



以路徑為基礎之 匝道與幹道協控系統

曾明德／創新交通科技有限公司 董事長

卓訓榮／國立交通大學 榮譽退休教授

許哲瑋／創新交通科技有限公司 交通工程師

都會區高速公路匝道於通勤運輸晨昏峰時間與平面幹道間之壅塞問題，針對「跨區域、跨單位之交通策略與管理」需求，本研究以路徑最佳化為基礎，建立匝道與幹道協控系統，以國道1號竹北交流道昏峰交通壅塞問題進行改善。本研究採階段性控制策略，以即時控制，依高速公路及平面道路不同壅塞狀況，提供不同控制策略及模式。經系統實際測試及績效顯示，系統運作後園區-竹北北上路段平均旅行時間皆較事前縮短，且路網車流總通過量皆有增加，顯示本系統策略模式在改善園區-竹北北上路徑之同時，對於整體示範區域而言，亦達到總系統通過量。

關鍵詞：控制策略、協控系統、即時性控制

In response to the congestion between freeway and arterial in the metropolitan area during peak hour, aiming at the needs of "trans-regional and inter-unit traffic strategy and management". Based on the path-based, this study established a ramp and arterial cooperative control system to improve the traffic congestion problem at the peak time of the Jubei Interchange on National Freeway No. 1. This study adopts a staged control strategy to provide different signal control strategies and modes in response to the congestion of highway and arterial in a real-time control manner. The actual test and performance of the system show that after the system is operated, the average travel time of the northbound section of National Freeway No. 1 (Science Park-Jubei) is shorter than before, and the total traffic flow of the road network has increased, indicating that the system's strategic model is improving National Freeway No. 1. At the same time as the National Freeway No. 1 (Science Park-Jubei) northbound path, for the overall demonstration area, it can also achieve the goal of increasing the total system throughput.

Key Words: control strategies; coordination traffic control system; real-time control.

前言

都會區高速公路交流道於通勤運輸上下班尖峰時間之壅塞現象，多數屬於匝道與平面幹道控制問題。不分國內外，此類型問題經常由於高速公路與平面幹道分屬不同管轄單位，在缺乏設備與整體交通控制模式的情況下，各管轄單位均難以實施全面且有效之交通控制策略，以致高速公路主線與地方幹道之重現性壅塞問題始終未能有效改善。有鑑於此，本研究以路

徑最佳化為基礎^[1-3]，建立匝道與幹道協控系統，發展一個高速公路及地方幹道車流需求與服務水準之控制系統。

而本研究選擇一個具有跨多單位交通管理需求之示範地區，透過建構之整合式區域交通控制系統，以整合區域性交通控制問題，達到跨區域交通壅塞問題之改善。示範區域部分，考量新竹科學園區為國內高科技重鎮，其廠家及員工居住範圍涵蓋新竹縣/市，

所產生龐大的交通需求，同時造成高速公路竹北及新竹交流道主線、匝道及周邊地區性幹道嚴重之交通壅塞，其管制單位包括國道高速公路局、新竹縣政府、新竹市政府及新竹科學工業園區管理局等，已非傳統單一交通控制手段得以單獨處理，為跨單位之區域交通控制課題，因此本研究以「國道 1 號竹北交流道北向出口匝道與周邊幹道」為示範建置區域。

控制概念與方法

階段性交通控制策略與系統建置流程

階段性交通控制策略概念

本研究之階段性交通控制概念，係於主要路徑上設定控制點的方式進行策略的研擬，即依據主要路徑不同的壅塞狀況，設定不同之求解目標與條件，並以區域性群組路口的概念同步進行號誌控制與調整，在使群組路口有效紓解及因應各路徑綠燈增減變化所帶來之車流量外，亦可維持主要幹道既有之連鎖效應。

在本研究中，將區域性交通壅塞問題，依其壅塞狀態劃分為三個階段，各階段分別對應「疏流」、「截流」及「分流」等交通控制策略，如圖 1 所示。在下游主要壅塞地區，若車流不多或未達飽和紓解率或各主要路徑車隊長度未達設定之第一級門檻時，下游壅塞區域之群組路口主要採取紓流策略，其可包括「固定時制模式」、「平衡路徑紓解時間模式」等；當下游

壅塞區域群組路口已無法紓解湧入之大量車流，各主要路徑停等車隊長度回堵超過設定之第二級門檻時，將於路徑上游區域之群組路口處採取截流策略，在平面道路可透過路口號誌管制方式；在高速公路部分則可透過主線速率控制或匝道儀控等方式，設法管制上游區域車輛湧入速度及進入之總車流量，而車流之管制量可依下游壅塞地區群組路口之紓解狀況予以調整；當主要路徑之車流持續回堵，且路徑停等車隊長度達設定之第三級門檻時，應於上游區域處採取分流策略，設法於上游區域分散車流量，將車流量導引至其它較不壅塞之替代道路，惟目前分流策略之實施手段，仍以資訊發佈之誘導方式居多，故該策略實施時機亦可與截流策略同步啟動。

依前述各階段交通控制策略概念，面對不同情況會有不同之控制邏輯，包括如下：

下游紓流策略

- (1) 固定時制：在非尖峰時段，車流量不大情況下（預測之停等車隊長度未達路徑觸動啟動之設定門檻），下游壅塞區域群組路口之號誌以固定時制方式運作。
- (2) 平衡路徑紓解時間模式：在尖峰時段時，車流量快速增加且預測之停等車隊長度達平衡路徑紓解時間模式啟動之設定門檻時，下游壅塞區域群組路口啟動平衡路徑紓解時間模式，而鄰近控制路口亦可配合動態調整號誌時制計畫。

截流策略

當進入下游壅塞區域群組路口之各主要路徑已無法紓解湧入之大量車流，且推估之路徑停等車隊長度達設定之第二級門檻時，下游壅塞區域群組路口除持續執行平衡路徑紓解時間模式外，各路徑上游區域群組路口將進一步採取截流策略，設法透過路口號誌管制或匝道儀控等控制進入之車流量，避免過多車流匯入導致下游壅塞路口之車流紓解壓力增加，壅塞問題持續惡化及擴大。

分流策略

當進入下游壅塞區域群組路口之各主要路徑，其車流持續往上游路段回堵，且推估路徑停等車隊長度達第三級門檻時，下游壅塞區域群組路口除持續執行平衡路徑紓解時間模式、上游區域群組路口亦持續進

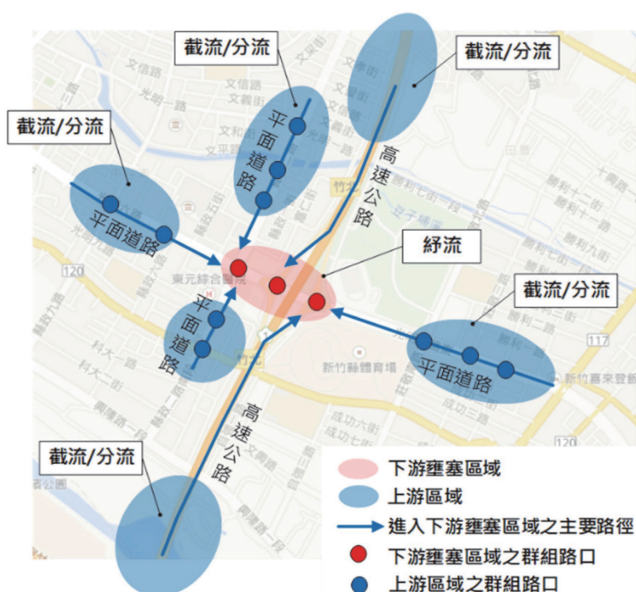


圖 1 主要車流路徑之交通控制策略

行路徑截流策略外，將同時透過資訊可變標誌（於進入下游壅塞區域之主要路徑上）或網路等方式發佈各路徑 / 路段壅塞資訊（壅塞訊息或旅行時間等），以引導車流量改道，避免持續湧入壅塞路段。

階段性交通控制系統建置流程

本研究對於階段性交通控制系統分析與建置流程，如圖 2 所示，各步驟操作說明如下。

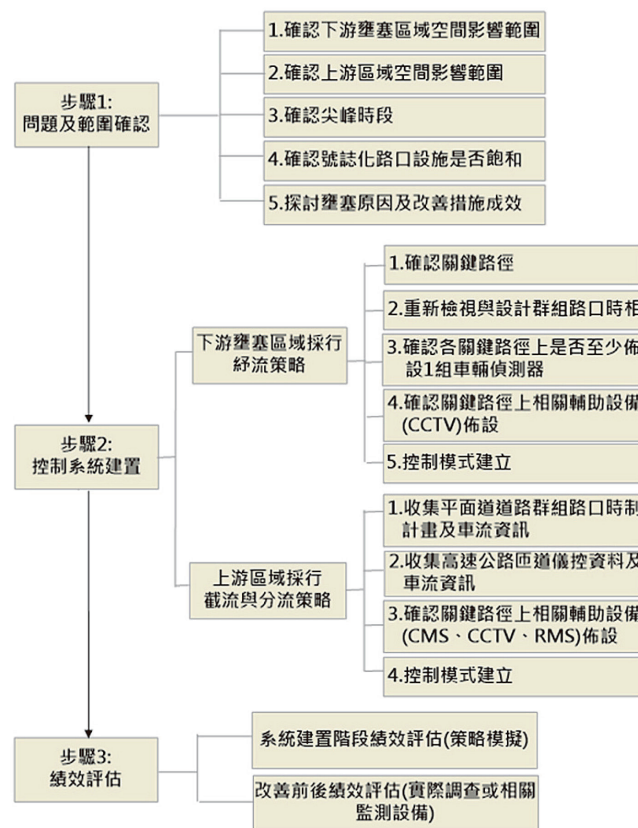


圖 2 階段性交通控制系統分析與建置流程

壅塞問題分析及壅塞範圍確認

- (1) 透過各項車流特性調查，確認下游壅塞區域之影響範圍（群組路口）及其上游區域影響範圍。
- (2) 確認區域壅塞之尖峰時段。
- (3) 進行壅塞原因分析與判斷，確認相關交通工程改善及號誌改善效益。

控制系統建置

- (1) 下游壅塞區域群組路口採行紓流策略

A. 路徑關係分析

透過旅次起訖調查或相關推估方法，確認下游壅塞區域與上游區域之路徑關係，並從而進行關鍵路徑之設定。

B. 重新檢討群組路口之時相設計

本研究對於主要車流路徑控制概念，如圖 3 所示，A 圖顯示 3 個關鍵路徑會通過 2 個群組路口，而本研究係將各主要關鍵路徑車流視為均會匯集至 1 個虛擬控制點（群組路口），如 B 圖，再以此控制點決定各路徑上的綠燈，因此該點並非群組內任一實體之路口，僅為一抽象控制概念路口。而群組內各路口時相設計方式則是讓各關鍵路徑方向能順暢通行為主要原則，再配合路徑上方之車輛偵測器蒐集路徑車隊停等狀態決定各路徑之綠燈時間長短。

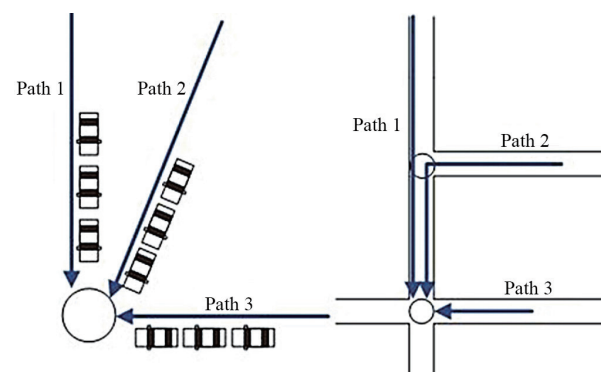


圖 3 主要車流路徑控制概念示意圖

- C. 確認設定之關鍵路徑上，至少需佈設有 1 組車輛偵測器，以蒐集路徑車隊停等狀態，作為各路徑綠燈時間長短之模式運算。
- D. 確認關鍵路徑之重要節點是否佈設影像監視設備，以作為系統運作之車流與交通狀態觀測。
- E. 開發紓流策略模式：平衡路徑紓解時間模式。

(2) 上游區域採行截流及分流策略

- A. 收集上游區域平面道路群組路口時制計畫或高速公路匝道儀控資料，並確認關鍵車流節點是否佈設有車輛偵測器，以提供截流模式所需之即時交通參數。
- B. 確認關鍵路徑上游適當地點是否有可實施車流管制之相關設施，例如：號誌化路口或匝道儀控或可變速限標誌牌等。
- C. 確認關鍵路徑上游適當地點是否有可實施分流資訊發佈之相關設施，例如：資訊可變標誌。
- D. 確認關鍵路徑之重要節點是否佈設影像監視設備，以作為系統運作之車流與交通狀態觀測。
- E. 開發截流策略模式，包括匝道儀控率計算或時差計算等。

績效評估

- (1) 於系統建置評估階段，透過模擬方式針對控制策略與模式進行模擬績效分析，以確認系統建置之可行性與效益。
- (2) 於系統建置前後，透過實際調查或建置相關監測設備，以進行改善前後之績效分析，確認系統之實際改善成效。

即時性交通控制模式

下游疏流策略：平衡路徑紓解時間模式

平衡路徑紓解時間模式為一種群組路口即時交通號誌控制方法及紓解路口車流所需綠燈時間的預測方法，其係將群組內各路口之車流方向，依行車路線，合併視為單一路徑車流來做規劃，主要優點除可有效簡化交通號制邏輯分析複雜度外，其係能夠快速且動態的應變交通車流的瞬時變化，即時做出最合理的交通號制控制決策，大幅提升交通號制控制系統整體運作效能，此外，其僅使用最簡單的車輛有無交通參數 (presence) 即可進行即時號誌控制，減少使用偵測器的成本，且在配合路徑控制方法後，亦能夠減少偵測器佈設數量，將大幅降低交通號制控制系統整體建置成本。

模式參數定義

依據偵測器每秒所測得之車輛有無交通參數 (presence) 進行回堵、紓解及到達等衝擊波之推估 [4-6]。當偵測區回報無車，則代表「空車」狀態；當偵測區回報有車，且車速大於零，則代表「車輛移動」狀態；當偵測區回報有車，但車速等於零，則代表「車輛停等」狀態，透過路段偵測器所測得有無車訊息，重新定義「空車」、「車輛移動」、「車輛停等」等狀態，並以「車輛停等」狀態下之時間長短，作為各衝擊波推導基礎。透過偵測區回報之資訊判斷車輛狀態，如下圖 4 所示。

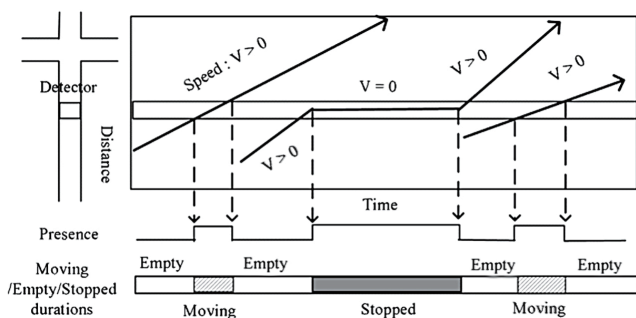


圖 4 偵測器偵測車流停等狀況示意圖

模式推導

透過車輛偵測器的多個偵測區 (至少 2 個) 位置獲得車輛停等狀態，可得知如圖 5 中 A1 座標為 (t_1, d_1) ；B1 座標為 (t_2, d_1) ；A2 座標為 (t_3, d_2) ；B2 座標為 (t_4, d_2) ；An 座標為 $(t_{(2n-1)}, d_n)$ ；Bn 座標為 (t_{2n}, d_n) ，並依據各點座標值計算回堵衝擊波 W_{30} 及紓解衝擊波 W_{10} 之斜率及直線方程式。而依據車流理論中的流量密度關係 (即 Q-K 圖)，則可再求得到達衝擊波 W_{31} 等於回堵衝擊波 W_{30} 減去紓解衝擊波 W_{10} ($W_{31} = W_{30} - W_{10}$)。

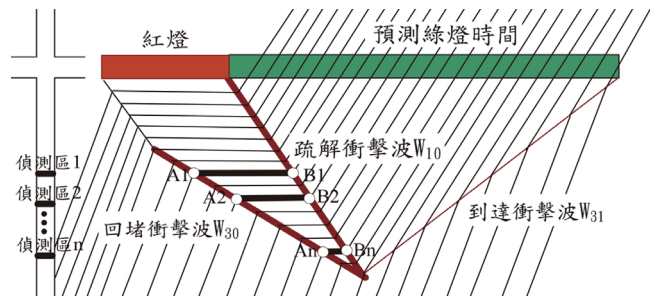


圖 5 群組路口偵測衝擊波示意圖

本研究藉由衝擊波原理計算車隊停等長度 (L) 及所需紓解綠燈時間 (g)，如圖 6 所示意。車輛偵測器設置於離群組路口 d 長度，當車輛偵測器於 t_1 時間點偵測到車輛開始出現停等狀態，即可得知 A 點座標為 (t_1, d) ，當於 t_2 時間點偵測到車輛結束停等狀態開始移動時，即可得知 B 點座標 (t_2, d) ；知道 A、B 兩點座標後，即可知車輛停等時間 S；再透過衝擊波斜率及歐式幾何，可求出 C 點及 E 點座標，而車隊停等長度 L 即為 C 點的 y 軸分量，所需要的綠燈時間長 g 即為 E 點的 x 軸分量，如下列式 (1)(2) 所示：

$$L = \frac{W_{30} W_{10} S}{W_{10} - W_{30}} + d \tag{1}$$

$$g = \frac{S(W_{10})^2}{(W_{10} - W_{30})^2} + \frac{d}{W_{10} - W_{30}} + t_1 \tag{2}$$

考量路徑車流壅塞狀況會隨時變化，車流的停等時間會在連續週期時間內有所增減，因此，透過連續兩週期，在偵測區上，車輛停等時間的變化量，可推算出該兩週期所需綠燈的增減值。

先將偵測器在第一週期內測得之車輛停等時間 S 作為初值，並計算所對應的紓解綠燈時間需求 g，透過比對前後兩週期的停等時間增減值 ΔS ，再利用下列方法求得增減綠燈差異值 Δg 。

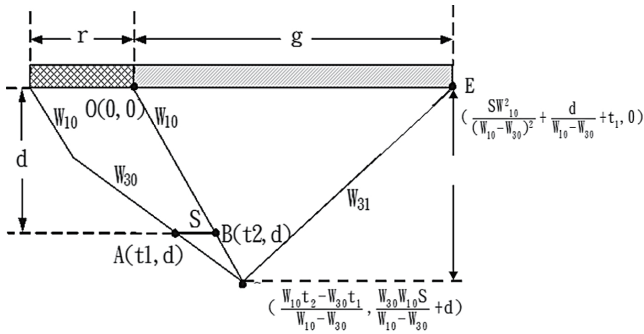


圖 6 藉由衝擊波原理推算停等長度及所需綠燈時間

表 1 圖 6 各參數代表意義

符號	意義
O	座標原點
r	紅燈時間
g	紓解所需綠燈時間
S	車輛停等時間
W_{10}	紓解衝擊波
W_{10}	回堵衝擊波
W_{10}	到達衝擊波
t_1	車輛偵測器偵測車輛開始知時間點
t_2	車輛偵測器偵測車輛結束停車開始移動之時間點
d	車輛偵測器設置位置至群組路口的距離

如圖 7 所示，一般車流狀況在連續兩週期內通常變化不大，故假設第二週期的流量與第一週期流量相等，則前後兩週期的衝擊波斜率會相同，即呈現在圖上的回堵衝擊波 W_{30} 、到達衝擊波 W_{31} 各有兩條平行線。當車輛偵測器偵測佈設在離群組路口距離 d 的位置，且第一週期偵測到車輛停滯在偵測區的停等時間長是 S ，若第二週期偵測器所偵測到的停滯時間增加 ΔS （圖上 W_{30} 衝擊波直線往左平移），則透過歐式幾何座標方式及 ΔS 、 Δg 之關係，可求得本週期新增的所需綠燈時間 Δg ，如下列式 (3) 所示。

$$\Delta g = \left[\left(\frac{W_{10}}{W_{31}} \right)^2 - 1 \right] + \Delta S \quad (3)$$

而此關係式，於停等時間 Δg 減少時，亦可同樣求得減少的所需綠燈時間 Δg 。該公式之意義，是車輛偵測器偵測到的停等時間增加，則所需綠燈時間亦增加，偵測器偵測到的停等時間減少，則所需綠燈時間亦減少，增減關係為線性，成一定比值。

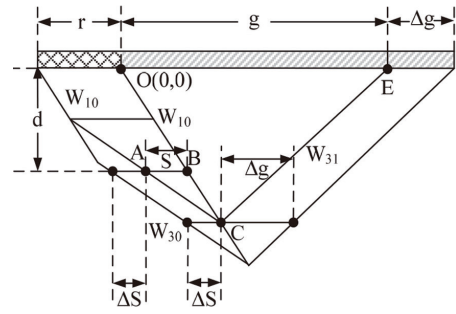


圖 7 藉由衝擊波計算所需綠燈增減時間示意圖

預測出紓解所需綠燈時間後，最後，進行綠燈時間分配，利用最佳化原理計算出主要路徑之均衡綠燈時間，此均衡綠燈時間如下列式 (4) 所示。

$$\text{目標式 } \min \left| \frac{G_1 - g_1}{\Sigma G} - \frac{g_1}{\Sigma g} \right| + \dots + \left| \frac{G_n - g_n}{\Sigma G} - \frac{g_n}{\Sigma g} \right| \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{限制式 } \Sigma G &= G_1 + \dots + G_n \\ \Sigma G &\leq \text{MaxPathCycle} \\ \Sigma g &\leq g_1 + \dots + g_n \\ \min G_i &\leq G_i \leq \text{Max } G_i, 1 \leq i \leq n \end{aligned}$$

表 2 圖 7 各參數代表意義

符號	意義
G_i	為第 i 個主要車流路徑之均衡綠燈時間
ΣG	為所有主要車流路徑均衡綠燈時間的總和
g_i	為預測的第 i 個主要車流路徑之均衡綠燈時間
Σg	為所有預測的主要車流路徑之未紓解車流所需綠燈時間
$\text{Max } G_i$	為第 i 個主要車流路徑的最大均衡綠燈時間限制
$\text{Min } G_i$	為第 i 個主要車流路徑最小均衡綠燈時間限制
n	為最大主要車流路徑數

截流策略模式

於各路徑中上游路段上佈設偵測器，透過偵測器偵測車流於該處之停等時間，並推估出後續到達車輛數及停等車隊長度，於路徑上各車流匯入點控制車流進入量，避免過多車流直接且快速進入路徑主線上導致下游壅塞路口之車流紓解壓力增加。本研究於平面道路所採去之截流策略措施包括路口時差設計及綠燈時間縮短二種方式，於高速公路部分之截流策略則是透過匝道儀控之管制，各措施內容及模式說明如下。

上下游路口時差設計

係於主控路口與其上游群組路口間設計一時差，讓上游群組路口與主控路口號誌間成迭亮狀態，促使上游車流無法順利通過主控路口，其時差設計方式如下圖 8。

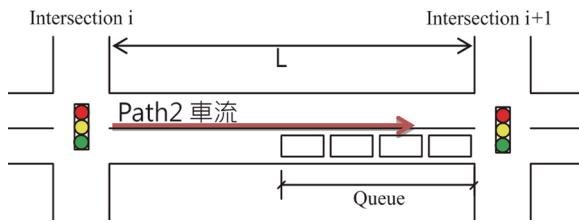


圖 8 路口逆時差設計示意圖

使 Path2 交通流無法順暢的通過下游路口 ($i + 1$)，並停等於下游路口前，路口 i 和 $i + 1$ 之間的秒差可以利用以下公式進行計算：

$$T = G_{(i+1)2} - \frac{L}{v} \quad (5)$$

其中，為路口時差、 $G_{(i+1)2}$ 為 $i + 1$ 路口，路徑 2 的均衡綠燈時間、 L 兩個路口間路段距離、 v 為路段間之車流平均行駛速度。

縮短該路徑方向之綠燈時間

依據主控路口之車流紓解量，針對其上游群組路口該路徑方向之綠燈時間進行相對應之縮減，以減少車流持續大量進入壅塞路段，造成路徑回堵問題持續往上游擴大，上游路口該路徑綠燈時間縮減設計方式如下圖 9。

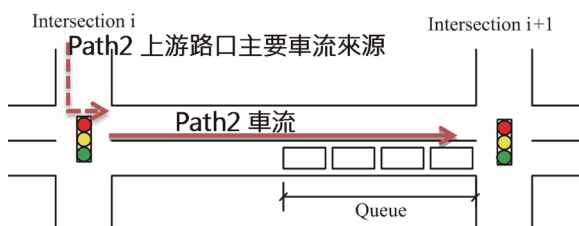


圖 9 上游路口主要路徑綠燈時間縮減設計示意圖

使 Path2 上游路口 (i)，主要流入車流來源方向之綠燈時間，得依下游路口 ($i + 1$) 的紓解量予以縮減， i 路口 path2 綠燈時間之縮減可利用以下公式進行計算：

$$\begin{aligned} \text{Min} &= (G_{i2}, G_{(i+1)2} \times a) \\ G_{i2} &\geq \text{Min} G_{i2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， G_{i2} 為 i 路口，Path2 主要車流來源時相之既有綠燈時間、 $\text{Min}G_{i2}$ 為 i 路口，Path2 主要車流來源時相之

最小綠燈時間、 $G_{(i+1)2}$ 為 $i + 1$ 路口，Path2 之均衡綠燈時間、 i 為路口 i 與 $i + 1$ 間之 Path2 總車流量中，源自 $i + 1$ 路口主要車流來源方向之車流比例。

匝道儀控率計算

在高速公路匝道儀控率模式部分，主要以 ALINEA 儀控率模式為基礎，並同時考量下游區域出口匝道車流紓解、上游區域進匝道前平面道路之車流狀態，因此，其計算方式改良如下，如圖 10 所示。

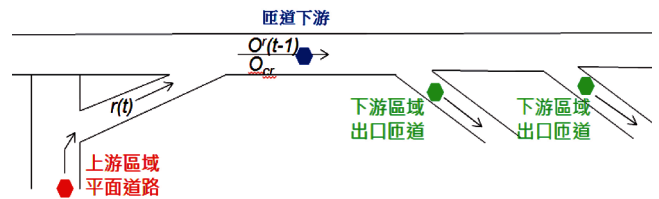


圖 10 匝道儀控率設計示意圖

$$\begin{aligned} r(t) &= r(t-1) + K_r [O_{cr} - O_r(t-1)] + \sum [D_i \cdot S_i'(t-1)] \\ &\quad - \max(U_j \cdot O_j'(t-1)) \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $r(t)$ 為在 t 時間的儀控率、 K_r 、 D_i 、 U_j 為控制常數、 K_r 、 D_i 、 $U_j > 0$ 、 O_{cr} 為匝道下游期望佔有率值、 $O_r(t-1)$ 為前一時間匝道下游佔有率值、 $S_i'(t-1)$ 為前一時間上游平面道路 stopped 值、 $O_j'(t-1)$ 為前一時間下游出口匝道佔有率值。

分流策略模式

在本計畫中對於分流策略主要採取二種措施，一是於下游壅塞區域群組路口發生壅塞時，透過平面道路或高速公路之資訊可變標誌發佈壅塞資訊，另一則是於上游區域透過路口員警引導車流方式處理，期避免車輛持續湧入壅塞路段。

1. 於下游壅塞區域群組路口主要路徑上游路段，發佈前方路口交通壅塞狀況，以利駕駛者作為改道判斷，尤其是針對過境性的交通旅次，透過前方路口壅塞狀況發佈，讓過境性車流及早改道，降低截流策略實施之衝擊及達到減少車流進入之目的。
2. 於上游區域群組路口，啟動截流策略後，對於進入下游壅塞區域之路徑將配合適當的縮減該路徑方向之綠燈時間，惟該路徑主要車輛停等長度到達不可接受範圍時，系統應發出訊息請求員警協助進行車流導引至其它替代道路。

實證案例

示範區域與交通特性

本研究試圖針對國道 1 號竹北交流道於通勤運輸下班尖峰時間壅塞問題進行改善，其壅塞主因乃是國道 1 號高速公路竹北交流道北向出口匝道與竹北地區之平面道路光明六路間號誌控制不佳，加上大量源自新竹科學工業園區（以下簡稱科學園區）之下班車潮間內持續湧入竹北交流道，故常使得回堵壅塞問題不斷往上游路段擴大，除衝擊國道一號公路主線車流外，甚至影響新竹科學園區之平面道路車流。而其交通影響轄管範圍涵蓋高速公路局、新竹縣政府、新竹市政府，以及新竹科學園區等，各管轄單位缺乏設備與整體交控因應模式之下，均難以實施有效交通控制策略，以致高速公路主線與地方幹道重現性交通壅塞問題始終未能有效改善，因此，本研究將以國道一號園區新安路交流道北上至竹北交流道出口間區段及匝道週邊聯絡幹道為示範區域，如圖 11 所示。

出口匝道停車車輛影響高速公路主線車流範圍

利用高公局提供之五分鐘車輛偵測器資料，進行關鍵點（出口匝道減速車道起點）及關鍵點上下游處各行車道之車流速度與流量分析，以瞭解出口匝道車流

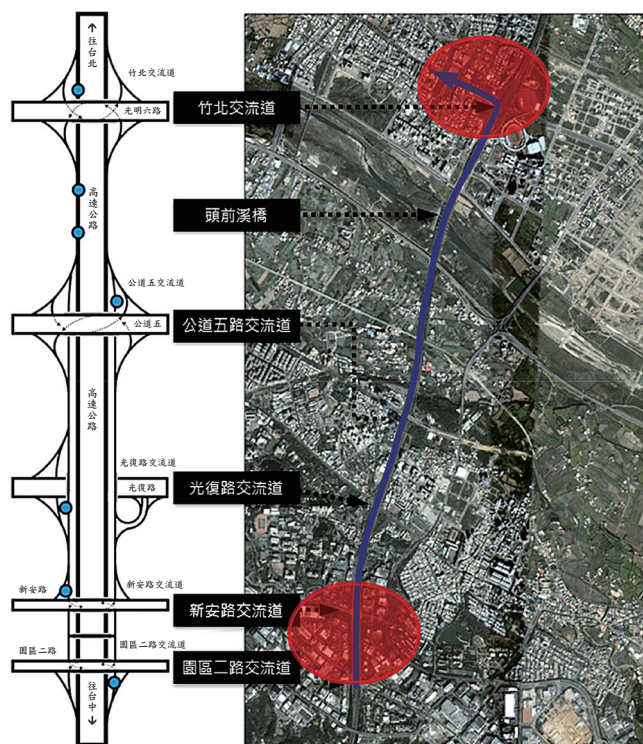


圖 11 下午尖峰時段系統行經範圍示意圖

是否影響高速公路主線車流，並探討壅塞之主要時段及影響空間範圍。

由圖 12 可以觀察到，竹北交流道北向出口匝道確實影響到高速公路主線車流（速度明顯下降），主要的影響時段約從 17:20 至 20:50，共約三個半小時；在空間範圍方面，從關鍵點（91.6k）至 92.000k 影響最為明顯，更上游處（93.590k 與 94.030k）則影響漸弱，最上游（97.560k）與下游（90.835k）則不受影響；在影響車道分佈方面，車道 2 受影響時間較車道 1（最內側車道）長。惟須注意的是，93.590k 與 94.030k 兩處觀測點速度與流量之變化尚受到前後匝道匯入車流之影響，非可全然歸因於竹北出口匝道車流影響。

平面幹道壅塞範圍

透過各關鍵路徑車流行經之重要平面號誌路口進行車隊調查與分析，以瞭解路口臨進路段在現有號誌時制控制下，最大與平均車隊長度之時空分佈概況與影響範圍。如圖 13 所示，壅塞路段是指在某一時段內，道路號控容量因無法滿足流量需求或被車流充分使用，以致停車隊發生嚴重回堵或行進車隊在強迫車流下呈現走走停停的路段。由於路口每一臨近路段某特定車道發生最長停車隊的時間點通常都在號誌

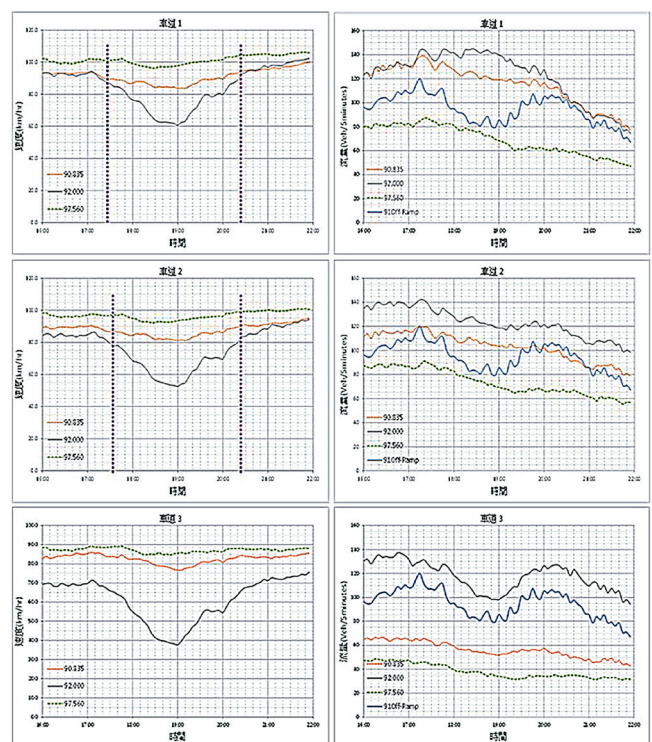


圖 12 高速公路各車道之速度與流量

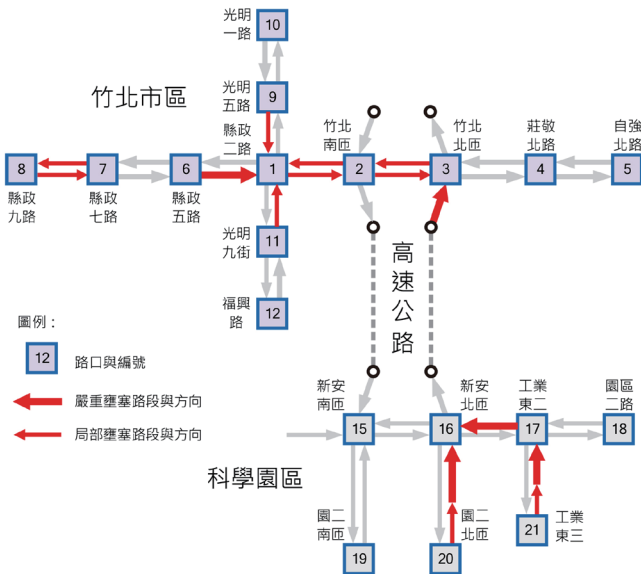


圖 13 下午尖峰壅塞車隊影響路段圖

紅燈終了時，之後隨著綠燈時間放行，車隊前端雖會開始依序消散，但車隊尾端仍會持續向上游延伸，一旦回堵至上游路口，便會耗損該路口的轉向容量，因此，本研究在界定壅塞車隊範圍時，係以路段最長停等車隊長度為依據，當最長停等車隊長度接近路段長度時，便認定可能發生壅塞。

壅塞路徑分析 – 關鍵路徑設定

經旅次 O-D 推估結果，如表 3 所示。本研究示範區域之關鍵路徑設定，以竹北地區為例。在本研究控制概念中，係將光明六路與縣政二路口、光明六路與南下匝道口、光明六路與北上匝道口等 3 路口視為一體之虛擬控制點，並依據前述車流 OD 推估結果，彙整如圖 7 所示之主要進入虛擬控制點之車流路徑。而對於關鍵路徑之設定主要以考量進入虛擬控制點之路徑車流大小，對於虛擬控制點內群組路口間之車流向或車流量均不在意。

表 3 竹北地區旅次起迄推估結果

OD	06	01	02	03	04	09	11	S1	S2	N1	N2	Oi
06	0	0	0	0	557	322	347	0	1710	0	916	3852
01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04	790	0	0	0	0	558	140	0	1622	0	1805	4915
09	297	0	0	0	562	0	1168	0	1489	0	765	4281
11	197	0	0	0	555	1062	0	0	675	0	276	2766
S1	937	0	0	0	1879	884	390	0	0	0	0	4089
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	2002	0	0	0	3609	1387	718	0	0	0	0	7716
N2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dj	4222	0	0	0	7163	4213	2763	0	5497	0	3762	27620

註：OD 起訖編號請對照圖 12 之編號

圖 13 中，進入虛擬控制點之路徑可包括 path1 ~ path7，而其中 path7 為高速公路南下出口匝道之右轉槽化道車流，車流進入平面道路（光明六路）後，未受號誌化路口管制即匯入路口編號 2 至 1 路段間之車流中，在本研究控制概念中，其亦歸屬於虛擬控制點內群組路口間之車流，故該路徑將不納入關鍵路徑中考量。而關鍵路徑之設定主要係考量車流高低，本研究以車流排序前 5 大的為關鍵路徑，即 path1 ~ path5。

竹北地區

竹北地區壅塞路徑中（如圖 14 所示），path1 主要是因為下午尖峰車流由科學園區北上進入竹北光明六路，導致壅塞於北向匝道口，當車流左轉至光明六路後，又因光明六路鄰近各路口距離短，儲車空間不足而導致回堵；path2 主要是下午尖峰由芎林方向來車經由光明六路至竹北，受科學園區來車影響，導致光明六路壅塞；path3 主要是下午尖峰竹北方向車流經由光明六路至芎林，受縣政二路來車影響，導致光明六路上壅塞；path4 主要是縣政二路北端南下後左轉光明六路；path5 主要是縣政二路南端北上後右轉光明六路，此兩路徑壅塞原因大致相同，光明六路鄰近匝道口距離短儲車空間不足，且該方向與高速公路進入竹北之車流為衝突時相，因而導致壅塞；而鄰近上游路口則因光明六路與縣政二路口流量過飽和，導致上游路口車輛無法進入該路口，增加停等延滯時間。

新竹科學園區

新竹科學園區壅塞路徑中（如圖 15 所示），path6、path7 與 path8 主要是因為下午尖峰車潮由科學園區進入高速公路北上；Path6 壅塞主要是因為北上高速公路車輛已達過飽和而回堵至園區二路；path7 壅塞乃是因

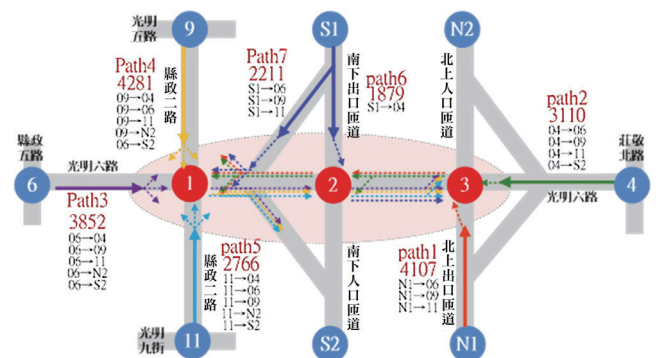


圖 14 竹北地區主要車流路徑

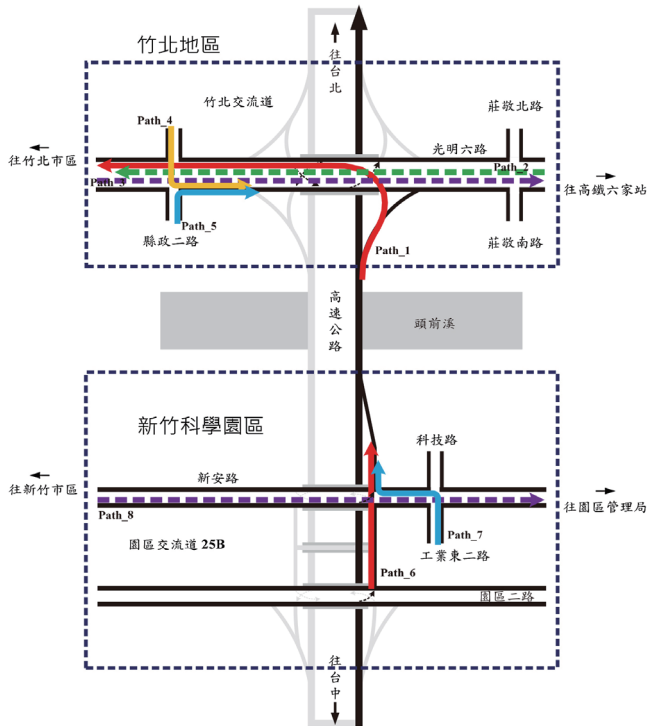


圖 15 各地區尖峰交通路徑示意圖

為新安路北向匝道口匯集由園區二路經聯絡道至新安路北向匝道與力行路經工業東二路至新安路北向匝道之車流；Path8 主要是新安路出園區大門車流，但因為與進入高速公路北向匝道車流相競爭，故亦呈現壅塞。

轉向需求與號誌時制現況

由檢討上述各路徑之擁擠車流，可知尖峰時段各路徑

車流量大，加上光明六路（北上匝道 - 南下匝道）儲車空間有限，左轉進入北上與南下匝道之停等車輛很容易影響其它主要路徑（path1 - path5）之紓解與通行；其次，光明六路往西方向左轉流量高於一車道的飽和流率，但目前只配置一左轉專用車道，導致直行車輛常被阻擋。

由交通量調查顯示目前壅塞路網之尖離峰流量差異大，且每日流量不穩，採用過長之時制計畫切分（時制計畫套數過少），常無法因應車流變化；目前竹北交流道週邊光明六路沿線之縣政二路口、南匝口、北匝口等路口，下午號誌時制僅配置 17:00 前、17:00 ~ 20:30，以及 20:30 後之時制計畫，顯示尖峰時段內僅有一套時制計畫，故不能滿足與因應較大之流量變化需求。

由檢視上述光明六路沿線之縣政二路口、南匝口、北匝口等路口，可續進之路徑僅有 path1 與 path3，惟其它路徑之車流量亦大，在無號誌續進設計下（無法順利通過主要路口），車輛將停等於進入各主要路口之上游路段。

系統架構與邏輯

控制系統架構

控制系統架構如圖 16 所示，本控制系統之即時性交通控制模式，將安裝於竹北地區路口端之號誌控制器主機中，各路徑上佈設之車輛偵測器回報有無車資訊至主要號誌控制程式進行處理，其中園區所佈設之

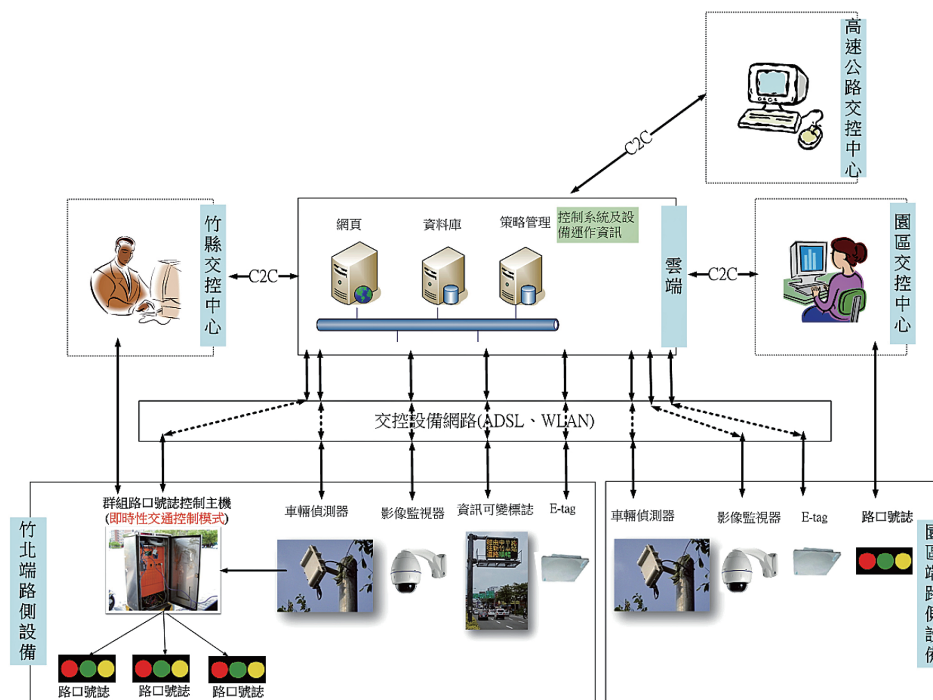


圖 16 控制系統架構

車輛偵測器將透過雲端平台取得所偵測之訊息，並納入系統模式分析。

在截流策略啟動前，控制主機內即時性交通控制模式所計算出之最佳化綠燈時間，將直接下傳至各群組路口號誌控制器，並於下週期驅動號誌燈顯示，以達號誌即時性及動態性調整；而在截流策略啟動後，需連動上游路口號誌（包括園區）加以配合變換時差或時比，以增加主控群組路口之車流紓解效果，將由雲端主動通知新竹縣或園區交控中心，請求配合進行相關路口之截流措施。各設備資訊均會傳送至雲端中心儲存，並透過 C2C 與新竹縣市、科管局、高公局等交控中心進行資訊交換。

控制系統運作邏輯

即時性交通控制系統運作流程如圖 17 所示，主要可區分為竹北地區及科學園區兩部分，以下針對各主要程序進行說明。

竹北地區

(1) 固定時制

利用交通流量調查結果，透過定時時制最佳化模式分析，產出主控路口之最佳化時制計畫（含時相調整），並以此最佳化後之號誌時制計畫為執行後續路口號誌策略之基礎時制計畫。此最佳時制計畫亦為未來系統運行階段當即時資料不足或流量超出系統負荷狀況下，降級定時號誌控制所需之時制計畫。

(2) 即時交通資料分析

主控路口之控制主機，會蒐集平面道路及高速公路上架設之車輛偵測器資訊，進行初步資料篩選，以確保後續即時性交通控制策略模式輸入參數之可靠性。

(3) 判斷各路徑預估車隊長度是否達第一級門檻

控制主機中之即時性控制系統，利用車輛偵測器有無車交通參數及衝擊波原理預估各主要路徑之車隊停等長度，當任一路徑預估之停等長度達預先訂定之第一級門檻位置時，竹北地區主控路口啟動「路徑平衡模式」；若未有任何路徑之車隊停等長度達第一級門檻位置時，主控路口持續原有定時時制運作。

(4) 「路徑平衡模式」啟動與執行

「路徑平衡模式」執行後，將持續蒐集各路徑車輛偵測器有無車交通參數，利用衝擊波原理推估各路徑下週期所需綠燈時間及路口綠燈最佳化配置，並透過控制主機將下週期綠燈最佳化配置運算結果傳送予其它路口號誌控制器中執行。

(5) 判斷 Path1 預估車隊長度是否達第二級門檻

主控路口在執行「路徑平衡模式」之同時，會持續進行 Path1 預估車隊長度是否達第二級門檻之判斷，當 Path1 預估車隊長達第二級門檻時，通知科學園區交控中心，將啟動上游（園區）之「截流策略模式」；若 Path1 預估車隊長未達第二級門檻時，則進行其它路徑之判斷。

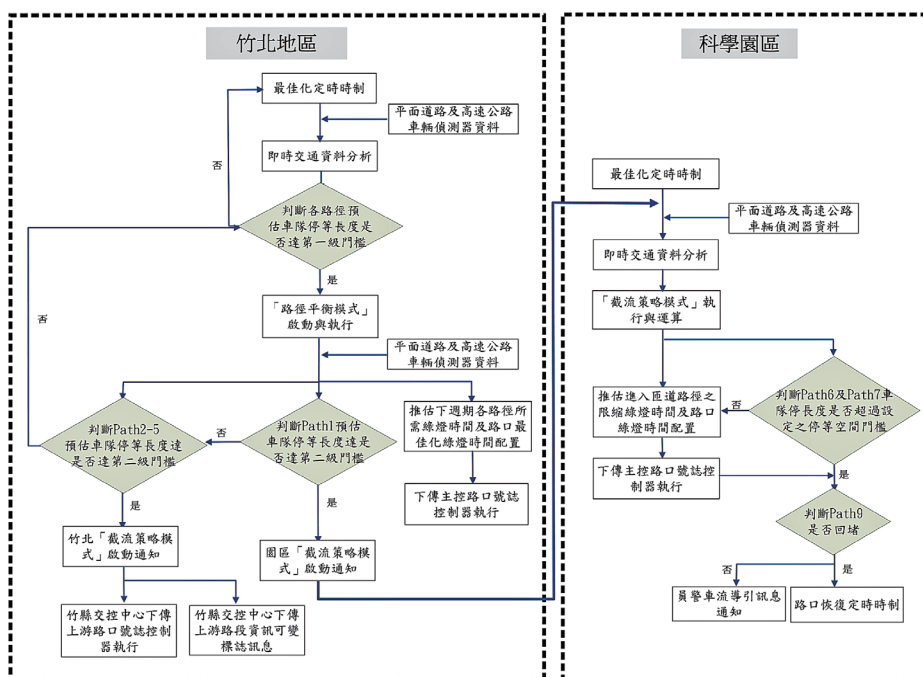


圖 17 控制系統運作流程

(6) 判斷 Path2 - Path5 預估車隊長度是否達第二級門檻

在 Path1 預估車隊長未達第二級門檻判斷確認後，則進行 Path2 - Path5 預估車隊長是否達第二級門檻判斷，若其中任一路徑預估車隊長達第二級門檻時，通知竹縣交控中心，將啟動上游（竹北）之「截流策略模式」；若各路徑預估車隊長度均未達第二級門檻時，則主控路口將進行路徑預估車隊長是否達第一級門檻之確認，以判斷降為定時時制計畫模式，亦或維持正在執行之「路徑平衡模式」。

(7) 竹北「截流策略模式」啟動通知

當 Path2 - Path5 任一路徑預估車隊長達第二級門檻時，控制主機將通知竹縣交控中心，將啟動上游（竹北）之「截流策略模式」，並由竹縣交控中心下傳上游路口之時制計畫及上游路段之資訊可變標誌發佈訊息。

科學園區

(1) 園區「截流策略模式」執行與運算

當竹北控制主機傳送園區「截流策略模式」啟動通知予科學園區交控中心後，園區交控中心將「截流策略模式」啟動訊息下傳控制園區路口控制主機，由園區路口控制主機進行園區「截流策略模式」之運算。

園區路口控制主機，將持續蒐集各路徑車輛偵測器有無車交通參數及竹北 Path1 之紓解率，估算出路口對應之綠燈配置，並透過控制主機將下週期綠燈配置運算結果傳送予其它路口號誌控制器中執行。

(2) 判斷 Path6 及 Path7 預估車隊長度是否超過設定之停等空間門檻

園區控制路口在執行「截流策略模式」之同時，會持續進行 Path6 及 Path7 預估車隊長度是否超過設定之停等空間門之判斷，當 Path6 及 Path7 預估車隊長度超過設定之停等空間時，再進行判斷 Path9 之回堵判斷；若 Path6 及 Path7 預估車隊長度未超過設定之停等空間時，則持續執行「截流策略模式」之綠燈時間運算。

(3) 判斷 Path9 是否回堵

在 Path6 及 Path7 預估車隊長超過設定之停等空間時，再進行判斷 Path9 之回堵判斷，當 Path9 未有車流量回堵狀況時，控制主機將傳送園區交控中心「請求員警協助進行車流導引」之通知；當 Path9 亦有車流量回堵狀況時，顯示車流量已超過系統所能控制，將建議恢復原定時時制運作模式。

各階段控制策略啟動時機及對應措施

各階段控制策略啟動及其對應之控制措施彙整如表 4 所示。

表 4 各階段控制策略啟動及控制措施對應表

交通狀態描述	預估車隊停等長度位置(啟動門檻)	對應控制措施	實際執行內容
各關鍵路徑預估之車隊停等長度位置均未達設定第 1 級門檻	-	固定時制	各路口執行原時制計畫內容
任一路徑預估之車隊停等長度位置達設定第 1 級門檻	<ul style="list-style-type: none"> Path1 達關鍵點 Path2 達光明六路與莊敬南北路前 500 公尺。 Path3 達光明六路與縣政五街口。 Path4 達縣政二路與光明五街口。 Path5 達縣政二路與光明九路口。 	啟動竹北地區之疏流策略	光明六路與縣政二路、光明六路與南下匝道、光明六路與北上匝道執行「路徑平衡模式」，動態調整 3 路口之時制計畫(週期、時比)
任一路徑預估之車隊停等長度位置達設定第 2 級門檻	<ul style="list-style-type: none"> Path1 達高速公路主線近台 68 快速道路處(約 93.5-94km)。 Path2 達光明六路與自強南路前。 Path3 達光明六路與縣政七街口。 Path4 達縣政二路與光明一路前。 Path5 達縣政二路與福興路前。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 啟動該路徑上游路口或地區之截流策略 2. 啟動竹北地區分流策略 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 竹縣部分 <ul style="list-style-type: none"> (1) 系統發出通知與上游路口時制計畫(改變時差)，請求竹縣交控中心配合調整。 (2) 系統要求路側資訊可變標誌以「前方車速 5 公里」、「前方路口回堵 請改道」等字樣循環顯示。 2. 園區部分: 系統發出通知與上游路口時制計畫，請求園區交控中心配合調整。
園區二路(Path6)之車隊停等長度到達不可接受範圍	車隊停等長度達園區二路與工業東九路口，且園區一路往慈雲路方向尚未有回堵情形	啟動園區分流策略	系統將發出訊息予園區交控中心，告知「新安路匝道回堵嚴重」或「path6 已回堵至園區二路與工業東九路口」等訊息，請求員警協助進行車流導引。

系統運作績效結果

本研究以旅行時間與系統通過量作為控制策略執行前後之績效比較基礎，用以了解本研究之控制策略系統改善前和改善後的差異。

資料蒐集日期分別為事前 102/4/23 ~ 25、102/12/12 調查，以及事後 102/12/26 調查，事前調查 4/23 ~ 25 為交通工程改善與協控系統皆尚未建置的日期；12/12 為已實施交通工程改善，但協控系統尚未運作的日期；而 12/26 則為交通工程改善與協控系統皆已正式運作後的日期。

旅行時間

對於旅行時間計算的起迄點，係以科學園區新安路北上匝道為起點，竹北地區之光明六路與北上出口匝道為迄點，如圖 18 所示。

由圖 19 之前、後旅行時間分佈趨勢對照結果顯示在此事故衝擊期間，12/26 調查呈現的旅行時間分佈雖提升相當程度，且較 12/12 同一期間為高，但仍呈相當穩定型態。

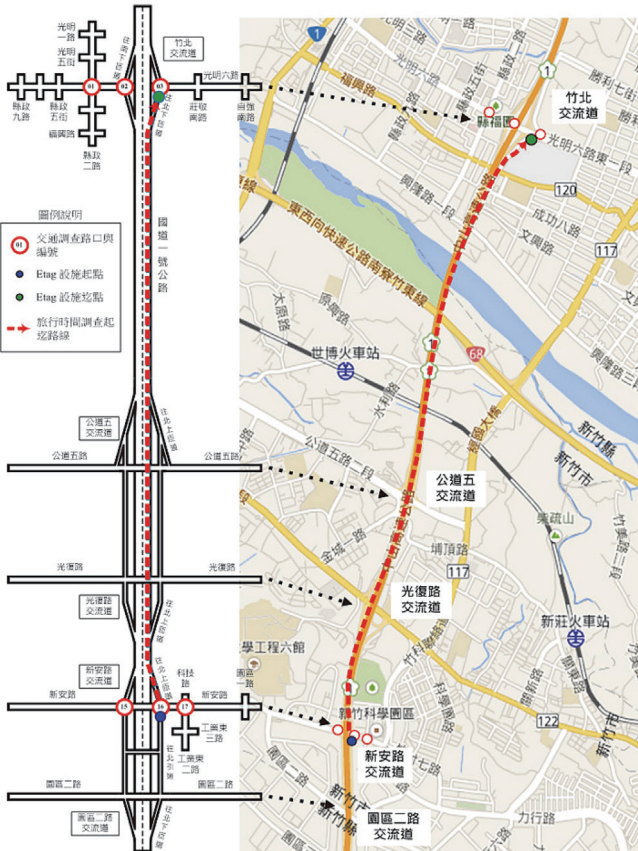


圖 18 評估旅行時間的路徑

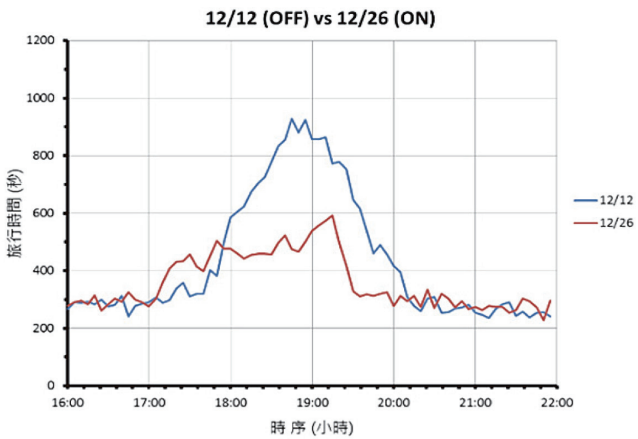


圖 19 事前 12/12 與事後 12/26 旅行時間分佈趨勢對照圖

圖 20 係進一步將事前 4/23 與 4/25 藉由浮動車法在不同出發時間點所記錄之旅行時間樣本加入分佈趨勢對照的結果，顯示所有事前調查日所蒐集的旅行時間樣本分佈趨勢都較一致，而事後調查日的旅行時間樣本分佈型態，特別是在 18:00 ~ 20:00 的高交通需求則相對較低而平緩。

圖 20 為將事前 12/12 與事後 12/26 比對吻合資料，採每五分鐘平均旅行時間分佈型態的比較結果，顯示在全部調查時段 (16:00 ~ 22:00) 內，事後 12/26

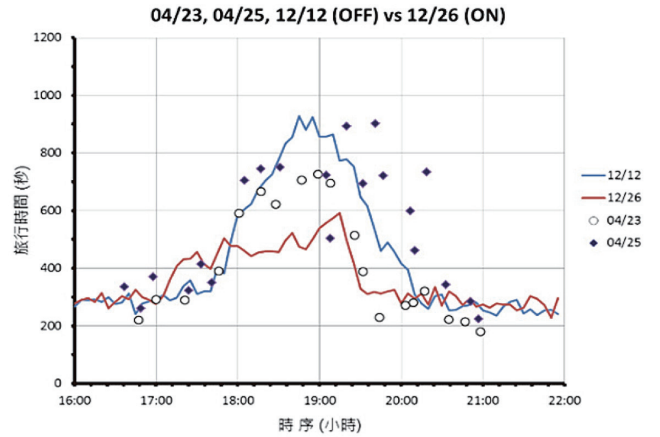


圖 20 事前 04/23, 04/25, 12/12 與事後 12/26 旅行時間分佈樣本趨勢對照圖

平均旅行時間約較事前 12/12 改善 6.8% (含多樁車輛事故衝擊在內)，若進一步排除 12/26 發生事故期間 (16:30 ~ 18:00) 之旅行時間樣本，則改善率提高至 14.5%。此結果也顯示，若單純只考量交通協控系統啟動之效益下 (12/12 與 12/26 皆已包含交工改善之影響)，即可使得從園區至竹北下匝道關鍵路徑在下午尖峰之平均旅行時間改善 5% 以上。

本研究進一步將 12/12 與 12/26 兩日 16:30 ~ 20:00 (需求尖峰期間) 的取樣資料排除，發現事前 12/12 與事後 12/26 其他期間的平均旅行時間分佈型態相當穩定一致，故分別假設此兩日在該期間的平均旅行時間值 (分別為 273.0 秒與 283.5 秒) 為自由行車旅行時間，並以此兩日在調查期間曾發生之最大 5 分鐘旅行時間值 (分別為 927.4 秒與 591.8 秒) 為計算最大旅行延誤值的基礎，求得事前 12/12 的最大旅行延誤為 654.4 秒，事後 12/26 為 308.3 秒，最大延誤時間減少約 53%，顯示新建系統已有相當適應車流型態急遽變異的能力與效果。

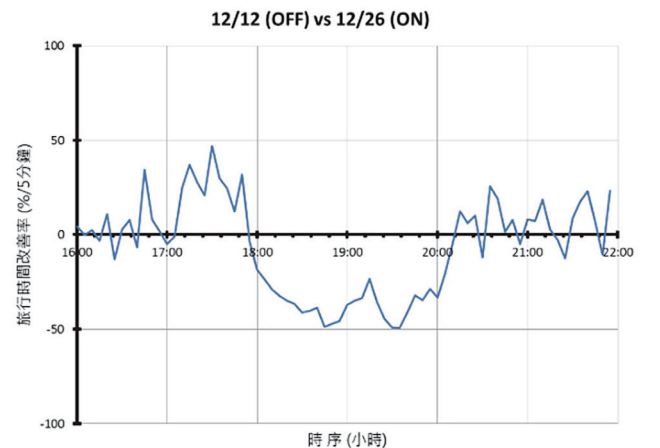


圖 21 事前 12/12 與事後 12/26 旅行時間消長趨勢圖

區域路網通過量

本研究檢視總通過流量 (throughput) 之區域路網計有兩處，分別為新竹科學園區新安路交流道週邊路網與竹北地區竹北交流道週邊路網，總通過流量之核計係以調查期間駛出該路網週界路段的調查流量為依據，圖 22、圖 23 與圖 24 分別為竹北區域路網與新竹科學園區路網之汽、機車交通量調查範圍與週界路段分佈概況。

本研究將累計調查期間各小時的總通過流量，竹北地區之累積趨勢分佈如圖 25 所示，相較結果顯示，事後 12/26 之 4 小時總通過流量約較事前 12/12 增加 2.84%，約較事前 04/25 增加 7.72%；圖 26 為科學園區累積趨勢分佈，顯示事後 12/26 之 4 小時總通過流量約較事前 12/12 增加 5.95%，約較事前 04/23 增加 8.54%。區域路網總通過量之彙總比較，詳列於表 5、表 6。

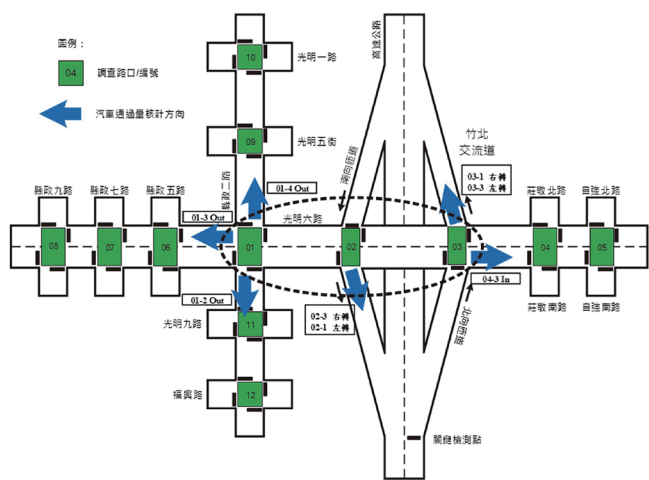


圖 22 竹北區域路網交通量調查範圍與週界路段分佈概況圖

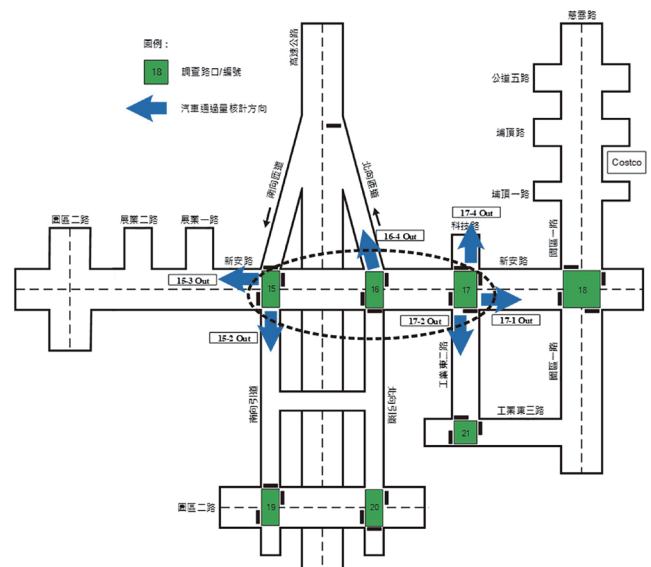


圖 23 新竹科學園區路網交通量調查範圍與週界路段分佈概況圖 (汽車)

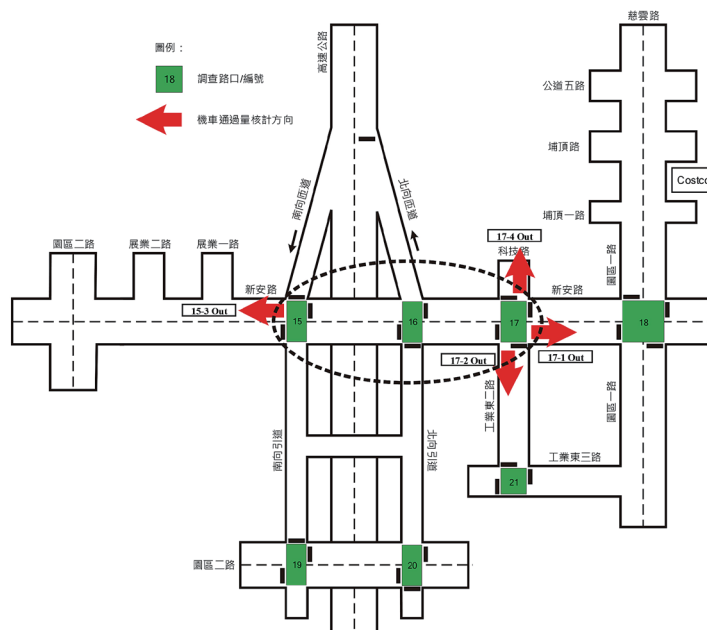


圖 24 新竹科學園區路網交通量調查範圍與週界路段分佈概況圖 (機車)

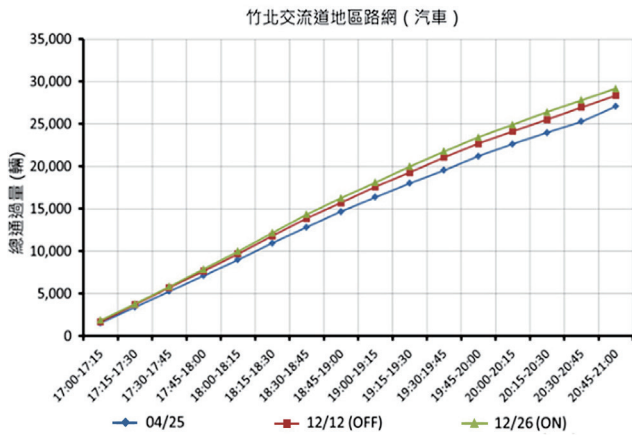


圖 25 竹北區域路網事前、後路網累計總通過流量對照圖

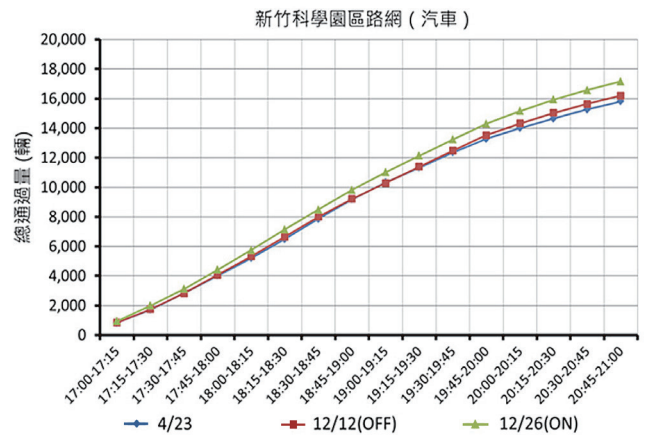


圖 26 新竹科學園區路網事前、後路網累計總通過流量對照圖

表 5 竹北區域路網事前、後依時總通過量彙整比較表

竹北地區						
	分時通過量			分時增加率 (%)		
	4月25日 (無交工無協控)	12月12日 (有交工無協控)	12月26日 (有交工有協控)	交工改善之影響	交工改善與 交通協控之影響	交通協控之影響
17:00-17:30	3396	3690	3757	8.66	10.63	1.82
17:30-18:00	3700	3964	4098	7.14	10.76	3.38
18:00-18:30	3845	4122	4290	7.20	11.57	4.08
18:30-19:00	3697	3920	4072	6.03	10.14	3.88
19:00-19:30	3365	3565	3748	5.94	11.38	5.13
19:30-20:00	3171	3400	3445	7.22	8.64	1.32
20:00-20:30	2784	2833	2984	1.76	7.18	5.33
20:30-21:00	3105	2854	2758	-8.08	-11.18	-3.36
	總通過量			總增加率 (%)		
17:00-21:00	27063	28348	29152	4.75	7.72	2.84

註：交工改善之增加率 = $\frac{12月12日-4月25日}{4月25日} \times 100\%$ 交工改善與協控之增加率 = $\frac{12月26日-4月25日}{4月25日} \times 100\%$ 交通協控之增加率 = $\frac{12月26日-12月12日}{12月12日} \times 100\%$

表 6 新竹科學園區路網事前、後依時全車種總通過量彙整比較表

新竹科學園區 (全車種)						
	分時通過量			分時增加率 (%)		
	4月25日 (無交工無協控)	12月12日 (有交工無協控)	12月26日 (有交工有協控)	交工改善之影響	交工改善與 交通協控之影響	交通協控之影響
17:00-17:30	1713	1742	1998	1.69	16.64	14.70
17:30-18:00	2303	2323	2425	0.87	5.30	4.39
18:00-18:30	2482	2592	2729	4.43	9.95	5.29
18:30-19:00	2693	2562	2669	-4.86	-0.89	4.18
19:00-19:30	2145	2178	2326	1.54	8.44	6.80
19:30-20:00	1945	2129	2153	9.46	10.69	1.13
20:00-20:30	1365	1508	1636	10.48	19.85	8.49
20:30-21:00	1165	1164	1225	-0.09	5.15	5.24
	總通過量			總增加率 (%)		
17:00-21:00	15811	16198	17161	2.45	8.54	5.95

結論與建議

針對國道 1 號竹北交流道下班尖峰時間交通壅塞問題，本研究以階段性控制策略方式，依高速公路及平面道路不同壅塞狀況，提供不同號誌控制策略及模式因應，經系統之實際上線運作測試及績效調查結果顯示，系統運作後 path1 之旅行時間皆較事前縮短，且改善幅度大於 5%，整體路網總通過量皆有增加。

本研究之即時性號誌控制係採用車輛偵測器之有無車訊息作為模式預測分析基礎，因此，也大量使用正向偵測的車輛偵測器，並進行了基本的正確性分析。根據本研究實測結果顯示，正向偵測之車輛偵測器其有無車參數在高速公路或平面道路之準確度均可達 90% 以上，且較不易受車速影響，相較使用其它偵測參數，可更確保有品質與可靠的偵測資料來源，尤其是低速（壅塞）狀態下。

此系統與模式設計係以路徑為主要分析對象，針對各路徑車流長短及前方路口回堵狀況，預估車流紓解所需綠燈時間，並動態調整每週期路口之週期、時比與時差，因此，對於模式及系統建議可適用之環境條件如下：

1. 車流特性
 - (1) 各時段或各路徑車流差異甚大之路口。
 - (2) 車流量大且具有多個特定路徑現象。
2. 道路環境特性
 - (1) 單一路口或群組路口均可適用，尤其是針對距離相近之群組路口，其改善效益較高。
 - (2) 交流道處，較適用於「鑽石型」、「部分苜蓿葉型」等交流道型式。

另在本研究示範區域中，已先初步界定竹北交流道北上出口匝道之車流主要源自科學園區，故在控制策略與模式設計時主要著重於竹北地區之紓流及園區新安路匝道之截流，對於高速公路（園區北上至竹北交流道）沿線之其它交流道目前尚未納入考量，然若車流分佈情況有所改變，即從光復路或公道五路交流道至竹北交流道之車流增加，在無相對應之截流策略下，大量車流進入高速公路恐影響竹北地區之車流紓解效果及園區之截流時間增長等問題，因此，建議在未來的研究方向，對於研究範圍內高速公路主要交流道均應納入評估與考量。

參考文獻

1. H.-J. Cho, T.-J. Huang, and C.-C. L. Huang (2019), "Path-based MAXBAND with green-split variables and traffic dispersion." *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, Vol. 7, No. 1, pp. 726-740.
2. Ming-Te Tseng, Mu-Heng Wang, Chueh-Ting Chen, Yong-Jhong Cheng, Chien-pang Liu, and Yi-Jung Wu (2019), "PaSO: A Path-based Signal Optimization Model for Signalized Intersections with Mixed Traffic Flows in Taiwan." 26th ITS World Congress, Singapore, 21-25 October 2019, AP-TP2006#.
3. Yang, X.F., Cheng, Y., and Chang, G.L. (2015), "A multi-path progression model for synchronization of arterial traffic signals." *Transportation Research Part C*, Vol. 53, pp. 93-111.
4. Cho, Hsun-Jung, Ming-Te Tseng, and Ming-Chorng Hwang (2014), "Using detection of vehicular presence to estimate shockwave speed and upstream traffics for a signalized intersection." *Applied Mathematics and Computation*, 232, pp. 1151-1165.
5. 曾明德 (2012), 「雷達車輛偵測及衝擊波技術應用於緊鄰路口號誌控制之研究」, 國立交通大學, 博士論文。
6. 曾明德等 (2013), 「群組路口即時交通號誌控制方法及其疏解路口車流所需綠燈時間預測方法」, 中華民國專利, 1416439。 



土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: admin@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。