



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406437

引用格式:王宝杰,陈芳榕,苒亮,等.基于改进元胞自动机的高速公路养护作业区交通流建模与仿真[J].科学技术与工程,2025,25(16):6953-6960.

Wang Baojie, Chen Fangrong, Chang Liang, et al. Traffic flow modeling and simulation for highway maintenance work zones based on an improved cellular automaton[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6953-6960.

基于改进元胞自动机的高速公路养护作业区 交通流建模与仿真

王宝杰,陈芳榕,苒亮,梁国华*

(长安大学运输工程学院,西安 710064)

摘要 高速公路养护作业占用了既有公路设施,对主线行车安全与效率具有重要影响。为解析四车道公路封闭内侧车道养护作业下的交通流运行特征,提出基于改进元胞自动机的高速公路养护作业区交通流建模与仿真方法。按照《公路养护安全作业规程》(JTG H30—2015)布置养护作业控制区,将主线公路设施划分为警告区、上游过渡区、缓冲区、工作区、下游过渡区、终止区 6 个交通场景;通过引入纵向安全距离模型和优化横向换道安全条件判定规则,对 NaSch 跟驰模型和双车道元胞自动机(symmetric two-lane cellular automata, STCA)换道模型进行改进;结合实测数据对模型进行标定,利用 MATLAB 对养护作业区交通流运行状态进行仿真。结果表明,当交通流密度达到每车道 1 550 pcu/h 时,将合流起始点设置于距警告区终点 1 000 m 处、限速值设置为 60 km/h、上游过渡区长度设置为 160 m,养护作业区交通运行安全与效率的指标最优。

关键词 NaSch 模型;双车道元胞自动机(STCA)模型;交通流;养护作业区;高速公路

中图分类号 U491; **文献标志码** A

Traffic Flow Modeling and Simulation for Highway Maintenance Work Zones Based on an Improved Cellular Automaton

WANG Bao-jie, CHEN Fang-rong, CHANG Liang, LIANG Guo-hua*

(School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

[Abstract] Highway maintenance operations occupy existing road infrastructure and have a significant impact on vehicle traffic safety and efficiency. In order to analyze the traffic flow characteristics during maintenance operations on a four-lane highway when the inner lane is closed, a traffic flow modeling and simulation method based on an improved cellular automaton was proposed. According to the *Highway Maintenance Safety Operation Regulations* (JTG H30—2015), maintenance operation control zones were established, dividing the mainline highway facilities into six traffic scenarios: warning zone, upstream transition zone, buffer zone, work zone, downstream transition zone, and termination zone. By introducing a longitudinal safety distance model and optimizing the lateral lane-changing safety condition determination rule, the NaSch car-following model and symmetric two-lane cellular automata (STCA) lane-changing model were improved. The model was calibrated using field data, and the traffic flow operating conditions in the maintenance work zone were simulated using MATLAB. The results show that when the traffic flow density reaches 1 550 pcu/h per lane, setting the merging start point 1 000 meters downstream of the warning zone, with a speed limit of 60 km/h and an upstream transition zone length of 160 meters, the traffic flow safety and efficiency indices in the maintenance zone are optimized.

[Keywords] NaSch model; symmetric two-lane cellular automata (STCA) model; traffic flow; maintenance work zone; highway

高速公路养护作业包括日常养护、预防养护、修复养护、专项养护、应急养护等,是确保高速公路路基坚实、路面平整、设施完善、路容美观的重要保障。高速公路养护作业往往要占用既有公路设施,过往车辆途经作业区的过程中,驾驶人需要根据交通管控信息和周围车辆运动状态,实时调整所驾车

辆的行驶速度和行驶车道。交通管控设施布置的合理性,对高速公路养护作业区车辆通行安全与效率具有重要影响。

高速公路养护作业区的交通安全与效率研究一直是中外学者的研究热点。在交通安全研究方面,学者们重点对养护作业区的施工方案^[1-2]、施工

收稿日期:2024-08-27; 修订日期:2025-03-20

基金项目:陕西交通科技项目(23-23R);陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-131);国家自然科学基金面上项目(52172338)

第一作者:王宝杰(1987—),男,汉族,河南商丘人,博士,副教授,博士研究生导师。研究方向:交通安全。E-mail:wangbj2@163.com。

*通信作者:梁国华(1977—),男,汉族,吉林珲春人,博士,教授,博士研究生导师。研究方向:交通安全。E-mail:lgh@chd.edu.cn。

环境^[3-4], 安全事故特性^[5-6]等进行详细分析。孟祥海等^[7]研究了双向四车道高速公路半幅封闭养护作业区车辆运行指标特征, 建立车辆追尾冲突预测模型, 并确定合理的养护作业区设施布置条件。Bidkar 等^[8]基于机器学习开发了半自动轨迹提取工具, 借此研究了追尾冲突特性, 并基于广义极值理论进一步检验了后端冲突变化。在交通效率研究方面, 既有研究表明, 养护作业区的通行能力受到车道封闭位置、限速类型和施工工期等多种因素的影响^[9-10], 且作业区内不同控制区段的通行能力亦存在较大差距^[11-14]。在《道路通行能力手册》中, Yeom 等^[15]提出了一种基于车道封闭程度、障碍物类型和施工工作条件等因素的高速公路作业区通行能力计算模型。研究表明, 作业区交通流在未出现排队拥堵时的流率相较于排队拥堵后高出 13.4%^[16-18]。

在养护作业安全设施的引导下, 高速公路交通流呈现合流、分流交替的现象。安全隐患黑点的形成便是交通流分、合流前后的公路设施与交通条件综合作用的结果。既有研究较少从全局视角探究警告区、过渡区、缓冲区、终止区与工作区的组合设计优化方法, 行业规范也仅对各区段长度提出了极值要求。基于此, 面向整个养护作业控制区, 通过引入纵向安全距离模型和优化横向换道安全条件判定规则, 对 NaSch 跟驰模型和双车道元胞自动机 (symmetric two-lane cellular automata, STCA) 换道模型进行改进; 结合陕西省某高速路段获得的实测数据对模型参数进行标定, 构建不同养护作业区的交通组织设计方案, 利用 MATLAB 实现数值模拟实验, 分析不同交通组织设计对交通流运行效率和安全性的影响。研究成果能够为《公路养护安全作业规程》(JTG H30—2015) 设计指标的进一步优化提供参考。

1 养护作业区场景描述

按照《公路养护安全作业规程》(JTG H30—2015) 将养护作业区划分为警告区 S、上游过渡区

L_s 、缓冲区 H、工作区 G、下游过渡区 L_x 、终止区 Z, 共 6 个区域, 其布置形式如图 1 所示。

(2) 警告区 S。警告标志至上游过渡区起点之间的路段, 其功能为提醒驾驶员前方存在道路施工, 注意谨慎驾驶。

(3) 上游过渡区 L_s 。车道被压缩时确保车辆能够平稳从封闭车道过渡至未封闭车道的过渡路段, 其功能为减少合流的交通冲突, 保障交通安全。

(3) 缓冲区 H。上游过渡区与工作区之间的路段, 其功能为避免驾驶员因误判而直接闯入工作区。

(4) 工作区 G。养护作业区内施工人员与设备工作的区域。

(5) 下游过渡区 L_x 。车辆由工作区过渡至正常通行区的路段, 其功能为保障车辆能够顺利进入正常路段。

(6) 终止区 Z。下游过渡区至解除养护作业区限速的路段。

2 模型构建

2.1 考虑安全距离的 NaSch 跟驰模型改进

安全距离指前车由于突发状况采取紧急制动时, 后车在此距离下做出反应而不会发生碰撞的距离, 车间距如图 2 所示。

安全距离模型的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta X_{n, \text{SAFE}}(t) &= X_{n+1}(t) - X_n(t) - L \\ &= V_n(t) T_s + \frac{V_n(t)^2}{2d_{n, \text{max}}} - \frac{V_{n+1}(t)^2}{2d_{n+1, \text{max}}} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta X_{n, \text{SAFE}}(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的安全距离; $X_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的车头位置; L 为前车的车身长度; T_s 为第 n 辆车的反应时间; $V_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的车头位置; $d_{n, \text{max}}$ 为第 n 辆车的最大减速度。

车辆的跟驰策略与运行规则如下。

Step 1 计算 t 时刻为避免与前车碰撞需采取

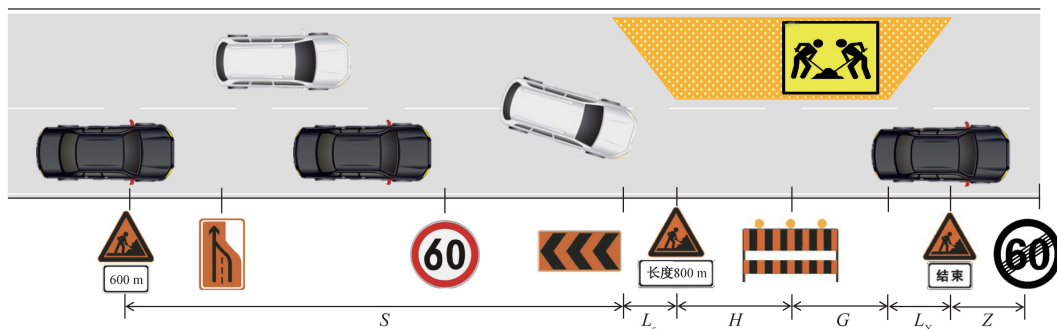


图 1 高速公路养护作业区布置形式

Fig. 1 Layout of the highway maintenance work zone

的安全行驶速度 $V_{n,SAFE}(t)$, 可表示为

$$V_{n,SAFE}(t) = -T_s d_{n,max} + \left\{ T_s^2 d_{n,max}^2 + d_{n,max} \left[2d_{n,max} - V_n(t) T_s + \frac{V_{n+1}(t)^2}{d_{n+1,max}} \right] \right\}^{-2} \quad (2)$$

Step 2 当 $\Delta X_n(t) > \Delta X_{n,SAFE}(t)$, 即第 n 辆车与其前车间距 $\Delta X_n(t)$ 大于安全距离 $\Delta X_{n,SAFE}(t)$ 时, 车辆按照加速规则进行加速行驶。

$$V_n(t+1) = \min[V_n(t) + a_n(t), V_{max}, V_{n,SAFE}(t)] \quad (3)$$

式(3)中: a_n 为第 n 辆车的最大加速度; V_{max} 为第 n 辆车的最大速度。

Step 3 当 $\Delta X_n(t) < \Delta X_{n,SAFE}(t)$, 车辆按照减速规则进行减速行驶。

$$V_n(t+1) = \max[V_n(t) - d_n(t), 0] \quad (4)$$

Step 4 当 $\Delta X_n(t) = \Delta X_{n,SAFE}(t)$ 时, 保持原有速度行驶。

Step 5 引入随机慢化概率 P 描述人工驾驶车辆运行的不确定性。

$$V_n(t+1) = \begin{cases} V_{n,acc}(t+1), & \text{sig}(2P-1) = 1 \\ V_{n,dec}(t+1), & \text{sig}(2P-1) = -1 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $V_{n,acc}$ 为第 n 辆车以最大加速度加速后的速度; $V_{n,dec}$ 为第 n 辆车以最大减速度减速后的速

度; $\text{sig}(x)$ 为符号函数。

Step 6 车辆在单位时间步长内进行速度判断演化后更新位置。

2.2 考虑换道安全条件判定规则优化的 STCA 换道模型改进

2.2.1 自由换道模型

传统 STCA 模型基于车辆运行最大速度判断换道安全条件, 但在实际情况中此条件过于严苛, 换道时风险主要集中于相邻目标车道的后方车辆, 将执行换道车辆与相邻目标车道后方车辆在运行一个仿真时间步长后的车辆间距作为判断两车之间冲突风险的指标更为合适。基于此, 对传统 STCA 模型的安全条件进行改进。由于人工驾驶车辆依靠驾驶员视觉判断后方车辆速度, 则将相邻目标车道后车行驶速度取最大值, 以最大限度确保换道的安全性。

改进 STCA 模型的安全条件判定规则可表示为

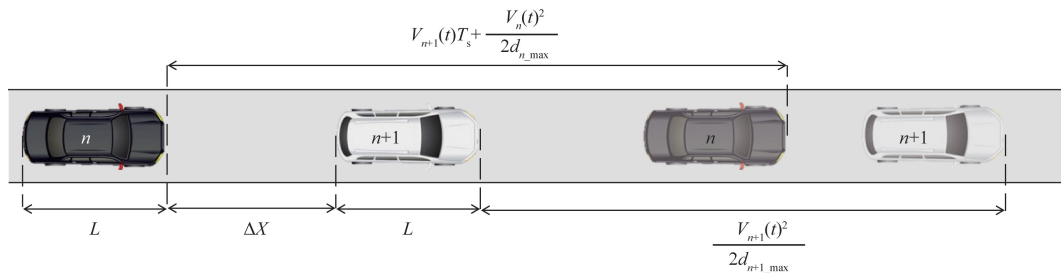
$$\Delta X_{n,back}^{HV}(t) > V_{max} - \min[V_n(t) + a_n(t), V_{max}] + \Delta X_{n,SAFE}(t) \quad (6)$$

式(6)中: $\Delta X_{n,back}^{HV}(t)$ 为第 n 辆人工驾驶车在时刻 t 与目标车道后车的间距。

实际情况下车辆换道行为以一定概率发生, 引入换道概率 $P_{change,lanes}$ 以描述车辆换道行为, 模型可表示为

$$P_{change,lanes} = P_{motivation} P_{acceptance} \quad (7)$$

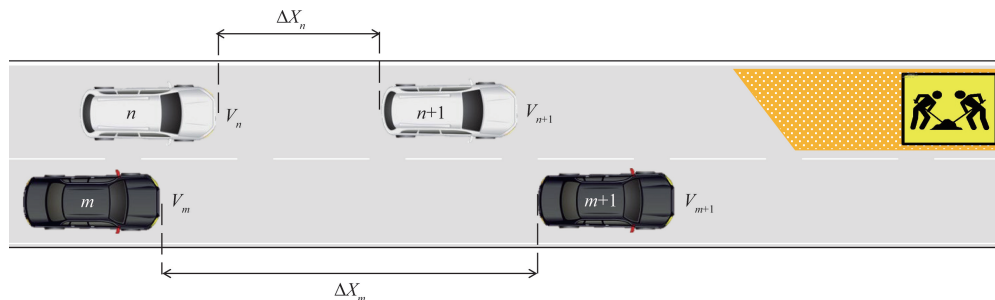
式(7)中: $P_{motivation}$ 为考虑效用的动机生成概率; $P_{acceptance}$ 为间隙接受概率。



ΔX 为后车与前车的车间距

图2 车辆安全距离

Fig. 2 Safe distances between vehicles



m 为目标换道间隙后车; $m+1$ 为目标换道间隙前车; V_m 为目标换道间隙后车速度; V_{m+1} 为目标换道间隙前车速度; ΔX_m 为目标换道间隙长度

图3 自由换道车道效用

Fig. 3 Lane utilization of free lane changing

换道车道效用图如图3所示, $P_{motivation}$ 的计算公式为

$$P_{motivation} = \frac{e^{U_g}}{e^{U_g} + e^{U_n}} \tag{8}$$

$$U = \frac{\Delta X(t) - \Delta X_{n,SAFE}(t)}{\Delta X_{n,SAFE}(t)} + \frac{\Delta V(t)}{V(t)} \tag{9}$$

式中: U_g 、 U_n 分别为目标车道与当前车道的车道效用; U 为车道效用; $\Delta X(t)$ 为后车与前车的车间距; $\Delta V(t)$ 为后车与前车的速度差; V 为换道车速度。

对换道间隙函数^[18]进行优化得到的间隙接受概率 $P_{acceptance}$ 可表示为

$$P_{acceptance} = \Phi \left\{ \frac{\ln[\Delta X_{n,back}(t)] - \ln \Delta X_{n,back}^{des}}{\sigma_{back}} \right\} \times \Phi \left\{ \frac{\ln[\Delta X_{n,front}(t)] - \ln \Delta X_{n,front}^{des}}{\sigma_{front}} \right\} \tag{10}$$

$$\Delta X_{n,back}^{des} = \beta_1 \ln^2 [1 + \exp(V_{back} - V_n)] + \beta_2 V_{back} + \beta_3 \tag{11}$$

$$\Delta X_{n,front}^{des} = \beta_4 \ln^2 [1 + \exp(V_n - V_{front})] + \beta_5 V_{front} + \beta_6 \tag{12}$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为累计正态分布函数; $\Delta X_{n,back}^{des}$ 、 $\Delta X_{n,front}^{des}$ 分别为该车对目标车道的后方理想间隙与前方理想间隙; σ_{back} 、 σ_{front} 分别为该车可接受的后方与前方换道间隙的对数标准差; V_{back} 为目标车道后车速度; V_{front} 为目标车道前车速度; V_n 为换道车速度; $\beta_1 \sim \beta_6$ 为模型系数。

2.2.2 强制换道模型

驾驶员在警告区与上游过渡区内必须采取强制换道行为,否则需停在强制换道末端等待换道时机出现。在警告区范围内,智能车换道概率为 $P_c = 1$,人工车对换道间隙函数进行优化以描述强制换道概率,模型表达式为

$$P_{motivation} = \frac{D_{max} - D}{D_{max} - D_{min}} \tag{13}$$

式(13)中: D_{max} 为最大临界距离; D_{min} 为最小临界距离; D 为车辆与过渡区终点的距离。

3 仿真实验

3.1 实验准备

3.1.1 参数标定

基于陕西省某高速公路养护作业区航拍视频,利用 George2.1 软件从中提取车辆位置、速度、加减速等运行信息,得到跟驰模型参数取值如表1所示。

参考 Ahmed 等^[19]的研究成果,利用遗传算法构建极大似然函数,结合调查作业区监控视频对自由换道模型的参数进行求解,得出换道模型参数值

如表2所示。 $\sigma_{back} = 1.743$, $\sigma_{front} = 1.722$ 。

表1 纵向跟驰模型参数值

Table 1 Parameter values of the longitudinal car-following model

参数	最大速度 $V_{max}/$ ($km \cdot h^{-1}$)	最大 加速度 $a_{max}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	最大 减速度 $d_{max}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	反应 时间 $T_s/$ s	车辆 长度 $L/$ m	随机慢 化概率 P
数值	100	3	5	1.5	5	0.1

表2 自由换道模型参数标定值

Table 2 Parameter calibration of the free lane-changing model

参数	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
取值	0.989	2.433	3.207	0.394	0.859	4.948

3.1.2 实验条件

对拟进行仿真实验做出如下限定条件以简化实验。

(1) 车辆在正常路段运行的最大速度为 100 km/h,以 Erlang 分布的车头时距从起点以最大速度生成,道路采用开放性边界条件。

(2) 经过合流起始位置后,内侧车道的车辆禁止换道,外侧车道的车辆强制换道进入内侧车道。

(3) 上游过渡区内,内侧上的车辆禁止换道,外侧车道上的车辆按照协同强制换道规则换道至内侧车道。

(4) 缓冲区与作业区内,车辆无法换道;下游过渡区内,内侧车道车辆可以自由换道。

(5) 终止区与下游正常路段内,所有车辆均可换道,在终止区终点处解除车辆限速。

(6) 忽略车道的换道过程,且不允许在一个时间步长内进行连续换道,仿真运行 3 600 步长。采用不同随机种子对各场景仿真 10 次。初始仿真场景参数如表3所示。

表3 仿真场景参数取值

Table 3 Parameter values of simulation scenario

参数	S/m	L_s/m	H/m	G/m	L_x/m	Z/m
取值	2 000	160	100	500	30	30

3.1.3 模型验证

在上述实验条件下,设置改进元胞自动机模型与经典的元胞自动机模型的对比实验,分别对陕西省某高速公路养护作业区的交通流进行仿真,结果表明:改进元胞自动机模型相较于经典的元胞自动机模型,在车头时距、换道位置及拥堵点分布的仿真准确性分别提高了 31.7%、28.4% 和 36.3%,证明改进元胞自动机模型拥有更好的适应性。

3.2 运行效率分析

3.2.1 合流起始位置影响分析

基于养护作业区基本场景,将限速值设置为 60 km/h,上游过渡区长度设置为 160 m,合流起始位置设于距警告区终点上游,距离以 250 m 为步长由 500 m 增大至 1 750 m 进行仿真,实验结果如图 4 所示。

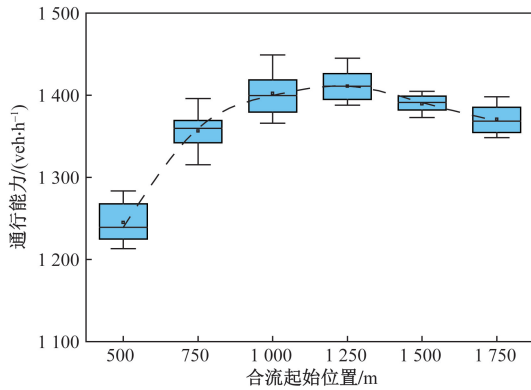


图 4 合流起始位置-通行能力关系

Fig. 4 Relationship between merging start position and capacity

由图 4 可知,随着合流起始位置距警告区终点距离的增加,道路通行能力呈现先增后略减的趋势,在 1 250 m 时取得最优值。当起始位置距警告区终点较近时,车辆允许换道的距离短,换道压力大,未能完成换道的车辆会进入上游过渡区内换道,易造成拥堵排队;当起始位置距警告区终点较远时,车辆在距警告区终点较远处完成换道,内侧车道更早达到饱和状态而产生拥挤,其余车辆寻求换道安全间隙的难度增加而产生延误。

3.2.2 限速模式影响分析

基于养护作业区基本场景,将合流标志置于距警告区终点 1 000 m 处,上游过渡区长度设置为 160 m,将限速值以 10 km/h 为步长,由 40 km/h 增大至 90 km/h 进行仿真,实验结果如图 5 所示。

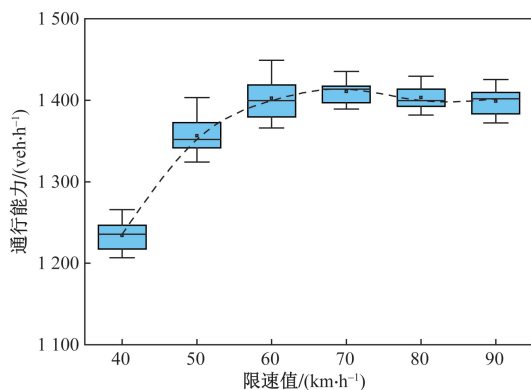


图 5 限速值-通行能力关系

Fig. 5 Relationship between speed limit and capacity

由图 5 可知,养护作业区道路通行能力随着限速增加呈现先增后减的趋势。当限速值由 40 km/h 增加至 60 km/h 时,通行能力有着明显提高,车道拥堵显著缓解,此时限速值对通行能力的改善有着决定性作用;当限速值由 60 km/h 增加至 90 km/h 时,通行能力略微减小,养护作业区的瓶颈效应导致能够通过的车辆有限,且较高的运行速度导致车流稳定性下降,对通行能力产生一定负面效果。

3.2.3 上游过渡区长度影响分析

基于养护作业区基本场景,将合流标志置于距警告区终点 1 000 m 处,限速值设为 60 km/h,设置上游过渡区长度以 20 m 为步长,由 120 m 增大至 200 m 的仿真实验,实验结果如图 6 所示。

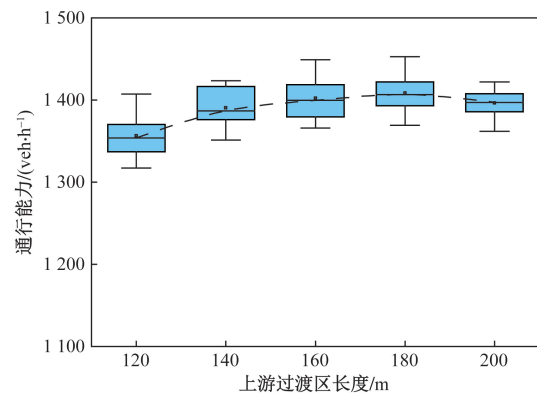


图 6 上游过渡区长度-通行能力关系

Fig. 6 Relationship between upstream transition zone length and capacity

如图 6 所示,随着上游过渡区长度的增加,通行能力呈现先增大后平稳的趋势。过渡区长度为 120 m 时,外侧车道未换道车辆的强制换道压力较大,且实际情况中道路线形变化较大,易导致车辆未能换道成功而在终点处停车等待换道时机,此时外侧车道在允许换道终点处的严重拥堵范围较大;随着过渡区长度增加,外侧车道的强制换道压力得到缓解,车辆可以保持顺畅的轨迹汇入内侧车道,在区段长度为 160 m 时达到较优水平。

3.3 运行安全性分析

运用速度标准差、碰撞时间 (time-to-collision, TTC)、整合碰撞时间 (time integrated time-to-collision, TIT) 及追尾碰撞风险指数 TERCRI 值探讨施工路段在不同交通组织下的运行安全性,各评价指标计算公式如下。

(1) 速度标准差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}{N - 1}} \quad (14)$$

式(14)中: v_i 为第 i 辆车的运行速度; \bar{v} 为所有车辆的均速; N 为车辆总数。

(2) 追尾碰撞风险指数。

$$\text{TERCRI}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \text{RCRI}_n(t) \Delta t \quad (15)$$

$$\text{RCRI}_n(t) = \begin{cases} 1, & \text{SD}_{\text{back}} > \text{SD}_{\text{front}} \\ 0, & \text{SD}_{\text{back}} \leq \text{SD}_{\text{front}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \text{SD}_{\text{back}} = v_n t_{\text{PRT}} + \frac{v_{n+1}^2}{2a_n} \\ \text{SD}_{\text{front}} = v_{n+1} h + \frac{v_{n+1}^2}{2a_{n+1}} + l \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\text{TERCRI}(t)$ 为时间 t 内的总追尾风险碰撞指数; $\text{RCRI}_n(t)$ 为第 n 辆车在时间 t 的追尾风险碰撞指数; Δt 为时间步长; SD_{back} 、 SD_{front} 分别为后、前车的制动距离; l 为车身长度; h 为车头时距; t_{PRT} 为跟驰车辆感知反应时间, 取 1.5 s; N 、 T 分别为仿真车辆总数与仿真时长。

(3) 碰撞时间。

$$\text{TTC}_n(t) = \frac{x_{n-1}(t) - x_n(t) - l}{v_n(t) - v_{n-1}(t)} \quad (18)$$

式(18)中: $x_{n-1}(t)$ 、 $x_n(t)$ 分别为第 $n-1$ 辆车和第 n 辆车的位置; $v_n(t)$ 、 $v_{n-1}(t)$ 分别为第 n 辆车和第 $n-1$ 辆车的速度。

(4) 整合碰撞时间。

$$\text{TIT} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [\text{TTC}^* - \text{TTC}_n(t)] \Delta t \quad (19)$$

式(19)中: N 为车辆总数; T 为仿真时长; $\text{TTC}_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的碰撞时间; TTC^* 为预先设定的碰撞时间阈值。

3.3.1 合流起始位置影响分析

合流起始位置为允许换道的起始点, 对施工路段车辆转向正常路段的驾驶行为具有重要影响, 将限速值设置为 60 km/h, 上游过渡区长度设置为 160 m, 合流起始位置置于距警告区终点上游, 距离以 250 m 为步长由 500 m 增大至 1 750 m 进行运行安全性仿真。

如图 7 所示, 随着合流起始位置距警告区终点距离的增加, 速度标准差、TIT 和 TERCRI 均呈现先减后增的趋势。在合流起始位置距警告区终点 500 m 时, 外侧车道车辆需要在较短的距离内完成向内侧车道换道, 车流难以维持稳定状态; 在距离 1 000 m 时各类指标均取得最优值, 外侧车道车辆能在适宜的距离内汇入内侧车道, 强制换道带来的负面效应得到减弱。距离继续增大时, 外侧车道汇入车流饱和的内侧车道会导致内测车流跟驰行为不稳定, 进而增加车辆的碰撞风险。

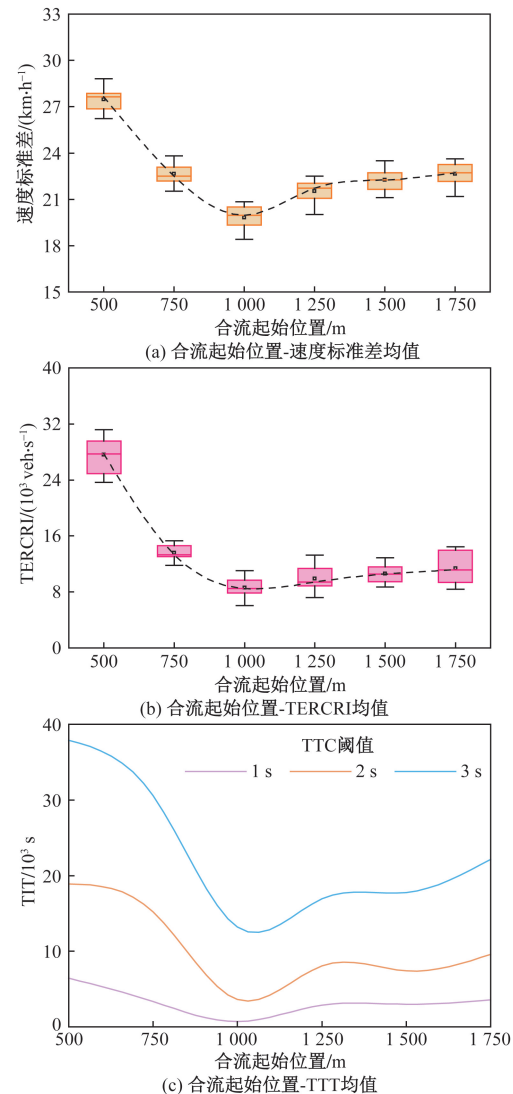


图 7 合流起始位置对安全性的影响

Fig. 7 Impact of merging start position on safety

3.3.2 限速值影响分析

道路限速对车辆运行具有决定性作用, 将合流标志置于距警告区终点 1 000 m 处, 上游过渡区长度设置为 160 m, 将限速值以 10 km/h 为步长, 由 40 km/h 增大至 90 km/h 进行运行安全性仿真。

如图 8 所示, 随着限速值的增加, TIT 与 TERCRI 呈现先减后增的趋势, 速度标准差则呈现上升趋势。限速值为 40 ~ 50 km/h 时, 车辆易采取激进的减速行为, 速度分布离散化严重; 限速值为 60 km/h 时, 各指标均取得较优值, 车流的速度分布情况较为理想; 限速值继续增大时, 养护作业区内车辆需要更长的制动距离, 易产生安全隐患。

3.3.3 上游过渡区长度影响分析

将合流标志置于距警告区终点 1 000 m 处, 限速值设为 60 km/h, 设置上游过渡区长度以 20 m 为步长, 由 120 m 增大至 200 m 的仿真实验。

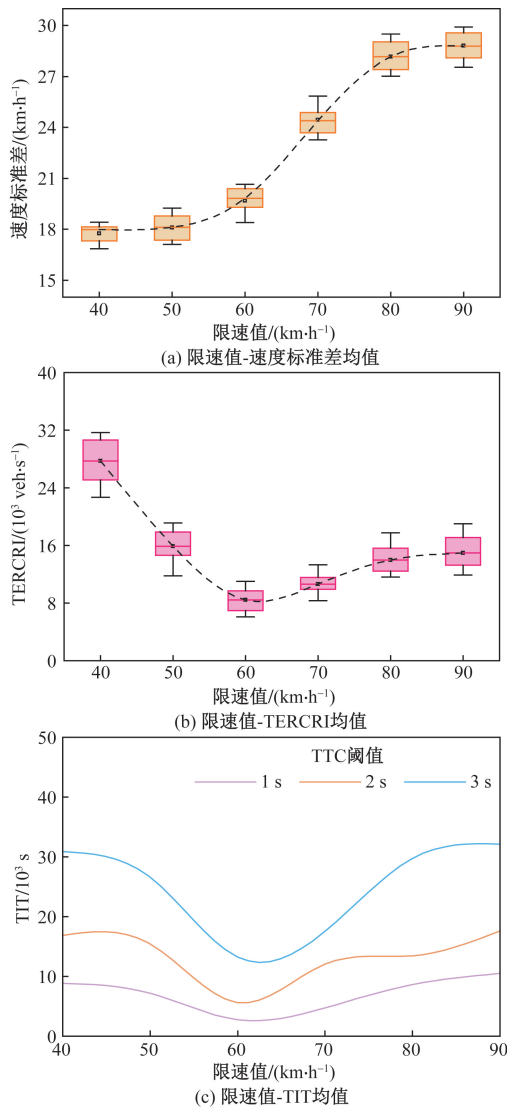


图8 限速值对安全性的影响

Fig. 8 Impact of speed limit on safety

如图9所示,随着上游过渡区长度的增加,速度标准差, TIT 和 TERCRI 均呈现先减后增的趋势。这种趋势与过渡区内的强制换道压力及道路缩减段线形有关,在长度为 120 ~ 160 m 时,警告区内外侧车道的强制换道压力小,对整体车流运行产生积极效应。长度为 160 m 是理想的上游过渡期长度。当过渡区长度增大时,车辆的换道行为更加激进导致稳定性减弱。

4 结论

以双车道高速公路养护作业区为研究场景,通过引入纵向安全距离模型和优化横向换道安全条件判定规则,对 NaSch 跟驰模型和 STCA 换道模型进行了改进与验证适应性,利用数值模拟实验解析了不同交通组织设计条件下的警告区、过渡区、缓冲带、终止区、工作区交通流运行状况,能够为《公

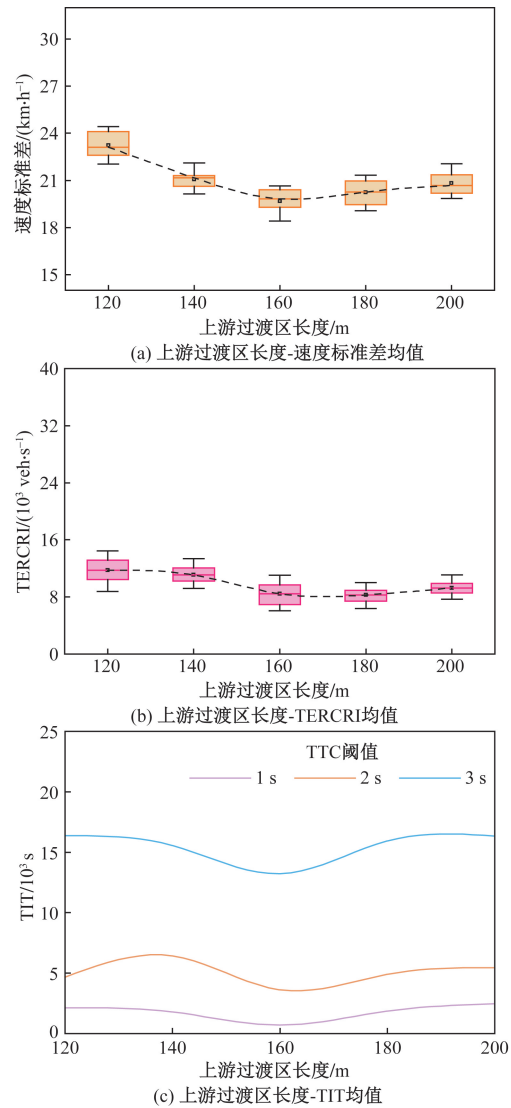


图9 上游过渡区长度对安全性的影响

Fig. 9 Impact of upstream transition zone length on safety

路养护安全作业规程》(JTG H30—2015)设计指标的进一步优化提供参考。得出如下主要结论。

- (1) 合流起始位置与警告区终点的间距为 1 250 m 时,路段运行效率达到最优;间距为 1 000 m 时,路段安全性达到最优。
- (2) 养护作业区限速为 60 km/h 时,道路运行效率与路段安全性同时达到最优。
- (3) 上游过渡区长度为 120 m 时,路段运行效率达到最优;过渡区长度为 160 m 时,路段安全性达到最优。

参 考 文 献

[1] Shakouri M, Ikuma L H, Aghazadeh F, et al. Drivers' merging behavior data in highway work zones[J]. Data in Brief, 2016, 6: 829-832.
 [2] 田毕江, 方嘉欣, 杨文臣, 等. 基于驾驶模拟的高速公路施工围挡位置熵权模糊综合评价[J]. 安全与环境学报, 2021, 21

- (4): 1412-1419.
- Tian Bijiang, Fang Jiabin, Yang Wenchen, et al. Entropy weight-fuzzy comprehensive evaluation of the work zone fence position of expressway: a driving simulator study[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(4): 1412-1419.
- [3] Khattak, Asad J, Aemal J, et al. Effects of work zone presence on injury and non-injury crashes[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2002, 34(1): 19-29.
- [4] Zhang Z, Akinci B, Qian S. How effective is reducing traffic speed for safer work zones? methodology and a case study in Pennsylvania [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2023, 183: 106966.
- [5] Wang B, Chen T, Zhang C, et al. Toward safer highway work zones: an empirical analysis of crash risks using improved safety potential field and machine learning techniques[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2023, 194: 107361.
- [6] Wang J, Song H, Fu T, et al. Crash prediction for freeway work zones in real time: a comparison between convolutional neural network and binary logistic regression model[J]. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022, 11(3): 484-495.
- [7] 孟祥海, 郑来, 毕海峰, 等. 高速公路半幅封闭施工区交通特性与交通冲突特性研究[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(2): 140-146.
- Meng Xianghai, Zheng Lai, Bi Haifeng, et al. Research on traffic characteristics and traffic conflicts of one-way closed work zone on expressway[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(2): 140-146.
- [8] Bidkar O, Arkatkar S, Joshi G, et al. Effect of construction work zone on rear-end conflicts by vehicle type under heterogeneous traffic conditions[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2023, 149(4): 05023001.
- [9] Mashhadi, Ali H, Mohammad F, et al. Review of methods for estimating construction work zone capacity [J]. *Transportation Research Record*, 2021, 2675(9): 382-397.
- [10] Heiden, Nina V, Justin G. Capacity of freeway work zones in Germany[J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 15: 233-244.
- [11] 邵长桥, 黄群龙. 高速公路改扩建施工区交通流特性[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(9): 1036-1047.
- Shao Changqiao, Huang Qunlong. Traffic characteristics of reconstruction and extension of expressway work zone[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(9): 1036-1047.
- [12] Weng J, Qiang M. Estimating capacity and traffic delay in work zones: an overview[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013, 35: 34-45.
- [13] 孙佳豪, 胡江涛, 朱嘉钰, 等. 基于遗传算法的高速公路施工区交通仿真研究[J]. *现代信息科技*, 2021, 5(19): 76-81.
- Sun Jiahao, Hu Jiangtao, Zhu Jiayu, et al. Research on traffic simulation of expressway construction section based on genetic algorithm[J]. *Modern Information Technology*, 2021, 5(19): 76-81.
- [14] 邵长桥, 郭杰. 基于等效通行能力的施工区交通影响评价方法[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(20): 8873-8880.
- Shao Changqiao, Guo Jie. Evaluation method of traffic impact evaluation method of work zones based on equivalent capacity[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(20): 8873-8880.
- [15] Yeom C, Hajbabaie A, Schroeder B J, et al. Innovative work zone capacity models from nationwide field and archival sources[J]. *Transportation Research Record*, 2015, 2485(1): 51-60.
- [16] 陈卫霞, 郑俞, 孟祥海, 等. 双向四车道高速公路超车道封闭施工作业区交通运行特性研究[J]. *公路*, 2022, 67(6): 229-237.
- Chen Weixia, Zheng Yu, Meng Xianghai, et al. Research on traffic operation characteristics of closed construction working area of dual 2-lanes expressway[J]. *Highway*, 2022, 67(6): 229-237.
- [17] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2010: HCM 2010[S]. Washington, D. C.: National Academy Press, 2010.
- [18] Thanistha K, 杨达, 吴悦竹, 等. 城市道路施工区交通延误建模与仿真[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(19): 8234-8240.
- Thanistha K, Yang Da, Wu Yuezhu, et al. Modeling and simulation of traffic delay in urban road work zone[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(19): 8234-8240.
- [19] Ahmed K, Ben-Akiva M, Koutsopoulos H, et al. Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior[J]. *Transportation and Traffic Theory*, 1996, 13: 501-515.