

文章编号:1671-8879(2017)02-0081-08

# 高速公路施工区车流跟驰追尾冲突风险

李 耘<sup>1,2</sup>, 张生瑞<sup>3</sup>, 茹澔博<sup>3</sup>

(1. 淮阴工学院 江苏省交通运输与安全保障重点实验室, 江苏 淮安 223003; 2. 淮阴工学院 交通工程学院, 江苏 淮安 223003; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了在传统交通冲突评价方法不适用于施工区的情况下,定量研究高速公路施工区警告区、上游过渡区、缓冲区和作业区的车辆跟驰追尾冲突风险程度,以车辆减速率为中间变量,运用碰撞时间函数 TTC 和驾驶人特性之间的关系,研究高速公路施工区车辆跟驰追尾冲突风险阈值;根据车辆不同减速率对应的驾驶人生理和心理反应程度,建立碰撞时间函数、车辆减速率与驾驶人特性之间的关系模型,提出基于驾驶人特性的高速公路施工区跟驰追尾冲突风险阈值的确定方法;根据减速率的划分范围和减速率与碰撞时间函数的关系,将高速公路施工区各区段的车辆跟驰追尾冲突风险程度划分为安全、较为安全、一般冲突和严重冲突 4 个风险等级,并以西安—临潼高速公路改扩建施工区为应用实例,采用实际调查数据评价高速公路施工区各区段的冲突风险程度。研究结果表明:警告区的跟驰追尾冲突风险程度最高,其冲突风险阈值、冲突点数和冲突比例都明显高于其他区段;对于同一区段,交通量越大,跟驰追尾冲突的风险性越高。该研究结果可对高速公路施工区各区段产生跟驰追尾冲突的可能性进行预判,防止交通事故的发生,同时还可对交通安全水平进行定量化判别。

**关键词:**交通工程;施工区;追尾冲突;驾驶人特性;风险阈值

**中图分类号:**U491.3 **文献标志码:**A

## Car following rear-end conflict risk of freeway work zone

LI Yun<sup>1,2</sup>, ZHANG Sheng-rui<sup>3</sup>, RU Mian-bo<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory for Traffic and Transportation Security, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, Jiangsu, China; 2. Faculty of Transportation Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, Jiangsu, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to quantitatively study the car following rear-end conflict risk degree of the warning area, upstream transition area, buffer space and operation area of freeway work zone on the condition that traditional method of traffic conflict evaluation can not be applied to freeway work zone, taking the vehicle deceleration rate as intermediate variable, the relationship between collision time function TTC and the driver's characteristics was used to study the car following rear-end conflict threshold. According to physiological and psychological reactions of the driver corresponding to different vehicle deceleration rates, the relationship model among collision time

收稿日期:2016-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51608221,51408252);江苏省科技厅政策引导类计划(产学研合作)——前瞻性联合研究项目(BY201606-01);江苏省交通运输与安全保障重点实验室开放基金项目(TTS2016-07);江苏省“333 工程”科研项目(BRA2016454)

作者简介:李 耘(1985-),女,甘肃陇西人,讲师,工学博士,E-mail:lyhyit@163.com。

function, deceleration rate and the driver's physiological and psychological characteristics was established, and the determination method of car following rear-end conflict risk threshold in freeway work zone based on the driver's characteristics were proposed. According to the division scope of vehicle deceleration rates and the relationship between deceleration rate and collision time function, the car following rear-end conflict risk degree of freeway work zone in each section were divided into four risk levels, namely, safe, not very safe, general conflict and serious conflict. Taking the reconstruction work zone of Xi'an to Lintong Freeway as an example, the field data was used to evaluate the conflict risk degree of freeway work zone in each section. The results show that the car following rear-end conflict risk in warning area is the highest, the conflict risk threshold, number conflict points and conflict percentage of which are significantly higher than that of other sections. The greater the traffic volume, the higher the risk of car following rear-end conflict for the same section. The research results can predict the possibility of car following rear-end conflict of freeway work zone in each section to prevent traffic accidents. At the same time, the traffic safety level can be determined quantitatively. 4 tabs, 6 figs, 26 refs.

**Key words:** traffic engineering; work zone; rear-end conflict; driver characteristics; risk threshold

## 0 引言

高速公路在养护施工期间通常并不中断日常交通,车道分布变化使得施工区对日常车流形成干扰,引起的交通安全问题愈加突出,主要表现在车流的重分布造成道路通行能力折减和交通事故时有发生<sup>[1]</sup>。为评估高速公路施工区道路交通安全水平和冲突风险程度,在初始研究中有学者采用常用的道路交通事故历史数据来建立相关冲突风险模型,包括多元条件 Logistic 回归模型和修正的负二项分布模型。此类方法以高速公路基本路段、山区高速公路基本路段、高速公路交织区和匝道为研究对象<sup>[2-11]</sup>。然而,由于施工区具有持续时间短,交通事故数据积累困难和道路交通环境复杂的特点,使交通事故数据统计结果不能满足统计分析的要求。因此,近年的研究集中在结合交通流实时监测和冲突发生条件来判断车辆发生追尾冲突的风险程度。Cunto 等采用避免冲突减速率模型(deceleration rate to avoid the crash, DRAC)来评价单车风险<sup>[12]</sup>;Weng 等采用碰撞时间函数 TTC 建立冲突风险模型以研究新加坡某城市施工区合流区的车辆合流和跟驰冲突风险<sup>[13-14]</sup>;孟祥海等引入避免碰撞减速率的概念,并采用敏感性分析法研究了高速公路施工区警告区和合流区的车辆追尾风险度与影响因素之间的关系<sup>[15]</sup>;Qu 等采用 TTC 和 DRAC 法对城市快速路的车速、车速标准差和交通量等安全评价指标进行了对比分析<sup>[16]</sup>;Gao 等采用 TTC 和 DRAC 法分别计算了半幅封闭施工区和单向行车

道封闭施工区合流区和作业区的车辆追尾冲突数和冲突发生的可能性<sup>[17]</sup>。张姝玮等利用 Vissim 软件建立了施工区仿真模型,以交通冲突率作为评价施工区行车风险的指标,建立了施工区行车风险评价模型并进行了风险分析<sup>[18]</sup>。上述研究虽然采用交通冲突技术代替了历史交通事故数据统计方法,以适应施工区道路交通环境的特殊性,但是其研究主要集中于国外施工区在混合车流情况下的追尾冲突,且未划分交通冲突风险的阈值。

为了定量描述跟驰状态下前后车辆发生冲突的可能性,Olsen 采取 30 s 作为前后两车发生冲突可能性的临界值<sup>[19]</sup>;Noy 提出防撞预警阈值为 3 s<sup>[20]</sup>;孟祥海等根据其计算的 TTC 值对风险程度进行了直接划分,将 TTC 小于 2 s 的冲突定义为严重冲突,将 TTC 介于 2~6 s 的定义为一般冲突<sup>[21-22]</sup>。由此可知,交通冲突严重程度可用 TTC 的取值划分范围进行描述,但是目前对于 TTC 值的划分标准却不完全统一,多为直接划分,且缺少划分依据。由于施工区道路交通环境复杂,交通设施设置密度较高,交通信息量大和车速变化频繁的特点,对驾驶人生理和心理特性产生明显的影响,特别是当 TTC 减小时,纵向安全性无法保证,造成驾驶人心理压力。因此,有必要以道路交通环境条件变化对驾驶人的影响程度为基础,研究车辆跟驰追尾冲突风险阈值。鉴于此,本文采用碰撞时间函数分析方法建立驾驶人生理和心理反应特性、车辆减速率及碰撞时间函数 TTC 之间的关系,对高速公路施工区各个区段的车辆跟驰追尾冲突风险阈值进行研究,并定量评价冲突风险程度。

## 1 施工区跟驰数据采集

### 1.1 数据来源

根据《公路养护作业安全规程》(JTJ H30—2015),高速公路施工区布局分为警告区、上游过渡区、缓冲区、作业区和下游过渡区。以西安—临潼高速公路(简称西临高速)改扩建期间单向行车道封闭施工区布局为研究对象,重点研究施工区各区段的车辆跟驰追尾冲突风险阈值和风险程度。原西临高

速基本路段为每方向 2 车道,车道宽度为 3.75 m,在养护施工期间采取货车强制性分流措施,施工区封闭段全长 2 km,采取锥形交通路标设施进行隔离,锥形交通路标位于车道分隔线上,同时紧贴内侧车道边缘线。施工区调查天气和时段为白天晴天,且未进行施工的时段,施工区限速 40 km/h,采用配备旗手、设置警告标志和限速标志等交通管理措施,西临高速施工区布局如图 1 所示,图中箭头所示为方向车流行驶方向。

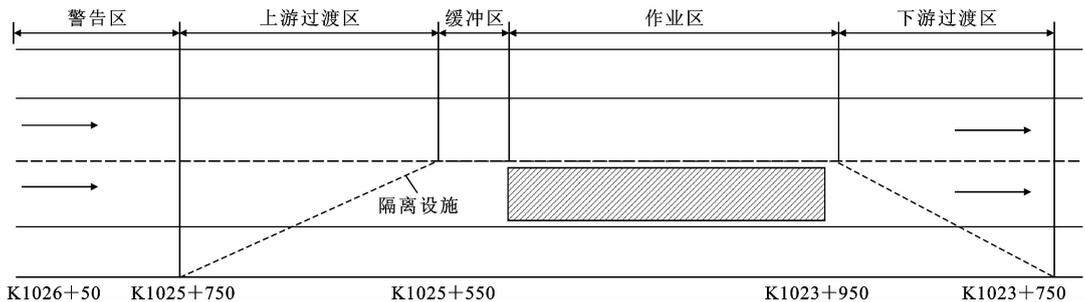


图 1 西临高速施工区布局

Fig. 1 Work zones layout of Xi'an to Lintong Freeway

在施工区段,车辆往往需要逐次减速行驶,部分车辆还要采取变道合流(或分流)的驾驶行为,这就显著增加了发生交通冲突甚至交通事故的风险,造成施工区追尾冲突和变道(或分合流)处的侧向冲突<sup>[23]</sup>。由于

在车辆通过作业区进入下游过渡区后开始加速,车辆行驶处于离散状态,车头间距逐渐增大,追尾冲突发生的概率减小,因此以施工区的警告区、上游过渡区、缓冲区和作业区作为研究对象区段,如图 2 所示。

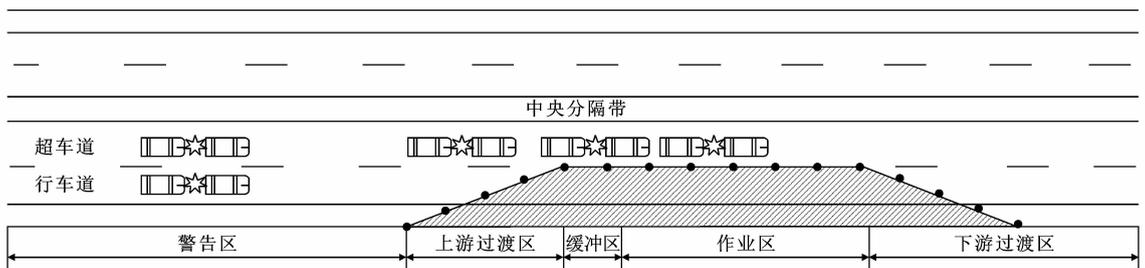


图 2 西临高速施工区车流跟驰追尾冲突区域

Fig. 2 Car following rear-end conflict section of Xi'an to Lintong Freeway work zones

### 1.2 数据获取与处理

数据获取采用基于 Metro Count 5600 仪器的机械计数法,该设备将车型划分为:微型车(包括微型面包车)、小型客车、小型货车、轻型货车(SV、SVT)、2 轴或 3 轴货车(TB2、TB3),4 轴卡车或多轴铰接车辆(T4、ART3、ART4、ART5、ART6)、集装箱运输车和拖挂车(BD、DRT)等。数据采集内容包括警告区、上游过渡区、缓冲区和作业区的车头时距、车辆长度、车辆类型、车辆轴数和车速等。

西临高速改扩建期间采取货车分流的措施,交通组成为小型车和 2 轴货车。施工区的警告区、上游过渡区、缓冲区和作业区的样本量分别为 2 974、

2 867、2 796、2 776 veh/h。施工区车辆跟驰追尾冲突发生的基本条件为同车道内后车车速大于前车车速,数据处理时对相邻车的车速进行连续两两对比,筛选出后车车速大于前车车速的数据进行研究。

## 2 施工区车辆跟驰追尾冲突风险研究方法

由于碰撞时间函数 TTC 能随时反映施工区车辆跟驰追尾冲突风险,并且已在施工区安全评价方面得到一定应用,故选取碰撞时间函数 TTC 作为施工区车辆跟驰追尾冲突风险的研究方法。施工区车辆跟驰追尾冲突表现为前后车辆冲突,即在某时

刻  $t$ , 后车车速大于前车车速且车头间距小于安全间距时, 若不采取任何措施, 后车与前车会发生追尾。此时, 从  $t$  时刻开始不采取措施到发生追尾碰撞的时刻为止, 该时间称为碰撞时间函数, 即将冲突时间作为发生事故的风险, 计算公式为<sup>[24-25]</sup>

$$I_{TTC_i} = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_{i-1}}{\dot{X}_i(t) - \dot{X}_{i-1}(t)} \quad (1)$$

式中:  $TTC_i$  为前车车辆  $i-1$  与后车车辆  $i$  之间的距离小于安全间距时, 在不采取任何措施的情况下两车发生追尾碰撞所需的时间(s),  $I_{TTC_i}$  为  $TTC_i$  的计算参数;  $X_i(t)$ 、 $X_{i-1}(t)$  分别为车辆  $i$ 、 $i-1$  的位置;  $l_{i-1}$  为前车车辆  $i-1$  的车身长度;  $\dot{X}_i(t)$ 、 $\dot{X}_{i-1}(t)$  分别为车辆  $i$ 、 $i-1$  的速度。

式(1)分子为两车之间的车头间距减去前车车辆的长度, 由于 Metro Count 5600 调查数据为车头时距、车辆长度和车速, 因此计算中用车头时距和车速替换分子, 则式(1)可表示为<sup>[26]</sup>

$$I_{TTC_i} = \frac{\dot{X}_i(t)h_i - l_{i-1}}{\dot{X}_i(t) - \dot{X}_{i-1}(t)} \quad (2)$$

式中:  $h_i$  为车辆  $i-1$  与车辆  $i$  之间的车头时距。

### 3 施工区车辆跟驰追尾冲突风险阈值

#### 3.1 模型构建

由  $TTC$  的定义和式(1)可以看出,  $TTC$  为前后两车相对距离与相对速度的比, 反映出前后两车发生碰撞的可能性大小, 即交通冲突的剧烈程度。当前方车辆比后方车辆速度快时, 或者两车速度接近时, 交通冲突发生的可能性趋近于 0, 碰撞时间函数  $TTC$  趋于  $+\infty$ ; 而当  $TTC$  的值越小时, 交通冲突发生的概率越大。当车辆处于跟驰状态时, 后车车辆驾驶人的视线被阻挡, 无法及时获取前方交通信息, 若前导车的  $TTC$  过小, 则无法保证车辆行驶的纵向安全性, 给驾驶人造成巨大的心理压力。同时, 施工区复杂的道路交通环境也对驾驶人生理和心理特性产生明显的影响。因此, 应以施工区车辆跟驰对驾驶人心理和生理影响程度为基础, 研究车辆跟驰追尾冲突的风险阈值。车辆减速度对驾驶人的血压、脉搏和驾驶行为等生理和心理有明显影响, 根据驾驶人交通心理研究结果, 不同减速度下驾驶人心理和生理反应见表 1<sup>[12]</sup>。

由表 1 可以看出, 减速度越大, 驾驶人生理和心理不良反应越明显, 则发生冲突的可能性越大, 因此根据减速度的划分范围提出交通冲突等级: 减速度小于  $2 \text{ m/s}^2$  时, 交通冲突等级为安全; 减速度位于

表 1 驾驶人在不同减速度下的生理和心理反应<sup>[27]</sup>

Tab. 1 Physiological and psychological reactions of driver under different decelerations

减速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	驾驶人的生理和心理反应	忍受时间/s
[2, 3]	腹部受压	>25
[3, 6]	胸部逐渐绷紧, 疼痛, 呼吸和说话困难, 视觉模糊	10~25
8	手和脚不能抬起	1

$[2 \text{ m/s}^2, 3 \text{ m/s}^2]$  时, 交通冲突为较为安全; 减速度位于  $[3 \text{ m/s}^2, 6 \text{ m/s}^2]$  时, 交通冲突等级为一般冲突; 减速度大于  $6 \text{ m/s}^2$  时, 交通冲突等级为严重冲突。根据以上分析, 为定义施工区车辆跟驰交通冲突不同等级与  $TTC$  取值的关系, 须根据调查数据确定  $TTC$  和减速度之间的关系。由于在用 Metro Count 5600 设备调查的过程中, 车辆的减速度不能直接获得, 同时为反映前后车发生交通冲突的可能性, 可引入相对减速度  $a_{d(i)}$  的概念。施工区车辆跟驰追尾冲突表现为前后车辆冲突, 当前车速度大于后车速度且发生减速时, 后车需要减速以避免与前车发生追尾冲突, 其对后车的减速度记为相对减速度  $a_{d(i)}$ 。由于施工区各车辆间车头时距较短, 可假设车辆减速为匀减速变化, 根据车速、加速度与距离之间的关系, 可将  $a_{d(i)}$  表示为

$$a_{d(i)} = \begin{cases} \frac{\dot{X}_i^2(t) - \dot{X}_{i-1}^2(t)}{2d_{i-1}} & \dot{X}_i(t) > \dot{X}_{i-1}(t) \\ 0 & \dot{X}_i(t) \leq \dot{X}_{i-1}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $d_{i-1}$  为前后车的车头间距。

为避免前后车发生碰撞,  $d_{i-1}$  可表示为

$$\begin{cases} d_{i-1} = X_i(t) - X_{i-1}(t) = \dot{X}_i(t)h_i \\ d_{i-1} \geq l_{i-1} + L_s \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $L_s$  为车辆  $i-1$  与车辆  $i$  之间的安全距离。

根据式(3)、式(4)可得车辆的  $a_{d(i)}$  为

$$a_{d(i)} = \begin{cases} \frac{\dot{X}_i^2(t) - \dot{X}_{i-1}^2(t)}{2\dot{X}_i(t)h_i} & \dot{X}_i(t) > \dot{X}_{i-1}(t) \\ 0 & \dot{X}_i(t) \leq \dot{X}_{i-1}(t) \end{cases} \quad (5)$$

根据西临高速施工区交通流数据, 利用式(1)、式(5)分别计算 4 个调查区段的  $a_{d(i)}$  和  $TTC$  值, 并确定两者之间的关系模型。由于当  $TTC > 30 \text{ s}$  时, 前后车辆不发生交通冲突, 所以选取  $0 \text{ s} < TTC \leq 30 \text{ s}$  的数据和对应的减速度数据来确定  $TTC$  与  $a_{d(i)}$  之间的关系, 如下页图 3~图 6 所示。

警告区、上游过渡区、缓冲区和作业区的时间碰撞函数  $TTC$  和相对减速度的关系为

$$I_{TTC_1} = 43.651e^{-0.509a_{d(i)}}, R^2 = 0.937 \quad (6)$$

$$I_{TTC_2} = 35.394e^{-0.591a_{d(i)}}, R^2 = 0.809 \quad (7)$$

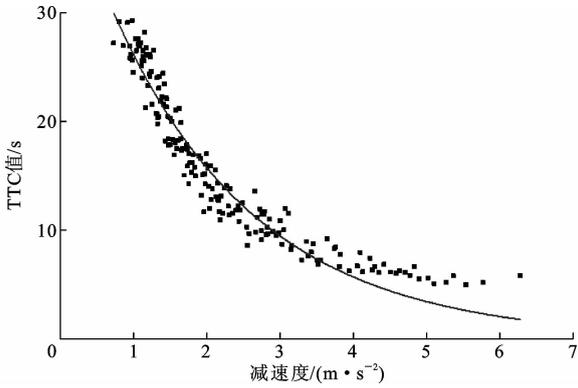


图 3 警告区 TTC 与减速度之间的关系  
Fig. 3 Relationship between TTC and deceleration in warning area

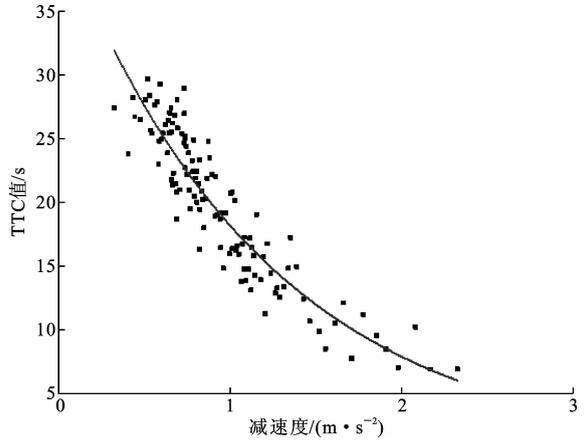


图 6 作业区 TTC 与减速度之间的关系  
Fig. 6 Relationship between TTC and deceleration in activity area

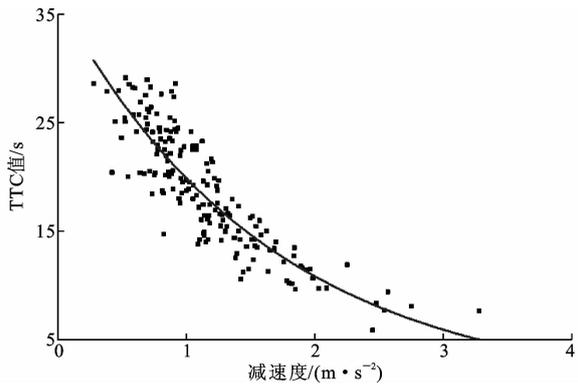


图 4 上游过渡区 TTC 与减速度之间的关系  
Fig. 4 Relationship between TTC and deceleration in upstream transition area

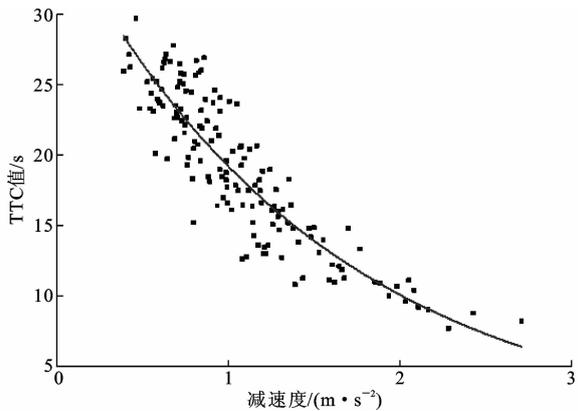


图 5 缓冲区 TTC 与减速度之间的关系  
Fig. 5 Relationship between TTC and deceleration in buffer area

$$I_{TTC_3} = 36.538e^{-0.645a_{d(i)}}, R^2 = 0.828 \quad (8)$$

$$I_{TTC_4} = 41.654e^{-0.835a_{d(i)}}, R^2 = 0.875 \quad (9)$$

式中:  $R^2$  为判定系数。

### 3.2 冲突风险阈值划分

将减速度对于交通冲突不同等级的划分标准值 2、3、6  $m/s^2$  分别代入式(6)~式(9), 计算得出 4 个调查点在不同减速度临界值时对应的 TTC 值, 计算结果见表 2。

根据上述计算, 将施工区警告区、上游过渡区、缓冲区和作业区 4 个区段调查点的交通冲突风险等级划分为安全、较为安全、一般冲突和严重冲突 4 个级别, 各区段对应的风险阈值见下页表 3。

由表 3 可以看出, 车辆由基本路段行驶到施工区时, 车速明显降低, 导致警告区冲突风险程度最高, 当  $TTC > 16$  s 时为安全状态; 随着车辆进入施工区, 车速逐渐降低至平稳通过, 施工区其余各区段冲突风险程度逐渐降低。

## 4 施工区车辆跟驰追尾冲突风险

确定 TTC 的等级阈值后, 即可对施工区进行车辆跟驰交通冲突分析。根据中国学者对施工区车流运行规律可以看出, 施工区上游过渡区和缓冲区车流刚经过合流, 车流不稳定, 为对比施工区各区段位置和交通流量大小对施工区交通冲突的影响, 对施工区各区段车辆跟驰追尾冲突进行分析对比, 计算结果见下页表 4。

表 2 施工区车辆跟驰追尾冲突不同等级情况下 TTC 值计算结果

Tab. 2 Calculation results of TTC value under different car following rear-end conflict levels

调查位置	警告区			上游过渡区			缓冲区			作业区		
	2	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6
减速度临界值/ $(m \cdot s^{-2})$	2	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6
TTC 计算值/s	15.8	9.5	2.1	10.8	5.9	1.1	9.8	5.1	0.7	7.9	3.4	0.3
TTC 临界值/s	16.0	10.0	3.0	11.0	6.0	2.0	10.0	6.0	1.0	8.0	4.0	1.0

表3 施工区车辆跟驰追尾冲突风险阈值

Tab. 3 Risk threshold of car following rear-end conflict in work zone

交通冲突风险等级		安全	较为安全	一般冲突	严重冲突
减速度临界值/( $m \cdot s^{-2}$ )		$<2$	$[2,3)$	$[3,6]$	$>6$
对应 TTC 临界值/s	警告区	$>16.0$	$(10.0,16.0]$	$[3.0,10.0]$	$<3.0$
	上游过渡区	$>11.0$	$(6.0,11.0]$	$[2.0,6.0]$	$<2.0$
	缓冲区	$>10.0$	$(6.0,10.0]$	$[1.0,6.0]$	$<1.0$
	作业区	$>8.0$	$(4.0,8.0]$	$[1.0,4.0]$	$<1.0$

表4 基于TTC的不同车辆跟驰追尾冲突等级计算结果

Tab. 4 Calculation results of different rear-end conflict degrees based on TTC

施工区位置		警告区		上游过渡区		缓冲区		作业区末端	
交通量/( $veh \cdot h^{-1}$ )		586	953	688	967	646	952	622	1 064
严重冲突	个数	0	1	0	0	0	1	0	0
	占TTC样本总量比例/%	0	0.10	0	0	0	0.11	0	0
一般冲突	个数	32	109	1	7	0	5	0	0
	占TTC样本总量比例/%	5.46	11.44	0.15	0.72	0	0.53	0	0
较为安全	个数	37	81	12	71	6	9	4	12
	占TTC样本总量比例/%	6.31	8.50	1.74	7.34	0.93	0.95	0.62	1.13
安全	个数	517	762	675	889	640	937	618	1 052
	占TTC样本总量比例/%	88.23	79.96	98.11	91.93	99.07	98.42	99.36	98.87

由表4可以看出,对于单向行车道封闭施工区,施工区警告区的车辆跟驰追尾交通冲突数和比例明显高于其他几个区段,随着车辆通过各个区段,跟驰追尾交通冲突逐渐减少,安全性提高。此外,对于同一区段而言,交通量越大,车辆跟驰追尾冲突风险越高。

## 5 结 语

(1)建立了施工区各区段的碰撞时间和车辆减速率模型,可以根据实时监测的交通流数据,定量计算出车辆跟驰追尾冲突的取值。

(2)针对施工区道路交通环境复杂且对驾驶人产生明显影响的特点,引入碰撞时间函数TTC和驾驶人特性研究结果,对施工区车辆跟驰追尾冲突风险等级进行划分,重点研究了单向行车道封闭施工区4个区段不同冲突风险等级的阈值。

(3)对于单向行车道封闭施工区,由于车辆由正常路段进入施工区后车速变化幅度较大,造成警告区的阈值明显大于施工区其他几个区段,车辆跟驰追尾冲突数和比例高于其他区段;同时对于施工区同一区段,车辆跟驰追尾风险随着交通量增加而增大。

(4)通过对施工区车辆跟驰追尾冲突风险分析,可以根据各区段交通流实时特性判断交通冲突的风险程度,有针对性地采取交通管制措施,以减少施工

区车速大幅度突变引发的交通事故。

(5)本文只考虑了施工区车辆跟驰追尾冲突风险,未综合考虑合流对车辆追尾冲突的影响和施工机械、交通隔离设施等对车辆行驶造成的风险等,这些都是在今后研究中需要进一步考虑的内容。

## 参考文献:

### References:

- [1] 陕西高速集团,长安大学.黄土地区高速公路改扩建施工交通组织与安全保障技术研究(专题一)——潼关—宝鸡高速公路改扩建工程现状交通流特性分析[R].西安:陕西高速集团,2010.  
Shaanxi Highway Group, Chang'an University. Research on traffic organization and security technology of freeway extension project in loess areas (special subject I): analysis on traffic flow characteristics of Tongguan to Baoji Freeway extension project [R]. Xi'an: Shaanxi Highway Group, 2010.
- [2] 马壮林,张宏璐,杨 杨.高速公路追尾碰撞事故起数预测模型研究[J].中国安全科学学报,2015,25(4): 58-62.  
MA Zhuang-lin, ZHANG Hong-lu, YANG Yang. Research on rear-end collision frequency prediction on expressway [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25 (4): 58-62.
- [3] 徐铖铖,刘 攀,王 炜,等.基于判别分析的高速公路交通安全实时评价指标[J].东南大学学报:自然科

- 学版,2012,42(3):555-559.
- XU Cheng-cheng, LIU Pan, WANG Wei, et al. Discriminant analysis based method to develop real-time crash indicator for evaluating freeway safety[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(3): 555-559.
- [4] 孟祥海,张晓明,郑 来. 基于线形与交通状态的山区高速公路追尾事故预测[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 113-118.
- MENG Xiang-hai, ZHANG Xiao-ming, ZHENG Lai. Prediction of rear-end collision on mountainous expressway based on geometric alignment and traffic conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 113-118.
- [5] LORD D, MANNERING F. The statistical analysis of crash-frequency data: a review and assessment of methodological alternatives [J]. Transportation Research Part A, 2010, 44(5): 291-305.
- [6] HARB R, RADWAN E, YAN X D, et al. Freeway work-zone crash analysis and risk identification using multiple and conditional logistic regression[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(5): 203-214.
- [7] 徐铖铖,刘 攀,王 炜,等. 恶劣天气下高速公路实时事故风险预测模型[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(1): 68-73.
- XU Cheng-cheng, LIU Pan, WANG Wei, et al. Real time crash risk prediction model on freeways under nasty weather conditions[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(1): 68-73.
- [8] KWAK H C, KHO S Y. Predicting crash risk and identifying crash precursors on Korean expressways using loop detector data [J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 88: 9-19.
- [9] HASSAN H M, ABDEL-ATY M A. Predicting reduced visibility related crashes on freeways using real-time traffic flow data[J]. Journal of Safety Research, 2013, 45: 29-36.
- [10] KIM J K, WANG Y H, ULFARSSON G F. Modeling the probability of freeway rear-end crash occurrence [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(1): 11-19.
- [11] WANG L, SHI Q, ABDEL-ATY M A. Predicting crashes on expressway ramps with real-time traffic and weather data [J]. Transportation Research Record, 2015(2514): 32-38.
- [12] CUNTO F, SACCOMANNO F F. Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections[J]. Accident Analysis & Prevention, 2008, 40(3): 1171-1179.
- [13] WENG J X, MENG Q. Rear-end crash potential estimation in the work zone merging areas[J]. Journal of Advanced Transportation, 2014, 48(3): 238-249.
- [14] WENG J X, XUE S, YANG Y, et al. In-depth analysis of drivers' merging behavior and rear-end crash risks in work zone merging areas[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 77: 51-61.
- [15] 孟祥海,徐汉清,王 浩,等. 基于 TTC 及 DRAC 的高速公路施工区追尾冲突研究[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(6): 6-10.
- MENG Xiang-hai, XU Han-qing, WANG Hao, et al. Rear-end conflict of freeway work zone based on TTC and DRAC[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, 30(6): 6-10.
- [16] QU X B, YAN K, ERWIN O, et al. Safety evaluation for expressways: a comparative study for macroscopic and microscopic indicators[J]. Traffic Injury Prevention, 2014, 15(1): 89-93.
- [17] GAO L B, MENG X H, XU H Q. Freeway work zone rear-end conflict study based on two traffic conflict indicators[C]//PENG Q Y, WANG K C P. Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Engineering. Reston: ASCE, 2013: 558-563.
- [18] 张姝玮,黄富斌,孟 杰. 基于 Vissim 仿真的高速公路施工区行车风险分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(6): 63-66, 70.
- ZHANG Shu-wei, HUANG Fu-bin, MENG Jie. Analysis on driving risk of expressway work zone based on Vissim[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(6): 63-66, 70.
- [19] OLSEN E C B. Modeling slow lead vehicle lane changing [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [20] NOY Y I. Ergonomics & safety of intelligent driver interfaces[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [21] 孟祥海,徐汉清,史永义. 高速公路施工作业区追尾风险及其突出影响因素识别[J]. 公路交通科技, 2012, 29(12): 133-138.
- MENG Xiang-hai, XU Han-qing, SHI Yong-yi. Identification of rear-end collision risk on freeway work zone and its prominent influencing factors[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(12): 133-138.
- [22] 吴 彪. 高速公路作业区行车风险与安全控制策略 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.

- WU Biao. Driving risk and safety control strategy for work zones of expressway[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [23] 徐景翠. 高速公路改扩建作业区保通技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- XU Jing-cui. Studies on the plan of maintaining traffic moving in reconstruction work zone of highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [24] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2001, 23(1): 89-97.
- [25] 蒋锐. 高速公路基本路段交通安全分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
- JIANG Rui. Studies on the safety of basic freeway session[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2005.
- [26] 李耘. 高速公路施工区交通流特性与安全风险分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LI Yun. Analysis on traffic characteristics and the safety risk of freeway workzone[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [27] 马跃. 高速公路隧道交通流实时行车风险模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- MA Yue. Research on real-time driving risk model of highway tunnel traffic flow [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- (上接第 80 页)
- [19] LI J C, MA G W. Experimental study on stress wave propagation across a filled rock joint[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2009, 46(3): 471-478.
- [20] 夏致晰, 张生余, 涂建刚. 爆炸应力波在层状岩体中的传播与衰减[J]. *河南科学*, 2007, 25(5): 727-730.
- XIA Zhi-xi, ZHANG Sheng-yu, TU Jian-gang. The propagation and attenuation of the explosive stress wave in layered rock mass[J]. *Henan Science*, 2007, 25(5): 727-730.
- [21] 孙冰, 袁登, 曾晟, 等. 爆炸应力波在层状节理岩体中的传播规律试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(11): 118-123.
- SUN Bing, YUAN Deng, ZENG Sheng, et al. Experimental study on propagation law of explosion stress wave in bedding joint rock mass[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(11): 118-123.
- [22] 张振刚, 张鸿儒, 张昀青, 等. 层状围岩隧道施工爆破与锚固研究[J]. *中国公路学报*, 2003, 16(2): 74-77.
- ZHANG Zhen-gang, ZHANG Hong-ru, ZHANG Yun-qing, et al. Research on dynamiting and anchor in tunneling of stratified rock[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(2): 74-77.
- [23] 杨峰, 陈咏泉, 王新明, 等. 水平层状围岩隧道光面爆破效果分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(6): 956-959.
- YANG Feng, CHEN Yong-quan, WANG Xin-ming, et al. Analysis of tunnel smooth blasting in horizontal layered rockmass[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(6): 956-959.
- [24] 何英伟, 周中, 张运良, 等. 水平层状围岩隧道超欠挖控制技术研究[J]. *公路与汽运*, 2010(5): 199-201.
- HE Ying-wei, ZHOU Zhong, ZHANG Yun-liang, et al. Research on the excessive and insufficient excavation control technology in horizontal layered rock-mass tunnel [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2010(5): 199-201.
- [25] 马建军, 程良奎, 蔡路军. 爆破应力波的传播及其远区破坏效应研究现状述评[J]. *爆破*, 2005, 22(2): 17-21, 26.
- MA Jian-jun, CHENG Liang-kui, CAI Lu-jun. Present situation of research on propagation of blasting stress wave and rock fragmentation effect in remote area[J]. *Blasting*, 2005, 22(2): 17-21, 26.