交　通　學　報
第　五　卷　第　一　期
民國九十四年十月
頁1～頁34

Journal of Traffic Science
Central Police University
Vol. 5 No. 1
Oct. 2005, pp. 1~34

縱向防撞警示系統演算法則之參數數值分析[1]

Numerical Analysis of Parameters in the Rear End Collision Warning System Algorithm

張建彥 Chien-Yen Chang[2]

張靖 Ching Chang[3]

摘　要

縱向防撞警示系統為先進安全車輛重要的駕駛輔助系統之一，其警示演算法則涉及多項駕駛者心理行為反應之人因參數，而警示系統啟動之跟車間距上限、警示門檻之駕駛者感知反應時間、煞車減速率、煞車停止後的靜止車間距離為主要的四項參數，因應不同駕駛者心理行為屬性，各項參數即會有不同的適用組合。鑒於不同參數值所推算之警示時機對積極駕駛者與保守駕駛者均會產生不同的心理行為反應結果，本研究乃歸納整理不同縱向防撞警示系統之防撞警示演算法則，並探討跟車間距上限、感知反應時間、煞車減速率、靜止車間距離等四項參數對縱向防撞警示系統演算法則的影響，期能以此作為有效縱向防撞警示演算法則建立之基礎，為車輛駕駛者在干擾最小的情況下，提供最大的安全警示。

關鍵詞：跟車間距上限、感知反應時間、煞車減速率、靜止車間距離、縱向防撞警示演算法則

---

[1] 本研究承國科會專題補助(計畫編號：NSC93-2218-E-216-014)，謹此致謝。作者感謝兩位匿名審查委員寶貴的修正意見，使本文更為嚴謹。

[2] 中華大學運輸科技與物流管理學系助理教授 (聯絡地址：新竹市300五福路二段707號，電話：03-5186085，傳真：03-5186545，E-Mail：axle@chu.edu.tw)

[3] 中華大學運輸科技與物流管理學系副教授

Abstract

The rear end collision warning system (RCWS) is one of the driving assistant subsystems in the advanced safety vehicle (ASV). The algorithm of RCWS concerns many human factor parameters of driver's psychology-behavior response. Maximum desired following distance of warning system opening, perception reaction time, braking deceleration and stationary vehicle spacing of warning threshold are four major parameters in the RCWS algorithm. The suitable combination of these four parameters will be different by different driver psychology-behavior characteristics. Since the effect of RCWS algorithm calculated threshold will be different for risk drivers and conservative drivers by applying different sets of parameters, this study collects and reviews the RCWS algorithms and analyzes the effect of RCWS algorithms by different parameter characteristics of maximum desired following distance, perception reaction time, braking deceleration and stationary vehicle spacing. The results of this study will be the basis in developing a useful RCWS to provide the best safety alert timing with the least disturbance to drivers.

Key words: *Maximum Desired Following Distance, Perception Reaction Time, Braking Deceleration, Stationary Vehicle Spacing, Rear End Collision Warning System (RCWS)*

壹、緒論

車輛縱向防撞警示系統為車輛尾撞警示系統(Rear End Collision Warning System)或前撞警示系統(Forward Collision Warning System)，乃是結合先進感測技術，聽覺(聲響、語音)、視覺(HUD、LCD)或觸覺(振動座椅、煞車)警示裝置，以及安全視距(Sight Distance)的演算法則，在車輛行駛過程中，依據不同的道路與交通狀況，適時地對駕駛者提供警訊，以確保行駛中車輛能隨時與前方維持適當的行車間距，達到安全防護的效果。目前美國、日本、歐洲等先進國家或地區，以及各大車廠(HONDA、MITSUBISH、MAZDA 等)均投入相當的心力開發新的縱向防撞系統，並將其結合於先進安全車輛(Advanced Safety Vehicle, ASV)中，除了在車輛產業的發展上有所助益外，亦期能在運輸

NATIONAL CENTRAL LIBRARY 國家圖書館 ROC

服務方面提供更安全的駕駛績效。

就我國道路交通安全的現況而言，縱向防撞警示系統的開發有其必要性與迫切性。依據交通部運輸研究所「汽車駕駛模擬系統軟硬體之擴充與測試駕駛行為實例應用之研究」研究【1】針對警政署道路交通事故資料庫統計指出，從民國 86 年至 90 年 A1 與 A2 事故之肇事原因中(見表 1)，未保持行車安全間隔佔所有 67 項肇事原因的第 12 位，且從民國 89 年起有遞增的趨勢；至於大客車之肇事原因中，依據內政部警政署民國 92 年臺閩地區大客車道路交通事故發生原因分析，未保持安全行車距離間隔更是高達第一位，佔 20.4%，如表 2 所示。而這些肇事原因的發生，大多是駕駛者注意力不足、分心或沒看到所導致(見表 3)，因此若能配備適當的縱向防撞警示系統，應能有效避免交通事故的發生。

表 1 民國 86 年至 90 年 A1 與 A2 事故之肇事原因排序表

主要肇因	86 年	87 年	88 年	89 年	90 年	合計	比例(%)
未依規定讓車	7070	8351	6642	13378	15807	51248	14
未注意車前狀態	4586	4006	3860	12230	16427	41109	11
違反號誌管制或指揮	3656	4835	3873	7096	7508	26968	7
未保持行車安全距離	8237	9379	1317	2607	3173	24713	7
尚未發現肇事因素	7330	6204	1692	3390	5611	24227	7
酒醉駕駛失控	3812	3806	2821	5659	5768	21866	6
左轉彎未依規定	2450	2163	1888	4824	6023	17348	5
其他引起事故之違規	2982	2826	2139	4263	4364	16574	5
肇事逃逸	1193	1641	1772	4362	4690	13658	4
未依規定減速	2136	1414	1395	3666	4319	12930	4
超速失控	2363	2129	1677	3413	3237	12819	4
未保持行車安全間隔	1603	1592	1140	2744	3628	10707	3
轉向或變換車道不當	2006	2073	961	1792	1733	8565	2
迴轉未依規定	963	990	829	2261	2856	7899	2

資料來源：【1】

NATIONAL CENTRAL LIBRARY 國家圖書館 ROC

表 2 民國 92 年臺閩地區大客車道路交通事故發生原因整理表

事故原因	件數	比例（%）
違規超車爭(搶)道行駛	1	2.3
蛇行逆向行駛	1	2.3
未靠右行駛、讓車	0	0
未依規定轉彎、倒車	1	2.3
超速失控	5	11.4
未依規定減速	1	2.3
搶越行人穿越道	4	9.1
未保持行車距離間隔	9	20.4
酒後駕駛、疲勞失控	1	2.3
未注意路況	8	18.1
違反號誌、標誌管制	3	6.8
肇事逃逸	0	0
機件故障	3	6.8
行人過失	0	0
其他	7	15.9
總計	44	100

註：本表數字僅含 A1 類（指造成人員當場或二十四小時內死亡之交通事故）
資料來源：【2】

從另一方面而言，任何防撞警示系統之開發或應用，均須深入了解駕駛者對於警示或資訊接收度與行為反應，而駕駛者對警示或資訊的接受程度與行為反應，除了駕駛者本身的駕駛習慣外，尚與警示顯示的方式、環境背景的複雜度、道路交通狀況及車流行為等因素有關，因此相關參、變數甚多而複雜，實有必要建立一套符合駕駛者心理－物理行為的警示方式，方能確立最有效的警示時機與內容。

NATIONAL CENTRAL LIBRARY 國家圖書館 ROC

表 3 肇事原因特性分類表

肇事原因排名		第一名	第二名	第三名	第四名	第五名	第六名	第七名	第八名	第九名	第十名
肇事原因		未依規定讓車	未注意車前狀態	違反號誌管制或指揮	未保持行車安全距離	酒醉駕駛失控	(1)左轉彎未依規定	未依規定減速	超速失控	未保持行車安全間隔	(2)轉向或變換車道不當
人	注意力問題	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	速度知覺	√	√		√	√		√	√	√	√
	空間知覺	√	√		√	√				√	√
	酒醉駕駛					√					
車與人路環境	未能及時偵測駕駛分心	√	√	√	√	√		√	√	√	√
	未能提醒安全距離不足		√		√					√	
	未能提醒車輛故障問題								√		
	未能提醒重要號誌與標誌			√				√	√		

註：(1)非禁止左轉交岔路口，因左轉彎時未先轉入最左方車道，或左彎專用車道或左轉待轉區內，並未事先顯示適當手勢、燈號，而肇事者。(2)路段中偏轉駕駛角度或車道變換行駛時，未注意安全，而肇事者。

資料來源：【1】

NATIONAL CENTRAL LIBRARY 國家圖書館 ROC

從國外目前所發展的各項縱向防撞警示演算法則(包括警示演算公式及警示門檻標準)中可以發現，後車(又稱主車，為警示主要對象車輛)駕駛者感知反應時間、煞車減速率和車輛煞停後與前車保持的靜止車間距離(即兩車靜止之車間距離)為演算法則中三項最重要的參數，也是影響警示啟動與否的門檻要素，而此三者又與駕駛者的生理條件與心理適應息息相關，其中駕駛者感知反應時間與煞車減速率之設定直接影響警示時機的安全性與駕駛者接受度，倘若設定過於冒險(例如感知反應時間太短或煞車減速率太大)，則極可能因警示太晚而導致碰撞危險發生；反之，若設定過於保守(例如感知反應時間太長或煞車減速率太小)，又可能因警示太早而對駕駛者產生干擾，甚至造成駕駛者對警示系統排斥而不用。至於車輛煞停後與前車保持之靜止車間距離設定一般均設定大於 0，如此在理想狀況下雖然不致有因設定而產生危險狀況，但是若靜止車間距離與一般駕駛行為差距太大，仍有可能造成警示過早或太慢，而與駕駛者心理適應產生衝擊，從而降低對警示系統的接受度。

除了感知反應時間、煞車減速率及靜止車間距離三項參數之外，如何確定車輛是處於跟車影響狀態，並從而啟動縱向防撞警示系統，也是一項重要的課題。由於車輛在道路駕駛時，並非一直處於跟車影響狀態，當前、後兩輛車間距過大時，前、後兩車之相互影響甚小，彼此依據各自的駕駛習慣行駛，此時縱向防撞警示系統便不需啟動；而一旦後車駕駛者感識到前車與自身之間距及相對速度差異過大時，乃加速貼近前車以縮短間距，逐漸由不受影響駕駛範圍進入受影響駕駛範圍，此時方形成跟車影響狀態，縱向防撞警示系統即需加以啟動。因此，如何確定受影響的跟車間距上限，則是縱向防撞警示系統的另一項重要的駕駛行為參數。

貳、縱向防撞警示演算法則分析

縱向防撞警示法則主要是以行車中前後兩車保持適當安全的距離，以因應不同的交通緊急狀況而不致產生碰撞為主，傳統交通工程之安全停車視距(Stop Sight Distance)觀念為演算法則發展的基礎。而由於車輛行進中，後車駕駛人、車之行為反應與前車駕駛人、車之行為反應均有所不同，且所遇到之環境狀況亦有所不同，故煞車減速變化即有所不同，再加上警示系統顯示之方式不同，乃衍生出應用於各種不同狀況的演算法則。以兩車同時行進跟車

行為下，前車緊急煞車為例，因前後兩車減速率不同，再加上後車駕駛人之感知反應時間變化，就可能產生：(1)前車先停止，後車才開始煞車；(2)前車緊急煞車(亮煞車燈)，後車即進行煞車反應，但前車先停止；(3)前車緊急煞車(亮煞車燈)，後車即進行煞車反應，但後車先停止三種狀況，每一種狀況所需的安全警示距離均有所不同，其中(1)情況所需的警示距離最長，(3)情況所需的警示距離最短，倘若將(1)情況套用在(3)情況下，則警示系統便會對後車駕駛者產生不必要的干擾，若將(3)情況套用在(1)情況下，警示系統即可能啟動太晚而造成危險；又例如警示系統顯示方式若採用綠(代表安全)、黃(代表警告)、紅(代表緊急)三種顏色之視覺顯示，則演算法則又與單一採用聲響或語音警示有所不同。本研究整理各相關研究與車廠之演算法則，分別加以比較評析如后。

(1) Peter 等【3】分別探討 MAZDA 汽車與 HONDA 汽車的縱向防撞警示演算法則，分別如下所示：

(a) MAZDA 演算法則

$$d_{br} = \frac{1}{2}\left[\frac{v^2}{\alpha_1} - \frac{(v - v_{rel})^2}{\alpha_2}\right] + v \cdot \tau_1 + v_{rel} \cdot \tau_2 + d_0 \qquad (1)$$

式中：

d_{br}：警示臨界距離；

v：裝有警示系統之後車車速；

α_1：後車最大減速率；

v_{rel}：前後車速差(即 $v_{rel} = v - v_{preceding}$)；

α_2：前車最大減速率；

τ_1：延遲時間(系統偵測延遲時間)；

τ_2：延遲時間(駕駛者感知反應時間)；

d_0：兩車車間距離補償。

此一警示系統乃是假設當兩車在保持 d_0 的狀況下，同時個別用最大減速率煞車，直到兩車完全靜止時，兩車所保持之靜止車間距離剛好為 0，不至於產生碰撞。由於 d_{br} 為後車感知反應後煞車距離加兩車車間距離補償 $(\frac{1}{2}\left[\frac{v^2}{\alpha_1}\right] + v \cdot \tau_1 + v \cdot \tau_2 + d_0)$ 與前車煞車距離 $(\frac{1}{2}\left[\frac{(v - v_{rel})^2}{\alpha_2}\right] + v_{preceding} \cdot \tau_2)$ 的相減值，因此若警示系統在兩車車間距離小於 d_{br} 後才給予警示，便會導致

兩車產生碰撞，而通常應用時，給予警示後兩車靜止時應再保持一定的緩衝距離，故縱向防撞警示門檻距離為 $d_{br}+\varepsilon$，ε 為緩衝距離參數。以 $\alpha_1=6\ \text{m/s}^2$、$\alpha_2=8\ \text{m/s}^2$、τ_1=0.1s、τ_2=0.6s、d_0=5m、v=100Km/Hr、$v_{preceding}$=100Km/Hr、ε=2m 為例，由於 d_{br} 約為 24m，因此當兩車車間距離等於 26m 時，即應給予警示。

前述警示演算法則中，v、v_{rel}、α_2、τ_1 可由先進感測系統偵測而得，τ_1 可由感測系統之特性而得；但 α_1、τ_2、d_0、ε 則必須由外部事先給定之參數，而事實上($d_0+\varepsilon$)可視為靜止車間距離參數。由於此一警示公式可避免所有的縱向碰撞，因此較保守。

(b) HONDA 演算法則

$$d_w = 2.2 \cdot v_{rel} + 6.2 \tag{2}$$

$$d_{br} = \tau_2 v_{rel} + \tau_1\tau_2\alpha_1 - 0.5\alpha_1\tau_1^{\,2} \quad \frac{v_2}{\alpha_2} \geq \tau_2 \quad \text{或}$$

$$d_{br} = \tau_2 v - 0.5\alpha_1(\tau_2-\tau_1)^2 - \frac{v_2^{\,2}}{2\alpha_2} \quad \frac{v_2}{\alpha_2} \leq \tau_2 \tag{3}$$

$$W = \frac{d-d_{br}}{d_w-d_{br}} \tag{4}$$

式中：

d_w：警示臨界距離；

d_{br}：煞車臨界距離；

v_{rel}：前後車速差(即 $v_{rel}=v-v_2$)；

v：裝有警示系統之後車車速；

v_2：前車車速；

τ_1：延遲時間(系統偵測延遲時間)；

τ_2：煞車時間；

α_1：後車最大減速率；

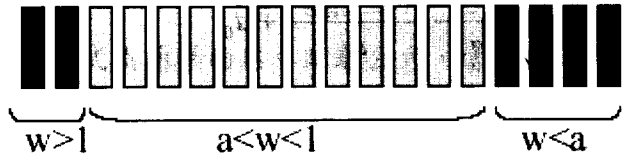
α_2：前車最大減速率；

d：前後兩車實際車間距離；

W：警示門檻參數。

前述之警示演算法則係以漸進式視覺顯示統系統搭配聲響警示系統之應用為主，漸進式視覺顯示系統包括綠、黃、紅三種燈色，如圖 1 所示。

當$W>1$時，表示$d>d_w$，此時安全無虞，故顯示綠燈；而當a<W<1時，a為聲響警示參數，此時為普通警示狀況，顯示黃燈，表示d雖然小於d_w，但仍大於d_{br}；當0<W<a時，d已非常接近d_{br}，故為緊急警示狀況，此時顯示紅燈並發出警告聲響；最後當W<0，應馬上採取煞車。



資料來源：【3】

圖 1 漸進式視覺警示顯示圖

Peter 在本篇研究中，除了定義給予警示之距離與直接啟動煞車之距離外，最後並加入路面摩擦係數與駕駛者特性因素來修正d_w和d_{br}，使得相關的外部輸入參數增加，但可更合理化。基本上，HONDA 演算法則由於採用漸進式之視覺警示系統，因此在警示距離的選擇上較為彈性，而其d_{br}的計算公式亦較不像 MAZDA 演算法則般保守，可以等到兩車距離較近時再給予危險警示，對駕駛者較不會產生過多的干擾，不過其演算法則所需提供的參數亦較多(包括d_w公式中的 2.2 及 6.2)。

(2) 朱海燕等【4】參考前述研究後，在比較 HONDA 和 MAZDA 相同功能產品的演算法後，將系統所偵測的數據整理成警示距離和最小煞車距離兩種。首先在警示距離部分，乃是以運動學上的關係求得公式(5)，再假設前車減速率等於後車減速率，同時定義相對速率為後車速率減前車速率之速差V_{rel}= V- $V_{forward}$，最後加上安全容差值d_0(在 ISO/TC204/WG 14N 144.16 中的標準為 2 公尺)乃得到警示距離D_w的實用公式如式(6)所示。

$$D = V \times \tau + \left(\frac{V^2}{2a} - \frac{V_{forward}^2}{2a_{forward}}\right) \tag{5}$$

式中：

D：警示距離；

V：後車車速；

τ：感知反應時間；

a：後車減速率；

$V_{forward}$：前車車速；

$a_{forward}$：前車減速率。

$$D_w = V \times \tau + \frac{1}{2} \bullet [\frac{V^2}{a} - \frac{(V - V_{rel})^2}{a}] + d_0 \tag{6}$$

至於在最小煞車距離公式方面，主要是假設兩輛車所能容許的最短距離係發生在前車已經踩煞車而後車剛要踩煞車的那一瞬間，將此最短距離設定為 0，並考慮駕駛人感知反應時間 τ，同時假設前後車減速率相同，即可得到最小煞車距離 D_{br} 如公式(7)所示。

$$D_{br} = V_{rel} \times \tau + \frac{1}{2} a \tau^2 \tag{7}$$

最後是警示值 W，如公式(8)所示，當 $W > 1$ 時，為安全的距離範圍，則無警示反應；當 $0.2 \le W \le 1$ 時，為稍具威脅的碰撞距離範圍，則對駕駛人發出初步縱向防撞警示；當 $W<0.2$ 時，為危險的碰撞距離，系統需對駕駛人發出縱向防撞警示，提醒駕駛人做出反應。

$$W = \frac{d - D_{br}}{D_w - D_{br}} \tag{8}$$

式中：

d：前後兩車實際車間距離。

上述的演算法則中，假設前後車之煞車減速率均相同，較為簡化，而實用上後車減速率與感知反應時間均為依狀況而變且必須由系統外給之參數。至於 $W<0.2$，是否合乎實際狀況則仍需進一步研究。

(3) Yuji 等【5】在進行駕駛輔助系統對駕駛者工作負荷所產生的影響模擬實驗中，所設定之縱向防撞警示公式如下：

$$D = V_1 \times T + \frac{V_1^2}{2a_1} - \frac{V_2^2}{2a_2} \tag{9}$$

式中：

D：警示距離；

V_1：後車車速；

T：延遲時間(設定 0.8 秒)；

V_2：前車車速；

a_1：後車減速率(設定 0.35g，g 為重力加速率)；

a_2：前車減速率(設定 0.35g，g 為重力加速率)。

基本上，此一公式為簡單的煞車距離公式，當前後兩車所保持之距離小於等於 D 時，即應給予警示，提醒注意。公式中，延遲時間與前、後車減速率均為固定參數值，由於公式(9)主要係供工作負荷實驗用之演算法則，因此較實際應用上簡化，考慮的現實狀況變化亦較少。

(4) Burgett 等【6】利用愛荷華駕駛模擬器 IDS(Iowa Driving Simulator)針對前後兩車以相同速率(均為 100 英呎/秒)相同方向，行駛在相同車道，前車開始煞車後，後車煞車反應後所產生的情境，來分析探討所須的縱向防撞警示架構。實驗分為三種縱向防撞警示之情境關係：(a)前車煞車停止後，再給予後車警示；(b)前車煞車即給後車警示，但前車先煞車停止；(c)前車煞車即給後車警示，但後車比前車先停止，同時假設前後車停止時應保持 6.67 英呎(約 2.03 公尺)的靜止車間距離、駕駛者感知反應延遲時間為 1.5 秒、後車煞車減速率為 0.75g，依此取得三種情境之兩車車間距離變化率與車間距離之關係，並推導出三種情況之警示門檻界限為：$T_h = 1/2V_0(1/d_L + 1/d_F) + 6.67/V_0 + 1.5$（保守界限）和 $T_h = 1/2V_0(1/d_L + 1/d_F) + 6.67/V_0$(冒險界限)。公式中 V_0 表前車車速；V_f 表後車車速；d_L 表前車減速率；d_F：後車減速率；T_h 為門檻間距(以秒為單位)。

(5) Harihamn Krishnan 等【7】提出考慮後車煞車減速率(A_d)、後車駕駛者感知反應時間(T_d)、後車舒適煞車減速率(A_{comf})、後車速率(V_0)、偵測延遲時間(T_{sensor})和煞車實際延遲時間(T_{brake})等因子。提出在前車靜止時，後車一般煞車減速率與舒適煞車減速率之警示距離門檻，分別如公式(10)及公式(11)所示。

一般煞車減速率的情況：

$$R_d = -\frac{V_0^2}{2A_d} + (T_d + T_{sensor})V_0 \tag{10}$$

舒適煞車減速率的情況：

$$R_{comf} = -\frac{V_0^2}{2A_{comf}} + (T_d + T_{sensor} + T_{brake})V_0 \tag{11}$$

式中：

V_0：為前車車速；

A_d：後車煞車減速率(在此公式中代負值)；

T_d：駕駛者感知反應時間；

T_{sensor}：偵測延遲時間；

A_{comf}：後車舒適煞車減速率(在此公式中代負值)；

T_{brake}：煞車實際延遲時間。

基本上，此一公式為前車靜止之防撞警示距離，當前後兩車所保持之距離等於R_d或R_{comf}時，即應給予警示。公式中，後車減速率、駕駛者感知反應時間、偵測延遲時間、煞車實際延遲時間等均為系統外部給定之參數。

(6) Lee Yang 等【8】整理出目前發展的 6 種縱向防撞警示演算法則，如表 4 所示。表中之警示演算法則各項參變數之意義，則如表 5 所示。表 4 中當$f_i(X,A)$，$i=1\sim6$等於 0 時，警示系統即應予以啟動。表中$f_1(X,A)$與$f_2(X,A)$為距離基礎(Distance Base)的警示門檻公式，$f_1(X,A)$為標準駕駛者警示公式(Standard Driver Alert Equation)，$f_2(X,A)$為靠近車間距離公式(Closing Rate Equation)；$f_3(X,A)$至$f_6(X,A)$為時間基礎(Time Base)或感識基礎(Perception Based)的警示門檻公式。$f_3(X,A)$及$f_4(X,A)$中之 *TTC* 即為碰撞時間(Time to Collision)，其基本公式為：$TTC=r/(v_F-v_L)$【9】，乃是假設兩車在現況車間距離下，各以現有速率行駛時，後車最後會碰撞前車的時間【10】，若 *TTC* 小於等於 0 則不會碰撞；若 *TTC* 大於 0，則 *TTC* 愈大，愈晚發生碰撞。此外，John D. Lee 等【11】修正最小 *TTC* 的公式為$TTC=\frac{V_f}{\bar{a}}$，V_f為後車與前車撞擊點的後車速率，$\bar{a}$為後車與前車撞擊點的後車加速率，在煞車反應時，$\bar{a}$為負值，故 *TTC* 為負值，表示若後車能提前 *TTC* 時間啟動煞車，則不會碰撞，故應在 *TTC* 前即予以警示。$f_5(X,A)$之 *THW* 為車頭距時間(Time to Headway)，可視為兩車保持安全之車頭距參數，其基本公式為：$THW=r/v_F$【9】；$f_6(X,A)$之 *TTI* 即為衝擊時間(Time

to Impact)，乃是涵蓋後車駕駛者感知反應時間的安全時間參數。就各公式之比較而言，$f_1(X,A)$與$f_2(X,A)$最大不同處在於$f_1(X,A)$考慮了前後兩車減速率之不同，此外，$f_1(X,A)$是以前後兩車煞車行駛距離為基礎，$f_2(X,A)$是以兩車行進時車間距離之變化為基礎；而$f_3(X,A)$與$f_4(X,A)$的差別則在於$f_4(X,A)$多了一個速率偵測的容差值，故$f_4(X,A)$較為保守。

在公式之應用上，TTC、THW、TTI為事先經過特定實驗所校估的特殊參數函數值，系統應用時應由外部給定；而a_F、RT、B則是與後車駕駛者特性有關的一般參數值，系統應用時亦應由外部給定。

表 4 縱向警示演算法則彙整表

編號	門檻函數 $f(X，A)$*
1	$f_1(X,A)=-r+\frac{(\dot{r}+v_F)^2}{2a_L}-\frac{v_F^2}{2a_F}+RT\bullet v_F+B$
2	$f_2(X,A)=-r-\frac{\dot{r}^2}{2a_F}+RT\bullet v_F+B$
3	$f_3(X,A)=-r-TTC\bullet\dot{r}$
4	$f_4(X,A)=-r-TTC\bullet\dot{r}+SP\bullet v_F$
5	$f_5(X,A)=-r+THW\bullet v_F$
6	$f_6(X,A)=-r-TTI\bullet\dot{r}-\frac{1}{2}\ddot{r}\bullet TTI^2$

* X 表變數組合；A 表參數組合。

資料來源：【8】

表 5 縱向警示演算法則參變數說明表

參數	說　明
r	兩車間距離[m]
$\dot{r}$	兩車速差[m/s]（$\dot{r}=v_L-v_F$）
$\ddot{r}$	兩車間加速率差[m/s²]（$\ddot{r}=a_L-a_F$）
v_F	後車速率[m/s]

v_L	前車速率[m/s]
a_L	前車加速率(LV)[m/s^2]
a_F	後車加速率[m/s^2]
RT	後車駕駛者感知反應時間[sec]
B	靜止車間距離[m]
SP	速率容差[sec/(km/h)]
TTC	碰撞時間(Time-to-collision)[sec]
THW	車頭距時間(Time-to-headway)[sec]
TTI	衝擊時間(time-to-Impact)[sec]

資料來源：【8】

(7) S.J. Brunson 等之研究【12】中提出以「無碰撞距離」(miss-distance)作為後車縱向防撞警示的門檻指標，所謂「無碰撞距離」(miss-distance)即當跟車狀態之前後兩車同時煞車停止時所保持的車間距離(即靜止車間距離)。警示的時機分為三種情境：(a)前車比後車先煞車停止；(b)前車先煞車但比後車晚停止；(c)前車一開始即是停止的，以此三種情境來推算 miss-distance 演算法則。而情境(a)中又分為前車在後車駕駛感知反應時間後停止，或前車在後車駕駛感知反應時間內停止，以前車在後車駕駛感知反應時間後停止為例，miss-distance 演算法則分為後車感知反應時間內之車間距離變化、感知反應時間到前車停止之車間距離變化、前車停止到後車靜止之車間距離變化三段，因此演算法則可大致如下：

(a) 前車比後車先煞車停止(前車在後車駕駛感知反應時間後停止)

$$D_{miss} = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 \tag{12}$$

$$\Delta R_1 = (RR)T_R + \frac{1}{2}(A_L - A_H)(T_R)^2 \tag{13}$$

$$\Delta R_2 = (RR + (A_L - A_H)T_R)(T_{LS} - T_R) + \frac{1}{2}(A_L - A_{H\max})(T_{LS} - T_R)^2 \tag{14}$$

$$\Delta R_3 = [RR + (A_L - A_H)T_R + (A_L - A_{H\max})(T_{LS} - T_R)](T_{HS} - T_{LS}) + \frac{1}{2}(0 - A_{H\max})(T_{HS} - T_{LS})^2 \tag{15}$$

整理而得：

$$D_{miss}=R+1/2(A_H-A_{Hmax})(T_R)^2-1/2A_L(T_{LS})^2-(A_H-A_{Hmax})T_RT_{HS}+(RR)T_{HS}$$
$$+A_LT_{HS}T_{LS}-1/2A_{Hmax}(T_{HS})^2 \quad (16)$$

式中：

R：Range，兩車原始車間距離；

ΔR_i，i=1~3：兩車車間距離變化值；

RR：Range Rate，兩車速差(前車車速-後車車速)；

T_R：感知反應時間；

A_L：前車減速率；

A_H：後車減速率；

A_{Hmax}：後車最大減速率；

T_{LS}：前車停止時間；

T_{HS}：後車停止時間。

若是前車在後車駕駛感知反應時間內停止，miss-distance 演算法分為前車停止之車間距離變化、前車停止至後車感知反應時間結束之車間距離變化、後車開始啟動煞車到後車靜止之車間距離變化三段，而經加總整理後，公式與式(16)相同。

至於情境(b)與情境(c)則 miss-distance 演算公式分為後車駕駛者感知反應時間之車間距離變化、後車開始啟動煞車至兩車停止之車間距離變化兩段。以情境(c)為例，演算法則如下：

(c)前車一開始即停止

$$D_{miss} = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 \quad (17)$$

$$\Delta R_1 = (RR)T_R + \frac{1}{2}(A_L - A_H)(T_R)^2 \quad (18)$$

$$\Delta R_2 = (RR + (A_L - A_H)T_R)(T_M - T_R) + \frac{1}{2}(A_L - A_{H\max})(T_M - T_R)^2 \quad (19)$$

整理而得：

$$D_{miss}=R+(RR)T_M+1/2(A_L-A_{Hmax})(T_M)^2-(A_H-A_{Hmax})T_MT_R+1/2(A_H-A_{Hmax})(T_R)^2 \quad (20)$$

式中：

R：Range，兩車原始車間距離；

ΔR_i，i=1~2：兩車車間距離變化值；

RR：Range Rate，兩車速差(前車車速-後車車速)；

T_R：感知反應時間；

A_L：前車減速率；

A_H：後車減速率；

T_M：後車停止時間；

A_{Hmax}：後車最大減速率。

警示法則為：

①警示系統每 0.1 秒算出 miss distance 值 D_{miss}。

②比較 D_{miss} 與下列警示門檻 D_{thresh} 之差異：

$$D_{thresh} = 2m + (V_H)(0.1s) \tag{21}$$

式中：

V_H：後車速率。

③在最近 3 次算出之 D_{miss} 若有兩次小於 D_{thresh} 時，即給予聲響警示。

④聲響警示原則上持續 1 秒鐘，1 秒後聲響轉為小聲；

⑤在警示聲響啟動時，若兩車速差(前車車速減後車車速)大於-1.99 公尺/秒或兩車車間距離大於 $R_{current}$ 時($R_{current} = 2.5m + (V_H)(0.1s)$)，則警示聲響隨即停止。

在前述警示法則之推導及應用狀況，有下列 8 項假設：

(a)前車維持現況之固定減速率；

(b)後車在固定駕駛者感知反應時間內維持現有加速率，然後再採取一固定減速率(最大煞車減速率)；

(c)前方來車時(前車車速低於-4.99 公尺/秒)，警示系統不啟動；

(d)後車車速低於 25 英哩/小時(約 11.199 公尺/秒)時，警示系統不啟動；

(e)後車處於煞車狀態時，警示系統不啟動；

(f)後車處於超車狀態時，警示系統不啟動；

(g)兩車相當接近至隨車(Tailgating)狀態時，不適用前述警示法則，另採隨車操作狀態控制；

(h)當車輛適應性巡航控制(Adaptive Cruise Control)系統啟動時，不適用前述警示系統，則車輛改採適應性巡航控制操作。

狀況(c)至狀況(f)主要是為了儘量不要對駕駛者產生太多警示干擾。

此外，本研究之警示法則除界定警示系統啟動時機的條件外，並且建立駕駛者冒險或保守程度的最大煞車減速率修正值(如表6所示)由駕駛者事先依個人狀況選擇輸入；惟警示法則之應用上仍需要由外部輸入後車駕駛者感知反應與系統延遲時間(本研究假設為 1.5 秒)、後車最大減速率(本研究基本假設為 0.55g，g 為重力加速率)、miss distance 門檻值(可視同靜止車間距離，本研究假設為 2 公尺)，而此 3 項外給參數的適當值則仍須進一步加以深入研究，方能符合真正駕駛行為之所需。

表 6 假設之後車最大減速率性能表

駕駛者對警示敏感度	假設之後車最大減速率性能(g)		
	警示等級		
	提早警示	適中警示	急迫警示
較敏感者	0.38	0.45	0.55
中等敏感者	0.32	0.40	0.55
不敏感者	0.27	0.35	0.55

資料來源：【12】

(8) R.J. Kiefer 等【13】提到縱向防撞警示之測試，是依照年齡分為 3 層共 72 個參與者，利用前車與後車兩個主體進行各種情境之模擬，其所設定的場景為三個相鄰筆直且具有六個減速墊的車道，分別在以下場景進行測試：一為前車不動測試，前車靜止不動，當後車接近前車時開始煞車。二為固定兩車車速之測試，前車與後車維持一固定速度，聽到命令後車開始煞車。三為前車減速測試，前車以各種不同減速值煞車，後車開始煞車等動作。這些測試並分別用"用力煞車"和"正常煞車"兩種方式進行實驗，以此觀察兩種煞車行為及各種情境中，而利用數據整理給予駕駛者警示。

綜合前述有關縱向防撞警示法則之整理與評析可知，目前所發展的縱向防撞警示法則，大多以車輛運動學的碰撞關係為主，而所發展的法則或公式

仍有必要繼續加強在人因工程方面的研究，尤其交通狀況為人、車、路(環境)三者相互作用的結果，因此不同道路環境下，駕駛者對車輛及警示系統的反應與行為，往往是決定防撞警示系統成敗的關鍵。警示系統啟動的跟車間距上限、後車駕駛者接受警示後之感知反應時間、後車接受警示後之煞車減速率、兩車停止後之靜止車間距離等，正是與駕駛者行為特性直接相關的參數，也是縱向防撞警示系統的重要輸入參數，因此建立適當的參數範圍，乃至演算法則，使其符合真正的駕駛反應行為，確實為現況縱向防撞警示系統發展的重要課題。

本研究綜合整理前述研究之各項警示法則公式特性及相關的重要參數，如表 7 所示。

表 7 警示法則公式特性及參數整理表

文獻	警示公式	警示系統特性	重要參數
Peter 等【3】	MAZDA 演算法則公式： $d_{br}=\frac{1}{2}\left[\frac{v^2}{\alpha_1}-\frac{(v-v_{rel})^2}{\alpha_2}\right]+v\cdot\tau_1+v_{rel}\cdot\tau_2+d_0$ 門檻值=$d_{br}+\varepsilon$	一次警示之系統	α_1(後車最大減速率) τ_2(駕駛者感知反應時間) ε(緩衝距離參數)
	HONDA 演算法則公式： $d_w=2.2\cdot v_{rel}+6.2$ $d_{br}=\tau_2 v_{rel}+\tau_1\tau_2\alpha_1-0.5\alpha_1\tau_1^2 \quad \frac{v_2}{\alpha_2}\geq\tau_2$ 或 $d_{br}=\tau_2 v-0.5\alpha_1(\tau_2-\tau_1)^2-\frac{v_2^2}{2\alpha_2} \quad \frac{v_2}{\alpha_2}\leq\tau_2$ $W=\frac{d-d_{br}}{d_w-d_{br}}$ (W>1 時，安全；a<W<1 時，普通警示狀況；0<W<a 時，緊急警示狀況；W<0，應馬上採取煞車。)	漸進式警示系統(多元化警示系統)	d_w(包括 2.2 及 6.2) α_1(後車最大減速率) τ_2(駕駛者感知反應時間) a(警示聲響參數)

資料來源：本研究整理

表 7 警示法則公式特性及參數整理表(續 1)

文獻	警示公式	警示系統特性	重要參數
朱海燕等【4】	$D_w = V \times \tau + \frac{1}{2} \bullet [\frac{V^2}{a} - \frac{(V - V_{rel})^2}{a}] + d_0$ $D_{br} = V_{rel} \times \tau + \frac{1}{2} a \tau^2$ $W = \frac{d - D_{br}}{D_w - D_{br}}$ (當$W > 1$時，安全；$0.2 \le W \le 1$時，稍具威脅的碰撞距離範圍；當$W < 0.2$時，危險的碰撞距離)	漸進式警示系統(多元化警示系統)	τ(駕駛者感知反應時間) d_0(安全容差值) W(判斷門檻中的 0.2)
Yuji 等【5】	$D = V_1 \times T + \frac{V_1^2}{2a_1} - \frac{V_2^2}{2a_2}$	一次警示之系統	T(延遲時間) a_1(後車減速率)
Burgett 等【6】	$T_h = 1/2V_0(1/d_L + 1/d_F) + 6.67/V_0 + 1.5$ $T_h = 1/2V_0(1/d_L + 1/d_F) + 6.67/V_0$	一次警示之系統	前後車停止時應保持 6.67 英呎(約 2.03 公尺)的車間距離(靜止車間距離) 駕駛者感知反應延遲時間為 1.5 秒 後車煞車減速率為 0.75g
Harihamn Krishnan 等【7】	$R_d = -\frac{V_0^2}{2A_d} + (T_d + T_{sensor})V_0$ $R_{comf} = -\frac{V_0^2}{2A_{comf}} + (T_d + T_{sensor} + T_{brake})V_0$	一次警示之系統	A_d(後車煞車減速率) T_d(駕駛者反應時間) A_{comf}(後車舒適煞車減速率) T_{brake}(煞車實際延遲時間)
Lee Yang 等【8】	$f_1(X, A) = -r + \frac{(\dot{r} + v_F)^2}{2a_L} - \frac{v_F^2}{2a_F} + RT \bullet v_F + B$	一次警示之系統	a_F(後車加速率) RT(後車駕駛者感知反應時間) B(靜止車間距離)

資料來源：本研究整理

表 7 警示法則公式特性及參數整理表(續 2)

文獻	警示公式	警示系統特性	重要參數
Lee Yang 等【8】	$f_2(X,A) = -r - \frac{\dot{r}^2}{2a_F} + RT \bullet v_F + B$	一次警示之系統	a_F (後車加速率) RT (後車駕駛者感知反應時間) B (靜止車間距離)
	$f_3(X,A) = -r - TTC \bullet \dot{r}$	一次警示之系統	TTC (碰撞時間)
	$f_4(X,A) = -r - TTC \bullet \dot{r} + SP \bullet v_F$	一次警示之系統	TTC (碰撞時間) SP (速率容差)
	$f_5(X,A) = -r + THW \bullet v_F$	一次警示之系統	THW (車頭距時間)
	$f_6(X,A) = -r - TTI \bullet \dot{r} - \frac{1}{2}\ddot{r} \bullet TTI^2$	一次警示之系統	TTI (衝擊時間)
S.J. Brunson 等之研究【12】	$D_{miss}=R+1/2(A_H-A_{Hmax})(T_R)^2-1/2A_L(T_{LS})^2$ $-(A_H-A_{Hmax})T_RT_{HS}+(RR)T_{HS}+A_LT_{HS}T_{LS}$ $-1/2A_{Hmax}(T_{HS})^2$ $D_{miss}=R+(RR)T_M+1/2(A_L-A_{Hmax})(T_M)^2-(A_H-A_{Hmax})T_MT_R$ $+1/2(A_H-A_{Hmax})(T_R)^2$ $D_{thresh} = 2m + (V_H)(0.1s)$	一次警示之系統	警示時機參數(包括警示啟動與結束的各種狀況與參數) 駕駛者感知反應與系統延遲時間(本研究假設為1.5 秒) 後車最大減速率(本研究基本假設為0.55g，g 為重力加速率) miss distance 門檻值(可視同靜止車間距離，本研究假設為 2 公尺)

資料來源：本研究整理

參、縱向防撞警示法則參數分析

依前述縱向防撞警示系統演算法則之分析探討可知，跟車間距上限影響警示系統啟動的時機；感知反應時間、煞車減速率、車輛停止後的靜止車間距離則是影響警示系統發出聲響或視覺警示的時機，此四項參數值的高低均會影響警示系統是適當或趨於保守、積極，從而影響駕駛者的接受度。本研究整理此四項參數之數值範圍，並加以探討分析如下：

(一)跟車間距上限之參數值

有關跟車間距上限之研究，目前在縱向防撞警示系統之應用研究較少，主要原因在於許多縱向防撞警示系統之啟動時機並不以跟車間距上限為門檻參數，然若能考量跟車間距上限於啟動時機之防撞警示系統法則中，則可避免警示系統過早啟動，並增加警示系統之自動化。

跟車間距上限之研究，以心理物理行為門檻模式為主，相關研究【14, 15】指出「為顧及駕駛者判斷間距能力之差異，跟車間距上限約在 1.5~2.5 倍最小跟車間距範圍內振動」，此即為該參數之門檻值估算方法之一。本研究整理出跟車間距上限與最小跟車間距之關係與計算式如表 8 所示。

表 8 心理物理行為門檻模式跟車間距上限與最小跟車間距之關係與計算式

行為門檻	許添本【14】	Mark Brackstone 等【15】
最小跟車間距	$(5+3\sqrt{v})$~$(7+4\sqrt{v})$公尺	$7.25+2.96\sqrt{v}$ 公尺
跟車間距上限	約 1.5~2.5 倍最小跟車間距	

註：v 為後車速率(公尺/秒)。

資料來源：本研究整理

(二)感知反應時間之參數值

用路人在行車中對突發事件完成感識、智慧(辨明)、情緒(判斷)及意志(行動)反應過程所需要的時間，稱為 PIEV(或 PIJR)時間，簡稱感知反應時間。美國州際公路與運輸官員協會(American Association State Highway and Transportation Officials，AASHTO)建議正常駕駛下之感知反應時間為 2.5 秒；而在號誌感知反應時間部分，美國運輸工程局(The Institute of Transportation

Engineers)則是建議為 1.0 秒【16】。然而不同的道路交通狀況、車輛設備、駕駛者特性下，駕駛者之感知反應時間均會有所不同，尤其是近年來先進通訊技術之發展，許多通訊產品之使用(如行動電話、ITS 車載設備等)，對駕駛者因應不同狀況下之感知反應時間變化，更是具有相當的影響。對縱向防撞警示系統而言，駕駛者接受警示系統前、後之感知反應時間狀況，必須進行深入之研究，才能提供適當的參數值，使警示時機符合駕駛者的需要。而依據相關研究【17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25】之感知反應時間參數值實驗與分析，感知反應時間(包括有、無警示系統的情況下)約在 0.3 秒至 4 秒的範圍之間。

(三)煞車減速率之參數值

(1) Yuji 等【5】在進行駕駛輔助系統對駕駛者工作負荷所產生的影響模擬實驗中，所設定之縱向防撞警示公式，其前、後車之減速率均為 0.35g，g 為重力加速率(公制為 9.8m/sec^2)。

(2) Burgett 等【6】利用愛荷華駕駛模擬器 IDS(Iowa Driving Simulator)針對前後兩車以相同速率(均為 100 英呎/秒)相同方向，行駛在相同車道，前車開始煞車後，後車煞車反應後所產生的情境，來分析探討所須的縱向防撞警示架構。其實驗所設定之後車煞車減速率為 0.75g。

(3) Harihamn Krishnan 等【7】提出舒適的減速率公式為：

$$Mean\ A_{comf} = -0.732 - (0.0859V_0) \tag{22}$$

式中：

$Mean\ A_{comf}$：平均舒適減速率(公尺/秒^2)；

V_0：車速(公尺/秒)。

(4) S.J. Brunson 等【12】之研究中，後車最大減速率設定為 0.55g，而依駕駛者特性可設定之減速率則有 0.27g、0.32g、0.35g、0.38g、0.40g、0.45g、0.55g 七種。

(5) R.J. Kiefer 等【13】提到縱向防撞警示之測試，分別是：(a)為前車不動測試，前車靜止不動，當後車接近前車時開始煞車；(b)為固定兩車車速之測試，前車與後車維持一固定速度，聽到命令後車開始煞車；(c)為前車減速測試，前車以各種不同減速值煞車，後車開始煞車等動作。這些測試分別用"正常煞車"和"用力煞車"兩種方式進行實驗，其中"正

常煞車"之減速率為 0.15g，"用力煞車"之減速率為 0.39g。

(6) SAE J2400【18】防撞系統的標準中，提到剎車減速規定方面，剎車減速率不超過 0.39g 時，駕駛者不會感覺不舒服。

依據前述研究分析整理，煞車減速率之參數值約在 0.15g 至 0.75g 的範圍之間。

(四)靜止車間距離之參數值

(1) Burgett 等【6】與 S.J. Brunson 等【12】研究所設定之靜止車間距離為 2 公尺。

(2) 許添本【14】提出兩車靜態間距公式為 $AX = L + (K_1 + K_2 * ZF_1)$，L 為前車實體車長，$K_1$、$K_2$ 為調整因子，ZF_1 為隨機變數因子，當車種為小汽車時，K_1 等於 1，K_2 等於 2，ZF_1 為 0 到 1 之常態分配，因此計算兩車靜止車間距離時，因不加入前車實體車長，可得靜止車間距離之分佈為 1~3 公尺。

(3) Mark Brackstone 等【15】以實車測試的方式，研究在英國高速公路駕駛人的跟車行為，其建立之靜止車間距離為 3.25 公尺。

依據前述研究之分析整理，靜止車間距離之參數值約在 1 公尺至 3.25 公尺的範圍之間。

肆、縱向防撞警示法則參數影響之數值分析

由前述縱向防撞警示演算法則之分析可知，感知反應時間、煞車減速率與靜止車間距離等參數多是由外部以固定值代入，而 S.J. Brunson 等【12】之演算法則雖已界定警示系統啟動時機與彈性化的最大煞車減速率輸入範圍，然其他相關參數仍須由外部給定一固定值。事實上，不同的駕駛者與不同的駕駛狀況，均會導致不同的參數值反應，其警示距離也會有所影響，因此有必要針對各項參數值對防撞警示門檻準則的影響加以深入探討。鑑於 Lee Yang 等【8】所整理之警示門檻公式中，以距離基礎的公式較為基本且一般化，本研究乃以其為主，進行後車駕駛者感知反應時間、煞車減速率、靜止車間距離之參數值組合對防撞警示門檻值的影響分析，基本公式分別如公式(23)及公式(24)所示，公式(23)為標準駕駛者警示公式(Standard Driver Alert Equation)，

公式(24)為靠近車間距離公式(Closing Rate Equation)，當兩車行駛時，實際保持的車間距離等於D_W時，系統即應提供警示訊息，否則便會太晚或太早警示。

$$D_W = \frac{(\dot{r} + v_F)^2}{2a_L} - \frac{v_F^2}{2a_F} + RT \bullet v_F + B \tag{23}$$

$$D_W{}' = -\frac{\dot{r}^2}{2a_F} + RT \bullet v_F + B \tag{24}$$

式中：

D_W 、 $D_W{}'$ ：警示距離(公尺)

$\dot{r}$ ：兩車速差(公尺/秒) ($\dot{r} = v_L - v_F$)

v_L ：前車速率(公尺/秒)

v_F ：後車速率(公尺/秒)

a_L ：前車加速率(公尺/秒^2)

a_F ：後車加速率(公尺/秒^2)

RT：後車駕駛者感知反應時間(秒)

B：靜止車間距離(公尺)

在前車減速率 0.55g(即a_L= -0.55g)、前車及後車車速均為 100 公里/小時的假設下，每一靜止車間距離(1 公尺、2 公尺及 3.25 公尺)下，不同後車加速率與感知反應時間之公式(23)與公式(24)所計算而得的縱向防撞警示距離分別如表 9、表 10 及圖 2 至圖 7 所示。表中數值顯示當前、後車間距離為該數值時，警示系統即應發出警示訊息，提醒駕駛人注意。

表 9 標準駕駛者警示公式之不同參數警示門檻距離表　　單位：公尺

B = 1 公尺									
RT(秒) / a_F**	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4
-0.15g	200.24	214.13	228.02	241.91	255.80	269.69	283.58	297.47	303.02
-0.30g	68.99	82.88	96.77	110.66	124.55	138.44	152.33	166.22	171.78
-0.45g	25.24	39.13	53.02	66.91	80.80	94.69	108.58	122.47	128.03
-0.60g	3.37	17.26	31.15	45.04	58.93	72.82	86.71	100.60	106.15

-0.75g	—*	4.13	18.02	31.91	45.80	59.69	73.58	87.47	93.03
B = 2 公尺									
RT(秒) / a_F	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4
-0.15g	201.24	215.13	229.02	242.91	256.80	270.69	284.58	298.47	304.02
-0.30g	69.99	83.88	97.77	111.66	125.55	139.44	153.33	167.22	172.78
-0.45g	26.24	40.13	54.02	67.91	81.80	95.69	109.58	123.47	129.03
-0.60g	4.37	18.26	32.15	46.04	59.93	73.82	87.71	101.60	107.15
-0.75g	—	5.13	19.02	32.91	46.80	60.69	74.58	88.47	94.03
B = 3.25 公尺									
RT(秒) / a_F	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4
-0.15g	202.49	216.38	230.27	244.16	258.05	271.94	285.83	299.72	305.27
-0.30g	71.24	85.13	99.02	112.91	126.80	140.69	154.58	168.47	174.03
-0.45g	27.49	41.38	55.27	69.16	83.05	96.94	110.83	124.72	130.28
-0.60g	5.62	19.51	33.40	47.29	61.18	75.07	88.96	102.85	108.40
-0.75g	—	6.38	20.27	34.16	48.05	61.94	75.83	89.72	95.28

*表示不須警示；**a_F為加速率，故a_F取負值代表減速率，g為重力加速率 9.8 公尺/秒^2。

表 10 靠近車間距離公式之不同參數警示門檻距離表　　單位：公尺

B = 1 公尺									
RT(秒) / a_F^*	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4
-0.15g	9.33	23.22	37.11	51.00	64.89	78.78	92.67	106.56	112.12
-0.30g	9.33	23.22	37.11	51.00	64.89	78.78	92.67	106.56	112.12
-0.45g	9.33	23.22	37.11	51.00	64.89	78.78	92.67	106.56	112.12
-0.60g	9.33	23.22	37.11	51.00	64.89	78.78	92.67	106.56	112.12
-0.75g	9.33	23.22	37.11	51.00	64.89	78.78	92.67	106.56	112.12
B = 2 公尺									
RT(秒) / a_F	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4

NATIONAL CENTRAL LIBRARY 國家圖書館 ROC

-0.15g	10.33	24.22	38.11	52.00	65.89	79.78	93.67	107.56	113.12
-0.30g	10.33	24.22	38.11	52.00	65.89	79.78	93.67	107.56	113.12
-0.45g	10.33	24.22	38.11	52.00	65.89	79.78	93.67	107.56	113.12
-0.60g	10.33	24.22	38.11	52.00	65.89	79.78	93.67	107.56	113.12
-0.75g	10.33	24.22	38.11	52.00	65.89	79.78	93.67	107.56	113.12
B = 3.25 公尺									
a_F \ RT(秒)	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4
-0.15g	11.58	25.47	39.36	53.25	67.14	81.03	94.92	108.81	114.37
-0.30g	11.58	25.47	39.36	53.25	67.14	81.03	94.92	108.81	114.37
-0.45g	11.58	25.47	39.36	53.25	67.14	81.03	94.92	108.81	114.37
-0.60g	11.58	25.47	39.36	53.25	67.14	81.03	94.92	108.81	114.37
-0.75g	11.58	25.47	39.36	53.25	67.14	81.03	94.92	108.81	114.37

*a_F為加速率，故 a_F取負值代表減速率，g為重力加速率 9.8 公尺/秒^2。

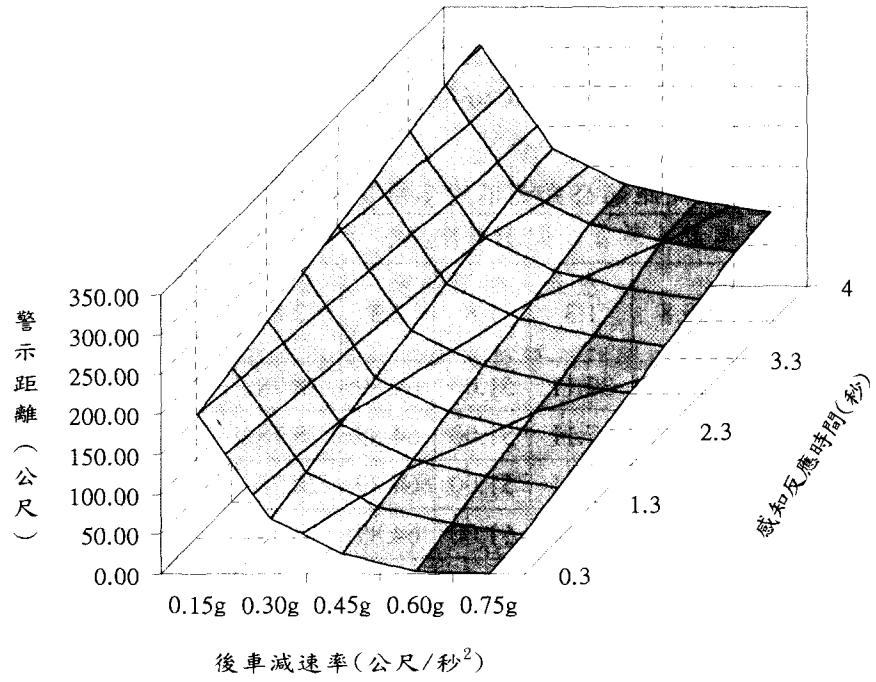


圖 2 標準駕駛者警示公式 B=1 公尺之警示門檻距離圖

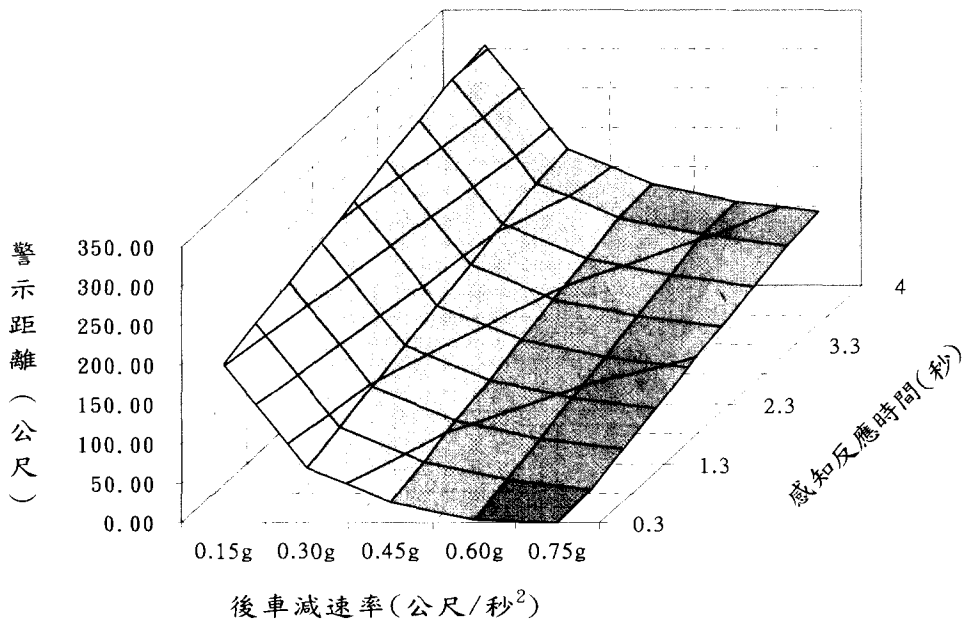


圖 3 標準駕駛者警示公式 B=2 公尺之警示門檻距離圖

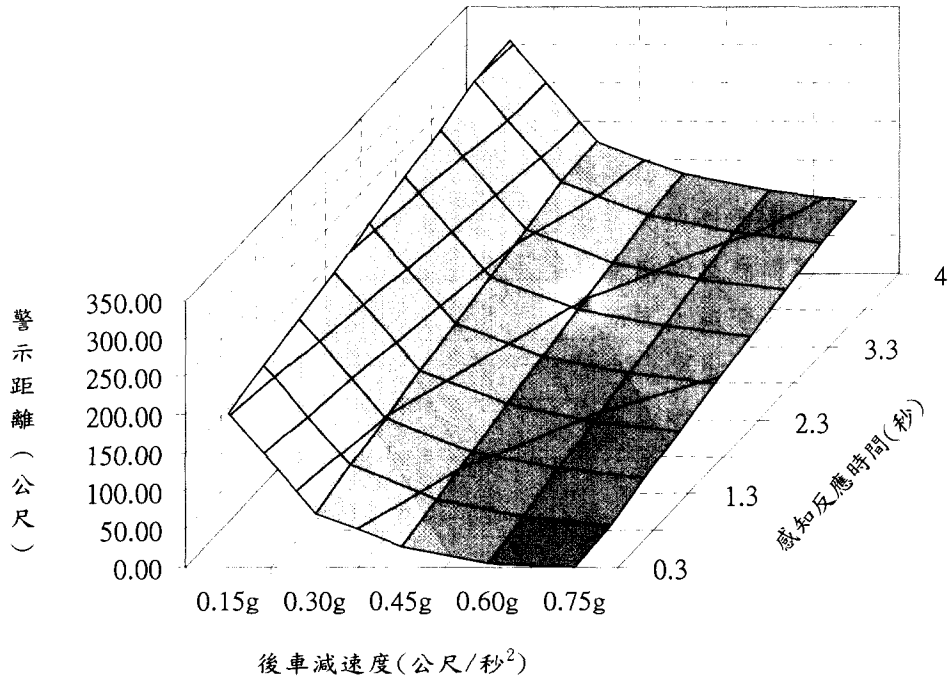


圖 4 標準駕駛者警示公式 B=3.25 公尺之警示門檻距離圖

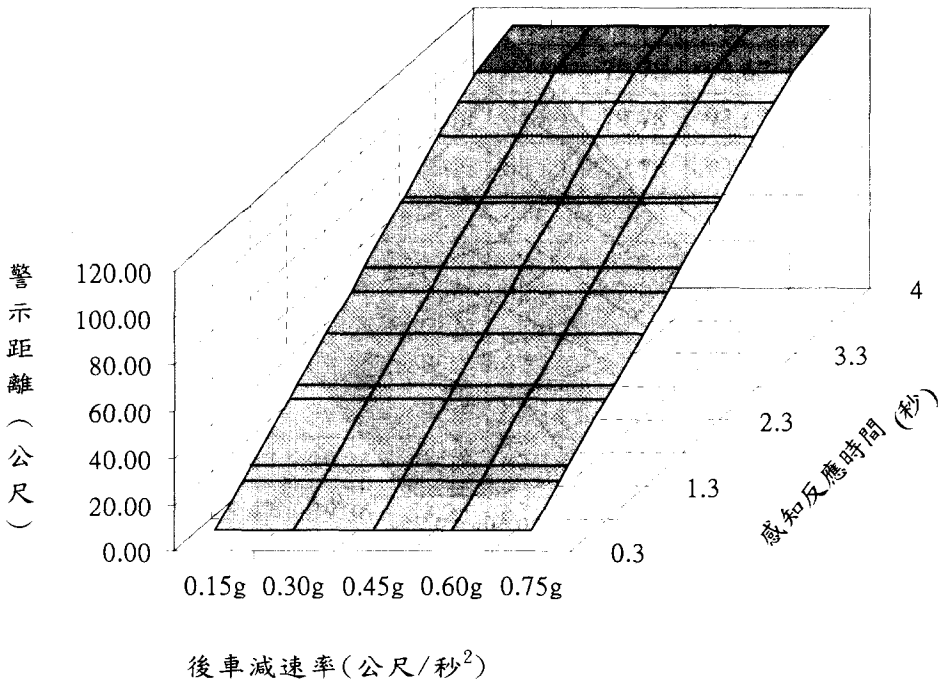


圖 5 靠近車間距離警示公式 B=1 公尺之警示門檻距離圖

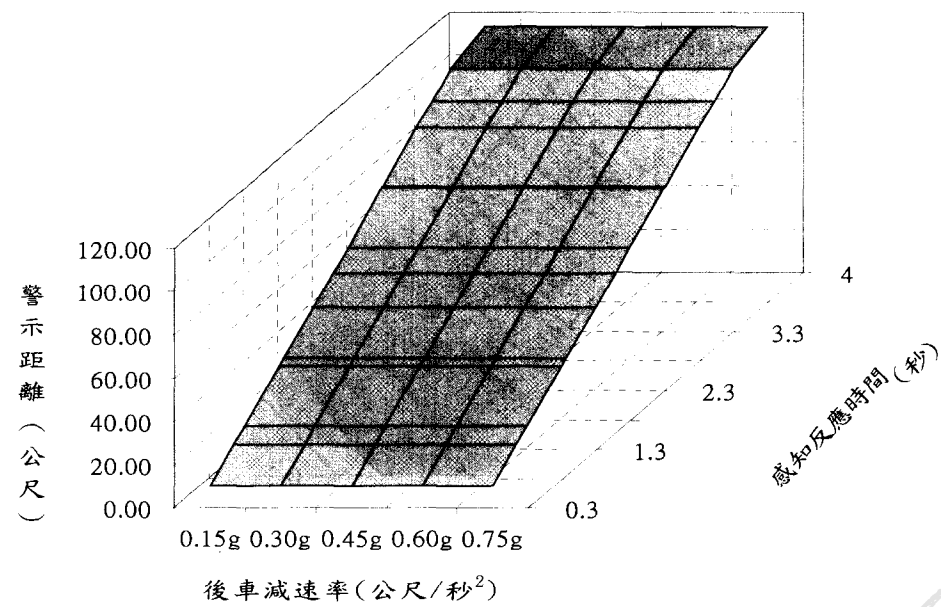


圖 6 靠近車間距離警示公式 B=2 公尺之警示門檻距離圖

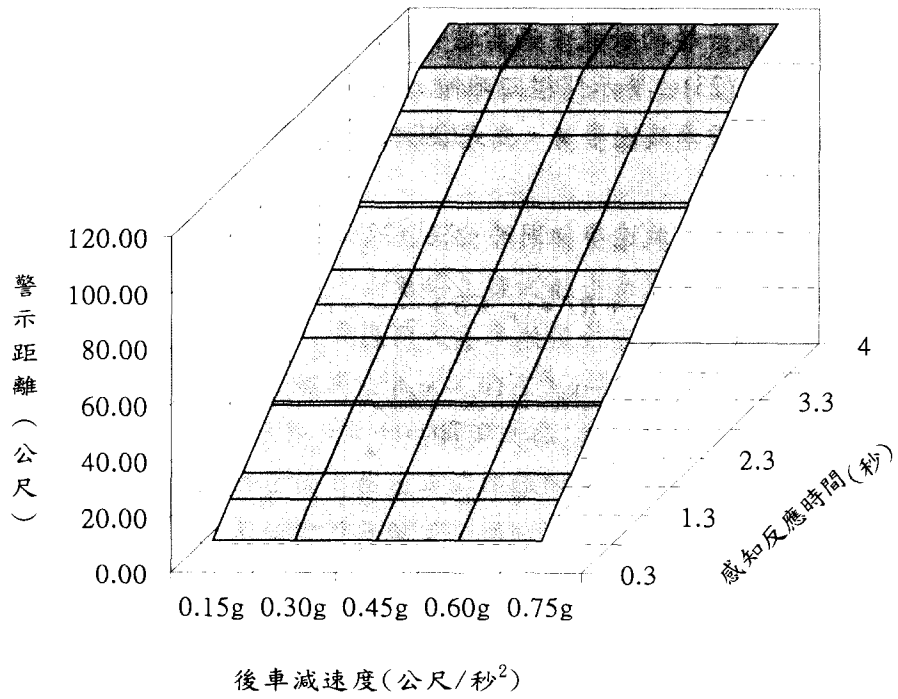


圖 7 靠近車間距離警示公式 B=3.25 公尺之警示門檻距離圖

由表中可知，當前後兩車速率相等，即速差為 0 時，公式(23)係以前車突然煞車後，後車跟著感知反應煞車後，前、後兩車不致碰撞的安全距離公式，其主要的影響參數包括後車減速率、後車駕駛者感知反應時間、靜止車間距離(前車速率、後車速率、前車減速率可由感測系統偵測而得)，其中因靜止車間距離的變化較小，故後車減速率與後車駕駛者感知反應時間便成為影響警示門檻距離的主要兩項參數；而以變化的幅度而言，減速率參數值的影響性又比感知反應時間參數值大，因此採用公式(23)時，駕駛者在公路行駛遇到前車突發狀況的減速靈敏度估計值乃成為決定門檻距離的最重要參數，若減速率的參數估計有誤，便會造成警示時機的誤判，徒然增加駕駛者的困擾或反而造成不安全。至於公式(24)主要由感知反應時間和靜止車間距離決定防撞警示的門檻距離，而因靜止車間距離的變化較小，故感知反應時間的參數值變化便成為決定門檻距離的最主要參數，由於在一般公路的正常跟車行為中，前後兩車往往會調整成保持相同或相近的速率行駛(即速差為 0 或趨近於 0)，因此，應用公式(23)與公式(24)所應重視的參數值有所不同。

就公式(23)和公式(24)之比較而言，當前後兩車速率相等且減速率相同時，兩公式就變成一樣的公式；而當前後兩車速率相同，後車減速率小於前車減速率時，公式(23)的警示門檻距離較大，顯示出較保守的警示值，反之，當後車減速率大於前車減速率時，公式(24)的警示門檻距離較小，顯示出較冒險的警示值。

若兩車速率不同而減速率相同時，公式(23)與公式(24)之比較可推導如下：

$$D_W - D_W' = \frac{(\dot{r}+v_F)^2}{2a_L} - \frac{v_F^2}{2a_F} + RT \bullet v_F + B + \frac{\dot{r}^2}{2a_F} - RT \bullet v_F - B$$

$$= \frac{(\dot{r}+v_F)^2}{2a_L} - \frac{v_F^2}{2a_F} + \frac{\dot{r}^2}{2a_F} = \frac{v_l^{\,2} - v_F^{\,2}}{2a_L} + \frac{(v_L - v_F)^2}{2a_L}$$

$$= \frac{2v_L(v_L - v_F)}{2a_L} \tag{25}$$

因為$a_L < 0$，因此當前車車速大於後車車速($v_L - v_F > 0$)時，$D_W < D_W'$，公式(24)較公式(23)保守，反之當前車車速小於後車車速($v_L - v_F < 0$)時，則$D_W > D_W'$，表示公式(23)較保守。

伍、結論與建議

本研究針對目前所發展應用的縱向防撞警示法則加以分析，探討其重要的影響參數，並整理跟車間距上限、感知反應時間、煞車減速率、靜止車間距離等四項參數的一般駕駛參數值範圍，最後則以標準駕駛者警示公式與靠近車間距離公式為例，透過數值分析深入探討感知反應時間、煞車減速率、靜止車間距三項參數對縱向防撞警示門檻距離的影響程度。本研究主要的結論與建議，說明如后。

(一) 結論

1. 由縱向防撞警示法則之整理與評析可知，目前所發展的縱向防撞警示法則，大多以車輛運動學的碰撞關係為主，而所發展的法則或公式仍有必要繼續加強在人因工程方面的研究，尤其交通狀況為人、車、路(環境)三者相互作用的結果，因此不同道路環境下，駕駛者對車輛及警示系統的反應與

行為，往往是決定防撞警示系統成敗的關鍵。

2. 警示系統啟動的跟車間距上限、後車駕駛者接受警示後之感知反應時間、後車接受警示後之煞車減速率、兩車停止後之靜止車間距離等四項參數，乃是與駕駛者行為特性直接相關的參數，也是縱向防撞警示系統的重要輸入參數。
3. 本研究整理跟車間距上限、後車駕駛者接受警示後之感知反應時間、後車接受警示後之煞車減速率、兩車停止後之靜止車間距離等參數值建立的相關研究發現，各研究建立或應用之各參數值並不全然相同，其中跟車間距上限以心理物理行為門檻模式為主，約在 1.5~2.5 倍最小跟車間距範圍內；感知反應時間約在 0.3 秒至 4 秒的範圍之間；煞車減速率約在 0.15g 至 0.75g 的範圍之間；兩車停止後之靜止車間距離則在 1 公尺至 3.25 公尺之間，且在不同研究背景、不同假設狀況下，因時、因地、因人而有所不同。
4. 經由數值分析之結果顯示，當前後兩車速率相等，即速差為 0 時，後車減速率與後車駕駛者感知反應時間為影響標準駕駛者警示公式警示門檻距離的主要兩項參數，後車減速率的影響性又高於駕駛者感知反應時間；至於對靠近車間距離公式而言，感知反應時間為影響警示門檻距離的主要參數。整體而言，靜止車間距離的影響性則相對較小。
5. 就標準駕駛者警示公式和靠近車間距離公式之比較而言，當前後兩車速率相等且減速率相同時，兩公式就變成一樣的公式；而當前、後兩車速率相同，後車減速率小於前車減速率時，標準駕駛者警示公式的警示門檻距離較大，顯示出較保守的警示值，反之，當後車減速率大於前車減速率時，標準駕駛者警示公式的警示門檻距離較小，顯示出較冒險的警示值。
6. 若兩車速率不同而減速率相同時，當前車車速大於後車車速時，靠近車間距離公式較標準駕駛者警示公式保守；反之當前車車速小於後車車速時，標準駕駛者警示公式較靠近車間距離公式保守。

(二) 建議

1. 縱向防撞警示系統為先進安全車輛(Advanced Safety Vehicle, ASV)的重要輔助系統之一，也是智慧型運輸系統(Intelligent Transportation Systems, ITS)之先進車輛控制及安全服務(Advanced Vehicle Control and Safety Service, AVCSS)的重要服務項目之一，目前除交通部正大力推動 ITS 政策外，經濟

部有關汽車前瞻技術的發展規劃中，亦包括先進安全車輛系統整合平台技術開發計畫與車輛安全防護系統。因此作為縱向防撞警示系統核心理論之警示演算法則，其重要性將愈來愈重要。鑒於目前世界各先進國家及車廠均投入相當的研究進行防撞警示法則的建立，以期提供適當的警示時機，未來國內相關計畫之推動亦應重視此一課題之研究。

2. 跟車間距上限、感知反應時間、煞車減速率、靜止車間距離四項參數為影響縱向防撞警示系統警示時機的重要參數，然而此四項參數之適用範圍並不易由實際觀測獲得，建議未來可利用駕駛模擬器之重複實驗特性，建立適當的實驗場景，加以實驗分析取得駕駛者之實際參數值。
3. 縱向防撞警示演算法則之建立，應考量如何在不對駕駛者產生太多的干擾下，提供適時的安全警訊，以符合駕駛者所需，然而駕駛者的行為特性除了具有個別的差異性外，其對跟車安全程度的認知亦有某種程度的模糊性，因此結合參數實驗與模糊理論之應用，發展符合駕駛者心理感受的適用警示演算法則，乃是未來可加以發展的重要研究方向。

參考文獻

1. 董基良等，「汽車駕駛模擬系統軟硬體之擴充與測試駕駛行為實例應用之研究」，期末報告(初稿)，交通部運輸研究所，民國 93 年 11 月。
2. 交通部統計處，「中華民國 92 年交通統計要覽」，民國 93 年 7 月。
3. Peter Seiler, Bongsob Song, J. Karl Hedrick, "Development of a Collision Avoidance System," 98PC-417, Society of Automotive Engineers, Inc., 1998.
4. 朱海燕等，「汽車安全輔助系統研究」，交通部，財團法人資訊工業策進會，MOTC-STAO-90-01710，民國 91 年 4 月。
5. Yuji Takada, Osamu Shimoyama, "Evaluation of Driving-Assistance Systems Based on Drivers' Workload," Driving Assessment 2001, International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Colorado, U.S.A., August 2001.
6. A.L. Burgett, A. Carter, R.J. Miller, W.G. Najim, and D.L. Smith, "A Collision Warning Algorithm for Rear-End Collisions," 16th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles Abstracts, 98-S2-P-3 1,

Washington, DC, May 1998.

7. Harihamn Krishnan, Scott Gibb, Aaron Steinfeld and Steven Shladover, "Rear-end Collision Warning System Design and Evaluation via Simulation," Transportation Research Record 1759, Paper No. 01-3021, 2000.
8. Lee Yang, Ji Hyun Yang, Eric Feron and Vishwesh Kulkarni, "Development of a Performance-Based Approach for a Rear-End Collision Warning and Avoidance System for Automobiles," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Columbus, OH, June 2003.
9. P.L. Zador, S.A. Krawchuk, R.B. Voas, "Automotive Collision Avoidance Systems (ACAS) Program," Final Report, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Performed by Delphi-Delco Electronic Systems, DOT HS 809 080, Washington, DC, August 2000.
10. Richard van der Horst, Jeroen Hogema, "Time-To-Collision and Collision Avoidance Systems," The 6th International Cooperation on Theories and Concept in Traffic Safety (ICTCT) Workshop, Saizburg, 1993.
11. John D. Lee, Daniel V. McGehee, Timothy L. Brown, Michelle L. Reyes, "Driver Distraction, Warning Algorithm Parameters, and Driver Response to Imminent Rear-end Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator," National Highway Traffic Safety Administration, Performed by Human Factors & Vehicle Safety Research Program, University of Iowa Public Policy Center, DOT HS 809 448, Washington, DC, March 2002.
12. S.J. Brunson, E.M. Kyle, N.C. Phamdo, G.R. Preziotti, "Alert Algorithm Development Program NHTSA Rear-End Collision Alert Algorithm," Final Report, National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 809 526, Washington, DC, September 2002.
13. R.J. Kiefer, M.T. Cassar, C.A. Flannagan, D.J. LeBlanc, M.D. Palmer, R.K. Deering and M.A Shulman, "Forward Collision Warning Requirements Project Task1-Final Report," National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Performed by the Crash Avoidance Metrics Partnership (CAMP), DOT HS 809 574, Washington, DC, January 2003.
14. 許添本，「多車種組合式模組化車流模擬模式之研究」，行政院國家科學委

員會，NSC82-0410-E-002-354，民國 83 年。

15.Mark Brackstone, Beshr Sultan, Mike McDonald,"Motorway Driver Behaviour: Studies on Car Following"Transportation Research Part F, 5(1), pp.31-46, 2002.

16. Roger P. Roess, Elena S. Prassas, William R. Mcshane, "Traffic Engineering," Third Edition, Prentice-Hall, Inc., pp.21-23, 2004.

17. Olson, P., et al., "Parameters Affecting Stopping Sight Distance," NCHRP Report 270, Transportation Research Board, Washington, DC, 1984.

18. "Forward Collision Warning Systems: Operating Characteristics and User Interface Requirements Information Report (Draft)," SAE standard J2400, June 2002.

19. Yamada, K., Wakasugi, T., "A Study on Effectiveness of Forward Vehicle Collision Warning (in Japanese with English summary)," Trans. JSAE, Vol. 32, No. 1, pp. 119–124, 2001.

20. Hiroyuki, M., et al., "Simulation Study of the Accident Reduction Effect with Advanced Cruise-Assist Highway System," 9th ITS World Congress on ITS, 2002.

21. Green, Paul,"Variations in Task Performance Between Younger and Older Drivers: UMTRI Research on Telematics,"Advancement of Automotive medicine Conference on Aging and Driving, 2001.

22. Lora, W. V., "Effects of Uncertainty, Transmission Type, Driver Age and Gender on Brake Reaction and Movement Time," Journal of Safety Research, Vol. 33, pp. 117-128, 2002.

23. McGee, et al., "Highway Design and Operation Standards Affected by Driver Characteristics," Volume II: Final Technical Report, Bellomo-McGee, Inc. Vienna, Virginia, Report No. FHWA-RD-83-015, 1983.

24. Roberts, Jr., C. C., "Response Time", http://www.roberts.ezpublishing.com/croberts/respon.htm

25. Johansson, G., Rumar, K., "Driver's Brake Reaction Times, Human Factors," Vol. 13, No. 1, pp. 23–27, 1971.

(94/04/20 收稿，94/08/18 第一次修改，94/09/20 定稿)