

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.10.016

# 基于元胞自动机的破损路面车辆换道仿真

陈红, 马晓彤, 赵丹婷  
(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 针对路面破损条件下, 驾驶员为获得更高行驶效益而进行车道变换的现象, 以元胞自动机 NaSch 模型为基础, 引入慢启动规则和换道规则, 建立路面破损条件下双车道车辆微观换道模型。以换道需求、车道选择、间隙检测和换道执行4个过程确立仿真流程, 对不同路面破损条件下的驾驶员特性、交通流特性和车辆换道特性进行仿真分析。从车辆运行角度对路面破损等级进行划分, 依据效用理论计算车辆在不同车道上的行驶效益, 建立车辆车道选择模型, 并定义换道系数, 分析单块路面破损对车辆换道行为的影响。基于驾驶员的行为差异, 在仿真过程中将驾驶员分为冒险型、机敏型、谨慎型和迟缓型4类, 通过设置仿真参数, 对不同类型驾驶员在路面破损条件下的行为特性进行分析。结果表明: 换道系数随路面破损等级的增加而不断增大, 破损等级越高, 车辆在破损路段行驶的效益越低, 进一步增大驾驶员进行车道变换的概率, 能够很好地模拟路面破损对车辆换道行为产生的影响。冒险型驾驶员在中密度区的换道率最高, 随着路面破损程度的增加, 车辆换道率和行驶速度方差随之增大, 说明破损路面会降低车辆行驶效益, 加剧换道行为的产生, 同时增加车辆行驶速度的波动性, 对交通流正常运行产生一定干扰, 不利于行车安全。

**关键词:** 交通工程; 换道行为; 元胞自动机; 破损路面; 交通流

**中图分类号:** U442.5<sup>+</sup>9, U448.38

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0268(2018)10-0117-09

## Simulation of Vehicle Lane-changing Behavior on Damaged Pavement Based on CA Model

CHEN Hong, MA Xiao-tong, ZHAO Dan-ting  
(School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** In view of the phenomenon that driver's lane-changing behavior for higher driving benefit on broken road, based on the CA NaSch model, by introducing slow start rule and new lane-changing rule, the vehicle micro lane-changing model for 2-lane traffic on damaged pavement is established. The simulation process is established through the processes of lane-changing demand, lane selection, clearance detection and lane-changing execution, the characteristics of driver, traffic flow and vehicle lane-changing under different damaged road conditions are simulated. The road damage level is divided from the perspective of vehicle operation, and the vehicle driving benefit is calculated through utility theory to establish a lane selection model. In addition, the lane-changing coefficient is defined to study the impact of single block pavement damage on lane-changing behavior. Based on driver's behavior difference, the drivers are divided into the categories of adventure, alert, cautious and slow. By setting simulation parameters, the characteristics of different types of drivers' behaviors under damaged pavement condition are analyzed. The result shows that (1) lane-changing coefficient increases with the increase of pavement damage level, the higher the level of damage, the lower the benefit of vehicle traveling on damaged road, further increasing the probability of lane-changing can well simulate the impact of pavement damage on vehicle lane-changing behavior; (2) the

收稿日期: 2017-12-04

作者简介: 陈红(1963-), 女, 湖南湘潭人, 博士. (hongchen82@126.com)

highest lane-changing rate is obtained by adventure driver in medium density, and the speed variance and lane-changing rate increase with the increase of pavement damage level, which indicates that pavement distress will reduce vehicle driving benefit and aggravate lane-changing behavior, and it will increase the fluctuation of vehicle speed and interfere with the normal operation of traffic flow, which is not conducive to traffic safety.

**Key words:** traffic engineering; lane changing behavior; cellular automaton (CA) model; pavement damage; traffic flow

## 0 引言

道路在使用过程中,受到行车荷载和自然因素的反复作用,加上维修、养护不及时,导致路面破损现象十分普遍。路面使用性能不好,一方面会加剧车辆磨损、降低行驶舒适性;另一方面驾驶员为获得更高的行驶效益会换道行驶,影响交通流的正常运行。目前,国内外对于路面破损的研究多集中于破损的评估、检测技术及图像识别方法<sup>[1-2]</sup>,而对路面破损造成的危害和对交通流运行特性产生的影响研究较少。因此,对路面破损条件下车辆换道行为和交通流特性进行研究,对改善交通运行状况,降低路面破损对行车安全的影响具有重要的现实意义。

换道行为是驾驶员根据自身行驶特性,产生换道意图而变换车道的驾驶行为。目前,对于车辆换道行为的研究,主要集中于考虑驾驶员和交通环境因素的换道行为分析,缺乏对车辆换道对交通流特性和交通安全的影响研究<sup>[3]</sup>。王永明<sup>[4]</sup>等基于驾驶员的个性差异,对换道规则做出改进,并对不同换道规则对交通流参数的影响进行研究;陈利霖<sup>[5]</sup>从驾驶员角度出发,研究了交织车辆的换道行为,并建立二元概率选择模型来模拟驾驶员的车道选择行为。丁深圳<sup>[6]</sup>采用动态换道概率,对不同密度条件下激进型驾驶员的换道行为进行研究。在换道模型方面,Gipps<sup>[7]</sup>最早对换道模型进行系统研究,建立了受交通信号、障碍物和重型车等影响的城市道路换道决策结构框架。在此基础上,国内外许多学者对换道模型做出进一步研究,目前应用比较多的模型有MITSIM模型、CORSIM模型、SITRAS模型等<sup>[8-10]</sup>。后来又有许多学者分别对基于神经网络、模糊逻辑、效用选择、动态博弈等理论的换道模型进行研究<sup>[11]</sup>,但构建的模型存在很大局限性,应用范围相对较窄。

元胞自动机(CA)利用离散单元格模拟车辆微观驾驶行为,能够很好地描述交通流这类非线性现

象,其中比较典型的代表包括NaSch模型、BML模型、FI模型、STCA模型等<sup>[12-13]</sup>。在这些研究的基础上,有些学者相继加入了对驾驶员行为、心理、交通条件、环境等因素的考虑,并在多车道模型中考虑不同换道规则对交通流参数的影响。华雪东等<sup>[14]</sup>引入反映驾驶员心理的选择换道概率与安全参数,模拟分析不同驾驶心理对交通系统的影响;施俊庆<sup>[15]</sup>通过改进网络拓扑结构、多车道换道规则以及交叉口车辆更新规则等,对城市路网的交通流特性进行研究。史丹丹<sup>[16]</sup>基于车-车通信环境,考虑邻近车辆的相对运动状态,对STCA模型做出改进,结果表明改进模型能够有效提高道路利用率。

路面破损易诱发车辆换道行驶,加剧车辆之间的相互干扰,相关研究表明,路面条件不良与事故发生的频率和严重性有关,对车辆行驶安全构成一定威胁<sup>[17-18]</sup>。交通系统本质上是离散的,而元胞自动机模型能够通过给定的规则推演系统的运行规律,利用元胞自动机能够很好地分析路面破损状况下的交通问题。因此,本研究以元胞自动机为基础,结合破损路面特点,考虑驾驶员类型、路面破损程度等对换道的影响,对不同路面破损条件下的车辆换道行为和交通流特性进行研究。

## 1 车辆换道过程分析

在破损道路上,驾驶员会综合考虑路面破损状况、驾驶行为特性、交通环境等影响因素,自由选择是否换道行驶,因此可将路面破损条件下的换道行为视作驾驶员自由选择的结果。以往选择性换道模型在进行换道条件判断时,将目标车道选择和可接受间隙检测统一考虑,缺乏对不同车道之间的效用分析,而且对车辆赋予确定性换道概率,使得模型适用性较差。因此,本研究从微观机理上对车辆选择性换道行为进行分析,将路面破损条件下车辆换道过程分为需求产生、车道选择、间隙检测和换道执行4个阶段。

### 1.1 换道需求产生

驾驶员对当前行驶状态不满意, 或为追求更加理想的运行速度会产生换道需求。相关研究表明, 路面破损的大小、位置、深度等都会对车辆行驶产生重要影响, 诱发驾驶员产生换道意图, 路面破损等级越高, 车辆压到破损时的颠簸感越强, 对在当前破损路段行驶的满意度就越低, 越易产生换道需求。常见的路面破损类型包括线型破损和面型破损 2 类, 根据我国目前的相关养护规范, 根据破损面积和深度可确定 2 类破损类型的等级划分阈值, 如表 1 所示<sup>[19]</sup>。

表 1 路面破损等级划分

Tab. 1 Classification of pavement damage levels

路面破损等级	等级划分阈值
轻型 (S <sub>1</sub> 型)	面积 < 1 m <sup>2</sup> , 深 ≤ 2.5 cm
中型 (S <sub>2</sub> 型)	面积 1 ~ 3 m <sup>2</sup> , 2.5 cm < 深 ≤ 4 cm
较严重型 (S <sub>3</sub> 型)	面积 1 ~ 3 m <sup>2</sup> , 4 cm < 深 ≤ 10 cm
严重型 (S <sub>4</sub> 型)	面积 > 3 m <sup>2</sup> , 或深 > 10 cm

从车辆运行角度, 综合考虑不同路面破损条件对驾驶员驾驶行为和车辆运行安全性的影响, 对 4 类路面破损等级特征进行定性分析, 如表 2 所示<sup>[20]</sup>。

表 2 路面破损等级特征分析

Tab. 2 Characteristic analysis of pavement damage level

路面破损等级	特征
轻型 (S <sub>1</sub> 型)	破损面积较小、深度浅, 车辆压过时无明显颠簸, 对交通流基本没有影响
中型 (S <sub>2</sub> 型)	车辆压过时略有颠簸, 车辆行驶的舒适性略受影响, 少数车辆会进行换道
较严重型 (S <sub>3</sub> 型)	车辆压过时具有明显颠簸感, 对驾驶员驾驶行为有较大影响, 不少车辆会选择车道变换
严重型 (S <sub>4</sub> 型)	破损面积大、深, 严重影响车辆的正常行驶, 迫使大部分车辆选择变道行驶

此外, 视认性影响驾驶员对路面破损信息的识别时间, 是影响车辆变道行为的又一重要因素, 可用破损识别距离描述。将处于破损识别距离内的道路界定为破损路面对车辆行驶产生影响的范围, 如图 1 中阴影部分所示。其中,  $m$  为主体车,  $m'$  为  $m$  在相邻车道的对应位置, 并定义 1 车道为内侧车道, 2 车道为外侧车道。那么,  $t$  时刻  $i$  车道车辆  $m$  的速度和位置分别用  $v_m(i, t)$  和  $x_m^{lanei}(t)$  ( $i=1, 2$ ) 表示, 并定义主体车  $m$  与前车  $m+1$  的间距为  $d_{-f}$ , 与相邻车道前方紧邻车辆  $k$  的间距为  $d_{-o}$ , 与相邻车道后方车辆  $o$  的间距为  $d_{-b}$ 。

### 1.2 车道选择

#### (1) 换道系数

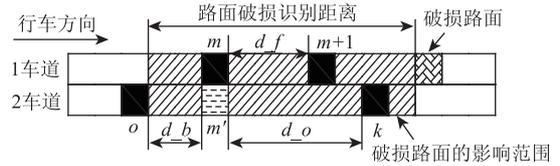


图 1 路面破损路段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of damaged road section

当车辆在破损道路上行驶时, 由于前方路面存在破损, 驾驶员会采取相应的减速或换道措施, 来减轻破损路面对车辆正常行驶带来的影响。为了描述这种影响, 本研究引入换道系数  $\Delta\mu$  来描述不同路面破损条件对驾驶员换道行为产生的影响, 定义如下:

$$\Delta\mu(t) = \beta\theta(t), \quad (1)$$

式中,  $\theta(t) = \frac{s}{dr_m(t)}$  为不同路面破损等级对驾驶员换道行为产生的影响;  $\beta$  为相应系数;  $dr_m(t)$  为  $t$  时刻车  $m$  与破损路面的纵向间距;  $s$  为路面破损系数,  $0 \leq s \leq 1$ , 与路面破损的大小、深度和位置有关, 可根据实际破损情况进行标定。换道系数表明, 驾驶员距破损路面的纵向间距越小, 破损等级越高, 破损路面对车辆换道产生的影响越大。为适应模型仿真的需要, 将  $s$  进行线性插值, 选取 4 个典型数值反映不同路面破损等级对车辆换道产生的影响, 取值情况如表 3 所示。

表 3 路面破损系数取值

Tab. 3 Value of pavement damage coefficient

路面破损等级	S <sub>1</sub> 型	S <sub>2</sub> 型	S <sub>3</sub> 型	S <sub>4</sub> 型
路面破损系数 $s$	0.2	0.4	0.6	0.8

#### (2) 车辆行驶效益分析

在车道选择上服从效益最大化原则, 即驾驶员会对在原车道和相邻车道行驶的效益进行判断, 选择效益大的车道作为车辆选择的目标车道。车道效益可用车辆行驶的自由度表示, 而自由度可通过各车道的道路和交通条件表示。道路条件即为路面破损状况, 交通条件可通过主体车与前车间的距离差和速度差表示。那么, 不处于路面破损影响范围的车辆行驶效益计算如下:

$$P_i(t) = \frac{\exp(\Delta v_m^{lanei}(t) + \Delta d_m^{lanei}(t) + \varepsilon_m^{lanei}(t))}{\sum_{j=1}^2 \exp(\Delta v_m^{lanej}(t) + \Delta d_m^{lanej}(t) + \varepsilon_m^{lanej}(t))}, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

式中,  $\Delta v_m^{lanei}(t)$  为  $t$  时刻车  $m$  与车道  $i$  前车之间的速度差;  $\Delta d_m^{lanei}(t)$  为  $t$  时刻车  $m$  与车道  $i$  前车之间的纵向距离;  $\varepsilon_m^{lanei}(t)$  为与车道效益有关的随机

变量。

处于路面破损影响范围的车辆行驶效益由式(3)计算:

$$P_i(t) = \frac{\exp(\Delta v_m^{\text{lane}i}(t) + \Delta d_m^{\text{lane}i}(t) - \Delta \mu_m^{\text{lane}i}(t) + \varepsilon_m^{\text{lane}i}(t))}{\sum_{j=1}^2 \exp(\Delta v_m^{\text{lane}j}(t) + \Delta d_m^{\text{lane}j}(t) - \Delta \mu_m^{\text{lane}j}(t) + \varepsilon_m^{\text{lane}j}(t))} \quad (3)$$

式中,  $\Delta \mu_m^{\text{lane}i}(t)$  为  $t$  时刻车  $m$  在路面破损车道  $i$  的换道系数。

### 1.3 间隙检测

驾驶员对在相邻车道行驶状态的满意度更高时, 会立即检测是否存在合适的插入间隙支持换道行为。在对间隙进行检测时, 考虑的主要因素有: 与相邻车道前后车辆的相对速度和相对位置。

### 1.4 换道执行

当车辆同时满足换道条件和安全条件时, 认为其跟驰状态不会发生太大变化, 会以一定换道概率  $p_c$  执行换道。路面破损条件下车辆换道的仿真流程如图2所示。

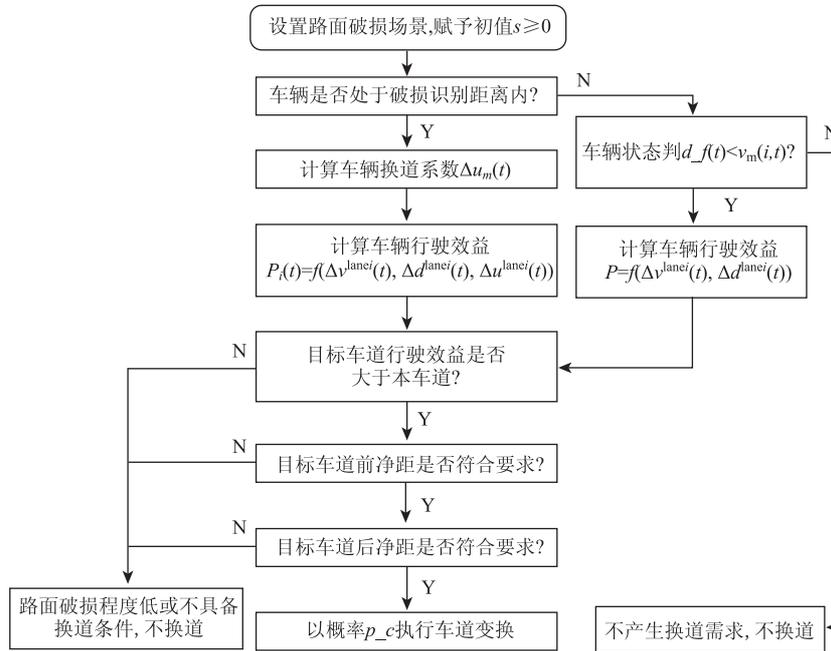


图2 路面破损条件下车辆换道仿真流程

Fig.2 Simulation process of lane-changing on damaged pavement

## 2 模型建立

### 2.1 假设条件

#### (1) 效用最大化假设

驾驶员会不断对在本车道和相邻车道行驶的效益进行对比, 只有在判断相邻车道的行驶效益大于原车道时, 才会进行换道。

#### (2) 确定性随机慢化概率假设

由于NaSch模型无法模拟临界点附近亚稳态和回滞现象, 本研究针对其不足, 借鉴VDR模型的慢启动规则, 考虑速度对随机慢化概率的影响, 分别对静止和运动车辆设置确定性随机慢化概率, 描述车辆由静止启动产生的延误现象, 使其更贴合实际交通流现象。

### 2.2 元胞环境描述

将道路视为2条并列、长度为  $L$  的离散网格, 每个单元格即为一个元胞, 车辆随机分布在这些元胞上, 如图3所示。假定道路上行驶的车辆均为小汽车, 黑色表示元胞被车辆占据, 白色表示元胞为空。那么, 每个元胞的运行状态有2种: (1) 元胞无车(空); (2) 元胞有车且速度在  $[0, v_{\max}]$  中取值,  $v_{\max}$  为车辆速度的最大值。那么  $d_f$ ,  $d_o$  和  $d_b$  的计算公式为:

$$d_f(t) = x_{m+1}^{\text{lane}i}(t) - x_m^{\text{lane}i}(t) - 1, \quad (4)$$

$$d_o(t) = x_k^{\text{lane}j}(t) - x_{m'}^{\text{lane}j}(t) - 1, \quad (5)$$

$$d_b(t) = x_{m'}^{\text{lane}j}(t) - x_o^{\text{lane}j}(t) - 1. \quad (6)$$

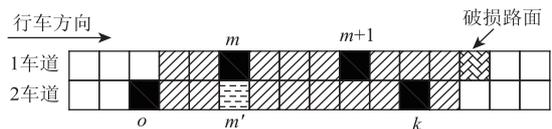


图3 双车道仿真示意图

Fig.3 Schematic diagram of 2-lane simulation

### 2.3 换道规则

D Sun<sup>[21]</sup>通过调查分析将驾驶员分为 4 种类型, 本研究在此基础上, 对不同类型驾驶员的换道行为特性进行分析, 如表 4 所示。

表 4 驾驶员类型分类

Tab. 4 Classification of driver types

驾驶员类型	行为特征
冒险型 (类型 A)	车辆行驶速度快, 驾驶员追求高速度的愿望比较强烈, 极易产生车道变换行为, 行车安全性较低
机敏型 (类型 B)	驾驶员反应迅速, 会根据实际交通条件做出合理的换道选择, 且车辆进行换道时安全性较高, 但车速不稳定
谨慎型 (类型 C)	驾驶员受外界干扰小, 车速不快, 车道变换行为过于保守, 遇到突发状况时, 不够果断, 容易错失最佳换道时机
迟缓型 (类型 D)	车速稳定, 但驾驶员反应慢、动作慢, 较少进行车道变换

假设车辆在换道过程中速度保持不变, 即  $v_m(t+1) = v_m(t)$ , 在考虑车辆换道的可行性、安全性以及换道执行过程的基础上, 将在车道  $\text{lane}_i (i = 1, 2)$  上行驶车辆  $m$  的换道规则表示如下:

$$\text{lane}_i = \begin{cases} \text{lane}_j & \begin{cases} d_{-o}(t) \geq d_{\text{safe1}} + v_m(i, t), \\ d_{-b}(t) \geq d_{\text{safe2}} + v_m(i, t) \end{cases} \\ \text{lane}_j(\text{with } p_{-c}) & \\ \begin{cases} d_{-o}(t) \geq d_{\text{safe1}} + v_m(i, t), \\ d_{\text{safe2}} + v_m(i, t) > d_{-b}(t) \geq d_{\text{safe2}} \end{cases} & \\ \text{lane}_i \text{ other situations} & \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, i \neq j),$$

式中,  $d_{\text{safe1}}$  和  $d_{\text{safe2}}$  分别为车  $m$  与相邻车道前、后车间的最小安全距离;  $p_{-c} = \max(p_{\text{change}}, \theta(t))$  为换道概率,  $p_{\text{change}}$  为不同类型驾驶员在不考虑路面条件下是否进行换道的概率。将换道条件分为以下 3 种情况进行讨论:

(1)  $d_{-o}(t) \geq d_{\text{safe1}} + v_m(i, t)$ ,  $d_{-b}(t) \geq d_{\text{safe2}} + v_m(i, t)$ , 表明车  $m$  换道后不影响邻道前车正常行驶, 因驾驶员在换道过程中对后车关注较少, 用条件  $d_{-b}(t) \geq d_{\text{safe2}} + v_m(i, t)$  表示车  $m$  换道后不影响邻道后车  $o$  的正常行驶, 且此时换道空间距离较大, 判断车辆一定会进行换道;

(2)  $d_{-o}(t) \geq d_{\text{safe1}} + v_m(i, t)$ ,  $d_{\text{safe2}} + v_m(i, t) > d_{-b}(t) \geq d_{\text{safe2}}$ , 表明车  $m$  在换道过程中会影响邻道

后车行驶, 此时车  $m$  会向后车发出换道信号, 并设置换道概率  $p_{-c}$  表征不同类型驾驶员的换道心理差异以及路面破损对驾驶员换道决策带来的影响, 克服了基于确定性换道概率进行换道选择的缺点。若  $\text{rand}(1) < p_{-c}$  则进行换道, 否则不换道;

(3)  $d_{-o}(t) < d_{\text{safe1}} + v_m(i, t)$ , 表明车  $m$  与邻道前车的距离不满足安全换道的距离条件, 不能换道。

### 2.4 运行规则

车辆的运行状态演化过程为:

(1) 加速规则:

$v_m(i, t+1) = \min\{v_m(i, t) + 1, v_{\text{max}}\}$ , 不同类型驾驶员  $v_{\text{max}}$  的取值不同。

(2) 减速规则:

若  $v_m(i, t) > d_{-f}(t)$ , 则  $v_m(i, t+1) = \min\{v_m(i, t+1), d_{-f}(t)\}$ 。

(3) 随机规则:  $v_m(i, t+1) = \max\{v_m(i, t+1) -$

$1, 0\}$ ,  $i = (1, 2)$ , with  $p = \begin{cases} p_1, & \text{if } v_m(i, t) = 0 \\ p_2, & \text{if } v_m(i, t) \neq 0 \end{cases}$ , 即

只有速度为零的车辆才会采用概率  $p_1$  进行速度慢启动, 其余车辆则以相同概率  $p_2$  进行减速。其中, 静止车辆的随机慢化概率  $p_1$  取值大于运动车辆的随机慢化概率  $p_2$ 。

(4) 位置更新:  $x_m(t+1) = x_m(t) + v_m(i, t)$ 。

## 3 模型仿真

### 3.1 仿真参数设置

仿真过程采用开放式边界条件, 每个车道长度由 50 个元胞组成, 将元胞长度规定为社会车辆的平均车长, 结合《汽车库建筑设计规范》(JGJ100—2015) 中对汽车设计车型外轮廓尺寸的界定, 标定一个元胞长度为 5 m, 则模拟道路长度为 250 m, 车辆速度  $1 \text{ cell/s} = 5 \text{ m/s}$ 。设共将路段分为  $N$  个元胞, 总的车辆数为  $n$ , 车流密度为  $K$ , 则:

$$K = \frac{n}{N} \text{ pcu/cell} = \frac{n}{N \times 5} \text{ pcu/m}。 \quad (7)$$

由于一般路面破损面积不会超过一个元胞范围, 仿真过程中将一个元胞标定为路面破损路段 ( $0 \leq s \leq 1$ ), 其余元胞道路条件均为良好, 并假设路面破损位于内侧 1 车道上, 如图 3 所示。王伟<sup>[22]</sup>指出对于双车道道路, 外侧车道的通行能力大约为内侧车道的 80%, 因此在仿真过程中, 设定外侧车道的发车频率为内侧车道的 0.8, 仿真时长为 1 500 s, 仿真间隔 1 s, 为消除暂态影响, 仅对后 1 000 个仿真步

长内的换道率、速度等参数进行统计,慢启动概率  $p_1 = 0.3$ , 随机慢化概率  $p_2 = 0.25$ ,  $\beta = 10$ 。同时考虑不同类型驾驶员的行为特性,期望速度、安全间距、换道概率等都有所不同,分别设置不同的仿真参数,如表5所示。

表5 不同类型驾驶员仿真参数

Tab.5 Simulation parameters of different types of drivers

驾驶员类型	$v_{max}/$ (cell · s <sup>-1</sup> )	$p_{change}$	$d_{safe1}/$ cell	$d_{safe2}/$ cell
A	4	0.8	1	1
B	4	0.6	1	2
C	3	0.4	1	2
D	3	0.2	2	2

### 3.2 仿真结果分析

#### (1) 驾驶员特性分析

当交通流密度小时,车辆之间干扰小,能够反映出不同类型驾驶员间的行驶差异性。自由流条件下各类驾驶员的速度变化曲线如图4所示,由图可知,冒险型和机敏型驾驶员的平均速度约为17.5 m/s (3.5 cell/s),谨慎型和迟缓型驾驶员的平均速度约为13 m/s (2.6 cell/s)。特别的,由于车辆的随机慢化规则导致车辆在自由状态行驶时的平均速度并不等于  $v_{max}$ 。同时,不同驾驶员的速度波动情况也不相同,以机敏型驾驶员最大,这是由于该类驾驶员在考虑安全性的前提下能够根据实际交通情况及时调整驾驶状态,符合实际情况,但也容易出现车速不稳定的现象。

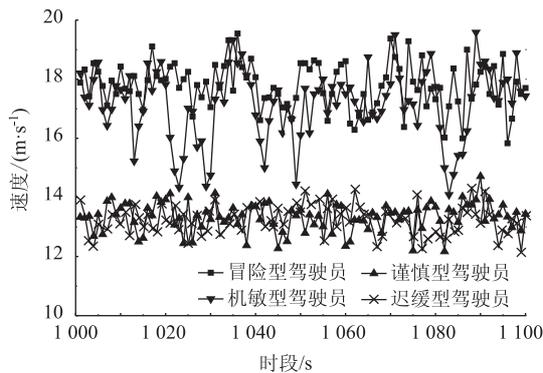


图4 不同类型驾驶员速度随时间变化曲线

Fig.4 Curves of driving speeds of different types of drivers varying with time

将一定时间间隔和路段长度内,发生换道车辆数  $n'$  与进入路段车辆总数  $n$  之比定义为换道率  $P = n'/n$ , 其能够直观地反映路段上换道车辆数量与车辆总数的关系。图5为不同类型驾驶员在不同密度条件下的换道率,可以看出最高换道率是由冒险型

驾驶员在中密度区获得的。在低密度条件下,各类驾驶员的换道率相差不大,这是因为车流密度低,车辆之间相互影响小,较少车辆需要利用换道来维持或获得更高的行驶速度。随着密度进一步增加,车辆行驶空间被压缩,驾驶员往往为寻求更高的行驶效益而进行变道,导致换道率明显提高。而在高密度区,车道变换主要受车辆安全间距影响,保守型驾驶员安全间距最大,换道率也最低。另外,交通密度很大时,满足车辆换道的安全间隙少,使得各类驾驶员的换道率相对较低。

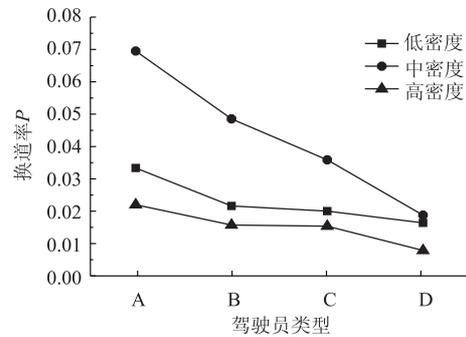


图5 不同类型驾驶员在不同密度条件下的换道率

Fig.5 Lane-changing rates of different types of drivers under different density conditions

#### (2) 交通流特性分析

以冒险型驾驶员为例,对不同路面状况下的交通流特性进行研究。图6为冒险型驾驶员在不同路面条件下的速度-密度折线图,可以看出随着密度增加,车辆平均速度整体呈下降趋势。当密度较小时 ( $0 < K < 40$  pcu/km), 车辆间速度差异小,基本维持在17.5 m/s左右,此时交通流表现为自由流,行驶自由度大,驾驶员可以灵活的选择变道来避免路面破损对车辆行驶带来的影响。当  $K > 40$  pcu/km左右时,车辆速度开始降低,并且速度变化率由小

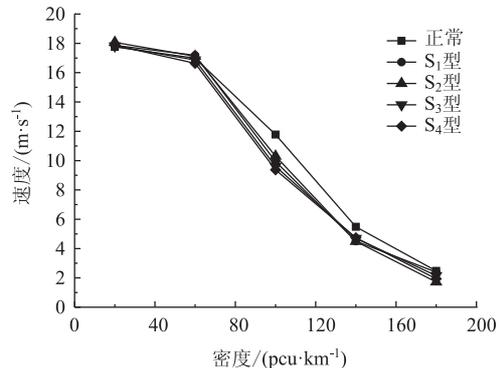


图6 不同路面破损条件下速度-密度变化曲线

Fig.6 Speed-density curves under different damaged pavement conditions

变大, 然后逐渐趋缓。同时, 通过模拟得到中等密度条件下, 车辆速度由于路面破损影响会呈现不同波动性, 但对整体车速变化的影响不太明显。

如图 6 可知, 车流密度较小或较大时, 不同路面条件下车辆速度的差异性并不明显, 但这并不意味着路面破损对车辆运行不产生影响。图 7 为密度为 40 pcu/km 左右时, 不同路面破损条件下, 1 车道车辆速度标准差  $\sigma(v)$  的分布情况。从图中可以看出, 随着路面破损程度增加,  $\sigma(v)$  有增大的趋势, 说明车辆速度波动性随路面破损状况的加剧而逐渐增加。从行车安全的角度出发, 希望速度标准差越小越好, 因此, 路面破损等级越高, 越不利于行车安全。同时, 通过模拟仿真, 车辆在 1 车道行驶的平均速度略低于 2 车道, 说明路面破损对交通流的正常运行同样存在一定干扰。

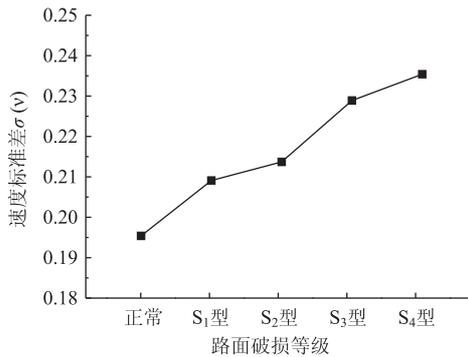


图 7 冒险型驾驶员速度标准差变化曲线

Fig. 7 Speed standard curves of adventure driver

(3) 换道特性分析

本研究对低密度状态下, 不同类型驾驶员在不同路面条件下的车辆换道特性进行研究, 如图 8 所示, 可以看出正常道路条件下换道率最低。随着破损等级增加, 换道系数随之增大, 导致车辆在破损道路上行驶的效益逐渐降低, 一旦驾驶员产生换道意图, 则会以较大概率进行换道。相应的, 车辆换道率随路面破损等级的增加而增加, 说明破损等级越高越易诱发驾驶员产生更多的换道行为, 加剧车辆之间的相互干扰, 并且在不同破损条件下冒险型驾驶员的换道率始终维持在最大值。这是因为冒险型驾驶员总是期望能够保持高速行驶的状态, 只要在当前车道行驶的自由度受到阻碍, 一旦存在换道机会此类驾驶员选择换道的概率要大于其他类型驾驶员。

假设 1 车道车辆的换道率  $P_1$  与 2 车道车辆换道率  $P_2$  之间的差值为  $\Delta P = P_1 - P_2$ , 则  $\Delta P$  在不同路面条件下的分布情况如图 9 所示。从图中可知, 正常路面条件下 1, 2 车道间车辆的换道率差异很小, 而

随着破损等级增加,  $\Delta P$  值随之增大, 这是因为路面破损越严重, 车辆换道系数越大, 驾驶员在破损车道的行驶效益越低, 也更容易产生换道需求, 一旦存在换道条件, 则会以较大概率进行车道变换。同时不同驾驶员换道行为的差异性开始显现, 冒险型驾驶员在 1, 2 车道的换道率差值最大, 保守型驾驶员最小, 说明路面破损越严重, 冒险型驾驶员行驶受到的制约作用越大, 越容易选择换道行驶。

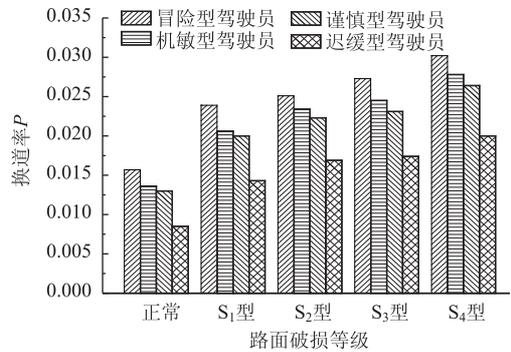


图 8 不同类型驾驶员在不同路面条件下的平均换道率

Fig. 8 Average lane-changing rates of different types of drivers under different road conditions

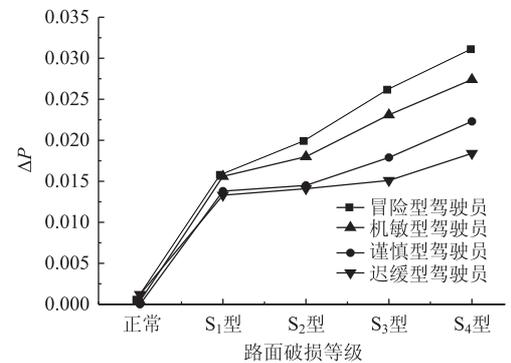


图 9 不同类型驾驶员在不同车道的换道率差值

Fig. 9 Differences of lane-changing rates of different types of drivers on different lanes

当破损路面位于外车道 2 时, 同样可模拟得到 4 种类型驾驶员在不同路面破损等级下的平均换道率。对破损路面位于内、外车道时车辆的平均换道率进行对比分析, 如图 10 所示。结果表明, 无论何种类型驾驶员, 破损路面位于内车道时的换道率均大于外车道, 说明双车道道路内侧车道出现破损更易导致车辆换道, 对行车安全产生较大影响。另外, 对于机敏型和谨慎型驾驶员来说, 破损路面位于内、外车道时车辆的平均换道率相差较大, 均大于 10%, 说明内外车道通行能力比值对这 2 种类型驾驶员产生的影响较大。

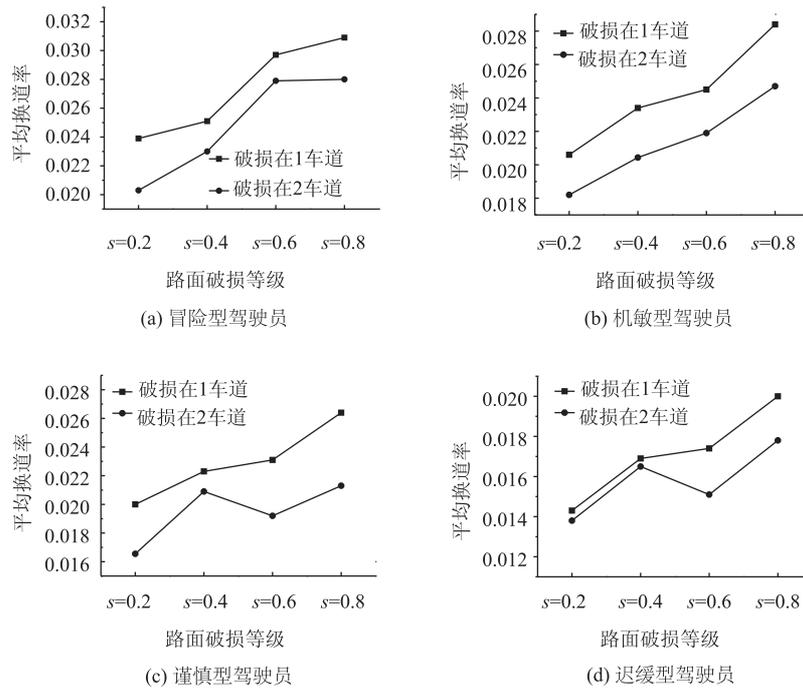


图 10 破损路面位于不同车道上的平均换道率

Fig. 10 Average lane-changing rates on different damaged lanes

#### 4 结论

本研究采用双车道元胞自动机模型对不同路面条件下车辆的行驶特性进行研究,引入换道系数反映路面破损对车辆换道产生的影响,并通过设置不同仿真参数模拟不同类型驾驶员的换道行为。通过 Matlab 仿真模拟,得到不同类型驾驶员的速度变化曲线,以及驾驶员在不同路面条件下的速度-密度关系和平均换道率分布情况,结果表明:

(1) 交通流密度小时,车辆处于自由行驶状态,不同类型驾驶员的驾驶行为特性差异明显。随着车流密度增加,车辆行驶空间被压缩,密度成为影响车辆运行的主要影响因素,此时驾驶员之间的行为差异性不再显著,其中冒险型驾驶员在中密度条件下的换道率最大。

(2) 换道系数能够很好地模拟路面破损对车辆行驶产生的影响,路面破损越严重,换道系数越大,使得车辆在当前车道的行驶效益降低,驾驶员进行车道变换的概率随之增加,符合实际情况,并且不同车道间车辆换道率的差值随路面破损程度的增加而呈上升趋势。

(3) 路面破损对交通流整体的速度变化情况影响不明显,但会加剧车辆速度的波动性。同时,驾驶员进行车道变换会增加交通流运行的不稳定性,路面破损越严重且破损路面位于内侧车道时,驾

员选择换道的概率越大,不利于行车安全。

最后需要指出的是,本研究忽略了不同路面条件下随机慢化概率取值对交通流的影响。事实上,大多数车辆在路面破损道路上行驶时发生了减速和换道,车辆减速行为与路面破损严重程度有关。而车辆行驶速度又会对随机慢化概率产生影响,文中选用确定性随机慢化概率与实际情况存在偏差,因此,在后续研究中,有必要加入对随机慢化规则的讨论分析。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] SHAH Y U, JAIN S S, TIWARI D, et al. Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 104 (2): 332 - 341.
- [2] 徐志刚. 基于多特征融合的路面破损图像自动识别技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.  
XU Zhi-gang. Study on Automatic Identification Technology for Pavement Distress Image Based on Multi-features Fusion [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [3] 王琳. 城市道路车辆换道行为特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
WANG Lin. Characters Research of Lane-changing Behavior in Urban Section [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [4] 王永明, 周磊山, 吕永波. 基于元胞自动机交通流模型的车辆换道规则 [J]. 中国公路学报, 2008, 21

- (1): 89-93.  
WANG Yong-ming, ZHOU Lei-shan, LÜ Yong-bo. Lane Changing Rules Based on Cellular Automaton Traffic Flow Model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (1): 89-93.
- [5] 陈利霖, 邹智军, 李珣辉. 交织车辆的跟车换道行为研究 [J]. 交通信息与安全, 2015, 33 (4): 43-48.  
CHEN Li-lin, ZOU Zhi-jun, LI Xun-hui. A Study on Following and Lane Changing Behaviors of Weaving Vehicles [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33 (4): 43-48.
- [6] 丁深圳, 杨晓芳, 王百里. 基于元胞自动机的激进型驾驶行为换道模型 [J]. 电子科技, 2017, 30 (4): 48-52.  
DING Shen-zhen, YANG Xiao-fang, WANG Bai-li. Aggressive Driving Behavior Lane-changing Model Research Based on Cellular Automata [J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30 (4): 48-52.
- [7] GIPPS P G. A Model for the Structure of Lane-changing Decisions [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1986, 20 (5): 403-414.
- [8] MEHMOOD A. Integrated Simulation Model for Driver Behavior Using System Dynamic [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2003.
- [9] YANG Q, KOUTSOPOULOS H N. A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1996, 4 (3): 113-129.
- [10] HIDAS P. Modelling Lane Changing and Merging in Microscopic Traffic Simulation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10 (5): 351-371.
- [11] 郑弘, 荣建, 任福田. 基于效用选择的换车道模型 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (5): 88-91.  
ZHENG Hong, RONG Jian, REN Fu-tian. A Lane Changing Model Based on Random Utility Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (5): 88-91.
- [12] 曹珊. 城市道路车辆换道模型及换道影响研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.  
CAO Shan. Study on Urban Vehicle Lane-changing Model and Impact of Lane-changing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
- [13] 李娟, 曲大义, 刘聪, 等. 基于元胞自动机的车辆换道行为研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (11): 140-145.  
LI Juan, QU Da-yi, LIU Cong, et al. Study on Vehicle Lane-changing Behavior Based on Cellular Automaton [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (11): 140-145.
- [14] 华雪东, 王伟, 王昊. 考虑驾驶心理的城市双车道交通流元胞自动机模型 [J]. 物理学报, 2011, 60 (8): 398-405.  
HUA Xue-dong, WANG Wei, WANG Hao. A Two-lane Cellular Automaton Traffic Flow Model with the Influence of Driving Psychology [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60 (8): 398-405.
- [15] 施俊庆, 程琳, 褚昭明, 等. 城市路网交通流元胞自动机模型研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (4): 143-149.  
SHI Jun-qing, CHENG Lin, CHU Zhao-ming, et al. Cellular Automata Model of Urban Road Network Traffic Flow [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (4): 143-149.
- [16] 史丹丹, 朱正旺, 刘好德. 考虑车-车通信的双车道元胞自动机交通流模型 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (增1): 142-146.  
SHI Dan-dan, ZHU Zheng-wang, LIU Hao-de. A Cellular Automaton Model of Traffic Flow Considering Vehicle-vehicle Communication [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (S1): 142-146.
- [17] LABI S. Efficacies of Roadway Safety Improvements across Functional Subclasses of Rural Two-lane Highways [J]. Journal of Safety Research, 2011, 42 (4): 231-239.
- [18] LI Y, LIU C, DING L. Impact of Pavement Conditions on Crash Severity [J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 59 (4): 399-406.
- [19] 毛程远. 路面破损对车辆行驶模式及交通流运行特性影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
MAO Cheng-yuan. Research on Vehicle Running Model and Characteristics of Traffic Flow Resulting from Pavement Distress [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [20] 贾贵宾. 路面破损对道路通行能力的影响研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
JIA Gui-bin. Research on Road Capacity Resulting from Pavement Distress [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [21] SUN D, ELEFTERIADOU L. Lane-changing Behavior on Urban Streets: A Focus Group-based Study [J]. Applied Ergonomics, 2011, 42 (5): 682-691.
- [22] 王伟. 交通工程学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.  
WANG Wei. Traffic Engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2000.