

# 超多车道高速公路复杂立交交织区安全性及优化方法研究

韩世宏<sup>1</sup>, 田文康<sup>2,3\*</sup>, 周 颖<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>广东省高速公路有限公司, 广东 广州

<sup>2</sup>中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉

<sup>3</sup>武汉中交交通工程有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年10月29日; 录用日期: 2026年1月21日; 发布日期: 2026年1月29日

## 摘要

针对十车道及以上超多车道高速公路改扩建工程, 小间距互通立交交织段安全风险突出, 但现行规范缺乏针对性指导的问题, 研究了该类复杂立交交织区的安全特性及设计方法。依托广东省深汕西高速公路改扩建工程, 通过理论计算、实际交通观测及VISSIM仿真分析; 结合工程实际交通量、车型比例及现场标定的仿真参数, 研究了不同交通条件、车道组合与交织长度下的交通行为。通过分析交织区长度与交通量、交织比例的关联性, 发现主线二级服务水平下辅助车道连接的交织区推荐最小长度需达600 m; 对于十车道高速公路, 当主线服务水平降至二级以下时, 辅助车道数量应增加至2条, 且需对交织区长度进行专项验算; 针对双向十二车道及以上高速公路, 采用集散车道连接时, 集散车道的设置数量不应少于2条。

## 关键词

多车道高速公路, 改扩建, 复合式立体交叉, 交织区, 交通冲突

# Research on Safety and Optimization Methods of Complex Interchange Weaving Areas in Extra-Multi-Lane Expressways

Shihong Han<sup>1</sup>, Wenkang Tian<sup>2,3\*</sup>, Ying Zhou<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Expressway Company Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Second Highway Survey and Design Institute of China Communications Construction Company Limited, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Wuhan China Communications Transportation Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei

\*通讯作者。

Received: October 29, 2025; accepted: January 21, 2026; published: January 29, 2026

## Abstract

Aiming at the reconstruction and expansion projects of extra-multi-lane expressways with ten or more lanes, the safety risks of weaving sections of interchanges with small spacing are prominent, but the current specifications lack targeted guidance. This study focuses on the safety characteristics and design methods of such complex interchange weaving areas. Based on the reconstruction and expansion project of Shenshan West Expressway in Guangdong Province, theoretical calculations, actual traffic observations and VISSIM simulation analysis are carried out. Combined with the actual traffic volume, vehicle type ratio and field-calibrated simulation parameters of the project, the traffic behaviors under different traffic conditions, lane combinations and weaving lengths are studied. By analyzing the correlation between weaving area length, traffic volume and weaving ratio, it is found that the minimum length of the weaving area connected by auxiliary lanes should reach 600 m under the secondary service level of the main line. For ten-lane expressways, when the service level of the main line drops below the secondary level, the number of auxiliary lanes should be increased to 2, and a special check on the length of the weaving area is required. For expressways with twelve or more bidirectional lanes, when using collector-distributor lanes for connection, the number of collector-distributor lanes should not be less than 2.

## Keywords

Multi-Lane Expressway, Reconstruction and Expansion, Complex Interchange, Weaving Area, Traffic Conflict

Copyright © 2026 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

随着我国高速公路改扩建进程加快，经济稠密区的高速公路改扩建呈现出交通量大、车道数多、互通密集、互通形式复杂的特点，导致工程设计中不可避免出现小间距互通立体交叉的交织段，影响运营期间交通安全[1]-[3]。为了降低运营期安全风险，需在规划设计阶段通过选取合理的技术参数与优化手段实现风险前置防控。

针对小间距的互通立体交叉之间的交织区域，虽然国内已有较多学者致力于其通行能力分析与交通流特性研究，但由于国内十车道及以上的高速公路建设刚刚起步，鲜有对超多车道高速公路交织段的研究；且现行规范对互通间距及交织区的规定也仅限于双向八车道高速公路，难以指导十车道及以上高速公路复杂互通节点的建设[4]-[6]。

## 2. 现行规范中互通间距及交织区设计要求

《公路路线设计规范》(JTG D20-2017)对互通立交上与相邻其他出入口设施之间间距的规定为，上一入口终点至下一出口起点的距离不应小于 1000 m，小于 1000 m 且经论证必须设置时，应按复合式互通立体交叉的方式处理。复合式互通式立体交叉的交织段长度不应小于 600 m。

复合式立体交叉的三种连接方式分别为：

- ① 采用辅助车道将两互通式立体交叉的上一入口至下一出口连通。  
 ② 采用与主线分隔的集散车道将主线一侧的所有出口、所有入口连通，形成在主线上一次流出、一次汇入的方式。

③ 采用交织分离车道，将在集散车道上的主要交织车流分离，形成两处互通式立体交叉间无交织运行的方式。

以上三种连接处理方式的选择原则为：

- 1) 两处一般互通立体交叉构成的复合式立体交叉可选择①种方式。
- 2) 一处一般互通式立体交叉和另一处枢纽互通式立体交叉构成的复合式立体交叉应选择第②种方式；交通量大、交织距离短、有双车道出入匝道时，应选择第③种方式。中西部地区转向交通量较小时，经过充分论证并对通行能力验算后，可采用第①种方式。
- 3) 两处枢纽互通式立体交叉构成的复合式立体交叉应在路网规划时尽量避免，不得已设置时应选择第③种方式。

其中①、②种连接方式存在交通交织，③种方式通过分离车道将交织车流分离，互通之间无交织，本节将分别对①、②种复合互通连接方式，计算多车道断面条件下的相邻互通出入口交织长度[7]-[9]。

### 3. 复合式互通立体交叉交织区长度计算

#### 3.1. 计算范围

由于交织区长度计算结果与交通量、交通组成、转向交通比、通行速度等相关，为了更全面研究复合式互通立体交叉间距长度，分别计算依托工程深山西高速公路交通流、高速公路二级服务水平和三级服务水平交通流条件下的交织区长度，计算条件见表 1 所示。

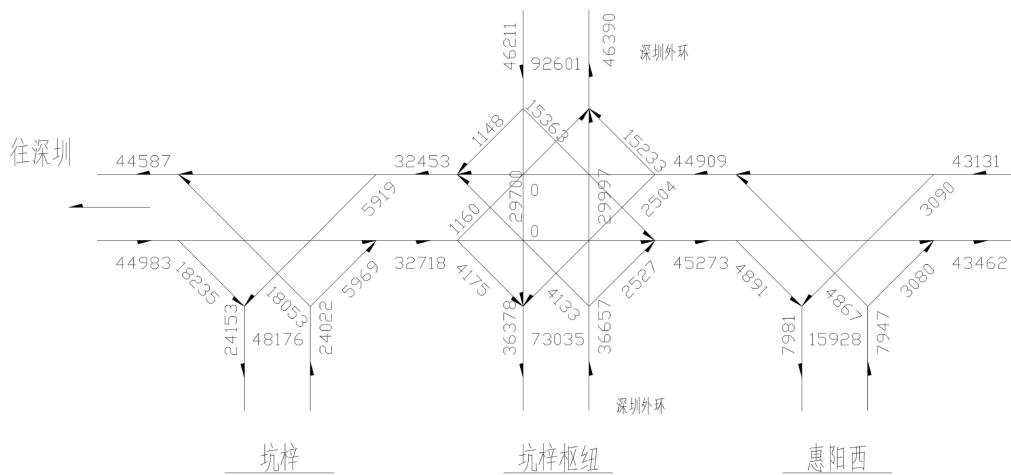
**Table 1.** Calculation conditions for throughput of interchange weaving sections  
**表 1.** 互通立交交织区通行能力计算条件

扩建工程车道数	交通量	连接方式
双向八车道	深山西预测交通量	① ②
	主线服务水平二、三级交通量	① ②
双向十车道	深山西预测交通量	① ②
	主线服务水平二、三级交通量	① ②
双向十二车道	深山西预测交通量	① ②
	主线服务水平二、三级交通量	① ②

#### 3.2. 计算交通量

##### 1) 主线计算交通量

根据深山西高速公路改扩建工程交通量预测结果，坑梓枢纽~坑梓互通交通量见图 1 所示。

**Figure 1.** Predicted traffic volume of Kengzi hub - Kengzi interchange**图 1. 坑梓枢纽~坑梓互通预测交通量**

预测车型比例见表 2 所示。

**Table 2.** Predicted traffic composition of Shenzhen-Shanwei west expressway  
**表 2. 深山西高速公路预测交通组成**

年份	一类车	二类车	三类车	四类车	五类车	免费车	合计
2022	78.28%	2.08%	8.13%	2.12%	7.32%	2.07%	100.00%

根据《公路路线设计规范》规定：主线设计速度 120 km/h、二级服务水平下的最大服务交通量为 1200 pcu/(h·ln)；设计速度 120 km/h、三级服务水平下的最大服务交通量为 1650 pcu/(h·ln)。

### 2) 辅助车道匝道计算交通量

计算匝道分别选用环形匝道(设计速度 40 km/h、交通量 1000 pcu/h)、I 型匝道(设计速度 40 km/h，交通量 1200 pcu/h)、II 型匝道(设计速度 60 km/h，交通量 1200 pcu/h)和 III 型(设计速度 60 km/h，交通量 1500 pcu/h)。

### 3) 集散车道匝道计算交通量

集散车道按照设计速度 60 km/h 的匝道考虑，二级服务水平的服务交通量为 800 pcu/(h·ln)，三级服务水平的服务交通量为 1100 pcu/(h·ln)。出入口匝道按最不利的环形匝道考虑，设计通行能力分别为 800 pcu/h、1000 pcu/h。

## 3.3. 计算结果

使用《道路通行能力手册》中交织区服务水平的计算方法，计算各种交通量条件下复核互通交织长度的要求，计算结果见表 3 所示。

**Table 3.** Summary of verification results for interleaved zone length analysis  
**表 3. 交织区长度分析验算结果汇总**

扩建工程车道数	交通量	连接方式	交织车道数	满足四级服务水平所需交织长度(m)
双向八车道	深山西	① ②	4 + 1、4 + 2 /	600 /

续表

双向十车道	主线二级服务水平	①	4 + 1、4 + 2	600
		②	4 + 1	无法满足四级服务水平
		②	4 + 2	600
	主线三级服务水平	①	4 + 1	无法满足四级服务水平
		①	4 + 2	600
		②	4 + 1	无法满足四级服务水平
		②	4 + 2	1000
双向十二车道	深山西	①	5 + 1、5 + 2	600
		②	/	/
		①	5 + 1、5 + 2	600
	主线二级服务水平	②	5 + 1	无法满足四级服务水平
		②	5 + 2	600
		①	5 + 1	无法满足四级服务水平
	主线三级服务水平	①	5 + 2	600-1000
		②	5 + 1	无法满足四级服务水平
		②	5 + 2	1000
双向十二车道	深山西	①	6 + 1、6 + 2	600
		②	/	/
		①	6 + 1、6 + 2	600
	主线二级服务水平	②	6 + 1	无法满足四级服务水平
		②	6 + 2	600
		①	6 + 1	无法满足四级服务水平
	主线三级服务水平	①	6 + 2	无法满足四级服务水平
		②	6 + 1	无法满足四级服务水平
		②	6 + 2	1000

#### 4. 复合式互通立体交叉交织区长度仿真

根据交织区长度的计算结果，仍有以下问题没有明确：1) 双向十车道、十二车道高速公路二级服务水平交织区长度低于 600 m 的可行性；2) 三级服务水平十车道高速采用 2 个辅助车道连接的交织区长度合适范围。采用 VISSIM 交通仿真进行论证。

##### 4.1. 试验路段

本试验路段双向十/十二车道通行，设计速度为 120 km/h，主线的车道宽度 3.75 m，辅助车道宽度 3.75 m，硬路肩宽度为 3 m；匝道为环形匝道，设计速度为 40 km/h。

##### 4.2. 交通量参数

- 1) 仿真交通量、车型比例与 3.2 小节保持一致。

2) 交织区长度。根据《公路立体交叉设计细则》，交织区长度不宜低于 600 m，因此试验采用 500、550、600、650 四个方案。

3) 车道数。分别对主线 5 车道 + 交织区 1 车道、主线 6 车道 + 交织区 1 车道和主线 5 车道 + 交织区 2 车道三种情况进行仿真。

### 4.3. 试验方案

分别将交通量、交织区长度、车型构成进行组合，为避免 VISSIM 随机数产生的影响，对每组试验均进行 8 次重复试验，全样试验  $3 * 2 * 2 * 4 * 8 = 384$  组。试验设计方案见表 4 所示。

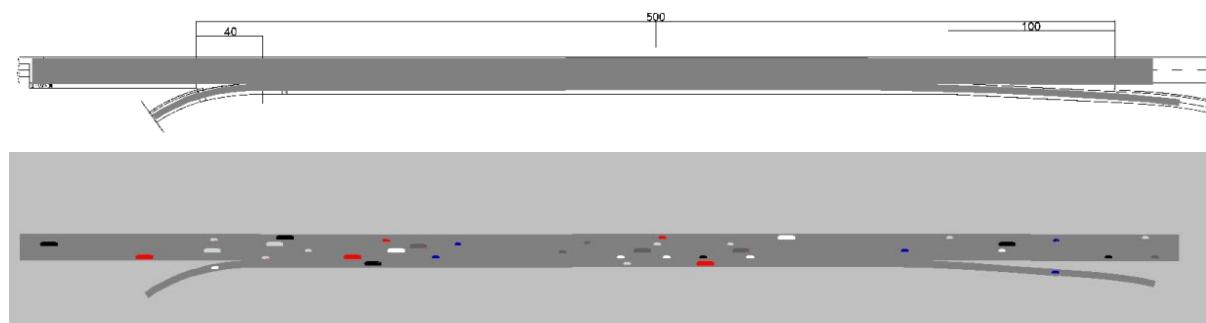
**Table 4.** VISSIM simulation conditions

**表 4.** VISSIM 仿真条件

影响因素	水平	备注
交织场景	3	
交通量	主线	2 二、三级水平
	匝道	2 上、下限设计交通量
大车率	2	30%、50%
交织区长度	4	500、550、600、650

### 4.4. 仿真建模

利用 VISSIM 软件搭建试验场景，根据在试验设计部分设计的试验方案来搭建相应的试验场景，试验场景见图 2 所示。



**Figure 2.** Simulation modeling of interleaved area

**图 2.** 交织区仿真建模

### 4.5. 模型标定

#### 1) 参数选取

为降低标定过程的复杂性，提高标定效率，以及模型标定的科学性，本研究构建了系统化的参数敏感性分析框架以筛选关键参数。

具体实施路径如下：首先，选取冲突率、换道率及延误作为核心响应指标，明确模型输出的量化评估维度；其次，针对各参数设定符合实际交通流特性的扰动区间( $\pm 10\%$ )，以模拟真实交通环境中参数的动态波动特征；随后，通过多轮系统性参数扰动试验，持续追踪并记录单一参数变动对核心响应指标的边际影响效应；最终从 23 个备选参数中选出敏感性较大的 8 个参数：CC0(停车间距)、CC1(车头时距)、

CC3(进入跟车状态的阈值)、CC4(消极跟车状态的阈值)、CC5(积极跟车状态的阈值)、CC6(车速振动)、CC7(加速度波动幅度)、安全距离折减系数，并将这8个参数作为待标定的仿真模型参数，有效规避了主观选择偏差[10]-[13]。

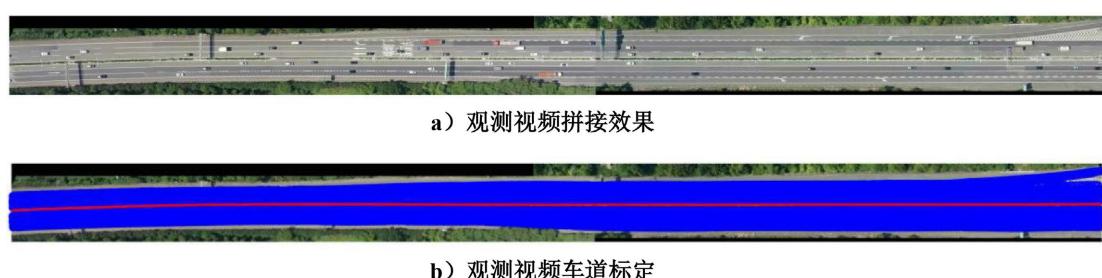
## 2) 参数标定

观测广东省某高速公路两个相邻互通交通流，互通之间出入口净距1.4 km。该路段为双向六车道高速公路，主线小客车限制速度120 km/h。利用两台无人机分别连续观测上游合流、交织和下游分流路段的交通流。观测效果见图3所示。



**Figure 3.** Observation result of interchange interval interleaving section  
**图3.** 互通间距交织段观测效果图

将两台无人机观测采集的视频拼接，并划定车道轨迹，标定匹配坐标以后，提取车辆在道路上的行驶轨迹。视频拼接效果及车道标定见图4所示。



**Figure 4.** Effect of video stitching and lane calibration for observation  
**图4.** 观测视频拼接及车道标定效果

对连续观测的交通流数据提取分析，标定仿真模型中的参数见表5所示。

**Table 5.** Comparison of default values and calibration values for parameters  
**表 5. 参数默认值与标定值对比**

序号	参数名	默认值	标定值
1	CC0 停车间距(m)	1.50	4.2
2	CC1 车头时距(s)	0.90	1.5
3	CC3 进入跟车状态的阈值	-8.00	-7.67
4	CC4 消极跟车状态的阈值	-0.35	-0.35
5	CC5 积极跟车状态的阈值	0.35	0.35
6	CC6 车速振动	11.44	12.0
7	CC7 加速度波动幅度(m/s <sup>2</sup> )	0.25	0.3
8	安全距离折减系数	0.60	0.6

## 5. 仿真结果分析

### 5.1. 试验数据采集

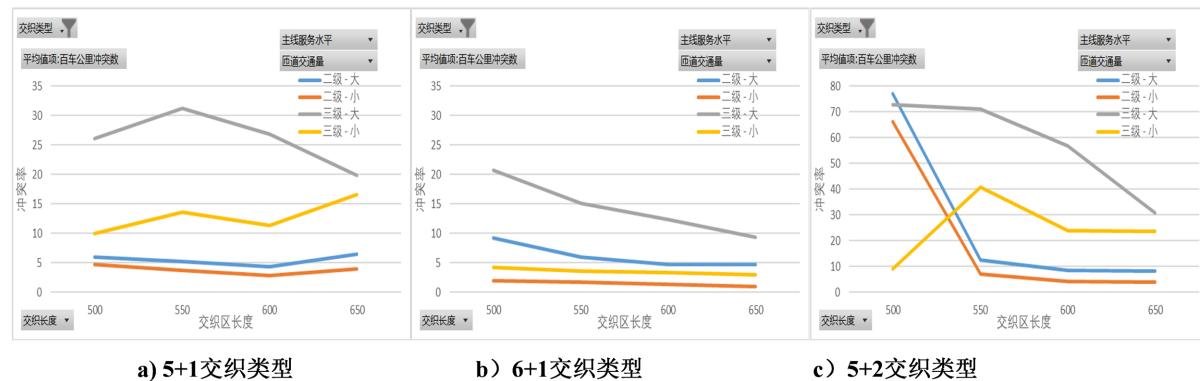
在行车安全方面考虑冲突与换道，在行车效率方面考虑车速与延误。数据获取见表 6 所示。

**Table 6.** Types of VISSIM simulation data collection  
**表 6. VISSIM 仿真数据采集类型**

数据分类	数据
冲突数据	总冲突数、侧向冲突数、追尾冲突数
换道数据	交织换道数、非交织换道数
车速数据	分流点车速标准差、合流点车速标准差、交织区中点车速标准差、
延误数据	车均延误、合流车辆延误、分流车辆延误、直行车辆延误

冲突采用公里冲突数进行分析，换道采用公里换道数进行分析，延误采用车均延误进行分析(见图 5)。

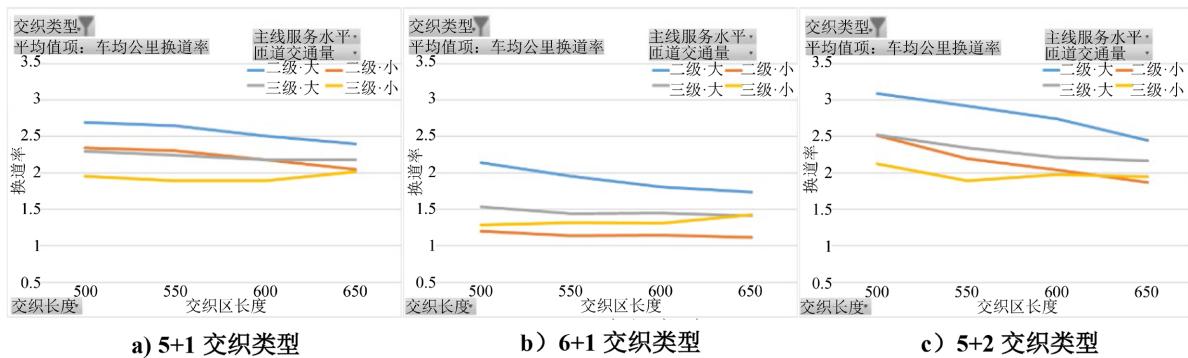
### 5.2. 冲突分析



**Figure 5.** Comparison of conflict analysis results for different traffic volume interweaving lengths  
**图 5. 不同交通量交织长度的冲突分析结果对比**

- 1) 在主线二级服务水平下,除了5+2之外,其冲突率随交织区长度变化微小。
- 2) 在主线三级服务水平下,其在不同交织类型下的冲突率变化相对二级服务水平较大,且在5+2情形下冲突显著增大。
- 3) 当辅助车道为单车道时,无明显规律,当辅助车道为双车道时,冲突率随着交织区长度先升后降,在550 m时冲突率最大。

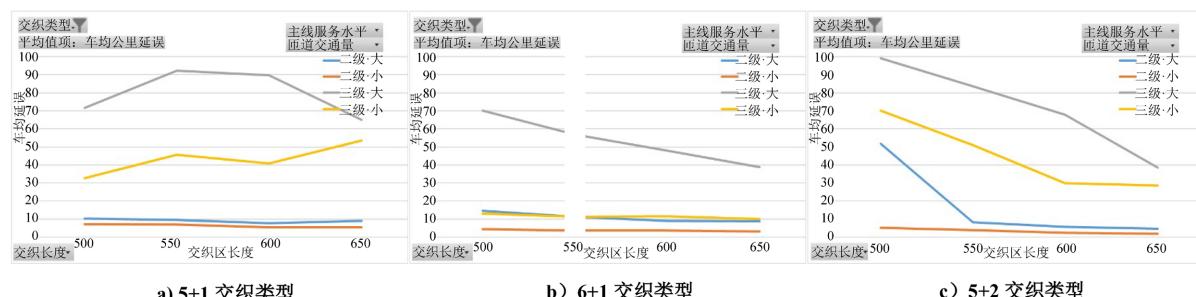
### 5.3. 换道分析



**Figure 6.** Comparison of lane-changing analysis results for different traffic volume interweaving lengths  
**图 6.** 不同交通量交织长度的换道分析结果对比

- 1) 在不同交织区下,换道率呈现基本随着交织区长度增加而下降。
- 2) 主线三级服务水平下,交织区长度增加对换道率减少效果更明显,但总体来说交织区长度550 m与600 m的换道率较为接近(见图6)。

### 5.4. 延误分析

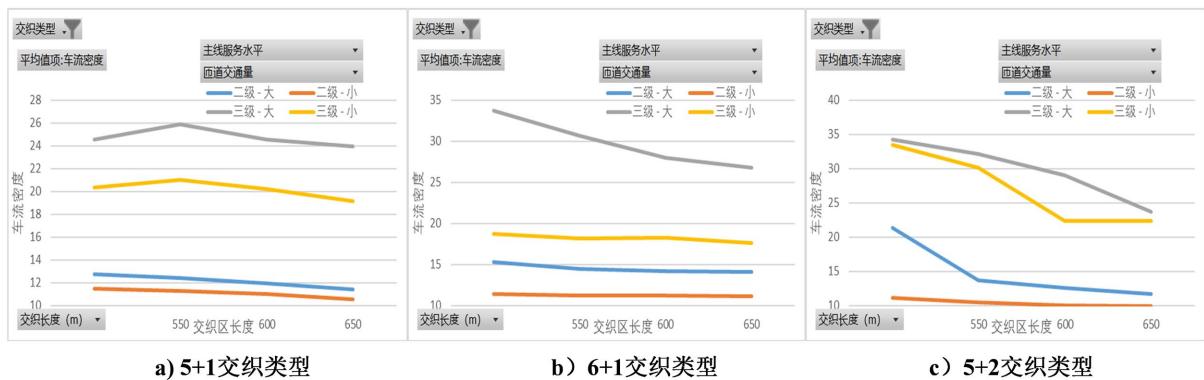


**Figure 7.** Comparison of hundred-vehicle-kilometer delay under different traffic volume interweaving lengths  
**图 7.** 不同交通量交织长度的百车公里延误对比

- 1) 在主线二级服务水平下,延误基本维持在较低的10 s左右水平。
- 2) 在主线三级服务水平下,四车道时,若匝道为小交通量时,延误与二级服务水平接近,但匝道为大交通量时,延误有明显倍增(见图7)。

### 5.5. 服务水平分析

- 1) 在交织区长度大于600 m以后的服务水平普遍趋于稳定,随着交织长度的增加不会有明显波动。
- 2) 服务水平与交通量关系更大(见图8)。



**Figure 8.** Comparison of service levels for different traffic volume interweaving lengths  
**图 8.** 不同交通量交织长度的服务水平对比

## 5.6. 小结

根据仿真对比分析结果：

- 1) “5+2”交织类型冲突率峰值源于空间与时间窗口的临界匹配：该长度使车辆换道所需空间与驾驶员决策反应时间到达零界点，导致驾驶员决策压力大。主线车辆因持续观察匝道车辆产生跟车干扰，匝道车辆则因空间受限频繁调整轨迹，形成复杂交互模式，显著降低驾驶员判断准确性，从而增加冲突风险。
- 2) 交织区长度与交通量存在非线性耦合关系：高交通量时，长度增加对服务水平的改善作用更显著；低交通量时，过长交织区无法提升安全效益，反而造成资源浪费。因此，设计必须基于实际交通量动态验算，而非采用固定长度标准。
- 3) 安全指标(如冲突率、换道率)随交织区长度增加总体呈下降趋势，但改善效果随长度增长而减缓，同时建设成本持续上升。推荐值——600 m 长度在安全效益与工程成本间实现关键平衡：既能有效降低安全风险，又避免了资源过度投入，成为兼顾安全性能与经济可行性的合理设计基准值。

## 6. 结论

本文分别从交织区计算、VISSIM 仿真分析的方式对复合式立体交叉交织区长度的安全特性及设计要求进行论证分析，其中交织区计算结合广东省深山西高速公路改扩建实际交通量及车型比例数据；VISSIM 仿真参数根据广东省某高速公路小间距互通之间的交织区实际观测进行标定，经研究，复合式立体交叉交织区的设计应满足以下要求：

- 1) 复合式互通立体交叉交织区的长度与具体道路交通量、交织比例密切相关，应根据具体的交织段交通量、交织比例判断连接形式。
- 2) 当主线处于二级服务水平，采用辅助车道连接时，交织区推荐最小长度 600 m 可以满足服务水平要求。
- 3) 十车道高速公路主线服务水平低于二级时，辅助车道数应增加至 2 条，并根据交通量具体情况验算交织区长度。
- 4) 主线双向十二及以上车道、或主线交通流量较大情况下，采用集散车道连接时，集散车道数应不低于 2 个。

## 基金项目

广东省省级科技计划项目 2021B1111610002。

## 参考文献

- [1] Road Research Laboratory (1965) Research on Road Traffic. HMSO.
- [2] Glennon, J.C., Neuman, T.R. and Leisch, J.E. (1983) Safety and Operational Considerations for Design of Rural Highway Curves (Report No. FHWA-RD-83-035). Federal Highway Administration.
- [3] Urbanik, T. (1994) Factors Affecting Selection of Lane Width and Shoulder Width on Urban Freeways. *Transportation Research Record*, **1445**, 125-125.
- [4] Casal, G., Santamarina, D. and Vázquez-Méndez, M.E. (2017) Optimization of Horizontal Alignment Geometry in Road Design and Reconstruction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **74**, 261-274.  
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.019>
- [5] Antonio Martín-Jiménez, J., Zazo, S., Arranz Justel, J.J., Rodríguez-Gonzálvez, P. and González-Aguilera, D. (2018) Road Safety Evaluation through Automatic Extraction of Road Horizontal Alignments from Mobile Lidar System and Inductive Reasoning Based on a Decision Tree. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **146**, 334-346.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.004>
- [6] Roque, C., Lourenço Cardoso, J., Connell, T., Schermers, G. and Weber, R. (2019) Topic Analysis of Road Safety Inspections Using Latent Dirichlet Allocation: A Case Study of Roadside Safety in Irish Main Roads. *Accident Analysis & Prevention*, **131**, 336-349. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.07.021>
- [7] 刘子剑. 减速车道的车流特征与设计对策[J]. 中南公路工程, 1994(2): 15-20+54.
- [8] 王维利, 胡江碧. 基于超车行为的高速公路车辆侧向间距研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2013(2): 60-62.
- [9] 黄光耀, 罗慧, 罗婷倚, 苏文妹. 高速公路互通式立交改扩建线形设计要点[J]. 西部交通科技, 2019(3): 42-45+54.
- [10] 吴华金, 郭海龙, 袁望方, 等. 驾驶员行车紧张度评价试验[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 100-104.
- [11] 王凤丽. 公路线形安全设计影响分析及对策研究[J]. 当代教育实践与教学研究, 2017(11): 241.
- [12] 王强. 改扩建公路路线的设计要点研究[J]. 交通世界, 2018(15): 124-125.
- [13] 朱子扬. 改扩建道路路线设计研究[J]. 住宅与房地产, 2019(24): 102.