

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0126

隧道路段应急车辆快速通行策略的数值模拟

何 芃¹, 王子康¹, 祝会兵^{1*}, 胡嶙峋², 陈 磊²

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江信电工程技术有限公司, 浙江 宁波 315021)

摘要: 利用元胞自动机交通流模型, 基于雷视一体机测得的实际交通数据, 考虑应急车辆在隧道路段快速通行及其与其他车辆之间的相互影响, 建立了一种适用于高速公路隧道路段有应急车辆通行时的交通流模型, 分析了交通流呈现自由流、同步流以及宽幅运动阻塞时流量与密度的关系。针对前方车辆不同的让行率, 计算了应急车辆通过隧道路段的时间。结果表明, 当密度 $\rho < 0.29$ 时, 前方车辆让行率大于 80% 可有效提高应急车辆的通行效率, 并从微观角度对该结果进行了探讨。研究结果可为高速公路隧道路段保障应急车辆的快速通行提供理论参考。

关键词: 高速公路; 隧道路段; 应急车辆; 交通流模型; 快速通行

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0095-09

救护车、消防车、警车等应急车辆作为公共安全体系的重要组成部分, 承担着挽救生命、提供援助和恢复现场秩序等安全维护责任^[1], 在及时提供紧急服务方面发挥着重要作用^[2]。而高速公路隧道路段因其独特的结构特点, 如入口处的“黑洞效应”和出口处的“白洞效应”, 以及隧道路段较低的限速, 使这一路段的交通流更易出现拥堵, 乃至发生交通事故^[3-6]。若应急车辆在执行任务时需要通过隧道路段, 会面临通行受阻的风险, 从而造成严重的后果^[7-8]。因此, 在混合应急车辆的交通流中, 保证应急车辆在隧道路段的快速通行是交通管理中迫切需要解决的问题。

要保证应急车辆快速通行, 首先要了解混有应急车辆时的交通流特性, 而交通流建模是探明交通流特性的一种有效手段。已有学者对有关应急车辆快速通行问题展开了研究, 如 Shibuya 等^[9]通过建模发现应急车辆在城市道路执行任务时换道率高的结果; 赵韩涛等^[10]在模型中引入应急车辆警笛的影响范围, 发现应急车辆对普通车流的影响并非完全负面, 在密度较低时能够促使交通流更加均衡。

目前, 针对应急车辆快速通行的方法和策略是交通流研究的热点之一。王强华等^[11]通过数值仿真发现, 在相同车流密度下, 应急车辆影响范围越大, 通行效率越高; Li 等^[12]通过分析应急救援车辆的交通流特点, 提出了保证应急车辆安全无延迟通过交叉口的交通管理措施; Zhao 等^[13]通过建模发现, 在密度较高的交通流中, 应急车辆通过换道可提高通行效率; 豆雪珊^[14]提出了一种以应急车辆优先通行为目标的方法及控制策略, 提升了应急车辆在交叉口的通行效率。综上所述, 应急车辆在城市道路, 尤其是交叉路口的优先通行研究已有成效, 但针对应急车辆在高速公路隧道路段的快速通行研究较为鲜见。

针对隧道路段的交通流特性研究已有报道, 如孙然然等^[15]根据隧道不同区段的交通流特性, 建立了特长隧道的元胞自动机交通流模型, 计算出各隧道区段车辆通行的最佳限速; Lu 等^[16]基于车辆的安全行驶距离^[17]和非对称换道规则^[18], 结合隧道路段特性, 展现了隧道入口前拥堵形成的特点, 揭示了通行能力下降的趋势; Wang 等^[19]提出了隧道路段考虑大车优化策略的双车道交通流

收稿日期: 2025-01-21 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市公益计划(202002N3199)

第一作者: 何 芃, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通流建模与交通优化。E-mail: 1175718301@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

模型,通过数值模拟证明该策略能够显著提高道路的通行能力;林杉等^[20]提出了含有隧道交通瓶颈的元胞自动机模型,研究了车辆换道行为、加减速等现象对交通流的影响;刘运霞等^[21]对高速公路隧道群进行合理分段,确定了各路段的最佳限速值。已有的研究成果为揭示隧道路段有应急车辆通过时的交通流特性打下了基础。

笔者基于本课题组早先提出的隧道路段交通流模型^[16],考虑应急车辆的独特行驶方式,提出了一种适用于隧道环境下有应急车辆通过时的元胞自动机交通流模型。通过该模型研究了应急车辆快速通行策略及其与普通车辆之间的互相影响,以期为隧道路段有应急车辆时的交通管理提供理论指导。

1 应急车辆通过隧道路段时的行驶特征

根据《中华人民共和国道路交通安全法》^[22]第 53 条规定,当应急车辆执行任务时,可以不受道路限速的影响,其他车辆应当让行,使其快速通过。在双车道高速公路上,应急车辆基本在车道 1 上行驶,同时鸣笛提醒前车避让。但是位于应急车辆前方不同范围内的车辆,对于应急车辆的鸣笛

行为反应不同,前方距离应急车辆较近的车辆一部分会选择让道,另一部分由于车辆性能或司机应激响应能力不同选择不让道;而前方较远处的车辆一般不会立即换道避让。

从一段救护车行车记录视频截图(图 1)可见,救护车选择在左侧车道(车道 1)上行驶,前方大车不换道让行^[23],小车(线框中车辆)发现后方鸣笛的救护车,主动换道至右侧车道(车道 2)。经统计,小车的让行率约为 80%。

在隧道路段,普通车辆必须遵守隧道内限速的规定,隧道内限速一般低于隧道外正常道路的限速,并且不允许换道。但对应急车辆,通过隧道路段时不受速度限制,且可以自由换道,其他车辆应主动为其让行(此时允许车辆通过换道为应急车辆快速通过提供方便)。然而,隧道作为一个半封闭的空间结构,内部较外部光线昏暗,在隧道入口和出口处容易产生“黑洞效应”和“白洞效应”,给司机驾驶车辆带来影响,因此在隧道路段更容易引发交通拥堵。

隧道本身的结构,以及隧道内外车辆速度的变化都会间接影响应急车辆的行驶效率。应急车辆通过隧道路段的交通场景如图 2 所示。



图 1 救护车行车记录视频中白色小车的让道行为

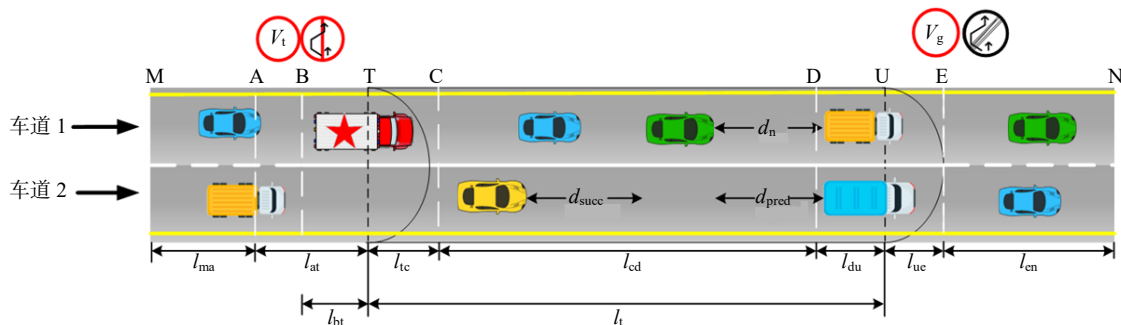


图 2 有应急车辆通过时的隧道路段交通流示意图

从图2可见, 研究路段MN包含隧道TU(长度 l_t)。考虑到车辆在不同位置司机的驾驶行为有所不同, 因此将整条道路划分为隧道接近段AT(长度 l_{at})、隧道入口段TC(长度 l_{tc})、隧道基本段CD(长度 l_{cd})、隧道出口段DU(长度 l_{du})、隧道出口至解除限速提示牌位置路段UE(长度 l_{ue}), 以及普通路段MA(长度 l_{ma})和EN(长度 l_{en})。此外, 在距离隧道入口 l_{bt} 的断面B处设置了限速提示牌和禁止换道提示牌, 普通车辆隧道内限速值为 V_t 。在距离隧道出口 l_{ue} 的断面E处设置了恢复普通道路限速值 V_g 提示牌, 以及解除禁止换道提示牌, 即在BE段, 普通车辆限速值为 V_t , 禁止换道, 其他路段限速值为 V_g , 允许换道, 且 $V_g > V_t$ 。

在普通路段MA行驶时, 普通车辆(大车和小车)可以双向换道, 限速 V_g 。当车辆驶入隧道接近段AT时, 司机往往会减速, 其中AB段中车辆可双向换道, 但BT段中车辆禁止换道, 此时车辆离隧道口越来越近, 开始减速, 从B点开始直至隧道出口E点, 车辆都被禁止换道。车辆进入隧道后, 经过隧道入口段TC, 司机会受到“黑洞效应”的影响, 车辆将继续减速行驶; 当车辆驶入隧道基本段CD时, 司机已经适应隧道内的光线, 车辆开始加速直至达到期望的车速; 当车辆驶入出口段DU时, 司机会受到“白洞效应”的影响, 车辆再次减速; 接着驶离隧道, 进入路段UE, 车辆开始加速, 但不会超过隧道内限速值 V_t 。当车辆驶入路段EN后, 车辆限速恢复至 V_g , 且恢复双向换道。

图2中有五角星标注的车辆为应急车辆, 行驶速度不受限速约束, 但会受到隧道的影响。假设隧道外应急车辆最大速度为 V_{eg} , $V_{eg} > V_g$, 隧道内应急车辆最大限速为 V_{et} , $V_{et} > V_t$ 。另外, 应急车辆在隧道内允许换道, 但一般在车道1上行驶。当应急车辆鸣笛驶入隧道, 此时允许前方的普通车辆换道, 以便给应急车辆让行。实际上, 大车由于车辆性能的原因一般不会换道, 部分车道1上小车则会换道至车道2, 为应急车辆让行, 等应急车辆通过后, 这部分小车又会重新换道至车道1。

2 有应急车辆通行时隧道路段的交通流模型

根据图2所示的道路和交通场景, 基于本课题组提出的隧道路段考虑大车影响距离的双车道交

通流模型^[16], 简称DTI(Distance of Truck's Influence)模型, 建立了考虑应急车辆通行的隧道路段元胞自动机交通流模型(TMEV-1模型)。

在模型中, 把道路上行驶的车辆分为3种类型: 应急车辆、小车和大车。其中应急车辆指救护车、交警巡逻车、消防车等处理紧急情况的车辆, 具有行驶速度快、加减速速度大、体积大等特点。小车指行驶速度较快、加减速速度大、体积小的车辆, 如轿车等。大车指重型车辆, 行驶速度较慢、加减速速度小、体积大的车辆, 如货车、卡车等。

与DTI模型相同, 模型考虑了司机性格差异, 将司机类型分为激进型司机、谨慎型司机和超激进型司机。激进型司机对交通环境的应激反应能力强, 追求高速度的愿望较为强烈, 极易出现换道行为。谨慎型司机在行驶过程中比较保守, 换道概率小。而超激进型司机行驶速度相比于激进型司机更快, 换道更频繁, 这里认为应急车辆司机的性格为超激进型司机。根据对实际交通中车辆主动为应急车辆换道让行的驾驶行为分析, 假设为应急车辆让行的司机为激进型司机, 从上述救护车的行车记录仪数据分析得到, 小车司机既有激进型也有谨慎型, 激进型司机占比为80%, 大车司机则全部为谨慎型司机。在模型中, 3种类型的司机采用不同的纵向前进规则和横向换道规则。

2.1 纵向前进规则

基于DTI模型中小车和大车的纵向前进规则^[16], 考虑应急车辆的存在对其他车辆的影响, 分别提出了小车、大车和应急车辆的纵向前进规则。

2.1.1 小车和大车的纵向前进规则

小车和大车的纵向前进规则采用DTI模型中规则, 分5部分: 确定安全跟随距离(S1); 慢启动规则(S2); 确定加速度 $a_n(t+1)$, 包括车辆的加速、随机慢化、主动减速、被动减速(S3); 确定车辆速度(S4); 位置更新(S5)。

2.1.2 应急车辆的前进规则

应急车辆执行紧急任务时, 快速通过是其唯一目的。在模型中, 考虑到应急车辆的优先通行权, 假设其在进、出隧道时不受“黑洞效应”和“白洞效应”的影响, 从而确保其能够快速通过隧道路段。为了实现这一目标, 司机会尽量避免任何可能导致减速的因素, 因此为了真实再现应急车辆的

纵向前进驾驶行为, 设定其纵向前进规则为: (1)不考虑随机慢化; (2)不考虑主动减速; (3)应急车辆隧道内最高车速为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 隧道外普通路段最高速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 普通车辆隧道内最高车速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 隧道外最高速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.2 横向换道规则

2.2.1 小车的换道规则

当小车同车道后方一定范围内无应急车辆, 即小车不受应急车辆的影响, 小车的换道规则与DTI模型中规则相同^[16], 且在隧道内不换道。

当小车同车道后方一定范围内存在应急车辆, 若小车与应急车辆的车间距为 d_e , 这里假设有2个范围, 即 $d_e \leq D_1$ 和 $D_1 < d_e \leq D_2$, 处在不同范围内的应急车辆对前方小车产生的影响不同, 具体规定为

(1) 若 $d_e \leq D_1$, 前方小车接收到应急车辆的鸣笛后, 大约 80%的激进型小车司机采取换道让行措施。

(2) 若 $D_1 < d_e \leq D_2$, 其中 $D_1 < D_2$, 即前方车辆离应急车辆稍远。此时, 50%的小车司机继续在本车道行驶, 50%采取换道让道措施。

(3) 若 $d_e > D_2$, 应急车辆不会对小车产生影响。

一般认为, 应急车辆对前方车辆的影响距离为 375 m ^[24], 文中取 D_1 为 250 m , D_2 为 375 m 。

另外, 避让应急车辆而换道的小车, 等应急车辆通过后, 会有换回车道 1 的意愿。当实施换道时, 换道需满足的条件与 DTI 模型中相同。在隧道外, 考虑小车尽量避免跟随同车道大车行驶^[25]。

2.2.2 大车的换道规则

大车主要在车道 2 上行驶, 模型中大车采用非对称换道规则, 即从车道 1 换到车道 2 与从车道 2 换到车道 1 的换道意愿不同, 规则参照 DTI 模型^[16]。另外, 在后方有应急车辆鸣笛时, 大车一般不会通过换道给应急车辆让行, 应急车辆会采用超越大车达到快速通过的目的。

2.2.3 应急车辆的换道规则

在高速公路上, 应急车辆一般在车道 1 上行驶, 为了追求最高速度, 当遇到前方有车辆阻挡, 则会快速换道至车道 2, 随后再换回车道 1, 达到超越阻挡车辆的目的。因此, 应急车辆采用与车道相关, 并以快速通过为目的的非对称换道规则。

(1) 从车道 1 换道至车道 2

当应急车辆在车道 1 上不能满足其最大行驶速度, 而相邻车道 2 的行驶条件优于车道 1, 在满足换道动机和安全条件时, 应急车辆换道至车道 2。

换道动机为

$$d_{\text{keep}}(v_e, v_{e+1}) \leq d_e < d_{\text{acc}}(v_e, v_{e+1})$$

$$d_{\text{pred}} \geq d_{\text{acc}}(v_e, v_{\text{pred}}), \text{ 且 } v_e < v_{\text{emax}} \quad (1)$$

或者:

$$d_e < d_{\text{keep}}(v_e, v_{e+1}), \text{ 且 } d_{\text{pred}} \geq d_{\text{keep}}(v_e, v_{\text{pred}}) \quad (2)$$

安全条件为

$$d_{\text{succ}} \geq d_{\text{keep}}(v_{\text{succ}}, v_e) \quad (3)$$

式中: v_e 表示应急车辆的速度; v_{e+1} 表示应急车辆前车的速度; $d_{\text{keep}}(v_e, v_{e+1})$ 表示应急车辆与前车之间的安全匀速距离; $d_{\text{acc}}(v_e, v_{e+1})$ 表示应急车辆与前车之间的安全加速距离; d_{pred} 和 v_{pred} 分别表示目标车道前车与应急车辆的车间距和目标车道前车的速度; $d_{\text{acc}}(v_e, v_{\text{pred}})$ 表示应急车辆以速度 v_e 换至目标车道后, 目标车道前车相对于应急车辆的安全加速距离; v_{emax} 表示应急车辆的最大速度; $d_{\text{keep}}(v_e, v_{\text{pred}})$ 表示应急车辆以速度 v_e 换至目标车道后, 目标车道前车相对于应急车辆的安全匀速距离; d_{succ} 表示目标车道后车与应急车辆的车间距; v_{succ} 表示目标车道后车的速度; $d_{\text{keep}}(v_{\text{succ}}, v_e)$ 表示应急车辆以速度 v_e 换至目标车道后, 目标车道后车相对于应急车辆的安全匀速距离。

安全加速距离、安全匀速距离的计算方法与DTI模型相同^[16]。

式(1)表示若应急车辆没有达到最大行驶速度, 且当前车道并不能满足应急车辆的加速需求, 而相邻车道可以满足这一要求; 式(2)表示当前车道的行驶条件迫使应急车辆减速, 而换道后应急车辆至少可以保持现有的速度行驶; 式(3)表示安全条件, 保证应急车辆换道后不会与后车相撞。

(2) 从车道 2 换道至车道 1

由于应急车辆通常在车道 1, 即在快车道上行驶, 所以行驶在车道 2 上的应急车辆一旦满足换道动机和安全条件, 就会换道至车道 1。

换道动机为

$$d_{\text{pred}} \geq d_{\text{keep}}(v_e, v_{\text{pred}}) \quad (4)$$

安全条件为式(3)。式(4)表示无论车道 2 上的

行驶条件如何, 只要车道 1 满足应急车辆可以维持目前行驶速度的条件, 司机会有换道的意愿, 反映了应急车辆主要在车道 1 上行驶的特点。

无论是从车道 1 换道至车道 2, 还是从车道 2 换道至车道 1, 当换道动机和安全条件均满足时, 应急车辆的换道概率均为 1。

3 模拟结果及分析

以甬莞高速宁波地界四脚岙隧道宁波方向的双车道交通流为计算案例, 对混有应急车辆时的交通流进行数值模拟。在数值模拟中, 采用开放式边界条件, 考虑仅有一辆应急车辆通过。

通过雷视一体机采集四脚岙隧道宁波方向路段在 2023 年 9 月 11 日 7:00 至 19:00 的交通流数据, 分析得到车道 1 和车道 2 上的大车比例分别为 0.08 和 0.60。根据四脚岙隧道的实际情况, 选取各参数, 详见表 1。

表 1 四脚岙隧道道路交通各参数的含义和取值

参数	含义	取值
l_{mn}	模拟路段总长度/m	3 700
l_t	隧道 TU 长度/m	1 400
l_{ma}	普通路段 MA 长度/m	950
l_{at}	隧道接近段 AT 长度/m	200
l_{bt}	限速提示牌与隧道入口间距 BT/m	150
l_{tc}	隧道入口段 TC 长度/m	50
l_{cd}	隧道基本段 CD 长度/m	1 150
l_{du}	隧道出口段 DU 长度/m	200
l_{uc}	隧道出口与限速提示牌间距 UE/m	150
l_{en}	普通路段 EN 长度/m	1 000
V_g	车辆在普通路段的限速/(km·h ⁻¹)	100
V_t	车辆在隧道段 BE 的限速/(km·h ⁻¹)	80
V_{eg}	应急车辆在隧道外路段的限速/(km·h ⁻¹)	120
V_{et}	应急车辆在隧道内路段的限速/(km·h ⁻¹)	100
D_1	前方车辆受应急车辆影响的较近距离/m	250
D_2	应急车辆对前方车辆的最大影响距离/m	375

根据对实测数据的分析, 车道 1 进车率 α_1 和车道 2 进车率 α_2 之间满足 $\alpha_2 = 0.66\alpha_1$ 。在数值模拟中, 把进车率换算成密度, 车道 1 和车道 2 的车辆总密度计算公式为

$$\rho = \frac{(N_{c1} + N_{c2})L_{car} + (N_{t1} + N_{t2})L_{truck}}{2L} \quad (5)$$

式中: N_{c1} 和 N_{c2} 分别表示车道 1 和车道 2 上小车的数量; N_{t1} 和 N_{t2} 分别表示车道 1 和车道 2 上大车的数量; L_{car} 和 L_{truck} 分别表示小车、大车所占的元胞格子数, 取 7 和 14, 文中一个元胞格子是 1 m, 因此小车的长度为 7 m, 大车的长度为 14 m; L 表示单条车道的元胞总数, 这里取 3 700, 对应实际长度 3 700 m。

在有应急车辆的情况下, 利用建立的交通流模型, 对图 2 中展现的前方小车让行率为 80% 的交通流进行模拟, 得到隧道路段双车道交通流流量与密度的关系, 如图 3 所示。

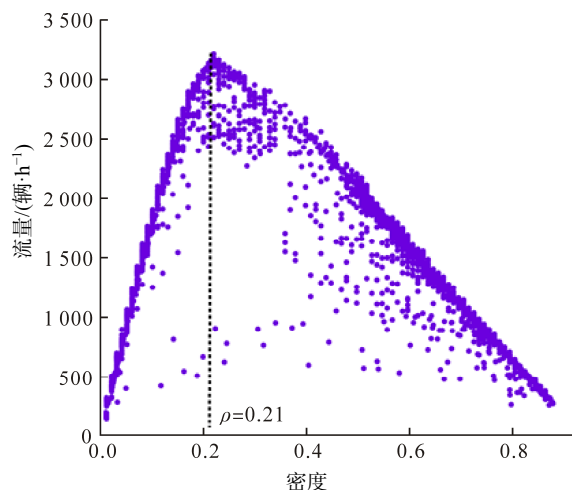


图 3 隧道路段交通流量与密度的关系

从图 3 可见, 当密度 $\rho < 0.13$ 时, 流量随着密度的增大而增加, 此时道路交通状态为自由流, 车辆可以按照理想的行驶速度前行。当密度逐渐增大 ($\rho > 0.13$), 流量呈现出二维分布状态, 即对应于某个密度, 流量呈现不同的值, 此时道路交通状态为同步流。当密度 $\rho = 0.21$ 左右时, 流量达到峰值, 约为 3200 辆·h⁻¹。随着密度的进一步增大, 二维分布的流量呈现下降趋势, 此时道路出现交通拥堵。

对于应急车辆, 在最短时间内通过路段至关重要。针对前方车辆不同的让行率, 计算应急车辆通过模拟路段所需时间。根据观察, 大车一般不让行; 小车可以分为 5 种情形: 前方小车全部采取换道让行(情形 A)、前方小车 80% 采取换道让行(情形 B)、前方小车 60% 采取换道让行(情形 C)、前方小

车 50%采取换道让行(情形 D)和前方小车均不采取换道让行(情形 E)。不同情形下应急车辆通过隧道路段所需时间的计算结果如图 4 所示。

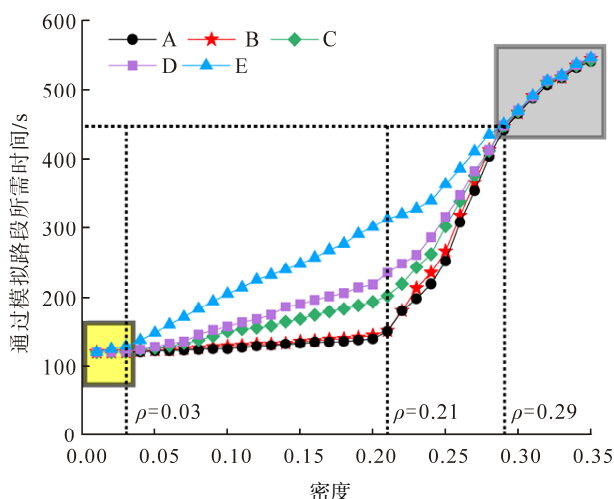


图 4 应急车辆通过隧道路段所需时间
随车辆密度的变化

从图 4 可见, 当 $\rho \geq 0.29$ 时, 随着密度的进一步增加, 不同的前车让行率下应急车辆通过模拟路段的时间都快速增长, 且趋于一致(图右上线框部分), 说明无论前车让行率多高, 在密度较大时应急车辆在通过双车道隧道路段时受到阻碍很大, 原因是此时道路已出现严重交通拥堵。若要使应急车辆通过拥堵路段, 需要开辟生命通道^[26], 对此文中不作讨论。

当 $\rho \leq 0.03$ 时, 5 种情形下应急车辆通过隧道时间几乎一致(图左下方线框部分), 约需 121 s, 说明密度较低时, 不管有多少前车采取避让措施, 应急车辆都能快速通行。

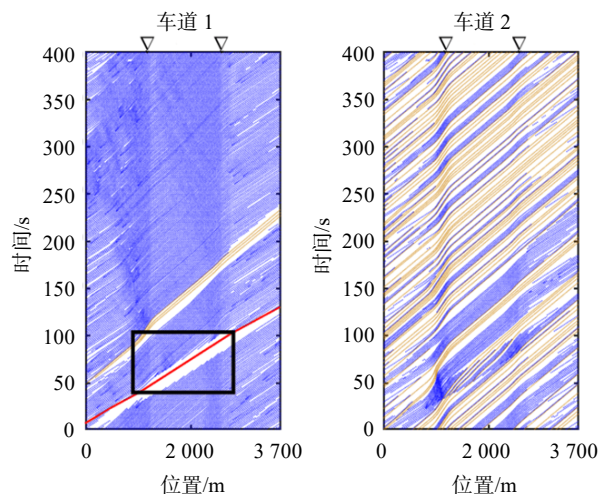
当 $0.03 < \rho \leq 0.21$ 时, 情形 A 与情形 B 的结果几乎重合, 并且通过时间与 $\rho \leq 0.03$ 时一致, 不随密度增大而变化, 说明当 $\rho \leq 0.21$ 时, 前车让道比例为 80% 和 100% 情况下, 应急车辆通过隧道的时间几乎相同, 与密度的增大无关。但当前方小车让行率小于 80% 后, 随着密度的增加, 应急车辆通过的时间逐渐增大, 尤其是前方所有车辆都不让行时, 应急车辆通过时间明显增加。这种差别在密度为 0.21 时达到极致, 此时情形 A 和情形 B 下应急车辆通过时间是 152 s, 比道路非常通畅的自由流时的通过时间只多了 31 s。而情形 E, 应急车辆通过时间是 315 s, 比情形 A 和 B 多了 163 s, 比道路

通畅时的通行时间多了 194 s, 即当车辆密度达到 0.21, 在总长 3 700 m, 其中 1 400 m 为隧道的路段, 前方小车让行率达到 80% 以上时, 应急车辆通过隧道时间只比畅行时多 31 s, 但是如果前方车辆都不让行, 应急车辆通过的时间要增加 163 s。表明当道路上有应急车辆鸣笛通过时, 其他车辆的配合让行非常重要, 可以有效提高应急车辆的通行效率, 在 $0.03 < \rho \leq 0.21$ 时, 前车的让行率越高, 应急车辆的通行效果越明显。

当 $0.21 < \rho \leq 0.29$ 时, 应急车辆通过模拟路段的时间快速增加, 并且不同的前车让行率下应急车辆通过时间的差距逐渐缩小, 前车让行对提高应急车辆通行效率所产生的效果逐渐减弱。从图 3 可见, 当密度大于 0.21 时, 流量逐渐减小, 拥堵逐渐显现, 即使前方车辆有较高的让行意愿, 但是由于道路拥堵, 也无法实现让行, 应急车辆的通过时间逐渐增加。

为了弄清应急车辆通过隧道路段时交通流的微观特征, 选取 2 种密度 ($\rho = 0.20$ 和 $\rho = 0.25$), 模拟得到前方车辆让行率为 80% 与 0% 时的车辆运动轨迹, 即情形 B 和情形 E 时车辆的时空演化, 如图 5 所示。图 5 中横轴表示车辆在道路上的位置, 纵轴表示时间, 上方 2 个倒三角表示隧道入口和出口的位置, 大车、小车和应急车辆的运动轨迹分别用浅黄色、深蓝色以及加粗深红色线条表示。

从图 5 可见, 车道 1 上小车居多, 大车大多在车道 2 上, 在隧道入口和出口处均可见车辆轨迹线斜率的变化, 这是因为隧道内外限速不同, 以及隧



(a) $\rho = 0.20$, 情形 B

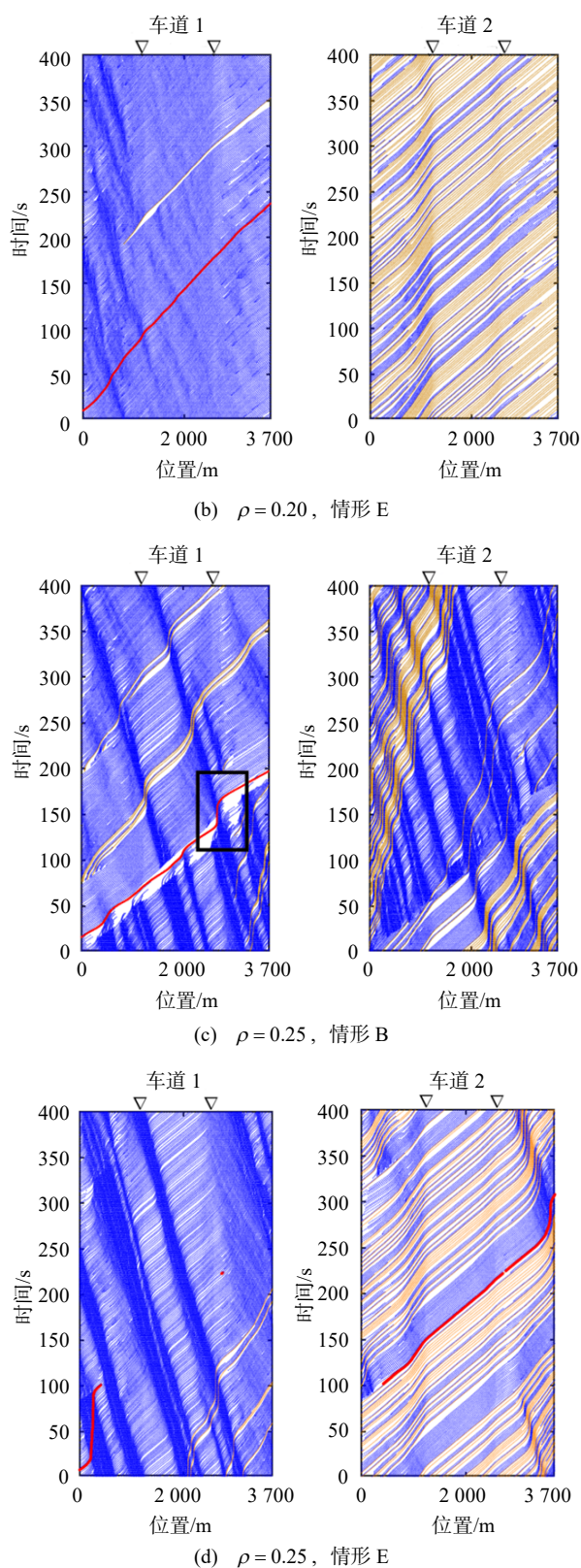


图5 不同密度和前车让行率下应急车辆通过时的时空演化

道入口的“黑洞效应”和出口的“白洞效应”, 造

成车辆进出隧道时速度减小。

从图 5(a)可见, 相比深蓝色和浅黄色轨迹线, 加粗深红色轨迹线在车道 1 上更加平缓, 表明应急车辆的速度高于小车和大车。同时, 应急车辆始终在车道 1 上, 并且前方出现空白间隙, 深蓝色轨迹线中断, 如线框中所示, 表明应急车辆无须换道, 一直行驶在车道 1 即可高速通行, 因为车道 1 上应急车辆前方有 80% 的小车听到鸣笛声后采取换道避让, 使得应急车辆前方一定距离内没有车辆阻挡, 从而可以全速行驶。另外, 在应急车辆后方不断有新的小车轨迹线出现, 这是换道至车道 2 的小车等应急车辆通过后又换道返回车道 1。

从图 5(b)可见, 前方车辆都不让行时, 应急车辆始终行驶在车道 1 上, 但前方没有空白间隙, 与图 5(a)中加粗深红色轨迹线相比, 明显变陡, 表明应急车辆速度明显降低。由于车辆密度达到 0.20, 换道条件不易满足, 应急车辆被迫低速跟随前方小车前行, 这是图 4 中当密度为 0.20 时情形 B 与情形 E 中应急车辆通过时间相差较大的原因。再次表明, 在中等密度情况下, 前方小车的让行对应应急车辆的快速通行至关重要。

从图 5(c)可见, 当密度增大到 0.25 时, 对比密度 0.20(图 5(a)), 不管是车道 1 还是车道 2, 出现了更多的时走时停波, 表明道路更加拥堵, 此时深蓝色轨迹线与浅黄色轨迹线斜率增大, 加粗深红色轨迹线斜率也同样增大, 表明各种车辆的速度都降低。应急车辆前方出现空白间隙, 说明有小车让行, 但是有时应急车辆紧随小车前行, 轨迹线突然变陡, 表明速度骤降, 甚至出现应急车辆轨迹线垂直横坐标的情况, 如线框所示, 此时应急车辆处于受阻停止状态。由此可以解释图 4 所见的情形 B 在密度为 0.25 时应急车辆通过时间比密度为 0.20 时明显增加的原因。

从图 5(d)可见, 在情形 E 下应急车辆有一段时间在车道 2 上行驶, 且紧随前方车辆前行, 轨迹线明显比图 5(c)中的轨迹线陡, 说明在相同密度下应急车辆的速度更低, 导致通行时间更长。这可以从图 4 中看到, 当密度为 0.25 时, 情形 E 比情形 B 应急车辆的通行时间更长, 虽然这个差距比密度为 0.20 时有所缩小, 但也说明前车采取让行的方式同样能够为应急车辆快速通行提供方便。

综上可知,在中等密度下,前车是否让行,对应急车辆快速通行的影响极大。因此,当隧道路段出现应急车辆时,前车应尽可能为应急车辆让行,从而提高应急车辆的通行效率,为救援工作赢得宝贵的时间。

4 结论

(1) 考虑应急车辆在隧道路段快速通过的需求,充分反应应急车辆与其他车辆的相互影响,顾及不同类型的车辆以及不同性格司机对应急车辆的协作反应模式,建立了有应急车辆通过时的隧道路段交通流模型,发现密度为 0.21 左右时交通流量最大,进而分析了交通流呈现自由流、同步流以及宽幅运动阻塞时流量与密度的关系。

(2) 计算得到应急车辆通过隧道路段的时间随密度的变化趋势,发现当密度 $\rho \leq 0.29$ 时,前方车辆的换道让行可以有效促进应急车辆的快速通行,让行率越高应急车辆通过时间越短,并从微观角度分析出现这一现象的原因。当隧道路段出现应急车辆时,建议其他车辆尽量让行,为应急车辆的快速通行提供方便。

(3) 当密度超过 0.29 后,常规前车让行的策略对应急车辆的快速通行已不起作用,为此需要在拥挤的车道 1 和车道 2 之间为应急车辆另开一条生命通道。

参考文献:

- [1] YU W Q, BAI W C, LUAN W J, et al. State-of-the-art review on traffic control strategies for emergency vehicles[J]. IEEE access, 2022, 10:109729-109742.
- [2] WU J B, LIN Y F, QI W W. Timing co-evolutionary path optimisation method for emergency vehicles considering the safe passage[EB/OL]. [2024-11-15]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23249935.2023.2253477>.
- [3] LI Z N, LIAO H C, TANG R R, et al. Mitigating the impact of outliers in traffic crash analysis: a robust Bayesian regression approach with application to tunnel crash data[J]. Accident analysis & prevention, 2023, 185: 107019.
- [4] LUO Q J, LIU C H. Exploration of road closure time characteristics of tunnel traffic accidents: a case study in Pennsylvania, USA[J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 132:104894.
- [5] NIU J A, LIANG B, WONG Y D, et al. Dynamic traffic safety risk assessment in road tunnel entrance zone based on drivers' psychophysiological perception states: methodology and case-study insights[J]. Tunnelling and underground space technology, 2024, 147:105677.
- [6] WANG X X, YOU L H, CHEN J Z, et al. The impact of different service states of tunnel lighting on traffic safety[J]. Accident analysis & prevention, 2023, 192: 107237.
- [7] 杨晓光, 彭国雄, 王一如. 高速公路交通事故预防与紧急救援系统[J]. 公路交通科技, 1998(4):48-53.
- [8] PATIL R, KHADE V, LAMBHATE D, et al. A survey on traffic management and control system for emergency vehicles[J]. Computer research and development, 2024, 24(6):11-20.
- [9] SHIBUYA S, YOSHIDA T, YAMASHIRO Z, et al. Fast emergency vehicle preemption systems[J]. Transportation research record, 2000, 1739(1):44-50.
- [10] 赵韩涛, 冷军强, 马国胜. 有应急车辆的双车道交通流元胞自动机模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 60-65.
- [11] 王强华, 刘小明, 王文, 等. 应急车辆作用下的路段交通仿真模型研究[J]. 交通标准化, 2013(9):12-16.
- [12] LI Z P, BAI W, GAN M. Research on intersection signal switching model under emergency situation[J]. Mathematical problems in engineering, 2012, 2012(1): 186383.
- [13] ZHAO H T, MAO H Y, HUANG R. Cellular automaton models for mixed traffic flow considering passage way of emergency vehicle[J]. Modern physics letters B, 2013, 27(8):1350052.
- [14] 豆雪珊. 应急车辆交叉口优先通行辅助方法及协调控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] RICKERT M, NAGEL K, SCHRECKENBERG M, et al.

- Two lane traffic simulations using cellular automata[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 1996, 231:534-550.
- [19] WANG Z K, ZHU H B, WU Q H, et al. Analysis of optimization strategy for trucks in highway traffic with a long tunnel[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2025, 658:130290.
- [20] 林杉, 许宏科, 刘占文. 一种高速公路隧道交通流元胞自动机模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(6):73-77.
- [21] 刘运霞, 周林英, 赵忠杰. 基于元胞自动机的高速公路隧道群交通流建模与仿真[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(11):66-69.
- [22] 法律出版社法规中心. 中华人民共和国道路交通安全法[M]. 北京: 法律出版社, 2021.
- [23] 郑林辉. 车联网环境下应急车辆优先通行策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [24] ZHAO H T, ZHAO X, LU J C, et al. Cellular automata model for urban road traffic flow considering internet of vehicles and emergency vehicles[J]. Journal of computational science, 2020, 47:101221.
- [25] 吴权浩, 逮星宇, 颜星, 等. 长隧道路段货车限道措施的数值模拟: 以甬莞高速角洞沱隧道路段为例[J]. 宁波大学学报(理工版), 2024, 37(3):70-79.
- [26] MAŁECKI K, KAMIŃSKI M, WAS J. A multi-cell cellular automata model of traffic flow with emergency vehicles: effect of a corridor of life and drivers' behaviour [J]. Journal of computational science, 2022, 61:101628.

Numerical simulation of efficient strategies for emergency vehicles' passing through tunnel sections rapidly

HE Peng¹, WANG Zikang¹, ZHU Huibing¹, HU Linxun², CHEN Lei²

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

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

Abstract: Based on the cellular automata traffic model and actual traffic data measured by thundervision integrated machines, with consideration of the requirement of emergency vehicles' passing through tunnel sections rapidly and the interaction between emergency vehicles and other vehicles, a traffic model is established for the tunnel sections of expressway with emergency vehicles. The relationship between flows and densities is analyzed when the traffic flow demonstrates free flow, synchronous flow and wide motion congestion, respectively. The time required for the emergency vehicles' passing through the tunnel section is calculated with different lane-changing yield rates of the preceding vehicles on the same lane. It is shown that when the density is $\rho < 0.29$, the traffic efficiency of emergency vehicles is improved distinctly if the yield rate of the preceding vehicles on the same lane is greater than 80%, and the reason of this result is analyzed from a microcosmic perspective. The research results are expected to provide a theoretical reference for the emergency vehicles' rapidly passing through tunnel sections of expressway.

Keywords: expressway; tunnel section; emergency vehicle; traffic model; passing through rapidly

(责任编辑 史小丽)