

基于自然驾驶研究的直行追尾危险场景 诱导因素分析

吴斌^{1,2}, 朱西产¹, 沈剑平², 孙晓宇¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 国家机动车产品质量监督检验中心(上海), 上海 201805)

摘要: 基于中国自然驾驶工况数据, 筛选了直行追尾危险工况, 通过修正的 DREAM(driving reliability and error analysis method)方法进行了诱导因素分析。对直行追尾危险场景依据车辆行驶特点进行了场景细分, 分析了不同场景细分类型下诱导因素逻辑图。结果表明, 在直行追尾场景中驾驶员的“力度不足”和“距离过短”为占比最高的紧急事件(危险特征), 并分析了追尾场景中 4 个细分类型对应的紧急事件特点。研究发现, 中国驾驶员的驾驶习惯与欧美有较大差别, 直行追尾危险场景中最主要的深层诱导因素为驾驶员习惯性期待他车特定驾驶行为等不良驾驶习惯, 而不是在驾驶过程中与驾驶操纵无关的第二行为。

关键词: 自然驾驶工况; 追尾危险场景; 驾驶可靠性及差错分析方法; 诱导因素分析

中图分类号: U46

文献标志码: A

Analysis of Causation of Rear-End Incidents Based on Naturalistic Driving Study

WU Bin^{1,2}, ZHU Xichan¹, SHEN Jianping², SUN Xiaoyu¹

(1. School of Automotive Studies, Shanghai 201804, China; 2. National Center of Supervision and Inspection on Motor Vehicle Products Quality (Shanghai), Shanghai 201805, China)

Abstract: Based on the rear-end incidents extracted from the China naturalistic driving data, the DREAM (driving reliability and error analysis method) was modified and used to identify contribution factors and causation patterns in these incidents. Those rear-end incidents were respectively classified in different driving scenarios, and the logic diagrams of the contribution factors with different detailed categories were obtained. The results showed that the main factors behind the rear-end incidents was the adoption of “insufficient force” and “small safety margins”. The characteristics of critical events of four detail categories in the rear-end

scenarios were also analyzed. In contrast to the results obtained from previous studies in the US and Europe, the deep-seated contribution factors was driver's habitual expectation for the specific driving behavior of other traffic users, instead of the second driving behavior.

Key words: naturalistic driving; rear-end critical scenarios; driving reliability and error analysis method (DREAM); causation analysis

研究交通事故及危险工况的驾驶员行为和诱导因素, 对于设计更加符合实际驾驶员操纵特性的驾驶辅助系统有重要作用。传统的交通事故分析是研究驾驶员行为的方法之一, 但事故现场获取的信息往往无法还原事故发生前后的整个过程。而自然驾驶工况中记录的视频、车辆运动参数等数据信息, 提供了危险发生前的整个过程, 对于分析驾驶员、车辆、环境等三要素对过程的影响提供了依据。

目前国外已开始利用自然驾驶工况中的数据信息, 分析危险工况的诱导因素, 主要集中在分析了驾驶员在驾驶过程中进行非驾驶相关操纵, 如电话、交谈等第二行为, 导致的分神驾驶或注意力不集中等对危险工况发生的影响。Engstrom 等^[1]利用自然驾驶工况采集的数据, 分析了分神驾驶对危险工况发生的影响; Dingus 等^[2]通过 100-Car 的自然驾驶工况数据, 分析了驾驶员分神、注意力不集中等诱导因素对危险工况和交通事故发生的影响。结果表明, 80% 的交通事故以及 65% 的危险工况都是由于驾驶员的分神、注意力不集中造成。上述研究一方面仅是针对单个诱导因素对危险或事故发生的作用, 但实际上危险或事故的发生是多个因素相互作用的结果; 另一方面中国的驾驶工况及驾驶习惯与欧美有较大的差别。

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 上海市科委研发平台项目(16DZ2291000)

第一作者: 吴斌(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为先进驾驶辅助系统开发。E-mail: binw@smvic.com.cn

通信作者: 朱西产(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车主被动安全。E-mail: xczechu@163.com

在描述和推断事故或危险工况发生的主要影响因素,并建立各个诱导因素之间的关系方面,国内外主要采用分析推导统计的方法,通过同一类工况下的事故或危险发生诱因的统计分析,找出该工况下的人、车、环境等主要影响因素。例如哈顿矩阵^[3],李方媛^[4]对重特大道路交通事故进行致因分析研究采用的故障树分析法(fault tree analysis, FTA),查尔姆斯大学 Warner 等^[5]提出的驾驶可靠性以及差错分析方法(driving reliability and error analysis method, DREAM)等。相比于其他方法, DREAM 方法更全面地给出了关于事故演变过程中,可能导致危险发生的相关因素,以及各个因素之间的相互关系等。

本文基于中国自然驾驶工况数据,筛选了直行追尾的危险工况,并对直行追尾场景进行了分类,利用修正后的 DREAM 方法对直行追尾危险的细分场景进行了诱导因素分析。结果表明,中国驾驶员的驾驶习惯与欧美有较大差别,直行追尾危险场景中最主要的深层诱导因素为驾驶员习惯性期待他车特定驾驶行为等不良驾驶习惯而非与驾驶操纵无关的第二行为引起的分神驾驶或注意力不集中。

1 自然驾驶工况的数据采集和筛选

为了研究驾驶员在真实交通环境中的驾驶行为,本文所使用的数据全部来自中国大型实车路试(China field operational test, China-FOT)的自然驾驶工况数据。所有实验车统一安装了针对本实验所设计的数据采集设备,包括 4 个摄像头以及 1 个眼动仪。4 个摄像头视角分别为脚踏板、驾驶员座椅、车辆前方、车辆后方,用以全面记录驾驶过程中驾驶员操作信息和道路环境信息,如图 1 所示。通过 China-FOT 项目采集了 32 名驾驶员的驾驶数据,共计约 3 559 h,总行程 129 109 km。

利用 Sun 等^[6]提出的针对 China-FOT 自然驾驶数据的危险筛选方法,共得到 780 例危险工况,其中直行追尾危险工况占比最高,也是目前 ADAS (advanced driver assistance systems)研究的主要危险场景。本文对危险程度相对较高的 85 例直行追尾危险工况进行诱导因素分析。

2 基于 DREAM 追尾场景分析方法概述

2.1 DREAM 关键要素构成与方法阐述

利用 DREAM 方法可更加全面地分析直行追尾

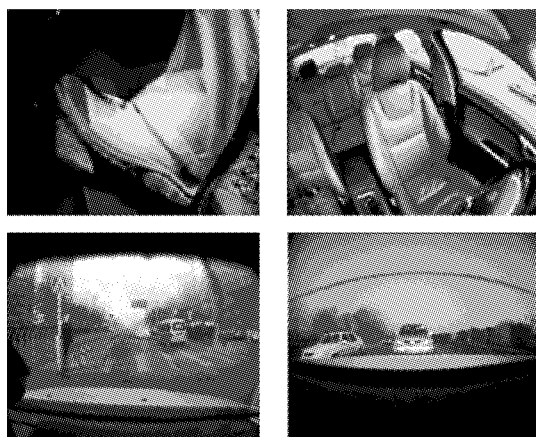


图 1 自然驾驶工况采集中的摄像头视角

Fig. 1 Imaging view of the cameras in naturalistic driving data

危险场景发生的过程,并对诱导因素进行系统分析。DREAM 方法主要包含两个要素:事件类型以及诱导因素。其中事件类型为直接导致事故或者危险事件发生的原因,一般从时间、速度等维度进行描述,如表 1 所示。诱导因素为导致事故或危险发生的因素,一般分为 3 类:驾驶员因素、车辆和道路环境因素以及其他因素,如表 1 所示。在本文后续分析中事件类型和诱导因素的编号,采用 DREAM3.0 版本中的编号方法^[5]。

表 1 DREAM 方法的事件类型和诱导因素分类

Tab. 1 Categories of critical events and contributing factors from DREAM manual

要素	分类	描述
事件类型	时间	过早动作;过晚动作;无动作
	速度	速度过快;速度过慢
	距离	距离过短
	方向	错误的操纵方法
	力度	操纵力度不足;操纵力度过大
诱导因素	驾驶员因素	观察、理解、计划、驾驶习惯问题等
	车辆及环境因素	长期或短期的交互界面问题、车辆设备失效;交通天气原因、道路状态等
	其他因素	个人驾驶目的等原因、道路设计缺陷、车辆设计缺陷等

2.2 DREAM 诱导因素分析方法修正

DREAM 诱导因素的分析方法目前主要应用在交通事故分析中,属于分析推导统计的范畴,但在分析中仍然有一些因素的评判存在偏差,特别是在事件类型的判别。本次所研究的数据基于真实路况视频以及实际采集数据,可以较大程度上降低上述偏差。定义虚拟驾驶员系统来模拟驾驶员的正常驾驶操纵行为。由于筛选出的直行追尾危险工况中的驾驶员操纵基本为紧急制动操纵,故仅建立虚拟驾驶员系统车辆的纵向模型。

正常驾驶状态下驾驶员遵循的原则是保证驾驶的平顺性,即不断调整优化控制的过程,符合人体行为学规律,优化目标如式 1 所示。

$$\min \int_0^T j(t)^2 dt \quad (1)$$

式中: $j(t)$ 为车辆纵向加速度梯度.利用五次多项式来表示制动过程中的车辆纵向位移变化 $S(t)$,并推导出其他运动参数,如式(2)、(3)所示。

$$S(t) = c_1 t + \frac{1}{2} c_2 t^2 + \frac{1}{6} c_3 t^3 + \frac{1}{24} c_4 t^4 + \frac{1}{120} c_5 t^5 \quad (2)$$

$$j(t) = c_3 + c_4 t + \frac{1}{2} c_5 t^2 \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $c_1 \sim c_5$ 分别为五次多项式的拟合参数。

优化约束条件为:①避免碰撞发生;②最大制动减速度绝对值小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (处于正常驾驶状态的

操纵范围)。

假设车辆初始状态: $S(0)=0, v(0)=v_0, a(0)=a_0, v, a$ 分别表示车辆速度和加速度;车辆的最终状态: $S(T)=S_f, v(T)=v_f, a(T)=0$,其中 T 为完成操纵的时间.将车辆的初始状态和最终状态代入多项式表征的运动参量中,通过优化算法可得到车辆的运动参数。

为便于清晰地区分,在分析紧急事件类型时(直接导致本车处于危险场景中的因素)采用专家型分析方法.提取自然驾驶工况中危险发生前的车辆运动参数,利用虚拟驾驶员系统进行模拟仿真,与实际驾驶员操纵进行比较,定性判定造成直行追尾危险工况的主要原因.随后根据 DREAM 的诱导因素分析方法,分析导致驾驶员不当操纵的具体原因.图 2 为修正的 DEAM 方法分析流程。

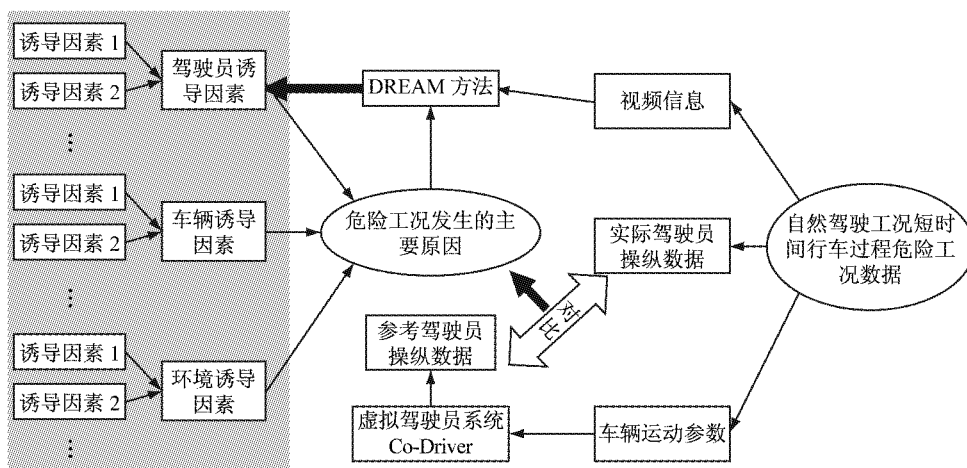


图 2 修正的 DREAM 方法的分析流程

Fig. 2 Analysis process of modified DREAM method

3 追尾危险场景的诱导因素分析

3.1 分析过程

以危险工况 A675 为例,利用修正的 DREAM 方法进行直行追尾危险工况的诱导因素分析。

提取该直行追尾危险工况发生前车辆运动参数,如表 2 所示.将表 2 参数输入到虚拟驾驶员系统中,在此将前车制动时刻作为事件的开始时刻,设置为 0 时刻.在该起危险工况中,本车的右侧车道有变道空间,虚拟驾驶员系统规划了制动和变道两种操纵.本次危险工况中驾驶员采用制动措施,故在此比较制动操纵。

虚拟驾驶员系统模拟了 3 种制动参考操纵,制

表 2 工况 A675 中的运动参数

Tab. 2 Motion parameter of Case A675	
参数类型	参数描述
本车参数	车速 $v_0=81 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;加速度 $a_0=0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
前车参数	车速 $v_1=80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;加速度 $a_1=-3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
相对位置	两车的距离 $D_0=60 \text{ m}$,时距 $T_h=2.7 \text{ s}$
环境参数	交通密度一般,夜间,光照良好

动反应时间分别为 0、1、2 s.虚拟驾驶员系统模拟得到的车辆加速度曲线与实际操纵曲线的比较见图 3,虚拟驾驶员系统模拟的车速曲线与实际操纵曲线的比较见图 4。

对虚拟驾驶员模拟的参考操纵和实际驾驶员的操纵进行比较.参考操纵 1、2、3 对应的最大制动减速度分别为 -3.0 、 -3.5 、 $-4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,分析可知,随反应时间的增加(制动动作越晚),所需的最大制

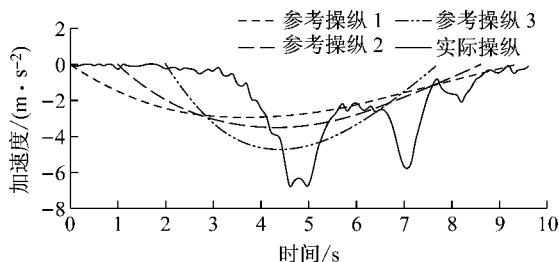


图3 参考操纵与实际操纵的车辆加速度曲线

Fig. 3 Acceleration curve comparison between reference maneuver and actual maneuver

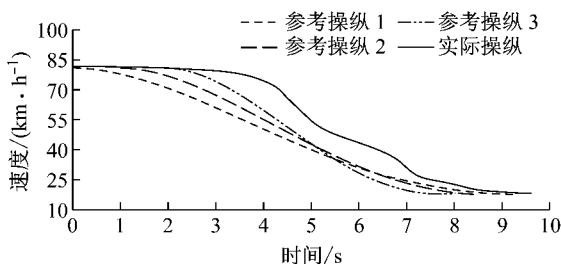


图4 参考操纵与实际操纵的车辆速度曲线

Fig. 4 Velocity curve comparison between reference maneuver and actual maneuver

动减速度也逐渐增加. 实际驾驶员采取制动措施的时间为 3.1 s, 最大制动减速度为 $-6.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 超出了正常驾驶状态的加速度范围. 在发生危险前, 本

车与前车的跟车时距为 2.7 s, 属于远距离跟车状态. 通过虚拟驾驶员系统的模拟分析, 可得 A675 工况中驾驶员的过晚动作是造成危险的主要诱因.

随后根据 DREAM 的诱导因素分析方法, 分析导致驾驶员过晚动作的具体原因. 该驾驶员行驶在封闭道路(高速公路)直行路段, 交通密度一般, 时间为夜间, 光照良好. 驾驶员前方车辆为轿车, 前方车辆欲换车道, 但是换道失败, 从前车制动灯亮起, 到驾驶员开始制动, 制动反应时间为 3.1 s, 视频信息显示, 驾驶员对前车的运动方向判断不准, 根据 DREAM 3.0 版本中的归类方法, 此为“C2_错误判断情况”.

进一步分析危险工况发生前的视频信息, 造成错误判断前车运动状况的原因有两个方面: ①驾驶员期待前车变道成功, 故并没有明显的减速行为, 因为“F2_期待他车特定的驾驶行为”, 具体表现为“F2.1_未预测前车的驾驶操纵”; ②驾驶员有明显的转头观察及扶正眼镜的姿势, 故驾驶员错误判断前方车辆运动状态的部分原因是“B1_错过观察”, 具体诱因是“E2_注意力未集中在当前工况”, 表现为“E2.2_驾驶员观察车外车辆行驶情况”. 最终得到相应的诱导因素逻辑关系见图 5.

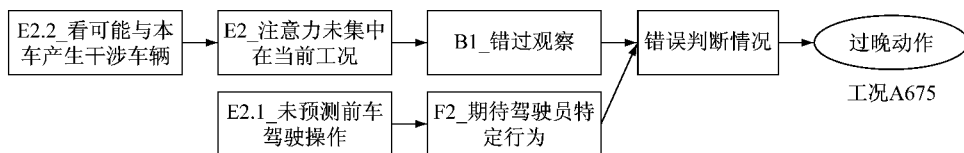


图5 工况 A675 的 DREAM 诱导因素逻辑关系

Fig. 5 Example of an individual causation chart for A675

图 5 是单个工况的诱导因素关系图, 将多个危险工况的诱导因素关系图相叠加就可分析某一类危险工况场景的诱导因素关系. 以图 6 为例, I、II 分别表示工况 A675、工况 A226 的诱导关系图, 将两者合并可得到 III, 其中因素框中数字为该因素在整个分析过程中本层次分析中的数量, 箭头中数字为前一因素导致后一因素的数量走向. 该流程图由左向右依次阅读, 箭头左侧的因素为导致箭头右侧因素的原因, 由左至右各因素表象越来越明显, 由右至左原因越来越深入.

3.2 典型追尾场景的诱导因素分析

3.2.1 确定典型追尾危险中场景细分类型

参考 NHTSA^[7]、AEB Group^[8]、SHRP2^[9-10]等主流测试机构的研究, 将直行追尾危险的场景细分类型分成 4 类, 如表 3 所示. 对所获得全部危险程度

较高的本车直线行驶遇到追尾危险的 85 例场景进行诱导因素分析.

对不同细分场景类型的诱导因素通过上一章节所述的修正的 DREAM 方法分析, 获得相应场景下诱导因素逻辑关系图, 如图 7、8、9、10 所示, 各图中灰背景框线内所含因素为该层次中较为主要的诱导因素.

3.2.2 直行追尾危险场景 A 的诱导因素分析

如图 7 所示, 对于直行追尾危险场景 A, 即本车在直道行驶接近前方车辆, 大多数情况都是前车突然紧急制动或处于静止状态. 导致本车追尾危险发生的原因: ①紧急制动力度不足, 占 39%, 未采取合理制动操纵导致危险的加剧; ②跟车距离过短, 占 30%, 本车与前车跟车距离较短(时距 $T_h < 1.5 \text{ s}$), 无法以正常驾驶操纵来处理突发事件.

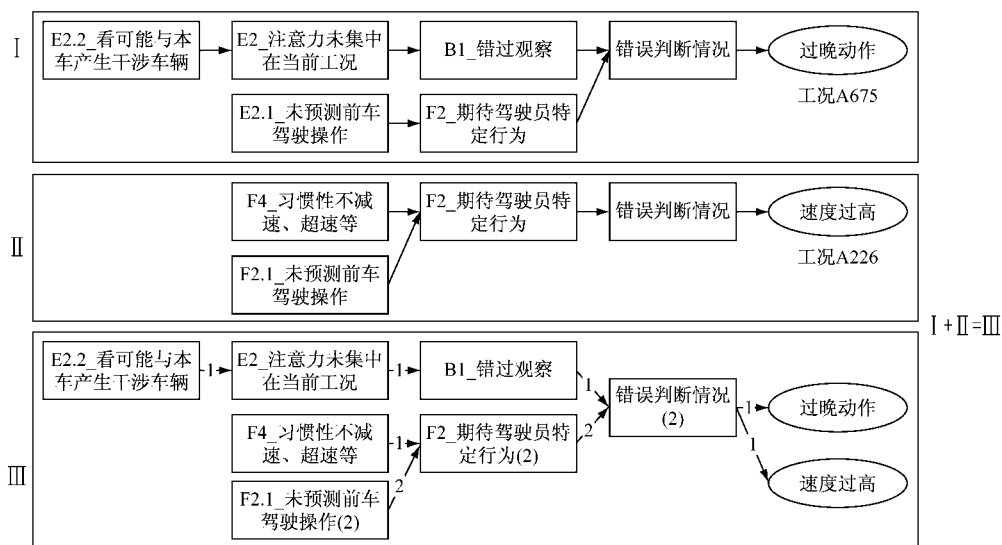


图6 工况 A675 和 A226 的 DREAM 诱导因素逻辑关系图合并

Fig. 6 Example of merging two individual causation charts(A675 & A226)

表2 直行追尾危险场景的细分

Tab.2 Categories of rear-end scenarios

类型	场景示例图	数量
场景 A: 本车在直道行驶接近前方车辆		33
场景 B: 本车在直道行驶接近前方车辆, 且不具备换道条件		39
场景 C: 本车在直道行驶, 旁车道有车变道, 意图切入本车道		7
场景 D: 本车接近前车, 前车切出本车道, 且本车道前方有车辆		6
合计		85

通过 DREAM 因素分析,导致该类紧急事件的主要原因为驾驶员错误地判断与前车的时间间隔(C1,22次,占67%),更深层原因则为驾驶员认为该场景下不够危险,并且期待前方车辆依旧以先前速度行驶(F2,21次)。一方面为了保证本车的驾驶空间选择较小的跟车距离,另一方面即使当前车制动灯亮起之后,驾驶员也不相应减慢行驶速度,最终不得不以紧急制动避免碰撞事故。而错误判断情况(C2,11次,占33%)比例相对较小,通过视频信息分析,驾驶员在不断接近前车的情况下,注意力都会集中在前车,注意力未集中导致错过观察的情况仅为

7次。

在直行追尾危险场景 A 中,驾驶员往往是因为不良的驾驶习惯导致了危险发生:期待驾驶员特定行为(F2,21次),习惯性不减速和超速等(F4,5次)以及过高估计自我驾驶技术(F5,11次)等。

3.2.3 直行追尾危险场景 B 的诱导因素分析

如图8所示,对于直行追尾场景 B,即本车在直道行驶接近前方车辆,同时本车左(右)车道有车或障碍物,不具备换道条件。共有39例该类场景工况,与直行追尾场景 A 相比,77%的工况都发生在交通情况较为拥挤的城市工况,造成追尾危险的原因也有所不同:过晚动作,占36%;跟车距离过短,占39%。

相对于直行追尾场景 A,在场景 B 中过晚动作的比例明显增加(场景 A 为10%,场景 B 为36%)。在交通比较拥挤的工况下,前车突然减速,国内驾驶员为了保证本车的通行效率,保证驾驶空间避免其他车辆切入,导致过晚动作的频繁发生。同时由于交通拥挤,驾驶员为了避免其他车辆的切入,常采取较短的跟车距离,也是直行追尾场景 B 的主要诱因。

通过 DREAM 方法分析,导致该事件发生的主要原因为驾驶员错误地判断与前车的距离以及前车速度(C1,30次,占77%),其中有部分原因是驾驶员受外界影响导致较晚或错过观察到前车(B1,14次),最主要的原因是驾驶员期待前车以特定的方式行驶(F2,21次)以及对自身驾驶技术的自信(F5,6次),同时在该场景类型中,大量发生在道路拥堵的路段,故驾驶员受拥堵道路影响也容易做出不合适的判断(E7.3,12次)。

3.2.4 直行追尾危险场景 C、D 的诱导因素分析

如图 9 所示,对于直行追尾场景细分类型 C,即本车在直道行驶,旁车道有车变道,意图切入本车道,造成该类危险的主要原因是驾驶员采取避让行为时力度不足.通过 DREAM 方法进行分析,因为错误判断时间间隔(C1,3 次)和前车的运动状态(C2,4 次)占比大致相同,深层分析原因为在前车切入过程,驾驶员往往先采取轻微制动措施,期待前车放弃切入操作(驾驶员期待他车特定驾驶行为(F2,5 次))导致了危险工况的发生.各个紧急事件的诱导

因素逻辑关系与前述相似,不再赘述.

如图 10 所示,对于直行追尾场景细分类型 D,即本车接近前车,前车切出本车道,且遇到前方车辆静止或低速行驶.该类危险场景 6 例,其中造成该类危险的主要原因为速度过高,导致该类紧急事件的主要原因为驾驶员错误判断前车的运动形式(C2,5 次),即驾驶员认为他车处于较为稳定的驾驶状态之下,为了防止其他车辆切入占据本车的驾驶空间,本车驾驶员往往通过加速来缩短与前车的距离,导致危险发生.

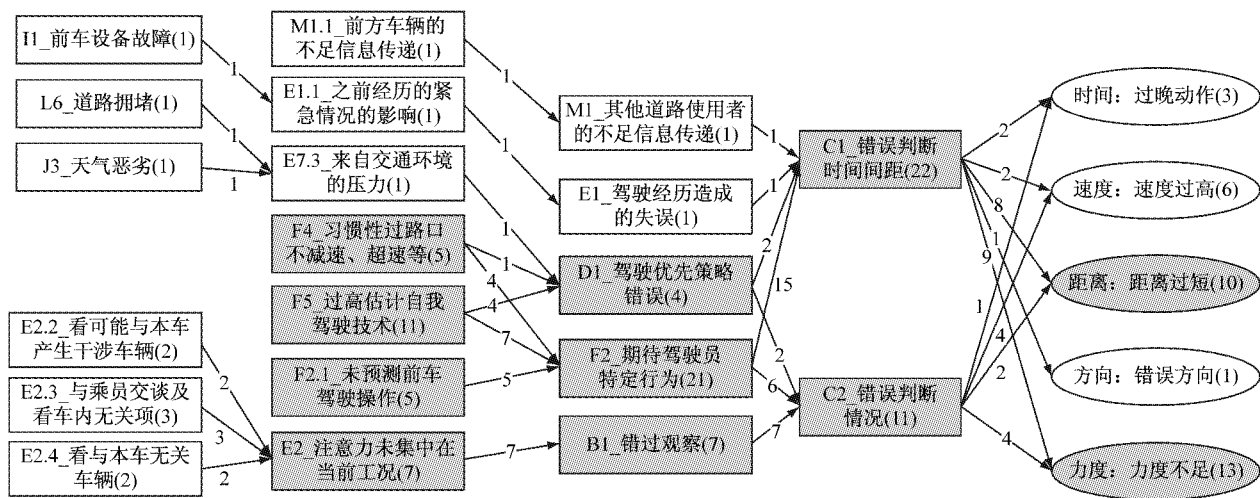


图 7 直行追尾危险场景 A 的 DREAM 诱导因素逻辑关系

Fig. 7 Causation patterns for the incidents in the rear-end scenarios A

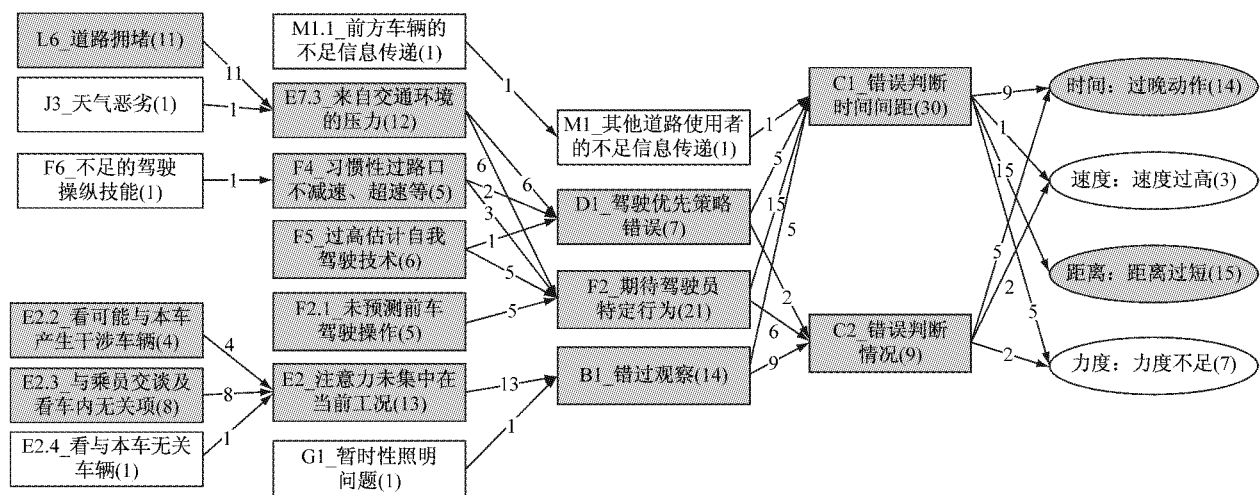


图 8 直行追尾危险场景 B 的 DREAM 诱导因素逻辑关系

Fig. 8 Causation patterns for incidents in rear-end scenario B

3.2.5 直行追尾危险场景的总体分析和比较

综合对比各个场景中相关的诱导因素,主要有以下特征:

(1) 4 种直行追尾危险场景中的主要危险原因不相同,故针对不同结果应该采用不同的措施规避

危险,如表 4 所示,综合分析各种场景下的直行追尾场景的主要原因(“错误方向”仅在场景 A 中出现过 1 次,在此不作为主要原因进行分析),跟车距离过短、力度不足为主要诱因.通过对全部直行追尾危险工况的分析发现距离过短甚至小于 1 s 的跟车过程

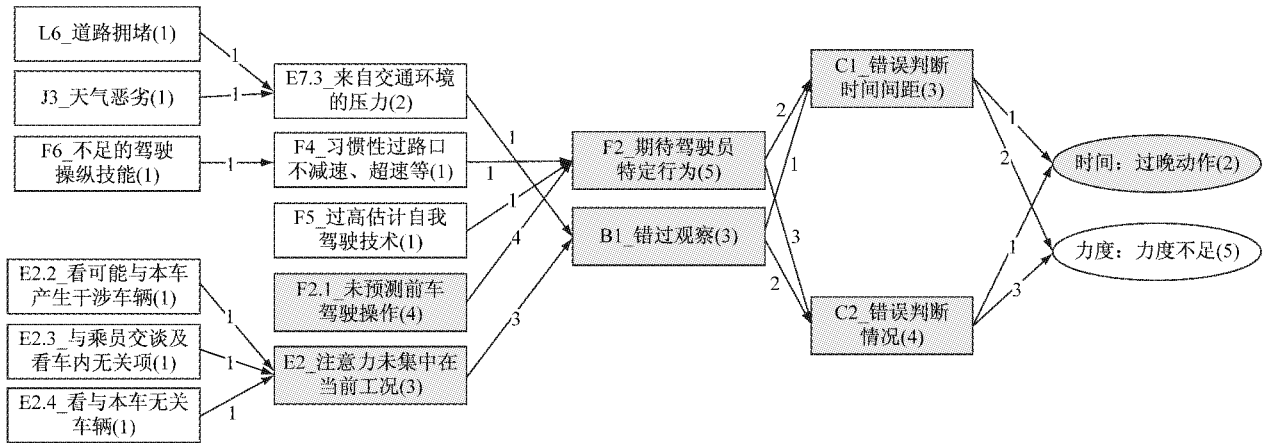


图9 直行追尾危险场景C的DREAM诱导因素逻辑关系

Fig.9 Causation patterns for the incidents in the rear-end scenarios C

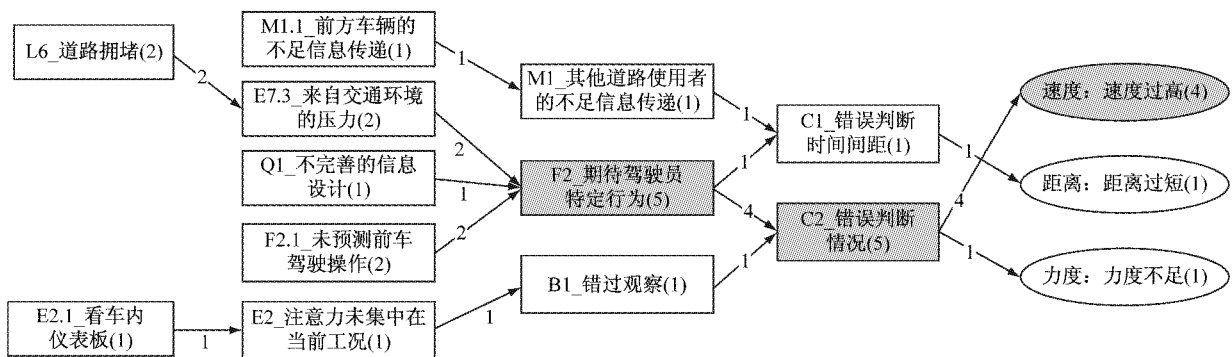


图10 直行追尾危险场景D的DREAM诱导因素逻辑关系

Fig.10 Causation patterns for the incidents in the rear-end scenario D

非常普遍,大部分情况是前车制定,由于本车跟车距离较近导致危险情况的发生.驾驶员“过晚动作”的比例在危险场景中也较高,驾驶员往往是看到前方车辆,但是由于驾驶习惯等原因,并不及时采取措施来避免危险发生.

表3 直行追尾危险场景主要诱因的比较

Tab. 3 Main factors of the rear-end scenarios

诱因	出现次数				合计
	场景 A	场景 B	场景 C	场景 D	
过晚动作	3	14	2	0	19
速度过高	6	3	0	4	13
距离过短	10	15	0	1	26
力度不足	13	7	5	1	26

Bianchi 等^[11]的研究表明,中国有经验的驾驶员,在追尾危险场景中的最主要的诱导因素为驾驶员习惯性选择较近的跟车距离,习惯性过晚采取避让行为.该结论与本文的结论几乎一致.

(2) 4种直行追尾危险场景中,驾驶员的不良驾驶习惯是主要的诱导因素.

在欧洲,Knipling 等^[12]认为64%的追尾事故的原因是驾驶员的注意力不集中;Bärgman^[13]的研究

发现,美国的追尾危险场景中驾驶员的分神为主要的诱导因素.通过中国自然驾驶工况数据的分析,中国道路交通环境相对欧美复杂,驾驶员分神驾驶的情况并不多,有明显第二行为的案例只有24例,占比为28%;主要的原因因为驾驶员自身期待他车会按照预期的行驶方式行驶(F2),或对自己驾驶技术有足够的信心(F5)导致对车辆状态的误判,最终不得不采取紧急制动行为进行避让.

4 结论

本文利用修正的DREAM分析方法,对中国自然驾驶数据中的直行追尾危险工况场景的诱导因素进行了深入分析.结果表明,在直行追尾危险场景中驾驶员的“距离过短”和“力度不足”为占比最高的紧急事件.

进一步分析表明,中国驾驶员和欧美驾驶员的驾驶文化是不同的,故表现出来的直行追尾危险工况的诱导因素并不相同.在美国,驾驶员的分神驾驶是发生危险工况的主要原因.但通过本文的研究,在

中国直行追尾危险工况中驾驶员分神驾驶的比例并不高(28%)。在中国的道路交通环境下,驾驶员通常会采用比较激进的驾驶风格来为自己争取一定的驾驶空间,但由于中国的道路交通参与者的复杂性,故容易发生危险或碰撞。直行追尾危险场景中最主要的深层诱导因素为驾驶员习惯性期待他车特定驾驶行为等不良驾驶习惯而非与驾驶操纵无关的第二行为。

参考文献:

- [1] ENGSTROM J, WERNEKE J, BÄRGMAN J, *et al.* Analysis of the role of inattention in road crashes based on naturalistic on-board safety monitoring data [C] // 3rd International Conference on Driver Distraction and Inattention (DDI2013). Gothenburg: [s. n.], 2013:17-20.
 - [2] DINGUS T A, KLAUER S G, NEALE V L, *et al.* The 100-car naturalistic driving study - phase II - results of the 100-car field experiment [R]. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 2006.
 - [3] 郭忠印. 道路安全工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2012.
GUO Zhongyin. Road safety engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
 - [4] 李方媛. 重特大道路交通事故成因机理及其风险行为研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
LI Fangyuan. Research on cause mechanism of road traffic accidents with at least 10 fatalities and its risk behaviors [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
 - [5] WARNER H W, LJUNG M, SANDIN J, *et al.* Manual for DREAM 3.0, driving reliability and error analysis method[R]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2008.
 - [6] SUN X, ZHU X, ZHANG K, *et al.* Automatic detection method research of incidents in China-FOT database [C] // International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rio de Janeiro: IEEE, 2016:754-759.
 - [7] NAJM W G, SMITH J D, YANAGISAWA M. Pre-crash scenario typology for crash avoidance research [J]. Dot Hs, 2007.
 - [8] SEINIGER P, BARTELS O, LANGNER T, *et al.* Development of a target propulsion system for assess [C] // 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington DC: [s. n.], 2011: 22ESV-000187.
 - [9] ANTIN J, LEE S, HANKEY J, *et al.* Design of the in-vehicle driving behavior and crash risk study[R]. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2011.
 - [10] SAGBERG F, EENINK R, HOEDEMAEKER M, *et al.* Recommendations for a large-scale European naturalistic driving observation study, PROLOGUE deliverable D4.1[R]. Oslo: Seventh Framework Programme Theme 7 Transport, 2011.
 - [11] BIANCHI G P, ENGSTRÖM J, BÄRGMAN J, *et al.* Factors contributing to commercial vehicle rear-end conflicts in China: a study using on-board event data recorders. [J]. Journal of Safety Research, 2017, 62:143.
 - [12] KNIPLING R R, MIRONER M, HENDRICKS D L, *et al.* Assessment of IVHS countermeasures for collision avoidance: rear-end crashes [R]. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 1993.
 - [13] BÄRGMAN J. Methods for analysis of naturalistic driving data in driver behavior research [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2016.
-
- (上接第1200页)
- [11] 张亚国, 李镜培. 软黏土中静压沉桩引起的侧向挤土位移分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12):1801.
ZHANG Yaguo, LI Jingpei. Lateral displacement of ground caused by piles installation in soft clay [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(12):1801.
 - [12] CHAI J C, JOHN P C, MIURA N, *et al.* Improved prediction of lateral deformations due to installation of soil-cement columns [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12):1836.
 - [13] WOOD D M. Soil behaviour and critical state soil mechanics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
 - [14] CHANG M F, TEH C I, CAO L F. Critical state strength parameters of saturated clays from Modified Cam Clay[J]. Can Geotech J, 1999, 36(5):876.
 - [15] 罗战友, 夏建中, 龚晓南, 等. 压桩过程中静压桩挤土位移的动态模拟和实测对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8):1709.
LUO Zhanyou, XIA Jianzhong, GONG Xiaonan, *et al.* Influence of prebored hole measures on compacting effects of jacked piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 846.
 - [16] 蒋明镜, 沈珠江, 邢素英, 等. 结构性黏土研究综述[J]. 水利水电科学进展, 1999, 19(1):26.
JIANG Mingjing, SHEN Zhujiang, XING Suying, *et al.* Review on structured clay [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1999, 19(1):26.
 - [17] 陈文, 施建勇, 龚友平, 等. 饱和粘土中静压桩挤土效应的离心模型试验研究[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6):103.
CHEN Wen, SHI Jianyong, GONG Youping, *et al.* Centrifugal model tests of piles jacked in saturated clay [J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 103.