

文章编号:1671-1637(2014)04-0076-06

# 高速公路车辆排队尾部交通事故时空分布特征

李志斌<sup>1,2</sup>, 王 炜<sup>1,2</sup>, 李晓伟<sup>1,2,3</sup>, 王 昊<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学 城市智能交通江苏省重点实验室, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京 210096; 3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**根据高速公路常发拥堵路段的交通流数据,采用累计占有率法绘制交通流占有率波动曲线,用来判断拥堵路段内车辆排队尾部轨迹,分析了占有率、里程位置、时间间隔的关系,确定了累计占有率曲线的拐点。分析了排队传播、消散过程中交通事故频数与时间、空间距离的关系,对分布特征进行了统计分析。分析结果表明:车辆在时间和空间上接近排队车辆尾部时,发生交通事故的频数明显增加,时间距离与空间距离以排队尾部为中心呈现正态分布,不同行驶方向路段内正态分布曲线不存在显著差异,但拥堵传播与消散过程的正态分布曲线存在显著差异。建立的事故发生概率的联合正态分布模型,可用于预测排队车辆尾部附近的交通事故风险,为实施动态交通控制以提高快速道路交通安全提供理论依据。

**关键词:**交通安全;高速公路;交通事故;排队尾部;时空分布

**中图分类号:**U491.31

**文献标志码:**A

## Spatial and temporal distribution characteristics of traffic accident for highway vehicle queue tail

LI Zhi-bin<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Xiao-wei<sup>1,2,3</sup>, WANG Hao<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;  
2. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the traffic flow data of recurrent congestion section on highway, the cumulative occupancy method was used to draw the fluctuating curve of traffic flow occupancy, which was used to judge the trajectory of vehicle queue tail at congestion section. The relations among occupancy, mileage position and time interval were analyzed. The inflection point of cumulative occupancy curve was determined. For the queue propagating and dissipating processes, the relations between traffic accident frequencies and temporal and spatial distances were analyzed, and the distribution features were statistically studied. Analysis result shows that when vehicle temporally and spatially approaches the queue tail, the occurrence frequency of traffic accident obviously increases, and the temporal distance and spatial distance follow the normal distribution centered on the queue tail. Normal distribution curves in different driving directions have no significant differences, but have significant differences between congestion

收稿日期:2014-04-01

基金项目:国家 973 计划项目(2012CB725400);国家 863 计划项目(2012AA112304);国家自然科学基金项目(51008074)

作者简介:李志斌(1983-),男,河北唐山人,东南大学工学博士研究生,从事交通安全与控制研究。

导师简介:王 炜(1959-),男,浙江绍兴人,东南大学教授,工学博士。

propagation and dissipation processes. The developed joint normal distribution model of traffic accident occurring probability can be used to predict the traffic accident risks in the vicinity of queue tail, and to provide the theoretical foundation for applying dynamic traffic control for improving highway safety. 2 tabs, 12 figs, 19 refs.

**Key words:** traffic safety; highway; traffic accident; queue tail; spatial and temporal distribution

**Author resumes:** LI Zhi-bin(1983-), male, doctoral student, +86-25-83689816, lizhibin@seu.edu.cn; WANG Wei(1959-), male, professor, PhD, +86-25-83689816, wangwei@seu.edu.cn.

## 0 引言

高速公路上存在若干交通瓶颈,瓶颈附近交通拥堵时常发生,车辆排队状态向上游路段蔓延,交通需求下降时排队向下游路段消散。当正常行驶车辆到达排队尾部时,从自由流下的速度急剧下降到排队中的速度,容易诱发交通事故。近年来,随着中国机动车保有量与使用率迅速增长,高速公路上交通拥堵时常发生,交通安全形势日益严峻。针对高速公路车辆排队尾部交通事故时空分布特征进行研究,可以对事故风险进行实时预测,从而为实施动态交通控制提供理论依据。

Abdel-Aty 等较早采用高速公路上检测器获得的交通流数据,对交通事故实时预测技术进行了大量理论研究,通过将交通事故发生前交通流特征与非事故交通流特征进行对比,从而对事故风险发生前兆进行判别<sup>[1-2]</sup>;Pande 等研究了高速公路追尾事故发生前的交通流特征<sup>[3]</sup>;Hossain 等采用决策树方法分析了交通事故发生的机理<sup>[4]</sup>;Xu 等采用遗传算法对交通流与交通事故相关性进行了研究<sup>[5]</sup>。以上研究表明,当高速公路路段内上游平均速度大于下游平均速度时,交通事故发生概率明显增加。Zheng 等研究了交通流运动波对交通事故的影响,发现行驶车辆遇到减速波时容易发生追尾事故<sup>[6-7]</sup>;Yeo 等针对不同交通流状态下事故风险进行了研究,发现车辆排队尾部发生交通事故的概率是自由流时的 4~5 倍<sup>[8-9]</sup>;Li 等研究发现高速公路交通瓶颈附近冲击波传播过程中追尾事故风险较高,排队尾部所在路段交通事故发生概率随速度波动幅度而增加<sup>[10-11]</sup>。现有研究普遍采用 5~10 min 内平均交通流数据进行研究,研究结果仅粗略揭示了排队尾部对交通事故的影响,无法对拥堵传播及消散过程中车辆排队尾部的位置进行精确估计,因此,至今很少有研究揭示高速公路上车辆排队尾部时空范围内交通事故的分布特征。

本文采集了某高速公路双向路段内交通流数据

与事故数据,采用累计占有率曲线法判断高速公路车辆排队尾部位置<sup>[12-13]</sup>,针对拥堵向上游传播与向下游消散 2 类情况,分析了每起事故与排队尾部的空间距离与时间距离,建立了排队尾部附近事故频数时空分布特征曲线,拟合了联合正态分布模型预测交通事故发生概率,揭示了高速公路上车辆排队现象对于交通事故的影响,研究成果可用于预测高速公路排队尾部时空范围内事故的发生概率,以提高高速公路行车安全。

## 1 时空距离的定义

为定量衡量高速公路车辆排队尾部时空范围内交通事故分布特征,对交通事故与排队尾部的空间距离及时间距离进行定义。按照排队传播与消散过程交通流运行状态的不同,图 1 描述了排队状态向上游路段传播的过程, $S$  为事故与排队尾部的空间距离, $T_1$  与  $T_2$  均为事故与排队尾部的时间距离, $w_1$  与  $w_2$  均为排队车辆尾部传播速度。

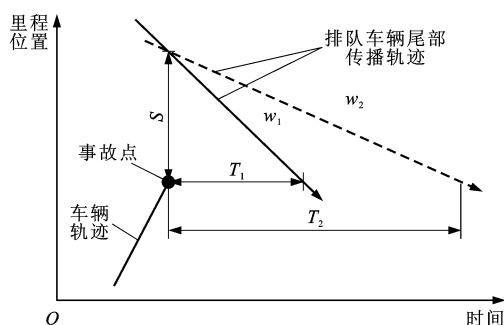


图1 排队传播过程

Fig. 1 Queue propagation process

以往研究仅考虑了交通事故与排队尾部的空间距离,本文考虑交通事故与排队尾部的时间距离可以提高研究精度:假设排队尾部以不同的速度向上游传播( $w_1 > w_2$ ),但时间距离却不相同( $T_1 < T_2$ ),而传播速度更快的交通拥堵更容易诱发交通事故<sup>[7,10]</sup>。

对交通事故与排队尾部的空间距离与时间距离的符号进行分析,如图 1 所示,如事故发生时排队尾

部位于事故下游路段,则定义空间距离  $S$  与时间距离  $T$  为负值,反之亦然。

对高速公路拥堵传播与消散过程加以区分,排队车辆消散过程见图 2,  $S'$  为事故与排队尾部的空间距离,  $T'$  为事故与排队尾部的时间距离。排队消散过程中,空间距离与时间距离的符号定义如图 2 中箭头所示,符号定义规则类似于排队传播过程。

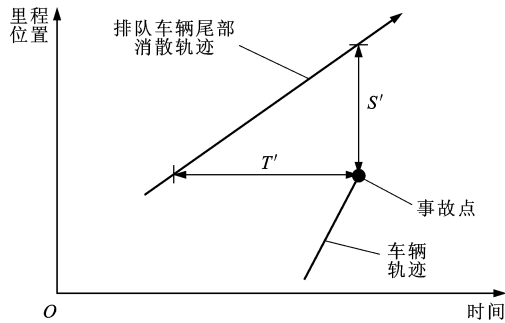


图 2 排队消散过程

Fig. 2 Queue dissipation process

## 2 研究路段与数据采集

本研究对数据要求为:交通流检测器布设在高速公路常发瓶颈上游路段;交通流检测器布设间距小于 1 km;交通流检测器提供检测周期为 30 s 的各车道交通流数据;历史数据具有较长保存周期;交通事故数据精确记录事故发生时间和位置。

研究对象为美国加利福尼亚州 I-880 高速公路北向 10 km 与南向 16 km 路段,研究路段见图 3。本文采用检测器数据对排队尾部进行定位,检测器布设较为关键。北向路段(路段 1)设有 12 个线圈检测器,南向路段(路段 2)设有 18 个线圈检测器。检测器布设间距为 0.42~1.02 km,平均间距为 0.69 km。

本文研究的 2 个高速公路路段下游均为常发性交通瓶颈。路段内典型工作日交通流状态见图 4、5,从中可以看出 2 个路段内均存在严重的交通拥堵。

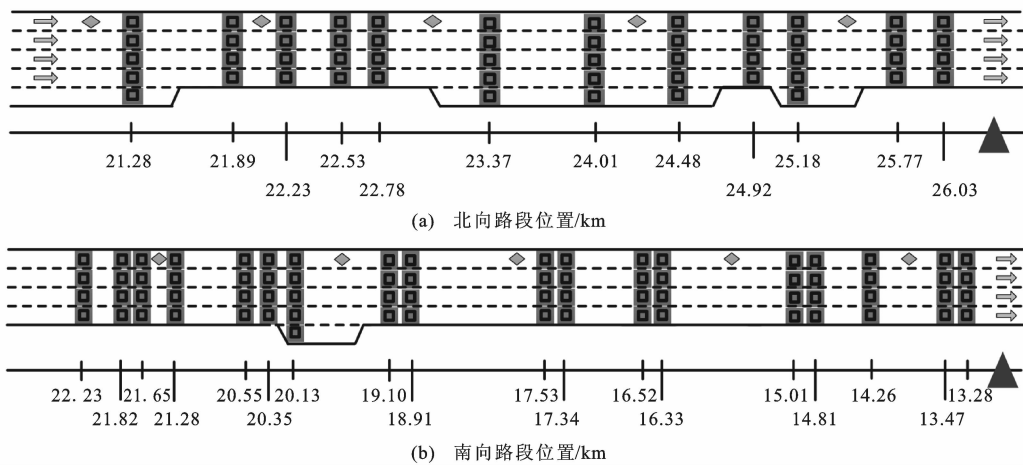


图 3 检测器位置

Fig. 3 Detector positions

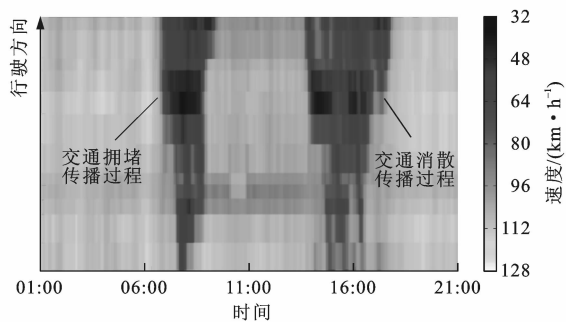


图 4 路段 1 拥堵传播与消散过程

Fig. 4 Propagation and dissipation process of congestion at section 1

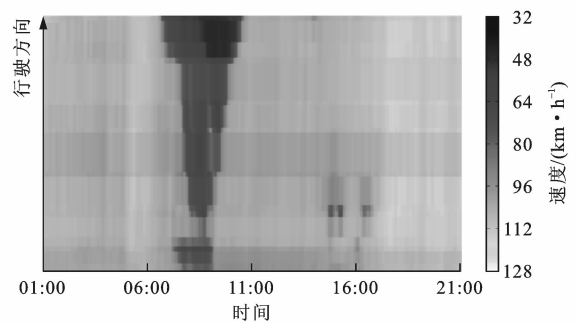


图 5 路段 2 拥堵传播与消散过程

Fig. 5 Propagation and dissipation process of congestion at section 2

路段 1 拥堵常发生在早高峰与晚高峰时段,排队长度约为 10 km,路段 2 拥堵常发生在早高峰时段,排

队长度约为 12 km。

对研究路段内近 3 年交通事故数据进行分析。

事故数据来源于加州交通部的 SWITRS 系统,该系统详细记录了每起交通事故的发生位置(精确到 0.01 km)、发生时间(精确到 30 s)和事故类型(追尾、刮擦等)。交通流数据来源于加州交通部门的 PEMS 系统,该系统记录了各检测器位置各车道每 30 s 的流量、速度和占有率数据。

由于本文旨在研究车辆排队尾部对交通事故的影响,数据筛选过程中剔除由于以下随机因素导致的交通事故数据:(1)事故发生在恶劣天气下;(2)事故中驾驶人有醉酒行为;(3)事故与行人、摩托车、动物及固定物相关;(4)事故发生在出入口匝道;(5)事故由于道路损坏、施工造成。

### 3 数据分析方法

图 6 为路段 1 某时间段内占有率时间间隔与里程位置的关系,行驶方向自下至上,深色区域表示占有率较高(处于交通拥堵状态),白色区域表示占有率较低(处于自由流状态),从中可以明显看出交通拥堵于 14:40 左右,生成于 25 km 位置,并随时间推移向上游传播,白色圆点表示发生交通事故,事故时间为 14:50,事故位置为 23.5 km。

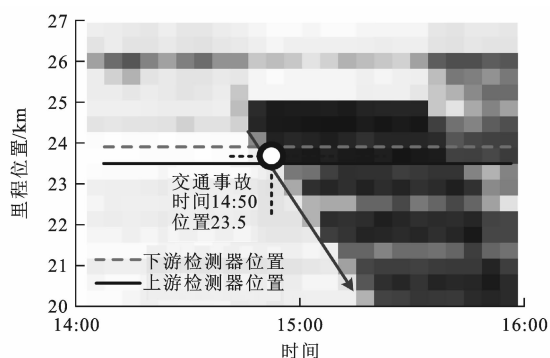


图 6 时间间隔与里程位置的关系

Fig. 6 Relations between time interval and mileage position

图 6 中展示了路段内每 5 min 占有率变化情况,但无法对车辆排队尾部的具体位置进行精确估计。本研究采用累计占有率曲线法来计算排队尾部位置。交通流占有率随时间的斜累积曲线可以放大占有率变化趋势,广泛应用于交通流领域中,具体绘制方法可参考文献[12-13]。

采用交通事故发生位置上下游的检测器数据(见图 6 中 2 条平行直线)分别绘制累计占有率曲线,见图 7,曲线的拐点为占有率开始大幅增加的時刻,表明车辆排队尾部到达检测器位置。下游检测器中占有率拐点对应时间约为 14:51,上游检测器中占有率拐点时间约为 14:54,假设排队状态在

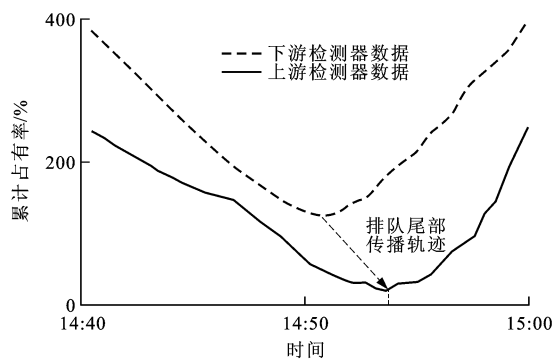


图 7 累计占有率曲线

Fig. 7 Cumulative occupancy curves

2 个检测器间匀速传播,则可推算出排队尾部随时间变化的位置。本文中排队尾部到达下游检测器的时间早于到达上游检测器的时间,表明该排队状态向上游传播;反之,表明排队状态向下游消散。

为保证对拐点时刻估计的准确性,本文以拐点为交点绘制拐点时刻前、后 3 min 内 2 条占有率拟合直线,变换拐点时刻使两直线偏离累计占有率曲线的总方差和最小,可以确定准确的拐点位置,获得排队尾部的到达时间与传播轨迹。累计占有率曲线的拐点见图 8。

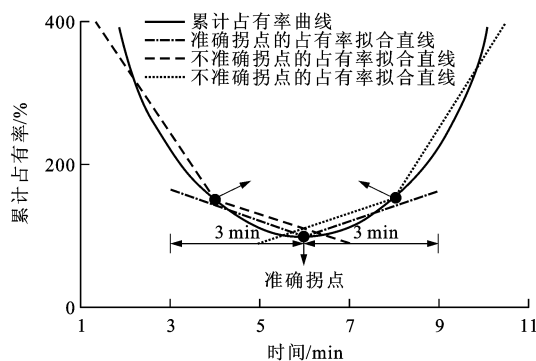


图 8 累计占有率曲线的拐点

Fig. 8 Inflection points of cumulative occupancy curves

交通事故的发生改变了拥堵传播轨迹,即事故发生后下游拥堵消散、上游拥堵加剧。此时,采用上游检测器数据估计的排队尾部到达时间受到事故发生影响,无法准确表征诱发交通事故的排队尾部传播特性。采用下游检测器及下游检测器数据来推算排队尾部传播轨迹,可以避免事故本身对于排队尾部传播轨迹的影响,使研究结果准确性更高。

### 4 计算结果分析

当交通事故与排队尾部的空间距离绝对值大于 5 km 或时间距离绝对值大于 30 min 时,认为排队尾部对于事故发生的影响可以忽略不计。剔除这些

事故样本后,共得到 239 起事故样本,包括 189 起追尾事故、40 起刮擦事故及 10 起其他类型事故。计算每起事故距离排队尾部的空间及时间距离,并进行集计统计分析。

车辆排队传播与消散过程各向路段内事故频数与空间、时间距离的分布曲线分别见图 9~12,从中可以看出,事故频数的分布近似于钟形正态分布,在空间或时间距离接近于 0 时,交通事故频数最大,表明在空间及时间范围内,高速公路上行驶车辆越接近排队尾部,越容易发生交通事故。

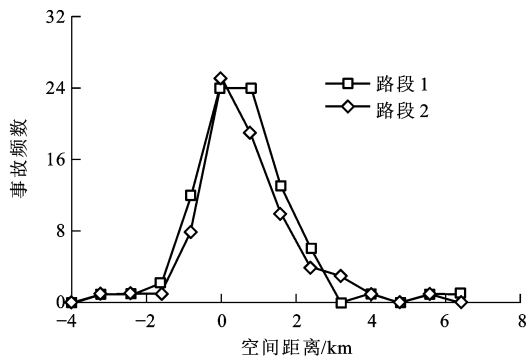


图 9 排队传播过程中交通事故频数与空间距离的关系  
Fig. 9 Relations between traffic accident frequencies and spatial distances during queue propagation

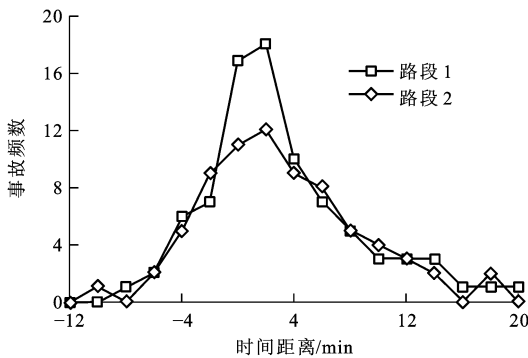


图 10 排队传播过程中交通事故频数与时间距离的关系  
Fig. 10 Relations between traffic accident frequencies and temporal distances during queue propagation

对交通事故频数与时间、空间距离关系的正态分布进行 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 单样本检验<sup>[14]</sup>,结果见表 1,检验结果表明,在 90%置信水平条件下,无法显著拒绝排队传播与消散过程中双向路段的交通事故频数曲线服从正态分布。

对南向与北向排队传播与消散过程中事故频次分布进行 K-S 双样本检验<sup>[15]</sup>,结果见表 2。在 90%置信水平下,无法显著拒绝南向与北向交通事故频次服从相同分布,表明在不同路段内排队尾部交通事故的时空分布具有相同特征。表 2 显示在 90%置信水平下,可以显著拒绝排队传播与消散过程交

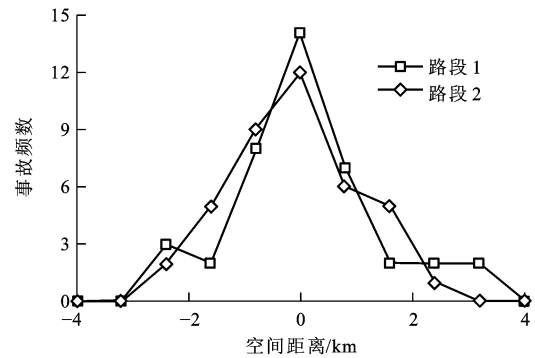


图 11 排队消散过程中交通事故频数与空间距离的关系  
Fig. 11 Relations between traffic accident frequencies and spatial distances during queue dissipation

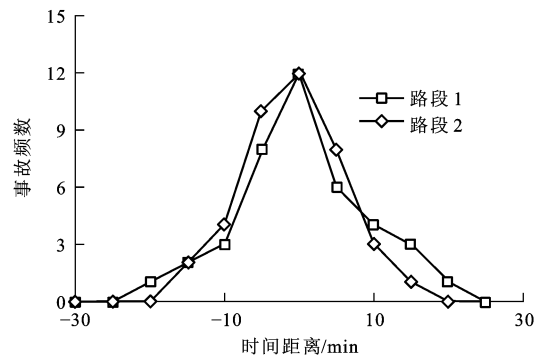


图 12 排队消散过程中交通事故频数与时间距离的关系  
Fig. 12 Relations between traffic accident frequencies and temporal distances during queue dissipation

表 1 K-S 单样本检验结果

Tab. 1 One-sample K-S test results

变量	均值	标准差	样本量	Z 值	显著性(双尾)
北向路段 S	0.544	1.360	85	0.837	0.486
北向路段 T	4.912	8.800	85	1.256	0.085
南向路段 S	0.608	1.344	74	1.074	0.199
南向路段 T	5.472	9.968	74	0.867	0.439
北向路段 S'	0.016	1.296	40	0.905	0.386
北向路段 T'	0.272	13.696	40	0.451	0.987
南向路段 S'	-0.064	1.120	40	0.450	0.987
南向路段 T'	-1.520	10.880	40	0.344	1.000

表 2 K-S 双样本检验结果

Tab. 2 Two-sample K-S test results

变量	系数	样本量	Z 值	显著性
北向 S 与南向 S	0.788	159	0.621	0.835
北向 T 与南向 T	0.927	159	0.522	0.948
北向 S' 与南向 S'	0.684	80	0.671	0.759
北向 T' 与南向 T'	0.873	80	0.559	0.913
传播 S 与消散 S'	0.027	125	1.388	0.042
传播 T 与消散 T'	0.009	125	1.565	0.015
传播 S 与消散 S'	0.010	114	1.542	0.017
传播 T 与消散 T'	0.004	114	1.680	0.007

通事故服从相同分布,表明排队传播过程与消散过程中,排队尾部交通事故时空分布特征不同,应该区别对待。

本文得到的排队尾部交通事故时空分布规律可以用于实时预测排队尾部附近事故发生概率。已知交通事故频数随时间及空间距离的分布曲线服从正态分布,则交通事故频数随时空距离的变化可认为服从联合正态分布。联合正态分布的概率密度函数  $f(S, T)$  为

$$f(S, T) = \frac{1}{2\pi\sigma_S\sigma_T\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{Z}{2(1-\rho^2)}\right] \quad (1)$$

$$Z = \frac{(S-\mu_S)^2}{\sigma_S^2} + \frac{(T-\mu_T)^2}{\sigma_T^2} - \frac{2\rho(S-\mu_S)(T-\mu_T)}{\sigma_S\sigma_T} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\sigma_{S,T}}{\sigma_S\sigma_T} \quad (3)$$

式中:  $\mu_S, \mu_T, \sigma_S, \sigma_T$  分别为事故频数随  $S$  和  $T$  的正态分布均值和标准差;  $\sigma_{S,T}$  为联合正态分布的协方差。

由此可得在排队传播或消散状态下,当  $S$  在任意 2 个位置  $x_1$  与  $x_0$  之内且  $T$  在任意 2 个时间段  $t_1$  与  $t_0$  之内时交通事故发生的概率为

$$P\{x_0 < S < x_1 \cap t_0 < T < t_1\} = \int_{x_0}^{x_1} \int_{t_0}^{t_1} f(S, T) dS dT \quad (4)$$

本文研究结果可以为实施动态交通管理与控制以降低交通事故风险提供理论依据<sup>[16-19]</sup>。根据本文建立的事故概率模型,可以计算高速公路排队尾部时空范围内交通事故风险,当估计的事故风险大于设定阈值时,可以启动交通控制降低车辆行驶速度,从而降低交通事故风险及事故严重程度。随着排队尾部位置的变化,事故概率的时空分布也随之发生变化。可设定时间周期,对事故风险进行更新计算,从而实现高速公路动态交通管理与控制。可采用 2 类控制策略:利用车载系统实时接收信息,对事故风险较高的车辆发布限速控制指示;采用路侧固定电子显示屏发布实时限速信息,对前方路段车辆排队进行预警。

## 5 结 语

本研究针对高速公路上车辆排队尾部附近交通事故时空分布特征进行研究,采集了某高速公路双向 10 km 路段内 3 年交通事故数据与线圈检测器交通流数据,采用了累计占有率曲线法计算排队尾

部传播位置,针对向上游传播及向下游消散 2 类车辆排队情况,分析了每起事故与排队尾部的空间距离与时间距离。高速公路上行驶车辆在空间及时间上接近车辆排队尾部时,事故发生频次显著增加,且事故频次与排队尾部距离呈现正态分布。不同路段上交通事故频次分布曲线无显著差异,拥堵传播与消散过程中交通事故频次分布曲线存在显著差异。拟合了事故频次的联合正态分布概率密度函数,可以用于预测车辆排队尾部时空范围内交通事故发生概率。

研究结果揭示了高速公路车辆排队尾部附近交通事故的时空分布特征,可为实施动态交通控制以减少事故风险提供理论依据。由于数据缺乏,尚未采用国内的相关数据对研究结果进行验证。验证数据应包含中国高速公路常发瓶颈路段内每隔 1 km 交通流检测器输出的每 30 s 的交通流占有率数据,以及该路段相应时间段内发生的交通事故数据。实际上,高速公路常发交通瓶颈路段交通流及交通安全特征具有相似性,即自由流车辆遇到瓶颈车辆排队时会紧急降低车速,导致交通事故,因此,本文针对高速公路车辆排队尾部交通事故时空分布特征的研究成果在中国具有较高的适应性,可为中国高速公路交通安全分析及动态交通控制提供参考依据。未来随着中国高速公路交通基础数据库的不断完善,可采用中国数据对本文建立的模型参数进行重新标定,提高模型总体预测精度。

## 参考文献:

### References:

- [1] ABDEL-ATY M, UDDIN N, PANDE A, et al. Predicting freeway crashes from loop detector data by matched case-control logistic regression[J]. Transportation Research Record, 2004(1897): 88-95.
- [2] ABDEL-ATY M, UDDIN N, PANDE A. Split models for predicting multivehicle crashes during high-speed and low-speed operating conditions on freeways[J]. Transportation Research Record, 2005(1908): 51-58.
- [3] PANDE A, ABDEL-ATY M. Comprehensive analysis of the relationship between real-time traffic surveillance data and rear-end crashes on freeways[J]. Transportation Research Record, 2006(1953): 31-40.
- [4] HOSSAIN M, MUROMACHI Y. Understanding crash mechanisms and selecting interventions to mitigate real-time hazards on urban expressways[J]. Transportation Research Record, 2011(2213): 53-62.
- [5] XU Cheng-cheng, WANG Wei, LIU Pan. A genetic programming model for real-time crash prediction on freeways[J]. IEEE

(下转第 104 页)

- experience on driver's eye movement and workload[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [15] 孙 璐, 郁 烨, 顾文钧. 基于 PCA 和 HMM 的汽车保有量预测方法[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(2): 92-98.
- SUN Lu, YU Ye, GU Wen-jun. Car ownership prediction method based on principal component analysis and hidden Markov model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(2): 92-98. (in Chinese)
- [16] WU Yi-hu, YU Dan, YU Wei, et al. Double-layer ramp-metering model for incident congestion on expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 129-137.
- [17] 裴玉龙, 于 涛. 车道变换进程中驾驶员视点转移特性研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(2): 92-95.
- PEI Yu-long, YU Tao. Driver's eye movement law during lane-change[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(2): 92-95. (in Chinese)
- [18] CHAPMAN J R, NOYCE D A. Influence of roadway geometric elements on driver behavior when overtaking bicycles on rural roads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 28-38.
- [19] 赵晓华, 许士丽, 荣 建, 等. 基于 ROC 曲线的驾驶疲劳脑电样本熵判定阈值研究[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 178-183.
- ZHAO Xiao-hua, XU Shi-li, RONG Jian, et al. Discriminating threshold of driving fatigue based on the electroencephalography sample entropy by receiver operating characteristic curve analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 178-183. (in Chinese)
- [20] 王琳虹, 李世武, 周茹波, 等. 高速公路路侧景观色彩对驾驶员心率指标的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(1): 74-90.
- WANG Lin-hong, LI Shi-wu, ZHOU Ru-bo, et al. Impact of roadside landscape color on driver mean heart rate[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(1): 74-90. (in Chinese)
- [21] 冀 杰, 李以农, 郑 玲, 等. 车辆自动驾驶系统纵向和横向运动综合控制[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 119-126.
- JI Jie, LI Yi-nong, ZHENG Liang, et al. Integrated control of longitudinal and lateral motion for autonomous vehicle driving system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 119-126. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 81 页)
- Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 574-586.
- [6] ZHENG Z D, AHN S, MONSERE C M. Impact of traffic oscillations on freeway crash occurrences[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(2): 626-636.
- [7] CHUNGK, JANG K, OUM S, et al. Investigation of attributes of kinematic waves preceding traffic collisions[C]// TRB. The 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2011: 28-39.
- [8] YEO H, JANG K, SKABARDONIS A. Impact of traffic states on freeway collision frequency[C]// TRB. The 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2010: 13-27.
- [9] XU Cheng-cheng, LIU Pan, WANG Wei, et al. Evaluation of the impacts of traffic states on crash risks on freeways[J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 47(1): 162-171.
- [10] LI Zhi-bin, AHN S, CHUNG K, et al. Surrogate safety measure for evaluating rear-end collision risk related to kinematic waves near freeway recurrent bottlenecks[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 64(4): 52-61.
- [11] LI Zhi-bin, WANG Wei, CHEN Ruo-yun, et al. Evaluation of the impacts of speed variation on freeway traffic collisions in various traffic states[J]. Traffic Injury Prevention, 2013, 14(8): 861-866.
- [12] CASSIDYM J, BERTINI R L. Some traffic features of freeway bottlenecks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1999, 33(1): 25-42.
- [13] CHUNG K, RUDJANAKANOKNAD J, CASSIDY M J. Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(1): 82-95.
- [14] SMIRNOVN V. Tables for estimating the goodness of fit of empirical distributions [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1948, 19(2): 279-281.
- [15] JUSTEL A, PENA D, ZAMAR R. A multivariate Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit[J]. Statistics and Probability Letters, 1997, 35(3): 251-259.
- [16] CARLSON R C, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M, et al. Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(2): 193-212.
- [17] WANG Yi-bin, PAPAGEORGIOU M, SARROS G, et al. Feedback route guidance applied to a large-scale express ring road[J]. Transportation Research Record, 2006(1965): 79-88.
- [18] LI Zhi-bin, LIU Pan, WANG Wei, et al. Development of a control strategy of variable speed limits to reduce rear-end collision risks near freeway recurrent bottlenecks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 866-877.
- [19] WU Yi-hu, YU Dan, YU Wei, et al. Double-layer ramp-metering model for incident congestion on expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 129-137.