

高速公路遞減速限控制之研究

丁國樑* 張榮成**

摘要

高速公路意外事故之發生依交通狀況與環境狀態之不一，有20~50%是由先前的事故所造成之衍生性事故，若能即時將接近與通過該瓶頸路段之順暢旅行速率給予上游駕駛人知曉，將可降低衍生性意外事故發生的可能性，節省車輛耗油量與降低廢氣排放量，並可誘導部分用路人改道行駛，以降低該路段之交通擁擠與旅行成本。

本研究首先以衝擊波分析法，對意外事件所產生之影響範圍及其旅行速率進行分析。然後，以耗油量為績效指標，在總耗油量最低之策略下構建遞減速限控制模式；同時，也對該控制時段內車輛排放物之總量加以分析。而為實施遞減速限控制，高速公路上需有偵測器以偵測事故之發生與車流狀態，同時也需有可變速限標誌以告知駕駛人改變其行駛速率，本研究考慮衝擊波擴散前偵測事故之發生，以每一公里設有一偵測器與可變速限標誌進行探討分析。

由模擬實例分析結果顯示，在實施遞減速限控制時，流量對其方案之實施有顯著之影響，在高流量下其單位車輛效益雖較低，但有較大之總效益。而可變速限標誌設置間距0.5公里較1.0公里有微量增加之效益，可變速限標誌變換時間間隔1分鐘也較5分鐘有微量增加之效益，但均沒有顯著的差異。在意外事件與施工路段所形成之瓶頸型態，實施遞減速限控制時間長短受瓶頸處之容量所影響，而在相同時間點上其效益沒有顯著之差異，遞減方案速限幅度則受允許實施速限之範圍與流量的影響。

一、前言

高速公路行車事故是無法完全避免的，其一旦發生意外事故時，極可能產生嚴重之旅行時間延滯、財物損失，甚至人員傷亡。依交通狀況與環境之不一，高速公路上所發生的事故中有20~50%是由先前的事故所造成之衍生性事故。國外早在60年代初期就已經致力於高速公路監測及控制系統之發展，期能藉此將發生衍生性事故的機率降至最低程度。

國道中山高速公路自民國67年10月31日全線完工通車後，改變了臺灣地區的運輸型態，確實提供快速、便捷與安全的服務。然因交通流量急遽增加，所導致

*國立成功大學交通管理科學研究所教授（電話：(06) 2757575-53226；傳真：2753882）。

**國立成功大學交通管理科學研究所研究生。

的交通事故與公路養護工作也隨著增加，而這些交通事件發生地點即成為路段瓶頸所在，對高速公路主線上的車流將產生影響或衝擊，上游車流若仍保持原速率接近，則容易產生強烈的衝擊波，導致車流的不穩定而衍生意外。若能即時將接近與通過該瓶頸路段之順暢旅行速率給予上游駕駛人知曉，將可降低衍生性意外事故發生的可能性，節省車輛耗油量與降低廢氣排放量，並可誘導部分用路人改道行駛，以降低該路段之交通擁擠與旅行成本。

基於此，本研究在防止衍生性事故發生、確保安全為首要目標之前提下，依據即時的流量資訊，估計出接近瓶頸路段應採行之順暢旅行速率，利用可變資訊標誌系統明確地告知用路人，如此將可消除由於上下游速度差異大所產生的衝擊波，維持車流之穩定，使不致發生衍生性之意外事件，同時也可減少因急劇減速與加速所增加的耗油量與廢氣排放物，降低用路人之旅行成本，減少環境衝擊【1】。

本文除此前言說明研究之背景外，第二節將說明相關之理論，如以衝擊波理論推估旅行時間，車輛耗油與排放物分析等，第三節則為速限控制模式之構建，第四節以實例分析模擬速限控制下之系統績效，並進行若干變數之敏感度分析，致獲得重要結論，最後則對後續之研究提出改進方向。

二、相關理論

2.1 交通衝擊波

當高速公路路段發生意外事故或由於養護維修而封閉車道形成瓶頸時，若上游的車流需求量大於該瓶頸路段的服務容量，則後續車流將會發生排隊過程並形成衝擊波；當瓶頸消除時，也會再次形成另一復原之衝擊波。

本研究主要應用交通衝擊波的理論進行車流行為變化的探討，其存在著許多簡化的假設，茲簡述如下：

- ①在所分析的時間與路段範圍中，各路段的容量可固定或變化，如有容量變化，則是以瞬間的方式改變到另一個容量值。
- ②在所分析的路段範圍內，上下游各只有一個出口及入口，中間沒有其他任何出入口。
- ③在所分析的整個時間範圍內，交通需求量可為固定或變化值，而如果有變化，則是以瞬間的方式改變到另一個交通需求量。
- ④在所分析的整個時間與路段範圍內，所選定流量—密度關係式【2】，不會隨時間而改變。
- ⑤只單獨考慮一個瓶頸路段的處理，而在擁擠車流中的等候車隊也假設沒有意外事故的情形發生。
- ⑥衝擊波分析是屬於巨觀 (Macroscopic)、確定性 (Deterministic) 的分析過程，所有車輛在同一車流型態下，以相同的速度行進，不考慮隨機的情況。
- ⑦駕駛人事先並未預期下游流量狀態的變化，所以速度的改變只在衝擊波的界面上瞬間變化，沒有加減速的考量。

2.2 旅行時間推估

首先必須求得受意外事件影響的衝擊波，並依據受衝擊波影響前後其相互間的關係找尋車輛的時空軌跡，以推估旅行時間與影響範圍，而在求解的過程中有一些假設輸入的變數必須加以決定，包括計算旅行時間的距離、車道封閉時間、需求流量、車流模式曲線、受阻路段容量等。

在決定計算旅行時間的距離上，以車道封閉地點上游非擁擠車流、距離D公里處，依衝擊波之發展可調整D的距離，但不涵蓋任何交流道之進出口。而車道封閉時間T的長短，則根據意外事故之嚴重程度，依經驗給予一所需的消除時間，並依實際狀況予以調整。

在求得不同界面之衝擊波後，再根據其相互間之關係來追蹤車輛的路徑軌跡，即能推算出車輛旅行時間及其影響範圍，並以此來實施遞減限速控制。依據本研究之推估，可將車輛的路徑軌跡共分成八大類，可參照圖1及圖2之說明如下【3】：

- D：意外事件地點至所採用之流量偵測器之距離
- $W_{11}、W_{12}、\dots、W_{1n}$ ：隨流量變動的衝擊波速度
- W_2 ：復原的衝擊波速度
- $W_{31}、W_{32}、\dots、W_{3n}$ ：隨流量變動的衝擊波速度
- t：車輛通過偵測器位置的時間與車道開始封閉的時間差
- $U_1、U_2、U_3$ ：車流速度
- Q_m ：擁擠車流的最大排隊長度
- T：車道封閉時間
- T_1 ：完全紓解擁擠車流所需的時間
- T_2 ：瓶頸解除後紓解擁擠車流所需之時間
- L_1 ：封閉時間經t時後其衝擊波形成之長度
- L_2 ：封閉時間經T時衝擊波形成之長度

(1)當 $t \leq T$ 且 $t + S_{11} + S_{22} < T$

$$L_1 = |W_{11} + W_{12} + \dots + W_{1n}| \Delta t$$

$$S_{11} = \frac{D - L_1}{U_1 + |W_{1n}|}$$

$$S_{12} = \frac{L_1 + |W_{1n}| S_{11}}{U_2}$$

$$S_1 = S_{11} + S_{12}$$

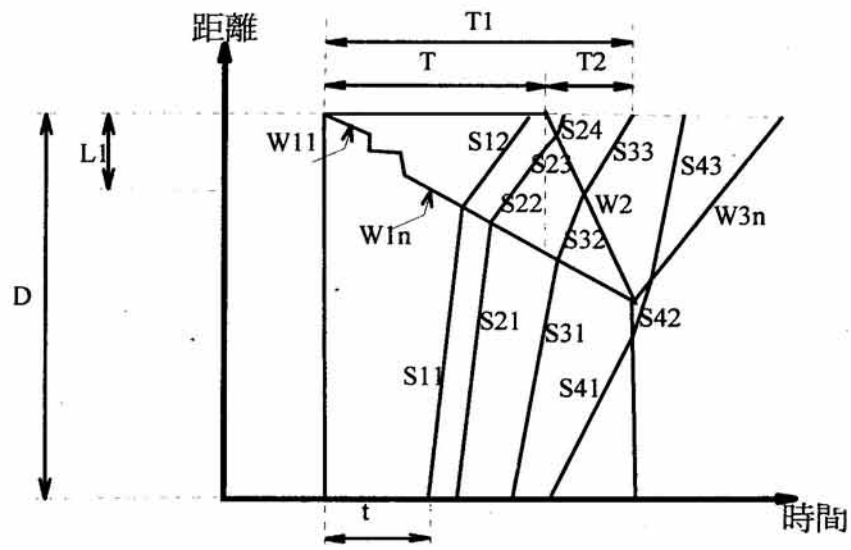


圖1 車輛路徑軌跡分類圖($t \leq T$)

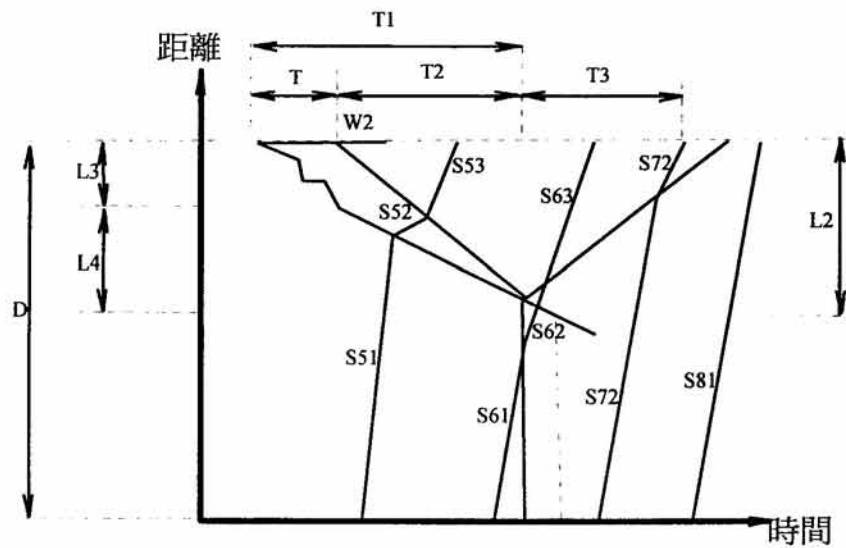


圖2 車輛路徑軌跡分類圖($t > T$)

(2) 當 $t < T$ 且 $t + S_{11} + S_{22} > T$

$$S_{21} = \frac{D - L_1}{U_1 + |W_{1n}|}$$

$$S_{22} = T - t - S_{21}$$

$$S_{23} = \frac{L_1 + S_{21}|W_{1n}| - S_{22}U_2}{U_2 + |W_2|}$$

$$S_{24} = \frac{|W_2|S_{23}}{U_3}$$

$$S_2 = S_{21} + S_{22} + S_{23} + S_{24}$$

(3) 當 $S_{31}U_1 \geq D - Q_m$ 且 $t + S_{21} < T$

$$S_{31} = \frac{D - L_1}{U_1 + |W_{1n}|}$$

$$T_2 = \frac{L_1 + (T - t)|W_{1n}|}{|W_2| - |W_{1n}|}$$

$$S_{32} = \frac{D - S_{31}U_1 - |W_2|(t - S_{31} - T)}{U_2 + |W_2|}$$

$$S_{33} = \frac{|W_2|(t + S_{31} + S_{32} - T)}{U_3}$$

$$S_3 = S_{31} + S_{32} + S_{33}$$

(4) 當 $t \leq T$ 且 $t + \frac{D}{U_1} \leq T_1 + \frac{Q_m}{W_{3n}}$

$$S_{41} = T_1 - t$$

$$S_{42} = \frac{D - Q_m - S_{41}U_1}{U_1 - |W_{3n}|}$$

$$S_{43} = \frac{D - U_1(S_{41} + S_{42})}{U_3}$$

$$S_4 = S_{41} + S_{42} + S_{43}$$

(5) 當 $t > T$ 且 $(T_1 - t)U_1 \geq D - Q_m$

$$A = \frac{T}{\Delta t}$$

$$L_3 = |W_{11} + W_{12} + \dots + W_{1A}| \Delta t$$

$$L_4 = L_1 - L_3$$

$$W_A = \left| \frac{L_4}{t - T} \right|$$

$$T_2 = \frac{L_3}{W_2 - W_A}$$

$$T_1 = T + T_2$$

$$Q_m = W_2 * T_2$$

$$T_3 = \frac{Q_m}{W_{3n}}$$

$$S_{51} = \frac{D - L_1}{U_1 + |W_{1n}|}$$

$$S_{52} = \frac{D - |W_2|(t - T + S_{51}) - S_{51}U_1}{U_2 + |W_2|}$$

$$S_{53} = \frac{|W_2|(t - T + S_{51} + S_{52})}{U_3}$$

$$S_5 = S_{51} + S_{52} + S_{53}$$

$$(6) \frac{(D - S_{51}U_1)}{U_1} < T_3$$

$$S_{61} = T_1 - t$$

$$S_{62} = \frac{D - |W_{3n}| \times T_3 - S_{61}U_1}{U_2 - W_3}$$

$$S_{63} = \frac{D - U_1(S_{61} + S_{62})}{U_3}$$

$$S_6 = S_{61} + S_{62} + S_{63}$$

(7) 當 $t > T_1$ 且 $S_{71}U_1 < D$

$$T_5 = t - T_1$$

$$P = \left(\frac{T_5}{\Delta t} \right)$$

$$Z(t) = \frac{T_5}{\Delta t} - P$$

$$L_2 = |W_{3n} + W_{3(n-1)} + \dots + W_{3p}| \cdot \Delta t + |W_{3p}| \cdot Z(t)$$

$$S_{71} = \frac{D - Q_m + L_2}{U_1 - |W_{3n}|}$$

$$S_{72} = \frac{D - S_{71}U_1}{U_3}$$

$$S_7 = S_{71} + S_{72}$$

(8) $T_1 + \frac{Q_m}{W_{3n}} < t + \frac{D}{U_1}$

$$S_{81} = \frac{D}{U_1}$$

2.3 車輛耗油分析

本研究在探討車輛行駛於共同路段不同速率下之耗油量，因此，可將所有車輛皆視為行駛在水平面上而分析其耗油量，而在研究路段範圍內其速率變化有四個階段，分三點說明如下：

1. 等速行駛或自然減速後等速行駛：此階段車輛之耗油量，本研究引用趙捷謙君等【4】之「台灣地區各型車輛水平路面耗油之分析」的結論。為排除換擋的影響，利用迴歸的方法配適成二次方程式。同時為簡化問題，以轎車耗油量為小客車當量值之耗油量。

2. 延滯等待：此階段車流受阻於瓶頸路段，車輛處於怠速狀況下，本研究則引用工研院機械所於74年7月測試之結果，小客車每分鐘耗油量為16.53公克（0.02215公升/分）。

3. 加速至原有速率行駛：此階段為所有車輛正通過瓶頸路段欲回復至原有速率，所產生速度變換而有超額耗油之情形。然而，本研究在於尋找瓶頸路段最適之速率方案，因此視其加速起點至最終速率在各方案皆為一致，即其耗油量相等，於是可將此項忽略。

由以上的說明與假設，本研究之耗油模式即：

$$F_{CC_i} = t_D \times F_D \times Q_D + Q_i \sum_{i,j} E_j \times L_{ij} \quad i=1, \dots, n; \quad j=\text{速率變化等級}$$

式中：

- F_{CC}：系統內總耗油量（公升）
- L_{ij}：i路段內車輛以j速率行駛之里程（公里）
- Q_i：i路段內的車輛數
- E_j：j速率下之耗油量（公升/公里）
- t_D：延滯時間（怠速時間）（分）
- F_D：延滯之耗油量（公升/分）
- Q_D：受延滯之車輛數
- n：所影響之路段數（n=1,2,3...）。

2.4 排放物分析

由於影響排放物之因素甚多，難以全部納入模式中，本研究僅對車流特性之影響加以考慮，採用吳贊鐸君【5】之汽車定速行駛之污染迴歸模式與延滯污染排放係數（Emission Factor for Delay）。

三、模式構建

遞減速限控制模式主要由前面所說明之旅行時間推估、耗油量與排放物分析等三部分所構建而成，圖3為遞減速限控制模式之基本流程。茲說明如下：

（一）資料輸入：

輸入瓶頸路段上游D距離處，非擁擠車流路段偵測器所蒐集的需求流量，並針對造成瓶頸之原因及相關資訊之掌握，以過去意外事故累積之經驗判斷道路封閉時間T，並做彈性調整。然而，並非意外事故發生之原因皆能即時為交控人員所掌握，依文獻顯示有98%之意外事故皆能在30分鐘內清除。因此，在無法即時掌握意外事故之原因時，封閉時間可先以30分鐘輸入。

（二）旅行時間推估

此階段利用旅行時間推估模式，推得旅行時間、平均速率與影響範圍，以作為方案選擇之限制式，而其需滿足總旅行時間不變的原則。所謂旅行時間不變是指在瓶頸發生後通過所選定流量觀測點至瓶頸位置所需之旅行時間，不會由於速限控制而改變。即在該路段範圍內，經由瓶頸上游可變速限標誌板配速後之平均速率需大或等於瓶頸發生後所選定路段若無任何速限控制下之平均速率。

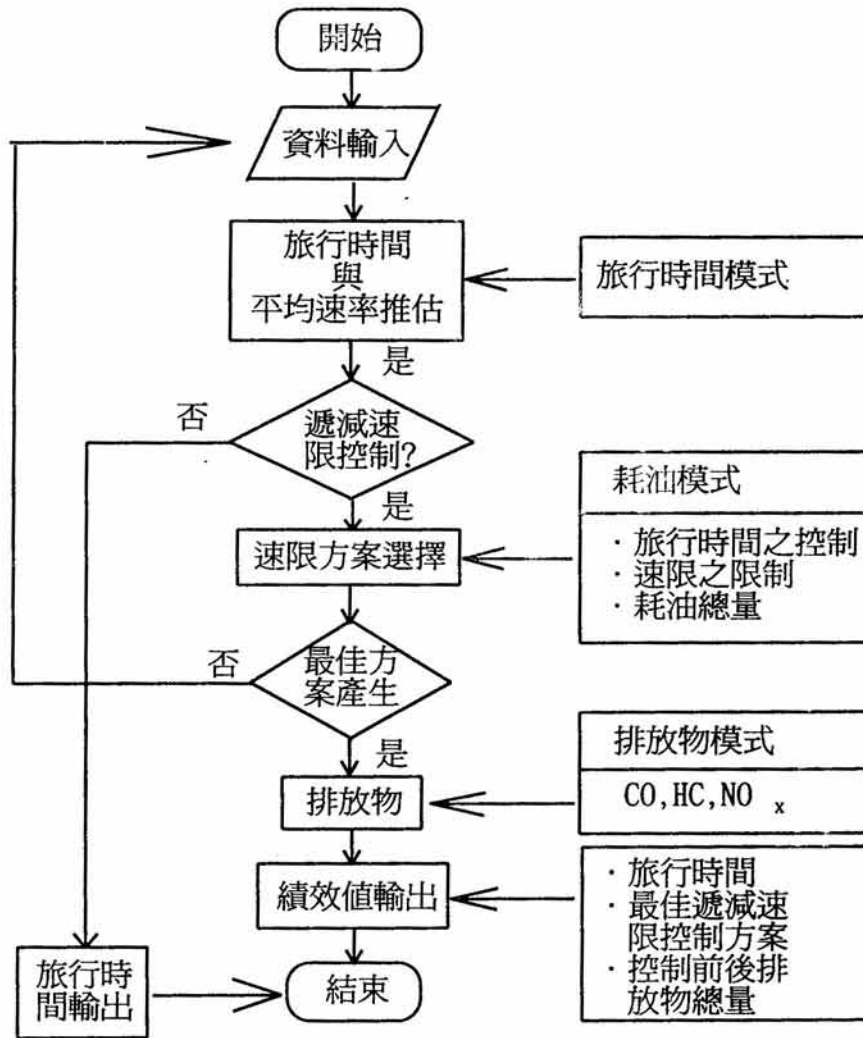


圖3 遞減速限控制模式基本流程

(三) 遞減速限控制實施與否

本模式主要為了促進車流安全與流暢，當控制路段車流之平均速度低於高速公路速限平均值時（80公里/小時）才實施遞減速限控制。

(四) 速限方案選擇

速限最佳方案是以總耗油量最低者為考慮，而方案的定義是在控制改變時間點上，由流量觀測點以自由流之車輛時空軌跡與衝擊波界面形成上游第一處可變速度標誌板基準點，分別以5, 10, 15, 20公里等5公里之倍數遞增至達自由流速率，而第一處上游可變標誌板之位置是考慮時速45公里，速度差為20公里時之最小安全煞車距離26.6公尺（ $f=0.325$ ）。此時速45公里也為最低之控制速限。

(五) 排放物分析

本階段在方案選取後，將方案實施前後之排放物，以其對人體健康影響大小順序之權數加以計算總量，以為管制之依據。

四、模擬實例分析

4.1 範例說明

當流量水準為 $v/c=0.66$ 時，若發生瓶頸使原有二車道縮減為一車道，每車道容量由2390veh/hr縮減為1810veh/hr，封閉時間為20分鐘，流量觀測點位於瓶頸處上游之13.5公里處，資訊可變標誌板變換間隔為五分鐘，所得到的遞減速限方案如表1所示。此基本方案之總效益為耗油量減省535.8公升，排放物降低82.6公斤。

表1 速限控制方案 ($v/c=0.66$)：二車道封一車道

		流量變動時間間隔：5（分） 流量觀測點之位置：13.5（公里）														速度控制起點里程（公里）					
封閉時間（分）	始控制時間（分）	速限控制（KPH）																控 制		未 控 制	
		里 程（km）																耗 油	排 放 物	耗 油	排 放 物
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	（公升）	（克）	（公升）	（克）	
20	0	45	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95				1.676	1818	2.605	1961	11.5
	5	45	45	45	55	65	75	85	95								1.977	1835	2.361	1894	7.5
	10	45	45	45	55	65	75	85	95								1.968	1767	2.398	1835	7.5
	15	45	45	45	45	55	65	75	85	95							1.748	1704	2.106	1758	8.5

4.2 敏感度分析

本研究曾針對若干變數進行敏感度分析，包括封閉時間、控制範圍、流量偵測間隔、流量大小、路段偵測間距等，其結果示如表2，所得到的結論大致如下：

- ①在相同條件之瓶頸型態，封閉時間之長短對於單位效益沒有明顯影響，但封閉時間長者，總效益較高。
- ②可變速限標誌變換時間間隔較小者其正確性較佳，對於流量之變化較敏感。
- ③高流量下實施遞減速限方案其單位效益較低，但其總效益隨流量之增加而增加。
- ④遞減速限實施之範圍將影響速限控制之最佳方案，其單位車輛效益也隨著變動。速限變化幅度大者即速限控制範圍小者，其效益較低。
- ⑤可變速限標誌設置之間距，以耗油量及排放物總量而言，設置間距0.5公里與1公里相較，其效益僅有微量之增加。

表2 敏感度分析結果

方案	耗油量減省(公升)	排放物降低(公斤)
基本方案	535.8	82.6
封閉30分鐘	835	128.3
流量偵測間隔1分鐘	573	87.7
流量 $v/c=0.85$	985	125.3
控制範圍7.5公里	296.6	46.7
路段偵測間距0.5公里	556	83.6

五、後續研究

實施遞減速限控制方案下之耗油量與排放總量，皆較未實施時有降低之現象。此模擬分析之結果基於若干假設，其並非一成不變，後續研究可進一步深入加以分析，如：

1. 每一路段以等遞減幅度改變速率可變更為非等幅度或非等路段長之變化。
2. 本研究所採用之車流曲線的流量、速率、密度關係值，在流量相同條件下與現行台灣地區公路容量手冊中之值比較，其速率有偏高而密度較低的現象，望後續研究者能加以驗證。
3. 遞減速限控制之成效決定於用路人之駕駛行為，後續研究者可對用路人對高速公路上之速限指示遵守程度及可接受之速度變化幅度進行研究。
4. 高速公路遞減速限控制之評估，本研究僅以耗油為績效指標進行方案選擇之決策，盼後續研究者能將更多之影響因素如排放物等加以綜合處理，以為評估之準則。
5. 欲實施遞減速限控制方案路段需普設偵測器及可變速限標誌，後續研究者可就其設置成本、維修成本與可獲得之效益進行分析，瞭解設置之可行性及最適之設置間距。
6. 高速公路收費站上游之固定遞減速限控制，可改為依等候線長度而改變之動態遞減速限控制，本研究發展之控制邏輯基本上可適用於此種速限控制。
7. 遞減速限控制之研究以實用性著眼，其需有某一程度之可靠性方能被接受，然而礙於現有硬體設備無法配合，本研究目前未能進行實證，未來仍有待建立實驗路段以驗證模式之實際效果。

參考文獻

1. 張榮成，「高速公路遞減速限控制之研究」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，83年6月。
2. 林貴璽，「高速公路基本路段容量暨相關影響因素特性之研究」，交通大學碩士論文，民國76年。

3. Wirasinghe S.S., " Determination of Traffic Delay form Shock Wave Analysis" Transp. Res. Vol.12, pp.343-348, 1978.
4. 趙捷謙、邱盛生，「台灣地區各型車輛水平路面耗油之分析」，運輸季劃季刊，第六卷第二期，民國66年4月。
5. 吳贊鐸，「移動污染源污染特性分析與其應用之研究」，交大運研所碩士論文，民國80年。