

# 武汉市城市地下道路入口路段严重冲突风险评估

王志军<sup>1</sup>, 沈逸杭<sup>2</sup>, 付卿<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学, 湖北 武汉, 430070)

**摘要:**【目的】为解决城市地下道路入口路段事故频发问题, 探明城市地下道路入口交通安全状况, 开展武汉市城市地下道路入口路段严重冲突风险评估研究。【方法】选取武汉市两处典型地下道路——梨园隧道与水果湖隧道, 作为研究对象, 基于雷视融合微波检测器采集的车辆轨迹与交通流数据, 结合道路几何特征、交通流特性及驾驶行为特征, 采用碰撞时间 (Time to Collision, TTC) 与碰撞时间差 (Time Difference to Collision, TDTC) 双指标协同辨识交通冲突, 构建严重冲突密度指标; 通过逐步回归分析, 建立以交通量、路段平均速度及速度标准差为驱动因素的线性预测模型, 模型拟合优度  $R^2=0.83$ , 显著性水平  $p<0.01$ ; 进一步结合 K 均值聚类算法与隶属度函数模型, 将风险等级划分为安全、临界安全、危险三级。【结果】梨园隧道因交通量较小、平均速度较高且允许变道, 严重冲突密度预测值为 0.0082, 风险等级为“安全”; 水果湖隧道因交通量较大、不可变道且速度离散性高, 严重冲突密度达 0.0178, 风险等级为“临界安全”。【结论】提出的风险分级方法可量化地下道路入口的安全水平, 为差异化限速、视线诱导设施优化等管控措施提供科学依据, 对提升城市地下道路通行安全性具有实践意义。

**关键词:** 交通风险评估; 城市地下道路; 交通冲突; K 均值聚类; 风险划分

**中图分类号:** U458.1

**文献标识码:** A

系统型城市地下道路主要承担多点进出的跨区、跨水域交通需求。由于入口路段大纵坡、光环环境突变、入口前路段交织较多等线形、环境以及交通流因素, 城市地下道路特别是地下道路入口路段的安全形势严峻, 存在诸如车辆碰撞及追尾、冲撞基础设施等交通风险。据统计, 上海越江隧道地下道路入口前后 200m 内事故总量是地下道路内部的 2 倍左右<sup>[1]</sup>, 由于车速快、流量大, 事故发生后, 更易造成二次伤害和交通瘫痪。因此, 研究城市地下道路入口路段的交通安全风险, 对于提升城市地下道路入口路段安全水平具有重要意义。

国内外学者对城市地下道路的安全影响因素、视知觉诱导改善等方面开展了一系列研究。陈鹏等<sup>[2]</sup>研究了城市隧道入口驾驶员的生理特性, 并分析了隧道出入口亮度变化对隧道入口障碍物视认距离的影响; 王子鸣等<sup>[3]</sup>通过实地调查, 建立了交通冲突和交通流量与交通密度之间的定性关系模型, 为交织区交通流研究特性和各车道安全评价方法提供了新思路。张楠等<sup>[4]</sup>使用基于累积频率曲线的计算方法, 用于确定隧道及其影响区的交通冲突风险阈值, 提高预测事故先兆的高效快速分析能力。杜志刚等从驾驶人视觉需求出发, 提出了城市水下道路隧道驾驶安全改善方法<sup>[5]</sup>, 并进行入口引导诱导设计<sup>[6]</sup>; 张梦茹<sup>[7]</sup>通过分析城市地下道路的运行

特征及出入段行车安全, 提出了基于运行速度的出入口安全评价方法, 制定了评价标准和安全保障建议措施。

在公路隧道入口的行车风险方面的研究较多, 现有研究主要通过模拟仿真、构建模型分析安全风险因素与判断风险等级, 研究内容集中在驾驶人的心理特性<sup>[8]</sup>和生理特性<sup>[9]</sup>、道路条件优化<sup>[10]</sup>、车辆运行特征<sup>[11]</sup>、视知觉标线<sup>[12]</sup>、隧道基础设施<sup>[13]</sup>等方面, 如李小川<sup>[14]</sup>分析总结平纵线形设计的关键因素, 分析验证了高速公路过江隧道入口段的安全风险。YING Y 等<sup>[15]</sup>采集了自然驾驶试验的驾驶行为数据, 构建了交通流风险因子 (Traffic flow risk factors, TRFI), 将隧道路段划分为 6 个风险等级; 薛锋等<sup>[16]</sup>通过提出一种基于 AHP-DEMATEL 和云模型的组合评价模型方法, 定性及定量分析了公路隧道交通安全影响因素及影响程度并确定隧道交通安全评价等级; 吴玲<sup>[17]</sup>用驾驶人心理负荷状态表征隧道入口风险程度, 分析心率指标与心率变异指标之间的相关关系; 周兵<sup>[18]</sup>等构建了城市交通隧道运营安全风险评估模型并设计了管理信息系统, 计算安全风险系数。

总体来看, 现有研究成果主要集中在高速公路以及公路普通隧道的风险评估和影响因素方面, 对城市地下道路入口路段的交通安全及风险评估的

收稿日期/Received: 2024-05-15

修回日期/Revised: 2024-09-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52272337)。

第一作者: 王志军 (1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事城市交通方面的研究。E-mail: wzj\_19830321@126.com。

通信作者: 沈逸杭 (2000—), 男, 技术员, 硕士, 从事城市交通方面的研究。E-mail: 605290965@qq.com。

研究不多，缺乏全面可靠的影响因素体系。同时区别于普通公路隧道，城市地下道路入口处的行车环境没有山体沟壑等视觉影响，且多为大下坡路段，车辆间交通冲突密集频发，复杂的交通运行环境可能会加剧城市地下道路入口风险水平，对于城市地下通道入口段的重冲突风险评估需要进一步研究。

基于此，本文针对城市地下道路入口路段，通过雷视融合微波探测器采集高峰时期车辆轨迹数据，选取严重冲突密度作为评价指标，从交通量、路段平均速度、路段速度标准差等交通流因素，以及能否变道等道路因素分析其对入口路段交通风险的影响，并构建严重冲突预测模型和等级划分模型，最后结合典型城市地下道路入口对预测模型进行论证，为城市地下道路入口路段的管理提供借鉴。

## 1 地下道路入口路段行车风险分析

### 1.1 地下道路入口路段研究范围

现有规范并未规定城市地下道路入口路段长度，结合线形特点、车辆运行特点，将限高架与地下道路洞口之间的路段作为地下道路入口路段，长度 200m~300m。

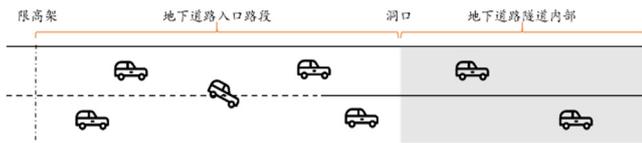


图 1 城市地下道路入口路段示意

Fig.1 Entrance section of urban underground road

### 1.2 交通风险影响因素

由于城市地下道路入口多为连续下坡，且入口处存在光环境变化，容易诱发不良驾驶行为，因此常存在交通流量分配不均、车流加减速差异较大、驾驶人驾驶任务较重等问题，导致城市地下道路入口路段存在较高的车辆追尾、冲撞隧道侧壁，路段拥堵等风险。结合上述风险分析，本文将风险影响因素分为交通流因素和道路因素<sup>[19]</sup>，其中交通流因素分为交通量、路段平均速度、路段速度标准差，道路因素为能否变道。

1) 交通量。交通量的大小在一定程度上会直接对驾驶员的心理紧张程度产生影响，且交通量的大小对于路段上车辆的运行产生影响，进而影响着交通冲突、交通安全的状况。研究发现，交通冲突、交通事故的产生与交通量的大小有着密不可分的关系，交通量的大小即目标路段车流量决定了车流的车头时距分布，进而也决定了前后车辆行驶过某地点的时间间隔，结合交通冲突的定义，说明交通量会很大程度的影响交通冲突的发生和分布。

2) 路段平均速度。路段交通流的平均速度反映了车流通过目标路段的平均速度，根据交通流理论，车流平均速度与交通量、交通流密度之间相互影响，通过交通流三参数的关系能很大程度地反映目标路段的交通流特征，交通流平均速度的大小对路段交通流的运行状况存在着影响，故选取交通流速度作为交通流因素，参与交通风险评估的建模。

3) 路段速度标准差。交通流速度标准差即通过目标路段上所有车辆的平均车速的标准差，能反映通过目标路段时不同车辆的速度差，进而反映目标路段上交通流的混乱程度，而交通流的混乱程度对目标路段上的交通安全会产生一定的影响。

4) 能否变道。城市地下通道入口衔接地上道路和地下通道，道路因素有许多，比如道路线形，坡度等，这些因素共同影响了车辆是否能够变道这一条件。车辆在入口段具有变道的需求，车辆能否合理的变道也是风险控制最重要的部分，而且车辆在变道过程中会干扰正常的交通秩序，诱发交通冲突，能否变道会对路段车流的通行产生影响，因此本文结合实际调研情况，选取“能否变道”作为风险驱动因子纳入风险评估。

## 2 数据采集及预处理

### 2.1 数据采集

本文选取武汉市两类具有代表性的城市地下道路：水果湖隧道和梨园地下通道，这两处地下道路车辆都只能通过两个入口和两个出口，路段车流量较大，设计速度也较高，路段基本情况见表 1。

表 1 实验数据采集路段基本情况

Tab.1 The basic situation of the road section for experimental data collection

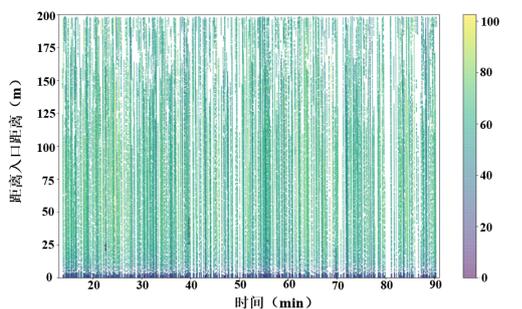
	梨园地下通道北进口	水果湖隧道北进口
实验地点	梨园地下通道北进口	水果湖隧道北进口
实验日期	2022.11.9 周三	2022.11.4 周五
采集时段	18:00-19:30	17:00-18:00
天气状况	晴	晴
入口车道数	3	2
设计速度/(km/h)	60	70
采集长度/ m	200	250

为保证足够的样本量，采集时间选取为工作日晚高峰时期 17:00~19:30。采集设备为雷视融合微波探测器 DTAMD39-V (简称“雷视一体机”)。雷视一体机采用人工智能深度学习算法，可同时检测纵向 350m 内 8 条车道的交通流数据、单车行驶数据，数据采集的刷新时间为 50ms，可同时检测纵向 8 条车道，跟踪 256 个车辆目标的车辆行驶数据，位置精度为 0.2m，速度精度为 0.1km/h，总体检测

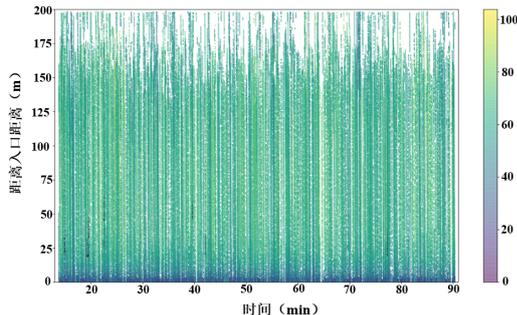
精度高于 95%，能够满足数据采集的精度要求。

## 2.2 数据预处理

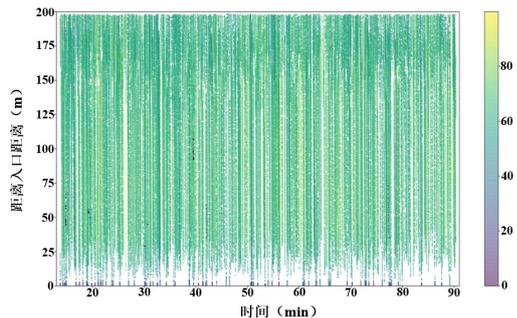
由雷视一体机采集的车辆编号、实时位置、车辆瞬时速度，绘制各进口车道的车辆运行轨迹图，如图 2 所示。以靠近车道中央分隔带的远近区分内外，内侧车道靠近分隔带，外侧车道远离分隔带，水果湖隧道不存在中间车道。其中，水果湖隧道数据缺口是因为进行数据采集时无人机受到外界干扰，晃动导致数据波动较大，为保证数据分析的有效性，本文采用卡尔曼滤波对轨迹数据进行去噪<sup>[21]</sup>，剔除了干扰及其前后的部分单元数据。



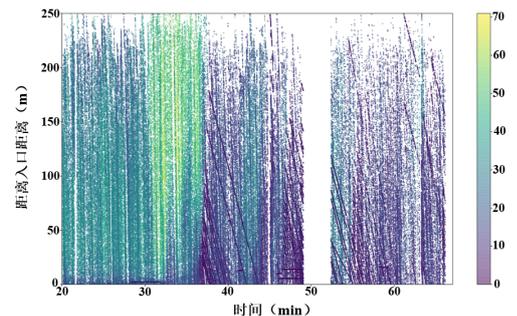
(a)梨园地下通道外侧进口道



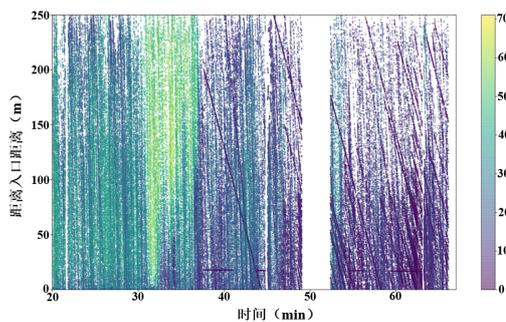
(b)梨园地下通道中间进口道



(c)梨园地下通道内侧进口道



(d)水果湖隧道外侧进口道



(e)水果湖隧道内侧进口道

图 2 各进口道车辆轨迹

Fig. 2 Vehicle trajectories at each entrance lane

图 2 展示了水果湖隧道和梨园地下通道各进口道的车辆轨迹。图中横轴表示时间，纵轴表示车辆距离洞门距离，颜色表示车辆运行速度，颜色越偏蓝紫色，表示运行速度越低。由图 2 可以看出，不同隧道入口路段、不同车道间车辆的运行特征均呈现出时空异质性。在高峰时期，限速 70km/h 的水果湖隧道更堵，运行速度分布在 40km/h 以下，且在 17:40-18:10 的平均运行速度接近 20km/h，可能原因是：水果湖隧道承担通勤过江需求，晚高峰期间的交通需求较大，饱和度过高。梨园地下通道的两条车道速度差异不大，但中间车道交通量远高于外侧车道，说明驾驶员更加倾向于选择中间车道；同时，越接近隧道洞口，车辆运行速度越低，这符合驾驶员在暗适应过程中的减速期望。

综合来看，雷视一体机采集的数据较好反映城市地下道路的车辆运行特征，同时，不同路段的时空异质性表明路段安全风险程度的差异，这进一步证明了量化交通安全水平，探究驱动因素影响机理的必要性。

## 3 交通风险评价指标选取

### 3.1 交通冲突指标

交通冲突<sup>[20]</sup>表示碰撞对象间的时间接近程度，可以用来衡量车辆之间的碰撞风险大小。常用的交通冲突指标包括：碰撞时间 (Time to Collision, TTC) 与碰撞时间差 (Time Difference to Collision, TDTC)。

#### 3.1.1 TTC 指标

TTC 即碰撞时间，是指当前时刻下，后车速度大于前车，若两车保持原有的速度和行驶轨迹不变，根据当前速度和轨迹，将会在某个时刻发生碰撞，那么从冲突开始至碰撞发生的时间段称为碰撞时间，适用于具有相同行驶轨迹的车辆冲突，尤其适用于不能变道地下道路口路段的追尾冲突。因此本文使用 TTC 指标计算同车道车辆之间的追尾冲突。

图 3 为追尾冲突情形下的 TTC 指标。根据冲突

追尾发生的定义：两车追尾时后车将与前车尾部接触，则其计算公式可表示为式 1。

$$TTC_n = \frac{S_n - l_{n-1}}{v_n - v_{n-1}} \quad (1)$$

式中： $TTC_n$ 为车辆  $n$  追尾前车（即车辆  $n-1$ ）的碰撞时间，s； $S_n$ 为车辆  $n$  距离与前车的车头距离，m； $v_{n-1}$ 为  $t$  时刻车辆  $n-1$  的瞬时速度，m/s； $v_n$ 为  $t$  时刻车辆  $n$  的瞬时速度，m/s； $l_{n-1}$ 为车辆  $n-1$  的车长，m。

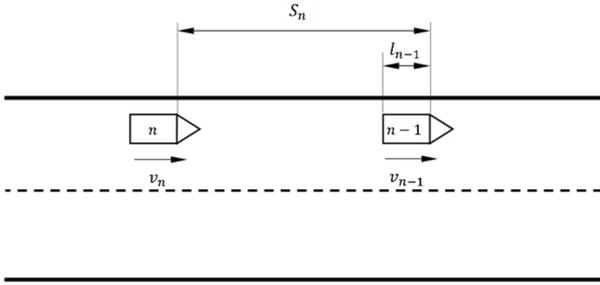


图 3 追尾冲突情形下的 TTC

Fig. 3 TTC under rear-end collision

### 3.1.2 TDTC 指标

TDTC 定义为在某个时刻，假定交通参与者的速度和路径方向保持不变，两个参与者通过当前方向的交叉点（冲突点）的时间差。只考虑两个参与者的当前方向，只要方向交叉，就进行计算。这样便包含了预定碰撞轨迹和非预定碰撞轨迹风险。变道冲突的计算定义过程如图 4 所示。

$$TDTC_n = t_n - t_{n-1} = \frac{S_n}{v_n} - \frac{S_{n-1}}{v_{n-1}} \quad (2)$$

式中：TDTC<sub>n</sub>为车辆  $n$  和车辆  $n-1$  经过同一假定冲突点的时间差，s； $t_n$ 为是车辆  $n$  以当前速度和方向到达假设冲突点所需要的时间，s； $S_n$ 为车辆  $n$  距离冲突点的距离，m； $v_n$ 为  $t$  时刻车辆  $n$  的

瞬时速度，m/s； $t_{n-1}$ 为是车辆  $n-1$  以当前速度和方向到达假设冲突点所需要的时间，s； $S_{n-1}$ 为车辆  $n-1$  距离冲突点的距离，m； $v_{n-1}$ 为  $t$  时刻车辆  $n-1$  的瞬时速度，m/s。

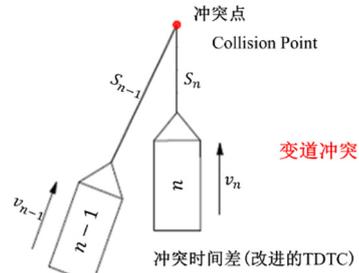


图 4 TDTC 变道冲突

Fig.4 TDTC lane-changing conflict

### 3.2 指标阈值确定

交通冲突指标值越小，表示事故发生的可能性越大。研究表明，交通冲突与交通事故之间关系的强弱很大程度上依赖于所选择的阈值。目前可以采取两种方法界定交通冲突阈值，一种是借鉴交通流理论中的可接受间隙理论，另一种是累积频率曲线法<sup>[22]</sup>。相较于前者，后者更具普适性，在交通工程中有广泛应用。累积频率曲线法是确定小概率事件发生的常用统计方法，随着观测手段的进步目前不少研究倾向于采用累积频率曲线法确定交通冲突严重程度的界定值，一般选取 TTC 值的 15%分位值作为严重冲突的判别阈值<sup>[23]</sup>。因此本文通过绘制各路段的 TTC 指标和 TDTC 指标的累积频率曲线，得到各车道的冲突指标阈值。

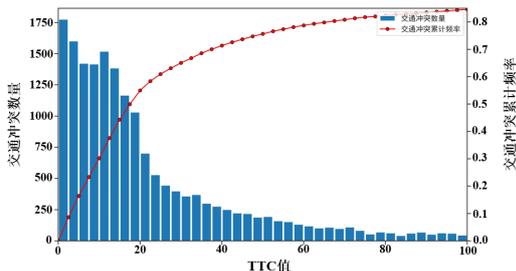
#### 3.2.1 TTC 指标阈值

绘制各路段的 TTC 指标累积频率曲线确定的 TTC 阈值如图 5 和表 2 所示。

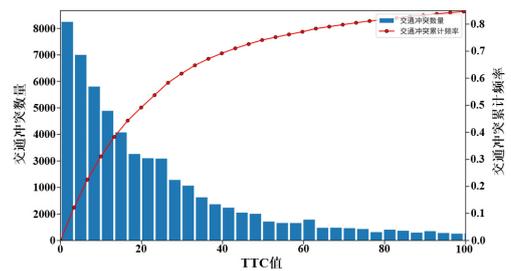
表 2 各车道的 TTC 阈值及交通冲突分类

Tab. 2 TTC threshold of each lane and traffic conflict classification

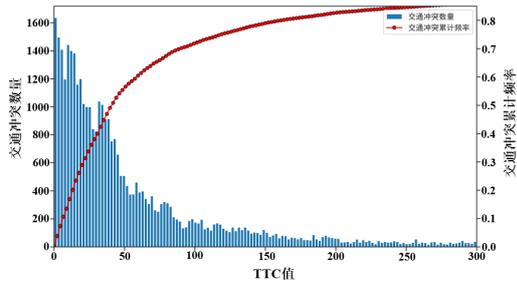
地下道路名称	外侧进口道			中间进口道			内侧进口道		
	严重冲突	TTC 阈值	一般冲突	严重冲突	TTC 阈值	一般冲突	严重冲突	TTC 阈值	一般冲突
水果湖隧道	(0,1.7662]	1.7662	(1.7662,+∞)	--	--	--	(0,1.5372]	1.5372	(1.5372,+∞)
梨园地下通道	(0,4.5153]	4.5153	(4.5153,+∞)	(0,4.0965]	4.0965	(4.0965,+∞)	(0,9.8347]	9.8347	(9.8347,+∞)



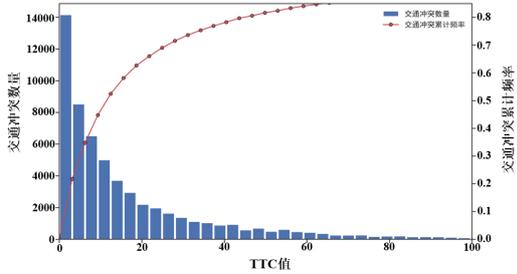
(a)梨园地下通道外侧车道



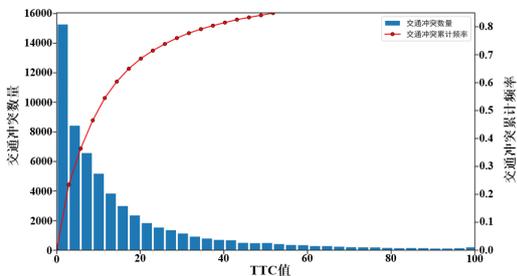
(b)梨园地下通道中间车道



(c)梨园地下通道内侧进口道



(d)水果湖隧道外侧车道



(e)水果湖隧道内侧车道

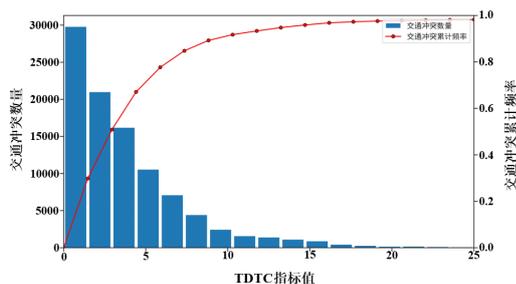
图5 TTC 值累积频率

Fig.5 Cumulative frequency distribution of TTC

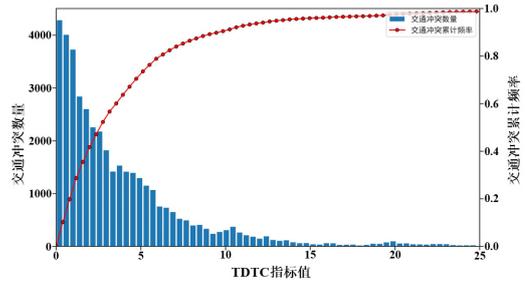
通过累积频率曲线法得到水果湖隧道和梨园隧道的严重冲突阈值如表 2 所示,水果湖隧道入口路段的 TTC 阈值 1.7662s,小于梨园地下通道 4.5153s,说明水果湖隧道的风险程度更高,发生交通事故的可能性越大。

### 3.2.2 TDTC 指标阈值

对于无法变道的水果湖隧道入口路段来说,并不存在变道冲突,而梨园隧道入口段为允许变道的三车道路段,因此以梨园地下通道为例研究 TDTC 指标阈值。选取梨园地下道路入口路段的内侧-中间相邻车道、中间-外侧相邻车道的车辆,同理统计 TDTC 交通冲突指标的累积分布频率,得到 TDTC 指标严重冲突阈值如图 6 和表 3 所示。



(a)内侧-中间相邻车道



(b)中间-外侧相邻车道

图6 TDTC 值累积频率

Fig.6 Cumulative frequency distribution of TDTC

表3 梨园地下通道 TDTC 阈值及交通冲突分类

Tab.3 TDTC threshold and traffic conflict classification of

Liyuan underground channel

位置	严重冲突	TDTC 阈值	一般冲突
进口道 1 与 2	(0,0.6591]	0.6591	(0.6591,+∞)
进口道 2 与 3	(0,0.5824]	0.5824	(0.5824,+∞)

### 3.3 风险评价指标

以上使用累积频率曲线法以交通冲突数量 15% 对应数值为判定交通冲突是否为严重冲突的临界值,因此统计低于阈值的严重冲突样本,将严重冲突密度作为城市地下道路入口路段的交通风险评价指标:

$$R = \frac{N}{Q \cdot L} \quad (3)$$

式中:  $R$  为严重冲突密度,次/( $\text{pcu} \cdot \text{m}$ );  $N$  为单位时间内发生的严重交通冲突数,次,将短时间内相同冲突的两辆车的重复冲突予以剔除;  $L$  为数据收集路段长度,  $\text{m}$ ;  $Q$  为数据收集路段单位时间内的主线交通量,  $\text{pcu}/\text{min}$ 。

## 4 严重冲突预测模型构建与实例分析

### 4.1 严重冲突时空分布分析

水果湖隧道和梨园地下通道各入口车道的严重冲突时空分布如图 7 和图 8 所示。总体来看,梨园地下通道外侧进口道的严重冲突比中间进口道少,这可能是因为允许变道,中间车道交通量高于外侧车道,因此严重交通冲突数量可能受到交通量影响。从空间分布来看,越靠近隧道洞口,严重冲突发生的频率越高,这可能是减速行为、速度分散带来交通流紊乱,由此可知车辆行驶速度可能是造成交通风险的潜在因素。

水果湖隧道两条进口道严重冲突的空间分布规律与梨园地下通道相似,严重冲突密度均在洞口前出现明显高峰,表现出越接近洞口,严重冲突密

度越大的规律。同时，水果湖隧道两条进口道的时

空分布规律较为相似，这可能是由于无法变道所致。

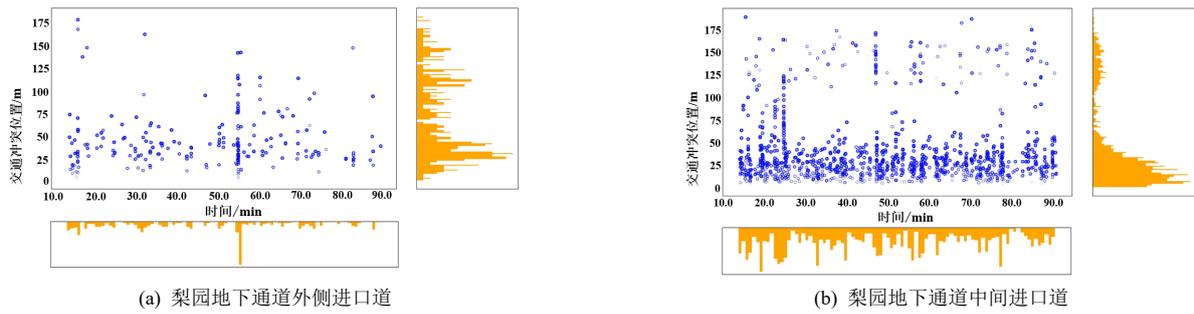


图 7 梨园地下通道入口路段严重冲突时空分布

Fig. 7 Time and space distribution of serious conflicts at the entrance of Liyuan underpass

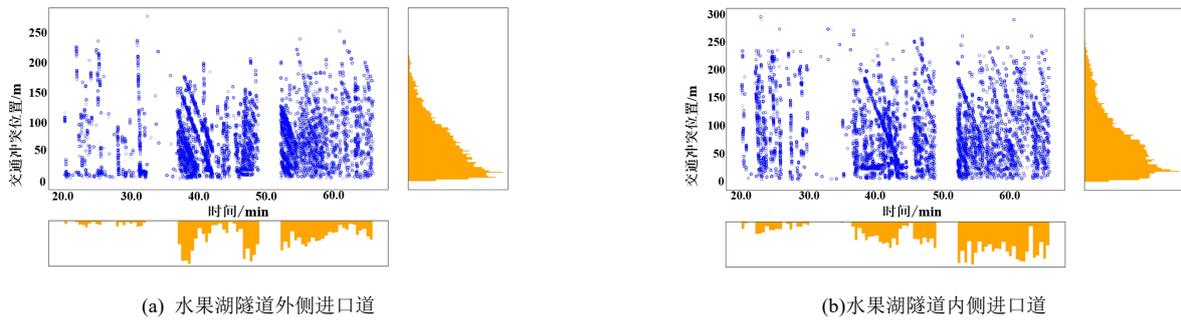


图 8 水果湖隧道入口路段严重冲突时空分布

Fig. 8 Time and space distribution of serious conflicts at the entrance of Fruit Lake tunnel

#### 4.2 驱动因素统计及单因素分析

为探究上文中各风险因素与交通冲突的具体关系，以 1min 为时间单元，将交通冲突密度与各驱

动因素散点图进行线性拟合，分析严重冲突密度与各驱动因素的相关性，如图 9 所示。

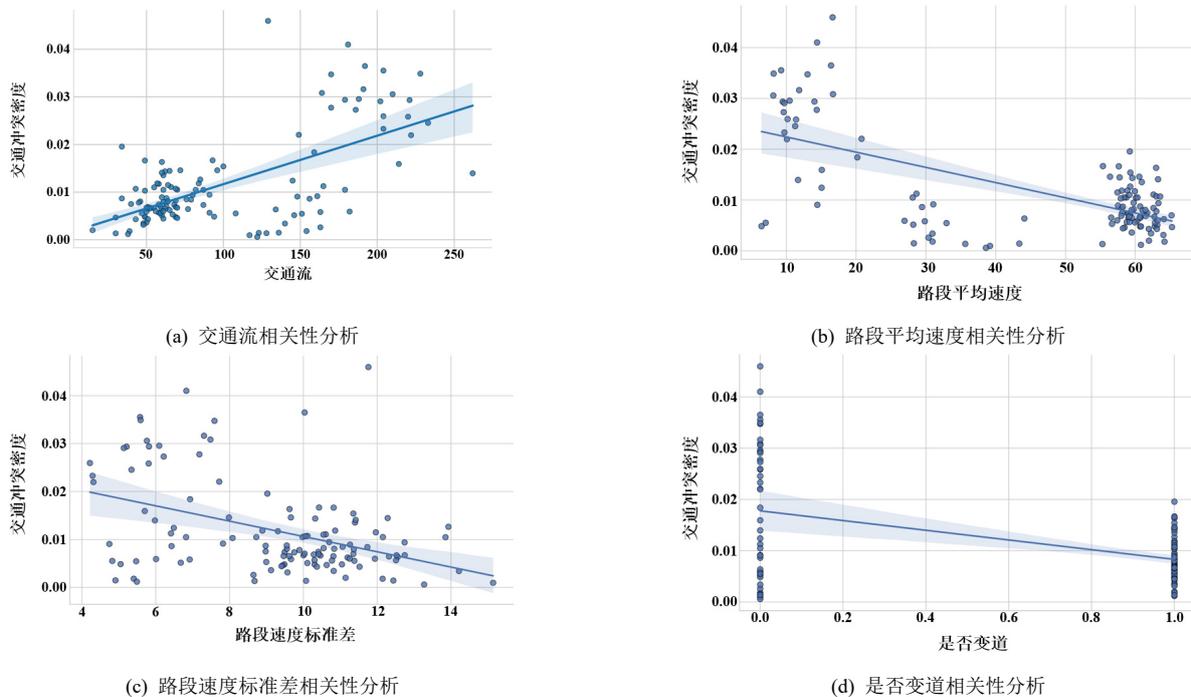


图 9 严重冲突与驱动因素相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of serious conflicts and risk factors

根据拟合直线斜率可知，严重冲突密度与交通流量大小呈正相关，表示交通量越大，严重冲突密度越大；严重冲突密度与路段平均速度、路段速度标准差、是否变道这三个驱动因素呈负相关，表明速度越大、速度标准差越大、允许变道这三种情况下，严重冲突密度更大。因此，四个指标均纳入严重冲突预测模型中。

#### 4.3 严重冲突预测模型标定

交通冲突是一种离散计数的非负变量，在单位时间内受到多种因素的影响，为明确城市地下道路入口路段交通风险的影响因素并实现严重冲突的准确预测，本文选取兼具良好预测速度与效果、结果易于说明的线性模型进行风险分析。线性模型在小数据集上表现优良，当数据增加时也易于更新，能够推广到较大的数据集，适用于微观层面上数据量丰富的交通冲突分析。同时受选取变量限制，将所选变量都化为连续变量后，logit 模型与非线性模型标定复杂且不够直观。因此，本文选取单位时间内的严重冲突密度作为因变量，以交通量、路段平均速度、车辆运行速度标准差、能否变道作为自变量构建线性模型，利用 Python 编程进行模型标定，结果如表 4 和式 4 所示。

表 4 严重冲突预测模型标定结果

驱动因素	未标准化系数		标准化系数	T 检验	显著性
	系数	标准差	Beta		
常量	.013	.005		2.350	.020
交通流	7.925E-5	.000	.488	3.313	.001
路段平均速度	-.001	.000	-1.863	-8.233	.000
路段速度标准差	.001	.000	.323	3.763	.000
能否变道	.030	.004	1.520	8.481	.000

$$\gamma = 0.01281 + 7.925 \times 10^{-5} Q - 8.710 \times 10^{-4} V + 1.231 \times 10^{-3} E + 3.026 \times 10^{-2} N \quad (4)$$

式中： $\gamma$  表示单位时间内的严重冲突密度，次/(pcu·m)； $Q$  表示主线交通量，pcu/min； $V$  表示路段平均车速，km/h； $E$  表示路段车辆速度标准差，km/h； $N$  表示能否变道，0 表示无法变道，1 表示可以变道。预测模型的  $R^2$  为 0.639，说明所选取的驱动因素可以较好地严重冲突进行预测。

由式 4 中的系数可以看出，单位时间内的交通流量、路段车辆速度标准差、能否变道指标的系数都为正值，路段平均速度为负值，说明前三个因素与严重冲突密度之间存在正相关关系，路段平均速度与严重冲突密度之间存在负相关关系。

同时，由回归后的标准化系数结果可知，排除

离散变量后，路段平均速度对严重冲突的影响程度最大，因为速度越低，说明路段拥堵程度越大，车辆间保持或调整安全距离，交通冲突概率越高，发生碰撞的概率越高。

#### 4.4 风险等级划分模型建立

为进一步划分严重冲突风险等级，运用 SPSS24.0 软件对城市地下道路入口路段严重冲突密度进行 K 均值聚类分析，将严重冲突密度数据聚类为安全、临界安全及危险三类，聚类中心结果见表 5。

表 5 城市地下道路入口路段严重冲突风险水平

	安全	临界安全	危险
严重冲突密度(次/(pcu·m))	0.00059	0.02329	0.04595

聚类中心确定后，运用降半梯形函数形式构造严重冲突密度指标的模糊隶属函数，隶属度函数分布示意如图 10。

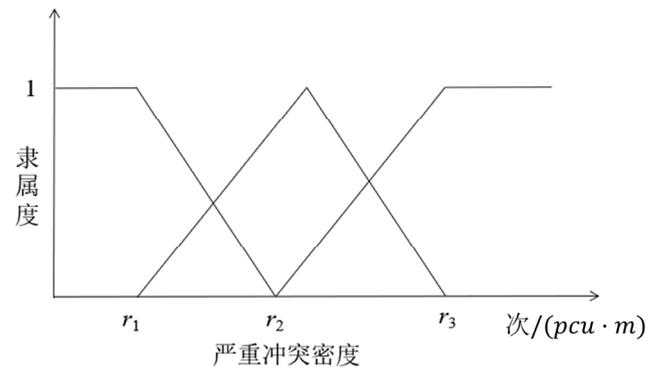


图 10 严重冲突密度隶属度函数分布

Fig. 10 Distribution of serious conflict rate membership function

现有研究一般使用隶属度函数来描述元素属于某个模糊集合的程度<sup>[24]</sup>。当函数值越接近于 1 时，表明变量的隶属度越高。本文采用 K 均值聚类将严重冲突密度数据分为三类，根据隶属度函数分布图与聚类结果，可得到相应的隶属度函数如式 5-式 7。

$$r_1 = \begin{cases} 1 & \gamma < 0.00059 \\ \frac{(0.02329 - \gamma)}{(0.02329 - 0.00059)} & 0.00059 \leq \gamma < 0.02329 \\ 0 & \gamma \geq 0.02329 \end{cases} \quad (5)$$

$$r_2 = \begin{cases} 1 & \gamma < 0.02329 \\ \frac{(\gamma - 0.00059)}{(0.02329 - 0.00059)} & 0.00059 \leq \gamma < 0.02329 \\ \frac{(0.04595 - \gamma)}{(0.04595 - 0.02329)} & 0.02329 \leq \gamma < 0.04595 \\ 0 & \gamma \geq 0.04595 \end{cases} \quad (6)$$

$$r_3 = \begin{cases} 1 & \gamma < 0.02329 \\ \frac{(0.04595 - \gamma)}{(0.04595 - 0.02329)} & 0.02329 \leq \gamma < 0.04595 \\ 0 & \gamma \geq 0.04595 \end{cases} \quad (7)$$

在对路段风险水平进行划分时，将地下道路入口路段交通流条件、道路条件等驱动因素代入严重冲突密度预测模型，获得严重冲突密度预测值，代入式 5-式 7 中得到隶属度值并取最大值，如式所示。

$$r_{\max} = \max \{r_1, r_2, r_3\} \quad (8)$$

式中： $r_{\max}$  为隶属度最大值， $i=1,2,3$ 。当  $r_{\max}$  等于  $r_1$  时代表该城市地下道路入口路段处于安全级别；等于  $r_2$  时处于临界安全级别；等于  $r_3$  时处于危险级别。

#### 4.5 模型总结与实例分析

本文从典型城市地下道路入口路段实际数据出发，分析了城市地下道路入口路段严重冲突风险

表 6 严重冲突风险等级划分实证

Tab. 6 Empirical study on the classification of serious conflict risk level

	交通量 (pcu/min)	路段平均 速度(km/h)	路段车辆速度 标准差(km/h)	是否可变道 (0—否；1—是)	严重冲突密度 预测值 $\gamma$	严重冲突等级 $r$
梨园地下通道	60	60.258	10.482	1	0.008244	$r_{\max} = r_1 = 0.6628$ ,安全水平
水果湖隧道	171	20.059	7.205	0	0.017760	$r_{\max} = r_2 = 0.7564$ ,临界安全水平

梨园地下通道和水果湖隧道的预测严重冲突密度分别为 0.0082 和 0.0178，风险等级分别为“安全”和“临界安全”。梨园地下通道的交通量较小，通行速度更快，因此严重冲突密度更低，处于“安全”水平。而由于水果湖隧道不可变道，且交通量较大，因此路段车辆平均行驶速度更低，导致车辆间难以保持安全的跟车间距，交通冲突发生的密集程度更高，因此严重冲突密度预测值更高，风险等级处于“临界安全”水平。根据上述结果，结合收集到的实际数据，该预测模型和风险等级划分模型较为合理。

## 5 结论

本文基于两种典型城市地下道路的实地观测数据，对地下道路入口路段交通风险进行研究，得到如下结论：

1) 以严重冲突密度为入口路段安全指标，高峰时期、距离洞口越近，严重冲突越密集；交通量大、速度标准差、能否变道对严重冲突密度负相关，路段平均速度对严重冲突密度正相关。

2) 构建的严重冲突密度模型对冲突密度进行预测，根据 K 均值聚类算法将出入口路段的行车风险评价标准分为安全、临界安全、危险 3 个等级。

影响因素，构建了线性模型实现严重冲突密度的预测，后结合 K 均值聚类算法与隶属度函数模型实现了路段严重冲突风险分级。目前普通公路隧道、高速公路隧道常用的短时事故风险预测模型更适用于高密度、高频率的交通流数据，风险指标选取多以事故率、速度变化为主，不适用于长度较短的城市地下道路入口节点。本文采用雷视融合技术，收集连续数据，针对不同类型的地下道路选取不同的交通冲突指标评估交通风险，更加适用于城市地下道路入口路段的行车环境。

利用严重冲突密度预测模型（式 4）和模糊隶属模型（式 5-式 7）对梨园地下通道和水果湖隧道的入口路段进行实证分析，包括对严重冲突密度进行预测，同时划分风险等级，结果如表 6 所示。

对梨园地下道路和水果湖隧道入口路段的风险等级进行评估，分别为“安全”和“临界安全”等级。

3) 本文在驱动因素的选取上考虑了交通量、速度等交通流因素、能否变道等线形因素，未考虑到单车交通流、坡度等因素的影响，因此下一阶段的研究将围绕这些内容展开。

## 参考文献

- [1] 周晶晶,王静,陆林军.城市越江隧道交通事故特征统计分析研究[J].交通与港航,2019,6(4):75-79.[ZHOU J J,WANG J,LU L J.Research on statistical analysis of traffic accident characteristics in the urban river-crossing tunnel[J].Communication & Shipping,2019,6(4):75-79.]
- [2] 陈鹏,潘晓东,付志斌,等.城市隧道出入口视觉适应性研究[J].交通标准化,2014,42(19):1-6.[CHEN P,PAN X D,FU Z B,et al.Visual adaptability at urban tunnel entrance and exit[J].Communications Standardization,2014,42(19):1-6.]
- [3] 王子鸣,李树彬,崔帅.基于交通冲突的主干路交织区特性与安全研究[J].中外公路,2024,44(03):236-245.[WANG Z M,LI S B,CUI S.Characteristics and safety of weaving areas of trunk roads based on traffic conflicts[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(03):236-245.]
- [4] 张楠,刘彬.基于交通冲突分析的智慧高速隧道主动风险

- 防控方法研究[J].公路,2024,69(06):272-277.[ZHANG N,LIU B.Research on active risk prevention and control method of intelligent high-speed tunnel based on traffic conflict analysis[J].Highway,2024,69(06):272-277.]
- [5] 杜志刚,梅家林,倪玉丹,等.城市水下道路隧道驾驶安全影响因素分析和改善思路[J].隧道建设(中英文),2020,40(11):1558-1569.[DU Z G,MEI J L,NI Y D,et al.Analysis of influencing factors and improve ideas for driving safety in urban road underwater road tunnels[J].Tunnel Construction,2020,40(11):1558-1569.]
- [6] 杜志刚,倪玉丹.城市水下隧道入口引道诱导设计[J].现代隧道技术,2019,56(S2):463-470.[DU Z G,NI Y D.Guide-based design of the entrance approach of urban underwater tunnel[J].Modern Tunnelling Technology,2019,56(S2):463-470.]
- [7] 张梦茹.城市地下道路运行特征分析及安全性评价[D].南京:东南大学,2020.[ZHANG M R.Operating characteristics analysis and safety evaluation of urban underground road[D].Nanking:Southeast University,2020.]
- [8] FENG Z X,YANG M M,ZHANG Y W,et al.Effect of longitudinal slope of urban underpass tunnels on drivers' heart rate and speed: a study based on a real vehicle experiment[J].Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2018,81:525-533.
- [9] 连冠,尚婷,夏瑜等.隧道群不同间距对驾驶人视觉特性影响研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2023,48(05):179-189.[LIAN G,SHANG T,XIA Y,et al.Influence of different spacing of tunnel group on drivers' visual characteristics[J].Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science),2023,48(05):179-189.]
- [10] 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(01):104-114.[WANG M,MAO Y,DI S D,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(01):104-114.]
- [11] 施正宝,何福成,王首硕,等.基于线性诱导的公路隧道入口区域交通安全优化研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(S1):136-146.[SHI Z B,HE F C,WANG S S,et al.Traffic safety optimization of entrance section in highway tunnels based on linear guiding[J].Tunnel Construction,2022,42(增刊 1):136-146.]
- [12] 潘福全,梁雪,王琳等.基于驾驶仿真的海底隧道出入口段视觉减速标线有效性[J].科学技术与工程,2022,22(21):9372-9380.[PAN F Q,LIANG X,WANG L,et al.Effectiveness of visual deceleration marking at the entrance and exit of undersea tunnel based on driving simulation[J].Science Technology and Engineering,2022,22(21):9372-9380.]
- [13] 葛敏莉,孙璐.山区高速公路隧道交通安全研究[J].交通运输工程与信息学报,2013,11(1):59-67.[GE M L,SUN L.Study on montanic highway tunnel traffic safety[J].Journal of Transportation Engineering and Information,2013,11(1):59-67.]
- [14] 李小川.公路过江隧道入口段局部线形安全风险[J].工程建设与设计,2022,No.487(17):122-124.[LI X C.Analysis of local line safety risk of highway crossing tunnel[J].Construction & Design for Engineering,2022,487(17):122-124.]
- [15] YAN Y,DAI Y,LI X,et al.Driving risk assessment using driving behavior data under continuous tunnel environment[J].Traffic Injury Prevention,2019,20(8):807-812.
- [16] 薛锋,胡萍,黄宇.基于组合模型的公路隧道交通安全评价[J].公路交通科技,2021,38(7):85-95.[XUE F,HU P,HUANG Y.Traffic safety evaluation of highway tunnel based on combined model[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2021,38(7):85-95.]
- [17] 吴玲.基于生理与行为指标的高速公路特长隧道环境驾驶人风险特性研究[D].西安:长安大学.2018.[WU L.Study on driver risk characteristics in extra-long highway tunnels based on physiological and behavioral indicators[D].Xi'an: Chang'an University,2018.]
- [18] 周兵,王传生,刘芳亮,等.城市交通隧道运营安全风险评估模型及管理系统研究[J].公路交通科技,2021,38(1):97-103.[ZHOU B,WANG C S,LIU F L,et al.Study on risk assessment model and management system for urban traffic tunnel operation safety[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2021,38(1):97-103.]
- [19] 邹禾.高速公路改扩建半幅封闭施工区交通冲突研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.[ZOU H.Study on the traffic conflict in the closed construction area of highway reconstruction and expansion[D].Wuhan: Wuhan University Of Technology,2020.]
- [20] 朱顺应,蒋若曦,王红,等.机动车交通冲突技术研究综述[J].中国公路学报,2020,33(02):15-33.[ZHU S Y,JANG R X,WANG H,et al.Review of research on traffic conflict

- techniques[J].China Journal of Highway and Transport,2020, 33(2):15-33.]
- [21] CHEN Q,ZHU S,WU J,et al.An acceleration denoising method based on an adaptive kalman filter for trajectory in merging zones[J].Journal of Advanced Transportation, 2023.
- [22] 王胤皓.城市快速路出口交通冲突影响及建模研究[D].长安大学,2019.[WANG Y H.Safety evaluation and modeling for exits of urban expressway using conflicts theory[D].Xi'an: Chang'an University,2019.]
- [23] 徐汉清.高速公路典型区段交通冲突及安全性评价研究[D].哈尔滨工业大学,2014.[XU H Q.Research on the traffic conflict and safety evaluation of freeway typical sections[D]. Harbin Institute of Technology,2014.]
- [24] 李琪霖,王红,吴月磊,等.基于非自由换道行为的高速公路互通立交最小净距模型[J].公路交通科技,2022,39(11):165-173.[LI Q L,WANG H ,WU Y L,et al. Expressway interchange minimum clear distance model based on non-free lane changing behavior[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022,39(11):165-173.]

## Severe Conflict Risk Assessment of Urban Underground Road Entrance Roads

WANG Zhijun<sup>1</sup>, SHEN Yihang<sup>2</sup>, FU Qing<sup>2</sup>

(1.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** **[Objective]** In order to solve the problem of frequent accidents at the entrance section of urban underground roads and to find out the traffic safety situation at the entrance section of urban underground roads, the risk assessment of serious conflicts at the entrance section of urban underground roads in Wuhan was carried out. **[Methods]** In this paper, two typical underground roads in Wuhan, Liyuan Tunnel and Shuiguo Lake Tunnel, are selected as the research objects. Based on the vehicle trajectory and traffic flow data collected by the thunder-see fusion microwave detector, combined with the geometric characteristics of the road, traffic flow characteristics and driving behavior characteristics, TTC (Time to Vollision) and TDTC (Time Difference to Collision) are used to identify traffic conflicts and construct a serious conflict density index. Through stepwise regression analysis, a linear prediction model with traffic volume, average speed of road section and standard deviation of speed as driving factors was established. The goodness of fit of the model was  $R^2 = 0.83$ , and the significance level  $p < 0.01$ . Further combined with K-means clustering algorithm and membership function model, the risk level is divided into three levels: safety, critical safety and danger. **[Results]** The results show that the predicted value of serious conflict density is 0.0082 and the risk level is 'safe' due to the small traffic volume, high average speed and allowed lane change in Liyuan Tunnel. Due to the large traffic volume, immutable lanes and high speed dispersion, the serious conflict density of Shuiguo Lake Tunnel is 0.0178, and the risk level is critical safety. **[Conclusion]** The risk classification method proposed in this study can quantify the safety level of underground road entrances, provide scientific basis for control measures such as differentiated speed limits and optimization of sight induction facilities, and have practical significance for improving the traffic safety of urban underground roads.

**Keywords:** traffic risk assessment; urban underground roads; traffic conflict; k-means clustering; risk division