

基于VISSIM仿真的互通入口匝道与平交口进口道组合路段运行影响因素分析及间距确定

袁英爽, 王世伟, 陈东升, 梁学荣

(中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300000)

摘要: 随着城镇化地区公路功能的不断发展, 城镇化地区一级公路已然成为服务对象齐全、行车速度高、车速离散度大的矛盾集中凸显的公路。为提高城镇化地区一级公路的通行能力以及安全性, 以入口匝道与平交口进口道的理论间距计算为基础, 进行VISSIM仿真实验设计。分别针对匝道交通量分布、平交口转向交通量、交通组成、匝道与平交口进口间距4种影响因素进行仿真分析, 从车辆运行速度、延误和排队的角度分析入口匝道-平交口进口道各组合类型路段的车辆运行特征, 并提出互通入口匝道与平交口进口道间距的设计建议。

关键词: 城镇化地区一级公路; 入口匝道; 平交口; 运行特征; 布设间距

中图分类号: U412.35

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0011-07

Analysis on Influencing Factors and Spacing Determination of Combined Road Section of Interchange On-ramp and At-grade Intersection Entrance Based on VISSIM Simulation

YUAN Yingshuang, WANG Shiwei, CHEN Dongsheng, LIANG Xuerong

(China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: With the continuous development of the functions of highways in urbanized areas, the first-class highways in urbanized areas have become the ones where the contradictions of having a complete range of service targets, high driving speeds and large vehicle speed dispersion are prominently displayed. To enhance the traffic capacity and safety of first-class highways in urbanized areas, a VISSIM simulation experiment design is carried out based on the theoretical spacing calculation between the on-ramp and at-grade intersections. The simulation analyses are respectively conducted for four influencing factors of ramp traffic volume distribution, at-grade intersection turning traffic volume, traffic composition, and the spacing between ramps and at-grade intersection entrances. The vehicle operation characteristics of various combined type road sections from on-ramps to at-grade intersection entrances are analyzed from the perspectives of vehicle operation speed, delay and queuing. And the design suggestions for the spacing between interchange on-ramps and at-grade intersections are put forward.

Keywords: first-class highway in urbanized areas; on-ramp; at-grade intersection; operational characteristics; layout spacing

0 引言

2021年交通运输部发布了《城镇化地区公路工程技术标准》(JTG 2112—2021), 标准规定了城镇化地区公路的主要设计技术指标, 但在精细化设计方面依然存在很多亟待解决的问题, 其中互通立交与

平交口设置间距要求也是其中一项。互通立交出入口与平交口的间距主要影响路段的通行效率。

国外对于互通立交出入口匝道与平交口之间的合理间距研究起步较早, 主要成果有: NCHRP的相关研究和报告、*Access Management Manual*、出入口规范手册成果以及一些设计标准等。其中 *Access Management Manual* 列出了有关出入口匝道衔接段管理策略以及技术指导, 建议出口匝道衔接段长度为230~800 m, 但并没有给出长度计算的模型以及具体的取值标准^[1]。

国内对互通立交出入口匝道与平交口的间距的

收稿日期: 2024-12-11

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技研发课题(2023A0220201)

作者简介: 袁英爽(1970—), 女, 学士, 正高级工程师, 从事道路设计、规划相关工作。

研究较少,主要研究成果集中在出口匝道衔接段的交织区长度研究及交叉口车辆的排队长度研究上。周商吾等^[2]提出交叉口的排队长度与道路通行能力、信号灯周期、车种、车流量等因素有关;陈小鸿等^[3]认为可以利用波动理论的方法来计算交叉口车辆排队长度;贾德生等^[4]利用车道变换理论及可接受间隙理论计算出了排队长度;刘忻梅等^[5]通过调查和分析交通数据,结合车辆排队长度和延误时间,提出了出口匝道衔接段合理长度的推荐值。

蔡亮华^[6]基于仿真手段研究了匝道出入口间距;胡玉洲、尚雨昕、武亚俊、陆振中、刘斌等^[7-11]基于VISSIM仿真研究了平面交叉口的交通组织设计;李根、王亚、孙剑、刘丽莎等^[12-15]基于VISSIM仿真对互通立交交织区长度及运行特征进行了研究。

从国内外研究成果可以看出,现有对于互通立交出入口匝道与平交口间距的研究成果较少,且主要集中于快速路。随着城镇化地区公路功能的不断发展,城镇化地区一级公路已然成为服务对象齐全、行车速度快、车速离散度大的矛盾集中凸显的公路,为提高城镇化地区一级公路的通行能力以及安全性,有必要针对一级公路的出入口匝道与平交口的间距进行系统性研究。

本文利用VISSIM仿真实验,针对不同实验变量进行仿真结果分析,重点分析总结一级公路的入口匝道与平交口进口道之间的车辆运行特征影响因素,并结合理论间距和仿真实验,提出间距设计值的相关建议。

1 入口匝道与平交口进口道理论计算间距

入口匝道至平交口进口道的距离为匝道终点与平交口处停止线的行驶距离^[16]。

在交通流较小的情况下,车辆基本处于自由行驶的状态,车辆的进出不受周围车辆的影响,此时入口匝道与平交口进口道间距主要受驾驶员视认及操作间距的影响,可以采用车辆动力学的方法进行入口匝道与平交口进口道间距的计算^[17-19]。当交通流逐渐增大时,车辆的换道和加减速会受到周边交通流的影响,此时,入口匝道与平交口进口道间距受交通流量的影响,入口匝道与平交口进口道间距不足时,极易造成交通瓶颈^[20-23]。所以,本文计算的理论间距适用于城镇化地区一级公路处于二级及以下服务水平的情况。

基础设施设置方面,入口匝道需要设置加速车

道,类型为平行式,长度见表1。平交口的进口道需要设置附加车道、导向箭头和指路标志^[24-25]。

表1 入口匝道与平交口进口道组合型式满足基础设施
设置需求的最小长度

设计速度/ (km·h ⁻¹)	入口匝道加速 车道长度	平面交叉附加 车道长度	总长度
100	280	155	435
80	250	100	350
60	215	70	285

根据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[26]第10.5的规定,右转附加车道减速段末的速度取20 km/h,则平交口进口道的右转弯附加车道长度见表2。

表2 右转弯附加车道长度的设置要求

设计速度/ (km·h ⁻¹)	渐变段长度	减速段长度	右转弯车道长度
100	60	95	155
80	50	50	100
60	40	30	70

根据《道路交通标志和标线 第2部分:道路交通标志》(GB 5768.2—2022)^[27],选择将交叉口告知标志设于交叉口前80 m。

按照《道路交通标志和标线 第3部分:道路交通标线》(GB 5768.3—2009)^[28]的规定,不同设计速度下导向箭头的设置距离见表3。

表3 设计导向箭头需要的距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	导向线长度	第二组与第三组 箭头间距	总长度
100	30	50	80
80	30	50	80
60	30	30	60

综合入口匝道与平交口进口道的基础设施设置需求,满足基础设施设置需求的入口匝道与平交口进口道组合型式的最小间距见表1。

结合对驾驶行为的分析,计算车辆由入口匝道驶入直左车道的行为需求距离(见表4)。

表4 入口匝道与平交口进口道组合型式满足驾驶行为
需求的最小长度

设计速度/ (km·h ⁻¹)	加速段 长度	标志视认 长度	两次换道 长度	减速 长度	总长度
100	162.0	166.6	375.0	185.2	888.8
80	92.6	133.4	300.0	115.7	641.7
60	38.6	100.0	216.6	61.7	416.9

经对比,满足驾驶行为需求的长度要求更长,因此,采用驾驶行为需求计算的长度进行入口匝道与平交口进口道组合类型的理论间距控制。

2 仿真实验设计

本次建立的仿真实验场景模型如图1所示。

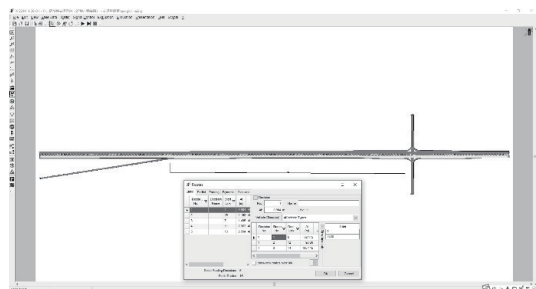


图1 仿真实验场景模型建立示意图

2.1 交叉口场景

平面交叉口设计为设计速度80 km/h的双向4车道一级公路与设计速度40 km/h的双向2车道三级公路正交,车辆在平交口处均可以直行、左转或右转。同时,结合相交道路的设计速度,拟定仿真场景中一级公路车道宽度3.75 m,三级公路车道宽度3.5 m,一级公路路口展宽段宽度3.75 m。根据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)第10.1.3条的规定,本次实验设计的两条相交公路的等级、交通量均有明显差别,且交叉口不属于城镇路段,一级公路为主路不间断交通。因此,本次设计交叉口的交通组织方式根据规范选取主路优先,无信号灯配置,公路交通车辆类型为小客车、货车和公交车。

依据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[26]的要求,确定平面交叉口主路右转弯车道总长度和主路加速汇流车道的总长度(见表5和表6)。

表5 一级公路右转弯车道总长度 单位:m

设计速度/ (km·h ⁻¹)	右转弯车道末速度/(km·h ⁻¹)		
	0	20	40
80	110	100	82

表6 一级公路加速汇流车道的总长度 单位:m

设计速度/(km·h ⁻¹)	变速车道长度	渐变段长度	总长度
80	140	50	190

2.2 入口匝道场景

匝道采用设计速度40 km/h的单向单车道匝道,车道宽度3.50 m,路缘带宽度0.50 m,左侧硬路肩宽度1.0 m,右侧硬路肩宽度1.50 m,长度设计为500 m,平面线形为直线。根据《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)^[29],入口匝道采用平行式,按照主路设计速度80 km/h取加速车道长度180 m、渐变段长度70 m。

2.3 实验变量设计

本次仿真实验变量包括入口匝道与平交口进口道的间距、基本路段交通量、交通组成和交通流向^[30]。

2.3.1 入口匝道与平交口进口道的间距

将理论计算的入口匝道与平交口进口道间距作为最小间距,采用以50 m为步长的等步长方法进行间距设计,共进行6组实验(见表7)。

表7 入口匝道与平交口进口道仿真间距 单位:m

设计速度/ (km·h ⁻¹)	仿真间距					
	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组
80	710	760	810	860	910	960

2.3.2 基本路段交通量

主线基本路段的交通量根据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[26]进行选取。在仿真实验的过程中,分别对一级公路三级和四级服务水平对应的交通量进行仿真实验,对三级公路四级服务水平对应的交通量进行仿真实验。交叉公路的最大服务交通量取值见表8。

表8 交叉公路的最大服务交通量取值

公路等级	设计速度/ (km·h ⁻¹)	交通量取值/[pcu·(h·车道) ⁻¹]	
		三级服务水平	四级服务水平
一级公路	80	1 250	1 600
三级公路	40	—	700 / 550 / 450

匝道设计速度40 km/h,根据《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)^[29],取单车道匝道设计通行能力1 000 pcu/h。

2.3.3 交通组成

在仿真软件中输入车辆类型,包括小客车、重型货车、客车3种类型,与《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[26]中的4种汽车代表车型分类不完全一致,虽然仿真软件中可以增加车辆类型,但是缺乏对应的车辆行为模型,因此将大型车归为客车。交通组成共设计9种工况(见表9)。

2.3.4 交通流向

交通流向包括交叉口主路和次路交通流向、入口匝道交通流向,交通流均在平交口处完成右转、直行和左转。此次仿真设计3种不同交通流向的占比(见表10)。

2.4 交通特性参数配置

在仿真实验中,按照不同的实验方案调整交通特性参数,包括交通组成、期望车速分布和车辆的加/减速设置、驾驶行为设置和交通量输入。在实验

表9 交通组成设计表(自然车比例)			
工况	小客车	客车	重型货车
1	0.70	0.05	0.250
2	0.70	0.15	0.115
3	0.70	0.25	0.050
4	0.95	0.05	0.000
5	0.65	0.05	0
6	0.60	0.05	0.350
7	0.55	0.05	0.400
8	0.50	0.05	0.450
9	0.45	0.05	0.500

表10 十字交叉口不同交通流向的占比(自然车)			
工况	右转	直行	左转
A	0.10	0.80	0.10
B	0.15	0.80	0.05
C	0.20	0.75	0.05

过程中:主路一级公路期望车速分布为75~110 km/h,次路三级公路期望车速分布为40~45 km/h;加速区的车辆加速度设置为1.5 m/s²,减速区的车辆减速度设置为2.0 m/s²;跟车行为模型选择VISSIM内定义的Wiedemann 99跟车模型。

2.5 数据采集

在实验过程中设置断面车速采集器、行程时间检测器和排队长度检测器。分别采集车辆平均速度、延误和排队信息。仿真实验运行状态如图2所示。

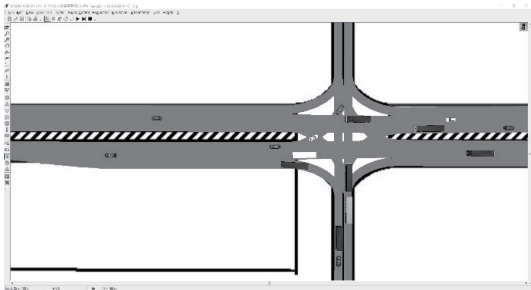


图2 入口匝道与平交口进口道仿真实验运行状态(交叉口影响段)

3 运行影响因素分析

3.1 不同匝道交通量分布的影响

选择主路交通量为2 500 pcu/h,次路交通量为700 pcu/h,匝道驶入交通量为1 000 pcu/h。间距为710 m;主路直行、左转、右转的交通量占比分别为0.8、0.1、0.1,次路直行、左转、右转的交通量占比分别为0.1、0.1、0.8。该场景下车型组成占比为小客车:客车:重型货车=0.7:0.05:0.25。

匝道交通流汇入主线后,会在较近的距离内通过平交口,所以匝道交通流通过平交口的方向选择

会对入口匝道与平交口进口道之间的交通流交织产生影响。为了厘清匝道交通流不同转向交通量对主路交通流的干扰程度,设计了匝道交通流转向分布(见表11)。

表11 匝道交通流的转向分布占比表			
匝道转向工况	直行	右转	左转
A	0.80	0.10	0.10
B	0.80	0.15	0.05
C	0.75	0.20	0.05
D	0.60	0.25	0.15
E	0.50	0.30	0.20
F	0.40	0.35	0.25
G	0.30	0.40	0.30
H	0.30	0.45	0.35

3.1.1 速度特征分析

仿真实验设置:1~11断面采集外侧行车道平均车速,12~22断面采集内侧超车道平均车速。

如图3、图4所示,速度检测断面4和15位于入口匝道与主路的交汇点,5和16断面位于加速车道的终点,6和17断面位于加速车道渐变段的终点,10和21断面位于右转加速车道的起点,11和22断面位于平交口停车线。

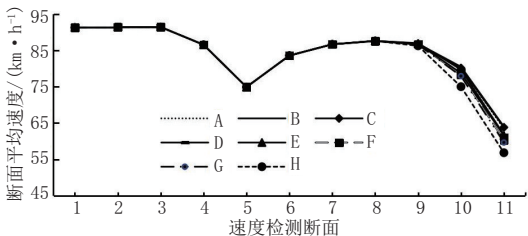


图3 匝道交通量分布对断面速度的影响变化图(行车道)

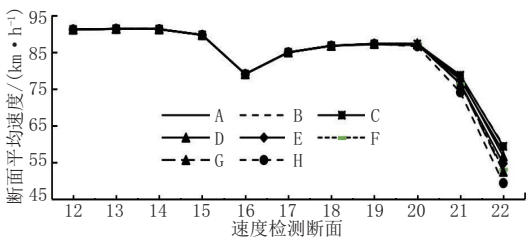


图4 匝道交通量分布对断面速度的影响变化图(超车道)

经分析可知,匝道交通量在平交口的转向分布并不会对匝道入口合流区域的平均速度产生较大的干扰,驾驶员更倾向于在平交口进口区域进行车道的选择,而不会提前进行换道。匝道转向交通占比对平交口的断面车速产生显著的影响,对直左车道的影响程度是直行车道的1.5倍。

3.1.2 延误特征分析

在主路基本段、入口匝道影响段、交织段和平交口进口道路段设置行程时间检测器,检测不同路段

平均延误时间(见图5)。

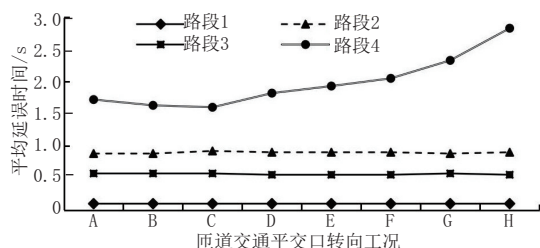


图5 不同检测断面的平均延误时间分布

可知,匝道交通量在平交口的转向分布并不会对入口匝道合流区域的平均延误时间产生较大的干扰,左转交通量占比与平交口段的平均延误时间呈指数变化的关系,且左转交通量越大,平均延误时间越长。

3.1.3 排队特征分析

为了确定匝道驶入交通量对排队的影响,在实验中设置了9处车辆排队检测器。检测断面1位于主路基本段,断面2位于匝道与主路的合流点,断面3位于加速车道终点,断面4位于加速车道渐变段终点,断面5位于平交口渐变段的起点,断面6位于平交口渐变段的终点,断面7位于平交口处,断面8位于左转车道,断面9位于右转车道。

匝道交通转向工况与车辆延误的关系如图6和图7所示。

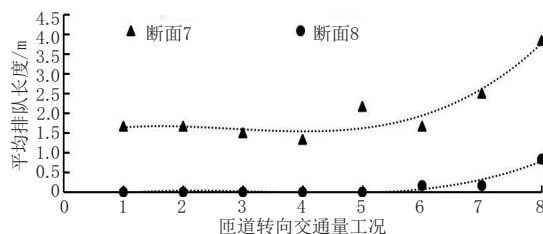


图6 平均排队长度统计图

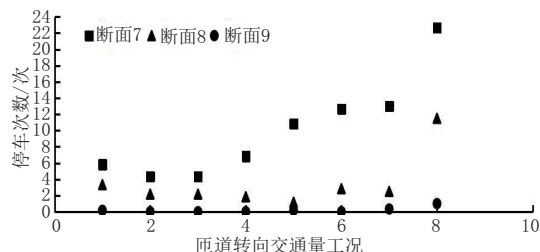


图7 停车次数

可知:当匝道转向交通量占比超过20%时,车辆的排队长度会呈显著的指数式上升;当左转交通量占比低于20%时,车辆的排队长度保持稳定。

3.2 不同平交口转向交通量分布的影响

与分析入口匝道交通量分布的影响时所选的相交公路设计速度、交通量和交通组成相同,以交叉口不同转向交通量的分布作为实验的变量,转向交通

量比例依据前述实验变量设计中的“交通流向”进行组合,分别为AA—CC。同时,断面速度检测器、行程时间检测器和排队长度检测器的设置与匝道交通量分布的影响实验设置完全相同。

3.2.1 速度特征分析

如图8、图9所示,根据实验结果对速度进行分析,平交口转向交通分布对速度没有显著的影响,可能的原因是实验设计中不同转向交通量之间的差异不大,所以影响的程度不明显。平交口进口道的车辆在距离平交口200 m时开始换道,与匝道入口的换道车辆未产生较大交织。

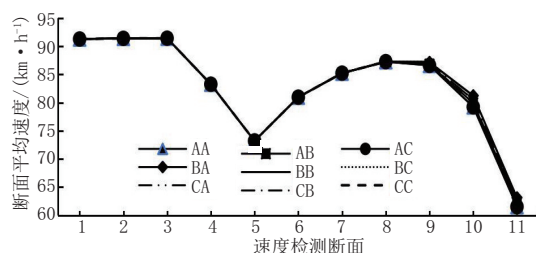


图8 交叉口不同转向交通分布条件下断面速度分布图(行车道)

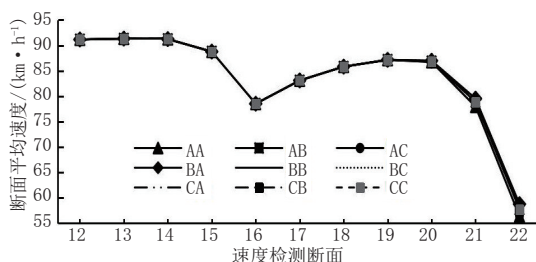


图9 交叉口不同转向交通分布条件下断面速度分布图(超车道)

3.2.2 延误特征分析

如图10所示,根据试验结果对延误进行分析,主路转向交通量的分布对平均延误的影响显著,平均延误随转向交通量的增加而增加,但是左转交通量的影响程度更大,约为右转交通量影响程度的3倍。

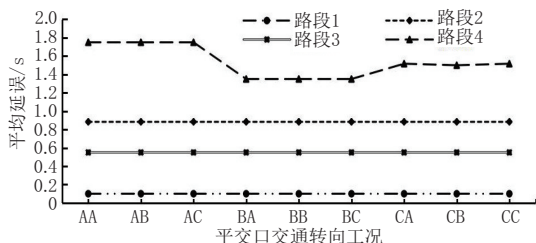


图10 平交口交通转向工况下车辆平均延误图

3.2.3 排队特征分析

由图11的统计结果可知,主路转向交通量的分布对平均排队长度的影响显著,转向车道处的平均排队长度主要受次路直行交通和左转交通的干扰。

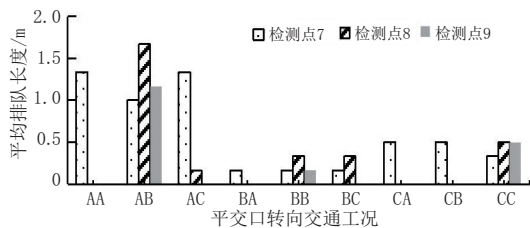


图11 平交口不同转向交通分布条件下平均排队长度统计图

3.3 不同交通组成的影响

以交通组成为实验变量,进行9种工况下的仿真实验。

3.3.1 速度特征分析

通过图12、图13分析货车比例对速度的影响规律,可知货车比例对入口匝道与平交口进口区域的影响高于基本路段。断面6和7属于交通流加速的影响区域,断面5和10属于换道干扰区域,分别选取了外侧车道4个断面进行重型车组成与速度的关系分析。

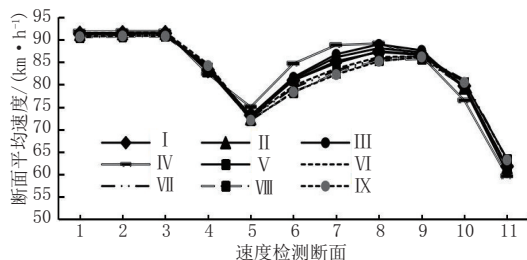


图12 不同交通组成情况下速度分布图(行车道)

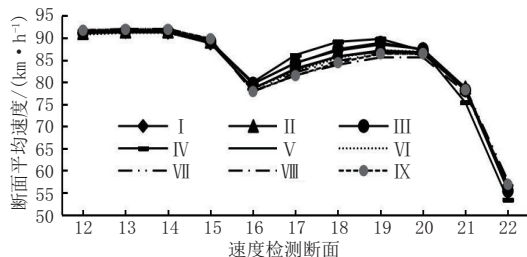


图13 不同交通组成情况下速度分布图(超车道)

通过定量的影响分析可知,货车比例与合流段、加速段的速度成反比关系,与减速段的速度呈正相关关系。其原因是货车制动性能差,速度控制能力劣于小客车。货车对加速段的速度影响程度是减速段、合流段的2倍,所以在货车比例较高的路段,需要将匝道与平交口的间距增长,以使车辆能够达到较高的通行速度,不会在本路段范围形成拥堵。

3.3.2 延误特征分析

由图14的仿真结果分析货车比例与延误的关系,可知货车比例不会对基本路段、合流段和加速段的延误产生影响,仅对平交口段的延误有影响。当货车比例低于35%时,随着货车比例的增加,平交口的延误降低,主要受货车自然车数量的影响。

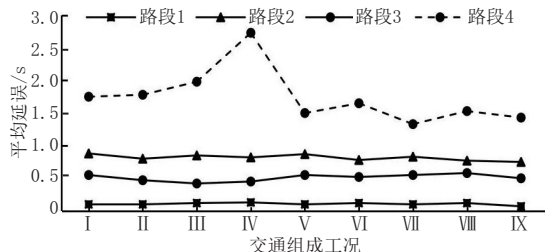


图14 不同工况条件下交通延误分布图

3.3.3 排队特征分析

由图15的仿真结果分析货车占比与平均排队长度的关系,可知当货车占比达到50%时,车辆在平交口处基本上不会出现排队现象,说明平均排队长度主要受自然车数量的影响,受交通流的影响不大。

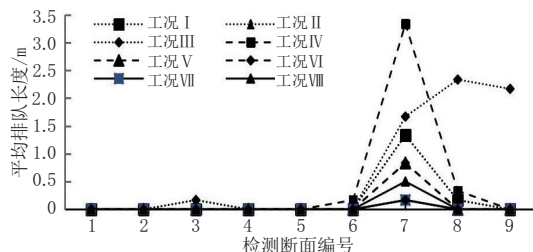


图15 不同货车占比条件下不同检测断面的平均排队长度统计图

3.4 不同入口匝道与平交口进口道间距的影响

以入口匝道与平交口进口道组合间距为实验变量,分别设置间距为710、760、810、860、910、960 m。

3.4.1 速度特征分析

由图16、图17的仿真结果可知,不同入口匝道与平交口进口间距会对合流区、中间段的速度产生影响,合流区内外侧车道的车速差远高于中间段。以合流区速度的最小值比基本段降低10 km/h为标准,确定入口匝道与平交口进口道的间距为900 m。

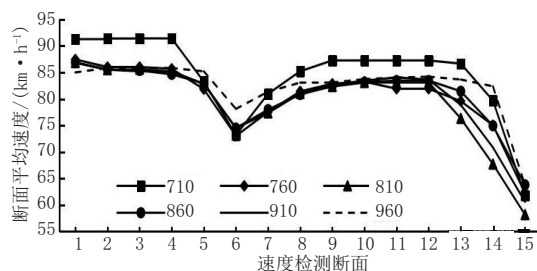


图16 不同间距条件下不同断面处车速变化规律(行车道)

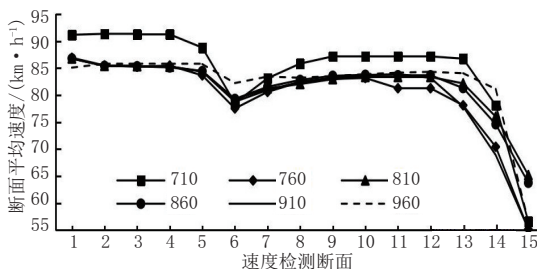


图17 不同间距条件下不同断面处车速变化规律(超车道)

3.4.2 延误特征分析

由图18的仿真结果可知,不同入口匝道与平交口进口道间距对合流区、中间段和平交口段的平均延误均产生影响,为了获取3个影响区段内速度的较小值,采用的间距宜达910 m。

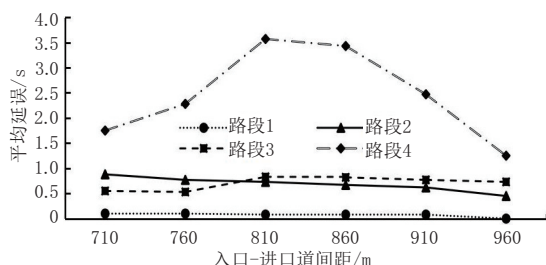


图18 间距与平均延误的分布图

3.4.3 排队特征分析

由图19的仿真结果可知,不同入口匝道与平交口进口道间距仅对平交口处的排队长度具有显著的影响,并呈现拟合度较高的抛物线关系,当间距为825 m时,平均排队长度达到峰值。

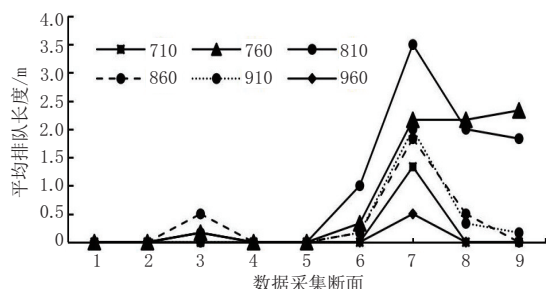


图19 平均排队长度的分布图

4 结 语

对表12进行分析总结,匝道转向交通量影响平面交叉口段的分析指标,当匝道左转交通量占比超过20%时,车辆的排队长度会呈显著的指数式上升。平均延误随转向交通量的增加而增加,但是左转交通量的影响程度更大,约为右转交通量影响程度的3倍。货车比例与合流段、加速段的速度成反比关系,与减速段的速度呈正相关关系,货车对加速段的影响程度是减速段、合流段的2倍。所以,在货车比例较高的路段,需要将匝道与平交口的间距增长,以使车辆能够达到较高的通行速度,不会在本路段范围形成拥堵。

参考文献:

- [1] TRB. Access Management Manual[M]. Washington, D.C.: TRB, 2003.
- [2] 周商吾,陈小鸿.城市高架道路与地理道路衔接的研究[J].城市道桥与防洪,1996(4):15-18.
- [3] 陈小鸿,肖海峰.交织区交通特性的微观仿真研究[J].中国公路学报,2001,14(增刊1):88-91.

表12 入口匝道-平交口进口道组合类型影响因素与分析指标的关系

影响因素	分析指标			研究结论
	断面速度	平均排队长度	平均延误	
匝道转向交通量	√	√	√	有影响
平交口转向交通量	×	√	√	有影响
货车比例	√	√	√	有影响
入口匝道与平交口进口道间距/m	900	910	825	有影响

注:√表示该影响因素对分析指标有明显的正向影响、强相关性或显著作用;×表示该影响因素与分析指标无明显关联、不符合假设或存在负向影响。

- [4] 贾德生,王涌,段俊亮.辅路平交口与快速路入口最小间距研究[J].市政技术,2016,34(2):24-27.
- [5] 刘忻梅,许有俊.快速路出口至前方灯控路口合理距离研究[J].交通信息与安全,2010,28(4):67-70.
- [6] 蔡亮华.基于VISSIM仿真的城市快速路出入口间距适应性分析[J].福建交通科技,2023(7):15-19.
- [7] 胡玉洲,施佳露.基于VISSIM仿真的城市道路平面交叉口交通组织优化[J].惠州学院学报,2023,43(6):22-27.
- [8] 尚雨昕,李思杰,刘志钢.平面交叉口交通组织优化设计及仿真评价[J].上海工程技术大学学报,2022,36(2):159-167.
- [9] 武亚俊,宋睿.城市大型平面交叉口优化方案设计及综合仿真评价[J].综合运输,2021,43(4):54-60.
- [10] 陆振中.基于设置直行待行区的平面信号交叉口交通改善研究[J].城市道桥与防洪,2015(8):1-3.
- [11] 刘斌,王建蓉.基于VISSIM的城市道路平面交叉口仿真研究[J].甘肃科学学报,2012,24(4):131-134.
- [12] 李根.基于VISSIM仿真的交织区通行能力分析实验设计[J].物流科技,2022,45(17):169-172.
- [13] 王亚.基于VISSIM仿真的快速路交织区交通特性研究[J].交通与运输,2020,33(增刊2):72-74.
- [14] 孙剑,李克平,杨晓光.拥挤交通流交织区车道变换行为仿真[J].系统仿真学报,2009,21(13):4174-4178.
- [15] 刘丽莎,王亚.基于VISSIM的交通微观仿真探讨[J].交通科技,2006(3):79-81.
- [16] 李妙晗,徐鹏,王新竹.城市高架式快速路出入口匝道与平面交叉口衔接段长度设计优化研究[J].公路交通技术,2023,39(1):161-167.
- [17] 田士华.高速公路驾驶员昼夜识别距离变化规律[J].科技展望,2014(18):279-283.
- [18] 郭应时,付锐,袁伟,等.通道宽度对驾驶员动态视觉和操作行为的影响[J].中国公路学报,2006(5):83-87.
- [19] 马栋林,马玉婷,冯文芳.驾驶员敏感行为对入匝道口车流量的影响.计算机仿真[J].2015,32(1):188-191.
- [20] 王晓飞,甘王盼,蒲华乔.城市快速路高架桥路段复杂出入口安全优化设计[J].公路,2021,66(11):85-89.
- [21] 陈群,颜姣.城市快速路入口匝道交通控制及优化[J].系统管理学报,2022,31(1):27-36.
- [22] 孙煦,林坤.北京市快速路入口匝道控制仿真研究[J].北京建筑大学学报,2020,36(3):37-43.
- [23] 邹彬,邱美华,方欣欣.快速路出口匝道地面衔接区交织段交通