

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫四：巨觀動態車流模型開發與驗證(1)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2218-E-009-046-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學運輸科技與管理學系(所)

計畫主持人：卓訓榮

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 11 月 1 日

摘要

本研究旨在發展一套新的動態巨觀車流模式，並且導入交通場與機動力的概念構建此模式。在本研究中，交通場又可分為外場與內場，前者收道路外在環境之影響，後者則跟相鄰兩車之間的互動有關，交通場的大小決定了車輛在道路上的加減速行為。機動力在本研究中代表不同駕駛習慣之參數，它將扮演一個重要的因子，且所有車輛行為都將受其影響，不管是交通場的選擇門檻或者是加減速行為。為了讓所有模式中的變數與參數有其物理意義，本研究在構建巨觀模式之前，先行根據交通場與機動力的概念設計一微觀車流模式，再將其推導成巨觀模式。

關鍵字：動態巨觀車流模式、交通場、機動力、車輛慣性

Abstract

The purpose of this research is to develop a new dynamic macroscopic model. In this research, we introduce the traffic fields and mobility into this new model. The traffic field is subdivided into external field and internal field, the external field is caused by the external conditions in the roads and the internal field is caused by the interactions between the adjacent cars. We assume that all cars move fast or slowly according to the magnitude of traffic field. Mobility is a key factor to affect the behaviors of vehicles and the thresholds of traffic fields. We design a microscopic model first, and we derive the macroscopic model from the microscopic one. It is the reason that every variables and parameters in this research are meaningful.

Keyword: dynamic macroscopic model, traffic fields, mobility, Driver's inertia.

一、研究背景與動機

智慧型運輸系統(Intelligent Transportation System)的發展中,先進用路人資訊系統(Advantage Transportation Information System)便是提供用路人資訊的重要建設。為求整體運輸網路的最佳化,提供給用路人的資訊系統應具有導引用路人在路徑選擇上達到系統最佳的作用,可見動態指派模式在此一系統中的重要性。唯動態指派模式中最重要也最不易估算的便是路段旅行時間。指派模式中的決定因子主要來自於路段旅行時間的預估,舊有四次方的成本函數在即時動態的系統中不易符合真實路況,車流模式的發展便能處理此一課題。

車流模式的發展可以簡單分為微觀模式與巨觀模式,前者在車輛行為的描述上較為細膩且易從個別車輛的行為假設來修正模式以適用於個別路況。但此一優點在模擬大規模路網時反因過多行為的描述而增加預測所需時間。但模擬路網的時間隨路網規模呈指數性的成長,模擬規模也因此受限,尤其即時資訊的必要性,更突顯計算快速的巨觀車流模式的重要。巨觀車流模式在車輛行為的細膩度上不比微觀模式,卻能大大減少模擬時間,在提供即時資訊的系統中,巨觀模式的發展有其必要。

巨觀車流模式的發展最早是由 Whitham、Lightwill、Richard 等人在 1957 年以連續方程式 (continuity equation) 為基礎發展的車流模式。而動態車流模式中最重要移動方程式 (motion equation) 成了描述車輛行為最主要的研究重點,如何細膩且寫實的利用所構建的移動方程式描述道路上車流的行為是本研究的目標。

二、文獻回顧

本研究以發展可行之巨觀動態車流模式為目的,並考慮其在智慧型運輸系統之應用。因此本研究探討動態巨觀車流模式之發展與限制。但在模式構建部份,由於本研究採用微觀車流模擬來構建巨觀車流模式,並使用 CA 模式來構建模擬器,因此在微觀車流模式與 CA 模式部分亦須有所著墨,以求在訂定模擬器行為假設時能有所根據。

以往的微觀跟車模式大致有幾類,如:由前後車速差決定後車加減速的 GM 模式[Gazis, 1959][Herman, 1959]、考慮跟車限制條件的四大跟車限制式[Lewis, 1963]、利用模糊理論所建立的規則決定後車加減速的模糊推論模式[Chakroborty, 1999]、或是認為在不同的速差及間隔下其決策應不同應予以分區的行為門檻模式 [Hoefs, 1972][Leutzbach, 1988][Widemann, 1974] 及 CARSIM [Benekohal, 1988]、以及考慮車輛應保持的跟車間距的 PITT 模式。

CA 理論早在 50 年代就已提出[Gerlough, 1956],但一直到近年統計物理學開始發展才受到重視,例如發展出以 CA 為基礎的簡單車流模式[Nagel, 1992]。CA 理論假設所有的車輛都以一介於 0 與 u_{\max} 的整數速度移動(這個整數速度代表的

是單位時間所能移動幾個細胞的距離)。時間 t 時的各種交通狀態被儲存來計算時間 $t+1$ 時的狀態，同理可以一直計算。CA 模式被認為能夠真實的描述並且模式化車輛的行為。然而，在描述汽機車混合車流時，由於機車的移動不受車道限制，二維的 CA 模式是有必要的。

動態巨觀模式以 LWR 模式為基礎，及根據不同之交通現象與道路狀況所建立的相關研究為主。由於 LWR 模式所能描述的車流現象有限，Payne[Payne, 1971] 在原 LWR 模式之一階波動方程式之外，另考慮一個動量方程式(momentum equation)，計算車子在加速及慣性作用時的動態行為，同時考慮駕駛者的反應時間。而 Baker[Baker, 1983]更進一步推導出車流之氣體動力模式(hydrodynamic model)，仍以擁擠車流與車隊擴散情況為探討重點，導出之波動方程為一以道路末端為自由車流之邊界條件的分子散播方程(dispersive equation)，此即為量子力學中著名之薛丁格方程(Schrodinger equation)，用以分析號誌路口週期性變化之車流特性。

三、車流模式建立

動態車流模式的構建，大多以一維空間為主。一維模式的好處在於可將模式重點專注於車輛縱向距離與速度差對車輛行為的影響。

3.1 加速度場與機動力

根據牛頓定律，我們假設車輛的移動均受到一個外在的場所影響，這個場可以是因為外在的影響因素所造成，諸如坡度、車道數、道路幾何型態等等。另一方面。另外從早期的跟車模式我們也發現，車輛與車輛間應該也存在一種互相影響的力量，我們假設造成此力量是所謂內在的場，影響此力量的因素不外乎車輛間的距離、車當量等等。從牛頓定律得知，場的大小應該與加速度有關，所以我們假設當車輛在不受其他車輛影響時所產生的加速度是由外在的場所造成，同樣的，因車輛間距離變化所產生的加減速行為是由內在的場所造成，所以我們將車輛受到的場分成兩部分探討，也就是內場與外場。

$$E_{\text{總}} = E_{\text{外}} + E_{\text{內}} \quad (\text{式 3-1})$$

3.1.1 內場

前節已經提到內場跟車輛間距離有關，更直接來說，我們引用牛頓定律假設內場與距離成反比，然而這樣的假設事實上在交通上是有瑕疵的。藉由觀察道路上車輛行為，本研究發現後車發生減速度行為的關鍵在駕駛者的判定，也就是維持等速前進是否會撞上前車，若會，則減速，反之，則加速或維持等速。因此本研究改以「駕駛者認定的碰撞可能性」來取代「前後車距離」，作為判定內場的依據。在後續模式構建中，「駕駛者認定的碰撞可能性」可表示成「當前後車維持等速時，後車撞上前車所需要的時間」，當所需時間越少代表碰撞可能性高，反之則代表可能性低。這樣的假設可以直覺判定內場會與碰撞可能性成正比。

由於我們無法得知內場大小與「碰撞可能性」呈幾次方的正比關係，於是我們暫時假設交通場是與駕駛者認定的碰撞可能性的 γ 次方成正比。另一個值得探討的議題是同車道與異車道間車輛的影響是否相同。實際觀察道路情況可以發現，小客車與大客車變換車道的行為並沒有所謂變動半個車道的情況，都是以一個車道為變動單位。如果將道路看成一個二維空間，y方向的移動，也就是變換車道方面幾乎僅在整數部分變化，更直接來說，橫向(變換車道方向)車輛間的影響結果只有換或不換車道的差別，也就是所謂的門檻限制，用距離反比來看橫向場的影響較無意義。雖然如此，在研究機動車輛的橫向移動時，由於機動車輛橫向移動不全是以車道為單位，為了將來能引用本研究發展之模式來分析混合車流，定義橫向場仍有必要。於是我們將內場分為橫向與縱向。

$$E_{\text{內}} = E_{\text{內,橫}} + E_{\text{內,縱}} \quad (\text{式 3-2})$$

圖 3-1 描述 0 號車輛遭受 1 號與 2 號車輛的影響，所產生的受到的橫向與縱向場：

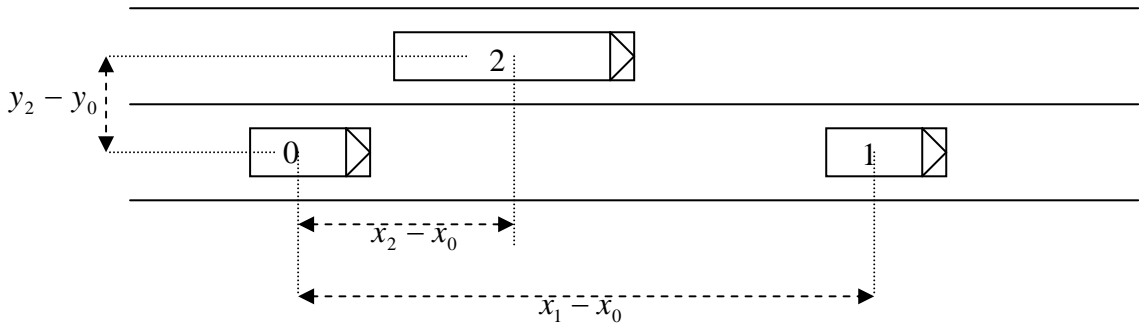


圖 3-1 車輛間的內場

為了一般化場的定義，我們同樣假設橫向車輛間的影響也與碰撞可能性成反比，但在討論車輛受到的縱向場大小時，可以理解同樣的碰撞可能性，同車道與異車道所產生的場應該有所不同，一般來說，在探討車輛的橫向行為時，同車道車輛的影響會較為敏感，所以我們暫將橫向距離等化為縱向距離的 M 分之一。特別是縱向車輛間同樣會產生橫向的力，這點是交通上特有的，也就是說在多車道的道路上，同車道的前後車關係，會因前後車間的距離縮短而促使後車變換車道，這點不難在實際道路上觀察出來。

我們假設道路狀況如圖 3-1 所示時，0 號車所受到的內場為：

$$E_{0, \text{縱}} = \frac{e_{10}}{\varepsilon} \left(\frac{u_{x,0} - u_{x,1}}{x_1 - x_0} \right)^\gamma \quad (\text{式 3-3a})$$

$$E_{0, \text{橫}} = \frac{1}{\varepsilon} \left[e_{10} \left(\frac{u_{x,0} - u_{x,1}}{x_1 - x_0} \right)^\gamma - e_{20} \left(\frac{u_{x,0} - u_{x,2}}{x_2 - x_0} \right)^\gamma - \frac{e_{20}}{M} \left(\frac{u_{y,0} - u_{y,2}}{y_2 - y_0} \right)^\gamma \right] \quad (\text{式 3-3b})$$

式 3-3a 與 3-3b 中的 ε 值代表車輛間影響參數， e_{10} 與 e_{20} 表示 1 號車輛與 2 號車輛的相對於 0 號車的當量。特別注意一點的是，就微觀的角度來看，雖然牛頓定律考慮的是所有物質之間的排斥力，但就車輛的角度來看，同樣的車間距

離，車輛受到前車的影響會大於後車的影響，包括橫向車輛亦是如此，而且僅僅只能意識到前後一台車輛的存在，這對之後的模擬是應該注意的。

另一方面，車輛間的速度差亦會對產生的場有所影響。以下例子可以說明在討論車輛間交互影響時，速度差的重要性。假設同一車道上有兩輛車，根據式 3-3a，對後車來說，當速度比前車大時，會產生排斥力，造成後車做減速的行為。但實際上並不完全如此，假如前車速度明顯小於後車，但只要前後車距離夠長，後車將不會有減速行為，甚至還會有些微的加速行為，這是式 3-3a 無法描述卻能在實際道路上觀測到的現象。於是我們將速度差的行為納入當量 e 中，同時假設當前車速度高過後車速度 δ 時，無論前後車之間距離多短，後車將有加速行為。值得注意的是 δ 是一個前後車間距的函數，當前後車距越大， δ 會越小，反之會越大。重新考慮速度差的影響後，式 3-3 將進一步細分為式 3-3c 與 3-3d：

$$E_{0, \text{縱}} = \frac{[u_0 - u_1 + \delta(x_1 - x_0)]}{\varepsilon} \left(\frac{u_0 - u_1}{x_1 - x_0} \right)^\gamma \quad \text{if } u_0 - u_1 + \delta(x_1 - x_0) \geq 0 \quad (\text{式 3-3c})$$

$$E_{0, \text{縱}} = 0 \quad \text{if } u_0 - u_1 + \delta(x_1 - x_0) < 0 \quad (\text{式 3-3d})$$

式 3-3c 的目的只是要說明 δ 會受密度所影響，有關影響 δ 的因子為何，將在後面章節討論。

3.1.2 外場

在 3.1.1 節已經提到，外在的道路狀況會對車輛產生一個持續的推進力，我們稱之為外場。令一個解釋外場存在的理由是就算道路上僅僅只有一輛車，在沒有其他車輛的影響下，車輛一樣會有速度變化的行為。換句話說，外場是由當下環境所產生的一個影響車輛行為的力量。令一方面，外場對車輛所造成的影響屬於一種改變車輛現狀的力量，這個力量會隨車輛逐漸改變為外場所欲達成的最後狀態而逐漸減小。這個現象可以用駕駛者當下的速度與其所欲達到的最終期望速度來表示：

$$E_{\text{外,縱}} = \frac{u_d - u_0}{t_d} \quad (\text{式 3-4})$$

其中， $u_d = u_d(k, p_1, p_2, \dots)$ ， p 代表的是外在道路環境，包括坡度、天候等等。 t_d 代表由當下速度 u_0 變化成期望速度 u_d 所需的時間。

3.1.3 機動力

顧名思義，機動力 λ 表示的是駕駛者在道路上的機動程度。在本研究中，機動力越高代表駕駛在相同外在環境下會有較高的移動速度，且在改善速度環境的行為中(例如變換車道)，越高機動力代表越容易改善駕駛自身的速度環境(越容易變換車道)。在本研究後續章節裡，機動力扮演影響車流模式相當重要的角色，在微觀行為的處理上，機動力不僅影響跟車距離、加減速行為，同時也將影響判

斷是否變換車道的程度。

本研究並未對橫向場加以著墨，因此後續提到的場都屬於縱向(車輛移動方向)場。

3.2 巨觀單車道模式

前述為微觀的車流模式，為了在模擬大規模路網時的即時性，有必要將複雜的微觀模式於予巨觀化。

3.2.1 巨觀內場

在巨觀化的過程中我們假設密度為距離的導數。當內場為：

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{[u_0 - u_1 + \delta(x_1 - x_0)]}{\varepsilon} \left(\frac{u_0 - \lambda \cdot u_1}{x_1 - x_0} \right)^\gamma \\
 &= \frac{[u_0 - u_1 + \delta(x_1 - x_0)]}{\varepsilon} \cdot \eta(\lambda) \cdot \left(\frac{u_0 - u_1}{x_1 - x_0} \right)^\gamma \\
 &= \frac{\eta(\lambda) (u_0 - u_1)^{\gamma+1}}{\varepsilon (x_1 - x_0)^\gamma} + \frac{\eta(\lambda) \delta(x_1 - x_0) (u_0 - u_1)^\gamma}{\varepsilon (x_1 - x_0)^\gamma} \\
 &= \frac{\eta(\lambda) (u_0 - u_1)^{\gamma+1}}{\varepsilon (x_1 - x_0)^\gamma} + \frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \delta(x_1 - x_0) \left(\frac{u_0 - u_1}{x_1 - x_0} \right)^\gamma \\
 &= -\frac{\eta(\lambda) (u_1 - u_0)^{\gamma+1}}{\varepsilon (x_1 - x_0)^{\gamma+1}} (x_1 - x_0) - \frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \delta(x_1 - x_0) \left(\frac{u_1 - u_0}{x_1 - x_0} \right)^\gamma \\
 &= -\frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \frac{\partial u^{\gamma'}}{\partial x^{\gamma'}} k - \frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \delta(k) \frac{\partial u^\gamma}{\partial x^\gamma}
 \end{aligned}$$

而在條件式的部分：

$$\begin{aligned}
 u_0 - u_1 + \delta(x_1 - x_0) &\geq 0 \\
 \Rightarrow \frac{u_0 - u_1}{x_1 - x_0} + \frac{\delta(x_1 - x_0)}{x_1 - x_0} &\geq 0 \\
 \Rightarrow -\frac{\partial u}{\partial x} + \delta'(k) &\geq 0 \\
 \frac{x_1 - x_0}{u_0 - \lambda \cdot u_1} &\geq \Delta t \\
 \Rightarrow \frac{u_0 - \lambda \cdot u_1}{x_1 - x_0} &\leq \frac{1}{\Delta t} \\
 \Rightarrow \eta(\lambda) \left(\frac{u_0 - u_1}{x_1 - x_0} \right) &\leq \frac{1}{\Delta t} \\
 \Rightarrow -\eta(\lambda) \frac{\partial u}{\partial x} &\leq \frac{1}{\Delta}
 \end{aligned}$$

重新整理得到式 3-5a：

$$E = -\frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \frac{\partial u^{\gamma'}}{\partial x^{\gamma'}} k - \frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \delta(k) \frac{\partial u^\gamma}{\partial x^\gamma} \quad \text{if } -\frac{\partial u}{\partial x} + \delta'(k) \geq 0 \text{ 且 } -\eta(\lambda) \frac{\partial u}{\partial x} \leq \frac{1}{\Delta} \quad (\text{式})$$

3-5a)

式 3-5a 中 $\gamma' = \gamma + 1$ 。冠上負號的理由包括將 $u_0 - u_1$ 轉換成 $u_1 - u_0$ 且由於內場僅造成減速度，就算 γ 是偶數，仍然不可以省略負號。式 3-5a 中多了三個在微觀模式中所沒有的參數， $\delta'(k)$ 、 $\eta(\lambda)$ 與 Δ 。

$$\delta'(k) = \frac{u_f}{x_1 - x_0} - \frac{2}{\Delta} = u_f \cdot k - \frac{2}{\Delta} \quad (\text{式 3-5b})$$

Δ 代表的是模擬的時間間隔，唯一需要額外處理的是 $\eta(\lambda)$ 。

由上述的推導已知：

$$\begin{aligned} \eta(\lambda) \frac{u_0 - u_1}{x_1 - x_0} &= \frac{u_0 - \lambda \cdot u_1}{x_1 - x_0} \\ \Rightarrow \eta(\lambda) &= \frac{u_0 - \lambda \cdot u_1}{u_0 - u_1} \geq \frac{u_0 - u_1}{u_0 - u_1} = 1 \end{aligned}$$

由於 λ 介於 0 與 1 之間，因此 $\eta(\lambda)$ 必大於 1。為了較估 $\eta(\lambda)$ ，我們將模擬所得資料整理如表 3-1：

表 3-1 機動力與 $\eta(\lambda)$ 關係之統計資料

機動力	$\eta(\lambda)$ 的平均值	$\eta(\lambda)$ 的標準差
0.1	1.295	0.254
0.2	1.242	0.383
0.3	1.386	0.512
0.4	1.360	0.659

表 3-1 顯示在決定 $\eta(\lambda)$ 時，機動力並不會影響 $\eta(\lambda)$ 的平均值，反而是影響其標準差。

3.2.2 巨觀外場

在微觀外場的描述上，我們採用駕駛者的期望速度來做為車輛所欲達到最後的狀態，但在巨觀的觀點，整個觀察路段上最終的均衡速度將取代個別駕駛的期望速度成為我們關注的重點。

本研究採用最廣為應用的鬆弛項(relaxation term)來作為外場的描述，須注意的是均衡速度(equilibrium velocity)的定義將不止是密度的函式，必須多考慮外在的道路環境。外場的定義如下：

$$E_{\text{外,縱}} = \frac{u_e - u}{T} \quad (\text{式 3-6})$$

其中， $u_e = u_e(k, p_1, p_2, \dots)$ ， p 代表的是外在道路環境，包括坡度、天候等等。由於均衡速度的判定需要現場資料的調查，本研究並無現場資料的蒐集，故仍採用 May 在 1967 年根據現場資料所估算的均衡速度關係式：

$$u_e = u_f \exp\left(\frac{k}{k_j}\right)^{-0.5} \quad (\text{式 3-7})$$

3.2.3 小結

整理前兩節的論述，一個無進出匝道的公路巨觀模式如式 3-8 所示：

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} &= 0, \quad \frac{du}{dt} = E + E_{\text{外}}, \quad q = ku \\ E &= -\frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \frac{\partial u^{\gamma'}}{\partial x^{\gamma'}} k - \frac{\eta(\lambda)}{\varepsilon} \delta(k) \frac{\partial u^{\gamma'}}{\partial x^{\gamma'}} \quad \text{if } -\frac{\partial u}{\partial x} + \delta'(k) \geq 0 \text{ 且 } -\eta(\lambda) \frac{\partial u}{\partial x} \leq \frac{1}{\Delta} \\ E &= -E_{\text{外}} - u \quad \text{if } -\frac{\partial u}{\partial x} + \delta'(k) \geq 0 \text{ 且 } -\eta(\lambda) \frac{\partial u}{\partial x} \leq \frac{1}{\Delta} \\ E &= 0 \quad \text{if } \frac{\partial u}{\partial x} + \delta'(k) < 0 \\ E_{\text{外}} &= \frac{u_e - u}{T}, \quad \delta'(k) = u_f \cdot k - \frac{2}{\Delta}, \quad u_e = u_f \exp\left(\frac{k}{k_j}\right)^{-0.5}, \quad \gamma' = 1 + \gamma = 2 + 10\lambda \end{aligned} \quad (\text{式 3-8})$$

四、結論及建議

本研究主要在發展一套含物理意義之巨觀車流模式，藉由微觀車輛行為的意義，推導成巨觀車流模式。另外本研究導入一個加速度場與機動力的概念，之所以將加速度場分為內場與外場在於觀察實際路況或模擬時，這樣的區隔能有效分辨出車輛行為的加速度是否屬於受其他車輛影響產生的結果，由於本研究主要在探討移動方程的組成，這樣的區隔更顯的重要。

以往類 PW 的巨觀模式最為人詬病的在於會有錯誤的車流行進方向，也就是車輛會發生往後移動的現象，本研究所構建的模式例用門檻限制的方式，區分出三個在不同條件下的內場，分別對應到的情況能避免車輛產生向後退的情形。

本模式中尚有許多有待改進之處，包括均衡速度應該受到道路實體狀況的影響，以及除了機動力外，應該還有影響 ε 的因子有待發現。另外，在多車道模式中，決定變換車道交通量的多寡引用 Machalopoulos 的模式也有待驗證其中相關的參數。

五、參考文獻

1. Baker, R.G. "A Model of Traffic Dispersion from a Congested Road", Transportation Research Part B 15, pp.319-327, 1981.
2. Benekohal, R.F., J. Treiterer, "CARSIM: CAR-Following Model for Simulation of Traffic in Normal and Stop-and-Go Conditions", Transportation Research Record, pp.99-111, 1988.
3. Chakroborty, P., S. Kikuchi, "Evaluation of the General Motors Based

- Car-following Models and A Proposed Fuzzy Inference Model”, Transportation Research Part C 7, pp.209-235, 1999.
4. Gazis, D. C., R. Herman, and R. B. Potts, “Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow”, Operations Research, Vol. 7, pp.499-505, 1959.
 5. Gerlough, D.L., “Simulation of Freeway Traffic by an Electronic Computer”, Proceedings of 35th Annual Meeting of Highway Research Board, 1956.
 6. Herman, R., E. W. Montroll, R. B. Potts, and R. W. Rothery, “Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following”, Operations Research, Vol. 7, pp.499-505, 1959.
 7. Hoefs, D.H., Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen, Forschungsberichte des Institut für Verkehrswesen, Heft 140, Universität Karlsruhe, 1972.
 8. Leutzbach, W., “Introduction to the Theory of Traffic Flow”, Springer-Verlag, 1988.
 9. Lewis, R.M., H.L. Michael, “Simulation of Traffic Flow to Obtain Volume Warrants for Intersection Control”, HRR 15, pp.1-43, 1963
 10. Nagel, K., “A Cellular Automation Model for Freeway Traffic”, Journal of Physics I 2, pp.2221-2229, 1992.
 11. Payne, H.J., “Models of Freeway Traffic and Control”, Math. Models Publ. Sys. Simul. Council Proc. 28, pp.51-61, 1971.
 12. Widemann, R., Simulation de Strassenverkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Universität Karlsruhe, 1974.