

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.06.005

大交通量高速公路互通合流区交通冲突分析*

高有千¹, 李家儒², 郑亮³, 陈特³, 王波⁴, 高建平²

(1.温州市交通工程管理中心, 浙江 温州 325699; 2.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;
3.温州金丽温高速公路东延线有限公司, 浙江 温州 325000; 4.重庆交大交通安全科技研究院
有限公司 杭州分公司, 浙江 杭州 311215)

摘要: 为了研究涉路施工大交通量高速公路互通合流区交通冲突特性, 为涉路工程建设交通动态管控提供技术支撑, 以浙江甬台温(宁波—台州—温州)高速公路温州南互通为研究对象, 采用交通仿真方法, 基于车辆距离碰撞时间 T_{TTC} 和后侵入时间 T_{PET} 划分冲突类别并采集交通冲突次数等数据, 分析道路和交通参数对合流区交通冲突的影响, 建立不同影响因素与严重冲突次数关系模型。结果表明, 对合流区冲突次数的影响程度从高到低依次为匝道交通量、加速车道长度、主线与匝道的限速差、主线货车比例; 匝道交通量增加对冲突发生概率的影响最大, 匝道交通量由 200 veh/(h·ln) 增大到 1 200 veh/(h·ln) 时, 冲突概率增加 182.77%, 严重冲突占比由 14.54% 上升至 20.92%; 随着主线货车比例的增加, 严重冲突占比由 15.55% 下降至 11.47%; 加速车道长度由 100 m 增加至 350 m, 发生换道冲突的概率降低 48.48%, 发生追尾冲突的概率增加 23.88%; 主线与匝道的限速差为 50 km/h 时, 发生严重冲突的概率增加 71.10%。

关键词: 公路交通; 高速公路; 大交通量; 互通合流区; 交通冲突

中图分类号: U491.265

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0027-06

互通合流区是高速公路高风险行车区域, 其交通事故率明显高于其他路段^[1]。当交通量接近饱和状态时, 合流区交通冲突更频繁, 事故风险加剧。

车辆从匝道汇入主线的过程中, 驾驶员不断调整驾驶操作以控制车辆运行状态, 满足适应道路环境转换的需求。温惠英等研究得出主线交通量低于 1 000 veh/(h·ln) 时, 合流区具有较高的通行效率与安全水平, 高于该交通量时合流区的安全水平有所降低^[2]。Sun G. Q. 以高速公路封闭单车道为例建立仿真模型, 对交通冲突进行了评价^[3]。赵笑月等将交通冲突分为严重、中度和一般三级, 确定严重冲突与中度冲突、中度冲突与一般冲突的时间阈值分别为 3.1 s、7.8 s^[4]。张宇等采用 VISSIM(Visual Simulation Model) 软件建立高速公路改扩建交通仿真模型, 对影响交通组织的 4 个主要指标进行分析, 结果表明交通量和封闭车道数对交通冲突次数有显著影响^[5]。宋杰、马艳丽等采用后侵入时间(Post Encroachment Time, PET) 算法对高速公路合流区单向两车道侧向冲突进行研究, 结果表明外

侧车道是发生侧向冲突的主要地点, PET 算法识别匝道合流区交通冲突的准确率达 91.71%^[6-7]。Carmacho-Torregrosa F. J. 等认为加速度对交通冲突有显著影响, 可利用加速度确定交通冲突的严重程度^[8]。陆毅忱、王雪松等提出城市道路交叉口交通冲突阈值, 认为利用风险域能更好地识别追尾冲突^[9-10]。徐海等建立交通隔离设施与冲突率之间的关系模型, 对道路隔离设施的设置条件进行了量化分析^[11]。朱顺应等建立贝叶斯网络模型, 对高速公路施工合流段交通冲突进行分析, 结果表明匝道合流段发生冲突的概率和严重程度比一般路段高^[12]。Abed H. M. 等利用 VISSIM 和 SSAM(Surrogate Safety Assessment Model) 建立城市道路交叉口仿真模型, 分析了交通冲突严重程度^[13]。陈勛等以城市绕城高速公路入口为研究对象, 以预测交通量为指标, 对不同立交设计方案的优缺点进行了比较^[14]。现有研究对一般高速公路合流区的冲突特性研究较多, 对于接近饱和的大交通量高速公路合流区的冲突特性研究较少。本文以浙江甬台

* 基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2021065); 四川省交通运输科技项目(2022-A-1); 重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2018005)

温(宁波—台州—温州)高速公路温州南互通为研究对象,通过 VISSIM 软件对高速公路合流路段交通状况进行仿真,利用 SSAM 软件分析不同影响因素对交通冲突次数的影响,建立影响因素与交通冲突次数关系模型。

1 大交通量高速公路合流区仿真方法

1.1 大交通量高速公路

参考文献[15],当高速公路服务水平达到三级,即路段饱和度 $V/C > 0.55$ 时,认定为大交通量状态。在互通合流区,通过高峰小时交通量可定义不同道路下大交通量状态,当交通量超过表 1 所示高峰小时交通量时,认定该路段达到大交通量状态。

表 1 高速公路定义为大交通量的高峰小时交通量

单侧车道数/条	不同设计速度(km/h)下高峰小时交通量/(pcu·h ⁻¹)		
	120	100	80
2	2 400	2 300	2 200
3	3 600	3 450	3 300
4	4 800	4 600	4 400

1.2 试验方法

采集互通合流区交通流信息的方法较多,主要有人工观测法、视频采集法、微观仿真法^[16-18]。人工观测法操作简单但所需人力多;视频采集法数据处理难度和误差较大;微观仿真能输出不同类型仿真冲突数量、位置及严重程度,在解析复杂交通网络中具有能提供显著样本量的优势^[19-20]。因此,采用微观交通仿真法分析大交通量高速公路合流区的交通特性。

1.3 仿真软件

通过对常用微观交通仿真软件的对比(见表 2),VISSIM 能输入较大样本量下交通参数,适用于模拟车辆与车辆之间的交互状态。因此,选取 VISSIM 采集各影响因素下交通冲突指标。

采用 SSAM 软件对合流区进行交通冲突分析。SSAM 是美国联邦公路管理局发布的一款安全评估模型软件,可通过微观交通模拟车辆轨迹产生安全绩效指标,如车辆距离碰撞时间 T_{TTC} 、后侵入时间 T_{PET} 、追尾冲突次数、换道冲突次数及冲突事件地点等,可分析由 VISSIM 生成的车辆轨迹数据评估文件。分析过程见图 1。

表 2 微观交通仿真软件对比

仿真软件	模型算法	优缺点
CORSIM	跟驰模型采用安全距离模型,换道模型采用强制性和可选择性模型	能较好地模拟城市路网不同的交通控制、管理和操作等
VISSIM	采用 Wiedemann 99 模型模拟车辆跟驰和换道的运动特征	能较好地模拟高速公路车辆特征的交通运行参数
AIMSUN	提供不同仿真方式,基于交通量和转弯比例,基于 OD 和路经的选择方式	适用于交通规划,采用线一连接结构描述路网
PARAMICS	跟驰模型采用心理—生理指标,换道模型采用智能体换道	可实现协同信号等基于城市交通流的复杂信号控制,但仿真场景参数较少



图 1 间接安全评价体系

1.4 仿真参数设置

选用甬台温高速公路温州东至塘下段的温州南互通作为合流区仿真对象。甬台温高速公路为双向四车道,设计速度为 100 km/h,最拥堵路段主线交通量达 90 595 pcu/d,最大小时交通量达 11 324 veh/h 即 5 662 veh/(h·ln)。

以最大小时交通量 11 324 veh/h 下车辆通过互通枢纽为模型进行仿真,通过动态分配进行运行特征模拟。匝道交通量取 200~1 200 veh/h,货车比例取 0~50%,加速车道长度取 100~350 m。

设计速度 100 km/h 下互通范围内主线最小圆曲线半径为 1 500 m,最大纵坡值不超过 2%。与实际路段对比,温州南互通的线形设计指标对交通量仿真结果的影响可忽略。

2 方法原理

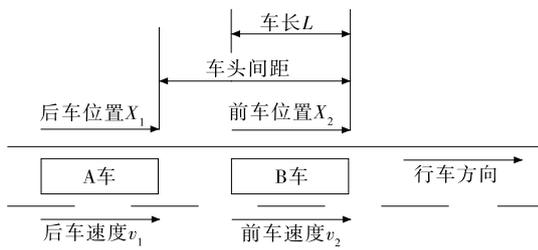
2.1 指标选取

T_{TTC} 、 T_{PET} 是目前使用最广泛的交通冲突指标^[21]。 T_{TTC} 的计算方法综合考虑了汽车行驶距离和速度,不仅适用于追尾冲突风险分析,也适用于转

向、碰撞、车辆与行人等冲突分析(见图 2)。计算公式如下:

$$T_{TTCN} = \frac{X_{N-1}(t) - X_N(t) - L_{N-1}}{\dot{X}_N(t) - \dot{X}_{N-1}(t)} \quad (1)$$

式中: $X_N(t)$ 和 $X_{N-1}(t)$ 分别为车辆 N 、 $N-1$ 的位置; L_{N-1} 为前车 $N-1$ 的车身长度; $\dot{X}_N(t)$ 和 $\dot{X}_{N-1}(t)$ 分别为车辆 N 、 $N-1$ 的速度。



X 为位移长度(m); L 为车身长度(m); v 为行车速度(m/s)

图 2 T_{TTC} 分析示意图

考虑到实际调查得到的多为车头时距,车头间距和车身长度较难获得,通过确定 $X_{N-1}(t) - X_N(t) - L_{N-1}$ 和车头时距的关系对式(1)进行改进:

$$T_{TTCN} = \frac{\dot{X}_N(t)h_N - L_{N-1}}{\dot{X}_N(t) - \dot{X}_{N-1}(t)} \quad (2)$$

式中: h_N 为车辆 $i-1$ 、 i 之间的车头时距。

T_{PET} 表示两辆车分别到达轨迹重合区域的时间差,以两车跟车行驶为例, T_{PET} 为前车车尾离开某一区域至后车车头进入该区域的时间差。若时间差较小,说明前后两车更接近于发生碰撞。不同轨迹重合区域的 T_{PET} 值不同,为使后侵入冲突值具有意义,取最小侵入时间作为冲突指标。

如图 3 所示,当匝道上汽车合流至主线时,与主线正常行驶的汽车会产生冲突区域。设主线车辆 A 与冲突区域起点的距离为 x_A 、速度为 v_A 、加速度为 a_A ,匝道车辆 B 与冲突区域起点的距离为 x_B 、速度为 v_B 、加速度为 a_B ,合流区冲突识别模型为:

$$T_{PET} = T_2 - T_1 = \frac{-2v_B + \sqrt{4v_B^2 - 8a_B(v_B\Delta t - x_B)}}{2a_B} - \frac{2v_A + \sqrt{4v_A^2 - 8a_Ax_A} + \Delta t}{2a_A} + \Delta t \quad (3)$$

式中: T_2 、 T_1 分别为匝道车辆和主线车辆到达轨迹重合区域的时间(s)。

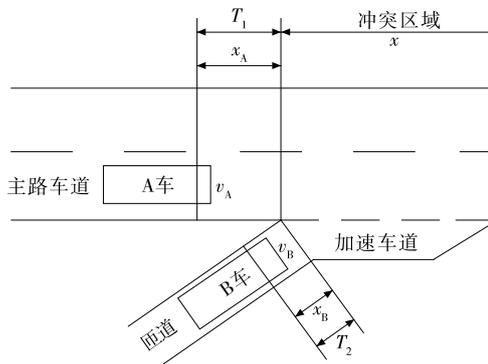


图 3 T_{PET} 分析示意图

2.2 冲突类型划分

根据相关研究^[7,22],高速公路互通合流区的冲突指标阈值与一般路段不同。大交通量下车速一般较低, T_{TTC} 临界值取为 $[2.8, 4.7]$ s, T_{PET} 临界值取为 $[1.7, 4.4]$ s。据此将冲突类型分为严重冲突、一般冲突、不构成冲突,满足一个指标阈值即为该冲突类型。冲突严重程度分级标准见表 3。

表 3 交通冲突指标 T_{TTC} 和 T_{PET} 的阈值 单位:s

冲突类型	T_{TTC}	T_{PET}
严重冲突	$[0.0, 2.8)$	$[0.0, 1.7)$
一般冲突	$[2.8, 4.7)$	$[1.7, 4.4)$
不构成冲突	$[4.7, +\infty)$	$[4.4, +\infty)$

3 合流区交通冲突分析

3.1 冲突严重程度和影响因素

根据大交通量的定义,高速公路断面交通量高于 1 150 veh/(h·ln)为大交通量高速公路。以该交通量为仿真下限,甬台温高速公路最大小时交通量为上限,设置主线交通量分别为 1 150 veh/(h·ln)、2 500 veh/(h·ln)、3 500 veh/(h·ln)、4 500 veh/(h·ln)、5 662 veh/(h·ln),分析在其他因素不变的情况下主线交通量变化对合流区冲突的影响,结果见图 4。从图 4 可看出:以主线交通量 2 500 veh/(h·ln)为临界点,随主线交通量增大,合流区的总冲突次数显著增加。

本文讨论的是在大交通量下合流区冲突特性,因此控制主线交通量不变,取主线交通量为 5 662 veh/(h·ln),分析匝道交通量(单车道)、主线货车比例、主线与匝道的限速差(以下简称速度差)等因素与交通冲突的关系,分析结果见图 5。

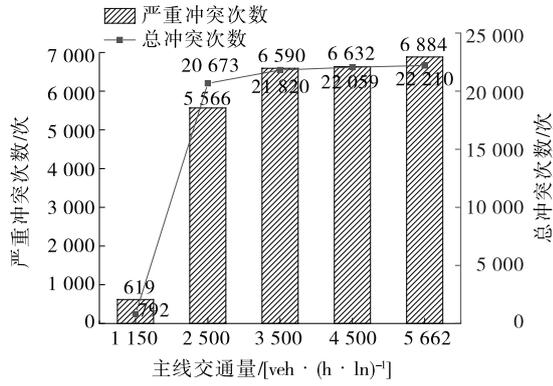


图4 不同主线交通量对合流区冲突的影响

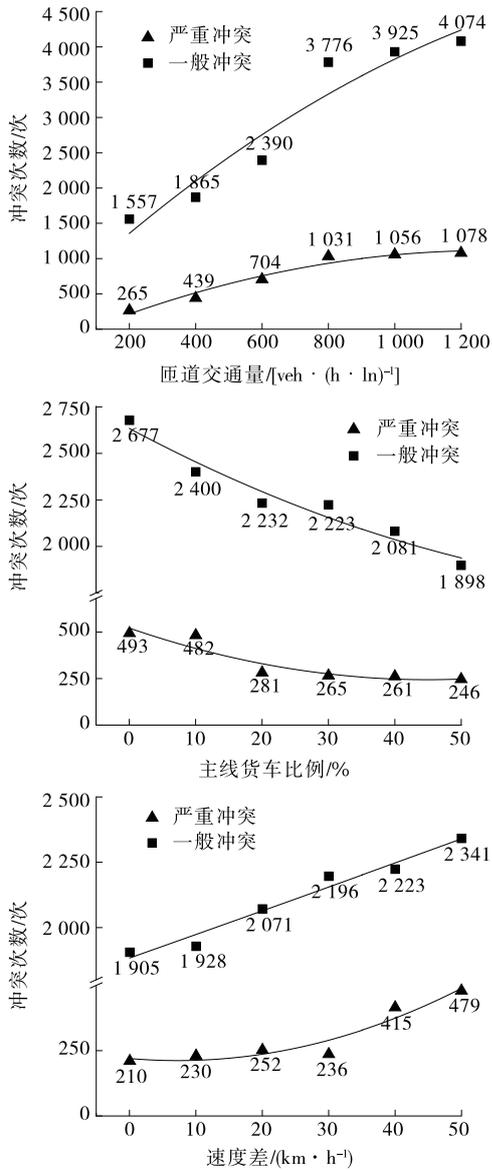


图5 合流区交通因素与交通冲突的关系

从图5可以看出：冲突次数随着匝道交通量和速度差的增大而增大，随着主线货车比例的增加

加而减小；匝道交通量由 200 veh/(h·ln)增大到 1 200 veh/(h·ln)时，严重冲突占比由 14.54% 上升到 20.92%；主线货车比例由零增加到 50%时，严重冲突占比由 15.55% 下降至 11.47%；速度差为 50 km/h 时，发生严重冲突的概率增加 71.10%。

3.2 冲突类别分析

不同交通影响因素下合流区的冲突类别占比见图6。

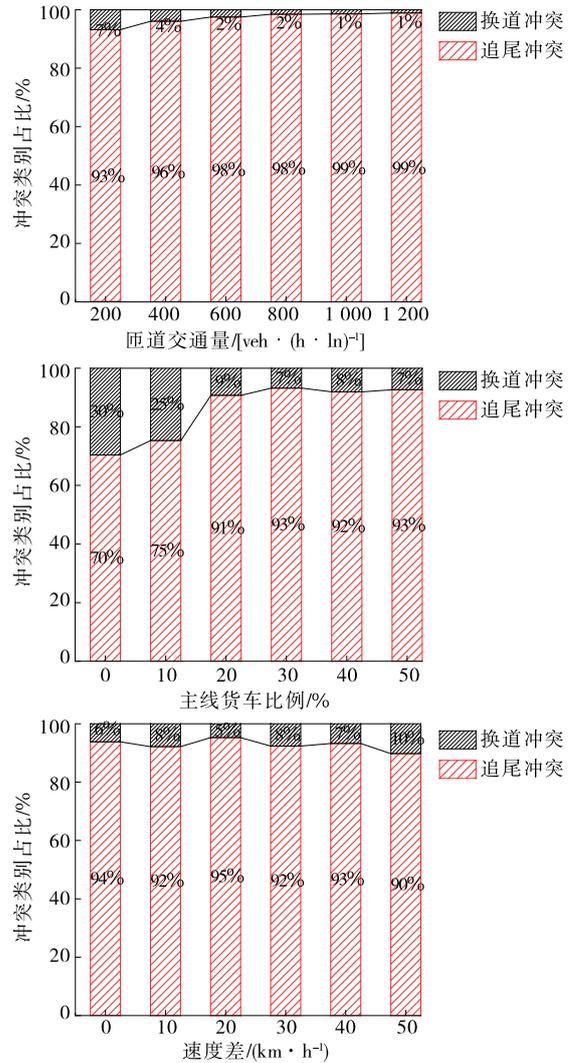


图6 不同交通因素下合流区冲突类别对比

由图6可知：在多个因素影响下，大交通量高速公路合流区的追尾冲突比例显著高于换道冲突。匝道交通量增加到 1 000 veh/(h·ln)时，换道冲突逐渐减少，由匝道交通量为 200 veh/(h·ln)时的 7% 下降至 1%。随着货车的增多，换道冲突占比降低，货车比例增加到 50%时，换道冲突占比降低 76.67%。可能是由于货车比例增加，汇入主线时驾驶员会下意识地注意与货车之间的横向距离，避免交通冲突

的发生。随着速度差的变化,追尾冲突和换道冲突的占比变化不大,速度差对冲突类型无明显影响。

3.3 加速车道长度影响分析

大交通量下加速车道长度对交通冲突的影响见图7、图8。

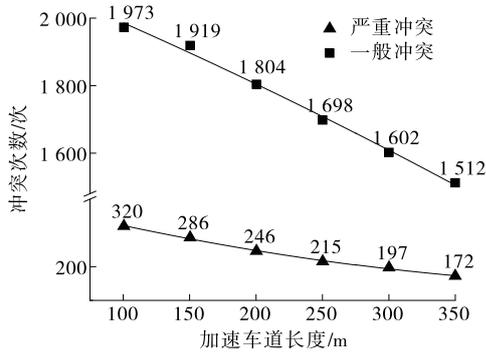


图7 不同加速车道长度时冲突严重程度对比

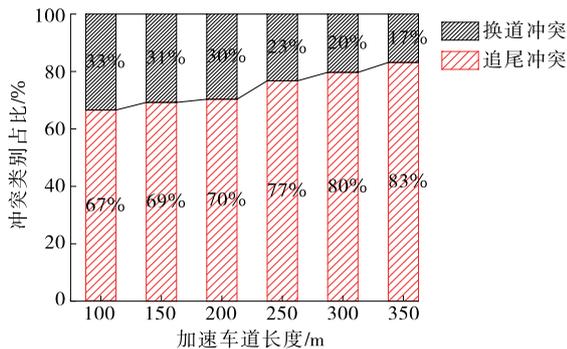


图8 不同加速车道长度时冲突类别对比

由图7可知:随着加速车道长度的增加,交通冲突次数减少,加速车道长度由100 m增加至350 m时,严重冲突次数减少46.25%,一般冲突次数减少23.36%。严重冲突的减少幅度较大,说明加大加速车道长度能缓解交通冲突。

从图8可以看出:随着加速车道长度的增大,换道冲突占比减小、追尾冲突占比增大,加速车道长度由100 m增加至350 m时,换道冲突占比降低48.48%,追尾冲突占比增加23.88%。这是因为加速车道长度增大,驾驶员汇入主线时的选择机会增多,换道冲突减少。

3.4 冲突影响因素回归模型

在进行多元回归建模前对影响因素进行自相关分析,Pearson相关性分析结果见表4。由表4可知:4个交通影响因素之间的Pearson相关性系数较小,无明显相关性。主线货车比例和速度差呈负相关,匝道交通量与加速车道长度呈负相关。匝道交通量、主线货车比例、速度差和加速车道长度均可

表4 交通影响因素 Pearson 相关性系数矩阵

交通影响因素	匝道交通量	主线货车比例	速度差	加速车道长度
匝道交通量	1.000			
主线货车比例	0.064	1.000		
速度差	0.158	-0.050	1.000	
加速车道长度	-0.158	0.050	0.122	1.000

用来与冲突次数进行回归分析。

对交通冲突和4种交通影响因素进行多元回归分析,建立严重冲突次数与影响因素关系模型,分析结果见表5。显著性水平 P 取0.05。由表5可知:各影响因素的 P 值均小于0.05,各因素均影响显著,与冲突次数存在线性回归关系。

表5 多元回归分析结果

交通影响因素	回归系数	标准差	t	P 值
常量	283.571	85.297	3.325	0.004
匝道交通量	0.883	0.057	15.528	0.000
主线货车比例	-528.016	173.365	-3.046	0.007
速度差	3.588	1.453	2.470	0.023
加速车道长度	-0.818	0.291	-2.816	0.011

4种交通影响因素与严重交通冲突次数之间的关系模型如下:

$$M_{tc} = 283.571 + 0.883V_{\text{ramp}} - 528.016R_t + 3.588v_d - 0.818L_a \quad (4)$$

式中: M_{tc} 为合流区严重交通冲突次数(次); V_{ramp} 为匝道交通量[veh/(h·ln)]; R_t 为主线货车比例(%); v_d 为速度差(km/h); L_a 为加速车道长度(m)。

4 结论

本文采用交通冲突指标 T_{TTC} 和 T_{PET} 对大交通量高速公路互通合流区进行交通冲突分析,建立不同影响因素下合流区严重交通冲突预测模型。主要结论如下:

(1) 4种因素对大交通量高速公路合流区交通冲突次数的影响程度从高到低依次为匝道交通量>加速车道长度>速度差>主线货车比例。

(2) 在影响因素不变的情况下,合流区发生严重冲突的次数随着主线流量的增大而增大,流量达到2500 veh/(h·ln)时严重冲突次数趋于稳定。

(3) 匝道交通量变化对冲突发生概率的影响最

大,交通量从 200 veh/(h·ln)增至 1 200 veh/(h·ln)时,冲突概率增加 182.77%,严重冲突占比由 14.54%上升到 20.92%。

(4) 主线货车比例由零增加至 50%时,严重冲突占比由 15.55%下降至 11.47%;换道冲突占比随着货车的增多而降低,降低 76.67%。

(5) 加速车道长度变化对冲突类别的影响最大,长度由 100 m 增加至 250 m 时,发生追尾冲突的概率增加 23.88%。

本文未考虑夜间行车情形,后续将针对夜间车辆特性进行研究。

参考文献:

- [1] 胡江碧,何禄诚,王荣华.高速公路互通立交安全性评价研究综述[J].中国公路学报,2020,33(7):17-28.
- [2] 温惠英,吴嘉彬,漆巍巍,等.高速公路入口匝道合流区的 CP-CS 融合模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(2):50-57.
- [3] SUN G Q. The Application of traffic simulation technology in traffic transportation system; A case study on the construction area conflict of one-way highway[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(10): 269-278.
- [4] 赵笑月,汪攀,朱顺应,等.基于视频识别的互通合流区交通冲突空间分布[J].公路交通科技,2021,38(5):90-99.
- [5] 张宇,吴忠广,田万利,等.基于 VISSIM 仿真的高速公路改扩建工作区布设分析[J].中外公路,2021,41(3):352-357.
- [6] 宋杰,王永岗,郑少娅.基于动态 PET 算法的互通立交合流区交通冲突研究[C]//中国公路学会.世界交通运输工程技术论坛(WTC 2021)论文集(上).北京:人民交通出版社股份有限公司,2021:1735-1740.
- [7] 马艳丽,祁首铭,吴昊天,等.基于 PET 算法的匝道合流区交通冲突识别模型[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(2):142-148.
- [8] CAMACHO-TORREGROSA F J, PÉREZ-ZURIAGA A M, CAMPOY-UNGRÍA J M, et al. New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 61: 33-42.
- [9] 陆毅忱,邹亚杰,程凯,等.基于风险域的城市道路交叉口交通冲突分析方法[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(7):941-948.
- [10] 王雪松,罗棟.信号控制交叉口交通冲突特征与影响因素[J].城市交通,2016,14(6):60-66.
- [11] 徐海,曾铖泓,谢成光,等.基于交通冲突理论的道路隔离设施设置研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2020,36(3):340-345.
- [12] 朱顺应,邹禾,蒋若曦,等.高速公路施工区合流路段交通冲突模型[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):70-76.
- [13] ABED H M, EWADH H A. Coupling visual simulation model (VISSIM) with surrogate safety assessment model (SSAM) to evaluate safety at signalized intersections[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1973(1): 012234-012244.
- [13] 陈勛,陈明,杨保兴.长沙绕城高速公路入口立交节点方案研究[J].公路与汽运,2021(2):99-103+107.
- [15] 赵佳军,吴昊,张文浩.大流量集中养护下高速公路交通可行性研究[J].中外公路,2021,41(6):81-287.
- [16] 郑展骥,项乔君,李涵,等.互通立交分流区交通冲突预测模型[J].中国安全科学学报,2018,28(6):85-90.
- [17] ROLL J. Daily traffic count imputation for bicycle and pedestrian traffic: Comparing existing methods with machine learning approaches[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(11): 1428-1440.
- [18] LOCHRANE T W P, AL-DEEK H, JIANG X M, et al. Capturing driver behavior by measuring time gap in freeway work zones [C]//Transportation Research Board. RB 96th Annual Meeting Compendium of Papers. Transportation Research Board, 2017: 01628735-01628757.
- [19] 江欣国,任瀚堃,范英飞,等.信号协调控制干线交通安全仿真分析[J].中国安全科学学报,2020,30(3):143-149.
- [20] MENG X H, ZHANG Z Z, SHI Y Y. Research on traffic safety on freeway merging sections based on TTC and PET[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 587-589: 2224-2229.
- [21] 李燊.基于交通冲突的高速公路互通立交交通安全分析方法[D].南京:东南大学,2017.
- [22] 刘昕,刘志远,聂品,等.微观交通仿真模型参数标定研究综述[J].铁道科学与工程学报,2022,19(11):3179-3189.

收稿日期:2022-11-25