文章编号:1008-1542(2024)04-0341-10

基于自适应权重 MPC 的 AEB-P 控制策略研究

陆　颖[1],陈　烨[1],杨　鹏[1],树爱兵[2],柏　军[1]

(1.江苏大学汽车与交通工程学院,江苏镇江　212013;
2.公安部交通管理科学研究所,江苏无锡　214151)

摘　要:为进一步优化面向行人的汽车自动紧急制动系统(AEB-P)控制算法,提出了一种综合考虑驾驶舒适性和行人损伤风险的 AEB-P 分层控制策略。针对 C-NCAP 的 AEB-P 评价标准,设计了考虑制动时驾驶员舒适感的制动安全距离模型;通过引入模糊规则综合考虑行人损伤风险和场景工况得到权重系数调整策略,并基于此设计自适应权重系数 MPC 上层控制器,采用 PID 下层控制器对自车实际减速度进行修正;建立车辆纵向动力学模型并通过 CarSim 与 Matlab/Simulink 搭建测试场景和控制算法,通过硬件在环实验对本文方法和固定 TTC 阈值算法进行对比。结果表明,所提控制算法能够在 93.75%的测试工况中有效避撞,而固定 TTC 阈值算法避障成功率仅有 43.75%。相较于传统控制策略,该方法能使自车和前方行人保持较稳定的最小间距,鲁棒性更好,可为 AEB-P 控制理论提供参考依据。

关键词:车辆工程;自动紧急制动;模型预测控制;行人损伤;行人避撞;硬件在环

中图分类号:U461.91　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2024yx04001

Research on AEB-P control strategy based on adaptive weight MPC

LU Ying[1], CHEN Ye[1], YANG Peng[1], SHU Aibing[2], BAI Jun[1]

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;
2. Institute of Traffic Management Science, Ministry of Public Security, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: To further optimize the automotive AEB-P (autonomous emergency braking for pedestrian) control algorithm, an AEB-P hierarchical control strategy that integrates driving comfort and pedestrian injury risk was proposed. A braking safety distance model considering the driver's comfort during braking was designed for the AEB-P evaluation standard of C-NCAP. The weight coefficient adjustment strategy was obtained by introducing fuzzy rules to comprehensively consider the risk of pedestrian injury and scenario working conditions. Based on this, the adaptive weight coefficient MPC (model predictive control) upper controller was designed, and the PID (proportion integration differentiation) lower controller was used to

收稿日期:2023-12-10;修回日期:2024-04-01;责任编辑:冯民
基金项目:国家自然科学基金(51605197);国家重点研发计划项目(2019YFB1600503);江苏省自然科学基金(BK20160524);镇江市重点研发计划(社会发展)项目(SH2019054)
第一作者简介:陆颖(1981—),男,江苏镇江人,副教授,博士,主要从事汽车被动安全方面的研究。
E-mail:luying@ujs.edu.cn

陆颖,陈烨,杨鹏,等.基于自适应权重 MPC 的 AEB-P 控制策略研究[J].河北科技大学学报,2024,45(4):341-350.
LU Ying,CHEN Ye,YANG Peng,et al. Research on AEB-P control strategy based on adaptive weight MPC [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2024,45(4):341-350.

correct the actual deceleration of the auto-vehicle. The vehicle longitudinal dynamics model was established and the test scenario and control algorithm were constructed through CarSim and Matlab/Simulink, then the proposed method and the fixed TTC (time to collision) threshold algorithm were compared through hardware-in-the-loop experiments. The results show that the proposed control algorithm can effectively avoid collision in 93.4% of the test conditions, while the fixed TTC threshold algorithm has a successful rate of only 43.75% in obstacle avoidance. Compared with the traditional control strategy, the proposed method can maintain a more stable minimum distance between the vehicle and the pedestrian in front of it, with better robustness, which provides a reference basis for the AEB-P control theory.

Keywords: vehicle engineering; automatic emergency braking; model predicative control; pedestrian injury; pedestrian collision avoidance; hardware-in-the-loop (HIL)

世界卫生组织的数据显示,全球每年交通事故夺去大约135万人的生命[1],其中弱势道路使用者(vulnerable road users, VRU)占50%以上,包括行人和骑行者等。中国作为交通事故死亡率高发国[2],汽车安全技术的研发尤其关注如何减少这类悲剧的发生,特别是自动紧急制动系统(autonomous emergency braking for pedestrian, AEB-P)针对行人的应用[3]。这项技术旨在显著降低交通事故中VRU的死亡风险[4],国际和国内的安全部门已制定相应的功能安全评估标准。

当前,AEB-P系统的探索主要聚焦于2个核心领域:一是行人识别与追踪的高效精准技术[5-6];二是构建严谨的安全评估和决策机制。现有的AEB策略通常依赖于安全距离模型[7]或时间碰撞(time to collision,TTC)模型[8-9]计算安全参数,然后通过与预设阈值的比较判断车辆的即时安全性[10]。随着对AEB(autonomous emergency braking)研究的深入,研究人员将驾驶员的特性纳入安全控制策略[11],在部分制动时设计了制动恢复区和释放区。尘帅等[12]强调了识别驾驶员制动意图的关键特征,并认为选择合适的特征参数、设定输出目标及建立多元评价体系是研究的重点。林国庆等[13]运用层次分析法构建了AEB-P的多层次模型,并通过PreScan模拟验证了其实用的测试和评价方法。ZULKIFLI等[14]提出了VC-APF运动方法,通过跟踪车辆的减速,使PI控制器经调整提供最佳制动力。YANG等[15]提出的基于模糊神经网络和遗传算法理论的AEB-P行人防撞控制模型,优化后车辆距离、速度和减速的输出曲线更平滑,误差从0.51 m/s^2 降到0.26 m/s^2。尽管已有显著成果,但AEB-P系统在确保制动过程中驾驶舒适度以及在潜在故障情况下的决策策略仍有待提升[16]。

随着汽车主被动融合理念的日益深入,以减少乘员伤害为着眼点来优化控制策略的研究逐渐受到重视。BANCE等[17]利用汽车碰撞数据库和乘员损伤数据库建立了损伤风险预测模型。WANG等[18]提出基于车内乘员损伤的智能车辆决策模型,车辆在发生不可避免碰撞时通过优化自动刹车等行为来减轻车内人员损伤。模型预测控制(model predicative control,MPC)作为一种先进的控制技术,因其对未来动态的预测和多目标优化能力,在AEB系统中也发挥了重要作用。CHENG等[19]提出了一种基于MPC控制紧急制动时自车横向稳定性的方法。刘永涛等[20]采用模糊规则和MPC控制相结合的方法,建立了一种改进的AEB控制系统。

考虑到主被动融合控制策略的多目标性以及MPC在处理多控制目标方面的优势,本文提出一种考虑驾驶舒适性和行人损伤风险的AEB-P控制策略。针对C-NCAP的AEB-P评价标准,设计考虑舒适感的制动安全距离模型,并基于分层理论重新设计AEB-P系统,上层控制器根据工况信息、控制目标和约束条件计算出期望制动加速度传递给下层控制器,下层控制器向车辆的制动系统发出控制指令。

1 AEB-P安全距离模型的建立

为了提高安全性,保证驾驶员有充足的反应时间,整个AEB-P预警系统分为3级:1级为安全行车无预警级,2级为潜在碰撞预警级,3级为主动制动介入级。1级表示当前行车安全,人车相对距离大于危险降临距离阈值 d_{wa},无前碰撞危险,预警系统发出信号值为0;2级表示当前行驶状态与前方行人有潜在碰撞危险,人车相对距离小于等于危险降临距离阈值 d_{wa},需要驾驶员采取措施,预警系统发出信号为1,AEB-P系统采用图像和声音信号提醒驾驶员;3级表示当前行驶状态即将与前方行人发生碰撞,人车相对距离小于等于紧急制动安全距离阈值 d_e,预警系统发出信号为2,若驾驶员还未执行转向避障操作或接管车辆制动操

作，此时 AEB-P 将会激活制动器以避免碰撞。预警制动模式如图 1 所示，D_2 和 D_3 分别表示 2 级和 3 级过程自车前进距离。

因此危险降临距离阈值为

$$d_{wa}=d_e+v_{rel}(t)t_w, \tag{1}$$

式中：d_e 为紧急制动安全距离阈值；d_0 为车辆停止时与行人的距离；$v_{rel}(t)$ 为人车相对速度；t_w 为驾驶员反应时间。据统计 t_w 通常为 1.14～1.38 s[21]，本文取平均值 $t_w=1.25$ s。

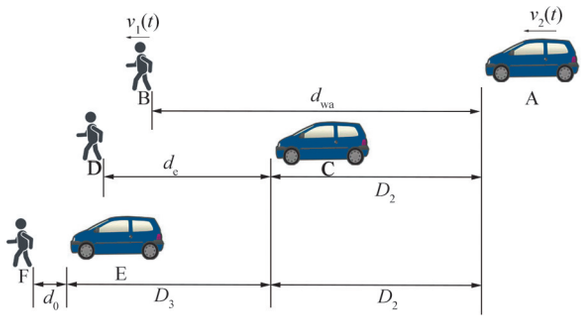


图 1　预警制动模式示意图

Fig. 1　Schematic diagram of pre-warning braking mode

驾驶员在进行车辆制动操作时通常需要经历几个不同的阶段才能使车辆完全停止，车辆的主动制动过程主要分为以下 6 个阶段：驾驶员反应阶段 0～t_1；驾驶员从反应到触碰制动踏板控制阶段 t_1～t_2；制动系统协调延迟阶段 t_2～t_3；制动减速度增加阶段 t_3～t_4；制动持续阶段 t_4～t_5；制动结束阶段 t_5～t_6。Δt_1、Δt_2、Δt_3、Δt_4、Δt_5、Δt_6 表示制动过程各阶段持续时长。车辆制动过程速度曲线如图 2 所示。

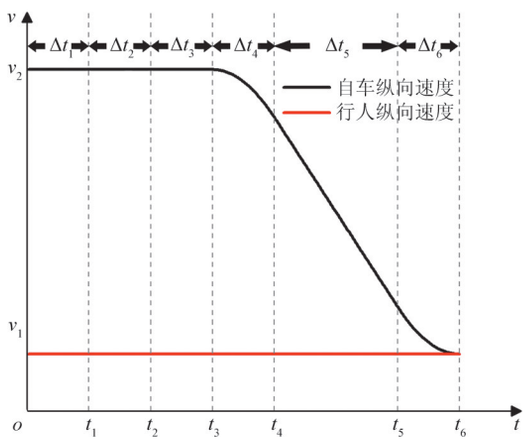


图 2　车辆制动过程车速曲线

Fig. 2　Vehicle speed profile during braking

针对 C-NCAP 规定的典型的 AEB-P 测试场景，对行人和自车相对运动关系进行分析得到制动安全距离模型。AEB-P 系统在激活主动制动控制时其制动过程与驾驶员控制的制动过程类似，但是对于 AEB-P 系统不存在 0～t_2 阶段。结合设计的制动过程速度曲线对人车相对运动关系进行具体分析，建立新的制动安全距离模型。

$$\text{jerk}(t)=\frac{a(t)-a(t-\Delta t)}{\Delta t}, \tag{2}$$

式中：jerk(t) 为加速度变化率，m/s^3；$a(t)$ 为当前的加速度；$a(t-\Delta t)$ 为上一时刻的加速度；Δt 为 2 个加速度信号之间的时间间隔。为使制动减速度不发生突变，本文在制动初期和末尾阶段分别设置一个减速度变化缓冲区，使最大加速度变化率 jerk_{max}（正值）和最小加速度变化率 jerk_{min}（负值）的绝对值相等。

根据上面的设定，缓冲区时长有 $\Delta t_4=\Delta t_6$，因此车辆在 AEB-P 系统触发后的理想制动减速度为

$$a_{des}(t)=\begin{cases}0, & t\in(0,t_3],\\ \text{jerk}_{min}(t-t_3), & t\in(t_3,t_4],\\ a_{d,max}, & t\in(t_4,t_5],\\ a_{d,max}+\text{jerk}_{max}(t-t_5), & t\in(t_5,t_6],\end{cases} \tag{3}$$

式中：$a_{d,max}$ 表示最大制动减速度；t 表示时刻；t_3、t_4、t_5、t_6 表示制动开始后的 4 个不同阶段的开始和结束时刻。

自车和行人之间的纵向相对速度为

$$v_{rel}(t)=v_2(t)-v_1(t), \tag{4}$$

式中：$v_2(t)$ 为自车 t 时刻行驶纵向速度；$v_1(t)$ 为目标行人 t 时刻纵向速度。

由此可以推导出理想的极限制动距离阈值为

$$d_e=v_{rel}(t)\Delta t_3+\int_{t_3}^{t_6}v_{rel}(t)\mathrm{d}t+d_0=(v_2-v_1)(\Delta t_3+\Delta t_4+0.5\Delta t_5)+d_0=(v_2-v_1)t_e+d_0, \tag{5}$$

式中：v_2 为紧急制动前车辆纵向速度；v_1 为行人纵向速度；Δt_3、Δt_4、Δt_5 分别为开始制动后 3 个不同阶段的相应时长；t_e 为极限制动时间阈值；d_0 表示车辆停止时与行人的最小安全距离。

为了避免对驾驶人正常行驶情况的干扰,《营运车辆自动紧急制动系统性能要求和测试规范》JT/T 1242—2019 中规定,AEB-P 系统紧急制动阶段不应在 $t_{TTC}\geqslant 3$ s 前开始,又有研究提出当 $t_{TTC}\geqslant 2$ s 时 AEB-P 系统不应该制动[22]。因此,本文方法中规定 $t_{TTC}=2$ s。

$$d_e=\begin{cases}(v_2-v_1)t_e+d_0, & t_e\leqslant t_{TTC},\\ (v_2-v_1)t_{TTC}+d_0, & t_e>t_{TTC}。\end{cases} \tag{6}$$

2 基于 MPC 的 AEB-P 上层控制系统

因建立的运动学模型只需反映出人-车纵向运动学特性即可,故对模型作一定简化。在保证安全性的前提下,兼顾本车的加速度和加速度变化率。

2.1 纵向动力学模型

通过分析人-车间运动学关系,选取人车间距、车辆速度、人车相对速度、车辆加速度和车辆加速度变化率为控制系统的状态量,即 $\boldsymbol{x}(k)=[d_{rel}(k),\ v_2(k),\ v_{rel}(k),\ a_2(k),\ \mathrm{jerk}(k)]^{\mathrm{T}}$,选取 $\boldsymbol{y}(k)=[d_{rel}(k),\ v_2(k),\ a_2(k)]^{\mathrm{T}}$ 作为待优化目标,得到纵向运动学状态方程模型:

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_d\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_d u(k),\\ \boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}_d\boldsymbol{x}(k),\end{cases} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{A}_d=\begin{bmatrix}1 & 0 & -T_s & -\frac{1}{2}T_s^2 & 0\\ 0 & 1 & 0 & T_s & 0\\ 0 & 0 & 1 & T_s & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1-\frac{T_s}{\tau_d} & 0\\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_d} & 0\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{B}_d=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\\frac{T_s}{\tau_d}\\\frac{1}{\tau_d}\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{C}_d=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$;$T_s$ 为系统采样时间;$\boldsymbol{u}(k)$为系统控制量;τ_d 为描述本车期望加速度 $u(k)$与实际加速度 $a_2(k)$的传递特性的 1 阶惯性环节时间常数。

2.2 AEB-P 系统性能要求与约束条件

对于自动紧急制动系统,安全性能是 AEB-P 系统最基本的功能。在保障安全性的同时兼顾驾驶舒适性,因此定义人车之间的约束条件为

$$\begin{cases}d_{rel}\geqslant d_0,\\ a_{d,max}\leqslant a(k)\leqslant a_{max},\\ \mathrm{jerk}_{min}\leqslant \mathrm{jerk}(k)\leqslant \mathrm{jerk}_{max},\\ u_{min}\leqslant u(k)\leqslant u_{max},\end{cases} \tag{8}$$

式中:$a_{d,max}$ 和 a_{max} 分别表示最大制动减速度和最大自车加速度;u_{min} 和 u_{max} 表示期望加速度的最小值与最大值。

因为行人的纵向速度较小,所以和 AEB 不同的是,AEB-P 应尽快制动以保证车辆速度能够降为 0,并与行人保持安全的车间距(此处 d_0 取 2 m),同时兼顾一定的舒适性,将优化目标表述如下:

$$\begin{cases}v_2(k)\to 0,\\ d_{rel}\to d_0,\\ \min\ |a_2(k)|。\end{cases} \tag{9}$$

2.3 MPC 控制器求解

根据式(7),可建立预测时域内的预测方程,定义 $\boldsymbol{e}(k)$为实际状态量与预测值之间的误差,建立如下模型:

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}=\boldsymbol{A}_p\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_p\boldsymbol{U}(k)+\boldsymbol{F}_p\boldsymbol{e}(k),\\ \boldsymbol{Y}=\boldsymbol{C}_p\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{D}_p\boldsymbol{U}(k)+\boldsymbol{H}_p\boldsymbol{e}(k),\end{cases} \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{X}$ 为预测时域 N_p 内预测状态变量合集;$\boldsymbol{Y}$ 为预测时域 N_p 内预测输出变量;$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{k})$为控制时域 N_c 期望

加速度输出变量序列。在预测模型中涉及到各预测矩阵 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}}$，$\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}}$，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{p}}$，$\boldsymbol{C}_{\mathrm{p}}$，$\boldsymbol{D}_{\mathrm{p}}$，$\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}$，其定义如下：

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}\\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}}\end{bmatrix},\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & 0 & \cdots & 0\\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}-1} & \boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}-1}\boldsymbol{B} & \cdots & \boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}-N_{\mathrm{c}}-1}\boldsymbol{B}\end{bmatrix},\boldsymbol{F}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}\\ \boldsymbol{F}^{2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{F}^{N_{\mathrm{p}}}\end{bmatrix},\boldsymbol{C}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}\\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}}\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & 0 & \cdots & 0\\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}} & \cdots & \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}^{N_{\mathrm{p}}-N_{\mathrm{c}}-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}}\end{bmatrix},\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{F}\\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{F}^{2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{F}^{N_{\mathrm{p}}}\end{bmatrix}。$$

综合对 AEB-P 系统控制性能要求的分析，设计优化的目标函数定义为

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{r}}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{p}}}\left\|y_{\mathrm{p}}(k+i\mid k)-y_{\mathrm{ref}}(k+i\mid k)\right\|_{Q}^{2}+\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{c}}}\left\|u(k+i)\right\|_{R}^{2}+\rho\varepsilon^{2},\tag{11}$$

式中：$y_p(k+i|k)$为在 k 时刻系统对$(k+i)$时刻控制输出量的预测值；$y_{\mathrm{ref}}(k+i|k)$表示控制输出对应的参考值；$u(k+i)$为$(k+i)$时刻的控制输入；$\boldsymbol{Q}$ 为输出量权重系数矩阵；$\boldsymbol{R}$ 为控制量增量权重矩阵；$\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(q_{\mathrm{d}},q_{\mathrm{v}},q_{a_{\mathrm{r}}})$，$\boldsymbol{Q}$ 中每个子矩阵代表每个状态量的权重因子，其值越大代表系统越趋向于减小其对应的状态量与参考量之间偏差；$\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}(q_{\mathrm{u}})$，$R$ 越大则代表系统更倾向于使控制量尽可能小；ε 与 ρ 分别为松弛因子与相应的权重系数。

通常可以将该优化问题转化为标准二次规划问题，通过 Matlab 优化工具箱的 quadprog 函数来求解，得到每一个采样时刻对应控制时域内的一系列最优控制量：

$$\boldsymbol{U}^{*}(k)=[u^{*}(k),u^{*}(k+1),\cdots,u^{*}(k+N_{\mathrm{c}}-1)]^{\mathrm{T}}。\tag{12}$$

2.4　基于运动状态和行人损伤风险的权重调整策略

传统的 MPC 算法中，目标函数中的权重系数通常是根据设计者追求部分性能设计的定值，当权重系数 q_{d}、q_{v} 设置得比较大时，系统更注重安全性；如果权重系数 $q_{a_{\mathrm{r}}}$ 设置得比较大，则系统更注重经济性和舒适性。CHENG 等[23]对影响行人头部损伤的因素进行正交实验，研究了碰撞速度与行人伤亡风险之间的关系，并建立了碰撞速度与简明损伤定级标准（abbreviated injury scale，AIS）大于 3，表示为 AIS3＋伤害风险的数学公式。本文在设置权重系数时在安全距离阈值的基础上引入了当前速度下与行人发生碰撞时行人损伤到达 AIS3＋的概率，如式(13)所示。

$$P_{\mathrm{AIS3+}}(v)=[1+\exp(5.261-0.104v_{\text{撞}})]^{-1},\tag{13}$$

式中 $P_{\mathrm{AIS3+}}(v)$是汽车与行人碰撞时自车速度($v_{\text{撞}}$)下的行人损伤到达 AIS3＋的概率，关系如图 3 所示。

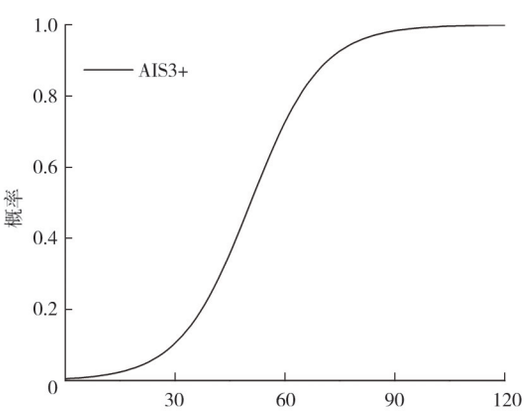


图 3　碰撞速度和行人损伤的概率关系

Fig. 3　Probabilistic relationship between collision speed and pedestrian injury

因为式(12)是双射函数，即碰撞速度和行人损伤概率一一对应，因此本文在设置权重系数时引入了行人的损伤概率 $P_{\mathrm{AIS3+}}(v)$，也引入了当前的行驶速度。选取间距误差和当前速度下行人损伤概率作为模糊控制器的输入，d_{rel} 的论域为[0，50]，用 7 个语言变量描述：Z0，P1，P2，P3，P4，P5，P6；$P_{\mathrm{AIS3+}}(v)$的论域为[0，1]，用 7 个语言变量描述：S，S1，S2，S3，S4，S5，S6；输出量 q_{d}，q_{v} 的论域均为[0.5，1.0]，用 6 个语言变量描述：V5，V6，V7，V8，V9，V10；输出量 $q_{a_{\mathrm{r}}}$ 的论域为[0，0.5]，用 6 个语言变量描述：V，V1，V2，V3，V4，V5。模糊关系法则为 Mamdani，解模糊采用重心法。输入变量和输出变量采用三角形隶属度函数，函数图和输入、输出变量曲面如图 4 和图 5 所示。

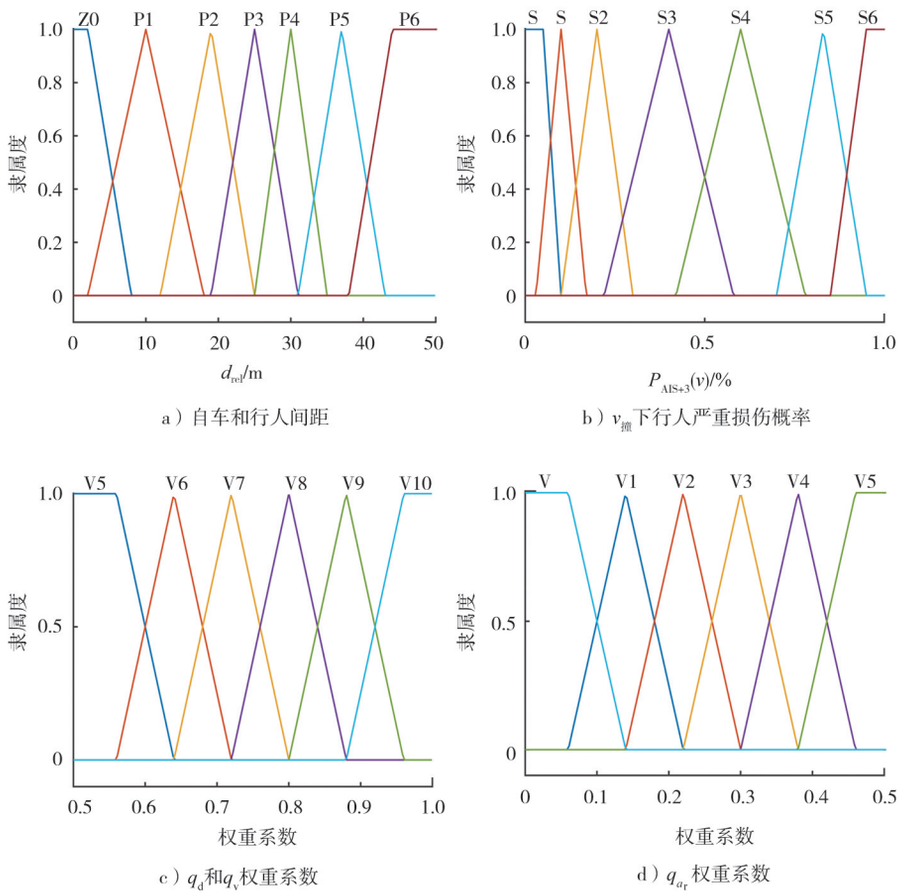


图 4 模糊控制隶属度函数

Fig. 4 membership function of fuzzy control

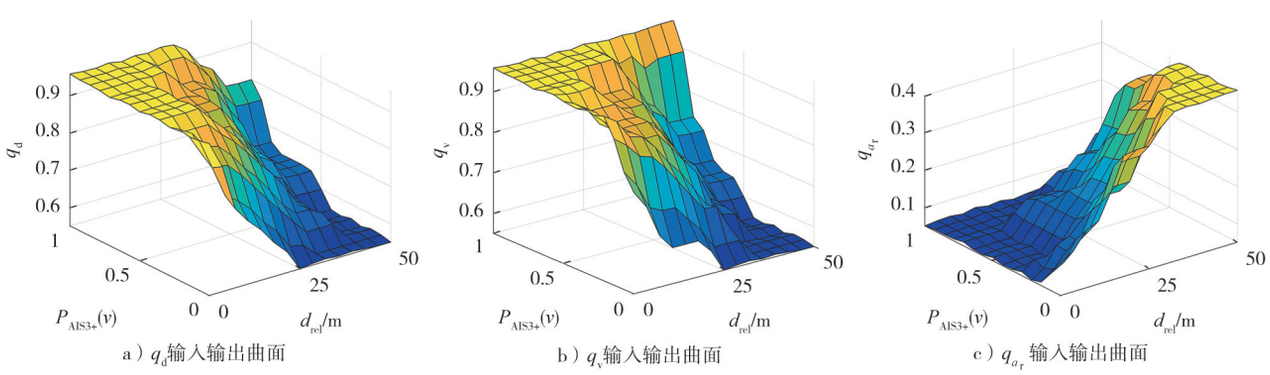


图 5 模糊控制权重系数曲面

Fig. 5 Fuzzy control weight coefficient surface

在保证行车安全的前提下，模糊规则的制定尽可能考虑车上乘员的乘坐舒适性。部分规则如表 1 所示。

表 1 部分模糊控制规则

Tab. 1 Part of fuzzy control rules

d_{rel}	$P_{AIS3+}(v)$	q_d	q_v	q_{a_r}	d_{rel}	$P_{AIS3+}(v)$	q_d	q_v	q_{a_r}
Z0	S	V10	V8	V1	P3	S5	V9	V10	V
Z0	S6	V10	V10	V	P4	S2	V6	V6	V4
P1	S	V7	V6	V2	P4	S4	V8	V8	V2
P1	S6	V10	V10	V	P5	S2	V6	V5	V5
P2	S1	V7	V7	V3	P5	S4	V7	V7	V2
P2	S5	V10	V10	V	P6	S2	V5	V5	V5
P3	S1	V6	V6	V3	P6	S3	V5	V5	V5

3　车辆模型和下层 PID 控制系统

3.1　车辆模型搭建

以某款 D 级车为研究对象，通过 Carsim 软件建立准确的自车动力学模型。整车主要参数如表 2 所示。

表 2　整车主要参数

Tab. 2　Main parameters of the vehicle

参　数	数值	参　数	数值
整车质量 m/kg	1 530	轮距 B/m	1.615
发动机额定功率 P_e/kW	150	重心高度 H/m	0.52
空气阻力系数 C_w	0.3	主减速器减速比 R_M	4.1
迎风面积 A/m^2	2.3	轮胎滚动半径 r/m	0.325
滚动摩擦阻力系数 f	0.015	传动系传动效率 h_t	0.9
空气密度 ρ/(kg/m^3)	1.206	前轮制动转矩与制动压力的比值/(N·m/MPa)	250
轴距 L/m	2.656	后轮制动转矩与制动压力的比值/(N·m/MPa)	100
重心到前轴中心的距离 Q/m	1.106	前后悬架纵向刚度/(kN/rad)	52.15/41.4
地面附着系数 m	0.9	前/后轴载荷/N	9 064/7 416

3.2　下层控制器

AEB-P 的下层控制器的主要功能是对上述车辆动力学模型进行控制和执行，实现制动与驱动模式切换并将相应的控制信号转化为节气门开度与制动压力值以进行实时控制。由于汽车纵向动力学的非线性特性，车辆的实际加速度与期望值存在误差，采用 PID 控制策略对加速度误差进行控制，将上层 MPC 控制器输出的期望状态与实际状态差值作为控制误差 $e(t)$，即：

$$e(t)=a_2(t)-a_{des}(t), \tag{14}$$

式中：$a_2(t)$为实际加速度；$a_{des}(t)$为期望加速度。

PID 的控制规律为

$$p_b(t)=K_p\left[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+T_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right], \tag{15}$$

式中：K_p、T_i、T_d 分别为 PID 控制器的比例增益、积分时间常数和微分时间常数；$p_b(t)$为输出的制动压力值。通过试凑法，设定 PID 下层控制器的控制参数：$K_p=2$，$T_i=12$，$T_d=0.01$。

4　AEB-P 系统试验验证

为验证所设计的 AEB-P 控制策略的有效性，本文使用硬件在环试验(hardware in loop，HIL)对其进行仿真验证。图 6 给出了硬件在环试验总体方案，其中 Carsim 软件提供仿真场景、感知模块和车辆动力学模型，将前方行人距离信息等传递给 Simulink 中 AEB-P 控制策略，AEB-P 上层决策模块结合车辆当前状态与所处环境信息作出决策，下层控制器完成车辆控制。控制算法被编译并烧录至真实的控制器上，模型被编译并通过上位机传输给实时仿真机。实时仿真机和控制器之间通过板卡进行信息交互。

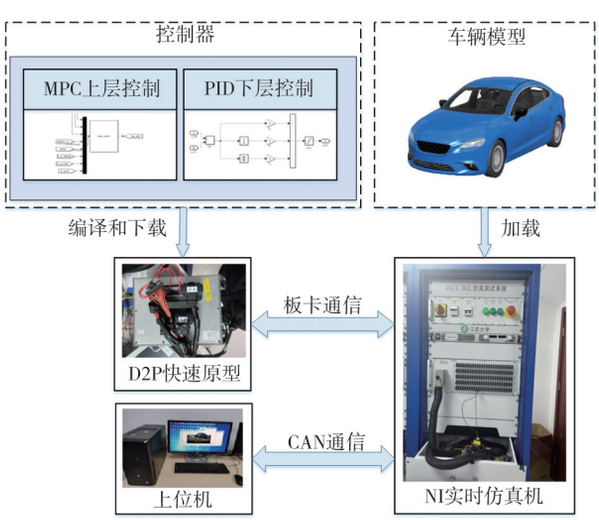


图 6　硬件在环试验总体方案

Fig. 6　General scheme of the test for hardware-in-the-loop testing

测试 AEB-P 系统的性能需要在人车碰撞的经典场景下进行，本文参考了 Euro-NCAP 和 C-NCAP 中的经典 AEB-P 测试场景，主要以 C-NCAP 于 2021 年最新发布的版本为标准，使用 Carsim 软件建立前方远端行人横穿(car-to-pedestrian farside adult，CPFA)和前方纵向行人(car-to-pedestrian longitudinal adult，CPLA)这 2 个最容易发生人车碰撞事故的场景，在这 2 个场景中对车辆搭载的 AEB-P 系统进行功能测试。为测试所

设计的 AEB-P 策略(策略 1)在不同工况下的性能,测试工况共有 8 组,拓展车速范围到 20～90 km/h,以 10 km/h 递增,并与采用固定 TTC 阈值的 AEB-P 策略(策略 2)进行对比,策略 2 的 TTC 阈值设置为 1 s,制动延迟时间为 0.2 s。同时,因为是面向行人的 AEB 控制策略,通常行人的运动速度较低,运动随机性较大,因此当检测到行驶危险情况时 AEB-P 会开始制动,使自车停止。测试场景为 CPFA-25、CPFA-50、CPLA-25、CPLA-50。CPFA-50 指的是车辆行驶方向前方存在同一车道行走的行人,在未施加任何制动作用的情况下车辆将与行人发生碰撞,且碰撞点位于车辆宽度的 50%处,其他测试场景同理。

4.1 CPFA 场景

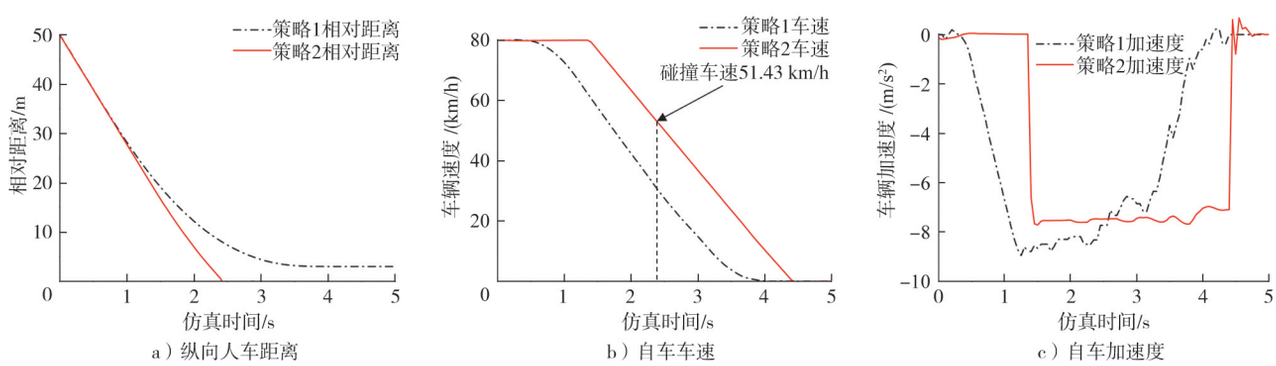
CPFA 场景下的行人速度为 6.5 km/h 横穿,自车以不同车速均匀前行。具体的 CPFA-25 和 CPFA-50 场景下仿真测试结果如表 3 所示。结合表 3 的统计数据,分析仿真测试结果可得:策略 1 情况下,车辆完成紧急制动后,与行人的最小间距保持在 2.31～2.98 m,该距离可以减少车辆紧急制动给行人带来的恐慌,避免更多不必要的伤害;各测试工况中,减速度大小可依据当前危险状况做出调整。策略 2 情况下,车辆完成紧急制动后,与行人的最小纵向相对距离保持在 2.21～4.16 m,最大制动加速度范围为 7.60 ～ 7.75 m/s^2,其中当车辆行驶速度超过 50 km/h 时,不能避免碰撞。

表 3 CPFA 场景仿真结果

Tab.3 Simulation results of CPFA scene

CPFA 场景	车速/(km/h)	最小间距/m		碰撞相对速度/(km/h)		$a_{d,max}$/(m/s^2)
		策略 1	策略 2	策略 1	策略 2	
CPFA-50	20	2.31	4.16	—	—	−6.61
CPFA-25	30	2.39	3.72	—	—	−7.15
CPFA-50	40	2.44	2.21	—	—	−7.36
CPFA-25	50	2.53		—	7.44	−7.58
CPFA-50	60	2.51	—	—	26.89	−8.17
CPFA-25	70	2.75	—	—	39.19	−8.37
CPFA-50	80	2.98	—	—	51.43	−8.95
CPFA-25	90	—	—	4.72	61.61	−8.89

当车速为 80 km/h,碰撞点位于车辆宽度的 50%的 CPFA 工况制动过程如图 7 所示。在图 7 中,仿真开始时行人和自车相距 50 m,策略 1 情况下在 0.4 s 左右触发制动策略,制动加速度经过 0.85 s 后达到最大;策略 2 情况下在 1.35 s 左右触发制动策略,制动加速度经过 0.1 s 达到最大,但是由于制动触发时机较晚,因此未能避免与行人发生碰撞。并且该场景下 8 组实验中策略 1 成功避撞了 7 组,成功率高达 87.5%,而策略 2 成功避撞 3 组,成功率仅 37.5%。



a) 纵向人车距离 b) 自车车速 c) 自车加速度

图 7 CPFA-50 80 km/h 工况制动过程

Fig.7 CPFA-50 scene braking process under 80 km/h condition

4.2 CPLA 场景

CPLA 场景下的行人速度为 5 km/h 纵向前进,自车以不同车速均匀前行。具体的 CPLA-25 和 CPLA-50 场景下仿真测试结果如表 4 所示。结合表 4 的统计数据,分析仿真测试结果可得:本文 AEB-P 控制策略下,车辆完成紧急制动后,与行人的最小间距保持在 1.14～3.76 m,最大制动加速度控制在−6.18～−8.91 m/s^2,其中当车速为 90 km/h 时,最小纵向距离 1.14 m 小于最小安全距离 d_0,但是避免了与行人的碰撞。传统控制策略下,车辆完成紧急制动后,与行人的纵向相对距离保持在 2.18～5.13 m,最大制动加速度范围

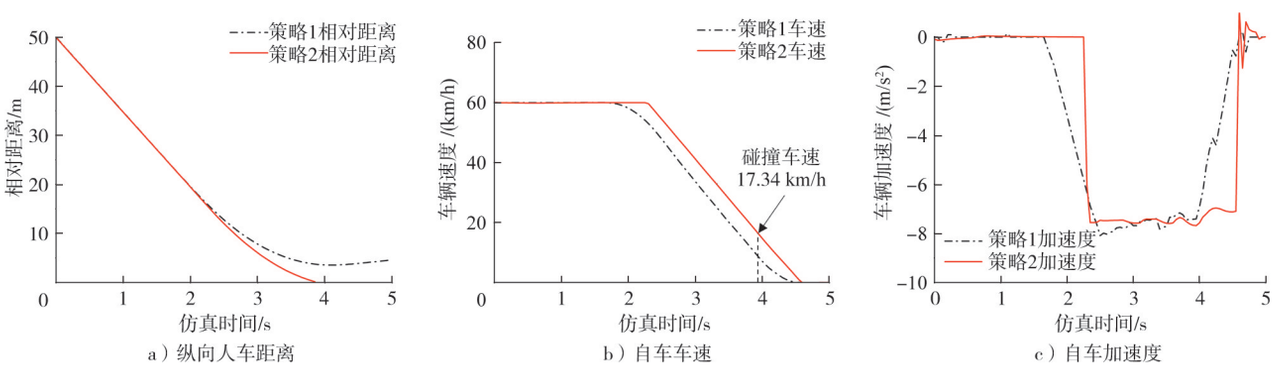
为－7.60～－7.75 m/s^2，其中当车辆行驶速度超过 60 km/h 时，不能避免碰撞。

表 4　CPLA 场景仿真结果

Tab. 4　Simulation results of CPLA scene

CPFA 场景	车速/(km/h)	最小间距/m		碰撞相对速度/(km/h)		$a_{d,max}$/(m/s^2)
		策略 1	策略 2	策略 1	策略 2	
CPLA-25	20	2.58	5.13	—	—	－6.18
CPLA-50	30	2.61	5.17	—	—	－6.93
CPLA-25	40	2.61	4.23	—	—	－7.17
CPLA-50	50	2.86	2.18	—	—	－7.52
CPLA-25	60	3.54	—	—	12.34	－8.09
CPLA-50	70	3.58	—	—	30.96	－8.27
CPLA-25	80	3.76	—	—	43.52	－8.79
CPLA-50	90	1.14	—	—	54.36	－8.91

当车速为 60 km/h，碰撞点位于车辆宽度的 25%的 CPLA 工况制动过程如图 8 所示。在图 8 中，仿真开始时人车相距 50 m，本文 AEB-P 控制策略在 1.7 s 左右触发制动策略，制动加速度经过 0.8 s 后达到最大，人车最小间距为 3.54 m，传统的 AEB-P 控制策略在 2.25 s 左右触发制动策略，由于制动触发时机较晚，最终在 3.9 s 与行人发生碰撞。并且该场景下 8 组实验中本文控制策略全部成功避撞，成功率高达 100%，而传统控制策略仅成功避撞 4 组，成功率仅 50%。



a）纵向人车距离　　b）自车车速　　c）自车加速度

图 8　CPLA-25 60 km/h 制动过程

Fig. 8　CPLA-25 scene braking process under 60 km/h condition

5　结　语

提出了一种基于 MPC 的面向行人的自动紧急制动系统控制算法，通过对目标函数的优化，使车辆更加有效地适应不同工况下的紧急制动。所提控制方法在各测试工况下共计 16 组实验安全制动停车 15 组，成功率高达 93.75%，且在保证安全的情况下，避免了 AEB-P 介入与退出制动时因制动减速度突变而带来的不适感，在一定程度上考虑了驾驶舒适性。在都成功避免碰撞的情况下，相较于传统控制策略，所提方法能使自车和前方行人保持较稳定的最小间距，鲁棒性更好，在保证行车制动安全性的同时，在整个制动过程中制动减速度变化更为平缓。

本文测试场景只考虑了平直路面行驶工况，驾驶场景较为简单。未来拟对弯道等复杂测试场景以及雨天湿滑等道路附着不良情况进行测试。

参考文献/References：

[1] ORGANIZATION W H. Global Status Report on Road Safety 2018：Summary[R]. Geneva：World Health Organization，2018.

[2] TIAN Jie，ZHANG Chuntao，WANG Qun. Analysis of craniocerebral injury in facial collision accidents[J]. PloS One，2020. DOI：10.1371/journal. pone. 0240359.

[3] 杨帅，张金换，钱占伟，等. 汽车安全多领域融合的研究与展望[J]. 汽车安全与节能学报，2022，13(1)：29-47.
YANG Shuai，ZHANG Jinhuan，QIAN Zhanwei，et al. Research and prospect of multi domain integration of automobile safety[J]. Journal of Automotive Safety and Engergy，2022，13(1)：29-47.

[4] FILDES B，KEALL M，BOS N，et al. Effectiveness of low speed autonomous emergency braking in real-world rear-end crashes[J]. Accident Analysis and Prevention，2015，81：24-29.

[5] GALVAO L G,ABBOD M,KALGANOVA T,et al. Pedestrian and vehicle detection in autonomous vehicle perception systems:A review [J]. Sensors,2021. DOI:10.3390/S21217267.

[6] 韩玲,朱长盛,迟瑞丰,等.面向智能汽车测试的弱势群体服饰色彩研究[J].中国公路学报,2023,36(1):240-252.
HAN Ling,ZHU Changsheng,CHI Ruifeng,et al. Clothing color of vulnerable groups for intelligent vehicle testing[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(1):240-252.

[7] 黄城,冀杰,陈琼红,等.考虑舒适性的 AEB 避撞算法及仿真验证[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(4):39-48.
HUANG Cheng,JI Jie,CHEN Qionghong,et al. Simulation verification of AEB collision avoidance algorithm in consideration of comfort [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2021,35(4):39-48.

[8] 兰凤崇,余蒙,李诗成,等.考虑预碰撞时间的自动紧急制动系统分层控制策略研究[J].汽车工程,2020,42(2):206-214.
LAN Fengchong,YU Meng,LI Shicheng,et al. Research on hierarchical control strategy for automatic emergency braking system with consideration of time-to-collision[J]. Automotive Engineering,2020,42(2):206-214.

[9] 杨贺博,张小俊,罗耿耿,等.基于动态碰撞时间的自动紧急制动策略设计[J].汽车技术,2024(2):17-24.
YANG Hebo,ZHANG Xiaojun,LUO Genggeng,et al. Design of automatic emergency braking strategy based on dynamic time to collision [J]. Automobile Technology,2024(2):17-24.

[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.
WANG Yinan,WANG Di,GUAN Yingzhou. Development overview of active collision avoidance system for intelligent and connected vehicles[J]. Automobile Technology,2023(3):1-9.

[11] BAE J J,LEE M S,KANG N. Partial and full braking algorithm according to Time-to-Collision for both safety and ride comfort in an autonomous vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology,2020,21(2):351-360.

[12] 尘帅,王吉忠,张西龙,等.面向车辆纵向动力学控制的制动意图识别综述[J].河北科技大学学报,2019,40(2):105-111.
CHEN Shuai,WANG Jizhong,ZHANG Xilong,et al. Overview of braking intention recognition for longitudinal dynamic control of vehicles[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2019,40(2):105-111.

[13] 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.
LIN Guoqing,LU Chao,HAN Longfei,et al. Test and evaluation method of pedestrian automatic emergency braking system[J]. Journal of Automotive Safety and Engergy,2020,11(3):296-304.

[14] ZULKIFLI A,PEEIE M H,ZAKARIA M A,et al. Motion planning and tracking trajectory of an autonomous emergency braking pedestrian(AEB-P)system based on different brake pad friction coefficients on dry road surface[J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering,2022,19(3):10002-10013.

[15] YANG Wei,ZHANG Zhen,JIANG Kongming,et al. Optimization of emergency braking pedestrian collision avoidance for autonomous vehicle fusing the fuzzy neural network with the genetic algorithm[J]. International Journal of Control,Automationand Systems,2022,20(7):2379-2390.

[16] 邹铁方,刘前程,魏亮.加装传统 AEB 后的未避免事故典型碰撞场景与事故特征[J].汽车工程,2023,45(6):1062-1072.
ZOU Tiefang,LIU Qiancheng,WEI Liang. Typical collision scenarios and accident characteristics of accidents not avoided after installing traditional AEB[J]. Automotive Engineering,2023,45(6):1062-1072.

[17] BANCE I,YANG Saichao,ZHOU Qing,et al. A framework for rapid on-board deterministic estimation of occupant injury risk in motor vehicle crashes with quantitative uncertainty evaluation[J]. Science China Technological Sciences,2021,64(3):521-534.

[18] WANG Qingfan,ZHOU Qing,LIN Miao,et al. Human injury-based safety decision of automated vehicles[J]. iScience,2022. DOI:10.1016/J. ISCI. 2022. 104703.

[19] CHENG Shuo,LI Liang,GUO Hongqiang,et al. Longitudinal collision avoidance and lateral stability adaptive control system based on MPC of autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2020,21(6):2376-2385.

[20] 刘永涛,刘传攀,刘湘安,等.基于自适应采样时间 MPC 的自动紧急制动系统[J].汽车工程,2023,45(1):32-41.
LIU Yongtao,LIU Chuanpan,LIU Xiangan,et al. Automatic emergency braking system based on model predictive control with adaptive sampling time[J]. Automotive Engineering,2023,45(1):32-41.

[21] 袁守利,郭铮.考虑驾驶员反应时间的车辆碰撞预警模型[J].安全与环境学报,2021,21(1):270-276.
YUAN Shouli,GUO Zheng. A warning model for vehicle collision on account of the reaction time of the driver[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(1):270-276.

[22] ITOH M,INAGAKI T,HORIKOME T. Design and evaluation of situation-adaptive pedestrian-vehicle collision avoidance system[C]// 2011 IEEE International Conference on Systems,Man,and Cybernetics. Anchorage:IEEE,2011:1063-1068.

[23] CHENG Rui,PAN Ye,XIE Lian. Analysis of vehicle-pedestrian accident risk based on simulation experiments[J]. Mathematical Problems in Engineering,2022. DOI:10.1155/2022/7891232.