

高速公路改扩建同向合流与相邻出口交通组织研究

钟纯耀¹, 赵文鼎^{2*}

¹广东省高速公路有限公司, 广东 广州

²中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年8月16日; 录用日期: 2025年10月28日; 发布日期: 2025年11月5日

摘要

针对高速公路改扩建中主线同向合流点与相邻出口间距过小引发的车辆连续变道冲突及安全风险问题, 以长春至深圳国家高速公路河源热水至惠州平南段改扩建工程为背景, 选取四角楼互通和麻陂互通为研究对象对改扩建同向分流与相邻出口交通组织研究。基于VISSIM微观仿真平台, 构建包含道路几何参数、交通流特性及驾驶行为模型的仿真场景, 结合SSAM冲突分析软件, 系统评估了多种交通组织方案对通行效率与安全性的影响。研究表明: 1) 禁止左幅主线车辆驶出临近出口可显著降低冲突率和延误率, 但需强制车辆提前变道; 2) 当允许左幅小型车驶出时, 缩短导流线长度可优化性能, 其中导流线缩短400 m~600 m后, 延误率与冲突率下降趋势趋于平稳; 3) 合流点 - 出口间距过小路段的通行效率损失及安全风险显著高于间距较大路段。研究成果揭示了导流线长度与车辆管控策略的协同优化机制, 为改扩建工程同类瓶颈路段交通组织提供了新的思路。

关键词

高速公路, 改扩建, 交通组织, 合流区

Research on the Organization of Co-Directional Confluence and Adjacent Exit Traffic of Expressway Reconstruction and Expansion

Chun Yao Zhong¹, Wending Zhao^{2*}

¹Guangdong Provincial Freeway Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²CCCC Second Highway Consultant Co., Ltd., Wuhan Hubei

*通讯作者。

文章引用: 钟纯耀, 赵文鼎. 高速公路改扩建同向合流与相邻出口交通组织研究[J]. 交通技术, 2025, 14(6): 683-693.
DOI: 10.12677/ojtt.2025.146068

Abstract

Against the background of vehicle continuous lane-changing conflicts and safety risks caused by the excessively small distance between the mainline co-directional merging point and adjacent exits in expressway reconstruction and expansion, this study takes the Reconstruction and Expansion Project of the Heyuan Reshui to Huizhou Pingnan Section of the Changchun-Shenzhen National Expressway as the research context, selecting the Sijiaolou Interchange and Mabei Interchange as research objects to investigate the traffic organization of co-directional divergence and adjacent exits in reconstruction and expansion projects. Based on the VISSIM microscopic simulation platform, a simulation scenario incorporating road geometric parameters, traffic flow characteristics, and driving behavior models was constructed. Combined with the SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) conflict analysis software, the impact of various traffic organization schemes on traffic efficiency and safety was systematically evaluated. The research results show that: Prohibiting vehicles on the left mainline from exiting at the adjacent exit can significantly reduce the conflict rate and delay rate, but it requires mandatory advance lane changes for vehicles. When allowing small vehicles on the left mainline to exit, shortening the length of the guide line can optimize performance. Specifically, after shortening the guide line by 400~600 meters, the downward trend of the delay rate and conflict rate tends to stabilize. The traffic efficiency loss and safety risks in sections with excessively small merging point-exit distances are significantly higher than those in sections with larger distances. The research findings reveal the collaborative optimization mechanism between guide line length and vehicle control strategies, providing new insights for traffic organization in similar bottleneck sections of reconstruction and expansion projects.

Keywords

Expressways, Reconstruction and Expansion, Traffic Organization, Confluence Areas

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国高速公路随着我国高速公路交通量的不断增长, 部分既有高速公路已出现通行能力不足、服务水平降低等情况, 现有的服务能力已不能满足交通量增长的需要, 对高速公路进行改扩建已成为一种重要的解决措施。高速公路改扩建工程受限于既有构造物、互通式立交、停车区以及铁路等因素的控制, 改扩建方式主要包括双侧拼宽、单侧拼宽、双侧分离增建和单侧分离增建等, 改扩建段主线同向分合流段落较多。同时, 改扩建段互通式立交、服务区或停车区等出入口也相对较多, 且主要设置在双侧或单侧拼宽路段, 造成部分主线同向合流至前方相邻出口的间距以及主线入口至前方相邻同向分流的间距均较小的情况, 由于主线同向合流至前方相邻出口的间距较小, 部分车辆可能在合流行驶后至出口前进行连续变道, 与其他车辆产生较多冲突, 影响路段交通安全。针对此类特殊路段, 相关规范未对合流点与出入口间距进行明确规定, 若未采取科学、合理的交通组织方案, 则极易影响主线车辆的通行效率, 并显著增大其行车安全风险。

针对改扩建期间的交通组织问题, 国内外不少学者都开展过相关研究。王龙[1]利用 vissim 仿真平台,

对高速公路改扩建施工区的安全风险进行了仿真分析; 袁子程[2]参考道路通行能力手册, 对平行式加速车道合流区的合理长度进行了分析计算; 雷涛[3]通过构建宏观和微观仿真实验, 研究了高速公路改扩建施工期在行驶方向左侧设置临时合流入口的可行性及安全性; 杨湖平[4]等人建立了高速公路改扩建期间交通组织评价体系; 陈继禹[5]等人研究了枢纽互通改扩建期间形成的匝道左入导改控制策略; 张东明[6]等人利用 vissim 仿真平台, 研究快速路单双平行式汇入匝道对快速路主线交通流运行状态的影响; Haoran [7]聚焦于合流区的交通安全提升措施, 例如优化车道设置、调整交通控制策略、施划标线等设施, 以期提高匝道合流区的运行效率及安全水平。总结国内外现有的研究, 国内外学者多聚焦于高速公路改扩建施工区域的整体交通组织以及合流区的交通安全性分析, 对于改扩建所产生的主线同向合流至前方相邻出口的间距较小路段的研究还有待进一步深化。

2. 工程概况

长春至深圳国家高速公路河源热水至惠州平南段是国家高速公路网第三条南北纵线 - 长春至深圳高速公路广东境内段的重要组成部分, 是联系深莞惠都市圈核心区与河源等地的重要高速通道, 同时也是联系珠三角与江西省等东部地区的重要的省际大通道。本项目北起广东省河源市东源县, 南至广东省惠州市惠城区平南工业区, 与惠盐高速公路对接, 本次高速公路改扩建路线全长约 116.35 公里。

根据现有的本项目改扩建实际情况, 受限于项目既有构造物、互通式立交等因素的控制, 河惠高速公路改扩建部分桥梁路段采取单侧分离新建的方式, 在主线上产生了同向分合流路段, 部分路段主线合流点位置距离互通出口较近。根据现有设计资料, 本项目平南方向主线相互合流点至前方四角楼互通出口渐变段起点的距离仅为 400 m 左右, 热水方向主线相互合流点至麻陂互通出口渐变段起点的距离仅为 1700 m 左右。

3. 主线合流及出口区仿真模型构建

本文聚焦于主线同向合流与前方相邻出口间距较小的路段, 通过建立仿真模型, 对上述间距较小的路段不同交通组织方案进行仿真实验。

3.1. 仿真平台及方法

VISSIM 是由德国 PTV 公司开发的微观交通流仿真系统, 能适用于高速公路、郊外公路或城市道路等多种交通环境, 并可根据实际应用条件动态调整各类仿真参数。

VISSIM 以单个车辆作为基本系统单元, 既能够对车辆跟驰、超车和变道等驾驶行为进行定义, 也可对交通量及其组成、期望速度、路径决策等变量做到极其细致的控制, 进而实现对整个交通流系统的模拟分析。

本研究采用 PTV Group 推出的 VISSIM 11.0 仿真平台, 其仿真流程见图 1。

3.2. 仿真参数的确定

3.2.1. 道路模型参数

在各次仿真实验中, 道路模型包括路段及连接器、冲突区域等。以仿真路段 CAD 平面图作为背景底图构建相关道路模型, 车道宽度和车道数均按照相应设计情况进行设置; 冲突区域让行规则按照《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》中的相关规定进行设置; 同时, 在高速公路主线内侧两车道均设置禁止大型车通行的规则, 分流路段内侧仅允许小型车辆通行。

3.2.2. 交通流参数

在各次仿真实验中, 选取 VISSIM 中的 Car 和 HGV 分别作为小型车和大型车的实验车型, 各次仿真

实验均根据各仿真场景下主线及匝道设计速度，采用“五点标定法”即在累计频率 0%~100%中分别取 5 个点位对小型车和大型车的期望速度分布进行设置。在 VISSIM 软件中，车辆的纵向运动采用了“心理-生理跟驰模型”；横向运动即车道变换采用了基于规则(Rule-based)的算法。根据各次仿真实验对象，在各次仿真实验中均选用 Wiedemann99 跟驰模型，其中各类驾驶行为参数均按照软件默认值进行设置。

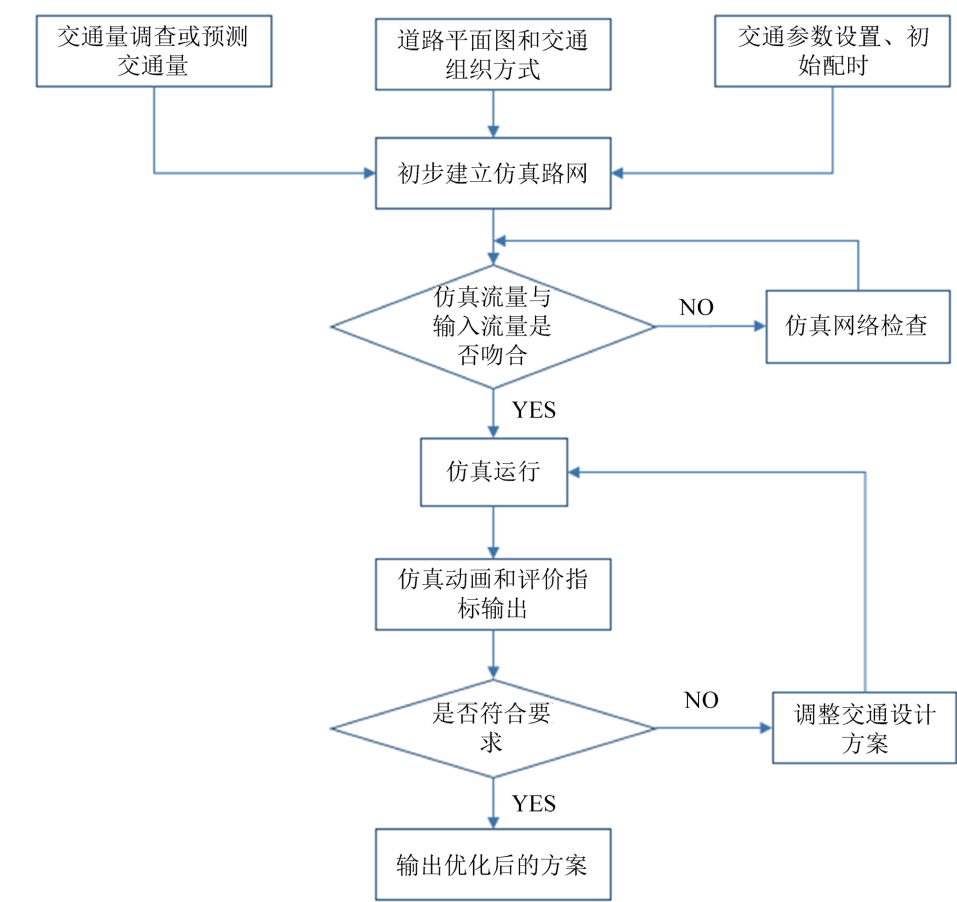


Figure 1. Simulation experimental flow
图 1. 仿真实验流程

根据河惠高速改扩建项目远景年(2046 年)预测交通量及其组成数据，并参照《公路工程技术标准》(JTG B01-2014)中规定的各汽车代表车型及车辆折算系数，可计算得到对应的绝对交通量，计算结果如表 1 所示。

Table 1. Traffic volume in all directions
表 1. 项目各方向交通量

方向	当量值(pcu/h)	绝对值(veh/h)
热水→平南	7066	5654
热水→四角楼	958	833
平南→热水	6302	4962
平南→麻陂	350	304

各次仿真实验的仿真总时间均设定为 3600 s, 其中 0 s~600 s 用于实现交通流稳定运行, 600 s~3600 s 则为持续进行数据采集的有效时间; 仿真精度设定为 10 时间步长/仿真秒。

3.3. 仿真场景的确定

本文以河惠高速公路改扩建四角楼互通、麻陂互通项目为研究对象, 其中四角楼互通原方案主线合流导流线 750 m, 主线合流点至出口距离约为 400 m; 麻陂互通原方案主线合流导流线 1800 m, 主线合流点至出口距离约为 1700 m。合流点距离互通出口距离较近, 主线靠左行驶的车辆可能没有足够距离完成换道并驶入出口。为确定合流点与互通出口间合理交通组织方案, 本文对不同合流导流线长度下上述两个互通进行模拟仿真, 具体仿真场景如表 2 所示。

Table 2. Simulate scene settings

表 2. 仿真场景设置

方案	四角楼互通	麻陂互通
方案一	导流线长度不变, 禁止任何左幅主线车辆驶入出口	导流线长度不变, 允许左幅小型车驶入出口
方案二	导流线长度不变, 允许左幅小型车辆驶入出口	导流线长度缩短 200 m, 允许左幅小型车辆驶入出口
方案三	导流线长度缩短 150 m, 允许左幅小型车辆驶入出口	导流线长度缩短 400 m, 允许左幅小型车辆驶入出口
方案四	导流线长度缩短 300 m, 允许左幅小型车辆驶入出口	导流线长度缩短 600 m, 允许左幅小型车辆驶入出口
方案五	导流线长度缩短 450 m, 允许左幅小型车辆驶入出口	导流线长度缩短 800 m, 允许左幅小型车辆驶入出口
方案六	导流线长度缩短 600 m, 允许左幅小型车辆驶入出口	导流线长度缩短 1000 m, 允许左幅小型车辆驶入出口
方案七	导流线长度缩短 750 m, 允许左幅小型车辆驶入出口	导流线长度缩短 1200 m, 允许左幅小型车辆驶入出口

3.4. 评价指标选择

交通流在高速公路互通式立交区域形成交织冲突, 由于冲突让行规则的作用, 各个方向的交通流会受到不同程度的相互影响, 从而产生延误时间等交通特征数据, 本文从通行效率和安全两个方面对仿真结果进行评价。通行效率采用延误率 AD 作为相应的评价指标, 即路段上所有观测车辆在单位行驶距离内所产生的平均延误时间, 其计算公式如下:

$$AD = \frac{1000D_t}{L} \quad (1)$$

式中: AD 为延误率, s/km; L 为车辆行驶距离, m; D_t 为车均延误时间, s。

交通安全方面采用交通冲突理论, 研究拟参照由美国联邦公路局 FHWA 研发的微观仿真车辆轨迹自动冲突识别分析软件 SSAM 进行冲突分析。SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) 交通冲突软件以交通冲突分析技术为基本原理, 能够依据 VISSIM 仿真实验结束后所形成的车辆轨迹数据文件获取车辆的行驶位置、速度和方向等相关信息, 依据设定的阈值分析计算得到关于交通冲突的数据信息。

将 VISSIM 仿真模拟生成的 trj 轨迹文件加载到 SSAM 软件中, 调整 SSAM 软件参数, 得出不同交

通冲突类型的冲突数。对于冲突角度及 PET、TTC 的阈值，各次仿真实验均按照 SSAM 软件中的默认取值进行设定(图 2)。

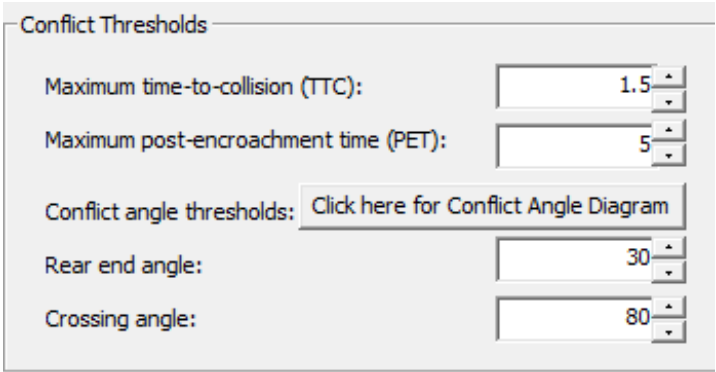


Figure 2. Traffic conflict threshold setting
图 2. 交通冲突阈值设定

本报告采用冲突率 f 作为相应的评价指标，即交通冲突数 N 与车辆行驶距离的比值，其计算公式如下：

$$f = \frac{1000 \times N}{L} \tag{2}$$

式中： f 为冲突率，次/km； L 为车辆行驶距离，m。

4. 仿真结果

4.1. 交通运行效率

通过 VISSIM 仿真模拟和相关计算，可获得河惠高速改扩建项目平南方向主线相互合流至四角楼互通出口段、热水方向主线相互合流至麻陂互通出口段远景年(2046 年)不同仿真场景下高峰小时各方向延误率，确定不同仿真场景下路段的通行效率。仿真结果如下。

(1) 四角楼互通

Table 3. The delay rate of the exit section of the Sijiaolou interchange in 2046
表 3. 远景年四角楼互通出口段延误率

仿真场景	车均延误(s/veh)	延误率(s/veh·km ⁻¹)
方案一	150.469	33.874
方案二	192.357	43.304
方案三	185.925	41.856
方案四	178.236	40.125
方案五	174.114	39.197
方案六	166.641	37.515
方案七	165.144	37.178

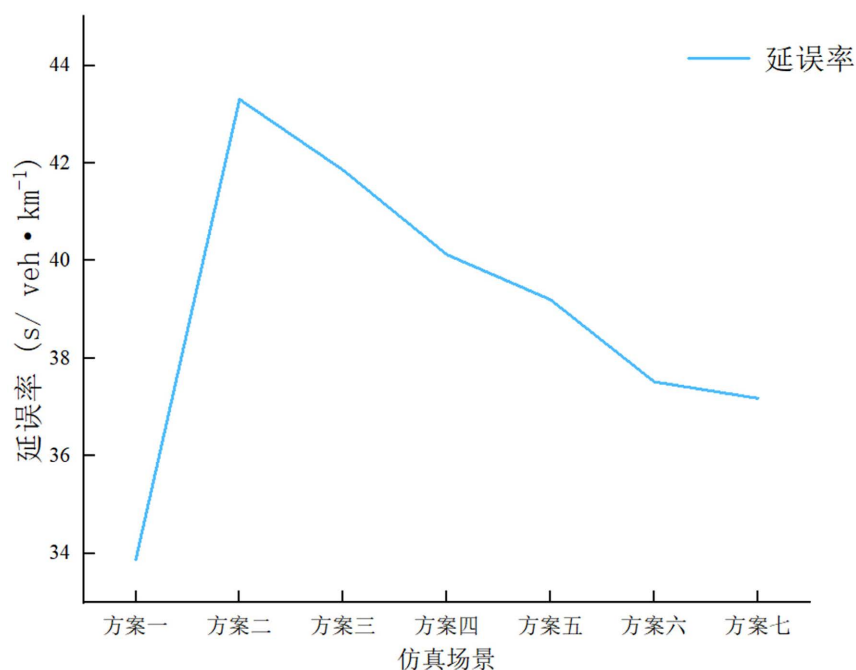


Figure 3. The delay rate of the exit section of the Sijiaolou interchange in 2046

图 3. 远景年四角楼互通出口段延误率

根据上述表 3、图 3 仿真结果可知:

① 在河惠高速改扩建项目平南方向主线相互合流至四角楼互通出口段远景年(2046 年)高峰小时内, 场景 1(导流线长度不变且禁止任何左幅主线车辆驶入前方四角楼互通出口即四角楼互通驶出车辆需提前向右变道至右幅主线)的总体延误率显著小于场景 2 至场景 7 (允许左幅主线小型车驶入前方四角楼互通出口);

② 对于场景 2 至场景 7, 在允许左幅主线小型车驶入前方四角楼互通出口的条件下, 随着导流线缩减长度的增加, 河惠高速改扩建项目平南方向主线相互合流至四角楼互通出口段远景年(2046 年)高峰小时总体延误率呈现下降趋势, 其中当导流线缩减长度达到 600 m (即场景 6)后, 总体延误率的下降趋势不再显著且趋于平稳。

(2) 麻陂互通

Table 4. The delay rate of the exit section of the Mabei interchange in 2046

表 4. 远景年麻陂互通出口段延误率

仿真场景	车均延误(s/veh)	延误率(s/veh·km ⁻¹)
方案一	4.69	3.234
方案二	4.60	2.788
方案三	4.21	2.276
方案四	4.37	2.132
方案五	4.71	2.093
方案六	4.72	1.927
方案七	5.01	1.891

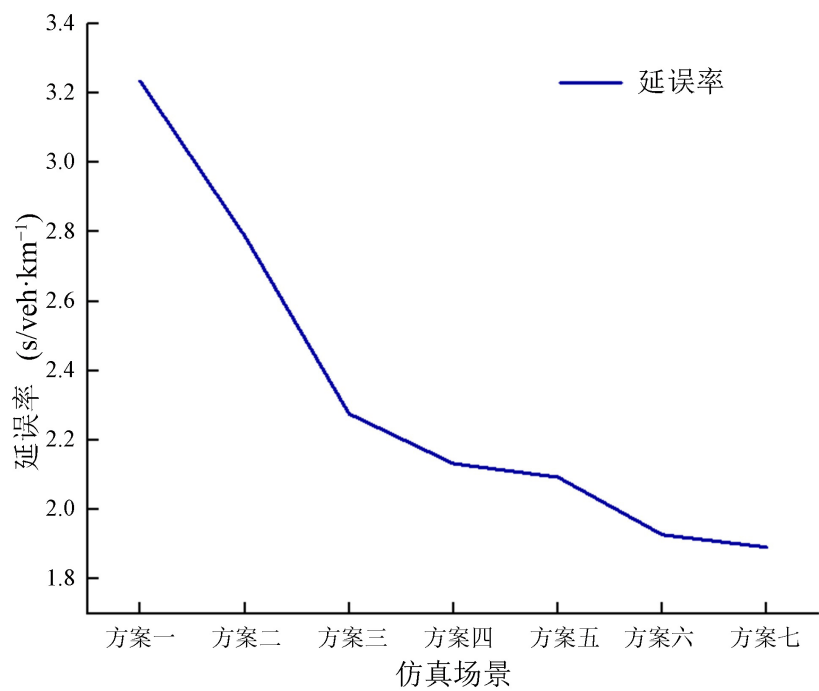


Figure 4. The delay rate of the exit section of the Mabei interchange in 2046
图 4. 远景年麻陂互通出口段延误率

根据上述表 4、图 4 仿真结果可知，对于场景 1 至场景 7，在允许左幅主线小型车驶入前方麻陂互通出口的条件下，随着导流线缩减长度的增加，河惠高速改扩建项目热水方向主线相互合流至麻陂互通出口段远景年(2046 年)高峰小时总体延误率呈现下降趋势，其中当导流线缩减长度达到 400 m (即场景 3)后，总体延误率的下降趋势不再显著且趋于平稳。

4.2. 交通安全风险

通过 VISSIM 仿真模拟和 SSAM 冲突分析，可获得河惠高速改扩建项目平南方向主线相互合流至四角楼互通出口段、热水方向主线相互合流至麻陂互通出口段远景年(2046 年)不同仿真场景下高峰小时总体冲突率，如下表和图所示。

(1) 四角楼互通

Table 5. The conflict rate of the exit section of the Sijiaolou interchange in 2046
表 5. 远景年四角楼互通出口段交通冲突率

仿真场景	冲突数(次)	冲突率(次/veh·km ⁻¹)
方案一	1571	0.0553
方案二	2904	0.1022
方案三	2589	0.0911
方案四	2367	0.0833
方案五	2049	0.0721
方案六	1878	0.0661
方案七	1816	0.0639

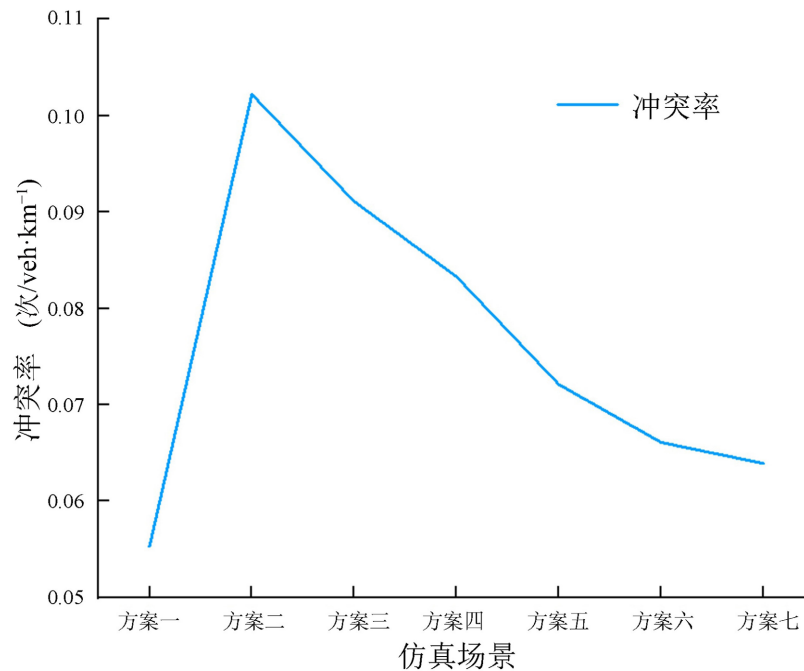


Figure 5. The conflict rate of the exit section of the Sijiaolou interchange in 2046

图 5. 远景年四角楼互通出口段交通冲突率

根据上述表 5、图 5 仿真结果可知:

① 在河惠高速改扩建项目平南方向主线相互合流至四角楼互通出口段远景年(2046 年)高峰小时内, 场景 1 (导流线长度不变且禁止任何左幅主线车辆驶入前方四角楼互通出口即四角楼互通驶出车辆需提前向右变道至右幅主线)的总体冲突率显著小于场景 2 至场景 7 (允许左幅主线小型车驶入前方四角楼互通出口);

② 对于场景 2 至场景 7, 在允许左幅主线小型车驶入前方四角楼互通出口的条件下, 随着导流线缩减长度的增加, 河惠高速改扩建项目平南方向主线相互合流至四角楼互通出口段远景年(2046 年)高峰小时总体冲突率呈现下降趋势, 其中当导流线缩减长度达到 600 m (即场景 6)后, 总体冲突率的下降趋势不再显著且趋于平稳。

(2) 麻陂互通

Table 6. The conflict rate of the exit section of the Mabei interchange in 2046

表 6. 远景年麻陂互通出口段冲突率

仿真场景	冲突数(次)	冲突率(次/veh·km ⁻¹)
方案一	302	0.0396
方案二	294	0.0338
方案三	252	0.0259
方案四	249	0.0231
方案五	261	0.0220
方案六	277	0.0215
方案七	285	0.0204

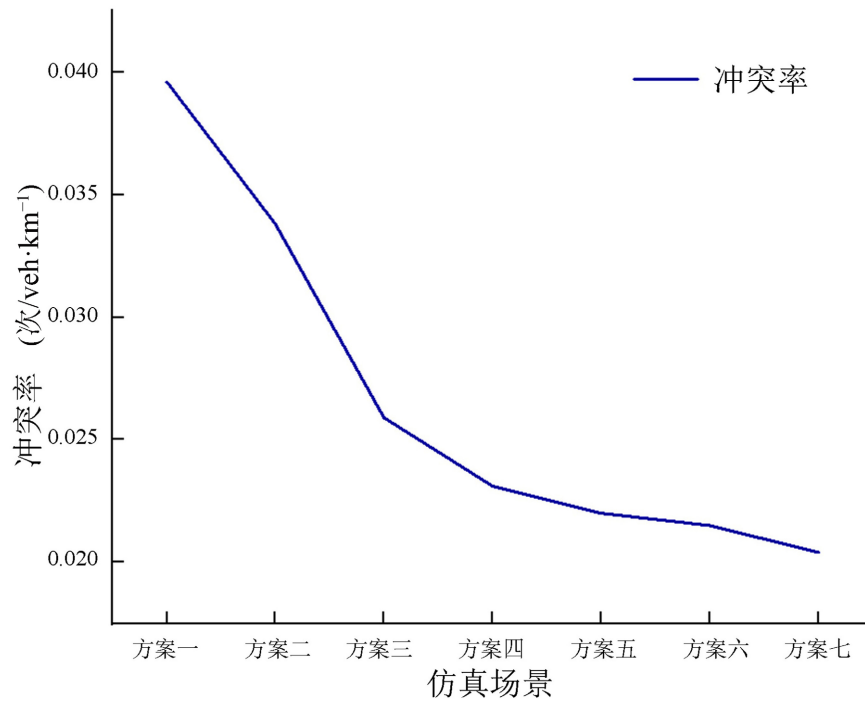


Figure 6. The conflict rate of the exit section of the Mabei interchange in 2046
图 6. 远景年麻陂互通出口段冲突率

根据上述表 6、图 6 仿真结果可知,对于场景 1 至场景 7,在允许左幅主线小型车驶入前方麻陂互通出口的条件下,随着导流线缩减长度的增加,河惠高速改扩建项目热水方向主线相互合流至麻陂互通出口段远景年(2046 年)高峰小时总体冲突率呈现下降趋势,其中当导流线缩减长度达到 400 m (即场景 3)后,总体冲突率的下降趋势不再显著且趋于平稳。

5. 结论与展望

本文以河惠高速公路改扩建项目为背景,重点分析了高速公路改扩建同向分流与相邻出口交通组织问题,以四角楼互通、麻陂互通为研究对象,利用 vissim 仿真软件构建仿真模拟平台,对不同交通组织方案下道路整体运行效率及安全性进行了分析。根据仿真结果,主要结论如下:

(1) 对于同向分流与相邻出口间距较近的情况,禁止车辆从主线左侧驶出临近出口能够有效地降低车辆冲突率,提高车辆的通行效率。以四角楼互通为例,禁止车辆从主线左侧驶出临近出口方案(场景一)的总体延误率以及冲突率均显著小于允许左幅主线小型车驶出的组织方案。

(2) 当允许车辆从分离主线左侧驶出临近出口时,随着导流线长度不断缩短,车辆的通行效率有所提升、冲突率有所下降。随着导流线长度缩短 400 m~600 m 后,车辆行驶的通行效率以及冲突率基本趋于平稳,继续缩短导流线长度对交通流的影响较小,通行效率和冲突率基本保持不变。

(3) 仿真结果表明,相较于麻陂互通,四角楼互通整体车辆通行效率较低,车辆冲突率较高。主要原因是主线相互合流点至四角楼互通出口渐变段起点的距离仅为 400 m,间距较近,车辆的换道行为较为密集,对路段的通行效率及安全影响较为显著。

研究表明,当高速公路主线合流路段距离前方互通出口距离较近时,禁止主线左侧车辆从前方出口驶出能够有效降低车辆冲突率,在一定程度上提升互通出口段的交通安全。当主线左侧车辆需要从前方驶出时,随着导流线长度不断缩短,车辆的通行效率有所提升、冲突率有所下降。随着导流线长度缩短

400 m~600 m 后, 车辆行驶的通行效率以及冲突率基本趋于平稳。本研究仅研究分析了主线分合流路段与互通出入口间距较小的情况, 未来可进一步研究主线入口至前方相邻同向分流的间距均较小的情况下交通组织方案的合理性。

基金项目

广东省省级科技计划项目(2021B1111610002)。

参考文献

- [1] 王龙. 基于 VISSIM 的高速公路改扩建施工区交通仿真与分析[J]. 市政技术, 2021, 39(5): 17-21.
- [2] 袁子程, 刘量. 基于美国规范的平行式加速车道合流区长度计算方法及工程实践[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(12): 35-39.
- [3] 雷涛, 宋太龙, 齐迪, 等. 改扩建公路左侧合流安全性研究及改善效用评估[J]. 湖南交通科技, 2025, 51(1): 182-190.
- [4] 杨湖平, 李凌云. 基于区域路网协调的高速公路安全施工交通组织研究[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 161-165.
- [5] 陈继禹, 方明山, 宋浪, 等. 高速公路改扩建分离式立交左入导改匝道控制方法[J]. 公路, 2023, 68(12): 59-65.
- [6] 张东明, 周雪梅. 快速路单双汇入匝道主线交通流运行分析[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(6): 23-28.
- [7] Li, H.R., Lu, Y.P., Li, Y.Q. and Zhang, J. (2024) A Dynamic Speed Guidance Method at On-Ramp Merging Areas of Urban Expressway Considering Driving Styles. *Frontiers of Engineering Management*, **11**, 92-106.
<https://doi.org/10.1007/s42524-023-0285-x>