

雨天高速公路车辆换道模型研究

张卫华 颜冉 冯忠祥 王锴

Study of highway lane-changing model under rain weather

Zhang Wei-Hua Yan Ran Feng Zhong-Xiang Wang Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 064501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.064501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑自适应巡航车辆影响的上匝道系统混合交通流模型

**A hybrid traffic flow model with considering the influence of adaptive cruise control vehicles and on-ramps**

物理学报.2016, 65(8): 084503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084503>

受碾区域内颗粒轴向流动特性的离散元模拟

**Granular axial flow characteristics in a grinding area studied by discrete element method**

物理学报.2015, 64(23): 234502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234502>

驾驶员预估效应下车流能耗演化机理研究

**Analysis of evolution mechanism of traffic energy dissipation by considering driver's forecast effect**

物理学报.2015, 64(15): 154503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154503>

部分道路关闭引起的交通激波特性研究

**Study of the shock wave induced by closing partial road in traffic flow**

物理学报.2015, 64(11): 114502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114502>

基于有向渗流理论的关联微博转发网络信息传播研究

**Information spreading in correlated microblog reposting network based on directed percolation theory**

物理学报.2015, 64(4): 044502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044502>

## 雨天高速公路车辆换道模型研究\*

张卫华<sup>1)</sup> 颜冉<sup>2)†</sup> 冯忠祥<sup>1)</sup> 王锬<sup>1)</sup>

1) (合肥工业大学交通运输工程学院, 合肥 230009)

2) (安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥 230022)

(2015年8月18日收到; 2015年12月1日收到修改稿)

降雨使得路面附着系数和驾驶员视距降低, 容易造成交通事故, 影响道路通行效率. 为了研究雨天天气下车辆的换道行为, 引入反映降雨对换道行为影响的路面附着系数参数和驾驶员反应时间参数, 并进行量化分析, 由此使得安全距离随降雨强度和车辆速度的变化而变化, 在考虑前车和后车速度差对换道行为影响的基础上, 建立了雨天高速公路车辆换道模型. 仿真分析表明, 在中密度区雨天换道率与晴天相比有明显下降, 最大降幅约为25%; 且改进模型再现了自由流、自由流在无外因影响下形成动态拥堵流以及阻塞流下车辆时走时停的现象; 在中密度和高密度交通流中, 雨天更易引起交通拥堵, 其道路时空图中拥堵出现的频率和持续时间均相应增大, 且车辆以低速度行驶的时间较晴天天气下高许多.

**关键词:** 雨天, 附着系数, 反应延迟时间, 时空图

**PACS:** 45.70.Vn, 89.40.-a

**DOI:** 10.7498/aps.65.064501

## 1 引言

降雨会对交通安全和交通流运行产生影响, 根据相关文献, 每年75%交通事故发生在潮湿的路面上, 47%的交通事故发生在降雨天气下, 雨天天气下车辆的碰撞风险增加了1倍之多<sup>[1]</sup>, 且降雨增加了71%的撞车率和49%的人员受伤率<sup>[2]</sup>. 其原因是降雨使得路面的附着系数减小, 车辆的制动性能降低, 另一方面降雨降低了能见度, 影响了驾驶员的视距, 增加了驾驶员感知周边环境以及做出反应的时间. 表现在宏观交通流中, 车辆换道所需的安全距离增加, 如果按照正常天气的换道安全距离进行换道, 则不可避免地会发生碰撞等交通事故, 如果安全距离过大则会造成道路资源的浪费. 所以如何通过研究雨天交通流的微观换道行为, 使得交通流在雨天天气下的换道行为与实际更为相符, 对解决雨天的交通问题具有重要的意义.

对于交通流跟驰模型的研究, 近年来取得了

很多成果. Reuschel和Pipes从运动学的角度首次提出了车辆跟驰的概念, 随后Nagel和Schreckenberg<sup>[3]</sup>提出了经典的基于元胞自动机的NaSch模型; Bando等<sup>[4]</sup>提出了后车可以根据与前车的距离迅速调整自身速度的优化速度(OV)模型; Helbing和Tilch<sup>[5]</sup>为了克服OV模型中加速度与实际偏差大的缺点, 提出了广义力速度(GF)模型, 并用观测数据对模型中的参数进行了标定. 根据OV模型和GF模型, Jiang等<sup>[6]</sup>提出了全速度差(FVD)模型, 很好地解释了车间距小于安全距离、前车速度比后车大很多时, 后车不会减速的现象, 随后其他学者也对单车道的跟驰模型进行了研究<sup>[7]</sup>. 对交通流换道模型的研究, Chowdhury等<sup>[8]</sup>在NaSch模型的基础上进行拓展, 提出了著名的双车道元胞自动机(STCA)模型; 国内学者对STCA换道模型进行了一系列的扩展研究<sup>[9,10]</sup>. 另外, 国内外其他学者关于换道行为对交通流的影响从其他方面也做了些研究<sup>[11,12]</sup>. 近年来许多换道模型的研究大都是在跟车模型的基础上引入特定的换道规则建立起来

\* 国家自然科学基金(批准号: 51308177, 51178158, 51578207)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yanranjia@163.com

的,如文献[13—15]基于OV模型建立了换道模型,文献[16—18]基于速度差模型建立了多车道车辆换道模型.有关不利天气对交通流和换道的影响国内外学者做了一些研究[19—21]:Hall和Barrow[19],Ibrahim和Hall[20]通过对不利天气交通流参数的调查,运用虚拟变量多元回归方法分析了不同天气条件下交通流运行特点;赵韩涛等[21]通过细化元胞尺寸,直接在模型中引入速度因子参数和间距因子参数,进而对冰雪条件下的交通流特性进行了研究,其模型没有考虑车流速度以及速度差对换道行为的影响.

综上所述,现有的换道模型大多是在跟车模型的基础上引入不同的换道规则进行的扩展研究,很少对雨天如何影响车辆换道行为进行具体分析.本文在量化雨天影响换道行为指标的基础上,提出了考虑速度差的雨天换道模型,并对雨天和晴天的换道率和时空图进行对比分析.

## 2 雨天对换道行为影响的量化分析

与晴天相比,雨天对车辆换道行为的影响可以体现在路面特性、车辆特性以及驾驶员特性的变化上.降雨条件下路面积水使得路面与轮胎间的附着系数减小,降雨尤其是暴雨严重影响驾驶员的视野,使得驾驶员感知周边环境并做出相应反应的时间增长,同时对驾驶员心理也有一定的影响.本文引入路面附着系数和驾驶员反应时间参数来量化降雨对车辆换道行为的影响.

### 2.1 路面附着系数

一般情况下轮胎与路面的附着系数主要与路面构造、轴重、轮胎类型、胎压以及车辆行驶速度等因素有关.在降雨条件下路面积水在轮胎和路面之间产生水膜,使得车辆与轮胎的附着系数减小,其减小量取决于水膜厚度的大小.

水膜厚度与降雨强度的关系为[22]

$$h = 0.1258 \times l^{0.6715} \times i^{-0.3147} \times d^{0.7786} \times TD^{0.7261} \quad (R^2 = 0.93), \quad (1)$$

其中, $h$ 为水膜厚度(mm), $l$ 为坡面长度(m), $i$ 为坡面坡度(%), $d$ 为降雨强度(mm/min), $TD$ 为路面构造深度(mm).

由文献[23],路面附着系数与行车速度和水膜厚度的关系表达式为

$$\varphi = 0.6603 - 0.0037v - 0.0057h \quad (R^2 = 0.8313). \quad (2)$$

考虑轮胎的磨损状态,对最大减速度进行修正,结合(1)和(2)式得到修正后的最大制动加速度表达式为

$$a^{\max} = \varepsilon \times \varphi \times g, \quad (3)$$

其中, $\varepsilon$ 为轮胎磨损程度对制动加速度的折减,对于一般的磨损取值为0.9; $g$ 为重力加速度(9.8 m/s<sup>2</sup>).

通过(1),(2)和(3)式可以清楚地看到降雨强度与路面附着系数的关系,同时也可以得到路面在不同降雨强度下的最大制动加速度.

### 2.2 驾驶员反应时间

降雨天气下,尤其大雨和暴雨时,道路的能见度降低,增加了驾驶员辨别前方道路以及前方车辆行驶状态的反应时间.降雨时为了保障低能见度情况下车辆的行驶安全,定义雨天反应延迟时间为:当能见度小于驾驶员安全视距时,驾驶员在正常反应时间的基础上预留的一段时间.正常情况下车辆的安全距离可以根据停车视距的安全距离模型得到,基于停车视距的安全距离模型表达式为

$$s_0 = v_0 t_0 + \frac{v_0^2}{2a_{\max}}. \quad (4)$$

为确保车辆安全,取2倍的正常条件下安全临界距离与能见度距离之差为车辆必须保持的安全距离[24],由(4)式得车辆需满足:

$$v_0(t_0 + t_i) + \frac{v_0^2}{2a_{\max}} \leq (2s_0 - s_{\text{rain}}). \quad (5)$$

由(5)式经过变换得到雨天反应延迟时间的计算式:

$$t_i = \frac{2s_0 - s_{\text{rain}} - \frac{v_0^2}{2a_{\max}}}{v_0} - t_0, \quad (6)$$

其中, $t_i$ 为驾驶员反应延迟时间(s), $s_0$ 为正常天气条件下的安全临界距离(m), $s_{\text{rain}}$ 为雨天能见度(m), $v_0$ 车辆的行驶速度(m/s), $t_0$ 为驾驶员在正常天气条件下的反应时间(s).

### 3 模型的建立

#### 3.1 经典STCA换道模型

对于元胞自动机换道模型,最为经典的是Chowdhury等提出的以NaSch模型为基础构建的STCA模型<sup>[8]</sup>,该模型把车辆的换道行为划分为两个过程,一个是换道过程,另一个是在单车道上以NS规则进行的跟驰.其换道过程需满足换道动机和安全条件:

- 1) 换道动机  $d_n < \min(v_n + 1, v_{\max}), d_{n,other} > d_n$ ;
- 2) 安全条件  $d_{n,back} > d_{safe}$ .

在STCA模型中,速度和距离等参数都被整数离散化,研究路段被划分为等距离离散的格子,也就是元胞,每个元胞有两种状态,是空的或者被一辆车所占据.  $v_n, v_{\max}$  分别为研究车辆的当前速度和最大速度,  $d_n$  为当前车道研究车辆  $n$  与前车之间的距离,即元胞数;  $d_{n,other}$  为研究车辆与相邻车道前车的距离;  $d_{n,back}$  为研究车辆与相邻车道后车的距离;  $d_{safe}$  为两车所必须保持的安全距离. STCA模型用简单的换道条件很好地表达了车辆的换道行为<sup>[9]</sup>,但换道安全间距  $d_{safe} = v_{\max}$ ,这与实际是不相符的,因为安全距离并不是固定不变的,而是随车辆行使速度的变化而变化的.

#### 3.2 安全距离模型

前车与后车之间的安全距离除与驾驶员自身的心理与身体素质有关以外,很大程度上取决于车辆本身的制动性能和驾驶员的反应时间.根据前车和后车的运动状态可以解得两车之间必须保持的安全距离为

$$d_{safe} = v_n(t_r + t_\pi) + \frac{v_n^2}{2a_f} + L - \frac{v_{n+1}^2}{2a_g}, \quad (7)$$

其中,  $v_n$  为前车的速度,  $v_{n+1}$  为后车的速度,  $L$  为静止时两车之间的最小安全距离,一般为3 m,  $a_f$  为后车最大制动加速度,  $a_g$  为前车最大制动加速度,  $t_\pi$  驾驶员反应时间,  $t_\pi = t_0 + t_i$ ;  $t_r$  制动系统协调时间.

在安全距离模型中,降雨对车辆换道行为的影响通过车辆最大制动加速度(路面附着系数)和驾驶员反应时间来体现,为下文考虑降雨的换道模型的建立打下基础.

#### 3.3 基于速度差的考虑降雨影响的车辆换道模型

对于3车道以上的换道,中间车道的换道会相对复杂,需要考虑向左、向右换道的条件.以三车道为例,如图1,车道2上的车辆在当前车道无法以期速度行驶时,若车道1或车道3有比当前车道更好的行车环境,且满足换道条件和安全条件,那么车辆会以一定的概率进行换道.

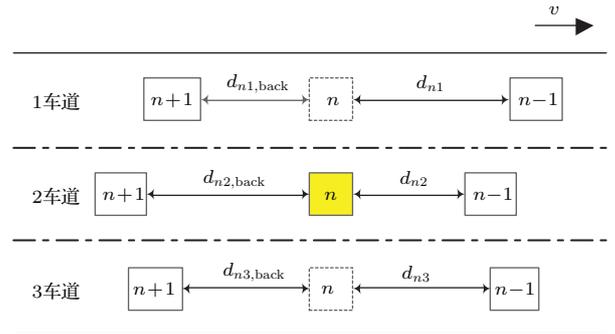


图1 三车道车辆关系示意图

Fig. 1. Relationships between vehicles on three-lane roadway.

本文以典型三车道为例,将路面附着系数指标和驾驶员反应延迟时间指标通过安全距离这一中间变量体现降雨对车辆换道行为的影响,在考虑速度差因素的基础上对STCA模型进行改进建立雨天的换道模型.

##### 3.3.1 左侧车道换道条件

左侧车道上的车辆无法以期速度行驶,即  $d_{n1} + \Delta v_1 < v_n(t + 1)$ ,相邻车道满足换道条件  $d_{n2} + \Delta v_2 > v_n(t + 1)$ 且同时满足安全条件  $d_{n2,back} + \Delta v'_2 > d_{safe}$ ,则车辆以一定的概率  $p_{change}$  换到中间车道上,其换道条件为

$$\begin{aligned} d_{n1} + \Delta v_1 &< v_n(t + 1), \\ d_{n2} + \Delta v_2 &> v_n(t + 1), \\ d_{n2,back} + \Delta v'_2 &> d_{safe}. \end{aligned} \quad (8)$$

车辆除换道之外的过程均遵循NaSch模型中的跟驰规则,即加速、减速、随机慢化、位置更新.当满足(8)式时进行位置更新:  $x_n = x_n + v_n(t + 1)$ ,  $y_n = y_n + 1$ ; 否则:  $x_n = x_n + v_n, y_n = y_n$ ,其中  $x_n$  表示研究车辆的横向位置,  $y_n$  表示研究车辆所在的车道.

### 3.3.2 中间车道换道条件

中间车道的换道相比两侧的车辆换道要相对复杂, 中间车道车辆的行驶状态有三种, 可以选择从左侧换道也可以选择从右侧换道, 或者保持继续跟驰. 中间车道的交通条件无法满足车辆行驶速度, 如相邻车道1车道和3车道均满足换道条件和安全条件时, 车辆会选择相邻车道前车与自己速度差较大的车道; 若相邻车道1车道和3车道仅有一个满足换道条件和安全条件时, 车辆会选择满足该条件的车道进行换道; 若相邻车道均不满足换道条件和安全条件时, 车辆将继续保持跟驰的行车状态.

1) 车辆在两种情况下会选择1车道进行换道, 一是相邻车道均满足换道条件和安全条件时, 且车道1 前车速度比车道3 前车速度大时, 二是相邻车道仅1车道满足换道条件和安全条件时, 车辆以一定的概率  $p_{\text{change}}$  从1车道进行换道, 换道条件为

$$\begin{cases} d_{n1} + \Delta v_1 > v_n(t+1), \\ d_{n2} + \Delta v_2 < v_n(t+1), \\ d_{n3} + \Delta v_3 > v_n(t+1), \\ \Delta v_1 > \Delta v_3, \\ d_{n1,\text{back}} + \Delta v'_1 > d_{\text{safe}}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} d_{n1} + \Delta v_1 > v_n(t+1), \\ d_{n2} + \Delta v_2 < v_n(t+1), \\ d_{n3} + \Delta v_3 < v_n(t+1), \\ d_{n1,\text{back}} + \Delta v'_1 > d_{\text{safe}}. \end{cases} \quad (10)$$

同时进行位置更新:  $x_n = x_n + v_n(t+1)$ ,  $y_n = y_n - 1$ .

2) 车辆在两种情况下会选择3车道进行换道, 一是相邻车道均满足换道条件和安全条件时, 且车道3 前车速度比车道1 前车速度大时, 二是相邻车道仅3车道满足换道条件和安全条件时, 车辆以一定的概率  $p_{\text{change}}$  从3车道进行换道, 换道条件为

$$\begin{cases} d_{n1} + \Delta v_1 > v_n(t+1), \\ d_{n2} + \Delta v_2 < v_n(t+1), \\ d_{n3} + \Delta v_3 > v_n(t+1), \\ \Delta v_1 < \Delta v_3, \\ d_{n3,\text{back}} + \Delta v'_3 > d_{\text{safe}}, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} d_{n1} + \Delta v_1 < v_n(t+1), \\ d_{n2} + \Delta v_2 < v_n(t+1), \\ d_{n3} + \Delta v_3 > v_n(t+1), \\ d_{n3,\text{back}} + \Delta v'_3 > d_{\text{safe}}. \end{cases} \quad (12)$$

同时进行位置更新:  $x_n = x_n + v_n(t+1)$ ,  $y_n = y_n + 1$ .

3) 当不满足从右侧换道和从左侧换道的条件时, 车辆保持原有的车道进行跟驰行驶, 此时的位置更新规则为:  $x_n = x_n + v_n$ ,  $y_n = y_n$ .

### 3.3.3 右侧车道换道条件

右侧车道上的车辆行车速度受阻时, 即  $d_{n3} + \Delta v_3 < v_n(t+1)$ , 相邻车道满足换道条件  $d_{n2} + \Delta v_2 > v_n(t+1)$  且同时满足安全条件  $d_{n2,\text{back}} + \Delta v'_2 > d_{\text{safe}}$ , 则车辆以一定的概率  $p_{\text{change}}$  换到中间车道上, 其换道条件为

$$\begin{cases} d_{n3} + \Delta v_3 < v_n(t+1), \\ d_{n2} + \Delta v_2 > v_n(t+1), \\ d_{n2,\text{back}} + \Delta v'_2 > d_{\text{safe}}. \end{cases} \quad (13)$$

同时进行位置更新:  $x_n = x_n + v_n(t+1)$ ,  $y_n = y_n - 1$ ; 否则  $x_n = x_n + v_n$ ,  $y_n = y_n$ .

在换道条件中,  $d_{n1}$ ,  $d_{n2}$ ,  $d_{n3}$  分别表示研究车辆  $n$  与车道1、车道2、车道3 上前车的距离,  $d_{n1,\text{back}}$ ,  $d_{n2,\text{back}}$ ,  $d_{n3,\text{back}}$  分别表示研究车辆  $n$  与车道1、车道2、车道3 上后车的距离,  $v_n(t+1)$  为研究车辆  $n$  在  $t+1$  时刻期望的速度,  $v_n(t+1) = \min(v_n(t) + 1, v_{\text{max}})$ .  $\Delta v_1$ ,  $\Delta v_2$ ,  $\Delta v_3$  分别表示研究车辆  $n$  与车道1、车道2和车道3 上前车之间的速度差;  $\Delta v'_1$ ,  $\Delta v'_2$ ,  $\Delta v'_3$  分别表示研究车辆  $n$  与车道1、车道2和车道3 上后车之间的速度差. 在模型中考虑  $\Delta v$ ,  $\Delta v'$  的影响使得换道动机更接近实际情况, 当  $\Delta v > 0$ , 即前车速度高于研究车辆, 这种情况下实际换道的车辆很少, 模型中  $\Delta v$  的引入减少了不必要的换道; 当  $\Delta v < 0$ , 即前车速度低于研究车辆, 在实际交通中, 研究车辆驾驶员一般会鸣笛催促前车车辆, 这里  $\Delta v$  的引入使换道动机更迫切; 当  $\Delta v' > 0$ , 即研究车辆速度大于相邻车道的后车,  $\Delta v'$  的引入使得安全条件更容易满足; 当  $\Delta v' < 0$ ,  $\Delta v'$  的引入使  $d_{n,\text{back}}$  更大时才能满足安全换道条件, 确保了换道安全.

改进模型将降雨对换道行为的影响, 通过安全距离融入到换道条件中, 使安全距离不再是一固定

值,而是随着车辆运行速度和降雨强度的变化而实时变化;同时考虑了研究车辆与相邻车道的前车速度差,以及研究车辆与相邻车道的后车速度差对换道行为的影响,使得换道条件更接近实际交通流中车辆换道时所考虑的因素.

### 4 仿真结果分析

以 3 mm/min 的降雨强度为例,取正常条件下驾驶员反应时间  $t_0 = 2$  s,由文献 [25] 可知该降雨强度下对应的能见度约为 50 m,由 (1), (2), (3) 和 (6) 式可以得出该降雨强度下不同行驶速度下车辆的附着系数(最大制动加速度)和驾驶员反应延迟时间,如表 1.

表 1 不同速度下的车辆制动加速度和反应延迟时间表  
Table 1. Braking acceleration and response delay time under different speed.

$v_n/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	20	40	60	80	100	120
$a_{\text{max}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	5.12	4.47	3.82	3.17	2.51	1.86
$t_i/\text{s}$	—	—	1.18	3.26	5.73	9.46

本文采用元胞自动机进行仿真分析,设定元胞总长度为 200 个,单个元胞长度为 5 m. 根据国外某高速公路在该降雨强度下的监测数据晴天和雨天车辆最大行驶速度可以分别近似为 6 个元胞和 5 个元胞. 在周期性边界条件下,车辆以一定的初始密度随机分布,为了更加符合交通流特性,在交通流中车辆以概率  $p = 0.1$  进行随机慢化,为了减少车辆乒乓换道现象的发生,取换道概率  $p_{\text{change}} = 0.5$ ,为了消除暂态等不稳定因素对结果的影响,舍弃前 1 万个步长的数据,对其后数据进行分析.

#### 4.1 换道率分析

根据文献 [26], 交通流密度可以分为三个等级,小于  $22 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$  为低密度,  $22\text{--}50 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$  为中密度,  $50\text{--}120 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$  为高密度区. 文中由于采用周期性边界条件进行仿真,初始密度的值即为研究道路上整个行驶过程中道路交通流的密度值. 为了分析降雨对换道率的影响,以晴天换道率为参照,通过仿真分析,得到了雨天和晴天条件下的车辆换道率随交通流密度的关系曲线,如图 2 所示.

由图 2 可以看出,车辆换道率与交通流密度的关系整体趋势是先增加后减小,最后趋于平缓且接近于零. 在低密度和高密度区晴天和雨天换道率相差很小,这是因为在低密度区车辆间的干扰很小,车辆无需换道即可保持期望速度行驶,在高密度区车辆间相互制约无法满足换道安全条件的缘故. 在中密度区雨天的换道率与晴天相比有明显下降,最大降幅约为 25%,且最大换道率对应的交通流密度雨天要低于晴天,这是因为雨天下车辆附着系数和驾驶员反应时间的变化导致车辆换道所需的安全距离增加的缘故.

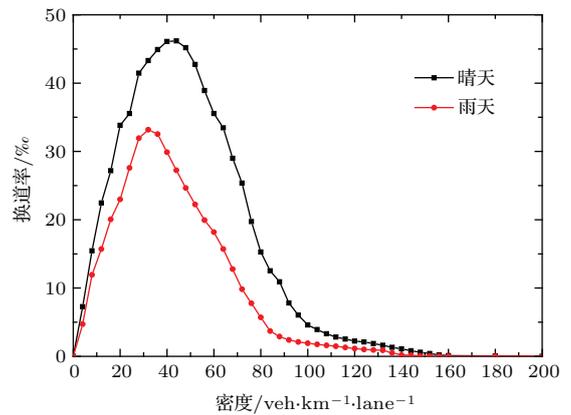


图 2 雨天和晴天的换道率与交通流密度关系  
Fig. 2. Relationship diagram between lane changing rate and traffic density on rainy and sunny day.

#### 4.2 时空图分析

根据交通流密度的分级,设研究道路上初始密度值为 0.1, 0.2 和 0.4, 对应的初始元胞数分别为 20, 40 和 80 个,因仿真道路的长度为 1 km,则对应的交通流密度分别为  $20, 40$  和  $80 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$ . 尽管每车道的车辆数相同,由于随机慢化的不确定性导致各车道上车辆行驶速度存在差异,根据元胞自动机车辆运动的规则,车辆所在元胞的位置也不尽相同,即三条车道的时空图是有差别的,文中选取其中一条车道即最左侧车道进行时空图分析.

##### 4.2.1 低密度区雨天和晴天时空图

交通密度  $K = 20 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$ , 雨天和晴天下的时空图如图 3 所示.

在低密度区,交通流处于畅通状态,车辆之间几乎没有干扰,由图 3 可以看出,雨天在低密度区对交通流的影响很弱,与晴天几乎没有区别.

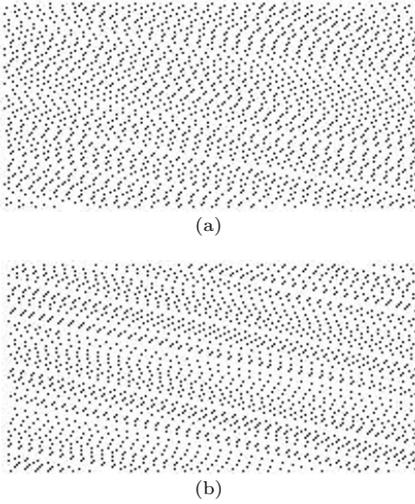


图3 低密度不同天气条件下道路时空图 (a) 雨天;  
(b) 晴天  
Fig. 3. Road space-time diagrams of different weather conditions under low density: (a) Rainy day; (b) sunny day.

#### 4.2.2 中密度区雨天和晴天时空图

交通密度  $K = 40 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$ , 雨天和晴天的时空图如图4所示.

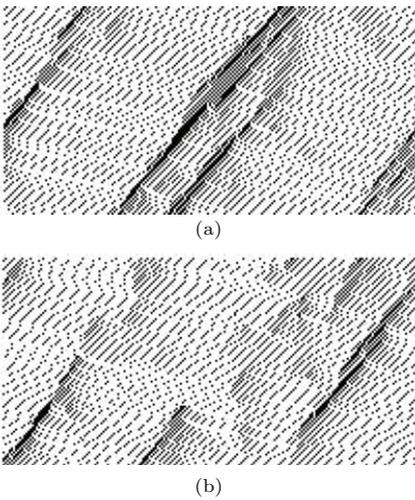


图4 中密度不同天气条件下道路时空图 (a) 雨天;  
(b) 晴天  
Fig. 4. Road space-time diagrams of different weather conditions under middle density: (a) Rainy day; (b) sunny day.

中密度区, 交通流中行驶的车辆不断增多, 前后两车之间逐渐产生影响, 加上随机慢化作用, 交通流中出现暂时性的动态拥堵现象. 从图4可以看出, 晴天交通流虽有车辆停顿, 但未出现上游交通流状态向下游传播的现象, 基本处于较畅通的行驶状态, 雨天交通流出现了上游交通状态向下游衰减传播的现象.

#### 4.2.3 高密度区雨天和晴天时空图

交通密度  $K = 80 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$ , 雨天和晴天的时空图如图5所示.

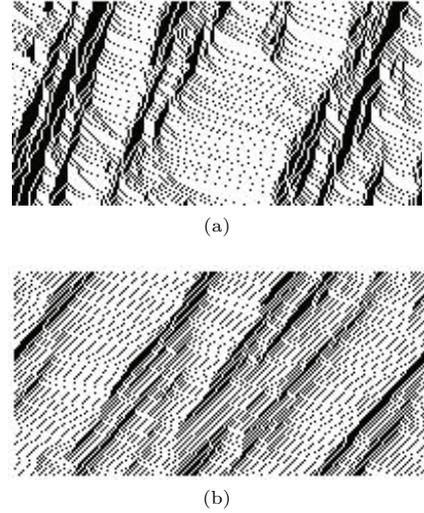


图5 高密度不同天气条件下道路时空图 (a) 雨天;  
(b) 晴天  
Fig. 5. Road space-time diagrams of different weather conditions under high density: (a) Rainy day; (b) sunny day.

在高密度交通流中, 车辆间的相互影响越来越强, 前车的行为直接对后车产生影响, 加上随机慢化的作用, 从图5可以看出无论雨天还是晴天, 均出现了拥堵的交通流. 雨天拥堵出现的频率较高、持续时间较长, 相比之下, 晴天拥堵次数明显减少、拥堵持续时间缩短.

### 4.3 车辆运行速度分析

为了进一步研究雨天和晴天下交通流特性, 采取监测系统中某一辆车的行驶情况, 得到三种密度等级下该车辆速度随时间的变化曲线.

#### 4.3.1 低密度区车辆的速度时间关系

交通密度  $K = 20 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$ , 雨天和晴天下一辆车速度随时间变化情况, 如图6所示.

从图6可以看出, 在低密度交通流中, 无论晴天和雨天车辆均保持较高的行驶速度. 由于随机慢化的作用, 车辆的速度会降为零, 但持续的时间很短, 对宏观交通流的影响很小, 车辆畅通行驶, 交通流为自由流状态, 对应于图3的时空图.

#### 4.3.2 中密度区车辆的速度时间关系

交通密度  $K = 40 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$ , 雨天和晴天下一辆车速度随时间变化情况, 如图7所示.

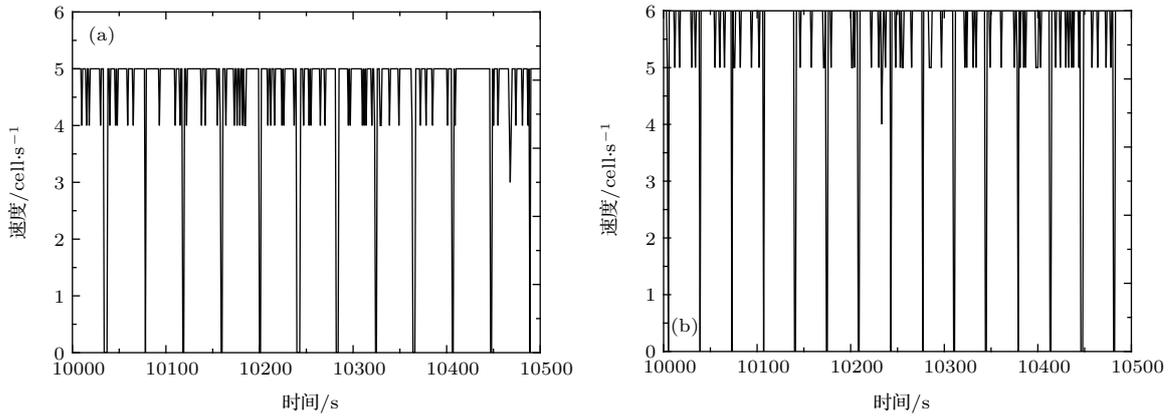


图6 车辆速度时间曲线 (a) 雨天; (b) 晴天

Fig. 6. Speed time curve relationship of one vehicle under low density: (a) Rainy day; (b) sunny day.

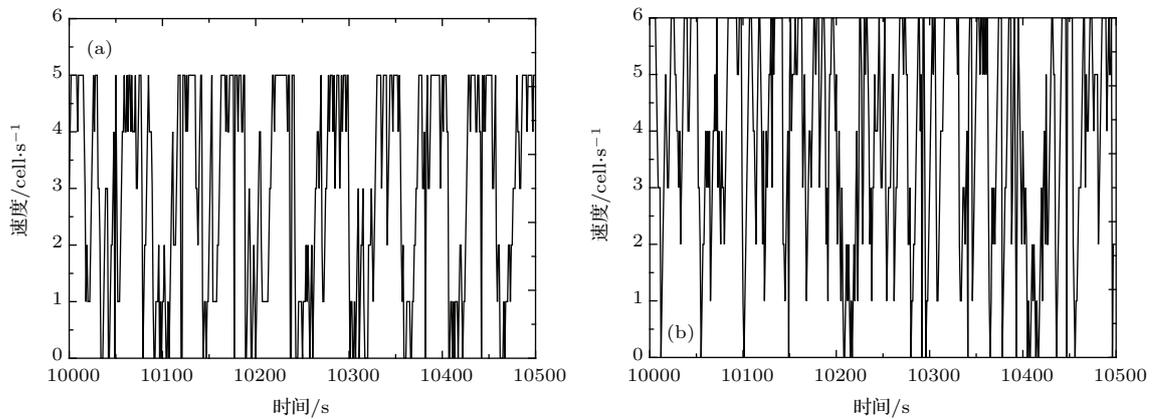


图7 车辆速度时间曲线 (a) 雨天; (b) 晴天

Fig. 7. Speed time curve relationship of one vehicle under middle density: (a) Rainy day; (b) sunny day.

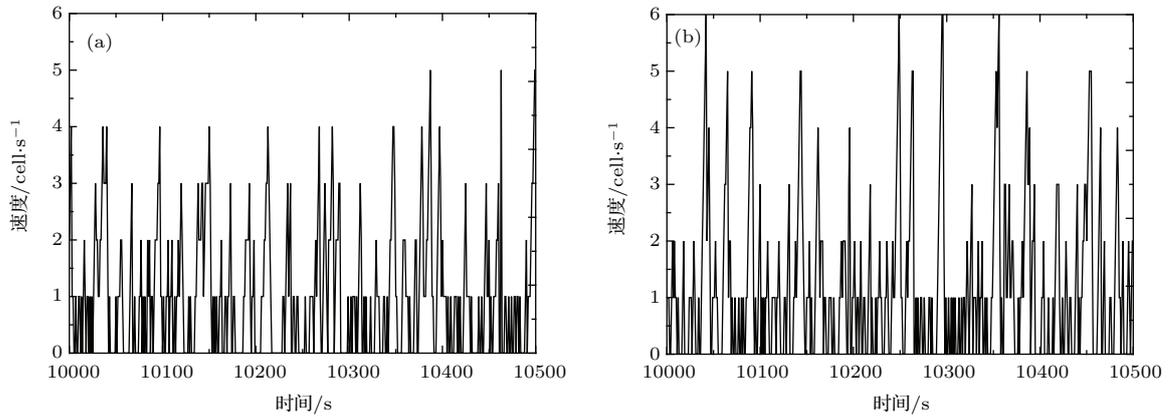


图8 车辆速度时间曲线 (a) 雨天; (b) 晴天

Fig. 8. Speed time curve relationship of one vehicle under high density: (a) Rainy day; (b) sunny day.

随着交通密度的增大, 车辆速度波动增加, 如图7所示, 高速行驶的时间仍占很大比例. 随着车辆的运行, 车辆速度时间图中会出现低速度以及速度为零的情况. 对比分析雨天和晴天的速度分布可知, 车辆在雨天下低速度、速度为零的时间

高于晴天. 由于速度为零持续时间较短, 所以形成的是动态的拥堵. 对应的时空图中出现了一些短暂的阻塞成分, 其他时间为畅通行驶的状态, 这些再现了交通流在无外因影响下形成动态拥堵流的现象.

## 4.3.3 高密度区车辆的速度时间关系

交通密度  $K = 80 \text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{lane}^{-1}$ , 雨天和晴天下一辆车速度随时间变化情况, 如图 8 所示.

当交通流处在高密度区时, 车辆可以保持高速行驶的时间很短, 绝大部分时间是保持低速度行驶以及速度为零的状态, 即出现了车辆时走时停的现象. 与晴天相比, 雨天车辆以高速行驶的时间明显减小, 且速度为零的时间明显增多, 所以雨天更容易引起拥堵, 这些与该密度下的道路时空图(图 5)相匹配.

雨天和晴天低密度、中密度和高密度的道路时空图和速度时间序列图分别再现了自由流、自由流在无外因影响下形成动态拥堵流以及阻塞流下车辆时走时停的现象. 另外, 在中高密度下雨天更容易造成交通拥堵, 这是因为雨天车辆间所必须保持的安全距离增大的缘故, 且降雨对交通流的影响随交通流密度的增加而不断增强. 这些均与实际是相符的.

## 5 结 论

通过分析雨天对交通流影响的机理, 量化分析了降雨条件下路面附着系数和驾驶员反应延迟时间, 使得安全距离随着车辆速度和降雨量的变化而变化; 在考虑速度差因素的基础上建立了雨天的换道模型. 仿真结果表明: 1) 随着密度的增加, 车辆换道率先增加后减小最后趋于平缓; 在中密度区与晴天相比, 雨天换道率明显降低了许多, 最大降幅约为 25%; 2) 改进模型再现了自由流和自由流在无外因影响下形成动态拥堵流以及阻塞流下车辆时走时停的现象; 3) 与晴天相比, 在中高密度交通流中, 雨天更易引起交通拥堵, 其道路时空图中拥堵出现的频率和持续时间均增大, 其速度时间序列图中低速度和速度为零的状态持续的时间增多.

文中仅区别了某一降雨强度下晴天和雨天车辆最大行驶速度的不同, 忽略了降雨对不同车道速度影响的差异. 另外本文是对 1 车道进行的时空图分析, 不能完全反映所有车道位置对换道行为的影响, 但其他车道对换道行为影响的分析方法都是一样的, 限于文章篇幅, 这里不再一一论述.

## 参考文献

[1] Andrey J, Mills B, Vandermolen J 2003 [http://ops.fhwa.dot.gov/weather/best\\_practices/1024x768/trans](http://ops.fhwa.dot.gov/weather/best_practices/1024x768/trans)

form\_param2.asp?xmlns=pub.xml&xmlns=publications.xml&keyname=44 [2003]

[2] Qiu L, Nixon W 2008 *Transport. Res. Rec.* **2055** 139

[3] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221

[4] Bando M, Hasebe K, Nakayama A, Shibata A, Sugiyama Y 1995 *Phys. Rev. E* **51** 1035

[5] Helbing D, Tilch B 1998 *Phys. Rev. E* **58** 133

[6] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 017101

[7] Zhang N X, Zhu H B, Lin H, Huang M Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024501 (in Chinese) [张柠溪, 祝会兵, 林亨, 黄梦圆 2015 物理学报 **64** 024501]

[8] Chowdhury D, Wolf D E, Schreckenberg M 1997 *Physica A* **235** 417

[9] Wang Y M, Zhou L S, Lü Y B 2008 *China J. Highway and Transport* **21** 89 (in Chinese) [王永明, 周磊山, 吕永波 2008 中国公路学报 **21** 89]

[10] Hua X D, Wang W, Wang H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084502 (in Chinese) [华雪东, 王玮, 王昊 2011 物理学报 **60** 084502]

[11] Wei L Y, Wang Z L, Wu R H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044501 (in Chinese) [魏丽英, 王志龙, 吴荣华 2014 物理学报 **63** 044501]

[12] He H D, Lu W Z, Dong L Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 040514

[13] Moussa N Daoudia A K, 2003 *Chin. J. Phys.* **41** 671

[14] Laval J A, Daganzo C F 2006 *Transport. Res. B* **40** 251

[15] Li X G, Jia B, Gao Z Y, Jiang R 2006 *Physica A* **367** 479

[16] Lv W, Song W G, Fang Z M, Ma J 2013 *Physica A* **392** 5143

[17] Lv W, Song W G, Fang Z M 2011 *Physica A* **390** 2303

[18] Fang Y, Chen J Z, Peng Z Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 108902

[19] Hall F L, Barrow D 1988 *Transport. Res. Rec.* **1194** 55

[20] Ibrahim A T, Hall F L 1994 *Transport. Res. Rec.* **1457** 184

[21] Zhao H T, Nie C, Li J R 2015 *J. Transport. Syst. Engineer. Inform. Technol.* **15** 87 (in Chinese) [赵韩涛, 聂滢, 李静茹 2015 交通运输系统工程与信息 **15** 87]

[22] Ji T J 2004 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [季天剑 2004 博士学位论文 (南京: 东南大学)]

[23] Ji T J, Huang X M, Liu Q Q 2004 *J. Traffic and Transport. Engineer.* **3** 10 (in Chinese) [季天剑, 黄晓明, 刘清泉 2004 交通运输工程学报 **3** 10]

[24] Jiang R, Guo Z Y, Li Z N 2011 *J. Tongji Univ.* **39** 529 (in Chinese) [蒋锐, 郭忠印, 李振楠 2011 同济大学学报 (自然科学版) **39** 529]

[25] Wang S, Wu C, Ruan Y D, Chen Q M 2013 *Electron. Measur. Technol.* **36** 16 (in Chinese) [王双, 吴聪, 阮雅端, 陈启美 2013 电子测量技术 **36** 16]

[26] Xu R M, Huang L, Yin S C, Yao D Y, Zhang H Z, Peng L H 2011 *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* Washington DC, USA, October 5-7, 2011 p822

# Study of highway lane-changing model under rain weather\*

Zhang Wei-Hua<sup>1)</sup> Yan Ran<sup>2)†</sup> Feng Zhong-Xiang<sup>1)</sup> Wang Kun<sup>1)</sup>

1) (School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

2) (School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China)

( Received 18 August 2015; revised manuscript received 1 December 2015 )

## Abstract

Rainfall decreases road adhesion coefficient and sight distance of drivers, these can easily lead to traffic accidents which affect the road traffic efficiency. To study the vehicle lane-changing behavior under rainfall conditions, the adhesion coefficient parameter and drivers' reaction delay time parameter are introduced into the safety distance model. Based on the relationship between rainfall intensity and the water film thickness as well as the relationship among the road adhesion coefficient, water film thickness, and vehicle speed, the influence of rainfall on the road adhesion coefficient is quantified. And based on the relationship between visibility distance under rainfall condition and safe distance upon stopping sight distance, the influence of rainfall on drivers' reaction delay time is quantified. Therefore, the safety distance is different under different rainfall conditions and vehicle speed, it no longer is a fixed value like in other lane-changing models by quantifying the two parameters. The improved lane-changing model is established by considering the influence of the speed difference on vehicle lane-changing behavior; the speed difference is not only existing between the research vehicle and the adjacent lane vehicle ahead, but also between the research vehicle and the adjacent lane after the car. And the safety distance model including the two parameters is embedded in the improved lane-changing model by the lane-changing rules. For the three-lane traffic, the lane-changing rules which take into consideration the safety distance and the speed difference are established respectively for each lane, and the simulation analysis is conducted using cellular automata based on the above mentioned rules. Simulation results show that in the medium density the lane-changing rates in the rain condition are significantly lower compared with sunny days, the biggest drop is about 25%. Through comparison and analysis of the space-time diagrams and the speed-time curve of one vehicle at different traffic density on rain days and sunny days, the improved model redisplay the phenomenon of free flow, free flow into dynamic blocking flow in the absence of external cause, and the phenomenon of vehicles stopping and going under blocking flow. In the medium and high densities, the rain causes more traffic congestion, and the frequency and duration of traffic congestion in space-time diagram increase accordingly; the low speed and the speed of zero state increase gradually in the speed-time curve.

**Keywords:** rain day, adhesion coefficient, reaction delay time, space-time diagram

**PACS:** 45.70.Vn, 89.40.-a

**DOI:** 10.7498/aps.65.064501

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51308177, 51178158, 51578207).

† Corresponding author. E-mail: [yanranjia@163.com](mailto:yanranjia@163.com)