

國立交通大學

運輸與物流管理學系

博士論文

No.006

考量高速公路主線與交流道車流延滯因素下之鄰近連接
幹道之號誌控制最佳化模式

A Signal Optimization Model to Minimize the Total Vehicle
Delay on the Freeway Interchange and Local Arterial

研究生：陳彥佑

指導教授：王晉元 教授

張金琳 教授

中華民國一〇三年六月

考量高速公路主線與交流道車流延滯因素下之鄰近連接幹道之號誌控制
最佳化模式

A Signal Optimization Model to Minimize the Total Vehicle Delay on the Freeway
Interchange and Local Arterial

研 究 生：陳彥佑

Student: Yen-Yu Chen

指導教授：王晉元 博士
張金琳 博士

Advisors: Dr. Jin-Yuan Wang
Dr. Gang-Len Chang

國立交通大學
運輸與物流管理學系
博 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management
College of Management
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Ph. D.

In

Traffic and Transportation

June 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一〇三年六月

考量高速公路主線與交流道車流延滯因素下之鄰近連接幹道之號誌
控制最佳化模式

學生：陳彥佑

指導教授：王晉元 博士
張金琳 博士

國立交通大學運輸與物流管理學系（研究所）博士班

摘 要

交通擁塞一直是大多數都市面臨的課題。交通擁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。另外，都市路網常與高速公路相連接，但高速公路與一般地方道路通常分屬不同的主管機關，在號誌設計方面常常出現歧見，高速公路主管單位希望可以盡量紓解高速公路上的車流，而地方主管機關則希望可以優先疏解地區道路的車流。因此整合考量高速公路與地方道路的車流狀況，訂定出一個讓整體路網效率最佳化的號誌時相是一件重要的工作。本研究目的為在整體考量高速公路以及地方道路的車流狀況下，建立一個號誌最佳化模式，以期讓整體路網的效率達到最佳化。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

A Signal Optimization Model to Minimize the Total Vehicle Delay on the Freeway Interchange and Local Arterial

Student: Yen-Yu Chen

Advisors: Dr. Jin-Yuan Wang
Dr. Gang-Len Chang

Department of Transportation and Logistics Management
National Chiao Tung University

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.

Urban networks usually include local arterials and freeway interchanges. Local arterials are within the compass of local governments, but freeways are under the jurisdiction of the Taiwan Area National Freeway Bureau. They have different opinions on traffic signal plans of the intersection which connects with the off-ramp and neighboring intersections. This study proposes a generalized signal optimization model for an interchange area including a segment of the freeway and several arterial intersections under oversaturated conditions. The optimized signal timings from TRANSYT-7F, TRANSYT 14, and the proposed model input into TSIS for comparison. The result presents that the proposed model reduces total delay or increases total throughput under oversaturated conditions as well as near-saturated conditions.

Key Words: Oversaturated; Signal Control; Lane Blockage; Spillback; Optimization

誌 謝

本論文得以順利完成，首先要感謝恩師 王晉元教授與 張金琳教授的指導和鼓勵，無論是在學業亦或生活的待人處事上，學生都受益良多。尤其是當論文的研究過程遇到瓶頸時，恩師們總是不厭其煩地給予學生指導和幫助，使學生能一次又一次的突破瓶頸往前邁進。

感謝張金琳老師給予學生前往馬里蘭大學進修之機會，並補助相關之研究與生活經費。並感謝王晉元老師支持學生前往美國馬里蘭大學進修。師恩浩蕩，在此謹致上學生最誠摯的敬意與謝意。

感謝台灣大學土木工程學系張堂賢教授、成功大學魏健宏教授、系上卓訓榮教授與邱裕鈞教授在論文口試時惠賜卓見及不吝指正，使本論文更臻完備。

感謝一直在背後默默陪伴我的家人以及貽婷，每當我遇到挫折時，他們總是能鼓勵、支持我，並且能讓我在求學過程中無後顧之憂。

這篇論文可以順利完成，要感謝的人實在是太多了，希望能在此與你們共同分享這份喜悅，謝謝大家！

陳彥佑

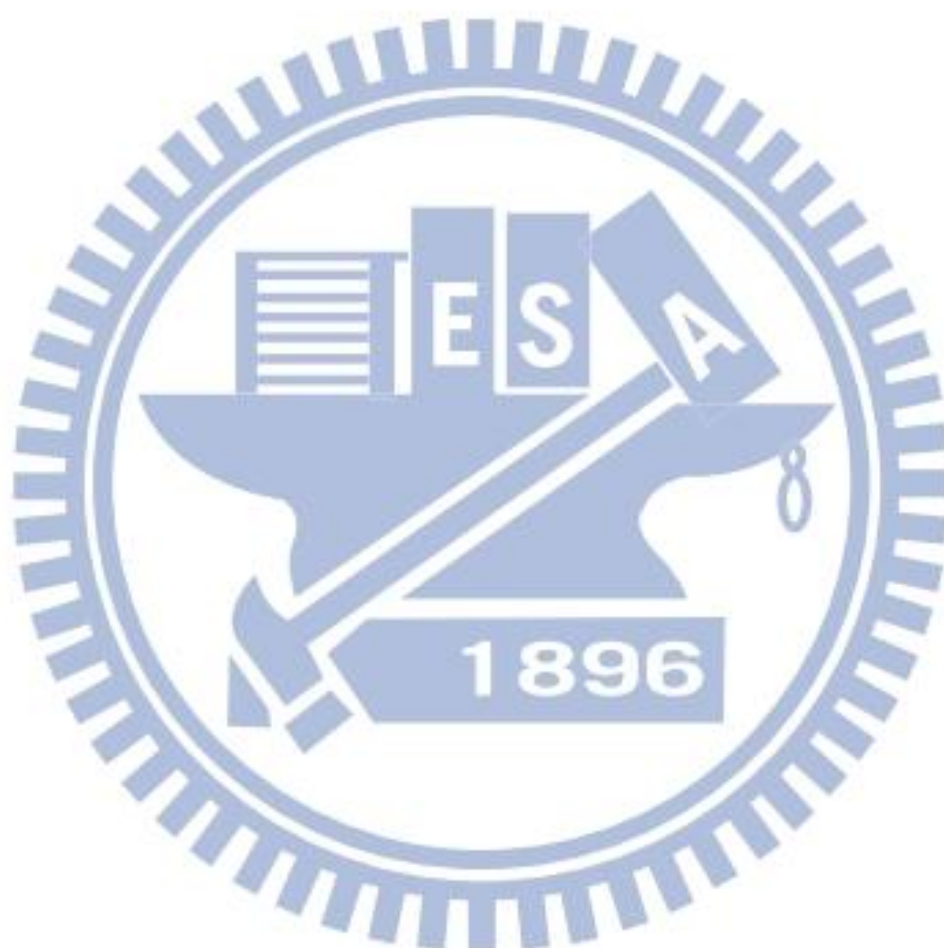
新竹交大

2014.06

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
一、緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究範圍	1
1.3 研究方法與流程	1
二、文獻回顧	3
2.1 都市幹道號誌最佳化模式	4
2.2 高速公路匝道儀控最佳化模式	10
2.3 整合式號誌最佳化模式	10
2.4 小結	12
三、號誌最佳化模式之建立	14
3.1 路網分解	15
3.1.1 市區道路路網分解	15
3.1.2 高速公路分解	17
3.2 單一車種市區幹道車流模式	20
3.3 混合車種市區幹道車流模式	28
3.4 高速公路車流模式	37
3.5 號誌相關限制與流量守恒	41
3.6 模式目標式	42
3.6.1 最小化總延滯	42
3.6.2 最大化通過量	43
3.7 模式求解	44
四、案例分析	45
4.1 市區幹道(單一車種與混合車種)	45
4.1.1 與 TRANSYT 7F 的比較結果	50
4.1.1 是否採用 PCE 的比較結果	53
4.1.2 與 TRANSYT 14 的比較結果	57
4.2 單一車種的複合式路網(市區幹道與高速公路)	61
4.2.1 最小化延滯	65
4.2.2 最大化總通過量	71

4.2.3	最小化延滯與最大化總通過量之比較.....	76
4.3	實際路網(竹北交流道).....	79
4.4	小結.....	84
五、	結論與建議.....	85
參考文獻	86



表目錄

表 1 市區幹道案例參數	45
表 2 案例情境	47
表 3 平均延滯差異百分比	50
表 4 每小時的總通過量	52
表 5 平均延滯差異百分比	54
表 6 每小時的總通過量	56
表 7 平均延滯差異百分比	57
表 8 平均延滯差異百分比	59
表 9 複合式路網參數	61
表 10 測試情境	63
表 11 整合式模式與非整合式模式之平均每車延滯之差異	67
表 12 整合式模式與非整合式模式之平均每車延滯之差異	72
表 13 竹北交流道路網參數	79
表 14 實際路段需求	79
表 15 本模式與 TRANSYT 14 之平均每車延滯之差異	82

圖目錄

圖 1	研究流程圖	2
圖 2	文獻回顧架構圖	3
圖 3	綠燈帶寬(outbound).....	4
圖 4	綠燈帶寬(inbound).....	5
圖 5	CTM 流量密度關係圖	8
圖 6	交通流量圖	9
圖 7	路網分解圖	11
圖 8	MPC 流程圖	12
圖 9	直行車道被左轉車輛堵塞	12
圖 10	車道間之等候長度差異懸殊	13
圖 11	模式流程圖	14
圖 12	路段分解示意圖	16
圖 13	區段分解示意圖	16
圖 14	高速公路路段分解	17
圖 15	匝道上游區域(U)分解圖	18
圖 16	匝道(R)與匝道下游(O)區域分解圖	19
圖 17	單一車種都市幹道車流模式流程圖	20
圖 18	混合車種都市幹道車流模式流程圖	28
圖 19	高速公路車流模式流程圖	37
圖 20	下匝道車輛可接受最小之車距圖	38
圖 21	直行車輛可接受最小之車距圖	38
圖 22	模式求解流程圖	44
圖 23	路網與時制	46
圖 24	路段編號與車道編號	49
圖 25	各路段平均延滯	51
圖 26	各路段平均延滯	55
圖 27	各路段平均延滯	58
圖 28	各路段平均延滯	60
圖 29	路網與號誌時相	62
圖 30	路段與車道編號	64
圖 31	平均每車延滯比較圖	66
圖 32	平均每車延滯	68
圖 33	下匝道路段之每小時通過量	68
圖 34	高速公路主線之每小時通過量	69
圖 35	高速公路之每小時通過量	69

圖 36 市區幹道之每小時通過量	70
圖 37 整體路網之每小時通過量	70
圖 38 平均每車延滯比較圖	72
圖 39 平均每車延滯	73
圖 40 下匝道路段之每小時通過量	73
圖 41 高速公路主線之每小時通過量	74
圖 42 高速公路之每小時通過量	74
圖 43 市區幹道之每小時通過量	75
圖 44 整體路網之每小時通過量	75
圖 45 平均每車延滯	76
圖 46 下匝道之每小時總通過量	76
圖 47 高速公路主線之每小時總通過量	77
圖 48 市區幹道之每小時總通過量	77
圖 49 整體路網之每小時總通過量	78
圖 50 竹北交流道路網與路口號誌時相	80
圖 51 竹北交流道路段編號	81
圖 52 竹北交流道之平均每車延滯比較圖	82
圖 53 竹北交流道路網邊界路段之每小時通過量比較圖	83

一、緒論

1.1 研究動機與目的

交通擁塞一直是大多數都市面臨的課題。交通擁塞不只會造成能源的消耗，也會為環境帶來汙染。造成交通擁塞的原因很多，可能的原因包括需求大於供給、道路幾何設計問題、號誌設計不良等。

高速公路與一般地方道路通常分屬不同的主管機關，在號誌設計方面常常出現歧見，高速公路主管單位希望可以盡量紓解高速公路上的車流，而地方主管機關則希望可以優先疏解地區道路的車流。因此整合考量高速公路與地方道路的車流狀況，訂定出一個讓整體路網效率最佳化的號誌時相是一件重要的工作。

本研究目的為在整體考量高速公路以及地方道路的車流狀況下，建立一個號誌最佳化模式，以期讓整體路網的效率達到最佳化。

1.2 研究範圍

本研究的研究範圍包括高速公路下匝道的前後路段以及三個地方道路的號誌化路口。

1.3 研究方法與流程

本研究的研究流程圖如圖 1 所示。首先先探討號誌最佳化的相關文獻，接著構建號誌最佳化的模式，包括市區單一車種、市區多車種、整合高速公路與幹道等的最佳化模式。模式構建完成後，便進行案例分析，最後做出結論。

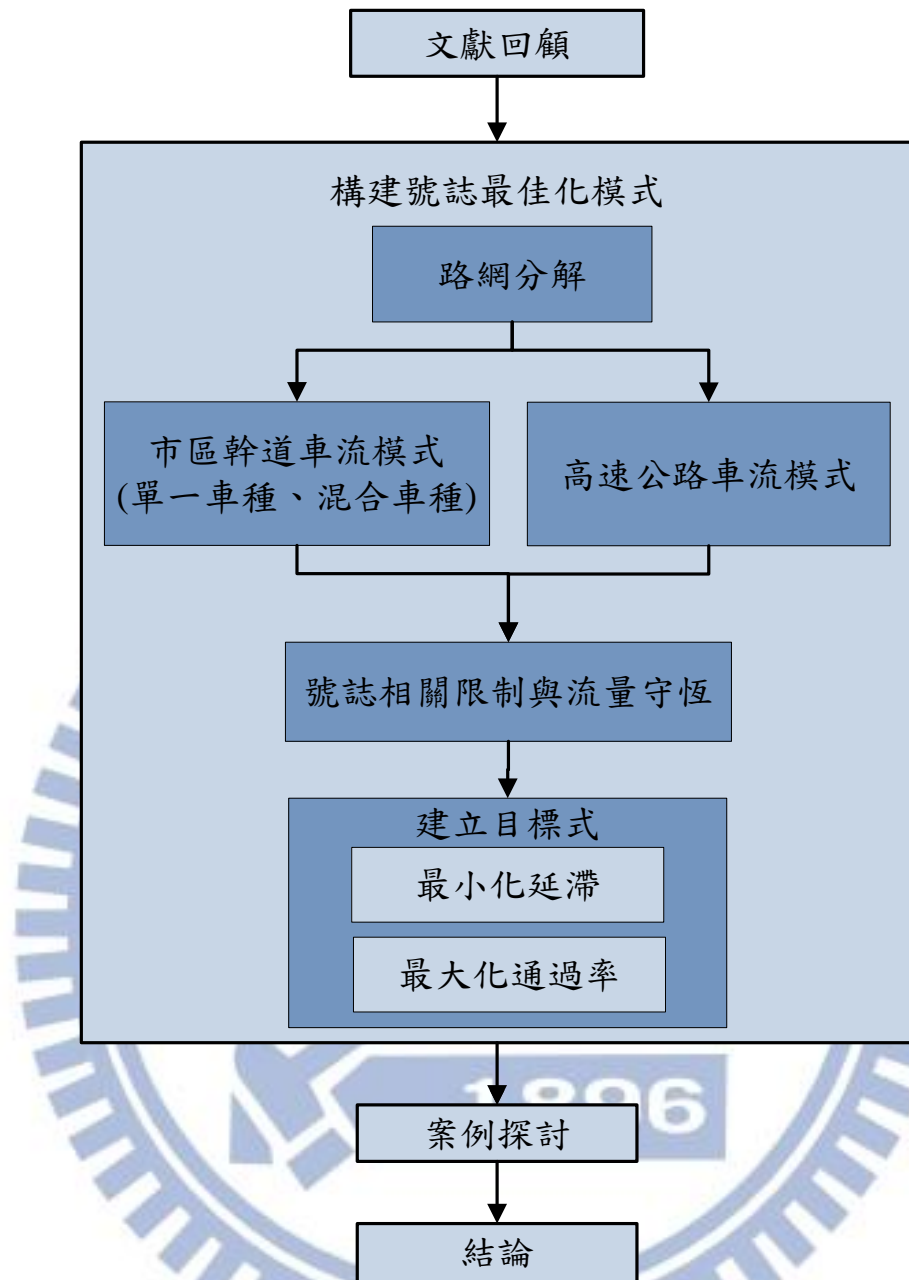


圖 1 研究流程圖

二、 文獻回顧

號誌最佳化模式依照路網範圍可以區分為以下三類：

1. 都市幹道號誌最佳化模式
2. 高速公路匝道儀控最佳化模式
3. 整合式號誌最佳化模式

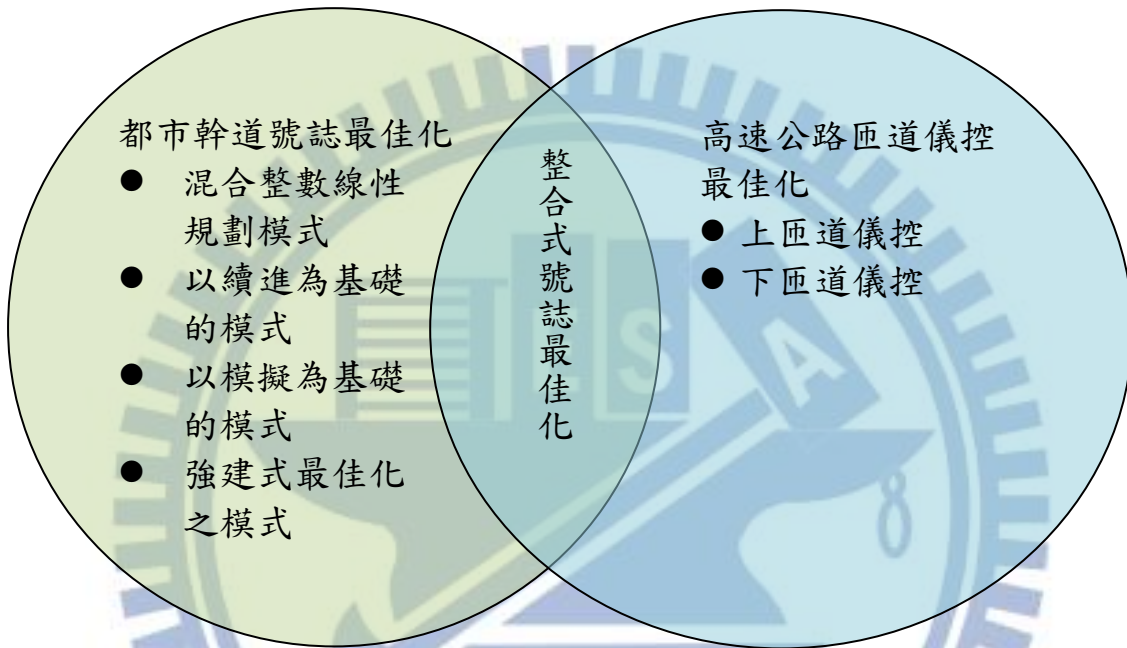


圖 2 文獻回顧架構圖

2.1 都市幹道號誌最佳化模式

Gartner[1]建立一個混合整數規畫模式來最佳化號誌的時差(offset)。Gartner 利用遺失率(loss rate)來評定路段的績效，遺失率包括車輛延滯時間、車輛停止次數、車輛加減速等。此模式的目標函數為最小化遺失率。最後 Gartner 利用 IBM 的軟體來求解此問題。Gartner[2]延續上述研究，除了將號誌時差(offset)當作決策變數外，也將時比(split)與號誌週期(cycle time)納入決策變數中。並將到達率假設為 Poisson 分配。最後他利用分支定界法求解。

有些文獻用模式來描述車輛的續進(progression)，並利用目標式來最大化續進或是最小化延滯。Gartner[3]建立了三個模式來最大化綠燈帶寬(bandwidth)。此模式利用圖 3、圖 4 中各項變數的關係建立模式。模式 1 是最基本的模式，此模式係針對單行道的號誌問題，在此模式中，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 將模式擴展為多重綠燈帶寬(multi-band)(模式 3)。

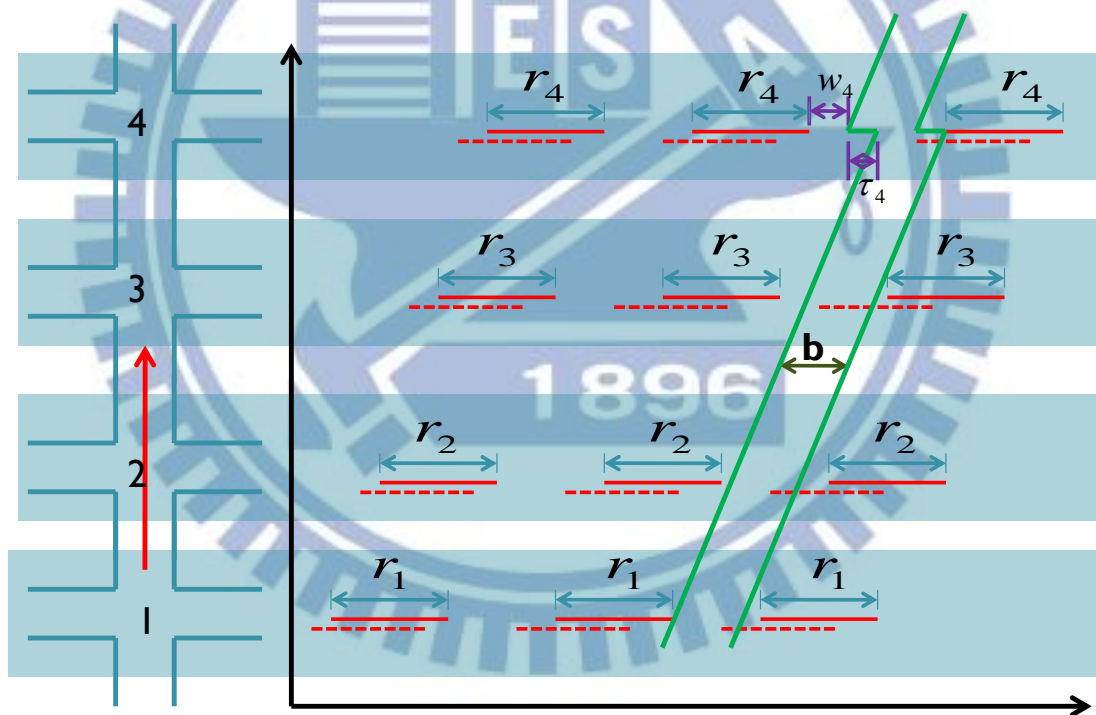


圖 3 綠燈帶寬(outbound)

資料來源：Gartner[3]

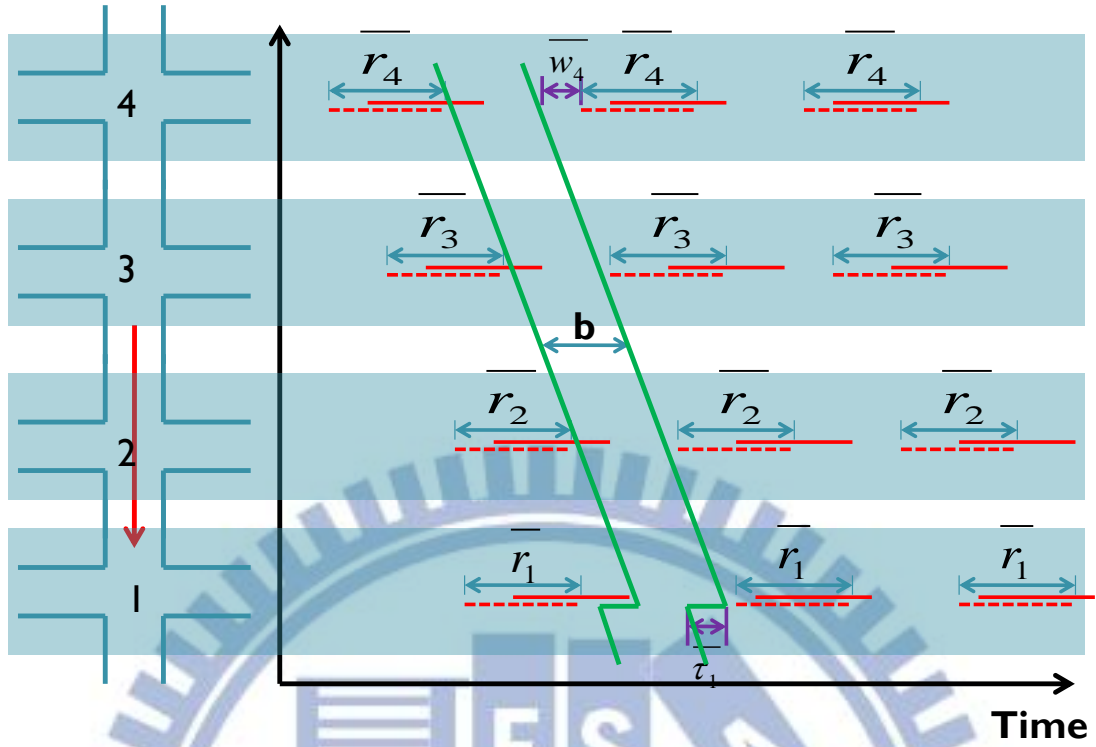


圖 4 綠燈帶寬(inbound)
資料來源：Gartner[3]

Find b, w_i, \bar{w}_i, m_i to

Max $b = \bar{b}$
subject to

$$w_i + b \leq 1 - r_i$$

$$\bar{w}_i + b \leq 1 - \bar{r}_i$$

$$t_i + \bar{t}_i + (\bar{w}_i + w_i) - (\bar{w}_{i+1} + w_{i+1}) + \Delta_i - \Delta_{i+1}$$

$$= -0.5 * (\bar{r}_i + r_i) + 0.5 * (\bar{r}_{i+1} + r_{i+1}) + (\tau_{i+1} + \tau_i) + m_i$$

$$m_i = \text{integer}$$

$$b, \bar{b}, w_i, \bar{w}_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n$$

(模式 1)

Find $b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, \delta_i, \bar{\delta}_i, m_i$ to

$$\text{Max } (b + k\bar{b})$$

subject to

$$(1-k)\bar{b} \geq (1-k)kb$$

$$1/C_2 \leq z \leq 1/C_1$$

$$w_i + b \leq 1 - r_i$$

$$\bar{w}_i + b \leq 1 - \bar{r}_i$$

$$\begin{aligned}
& (\bar{w}_i + w_i) - (\bar{w}_{i+1} + w_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) \\
& + \delta_i L_i - \bar{\delta}_i \bar{L}_i - \delta_{i+1} L_{i+1} + \bar{\delta}_{i+1} \bar{L}_{i+1} - m_i \\
& = (r_{i+1} - r_i) + (\tau_i + \bar{\tau}_i) \\
& (d_i / f_i) z \leq t_i \leq (d_i / e_i) z \\
& (d_i / h_i) z \leq (d_i / d_{i+1}) t_{i+1} - t_i \leq (d_i / g_i) z \\
& (\bar{d}_i / \bar{f}_i) z \leq \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i / \bar{e}_i) z \\
& (\bar{d}_i / \bar{h}_i) z \leq (\bar{d}_i / \bar{d}_{i+1}) \bar{t}_{i+1} - \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i / \bar{g}_i) z \\
& b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i \geq 0 \\
& \delta_i, \bar{\delta}_i : 1-0 \text{ variable} \\
& m_i \text{ integer}
\end{aligned} \tag{模式 2}$$

Find $b_i, \bar{b}_i, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, \delta_i, \bar{\delta}_i, m_i$ to

$$\max B = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i b_i + \bar{a}_i \bar{b}_i)$$

Subject to

$$\begin{aligned}
& (1-k_i) \bar{b}_i \geq (1-k_i) k_i b_i \\
& 1/C_2 \leq z \leq 1/C_1 \\
& 0.5b_i \leq w_i \leq (1-r_i) - 0.5b_i \\
& 0.5b_i \leq w_{i+1} \leq (1-r_{i+1}) - 0.5b_i \\
& 0.5\bar{b}_i \leq \bar{w}_i \leq (1-\bar{r}_i) - 0.5\bar{b}_i \\
& 0.5\bar{b}_i \leq \bar{w}_{i+1} \leq (1-\bar{r}_{i+1}) - 0.5\bar{b}_i \\
& (\bar{w}_i + w_i) - (\bar{w}_{i+1} + w_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) \\
& + \delta_i L_i - \bar{\delta}_i \bar{L}_i - \delta_{i+1} L_{i+1} + \bar{\delta}_{i+1} \bar{L}_{i+1} - m_i \\
& = (r_{i+1} - r_i) + (\tau_i + \bar{\tau}_i) \\
& (d_i / f_i) z \leq t_i \leq (d_i / e_i) z \\
& (d_i / h_i) z \leq (d_i / d_{i+1}) t_{i+1} - t_i \leq (d_i / g_i) z \\
& (\bar{d}_i / \bar{f}_i) z \leq \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i / \bar{e}_i) z \\
& (\bar{d}_i / \bar{h}_i) z \leq (\bar{d}_i / \bar{d}_{i+1}) \bar{t}_{i+1} - \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i / \bar{g}_i) z \\
& b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i \geq 0 \\
& \delta_i, \bar{\delta}_i : 1-0 \text{ variable} \\
& m_i \text{ integer}
\end{aligned} \tag{模式 3}$$

Abu-Lebdeh[4]也利用續進為基礎來建立模式，他針對過飽和路段建立一個最佳化模式，以最大化通過量為目標式，利用基因法求解時比以及時差。而 Abu-Lebdeh[5]也把等候長度的限制加入模式中，以防止等候線長度超過路段長度，進而回堵到上游路口。Abu-Lebdeh 一樣使用基因法求解此問題。

為了能更加詳細的描述車流特性，有些文獻利用模擬的概念來建立模式。這些模式包括 store-and-forward 模式 (Denos C. Gazis[6]; D'Ans and Gazis[7]; Papageorgiou[8])、Cell Transmission Model (Daganzo [9]; Lo[10])、以及 TRANSYT。其中 Cell Transmission 模式已經被第 13 版的 TRANSYT 用來求解過飽和路段的號誌最佳化問題(Binning et al.[11])。分述如下：

1. Store-and-forward 模式

此模式由 Denos C. Gazis 於 1964 年提出，此模式的概念來自於電信技術，在電信傳導中，訊息會先被傳到中繼站，整理之後再傳到目的地。由於過飽和路口的等候隊列需要多個週期才能消化完畢，這跟 store-and-forward 的概念很像，因此 Gazis 用 store-and-forward 的概念來描述車隊在路口等候的狀態，並用最小化總延滯當成目標式，目的在於希望可以最小化車輛在車隊中的等候時間。

2. Cell Transmission Model (CTM)

Lighthill and Whitham (1955) and Newell (1991) 提出了 LWR 模式，而 Daganzo 將其中的速度與流量關係式簡化為線性關係(圖 5)，並提出 Cell Transmission Model。

Daganzo[12]將路段分成若干個等長的小段(Cell)，每個 Cell 的長度為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 cell 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

Lo [10]採用 Cell transmission model (CTM)的概念，將號誌最佳化模式建立為一個混合整數規劃問題，此模式的號誌僅包含兩時相，且只有直行車輛。

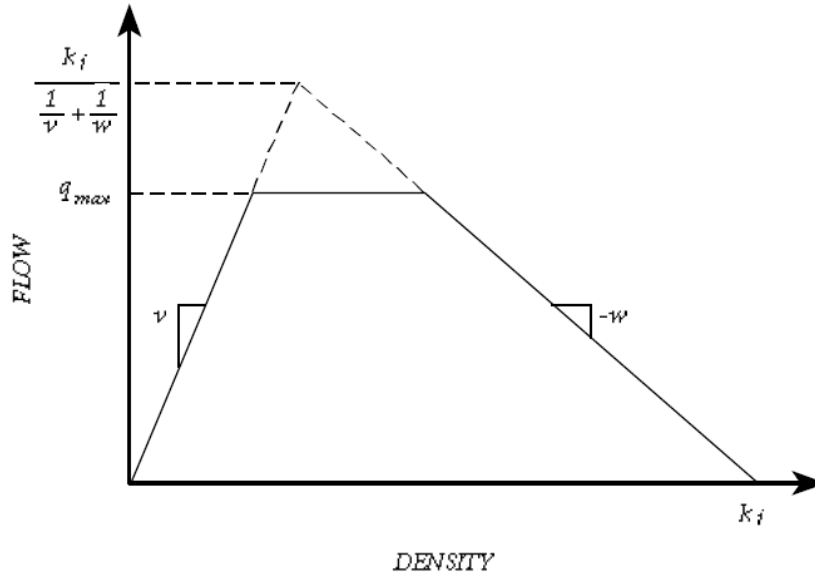


圖 5 CTM 流量密度關係圖

資料來源：Daganzo[12]

3. TRANSYT

TRANSYT 是由 Transportation Research Laboratory (TRL) 在 1967 年所發展的一套號誌最佳化軟體，目前的版本已經到第 14 版。TRANSYT 14 中對於號誌化路口有兩個主要模式，一個是 Platoon Dispersion Method(PDM)，另一個是採用 CTM。CTM 如上述，因此以下就 PDM 作一介紹。

PDM 是一個巨觀的車流模擬方法，PDM 主要分成三部分：

1. The Arrival Flow Pattern (IN-Pattern)
2. The Saturation Flow Pattern (GO-Pattern)
3. The Departure Flow Pattern (OUT-Pattern)

分述如下：

1. IN-Pattern

IN-Pattern 是由所有上游路段的 OUT-Pattern 加總而得。

2. GO-Pattern

GO-Pattern 是每個時段中，潛在可以離開路段的流量。若是下游有回堵，或是有車道堵塞，則會反映在 GO-Pattern 中。

3. Out-Pattern

Out-Pattern 是每個時段中，真正離開路段的流量。如果有等候車隊的時候，Out-Pattern 通常都會等於 GO-Pattern，當等候列隊消散的時候，則 Out-Pattern 會等於 IN-Pattern。

TRANSYT 14 的目標式如(2)式所示。

$$PI = \sum_{i=1}^N W * w_i d_i + \left(\left(\frac{k}{100} \right) * k_i s_i \right) \quad (2)$$

其中，

- N 路段的個數
- W 每 PCU 小時的延滯成本
- k 每 100 個 PCU 的停等成本
- w_i 每個路段延滯的權重
- d_i 第 i 路段的延滯
- k_i 每個路段停等次數的權重
- s_i 第 i 路段的總停等次數

最佳化的模式大多是針對某種交通流量的情況來求解，但實際應用上可能會面臨交通流量的擾動，因此 Yafeng Yin[13]建立了一個強健式的號誌最佳化模式。此研究首先將交通流量分成數個情況，接著依照 Highway Capacity Manual (HCM) 中的延滯公式計算每種流量情況下，每台車輛之延滯，如(3)式。

$$d(q^k, C, g) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{C(1-\lambda_i)^2 q_i^k}{2(1-\lambda_i \min(1, x_i^k))} + 900Tq_i^k \left(x_i^k - 1 + \sqrt{(x_i^k - 1)^2 + \frac{4x_i^k}{c_i T}} \right) \right]}{\sum_{i=1}^N q_i^k} \quad (3)$$

此模式的目標式是在各種可能的流量下，求取最小的平均延滯以及最小化績效的變異，如(4)式。

$$\min Z = (1 - \gamma) \sum_{k \in \Omega} \pi^k d^k + \gamma \sqrt{\sum_{k \in \Omega} \pi^k (d^k - \sum_{k \in \Omega} \pi^k d^k)^2} \quad (4)$$

Chang[14]將路段分成四段：到達(Upstream arrivals)、移動(Propagation to queue)、交會(Merge into lane groups)、離開(Departure) (圖 6)。接著建立各段之間流量的關係，並且在流量低時以最小化延滯做為目標式，流量大時以最大化通過車輛數當成目標式。最後以基因法求解。

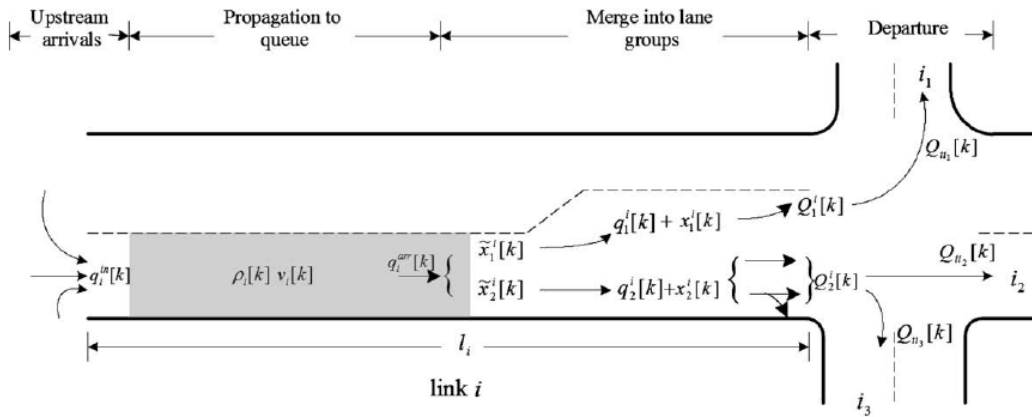


圖 6 交通流量圖
資料來源：Chang[14]

而在混合車流的部分比較少有文獻探討，Mariagrazia[15]將貨車以及摩托車轉換成小客車當量後帶入文獻中的單一車種最佳化模式來求解，以求得在混合車流下的最佳化週期與時比。

2.2 高速公路匝道儀控最佳化模式

高速公路匝道儀控方面的模式可以分成兩類，上匝道與下匝道。探討上匝道的文獻數量眾多，主要的概念是利用匝道儀控來控制高速公路主線道上的車流密度。

Papageorgiou[16]發展出一套匝道儀控的方法--ALINEA。這個方法主要的概念是要讓高速公路主線車流與上匝道車流交會處的密度保持在最佳的狀態。因此只需要在上匝道的下游處裝設偵測器偵測密度即可。

回饋機制的公式如(5)式所示，當下游偵測器偵測到的密度較低時，則增加上匝道的儀控率，若當下游偵測器偵測到的密度較高時，則減少上匝道的儀控率，以減低進入高速公路主線的車流數量。

$$r(k) = r(k-1) + K_R(\hat{O} - O_{out}(K)) \quad (5)$$

有較多文獻在探討上匝道的問題，因為認為上匝道的車輛會導致主線車道車輛數目增加，若是超過容量時，就會影響主線上的行車。但 Michael Cassidy[17]認為下匝道的車輛也會影響主線車流，當下匝道車輛由於下匝道儀控的關係導致回堵至主線道時，就會開始對主線道的車流有所影響。Michael Cassidy 觀察了加州橘縣的州際五號公路，發現下匝道回堵的車隊長度會跟鄰近車道的消散率成反比，亦即當下匝道的車隊回堵越長時，則主線道上鄰近車道的消散率就會越低。而 Munoz[18]也提出當下匝道車輛有回堵到主線時，高速公路的最外側車道與中間車道的流量與速度皆不一樣，因此多車道的高速公路不應該被簡化為單一的車流，應該要針對不同車道來分開探討。

Zichuan Li, Gang-len Chang[19]利用 CTM 的概念建立一個混合整數規劃問題，來求解最佳的下匝道儀控率。

2.3 整合式號誌最佳化模式

除了個別針對幹道或是高速公路上/下匝道的號誌最佳化模式之外，也有一些文獻探討整體路網的號誌最佳化。

Papageorgiou[8]以 Store and forward 概念，建立了一個線性規劃的模式來最佳化道路管理的策略，模式中的策略包含了幹道號誌、匝道儀控、可變號誌標誌系統、以及道路指引，此模式的目標式為最小化旅行時間，模式的假設如下：

1. 每個路口的號誌周期為已知且相等。
2. 每個路口的綠燈損失時間為已知。
3. 飽和流量為已知。
4. 轉向比為已知。

Jifeng Wu, Gang-Len Chang[20]將路網分成高速公路以及市區幹道兩部分，而每一部分在分成若干段，如圖 7 接著便建立相鄰各段間的流量關係式，最後以最小化總旅行時間為目標式，並以 Successive Linear Programming (SLP)解法求解此問題。

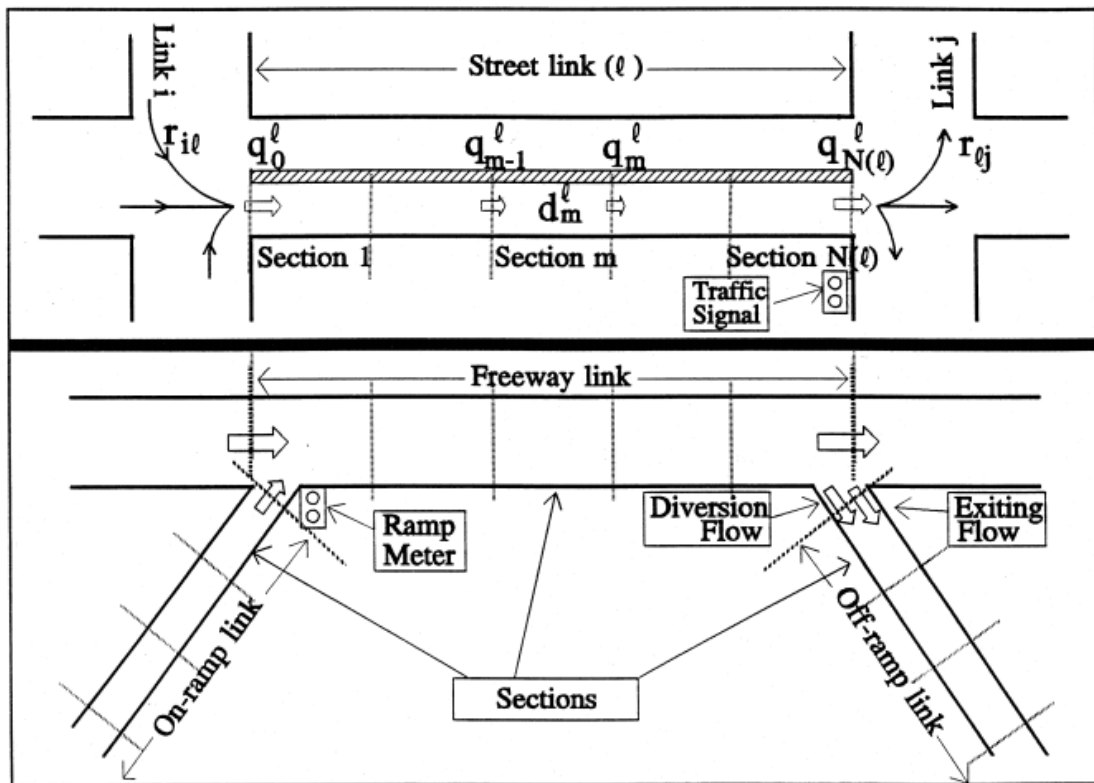


圖 7 路網分解圖

資料來源：Jifeng Wu, Gang-Len Chang[20]

H. M. Zhang and W. W. Recker[21]以 Lighthill-Witham-Richard (LWR) 為基礎建立一個整合式的號誌最佳化模式，此模式以最小化旅行時間以及等候車隊長度為目標式。Monique van den Berg[22]整合了 METANET 車流模式以及 Kashani 模式，此兩模式分別用來描述高速公路以及市區幹道的車流。Monique van den Berg[23]繼續延續相同的方式，並加入了 Model predictive control (MPC) 來最佳化號誌。MPC 原本是應用在製程產業上，MPC 的目標是最小化給定時間內的總成本。MPC 的流程圖如圖 8 所示，當系統偵測到現在路網的車流情形之後會回傳給控制模組，控制模組中包含預測以及最佳化模組，預測模組用來預測預測未來特定時段內的車流情形，而最佳化模組則是針對車流情形來最佳化號誌時比。

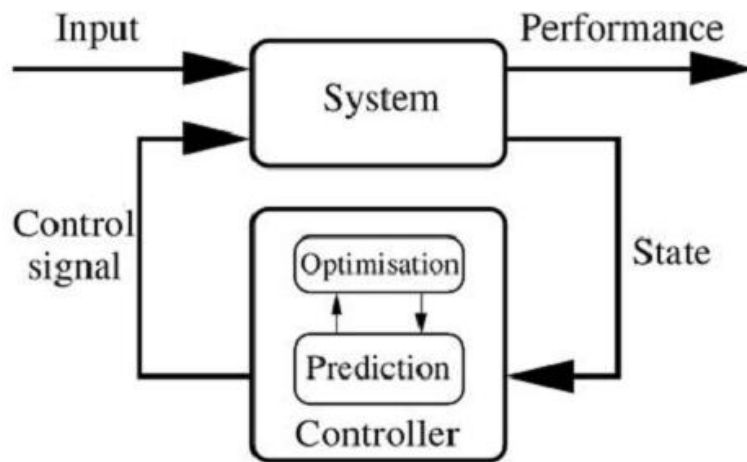


圖 8 MPC 流程圖

資料來源：Monique van den Berg[23]

Ta-Yin Hu 與 Tung-Yu Wu[24]以 store-and-forward 為基礎概念，建立了一個線性模式，此模式的目標式是最小化等候車隊長度，並以 CPLEX 求解。

2.4 小結

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 Chang[14]與 TRANSYT 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 Chang 的模式為基礎，並再納入下列影響過飽和車流運行之因素，並考量混合車種之影響，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(如圖 9)
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(如圖 10)

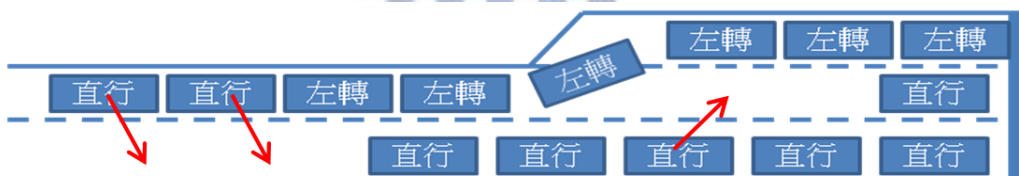


圖 9 直行車道被左轉車輛堵塞
(箭頭表示欲變換車道之方向)

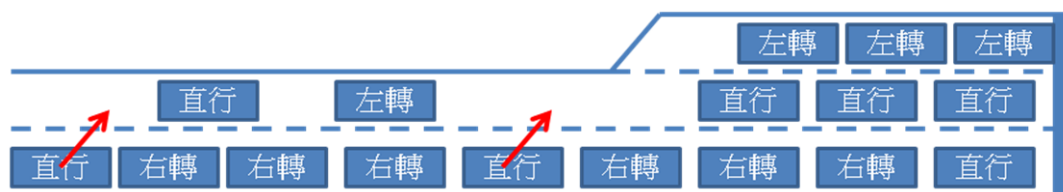


圖 10 車道間之等候長度差異懸殊
(箭頭表示欲變換車道之方向)

另外，當下匝道車流回堵至高速公路主線時，會影響主線之車流。Munoz[18]提出當下匝道車輛回堵到主線時，高速公路的最外側車道與中間車道的流量與速度皆不一樣。而目前大多數的模式都是將高速公路所有車道分成同一段，而在此分段中的速度與流量皆一致。有鑑於此，本研究提出之模式可較為準確的描述高速公路下匝道路段回堵至主線時的車流情形。且文獻中對於混合車流的探討極少，大多是將其他車種轉換成 PCU 來帶入模式中進行號誌之最佳化，本模式提出另一種非 PCE 方式的模式來進行混合車流的號誌最佳化。

三、 號誌最佳化模式之建立

號誌最佳化模式流程圖如圖 11。步驟討論如下：

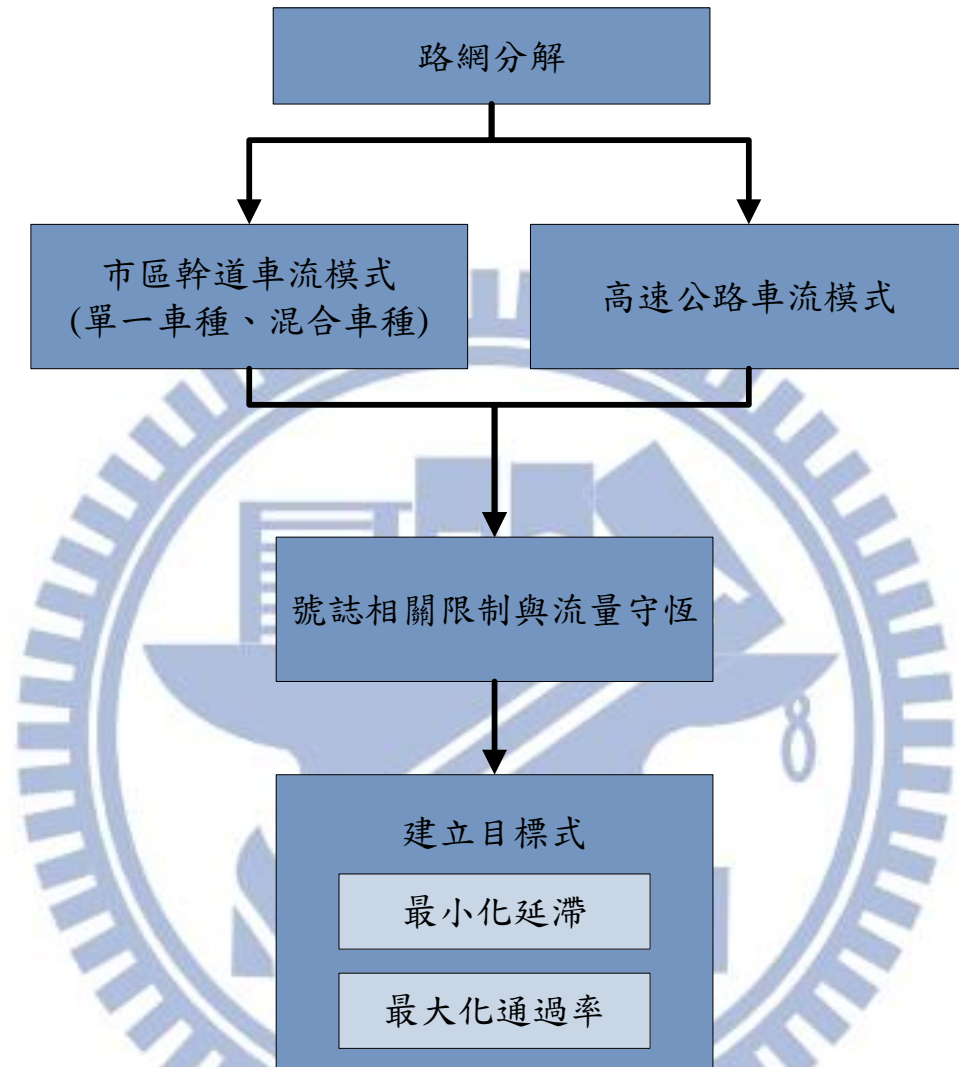


圖 11 模式流程圖

3.1 路網分解

路網中可能包含一般都市幹道以及高速公路，本研究首先把路網分成都市幹道以及高速公路兩部分，接著分別進行分解，市區幹道的部分如節 3.1.1 所示，高速公路的部分如節 3.1.2 所示。

3.1.1 市區道路路網分解

先將市區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)：

1. 傳遞(P)
2. 分散(D)

接著本研究再進一步將上述區段中的每一車道，依等候車隊長度，再分為若干小段(sub-segment)，如圖 12。

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. 選擇等候隊列長度較短的車道(c)
5. 選擇最快的車道(f)

各小段的長度說明如下：

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 13 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)

此小段的長度為車輛的煞停距離。

4. 選擇等候隊列長度較短的車道(c)

在此小段的駕駛人希望可以加入等候隊列較短的車道。

5. 選擇最快的車道(f)

此小段的駕駛人會選擇速度較快的車道行駛，此小段的長度為路段長度減去第 1~4 項的長度。

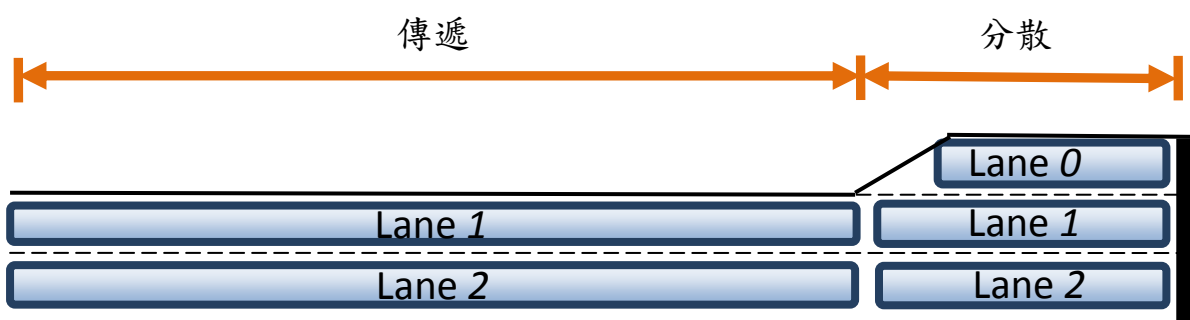


圖 12 路段分解示意圖

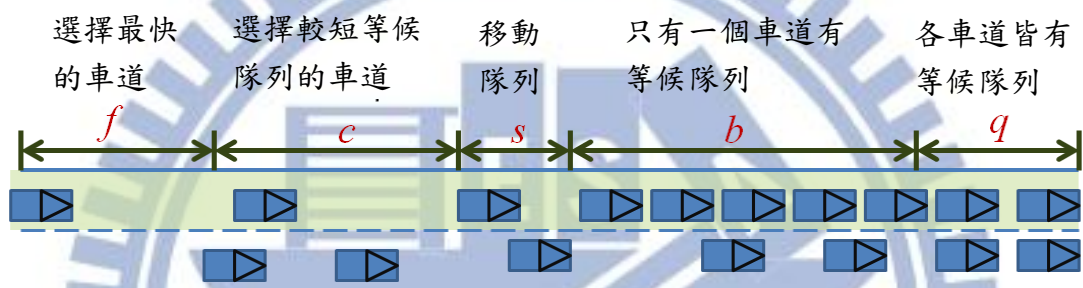


圖 13 區段分解示意圖

3.1.2 高速公路分解

為了要描述高速公路的車流特性，本研究將高速公路分成以下數個區域(zone)(圖 14)：

1. 到達(A)
2. 匝道上游(U)
3. 匝道(R)
4. 匝道下游(O)
5. 離開(D)
6. 下匝道(M)

其中匝道上游區域(U)，依照最外側車道的等候列隊長度，可以再分成若干個區段，如圖 15：

1. 等候車隊(Q)
2. 移動列隊(s)
3. 變換車道熱區 1 (h)
4. 變換車道熱區 2 (z)
5. 一般變換車道區(g)

每一區段可再依照車道區分，而每一車道又可以再分成若干小段，如圖 15：

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. 選擇等候隊列長度較短的車道(c)
5. 選擇最快的車道(f)

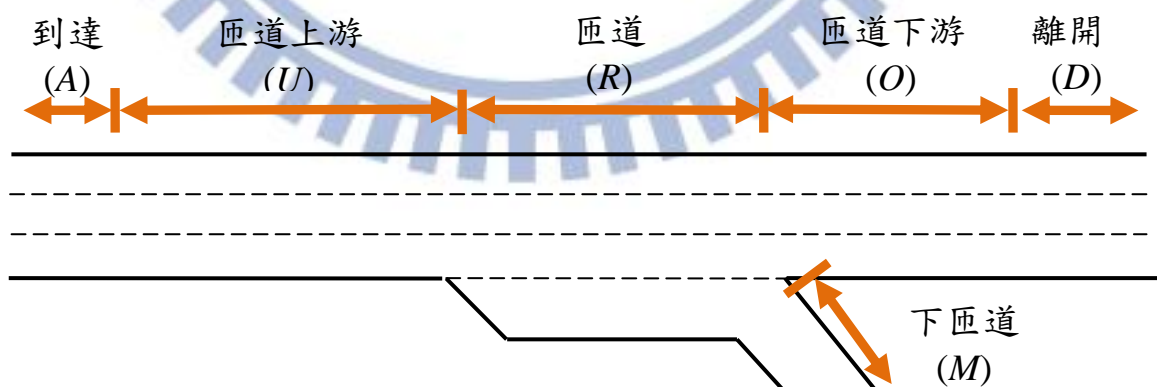


圖 14 高速公路路段分解

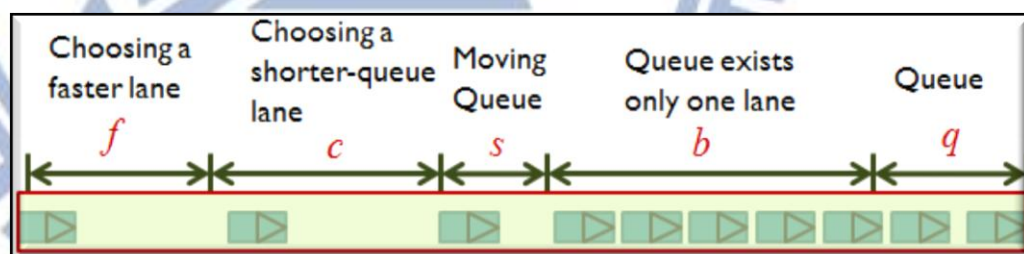
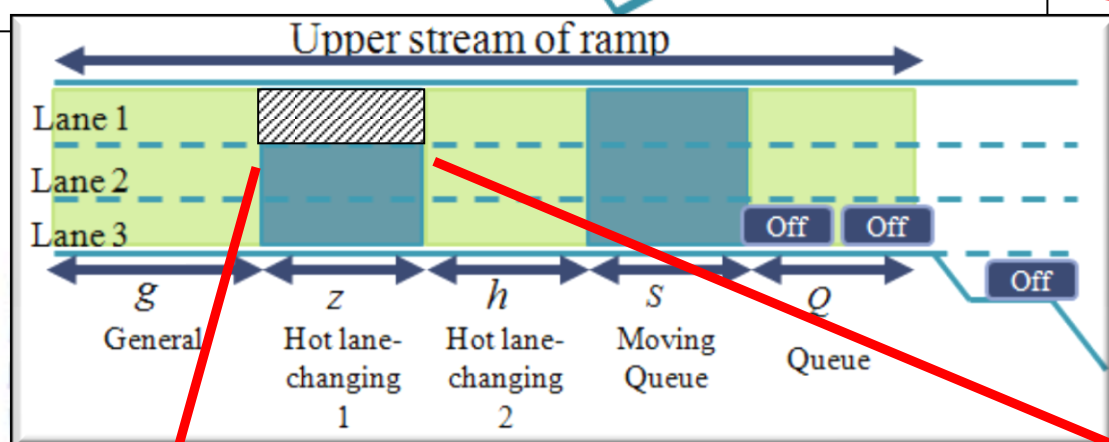
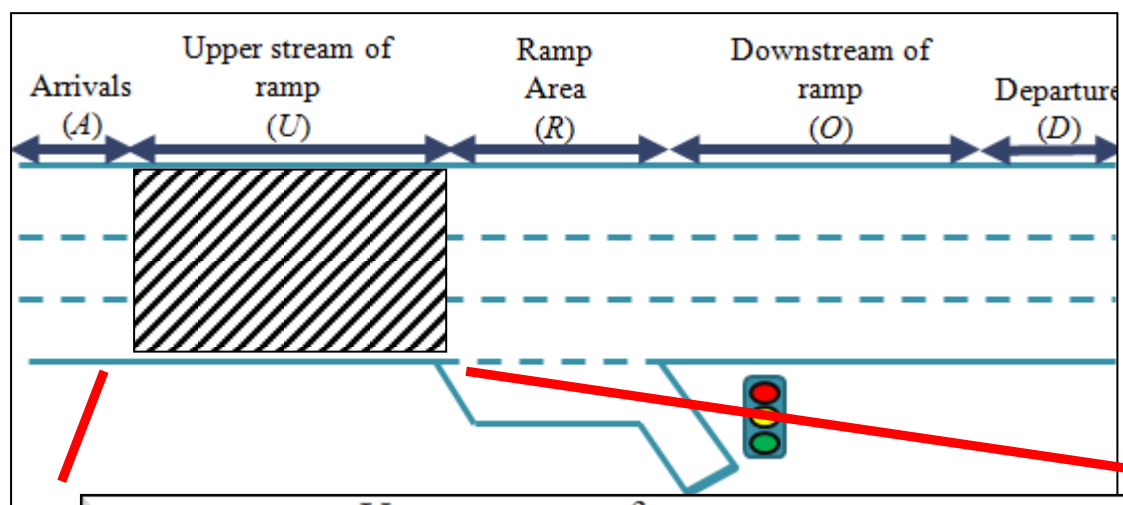


圖 15 匝道上游區域(U)分解圖

匝道(R)與匝道下游(O)區域先依照車道區分，每一車道可以再分成若干小段，
如圖 16：

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. 選擇等候隊列長度較短的車道(c)
5. 選擇最快的車道(f)

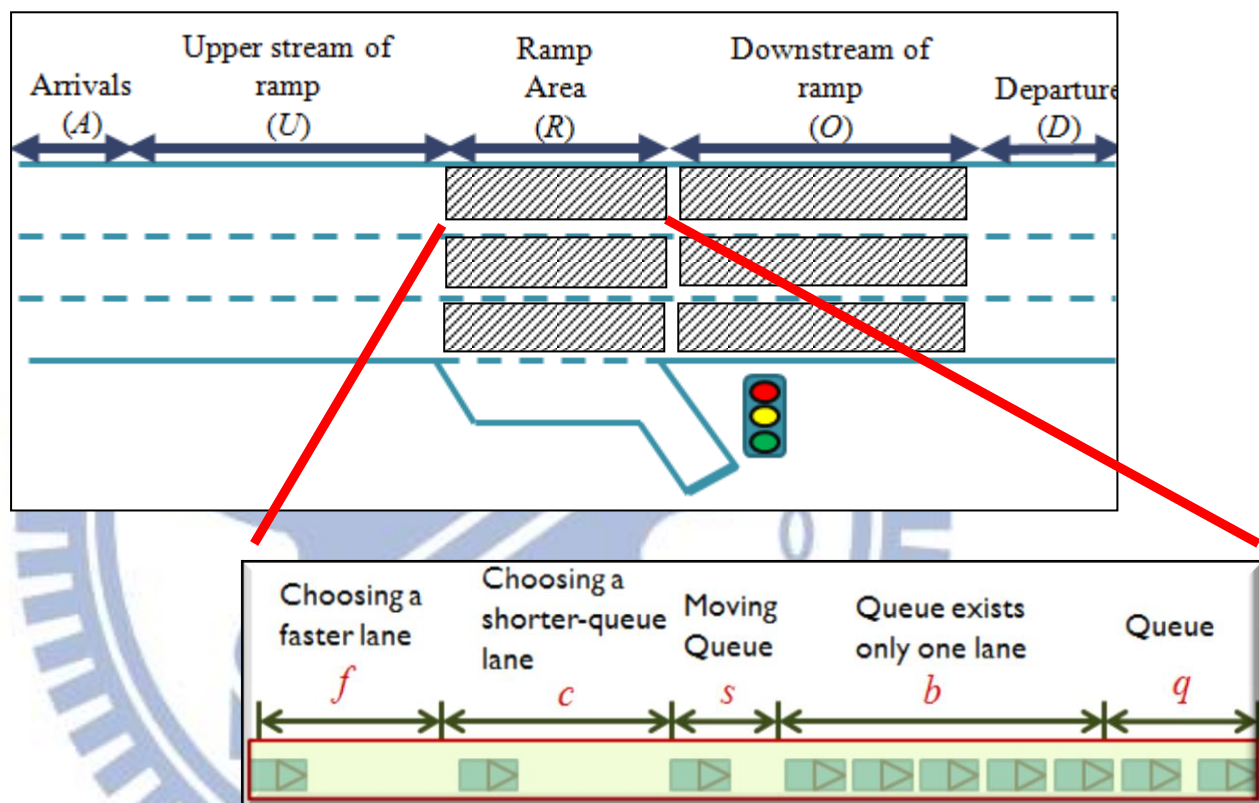


圖 16 匝道(R)與匝道下游(O)區域分解圖

本模式之已知條件如下：

1. 轉向比
2. 流量密度關係式
3. 下匝道的比例
4. 最大之最小可接受變換車道車距為 4 秒
5. 最小之最小可接受變換車道車距為 2 秒

本模式之假設如下：

1. 大車占用空間是小車的兩倍
2. 每個時段的車輛需求是一致的
3. 右轉/下匝道的車輛會使用最右側車道
4. 左轉車輛會使用最左側車道
5. 右轉/下匝道車輛有優先使用右側相鄰車道的權力
6. 左轉/下匝道車輛有優先使用左側相鄰車道的權力

3.2 單一車種市區幹道車流模式

單一車種市區幹道車流模式流程圖如圖 15 所示，每個步驟分述如下：

步驟一 計算傳遞區段(P)中每個車道的車流進入量

- 1-1: 計算每個車道的需求
- 1-2: 計算車道的剩餘容量
- 1-3: 計算實際可以進入的車流量

步驟二 建立每個車道的變換車道行為模式

- 2-1: 計算在 b 小段的變換車道車輛數
- 2-2: 計算在 c 小段的變換車道車輛數
- 2-3: 計算在 f 小段的變換車道車輛數

步驟三 計算從傳遞區段(P)到分散區段(D)的車輛數目

- 3-1: 計算傳遞區段中，潛在可以進入分散區段的車輛數目
- 3-2: 計算傳遞區段的最大輸出車流量
- 3-3: 計算分散區段中的剩餘容量
- 3-4: 計算實際從傳遞區段到分散區段的車輛數目

步驟四 計算從路段離開的車輛數目

- 4-1: 計算在分散區段中，潛在可以離開路段的車輛數目
- 4-2: 計算每個車道的最大輸出車流量
- 4-3: 計算接受車道的剩餘容量
- 4-4: 計算實際從路段離開的車輛數目

圖 17 單一車種都市幹道車流模式流程圖

步驟一 計算傳遞區段(P)中每個車道的車流進入量
抵達路段的每個車道的車流進入量會等於(6)式：

$$\text{傳遞區段之每個車道的車輛進入數目} = \min\{\text{每個車道之需求}, \text{車道之剩餘容量}\} \quad (6)$$

下列分別計算每個車道之需求以及剩餘容量。

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(7)式求得

$$D^k = \left(\frac{D}{3600} * \Delta t\right) \quad (7)$$

其中，

D^k 時段 k 的需求
 D 總需求(輛/小時/車道)
 Δt 時間區間

步驟1-2 計算每個車道的剩餘容量

"傳遞"區段中每個車道的剩餘容量可以由車道容量減去行進與停等的車輛數目求得，如(8)式。

$$S_i^k = (C_i - n_i^k - x_i^k) \quad (8)$$

其中，

S_i^k k 時段， P 區段之車道 i 的剩餘容量
 C_i P 區段之車道 i 的可容納車輛數
 n_i^k 時段 k ， P 區段之車道 i 的行進車輛數目
 x_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的車輛數目

實際可以進入車道的車輛數目等於步驟1-1與步驟1-2兩者中的最小值，如(9)式。

$$y_i^k = \min \{ D^k, S_i^k \} \quad (9)$$

其中，

y_i^k 第時段 k ，實際進入 P 區段車道 i 的車輛數目

步驟二 建立每個車道的變換車道行為模式

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的變換車道行為不完全相同，而每小段中，不同轉向的車輛，變換車道的行為也不盡相同，本研究以最內側車道說明變換車道的行為模式，各小段的變換車道的車輛數分別計算如下。

步驟2-1 計算在 b 小段的變換車道車輛數

在 b 小段中，位於最內側車道的右轉與直行車輛有可能會變換車道，分述如下：

1. 右轉車輛

位於 b 小段最內側車道且會變換車道的右轉車輛數目如(10)式，

$$\begin{aligned} & \text{在 } b \text{ 小段最內側車道可變換車道的右轉車輛數目} \\ & = \min\{\text{在 } b \text{ 小段最內側車道的右轉車輛數目, 相鄰車道的剩餘容量}\} \end{aligned} \quad (10)$$

分述如下：

(1) 在 b 小段的右轉車輛數目

因為所有右轉車輛皆會變換車道到最右側車道，因此在最內側車道的右轉車輛數如(11)式。

$$X_{1,b}^{R,k} = x_{1,b}^k * R_{1,b}^{R,k} \quad (11)$$

其中，

$$\begin{aligned} X_{1,b}^{R,k} & \text{ 時段 } k, P \text{ 區段之 } b \text{ 小段之車道 1(最內側車道)的右轉車輛數} \\ x_{1,b}^k & \text{ 時段 } k, P \text{ 區段之 } b \text{ 小段之車道 1(最內側車道)的車輛數} \\ R_{1,b}^{R,k} & \text{ 時段 } k, P \text{ 區段之 } b \text{ 小段之車道 1(最內側車道)的右轉車輛比例} \end{aligned}$$

(2) 相鄰車道的剩餘容量

相鄰車道之總剩餘容量如(12)式。

$$(C_{2,b}^k - n_{2,b}^k) \quad (12)$$

其中，

$$\begin{aligned} C_{2,b}^k & \text{ 時段 } k, P \text{ 區段, } b \text{ 小段, 車道 2 可容納車輛數} \\ n_{2,b}^k & \text{ 時段 } k, P \text{ 區段, } b \text{ 小段, 車道 2 之移動車輛數} \end{aligned}$$

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(13)式所示。

$$P_{2,b}^k = P(T^k \geq t) \quad (13)$$

其中，

$$T^k \quad \text{時段 } k \text{ 時, 相鄰車道車輛之車距}$$

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(14)式。

$$S_{2,b}^{R,k} = P_{2,b}^k * (C_{2,b}^k - n_{2,b}^k) \quad (14)$$

綜合(11)式、(14)式，在 b 小段變換車道之右轉車輛數如(15)式。

$$y_{1,2}^{b,R,k} = \min \{X_{1,b}^{R,k}, S_{2,b}^{R,k}\} \quad (15)$$

2. 直行車輛

可以變換車道的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剩餘容量。因此(14)式改寫為(16)式。

$$S_{2,b}^{T,k} = P_{2,b}^k * (C_{2,b}^k - n_{2,b}^k - y_{1,2}^{b,R,k}) \quad (16)$$

步驟2-2 計算在 c 小段的變換車道車輛數

以車道1之直行車輛為例，欲變換車道之直行車輛數目如(17)式所示：

$$(n_{1,c}^k * R_{1,c}^{T,k}) \quad (17)$$

其中，

$n_{1,c}^k$ 時段 k ， P 區段， c 小段之第1車道的行進中車輛數目
 $R_{1,c}^{T,k}$ 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(18)式

$$N_{1,c}^{T,k} = n_{1,c}^k * R_{1,c}^{T,k} * I_{1,2}^{c,k} \quad (18)$$

其中，

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

$N_{1,c}^{T,k}$ 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

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

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

相鄰車道之剩餘可利用容量計算方式與(16)式同。

步驟2-3 計算在*f*小段的變換車道車輛數

*f*小段的直行車輛會選擇較快速的車道，因此只需將(19)式中的 $I_{1,2}^{c,k}$ 改成 $I_{1,2}^{f,k}$ ，其餘的計算方式與*c*小段一致。

$$I_{1,2}^{f,k} = \begin{cases} 1, & \text{當車道 2 的速度快於車道 1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

步驟三 計算從傳遞區段(*P*)到分散區段(*D*)的車輛數目

從傳遞區段到分散區段的車輛數目可以由(20)式計算而得。

$$\begin{aligned} &\text{傳遞區段到分散區段的車輛數目} = \\ &\min\{\text{傳遞區段中，潛在可以進入分散區段的車輛} \\ &\quad \text{數目，傳遞區段的最大輸出車流量，分散區段中} \\ &\quad \text{的剩餘容量}\} \end{aligned} \quad (20)$$

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的車輛數目

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，分散區段的旅行時間計算如(21)式。

$$T_2^k = \frac{L_{2,f}^k}{v_{2,f}^k} + \frac{L_{2,c}^k}{v_{2,c}^k} + \frac{L_{2,b}^k}{v_{2,b}^k} + \frac{L_{2,s}^k}{v_{2,s}^k} \quad (21)$$

其中，

$$\begin{aligned} T_2^k & \quad \text{時段 } k, P \text{ 區段中之車道 2 的旅行時間} \\ L_{2,j}^k & \quad \text{時段 } k, P \text{ 區段中之車道 2 的 } j \text{ 小段的長度}(j=f, c, b, s) \\ v_{2,j}^k & \quad \text{時段 } k, P \text{ 區段中之車道 2 的 } j \text{ 小段的平均速度}(j=f, c, b, s) \end{aligned}$$

旅行時間可以被轉換成時段，如(22)式。

$$n = \left\lfloor \frac{T_2^k}{\Delta t} \right\rfloor \quad (22)$$

在時段(*k-n*)到時段*k*之間，進入*P*區段的車輛數如(23)式。

$$y_2^K = \sum_{t=k-n}^k y_2^t \quad (23)$$

因此於時段(*k-n*)之前進入*P*區段的車輛數為

$$(n_2^k - y_2^K + x_2^k) \quad (24)$$

其中，

$$\begin{aligned} n_2^k & \quad \text{時段 } k, P \text{ 區段中之車道 2 的行進中車輛數} \\ y_2^K & \quad \text{在時段}(k-n)\text{到時段 } k \text{ 之間，進入 } P \text{ 區段第 2 車道的車輛數} \\ x_2^k & \quad \text{時段 } k, P \text{ 區段中之車道 2 的停等車輛數} \end{aligned}$$

步驟3-2 計算傳遞區段的最大輸出車流量

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，如(25)式。

$$(R_2^{T,k} + R_2^{R,k}) * \rho_2^k * v_2^k * \Delta t \quad (25)$$

其中，

$R_2^{T,k}$ 時段 k ， P 區段中之車道 2 的直行車輛比例

$R_2^{R,k}$ 時段 k ， P 區段中之車道 2 的右轉車輛比例

ρ_2^k 時段 k ， P 區段中之車道 2 的密度

v_2^k 時段 k ， P 區段中之車道 2 的平均速度

步驟3-3 計算分散區段中的剩餘容量

分散區段(D)的剩餘容量可以由(26)式求得。

$$S_{D,2}^k = (C_{D,2} - n_{D,2}^k - x_{D,2}^k) \quad (26)$$

其中，

$C_{D,2}$ D 區段中之車道 2 的可容納車輛數

$n_{D,2}^k$ 時段 k ， D 區段中之車道 2 的行進中車輛數

$x_{D,2}^k$ 時段 k ， D 區段中之車道 2 的停等車輛數

如果分散區段的車道為左轉車道，必須要考慮車道堵塞的問題，因為直行車道可能會因為車隊回堵而擋住左轉車道。因此若是分散區段的車道為左轉車道時，(26)式必須乘上一個指標變數($Q_{D,1}^k$)

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

步驟3-4 計算實際從傳遞區段到分散區段的車輛數目

實際從傳遞區段(P)到分散區段(D)的車輛數目為取步驟3-1至3-3的最小值，如(27)式。

$$y_{2,D,2}^{E,k} = \min\{n_2^k - y_2^K + x_2^k, (R_2^{T,k} + R_2^{R,k}) * \rho_2^k * v_2^k * \Delta t, S_{D,2}^k\} \quad (27)$$

步驟四 計算從路段離開的車輛數目

從分散區段離開路段的車輛數目可以由(28)式計算而得。

$$\begin{aligned} & \text{從分散區段離開路段的車輛數目} = \\ & \min\{\text{分散區段中，潛在可以離開路段的車輛數} \\ & \quad \text{分散區段的最大輸出車流量,} \\ & \quad \text{下游車道的剩餘容量}\} \end{aligned} \quad (28)$$

以左轉車道(車道0)為例，各項目計算方式如下：

步驟4-1 計算在分散區段中，潛在可以離開路段的車輛數目

在分散區段(D)中，潛在可以離開路段的車輛數目可由(29)式求得。

$$(n_{D,0}^k - y_{1,D,0}^K + x_{D,0}^k) \quad (29)$$

其中，

$$\begin{aligned} n_{D,0}^k & \text{ 時段 } k, D \text{ 區段中之左轉道的行進中車輛數} \\ y_{1,D,0}^K & \text{ 在時段 } (k-n) \text{ 到時段 } k \text{ 之間，進入 } D \text{ 區段左轉道的車輛數} \\ x_{D,0}^k & \text{ 時段 } k, D \text{ 區段中之左轉道的停等車輛數} \end{aligned}$$

如果下游路段的車道數目超過一個車道，則從此路段離開的車輛可能會進入不同的車道，此時(29)式需要乘上一個車道選擇的變數($U_{A,i}$)來表示左轉車道的車輛是進入下游路段中的哪一個車道。

$$(n_{D,0}^k - y_{1,D,0}^K + x_{D,0}^k) * U_{A,i} \quad (30)$$

步驟4-2 計算每個車道的最大輸出車流量

每個車道的可輸出最大車流量與號誌跟飽和流率有關，左轉車道的最大可輸出車流量如(31)式。

$$D_{D,0} * \Delta t * G_p^{H,k} \quad (31)$$

其中，

$$\begin{aligned} G_p^{H,k} & = \begin{cases} 1, & \text{如果時段 } k \text{ 時，路口 } H \text{ 的 phase } p \text{ 為綠燈} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ D_{D,0} & \text{ } D \text{ 區段中左轉車道的消散率} \\ G_p^{H,k} & \text{ 綠燈指標變數} \end{aligned}$$

若下游路段車道數目超過一個車道，則(31)式需要乘上車道選擇的變數($U_{A,i}$)。

步驟4-3 計算下游車道的剩餘容量

下游車道的剩餘容量可由(32)式求得。

$$(C_{A,i} - n_{A,i}^k - x_{A,i}^k) \quad (32)$$

其中，

$$C_{A,i} \text{ 下游路段 } A \text{ 可容納的車輛數}$$

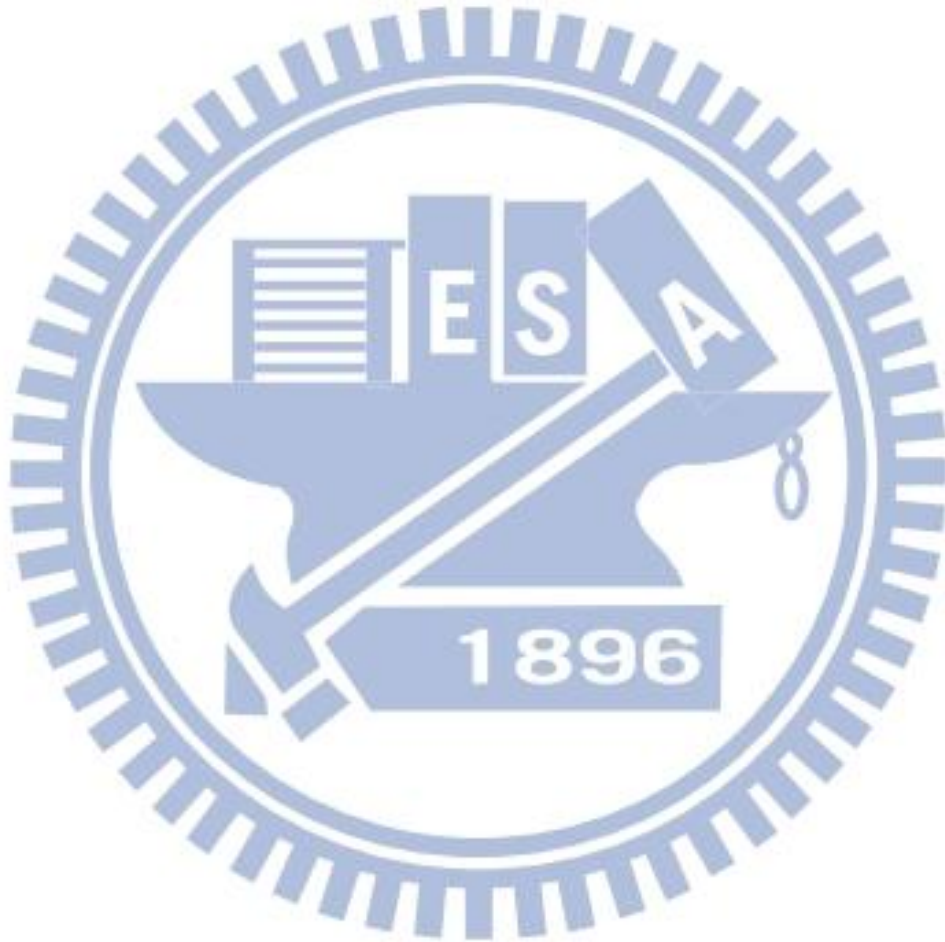
$n_{A,i}^k$ 時段 k ，路段 A 之車道 i 的行進中車輛數

$x_{A,i}^k$ 時段 k ，路段 A 之車道 i 的等候車輛數

步驟4-4 計算實際從路段離開的車輛數目

實際從路段離開的車輛數目為取步驟4-1到4-3的最小值，如(33)式。

$$y_{D,0,A,i}^k = \min \{ (n_{D,0}^k - y_{1,D,0}^K + x_{D,0}^k) * U_{A,i}, \\ D_{D,0} * \Delta t * G_p^{H,k} * U_{A,i}^E, \\ (C_{A,i} - n_{A,i}^k - x_{A,i}^k) \} \quad (33)$$



3.3 混合車種市區幹道車流模式

混合車種市區幹道車流模式流程圖如圖 16 所示，每個步驟分述如下：



圖 18 混合車種都市幹道車流模式流程圖

步驟一 計算傳遞路段(D)中各車道每個車種的車流進入量

傳遞路段的每個車道的車流進入量會等於(34)式：

$$\text{傳遞區段的每個車道的各車種車輛進入數目} = \min\{\text{每個車道各車種的需求, 車道的剩餘容量}\} \quad (34)$$

下列分別計算每個車道各車種的需求以及剩餘容量。

步驟1-1 計算每個車道的需求

每一車道第 k 時段的需求可以由(35)式求得

$$D^{E,k} = \left(\frac{D^E}{3600} * \Delta t \right) \quad (35)$$

其中，

$D^{E,k}$ k 時段車種 E 的需求量
 D^E 車種 E 的每小時需求量(vphpl)
 Δt 時間區間

步驟1-2 計算每個車道的剩餘容量

"傳遞"區段(P)中每個車道的總剩餘容量可以由車道容量減去行進與停等的車輛數目求得，如(36)式。

$$(C_i - n_i^k - x_i^k) \quad (36)$$

其中，

C_i 傳遞區段(P)中車道 i 的容量
 n_i^k 時段 k ， P 區段之車道 i 的行進車輛數目
 x_i^k 時段 k ， P 區段之車道 i 的停等車輛數目

由於各車種的需求量會依照各車種的比例呈現均勻分佈，因此剩餘容量係依照各車種的需求量比例來分配，如(37)式。

$$(C_i - n_i^k - x_i^k) * V^E \quad (37)$$

其中，

V^E 車種 E 占總需求的比例

因為不同車種所占的空間不同，因此需要轉換成小汽車的占用空間，以利後續計算。 O_E 表示車種 E 的佔用空間(本研究假設客運巴士的佔用空間為小汽車的兩倍)，(38)式乘 $\frac{1}{O_E}$ 則可以把單位從"車種 E 的車輛數"轉換成"小汽車的車輛數"，如(38)式。

$$S_i^{E,k} = \frac{1}{O_E} * (C_i - n_i^k - x_i^k) * V^E \quad (38)$$

步驟1-3 計算實際可以進入車道的車輛數目

實際可以進入車道的車輛數目等於步驟1-1與步驟1-2兩者中的最小值，如(39)式。

$$y_i^{E,k} = \min \{ D^{E,k}, S_i^{E,k} \} \quad (39)$$

其中，

$y_i^{E,k}$ k 時段，車種 E 實際進入 P 區段之車道 i 的車輛數目

步驟二 建立每個車道各車種的變換車道行為模式

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的變換車道行為不完全相同，而每小段中，不同轉向的車輛，變換車道的行為也不盡相同，本研究以最內側車道說明變換車道的行為模式，各小段各車種的變換車道的車輛數分別計算如下。

步驟2-1 計算 b 小段各車種的變換車道車輛數

在 b 小段中，位於最內側車道的右轉與直行車輛有可能會變換車道，分述如下：

1. 右轉車輛

位於 b 小段最內側車道且會變換車道的右轉車輛數目如(40)式。

$$\begin{aligned} & \text{車種} E \text{ 在 } b \text{ 小段最內側車道可變換車道的右轉車輛數目} \\ &= \min \{ \text{車種} E \text{ 在 } b \text{ 小段最內側車道的右轉車輛數目,} \\ & \quad \text{相鄰車道的剩餘容量} \} \end{aligned} \quad (40)$$

分述如下：

(1) 車種 E 在 b 小段的右轉車輛數目

因為所有右轉車輛皆會變換車道到最右側車道，因此在最內側車道車種 E 的右轉車輛數如(41)式。

$$X_{1,b}^{E,R,k} = x_{1,b}^{E,k} * R_{1,b}^{E,R,k} \quad (41)$$

其中，

$X_{1,b}^{E,R,k}$ k 時段， b 小段中，車種 E 在車道 1(最內側車道)的右轉車輛數

$x_{1,b}^{E,k}$ k 時段， b 小段中，車種 E 在車道 1(最內側車道)的等候車輛數

$R_{1,b}^{E,R,k}$ k 時段， b 小段中，車種 E 在車道 1(最內側車道)的右轉車輛比例

(2) 相鄰車道的剩餘容量

相鄰車道的總剩餘容量如(42)式。

$$(C_{2,b}^k - n_{2,b}^k) \quad (42)$$

其中，

$C_{2,b}^k$ 在 k 時段， b 小段車道 2 可容納的車輛數

$n_{2,b}^k$ 在 k 時段， b 小段中，車道 2 的移動車輛數

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車種 E 變換車道之最小可接受車距的機率如(43)式所示。

$$P_{2,b}^{E,k} = P(T^k \geq t^E) \quad (43)$$

其中，

T^k 時段 k 時，相鄰車道車輛之車距
 t^E 車種 E 變換車道需要之最小可接受車距

不同車種在變換車道時的可接受車距也不同，小汽車可接受車距較短，大客車則較長。當鄰近車道的車距大於大客車可接受車距時，小汽車與大客車皆可變換車道；當鄰近車道車距介於兩者之間時，只有小汽車可以變換車道；當鄰近車道車距小於小汽車可接受車距時，兩者皆無法變換車道。若是大小車皆可以變換車道時，則變換車道的大小車比例係依照車道中的大小車比例。上述情形可以用(44)式描述之。

$$\frac{R_{1,b}^{E,R,k} * P_{2,b}^{E,k}}{\sum_E (R_{1,b}^{E,R,k} * P_{2,b}^{E,k})} \quad (44)$$

其中，

$R_{1,b}^{E,R,k}$ k 時段， P 區段，車道 1 之車種 E 的右轉比例

可被車種 E 利用的剩餘容量如(45)式，其中乘上 $\frac{1}{O_E}$ 是為了轉換單位。

$$S_{2,b}^{E,R,k} = \frac{1}{O_E} * \frac{R_{1,b}^{E,R,k} * P_{2,b}^{E,k}}{\sum_E (R_{1,b}^{E,R,k} * P_{2,b}^{E,k})} * (C_{2,b}^k - n_{2,b}^k) \quad (45)$$

其中，

$n_{2,b}^k$ 在 k 時段， b 小段中，車道 2 的移動車輛數
 $C_{2,b}^k$ 在 k 時段， b 小段車道 2 可容納的車輛數

綜合(1)、(2)，在 b 小段車種 E 的變換車道車輛數如(46)式。

$$y_{1,2}^{E,b,R,k} = \min \{X_{1,b}^{R,k}, S_{2,b}^{R,k}\} \quad (46)$$

2. 直行車輛

可以變換車道的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剩餘容量。因此(45)式改寫為(47)式。

$$S_{2,b}^{E,T,k} = \frac{1}{O_E} * \frac{R_{1,b}^{E,T,k} * P_{2,b}^{E,k}}{\sum_E (R_{1,b}^{E,T,k} * P_{2,b}^{E,k})} * (C_{2,b}^k - n_{2,b}^k - y_{1,2}^{E,b,R,k}) \quad (47)$$

步驟2-2 計算在c小段的變換車道車輛數

以車道1之直行車輛為例，欲變換車道之直行車輛數目如(48)式所示：

$$(n_{1,c}^k * R_{1,c}^{E,T,k}) \quad (48)$$

其中，

$n_{1,c}^k$ 時段k，P區段，c小段之第1車道的行進中車輛數目
 $R_{1,c}^{E,T,k}$ 時段k，P區段，c小段之第1車道的直行車輛比例(車種E)

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(49)式

$$N_{1,c}^{E,T,k} = n_{1,c}^k * R_{1,c}^{E,T,k} * I_{1,2}^{c,k} \quad (49)$$

其中，

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

$N_{1,c}^{E,T,k}$ 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(車種E)

相鄰車道之剩餘可利用容量計算方式與(45)式同。

步驟2-3 計算在f小段的變換車道車輛數

f小段的直行車輛會選擇較快速的車道，因此只需將(49)式中的 $I_{1,2}^{c,k}$ 改成 $I_{1,2}^{f,k}$ ，其餘的計算方式與c小段一致。

$$I_{1,2}^{f,k} = \begin{cases} 1, & \text{當車道2的速度快於車道1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (50)$$

步驟三 計算從傳遞區段(Propagation)到分散區段(Diverging)的各車種的車輛數目

從傳遞區段到分散區段的各車種之車輛數目可以由(51)式計算而得。

$$\begin{aligned} &\text{傳遞區段到分散區段之各車種車輛數目} = \\ &\min\{\text{傳遞區段中，潛在可以進入分散區段的各車種車輛} \\ &\quad \text{數目，傳遞區段各車種的最大輸出車流量，} \\ &\quad \text{分散區段中的剩餘容量}\} \end{aligned} \quad (51)$$

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各車種車輛數目

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，車種E在分散區段的旅行時間計算如(52)式。

$$T_2^{E,k} = \frac{L_{2,f}^k}{v_{2,f}^{E,k}} + \frac{L_{2,c}^k}{v_{2,c}^{E,k}} + \frac{L_{2,b}^k}{v_{2,b}^{E,k}} + \frac{L_{2,s}^k}{v_{2,s}^{E,k}} \quad (52)$$

其中，

- $T_2^{E,k}$ 時段 k ， P 區段之車道 2 的旅行時間
- $L_{2,j}^k$ 時段 k ， P 區段之車道 2 之 j 小段的長度($j=f, c, b, s$)
- $v_{2,j}^{E,k}$ 時段 k ， P 區段之車道 2 之 j 小段的車種 E 之速度($j=f, c, b, s$)

旅行時間可以被轉換成時段，如(53)式。

$$n = \left\lfloor \frac{T_2^{E,k}}{\Delta t} \right\rfloor \quad (53)$$

在時段($k-n$)到時段 k 之間，進入 P 區段的車種 E 之車輛數如(54)式。

$$y_2^{E,K} = \sum_{t=k-n}^k y_2^{E,t} \quad (54)$$

因此於時段($k-n$)之前進入 P 區段之車種 E 之車輛數為

$$(n_2^{E,k} - y_2^{E,K} + x_2^{E,k}) \quad (55)$$

其中，

- $n_2^{E,k}$ 時段 k ， P 區段，車道 2 的行進中之車輛數(車種 E)
- $y_2^{E,K}$ 在時段($k-n$)到時段 k 之間，進入 P 區段車道 2 的車輛數(車種 E)
- $x_2^{E,k}$ 時段 k ， P 區段，車道 2 的停等車輛數(車種 E)

步驟3-2 計算傳遞區段的各車種最大輸出車流量

傳遞區段(P)車道2之車種 E 的最大可輸出車流量可以由速度跟密度計算而得，如(56)式。

$$\frac{1}{O_E} * V_2^{E,k} * (R_2^{E,T,k} + R_2^{E,R,k}) * \rho_2^k * v_2^{E,k} * \Delta t \quad (56)$$

其中，

- $V_2^{E,k}$ 時段 k ， P 區段之車道 2 的車種 E 的比例
- $R_2^{E,T,k}$ 時段 k ， P 區段之車道 2 的車種 E 的直行車輛比例
- $R_2^{E,R,k}$ 時段 k ， P 區段之車道 2 的車種 E 的右轉車輛比例
- ρ_2^k 時段 k ， P 區段之車道 2 的密度
- $v_2^{E,k}$ 時段 k ， P 區段之車道 2 的平均速度(車種 E)

步驟3-3 計算分散區段中的剩餘容量

分散區段(D)的總剩餘容量可以由(57)式求得。

$$(C_{D,2} - n_{D,2}^k - x_{D,2}^k) \quad (57)$$

其中，

- $C_{D,2}$ 分散區段的第 2 車道的可容納車輛數
- $n_{D,2}^k$ 時段 k ， D 區段之車道 2 的行進中車輛數
- $x_{D,2}^k$ 時段 k ， D 區段之車道 2 的停等車輛數

總剩餘容量必須分配給各車種的車輛，分配的方式係依照各車種的車流量，如(58)式。

$$\frac{\rho_2^k * v_2^{E,k} * \Delta t}{\sum_E \rho_2^k * v_2^{E,k} * \Delta t} \quad (58)$$

其中，

$$\begin{aligned} \rho_2^k & \text{ 時段 } k, P \text{ 區段之車道 } 2 \text{ 的密度} \\ v_2^{E,k} & \text{ 時段 } k, P \text{ 區段之車道 } 2 \text{ 的車種 } E \text{ 的平均速度} \end{aligned}$$

因此，D區段中，分配給車種E的剩餘容量如(59)式。

$$S_2^{E,k} = \frac{1}{O_E} * \frac{\rho_2^k * v_2^{E,k} * \Delta t}{\sum_E \rho_2^k * v_2^{E,k} * \Delta t} * (C_{D,2} - n_{D,2}^k - x_{D,2}^k) \quad (59)$$

如果分散區段的車道為左轉車道，必須要考慮車道堵塞的問題，因為直行車道可能會因為車隊回堵而擋住左轉車道。因此若是分散區段的車道為左轉車道時，(59)式必須乘上一個指標變數($Q_{D,1}^k$)

$$Q_{D,1}^k = \begin{cases} 0, & \text{if } (C_{D,1} - n_{D,1}^k - x_{D,1}^k) = 0 \\ 1, & \text{if } (C_{D,1} - n_{D,1}^k - x_{D,1}^k) > 0 \end{cases} \quad (60)$$

步驟3-4 計算實際從傳遞區段到分散區段的各車種之車輛數目

實際從傳遞區段(P)到分散區段(D)的車種E之車輛數目為取步驟3-1至3-3的最小值，如(61)式。

$$y_{2,D,2}^{E,k} = \min\{n_2^{E,k} - y_2^{E,K} + x_2^{E,k}, \frac{1}{O_E} * V_2^{E,k} * (R_2^{E,T,k} + R_2^{E,R,k}) * \rho_2^k * v_2^{E,k} * \Delta t, S_{D,2}^{E,k}\} \quad (61)$$

步驟四 計算從路段離開的各車種車輛數目

離開分散區段的各車種車輛數目可以由(62)式計算而得。

$$\begin{aligned} \text{離開分散區段的各車種車輛數目} = \\ \min\{ \text{分散區段中，潛在可以離開路段的各車種車輛數} \\ \text{分散區段各車種之最大輸出車流量,} \\ \text{下游車道的剩餘容量} \} \end{aligned} \quad (62)$$

以左轉車道(車道0)為例，各項目計算方式如下：

步驟4-1 計算在分散區段中，潛在可以離開路段的各車種車輛數目

分散區段(D)中，潛在可以離開路段的各車種車輛數目可由(63)式求得。

$$(n_{D,0}^{E,k} - y_{P,1,D,0}^{E,K} + x_{D,0}^{E,k}) \quad (63)$$

其中，

$$\begin{aligned} n_{D,0}^{E,k} & \text{ 時段 } k, D \text{ 區段之左轉道的行進中車輛數(車種 } E) \\ y_{P,1,D,0}^{E,K} & \text{ 在時段}(k-n) \text{ 到時段 } k \text{ 之間，進入 } D \text{ 區段左轉道的車輛數(車種 } E) \\ x_{D,0}^{E,k} & \text{ 時段 } k, D \text{ 區段之左轉道的停等車輛數(車種 } E) \end{aligned}$$

如果下游路段的車道數目超過一個車道，則從此路段離開的車輛可能會進入不同的車道，此時(63)式需要乘上一個車道選擇的變數($U_{A,i}^E$)來表示左轉車道的車輛是進入下游路段中的哪一個車道。

$$(n_{D,0}^{E,k} - y_{P,1,D,0}^{E,K} + x_{D,0}^{E,k}) * U_{A,i}^E \quad (64)$$

步驟4-2 計算每個車道的各車種之最大輸出車流量

每個車道各車種的可輸出最大車流量與號誌跟飽和流率有關。左轉車道各車種的最大可輸出車流量如(65)式。

$$\frac{\rho_{D,0}^k * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t}{\sum_E \rho_{D,0}^E * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t} * D_{D,0}^E * \Delta t * G_p^{H,k} \quad (65)$$

其中，

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

$D_{D,0}^E$ D 區段中左轉車道車種 E 的消散率
 $G_p^{H,k}$ 綠燈指標變數
 $\rho_{D,0}^k$ 時段 k , D 區段之左轉道的密度
 $v_{D,0}^{E,k}$ 時段 k , D 區段之左轉道的車種 E 的平均速度

若下游路段車道數目超過一個車道，則(65)式需要乘上車道選擇的變數($U_{A,i}^E$)。

步驟4-3 計算下游車道的剩餘容量

下游車道的剩餘容量可由(66)式求得。

$$\frac{1}{O_E} * \frac{\rho_{D,0}^k * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t}{\sum_E \rho_{D,0}^E * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t} * (C_{A,i} - n_{A,i}^k - x_{A,i}^k) \quad (66)$$

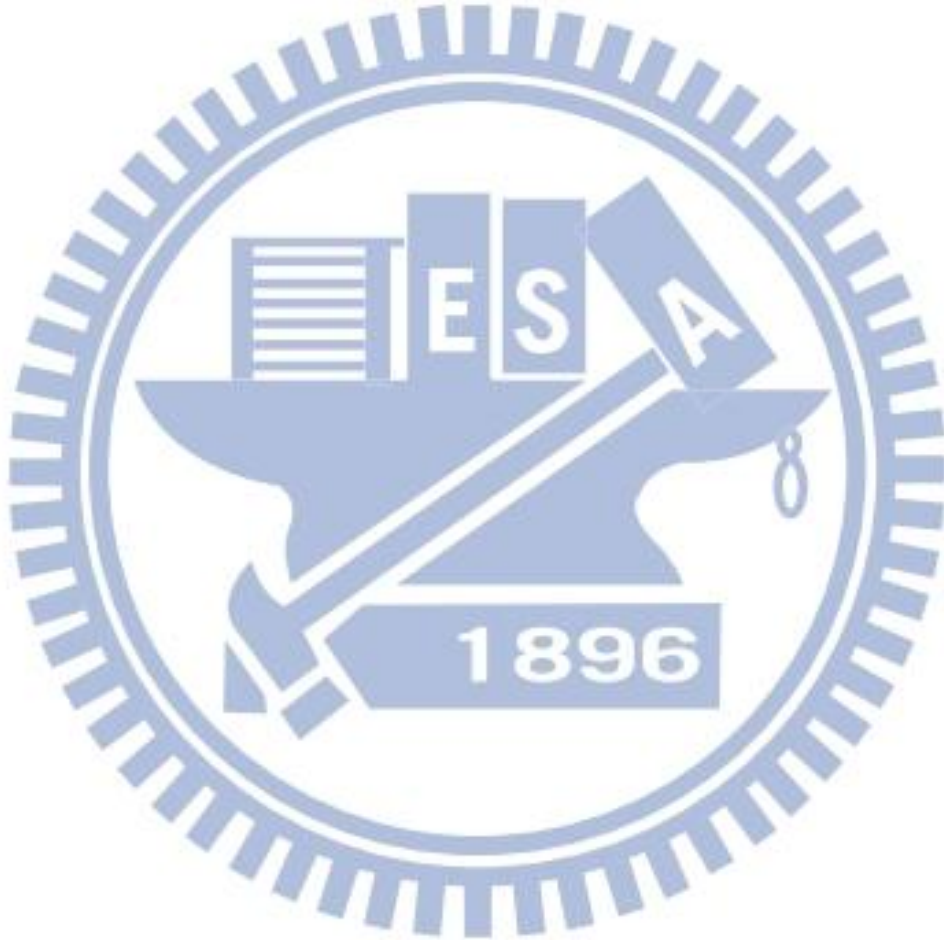
其中，

$$\begin{aligned} C_{A,i} & \text{ 下游路段 } A \text{ 可容納的車輛數} \\ n_{A,i}^k & \text{ 時段 } k, \text{ 路段 } A \text{ 車道 } i \text{ 的行進中車輛數} \\ x_{A,i}^k & \text{ 時段 } k, \text{ 路段 } A \text{ 車道 } i \text{ 的等候車輛數} \\ \rho_{D,0}^k & \text{ 時段 } k, D \text{ 區段之左轉道的密度} \\ v_{D,0}^{E,k} & \text{ 時段 } k, D \text{ 區段之左轉道的車種 } E \text{ 的平均速度} \end{aligned}$$

步驟4-4 計算實際從路段離開的車輛數目

實際從路段離開的車輛數目為取步驟4-1到4-3的最小值，如(67)式。

$$y_{D,0,A,i}^{E,k} = \min \left\{ (n_{D,0}^{E,k} - y_{P,1,D,0}^{E,K} + x_{D,0}^{E,k}) * U_{A,i}^E, \right. \\ \left. \frac{\rho_{D,0}^k * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t}{\sum_E \rho_{D,0}^E * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t} * D_{D,0}^E * \Delta t * G_p^{H,k} * U_{A,i}^E, \right. \\ \left. \frac{1}{o_E} * \frac{\rho_{D,0}^k * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t}{\sum_E \rho_{D,0}^E * v_{D,0}^{E,k} * \Delta t} * (C_{A,i} - n_{A,i}^k - x_{A,i}^k) \right\} \quad (67)$$



3.4 高速公路車流模式

高速公路車流模式流程圖如圖 17 所示，每個步驟分述如下：

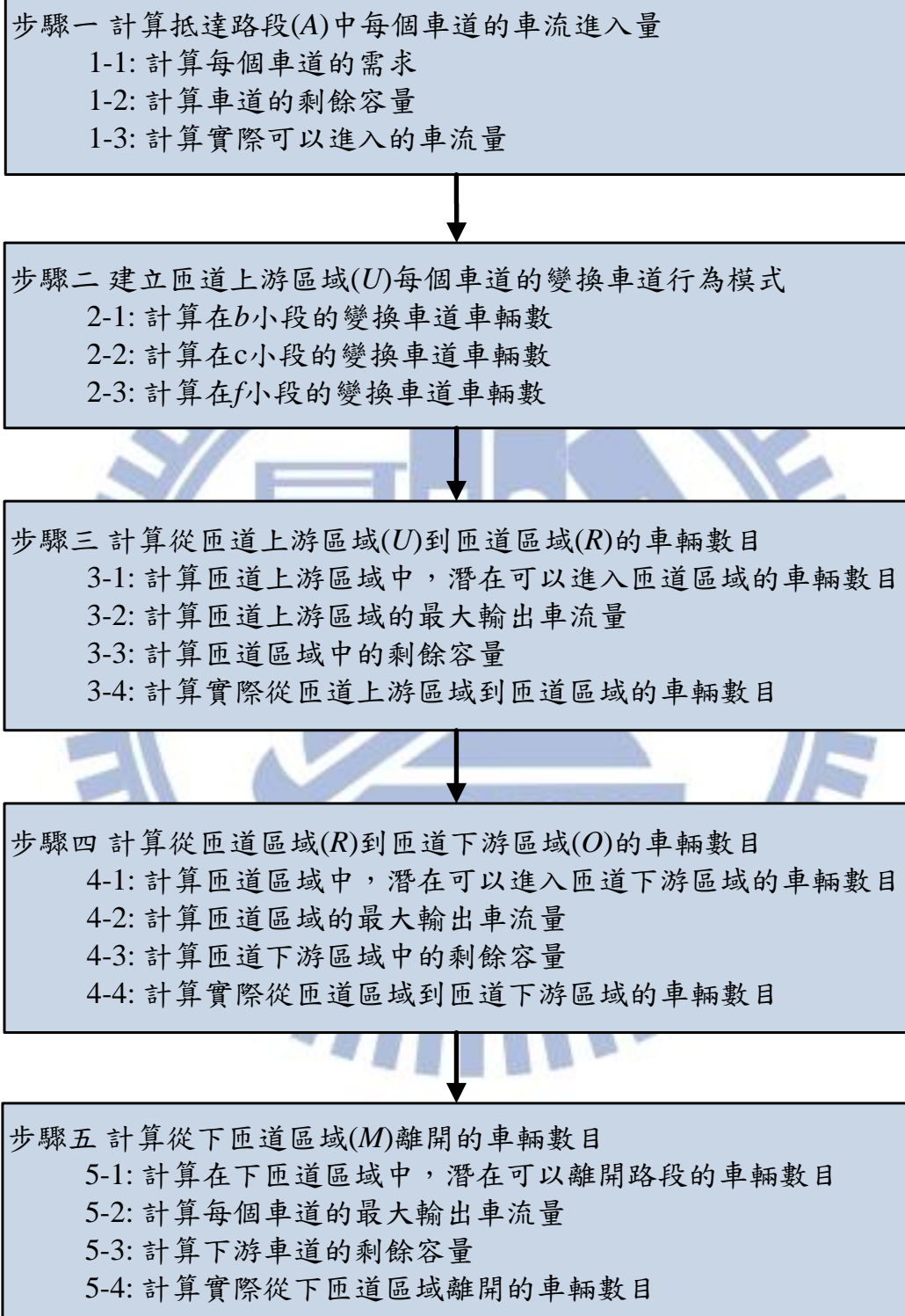


圖 19 高速公路車流模式流程圖

步驟一 計算抵達路段(A)中每個車道的車流進入量

此步驟的算法與3.2節中的步驟一相同。

步驟二 建立匝道上游區域(U)每個車道的變換車道行為模式

車輛在匝道上游區域(U)可能會變換車道，而此變換車道與市區幹道的差異在於在市區幹道模式中，車輛變換車道可接受的最小車距是固定的。而在高速公路上，可接受的最小車距是變動的，茲說明如下：

對於下匝道車輛來說，當越接近匝道，駕駛人為了可以順利下匝道，因此可以接受越小的車距。各段之下匝道車輛可接受最小之車距如圖20所示，說明如下：

1. 一般變換車道區(g)

此區之下匝道車輛之變換車道車距皆為最大之車距。

2. 變換車道熱區 2(z)

位於此區車道 1 的下匝道車輛，為了要能夠先進入中間車道後，再進入最外側車道。因此車道 1 的下匝道車輛之可接受最小車距從最大遞減至最小，平均來看，在此區車道 1 之可接受最小車距為

$$t = \frac{t_{max} + t_{min}}{2} \quad (68)$$

其中，

t 可接受之最小變換車道車距

t_{max} 最大車距

t_{min} 最小車距

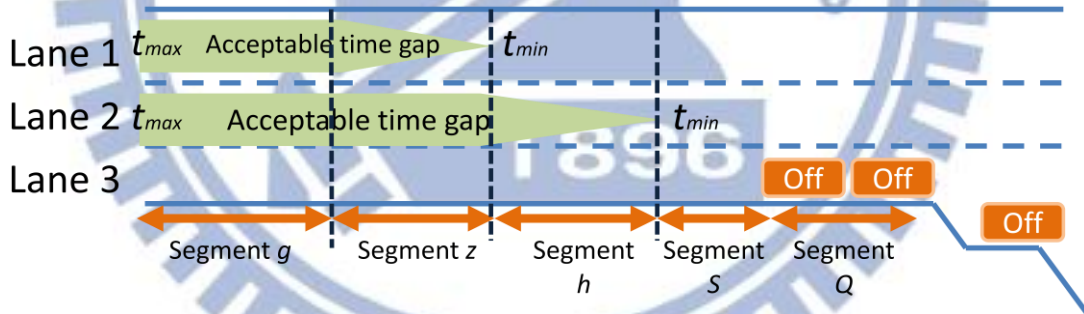


圖 20 下匝道車輛可接受最小之車距圖

對於直行車輛而言，為了不要加入下匝道車輛之等候車隊，因此在h段之可接受最小車距從最大(t_{max})遞減至最小(t_{min})，而s段則是維持在最小(t_{min})。其餘區段皆為 t_{max} ，如圖21。

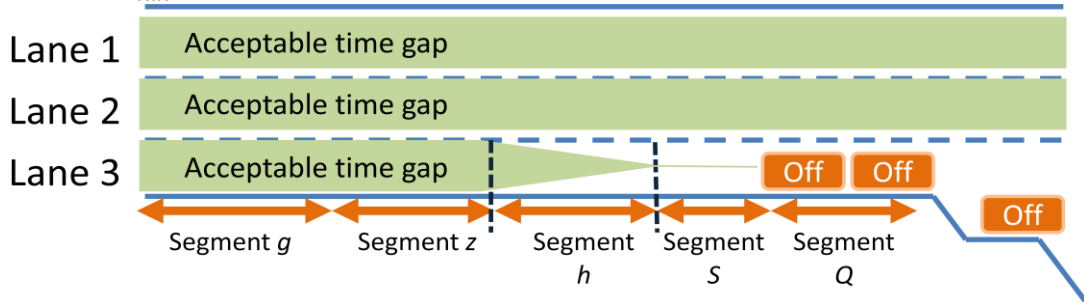


圖 21 直行車輛可接受最小之車距圖

此步驟的算法與3.2節中的步驟二相同，只需將3.2節中之右轉車輛以下匝道車輛取代，另外各區段的變換車道時的最小可接受車距必須依照上述置換成相對應之數值。

步驟三 計算從匝道上游區域(U)到匝道區域(R)的車輛數目

從匝道上游區域(U)到匝道區域(R)的車輛數目可以由(69)式計算而得。

$$\begin{aligned} & \text{匝道上游區域到匝道區域的車輛數目} = \\ & \min\{ \text{匝道上游區域中, 潛在可以進入匝道區域的車輛數,} \\ & \quad \text{匝道上游區域的最大輸出車流量,} \\ & \quad \text{匝道區域中的剩餘容量} \} \end{aligned} \quad (69)$$

以車道1(最內側車道)為例，各項目計算方式如下：

步驟3-1 計算匝道上游區域中，潛在可以進入匝道區域的車輛數目

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，分散區段的旅行時間計算如(70)式。

$$T_{U,1}^k = \sum_{i,j} \left(\frac{L_{U,i,1,j}^k}{v_{U,i,1,j}^k} \right) \quad (70)$$

其中，

$$\begin{aligned} T_{U,1}^k & \text{ 時段 } k, U \text{ 區域中, 車道 } 1 \text{ 的旅行時間} \\ L_{U,i,1,j}^k & \text{ 時段 } k, U \text{ 區域中, 區段 } i, \text{ 車道 } 1 \text{ 的第 } j \text{ 小段之長度}(j=f, c, b, s) \\ v_{U,i,1,j}^k & \text{ 時段 } k, U \text{ 區域中, 區段 } i, \text{ 車道 } 1 \text{ 的第 } j \text{ 小段之平均速度}(j=f, c, b, s) \end{aligned}$$

旅行時間可以被轉換成時段，如(71)式。

$$N = \left\lceil \frac{T_{U,1}^k}{\Delta t} \right\rceil \quad (71)$$

在時段(k-n)到時段k之間，進入U區域第1車道的車輛數如(72)式。

$$y_{U,1}^K = \sum_{t=k-N}^k y_{U,1}^t \quad (72)$$

因此於時段(k-n)之前進入U區域第1車道的直行車輛數為

$$(n_{U,1}^k - y_{U,1}^K + x_{U,1}^k) * R_{U,1}^{T,k} \quad (73)$$

其中，

$$\begin{aligned} n_{U,1}^k & \text{ 時段 } k, U \text{ 區域的第 } 1 \text{ 車道之行進中車輛數} \\ y_{U,1}^K & \text{ 在時段}(k-n)\text{到時段 } k \text{ 之間, 進入 } U \text{ 區域的第 } 1 \text{ 車道之車輛數} \\ x_{U,1}^k & \text{ 時段 } k, U \text{ 區域的第 } 1 \text{ 車道之停等車輛數} \\ R_{U,1}^{T,k} & \text{ 時段 } k, U \text{ 區域的第 } 1 \text{ 車道之直行車比例} \end{aligned}$$

步驟3-2 計算匝道上游區域的最大輸出車流量

匝道上游區域的第1車道之最大可輸出車流量可以由速度跟密度計算而得。

在車道1，只有直行車輛會從匝道上游區域到匝道區域。因此匝道上游路段之最大輸出車流如(74)式。

$$\rho_{U,1}^k * v_{U,1}^{D,k} * \Delta t * R_{U,1}^{T,k} \quad (74)$$

其中，

- $\rho_{U,1}^k$ 時段 k ， U 區域的第 1 車道之密度
- $v_{U,1}^{D,k}$ 時段 k ， U 區域的第 1 車道鄰近區段之平均速度
- $R_{U,1}^{T,k}$ 時段 k ， U 區域的第 1 車道之直行車輛比例

若是相鄰車道之速度較慢，則第1車道之平均速度會受到下列因素影響：

1. 欲變換車道之車輛須減速以進入相鄰車道
2. 從相鄰車道變換過來的車輛之速度

若是匝道上游區域與匝道區域的連接段是 c 區段，則車道1鄰近區段之平均速度如(75)式所示。

$$v_{U,g,1,c}^{D,k} = \begin{cases} \frac{v_{U,g,1,c}^k + \min\{v_{U,g,1,c}^k, v_{U,g,2,c}^k\}}{2}, & \text{若 } y_{U,g,1,c,2}^k > 0 \text{ 或 } y_{U,g,2,c,1}^k > 0 \\ v_{U,g,1,c}^k, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (75)$$

其中，

- $v_{U,g,1,c}^{D,k}$ 時段 k ， U 區域的第1車道之平均速度
- $v_{U,g,1,c}^k$ 未計算鄰近車道影響前之平均速度
- $y_{U,g,1,c,2}^k$ 時段 k ， U 區域之 g 區段中從車道1變換到車道2的車輛數
- $y_{U,g,2,c,1}^k$ 時段 k ， U 區域之 g 區段中從車道2變換到車道1的車輛數

步驟3-3 計算匝道區域中的剩餘容量

分散區段(D)的剩餘容量可以由(76)式求得。

$$S_{R,1}^k = (C_{R,1} - n_{R,1}^k - x_{R,1}^k) \quad (76)$$

其中，

- $C_{R,1}$ 匝道區域的車道 1 的可容納車輛數
- $n_{R,1}^k$ 時段 k ，匝道區域的車道 1 之行進中車輛數
- $x_{R,1}^k$ 時段 k ，匝道區域的車道 1 之停等車輛數

步驟3-4 計算實際從匝道上游區域到匝道區域的車輛數目

實際從匝道上游區域(U)到匝道區域(R)的車輛數目為取步驟 3-1 至 3-3 的最小值。

步驟四 計算從匝道區域(R)到匝道下游區域(O)的車輛數目

此步驟算法與步驟三相同。

步驟五 計算從下匝道區域(M)離開的車輛數目

此步驟算法與3.2節中的步驟四相同

3.5 號誌相關限制與流量守恒

與號誌相關的限制式如下：

$$g_{h,j} \geq G_{min}, j = 1, \dots, 4 \quad (77)$$

$$C_{min} \leq C_h \leq C_{max} \quad (78)$$

$$\sum_j g_{h,j} + \sum_j I_{h,j} = C_h \quad (79)$$

$$G_p^{h,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{j=1}^{p-1} (g_{h,j} + I_{h,j}) < \text{mod}(k * \Delta t, C) \leq \sum_{j=1}^{p-1} (g_{h,j} + I_{h,j}) + g_{h,p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (80)$$

其中，

- g_{hj} h 路口第 j 時相之綠燈秒數
- 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 時相之黃燈秒數
- $G_p^{h,k}$ k 時段時， h 路口第 p 時相是否為綠燈的指標變數

流量守恒限制式如下：

$$n_{i,j}^{k+1} + x_{i,j}^{k+1} = n_{i,j}^k + x_{i,j}^k + \sum_{l,m} y_{l,m,i,j}^k - \sum_{o,n} y_{i,j,o,n}^k \quad (81)$$

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 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 n 車道的車輛數

3.6 模式目標式

3.6.1 最小化總延滯

號誌化路口的延滯主要來自停等時間，此停等時間包括紅綠燈的停等時間以及等待前方車輛啟動的時間。若是多車種時，則車隊中各車種的數量與位置皆會影響整體的等待時間。因此本研究需計算多車種時的等待時間期望值。期望值計算方式如下：

時段 k ，第 $(n+1)$ 輛車的期望等待時間 =
等待前面 n 輛車啟動的總時間 + 本身的啟動時間 (82)

1. 等待前面 n 輛車啟動的總時間

如果前 n 輛車中，有 B_n^k 輛大車與 P_n^k 小汽車，則前面 n 輛車的啟動總時間為

$$B_n^k * D_B + P_n^k * D_P \quad (83)$$

其中，

D_B 一輛大車的啟動時間

D_P 一輛小車的啟動時間

而在前面 n 輛車中，有 B_n^k 輛大車與 P_n^k 小汽車的機率為

$$\frac{C_{B_n^k}^{x_{D,i}^{B,k}} * C_{P_n^k}^{x_{D,i}^{P,k}}}{C_n^{x_{D,i}^k}} * [B_n^k * D_B + P_n^k * D_P] \quad (84)$$

其中，

$x_{D,i}^{B,k}$ 在等候車隊中，時段 k 時，大車的數量

$x_{D,i}^{P,k}$ 在等候車隊中，時段 k 時，小車的數量

$x_{D,i}^k$ 時段 k 時，等候車隊的總車輛數

D_B 一輛大車的啟動時間

D_P 一輛小車的啟動時間

因此，前 n 輛車的啟動總時間之期望值為

$$\sum_{B_n^k} \frac{C_{B_n^k}^{x_{D,i}^{B,k}} * C_{P_n^k}^{x_{D,i}^{P,k}}}{C_n^{x_{D,i}^k}} * [B_n^k * D_B + P_n^k * D_P] \quad (85)$$

2. 本身的啟動時間期望值

本身車輛的啟動時間期望值如下：

$$\frac{(x_{D,i}^{B,k} - B_n^k)}{x_{D,i}^k - n} * D_B + \frac{x_{D,i}^{P,k} - P_n^k}{x_{D,i}^k - n} * D_P \quad (86)$$

加總上列期望值，可得第 $(n+1)$ 台車的等候時間期望值：

$$E_{D,i,n+1}^k = \sum_{B_n^k} \frac{C_{B_n^k}^{x_{D,i}^{B,k}} * C_{P_n^k}^{x_{D,i}^{P,k}}}{C_n^{x_{D,i}^k}} * [B_n^k * D_B + P_n^k * D_P] + \frac{(x_B^k - B_n^k)}{x^k - n} * D_B + \frac{x^k - P_n^k}{x^k - n} * D_P \quad (87)$$

而總紅燈停等時間為

$$\Delta t * I_i^k * x_i^k \quad (88)$$

其中，

I_i^k 車道*i*在時段*k*是否為紅燈的指標變數

x_i^k 時段*k*，在車道*i*的等候車輛數

因此總延滯為

$$\sum_i \sum_k ((\sum_n E_{D,i,n}^k) + \Delta t * I_{D,i}^k * x_i^k) \quad (89)$$

目標式為最小化總延滯。

3.6.2 最大化通過量

最大化通過量之目標式如下：

$$\max \sum_{i,k} y_{i,out}^k \quad (90)$$

其中，

$y_{i,out}^k$ 時段*k*，從路網邊界之車道*i*出去的车辆數

3.7 模式求解

本研究提出一啟發式演算法求解此模式。演算法之流程如圖 22 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，直行/右轉時相因需考慮行人通行，因此直行/右轉時相之最小綠燈秒數設定為 15 秒，左轉時相之最小綠燈秒數則設定為 10 秒。並設定各路口各時相之時相指標、路口指標。並利用初始綠燈秒數求出一初始目標函數值。

接下來開始依序增加各路口與各時相之秒數，首先由路口 1 之時相 1 開始。每次增加時相秒數後，便計算目標函數值，並比較目前已知之最佳目標函數值以及新的目標函數值。若新的目標函數值較好，則更新目前的最佳解，更新後再繼續增加該時相之秒數，接著再與目前的最佳解比較，直至若新的目標值較目前的最佳解為差時，則停止增加該時相之秒數，轉而增加下一時相之秒數。當此路口的所有時相皆已計算完畢後，則換計算下一個路口之第一個時相，如此依序計算，直到所有路口皆計算完畢為止。當所有路口皆計算完畢後，需再從第一個路口之第一個時相開始計算，如此循環，直至收斂為止。

由於本模式之解法為一啟發式演算法，求解路口之順序會影響最後之結果。本模式當幹道各路口之需求量不同時，係先由需求量大之路口開始增加時相秒數。而對於同一路口而言，亦由需求量大之時相開始調整。

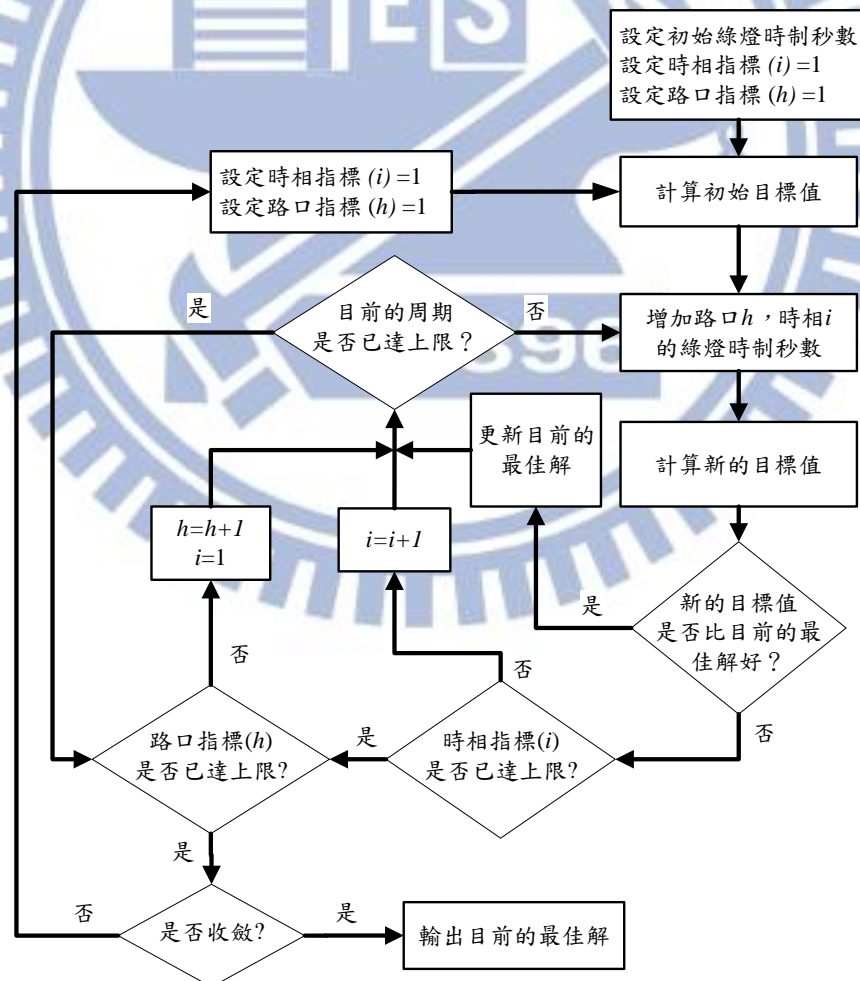


圖 22 模式求解流程圖

四、 案例分析

本研究將模式求解出的綠燈時制放入 Tsis 模擬軟體中進行模擬比較，比較可以分成三部分：

1. 市區幹道(單一車種與混合車種)
2. 單一車種的複合式路網(市區幹道與高速公路)
3. 實際路網(竹北交流道)

4.1 市區幹道(單一車種與混合車種)

市區幹道的案例如表 1。本研究之測試除了與 TRANSYT 7F 以及 TRANSYT 14 比較之外，也作了是否使用 PCE 來計算其他車種的差異比較，如表 2。各路段編號與車道編號如圖 24。

表 1 市區幹道案例參數

項 目	數 值
最小綠燈時間	15 秒(直行/左轉) 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)

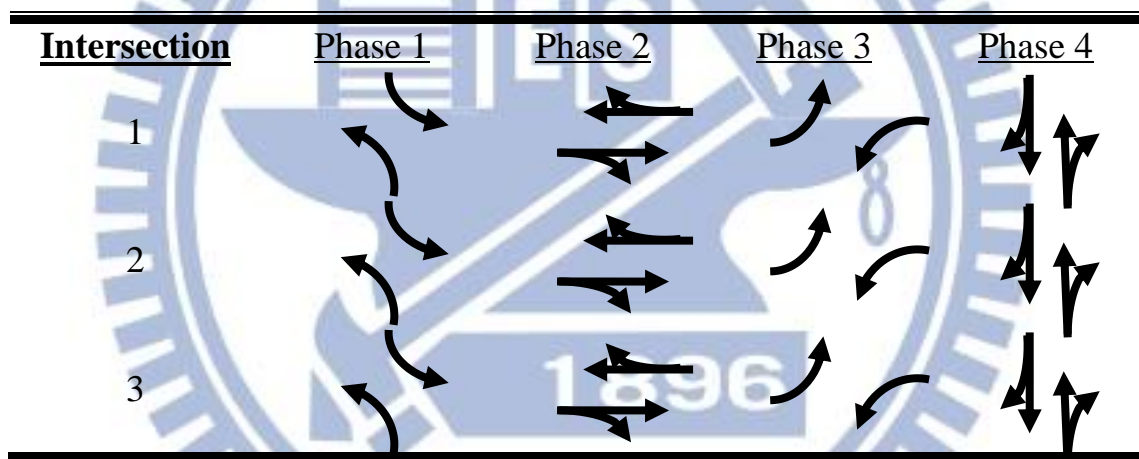
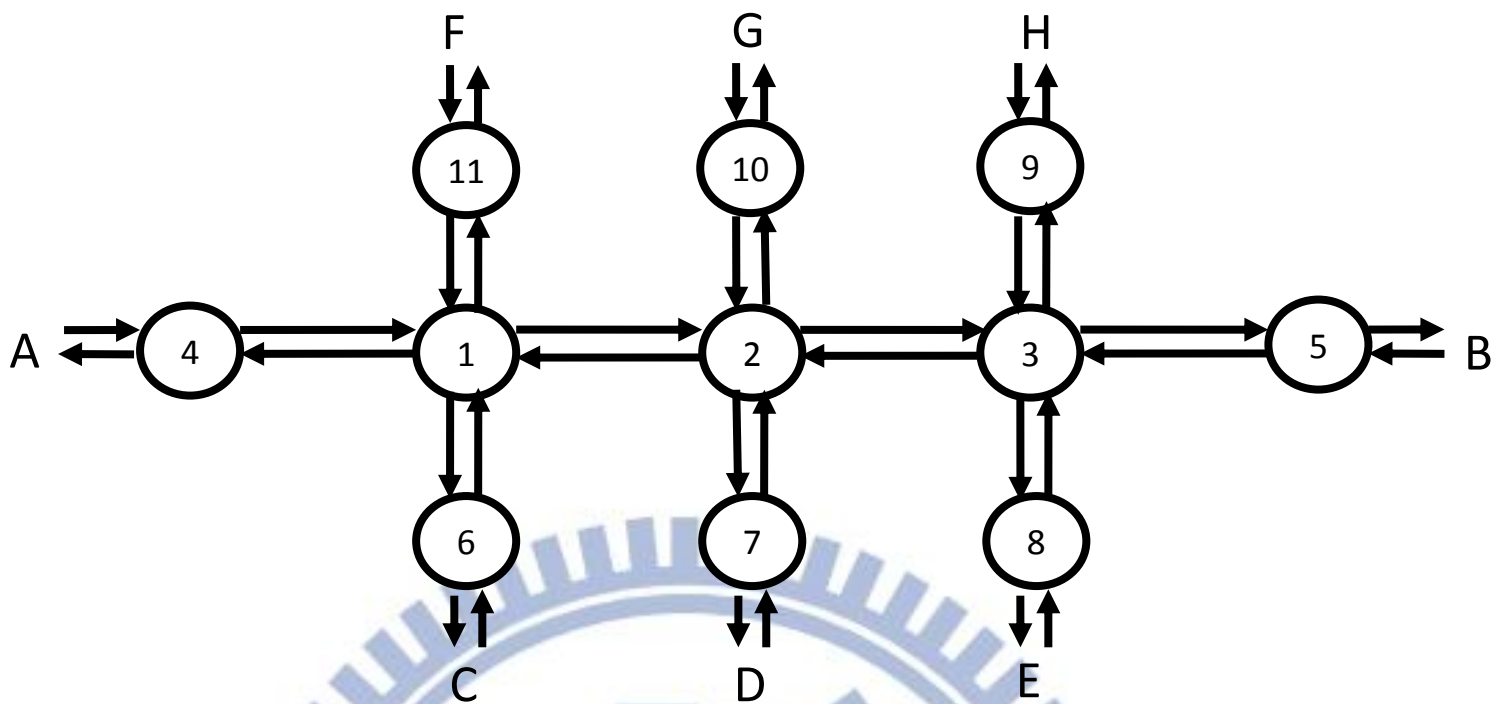


圖 23 路網與時制

表 2 案例情境

(a) 與 T7F 比較之案例

情境 編號	目標 函數	混合 車流	巴士 比例	需 求 (vph/lane)							
				A	B	C	D	E	F	G	H
1	Min	否	0	600	600	500	500	500	500	500	500
2	Min	否	0	700	700	500	500	500	500	500	500
3	Min	否	0	800	800	500	500	500	500	500	500
4	Max	否	0	600	600	500	500	500	500	500	500
5	Max	否	0	700	700	500	500	500	500	500	500
6	Max	否	0	800	800	500	500	500	500	500	500
7	Max	否	0	900	900	500	500	500	500	500	500
8	Max	否	0	1000	1000	500	500	500	500	500	500
9	Min	是	0.3	600	600	500	500	500	500	500	500
10	Min	是	0.3	700	700	500	500	500	500	500	500
11	Max	是	0.3	600	600	500	500	500	500	500	500
12	Max	是	0.3	700	700	500	500	500	500	500	500
13	Max	是	0.3	800	800	500	500	500	500	500	500
14	Max	是	0.3	900	900	500	500	500	500	500	500
15	Max	是	0.3	1000	1000	500	500	500	500	500	500

(b) 有無採用 PCE 之比較

情境 編號	目標 函數	混合 車流	巴士 比例	需 求 (vph/lane)							
				A	B	C	D	E	F	G	H
16	Min	是	0.3	400	400	400	400	400	400	400	400
17	Min	是	0.3	500	500	500	500	500	500	500	500
18	Min	是	0.3	600	600	500	500	500	500	500	500
19	Max	是	0.3	600	600	500	500	500	500	500	500
20	Max	是	0.3	700	700	500	500	500	500	500	500
21	Max	是	0.3	800	800	500	500	500	500	500	500
22	Max	是	0.3	900	900	500	500	500	500	500	500
23	Max	是	0.3	1000	1000	500	500	500	500	500	500
24	Min	是	0.5	400	400	400	400	400	400	400	400
25	Min	是	0.5	500	500	500	500	500	500	500	500
26	Min	是	0.5	600	600	500	500	500	500	500	500
27	Max	是	0.5	600	600	500	500	500	500	500	500
28	Max	是	0.5	700	700	500	500	500	500	500	500
29	Max	是	0.5	800	800	500	500	500	500	500	500
30	Max	是	0.5	900	900	500	500	500	500	500	500
31	Max	是	0.5	1000	1000	500	500	500	500	500	500
32	Min	是	0.7	400	400	400	400	400	400	400	400
33	Min	是	0.7	500	500	500	500	500	500	500	500
34	Max	是	0.7	600	600	500	500	500	500	500	500
35	Max	是	0.7	700	700	500	500	500	500	500	500
36	Max	是	0.7	800	800	500	500	500	500	500	500
37	Max	是	0.7	900	900	500	500	500	500	500	500
38	Max	是	0.7	1000	1000	500	500	500	500	500	500

(c) 與 TRANSYT 14 比較之案例

情境 編號	目標 函數	混合 車流	巴士 比例	需 求 (vph/lane)							
				A	B	C	D	E	F	G	H
39	Min	否	0	600	600	500	500	500	500	500	500
40	Min	否	0	700	700	500	500	500	500	500	500
41	Min	否	0	800	800	500	500	500	500	500	500

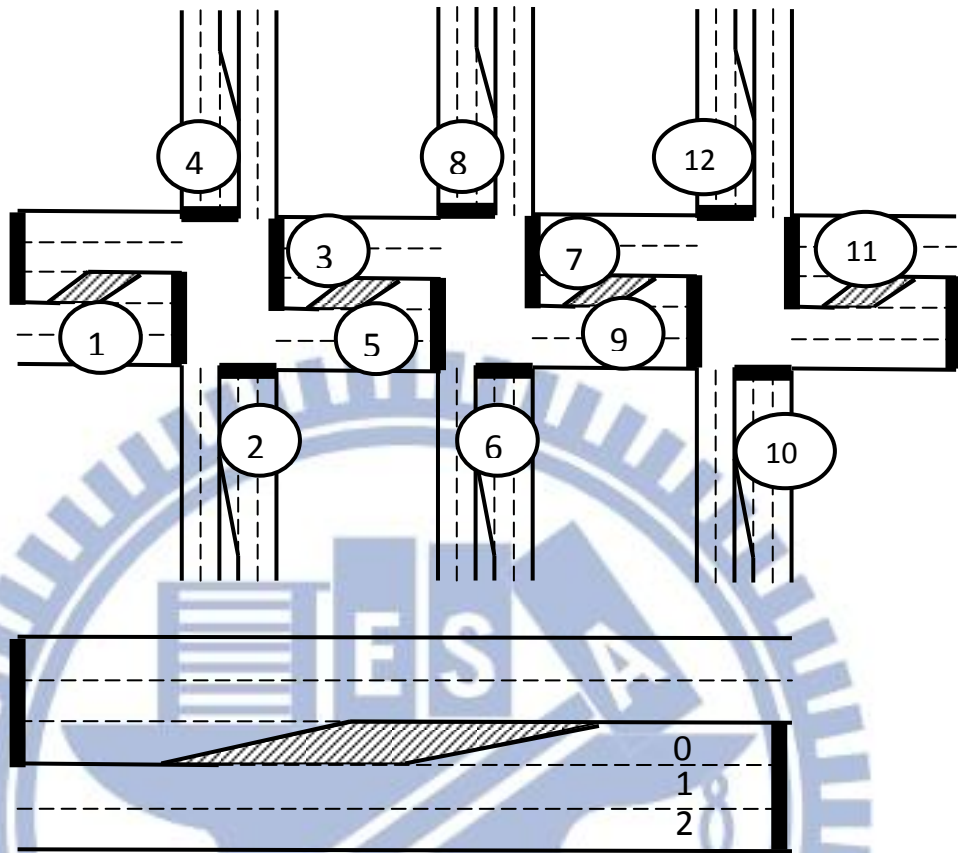


圖 24 路段編號與車道編號

與 TRANSYT 7F 的比較如 4.1.1 小節所示。是否採用 PCE 的比較結果如 4.1.2 小節所示。與 TRANSYT 14 的比較如 4.1.3 小節所示。

4.1.1 與 TRANSYT 7F 的比較結果

單一車種時，本模式與 TRANSYT 7F 比較結果如下：

1. 由表 3 可以看出，於單一車種時，當東西向需求在 600vphpl 時(情境 1)，TRANSYT 7F 出現車道互相堵塞的路段有六個，而本研究提出的模式，則只有一個路段。而當需求逐漸增加時，TRANSYT 7F 出現車道互相堵塞的路段仍多於本研究提出之模式(情境 2~3)。
2. 由表 3 可以看出，於混合車種時，當東西向需求在 600vphpl 時(情境 9)，TRANSYT 7F 已經出現車道回堵的情形，而本研究提出之模式則是到了 700vphpl 時(情境 10)才開始發生車道回堵的情形。
3. 由圖 25 可看出，TRANSYT 7F 在第 1 與第 11 路段之延滯大多遠大於本研究之模式，此兩路段為需求較大之邊界路段。
4. 由表 4 可以看出，當路網需求越大時，本研究之模式較 TRANSYT 7F 有更多的通過量。

表 3 平均延滯差異百分比

單位: %

路段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
情境 1	-33.9 o	1.1	-36.2 o	-4.4	-29.8 o	-3.9	-37.2 o	2.1	-7.8 o	-5.9	1.1 o	-4.0
											x	
情境 2	-82.2 oo x	48.2	-51.0 o	41.3 x	-4.6 o x	2.1	-49.6 o	5.3	-24.3 o	19.6	-73.8 oo x	18.2
情境 3	-33.7 oo xx	15.4 x	-25.1 o	6.3	-7.5 o x	13.7	-13.5 o x	14.6	-23.9 o	16.6	-43.4 oo xx	-0.2
情境 9	-66.8 oo x	-0.9 o	-63.4 o x	-2.3 o x	-22.0 o x	-20.7 x	-52.3 o x	-7.7 o x	-10.3 o x	-18.3 o x	-41.6 oo x	-12.2 o
情境 10	-42.7 oo xx	69.2 o x	-4.9 o x	47.4 o x	-40.1 o x	-6.8 o x	-13.2 o x	6.4 o x	73.1 o x	117.9 o x	-41.5 oo xx	73.2 o x

T7F occurs lane blockage: o

T7F occurs lane blockage and spillback: oo

Proposed model occurs lane blockage: x

Proposed model occurs lane blockage and spillback: xx

Delay Difference percentage = [(Delay of proposed model)-(Delay of T7F)]/(Delay of T7F)

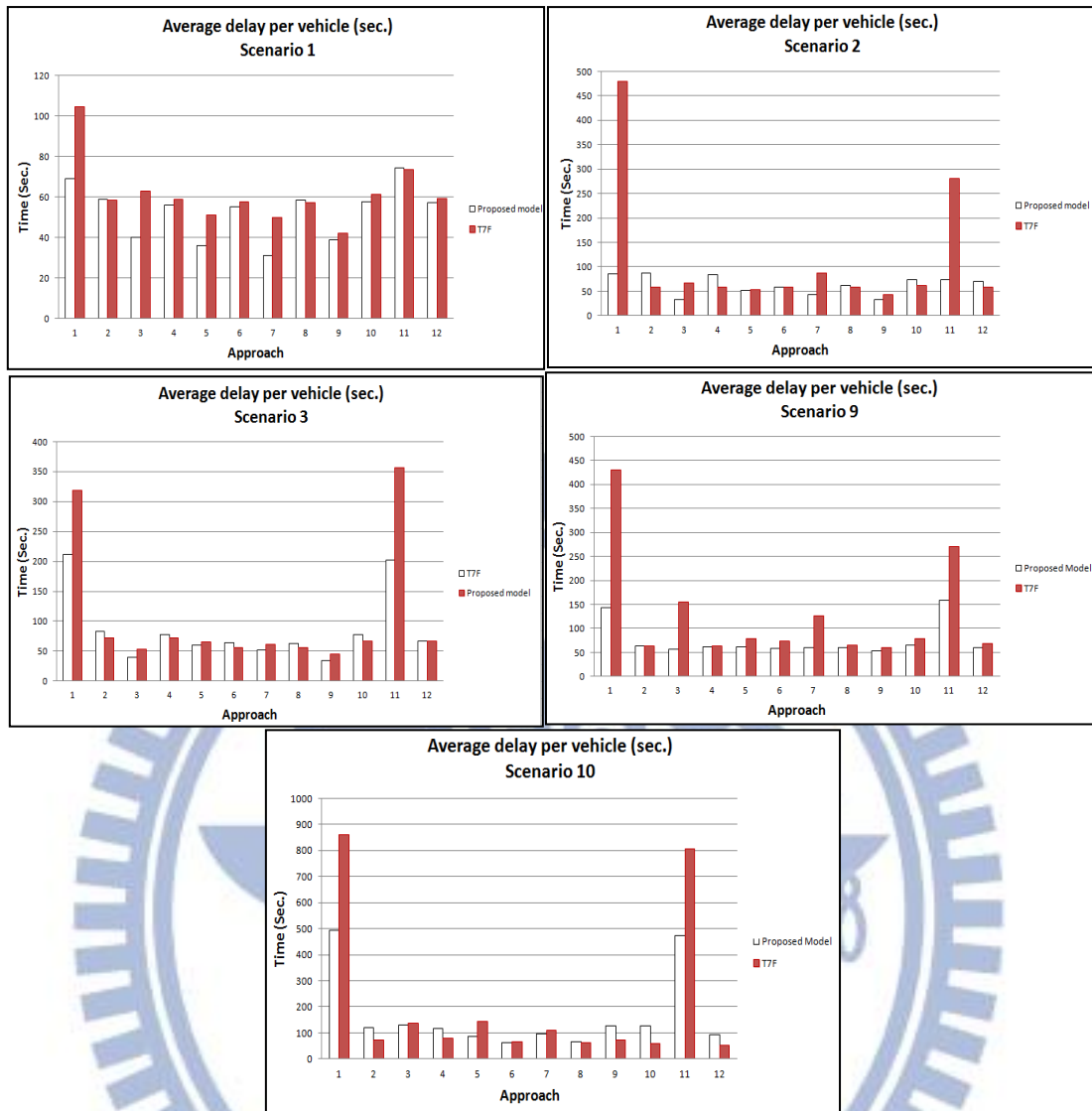


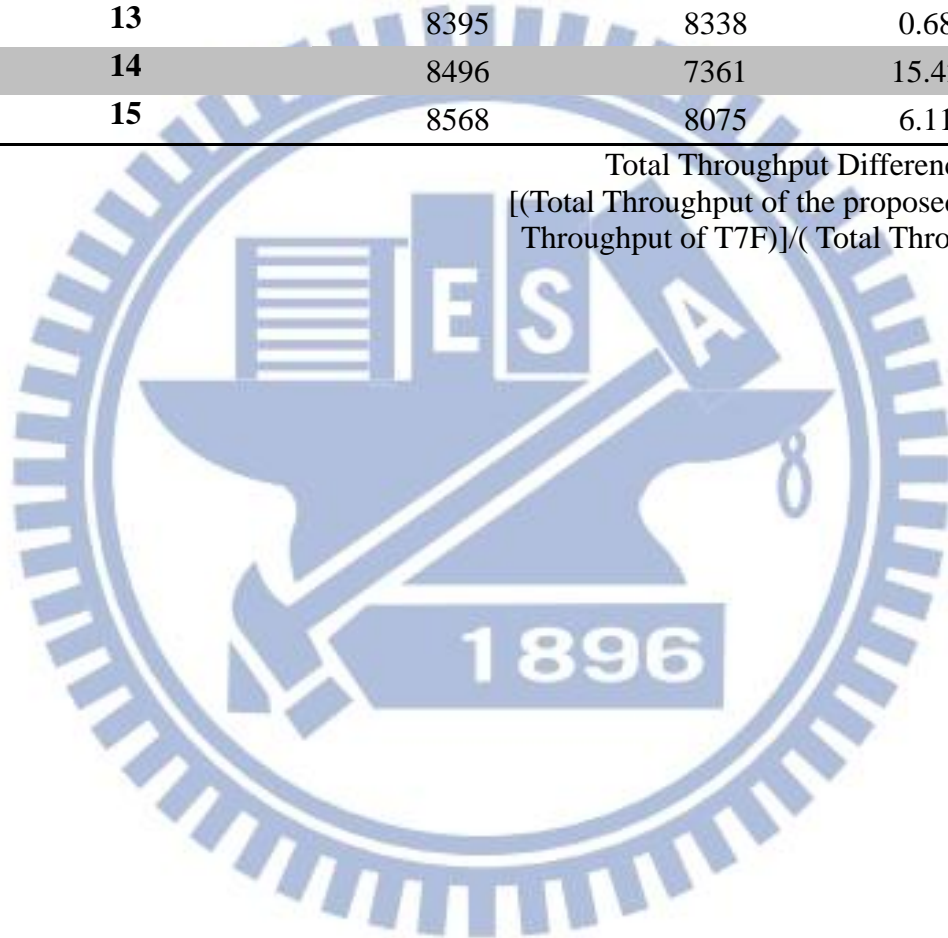
圖 25 各路段平均延滯

表 4 每小時的總通過量

情境	The proposed model	T7F	Diff.
4	8421	8417	0.05%
5	8648	8460	2.22%
6	8863	8570	3.42%
7	9121	8566	6.48%
8	9359	7413	26.25%
11	8394	8123	3.34%
12	8284	8040	3.03%
13	8395	8338	0.68%
14	8496	7361	15.42%
15	8568	8075	6.11%

Total Throughput Difference percentage =

$$\frac{[(\text{Total Throughput of the proposed model}) - (\text{Total Throughput of T7F})]}{(\text{Total Throughput of T7F})}$$



4.1.1 是否採用 PCE 的比較結果

本模式是否採用 PCE 之比較結果如下：

1. 由表 5 可以看出，當大車比例為 0.3 時，採用 PCE 造成車道堵塞的路段較多，而當大車比例慢慢增加時，有無採用 PCE 在車道回堵路段數方面是差不多的。
2. 由圖 26 可以看出，在大多數的路段，採用 PCE 的模式造成的平均延滯均大於未採用 PCE 的模式。
3. 由表 6 可以看出，當需求量小時，採用 PCE 與未採用 PCE 的模式，在通過量方面無明顯差異，但當需求量越高時，採用 PCE 的模式之每小時總通過量均小於未採用 PCE 的模式。



表 5 平均延滯差異百分比

單位: %

路 段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
情境 16	-25.4 x	-51.9 o	-24.9	-18.7	1.3	-5.1	0.9	1.6	-58.5 o	-57.0 o	-48.2 o	-33.4 o
情境 17	-68.2 oo	-67.3 oo	-63.1 o x	-71.0 oo	-37.7 o	-45.3 oo	-35.5 oo	-41.0 oo x	-68.1 o	-70.0 oo x	-70.4 oo x	-69.3 oo
情境 18	-44.6 oo x	-58.3 oo	-50.0 o x	-62.1 oo x	-64.3 o x	-15.0 o	-42.8 o x	-28.8 o x	-60.6 o x	-61.5 o x	-37.1 oo x	-50.0 o
情境 24	-5.4	-7.4	-6.5	-0.5	-8.7	-11.1 o	-16.7	-10.6 o x	6.9	8.5	4.2 x	-3.1
情境 25	-1.5 o x	-18.0 o x	5.9 o x	-17.7 o x	-53.8 o x	-18.0 o x	-38.3 o x	-41.8 o x	22.0 o x	-3.3 o x	-2.9 o x	-9.5 o x
情境 26	-7.9 oo xx	-22.1 oo xx	-14.1 o x	0.3 oo xx	-66.5 o x	11.3 o xx	-61.2 o x	4.5 o x	47.3 o x	-5.7 oo xx	-21.9 oo xx	11.8 o xx
情境 32	-54.3 o x	-69.5 o x	-66.3 o x	-62.9 o x	1.4 o x	-58.7 o x	-26.2 o x	-29.2 o x	-60.7 o x	-68.3 o x	-59.5 o x	-63.6 o x
情境 33	-62.2 oo xx	-23.8 oo xx	-24.5 o x	-24.4 oo xx	-36.9 o x	-19.7 oo xx	-51.3 o x	0.7 oo xx	-20.6 o x	-19.1 oo xx	-66.0 oo xx	-34.9 oo xx

Adopting PCE occurs lane blockage: o

Adopting PCE occurs lane blockage and
spillback: oo

Non adopting PCE occurs lane blockage: x

Non adopting PCE occurs lane blockage
and spillback: xx
$$\text{Delay Difference percentage} = [(\text{Delay of non adopting PCE}) - (\text{Delay of adopting PCE})] / (\text{Delay of adopting PCE})$$

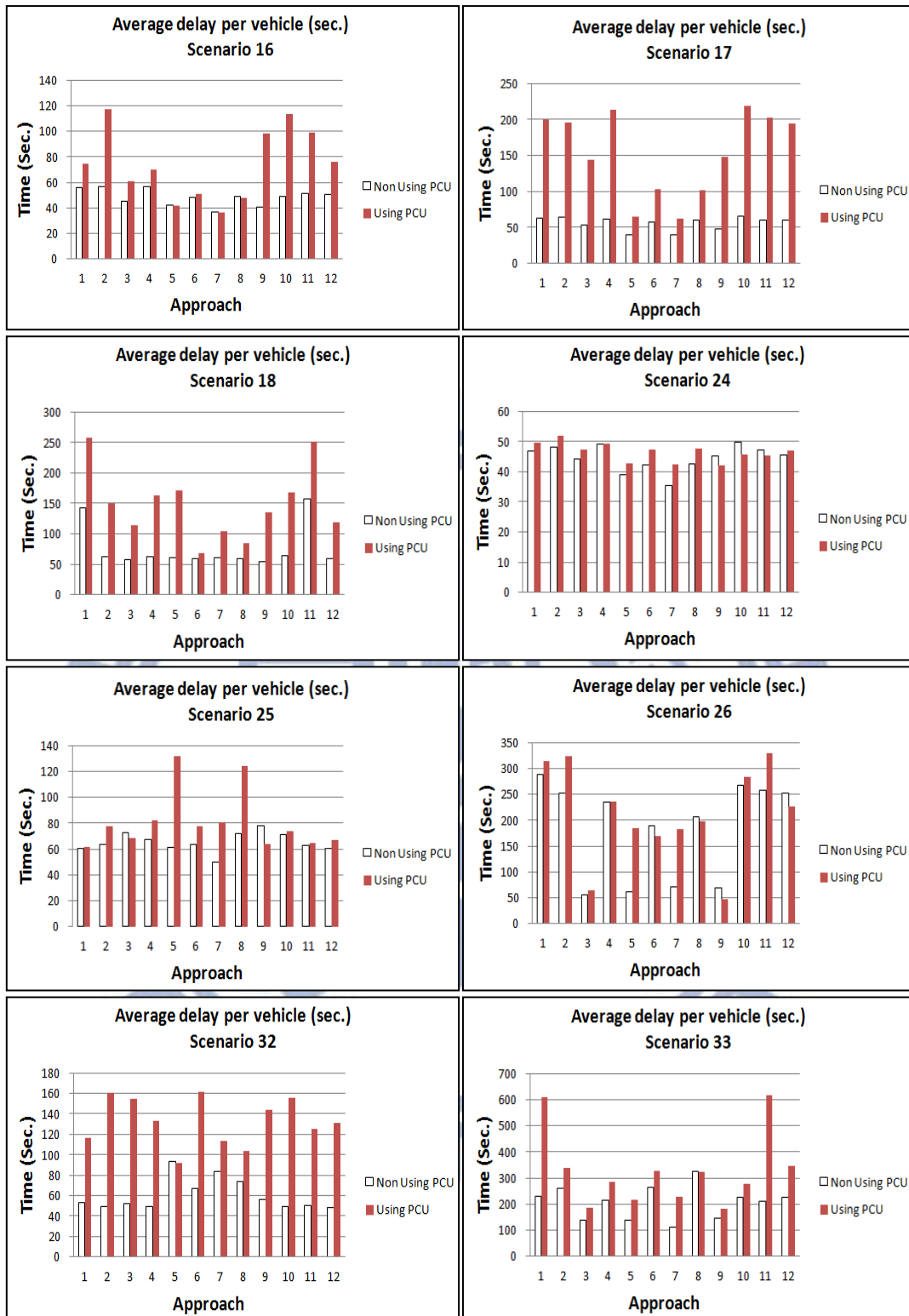


圖 26 各路段平均延滯

表 6 每小時的總通過量

情境	Non adopting PCE	Adopting PCE	Diff.
19	8394	8321	0.88%
20	8284	8284	0%
21	8514	8260	3.08%
22	8496	8121	4.62%
23	8568	8176	4.79%
27	8107	8149	-0.52%
28	7645	7645	0%
29	7972	7711	3.38%
30	7944	7608	4.42%
31	7921	7543	5.01%
34	7599	7562	0.49%
35	7418	7003	5.93%
36	7372	7043	4.67%
37	7331	6953	5.44%
38	7355	6995	5.15%

Total Throughput Difference percentage =

$$\frac{[(\text{Total Throughput of the non adopting PCE}) - (\text{Total Throughput of adopting PCE})]}{(\text{Total Throughput of adopting PCE})}$$

4.1.2 與 TRANSYT 14 的比較結果

TRANSYT 14 有兩種模式可以採用，一種是 PDM，一種是 CTM。本研究與 PDM 以及 CTM 比較的結果如下：

1. PDM

本模式與 TRANSYT 14 之 PDM 模式之比較結果如下：

- (1) 由表 7 可以看出，在單一車種時，TRANSYT 14 之 PDM 模式在三個情境下造成車道堵塞的路段之數量均大於本研究之模式。
- (2) 由圖 27 可以看出，當第 1 與第 11 路段進來的流量越多時，TRANSYT 14 與本模式之平均每車延滯的差異也越大。

表 7 平均延滯差異百分比

單位: %

路段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
情境 39	-8.71 o	-17.93 o	-32.47 o	-20.84 o	-40.26 o	-22.02 o	-43.39 o	-17 o	-34.01 o	-21.67 o	-3.72 o	-18.63 o
											x	
情境 40	-23.21 o x	14.65 o	-45.90 o	5.24 o x	-22.46 o x	-23.35 o	-32.37 o	-20.6 o	-47.32 o	-6.81 o	-39.72 o	-12.79 o
											x	
情境 41	-44.15 oo xx	-3.47 o x	-35.99 o	-6.23 o	-23.11 o	-20.98 o	-28.78 o	-22.97 o	-43.47 o	-10.62 o	-41.89 oo xx	-20.98 o

TRANSYT 14 occurs lane blockage: o
 TRANSYT 14 occurs lane blockage and
 spillback: oo
 Proposed model occurs lane blockage: x
 Proposed model occurs lane blockage
 and spillback: xx
 $\text{Delay Difference percentage} = [(\text{Delay of proposed model}) - (\text{Delay of TRANSYT 14})] / (\text{Delay of TRANSYT 14})$

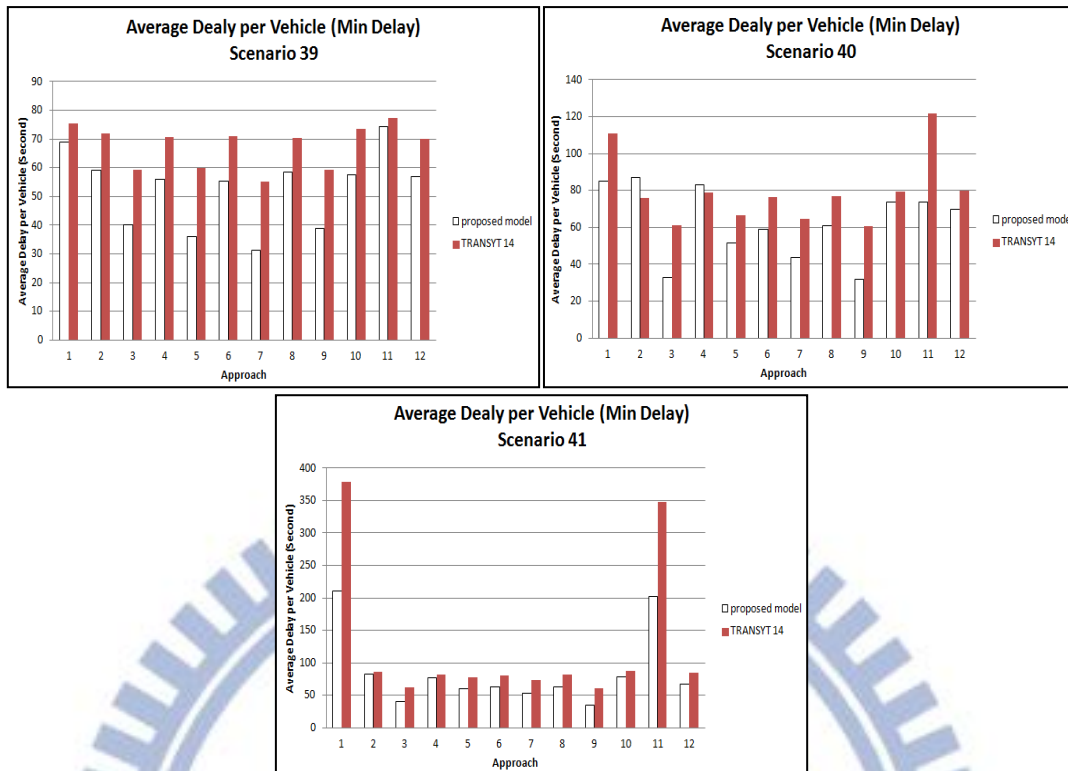


圖 27 各路段平均延滯

2. CTM

本模式與 TRANSYT 14 之 CTM 模式之比較結果如下：

- (1) 由表 8 可以看出，在單一車種時，TRANSYT 14 之 CTM 模式在三個情境下造成車道堵塞的路段之數量均大於本研究之模式。
- (2) 由表 8 可以看出，在單一車種時，TRANSYT 14 之 CTM 模式在三個情境下造成車道回堵之路段數量均大於本研究之模式。
- (3) 由圖 28 可以看出，在大多數路段，TRANSYT 14 之平均每車延滯均較本研究之模式為大。

表 8 平均延滯差異百分比

單位: %

路段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
情境 39	-94.32 oo	-90.46 oo	-85.13 o	-91.45 oo	-89.33 o	-91.22 oo	-92.49 o	-91.41 oo	-86.69 o	-57.99 oo	-94.13 oo x	-1.46 o
情境 40	-91.01 oo x	59.93	-89.19 o	50.02 x	8.76 o x	-55.85 oo	-38.2 o	-60.08 o	-32.16 o	21.71	-48.48 o x	7.34 o
情境 41	-85.78 oo xx	48.82 x	-88.01 o	36.06	-2.64 o x	-72.43 oo	-80.79 o	-21.09 o	-44.92 o	-57.52 oo	-68.23 oo xx	-8.05 o

TRANSYT 14 occurs lane blockage: o
 TRANSYT 14 occurs lane blockage and
 spillback: oo
 Proposed model occurs lane blockage: x
 Proposed model occurs lane blockage
 and spillback: xx
 $\text{Delay Difference percentage} = [(\text{Delay of proposed model}) - (\text{Delay of TRANSYT 14})] / (\text{Delay of TRANSYT 14})$

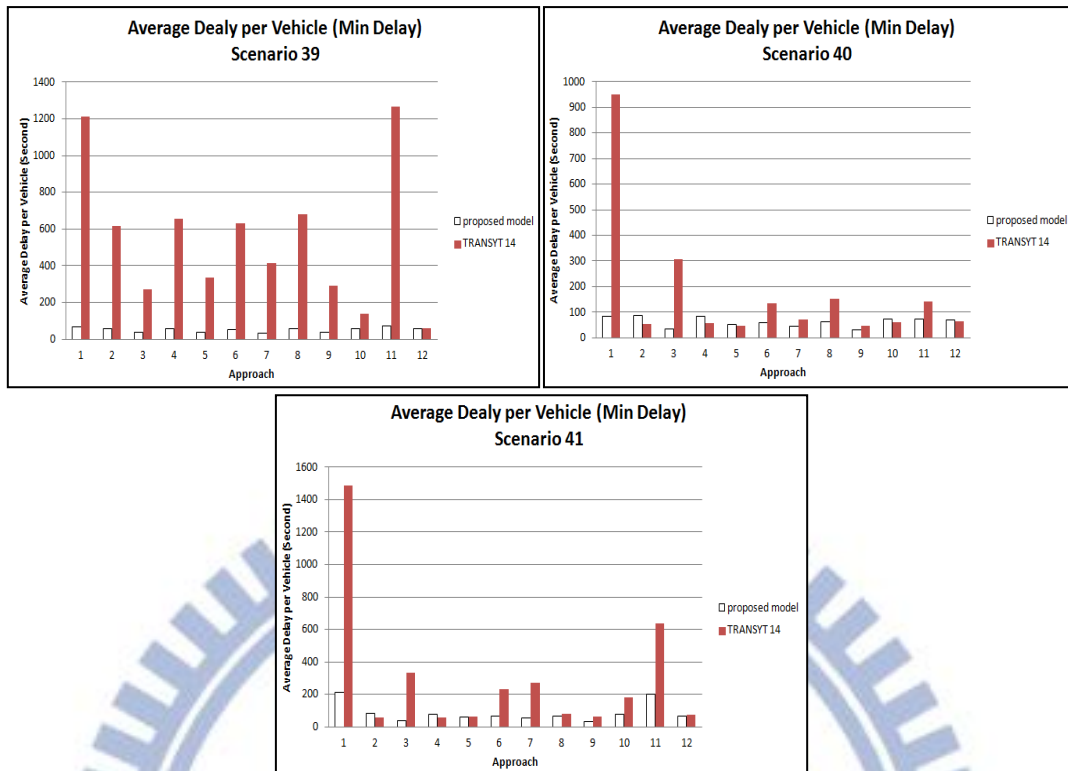


圖 28 各路段平均延滯

4.2 單一車種的複合式路網(市區幹道與高速公路)

複合式路網的參數如表 9。路網與時相如圖 29。測試情境如表 10。路段與車道編號如圖 30。目標式為最小化延滯的結果如 4.2.1 小節所示，目標式為最大化通過量的結果如 4.2.2 小節所示。

表 9 複合式路網參數

項 目	數 值
最小綠燈時間	15 秒(直行/右轉時相) 10 秒(左轉時相)
最大週期	150 秒
飽和流率	1600 輛/小時/車道 (市區幹道) 2000 輛/小時/車道 (高速公路)
自由車流速度	40 英里/小時 (市區幹道) 65 英里/小時 (高速公路)
黃燈時間	3 秒
擁擠密度	130.4 輛/公里/車道 (210 輛/英里/車道)
小汽車車長	5.5 公尺 (18.04 英尺)
轉向比	0.3(左轉) 0.5(直行) 0.2(右轉)
下匝道車輛比例	0.3
左轉道長度	64 公尺
減速車道長度	300 公尺
匝道長度	300 公尺
市區幹道路段長度	372 公尺

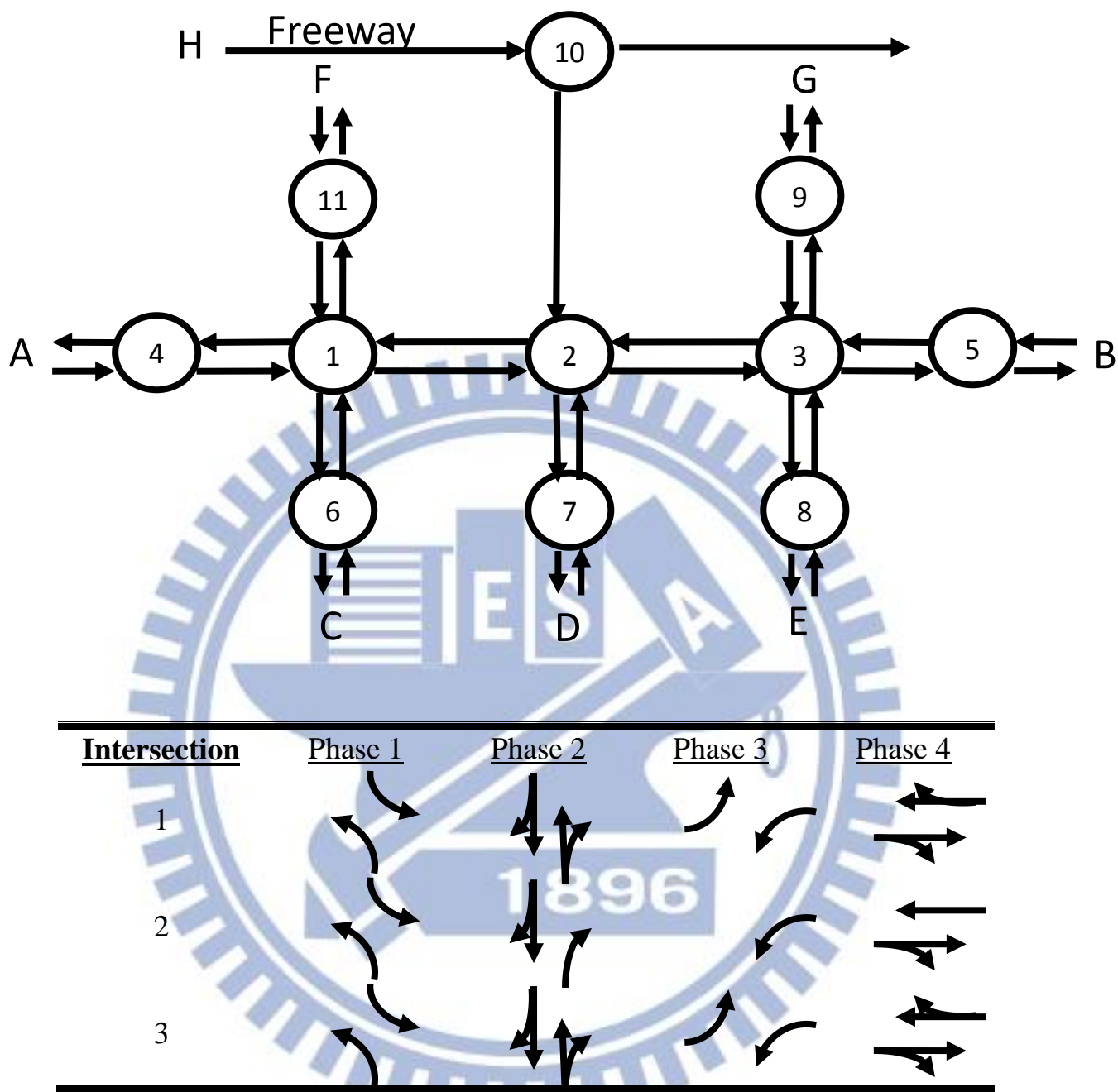
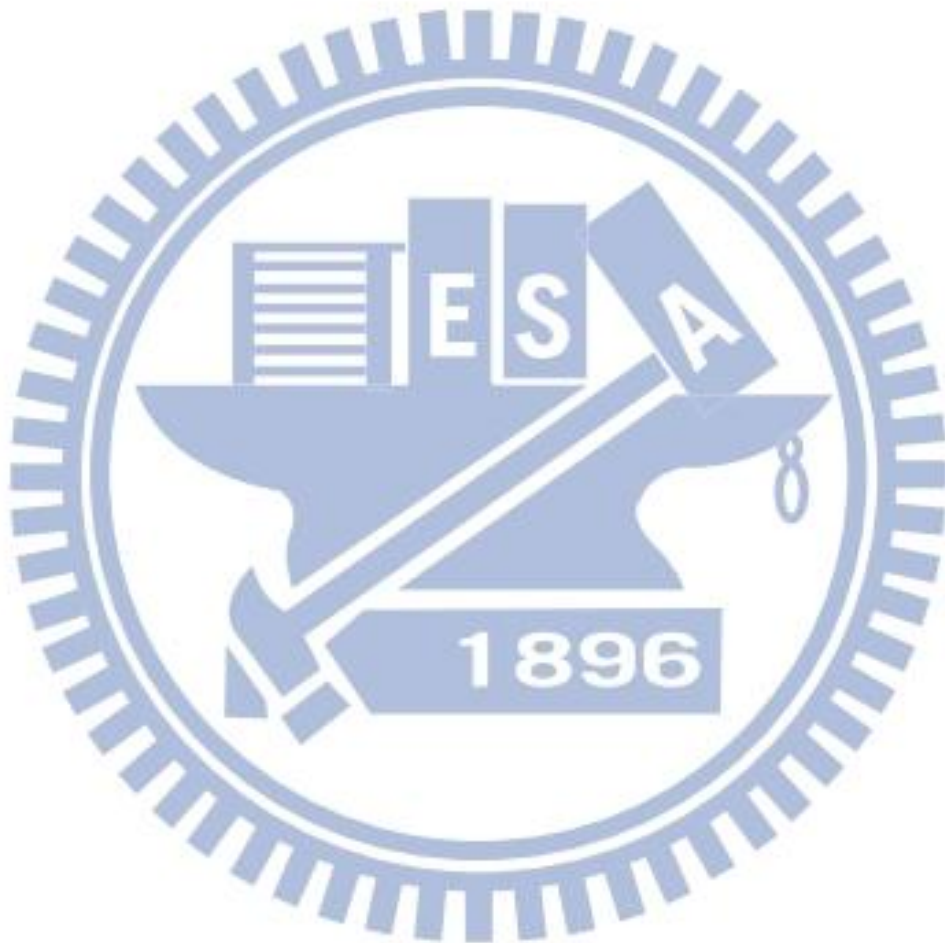


圖 29 路網與號誌時相

表 10 測試情境

情境	需求 (vph/lane)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	600	600	500	500	500	500	500	600
2	600	600	500	500	500	500	500	800
3	600	600	500	500	500	500	500	1000
4	600	600	500	500	500	500	500	1200
5	600	600	500	500	500	500	500	1400
6	600	600	500	500	500	500	500	1600
7	600	600	500	500	500	500	500	1800
8	600	600	500	500	500	500	500	2000



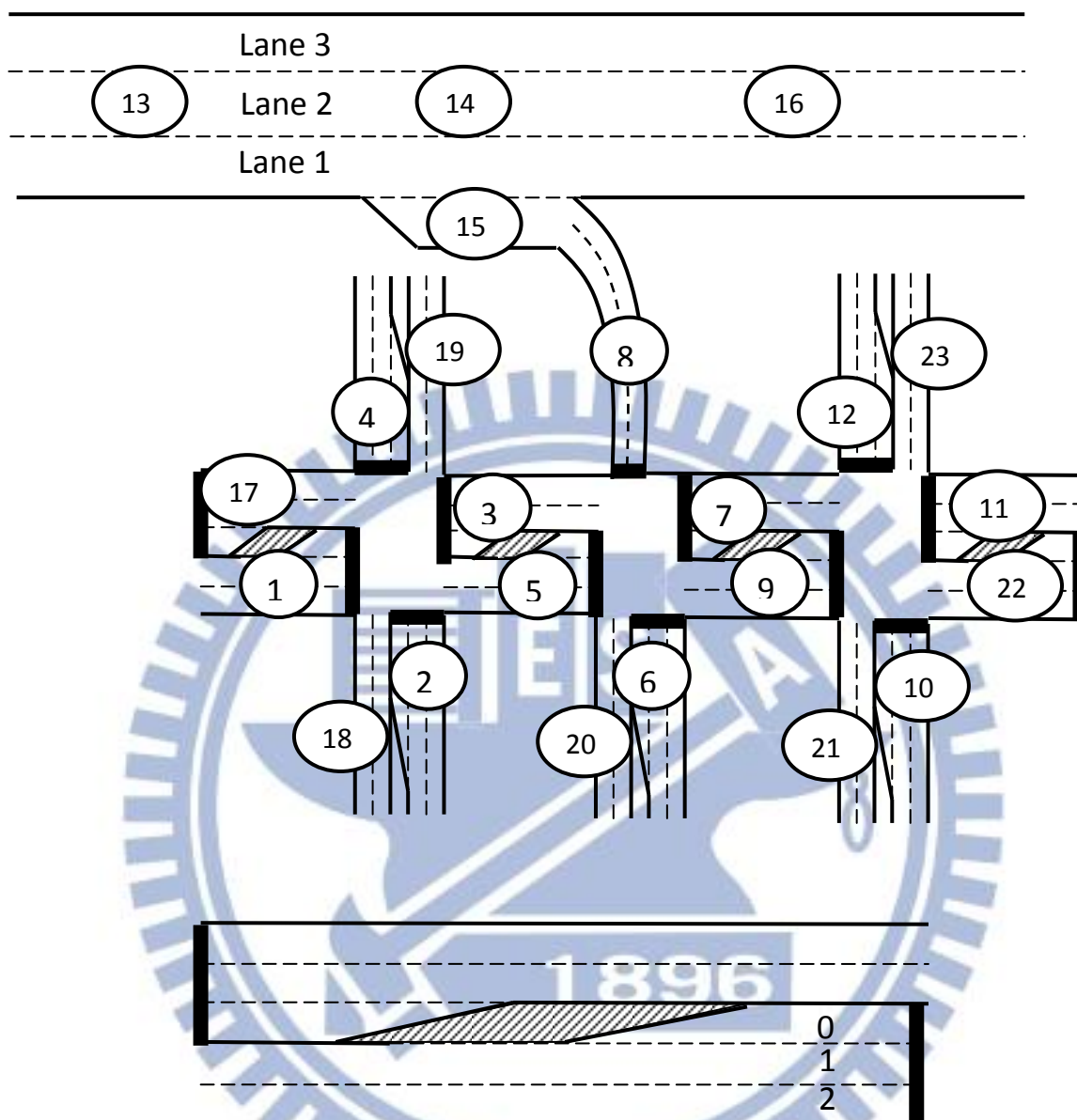


圖 30 路段與車道編號

4.2.1 最小化延滯

平均每輛車延滯如圖 31 所示。整合式模式與非整合式模式之每車延滯之差異比較表如表 15。不同情境間的比較如圖 32 至圖 37。

是否採用整合式模式之比較結果如下：

- (1) 由圖 31 可以看出，當高速公路需求低時，整合與非整合模式的市區幹道之平均延滯均較高，而當高速公路流量增加時，整合與非整合式模式的高速公路平均延滯則開始增加並超越市區幹道的平均延滯。
- (2) 由圖 31 可以看出，當高速公路流量增加時，在高速公路路段的平均延滯方面，整合模式較非整合模式來得小。
- (3) 由表 15 可以看出，當採用整合式模式時，市區幹道路段之平均每車延滯雖然會增加一點，不過高速公路路段的平均每車延滯會減少許多，因此整體路網的平均每車延滯仍然比使用非整合式模式低。
- (4) 由圖 32 可以看出，當高速公路需求量較低(600vphpl)時，整合與非整合模式在整體路網的平均延滯方面無太大差異。當高速公路需求量增加時，則此差異越來越大。直到高速公路需求量超過 1600vphpl 時，則此差異又開始減小。
- (5) 由圖 33 至圖 37 可以看出，採用整合式模式時，高速公路的通過量會增加，但市區幹道的通過量則與採用非整合式模式無異。
- (6) 由圖 37 可以看出，當高速公路需求量較低(600vphpl)時，整合與非整合模式在整體路網的每小時總通過量方面無太大差異。當高速公路需求量增加時，則此差異越來越大。直到高速公路需求量超過 1600vphpl 時，則此差異又開始減小。

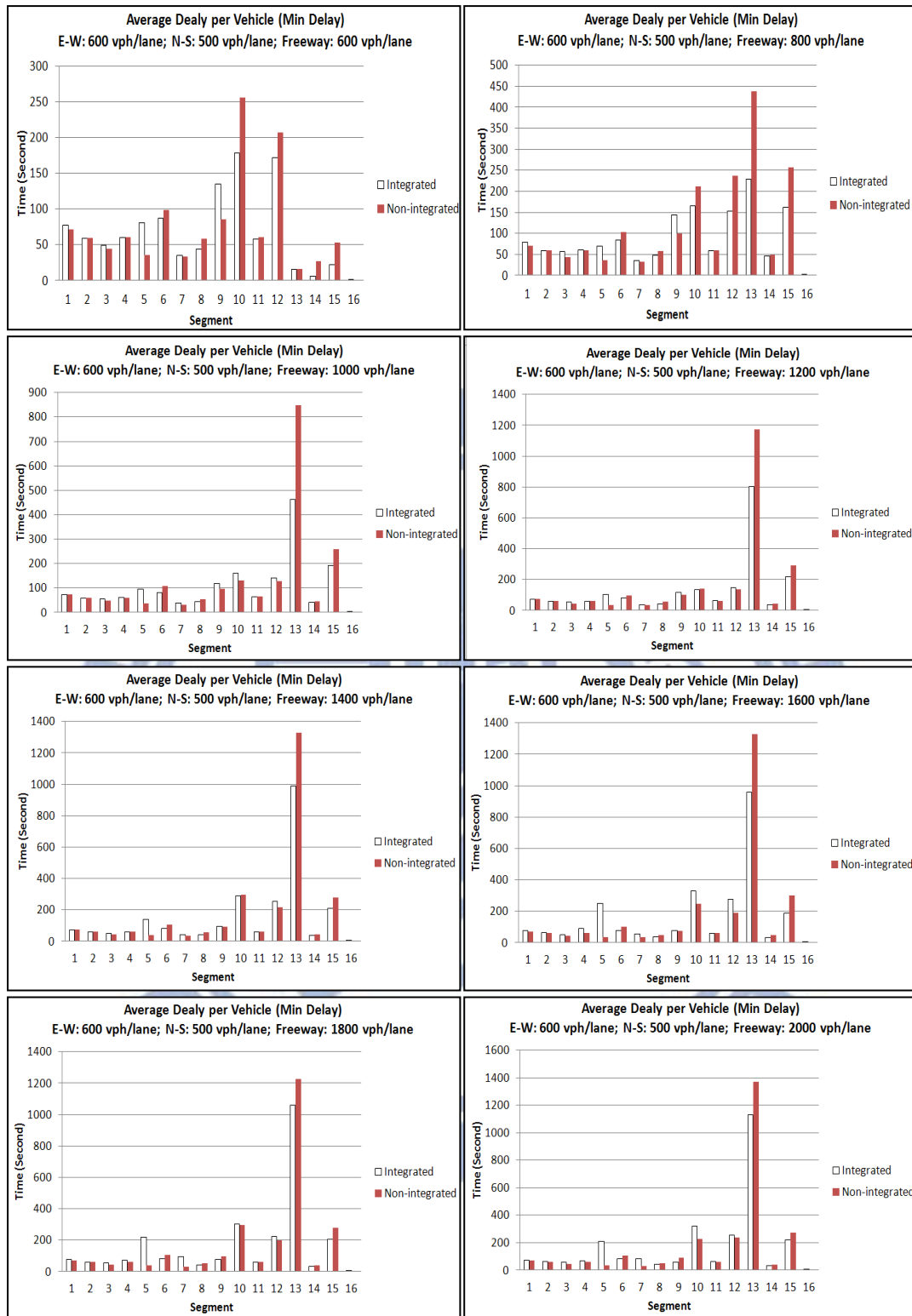


圖 31 平均每車延滯比較圖

表 11 整合式模式與非整合式模式之平均每車延滯之差異

單位:分鐘

情境	Arterial 1*	Arterial 2**	Diff (%)	Freeway 1*	Freeway 2**	Diff (%)	Network 1*	Network 2**	Diff (%)
1	1.36	1.30	5.38	0.14	0.22	-39.72	0.86	0.86	0.36
2	1.35	1.25	8.09	1.04	1.86	-44.27	1.23	1.55	-20.58
3	1.33	1.21	9.66	2.31	3.77	-38.65	1.82	2.41	-24.44
4	1.36	1.24	9.64	3.79	5.92	-35.96	2.58	3.45	-25.24
5	1.49	1.27	17.09	5.23	8.00	-34.63	3.41	4.48	-23.89
6	1.62	1.34	20.62	6.60	9.44	-30.08	4.21	5.26	-20.01
7	1.66	1.31	27.35	8.08	10.65	-24.09	4.99	5.83	-14.33
8	1.61	1.27	26.81	9.95	11.90	-16.40	5.85	6.34	-7.63

*1: Integrated

**2: Non-integrated



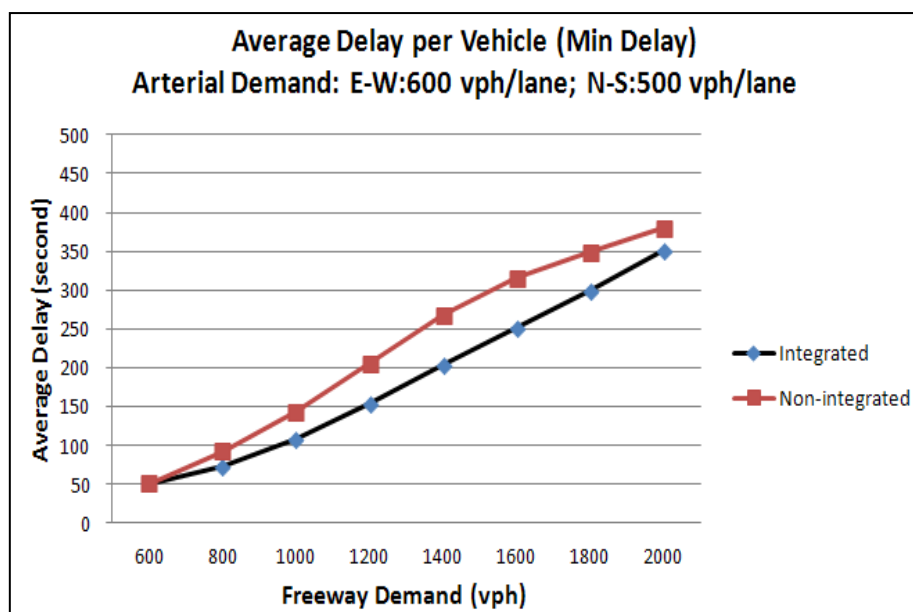


圖 32 平均每車延滯

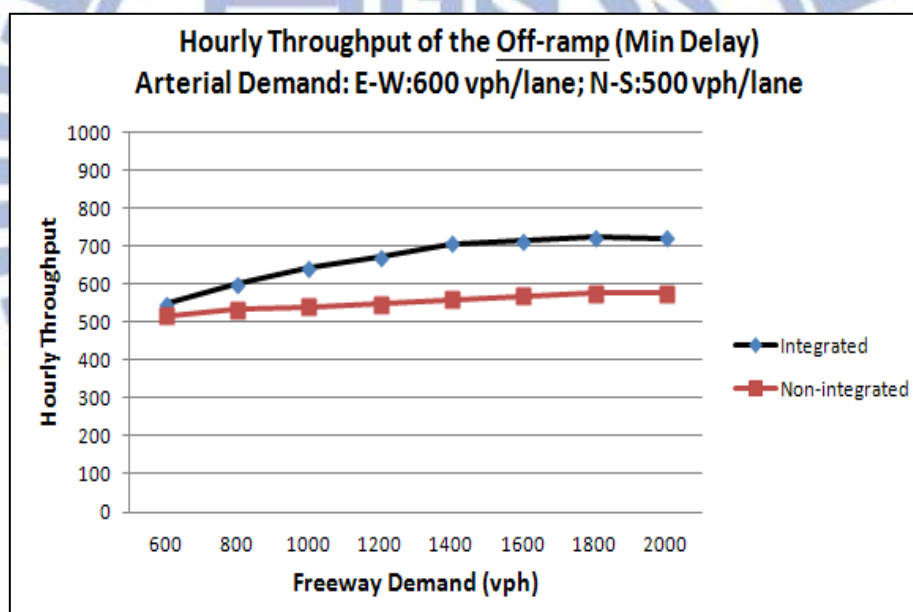


圖 33 下匝道路段之每小時通過量

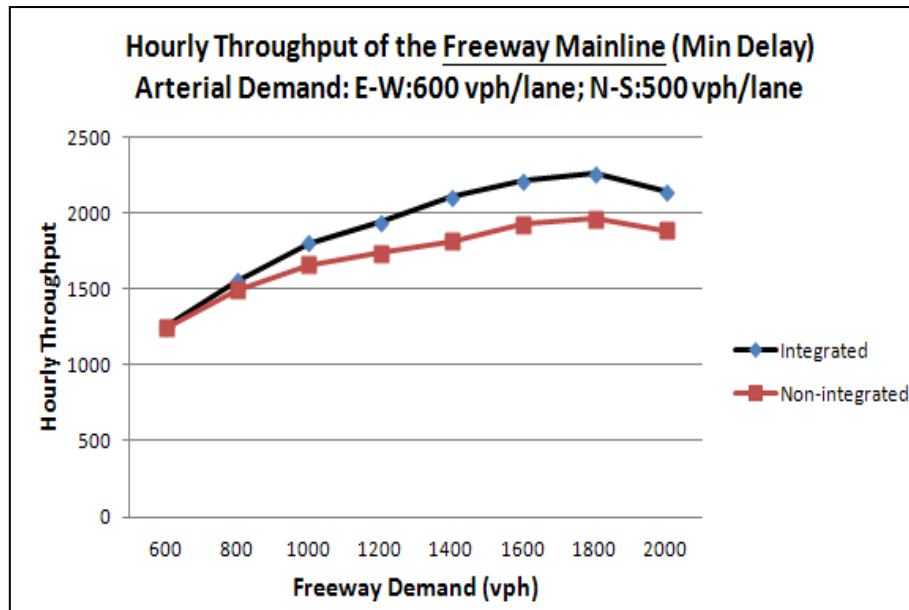


圖 34 高速公路主線之每小時通過量

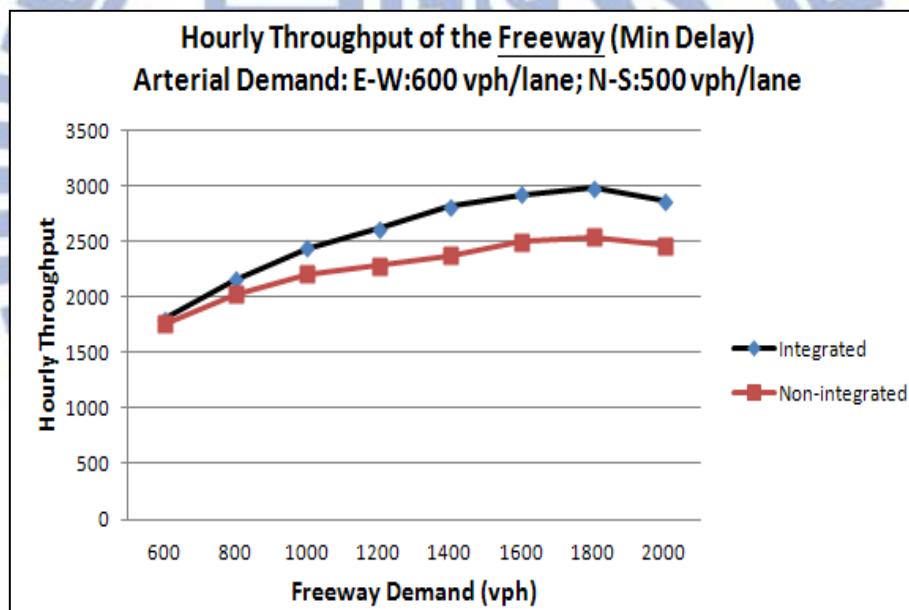


圖 35 高速公路之每小時通過量

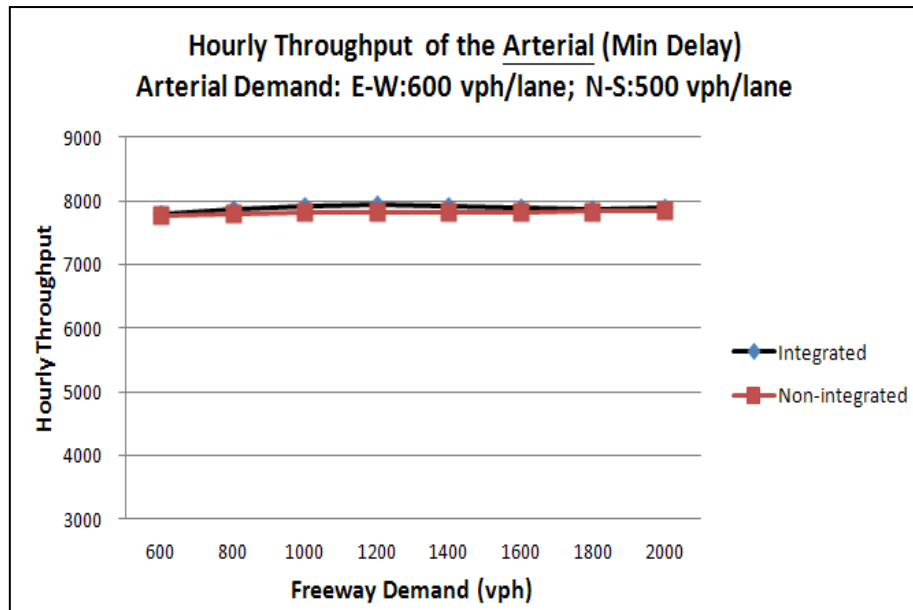


圖 36 市區幹道之每小時通過量

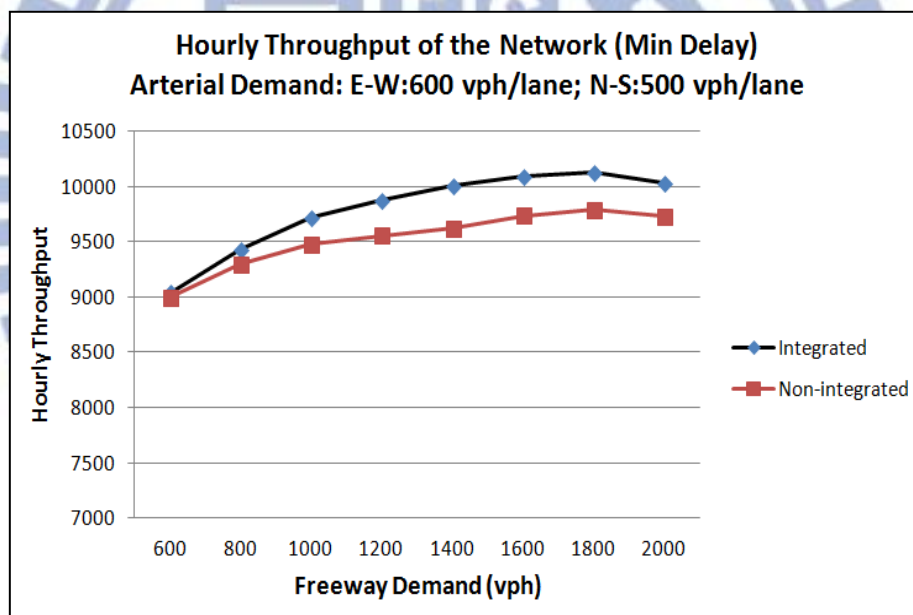


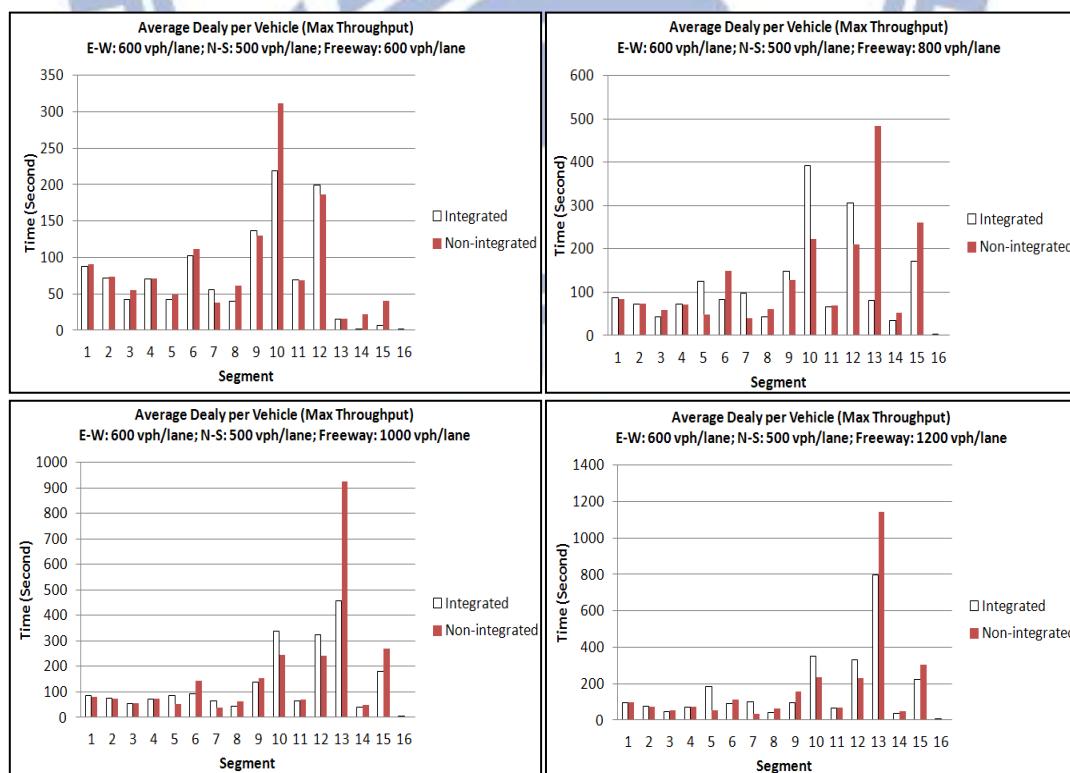
圖 37 整體路網之每小時通過量

4.2.2 最大化總通過量

平均每輛車延滯如圖 38 所示。整合式模式與非整合式模式之每車延滯之差異比較表如表 12。不同情境間的比較如圖 39 至圖 44。

當目標式採取最大化總通過量時，其結論與採用最小化總延滯一致：

- (1) 由圖 38 可以看出，當高速公路需求低時，整合與非整合模式的市區幹道之平均延滯均較高，而當高速公路流量增加時，整合與非整合式模式的高速公路平均延滯則開始增加並超越市區幹道的平均延滯。
- (2) 由圖 38 可以看出，當高速公路流量增加時，在高速公路路段的平均延滯方面，整合模式較非整合模式來得小。
- (3) 由表 17 可以看出，當採用整合式模式時，市區幹道路段之平均每車延滯雖然會增加一點，不過高速公路路段的平均每車延滯會減少許多，因此整體路網的平均每車延滯仍然比使用非整合式模式低。
- (4) 由圖 39 可以看出，當高速公路需求量較低(600vphpl)時，整合與非整合模式在整體路網的平均延滯方面無太大差異。當高速公路需求量增加時，則此差異越來越大。直到高速公路需求量超過 1600vphpl 時，則此差異又開始減小。
- (5) 由圖 40 至圖 44 可以看出，採用整合式模式時，高速公路的通過量會增加，但市區幹道的通過量則與採用非整合式模式無異。
- (6) 由圖 44 可以看出，當高速公路需求量較低(600vphpl)時，整合與非整合模式在整體路網的每小時總通過量方面無太大差異。當高速公路需求量增加時，則此差異越來越大。直到高速公路需求量超過 1600vphpl 時，則此差異又開始減小。



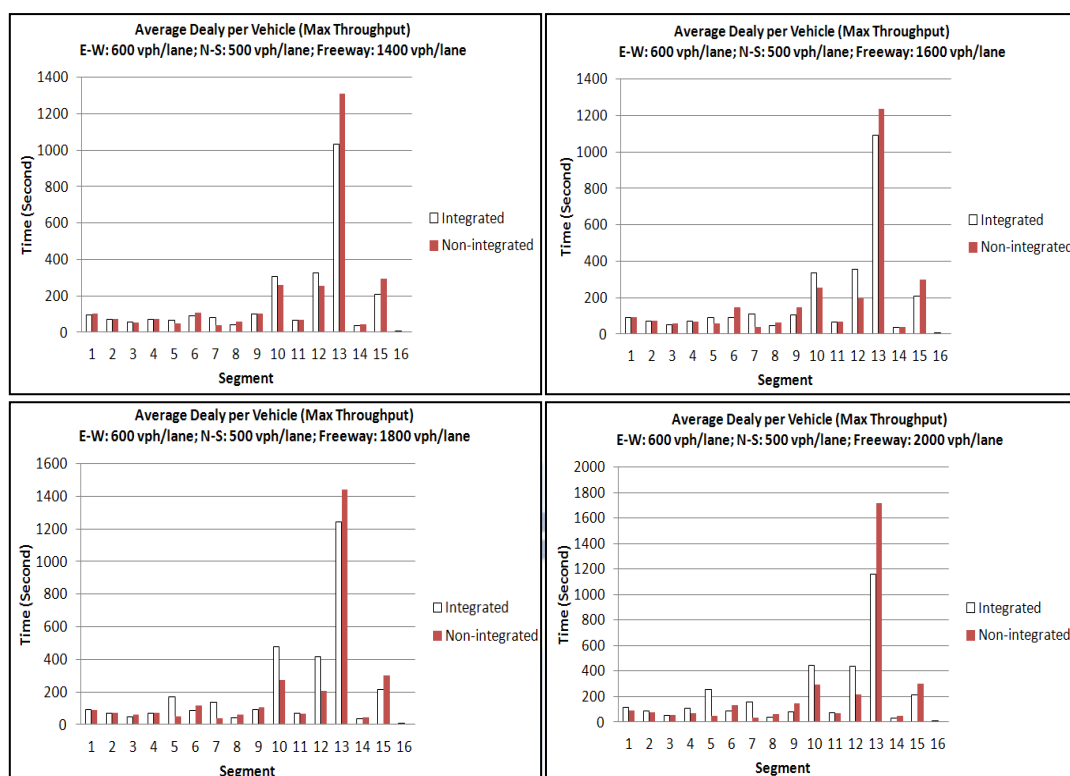


圖 38 平均每車延滯比較圖

表 12 整合式模式與非整合式模式之平均每車延滯之差異

單位:分鐘

情境	Arterial 1*	Arterial 2**	Diff (%)	Freeway 1*	Freeway 2**	Diff (%)	Network 1*	Network 2**	Diff (%)
1	1.47	1.62	-9.29	0.11	0.20	-46.35	0.91	1.04	-12.42
2	1.67	1.60	4.27	0.83	1.99	-58.10	1.31	1.80	-27.48
3	1.77	1.59	11.21	2.08	3.84	-45.99	1.94	2.64	-26.56
4	1.68	1.58	6.15	3.94	5.90	-33.19	2.82	3.62	-22.28
5	1.67	1.59	5.25	5.85	7.64	-23.37	3.79	4.51	-15.87
6	1.73	1.56	10.55	7.79	9.64	-19.19	4.79	5.46	-12.32
7	1.88	1.54	22.03	9.25	10.91	-15.26	5.61	6.06	-7.54
8	2.00	1.42	40.34	10.46	11.95	-12.51	6.29	6.48	-2.83

*1: Integrated

**2: Non-integrated

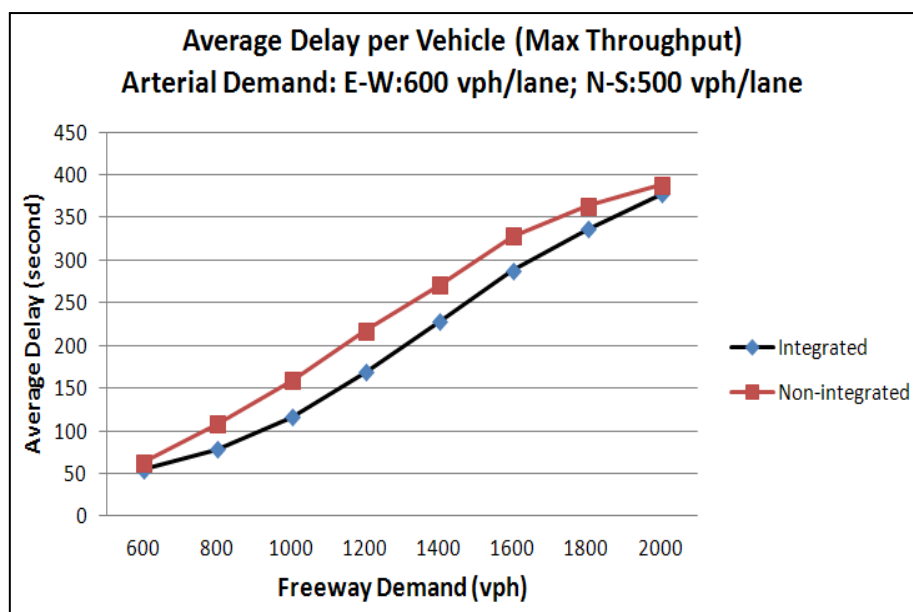


圖 39 平均每車延滯

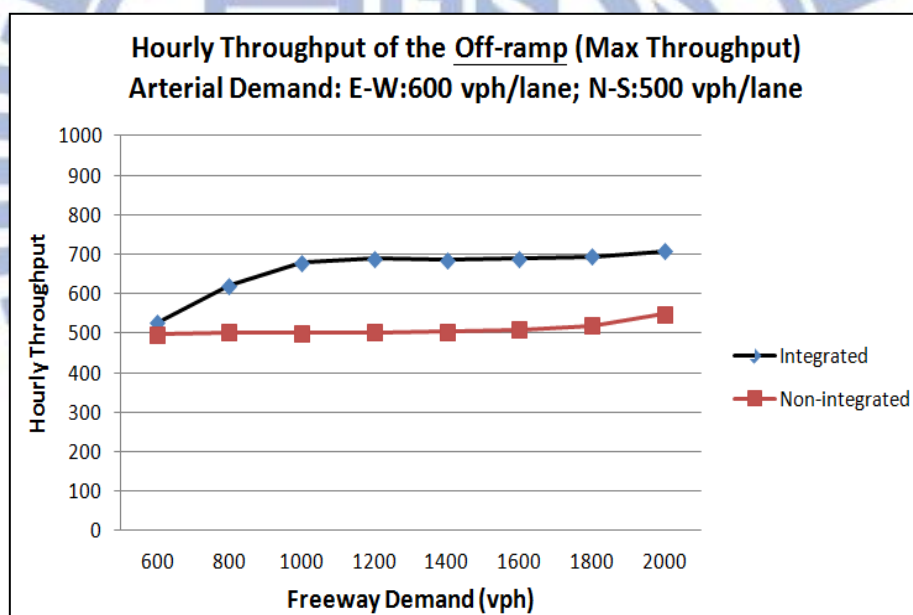


圖 40 下匝道路段之每小時通過量

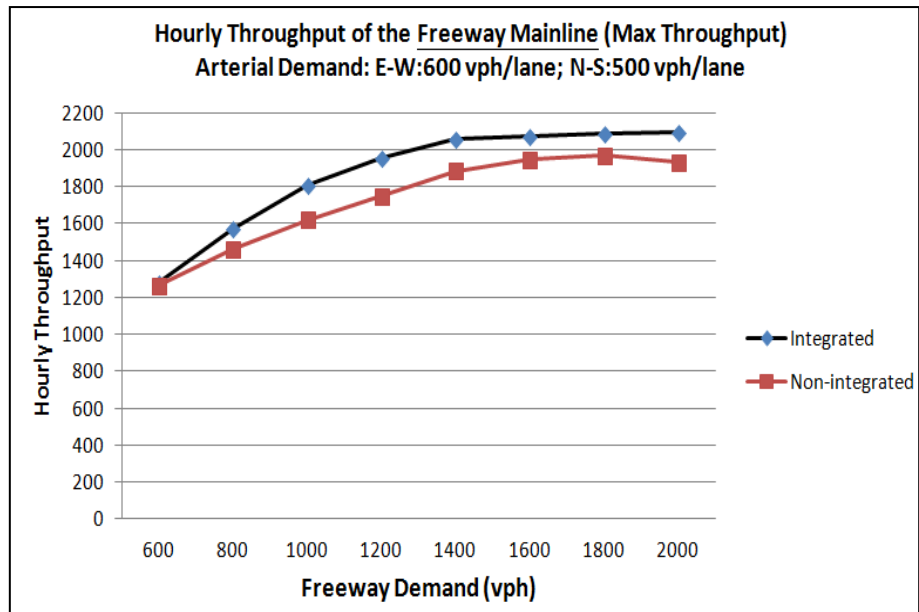


圖 41 高速公路主線之每小時通過量

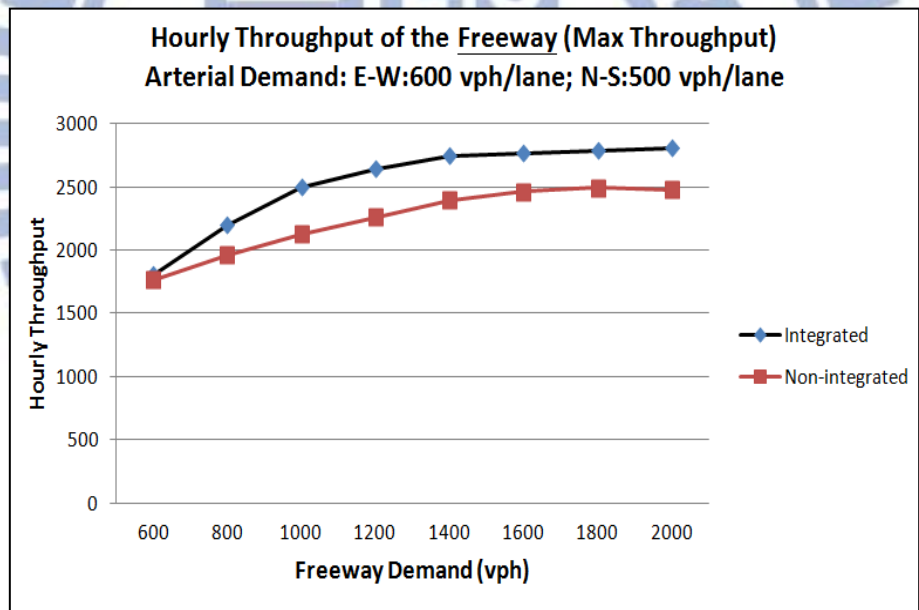


圖 42 高速公路之每小時通過量

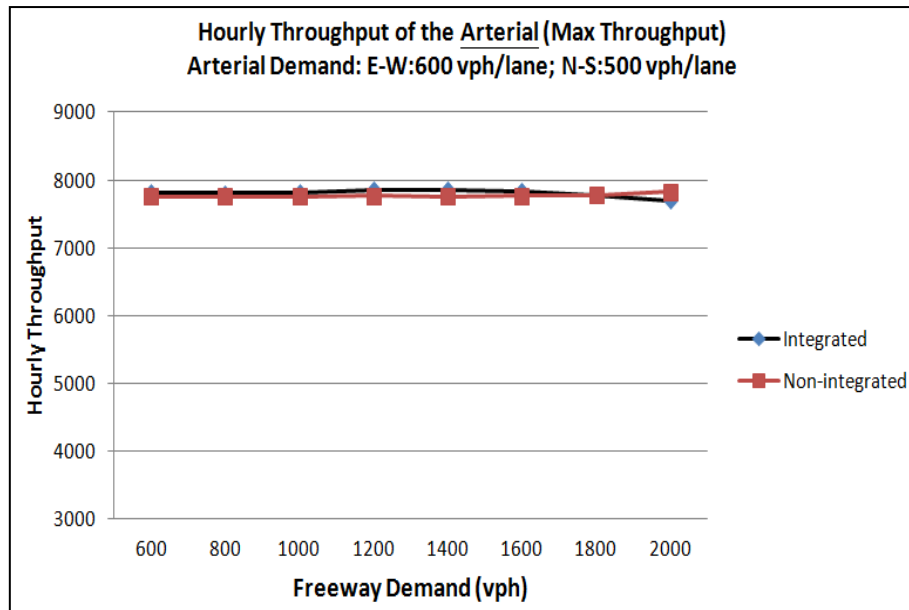


圖 43 市區幹道之每小時通過量

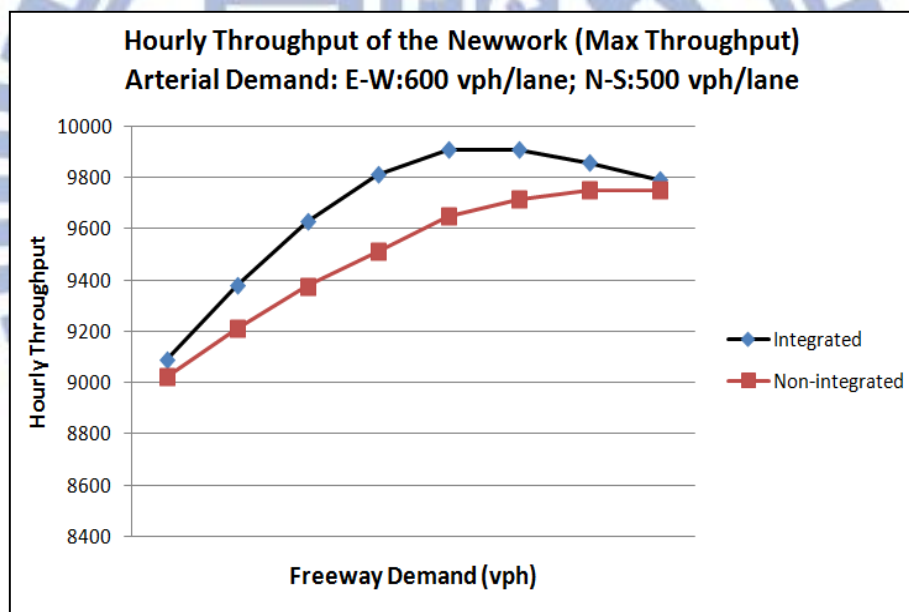


圖 44 整體路網之每小時通過量

4.2.3 最小化延滯與最大化總通過量之比較

此節主要在比較整合式模式採取不同的目標式之差異。平均每車延滯之差異如圖 45。下匝道路段每小時總通過量之差異如圖 46。高速公路主線路段每小時總通過量如圖 47。市區幹道路段每小時總通過量如圖 48。整體路網每小時總通過量如圖 49。由圖 45 至圖 49 可知採用兩種目標式的結果無明顯差異。

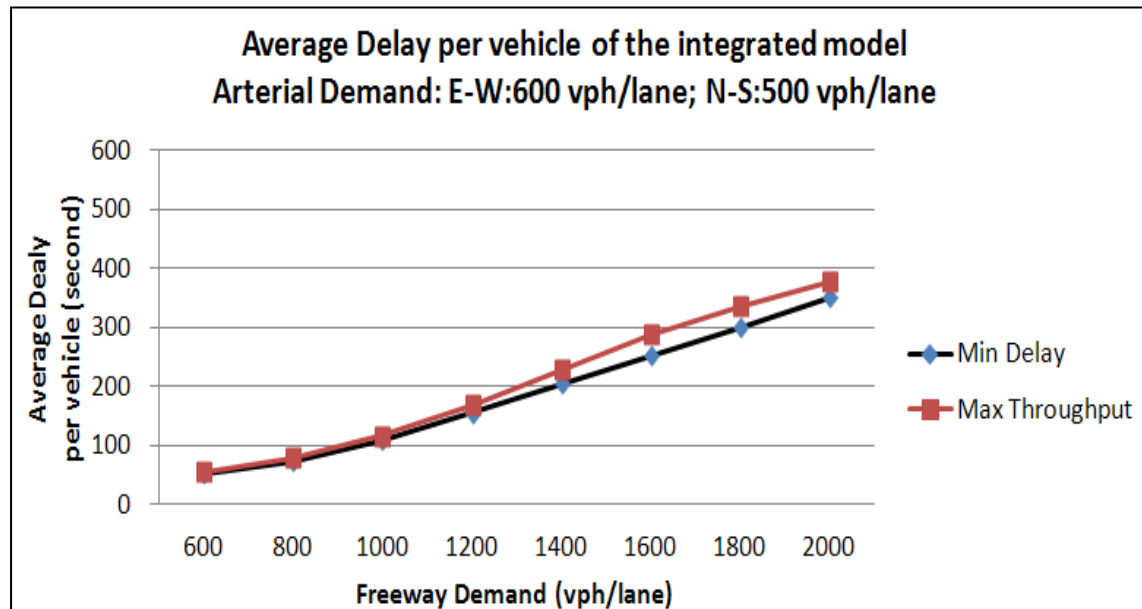


圖 45 平均每車延滯

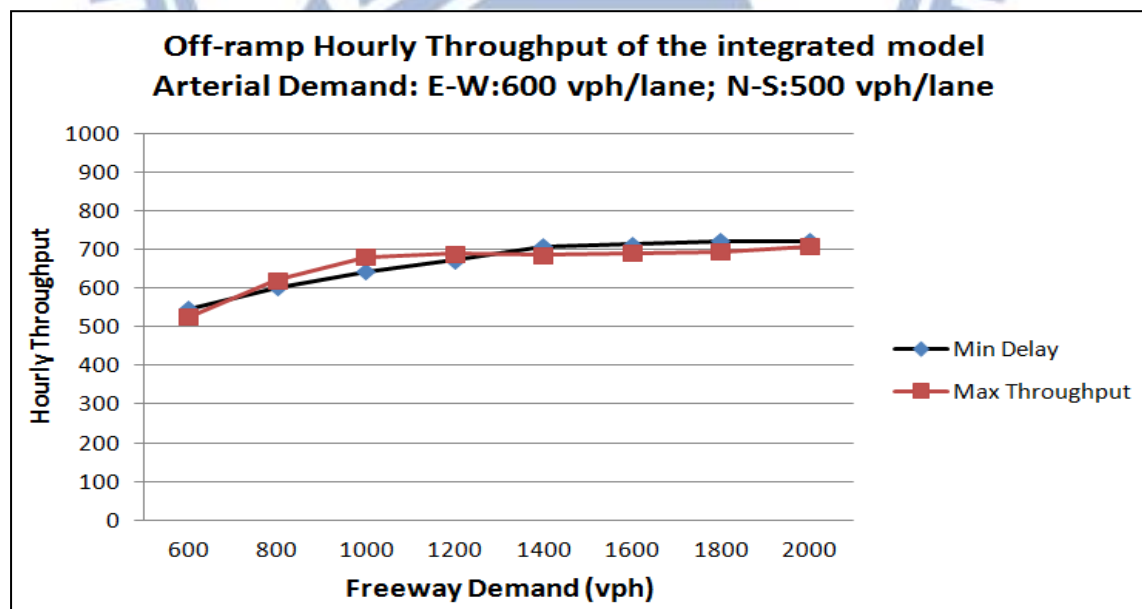


圖 46 下匝道之每小時總通過量

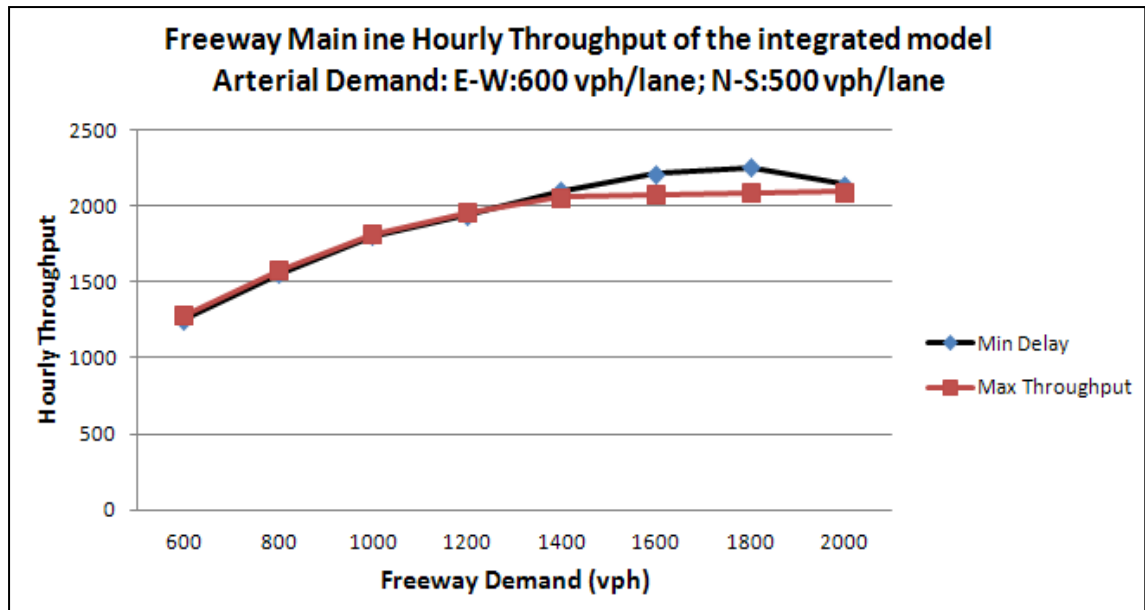


圖 47 高速公路主線之每小時總通過量

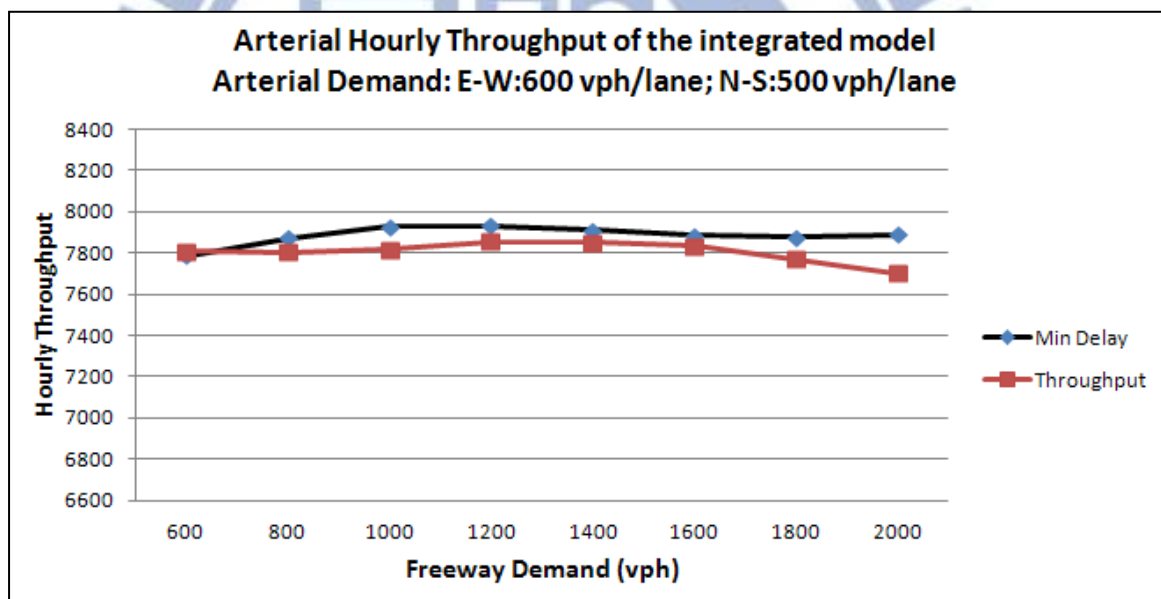


圖 48 市區幹道之每小時總通過量

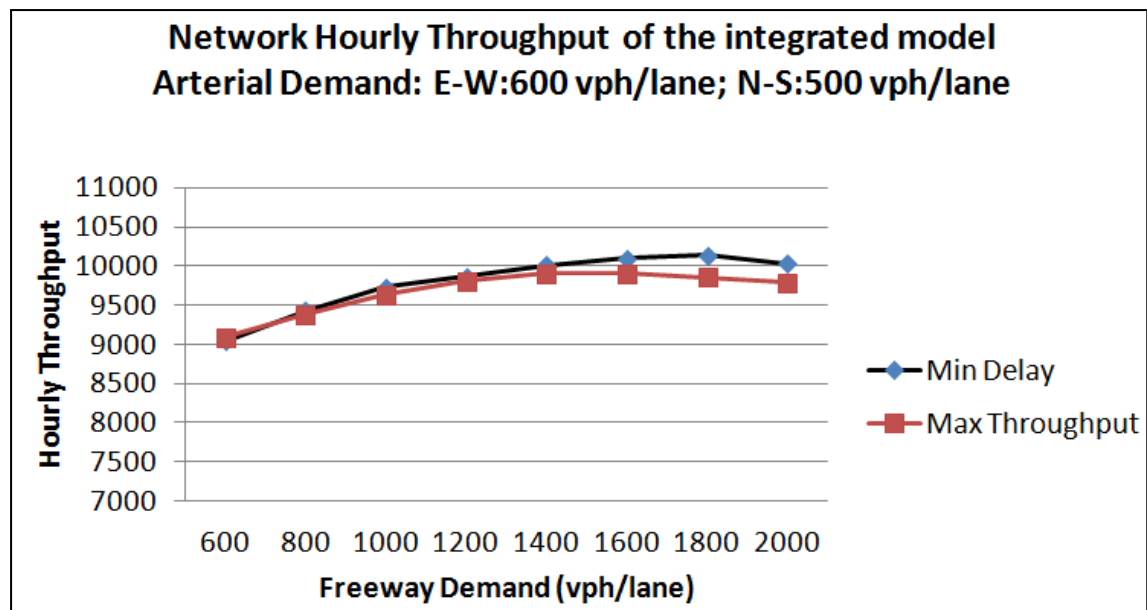


圖 49 整體路網之每小時總通過量



4.3 實際路網(竹北交流道)

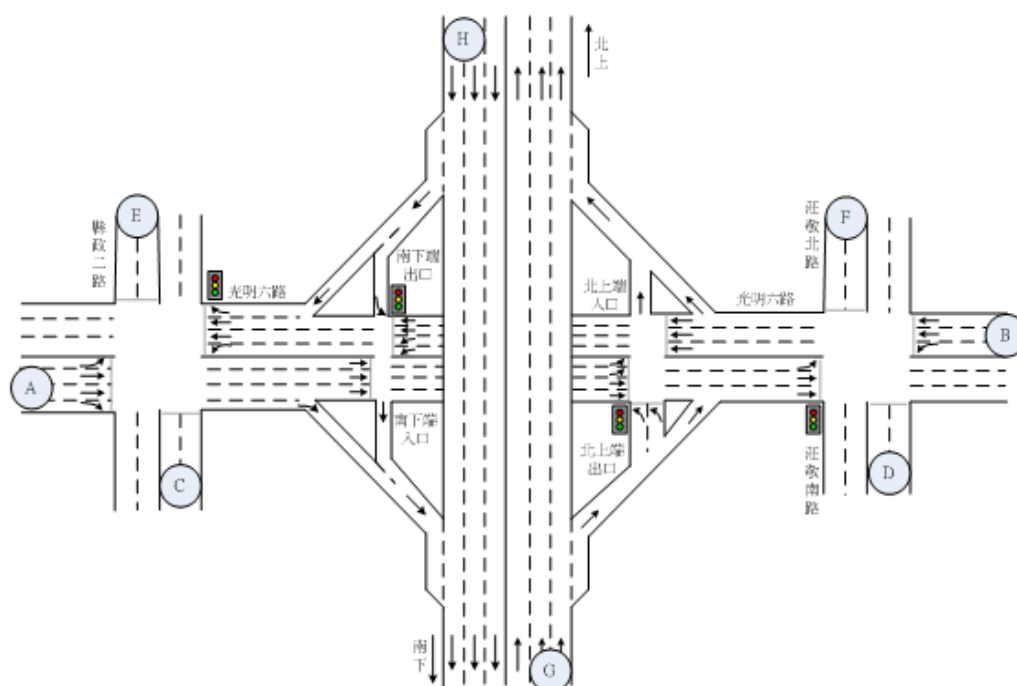
每到下班時間，總是有許多車輛經由國道一號由新竹往竹北，因此這地區之壅塞情形嚴重。本小節以竹北交流道之實際案例，比較本模式與 TRANSYT-14 之績效，由 4.2 小節可知，TRANSYT-14 中，PDM 模式之績效比 CTM 為佳，因此本節使用 TRANSYT-14 中之 PDM 模式為比較對象。竹北交流道之參數如表 13。路網與時相如圖 50。各路段實際需求如表 14。路段與車道編號如圖 51。

表 13 竹北交流道路網參數

項 目	數 值
最小綠燈時間	15 秒(直行/右轉時相) 10 秒(左轉時相)
最大週期	200 秒
飽和流率	1600 輛/小時/車道 (市區幹道) 2000 輛/小時/車道 (高速公路)
自由車流速度	38 英里/小時 (市區幹道) 60 英里/小時 (高速公路)
黃燈時間	3 秒
擁擠密度	130.4 輛/公里/車道 (210 輛/英里/車道)
小汽車車長	5.5 公尺 (18.04 英呎)
下匝道車輛比例	0.3(北上)；0.25(南下)

表 14 實際路段需求

Scenario	Demand entries (vph/lane)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	375	390	265	458	537	353	2000	1575



Intersec.	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1				
2				
3				
4				

圖 50 竹北交流道路網與路口號誌時相

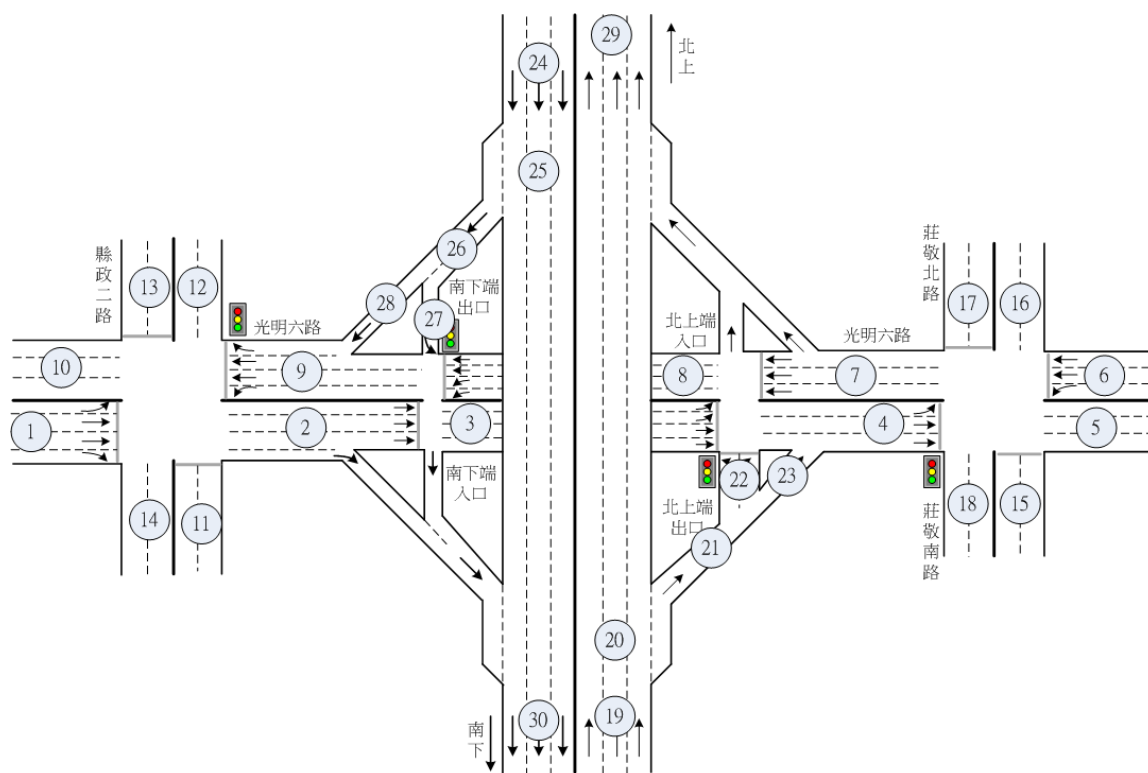


圖 51 竹北交流道路段編號



本模式與 TRANSYT 14 之平均每車延滯如圖 52 與表 15 所示，。路網邊界路段之每小時通過流量比較圖如圖 53 所示。

由圖 52 可知，本模式於市區路段 1、2、3、11、13 之平均每車延滯均低於 TRANSYT 14，於國道路段 19、20、21、22 之平均每車延滯亦低於 TRANSYT 14 甚多。這幾個路段即為下班時段之壅塞路段。由表 15 可知，在市區部分，本模式之平均每車延滯比 TRANSYT 14 少 68.29%，而高速公路部分，則少 60.6%。

而在通過量方面，由圖 53 可知，不僅都市路段之通過量增加，由於本模式之高速公路路段延滯較 TRANSYT 14 減少甚多，也因此通過量較 TRANSYT 14 為多，由其在北上路段(路段 29)之通過量更是為 TRANSYT 14 之 2.59 倍。而本模式路網之總通過量為 15395 輛/小時，TRANSYT 14 為 11115 輛/小時，總共增加了 38%。

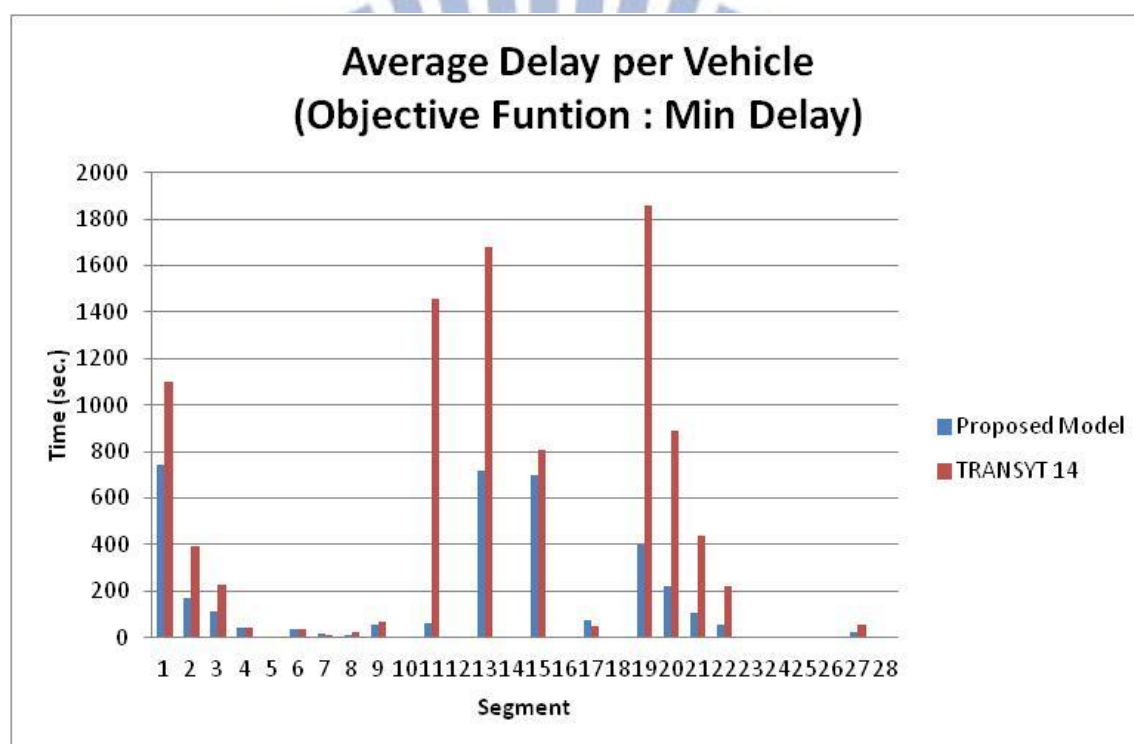


圖 52 竹北交流道之平均每車延滯比較圖

表 15 本模式與 TRANSYT 14 之平均每車延滯之差異

單位:分鐘

Arterial 1*	Arterial 2**	Diff (%)	Freeway 1*	Freeway 2**	Diff (%)	Network 1*	Network 2**	Diff (%)
17.09	53.88	-68.29	18.77	47.64	-60.60	36.41	102.56	-64.49

*1: 本模式

**2: TRANSYT 14

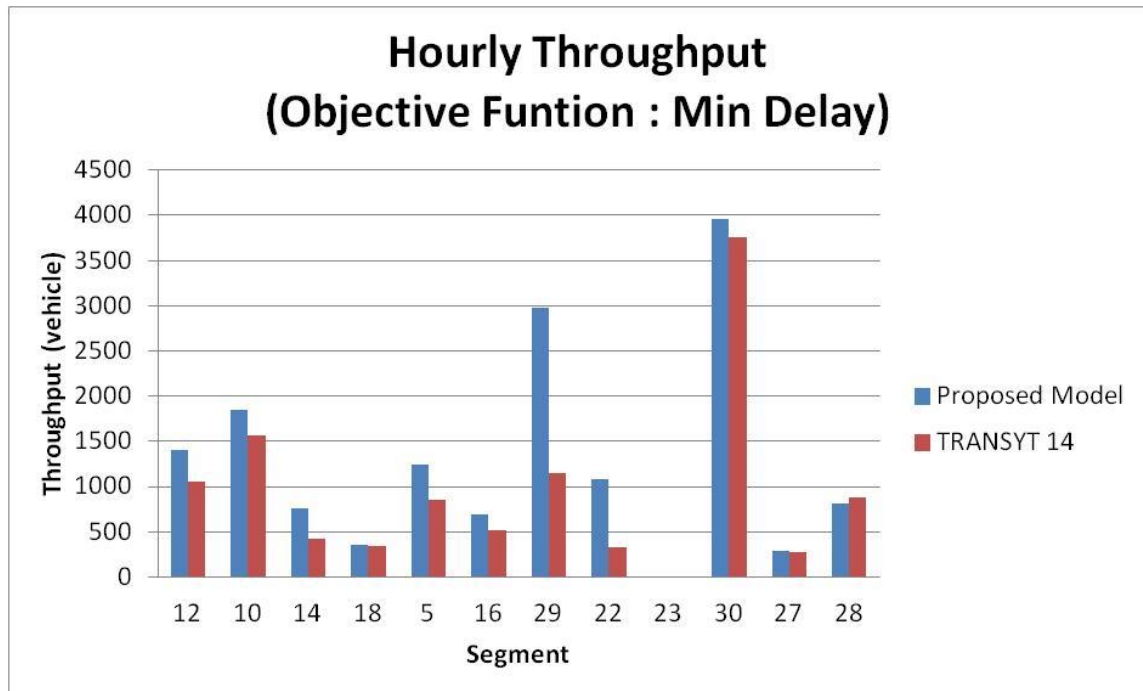


圖 53 竹北交流道路網邊界路段之每小時通過量比較圖

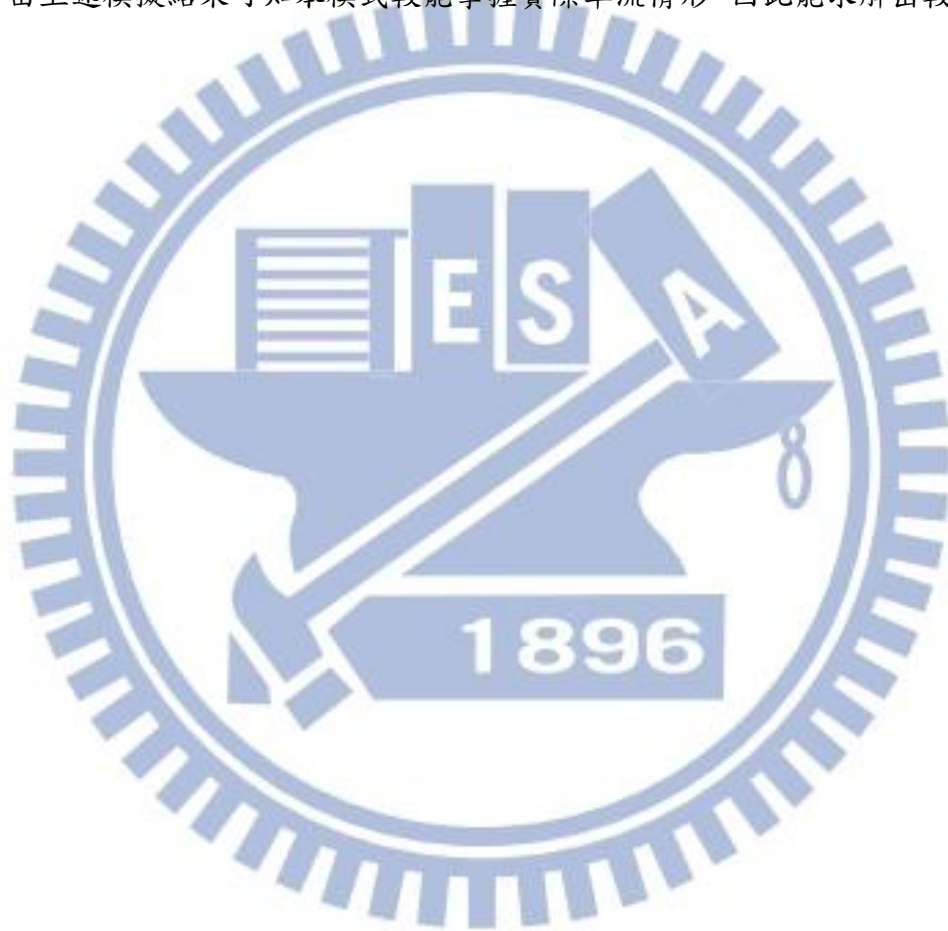


4.4 小結

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。

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。



五、 結論與建議

本研究提出一整合市區幹道與高速公路之號誌最佳化模式，並將過飽和路段可能會發生之車流情形納入模式中，可能之情形包括：

1. 高速公路下匝道之等候隊列回堵至主線時，對主線車流之影響
2. 平面道路路口之等候隊列回堵至上游路口
3. 左轉車道被直行車輛堵塞，導致左轉車需等候下一次的綠燈時相才能消散
4. 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
5. 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情境，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，並兼顧高速公路與平面道路之績效，進而求解出更符合車流狀況之號誌時制。

本研究未將機車納入模式中，未來或可將機車駕駛行為以及機車待轉區納入模式中，如此應能建立一個更適合台灣車流狀況的號誌控制最佳化模式。



參考文獻

- [1] N.H. Gartner, J.D.C. Little, H. Gabbay. “Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed Integer Linear Programming. Part I: the Network Coordination Problem”, Transportation Science, vol. 9, pp. 321–343, 1975.
- [2] N.H. Gartner, J.D.C. Little, H. Gabbay. “Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed Integer Linear Programming. Part II: the Network Synchronization Problem”, Transportation Science, vol. 9, pp. 321–343, 1975.
- [3] N.H. Gartner, S.F. Assmann, F.L. Lasaga, D.L. Hou.. “A Multi- band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization”, Transportation Research Part B, vol. 25, pp. 55–74, 1991.
- [4] G. Abu-Lebdeh, R.F. Benekohal. “Development of a Traffic and Queue Management Procedure for Oversaturated Arterials”, Transportation Research Record, 1603, pp. 119–127, 1997.
- [5] G. Abu-Lebdeh and R.F. Benekohal. “Design and Evaluation of Dynamic Traffic Management Strategies for Congested Conditions”, Transportation Research Part A, 37, pp. 109–127, 2003.
- [6] Denos C. Gazis. “Optimum Control of a System of Oversaturated Intersections”, Operations Research, vol. 12, Special Transportation Science Issue, pp. 815-831, 1964.
- [7] G.C. D’Ans, D.C. Gazis. “Optimal Control of Oversaturated Store and Forward Transportation Networks”, Transportation Science 10, pp. 1–19, 1976.
- [8] Papageorgiou, M.. “An Integrated Control Approach for Traffic Corridors”, Transportation Research Part C, vol. 3, pp. 19–30, 1995.
- [9] Daganzo C.F., “The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory”, Transportation Research Part B: Methodological, vol. 28, pp. 269-287, August 1994.
- [10]H. Lo. “A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plans”, Transportation Science, vol. 35, pp. 148–164, 2001.
- [11]Binning, J.C., Burtenshaw, G., Crabtree, M., TRANSYT 13 User Guide. Transport Research Laboratory, UK, 2008.

- [12] Carlos F. Daganzo, The Cell Transmission Model: Network Traffic, UC Berkeley: California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), 1993.
- [13] Yafeng Yin, "Robust optimal traffic signal timing," Transportation Research Part B: Methodological, vol. 12, pp. 911-924, December 2008.
- [14] Yue Liu, Gang-Len Chang. "An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage", Transportation Research Part C, vol. 19, pp. 130-144, 2011.
- [15] Mariagrazia Dotoli, Maria Pia Fanti, Carlo Meloni. "A signal timing plan formulation for urban traffic control", Control Engineering Practice, vol. 14, pp. 1297-1131, 2006.
- [16] Papageorgiou, Markos, Hadj-Salem, Habib, and Blosseville, Jean-Marc, "ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-ramp Metering," Transportation Research Record 1320, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.58-64, 1991.
- [17] Cassidy, Michael J., Anani, Shadi B., Haigwood, John M., Study of Freeway Traffic Near an Off-ramp, Working Papers, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), Institute of Transportation Studies (UCB), UC Berkeley, 2002.
- [18] Munoz, J. C., Daganzo, C.F., Experimental Characterization of Multi-lane Freeway Traffic Upstream of an Off-ramp Bottleneck. Working Papers, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), Institute of Transportation Studies (UCB), UC Berkeley, 2000
- [19] Liu, Y., Yu, J., Chang, G.L., Rahwanji, S.. "A Lane-group Based Macroscopic Model for Signalized Intersections Account for Shared Lanes and Blockages", In: Proceeding of 11th IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 639-644, 2008.
- [20] Wu, J., Chang, G.L.. "An Integrated Optimal Control and Algorithm for Commuting Corridors", International Transactions on Operations Research, 6, pp. 39-55, 1999.
- [21] H. M. Zhang, W. W. Recker. "On Optimal Freeway Ramp Control Policies for Congested Traffic Corridors", Transportation Research Part B: Methodological, vol. 33, pp. 417-436, 1999
- [22] Van den Berg, M., Hegyi, A., and Hellendoorn, J., "A Macroscopic Traffic Flow Model for Integrated Control of Freeway and Urban

- Traffic Networks,” In: Proceeding of 42nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2774 - 2779, 9-12 December 2003.
- [23] Monique van den Berg, Andreas Hegyi, Bart De Schutter, Hans Hellendoorn. “Integrated Traffic Control for Mixed Urban and Freeway Networks: A Model Predictive Control Approach”, European Journal of Transport and Infrastructure Research, 7, pp. 223-250, 2007.
- [24] Ta-Yin Hu, Tung-Yu Wu,. “An Optimal Control Model for Traffic Corridor Management”, In: Proceeding of the 17th World Congress on Intelligent Transportation Systems, 2010.
- [25] Abu-Lebdeh, G., Chen, H., Benekohal, R.F. “Modeling Traffic Output for Design of Dynamic Multi-cycle Control in Congested Conditions”, Journal of Intelligent Transportation Systems, 11, pp. 25-40, 2007.
- [26] Blossville, J.M., Papageorgiou, M.. “ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering”, Transportation Research Record 1320, pp.58-64, 1991.
- [27] Chang, Tang-Hsien, Lin, Jen-Ting,. “Optimal Signal Timing for an Oversaturated Intersection”, Transportation Research Part B, vol. 34, pp. 471–491, 2000.
- [28] Chang, Tang-Hsien, Sun, Guey-Yin. “Modeling and Optimization of an Oversaturated Signalized Network”, Transportation Research Part B, vol. 38, pp. 687–707, 2004.
- [29] Girianna, M., Benekohal, R.F.. “Using Genetic Algorithms to Design Signal Coordination for Oversaturated Networks”, Journal of Intelligent Transportation Systems, 8, pp. 117–129, 2004.
- [30] Isaksen, L., Payne, H.. “Suboptimal Control of Linear Systems by Augmentation with Application to Freeway Traffic Regulation”, IEEE Transactions on Automatic Control, pp. 210-219, 1973.
- [31] Li, M.-T., Gan, A.C.. “Signal Timing Optimization for Oversaturated Networks Using TRANSYT-7F”, Transportation Research Record 1683, pp. 118–126, 1999.
- [32] Little, J.D.C., Kelson, M.D., Gartner, N.H.. “MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arterials and Triangular Networks”, Transportation Research Record 795, pp. 40–46, 1981.
- [33] Lo, H., Chang, E., Chan, Y.. “Dynamic network traffic control”, Transportation Research Part A, 35, pp. 721–744, 2001.

- [34]Markos Papageorgiou. “An Integrated Control Approach for Traffic Corridors”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 3, pp. 19-30, 1995.
- [35]Mike Maher. “A Comparison of the Use of the Cell Transmission and Platoon Dispersion Models in TRANSYT 13”, Transportation Planning and Technology, vol. 34, pp. 71-85, 2011.
- [36]Robertson, D.I.. TRANSYT: a Traffic network study tool. RRL Report LR 253, Road Research Laboratory, England, 1969.
- [37]Robertson, D.I., Bretherton, R.D.. “Optimizing Networks of Traffic Signals in Real-time: the SCOOT Method”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 40, pp. 11–15, 1991
- [38]Wallace, C.E., Courage, K.G., Reaves, D.P., Shoene, G.W., Euler, G.W., Wilbur, A., TRANSYT-7F User’s Manual: Technical Report. University of Florida, Gainesville, FL, 1988.
- [39]Wong, S.C.. “Group-based Optimization of Signal Timings Using the TRANSYT Traffic Model”, Transportation Research Part B, 30, pp. 217–244, 1996.
- [40]Wong, S.C.,. “A Lane-based Optimization Method for Minimizing Delay at Isolated Signal-controlled Junctions”, Journal of Mathematical Modeling and Algorithms, 2, pp. 379–406, 2003.
- [41]Wong, C.K., Wong, S.C. “Lane-based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions”, Transportation Research Part B. 37, pp. 63-84, 2001.
- [42]Yen-Yu Chen, ”A Study of Signal Control for Oversaturated Arterials”, Transportation Planning Journal, vol. 42, pp. 331-359, 2013
- [43]Yen-Yu Chen, Gang-Len Chang, “A Macroscopic Signal Optimization Model for Arterials Under Heavy Mixed Traffic Flows”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, vol. 15, pp. 805-817, April 2014.
- [44]Yu, X.H., Recker, W.W.,. “Stochastic Adaptive Control Model for Traffic Signal Systems”, Transportation Research Part C, 14, pp. 263–282, 2006.
- [45]Zichuan Li, Gang-Len Chang, and Suhasini Natarajan, “Integrated Off-ramp Control Model”, The 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation System, October 2008 in Beijing, China, 2008.