

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1225

长隧道路段货车限道措施的数值模拟

——以甬莞高速角洞岙隧道路段为例

吴权浩¹, 逯星宇², 颜 星¹, 祝会兵^{1*}, 沈 军³, 晏艳彬³

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315032;
3. 浙江信电工程技术有限公司, 浙江 宁波 315021)

摘要: 基于实际交通录像分析得出的边界条件和货车影响距离, 提出了含有长隧道的双车道元胞自动机交通流模型. 模拟结果与实际交通数据对比, 吻合较好, 表明模型能够准确反映实际交通流的特性. 数值模拟显示, 货车的存在增加了隧道路段交通拥堵的发生概率, 且这种影响随货车比增加而增强. 为降低货车对隧道交通的影响, 提出了货车限道措施, 并开展数值模拟, 结果表明, 货车限道措施能显著提升左车道的车速, 在大进车率时也能提升右车道的车速, 在高货车比时流量提升效果显著.

关键词: 高速公路; 长隧道路段; 交通流模型; 混合交通流; 货车限道措施

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 03-0070-10

货车在运输效率及成本方面具有一定优势^[1], 但是货车速度较低、行驶不灵活、占用道路空间较大, 往往成为高速公路上不可忽视的移动交通瓶颈^[2-3], 对交通流产生负面影响^[4]. 而隧道作为公路的重要组成部分, 在缩短线路距离、提高运输能力的同时, 也会对交通产生不利影响. 隧道入口端和出口端的“黑洞”效应和“白洞”效应^[5], 以及隧道内较低的限速要求都会增加交通事故的发生概率^[6]. 在隧道中货车和小车之间的相互干扰会明显增加, 从而带来严重的道路交通安全问题^[7]. 因此, 隧道路段混合交通流的特性研究及其交通优化措施分析已成为相关研究的热点之一.

在交通流特性研究过程中, 交通流建模是一种有效的方法^[8], 而元胞自动机模型由于其离散性、自组织性、多样性、实时性以及可视化和可解释性等优点, 在交通流特性研究方面具有独特的优势^[9-12]. 目前已有一些重要的双车道及多车道交通流模型报道, 如 Rickert 等^[13]提出了一套车辆换道规则, 率先将单车道的 NaSch 模型^[14]扩展到双

车道系统. Lárrega 等^[15]基于车辆间的相对距离、相对速度和驾驶员对驾驶环境的反应, 提出了 LAI 模型(一种考虑车辆行驶安全距离的模型). 随后, Guzmán 等^[16]根据运动学理论, 将 LAI 模型扩展为 LAI-E 模型, 可以更加清晰地再现车-车相互作用的现象.

针对隧道路段, 也有学者提出了一些交通流模型, 模拟特殊路段的交通流特征. 如孙然然等^[17]根据隧道不同区段的交通流特征建立了一种适用高速公路中特长隧道的元胞自动机交通流模型. 胡晓辉等^[18]考虑前车相对运动对跟随车的影响, 建立了改进的考虑慢启动的绿波模型, 对高速公路隧道交通流进行了模拟仿真. 事实上, 隧道多出现在山区, 地形地势各有不同, 隧道路段的交通流通常表现出有别于普通路段的独特性质. 因此, 隧道路段交通流的许多特征仍有待揭示.

在改善货车对道路交通负面影响方面, 早在 20 世纪初, 国外就有相关货车管理措施被提出^[19], 随后众多学者利用交通流模型相继完善了货车管

收稿日期: 2023-12-16.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY22E080005).

第一作者: 吴权浩, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通流建模与交通优化. E-mail: 1148497962@qq.com

*通信作者: 祝会兵, 教授, 主要研究方向: 交通流建模与交通优化. E-mail: zhuhuibing@nbu.edu.cn

理措施,取得了一定成效.如Das等^[20]通过交通安全预测模型,研究了货车限道措施对提高高速公路安全性的作用.El-Tantawy等^[21]采用微观交通流模拟,得到了货车限道措施对交通安全效果最佳的货车比.在国内,也有学者对货车管理措施进行研究,如曹嘉晨^[22]结合实际路段数据,搭建了交通仿真模型,设计了车道限速方案,利用综合指标确定了不同流量和货车比下的最佳分车道限速值.钟连德等^[23]通过对节假日期间广东省高速公路交通数据的统计和交通仿真分析,提出了对货车实施诱导和强制分流绕行国道的方案.但这些货车管理措施的研究大多是对一般高速公路路段,针对隧道路段的研究鲜见报道.

本文基于先前建立的隧道路段交通流模型^[24],引入更加符合实际的边界条件,在混合交通流中细化不同车速下货车对小车的影响程度,从而使模拟结果更能反应隧道路段的交通流特征.针对双车道长隧道路段货车加剧交通拥堵的情况,提出了货车限道措施,并利用交通流模型模拟货车限道措施的交通优化效果.结果表明在大流量及大货车比的条件下,交通优化措施值得推荐.该研究成果可为隧道路段的交通管理提供理论指导.

1 隧道路段交通流模型的提出

1.1 角洞岙隧道路段已有交通流模型介绍

以甬莞高速宁波与象山之间的角洞岙隧道路段为研究对象,采用本课题组早先建立的双车道元胞自动机交通流模型^[24],对隧道路段的交通流特性展开了研究.角洞岙隧道(图1)全长 L_{CF} 为2155 m,属于长隧道.考虑到车辆在隧道不同位置有不同的驾驶行为,将隧道及其连接线划分为5个路段,分别为隧道接近段AC、入口段CD、基本段DE、出口段EF以及普通路段MA和GN,长度 L_{AC} 、

L_{CD} 、 L_{DE} 、 L_{EF} 以及 L_{MA} 和 L_{GN} ,分别为200、50、1905、200 m以及2000 m和2100 m.在距隧道入口 L_{BC} 的B断面有限速标记和禁止换道标记,在距隧道出口 L_{FG} 的G断面有恢复普通路段限速及恢复换道许可标记. L_{BC} 和 L_{FG} 分别为50 m和100 m.在BG段,车辆限速值为 V_l ,禁止车辆换道,其他路段限速值为 V_g ,允许车辆换道.这里 V_l 取 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, V_g 取 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

为符合实际情况,模型中定义2种车型,分别为车身尺寸较小、速度性能较好的小车和车身尺寸较大、速度性能稍差的货车.此外,考虑司机个体性格差异,将司机划分为谨慎型和激进型2类,其中谨慎型司机的驾驶风格较为保守,激进型司机的驾驶风格较为激烈.考虑到货车体积大、加速慢等特性,货车司机全部被视作谨慎型司机,小车司机被分为谨慎型和激进型,激进型小车司机占总数的25%^[25].

模型中车辆运行规则分为两部分:车辆纵向前进规则和车辆横向换道规则^[24].车辆纵向前进规则是在LAI-E模型^[16]基础上,考虑不同性格的司机类型,并将车辆的加减速行为与隧道不同区段的交通流特性相结合后得出.另外,在Guzmán等^[26]提出的非对称双车道换道规则基础上,结合角洞岙隧道路段的交通流特性,引入小车避免跟随货车行驶的驾驶特点,提出了车辆横向换道规则.为符合实际情况,采用开放式边界条件.通过数值模拟,得到了隧道路段交通流的一些特征表现,指出随着进车率的增加,隧道入口前拥堵不断向上游传播,再现了速度波动和车道利用不平衡等实际交通现象,为进一步研究隧道路段混合交通流的交通优化措施奠定基础.

图2为模型修改前速度随进车率和位置的变化.从图2可知,模型有2处可以完善:(1)当进车

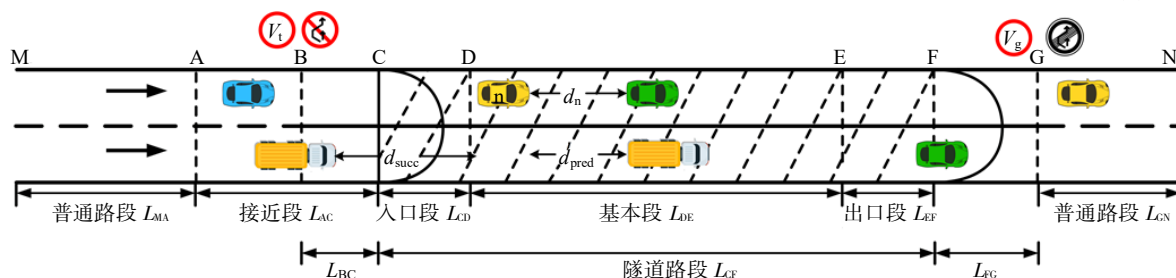


图1 角洞岙隧道路段交通流示意图

率稍大时,车辆从左边界以 $V_{\max}$ 驶入道路系统后,速度会发生骤降(黑框显示了速度降落现象),说明左边界处的初始速度设定不够合理.从实测资料可知,左、右车道进车率之比为 1:0.45(从图 2 左、右车道的进车率可得). (2)当进车率较大时,在隧道上游路段,以小车为主的左车道上车辆的平均车速低于以货车为主的右车道上车辆的平均车速.而在实际交通中,大进车率时两条车道上车辆的平均速度接近.因此,本文对模型进行了修正.

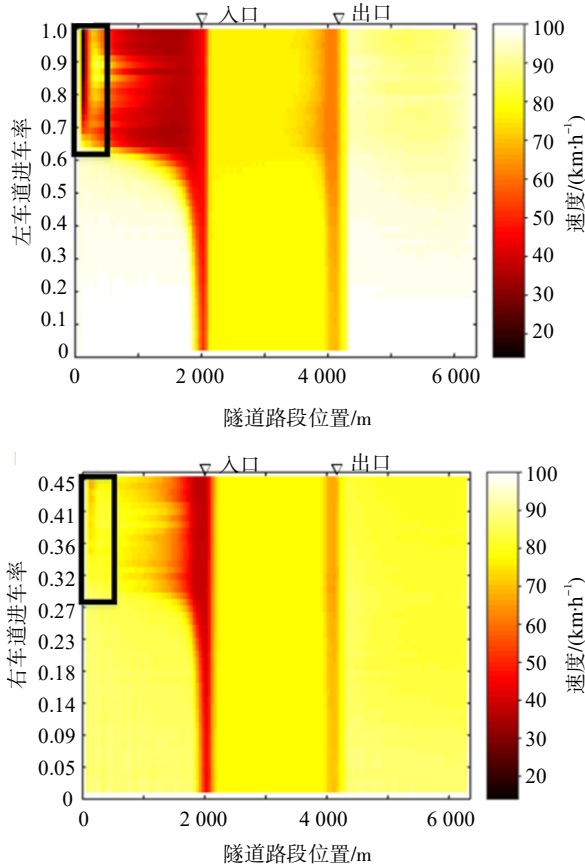


图2 模型修改前速度随进车率和位置的变化

1.2 交通流模型的修正

1.2.1 边界条件

对模型的左边界进行修正,将进入左边界的车辆初始速度设定为自适应速度 V_{keep} (根据前车的速度确定,而不是固定的最大值 $V_{\max}$). V_{keep} 的确定分为以下 4 个步骤:

(1)确定主系统中最末一辆车,即距离左边界最近车辆(记为车辆 p),其速度为 V_p 、位置为 X_p .

(2)确定新生成车辆的安全跟车距离 d_{keep} . 对于左边界新生成的车辆,以车辆 p 作为前车,确定

匀速安全跟随距离^[24],即跟随前车保持匀速行驶所需的安全跟车距离.在计算时考虑避免以下 2 种碰撞情形: (a)前车紧急刹车直至停车,后车仍在行驶,与前车发生碰撞. (b)无车辆停止,两车在行驶中发生碰撞.因此需要计算车辆保持的匀速安全距离 $d_{\text{keep}}^{\text{det}}$ 和 $d_{\text{keep}}^{\text{mov}}$,计算过程为:

(i)若 $\tilde{\tau} < t_s$ 和 $\tilde{\tau} < t_p$ 同时满足,且前后相邻车辆为具有不同加速能力的不同类型车辆,则可能的碰撞形式为情形(b),车辆的匀速安全跟随距离为 $d_{\text{keep}}^{\text{det}}$. 这里 $\tilde{\tau}$ 表示左边界中新生成的车辆从 $(t+1)$ 时刻开始以最大减速度 $a_{\max}$ 刹车,直到与系统内最后一辆车的车间距最小时所经过的时间.

$$\tilde{\tau} = \frac{V_p(t+1) - V_s(t+1)}{a_{\max,p} - a_{\max,s}},$$

式中: $V_s(t+1)$ 表示位于左边界内新生成的车辆在 $(t+1)$ 时刻的速度; $V_p(t+1)$ 表示主系统内最靠近左边界的车辆在 $(t+1)$ 时刻的速度; t_s 表示左边界中新生成的车辆从 $(t+1)$ 时刻开始以最大减速度 $a_{\max}$ 刹车,直至停止所需时长, $t_s = v_s(t+1)/a_{\max,s}$; t_p 是主系统内最后一辆车以最大减速度 $a_{\max}$ 刹车直至停止所需时长,与 t_s 有相似意义.

$d_{\text{keep}}^{\text{mov}}$ 值的计算公式^[24]为:

$$d_{\text{keep}}^{\text{mov}} = \frac{a_{\max,p}}{2} - \frac{(v_p(t) - a_{\max,p} - v_s(t))^2}{2(a_{\max,p} - a_{\max,s})} (v_p(t) - v_s(t)). \quad (1)$$

(ii)若 $\tilde{\tau} < t_s$ 和 $\tilde{\tau} < t_p$ 不能同时满足,则可能碰撞形式为情形(a),车辆的匀速安全跟随距离 $d_{\text{keep}}^{\text{det}}$ 的计算公式^[24]为:

$$d_{\text{keep}}^{\text{det}} = \frac{(v_s(t))^2}{2a_{\max,s}} - \frac{(v_p(t) - a_{\max,p})^2}{2a_{\max,p}} + \frac{a_{\max,p}}{2} - (v_p(t) - v_s(t)), \quad (2)$$

式中: v 和 a 分别表示车辆的速度和加(减)速度; $a_{\max}$ 表示最大减速度且为正值,对于不同车型 a 和 $a_{\max}$ 的取值均不同; $a_{\max,s}$ 和 $a_{\max,p}$ 分别代表新生成车辆和前车 p 的最大减速度.根据动力学理论,当车辆 p 以最大减速度刹车时,在 $(t+1)$ 时刻的速度为 $v_p(t+1) = v_p(t) - a_{\max,p}$. 生成车辆的速度 v_s 是从 0 到 $v_{\max}$ 的整数,如果 $v_{\max}$ 为 N ,那么 v_s 就有 $(N+1)$ 个可能的值.

由此得到的新生成车辆可能的安全跟随距离

d_{keep} 同样也有 $(N+1)$ 个值.

(3) 确定新生成车辆的位置 X_s .

$$X_s = X_p - d_{\text{keep}} - L_p, \quad (3)$$

式中: X_s 为左边界中新生成车辆的位置; X_p 为主系统中离左边界最近的车辆 p 的位置; d_{keep} 由步骤 2 得到; L_p 指车辆 p 的长度.

因此, 由式(3)得到 $(N+1)$ 个 X_s 值. 如果左边界包含 M 个元胞格子, 那么挑出位于 0 到 M 范围内的 X_s , 表示生成车辆的若干个潜在位置.

(4) 确定适应性速度 V_{keep} . 由步骤(3)得到 X_s 值, 再由式(3)计算出其各自相对应的 d_{keep} 值. 为了避免生成车辆与前车发生碰撞, 根据式(1)或式(2)计算左边界新生成车辆的速度 v_s . 这样可得若干 v_s , 取最大 v_s 值, 即为初始自适应速度 V_{keep} .

通过上述 4 个步骤, 得到修正后左边界新生成车辆的初始速度. 利用交通流模型, 重新模拟得到左、右车道上不同位置处车辆速度随进车率的变化(图 3). 从图 3 可知, 左边界处车辆的速度没有出现突然降低的现象, 车速特征与实际情况相符.

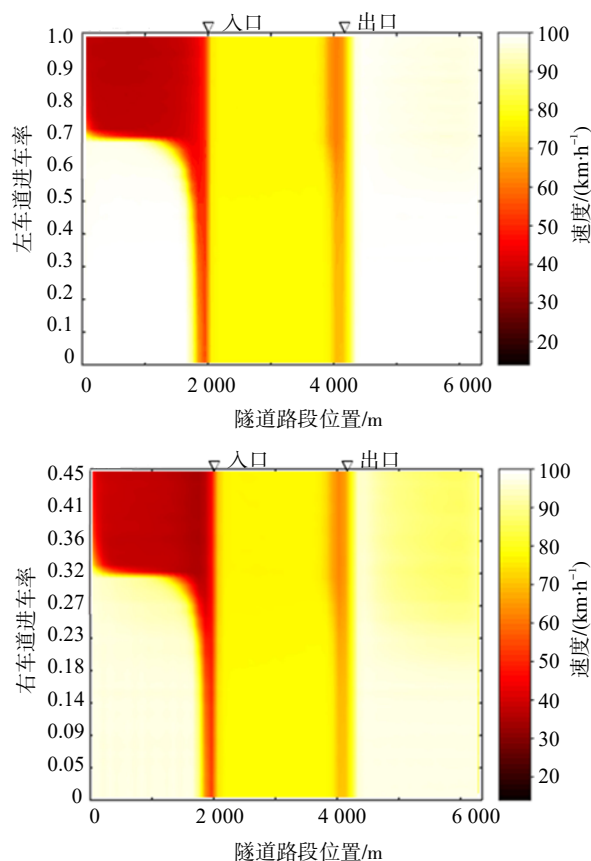


图3 模型修正后速度随进车率和位置的变化

1.2.2 货车对小车产生影响的程度及范围

从图 2 可见, 当进车率较大时, 左车道上车速低于以货车为主导的右车道平均速度, 而从实测数据的统计分析中发现, 大流量时两条车道上的车速接近. 产生差异的原因是模型中强调小车避免跟随货车前行, 使得右车道上货车较多, 小车尽量在左车道, 造成左车道密度较大、车速缓慢. 事实上, 只有在车辆密度不太大, 速度大于 V_1 时, 小车才会避免跟随货车. 当车辆密度较大, 速度小于 V_2 ($V_2 < V_1$) 时, 即使前面的车辆是货车, 小车驾驶员也会根据具体情况在两条车道之间换道, 以尽快向前行驶. 当车辆密度适中, 速度介于 V_2 和 V_1 之间时, 小车避免跟随货车行驶的意愿则会随着车速的变化而变化. 因此, 依据录像资料, 对交通流模型横向换道规则中的货车影响距离进行了修改.

(1) 当密度较小, 小车速度大于 V_1 情况下, 纵向行驶会严格遵循原模型中提出的小车避免跟随货车行驶的规则^[24], 设置货车对小车产生严重影响的极限距离 $L_{\text{max}1}$ 和产生中等影响的极限距离 $L_{\text{max}2}$ ($L_{\text{max}1} < L_{\text{max}2}$). 当小车与货车的距离小于 $L_{\text{max}1}$ 时, 货车对小车行驶产生严重影响, 即当货车在小车同车道时, 不管是谨慎型司机还是激进型司机, 小车会尽快换道, 换道概率为 1; 当货车在旁边车道时, 小车会保持当前车道行驶. 当小车与货车的距离大于 $L_{\text{max}1}$ 而小于 $L_{\text{max}2}$ 时, 货车对小车的行驶产生中等影响, 即当货车在小车同车道时, 谨慎型司机可能会选择换道, 换道概率为 0.7^[24], 激进型司机会按照通常的换道规则进行换道, 换道概率为 1^[24]; 当货车在旁边车道时, 谨慎型司机会保持当前车道行驶, 激进型司机会按照通常的换道规则进行换道, 换道概率为 0.5^[24]. 当小车与货车的距离大于 $L_{\text{max}2}$ 时, 货车对小车行驶产生的影响可以忽略, 此时小车按照通常的换道规则进行换道.

(2) 当密度较大, 小车速度低于 V_2 情况下, 小车以追求更高的行驶速度作为首要目标, 不排除选择在货车后方行驶, 即在这种情况下, 不考虑原模型中货车对小车的影响, 小车驾驶员会根据具体情况, 在两条车道之间换道, 以尽可能快地向前行驶. 根据对实测数据的分析, 当换道动机和安全条件均满足时, 无论是谨慎型司机还是激进型司机, 此时换道概率都为 1^[24].

(3)当小车的行驶速度在 V_1 和 V_2 之间时, 采用线性插值法计算货车对小车的严重影响距离 L_{tt1} 和中等影响距离 $L_{tt2}(L_{tt1} < L_{tt2})$, 具体计算公式为:

$$L_{tt1} = L_{\max1} - (V_1 - V)L_{\max1} / (V_1 - V_2), \quad (4)$$

$$L_{tt2} = L_{\max2} - (V_1 - V)L_{\max2} / (V_1 - V_2), \quad (5)$$

式中: V 是此时小车的行驶速度。

由式(4)和式(5)可知, 当小车的行驶速度在 V_1 和 V_2 之间时, 货车 L_{tt1} 和 L_{tt2} 随着小车速度的减小而线性递减, 即随着车辆速度的减小, 货车对小车产生影响的范围逐渐减小。当小车与货车的距离在不同的影响范围时, 小车的换道行为与上述(1)相同。

根据文献[24], $L_{\max1}$ 和 $L_{\max2}$ 分别设为 100 m 和 200 m。通过模拟结果与实测数据拟合, 得到 V_1 和 V_2 分别为 $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

根据图 3, 当进车率较大时, 在隧道上游路段, 左、右车道的平均速度趋于一致, 说明模型修改后其结果更符合实际交通情况。

2 交通流模型验证与交通流特性分析

选取 2020 年 12 月 6 日 07:00 至 19:00 角洞岙隧道路段宁波方向的实测交通录像资料进行统计

分析, 测试断面路段如图 4 所示。截面I和截面II是隧道入口处用于参数统计的控制截面, 两截面之间的距离 L_1 为 60 m。截面III和截面IV为隧道中间路段的控制截面, 两截面之间的距离 L_2 为 100 m。截面V和截面VI是隧道出口处用于参数统计的控制截面, 两截面之间的距离 L_3 为 90 m。

统计隧道入口处左、右车道 5 min 流量, 得到左、右车道流量随时间的变化(图 5)。同时, 利用建立的交通流模型, 模拟得到隧道入口处左、右车道 5 min 的流量。从图 5 可见, 左、右车道实测与模拟流量随时间变化基本吻合。

另外, 统计交通录像视频中的车辆速度^[24], 分别测得车辆通过隧道入口、隧道中间路段、隧道出口处各截面所需时间, 由 L_1 、 L_2 、 L_3 分别除以车辆通过时间, 得到车辆在隧道入口、隧道内部、隧道出口处左、右车道的车辆速度。

利用建立的交通流模型进行数值模拟, 在隧道入口、隧道内部和隧道出口分别设置虚拟探测器, 得到隧道 3 个位置处左、右车道车辆 5 min 的平均速度。当实测流量与模拟流量相当时, 比较此时 3 个位置处左、右车道上车速的实测结果与模拟结果如图 6 所示。图 6(a)中实测流量为 $789 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$, 模拟

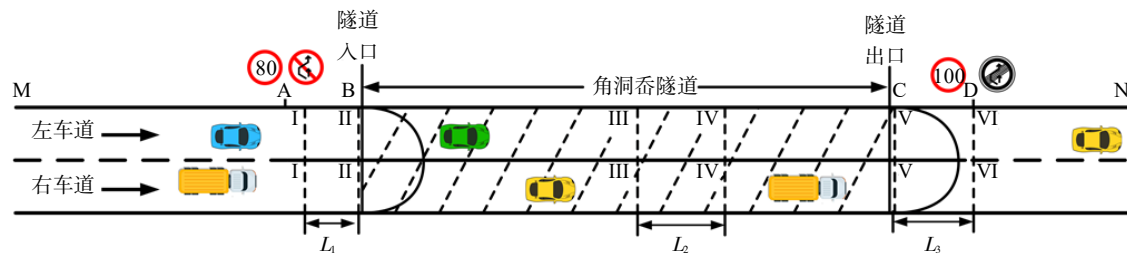


图 4 角洞岙隧道路段各测试断面示意图

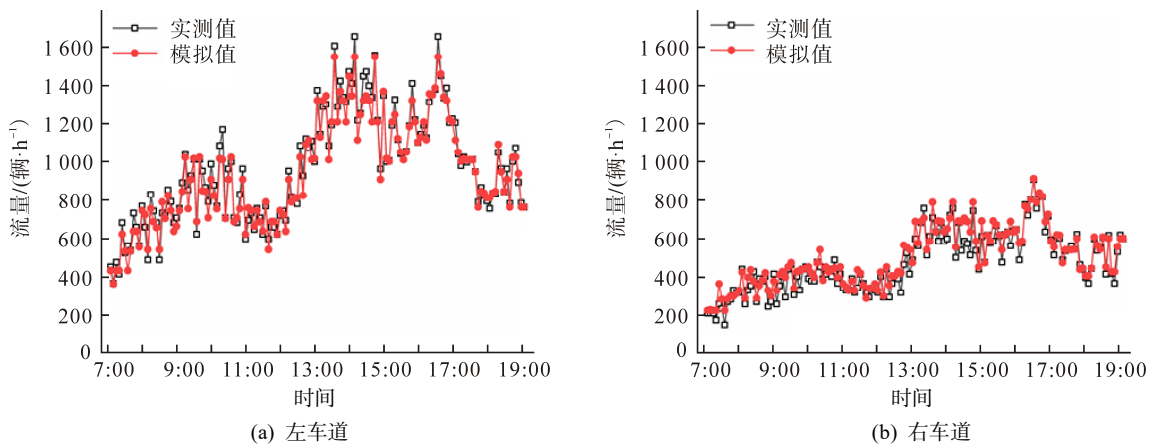


图 5 隧道入口处流量模拟结果与实测数据的比较

流量为 $793 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$; 图 6(b)中实测流量值 $1303 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$, 模拟流量为 $1305 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$.

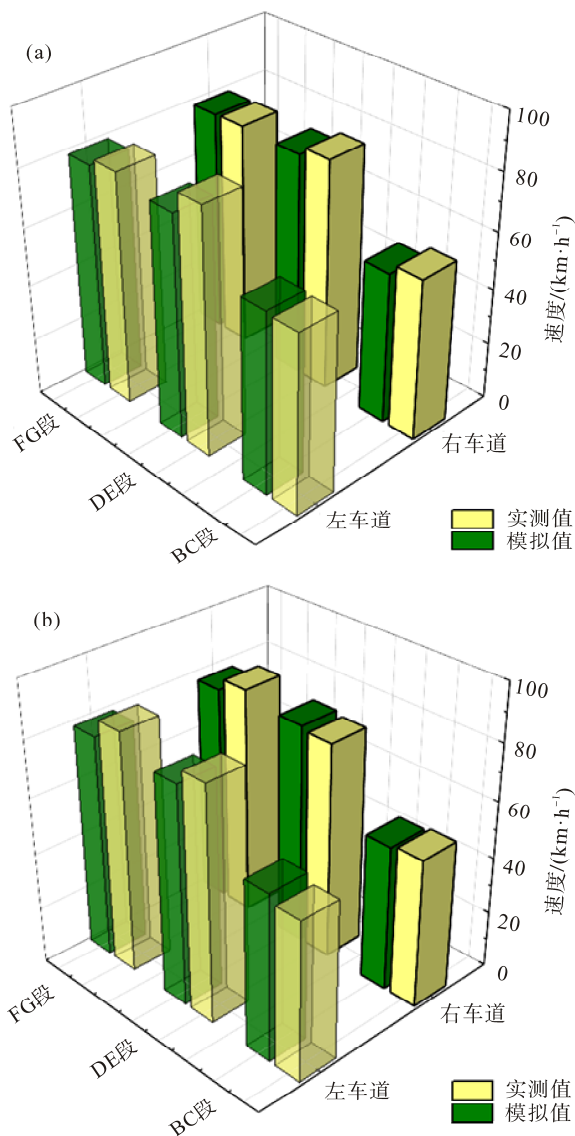


图6 在车流量相当情况下速度实测值与模拟值比较

从图 6 可知, 在 2 种情况下, 不管是左车道还是右车道, 也不管是在隧道入口、内部还是出口, 车速模拟值与实测值高度吻合。进一步分析发现, 在比较结果中, 50%的相对误差小于 5%, 89%的相对误差小于 10%, 说明修正后的交通流模型能更有效地反映隧道路段的交通流特性。

从图 6 还可知, 不论车流量低还是高, 隧道入口前两条车道上车辆的速度均明显低于隧道内和隧道出口处车速, 且车流量大时隧道入口前的车速降幅更大, 表明车辆进入隧道前由于“黑洞”效应和隧道内较低的限速要求, 造成车辆局部集簇

现象增加, 并且流量越大, 车辆的集簇越严重, 向上游蔓延的范围也越广, 从而车辆速度越小, 这也是隧道前交通拥堵现象常有发生的原因。然而, 隧道内和隧道出口后路段的速度比隧道入口前的速度大, 这是由于隧道内车辆不允许换道, 车辆之间的影响减弱, 从而车速变大。另外, 车辆驶出隧道后, 限速值由 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高到 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 因此车速也比隧道入口前大。这与王抢^[27]的研究结果相一致。

3 货车限速措施的数值模拟

为了进一步研究隧道路段货车对交通流造成的影响程度, 利用交通流模型得到了货车比 R 分别为 0、0.1、0.2, 且进车率为 0.4 时的车辆时空演化结果, 如图 7 所示。从图 7 可知, 在隧道入口和出口前方, 左、右车道上的车辆轨迹线变陡, 说明出现了明显的减速现象, 这与实际观察到的现象^[24]相符, 部分与隧道的“黑洞”效应和“白洞”效应有关。

当无货车(R 为 0)时, 在隧道入口和出口前方, 车辆轨迹线变陡, 车间距减小, 表示这些地方车速减小, 出现了车辆集簇现象, 但其余路段车辆轨迹线顺直, 交通状态为自由流。当 R 增加到 0.1(混合交通流)时, 可以看到左车道上小车居多, 只有个别几辆货车, 右车道上货车较多, 此时左、右车道上出现了一些空白间隙, 这是由于货车速度慢, 拉大了与前面小车的车距。如果左、右车道上出现了 2 辆并排行驶的货车(图 7(c)和(d)黑色箭头处), 道路上会形成“塞子”, 阻挡后面车辆的快速通行。在隧道内部, 车辆不允许换道操作, 此时轨迹线基本完整, 没有中断, 即车辆没有换道, 通行状况较好。在隧道出口下游, 小车的轨迹线开始变得断断续续, 这是由于限速值从 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高到 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 小车开始频繁换道, 以避免跟随货车后行驶。当 R 为 0.2 时, 在左车道上随着货车数量的明显增加, 隧道入口处出现了明显的交通拥堵, 拥堵区域由隧道入口前约 160 m 扩大到隧道入口前约 400 m。同时, 左车道上的空白间隙明显增宽, 这是由于前方小车与后面货车的速度差以及并排行驶货车的“塞子”效应(图 7(e)和(f)黑色箭头处)造成。尤其是, 隧道出口下游的空白间隙明显扩大(图

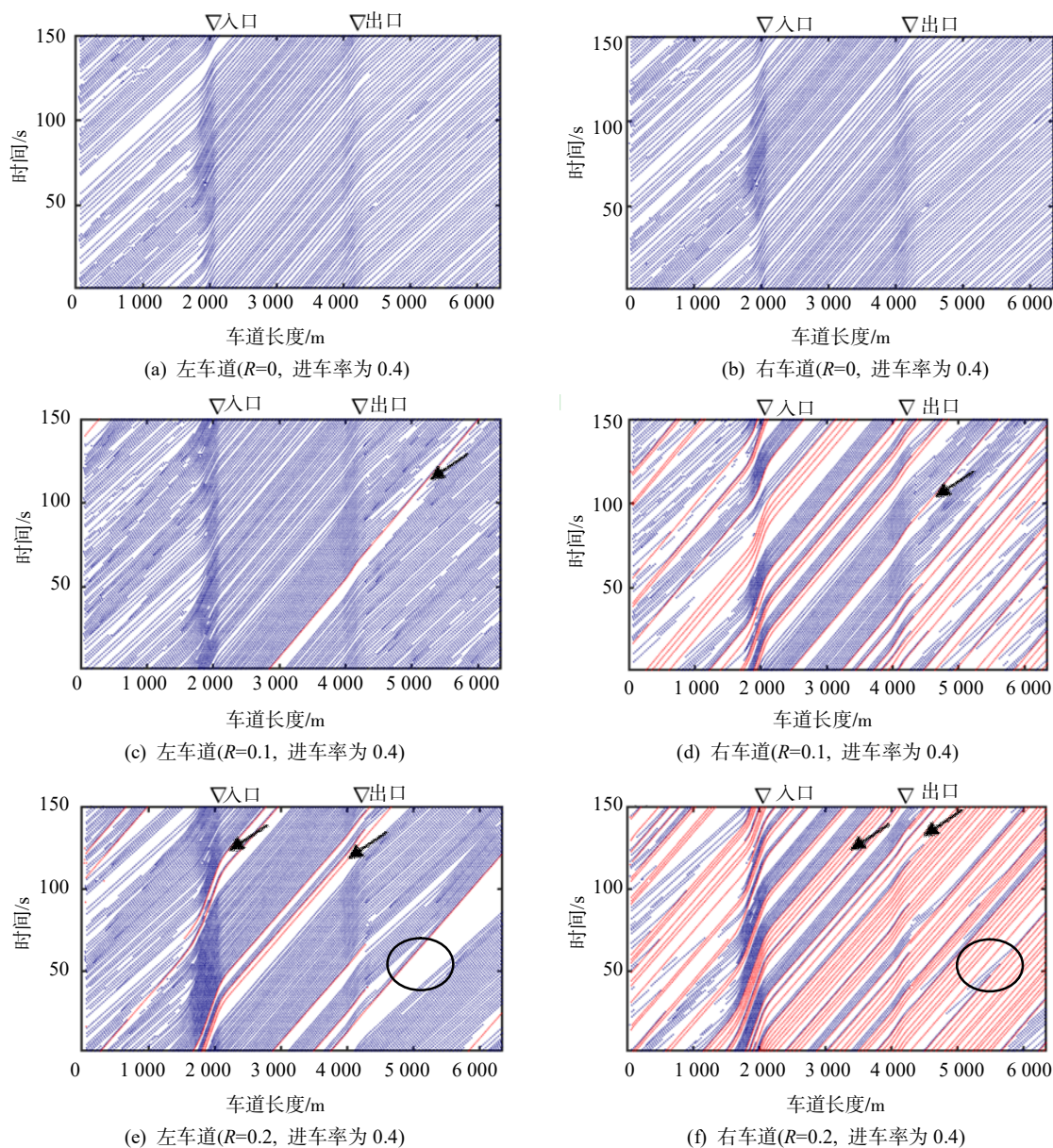


图 7 不同货车比下的车辆时空演化

7(e)和(f)中黑色圆圈内),这是由于此处小车限速值由 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 提高至 $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,而货车的最大速度只有 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,速度差引起了更大的空白间隙,降低了道路的利用率,从而降低了流量.与图 7(d)相比,右车道上货车数量明显增多,且车速减小.

综上分析可知,由于货车行驶速度较慢,会影响后方车辆的正常行驶,尤其是当2辆低速行驶的货车在左、右车道上并排行驶或距离过近时,会形成“塞子”,阻挡后方车辆.同时,由车速差引起的货车和小车之间的大量空白间隙降低了道路的利用率,导致车速和车密度明显降低,从而进一步

降低了车流量.这些现象随着货车比的增加变得更为明显.

这种由于货车行驶速度较慢,影响后方车辆正常行驶的现象,在其他仿真模型中也同样出现.如刘琦^[28]建立的沪宁高速公路苏州段高速公路 VISSIM 仿真模型研究中,发现货车作为道路上的“移动瓶颈”,会引起小车减速跟随货车前进,尤其是当货车车速较低,小车车速较高时,更大的车速差使得货车的“移动瓶颈”影响更加明显.

为了提高道路通行能力,需要对货车进行管理.货车的管理方法主要有客货分离、货车限道等.

客货分离是指在道路上通过分隔方式,将小车和货车完全或部分分隔,成为相互独立的两股车流,减少小车与货车之间的相互干扰.对于单向双车道的角洞岢隧道路段,实施客货分离的方法会严重占用道路资源,增加交通拥堵的可能性.而货车限道措施允许货车在指定车道,一般为右车道内行驶,而小车可以在左、右车道内行驶,这种措施可以保证左车道上的小车不受货车的干扰.

在隧道路段实施货车限道措施后,车辆的行驶速度成为反映交通通畅性的重要参数,也是评价交通优化措施效果的重要指标.为了研究不同货车比时货车限道措施对车辆速度的提升程度,分别模拟了货车限道前后道路上车辆的行驶速度.图8为货车限道措施实施前后的车速比较,其中情形A为货车限道措施实施前,此时货车、小车可以在任意车道上行驶;情形B为货车限道措施实施后,此时货车仅允许在右车道上行驶,而小车可以在任意车道上行驶.

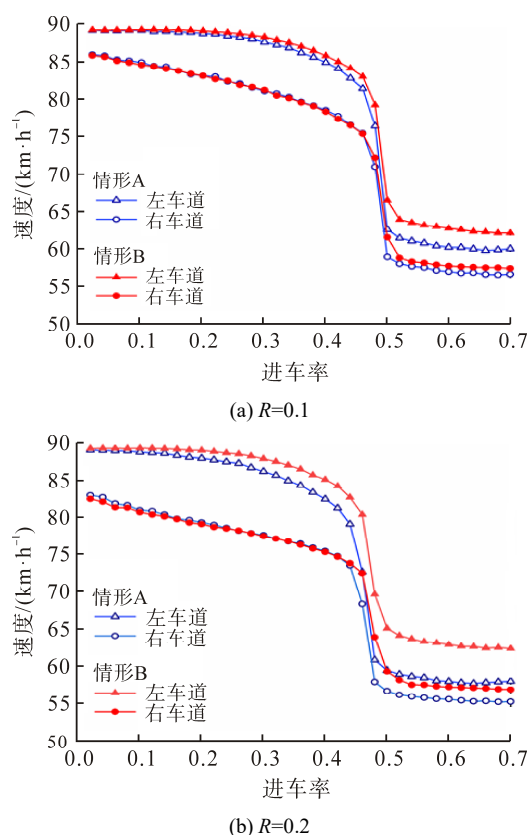


图8 货车限道措施实施前后的车速比较

从图8(a)可知,当 R 为0.1,进车率低于0.48时,左、右车道车辆的平均速度随着进车率的增加

而较为平稳地下降,货车限道后,左车道车速略有提高,右车道几乎无变化.当进车率超过0.48时,道路上车速都急剧降低,速度差接近 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,表明此时交通出现了拥堵.货车限道后,左车道上车速明显提升,右车道上车速也有增加,但增幅稍小.可见,当 R 为0.1,进车率较大时,货车限道可以有效提升车辆速度.

从图8(b)可知,在 R 为0.2且进车率约为0.46时,车速开始急剧降低(小于 R 为0.1,进车率为0.48时),表明在较高货车比的情况下,因车速急速下降,更容易导致交通拥堵.

此外,货车限道后左车道的车速在各个进车率下均显著提高,当进车率从0.02增至0.46时,左车道车速提升的幅度逐渐增大,这是由于在货车限道前,左车道上仍有少量货车行驶,影响小车加速,随着进车率增大,这种阻挡影响增大.而货车限道后,左车道上的小车行驶环境得到改善,速度随之提高.然而,对于右车道,在进车率低于0.46时,货车限道前后的速度基本一致,当进车率高于0.46时,货车限道后的车速显著提高.这是由于当进车率较高(大于0.46)时,进入到道路上的车辆较多,但是由于左车道上小车行驶环境得到改善,换道至右车道的车辆减少,从而使右车道上的交通更加有序,平均车速得到提高.因此,在 R 为0.2时,货车限道后的车辆速度提升效果比 R 为0.1时更为明显.

综上所述,在高进车率、高货车比时,货车限道措施能够更加有效地提升车速,从而提高交通流量.

4 结论

(1)基于本课题组早先建立的隧道路段交通流模型,通过修改模型的边界条件,细化不同车速下货车对小车影响程度及范围的差异,消除了原模型中的不合理成分,建立了更符合实际的隧道路段交通流模型.通过数值模拟,计算得到了流量的时间序列以及不同隧道断面的车辆速度,与实测数据比较,吻合较好,表明该模型能够有效模拟隧道路段的交通流特性.同时,揭示了隧道入口前比隧道内和隧道出口处更易引发交通拥堵的原因.

(2)通过模拟得到了不同货车比下车辆时空演

化图, 展现了货车的存在降低了车流量, 容易引发交通拥堵的深层原因. 为了缓解货车对交通造成的不利影响, 提出了货车限道措施. 利用提出的交通流模型, 模拟得到了货车限道前后左、右车道上车速的变化情况. 当货车比为 0.1, 大进车率时, 货车限道可以有效提升车辆速度, 左车道上提升效果更为明显; 当货车比为 0.2, 无论多大的进车率, 货车限道都可以有效提升左车道的车速. 在大进车率时, 右车道上的车速也可得到提升. 在高货车比时, 货车限道措施更有利于提高车流量、减少交通拥堵.

参考文献:

- [1] KORPINEN O, AALTO M, VENÄLÄINEN P, et al. Impacts of a high-capacity truck transportation system on the economy and traffic intensity of pulpwood supply in southeast Finland[J]. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 2019, 40:89-105.
- [2] AGHABAYK K, SARVI M, YOUNG W. Understanding the dynamics of heavy vehicle interactions in car-following[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, 138(12):1468-1475.
- [3] LYU Z L, HU X J, ZHANG F, et al. Heterogeneous traffic flow characteristics on the highway with a climbing lane under different truck percentages: the framework of Kerner's three-phase traffic theory[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 587:126471.
- [4] BEHNOOD A, AL-BDAIRI N S S. Determinant of injury severities in large truck crashes: a weekly instability analysis[J]. *Safety Science*, 2020, 131:104911.
- [5] ZENG J W, QIAN Y S, ZHANG J L, et al. A cellular automata model to simulate micro-characteristics of tunnel traffic flow[J]. *Acta Microscopica*, 2018, 27(4): 235-241.
- [6] MA Z L, SHAO C F, ZHANG S R. Characteristics of traffic accidents in Chinese freeway tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(3):350-355.
- [7] SUN H, WANG Q P, ZHANG P, et al. Spatialtemporal characteristics of tunnel traffic accidents in China from 2001 to present[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019:4536414.
- [8] TIAN J F, ZHU C Q, JIANG R, et al. Review of the cellular automata models for reproducing synchronized traffic flow[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021, 17(4):766-800.
- [9] KONG D W, LIST G F, GUO X C, et al. Modeling vehicle car-following behavior in congested traffic conditions based on different vehicle combinations[J]. *Transportation Letters*, 2018, 10(5):280-293.
- [10] FENG T J, LIU K Y, LIANG C Y. An improved cellular automata traffic flow model considering driving styles[J]. *Sustainability*, 2023, 15(2):952.
- [11] ZHU H B, LEI L, DAI S Q. Two-lane traffic simulations with a blockage induced by an accident car[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2009, 388(14): 2903-2910.
- [12] ZHU H B, ZHANG N X, WU W J. A modified two-lane traffic model considering drivers' personality[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2015, 428: 359-367.
- [13] RICKERT M, NAGEL K, SCHRECKENBERG M, et al. Two lane traffic simulations using cellular automata[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1996, 231(4):534-550.
- [14] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. *Journal de Physique I*, 1992, 2(12):2221-2229.
- [15] LÁRRAGA M E, ALVAREZ-ICAZA L. Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2010, 389(23):5425-5438.
- [16] GUZMÁN H A, LÁRRAGA M E, ALVAREZ-ICAZA L, et al. A cellular automata model for traffic flow based on kinetics theory, vehicles capabilities and driver reactions [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, 491:528-548.
- [17] 孙然然, 张静萱, 戴泽华, 等. 基于元胞自动机的特长隧道交通流模型研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45(4):618-625.
- [18] 胡晓辉, 何晓庆, 郑峰, 等. 一种改进 CA 高速公路隧道交通流仿真研究[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(16):207-211.
- [19] DOUGLAS J G. Strategies for managing increasing truck traffic[M]. Washington: Transportation Research Board, 2003:1-89.
- [20] DAS S, LE M, PRATT M P, et al. Safety effectiveness of truck lane restrictions: a case study on Texas urban

- corridors[J]. *International Journal of Urban Sciences*, 2020, 24(1):35-49.
- [21] EL-TANTAWY S, DJAVADIAN S, ROORDA M J, et al. Safety evaluation of truck lane restriction strategies using microsimulation modeling[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2099:123-131.
- [22] 曹嘉晨. 考虑货车交通影响的多车道高速公路管控方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [23] 钟连德, 李爱民, 曾洪岸, 等. 节假日高速公路大货车管理策略研究[J]. *公路*, 2011, 56(3):102-106.
- [24] LU X Y, ZHU H B, WANG J G, et al. Modeling impacts of the tunnel section on the mixed traffic flow: a case study of Jiaodong'ao Tunnel in China[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 603: 127840.
- [25] 吴胜春, 郑贤清, 郭明旻, 等. 国内典型大城市快速路交通流实测[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2011, 41(6):791-800.
- [26] GUZMÁN H A, LÁRRAGA M E, ALVAREZ-ICAZA L. A two lanes cellular automata model for traffic flow considering realistic driving decisions[J]. *Journal of Cellular Automata*, 2015, 10:65-93.
- [27] 王抢. 高速公路长隧道出入口段可变限速研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [28] 刘琦. 高速公路重载货车移动瓶颈仿真研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.

Numerical simulation of lane restriction measure for trucks in a long tunnel section: a case study of Jiaodong'ao Tunnel on the Ningbo-Dongguan Expressway in China

WU Quanhao¹, LU Xingyu², YAN Xing¹, ZHU Huibing¹, SHEN Jun³, YAN Yanbin³

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315032, China;

3.Zhejiang Xindian Engineering Technology Co., Ltd., Ningbo 315021, China)

Abstract: A two-lane cellular automaton traffic model with a long tunnel is proposed based on the analysis of actual measured traffic data, in which a new boundary condition and the influence range of trucks on cars are adopted. The simulation results are compared with the measured data, and they are in good agreement with each other. It indicates that the improved traffic model can effectively simulate the characteristics of traffic flow with a long tunnel section. Numerical simulations show that the presence of trucks increases the probability of congestion in the tunnel section, and this effect increases with the proportion of trucks. In order to reduce the negative impact of trucks on traffic flow in tunnel section, the measure of lane restriction for trucks is proposed, and the numerical simulation is carried out. It is shown that vehicles' speeds in the left lane increase when the measure of lane restriction for trucks is adopted, and vehicles' speeds in the right lane will increase when the injection is large. Especially, in the case of high proportion of trucks, speeds increase significantly. Large speeds lead to high traffic flow. The research can be used as a theoretical reference for the management of traffic flow on the highway with long tunnels.

Key words: highway; long tunnel section; traffic model; mixed traffic flow; lane restriction for trucks

(责任编辑 史小丽)