

基于交通冲突的城市地下互通左出匝道 减速车道长度研究

王海亮¹,程冲²,官洪³,丁乃侃^{4*}

(1.武汉城市铁路建设投资开发有限责任公司,湖北 武汉 430061;2.中交第二公路勘察设计研究院有限公司,

湖北 武汉 430056;3.武汉工程大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;

4.武汉理工大学 智能交通系统研究中心,湖北 武汉 430063)

摘要:为了确定城市地下互通左出匝道分流区减速车道长度的合理区间,研究减速车道长度与主线、匝道的交通量和设计速度的交互作用对左出分流区交通冲突的影响,该文以武汉市两湖隧道工程地下互通立交为例,开展VISSIM微观交通仿真试验,并提取冲突率(R_{CR})和碰撞暴露时间(T_{TET})指标进行分析。结果显示:①随着减速车道长度增加,分流区冲突率减小而 T_{TET} 增大;②随着主线交通量或匝道交通量的增大,分流区冲突率未呈现显著变化,而 T_{TET} 有不同程度的增大;③随着主线设计速度的增大或匝道设计速度的减小,分流区冲突率和 T_{TET} 均呈现增大的趋势;④方差分析和多重比较表明,减速车道长度是引起冲突率和 T_{TET} 变化的关键原因,且综合来看地下互通立交左出匝道分流区减速车道长度的一般合理区间应设置为120~170 m,考虑工程经济性最大长度宜控制在195 m以内。

关键词:交通安全;左出匝道;减速车道长度;交通冲突;VISSIM仿真

中图分类号:U491.5

文献标志码:A

Study on Length of Deceleration Lane of Left Off-Ramp for Urban Underground Interchanges Based on Traffic Conflicts

WANG Hailiang¹, CHENG Chong², GUAN Hong³, DING Naikan^{4*}

(1.Wuhan Urban Railway Construction Investment & Development Co., Ltd., Wuhan 430061, China; 2.Second Highway Consultant Company Ltd.,

CCCC, Wuhan 430056, China; 3.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

4.Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: To set a reasonable range of the length of the deceleration lane in the diverge area of the left off-ramp for urban underground interchanges, the effects of the length of the deceleration lane, as well as interactions between traffic volumes and design speeds of mainline and ramp on traffic conflict in the diverge area, were examined. By taking the underground interchange of the Wuhan East-South Lakes Tunnel Project as an example, the VISSIM micro traffic simulation test was carried out, and the conflict rate (R_{CR}) and exposed time to collision (T_{TET}) were extracted. The results show that ① when the length of the deceleration lane increases, the conflict rate decreases, and the T_{TET} increases in the diverge area; ② when the traffic volumes of the mainline or ramp increase, no significant changes were observed in the conflict rate of the diverge area, while the T_{TET} increases to varying degrees; ③ when the design speed of the mainline increases, or the design speed of the ramp reduces, both the conflict rate and the T_{TET} of the diverge area increase; ④ Analysis of variance and multiple comparisons indicate that the length of the deceleration lane plays a critical role in the

收稿日期:2023-05-31(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:71901166)

作者简介:王海亮,男,硕士,高级工程师.E-mail:69474415@qq.com

*通信作者:丁乃侃,男,博士,副研究员.E-mail:nkding@whut.edu.cn

variations of conflict rate and T_{PET} , and 120~170 m is generally recommended to be a reasonable length of the deceleration lane in the diverge area of the left off-ramp for underground interchanges. The maximum length should be controlled within 195 m considering the economic value of the project.

Keywords: traffic safety; left off-ramp; length of deceleration lane; traffic conflict; VISSIM simulation

0 引言

为了缓解因城市交通运行的压力,城市地下道路及地下互通立交逐渐被广泛采用,并成为缓解城市地面交通拥堵的重要途径之一^[1-2],但出入口匝道仍是交通冲突和事故的多发点。《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[3]明确提出“互通式立体交叉的出入口除高速匝道外,应设置在主线的右侧”。但是,由于城市道路交通环境、土地利用和工程经济等多重因素的制约,不得不对地下互通立交设置左出匝道^[4]。

然而,由于主线和匝道设计速度的差异,主线车辆驶入出口匝道时需要减速和转向,由此导致分流区交通事故频发,事故致死致伤率较高^[5]。大量研究显示,分流区减速车道长度、设计速度和交通量与交通冲突之间存在显著相关性^[6-8]。对于高速互通式立交的常规右出匝道,郑展骥等^[9]以碰撞时间(Time to Collision, T_{TTC})作为冲突指标,构建基于间隙接受理论的交通冲突预测模型,分析了分流区交通安全状况,结果表明减速车道长度和分流比是影响交通冲突数的主要因素;唐超^[10]以 T_{TTC} 为冲突指标分析发现,减速车道长度区间为 100~225 m 时,随着减速车道长度的增长,分流区交通冲突数呈现减小趋势,当减速车道长度大于 225 m 时,交通冲突减小趋势变缓;且随着主线和匝道交通量的增长,分流区交通冲突数随之增加;李燊^[11]以 T_{TTC} 为交通冲突指标,研究了分流区减速车道长度与交通冲突之间的关系,结果表明:在 250~500 m 区间内,冲突数随着减速车道长度增加而下降;白志军等^[12]通过交通仿真软件分析变速车道长度在 280~400 m 区间时,匝道入口处的交通冲突数量,随变速车道长度的增加而减少,经分析,得到主线设计车速为 120 km/h、100 km/h 和 80 km/h 共 3 种情况下所对应不同匝道设计车速时变速车道设置长度推荐值;孙璐等^[13]以交通冲突率为主要指标,利用 SSAM 分析车辆轨迹数据,分析了城市快速路多个交织区之间的相对交通安全状况,

结果表明:当交织区长度区间在 500~1 300 m 时,交通冲突率随交织区长度的增加而降低;张卫华等^[14]针对城市快速路互通立交分流区,利用碰撞时间和后侵入时间(Post Encroachment Time, T_{PET})指标建立了交通冲突 Logistic 回归模型,发现交通冲突不仅随交通量的增加而上升,同时还受主线和匝道车速的显著影响。此外,对于互通立交匝道分流区而言,减速车道长度的合理取值需要同时匹配主线和匝道的交通量、设计速度等条件^[15-18],以平衡分流区交通运行效率和安全的需要。

可以看出:已有研究均针对常规的右出匝道场景开展了分流区交通安全和减速车道长度之间的关联性研究,而鲜有关左出匝道情形。然而,左出匝道尤其是城市地下互通立交环境下的左出匝道,由于其特殊的道路空间环境和违背中国驾驶人驾驶习惯的出口设置方式,其交通运行和事故风险特征尚未被深入认识,并由此导致左出匝道分流区减速车道设置亦缺乏理论支撑。同时,已有研究较少综合考虑出口匝道减速车道长度与主线、匝道交通条件(交通量、设计速度)之间的交互作用对分流区交通冲突的影响。此外,已有研究多直接利用 T_{TTC} 指标进行分流区交通安全分析,而较少考虑冲突在分流区特定时间和空间尺度下的累计特征,且由此得到的分流区交通冲突风险和减速车道长度设置的结论或许存有一定偏颇。鉴于此,为探究左出匝道的减速车道长度的合理设置区间,本研究以武汉两湖隧道工程地下互通立交为实际案例,通过开展一系列 VISSIM 仿真,研究左出匝道减速车道长度与主线、匝道的交通量和设计速度的交互作用对左出匝道分流区交通冲突的影响,最终得出合理的减速车道长度设置区间。

1 仿真试验

本研究依托武汉两湖隧道工程的一处地下互通立交实际案例开展不同减速车道长度、主线或匝道交通量和设计速度组合条件下的 VISSIM 仿真。仿

真前需对 VISSIM 中的驾驶行为参数进行标定以更客观地反映驾驶人在地下互通立交的驾驶行为。由于两湖隧道工程仍处于施工阶段,本研究借助厦门万石山地下立交工程案例及其交通调查数据作为驾驶行为参数标定的依据^[19]。

1.1 仿真参数标定

1.1.1 敏感性分析

本研究基于敏感性分析方法确定需要校正的评价指标分别是车均行程时间和交通冲突数。其中,车均行程时间可由 VISSIM 仿真输出,交通冲突数可借助 SSAM 分析车辆行驶轨迹数据得到^[20-21]。针对城市道路仿真,本研究采用“Wiedemann 74”模型作为 VISSIM 驾驶行为基础模型,用以校核跟驰和换道行为。

利用敏感性分析逐一对参数进行仿真之后得出平均停车间距、安全距离附加部分、安全距离倍数部分^[22]和最大减速度这4个驾驶行为参数对车均出行时间和交通冲突数的影响最大,因此将上述4个参数作为 VISSIM 驾驶行为参数标定的对象,其他参数按照合理的经验值作细微调整。

1.1.2 仿真参数取值

本次仿真模型以厦门万石山地下互通立交交通

运行特征为基础,对 VISSIM 模型关键参数进行标定,使仿真平台的标定验证达到95%的置信水平,以确定最佳的驾驶行为参数取值。模型关键交通仿真参数见表1。

表1 模型关键交通仿真参数

Table 1 Key traffic simulation parameters of model			
模型	参数名称	单位	取值
跟车模块	平均停车间距	m	2.0
	安全距离附加部分		1.2
	安全距离倍数部分		3.0
车道变换	最大减速度	m/s ²	-6.0

1.2 仿真场景设置

仿真参数经校正之后,此处以武汉市两湖隧道工程中的文荟街地下互通立交左出匝道分流区为基础构建仿真模型,通过调控左出匝道分流区减速车道长度、主线或匝道的交通量和设计速度,来完成一系列交通运行仿真,最后基于交通冲突指标分析左出匝道分流区减速车道长度的合理设置区间。

1.2.1 仿真路网建模

以武汉两湖隧道工程文荟街地下互通立交左出匝道的设计方案为基础,构建 VISSIM 微观仿真路网,相关道路和交通条件设置情况见图1。

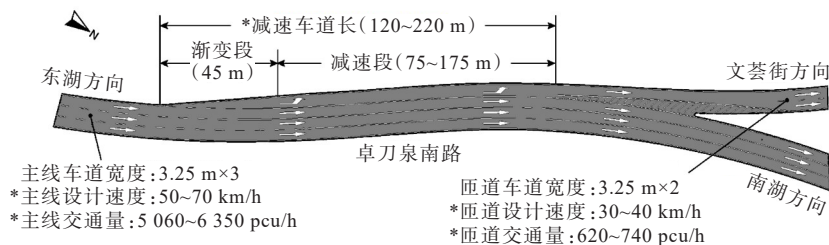


图1 左出匝道分流区示意(其中*号表示仿真控制变量)

Figure 1 A sketch of diverge area of left off-ramp (wherein * indicates controlled variables in simulation)

1.2.2 仿真试验方案设计

(1) 控制变量选取。基于本文对左出匝道分流区减速车道长度的研究,仿真将从多因素多角度研究各个交通因素组合与交通冲突指标之间的关系。根据分析,选取的影响因素有:减速车道长度、主线交通量、匝道交通量、主线设计车速、匝道设计车速等,两湖隧道南湖段的施工方案规定文荟街地下互通立交左出匝道分流区的减速车道设计长度为140 m;主线和匝道交通量为建成年和中远期预测高峰小时交通流量,建成年的主线交通量为5 060 pcu/h,匝道交通量为620 pcu/h;主线设计车速为50 km/h;匝

道设计车速为30 km/h。其中减速车道长度、主线或匝道的交通量和主线或匝道的行车速度的交互作用对分流区的交通安全的影响是此次研究的重点,结合对左出匝道相关文献的研究^[23]以及对工程案例设计方案的分析,分流区减速车道长度的仿真设置区间应考虑实际工程意义,具体各因素的取值见表2。

(2) 正交试验设计。确定所要研究的变量指标,此次仿真方案采取正交试验设计的方法,期望以具有代表性的各种变量因素组合方案分析不同交通条件组合下分流区所产生的交通冲突^[24],将分流区的车辆轨迹数据导入 SSAM 软件中得到交通冲突数和

表2 控制变量取值设置

Table 2 Controlled variable settings

因素	单位	取值
减速车道长度	m	120、145、170、195、220
主线交通量	pcu/h	5 060、5 700、6 350
匝道交通量	pcu/h	620、680、740
主线设计速度	km/h	50、60、70
匝道设计速度	km/h	30、40

表3 仿真试验方案正交设计

Table 3 Orthogonal design of simulation test

序号	减速车 道长度/m	交通量(主线/匝 道)/(pcu·h ⁻¹)	设计车速(主线/匝 道)/(km·h ⁻¹)	序号	减速车 道长度/m	交通量(主线/匝 道)/(pcu·h ⁻¹)	设计车速(主线/匝 道)/(km·h ⁻¹)
1	145	5 060/680	70/30	14	145	5 700/620	50/40
2	220	5 060/620	70/30	15	220	5 060/680	50/40
3	195	5 060/740	60/40	16	170	5 060/620	50/40
4	170	6 350/680	50/30	17	145	5 060/680	60/30
5	170	5 060/620	60/30	18	120	6 350/620	60/40
6	120	5 060/740	60/30	19	145	5 700/620	60/40
7	195	5 060/680	50/40	20	220	5 700/620	60/30
8	170	5 700/680	60/30	21	195	5 700/620	50/30
9	195	6 350/620	70/30	22	220	5 700/740	50/30
10	120	5 700/680	50/30	23	120	5 060/620	50/30
11	170	5 700/740	70/40	24	145	6 350/740	50/30
12	120	5 700/680	70/40	25	220	6 350/680	60/40
13	195	5 700/680	60/30				

1.2.3 仿真评价指标

本研究综合运用基于交通冲突个数的统计量和基于安全替代指标的计算值来直接和间接评价不同方案下的仿真结果,分别为交通冲突率(Crash Rate, R_{CR})和碰撞暴露时间(Time Exposed Time to Collision, T_{TET})。

(1) 交通冲突率(R_{CR})。此处定义交通冲突率为交通冲突数与分流区减速车道长度和交通量乘积的比值,计算见式(1):

$$R_{CR} = \frac{C}{QL} \quad (1)$$

式中: R_{CR} 为交通冲突率/[个·(pcu·m)⁻¹]; C 为单位时间内发生的交通冲突数/(个·h⁻¹); Q 为单位小时交通量/(pcu·h⁻¹); L 为分流区减速车道长度(m)。其中,冲突数是根据设定的 T_{TTC} 阈值判别冲突^[25],本研究中 T_{TTC} 阈值取 4 s,即当计算得到冲突车辆间的 T_{TTC} 值小于或等于 4 s 时,便认为冲突车辆间存在交

T_{TTC} 均值。正交试验设计表用 SPSS 软件输出,最终方案见表 3,根据正交试验法获得 25 种设计方案,利用 VISSIM 软件对 25 种方案的每一种方案进行仿真试验,在仿真时取 5 个不同的随机种子进行仿真试验来增加随机性,一共产生 $25 \times 5 = 125$ 组试验方案,对每种方案取均值使试验数据更具代表性。最后,对试验所产生的交通冲突数据进行分析整理,建立交通冲突指标与各交通因素的分析模型。

通冲突,反之则不存在冲突。统计轨迹数据中所有 T_{TTC} 值小于或等于 4 s 的个数即为交通冲突数。

(2) 碰撞暴露时间(T_{TET})。碰撞暴露时间,表示驾驶员在 T_{TTC} 值低于规阈值 T_{TTC}^* 的情况下接近前方车辆的所有时刻(在所考虑的时间段内)的总和, T_{TET} 越低代表所研究路段越安全^[26-28]。本仿真试验中 T_{TET} 为所有车辆在单位时间段和区域段内低于 T_{TTC} 值小于或等于 4 s 该阈值的碰撞时间之和。 T_{TET} 的计算见式(2)~(4):

$$T_{TET} = \sum_{i=1}^N T_{TETi} \quad (2)$$

$$T_{TETi} = \sum_{t=0}^T \delta_i(t) \Delta t \quad (3)$$

$$\delta_i(t) = \begin{cases} 1, & \forall 0 < T_{TTCi}(t) \leq T_{TTC}^* \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{TTCi}(t) = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_{i-1}}{V_i(t) - V_{i-1}(t)}, \quad X_i(t) > X_{i-1}(t) \quad (5)$$

式中: T_{TET} 为 N 辆车 ($i=1,2,\dots,N$) 所产生的碰撞暴露时间(s); T_{TET_i} 为第 i 辆车所产生的碰撞暴露时间(s); N 为仿真试验中的车辆数量(pcu); $\delta_i(t)$ 为第 i 辆车 t 时刻的切换变量,如果驾驶员在时刻 t 的 T_{TTC} 值介于0和指定阈值 T_{TTC}^* ,其值为1,否则,其值为0; Δt 为迭代时间间隔,本文设 Δt 的值为0.01 s; T 为仿真时段长度(s); T_{TTC}^* 为 T_{TTC} 阈值,本文设阈值为4 s; $T_{TTC_i}(t)$ 为第 i 辆车追尾前车(即 $i-1$ 车)的碰撞时间(s); $X_{i-1}(t)$ 为 t 时刻 $i-1$ 车在道路上的位置坐标(m); $X_i(t)$ 为 t 时刻 i 车在道路上的位置坐标(m); $V_{i-1}(t)$ 为 t 时刻 $i-1$ 车的地点速度(m/s); $V_i(t)$ 为 t 时刻 i 车的地点速度(m/s); l_{i-1} 为前车的车长(m)。

2 仿真结果分析

2.1 左出匝道减速车道长度对 R_{CR} 的影响

2.1.1 左出匝道减速车道长度与交通量之间的交互作用

图2显示了不同左出匝道减速车道长度和主线交通量、匝道交通量情况下的冲突率。总体上可以看出:随着减速车道长度的增加,冲突率有不同程度

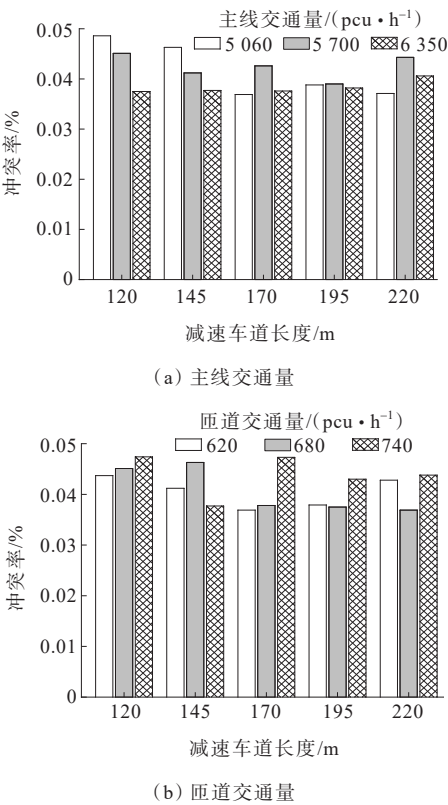


图2 左出匝道减速车道长度与交通量对冲突率的影响
Figure 2 Effect of deceleration lane length of left off-ramp and traffic volume on conflict rate

的减少。当减速车道长度由120 m增加至170 m和220 m时,冲突率由0.045%分别减小至0.039%和0.041%;可见主线交通量和匝道交通量变化时,冲突率无明显差异。三因素方差分析(Three-way ANOVA)显示(表4),仅减速车道长度及其与主线交通量的交互作用对冲突率产生了显著影响,而主线交通量、匝道交通量以及二者的交互作用均未导致冲突率的显著变化。此外,多重比较(TukeyHSD检验)显示上述显著影响主要来源于减速车道长度的差异,且仅减速车道长度120 m与195 m之间的配对比较具有显著性差异($p<0.05$),而其他配对比较均无显著性差异。

表4 左出匝道减速车道长度与交通量对冲突率影响的方差分析结果

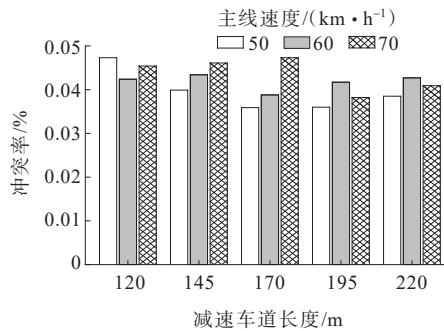
Table 4 Variance analysis of effect of deceleration lane length of left off-ramp and traffic volume on conflict rate						
差异源	自由度	偏差平方 总和	偏差平方 均值	F 值	p 值	效用量 η^2
L_{DLL}	4	6.48E-08	1.62E-08	2.75	0.032*	0.076
Q_M	2	2.92E-08	1.46E-08	2.48	0.089	0.034
Q_R	2	2.07E-08	1.03E-08	1.76	0.178	0.024
$L_{DLL} \times Q_M$	8	9.61E-08	1.20E-08	2.04	0.049*	0.113
$L_{DLL} \times Q_R$	4	2.58E-08	6.45E-09	1.10	0.363	0.030
残差	104	6.12E-07	5.89E-09			

注: L_{DLL} 为减速车道长度; Q_M 为主线交通量; Q_R 为匝道交通量。*表示 $p<0.05$, **表示 $p<0.01$, ***表示 $p<0.001$ 。

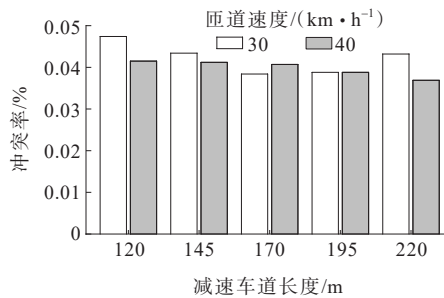
2.1.2 左出匝道减速车道长度与设计速度之间的交互作用

图3显示了不同左出匝道减速车道长度和主线速度、匝道速度条件下的冲突率。总体上可以看出,除了减速车道长度引起的冲突率变化以外,随着主线速度的增加或匝道速度的降低,冲突率均有一定程度的增加,其中,当主线速度由50 km/h增加至60 km/h和70 km/h时,冲突率分别由0.040%增加至0.042%和0.044%;匝道速度由40 km/h降低至30 km/h时,冲突率由0.040%增加至0.042%。三因素方差分析显示(表5),减速车道长度及其与主线速度的交互作用对冲突率产生了极为显著的影响;此外,主线速度及其与匝道速度的交互作用对冲突率也产生了显著影响;匝道速度及其与其他因素的交互作

用均未导致冲突率的显著变化。此外,多重比较(TukeyHSD检验)显示上述显著影响主要来源于减速车道长度的差异,且仅减速车道长度120 m与195 m之间的配对比较具有显著性差异($p<0.05$),而其他配对比较均无显著性差异。



(a) 主线速度



(b) 匝道速度

图3 左出匝道减速车道长度与设计速度对冲突率的影响

Figure 3 Effect of deceleration lane length of left off-ramp and design speed on conflict rate

表5 左出匝道减速车道长度与设计速度对冲突率影响的方差分析结果

Table 5 Variance analysis of effect of deceleration lane length of left off-ramp and design speed on conflict rate

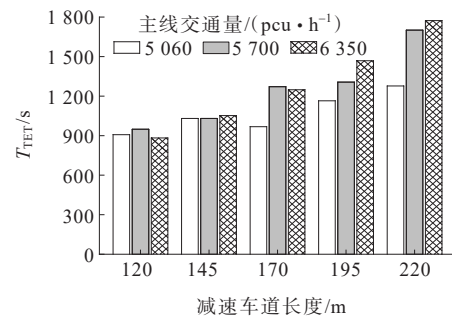
变量	自由度	偏差平方总和	偏差平方均值	F值	p值	效用量 η^2
L_{DLL}	4	6.03E+05	1.51E+05	31.67	0***	0.442
V_M	2	3.18E+04	1.59E+04	3.344	0.039*	0.023
V_R	1	1.62E+04	1.62E+04	3.414	0.068	0.012
$L_{DLL} \times V_M$	8	1.51E+05	1.88E+04	3.958	0***	0.110
$L_{DLL} \times V_R$	4	3.31E+04	8.27E+03	1.738	0.147	0.024
$V_M \times V_R$	1	2.11E+04	2.11E+04	4.440	0.038*	0.016
$L_{DLL} \times V_M \times V_R$	2	2.43E+04	1.22E+04	2.557	0.083	0.018
残差	104	6.12E-07	5.89E-09			

注: V_M 为主线设计速度; V_R 为匝道设计速度。

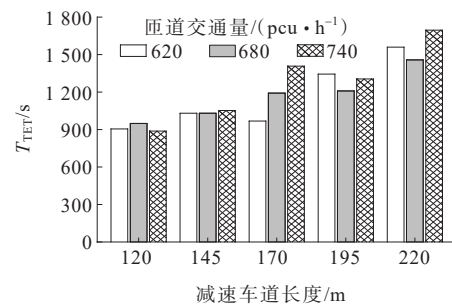
2.2 左出匝道减速车道长度对 T_{TET} 的影响

2.2.1 左出匝道减速车道长度与交通量之间的交互作用

图4显示了不同左出匝道减速车道长度和主线交通量、匝道交通量情况下的 T_{TET} 。总体上可以看出:随着减速车道长度或交通量的增加, T_{TET} 有不同程度的增大。当减速车道长度由120 m增加至170 m和220 m时, T_{TET} 分别相对增加24.6%和68.2%;当主线的交通量由5 060 pcu/h增加至5 700 pcu/h和6 350 pcu/h时, T_{TET} 分别增加17.0%和20.2%;当匝道交通量由620 pcu/h增加至680 pcu/h和740 pcu/h时, T_{TET} 分别增加0.5%和9.3%。三因素方差分析显示(表6),减速车道长度和主线交通量均对 T_{TET} 产生了极为显著的影响,且二者的交互作用也对 T_{TET} 产生了非常显著的影响;然而,匝道交通量及其与减速车道长度的交互作用均未导致 T_{TET} 的显著变化。此外,多重比较(TukeyHSD检验)显示上述显著影响主要来源于减速车道长度的差异,且减速车道长度120 m与170 m($p<0.01$)、120 m与195 m($p<0.001$)、120 m与220 m($p<0.001$)之间的配对比较存在显著差异;减速车道长度145 m与195 m($p<0.001$)、145 m



(a) 主线交通量



(b) 匝道交通量

图4 左出匝道减速车道长度与交通量对 T_{TET} 的影响

Figure 4 Effect of deceleration lane length of left off-ramp and traffic volume on T_{TET}

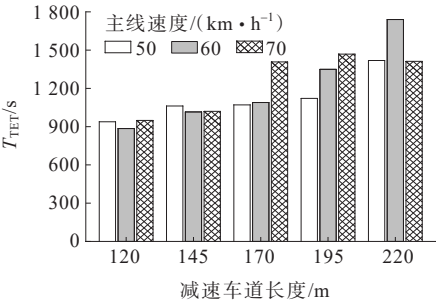
表6 左出匝道减速车道长度与交通量对 T_{TET} 影响的方差分析结果

Table 6 Variance analysis of effect of deceleration lane length of left off-ramp and traffic volume on T_{TET}						
变量	自由度	偏差平方和	偏差平方均值	F值	p值	效应量 η^2
L_{DLL}	4	5.86E+06	1.47E+06	34.76	0***	0.452
Q_M	2	1.14E+06	5.71E+05	13.53	0***	0.088
Q_R	2	2.22E+05	1.11E+05	2.63	0.077	0.017
$L_{DLL} \times Q_M$	8	1.01E+06	1.27E+05	3.00	0.005**	0.078
$L_{DLL} \times Q_R$	4	3.56E+05	8.91E+04	2.11	0.085	0.027
残差	104	4.39E+06	4.22E+04			

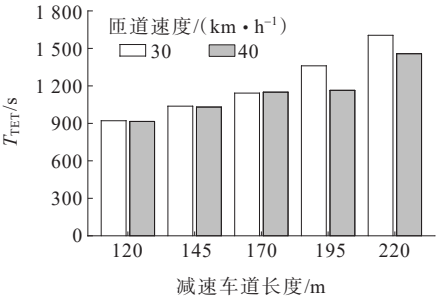
与220 m($p<0.001$)之间的配对比较存在显著差异;减速车道长度220 m与170 m($p<0.001$)、220 m与195 m($p<0.001$)之间的配对比较存在显著差异。此外,主线交通量5 060 pcu/h与5 700 pcu/h($p<0.001$)、5 060 pcu/h与6 350 pcu/h($p<0.001$)对于 T_{TET} 的配对比较也存在显著差异。

2.2.2 左出匝道减速车道长度与设计速度之间的交互作用

图5显示了不同左出匝道减速车道长度和主线速度、匝道速度条件下的 T_{TET} 。总体上可以看出:除



(a) 主线速度



(b) 匝道速度

图5 左出匝道减速车道长度与设计速度对 T_{TET} 的影响
Figure 5 Effect of deceleration lane length of left off-ramp and design speed on T_{TET}

了减速车道长度引起的 T_{TET} 变化以外,随着主线速度的增大或匝道速度的降低, T_{TET} 呈现不同程度的增大。其中,当主线速度由50 km/h增大至60 km/h和70 km/h时, T_{TET} 分别增加8.4%和17.0%,当匝道速度由40 km/h降低至30 km/h时, T_{TET} 增加6.1%。三因素方差分析显示(表7):减速车道长度及其与主线速度的交互作用均对 T_{TET} 产生了极为显著的影响;主线速度、主线速度与匝道速度的交互作用以及三者的交互作用均对 T_{TET} 产生了显著影响;匝道速度及其与减速车道长度的交互作用均对 T_{TET} 未产生显著影响。此外,多重比较(TukeyHSD检验)显示上述显著影响主要来源于减速车道长度的差异(具体配对比较特征见2.2.1节),主线速度或匝道速度之间的配对比较在 T_{TET} 上均无显著性差异。

表7 左出匝道减速车道长度与设计速度对 T_{TET} 影响的方差分析结果

Table 7 Variance analysis of effect of deceleration lane length of left off-ramp and design speed on T_{TET}						
变量	自由度	偏差平方和	偏差平方均值	F值	p值	效应量 η^2
L_{DLL}	4	6.03E+05	1.51E+05	31.67	<2E-16***	0.442
V_M	2	3.18E+04	1.59E+04	3.34	0.039*	0.023
V_R	1	1.62E+04	1.62E+04	3.41	0.068	0.012
$L_{DLL} \times V_M$	8	1.51E+05	1.88E+04	3.96	0***	0.110
$L_{DLL} \times V_R$	4	3.31E+04	8.27E+03	1.74	0.147 33	0.024
$V_M \times V_R$	1	2.11E+04	2.11E+04	4.44	0.038	0.016
$L_{DLL} \times V_M \times V_R$	2	2.43E+04	1.22E+04	2.56	0.083	0.018
残差	104	6.12E-07	5.89E-09			

3 结语

左出匝道已逐步成为城市地下互通立交建设的重要方案选择,但目前对其认识不足,相关设置依据缺乏理论支撑。鉴于此,本文针对城市地下互通立交左出匝道分流区场景,通过VISSIM仿真手段,从分流区交通安全的角度,利用交通冲突率(R_{CR})和碰撞暴露时间(T_{TET})指标,研究分析了左出匝道分流区减速车道长度的合理设置区间,并同时考虑了主线或匝道的交通量 and 设计速度的交互作用。研究结果表明:随着减速车道长度的增加,左出匝道分流区冲突率和 T_{TET} 逐渐增大,且当减速车道长度达到170 m

以后,冲突增幅显著减小; T_{TET} 随着主线或匝道交通量的增加而增大,冲突率并未随交通量呈现显著变化;冲突率和 T_{TET} 随着主线速度的增大或匝道速度的减小而增大;相对于冲突率和 T_{TTC} 指标,碰撞暴露时间(T_{TET})统计了特定时间范围内分流区的冲突累计特征,可以更好地捕捉减速车道长度与交通量、速度之间的交互作用。综合方差分析和多重比较发现,减速车道长度是引起左出匝道分流区交通冲突变化的关键原因,且减速车道长度处于120~170 m范围时较为合理,考虑工程经济性最大长度宜控制在195 m以内。

本研究以工程实例为基础,揭示了城市地下互通立交左出匝道减速车道长度与主线、匝道交通量和设计速度对分流区交通冲突的交互作用,明确了左出匝道减速车道长度的合理区间,可为左出匝道交通运行管理提供理论支撑,同时也可为城市地下互通立交工程实际提供具体案例和建设依据。

参考文献:

References:

- [1] 李正刚,晏秋,张超越.城市核心区地下道路设计关键问题研究[J].综合运输,2022,44(5):18-23,73.
LI Zhenggang, YAN Qiu, ZHANG Chaoyue. Research on key issues of underground road in urban core area[J]. China Transportation Review, 2022, 44(5): 18-23, 73.
- [2] 游克思,俞明健,刘艺.多点进出型城市地下道路出入口匝道设计研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1383-1389.
YOU Kesi, YU Mingjian, LIU Yi. On and off-ramps design for urban underground road with multi-entrances and exits [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1383-1389.
- [3] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTG D20—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
CCCC First Highway Consultants Co., Ltd.. Design specification for highway alignment: JTG D20—2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [4] 梁汉冕.主线左侧出入口设置技术及安全保障措施研究[D].西安:长安大学,2020.
LIANG Hanmian. Research on the setting technology and security measures of the left entrance and exit at main line [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [5] 中华人民共和国公安部交通管理局.中华人民共和国道路交通事故统计年报(2020年度)[R].北京:公安部交通管理局,2021.
Traffic Administration Bureau of the Ministry of Public Security of the People's Republic of China. The road traffic accidents statistics report in China (2020) [R]. Beijing: Ministry of Public Security Transportation Bureau, 2021.
- [5] 邓国忠,曹帆,吴勇,等.互通式立交与隧道出口小间距路段事故影响因素分析[J].中外公路,2019,39(4):283-287.
DENG Guozhong, CAO Fan, WU Yong, et al. Analysis on accidents influence factors of the small spacing section between intersection and tunnel exit[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(4): 283-287.
- [7] 陈乾.快速路互通立交分合流区交通冲突机理研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
CHEN Qian. Study on traffic conflict mechanism in diverging and merging segment of expressway interchange [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [8] 陶虎.快速路连续互通立交出入口组合区关联参数优化[D].合肥:合肥工业大学,2020.
TAO Hu. Optimization of correlation parameters of entrance and exit combination segment of expressway continuous interchange[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [9] 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.
ZHENG Zhanji, XIANG Qiaojun, LI Han, et al. Model for predicting traffic conflict in interchange diverging area[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(6): 85-90.
- [10] 唐超.高速公路互通立交交通冲突形成机理研究[D].南京:东南大学,2016.
TANG Chao. Research on the traffic conflict mechanism in freeway interchange[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [11] 李荣.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.
LI Shen. Traffic safety analysis method of expressway interchange based on traffic conflict[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [12] 白志军,陈慧,张绍理.高速公路互通立交出入口位置行车安全性分析[J].中外公路,2015,35(5):334-337.
BAI Zhijun, CHEN Hui, ZHANG Shaoli. Analysis of traffic safety at the entrance and exit of expressway interchange [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5): 334-337.
- [13] 孙璐,李颜平,钱军,等.基于交通冲突技术的交织区交通安全评价[J].中国安全科学学报,2013,23(1):55-60.

- SUN Lu, LI Yanping, QIAN Jun, et al. Evaluation of weaving sections with respect to traffic safety based on traffic conflict technique[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(1): 55-60.
- [14] 张卫华, 陶虎, 陈乾. 城市快速路互通立交分流区交通冲突预测模型[J]. 公路工程, 2022, 47(1): 149-155.
- ZHANG Weihua, TAO Hu, CHEN Qian. The predicting model of traffic conflicts in diverging segments of expressway interchange[J]. Highway Engineering, 2022, 47(1): 149-155.
- [15] 王萌, 毛琰, 狄胜德, 等. 城市地下道路分合流区变速车道长度研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(1): 104-114.
- WANG Meng, MAO Yan, DI Shengde, et al. Study on length of speed-change lane in diverging and merging areas of urban underground road[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(1): 104-114.
- [16] 李青. 高速公路互通立交三车道匝道出口分流区设置研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- LI Qing. Research on the setting of the three-lane off-ramp diversion area of expressway interchange[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [17] 王海君, 杨少伟. 高速公路互通式立交单车道减速车道长度研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 124-128.
- WANG Haijun, YANG Shaowei. Research of length of deceleration lane at expressway interchange[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(3): 124-128.
- [18] 王春娥. 高速公路立交变速车道长度研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(1): 120-125.
- WANG Chune. Length of speed-change lane at highway interchange[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(1): 120-125.
- [19] 靳祥. 地下立交设施通行能力模型与仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- JIN Xiang. The modeling and simulation on capacity of the underground interchange[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [20] 黄飞. 基于SSAM进行快速路合流区安全评价的有效性验证研究[C]// 创新驱动与智慧发展: 2018年中国城市交通规划年会论文集, 2018: 1190-1198.
- HUANG Fei. Validation study on the effectiveness of safety evaluation of enpressvary confluence area based on SSAM[C]// 2018 China Urban Transpont Planning Annual Conferene, Urban Transportation, 2018: 1190-1198.
- [21] 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.
- ZHANG Yu, WU Zhongguang, TIAN Wanli, et al. Layout analysis of highway reconstruction and extension working area based on VISSIM simulation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3): 352-357.
- [22] 周晨静, 荣建, 陈春安. 面向微观交通仿真实验的模型参数敏感性分析方法[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(11): 1728-1733.
- ZHOU Chenjing, RONG Jian, CHEN Chun'an. Parameter sensitivity analysis method for microscopic traffic simulation experiment[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(11): 1728-1733.
- [23] CHEN H Y, ZHOU H G, ZHAO J G, et al. Safety performance evaluation of left-side off-ramps at freeway diverge areas[J]. Accident Analysis & Prevention, 2011, 43(3): 605-612.
- [24] 蒲超伦. 基于正交试验的道路交叉口仿真分析及优化[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 308-312.
- PU Chaolun. Simulation analysis and optimization of road intersection based on orthogonal test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 308-312.
- [25] MA Y F, MENG H C, CHEN S Y, et al. Predicting traffic conflicts for expressway diverging areas using vehicle trajectory data[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146(3).
- [26] SOHEL MAHMUD S M, FERREIRA L, HOQUE M S, et al. Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs[J]. IATSS Research, 2017, 41(4): 153-163.
- [27] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment[J]. Accident Analysis & Prevention, 2001, 33(1): 89-97.
- [28] WANG C, XIE Y C, HUANG H L, et al. A review of surrogate safety measures and their applications in connected and automated vehicles safety modeling[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 157: 106157.