

基于驾驶员紧急制动行为特征的危险估计算法

李霖¹, 贺锦鹏^{1,2}, 刘卫国², 朱西产¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 吉利汽车研究院有限公司, 杭州 311228)

摘要: 基于真实交通工况下驾驶员的紧急制动行为特征, 建立了一种新的危险估计算法用于汽车避撞系统的控制策略开发. 通过在车辆上安装车辆行驶记录仪采集了目标区域内驾驶员的真实交通场景; 对采集到的交通场景进行人工筛选, 并按照美国高速公路安全管理局(NHTSA)的分类方法进行了分类, 得到了6种典型的危险工况; 通过视频图像处理等方法对典型危险工况下驾驶员的紧急制动行为进行了分析, 得到了驾驶员紧急制动起始点的碰撞时间 t_{TTC} 值以及车辆在紧急制动过程中的平均制动减速度, 并利用这些数据建立了基于碰撞时间倒数 t_{TTC} 和期望减速度 a_{req} 的危险估计算法. 这种危险估计算法能够同时考虑两车快速靠近以及稳定跟车工况, 并与驾驶员在真实交通环境中的紧急制动行为相对应.

关键词: 主动安全; 汽车避撞系统; 危险估计; 驾驶员紧急制动行为; 交通工况

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

Threat Assessment Algorithm Based on Characteristics of Driver Emergency Braking Behavior

LI Lin¹, HE Jinpeng^{1,2}, LIU Weiguo², ZHU Xichan¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Zhejiang Geely Automotive Research Co. Ltd., Hangzhou 311228, China)

Abstract: Based on characteristics of driver emergency braking behavior in real traffic scenarios, a new threat assessment algorithm was established for control strategy development of automotive collision avoidance system. Real driving scenarios of drivers in the target area were collected by video drive record (VDR). After manual selection and classification according to the scenario typology defined by National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), six typical types of risk scenarios were obtained. Emergency braking behavior of drivers under these typical risk scenarios

were analyzed by using video image processing method and then the t_{TTC} (time-to-collision) values at the starting point of emergency braking as well as the average values of emergency braking decelerations were obtained. These data were then used to establish the threat assessment algorithm based on $1/t_{TTC}$ ($t_{TTC} \cdot t_{TTC} = 1$) and the required deceleration a_{req} . This threat assessment algorithm can take both the fast closing condition and stable following condition into consideration and correspond with driver emergency braking behavior in real traffic scenarios.

Key words: active safety; automotive collision avoidance system; threat assessment; driver emergency braking behavior; traffic scenario

目前汽车安全技术的研究重心逐渐由被动安全技术向主动安全技术转移. 由于汽车避撞系统 (collision avoidance system, CAS) 具有很大的潜力, 用于减少交通事故, 因此得到了越来越多的重视, 已经成为主动安全研究的一个重要方向. 汽车避撞系统通过诸如雷达、摄像头等多个传感器实时获取交通环境信息并估计当前环境的危险程度, 当检测到有碰撞危险时, 系统向驾驶员发出警告提醒驾驶员采取措施回避危险. 一些汽车避撞系统在驾驶员没有及时对警告信号做出正确的反应且碰撞危险变得十分紧急时, 通过自动制动等主动介入方式来回避碰撞或减轻碰撞事故的严重程度.

对于汽车避撞系统而言, 一个核心问题是确定合适的介入时刻. 以前碰撞预警系统 (forward collision warning, FCW) 为例, 如果发出警告的时间过晚, 则留给驾驶员的反应时间很短, 驾驶员很难在短时间内做出正确的操作来回避碰撞, 导致系统的安全效能降低; 相反, 如果发出警告的时间过早, 则会干扰驾驶员正常驾驶, 引起驾驶员的反感情绪, 导

致用户接受程度降低. 因此, 汽车避撞系统必须正确估计当前交通环境的危险程度来确定合适的介入时刻, 才能达到安全效能和用户接受度的最优化.

目前主要有两类危险估计算法: 确定性算法(deterministic algorithms)和随机性算法(stochastic algorithms). 随机性算法通过计算自车与不同目标发生碰撞的概率分布来估计危险程度. 该方法可以应用于复杂的交通环境, 能够考虑多个目标之间的相互作用, 同时适用于不同的安全系统. 但随机性算法通常需要用到 Monte Carlo 采样等方法, 计算量较大, 因此目前还处于研究中^[1], 实际应用很少. 而确定性算法通常只考虑某一类特定的危险工况, 通过一些诸如碰撞时间(time-to-collision, TTC, 以 t_{TTC} 表示)的客观测量参数来表征当前的危险程度. 确定性算法目前研究较多, 应用也最为普遍. Zhang 等^[2]对用于确定性危险估计算法的测量参数进行了总结, 并将这些参数分为基于时间、基于距离、基于减速度三类. Kitajima 等^[3]对基于时间的各种危险估计测量参数进行了分析和比较. Lee 和 Peng^[4]通过实际交通工况数据对基于距离的危险估计算法与 TTC 进行了评价和比较.

本文采用确定性算法来构建危险估计模型. 虽然确定算法研究很多, 但不同国家和地区的交通环境不同, 驾驶员的驾驶习惯也不同, 对于危险程度的感受也会有差异, 因此这些已有的算法并不能直接应用, 必须根据目标驾驶员人群的驾驶行为进行适当的调整. 为了建立适当的危险估计算法, 本文首先通过视频采集获得了真实交通场景数据, 并从中筛选出了典型的危险工况用于驾驶员驾驶行为的分析. 然后根据驾驶员行为数据建立了基于碰撞时间倒数 t_{TTC} 和期望减速度 a_{req} 的危险估计算法.

1 真实交通工况的采集

由于出租车具有运营时间长, 运行道路覆盖范围广等特点, 因此特别适用于快速获取真实的交通工况. 本文通过在数辆出租车和警车上安装车辆行驶记录仪(video drive record, VDR)来采集上海市嘉定区的真实交通场景(图1). VDR 内置一个摄像头来记录车辆前方的交通状况, 其他一些信息如车辆速度、纵向加速度、侧向加速度等也同时记录. 本文中所用的 VDR 在纵向或侧向加速度绝对值大于 $0.4g$ (g 为重力加速度)时触发, 只记录触发前15 s和触发后5 s的数据.



图1 通过 VDR 采集真实交通场景

Fig.1 Real traffic scenarios collected by VDR

2 驾驶员紧急制动行为特征参数提取

通过 VDR 采集获得了总计约 4 000 例触发工况, 对这些数据进行人工筛选后, 去掉没有发生碰撞危险的工况, 总共得到 8 例事故和 1 200 例危险工况. 本文对这 1 200 例危险工况通过主观评价进行分级, 危险等级主要分为四级: 0-危险预兆, 1-轻微危险, 2-一般危险, 3-紧急危险. 这里选取危险度为 2 级和 3 级的危险工况作为分析目标, 共计 430 例.

得到这 430 例危险工况后, 本文按照 NHTSA 提出的 37 类预碰撞(Pre-Crash)场景分类方法对这些危险工况进行分类^[5], 从分类结果(图2)可以看出, 最典型的 6 类危险工况共有 303 例, 占有危险工况总数的 70%. 本文采用这 303 例危险工况来分析驾驶员行为. 图2中, 图例顺序按顺时针旋转.

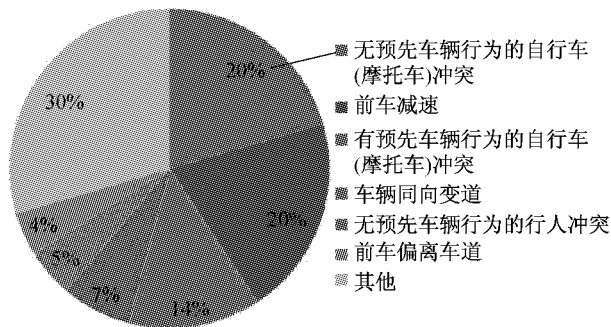


图2 危险工况分类结果

Fig.2 Classification results of risk scenarios

在这 303 例危险工况中, 所有驾驶员都采用了制动操作来避免碰撞, 极少一部分驾驶员在制动的同时也进行了转向操作. 因此, 本文中只分析驾驶员的制动避撞行为, 然后根据分析得到的特征参数构建危险估计算法, 同时根据已有的关于驾驶员转向行为的研究成果, 在车速较高时对本文所建立的危险估计算法进行修正, 避免与驾驶员有意识的转向避撞行为相冲突. 本文根据车辆的速度曲线提取驾驶员在危险工况下的紧急制动行为特征参数(图3), 在没有危险出现时, 驾驶员按照自己的期望进行操

作.在B点,驾驶员发现危险,但由于驾驶员反应时间以及制动器反应时间带来的延迟,车辆在C点才开始紧急制动并一直持续到D点,D点后驾驶员逐渐松开制动踏板,到E点时危险消除,车辆得以成功避让.

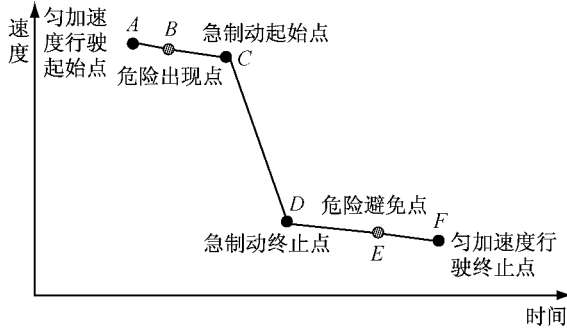


图3 驾驶员制动避让行为特征曲线

Fig.3 Characteristic curve of driver braking behavior for collision avoidance

为了建立符合驾驶员主观感知的危险估计算法,必须分析在危险工况下驾驶员制动开始的时刻以及制动的强度.因此,本文着眼于分析驾驶员紧急制动起始点的 t_{TTC} 值以及在紧急制动过程中车辆的平均制动减速度.在这303例危险工况中,车辆的平均制动减速度绝对值分布如图4所示.对该分布进行高斯分布拟合,得到平均制动减速度绝对值的均值 $\mu=2.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,标准差 $\sigma=1.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.所以,可以认为95%的驾驶员在紧急制动时平均制动减速度的绝对值小于 $\mu+1.64\sigma=4.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

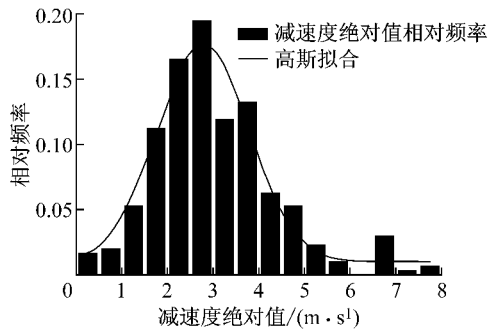


图4 平均制动减速度绝对值分布及拟合曲线

Fig.4 Absolutely values distribution and the fitting curve of average emergency braking deceleration

TTC是指同一路径上的两车保持当前速度直到碰撞发生所需要的时间,即两车相对距离除以两车相对速度,计算表达式为

$$t_{TTC} = -x_r/v_r \quad (1)$$

式中, x_r 、 v_r 分别为相对距离和相对速度, x_r 、 v_r 含义如图5所示.

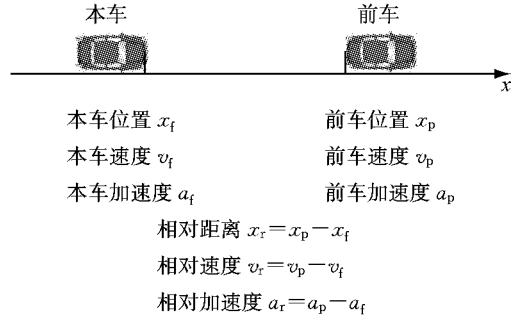


图5 相关参数定义

Fig.5 Definitions of related parameters

为了数据提取方便准确,在计算驾驶员紧急制动开始时的 t_{TTC} 值时,本文只选用前车减速工况,这类工况总数为87例,占有430例危险工况的20%(图2),是数量第二多的危险工况类型,具有较强的代表性.除去难以进行视频图像处理的数据,最终得到的有效数据为75例.在这75例工况中驾驶员紧急制动开始时的 t_{TTC} 值与本车速度的关系如图6所示,所有的车辆在紧急制动开始时的 t_{TTC} 值均小于5s,绝大部分分布在0.8~2s之间.实际上由于制动器延迟的影响,驾驶员开始紧急制动的时刻应比本文中得出的时刻更早,这部分延迟时间约为0.1~0.2s,但为了分析方便,本文将制动器延迟时间纳入驾驶员反应时间的范围,不作为一个单独的因素进行分析.同时可以看到,由于用来采集交通工况的出租车和警车主要行驶在城市道路,危险发生时刻的车速基本都分布在 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下.

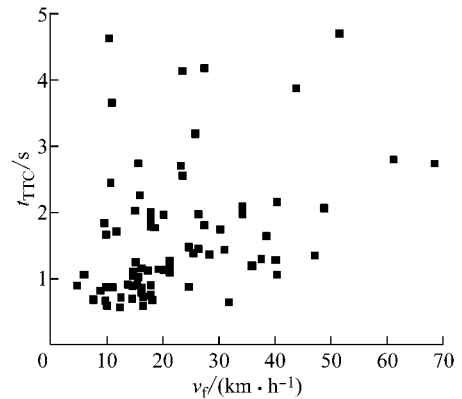


图6 驾驶员紧急制动开始时的车速和 t_{TTC} 值

Fig.6 Velocities and t_{TTC} values at the emergency braking starting points

3 危险估计算法的建立

根据Moon^[6],Kiefer^[7]等的研究成果,驾驶员的制动行为与 t_{TTC} 的倒数(t_{iTTC})密切相关,因此,本文中主要采用 t_{iTTC} 来建立危险估计算法.同时,考虑

到在稳定跟车工况下, t_{TTC} 无法准确表征危险, 因此引入期望减速度 a_{req} , 通过 a_{req} 来估计稳定跟车工况中存在的潜在碰撞危险。

3.1 基于 t_{TTC} 的危险估计方法

从图6中可以看出, 危险工况主要集中在 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下, 因此本文中只选用速度在 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下的数据进行分析。对这部分数据中驾驶员紧急制动开始时刻的 t_{TTC} 与车速的关系进行线性拟合并求出90%的预测区间, 最终结果如图7所示。其中50百分位线的函数表达式为

$$t_{\text{TTC}} = 1.1184 - 0.0131v_f \quad (2)$$

该直线表示约有50%的驾驶员在 t_{TTC} 达到该线时已经采取了制动。可以看出, 驾驶员紧急制动开始时刻的 t_{TTC} 值并不是一个定值, 而是与自车速度成一定关系, 这点与Brown得出的结论一致^[8]。5百分位线和95百分位线包围区域为驾驶员急制动开始时刻的 t_{TTC} 的90%预测区间, 95百分位线可表示为当 t_{TTC} 达到该曲线所表示的值时, 约有95%的驾驶员已经采取了制动。95百分位线函数表达式为

$$t_{\text{TTC}} = 1.7609 - 0.0128v_f \quad (3)$$

5百分位线可表示为只有约5%的驾驶员在

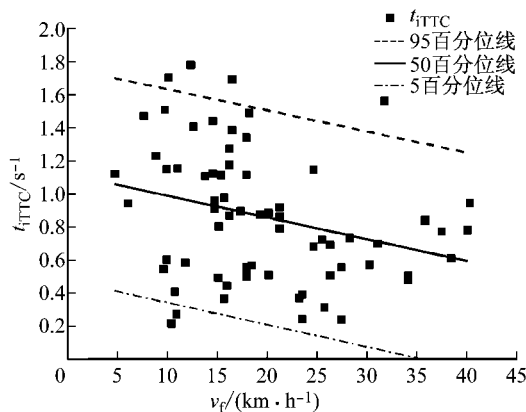


图7 驾驶员紧急制动开始时的车速和 t_{TTC} 值及拟合曲线

Fig.7 Velocities and t_{TTC} values at the emergency braking starting points and fitting curves

当 t_{TTC} 值高于50百分位线时, 危险等级较高。同理, 当车速较高时, 设定临界 t_{TTC} 值为定值, 设50%的驾驶员在通过转向回避碰撞时的平均侧向加速度小于 $0.3g$ ^[10], 即 $a_{y,50} = 0.3g$, 求得50%的驾驶员在通过转向回避碰撞时间的下限值 $t_{\text{TTC},\text{thr},50}$ 的倒数 $t_{\text{TTC},\text{thr},50} = 0.65$ 。故当 $t_{\text{TTC}} \geq \max(1.1184 - 0.0131v_f, 0.65)$ 时, 危险等级较高(图8中区域Ⅲ)。

当 t_{TTC} 高于5百分位线时, 危险等级一般。从图6中可以看出, 所有驾驶员紧急制动开始时刻的 t_{TTC}

达到该曲线所表示的值时采取了紧急制动, 函数表达式为

$$t_{\text{TTC}} = 0.476 - 0.0134v_f \quad (4)$$

根据图7中结果可以按照 t_{TTC} 与速度的关系划分危险等级(图8)。当 t_{TTC} 值高于95百分位线时, 危险等级最高, 可见, 临界 t_{TTC} 值随车速升高而降低。由于本文中所建立的危险估计算法是用来开发前碰撞预警以及紧急制动避撞的控制策略, 考虑到随着车速的增大, 驾驶员通过转向回避碰撞有增多的趋势^[9], 因此, 为了避免与驾驶员有意识的转向行为发生冲突, 在车速较高时, 设定临界 t_{TTC} 为定值。设驾驶员转向过程中车辆侧向位移为 3.5 m , 95%的驾驶员在通过转向回避碰撞时的平均侧向加速度 $a_{y,95}$ 小于 $0.6g$ ^[10], 即 $a_{y,95} = 0.6g$, 则:

$$\frac{1}{2}a_{y,95} \cdot t_{\text{TTC},\text{thr},95}^2 = y$$

$$t_{\text{TTC},\text{thr},95} = \sqrt{2y/a_{y,95}} = 1.09 \text{ s}$$

式中, $t_{\text{TTC},\text{thr},95}$ 为95%的驾驶员在通过转向回避碰撞时间的下限值, 故 $t_{\text{TTC},\text{thr},95} = 1/t_{\text{TTC},\text{thr},95} = 0.92$ 。所以当 $t_{\text{TTC}} \geq \max(1.7609 - 0.0128v_f, 0.92)$ 时, 危险等级最高(图8中区域Ⅳ)。

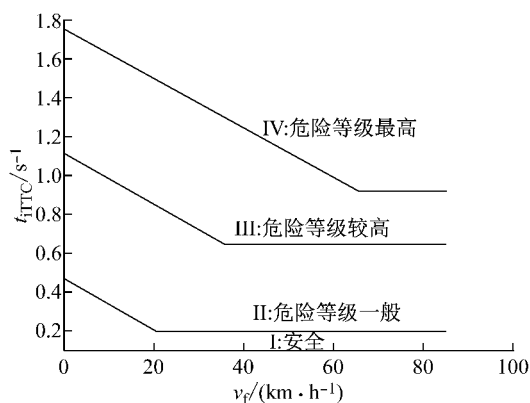


图8 危险区域划分

Fig.8 Classification of risk areas

均小于5 s, 可见在 $t_{\text{TTC}} > 5 \text{ s}$ 时, 驾驶员通常不会觉得危险, 因此设定临界 t_{TTC} 为0.2, 即当 $t_{\text{TTC}} \geq \max(0.476 - 0.0134v_f, 0.20)$ 时, 危险等级一般(图8中区域Ⅱ)。

当 $t_{\text{TTC}} < \max(0.476 - 0.0134v_f, 0.20)$ 时, 当前交通环境安全(图8中区域Ⅰ)。

3.2 基于 a_{req} 的危险估计方法

基于 t_{TTC} 的危险估计方法只适用于相对速度较大的情况, 这种情况下危险已经存在。对于近距离稳

定跟车工况,即两车距离较小但相对速度很小甚至为零时,如果前车突然制动,后车将会有发生追尾碰撞的危险.这种危险属于潜在的,基于 t_{TTC} 的算法无法识别这种危险.

为了考虑这种近距离稳定跟车工况,最常见的做法是引入 THW (time headway, 即两车相对距离除以后车速度,以 t_{THW} 表示). 但是 t_{THW} 并不是一个与碰撞危险直接相关的量,驾驶员在选取跟车工况下的 t_{THW} 值时受到多方面因素的影响,比如地域、前车类型等^[11],因此采用 t_{THW} 并不能准确地估计危险程度.

本文采用基于期望减速度 (acceleration required, a_{req}) 的算法来考虑近距离稳定跟车工况 ($t_{\text{TTC}} > 5$ s). 根据 Hiraoka 等提出的方法^[12],设前车初始位置为 x_{p0} , 初始速度为 v_{p0} , 后车初始位置为 x_{f0} , 初始速度为 v_{f0} , 即两车初始相对距离 $x_{r0} = x_{p0} - x_{f0}$, 初始相对速度 $v_{r0} = v_{p0} - v_{f0}$.

在零时刻,前车以 a_{p0} (为负) 的减速度开始制动,前车的位置为

$$x_p(t) = x_{p0} + v_{p0}t + \frac{1}{2}a_{p0}t^2 \quad (5)$$

前车的速度为

$$v_p(t) = v_{p0} + a_{p0}t \quad (6)$$

后车在 T (驾驶员反应时间) 时刻以 a_f (为负) 制动,后车的位置为

$$x_f(t) = x_{f0} + v_{f0}T + v_{f0}(t-T) + \frac{1}{2}a_f(t-T)^2 \quad (7)$$

后车速度为

$$v_f(t) = v_{f0} + a_f(t-T) \quad (8)$$

所以两车相对距离为

$$x_r(t) = x_p(t) - x_f(t) = x_{r0} + v_{r0}t + \frac{1}{2}a_{p0}t^2 \quad (9)$$

两车的相对速度为

$$v_r(t) = v_{r0} + a_{p0}t - a_f(t-T) \quad (10)$$

考虑以下两类工况:

(1) 相对距离为零时前车还未停止,即后车先完成制动(图 9a).

(2) 相对距离为零时前车已经停止,即前车先完成制动(图 9b).

假设后车无操作时,两车相对距离为 0 的时刻为 t_1 ,计算公式如下:

$$\begin{aligned} t_1 &= T - 2x_r(T)/v_r(T) = \\ &= T - \frac{2x_{r0} + 2v_{r0}T + a_{p0}T^2}{v_{r0} + a_{p0}T} = \\ &= \frac{2x_{r0} + v_{r0}T}{v_{r0} + a_{p0}T} \end{aligned}$$

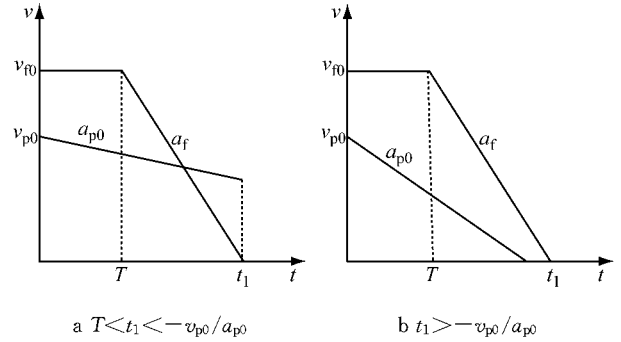


图9 两种不同的制动工况

Fig.9 Two different braking conditions

对于第一种工况,即 $T < t_1 \leq -v_{p0}/a_{p0}$,此时应满足 $x_r(t) = 0$ 无解,求得:

$$a_f < -\frac{v_{f0}^2 - 2a_{p0}x_{r0}}{2x_{r0} + 2v_{r0}T + a_{p0}T^2}$$

对于第二种工况,即 $t_1 > -v_{p0}/a_{p0}$,此时应满足两车都停止后相对距离不小于 0,即:

$$x_{f0} + v_{f0}T + \left(-\frac{v_{f0}^2}{2a_f}\right) < x_{p0} + \left(-\frac{v_{p0}^2}{2a_{p0}}\right)$$

求得:

$$a_f < -\frac{v_{f0}^2}{2x_{r0} - 2v_{r0}T - v_{p0}^2/a_{p0}}$$

所以,后车避免碰撞所需的期望减速度 a_{req} 为

$$a_{\text{req}} = \begin{cases} -\frac{v_{f0}^2 - 2a_{p0}x_{r0}}{2x_{r0} + 2v_{r0}T + a_{p0}T^2}, & T < t_1 \leq -\frac{v_{p0}}{a_{p0}} \\ -\frac{v_{f0}^2}{2x_{r0} - 2v_{r0}T - v_{p0}^2/a_{p0}}, & t_1 > -\frac{v_{p0}}{a_{p0}} \end{cases} \quad (11)$$

根据 Zhang 等人的研究成果,取驾驶员反应时间 $T = 1.1$ s^[5],因为 50% 的驾驶员紧急制动减速度绝对值小于 $2.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,95% 的驾驶员紧急制动减速度绝对值小于 $4.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 4),因此,取 $a_{p0} = -4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 将这些值代入式(1)求出 a_{req} ,并根据 a_{req} 的大小将稳定跟车工况划分为 3 个区域(图 10): 当 $a_{\text{req}} > -3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,属于安全跟车工况;当 $a_{\text{req}} \leq -3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,所需减速度已经超过 50% 的驾驶员制动时的减速度值,因此认为这种情况属于轻度危险跟车工况;当 $a_{\text{req}} \leq -4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,所需减速度已经超过 95% 的驾驶员制动时的减速度值,跟车危险已经较高,属于高度危险跟车工况.

3.3 最终的危险估计算法

因此,本文最终建立的危险估计算法可总结如下:

当 $t_{\text{TTC}} \leq 5$ s 时,根据 t_{TTC} 来估计危险,估计方法

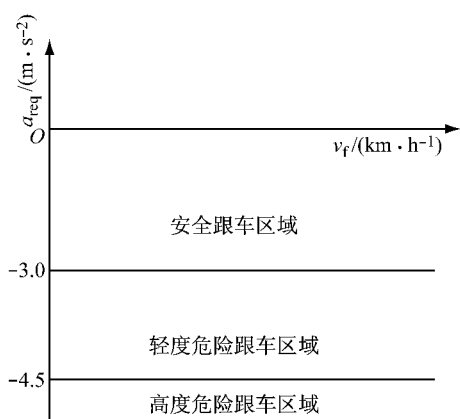


图10 稳定跟车工况危险划分

Fig.10 Risk areas classification of stable following condition

为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} t_{\text{TTC}} \geq \max(1.7609 - 0.0128v_f, 0.92) & \text{危险等级最高} \\ t_{\text{TTC}} \geq \max(1.1184 - 0.0131v_f, 0.65) & \\ \text{且 } t_{\text{TTC}} < \max(1.7609 - 0.0128v_f, 0.92) & \text{危险等级较高} \\ t_{\text{TTC}} \geq \max(0.476 - 0.0134v_f, 0.20) & \\ \text{且 } t_{\text{TTC}} < \max(1.1184 - 0.0131v_f, 0.65) & \text{危险等级一般} \\ t_{\text{TTC}} < \max(0.476 - 0.0134v_f, 0.20) & \text{安全} \end{array} \right.$$

当 $t_{\text{TTC}} > 5$ s 时,考虑到潜在的碰撞危险,根据期望减速度 a_{req} 来估计危险,估计方法为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} a_{\text{req}} > -3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} & \text{安全} \\ -4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} < a_{\text{req}} \leq -3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} & \text{轻度危险} \\ a_{\text{req}} \leq -4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} & \text{高度危险} \end{array} \right.$$

4 结论

本文根据目标区域驾驶员的真实驾驶场景,提取了6种典型的危险工况,并针对这6种典型危险工况下驾驶员的紧急制动行为进行分析,获得了驾驶员紧急制动开始时刻的 t_{TTC} 值以及紧急制动过程中的平均制动减速度绝对值。根据分析结果,本文建立了基于 t_{TTC} 和期望减速度 a_{req} 的危险估计算法。当 $t_{\text{TTC}} \leq 5$ s 时,采用基于 t_{TTC} 的危险估计方法。但由于基于 t_{TTC} 的方法无法识别稳定跟车工况中潜在的危险,因此本文在 $t_{\text{TTC}} > 5$ s 时,采用期望减速度 a_{req} 来进行危险估计。本文建立的危险估计算法中的阈值是根据我国上海地区实际交通工况中提取的驾驶员紧急制动特征参数来设置,与我国驾驶员在危险工

况下的紧急制动行为相对应,对于设计针对中国用户的汽车防撞系统具有重要的意义。

由于目前采集的样本量还相对较少,未来需要用更多的数据来对本文提出的危险估计算法进行修正和优化。同时,本文中所涉及到的驾驶员通过转向回避碰撞时的最大平均侧向加速度是在参考前人研究基础上的假设值,未来还需要用实验数据来进行修正。另外,本文中并没有考虑道路条件的影响,未来还需要在危险估计算法中引入道路摩擦系数,使得算法能够满足更多的工况。

参考文献:

- [1] Eidehall A. Tracking and threat assessment for automotive collision avoidance [D]. Linköping: Department of Electrical Engineering of Linköping University, 2007.
- [2] Zhang Y, Antonsson E K, Grote K. A new threat assessment measure for collision avoidance systems [C]//Proceedings of the IEEE ITSC 2006. Toronto: IEEE Press, 2006: 968-975.
- [3] Kitajima S, Marumo Y, Hiraoka T, et al. Comparison of evaluation indices concerning estimation of driver's risk perception- risk perception of rear-end collision to a preceding vehicle [J]. Review of Automotive Engineering, 2009, 30(2): 191.
- [4] Lee K, Peng H. Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(10): 735.
- [5] Najm W G, Smith J D, Yanagisawa M. Pre-crash scenario typology for crash avoidance research [R]. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 2007.
- [6] Moon S, Yi K. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8): 661.
- [7] Kiefer R J, Leblanc D J, Flannagan C A. Developing an inverse time-to-collision crash alert timing approach based on drivers' last-second braking and steering judgments [J]. Accident Analysis & Prevention, 2005, 37(2): 295.
- [8] Brown T L, Lee J D, McGehee D V. Human performance models and rear-end collision avoidance algorithms [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2001, 43(3): 462.
- [9] Kiefer R J, Cassar M T, Flannagan C A, et al. Forward collision warning requirements project final report—task 1 [R]. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 2003.
- [10] Hugemann D W, Nickel D M, Morawski I, et al. Longitudinal and lateral accelerations in normal day driving [C]//The 6th International Conference of The Institute of Traffic Accident Investigators. London: The Institute of Traffic Accident Investigator, 2003: 1-8.
- [11] Brackstone M, McDonald M. Driver headway: how close is too close on a motorway? [J]. Ergonomics, 2007, 50(8): 1183.
- [12] Hiraoka T, Tanaka M, Kumamoto H, et al. Collision risk evaluation index based on deceleration for collision avoidance (First Report) [J]. Review of Automotive Engineering, 2009, 30(4): 429.