



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403108

引用格式:程冲,官洪,丁乃侃,等.基于分合流区事故风险变化预测的地下互通立交合理间距[J].科学技术与工程,2025,25(9):3914-3920.

Cheng Chong, Guan Hong, Ding Naikan, et al. Determining reasonable spacing of underground interchanges based on crash risk variation prediction for the diverging and merging areas[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3914-3920.

基于分合流区事故风险变化预测的 地下互通立交合理间距

程冲¹, 官洪², 丁乃侃^{3*}, 卢林盛²

(1. 中交第二公路勘察设计院有限公司, 武汉 430056; 2. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 武汉 430074;
3. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430063)

摘要 为了确定城市地下道路的互通立交合理间距设置,以武汉市两湖隧道文荟街地下互通立交为实际案例,开展了不同间距情况下的VISSIM微观交通仿真实验,分析了不同间距、主线及匝道交通量和设计速度条件,对地下互通立交分合流区事故风险的影响,并进一步利用极端梯度提升模型(extreme gradient boosting, XGBoost)、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林(random forest, RF)、多层感知机(multilayer-perceptron, MLP),开展了地下互通立交分合流区事故风险变化预测。研究结果显示:当间距由1.5 km增加至2.5 km时,行程时间、平均延误、平均排队长度、交通冲突率有显著降低,碰撞风险指标[碰撞时间(time-to-collision, TTC)]有显著的增大;当间距在2.5 km以上时,行程时间、平均延误、平均排队长度、交通冲突率降低趋势缓慢,TTC增大趋势较小;间距在2.5 km及以上时,地下互通立交整体交通运行效率显著提高,在不影响服务沿线重点片区功能定位的前提下;通过过采样技术均衡化数据样本后,XGBoost模型对于事故风险变化预测精确率达到88.3%。研究结论可为地下互通立交间距设置提供理论支撑和应用借鉴。

关键词 交通工程; 地下互通立交; 合理间距; 事故风险; VISSIM仿真; 机器学习

中图法分类号 U491.5⁺4;

文献标志码 A

Determining Reasonable Spacing of Underground Interchanges Based on Crash Risk Variation Prediction for the Diverging and Merging Areas

CHENG Chong¹, GUAN Hong², DING Nai-kan^{3*}, LU Lin-sheng²

(1. Second Highway Consultant Co., Ltd., CCCC, Wuhan 430056, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

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

[Abstract] In order to determine the reasonable spacing of underground interchanges, a series of traffic simulation experiments with varying spacing cases was conducted in VISSIM using the Wenhui Street underground interchange of the Two Lakes Tunnel in Wuhan City as a practical case. The effects of interchange spacing, mainline and ramp traffic volumes and design speeds on crash risk at the diverging and merging areas of the underground interchanges were analyzed. Then, the crash risk variation at the diverging and merging areas of the underground interchanges was predicted using the four typical machine learning algorithms, i. e., extreme gradient boosting (XGBoost), support vector machine (SVM), random forest (RF), and multilayer-perceptron (MLP). Results show that when the spacing increases from 1.5 km to 2.5 km, travel time, average delay, average queue length, and traffic conflict rate decrease significantly, and the collision risk index of time-to-collision(TTC) increase significantly. When the spacing is above 2.5 km, the decreases in travel time, average delay, average queue length, and traffic conflict rate start to slow down, and so does the increase in TTC. When the spacing is 2.5 km and above, the overall traffic operation efficiency and safety of the underground interchange increase significantly. The XGBoost model can predict the crash risk variation reaching a precision of 88.3%. This study can be a theoretical support and practical case for the setting of underground interchange spacing.

[Keywords] traffic engineering; underground interchange; reasonable spacing; traffic operation efficiency; VISSIM simulation; machine learning

收稿日期: 2024-04-26 修订日期: 2024-12-16

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3081700)

第一作者: 程冲(1986—),男,汉族,湖北襄阳人,硕士,高级工程师。研究方向:交通规划与管理。E-mail:390963570@qq.com。

*通信作者: 丁乃侃(1989—),男,汉族,湖北孝感人,博士,副研究员。研究方向:交通安全分析与防控。E-mail:nkding@whut.edu.cn。

近年来,随着城市地下道路的不断发 展,城市地下道路的布置也由简单的单点进出布局发展为复杂的多点进出布局^[1],在多点进出的情形下,需要考虑地下互通立交间距对地下道路运行效率的影响^[2]。地下互通立交间距过小,与其服务中长距离到发交通的功能不符,同时将吸引大量的短距离交通,影响主线的运行状况及交通可靠性^[3];而地下互通立交间距过大,则不能满足其服务沿线重点区域的功能,同时会引起出入口附近交通的高度集聚,对周边路网运行造成较大压力^[4],所以地下互通立交合理间距对维持地下道路高效的运行状态至关重要。

对于城市互通立交间距,陈剑^[5]基于交通流理论,分析了最不利驾驶行为条件下的城际道路相邻互通式立交路段车辆换道行为,建立了城际道路独立的相邻互通式立交最小间距模型,确定了城际道路互通式立交最小间距范围在 1.777 ~ 2.077 km。肖忠斌等^[6]分析了互通立交间距影响因素,提出了城市互通立交最小间距计算模型,确定城市快速路互通立交最小间距推荐值为 1.0 ~ 2.0 km。

此外,易刚等^[7]、侯珊珊等^[8]、徐同等^[9]通过采集驾驶自然驾驶实验数据研究了交通流量、行车速度、驾驶风格、驾驶人心理特性等多因素对城市小间距互通立交出入口区段行车风险和稳定的影响。对于地下道路出入口间距,《城市快速路设计规程(CJJ 129—2009)》^[10]中规定匝道出入口最小间距在 0.16 ~ 1.27 km。在《城市地下道路工程设计规程(CJJ 221—2015)》^[11]中规定地下道路出入口最小间距在 0.11 ~ 1.02 km。

综上所述,大多学者主要关注城市地面互通立交最小间距,对于地下互通立交间距的研究几乎仍是空白。目前对于地下互通立交间距的设置多是参考地面互通立交间距,但是地下道路具有不同于地面道路系统行车环境及交通流特征,导致地下互通立交的间距布置与地面互通立交存在一些差异。此外,已有关于互通立交间距设置的研究重在考查交通运行效率的保障,而忽视了不同间距设置方式对互通分合流区交通安全的影响以及由此引发的对整体交通运行稳定性的影响。鉴于此,为探究地下互通立交合理间距,现以武汉两湖隧道工程地下互通立交为实际案例,通过实地调查与微观交通仿真相结合的方式,研究间距设置、交通流量、设计速度等要素耦合作用对互通立交分合流区交通安全的影响,并得出地下互通立交合理间距设置参数。

1 仿真实验及数据获取

以武汉市两湖隧道文荟街地下互通立交为实际

案例,运用 VISSIM 软件进行不同地下互通立交间距条件微观交通仿真。由于两湖隧道仍处于施工阶段,故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,如表 1 所示。

表 1 文荟街地下互通立交几何尺寸
Table 1 Geometry of Wenhui Street underground interchange

名称	取值
主线路段长度/m	900
主线车道宽度/m	3.25
主线车道数	3
换道区长度/m	140
渐变段	45
匝道车道宽度/m	3.25
匝道车道数	2
上行/下行内侧封闭车道长度/m	100
封闭车道距离减速车道距离/m	55

1.1 仿真参数标定

在对文荟街地下互通立交进行仿真之前,需对 VISSIM 仿真软件中的驾驶行为参数进行仿真修正,选取厦门万石山地下立交 C 匝道分流区作为参数修正模型构建对象^[12],为参数修正提供帮助。

针对城市道路仿真,采用“Wiedemann74”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、安全距离的附加部分、安全距离倍数部分^[13]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做细微调整。其中,平均停车间距取值为 2 m,安全距离的附加系数为 1.2,安全距离的倍数系数为 3,最大减速度为 -6 m/s^2 。

1.2 仿真场景设置

依据两湖隧道南湖段的施工方案设定文荟街地下互通立交的几何参数(表 1)和交通流参数。

(1)交通流参数。车型组成全部为小型车,交通流量依据两湖隧道建成年和中远期高峰小时预测流量设定,具体参数如表 2 所示。

(2)仿真路网建模。以武汉两湖隧道工程文荟街地下互通立交的设计方案为基础,构建 VISSIM 微观仿真路网,相关道路和交通条件设置情况如图 1 所示。

1.3 仿真实验方案设计

相关标准规范指出城市互通立交最小间距在 1.8 ~ 3 km;已有工程案例经验显示,国内地下道路

表 2 交通流参数

Table 2 Traffic flow parameters

名称	路段	2023 年	2033 年	2043 年
交通量/(pcu·h ⁻¹)	上层主线	5 050	5 700	6 350
	下层主线	4 800	5 400	6 000
	西北匝道(文荟街-上行主线)	1 140	1 210	1 280
	北西匝道(下行主线-文荟街)	1 140	1 210	1 280
	西南匝道(文荟街-下行主线)	740	800	860
	南西匝道(上行主线-文荟街)	620	680	740
期望速度/(km·h ⁻¹)	主线设计速度		50,60	
	匝道设计速度		30,40	

注:pcu/h 是车流量单位,表示每小时可以通过某路段的最大车辆数,pcu 为标准车当量数(passenger car unit)。

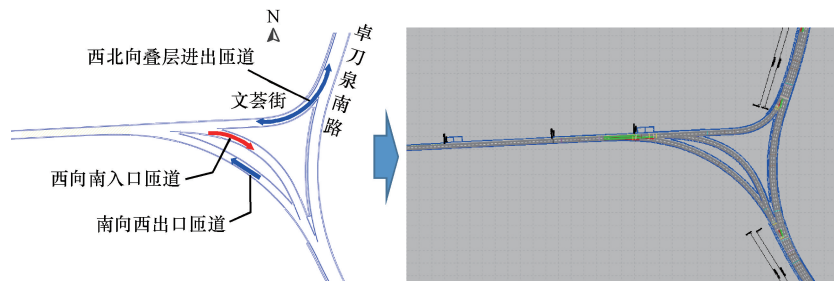


图 1 武汉两湖隧道地下互通立交仿真路网设置

Fig. 1 Road network setting of underground interchange in VISSIM

出入口间距范围在 1.22 ~ 5 km,其中较长距离地下通道出入口平均间距为 2.7 km 左右。因此,根据相关标准规范、工程案例经验以武汉两湖隧道建设方案设计了如表 3 所示的仿真实验方案。其中,武汉两湖隧道的建设方案种,地下互通立交的平均间距设置为 2.5 m。将以 2.5 m 的间距作为基准条件,来分析其他不用间距条件下的安全风险变化情况。

表 3 地下互通立交合理间距仿真实验方案设计

Table 3 Design of simulation experiment scheme for reasonable spacing of underground interchange

试验方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出入口间距/km	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5

1.4 安全风险评价指标

利用碰撞率(crash rate, CR)指标来表征不同条件下的运行风险,其计算公式为

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

式(1)中:CR 为交通冲突率,个/(pcu·m),pcu 为标准车当量数(passenger car unit);C 为单位时间内发生的交通冲突数,个/h;Q 为交通量,pcu/h;L 为分流区及合流区的道路长度,m。其中,冲突数基于碰撞时间(time-to-collision, TTC)指标及其阈值得到^[14-15]。TTC 的计算公式为

$$TTC_i(t) = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_{i-1}}{V_i(t) - V_{i-1}(t)} \quad (2)$$

式(2)中: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。TTC 阈值取 4 s,即当计算得到冲突车辆间的 TTC 小于或等于 4 s 时,便认为冲突车辆间存在交通冲突,反之则不存在冲突。统计轨迹数据中所有 TTC 小于或等于 4 s 的个数即为交通冲突数。

基于式(1),提出碰撞率变化(crash rate variation, CRV)指标,来比较相对于某基准场景,设置其他地下互通立交间距时的事故风险变化情况,其具体计算公式为

$$CRV = \frac{CR_i - CR_0}{CR_0} \quad (3)$$

式(3)中:CR₀ 为某基准场景的碰撞率;CR_i 为某其他间距条件下的碰撞率。

此外,综合考虑不同互通立交间距、交通量和设计速度条件下的分合流区的行程时间、延误、排队长度等因素,来综合分析地下互通立交场景“人车路环”多要素耦合作用对其交通运行安全的影响。

1.5 仿真结果分析

依据 2.2 节和 2.3 节的仿真控制变量,每个方案下仿真运行 5 次,最终一共获取 9 × 3 × 3 × 2 × 2 × 5 (间距 × 主线交通量 × 匝道交通量 × 主线设计速度 × 匝道设计速度 × 5)次仿真,即 1 620 个数据样本。该原始样本数据的描述性统计结果如表 4 所示。

1.5.1 交通运行状态分析

此处交通运行状态主要从匝道的行程时间、延误和分合流区的排队长度几个方面来表征。从匝

道的行程时间来看,如图2(a)所示,不同地下互通立交间距条件下各个匝道的平均行程时间存在一定的差异,且地下互通立交间距设为2.5 km及以上

表4 样本数据描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of data sample

类型	变量编码	含义	均值	标准差	最小值	最大值
道路条件	Spe	互通立交间距/km	3.5	1.37	1.5	5.5
交通条件	Vol_m	主线交通量/(辆·h ⁻¹)	5 550	583	4 800	6 350
	Vol_r	匝道交通量/(辆·h ⁻¹)	975	256	620	1 280
	DSpd_m	主线设计速度/(km·h ⁻¹)	55	7.1	50	60
	DSpd_r	匝道设计速度/(km·h ⁻¹)	35	7.1	30	40
交通运行状态	TT_r	匝道行程时间/s	18.2	7.5	10.9	29.5
	Del_r	匝道延误/s	2.1	2.56	0.4	6.5
	PL_dm	分合流区排队长度/m	33.4	29.7	2.88	89.8

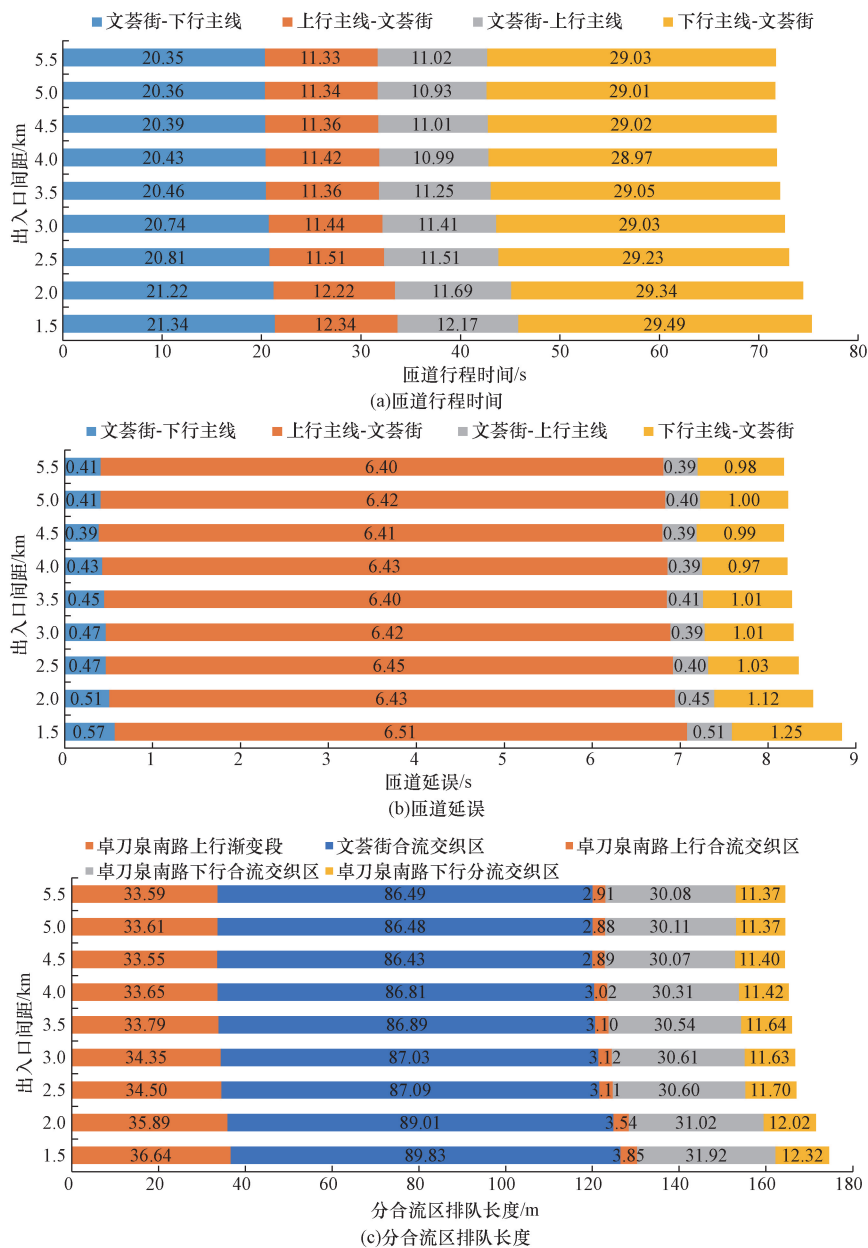


图2 不同间距条件下的匝道行程及分合流区交通运行状态特征

Fig. 2 Traffic operation states on the ramp and diverging and merging area under varying spacing conditions

时,各个匝道的行程时间之和有较为显著的降低。当间距由 1.5 km 增加至 2 km,行程时间之和由 75.34 s 降低至 74.47 s,降低了 1.1%;当间距增加至 2.5 km 时,行程时间之和为 73.06 s,降低了 1.8%;当间距在 2.5 km 以上时,行程时间之和降低趋势较为缓慢。从匝道的行程延误来看,如图 2(b) 所示,不同互通立交间距(出入口)条件下各个匝道的平均延误存在一定的差异,且互通立交间距设为 2.5 km 及以上时,各个匝道的延误之和有较为显著的降低。当间距由 1.5 km 增加至 2 km,平均延误由 8.84 s 降低至 8.59 s,降低了 2.8%;当间距增加至 2.5 km 时,平均延误为 8.34 s,降低了 2.9%;当间距在 2.5 km 以上时,行程时间之和降低趋势较为缓慢。从分合流区排队长度来看如图 2(c) 所示,不同互通立交间距(出入口)条件下各个分合流区的平均排队长度存在一定的差异,且互通立交间距设为 2.5 km 及以上时,各个分合流区的平均排队长度之和有较为显著的降低。当间距由 1.5 km 增加至 2 km,平均排队长度由 174.54 m 降低至 171.48 m,降低了 1.8%;当间距增加至 2.5 km 时,平均排队长度为 167 m,降低了 2.6%;当间距在 2.5 km 以上时,行程时间之和降低趋势较为缓慢。

1.5.2 分合流区交通冲突分析

根据仿真结果可以看出(如图 3 所示),不同互通立交间距(出入口)条件下各分合流区交通冲突情况表现出一定的差异,且互通立交间距设为 2.5 km 及以上时,各分合流区交通冲突率之和有较为显著的降低,碰撞风险指标(TTC)有显著的增大。对于各分合流区交通冲突率之和,当间距由 1.5 km 增加至 2 km,交通冲突率由 0.275% 降低至 0.261%,降低了 5.1%;当间距增加至 2.5 km 时,交通冲突率为 0.235%,降低了 9.9%;当间距在 2.5 km 以上时,交通冲突率降低趋势较为缓慢。

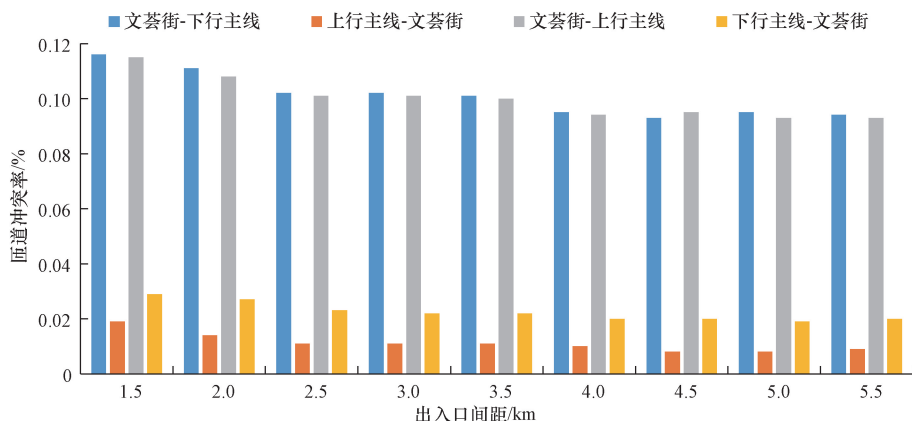


图3 不同出入口间距条件下交通冲突率

Fig. 3 Traffic conflict rate under different distance between entrances and exits

2 事故风险预测建模方法

综合 1.5 节的仿真结果可以看出,当地下互通立交间距由 1.5 km 增加到 2.5 km 时,匝道的行程时间、延误以及冲突风险有显著降低的趋势,而当间距继续增大时,上述交通运行状态指标的优化程度放缓。同时,结合相关国内外地下互通立交的工程实际,选取 2.5 m 互通立交间距设置方案为基准场景来计算碰撞率变化(CRV)指标。由此可得到碰撞率相对基准场景增大的样本共有 1 039 个,标记为“increase”;碰撞率相对减小的样本有 581 个,标记为“decrease”。

针对上述典型二分类问题,利用 4 类常用的机器学习模型来开展地下互通立交事故风险变化(crash rate variation)预测,即极端梯度提升模型(extreme gradient boosting, XGBoost)、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林(random forest, RF)、多层感知机(multilayer-perceptron, MLP)。这 4 种模型对应于集成学习、单分类器和深度学习三大类;其中, XGBoost 属于多分类器串行(boosting)集成模型、RF 属于多分类器并行(bagging)集成模型, SVM 为单分类器模型, MLP 为深度学习(神经网络)模型。为了一致评估不同机器学习模型的事故风险预测效果,选用以下常用的分类模型效果评估指标,即准确率(accuracy, A)、精确率(precision, P)、灵敏度(sensitivity, S_{en})、特异度(specificity, S_{pe}),其具体计算公式如下。

$$A = \frac{T_{in} + T_{de}}{T_{in} + F_{de} + T_{de} + F_{in}} \quad (4)$$

$$P = \frac{T_{in}}{T_{in} + F_{in}} \quad (5)$$

$$S_{en} = \frac{T_{in}}{T_{in} + F_{de}} \quad (6)$$

$$S_{pe} = \frac{T_{de}}{T_{de} + F_{in}} \quad (7)$$

式中: T_{in} 为正确预测碰撞率增大的情形; F_{in} 为错误地将碰撞率增大预测为减小的情形; T_{de} 为正确预测碰撞率减小的情形; F_{de} 为错误地将碰撞率减小预测为增大的情形。

此外,由于较低的精确率会导致过高的误报率(false alarm rate),因此选取精确率(precision, P)作为核心模型效果评估指标。另外,通常认为模型精确率大于或等于 0.8 被视为有效的分类预测。此外,将综合利用受试者工作特征曲线或感受性曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)及其 ROC 曲线下的面积(area under curve, AUC)来展现上述模型的预测能力。

为了进行模型训练和验证,此处将上述样本数据集的 70% 作为训练集,30% 作为测试集。表 3 中的 8 个变量作为模型的输入来预测不同间距设置条件下的碰撞率相对标准场景(2.5 m 间距)是增大或减小。由于仿真得到的数据样本集在碰撞率增大或减小结果上存在显著不均衡性,因此分别使用过采样(over-sampling)和欠采样(under-sampling)技术来均衡样本分布。即使用“人工合成少数类过采样法(synthetic minority over-sampling technique, SMOTE)”来生成少数类的样本,或使用(repeated edited nearest neighbors, RENN)来移除多数类样本中一定数量的非一致性样本。此外,上述模型也直接在原始不均衡数据样本上进行了训练,以对比其与上述两种重采样方法对于模型预测效果的影响。最终用于模型训练的数据集有 3 个,即原始样本数据集、过采样数据集(SMOTE)和欠采样数据集(RENN)。同时,上述所有模型的测试验证均在原始的不均衡测试数据集上开展。此外,为了消除不同变量的量纲、数量级和离散程度对模型预测结果的影响,以上数据集中的变量数值均通过 Z -score 方法进行了数据标准化处理。

3 事故风险预测结果分析

结合上述仿真数据和分析方法,可得到不同间距条件下地下互通立交分合流区碰撞率变化预测结果如表 5 所示。可以看出,基于过采样数据集训练的 XGBoost 模型对于原始非均衡测试集的预测效果最佳,预测精确率(P)达到 0.883,且 AUC 达到 0.877。这可能是由于多个弱分类器串行集成(boosting)不断地减小预测迭代过程中的损失函数有利于对独立的事故风险变化事件的区分和检测。另外,可以发现,经过重采样均衡化数据集以后,4 种

表 5 机器学习模型事故风险变化预测效果对比
Table 5 Comparison of accident risk prediction effects of machine learning model changes in real-time traffic

模型	指标	结果		
		原始数据集	过采样数据集 (SMOTE)	欠采样数据集 (RENN)
XGBoost	A	0.735	0.881	0.831
	P	0.830	0.883	0.832
	S_{en}	0.738	0.879	0.835
	S_{pe}	0.730	0.883	0.828
	AUC	0.821	0.877	0.833
SVM	A	0.719	0.836	0.821
	P	0.810	0.833	0.818
	S_{en}	0.732	0.842	0.831
	S_{pe}	0.694	0.830	0.811
	AUC	0.793	0.814	0.807
RF	A	0.718	0.814	0.827
	P	0.817	0.813	0.828
	S_{en}	0.722	0.819	0.830
	S_{pe}	0.711	0.810	0.824
	AUC	0.798	0.793	0.812
MLP	A	0.728	0.832	0.833
	P	0.824	0.831	0.834
	S_{en}	0.732	0.836	0.836
	S_{pe}	0.719	0.828	0.830
	AUC	0.812	0.823	0.824

模型的预测精度均有不同程度的提升。且 XGBoost 模型在过采样(SMOTE)的协助下,预测性能提升最为显著。此外,依据精确率和 AUC 指标来看,除了 XGBoost 模型以外,MLP 模型的预测能力优于 SVM 模型和 RF 模型,且 MLP 模型基于过采样数据集(精确率:0.831, AUC:0.823)和欠采样数据集(精确率:0.834, AUC:0.824)的预测效果更为稳定。虽然基于深度神经网络的 MLP 模型并没有表现出比 XGBoost 模型更好的预测能力,但其较高的预测精度和预测稳定性仍然可以很好地应用于事故风险识别,以及用于拓展开基于深度学习模型的迁移学习方法以面向更加复杂的场景和更高维的数据来进行事故风险推断。此外,高精度的分类预测结果也表明,以 2.5 km 间距作为基准场景有利于准确识别不同地下互通立交间距设置方案的差异,也进一步证实了将地下互通立交间距选取在 2.5 km 左右是较为合理的方案。

过采样数据集和欠采样数据集的预测效果对比可以发现,在原始样本较少的情况下,过采样技术(SMOTE)相比于欠采样技术(RENN)总体可以更好地支持机器学习模型实现预测能力的提升。这可能是因为在小样本情况下,SMOTE 可以高质量地生成与原始样本特征无偏或无显著差异的数据样本点,并有助于分类器更好地学习样本特征,即提升其识别事故风险变化的能力。

4 结论

为研究城市地下互通立交的合理间距,统计分析了城市地面互通立交及地下道路出入口间距,并基于统计数据,设计了9组不同间距的仿真实验方案,通过VISSIM仿真手段,利用行程时间、延误、排队长度及交通冲突这4个指标,从交通运行效率的角度得到了地下互通立交的间距建议值。研究结果表明,随着地下互通立交间距的增加,行程时间、延误、排队长度及交通冲突率逐渐减小,且当地下互通立交间距为2.5 km时,以上指标显著减小;碰撞风险指标(TTC)随着间距的增加而增大,TTC越大,发生事故的可能性就越小。综合以上分析发现,间距的设置对地下互通立交的交通运行效率影响很大,间距越大,地下互通立交的交通运行效率越高,间距在2.5 km及以上时,地下互通立交整体运行效率显著提高,且事故发生可能性越小。此外,进一步以2.5 km间距作为基准场景可以准确识别不同地下互通立交间距设置方案下的事故风险差异,也进一步证实了将地下互通立交间距选取在2.5 km左右的合理性。研究可为地下互通立交间距设置理论支撑,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。未来将深入挖掘影响地下互通立交间距的影响因素,进一步分析各种情况下的合理间距。

参 考 文 献

- [1] 许声涯, 陈首超, 徐湃, 等. 新牌坊立交改造方案探讨[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1): 342-348.
Xu Shengya, Chen Shouchao, Xu Pai, et al. Discussion on the reconstruction scheme of the new archway interchange[J]. Modern Tunnel Technology, 2021, 58(S1): 342-348.
- [2] 袁胜强. 地下互通立交总体设计研究[J]. 上海公路, 2018(1): 1-5, 100.
Yuan Shengqiang. Study on the overall design of underground interchange[J]. Shanghai Highway, 2018(1): 1-5, 100.
- [3] 马璐, 蒋树屏, 林志, 等. 大型地下互通式立交型式选择方法及实例[J]. 公路交通技术, 2011(1): 26-28, 36.
Ma Lu, Jiang Shuping, Lin Zhi, et al. Selection method and example of large-scale underground interchange type[J]. Highway Traffic Technology, 2011(1): 26-28, 36.
- [4] 袁胜强, 景啸, 史程祥. 城市地下互通立交通行能力计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 236-242.
Yuan Shengqiang, Jing Xiao, Shi Chengxiang. Capacity calculation of urban underground interchange[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2021, 49(2): 236-242.
- [5] 陈剑. 城际道路互通式立交最小间距研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
Chen Jian. Study on the minimum spacing of interchange between cities[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [6] 肖忠斌, 王炜, 李文权, 等. 城市快速路互通立交最小间距模型[J]. 公路交通科技, 2007(11): 105-108, 129.
Xiao Zhongbin, Wang Wei, Li Wenquan, et al. Minimum spacing model of urban expressway interchange[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2007(11): 105-108, 129.
- [7] 易刚, 杨迪, 矫成武, 等. 高密度立交出入口区段车流量对驾驶人精神负荷影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1224-1233.
Yi Gang, Yang Di, Jiao Chengwu, et al. Influence of traffic flow in the entrance and exit section of high density interchange on the driver's mental load[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 1224-1233.
- [8] 侯珊珊, 张杰, 张雪榆, 等. 考虑驾驶风格的高密度立交群出入口车辆驾驶风险研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4317-4328.
Hou Shanshan, Zhang Jie, Zhang Xueyu, et al. Investigation on the driving risk of high-density over-exchange group vehicles considering driving style[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4317-4328.
- [9] 徐同, 张雪榆, 张杰, 等. 高密度立交出入口车辆纵向运行特性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 816-826.
Xu Tong, Zhang Xueyu, Zhang Jie, et al. Vehicle longitudinal operating characteristics at the entrance and exit of high-density interchange[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 816-826.
- [10] 上海市工程设计研究总院. 城市道路设计规程: DGJ 08-2106—2012[S]. 上海: 中国建筑工业出版社, 2012.
Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute. Urban road design code: DGJ 08-2106—2012[S]. Shanghai: China Construction Industry Press, 2012.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市地下道路工程设计规范: CJJ 221—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of urban underground road engineering: CJJ 221—2015[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.
- [12] 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. Capacity model and simulation of underground interchange facilities[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [13] 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 Chunan. Sensitivity analysis method of model parameters for microscopic traffic simulation experiment[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(11): 1728-1733.
- [14] 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(2): 15-33.
Zhu Shunying, Jiang Ruoxi, Wang Hong, et al. Summary of research on motor vehicle traffic conflict technology[J]. Journal of China Highway, 2020, 33(2): 15-33.
- [15] 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): 4020003.