

非線性系統於高快速道路整合匝道儀控 之研究

A NONLINEAR CONTROL SYSTEM FOR INTEGRATED FREEWAY RAMP METERING

張堂賢 Tang-Hsien Chang¹
莊國欽 Kou-Chin Chuang²

(92年11月26日收稿, 93年2月5日第一次修改, 93年3月12日
第二次修改, 93年4月19日定稿)

摘 要

都市地區高快速道路路段於晨昏峰時段, 因上匝道需求及交織量大, 經常發生交通壅塞。交通壅塞致使運輸效率降低與增加空氣污染。不連鎖的獨立匝道儀控系統效率則難達最佳化。本研究採 Payne 車流模式以泰勒展開式及連鎖律推導法, 構建出一非線性系統整合匝道儀控模型, 目標在使系統流量最大。在以中山高速公路臺北都會區路段及建國南北高架快速道路 T 形系統交叉之晨峰、昏峰的交通資料讀入模擬分析驗證結果, 發現本模式可相當有效紓解尖峰時刻車輛壅塞的情形。

關鍵詞：非線性控制；匝道儀控；車流模式；交通控制

-
1. 國立臺灣大學土木工程學系所交通組教授 (聯絡地址：106 臺北市羅斯福路四段 1 號臺大土木工程學系)。
 2. 國立臺灣大學土木工程研究所交通組碩士。

ABSTRACT

Traffic jam frequently occurs on urban freeway or expressway sections, particularly during morning and evening peak periods with heavily weaving and on-ramp demand. Congestion reduces transport efficiency and increases air pollution. With an isolated on-ramp metering control, it will not reach optimum. In this study, we applied Taylor's expansion and chaining law to Payne's dynamic traffic flow model, then formulated a nonlinear system model for integrated ramp metering control. The objective is to maximize the system throughputs. Using the T-type linked road network of the Sun Yat-Sen Freeway and Chan-Kuo Expressway in Taipei City as a test site, a simulation analysis revealed that the proposed model was able to relieve the traffic from congestion.

Key Words: *Nonlinear control; Ramp metering control; Traffic flow model; Traffic control*

一、前言

一般高速公路在都會區路段(如臺北)運輸需求量顯著增加。都會區高速公路與快速道路的銜接處更容易產生行車的瓶頸。快速道路匯入高速公路之車流常因採用時匝道儀控,使得匝道運作無法因應調解,車流回堵的情形時而產生。又若在快速道路上未實施匝道儀控,車輛可以自由進入高速公路主線段,過多的車輛匯入亦將使主線產生過飽和現象,將驅使快速道路在尖峰時刻形成一個大型而不穩定的運輸走道。為改善此種交通,應有更好的儀控策略規劃。

國內外相關匝道儀控研究相當多,本文選擇國內及部分國外主要參考資料說明於後。林福田^[1]係根據 Wattleworth 模型建立線性規劃模式,並加入匯入區域容量限制式,建立匝道儀控最佳化模式。然該研究沒有考慮匝道等候長度及最大儀控率(metering rate)之限制。陳菟蕙^[2]利用 FREQ8PE 模擬高速公路車流上下匝道之操作績效,並由此軟體提供匝道儀控之最佳儀控策略以建立一線型的高速公路交通控制策略專家系統之雛形,並未討論 T 型交叉複雜問題。張程皓^[3]以 FREQ10PE 模擬模式為分析工具,由出、入口匝道流量及路段流量資料推估高速公路旅次起迄型態,探討高速公路於都會區之功能定位,並作為模擬匝道儀控程序之量化基礎,由高速公路與平面道路之互動關係,考量短程旅次移轉等特性,構建都會區高速公路和平面道路之整合控制程序。蘇梓見^[4]以模擬實驗法,採用 FHWA 所研發之 FRESIM 微觀車流模擬模式,控制策略採用定時儀控及地區交通感應儀控策略,並未考慮整合儀控策略及匯入控制。吳耿毓^[5]利用簡單的試誤性學習方式概念,利用人工智慧取代目前利用計算的方式,進行高速公路匝道儀控。Papageorgiou 等^[6]提出 ALINEA 自動控制策略的匝道儀控法。Papageorgiou 與 Mayr^[7]提出非線性儀控模式;Chang、Ho 與 Wei^[8]發展有 DSCOM 數學規劃模式;Zhang、Ritchie 與 Recker^[9]建議採用非線性最佳控制的模式。李宗憶^[10]研究引用動態 OD 技術估計並預測各時段上匝道駛入高速公路車輛

的 OD 分配及其到達下匝道的時間分布來加以描述，以充分反映高速公路各匝道之間車流運行的 OD 特性。在系統描述方面，採用波動方程式來描述高速公路車流運行的動態系統模式，以促使系統狀態與理想狀態之間的偏差量最小為控制目標，構成所謂的線性二次控制問題。張堂賢^[11]提出一應用於高速公路整體匝道儀控之非線性模式。以二階車流波動系統描述速率方程、以一階車流波動系統描述密度方程，構成一非線性控制系統，更能精確達到描述高速公路車流模式的目的。目標式採用主線流量最大，並以偏微分求解出儀控律 (control law)。

本研究則設計以建置在高、快道路上的偵測器所蒐集到資料加以應用，能即時反映道路狀況為前提，並利用上匝道儀控的方式來控制高快速道路的運行狀況。控制機制係以非線性控制理論為基礎，建立一個即時反映尖峰、非尖峰車流的閉迴路控制系統，在匝道容量限制下，使得整個公路相鄰路段得以達到整合性最大的使用效率。

根據觀察，中山高速公路臺北都會區路段為全線交通量最大且壅塞最為嚴重的區段，於晨昏峰時段之服務水準均在 D 級及 E 級之間，圓山至三重交流道區間更達 F 級程度^[12]，顯然高速公路服務水準受都會區尖峰時段之交通需求影響甚大。本研究之儀控模式應用之驗證即以中山高速公路臺北都會區路段 (長度 17.5 公里，五個交流道 11 個進出匝道口) 及建國南北高架快速道路 (長度 6.6 公里，21 個匝道口) 所形成之 T 型路網為例 (參見圖 1)，以實際該路進出車輛晨峰、昏峰的交通資料進行模擬，分析所提模式之效能。

二、非線性控制系統模式之建立

本節以 Payne 的離散線性方程式為基礎^[11,13,14]，先引用其一階非線性方程組，再根據泰勒展開式及連鎖律推導出二階的非線性速率方程式，得到由速率及密度方程式所組成的系統狀態方程組。之後，考量所可能遇到的上下匝道及匯入匝道限制式，最後訂定非線性控制系統目標函數。

2.1 Payne 公式應用於控制系統之描述

Payne 的車流方程主要是根據巨觀動量模式 $q = \rho \times u$ 所推導出來 (q 為車流量； ρ 為車輛密度； u 為車流速率)，為符合實際車流行為，並加入了駕駛人對路況預期心態之影響和加減速對車流流場之壓縮膨脹現象因子： v (駕駛者預期心態係數，用於反映本路段的駕駛者將受到下一路段交通狀況的衝擊影響，即下一路段若比本路段擁擠，駕駛可能減速的程度係數) 及 τ (駕駛者跟車反映時間係數，反映某時點 k 之實際行車速率與理論均衡速率間倘有落差，對駕駛者所需調解的時間)。下面是該模型之多路線多路段之離散型表示式^[11]，本文中相關符號定義請參見附錄：

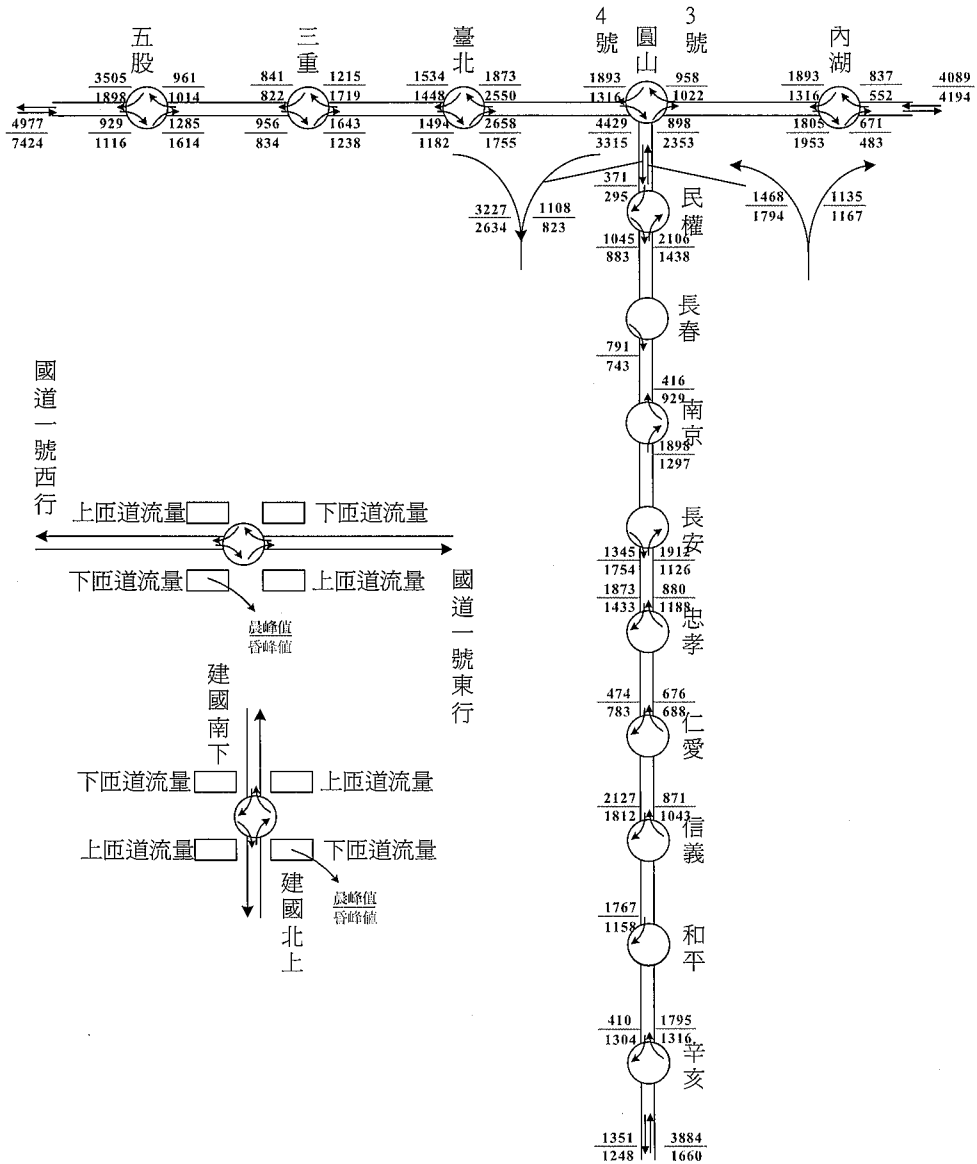


圖 1 中山高速公路臺北區路段及建國南北高架道之匝道與需求流量示意圖

密度方程式

$$\rho_{f,l}^{k+1} = \rho_{f,l}^k + \Delta t \frac{n_{f,l-1} q_{f,l}^{k+1} - n_{f,l} q_{f,l+1}^{k+1}}{n_{f,l} (x_{f,l+1} - x_{f,l})} + \Delta t \frac{r_{f,l}^{k+1} - s_{f,l}^{k+1}}{n_{f,l} (x_{f,l+1} - x_{f,l})} \quad (1)$$

速率方程式

$$u_{f,l}^{k+1} = u_{f,l}^k - \Delta t \frac{u_{f,l}^k (u_{f,l}^k - u_{f,l-1}^k)}{0.5(x_{f,l+1} - x_{f,l-1})} - \frac{\Delta t}{\tau} [u_{f,l}^k - u_e(\rho_{f,l}^k)] - v \left(\frac{\Delta t}{\tau} \right) \left[\frac{\rho_{f,l+1}^k - \rho_{f,l}^k}{0.5\rho_{f,l}^k (x_{f,l+2} - x_{f,l})} \right] \quad (2)$$

流量方程式

$$q_{f,l}^{k+1} = \rho_{f,l-1}^k \times u_{f,l-1}^k \quad (3)$$

上匝道淨流量

$$\gamma_{f,l}^{k+1} = r_{f,l}^{k+1} - s_{f,l}^{k+1} \quad (4)$$

彙整(1)、(3)與(4)可得到一個一階密度遞移方程式

$$\rho_{f,l}^{k+1} = \rho_{f,l}^k + \Delta t \frac{n_{f,l-1} \rho_{f,l-1}^k u_{f,l-1}^k - n_{f,l} \rho_{f,l}^k u_{f,l}^k}{n_{f,l} (x_{f,l+1} - x_{f,l})} + \Delta t \frac{\gamma_{f,l}^{k+1}}{n_{f,l} (x_{f,l+1} - x_{f,l})} \quad (5)$$

本研究以臺北市建國快速道路與中山高速公路之 T 型交叉為受控系統。建國快速道路北向令為路線一、中山高速公路東向令為路線二、西向令為路線三、建國快速道路南向令為路線四。每路線分成數個路段，除了初始路段外，各路段包括一組上下匝道（功能性匝道）。且北向道路末端路段，部分車流透過系統性匝道併入東向道路；北向公路末端另一部分車流透過系統性匝道併入西向道路。本模式同時亦考慮公路對公路之四個匯入匝道（系統性匝道），構成一個整合匝道儀控模型。

以方程式(2)及(4)，就路線 f 路段 l 而言，可組成一系統方程組如下：

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{f,l} \\ \Delta \rho_{f,l} \end{bmatrix} = \Delta t \times \left\{ \begin{bmatrix} g_{f,l} \\ h_{f,l} \end{bmatrix} + \frac{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}{n_{f,l} (x_{f,l+1} - x_{f,l})} \gamma_{f,l}^{k+1} \right\} \quad (6)$$

其中

$$\Delta u_{f,l} = u_{f,l}^{k+1} - u_{f,l}^k \quad (7)$$

$$\Delta \rho_{f,l} = \rho_{f,l}^{k+1} - \rho_{f,l}^k \quad (8)$$

$$h_{f,l} = \frac{n_{f,l-1} \rho_{f,l-1}^k u_{f,l-1}^k - n_{f,l} \rho_{f,l}^k u_{f,l}^k}{n_{f,l} (x_{f,l+1} - x_{f,l})} \quad (9)$$

$$g_{f,l} = -u_{f,l}^k \frac{u_{f,l}^k - u_{f,l-1}^k}{0.5(x_{f,l+1} - x_{f,l-1})} - \frac{1}{\tau} [u_{f,l}^k - u_e(\rho_{f,l}^k)] - v \left(\frac{1}{\tau} \right) \left[\frac{\rho_{f,l+1}^k - \rho_{f,l}^k}{0.5\rho_{f,l}^k (x_{f,l+2} - x_{f,l})} \right] \quad (10)$$

依研究例設定 $f = 1, 2, 3, 4$ ， $l = 0, 1, 2, \dots, M_f$ 。茲將(6)式簡化表示如下：

$$\Delta \mathbf{X} = \Delta t \times [\mathbf{F}(\mathbf{X}) + \mathbf{B} \times \gamma] \quad (11)$$

式中

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2]^T ; \Delta \mathbf{X} = [\Delta \mathbf{x}_1, \Delta \mathbf{x}_2]^T$$

$$\mathbf{F} = [g(\mathbf{X}), h(\mathbf{X})]^T ; \mathbf{B} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{b}]^T$$

$$\Delta \mathbf{x}_1 = \Delta t \times g(\mathbf{X}) ; \Delta \mathbf{x}_2 = \Delta t \times [h(\mathbf{X}) + \mathbf{b} \times \gamma]$$

$$\mathbf{x}_1 = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T \text{ (速率向量矩陣)} ; \Delta \mathbf{x}_1 = [\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3, \Delta u_4]^T$$

$$\mathbf{x}_2 = [\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4]^T \text{ (密度向量矩陣)} ; \Delta \mathbf{x}_2 = [\Delta \rho_1, \Delta \rho_2, \Delta \rho_3, \Delta \rho_4]^T$$

$$u_1 = [u_{1,1}, u_{1,2}, u_{1,3}, \dots, u_{1,M_1}]^T ; \Delta u_1 = [\Delta u_{1,1}, \Delta u_{1,2}, \Delta u_{1,3}, \dots, \Delta u_{1,M_1}]^T$$

$$u_2 = [u_{2,1}, u_{2,2}, u_{2,3}, \dots, u_{2,M_2}]^T ; \Delta u_2 = [\Delta u_{2,1}, \Delta u_{2,2}, \Delta u_{2,3}, \dots, \Delta u_{2,M_2}]^T$$

$$u_3 = [u_{3,1}, u_{3,2}, u_{3,3}, \dots, u_{3,M_3}]^T ; \Delta u_3 = [\Delta u_{3,1}, \Delta u_{3,2}, \Delta u_{3,3}, \dots, \Delta u_{3,M_3}]^T$$

$$u_4 = [u_{4,1}, u_{4,2}, u_{4,3}, \dots, u_{4,M_4}]^T ; \Delta u_4 = [\Delta u_{4,1}, \Delta u_{4,2}, \Delta u_{4,3}, \dots, \Delta u_{4,M_4}]^T$$

$$\rho_1 = [\rho_{1,1}, \rho_{1,2}, \rho_{1,3}, \dots, \rho_{1,M_1}]^T ; \Delta \rho_1 = [\Delta \rho_{1,1}, \Delta \rho_{1,2}, \Delta \rho_{1,3}, \dots, \Delta \rho_{1,M_1}]^T$$

$$\rho_2 = [\rho_{2,1}, \rho_{2,2}, \rho_{2,3}, \dots, \rho_{2,M_2}]^T ; \Delta \rho_2 = [\Delta \rho_{2,1}, \Delta \rho_{2,2}, \Delta \rho_{2,3}, \dots, \Delta \rho_{2,M_2}]^T$$

$$\rho_3 = [\rho_{3,1}, \rho_{3,2}, \rho_{3,3}, \dots, \rho_{3,M_3}]^T ; \Delta \rho_3 = [\Delta \rho_{3,1}, \Delta \rho_{3,2}, \Delta \rho_{3,3}, \dots, \Delta \rho_{3,M_3}]^T$$

$$\rho_4 = [\rho_{4,1}, \rho_{4,2}, \rho_{4,3}, \dots, \rho_{4,M_4}]^T ; \Delta \rho_4 = [\Delta \rho_{4,1}, \Delta \rho_{4,2}, \Delta \rho_{4,3}, \dots, \Delta \rho_{4,M_4}]^T$$

$$g(\mathbf{X}) = [g_1, g_2, g_3, g_4]^T ; h(\mathbf{X}) = [h_1, h_2, h_3, h_4]^T$$

$$g_1 = [g_{1,1}, g_{1,2}, g_{1,3}, \dots, g_{1,M_1}]^T ; h_1 = [h_{1,1}, h_{1,2}, h_{1,3}, \dots, h_{1,M_1}]^T$$

$$g_2 = [g_{2,1}, g_{2,2}, g_{2,3}, \dots, g_{2,M_2}]^T ; h_2 = [h_{2,1}, h_{2,2}, h_{2,3}, \dots, h_{2,M_2}]^T$$

$$g_3 = [g_{3,1}, g_{3,2}, g_{3,3}, \dots, g_{3,M_3}]^T ; h_3 = [h_{3,1}, h_{3,2}, h_{3,3}, \dots, h_{3,M_3}]^T$$

$$g_4 = [g_{4,1}, g_{4,2}, g_{4,3}, \dots, g_{4,M_4}]^T ; h_4 = [h_{4,1}, h_{4,2}, h_{4,3}, \dots, h_{4,M_4}]^T$$

$\mathbf{0} = [0]$, 為 $(M_1 + M_2 + M_3 + M_4) \times (M_1 + M_2 + M_3 + M_4)$ 零方陣

$\mathbf{b} = \text{Dia}[b_{f,l}]$, 為 $b_{f,l} = 1/[n_{f,l}(x_{f,l+1} - x_{f,l})]$ 之 $(M_1 + M_2 + M_3 + M_4) \times (M_1 + M_2 + M_3 + M_4)$ 對角方陣

$$\gamma = [\gamma_{f,l}^{k+1}]_{(M_1 + M_2 + M_3 + M_4) \times 1}$$

(11)非線性速率方程部分若以泰勒展開式分解取得更為精確的二階非線性速率方程式將如(12)所示。於是方程式(11)變為：

$$\mathbf{x}_1(k+1) = \mathbf{x}_1(k) + \Delta t \cdot g(\mathbf{X}(k)) + \frac{\Delta t^2}{2} \left\{ \frac{\partial g(\mathbf{X}(k))}{\partial \mathbf{x}_1} \cdot g(\mathbf{X}(k)) + \frac{\partial g(\mathbf{X}(k))}{\partial \mathbf{x}_2} [h(\mathbf{X}(k)) + \mathbf{b}\gamma(k)] \right\} \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_2(k+1) = \mathbf{x}_2(k) + \Delta t \cdot [h(\mathbf{X}(k)) + \mathbf{b}\gamma(k)] \quad (13)$$

2.2 系統限制式

1. 上匝道流量限制方程

高快速公路路段的各個上匝道運作有其最大容量 $r_{f,l}^{\max}$ ，於是各匝道的儀控量 $r_{f,l}^k$ 必須要小於匝道容量 $r_{f,l}^{\max}$ 。在駕駛心理考量下，另外亦須給予各匝道一個最小儀控流量，適度的讓車輛進入主線段，以避免等太久而產生無效控制（違規）。假設此最小儀控量為 $r_{f,l}^{\min}$ ，則儀控量的邊界條件即：

$$r_{f,l}^{\min} \leq r_{f,l}^k \leq r_{f,l}^{\max} \quad (14)$$

同樣對於公路主線與主線相交之系統性匝道，亦須設有控制之上下限制量。其邊界條件如下式(15)：

$$rm_f^{\min} \leq rm_f^k \leq rm_f^{\max} ; f = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

2. 上匝道佇列限制方程

上匝道方面必須考慮匝道的佇列長度 $\lambda_{f,l}^{\max}$ 。根據 $k-1$ 時期期末的匝道佇列車輛數 $\lambda_{f,l}^{k-1}$ 及 k 時期的匝道需求量 $d_{f,l}^k$ ，來決定第 k 時期的上匝道流量 $r_{f,l}^k$ 。如此匝道上的佇列車輛就不會溢流到市區平面道路上。

$$\lambda_{f,l}^k = (d_{f,l}^k - r_{f,l}^k)\Delta t + \lambda_{f,l}^{k-1} \leq \lambda_{f,l}^{\max} ; f = 1, 2, 3, 4, l = 0, 1, 2, \dots, M_f \quad (16)$$

當尖峰時刻上匝道需求量過多，以致車輛在匝道上形成佇列情形，超出匝道的最大容許佇列車輛數。在市區快速道路上，由於市區快速道路上匝道之間的距離短，可考慮匝道需求移轉的替代方案，允許一部分的上匝道需求經由與快速道路平行的替代道路直接行駛至下一個路段上匝道，超出最大容許佇列車輛數 $\lambda_{f,l}^{\max}$ 的部分，則稱為匝道溢流 $w_{f,l}^k$ ，匝道溢流的部分須藉由匝道需求移轉來解決。

$$w_{f,l}^k = d_{f,l}^k - r_{f,l}^k + \frac{(\lambda_{f,l}^{k-1} - \lambda_{f,l}^k)}{\Delta t} ; \lambda_{f,l}^k = \lambda_{f,l}^{\max} \quad (17)$$

$$a_{f,l+1}^{k+i} = w_{f,l}^k ; i = \frac{L_{f,l}}{V} \quad (18)$$

$$d_{f,l}^k = d_{f,l}^k + a_{f,l}^k \quad (19)$$

3. 兩公路匯流之匝道佇列限制方程

公路對公路匯入匝道方面，由於其較功能性匝道複雜，且容量及最大容許佇列車輛數亦較大。以本模式的中山高速公路與建國快速道路間之系統性匝道為例，其相交在進行模式建構時需要特別加以注意。所構建的 T 型交叉路網中，路線一的最末端車流匯入路線二

的第 l' 路段及路線三的第 l° 路段，在 k 時期匯入路線二的比率令為 θ_1^k ，匯入路線三的比率令為 θ_2^k 。另外，路線一匯入路線二的車流將與由路線二第 l' 路段平面道路上匝道的需求流量 $d_{2,l'}^k$ 合流成為 rd_1^k 。假設經過後續最佳化的運算結果後，將放行 rm_1^k 的儀控車流量進入路段 l' ，分配如圖 2 所示。另路線一匯入路線三的車流將與由路線三第 l° 路段平面道路上匝道的需求流量 d_{3,l°^k 合流成為 rd_2^k 。假設經過最佳化的運算結果後，將放行 rm_2^k 的儀控車流量進入路段 l° ，詳如圖 3 所示。

$$rd_1^k = \theta_1^k \times q_{1,final}^k + d_{2,l'}^k \quad (20)$$

$$q_{1,final}^k = n_{1,M} \times \rho_{1,M_1}^{k-1} \times u_{1,M_1}^{k-1} \text{ (流量守恆)} \quad (21)$$

$$\lambda_1^k = (rd_1^k - rm_1^k) \Delta t - \lambda_1^{k-1} \leq \lambda_1^{\max} \quad (22)$$

$$rd_2^k = \theta_2^k \times q_{1,final}^k + d_{3,l^\circ}^k \quad (23)$$

$$\theta_1^k + \theta_2^k = 1 \quad (24)$$

$$\lambda_2^k = (rd_2^k - rm_2^k) \Delta t - \lambda_2^{k-1} \leq \lambda_2^{\max} \quad (25)$$

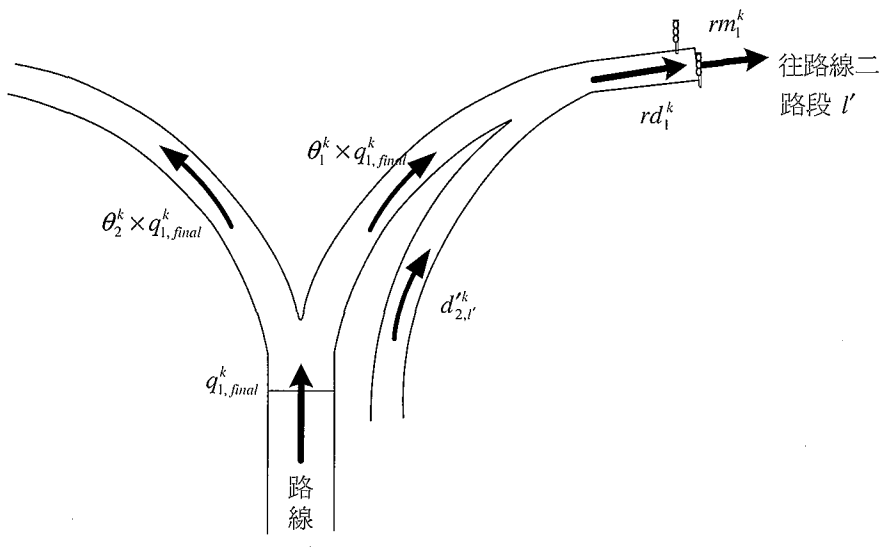


圖 2 公路對公路匯入匝道流量示意圖 (1/3)

另外，在所構建的 T 型交叉路網路線四的起始端的部分，車流將由路線二的第 l' 路段及路線三的第 l° 路段匯入路線四。路線三第 l° 路段下匝道車流 s_{3,l°^k ，在 k 時期匯入路線三的比率為 θ_3^k ，其餘分流則進入市區平面道路。路線二第 l' 路段下匝道車流 $s_{2,l'}^k$ ，在 k 時期

匯入路線四的比率為 θ_4^k ，其餘分流則進入市區平面道路。針對路線三及路線二進入路線四的上匝道需求 rd_3^k 及 rd_4^k ，假設經過最佳化的運算結果後，將放行 rm_3^k 及 rm_4^k 的儀控車流量進入路線四，其分配情形如圖 4 所示。

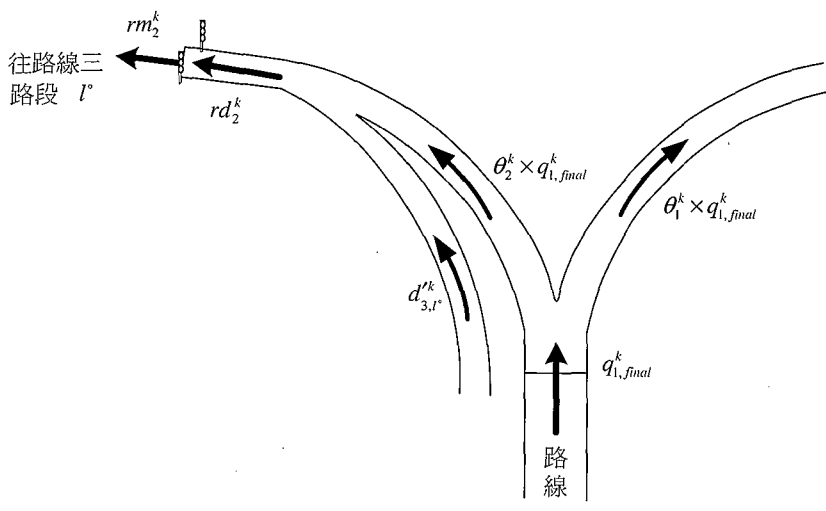


圖 3 公路對公路匯入匝道流量示意圖 (2/3)

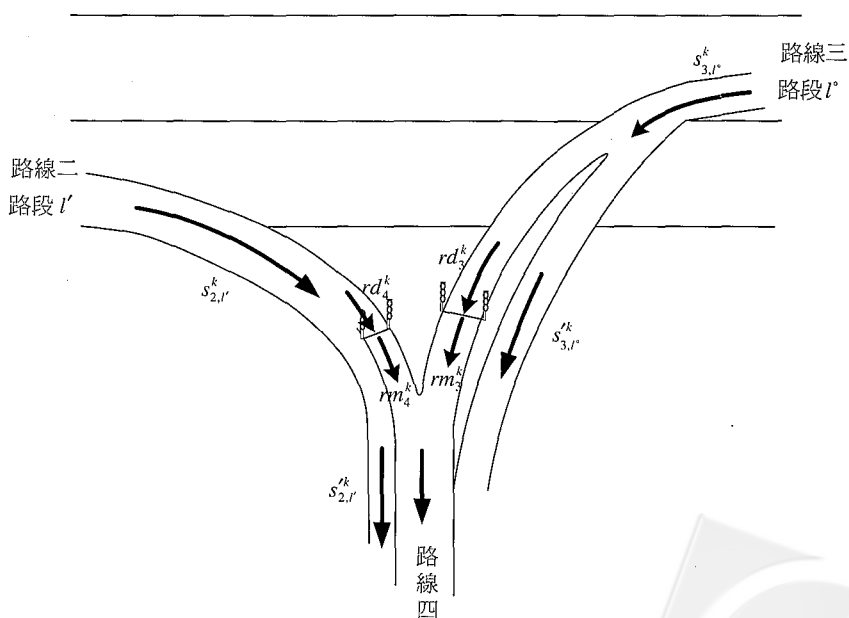


圖 4 公路對公路匯入匝道流量示意圖 (3/3)

$$rd_3^k = s_{3,l}^k - s_{3,l'}^k \quad (26)$$

$$rd_4^k = s_{2,l'}^k - s_{2,l}^k \quad (27)$$

$$\lambda_3^k = (rd_3^k - rm_3^k)\Delta t - \lambda_3^{k-1} \leq \lambda_3^{\max} \quad (28)$$

$$\lambda_4^k = (rd_4^k - rm_4^k)\Delta t - \lambda_4^{k-1} \leq \lambda_4^{\max} \quad (29)$$

2.3 非線性控制系統求解

假設將儀控系統訂定在使主線流率達到最大化為目標，這相當於主線實際車流與理想車流之間的差距最小。於是假設高速公路的最大流量發生在速率為 \mathbf{x}_{10} 、密度為 \mathbf{x}_{20} 的控制點，則目標函數可以設為下式，其中正定方陣 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分別代表速率、密度和控制變數的權重^[11]。

$$J = D_1^T Q_1 D_1 + D_2^T Q_2 D_2 + \gamma^T(k) Q_3 \gamma(k) \quad (30)$$

其中

$$D_1 = [\mathbf{x}_1(k+1) - \mathbf{x}_{10}] , \quad D_2 = [\mathbf{x}_2(k+1) - \mathbf{x}_{20}] \quad (31)$$

依式 (11)， $\mathbf{x}_1(k+1)$ 定義為 $k+1$ 時期之速率向量矩陣， $\mathbf{x}_2(k+1)$ 定義為 $k+1$ 時期之密度向量矩陣。

為了求得使下一階段 ($k+1$) 成本績效值最小的控制變數 $\gamma(k)$ ，將(12)及(13)代入上式，並對 J 微分，再令 $\frac{dJ}{d\gamma}$ 為零，則求解出最適控制量 $\gamma^*(k)$ ：

$$\begin{aligned} \gamma^*(k) = & -\Delta t^{-3} \left\{ \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\partial g[\mathbf{X}(k)]}{\partial \mathbf{x}_2} \right) \mathbf{b} \right]^T Q_1 \left[\left(\frac{\partial g[\mathbf{X}(k)]}{\partial \mathbf{x}_2} \right) \mathbf{b} \right] + \mathbf{b}^T Q_2 \mathbf{b} + \Delta t^{-4} \times Q_3 \right\}^{-1} \times \\ & \left\{ \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\partial g[\mathbf{X}(k)]}{\partial \mathbf{x}_2} \right) \mathbf{b} \right]^T Q_1 \left[(\mathbf{x}_1(k) - \mathbf{x}_{10}) + \Delta t \cdot g[\mathbf{X}(k)] + \frac{\Delta t^2}{2} \left(\frac{\partial g[\mathbf{X}(k)]}{\partial \mathbf{x}_1} \right) \times \right. \\ & \left. g[\mathbf{X}(k)] + \frac{\partial g[\mathbf{X}(k)]}{\partial \mathbf{x}_2} h(\mathbf{X}(k)) \right] + \mathbf{b}^T Q_2 \cdot [(\mathbf{x}_2(k) - \mathbf{x}_{20}) + \Delta t \times h(\mathbf{X}(k))] \left. \right\} \quad (32) \end{aligned}$$

上式中的反矩陣式，因設定 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 均為正定方陣 (positive definite)，又

$$(1) \text{ 二次式 } \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\partial g[\mathbf{X}(k)]}{\partial \mathbf{x}_2} \right) \mathbf{b} \right]^T Q_1 \left[\left(\frac{\partial g[\mathbf{X}(k)]}{\partial \mathbf{x}_2} \right) \mathbf{b} \right] \geq 0 \rightarrow \text{為半正定矩陣 (semi-positive)}$$

(2) 因 \mathbf{b} 為對角方陣，且路段不會有 0 長度， $(\Delta t^{-2} \times \mathbf{b}^T Q_2 \mathbf{b}) > 0 \rightarrow$ 為正定矩陣

(3) $\Delta t^{-4} \times Q_3 \geq 0 \rightarrow$ 為半正定矩陣

(1)(2)(3)之和顯然 > 0 為正定矩陣，故反矩陣存在。同理亦容易證明 $\frac{d^2 J}{dy^2} > 0$ 。

由(4)知，最後之儀控率取決於

$$r_{f,l}^{k+1} = \hat{\gamma}_{f,l}^{k+1} + s_{f,l}^{k+1}, \quad \hat{\gamma}_{f,l}^{k+1} \in \gamma^*(k) \quad (33)$$

三、數值模擬與分析

本研究主要引用中山高速公路臺北都會區路段及建國南北高架快速道路 T 型交叉實際資料來驗證非線性控制模式。基本資料取自張程皓^[3]及黃思芬^[15]所蒐集的交通參數資料。

3.1 實驗設計

1. 儀控實驗道路說明—建國南北高架快速道路及中山高速公路臺北都會區路段

建國南北高架快速道路北起圓山交流道，南接辛亥快速道路，南北共設置二十一處進、出口匝道。在設計上除南北兩側為連接高速公路與快速道路之系統性匝道，其餘為與平面道路相連接之功能性匝道，主線行車速限 70 公里/小時，全線 6.6 公里（包含辛亥高架快速道路）。主線道除民權東路匝道和信義路匝道間為三車道外，其餘路段為二車道無路肩之設計。匝道部分除南北兩端與忠孝、長安匝道為兩車道之進出外、其餘均為單車道設計。由於辛亥高架和建國南北高架快速道路相連接，規劃時一併將辛亥高架考慮進來。匝道儀控南北向可分開設計。南向方面自圓山交流道至羅斯福路全長 6.6 公里。高架路段共分成路段零、路段一至路段八，共九個路段。北向方面自羅斯福路至圓山交流道全長 6.6 公里。高架路段共分成路段零、路段一至路段八，共九個路段。

中山高速公路臺北都會區路段部分由北至南包括內湖交流道、圓山交流道、臺北交流道、三重交流道、五股交流道，共五個交流道。南北共設置十一處進、出口匝道。主線行車速限 100 公里/小時，全線 17.0 公里。在內湖至圓山交流道之間單向為二車道之設計，圓山至臺北交流道路段單向為三車道設計，臺北至五股交流道之間則單向為四車道之設計。從區位來講，在北市區內中山高速公路幾乎是東西走向。東向為本模式的路線二，自內湖交流道路至五股交流道全長 17.5 公里。高架路段共分成路段零、路段一至路段五，共六個路段。西向為本模式的路線三，自三重交流道至內湖交流道全長 17.0 公里。高架路段共分成路段零、路段一至路段五，共六個路段。

2. 交通參數及分區說明

- 儀控分段起點主要設置在出口匝道（可為虛擬匝道）上游 10 ~ 20 公尺，迄點則設在下一個儀控分段的起點。

- 假設分區內的車流具有均質性。
- 儀控單一分段內車道數一致。
- 依據 2001 年公路容量手冊^[16]，快速道路主線路段，單一車道服務容量訂為 2000 pcphpl。快速道路單一車道匝道容量為 1500 pcphpl，雙車道匝道容量為 3000 pcphpl。
- 高速公路主線路段，單一車道服務容量訂為 2300 pcphpl。高速公路單一車道匝道容量為 2000 pcphpl，雙車道匝道容量為 3400 pcphpl。
- 高速公路匝道最大等候車輛數，依照 83 年交通部運輸研究所^[12]的報告數據，以八公尺停一部車為基準，將匝道等候長度除以八求得匝道最大等候車輛數。匝道等候長度則為匝道儀控停止線至匝道末端之距離。
- 建國高架快速道路之匝道儲存長度係由匝道本體長度和匝道出口至順行相鄰橫向路口長度兩個部分相加及每 6.5 公尺計算得到。
- 本模型僅考慮上匝道的流量儀控。
- 晨、昏峰分析時刻各為三小時，計算週期 $\Delta t = 20$ 秒。
- 參數 $\tau \approx 0.022$ ，及參數 $\nu \approx 19.2$ (km^2/hr)。取建國高架旁高樓錄影一路段之車流，由錄影檔記錄每隔一單位時間 (10 秒) 擷取路段頭尾之車流速率及進出該路段車輛數，由紀錄中計算每兩兩相隔速差及該路段車密度，再以迴歸分析演算(2)式，採 $R^2 = 0.9$ 校估出此二參數值。

又本研究的高速公路速率－密度函數係採用林貴璽^[17]所推導的車流行為為基礎，以下述條件加以校估而得。依據 2001 年公路容量手冊^[16]，高速公路最大流量為 2300 小客車／小時，此時的臨界速率為 80 公里／小時。另根據 Papageorgiou^[18]的研究，進行匝道儀控的控制點應低於最大流量，控制點的流量與最大流量之間的差距為邊際流量，邊際流量的值約在 200 小客車／小時。故本研究控制目標流量訂在 2100 小客車／小時，該控制點所對應的速率為 81 公里／小時及密度為 26 (輛／公里／車道)，即控制點設定於 $q = 2100$ veh/hr $x_{10} = [u] = 81$ kph, $x_{20} = [\rho] = 26$ veh/km。在都會區快速道路方面，控制目標流量採 1900 小客車／小時，控制點對應的速率為 64 公里／小時及密度 29.5 (輛／公里／車道)，即控制點設定於 $q = 1900$ veh/hr, $x_{10} = 64$ kph, $x_{20} = 29.5$ veh/km。校估後之車流函數為：

(1) 高速公路三車道車流模型

$$u = 100 \left[1 + 8.81 \left(\frac{\rho + 10}{53.7} \right)^{6.1} \right]^{-0.37} \quad (34)$$

依 $q = \rho \times u$ 關係得



$$u = 100 \left[1 + 8.81 \left(\frac{\frac{q}{u} + 10}{53.7} \right)^{6.1} \right]^{-0.37} \quad (35)$$

即

$$q = 53.7u \left[\left(\frac{\left(\frac{u}{100} \right)^{0.37} - 1}{8.81} \right)^{-6.1} - 10 \right] \quad (36)$$

(2) 快速道路三車道車流模型

$$u = 75 \left[1 + 8.81 \left(\frac{\rho + 10}{63} \right)^{6.1} \right]^{-0.37} \quad (37)$$

即

$$u = 75 \left[1 + 8.81 \left(\frac{\frac{q}{u} + 10}{63} \right)^{6.1} \right]^{-0.37} \quad (38)$$

$$q = 63u \left[\left(\frac{\left(\frac{u}{75} \right)^{0.37} - 1}{8.81} \right)^{-6.1} - 10 \right] \quad (39)$$

3.2 方案模擬與分析

考慮在晨、昏峰尖峰時刻不同交通需求 (參見圖 1) 特性下, 分析不實施儀控及實施本模式兩種, 其管制方法共四組情境, 如表 1 所示。在針對不同的情境進行模擬後, 計算其績效指標值, 以作為分析、討論的基礎。

本研究進行模擬晨昏峰各為三小時, 計算週期 $\Delta t = 20$ 秒。模擬所得結果如圖 5 ~ 12, 分析數據如表 2 所示。

綜合前述之模擬結果, 茲分析於下:



表 1 模擬情境規劃與設定

尖峰型態	高速公路控制方式	不實施	非線性控制
	晨 峰	情境一	情境二
	昏 峰	情境三	情境四

情境一 (scenario 1)：晨峰時，不執行儀控

情境二 (scenario 2)：晨峰時，執行本模式之儀控

情境三 (scenario 3)：昏峰時，不執行儀控

情境四 (scenario 4)：昏峰時，執行本模式之儀控

表 2 各情境下績效指標值

路線	主線路段分區 路線名稱	情境一	情境二	情境三	情境四	情境二較情境一	情境四較情境三
						改善幅度	改善幅度
		平均速率 (公里/小時)				改善幅度 (%)	
1	建國快速道路 北上路段	47.3	63.1	60.0	63.3	+33.4%	+5.5%
2	中山高速公路 東向路段	80.1	88.7	62.7	70.7	+10.9%	+12.8%
3	中山高速公路 西向路段	92.2	90.3	85.5	88.4	-2.1%	+3.4%
4	建國快速道路 南下路段	68.5	68.3	66.0	67.3	-0.3%	+2.0%
		平均密度 (車/公里/車道)				改善幅度 (%)	
1	建國快速道路 北上路段	41.4	27.8	32.2	29.7	+32.8%	+7.7%
2	中山高速公路 東向路段	25.9	19.5	43.3	35.2	+24.7%	+18.7%
3	中山高速公路 西向路段	19.0	19.5	21.1	19.8	-2.6%	+6.2%
4	建國快速道路 南下路段	16.2	20.6	22.1	22.4	-0.27%	-1.4%
對 T 型系統而言							
平均流量 (輛/小時/車道)		1443	1729	1647	1707	+19.8%	+3.7%
平均速率 (公里/小時)		68.8	74.8	67.3	70.8	+8.7%	+5.2%
平均密度 (車/公里/車道)		26.4	22.6	29.1	26.6	+14.4%	+8.6%

[註]上午尖峰時刻 AM07:30 ~ 08:30，下午尖峰時刻 PM17:30 ~ 18:30。

1. 晨峰的分析

- 根據圖 5 ~ 7 所示可以看到在未實施儀控的狀況下，七點之後整個 T 型交叉系統的上匝道需求量增加，主線路段不斷有車輛湧入，使得主線的道路流量增加，一直到七點十五分左右，由於湧入的車輛過多，密度提高，平均車速次第減少，不穩定車流在主線路段開始產生，最後因密度過高，出現壅塞使得整體運輸效率減低。從圖 5 配合圖 6 及 7 知，情境一（無儀控）在上午七時十五分因塞車，流量就迅速衰退，但情境二（有儀控）卻可保持高流量紓解狀態。到九時，情境二交通已完全紓解，但情境一卻流量回升，顯示車流暫時尚難紓解。又由圖 8 知實施儀控前，有些路段塞得很嚴重，而有的路段卻很順暢，十分不平均。實施匝道儀控後，則可以有效的提高車速，減低主線段的密度，車流量可提早獲得紓解。

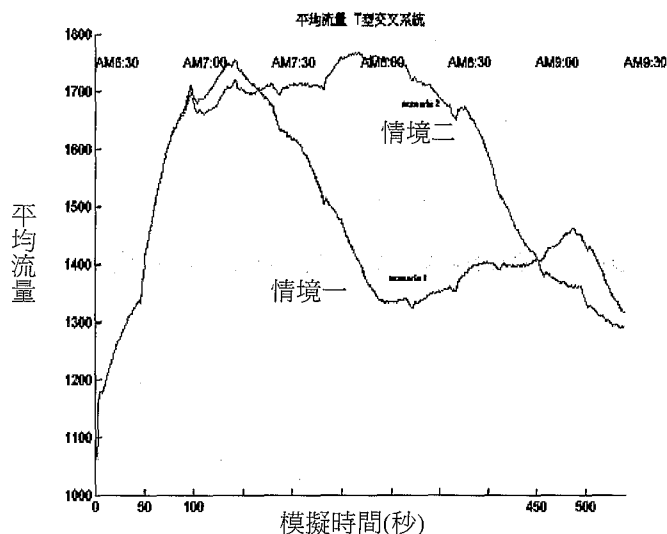


圖 5 T 型路網流量分析圖 (情境一與情境二)

- 在服務水準方面，根據計算，在未實施儀控之前，路線一在和平東路至長安東路的服务水準都在 D 以下，顯示該路段常會塞車，而實施儀控之後，可以有效的減少該路段的壅塞狀況。在路線二方面，未實施儀控前臺北至圓山交流道之間的服务水準為 F 級，經過儀控之後，該路段的服务水準已提升至 E 級。圓山至內湖路段也因為路線一的车流順暢，车流增加，服务水準跟著由 A 級變成 C 級。路段三的部分，主要可改善內湖至圓山的道路服务水準，圓山到臺北路段由於路線一的车流順暢而使得流量增加。路線四的部分，主要的瓶頸還是在臺北進城的车輛，由於進城車輛過多，會在系統匝道四產生壅塞的情形，在路段四的初始路段亦會因為過多的車輛進入，致使該路段產生壅塞，壅塞一直要到路段一由二車道轉成三車道，塞車的情況才會跟著紓解。

明顯地，這樣的控制均衡了尖峰時的道路使用效率。圖 8 列有事先事後交通服務水準之比較。

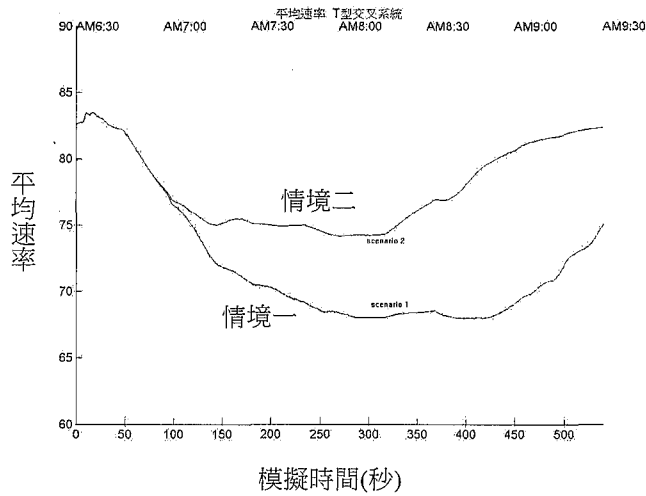


圖 6 T 型路網速率分析圖 (情境一與情境二)

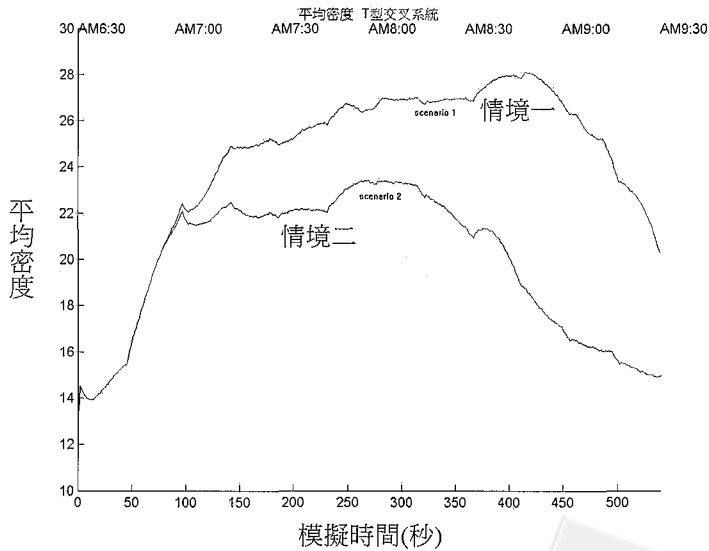
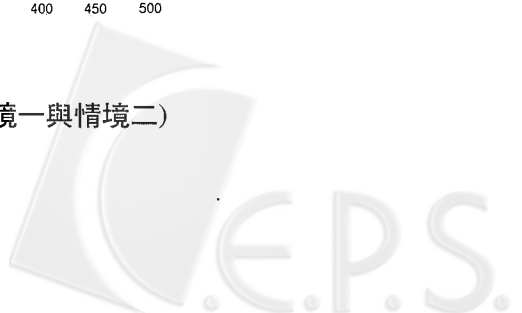


圖 7 T 型路網密度分析圖 (情境一與情境二)



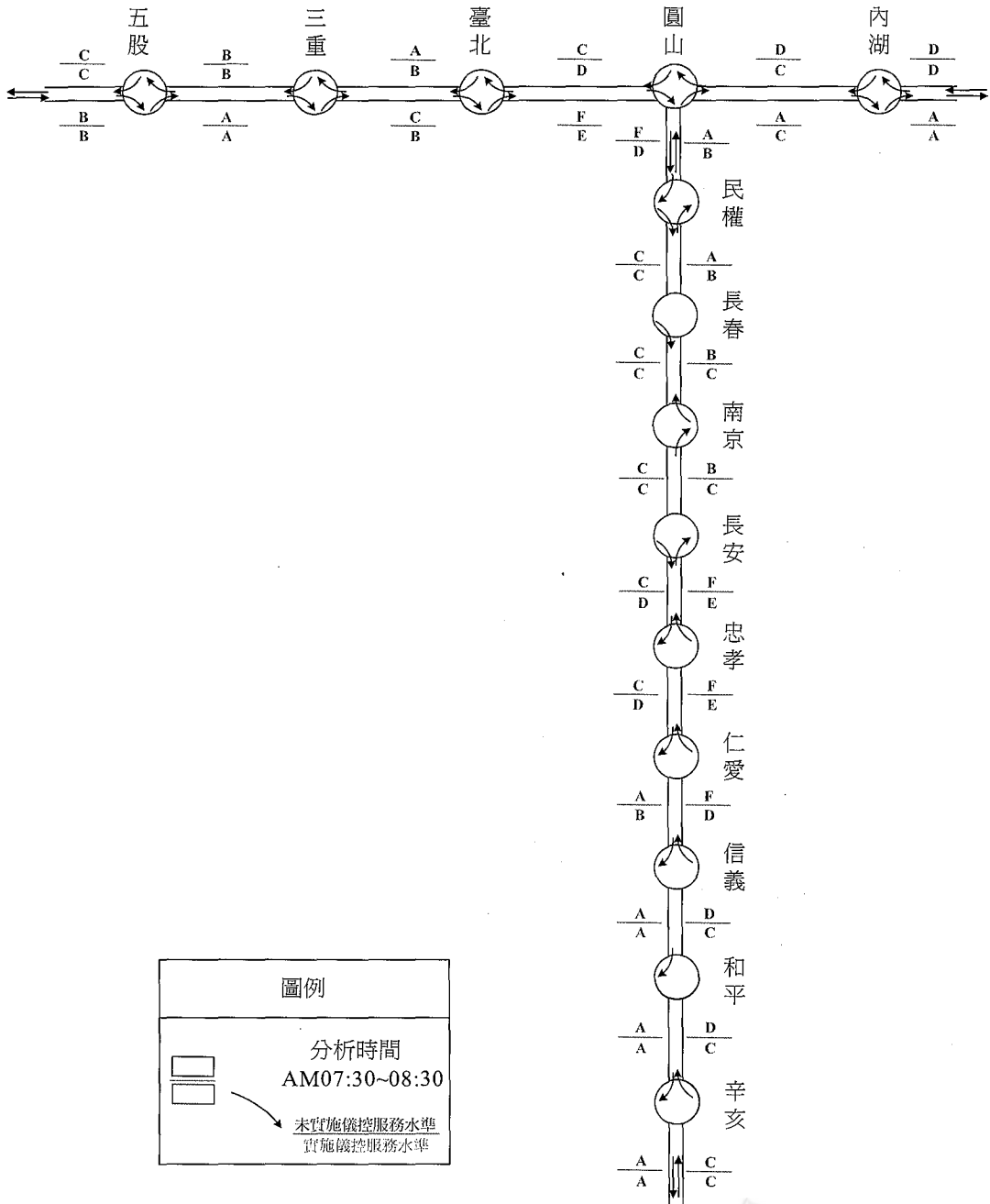


圖 8 事前事後交通服務水準之比較 (晨峰)



2. 昏峰的分析

- 在昏峰的流量方面，根據圖 9 ~ 11 在未實施儀控的狀況下，可以看到在下午五點之後整個 T 型交叉系統的上匝道需求量迅速增加，主線路段不斷有車輛湧入，使得主線的流量增加，在五點半左右，由於湧入的車輛過多，車速開始降低，密度漸次增加，平均流量即減少。依軌跡線之變化知，昏峰比晨峰更不穩定，表示過多的車輛進入致使部分主線段不均勻壅塞。由圖 9 ~ 11 知，下午五時後，情境三（無儀控）比情境四（有儀控）密度高，車速低，流量下降快，造成壅塞。雖然情境四在六時後車流亦下降，但其密度下降且車速回升，表示車流逐漸紓解。顯示唯有實施匝道儀控，將部分的上匝道需求加以控制，方能有效的減低主線段的密度，才能讓主線的壅塞獲得舒緩。
- 在服務水準方面，根據分析，未實施儀控之前，路線一在仁愛路以北的服務水準都在 D 以下，顯示該路段常會塞車，而實施儀控之後，可以有效的減少該路段的壅塞狀況。在路線二方面，未實施儀控前臺北至圓山交流道之間的服务水準為 F 級，經過儀控之後，該路段的服務水準已提升至 E 級。圓山至內湖路段，由於過多的車流進入，但服務水準仍在 F 級。路段三的部分，圓山到臺北路段由於路線一的车流順暢而使得進入的流量增加。路線四的部分，主要的瓶頸還是在臺北進城的車輛，由於進城車輛多，在系統匝道四產生壅塞，但壅塞的情況卻不像早上那麼嚴重。而壅塞一直要到路段一由二車道轉成三車道，塞車的情況才會跟著紓解。圖 12 為事前事後交通服務水準之比較圖。

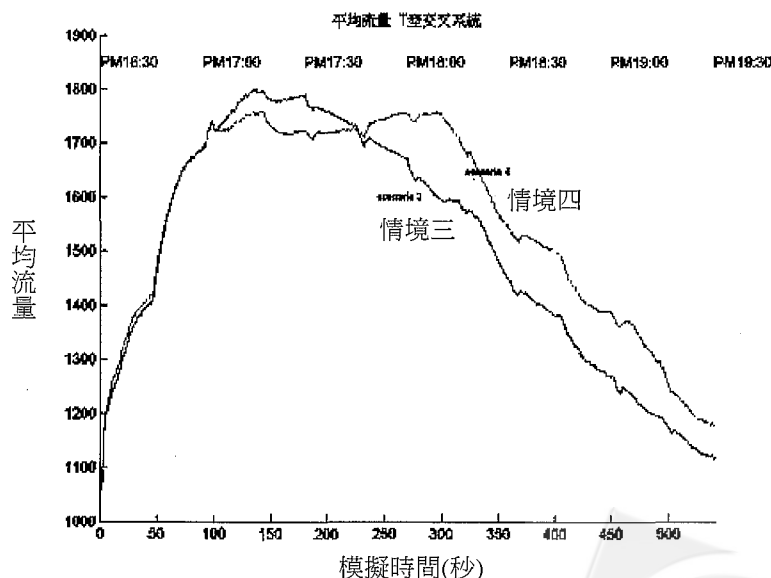


圖 9 T 型路網流量分析圖 (情境三與情境四)

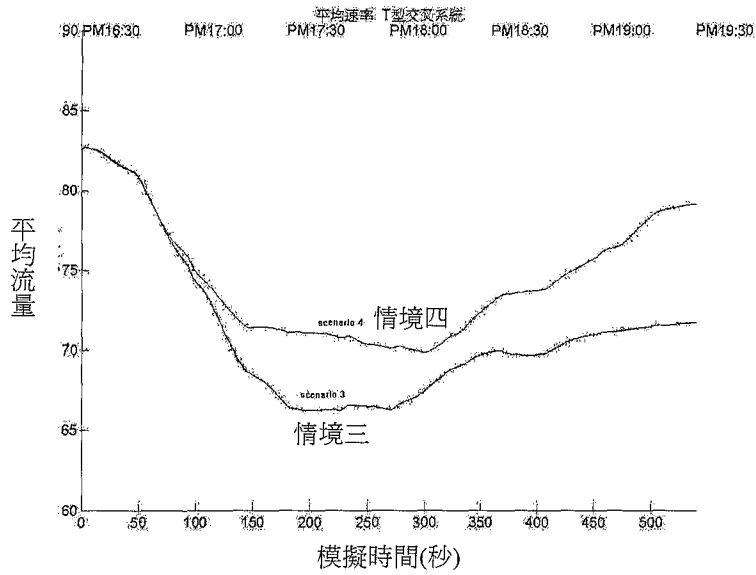


圖 10 T 型路網速率分析圖 (情境三與情境四)

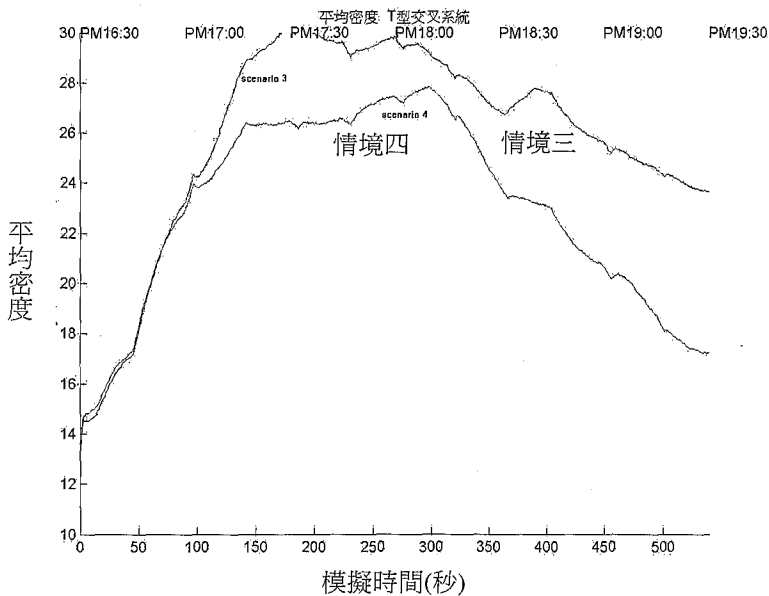


圖 11 T 型路網密度分析圖 (情境三與情境四)

以整個 T 型交叉系統而言，根據表 2 顯示，在早上的尖峰時刻實施本模式比不實施交通管制措施，可以讓流量增加 19.8%，平均速率提高 8.7%，在密度方面亦較原本的狀況減少 14.4%。在下午的尖峰時刻實施本模式比不實施交通管制措施，可以讓流量增加 3.7%，平均速率提高 5.2%，在密度方面亦較原本的狀況減少 8.6%。

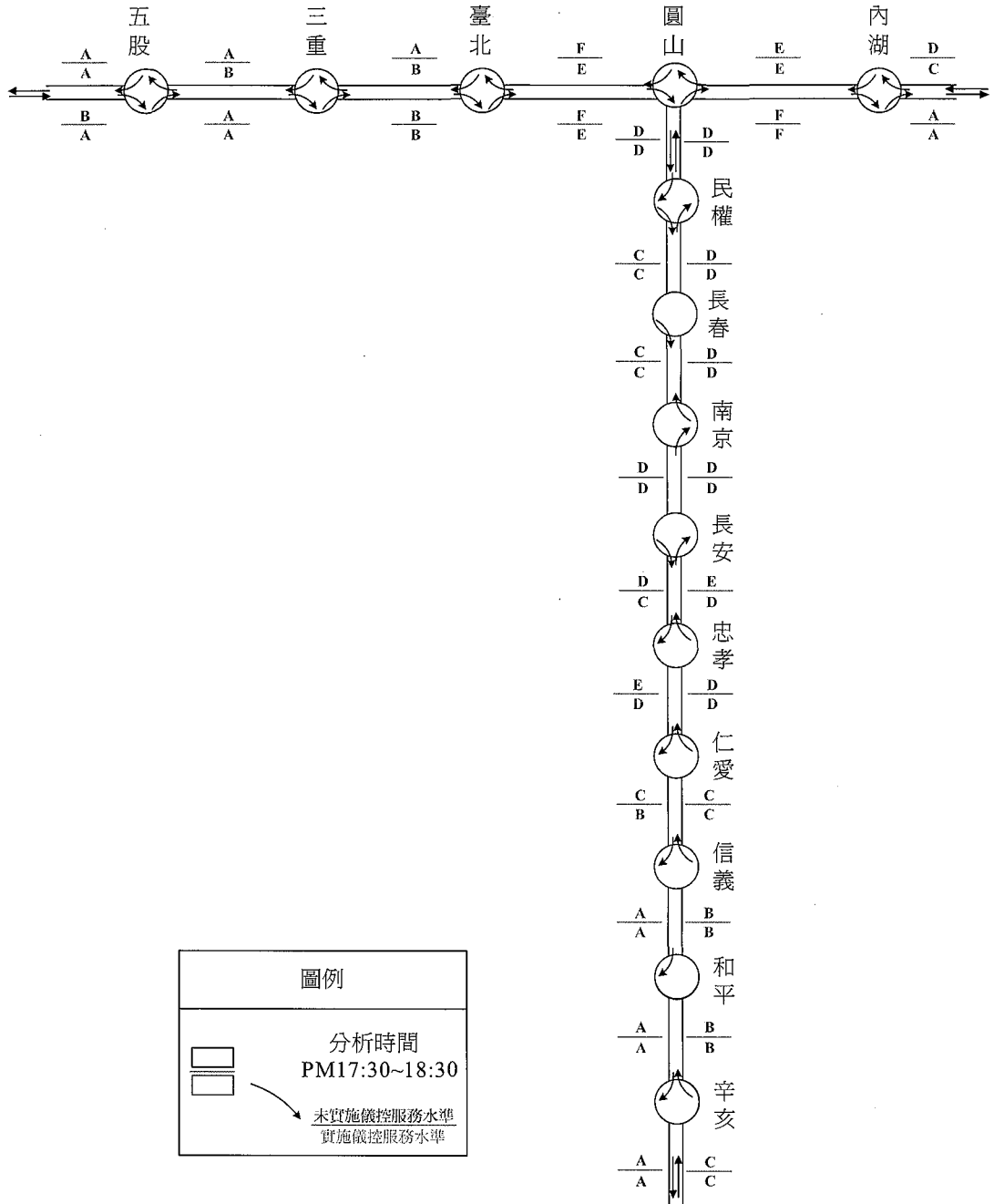


圖 12 事前事後交通服務水準之比較 (昏峰)

3. 匝道溢流問題與策略

在前面的模擬中，本模式對主線控制有相當的效果，整體流量增加了，對匝道的車流紓解也有相當助益。但進一步檢驗匝道是否溢流是必要的，若產生溢流必對平面道路造成影響。根據模擬結果發現建國快速道北向路線在晨昏峰都有溢流現象，值得加以檢討。圖 13 及圖 14 分別是該路段晨峰和昏峰各匝道車輛佇列之時間序列圖，各匝道標號請參見表 3。表 3 列有各匝道可佇列之車輛數及由圖 13 與 14 模擬中所得之最大等候線車輛數。從中發現晨峰時間在仁愛路的上匝道有過長現象，溢流達 46 輛之多。在長安東路下匝道無論晨間或晚間亦可能有 9 輛溢流現象。最嚴重的是，南京東路上匝道於昏峰時，有大量往北上建國快速道路之需求，造成匝道溢流達 150 餘輛。另外在民族東路前往圓山交流道往東匝道亦有 130 餘輛的嚴重溢流。這四處亟需另加改善方案。

改善之道需於適當路段設置資訊可變標誌 (changeable message sign, CMS)，在匝道即將溢流前，通知駕駛改道或建議使用何匝道。以仁愛路的上匝道言，若該處進入擁擠，該處 CMS 即可提供駕駛行駛平面車道前往忠孝東路匝道。長安東路下匝道擁擠時應於其以南主線上之 CMS 告知『長安東路下匝道擁擠』消息，以便讓駕駛選擇是否提前下匝道。南京東路昏峰上匝道問題則應於該匝道前路口設 CMS，告知南京東路北上建國快速道路匝道擁擠，往中山高速公路南下的車可行駛建國北路平面車道或松江路到圓山交流道；此時因圓山交流道東向匝道亦十分擁擠，於是南京東路的 CMS 要告知往中山高速公路北上的車輛請改道。沿建國南北路的 CMS 亦需通告『圓山交流道東向匝道擁擠』消息。

表 3 建國快速道路晨昏峰北上路段各匝道佇列情形

匝道編號	匝道地點	佇列長度限制 (車輛數)	晨峰最大佇列 (車輛數)	昏峰最大佇列 (車輛數)
1	辛亥路 (上匝道)	52	0	0
2	信義路 (上匝道)	47	10	12
3	仁愛路 (上匝道)	14	60	4
4	忠孝東路 (上匝道)	60	22	8
5	長安東路 (下匝道)	56	65	65
6	南京東路 (下匝道)	33	0	0
7	南京東路 (上匝道)	26	15	180
8	民權東路 (下匝道)	38	0	0
*	圓山交流道 (西向上匝道)	100	56	11
*	圓山交流道 (東向上匝道)	54	9	190

* 取於路線 2 與 3 之模擬資料。

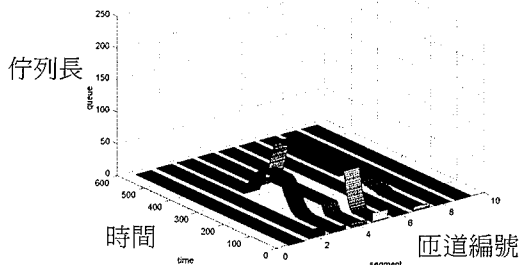


圖 13 建國快速道路晨峰北上佇列變化圖

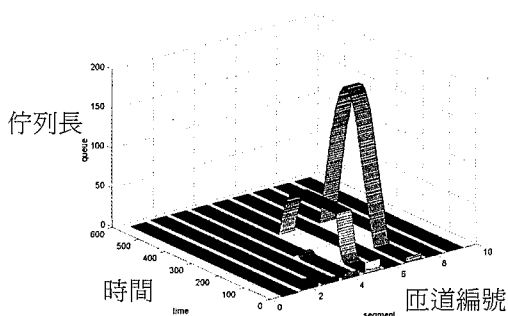


圖 14 建國快速道路昏峰北上佇列變化圖

四、結論與建議

4.1 結論

1. 本研究模擬與不實施儀控比較下，實施整合式匝道儀控具有較佳的績效值，實施本模式匝道儀控後，在上下午尖峰時，可以讓主線平均流量維持在較高的流量，另外在速率及密度上，亦能維持在一個較為穩定的狀況。
2. 在高、快速道路上，由於主線路段車道數不同再加上瓶頸路段的存在，容易產生瓶頸路段上游及下游的行車狀況過於順暢，而瓶頸路段的流量卻嚴重降低，塞車的狀況將不容易紓解。整合式匝道儀控模式中利用速率、密度及流量為狀態變數，並對上匝道流量加以管制，使得主線車流可以維持在一個穩定的狀態。
3. 在匝道佇列方面，當主線產生壅塞時，上匝道併入主線的車輛將不若併入自由車流那樣

的順利，若主線壅塞嚴重，上匝道的車流將會影響到市區平面道路，這在情境一（晨峰不實施儀控），可以很清楚的比較出來，此時若實施匝道儀控，減少瓶頸路段併入的車輛數，使得瓶頸路段可以維持較高的流量，快速紓解由上游來的車輛。

4. 在都市地區交通尖峰時間實施匝道儀控容易造成溢流現象，而影響平面道路。依本研究對臺北市建國高架道路的模擬結果，發現北向路線在晨昏峰都有溢流現象，較嚴重的在仁愛路的晨峰上匝道、南京東路昏峰上匝道及民族東路前往圓山交流道往東匝道。改善之道得於適當路段設置資訊可變標誌，在匝道即將溢流前，通知駕駛使用其他匝道或改道。

4.2 建議

本研究中發現匝道儀控確有其改善交通之效果，以臺北市建國高架快速道路之模擬結果，建國高架道路有必要實行匝道儀控，並配合資訊可變標誌，導引車流。另外亦應整合中山高速公路圓山交流道而建立實施整合式匝道儀控。

在本研究中亦有如下缺失，建議未來進一步研究：

1. 高速公路及快速道路的車流方程式在國內並沒有一個統一的標準。車流方程式應該和車道數、路肩寬度、超高、坡度等，有絕對的相關性，本研究所引用的車流模式，於日後應用時尚需進一步校估模式參數。
2. 由於高快速道路車流是動態變動，即時 O-D 表的取得不易，流量的分配無法透過即時的 O-D 表反映出來，但若採用卡爾曼濾波技術，利用一連串的下匝道流量序列，推估出下一時段的下匝道流量，以解決即時 O-D 表取得不易的問題，將有助動態匝道儀控績效更上層樓^[14]。
3. 由於他種儀控模式之程式取得困難，本文未能將模擬結果與他種模式所展示之結果做比較，建議後續進一步研究各模式在應用上之優劣。

參考文獻

1. 林福田，「臺北都會區高速公路次系統交通控制策略之研究」，成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國六十九年六月。
2. 陳菀蕙，「FREQ8PE 應用於高速公路匝道控制之研究－以五股至內湖段為例」，臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國七十八年六月。
3. 張程皓，「都會區高速公路匝道儀控之研究」，臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國八十二年六月。
4. 蘇梓見，「建立高速公路入口匝道儀控專家系統之研究」，中央警察大學警政研究所碩士論文，民國八十四年六月。
5. 吳耿毓，「類神經網路應用於自動化高速公路匝道儀控之研究」，成功大學交通管理科學

系碩士論文，民國八十四年六月。

6. Papageorgiou, M., Habib, H. S., and Blosseville, J. M., "ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering", *Transportation Research Record*, 1320, 1991, pp. 58-64.
7. Papageorgiou, M. and Mayr, R., "Optimal Decomposition Methods Applied to Motorway Traffic Control", *Int. J. Control*, 35(2), 1982, pp. 269-280.
8. Chang, G. L., Ho, P. K., and Wei, C. H., "A Dynamic System Optimum Control Model for Commuting Traffic Corridors", *Transportation Research*, 1C(1), 1992, pp. 3-22.
9. Zhang, H., Ritchie, S. G., and Recker, W. W., "Some General Results on the Optimal Ramp Control Problem", *Transportation Research*, 4C(2), 1996, pp. 51-69.
10. 李宗憶，「考慮動態 OD 推估之適應性整體匝道儀控模式研究」，淡江大學交通管理學系碩士論文，民國八十六年六月。
11. Chang, T.-H., "Nonlinear Control Application Integrating Freeway On-Ramp Flow Metering", *Proceedings of 14th World Congress of International Federation of Automatic Control*, Vol. Q, 1999, pp. 91-96 (An Imprint of Elsevier Science).
12. 交通部運輸研究所，高速公路匝道儀控現場督導、實施績效與衝擊評估，民國八十三年十一月。
13. Payne, H. J., "FREFLO: A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic", *TRR*, 722, Transportation Research Board, 1979, pp. 68-77.
14. Chang, T.-H. and Li, Z.-Y., "Optimization of Mainline Traffic via an Adaptive Coordinated Ramp-Metering Control Model with Dynamic OD Estimation", *Transportation Research Part C*, Vol. 10, No. 2, 2002, pp. 99-120.
15. 黃思芬，「都會區高速公路走廊實施匝道控制之整體交控策略研究」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國七十九年六月。
16. 交通部運輸研究所，2001 年臺灣地區公路容量手冊，民國九十三年三月。
17. 林貴璽，「高速公路基本路段容量暨相關影響因素特性之研究」，交通大學交通運輸工程研究所碩士論文，民國七十五年六月。
18. Papageorgiou, M., "A New Approach to Time-of-Day Control Based on a Dynamic Freeway Traffic Model", *Transportation Research*, 14B, 1980, pp. 349-360.



附錄：符號定義

- $d_{f,l}^k$ ：時段 k 期間，路線 f ，第 l 路段的上匝道需求量；
 $d'_{f,l}^k$ ：加上匝道移轉後，時段 k 期間，路線 f ，第 l 路段的總上匝道需求量；
 $d_{2,l'}^k$ ：考慮匝道需求移轉後，路線二第 l' 路段平面道路上匝道第 k 時期需求流量；
 $d_{3,l''}^k$ ：考慮匝道需求移轉後，路線三第 l'' 路段平面道路上匝道第 k 時期需求流量；
 f ：路線數，北向為路線一、東向為路線二、西向為路線三、南向為路線四；
 k ：時間狀態參數（離散），時間點 $[(k-1)\Delta t, k\Delta t]$ 之間為第 k 時段；
 l ：路段編號；
 l' ：路線二與路線一最末端（路段 M_1 終點）銜接的路段；
 l'' ：路線三與路線一最末端（路段 M_1 終點）銜接的路段；
 $L_{f,l}$ ：路線 f 第 l 路段的路段長度（公里）；
 M_f ：高速公路總路段數； $f=1, 2, 3, 4$ ；
 $n_{f,l}$ ：路線 f ，第 l 路段的車道數；
 q ：車流量；
 $q_{f,l}^k$ ：在 k 時段期間（時間點 $[(k-1)\Delta t, k\Delta t]$ 之間）經過點 $x_{f,l}$ 路段流量（輛／小時）；
 $r_{f,l}^k$ ：在 k 時段期間，路線 f 第 l 路段之上匝道實際流量或儀控流量（輛／小時）；
 rm_f^k ：在 k 時段期間，公路對公路匯入匝道 f 的儀控流量；
 rd_f^k ：在 k 時段期間，公路對公路匯入匝道 f 的匝道需求量；
 $s_{f,l}^k$ ：在 k 時段期間，路線 f 第 l 路段之下匝道流量（輛／小時）；
 $s_{2,l'}^k$ ：路線三第 l' 路段第 k 時期下匝道流量；
 $s_{3,l''}^k$ ：路線三第 l'' 路段第 k 時期下匝道流量；
 t ：時間狀態參數（連續）；
 Δt ：模擬掃描時段長度（秒）；
 u ：車流速率；
 $u_{f,l}^k$ ：在時間點 $k\Delta t$ ，路線 f 第 l 路段內所有車輛的平均速率（單車道）；
 $u_e(\rho)$ ：路段密度為 ρ 時，所對應的自由流均衡速率（公里／小時）；
 V ：市區道路車流行駛速率；
 $w_{f,l}^k$ ：時段 k 期間，路線 f 第 l 路段的匝道需求移轉至下一路段 $(l+1)$ 的流量；
 $x_{f,l}$ ：路線 f ，第 l 路段起始里程（公里）；

τ ：紓解時間 (relaxation time)；

ν ：預期參數 (anticipation parameter)，反應駕駛者對下一路段密度改變的預期；

ρ ：車輛密度；

$\rho_{f,l}^k$ ：在時間點 $k\Delta t$ ，路線 f 第 l 路段的車輛平均密度 (單車道)；

$\lambda_{f,l}^{k-1}$ ：在時段 $k+1$ 結束，路線 f 第 l 路段的上匝道佇列車輛數；

$\lambda_{f,l}^{\max}$ ：路線 f 第 l 路段，上匝道的最大容許佇列車輛數；

λ_f^k ： $f=1, 2, 3, 4$ 時段 $k-1$ 結束時，公路對公路匯入匝道 f 的匝道佇列車輛數；

θ_1^k ：第 k 時期，路線一匯入路線二之匯流比率 $0 \leq \theta_1^k \leq 1$ ；

θ_2^k ：第 k 時期，路線一匯入路線三之匯流比率 $0 \leq \theta_2^k \leq 1$ ；

θ_3^k ：第 k 時期，路線三下匝道流量 $s_{3,l}^k$ 匯入路線四的比率 $0 \leq \theta_3^k \leq 1$ ；

θ_4^k ：第 k 時期，路線二下匝道流量 $s_{2,l}^k$ 匯入路線四的比率 $0 \leq \theta_4^k \leq 1$ 。