

DOI:10.11918/202207089

# 车辆轨迹数据驱动的急弯路段追尾冲突 风险时空演化规律

王永岗<sup>1,2</sup>, 李晓坤<sup>1</sup>, 宋杰<sup>1</sup>, 李德林<sup>1</sup>

(1. 长安大学 运输工程学院, 西安 710018; 2. 生态安全屏障区交通网设施管控及  
循环修复技术交通运输行业重点实验室(长安大学), 西安 710018)

**摘要:** 为有效揭示急弯路段上车辆间追尾冲突风险的形成与变化态势, 选取典型事故多发急弯路段使用无人机航拍等方式采集交通流数据, 利用 Tracker 软件提取车辆轨迹信息, 构建急弯路段追尾冲突后侵入时间 PET 判别指标, 结合冲突先导车 LV 与跟随车 FV 的速度、加速度变化划分追尾冲突模式, 进而界定临界冲突点、冲突风险范围及 PET 变化率指标 DPET, 运用回归分析量化 LV 与 FV 的速度、加速度、速度差及加速度差对 DPET 的影响, 阐明临界冲突点及主要追尾冲突模式的微观变化特性及时空演化规律。结果表明: 车辆追尾冲突存在空间集聚性, 主要集中在入弯缓和曲线上游、曲中标志断面下游及出弯缓和曲线下游; 在潜在追尾冲突的九大类别中发生频率最高的四大类冲突数量占比高达 83.24%; PET 在冲突临界点和冲突风险范围内均下降, 导致 DPET 均为负值, 在冲突临界点 PET 快速下降, 其下降程度显著大于冲突风险范围; FV 速度、加速度及 LV、FV 间速度差、加速度差四个指标显著影响追尾冲突临界点的 DPET 变化; T10 模式 (LV 减速、FV 加速) 冲突过程中的 DPET 均值最小, PET 序列下降最为剧烈, 危险性显著高于其他冲突模式。

**关键词:** 急弯路段; 追尾冲突风险; 时空演化; 后侵入时间 PET; DPET; 车辆轨迹

中图分类号: U491.3 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2024)03-0038-08

## Spatial and temporal evolution of rear-end conflict risk at sharp curves using vehicle trajectory data

WANG Yonggang<sup>1,2</sup>, LI Xiaokun<sup>1</sup>, SONG Jie<sup>1</sup>, LI Delin<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China;

2. Key Laboratory of Transport Industry of Management, Control and Cycle Repair Technology  
for Traffic Network Facilities in Ecological Security Barrier Area (Chang'an University), Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In order to reveal the formation and change of rear-end collision risk between the lead and following vehicles on sharp curves effectively, a typical accident-prone sharp curved segment is selected to collect traffic flow data by vertical aerial photography from unmanned aerial vehicles. Vehicle trajectory information is extracted via Tracker to determine the post-encroachment time (PET) variable of rear-end conflict cross the sharp curve. The results show that there is a spatial clustering feature in rear-end conflicts, which mainly concentrate in the upstream of the entry transition curve and the downstream of the circular and exit transition curves. Four types of rear-end conflicts make up 83.24% of all types of conflicts, and PET decreases both at threshold moment and within conflict risk range with the former is even more so than the latter, resulting in declines of DPET (derivative of PET) values. Also, four indicators as speed of FV, acceleration, difference in speed and acceleration between LV and FV have a significant impact on the DPET change at the threshold moment of rear-end conflicts. The mean value of DPET during the conflict evolution process of T10 (LV decelerates and FV accelerates) is the smallest with the PET sequence declines most sharply, which shows a significantly higher risk than other conflict modes.

**Keywords:** sharp curves; rear-end conflict risk; spatial and temporal evolution; post encroachment time (PET); derivative of PET (DPET); vehicle trajectory

21 世纪以来, 伴随着中国公路网络的快速延伸, 大量山区公路陆续建成通车, 解决了广大偏远山

区村镇的交通难题。然而, 山区公路常伴随急弯、陡坡等不良线形路段, 给安全行车埋下了严重隐患, 亟

收稿日期: 2022-07-21; 录用日期: 2022-09-26; 网络首发日期: 2024-03-18

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240315.1131.006>

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1600500)

作者简介: 王永岗(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 宋杰, chdjiesong@yeah.net

需采取积极主动的防控措施来有效遏制道路交通事故的发生<sup>[1]</sup>。目前研究多关注单一车辆实体在过弯时的侧滑侧翻问题,多涉及驾驶行为、轨迹特性、速度预测等领域,进而依据不同指标进行安全风险预警<sup>[2-3]</sup>。而急弯路段中两个及以上车辆实体间若车速过快、车距过小、视距不足时同样易引发追尾事故<sup>[4]</sup>,亟需深入分析该类事故,以提出针对性防控措施。

传统的交通事故研究多以往期事故数据等方向入手,而随着数据获取手段的不断更新,交通冲突分析技术逐渐成为主流。交通冲突技术作为一种交通事故风险量化分析方法,具有可获得性、直观、周期短、样本量大等优势<sup>[5]</sup>,目前国内外已有大量针对交通冲突的相关研究,主要包括冲突判定及严重程度划分等方面<sup>[5-6]</sup>,如文献[7]结合车辆运动信息建立了基于后侵入时间 PET (post-encroachment time) 算法的交通冲突识别模型;文献[8]利用车辆的精确位置及宽度来确定所有类型车辆间的关键相互作用,运用改进的碰撞时间 MTTC (modified time to collision) 模型对于所获取的相互作用中的交通冲突进行了识别;文献[9]利用高速公路上雷达传感器采集的追尾冲突 TTC (time to collision) 值作为输入,预测下一个时间间隔内的追尾碰撞风险。文献[10]通过对运动目标进行轨迹提取,利用神经网络预测车辆运动轨迹,结合碰撞概率评估冲突严重程度。综上,现有交通冲突研究多依据采集或预测的车辆轨迹数据,提取 PET、TTC 等指标以判别、预测冲突发生或划分冲突严重程度,借此可评估车-车间潜在碰撞事故。

目前针对交通冲突的研究成果较多,但大多仅考虑冲突是否发生及其严重程度,却忽视了对冲突微观过程及相关特征的探究。交通流运行过程中,运动车辆在安全状态与危险状态间具有过渡性<sup>[11]</sup>,所引发的交通冲突呈现一定时空演化特征。急弯路段上车辆加减速频繁,易引发冲突,但目前研究多关注冲突的辨识<sup>[8]</sup>或预测<sup>[12-13]</sup>,缺乏对其时空演化规律的深入研究。因此,本文以急弯路段为研究对象,通过实地调查获取交通流数据,提取车辆轨迹信息来判定车辆间追尾冲突,并着重探究不同类型冲突状态在入弯-出弯过程中的时空演化规律,以便针对性提出急弯路段车辆防追尾碰撞技术措施。

## 1 研究对象与数据获取

### 1.1 路段基本信息

选定西安市灞桥区 X101 狄寨原路西安思源学院段急弯为研究路段,该弯道半径为 46 m,曲线长

为 400 m、横坡度约为  $1^\circ$ ,根据《公路路线设计规范及条文说明(JTG D20—2006)》中的相关规定,该路段可被视为急弯路段。考虑到一般驾驶习惯,确定急弯路段起点上游 50 m 处为研究起点,将急弯路段结束点下游 50 m 作为研究终点,共长 500 m。同时,直线-入弯缓和和曲线交界点( $O_{ZH}$ )、入弯缓和和曲线-圆曲线交界点( $O_{HY}$ )、圆曲线中心点( $O_{QZ}$ )、圆曲线-出弯缓和和曲线交界点( $O_{YH}$ )、出弯缓和和曲线-直线交界点( $O_{HZ}$ )点作为标志点,这 5 个标志点所在断面分别为 ZH、HY、QZ、YH、HZ 标志断面,并以 ZZ1、ZZ2 断面为数据调查的起止点所在断面,如图 1 所示。

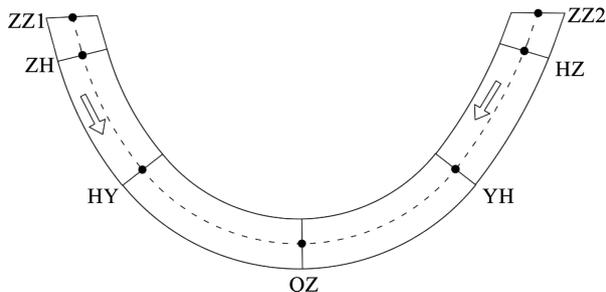


图 1 急弯路段区域划分

Fig. 1 Zones of current sharp curve

### 1.2 数据获取方法

开展实地调查获取所研究急弯路段的交通流数据。选用大疆“DJI Air 2S”无人机升空至 QZ 断面 120 m 处悬停记录行车数据,共获得 17 段有效航拍视频,总有效时长为 119 min,并用 Tracker 软件处理视频,以获取不同类型车辆的时间、车辆坐标及相应的速度、加速度、车辆方位角、速度方位角。

### 1.3 车辆运动特征

图 2 给出了所研究急弯路段的车速与加速度空间分布状况,可见不同类型车辆过弯时均遵循先减速后加速的运动规律。

由图 2(a)可知,在入弯缓和曲线段平均车速最小,在出弯直线段(HZ—ZZ2)段平均车速最大。由图 2(b)可知,急弯路段车辆加速度变化分为预减速、匀减速、匀速波动及加速 4 个阶段,分别对应图中 0—ZH、ZH—HY、HY—QZ、QZ—YH 段。

## 2 追尾冲突判别

由图 2 中采集数据分析结果可知,车辆因跟驰过弯且加减速频繁而易产生追尾冲突,故选用后侵入时间 PET 指标判别急弯路段的追尾冲突<sup>[14]</sup>。

依据 PET 指标的定义,根据冲突先导车 LV 和冲突跟随车 FV 通过固定断面的时间差  $t_{FV} - t_{LV}$  建立急弯路段 PET 识别模型。由于车辆一般采用制动

减速入弯和加速出弯的方式通过急弯路段,选取  $O_{QZ}$ 、 $O_{HZ}$  点所在断面 QZ、HZ 作为入弯和出弯侵入

面,见图 3,分别判定入弯和出弯车辆间的追尾冲突。

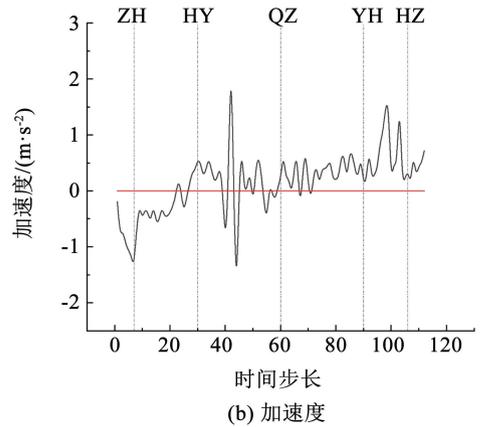
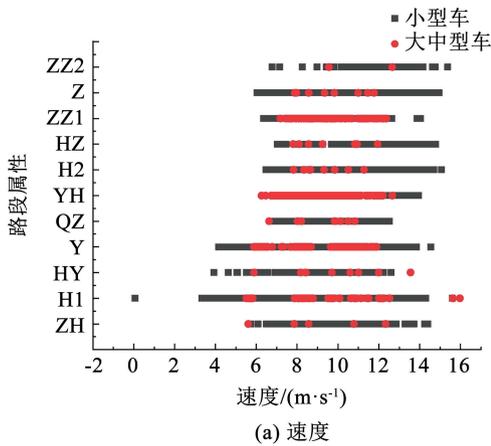


图 2 急弯路段车速分区段分布

Fig. 2 Distribution of speed zones oncurrent sharp curve

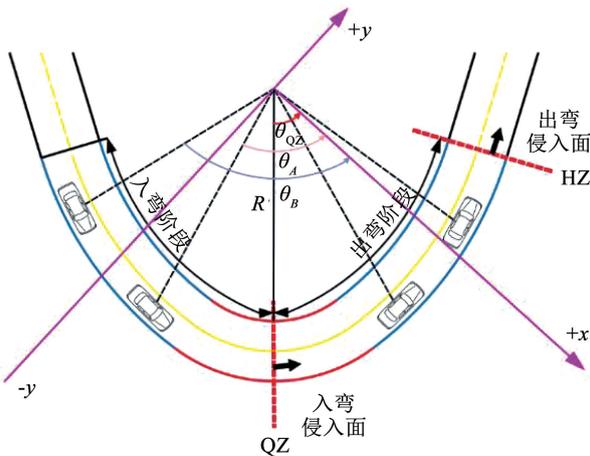


图 3 追尾冲突计算示意

Fig. 3 Rear-end conflict illustration

假定在  $t$  时刻位于  $O_{QZ}$  标志点上游的 LV、FV 间因近距离跟驰产生冲突,其地点车速分别为  $v_{LV}(t)$ 、 $v_{FV}(t)$ ,忽略缓和曲线和圆曲线间的平曲线半径差异,假定车辆保持当前速度不变,可得  $t$  时刻入弯路段 LV 与 FV 间追尾冲突判别的 PET 模型:

$$PET_{LV_{FV_{en}}}(t) = t_{FV} - t_{LV} = \frac{\pi r}{180} \left[ \frac{|\theta_{QZ} - \theta_{FV}|}{v_{FV}(t)} - \frac{|\theta_{QZ} - \theta_{LV}|}{v_{LV}(t)} \right] \quad (1)$$

式中: $\theta_{QZ}$  为 QZ 标志断面的方位角, ( $^{\circ}$ );  $\theta_{LV}$ 、 $\theta_{FV}$  分别为  $t$  时刻 LV、FV 的方位角, ( $^{\circ}$ );  $r$  为平曲线半径均值, m。

对于出弯路段,以断面 HZ 替换断面 QZ,同理可得  $t$  时刻出弯阶段 LV 与 FV 间追尾冲突判别的 PET 模型:

$$PET_{LV_{FV_{ex}}}(t) = t_{FV} - t_{LV} = \frac{\pi r}{180} \left[ \frac{|\theta_{HZ} - \theta_{FV}|}{v_{FV}(t)} - \frac{|\theta_{HZ} - \theta_{LV}|}{v_{LV}(t)} \right] \quad (2)$$

式中  $\theta_{HZ}$  为 HZ 标志断面的方位角, ( $^{\circ}$ )。

以时刻  $t$  为基点,  $\Delta t = 1/6$  s 为时间步长,计算 LV 与 FV 分别位于入弯和出弯路段的 PET 指标动态变化序列值。对于每一组车头间距小于 50 m 的近距离跟驰车对 LV 与 FV 间的两组 PET 序列,若其序列值随时间呈现上升或平稳的趋势,可判定该车对间不存在追尾冲突,反之则存在潜在追尾冲突。

### 3 追尾冲突动态演化

#### 3.1 冲突类别划分

根据入弯与出弯的 PET 序列值计算结果,共筛选出符合要求的追尾冲突车辆 98 对,冲突序列 143 组,提取出冲突关键帧数据共 2 432 帧,其中位于 1 ~ 2.5 s 之内的 PET 值最多,占比高达 63.86%。根据冲突 LV 与 FV 的速度、加速度变化,将追尾冲突模式划分为 T1 ~ T13 共 13 小类,如表 1 所示,其中 ↗、一、↘ 依次表示增加、持平、减少 3 种趋势。模式 T1 ~ T3、T4 ~ T6 分别对应 LV、FV 均加速和均减速两种场景,可进一步归纳为大类 I、II,其余模式 T7 ~ T13 对应大类 III ~ IX。

由表 1 可知,急弯路段出现的各类追尾冲突模式中大类 II、VI、I、IV 占比较高,分别为 25.88%、22.38%、20.99% 和 13.99%,合计 83.24%,剩余大类仅占约 15%。其中,模式 I 表征了 LV、FV 均加速情况,其中 T2 模式占据了大部分(14.69%),表明在 LV、FV 均加速导致的追尾冲突中 FV 加速度是关键影响因素;同样,模式 II 表征了 LV、FV 均减速情况,其中 T6 模式占比最大(14.69%),表明在 LV、FV 均减速导致的追尾冲突中速度和加速度均有显著影响。

表1 急弯路段追尾冲突模式指标变化

Tab.1 Changes in indicators for rear-end conflict patterns on current sharp curves

模式大类	模式小类	$v_{LV}$	$v_{FV}$	$\Delta v$	冲突占比/%
I	T1	↗	↗	↘	2.80
	T2	↗	↗	↘	14.69
	T3	↗	↗	↗	3.50
	T4	↘	↘	↘	7.69
II	T5	↘	↘	↘	3.50
	T6	↘	↘	↗	14.69
III	T7	—	↘	↘	2.80
IV	T8	—	↗	↗或↘	13.99
V	T9	—	—	—	2.10
VI	T10	↘	↗	↗或↘	22.38
VII	T11	↗	↘	↘	4.20
VIII	T12	↗	—	↘	0.70
IX	T13	↘	—	↗或↘	6.99

### 3.2 冲突演化过程

#### 3.2.1 表征指标构建

绘制追尾冲突 PET 序列值的变化曲线,发现 PET 变化包含两种类型,如图 4 所示。

追尾冲突 PET 的消散模式可分为两种,如图 4(a)所示,第 1 种模式中追尾冲突过程中 PET 序列值快速下降,表明冲突 FV 追尾 LV 的时间距离越来越小,当 PET 减小到一定程度后出现上升趋势,即此时冲突 FV 追尾 LV 的时间距离开始增大,冲突开始消散。如图 4(b)所示,在第 2 种模式冲突发生时同样伴随着 PET 序列值的快速下降,当 PET 减小到一定程度后不再继续减小,而是保持相对稳定并上下波动,即代表冲突消散。

为细致刻画追尾冲突发生过程中 PET 序列值的动态变化幅度,定义指标 DPET (derivative of PET),即 PET 的导数:

$$DPET(t + \Delta t) = \frac{PET(t + \Delta t) - PET(t)}{\Delta t} \quad (3)$$

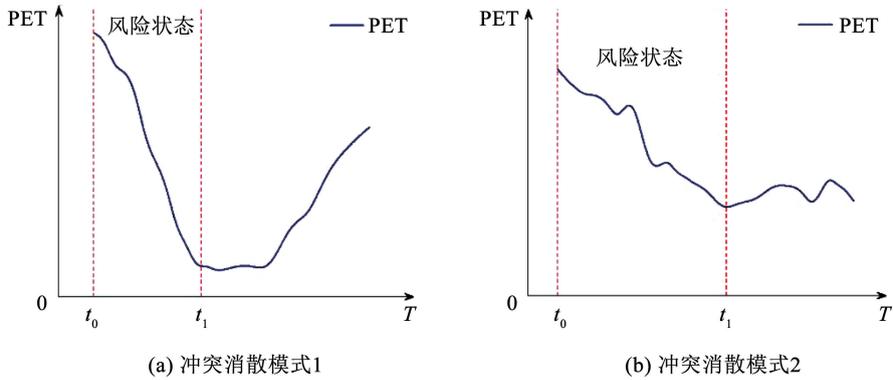


图4 追尾冲突 PET 变化

Fig. 4 PET changes of rear-end conflict

将 LV 与 FV 由安全状态转变为冲突风险状态的临界时刻定义为冲突临界点  $t_0$ ,即 PET 由上升或平稳分布开始快速下降的转折点,DPET 由非负值转变成负值的零点;将由冲突风险状态恢复到安全

驾驶状态的临界点定义为  $t_1$ ,即 PET 快速下降停止的转折点,DPET 由负值转变成非负值的零点。图 5 为 DPET 指标在冲突临界点和冲突风险范围内的分布情况。

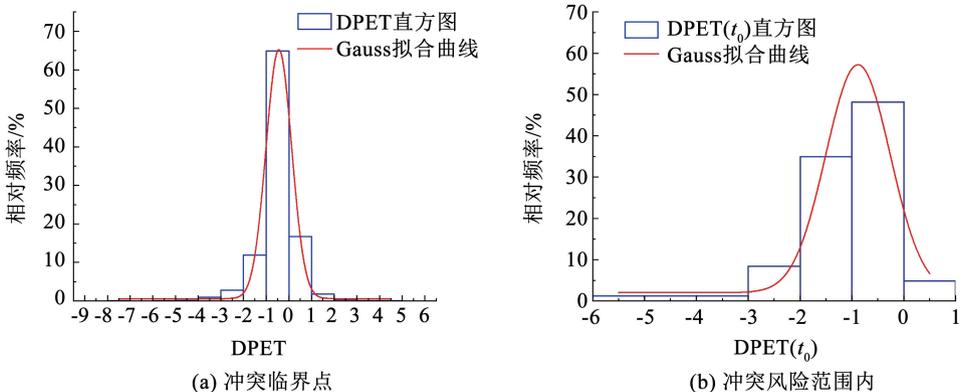


图5 DPET 分布

Fig. 5 DPET distribution

根据图 5(a) DPET 值分布情况,在整个冲突风险范围内 DPET 值分布于  $(-1, 0)$  中的占比约 65%,而小于  $-1$  的仅占约 15%。在冲突临界点, DPET 值位于  $(-1, 0)$  中的占比同样最多(48%),但相较整个冲突风险范围明显减少,而小于  $-1$  的占比有较大幅度的上升。

由图 5(b)可见,在冲突临界点 DPET 指标相对于整个冲突过程呈现更大的负值,随后逐渐下降至平缓。这是因为在风险时段内, LV 与 FV 开始采取减速或加速操作,导致两车间相对速度等发生突变,产生更大的冲突风险;其后,随着驾驶人感知到风险并采取避险措施, PET 值下降逐渐放缓,该时段的 DPET 值亦呈现出缓和趋势。

### 3.2.2 冲突临界点回归模型

选取  $t_0$ 时刻 6 个指标速度  $v_{LV}(t_0)$  和  $v_{FV}(t_0)$ 、加速度  $a_{LV}(t_0)$  和  $a_{FV}(t_0)$ 、速度差  $\Delta v(t_0) = v_{FV}(t_0) - v_{LV}(t_0)$ 、减速度差  $\Delta a(t_0) = a_{FV}(t_0) - a_{LV}(t_0)$  作为输入变量,列出了自变量与因变量间皮尔逊相关性的计算值,一般认为  $p < 0.01$  呈现相关性,  $p < 0.001$  呈现强相关性,由于篇幅限制,对于弱相关变量将不再标注。

表 2 冲突临界点变量统计

Tab.2 Variable statistics for critical conflict point

变量	均值	方差	相关系数 $r$
$v_{LV}(t_0)$	9.14	3.00	-0.03
$a_{LV}(t_0)$	-0.62	1.45	0.29**
$v_{FV}(t_0)$	8.82	2.44	0.06
$a_{FV}(t_0)$	0.75	1.43	-0.75****
$\Delta v(t_0)$	-0.31	1.15	0.12
$\Delta a(t_0)$	1.37	2.72	-0.76****
DPET( $t_0$ )	-1.12	0.99	—

注: \*\*表示  $p < 0.01$ , \*\*\*\*表示  $p < 0.001$ 。

显然,  $t_0$ 时刻 DPET( $t_0$ ) 仅与  $a_{LV}(t_0)$ 、 $a_{FV}(t_0)$ 、 $\Delta a(t_0)$  显著相关,且与  $a_{LV}(t_0)$  正相关,而与  $a_{FV}(t_0)$ 、 $\Delta a(t_0)$  显著负相关<sup>[15]</sup>,表明加速度尤其是  $a_{FV}(t_0)$  对追尾冲突的演化有重要影响。

以这 6 个指标为输入变量进行逐步回归分析,  $v_{FV}(t_0)$  与  $a_{FV}(t_0)$  被排除,其余 4 个指标均能显著影响 DPET( $t_0$ ) 值( $p < 0.05$ ),且 VIF 均小于 5,表明各变量间不存在多重共线性<sup>[15]</sup>。回归分析模型见表 3,  $R^2$  为 0.710,表明所建立的模型能较好解释 DPET( $t_0$ ) 值的变化。

表 3 DPET( $t_0$ ) 回归分析结果

Tab.3 Results of DEPT regression analysis

参数	非标准化系数 B	估计标准误差 SE	标准化系数 Beta	显著性检验值 $t$	方差膨胀系数 VIF
Constant	-1.376***	0.361	—	-3.812	—
$v_{FV}(t_0)$	0.103*	0.041	0.163	2.531	1.170
$a_{FV}(t_0)$	-0.362***	0.072	-0.436	-5.023	2.133
$\Delta v_{FV}(t_0)$	-0.174**	0.060	-0.188	-2.916	1.171
$\Delta a_{FV}(t_0)$	-0.325***	0.052	-0.539	-6.217	2.128

注: \*表示  $p < 0.05$ , \*\*表示  $p < 0.01$ , \*\*\*表示  $p < 0.001$ 。

由表 3 结果可知,  $v_{FV}(t_0)$ 、 $a_{FV}(t_0)$  与  $\Delta v(t_0)$ 、 $\Delta a(t_0)$  是引发该急弯路段追尾冲突的显著性影响因素,而  $v_{FV}(t_0)$ 、 $\Delta a(t_0)$  对 PET 值下降的影响更大,这说明控制 FV 安全运动状态能有效防控追尾冲突风险。

### 3.2.3 冲突风险状态回归模型

针对急弯路段追尾冲突的 4 类主要冲突模式 T2、T6、T8 及 T10,分别建立其冲突风险状态 DPET 指标的回归分析模型,量化上述 6 个输入因素的影响程度。表 4 给出了各模式的描述变量统计及皮尔逊相关性分析结果。

表 4 典型追尾冲突模式状态变量统计

Tab.4 Variable statistics of typical rear-end conflict modes

变量名称	均值/方差				$r$			
	T2	T6	T8	T10	T2	T6	T8	T10
$v_{LV}$	9.28/2.25	8.51/2.82	10.26/1.70	8.37/1.88	0.06	0.01	0.11	-0.03
$a_{LV}$	0.21/0.88	-0.43/0.36	-0.06/2.92	-0.27/0.99	0.37**	0.53**	0.38**	0.39**
$v_{FV}$	8.79/2.10	9.83/2.13	9.76/1.17	8.51/2.02	0.12	0.17*	0.29**	0.11*
$a_{FV}$	0.57/0.97	-0.26/0.40	0.47/0.77	0.29/0.86	-0.78**	-0.60**	-0.70**	-0.72**
$\Delta v$	-0.49/0.20	1.32/0.76	-0.51/0.78	0.14/0.52	0.19**	0.25**	0.19**	0.28**
$\Delta a$	0.36/1.88	0.17/0.72	0.54/3.36	0.56/1.71	-0.81**	-0.82**	-0.69**	-0.80**
DPET	-0.38/1.05	-0.37/0.35	-0.36/0.44	-0.60/0.67	—	—	—	—

注: \*表示  $p < 0.05$ , \*\*表示  $p < 0.01$ 。

由表4可知,4类主要追尾冲突模式的风险状态时段内 $a_{LV}$ 、 $a_{FV}$ 、 $\Delta v$ 、 $\Delta a$ 4个变量均与DPET值显著相关,且各变量的相关程度差异较大。表5给出了各冲突模式下DPET的多元线性回归分析结果。

著相关,且各变量的相关程度差异较大。表5给出了各冲突模式下DPET的多元线性回归分析结果。

表5 典型追尾冲突模式回归分析结果

Tab.5 Regression results of typical rear-end conflict modes

冲突模式	矫正决定系数 Adj. $R^2$	杜宾-瓦特森检验 D-W	变量	B	SE	Beta	t	VIF
T2	0.750	1.782	Constant	-0.991 ***	0.203	—	-4.888	—
			$a_{LV}$	-0.413 ***	0.049	-0.379	-8.470	1.953
			$v_{FV}$	0.113 ***	0.023	0.160	4.979	1.003
			$\Delta a$	-0.806 ***	0.033	-1.081	-24.143	1.954
T6	0.710	1.123	Constant	-0.932 ***	0.155	—	-6.013	—
			$a_{LV}$	0.053 **	0.015	0.150	3.466	1.328
			$\Delta v$	0.154 ***	0.030	0.226	5.180	1.349
			$\Delta a$	-0.555 ***	0.026	-0.797	-21.041	1.018
T8	0.732	1.671	Constant	-1.328 ***	0.203	—	-6.530	—
			$v_{FV}$	0.127 ***	0.021	0.208	6.185	1.019
			$a_{FV}$	-0.361 ***	0.027	-0.480	-13.191	1.190
			$\Delta a$	-0.179 ***	0.013	-0.497	-13.773	1.170
T10	0.723	1.187	Constant	-0.339 ***	0.025	—	-13.569	—
			$a_{FV}$	-0.301 ***	0.032	-0.341	-9.553	1.740
			$\Delta v$	0.130 ***	0.032	0.114	4.126	1.048
			$\Delta a$	-0.350 ***	0.023	-0.558	-15.379	1.796

注: \*\*表示  $p < 0.01$ , \*\*\*表示  $p < 0.001$ 。

显然,对于各主要冲突模式均有3个不同显著变量能较好表征其DPET变化,且 $\Delta a$ 在各模式中均对DPET有显著影响。此外,该指标在T2、T6、T10中标准化系数Beta绝对值最大,且与其他可解释变量的Beta值差距较大,说明 $\Delta a$ 是这些模式中影响急弯路段追尾冲突的主要因素。在T8中, $\Delta a$ 和 $a_{FV}$

两个变量的Beta绝对值均较大且差距极小,表明该模式下 $\Delta a$ 与 $a_{FV}$ 对DPET变化的影响均较大,究其原因在于追尾冲突主要由 $a_{FV}$ 所引发,且难以被LV及时发现,因而导致DPET持续下降。图6给出了4类典型冲突模式的DPET指标分布情况。

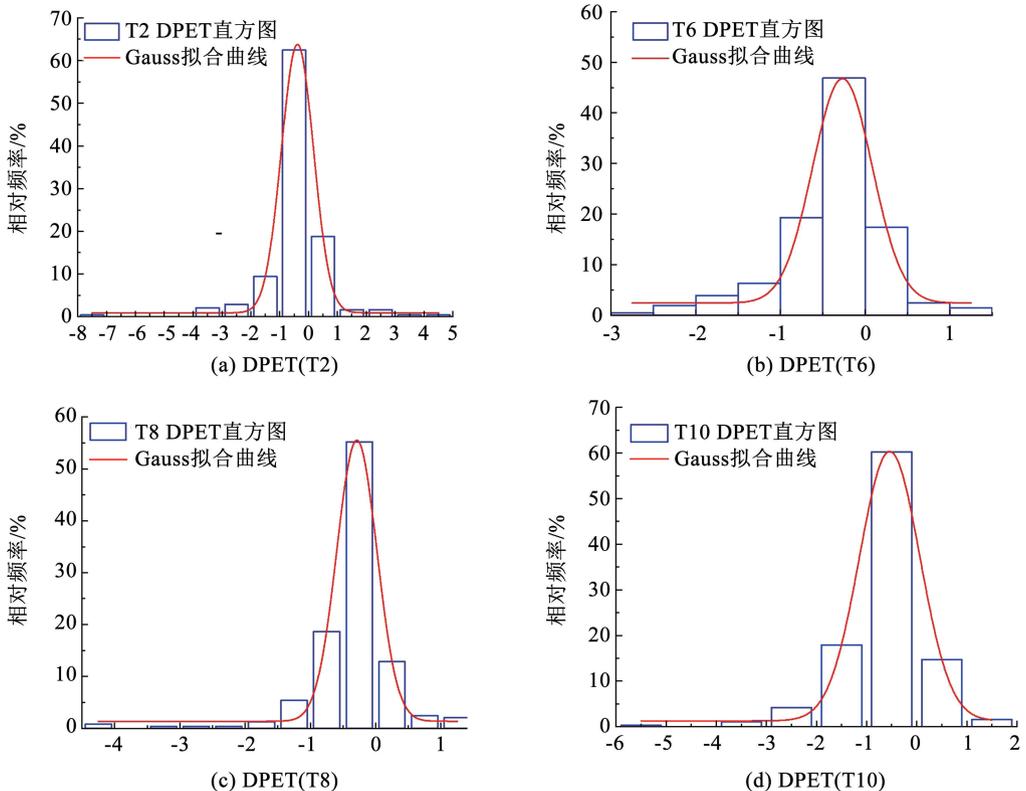


图6 典型冲突模式的DPET指标分布

Fig.6 DPET distribution of typical conflict modes

由计算结果可知,如图 6(a)、6(b)、6(c)所示, T2、T6、T8 的 DPET 指标较为接近 ( $-0.376$ ,  $-0.374$ ,  $-0.357$ ),但图 6(d)中 T10 的 DPET 指标存在较大差距 ( $-0.601$ ),表明 T10 的 PET 序列值下降最为快速,而其余 3 类模式的下降程度不存在显著差异。从 T2、T6、T8 的 DPET 演化看,分布于  $[-1, 0]$  中的比例约为 65%, 小于  $-1$  的占比均不到 15%, 而 T10 模式中小于  $-1$  的占比接近 30%, 表明 T10 模式出现 PET 序列值快速下降的概率远大于其他模式,这将导致该模式的追尾冲突危险性更大,亦是风险防范的着力点<sup>[16]</sup>。

### 3.3 冲突空间分布

以临界冲突时刻  $t_0$  对应的 FV 位置为坐标,分别提取冲突模式 T2、T6、T8 及 T10,得到追尾冲突在急弯路段上的空间分布,如图 7 所示。

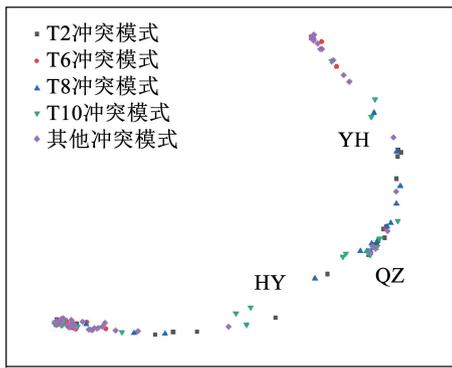


图 7 急弯路段追尾冲突空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of rear-end conflicts on current sharp curves

由图 7 可看出急弯路段追尾冲突分布呈现空间

聚集性,以图 1 中 ZZ1 点至 ZZ2 点方向为上行方向,从该方向看,主要集中在入弯缓和曲线上游 (ZZ1—ZH 段)、曲中标志断面下游 (QZ—YH 的前半段) 及出弯缓和曲线下游 (HZ—ZZ2 段) 3 处,因此对  $t_0$  时刻这 3 处的追尾冲突分别进行  $DPET(t_0)$  指标的显著性检验,并列出了自变量与因变量间皮尔逊相关性的计算值,结果见表 6。

由回归分析结果可知,  $DPET(t_0)$  在入弯缓和曲线上游受  $\Delta a$  和  $a_{FV}$  的显著影响,其形成与进入缓和曲线上游的 FV 的减速大小有关,此时 LV 基本已完成减速,而此时  $a_{FV}$  对冲突影响显著,同时  $\Delta a$  对冲突影响最为显著。  $DPET(t_0)$  在曲中标志断面下游受  $\Delta a$  的影响最为显著,其形成与曲中断面后的加速行驶有关。  $DPET(t_0)$  在曲线下游受  $\Delta a$  和  $a_{FV}$  的显著影响,其形成与曲中断面后的加速行驶有关,且主要由于 FV 加速行驶导致的  $\Delta a$ ,进而形成追尾冲突。

由表 6 可见, LV 的加速行为可降低追尾冲突风险, FV 的加速行为则恰恰相反,但在 3 处冲突密集处,上述行为对追尾冲突风险的影响程度有明显差异,即  $\Delta v$  与  $\Delta a$  对冲突风险的影响存在空间差异性。这是因为在急弯不同区段中, LV 与 FV 往往呈现不同的相对状态。当两车位于弯道前半段呈接近状态时, FV 驾驶策略尚未完全确定,其速度、加速度等运动参数的变化幅度较大,但 LV 一般选择逐渐减速策略以通过弯道,此时 FV 更能对追尾冲突风险产生更显著的影响;当两车位于弯道后半段呈远离状态时,与上述情况相反, FV 驾驶策略已定而 LV 驾驶策略开始出现变化,导致 LV 对追尾冲突风险的影响上升。

表 6 不同区段冲突临界点显著性检验

Tab. 6 Significance tests for conflict thresholds at different zones

变量	曲线上游			曲线中游			曲线下游		
	均值	方差	$r$	均值	方差	$r$	均值	方差	$r$
DPET	-0.868	1.215	—	-0.719	1.028	—	-0.512	0.878	—
$v_{LV}$	8.779	1.605	0.166	10.008	1.513	-0.090	10.069	1.451	0.420
$a_{LV}$	-0.080	0.851	0.309	-0.925	2.127	0.608**	-0.078	1.418	0.637**
$v_{FV}$	9.470	1.796	0.307	9.212	1.330	0.680	9.409	1.082	0.204
$a_{FV}$	0.362	1.138	0.847***	0.422	0.880	-0.549	0.662	1.046	-0.905***
$\Delta v$	0.690	1.333	0.215	-0.796	1.100	0.206	-0.660	0.855	0.187
$\Delta a$	0.442	1.394	0.880***	1.346	2.203	-0.806***	0.740	2.050	-0.902***

注: \*\* 表示  $p < 0.01$ , \*\*\* 表示  $p < 0.001$ 。

## 4 结 论

针对急弯路段追尾事故多发的特点,利用交通冲突技术,系统研究了急弯路段的追尾冲突及其演

化机理,主要研究结论如下:

1) 在急弯路段九大类潜在追尾冲突模式中,发生频率最高的有四大类,包括 II (T6 为主)、VI (T10)、I (T2 为主)、IV (T8), 占比分别为

25.88%、22.38%、20.99%和13.99%。

2)加速度差  $\Delta a$  是急弯路段追尾冲突 T2、T6、T10 模式中引发 DPET 变化的首要因素,影响 PET 序列的下降程度; $a_{rv}$  与  $\Delta a$  对 T8 模式的 DPET 变化均有显著影响,但影响程度差异较小;T10 模式的 DPET 均值最小,表明 PET 序列下降最为剧烈,危险性较高。

3)急弯路段追尾冲突模式分布具有空间集聚性。T2 主要分布于圆曲线下游,T6 模式主要分布于入弯缓和曲线上游和出弯缓和曲线下游,T8 模式与 T10 模式主要分布于圆曲线下游,少量分布于入弯缓和曲线段,这与急弯路段上车速变化特征一致。

本研究提出了急弯路段追尾冲突风险的时空分布甄别方法,对追尾事故防控有较高的理论指导价值,同时也为一般弯道及平直路段上冲突风险研究提供了借鉴思路。受时间所限,本研究仅对单个急弯路段的追尾冲突进行了系统研究,难以将结论移植至连续急弯、弯坡组合等其他事故多发路段,同时追尾冲突时空演化规律只考虑冲突发生的可能性,并未体现出潜在碰撞事故的严重程度。后续应拓展研究范围,可侧向冲突等纳入考虑,并研究连续弯道、回旋曲线等其他形式弯道的交通冲突相关问题,同时系统考量潜在碰撞事故的发生概率及严重程度。

## 参考文献

- [1] WANG Y, PRATO C G. Determinants of injury severity for truck crashes on mountain expressways in China: a case-study with a partial proportional odds model[J]. *Safety Science*, 2019, 117: 100
- [2] XIN T, XU J, GAO C, et al. Research on the speed thresholds of trucks in a sharp turn based on dynamic rollover risk levels[J]. *PLoS One*, 2021, 16(8): e0256301
- [3] XU J, LUO X, SHAO Y M. Vehicle trajectory at curved sections of two-lane mountain roads: a field study under natural driving conditions[J]. *European Transport Research Review*, 2018, 10(1): 12
- [4] SALEEM T, PERSAUD B. Another look at the safety effects of horizontal curvature on rural two-lane highways [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 106: 149
- [5] MINDERHOUD M M, BOVY P. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2001, 33(1): 89
- [6] 戴晓峰,谢世坤,覃文文,等. 基于轨迹数据的山区危险性弯道路段交通事故风险动态预测[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 277

Ji Xiaofeng, Xie Shikun, Qin Wenwen, et al. Dynamic prediction

- of traffic accident risk in risky curve sections based on vehicle trajectory data[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 277
- [7] 马艳丽,祁首铭,吴昊天,等. 基于PET算法的匝道合流区交通冲突识别模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(2): 142
  - MA Yanli, Qi Shouming, Wu Haotian, et al. Traffic conflict identification model based on post encroachment time algorithm in ramp merging area [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(2): 142
  - [8] CHARLY A, MATHEW T V. Estimation of traffic conflicts using precise lateral position and width of vehicles for safety assessment [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 132: 105264
  - [9] ORSINI F, GECHELE G, ROSSI R, et al. A conflict-based approach for real-time road safety analysis: comparative evaluation with crash-based models [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 161: 106382
  - [10] 姜雪娇,郭唐仪. 基于轨迹数据的高速公路分流区冲突替代指标研究[J]. *交通信息与安全*, 2016, 34(2): 39
  - JIANG Xuejiao, GUO Tangyi. Development of alternative indicators of conflict at freeway diverging area using trajectory data [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2016, 34(2): 39
  - [11] LI Y, WU D, LEE J, et al. Analysis of the transition condition of rear-end collisions using time-to-collision index and vehicle trajectory data[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 144: 105676
  - [12] 柳本民,廖岩枫,涂辉招,等. 基于模拟实验的低等级公路车辆过弯风险预测模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 499
  - LIU Benmin, LIAO Yanfeng, TU Huizhao, et al. Risk prediction model of vehicle driving in small radius curves based on simulation experiment[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(4): 499
  - [13] 房锐,张琪,胡澄宇,等. 基于风险矩阵的干线公路弯道路段交通冲突风险评估模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(2): 166
  - FANG Rui, ZHANG Qi, HU Chengyu, et al. Risk assessment model based on risk matrix for traffic conflict on arterial highway bend section[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(2): 166
  - [14] VOGEL K. A comparison of headway and time to collision as safety indicators[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2003, 35(3): 427
  - [15] KUTNER M H, NACHTSHEIM C J, NETER J, et al. Applied linear regression models [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2004
  - [16] SHANGGUAN Q, FU T, WANG J, et al. Quantification of rear-end crash risk and analysis of its influencing factors based on a new surrogate safety measure[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 5551273