

系统仿真学报  
*Journal of System Simulation*  
ISSN 1004-731X, CN 11-3092/V

## 《系统仿真学报》网络首发论文

题目: 基于元胞自动机的雾天车辆跟驰建模与仿真  
作者: 刘展宏, 杨秀建, 吴相稷, 黄震  
收稿日期: 2020-08-14  
网络首发日期: 2021-02-04  
引用格式: 刘展宏, 杨秀建, 吴相稷, 黄震. 基于元胞自动机的雾天车辆跟驰建模与仿真. 系统仿真学报.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20210204.1616.010.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于元胞自动机的雾天车辆跟驰建模与仿真

刘展宏, 杨秀建\*, 吴相稷, 黄震  
(昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 为保证雾天行车安全, 基于元胞自动机建立雾天条件下的跟驰和换道交通流微观模型。针对雾天条件下跟驰状态不稳定的现象, 引入动态随机加速进行分段建模。并通过元胞尺寸和元胞步长的细化以及添加位置更新余量来提高模拟精度。最后得到了速度、车辆离散度随时间变化的关系曲线以及速密图。研究表明: 中雾车速波动很大; 浓雾车速离散度较大; 换道次数随雾天浓度增大而降低, 与实际交通特征相吻合, 因此该模型能部分地反映雾天行车的交通流微观特性和真实体现雾天车辆跟驰行为。

**关键词:** 交通工程; 雾天跟驰; 元胞自动机; 交通流; 计算机仿真

中图分类号: U495

文献标志码: A

## Modeling and Simulation of Car Following in Fog Based on Cellular Automata

LIU Zhanhong, YANG Xiujian\*, WU Xiangji, HUANG Zhen

( Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China)

**Abstract:** In order to ensure driving safety in foggy days, a microscopic model of car following and lane changing traffic flow is established based on cellular automata. In view of the instability of car following state in foggy weather, dynamic random acceleration is introduced to segment modeling. The simulation accuracy is improved by refining cell size and cell step size and adding position update allowance. Finally, the relationship curves of speed and vehicle dispersion with time and the speed density diagram are obtained. The results show that: the vehicle speed fluctuates greatly in medium fog; the dispersion of vehicle speed in fog is large; the number of lane changing decreases with the increase of fog concentration, which is consistent with the actual traffic characteristics. Therefore, the model can partly reflect the microscopic characteristics of traffic flow, and more truly reflect the car following behavior in fog.

**Keywords:** traffic engineering; car following in fog; cellular automata; traffic flow; computer simulation

## 引言

我国许多地方因雾霾天气引发的交通事故屡见不鲜。例如, 2017 年 11 月 15 日 G63 高速合

肥方向发生连环撞车事故, 死伤 39 人<sup>[1]</sup>。调查显示, 高速公路交通事故中约有 22%~45% 与雾、雨等天气相关<sup>[2]</sup>。雾天行车可能导致驾驶员产生异常驾驶行为: 一方面雾天会影响能见度从而影响驾驶员的视线, 增加驾驶员心理负担; 另一方面会对相邻车道产生干扰, 降低道路通行能力, 对整个道路交通系统运行稳定性产生一定的干扰<sup>[3]</sup>。研究表明, 提高雾天行车安全和交通利用率, 可有效改善现有雾天的交通拥堵现象。揭示雾天交通拥堵演变机理是提升交通管控效率的前提



收稿日期: 2020-08-14 修回日期: 2021-1-4  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51465023)  
作者简介: 刘展宏(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车系统动力学与智能交通  
E-mail: 602419619@qq.com; 通信作者: 杨秀建  
(1980-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为汽车系统动力学与智能交通。E-mail: yangxiujian2013@163.com

[4], 建立一个相对完善的雾天车辆跟驰模型是交通拥堵演变研究的重点。

目前, 对于基本路段微观交通流模型的研究主要有车辆跟驰模型 (Car-following model) [5] 及换道模型 (Lane-change model) [6], 跟驰模型是换道模型的基础, 研究方法有利用驾驶模拟器 [7]、理论推演 [8] 和元胞自动机模型 (Cellular automation, CA) [9-10]。其中, 元胞自动机凭借其规则简单、计算速度快的特点并且可以很好的模拟人、车、路、环境之间的相互影响和关系, 在微观交通流建模和理论研究中得到较为广泛的应用 [11-12]。最具代表性的经典模型之一的是 1992 年 Nagel 和 Schreckenberg 提出的 NaSch [13] (下文用 NS 表示) 模型。不过, NS 模型难以刻画特殊交通环境下车辆的异常行驶行为、反映实际交通物理特性。在此基础上, 国内外学者考虑不同驾驶行为与场景, 从城市道路、高速道路、机非混合、不良环境道路等方面出发, 提出各种改进模型, 例如, 改进加速度规则的 FI 模型 [14], 改变确定减速度的和随机减速度的顺序的敏感驾驶模型 [15], 引入慢启动规则的 VDR 模型 [16], TT 模型 [17], 以及研究冰雪环境下的 CA 模型 [18] 等。

上述研究针对不同的驾驶环境和驾驶行为, 完善和修正交通流模型, 丰富了交通流模型的研究。针对雾天情况, 国内外学者展开并取得了丰硕的研究成果。例如, 刘兆惠 [3] 建立了不同雾浓度等级下的安全跟驰模型, 得到了理论安全距离值。于乐美 [19] 构建了心理的雾天交通流模型。Mohammad 等 [20] 对工程学模型和心理学模型进行了较为全面的比较。Rui Ni 等 [21] 研究雾天能见度低时, 发现年龄差异会导致跟车行为的不同, 得到高龄驾驶人在高雾密度和中等车速下可能面临更大的碰撞风险。高坤等 [22] 研究低能见度下对不同跟驰状态的影响, 其结论表明雾天的加减速均异于晴天, 且平稳跟驰状态相较于晴天更敏感。时恒 [23] 利用 8 自由度的驾驶模拟器对雾天下的跟驰行为进行了分析, 得到雾霾天气驾驶员谨

慎驾驶会导致延迟时距和离散性增大。赵晓华 [24] 研究发现不同等级的不良天气下车速、车头时距、反应时间、车辆延迟启动均存在较大的差异, 且在低速跟驰过程中车辆稳定性和车距控制能力下降, 伴随天气恶劣程度增加, 交通系统顺畅性呈减小趋势。不过, 上述研究大多采用工程模型进行分析, 且大多研究对实验条件较苛刻, 较少考虑心理因素可能对车辆跟驰状态产生的不稳定影响。本文针对雾天情况下的车辆的不稳定跟驰行为, 考虑雾天不同能见度对车辆跟驰行为的影响, 利用元胞自动机在特殊交通环境建模的优势, 建立高速公路雾天车辆跟驰行为模型。

具体思路为: 基于经典 NS 模型, 通过细化其元胞尺寸和步长; 引入 Gipps 安全间距模型 [25] 和动态随机慢化规则 [26]; 针对驾驶员在雾天的谨慎行驶的特性, 改进以往加速过程中的贪婪机制, 采用分段建模的思想, 描述车辆加速行为的随机性; 最后, 通过数值模拟得到不同雾浓度下车辆的速度、密度等数据, 分析不同雾浓度下对交通流的影响, 为高速公路雾天管控策略奠定基础。

## 1 模型构建

### 1.1 NS 模型的演化规则和不足

经典的 NS 模型, 将车辆的运动行为分成了 4 个步骤: (1) 加速规则,  $v_n = \min(v_n + 1, v_{\max})$ ; 反映车辆能以最大的期望速度行驶, 车速加 1 和最大速度作比较取最小值。不超过规定的最大车速  $v_{\max}$  加速行驶。(2) 确定性减速规则,  $v_n = \min(v_n, d_n)$ ; 为了避免碰撞而进行确定性减速, 取当前速度和间距的最小值。(3) 随机慢化,  $v_n = \max(v_n - 1, d_n)$ ; 引入一个随机慢化概率  $p_{\text{slow}}$  体现实际交通中的不确定驾驶行为, 以  $p_{\text{slow}}$  的概率让车随机减速。(4) 位置更新,  $x_n = x_n + v_n$ ; 车辆位置的更新。这里  $x_n$ ,  $v_n$  分别表示第  $n$  辆车的速度和位置,  $d_n = x_{n+1} - x_n - l_{\text{car}}$  表示第  $n$  辆车和

$n+1$  辆车之间的距离,  $l_{car}$  表示车身长度,  $v_{max}$  表示车辆的最高速度。其中, 车辆长度一般为 7.5 m, 更新步长为 1 s。可以看出经典模型存在以下问题: ①模型尺度方面。经典模型尺度较为粗糙, 难以表征特殊交通环境下车辆复杂的跟驰行为; ②模型规则方面。经典模型采用贪婪加速机制, 同时, 随机慢化概率大多取的固定的经验值, 难以描述雾天跟驰行为的不确定性。考虑到经典模型的不足, 本文细化元胞尺寸和更新步长, 引入分段建模的思想, 将加速度与随机慢化值设置为动态变量, 建立雾天跟驰模型。

## 1.2 考虑雾天条件下的车辆跟驰行为模型

### 1.2.1 模型框架

本文的雾天跟驰模型通过引入 NaSch 模型规则, 并细化其元胞尺寸与更新步长, 可为雾天跟驰行为精细化建模提供有力条件。跟驰行为过程主要为, 车辆首先判断是否满足加速条件, 若满足, 则逐渐加速至期望速度或匀速跟车; 若不满足, 减速跟车。由于雾天行驶独特的交通特性根据不同的间距采用不同的加速方式, 进行分段建模。经典驾驶模型中所有的驾驶员都追求快速行驶的心理, 但事实上一味的追求快速行驶并不是很好的策略。实际驾驶中驾驶员加速或者减速的决策是随机的, 特别是车辆距离比较近时, 车辆加速概率反而偏小。因此, 本文考虑了雾天条件下前车间距和加速的关系, 制定了不同车辆间距的车辆跟驰行为规则, 据此构建了复杂雾天的元胞自动机交通流模型。该模型具体决策结构如图 1 所示, 雾天的跟驰结构反映各因素之间的逻辑关系, 本文采用双层准则体系结构, 上层是跟驰间距条件, 下层是决策方案。

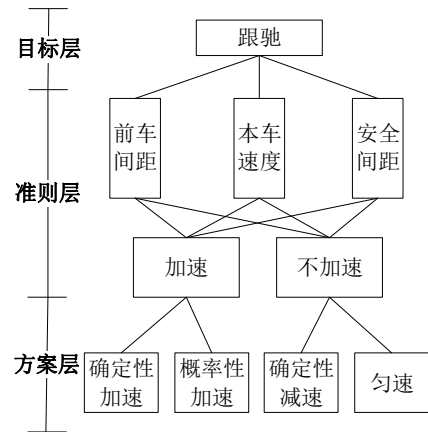


图 1 决策结构

Fig.1 Decision structure

如图 2 所示, 根据与前车的间距和安全间距做比较, 计算并判断该采用何种跟驰方式。每个时间步  $t \rightarrow t + \Delta t$  ( $\Delta t > 0$ ), 所有车辆位置和状态按照下面的规则并更新。

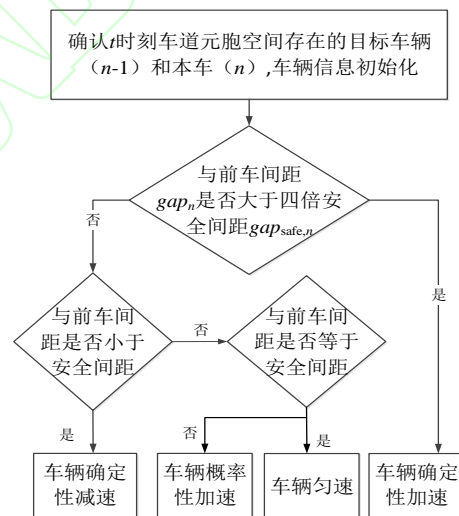


图 2 决策方案

Fig.2 Decision making scheme

具体决策方案规则如下:

(1) 当前车辆与前车的间距大于 4 倍安全间距时候, 为保证更快的通行速度, 车辆确定性加速。

(2) 当前车辆与前车的间距小于 4 倍安全间距时候, 同时大于安全间距的时候, 车辆以一定概率随机加速。



(3) 当前车辆与前车的间距等于安全间距的时候, 车辆匀速行驶。

(4) 当前车辆与前车的间距小于安全间距的时候, 车辆确定性减速。

### 1.2.2 安全间距、随机加速与随机慢化变量计算

元胞变量设置, 设:  $cellsize$  为元胞尺寸;  $v_{\max}$  为最大速度;  $carsize$  为元胞量纲下的车身长度;  $acc$  与  $dec$  是元胞量纲下的车的加速度和减速度;  $front-acc$  和  $front-dec$  是元胞量纲下前车的加速度和减速度。  $gap_n(t)$  是第  $n$  辆车的前车间距, 其取值是第  $n$  辆车的车头和第  $n-1$  辆车车尾的间距 ( $gap_n(t)=x_{n+1}-x_n-carsize$ )。实际变量设置, 设:  $\Delta t$

为更新时间步长值; 真实道路长为  $rlength$ ; 车辆长为  $rcarsize$ ;  $racc$  和  $rdec$  是车辆实际最大加速度和减速度。  $\alpha$  是雾天条件下的速度因子。  $\beta$  是雾天条件下的间距因子。细化处理可有效提升模拟精度、改善系统流量较大的情况<sup>[27]</sup>。

安全间距指前车紧急刹车防止与其追尾的车辆之间所必须的保持的一个安全距离<sup>[28]</sup>, 它与驾驶人员的反应时间和车辆自身制动性以及前车的制动性都息息相关。为此本文引入了邱小平所研究基于安全间距的元胞自动机模型<sup>[28]</sup>其安全间距示意图如图 3 所示。根据 Gipps 安全距离规则<sup>[25]</sup>, 确定安全距离  $gap_{safe,n}$  和安全速度  $v_{safe,n}$

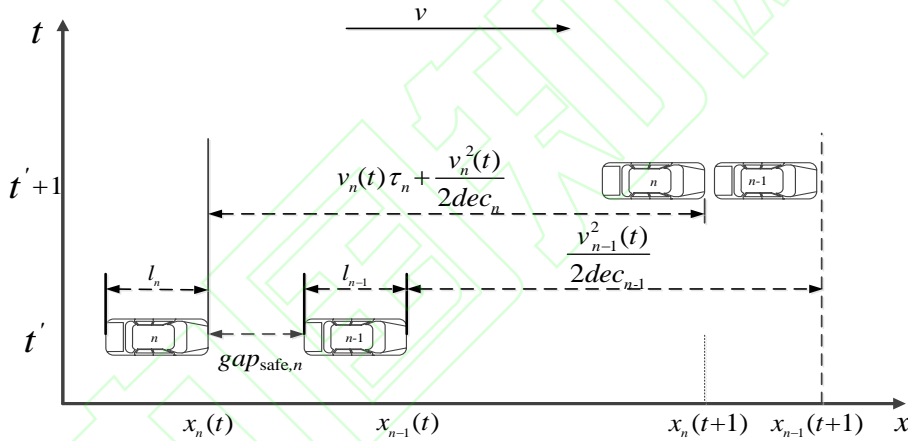


图 3 安全间距示意图

Fig.3 Schematic diagram of safety distance

根据 Gipps 安全距离规则, 得到最小间距约束公式<sup>[28]</sup>为:

$$x_{n-1}(t) + \frac{v_{n-1}^2(t)}{2dec_{n-1}} - l_{n-1} \geq x_n(t) + v_n(t)\tau_n + \frac{v_n^2(t)}{2dec_n} \quad (1)$$

$$gap_{safe,n} = x_{n-1}(t) - x_n(t) - l_{n-1} = \frac{v_n^2(t)}{2dec_n} - \frac{v_{n-1}^2(t)}{2dec_{n-1}} + \tau_n v(t) \quad (2)$$

$$v_{safe,n}(t) = -dec_n \tau_n + \sqrt{dec_n \{2[x_{n-1}(t) - x_n(t) - l_{n-1}] - \tau_n v_n(t) + \frac{v_{n-1}^2(t)}{dec_{n-1}}\} + dec_n^2 \tau_n^2} \quad (3)$$

式中  $gap_{safe,n}$  是第  $n$  辆车与前车驾驶时所需的安全距离;  $v_{safe,n}$  是第  $n$  辆车的不与前车相碰的安全速度;  $v_n(t)$  和  $v_{n-1}(t)$  是第  $n$  辆车与前车  $t$  时刻的速度;  $x_n(t)$  和  $x_{n-1}(t)$  是第  $n$  辆车与前车  $t$  时刻的位置;  $\tau_n$  是第  $n$  辆车驾驶员的反应时间;  $dec_n$  和  $dec_{n-1}$

分别为本车和前车最大减速度。

车辆在具备了加速条件后, 随着车距的减小, 为了安全行驶加速概率随之减小。考虑到这种行为特征, 加速更新规则应该是确定性和随机性的组合体。为了在模型中表现出这种行为, 本

文借鉴了 Logistic 函数<sup>[29]</sup>, 构造基于安全间距的综合决策函数为:

$$g(y) = \frac{2}{1 + e^{-\alpha y}} - 1 \quad (4)$$

$$y_n = (gap_n - gap_{safe,n})^2 \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  是形状参数, 这里取值 0.6, 图 4 是  $\alpha=0.6$  的  $g(y)$  为正的函数曲线,  $y$  表示的前车间距与安全间距之差的平方。

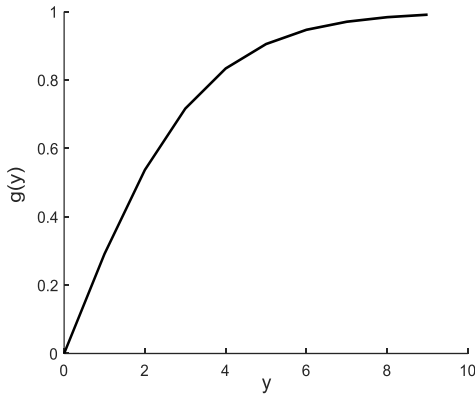


图 4  $g(y)$  为正的函数曲线,  $\alpha=0.6$   
Fig.4  $g(y)$  is a positive function curve when  $\alpha=0.6$

大多数经典模型中, 随机慢化概率都是一个固定值, 但事实慢化概率是模拟一个驾驶员的一些不确定的驾驶行为, 并非是一个固定值而是无规律可循的。所以在不同情况下应该有不同的慢化概率。本文考虑车流密度和速度对慢化的实时影响, 引入一种可以不是用固定不变的值的去描述所有车辆的随机慢化<sup>[26]</sup>, 而是用实际道路情况去决定慢化概率。当车流密度较大, 车辆间的间距较小, 其车辆行驶独立性较小, 慢化概率较大, 因为此时刹车的可能性比较大。相反, 当车流密度较小, 车辆间的间距较大, 慢化概率较小。同时车辆速度较大时, 容易刹车慢化概率大。相反, 车辆速度较小时, 刹车机率小慢化概率小。于是假定随机慢化  $p_{slow}$  概率与密度  $k$  和速度  $v_n$  存在如下关系<sup>[26]</sup>:

$$p_{slow} = \frac{k^\delta v_n}{v_{max}} \quad (6)$$

其中,  $\delta$  是可调的指数参数, 取值  $0 \leq \delta \leq 1$ , 以保证  $p_{slow}$  不超过 1。

在随机慢化概率中调整  $\delta$  的值可以改变  $p_{slow}$  的值, 但是这样会得出一系列的连续值这样不方便仿真计算, 于是我们对本文的  $p_{slow}$  做进一步的调整。

$$p_{slow} = \begin{cases} p_3, & k, v \text{ 都较大时} \\ p_1, & k, v \text{ 都较小时} \\ p_2, & \text{其余情况} \end{cases} \quad (7)$$

最后取多组实验值和参考相关文献[26], 综合得出  $p_1=0.1$ ,  $p_2=0.3$ ,  $p_3=0.75$ 。

### 1.2.3 车辆跟驰行为建模

#### (1) 元胞精细化设置

由于传统的元胞尺度较为粗糙, 本文考虑到取整函数对位移累计可能带来的“迟滞”效应, 为了更加真实体现车辆之间的相对运动, 本文通过对位移部分小数点的影响累计更新, 构建细化雾天的元胞自动机模型。本文对速度的计算中允许小数的存在, 在位置更新过程中, 对新增位移进行两部分的处理, 对整数部分进行更新, 对其小数部分通过引入位置辅助余量进行存储和累加更新, 从而保证仿真结果的精确性<sup>[28]</sup>。具体计算方法如下:

辅助余量更新:

$$Y_n(t + \Delta t) = Y_n(t + \Delta t) - \text{fix}(Y_n(t + \Delta t))$$

$$Y_n(t + \Delta t) = Y_n(t) + v_n(t) \times \Delta t$$

位置更新:

$$\text{IF } Y_n(t + \Delta t) \geq 1$$

$$\text{THEN } x_n(t + \Delta t) = x_n(t) + \text{fix}(Y_n(t + \Delta t))$$

$$Y_n(t + \Delta t) = Y_n(t + \Delta t) - \text{fix}(Y_n(t + \Delta t))$$

式中,  $Y_n(t)$  为  $t$  时刻第  $n$  辆车的位置更新的辅助余量 (其初始值为 0)。

#### (2) 加速行为建模

当车辆  $n$  还未达到限值  $v_{max}$ , 且加速后不会追尾前车时, 车辆进行加速操作, 具体加速情况分为两类如图 5 图所示。

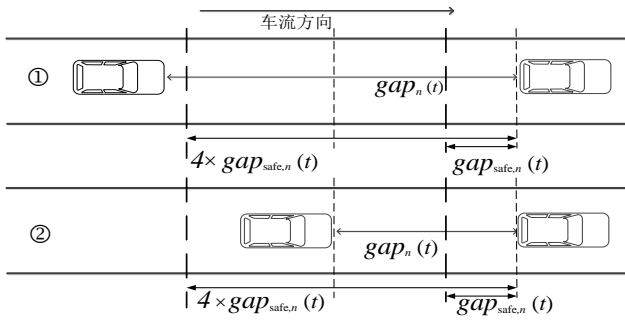


图 5 加速行为建模示意图

Fig.5 Accelerated behavior modeling diagram

加速规则如下：

根据交通法规得出以 4 倍安全间距为分段点，如图 5 情况①当离前车间距很远的时候，大于四倍安全间距时驾驶员驾驶车辆进行确定性加速以最大期望的速度行驶，随着雾天的能见度不同，以不同的最大期望速度行驶。

IF  $gap_n > 4 \times gap_{safe,n}$ ,  $gap_n > v_n(t + \Delta t)$   
 THEN  $v_n(t + \Delta t) = \min\{v_n(t) + acc \times \Delta t, 1.5 \times \alpha_i \times v_{max} - 0.5 \times \alpha_i^2 \times v_{max}, v_{safe,n}(t), gap_n(t)\}$

如图 5 情况②距离前车的间距满足加速条件，距离大于安全间距同时又小于四倍安全间距时，驾驶员在雾天为了谨慎驾驶所以选择性随机加速而非确定性加速。

令  $p = g(y_n) \ \& \ y_n(t) \geq 0$ ,

IF  $gap_{safe,n} \leq gap_n \leq 4 \times gap_{safe,n}$  车辆以概率  $p$  随机加速。

THEN  $v_n(t + \Delta t) = \min\{v_n(t) + acc \times \Delta t, 1.5 \times \alpha_i \times v_{max} - 0.5 \times \alpha_i^2 \times v_{max}, v_{safe,n}(t), gap_n(t)\}$

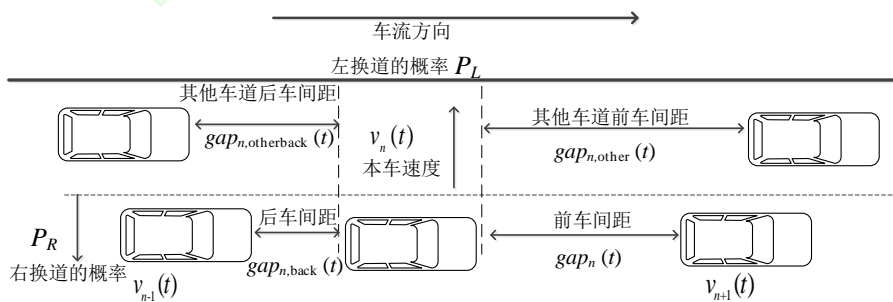


图 6 车辆换道行为建模示意

Fig. 6 vehicle lane changing behavior modeling

### (3) 匀速行为建模

当与前车的距离等于安全间距时，在保证安全的情况下，车辆匀速行驶。或已达到所期望的速度，在保证安全的前提下车辆以最大速度匀速行驶。

IF  $gap_n = gap_{safe,n}$

THEN

$v_n(t + \Delta t) = \min\{v_n(t), gap_n(t), \alpha_i \times v_{max}\}$

### (4) 减速行为建模

减速行为分为两种情况一种是为了避免与前方车辆相撞，车辆进行确定性减速。另外一种情况是为了描述交通中的不确定驾驶行为，以  $p_{slow}$  的概率让车随机减速。

①确定性减速：

IF  $gap_n < gap_{safe,n}$ ,  $gap_n < v_n(t + \Delta t)$

THEN

$v_n(t + \Delta t) = \max\{\min(v_{safe,n}(t)), \beta_i \times gap_n(t), 0\}$

②随机慢化：

$v_n(t + \Delta t) = \max\{v_n(t + \Delta t) - dec \times \Delta t, 0\}$  引入

一个随机慢化概率  $p_{slow}$  体现实际交通中的不确定驾驶行为，以  $p_{slow}$  的概率让车随机减速。

## 1.3 考虑雾天条件下的换道行为模型

模型主要根据车辆行驶过程中的跟驰行为和换道行为，在微观尺度上考虑了目标车辆与周边紧邻车辆的间距，本车速度等综合因素，车辆运行时需判断的速度、间距变量如图 6 所示。

由模型的框架可知，车辆跟驰的时候，主要

包括加速、减速、匀速，仅需要考虑本车速度和

前车间距以及安全间距等因素；车辆换道时候需要综合考虑本车与相邻车车辆的速度和间距。以右车道为例，仅本车、正前车、左前车、左后车的速度与间距是否满足换道的条件。

换道规则如下：

(1)  $gap_n < \min(v_n(t) + acc \times \Delta t, \alpha_i \times v_{\max}, v_{\text{safe},n}(t), gap_n(t))$ ；表示当前车  $n$  受阻于前车  $n-1$ ，有换道的动机。

(2)  $gap_{n,other} > \min(v_{n,other}(t) + acc \times \Delta t, \alpha_i \times v_{\max}, v_{\text{safe},n}(t), gap_n(t))$ ；表示相邻车道有足够的换道空间，提供给当前车换道。 $gap_{n,other}$  表示相邻车道离当前车的间距。

(3)  $gap_{n,back} > \min(v_{n,other}(t) + acc \times \Delta t, \alpha_i \times v_{\max}, v_{\text{safe},n}(t), gap_n(t))$ ；防止换道后被后方车辆追尾， $gap_{n,back}$  表示当前车与相邻车道后方车辆间距

(4)  $rand() > p_{\text{change}}$ ， $p_{\text{change}}$  表示换道概率，包含向左换道概率  $P_L$  和向右换道概率  $P_R$ ， $rand()$  是一个 0~1 之间的一个随机数，满足上述所有条件当前车  $n$  以概率  $p_{\text{change}}$  实施换道。

## 2 模型参数标定

我国限速和车距标准<sup>[30]</sup>见表 1。 $\alpha$  为雾天条件下的速度因子，取值  $\alpha \in (0,1)$ ，计算公式：

$$\alpha_i = \frac{v_{i,\max}}{v_{\max}} \quad (8)$$

式中， $v_{i,\max}$  是不同能见度下的限速值， $v_{\max}$  晴天条件下的最大限速值，本文晴天最大限速值取 17cell/s，约 122 km/h。通过表 1 我国雾天限速标准以及晴天的道路限速，对雾天速度进行折算。可以知道我国不同雾天程度下的速度因子。薄雾、中雾、浓雾下的  $\alpha$  取值分别为 0.83、0.50、0.16。

$\beta$  雾天条件下的间距因子，取值  $\alpha \in (0,1)$ ，计算公式：

$$\beta_i = \frac{l_{i,\min}}{l_{\min}} \quad (9)$$

式中， $l_{i,\min}$  是不同能见度下的车距， $l_{\min}$  晴天条件

下的最小间距，本文晴天最小间距值取 104cell，为 208 m。通过表 1 我国雾天最小车距标准，以及晴天的最小安全跟车间距进行折算，可以得出我国不同雾天程度下的间距因子。薄雾、中雾、浓雾  $\beta$  下的取值分别为：0.71、0.47、0.24。

表 1 低能见度时中国高速公路交通管理规定  
Table.1 national highway traffic management regulations in case of low visibility

定义	能见度(m)	限速(km/h)	车距(m)
无雾	>1000	—	—
小雾	500~1000	100	> 150
轻雾	200~500	80	> 150
中雾	100~200	60	> 100
大雾	50~100	40	> 50
浓雾	<50	20	—

## 3 数值模拟和分析

设置车道长  $rlength$  为 7.5 km； $cellsize=2$  m； $rcarsize$  为 6 m； $v_{\max}=17\text{cell/s}$ ，对应 122 km/h；加速度  $acc$  和减速度  $dec$  均取  $3\text{cell/s}^2$  对应  $6\text{ m/s}^2$ ；晴天最小安全间距取 104cell，为 208 m； $\Delta t=0.5$  s。为尽量消除暂态对结果的影响，运行 9000 时间步，取稳定时步做相应分析。数值模拟是开放性边界，取单车道进行分析。

### 3.1 速度特性分析

通过 Matlab 进行仿真得到不同雾浓度下的速度和时步关系，晴天、小雾、中雾、浓雾的所有时间步数下的整体平均速度，分别是：116.4 km/h、94.4 km/h、51.3 km/h、24.7 km/h。由图 7 可知雾的浓度不同，速度差异也很大。随着雾浓度的增大，车速明显下降。



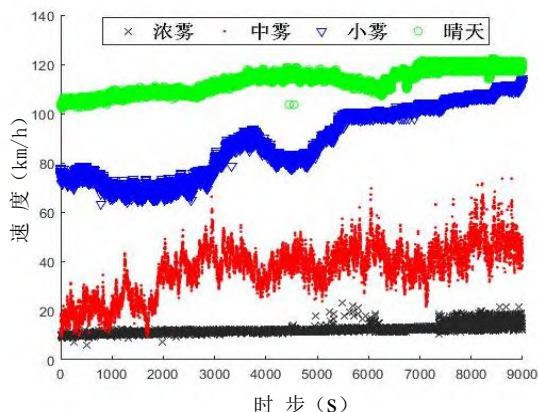


图7 单车道下不同雾浓度下速度随时间演化过程  
Fig. 7 Evolution process of velocity with time under different fog concentration in single lane

正常天气情况下，道路驾驶条件良好，能见度高，不受雾天的影响。车辆行驶车速较高，整体的平均速度较大，驾驶员以自己期望的速度驾驶。小雾天气时，能见度不如晴天良好，路面有所湿滑，对行车产生一定的影响。虽然有减速，但是整体还是维持在一个较高的车速，并逐渐趋于一个稳定的行车速度；中雾天气和浓雾天气的能见度已经对行车产生一定的影响。中雾天车速波动较大，因为此时车速较高，由于能见度的问题和路面有所湿滑导致行车环境复杂，驾驶员容易加减速导致车速有较大的波动；浓雾天气下的行车速度相较晴天和小雾天气，瞬间下降了许多。此时能见度低，驾驶员会倾向于谨慎驾驶。

因此车速低，车速的波动相对较小。并且正如模型所体现的那样，雾天等不良天气行车，整个交通系统是一个确定性和随机性的结合体。因为整个交通系统要相互协调应对不良的驾驶环境，让其平稳进行。由此可见该模型确实能较好的模拟雾天行车的现象和特征。

由于雾天跟驰速度实测数据较少，本文采用驾驶模拟的数据作为实测数据，定量分析速度与雾天浓度的关系特性，进行对比。驾驶模式器广泛应用于研究复杂交通环境下的驾驶员驾驶行为特性，本文引证文献[31]数据是不同能见度和期望速度下的雾天下车辆运行速度特性，与本文模拟的场景基本一致。因此，该数据具有有效性和可靠性。

表2展示了实测数据和本文模型趋于平稳后的速度对比情况，可以看出：(1)表中速度值随雾天浓度增大而减小，符合实际交通情况；(2)对于平均速度的误差分析，优劣排序依次是晴天、小雾、浓雾、中雾，且误差都在允许范围内。其中，中雾误差略大（14.36%）原因是模型设置的动态随机加速和慢化导致车辆偏向谨慎驾驶，导致速度低于实测速度。总体上，经分段建模和细化后，可较好反映不同浓度下的速度差异，刻画雾天行车的速度特性。

表2 车辆平均速度对比  
Table.2 Vehicle average speed comparison

天气状况及限速值/(km h <sup>-1</sup> )	晴天 120	小雾 100	中雾 60	浓雾 20
实测平均速度/(km h <sup>-1</sup> )	115.7	92.5	59.9	27.0
本文平均速度/(km h <sup>-1</sup> )	116.4	94.4	51.3	24.7
平均值误差	0.57%	2.05%	14.36%	8.51%

### 3.2 速度与密度关系

图8是不同雾浓度下的密度-速度曲线，随着密度的增大，整体的速度都呈现下降的趋势，从图我们可以看出晴天和小雾天气下的速度密度关系曲线十分相似。在高速路上车辆行驶，遇到密度较大时，行驶空间被压缩，车辆的行驶空间

被前后车辆占据，所以速度减小。特别是密度较小时候，速度随密度增大而减小的趋势也最为明显，单位密度下的速度变化率也相比中雾和浓雾表现的更敏感。但是上述现象在浓雾和中雾天气下并不明显，特别是低密度段（约0~23veh/km）。因为车辆的最大行驶安全速度比较低和天气因

素导致驾驶员谨慎驾驶天气原因占据的主导因素。所以速度此时并不会随着密度的变化产生很明显的效果。中雾天气下的交通在中等密度阶段（约 23~55veh/km）中雾的曲线和小雾、晴天基本重合了，因为此时的密度占据了主导因素，道路处于临界状态。此时的交通流为高密度、低速度的拥挤状态。但是观察浓雾天气的交通流现象我们能发现，浓雾天气下的速度几乎都没有太大的波动。因为浓雾天气下的最大安全行驶速度较低被限制，天气因素的影响作用大于了密度因素。

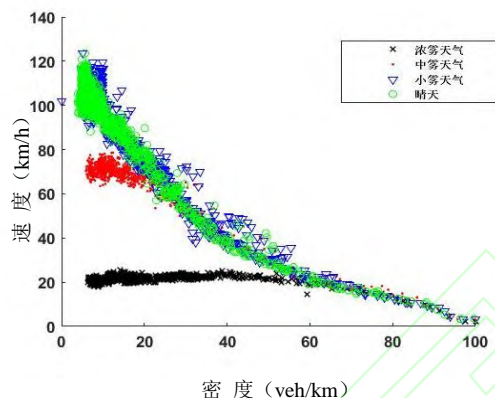


图 8 不同雾浓度下密度-速度关系  
Fig.8 Density-velocity versus fog concentrations

### 3.3 时步与车速离散度关系

图 9 是不同天气下的车速离散度（Speed Dispersion, SD）和时步关系曲线，车速离散性是一个描述交通流的稳定性的一个重要特征。反映了车辆之间的相互作用和交通流的为微观动态特性。本文采用平均速差 SD 刻画车速离散性，车速离散度（SD）指一条道路上各车辆之间的平均车速差与平均车速的比值，比值越大，车速分布越离散<sup>[32]</sup>。

从图 9 我们可以整体比较看出：晴天、小雾天气时候车速分布波动并不大，车速离散度主要分布 0.05 以下车辆间的相互作用可以忽略不计，中雾离散度相对浓雾也较小，但相对于晴天和小雾天气分布高于两者。浓雾情况我们可以明显的

看出分布比较广，且有些许杂乱的较大的值，整体离散度结论与文献[33]的研究基本一致。说明雾天时候实际交通系统跟驰状态并不稳定，浓雾天气的跟驰状态尤其不稳定。说明车辆在行驶过程中遇到的阻碍情况更频繁，造成车间距偏大，阻碍交通流量的增加，使得整体平均速度下降。

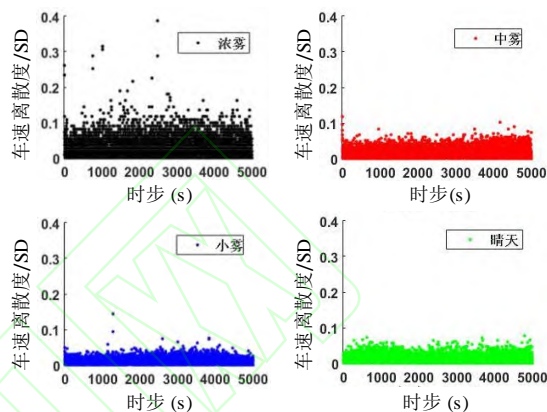


图 9 时步与车速离散度关系图  
Fig. 9 Relation between time step and vehicle speed dispersion

### 3.4 天气状况与换道次数关系

图 10 是不同雾浓度下的车辆换道次数，从图 10 我们可以看到不同雾浓度情况下的车辆换道次数差异很大，晴天的车辆换到次数明显高于其他情况，而浓雾天气是最小的。也侧面印证了雾天驾驶行为与正常驾驶行为确实有很大的差异性。

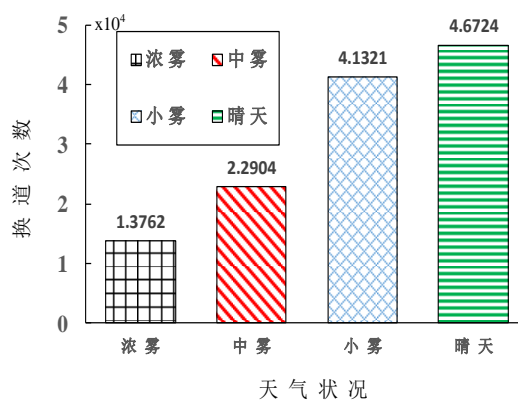


图 10 不同雾浓度下换道次数  
Fig. 10 Lane change number versus fog concentration

### 3.5 模型对比

为进一步对模型进行验证, 本文采用了两个经典的 VDR 和 NS 模型进行对比, 如表 3 所示。

表 3 展示的是不同模型的车速对比情况, 可以看出: (1) 模型 I~模型 III 平均误差逐渐增加, 说明本文模型的分段建模可有效提升仿真的准确性; (2) 模型 I~模型 III 晴天和小雾天气仿真效果相近; 模型 III 的仿真效果优于模型 I 和模型

II, 但随着雾浓度的增加, 模型 III 的平均速度误差逐渐增大, 至浓雾状况时, 模型 III 的平均速度误差达 41.48%, 本文模型显著优于模型 III, 说明 NS 模型不太适用于雾天复杂环境的交通模拟; (3) 从平均误差方面来看, 模型 I 和模型 II 平均误差相对模型 III 较小, 且模型 II 的误差逐渐增大, 浓雾天气的误差比模型 I 大, 说明模型 I 可更好反映浓雾天气下车速运行情况。

表 3 模型平均速度对比  
Table.3 Comparison of model average speed

天气 状况	实测平均车速 $/(km\ h^{-1})$	本文模型 (I)		VDR 模型 (II)		NS 模型 (III)	
		$\bar{v}_n/(km\ h^{-1})$	误差	$\bar{v}_n/(km\ h^{-1})$	误差	$\bar{v}_n/(km\ h^{-1})$	误差
晴天	115.7	116.4	0.57%	117.3	1.38%	116.6	0.77%
小雾	92.5	94.4	2.05%	94.6	2.27%	92.3	0.21%
中雾	59.9	51.3	14.36%	52.8	11.85%	42.1	29.71%
浓雾	27.0	24.7	8.51%	21.4	20.74%	15.8	41.48%
平均误差		6.37%		9.06%		18.04%	

总体上, 经分段建模后和细化后, 本文模型 (模型 I) 相较于传统模型 (模型 II/III) 可较好的刻画车辆雾天跟驰速度特性。

## 4 结论

本文通过引入基于安全间距的车辆跟驰的模型, 针对雾天条件下跟驰状态不稳定的现象, 引入动态随机加速, 进行雾天车辆跟驰分段建模。通过模拟仿真从微观的角度对雾天跟驰的交通流非线性特性进行分析, 揭示其雾天环境下交通跟驰状态和晴朗下跟驰状态的差异。其模拟的结果表明:

(1) 基于 NaSch 模型, 提出了元胞自动机雾天跟驰模型来模拟车辆在能见度差的环境下车辆谨慎驾驶的特点。该模型区别于传统的贪婪加速机制, 将加速阶段分成确定性加速和随机加速两部分, 考虑车辆安全间距与速度位移小数点部分累计的影响, 提高了模拟的精度, 增大了系统流量, 能较好的模拟出雾天行车的跟驰行为和现象。

(2) 随着雾浓度的增大, 车速随之下降, 中雾天气的车速波动最大。低密度时天气因素对速度的影响要大于密度的因素, 且雾天的最大行驶速度和流量与晴天的相比都发生改变。浓雾天交通系统的跟驰状态最不稳定。说明车辆在行驶过程中遇到的阻碍情况更频繁, 造成车间距偏大, 阻碍交通流量的增加, 使得整体的平均速度下降。雾天换道次数低于晴天, 表明雾天状况下不适合换道。侧面印证行车安全性确实小于晴天。可以看出雾天跟驰行为特征对交通拥堵机理有较大的影响, 这与实际交通现象相符合, 其研究结果可以在一定程度上帮助我们认识雾天行车的内在交通流微观机理, 有助于交通科研者进一步探索和理解复杂的交通现象。因此, 本文提出的雾天模型能较好的部分反映雾天的交通流特性, 再现复杂的雾天交通现象。

### 参考文献:

- [1] 张驰, 贺亚龙, 等. 雾天不同能见度条件下高速公路限速建议值研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(5):25-33. (Zhang Chi, he Yalong, et al. Study on the recommended value of Expressway speed limit



- under different visibility conditions in foggy days [J]. Traffic information and safety, 2018, 36 (5): 25-33)
- [2] 张续光, 高静如, 高建平. 高速公路雾形成预测研究[J].中国安全生产科学技术, 2015, 11(1):173-179. (Zhang suguang, Gao Jingru, Gao Jianping. Study on prediction of fog formation on expressways [J]. China safety production science and technology, 2015,11 (1): 173-179)
  - [3] 刘兆惠, 虞春滨, 王超, 李倩. 雾天环境对高速公路车辆跟驰安全的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2019,38(9):88-94. (Liu Zhaohui, Yu Chunbin, Wang Chao, Li Qian. Influence of foggy environment on vehicle following safety on Expressway [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2019,38 (9): 88-94)
  - [4] 谭金华,石京. 浓雾下高速公路双车道间断放行措施[J].清华大学学报(自然科学版), 2016,56(9):985-990. (Tan Jinhua, Shi Jing. Two lane intermittent release measures for expressways under dense fog [J]. Journal of Tsinghua University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2016,56 (9): 985-990)
  - [5] 贾宇涵, 吴建平, 杜怡曼, 刘明宇.快速路车辆跟驰建模与仿真研究(英文)[J].系统仿真学报, 2019,31(2):248-256. (Jia Yuhan, Wu Jianping, Du Yiman, Liu Mingyu. Modeling and simulation of vehicle following on expressways [J]. Journal of system simulation, 2019,31 (2): 248-256)
  - [6] 王家凡, 罗大庸.交通流微观仿真中的换道模型[J].系统工程, 2004(3):92-95.( Wang Jiafan, Luo Dayong. Lane changing model in microscopic simulation of traffic flow [J]. Systems engineering, 2004 (3): 92-95)
  - [7] 田顺, 谷亚蒙, 魏朗, 刘晶郁, 关闯.驾驶模拟器的发展历程及最新应用实例[J].汽车技术, 2018(4):35-42.(Tian Shun, Gu Yameng, Wei Lang, Liu Jingyu, Guan Chuang. Development history and latest application examples of driving simulator [J]. Automotive technology, 2018 (4): 35-42)
  - [8] 杨龙海, 张春, 仇晓赟, 等. 车辆跟驰模型研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2019, 019(5):125-138.( Yang Longhai, Zhang Chun, Qiu Xiaofu, et al. Research progress of vehicle following model [J]. Journal of transportation engineering, 2019, 019 (5): 125-138)
  - [9] 李杰,杨晓芳, 付强. 分析驾驶行为的快速路交通流元胞自动机模型[J]. 物流科技, 2018, 041(12):63-67. (Li Jie, Yang Xiaofang, Fu Qiang. Cellular automata model of expressway traffic flow for analyzing driving behavior [J]. Logistics technology, 2018, 041 (12): 63-67)
  - [10] 张杰. 再现交通流不确定性的一维元胞自动机仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1958-1961 ( Zhang Jie. One dimensional cellular automata simulation model for reproducing traffic flow uncertainty [J]. Journal of system simulation, 2006, 18 (7): 1958-1961)
  - [11] 文元桥, 杜磊, 黄亚敏, 孙腾达, 肖长诗, 周春辉. 水上交通流宏观复杂度建模与仿真[J].系统仿真学报, 2017,29(4):826-831 ( Wen Yuanqiao, Du Lei, Huang Yamin, sun Tengda, Xiao Changshi, Zhou Chunhui. Modeling and simulation of macroscopic complexity of water traffic flow [J]. Journal of system simulation, 2017,29 (4): 826-831)
  - [12] 张博, 赵慧英. 元胞自动机交通流 NS 模型的参数关联研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2016(4):45-51. (Zhang Bo, Zhao Huiying. Study on parameter correlation of NS model of cellular automata traffic flow [J]. Journal of Kunming University of science and Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2016 (4): 45-51)
  - [13] Kai Nagel,Michael Schreckenberg. A Cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de Physique I,1992,2(12). ISSN: 1155-4304
  - [14] Minoru Fukui,Yoshihiro Ishibashi. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed[J]. Journal of the Physical Society of Japan,1996,65(6). ISSN: 0031-9015
  - [15] 雷丽,薛郁, 戴世强. 交通流的一维元胞自动机敏感驾驶模型[J].物理学报, 2003,52(9): 2121 - 2126. (Lei Li, Xue Yu, Dai Shiqiang. One dimensional cellular automata sensitive driving model for traffic flow [J]. Acta physica Sinica, 2003,52 (9): 2121-2126)
  - [16] R. Barlovic,L. Santen,A. Schadschneider,M. Schreckenberg. Metastable states in cellular automata for traffic flow[J]. The European Physical Journal B,1998,5(3). ISSN: 1434-6028
  - [17] Misako Takayasu,Hideki Takayasu. 1/f Noise in a traffic model [J]. Fractals,1993,1(4): 860-866. ISSN: 0218-348X
  - [18] 赵韩涛, 聂涔, 李静茹.冰雪条件下的交通流元胞自动机模型[J].交通运输系统工程与信息, 2015,(1):87-92. (Zhao Hantao, Nie Cen, Li Jingru. Cellular automata model of traffic flow under ice and snow conditions [J]. Transportation system engineering and information, 2015, (1): 87-92)

- [19] 于乐美, 张萌萌, 王星月. 基于跟驰模型的雾天安全限速模拟研究 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 224-229. (Yu Lemei, Zhang Mengmeng, Wang Xingyue. Simulation study on safety speed limit in foggy days based on car following model [J]. Science, technology and engineering, 2018, 18 (33): 224-229)
- [20] Mohammad Saifuzzaman, Zuduo Zheng. Incorporating human-factors in car-following models: A review of recent developments and research needs [J]. Transportation Research Part C, 2014, 48.
- [21] Ni Rui, Kang Julie J, Andersen George J. Age-related declines in car following performance under simulated fog conditions [J]. Accident; analysis and prevention, 2010, 42(3).
- [22] 高坤, 涂辉招, 时恒, 李振飞. 雾霾天气低能见度对不同跟驰状态驾驶行为的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(6): 1716-1727. (Gao Kun, Tu huizhao, Shi Heng, Li Zhenfei. Influence of low visibility on driving behavior under different car following conditions in haze weather [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2017, 47 (6): 1716-1727)
- [23] 时恒, 涂辉招, 高坤. 基于高逼真驾驶模拟器雾霾天气下跟驰行为分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 326-333. (Shi Heng, Tu huizhao, Gao Kun. Analysis of car following behavior in haze weather based on high fidelity driving simulator [J]. Journal of Tongji University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2018, 46 (3): 326-333)
- [24] 赵晓华, 任贵超, 陈晨, 荣建. 不良天气下驾驶行为研究综述 [J]. 交通信息与安全, 2017, 35(5): 70-77. (Zhao Xiaohua, Ren Guichao, Chen Chen, Rong Jian. Research review on driving behavior in bad weather [J]. Traffic information and safety, 2017, 35 (5): 70-77)
- [25] Gipps P.G. A behavioural car-following model for computer simulation [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105-111. ISSN: 0191-2615
- [26] 叶冬. 基于元胞自动机的交通流模型研究 [D]. 长安大学, 2014. (Ye Dong. Research on traffic flow model based on cellular automata [D]. Chang'an University, 2014)
- [27] 敬明, 邓卫, 季彦婕, et al. 更新步长和元胞尺寸对元胞自动机模型的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2013(2): 43-49. (Jing Ming, Deng Wei, Ji Yanjie, et al. Effects of update step size and cell size on cellular automata model [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2013 (2): 43-49)
- [28] 邱小平, 于丹, 孙若晓, et al. 基于安全距离的元胞自动机交通流模型研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 54-60. (Qiu Xiaoping, Yu Dan, sun ruoxiao, et al. Research on cellular automata traffic flow model based on safe distance [J]. Transportation system engineering and information, 2015, 15 (2): 54-60)
- [29] 冯树民, 聂涔, 胡宝雨. 基于元胞自动机的高速公路货车结伴行为研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2016(16): 103. (Feng Shumin, Nie Cen, Hu Baoyu. Research on highway truck partnership behavior based on cellular automata [J]. Transportation system engineering and information, 2016 (16): 103)
- [30] 王召阳. 基于 CA 模型的低能见度道路交通流动态特性研究 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 2011. (Wang Zhaoyang. Study on dynamic characteristics of low visibility road traffic flow based on CA model [D]. Anhui: Hefei University of technology, 2011)
- [31] 田家斌. 雾天环境下驾驶行为及安全特性研究 [D]. 青岛理工大学, 2018. (Tian Jiabin. Study on driving behavior and safety characteristics in foggy environment [D]. Qingdao University of technology, 2018)
- [32] 朱宏佳, 王丹. 考虑 ASD 和 LCR 的高速公路多车道交通流元胞自动机模型 [J]. 交通与运输 (学术版), 2017(1): 50-54. (Zhu Hongjia, Wang Dan. Cellular automata model of expressway multi lane traffic flow considering ASD and LCR [J]. Transportation and transportation (Academic Edition), 2017 (1): 50-54)
- [33] 赵晓华, 任贵超, 陈晨, 荣建, 常新. 基于驾驶模拟技术的不良天气对驾驶员跟驰行为的综合影响研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2019, 38(6): 90-95. (Zhao Xiaohua, Ren Guichao, Chen Chen, Rong Jian, Chang Xin. Study on the comprehensive influence of bad weather based on driving simulation technology on driver following behavior [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2019, 38 (6): 90-95)