

# 考虑安全性和舒适性的 AEB 系统跟车控制策略研究

赵会强<sup>1</sup>, 郭致远<sup>2</sup>, 刘兆波<sup>2</sup>

(1. 陕西法士特汽车传动集团有限责任公司, 西安 710119; 2. 长安大学汽车学院, 西安 710064)

**摘要:** 针对 AEB 系统安全模型难以兼顾行车安全性和驾驶舒适性的问题, 提出了考虑安全性和舒适性的安全模型, 制定了相应的预警制动策略。在经典 TTC 模型的基础上引入两车加速度构建二阶 TTC 模型, 结合路面条件对基于制动过程分析的安全距离模型进行修正, 综合考虑安全性与舒适性需求, 制定预警阶段采用二阶 TTC 模型、制动阶段采用修正安全距离模型的危险状态判断策略。设计 AEB 分层式控制系统, 并搭建联合仿真平台与实车试验平台进行验证。结果表明, 在多种测试场景下, 设计的 AEB 系统跟车控制策略均能成功避险, 制动时刻不会对驾驶员的正常驾驶造成干扰, 预警时长保证驾驶员有充足的反应时间, 制动后的两车最小距离在合理范围内, 且在湿滑路面也能实现较好的避险效果。

**关键词:** 主动安全; AEB 系统; 安全模型; 控制策略

中图分类号: U463.5 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.04.02

## A Car-Following Control Strategy for AEB Systems Balancing Safety and Comfort

ZHAO Huiqiang<sup>1</sup>, GUO Zhiyuan<sup>2</sup>, LIU Zhaobo<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Fast Motor Transmission Group Co., Ltd., Xi'an 710119, China;  
2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** To address the difficulty of balancing safety and ride comfort, this paper proposes a new safety model considering both factors, and introduces a corresponding early-warning braking strategy. First, the second-order time-to-collision (TTC) model is constructed by incorporating the accelerations of both vehicles into the classical TTC model. Then the safety distance model based on braking process analysis is modified according to road conditions. Combining the safety and comfort requirements, the paper employs the second-order TTC model during the warning phase, and the modified safety distance model during the braking phase to judge dangerous states. The hierarchical AEB control system is designed, and co-simulation and real-vehicle test platforms are built for verification. The results show that, under various test scenarios, the proposed car-following control strategy for AEB systems successfully avoids collisions, initiates braking without disrupting normal driving, provides warning times that give the driver ample reaction time, keeps the minimum inter-vehicle distance after braking within a reasonable range, and achieves effective hazard avoidance even on wet roads.

**Keywords:** active safety; AEB system; security models; control strategies

收稿日期: 2024-03-06 改稿日期: 2024-06-19 网络首发日期: 2024-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2501201)

参考文献引用格式:

赵会强, 郭致远, 刘兆波. 考虑安全性和舒适性的 AEB 系统跟车控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(4): 445-456.

ZHAO Huiqiang, GUO Zhiyuan, LIU Zhaobo. A Car-Following Control Strategy for AEB Systems Balancing Safety and Comfort

[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(4): 445-456. (in Chinese)



近年来,汽车行业与互联网、人工智能和 5G 通信等行业逐步融合,智能网联汽车产业高质量发展,为行业注入创新活力。然而,汽车产业飞速发展的同时也导致交通压力过大,安全事故频发。研究表明,近九成的道路交通事故是由驾驶员操作不当或反应不及时而导致的<sup>[1]</sup>。而自动紧急制动系统(AEB)可以很好地弥补驾驶员的不足,从而大幅降低跟车场景下由驾驶员因素引发的交通事故<sup>[2]</sup>。

AEB 系统主要由环境感知模块、决策算法模块和执行控制模块三部分组成。由环境感知模块获取周围环境信息,决策算法模块判断当前工况的行车危险状态,最后由执行控制模块实现对车辆运动状态的控制<sup>[3]</sup>。系统应当对行车工况危险程度有比较准确的判断且符合驾驶员的主观认知,这就需要合理的安全模型与预警制动策略作为基础<sup>[4]</sup>。

目前的研究中,常用的安全模型主要有安全时间模型和安全距离模型<sup>[5]</sup>。安全时间模型从主车与前车发生碰撞的时间尺度衡量当前行车工况的危险程度。经典安全时间模型有碰撞时间 TTC 模型<sup>[6]</sup>、碰撞时间倒数 TTCi 模型<sup>[7]</sup>和车头时距 THW 模型<sup>[8]</sup>。其中, TTC 模型和 TTCi 模型在两车相对速度较小时难以发挥作用。THW 模型缺少前车速度信息,对碰撞风险的描述不够完备。并且常见的安全时间模型普遍没有考虑行车时的路面条件,在湿滑路面上的效果较差<sup>[9]</sup>。

安全距离模型从主车与前车之间的实时距离尺度衡量当前行车工况的危险程度。经典安全距离模型主要有 Mazda 模型<sup>[10]</sup>、Honda 模型<sup>[11]</sup>、Berkeley 模型<sup>[12]</sup>和 SeungwukMoon 模型<sup>[13]</sup>。上述模型均能根据行车状态进行相应的预警制动操作,但未综合考虑 AEB 系统进行预警制动操作时的行车安全性和驾驶舒适性。

在此基础上,朱西产等<sup>[14]</sup>提出时间裕度 TM 模型作为 THW 模型的修正,能更好地描述驾驶员的主观瞬态碰撞风险。DONG Jie 等<sup>[15]</sup>将多种安全模型进行加权耦合建立多重安全距离模型,减少系统在车辆换道时的误触发情况。考虑到前车行驶状态对制动过程的影响,刘庄等<sup>[16]</sup>利用人工神经网络

对驾驶工况进行辨识和预测,根据识别结果对安全距离模型进行优化。王全等<sup>[17]</sup>结合前方障碍物运动状态,提出一种可自适应调整预警时间和距离的全工况 AEB 控制系统。考虑到路面条件对车辆制动过程的影响,吴镇平等<sup>[18]</sup>提出一种考虑路面坡度和摩擦因数的自动紧急制动系统以实现在斜坡路面情况下的有效避险。SEVIL 等<sup>[19]</sup>结合路面附着系数与坡度等因素,提出基于轮胎-路面附着系数的自适应 AEB 算法。

上述研究主要从安全性、舒适性或适应性等单一角度进行安全模型的改进,因此,针对目前安全模型难以兼顾行车安全性与驾驶舒适性且在湿滑路面适应性较差的问题,本文构建了考虑安全性和舒适性的安全模型与预警制动策略,设计了分层式控制系统实现对车辆运动状态的控制,最后通过仿真试验与实车试验对 AEB 系统跟车控制策略进行了验证。

## 1 考虑安全性和舒适性的安全模型

### 1.1 碰撞时间模型

本文研究对象为同车道两车纵向碰撞风险场景,如图 1 所示。

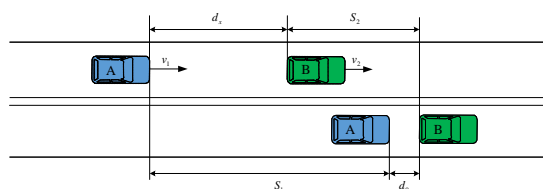


图 1 碰撞风险场景

基于碰撞时间的安全模型(TTC)以主车与前车保持当前运动状态继续行驶,直至发生碰撞所需要的时间来衡量碰撞风险水平。表达式为:

$$t_{\text{TTC}} = \frac{d_x}{v_{\text{rel}}} \quad (1)$$

式中:  $t_{\text{TTC}}$  为碰撞时间;  $d_x$  为主车与前车的相对距离;  $v_{\text{rel}}$  为主车与前车的相对速度。

然而在两车速度接近时,传统 TTC 模型难以对碰撞风险进行准确的描述,并且只包括了相对距离和相对速度 2 个变量,对碰撞风险的描述完备性不足<sup>[20]</sup>。

因此，将两车加速度引入碰撞时间模型，采用二阶TTC模型评估行车工况的碰撞风险，根据两车相对速度和相对加速度的情况进行讨论，得到二阶TTC模型在不同工况下的计算式，见表1。

表1 不同工况下的二阶TTC

相对速度和相对加速度情况	二阶TTC
$v_{rel} = 0, a_{rel} > 0$	$t_{TTC2} = \sqrt{\frac{2d_x}{a_{rel}}}$
$v_{rel} > 0, a_{rel} \neq 0$	$t_{TTC2} = \frac{-v_{rel} + \sqrt{v_{rel}^2 + 2d_x a_{rel}}}{a_{rel}}$
$v_{rel} > 0, a_{rel} = 0$	$t_{TTC2} = \frac{d_x}{v_{rel}}$

### 1.2 安全距离模型

基于制动过程分析的安全模型以主车与前车的实时车距来衡量碰撞风险水平。制动过程中的减速度变化如图2所示。

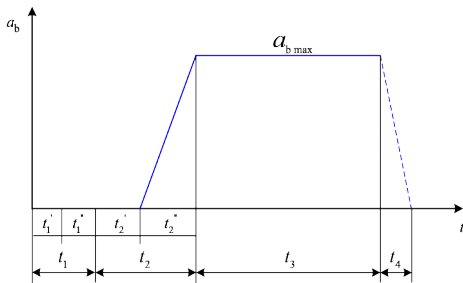


图2 制动过程中的减速度变化

临界制动距离主要计算制动力起作用阶段 $t_2$ 和持续制动阶段 $t_3$ 时间内车辆的行驶距离，不包括驾驶员反应阶段 $t_1$ 和放松制动阶段 $t_4$ 。

临界制动距离与主车末速度有关，而主车末速度取决于前车的运动状态，因此，根据前车运动状态的不同进行分类讨论，得到不同工况下的临界制动距离 $S_b$ 计算式，见表2。

表2 不同工况下的临界制动距离

前车运动状态	临界制动距离
前车静止	$S_b = v_1 t_2' + \frac{1}{2} v_1 t_2'' + \frac{v_1^2}{2a_{b\max}} + d_0$
前车匀速或加速	$S_b = v_{rel} t_2' + \frac{1}{2} v_{rel} t_2'' + \frac{v_{rel}^2}{2a_{b\max}} + d_0$
前车制动	$S_b = v_1 t_2' + \frac{1}{2} v_1 t_2'' + \frac{v_1^2}{2a_{b\max}} + \frac{v_2^2}{2a_2} + d_0$

表2中： $v_1$ 为主车纵向速度； $t_2'$ 为克服制动踏板自由行程时间； $t_2''$ 为制动减速度随制动力增长时间； $a_{b\max}$ 为最大制动减速度的绝对值； $d_0$ 为制动后的最小车距。

系统在紧急制动之前，需要对驾驶员进行预警，预警时长应当保证驾驶员能有充足的反应时间进行避险操作，因此，临界预警距离 $S_w$ 可表示为：

$$S_w = S_b + v_1 t_1 \quad (2)$$

通常情况下，安全模型中的最大减速度被设定为一个常数，这就导致安全模型只能在特定路面上实现较好的制动效果，在湿滑路面上的适应性较差，因此，需要结合路面附着系数对制动减速度进行修正<sup>[21]</sup>。

车辆的最大减速度通常无法达到车辆或路面的极限值，因此，本文定义车辆紧急制动时的最大减速度绝对值为：

$$a_{b\max} = \mu g - 1 \quad (3)$$

式中： $\mu$ 为路面附着系数； $g$ 为重力加速度。

考虑到车辆舒适性需求，采用分级制动策略，制动距离比全程采用最大减速度的制动距离要大一些。综合考虑行车安全性与驾驶舒适性，取 $-6.5 \text{ m/s}^2$ 作为计算安全距离模型临界制动距离时的制动减速度。若路面附着系数较低，则采用最大减速度进行限制。综上，本文计算临界制动距离时的主车制动减速度为：

$$a_1 = \max\{-6.5, -a_{b\max}\} \quad (4)$$

修正后的安全距离模型能在满足安全性和舒适性的基础上，根据路面附着系数的不同进行调整，在各种路面条件下均能满足制动需求。

安全模型中的最小车距往往设定为1~5 m的固定值，然而根据实际驾驶经验可知，不同行驶工况下采用相同的最小车距并不合理<sup>[22]</sup>。本文参考现有研究中根据真实驾驶员制动数据得到的拟合公式设置不同车速下的最小车距，公式为：

$$d_0 = 0.36v_1 + 1.4 \quad (5)$$

式中： $v_1$ 为最终两车所能达到的相同车速。

驾驶员反应时间的影响因素众多，难以用精确的数学模型进行衡量。参考现有研究中根据驾驶员在真实交通危险工况下反应时间的统计参数，选取驾驶员反应时间为 1.36 s<sup>[23]</sup>。

制动系统起作用时间与制动器结构有关，发达国家通常在 0.1~0.2 s 左右，因此，本文取制动器起作用时间为 0.15 s。

### 1.3 预警制动策略

为满足复杂工况下的安全模型需求，构建了一种综合考虑安全性和舒适性的安全模型，在车辆预警阶段采用二阶 TTC 模型判断车辆是否存在碰撞风险，制动阶段采用修正安全距离模型判断应当采取的制动等级。预警阶段与制动阶段的切换时刻取决于实时车距与修正安全距离模型中临界制动距离的关系，即通过比较实时车距与临界制动距离的大小关系，选择采用二阶 TTC 模型还是修正安全距离模型来评估行车风险水平。该策略的目标是在不同阶段采用最适合的安全模型，以确保驾驶员和车辆在各种工况下都能安全行驶。

预警阶段采用二阶 TTC 模型判断车辆是否存在碰撞风险，计算 TTC 值与阈值进行比较，如图 3 所示。

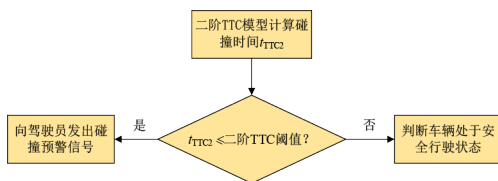


图 3 AEB 系统预警策略

在车速较高时适当增加预警阈值，留给驾驶员更多的反应时间，不同车速下的二阶 TTC 阈值见表 3。

表 3 不同车速下的二阶 TTC 阈值

行驶速度/(km/h)	危险等级	二阶 TTC 阈值
0 < v ≤ 60	安全行驶	$t_{TTC2} > 2.6$
	碰撞预警	$0 < t_{TTC2} \leq 2.6$
60 < v ≤ 100	安全行驶	$t_{TTC2} > 2.8$
	碰撞预警	$0 < t_{TTC2} \leq 2.8$

制动阶段采用修正安全距离模型判断应当采取的制动等级，计算危险系数与阈值进行比较，如图 4 所示。

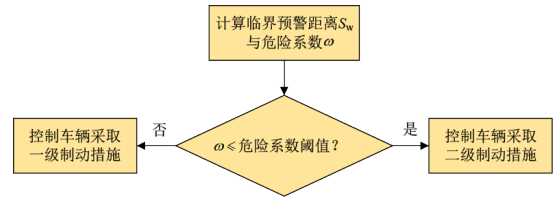


图 4 AEB 系统制动策略

在车速较高时将切换阈值适当增大，提前一段距离开始制动以保障行车安全，不同车速下的危险系数阈值见表 4。

表 4 不同车速下的危险系数阈值

行驶速度/(km/h)	危险等级	危险系数阈值
0 < v ≤ 60	一级制动	$-0.7 < \omega \leq 0$
	二级制动	$\omega \leq -0.7$
60 < v ≤ 100	一级制动	$-0.6 < \omega \leq 0$
	二级制动	$\omega \leq -0.6$

舒适性方面，二阶 TTC 模型主要从驾驶员的主观认知角度评估当前行车工况的危险程度，用于预警阶段能带来更好的驾驶体验。安全性方面，修正安全距离模型主要从避免与前车发生碰撞的角度评估当前行车工况的危险程度，用于制动阶段能保障行车安全。适应性方面，模型考虑了路面条件对制动距离的影响，因此，在湿滑路面也能实现较好的预警/制动效果，对不同工况的适应性较好。完备性方面，涉及了主车与前车的速度、加速度、相对距离以及路面附着系数等状态量，能比较完备地描述行驶过程中的碰撞风险。综上所述，本文的 AEB 系统跟车控制策略在舒适性、安全性、适应性和完备性方面均有一定的优势。

## 2 分层式控制系统设计

控制系统根据当前行车危险程度计算车辆期望制动减速度，并将结果转化为制动压力实现对车辆运动状态的控制。

### 2.1 上层控制器设计

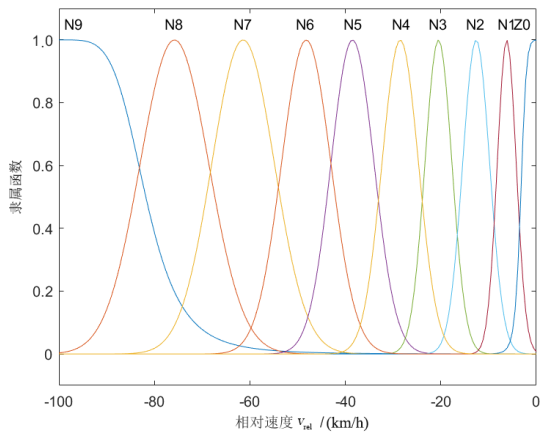
上层控制器基于模糊控制理论进行设计。当行车危险等级为一级制动时，根据行车状态信息判断车辆应当采取的期望减速度大小。当行车危险等级达到二级制动时，采用最大减速度作为期望减速度。

本文设置相对速度、相对距离、期望减速度的论域分别为  $[-100, 0]$  km/h、 $[0, 60]$  m 和  $[-8, 0]$  m/s<sup>2</sup>，具体确定的模糊语言变量为：

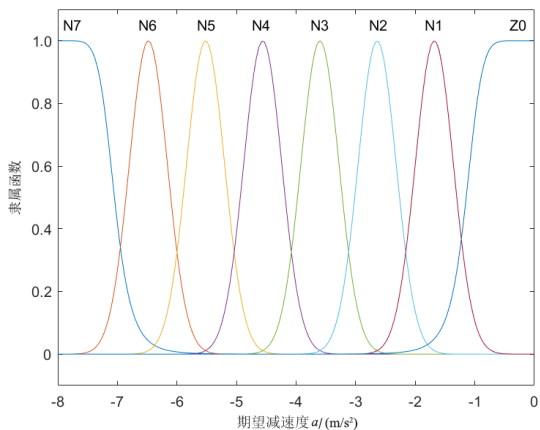
$$\begin{aligned} \gamma_v &: \{Z0, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9\}, \\ \gamma_d &: \{Z0, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8\}, \\ \gamma_a &: \{Z0, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7\}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\gamma_v, \gamma_d, \gamma_a$  为模糊集合，Z0 表示 0；N1~N9 表示负小到负大；P1~P8 表示正小到正大。

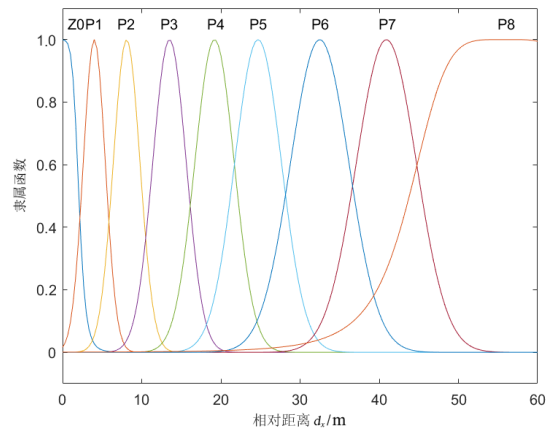
在 Matlab 模糊控制工具箱中采用高斯型隶属度函数和广义钟型隶属度函数设置输入输出变量的隶属度函数以兼顾系统的灵敏度和稳定性，如图 5 所示。



(a) 相对速度隶属度函数



(b) 相对距离隶属度函数



(c) 期望减速度隶属度函数

图 5 输入输出变量隶属度函数

结合专家经验与试验结果制定模糊控制规则，见表 5。

表 5 模糊控制规则

$v_{rel}$	$d_x$								
	Z0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Z0	N2	Z0	Z0	Z0	Z0	Z0	Z0	Z0	Z0
N1	N3	N2	N1	N1	Z0	Z0	Z0	Z0	Z0
N2	N5	N3	N2	N2	N1	Z0	Z0	Z0	Z0
N3	N6	N4	N3	N2	N1	N1	Z0	Z0	Z0
N4	N6	N6	N5	N4	N3	N2	N1	Z0	Z0
N5	N7	N6	N6	N5	N4	N3	N2	N2	N1
N6	N7	N7	N6	N6	N5	N3	N3	N2	N2
N7	N7	N7	N7	N6	N6	N5	N4	N3	N2
N8	N7	N7	N7	N7	N7	N6	N5	N4	N3
N9	N7	N7	N7	N7	N7	N6	N6	N5	N4

经过模糊推理得到模糊输出变量后，利用重心法进行解模糊处理，得到实际输出变量。

### 2.2 下层控制器设计

下层控制器基于 PID 理论进行设计，保证控制系统具有较好的鲁棒性与稳定性，PID 控制原理如图 6 所示。采用粒子群算法 (PSO) 实现 PID 参数的自整定，以提高系统的自动化水平。

根据其控制规律，主车控制减速度为：

$$a_{con}(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (7)$$

式中： $e(t)$  为期望减速度与实际减速度的误差；

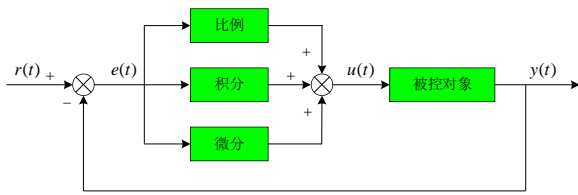


图6 PID控制原理

$K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ 分别为比例系数、积分时间长度和微分时间常数。

采用粒子群算法实现PID参数的自整定,设置粒子群的参数维度为3,种群规模为20,最大迭代次数为50。选取时间 $t$ 乘以误差 $\text{err}(t)$ 绝对值的积分作为系统整定的性能评价指标,粒子的适应值越小,说明位置越接近最优解。取初始惯性权重和最终惯性权重分别为0.9和0.4,设置线性递减权值策略对惯性权重进行更新,通过多次迭代得到PID控制参数。

### 2.3 车辆逆动力学模型

选取CarSim 2020.0版本中的F-Class, Sedan车型作为联合仿真平台的车辆模型,引入车辆逆动力学模型实现对车辆运动状态的控制。

#### (1) 逆驱动模型

在实际行驶过程中,由于受到空气阻力和滚动阻力的影响,车辆在平直路面上时的行驶方程为:

$$F_t = \frac{1}{2} C_D A \rho v_x^2 + mgf + \delta ma \quad (8)$$

式中: $F_t$ 为驱动力; $C_D$ 为空气阻力系数; $A$ 为迎风面积; $v_x$ 为纵向速度; $\rho$ 为空气密度; $m$ 为整车质量; $f$ 为滚动阻力系数; $\delta$ 为旋转质量换算系数; $a$ 为车辆加速度。

根据车辆动力传输路径可得发动机转矩为:

$$T_q = \frac{(\frac{1}{2} C_D A \rho v_x^2 + mgf + \delta ma) \times r}{i_g i_0 \eta_T \varphi(\frac{n_0}{n_c})} \quad (9)$$

式中: $T_q$ 为发动机转矩; $i_g$ 为变速器传动比; $i_0$ 为主减速器传动比; $\eta_T$ 为传动系机械效率; $r$ 为车轮滚动半径; $\varphi(\cdot)$ 为液力变矩器的转矩特性函数。

将所选车辆模型发动机Map图中的发动机输出转矩和转速作为输入,节气门开度作为输出,线性插值后得到逆发动机特性图,如图7所示。

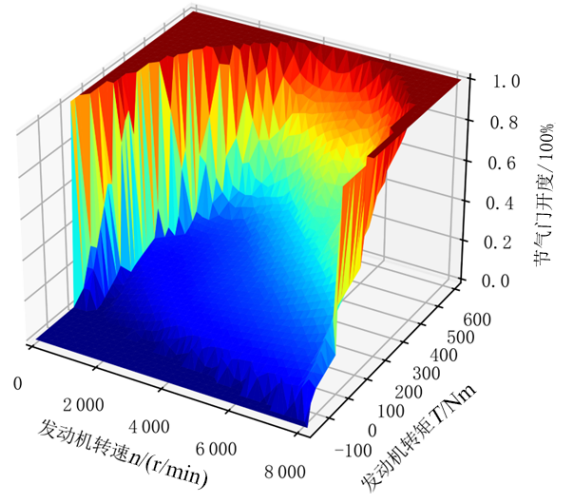


图7 逆发动机特性图

在已知期望加速度的情况下,先利用上式求出期望转矩,再结合逆驱动模型即可计算期望节气门开度。

#### (2) 逆制动模型

车辆主要依靠整车阻力和制动器提供的液压制动力进行减速,制动过程中的整车制动力为:

$$F_b = -\frac{1}{2} C_D A \rho v_x^2 - mgf - \delta ma \quad (10)$$

当需要的制动力不超过路面极限时,制动力与制动主缸压力近似呈线性关系,则制动压力可表示为:

$$P = \frac{\left| -\frac{1}{2} C_D A \rho v_x^2 - mgf - \delta ma \right|}{K_b} \quad (11)$$

式中: $P$ 为制动主缸压力; $K_b$ 为制动力和制动主缸压力的比值。

在CarSim软件中控制车辆以恒定压力制动,将得到的前后车轮制动力矩数据代入上式可得 $K_b$ 的值约为3 097.26。

## 3 仿真实验与实车验证

### 3.1 C-NCAP仿真实验

参考2021版本中国新车评价规程C-NCAP中的CCRs(前车静止)和CCRm(前车慢行)测试工况对AEB系统控制策略进行仿真实验,测试场景

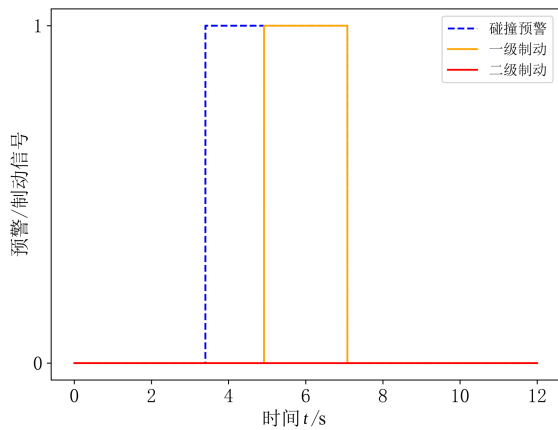
参数设置见表 6。篇幅所限，下文仅详述主车速度为 30 km/h 的 CCRs 工况和主车速度为 40 km/h 的 CCRm 工况的仿真结果。

表 6 C-NCAP 测试场景参数

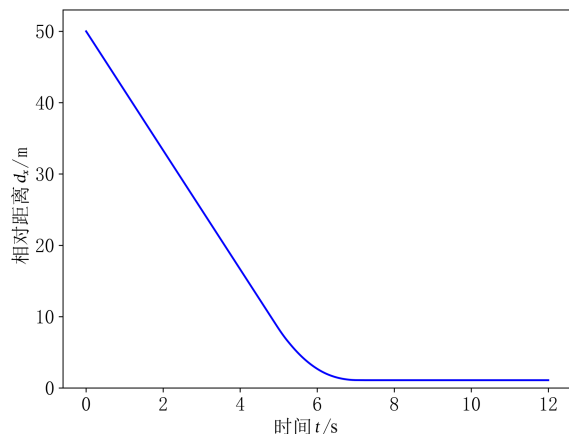
测试工况	主车速度 / (km/h)	前车速度 / (km/h)	初始距离/m
CCR <sub>s</sub>	20	0	50
	30	0	50
	40	0	50
CCR <sub>m</sub>	30	20	30
	40	20	30
	50	20	30

(1) 主车 30 km/h 的 CCR<sub>s</sub> 测试工况

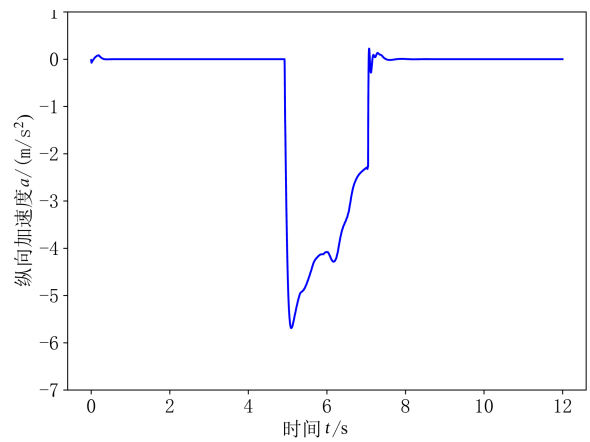
主车以 30 km/h 的初始速度逐渐接近前方静止障碍车，初始距离为 50 m，路面附着系数为 0.85，仿真时长为 12 s，仿真结果如图 8 所示。



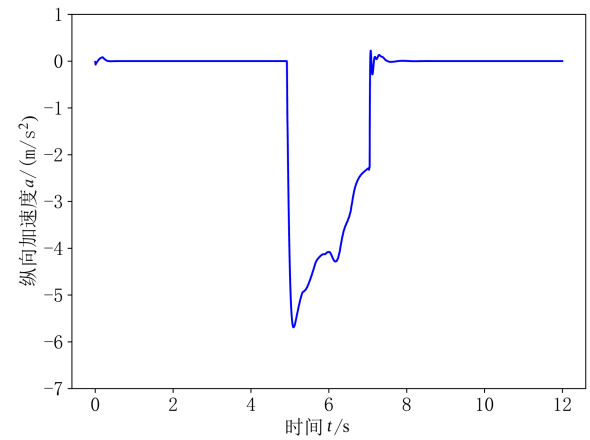
(a) 预警/制动信号



(b) 两车相对距离



(c) 主车速度



(d) 纵向加速度

图 8 主车 30 km/h 的 CCR<sub>s</sub> 测试工况仿真结果

由仿真结果可知，系统在第 3.40 s 判断车辆存在碰撞风险并向驾驶员发出预警，预警过程持续 1.52 s，驾驶员有充足的时间进行避险操作。随后系统接管车辆权限进行紧急制动，临界制动距离为 8.96 m，制动持续 2.16 s，制动过程中的减速度峰值为  $-5.69 \text{ m/s}^2$ ，制动后的最终距离为 1.11 m，最小车距在合理范围内，没有对驾驶员的正常行驶造成干扰或影响道路交通效率，驾驶舒适性较好。

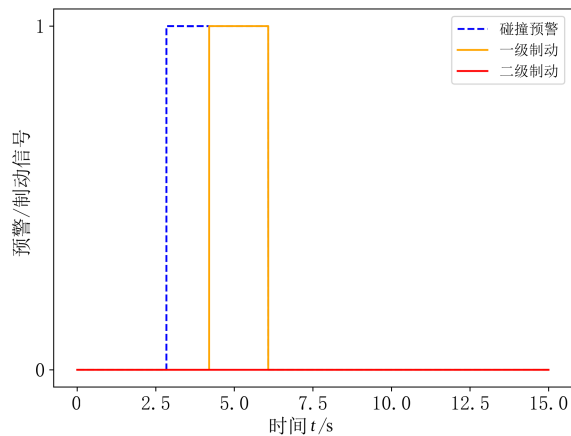
CCR<sub>s</sub> 测试场景所有仿真结果见表 7。

表 7 CCR<sub>s</sub> 测试场景仿真结果

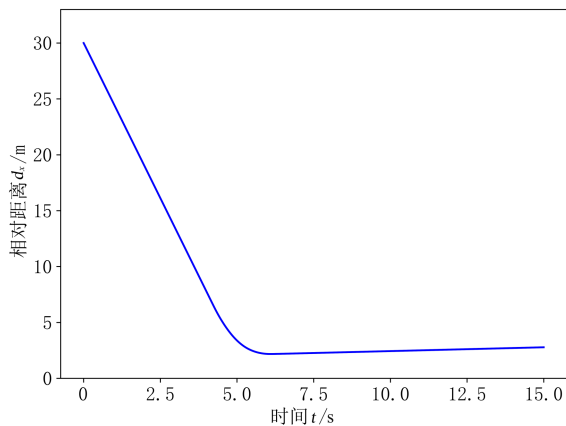
主车速度/(km/h)	预警时长/s	临界制动距离/m	最终车距/m
20	1.87	5.46	1.29
30	1.52	8.96	1.11
40	1.40	13.11	1.29

## (2) 主车 40 km/h 的 CCRm 测试工况

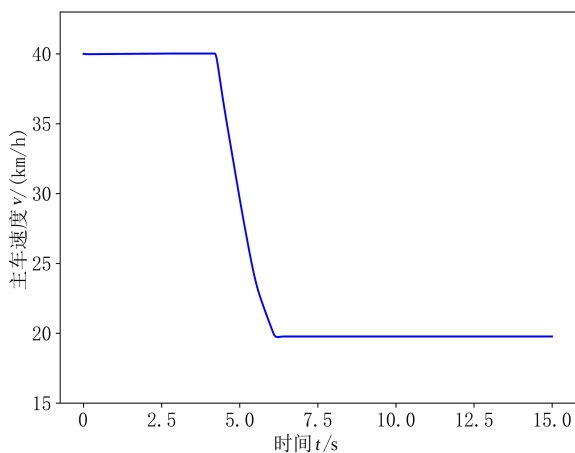
主车以 40 km/h 的初始速度逐渐接近前方以 20 km/h 的速度匀速行驶的障碍车，初始距离为 30 m，路面附着系数为 0.85，仿真时长为 15 s，仿真结果如图 9 所示。



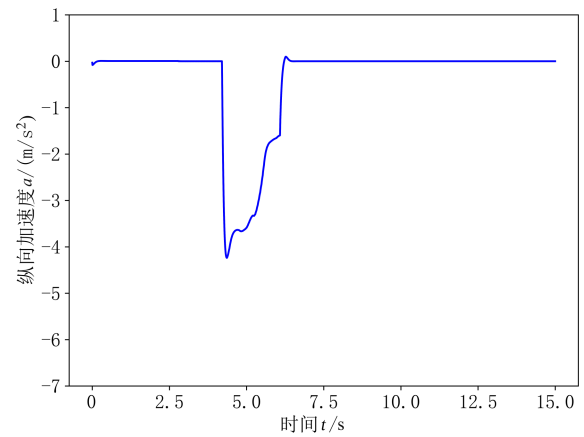
(a) 预警/制动信号



(b) 两车相对距离



(c) 主车速度



(d) 纵向加速度

图 9 主车 40 km/h 的 CCRm 测试工况仿真结果

初始时刻两车以恒定速度匀速行驶，2.84 s 后系统发出预警，预警时长为 1.36 s。主车开始制动时的相对距离为 6.68 m，制动持续 1.88 s，制动中的减速度峰值为  $-4.24 \text{ m/s}^2$ ，制动结束后的跟车距离为 2.18 m，在合理范围内，能保障行车安全性并兼顾驾驶舒适性。

CCRm 测试场景所有仿真结果见表 8。

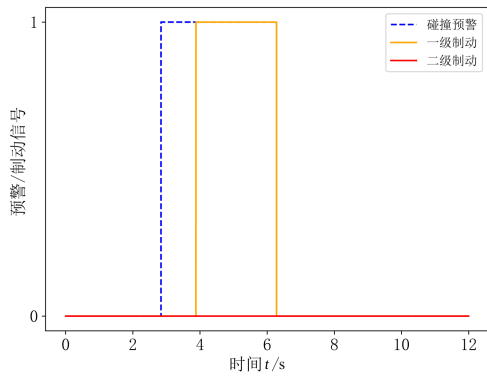
表 8 CCRm 测试场景仿真结果

主车速度/(km/h)	预警时长/s	临界制动距离/m	跟车车距/m
30	1.75	4.51	2.84
40	1.36	6.68	2.18
50	1.36	10.15	1.87

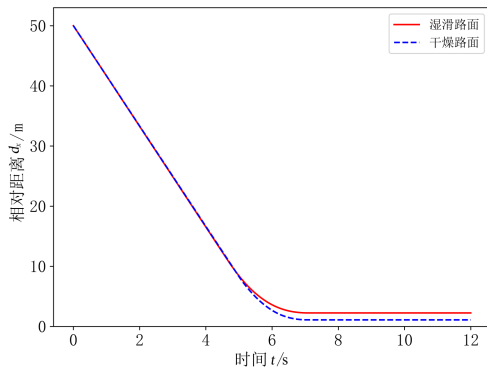
由所有仿真结果可知，本文的 AEB 系统控制策略能在全部 C-NCAP 测试场景下实现成功避免。当车辆行驶速度发生变化时，控制策略中的制动距离和制动强度也会随之变化，能保障行车安全。预警时长在 1.36~1.87 s 之间，留给驾驶员足够的反应时间。制动后的最终车距在 1.11~2.84 m 之间，不会过早制动干扰驾驶员正常操作，也不会影响道路通行效率，驾驶体验较好。

## 3.2 湿滑路面仿真实验

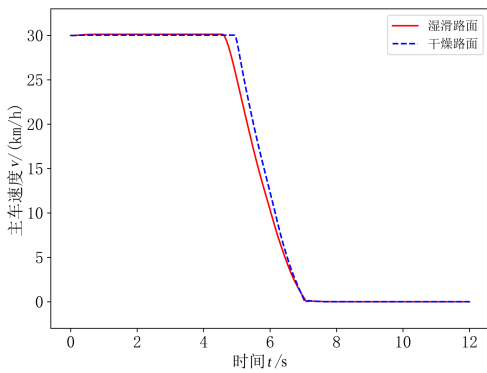
为验证本文 AEB 系统控制策略在不同路面条件下的适应性，选取主车速度为 30 km/h 的 CCRs 测试工况在附着系数为 0.5 的湿滑路面上进行仿真试验，结果如图 10 所示。



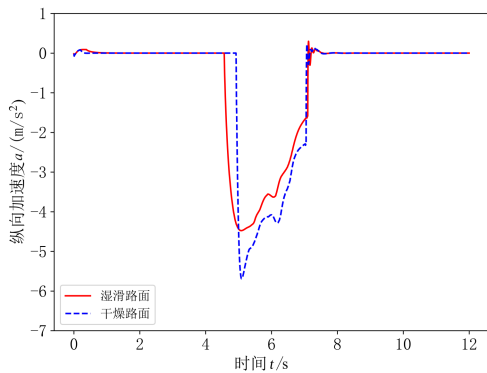
(a) 预警/制动信号



(b) 两车相对距离



(c) 主车速度



(d) 纵向加速度

图 10 主车 30 km/h 的 CCRs 湿滑路面测试工况仿真结果

湿滑路面下的制动时刻比附着系数为 0.85 的干燥沥青路面提前 0.36 s，制动距离增加 2.89 m，制动后的车距由 1.11 m 增至 2.25 m，制动过程中的最大减速度略有降低。这表明本文的 AEB 系统能根据不同路面条件进行调整，以满足湿滑路面下的制动要求。

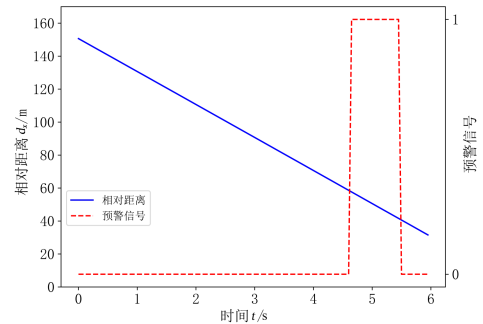
### 3.3 预警策略实车验证

出于试验安全的考虑，本文只在实车上验证 AEB 系统控制策略的预警部分，制动部分通过仿真平台验证。试验车如图 11 所示。

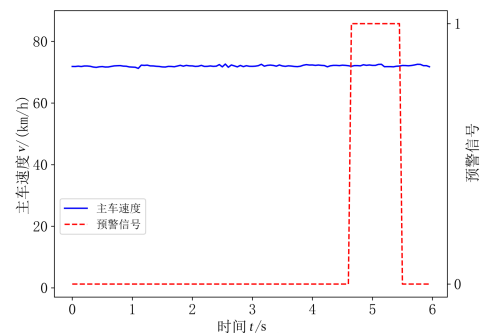


图 11 试验车

参考交通运输行业标准 JT/T 883—2014《营运车辆行驶危险预警系统技术要求和试验方法》选取前车静止测试工况。主车初速度为 72 km/h，前车静止，初始距离为 150 m，实车试验结果如图 12 所示。



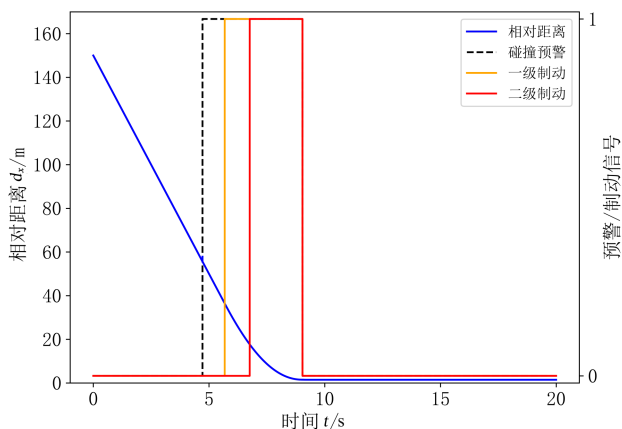
(a) 实车试验预警信号与相对距离



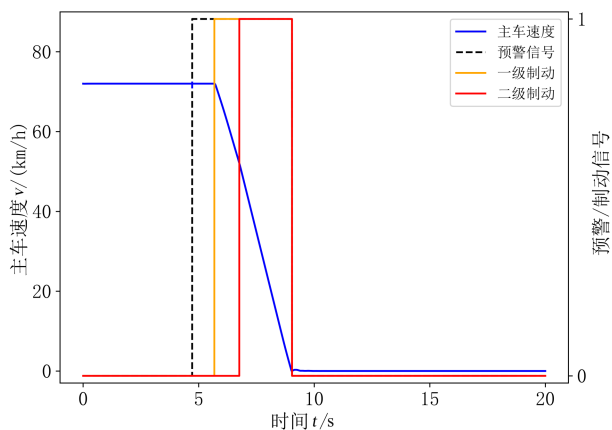
(b) 实车试验预警信号与主车速度

图 12 实车预警试验结果

设置相同测试工况进行仿真测试,结果如图 13 所示。



(a) 仿真试验预警/制动信号与相对距离



(b) 仿真试验预警/制动信号与主车速度

图 13 仿真试验结果

由实车试验结果可知,系统在车辆行驶的第 4.65 s 开始对驾驶员进行预警,此时主车速度为 71.93 km/h,两车相对距离为 57.62 m,随后驾驶员控制车辆进行转向避险。由仿真结果可知,在第 4.72 s 时系统开始对驾驶员发出预警,预警时的相对距离为 55.61 m,预警持续 0.96 s 后系统开始控制车辆进行制动。

## 参考文献 (References)

[1] 石莹,刚宪约.基于有限的汽车轻量化车身防追尾碰撞仿真[J].计算机仿真,2019,36(11):110-113.  
SHI Ying, GANG Xianyue. Simulation of Anti-Rear-End Collision of Lightweight Vehicle Body Based on Finite Element Method [J]. Computer Simulation, 2019, 36 (11):110-113.(in Chinese)

经计算,实车试验结果中的车辆速度、预警时间和相对距离与仿真试验结果之间的误差率均小于 5%,可以认为实车试验结果与仿真试验结果基本一致。仿真试验中的临界制动距离为 36.41 m,制动过程持续 3.36 s,最终车距为 1.47 m,能避免碰撞事故的发生且驾驶舒适性较好。由试验结果可知,本文的 AEB 系统跟车控制策略在当前工况下能保障行车安全。

## 4 结论

本文从综合考虑复杂工况下行车安全性和驾驶舒适性的角度出发,将二阶 TTC 模型和修正安全距离模型进行融合,构建一种考虑安全性和舒适性的安全模型。设计 AEB 分层式控制系统,基于模糊控制理论与粒子群 PID 理论,结合行车状态信息输出控制减速度,通过逆动力学模型实现对车辆运动状态的控制。搭建 PreScan/CarSim/Simulink 联合仿真平台与实车试验平台,在多种试验工况下验证本文的跟车预警制动策略。C-NCAP 测试场景的仿真结果表明,本文控制策略在 CCRs 和 CCRm 测试场景的不同速度要求下均能实现较好的预警/制动效果,预警时长在 1.36~1.87 s 之间,驾驶员有足够的时间进行避险操作,两车之间的最小车距在 1.11~2.84 m 之间,不会因车距过大影响道路通行效率。湿滑路面测试场景的仿真结果表明,本文的控制策略能随路面条件的改变进行相应的调整,在湿滑路面的预警时刻与临界制动距离均有所增加,制动过程中采用的最大减速度有所降低,具有较好的适应性。实车试验结果表明,本文的控制策略能在实际行驶过程中实时判断潜在碰撞风险并及时对驾驶员进行预警,以避免碰撞事故的发生。

[2] 宋志强,曹立波,吴俊,等.自动紧急制动系统测试设备开发和应用研究[J].机械设计,2020,37(2):32-38.  
SONG Zhiqiang, CAO Libo, WU Jun, et al. Research on Development and Application of Test Equipment for Automatic Emergency Braking System [J]. Machine Design, 2020, 37(2):32-38.(in Chinese)

- [3] 何仁,冯海鹏.自动紧急制动(AEB)技术的研究与进展[J].汽车安全与节能学报,2019,10(1):1-15.  
HE Ren, FENG Haipeng. Research and Progress of Automatic Emergency Braking (AEB) Technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2019, 10(1): 1-15.(in Chinese)
- [4] 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):109-114.  
LI Lin, HE Jinpeng, LIU Weiguo, et al. Based on Driver's Emergency Braking Behavior Characteristics of the Risk Estimation Algorithm [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(1): 109-114. (in Chinese)
- [5] 胡远志,杨喜存,刘西,等.基于驾驶员特性的主动避障分级制动策略与验证[J].汽车工程,2019,41(3):298-306.  
HU Yuanzhi, YANG Xicun, LIU Xi, et al. Active Hedging Stage Braking Strategy and Verification Based on Driver Characteristics [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(3):298-306.(in Chinese)
- [6] HAYWARD J C. Near-Miss Determination Through Use of a Scale of Danger [J]. Highway Research Record, 1972,38(4):24-34.
- [7] 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.
- [8] MILANÉS V, PÉREZ J, GODOY J, et al. A Fuzzy Aid Rear-End Collision Warning/Avoidance System [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(10): 9097-9107.
- [9] 邢慧宁,秦华,钮建伟.自动驾驶车辆中驾驶人的信息需求特征[J].城市交通,2019,17(3):96-104.  
XING Huining, QIN Hua, NIU Jianwei. Characteristics of Drivers' Information Requirements in Autonomous Vehicles [J]. Urban Transportation, 2019, 17(3): 96-104. (in Chinese)
- [10] DOI A, BUTSUEN T, NIIBE T, et al. Development of a Rear-End Collision Avoidance System with Automatic Brake Control [J]. JSAE Review, 1994, 15(4):335-340.
- [11] FUJITA Y, AKUZAWA K, SATO M. Radar Brake System [J]. JSAE Review, 1995, 16(2):95-101.
- [12] SEILER P, SONG B, HEDRICK J K. Development of a Collision Avoidance System [J]. Neurosurgery, 1998, 46(2):492.
- [13] MOON S W M, YI K S. Human Driving Data-Based Design of a Vehicle Adaptive Cruise Control Algorithm [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8):661-690.
- [14] 朱西产,魏昊舟,马志雄.基于自然驾驶数据的跟车场景潜在风险评估[J].中国公路学报,2020,33(4):169-181.  
ZHU Xichan, WEI Haozhou, MA Zhixiong. Potential Risk Assessment of Car Following Scenarios Based on Natural Driving Data [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2020, 33(4): 169-181. (in Chinese)
- [15] DONG Jie, CHU Liang. Coupling Safety Distance Model for Vehicle Active Collision Avoidance System [C]//SAE Technical Papers, 2019-01-0130, 2019.
- [16] 刘庄,朱茂桃,徐晓明,等.基于工况识别的安全距离模型[J].科学技术与工程,2020,20(32):13431-13438.  
LIU Zhuang, ZHU Maotao, XU Xiaoming, et al. Safety Distance Model Based on Condition Recognition [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(32): 13431-13438. (in Chinese)
- [17] 王全,杨杰君,周艳辉,等.基于全工况模型的自动紧急制动系统及其控制策略研究[J].控制与信息技术,2021(3):60-64.  
WANG Quan, YANG Jiejun, ZHOU Yanhui, et al. Research on Automatic Emergency Braking System and Its Control Strategy Based on Full Working Condition Model [J]. Control and Information Technology, 2021(3):60-64.(in Chinese)
- [18] 吴镇平,向铁明,吴武和.考虑路面坡度和摩擦系数的自动紧急制动系统设计[J].九江学院学报(自然科学版),2022,37(1):69-75.  
WU Zhenping, XIANG Tieming, WU Wuhe. Design of Automatic Emergency Braking System Considering Road Slope and Friction Coefficient [J]. Journal of Jiujiang University (Natural Science), 2022, 37(1): 69-75. (in Chinese)
- [19] SEVIL A O, CANEVI M, SOYLEMEZ M T, et al. Development of an Adaptive Autonomous Emergency Braking System Based on Road Friction [C]//11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Nov. 28-30, 2019, Bursa, Turkey. Piscataway NJ: IEEE, c2019:815-819.
- [20] ZHAO Y Q, MIYAHARA T, MIZUNO K, et al. Analysis of Car Driver Responses to Avoid Car-to-Cyclist Perpendicular Collisions Based on Drive Recorder Data and Driving Simulator Experiments [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 150:105862.1-105862.11.
- [21] 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-

- 86,93.  
XIN Jiageng, YANG Fuyu, ZHANG Baodi, et al. AEB Control Strategy for Electric Vehicles Based on Fusion Algorithm [J]. Beijing Jiaotong University, 2021, 45(6): 77-86,93.(in Chinese)
- [22] 吴斌,朱西产,沈剑平,等.基于自然驾驶数据的危险评估算法研究[J].汽车工程,2017,39(8):907-914.  
WU Bin,ZHU Xichan,SHEN Jianping,et al.A Study on Risk Assessment Algorithm Based on Natural Driving Data[J].Automotive Engineering,2017,39(8):907-914.(in Chinese)
- [23] 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):1225-1229,1253.  
LI Lin, ZHU Xichan, MA Zhixiong. Driver Brake Reaction Time Under Real Traffic Risk Scenarios [J]. Automotive Engineering, 2014, 36 (10) : 1225-1229, 1253.(in Chinese)

#### 作者简介



赵会强 (1980-), 男, 河北保定人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为汽车控制与智能化技术。

E-mail: zhaohuiqiang@chinafastgear.com

#### 通信作者



郭致远 (2000-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为自动驾驶同步定位与建图。

E-mail: 973166148@qq.com