

廖剑, 孙瑜, 刘若愚, 等. 基于 DBSCAN 算法的高速公路车群行为特征与安全风险分析[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(4): 145-150. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24101007

基于 DBSCAN 算法的高速公路车群行为特征与安全风险分析

廖剑¹, 孙瑜², 刘若愚¹, 潘林峰²

(1 上海浦东路桥(集团)有限公司, 上海 200126; 2 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 本研究分析了高速公路上车辆行为的复杂性, 指出车辆换道和制动等行为会在车群中产生连锁反应, 提出考虑车辆间影响和风险传递的高速公路车群概念。在模拟实验的基础上, 使用 DBSCAN 算法思想对高速公路车群进行了定义, 定义邻域半径和对象数, 并对高速公路车群的交互过程进行了详细分析。此外, 提出了高速公路车群消散与车群重组两个过程, 从运行车群脆性风险的角度构建了车群运行风险评价指标体系, 建立了高速公路车群运行风险模糊综合评价模型, 并量化了车群运行风险, 为今后车群运行特征以及运行风险分析提供了新的理论基础。

关键词: 高速公路车群; 多车交互; DBSCAN 算法; 空间聚类; 模拟驾驶

中图分类号: TP311.13

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)04-0145-06

Behavior characteristics and safety risk analysis of highway vehicle clusters based on DBSCAN algorithm

LIAO Jian¹, SUN Yu², LIU Ruoyu¹, PAN Linyi²

(1 Shanghai Pudong Road and Bridge Group Co., Ltd., Shanghai 200126, China;

2 Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this study, the complexity of vehicle behavior on the highway is analyzed, and it is pointed out that the behavior of vehicles such as lane changing and braking will have a chain reaction in the group of vehicles, and the concept of the group of vehicles on the highway is proposed considering the impact and risk transmission between vehicles. On the basis of the simulation experiment, the concept of DBSCAN algorithm is used to define the expressway vehicle cluster, the neighborhood radius and the number of objects of the defined index are determined, and the interactive process of the expressway vehicle cluster is analyzed in detail. In addition, two processes of highway fleet dissipation and fleet reorganization are proposed, a fleet operation risk evaluation index system is constructed from the perspective of brittle risk of operating fleet, a fuzzy comprehensive evaluation model of highway fleet operation risk is established, and the fleet operation risk is quantified, which provides a new theoretical basis for the characteristics of future fleet operation as well as the analysis of operation risk.

Key words: expressway vehicle cluster; multi-vehicle interaction; DBSCAN algorithm; spatial clustering; driving simulation

0 引言

随着国内高速公路里程的迅速增长, 国内高速公路的道路交通安全形势也日趋严峻。虽然高速公路车群概念在一些文献中有所提及, 但多停留在宏观层面, 缺乏具体方法论。雷毅等学者^[1]基于路侧固定式采集试验得出导致车群发生制动的的原因有前方车辆运行状态变化和自车危险预测。Li 等学者^[2]认为车头间距是影响车辆加减速非对称特性

的重要因素。田钧方学者^[3]介绍基于跟驰行为分析成果而构建的仿真模型。王波等学者^[4]认为驾驶员的驾龄、性别等是影响期望安全距离的主要因素。黄帅等学者^[5]认为传统人驾车驾驶行为会受到驾驶员的心理和生理活动的不确定性影响, 可能使得车辆频繁地加减速。曲大义等学者^[6]提出了运用交叉跟驰模型解决侧向干扰对跟驰车辆带来的影响。朱西产等学者^[7]构建了代表驾驶人在潜在危险跟车场景下进行避撞操作需满足的最大反应时

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(220904757090255)。

作者简介: 廖剑(1990—), 男, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向: 交通流理论。

通信作者: 孙瑜(1989—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 交通工程。Email: ysun@usst.edu.cn。

收稿日期: 2024-10-10

间的参数时间裕度(TM)。彭金栓等学者^[8]研究得出随车速增大,跟车间距与加速踏板开度亦呈现增大趋势。吴至锦等学者^[9]提出一种以 Stacking 为基础,融合多个基学习器的车辆跟驰模型。

车辆换道3个关键的影响因素分别为间隙接受度、车辆换道时间及对跟随车辆的影响^[10]。Li等学者^[11]将融合了高斯混合模型的变道贝叶斯网络用于预测驾驶人的换道意图。Peng等学者^[12]基于车辆运动状态、驾驶状态和头部运动信息来预测变道行为。曲大义等学者^[13-14]建立了模拟分子动力学的期望安全间距模型。此外,基于博弈论的思想进行混合交通流中自主车辆换道行为建模。沈金星^[15]通过实验研究得到不同交通流量条件下,驾驶员对车道的选择会导致路段不同车道上的交通量分布具有显著的差异性。黄开启等学者^[16]利用博弈矩阵建立车辆冲突的动力学模型,在换道车辆和所有博弈车辆都基于自身利益最大化条件下对存在的各种情况的均衡点的存在和稳定性进行分析。潘公宇等学者^[17]将换道车辆的跟驰过程划分为“基本跟驰”与“换道前跟驰”两阶段。王笑等学者^[18]提出了一种保证乘客舒适性以及车辆安全性的换道路径跟踪控制算法。赵盛等学者^[19]提出了一种基于 FCNN 神经网络的人工车辆多驾驶风格换道决策预测方法。姚鸣杰等学者^[20]设计了危险评估模型进行车辆换道避障的危险评估。

1 复杂交通环境下的车群概念

高速公路上车辆行驶时往往不仅受到前方紧邻车辆和侧向车辆的影响,同时还可能受到前方较远车辆的影响。

当高速公路车流量较大时,往往会存在一些行车复杂环境如图1所示。车辆X1紧急制动可能导致后车X2变道避险。X2变道受X1、Y1、Y2影响,需保持安全距离。X2变道会连锁影响Y2及后续车辆,影响逐渐减弱。前车行为也会影响后续车辆。研究常忽略链式传递效应,未全面考虑车辆行为的相互影响。因此,提出车群概念,综合考虑跟驰和变道行为,对区域内车辆行为进行整体分析,对评估高速路风险至关重要。

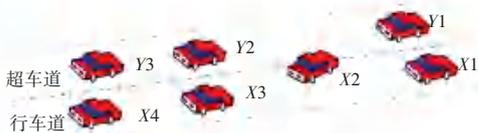


图1 高速公路复杂环境下车辆运行示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle operation in the complex environment of a motorway

2 基于空间聚类的高速公路车群定义

DBSCAN 是一个典型的基于密度的聚类分析方法,将高速公路车群定义为:高速公路运行的车辆集合,集合为关于邻域半径 Eps 和对象数 $MinPts$ 的一个聚类,集合中的车辆是集合关于 Eps 和 $MinPts$ 的密度连通集,并且满足车群中的任意车辆密度相连。本文选用法国软件 Virtools TM4.0 作为研究驾驶模拟的平台。

2.1 邻域半径 Eps 的选取

车辆影响范围示意图如图2所示,车辆在高速公路行驶时,可能对同一车道跟驰后车产生影响,影响范围为 $D1$ 。根据国内外研究总结后可以认为 $D1$ 的值为 150 m。

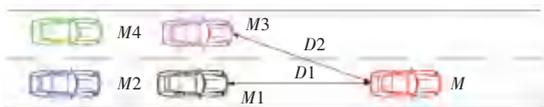


图2 车辆影响范围示意图

Fig. 2 Schematic of vehicle impact area

同时,车辆若偏离行驶车道,在向相邻车道行驶换道过程中,车辆会对相邻车道后车产生影响,影响范围为 $D2$ 。

$D2$ 是通过车辆换道过程中后车能够受换道车辆影响的车辆换道间距来确定的。为了研究这一距离,从多车交互实验中筛选了变道车辆及其相邻车道后车的相关信息,并依据变道时的间距,以 10 m 为一个区间进行分组,共设置 10 个组别,从 40 m 至 140 m,从车辆换道间距与后车车辆行驶状态以及驾驶行为的变化关系两个方面进行数据分析,通过 Excel 和 SPSS 处理后的实验数据结果如下。

2.1.1 车辆行驶状态

(1) 车辆换道间距与两车速度相关系数的变化关系。分别分析两车速度的相关系数,得到不同车辆换道间距内两车车速相关系数散点如图3所示。

由图3可知,随着车辆换道间距的增大,两车车速的相关性系数逐渐减小。通过 SPSS 对车辆换道间距 80~90 m、90~100 m、100~110 m 和 110~120 m 四组数据进行 Spearman 秩相关系数检验得到的分析结果见表1。

由相关性分析表可以分析得出换道车辆对后车影响范围的极限值为 90~100 m。

(2) 车辆换道间距与后车纵向加速度的变化关系。根据之前的车辆换道间距分组,将每组的换道车辆换道起始时刻的后车加速度平均值列于图4中。

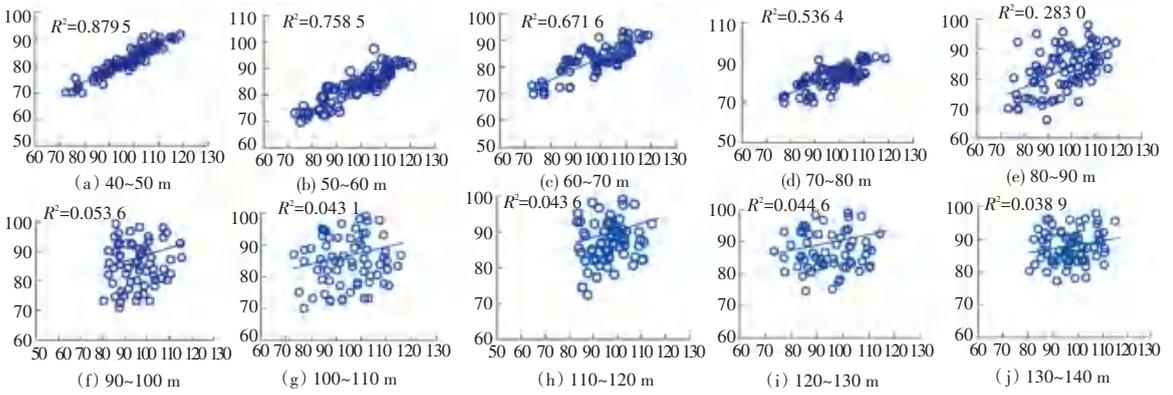


图 3 不同车辆换道间距内两车车速相关系数散点图

Fig. 3 Scatterplot of correlation coefficients of speeds of two vehicles with different spacing between lane changes

表 1 相关性分析表

Table 1 Correlation analysis table

车辆换道间距/m	变量 1	变量 2	相关性系数	显著性水平 Sig.	样本 N
80~90	换道车辆车速	目标车道后车速	0.283 0	0.001	196
90~100	换道车辆车速	目标车道后车速	0.053 6	0.046	202
100~110	换道车辆车速	目标车道后车速	0.043 1	0.074	183
110~120	换道车辆车速	目标车道后车速	0.043 6	0.072	187

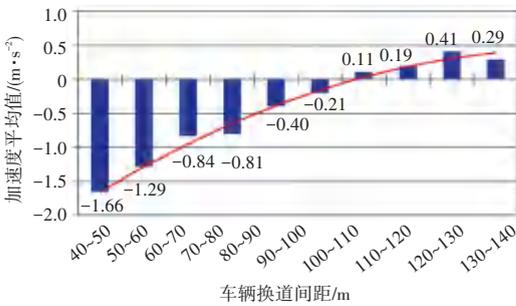


图 4 不同车辆换道间距的换道起始时刻后车加速度平均值分布图

Fig. 4 Distribution of mean value of rear vehicle acceleration at the onset of lane change for different vehicle change spacings

90~100 m (D2) 区间,取其极限值 100 m。



图 5 不同车辆换道间距的换道起始时刻后车踏板行程平均值分布图

Fig. 5 Distribution of mean values of rear vehicle pedal travel at the onset of lane change for different vehicle change spacings

2.2 对象数 MinPts 的选取

DBSCAN 算法中,对于二维空间数据,可以选取代表对象数 (MinPts) 为 4。

若对象数 MinPts 选取 3,图 6(a)中运行车辆 M、M2、M3 则不构成车群,而在图 6(b)中,车辆 M2、M3、M5 处于 M 车邻域 Eps 内,车辆 M、M2、M3、M5 能够构成车群。同时,车群内包含车辆间的纵向影响和横向影响,因此 4 作为对象数 MinPts 即可有效地表示高速公路车群的运行状态。同样地,对于多车道高速公路行驶的车辆而言,车群定义采用 4 作为对象数 MinPts 也是可行的。见图 6(c)、图 6(d)。

综上所述,高速公路车群定义中对象数 MinPts 的值应该选取 4。

通过图 4 可以总结得到,从换道后车纵向加速度影响的角度考虑,可以认为换道车辆对后车影响范围的极限值为 90~100 m。

2.1.2 驾驶行为变化

踏板行程是研究驾驶人基于纵向操作行为常用的分析指标。本文可以运用该指标来分析车辆是否受到相邻车道前车换道的影响。实验所采集的踏板行程数据形式为百分比制,实验数据按照车辆换道间距分组如图 5 所示。

通过图 5 分析得到,可以认为换道车辆对后车影响范围的极限值为 90~100 m。综合考量车辆在相同车道及相邻车道对后车的影响,将 Eps 设定在

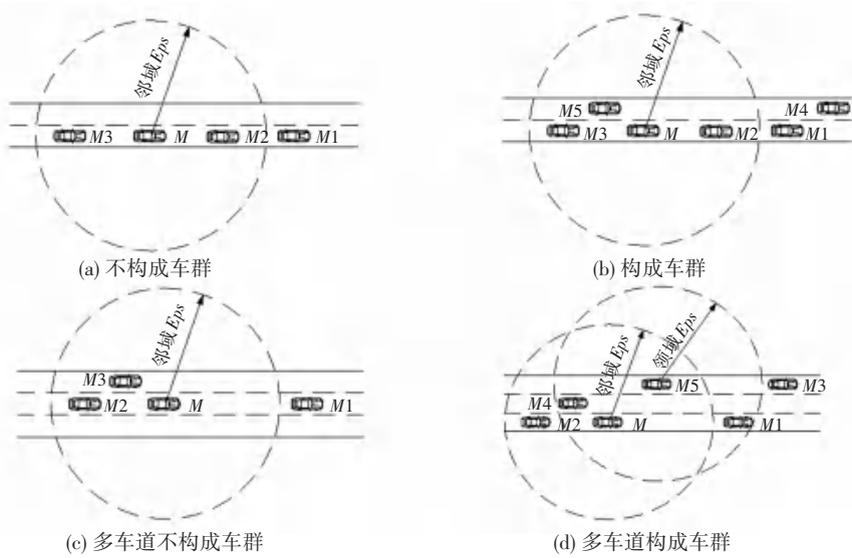


图 6 对象数 $MinPts$ 选取示意图

Fig. 6 Diagram for selecting the number of objects $MinPts$

3 高速公路车群交互过程分析

综合前文分析所述,高速公路车群定义可以简化为:车群是高速公路运行的车辆集合,集合为关于邻域半径 100 m 和对象数 4 的聚类,车辆形成的集合为密度连通集,并且满足车群中的任意车辆密度相连。由此可以引出车群运行的 2 个交互过程,即高速公路车群消散与车群重组。

3.1 高速公路车群消散

高速公路车群消散是指高速公路某一运行车群

由于群内车辆运行状态的改变而使车辆集合无法再满足车群条件的车辆行驶过程。

在图 7 的三车道高速公路中,假设某 t_1 时刻高速公路车辆行驶状态如图 7(a) 所示,由车群定义可知车辆 $M、M_1、M_2、M_4、M_5$ 可以通过聚类构成一个车辆数为 5 的车群,而随着车辆运行过程中的状态变化,一段时间后的 t_2 时刻,车辆的位置以及车辆间距发生了一定的改变,此时车辆 M_5 脱离了 M 车的邻域,并且 M 车也不在 M_5 车的邻域内,通过对车辆 $M、M_1、M_2、M_4、M_5$ 的再次聚类,称之为车群消散。

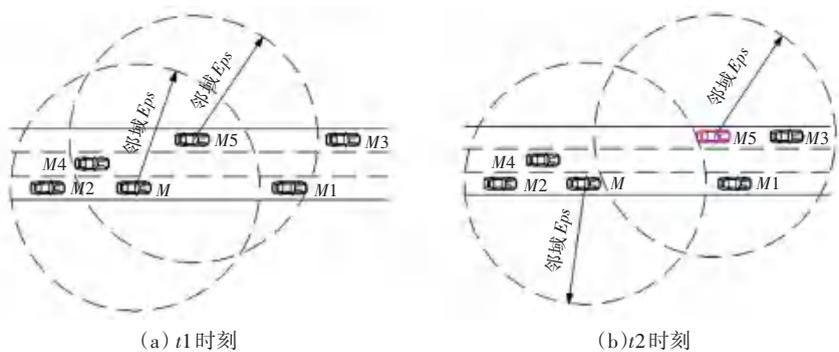


图 7 车群消散示意图

Fig. 7 Schematic diagram of vehicle dispersion

3.2 高速公路车群重组

高速公路车群重组是指高速公路某一运行车群由于群外车辆的不断加入而重新构成一个新车群的车辆行驶过程。

在图 8 的三车道高速公路中,假设某 t_1 时刻高速公路车辆行驶状态如图 8(a) 所示,由车群定义可知车

辆 $M_1、M_2、M_3、M_4、M_6$ 可以通过聚类构成一个车辆数为 5 的车群,而随着车辆运行过程中的状态变化,一段时间后的 t_2 时刻,车辆的位置以及车辆间距发生了一定的改变,此时车辆 M_5 进入了 M_3 车的邻域,并且 M_7 车、 M_8 车进入了 M_2 车的邻域内,通过对车辆 $M_1、M_2、M_3、M_4、M_5、M_6、M_7、M_8$ 的再次聚类,称之为车群重组。

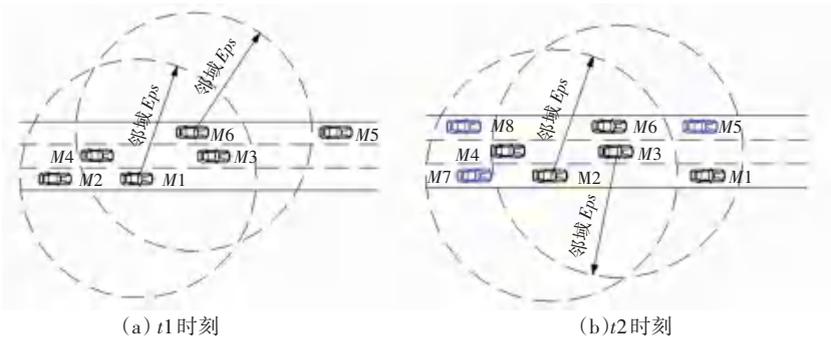


图8 车群重组示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the reorganization of the vehicle fleet

3.3 高速公路车群运行风险模糊综合评价模型

脆性最初是指材料受到外力的作用后发生微小的形变就断裂或者破坏的特性质。车群在运行过程中始终存在脆性风险并通过车群的纵向和横向变化来体现。

3.3.1 模糊综合评价指标体系构建

图9为模糊综合评价指标体系。

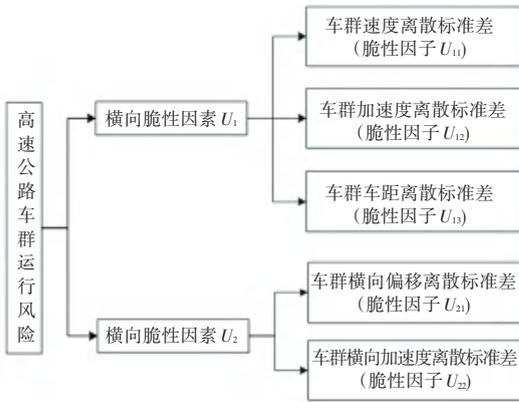


图9 模糊综合评价指标体系图

Fig. 9 Fuzzy comprehensive evaluation index system diagram

3.3.2 评价指标因素隶属度

U_{11} 表征的是车群内各车速度的 consistency 情况。

U_{11} 隶属度函数为:

$$U_{11} = \begin{cases} 0, & x_{11} \leq 0.83 \\ \frac{x_{11} - 0.83}{9.01}, & 0.83 < x_{11} < 9.84 \\ 1, & x_{11} \geq 9.84 \end{cases} \quad (1)$$

U_{12} 表征的是车群内各车加速度的离散情况。

U_{12} 隶属度函数为:

$$U_{12} = \begin{cases} 0, & x_{12} \leq 0.10 \\ \frac{x_{12} - 0.10}{0.57}, & 0.10 < x_{12} < 0.67 \\ 1, & x_{12} \geq 0.67 \end{cases} \quad (2)$$

U_{13} 表征的是车群内处于同一车道上车辆的纵

向间距的离散情况。 U_{13} 隶属度函数为:

$$U_{13} = \begin{cases} 0, & x_{13} \leq 3.31 \\ \frac{x_{13} - 3.31}{13.70}, & 3.31 < x_{13} < 17.01 \\ 1, & x_{13} \geq 17.01 \end{cases} \quad (3)$$

U_{21} 表征的是车群内各车横向偏移的一致性情况。 U_{21} 隶属度函数为:

$$U_{21} = \begin{cases} 0, & x_{21} \leq 0.02 \\ \frac{x_{21} - 0.02}{0.90}, & 0.02 < x_{21} < 0.92 \\ 1, & x_{21} \geq 0.92 \end{cases} \quad (4)$$

U_{22} 表征的是车群内各车横向移动的一致性情况。 U_{22} 隶属度函数为:

$$U_{22} = \begin{cases} 0, & x_{22} \leq 0.02 \\ \frac{x_{22} - 0.02}{0.74}, & 0.02 < x_{22} < 0.76 \\ 1, & x_{22} \geq 0.76 \end{cases} \quad (5)$$

3.3.3 算例代入

对实验数据进行整理,以车群样本1在 $t = 2$ s 时刻的运行数据为例,其实验数据见表2。

表2 $t=2$ s 时车群样本1的运行数据

Table 2 Operational data for sample 1 of the fleet at $t=2$ s

脆性因素	脆性因子	实验数据
纵向脆性因素 U_1	车群速度离散标准差 $U_{11}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6.941
	车群加速度离散标准差 $U_{12}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.387
	车群车距离散标准差 U_{13}/m	6.145
横向脆性因素 U_2	车群横向偏移离散标准差 U_{21}/m	0.067
	车群横向偏移离散标准差 $U_{22}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.178

设 U_i 的指标重要程度模糊子集为 W_i^1 , U_i 的单一因素评价矩阵为 R_i^1 , 得到 U_i 的一级评判向量 B_i^1 :

$$B_i^1 = W_i^1 \cdot R_i^1 \quad (6)$$

由一级评判向量 B_1^1, B_2^1 构成二级综合评判单一因素评价矩阵 R^2 , 并由模糊子集权重向量 W^2 , 得到二

级综合评判值 B^2 :

$$B^2 = W^2 \cdot R^2 \quad (7)$$

B^2 即为车群运行风险模糊评价结果,结果如图10所示。

通过风险时变图得到,由于车群样本1在前期和后期的运行相对不稳定,其脆性风险在车群运行状态中反应较为明显,在车群运行中期由于存在之前提到的变换车道行为,因此使得车群整体的运行变化较大,其脆性风险体现得较为突出,但由于车群内部车辆自身的调整,使得脆性风险能够保持在一定可控范围内,不会导致事故的发生,因而使车群运行风险又再次降下来。

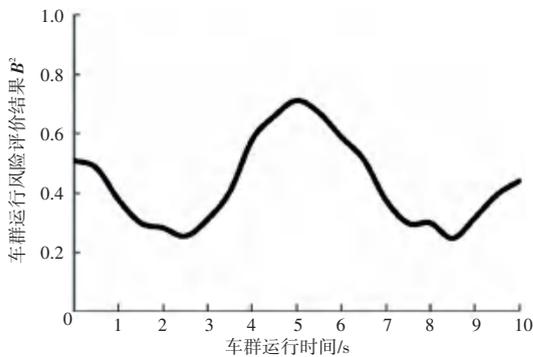


图10 车群样本1的运行风险时变图

Fig. 10 Time-varying plot of operational risk for vehicle fleet sample 1

4 结束语

高速公路复杂条件下对车辆的安全分析需要把存在相互影响的车辆集合作为群组来考虑。本文采用空间聚类的思想给出了高速公路车群的定义,并结合多车模拟交互平台数据确定了车群定义中的2个关键参数:邻域半径和对象数。此外,对高速公路车群的交互过程进行了详细分析,提出了高速公路车群消散和车群重组两个过程,建立了高速公路车群运行风险模糊综合评价模型,并量化了车群运行风险,为今后车群运行特征以及运行风险分析提供了新的理论基础。

参考文献

[1] 雷毅,肖星星,陈艺梦,等. 高速公路车群跟车制动行为特性分析[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(5): 79-83.

[2] LI Xiangchen, LUO Xia, HE Mengchen, et al. An improved car-following model considering the influence of space gap to the response [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 509: 536-545.

[3] 田钧方,朱陈强,贾宁,等. 基于轨迹数据的车辆跟驰行为分析与建模综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 148-159.

[4] 王波,惠宏伟,李永建,等. 基于期望安全车距的车辆跟驰行为分析与仿真[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(9): 91-95.

[5] 黄帅,孙隼华,赵敏. T-CPS下考虑人驾车行为影响的混行车辆协同控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1424-1432.

[6] 曲大义,陈文娇,郭涛,等. 考虑横向干扰的交叉跟驰模型研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(1): 122-127.

[7] 朱西产,魏昊舟,马志雄. 基于自然驾驶数据的跟车场景潜在风险评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 169-181.

[8] 彭金栓,赵文超,刘璐,等. 稳定跟车状态驾驶风格识别及迁移特性[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(8): 106-113.

[9] 吴至锦,曹从咏,孔进,等. 基于模型融合的车辆跟驰模型研究[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(3): 215-220.

[10] YANG Minming, WANG Xuesong, QUDDUS M. Examining lane change gap acceptance, duration and impact using naturalistic driving data [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 104: 317.

[11] LI Xiaohan, WANG Wenshuo, ROETTING M. Estimating driver's lane-change intent considering driving style and contextual traffic [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(9): 3258-3271.

[12] PENG Jinshuan, GUO Yingshi, FU Rui, et al. Multi-parameter prediction of drivers' lane-changing behaviour with neural network model[J]. Applied Ergonomics, 2015, 50: 207-217.

[13] 曲大义,邴其春,贾彦峰,等. 基于分子动力学的车辆换道交互行为特性及其模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(3): 68-74.

[14] 曲大义,黑凯先,郭海兵,等. 车联网环境下车辆换道博弈行为及模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(1): 101-109.

[15] 沈金星. 城市快速路车辆自由换道行为特征研究[J]. 物流工程与管理, 2017, 39(11): 108-109.

[16] 黄开启,瞿桃欢,黄明禹,等. 基于演化博弈的车辆换道研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(8): 31-39.

[17] 潘公宇,马斌. 基于CNN-LSTM模型的车辆换道前跟驰研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(2): 1-8.

[18] 王笑,仪垂杰,王东. 基于模型预测的车辆换道路径跟踪控制[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(17): 55-64.

[19] 赵盛,王嘉文,王明炯,等. 基于FCNN神经网络的多驾驶风格车辆换道预测[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(5): 199-204.

[20] 姚鸣杰,张缓缓,杨博. 考虑失稳风险的智能车辆换道避障危险评估方法研究[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(1): 203-207.