

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.02.001

# 自动紧急制动系统行人避撞策略及仿真验证

杨 为<sup>a,b</sup>, 赵胡屹<sup>a,b</sup>, 舒 红<sup>b</sup>

(重庆大学 a.机械传动国家重点实验室;b.汽车工程学院,重庆 400044)

**摘要:**为提高自动紧急制动系统对行人保护的安全性,提出了一种采用上层模糊控制和下层 PID(proportion integration differentiation)控制的分层控制行人避撞策略。以某款 E 级 SUV 车辆为研究对象,建立其动力学模型,在国内外真实行人测试场景下,构建了基于 TTC(time to collision)碰撞时间理论的风险评估模型,通过 Matlab 和 CarSim 软件的联合仿真,对控制策略进行了仿真验证。仿真结果表明:所提出的自动紧急制动系统行人避撞策略能满足国内行人测试工况标准,与行人最小安全距离为 0.9 m;在保证安全的前提下,模糊控制可自动调节制动强度,输出减速度范围控制在 4.8~6.1 m/s<sup>2</sup>,有较好的舒适性;TTC 风险评估模型正确发出了行人碰撞预警,无漏警和误警发生。

**关键词:**智能汽车;自动紧急制动;模糊控制;行人避撞;联合仿真

**中图分类号:**U461.91

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2019)02-001-10

## Simulation and verification of the control strategies for AEB pedestrian collision avoidance system

YANG Wei<sup>a,b</sup>, ZHAO Huyi<sup>a,b</sup>, SHU Hong<sup>b</sup>

(a. State Key Laboratory of Mechanical Transmission;b. School of Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** In order to improve the safety of AEB (autonomous emergency braking) pedestrian protection, a hierarchical pedestrian collision avoidance strategy based on upper fuzzy control and lower PID control was proposed. Taking an E-class SUV vehicle as the research object, its dynamic model was established. Based on the real pedestrian test scenarios at home and abroad, the TTC (time to collision) risk assessment model was established. Then the control strategies were simulated and verified through the joint simulation of Matlab and CarSim. The simulation results show that the strategies of the pedestrian collision avoidance system can satisfy the domestic pedestrian test condition standards, and the minimum safe distance from vehicle to pedestrians is 0.9 m. The fuzzy control can automatically adjust the braking strength, the output deceleration range is controlled within 4.8 m/s<sup>2</sup> to 6.1 m/s<sup>2</sup> for better comfort on the premise of ensuring safety. The risk assessment model can correctly send out pedestrian collision warning signals without

**收稿日期:**2018-10-12

**基金项目:**工信部智能网联汽车系统及通信标准化研究与试验验证平台建设项目(2016ZXFB06002)。

Supported by the Research of Intelligent Network Vehicle System, Communication Standardization and the Construction of Verification Platform Fund Project of Ministry of Industry and Information Technology (2016ZXFB06002).

**作者简介:**杨为(1973—),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为汽车电动制动系统、主动安全技术、无人驾驶环境感知,(E-mail)slmto53@126.com。

missed alarm and false alarm.

**Keywords:** intelligent vehicles; autonomous emergency braking; fuzzy control; pedestrian collision avoidance; joint simulation

自动紧急制动系统(autonomous emergency braking, AEB)是一种高级辅助驾驶系统。它通过雷达、摄像头等环境感知设备,对周围的行车环境进行危险识别和判断,并在碰撞危险发生之前,及时向驾驶员发出报警信息,若驾驶员未采取任何措施,则该系统会自动介入并紧急制动,避免或减轻对行人的碰撞伤害。据欧盟新车安全评鉴协会(Euro-NCAP)研究结果表明,AEB系统的普及可有效避免 27% 的车辆碰撞事故<sup>[1]</sup>,极大地保障了驾驶员和行人的生命财产安全。国内外各大安全评价机构如美国高速交通安全管理局(NHTSA)、中国新车评价规程(C-NCAP)等已针对 AEB 系统相继发布了评价标准,其中最重要的一项是对自动紧急制动行人避撞系统(autonomous emergency braking pedestrian, AEB-P)功能安全的评价。因此,AEB-P 系统已成为国内外研究热点。

目前,国内外学者对行人避撞系统的研究主要集中在 3 个方面:行人检测、控制策略及行人危险场景。刘颖等<sup>[2]</sup>针对中国目前交通状况建立了 AEB-P 行人典型危险测试场景,通过 PreScan 仿真测试,对 AEB-P 系统进行初步评价。Tang 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于车间通信 AEB-P 的 Matlab/Simulink 仿真模型,并通过 PreScan 进行了仿真验证。Llorca 等<sup>[4]</sup>基于模糊控制理论,提出了一种自动转向行人避撞系统,该系统可实现车速 30 km/h 内的有效避撞。Park 等<sup>[5]</sup>运用漏斗图理论(funnel map)提出了一种融合行人预测位置和车辆速度的目标检测算法,最高有效避撞车速可达 40 km/h。Saito 等<sup>[6]</sup>针对行人横穿马路的潜在危险场景,设计了一种车辆减速度控制系统,实现行人避撞功能。Shimizu 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于行人避撞速度的风险量化方法,对潜在行人碰撞危险程度进行了量化评估。该方法与真实驾驶安全评估数据保持了良好一致性。

由于国内对 AEB-P 系统的研究主要集中在行人目标检测及行人典型危险场景,关于行人避撞控制策略的研究较少,而各国的交通状况也不相同,国外的研究成果并不能直接应用于中国。据此,笔者针对中国 C-NCAP(2018 版)新发布的 AEB-P 行人避撞评价标准,提出了一种基于上层模糊控制和下层 PID 控制的分层控制策略;对比安全距离(safety distance, AS)算法<sup>[8-10]</sup>、碰撞时间(time to collision, TTC)算法<sup>[11]</sup>和车头时距(time-headway, THW)算法<sup>[12]</sup>3 种 AEB 风险评估算法,以不干扰驾驶员正常驾驶和风险评估算法的可靠性为标准<sup>[13]</sup>,建立了 TTC 算法风险评估模型,最后通过联合仿真进行了分析验证。

## 1 风险评估模型和预警系统

### 1.1 风险评估模型的建立

AEB-P 系统的触发时机由风险评估模型决定,是 AEB-P 系统功能安全性的根本保障。笔者建立了 TTC 风险评估模型, $t_{TTC}$ 是指某一时刻开始,驾驶员可利用的通过控制车速来避免与前车发生碰撞的时间。其主要公式如下<sup>[14]</sup>:

$$t_{TTC} = \begin{cases} -\frac{\Delta s}{\Delta v}, & \Delta v < 0 \& \Delta a = 0; \\ \frac{\Delta v}{\Delta a} - \frac{\sqrt{\Delta v^2 - 2\Delta s \Delta a}}{\Delta a}, & \Delta v < 0 \& \Delta a \neq 0; \\ -\frac{\Delta v}{\Delta a} + \frac{\sqrt{\Delta v^2 - 2\Delta s \Delta a}}{\Delta a}, & \Delta v \geq 0 \& \Delta a < 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\Delta v$  (m/s)、 $\Delta a$  (m/s<sup>2</sup>) 分别为车与目标物纵向相对速度和相对加速度。

$t_{TTC}$  安全阈值是指 AEB-P 预警系统发出预警信号和制动信号时, $t_{TTC}$  的临界值。其选取结合了不同类型驾驶员驾驶行为和碰撞风险的分析评估<sup>[15-17]</sup>,以中国 C-NCAP 发布的 AEB-P 行人避撞测试工况为评价标准,通过大量仿真和试验得以确定。 $t_{TTC}$  安全阈值与表 1 的  $t_{TTC}$  取值相对应,不同车速下  $t_{TTC}$  安全阈值不同。例如,表 1 中车速为 20 km/h 的工况下,当  $t_{TTC}$  值为 2.7 s 时,达到了预警阈值, $t_{TTC}$  在 1.2~2.7 s 范围内,

AEB-P 预警系统将持续发出碰撞预警信号。当  $t_{TTC}$  值为 1.2 s 时,达到了制动阈值, $t_{TTC}$  在 0~1.2 s 范围内,AEB-P 预警系统将持续发出制动信号。由此建立了可靠的 TTC 风险评估模型。

### 1.2 AEB-P 预警系统

建立的 AEB-P 预警系统采用分级预警算法,对不同工况下的  $t_{TTC}$  取值范围,进行了安全等级划分。按危险程度一共分为 3 级,Ⅰ级为行驶安全级,Ⅱ级为碰撞预警级,Ⅲ级为碰撞危险级。Ⅰ级表示当前行车安全,无潜在危险,AEB-P 预警系统发出信号值为 0;Ⅱ级表示已探测到前方行人有潜在碰撞危险,需要驾驶员采取措施,AEB-P 预警系统发出信号值为 1;Ⅲ级为即将发生行人碰撞,AEB-P 预警系统将发出制动信号 2,若驾驶员未采取措施,制动系统将自动介入避免碰撞发生。

当车辆处于安全行驶级时,AEB-P 系统不会介入去干扰正常驾驶。当车辆处于碰撞预警级时,系统会持续发出报警提示音。据统计驾驶员的制动反应时间为 1.14~1.38 s<sup>[18]</sup>,取平均值 1.25 s。此外,制动管路的制动间隙和液压迟滞一般为 0.2~0.3 s。因此,笔者所提出预警算法中的蜂鸣报警时间为 1.5 s。表 1 为不同工况下  $t_{TTC}$  取值范围和对应安全等级。

表 1 不同车速工况下  $t_{TTC}$  取值范围和对应安全等级  
Table 1 The corresponding safety rating and the range of  $t_{TTC}$  under different working conditions

| 不同车速工况/(km·h <sup>-1</sup> ) | $t_{TTC}$ 取值范围/s | 安全等级 |
|------------------------------|------------------|------|
| 20                           | 0.0~1.2          | Ⅲ    |
|                              | 1.2~2.7          | Ⅱ    |
|                              | >2.7             | Ⅰ    |
| 30                           | 0.0~1.2          | Ⅲ    |
|                              | 1.2~2.7          | Ⅱ    |
|                              | >2.7             | Ⅰ    |
| 40                           | 0.0~1.3          | Ⅲ    |
|                              | 1.3~2.8          | Ⅱ    |
|                              | >2.8             | Ⅰ    |
| 50                           | 0.0~1.4          | Ⅲ    |
|                              | 1.4~2.9          | Ⅱ    |
|                              | >2.9             | Ⅰ    |
| 60                           | 0.0~1.5          | Ⅲ    |
|                              | 1.5~3.0          | Ⅱ    |
|                              | >3.0             | Ⅰ    |

## 2 AEB-P 系统分层控制策略

### 2.1 AEB-P 系统工作流程

图 1 为 AEB-P 系统工作流程,采用上层模糊控制和下层 PID 控制的分层控制策略,上层控制系统根据风险评估模型输出的控制信号向下层控制器输出期望减速度值,下层 PID 控制器将期望减速度值转化为制动管路压力,对车辆进行制动控制。

### 2.2 AEB-P 上层模糊控制系统

研究中模糊控制器输入量为车与行人纵

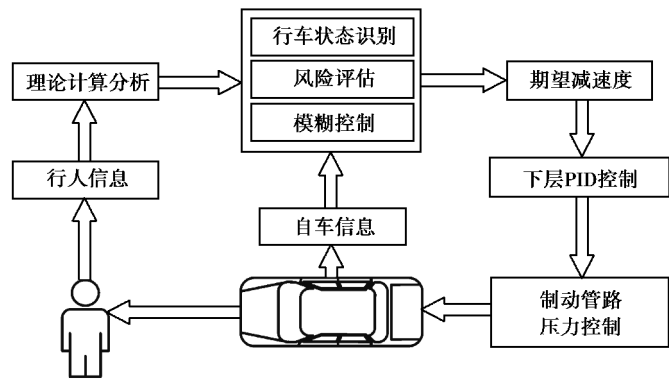


图 1 系统工作流程

Fig. 1 The working flow of the system

向相对速度  $\Delta v_0$  ( $\Delta v_0 = 0 - v_2$ , km/h) 和纵向相对距离  $\Delta s$  (m)。测试工况中, 行人纵向位移和纵向速度为 0。模糊输入输出语言变量按 N10(负大) ~ N1(负小)、Z0(零)、P1(正小) ~ P7(正大) 划分。 $\Delta s$  的论域为  $[0, 80]$ , 用 8 个语言变量描述: Z0、P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7;  $\Delta v_0$  的论域为  $[-150, 0]$ , 用 11 个语言变量描述: Z0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7、N8、N9、N10; 输出量期望减速  $a_r$  ( $\text{m/s}^2$ ) 的论域为  $[-10, 0]$ , 用 8 个语言变量描述: Z0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7。模糊关系法则为 Mamdani, 解模糊采用重心法。隶属度函数图和输入输出变量曲面如图 2~5 所示。

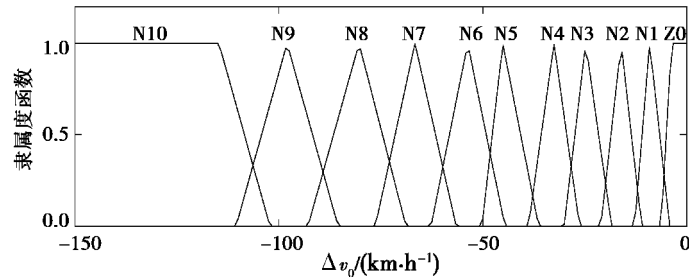


图 2 车与行人纵向速度差隶属度函数

Fig. 2 The membership function of longitudinal velocity difference between pedestrians and rear vehicles

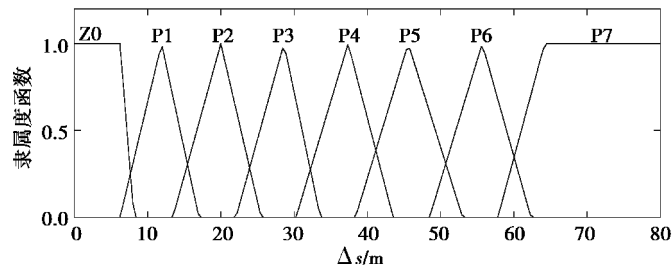


图 3 车与行人间距隶属度函数

Fig. 3 The membership function of distance between pedestrians and rear vehicles

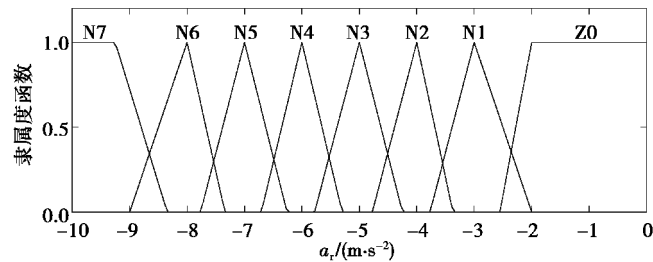


图 4 主车期望减速度隶属度函数

Fig. 4 The membership function of subject vehicle expected deceleration

在保证安全的前提下, 模糊规则的制定以行人测试工况为标准, 尽可能考虑车上乘员的乘坐舒适性。部分规则如表 2 所示。

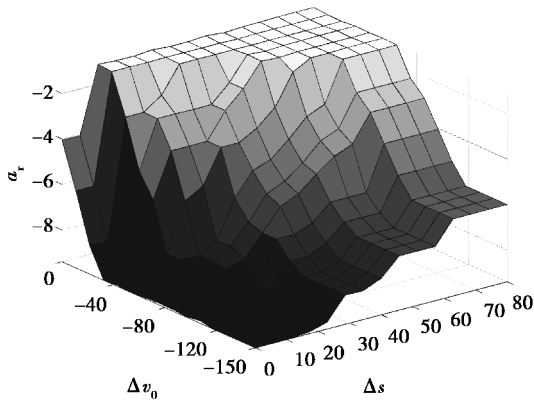


图 5 输入、输出变量曲面

Fig. 5 Input and output variable surface

### 2.3 AEB-P 下层 PID 制动控制系统

下层 PID 控制系统的主要功能是接收上层控制器的期望减速度值并把它转换为车辆制动管路压力对车辆减速度进行控制。PID 控制器输入量为上层期望减速度和期望减速度与实际减速的差值,输出为制动管路压力值,期望减速度和实际减速的差值作为误差控制。PID 3 个参数为比例参数( $k_p$ )、积分参数( $k_i$ )和微分参数( $k_d$ ),其参数值的选取以期望减速度和实际减速度的误差值作为标准,选取误差值为最小的一组 PID 参数作为最优参数。PID 3 个参数最终确定为: $k_p=5, k_i=15, k_d=0$ 。

## 3 AEB-P 系统仿真验证

### 3.1 整车动力学系统模型建立

以某款 E 级前置前驱 SUV 车型为研究对象,通过 CarSim 软件建立了包括车身、转向系、传动系、制动系、悬架及轮胎的动力学模型。其主要参数如表 3 所示。

表 3 整车主要参数

Table 3 Main parameters of the vehicle

| 发动机<br>额定功率/<br>kW | 发动机<br>最大扭矩/<br>(N·m) | 整车整备<br>质量/kg | 空气阻力<br>系数   | 迎风<br>面积/m <sup>2</sup> | 滚动摩擦<br>阻力系数 | 轴距/m   | 轮距/mm   | 重心到<br>前轮中心<br>的距离/<br>m | 重心<br>高度/<br>m      |
|--------------------|-----------------------|---------------|--------------|-------------------------|--------------|--|---|--------------------------|---------------------|
| 125                | 251                   | 1 615         | 0.32         | 2.73                    | 0.004        | 2.75   | 1615  | 1.106 5                  | 0.78                |
| 主减速器<br>减速比        | 轮胎滚动<br>半径/mm         | 传动系<br>传动效率   | 制动盘<br>质量/kg | 制动踏板<br>杠杆比             | 主缸<br>直径/mm  | 制动钳<br>0 °C<br>时制动盘<br>比热容/<br>(kJ·<br>(kg·°C) <sup>-1</sup> ) | 液压缸中<br>单位流量<br>所产生的<br>压力/<br>(MPa·<br>(mm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ) | 启动助力<br>的时间<br>迟滞/s      | 关闭助力<br>的时间<br>迟滞/s |
| 3.48               | 0.358 8               | 0.9           | 9.65         | 3.6                     | 25.4         | 1.042 5  | 4.10×10 <sup>-6</sup>   | 0.001                    | 0.001               |

表 2 部分模糊控制规则  
Table 2 Part of the fuzzy control rules

| $\Delta s$ | $\Delta v_0$ | $a_r$ |
|------------|--------------|-------|
| Z0         | Z0           | N2    |
| Z0         | N10          | N7    |
| P1         | N1           | Z0    |
| P1         | N9           | N7    |
| P2         | N2           | N1    |
| P2         | N8           | N6    |
| P3         | N3           | N1    |
| P3         | N7           | N4    |
| P4         | N4           | N1    |
| P4         | N6           | N2    |
| P5         | N5           | Z0    |
| P5         | N5           | N1    |
| P6         | N6           | N1    |
| P6         | N4           | Z0    |
| P7         | N7           | N1    |
| P7         | N3           | Z0    |

### 3.2 C-NCAP 行人测试工况

C-NCAP 行人测试工况分为两大类,即成年行人远端横向穿行和成年行人近端横向穿行。根据碰撞不同位置远端穿行又可分为 CVFA-25、CVFA-50,近端穿行可分为 CVNA-25、CVNA-75。行人行走速度分别为 5.0 km/h 和 6.5 km/h。测试工况图如图 6、7 所示。

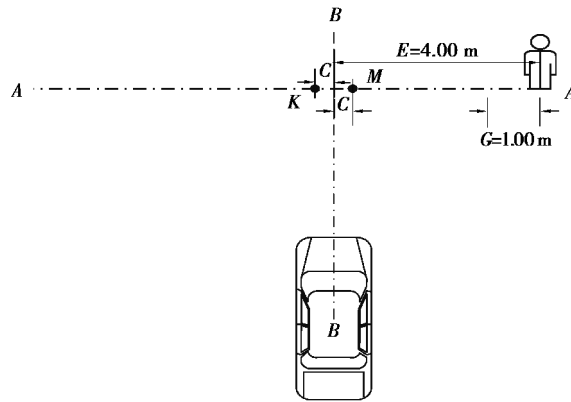


图 6 CVNA-25、CVNA-75(近端)行人测试场景

Fig. 6 CVNA-25、CVNA-75 (near-end) Pedestrian test scenarios

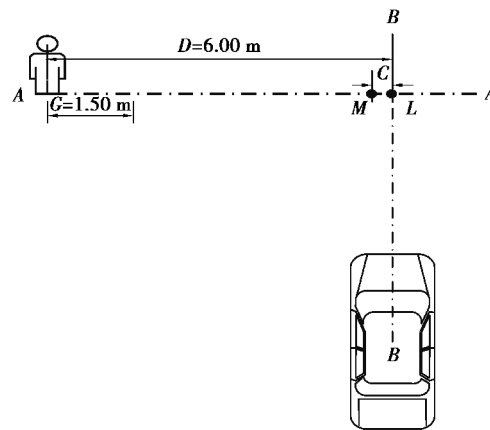


图 7 CVFA-50、CVFA-25(远端)行人测试场景

Fig. 7 CVFA-50、CVFA-25 (far-end) Pedestrian test scenarios

图 6 中,轴线 AA 为假人重心点 H 的运动轨迹, BB 为试验车中心线, G 为假人加速距离, C 为 25% 和 75% 近端场景碰撞位置偏移量。K 为近端场景 75% 碰撞位置, M 为近端场景 25% 碰撞位置。图 7 中, C 为 25% 远端场景碰撞位置偏移量。L 为 50% 远端场景碰撞位置, M 为 25% 远端场景碰撞位置。

测试工况共有 5 组,车速范围是 20~60 km/h,以 10 km/h 递增。每组测试工况测试场景为: CVFA-50、CVFA-25、CVNA-25、CVNA-75。CVFA 场景下行人速度为 6.5 km/h, CVNA 场景下行人速度为 5.0 km/h。

### 3.3 AEB-P 系统仿真分析及结果

建立的 AEB-P 的 CarSim 和 Matlab/Simulink 联合仿真模型图如图 8 所示。图 8 中理论计算模型主要读取车与行人基本信息(速度、位置等),并计算对应  $t_{TTC}$  值。逆动力学模型主要对车辆动力系统和制动系统进行建模,可将期望减速度转化为制动管路压力,控制其车辆减速度。

针对 C-NCAP 颁布的 AEB 行人测试法规要求,对 AEB-P 系统进行仿真验证和结果分析,部分典型仿真结果如图 9、10 所示。在制动轮缸压力曲线图中,  $L_1$  为左前轮制动轮缸曲线图,  $L_2$  为左后轮制动轮缸曲线图。由于所建立的制动系统对车辆的前轴左右轮或后轴左右轮的制动控制压力相同,因此仅须对左前轮和左后轮制动轮缸压力曲线图进行分析。

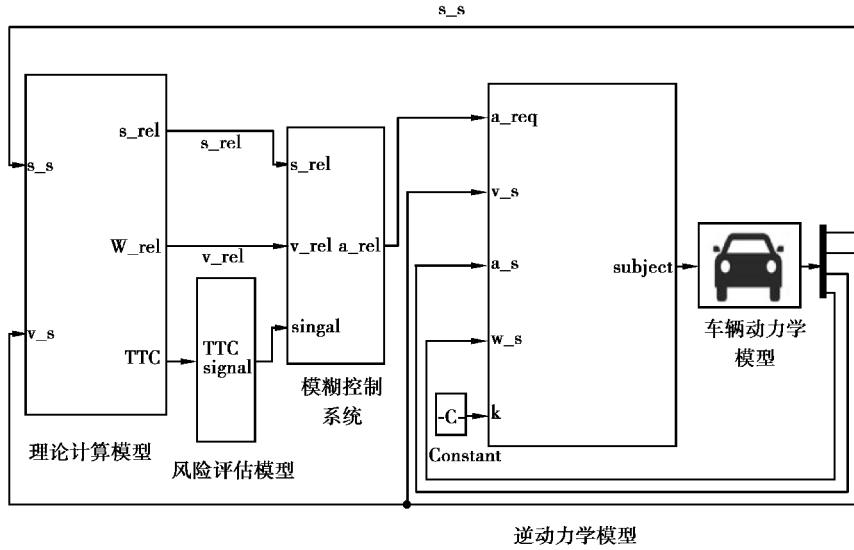


图 8 Simulink 仿真模型

Fig. 8 Simulink simulation model

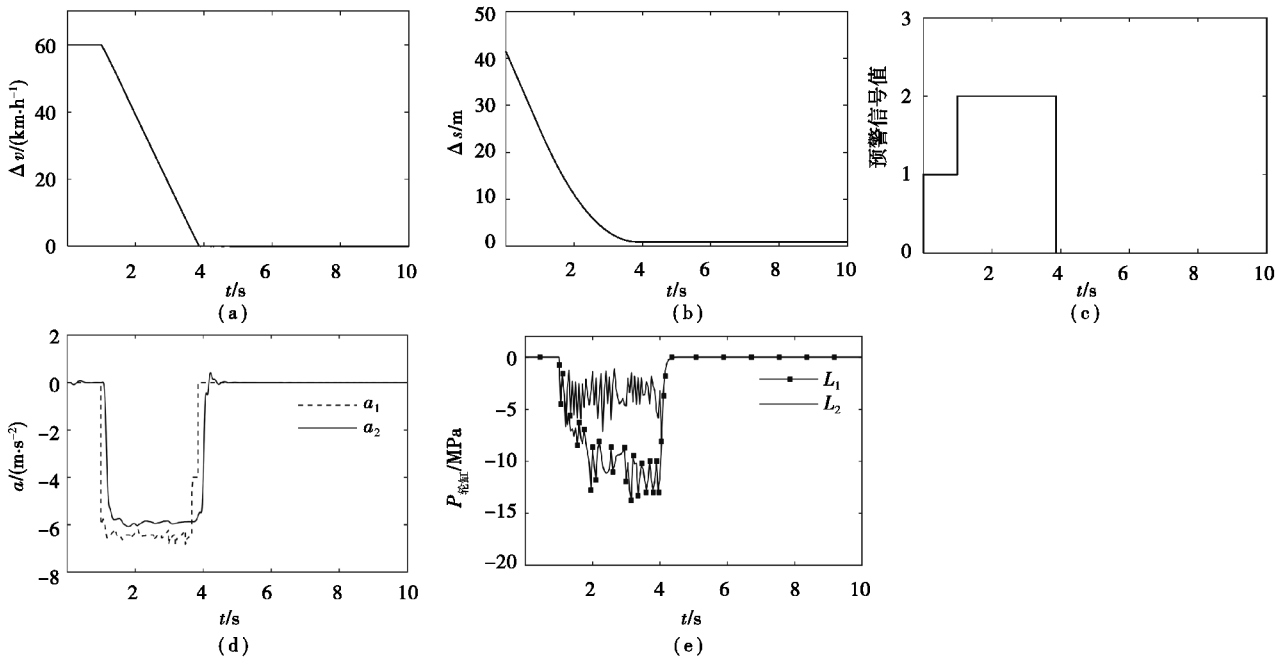


图 9 CVNA-75, 自行车速为 60 km/h

Fig. 9 CVNA-75 ( $v_2 = 60 \text{ km/h}$ )

如图 9、10 所示的典型仿真工况中,车辆开始制动后,相对车速曲线变化平稳,均及时减为 0。相对距离曲线均显示未与行人发生碰撞( $\Delta s \neq 0$ )。预警系统正确地发出了预警信号 1 和制动信号 2,制动过程中,制动信号能保持持续稳定输出,直到制动结束。在图 9 减速度曲线中,实际减速度( $a_2$ )与期望减速度( $a_1$ )跟随性良好,误差较小。车辆正常行驶时, $a = 0$ ,未干扰驾驶员正常行驶;制动开始后,减速度曲线输出平稳,振荡较小。图 9 轮缸压力曲线图中,系统输出期望减速度较大,为  $-6 \text{ m/s}^2$ ,后轴车轮首先触发制动系统 ABS (antilock brake system) 模块,其轮缸压力( $L_2$ )出现频繁波动,随后前轴车轮轮缸压力( $L_1$ )在  $-10 \text{ MPa}$  左右时,触发 ABS。前后轮均触发制动系统 ABS,因此滑移率得到较好控制,且充分利用了路面附着系数,保证输出一个较大的减速度。

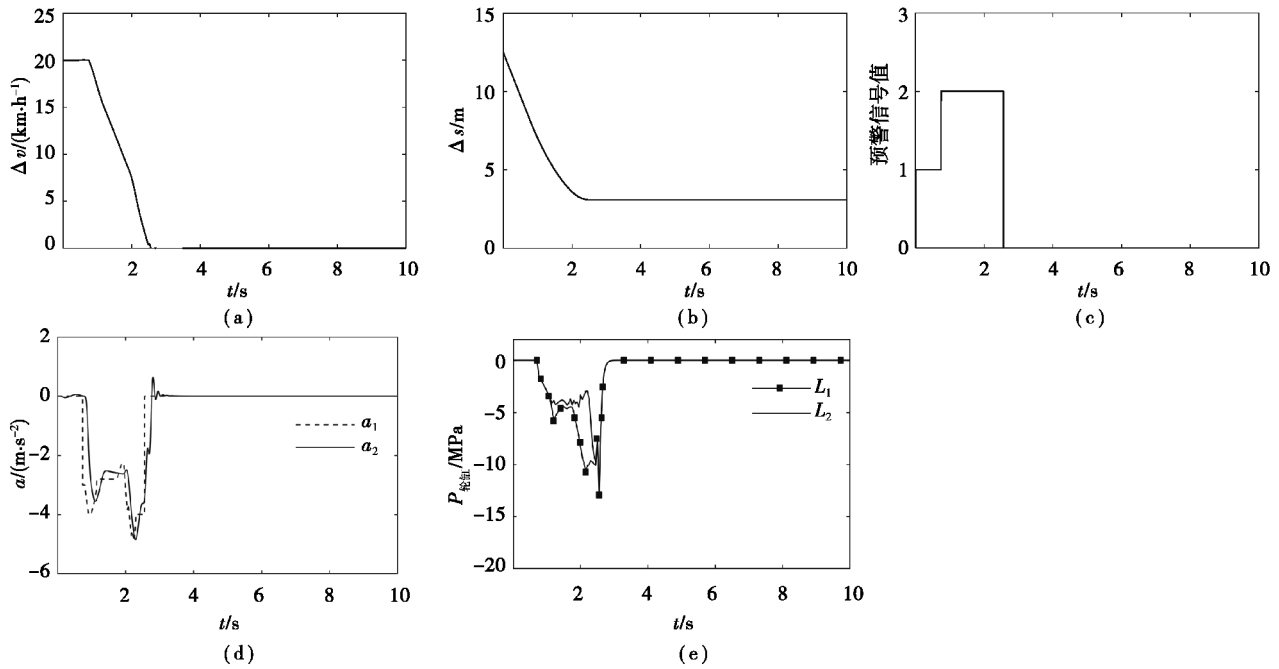


图 10 CVFA-25, 自车车速为 20 km/h

Fig. 10 CVFA-25 ( $v_2 = 20$  km/h)

在图 10 减速度曲线中,实际减速度( $a_2$ )能根据模糊控制输出期望减速度( $a_1$ )作出准确响应。所设计的 AEB-P 系统可对碰撞风险进行实时判断,若制动力过小,不能解除碰撞风险,则系统可自动调节减速度值,保证车辆与行人的安全。图 10 轮缸压力曲线图中,后轴车轮首先触发 ABS,其轮缸压力( $L_2$ )出现频繁波动并维持在 $-4$  MPa 左右。前轴车轮轮缸压力曲线如  $L_1$  所示,制动过程中未触发 ABS。在 2 s 左右时,减速度突然增大,前后轴轮缸压力均有较大增加。

具体 C-NCAP 行人 AEB-P 测试工况仿真结果如表 4 所示。结合表 4 统计数据,分析各测试工况仿真结果可得:车辆紧急制动完成后,与行人的纵向相对距离保持在 0.9~3.1 m,该距离可减少车辆紧急制动带给行人的恐慌,避免不必要的伤害;各测试工况中,车辆的减速度控制在  $4.8\sim 6.1$   $\text{m/s}^2$ ,制动强度范围为 0.48~0.61,属于中等制动强度,且减速度大小可根据实时危险状况做出调整;为了保证避撞效果,预警时间仅有 1 s 左右,AEB-P 系统误警、漏警次数为 0。

表 4 测试工况仿真结果

Table 4 Simulation results of test conditions

| 车速/<br>( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 测试工况    | 行人速度/<br>( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 报警持续<br>时间/s | 误、漏报警<br>次数 | 最大制动<br>减速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | 制动停止相对<br>距离/m |
|--|---------|--|--------------|-------------|---|----------------|
| 20   | CVFA-25 | 6.5  | 1.1          | 0           | 4.8   | 2.9            |
|  | CVFA-50 | 6.5  | 1.0          | 0           | 4.9   | 3.1            |
|  | CVNA-25 | 5.0  | 0.9          | 0           | 4.8   | 3.0            |
|  | CVNA-75 | 5.0  | 1.0          | 0           | 4.9   | 2.9            |
| 30   | CVFA-25 | 6.5  | 0.8          | 0           | 5.7   | 2.9            |
|  | CVFA-50 | 6.5  | 1.0          | 0           | 5.6   | 2.9            |
|  | CVNA-25 | 5.0  | 0.7          | 0           | 5.7   | 2.8            |
|  | CVNA-75 | 5.0  | 0.9          | 0           | 5.6   | 2.9            |



续表4

| 车速/<br>( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 测试工况    | 行人速度/<br>( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 报警持续<br>时间/s | 误、漏报警<br>次数 | 最大制动<br>减速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | 制动停止相对<br>距离/m |
|--|---------|--|--------------|-------------|---|----------------|
| 40   | CVFA-25 | 6.5  | 0.8          | 0           | 6.0   | 2.6            |
|  | CVFA-50 | 6.5  | 1.0          | 0           | 6.0   | 2.7            |
|  | CVNA-25 | 5.0  | 0.6          | 0           | 6.0   | 2.7            |
|  | CVNA-75 | 5.0  | 0.9          | 0           | 6.0   | 2.7            |
| 50   | CVFA-25 | 6.5  | 0.8          | 0           | 5.9   | 2.2            |
|  | CVFA-50 | 6.5  | 1.0          | 0           | 6.0   | 2.2            |
|  | CVNA-25 | 5.0  | 0.6          | 0           | 6.0   | 2.0            |
|  | CVNA-75 | 5.0  | 1.0          | 0           | 6.0   | 2.1            |
| 60   | CVFA-25 | 6.5  | 0.8          | 0           | 6.0   | 1.0            |
|  | CVFA-50 | 6.5  | 1.0          | 0           | 6.0   | 1.0            |
|  | CVNA-25 | 5.0  | 0.7          | 0           | 6.1   | 0.9            |
|  | CVNA-75 | 5.0  | 1.0          | 0           | 6.1   | 1.0            |

## 4 结 论

1) 建立的 TTC 风险评估模型可正确发出行人碰撞预警和制动信号,未出现漏警和误警,未干扰驾驶员正常驾驶。

2) 采用的模糊控制和 PID 控制的 AEB-P 分层控制系统,满足 C-NCAP 行人测试要求,极端危险工况下(CVNA-25,车速 60 km/h)也能保证车辆与行人的安全(最小距离为 0.9 m)。

3) 车辆制动强度范围为 0.48~0.61,属于中等制动强度,一定程度上考虑了车内人员的驾乘舒适性,减轻了车辆刹车时产生的惯性冲击和噪音给人带来的不适感。

4) 模糊控制使得减速度输出曲线较为平稳且振荡小,较好地模拟了有经验驾驶员的紧急制动过程,与单一恒定减速度输出控制系统相比,具有适应性强、功能安全性好的特点。

### 参考文献:

- [1] 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.  
LI Lin, ZHU Xichan, DONG Xiaofei, et al. A research on the collision avoidance strategy for autonomous emergency braking system [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(2): 168-174.(in Chinese)
- [2] 刘颖,贺锦鹏,刘卫国,等. 自动紧急制动系统行人测试场景的研究[J]. 汽车技术, 2014(3): 35-39.  
LIU Ying, HE Jinpeng, LIU Weiguo, et al. Research on test scenarios for AEB pedestrian system [J]. Automobile Technology, 2014(3): 35-39.(in Chinese)
- [3] Tang B, Chien S, Huang Z, et al. Pedestrian protection using the integration of V2V and the pedestrian automatic emergency braking system[C]//2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), November 1-4, 2016, Rio de Janeiro, Brazil. IEEE, 2016: 2213-2218.
- [4] Fernandez Llorca D, Milanes V, Parra Alonso I, et al. Autonomous pedestrian collision avoidance using a fuzzy steering controller [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(2): 390-401.
- [5] Park M K, Lee S Y, Kwon C K, et al. Design of pedestrian target selection with funnel map for pedestrian AEB system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016: 1-1.
- [6] Saito Y, Raksincharoensak P. Shared control in risk predictive braking manoeuvre for preventing collision with pedestrian

- [J]//IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(4):314-324.
- [7] Shimizu T, Raksincharoensak P. Motion planning via optimization of risk quantified by collision velocity accompanied with AEB activation[C]//2017 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), June 27-28, 2017, Vienna, Austria. IEEE, 2017: 19-25.
- [8] 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.
- [9] Seiler P, Song B, Hedrick J K. Development of a collision avoidance system [J]. Neurosurgery, 1998, 46(2): 492-492.
- [10] Moon S, Yi K. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8): 661-690.
- [11] Hayward J C. Near-miss determination through use of a scale of danger [J]. Highway Research Record, 1972, 384: 24-32.
- [12] 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.
- [13] 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.(in Chinese)  
HU Yuanzhi, LYU Zhangjie, LIU Xi. Algorithm and simulation verification of longitudinal collision avoidance for autonomous emergency break (AEB) system based on PreScan [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(2):136-142.
- [14] Coelingh E, Eidehall A, Bengtsson M. Collision warning with full auto brake and pedestrian detection-a practical example of automatic emergency braking [C] // 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, September 19-22, 2010, Funchal, Portugal. IEEE, 2010: 155-160.
- [15] Li X Q, Jiang J, Lu J. Safety differences between novice and experienced drivers under car-following situations[C]// 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals, August 14-17, 2011, Nanjing, China. American Society of Civil Engineers, 2012: 2196-2207.
- [16] 陆建, 张文珺, 杨海飞, 等. 基于碰撞时间的追尾风险分析[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(5):58-64.  
LU Jian, ZHANG Wenjun, YANG Haifei, et al. Analysis of rear-end risk based on the indicator of time to collision[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014, 32(5): 58-64.(in Chinese)
- [17] Eckert A, Sevenich M, Rieth P E. 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.
- [18] Zhang Y Z, Antonsson E K, Grote K. A new threat assessment measure for collision avoidance systems[C]//2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, September 17-20, 2006, Toronto, Ont., Canada. IEEE, 2006: 968-975.