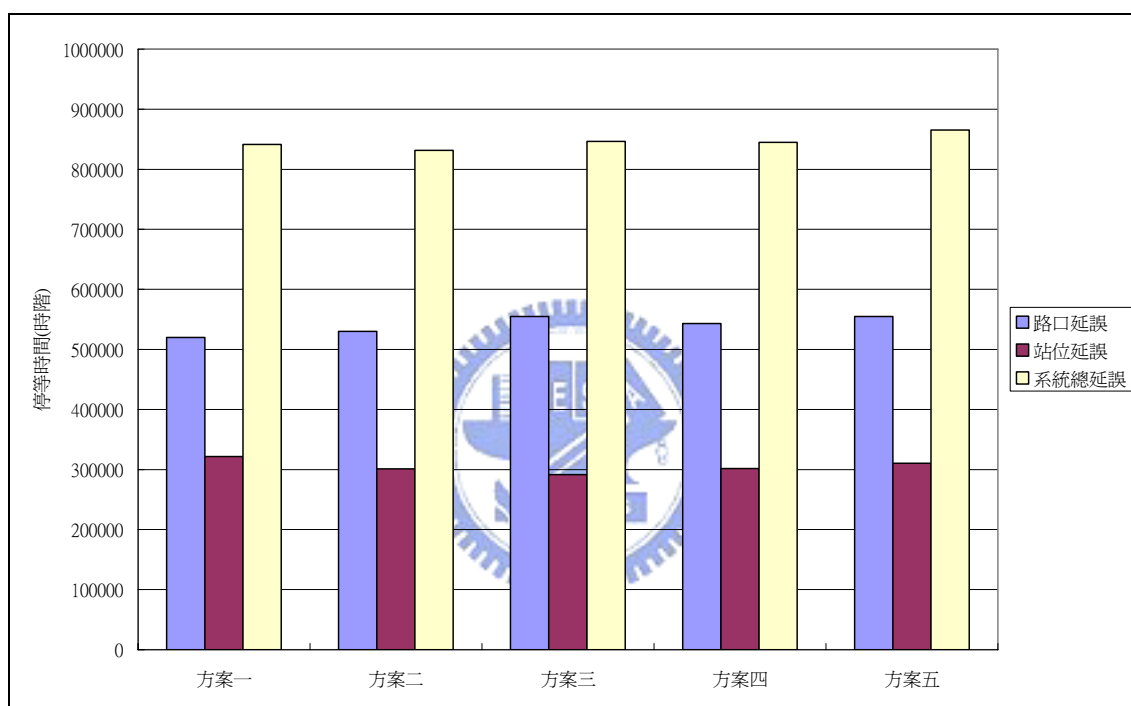


圖 5.28 公車班距-延誤成本圖（20 分鐘班距）

表 5.19 公車班距-延誤成本表（30 分鐘班距）

	路口延誤時間（時階）	站位延誤時間（時階）	系統延誤時間（時階）
方案一	516133.0	591875.1	1108008.1
方案二	522811.2	591327.6	1114138.7
方案三	526292.9	589271.0	1115563.9
方案四	526013.8	588535.6	1114549.4
方案五	527848.3	582441.7	1110289.9

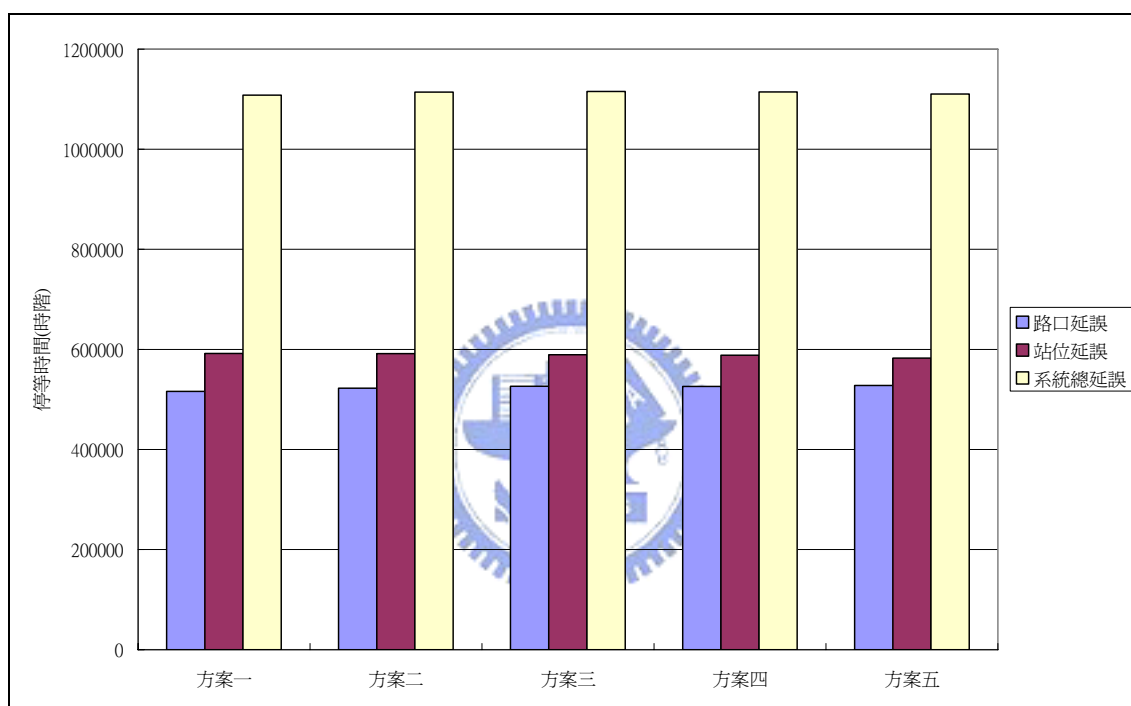


圖 5.29 公車班距-延誤成本圖（30 分鐘班距）

表 5.20 公車班距-方案績效表

班距 (分鐘)	最佳方案	路口延誤時間 (時階)	站位延誤時間 (時階)	系統總延誤時間 (時階)
1	方案一	535221.7	21578.6	556800.3
5	方案二	543186.4	83526.9	626713.3
10	方案二	534204.3	154686.1	688890.4
20	方案二	530179.1	301153.2	831332.3
30	方案一	516133	591875.1	1108008

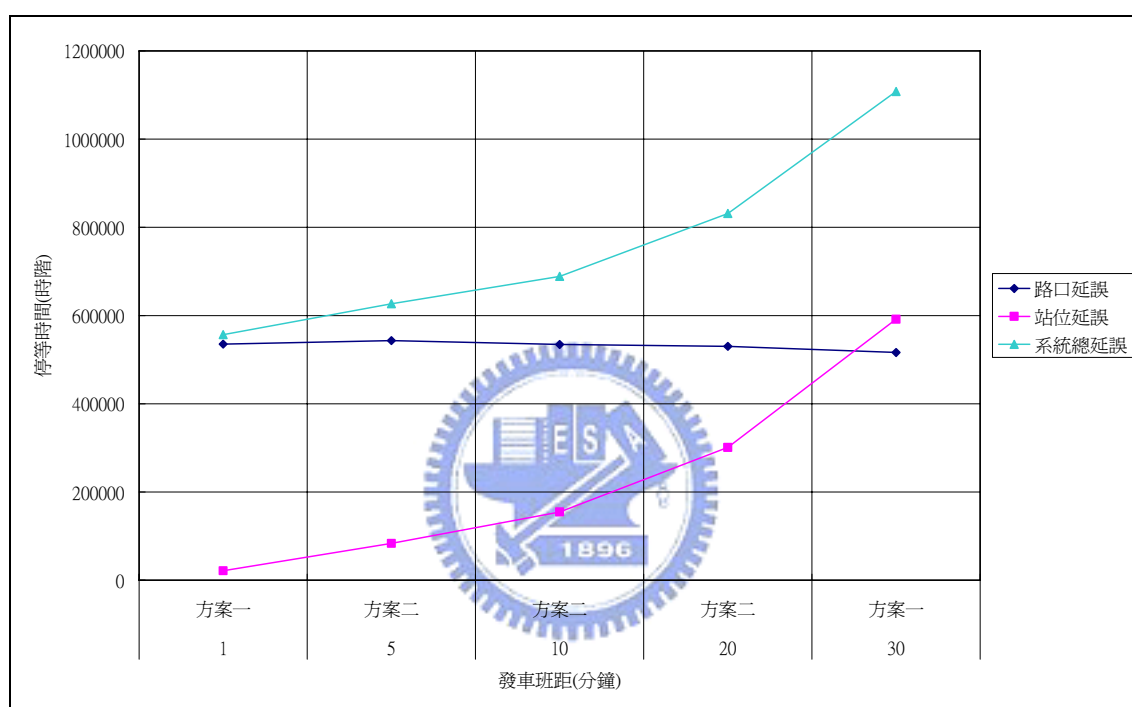


圖 5.30 公車班距-方案績效圖

5.3 本章小結

1. 由號誌運作圖與時空圖可知，班距或班表適應式控制對於公車路線控制有其作用，若加入補償時相則會降低部分公車路線控制的彈性。班表控制由於不受前後公車車影響，完全依照班表時間執行控制，因此對於公車較不會產生長時間的停等，而班距控制由於受前輛公車影響，在路口會發生公車須停等較久的情況。
2. 流量與系統延誤成本關係：顯示在低流量時，班距控制相較於其他控制而言，會有較佳的系統績效，主要是因為其站位績效相較於其他方案較佳；然而在中流量時，以班表控制會有較佳的績效，因為班距控制在路口的控制容易因流量

的增加，導致其為了維持前後公車班距，而須愈早或愈晚抵達路口，因此路口延誤增加，而班表控制僅需注意該公車與班表的容忍範圍，因此在中流量時，班表控制有較佳的績效；至於在高流量時，班表控制與班距控制的績效均會降低，由於流量增大，導致班表控制或班距控制常超出容忍範圍，且執行控制時，使支道會產生過多延誤，若加上補償時段，則主要幹道亦會產生較高的延誤，因此，在高流量時，以純定時式號誌時制具有較佳的績效。

3. 公車站位需求與系統延誤成本關係：當公車乘客旅運需求不大時，採用定時式號誌控制相較於採用班表控制或班距控制佳，因為旅運需求偏低，相對站位延誤較小，故執行班表或班距控制在路口的延誤就相對較大，因此，當公車旅運需求不大時，建議採用純定時式號誌控制；而在公車乘客旅運需求較大時，採用班表控制或班距控制會有較小的站位延誤，而純定時式控制的站位延誤較大，因此總系統成本會以採用班表或班距控制較佳，其中又以班表控制較佳。
4. 班距與系統延誤成本關係：當班距相當小時，路口的班表控制或是班距控制會導致路口延誤增加許多，由於當班距短、公車班次密集的時候，路口號誌因為需時常進入路線控制階層與補償模組，導致路口延誤大量增加，且在班次密集的情況下，站位延誤相當低，因此，當班距很小時，採用純定時式號誌控制較佳；當班距較大時，公車班次較少，此時班表控制或是班距控制的影響相當有限，幾個方案績效差別不大，因此採用方案一，不進行額外控制策略較佳；至於當班距介於中間時，適時的路口控制可以使站位延誤降低，且不至於增加過多路口延誤，因此以班表控制較佳。

第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 本研究分析國內外相關公車號誌優先文獻發現，以往研究公車優先號誌多採用綠燈延長、紅燈切除與紅燈中斷等方法，且號誌系統多為觸動式號誌，其中採用適應式號誌者仍在少數；另外，以往研究中探討公車優先多以順利通行為主，較少針對公車準點性進行控制。本研究除了採用適應式號誌外，並引入了階層的觀念，分別針對公車路線以及路口階層採用不同的控制方法，對於公車路線階層以其準點性為考量，透過設定不同的公車權重，利用適應式號誌的績效來控制公車通行的時間，而路口階層則以定時號誌控制車輛運行。
2. 本研究主要包含三部分，分別為車流產生模組、路段車流模組與路口號誌控制模組：

一、車流產生模組：當上游非路口時，則為車輛產生點，小客車以特定機率分配，透過亂數產生車輛數，公車則依班表產生車輛；若上游為路口時，則以上游路口通行的車輛數，作為下個路段起點的車輛進入數。

二、路段車流模組：小客車由各路口至下游路口的路段移動，是以車隊擴散關係來推算，公車抵達時間的計算可分為有無經過公車站位兩種，當路段中有公車站位時，抵達路口時間為公車抵達站位的時間加上站位停等時間再加上從站位至路口的時間，若無站位則直接計算從整個路段的旅行時間

三、路口號誌控制模組：包括路口控制階層、路線控制階層與補償時相：

- (1) 路口控制階層：當無公車或公車無路線控制的需求時，採用定時號誌控制。
- (2) 路線控制階層：當公車有控制的需求時，採用適應式號誌，依其緩急程度給予不同的權重設定，使其順利通過路口或於路口停等。
- (3) 補償時相：當號誌由路線控制階層轉換至路口控制階層時，插入一補償時相，以彌補橫向車流的損失。

3. 本研究根據班表控制或班距控制與有無補償時相設定了五種方案，分別為純定時式號誌、適應式班表控制、適應式班距控制、有補償時相適應式班表控制與有補償時相適應式班距控制。
4. 在低流量時，採用班距控制較佳，原因為其站位績效相較於其他方案為佳；在中流量時，採用班表控制會有較佳的績效，因為班距控制在路口的控制容易因流量的增加，導致為了維持前後公車班距，而增加路口延誤；在高流量時，純定時式號誌時制具有較佳的績效，原因為當流量高時，採用額外的控制將使路口延誤大幅增加。
5. 當公車乘客需求較低時，採用定時式號誌控制較佳，原因為需求偏低，相對站位延誤就比較小，因此執行班表或班距控制在路口延誤就相對較大；當公車乘客需求較大時，採用班表控制或班距控制則會有較低的站位延誤，其中又以班表控制較佳。
6. 當班距相當小時，採用純定時式號誌控制較佳，原因為路口的班表控制或班距控制會大量增加路口延誤，由於在班距短、公車班次密集的時候，路口號誌需常進入路線控制階層與補償模組，導致大量增加路口延誤，且在班次密集的情況下，站位延誤會相當低；當班距稍大時，採用班表控制，原因為適時的路口控制會使站位延誤降低，且不至於增加過多路口延誤；當班距較大時，採用定時控制，原因為公車班次較少，此時班表控制或是班距控制的影響相當有限，幾個方案間差別不大。
7. 本研究模擬績效顯示出，補償時相易導致路口延誤增大，當流量小或班距較大時，路口延誤影響較小，因此若額外考量橫向車流的損失，可額外插入一補償時相。

6.2 建議

1. 本研究僅模擬兩條主要幹道，且僅考慮直進，未來應擴充成為一完整路網型態，並加入其他轉向，且公車運行不單只有於幹道上運行，也應擴充至更多路線或模擬公車運行於公車專用道的情形。另外，本研究中不探討違規行為、路邊停車行為，將來亦可加入研究。
2. 本研究公車僅能搭載旅客，且不考量公車容量，公車停站時間僅考量進出站與乘客上車的時間，實際上應考量旅客上下車，以及公車是否滿載的影響。

3. 本研究績效值僅考量以延誤成本作為績效函數，包括站位延誤與路口延誤，可額外加入一準點性績效的考量，並透過問卷詢問公車乘客，其對於準點性的重要度，以設計不同的權重。
4. 本研究路段的小客車推進行為，目前採用車隊擴散模式，其中各項參數均為假設，未來可實際校估該值，以更精確的描述路段的車輛推進行為。至於公車的推進，由於本研究僅以平均旅行時間的上下 0.5 倍的亂數值作為路段的旅行時間，同樣建議可針對公車的推進作更精準的預估。
5. 本研究模擬僅比較小客車流量值、公車班距與公車站位乘客，未來可針對不同的幹道與支道流量，設定不同的綠燈時比，或其他控制參數進行比較。
6. 本研究號誌設計中，並未加入定時式號誌時制的連鎖，由於當從適應式號誌時制時相或補償時相回到定時號誌時制時，並未能回到連鎖基準點上，因此未來可考慮如何增加定時式號誌連鎖機制，以同時增進小客車續進的能力。



參考文獻

1. A. Essam Radwan, Jamie W. Hurley, JR, "Macroscopic Traffic Delay Model of Bus Signal Preemption", Transportation Research Record 881, 1982.
2. A. Manar, K. G. Baass, "Traffic Platoon Dispersion Modeling On Arterial Streets", Transportation Research Board 75th Annual Meeting January 7-11, Washington, D. C., 1996.
3. Bang, K. L. and Nilsson, L. E., "Optimal Control of Isolate Traffic Signals.", ARRB Proc., Vol. 8, pp. 16-24, 1976.
4. Bill Alan Cisco, Snehamay Khasnabis, "Techniques To Assess Delay and Queue Length Consequences of Bus Preemption", Transportation Research Record 1494, 1995.
5. David E. Castle, John W. Bonnaville, "Platoon Dispersion over Long Road Links", Transportation Research Record 1021, 1986.
6. Feng-Bor Lin, Donald Cooke, Sangaranathan Vijayakumar, "Use of Predicted Vehicle Arrival Information for Adaptive Signal Control – An Assessment", Transportation Research Record 1112, 1987.
7. Gang-Len Chang, Meenakshy Vasudevan, Chih-Chiang Su, "Bus-Preemption Under Adaptive Signal Control Environments", Transportation Research Record 1494, 1995.
8. Gartner, N.H., "OPAC: A demand responsive strategy for traffic signal control.", Transportation Research Record, 906, pp. 75-81, 1983.
9. Henry, J.J., J.L. Farges and J. Tuffal., "The Prodyn Real Time Traffic Algorithm.", IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, pp. 305-310, 1983.
10. Hunt, P. B., Robertson, D. I., Bretherton, R. D., and Winton, R. I., SCOOT – a Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. Department of Transport, TRRL Laboratory Report LR 1014, Crowthorne, 1981.
11. Joseph A. Wattleworth, Kenneth G. Courage, Charles E. Wallace, "Evaluation of Bus-Priority Strategies on Northwest Seventh Avenue in Miami", Transportation Research Record 626, 1977.
12. Kay W. Axhausen, Hans-Georg Korling, "Some Measurement of Robertson's Platoon", Transportation Research Record 1112, 1987.
13. Khaled Al-Sahili, William C. Taylor, "Evaluation of Bus Priority Signal (BPS) Strategies in Ann Arbor, Michigan", Transportation Research Board 75th Annual Meeting January 7-11, Washington, D. C., 1996.
14. Lowie, P. R., "The SYDNEY Co-ordinated Adaptive Traffic System : Principle, Methodology, Algorithms." International Conference on Road Traffic Signalling, The institution of Electrical Engineers, London, UK, 1982.

15. Matthew I. Koch, Daniel C. Chin, Richard H. Smith, "A Network-Wide Approach to Optimal Signal Light Timing for Integrated Transit Vehicle and Traffic Operations", Transportation Research Board 75th Annual Meeting January 7-11, Washington, D. C., 1996.
16. Mauro, V. and C. Di Taranto., "UTOPIA.", IFAC Control, Computer, Communication in Transportation, Paris, France, pp. 245-252, 1989.
17. M. G. Mowatt, P. Brinckerhoff, "Transit Signal Priority : A Regional Implementation", 65th ITE Annual Meeting, August 1995.
18. Miller, A. J., "A Computer Control System for Traffic Network." Proc. Second Intern. Symp. On Theory of Road Traffic Flow, London, U.K., pp. 201-220, 1963.
19. Miomir Ivanovic, Tom Halterman, Mark Yedlin, Frederick R. Childs, "Assessing The Impact of Signal Preemption and Coordination on LRT Operations Using Simulation", Transportation Research Board 76th Annual Meeting, January 12-16, Washington, D. C., 1997.
20. Nagui M. Rouphail, "Operational Evaluation of Bus Priority Strategies", Transportation Research Record 994, 1984.
21. Patrick T. McCoy, Elizabeth A. Balderson, Richard T. Hsueh, Abbas K. Mohaddes, "Calibration of TRANSYT Platoon Dispersion Model for Passenger Cars Under Low-Friction Traffic Flow Conditions", Transportation Research Record 905, 1984.
22. Samuel R. Seward, Robert N. Taube, "Methodology for Evaluating Bus Actuated, Signal-Preemption Systems", Transportation Research Record 630, 1977.
23. Snehmay Khasnabi, Rama K. Rudraraju, "Optimal Bus Headways For Preemption : A Simulation Approach", Transportation Research Board 76th Annual Meeting, January 12-16, Washington, D. C., 1997.
24. Srinivasa R. Sunkari, Phillip S. Beasley, Thomas Urbanik II, Daniel B. Fambro, "Model to Evaluate the Impacts of Bus Priority on Signalized Intersections", Transportation Research Record 1494, 1995.
25. S. Khasnabis, R. R. KARNATI, R. K. Rudraraju, "A Netsim-Based Approach to Evaluate Bus-Preemption Strategies", Transportation Research Board 75th Annual Meeting January 7-11, Washington, D. C., 1996.
26. T. Y. El-Reedy, R. Ashworth, "The Effect of Bus Detection on the Performance of A Traffic Signal Controlled Intersection", Transpn Res. Vol. 12, pp. 337-342, 1978.
27. Vincent, R.A. and J.R. Peirce. , "Mova: Traffic Responsive, Self Optimizing Signal Control for Isolated Intersections", TRRL Report LR170, Crowthorne, 1988.
28. Wann-Ming Wey, R. Jayakrishnan, "A Network Traffic Signal Optimization Formulation With Embedded Platoon Dispersion Simulation", 76th TRB Annual, Paper No.971337, 1997.

29. 交通部運輸研究所，「2001 年台灣地區公路容量手冊」，民國 90 年 3 月。
30. 何志宏，「現代交通控制學-理論模式與實務應用」，民國 78 年 1 月。
31. 顏贊峰，「公車優先號誌控制策略於無設路口之應用」，中央大學土木工程研究所論文，86 年 6 月。
32. 李紹榆，「公車優先通行與智慧型全觸動交通號誌整合控制之研究」，中央警察大學交通管理研究所碩士論文，民國 86 年 6 月。
33. 陳文粹，「配合公車專用道公車優先號誌時制設計之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 87 年 6 月。
34. 吳育婷，「公車優先號誌控制策略之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 88 年 6 月。
35. 吳淵展，「公車絕對、條件與補償優先號誌時制之研究」，中央大學土木工程研究所碩士論文，民國 88 年 6 月。
36. 李政聰，「幹道公車優先通行號誌控制模式之研究」，中央警察大學交通管理研究所碩士論文，民國 88 年 6 月。
37. 鄭雄飛，「考慮公車車隊之公車優先號誌模擬分析」，台灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 89 年 6 月。
38. 謝有筆，「臺北市路口公車優先號誌控制系統實證之研究」，中央警察大學交通管理研究所碩士論文，民國 90 年 6 月。
39. 周志昇，「路口公車優先號誌設置準則之研究-以臺北市為例」，中央警察大學交通管理研究所碩士論文，民國 90 年 6 月。