

多重代理人系統應用於輕軌列車運行 調度模擬之研究

THE APPLICATION OF MULTI-AGENT SYSTEMS TO LIGHT RAIL TRAIN OPERATION SIMULATION

陶冶中 Chi-Chung Tao¹

江品瑩 Pin-Ying Chiang²

(102 年 12 月 24 日收稿，103 年 3 月 7 日第 1 次修改，103 年 5 月 1 日定稿)

摘 要

輕軌運輸系統相較於其他軌道運輸系統而言，具有造價成本低、施工期短、路權選用彈性高之特性，其運量亦可達中運量水準，因此已成為我國各縣市政府推動捷運建設的另一替選方案。目前國內尚無輕軌運輸系統的實際營運經驗，多數文獻偏重於平面輕軌優先號誌課題之探討。因此本研究之模擬模式，除考量平面交叉路口特性之外，亦考量不同路權之影響，探討延誤產生時，如何因應延滯情境而啟動營運策略，維持服務品質。本研究以多重代理人系統為基礎，依照系統功能性與服務對象，劃分出列車、車站、路口與區域路權等四種代理人，其功能分別為：列車運行控制、判斷車站之停等時間、判斷優先號誌啟動與否、監督管理範圍內之代理人與判斷調度策略啟動與否。未來整體系統架構係設定輕軌車輛為鋼輪鋼軌系統，以 GPS 為車輛定位系統，並具備車載通訊設備與軌旁定位設施，列車運行則為移動閉塞制；車站區分為一般車站與轉運站；優先號誌雖以絕對優先為主，但於情境分析時納入條件優先；營運策略則有站間趕點與縮短班距。

-
1. 淡江大學運輸管理學系副教授（聯絡地址：25137 新北市淡水區英專路 151 號淡江大學運輸管理學系；電話：(02) 26215656 Ext. 2983；E-mail：cctao@mail.tku.edu.tw）。
 2. 淡江大學運輸科學研究所碩士。

關鍵詞：輕軌運輸系統；多重代理人系統；優先號誌

ABSTRACT

Comparing with other rail transit systems, LRT (Light Rail Transit) has become a better alternative to construct MRT in Taiwan because of its advantages such as low cost, short period of construction, flexibility of ROW (Right of Way) and similar capacity with a medium-capacity transit system. So far there is no LRT in operation in Taiwan and most of research studies are full of discussions surrounding the signal priority for LRT at intersections. Therefore, the proposed simulation model in this study aims at providing better LRT operation strategies to ensure service quality in case of delay occurrences for scenarios with signal priority conditions and different types of ROW. According to system functions and objects to be served, four types of agent including trains, stations, intersections and regions are classified based on multi-agent systems. The functions are used to control train movement, determine waiting time at stations, give signal priority and implement operation strategies with concerned agents. The proposed LRT technical system architecture consists of wheel-rail rolling stock, GPS-based on board equipment, communication network among train, a control center and track-side facilities. Moving Automatic-blocking System is also assumed as the train control system. Stations are classified into general stations and transfer stations. An absolute priority-based signal strategy will be used in this study, while partial signal priority strategy is only used for scenario analysis. Two types of operation strategy are recommended: one is to speed up to reduce running time and the other is to shorten headway.

Key Words: Light rail transit system, Multi-agent systems, Signal priority

一、前 言

輕軌運輸系統 (light rail transportation, LRT) 於國外已發展百餘年，是由傳統電車演變而來的公共運輸系統。相較於其他軌道運輸系統，輕軌具有造價成本低、施工期短、路權選用彈性高的特性，運量亦可達中運量的水準，因此已成為各縣市政府推動捷運建設的另一優先替選方案。輕軌最大的特性在於路權選擇之彈性，不僅可如捷運系統具有專用路權，亦可如公車以混合路權的方式營運。然而，若輕軌行駛於平面道路時，必將面臨號誌化路口的交通控制問題。根據交通部的日本輕軌系統考察報告^[1]，廣島電車系統於總旅行時間中，運行時間約占 54%，上下車時間約占 12%，等候其他車輛時間約占 3%，等候號誌時間約占 31%，由此可見，號誌化路口對於輕軌的營運效率影響甚大。

從系統整體績效的角度而言，當列車產生延滯時，若未能及時紓解，即可能造成延滯的擴散，影響原本的列車運行計畫，而損及服務品質。因此，輕軌雖有選擇路權的高度彈性，亦隱含延滯擴散的風險。由於輕軌在國外的發展已久，相關的研究課題既多元又豐富，

國內則尚無實際營運經驗，多以探索性或規劃性研究為主，且偏重於平面輕軌優先號誌的研究課題。有鑒於此，本研究除了考量平面交叉路口之特性外，亦考慮不同路權的情況下，如何因應延滯情境而啟動營運策略，維持服務品質。本研究嘗試引進多重代理人系統概念，建構不同路權下輕軌列車調度策略的模擬模式。

二、文獻回顧

2.1 輕軌運輸系統

國內外有關輕軌運輸系統的定義甚多，如英國則將其定義為「以電力驅動列車之都會型軌道系統且可行駛於不同路權」。交通部頒訂之「輕軌系統建設及車輛技術標準規範」^[2]中，則將其定義為「有人駕駛、使用導引、電力驅動之客運運輸系統，可因地制宜，同一路線可單獨或混合採用專用路權、隔離路權、共用路權；相較於高運量或中運量鋼軌鋼輪捷運，輕軌系統之車輛具軸重較輕、車輛界限較小、轉彎能力較強、爬坡能力較強、制動能力較高之特性」。由此可知，輕軌多被定義為鋼輪鋼軌系統，而路權則根據服務定位來決定。本研究參酌國內相關單位近年之國外考察報告書^[2-8]，彙整各國輕軌系統之路權、控制方式、服務尖峰班距與速度等營運特性，如表 1 所示。

表 1 國外輕軌系統營運特性

國 家	系統名稱	路權	控制	尖峰班距 (秒)	速度 (公里/時)
日 本	廣島電鐵	B、C 型	司機/號誌	4	最高速度 60
	京阪電鐵	B、C 型	司機/號誌	5	最高 75 (B 型) 最高 30 (C 型)
法 國	T1	B 型	司機/號誌	5	最高 70
	T2	A 型	司機	5	最高 70
	T3	B 型	司機/號誌	2	最高 70
	T4	B、C 型	司機/號誌	6	最高 70 (B 型) 最高 30 (C 型)
	波爾多	B、C 型	司機/號誌	4	最高 60
英 國	道克蘭	A 型	電腦控制	3	最高 80
新加坡	盛 港	A 型	電腦控制	3	最高 70
中 國	香 港	B 型	司機/號誌	2	最高 80
說明：A 型路權 (專用路權)：輕軌行駛之全線路段與平面道路完全隔離。 B 型路權 (隔離路權)：輕軌於平面道路之交叉路口採用優先通行號誌處理，其餘路段則設有隔離設施。 C 型路權 (共用路權)：輕軌列車與平面道路車輛共同行駛的路段。					

技術特性上，列車多採模組化概念製造，可提供不同長度之輕軌列車，但一般較少超過 45 公尺。其他性能方面，根據 Vuchic^[9] 研究指出，可分為 4 軸、6 軸與 8 軸而有所不同，列車設計速度最高可達 120 km/h，營運速度一般位於 18 ~ 40 km/h。不同軸數之列車運轉性能如表 2 所示。

表 2 列車運轉性能

性能屬性	車 種		
	4 軸	6 軸	8 軸
最小轉彎半徑 (m)	12~20	13~25	15~20
最大加速度 (m/s^2)	0.9~1.8	1.0~1.7	1.0~1.9
最大速率 (km/h)	70~80	65~100	60~80
減加速度 (m/s^2)	1.0~1.5	1.0~1.7	1.0~1.9
正常／緊急	2.3~2.7	2.7~3.0	2.0~3.0
最大坡度%	4~6%		

資料來源：Vuchic^[9]。

一般軌道運輸系統基於安全考量，列車之間應保持一定的距離以避免發生追撞事故，過去多採固定閉塞區間行車制，近年則漸以移動自動閉塞區間行車制為主，後者係利用通訊技術紀錄列車之間的相對位置，依據前後列車之間的距離判斷是否在安全範圍內，常見的技術如軌道電路與無線通訊。

多數輕軌運輸系統在平面道路上會採用優先號誌，取得優先通行權。基於安全考量避免與其他車流衝突，相關號誌設施的設置與燈號顯示方式須有所差別，燈號顯示方式以箭頭指示最為有效^[10-13]。一般而言，優先號誌種類可分為被動式優先 (passive priority) 與主動式優先 (active priority) 兩種^[14]，前者係藉由蒐集輕軌營運歷史資料作為預測優先號誌的基礎，以便適時適地滿足輕軌通行需求，多用於專有路權上，如 Brilon 與 Laubert^[15] 研究中以縮短號誌週期並配合取消左轉方式來調整號誌時制週期，蘇昭銘等^[16] 則以調整時差與綠燈時比的方式調整時制；後者優先方式係利用設置偵測器來預測到達路口時間，多用於非專有路權，並可考量其他車流量來決定優先程度，如 Tighe 與 Patterson^[17]、Muir^[11]、林胤宏^[18] 等研究即以絕對優先、條件優先的情境，進行個別績效差異的比較。

2.2 列車運行模式與調度策略

多數研究對於列車運行模式皆以行車動力學為基礎^[19-22]，且可根據不同閉塞系統加入運行限制式，如 Li 與 Gao^[21] 以移動閉塞區間作為行車控制基礎，以最小安全跟車距離作為限制式，研究發現，當行車密集程度越大時越容易產生延滯。林琮欽^[22] 除以移動閉塞

區間行車制為主之外，亦加入模糊理論，建立模糊跟車規則。若研究中欲探討機電系統對於行車之影響時，除以基本行車動力學為基礎建立列車機械特性之外，尚加入機電相關限制式，預測列車於各處加速度、速度、牽引力、行駛阻力、功率與能源消耗等。綜合言之，列車最常使用的模式有加速模式、等速模式、惰性運轉模式、減速模式、再生電力煞車模式等 5 種^[20]。

在列車調度策略方面，Li 等人^[23]在總延滯時間為最小之目標下，以調整列車離站的時間與順序為策略，借助基因演算法模仿生物演化的過程，以全域搜尋演算法進行求解。李治綱等人^[24]則以站間趕點、月台趕點、調整前車（後車）間距、刪除列車等策略進行情境模擬。D'Ariano 等人^[25]提出一套電腦化的列車調度系統 ROMA (railway traffic optimization by means of alternative graphs) 的架構，該系統首先使用分支限定法計算列車的運行順序，再經由禁忌搜尋法選擇所有運行序列的解集中延滯最小的方案。回顧前述相關文獻可知，軌道列車運行研究方法大致可分為兩大類，一為數學規劃法，二為電腦模擬法，前者如基因搜尋法、分支限定法、禁忌搜尋法等；後者則以電腦強大的計算功能來處理，目前較常見的軌道列車模擬軟體有^[26]：

1. RAILSIM：此軟體為北美鐵路最常使用的軌道模擬軟體，內建具有龐大的車輛參數數據庫，能提供使用者自訂列車牽引力與阻力的模型，其核心在於以列車績效計算器 (train performance calculator, TPC)，可模擬出不同情境下列車運行的動態行為結果，並輸出各類績效分析報表。
2. RAILSYS：此軟體已廣泛使用於歐洲之鐵路營運公司、工程設備供應商、工程諮詢機構與科學研究教學機構。該軟體擅長處理既有鐵路或新建線路、車站以及路網的比較評估以及列車運行計畫的編排與驗證。內建模組有設施管理模組、時刻表管理模組、模擬管理模組以及績效分析模組。
3. OPENTRACK：此軟體係由瑞士蘇黎世聯邦理工大學 (ETH) 所開發，最大的特色在於提供微觀的模擬分析，能按照所輸入之參數模擬出列車於車站的運行狀態，並計算出績效指標。此外，亦能設定多種延滯事件，分析許多情境對於列車運行狀態的影響。
4. DYNAMIS：此軟體能計算出列車運行速度、距離與耗能，亦提供節能控制算法，還可嵌入 RAILSYS 系統進行列車動態運行的計算。

2.3 文獻評析與小結

回顧國內外相關文獻後，本研究將設定輕軌運輸系統採用鋼軌鋼輪，輕軌列車並具有 GPS 系統與車載通訊設備，以利於行控中心與司機員連繫，且路線上具備軌旁定位設施。在此技術架構下，列車每秒的位置皆可顯示於行控中心，行車控制則以移動自動閉塞區間系統為基礎。在號誌控制部分，由於輕軌營運初期，民眾對輕軌運行尚未熟稔，基於安全考量仍應以絕對優先為主。列車運行模式則以行車動力學為建構基礎，但不探究坡度、轉

向彎與機電系統對於加減速之影響，故列車運行模式上僅有等速運行、加速運行、減速運行 3 種。列車調度部分，一般採用趕點策略、縮短發車班距與加派備用車上線等策略來抑制延滯擴散。本研究限於時程與經費資源，僅採用趕點與縮短發車班距兩種策略，並以列車總延滯時間、平均總旅行時間與平均站間旅行時間作為績效評量依據。在研究方法的選擇上，數學規劃法雖有值得參考之處，但考量國內尚無輕軌實際營運經驗，且亦有學者提出「當無實際營運經驗時，建議以模擬法為佳」^[24,26]，因此，本研究乃決定採用電腦模擬法。許多列車運行模擬之套裝軟體為符合在地化之需求與情境，採用 C++ 程式語言進行程式撰寫，本研究亦然。

三、研究方法與模式建構

3.1 多重代理人系統

多重代理人系統源自於複雜性科學 (complexity science) 中的複雜適應性系統 (complex adaptive system, CAS)，代理人 (agent) 是能搜尋環境並作成決策的模型單位。此方法試圖從複雜系統的個體行為層面建立個體的相同結構微觀模型，其基本思維係根據複雜系統的特點萃取出複雜系統的個體模型，進行對各個個體之間的關係及其相互作用之分析而建立個體與個體的交互模型，並在一定的綜合環境下運行，經由個體的相互作用而表現出複雜系統的宏觀整體行為。

多重代理人系統在設計上可分為審議型、反應型與混合型，一般來說，若需透過兩種以上模組進行運算後方能求解者係以審議型為佳；若為簡單規則或緊急事件者則以反應型為佳，多數研究均以混合型來處理，除能保有審議型之精密計算能力外，亦能兼顧反應型之效率，再者，在問題求解過程中皆借助電腦模擬，其特點在於運算速度快、具有分散式計算能力、可自下而上 (bottom-up) 建構模式、模式重覆使用性高、模擬的動態性與靈活性高、可有機化 (organically) 結合系統宏觀與微觀行為等，因此成為本研究所採用之主因。

關於多重代理人的理論與模式，目前有兩大發展方向：一是以分散式人工智慧 (distributed artificial intelligence, DAI) 為基礎而擴展的各種理論與技術；另一則是以 CAS 為理論基礎的多重代理人模式建構 (agent-based model, ABM) 與應用^[27]。近年來，多重代理人系統漸已廣泛應用於運輸課題，例如：交通號誌控制^[28-30]、車載資通訊^[31]與列車調度^[32,33]，且大多採用 ABM 為核心方法，本研究亦然。

3.2 系統組成

本研究依照人、車、路以及中心進行代理人劃分，可分為車站代理人、列車代理人、路口代理人與區域路權代理人四種。由於本研究並非建構微觀模擬模式，故簡化輕軌 C 型路權之運作流程。本研究多重代理人系統之組成如圖 1 所示。

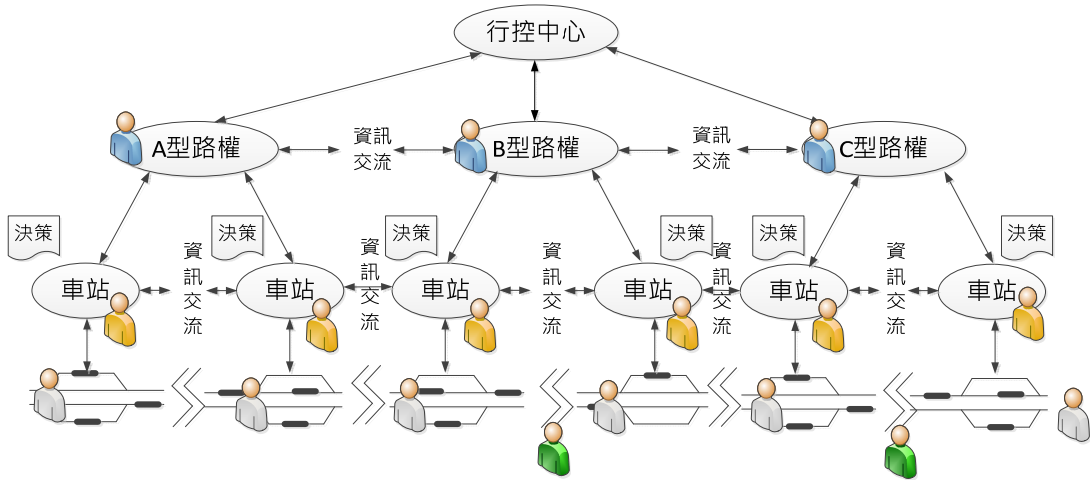


圖 1 本研究多重代理人系統之組成

3.2.1 列車代理人

軌道列車運行控制係以初速度、加減速度與當前位置作為投入參數，藉由梯形公式將行車動力學轉換成列車速度、位置與時間公式作為運算式，以 Li 與 Gao^[21] 提出之最小安全剎車距離公式作為條件式，判斷列車下一秒應採用何種運行模式，如下列公式 (1)-(6) 所示：

1. 運動學基本公式

$$S_{n+1} = S_n + \frac{1}{2}(V_n + V_{n+1}) \times dt \quad (1)$$

2. 距離計算公式

$$S_n = S_{n-1} + \frac{V_{n-1}(V_n - V_{n-1})}{a_n} + \frac{(V_n - V_{n-1})^2}{2a_n} \quad (2)$$

3. 時間計算公式

$$t_n = t_{n-1} + \frac{(V_n - V_{n-1})}{a_n} \quad (3)$$

4. 速度計算公式

$$V_{n+1} = V_n + dt \times a_n \quad (4)$$

5. 當給定特定距離 S ，($S_n < S < S_{n+1}$)，列車速度計算公式為

$$V = \sqrt{V_n^2 + 2(S - S_n)a_n} \quad (5)$$

5. 最小安全剎車距離公式

$$d_{\min} = \frac{v_f^2}{2b} + SM \quad (6)$$

其中，

S ：位移 (m)

V ：速度 (m/s)

t ：時間 (s)

a ：加(減)速度 (m/s²)

dt ：時間增量 (s)

n ：第 n 部列車

$d_{\min}$ ：最小安全剎車距離 (m)

b ：剎車率 (m/s²)

v_f ：前方列車速度 (m/s)

SM ：安全邊際距離 (m)， $SM = \tau \cdot v_f$ ， τ 為傳遞訊號時的延滯時間：1 秒

本研究在建構輕軌列車代理人時，將依照路線別進行劃分，同一路線由同一個列車代理人管理。

3.2.2 車站代理人

此係模擬列車到站之後，旅客上下車所需要的停站時間。停站時間之設定係根據交通部制定「交通技術標準規範捷運類車輛設計部：輕軌系統建設及車輛技術標準規範」^[2]中，建議停站時間以 25 秒為原則。在實務上，一般軌道運輸系統除須遵守相關法規規範外，亦視旅客量多寡而調整停等時間，如捷運系統將站等分為轉運站與一般車站，前者為不同路線的交會點，旅客量較多，故所需的停站時間長，如台北車站、忠孝復興站等。因此，本研究在建構車站代理人時，亦加入站等判斷的條件式而確定對應之停站時間。表 3 為車站代理人之規則庫。

表 3 車站代理人規則庫

路 權	限 制 式	判 斷 式
專有路權	停站時間	若滿足停站時間，則啟動列車離站 未滿足停站時間則駐車停等
非專有路權	停站時間 路口號誌燈為綠燈	若滿足 1 與 2，則啟動列車離站 僅未滿足其中一項，即須駐車停等

3.2.3 路口代理人

為模擬輕軌列車於平面路權上之運行狀況，本研究以路口代理人為判斷優先號誌執行與否之決策角色，並於路口設置上下游決策點，作為啟動與關閉優先號誌之觸發因子，並採用兩種優先號誌，分別為絕對優先與條件優先，說明如下：

1. 絕對優先

類似台鐵平交道控制方式，當輕軌列車通過上游決策點時，於時制計畫中插入綠燈，直到列車通過下游決策點之後才回到原本時制計畫。若後續列車有通行需求，則延續優先號誌綠燈時相直到列車完全通過路口為止。流程示意圖如圖 2 所示。

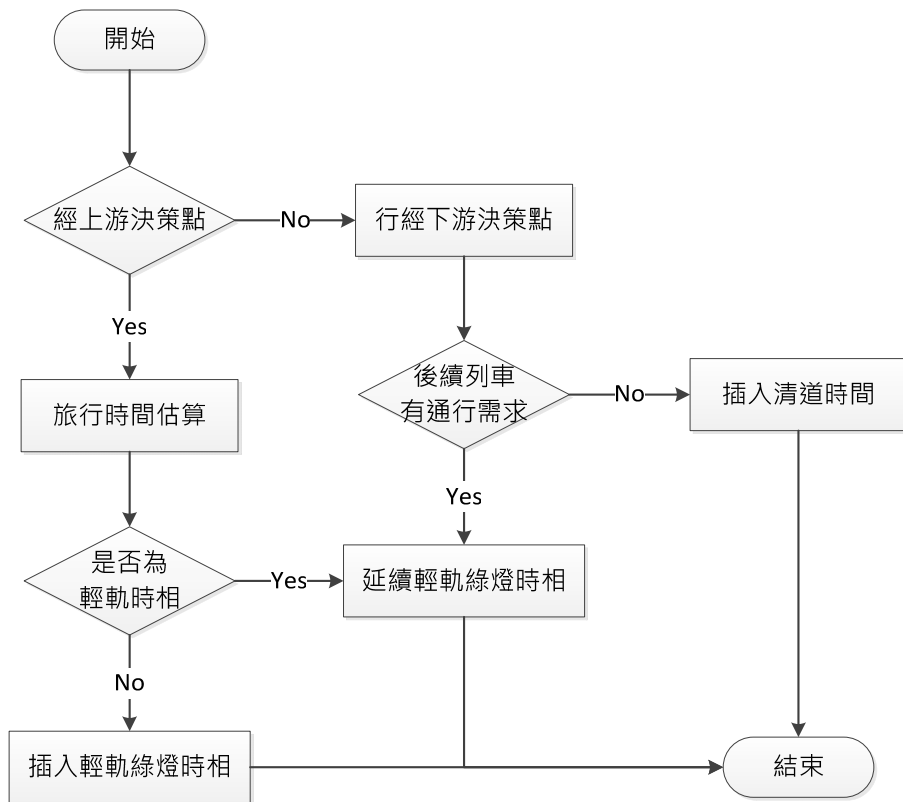


圖 2 輕軌絕對優先號誌控制流程

2. 條件優先

當輕軌列車通過上游決策點時，根據列車完全通過路口所需的時間與當時的燈號來判斷，若臨近路口為綠燈且剩餘綠燈時間足以讓列車通過路口時，則維持原時制計畫；剩餘綠燈時間不足則延長綠燈時間，但受到最大綠燈時間的限制。若臨近路口為紅燈，判斷已用的紅燈時間是否超過橫向最小綠燈時間，超過則中斷當前紅燈秒數；不足則開放到衝突

時相最小綠燈時間為止，如圖 3 所示。最大綠燈時間係根據 Wulf 與 Jason^[34]之建議，一般以綠燈時相的 1.25 倍或 1.5 倍來設計。最小綠燈時間則參考許添本^[35]之建議，採用下列公式：

$$G_m = 1 + 0.71D - 3 + 6 = 4 + 0.71D \quad (7)$$

其中，

D ：路口寬度（公尺）

G_m ： D 所對應之最小綠燈時間（秒）

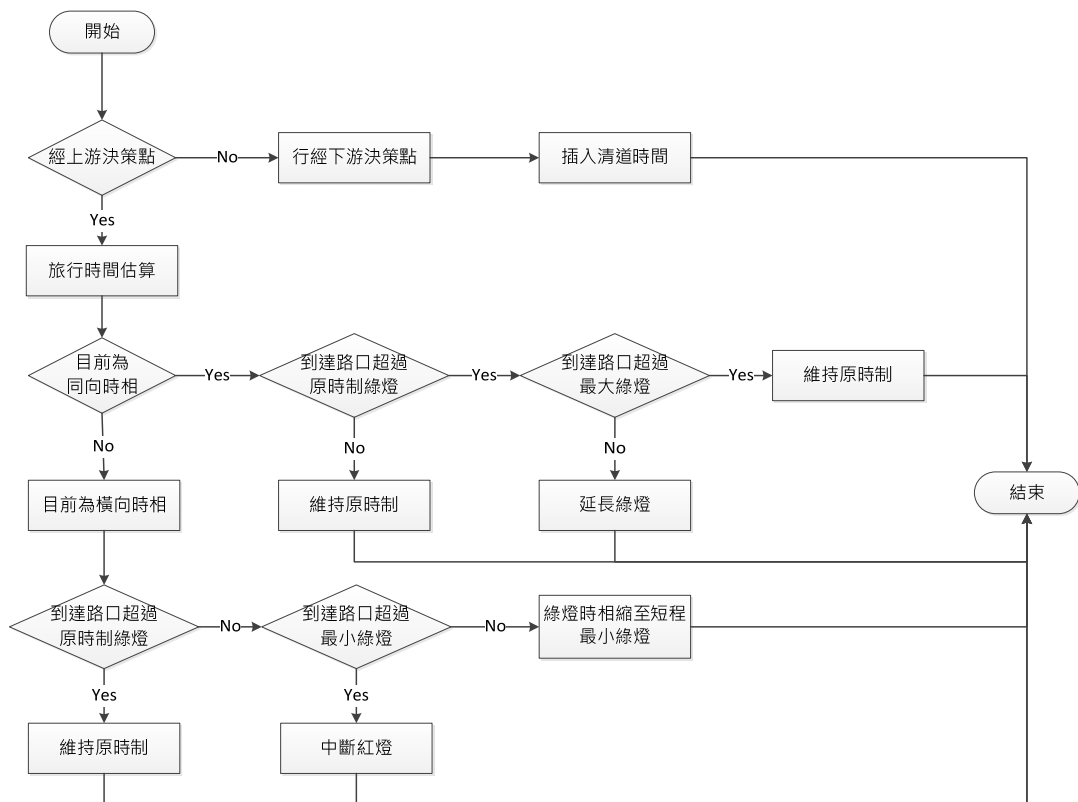


圖 3 輕軌條件優先號誌控制流程

3.2.4 區域路權代理人

區域路權代理人負責監督管理該路權下之列車代理人、車站代理人與路口代理人，並處理代理人相關請求。此外，為保持系統準點性與服務績效，經由區域路權代理人檢核管轄區內各列車班表，當延滯時間超過門檻值時，則啟動調度策略。本研究將參考台北捷運中運量之門檻值 120 秒作為啟動調度策略之參數，門檻值計算如下：

$$T_{\text{Threshold}} = T_{\text{arrival}}^{i,k} - T_{\text{timetable}}^{i,k} \quad (8)$$

其中，

$T_{\text{arrival}}^{i,k}$ = 第 i 車次在第 k 車站實際運行時間

$T_{\text{timetable}}^{i,k}$ 車次 i 在第 k 車站表定運行時間

績效指標方面，係以列車總延滯時間與平均系統總旅行時間來衡量，前者係記錄模擬時間內所有列車實際運行時間與表定運行時間班表之誤差；後者則計算自營運策略實施後之整體總旅行時間。列車總延滯時間與平均系統總旅行時間之計算公式分別為 (9) 與 (10)。

$$T_{\text{total delay}} = \sum_{i=1}^n (T_{\text{arrival}}^{i,k} - T_{\text{timetable}}^{i,k}) \quad (9)$$

$$T_{\text{total trvaltime}} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{k,m}^i)}{n} \quad (10)$$

其中， $T_{k,m}^i$ = 列車 i 從第 k 到 m 站之時間， k 為起點， m 為終點

為了更細緻觀察營運策略啟動之成效，將以平均站間旅行時間進行資料比對而觀察輕軌列車於各站的旅行時間變化，其計算公式如下：

$$T_{i,k,k+1}^{\text{travel}} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{k,k+1}^i)}{n} \quad (11)$$

其中， $T_{i,k,k+1}^{\text{travel}}$ 為車次 i 從 k 站到 $k+1$ 站所需之站間旅行時間

3.3 資訊交流與協商機制

由於安全為輕軌運輸系統運行之必要條件，任一代理人所產生之決策均不可違反，因此在確保行車安全與維持整體系統運作之目標下，須藉由彼此資訊交流與協調來完成任務。同一屬性與不同屬性代理人之互動關係說明如下：

3.3.1 同一屬性代理人

1. 列車代理人

同一路線之車次將歸屬於同一個代理人管理。基於行車安全限制，相鄰兩列車須保持一定安全距離，由於最小安全距離隨後車車速變化，因此欲判斷下一秒運行模式時，後車首先須取得前車位置，再根據目前車速計算出最小安全距離，並在不違反最高速限下，判斷下一秒運行模式。決策程序與結果如表 4 所示。

表 4 列車代理人決策程序與結果

群 體 層			個體層
後車車速	決策程序	決策結果	輸入參數
最 高 速	$D(i,i+1) > dmin$	等速運行	加速度 (= 0)
非最高速	$D(i,i+1) > dmin$	加速運行	加速度
非最高速	$D(i,i+1) > dmin$	加速運行	加速度
非最高速	$D(i,i+1) \leq dmin$	減速運行	減速度

註： $D(i,i+1)$ =前後車距離； $dmin$ =最小安全距離；輸入參數尚有初速度與位置。

2. 區域路權代理人

列車於系統中屬於動態資料，當轉換路權時，原先之路權代理人應將該列車資料傳送到下一個路權代理人，以便接手管理。

3.3.2 不同屬性代理人

1. 列車代理人與車站代理人

當列車臨近車站時，根據停車規則需減速前進，直到完全停車為止，其後再經由與車站代理人取得停站時間，待離站時間後加速前進。決策程序與結果如表 5 所示。

表 5 列車代理人與車站代理人決策程序與結果

群 體 層		個體層
決策程序	決策結果	輸入參數
$D(i, Station) \leq dmin$	減速前進	減速度
$T < Tdeparture$	駐車停等	加速度 = 0
$T \leq Tdeparture$	加速運行	加速度

註： T = 目前時間； $Tdeparture$ = 離站時間。

2. 列車代理人、口代理人與區域路權代理人

當列車通過上游決策點時，即向路口代理人提出通過路口之請求，並傳送當前位置、速度等資訊，再根據路口位置判斷優先號誌種類。若為絕對優先，則計算出到達路口時間，於到達前開放優先號誌；若為條件優先則透過相關計算邏輯判斷號誌策略（維持原時制、延長綠燈、中斷紅燈）。路口代理人將所得決策資訊傳送給列車代理人後，再自行判斷下一秒運行模式。當車站設於近端時，路口代理人除先取得列車相關資訊外，尚需向車站代理人取得停站時間，以便預估列車離站時間之燈號，再根據路口優先號誌類別產生對應決策，然後將資訊傳給列車代理人。決策程序與結果如表 6 與表 7 所示。

表 6 列車、路口與區域路權代理人決策程序與結果－絕對優先

群 體 層				個體層
決策程序 1	決策結果 1	決策程序 2	決策結果 2	輸入參數
$I.S \in \{\text{Absolutely Priority}\}$	插入綠燈	$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	等速運行	加速度 = 0
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	減速運行	減速度
		$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	加速運行	加速度
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	減速運行	減速度

註： $I.S$ = 路口位置；Absolutely Priority = 絕對優先； $D(i, I.S)$ = 列車與路口距離； d_{amin} = 減速至路口速限距離； V = 列車速度； V_{max} = 最高速限；輸入參數尚有初速度、位置；此表僅有部分的決策過程。

表 7 列車、路口與區域路權代理人決策程序與結果－條件優先

群體層				個體層
決策程序 1	結果 1	決策程序 2	決策結果 2	輸入參數*
$(\text{Sign}T(i, I.S) = G) \cap (TRG > T(i, I.S))$	維持原時制	$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	等速運行	加速度 = 0
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	減速運行	減速度
$(\text{Sign}T(i, I.S) = G) \cap (TRG = T(i, I.S))$		$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	加速運行	加速度
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	減速運行	減速度
$(\text{Sign}T(i, I.S) = G) \cap (TRG < T(i, I.S)) \cap (T(i, I.S) < TG_{max})$	延長綠燈	$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	等速運行	加速度 = 0
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	減速運行	減速度
$(\text{Sign}T(i, I.S) = Y)$		$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	加速運行	加速度
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	減速運行	減速度
$(\text{Sign}T(i, I.S) = R) \cap (TAR > TG_{min})$	中斷紅燈	$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	等速運行	加速度 = 0
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V = V_{max})$	減速運行	減速度
		$(D(i, I.S) > d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	加速運行	加速度
		$(D(i, I.S) \leq d_{amin}) \cap (V \neq V_{max})$	減速運行	減速度
$(\text{Sign}T(i, I.S) = R) \cap (TAR = TG_{min})$	中斷紅燈 2*	$(D(i, I.S) > d_{min}) \cap (V = V_{max})$	等速運行	加速度 = 0
		$(D(i, I.S) \leq d_{min}) \cap (V = V_{max})$	減速運行	減速度
$(\text{Sign}T(i, I.S) = R) \cap (TAR < TG_{min})$		$(D(i, I.S) > d_{min}) \cap (V \neq V_{max})$	加速運行	加速度
		$(D(i, I.S) \leq d_{min}) \cap (V \neq V_{max})$	減速運行	減速度

註： $\text{Sign}T(i, I.S)$ = 列車到達路口之燈號； G = 綠燈； Y = 黃燈； R = 紅燈； $T(i, I.S)$ = 列車到達路口時間； TRG = 剩餘綠燈時間； TAR = 已用紅燈時間； TG_{max} = 最大綠燈時間； TG_{min} = 最小綠燈時間； $D(i, I.S)$ = 列車與路口距離； d_{amin} = 減速至路口速限距離； d_{min} = 最小安全距離； V = 列車速度； V_{max} = 最高速限；輸入參數尚有初速度、位置；中斷紅燈 2 不足最小綠燈時間，需停等至最小綠燈時間後方可變換燈號。

3. 列車代理人與區域路權代理人

區域路權代理人僅處理管轄範圍內之代理人請求，因此當列車進入模擬系統時，即先根據位置分配給所屬的路權，路權代理人根據列車班表資料監督運行狀況。若發現實際運行班表與表定運行班表誤差超過門檻值時，則立即啟動調度策略。決策程序與結果如表 8 所示。

表 8 列車代理人與區域路權代理人決策程序與結果

群 體 層		個體層
決策程序	決策結果	對應結果
$T_{arrival}^{i,k} - T_{timetable}^{i,k} \geq T_{Threshold}$	啟動策略	修改最高速限或修正班表資料
$T_{arrival}^{i,k} - T_{timetable}^{i,k} < T_{Threshold}$	不啟動策略	

註： $T_{arrival}^{i,k}$ 第 i 車次在第 k 車站實際運行時間； $T_{timetable}^{i,k}$ 車次 i 在第 k 車站表定運行時間； $T_{arrival}^{i,k}$ = 門檻值。

4. 車站代理人與區域路權代理人

區域路權代理人除了身兼管理者的角色外，亦扮演監督者的角色，藉由檢核範圍內之車站的停等時間，確認各站決策所對應之停站時間與車站等級是否符合，若檢核結果有誤，則立即修正停站時間。決策程序與結果如表 9 所示。

表 9 車站代理人與區域路權代理人決策程序與結果

群 體 層		個體層
決策程序	決策結果	對應結果
$(S.L \in \{Normal\ Station\}) \cap (TS.L = TN.S)$	True	維持原停站時間
$(S.L \in \{Normal\ Station\}) \cap (TS.L \neq TN.S)$	False	修正成對應停站時間
$(S.L \in \{Transfer\ Station\}) \cap (TS.L = TT.S)$	True	維持原停站時間
$(S.L \in \{Transfer\ Station\}) \cap (TS.L \neq TT.S)$	False	修正成對應停站時間

註： $S.L$ = 車站等級；Normal Station = 一般車站；Transfer Station = 轉運站； $TS.L$ = 車站停站時間； $TN.S$ = 一般車站停站時間； $TT.S$ = 轉運站停站時間。

整體而言，當系統開始運作時，只要任一代理人發出請求，即開始進行資訊交流，且皆同時進行，本研究根據上述不同屬性之代理人組合，將整體輕軌列車運行調度流程之代理人關係網路繪製成圖 4。

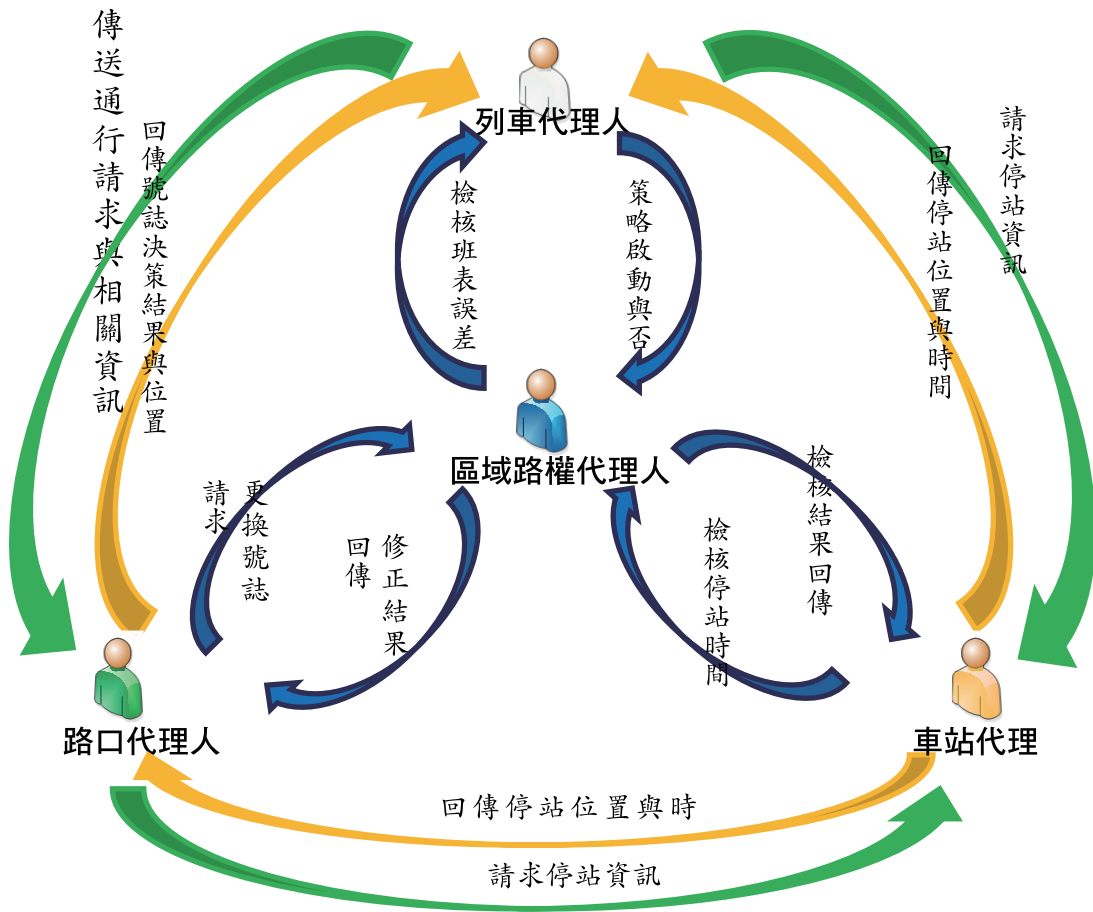


圖 4 本研究之多重代理人關係網路圖

四、實證分析

在行車控制系統為移動閉塞制之前提下，為確保模擬程式之可用性，本研究以極限班距進行程式確認 (verification)，檢測列車是否會發生追撞情況。經由程式確認結果，發現當班距為 40 秒時，已產生列車於站外停等之情形直至 30 秒時，系統即宣告終止而完成程式確認。

4.1 案例說明

本研究之實證分析對象為淡水捷運延伸線-淡海輕軌，其系統最適路線方案係根據「淡水捷運延伸線可行性分析」之研究結果^[36]，共有兩條路線，分別為綠山線與藍海線。綠山線由捷運紅樹林站出發，往北經淡金公路直至濱海路往西進入新市鎮範圍，其中 G1 到 G4 為高架 A 型路權，G5-G8 為平面 B 型路權；藍海線由捷運淡水站出發，沿省道臺 2 乙線

往西布設，路線在紅毛城以東分為「臺 2 乙段」及「淡水老街段」，為服務於漁人碼頭，續往北進入淡海新市鎮範圍，B6-B8 為平面 B 型路權，其餘為平面混合路權。根據高鐵局^[36]相關研究報告中說明第 1 期路網營運模式為綠 1 線 G1-G8 站以及綠 2 線 G1-G6-B6 站，路線如圖 5 所示。尖峰營運班距規劃為 3 分鐘。



資料來源：高鐵局^[36]。

圖 5 淡海輕軌第一期路線圖

4.2 相關參數說明

因目前淡海輕軌尚未建置，並無實際營運資料可供參考，僅能引用相關規劃報告或文獻研究結果，作為本研究設定參數之參考依據。

1. 路線資料

淡海輕軌第一期路網簡圖、各站位置與速限資料，分別如圖 6、表 10 與表 11 所示。

路口號誌資料包括號誌時相、路寬 (如表 12) 與綠燈時間參數 (如表 13)。

列車營運與運轉性能資料，如表 14 所示。

表 10 速限資料

路線別	A 型路權	B 型路權	號誌路口
路線 1	50 km/h	50 km/h	30 km/h
路線 2	50 km/h	50 km/h	30 km/h

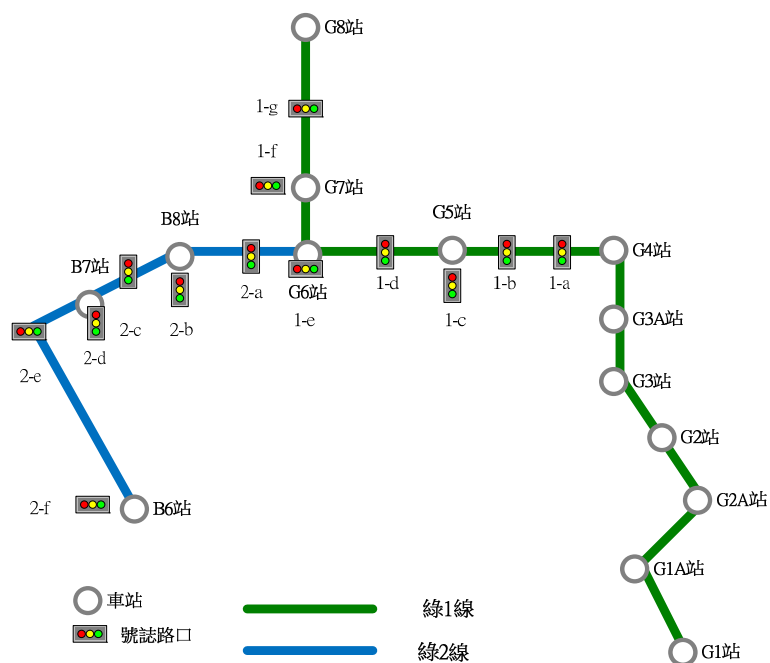


圖 6 淡海輕軌第一期路網簡圖

表 11 站間距離

路線別	運行區間		距離 (公尺)
綠 1 與綠 2 共線	G1 站	G1A 站	840
	G1A 站	G2A 站	945
	G2A 站	G2 站	960
	G2 站	G3 站	600
	G3 站	G3A 站	505
	G3A 站	G4 站	705
	G4 站	G5 站	995
	G5 站	G6 站	715
綠 1 線	G6 站	G7 站	535
	G7 站	G8 站	560
綠 2 線	G6 站	B8 站	585
	B8 站	B7 站	985
	B7 站	B6 站	760

資料來源：高鐵局^[36]。

表 12 路口號誌時相資料

路口	綠燈 (秒)	黃燈 (秒)	紅燈 (秒)	路寬 (公尺)*
1-a	40	3	75	40
1-b	55	3	42	30
1-c	73	3	42	30
1-d	75	3	42	40
1-e	45	3	40	50
1-f*	40	3	45	50
1-g*	40	3	45	50
2-a	108	2	42	50
2-b	104	4	40	50
2-c	50	3	37	30
2-d	45	3	42	45
2-e	35	3	82	45
2-f	40	3	70	30

備註：1-f、1-g 路口已封閉，無實際資料，採用與其道路幾何設計相符之路口作為參數輸入值。
資料來源：高鐵局^[36]、本研究調查之號誌資料。

表 13 路口號誌參數

路口編號	最大綠燈時間 (秒)	橫向最小綠燈時間 (秒)	輕軌黃燈 (秒)	輕軌全紅 (秒)
1-a	60	32	7	6
1-b	80	25	7	5
1-c	110	25	7	6
1-d	110	32	7	5
1-e	70	40	7	6
1-f	60	40	7	6
1-g	60	40	7	6
2-a*	135	40	7	6
2-b*	130	40	7	6
2-c	75	25	7	5
2-d	70	35	7	6
2-e	55	35	7	6
2-f	60	25	7	5

表 14 列車營運與性能資料

列車長度	30 公尺	
列車性能	加速度	1.0-1.3 (m/s ²)
	減速度	最大 1.5 (m/s ²)
發車班距	平均 360 秒，路線 1 與 2 交錯發車	

資料來源：交通部^[2]、高鐵局^[36]。

4.3 模式驗證

模式驗證 (validation) 的方式係將各站模擬的站間旅行時間與實際量測之時間進行比較，以 MAPE (mean absolute percentage error) 檢視模式是否具有代表性。根據 Lewis^[37] 評估準則顯示，本模式於各站間誤差皆小於 15%，屬於優良以上之水準，表 15 即為模擬時間與量測時間之比較結果。

表 15 站間旅行時間之驗證結果

站點	距離 (公尺)	模擬值 (秒)	實際值 (秒)	MAPE
G1-G1A	840	81.37	70.01	0.14
G1A-G2A	945	90.75	78.24	0.14
G2A-G2	960	92.08	79.27	0.14
G2-G3	600	55.81	53.49	0.04
G3-G3A	505	43.92	46.71	0.06
G3A-G4	705	63.15	61.22	0.03
G4-G5	995	95.21	87.33	0.08
G5-G6	715	70.22	62.76	0.11
G6-G7	535	47.67	49.13	0.03
G7-G8	560	49.69	49.48	0.00
G6-B8	585	53.93	56.62	0.05
B8-B7	985	94.50	82.69	0.12
B7-B6	760	74.41	66.71	0.10
總體誤差率				0.08

4.4 情境分析

本研究之模擬情境係考量路線總旅行時間為 15 分鐘，因此暖機時間切除時間以系統模擬時間前後 5 分鐘為主，總模擬時間為 300-6,900 秒。情境設計係選取延滯事件進行模

擬，分為 30、60、90、120 秒延滯，且命令延滯發生時間為 3,600 秒。營運策略則採兩種，分別為站間趕點策略與縮短班距，前者係將速限由 50 km/h 提升到 60 km/h，並將門檻值分為 120 秒、90 秒、60 秒，以觀察各門檻值對於情境的影響；後者則將原先的 180 秒班距縮短至 150 或 120 或 90 秒，門檻值維持在 120 秒，觀察各種班距的差異。本研究設計之 4 種情境分別說明如下：

1. 情境 1

此情境係於 A 型路權群組中，選擇一車站產生 30、60、90、120 秒延誤。實務上，容易發生停站時間增加之車站其人口密度較高。基於上述原因，本研究選擇 G3 站（淡金路北新路口）作為情境 1 之對象。經過模擬結果發現，以門檻值 60 秒，延誤 120 秒的延滯狀況最為明顯，但延滯擴散情形並不嚴重，推究其原因應與發車班距有關係，如圖 7 所示。

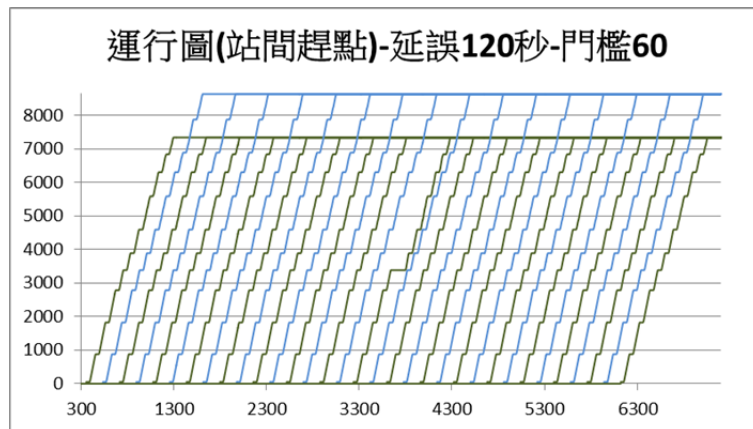


圖 7 情境 1-門檻值 60 秒延誤 120 秒之運行圖

從表 16 可知，總延滯時間受延誤列車為綠 1 線，且不同延誤時間下，延誤時間隨門檻值呈正向成長，其原因為當門檻值越大，可接受的班表誤差越大，因此延滯時間亦較長。整體而言，當門檻值為 60 秒時，趕點效果最佳。綠 2 線延滯時間均小於綠 1 線之延滯時間，原因為非直接受到延誤的列車，且發車班距密度不至於嚴重影響後續列車。

從表 17 之平均總旅行時間結果可知，綠 1 線於門檻值 120 秒之趕點效果較不顯著，原因為可接受班表誤差之範圍較大，且受延誤之列車因與班距密度關係，不易造成延滯擴散。綠 2 線其平均總旅行時間皆與無延誤之時間差距不大，甚至比無延誤之時間還要小，推測其原因為發生延誤列車為綠 1 線，而延誤時間比發車班距小的情形下，不易造成後續列車太大的影響。

在平均站間旅行時間部分，綠 1 線與綠 2 線均以延誤 120 秒、門檻值為 120 秒為範例說明，結果發現無延誤與延誤 120 秒並無顯著差異，如圖 8 與圖 9 所示。推測其原因係受到發車班距密度之影響。

表 16 情境 1 總延滯時間 (單位：秒)

總延滯時間	延誤時間	無策略	站間趕點		
			門檻值 60 秒	門檻值 90 秒	門檻值 120 秒
綠 1 線	30	58	54	63	72
	60	98	78	99	103
	90	132	96	109	117
	120	162	108	142	156
綠 2 線	30	58	54	63	72
	60	44	25	25	36
	90	52	34	43	33
	120	60	36	44	48

表 17 情境 1 平均總旅行時間 (單位：秒)

平均總旅行時間	情境 0	延誤時間	無策略	站間趕點		
				門檻值 60 秒	門檻值 90 秒	門檻值 120 秒
綠 1 線	965	30	967	967	967	968
		60	969	968	969	968
		90	972	969	970	969
		120	973	972	972	973
綠 2 線	1108	30	1108	1109	1107	1108
		60	1109	1109	1109	1107
		90	1108	1107	1111	1109
		120	1107	1107	1108	1106

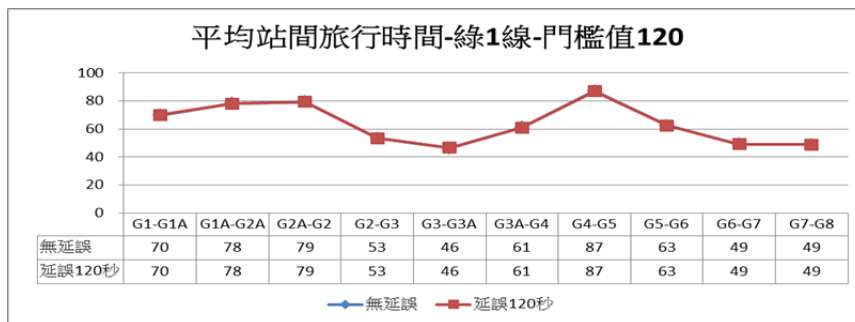


圖 8 情境 1—平均站間旅行時間—綠 1 線—延誤 120 秒

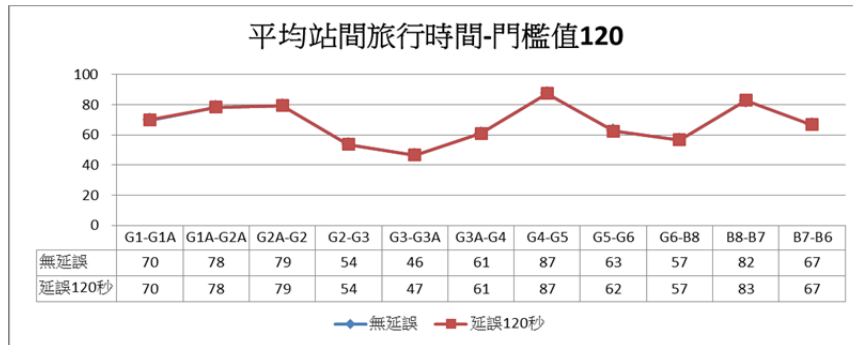


圖 9 情境 1—平均站間旅行時間—綠 2 線—延誤 120 秒

2. 情境 2

此情境係於 B 型路權群組中，僅選擇某一路口號誌從原本的絕對優先改為條件優先。本研究選擇路口 1-a，如圖 10 紅色圈選處，此處為淡水區中山北路與濱海路的交叉路口，係往來市區主要道路，且附近有大型量販店進駐，以絕對優先可能會對其他車輛產生嚴重的延滯，故於情境分析時，將該路口設計成條件優先。

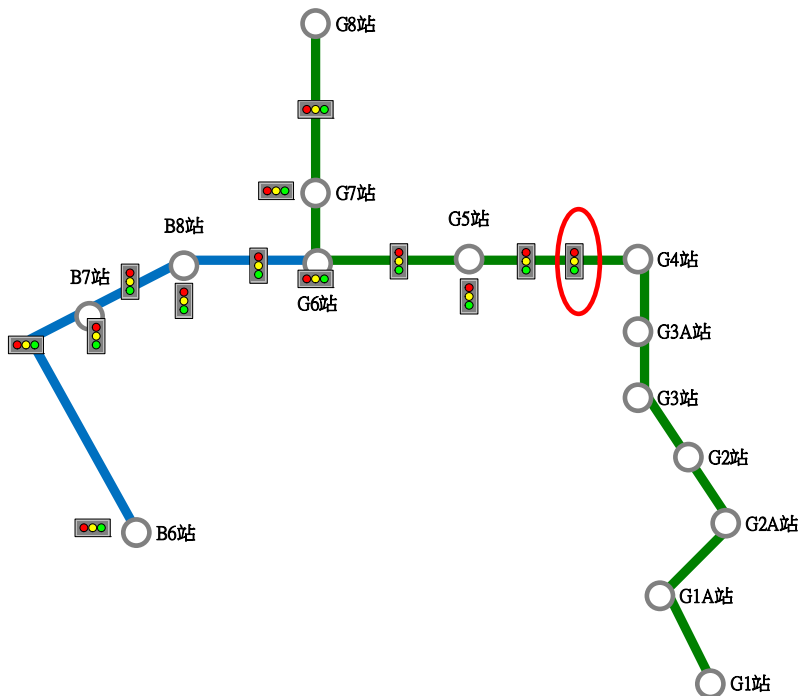


圖 10 情境 2 之路口位置圖

總延滯時間部分，由表 18 可發現當門檻值為 60 與 120 秒時，延滯時間雖比無策略還要小，但其延滯時間差異不大。推估原因可能為門檻值 60 秒可容忍班表誤差最小，易啟動策略。然而當車速越高，需保持之跟車距離越長，造成速度上的變異性。最特別的是，當門檻值為 90 秒時，能減少最長的延滯時間，此亦顯示該情境下，以門檻值 90 秒做為策略啟動之標準值最能提升整體績效。

表 18 情境 2 總平均總旅行時間 (單位：秒)

條件優先路口	1-a	無策略	站間趕點		
			門檻值 60 秒	門檻值 90 秒	門檻值 120 秒
總延滯時間	綠 1 線	196	180	119	187
	綠 2 線	220	97	41	137

在平均總旅行時間部分，表 19 中顯示無論是綠 1 線或綠 2 線，其門檻值 60 秒與 120 秒之平均總旅行時間均與無策略差異不大，而門檻值 90 秒效果最為明顯。整體而言，其績效仍比情境 0 低，平均增加 5-10 秒旅行時間，推估可能原因為路口 1-a 為條件優先時，至多需停等其最小綠燈時間 32 秒，因此計算平均總旅行時間時，必然會比情境 0 還要來的長。

表 19 情境 2 平均總旅行時間 (單位：秒)

條件優先路口	1-a	情境 0*	無策略	站間趕點		
				門檻值 60 秒	門檻值 90 秒	門檻值 120 秒
平均總旅行時間	綠 1 線	965	976	975	970	975
	綠 2 線	1108	1118	1113	1109	1116

註：情境 0 為所有路口均採用絕對優先號誌。

在平均站間旅行時間部分，由於路口 1-a 位置落在 G4-G5 站之間，因此從表 20 可發現此區間之平均站間旅行時間明顯地比情境 0 來的高，此亦說明絕對優先確能減少路口延滯時間。門檻值部分，整體而言，兩路線於門檻值 90 秒時，其延滯時間幾乎小於門檻值 60 秒，表示以門檻值 90 秒做為策略啟動之標準值最能提升整體績效。

3. 情境 3

此部分將結合情境 1 與 2，產生延誤車站同樣為 G3 站，選擇條件優先為路口 1-a (中山北路與濱海路口)，探討不同延誤時間與不同門檻值之結果。整體而言，僅在門檻值 60 秒、延誤 120 秒時，明顯影響到後車，此顯示在 180 秒班距下，延滯擴散程度較小，如圖 11 所示。

表 20 情境 2 平均站間旅行時間 (單位：秒)

路線別	站點	情境 0*	無策略	站間趕點		
				門檻 60 秒	門檻 90 秒	門檻 120 秒
綠 1 線	G1-G1A	70	70	70	70	70
	G1A-G2A	78	78	78	78	78
	G2A-G2	79	79	79	79	79
	G2-G3	53	53	53	54	53
	G3-G3A	46	47	47	46	46
	G3A-G4	61	61	61	60	61
	G4-G5	87	97	90	91	95
	G5-G6	63	63	63	63	63
	G6-G7	49	49	49	49	49
	G7-G8	49	49	49	49	49
綠 2 線	G1-G1A	70	70	70	70	70
	G1A-G2A	78	78	78	78	78
	G2A-G2	79	79	79	79	79
	G2-G3	54	53	54	53	53
	G3-G3A	46	47	47	47	47
	G3A-G4	61	61	61	61	61
	G4-G5	87	97	90	88	96
	G5-G6	63	63	63	62	63
	G6-B8	57	57	57	57	57
	B8-B7	82	83	83	83	83
	B7-B6	67	67	67	67	67

註：情境 0 為所有路口均採用絕對優先號誌。

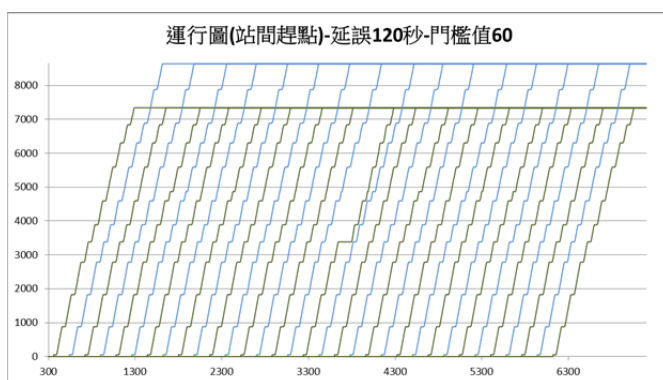


圖 11 情境 3-延誤 120 秒—門檻值 60 秒

在總延滯時間部分，從表 21 中可發現當綠 1 線延誤時間為 30 秒時，門檻值 60 秒已可立即反應，因此延滯最少，而門檻值 120 秒則與無策略結果接近，其原因推測為 120 秒對於班表之容忍誤差較大，因此系統容易將其視為正常情況，綠 2 現亦有相似之處。整體而言，門檻值 60 秒最能即時反應延誤，追回延滯的時間。

表 21 情境 3 總延滯時間 (單位：秒)

總延滯時間	延誤時間	無策略	站間趕點		
			門檻值 60 秒	門檻值 90 秒	門檻值 120 秒
綠 1 線	30	178	78	139	178
	60	191	161	154	153
	90	233	170	147	187
	120	355	220	286	306
綠 2 線	30	113	64	86	104
	60	115	84	88	121
	90	184	93	90	129
	120	217	96	98	193

在平均總旅行時間部分，從表 22 中可看出，門檻值與平均總旅行時間呈正向關係。特別的是，門檻值為 60 秒與 90 秒，部分延誤時間效果差異不大，然而當綠 1 線延誤時間越長，越能看出趕點效果的差異。綠 2 線則是當延誤超過 90 秒時，可明顯看出無策略與站間趕點的差異。整體而言，站間趕點策略確實能追回延滯的時間，回復原先班表。

表 22 情境 3 平均總旅行時間 (單位：秒)

平均總旅行時間	情境 0*	延誤時間	無策略	站間趕點		
				門檻值 60 秒	門檻值 90 秒	門檻值 120 秒
綠 1 線	965	30	977	968	973	974
		60	980	976	976	979
		90	982	973	973	979
		120	985	977	982	983
綠 2 線	1108	30	1114	1112	1113	1114
		60	1115	1113	1114	1114
		90	1119	1112	1112	1118
		120	1122	1113	1114	1120

註：情境 0 為所有路口均採用絕對優先號誌。

在平均站間旅行時間部分，從表 23 中發現該情境雖以指派 G3 站產生延誤，但該站前後路段卻無明顯增加延滯時間，僅能看出 G4-G5 站有些微小的影響，其原因為產生延誤時，只有一列車受到影響，而每輛列車都可能會遇到條件優先，故延滯時間較為明顯。整體來說，即使列車受到號誌延滯，均可在下一站回復原先的旅行時間，因此當列車到達 G5 站時，已可回復原先站間旅行時間。

表 23 情境 3 平均站間旅行時間 (單位：秒)

路線別	站點	情境 0*	無策略	站間趕點		
				門檻 60 秒	門檻 90 秒	門檻 120 秒
綠 1 線	G1-G1A	70	70	70	70	70
	G1A-G2A	78	78	78	78	78
	G2A-G2	79	79	79	79	79
	G2-G3	53	53	54	54	54
	G3-G3A	46	47	46	46	46
	G3A-G4	61	61	61	61	61
	G4-G5	87	98	93	94	98
	G5-G6	63	63	62	63	62
	G6-G7	49	49	49	49	49
	G7-G8	49	49	49	49	49
綠 2 線	G1-G1A	70	70	70	70	70
	G1A-G2A	78	78	78	78	78
	G2A-G2	79	79	79	79	79
	G2-G3	54	53	54	53	54
	G3-G3A	46	47	46	46	47
	G3A-G4	61	61	61	61	61
	G4-G5	87	99	92	94	98
	G5-G6	63	63	63	63	63
	G6-B8	57	57	57	57	57
	B8-B7	82	83	83	83	83
	B7-B6	67	67	67	67	67

註：情境 0 為所有路口均採用絕對優先號誌。

4. 情境 4

此情境以縮短班距為調度策略，選擇 G3 與 G6 做為發生延誤之車站，其中 G6 為兩路線交會點，且鄰近大型量販店與學區，門檻值為 120 秒，並以班距 150 秒、120 秒與 90 秒為策略，檢視不同班距策略下之各別系統績效。圖 12 為延誤 120 秒、班距縮短至 90 秒之

運行圖，從圖可知兩站發生延誤均為綠 1 線，班距縮短的時間發生在車站產生延誤後，亦即 3,600 秒以後。

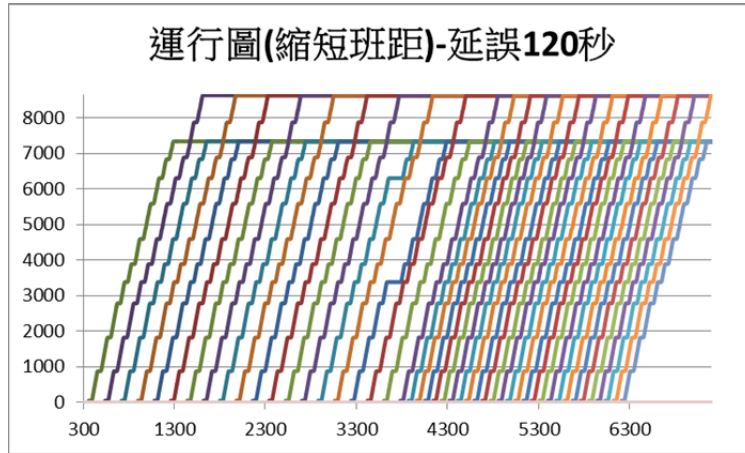


圖 12 情境 4—延誤 120 秒—縮短班距 90 秒

從表 24 之總延滯時間可知，當延誤 30 秒時，因未達門檻值 120 秒，因此系統將其視為可容忍範圍，因此未啟動策略。當綠 1 線班距縮短為 150 秒時，總延滯時間皆小於 120 與 90 秒，表示 150 秒已可趨緩延滯時間。然而，當延誤 120 秒時，無策略的結果反而優於其他方案，推測原因可能是與班距密度影響了前後車之車速，因此導致班距雖縮短，卻反而增加延滯時間。由於兩車站延誤均發生在綠 1 線，所以綠 2 線延滯時間明顯較少，對於縮短班距策略的結果與綠 1 線有相同之處。此亦顯示當延誤時間越長，班距越密的情況下，延滯時間不減反增。

表 24 情境 4 總延滯時間 (單位：秒)

總延滯時間	延誤時間	無策略	縮短班距		
			班距 150 秒	班距 120 秒	班距 90 秒
綠 1 線	30*	108	-	-	-
	60	157	163	179	178
	90	229	227	241	256
	120	279	294	298	326
綠 2 線	30*	5	-	-	-
	60	14	9	13	11
	90	17	8	18	15
	120	28	14	17	33

註：延誤 30 秒時系統將其視為正常，故不啟動策略。

在平均總旅行時間部份，從表 25 可看出雖受到延誤的列車均為綠 1 線，但受到班距密度的影響，因此延滯擴散情形並不嚴重，反而在縮短班距後，造成更長的延滯時間，以延誤 120 秒為例，發車班距 90 秒下，總旅行時間已超過無策略。

表 25 情境 4 平均總旅行時間 (單位：秒)

平均總旅行時間	延誤時間	無策略	縮短班距		
			班距 150 秒	班距 120 秒	班距 90 秒
綠 1 線	30*	970	-	-	-
	60	973	973	972	973
	90	977	976	976	977
	120	978	979	978	980
綠 2 線	30*	1103	-	-	-
	60	1103	1103	1104	1104
	90	1105	1103	1105	1106
	120	1105	1104	1105	1106

註：延誤 30 秒時系統將其視為正常，故不啟動策略。

在平均站間旅行時間部分，以延誤 120 秒為範例說明，經過多次模擬後發現兩條路線之平均站間旅行時間無論何種發車班距下，時間均無差異，如圖 13 與圖 14 所示。最大原因在於班距密度的影響，且當班距縮短以後，系統內通過車輛數越多，計算平均站間旅行時間時，時間越趨一致，因此難以看出變化。

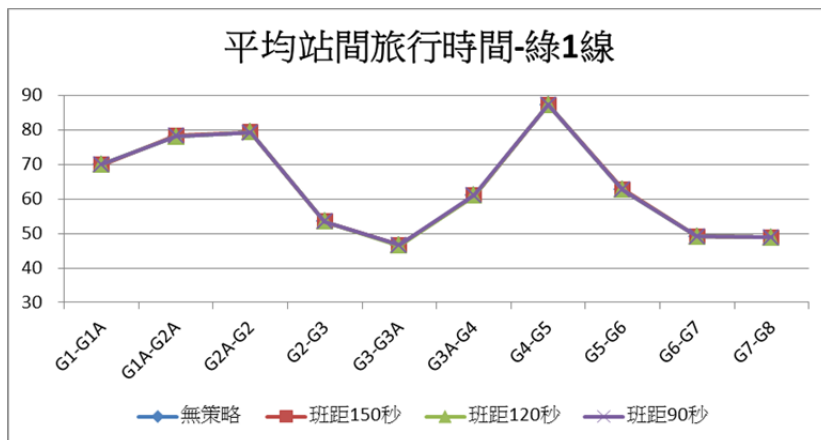


圖 13 情境 4—延誤 120 秒—綠 1 線

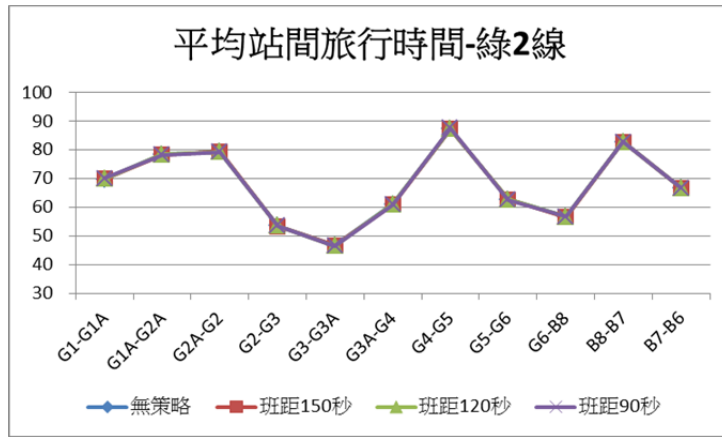


圖 14 情境 4—延誤 120 秒—綠 2 線

五、結論與建議

本研究旨在應用多重代理人系統建構輕軌列車調度模擬模式，其特別之處在於代理人之間具有資訊交換與協調機制，為使此機制能順利運作，須將各代理人輸出之參數量化為相同單位。此外，過去輕軌運輸系統多數以研究單一路權為主，而本研究範圍內包含兩種路權。考量到不同路權之營運方式略有差異，如 B 型路權於平面交叉路口受到號誌控制，須獨立設計出優先號誌計算邏輯之模組，而列車運行時亦須根據目前所在位置判斷欲遵行之限制。

在多種組合條件下，本模式運用多重代理人系統的特性來建構模擬模式，且系統整體誤差率為 0.08，說明本研究建構之模式對於真實世界具有一定的代表性。情境分析部分，經過多次模擬後發現，班距密度為影響調度策略績效之重要因素，延誤時間亦是如此。整體而言，當門檻值越大，可容忍班表誤差越大，越不易啟動策略，因此延滯時間較長。若延誤時間小於發車班距，受延誤之列車數少，可直接以提高速限的方式降低延滯，若以縮短班距作為調度策略時，須注意班距密度，當密度越大對於延誤的反應則越靈敏，而本研究探討之情境在現行班距設計下已有足夠的緩衝時間，因此延滯擴散之影響並不大。

本研究雖考量到平面交叉路口特性，但限於人力物力等因素並未採用微觀模擬，建議後續可納入國人駕駛行為、道路幾何設計等因素建構微觀模擬模式，並納入轉向彎與坡道對於加減速度的影響。待系統開始營運後，若能取得長期營運相關資料，可進行統計分配函數之校估與驗證，使模式更具實用性。此外，亦可設計不同優先號誌控制之情境，以增加研究之深度與廣度。

參考文獻

1. 交通部，考察都市輕軌系統對交通環境之影響及其相關管理法令制度，民國 94 年。
2. 交通部，輕軌系統建設及車輛技術標準規範，民國 100 年。
3. 交通部，考察都市輕軌系統對交通環境之影響及其相關管理法令制度報告書，民國 94 年。
4. 交通部運輸研究所，歐洲都市輕軌運輸系統考察報告，民國 89 年。
5. 交通部高速鐵路工程局，考察日本輕軌運輸系統設計施工與營運管理考察報告，民國 95 年。
6. 臺北市政府捷運工程局，赴德國、法國考察歐洲城市輕軌運輸及輕軌系統之運用考察報告，民國 97 年。
7. 臺北市政府捷運工程局，歐亞城市輕軌運輸及軌道工程之規劃考察報告書，民國 97 年。
8. 行政院，考察國外公車捷運系統規劃及營運機制報告書，民國 100 年。
9. Vuchic, V. R., *Urban Public Transportation: Systems and Technology*, 1st Ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1981.
10. Korve, H., "Guidelines for Design of Light Rail Grade Crossings", *ITE Journal*, Vol. 62. No.8, 1992, pp.25-27.
11. Muir, R. S., "A British Traffic Signal Control and Detection System for LRV Priority at Signaled Intersections", IEE Colloquium on Light Rapid Transit On-Street, 1989, pp.10/1-10/4.
12. Saffer, H. G. and Wright, T., "The Development of LRT Signal Control Techniques for the Sheffield Supertram System", *Road Traffic Monitoring and Control*, Institution of Electrical Engineers, 1994, pp.26-28.
13. Overton D. T., "Traffic Signal Control of LRV's", IEE Colloquium on Light Rapid Transit On-Street, 1989, pp.9/1-9/3.
14. McGinley, F. J. and Stolz, D. R., "The Design of Tram Priority at Traffic Signals", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 19. No.2, 1985, pp.131-151.
15. Brilon, W. and Laubert, W., "Priority for Public Transit in Germany", *Journal of Advance Transportation*, Vol.28, No.3, 1994, pp.313-340.
16. 蘇昭銘、黃佳龍、吳佩儒，輕軌運輸系統環境下之路口號誌設計分析，中華大學電子計算中心，新竹市，民國 101 年。
17. Tighe, W. A., and Patterson, L. A., "Integrating LRT into Flexible Traffic Control Systems: Light Rail Transit System Design for Cost-Effectiveness", *Transportation Research Board*, 1985, pp.213-220.
18. 林胤宏，「輕軌運輸系統交通控制策略之模擬分析」，臺灣大學土木工程學系碩士論文，民國 89 年。
19. 曾乙申，「捷運與輕軌供電系統電腦化模擬（上）—列車運行模擬」，*捷運技術半年刊*，民國 91 年，頁 161-184。
20. 陳詩韻，「軌道列車電能消耗極小化之速率最佳化模式」，成功大學交通管理學系碩士論文，民國 93 年。

21. Li, K. P. and Gao, Z. Y., “An Improved Equation Model for the Train Movement”, *Simulation Modeling Practice and Theory*, Vol. 15, No. 9, 2007, pp.1156-1162.
22. 林琮欽，「移動閉塞區間制下混合派翠網路應用於捷運列車運轉整理策略之模擬研究」，淡江大學運輸管理學系碩士論文，民國 98 年。
23. Li, P., Nie, A., Jin, L., and Wang, F., “Study on Intelligent Train Dispatching”, *Intelligent Transportation Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001, pp.949-953.
24. 李治綱、陳朝輝、簡聰裕，「捷運鐵路列車延滯事件發生後行車調度策略之模擬分析」，*運輸計劃季刊*，第 31 卷，第 2 期，民國 91 年，頁 299-321。
25. D’Ariano, A., Corman, F., and Hansen, I. A., “Evaluating the Performance of An Advanced Train Dispatching System”, *Infrastructure Systems and Services: Building Networks for a Brighter Future (INFRA)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, pp.1-6.
26. The Technology Strategy Board, “Modelling and Simulation in Rail”, <https://www.innovateuk.org/-/modelling-and-simulation-in-rail>, 2013.
27. Jennings, N. R., Sycara, K., and Wooldridge, M., “A Roadmap of Agent Research and Development”, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 1, No. 1, 1998, pp. 7-38.
28. Hernández, J. Z., Ossowski, S., and García-Serrano, A., “Multi-Agent Architectures for Intelligent Traffic Management Systems”, *Transportation Research Part C*, Vol. 10, No. 5, 2002, pp.473–506.
29. Kosonen, I., “Multi-Agent Fuzzy Signal Control Based on Real-Time Simulation”, *Transportation Research Part C*, Vol. 11, No. 5, 2003, pp. 389-403.
30. 陳伶宜，「智慧代理人於交通管理與控制之應用」，成功大學交通管理學系碩士論文，民國 97 年。
31. Lo, S. K. C., “A Collaborative Multi-Agent Message Transmission Mechanism in Intelligent Transportation System – A Smart Freeway Example”, *Information Sciences*, Vol. 184, No.1, 2012, pp. 246-265.
32. Zhibin, J. and Chao, X., “Multi-Agent Delay Simulation Model in Mass Rail Transit System”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11, No. 2, 2009, pp.717-720.
33. Wang, Z. F., Ruan, L., Xiao, L., Zheng, Y., and Dong, Y., “Distributed Train-Group Modeling and Simulation Based on Cellular Automaton and Multi-Agent”, *AICT’11 Proceedings of the Third International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, Vol. I, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp.146-154.
34. Wulf, G. and Jason, C. Y., “Analysis of Light Rail Vehicle Clearance Time at Intersection”, *Transportation Research Record*, 1005, 1985, pp. 38-45.
35. 許添本等，「VISSIM 與 NETSIM 於國內應用的飽和流量驗證比較分析」，中華民國運輸學會第 15 屆學術論文研討會論文集，中華民國運輸學會，民國 89 年，頁 97-106。
36. 交通部高速鐵路工程局，*淡水捷運延伸線綜合規劃暨環境影響評估報告書*，民國 100 年。
37. Lewis, C. D., *Industrial and Business Forecasting Methods: A Practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting*, 1st Ed., Butterworth Scientific, London, 1982.

