

高速公路拥堵下的分级限速控制策略

余雪^{1,2}, 凤鹏飞^{1,3,4}, 段萌萌^{1,3,4}

1. 安徽三联学院智慧交通现代产业学院, 安徽 合肥 230601;

2. 山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357;

3. 国家车辆驾驶安全工程技术研究中心, 安徽 合肥 230601;

4. 安徽省普通高校交通信息与安全重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要:为缓解高速公路交通事故后的拥堵问题,采用软件 VISSIM 模拟高速公路发生交通事故前、后的交通流状态,获取非拥堵状态和拥堵状态的交通流数据,分别采用 Greenshields 模型和 Greenberg 模型拟合非拥堵状态和拥堵状态的车流速度-密度关系曲线,构建高速公路交通拥堵持续时间预测模型,通过该模型计算不同上游到达流量和不同交通事故阻塞时间下交通拥堵持续时间,并通过仿真验证模型的准确性。将高速公路交通拥堵持续时间预测模型与遗传算法相结合,求解车辆到达拥堵路段排队队尾位置时的车速,以此确定参考限速,针对拥堵情况提出分级限速控制策略,从事故上游路段对车辆实施多次逐级限速,使车速平稳减小,限制拥堵区的车辆数。结果表明:不同上游到达流量和不同阻塞时间下交通拥堵持续时间计算结果和仿真结果的平均绝对百分比误差为 14.37%,交通拥堵持续时间预测模型准确性较高,可用来计算高速公路事故发生后的拥堵持续时间;采取分级限速控制策略后,上游到达流量为 3 000 veh/h 时,平均排队长度从 2 141 m 降至 1 340 m,拥堵路段平均车流速度从 28.7 km/h 增至 36.0 km/h,分级限速控制策略可有效缓解高速公路交通事故后的拥堵状况。

关键词:高速公路;拥堵持续时间;分级限速;仿真

中图分类号:U491.4

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0019-06

引用格式:余雪, 凤鹏飞, 段萌萌. 高速公路拥堵下的分级限速控制策略[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(5): 19-24.

YU Xue, FENG Pengfei, DUAN Mengmeng. Graded speed limit control strategy under highway congestion [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5): 19-24.

0 引言

近年来,随着机动车保有量持续增长和交通流复杂性增大,高速公路一旦发生交通事故,易引发大规模交通拥堵,加剧车辆排队与延误,降低通行效率,还可能诱发次生事故,增大安全风险。通过仿真建模准确预测高速公路交通事故影响范围及拥堵持续时间,为制定科学的限速控制策略提供依据,对有效缩短拥堵时间、提高道路通行效率具有重要的现实意义。

Jovanović 等^[1]对比 12 种交通流模型在连续交通流与间断交通流条件下的性能,发现不同模型预测的道路通行能力及对应密度存在显著差异,需根据交通流类型采用不同的回归函数进行建模。张亮等^[2]采用软件 VISSIM 模拟高速公路上不同因素引发的交通事故排队过程,通过参数调整与场景仿真,依据车

收稿日期:2024-04-15

基金项目:安徽省普通高校交通信息与安全重点实验室开放课题(JTX202302);安徽省高校优秀青年项目(2022AH030161);专业服务安徽省十大新兴产业项目(23zlgc002);安徽三联学院校级科研基金项目(KJZD2023001);安徽三联学院协同创新中心专项研究项目(zjt230001)

第一作者简介:余雪(2000—),女,安徽六安人,工学硕士,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail:2412088006@qq.com。

流速度与排队长度变化评价不同类型交通事故产生的影响。Hou 等^[3]基于改进的特征增强图卷积、门控循环单元及改进的轻量粒子群算法,构建组合交通流预测模型,通过增强时空特征提取与自适应参数优化,准确预测区域交通流。刘格格等^[4]采用软件 AnyLogic 构建交通拥堵状态评估模型,并验证模型准确性,为交通管理与规划提供可靠依据。余雪等^[5]分析交通流量、车流密度和车流速度的关系,研究交通流拥堵扩散与消散规律,建立交通拥堵持续时间模型,但并未提出缓解拥堵的控制策略。赵再先等^[6]以可变速度限制模型和动态交通流模型为基础,引入等价速度分析模型,建立分段限速动态综合模型,制定高速公路限速控制策略。韩雨等^[7]通过建立离散一阶交通流模型,模拟运动波传播过程,分析可变限速对交通效率与安全的影响机制,提出可提高通行效率与安全水平的优化控制方法。宋现敏等^[8]针对快速路入口匝道冲突点拥堵问题,建立快速路入口匝道与衔接交叉口联动控制优化模型,选择延误和排队长度为评价指标,经仿真验证和模型对比,发现联动控制优化方法可显著改善交通流状态。Han 等^[9]提出基于深度强化学习的差异化可变限速控制模型,通过多目标奖励机制训练模型控制器,仿真结果表明该控制器在不同驾驶行为环境中均表现出良好的泛化能力和鲁棒性。朱俊奇等^[10]分析高速公路隧道内的交通状态,提出正常状态、事件状态及维修模式下的交通诱导与控制策略,通过运用隧道交通智能化管理模式,提高隧道交通安全。国内外学者采用多种方法对交通流进行建模与预测,但多数仍集中于宏观层面的交通流分析^[11-12],现有控制策略也主要针对瓶颈路段提出相应措施并验证可行性^[13-14],面向高速公路事故场景的控制策略研究相对较少。

本文采用软件 VISSIM 从微观层面仿真高速公路发生交通事故后的交通流情况,基于交通流特性建立高速公路交通拥堵持续时间预测模型,分析不同上游到达流量和不同交通事故阻塞时间下的交通拥堵持续时间。将高速公路交通拥堵持续时间预测模型与遗传算法相结合,求解车辆到达拥堵路段排队队尾位置时的车速,提出分级限速控制策略,通过分级限制高速公路事故上游路段的车速,减少到达事故点的车辆,缓解交通拥堵。

1 高速公路交通拥堵持续时间预测模型构建

交通波模型是用于表征交通流量、车流密度与车流速度间关系的理论模型,可有效解释交通流的动态演化行为。该模型将交通流视为连续流体,通过分析车流密度变化揭示交通流在空间和时间维度下的演变规律。连续交通流模型在准确描述交通流行为方面具有显著优势,尤其在拥堵状态下,能准确描述交通流的波动和车辆队列的形成与解散过程。

交通波速度^[15]

$$u_w = (u_A k_A - u_B k_B) / (k_A - k_B),$$

式中: u_A 为拥堵区的车流平均速度, k_A 为拥堵区的车流密度, u_B 为非拥堵区的车流平均速度, k_B 为非拥堵区的车流密度。

采用软件 VISSIM 仿真模拟高速公路交通事故前、后的车流运行状态,仿真场景为双向四车道高速公路,车道宽 3.5 m,路段长 10 km,交通事故阻塞时间为 2 h,仿真时间为 10 h。仿真输出非拥堵状态和拥堵状态下的车流速度-密度数据。

采用软件 SPSS 对 VISSIM 输出的不拥堵状态下的交通流数据进行曲线拟合,线性函数、幂函数、对数函数、指数函数及二次函数的决定系数 R^2 分别为 0.835、0.814、0.814、0.818、0.818,线性函数的拟合效果最好。Greenshields 模型可较好地描述非拥堵状态下车流速度与密度间的线性关系。非拥堵状态车流速度-密度散点数据拟合公式为^[16]:

$$u = u_f(1 - k/k_j),$$

式中: u 为车流速度, u_f 为线性模型自由流速度, k 为车流密度, k_j 为线性模型阻塞密度。

采用软件 SPSS 对 VISSIM 输出的拥堵状态下车流速度-密度数据进行曲线拟合,线性函数、幂函数、对数函数、指数函数及二次函数的 R^2 分别为 0.865、0.888、0.905、0.891、0.905,对数函数和二次函数的

拟合效果最好。交通事故后高密度拥堵状态的交通流数据符合 Greenberg 模型,因此选择对数模型作为拟合函数。拥堵状态下车流速度-密度散点数据拟合公式为^[17]:

$$u = u_{fc} \ln(k_{jc}/k),$$

式中: u_{fc} 为特征速度, k_{jc} 为对数模型阻塞密度。

高速公路交通事故场景示意图如图 1 所示,将高速公路交通事故相关路段分为上游车辆到达区域、中游交通拥堵区域和下游事故影响恢复区域。



图 1 高速公路交通事故场景示意图

在上游车辆到达区域和中游交通拥堵区域的交界处形成集结波,根据交通波模型,集结波速度

$$u_{w1} = [k_1 u_f - k_1^2 u_f / k_j - k_2 u_{fc} \ln(k_{jc}/k_2)] / (k_1 - k_2), \quad (1)$$

式中: k_1 为上游车流密度, k_2 为中游车流密度。

清除交通事故车辆后,中游交通拥堵区域和下游事故影响恢复区域的交界处形成消散波,下游车辆以最大流量疏散。消散波速度

$$u_{w2} = [k_2 u_{fc} \ln(k_{jc}/k_2) - k_3 u_f + k_3^2 u_f / k_j] / (k_2 - k_3), \quad (2)$$

式中 k_3 为下游车流密度。

假设交通事故阻塞时间为 t_0 ,清除事故车辆后到交通事故消散完成时间为 t_s ,则集结波速度与消散波速度的关系为^[5]:

$$|u_{w1}|(t_0 + t_s) = |u_{w2}|t_s.$$

高速公路交通拥堵持续时间

$$t_j = t_0 + t_s = t_0 + t_0 |u_{w1}| / (|u_{w2}| - |u_{w1}|). \quad (3)$$

2 仿真实验

为保证充分加载交通流,在 VISSIM 仿真中,设定预热时间为 1 000 s,移除初始不稳定数据。仿真路段为单向双车道高速公路,长 10 km,车道宽 3.5 m。在内侧道路随机设置交通事故车辆,并形成拥堵点;车辆类型包括小轿车和重型货车。当事故车辆影响后方正常通行时,其他车辆在确保安全的前提下换道行驶,将数据检测器间隔 100 m 布设在拥堵点上游、下游及中游拥堵区域。在不同上游到达流量及不同交通事故阻塞时间下,每隔 15 min 统计交通流数据,得到高速公路单车道交通拥堵的车流速度-密度散点图如图 2 所示。由图 2 可知:交通事故的发生导致交通流状态由非拥堵状态向拥堵状态跃迁,车流速度与密度关系呈明显分段特征。

分别拟合非拥堵和拥堵两种状态下的数据,得到车流密度与速度间的关系式为:

$$\{u\} = \begin{cases} -0.07\{k\} + 91.82, & 0 \leq \{k\} \leq 50 \\ -30.80 \ln\{k\} + 165.63, & \{k\} > 50 \end{cases},$$

式中: $\{u\}$ 为以 km/h 为单位的 u 的数值, $\{k\}$ 为以 veh/km 为单位的 k 的数值。

结合式(1)~(3),通过高速公路交通拥堵持续时间预测模型计算不同上游到达流量 q_1 和不同交通

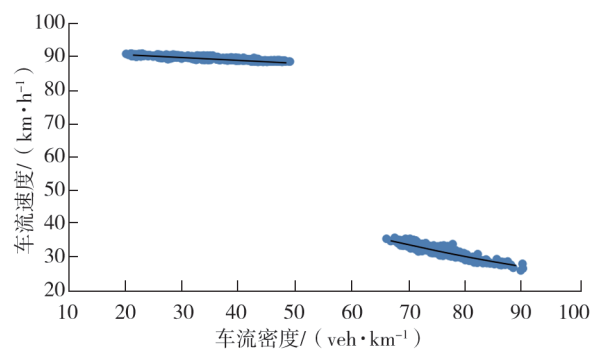


图 2 高速公路单车道交通拥堵的车流速度-密度散点图

事故阻塞时间 t_0 下的高速公路交通拥堵持续时间 t_j , 并与 VISSIM 仿真得到的交通拥堵持续时间 t_j' 对比, 结果如表 1 所示。由表 1 可知: 随上游到达流量和交通事故阻塞时间的增大, 高速公路交通拥堵持续时间增大。

表 1 不同上游到达流量和不同交通事故阻塞时间下交通拥堵持续时间计算结果及仿真结果

$q_1/$ (veh·h ⁻¹)	t_j/min					t_j'/min				
	$t_0=60\text{ min}$	$t_0=90\text{ min}$	$t_0=120\text{ min}$	$t_0=150\text{ min}$	$t_0=180\text{ min}$	$t_0=60\text{ min}$	$t_0=90\text{ min}$	$t_0=120\text{ min}$	$t_0=150\text{ min}$	$t_0=180\text{ min}$
2 000	65.8	98.8	131.4	164.4	197.5	63.0	93.0	122.0	154.0	186.0
2 500	96.0	144.6	192.8	241.0	289.0	79.0	110.0	133.0	168.0	202.0
3 000	101.0	151.6	202.0	252.0	303.0	92.0	133.0	172.0	200.0	238.0
3 500	109.1	163.7	218.3	272.8	327.4	124.0	167.0	215.0	261.0	308.0
4 000	173.7	230.5	297.4	354.2	411.1	177.0	234.0	321.0	379.0	434.0

为验证计算结果的准确性, 采用绝对百分比误差 E_{AP} 对比高速公路交通拥堵持续时间的计算结果和仿真结果, E_{AP} 越小, 说明计算结果越准确, 计算公式为:

$$E_{AP} = 100\% \times |t_j' - t_j|/t_j'。$$

交通拥堵持续时计算结果与仿真结果的 E_{AP} 如表 2 所示。由表 2 计算可知: 不同上游到达流量和不同交通事故阻塞时间下交通拥堵持续时间计算结果和仿真结果的平均绝对百分比误差为 14.37%, 交通拥堵持续时间预测模型准确性较高, 可用来预测高速公路交通事故发生后的拥堵持续时间。

表 2 交通拥堵持续时间计算结果和仿真结果的 E_{AP}

$q_1/$ (veh·h ⁻¹)	$E_{AP}/\%$				
	$t_0=60\text{ min}$	$t_0=90\text{ min}$	$t_0=120\text{ min}$	$t_0=150\text{ min}$	$t_0=180\text{ min}$
2 000	4.4	6.2	7.7	6.8	6.2
2 500	21.5	31.4	45.0	43.5	43.1
3 000	9.8	13.9	17.4	26.0	27.3
3 500	12.0	2.0	1.5	4.5	6.3
4 000	1.9	1.5	7.3	6.5	5.3

3 分级限速控制策略

3.1 限速条件

采用遗传算法求解高速公路发生交通事故后上游路段车辆的最优限速, 需进行算法编码、适应度函数定义及约束条件确定。

1) 编码。遗传算法无法直接处理模型参数, 采用二进制编码方式对车辆速度进行编码。

2) 适应度函数。构建限速与排队队尾位置关系函数, 求解车辆到达拥堵路段排队队尾位置时的车速, 作为参考限速 u_c 。路段入口至交通事故拥堵排队队尾的距离

$$s = t_0 [u_1 k_1 - k_1^2 u_1 / k_j - k_2 u_{ic} \ln(k_{jc} / k_2)] / (k_1 - k_2) + t_0 u_c |u_{w2}| / (|u_{w2}| - |u_{w1}|), 10\text{ km} \leq s \leq 100\text{ km}。$$

遗传算法包括种群大小 N_p 、最大迭代次数 G 、交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 等参数。经测试, 当 $N_p=50$, $G=100$, $P_c=0.8$, $P_m=0.2$ 时, 遗传算法的适应度较高, 能搜索到最优解, 适应度进化曲线如图 3 所示。

3) 约束条件。合理的限速控制对提高高速公路通行效率、增强交通流稳定性、保障行车安全有重要

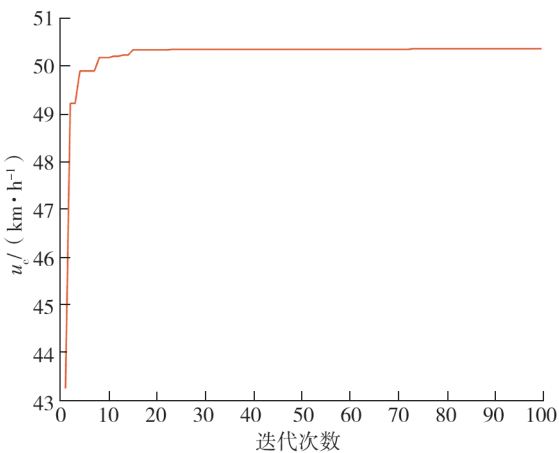


图 3 适应度进化曲线

作用。研究路段的最大限速为 110 km/h,车辆平均速度不超过 100 km/h,确定分级限速控制策略的限速上限为 100 km/h。在保障高速公路通行效率的前提下,最小限速不应低于静态限速下限 40 km/h^[18]。当车速低于 48 km/h 时,事故发生率会显著增大^[19]。综合上述因素,确定分级限速控制策略的限速下限为 50 km/h。

3.2 限速方案

针对高速公路交通事故导致的拥堵问题,提出一种分级限速控制策略。该策略在限速控制区内对车辆实施多次逐级限速,使车速平稳减小,提高行车安全性与路段通行效率。限速自拥堵区域起向上游路段依次设置,按 10 km/h 的梯度逐级向拥堵区域递减^[20]。为避免因限速区过短导致车速骤减,影响行车安全,综合考虑高速公路特性、排队长度与交通波传播速度,设定各段限速区长 20 km。通过构建低速高密度的交通运行区,有效减少从该区域驶出的车辆数,防止拥堵区域通行能力严重过载。

3.3 结果对比

以单向双车道高速公路单侧车道发生交通事故为例,采用软件 VISSIM 分别对实施分级限速控制策略与无策略两种情况下的路段拥堵情况进行仿真。仿真路段长 100 km,车道宽 3.5 m,设置交通流量为 3 000 veh/h。分级限速控制策略与无策略的排队长度、车流密度及平均车流速度对比如图 4 所示。

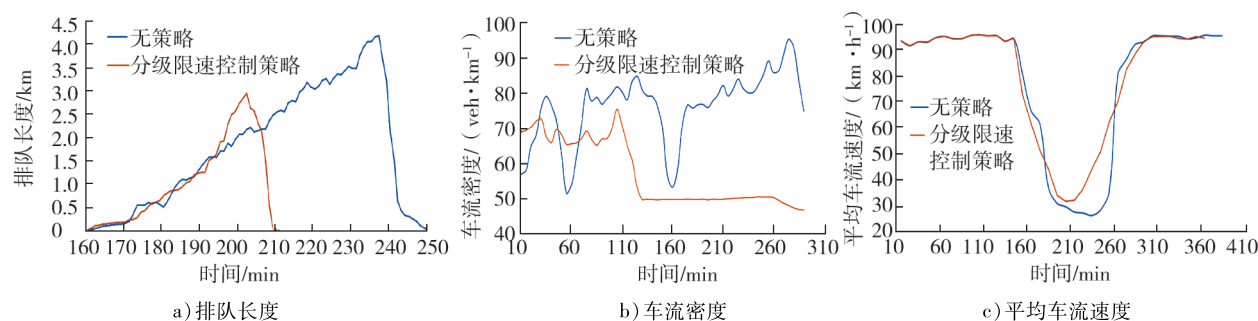


图4 分级限速控制策略与无策略仿真结果对比

由图4可知:采用分级限速控制策略后,排队长度峰值显著减小,从无策略时的 4 188 m 降至 2 951 m,平均排队长度从 2 141 m 降至 1 340 m;在无策略情况下,拥堵段车流密度波动剧烈,而分级限速控制策略能有效平抑车流密度变化幅度,拥堵路段平均车流速度从 28.7 km/h 增至 36.0 km/h,分级限速控制策略可有效缓解高速公路拥堵状况。

4 结束语

为缓解高速公路交通事故后的拥堵情况,基于交通波模型构建高速公路交通拥堵持续时间预测模型,通过遗传算法求解高速公路拥堵情况下的最优限速,提出分级限速控制策略,防止拥堵区域通行能力过载。

1)采用软件 VISSIM 仿真高速公路发生交通事故前、后的交通流情况,分别采用 Greenshields 模型和 Greenberg 模型拟合非拥堵状态与拥堵状态的车流速度-密度曲线。基于交通波模型构建交通拥堵持续时间预测模型,通过仿真验证不同上游到达流量和不同交通事故阻塞时间下交通拥堵持续时间,计算结果和仿真结果的平均绝对百分比误差为 14.37%,交通拥堵持续时间预测模型准确性较高,可用来预测高速公路交通事故后的拥堵时间。

2)将交通拥堵持续时间预测模型与遗传算法相结合,求解参考限速,制定分级限速控制策略,在限速控制区域内对车辆实施多次逐级限速,防止交通拥堵区域通行能力严重过载。上游到达流量为 3 000 veh/h 时,采取分级限速控制策略后,平均排队长度从 2 141 m 降至 1 340 m,拥堵路段的平均车流速度从 28.7 km/h 增至 36.0 km/h,分级限速控制策略可在一定程度上缓解拥堵情况。

参考文献:

- [1] JOVANOVIĆ B, ŠEVROVIĆ M, LUBURIĆ G. Comparative analysis of deterministic fundamental diagrams representative of continuous and interrupted traffic flow on selected regional road in Croatia[J]. Applied Sciences, 2024, 14(2): 533.
- [2] 张亮, 云旭, 高永, 等. 基于 Vissim 仿真的高速公路事故影响因素研究[J]. 交通工程, 2023, 23(4): 106-110.
- [3] HOU Y, ZHANG D, LI D, et al. Regional traffic flow combination prediction model considering virtual space of the road network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2024, 637: 129598.
- [4] 刘格格, 万传风, 李欣, 等. 基于 AnyLogic 的道路交通拥堵仿真分析[J]. 中国公路, 2022(14): 94-97.
- [5] 余雪, 高超, 张冲, 等. 基于 VISSIM 仿真的高速公路交通事故拥堵扩散与消散预测[J]. 山东交通学院学报, 2023, 31(3): 47-52.
- [6] 赵再先, 赖旭. 高速公路交通拥堵状态下限速策略[J]. 交通与运输, 2019, 35(增刊 1): 85-87.
- [7] 韩雨, 郭延永, 张乐, 等. 消除高速公路运动波的可变限速控制方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 151-158.
- [8] 宋现敏, 张璐雨, 白乔文, 等. 快速路入口匝道与衔接交叉口联动控制优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6): 63-73.
- [9] HAN L, ZHANG L, GUO W A. Optimal differential variable speed limit control in a connected and autonomous vehicle environment for freeway off-ramp bottlenecks[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2023, 149(4): 04023009.
- [10] 朱俊奇, 郑嘉. 隧道交通控制策略研究[J]. 交通世界, 2020(18): 118-119.
- [11] 潘红光, 高磊, 米文毓. 基于改进宏观交通流模型的 MPC 算法设计[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1875-1881.
- [12] NAGATANI T. Dynamic model for traffic concentration and congestion near bridge[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2023, 621: 128800.
- [13] 王艳红, 刘铜, 赵玉玺, 等. 基于 VISSIM 的高速公路虚拟应急车道建模研究[J]. 科技和产业, 2024, 24(4): 165-171.
- [14] 韩磊, 张轮, 郭为安. 混合交通流环境下基于改进强化学习的可变限速控制策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(3): 110-122.
- [15] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [16] GREENSHIELDS B D, BIBBINS J R, CHANNING W S. A study of traffic capacity[J]. Highway Research Board Proceedings, 1935: 107546777.
- [17] 王丽媛. 基于时空特征的高速公路车流的异常数据识别和修复[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [18] 陈维, 庞俊恒, 吴勇, 等. 基于 METANET 模型的高速公路主线局部缩减路段可变限速方法研究[C]//《工业建筑》2018 年全国学术年会论文集(下册). 北京:《工业建筑》2018 年全国学术年会, 2018: 1063-1067.
- [19] SOLOMON D. Accidents on mainrural highways related to speed, driver and vehicle[R]. Washington, USA: Bureau of Public Roads, Department of Commerce, 1964.
- [20] 郝媛, 孙立军, 徐天东, 等. 城市快速路交通拥挤分析及拥挤阈值的确定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 609-614.

Graded speed limit control strategy under highway congestion

YU Xue^{1,2}, FENG Pengfei^{1,3,4}, DUAN Mengmeng^{1,3,4}

1. College of Intelligent Transportation Modern Industry, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China;

2. School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

3. National Engineering Research Center for Vehicle Driving Safety, Hefei 230601, China;

4. Anhui Provincial Key Laboratory of Traffic Information and Safety in General Universities, Hefei 230601, China

Abstract: To alleviate occasional congestion problems after highway traffic accidents, the traffic flow states before and after accidents are simulated using the software VISSIM, and traffic flow data for non-congested and

(下转第 43 页)

of the left side wall, and the middle inner side of the right side wall, with the maximum tensile stress peak occurring on the upper outer side of the left side wall and the largest fluctuation amplitude generated on the inner side of the top slab of the left chamber. 3) The vibration acceleration response of the top slab is larger, as it transmits the vibration acceleration response along the tunnel side walls and the central diaphragm to the bottom slab, with the top slab and side walls stabilizing around the second second, and the bottom slab stabilizing around the first second; after stabilization, the peak vibration acceleration of the top slab is the largest, while that of the bottom slab is the smallest. 4) As the burial depth of the tunnel increases, the settlement of the soil at the bottom of the tunnel decreases, and the peak vibration acceleration of the top slab, side walls, and bottom slab decreases, with a recommended burial depth of 2.5 m to 3.0 m; as the vehicle load amplitude increases, the peak tensile stress, settlement, and peak acceleration of the tunnel all increase; the vehicle load applied directly above the comprehensive utility tunnel is the most detrimental to the tunnel, resulting in the maximum peak tensile stress and acceleration, while moving the loading position away from the tunnel's central axis to the left or right generally reduces the peak tensile stress and vibration acceleration of each structure of the tunnel. 5) An increase in the elastic modulus of the backfill soil helps to reduce the settlement and peak acceleration of the tunnel. With the increase of groundwater level, the settlement at the bottom of the tunnel initially decreases slightly and then increases.

Keywords: comprehensive utility tunnel; silty soil foundation; dynamic load; low plasticity clay; acceleration response

(责任编辑:王惠)

(上接第24页)

congested states are obtained. The Greenshields model and the Greenberg model are used to fit the speed-density relationship curves for non-congested and congested states, respectively, and a highway traffic congestion duration prediction model is constructed. Through the model, the congestion duration under different upstream arrival flows and different traffic accident blockage times is calculated, and the model's accuracy is verified through simulation. The highway traffic congestion duration prediction model is combined with a genetic algorithm to solve the vehicle speed when vehicles arrive at the queue tail position of the congested section, thereby determining the optimal speed limit. A graded speed limit control strategy is proposed for congestion situations, where multiple gradual speed limits are implemented for vehicles from the upstream section of the accident, allowing the speed to decrease smoothly and restricting the number of vehicles in the congested area. The results show that the mean absolute percentage error between the calculated and simulated results of congestion duration under different upstream arrival flows and different blockage times is 14.37%, indicating that the traffic congestion duration prediction model has high accuracy and can be used to calculate the congestion duration after highway accidents. After implementing the graded speed limit control strategy, when the upstream arrival flow is 3 000 veh/h, the average queue length decreases from 2 141 m to 1 340 m, and the average traffic flow speed in the congested section increases from 28.7 km/h to 36.0 km/h, demonstrating that the graded speed limit control strategy can effectively alleviate highway congestion.

Keywords: highway; congestion duration; graded speed limit; simulation

(责任编辑:赵玉真)