

人车事故重建及AEB介入后行人损伤分析

楚小兰

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2023年5月26日; 录用日期: 2023年7月18日; 发布日期: 2023年7月25日

摘要

本文为确定AEB系统介入后能够避免碰撞或降低碰撞速度, 从而降低行人的损伤情况。首先对184起行人正面碰撞事故重建后进行参数分析, 其次利用PreScan和MATLAB/Simulink联合仿真搭建融合AEB模块的车辆模型, 最终对模型进行了有效性验证。结果表明: 在探测角度50°、触发宽度10 m以及探测距离50 m的条件下, 在车辆介入AEB后, 汽车的平均碰撞速度由59.6 km/h下降到32.4 km/h, 下降比率达到45.6%, 行人的死亡风险降低了54.8%, 同时将AIS3+损伤降低为AIS2-损伤的事故率由5%提高至70%。

关键词

事故重建, AEB系统, 行人损伤

Reconstruction of Vehicle-Pedestrian Accident and Analysis of Pedestrian Injury after AEB Intervention

Xiaolan Chu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: May 26th, 2023; accepted: Jul. 18th, 2023; published: Jul. 25th, 2023

Abstract

In this paper, to determine the intervention of AEB system can avoid collision or reduce the collision speed, thus reducing the injury situation of pedestrians. Firstly, a parametric analysis of 184 reconstructed pedestrian frontal collisions was conducted, followed by a joint simulation using PreScan and MATLAB/Simulink to build a vehicle model incorporating the AEB module, and finally

the validity of the model was verified. The results show that under the conditions of detection angle of 50° , trigger width of 10m and detection distance of 50 m, the average crash speed of the vehicle decreases from 59.6 km/h to 32.4 km/h after the vehicle intervenes in AEB, with a decrease ratio of 45.6%, and the risk of pedestrian fatalities is reduced by 54.8%, while the accident rate of reducing AIS3+ damage to AIS2- damage is increased from 5% to 70%.

Keywords

Accident Reconstruction, AEB System, Pedestrian Injury

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国道路交通环境日益复杂, 以及各年龄段行人均有不良行走习惯等问题[1]。据世界卫生组织《全球道路安全现状报告 2018》发布的数据显示, 弱势道路使用者(行人、二轮车驾驶员等)占全球死亡人数的一半以上[2]。根据调查机构数据表明, 预计到 2032 年主动安全 AEB 系统市场配置率将超过 50% [3], 中国汽研安全中心的测评结果表明自动紧急制动系统(Automatic Emergency Braking System, AEB)可以有效提高车内乘员与行人等弱势道路使用者的安全系数。

欧盟、澳大利亚、美国、中国等国家的标准法规制定部门及相关检测机构纷纷引入了面向行人的 AEB 测试评价规范。Edwards 等人基于 GIDAS 数据库将 AEB 系统假设安装到汽车上检测行人并自动制动用来防止或降低与行人的碰撞速度, 通过利用伤害风险与伤亡影响速度分布之间的关系, 预估了汽车上安装 AEB 系统以保护行人的潜在好处[4]。Ohlin 等人研究得到基于 E-NCAP 中的 AEB 行人测试中获得高分的汽车可以降低长期伤害风险[5]。刘福聚等人基于 CIDAS 数据库筛选出的 178 起乘用车行人事故案例, 通过 PC-CRASH 软件仿真碰撞前 1 s 乘用车与行人运动参数, 探索出最优化的 AEB 参数可以避免 58.4% 的乘用车行人事故, 同时碰撞速度也降低 31.7 km/h, 减轻了碰撞造成的行人损伤[6]。西华大学的曹毅在 Simulink 中搭建基于 TTC 模型的 AEB 控制模块并添加到测试车辆上, 以优化 AEB 系统的探测角度、制动触发宽度以及触发时间为目的, 也为开发 AEB 提供参考依据[7]。2021 年, 邹天芳等人通过考虑行人 AEB 中的行人减速来提高事故避免率, 研究结果表明: 在行人减速间隔为 $[0.1, 8.2]$ m/s²的紧急情况下, 事故避免率随着行人减速的增加而增加[8]。

本文依据国家车辆事故深度调查体系(National Automobile Accident In-depth Investigation System, NAIS)采集到的真实的人车事故案例, 利用 PC-Crash 进行事故重建获得相关特征参数, 基于真实的事故特征信息对 AEB 提供的减速评估对减少行人损伤的潜力进行研究。

2. 事故重建与参数分析

对 NAIS 数据库 2017~2021 年的人车碰撞事故进行选取, 基于再现事故过程、行驶记录仪以及道路监控视频等信息得到相关参数进行统计分析。

2.1. 案例筛选与采集内容

2.1.1. 案例筛选

本文根据下面的人车事故选取准则筛选出 184 起(AIS3+)行人与汽车正面碰撞的事故案例, 筛选标准

为:

- 1) 碰撞类型是汽车与行人相撞, 事故车辆为轿车、MPV、SUV 以及微面的案例;
- 2) 碰撞参与方仅为汽车与行人, 在单个案例中汽车只能有一辆, 行人为成年人且数量也必须只能有一个, 多次碰撞的事故和推车行人案例均不予考虑;
- 3) 在案例采集过程中, 重点对有人员重伤或死亡的事故进行采集, 故分析案例中行人受重伤或死亡的案例占大多数;
- 4) 案例有事故现场图、EDR 数据、行车记录仪或道路监控视频, 可根据事故信息获得清晰准确的事故过程, 进行事故重建。

2.1.2. 采集内容

图 1 所示为人车碰撞事故深度调查的流程及内容, 包括对事故现场信息、事故车辆及其他相关信息等进行系统的采集内容, 数据采集的信息种类繁多。

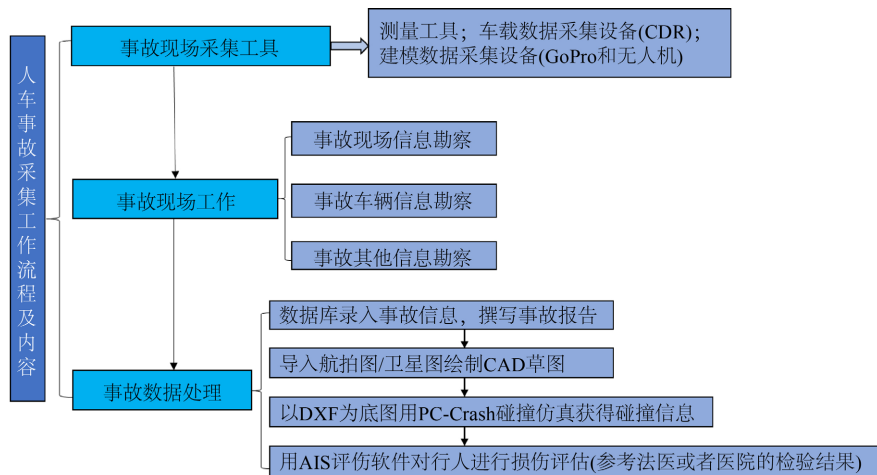


Figure 1. Diagram of traffic accident collection process and content

图 1. 人车交通事故采集流程及内容

2.2. 事故重建

PC-Crash 软件的人车事故的重建流程如图 2 所示。

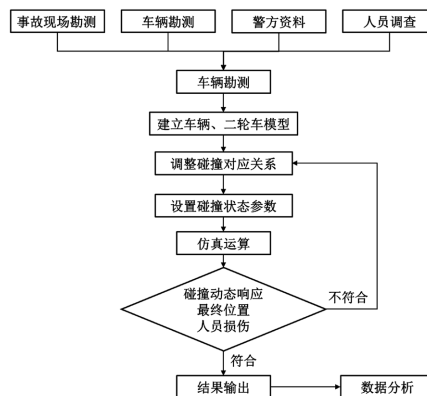


Figure 2. PC-Crash simulation flow

图 2. PC-Crash 仿真流程

2.2.1. 场景重建

在 2021 年 11 月 18 日 14:38, 甲车驾驶员驾车沿某路由西向东右机动车道直行至某小区北门处, 适逢行人乙从小区门口处路段的人行横道上由南向北步行横过某路, 在此过程中, 甲车车头左部与行人乙左侧在人行横道内发生碰撞, 导致行人乙抢救无效死亡、甲车损坏的道路交通事故的发生。图 3 为重建时在 CAD 中附着卫星图和航拍图的结合图, 并用分层对道路情况按规则描线绘制的方法, 可以在仿真环境中还原事故场景, 事故过程的道路监控视频截图如图 4 所示。

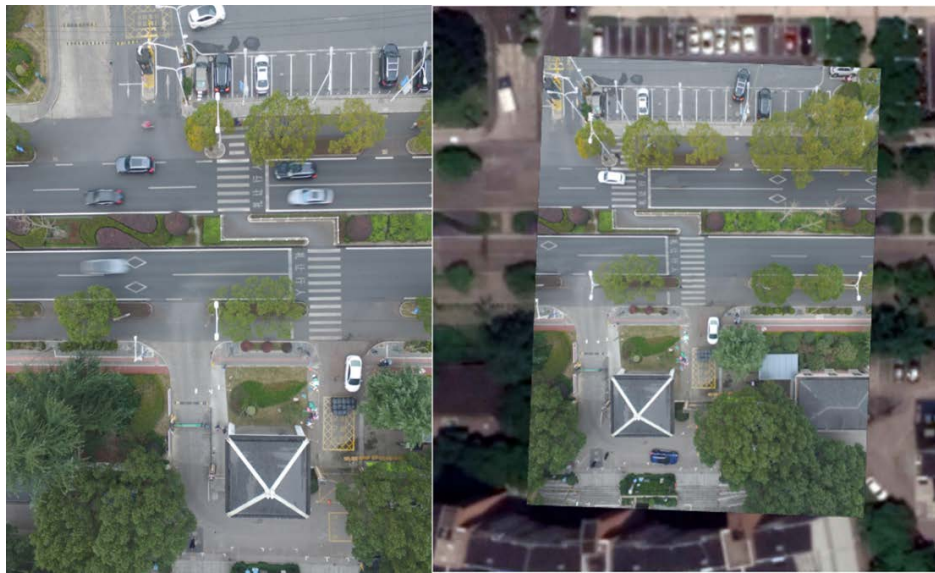


Figure 3. Diagram of satellite image and aerial photo combination
图 3. 卫星图和航拍图结合后的展示图



Figure 4. Screenshot of road video accident process
图 4. 道路视频事故过程截图

2.2.2. 碰撞过程重建

该案例中车辆模型从 PC-Crash 软件的车辆模型库中选用 BMW, 在根据实际情况调整车辆参数后直接调用。行人模型选用多体组合模型, 其碰撞过程仿真如图 5 所示, 碰撞结果详细参数信息如图 6 所示。通过事故现场图或视频信息调整车辆初始位置, 经过仿真过程可以确定碰撞双方的最终定位。

2.2.3. 动画时刻相对位置验证

仿真过程与视频信息对比如表 1 所示。从这些时刻车辆与行人相对位置可以明显看出重建的仿真模型和事故视频中对应的时刻比较一致。

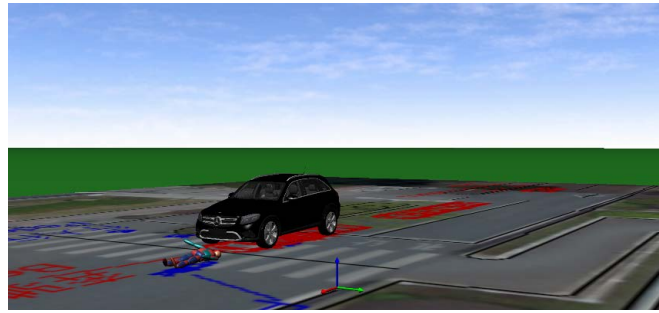


Figure 5. Incident simulation process
图 5. 事故仿真过程

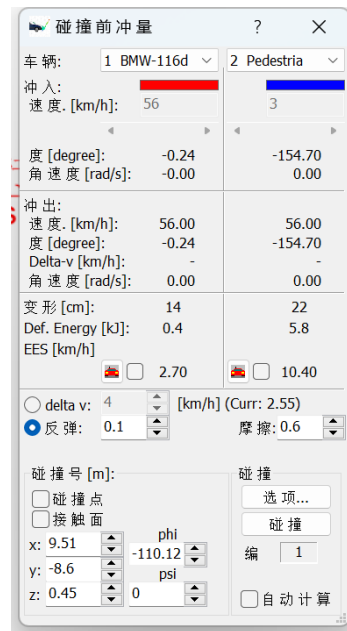


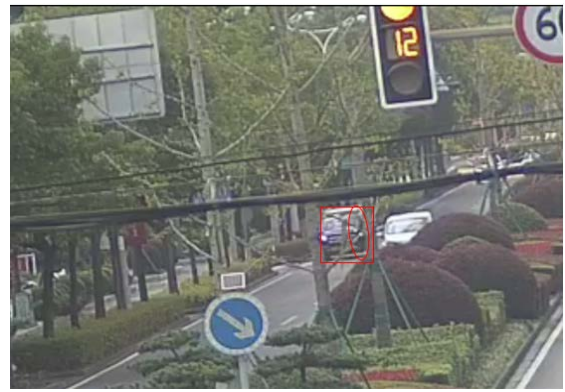
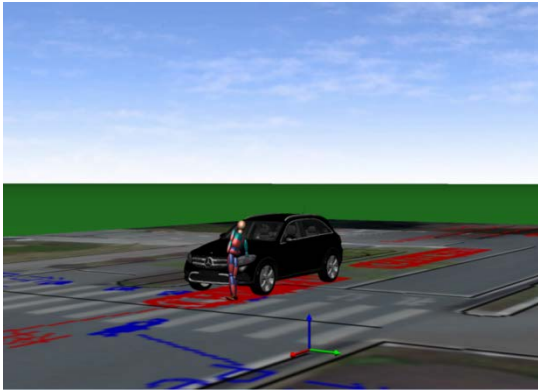
Figure 6. Impulse before collision
图 6. 碰撞前冲量

Table 1. Comparison between simulation process and video data
表 1. 仿真过程与视频资料比较

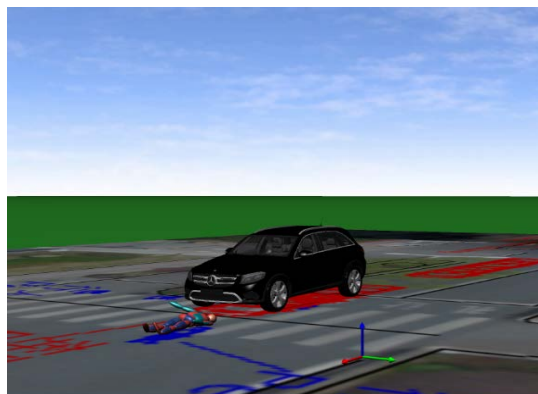
仿真过程	视频数据
	

在 $t = 0 \text{ ms}$ 时，行人左侧与事故车左前处接触

Continued



在 $t = 30 \text{ ms}$ 时，行人左侧大腿与机罩左前端发生接触



在 $t = 78 \text{ ms}$ 时，行人和车辆到最终位置

2.3. 参数分析

如图7所示，对184起汽车直行与行人横穿的原始事故进行重建后发现，车辆速度大部分集中于40~60 km/h，经计算得到汽车的平均碰撞车速为59.6 km/h，80%的事故碰撞速度小于70 km/h。

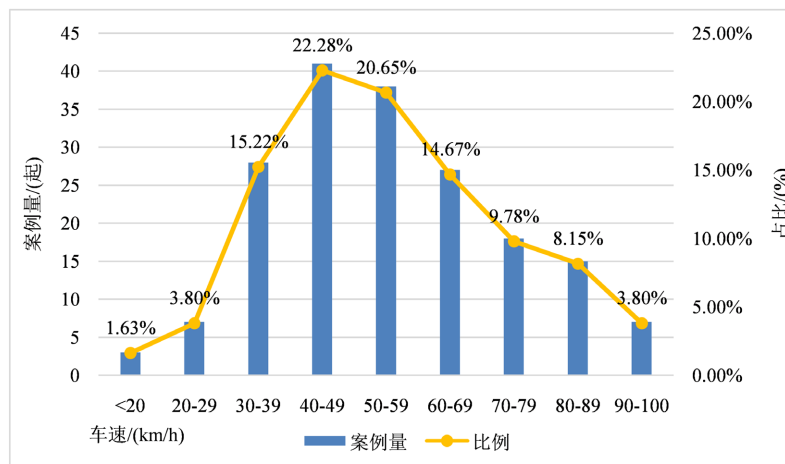


Figure 7. Distribution of vehicle collision velocity
图7. 汽车碰撞速度分布

行人在碰撞前的运动状态分为 4 类，分别是静止、缓慢步行、快速步行和跑步，统计结果如图 8 可以发现，行人在碰撞前的运动状态以缓慢步行居多，占 50.00%，其次是快速步行，占 25.54%。

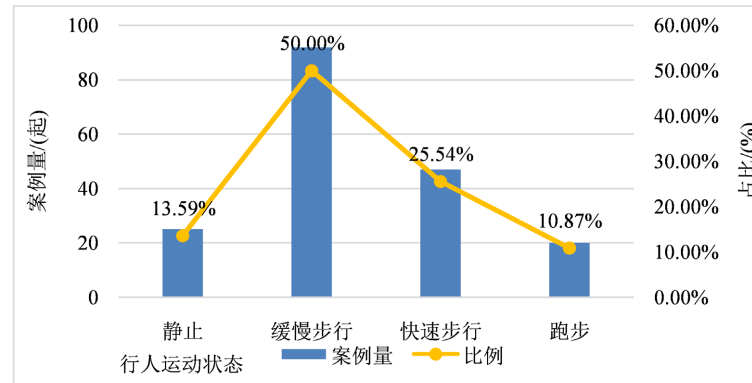


Figure 8. Distribution of pedestrian movement
图 8. 行人运动状态分布

2.4. 行人损伤评价指标

交通损伤评估中最常用的评估方法是简明损伤分级标准 AIS (Abbreviated Injury Scale) [9]，AIS 根据对生命的危害程度将损伤排序，从 AIS0 到 AIS6 共分为 7 个不同的等级，人员伤害等级与人体损伤程度、死亡率的关系如表 2 所示。

Table 2. Classification of AIS grades
表 2. AIS 损伤等级

AIS 等级	损伤程度	五类	死亡率
0	未受伤	未受伤	0
1	轻度	轻中度伤	0
2	中度		0.1~0.4
3	较重	重伤	0.8~2.1
4	重度		7.9~10.6
5	危重	死亡	53.1~58.4
6	极度：目前无法救治		100
9	未知	未知	未知

1971 年 Versace 提出 HIC 值可用于描述人员头部损伤程度被广泛接受并用于行人法规[10]，其计算公式如下：

$$HIC = \left[(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} \right]_{\max} \quad (1)$$

王岩利用北京地区的人车事故数据建立的碰撞车速与行人死亡风险预测模型[11]，其公式为：

$$p(v) = \frac{1}{1 + \exp(5.442 - 0.102v)} \quad (2)$$

3. 模型建立及验证

利用 PreScan 以及 Simulink 软件设计面向行人的 AEB 系统测试仿真模型的过程如图 9。

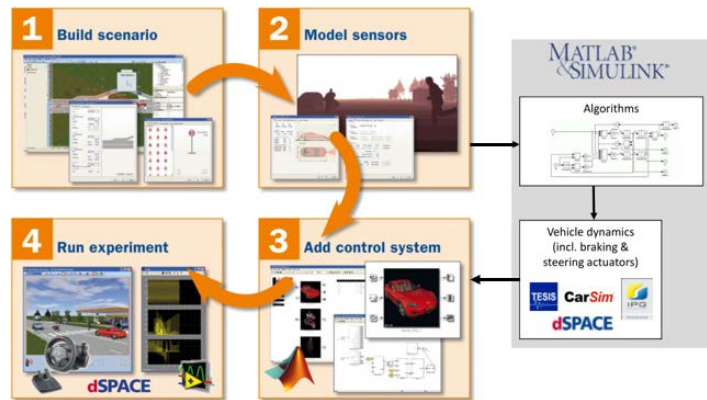


Figure 9. Diagram of PreScan/Simulink joint work
图 9. PreScan/Simulink 联合工作的示意图

3.1. 预碰撞模型搭建

在 PreScan 的图形用户界面(Graph User Interface, GUI)构建事故环境, 单车道的道路宽度为 3.5 m, 事故场景构建效果如图 10 所示。



Figure 10. Pre-collision scenario construction
图 10. 预碰撞场景搭建

选择 PreScan 软件中提供的 2D 车辆动力学模块, 以满足试验需求。本文选择汽车模型为 Toyota Prius Sedan, 车辆基本参数如表 3 所示。在 PreScan 中选择行人模型为亚洲男性, 行人的速度、运动方向等均可进行修改。以汽车前部传感器为原点建立坐标系, 以汽车纵向为 X 轴, 横向为 Y 轴。AEB 探测模型如图 11 所示, 图中 Y_p 为行人相对于传感器安装位置的横向距离(m), X_p 为行人相对于传感器安装位置的纵向距离(m), θ 为传感器视场角(rad), W 为触发宽度(m), 碰撞点为 M 点。

Table 3. Basic vehicle parameters

表 3. 车辆基本参数

参数/(单位)	数值
长*宽*高/(m)	4.410*1.545*1.630
总质量/(kg)	1650
质心高度/(m)	0.58

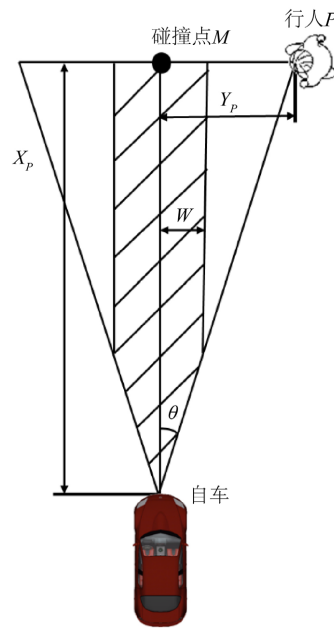


Figure 11. Pedestrian detection model
图 11. 行人探测模型

3.2. 传感器参数选择

图 12 为 184 起正面碰撞的 45 起重伤事故和 139 起死亡事故碰撞前 1 s 时行人相对汽车的位置分布图，图中蓝色圆圈代表的是事故前传感器探测到的重伤案例，红色圆圈代表的是事故前传感器探测到的死亡案例。从探测结果可以看出，把 AEB 探测角 θ 分别设置为 30° 、 40° 以及 50° 时，事故可被探测到的比例为 91.4%、96.7% 以及 100%。根据图中 Y_p 和 X_p 的参数情况，将触发宽度设置为 10 m，将探测距离 R 设置为 50 m。

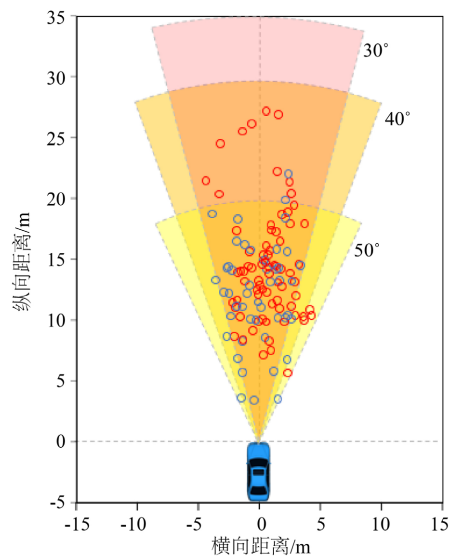


Figure 12. Distribution of relative positions between car and pedestrians 1 s before serious injury/death accidents collision
图 12. 重伤/死亡事故碰撞前 1s 汽车与行人相对位置分布

3.3. AEB 纵向控制算法设计

目前, AEB 系统常用的安全算法主要有基于碰撞安全距离(Safety Distance, AS)算法和碰撞安全距离(Time to Collision, TTC)算法。相较于 AS 算法, TTC 算法公式简单, 仅需灵活调整不同的 TTC 阈值就能适应不同工况[12]。TTC 算法的计算公式为:

$$TTC = \frac{D}{v_{rel}} \quad (3)$$

$$d_{br} = TTC \times v_{rel} + d_0 \quad (4)$$

式中, D 为自车与前方障碍物的相对距离(m), v_{rel} 为自车与前方障碍物的相对速度(m/s), d_{br} 为自车制动危险距离(m), d_0 为安全停车距离(m)。本文采用 TTC 模型, 当车辆的 TTC 小于设定的阈值时, AEB 便以一恒定的减速度制动, 即一级全力制动。

TTC 阈值过大会造成车辆与行人相对距离过大, 影响驾驶体验; 取值过小可能无法起规避作用。结合目前市场上大多数 AEB 系统的 TTC 设置, TTC 取值 1.0 s。因此, 在自车 TIS 传感器探测到行人的情况下, 当 $0 \text{ s} < T_{tc} \leq 1.0 \text{ s}$ 时, 系统以制动减速度为 0.8 g 全力制动触发, 制动到车辆停止状态, T_{tc} 为阈值碰撞时间。

3.4. AEB 控制模型验证

为验证上述搭建的车辆模型的有效性, 如图 13 为 PreScan GUI 界面搭建一个长度为 100 m 的双向两车道的路段场景, 汽车采用 Toyota Prius Sedan 车型, 行人采用男性行人; 汽车以初始速度 60 km/h 行驶, 在车辆前方 60 m 处放置静止的行人。设置传感器探测距离为 50 m, 探测角为 50° 。触发 AEB 的 TTC_{max} 初始值设置为 1.0 s, 触发宽度为 10 m, 最大制动减速度为 0.8 g。观察仿真碰撞情况以及仿真结果输出如图 14 所示, 仿真持续了约 5 s, 碰撞速度为 33 km/h, 制动开始时刻在 4.1 s, 制动减速度为 7.8 m/s^2 。

当达到 TTC_{max} 时, 公式为:

$$v_i^2 - v_b^2 = 2 \times a \times TTC_{max} \times v_i \quad (3-3)$$

式中: v_i 为自车的初始速度(km/h), v_b 为自车与行人碰撞时的理论速度(km/h)。统一单位量纲后, 根据公式计算得出自车与行人碰撞时的理论速度为 32.2 km/h, 实际值与理论值误差为 2.4%, 可以认为该模型可靠。

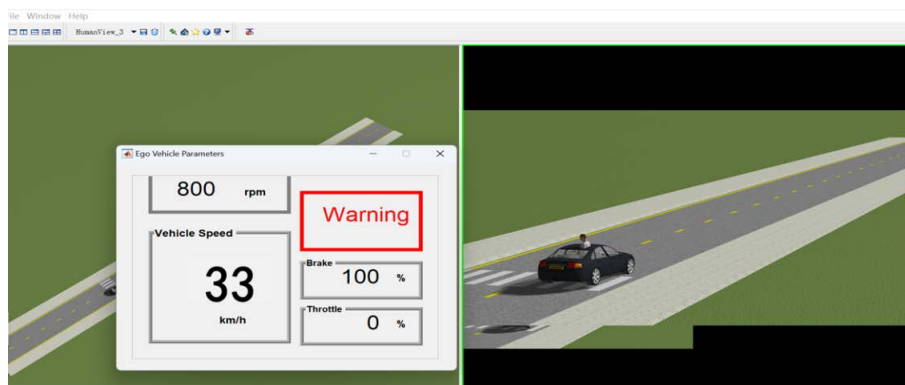


Figure 13. Scene construction
图 13. 场景搭建

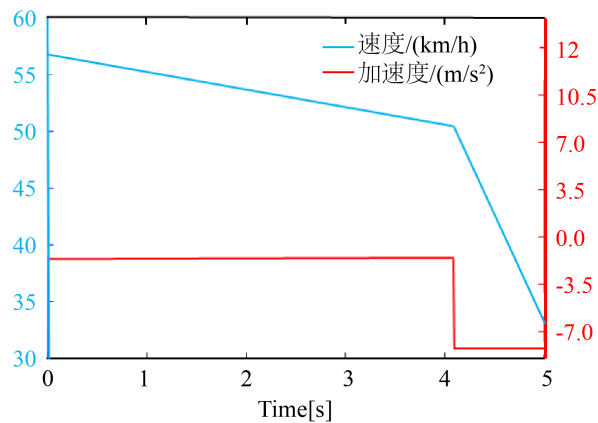


Figure 14. Simulation output results
图 14. 仿真输出结果

4. 仿真结果分析

结合 C-NCAP 行人主动安全测试场景 CPFA、CPNA、CPLA 的三种分类，同时基于 184 起汽车与行人正面碰撞的事故案例的 UTYP 规则分类，设置如表 4 的仿真工况。

Table 4. Simulated conditions
表 4. 仿真工况

	仿真工况	案例量/(起)	占比/(%)	UTYP 分类
CPFA	汽车直行碰撞左穿行人	82	45%	
CPNA	汽车直行碰撞右穿行人	93	51%	
CPLA	汽车直行碰撞同向行人	9	4%	

由图 15 和公式(3)计算可知，184 起事故车辆未加 AEB 时，车辆的平均碰撞车速为 59.6 km/h，行人的死亡风险为 65.4%；在车辆配备 AEB 系统条件下，38 起(21%)碰撞事故得到避免，其余 146 起(79%)事故车辆的平均碰撞车速降低至 32.4 km/h，此时行人的死亡风险达到 10.6%。结果表明，AEB 介入后，汽车的平均碰撞速度由 59.6 km/h 下降到 32.4 km/h，下降比率达到 45.6%，行人的死亡风险降低了 54.8%；在超过 80%的事故中，汽车的碰撞速度从小于 70 km/h 降低为小于 40 km/h。

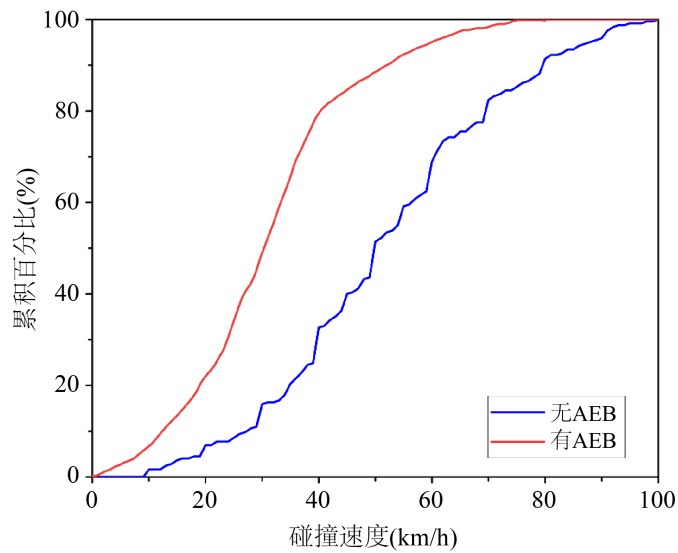


Figure 15. Cumulative percent of car collision speed with/without AEB

图 15. 有/无 AEB 的汽车碰撞速度累积百分比

如图 16 所示，在原始事故中，有 5% 的事故行人头部损伤 HIC 值小于 1000；在 AEB 介入后，通过对比行人头部损伤 HIC 值发现，将 AIS3+ 损伤降低为 AIS2- 损伤的事故率由 5% 提高至 70%。

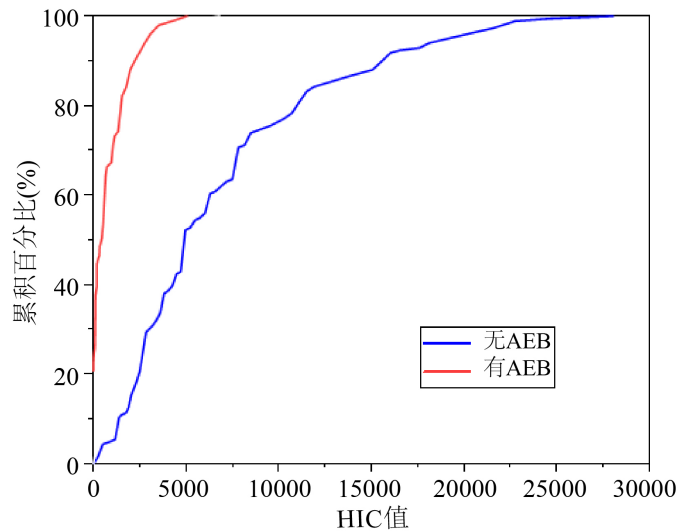


Figure 16. Cumulative percentage of HIC for pedestrian head injuries

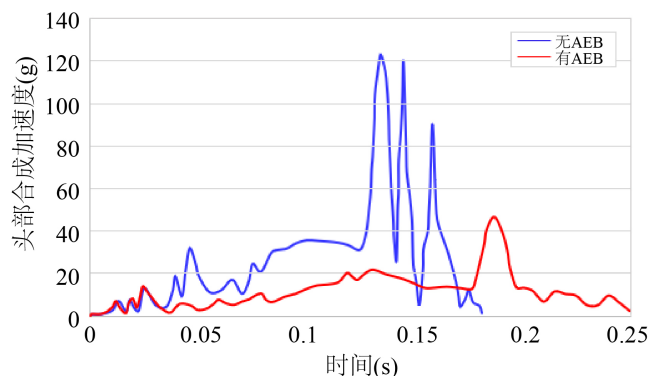
图 16. 行人头部损伤的 HIC 累积百分比

根据道路规定的车辆限速情况，0~60 km/h 是城市道路的限速范围，其中行人违反交通规则横过马路是事故的主要原因；60~100 km/h 是城市道路的超速范围。如表 5 所示，车辆配备 AEB 系统后，限速工况中行人的伤害碰撞率降低 31%，行人重伤/死亡的伤害碰撞率降低 81%；超速工况中行人的伤害碰撞率未降低，行人重伤/死亡的伤害碰撞率降低 46%；所有重伤/死亡的行人碰撞和伤害碰撞的减少显著。

在 40 km/h 的碰撞速度下，测试车辆有/无配置 AEB 系统的作用下，行人头部合成加速度的变化趋势。由图 17 可以观察到，AEB 系统延迟了峰值时间，并降低了加速度峰值。

Table 5. Distribution of pedestrian injuries in vehicles equipped with AEB**表 5.** 车辆配备 AEB 后行人的伤害分布

车辆系统	案例量/(起)	行人受伤撞车事故/(起)		行人重伤/死亡事故/(起)
		限速范围	案例量/(起)	
AEB	123	0~60 km/h	85	16
	61	60~100 km/h	61	33
总数	184	/	146	49

**Figure 17.** Head acceleration at a collision speed of 40 km/h**图 17.** 40 km/h 碰撞速度下头部合成加速度

5. 结论与展望

本文基于 184 起原始碰撞事故案例进行特征分析, 结合 3 类正面碰撞的测试场景, 通过联合仿真, 对 AEB 介入后的行人损伤进行研究, 得出如下结论:

- 1) 在 AEB 介入后, 汽车的平均碰撞速度由 59.6 km/h 下降到 32.4 km/h, 下降比率达到 45.6%, 行人的死亡风险降低了 54.8%;
- 2) 通过对比行人头部损伤 HIC 值发现, 行人头部损伤 HIC 值小于 1000, 即 AIS3+ 损伤降低为 AIS2- 损伤的事故率由 5% 提高至 70%;
- 3) 车辆配备 AEB 系统后, 在 0~60 km/h 中行人的伤害碰撞率降低 31%, 行人重伤/死亡的伤害碰撞率降低 81%; 在 60~100 km/h 中行人的伤害碰撞率未降低, 行人重伤/死亡的伤害碰撞率降低 46%。

本文建立的 3 类测试场景无法充分展现中国行人危险场景, 如其他复杂的工况(转弯等)、极端天气, 还需要后续花时间去进一步研究。在后续研究中将对转向车辆与行人碰撞进行研究, 并考虑障碍物对传感器探测范围和控制策略的影响。

基金项目

国家自然科学基金面上项目资助(81571851); 产品安全召回技术支撑——基于车辆事故深度调查的车辆缺陷分析判定技术应用研究(上海松江)项目(ZL-ZHGL-2020015); 上海市司法鉴定专业技术服务平台资助项目(19DZ2292700)。

参考文献

- [1] 谷旭佳. 交叉口人车事故风险及伤害程度统计分析方法[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.

-
- [2] World Health Organization (2018) Global Status Report on Road Safety 2018: Summary. World Health Organization. <https://fctc.who.int/publications/i/item/9789241565684>
- [3] McAuley, J., Cregan, M. and Risbey, T. (2015) The Impact of Airbags, Electronic Stability Control and Autonomous Emergency Braking on Australian Light Vehicle Fatalities: Methodology and Findings. 2015 *Australasian Road Safety Conference*, Gold Coast, 14-16 October 2015. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-impact-of-airbags%2C-electronic-stability-control-Mcauley-Cregan/8b89d340c1831476a119a885a790ae6a935428e0>
- [4] Edwards, M., Nathanson, A. and Wisch, M. (2014) Estimate of Potential Benefit for Europe of Fitting Autonomous Emergency Braking (AEB) Systems for Pedestrian Protection to Passenger Cars. *Traffic Injury Prevention*, **15**, S173-S182. <https://doi.org/10.1080/15389588.2014.931579>
- [5] Ohlin, M., Strandroth, J. and Tingvall, C. (2017) The Combined Effect of Vehicle Frontal Design, Speed Reduction, Autonomous Emergency Braking and Helmet Use in Reducing Real Life Bicycle Injuries. *Safety Science*, **92**, 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.05.007>
- [6] 刘福聚, 王鹏, 陈吉光. 基于 CIDAS 乘用车行人事故的 AEB 系统参数研究[J]. 中国汽车, 2018(9): 26-29.
- [7] 曹毅. 基于 NAIS 的人车事故场景及 AEB 优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2019.
- [8] Zou, T., Liu, Z., Wang, D., *et al.* (2022) Assessing the Effect of Pedestrian Deceleration on Pedestrian Autonomous Emergency Braking Systems. *International Journal of Crashworthiness*, **27**, 1368-1373. <https://doi.org/10.1080/13588265.2021.1927611>
- [9] 陈勇. 行人和自行车交通事故中头部动力学响应和损伤机理研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [10] Versace, J. (1971) A Review of Severity of Index. *15th STAPP Car Crash Conference*, USA, November 17-19 1971. <https://doi.org/10.4271/710881>
- [11] 王岩. 基于人车事故数据的行人碰撞后运动及损伤规律研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2017.
- [12] 侯彦巧. 基于典型场景的自动紧急制动系统对骑车人保护效果研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2020.