

基于 PreScan 的 AEB 系统控制策略

吕晓娇¹, 李方媛^{1*}, 徐月云², 赵长利¹, 郑刘源¹

1. 山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357; 2. 国家智能网联汽车创新中心, 北京 100176

摘要:为提高雨、雾等恶劣天气下汽车自动紧急制动(automatic emergency braking, AEB)系统的适用性,提出一种基于有限状态机的分级预警与分级制动控制策略。综合考虑驾驶员特性和车辆运行状态,优化碰撞时间(time to collision, TTC)预警阈值与制动临界安全距离,通过控制制动减速度变化率,提高制动过程中的驾乘舒适性。在中国新车评价规程(China New Car Assessment Program, C-NCAP) 2021 版提出的前车静止(car-to-car rear stationary, CCRs)、前车匀速(car-to-car rear moving, CCRm)和车辆碰撞纵向行驶自行车(car-to-bicyclist longitudinal adult, CBLA-50)典型工况下,构建雾天测试场景,通过软件 PreScan 和 MATLAB/Simulink 联合仿真 AEB 分级控制策略,并与固定 TTC 阈值控制策略进行对比,验证 AEB 分级控制策略的可行性。仿真结果表明:天气状况为雾天时,固定 TTC 阈值控制策略在 CCRs、CCRm、CBLA-50 工况下避撞成功率分别为 28.6%、66.7%、60.0%,车速较高时,无法实现避撞;分级控制策略在 CCRs、CCRm、CBLA-50 工况下的避撞成功率分别为 100.0%、100.0%、93.3%,有效避撞的同时保证制动时的驾乘舒适性。

关键词: AEB 系统; 控制策略; 制动; TTC

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2025)02-0001-09

引用格式: 吕晓娇, 李方媛, 徐月云, 等. 基于 PreScan 的 AEB 系统控制策略[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(2): 1-9.

LÜ Xiaojiao, LI Fangyuan, XU Yueyun, et al. Control strategy of AEB system based on PreScan[J].

Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(2): 1-9.

0 引言

随着机动车保有量的持续增长,交通事故率呈上升趋势,其中车速过快是造成道路交通事故的主要因素之一^[1]。汽车自动紧急制动(automatic emergency braking, AEB)系统是一种主动安全技术,能自动识别碰撞风险并实施紧急制动,可降低交通事故率。AEB 系统的理论研究和应用对提高道路交通安全及推动智能交通发展至关重要^[2-4]。

研究人员提出多种车辆避撞控制方法。郭文博^[5]设计安全时间模型,通过比较碰撞时间(time to collision, TTC)和安全避撞时间(time to avoidance, TTA),判断车辆的危险状态。田祖林^[6]在基于 TTC 模型的控制策略中加入预填充机制,缩短 AEB 系统的自动响应时间。TTC 模型更贴近驾驶员操作习惯,但未考虑距离因素,安全性稍逊于安全距离模型,前车刹车时, TTC 模型的碰撞率高于安全距离模型,安全距离模型能评估危险度,却难以精确预测避撞措施介入后的效果,常设保守阈值,易致系统误报或过早反应^[7-10];也可将二者综合,采用安全时间-距离模型实现避撞。尤本隆^[11]、荣同康^[12]、李迎弟^[13]构建融合安全距离与安全时间的 AEB 模型,基于典型测试工况进行仿真,结果表明该控制策略能有效实现预警与

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MG022)

第一作者简介: 吕晓娇(1999—),女,济南人,硕士研究生,主要研究方向为汽车主动安全, E-mail: lxj7221@163.com。

* 通信作者简介: 李方媛(1984—),女,内蒙古赤峰人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为汽车保险与交通安全管理, E-mail: 15753120911@163.com。

分级制动控制功能。

驾驶员的驾驶习惯影响道路安全,激进驾驶员倾向近距离强力制动,而保守者则提前制动。过大的制动减速度或频繁制动会降低车辆的驾乘舒适性^[14]。控制制动减速度及其变化率能优化驾乘舒适性。杨澜等^[15]考虑前车制动意图设计 AEB 控制策略及其测试评价方法,主车根据前车制动意图计算安全距离阈值并制定避撞策略,结果表明该方法在不同制动程度下均可及时制动,同时可减少过早制动造成的驾驶不适感。舒红等^[16]基于模型预测控制优化 AEB 控制策略,与模糊控制相比,确保安全的同时降低冲击力度,提高驾乘舒适性。

部分学者考虑驾驶员特性对 AEB 系统影响。李后隆^[17]基于驾驶特性和路面附着系数将 NGSIM 数据集中的驾驶员分为不同类型,根据驾驶风格确定驾驶员反应时间,采用路面附着系数修正安全距离模型,增强系统适应性。杜峰等^[8]采集不同驾驶员在制动过程中的驾驶数据,研究不同车速下驾驶员的制动行为特性,依据实测数据设定预警与制动阈值及减速度,设计基于驾驶行为特性的 AEB 系统控制策略,验证个性化控制策略的有效性。上述研究考虑驾驶员特性对 AEB 控制策略的影响,但控制策略中制动减速度波动较大,驾乘舒适性仍不足。在不同工况和环境条件的影响下,精准选择 AEB 系统的预警与制动介入时机,并优化制动减速度变化率是目前 AEB 系统的重要研究内容之一。

本文将驾驶员分为青年、中年及老年 3 组,综合考虑不同年龄段驾驶员的行为特性与车速因素,基于 TTC 模型与安全距离模型,优化 AEB 系统控制策略的预警时间阈值与制动触发阈值,并限制制动减速度变化率,确保制动过程中的驾乘舒适性,设计分级预警和分级制动控制策略,最后在雾天场景下对 AEB 控制策略进行仿真验证,以期提高 AEB 系统的安全性与适用性。

1 AEB 系统分级控制策略

在 AEB 系统固定 TTC 阈值控制策略中,当碰撞时间 $t_{TTC} \leq 2.6$ s 时,开始预警;当 $t_{TTC} \leq 1.6$ s 时,开始一级制动;当 $t_{TTC} \leq 0.6$ s 时,开始二级制动,该控制策略未考虑驾驶员差异、车速等 TTC 阈值的影响因素。由于驾驶环境的复杂多变及驾驶员驾驶特性的差异,传统 AEB 系统采用固定 TTC 阈值控制策略,无法满足实际需求。本文采用安全时间和安全距离 2 个指标,设计分级控制策略,将安全时间模型应用在预警策略中,安全距离模型应用在制动策略中。为提高安全时间模型和安全距离模型的通用性,对不同的车速和驾驶员设定不同的预警与制动阈值。

1.1 安全时间模型

基于安全时间模型建立 AEB 系统预警策略,碰撞时间达到设定阈值时,AEB 预警系统开始报警。

紧急制动时间阈值

$$t_{TTA} = v_1 / (\mu g \cos \delta + g \sin \delta) + t_2 + 0.5t_3 + t_1,$$

式中: v_1 为主车车速,m/s; μ 为轮胎与路面的附着系数; g 为重力加速度, $g=9.8$ m/s²; δ 为道路坡度,此处为水平道路, $\delta=0$; t_2 为驾驶员踩制动踏板到制动器发挥制动效果的时间,s; t_3 为制动效果提高时间,s; t_2+t_3 为制动器的作用时间,一般为 0.2~0.9 s^[18],为计算方便,取 $t_2=0.10$ s, $t_3=0.25$ s; t_1 为驾驶员反应时间,s。

一级预警阈值^[19]

$$t_{TTC}^1 = t_{TTA} + \Delta t_1, \quad (1)$$

式中: Δt_1 为一级预警和 AEB 系统制动时间的间隔,须紧急制动前 1.4 s 产生一级预警^[20],取 $\Delta t_1=1.5$ s。

二级预警阈值

$$t_{TTC}^2 = t_{TTA} + \Delta t_2, \quad (2)$$

式中: Δt_2 为二级预警和 AEB 系统制动时间的间隔,须紧急制动前 0.8 s 产生二级预警^[20],取 $\Delta t_2=1.0$ s。

Khashbat 等^[21]认为不同驾龄和年龄的驾驶员的制动反应时间不同,将驾龄设定为 0~5 a、>5~10 a、>10~25 a,驾驶员分为青年组(18~30 岁)、中年组(31~45 岁)和老年组(46~60 岁),通过数据统计与分

析得到驾驶员的制动反应时间与驾龄、年龄段的关系,如表 1 所示。一般情况下年轻驾驶员的驾龄相对较短,老年驾驶员的驾龄相对较长。由表 1 可知:驾龄越长,制动反应时间越短;中年组在各驾龄内制动反应时间最短,老年组的制动反应时间比青年组短。本文取青年组、中年组、老年组驾驶员的制动反应时间分别为 0.96、0.78、0.77 s。

$t_{TTC} > 4.4$ s 时,AEB 系统不发出碰撞预警^[20],设置碰撞时间最大预警阈值为 4.4 s。由式(1)(2)计算得到不同车速下的一、二级预警阈值如表 2 所示。

表 1 不同驾龄和年龄段的驾驶员的制动反应时间

驾龄/a	制动反应时间/s		
	青年组	中年组	老年组
0~5	0.96	0.83	0.85
>5~10	0.87	0.78	0.79
>10~25	0.82	0.76	0.77

表 2 不同车速下的一、二级预警阈值

车速/ (km·h ⁻¹)	t_{TTC}^1/s			t_{TTC}^2/s			车速/ (km·h ⁻¹)	t_{TTC}^1/s			t_{TTC}^2/s		
	青年组	中年组	老年组	青年组	中年组	老年组		青年组	中年组	老年组	青年组	中年组	老年组
20	3.4	3.2	3.2	3.0	2.8	2.8	60	4.4	4.4	4.4	4.4	4.2	4.2
30	3.7	3.6	3.6	3.3	3.2	3.2	70	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
40	4.1	3.9	3.9	3.7	3.5	3.5	80	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
50	4.4	4.3	4.3	4.1	3.9	3.9							

1.2 安全距离模型

制动安全距离是避撞的关键因素^[22]。为测试 AEB 系统,欧洲新车安全评鉴协会(European New Car Assessment Program,Euro-NCAP)和中国新车评价规程(China New Car Assessment Program,C-NCAP)设有前车静止(car-to-car rear stationary,CCRs)、前车匀速(car-to-car rear moving,CCRm)、前车匀减速(car-to-car rear braking,CCRB)及车辆碰撞纵向行驶自行车(car-to-bicyclist longitudinal adult,CBLA-50)等一系列典型测试工况,基本能覆盖实际驾驶环境中的多种驾驶工况。综合考虑各工况,选取 2021 版 C-NCAP 的 CCRs、CCRm、CBLA-50 工况,建立安全距离模型。

1.2.1 CCRs 工况

在道路交通中车辆会因事故或故障等在道路上无法移动,后车需判断与障碍物的距离决定是否进行紧急制动或变道^[23]。

一级制动临界安全距离

$$d_{s1} = v_1(t_1 + t_2 + 0.5t_3) + 0.5v_1^2/a_1 + \Delta r,$$

式中: a_1 为主车能达到的最大制动减速度,m/s²; Δr 为两车解除碰撞危险后需保持的最小安全距离,一般为 2~5 m^[24],本文取 $\Delta r = 2$ m。

二级制动临界安全距离

$$d_{s2} = v_1(t_2 + 0.5t_3) + 0.5v_1^2/a_1 + \Delta r。$$

1.2.2 CCRm 工况

当前方存在同向匀速行驶的目标车且车速不小于主车时,不存在碰撞风险,当目标车的车速小于主车时,两车存在碰撞风险,主车减速制动。

一级制动临界安全距离

$$d_{m1} = (v_1 - v_2)(t_1 + t_2 + 0.5t_3) + 0.5(v_1 - v_2)^2/a_1 + \Delta r,$$

式中: v_2 为目标车车速,m/s。

二级制动临界安全距离

$$d_{m2} = (v_1 - v_2)(t_2 + 0.5t_3) + 0.5(v_1 - v_2)^2/a_1 + \Delta r。$$

1.2.3 CBLA-50 工况

同一车道上,主车前方存在同向匀速行驶的二轮车时,两车存在碰撞风险,主车减速制动。

一级制动临界安全距离

$$d_{b1} = (v_1 - v_3)(t_1 + t_2 + 0.5t_3) + 0.5(v_1 - v_2)^2/a_1 + \Delta r,$$

式中: v_3 为二轮车车速, m/s。

二级制动临界安全距离

$$d_{b2} = (v_1 - v_3)(t_2 + 0.5t_3) + 0.5(v_1 - v_2)^2/a_1 + \Delta r。$$

车辆质量一定时,由路面附着系数确定最大制动减速度^[17]。水平道路上车辆最大制动减速度 $a_{\max} = \mu g$, 本文路面种类为沥青(干), 取 $\mu = 0.8$, 则 $a_{\max} = 7.84 \text{ m/s}^2$ 。

1.3 AEB 系统分级预警与分级制动策略设计

驾驶环境复杂多变,车辆换道较频繁,若仅把本车道内前方车辆的运动状态作为 AEB 系统决策的唯一判断依据,会导致 AEB 系统存在误触发或漏触发现象,降低安全性和可靠性。控制 AEB 系统前,须准确判定车辆危险状况,合理设计预警策略。首先判断主车和前方目标车辆的横向距离是否不大于车道宽度的 1/2,若是,需判断主车与前方目标车的纵向距离 d 与一级制动临界安全距离 d_1 、二级制动临界安全距离 d_2 的关系。AEB 系统触发逻辑如图 1 所示。

AEB 系统触发逻辑包括 3 部分: 1) 车道宽度一般为 3.50~4.00 m, 高速公路行车道标准宽度为 3.75 m, 本文取车道宽度为 3.75 m, 当主车横向距离与前车存在碰撞风险时,继续判断纵向状态。2) AEB 系统计算模块将实时的 t_{TTC} 与设置的 TTC 阈值对比^[25], $t_{\text{TTC}} \leq t_{\text{TTC}}^1$ 时,发出一级预警,请求驾驶员介入;若驾驶员未采取相应措施,且 $t_{\text{TTC}} \leq t_{\text{TTC}}^2$ 时,发出二级预警。3) 若驾驶员对碰撞预警没有反应且 $d \leq d_2$,执行自动减速,制动强度为 $0.8g$,为提高驾乘舒适性,限制减速度变化率,满足驾乘舒适性的减速度变化率不大于 10 m/s^3 ^[26],限制制动减速度变化率绝对值为 $0 \sim 10 \text{ m/s}^3$;若未触发二级制动, $d \leq d_1$,以 $0.4g$ 的制动减速度进行一级制动^[27],同样限制制动减速度变化率绝对值为 $0 \sim 10 \text{ m/s}^3$,一级制动目标是让驾驶员有更多时间做出适当的驾驶反应。

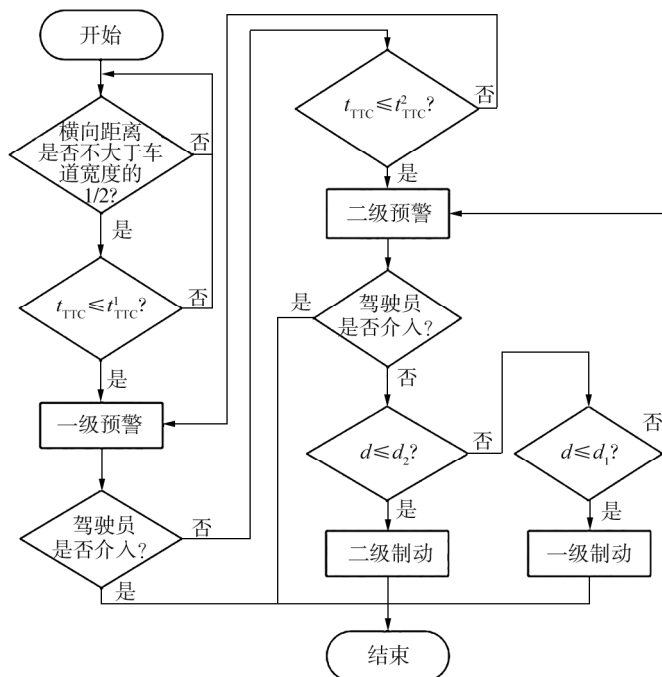


图 1 AEB 系统触发逻辑

2 AEB 系统虚拟仿真测试

2.1 联合仿真平台

采用软件 PreScan 和 MATLAB/Simulink 搭建驾驶场景和控制算法,以软件 PreScan 自带车型 Toyota Prius Sedan 为研究对象,采用该车型的默认参数。基于 Simulink 搭建车辆控制模型,加入 AEB 系统控制模块,仿真测试自动紧急制动功能^[28]。AEB 系统控制模块包括目标检测、触发条件、TTC 计算、横向距离计算、主车是否静止判断、允许开启判断和状态机 7 个模块,其中前 6 个模块的结果输入状态机,状态机输出主车减速度、碰撞预警是否工作、制动是否工作和 AEB 系统保持信号。状态机根据主车与目标车的相对位置与速度等信息,实时判断制动强度和预警等级。

状态机处于初始状态、未检测到目标、不满足碰撞预警条件、不满足碰撞制动条件时,状态机输出的主车减速度、碰撞预警信号、制动信号均为 0。当检测到目标且满足一级碰撞预警条件时,输出的主车减

速度为 0,并发出一级碰撞预警信号;当检测到目标且满足二级碰撞预警条件时,输出主车减速度为 0,并发出二级碰撞预警信号;当检测到目标且满足一级碰撞制动条件时,输出主车减速度为 $0.4g$,并发出一级碰撞制动信号;当检测到目标且满足二级碰撞制动条件时,输出的主车减速度为 $0.8g$,并发出二级碰撞制动信号。

2.2 AEB 系统测试场景

在软件 PreScan 中设置天气状况为雾天,能见度为 300 m。根据 2021 版 C-NCAP 测试标准设置 AEB 系统的测试车速,CCRs 工况下主车速度分别为 20、30、40、50、60、70、80 km/h,目标车速度和加速度均为 0,两车初始距离为 100 m;CCRm 工况下主车速度分别为 30、40、50、60、70、80 km/h,目标车匀速行驶,速度为 20 km/h,两车初始距离为 100 m;CBLA-50 工况下主车速度分别为 20、30、40、50、60 km/h,二轮车匀速行驶,速度为 15 km/h,两车初始距离分别为 10、31、52、73、94 m。

2.3 AEB 系统仿真验证及结果分析

2.3.1 CCRm 工况测试场景

CCRm 工况下制动停止时两车相对距离如图 2 所示。由图 2 可知:CCRm 工况下,采用分级控制策略时,3 组驾驶员的避撞成功率均为 100%,制动停止时两车相对距离为 1.00~1.51 m;采用固定 TTC 阈值控制策略时,避撞成功率为 66.7%,当主车速度为 70~80 km/h 时,AEB 系统介入时机过晚,主车不能及时制动,最终发生碰撞。

CCRm 工况下,主车初速度分别为 30、80 km/h,与前方以 20 km/h 匀速行驶目标车的初始距离为 100 m,分级控制策略及固定 TTC 阈值控制策略下主车速度、主车加速度及两车相对距离的仿真结果如图 3、4 所示。

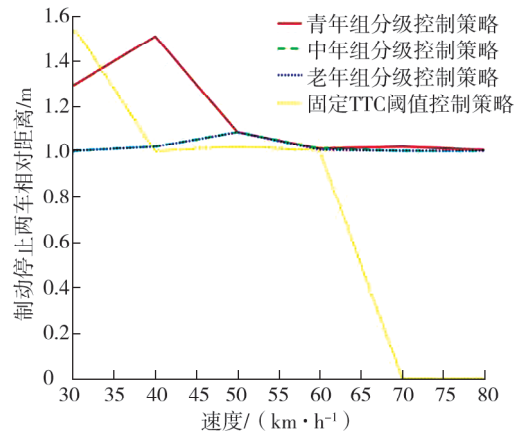


图2 CCRm 工况下制动停止时两车相对距离

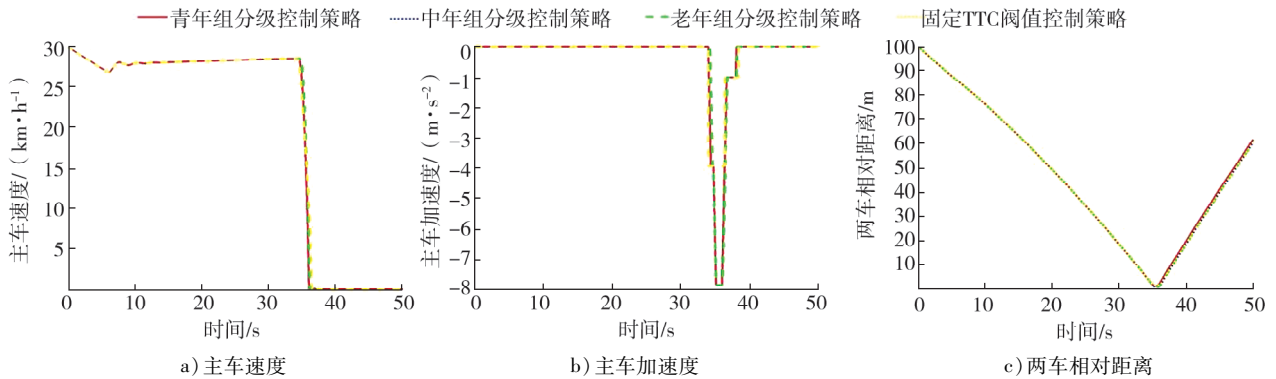


图3 CCRm 工况下主车初速度为 30 km 时 2 种控制策略的 AEB 系统仿真结果

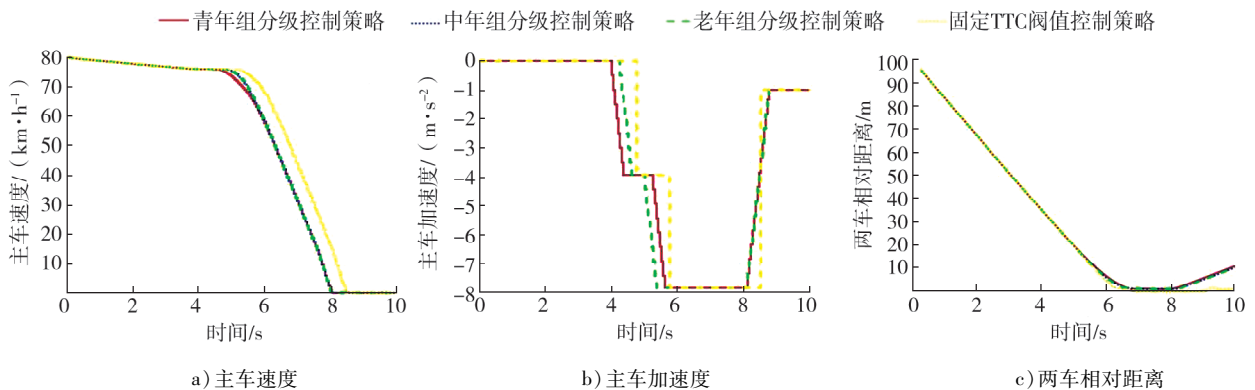


图4 CCRm 工况下主车初速度为 80 km 时 2 种控制策略的 AEB 系统仿真结果

由图3可知:主车初速度为30 km/h时,采用分级控制策略和固定TTC阈值控制策略均能有效避撞,固定TTC阈值控制策略在第34.0秒开始一级制动,最小相对距离为1.57 m,分级控制策略在第34.0~34.3秒、第34.7秒分别开始一、二级制动,最小相对距离为1.00~1.30 m,制动减速度变化率绝对值为0~10 m/s^3 ,能保证安全性和驾乘舒适性。

由图4可知:主车初速度为80 km/h时,采用固定TTC阈值控制策略无法避撞,该策略在第4.8秒、第5.8秒分别开始实施一、二级制动;采用分级控制策略避撞成功,该策略在第4.0~4.3秒、第5.0~5.2秒分别开始一、二级制动,最小相对距离为1.00 m,制动减速度变化率绝对值为0~10 m/s^3 ,能保证安全性和驾乘舒适性。

2.3.2 CCRs 工况测试场景

CCR_s 工况下制动停止时两车相对距离如图5所示。由图5可知:CCR_s 工况下,采用分级控制策略时,避撞成功率为100%,制动停止时两车相对距离为1.00~2.92 m;采用固定TTC阈值控制策略时,避撞成功率为28.6%,当主车速度为40~80 km/h时,AEB系统介入时机过晚,主车不能及时制动,最终发生碰撞。

CCR_s 工况下,主车初速度分别为20、80 km/h,前方目标车静止,两车初始距离为100 m,分级控制策略及固定TTC阈值控制策略下主车速度、主车加速度及两车相对距离的仿真结果如图6、7所示。

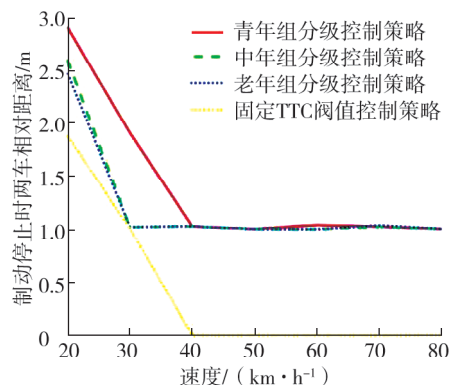


图5 CCR_s 工况制动停止时两车相对距离

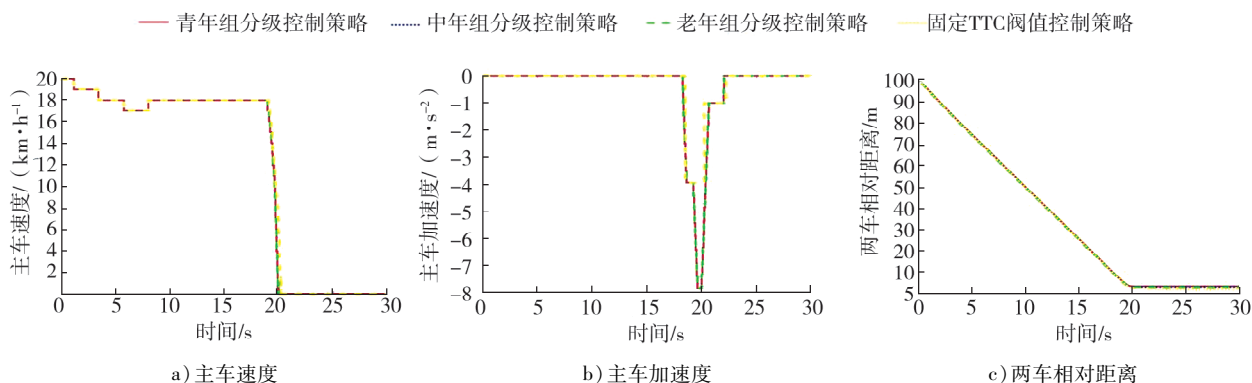


图6 CCR_s 工况下主车初速度为20 km/h时2种控制策略的AEB系统仿真结果

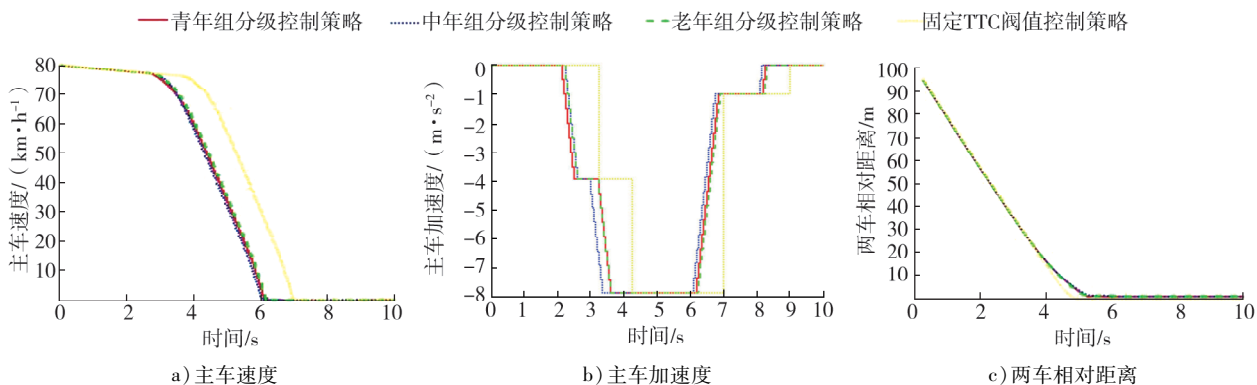


图7 CCR_s 工况下主车初速度为80 km/h时2种控制策略的AEB系统仿真结果

由图6可知:主车初速度为20 km/h时,采用分级控制策略和固定TTC阈值控制策略均能避撞成功;TTC控制策略在第18.5秒开始一级制动,最小相对距离为1.88 m;分级控制策略在第18.3秒、第19.2

秒分别开始一、二级制动,最小相对距离为 2.48~2.92 m,制动减速度变化率绝对值为 $0\sim 10\text{ m/s}^3$,能保证安全性和驾乘舒适性。

由图 7 可知:主车初速度为 80 km/h 时,采用固定 TTC 阈值控制策略无法避撞,其在第 3.3 秒、第 4.3 秒分别开始一、二级制动;采用分级控制策略时避撞成功,该策略在第 2.2~2.3 秒、第 3.0~3.2 秒分别开始一、二级制动,最小相对距离为 1.00 m ,制动减速度变化率绝对值为 $0\sim 10\text{ m/s}^3$,能保证安全性和驾乘舒适性。

2.3.3 CBLA-50 工况测试场景

CBLA-50 工况下制动停止时两车相对距离如图 8 所示。由图 8 可知:CBLA-50 工况下,采用分级控制策略时,避撞成功率为 93.3%,避撞成功时主车和目标车的相对距离为 $1.00\sim 2.36\text{ m}$;采用固定 TTC 阈值控制策略时,避撞成功率为 60.0%,当主车速度为 $50\sim 60\text{ km/h}$ 时,AEB 系统介入时机过晚,主车不能及时制动,最终发生碰撞。

CBLA-50 工况下,主车初速度为 20 km/h ,二轮车速度为 15 km/h ,两车间隔 10 m ,分级控制策略及固定 TTC 阈值控制策略下主车速度、加速度及两车相对距离的仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知:CBLA-50 工况下,采用分级控制策略和固定 TTC 阈值控制策略均能成功避撞;固定 TTC 阈值控制策略在第 9.0 秒开始一级制动,最小相对距离为 1.00 m ;分级控制策略在第 8.0~8.3 秒直接开始二级制动,最小相对距离为 $1.43\sim 1.46\text{ m}$,制动减速度变化率绝对值为 $0\sim 10\text{ m/s}^3$,能保证安全性和驾乘舒适性。

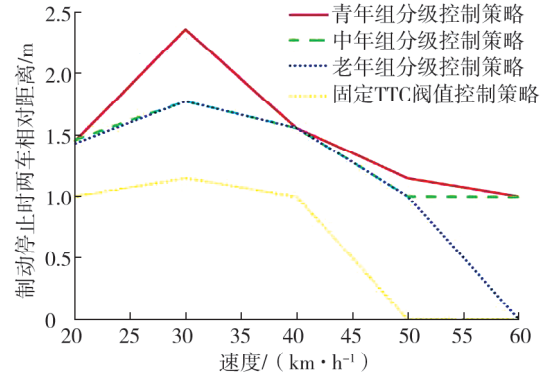


图 8 CBLA-50 工况下制动停止时两车相对距离

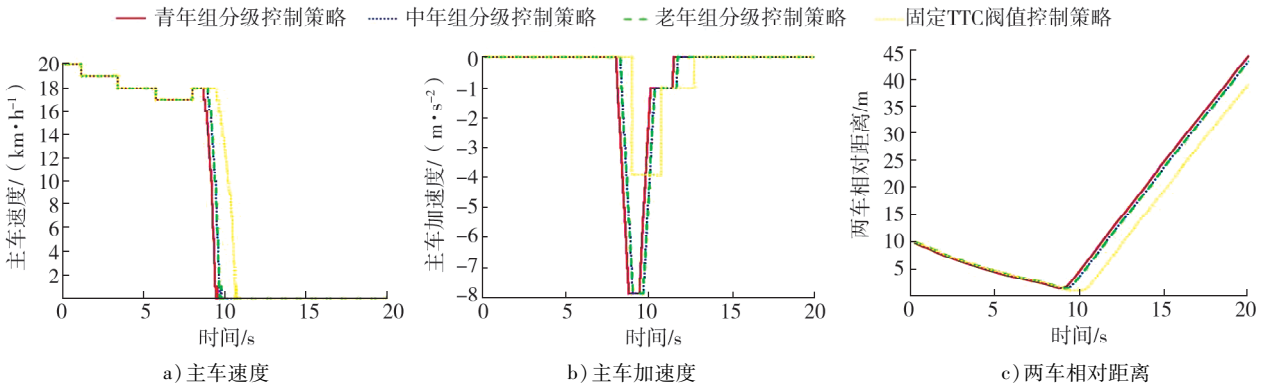


图 9 CBLA-50 工况下主车低速行驶时 2 种控制策略的 AEB 系统仿真结果

CBLA-50 工况下,主车初始速度为 60 km/h ,与前方目标车的初始距离为 94 m ,分级控制策略及固定 TTC 阈值控制策略下主车速度、加速度及两车相对距离的仿真结果如图 10 所示。

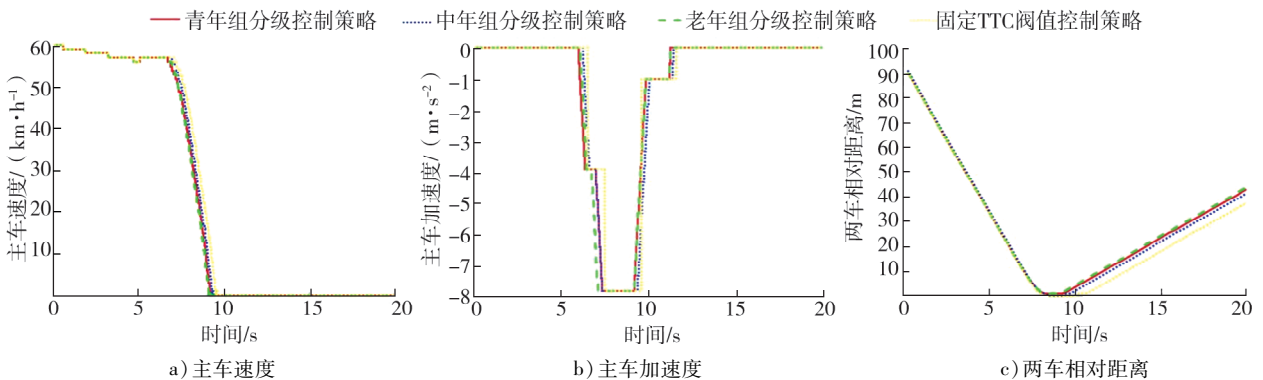


图 10 CBLA-50 工况下主车高速行驶时 2 种控制策略的 AEB 系统仿真结果

由图10可知:CBLA-50工况下,采用固定TTC阈值控制策略无法避撞,该策略在第6.5秒、第7.5秒分别开始一、二级制动;采用分级控制策略时,青年组和老年组避撞成功,最小相对距离为1.00 m,中年组无法避撞,该策略在第6.0~6.3秒、第6.8~7.0秒分别开始一、二级制动,制动减速度变化率绝对值为 $0\sim 10\text{ m/s}^3$ 。

3 结束语

本文考虑驾驶员的驾驶特性及车速,采用安全时间模型和安全距离模型,设计AEB系统分级控制策略,优化预警模块中的碰撞时间预警阈值,及制动模块中的制动临界安全距离,为保证驾乘舒适性,限制制动减速度变化率。通过软件PreScan和MATLAB/Simulink搭建驾驶场景和控制算法进行AEB系统仿真测试。仿真结果表明:天气状况为雾天时,基于安全时间和安全距离模型的AEB分级控制策略能及时并正确发出预警、制动信号,在CCRM工况、CCRs工况下避撞成功率均为100%,CBLA-50工况下避撞成功率93.3%,制动减速度变化率绝对值为 $0\sim 10\text{ m/s}^3$ 。AEB分级控制策略具有较高的准确性,能提高车辆的行驶安全性的同时保证驾乘舒适性。

本文研究了AEB系统纵向避撞控制策略,但未考虑车辆侧向避撞,未来将进一步研究横、纵组合避撞控制策略。

参考文献:

- [1] 周文帅. 基于典型测试场景的自动驾驶汽车紧急制动系统测试评价方法研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- [2] 田永. 基于多传感器融合的汽车AEB系统控制策略研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2022.
- [3] 段金杰. 汽车自动紧急制动系统设计与控制策略优化研究[D]. 武汉:江汉大学,2023.
- [4] 张成财. 商用车紧急制动控制策略研究及典型工况应用[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2023.
- [5] 郭文博. 车辆AEB系统防撞预警控制及仿真测试方法研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2021.
- [6] 田祖林. 基于AEB的汽车自动制动系统硬件设计及控制算法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2021.
- [7] 杨一鹏. 考虑前车制动意图的自动驾驶AEB控制策略与测试评价研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [8] 杜峰,程剑锋,齐蕾,等. 基于驾驶行为特性的AEB系统控制策略研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(6):16-25.
- [9] 辛佳庚,杨复钰,张宝迪,等. 基于融合算法的电动汽车AEB控制策略[J]. 北京交通大学学报,2021,45(6):77-86.
- [10] 王祎男,王迪,关瀛洲. 智能网联汽车主动避撞系统发展综述[J]. 汽车技术,2023(3):1-9.
- [11] 尤本隆. 基于Prescan自动紧急制动系统分级控制策略研究[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(1):54-59.
- [12] 荣同康. 汽车紧急制动系统控制策略研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2021.
- [13] 李迎弟. 汽车自动紧急制动系统控制策略研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- [14] 林国庆,逯超,韩龙飞,等. 汽车自动紧急制动系统行人测试与评价方法[J]. 汽车安全与节能学报,2020,11(3):296-304.
- [15] 杨澜,杨一鹏,刘松岩,等. 考虑前车制动意图的自动紧急制动策略及其测试评价方法[J]. 汽车技术,2024(2):25-32.
- [16] 舒红,张光琛,何杉,等. 汽车自动紧急制动系统控制研究[J]. 公路交通科技,2023,40(7):216-223.
- [17] 李后隆. 基于驾驶特性和路面附着系数的自动紧急制动系统控制策略研究及仿真[D]. 西安:长安大学,2021.
- [18] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2012.
- [19] 徐洋. 基于强化学习的AEB控制策略研究[D]. 西安:长安大学,2022.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 营运车辆自动紧急制动系统性能要求和测试规程:JT/T1242—2019[S]. 北京:人民交通出版社,2021.
- [21] KHASHBAT J, TSEVEGJAV T S, MYAGMARJAV J, et al. Determining the driver's reaction time in the stationary and real-life environments (comparative study) [C]//7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Tomsk, Russia: IEEE, 2012:1-3.

- [22] 李晓阳. 考虑驾驶员特性的行人避撞 AEB 系统研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2021.
- [23] 陈力. 紧急工况下无人驾驶汽车智能决策方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.
- [24] 肖雨琳. 基于毫米波雷达的无人车 AEB 系统研究与实现[D]. 西安:长安大学,2019.
- [25] 罗德意,陆静,王玉江,等. 行人横穿场景下某智能接驳车 AEB 算法优化研究[J]. 汽车实用技术,2024,49(8): 22-29.
- [26] 张春雷. 基于驾驶员避撞行为的追尾避撞控制策略研究[D]. 镇江:江苏大学,2017.
- [27] 韩勇,袁小宾,卢明,等. 汽车与电动两轮车碰撞典型场景下的 AEB 纵横向触发策略研究[J]. 汽车工程 2023,45(3):501-509.
- [28] 毛攀. 汽车与两轮车碰撞事故场景分析及 AEB 避撞研究[D]. 成都:西华大学,2020.

Control strategy of AEB system based on PreScan

LÜ Xiaojiao¹, LI Fangyuan^{1*}, XU Yueyun², ZHAO Changli¹, ZHENG Liuyuan¹

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. National Innovation Center of Intelligent and Connected Vehicles, Beijing 100176, China

Abstract: In order to improve the applicability of the automatic emergency braking (AEB) system in severe weather such as rain and fog, a hierarchical warning and braking control strategy based on finite-state machine is proposed. Taking into account the driver's characteristics and vehicle operating status, the time-to-collision (TTC) warning threshold and braking critical safety distance are optimized to improve the driving comfort during the braking process and control the rate of change of braking deceleration. Under the typical working conditions of car-to-car rear stationary (CCRs), car-to-car rear moving (CCRm), and car-to-cyclist longitudinal adult (CBLA-50) proposed in the 2021 version of the China New Car Assessment Program (C-NCAP), a foggy test scenario was constructed to simulate the AEB hierarchical control strategy through software PreScan and MATLAB/Simulink, and compared with the fixed TTC threshold control strategy to verify the feasibility of the AEB hierarchical control strategy. The simulation results show that when the weather conditions are foggy, the success rate of collision avoidance of the fixed TTC threshold control strategy under CCRs, CCRm, and CBLA-50 working conditions is 28.6%, 66.7%, and 60.0%, respectively. When the vehicle speed is high, collision avoidance cannot be achieved. The success rate of collision avoidance of the hierarchical control strategy under CCRs, CCRm, and CBLA-50 working conditions is 100.0%, 100.0%, and 93.3%, respectively, which effectively avoids collisions while ensuring driving comfort during braking.

Keywords: AEB system; control strategy; braking; TTC

(责任编辑:赵玉真)