

## 车辆主动防碰撞控制技术研究进展<sup>①</sup>

张惠玲<sup>②\*\*\*</sup> 孔德学<sup>\*\*</sup> 敖谷昌<sup>③\*\*\*</sup> 邵毅明<sup>\*\*\*</sup>

(\* 重庆交通大学山地城市交通系统与安全重庆市重点实验室 重庆 400074)

(\*\* 重庆交通大学交通运输学院 重庆 400074)

**摘要** 为提高控制系统的运行准确性和协调适应性,本文从国内外智能汽车辅助系统研究入手,分析现有避撞控制系统危险评估模型的特点,并系统梳理了影响车辆避撞的因素,提出多因素融合建模的必要性,明确避撞控制系统研究的三个核心是危险评估模型、避撞控制策略以及差异化预警。评述与研究了涵盖多种影响因素的危险评估模型的机遇、难点和挑战,并揭示避撞控制策略与危险评估模型的关联性,综述了避撞控制系统实现差异化预警的改进方法,最后总结了避撞控制技术的发展趋势及研究方向。

**关键词** 车辆工程;主动安全;危险评估;控制策略;差异化预警

### 0 引言

近年来,随着我国国民经济的快速发展,我国的汽车保有量和驾驶员人数有了大幅增加,尽管交通运输部每年公布的道路交通事故死亡人数有所下降,但事故数量仍然呈逐年增长态势<sup>[1]</sup>。目前,避免交通事故发生、减缓交通事故严重程度已成为各级政府着力解决的问题,车辆主动防碰撞控制技术的开发也引起了全球各大汽车厂商的广泛关注,车辆主动防碰撞系统进而成为了智能汽车的重要组成部分。车辆主动防碰撞系统是指利用摄像头和雷达等传感器设备检测与前车的速度、距离和加速度等信息,实时评判车辆当前所处工况的危险程度,并且提醒驾驶员采取避撞措施的行驶安全设备<sup>[2]</sup>。对于配置有主动防碰撞系统的车辆,当其进入紧急危险工况时,如果驾驶员仍未采取有效的避撞操作,车辆将接管对制动系统的控制,采取主动制动以避免碰撞<sup>[3]</sup>。

据统计,在所有的道路交通事故中,汽车与固定物的碰撞是汽车碰撞的主要形式,占交通事故的

60%~70%<sup>[4-6]</sup>。而汽车碰撞事故主要由驾驶速度过快、车距过小、驾驶员操作失误等因素造成<sup>[5]</sup>。当驾驶员在发生碰撞前 0.5 s 获得预警信息,并及时采取避撞措施时,约 50% 的碰撞事故可以避免;若能提前 1~2 s 得到预警,则可以避免 90% 的交通事故<sup>[7-8]</sup>。因此,为了提高道路行车安全水平和降低碰撞事故程度,研究出能够准确模拟出车辆在进入危险行驶状态的避撞模型,并制定一种安全、可靠、稳定、有效的避撞控制策略,对汽车主动防碰撞控制技术的发展至关重要。

20 世纪末,国内外很多汽车公司开始展开车辆主动安全控制的研究和开发,其中本田公司提出了用安全距离来估计报警临界距离和最小制动距离的算法<sup>[3]</sup>。福特公司基于城市道路低速行驶状态汽车行驶特点,并结合激光雷达行人检测技术,提出了在不同行驶速度下的制动安全距离模型<sup>[9]</sup>。沃尔沃公司针对货运汽车的特殊性和驾驶员的制动反应特性,重新设定了主动控制系统的制动临界距离界限<sup>[10]</sup>。马自达公司根据驾驶员的反应延迟和汽车制动滞后特性,提出了新的制动最小安全距离计算

① 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0786)和重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800727)资助。

② 女,1980年生,博士,教授;研究方向:交通控制,汽车安全;E-mail: huilingz@126.com。

③ 通信作者,E-mail: agc2002@163.com。

(收稿日期:2021-03-01)

方法<sup>[8]</sup>。近年来,随着汽车防碰撞系统研究的深入,各大汽车厂商相继在智能汽车上装备了先进驾驶辅助系统(advanced driver assistance system, ADAS),该系统包含汽车主动报警避撞系统(collision warning/avoidance, CW/CA)、车辆自适应巡航控制系统(adaptive cruise control, ACC)、自动紧急制动系统(autonomous emergency braking system, AEBS)、汽车前向防碰撞预警系统(forward collision warning system, FCWS)等子系统,可以避免70%的严重交通事故<sup>[11]</sup>,其中AEBS能够避免27%的碰撞事故<sup>[12]</sup>。毫无疑问,车辆主动防碰撞系统在缓解道路交通事故、保障人车安全等方面具有重要作用,这种作用能否进一步强化,重点取决于主动防碰撞控制技术的发展及应用。

本文概述车辆主动防碰撞控制技术的危险评估原理及其模型分类,以此对纵向主动防碰撞控制策略、制动与转向协同控制策略进行综述,并指出避撞预警策略应体现驾驶员特性差异的重要性,以期对车辆主动防碰撞控制技术的进一步研究和发展提供理论参考。

## 1 危险评估模型

目前,国内外对危险评估模型的研究主要包括基于碰撞时间的和基于制动安全距离的评估模型,同时针对常规的避撞危险评估模型存在特性参数考虑不足、鲁棒性与普适性差的问题,提出了改进估计模型及其算法。

### 1.1 基于碰撞时间的危险评估模型

基于碰撞时间的危险评估模型是指从时间尺度上衡量自车当前运动状态的危险程度,通过摄像头、雷达和红外等设备获取与前车的实际间距和相对速度,将计算出的剩余碰撞时间(time to collision, TTC)与两车间的预警时间阈值和制动时间阈值进行比较,并将结果反馈给车辆主动防碰撞控制系统,指导其进行相应的预警和制动避撞操作。最初的TTC模型是由文献[13]提出的,以其理论简单成熟、输入参数少等优势,被广泛应用于科学研究和车载避撞系统的开发。

TTC模型认为,单独从油门踏板操作来区分驾驶员的制动意图可能会造成防撞系统失效,从而提出用碰撞时间来弥补驾驶员反应延迟问题,将其作为判定道路危险程度的标准。当驾驶员发现前方障碍物后,系统可以及时进行减速,以达到避免碰撞的目的<sup>[13]</sup>,TTC模型的基本公式为

$$TTC = \frac{d_s}{v_{rel}} \quad (1)$$

式中, $TTC$ 为碰撞时间(h); $d_s$ 为前后行驶两辆车之间的距离(km); $v_{rel}$ 为前后行驶两辆车的相对速度(km/h)。

基于对TTC模型的理解,文献[14]提出了一种驾驶员利用视觉信息控制其制动行为的理论。对驾驶员眼睛光学阵列的研究分析表明,视觉上最易获取的信息是碰撞时间而不是关于车距、速度以及加速/减速,研究揭示了驾驶员如何使用视觉信息来预测车辆的碰撞时间、判断制动时机和控制车辆的速度,使用碰撞时间TTC作为主动防碰撞控制模型的参数,更易体现驾驶员对危险行驶状态的认知和判断。但传统基于视觉的防撞系统由于其普遍存在虚警率高、检测率低等问题,只能用于特定交通环境条件下的避撞测试。为此,文献[15]开发了一种使用单目摄像机的目标车辆测量估算方法,对检测到的车道信息和摄像机识别模型进行数据融合,得到的TTC估计结果具有更好的性能,提高了系统控制的鲁棒性。文献[16]引入一种组合滑移轮胎模型估计路面峰值摩擦力,可以避免视觉与雷达传感器的测量误差,利用最大路面摩擦力估算TTC极限制动阈值,以提高避撞系统对不同路面情况的适应性。

文献[17]指出驾驶员感知前方目标车辆的大小主要取决于两车间的距离,这种现象被称为“looming”效应,并提出用碰撞时间倒数 $TTC^{-1}$ 来表征“looming”效应,能更好地体现驾驶员的避撞特性。如图1所示,主目标的宽度 $w$ 是一定的,并且与间距 $R$ 有以下几何关系:

$$w = R \cdot \theta \quad (2)$$

式中, $w$ 为目标宽度, $R$ 为前后车间距, $\theta$ 为视线遮挡角。

碰撞时间倒数 $TTC^{-1}$ 的计算为

$$TTC^{-1} = \frac{v_c - v_p}{R} \quad (3)$$

式中,  $v_c$ 、 $v_p$  为自车速度和前车速度。

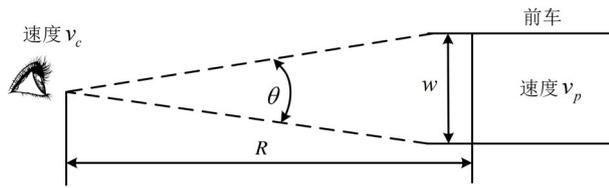


图1 “looming”效应示意图

另外,文献[3]针对前后车距、相对速度、相对减速等信息对传统的TTC建模方法进行改进,使车辆危险状态评估结果更加准确、直观,并指出当车速超过70 km/h或前车出现紧急情况(如突发交通事故、行人横穿马路等)时车辆不能完全实现避撞。针对该问题,文献[18]通过融合交通冲突数据,结合碰撞时间TTC对道路交通安全状态进行评估,将极限安全时间阈值设定为3 s甚至更小。文献[19]则根据驾驶员在交叉口的制动行为偏好和反应时间等参数对TTC值进行了调整,通过修正阈值来提高车辆的避撞性能。文献[20]提出一种参数可调的TTC避撞算法,可以减少转向避撞操作的风险,同时确保碰撞时间阈值可随速度变化而实时进行调整,实现闭环集成控制。文献[21]通过实车实验数据提出了基于 $TTC^{-1}$ 的避撞控制判定评价指标,对国内汽车主动安全系统的发展具有重大意义。同时,基于不同行驶速度工况对碰撞时间TTC预警算法进行改进,可解决原有TTC预警阈值在低速行驶工况存在预警过早和在高速行驶工况出现预警不及时的问题,对提高系统的预警精度有显著效果<sup>[22-23]</sup>。

综上所述,当前对基于碰撞时间的危险评估模型的研究已趋于成熟,TTC值可以综合反映前后两车之间的相对距离和相对速度,作为评判车辆危险程度的指标。但当两车之间的相对速度趋于零或各自速度较快的时候,系统并不能实现完全避撞,但是可以通过调整预设定的碰撞时间阈值、融合其他交通源数据以及改进避撞控制策略等方式,达到成功避免碰撞的目的。

### 1.2 基于安全距离的危险评估模型

基于安全距离的危险评估模型是指从距离尺度

上衡量自车当前运动状态的危险程度,与控制策略中的预警临界距离和紧急制动临界距离进行比较判断,指导其进行预警和制动避撞操作。安全距离模型通过实时动态采集自车与前车之间的相对运动状态参数以及其他相关因素估算出预警距离和紧急制动距离,保证车辆不发生碰撞。

最早的防碰撞预警系统大都是基于安全距离模型设计的,比较典型的有Mazda模型、Honda模型、Berkeley模型、Jaguar模型和NHSTA模型<sup>[24-30]</sup>。Mazda模型<sup>[31]</sup>最早是由日本马自达公司开发的,通过比较前后车间距与自车最小制动安全距离来判断车辆是否进入危险状态。Honda模型<sup>[32]</sup>在Mazda模型的基础上,通过分别计算预警临界距离和制动临界距离作为预警的指标,在降低误警率方面表现较优。Berkeley模型<sup>[33]</sup>在前后车最大制动减速度方面对Mazda模型做了进一步的改进,模型计算出的安全预警距离具有可靠性高、实用性强等优点。Jaguar模型根据前方目标的运动状态,分别设置了预警临界距离的指标。NHSTA模型通过设定只有当系统连续两次检测到前后车间距小于预警安全距离时才会触发警报,以提高系统预警鲁棒性。

美国密歇根大学基于ICCFOT数据库对上述5种模型的漏报率和误报率进行了评价,其中NHSTA模型表现的性能最好,但报警精确性仅有23%<sup>[34]</sup>,说明该模型算法缺乏实用性。而Berkeley模型相比其他模型,通过实时估计调整轮胎路面附着系数目标函数 $F(\mu)$ 以适应行驶路面与天气的变化,可有效解决误警率高、预警不及时的问题,该模型的计算公式为

$$D_w = \frac{1}{2} \left( \frac{v_c^2}{a_1} - \frac{(v_c - v_{rel})^2}{a_2} \right) + v_c t_s + d_0 \quad (4)$$

$$D_{br} = v_{rel}(t'_1 + t'_2) + 0.5 a_2 v_c (t'_1 + t'_2)^2 \quad (5)$$

$$F(\mu) = \begin{cases} F(\mu_{\min}) & \mu < \mu_{\min} \\ F(\mu_{\min}) + \frac{F(\mu_{\text{mean}}) - F(\mu_{\min})}{\mu_{\text{mean}} - \mu_{\min}} (\mu - \mu_{\min}) & \mu_{\min} < \mu < \mu_{\text{mean}} \\ F(\mu_{\text{mean}}) & \mu > \mu_{\text{mean}} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $D_w$  为安全预警距离,  $a_1$  为自车最大减速度,  $a_2$

为前车最大制动减速度,  $t_s$  为制动过程所需时间,  $d_0$  为最小安全距离,  $D_{br}$  为制动最小安全距离,  $t'_1$ 、 $t'_2$  分别表示驾驶员反应时间和车辆制动延迟滞后时间,  $F(\mu)$  为路面附着系数目标函数,  $\mu$ 、 $\mu_{\min}$ 、 $\mu_{\text{mean}}$  分别为系数的估计值、最小值以及平均值。

安全距离模型主要是基于车辆间运动学关系建立的,需要实时获取自车参数与外部环境信息<sup>[35]</sup>,但某些关键参数以目前的环境感知技术很难获得,且存在数据稳定性低、实用性较差以及驾驶环境条件考虑不足等方面问题,这些会干扰系统对障碍物的识别。为解决该问题,文献[36]提出考虑汽车制动延迟特性和驾驶员期望减速度的制动安全距离预测算法,并且该系统在城市道路实车实验中得到有效的验证。文献[37]提出综合考虑驾驶员特征、交通路况以及车辆制动因素(driver road vehicle, DRV)的安全距离模型,利用文献[38,39]提出的车速及轮胎滑移率模型对轮胎-路面附着系数进行估计,并对现有的 Mazda 安全距离模型进行优化和改进。图2是基于 Prescan 软件的仿真结果,可以看出 DRV 安全距离模型较于 Hideo Araki 模型能够适应不同驾驶员的操作特点,可以较好地解决因路况差异所造成的误警率高的问题,充分考虑车辆间的制动性能差异,提高了模型的普适性,相比于 Mazda 模型可以有效降低系统的虚警率。

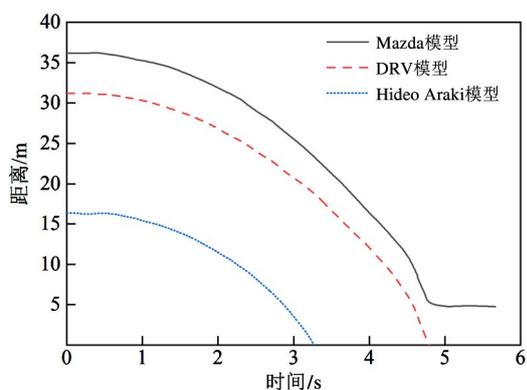


图2 3种模型报警安全距离的仿真对比分析

现有安全距离模型通常是依据最大制动减速度建立的,但大多数驾驶员在实际行驶过程中无法充分发挥汽车的制动潜能,只有不到10%的驾驶员在实际制动时达到制动减速度的最大值,这一程度

上限制了传统安全距离模型的应用范围<sup>[40-42]</sup>。由美国国家公路交通安全管理局<sup>[43]</sup>统计的驾驶员平均减速度与最大减速度的规律(见表1)可知,98%的驾驶员行车减速度不会超过 $-2.17 \text{ m/s}^2$ ,而当减速度达到 $-3 \sim -4 \text{ m/s}^2$ 时会引起人体的不适。

表1 制动减速度统计规律

类型	减速度/( $\text{m/s}^2$ )				
	5%	25%	50%	75%	95%
平均减速度	-0.15	-0.29	-0.38	-0.42	-0.55
最大减速度	-0.37	-0.58	-0.72	-0.82	-0.92

文献[44]采用 Zigbee 无线通信技术实时采集前后车的运行状态信息,并根据前后车制动时间不同建立了动态选取安全预警距离的改进 Berkeley 模型,以满足不同制动减速度下对安全预警距离的需求。若假定在刹车系统介入之前,自车以匀速行驶,当主动制动系统生效时,自车减速度呈线性趋势变化,如图3所示。

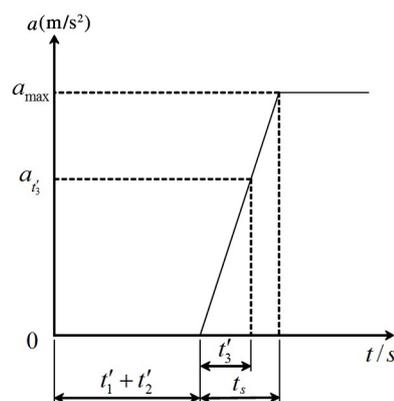


图3 自车减速度变化趋势

改进模型的安全预警距离计算公式为

$$D_w = v_c t_x + \left( v_c - \frac{a_{t_3}^2 t_s}{2a_1} \right) (t - t_x) - \frac{1}{2} a_{t_3} (t - t_x) - (v_c - v_{rel}) t + \frac{1}{2} a_2 t^2 + d_0 \quad (7)$$

式中,  $t_x = t'_1 + t'_2 + t'_3$ ,  $t'_3$  和  $a_{t_3}$  分别为制动减速度时间以及该时刻的减速度,  $t$  为整个制动过程所需的总时间。

综上可知,现有的安全距离模型由于考虑的安全影响因素过于片面,其防碰撞控制模型未能模拟

出真实道路的运行情况,而且模型种类繁多,缺乏广泛的适用性,为此,未来研究将基于更复杂的行驶工况来优化避撞控制模型。

### 1.3 基于实车数据的改进模型

单纯依赖避撞时间或安全距离来进行避撞风险估计,无法充分发挥车辆避撞系统的潜能,而且国内道路交通状况、驾驶员操作习惯都有别于国外,直接使用现有系统的模型算法会导致其失效率大幅度提高。因此,需要通过对中国实际道路的风险评估展开实验分析,并且对模型的相关参数进行改进,以适应不同类型车辆和国内各种城市行驶工况。基于实车数据对常规危险评估模型在影响因素考虑不全、评价指标单一、数据来源不足等方面进行综合数据处理来实现对前车的避撞操作。

国内的汽车厂商和高校对现有的车载主动防碰撞控制系统在我国道路上的表现进行了实验分析,发现把  $TTC^{-1}$  和安全距离进行融合建模,可以解决单一危险评价指标误警率高的问题,重新估算的预警时间阈值、制动时间阈值、预警安全距离阈值以及制动最小安全距离阈值,可有效提高车辆制动的舒适性和安全性<sup>[45]</sup>。文献[29]提出在常规的碰撞时间逻辑算法中将跟车时距(time headway, THW)和TTC指标融合协调使用,通过实车实验数据改进原有的碰撞时间阈值,给出了适应不同车辆行驶工况下的安全预警距离计算公式。实验结果表明该控制模型能够在一定程度上改善道路交通状况并提高道路运行效率。

同时,基于中国驾驶员的制动避撞行为特性对防碰撞控制模型做出了进一步的丰富与优化,提出了以避撞减速度为主要特征参数的安全距离控制模型<sup>[46]</sup>、基于危险品运输车辆的自主紧急制动控制模型<sup>[47]</sup>、基于中国驾驶员制动行为特性的车辆主动避撞控制模型<sup>[48]</sup>,显著提高了车辆防碰撞控制技术的适用性。

## 2 主动避撞控制策略

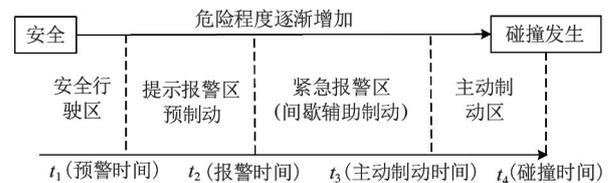
目前,国内外研究者针对主动防碰撞控制策略的研究主要以提高车辆整体的安全性能为目标,围

绕纵向避撞控制策略、制动与转向协调避撞控制策略展开研究。

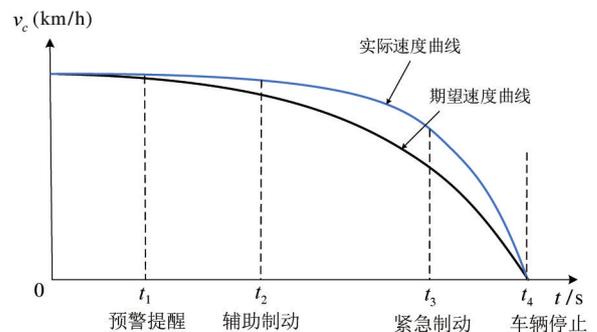
### 2.1 纵向避撞控制策略

主动防碰撞控制系统通过雷达、摄像等环境感知技术获取与前方目标车辆的距离、速度和加速度等信息,判断自车与前车发生碰撞的危险程度,并采取一系列警告、制动辅助及自主紧急制动等措施,帮助驾驶员避免碰撞或减缓碰撞严重程度<sup>[49]</sup>。主动防碰撞控制系统工作的关键是不同功能阶段的预警时机,合理的避撞控制策略应该既能达到安全避撞的需求,又不对驾驶员的正常行驶造成干扰,预警过早与过晚都无法起到有效避撞的目的<sup>[50]</sup>。因此,纵向避撞辅助系统控制策略的制定应结合车辆的实际运行状态,帮助驾驶员识别前方道路的危险障碍物,通常是以安全距离和碰撞时间阈值两个参数作为系统输出驾驶辅助信号的依据。

纵向避撞控制应该以驾驶员主动控制操作为优先级,如图4(a)所示,只在前后车距小于最小紧急制动安全距离、碰撞剩余时间小于 $(t_4 - t_3)$ 时,系统才会采取紧急自主制动。图4(b)中显示出避撞辅助系统的车辆速度变化特性,表明在紧急制动情况下,在驾驶员认识到碰撞风险后,制动辅助系统将对驾驶员的制动反应延迟时间进行补偿。而当自车位



(a)纵向避撞逻辑



(b)纵向避撞辅助策略

图4 纵向制动控制系统工作原理

于提示报警区和紧急报警区,碰撞时间剩余在  $t_1$ 、 $t_3$  之间时,以声音报警或者间歇辅助制动方式来提示驾驶员。系统可以根据前后车之间的距离或者时间实时判断该车处于图 4 中的哪个阶段,从而采取相应的制动操作。

通过引入危险状态因子  $f_d$ <sup>[21,24,47,51-52]</sup> 来评估自车所处状态的危险程度,使避撞系统控制更加细致准确。

$$f_d = \frac{D_w - D}{D_w - D_b} \quad (8)$$

式中,  $f_d$  为危险状态因子,  $D_w$  为安全预警距离,  $D_b$  为紧急制动距离,  $D$  为前后车实际距离。当  $f_d < 0$  时,表示车距大于报警距离,位于安全状态;当  $0 \leq f_d < 0.5$  时,表示车距刚进入报警距离,处于系统警告和预制动状态;  $0.5 \leq f_d < 1$  时,表示车距接近紧急制动距离,进入系统辅助制动阶段,在该阶段若驾驶员未采取减速或者其他避险措施,该系统将接管车辆;当  $f_d \geq 1$  时,表示车距达到紧急制动距离,进入紧急制动阶段。

危险系数  $f_d$  本质上是基于车辆间运动学关系的线性距离指标,但当车辆速度过大或者以较高的相对速度减速时,系统不一定能够对车辆危险状态做出实时准确的评估,系统预警触发不及时,以至于无法避免碰撞。文献[53]在前向避撞系统 FCW 的基础上开发出避撞指标协调控制 (collision avoidance metrics partnership, CAMP) 算法,提高了系统在极端高碰撞危险情况的避险能力。文献[51]采用一种基于时间的危险判定指标  $T_{buffer}$ , 能直观反映车辆实时的碰撞时间余量,充分利用了车辆运动状态、驾驶员习惯特性以及行驶路况等信息。

## 2.2 转向与制动协调避撞策略

纵向防碰撞控制的制动距离会随车速呈指数增长,增加汽车行驶安全距离,极大降低道路使用效率,因此在高速工况下不适宜采用纵向制动来规避碰撞<sup>[45]</sup>。根据已有的研究成果,如图 5 所示的转向避让操作可以减少 24% 以上的追尾事故<sup>[54]</sup>,而且随车速的升高,驾驶员通过转向操作来避让碰撞的趋势会有所增加<sup>[55]</sup>。

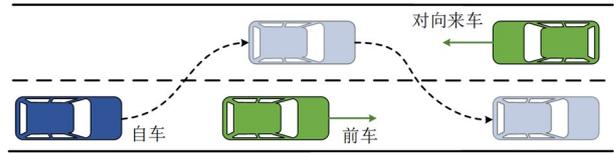


图 5 转向避撞操作过程

系统转向操作的工作原理如图 6 所示,其中  $r_r$  代表自车和前方障碍物车辆的安全半径,圆内为斥力场安全区域;  $r_{min}$  为自车转向避撞的最小安全半径,其与车辆前后轴间距和前轮转角有关,当前后车间距  $d_s \leq 0.5r_{min}$ , 在相邻车道畅通的前提下,系统会自动操纵方向盘的转向角度以避开碰撞。文献[56-58]指出驾驶员采用转向回避碰撞的比例会随着碰撞时间 TTC 的减少而增加;而且转向避撞相对于制动避撞在高相对速度、低附着系数、低重叠率的工况下能发挥更大的避撞潜能<sup>[45,59-61]</sup>。然而,目前国内大多数外学者都将制动和转向 2 种避撞方式孤立看待,均未能充分发挥车辆的避撞潜力,而采用制动、转向联合规避危险的研究较少。所以通过模拟驾驶员的避撞决策逻辑,实时准确评判碰撞危险程度,将制动和转向相结合来帮助驾驶员实现主动避撞是未来主动避撞技术的核心<sup>[62-64]</sup>,具体的制动与转向避撞决策逻辑如图 7 所示。

转向和制动协调控制的防撞策略是通过车辆动力学预测车辆的未来行驶轨迹。基于此,文献[65]提出一种采用非线性模型预测控制的转向和制动同时进行的避撞策略,其通过对车轮转向角度和横向

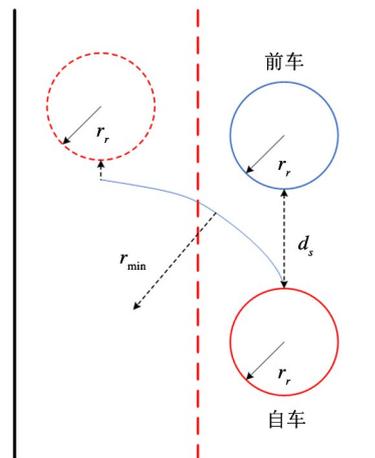


图 6 车辆转向操作斥力场简化模型

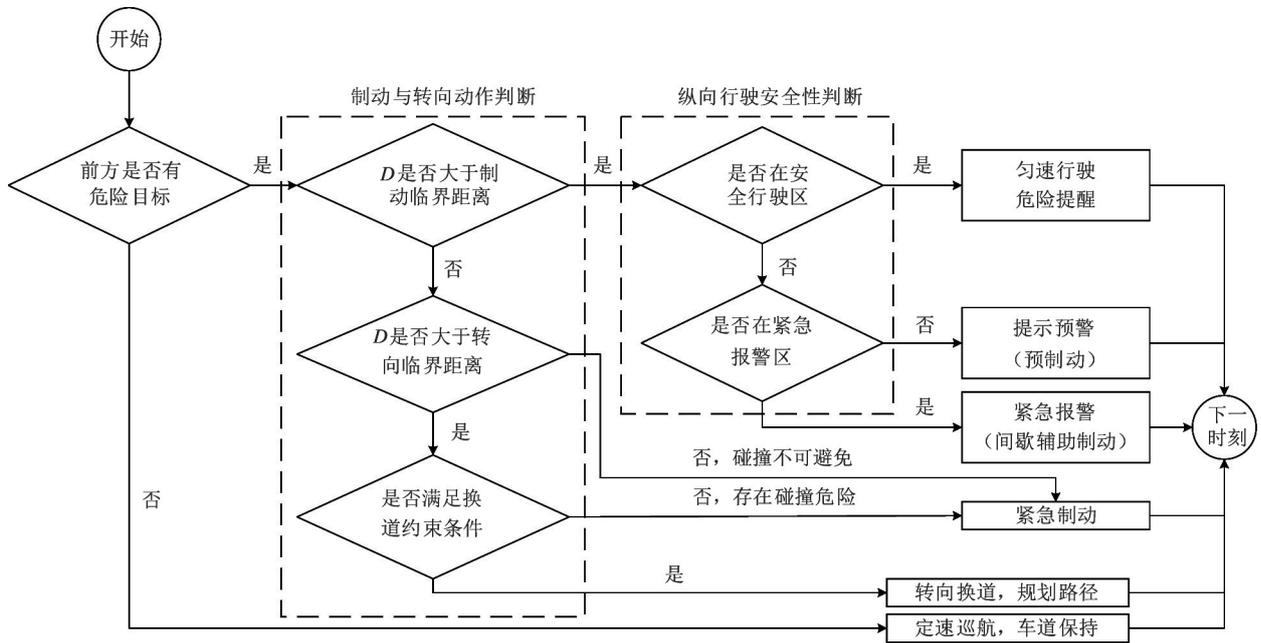


图7 制动与转向协调控制系统决策逻辑

加速度设定约束条件,提高了转向避撞的安全稳定性,并利用仿真软件验证了紧急情况下所提出策略的优越性能,如图8所示,在高相对速度情况下转向与制动协调控制相对于其他方法对极限避撞车距的需求更小。

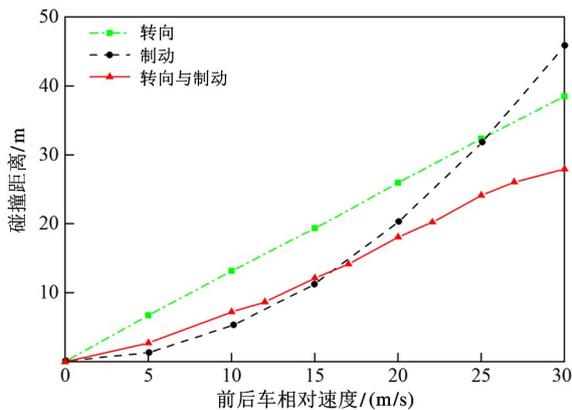


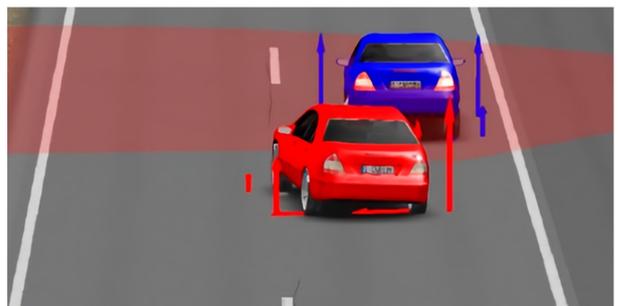
图8 不同控制策略的避撞车距需求<sup>[65]</sup>

此外,文献[66]基于一维追尾碰撞模型推导出二维状态下的转向避撞控制模型,构建如图9所示的CarSim驾驶模拟场景,验证该控制算法和转向干预系统在前车发生突发事故或者紧急情况时,能有效帮助车辆避开前方的动态障碍物,降低碰撞的可能性,仿真结果如图10所示。

目前,车辆转向换道路径模型的研究主要是基



(a) 驾驶模拟器界面



(b) CarSim 模拟车辆碰撞场景

图9 驾驶模拟器实验仿真<sup>[66]</sup>

于几何法规划换道轨迹。文献[67]提出采用 $\beta$ 样条曲线得到的车辆换道轨迹具有连续曲率,提供了无碰撞的平滑路径。文献[68]提出一种基于贝塞尔曲线的车辆路径生成方法,可以通过调整曲线控

制点来变化曲线形状,并证实在二维、三维空间中利用该方法生成路径具有不错的表现。文献[69]提出的正弦函数换道轨迹模型具有模型全局收敛快、曲线简单、平滑性好等优点,而且通过设定系统侧向加速度限值避免车辆转向失稳,提高了驾驶员的舒适度。在国内,因五次多项式避撞换道路径<sup>[70-74]</sup>的曲线连续光滑、符合驾驶轨迹行为特征而被广泛应用。

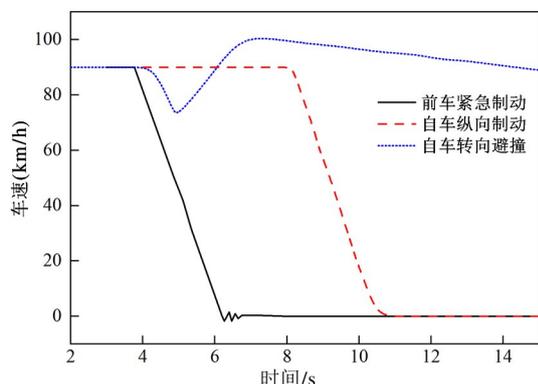


图10 车速为90 km/h时的仿真结果<sup>[66]</sup>

但是转向避让也应满足相邻车道的安全距离约束,以避免不合理的转向动作导致车辆出现失稳、侧翻等危险工况。文献[75]的研究数据表明因车辆变道而导致的车祸占总车祸的5%,占总车祸死亡人数的7%,而且由转向变道造成的交通事故都非常严重。由此可见,开发出可以稳定可靠的转向变道轨迹规划模型是转向避撞控制的关键。

### 3 避撞系统的差异化预警

基于运动学公式与碰撞时间设计的系统预警策略对驾驶员和不同路况的适应性都不够,且实际道路中行驶环境错综复杂,会大幅度降低控制系统的运行准确性。为解决在系统并未发生故障和失效的情况下,因其技术局限性而导致的不合理事故风险,国内外的汽车厂商制定了预期功能安全(safety of the intended functionality, SOTIF)的行业规范。在SOTIF方法论中,将驾驶场景分为已知安全、已知危险、未知危险和未知安全4个部分,当前的研究热点主要是针对已知危险和未知危险这两个场景的识别和安全设计。基于此,文献[76]指出为了提高控制

系统的安全性和可靠性,实车路试和仿真测试必须在高维度和复杂的交通场景下进行,通过不断地积累实验数据,逐渐将未知危险转变为已知风险,而且还要充分考虑驾驶员的差异性以及不同程度下的人机交互作用。

另有研究指出,驾驶员因其年龄、性别、性格以及驾龄等因素的差异有着不同的驾驶特性,而且该特性会随着道路行驶工况的变化而呈现出不同的驾驶习惯<sup>[77-78]</sup>。为此,考虑驾驶员特性的避撞预警研究也得到了很多研究者的关注。

文献[79]提出更符合驾驶员操作特性的碰撞危险评估算法,并设计大量事故场景进行模拟,降低了系统的误警率。基于低速行驶工况,文献[80]开发出充分考虑驾驶员和乘客舒适性的避撞预警算法。文献[81]设计了一种基于驾驶员行为特征、视觉特性以及生理特征的监督学习碰撞预测模型,显著提高了模型对碰撞危险工况识别的准确性,通过量化驾驶员的危险状态作为输入参数验证了碰撞模型预测的有效性。文献[24]提出车辆的安全预警距离可以根据不同驾驶员的心理安全范围来确定:

$$D_w = D_b + v_c t_h \quad (9)$$

式中, $t_h$ 表示驾驶员心理最小安全时间,一般取0.5~1.5 s<sup>[24]</sup>。

文献[82]基于实车数据展开对驾驶行为变化特性的分析,对每位驾驶员释放加速踏板和制动启动时刻的TTC值进行聚类分析,根据驾驶员面临危险时的制动行为特征将其分为谨慎、正常、激进3类,并对不同风格的驾驶员设定相应的预警和制动阈值。文献[51]指出防碰撞控制系统预警时间标定要综合考虑驾驶员反应时间和车辆制动持续时间,因此根据不同类型的驾驶风格对图4的预警时间和报警时间给出了如表2所示的标定结果。文献[83]利用BP神经网络对不同驾驶员群体的制动深度、 $TTC^{-1}$ 、驾驶员反应时间等特征参数进行学习,建立了可以有效预测驾驶员待制动行为的非线性关系知识库,对降低误警率有显著效果。

由于驾驶群体的差异性和复杂性,可以表征驾驶特性的因素有很多,而诸如驾驶员情绪、车内外视野、路况等很难用参数量化来表征,因此当前的研究

还未能全面考虑所有干扰因子对驾驶行为预测模型的影响,这些将会成为未来避撞控制预警系统的一个重要研究方向。

表2 预警时间标定

驾驶风格	$t_1/s$	$t_2/s$
激进	2.8	2.4
正常	3.2	2.7
保守	3.8	3.1

## 4 展望与挑战

当前国内外学者针对控制模型参数设定以及避撞控制策略等关键技术开展了深入的研究,并取得了丰富的研究成果,但尚有许多方面值得进一步探索。

### (1) 采取合理的制动减速度

通常避撞系统在紧急制动阶段都会采取最大减速度来估算避撞距离,这与实际驾驶情况不符,而且当加速度过快时驾驶员会产生不适感,导致运输车辆货物受到损坏。所以根据行驶车辆的实际情况并且结合其运行特性选择合理的制动减速度尤为关键。

### (2) 复杂危险工况下制动与转向的协调控制

在危险紧急工况下驾驶员潜意识会优先选择转向避让碰撞目标,转向操作在阴雨湿滑路面、高速工况下比制动避撞表现效果更优。采取转向方式来避开前方危险车辆,不仅需要考虑到相邻左边车道的转向安全约束条件,还需驾驶员有足够的经验应付紧急转向行为而导致车辆失稳的后果。因此研究者将会根据各种危险工况来丰富和完善制动转向协调控制模式,并提升其安全性与稳定性。

### (3) 避撞系统应体现驾驶行为的差异性

系统应通过不断积累驾驶员行为数据,自适应学习不同驾驶员在遇到危险时的反应时间和制动习惯等信息,深入探索干扰驾驶员决策和感知的影响因素,研究其变化规律,建立预测准确率高的驾驶员制动行为知识库,并确保驾驶的舒适性。

## 参考文献

- [ 1 ] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2016年度)[R]. 北京:公安部交通管理局, 2017
- [ 2 ] RAJARAM V, SUBRAMANIAN S C. Heavy vehicle collision avoidance control in heterogeneous traffic using varying time headway[J]. *Mechatronics*, 2018, 50: 328-340
- [ 3 ] 胡远志, 杨喜存, 刘西, 等. 基于驾驶员特性的主动避撞分级制动策略与验证[J]. *汽车工程*, 2019, 41(3): 298-306
- [ 4 ] 边明远. 基于紧急变道策略的汽车主动避障安全车距模型[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2012, 26(4): 1-4
- [ 5 ] HAN I. Analysis of vehicle collision accidents based on qualitative mechanics[J]. *Forensic Science International*, 2018, 291: 53-61
- [ 6 ] 刘存星, 魏民祥, 顾亮. 车辆紧急变道避撞安全距离建模与仿真研究[J]. *机械设计与制造*, 2016(2): 17-20
- [ 7 ] 王建强, 刘刚, 李克强, 等. 复杂路况下汽车主动避撞报警技术研究[J]. *公路交通科技*, 2005(4): 132-135
- [ 8 ] XIANG W, YAN X D, WENG J X, et al. Effect of auditory in-vehicle warning information on drivers' brake response time to red-light running vehicles during collision avoidance[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2016, 40(7): 56-67
- [ 9 ] CICCHINO J B, ZUBY D S. Characteristics of rear-end crashes involving passenger vehicles with automatic emergency braking[J]. *Traffic Injury Prevention*, 2019, 20(1): S112-S118
- [ 10 ] CLAUDIA W, SEBASTIAN W, TRENT V. Eye movement and brake reactions to real world brake-capacity forward collision warnings—A naturalistic driving study[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 58: 259-270
- [ 11 ] VOLLRATH M, BRIEST S, SCHIEL C, et al. Drawing up requirements for driver assistance systems from the perspective of traffic safety[M]. Germany: Institute for Traffic Management and Vehicle Control, 2006: 11-12
- [ 12 ] EURO N. Test protocol—AEB systems version 1.1[EB/OL]. <https://cdn.euroncap.com/media/17719/eur-ncap-aeb-test-protocol-v11.pdf>; Euro NCAP, (2015-06),

- [2021-02-01]
- [13] YOSHIDA H. Target following brake control for collision avoidance assist of active interface vehicle [C] // SICE-ICASE International Joint Conference, Busan, Korea, 2006: 4436-4439
- [14] LEE D N. A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision[J]. *Perception*, 1976, 5(4): 437-459
- [15] HAN J, HEO O, PARK M, et al. Vehicle distance estimation using a mono-camera for FCW/AEB systems [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2016, 17(3): 483-491
- [16] HAN I C, LUAN B C, HSIEH F C. Development of autonomous emergency braking control system based on road friction[C] // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Taipei, China, 2014: 933-937
- [17] FANCHER P, BAREKET Z, ERVIN R. Human centered design of an ACC-with-braking and forward-crash-warning system[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2001, 36(2-3): 203-223
- [18] DIJCK T V, HEIJDEN G A J. VisionSense: an advanced lateral collision warning system [C] // IEEE Proceedings Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, USA, 2005: 296-301
- [19] MILLER R, HUANG Q F. An adaptive peer-to-peer collision warning system [C] // IEEE Vehicular Technology Conference, Birmingham, USA, 2002: 317-321
- [20] ARIKERE A, YANG D, KLOMP M, et al. Integrated evasive maneuver assist for collision mitigation with oncoming vehicles[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2018, 56(10): 1577-1603
- [21] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车主动避撞系统的安全距离模型和目标检测算法[J]. *汽车安全与节能学报*, 2012, 3(1): 26-33
- [22] 王建强, 迟瑞娟, 张磊, 等. 适应驾驶员特性的汽车追尾报警-避撞算法研究[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(S1): 7-12
- [23] 刘庆华, 邱修林, 谢礼猛, 等. 基于行驶车速的车辆防撞时间预警算法[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 99-106
- [24] SEILER P, SONG B, HEDRICK J K. Development of a collision avoidance system[J]. *SAE Transactions*, 1998, 107(6): 1334-1340
- [25] LEE D, TAK S, CHOI S, et al. Development of risk predictive collision avoidance system and its impact on traffic and vehicular safety[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(7): 454-465
- [26] XIONG X X, WANG M, CAI Y F, et al. A forward collision avoidance algorithm based on driver braking behavior[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 129(8): 30-43
- [27] TAWFEEK M H, ELBASYOUNY K. A perceptual forward collision warning model using naturalistic driving data[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2018, 45(10): 899-907
- [28] WEI S Y, ZOU Y, ZHANG X D, et al. An integrated longitudinal and lateral vehicle following control system with radar and vehicle to vehicle communication [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(2): 1116-1127
- [29] 于广鹏, 谭德荣, 田厚杰, 等. 基于纵向避撞时间的预警/制动算法[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(2): 30-34
- [30] 商强, 谭德荣, 高松, 等. 基于驾驶倾向性辨识的避撞报警算法[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(13): 282-285
- [31] BELLA F, RUSSO R. A collision warning system for rear-end collision: a driving simulator study [J]. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2011, 20: 676-686
- [32] ARARAT O, KURAL E, GUVENC B A. Development of a collision warning system for adaptive cruise control vehicles using a comparison analysis of recent algorithms [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, 2006: 194-199
- [33] MANJUNATH K G, JAISANKAR N. A survey on rear end collision avoidance system for automobiles[J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2013, 5(2): 1368-1372
- [34] TRICOT N, RAJAONAH B, PACAUX M, et al. Driver's behavior and human-machine interactions characterization for the design of an advanced driving assistance system [C] // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hague, Netherlands, 2004: 3976-3981
- [35] KOOPMANN J, NAJM G. Characterizing the capability of a rear-end crash avoidance system [J]. *SAE Transactions*, 2003, 112(7): 759-766

- [36] LEE D H, KIM S K, KIM C S, et al. Development of an autonomous braking system using the predicted stopping distance[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2014, 15(2): 341-346
- [37] 袁朝春, 李道宇, 吴飞, 等. 汽车纵向主动避撞 DRV 安全距离模型建模研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(10): 29-33
- [38] ALVAREZ L, YI J, HOROWITZ R, et al. Emergency braking control in automated highway systems with underestimation of friction coefficient[C]//Proceedings of the 2000 American Control Conference, Chicago, USA, 2000: 574-579
- [39] ABE G, RICHARDSON J. Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems[J]. *Applied Ergonomics*, 2006, 37(5): 577-586
- [40] 肖献强, 王其东. 基于驾驶行为的汽车主动安全技术研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(19): 2390-2393
- [41] LI L, ZHU X C, MA Z X. Driver braking behavior under near-crash scenarios[J]. *International Journal of Vehicle Safety*, 2014, 7(3-4): 374-389
- [42] 李霖, 朱西产, 董小飞, 等. 自主紧急制动系统避撞策略的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(2): 168-174
- [43] MOON S, YI K. Human driving databased design of a vehicle adaptive cruise control algorithm[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46(8): 661-690
- [44] 臧利国, 滕飞, 彭志洋, 等. 改进 Berkeley 模型的汽车防碰撞预警算法[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(7): 1082-1088
- [45] 袁伟, 蒋拯民, 郭应时. 制动与转向协调动作的车辆避撞控制研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 173-181
- [46] 刘志强, 贾海江, 汪彭, 等. 基于减速度的车辆主动避撞模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(11): 76-80
- [47] 俄文娟, 丁延超, 赵鹏, 等. 危险品运输车辆自主紧急制动控制策略研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(S2): 44-50
- [48] 刘志强, 张春雷, 倪婕, 等. 一种基于驾驶员制动行为的车辆主动避撞模型研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(2): 10-16
- [49] CICCHINO J B. Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2017, 99(2): 142-152
- [50] 胡远志, 吕章洁, 刘西. 基于 PreScan 的 AEB 系统纵向避撞算法及仿真验证[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(2): 136-142
- [51] 裴晓飞, 齐志权, 王保锋, 等. 汽车前向主动报警/避撞策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(3): 599-604
- [52] 刘志强, 张春雷, 张爱红, 等. 基于驾驶行为的追尾避撞控制策略研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(9): 1068-1073
- [53] WANG X S, CHEN M, ZHU M X, et al. Development of ki-nematic based forward collision warning algorithm using an advanced driving simulator[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2583-2591
- [54] BRANNSTROM M, COELINGH E, SJOBERG J. Model-based threat assessment for avoiding arbitrary vehicle collisions[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3): 658-669
- [55] BARGMAN J, SMITH K, WERNEKE J. Quantifying drivers' comfort-zone and dread-zone boundaries in left turn across path/opposite direction(LTAP/OD) scenarios [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2015, 35(11): 170-184
- [56] LECHNER D, MALATERRE G. Emergency maneuver experimentation using a driving simulator [R]. USA: SAE Technical Paper 910016, 1991
- [57] MCGEHEE D V, MAZZAE E, BALDWIN S, et al. Examination of drivers' collision avoidance behavior using conventional and antilock brake systems[J]. *Accident Reconstruction Journal*, 2001, 12(1): 45-58
- [58] ECKERT A, HARTMANN B, SEVEBICH M, et al. Emergency steer & brake assist: a systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems [J]. *European Journal of Political Research*, 2011, 50(4): 441-478
- [59] SCHWARTING W, ALONSO M J, PAULL L, et al. Safe nonlinear trajectory generation for parallel autonomy with a dynamic vehicle model[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 19(9): 2994-3008
- [60] YI B L, BENDER P, BONARENS F, et al. Model predictive trajectory planning for automated driving [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018, 4(1):

- 24-38
- [61] 李霖, 朱西产, 陈海林. 驾驶员制动和转向避撞极限[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 1743-1748
- [62] SUH J, YI K, JUNG J, et al. Design and evaluation of a model predictive vehicle control algorithm for automated driving using a vehicle traffic simulator[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 51(6): 92-107
- [63] DAHL J, CAMPOS G R, OLSSON C, et al. Collision avoidance: a literature review on threat-assessment techniques[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018, 4(1): 101-113
- [64] EIDEHALL A, POHL J, GUSTAFSSON F, et al. Toward autonomous collision avoidance by steering[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, 8(1): 84-94
- [65] CHOI C, KANG Y. Simultaneous braking and steering control method based on nonlinear model predictive control for emergency driving support[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017, 15(1): 345-353
- [66] CHEN S L, CHENG C Y, HU J S, et al. Strategy and evaluation of vehicle collision avoidance control via hardware-in-the-loop platform[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(11): 327
- [67] BERRAVO F G, CUESTA F, OLLERO A, et al. Continuous curvature path generation based on  $\beta$ -spline curves for parking maneuvers[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(4): 360-372
- [68] KAWABATA K, MA L, XUE J, et al. A path generation for automated vehicle based on Bezier curve and waypoints[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 74(12): 243-252
- [69] FENG Y, ZHANG R H, GUO L, et al. Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(14): 5932-5946
- [70] 任玥, 郑玲, 张巍, 等. 基于模型预测控制的智能车辆主动避撞控制研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(4): 404-410
- [71] 阴培, 蒋拯民, 叶茂, 等. 考虑转向的汽车主动避撞控制系统研究[J]. 汽车技术, 2019(7): 1-7
- [72] 刘志强, 王一凡, 吴雪刚, 等. 基于线性路径跟踪控制的换道避撞控制策略研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 86-95
- [73] 袁朝春, 孙彦军. 基于可拓控制的智能车换道避撞系统研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(9): 29-38
- [74] 朱西产, 刘智超, 李霖. 基于车辆与行人危险工况的转向避撞控制策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(3): 217-223
- [75] HOU Y, EDARA P, SUN C. Situation assessment and decision making for lane change assistance using ensemble learning methods[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(8): 3875-3882
- [76] STELLET J E, ZOFKA M R, SCHUMACHER J, et al. Testing of advanced driver assistance towards automated driving: a survey and taxonomy on existing approaches and open questions[C]//2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Washington, USA, 2015: 1455-1462
- [77] 房曰荣. 不同类别驾驶员的驾驶行为特性差异实验研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(5): 204-208
- [78] 张圆, 邓院昌, 林庆丰, 等. 不同性别驾驶员小轿车交通事故的影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(3): 166-170
- [79] JANSSON J, JOHANSSON J, GUSTAFSSON F. Decision making for collision avoidance systems[J]. *SAE Transactions*, 2002, 111(7): 197-204
- [80] HUH K, SEO C, KIM J, et al. An experimental investigation of a CW/CA system for automobile using hardware in the loop simulation[C]//Proceedings of the American Control Conference, San Diego, USA, 1999: 724-728
- [81] BA Y T, ZHANG W, WANG Q H, et al. Crash prediction with behavioral and physiological features for advanced vehicle collision avoidance system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 74(1): 22-33
- [82] WANG J Q, YU C F, LI S E, et al. A forward collision warning algorithm with adaptation to driver behaviors[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 17(4): 1157-1167
- [83] 章军辉, 李庆, 陈大鹏. 基于BP神经网络的纵向避撞安全辅助算法[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 140-147

## Research progress on active collision avoidance control technology

ZHANG Huiling<sup>\* \*\*</sup>, KONG Dexue<sup>\*\*</sup>, AO Guchang<sup>\* \*\*</sup>, SHAO Yiming<sup>\* \*\*</sup>

(<sup>\*</sup> Chongqing Key Lab of Traffic System and Safety in Mountain Cities,  
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

(<sup>\*\*</sup> College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

### Abstract

In order to improve the operation accuracy and coordination adaptability of the control system, the characteristics of existing risk assessment models for collision avoidance systems are analyzed based on the research of intelligent vehicle assistance systems. The necessity of multi-factor fusion modeling is proposed based on the systematic analysis of the impact factors of vehicle collision avoidance. Three core problems are defined, which are risk assessment models, collision avoidance control strategies, and differential warning. The opportunity, difficulty and challenge of risk assessment models covering multiple influencing factors are reviewed and studied. The relevance between collision avoidance control strategies and risk assessment models is revealed. And then the improvement method of the collision avoidance control model to realize the differentiated warning is summarized. Finally the development trend of collision avoidance control technology research and the direction of further researches are concluded.

**Key words:** vehicle engineering, active safety, risk assessment, control strategy, differential warning