

DOI:10.11918/202310048

电动自行车穿行对公交乘客进出站行为的安全影响分析

王宝杰¹, 申及平¹, 梁国华¹, 薛祥北²

(1. 长安大学 运输工程学院, 西安 710064; 2. 济宁市交通运输综合执法支队, 山东 济宁 272000)

摘要: 为深刻认知公交乘客在横穿非机动车道进出公交站台过程中与纵向穿行的电动自行车形成的交叉型碰撞冲突的特征并探究冲突严重程度的影响因素, 提出电动自行车穿行对公交乘客进出站行为的安全影响分析方法。首先, 依据航拍获取的电动自行车和公交乘客运行轨迹, 将公交乘客-电动自行车冲突划分为公交乘客避险、电动自行车避险、双方均避险等3类; 然后在交叉型冲突特征分析的基础上, 提出相对碰撞时间(TTR)指标, 联合后侵入时间(PET)、安全减速度(DST)构建基于改进K-means聚类的冲突严重程度评价模型; 最后分别从公交乘客和电动自行车视角提取5个冲突严重程度影响因素, 建立基于BP神经网络的冲突严重等级预测模型, 并对模型有效性进行检验。结果表明: 速度差和相对速度对冲突严重等级的影响最大; 电动自行车主动避险对冲突双方的运动状态影响最小, 相对碰撞能量最低; 所提冲突严重等级预测模型的计算结果与实际冲突等级具有较高符合度, 能够在一定程度预测冲突严重程度。

关键词: 交通冲突; 公交乘客; 电动自行车; 改进K-means聚类; BP神经网络

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)11-0055-08

Analysis of the safety impact of E-bike passing through on the behavior of bus passengers entering and exiting bus stops

WANG Baojie¹, SHEN Jiping¹, LIANG Guohua¹, XUE Xiangbei²

(1. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Jining Traffic and Transportation Comprehensive Law Enforcement Detachment, Jining 272000, Shandong, China)

Abstract: In order to deeply understand the characteristics of the cross-type collision conflict between bus passengers crossing the non-motorised road to enter and exit bus stops and the longitudinal crossing of E-bikes, and to explore the factors influencing the severity of the conflict, a method for analyzing the safety impacts of E-bike crossings on the entering and exiting behaviors of bus passengers was proposed. Based on the trajectories of E-bikes and bus passengers obtained from aerial photography, the bus passenger-E-bike conflict was divided into three categories: bus passenger avoidance, E-bike avoidance, and both sides avoidance. Based on the characterization of cross-type conflicts, the relative collision time (TTR) indicator was proposed, and the conflict severity evaluation model based on improved K-means clustering was constructed by combining the post-trespassing time (PET) and safety deceleration speed (DST). Finally, five conflict severity influencing factors were extracted from the perspectives of bus passengers and E-bikes respectively, and a conflict severity level prediction model based on BP neural network was established and tested for model validity. The results show that speed difference and relative speed have the greatest influence on the conflict severity level. E-bike active avoidance has the least influence on the motion state of both parties in the conflict, and the relative collision energy is the lowest. The calculation results of the proposed conflict severity level prediction model have a high degree of conformity with the actual conflict level, and can predict the conflict severity level to a certain extent.

Keywords: traffic conflicts; bus passengers; E-bikes; improved K-means clustering; BP neural network

当城市道路采用三幅路的横断面结构时, 公交站台常设置于机非绿化带上, 公交乘客进出站需横穿非机动车道。大量电动自行车运行于非机动车道, 且规模正持续增长^[1]。电动自行车体积小、行

驶灵活、车辆安全性能和技术指标参差不齐, 且部分骑行者交通安全意识薄弱、秩序遵守自觉性不足, 致使非机动车道交通安全问题极为严峻^[2]。据调查, 电动自行车的平均行驶速度为 13.8 ~ 25 km/h, 最

收稿日期: 2023-07-04; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2024-10-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241017.1340.006>

基金项目: 国家自然科学基金(52172338); 陕西省自然科学基金(2022JQ527); 陕西省交通科技项目(23-23R); 陕西省科技计划项目(2024GX-YBXM-131)

作者简介: 王宝杰(1987—), 男, 副教授, 博士生导师; 梁国华(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 梁国华, lgh@chd.edu.cn

高速度可达 33 km/h^[1],多数城市的电动自行车亡人事故约占全市交通亡人事故的 30%。

电动自行车急加速、临时变道、逆行等现象普遍,对横穿非机动车道进出公交站的公交乘客造成重大安全隐患。公交乘客对电动自行车运行轨迹、速度变化、礼让意愿的误察、误判,以及骑行者的失误驾驶,是公交站台区域涉及电动自行车与行人交通安全事故的重要致因。

为深刻认知公交乘客、电动自行车的交通特性、冲突机理及安全影响因素,学者们已进行了大量研究。众多学者在对行人过街行为的研究中发现,天气、年龄、性别等因素对行人过街意识和行为影响较大^[3];此外还通过构建行人交通行为的微观仿真模型,对行人的群体行为进行仿真模拟^[4]。在针对电动自行车交通特性的研究中,有学者基于骑行者的纵横向距离和速度差值研究自行车的跟驰行为以及超车行为特征,并构建了电动自行车道服务水平评价体系^[5-6];另有学者发现电动车在低流量时段对行人的过街造成更大威胁^[7-9]。

在交通冲突研究领域,众多学者进行了详尽的研究^[10-14]。在行人与非机动车冲突方面,学者们通过构建冲突概率分布模型^[15]、基于个体的冲突风险自动识别模型^[16]、冲突演化博弈模型^[17]等方法对冲突机理、安全水平和影响因素进行了详细分析,梳理了行人与自行车共存时的冲突风险^[18]。在公交站台区域,公交乘客与电动自行车的冲突具有空间特性,学者们针对此区域冲突展开研究,有学者建立了广义事件计数模型对公交站台区域自行车-乘客冲突进行预测和分析^[19];另有学者探究了公交站台区域行人与电动自行车发生冲突时双方的通行策略选择机制^[17];此外,还分析了影响公交站台区域冲

突数的关键参数,探究了公交站台旁的电动自行车道通行能力的影响因素^[20];并且通过对比分析常用的行人-车辆冲突参数得出冲突时间差和车辆速度对行人-车辆冲突的安全性影响最大的结论^[21]。

综上所述,在揭示行人与电动自行车事故发生机理和风险评估方面虽已取得诸多成果,但较少考虑不同避险主体对事故风险的影响差异,由此构建的冲突评价方法难以精准揭示行人-电动自行车事故风险本质。本研究旨在探索电动自行车穿行对公交乘客进出站行为安全的影响机理,为弥补已有研究不足,依据不同主动避险的主体将公交乘客与电动自行车冲突划分为 3 类,提出适用于交叉型冲突的冲突严重性评价指标,运用统计学方法和聚类模型分析三类交通冲突的特征和安全水平,采用 BP 神经网络建立冲突严重等级预测模型,最后结合实测数据检验模型精度并揭示电动自行车穿行对公交乘客进出站行为的安全影响机理。

1 数据获取与预处理

选取西安市北关站、南稍门站、北大街站、省体育场站 4 个公交站作为研究对象。站点所在的城市道路横断面均为三幅路,公交站台设置于机非绿化带上,进出站的公交客流量、非机动车道穿行的电动自行车流量均较大。

采取 Phantom 4 Pro 无人机对研究区域进行垂直俯拍,拍摄时间为 2023 年 6 月 26 日—30 日期间每天 7:30—8:30 和 17:30—18:30,累计拍摄时长为 10 h,站点的基础信息见表 1。应用 DataFromSky 视频分析软件处理航拍视频,提取公交乘客和电动自行车的位置坐标、瞬时速度、加速度等数据,时间粒度为 0.1 s,轨迹误差为 0.1 m。

表 1 数据采集区域的交通条件

Tab. 1 Traffic conditions in the data collection area

公交站点名称	机非绿化带 宽度/m	公交站台 长度/m	非机动车道 宽度/m	公交线路条数	公交平均到站 间隔/min	公交乘客流 量/(人·h ⁻¹)	电动自行车流 量/(veh·h ⁻¹)
北大街	2.5	13	1.0	25	7.3	7.3	1 320
北关	2.0	50	3.0	24	9.0	9.0	1 140
省体育馆	2.5	30	4.5	15	11.6	11.6	1 080
南稍门	2.0	15	3.0	26	11.5	11.5	720

2 安全分析模型

2.1 冲突建模与类型划分

2.1.1 二维直角坐标系建立

按照道路线形和公交站台位置,以人行道边缘为 X 轴,电动自行车行驶方向为 X 轴的正向;由公

交站台上游(左侧)边缘向人行道做垂线,以该垂线为 Y 轴,垂足为坐标轴原点,公交站台所在方向为 Y 轴的正向,如图 1(a)所示。

图 1 中 (x, y) 是冲突点坐标, P_{pi} 、 V_{pi} 分别是公交乘客的位置和速度向量, L 、 W 分别是电动自行车的长、宽, S_{pi} 、 V_{pi} 分别是公交乘客和电动自行车到冲突

点的距离, P_{ei} , V_{ei} 分别是电动自行车的位置和速度向量, d_i 是公交乘客与电动自行车的距离。

2.1.2 公交乘客 - 电动自行车冲突类型划分

依据主动避险的行为主体不同, 将公交乘客 - 电动自行车冲突划分为 3 类, 如图 1 所示, 具体释义及判定依据如下:

1) 公交乘客避险类型。公交乘客采取减速、驻足等避险行为, 让行电动自行车率先通过冲突点, 当满足式(1)条件时即为公交乘客避险类型。

$$\frac{S_{ei} + L}{v_{ei}} < \frac{S_{pi}}{v_{pi}} \text{ 或 } \frac{d^2 s_{pi}}{dt^2} < 0, \frac{d^2 s_{ei}}{dt^2} > 0 \quad (1)$$

2) 电动自行车避险类型。电动自行车采取制动、减速等避险行为, 让行公交乘客率先通过冲突点, 当满足下式条件时即为电动自行车避险类型。

$$\frac{S_{ei}}{v_{ei}} < \frac{S_{pi} + w}{v_{pi}} \text{ 或 } \frac{d^2 s_{pi}}{dt^2} > 0, \frac{d^2 s_{ei}}{dt^2} < 0 \quad (2)$$

3) 双方均避险类型。公交乘客、电动自行车均采取避险行为, 当满足下式条件时即为双方避险类型。

$$\frac{d^2 s_{pi}}{dt^2} < 0, \frac{d^2 s_{ei}}{dt^2} < 0 \quad (3)$$

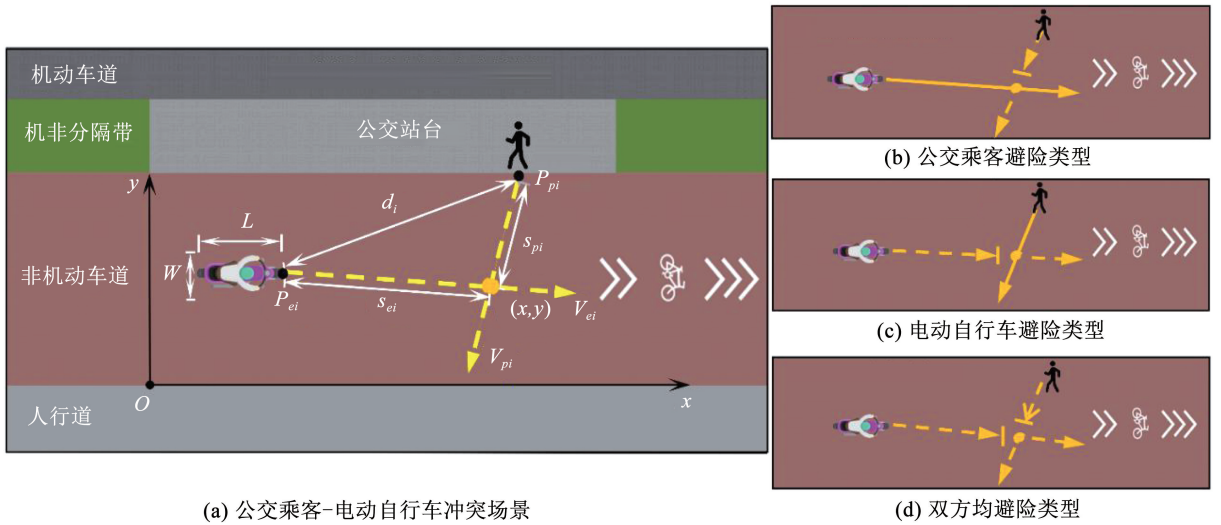


图 1 3 种公交乘客 - 电动自行车冲突类型的释义

Fig. 1 Interpretation of the 3 types of bus passenger-E-bike conflicts

通过初始数据的筛选和处理, 共获取 738 组交通冲突有效数据, 各冲突类型的数据量及占比见表 2。

表 2 公交乘客 - 电动自行车冲突的有效数据量

Tab. 2 Effective data volume for bus passenger-E-bike conflicts

类型	数据量/组	占比/%
公交乘客避险	144	20
电动自行车避险	196	27
双方均避险	398	54

2.2 冲突严重性评价模型

2.2.1 冲突严重性评价指标

1) 相对碰撞时间 (TTR)。考虑公交乘客与电动自行车的体积小、运行轨迹多样和速度变化灵活, 依据交叉型冲突的运动学特征, 提出相对碰撞时间 (time to relative collision) 的概念。定义 TTR 为冲突双方直线距离与其相对速度的商的最小值, TTR 越小, 冲突越严重, 具体为

$$TTR = \min \{ TTR_i \} \quad (4)$$

$$TTR_i = \frac{d_i}{v_{ri}} = \frac{\sqrt{(x_{ei} - x_{pi})^2 + (y_{ei} - y_{pi})^2}}{(v_{exi} \cos \alpha_i + v_{eyi} \sin \alpha_i) + (v_{pxi} \cos \alpha_i + v_{pyi} \sin \alpha_i)} \quad (5)$$

$$\alpha_i = \arctan \frac{y_{ei} - y_{pi}}{x_{ei} - x_{pi}} \quad (6)$$

式中: (x_{pi}, y_{pi}) 、 (x_{ei}, y_{ei}) 分别为公交乘客与电动自行车在第 i 时刻的位置, (v_{pxi}, v_{pyi}) 、 (v_{exi}, v_{eyi}) 分别为公交乘客与电动自行车在第 i 时刻速度的向量, d_i 为第 i 时刻公交乘客与电动自行车的直线距离, α_i 为公交乘客与电动自行车连线与 x 轴正向夹角。

2) 后侵入时间 (PET) 和安全减速度 (DST)。后侵入时间 (PET)、安全减速度 (DST) 的概念及计算方法借鉴已有研究成果^[14], 具体为

$$PET = |T_p - T_e| \quad (7)$$

$$DST_i = \begin{cases} \frac{2v_{pi} [(s_{pi} + W)v_{ei} - s_{ei}v_{pi}]}{(s_{pi} + W)^2}, & \text{公交乘客先通过} \\ \frac{2v_{pi}(s_{pi}v_{ei} - s_{ei}v_{pi})}{s_{pi}^2}, & \text{电动自行车先通过} \end{cases} \quad (8)$$

$$DST = \max \{ |DST_i| \} \quad (9)$$

式中： T_p 、 T_e 分别为公交乘客、电动自行车通过冲突点的时刻， v_{pi} 、 v_{ei} 、 s_{pi} 、 s_{ei} 分别为公交乘客、电动自行车在第 i 时刻的速度和到冲突点的距离， W 为电动自行车的宽度，取 0.5 m。

2.2.2 基于改进 K-means 聚类的冲突等级判别模型

为量化分析冲突严重程度，应用 TTR、PET、DST 评价指标和改进 K-means 聚类方法建立冲突等级判别模型。

设 Q 为评价指标的样本，即 $Q = Q(TTR, PET, DST) = Q_i(x_i, y_i, z_i)$ ， $(i = 1, 2, \dots, 738)$ 。将 $Q_i(x_i, y_i, z_i)$ 聚类成 3 类，步骤如下。

步骤 1 随机选择一组样本为第一个聚类中心 $c_1(x_1, y_1, z_1)$ ，计算 $Q_i(x_i, y_i, z_i)$ 与 $c_1(x_1, y_1, z_1)$ 的距离 $D(Q_i, c_1)$ ，即

$$D(Q_i, c_1) = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + (z_i - z_1)^2} = \sqrt{(TTR_i - TTR_1)^2 + (PET_i - PET_1)^2 + (DST_i - DST_1)^2} \quad (10)$$

步骤 2 计算每组冲突样本被选为聚类中心的概率 P_i ，并基于 P 最大原则，选择下一个聚类中心，重复上述步骤直至得出一组初始聚类中心 $c_j(x_j, y_j, z_j)$ ，即

$$P_i = \frac{D_{i \neq 1}(Q_i, c_1)^2}{\sum_{i=1}^n D(Q_i, c_1)^2} \quad (11)$$

步骤 3 求解 $Q_i(x_i, y_i, z_i)$ 与 $c_j(x_j, y_j, z_j)$ 的欧氏距离 $D(Q_i, c_j)$ ， $j = 1, 2, 3$ ，即

$$C_j = \sum_{Q_i \in k_j} Q_i(x_i, y_i, z_i) / n \quad (12)$$

步骤 4 计算目标函数 ε ，若 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$ (ε_0 为聚类准则临界值)，则输出分类结果，否则返回步骤 3，直至实现 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$ 。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \|Q_i - c_j\|^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (Q_i - c_j)^T (Q_i - c_j) \quad (13)$$

2.3 基于 BP 神经网络的冲突严重程度预测模型

考虑冲突严重程度影响因素多样且映射函数未知，而 BP 神经网络具有通过自学习能力构建变量间非线性映射关系的优点，因而选择 BP 神经网络预测模型进行回归预测。

通过对公交乘客和电动自行车的行为状态分析，构建一个 BP 神经网络预测模型，其中输入层包含 5 个神经元，用 I_i 表示，分别是公交乘客速度、电动自行车速度、速度差、相对速度及公交乘客过街方向；输出层包含 3 个神经元，用 J_i 表示，分别是轻微冲突、一般冲突、严重冲突；参考如下的经验公式，设

置拥有 4 个神经元的单层隐藏层 L 。

$$\frac{I+J}{2} \leq L \leq \sqrt{I+J} + c \quad (14)$$

构建的 BP 神经网络预测模型共包含 32 个权重值和 7 个阈值，神经元结构如图 2 所示。

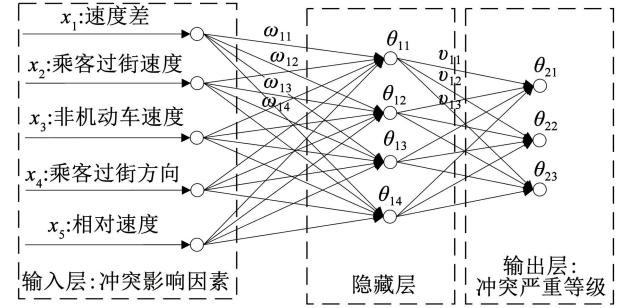


图 2 BP 神经网络预测模型的结构

Fig. 2 Structure of the BP neural network prediction model

选取 Sigmoid 函数作为激活函数，利用 SoftMax 分类函数体现分类结果，即

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (15)$$

$$\text{SoftMax}(F(x)) = e^{F(x)} / \sum_{j=1}^n e^{F(x)} \quad (16)$$

其中，训练集与测试集的比例取 8:2，网络学习率取 0.1，最大学习次数设为 10^3 次，预测结果与实际结果的可接受误差取 0.000 1。模型性能由 ROC 曲线和预测拟概率体现，其中 ROC 曲线右下区域面积大于 0.8、预测准确率大于 80% 则说明模型性能良好。

3 安全评价与影响因素分析

3.1 运动学特征统计

3.1.1 运动特性

1) 相对速度。预测实验共得到 738 组数据，其中公交乘客与电动自行车的相对速度基本呈正态分布，数值为 3.67 ~ 18.61 km/h 的样本占 92.41%，大于 18.61 km/h 的样本占 2.71%，均值为 11.30 km/h，最大值为 26.86 km/h，最小值为 0.61 km/h，方差值为 1.610 2。相对速度分布情况如图 3 所示。

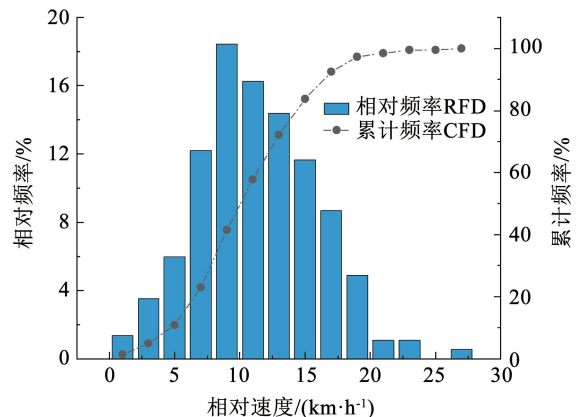


图 3 公交乘客与电动自行车的相对速度分布

Fig. 3 Relative speed distribution of bus passengers versus E-bikes

2) 相对速度与冲突类型的关联性。如图 4 所示, 各类型中, 公交乘客避险和双方均避险的相对速度值大于 14 km/h 的样本分别占 30% 和 27.14%, 而在电动自行车避险冲突中仅有 9.38%。

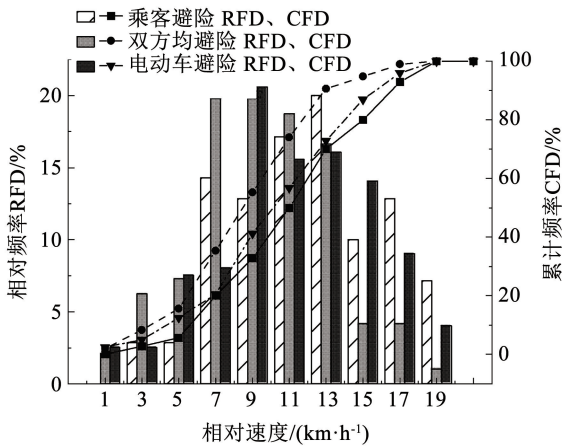


图 4 3 种冲突类型下的相对速度分布情况

Fig. 4 Relative velocity distribution under three conflict types

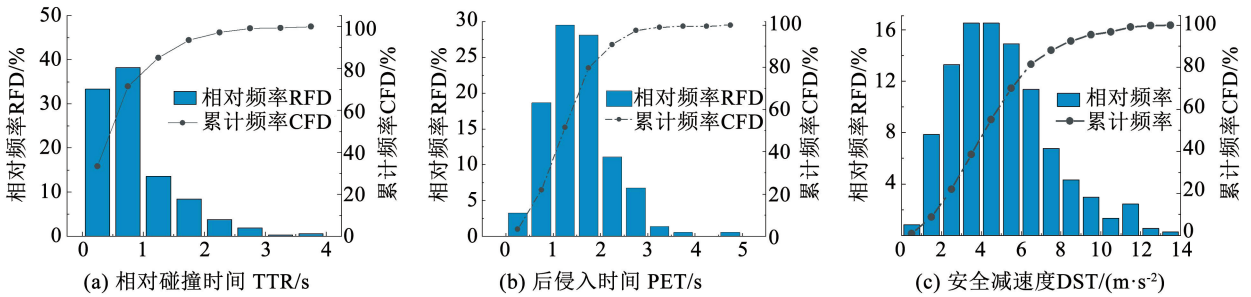


图 5 3 项冲突指标的整体分布

Fig. 5 Overall distribution of the three conflict indicators

2) 冲突指标分布与冲突类型的关联性。由表 4 可以看出, 公交乘客避险型的 PET、TTR 均值最小, DST 均值最大; 电动自行车避险型的 PET、TTR 均值最大, DST 均值最小。

TTR 分布情况如图 6(a) 所示, 电动自行车避险型的 TTR 分布偏右, 其中超过 80% 的公交乘客避险

3.1.2 冲突特性

1) 冲突指标分布。从 738 组数据的统计分析结果(表 3) 可以看出, TTR 和 PET 两项冲突指标数值较为集中, 离散程度较小, 而 DST 的数值分布较广泛, 离散程度更高。3 项冲突指标的整体分布如图 5 所示, 3 项指标均为非负值, 呈偏左型的偏态分布。TTR 和 PET 的频率直方图为明显偏左型, 数值分布集中; 85.09% 的 TTR 样本值分布在 0 ~ 1.45 s 之间, 87.53% 的 PET 样本值分布在 0.5 ~ 2.49 s 之间。

表 3 乘客与电动自行车冲突指标统计表

Tab. 3 Passenger and E-bike conflict indicator statistical table

冲突指标	均值	最大值	最小值	标准差
TTR/s	0.85	3.64	0.13	0.617 2
PET/s	1.51	4.84	0.10	0.673 3
DST/(m·s ⁻²)	5.04	13.09	0.66	2.436 1

和双方均避险冲突的 TTR 分布在 0 ~ 1 s 之间, 86.73% 的电动自行车避险冲突的 TTR 分布在 0 ~ 2 之间; 公交乘客避险和双方均避险中 TTR 大于 1 s 的样本占 11.11% 和 20.10%, 而电动自行车避险冲突中有 58.16%。

表 4 3 种冲突类型的冲突指标统计表

Tab. 4 Conflict indicators of three types of conflicts

冲突类型	冲突指标	最大值	最小值	均值	标准差
公交乘客避险	PET/s	2.60	0.40	1.36	0.551 5
	DST/(m·s ⁻²)	13.59	1.62	5.25	2.819 5
	TTR/s	2.15	0.22	0.61	0.352 4
电动自行车避险	PET/s	4.60	0.40	1.69	0.791 2
	DST/(m·s ⁻²)	8.36	1.70	4.78	1.564 5
	TTR/s	3.64	0.25	1.23	0.776 9
双方均避险	PET/s	3.39	0.10	1.52	0.682 5
	DST/(m·s ⁻²)	11.53	0.66	4.88	2.650 7
	TTR/s	3.80	0.13	0.79	0.610 0

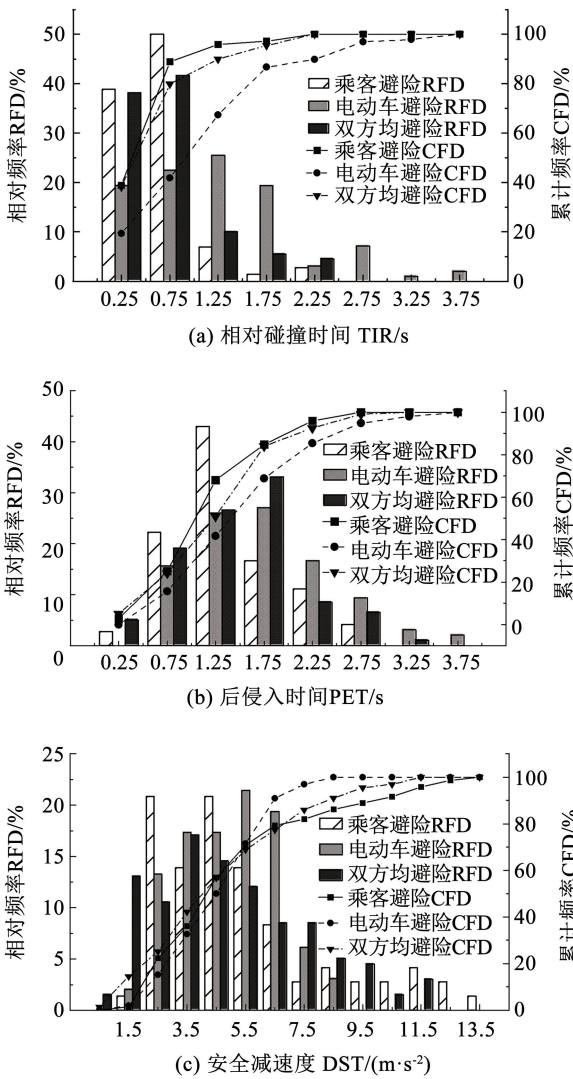


图 6 3 项冲突指标在不同冲突类型中的分布情况

Fig.6 Distribution of the three conflict indicators across conflict types

PET 分布情况如图 6(b) 所示, 电动自行车避险型的 PET 分布偏右, 其中 81.95% 的公交乘客避险冲突和 78.89% 的双方均避险冲突的 PET 分布在 0.5 ~ 2.0 s 之间, 85.42% 的电动自行车避险冲突的 PET 分布在 0.5 ~ 2.5 s 之间; 公交乘客避险和双方均避险中 PET 大于 2 s 的样本占 15.28% 和 16.08%, 而电动自行车避险冲突中有 32.65%。

DST 分布情况如图 6(c) 所示, 3 类冲突的 DST 分布在 6.5 m/s² 处出现明显差异, 公交乘客避险和双方均避险的 DST 大于 6.5 m/s² 的样本占 23.61% 和 27.64%, 而仅有 12.24% 的电动自行车避险冲突的 DST 大于 6.5 m/s²。

3.2 冲突严重程度分析

3.2.1 严重程度等级划分

由方差分析结果得, 3 项冲突指标的显著性水平平均小于 0.001, 聚类划分的类别间存在显著性差

异, 分类有效。不同等级冲突的聚类中心和结果如表 5 所示, 通过对比发现冲突严重等级与 TTR、PET 的大小成反相关, 与 DST 的大小成正相关。

表 5 不同等级冲突的聚类中心

Tab.5 Cluster centers of different levels of conflicts

聚类等级	评价指标			样本量	占比/%
	TTR/s	PET/s	DST/(m·s ⁻²)		
轻微冲突	1.177 3	2.029 0	2.788 1	292	39.57
一般冲突	0.761 4	1.354 9	5.444 8	316	42.82
严重冲突	0.482 7	0.839 4	9.115 7	130	17.62

3.2.2 严重程度差异性分析

3 种冲突类型下的冲突严重等级分布如表 6、图 7 所示, 当电动自行车主动避险时, 轻微冲突占比最多, 严重冲突占比较少; 当公交乘客主动避险时, 轻微冲突占比最少, 严重冲突占比较多。

表 6 不同类型冲突的严重等级分布

Tab.6 Distribution of severity levels of different types of conflicts

冲突等级	不同冲突类型的冲突组数		
	乘客采取避险	电动自行车避险	双方均避险
轻微冲突	32	84	140
一般冲突	82	100	190
严重冲突	30	12	84

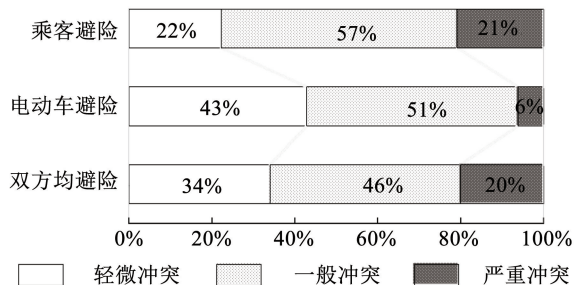


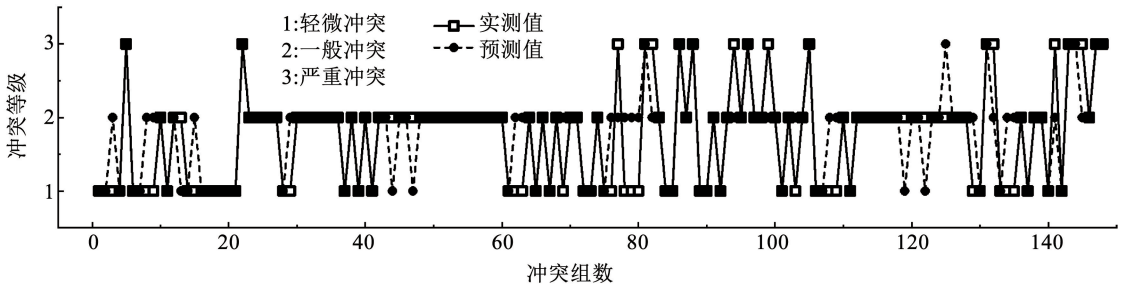
图 7 不同冲突类型的冲突严重等级比例分布

Fig.7 Proportional distribution of conflict severity ratings by conflict type

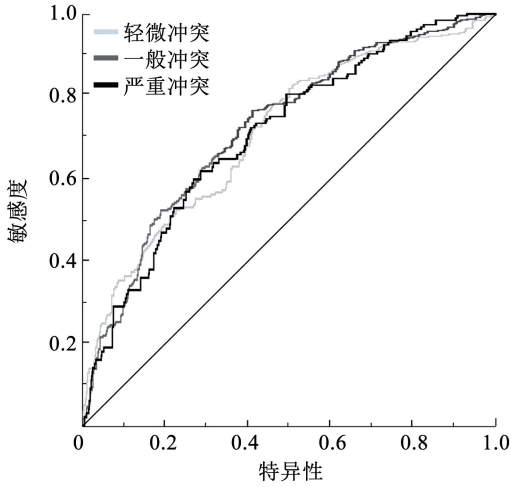
3.3 严重程度影响因素分析

由图 8(a) 可知, 冲突严重程度预测准确率达 81%; 由图 8(b) 可知, ROC 曲线右下区域面积大于 0.8, 预测结果良好; 由图 8(c) 可知, 预测等级与实测等级一致的预测拟概率最高, 一般冲突的预测效果最好, 准确率为 82.43%。

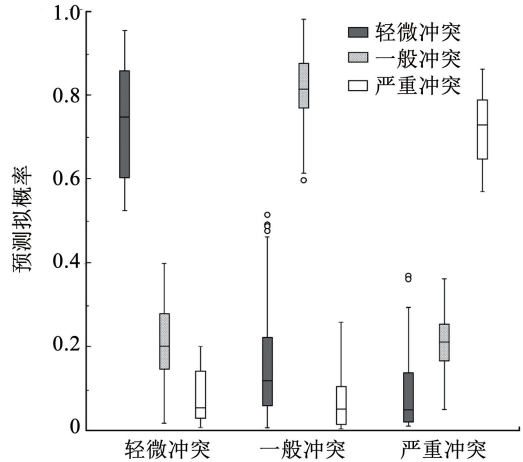
BP 神经网络模型的自变量重要性结果如图 9 所示。速度差和相对速度对冲突严重程度的影响最显著, 二者与冲突严重程度等级成正相关。当速度差和相对速度增大时, 乘客与电动自行车冲突严重程度增加, 潜在的碰撞能量和冲击力越大。



(a)BP神经网络预测模型预测值与实测值的对比



(b) 预测模型的ROC 曲线



(c) 预测模型的概率

图 8 预测模型结果评价

Fig. 8 Evaluation of predictive model results

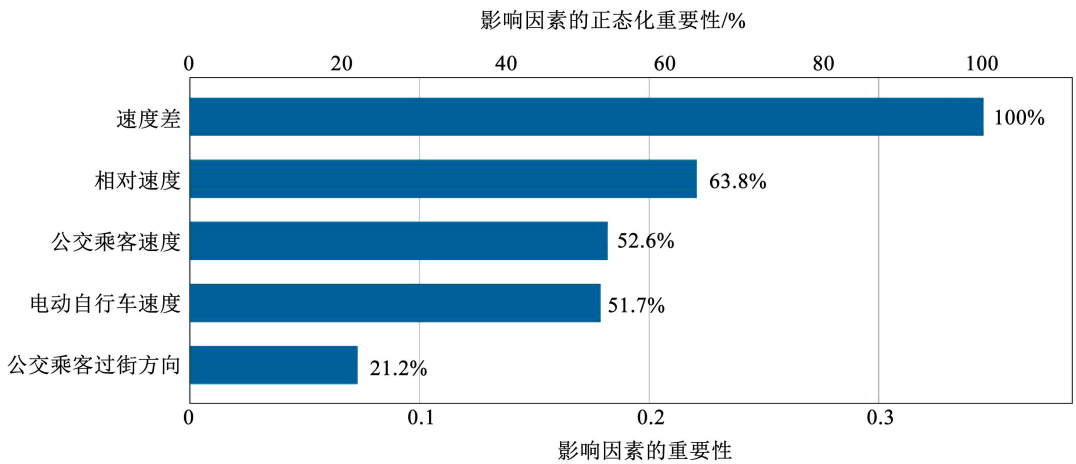


图 9 影响因素的重要性

Fig. 9 Importance of influencing factors

4 结 论

本文探讨了公交乘客与电动自行车的交通冲突特征及其严重程度。根据主动避险的行为主体不同,将冲突分为公交乘客避险、电动自行车避险、双方均避险 3 类,融合相对碰撞时间(TTR)、后侵入时间(PET)、安全减速度(DST)构建基于改进 K-means 聚类的冲突严重性评价模型,应用 BP 神经网络建立冲突严重等级预测模型,并进行实证分析。主要

结论如下:

1) 相对速度大于 15.62 km/h 时,公交乘客倾向于主动避险;而当相对速度小于 15.62 km/h 时,电动自行车主动避险的概率更高。

2) 电动自行车主动避险对冲突双方的运动状态影响最小,潜在碰撞能量最低。

3) 公交乘客避险、电动自行车避险、双方均避险 3 种冲突类型的严重冲突占比分别为 21%、6%、20%。

4) 公交乘客与电动自行车的速度差和相对速

度对冲突严重程度影响显著,速度差和相对速度越大,冲突越严重。

因此,通过交通管理设施精细化建设和交通行为规范宣传教育,加强电动自行车骑行速度管理和礼让意识树立,对提升公交站台区域的交通安全水平具有重要意义。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022
Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022
- [2] 李英帅, 张旭, 王卫杰, 等. 基于随机森林的电动自行车骑行者事故伤害程度影响因素分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 196
LI Yingshuai, ZHANG Xu, WANG Weijie, et al. Factors affecting electric bicycle rider injury in accident based on random forest mode [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 196. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.01.030
- [3] HOLLAND C, HILL R. The effect of age, gender and driver status on pedestrians' intentions to cross the road in risky situations[J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(2): 224. DOI: 10.1016/j.jsr.2024.08.009
- [4] 王爱丽, 董宝田, 王泽胜. 基于社会力的行人交通微观仿真模型研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 662
WANG Aili, DONG Baotian, WANG Zesheng. Modeling and simulation of microscopic pedestrian based on social force [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(3): 662. DOI: 10.1016/j.ins.2016.04.018
- [5] MOHAMMED H, BIGAZZI A Y, SAYED T. Characterization of bicycle following and overtaking maneuvers on cycling paths [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 98(1): 139. DOI: 10.1016/j.trc.2018.11.012
- [6] KANG K, LEE K. Development of a bicycle level of service model from the user's perspective [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2012, 16(6): 1032. DOI: 10.1007/s12205-012-1146-z
- [7] 文夏梅, 傅立平, 钟鸣, 等. 城市混合交通共享街道驾驶行为及行人过街安全研究[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(5): 12
WEN Xiamei, FU Liping, ZHONG Ming, et al. Analysis of driving behaviors and pedestrian crossing safety on urban roadway with mixed traffic flow [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(5): 12. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.05.002
- [8] 平萍, 常玉林, 张鹏. 公交站台进出乘客对邻接非机动车道通行能力的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(9): 103
PING Ping, CHANG Yulin, ZHANG Peng. Impact of inbound and outbound passengers from bus stop on neighboring bicycle lane capacity [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018, 32(9): 103. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2018.09.017
- [9] LIANG X Y, MENG X H, ZHENG L. Investigating conflict behaviors and characteristics in shared space for pedestrians, conventional bicycles and E-bikes [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 158: 106167. DOI: 10.1016/j.aap.2021.106167
- [10] GETTMAN D, SAYED T, PUET L, et al. Surrogate safety assessment model and validation [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2008
- [11] SAUNIER N, SAYED T. A probabilistic framework for automated analysis of exposure to road collisions [J]. Transportation Research Record, 2008, 2083(1): 96. DOI: 10.3141/2083-11
- [12] CHIN H C, QUEK S T. Measurement of traffic conflicts [J]. Safety Science, 1997, 26(3): 169. DOI: 10.1016/S0925-7535(97)00041-6
- [13] 王俊骅, 张方方, 张兰芳. 基于 OpenCV 和 Halcon 的交通冲突视频自动检测及数据处理 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 238
WANG Junhua, ZHANG Fangfang, ZHANG Lanfang. Halcon and OpenCV-based traffic automatic conflicting detecting method and data transaction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(2): 238. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2010.02.015
- [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
ZHU Shunying, JIANG Ruoxi, WANG Hong, et al. Review research of traffic conflict techniques [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 15. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.02.002
- [15] 慈玉生, 吴丽娜, 李潇逸, 等. 路侧停车区域电动自行车冲突概率分布 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(2): 46
CI Yusheng, WU Lina, LI Xiaoyi, et al. Traffic conflict probability distribution for non-motor vehicles at curb parking area [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(2): 46. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.02.009
- [16] 郑玉冰, 马羊, 程建川, 等. 基于轨迹数据的电动自行车道内冲突事件自动识别与可视化 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 71
ZHENG Yubing, MA Yang, CHENG Jianchuan, et al. Automated identification and visualization of conflict events in bike lanes using trajectory data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 71. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.01.007
- [17] 周旦, 姚威振, 顾国斌, 等. 公交站台区域电动自行车与行人通行冲突演化博弈模型 [J]. 交通信息与安全, 2021, 39(5): 27
ZHOU Dan, YAO Weizhen, GU Guobin, et al. An evolutionary game model of traffic conflict between electric bicycles and pedestrians in bus stop areas [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(5): 27. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2021.05.004
- [18] BEITEL D, STIPANCIC J, MANAUGH K, et al. Assessing safety of shared space using cyclist-pedestrian interactions and automated video conflict analysis [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 65: 710. DOI: 10.1016/j.trd.2018.10.001
- [19] YAN X C, WANG T, CHEN J, et al. Analysis of the characteristics and number of bicycle-passenger conflicts at bus stops for improving safety [J]. Sustainability, 2019, 11(19): 56. DOI: 10.3390/su11195263
- [20] 闫星臣. 混合电动自行车交通运行特性及自行车道优化设计方法 [D]. 南京: 东南大学, 2017
YAN Xingchen. Study on operational characteristics of mixed bicycle traffic flow and design optimization of bicycle lane [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. DOI: CNKI: CDMD: 1.1018.122129
- [21] 张盈盈, 刘帅, 邱志军, 等. 行人车辆冲突参数分析与安全评价 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(12): 123
ZHANG Yingying, LIU Shuai, QIU Zhijun, et al. Pedestrian-vehicle conflict parameter analysis and safety evaluation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 123. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2012.12.022