

基于自然驾驶数据的驾驶员紧急制动行为特征

吴斌^{1,2}, 朱西产¹, 沈剑平²

(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: 基于中国自然驾驶数据, 建立了紧急工况下制动避撞的驾驶员模型, 分析了驾驶员的紧急制动反应时间和紧急制动输入特性的规律特征. 结果表明: 驾驶员的紧急制动反应时间与驾驶工况的紧急程度相关, 以碰撞时刻倒数的临界值 0.2 s^{-1} 作为危险触发阈值, 驾驶员的紧急制动反应时间分布为均值 0.5 s 的正态分布; 最大制动减速度随驾驶工况紧急程度变化不明显, 最大制动减速度梯度随驾驶工况紧急程度的增加而增加.

关键词: 自然驾驶数据; 紧急制动; 驾驶行为

中图分类号: U461

文献标志码: A

Driver Emergency Braking Behavior Based on Naturalistic Driving Data

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

(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 China naturalistic driving data, a driver model for emergency braking was set up and the general characteristics of driver's braking behavior were analyzed. The results show that the driver's emergency braking response time is related to the urgency of emergency scenario. By taking the inverse of time to collision 0.2 s^{-1} as dangerous trigger threshold, the driver's emergency braking reaction time is the normal distribution of mean 0.5 s . The maximum braking deceleration do not vary with the urgency of the scenarios. The maximum braking deceleration jerk increases with the urgency of the scenarios.

Key words: naturalistic driving data; emergency braking; driver's behavior

撞行为主要分为紧急制动和转向两大类, 本文主要研究驾驶员的紧急制动行为特征. 纵向避撞系统, 如前碰预警系统(FCW)、紧急制动系统(AEB)等, 只考虑车辆纵向运动方向上的危险. 国内外的研究表明, 追尾事故占比很高^[1]. 李霖等^[2]对行车记录仪采集到的危险场景进行统计, 结果表明追尾危险场景占比 20.2% . 将追尾危险场景中的驾驶员紧急制动行为特征作为设计开发输入, 对建立紧急制动系统、前碰预警系统有重要意义.

目前研究驾驶员紧急制动行为的方法有以下几种: 交通事故数据方法、自然驾驶行为方法、场地测试方法、驾驶模拟器试验方法. 通过交通事故数据可获取典型事故场景, 但得到的车辆参数和驾驶员行为参数并不多, 准确性很难保证; 场地测试和驾驶模拟器试验也存在缺陷, 不能完全与真实交通工况中的场景相对应. 随着驾驶行为研究的深入, 自然驾驶数据得到了越来越多的重视. 自然驾驶行为研究(NDS)是指在不干扰驾驶员行为的前提下记录真实交通环境中驾驶员行为的研究方法^[3-4], 因此通过自然驾驶工况提取出的驾驶员行为完全是真实的驾驶员行为. 不同地区和国家的驾驶员驾驶习惯不同, 故有必要研究我国驾驶员在真实交通环境下的紧急制动行为特征.

驾驶员紧急制动行为特征的研究主要集中在紧急制动反应时间和紧急制动输入特性两方面^[2].

紧急制动反应时间通常指从潜在危险出现的时刻到驾驶员开始采取某种避让措施的时间段^[5]. Green^[5]的研究表明, 驾驶员在追尾事件有完全预期的情况下紧急制动反应时间为 $0.70 \sim 0.75 \text{ s}$, 对于突发事件的紧急制动反应时间为 1.25 s . Brunson等^[6]的研究表明, 驾驶员的紧急制动反应时间近似服从对数正态分布, 约为 1.36 s . Chang等^[7]发现车速对驾驶员的紧急制动反应时间有影响, 车速从 40

紧急工况下驾驶员行为研究是开发先进驾驶辅助系统(ADAS)的前提. 驾驶员在紧急工况下的避

收稿日期: 2017-12-28

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

通讯作者: 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

$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 升高到 $64 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 紧急制动反应时间缩短 0.5 s . Schweitzer 等^[8]的研究认为, 车速和驾驶员的紧急制动反应时间无相关性. 国内外对于紧急制动反应时间的研究较多, 但由于测试环境不同, 因此得出的研究结果之间差异较大, 而且对于真实交通环境下的驾驶员紧急制动反应时间的研究较少.

紧急制动输入特性方面, 李霖等^[9]对危险场景下驾驶员的制动减速度、制动减速度梯度进行了统计分析, 由于采集设备(行车记录仪)的局限性未定量分析影响紧急制动输入特性的因素. Bosetti 等^[10]通过场地测试对驾驶员在驾驶过程中的纵向和横向加速度范围进行了统计分析, 驾驶员的制动减速度分布与车速无关, 大部分驾驶员的制动减速度小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 但未深入研究驾驶员紧急制动场景下的制动输入特性. Smith 等^[11]、Lee 等^[12]将路面的最大摩擦力和车辆的极限性能作为驾驶员的最大制动减速度输入, 未考虑驾驶员的驾驶习惯. 目前基于自然驾驶数据进行驾驶员紧急制动输入特性的研究还不够深入, 未针对典型危险场景下驾驶员紧急制动行为特征进行系统性分析.

根据国内外的研究现状, 开展兼容我国特殊交通工况的驾驶员紧急制动行为特征研究, 是目前开发纵向驾驶辅助系统的难点, 也是以人为中心的纵向避撞系统设计和开发的重点. 基于中国大型实车路试中的自然驾驶数据, 开展驾驶员在典型追尾危险场景下的紧急制动行为特征研究, 对驾驶员紧急制动反应时间、最大制动减速度和最大制动减速度梯度进行影响因素分析和概率分布拟合, 为开发适合我国驾驶员特征的先进驾驶辅助系统提供依据.

1 自然驾驶数据的采集和筛选

为了研究驾驶员在真实交通环境下的驾驶行为, 本文所使用的数据全部来自中国大型实车路试(China-FOT)的自然驾驶数据. China-FOT 数据来源有: ①汽车总线; ②外接传感器, 包括独立加速度传感器, 用于保证数据的完整性和准确性; ③眼动仪, 用于记录驾驶员眼球状态, 但由于企业保密, 不对该类型数据开放; ④摄像头, 分别为前置摄像头、前置广角摄像头、车内驾驶员面部摄像头、踏板摄像头(见图 1). 数据采集从人、车、路三方面角度出发, 采集驾驶员日常驾驶行为数据、车辆行驶运动状态参数和道路交通环境信息. 通过 China-FOT 项目采集了 32 名驾驶员的驾驶数据, 共计约 $3\,559 \text{ h}$, 总行

程 $129\,109 \text{ km}$.

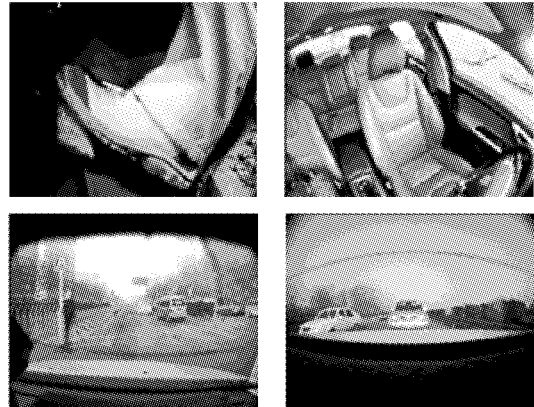


图 1 自然驾驶数据采集中的摄像头视角

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

本文主要通过车辆的制动减速度、制动减速度梯度、横向加速度、驾驶员方向盘转速等 4 个参数, 对自然驾驶数据进行危险场景的筛选^[13]. 本文中制动减速度和制动减速度梯度数值均用负值表示. 驾驶员紧急制动场景的筛选参数等级划分如表 1 所示.

表 1 紧急制动场景的筛选参数

Tab.1 Filter parameters of emergency braking scenarios

危险等级	制动减速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	制动减速度梯度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-3})$
1	-5	-10
2	-6	-15
3	-8	-20

通过上述筛选方法, 得到共 780 例危险工况, 其中直行追尾危险工况占比最高(43.83%), 也是目前 ADAS 研究的主要危险场景. 本文选取危险等级较高的紧急制动工况 121 例(排除了部分危险程度较低以及数据不全的工况).

2 驾驶员紧急制动操纵的参数拟合

在紧急工况下驾驶员纵向制动操纵的减速度峰值较高, 制动减速度梯度也保持恒定. Markkula 等^[14]对驾驶员制动减速度模型的分析 and 对比结果表明, 延时恒定减速度模型能更好地拟合驾驶员在紧急情况下的制动操纵, 即在一定的制动反应时间延迟后驾驶员以某一制动减速度梯度制动, 达到最大制动减速度后保持制动减速度不变至停车.

为了统一提取危险工况下驾驶员操纵参数, 利用如图 2 所示的延时恒定减速度模型来拟合驾驶员的制动减速度操纵. 如图 2 所示, T_0 为驾驶员紧急

制动起始时刻,在模型中定为零时刻; a_0 为初始纵向加速度, a_L 为最大制动减速度。

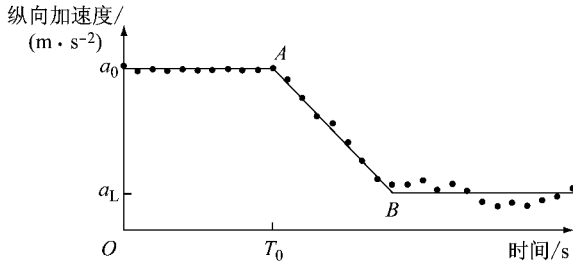


图 2 驾驶员紧急制动模型

Fig.2 Driver model for emergency braking

根据自然驾驶数据中驾驶员紧急制动反应时间和驾驶员紧急制动输入特性数据,可以构建出驾驶员在危险工况中的紧急制动避撞延时恒定减速度模型参数。

表 2 是工况 A1231 和 A1277 的相关参数,图 3 和图 4 是工况 A1231 和 A1277 减速度拟合结果。从表 2 和图 3、4 可以看出,总体上驾驶工况的拟合效果较好,拟合系数的 R^2 均值在 0.85 以上。

表 2 工况 A1231 和 A1277 的相关参数和描述

Tab.2 Parameters and description of case A1231 and A1277

工况编号	最大制动减速度/ $(m \cdot s^{-2})$	最大制动减速度梯度/ $(m \cdot s^{-3})$	工况描述
A1231	-7.0	-10.0	前车慢行
A1277	-6.1	-8.4	前车静止

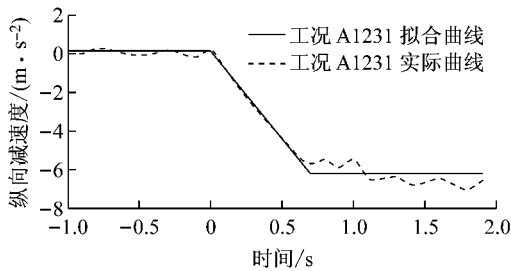


图 3 工况 A1231 纵向减速度拟合情况

Fig.3 Fitting results of deceleration for case A1231

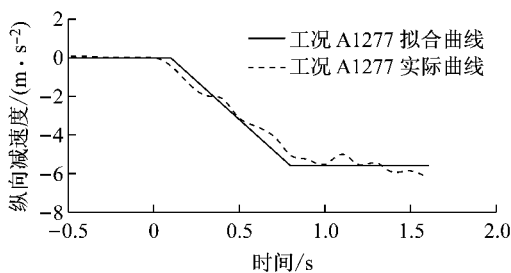


图 4 工况 A1277 纵向减速度拟合情况

Fig.4 Fitting results of deceleration for case A1277

3 驾驶员紧急制动反应时间

T_0 为紧急制动起始时刻,实际上由于车辆制动系统响应带来的延迟,因此驾驶员开始制动的时刻比 T_0 更早.将制动系统响应的延迟时间视为驾驶员紧急制动反应时间的一部分^[4],驾驶员紧急制动反应时间还包含驾驶员神经滞后和惯性滞后,本文不再细分。

121 例追尾危险场景的分类如表 3 所示.前车突然减速制动的追尾危险工况类型共 70 例,占 58%,此场景下前车制动灯常亮;前车静止或慢速的追尾危险工况类型共 51 例,占 42%,在此场景下前车的制动灯并不是常亮。

表 3 追尾危险场景的分类

Tab.3 Category of rear-end scenarios

类型	场景示例图	数量
A	前车突然制动的追尾危险工况,前车制动灯亮	70
B	前车静止或者慢速的追尾危险工况,制动灯不常亮或不亮	51
总计		121

3.1 紧急制动场景的环境参量划分

如何确定危险出现时刻是研究基于自然驾驶数据的紧急制动反应时间的难题.驾驶员在紧急情况下通过感知危险程度来采取制动措施,国内外大部分研究通常将前车制动灯亮起时刻作为危险出现时刻,但只适用于场景 A;对于场景 B,驾驶员通过感知与前车之间的相对运动关系来感知危险程度,本文采用 TTC(time to collision)的倒数 T_{tc}^{-1} 来量化危险感知时刻。

为了获得紧急制动危险场景下的 TTC 分布,对紧急制动场景下的 TTC 分布进行数据统计分析.在驾驶舒适区域,驾驶员一般保持跟车或自由驾驶状态,此时本车与前车的 TTC 趋于无穷大;当前车制动或慢行时,TTC 逐渐变小,进入驾驶冲突区域.在驾驶冲突区域如果环境条件允许,驾驶员就会采用变道来保证通行效率或者制动减速来避免碰撞;如果驾驶员一开始未采取合适措施,TTC 进一步变小,进入驾驶危险区域,最后驾驶员就必须采取紧急避让措施.驾驶舒适区域和冲突区域属于驾驶员正常驾驶工况。

根据上述分析随机选取正常驾驶状态中的变道工况 80 例,并提取变道时的 TTC.图 5 为 80 例正常变道工况与 121 例紧急制动工况 TTC 分布情况,利用支持向量机的界限分割方法划分正常工况与紧急

制动工况的 TTC 边界,可知紧急制动工况的 $T_{ttc} < 5.0$ s.

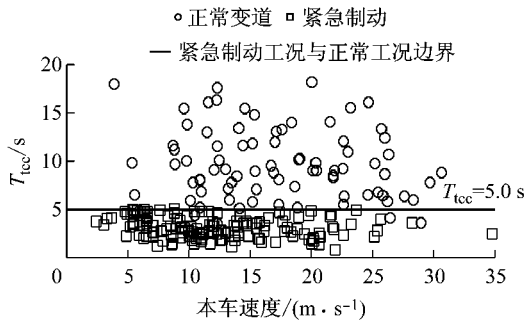


图 5 紧急制动场景的 TTC 分布

Fig.5 TTC distribution of emergency braking scenarios

驾驶员在行车过程中一般是通过 T_{ttc}^{-1} 来确定与前车之间的相对位置,以此感知危险程度,故以 $T_{ttc}^{-1} = 0.2$ s⁻¹ ($T_{ttc} = 5$ s) 作为驾驶员感知危险的阈值.

3.2 不同场景的紧急制动反应时间分布

根据前述追尾危险场景危险出现时刻的定义,以及紧急制动拟合的制动开始时刻 T_0 ,分析 121 例直行追尾危险工况的紧急制动反应时间分布.

图 6 为 70 例前车突然制动的追尾危险工况下驾驶员紧急制动反应时间分布,其中 n, u, σ 分别为对数正态分布拟合的样本数、均值和标准差.从前车制动灯亮到驾驶员开始制动时刻的持续时间为驾驶员的紧急制动反应时间,对其进行对数正态分布拟合,拟合相关系数 $R = 0.80$,与 Brunson 等^[6]、李霖等^[2]的研究结论一致.对于 70 例前车减速制动的追尾危险工况,驾驶员的紧急制动反应时间分布较分散,对数正态分布的均值为 1.96 s,有些工况驾驶员紧急制动反应时间甚至在 4.00 s 以上.

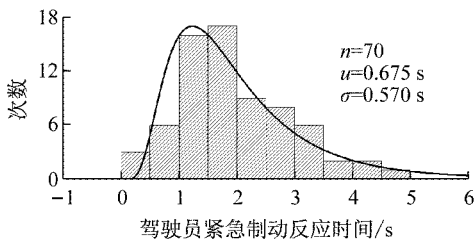


图 6 追尾危险场景 A 中驾驶员紧急制动反应时间分布及拟合
Fig.6 Distribution and fitting results of driver's emergency braking response time in rear-end scenario A

图 7 为 51 例前车慢速或静止的直行追尾危险工况的紧急制动反应时间分布,紧急制动反应时间为负的工况表明驾驶员在 $T_{ttc}^{-1} = 0.2$ s⁻¹ 前就采取了

制动措施.对 51 例前车慢速或静止的直行追尾工况的驾驶员紧急制动反应时间分布进行正态分布拟合,拟合相关系数 $R = 0.85$,正态分布拟合的紧急制动反应时间均值为 0.40 s.

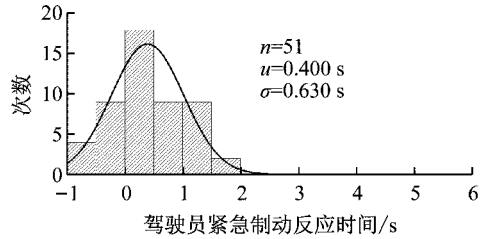


图 7 追尾危险场景 B 中驾驶员紧急制动反应时间分布及拟合
Fig.7 Distribution and fitting results of driver's emergency braking response time in rear-end scenario B

3.3 紧急制动反应时间和 T_{ttc}^{-1} 的关系

比较图 6 和图 7 可知,场景 A 中以制动灯作为危险开始时刻,70 例紧急制动反应时间分布较广.为研究驾驶员是如何判断合适时机来采取紧急制动措施的,提取了场景 A 中驾驶员紧急制动反应时间和前车制动灯亮时刻的 T_{ttc}^{-1} 关系,如图 8 所示.

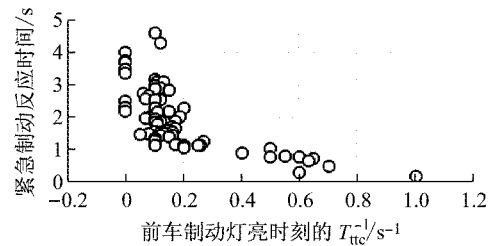


图 8 追尾危险场景 A 中紧急制动反应时间与前车制动灯亮时刻的 T_{ttc}^{-1} 关系
Fig.8 Relationship between emergency braking response time and T_{ttc}^{-1} of lead vehicle brake light onset in rear-end scenario A

从图 8 可知,当前车制动灯亮时刻的 T_{ttc}^{-1} 在 0.2 s⁻¹ 附近时,即前车制动灯亮时达到驾驶员感知危险的阈值,此时驾驶员的紧急制动反应时间相对比较集中,且反应时间较短,几乎都小于 1 s;当前车制动灯亮时刻的 $T_{ttc}^{-1} < 0.2$ s⁻¹ 时,即前车制动灯亮时刻还没有达到驾驶员感知危险的阈值,驾驶员的紧急制动反应时间分布较广,甚至到 3~4 s.主要原因为当前车制动灯亮起时,驾驶员虽已注意到危险发生,但不认为有必要立刻采取制动,驾驶员感知的紧急程度是影响紧急制动反应时间的重要因素.

将 121 例直行追尾工况的危险出现时刻都定义为 $T_{ttc}^{-1} = 0.2$ s⁻¹.图 9 是 121 例追尾危险工况从 $T_{ttc}^{-1} = 0.2$ s⁻¹ 出现到采取制动措施时刻 T_0 的持续

时间分布. 由于时间分布集中, 因此用正态分布进行拟合, 平均持续时间为 0.5 s.

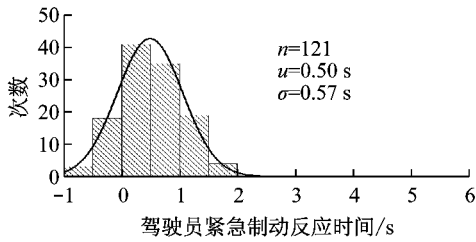


图 9 $T_{tc}^{-1} = 0.2 \text{ s}^{-1}$ 到 T_0 的持续时间分布及拟合
Fig.9 Distribution and fitting results of time from $T_{tc}^{-1} = 0.2 \text{ s}^{-1}$ to braking onset T_0

在研究紧急制动反应时间时, 国内外大部分学者将紧急制动反应时间理解为驾驶员在大脑中处理观察到的信息, 然后做出制动操纵行为的时间过程. 通过上述分析, 驾驶员的紧急制动反应时间与车辆之间的运动关系密切相关, 当车辆的相对运动关系达到一定的危险触发阈值时, 驾驶员便会迅速采取紧急制动措施.

在 70 例前车减速制动工况中, 前车制动灯亮的信号并不是影响紧急制动反应时间的主要因素和触发条件. 大部分驾驶员是在前车制动灯亮 1.96 s 后采取制动措施, 且分布的范围较广, 说明当车辆的相对运动关系未达到一定的危险触发阈值时, 驾驶员并不会立即采取制动措施. 如图 10 所示, 以 T_{tc}^{-1} 来描述危险触发阈值, 当 $T_{tc}^{-1} > 0.2 \text{ s}^{-1}$ 时, 驾驶员的紧急制动反应时间明显缩短, 大部分在 1 s 之内.

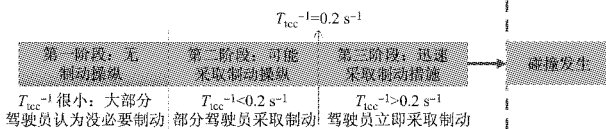


图 10 驾驶员紧急制动反应的 3 个阶段
Fig.10 Three phases of driver's emergency braking response

以 $T_{tc}^{-1} = 0.2 \text{ s}^{-1}$ 作为危险触发阈值, 对 121 例紧急制动工况进行分析. 结果表明, 驾驶员在 $T_{tc}^{-1} > 0.2 \text{ s}^{-1}$ 的情况下, 驾驶员的紧急制动反应时间较集中, 满足正态分布, 均值为 0.5 s.

如图 10 所示, 可将驾驶员的紧急制动反应过程分成 3 个阶段: 第一阶段, 驾驶员发现前车制动或者慢行, 此阶段 T_{tc}^{-1} 很小, 工况不够紧急, 故驾驶员未采取制动措施; 第二阶段, 驾驶员可能采取制动措施, 此时 $T_{tc}^{-1} < 0.2 \text{ s}^{-1}$, 大部分驾驶员不采取措施; 第三阶段, 驾驶员发现 $T_{tc}^{-1} > 0.2 \text{ s}^{-1}$, 工况足够紧急, 驾驶员会立即进行紧急制动.

通过对上述 3 个阶段的分析可知, 驾驶员的紧急制动反应时间受车辆相对运动关系的影响. 工况越紧急, 如跟车距离较近或车速过快等紧急工况, 驾驶员制动过程很快达到 $T_{tc}^{-1} > 0.2 \text{ s}^{-1}$ 的危险阈值, 导致紧急制动反应时间的缩短.

4 驾驶员紧急制动输入特性

4.1 驾驶员紧急制动输入特性的统计分析

采用驾驶员紧急制动拟合方法, 提取制动减速度和制动减速度梯度进行紧急制动输入特性研究.

制动减速度表征了驾驶员在危险工况下对车辆制动力的利用水平. 图 11 是 121 例追尾危险工况下紧急制动避撞延时恒定减速度模型拟合的最大制动减速度 a_L 与紧急制动开始时刻 T_0 的 T_{tc}^{-1} 关系. 通过统计分析, 121 例追尾危险驾驶工况的最大制动减速度平均值为 $-6.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 随着 T_{tc}^{-1} 的增加, 驾驶工况紧急程度不断增加, 最大制动减速度并没有明显增加的趋势, 表明了紧急制动驾驶工况下驾驶员的最大制动减速度与 T_{tc}^{-1} 的无相关性.

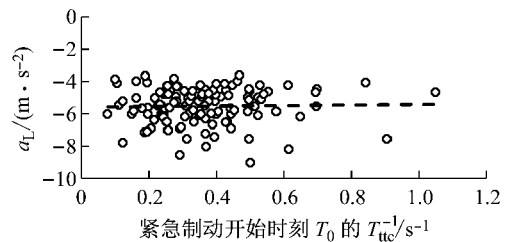


图 11 最大制动减速度与紧急制动开始时刻 T_0 的 T_{tc}^{-1} 关系
Fig.11 Relationship between maximum braking deceleration and T_{tc}^{-1} of emergency braking onset T_0

制动减速度梯度是指制动时减速度的上升快慢, 反映了驾驶员踩制动踏板的速度, 也是驾驶员对碰撞危险感知的直观反应. 图 12 是 121 例追尾危险工况下紧急制动避撞延时恒定减速度模型拟合的最大制动减速度梯度 j_L 与制动时刻 T_0 的 T_{tc}^{-1} 关系. 统计分析结果表明, 121 例直行追尾危险驾驶工况的最大制动减速度梯度平均值为 $-9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$. 随着 T_{tc}^{-1} 的增加, 工况紧急程度增加, 最大制动减速度梯度绝对值有明显增加趋势. 进一步分析得到最大制动减速度梯度与紧急制动开始时刻 T_0 的 T_{tc}^{-1} 线性相关度为 0.4.

4.2 驾驶员紧急制动输入的概率分布与讨论

驾驶员的最大制动减速度与驾驶工况紧急程度无关. 通过自然驾驶数据的视频分析可知, 在危险驾

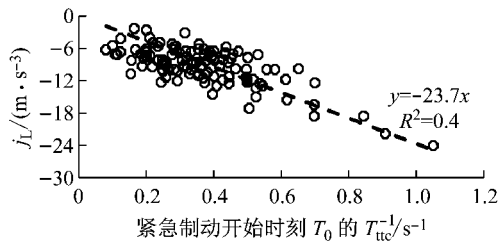


图 12 最大制动减速度梯度与紧急制动开始时刻 T_0 的 T_{tc}^{-1} 关系

Fig.12 Relationship between maximum braking deceleration jerk and T_{tc}^{-1} of emergency braking onset T_0

驶工况下从紧急制动到脱离碰撞危险时,驾驶员通常不再增加制动减速度.在同一驾驶工况下,脱离危险时与前车之间的相对位置等受驾驶员驾驶风格影响较大.

在紧急制动工况下未发生碰撞,驾驶员的制动过程在其操控能力范围内,是驾驶员在意识到危险存在时的正确反应,反映了驾驶员在这些工况下的预期.在大部分危险工况下车辆的最大制动减速度都未达到车辆或路面的极限情况,故以车辆物理极限来设计的驾驶辅助系统是不合理的,需要考虑驾驶员的紧急制动特征,如图 11 所示.

利用正态分布对最大制动减速度 a_L 进行拟合(见图 13),正态分布均值 $\mu = -6.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 标准差 $\sigma = 1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

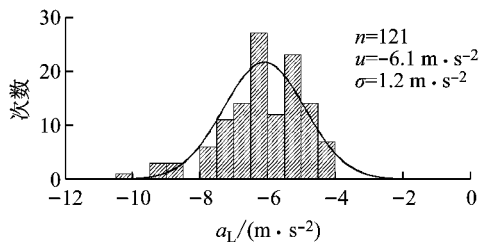


图 13 最大制动减速度分布及拟合

Fig.13 Distribution and fitting results of driver's maximum braking deceleration

紧急制动减速度梯度绝对值随着 T_{tc}^{-1} 的增加而不断增加,引入线性放大因子 K_B 来表征紧急制动减速度梯度和 T_{tc}^{-1} 的关系,如下所示:

$$j_L = -K_B T_{tc}^{-1} \quad (1)$$

线性放大因子 K_B 表征了两者之间的线性关系,由图 12 可知, j_L 与 T_{tc}^{-1} 之间存在较弱的线性关系, K_B 并不是定值.本文用对数正态分布来表征 K_B 的概率分布,如图 14 所示.

驾驶辅助系统通过 K_B 可以预判驾驶员在危险

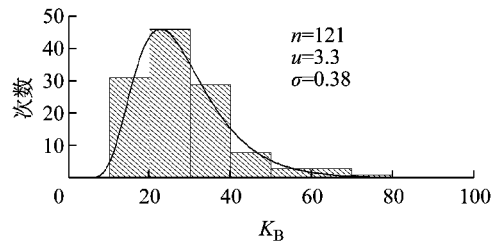


图 14 线性放大因子 K_B 的分布及拟合

Fig.14 Distribution and fitting results of linear scaling factor K_B

工况下的紧急制动行为,从而估计驾驶员是否能够合理避免碰撞的发生;另一方面, K_B 的取值也可根据驾驶员的不同驾驶习惯进行调整,使得驾驶辅助系统更加拟人化.

5 结语

通过对 121 例追尾危险工况的综合分析表明,驾驶员是通过感知工况的危险程度来进行制动操纵.驾驶员的紧急制动过程分为 3 个阶段,紧急制动反应时间与驾驶员感知的工况紧急程度相关,以 $T_{tc}^{-1} = 0.2 \text{ s}^{-1}$ 为危险触发阈值.驾驶员的紧急制动反应时间符合正态分布,平均持续时间为 0.5 s.

121 例紧急制动工况中,驾驶员的最大制动减速度随工况紧急程度变化并不明显,最大制动减速度的分布呈正态分布.驾驶员的最大制动减速度梯度随着工况紧急程度的不断增加(T_{tc}^{-1} 增大)而增加,引入线性放大因子 K_B 表征两者的线性关系, K_B 呈对数正态分布特性.

基于自然驾驶数据的研究表明,驾驶员的紧急制动特征与车辆的相对运动参数 T_{tc}^{-1} 有关,建立的紧急制动反应时间、最大制动减速度和最大制动减速度梯度等概率分布模型,可用于开发和评价兼容中国驾驶员驾驶特征的驾驶辅助系统.

参考文献:

[1] KIEFER R J, CASSAR M T, FLANNAGAN C A, et al. Forward collision warning requirements project final report task1, DOT HS809 574 [R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2003.

[2] 李霖,朱西产,马志雄.驾驶员在真实交通危险工况中的制动反应时间[J].汽车工程,2014,36(10):1225.

LI Lin, ZHU Xichan, MA Zhixiong. Driver brake reaction time under real traffic risk scenarios[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(10):1225.

- ignition: $\text{HO}_2 + \text{CH}_3\text{OH}$ and $\text{O}_2 + \text{CH}_3\text{OH}$ [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1):351.
- [11] 苏万华,赵华,王建昕,等. 均质压燃低温燃烧发动机理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2010.
SU Wanhua, ZHAO Hua, WANG Jianxin, *et al.* Engine theory and technology of homogeneous charge compression combustion and low temperature combustion [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [12] CANCINO L R, FIKRI M, OLIVEIRA A A M, *et al.* Measurement and chemical kinetics modeling of shock-induced ignition of ethanol-air mixtures[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(5):2830.
- [13] BRADLEY D, HICKS R A, LAWES M, *et al.* The measurement of laminar burning velocities and Markstein numbers for iso-octane-air and iso-octane-n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb [J]. Combustion & Flame, 1998, 115 (1/2):126.
- [14] FIKRI M, HERZLER J, STARKE R, *et al.* Autoignition of gasoline surrogates mixtures at intermediate temperatures and high pressures[J]. Combustion & Flame, 2008, 152(1):276.
- [15] CANCINO L R, FIKRI M, OLIVEIRA A A M, *et al.* Ignition delay times of ethanol-containing multi-component gasoline surrogates: shock-tube experiments and detailed modeling[J]. Fuel, 2011, 90(3):1238.
- [16] NATHAN I D H. Measuring laminar burning velocities using constant volume combustion vessel techniques [D]. Oxford: University of Oxford, 2014.
- [17] LIPZIG J P, NILSSON E J K, GOEY L. Laminar burning velocities of n-heptane, iso-octane, ethanol and their binary and tertiary mixtures[J]. Fuel, 2011, 90:2773.
- [18] DIRRENBERGER P, GLAUDE P A, BOUNACEUR R, *et al.* Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol [J]. Fuel, 2014, 115(1):162.
- [19] JERZEMBECK S, GLAWE C, PETERS N. Development and experimental evaluation of a high temperature mechanism for blended n-heptane-isooctane-ethanol-air-mixtures and gasoline-ethanol-air-mixtures [C] // World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Stevens Point. Wisconsin; [s. n.], 2009:79-83.
- [20] LIANG J, LI G, ZHANG Z, *et al.* Experimental and numerical studies on laminar premixed flames of ethanol-water-air mixtures[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(7):4754.

~~~~~

(上接第 1519 页)

- [3] ANTIN J, LEE S, HANKEY J, *et al.* Design of the in-vehicle driving behavior and crash risk study: in support of the SHRP 2 naturalistic driving study[R]. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2011.
- [4] SAGBERG F, EENINK R, HOEDEMAEKER M, *et al.* Recommendations for a large-scale European naturalistic driving observation study, PROLOGUE Deliverable D4.1[R]. Washington DC: Seventh Framework Program Theme 7 Transport, 2011.
- [5] GREEN M. "How long does it take to stop?" Methodological analysis of driver perception-brake times [J]. Transportation Human Factors, 2000, 2(3): 195.
- [6] BRUNSON S J, KYLE E M, PHAMDO N C, *et al.* Alert algorithm development program NHTSA rear-end collision alert algorithm [R]. Washington DC: Collision Avoidance Systems, 2002.
- [7] CHANG M S, MESSER C J, SANTIAGO A J. Timing traffic signal change intervals based on driver behavior [M]. Washington DC: Transportation Research Board, 1985.
- [8] SCHWEITZER N, APTER Y, BEN-DAVID G, *et al.* A field study on braking responses during driving II: minimum driver braking times [J]. Ergonomics, 1995, 38(9):1903.
- [9] 李霖, 贺锦鹏, 刘卫国, 等. 基于驾驶员紧急制动行为特征的危险估计算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1):109.
- LI Lin, HE Jinpeng, LIU Weigu, *et al.* Threat assessment algorithm based on characteristics of driver emergency braking behavior[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(1):109.
- [10] BOSETTI P, LIO M D, SAROLDI A. On the human control of vehicles: an experimental study of acceleration[J]. European Transport Research Review, 2014, 6(2):157.
- [11] SMITH D L, NAJM W G, LAM A H. Analysis of braking and steering performance in car-following scenarios [R]. Detroit: SAE, 2003.
- [12] LEE J D, MCGEHEE D V, BROWN T L, *et al.* Collision warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collisions in a high-fidelity driving simulator [J]. Human Factors, 2002, 44(2):314.
- [13] 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.
- [14] MARKKULA G, BENDERUS O, WOLFF K, *et al.* A review of near-collision driver behavior models [J]. Human Factors, 2012, 54(6):1117.