

考慮路徑導引下之運輸走廊最佳化 控制模式

AN OPTIMAL CONTROL MODEL ON TRAFFIC CORRIDORS WITH ROUTE GUIDANCE

胡大瀛 Ta-Yin Hu¹
吳東祐 Tung-Yu Wu²

(99 年 7 月 20 日收稿，100 年 1 月 28 日第一次修改，
100 年 2 月 25 日第二次修改，100 年 3 月 31 日定稿)

摘 要

尖峰時段下運輸走廊上常出現重現性的壅塞情形，且車輛容易回堵至附近市區道路，甚至影響到高速公路主線上的車輛運行。近年來，智慧型交通管理 (intelligent traffic management, ITM) 已應用於高速公路管理，藉以紓解運輸走廊中產生的車輛擁擠情形。本研究根據 store-and-forward 概念，整合路徑導引特性，建構線性最佳化控制模式，其控制變數包括綠燈時間、匝道儀控率及各路段車輛停等長度。此一最佳化控制模型優點為可作離線型運輸走廊控制策略的評估，且可為線上型交通控制策略的擬定參考。最佳化求解採用數學規劃軟體 CPLEX，除可求取運輸走廊中目標函數總延滯時間 (total delay) 最小化，並可分析不同交通管理策略之效率。

關鍵詞：運輸走廊；智慧型交通管理；路徑導引

-
1. 國立成功大學交通管理科學系教授 (聯絡地址：70101 臺南市東區大學路 1 號成功大學交通管理科學系；電話：06-2757575 轉 53224；E-mail：tyhu@mail.ncku.edu.tw)。
 2. 國立成功大學交通管理科學系碩士。

ABSTRACT

During the peak period, recurrent traffic congestion usually occurs in transportation corridors, and the resulting queues affect not only mainline freeways but also near-by surface streets. Intelligent Traffic Management (ITM) has been proposed to relieve possible congestion on traffic corridors through advanced and intelligent traffic control strategies. Based on the concept of the store-and-forward method, the corridor management problem is formulated as a linear optimal control model, and the objective function is to minimize the total queue length for considered traffic corridors. The advantage of an optimal linear control model can be used to evaluate the offline control strategy and online control. Objective values for different control strategies are solved by CPLEX, and the optimal control settings are obtained based on these calculations.

Key Words: *Traffic corridor; Intelligent traffic management; Route allocation*

一、緒 論

由於車輛持有率的快速成長，使得現今道路基礎設施不敷使用，尤其在於上下午尖峰時段，常在運輸走廊上出現重現性的壅塞情形，且車輛容易回堵至附近市區道路，甚至影響到高速公路主線上的車輛運行，因此車輛壅塞問題不僅是對於單一市區道路，影響的範圍觸及市區道路和高速公路。而現今政府交通管理單位的管理策略，多以單一層級為主要的管理策略研擬範圍，較少考慮其他等級的道路型態，如號誌化路口的號誌設計，未考量相鄰路段的車流，因此常影響其他路段；另外如匝道儀控管制指考慮高速公路主線車流，而未將市區道路車流納入考量。因此，發展整體路網考量的整合型交通管理策略及最佳化控制模型，藉此將相關交管策略整合，將可較有效改善路網的運行效率。因此，結合整合型交通管理策略與智慧型運輸系統相關系統內容成為智慧型交通管理策略，將可有效提升運輸走廊的運行效率，並提升運輸安全及用路人滿意度。

運輸走廊的交通管理策略一般考慮維持高速公路主線暢通，常用的交管策略為匝道儀控，但若缺乏平面道路的配套措施，常會造成因匝道區域的車流回堵而影響市區道路的車流情形。過去相關的文獻大多討論交管策略研擬或特殊路況下的分析，整體最佳化控制的討論仍非常有限。針對相關課題，Kotsialos 與 Papageorgiou^[1] 的研究提供完整的回顧。本研究根據 Papageorgiou^[2] 及 store-and-forward 概念 (Gazis^[3]) 建立一線性控制最佳化模式，模式中考慮高速公路、平行高速公路的主要幹道及市區道路，透過相關的交通管理策略，如匝道儀控、號誌控制、路徑導引及可變標誌系統等影響，反映出不同交通管理策略下對路段等候情形及車流量變化的影響。此一模式的基本精神為 Gazis^[3] 所提出的 store-and-forward 概念，早期也應用於號誌化路口的控制 (Michalopoulos and Stephanopoulos^[4,5]; Rathi^[6])。store-and-forward 的方法適用於飽合車流狀況下，運輸走廊

內各運輸設施間等候車隊的動態管理，這個方法的優點為採用單一指標，可建立完整的最佳化控制模型。

本研究發展的模式，主要透過數學模式結合路徑導引的概念，建構一完整最佳化控制模型，以反應在運輸走廊中車流變化及路段車輛停等情形，以驗證該最佳化控制模型，另外並針對實際路網進行相關求解實驗，以探討運輸走廊在各情況之下運行效率的表現，並透過相關的交通管理策略如匝道儀控、號誌控制及可變標誌等手段，反應在各種策略下對於路段上車輛等候情形及車流分佈的影響。

本文於第二節回顧運輸走廊管理之文獻；第三節建構本模式架構；第四節進行虛擬路網實驗與相關參數分析；第五節進行桃園實際路網實驗與數值結果分析；第六節進行路網情境實驗模擬及分析；第七節提出結論與建議。

二、文獻回顧

本研究之文獻回顧主要分為兩個部分，第 2.1 節將介紹運輸走廊交通管理相關的內容，包括匝道管理及最佳化控制的運輸走廊管理；第 2.2 節介紹 store-and-forward 模型。

2.1 運輸走廊交通管理

運輸走廊管理在於交通管理上漸趨重要，在進行相關管理策略研擬時，以整體運輸走廊為一個管理層級單位，並以整體運輸走廊運行效率為管理指標，通常在一運輸走廊上，會由相關設備儀器進行資料傳遞及整合。運輸走廊多為一線性區域，擁有高車流且高服務性的運輸路線，並且提供用路人較高容量的路徑。以下於 2.1.1 節介紹運輸走廊的定義與相關管理策略；2.1.2 節為匝道管理及相關控制策略；2.1.3 節討論最佳化控制的運輸走廊管理。

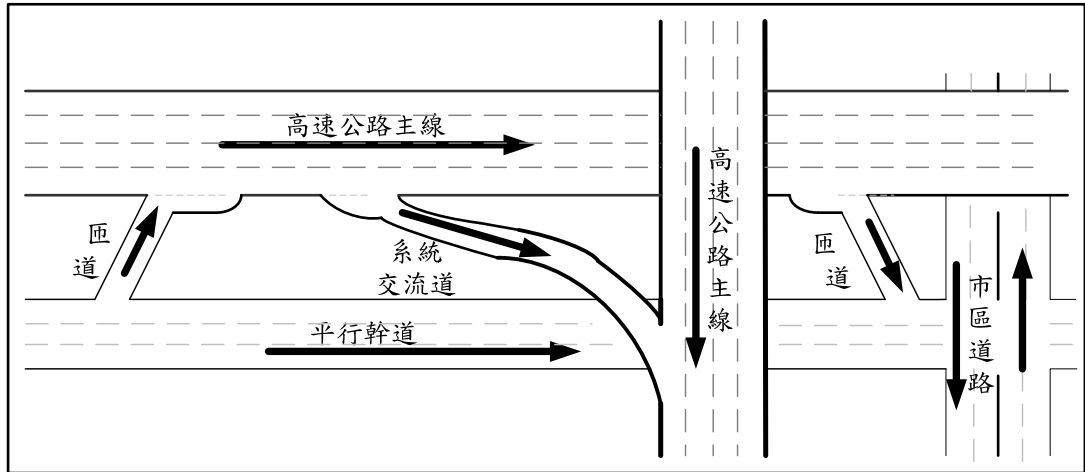
2.1.1 運輸走廊定義與管理策略

市區道路和高速公路路網範圍逐漸擴大，交通管理策略的實施將影響路網運行的效率表現，現今交通問題使用獨立分層概念進行管理已不符需求，因此，由高速公路區域和主要幹道以及市區道路所組成之運輸走廊 (traffic corridor)，須以整體路網為考量的智慧型交通管理方式進行。

運輸走廊是由許多區域所組成，如下圖 1 所示。FHWA^[7] 定義一個完整的運輸走廊主要包含三個部分：(1) 一個連接城際間主要途徑之高速公路和其匝道；(2) 平行於高速公路之主要幹道；(3) 都市間之市區道路。

而運輸走廊下運行效率和安全的優劣，會受到路網中交通擁擠型態和交管整合完整程度兩種構面所影響。在交通擁擠型態的部分，針對不同交通擁擠程度及狀況相應的交通管

理策略，主要分為以下四種：



資料來源：江立仁^[8]。

圖 1 運輸走廊示意圖

1. 局部性連鎖策略 (local coordinated strategy)：

當匝道儀控不符高速公路需求時，即用局部性連鎖策略提升改善匝道儀控率，以提高運輸走廊使用效率。在一般情況下，匝道儀控和鄰近市區道路號誌時制兩者間，相關交管單位會依照對方的控制方式，以最大運行效率的配合進行調整。

2. 區域性整合策略 (areawide integrated strategy)：

當高速公路的車流量增加到某一程度，使得任何匝道儀控率都無法紓解，進而影響到平面市區道路運行時，即採用區域性整合策略以降低高速公路主線的擁擠情形，該策略會以運輸走廊為主要的考慮對象。

3. 轉向策略 (diversion strategy)：

該策略主要針對於事故發生所影響的路段，利用調整路口號誌及匝道儀控率來改變短期車流量的劇增。

4. 壅塞策略 (congestion strategy)：

當交通需求量超過鄰近區域的車流量時，會利用該策略處理壅塞情況，而非控制需求量。

在於運輸走廊交管策略擬定部分，Diakaki 等人^[9]認為可依據整合程度分為五個層級：

- 層級一 路網中各類控制為獨立執行；
- 層級二 考量附近交通流量及需求的獨立執行策略；
- 層級三 衡量路網中各策略權重分佈的分散式控制應用；

- 層級四 由高層級交管單位進行各獨立控制策略的連鎖合作；
- 層級五 完善的整合型控制應用。

2.1.2 匝道管理

在運輸走廊的組成中，交流道為高速公路與一般市區道路之間的聯絡通道，車輛必須使用交流道才能在高速公路和市區道路之間來往，因此匝道的管理對於運輸走廊管理占有相當重要的比例，藉由匝道管理策略，可以幫助平衡高速公路及平面道路的需求，並且可提升高速公路運行效率、降低事故發生機率及提升道路安全。FHWA^[10]對於匝道管理部分，分為四種策略：

1. 匝道封閉 (ramp closure)：

利用封閉匝道策略，導引一般市區車流尋求其他交流道上下高速公路，可以避免在特定高速公路路段及市區道路造成嚴重性的擁擠情形。由於匝道封閉影響的範圍較大，因此較少作為長期的控制策略，多為因應短期車流量變化的情況。

2. 匝道儀控 (ramp metering)

利用號誌控制進入高速公路主線的車流，藉由儀控率的變化來控制單位時間內進入主線的車輛數，若高速公路主線車流量大，則使用較低的儀控率，避免過多車輛進入主線而影響通行；反之，則使用較高的儀控率。

3. 特殊使用處理控制 (special use treatments)：

針對特殊用路人或車種，例如使用高乘載車道 (HOV) 提供給高乘載車輛優先通行，使得該用路人可以使用較佳的道路服務環境，另外還有緊急救援車輛及工程車輛的使用，皆屬於特殊使用處理的部分。

4. 匝道端點處理控制 (ramp terminal treatments)：

針對特殊事件而施行的策略，尤其針對因平面道路號誌所造成匝道上停等車輛情形，可以避免影響高速公路主線及鄰近市區道路，利用在匝道入口處提供相關訊息供用路人知悉，避免過多車輛使用同一交流道。調整號誌控制時間及時相、增加匝道車道數及使用調撥車道等策略亦屬之。

2.1.3 最佳化控制運輸走廊管理

在交通運行及號誌控制中，整合型的走廊管理越顯重要，近幾年來交通方面的控制策略快速發展，利用匝道儀控、可變標誌系統、高速公路之間控制及高速公路及市區道路之間的整合管理，控制策略發展越趨成熟及完整。這些發展中包括了專家經驗法則、模糊理論、類神經網絡及古典反饋控制。這些方法從最佳化控制的理念獲得解決途徑，提供一個適當的控制標準建立控制準則。Kotsialos 與 Papageorgiou^[1]提出了對於高速公路交通控制方法完整的回顧，針對個別的交通策略均有深入的討論。

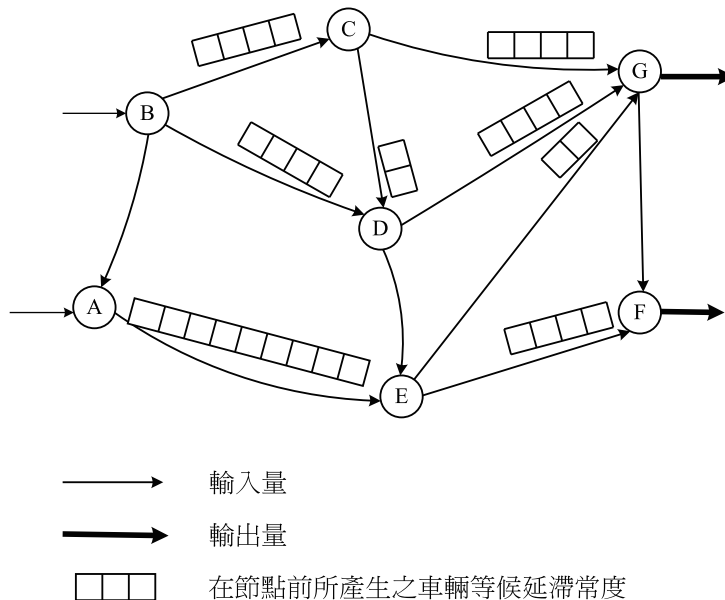
Moreno-Banos 等人^[11]根據簡化車流模型提出一個整合交通控制策略，主要針對路徑

導引及匝道儀控。Papageorgiou^[2]提出一個線性規劃方法的整合號誌控制策略，其包括交通號誌控制、路徑導引及匝道儀控。Diakaki 等人^[9]以整體路網為考量，提出一回饋型的交通控制策略方法。

Kotsialos 等人^[12]提出一個數學模型，主要考慮運輸走廊中的匝道儀控、路徑導引及高速公路之間的控制，該數學模型以離散時間來建構，並以一個演算法來尋找可行解。Papamichail 等人^[13]提出一個針對預測性的非線性數學模型，處理高速公路整合型的匝道儀控，其運用有三個層級：估計／預測層、最佳化層及直接控制層。

2.2 store-and-forward

store-and-forward 原為電信數據傳遞的一種技術，此技術說明傳遞訊息時，會先傳遞至中繼站，經過整理之後會再傳遞至目的地，因此 store-and-forward 有儲存及再發送的特性。而在於交通方面，此方法常應用於飽和及擁擠的路網中，如下圖 2。



資料來源：Gazis^[3]。

圖 2 store-and-forward 概念下飽和路網圖

尖峰時刻下大量車流造成路網過飽和的狀態，若無適當配套措施將導致路網車流過飽和，嚴重可導致整體交通癱瘓。由於吞吐量限制點 (throughput limiting points, TLPs) 的影響，會影響車流的移動，當路網中節點車流輸出量 (output) 的能力小於輸入量 (input) 時，會造成車輛等候在節點的上游路段直到尖峰時刻結束為止，此節點即為吞吐量限制

點。如上圖所示，節點 C、D、E、F 以及 G 為吞吐量限制點，在部分上游路段產生延滯車輛。

交通控制策略研擬可透過 store-and-forward 進行最佳化分析，此種方式假設以下三種條件：

1. 路網中存在依時性 (time-dependent)、隨機性 (stochastic)、有旅次目的的交通流量。尤其於尖峰時刻，因吞吐量限制點所影響的車流量。
2. 假設已知路網中各路段有三種交通參數：
 - (1) 各路段的旅行時間或旅行成本；
 - (2) 各路段之容量限制，如每單位時間下最大流出量；
 - (3) 各節點的上游路段所能儲存之車流量；
3. 車流以均速 (constant speed) 的方式依據「節點－路段－節點」的連接進行移動，有直接通過節點或儲存在節點上游路段兩種行為模式。

根據以上三種假設條件，store-and-forward 方法會讓車流在各限制點前的上游路段產生儲存行為，並且根據先進先出 (first-in-first-out, FIFO) 的準則進行車輛紓解的動作。

而在 store-and-forward 路網中，主要的目標即為將總延滯時間最小化，當交通服務環境的服務能力小於需求量時，則會產生延滯的情形，因此藉由最佳化控制管理及 store-and-forward 概念，可以藉由路網中各個節點的吞吐量限制，決定出各車流的行徑路線及各路口號誌控制的時相配置，以達到整體路網的最佳效率。

在於實際應用部分，Aboudolas 等人^[14]將 store-and-forward 概念套用至希臘 Chania 的一個都市路網中，進行相關的管理實驗，利用相關交管策略的施行，確實可以有效改善某些擁擠路口的運行狀況。藉此實際應用例子中發現，store-and-forward 概念適用於表示大範圍的路網。

三、研究方法

本研究主要根據 store-and-forward 概念 (Gazis^[3]) 利用最佳化控制理論建立智慧型運輸走廊管理模式，將整體運輸走廊的總車輛延滯時間作為目標式，最佳化整體運輸走廊。以下將於 3.1 節描述本研究所處理的問題假設與模型架構；3.2 節為本研究管理策略模式的介紹。

3.1 問題描述與研究架構

本研究主要對象為運輸走廊，根據 FHWA^[7]對於運輸走廊的定義，運輸走廊包括了三個部分：高速公路區域（主線、上下匝道）、平行於高速公路的主要幹道及市區道路。其他文獻中對於運輸走廊的討論，認為運輸走廊為區域中交通的主幹，為大多數車輛主要會

使用的區域。而就幾何方面來看，運輸走廊為一條帶狀的區域，擁有快速且便捷的路網，且有替代性高的其他等級道路，可供路網壅塞時，紓解路網車輛的功能。

在運輸走廊中，高速公路為主幹道，進行快速且便捷的服務，扮演運輸走廊中主要車輛行駛的路段；匝道區域為高速公路與一般市區道路的聯絡通道，也是主要車輛進行交集的區域，因此對於該區域的管理也相當重要；最後是在一般市區道路部分，主要受到路口號誌的影響，號誌週期的長短、時相的配置，皆會影響到市區道路的運行效率。

本研究利用 Papageorgiou^[2]所建立之數學模式，並導入路徑導引特性，以建立本研究最佳化控制模型。過去對於該數學模式並無實際路網的運用，因此本研究會針對實際路網進行不同情境設定進行求解，以驗證本研究所使用數學模式之正確性及實用性。

Store-and-forward 的概念最主要的優點，為簡化複雜的運輸走廊控制問題，以線性數學模式建構，有利於後續求解的效率。然而，store-and-forward 的概念表達在擁擠狀況現有道路容量限制下，車輛等候長度的形成，缺乏對車流速度與密度相關特性的描述。因此所發展的數學模型，為在理想狀態下所產生的交通管理與控制策略。

本研究以整體路網的總延滯時間為主要的目標式，而本研究限制式必須依照路網的幾何特性建立，因此隨著路網範圍的大小及高速公路和一般道路的分佈情形，路網範圍越大、節線越多及時段切割越多則須建立較多的限制式，因此也將影響求解的效率。本研究將時間切割為離散式的時間區段進行相關求解實驗，以觀察不同時段中車流變化情形，因此本研究為依時性的問題，在前後時段的車流情形將會互相影響。

如圖 3 所示，首先蒐集路網相關資料，如運輸走廊的幾何條件，路段長度、流量需求及每個路段轉向關係等，透過蒐集車流型態資料、路網幾何資料及路網需求資料，建立數學模式中的目標式及限制式。最佳化控制模型中主要包含三個部分：高速公路主線、匝道區域及一般市區道路。以上數學模式包含各個路段在於不同時段之間的關係、路段之間的流量守恒問題以及號誌時間設定的最大值和最小值。

本研究的最佳化控制模型係根據 Papageorgiou^[2]和 store-and-forward 概念 (Gazis^[3])，並引入路徑導引的概念，以達智慧型管理的特性。藉由以上概念建立本研究數學模式後，利用 CPLEX 進行求解，因此可以得到該運輸路網中儀控率及路口號誌的設定，並且可以得知各個路段在不同時段下排隊停等車輛的長度。之後將最佳化控制模型求得的最佳解，輸入模擬軟體 DynaTAIWAN 中進行模擬實驗，以觀察車輛流動情形，並驗證最佳化控制模型的應用性質。

除此之外，將進行不同需求量的實驗，並分析不同需求量下，路網運行效率的比較與分析，以觀察在不同車流量下，運輸走廊各路段的排隊停等車輛的長度及分佈變化情形。接著利用模擬軟體進行模擬，以觀察若有事故發生下對於運輸走廊的變化，以供運輸走廊管理策略的研擬，以驗證最佳化控制模型的合理性及可應用性。

3.2 智慧型運輸走廊管理模式

本研究使用的管理數學模式，係根據 Papageorgiou^[2]所整理的管理模式，並將引入路徑導引概念，3.2.1 節將介紹引入路徑導引的概念；3.2.2 節整理本研究所利用到的參數設定假設及數學模式。

3.2.1 路徑導引之概念

透過固定式路標，對路網中用路人進行路徑導引，將路徑資訊充分地提供給用路人，使得用路人依循提供之路徑，藉此可以得知路網中車輛及路徑。而在交通偵測技術尚未成熟時，原始數學模式中各路段的轉向比是由歷史資料中得知，圖 3 為無路徑導引下的路段流量關係圖。

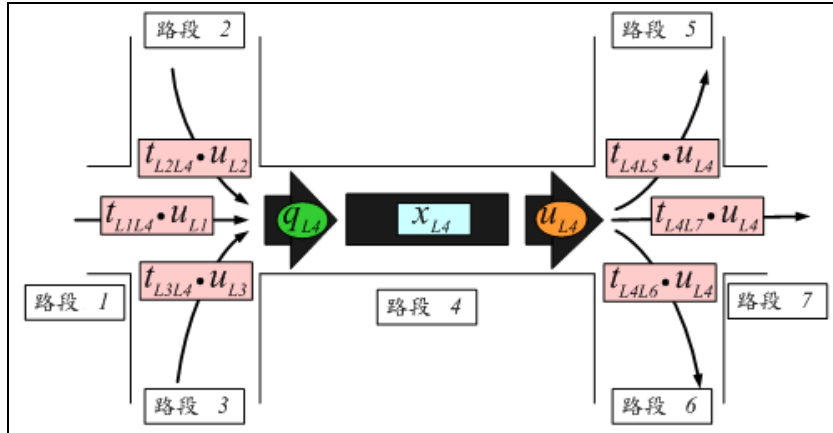


圖 3 無路徑導引下各路段流量關係圖

圖 3 中 u_{L4} 表路段 4 之流出量 (輛)， q_{L4} 表路段 4 之流入量 (輛)， t_{ij} 表由路段 i 轉向到路段 j 的比例。由圖 3 示意圖，可知路段 1、路段 2 以及路段 3 部分比例之流出量，會匯集成為路段 4 之流入量，路段 4 之流出量會分成三種比例進入路段 5、路段 6 以及路段 7。在此示意圖中，路段 4 之流入量以及到各路段的流出量，並未考慮可能路徑資訊之提供，在固定道路容量考慮下，當流入量大於流出量時，車輛無法完全通過路段 4，將形成延滯的情形；也因為缺乏下游路段相關資訊，導致在路段 4 其他轉向之車輛相互影響而產生延滯。

圖中 u_{ij} 表路段 i 到路段 j 之流出量 (輛)， q_{ij} 表路段 i 到路段 j 之流入量 (輛)。圖 4 為使用路徑導引之運作圖，路段 1、路段 2 及路段 3 進入路段 4 之用路人，透過路徑導引使用路段 4，得知即將前往之下一路段如路段 5、路段 6 以及路段 7 並分為 q_{L4D5} 、 q_{L4D7} 以及 q_{L4D6} ，因此在路段 4 的用路人便能有效使用各車道容量，各轉向之流出量如 u_{L4D5} 、

u_{L4D5} 以及 u_{L4D5} 相互影響程度比原始數學模式小，可有效減少路段 4 車輛等候長度。

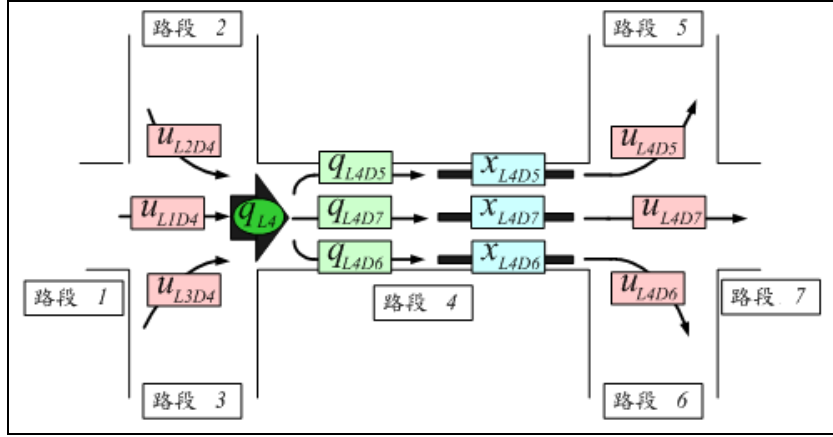


圖 4 使用路徑導引下各路段流量關係圖

在此根據路徑導引觀念以達到路徑最佳化的使用，由於在無路徑導引情況下，用路人常因道路不熟悉，因此行駛其他路徑而非最佳路徑，造成路徑使用之不均導引。鑒於以上問題，使用路徑導引的觀念指引用路人使用最佳路徑，使得路網中路徑皆可有效地使用。在本研究中，假設所有車輛皆依循路徑資訊使用最佳路徑，引入路徑導引觀念後，可將一路段中的流入量、流出量及車輛停等長度，依據前後路段關係將車流分別表示，因此可得知各方向的車流，並有效使用道路容量。

以上為本研究引入路徑導引的概念，藉由偵測器資料及固定式路標得知前後路段中車流的關係，且毋須歷史資料即可進行分析比較，因此藉由路徑導引概念，可最佳化路徑資源的使用，使得路段充分運用。在無路徑導引概念中，原先可用一個變數描述一個路段的車輛停等情形，但引入路徑導引概念後，必須分為兩個以上變數才能描述一個路段的車輛停等情形，使得變數及限制式增加，影響求解的效率。而路段流入流出量亦同於車輛停等長度，必須增加變數方能引入路徑導引概念。

3.2.2 智慧型運輸走廊管理之數學模式

本研究建立一智慧型運輸走廊管理之最佳化控制模型，其包含三個部分，即為前述之高速公路主線、匝道區域及一般市區道路數學模式。而在進行該數學模式建立時，有以下三點假設：

1. 整體路網為一管理層級單位。
2. 運輸走廊下所使用之相關儀器設備皆以整體路網為考量設計，且可以進行資料相互傳遞及整合。
3. 實驗時間切割為離散式時間區段進行車流觀察，且為一依時性問題。

因此，本研究探討運輸走廊下智慧型交通管理問題，需考量整體路網對各項交通控制策略進行數學模式的求解。為了達到智慧型運輸管理特性，在數學模式加入路徑導引，可以得知每個路段中，不同轉向車流的情形，因此針對高速公路、匝道區域及一般市區道路，進行最佳化控制方式，使得運輸走廊的總延滯時間最小化。式 (1) 描述本研究之目標式，為運輸走廊中所有路段延滯車輛的總和乘上時間區段，即為總延滯時間。

$$\text{Min } J_D = \tau \sum_{i,j \in I} \sum_{k=0}^K x_{i,j}(k), \quad I = U \cup R \cup H \quad (1)$$

其中，

J_D ：運輸走廊之總延滯時間；

τ ：係實驗中的時間區段長度；

I ：為所有路段的集合，其中包括一般市區道路 U 、匝道區域 R 及高速公路主線 H ；

K ：係實驗的最後一個時段；

k ：係實驗的時間區段；

$x_{i,j}(k)$ ：在第 k 時段下，由路段 i 轉向路段 j 之車輛等候長度 (輛)。

而在於限制式部分，即為前述之三部分數學模式，並結合路徑導引，建立本研究之智慧型運輸走廊管理模式，整理如下所示。

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + \tau[q_{i,j}(k) - u_{i,j}(k)], \quad \forall i, j \in I \quad (2)$$

$$x_i(k) = \sum_{j \in I} x_{i,j}(k), \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$q_i(k) = \sum_{j \in I} u_{j,i}(k), \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$u_i(k) = \sum_{j \in I} u_{i,j}(k), \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$u_i(k) \leq \frac{S_i g_{r,f}(k)}{C}, \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$r_i(k+1) = r_i(k) + H[o_i^* - o_{out,i}(k)], \quad \forall i, j \in I \quad (7)$$

$$\rho_{cr,Hj}(k) = \frac{q_{Hj}(k)}{\beta_{Hj} \times n_{Hj}}, \quad \forall j \in I \quad (8)$$

$$o_{out,i}(k) = \frac{(\beta_v + \beta_d) \times \rho_{cr,Hj}(k)}{1000}, \quad \forall i, j \in I \quad (9)$$

$$u_{Ri}(k) \leq \alpha \times r_i(k), \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$u_{Rj}(k) \leq S_{sat,Rj}, \quad \forall j \in I \quad (11)$$

$$0 \leq u_i(k) \leq M_i, \quad \forall i, j \in I \quad (12)$$

$$0 \leq u_i(k) \leq Q_i, \quad \forall i, j \in I \quad (13)$$

$$g_{\min} \leq g_{\gamma,f}(k) \leq g_{\max} \quad (14)$$

其中，

$q_{i,j}(k)$ ：第 k 時段下，由路段 i 轉入到路段 j 之流入量 (輛／單位時間)；

$u_{i,j}(k)$ ：第 k 時段下，進入路段 i 轉向路段 j 之流出量 (輛／單位時間)；

$x_i(k)$ ：第 k 時段下，路段 i 之車輛等候長度 (輛)；

$q_i(k)$ ：第 k 時段下，路段 i 之流入量 (輛／單位時間)；

$u_i(k)$ ：第 k 時段下，路段 i 之流出量 (輛／單位時間)；

S_i ：路段 i 之飽和流率；

$g_{\gamma,f}(k)$ ：第 k 時段下，路口 γ 在時相 f 之有效綠燈時間 (秒)；

C ：為路口週期時間 (秒)；

$r_i(k)$ ：第 k 時段下，上匝道路段 i 之儀控率 (輛)；

o_i^* ：儀控目標之佔有率水準；

$o_{out,i}(k)$ ：第 k 時段下，匝道路口下游路段 (高速公路主線) 之佔有率；

H ：經校估得到之參數；

$\rho_{cr,Hj}(k)$ ：第 k 時段下，高速公路路段 j 之臨界密度；

n_{Hj} ：高速公路路段 j 之車道數；

β_v ：平均車長 (公尺)；

β_d ：偵測區長度 (公尺)；

α ：為 $u_{Ri}(k)$ 和 $r_i(k)$ 兩者間時間單位的轉換參數；

$S_{sat,Rj}$ ：下匝道路段 j 之飽和流率 (輛)；

M_i ：在路段 i 可容納之最大流出量 (輛)；

Q_i ：在路段 i 可容納之排隊停等車輛數最大值 (輛)；

$g_{\min}$ ：最小綠燈時間 (秒)；

$g_{\max}$ ：最大綠燈時間 (秒)。

以上為本研究所建立之智慧型運輸走廊管理之最佳化控制模型，式 (2) 描述第 $k+1$ 時段由路段 i 到路段 j 的排隊停等車輛受到第 k 時段排隊停等車輛，加上於 τ 時間長度下流入、流出量變化的影響。而式 (3) ~ (5) 為流量守恆的觀念，第 k 時段下，路段 i 的排隊停等車輛為從路段 i 到路段 j 排隊停等車輛的總和，而路段 i 流入量為從上游路段 j 流出到路

段 i 的流量總和，流出量亦同，路段 i 流出量為從上游路段 j 流入到路段 i 的流量總和。於號誌化路口，路段的流出量受到週期長度、飽和流率及綠燈時間所影響，式 (6) 描述為該路段之路段飽和流率乘上有效綠燈占週期之百分比。

而式 (7)~(9) 為匝道儀控的部分，式 (7) 描述第 $k+1$ 個時段上匝道路段 i 的儀控率為 $r_i(k+1)$ ，會根據前一個時段 k 的儀控率，加上上下游路段佔有率變化的情形來決定，即為 $H[o_i^* - o_{out,i}(k)]$ 。式 (8) 描述下游路段，高速公路臨界密度的計算，其會受到長度及車道數所影響。式 (9) 為下游路段佔有率的計算，受到平均車長、偵測區長度及車流密度所影響。而在於經匝道儀控進入高速公路主線的車流量部分，式 (10) 描述其進入高速公路主線的流量受到儀控率的影響。而式 (11) 描述下匝道路段 j 的流出量進入市區道路，必須小於或等於其飽和流率。而式 (12)~(14) 描述路段流出量、排隊停等車輛及路口號誌綠燈時間的上下界範圍。

四、虛擬路網實驗與時段長度之敏感度分析

本研究首先針對一虛擬路網進行實驗求解，根據模式分析求解結果，進行時段長度敏感度之分析。4.1 節將介紹本研究所使用之虛擬路網及相關參數的設定；4.2 節將介紹虛擬路網的基本實驗設計；4.3 節探討時段長度敏感度之分析。

4.1 虛擬路網介紹與參數設定

本研究欲建立一虛擬路網進行初步實驗，該虛擬路網包括：主要幹道的高速公路、平行幹道的一般道路及市區道路，該虛擬路網如下圖 5 所示。該虛擬路網有一條主線高速公路，兩個上匝道及兩個下匝道路段，兩條單向平行幹道，及兩個號誌化路口。

在圖 5 中粗黑線部分為高速公路路段，虛線部分為上下匝道，而一般線段則為一般市區道路，各節點編號及節線編號如圖 5 所示，該路網有 32 條節線及 22 個節點，共分為 4 個分區。

針對該路網各參數設定進行說明，首先為高速公路部分，所有路段皆為 3 車道，飽和流率部分皆設定為 0.65 (輛/秒/車道)，速限為 110 (公里/小時)，詳細的各路段長度及相關設定如表 1 所示。綜合表 1 所示可知該路網共有 6 條節線為高速公路路段。

在上下匝道部分，所有匝道皆為 2 車道，其上匝道的飽和流率為 0.33 (輛/秒/車道)，而下匝道的飽和流率為 0.42 (輛/秒/車道)，速限為 40 (公里/小時)，詳細的各路段長度及相關設定如表 2 所示。

而一般市區道路部分，分別平行幹道及一般市區道路，皆為 2 車道，其飽和流率設定為 0.5 (車輛/秒/車道)，在於速限部分皆為 60 (公里/小時)，詳細的各路段長度及相關設定如表 3 所示。

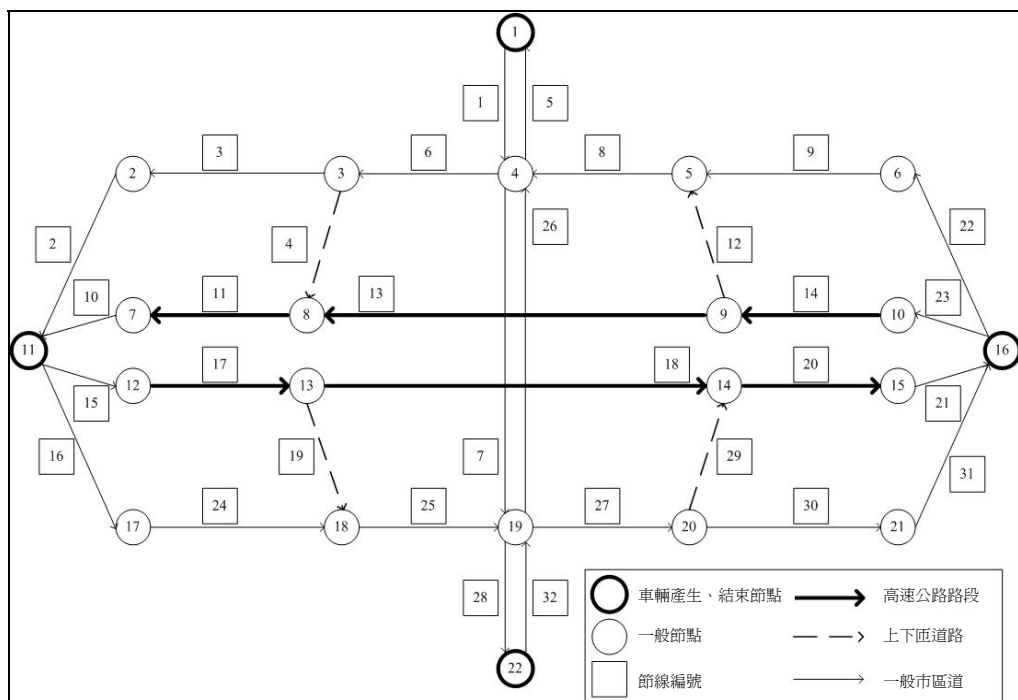


圖 5 虛擬路網示意圖

表 1 虛擬路網高速公路路段各項設定值

路段	節線 編號	長度 (公尺)	車道數	速限 (公里／小時)	飽和流率 (輛／秒／車道)
高速公路	11	500	3	110	0.65
	14				
	17				
	20				
	13	1500			
	18				

表 2 虛擬路網上下匝道路段各項設定值

區域	節線編號	長度 (公尺)	車道數	速限 (公里／小時)	飽和流率 (輛／秒／車道)
上匝道	4	200	2	40	0.33
	29				
下匝道	12	200			0.42
	19				

匝道儀控部分相關設定參數如表 4 所示，給定初始儀控率為 20 (車輛／分鐘／車道)，根據交通部運輸研究所研究^[15]，設定校估參數 H 為 19.2，目標儀控率水準為 20%。另外根據交通部運輸研究所研究^[16]，設定平均車輛長度為 6 公尺及偵測器長度為 1.83 公尺。

在該虛擬路網中有兩個號誌化路口，為節點 4 跟節點 19 兩個路口，其皆設為兩時相，週期長度為 60 秒，總損失時間為 5 秒，相關設定參數如表 5 所示。

表 3 虛擬路網一般市區道路路段各項設定值

路段	節線編號	長度 (公尺)	車道數	速限 (公里／小時)	飽和流率 (輛／秒／車道)
市區道路	1	500	2	60	0.5
	5				
	6				
	7				
	8				
	25				
	26				
	27				
	28				
	32				
	3	750	2	60	0.5
	9				
	24				
	30				
	2	1000	2	60	0.5
	10				
	15				
	16				
	21				
	22				
	23				
	31				

表 4 虛擬路網匝道儀控各項設定值

區域	參數設定				
	初始儀控率 (車輛／分鐘／車道)	H	儀控目標之 占有率 (%)	車輛長度 (公尺)	偵測器長度 (公尺)
上匝道	20	19.2	20	6	1.83

表 5 虛擬路網號誌化路口各項設定值

路口	可能轉向	時相數	週期時間 (秒)	損失時間 (秒)
4	1,3,19	2	60	5
19	4,20,22	2	60	5

而虛擬路網中，各路口轉向比假設如表 6 所示。

表 6 虛擬路網路口轉向比設定值

路段	節線編號	轉向	轉向比
市區道路	1	6 (右)	0.3
		7 (直)	0.7
	6	3 (直)	0.5
		4 (上匝道)	0.5
	7	27 (左)	0.2
		28 (直)	0.8
	8	5 (右)	0.2
		6 (直)	0.7
		7 (左)	0.1
	25	26 (左)	0.1
		27 (直)	0.7
		28 (右)	0.2
	26	5 (直)	0.8
		6 (左)	0.2
	27	29 (上匝道)	0.5
		30 (直)	0.5
高速公路	14	26 (直)	0.7
		27 (右)	0.3
	17	12 (下匝道)	0.3
		13 (直)	0.7
		18 (直)	0.7
		19 (下匝道)	0.3

虛擬路網係依據運輸走廊基本的定義所建立，藉由不同的實驗設計了解最佳化控制模型的求解情形，主要透過不同的需求量實驗觀察最佳化結果的變化，並觀察路網中各路段停車隊長度及路段分佈的變化。該虛擬路網分為 4 個分區，車輛分別由 4 個分區進入路

網，分為 6 個時段，一個時段為 10 分鐘共 60 分鐘，在於基礎實驗的車輛數設定為 200 (輛／分區／10 分鐘)，因此 1 個小時中該路網共產生 4800 (輛／小時)。藉由不同需求量的設定觀察路網的變化，分別設定為 11 組的實驗，車流量為基礎實驗的 50%～150%，詳細的實驗設計如表 7 所示。

表 7 虛擬路網實驗設計

實驗	產生車流量 (輛／分區／十分鐘)	車流百分比	號誌化路口週期	初始匝道儀控率 (輛／車道／分鐘)
1	100	50%	60 秒	20
2	120	60%	60 秒	20
3	140	70%	60 秒	20
4	160	80%	60 秒	20
5	180	90%	60 秒	20
6	200	100%	60 秒	20
7	220	110%	60 秒	20
8	240	120%	60 秒	20
9	260	130%	60 秒	20
10	280	140%	60 秒	20
11	300	150%	60 秒	20

4.2 虛擬路網基本實驗

針對虛擬運輸走廊進行不同需求量的實驗，共分為 11 組不同的車流量實驗，從 50% 的基礎流量，增加至 150% 的基礎流量，藉由不同的需求量設定觀察目標式數值的變化、各路段車流的變化及路網中車輛停等長度的變化及分佈情形。

本研究依據虛擬走廊的建立，設定 11 組的不同需求車流量實驗，以比較各組最佳化結果中目標式結果的變化，並觀察相關變數的數值及變化情形。依據 4.1.2 節的虛擬路網實驗設計，11 組實驗的車流量前後差為 10% 的基礎流量，而依據求解後的目標式結果變化情形，如圖 6 所示。

根據實驗結果，在於 50% 的車流量中，目標式數值為 218 (車輛分鐘)，而隨著車流量的增加，在 60% 的車流中增加至 2488 (車輛分鐘)，在基礎車流情況下，目標式數值為 19064 (車輛分鐘)，而當路網中車輛增加到基礎車流的 150% 時，整體路網的目標式數值則增加至 46292 (車輛分鐘)，藉由圖 7 可看出，隨著車流量不斷地增加，整體路網也產生較多的車輛停等長度，使得目標式也不斷地上升。

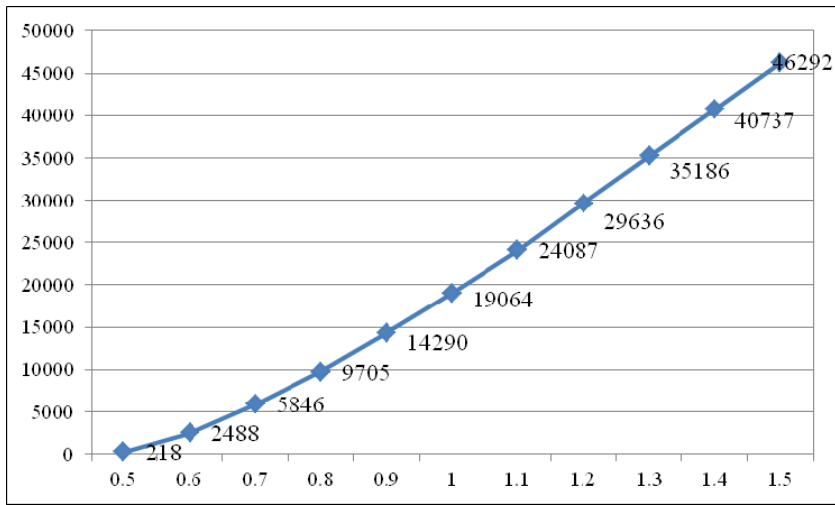


圖 6 虛擬路網各實驗下目標式變化情形

另外，對於各個實驗所增加延滯車輛的差值，由較多車輛實驗減去少 10% 的前一個實驗，其差距結果如下圖 7 所示。

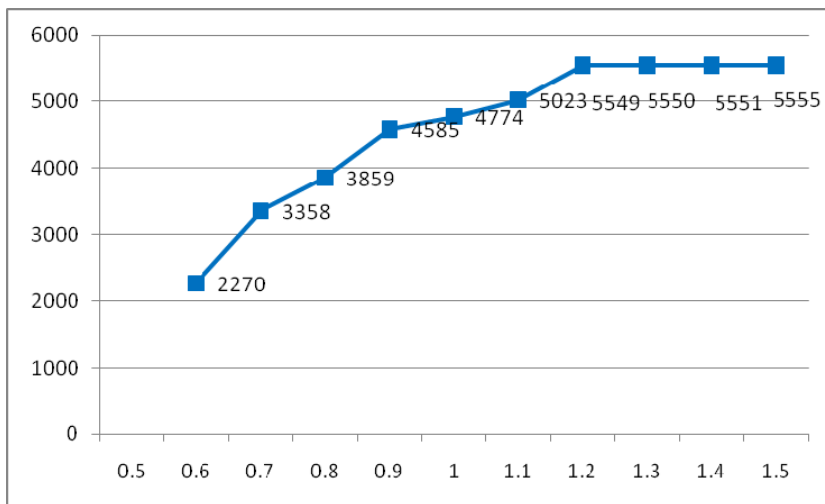


圖 7 虛擬路網各實驗下目標式增加量情形

根據其結果，可看出當車流量增加，將使得每一實驗的目標式也隨之增加，而於前一實驗相差之增加量，也隨著不同百分比的車流量實驗增加，60% 的車流量實驗與 50% 車流量實驗增加約 2270 (車輛分鐘)，而在實際中 60% 的車輛數比 50% 的車輛數增加 480 輛車，因此可以看出在 480 輛車中，僅增加了 227 輛車輛停等長度。而當車輛數增加到 100% 的

基礎流量時，與 90%車流量相比時，兩實驗的差距則為 4774 (車輛分鐘)，因此可以看到 100%的車流實驗增加的車輛數均產生停等的情形。而當車輛數達 110%基礎流量之後，增加的幅度皆大於增加的車輛數，因此可以看出當路網中車輛越來越多時，產生的擁擠情形也越嚴重。

4.3 時段長度之敏感度分析

在虛擬路網實驗中，將一個小時切割為 6 個時段進行實驗求解，每個時段為 10 分鐘，本小節討論不同時段長度對於求解的影響，4.3.1 節討論不同時段長度對於路網及目標式結果可能產生的影響；4.3.2 節為探討每個時段 3 分鐘與 10 分鐘的求解結果比較。

4.3.1 時段長度的影響

在原先的設定中將一個小時切割為 6 個時段，每個時段 10 分鐘，因此不同時段長度設定將影響每個時段的流入量及流出量，因其受到飽和流率的影響，例如某一路段的飽和流率為 0.5 (輛/秒/車道)，其有 2 車道，因此時段 10 分鐘的設定，該路段在一個時段的最大流出量為 600 (輛/十分鐘)，但若將時段切割為 3 分鐘一個時段，則該路段最大流出量則為 180 (輛/三分鐘)。但不同時段長度對於路段可容納的最大停等長度則沒有影響，因為該停等長度僅受路段長度所影響，並不會受到時間改變而有變化，因此不同時段長度可能產生的影響可分為三個部分，以下分別說明之。

1. 路段中並無產生車輛停等情形

由於路段中單位時段的流入量皆可順利流出路段，因此該路段並不會產生車輛停等情形，因此不同的時段長度並不會影響目標式數值。

2. 路段中產生些許車輛停等情形

當路段的單位時段流入量大於最大流出量時，將會有部分車輛停等在路段中，而不同時段對於路段車輛停等情形如圖 8 所示。

在每時段 10 分鐘中，其路段的最大流出量及流入量為 600 及 650 輛，而每時段為 3 分鐘時，其路段的最大流出量及流入量為 180 及 195 輛，因此在兩者設定中分別產生 15 及 50 輛車輛停等長度，此結果反應到目標式將變為 45 (車輛分鐘)及 500 (車輛分鐘)，因此可看出在同樣的車流比例之下，短時段則會產生較小的目標式數值。

3. 路段中產生嚴重車輛停等情形

亦同於第二種情況，當路段的單位時段流入量大於最大流出量時，將會有車輛停等在路段中，如圖 9 所示。

在每時段 10 分鐘中，其路段的最大流出量及流入量為 600 及 800 輛，而每時段為 3 分鐘時，其路段的最大流出量及流入量為 180 及 240 輛，因此在兩者設定中分別產生 60 及 200 輛車輛停等長度，但在該路段可容納最大的車輛停等長度為 180 輛，因此在時段為 10 分鐘時產生過多的車輛停等長度，會產生回堵的情形 (spillback)，進而影響到其他路

段，結果反應到目標式將變為 180 (車輛分鐘) 及 2000 (車輛分鐘)，甚至在時段為 10 分鐘時，會產生更大的目標式數值，可看出在同樣的車流比例之下，長時段會產生更大的目標式數值。

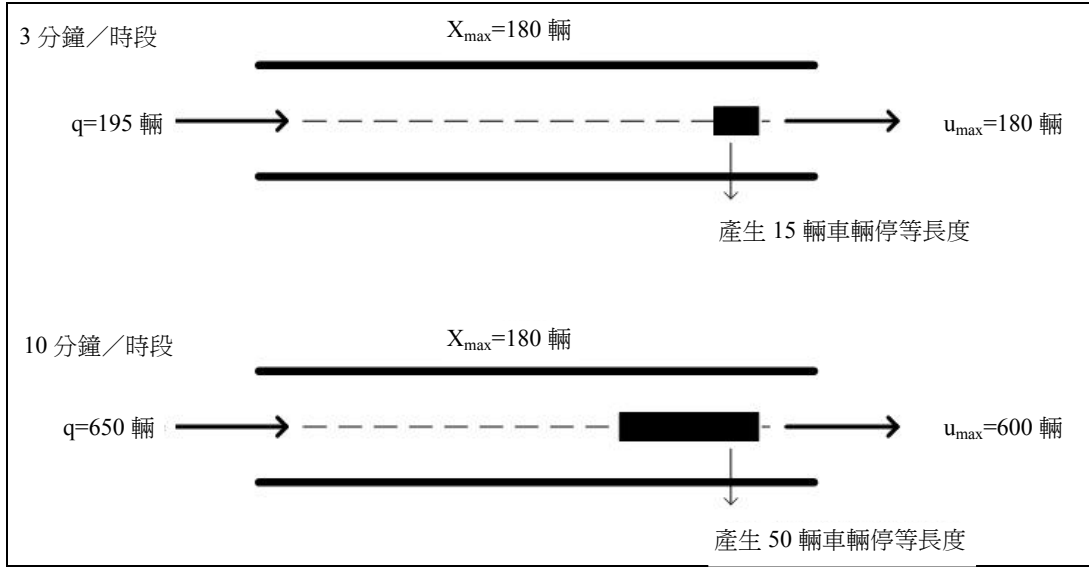


圖 8 路段中產生些許車輛停等情形示意圖

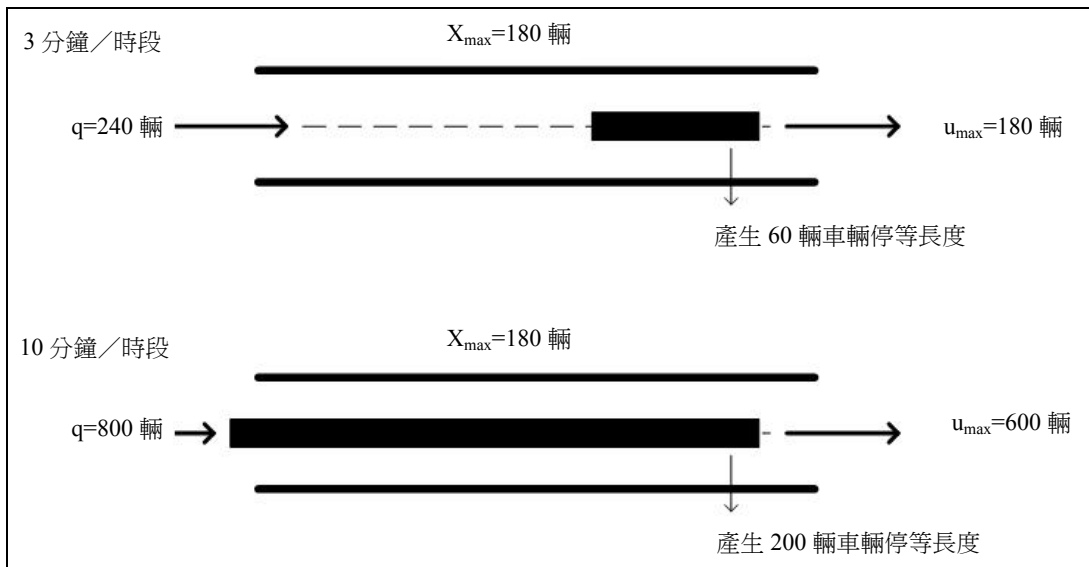


圖 9 路段中產生嚴重車輛停等情形示意圖

綜合以上結果，利用不同的時段長度進行實驗求解時，會產生不同的目標式數值。除了會影響目標式數值外，由於切割為更細的時間區段，使得變數及限制式增加，將增加求解的難度及影響求解效率。

4.3.2 時段長度之敏感度分析與結果比較

針對不同時段設定的影響，本小節將虛擬路網實驗時段設定為 3 分鐘，進行相同的實驗，並將其實驗結果與時段 10 分鐘的結果進行比較分析，其目標式結果如圖 10 所示。

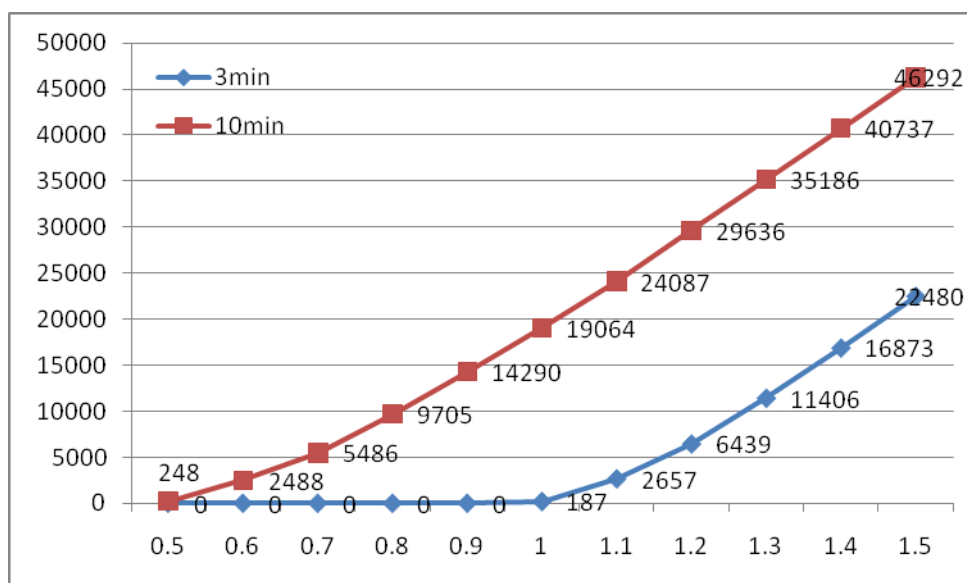


圖 10 不同時段長度對於目標式之影響

在時段為 3 分鐘時，實驗 1 到實驗 5 皆無產生車輛停等情形，而當車流為 100% (實驗 6) 情況下目標式數值為 187 (車輛分鐘)，而當路網中車輛增加至 150% 時，其目標式結果為 22480 (車輛分鐘)，可知隨著車輛數增加，目標式結果也不斷增加，但相對於時段 10 分鐘的實驗結果，時段 3 分鐘的目標式皆小於 10 分鐘的實驗。

而在於目標式差值部分，車輛數低於 90% 的實驗中皆為 0，而 100% 車輛數比 90% 車輛數的求解結果相差 187 (車輛分鐘)，而隨著車流量的增加，使得前後實驗目標式數值差值越來越大，如圖 11 所示。

不同的時段長度影響目標式結果之外，也影響變數及限制式的數目，在時段 10 分鐘設定之下，共有 1323 個變數及 1089 條限制式，而當時段為 3 分鐘時，則有 4448 個變數及 3802 條限制式，因此可看出當時段切割較小時，將會增加變數及限制式的數量，進而

影響求解的效率。

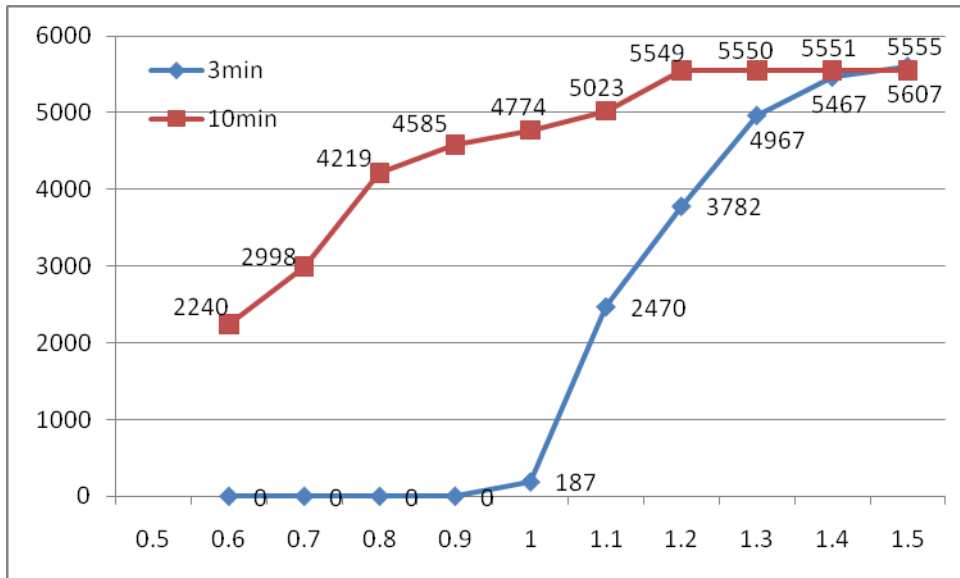


圖 11 不同時段長度對於目標式差值之影響

五、桃園路網實驗與數值結果分析

利用桃園路網驗證本研究最佳化控制模型，藉由實際路網特性及車流情形，驗證本研究最佳化控制模型之可行性及實用性。5.1 節為本研究中桃園路網介紹與實驗設計；5.2 節為桃園路網實驗的求解結果及數值分析。

5.1 路網說明與實驗設計

本研究欲實驗的桃園路網範圍，包含國道 1 號、國道 2 號、省道 4 號及省道 31 號，其中包含大竹交流道、機場系統交流道及南坎交流道，該路網為北部國道重要的區域，北向可直接進入大臺北地區，南向可到達新竹科學區及大臺中地區，往西可到達桃園中正國際機場，因此該運輸走廊的服務能量相當高，也具有高功能性的服務，故挑選該區域範圍作為本研究實驗的運輸走廊。該實際路網符合運輸走廊的定義，包含一條主要幹道的高速公路（國道 1 號）、平行於主要幹道的道路（省道 31 號）及部分市區道路，該路網如圖 12 所示。在圖中粗黑線部分為高速公路路段，虛線部分為上下匝道，而一般線段則為一般市區道路，各節點編號及節線編號如圖 12 所示，該路網有 54 條節線及 35 個節點，共分為 8 個分區。

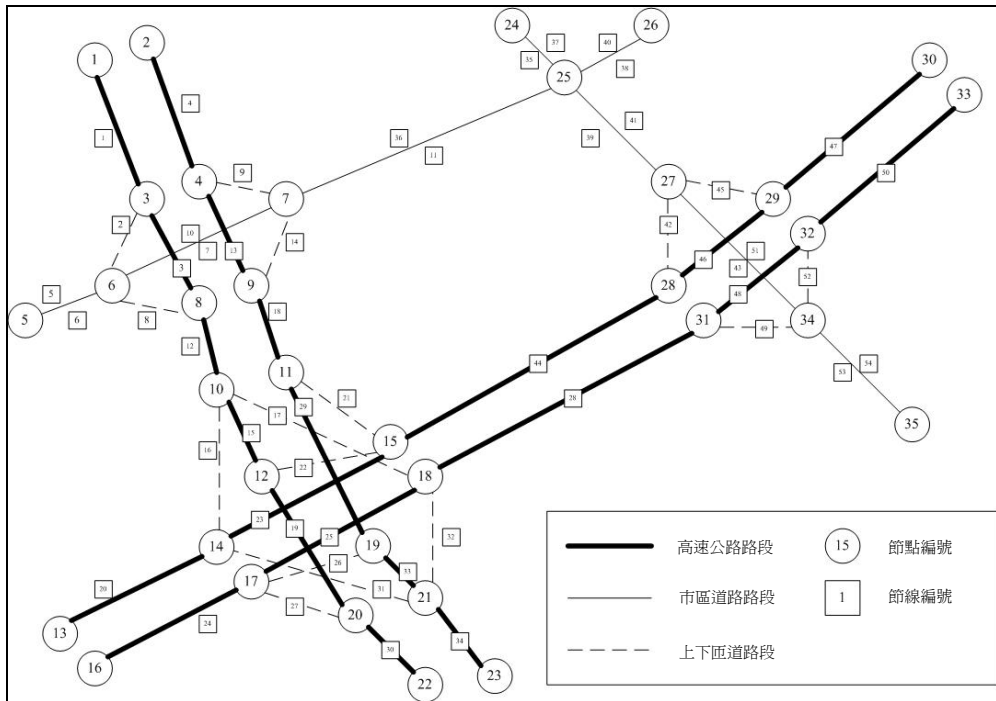


圖 12 桃園路網示意圖

為了解桃園路網求解情形，本研究根據不同的需求量進行求解，依據鼎漢國際工程顧問股份有限公司研究^[17]設計桃園路網產生車輛數，實驗時間分為 6 個時段，一個時段為 10 分鐘共 60 分鐘。調查桃園整體運輸的車輛起迄輛作為基礎車流量，第 1 時段到第 6 時段依序為 80%、100%、100%、80%、60%及 40%。本研究將桃園路網分為 8 個分區，車輛分別由 8 個分區進入路網，基礎車流量共產生 13491 輛。藉由不同的車輛需求量實驗觀察最佳化結果的變化，並觀察整體路網中車流的變化，共分為 11 組不同的需求量實驗，分別為基礎車流量的 50%~150%，另外將針對不同的車流量，定義為低、中及高三種程度的需求量，觀察不同路段的車流變化，詳細的實驗設計如表 8 所示。

在不同需求量實驗之後，將設定路網中有事故發生，藉由最佳化控制模型求解並觀察路網中車流的變化，並針對事故發生附近路段車流及車輛停等車隊的影響變化進行討論。接著將引入 VMS (variable message systems, 可變標誌系統)，觀察當發生事故時引入 VMS 對於路網的影響。最後使用 DynaTAIWAN 進行模擬實驗，並與最佳化控制模型最佳解進行比較與分析。

5.2 不同需求量實驗結果與數值分析

根據求解結果，在 50%的車流量中，目標式數值為 13279 (車輛分鐘)，而隨著車流量

的增加，在 60% 的車流中增加至 31506 (車輛分鐘)，在基礎車流情況下，目標式數值為 138006 (車輛分鐘)，而當路網中車輛增加到基礎車流的 150% 時，整體路網的目標式數值則增加至 319382 (車輛分鐘)。藉由圖 13 可看出，隨著車流量不斷地增加，整體路網也產生較多的車輛停等長度，使得目標式也不斷地上升。

表 8 桃園路網實驗設計

實驗	總產生車流量 (輛／小時)	車流百分比	號誌化路口週期	初始匝道儀控率 (輛／車道／分鐘)
1	6746	50%	60 秒	20
2	8095	60%	60 秒	20
3	9444	70%	60 秒	20
4	10793	80%	60 秒	20
5	12142	90%	90 秒	20
6	13491	100%	90 秒	20
7	14840	110%	90 秒	20
8	16189	120%	120 秒	20
9	17538	130%	120 秒	20
10	18887	140%	120 秒	20
11	20237	150%	120 秒	20

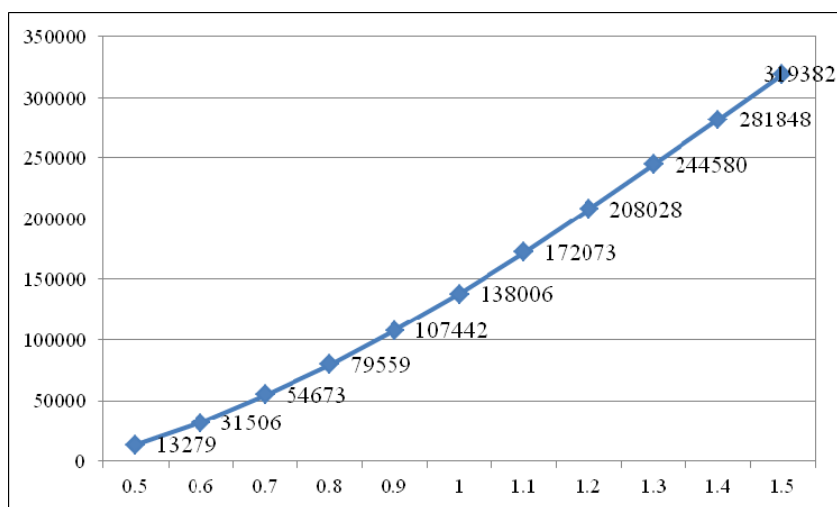


圖 13 桃園路網各實驗下目標式變化情形

另外，對於各個實驗所增加延滯車輛的差值，由較多車輛實驗減去少 10% 的前一個實驗，其差距結果如下圖 14 所示。根據其結果，可看出當車流量增加時，每一實驗的目標式也隨之增加，而與前一實驗相差之增加量，也隨著不同百分比的車流量實驗增加，60% 的車流量實驗與 50% 車流量實驗增加約 18227 (車輛分鐘)，而實際中 60% 的車輛數比 50% 的車輛數增加 1349 輛車，車輛停等長度增加的幅度大於增加的車輛數。當車輛數增加到 100% 的基礎流量時，與 90% 車流量相比，兩實驗的差距則為 30564 (車輛分鐘)，因此可以看到 100% 實驗增加的車輛數均產生停等情形，且增加的幅度皆大於增加的車輛數，可知當路網中車輛越來越多時，產生的擁擠情形越嚴重。

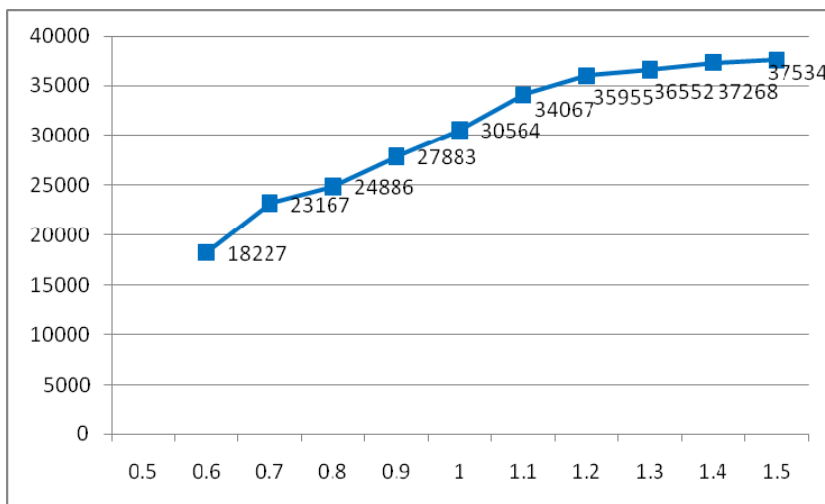


圖 14 桃園路網各實驗下目標式增加量情形

據以上實驗結果，分別定義實驗 1 為低車流量、實驗 6 為中流量及實驗 8 為高車流量，以下將詳細討論在三種程度車流量下路網車流的變化。在目標式數值的部份，低、中、高三種實驗的結果分別為 13279 (車輛分鐘)、138006 (車輛分鐘) 及 208028 (車輛分鐘)，可知當路網中車輛增加時，其停等車隊也較多，目標式數值相對也越大。

針對各路段所產生的車輛停等情形，表 9 整理出在三種實驗中，各路段所產生的停等車隊分佈情形。在國道 1 號部分，於低、中、高三種流量時皆產生停等車隊情形，尤其是路段 46，於三實驗中皆產生車輛停等情形，可看出國道 1 號中主要的車流瓶頸。在國道 2 號部分，三實驗中皆產生停等車隊，而路段 18 則為國道 2 號的車流瓶頸路段。而省道 31 號部分，車輛停等情形皆產生在路段 7 及 36。省道 4 號部分，路段 39 及 51 於三種車流量實驗中皆產生車輛停等，因此可看出市區道路中車流主要行經路段。在上匝道部分，由於匝道儀控的關係，當下游路段高速公路主線較多車時，上匝道放行的車輛則較少，使得部分車輛停等在上匝道，如上匝道路段 9 (大竹交流道西向上匝道)、42 及 52 (南崁交流道雙向上匝道)，在中高車流量中均產生大量的停等車隊，可看出該南崁交流道的車流擁擠

情形。在下匝道部分，低流量的情況下並無產生車輛停等情形，但在中、高流量時，南崁交流道的雙向下匝道皆產生些許停等車隊，其影響原因為平面市區道路的擁擠，造成車輛回堵至匝道上。

因此可以看出當車流量增加時，使得路網較擁擠，產生較多的停等車隊，而隨著車流量的增加，各路段所產生的車輛停等長度較多且時間也較長，分佈的範圍也較大。

表 9 桃園路網三實驗各路段車輛停等長度之路段分佈情形

路段	實驗車流量	產生路段編號
國道 1 號	低	46
	中	25、28、44、46、48
	高	25、28、44、46、48
國道 2 號	低	18
	中	12、18
	高	12、13、18
省道 31 號	低	7、36
	中	7、36
	高	7、36
省道 4 號	低	39、51
	中	39、43、51
	高	39、43、51
上匝道	低	X
	中	9、42、52
	高	9、42、52
下匝道	低	X
	中	45
	高	45、49

根據以上桃園路網實驗結果，驗證出該最佳化控制模型套用至實驗路網求解的情形，隨著車流量的增加，目標式數值也隨之增加，可得知當路網中車輛增加時，使得路網中車輛停等長度也隨之增加，但於後面幾個時段，由於進入路網車輛數較少，使得部分路段的車輛停等情形獲得紓解，甚至有些路段在最後的時段完全無車輛停等情形；而隨著整體車流量增加，路網中產生車輛停等情形的路段也較多，且產生時段也較長，藉此可看出當車流量增加時對於路網的影響。而藉由停等車隊的路段及時間分佈，可以觀察出該路網中車流的瓶頸路段及車流主要行經路段，藉此可以提供作為交通管理策略的擬訂及措施，如南崁交流道為該桃園路網中較為擁擠的路段，相關交管單位可參考之。本實驗結果也驗證了最佳化控制模型的實用性及擴充性。

六、情境實驗及模擬分析

利用最佳化控制模型的求解觀察事故下路網變化的情形，另外引入 VMS 觀察對於路網中發生事故的影響，最後將藉由模擬模式 DynaTAIWAN 進行模擬分析。模擬分析中主要考慮兩個情境為初始設定控制與最佳化控制模型的最佳解，利用相關的指標觀察整體路網績效的變化。6.1 節為情境設定的求解實驗，包括事故發生及引入 VMS 的影響；6.2 節將利用 DynaTAIWAN 模擬路網的運行情形，以比較模擬結果及求解結果。

6.1 交通情境設定與數值分析

透過交通事故的設定了解最佳化控制模型的實用性，在本研究中假設交通事故發生在國道 1 號北上路段，即節點 17 到節點 18 的路段 (路段 25)。其假設事故發生於實驗時間的第 10 分鐘，影響的時間持續為 30 分鐘，即第 1 時段到第 3 時段，其事故的發生占據主線四車道中的三車道，使得主線可通過車流縮為 25%，藉由以上的假設來觀察事故對於路網的影響。

根據以上交通事故相關設定求解後，目標式結果為 139314 (車輛分鐘)，而在無事故狀況下的目標式結果為 138006 (車輛分鐘)，可以看出事故確實使得路段較為擁擠，且產生較多的車輛停等長度。

此外，在高速公路發生事故後，於發生交通事故的上游路段設定 VMS，以提供用路人選擇替代道路的機會。設定 VMS 的路段為國道 1 號路段 24 (節點 16~節點 17)，發佈時間為 20 到 50 分鐘，共 30 分鐘，藉此 VMS 的設定，提供用路人可以選擇轉向國道 2 號以避開國道 1 號的事故，假設該路段中有 10% 的車輛依循 VMS 所提供資訊選擇替代道路。

根據以上設定，經過最佳化控制模型的求解後，目標式結果為 136674 (車輛分鐘)，另外發生事故時的目標式結果為 139314 (車輛分鐘)，可發現當路網中發生事故而引入 VMS，可幫助降低路網的車輛停等情形，並紓解部分車輛選擇替代道路避開事故路段，以避免擁擠路段的產生。

無事故、發生事故及發生事故並發布 VMS 資訊三種設定，其目標式數值如表 10 所示。

表 10 有無發生事故及 VMS 設定目標式數值變化

情境設定	無事故	有事故	有事故及 VMS
目標式結果 (車輛分鐘)	138006	139314	136674

此外，為探討 VMS 資訊對於車輛移轉的影響，將假設三種實驗比較目標式的變化，假設路段中接受到 VMS 資訊而選擇改道的車輛有 10%、30% 及 50%，藉此觀察整體路網

的變化，根據最佳化控制模型求解結果如表 11 所示。

表 11 不同比例車輛接受 VMS 資訊目標式結果比較

接受 VMS 資訊比例	10%	30%	50%
目標式結果(車輛分鐘)	136674	132076	128271

由以上結果可以發現，當較多駕駛人接受發佈的 VMS 資訊時，使得路網中的車輛選擇替代道路以避開壅塞路段，並且降低壅塞路段的車輛停等情形外，其他路段亦獲得較多的使用率，提升整體路網運行效率。當路段中 10% 的車輛選擇替代道路時，目標式結果為 136674 (車輛分鐘)，而當有 30% 車輛依循 VMS 資訊時，目標式結果則降為 132076 (車輛分鐘)，而當路段中 50% 車輛行駛 VMS 所提供之替代道路，則目標式結果則為 128271 (車輛分鐘)，可以看出 VMS 對於擁擠路網的改善情形。

6.2 控制策略之模擬分析

利用模擬模式 DynaTAIWAN 進行模擬分析，主要目的是希望觀察整體路網績效，在不同控制策略下可能的變化。模擬分析中主要考慮兩個情境為初始設定控制與最佳化控制模型的最佳解。

實驗設計以前節桃園路網的實驗 6 為基礎，建構所有的輸入資料，包括路網的特性與需求資料。基礎實驗為路網中號誌化路口時制設計為預設時制，而對照組實驗為最佳化控制模型求取的時制設計，比較不同的交通管理策略對於整體路網的影響。

經由 DynaTAIWAN 模擬之後，整理出整體路網的相關實驗結果如表 12 所示。由結果可以看出，當路網中號誌時制設計為預設時制時，通過該號誌路口車輛的平均旅行時間為 9.03 (分鐘／輛)，但若號誌時制設計為最佳化控制模型最佳解時，平均旅行時間有明顯的下降，約為 5.62 (分鐘／輛)，兩者比較改善 3.41 分；在停等時間有很明顯的變化，最佳

表 12 預設時制與最佳化控制模型最佳解設定 DynaTAIWAN 模擬結果比較

	預設時制設計	最佳化控制模型最佳解
平均旅行時間 (分鐘／輛)	9.03	5.62
平均停等時間 (分鐘／輛)	4.51	1.53
平均旅行距離 (公里／輛)	5.339	5.172
平均速度 (公尺／分鐘)	1164.39	1364.76

化控制模型的最佳解約減少 2.98 分鐘，另外在平均旅行速度也有明顯的改善，由此可知經由最佳化控制模型求取的最佳解能改善路網的運行效率。

另外針對匝道儀控部分，藉由模擬的方法比較設置匝道儀控對於路網的影響，以桃園路網實驗 6 為基礎實驗，分別設定為定時儀控及最佳化控制模型最佳解儀控設計，相互比較三種情況下，整體路網平均數值的變化。定時儀控率的部分，則由初始儀控率作為設定，即為 20 (輛／分鐘／車道)。經由 DynaTAIWAN 模擬之後，各項模擬結果平均數值如表 13 所示。

表 13 有無設置匝道儀控設定 DynaTAIWAN 模擬結果比較

	無匝道儀控	定時匝道儀控	最佳化控制模型最佳解
平均旅行時間 (分鐘／輛)	4.15	4.09	4.05
平均停等時間 (分鐘／輛)	0.28	0.24	0.21
平均旅行距離 (公里／輛)	5.228	5.224	5.217
平均速度 (公尺／分鐘)	1364.76	1358.19	1365.95

此結果可發現，將最佳化控制模型求取最佳解的匝道儀控設定經由模擬之後，與其他兩組模擬實驗比較，則有小幅度的改善，可知最佳化控制模型中匝道儀控設定考量高速公路主線車流占有率，較能夠對當下車流狀況進行修改儀控率設定，使得車輛能較順暢，並提升整體運輸效率。

經以上實驗結果發現，當路網中發生事故時，會影響該路段及附近路段的車輛停等情形，使得整體路網車輛停等情形增加，因此，引入 VMS 提供駕駛人替代道路選擇的機會，可改善整體路網的運輸效率，並減少事故影響的時間。模擬結果驗證本研究建立最佳化控制模型之實用性，由最佳化控制模型求解後的最佳解設定，如號誌化路口的時制設計及匝道儀控率的設定，確實可以改善整體運輸走廊的運行效率，並提升平均旅行時間及速度，降低平均停等時間，驗證本研究最佳化控制模型的可用性，此最佳化控制模型可作為交管單位研擬交管策略的一項參考。

七、結論與建議

本研究係以最佳化控制模型的建立，探討運輸走廊中車流變化的情形，將路徑導引設定至最佳化控制模型，以更確切掌握路網中車流的行進狀態，並透過不同的車輛求解實

驗，觀察路網中各路段的車輛停等情形。本研究最佳化控制模型套用至實際桃園路網進行相關需求量的實驗，實驗結果驗證最佳化控制模型的實用性及擴充性，並利用 DynaTAIWAN 模擬軟體進行相關實驗模擬，已驗證本研究最佳化控制模型的求解結果，可有效改善整體運輸走廊的運行效率。本研究獲至幾項結論與建議如下：

1. 本研究探討範圍為高速公路、平行幹道及市區道路組成之運輸走廊，利用最佳化控制模型建立運輸走廊的幾何特性及車流情形，經由最佳化求解各路段於各時段的車輛停等長度、號誌化路口時制設計及匝道儀控率的設定，藉由以上各變數結果，得知本研究最佳化控制模型具有其合理性、實用性及擴充性。
2. 在不同車流需求量方面，當各時段進入路網車輛增加時，整體路網的車輛停等情形也隨之增加，透過低中高三種車流量的實驗結果，可觀察出該運輸走廊主要的車流瓶頸路段，此結果可供相關交管單位進行交管策略的訂定，以改善整體路網的運行。隨著車流量的增加，路網中路段產生的車輛停等情形隨之增加，分佈的路段也增加，持續的時間也較長，影響整體路網的情形也較大。
3. 由路徑導引的方法，可以得知各路段轉向的車流情形，以觀察運輸走廊中車流主要行駛方向，藉由針對路網中各車流方向進行觀察，可得知路網中車流主要瓶頸路段及方向，並且最佳化路徑資源的使用。
4. 在匝道儀控方面，本研究內容主要包括大竹及南崁交流道，藉由匝道儀控率控制進入高速公路的車輛數，隨著上匝道的下游路段高速公路主線車流增加，匝道儀控率隨之調低，而當高速公路主線車流趨近飽和時，匝道儀控率將隨之降低，以避免更嚴重的車輛回堵。而當各時段進入路網的車輛增加時，匝道儀控率的調整幅度也隨之變大，以控制車輛流入量。
5. 當運輸走廊中路段發生事故時，由目標式結果看出事故將增加路網中車流停等情形，當引入 VMS 至最佳化控制模型中時，發現 VMS 將引導部分車流選擇替代道路以避開事故路段，並改善整體路網車輛停等情形，藉此結果可供交管單位進行事故分析及設定交管策略參考。
6. 在模擬結果方面，由最佳化控制模型求取之號誌時制及匝道儀控設定之模擬實驗可得知，最佳化控制模型的相關交管策略設定，可改善整體路網的運行效率，如匝道儀控率可改善整體路網的平均旅行時間、平均停等時間及平均旅行速度。此結果證實，本研究建立之最佳化控制模型，確實可以幫助改善運輸走廊的運行效率。
7. 在號誌化路口部分，本研究已給定週期時間、損失時間及時相數，因此未來可針對各時段的車流數決定週期時間、綠燈時間及時相數，使得號誌化路口的時制設定，可更貼近當下的車流情況。
8. 本研究僅將路徑導引、匝道儀控、號誌時制設計及 VMS 等交管策略列入實驗之中，未來可針對更多交管策略進行探討，如車道縮減、轉向策略、壅塞策略等等，藉此觀察本研究建立之最佳化控制模型的擴充性及實用性。

9. 本研究僅藉由 DynaTAIWAN 模擬匝道儀控對於路網的影響，未來可將其他交管策略列入模擬的項目當中，以觀察各交管策略對於路網的改善程度，供交管單位進行交管策略研擬之參考。

參考文獻

1. Kotsialo, A. and Papageorgiou, M., “Motorway Network Traffic Control Systems”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 152, No. 2, 2004, pp. 321-333.
2. Papageorgiou, M., “An Integrated Control Approach for Traffic Corridors”, *Transportation Research C*, Vol. 3, No. 1, 1995, pp. 19-30.
3. Gazis, D. C., *Traffic Theory*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 2002.
4. Michalopoulos, P. and Stephanopoulos, G., “Oversaturated Signal System with Queue Length Constraints: Single Intersection”, *Transportation Research*, Vol. 11, No. 6, 1977, pp. 413-422.
5. Michalopoulos, P. and Stephanopoulos, G., “Oversaturated Signal System with Queue Length Constraints: Systems of Intersections”, *Transportation Research*, Vol. 11, No. 6, 1977, pp. 423-428.
6. Rathi, A. K., “A Control Scheme for High Traffic Density Sectors”, *Transportation Research B*, Vol. 22, No. 2, 1988, pp. 81-101.
7. FHWA, *Traffic Control Systems Handbook*, FHWA-SA-95-032, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington, D.C., 1996.
8. 江立仁，「整合型運輸走廊交通管理模式之研究」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 97 年。
9. Diakaki, C., Papageorgiou, M., and Mclean, T., “Simulation Studies of Integrated Corridor Control in Glasgow”, *Transportation Research C*, Vol. 5, No. 3, 1977, pp. 211-224.
10. FHWA, *Ramp Management and Control Handbook*, FHWA-HOP-06-001, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington, D.C., 2006.
11. Moreno-Banos, J. C., Papageorgiou, M., and Schaffnet, C., “Integrated Optimal Flow Control in Traffic Networks”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 71, No. 2, 1993, pp. 317-323.
12. Kotsialos, A., Papageorgiou, M., Mangeas, M., and Haj-Salem, H., “Coordinated and Integrated Control of Motorway Networks via Non-linear Optimal Control”, *Transportation Research C*, Vol. 10, No. 1, 2002, pp. 65-84.
13. Papamichail, I., Kotsialos, A., Margonis, I., and Papageorgiou, M., “Coordinated Ramp Metering for Freeway Networks – A Model Predictive Hierarchical Control Approach”, *Transportation Research C*, Vol. 18, No. 3, 2010, pp. 311-331.
14. Aboudolas, K., Papageorgiou, M., and Kosmatopoulos, E., “Store-and-forward Based Methods for the Signal Control Problem in Large-scale Congested Urban Road Networks”, *Transportation*

Research C, Vol. 17, No. 2, 2009, pp. 164-174.

15. 交通部運輸研究所，**區域智慧型運輸系統示範計畫－核心交通分析與預測系統（第二年期）**，民國 94 年。
16. 交通部運輸研究所，**臺灣地區公路容量手冊**，民國 90 年。
17. 鼎漢國際工程顧問股份有限公司，**「桃園整體運輸規劃案」**，民國 94 年。