

國立政治大學理學院應用物理研究所

碩士論文

Graduate Institute of Applied Physics

College of Science

National Chengchi University

Master Thesis

以微觀模擬探討多車道使用規則：  
對臺灣高速公路行車法規建言

A comparative study of multi-lane traffic rules using  
microsimulation modeling: a proposal for highway rules in Taiwan

張太乙

Taiyi Zhang

指導教授：林瑜瑋博士

Advisor: Yu-Cheng Lin, Dr. rer. nat.

中華民國 106 年 6 月

June, 2017



# 摘要

本論文藉由微觀模擬探討高速公路（或快速公路）之車道使用規則。我們比較三種規則：（1）對稱規則，車輛得選擇任一車道行車，並允許左側超車與右側超車；（2）非對稱規則，車輛僅能使用右側車道行車，並僅允許左側超車，完成超車之車輛須駛回右側車道繼續行車；（3）複合規則，車輛得選擇最左側車道以外之車道行車，而左側車道為超車道，於其上之車輛完成超車後須駛回相鄰之右側車道繼續行車。基礎構圖為比較之基準。模擬結果顯示非對稱規則使得總體流量提升。本論文之結果可作為法規修訂之參考。

**關鍵字：**微觀模擬、多車道模型、變換車道規則、單車道模型、基本構圖。



# Abstract

Using microsimulation we investigate a set of lane-changing rules for highway traffic. We compare three types of lane-changing rules in terms of the fundamental diagram of traffic flow in multi-lane versions of the Nagel-Schreckenberg model: (1) the symmetric rule, in which overtaking is allowed on all lanes; (2) the asymmetric rule, in which overtaking is forbidden on the right; vehicles should use left-hand lanes to overtake but return to the right lane after overtaking when safety criteria are fulfilled; (3) the hybrid rule, in which the leftmost lane is the overtaking lane while other lanes are treated equally as in the symmetric rule; the hybrid rule differs from the asymmetric rule only when the total number of lanes is larger than two. The simulation results show that the overall traffic flow increases when the asymmetric rule of lane changes is applied, revealing the advantage of this type of overtaking regulations.

**Keywords:** microsimulation, multi-lane model, lane-changing rules, single-lane model, fundamental diagram of traffic flow.



# 目錄

摘要	iii
Abstract	v
目錄	vii
1 緒論	1
2 單車道模型	3
2.1 簡介	3
2.2 模擬結果	7
2.3 交通相態變化之探討	12
2.3.1 序參數	14
2.3.2 空間關聯	15
2.3.3 鬆弛時間	18
3 二車道模型	21
3.1 簡介	21
3.2 模型定義	22
3.2.1 對稱模型	22
3.2.2 單車種非對稱模型	24
3.2.3 二車種非對稱模型	26
3.3 模擬結果	27
3.3.1 單車種	28
3.3.2 二車種	31
3.4 小結	35
4 三車道模型	39
4.1 簡介	39
4.2 對稱模型	40
4.3 非對稱模型	41

4.4	複合模型	42
4.5	模擬結果	42
4.5.1	單車種	43
4.5.2	二車種	46
<b>5</b>	<b>結論與建議</b>	<b>51</b>
5.1	結論	51
5.2	討論	52
5.2.1	非均車速之成因	52
5.2.2	對於現行法規之探討	53
5.3	建議	53
5.4	展望	55
<b>A</b>	<b>模型變換車道條件程式碼</b>	<b>57</b>
	<b>參考文獻</b>	<b>67</b>





# 1

## 緒論

交通模擬已是今日交通管理不可或缺的科學工具，其中微觀模擬（microsimulation）是藉由具交互作用的個體，如車輛、行人等，所建構的模型來模擬計算出巨觀的量，如車流、平均速率等，進而呈現在不同控制變因及隨機參數下的整體交通現象。如此微觀模擬的技術及概念同時也是統計物理及計算物理處理關聯性多體系統常用的方法。

本論文以細胞自動機探討高速公路車流，自相關模型中尋求最佳之車道使用方式。本論文的計算完全使用自行開發的程式，此以 C++ 語言撰寫的程式可彈性擴充至任意車道數及不同車道使用模式的高速公路交通模型。

本論文的架構大致如下：第 2 章首先介紹由 Nagel 與 Schreckenberg 提出的經典單車道細胞自動機模型，並且加以模擬，而後藉由模擬之結果介紹相關交通車流觀察量。我們並討論模型的相變問題。第 3 章介紹二車道模型，與單車道相比，其牽涉變換車道之行為，為本論文之核心概念，我們將介紹對稱與非對稱車道使用模式，及其變換車道行為。第 4 章介紹三車道模型，除二車道已有之對稱／非對稱車道使用模式外，由於車道數之增加，我們將再介紹一複合型車道使用模式，我們相信此模型更貼近於臺灣現行法規之多車道使用模式。最後於第 5 章我們根據模擬結果提出相關建議。部份程式碼呈現於附錄 A。



## 2

# 單車道模型

## 2.1 簡介

1992 年兩名德國物理學者 Nagel 和 Schreckenberg 介紹了一細胞自動機模型 (cellular automaton)，簡稱 NaSch 模型，試圖描述高速公路之車流情形 [23]。所謂細胞自動機模型為一空間及時間均為離散之模型，其概念原由匈牙利暨美國科學家 von Neumann 於 1950 年代建構「自我複製」(self-replication) 理論時提出 [25]。NaSch 模型中車輛之位置、速率及加速均為離散的變數。模型係定義在一具  $L$  個位置 (site) 之陣列上 (相當於將車道分割為  $L$  個區塊)，每個位置可為空或者為一車輛所使用 (如圖 2.1 之模型示意)。陣列之長度相當於車道之長度，位置之長度則相當於車輛之長度。每車輛分別具  $0$  至  $v_{\max}$  其中之一之整數速率： $v = 0, 1, \dots, v_{\max}$ ，此一數值代表車輛於單位時間內所前進之位置數， $v_{\max}$  對每輛車均相同。

在 NaSch 模型中，我們於一單位時間內 ( $\Delta t = 1$ ) 對每一車輛進行以下四個步驟之狀態更新：



圖 2.1：單車道細胞自動機模型示意圖。圖中顯示 17 個車位，代表車道長度為  $L = 17$ 。車輛使用情形如圖所示，同一時間每個車位只能最多被一輛車所使用，車輛右上角之數字為該車之速率。圖片源自 [6]。

### 1. 加速

若一車輛之速率  $v$  尚未達到  $v_{\max}$ ，則將其之速率加 1，同時考慮加速後其速率不超過所允許的  $v_{\max}$ ，

$$v \rightarrow \min(v + 1, v_{\max}).$$

此代表在速限範圍內儘量提高速率行駛。

### 2. 減速

為保持安全距離，避免後車碰撞前車，則須遵行以下減速法則：若一車輛之速度  $v$  大於與前車間之距離  $d$ ，則將  $v$  減速為  $d$ 。即

$$v \Delta t \rightarrow d, \quad \text{if } v \Delta t > d.$$

此處  $\Delta t$  為單位時間  $\Delta t = 1$ 。

### 3. 隨機減速

對於速度大於 0 之個別車輛，我們以  $p$  的機率使其速度減 1。

$$v \rightarrow v - 1, \quad \text{if } v > 0 \text{ and } \text{ran}() < p,$$

其中  $\text{ran}()$  為均勻介於  $[0, 1)$  區間的亂數。

### 4. 車輛移動

將個別車輛向前移動  $v \Delta t \equiv v$  個位置。

以上  $v_{\max}$ ,  $p$  及  $L$  為模型的三個參數。

在模擬作業中，步驟 3 隨機性之引進乃係考慮人類行為，如最高速率之浮動、過度反應之煞車與延遲之加速等。此模型儘管簡單，卻能有效地重製接近真實車流之行為（如車輛之走走停停（stop-and-go traffic））[20, 21]。

NaSch 模型可定義在一具週期性（periodic）或者開放（open）邊界條件之陣列上。週期性邊界條件係將車道之頭尾相連，視為一環狀陣列，無車輛進出口，

車輛數守恆，為一封閉系統 (closed system)；如此可定義車輛數  $N$ 。開放邊界條件係指陣列兩端分別為車輛入口及出口，並經由特定邊界條件來形成一系統，如於單位時間內，指定一定數量之車輛至車道入口處附近，與移除出口處附近某一數目位置其上之所有車輛 [23]，在實際道路上，此猶如匝道或隧道之管制。

本論文中僅考慮週期性邊界條件。在給定車輛數  $N$  及道路長度  $L$  下，系統密度  $\rho$  定義為

$$\rho = N/L. \quad (2.1)$$

車流量  $J$  則定義為

$$J = \rho \bar{v}, \quad (2.2)$$

其意義為單位時間通過道路橫斷面 (cross section) 之車輛數 (相當於物理學中電流之定義：單位時間內通過一截面之電荷)，其中  $\bar{v}$  為平均速率，在某一時間點定義為：

$$\bar{v}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(t), \quad (2.3)$$

上式求和符號中的  $n$  為車輛編號。實際模擬中，我們等待一段時間  $t_0$  後，才開始進行測量，以確定系統呈穩定態 (stationary state)，不受初始條件之影響。經測試後，我們設定  $t_0 = 10L$ 。又為得到更佳的統計結果，平均速率亦對一觀察週期  $T$  做時間平均：

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \bar{v}(t). \quad (2.4)$$

我們探討車流量  $J$ 、密度  $\rho$  與平均速率  $\bar{v}$  間之關係，我們使用流量—密度圖 ( $J-\rho$ )、速率—密度圖 ( $\bar{v}-\rho$ ) 與速率—流量圖 ( $\bar{v}-J$ ) 來探討，其中流量—密度圖又稱為基本構圖 (fundamental diagram)。這類圖形經常被使用來比較實際與模擬之資料，藉此驗證模型之正確性，並藉由調整參數使模擬結果擬合實際資料，擬合所得之參數可進而預測不同道路型態上之車流情形。實際道路測量時，密度與流量常採用埋設於道路中之單一定點之偵測器求得。模擬上我們亦可用此一方式來求得相應資料。考慮位於位置  $i$  的偵測器於一長時間觀察週期  $T$  記錄時間點  $t$

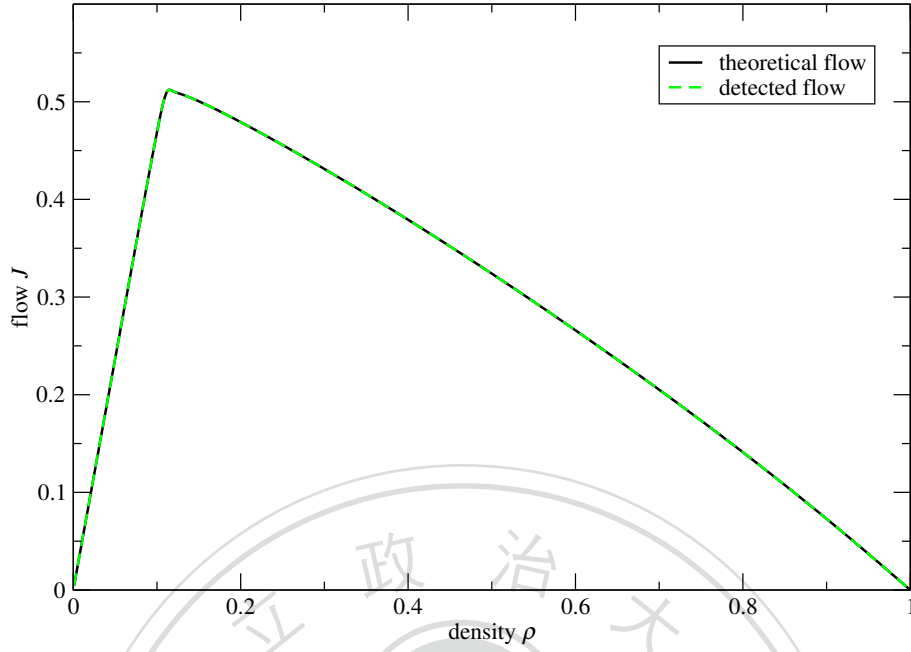


圖 2.2：理論流量與偵測器流量之比較，可看出兩者幾無差異。此處觀察時間為  $T = 20000$ 。

通過之車輛數

$$n_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{若位置 } i \text{ 被占用,} \\ 0 & \text{若位置 } i \text{ 為空,} \end{cases} \quad (2.5)$$

求得週期  $T$  內的偵測器密度

$$\bar{\rho}^T = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} n_i(t). \quad (2.6)$$

在長觀察時間  $T$  極限下，此測量方式與公式 (2.1) 其實是相同的 [23]：

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \bar{\rho}^T = \rho. \quad (2.7)$$

車流量在實際道路則需由可探測車輛移動之偵測器記錄；於單位時間  $t$  記錄

$$n_{i,i+1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{若位置 } i \text{ 與位置 } i+1 \text{ 間偵測到車輛移動,} \\ 0 & \text{其他情形,} \end{cases} \quad (2.8)$$

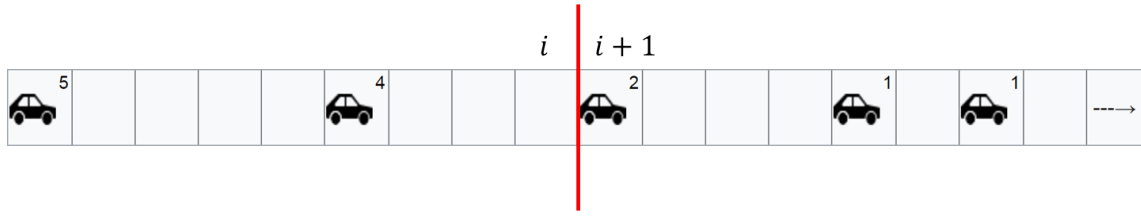


圖 2.3：偵測器示意圖。圖改編自 [6]。

則可得偵測器流量

$$\bar{J}^T = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} n_{i,i+1}(t). \quad (2.9)$$

由 (2.9) 更可直覺看出流量之定義：單位時間通過道路橫斷面之車輛數，參考圖 2.3。在長  $T$  極限下，同樣地

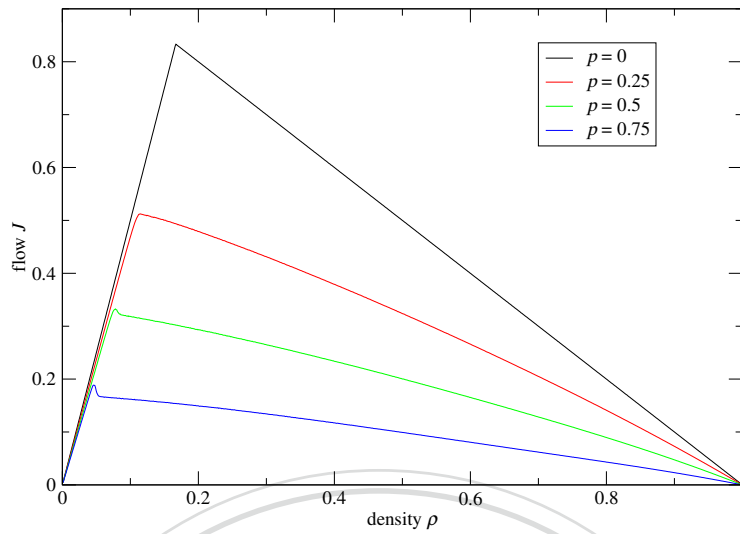
$$\lim_{T \rightarrow \infty} \bar{J}^T = J. \quad (2.10)$$

圖 2.2 我們驗證偵測器方法與式 (2.1) 及式 (2.2) 的理論方法在長觀察時間下確實得到相符的結果。

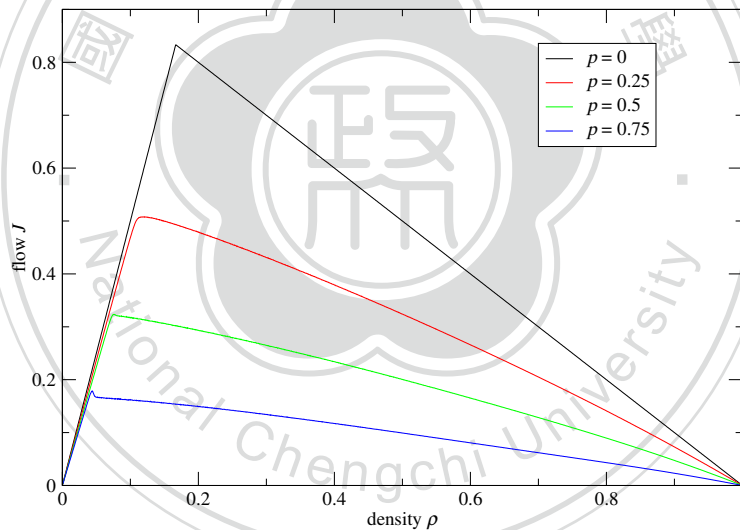
在本論文中我們採用式 (2.1) 及式 (2.2) 來計算密度及流量。

## 2.2 模擬結果

本節我們展示一些模擬結果，測量值均作時間平均（使用  $T = 10000$ ）及 100 個獨立模擬樣本平均，又模擬時間  $t_0 = 10000$  後才進行測量。我們於圖 2.4 示範在  $v_{\max} = 5$  速限及各種不同煞車機率下模擬的基本構圖。可以看出於密度低時，流量隨著密度增加而增加，而當密度達一臨界值後則開始往下降。因此我們可以說，密度是影響流量的關鍵因素，密度超過一臨界值  $\rho_c$  後，流量降低與壅塞即是無可避免的。同樣資訊我們也可用速率—密度圖來呈現，此處同樣顯示臨界密度劃分兩相態：密度小於臨界值時的自由車流相態（free flow phase）[28]，及密度高時的壅塞相態。在自由車流相態，平均速率幾乎為一不隨密度而改變之定值，而在密度大於臨界值的壅塞態，平均速率則隨密度增加急遽下降。由於駕駛者對於速率之感受是較流量來得明顯，因此透過速率—密度圖，我們更能體會密度增



(a)  $L = 1024$



(b)  $L = 2048$

圖 2.4：單車道模型之基本構圖。每條曲線的最高點所對應的密度，為文中談及的臨界密度  $\rho_c$ ，此臨界值區別流量上升的順暢態及流量下降的壅塞態。於同一密度下，煞車機率  $p$  愈高，流量愈低，且  $\rho_c$  愈偏向密度小的值，由此可看出不同煞車機率  $p$  對於流量之影響。圖 (a) 與 (b) 分別對應車道長度為  $L = 1024$  與  $L = 2048$  之情形。高  $p$  曲線於  $\rho_c$  附近的小突出隨車道長度增加而不明顯，我們推測此類曲線之不規則僅為有限尺度效應 (finite size effect)。

加所帶來的影響。

由於車輛密度高於某一臨界值即進入壅塞態，管理上我們可藉由調配道路上各路段的密度，來避免某些路段之密度過度增加造成流量降低而成為整體道路之瓶



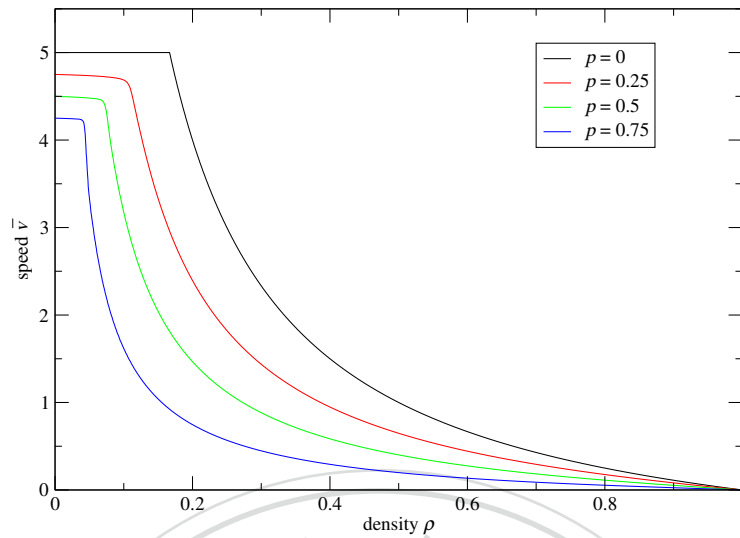


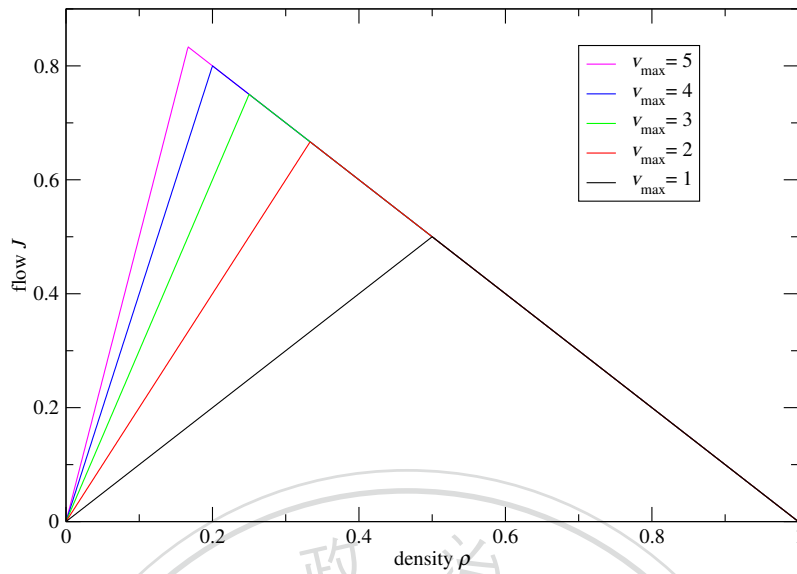
圖 2.5：單車道模型之速率—密度圖。可看出不同煞車機率  $p$  對於速率之影響：於同一密度下，煞車機率  $p$  愈高，平均速率愈低。在密度小於臨界值的順暢態呈現之平均速率幾乎為一定值，且於  $p = 0$  時，此平均速率定值為最高速限  $v_{\max} = 5$ 。



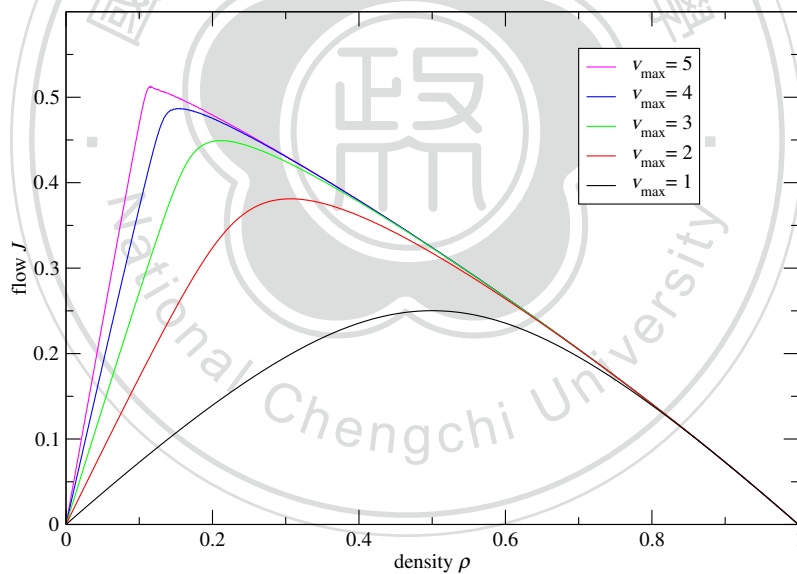
圖 2.6：控制實驗快照圖，源自文獻 [30]。環型車道圓周為 230 公尺，車輛數為 22。車道上無瓶頸及其他障礙，環型車道設計主要避免車道進出口帶來的邊界效應，為一具平移不變（translation invariance）的系統。

頸，從而使得整體交通順暢。而一些常見之方法如匝道管制或開放路肩，尚不乏具此一功效。茲分述如下：匝道管制可避免主線車道之密度因上匝道之車輛而過度增加，從而導致流量降低；開放路肩可增加道路面積進而降低密度。

另外，在同一密度下，基本構圖 2.4 及速率—密度圖 2.5 顯示煞車機率的增加亦明顯影響車流量；除了整體流量及平均速率隨煞車機率增加而下降外，密度臨界值亦隨之變小而縮小了順暢態區域，也就是說，不必要的煞車或不經意的降速行為將阻礙車流之順暢。這個現象可由控制實驗觀察出，例如圖 2.6。此實驗



(a)  $p = 0$



(b)  $p = 0.25$

圖 2.7：不同最高速限下的流量—密度圖。當煞車機率為 0 時 (a)，最高速限主要影響順暢態；當引入有限煞車機率 (b)，速限愈低時順暢態與壅塞態間之區分愈不明顯，整體車流量隨  $v_{\max}$  降低而變小。

由日本名古屋大學等團隊等進行 [30]，實驗場地為一環型車道（與本論文模型相同）以保持車輛數為定值，且無其他道路瓶頸。此類具週期性邊界條件的設計常用於物理模型來消弭邊界效應（如車道進出口的影響）。實驗設計初始狀態為自由車流態，隨機煞車造成速率起伏，前車剎車而降速將導致後車也可能需調降速

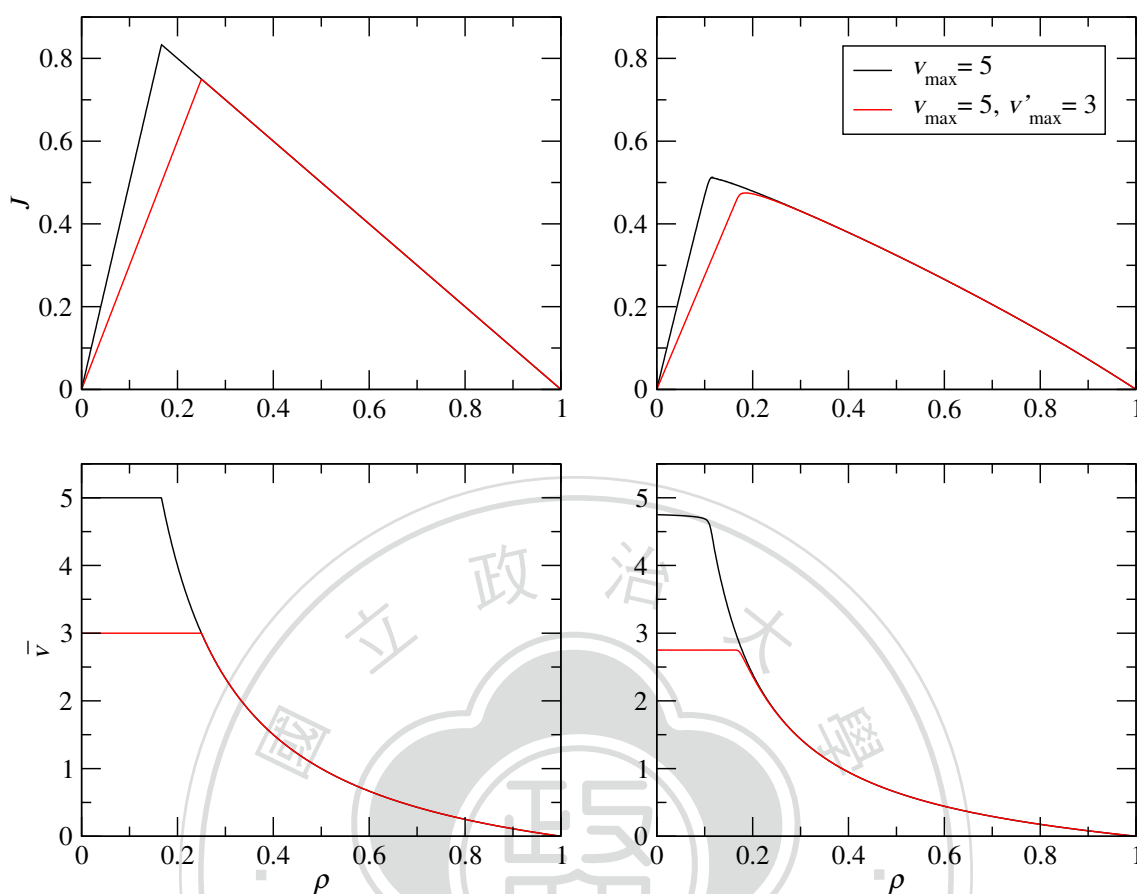


圖 2.8：單一慢車的影響，車輛最高速全為  $v_{\max} = 5$ （黑線）與其間置入一輛最高速僅為  $v'_{\max} = 3$  之慢車之基本構圖（紅線）比較。左側圖煞車機率為  $p = 0$ ，右側圖煞車機率為  $p = 0.25$ 。單一慢車明顯降低了低密度自由車流態之車流量及平均速率，因為其他車輛均受制於該慢車的速限  $v'_{\max}$ 。

率，故局域不順暢的現象最後可擴及造成整體車流狀態進入壅塞態。因為實驗場地不具瓶頸或障礙，故此控制實驗呈現的是自發性（spontaneously）形成的集體現象（collective phenomenon），其機制如同許多物理系統所呈現的非平衡相變行為 [17]。

接著我們探討速限  $v_{\max}$  對車流量的影響。由圖 2.7 可以發現，速限之提升對於順暢時之流量有相當大的提升。另外，當引入有限煞車機率（圖 2.7 (b)），速限愈低時順暢態與壅塞態間之區分愈不明顯。由此我們可說，在考慮安全情形下，公路速限的提高有助流量之提升。

除了最高速限外，若少數車輛以低速行駛也將影響整體的交通順暢。針對這個問題，我們在模擬系統中置入一輛慢速車，其以有別於其他車輛的最高速率（ $v'_{\max} < v_{\max}$ ）行進。結果顯示，此唯一一輛慢速車將造成在自由車流狀態的整體

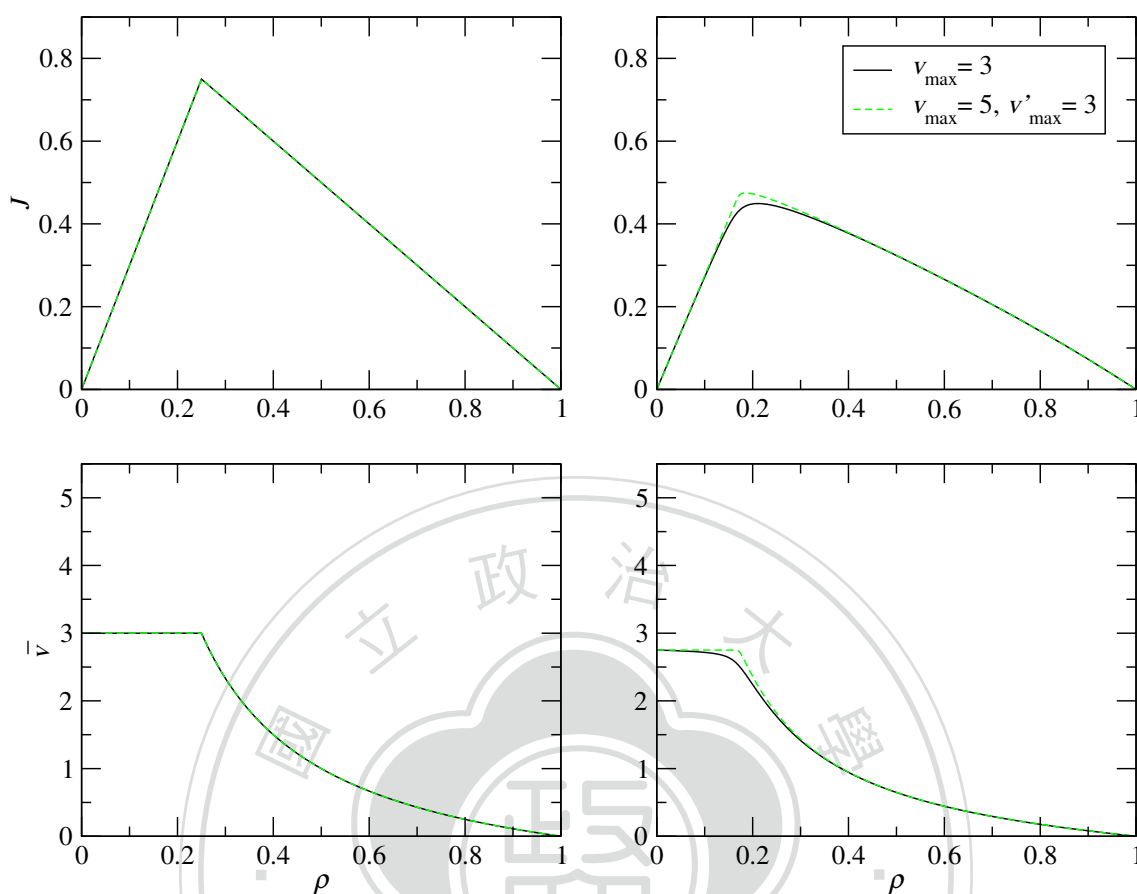


圖 2.9：單一慢車的影響，車輛最高速全為  $v_{\max} = 3$ （黑線）與一輛最高速僅為  $v'_{\max} = 3$  之慢車置於其他最高速為  $v_{\max} = 5$  車輛間之基本構圖（綠色虛線）比較。左側圖煞車機率為  $p = 0$ ，右側圖煞車機率為  $p = 0.25$ 。基本構圖曲線的吻合說明單一慢車足以導致其他車輛的速率受制於該慢車的最高速。

流量與平均速率明顯降低（參考圖 2.8）；又圖 2.9 清楚顯示一輛慢速車的影響事實上等同全數車輛最高速限降為與此慢速車速限相同之情況，此現象為單車道必然的結果。解決少數慢速車帶來的阻礙車流問題，管理上可藉最低速限的制定來排除慢速車種進入或避免人為的低速駕駛行為。另外，在鄉間或山路等單車道之路段，慢速車種在安全之情況下應適度靠邊讓快速之車輛先行通過。關於高速公路或快速道路多車道車速分流的模式我們將在下二章探討。

### 2.3 交通相態變化之探討

上節提及臨界密度（對應基本構圖車流最高時之密度）區分交通順暢態及壅塞態，除了我們考慮的 NaSch 模型，許多其他交通模型（包含建立於連續空間或時

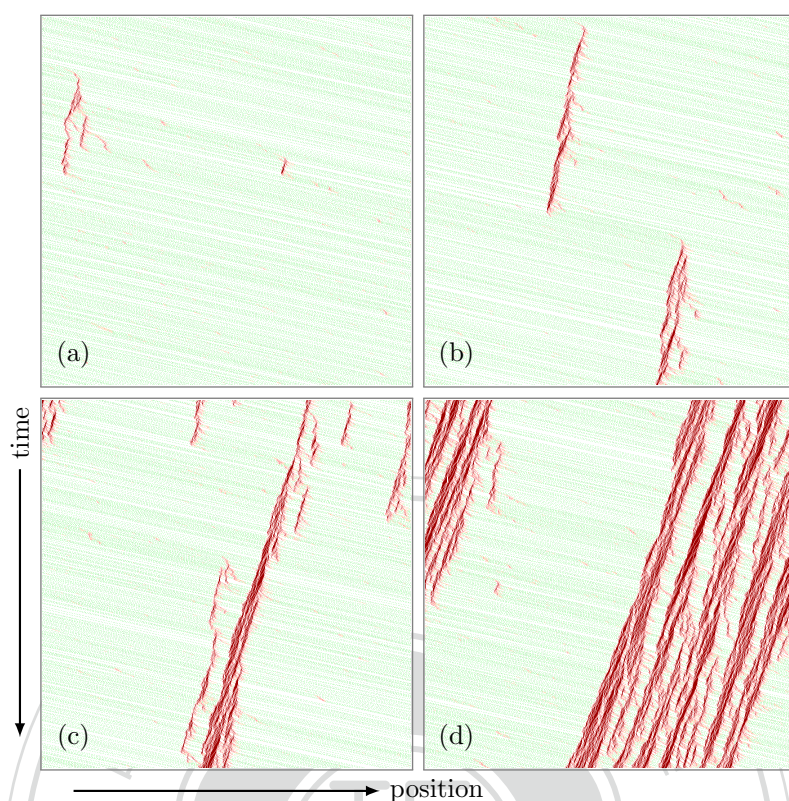


圖 2.10：NaSch 模型不同車密度下之車速演化時空圖，此範例圖之隨機煞車機率為  $p = 0.5$ 。圖中每一像素 (pixel) 代表一輛車瞬間之位置，其中縱軸 (行) 為時間，橫軸 (列) 為位置，車行向右。車輛速率以不同顏色表示，綠色色點為最高速限 (此處  $v_{\max} = 5$ )，顏色愈深之棕色點則代表愈低車速；故棕色區域為交通不順暢區。各子圖對應之密度分別為 (a)  $\rho = 0.077$ ；(b) 臨界密度  $\rho_c = 0.078$ ；(c)  $\rho = 0.096$ ；(d)  $\rho = 2$ 。可看出密度小於臨界密度時；壅塞波很快消散；密度大於臨界密度時，不順暢現象持續長時間，且壅塞波向車行反方向擴散。

間的模型) 亦顯示相似的相圖 (phase diagram)，或除上述兩相態尚呈現其他態，如亞穩態 (metastable states)。這些不同相態間的變化如同許多物理系統的非平衡相變現象 [17] 或壅塞轉變 (jamming transition) [11]。圖 2.10 呈現 NaSch 模型典型的演化時空圖，我們看出不同相態時局域不順暢現象如何隨時間演化：密度小於臨界密度時；車流局域遲滯現象很快消散；密度大於臨界密度時，不順暢現象持續長時間，且影響範圍愈向車行反方向擴散。探討交通不同相態間變換的屬性——如其是否為不連續 (一階) [19] 或連續 (二階) [14–16, 18, 22, 27, 29] 相變，或僅是隨參數跨越 (crossover) 至另一狀態的情形 [12] ——常是統計物理學家感興趣之課題。

本章節我們就原始的 NaSch 模型，根據文獻 [15] 所定義的序參數 (order parameter)、鬆弛時間 (relaxation time) 及空間關聯函數 (spatial correlation

function) 等物理量來檢視 NaSch 模型相態間的變換性質。

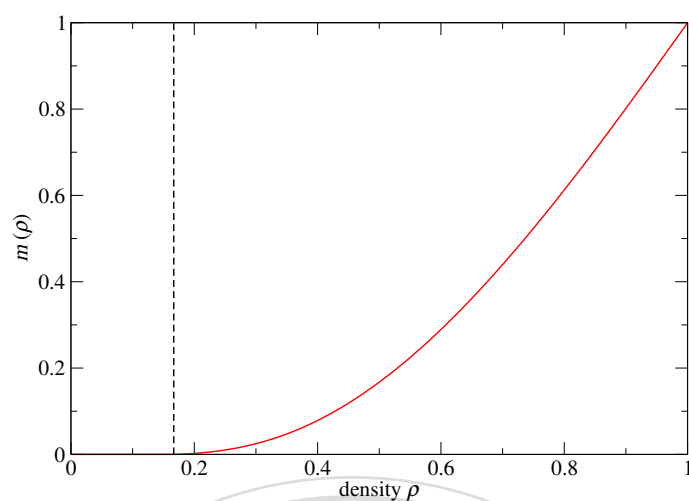
### 2.3.1 序參數

探討相變問題時，首先定義序參數來對不同相態作量化的描述，藉以界定相邊界。例如在磁性物質，磁化量 (magnetization) 量化物質中的磁序 (magnetic order)，在磁性消失的相態，其值為 0，而在具磁性的相態，其呈現非 0 之值。在交通模型中，序參數應能區分自由態及壅塞態。針對 NaSch 模型，可能使用的序參數為停止 (速率  $v(t) = 0$ ) 車輛的平均數目比例 [31]。這裡我們根據文獻 [15] 定義穩定態序參數為

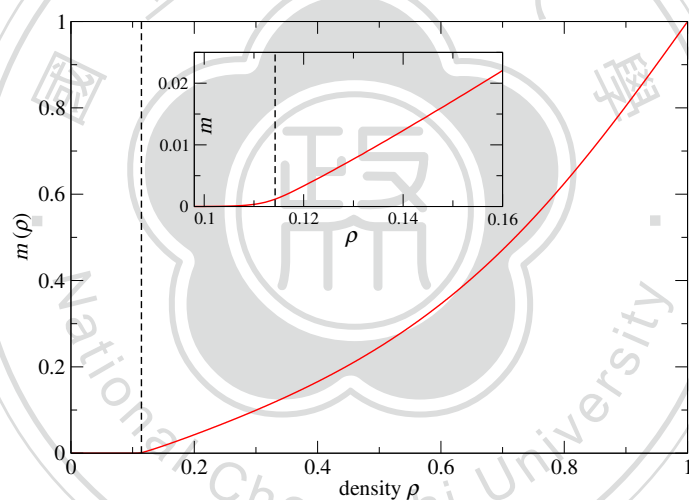
$$m = \frac{1}{T} \frac{1}{L} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^L n_i(t) n_{i+1}(t) \quad (2.11)$$

其中  $L$  為車道長度， $T$  為不同時間點的測量次數， $n_i(t)$  標示時間  $t$  時車位  $i$  處是否有車輛，以  $n_i(t) = 0$  表示該車位為空的狀態， $n_i(t) = 1$  則表示該車位被使用。若時間  $t$  當下相鄰車位  $i$  與  $i + 1$  其一不被車輛使用中，則  $n_i(t) n_{i+1}(t)$  貢獻值為 0。如此的定義與統計力學描述簡單流體的晶格氣體模型 (lattice gas model) 或描述磁性物質的 Ising 模型之序參數相似，惟這裡的序參數以相鄰兩晶格 (車位) 為考量，以描述在給定車密度下的擁擠程度。可想見，當車流呈自由態時， $m$  值應為 0 或趨近於 0，當進入壅塞態時，因車龍漸形成，此序參數將漸趨最大値  $m = 1$ 。

待模擬一段時間 ( $t_0 = 10L$ ) 後，我們對不同密度進行序參數之測量。圖 2.11 呈現煞車機率為  $p = 0$  及  $p = 0.25$  情形下的序參數對密度的關係。在低密度時， $m = 0$ ，當密度大於一特定值， $m$  變有限非 0 值。與上節討論的車流—密度圖對應流量最高處的密度值  $\rho_c$  (虛線標示) 比較，序參數由  $m = 0$  至  $m > 0$  處的密度值看似與  $\rho_c$  謀合。但事實上， $p = 0.25$  情形下， $\rho_c$  切過  $m > 0$  處 (圖 2.11 (b) 內小圖)。類似的結果也出現在以速率相關量為序參數的情形，解析研究證明 [16]，有限煞車機率  $p > 0$  造成小於等於某一速率的車輛數比例在任何密度 (包含  $\rho \rightarrow 0$ ) 均不為 0。



(a)  $p = 0$



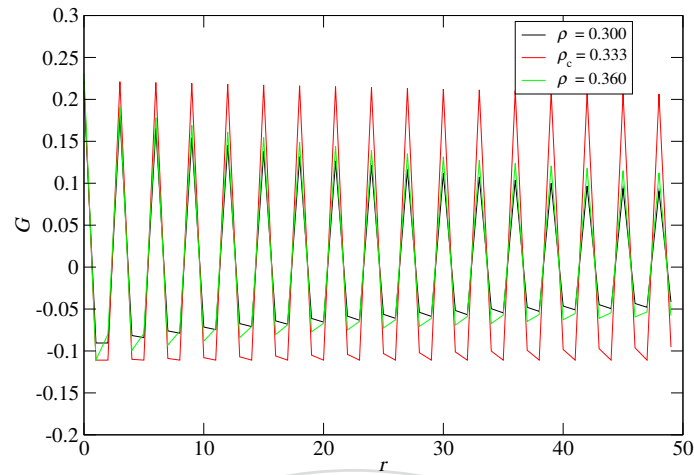
(b)  $p = 0.25$

圖 2.11：序參數  $m$  在不同密度下的演化。模擬系統的車道長度為  $L = 1024$ ，測量時間為  $T = 10000$ 。黑色虛線標出對應車流量最高處的密度值，即上節討論的密度臨界值  $\rho_c$ 。

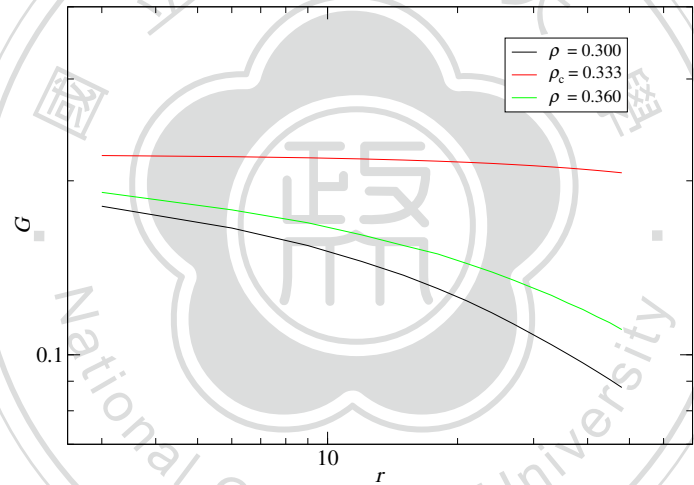
### 2.3.2 空間關聯

連續相變（序參數呈連續變化）的特色之一為相變點（臨界點）處的關聯長度發散。關聯長度  $\xi$  描述空間兩點關聯函數（spatial correlation function） $G(r)$  與兩點距離  $r$  的關係，一般透過以下指數般遞降關係：

$$G(r) \sim r^{-\alpha} e^{-r/\xi}. \quad (2.12)$$



(a) 關聯函數—距離關係圖



(b) 關聯函數振幅（取  $G(r)$  正值的部分）。此圖  $x, y$  軸均取對數。

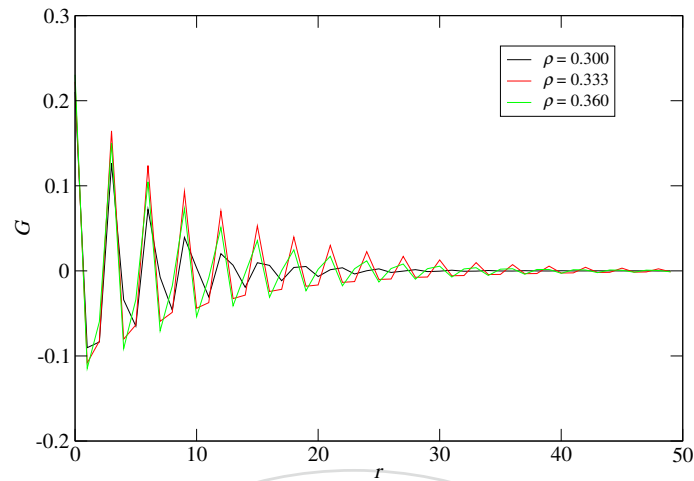
圖 2.12：單車道模型，無隨機煞車  $p = 0$  情形下，密度臨界值  $\rho_c = 0.333$  附近不同密度下之關聯函數與距離的關係。模擬車道長度為  $L = 1024$ ，所有車之最高速率為  $v_{\max} = 2$ 。定義如式 (2.13) 之關聯函數隨距離呈正負震盪之情形 (a)，若只考慮  $G(r) > 0$  的部分 (b)，可觀察出在對應車流量最高處的密度臨界值之關聯函數呈幂方下降，在其他密度時則更急速遞減。

在關聯長度發散  $\xi \rightarrow \infty$  時， $G(r)$  則隨距離呈幂方下降。

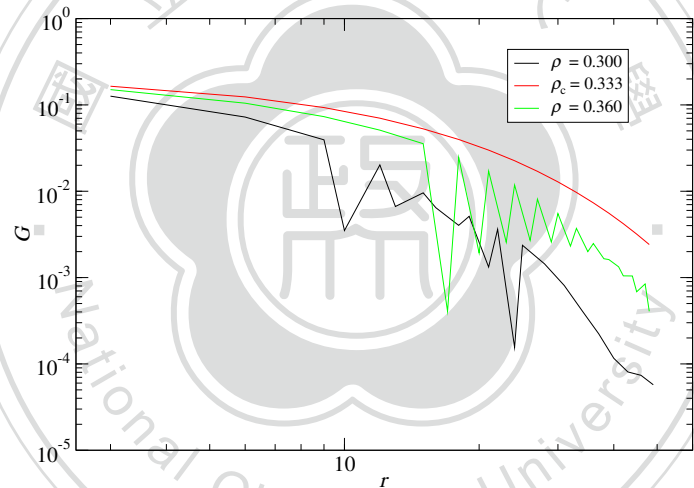
在建立於晶格上的 NaSch 模型的空間關聯函數，可參考晶格氣體模型的密度—密度關聯函數，定義為 [15]

$$G(r) = \frac{1}{T} \frac{1}{L} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^L n_i n_{i+r} - \rho^2, \quad (2.13)$$





(a) 關聯函數—距離關係圖



(b) 關聯函數振幅（取  $G(r)$  正值的部分）。此圖  $x, y$  軸均取對數。

圖 2.13：單車道模型，在煞車機率  $p = 1/128$  情形下，密度臨界值附近不同密度下之關聯函數與距離的關係。模擬車道長度為  $L = 1024$ ，所有車之最高速率為  $v_{\max} = 2$ 。關聯函數在各密度下隨距離增加而呈指數般急速下降。

其中  $n_i(t) = 0, 1$ ，如同式 2.11 標示車位  $i$  於時間  $t$  時是否被佔用。

首先我們考慮沒有隨機煞車的情形  $p = 0$ 。圖 2.12 顯示關聯函數  $G(r)$  在密度臨界值  $\rho_c = 0.333$ （對應車流量最高處的密度值）附近與距離  $r$  的關係，其呈現正負震盪。若只截取  $G(r) > 0$  部分考慮振幅，可觀察出在對應車流量最高處的密度臨界值之關聯函數呈幕方下降，在其他密度時則更急速遞減。

若加入些微的煞車隨機性  $p = 1/128$ ，圖 2.13 顯示關聯函數  $G(r)$  在密度臨界值附近不同密度下均呈指數型急速下降的情形。這結果連同上一節關於序參數的

討論，可得出隨機性 ( $p > 0$ ) 使相變變模糊的結論。

### 2.3.3 鬆弛時間

除了空間關聯長度  $\xi$  外，時間上的關聯長度在臨界點亦發散，這個現象稱為「臨界遲滯」現象 (critical slowing down)。在此時間關聯長度可指鬆弛時間  $\tau$  (relaxation time)，其描述系統從非定態達具平均速率  $\bar{v}_\infty$  的穩定態所需要的时间：

$$\bar{v}(t) - \bar{v}_\infty \propto e^{-t/\tau}. \quad (2.14)$$

針對 NaSch 模型，我們可根據文獻 [14, 15] 以下列方式測量鬆弛時間：

$$\tau = \int_0^\infty (\min[v^*(t), \bar{v}_\infty] - \bar{v}(t)) dt \quad (2.15)$$

其中  $\bar{v}(t)$  為每時間  $t$  車輛的平均速率 (並作樣本平均)，而  $v^*(t)$  為低密度時  $\rho \rightarrow 0$  初始時間  $t \rightarrow 0$  加速過程之平均速率，因在此狀況車輛不互相影響，故  $v^*(t) = (1 - p)t$ 。如此，鬆弛時間由平均速率  $\bar{v}(t)$  與低密度時無交互作用單一車輛速率偏差加總而得。

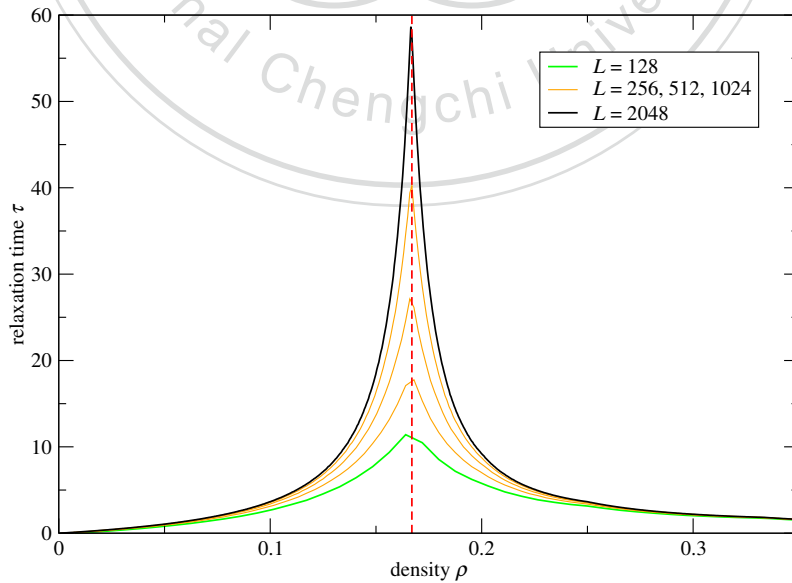


圖 2.14：單車道單一車種模型。煞車機率  $p = 0$ ，最高速率  $v_{\max} = 5$ ，不同車道長度下之鬆弛時間  $\tau$ 。紅色虛線標出對應最高車流的臨界密度值  $\rho_c \approx 0.16667$ ，此密度與鬆弛時間的高峰處謀合。

在無隨機煞車  $p = 0$  情形下，式 (2.15) 定義的鬆弛時間確實在密度臨界值處（見圖 2.14，以  $v_{\max} = 5$  為例）隨車道長度 ( $L$ ) 增長而漸進發散，呈現連續相變預期可見的行為。

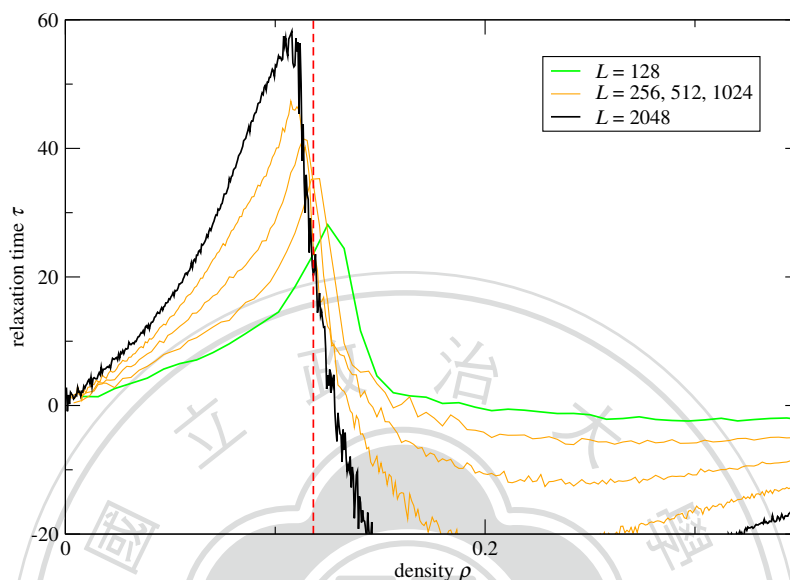


圖 2.15：煞車機率  $p = 0.25$ ，最高速率  $v_{\max} = 5$ ，不同車道長度下  $L$  之鬆弛時間  $\tau$ 。

若引入有限隨機煞車機率  $p > 0$ ，圖 2.15 以  $p = 0.25$  為例顯示鬆弛時間隨密度變化的最大值並不落在對應最高車流的密度臨界值（雖相距不甚遠），且高峰的寬度並不隨系統大小  $L$  增加而變窄（比較圖 2.14 之  $p = 0$  情形），故再次顯現煞車機率模糊或破壞 NaSch 模型的臨界現象。我們亦可觀察到鬆弛時間變成負值的高密度區段，由式 (2.15) 的定義，負值的  $\tau$  表示某時間系統所處狀態的平均車速  $\bar{v}(t)$  高於穩定態的速率  $\bar{v}_{\infty}$ ，這可由高密度時堵車範圍擴大所造成（而  $p > 0$  惡化壅塞現象），許多車量陷入低速行駛或甚至靜止的狀態，導致  $\bar{v}_{\infty}$  下降以及  $\tau < 0$ 。由此也可說明，式 (2.15) 的鬆弛時間定義不適用於  $p > 0$  情形。

關於「壅塞轉變」(jamming transition) 及其屬性的探討在許多物理系統亦尚是棘手的問題 [11]，本文不深入討論此方向的問題。在後續的章節中，我們將持續使用「密度臨界值」或「臨界密度」來代表達最大車流的密度值，雖然在  $p > 0$  系統不一定存在臨界現象 (critical phenomena)。



# 3

## 二車道模型

### 3.1 簡介

為了能更真實的描述公路上之交通情況如多車道之公路與車輛之變換車道行為，單車道模型應加以擴充，如引入多車道概念之系統與相關變換車道規則，使得前述之交通情況能被加以描述。經典的多車道模型主要包含 M. Rickert 等人建立於 NaSch 模型之多車道模型 [26]。二車道模型之系統係定義為二平行相鄰之一維陣列（如圖 3.1），陣列上之車輛除了如同單車道 NaSch 模型可於一維陣列中前進外，亦可變換於相鄰之一維陣列間。綜觀世界各國主要之車道使用規定，可以將之分類為對稱（symmetric）與非對稱（asymmetric）型。對稱型之行車概念為超車得於前車左側或右側之車道進行，並且超車完不必駛回原車道，於此情形左右車道之行車速率大致相等；非對稱型之行車概念（以靠右行駛之國家為例）為超車須於前車左側之車道進行，並且超車完須駛回原車道，於此情形左車道之行車速率應大於右側車道。其中超車為車輛以相對較快速率「經過」同方向行駛的另一車輛之行為，並且無需考慮車輛於超越前後是否處於同一車道。

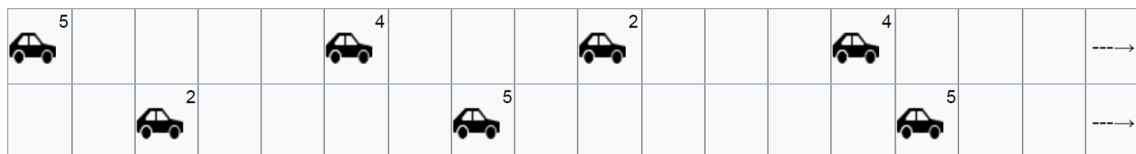


圖 3.1：二車道模型系統，由二平行相鄰之一維陣列所組成。車輛除了如同單車道模型可於一維陣列中前進外，亦可變換於相鄰之一維陣列間。圖改編自 [6]。

Rickert 等人即依上述行車方式建立相應之對稱 (symmetric) 與非對稱 (asymmetric) 模型，藉由引入相關變換車道條件以模擬上述車道使用規定之車流行為 [26]。變換車道條件可包括動機與安全等。如當同一車道之前車間距太小，且另一車道有較適宜的間距時，駕駛人即有愈變換車道超車之動機之條件。又如當另一車道後方來車間距大於最高速率時，即滿足了避免變換車道後方來車須減速之安全條件。

D. Chowdhury 等人於 1997 年所發表的論文 [13] 將 Rickert 等人之模型作了些許修改，並引進了快慢車的概念（如小汽車與大貨車），以更貼近真實高速公路情況；模型中因此具二種最高速率，即快車最高速率  $v_{f,max}$ ，及慢車最高速率  $v_{s,max}$ 。值得注意的是，此種快慢車概念不僅適用於車輛本質上之性能差異，亦可適用於同一車種下，不同的駕駛組成所產生之期望速率 (desired speed) 差異，如部分人喜歡達最高速限，部分人喜歡開比速限低一些。

針對二車道模型之模擬，我們主要根據 Chowdhury 建立模型，比較對稱模型及非對稱模型在單一車種及二車種情況下之優劣。

## 3.2 模型定義

### 3.2.1 對稱模型

在對稱模型中，因為兩車道之功能完全相同，變換車道之條件適用由左至右車道及由右至左車道。配合簡介提到的變換車道動機及安全條件，模型引入：

- (i) 與前車間距之最小容忍值  $l$ ；
- (ii) 與另一車道前車間距之期待值  $l_0$ ；
- (iii) 與另一車道後方來車之最小安全距離  $l_{0,back}$ 。

這些參數的選擇隨模型定義不同而有所差異，這裡我們根據文獻 [13] 的定義，選擇如下：

- (i) 最小容忍車距取決於單位時間 ( $\Delta t = 1$ ) 內以最高速限行駛之距離  $v_{max}$ ，或

加速後行駛之距離  $v + 1$ ，定義為

$$l = \min(v + 1, v_{\max}).$$

(ii) 另一車道車距期待值為較本車道與前車之車距 ( $d$ ) 大，定  $l_o$  為

$$l_o = d$$

(iii) 與另一車道後方來車之安全距離為滿足後車單位時間內 ( $\Delta t = 1$ ) 以最高速限行駛之距離：

$$l_{o,\text{back}} = v_{\max}.$$

若為二車種模型，我們則假定後車為快速車種，故

$$l_{o,\text{back}} = v_{f,\text{max}}.$$

多車道系統更新包括變換車道規則判斷與個別車道之標準 NaSch 模型步驟，即於一單位時間內 ( $\Delta t = 1$ ) 對每一車輛進行以下二個步驟之狀態更新：

1. 變換車道。
2. 各車道 NaSch 模型之更新（見第 2.1 節）。

而變換車道須滿足以下全部五個條件才執行：

- (C1) 與前車車距 ( $d$ ) 不足： $d < l$ 。
- (C2) 另一車道提供較佳前車距離： $d_o > l_o$ 。
- (C3) 橫向相鄰之位置無車輛占用。
- (C4) 與另一車道後車車距 ( $d_{o,\text{back}}$ ) 滿足安全距離： $d_{o,\text{back}} \geq l_{o,\text{back}}$ 。
- (C5) 以  $p_c$  機率變換車道： $\text{ran}() < p_c$ ，其中  $\text{ran}()$  為均勻介於  $[0, 1)$  區間的亂數。

上述 (C1) 與 (C2) 條件屬變換車道的動機，(C3) 與 (C4) 為行車安全條件，而 (C5) 的隨機性則考慮駕駛人猶豫等情形。關於隨機性 (C5) 的引入，除了考慮駕

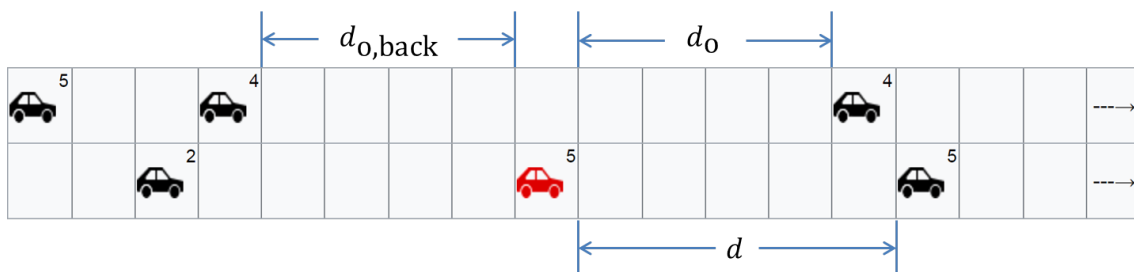


圖 3.2：二車道模型之系統及相關變數，所考慮之車輛以紅色標示。圖改編自 [6]。

駛人變換車道的意願外，在模擬上可排除所謂的「乒乓式變換車道」(ping-pong lane changes)，其情形如下：初始時所有車輛若排置於同一車道，在車輛密度高時，所有駕駛員均判斷可變換至另一車道，造成所有車輛均同時變換至另一車道，如此情形將持續一段模擬時間。模擬上排除上述乒乓效應另一方式則為初始時將所有車輛分置於兩車道上。變換機率  $p_c$  對車流量的影響，在其他文獻如 [26] 曾系統性探討過，結果顯示  $p_c$  的選擇並不影響整體的密度—車流基本構圖，僅些微改變車流量的值。本論文將不考慮變換車道的機率性，即設定  $p_c = 1$ 。

### 3.2.2 單車種非對稱模型

不同於上節描述的對稱模型，非對稱模型中變換車道條件隨所考慮車輛所處之車道而有所不同，亦即由左變換至右車道條件不同於由右至左車道之條件。此模型設計主要配合有些國家交通法規中兩車道之功能不同，例如在德國二車道高速公路上左車道為超車道，且禁止右側超車；右車道車輛經過左車道車輛僅允許於少數例外情形 [9]，如塞車同一方向車輛形成車籠時。此處模型之定義為針對左車道為超車道的設計，若右車道為超車道者（如執行於日本及英國等國家），則僅需將左、右規則交換。

我們首先考慮單車種情形，即所有車輛之最高速限一致。模擬步驟與對稱模型相同，主要分為變換車道的判斷及各車道 NaSch 模型的更新。以下為非對稱模型的變換車道判斷規則：



### 右至左的變換條件

當車輛位於右側車道時，變換規則與對稱模型相同，重述如下：

(R1) 同車道前方車距  $d$  不足於容忍值：

$$d < \min(v + 1, v_{\max}),$$

其中  $v$  為車輛當下之速率， $v_{\max}$  為車輛之最高速率。

(R2) 左側車道前方車距  $d_o$  大於同車道前方車距  $d$ ，較有利於行車：

$$d_o > d.$$

(R3) 橫向相鄰之位置無車輛占用。

(R4) 左側車道後方車距  $d_{o,\text{back}}$  大於安全距離：

$$d_{o,\text{back}} \geq v_{\max}.$$

此為避免影響後方來車。

### 左至右的變換條件

因為左車道設計為超車道，右車道為一般行車道，故左至右的變換條件僅考慮安全條件，即超車後駛回原車道之概念。左至右的變換條件為：

(L1) 右側車道前方間距  $d_o$  足夠讓車輛以當下之速率  $v$  行駛。

$$d_o \geq v$$

(L2) 橫向相鄰之位置無車輛占用。

(L3) 右側車道後方車距  $d_{o,\text{back}}$  滿足安全距離：

$$d_{o,\text{back}} \geq v_{\text{max}}$$

### 3.2.3 二車種非對稱模型

本節同樣描述非對稱模型，但考慮具有快慢車的情形，即系統中有兩種最高速度：  $v_{f,\text{max}}$  及  $v_{s,\text{max}}$ 。

#### 右至左的變換條件

首先考慮車輛位於右側車道。就慢速車而言，其變換至左側車道的條件與對稱模型相同，但快速車則有稍不同的變換車道條件：

(R1) 同車道前方車距  $d$  不足以車輛以下一時間 NaSch 更新後之速率行駛，即

$$d < \min(v + 1, v_{\text{max}}).$$

其中  $v$  為車輛當下之速率， $v_{\text{max}}$  為最高速率，其隨車種而不同；或者，當所考慮車輛之車輛型式為快速車輛，並且同車道前車車輛型式為慢速車輛時，前車距不足條件則為：

$$d < v_{f,\text{max}}.$$

此代表快速車輛遇前方慢速車輛時，會提早變換至左側車道。

(R2) 左側車道前方車距  $d_o$  大於同車道前方車距  $d$ :

$$d_o > d.$$

(R3) 橫向相鄰之位置無車輛占用。

(R4) 左側車道後方車距  $d_{o,\text{back}}$  不小於快速車輛之速度  $v_{f,\text{max}}$ :

$$d_{o,\text{back}} \geq v_{f,\text{max}}.$$

### 左至右的變換條件

當車輛位於左側車道時，若下列 (L1)—(L3) 滿足則變換至右側車道：

(L1) 右側車道前方間距  $d_o$  足夠讓車輛以當下之速率  $v$  行駛。

$$d_o \geq v$$

(L2) 橫向相鄰之位置無車輛占用。

(L3) 右側車道後方車距  $d_{o,back}$  大於快速車輛之最高速率  $v_{f,max}$ ：

$$d_{o,back} \geq v_{f,max}$$

此為基於安全理由，考量後方來車可達快車速限。

然而若考量的車輛屬快速車，以下情形將使其持續使用左側車道超車而不駛回原車道，儘管前述 (L1)—(L3) 條件均滿足：

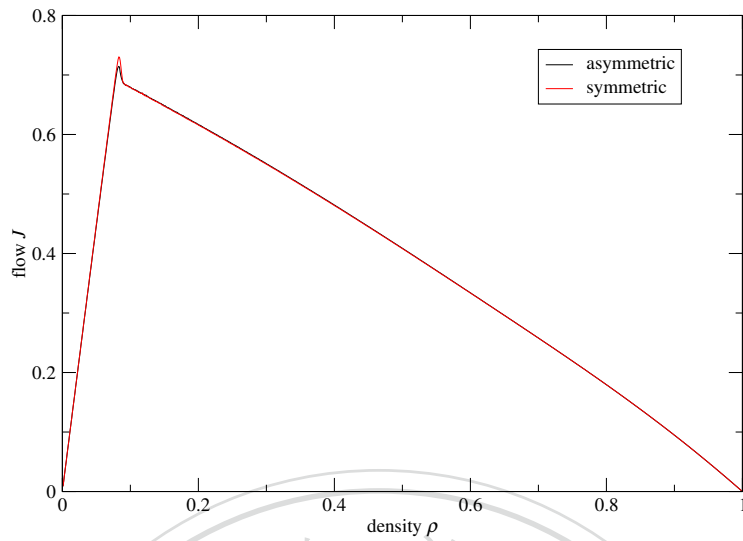
(L4)' 右側車道前方間距  $d_o$  小於快速車輛之最高速率  $v_{f,max}$ ：

$$d_o < v_{f,max},$$

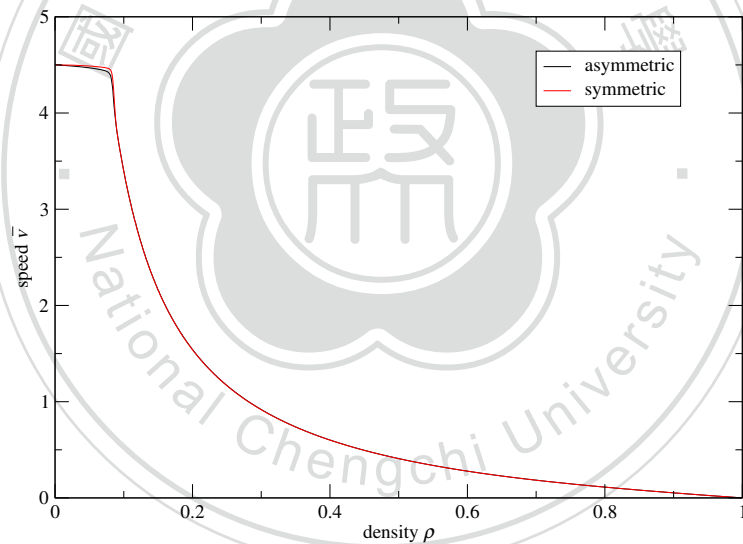
且右側車道前車車輛型式為慢速車輛時。即當快速車輛預期變換至右側車道而導致降低速率時，其將持續使用左側車道超車而不駛回原車道。

### 3.3 模擬結果

以下我們分別就單車種及二車種情形，比較對稱模型及非對稱模型的模擬結果，並進行相關討論。



(a) 總流量—密度圖

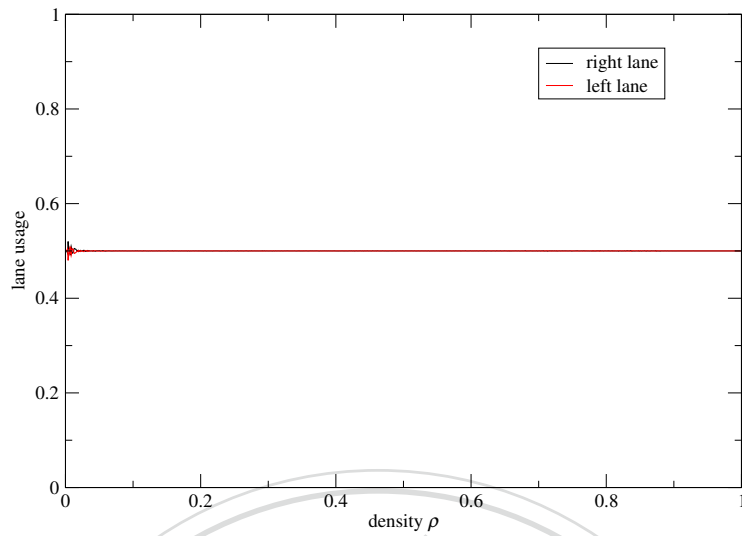


(b) 速率—密度圖

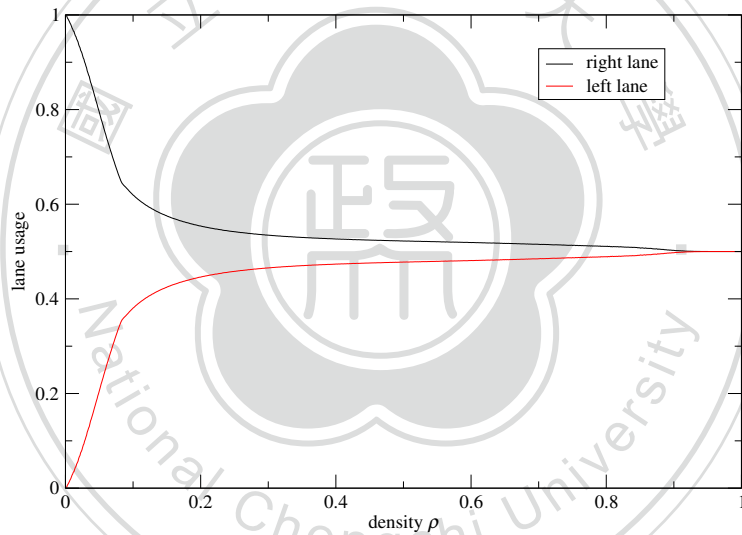
圖 3.3：二車道單車種模型之基本構圖，紅曲線對應對稱模型，黑曲線則為非對稱模型的資料。可觀察出二者幾無差異，除了於密度臨界值附近對稱模型之流量較非對稱模型些微高，但這無法與上章節討論的有限尺度效應作區別。

### 3.3.1 單車種

在單車種模型我們將所有速率上限設為  $v_{\max} = 5$ 。系統的隨機性包含在各車道 NaSch 更新中車輛隨機煞車機率，我們設此機率為  $p = 0.5$ 。為避免第 3.2.1 節述及的「乒乓效應」，模擬初始狀態均將車輛等同分置於二車道上。模擬時間（以完成模型定義的一次完整步驟為單位時間）為  $t = 20000$ ，我們待  $t_0 = 10000$  後才



(a) 對稱模型。



(b) 非對稱模型。

圖 3.4：二車道單車種，二模型之車道使用率。非對稱模型之右側車道使用率均較左側車道高。對稱模型則相差不大。

進行測量，即以觀察週期  $T = 10000$  做測量值時間平均，另外又做 100 個樣本平均。

首先我們比較對稱模型及非對稱模型的基本構圖，圖 3.3 為二模型之車流量—密度圖與速率—密度圖，所測量之車流量為合併兩車道的總車流量。如單車道模型一樣，其呈現低密度的自由流態及高密度的壅塞態，再次印證密度為影響流量之重要因素。另外可觀察出單車種情況下，對稱模型及非對稱模型模型之流量與行車速率幾無差異，尤其是界定自由流態及壅塞態的密度臨界值幾相同。

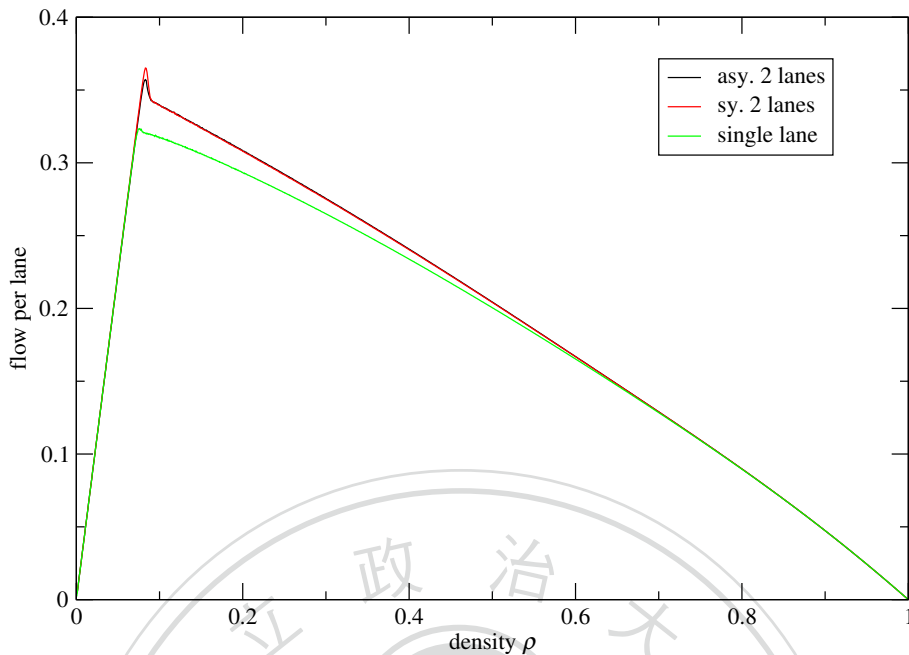


圖 3.5：單車道、對稱模型與非對稱模型基本構圖之比較。選擇的模擬參數為：煞車機率  $p = 0.5$ ，最高速率  $v_{\max} = 5$ 。於壅塞態時二車道模型之每車道平均流量均較單車道模型高。

在兩車道之個別使用率上，可想見對稱模型與非對稱模型有所差別。使用率定義為個別車道上之車輛數除以總車輛數。圖 3.4 為二模型之左右車道使用率。如預期，圖 3.4 (a) 顯示對稱模型無論於何種密度，使用左右車道之使用率均幾相等（除了密度接近 0 時的些微擾動外）。而非對稱模型（圖 3.4 (b)）的右側車道使用率則較高，此情形於低密度時尤其明顯，而當密度提升至很高時（ $\rho \gtrsim 0.9$ ），左右車道之使用頻率則漸趨相等；非對稱模型的結果隱含不對等地車道使用雖造成一車道較另一車道空間減少，但並不會負面地影響交通流量及順暢。

接著我們探討可變換車道之二車道道路使用效率是否相較於不可變換車道者佳。不可變換車道的二車道系統等同第 2 章討論的單車道模型，可視為並排兩互相獨立的單車道。我們透過每車道平均流量（flow per lane）來比較可變換及不可變換車道之優劣，此處所指的每車道平均流量即為總流量處以車道數。所得之結果呈現於圖 3.5。可觀察到於壅塞態時二車道模型（不論是對稱或非對稱模型）之每車道平均流量均較不可變換車道的單車道模型來得高。亦即二車道公路若可供變換車道，則其使用效率較不可變換者高，且於車密度高於臨界值時效率更顯著較高。

上述變換車道可否的比較結果或可特別提供二車道長隧道（如雪山隧道）車道使用規定之擬定作參考。若單純以交通效率作考量，在尖峰時段開放雪山隧道內變換車道不失為一紓解交通的好辦法。

### 3.3.2 二車種

考慮車道上具快慢兩種車時，模擬參數須加入兩種不同的速限，分別為快車速限  $v_{f,max}$  及慢車速限  $v_{s,max}$ ；另外須調配車種比例，即快車比例

$$w_f = \frac{\text{快車車輛數目}}{\text{所有車輛數目}}, \quad (3.1)$$

及慢車比例

$$w_s = 1 - w_f. \quad (3.2)$$

首先我們先比較不同車種比例的流量（平均速率）—密度關係，快車比例分別為  $w_f = 3/4, 1/2, 1/4$  的結果呈現於圖 3.6，其他模擬參數為煞車機率  $p = 0.5$  及速限為  $v_{f,max} = 5, v_{s,max} = 3$ 。結果顯示在自由態時非對稱模型較對稱模型具優勢，在相同密度下，非對稱模型呈現較高車流量及平均速率。非對稱模型的優勢在快車比例較大的情形下愈形明顯，而在慢車居多的情況則與對稱模型不分優劣。我們回顧上節單車種情況的結果，其顯示非對稱及對稱使用車道模式導致相同的流量—密度關係，這意味著非對稱模型的優勢凸顯於非均質（heterogeneous）車種狀況，且特別適用於快車居多的高速公路。

關於非均質車種情況的探討，我們也納入單車道模型一併作比較（單車道模型同等於不允許變換車道的二車道系統）。我們在單車道模型中置入一輛具速限  $v'_{max} = 3$  的慢速車，且其他車輛速限為  $v_{max} = 5$ ，比較快慢車比例為 75 : 25 的對稱及非對稱模型。結果（圖 3.7）顯示再次印證可變換車道的二車道模型均較不可變換車道的單車道模型較具高交通效率，車流量及平均速率不僅於自由態也於壅塞較高，且進入壅塞態的車密度臨界值也較大；而如前之討論，非對稱模型又較對稱模型更顯優勢。

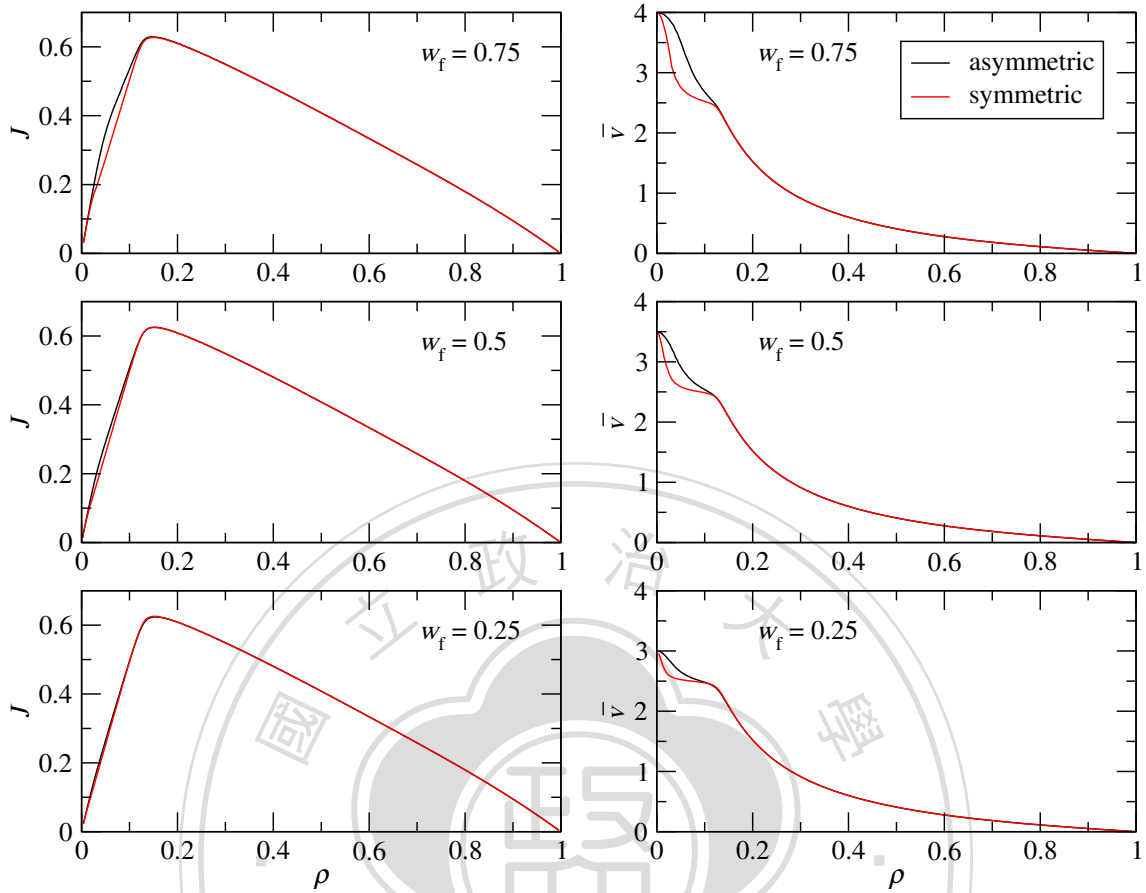
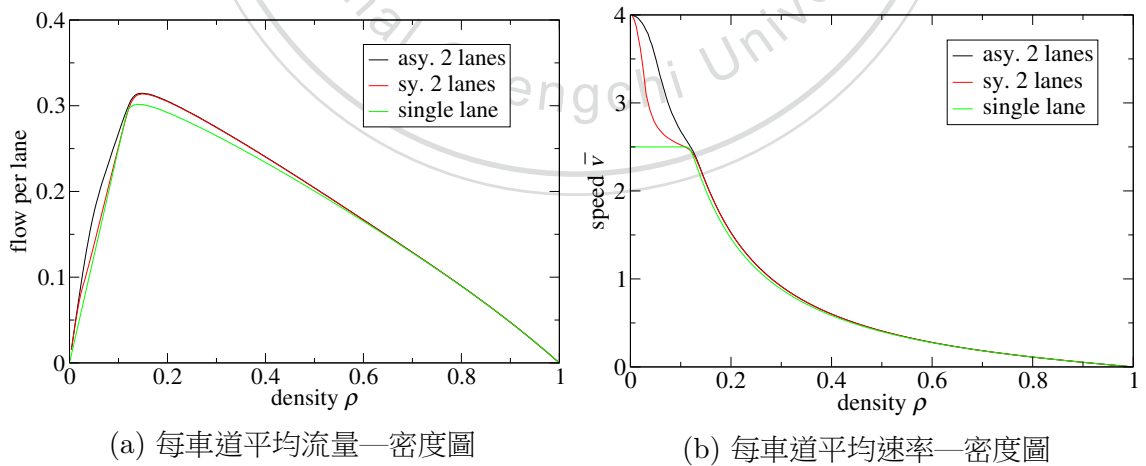


圖 3.6：二車道二車種模型之基本構圖。由上至下圖的快慢車比例分別為 75 : 25, 50 : 50 及 25 : 75。可觀察出，在自由態時非對稱模型較對稱模型具優勢，即具較高的車流量及平均速率；但此優勢在慢車居多的情形下並不明顯。



(a) 每車道平均流量—密度圖

(b) 每車道平均速率—密度圖

圖 3.7：單車道、對稱模型與非對稱模型基本構圖之比較。二車道模型非對稱模型之每車道平均流量 (a) 及速率 (b) 較單車道模型來得高。其中單車道為置入一輛慢車  $v'_{\max} = 3$  之情形。

以上的比較是基於煞車機率為  $p = 0.5$  的情形，但如圖 3.8 呈現的基本構圖顯示，非對稱模型的優勢在非 0 煞車機率下  $p > 0$  均成立，且其優勢在煞車機率高



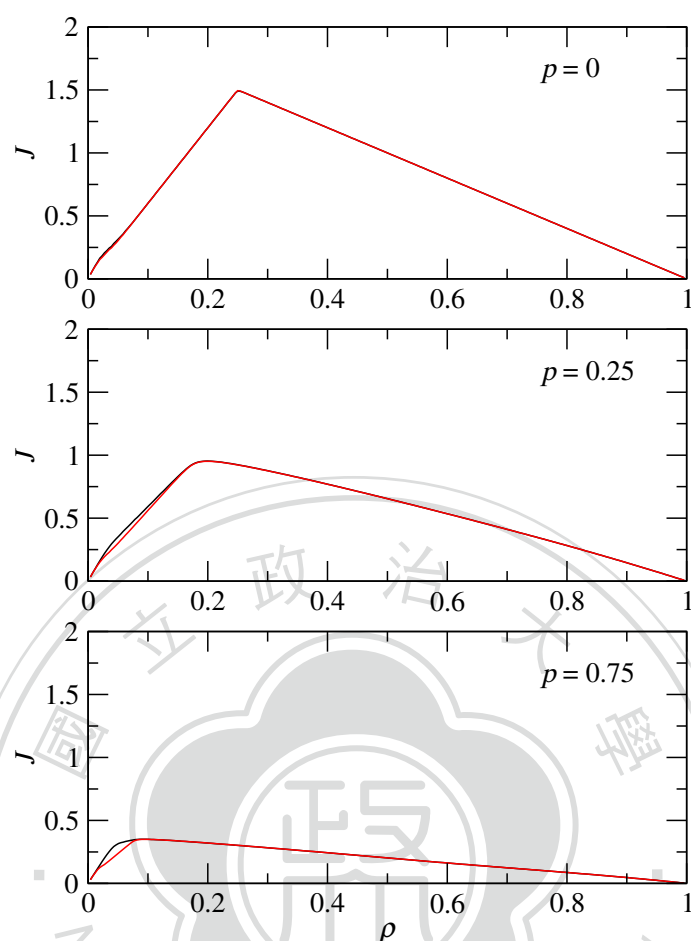


圖 3.8：二車道二車種，二模型之基本構圖。可觀察到當煞車機率  $p > 0$  時，非對稱模型於自由態時明顯具優勢。

的情形下愈明顯；在  $p = 0$  的非隨機性模型，對稱或非對稱式的車道使用模式則呈現沒有差異的結果。有限煞車機率的隨機性某程度上可視為交通秩序上的「擾動」或不確定性，其如同非均質的車種均可反應實際交通狀況的不完美性，而針對如此的狀況，非對稱使用車道的方式顯現較理想的交通效率。

接著我們分析各車道及各車種的基本構圖。首先圖 3.9 呈現的平均速率—密度關係顯示非對稱模型的二車道速率大致均較對稱模型高，非對稱模型的設計為左車道為超車道，故該車道自然顯現最高的平均速率；有趣的是，非對稱模型的右側行車道的平均速率在低密度自由流態也明顯較對稱模型高，而這也正是非對稱模型流量占優勢之時，其隱含對稱模型之快慢車夾雜車道使用道方式並非理想之交通模式。兩模型在各車種的比較結果可見圖 3.10，其反應出非對稱模型的設計最明顯使快速車種受益，這也應是高速公路的首要目的。

在各車道使用率，整體情形與上節討論的單車種模型雷同：對稱模型兩車道之

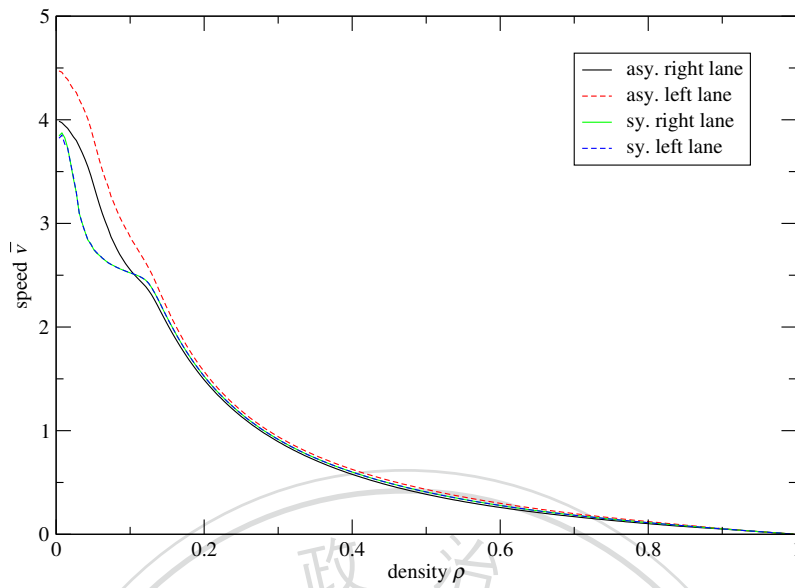
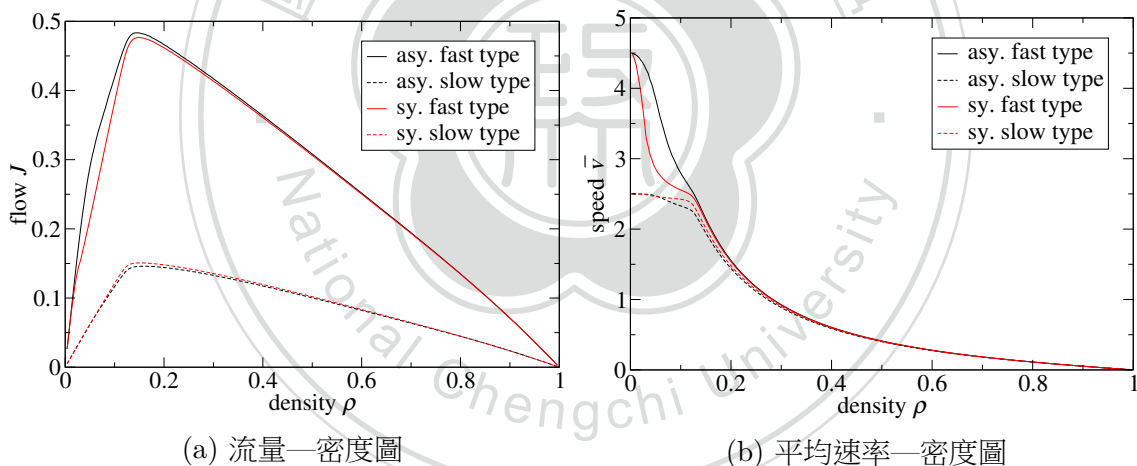


圖 3.9：二車道二車種，二模型各車道之基本構圖。非對稱模型左側超車道的平均速率最高，甚至右側行車道的速率在自由態時也明顯較快慢車夾雜用道方式的對稱模型速率高。



(a) 流量—密度圖

(b) 平均速率—密度圖

圖 3.10：二車道二車種模型各車種基本構圖之比較。快速車種在非對稱模型最明顯受益，而慢速車的效率則在兩模型中沒有顯著差別（雖在對稱模型些微較佳）。

個別使用率相同，而非對稱模型的右側行車道具明顯較高的使用率，且在極高車輛密度下兩車道的使用率才漸趨相同；這個結果呈現於圖 3.11。若將兩不同車種分開分析（見圖 3.12），我們可觀察出在非對稱模型中，低密度時快車及慢車均多使用右側行車道，當車輛密度增高但未飽和前，快車則多行駛左側超車道，而慢車則在中、高密度時均多使用右側行車道，如此現象大致符合非對稱模型的設計概念。

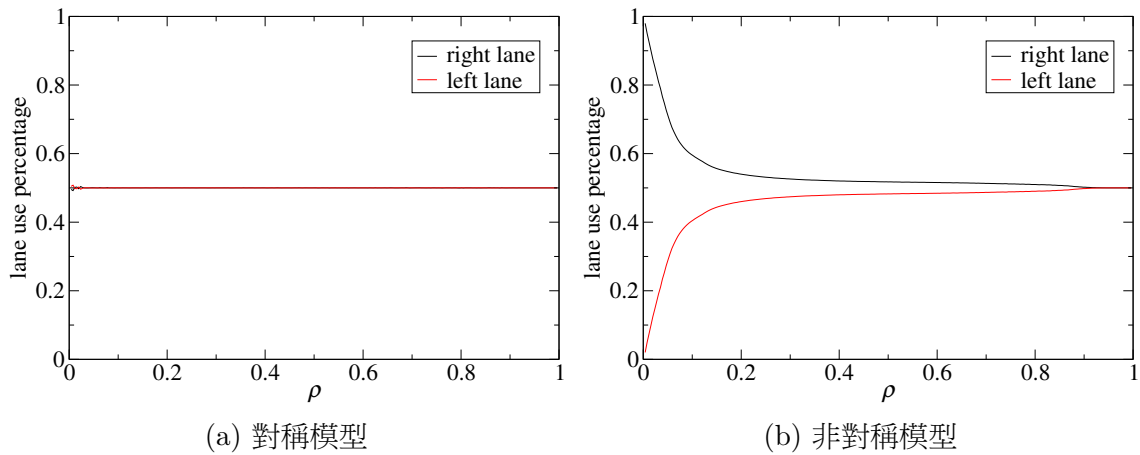


圖 3.11：二車道二車種，二模型之車道使用率。非對稱模型之右側車道使用率均較左側車道高。對稱模型則相差不大。

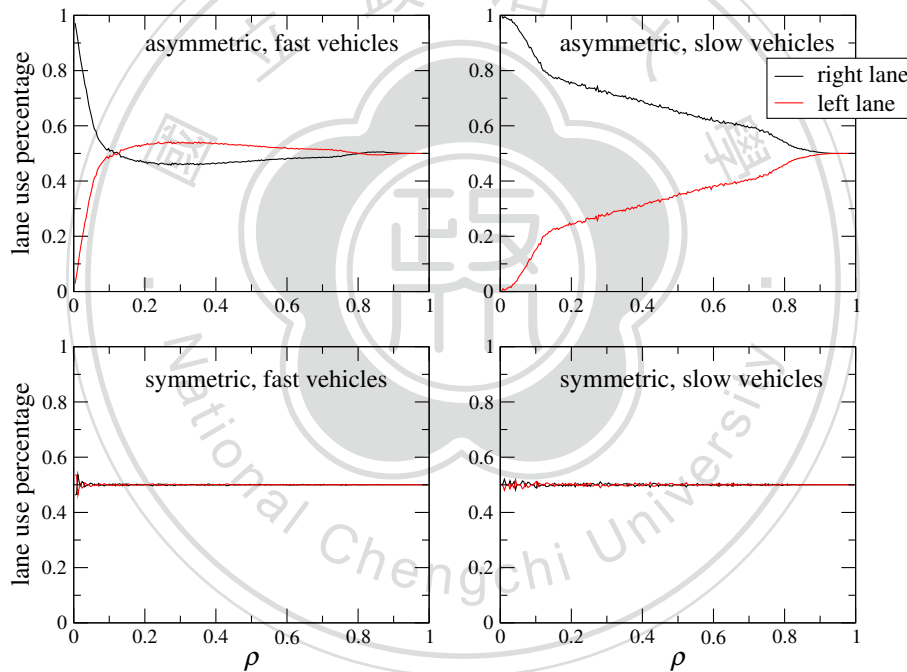


圖 3.12：二車道二車種，各模型之車種車道使用率。圖中左欄與右欄分別為快速車輛與慢速車輛之情形。而圖上列與下列分別為非對稱模型與對稱模型之情形。

### 3.4 小結

由二車道的模擬結果，我們得出以下兩個主要結論：(1) 可變換車道較不可變換車道的模式較能紓解交通。(2) 在車輛最高速率不一或隨機性高的「非均質」交通狀況下，非對稱模型相較於對稱模型對於自由態流量之提升較有助益；雖於某些狀況對稱模型之自由態流量僅有些許差距，但在道路空間有限之條件下，若採用非對稱用道模式才能使公路發揮最大效益。非對稱模型的優勢尤其顯現在快

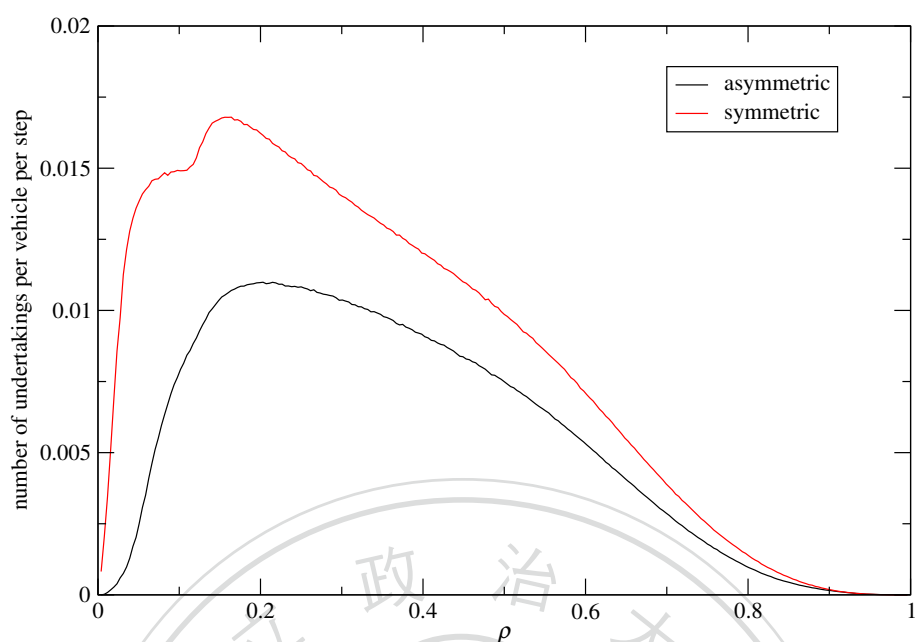


圖 3.13：二車道二車種各模型之每單位時間及每車輛右側超車發生次數。

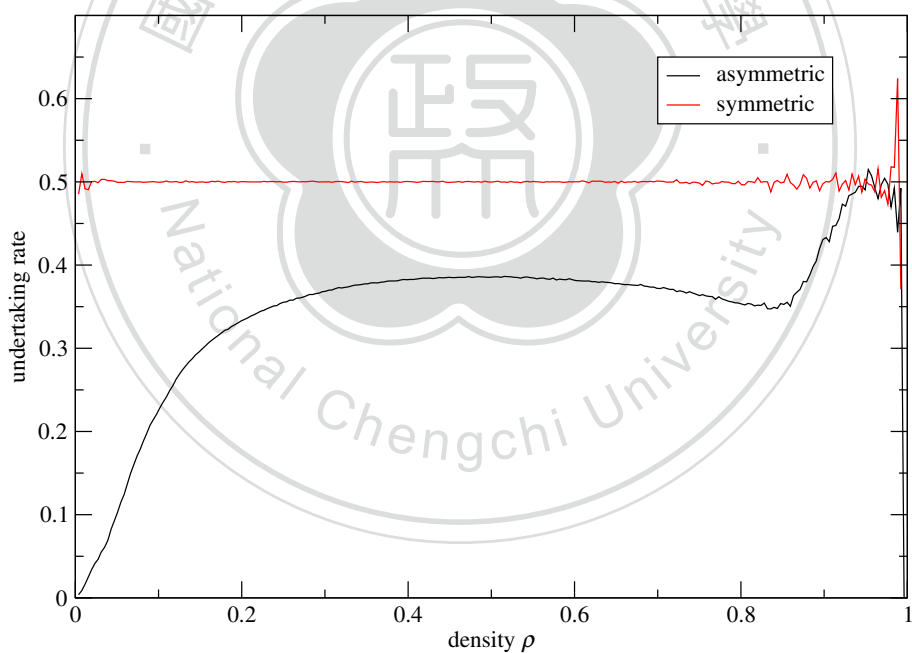


圖 3.14：二車道二車種各模型之右側超車發生比例，即右側超車次數占總超車次數的比例。

速車種比例較高情形，顯示此用道模式特別適用於高速公路。

目前我國高速公路及快速公路法規規定大型車（如大貨車）應使用右側車道，尚規定左側車道為超車道 [1]；在二車道情形下，這大抵上已屬非對稱模型，但在三或以上數目車道情形下，非對稱模型之概念將趨於模糊，此部分將於下章節討論。又法規另加註「小型車於不堵塞行車之狀況下，得以該路段容許之最高速限

行駛於內側車道」(高速公路及快速公路交通管制規則，第 8 條第 1 項第 3 款)，如此恐更增加實際交通狀況成為對稱模型的可能性。比較其他國家法規，我們認為欲徹底執行非對稱模式用道模式(即右側為行車道，左側為超車道)，對於所謂「超車」的定義應明確。歐洲國家嚴謹定義超車為以相對較快速率經過同方向行駛的另一車輛之行為，釐清超車無需考慮車輛於超越前後是否處於同一車道，如此在實際執行上能確保非對稱模式的運作(雖本文討論的非對稱模型較其法規鬆散)，且能避免以絕對速率來判斷是否可占用內車道所造成的爭議(因速率表誤差等因素)。

最後我們以圖 3.13 與 3.14 說明本文討論的非對稱模型並不滿足歐洲國家所規定的禁止右側超車的規定。圖記錄單位時間及單位車輛從右側以相對較高速率經過左側同向車的次數及比例，結果顯示非對稱模型仍然存在右側超車情形，儘管整體次數已較對稱模型來得少(尤其在密度較低之情況下)。





# 4

## 三車道模型

### 4.1 簡介

經模擬證實，非對稱模型對於提升二車道系統之流量有一定的助益。然而交通負荷繁重之主要公路經常為三車道或更多道之型態，故於此情形比較何種車道使用方式對於流量較有助益亦為一重要課題。本章我們將擴充二車道模型中之對稱與非對稱模型，使之能適用於三或以上數目車道之道路。而根據國際上相關法規，三車道或以上數目之車道高速公路之車道使用方式，除了二車道已有之對稱與非對稱型外，尚有僅具單一超車道之型式，在此稱為複合型 (hybrid type)。以三車道公路為例，複合型車道使用方式如下：車輛得以將右二車道視為對稱型，不必考量此二道車輛相互超車行為，然而最左側車道為所謂超車道，車輛僅於超車時使用此道，並於超車完畢後即退出左側車道。我們將據此首度建立複合模型 (hybrid model)，據我們所知，這模型未曾在其他文獻探討過。以下兩節我們將先介紹對稱與非對稱模型，而後再介紹複合模型。

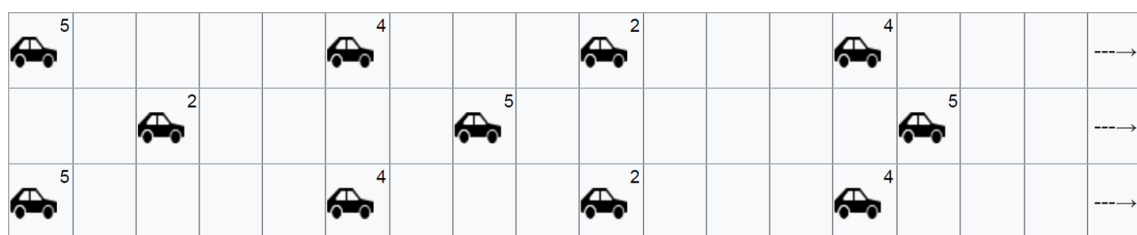


圖 4.1：三車道模型系統。圖改編自 [6]。

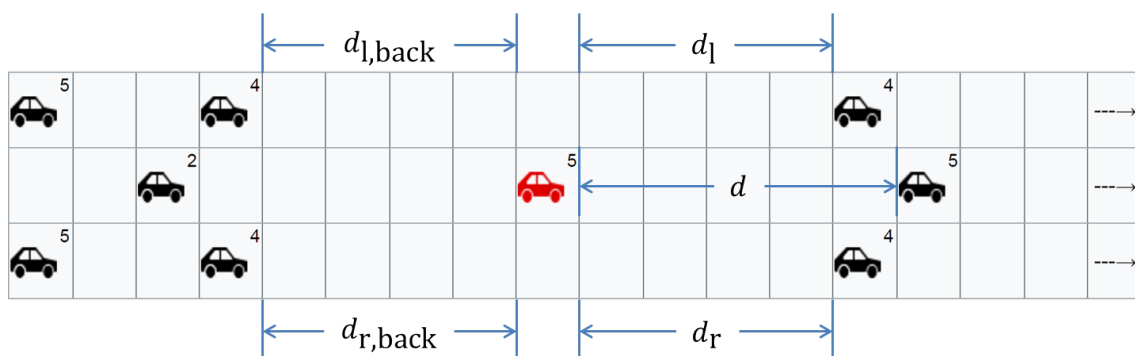


圖 4.2：三車道系統與相關變數，所考慮之車輛以紅色標示。圖改編自 [6]。

## 4.2 對稱模型

與二車道情形相同，對稱模型係指所有車道功能相同，超車並無規定須從左側或右側進行，車輛變換動機及安全條件與二車道對稱模型一致，惟相關另一車變數  $d_o, d_{o,back}$  將轉而成為左車道變數  $d_l, d_{l,back}$  與右車道變數  $d_r, d_{r,back}$ ，如圖 4.2 所示。因為對稱性，中間車道之車輛在相關條件滿足下，可選擇變換至左車道或右車道來進行超車。另外，在三車道模型中，變換車道僅限於「相鄰」車道，而不能一次跨多個車道。並且當左側車道及右側車道的車輛欲變換至中間車道時，應有相關機制來避免左右兩車同時變換至中間車道同一位置之情形，進而避免發生側向碰撞，如圖 4.3 所示，我們採取的作法為：若模型中發現該情形，則該二車輛之變換車道行為即取消。

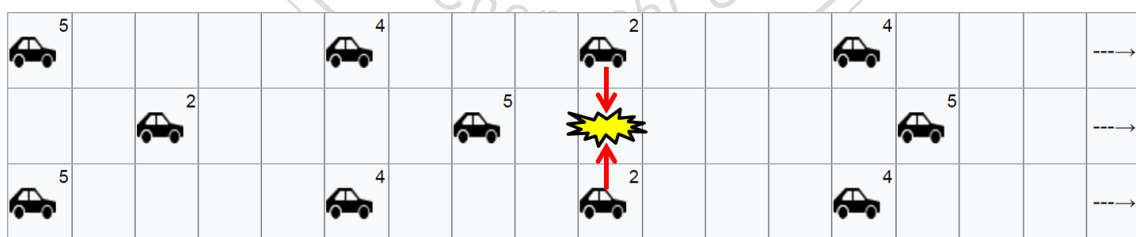


圖 4.3：三車道系統左右兩車同時變換至中間車道同一位置之情形。圖改編自 [6]。

以下以中間車道為例，敘述三車道對稱模型的變換車道過程：當所考慮的中間車道車輛與前車距離不滿足時，則

- (i) 變換至左側車道：若滿足變換至左側車道之條件，但不滿足變換至右側車道之條件。
- (ii) 變換至右側車道：若滿足變換至右側車道之條件，但不滿足變換至左側車道



之條件。

- (iii) 變換至左側車道：若同時滿足變換至左側與右側車道的條件，但左側車道之前車間距  $d_l$  較右側者大  $d_r$ 。
- (iv) 變換至右側車道：若同時滿足變換至左側與右側車道的條件，但右側車道之前車間距  $d_r$  較左側者大  $d_l$ 。
- (v) 1/2 機率變換至左側或右側車道：若同時滿足變換至左側與右側車道的條件，並且左側車道與右側車道之前車間距相等。

此處的考慮變換車道條件（與前車距離，其他車道狀況等）與二車道對稱模型一樣，故不再重複。又除了上述 (v) 中間車道的對稱性外，我們在此亦不考慮變換車道的隨機性，所以一旦變換車道條件成立即變換。

完成變換車道考量後，我們對每車道執行（如單車道模型的）NaSch 更新步驟，此時將考慮煞車的隨機性。

### 4.3 非對稱模型

三車道之非對稱模型之概念基本上與二車道非對稱模型雷同：超車須從左側，並且於右側相鄰車道有空間時須駛回。因此我們同樣將條件區分向左或向右變換車道之情形，且變換車道僅限於相鄰車道。對中間車道而言，若車輛同時滿足變換至左與右車道之條件，其仍只能變換至左側車道，而無須如同前述之對稱模型引入 1/2 機率來決定變換至左或右；此確保非對稱模型中超車須從左側的概念。

非對稱模型中所有車道（包含中間車道）變換車道過程如下：

- (i) 變換至左側車道：與前車距離不滿足時，且變換至左側車道之條件滿足。
- (ii) 變換至右側車道：若不滿足變換至左側車道條件但滿足變換至右側車道之條件時，即右側車道有空間可供當下速率行駛時。注意到此時並不涉及同車道前車間距大小之判斷，原意在於超車完成後回歸至右側車道。

## 4.4 複合模型

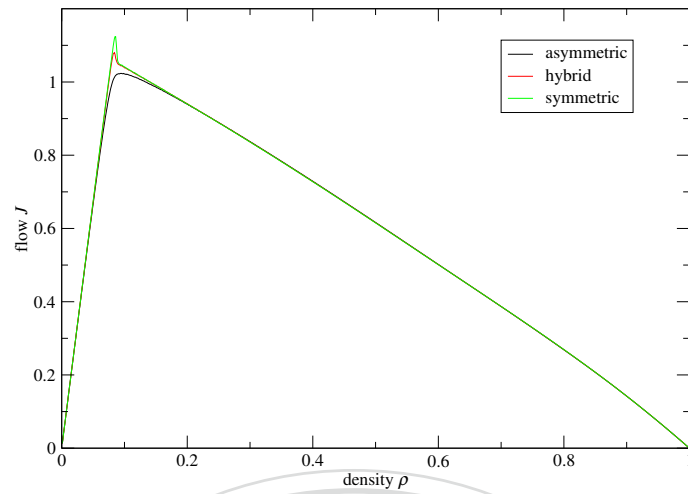
三車道複合模型可視為由對稱與非對稱模型所組成，其中右車道與中間車道一併為對稱模型，兩者均為行車道，而左車道為唯一超車道，其與中間車道的關係屬非對稱模型。

判斷變換車道時，車輛依其所處車道而有不同模型之適用：

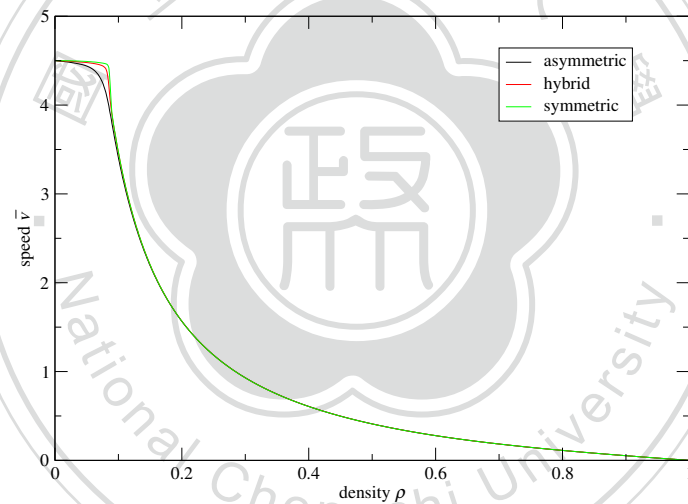
- (R) 當車輛位於右車道，使用對稱模型之方式判斷，即當車輛與前車距離不滿足時，且相鄰的中間車道提供滿足的變換車道條件，則變換至中間車道。
- (M) 當車輛位於中間車道，使用對稱模型之方式判斷，即當車輛與前車距離不滿足時，
  - (i) 變換至左側車道：若滿足變換至左側車道之條件，但不滿足變換至右側車道之條件。
  - (ii) 變換至右側車道：若滿足變換至右側車道之條件，但不滿足變換至左側車道之條件。
  - (iii) 變換至左側車道：若同時滿足變換至左側與右側車道的條件，但左側車道之前車間距  $d_l$  較右側者大  $d_r$ 。
  - (iv) 變換至右側車道：若同時滿足變換至左側與右側車道的條件，但右側車道之前車間距  $d_r$  較左側者大  $d_l$ 。
  - (v) 1/2 機率變換至左側或右側車道：若同時滿足變換至左側與右側車道的條件，並且左側車道與右側車道之前車間距相等。
- (L) 當車輛位於左側車道時，使用非對稱模型之方式判斷，即當中間車道有空間可供當下速率行駛時，則變換至中間車道。注意到此時並不涉及同車道前車間距大小之判斷。原意在於儘可能淨空左車道，使其僅供超車使用。

## 4.5 模擬結果

以下我們分別就單車種及二車種情形，比較各模型的模擬結果，並進行相關討論。相關模擬參數為煞車機率  $p = 0.5$ ，初始狀態為車輛等同分置於三車道上，模



(a) 基本構圖



(b) 速率—密度圖

圖 4.4：三車道單車種模型之基本構圖與速率—密度圖，綠曲線為對應對稱模型，紅曲線為複合模型，黑曲線則為非對稱模型的資料。可觀察出三者幾無差異，除了於密度臨界值（轉折處）附近有些微差距。

擬時間共  $t = 20000$  完整步驟，含  $t_0 = 10000$  待呈「穩流」時間，及  $T = 10000$  次作測量值時間平均，並進行 100 個獨立模擬以求取樣本平均。

#### 4.5.1 單車種

首先我們考慮所有車輛速限均為  $v_{\max} = 5$  的單車種情形。圖 4.4 為三車道單車種各模型之車流—密度圖 (a) 與速率—密度圖 (b)。可觀察出各模型之流量與

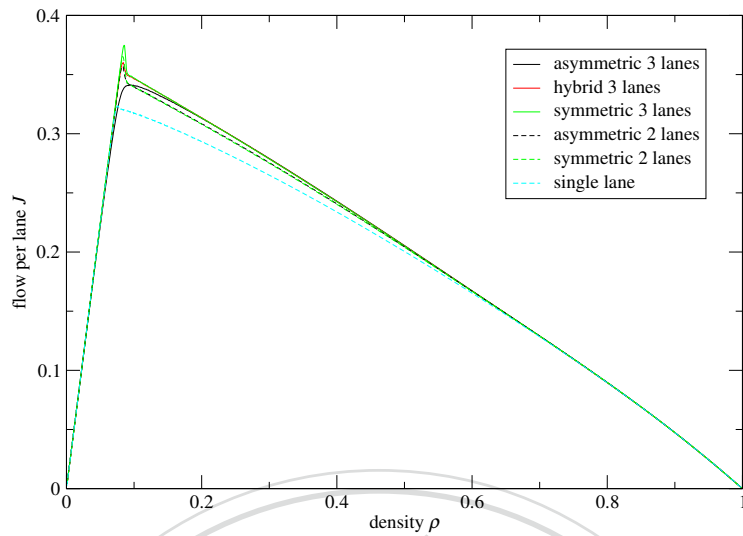


圖 4.5：三車道與二車道之各模型與單車道模型於單車種情形下之每車道平均流量—密度圖。

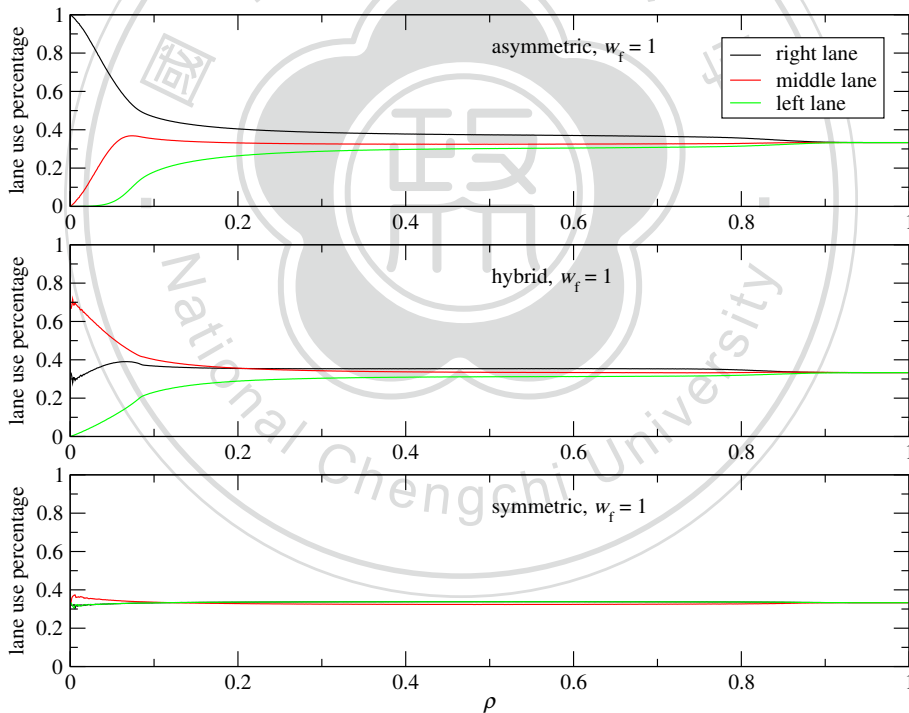
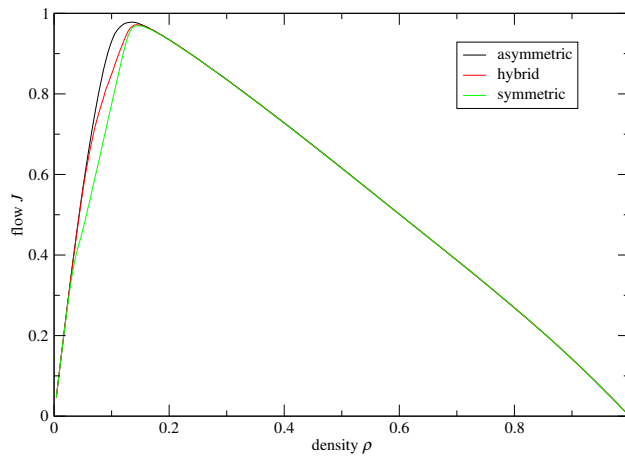


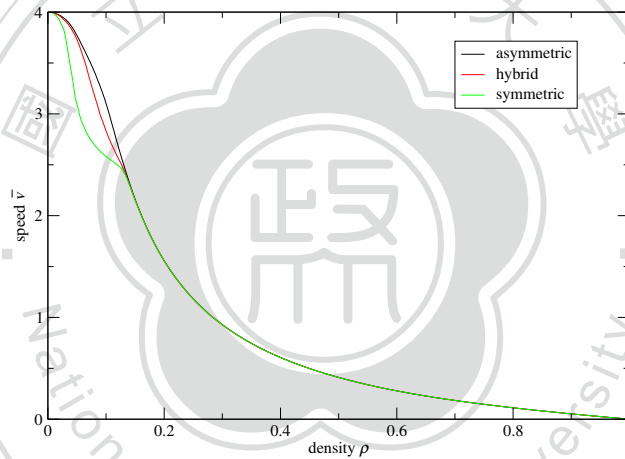
圖 4.6：三車道單車種情形下各模型之車道使用率。圖上至下分別為非對稱模型、複合模型與對稱模型之情形。

行車速率差異不大。因此若各車輛間之最高速率相同（即單車種），各模型間並未存在明顯差異。

若與二車道及單車道比較，圖 4.5 顯示三車道與二車道的各變換車道模型每車道平均車流量大致相同，且均較不可變換車道的單車道來得佳，尤其在密度大於臨界值的壅塞態差距更明顯。



(a) 基本構圖



(b) 速率—密度圖

圖 4.7：三車道二車種模型之基本構圖與速率—密度圖，綠曲線為對應對稱模型，紅曲線為複合模型，黑曲線則為非對稱模型的資料。可觀察出非對稱模型於自由態時具最高之流量及平均速率，複合模型次之，對稱模型最低，並且差異相當明顯。

比較各模型之車道使用率（圖 4.6）可觀察到非對稱模型於自由態時，右側車道使用率最高、中間車道次之、左側車道最低；對稱模型則是每個車道近乎相等，此結果符合預期。而複合模型方面，則是中間車道之使用率最高、右側車道次之、左側車道最低。

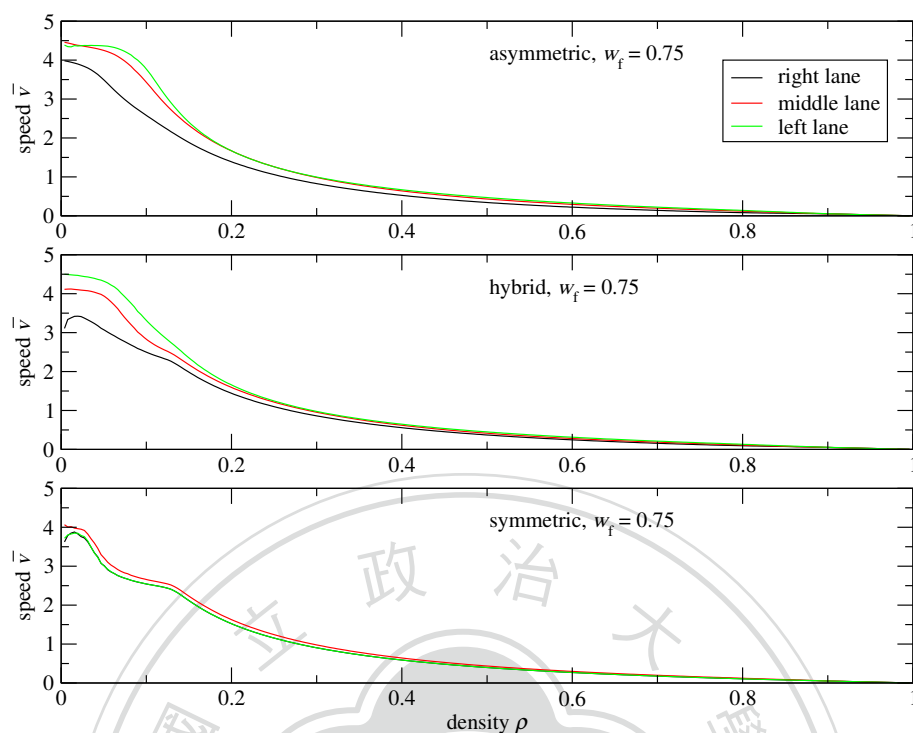


圖 4.8：三車道二車種各模型之各車道速率—密度圖。圖上至下分別為非對稱模型、複合模型與對稱模型之情形。

#### 4.5.2 二車種

在此我們考慮二車種情形：具速限  $v_{f,\max} = 5$  的快車及速限  $v_{s,\max} = 3$  的慢車。此處快慢車輛比率為 75 : 25，即  $w_f = 3/4$ 。

圖 4.7 的車流—密度與速率—密度圖顯示：非對稱模型之流量與行車速率為最佳、複合模型次之、對稱模型最差。這個有趣的結果隱含：（1）非對稱模型有序地管理由左超車模式在多車種速率不均下顯現其優勢；（2）複合模型相對於對稱模型雖僅多一超車道，但其所帶來的流量與行車速率效益卻是相當明顯的。亦即超車道之設置確實會對流量與行車速率有顯著之提升。

我們也觀察各車道速率—密度關係。圖 4.8 顯示非對稱與複合模型大抵均呈現左側車道快、中間車道次之與右側車道慢之情形。而效益最差的對稱模型則呈現出中間車道車速較其他二車道高之情形。

若分別考慮不同車種的狀況，由圖 4.9 可觀察到快速車輛明顯於非對稱模型具最高流量與行車速率，複合模型次之、對稱模型最低。慢速車輛之結果則與快速車輛相反，但差異不大。類似結果也顯現於上章討論的二車道模型中，再次顯示非均速率情況下，非對稱模型最能使快速車種受益。

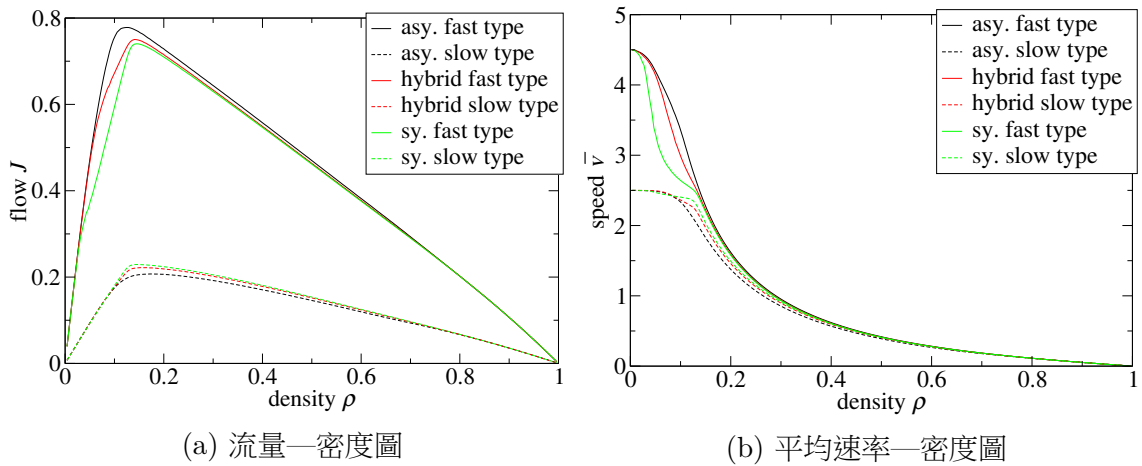


圖 4.9：三車道二車種模型各車種基本構圖與速率—密度圖之比較。快速車種在非對稱模型最明顯受益，而慢速車的效率則在三模型中沒有顯著差別。

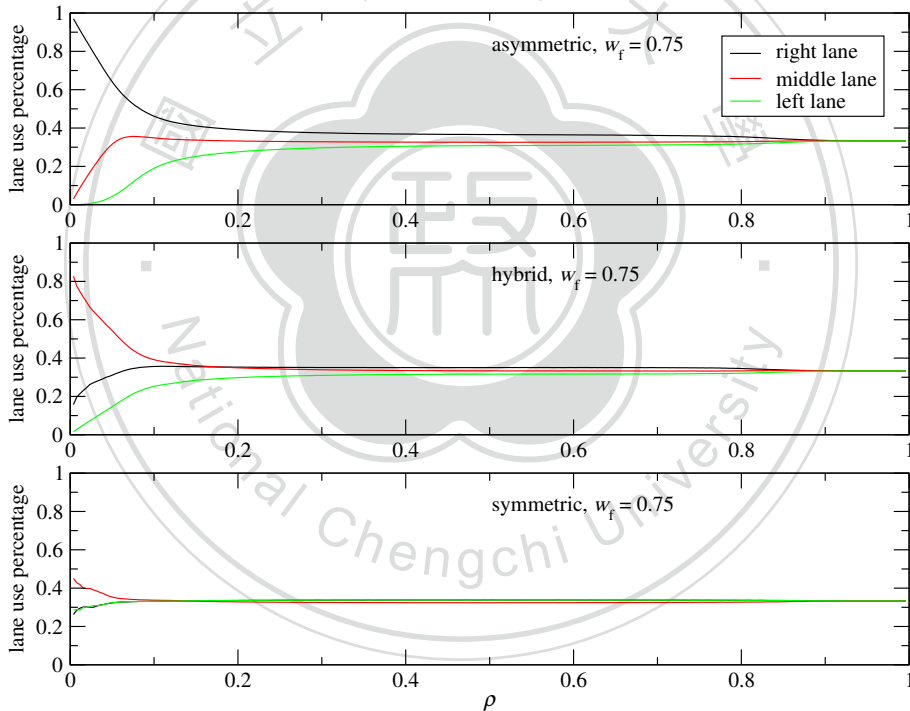


圖 4.10：三車道二車種情形下各模型之車道使用率。圖上至下分別為非對稱模型、複合模型與對稱模型之情形。

車道使用率方面（圖 4.10）則與單車種之結果相差不大：於自由態非對稱模型車道之使用率由高至低為右側車道、中間車道與左側車道，複合模型為中間車道、右側車道與左側車道，對稱模型則是中間車道與其他二車道。圖 4.11 為各車種之車道使用率。非對稱模型之快速車輛於密度低時大多使用右側車道，隨著密度提升，車輛逐步依次開始使用中間車道與左側車道；慢速車輛於大部分情形均多使用右側車道，偶使用中間車道，並且於低密度時，其幾乎不太會使用到左側

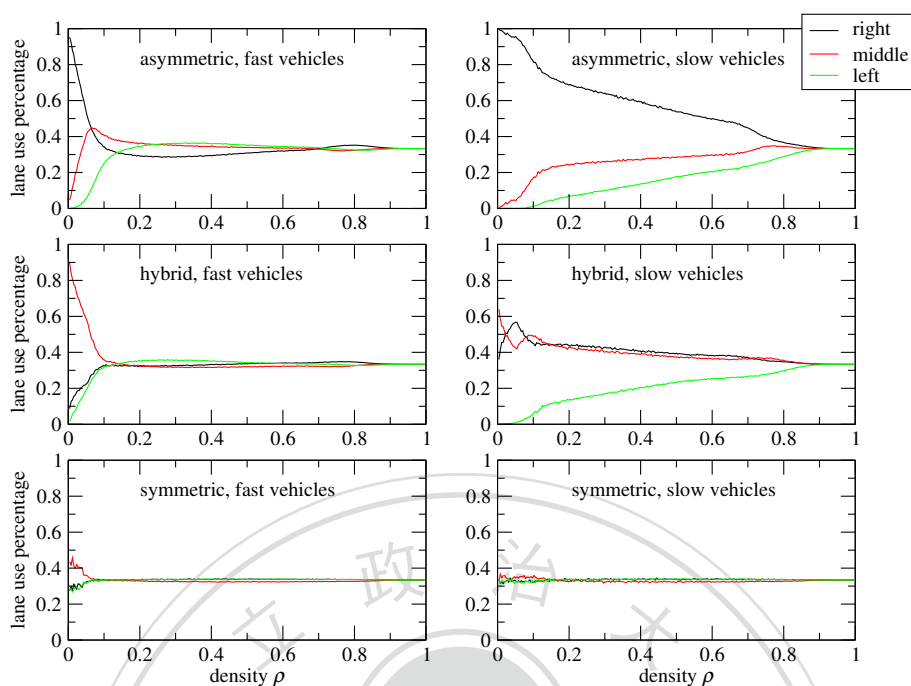
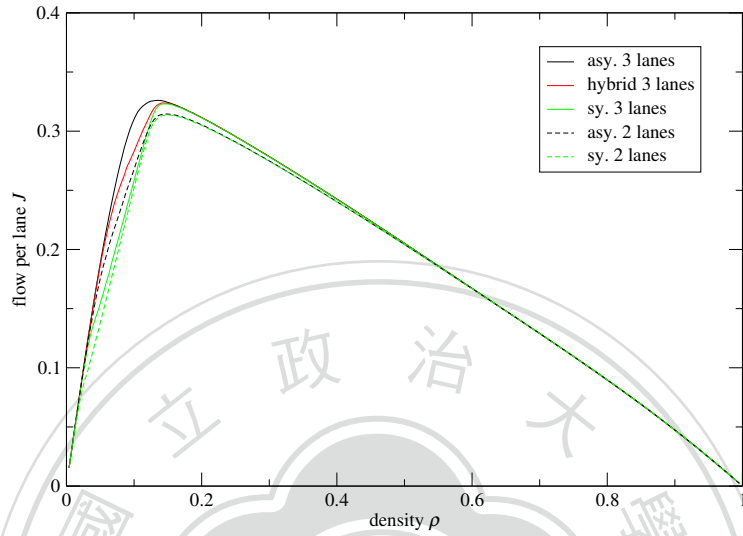


圖 4.11：三車道二車種情形下各模型之車種車道使用率。圖中左欄與右欄分別為快速車輛與慢速車輛之情形，而圖上至下分別為非對稱模型、複合模型與對稱模型之情形。

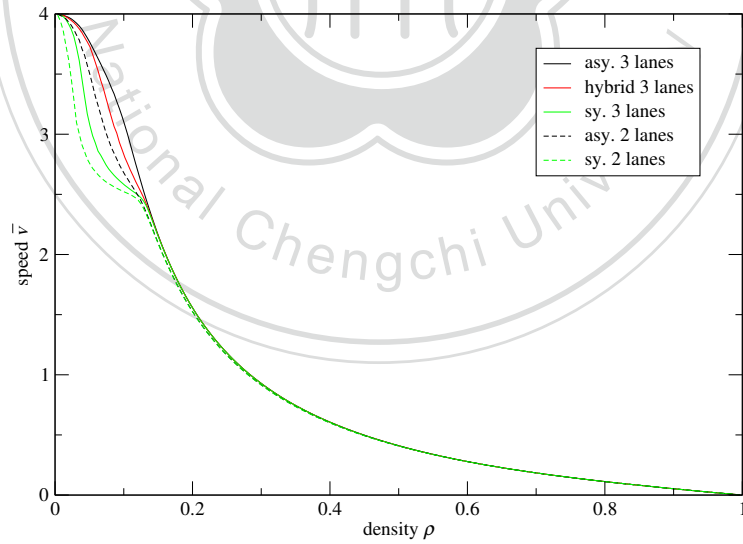
車道。僅具單一超車道之複合模型之快速車輛其於密度低時大多使用中間車道，隨著密度提升，各車道之使用率漸趨相等；慢速車輛於大部分情形使用中間車道與右側車道，偶使用左側車道。對稱模型於大多數情形則不分車種，各車道使用率均大致相等，除了快速車輛於低密度時較為使用中間車道。各模型於高密度時，車種車道使用率均差異不大。

此前我們討論過單車種時之每車道平均流量與行車速率是否會隨車道數增加和顯著提升，其結果為不明顯。在此我們再將該討論套用至二車種，結果（圖 4.12）顯示，於二車種情形，車道數之增加確實有助於流量與行車速率之提升，然而此結果僅適用於非對稱模型與複合模型，並不適用對稱模型，可觀察出於自由態時三車道之對稱模型每車道流量與行車速率甚至比二車道之非對稱模型還低。故唯有當道路具非均質車種且車道使用方式採用非對稱或者複合模型時，車道數之增加才有助於提升道路之使用效率。





(a) 每車道平均流量—密度圖



(b) 速率—密度圖

圖 4.12：三車道與二車道模型之每車道平均流量—密度與速率—密度圖，三車道模型非對稱模型具最高車道使用效率。



# 5

## 結論與建議

### 5.1 結論

本論文模擬單車道、二車道及三車道的高速公路（或快速道路）模型。我們的結果大致整理如下：

1. 當車輛因車種不同或駕駛人行為導致最高速率（速限）有差異時，非對稱用道模式對於流量提升有助益。這裡所謂非對稱模式是指，規劃最外側（右側）車道為行車道，超車時僅能藉變換至左側車道進行。非對稱模型總體描述為：多線公路上，每車道的左側車道為其超車道，且超車完成後即回原車道，使超車道（所有右側車道）儘可能淨空，且最右側車道為唯一行車道；以三車道為例，最右側車道為行車道，中間車道為右側車道的超車道，最左側車道則供超越中間車道車輛時使用。
2. 若能達到公路上所有車輛之最高速率一致的理想狀況，不同的車道使用模式（對稱或非對稱）則沒有明顯的車流量或平均速率上之優劣。
3. 可變換車道之多車道道路之流量較不可變換者高。

## 5.2 討論

### 5.2.1 非均車速之成因

如模擬結果顯示，若多線道路上所有車輛均具相同的最高速率，則不同車道使用規則所達到的交通效益並無區別。但事實上以下可排除或不可排除之因素常造成非均車速：

1. **駕駛人或車輛性能之差異** 公路上有不同性質之駕駛人，一些駕駛人喜好以較高速率行駛，一些駕駛人喜好以較低速率行駛，如此即造成速率差異。此外，公路上之車輛亦存在性能之差異，如此亦會造成速率差異，如小型車與大型車。
2. **時速表誤差** 根據 UNECE Regulation No. 39 paragraph 5.3 [8]，一輛車之時速表之讀數  $v_s$  與真實速率  $v_t$  必須滿足

$$0 \leq v_s - v_t \leq \frac{v_t}{10} + 4 \text{ km/h.} \quad (5.1)$$

整理後為

$$\frac{10}{11}(v_s - 4 \text{ km/h}) \leq v_t \leq v_s. \quad (5.2)$$

如讀數  $v_s$  為 100 km/h 之車輛，其真實速率可能值為 87.27 km/h 至 100 km/h，二者相差 12.73 km/h。而讀數  $v_s$  為 110 km/h 之車輛，其真實速率可能值為 96.36 km/h 至 110 km/h，二者相差 13.64 km/h。因此當二車輛行駛於相同時速表讀數速率  $v_s$  時，其二者之真實速率  $v_t$  未必會相等



圖 5.1：速率計實測結果，圖片源自 [10]。

(參考圖 5.1)，如此即可能造成實際速率之差異。

3. **超速取締寬容值** 依現行違反道路管理事件統一裁罰基準及處理細則第 12 條 [2]「行為人有下列情形之一，而未嚴重危害交通安全、秩序或發生交通事故，且情節輕微，以不舉發為適當者，交通勤務警察或依法令執行交通稽查任務人員得對其施以勸導，免予舉發：十一、駕駛汽車行車速率超過規定之最高時速未逾十公里。」如此，速限雖為一定值，但駕駛人尚可以超過其而未逾 10 km/h 之速率行駛而不被舉發，進而造成速率之差異。

例如於速限 100 km/h 路段，駕駛人 A 偏好以 105 km/h 行駛，駕駛人 B 偏好以 100 km/h，此二者均未達必須被舉發之條件，即均被視為「已達最高速」，惟速率仍然存在差異。

### 5.2.2 對於現行法規之探討

臺灣現行法規高速公路及快速公路交通管制規則第 8 條第 1 項第 3 款 [1] 規定「三、內側車道為超車道。」已屬流量居中之複合式車道使用方式，然而尚具但書「但小型車於不堵塞行車之狀況下，得以該路段容許之最高速限行駛於內側車道。」而由於前述時速表誤差與超速取締寬容值所形成之速率差異之故，該但書極可能使得車道使用方式由複合車道使用方式轉變為對稱車道使用方式。

## 5.3 建議

鑒於 NaSch 模型配合相關變換車道規則對於實際車流情形描述有一定的可靠性 [24]，本論文建議

1. 交通法規導入非對稱之車道使用方式：應儘量靠右行駛，超車從左側。關於法規細節之部分可參考其他國家已具相同概念之法規。並且應避免出現如臺灣現行法規高速公路及快速公路交通管制規則第 8 條第 1 項第 3 款中之「但小型車於不堵塞行車之狀況下，得以該路段容許之最高速限行駛於內側車道。」這類可能致使非對稱車道使用方式轉變為對稱車道使用方式而不利於流量之例外條款。大多數人刻板認為左側車道儘可能淨空僅供超車使用將

「浪費使用空間」而有損交通效益，這想法事實上與科學模擬出來的結果相違。

## 2. 隧道內開放變換車道。

俾使資源有限之道路發揮最高使用效率。

以下列舉一些國家的交通法規供參考：

### **英國 Highway Code [5]**

Rule 264 You should always drive in the left-hand lane when the road ahead is clear. If you are overtaking a number of slower-moving vehicles, you should return to the left-hand lane as soon as you are safely past. Slow-moving or speed-restricted vehicles should always remain in the left-hand lane of the carriageway unless overtaking. You MUST NOT drive on the hard shoulder except in an emergency or if directed to do so by the police, traffic officers in uniform or by signs.

### **法國 Code de la route [4]**

Article R412-9 En marche normale, tout conducteur doit maintenir son véhicule près du bord droit de la chaussée, autant que le lui permet l'état ou le profil de celle-ci. (儘可能靠右行駛)

Article R414-6 I. - Les dépassements s'effectuent à gauche. (超車從左側)

### **荷蘭 Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 (RVV 1990) [7]**

Artikel 3 1 Bestuurders zijn verplicht zoveel mogelijk rechts te houden. (儘可能靠右行駛)

Artikel 11 1 Inhalen geschiedt links. (超車從左側)

### **德國 Straßenverkehrs-Ordnung [9]**

§ 2 Straßenbenutzung durch Fahrzeuge (2) Es ist möglichst weit rechts zu fahren (儘可能靠右行駛) ...

§ 5 Überholen (1) Es ist links zu überholen. (超車從左側)

### 日本道路交通法 [3]

第二十条車両は、車両通行帯の設けられた道路においては、道路の左側端から数えて一番目の車両通行帯を通行しなければならない。ただし、自動車（小型特殊自動車及び道路標識等によつて指定された自動車を除く。）は、当該道路の左側部分（当該道路が一方通行となつてゐるときは、当該道路）に三以上の車両通行帯が設けられてゐるときは、政令で定めるところにより、その速度に応じ、その最も右側の車両通行帯以外の車両通行帯を通行することができる。（車輛應靠左行駛）

第二十八条車両は、他の車両を追い越そうとするときは、その追い越されようとする車両（以下この節において「前車」という。）の右側を通行しなければならない。（超車應從右側）

我們在此須強調，歐盟國家及英國對於所謂「超車」的定義係指：車輛以相對較快的速率經過另一車道車輛的行為，而並不限於超車前後兩車是否處於同一車道。如此即可避免以絕對速率來判斷是否可占用左側車道（或中間車道）所造成的爭議，且確保非對稱模型的運作，雖然本論文討論的非對稱模型所涉及的超車行為較此種法規鬆散。

## 5.4 展望

細胞自動機模型提供具彈性的交通微觀模擬方式，例如我們可藉車道的擴充與變換車道的條件等來設計各類型的管理交通模式。本論文討論的非對稱多車道模型顯示出最大之交通效益，惟其尚不能完全重製嚴禁右側超車之行為，因此如何將之修改使之更符合現實應可作為未來研究的課題之一。

鑑於交通微觀模擬的重要性，我們將擴充本論文所開發的程式碼，使之能藉不同參數及改變各車道功能以廣泛應用於各式交通模型。





## 附錄 A

### 模型變換車道條件程式碼

對稱模型

```
/* speed_of_car 為記錄車道上車輛速率之陣列。 */
/* type_of_car 為記錄車道上車輛型式之陣列。 */
/* direction_of_car 為記錄車道上車輛變換車道方向之陣列。 */
/* 變換車道條件 */
/* 右至左 */
/* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token+1 表其左側之相鄰車道。 */
if(lane_token+1<num_of_lanes
&& std::min(speed_of_car[L*lane_token+i]+1,
Vmax[type_of_car[L*lane_token+i]])>pos_diff_current_front-1
&& pos_diff_left_front>pos_diff_current_front
&& speed_of_car[L*(lane_token+1)+i]<0
&& pos_diff_left_behind-1>=Vmax[0]){
    left_token=1;
}
/* 左至右 */
/* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token-1 表其右側之相鄰車道。 */
if(lane_token-1>=0
&& std::min(speed_of_car[L*lane_token+i]+1,
Vmax[type_of_car[L*lane_token+i]])>pos_diff_current_front-1
&& pos_diff_right_front>pos_diff_current_front
&& speed_of_car[L*(lane_token-1)+i]<0
&& pos_diff_right_behind-1>=Vmax[0]){
```

```

right_token=1;
}
/* 若同時滿足右至左與左至右之條件 */
if(left_token==1 && right_token==1){
/* 若相鄰左側車道之前車間距較右側大，則變換至左側。 */
if(pos_diff_left_front>pos_diff_right_front){
if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
}
/* 若相鄰右側車道之前車間距較左側大，則變換至右側。 */
else if(pos_diff_left_front<pos_diff_right_front){
if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
}
/* 若相鄰左側與右側車道之前車間距相等，則以機率決定。 */
else if(pos_diff_left_front=pos_diff_right_front){
if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < 0.5){
if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
}
else{
if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
}
}
}
}
/* 僅滿足右至左之條件 */
else if(left_token==1){
if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
}
/* 僅滿足左至右之條件 */
else if(right_token==1){
if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)

```

```

    direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
}
/* 避免側向碰撞 */
for(int lane_token=0; lane_token<num_of_lanes-2; lane_token++){
    for(int i = 0; i < L; i++){
        if(direction_of_car[L*lane_token+i]==1
        && direction_of_car[L*(lane_token+2)+i]==2){
            direction_of_car[L*lane_token+i]=0;
            direction_of_car[L*(lane_token+2)+i]=0;
        }
    }
}
/* 變換車道 */
for(int lane_token=0; lane_token<num_of_lanes; lane_token++){
    for(int i=0; i<L; i++){
        /* 右至左 */
        if(lane_token+1<num_of_lanes && direction_of_car[L*lane_token+i]==1){
            std::swap(speed_of_car[L*lane_token+i],
            speed_of_car[L*(lane_token+1)+i]);
            std::swap(type_of_car[L*lane_token+i],
            type_of_car[L*(lane_token+1)+i]);
        }
        /* 左至右 */
        else if(lane_token-1>=0 && direction_of_car[L*lane_token+i]==2){
            std::swap(speed_of_car[L*lane_token+i],
            speed_of_car[L*(lane_token-1)+i]);
            std::swap(type_of_car[L*lane_token+i],
            type_of_car[L*(lane_token-1)+i]);
        }
    }
}
}

```

### 非對稱模型

```

/* speed_of_car 為記錄車道上車輛速率之陣列。 */
/* type_of_car 為記錄車道上車輛型式之陣列。 */

```

```

/* direction_of_car 為記錄車道上車輛變換車道方向之陣列。 */
/* 變換車道條件 */
/* 右至左 */
/* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token+1 表其左側之相鄰車道。 */
if(lane_token+1<num_of_lanes
&& (std::min(speed_of_car[L*lane_token+i]+1,
Vmax[type_of_car[L*lane_token+i]])>pos_diff_current_front-1
|| (type_of_car[L*lane_token+i]==0
&& type_of_car[L*lane_token+(i+pos_diff_current_front)%L]==1
&& Vmax[0]>pos_diff_current_front-1))
&& (pos_diff_left_front>pos_diff_current_front)
&& (speed_of_car[L*(lane_token+1)+i]<0)
&& (pos_diff_left_behind-1>=Vmax[0])){
    if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
        direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
}
/* 左至右 */
/* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token-1 表其右側之相鄰車道。 */
else if(lane_token-1>=0
&& (pos_diff_right_front-1>=speed_of_car[L*lane_token+i])
&& (speed_of_car[L*(lane_token-1)+i]<0)
&& (pos_diff_right_behind-1>=Vmax[0])
&& (type_of_car[L*lane_token+i]==1
|| (type_of_car[L*lane_token+i]==0
&& !(type_of_car[L*(lane_token-1)+(i+pos_diff_right_front)%L]==1
&& Vmax[0]>pos_diff_right_front-1))))){
    if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
        direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
}
/* 避免側向碰撞 */
for(int lane_token=0; lane_token<num_of_lanes-2; lane_token++){
    for(int i = 0; i < L; i++){
        if(direction_of_car[L*lane_token+i]==1
&& direction_of_car[L*(lane_token+2)+i]==2){

```

```

direction_of_car[L*lane_token+i]=0;
direction_of_car[L*(lane_token+2)+i]=0;
}
}
}
/* 變換車道 */
for(int lane_token=0; lane_token<num_of_lanes; lane_token++){
for(int i=0; i<L; i++){
/* 右至左 */
if(lane_token+1<num_of_lanes && direction_of_car[L*lane_token+i]==1){
std::swap(speed_of_car[L*lane_token+i],
speed_of_car[L*(lane_token+1)+i]);
std::swap(type_of_car[L*lane_token+i],
type_of_car[L*(lane_token+1)+i]);
}
/* 左至右 */
else if(lane_token-1>=0 && direction_of_car[L*lane_token+i]==2){
std::swap(speed_of_car[L*lane_token+i],
speed_of_car[L*(lane_token-1)+i]);
std::swap(type_of_car[L*lane_token+i],
type_of_car[L*(lane_token-1)+i]);
}
}
}
}

```

## 複合模型

```

/* speed_of_car 為記錄車道上車輛速率之陣列。 */
/* type_of_car 為記錄車道上車輛型式之陣列。 */
/* direction_of_car 為記錄車道上車輛變換車道方向之陣列。 */
/* 變換車道條件 */
/* 最左側車道使用非對稱模型 */
/* lane_token 表車輛所處之車道 */
if(lane_token+1==num_of_lanes){
/* 右至左 */
/* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token+1 表其左側之相鄰車道。 */

```

```

if(lane_token+1<num_of_lanes
&& (std::min(speed_of_car[L*lane_token+i]+1,
Vmax[type_of_car[L*lane_token+i]])>pos_diff_current_front-1
|| (type_of_car[L*lane_token+i]==0
&& type_of_car[L*lane_token+(i+pos_diff_current_front)%L]==1
&& Vmax[0]>pos_diff_current_front-1))
&&(pos_diff_left_front>pos_diff_current_front)
&&(speed_of_car[L*(lane_token+1)+i]<0)
&&(pos_diff_left_behind-1>=Vmax[0])){
    if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
        direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
}
/* 左至右 */
/* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token-1 表其右側之相鄰車道。 */
else if(lane_token-1>=0
&& (pos_diff_right_front-1>=speed_of_car[L*lane_token+i])
&& (speed_of_car[L*(lane_token-1)+i]<0)
&& (pos_diff_right_behind-1>=Vmax[0])
&& (type_of_car[L*lane_token+i]==1
|| (type_of_car[L*lane_token+i]==0
&& !(type_of_car[L*(lane_token-1)+
(i+pos_diff_right_front)%L]==1
&& Vmax[0]>pos_diff_right_front-1))))){
    if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
        direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
}
}
/* 其他車道使用對稱模型 */
else{
    /* 右至左 */
    /* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token+1 表其左側之相鄰車道。 */
    if(lane_token+1<num_of_lanes
&& std::min(speed_of_car[L*lane_token+i]+1,
Vmax[type_of_car[L*lane_token+i]])>pos_diff_current_front-1

```

```

&& pos_diff_left_front>pos_diff_current_front
&& speed_of_car[L*(lane_token+1)+i]<0
&& pos_diff_left_behind-1>=Vmax[0]){
    left_token=1;
}
/* 左至右 */
/* lane_token 表車輛所處之車道，lane_token-1 表其右側之相鄰車道。 */
if(lane_token-1>=0
&& std::min(speed_of_car[L*lane_token+i]+1,
Vmax[type_of_car[L*lane_token+i]])>pos_diff_current_front-1
&& pos_diff_right_front>pos_diff_current_front
&& speed_of_car[L*(lane_token-1)+i]<0
&& pos_diff_right_behind-1>=Vmax[0]){
    right_token=1;
}
/* 若同時滿足右至左與左至右之條件 */
if(left_token==1 && right_token==1){
    /* 若相鄰左側車道之前車間距較右側大，則變換至左側。 */
    if(pos_diff_left_front>pos_diff_right_front){
        if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
            direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
    }
    /* 若相鄰右側車道之前車間距較左側大，則變換至右側。 */
    else if(pos_diff_left_front<pos_diff_right_front){
        if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
            direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
    }
    /* 若相鄰左側與右側車道之前車間距相等，則以機率決定。 */
    else if(pos_diff_left_front=pos_diff_right_front){
        if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < 0.5){
            if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
                direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
        }
    }
    else{

```

```

    if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
        direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
    }
}
}
/* 僅滿足右至左之條件 */
else if(left_token==1){
    if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
        direction_of_car[L*lane_token+i]=1;
    }
/* 僅滿足左至右之條件 */
else if(right_token==1){
    if((double) rand() / (RAND_MAX+1.0) < pc)
        direction_of_car[L*lane_token+i]=2;
    }
}
/* 避免側向碰撞 */
for(int lane_token=0; lane_token<num_of_lanes-2; lane_token++){
    for(int i = 0; i < L; i++){
        if(direction_of_car[L*lane_token+i]==1
        && direction_of_car[L*(lane_token+2)+i]==2){
            direction_of_car[L*lane_token+i]=0;
            direction_of_car[L*(lane_token+2)+i]=0;
        }
    }
}
/* 變換車道 */
for(int lane_token=0; lane_token<num_of_lanes; lane_token++){
    for(int i=0; i<L; i++){
        /* 右至左 */
        if(lane_token+1<num_of_lanes && direction_of_car[L*lane_token+i]==1){
            std::swap(speed_of_car[L*lane_token+i],
            speed_of_car[L*(lane_token+1)+i]);
            std::swap(type_of_car[L*lane_token+i],

```



```
    type_of_car[L*(lane_token+1)+i]);  
}  
/* 左至右 */  
else if(lane_token-1>=0 && direction_of_car[L*lane_token+i]==2){  
    std::swap(speed_of_car[L*lane_token+i],  
             speed_of_car[L*(lane_token-1)+i]);  
    std::swap(type_of_car[L*lane_token+i],  
             type_of_car[L*(lane_token-1)+i]);  
}  
}  
}
```





## 參考文獻

- [1] 高速公路及快速公路交通管制規則.  
<http://law.moj.gov.tw/LawClass/LawSingle.aspx?Pcode=K0040019&FLNO=8>.
- [2] 違反道路管理事件統一裁罰基準及處理細則.  
<http://law.moj.gov.tw/LawClass/LawSingle.aspx?Pcode=D0080029&FLNO=12>.
- [3] 道路交通法.  
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S35/S35H0105.html>.
- [4] Code de la route.  
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074228>.
- [5] Highway Code.  
<https://www.gov.uk/guidance/the-highway-code/motorways-253-to-273#lane-discipline-rules-264-to-266>.
- [6] Nagel-Schreckenberg-Modell.  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Nagel-Schreckenberg-Modell>.
- [7] Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 (RVV 1990).  
<http://wetten.overheid.nl/BWBR0004825>.

- [8] Regulation No 39 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the speedometer equipment including its installation.
- [9] Straßenverkehrs-Ordnung.  
[http://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/](http://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/).
- [10] 林品亨, 林信賢. 速率計檢測介紹.  
[https://www.artc.org.tw/upfiles/ADUpload/knowledge/tw\\_knowledge\\_m073\\_05.pdf](https://www.artc.org.tw/upfiles/ADUpload/knowledge/tw_knowledge_m073_05.pdf), 12 2009.
- [11] BIROLI, G. Jamming: A new kind of phase transition? *Nature Physics* 3, 4 (2007), 222–223.
- [12] CHOWDHURY, D., KERTÉSZ, J., NAGEL, K., SANTEN, L., AND SCHADSCHNEIDER, A. Comment on “Critical behavior of a traffic flow model”. *Phys. Rev. E* 61 (3 2000), 3270–3271.
- [13] CHOWDHURY, D., WOLF, D. E., AND SCHRECKENBERG, M. Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane-changing rules. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 235, 3-4 (1997), 417–439.
- [14] CSÁNYI, G., AND KERTÉSZ, J. Scaling behaviour in discrete traffic models. *Journal of Physics A: Mathematical and General* 28, 2 (1995), L427–L432.
- [15] EISENBLÄTTER, B., SANTEN, L., SCHADSCHNEIDER, A., AND SCHRECKENBERG, M. Jamming transition in a cellular automaton model for traffic flow. *Phys. Rev. E* 57, 2 (1998), 1309–1314.
- [16] GERWINSKI, M., AND KRUG, J. Analytic approach to the critical density in cellular automata for traffic flow. *Physical Review E* 60, 1 (1999), 188.
- [17] HINRICHSSEN, H. Non-equilibrium critical phenomena and phase transitions into absorbing states. *Advances in Physics* 49, 7 (2000), 815–958.

- [18] IANNINI, M. L. L., AND DICKMAN, R. Traffic model with an absorbing-state phase transition. *Phys. Rev. E* 95 (2 2017), 022106.
- [19] KRAUSS, S., WAGNER, P., AND GAWRON, C. Continuous limit of the Nagel-Schreckenberg model. *Physical Review E* 54, 4 (1996), 3707.
- [20] NAGEL, K. Particle hopping vs. fluid-dynamical models for traffic flow, 1995.
- [21] NAGEL, K. Particle hopping models and traffic flow theory. *Phys. Rev. E* 53 (5 1996), 4655–4672.
- [22] NAGEL, K., AND PACZUSKI, M. Emergent traffic jams. *Phys. Rev. E* 51 (4 1995), 2909–2918.
- [23] NAGEL, K., AND SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I* 2, 12 (1992), 2221–2229.
- [24] NAGEL, K., WOLF, D. E., WAGNER, P., AND SIMON, P. Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. *Phys. Rev. E* 58, 2 (1997), 1425–1437.
- [25] NEUMANN, J. V., AND BURKS, A. W. Theory of self-reproducing automata, 1966.
- [26] RICKERT, M., NAGEL, K., AND SCHRECKENBERG, M. Two lane traffic simulations using cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 231 (1996), 534–550.
- [27] ROTERS, L., LÜBECK, S., AND USADEL, K. Critical behavior of a traffic flow model. *Physical Review E* 59, 3 (1999), 2672.
- [28] SCHADSCHNEIDER, A. Modelling of transport and traffic problems. In *Cellular Automata. ACRI 2008. Lecture Notes in Computer Science, vol 5191*. (2008), U. H., M. S., N. K., K. T., and B. S., Eds., Springer, Berlin, Heidelberg.

- [29] SOUZA, A. M. C. D., AND VILAR, L. Traffic-flow cellular automaton: Order parameter and its conjugated field. *Physical Review E* 80, 2 (2009), 021105.
- [30] SUGIYAMA, Y., FUKUI, M., KIKUCHI, M., HASEBE, K., NAKAYAMA, A., NISHINARI, K., ICHI TADAKI, S., AND YUKAWA, S. Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics* 10, 3 (2008), 033001.
- [31] VILAR, L. C. Q., AND DE SOUZA, A. Cellular automata models for general traffic conditions on a line. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 211, 1 (1994), 84–92.

