

過飽和市區幹道號誌控制之研究¹

A STUDY OF SIGNAL CONTROL FOR OVERSATURATED ARTERIALS

陳彥佑 Yen-Yu Chen²

(102 年 1 月 10 日收稿，102 年 3 月 22 日第一次修改，102 年 8 月 30 日第二次修改，
102 年 10 月 22 日第三次修改，102 年 12 月 12 日定稿)

摘 要

交通壅塞一直是大多數都市面臨的課題。交通壅塞不只會造成能源的消耗，也會為環境帶來汙染。在都市的尖峰時間，許多幹道都呈現過飽和的情況，過飽和的情況可能會造成車輛回堵到上游路口、左轉與直行車輛相互堵塞，或是因各轉向比間之差異，造成某車道之等候列隊長度較相鄰車道長，進而增加駕駛人變換車道的行為。且目前都市地區不易取得道路用地拓寬道路來降低過飽和之情況，因此透過調整時制計畫來增進路網效率，不失為一個快速、有效且省成本的方法。本研究目的為在考量過飽和車流情況下，建立一號誌最佳化模式，以期讓整體路網之效率達到最佳化。本研究最後將 TRANSYT-7F 以及 TRANSYT 14 與本模式求解出之最佳化號誌時制分別放入 TSIS 模擬，結果發現本模式在近飽和或是過飽和狀態下，皆能有效降低平均每車延滯或是提高最大通過量。

關鍵詞：過飽和；號誌控制；車道間互相堵塞；路段回堵；最佳化

-
1. 此篇為作者於美國馬里蘭大學土木與環境工程學系進修時，在該系張金琳教授指導下完成之研究。在此特別感謝張教授給予作者前往該系進修之機會，並補助相關之研究及生活費用。並感謝作者之指導教授，國立交通大學運輸與物流管理學系王晉元教授，支持作者前往馬里蘭大學進修。
 2. 國立交通大學運輸與物流管理學系博士候選人（聯絡地址：300 新竹市大學路 1001 號國立交通大學運輸與物流管理學系；電話：03-5712121 轉 31336；E-mail：ymm887@yahoo.com.tw）。

ABSTRACT

Traffic jams are a big issue in most cities. The traffic jam causes energy waste and air pollution. Arterials in some urban areas are often oversaturated in peak hours. Oversaturated conditions include spillback, lane blockage, and unbalance queue which is caused by different turning ratio and will increase lane-changing behavior. However, land acquisition for road construction becomes more and more difficult. Retiming traffic signals is an efficient and low-cost way to reduce road congestion. This study proposes a model which optimizes signal timings under oversaturated conditions. The optimized signal timings from TRANSYT-7F, TRANSYT 14, and the proposed model input into TSIS for comparison. The result presents the proposed model reduces total delay or increases total throughput under oversaturated conditions as well as near-oversaturated conditions.

Key Words: *Oversaturated; Signal control; Lane blockage; Spillback; Optimization*

一、前 言

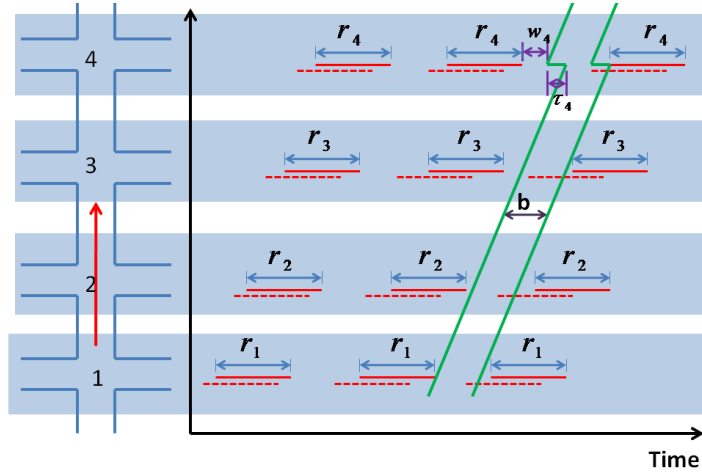
如何充分利用道路現有容量來解決重現性之壅塞問題，一向是非常重要的議題。過去幾十年間，學術與實務界均投入大量的人力物力來研究各種交通控制策略，以期能解決此項問題，例如：幹道號誌連鎖、適應性號誌控制系統、前瞻性號誌控制系統等。而 1990 年代出現的智慧型運輸系統更將號控推向即時控制 (real time control) 的層級。然而雖然使用先進的技術可以取得較佳之交通資料，並可更加清楚掌握交通情況，但是多數已開發與開發中國家的號誌控制，仍是以定時號制控制為大宗，甚至在每日的尖峰時刻，仍然使用定時號制控制。

從文獻回顧中可知，大多數現存的號誌控制最佳化之文章可分成兩大類：

1. 以數學規劃為基礎的模式
2. 以模擬為基礎的模式

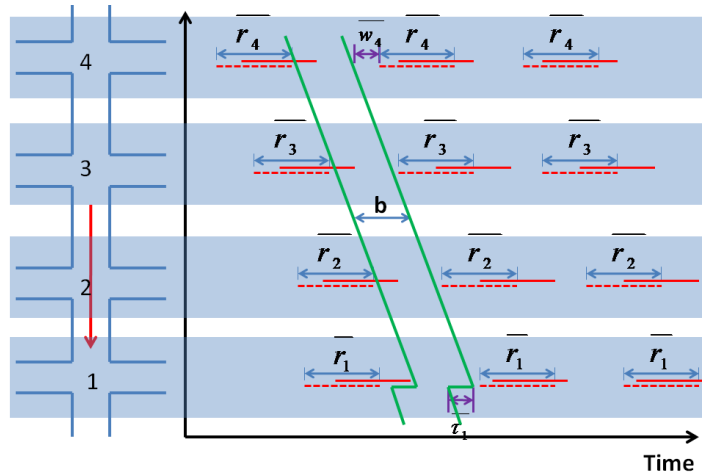
在第一類型的文獻中，初期有一些研究^[1-6]利用混合整數規劃來最大化幹道的續進帶寬。如 Gartner^[3]建立了 3 個模式來最大化綠燈帶寬 (bandwidth)。模式 1 係建立圖 1、圖 2 中各項變數之關係式。此模式為最基本之模式，另兩模式皆為此模式之延伸。模式 1 係針對單行道之號誌問題，且橫跨各個路口的綠燈帶寬是對稱且寬度一致的。模式 2 則是將基本的單行道模式擴展到雙向道，且增加了左轉時相。最後 Gartner^[3]將模式擴展為多重綠燈帶寬 (multi-band) (模式 3)。這些研究較無著墨於解決當路段出現某些轉向車流特別多之情形。近期的一些文獻^[7,8]延續此主軸來最小化幹道路網的延滯。這些文獻確有其貢獻，但是數學規劃模式仍有其本質上之限制，無法捕捉較為複雜之路口車流關係，例如：

左轉專用道車流之溢流 (overflow)、直行車輛與轉彎車輛互相堵塞之情形，而這些情況均可能出現於過飽和路段。



資料來源：Gartner^[3]

圖 1 綠燈帶寬 (outbound)



資料來源：Gartner^[3]

圖 2 綠燈帶寬 (inbound)

而第 2 個分類則是利用模擬為基礎的方法捕捉不同號誌時相時，交通車流與其演進之關係。TRANSYT-7F^[9,10] 是這方面最廣被認可的模式之一。其以巨觀之角度建立幹道車流演進與路口等候長度之關係式，以預先定義好之績效指標當作目標式，並利用內嵌之演算

法求解。而此類以模擬為基礎的方式也被使用在適應性號誌最佳化上，利用由偵測器取得的即時交通資訊，即時運算取得一較佳的可行解。SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)^[11]、SCOOT (Split, Cycle, and Offset Optimization)^[12]、OPAC^[13] 與 RHODES^[14] 皆屬於此類系統。

有些文獻使用與上述相似的概念來最佳化號誌時制，包括 store-and-forward 模式^[15,16]、queue-dispersion 模式^[17-19]、隨機模式^[20] 與離散時間的 kinematic 模式^[21]。然而這些研究多著重於探討未飽和之交通情況，較少著墨於當路段或是左轉專用道長度受限時，所導致的路段回堵或是各轉向車輛相互堵塞之問題。當這些問題發生時，皆會使車流更加壅塞。

除了上述研究未飽和車流的研究，同時間也有許多針對過飽和車流的號控研究。例如：bang-bang 號控流程^[22,23] 定義幹道中各號誌時相的最佳切換時機。接著有些研究^[24,25] 將此模式加入流量傳遞關係式後，應用在過飽和的路口。Abu-Lebdeh 與 Benekohal^[26] 延續此研究主軸，建立了動態離散的模式來描述過飽和路段中，各路口的等候線形成與消散之情形，並以基因法求解^[27,28]。Li^[29] 也使用類似概念建立模式來描述各路口之間交通流量的關係。

TRANSYT-7F^[29] 為了描述過飽和時複雜的車流情形，在原本的績效函數中引入了處罰函數來增加各車道間發生互相堵塞情形時的成本。使用者可以選擇使用步進式模擬 (stepwise simulation program) 來將路段回堵對整體車流的影響納入其中。最新版的 TRANSYT^[30] 採用 cell transmission model (CTM) 來描述車道互相堵塞的狀況。

CTM 係由 Daganzo^[31,32] 提出，其將路段分成若干個等長的格位 (cell)，每個格位的長度為車輛以自由車流速率行駛一個時間段的距離，此模式中亦假設速度與流量之關係為線性關係，每個格位間的流量關係如 (1) 式。

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

其中，

$y_i(t)$ 在 t 時段中，由 cell $(i-1)$ 流向 cell i 的車輛數

$n_{i-1}(t)$ 在 t 時段中，cell $(i-1)$ 中的車輛數

$Q_i(t)$ 在 t 時段中，cell $(i-1)$ 可流向 cell i 的最大流量

w 衝擊波速度

v 自由車流速率

$N_i(t)$ 在 t 時段內，cell i 所能儲存的最大車輛數

$n_i(t)$ 在 t 時段內，cell i 的車輛數

另外有許多學者^[33-36] 也以模擬的概念來建立許多不同的模式來描述路口等候線的形成與消散，並最佳化號誌時制。

目前文獻中，已有許多考量過飽和路段之號誌設計模式，但多數文獻之模式均只考量下列兩項過飽和路段之特性：

1. 過飽和路段之車流無法在一個週期內消散完畢
2. 等候車輛可能回堵至上游

而 Liu 與 Chang^[36] 及 TRANSYT^[29,30] 除了上述特性外，也將路段在過飽和情形下，左轉車輛與直行車輛可能相互堵塞之狀況列入模式中加以考量。本研究將以 Liu 與 Chang^[36] 的模式為基礎，並再納入下列影響過飽和車流運行之因素，進而建立一更符合實際情況之號誌最佳化模式。

1. 直行車輛被左轉車輛堵塞時，會增加直行車變換車道之頻次（圖 3）
2. 由於某種轉向的車輛數較多，導致各車道的等候長度差異較大，使駕駛人欲變換車道至等候長度較短之車道（圖 4）

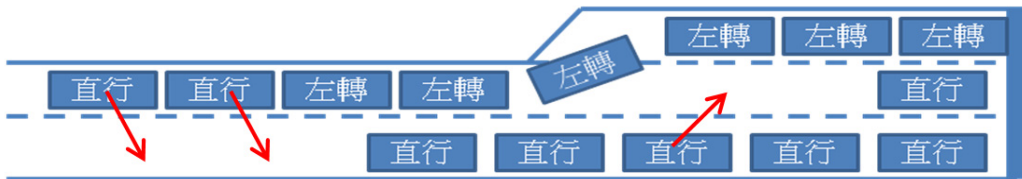


圖 3 直行車道被左轉車輛堵塞
(箭頭表示欲變換車道之方向)

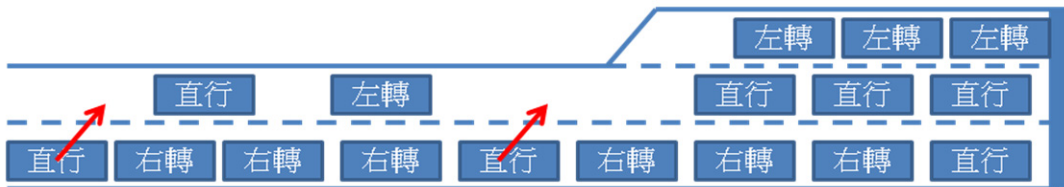


圖 4 車道間之等候長度差異懸殊
(箭頭表示欲變換車道之方向)

二、研究方法

本研究為了將上述所探討之過飽和車流情形納入模式，須先分解路網，以利描述上述特性。本研究以 Liu 與 Chang^[36] 分解路網之方式為基礎，再依照「車道」與「各車道與相鄰車道間等候長度之關係」，將路網做進一步之分解。路網分解後，則建立各分段間之車流關係式，建立關係式之方式係延續自 Liu 與 Chang^[36]，但由於路網分解方式已有所不同，且模式考量之車流運行因素亦有增加，因此關係式已與 Liu 與 Chang^[36] 有所差異。接著考

量號誌相關之限制式以及流量守恒關係式。本模式即以車流關係式、號誌相關限制式以及流量守恒關係式作為模式之限制式，並分別利用最小化延滯與最大化通過量為目標式來求解。本研究之研究方法流程如圖 5 所示，各步驟討論如下：

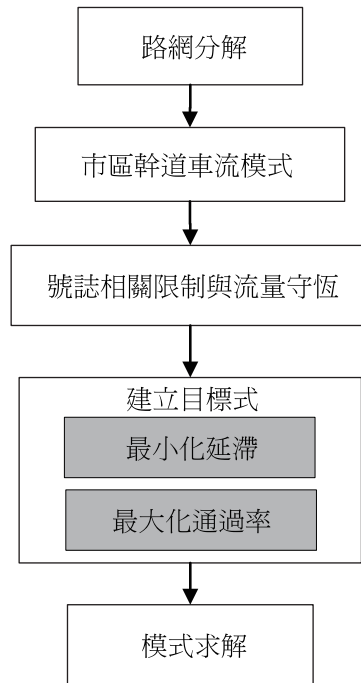


圖 5 研究方法流程圖

2.1 路網分解

首先，依照 Liu 與 Chang^[36] 之方式，將道路路網依照路口分成數個路段，再將每個路段分成兩個區段 (segment)，如圖 6 所示：

1. 傳遞區段 (P)
2. 分散區段 (D)

接著本研究再進一步將每個區段依照車道區分。而其中「傳遞」與「分散」這兩區段中的每一車道再依照等候隊列長度，可以再分為若干小段 (sub-segment)，如圖 7 所示。

1. 各車道皆有等候隊列 (q)
2. 只有一個車道有等候隊列 (b)
3. 移動隊列 (s)
4. 車輛選擇等候隊列長度較短之車道 (c)
5. 車輛選擇較快之車道 (f)

各小段之長度說明如下：

1. 各車道皆有等候隊列 (q)

此小段為各車道都有等候隊列，因此在此小段中，車輛無法變換車道，此小段的長度等於所有車道之間，最短的等候隊列長度。

2. 只有一個車道有等候隊列 (b)

此小段只有一個車道有等候隊列，以圖 7 來說，只有左側車道有等候隊列，右側車道沒有。因此此小段的長度等於兩車道間，等候隊列長度的差值。

3. 移動隊列 (s)

此小段之長度為車輛的煞停距離。

4. 車輛會選擇等候隊列長度較短之車道 (c)

在此小段之駕駛人希望可以加入等候隊列較短的車道。

5. 車輛會選擇較快之車道 (f)

此小段之駕駛人會選擇速度較快的車道行駛，此小段之長度為總路段長度減去第 1~4 項小段長度之總和。

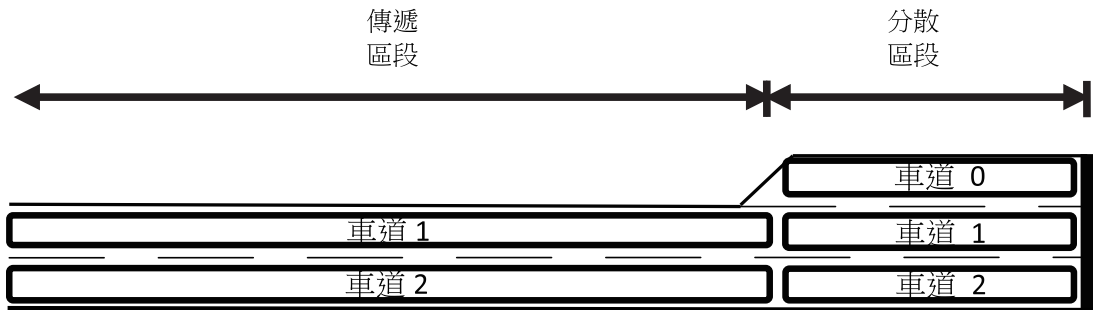


圖 6 路段分解為區段示意圖

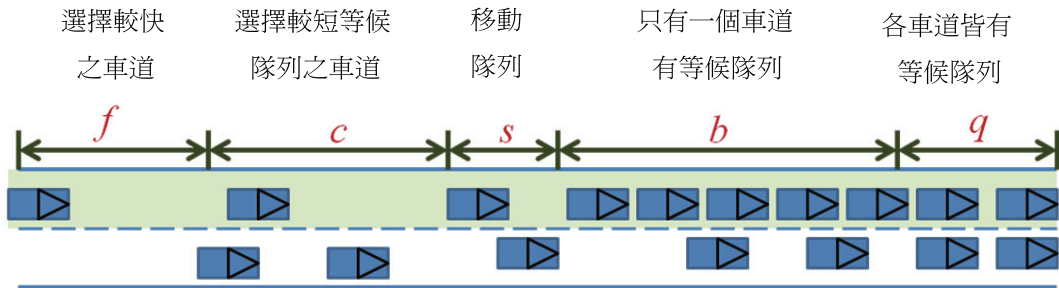


圖 7 區段分解為小段示意圖

本模式之假設如下：

1. 轉向比已知；
2. 流量密度關係式已知；
3. 每個時段的車輛需求是一致的；
4. 右轉車輛會在進入路口前變換至最右側車道；
5. 左轉車輛會在進入路口前變換至最左側車道；
6. 右轉車輛有優先使用右側相鄰車道的權力；
7. 左轉車輛有優先使用左側相鄰車道的權力。

2.2 市區幹道車流模式

路網分解後，則開始利用各分段間之車流關係，建立市區幹道車流模式，其流程圖如圖 8 所示，每個步驟分述如下：

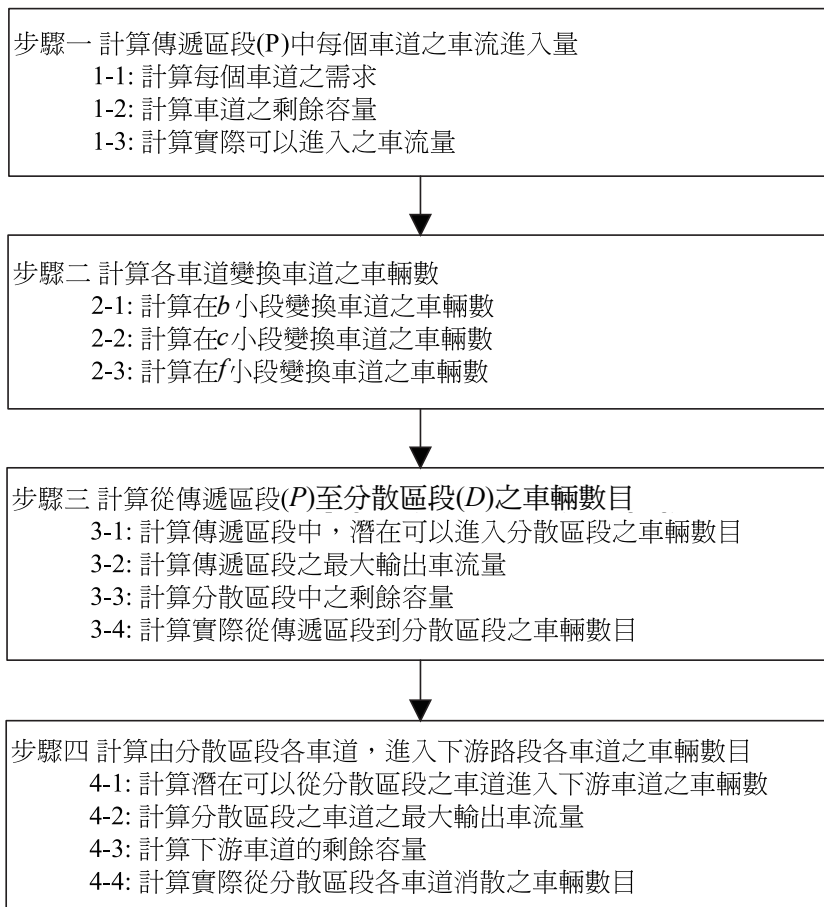


圖 8 都市幹道車流模式流程圖

步驟一 計算傳遞區段 (P) 中每個車道之車流進入量

傳遞區段 (P) 之每個車道的車流進入量如 (2) 式：

$$\text{傳遞區段 } (P) \text{ 之每個車道的車輛進入數目} = \min\{\text{每個車道之需求, 車道之剩餘容量}\} \quad (2)$$

每個車道之需求以及剩餘容量分別計算如下：

步驟 1-1 計算每個車道之需求

每一車道第 k 時段之需求可以由 (3) 式求得

$$D^k = \left(\frac{D}{3600} * \Delta t \right) \quad (3)$$

其中，

- D^k 時段 k 之需求；
- D 總需求 (輛／小時／車道)；
- Δt 時間區間。

步驟 1-2 計算每個車道之剩餘容量

傳遞區段 (P) 中每個車道之剩餘容量可以由車道容量減去區段中行進與停等的車輛數目求得，如 (4) 式。

$$S_{p,i}^k = (C_{p,i} - n_{p,i}^k - x_{p,i}^k) \quad (4)$$

其中，

- $S_{p,i}^k$ k 時段， P 區段之車道 i 的剩餘容量；
- $C_{p,i}$ P 區段，車道 i 之可容納車輛數；
- $n_{p,i}^k$ 時段 k ， P 區段之車道 i 的行進車輛數目；
- $x_{p,i}^k$ 時段 k ， P 區段之車道 i 的停等車輛數目。

步驟 1-3 計算實際可以進入車道之車輛數目

實際可以進入車道之車輛數目等於步驟 1-1 與步驟 1-2 兩者中之最小值，如 (5) 式。

$$y_{p,i}^k = \min\{D^k, S_{p,i}^k\} \quad (5)$$

其中，

- $y_{p,i}^k$ k 時段，實際進入 P 區段車道 i 之車輛數目

步驟二 計算各車道變換車道之車輛數

車輛在傳遞 (P) 與分散 (D) 區段可能會變換車道，而在此兩區段中的每個小段之變換車道行為不完全相同，而每小段中，不同轉向車輛間的變換車道之行為也不盡相同，本研究以傳遞區段中的最內側車道說明各小段之變換車道的車輛數計算方式。

步驟 2-1 計算在 b 小段變換車道之車輛數

b 小段之最內側車道中，只有右轉與直行車輛可能會變換至外側車道，右轉與直行之變換車道車輛數分別計算如下：

1. 右轉車輛

位於 b 小段最內側車道且會變換車道之右轉車輛數目如 (6) 式。

$$b \text{ 小段最內側車道中，右轉車輛變換車道之車輛數} \\ = \min\{\text{在 } b \text{ 小段最內側車道之右轉車輛數目, 鄰車道之剩餘容量}\} \quad (6)$$

分述如下：

(1) 在 b 小段最內側車道之右轉車輛數目

因為所有右轉車輛皆會變換至最右側車道，因此最內側車道之右轉車輛數如 (7) 式。

$$X_{P,1,b}^{R,k} = x_{P,1,b}^k * R_{P,1,b}^{R,k} \quad (7)$$

其中，

$X_{P,1,b}^{R,k}$ 時段 k ， P 區段， b 小段，車道 1 (最內側車道) 之右轉車輛數；

$x_{P,1,b}^k$ 時段 k ， P 區段， b 小段，車道 1 (最內側車道) 之車輛數；

$R_{P,1,b}^{R,k}$ 時段 k ， P 區段， b 小段，車道 1 (最內側車道) 之右轉車輛比例。

(2) 相鄰車道之剩餘容量

相鄰車道之總剩餘容量如 (8) 式。

$$(C_{P,2,b}^k - n_{P,2,b}^k) \quad (8)$$

其中，

$C_{P,2,b}^k$ 時段 k ， P 區段， b 小段，車道 2 可容納車輛數；

$n_{P,2,b}^k$ 時段 k ， P 區段， b 小段，車道 2 之移動車輛數。

車輛要變換到相鄰車道，除了相鄰車道有剩餘容量外，其車距也必須要大於最小可接受之變換車道車距。相鄰車道車輛車距大於變換車道之最小可接受車距的機率如 (9) 式所示。

$$P_{P,2,c}^k = P(T^k \geq t) \quad (9)$$

其中，

T^k 時段 k 時，相鄰車道車輛之車距；

t 變換車道需要之最小可接受車距。

只有當目標車道出現可接受車距時，車輛才能順利變換車道。由於此過程為一個複雜的隨機等候 (stochastic queuing) 之課題。而對於本研究的目標－最佳化定時號誌之時制－而言，選取一個適當的機率函數來估算可接受車距出現的機率似乎不失為一個有效率又不失準確性的方式。由於各地方之車流情況不一，因此須依據各地的交通情況來選擇合適之統計分配代入上式。

相鄰車道可被利用之剩餘容量如 (10) 式。

$$S_{P,2,b}^{R,k} = P_{P,2,c}^k * (C_{P,2,b}^k - n_{P,2,b}^k) \quad (10)$$

綜合 (7) 式、(10) 式，在 b 小段變換車道之右轉車輛數如 (11) 式。

$$y_{P,1,2}^{b,R,k} = \min\{X_{P,1,b}^{R,k}, S_{P,2,b}^{R,k}\} \quad (11)$$

2. 直行車輛

可以變換車道之直行車輛數目的計算方式與右轉車輛的計算方式相似，由於本模式假設「右轉車輛有使用右側鄰近車道的優先權」，因此在計算鄰近車道剩餘容量時，必須先扣除右轉車輛使用掉的容量。因此在計算直行車輛可使用的相鄰車道剩餘容量時，需將 (10) 式改寫為 (12) 式，其餘計算方式與右轉車輛相同。

$$S_{P,2,b}^{T,k} = P_{P,2,c}^k * (C_{P,2,b}^k - n_{P,2,b}^k - y_{P,1,2}^{b,R,k}) \quad (12)$$

步驟 2-2 計算在 c 小段變換車道之車輛數

以車道 1 之直行車輛為例，欲變換車道之直行車輛數目如 (13) 式所示：

$$(n_{P,1,c}^k * R_{P,1,c}^{T,k}) \quad (5)$$

其中，

$n_{P,1,c}^k$ 時段 k ， P 區段， c 小段之第 1 車道的行進中車輛數目；

$R_{P,1,c}^{T,k}$ 時段 k ， P 區段， c 小段之第 1 車道的直行車輛比例。

在 c 小段之直行車輛會選擇具有較短等候隊列長度之車道，因此欲變換車道之車輛數如 (14) 式：

$$N_{P,1,c}^{T,k} = n_{P,1,c}^k * R_{P,1,c}^{T,k} * I_{P,1,P,2}^{c,k} \quad (14)$$

其中，

$$I_{P,1,P,2}^{c,k} = \begin{cases} 1, \text{當車道2的等候長度小於車道1} \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

$N_{P,l,c}^{T,k}$ 時段 k , P 區段之 c 小段的第 1 車道中欲變換車道之直行車輛;

$n_{P,l,c}^k$ 時段 k , P 區段, c 小段之第 1 車道的行進中車輛;

$R_{P,l,c}^{T,k}$ 時段 k , P 區段, c 小段之第 1 車道的直行車輛比例。

相鄰車道之剩餘可利用容量計算方式與 (12) 式同。

步驟 2-3 計算在 f 小段變換車道的車輛數

f 小段的直行車輛會選擇較快速的車道, 因此只需將 (14) 式中的 $I_{P,1,P,2}^{c,k}$ 改成 $I_{P,1,P,2}^{f,k}$, 其餘的計算方式與 c 小段一致。

$$I_{P,1,P,2}^{f,k} = \begin{cases} 1, \text{當車道2的速度快於車道1} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

步驟三 計算從傳遞區段 (propagation) 至分散區段 (diverging) 之車輛數目

從傳遞區段至分散區段之車輛數目可以由 (16) 式計算而得。

$$\begin{aligned} &\text{傳遞區段至分散區段之車輛數目} = \\ &\min \{ \text{傳遞區段中, 潛在可以進入分散區段之車輛數目,} \\ &\quad \text{傳遞區段之最大輸出車流量, 分散區段之剩餘容量} \} \end{aligned} \quad (16)$$

以第 2 車道 (最外側車道) 為例, 各項目計算方式如下:

步驟 3-1 計算傳遞區段中, 潛在可以進入分散區段之車輛數目

當車輛進入傳遞區段時, 要經過一段旅行時間才能進入分散區段, 傳遞區段之旅行時間如 (17) 式所示。

$$T_{P,2}^k = \frac{L_{P,2,f}^k}{v_{P,2,f}^k} + \frac{L_{P,2,c}^k}{v_{P,2,c}^k} + \frac{L_{P,2,b}^k}{v_{P,2,b}^k} + \frac{L_{P,2,s}^k}{v_{P,2,s}^k} \quad (17)$$

其中,

$T_{P,2}^k$ 時段 k , P 區段, 車道 2 之旅行時間;

$L_{P,2,j}^k$ 時段 k , P 區段, 車道 2, j 小段之長度 ($j=f, c, b, s$);

$v_{P,2,j}^k$ 時段 k , P 區段, 車道 2, j 小段之平均速度 ($j=f, c, b, s$)。

由於本模式係以時段為基礎來計算車流間之關係, 因此需將車輛在傳遞區段之旅行時間轉換成時段個數, 轉換方式如 (18) 式所示。

$$n = \left\lfloor \frac{T_{P,2}^k}{\Delta t} \right\rfloor \quad (18)$$

於時段 $(k-n)$ 至時段 k 間，進入 P 區段之車輛數如 (19) 式所示。

$$y_{P,2}^K = \sum_{t=k-n}^k y_{P,2}^t \quad (19)$$

因此於時段 $(k-n)$ 之前進入 P 區段之車輛數為

$$(n_{P,2}^k - y_{P,2}^K + x_{P,2}^k) \quad (20)$$

其中，

- $n_{P,2}^k$ 時段 k ， P 區段，車道 2 之行進中車輛數
- $y_{P,2}^K$ 於時段 $(k-n)$ 至時段 k 間，進入 P 區段第 2 車道之車輛數
- $x_{P,2}^k$ 時段 k ， P 區段，車道 2 之停等車輛數

步驟 3-2 計算傳遞區段之最大輸出車流量

傳遞區段 (P) 的車道 2 之最大可輸出車流量可以由速度跟密度計算而得。由於左轉車輛不會由車道 2 駛出路段，因此由密度與速度計算出的車輛數必須要扣除左轉車輛後，才是真正由車道 2 輸出之車輛數，如 (21) 式所示。

$$(R_{P,2}^{T,k} + R_{P,2}^{R,k}) * \rho_{P,2}^k * v_{P,2}^k * \Delta t, \quad (21)$$

其中，

- $R_{P,2}^{T,k}$ 時段 k ， P 區段，車道 2 之直行車輛比例；
- $R_{P,2}^{R,k}$ 時段 k ， P 區段，車道 2 之右轉車輛比例；
- $\rho_{P,2}^k$ 時段 k ， P 區段，車道 2 之密度；
- $v_{P,2}^k$ 時段 k ， P 區段，車道 2 之平均速度。

步驟 3-3 計算分散區段之剩餘容量

分散區段 (D) 之剩餘容量可以由 (22) 式求得。

$$S_{D,2}^k = (C_{D,2} - n_{D,2}^k - x_{D,2}^k) \quad (22)$$

其中，

- $C_{D,2}$ 分散區段 (D) 中，車道 2 之可容納車輛數；
- $n_{D,2}^k$ 時段 k ， D 區段，車道 2 之行進中車輛數；

$x_{D,2}^k$ 時段 k , D 區段, 車道 2 之停等車輛數。

於過飽和情形下, 直行車輛之等候列隊長度可能會超過左轉專用道之長度, 因而阻擋左轉車輛進入左轉專用道, 因此當計算分散區段左轉專用道之剩餘容量時, 必須要考慮直行車輛堵塞左轉專用道的問題。本模式利用一指標變數 ($Q_{D,1}^k$) 來表示直行車輛之等候列隊長度是否超過左轉專用道。

當分散區段之車道 1 已被車輛排滿時, 亦即車道 1 之等候列隊長度已經等於或大於左轉專用道的長度, 此時指標變數 $Q_{D,1}^k$ 為 0, 亦即左轉車輛無法進入左轉專用道; 反之, $Q_{D,1}^k$ 為 1:

$$Q_{D,1}^k = \begin{cases} 0, & \text{if } (C_{D,1} - n_{D,1}^k - x_{D,1}^k) = 0 \\ 1, & \text{if } (C_{D,1} - n_{D,1}^k - x_{D,1}^k) > 0 \end{cases}$$

因此若是下游車道為左轉專用道, 則需要將 (22) 式乘以上述之指標變數, 如 (23) 式所示。若是 D 區段之車道 1 之等候列隊長度已經等於或大於左轉專用道的長度, 即使左轉專用道仍有空間, $S_{D,0}^k$ 仍會為 0, 亦即無車輛可以進入 D 區段之左轉專用道 (車道 0)。

$$S_{D,0}^k = (C_{D,0} - n_{D,0}^k - x_{D,0}^k) * Q_{D,1}^k \quad (23)$$

其中,

$C_{D,0}$ 分散區段 (D) 中, 車道 0 之可容納車輛數;

$n_{D,0}^k$ 時段 k , D 區段, 車道 0 之行進中車輛數;

$x_{D,0}^k$ 時段 k , D 區段, 車道 0 之停等車輛數。

步驟 3-4 計算實際從傳遞區段至分散區段之車輛數目

實際從傳遞區段 (P) 車道 2 至分散區段 (D) 車道 2 之車輛數目為取 (20)、(21) 與 (22) 式之最小值, 如 (24) 式所示。

$$y_{P,2,D,2}^{E,k} = \min\{(n_{P,2}^k - y_{P,2}^k + x_{P,2}^k), (R_{P,2}^{T,k} + R_{P,2}^{R,k}) * \rho_{P,2}^k * v_{P,2}^k * \Delta t, \quad (24)$$

步驟四 計算由分散區段各車道, 進入下游路段各車道之車輛數目

由於下游路段可能有多個車道, 因此本步驟為計算由分散區段之各車道進入下游路段各車道之車輛數。從分散區段之車道, 進入下游車道之車輛數可以由 (25) 式計算而得。

從分散區段車道進入下游車道之車輛數目 =

$$\min\{\text{潛在可以從分散區段之車道進入下游車道之車輛數}, \\ \text{分散區段之車道之最大輸出車流量, 下游車道之剩餘容量}\} \quad (25)$$

以左轉專用道 (車道 0) 為例, 各項目計算方式如下:

步驟 4-1 計算潛在可以從分散區段之車道進入下游車道之車輛數

在分散區段 (D) 中，潛在可以由左轉專用道消散的車輛數目如 (26) 式。

$$(n_{D,0}^k - y_{P,1,D,0}^k + x_{D,0}^k) \quad (26)$$

其中，

$n_{D,0}^k$ 時段 k ， D 區段之左轉道的行進中車輛數

$y_{P,1,D,0}^k$ 時段 $(k-1)$ 至時段 k 之間，進入 D 區段左轉道之車輛數

$x_{D,0}^k$ 時段 k ， D 區段之左轉道的停等車輛數

當下游路段之車道數目超過一個車道時，由此左轉道消散之車輛可能會進入下游的任一車道，因此 (26) 式需要乘上一個車道選擇比例 ($U_{A,i}$)，用以表示左轉車道之車輛進入下游車道 i 的比例。

$$(n_{D,0}^k - y_{P,1,D,0}^k + x_{D,0}^k) * U_{A,i} \quad (27)$$

步驟 4-2 計算分散區段之車道之最大輸出車流量

每個車道的可輸出最大車流量與號誌以及飽和流率有關，左轉車道的最大可輸出車流量如 (28) 式。

$$(D_{D,0} * \Delta t * G_p^{h,k}) \quad (28)$$

其中，

$$G_p^{h,k} = \begin{cases} 1, & \text{如果時段 } k \text{ 時, 路口 } h \text{ 的 phase } p \text{ 為綠燈} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$D_{D,0}$ D 區段中左轉車道的消散率

若下游路段車道數目超過一個車道，則 (28) 式需乘上車道選擇比例 ($U_{A,i}$)。

步驟 4-3 計算下游車道之剩餘容量

下游車道之剩餘容量可由 (29) 式求得：

$$(C_{A,i} - n_{A,i}^k - x_{A,i}^k) \quad (29)$$

其中，

$C_{A,i}$ 下游路段 A 可容納之車輛數；

$n_{A,i}^k$ 時段 k ，路段 A 之車道 i 的行進中車輛數；

$x_{A,i}^k$ 時段 k ，路段 A 之車道 i 的等候車輛數。

步驟 4-4 計算實際從分散區段各車道消散之車輛數目

實際從分散路段左轉道消散之車輛數目為取步驟 4-1 到 4-3 的最小值，如 (30) 式：

$$y_{D,0,A,i}^k = \min \{ (n_{D,0}^k - y_{P,1,D,0}^k + x_{D,0}^k) A * U_{A,i}, D_{D,0} * \Delta t * G_p^{H,k} * U_{A,i}^E, (C_{A,i} - n_{A,i}^k - x_{A,i}^k) \} \quad (30)$$

2.3 號誌相關限制與流量守恆

號誌相關之限制式如下：

$$g_{h,j} \geq G_{\min}, \quad j=1, \dots, 4 \quad (31)$$

$$C_{\min} \leq C_h \leq C_{\max} \quad (32)$$

$$\sum_j g_{h,j} + \sum_j I_{h,j} = C_h \quad (33)$$

$$G_p^{h,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{j=1}^{p-1} (g_{h,j} + I_{h,j}) < \text{mod}(k * \Delta t, C) \leq \sum_{j=1}^{p-1} (g_{h,j} + I_{h,j}) + g_{h,p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (34)$$

其中，

g_{hj} h 路口第 j 時相之秒數；

C_h h 路口之週期；

$G_{\min}$ 最小綠燈時間；

$C_{\min}$ 最小週期；

$C_{\max}$ 最大週期；

I_{hj} h 路口第 j 時相之綠燈間隔時間；

$G_p^{h,k}$ k 時段時， h 路口第 p 時相是否為綠燈的指標變數。

流量守恆限制式如下：

$$n_{i,j}^{k+1} + x_{i,j}^{k+1} = n_{i,j}^k + x_{i,j}^k + \sum_{l,m} y_{l,m,i,j}^k - \sum_{o,n} y_{i,j,o,n}^k \quad (35)$$

其中，

$n_{i,j}^{k+1}$ 時段 $(k+1)$ ， i 區段， j 車道的行進中車輛數；

$x_{i,j}^{k+1}$ 時段 $(k+1)$ ， i 區段， j 車道的等候車輛數；

$n_{i,j}^k$ 時段 k ， i 區段， j 車道的行進中車輛數；

- $x_{i,j}^k$ 時段 k , i 區段, j 車道的等候車輛數;
 $y_{l,m,i,j}^k$ 時段 k , 從 l 區段, m 車道進入 i 區段之 j 車道的車輛數;
 $y_{i,j,o,n}^k$ 時段 k , 從 i 區段, j 車道進入 o 區段之 n 車道的車輛數。

2.4 模式目標式

2.4.1 最小化總延滯

號誌化路口的延滯主要來自前方車輛總啟動時間、本身之啟動時間、車隊之啟動損失之時間以及紅綠燈之停等時間。

1. 前方車輛總啟動時間

若是前方有 n 輛車在等待, 則前方 n 輛車之總啟動時間為:

$$(n * D) \quad (36)$$

其中,

D 一輛車之啟動時間。

2. 本身之啟動時間亦為 D

3. 車隊之啟動損失時間為 L

4. 紅燈停等時間為

$$(\Delta t * I_p^{h,k} * x^k) \quad (37)$$

其中,

$$I_p^{h,k} = \begin{cases} 1, & \text{如果時段 } k \text{ 時, 路口 } h \text{ 的 phase } p \text{ 為紅燈} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

x^k 時段 k 的等候車輛數。

因此路段之總延滯為:

$$(n+1) * D + L + \sum_k (\Delta t * I_p^{h,k} * x^k) \quad (38)$$

由於本模式採用之車隊啟動損失時間 (L) 為一常數, 可不放入目標式中。因此最小化路網之總延滯如下式:

$$\min \sum_{h,p} [(n+1) * D + \sum_k (\Delta t * I_p^{h,k} * x^k)] \quad (39)$$

2.4.2 最大化通過量

最大化通過量之目標式如下式：

$$\max \sum_k y_{out}^k \quad (40)$$

其中，

y_{out}^k 時段 k ，從路網邊界出去的车辆數。

2.5 模式求解

本研究以 VB 來撰寫求解之演算法，演算法之流程如圖 9 所示。首先本模式設定各路口各時相之最小綠燈秒數為初始之綠燈秒數，並設定各路口各時相之時相指標、路口指標。接著利用初始綠燈秒數求出一初始之目標函數值。接著增加路口 h 之時相 i 的秒數，

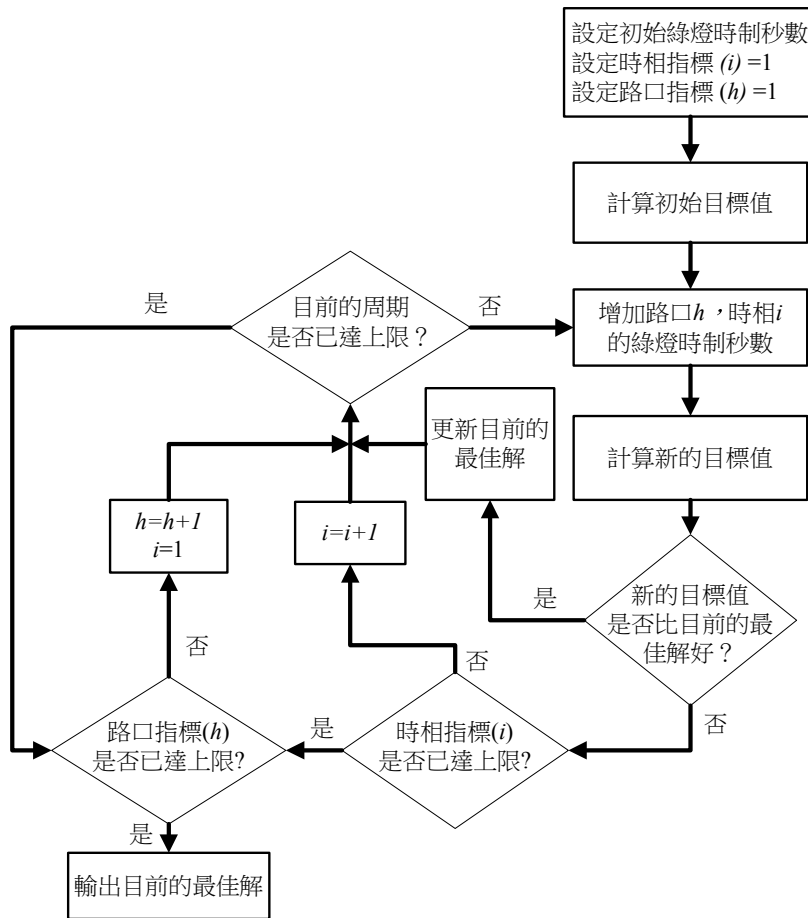


圖 9 模式求解流程圖

增加後便再次計算目標函數值，計算後比較目前已知的最佳函數值以及新的目標函數值。如果新的目標值比較好，則更新目前的最佳解，更新後再繼續增加路口 h 之時相 i 的秒數，接著再與目前的最佳解比較；如果新的目標值比較差，則改由增加下一個時相的秒數，若是此路口的所有時相皆已計算完畢，則換計算下一個路口，如此循環計算，直到所有路口皆計算完畢為止，計算完畢後則輸出目前已知之最佳解。

三、案例分析

本研究將本模式、TRANSYT-7F 與 TRANSYT 14 求解出的號誌時制分別放入 TSIS 模擬軟體中進行模擬，並比較各模式之模擬結果。各路段之參數如表 1。各路口、路段與車道編號如圖 10，各路口號誌時相如圖 11。

與 TRANSYT-7F 的比較結果如 3.1 小節所示。與 TRANSYT 14 的比較結果如 3.2 小節所示。

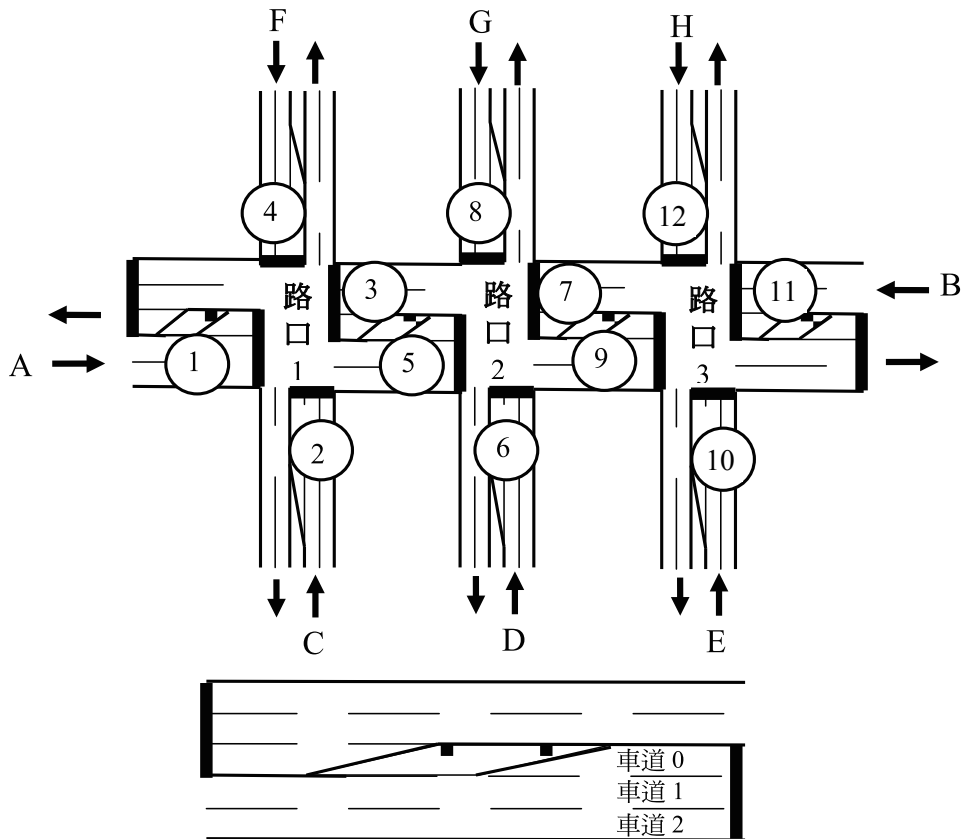


圖 10 路口、路段與車道編號

表 1 路段參數

項 目	數 值
最小綠燈時間	15 秒 (直行／右轉) 10 秒 (左轉)
最大週期	150 秒
飽和流率	1600 vph/lane
自由車流速度	40 mph
轉向比	0.3 (左轉)、0.5 (直行)、0.2 (右轉)
左轉道長度	64 公尺 (210 英呎)
路段長度	372 公尺 (1220 英呎)

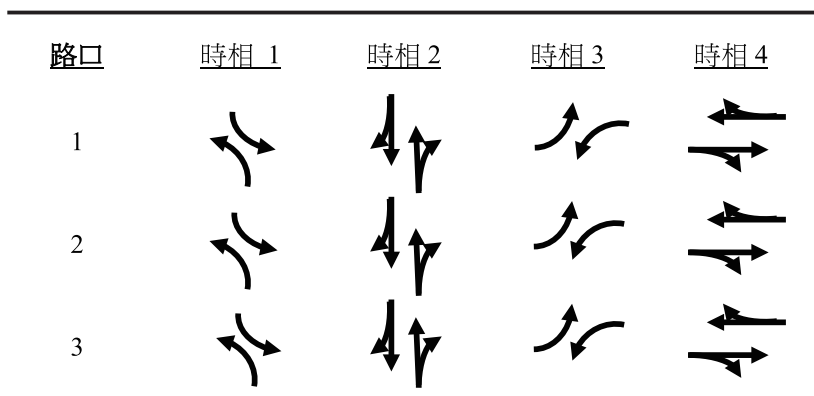


圖 11 各路口號誌時相

表 2 案例情境

(a)與 TRANSYT-7F 比較之案例

情境 編號	目標函數	需 求 (vph/lane)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
1	Min	600	600	500	500	500	500	500	500
2	Min	700	700	500	500	500	500	500	500
3	Min	800	800	500	500	500	500	500	500
4	Max	600	600	500	500	500	500	500	500
5	Max	700	700	500	500	500	500	500	500
6	Max	800	800	500	500	500	500	500	500
7	Max	900	900	500	500	500	500	500	500
8	Max	1000	1000	500	500	500	500	500	500

(b)與 TRANSYT 14 比較之案例

情境編號	目標函數	需 求 (vph/lane)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
9	Min	600	600	500	500	500	500	500	500
10	Min	700	700	500	500	500	500	500	500
11	Min	800	800	500	500	500	500	500	500

3.1 與 TRANSYT-7F 之比較結果

情境 1 至情境 3 以最小化總延滯為目標式。當路網需求較小 (情境 1 與情境 2) 時，本模式無論在各路段之平均每車延滯 (表 3) 或是整體路網的平均每車延滯 (表 4) 皆比 TRANSYT-7F 低。當主要的流量進入點 (A 與 B 點) 的流量增加至較高的流量 (情境 3) 時，除了路段 1 與路段 11 之外，本模式在其它各路段之平均每車延滯也仍低於 TRANSYT-7F。而就整體路網的平均每車延滯而言，本模式的平均每車延滯仍低於 TRANSYT-7F 達 14.39% (表 4)。這表示本模式可以控制進入路網的流量，進而最小化路網內部路段發生溢流 (overflow) 之潛在機率，進而減低路網內部的延滯。

情境 4 至情境 8 則是以最大化總通過量為目標式。當路網需求小 (情境 4 至情境 6) 時，本模式之每小時通過量與 TRANSYT-7F 差異不大，但隨著需求越來越大 (情境 7 與 8) 時，本模式較 TRANSYT-7F 有更多的通過量 (表 5)。另外本模式在這些情境 (情境 4 至 8) 的路網平均每車延滯也皆低於 TRANSYT-7F。以情境 8 為例，本模式之路網平均每車延滯比 TRANSYT-7F 低 36% (表 4)，則而總通過量則比 TRANSYT-7F 多 5% (表 5)。

以號誌時制的角度來分析，於低流量的情境下，TRANSYT-7F 所求出的號誌週期皆比本模式為長 (表 6)，過長的週期會增加了車輛的停等延滯。這也正是在低流量時，本模式之路網的平均每車延滯均小於 TRANSYT-7F 的原因。而於高流量之情境下，TRANSYT-7F 利用過長之週期來增加通過量，由於週期過長，導致等候隊列也長，因此增加了本身路段左轉車與直行車輛互相堵塞之機會。過長之週期也增加了下游路段的到達率，也因此增加了發生左轉與直行車輛互相堵塞的機率，為了降低其機率，則勢必增加下游路段的綠燈秒數，如此會造成下游路口其它方向路段之停等延滯的增加。而本模式則選擇一較適當之週期，也因此在高流量之情境下，本模式之通過量大於 TRANSYT-7F (表 5)，且路網之平均每車延滯亦小於 TRANSYT-7F (表 4)。

以情境 8 (進入流量最大之情境) 為例，就路口 1 而言，由於 TRANSYT-7F 給予時相 3 與時相 4 (主要車流方向) 之秒數較多 (表 6)，造成了次要車流方向的綠燈間隔時間較長，也因此給予時相 1 與時相 2 較長的秒數來紓解車流，這又會反過來造成主要車流方向 (路段 1) 的綠燈間隔時間增長，進而增加其延滯。尤其在過飽和之情形下，此舉亦增加了左轉與直行車輛間之互相堵塞的機率，因此 TRANSYT-7F 在路段 1 (主要的流量進入路段)

之延滯比本模式多 45%。同樣的情形一樣發生在另一主要的流量進入路段--路段 11，該路段之平均延滯更比本模式多達 50% (表 3)。

就路口 2 而言，TRANSYT-7F 於路口 1 採取過長之週期，造成路段 5 之車輛到達率較高，因此 TRANSYT-7F 亦給予路口 2 的時相 3 與時相 4 (圖 11) 較高的秒數，如此亦增加了次要路段 (路段 6 與路段 8) 的平均每車延滯。而本模式於路口 1 採取較 TRANSYT-7F 短之週期，而路口 2 配合上下游之號誌，亦給予各時相較短之秒數，雖然造成路段 5 與路段 7 之平均每車延滯較 TRANSYT-7F 多，但次要路段的停等延滯卻遠低於 TRANSYT-7F (圖 12)，且本模式路口 2 的平均每車延滯仍低於 TRANSYT-7F。由此可知，本模式較能考量路網整體之延滯情形，給予各時相適當之秒數，進而降低整體路網之延滯。

表 3 各路段平均每車延滯差異

單位：百分比

路段 情境	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-17.3	-27.5	-47.0	-30.5	-56.9	-31.1	-64.8	-22.8	-47.8	-33.3	-11.0	-29.1
2	-13.7	-1.2	-54.6	-5.0	-37.1	-30.1	-51.7	-25.3	-55.1	-21.8	-26.0	-22.4
3	13.3	-14.0	-47.5	-16.4	-42.8	-15.7	-40.9	-18.7	-45.0	-17.9	2.2	-20.7
4	-15.3	-25.9	-23.6	-33.2	-34.3	-33.0	-40.7	-32.3	-24.2	-31.5	-18.8	-23.3
5	12.2	-15.9	-41.9	-17.3	59.5	-34.7	41.1	-34.5	-43.4	-14.8	-8.0	-12.7
6	-5.2	-3.6	-29.9	-3.5	25.4	-39.5	46.1	-40.5	-31.1	-6.2	-6.9	-8.5
7	-41.0	41.1	-25.6	30.1	-1.2	-52.7	-18.6	-62.8	-27.9	52.1	-41.9	11.5
8	-45.3	-18.8	-17.4	-18.1	168.3	-77.9	122.4	-75.7	-23.4	-34.1	-50.2	-27.0

$$\text{平均每均每車延滯} = \frac{(\text{本模式之平均延滯} - \text{T7F之平均延滯})}{\text{T7F之平均延滯}} * 100\%$$

表 4 平均每車延滯差異

情境	平均每車延滯差異
1	-34.88%
2	-28.03%
3	-14.39%
4	-27.95%
5	-7.68%
6	-7.98%
7	-26.19%
8	-36.76%

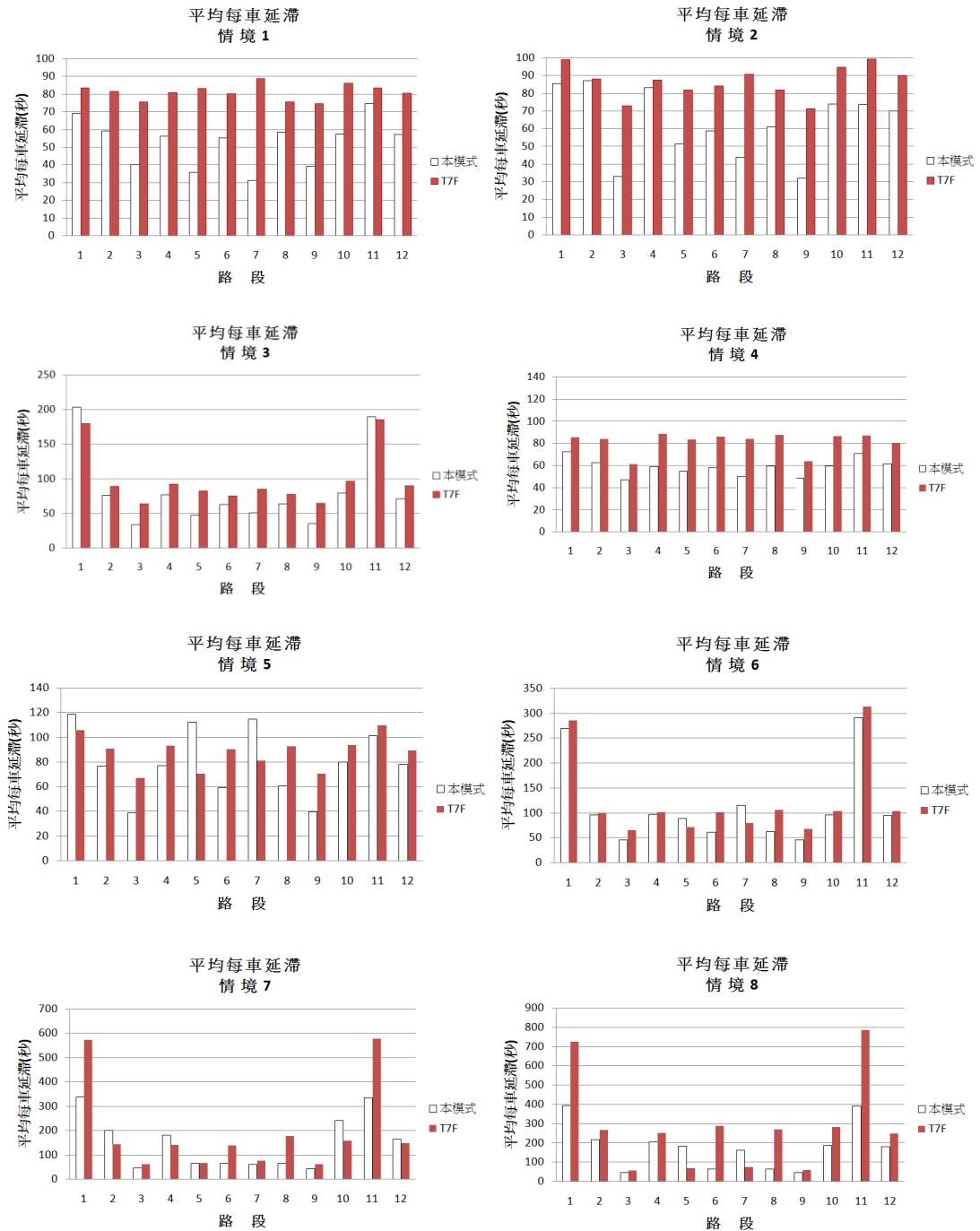


圖 12 各路段的平均每車延滯

表 5 每小時的總通過量

單位：輛

情境	本模式	TRANSYT-7F	差異百分比
4	8421	8395	0.31%
5	8768	8770	-0.02%
6	9008	9004	0.04%
7	9121	9016	1.16%
8	9359	8875	5.45%

表 6 時相秒數表

單位：秒

情境		路口 1 時相				路口 2 時相				路口 3 時相			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	本模式	10	16	10	16	10	16	10	16	10	16	10	16
	TRANSYT-7F	28	32	32	37	30	35	30	34	28	32	32	37
2	本模式	10	16	14	26	10	18	10	18	10	16	14	22
	TRANSYT-7F	25	30	34	40	27	34	32	36	25	30	34	40
3	本模式	10	16	14	24	12	18	12	22	10	16	14	22
	TRANSYT-7F	20	24	31	36	22	30	28	31	20	24	31	36
4	本模式	15	20	15	20	15	22	15	18	15	20	15	20
	TRANSYT-7F	29	34	34	40	29	34	34	40	29	34	34	40
5	本模式	15	20	18	32	15	22	16	18	15	20	18	32
	TRANSYT-7F	27	32	36	43	27	32	36	43	27	32	36	43
6	本模式	15	20	18	40	15	20	16	20	15	20	18	40
	TRANSYT-7F	25	30	38	45	25	30	38	45	25	30	38	45
7	本模式	15	20	20	47	15	18	16	22	15	20	20	47
	TRANSYT-7F	24	27	39	46	24	27	39	46	24	27	39	46
8	本模式	15	20	20	47	15	18	16	22	15	20	20	47
	TRANSYT-7F	22	26	41	49	22	26	41	49	22	26	41	49

3.2 與 TRANSYT 14 之比較結果

情境 9 至情境 11 為低流量且目標式為最小化總延滯之情境。本模式與 TRANSYT 14 之比較結果如下：

1. 由表 8 可知，本模式之平均每車延滯皆比 TRANSYT 14 低約 20%~30% 左右。且當進入

- 流量越多時，TRANSYT 14 與本模式之平均每車延滯的差異也越大。
- 由圖 13 可知，當需求較小時（情境 9），本模式中每個路段的平均每車延滯皆小於 TRANSYT 14 中每個路段的平均每車延滯。而當需求漸漸變大時，本模式之路網內部路段之平均延滯仍皆小於 TRANSYT 14，這表示本模式能有效控制進入路網之車流，進而減少路網內部路段之延滯。且其整體路網之延滯亦小於 TRANSYT 14 之延滯。
 - 情境 9 至情境 11 為路段流量較小之情境，但由表 9 可知，TRANSYT 14 所求出的各路口最佳號誌週期均較本模式所求出的最佳號誌週期為長，而過長的週期恐會增加停等延滯，這也是造成兩者間平均每車延滯差異的主要因素。

表 7 各路段平均每車延滯差異

單位：百分比

路段 情境	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9	-8.71	-17.93	-32.47	-20.84	-40.26	-22.02	-43.39	-17	-34.01	-21.67	-3.72	-18.63
10	-23.21	14.65	-45.90	5.24	-22.46	-23.35	-32.37	-20.6	-47.32	-6.81	-39.72	-12.79
11	-44.15	-3.47	-35.99	-6.23	-23.11	-20.98	-28.78	-22.97	-43.47	-10.62	-41.89	-20.98

表 8 平均每車延滯差異

情境	平均每車延滯差異
9	-22.06%
10	-22.49%
11	-33.12%

表 9 時相秒數表

單位：秒

情境		路口 1 時相				路口 2 時相				路口 3 時相			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
9	本模式	10	16	10	16	10	16	10	16	10	16	10	16
	TRANSYT 14	18	27	21	29	18	28	19	30	18	27	20	30
10	本模式	10	16	14	26	10	18	10	18	10	16	14	22
	TRANSYT 14	19	29	25	32	19	30	22	34	18	29	24	34
11	本模式	10	16	14	24	12	18	12	22	10	16	14	22
	TRANSYT 14	19	28	30	33	19	31	24	36	18	30	27	35

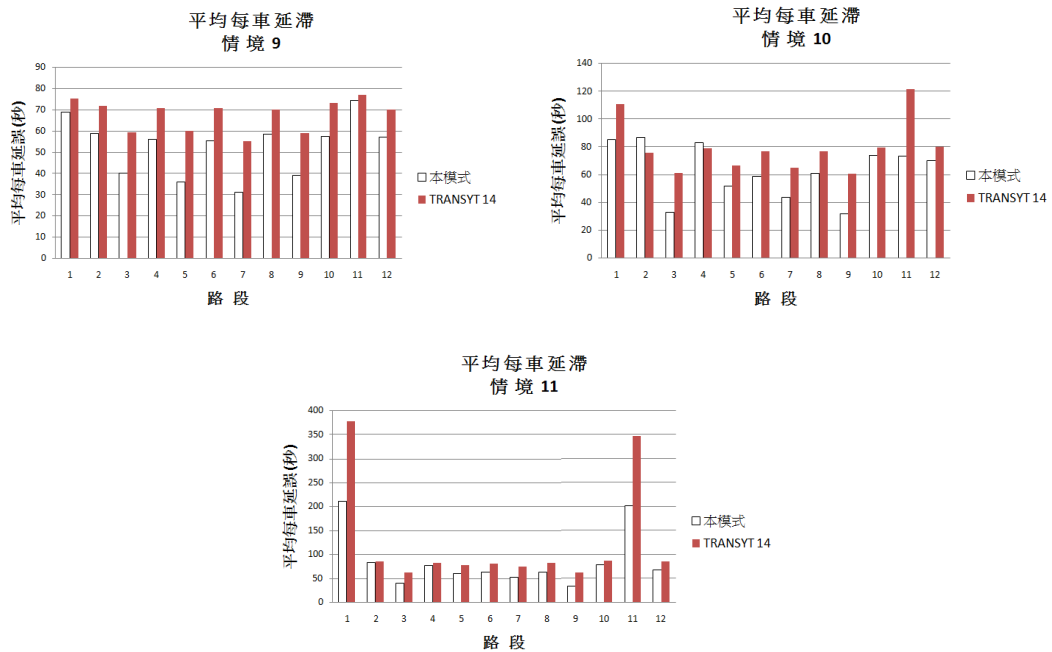


圖 13 各路段的平均每車延滯

3.3 小結

本研究將本模式、TRANSYT-7F 以及 TRANSYT 14 在不同需求下求解出的最佳號誌時制分別放入 TSIS 模擬，模擬結果顯示：

1. 需求較低、使用最小化總延滯為目標式時，無論與 TRANSYT-7F 或是 TRANSYT14 相比，本模式均能有效降低路網之總延滯。
2. 需求較低、使用最大化總通過輛為目標式時，本模式之總通過量與 TRANSYT-7F 並無差異。
3. 需求較高，且使用最大化總通過輛為目標式時，本模式之總通過輛與 TRANSYT-7F 相較，改善幅度隨流量增加而增加。
4. 過長之週期會增加綠燈間隔時間，進而增加停等延滯以及本身與下游路段發生左轉與直行車輛互相堵塞的機率，而過短的週期則會減少通過量。本模式能求解出一較適當之週期來增加通過量，並減少路網之平均每車延滯。

由上述模擬結果可知本模式較能掌握實際車流情形，因此能求解出較佳之結果。

四、結論與建議

本研究提出一過飽和市區幹道號誌最佳化之模式，可掌握過飽和路段可能會發生之車流情形：

1. 等候隊列回堵到上游路口。
2. 左轉車道被直行車輛堵塞。
3. 直行車道被左轉車輛堵塞，導致駕駛人增加變換車道之頻次。
4. 由於某種轉向的車輛數較多，導致各車道的等候長度差異較大，導致等候列隊較長之車道之駕駛人增加變換車道之頻次。

雖本研究之模式著重於過飽和之市區幹道，但仍能兼顧中低飽和之情境。由與 TRANSYT-7F 與 TRANSYT 14 比較之結果顯示，本模式於低飽和至過飽和之情境下皆能有所改善，而近飽和與過飽和之改善幅度又大於中低飽和之改善幅度。由此結果顯示，本研究之模式的確可以更加精準描述過飽和時之車流特性，進而求解出更符合車流狀況之號誌時制。

本模式主要的研究重點有二：

1. 左轉與直行車輛相互堵塞時，直行車輛變換車道對車流之影響。
2. 當某種轉向車輛數較多時，各車道的等候長度會產生較大之差異，也會增加直行車輛變換車道的次數，而此亦會對車流產生額外之影響。

因此本研究之模式適用於左／右轉向比例較高的過飽和路段，也因此減低了路口續進的需求，所以本模式無考量時差變數，未來或可將時差納入模式中探討。

另外，本研究僅探討單一車種，未來或可針對多車種進行探討，尤其可將機車駕駛行為以及機車待轉區納入模式中，應能建立一個適合臺灣車流狀況的號誌控制最佳化模式。

參考文獻

1. Gartner, N. H., Little, J. D. C., and Gabbay, H., "Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed Integer Linear Programming Part I: The Network Coordination Problem", *Transportation Science*, Vol. 9, No. 4, 1975, pp. 321-343.
2. Gartner, N. H., Little, J. D. C., and Gabbay, H., "Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed-Integer Linear Programming Part II: The Network Synchronization Problem", *Transportation Science*, Vol. 9, No. 4, 1975, pp. 344-363.
3. Gartner, N. H., Assmann, S. F., Lasaga, F. L., and Hou, D. L., "A Multi-Band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization", *Transportation Research Part B*, Vol. 25, No. 1, 1991, pp. 55-74.

4. Cohen, S. L. and Liu, C. C., "The Bandwidth-Constrained TRANSYT Signal Optimization Program", *Transportation Research Record*, Vol. 1057, 1986, pp. 1-7.
5. Chaudhary, N. A. and Messer, C. J., "PASSER-IV: A Program For Optimizing Signal Timing in Grid Networks", *Transportation Research Record*, No. 1421, 1993, pp. 82-93.
6. Lin, L. T., Tung, L. W., ASCE, A. M., and Ku, H. C., "Synchronized Signal Control Model for Maximizing Progression along an Arterial", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136, No. 8, 2010, pp.727-73
7. Wong, S. C., "A Lane-Based Optimization Method for Minimizing Delay at Isolated Signal-Controlled Junctions", *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms*, Vol. 2, No. 4, 2003, pp. 379-406.
8. He, Q. K., Head, K. L., and Ding, J., "PAMSCOD: Platoon-Based Arterial Multi-Modal Signal Control with Online Data", *Transportation Research Part C*, Vol. 20, No. 1, 2012, pp. 164-184.
9. Robertson, D. I., *TRANSYT: A Traffic Network Study Tool*, RRL Report LR No. 253, Road Research Laboratory, England, 1969.
10. Wallace, C. E., Courage, K. G., Reaves, D. P., Shoene, G. W., Euler, G. W., and Wilbur, A., *TRANSYT-7F User's Manual*, University of Florida, Gainesville, FL., 1988.
11. Lowrie, P., "The Sydney Coordinated Adaptive Control System – Principles, Methodology, Algorithms", IEEE Conference Publication, Vol. 207, 1982.
12. Robertson, D. I. and Bretherton, R. D., "Optimizing Networks of Traffic Signals in Real-Time: The SCOOT Method", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 40, 1991, pp. 11-15.
13. Gartner, N. H., "OPAC: A Demand-Responsive Strategy For Traffic Signal Control", *Transportation Research Record*, Vol. 906, 1983, pp. 75-81.
14. Mirchandani, P. and Head, L., "A Real-Time Traffic Signal Control System: Architecture, Algorithms, and Analysis", *Transportation Research Part C*, Vol. 9, 2001, pp. 415-432.
15. D'Ans, G. C. and Gazis, D. C., "Optimal Control of Oversaturated Store and Forward Transportation Networks", *Transportation Science*, Vol. 10, No.1, 1976, pp. 1-19.
16. Papageorgiou, M., "An Integrated Control Approach for Traffic Corridors", *Transportation Research Part C*, Vol. 3, 1995, pp. 19-30.
17. Kashani, H. R. and Saridis, G. N., "Intelligent Control for Urban Traffic Systems", *Automatica*, Vol. 19, 1983, pp. 191-197.
18. Wu, J. and Chang, G. L., "An Integrated Optimal Control and Algorithm for Commuting Corridors", *International Transactions on Operations Research*, Vol. 6, 1999, pp. 39-55.
19. Van den Berg, A., Hegyi, B., De Schutter, and Hellendoorn, J., "A Macroscopic Traffic Flow Model for Integrated Control of Freeway and Urban Traffic Networks", 42nd IEEE International Conference on Decision and Control, Hawaii, 2003, pp. 2774-2779.
20. Yu, X. H. and Recker, W., "Stochastic Adaptive Control Model for Traffic Signal Systems", *Transportation Research Part C*, Vol. 14, 2006, pp. 263-282.
21. Lo, H., "A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing

- Plans”, *Transportation Science*, Vol. 35, No. 2, 2001, pp. 148-164.
22. Michalopoulos, P. G. and Stephanopolos, G., “Oversaturated Signal System with Queue Length Constraints – I”, *Transportation Research*, Vol. 11, 1977, pp. 413-421.
23. Michalopoulos, P. G., and Stephanopolos, G., “Optimal Control of Oversaturated Intersections: Theoretical and Practical Considerations”, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 19, 1978, pp. 216-221.
24. Chang, G. and Lin, J. T., “Optimal Signal Timing for an Oversaturated Intersection”, *Transportation Research Part B*, Vol. 34, 2000, pp. 471-491.
25. Chang, G. and Sun, G. Y., “Modeling and Optimization of an Oversaturated Signalized Network”, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, 2004, pp. 687-707.
26. Abu-Lebdeh, G. and Benekohal, R. F., “Development of a Traffic and Queue Management Procedure for Oversaturated Arterials”, *Transportation Research Record*, Vol. 1603, 1997, pp. 119-127.
27. Girianna, M. and Benekohal, R. F., “Using Genetic Algorithms to Design Signal Coordination for Oversaturated Networks”, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, 2004, pp. 117-129.
28. Abu-Lebdeh, G., Chen, H., and Benekohal, R. F., “Modeling Traffic Output for Design of Dynamic Multi-Cycle Control in Congested Conditions”, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11, 2007, pp. 25-40.
29. Li, M. T. and Gan, A. C., “Signal Timing Optimization for Oversaturated Networks Using TRANSYT-7F”, *Transportation Research Record*, Vol. 1683, 1999, pp. 118-126.
30. Binning, J. C., Burtenshaw, G., and Crabtree, M., *TRANSYT 13 User Guide*, Transport Research Laboratory, UK, 2008.
31. Daganzo, C. F., “The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory”, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, 1994, pp. 269-287.
32. Daganzo, C. F., “The Cell Transmission Model Part II: Network Traffic”, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, 1995, pp. 79-93.
33. Park, B., Messer, C. J., and Urbanik, T., “Traffic Signal Optimization Program for Oversaturated Conditions: Genetic Algorithm Approach”, *Transportation Research Record*, Vol. 1683, 1999, pp. 133-142.
34. Yun, I. and Park, B., “Application of Stochastic Optimization Method for an Urban Corridor”, *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2006, pp. 1493-1499.
35. Stevanovic, A., Martin, P. T., and Stevanovic, J., “VisSim-Based Genetic Algorithm Optimization of Signal Timings”, *Transportation Research Record*, Vol. 2035, 2007, pp. 59-68.
36. Liu, Y. and Chang, G. L., “An Arterial Signal Optimization Model for Intersections Experiencing Queue Spillback and Lane Blockage”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, 2011, pp. 130-144.

