

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.08.002

王丹琦, 刘家豪, 石亮亮, 等. 考虑行人安全的智能车辆制动避撞策略及优化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(8): 13-25.

考虑行人安全的智能车辆制动避撞策略及优化

王丹琦^{1,2}, 刘家豪^{1,2}, 石亮亮³, 刘念松³, 张洪浩^{4,5}

1. 长沙理工大学 机械与运载工程学院, 长沙 410114;
2. 工程车辆安全性设计与可靠性技术湖南省重点实验室, 长沙 410114;
3. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122;
4. 山东大学 机械工程学院, 济南 250061;
5. 山东大学 金属成形高端装备与先进技术全国重点实验室, 济南 250061

摘要: 车辆主动避撞技术通过改变自车运动状态来避免或减轻碰撞危险, 可有效降低突发行人干扰事故的损伤风险, 成为主动安全领域的研究热点。以降低行人头部损伤为目标, 提出一种以余弦曲线为基础的智能车辆制动避撞控制策略及优化方法, 通过 ISIGHT 和 MADYMO 联合仿真与遗传算法构建优化框架, 优化智能车辆余弦制动曲线频率、振幅和相位参数。以某乘用车与行人碰撞事故为例, 对比分析车辆完全制动、初始控制制动、优化后控制制动 3 种避撞策略对行人头部 HIC 值、头部与车辆接触加速度峰值、头部与地面接触加速度峰值 3 个指标的影响规律。研究发现, 当行人位于车辆前方中间和左侧时, 改变初始控制制动策略的振幅和频率对头部与地面接触加速度峰值和 HIC 产生积极影响。构建的车辆紧急制动策略优化方法相较于初始控制制动方案, 行人头部 HIC 值降低 8.54%; 相较于车辆完全制动方案, 行人头部 HIC 值降低 32.65%, 有效实现行人头部碰撞损伤防护。所提出的方法可为 L2 级及以上车辆辅助驾驶功能设计和以行人保护为目标的车辆主动控制策略开发提供理论和工程参考。

关键词: 车辆紧急制动; 行人头部损伤; 制动策略优化

中图分类号: U467.1+4

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2025)08-0013-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Collision Avoidance Strategies of Braking and Optimization of Intelligent Vehicle Considering Pedestrian Safety

WANG Danqi^{1,2}, LIU Jiahao^{1,2}, SHI Liangliang³,
LIU Niansong³, ZHANG Honghao^{4,5}

收稿日期: 2025-05-02

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目(2025JJ50257); 湖南省教育厅优秀青年项目(24B0302)。

作者简介: 王丹琦, 博士, 讲师, 主要从事汽车智能安全研究。

1. School of Mechanical and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Province Key Laboratory of Safety Design and Reliability Technology for Engineering Vehicle, Changsha 410114, China;
3. China Automotive Engineering Research Institute Co. Ltd., Chongqing 401122, China;
4. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
5. State Key Laboratory of Advanced Equipment and Technology for Metal Forming, Shandong University, Jinan 250061, China

Abstract: Vehicle active collision avoidance technology can effectively reduce the risk of injury in sudden pedestrian interference accidents by changing the vehicle's motion state, and has become a research hotspot in the field of active safety. This paper aims to reduce pedestrian head injury and proposes an intelligent vehicle compound braking collision avoidance control strategy and optimization method based on cosine curves. An optimization framework was constructed through the joint simulation of ISIGHT and MADYMO and genetic algorithm to optimize the frequency, amplitude and phase parameters of the intelligent vehicle's cosine braking curve. Taking a passenger car-pedestrian collision accident as an example, the influence laws of three collision avoidance strategies, namely vehicle compound complete braking, initial compound cosine braking and optimized compound control braking, on three indicators, namely pedestrian head *HIC* value, peak acceleration of head contact with vehicle and ground, were compared and analyzed. The research finds that when the pedestrian is located in the middle and left front of the vehicle, changing the amplitude and frequency of the compound control braking strategy will have a positive impact on the peak acceleration of head contact with the ground and *HIC*. Compared the vehicle emergency braking strategy optimization method constructed in this paper with the initial cosine braking scheme and the vehicle complete braking scheme, the pedestrian head *HIC* value was reduced by 8.54% and 32.65%, respectively, effectively achieving pedestrian head collision injury protection. The method proposed in this paper can provide theoretical and engineering references for the design of L2-level and above vehicle auxiliary driving functions, and the development of vehicle active control strategies aimed at pedestrian protection.

Key words: emergency braking of vehicles; pedestrian head injury; braking strategy optimization

根据《中国统计年鉴 2024》及公安部数据,中国机动车保有量达 4.53 亿辆,较 2023 年增长约 16.2%,机动车驾驶员数量突破 5.42 亿人,新能源汽车保有量同比激增 51.5%^[1]。《2024 年国民经济和社会发展统计公报》显示,2024 年我国交通事故死亡人数为 61 703 人,其中行人死亡占比超过 20%,而头部损伤是导致行人死亡的首要原因^[2-5]。因此,面向我国复杂的人车混行交通场景,降低行人在事故中的损伤风险,尤其是降低行人头部损伤风险对提升我国道路交通安全具有重要意义。

当前 L2 级及以上辅助驾驶在乘用车新车渗透率已超过 70%,我国典型城市道路交通在中长期将处于传统汽车、智能驾驶汽车与行人、两轮车等弱势交通使用者混行状态,车辆辅助驾驶系统面临更复杂的交

通场景安全挑战,而现有车辆主动安全技术虽可降低事故发生概率,但还无法杜绝事故发生,尤其针对出行意图高度随机、缺乏有效防护装置的行人与车辆碰撞事故问题^[6-7]。当前研究发现,汽车自动紧急制动系统(AEB)不仅可以在一定程度上缓解车辆与行人的交通冲突,还能在事故不可避免的高风险场景下有效降低行人头部撞击损伤风险^[8-9]。文献[10]研究发现行人损伤模式与碰撞速度呈现显著相关性:在低速碰撞(≤ 30 km/h)情况下,行人与地面的二次碰撞往往造成比车辆直接撞击更为严重的伤害;而当碰撞速度提升至 40 km/h 及以上时,行人头部损伤则主要源于与车辆的首次接触冲击。文献[11]基于行人运动学响应和头部损伤特征,对比分析完全制动与控制制动策略下不同参数对行人头部一次/二次损伤的影响,验证了制动控制策略对降低行人头部损伤风险的积极作用。文献[12]提出了一种基于转向和制动结合的自适应模型预测控制避碰策略。文献[13]开发了集成制动与转向的紧急避碰系统,通过计算最小避碰距离并优化干预时机来降低碰撞风险。

当前国内外学者针对车辆单一制动、制动与转向协同优化降低事故风险方面进行深入研究,在制动、转向控制参数对行人损伤影响分析方面也开展了相关研究,但针对以行人损伤为目标的车辆控制策略优化问题还需进一步探索,主要表现在:一方面车辆制动过程对行人损伤影响机理尚不明确,另一方面行人损伤结果高度随机,与碰撞环境参数难以形成趋势明显的量化关系,导致车辆控制策略优化困难。

为此,本研究基于中国交通事故深度调查(CIDAS)数据库中的轿车—行人碰撞事故案例,构建基于多体动力学仿真软件 MADYMO 与优化设计平台 ISIGHT 的联合仿真环境,实现事故场景高效重建;引入带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对重建模型进行参数优化,研究车辆控制制动策略对头部与车辆接触加速度峰值 ACC_1 、头部与地面接触加速度峰值 ACC_2 和 HIC 值的影响机制,揭示关键影响因子的变化规律及其相关性;结合自动化仿真与智能优化技术,提出以降低行人头部损伤为目标的车辆制动控制策略,以为车辆主动安全系统制动曲线优化提供理论依据与工程实现路径,对提升复杂交通场景下行人保护性能具有重要参考价值。

1 优化框架构建

车辆在运行过程中遇到突发行人干扰,车辆采用通过优化的制动系统作为避险方式。假设车辆与行人碰撞前后位置如图 1 所示, V_1 为碰撞时车辆速度, V_2 为碰撞后车辆速度。通常车辆在紧急制动过程中会采用完全制动方案,通过研究发现分阶段制动对降低行人头部损伤有较好收益。为了便于参数优化,本研究以余弦曲线为基础,通过更改其相位、周期和幅值实现制动曲线控制。车辆制动控制过程如图 1 所示,控制制动曲线如图中红色曲线所示,计算公式如下所示:

$$y = A \cos(a(x + t)) - b \quad (1)$$

式中: A 为振幅大小; a 为周期系数; t 为初始相位; b 为上下平移距离。

行人在碰撞过程中的头部损伤评价指标采用 HIC 值。 HIC 值通过计算头部在任意时间间隔(t_1 至 t_2)内平均加速度来量化损伤风险^[14],其计算公式如下所示^[15-16]:

$$HIC = \left((t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \alpha(t) dt \right)^{2.5} \right)_{\max} \quad (2)$$

式中: $\alpha(t)$ 表示头部质心的合成加速度,单位为 g, $1 \text{ g} = 9.8 \text{ m/s}^2$; $t_1 - t_2$ 表示 HIC 取最大值时的时间间

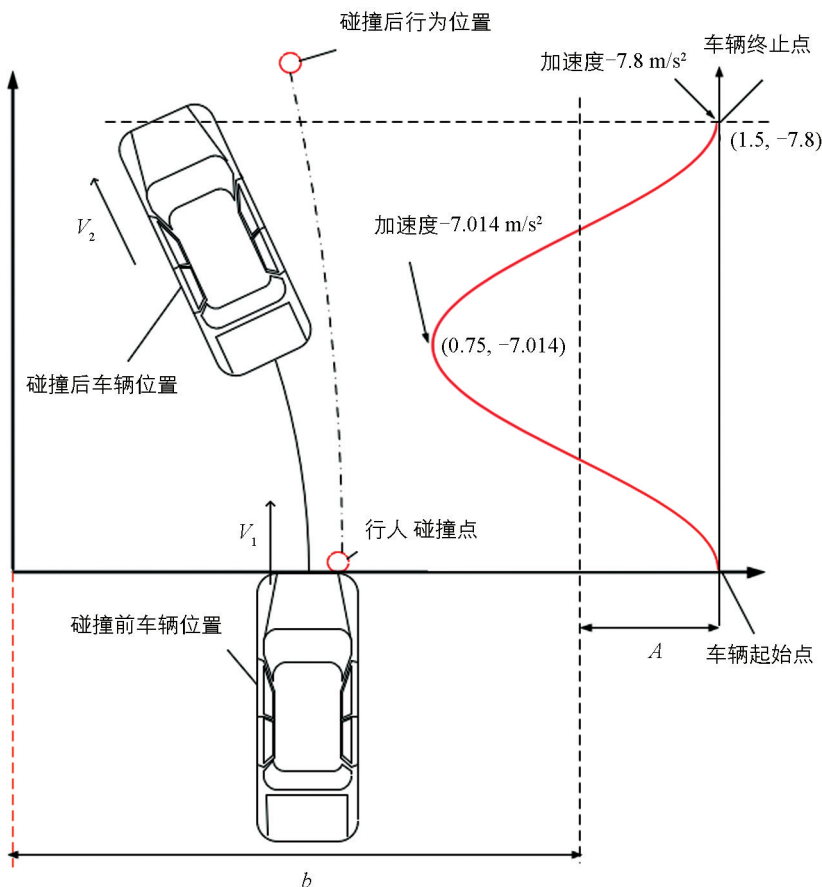


图 1 车辆制动控制过程示意图

隔。本研究采取 HIC_{36} 头部损伤准则, HIC 取最大值时的时间间隔为 36 ms。

本研究基于 ISIGHT 5.9 构建优化框架, 其中包括 MADYMO 主程序模块、输入与输出参数计算器模块以及优化算法模块^[17], 优化框架图如图 2 所示。

首先, 本研究以制动曲线控制参数为设计变量, 以行人头部 HIC 值为优化目标, 借助 MADYMO 软件对事故场景进行重建, 构建碰撞场景仿真分析模型, 将设计变量作为仿真分析的输入, 将仿真计算 HIC 值作为优化目标。接着, 利用 ISIGHT 构建自动优化仿真平台, 调用 MADYMO 构建的事故重建模型进行自动计算, 并读取优化结果和目标值, 利用 NSGA-II 算法分析结果和目标值并进行迭代优化, 输出优化平台计算的头部损伤参数最小值和对应的制动曲线控制参数, 即为最优结果。最后, 将最优结果重新代入仿真模型进行计算, 获得除优化目标外所有行人损伤值, 以及行人在碰撞过程中的运动响应和三维动画。本研究的优化问题描述如下:

$$\min F(X) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)\} \quad (3)$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T \quad (4)$$

其中: $F(X)$ 为目标函数; $f_i(x)$ 为 N 维目标集的第 i 个子目标函数; x_j 为 M 维设计变量的第 j 维列向量。

优化过程将多个子目标函数按照其权重系数与尺度参数进行线性加权组合, 构建出用于指导迭代优化方向的总目标函数。给定一组子目标函数, 其对应的权重系数为 w_n , 缩放因子为 s_n , 本研究的权重系数和缩放因子均设为 1, 最优化算法中 Objective function 值为输出变量的总和, 该聚合函数可以在优化过程中

动态调整各子目标的贡献, 确保算法朝着全局最优解方向高效收敛。

2 事故案例分析

基于 CIDAS 数据库, 以某轿车与行人碰撞事故为例进行模拟分析, 案例特征如下: 行人突然横穿道路, 被车辆前部右侧撞击后死亡; 事故车辆(雪佛兰 CRUZE 型轿车)主要损伤集中于前部发动机罩区域, 具体表现为罩盖中部偏右位置呈现显著凹陷变形, 车辆其余结构部件未明显形变; 由于事故现场缺乏监控视频资料, 无法直接通过影像数据验证所构建碰撞模型的有效性。为此, 本研究采用事故现场底图作为基础数据, 运用 PC-Crash 12.0 仿真软件平台进行事故场景重建, 旨在精确获取涉事车辆的动力学参数及行人碰撞过程中的运动学特征。基于 PC-Crash 12.0 的仿真重建结果, 提取人车碰撞动力学关键参数, 并借助 MADYMO 构建精细化人车碰撞模型。最终, 通过对比 MADYMO 仿真结果与 PC-Crash 重建场景的动力学响应, 验证所建模型的可靠性与准确性。还原场景和事故案例底图如图 3 所示。

鉴于事故案例中行人身高为 174 cm, 体重为 75 kg, 与 MADYMO 软件库中第 50 百分位男性假人模型(Hybrid III 50th)具有高度相似性, 为保持仿真精度并提高计算效率, 本研究直接采用该标准假人模型进行碰撞仿真分析, 未进行额外的模型缩放处理。

本研究中轿车主要外形参数如表 1 所示, 采用 MADYMO 对事故进行重建。本研究建立了高精度车辆三维模型, 重点确保车头部位的几何特征与原事故车型保持高度一致。通过 PC-Crash 事故还原和 MADYMO 仿真的对比, 验证重建模型的有效性, 如表 2 所示。

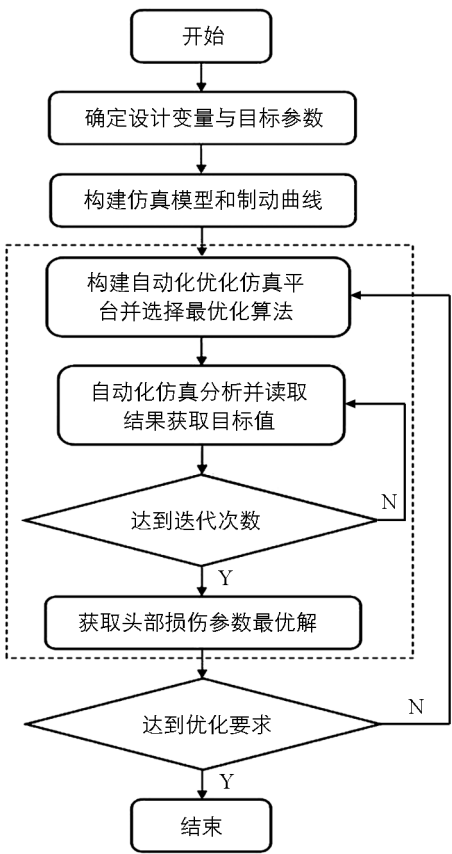


图 2 优化框架图

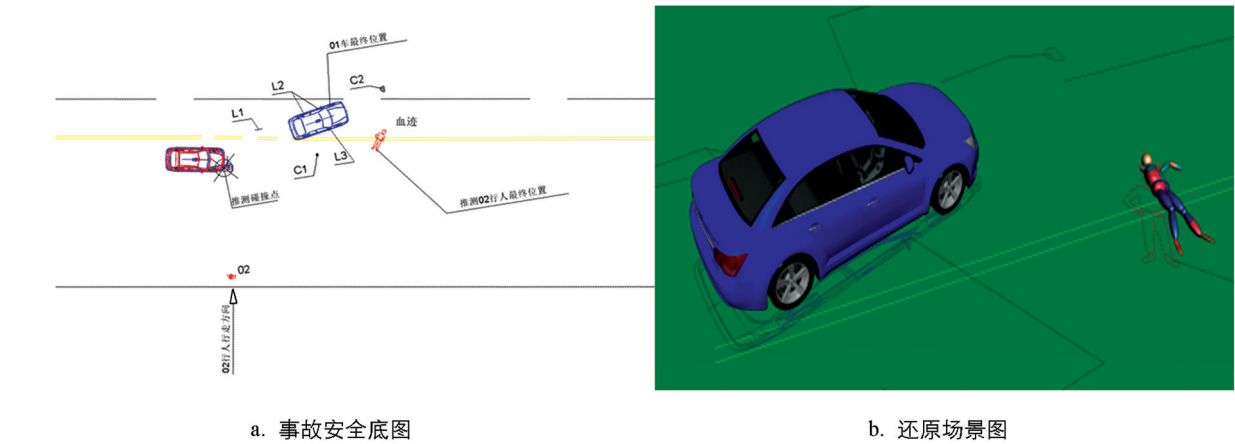
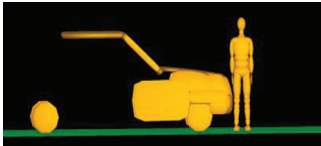
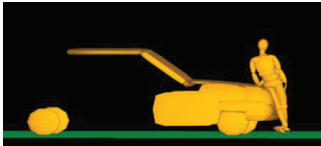
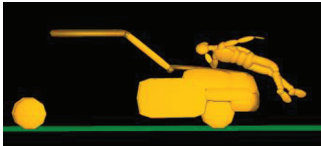
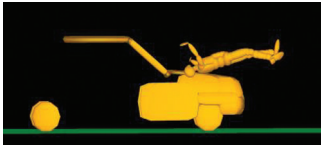
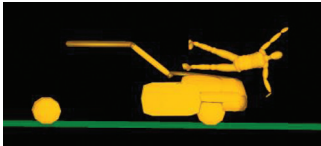
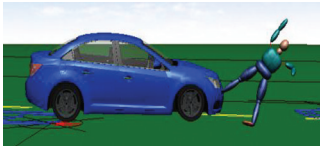
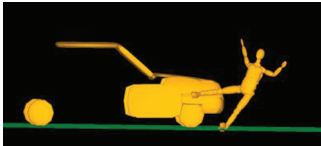
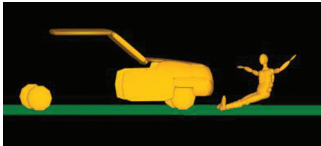


图 3 还原场景和案例底图

表 1 雪佛兰 CRUZE 型轿车主要外形参数

参数	数值
长×宽×高/mm ³	4 643×1 797×1 477
轴距/mm	2 685
前/后轮距/mm	1 544/1 565
保险杠中心离地高度/mm	100
发动机罩前缘离地高度/mm	720
发动机罩长度/mm	900
发动机罩倾斜角度/°	10
挡风玻璃倾斜角度/°	28
整备质量/kg	1 320

表 2 轿车模型重建对比

仿真时间 T/ms	PC-Crash 事故还原	MADYMO 仿真
0		
30		
90		
150		
540		
705		
870		

仿真结果表明:事故发生时,行人初始位于车辆右前方,车头右前侧首先与行人下肢发生碰撞接触。碰撞力导致行人上半身绕接触点旋转,头部与发动机罩中右部区域发生二次碰撞,造成头部损伤。随后行人被抛向前方,在空中完成 360°旋转后,以下肢着地的方式与地面发生最终碰撞。事故车辆的损伤特征显示,发动机罩中右部出现明显凹陷变形,与仿真中行人头部碰撞位置完全吻合,且车身其他部位未见明显损伤,进一步验证了仿真结果的可靠性。

3 结果与分析

3.1 制动策略分析

当车辆在同一事故中采用不同控制策略时,车辆与行人的相对运动轨迹发生变化,改变了行人与车辆的接触位置以及与车辆接触后的抛射轨迹,进而影响行人与车辆接触造成的损伤。而行人落地姿态存在不可预测性,可能引发头部与地面的剧烈二次碰撞,进一步加剧损伤风险。这种损伤机制的差异性突显了行人保护系统中空间定位因素的重要性。

课题组在前期研究^[18]中对对比分析了行人与车头左前方、正前方和右前方碰撞时,智能汽车集成自动紧急转向(AES)系统对行人头部损伤的影响,发现在车辆控制过程中增加合适的偏转角度可以显著降低行人头部受伤风险。因此本研究在现有研究基础上将碰撞时的车速设为 40 km/h,车辆带有初始偏转角度,设计两种制动方案:方案 1,车辆采用完全制动,制动减速度值恒为 -7.8 m/s^2 ;方案 2,车辆采用预设余弦曲线作为控制制动曲线,余弦制动曲线如公式(5)所示。在此基础上开展仿真分析,并对仿真实验结果进行数据分析处理,获取 Hybrid III 第 50 百分位男性假人模型在不同位置下的头部损伤 HIC 值以及 ACC_1 、 ACC_2 ,如表 3 所示。

$$y=0.393\cos\left(\frac{4}{3}\pi(x+0.75)\right)-7.407$$

(5)

表 3 车速为 40 km/h 时两种制动策略行人损伤数据对比

行人位置	方案 1			方案 2		
	ACC_1	ACC_2	HIC	ACC_1	ACC_2	HIC
右侧	359.660	358.566	89.039	285.096	752.011	89.044
中间	2 108.350	2 037.780	1 373.740	655.719	1 435.230	1 011.630
左侧	596.822	894.257	362.736	593.571	774.285	275.261

根据车速为 40 km/h 时两种制动策略行人损伤数据对比仿真结果可知,当行人位于车头前方中间位置时,得到的 HIC 值、 ACC_1 和 ACC_2 结果普遍高于其他两种位置情况,制动策略对比发现控制制动策略的损伤结果低于完全制动策略,特别是 HIC 值大幅降低。当行人位于车头前方右侧时,损伤结果整体低于其他两种位置,主要由于行人未在车辆转向方向一侧,使得行人被撞倒后头部未与发动机罩发生直接正面接触,而是头部和车头右侧边轻微擦碰,虽然控制制动策略的 ACC_1 略低于完全制动策略,但控制制动策略的 ACC_2 更高。当行人位于车头前方左侧时,控制制动策略的 ACC_2 和 HIC 值相对于完全制动策略有小幅度改善,但是 ACC_1 基本上没有改变。

对比分析不同车辆制动策略对行人碰撞动力学的影响。在 40 km/h 车速下实施完全制动策略时,车辆横向加速度的改变使行人运动学响应产生显著变化。碰撞过程中行人呈现逆时针旋转($\theta<270^\circ$),并通过下肢—上肢—头部的序列式撞击实现能量耗散。该模式虽将头部首次接触延迟至碰撞序列末端,但地面反作用力引发的二次抛掷运动仍会导致 HIC 值上升(图 4a)。采用控制制动策略后,系统通过实时调节制动力

矩实现了碰撞能量梯级耗散。在此工况下,行人保持逆时针旋转($\theta < 270^\circ$)的同时,其碰撞后运动轨迹呈现渐进式地面接触特征,减少了对地面的冲击力且有效抑制了二次弹起现象,进一步降低对行人头部的损伤(图 4b)。在制动系统条件下,可有效调控行人与地面接触的时空序列,这种基于能量耗散路径优化的损伤缓释机制,为智能紧急制动系统的控制算法设计提供了理论依据。优化控制策略中采用的余弦函数制动曲线,因其渐进式力矩变化特性,在行人与车辆非正交碰撞中,针对中等车速范围(25~50 km/h)的交叉口左转车辆与行人冲突事故,该系统最为适用,其平滑的减速度梯度,能有效协调转向与制动的时空耦合效应,既可实现碰撞能量沿行人运动切向的最优耗散,又能抑制因车辆俯仰导致的二次碰撞风险。

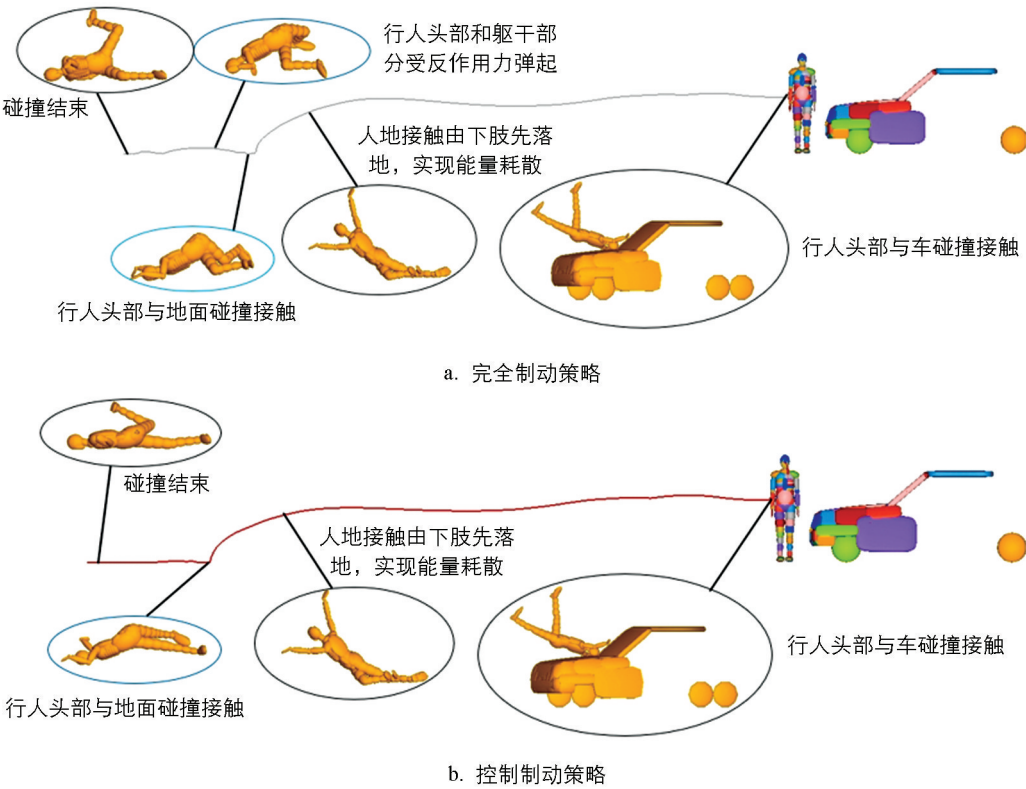


图 4 两种制动策略碰撞时行人与地面接触过程

控制制动策略对减轻车头前方右侧行人的损伤未达预期效果,但当行人在车头前方左侧和中间位置时,控制制动策略都能帮助行人降低头部损伤,特别是在行人位于中间时 HIC 值降低了 26.36%,行人位于左侧时 HIC 值降低了 24.12%。

3.2 控制制动曲线相关性分析

本节从控制制动曲线的振动频率、振动幅度和相位出发,选取样本进行相关性分析。分析某一变量时,其余两个变量均保持预设的余弦函数曲线不变,研究曲线变化与行人头部损伤的关联。行人损伤数据如表 4—表 6 所示。

表 4 不同振动频率下的行人损伤数据

行人位置	T=1.5			T=0.75			T=0.5		
	ACC ₁	ACC ₂	HIC	ACC ₁	ACC ₂	HIC	ACC ₁	ACC ₂	HIC
右侧	285.096	752.011	89.044	285.946	269.819	89.304	286.006	206.433	83.569
中间	655.719	1 435.230	1 011.630	637.145	1 858.310	2 169.000	648.037	1 818.810	1 915.810
左侧	593.571	774.285	275.261	597.739	740.571	202.339	597.991	905.158	451.139

表 5 不同振动幅度下的行人损伤数据

行人位置	$a=0.393$			$a=0.786$			$a=1.179$		
	ACC_1	ACC_2	HIC	ACC_1	ACC_2	HIC	ACC_1	ACC_2	HIC
右侧	285.096	752.011	89.044	286.164	185.310	89.395	286.678	1 517.960	90.316
中间	655.719	1 435.230	1 011.630	635.895	1 806.970	1 910.670	683.695	1 834.120	2 045.200
左侧	593.571	774.285	275.261	579.280	911.850	366.893	597.897	871.003	361.009

表 6 不同相位下的行人损伤数据

行人位置	左平移 1/4 周期			左平移 2/4 周期			左平移 3/4 周期		
	ACC_1	ACC_2	HIC	ACC_1	ACC_2	HIC	ACC_1	ACC_2	HIC
右侧	288.242	439.033	992.927	290.595	1 024.840	95.540	287.063	303.131	91.809
中间	697.317	1 862.430	2 074.330	737.827	1 786.400	1 958.890	655.751	1 550.210	1 316.700
左侧	597.547	831.968	338.700	592.860	762.727	210.967	596.340	1 056.900	627.639

如表 5 不同振动幅度下的行人损伤仿真数据结果所示, 无论行人位于车头前方何种位置, 通过增大振动幅度对 ACC_1 的影响几乎为零, 结果都略好于完全制动的情况。当行人位于右侧时, HIC 值都会处于较低的范围, 并且与完全制动策略产生的 HIC 值相差很小, 进一步证明当行人位于车辆前方右侧时, 制动曲线对行人 HIC 的影响较小; 当行人位于中间位置和左侧位置时, 随着振动幅度减小, ACC_2 和 HIC 值相对于原制动曲线策略损伤结果会降低, 尤其是当行人位于中间位置时, 损伤结果的变化幅度整体较大, 当 a 从 0.786 变成 0.393 后, 减小振动幅度能够大幅降低中间位置行人的 ACC_2 和 HIC 值, 同时会导致在车头前方右侧位置行人的 ACC_2 急剧增长, 可能是由于车头转向后导致行人从车辆侧面滑落, 头部先着地引起的。总而言之, 随着振动幅度的增大, 当行人位置位于中间和左侧时损伤结果呈现总体增大的趋势, 行人位于右侧时, 影响关联性很小。而不同振动频率下的行人损伤数据和不同相位下的行人损伤数据结果分别如表 4 和表 6 所示, 表现出不确定性。因为相位移动分析在制动曲线优化中占据主导地位, 其直接关联时间控制精度、动态响应匹配和多系统协同, 同时更符合工程实践中的硬件限制与控制灵活性需求。本研究将从相位变化和振动幅度中选取相位变化进行最优值的求解, 通过自动化仿真平台结合最优化算法目标分别以相位量变化和振动幅度为优化变量寻求控制制动曲线的最优解, 并研究随优化变量变化的损伤结果趋势。

3.3 最优化算法分析结果

本研究基于 NSGA-II 算法对选取变量进行联合自动化仿真分析 HIC 和 3 ms 累积头部质心加速度变化, 优化过程中得到共计 482 组解集, 共用时 15 h, 优化过程中各优化目标认定为同等重要, 即具有相同权重, 优化过程如图 5 所示。

仿真结果表明, 在相位变化作为优化变量的情况下, 第 236 次和 241 次迭代获得了最优解, 其中相位参数 $t=0.656\ 721\ 786\ 7$ 时, HIC 指标达到最优值 925.25, 同时 3 ms 累计头部质心加速度为 $1\ 184.6\ m/s^2$, 该组参数构成了最优解集。基于此优化结果推导出的控制制动曲线函数如公式(6)所示, 其与基准曲线的对比分析如图 6a 所示。当以振幅作为优化变量时, 第 45 次和 241 次迭代产生了最优解, 振幅参数 $A=0.533\ 511\ 860\ 3$ 对应的 HIC 值为 976.45, 3 ms 累计头部质心加速度为 $1\ 212.2\ m/s^2$, 该组参数同样构成了最优解集, 其对应的优化制动曲线函数如公式(7)所示, 相关曲线对比结果如图 6b 所示。

$$y=0.393\cos\left(\frac{4}{3}\pi(x+0.656\ 721\ 786\ 7)\right)-7.407$$

(6)

$$y=0.533\ 511\ 860\ 3\cos\left(\frac{4}{3}\pi(x+0.75)\right)-7.266\ 488\ 139\ 7$$

(7)

对比分析显示，相位优化方案在 HIC 指标和头部加速度控制方面均优于振幅优化方案，这一结果验证了相位参数在制动曲线优化中的关键作用。

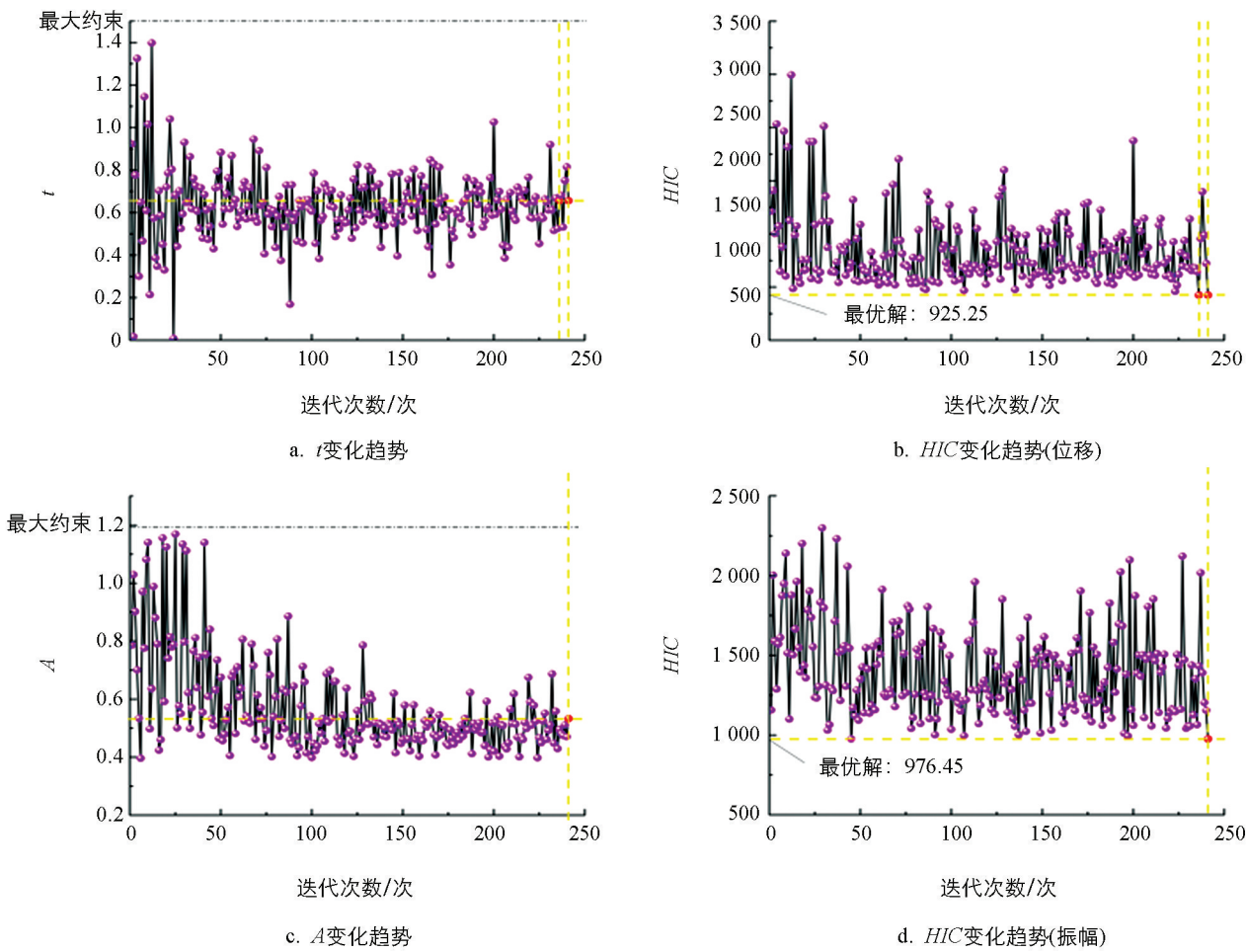


图 5 优化变量与目标的迭代过程图

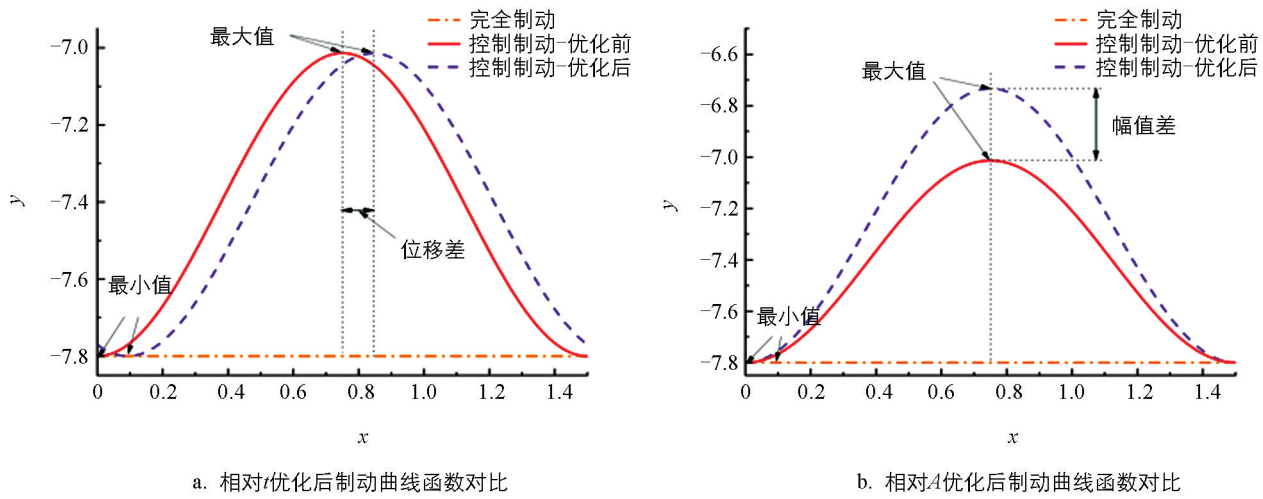


图 6 3 种制动曲线函数图像

根据 HIC 值随相位 t 变化散点图,如图 7a 所示,当 t 在 0 到 0.57 之间变化时, HIC 值随相位变化降低,当 t 在 0.57 到 1.5 之间变化时, HIC 值随相位变化增大, t 在 0.35 到 0.85 之间收敛。图 7b 所示,3 ms 累积头部质心加速度变化趋势与 HIC 变化大致相同。如图 7c 所示,遗传算法对振幅 A 的取点范围收敛集中在 0.4 到 0.75 之间,能够发现在这个范围内 HIC 值偏离散,振幅越小 HIC 值不一定会更小,但总体而言 HIC 随着 A 的增大而上升。3 ms 累积头部质心加速度变化趋势与 HIC 变化大致相同,如图 7d 所示。

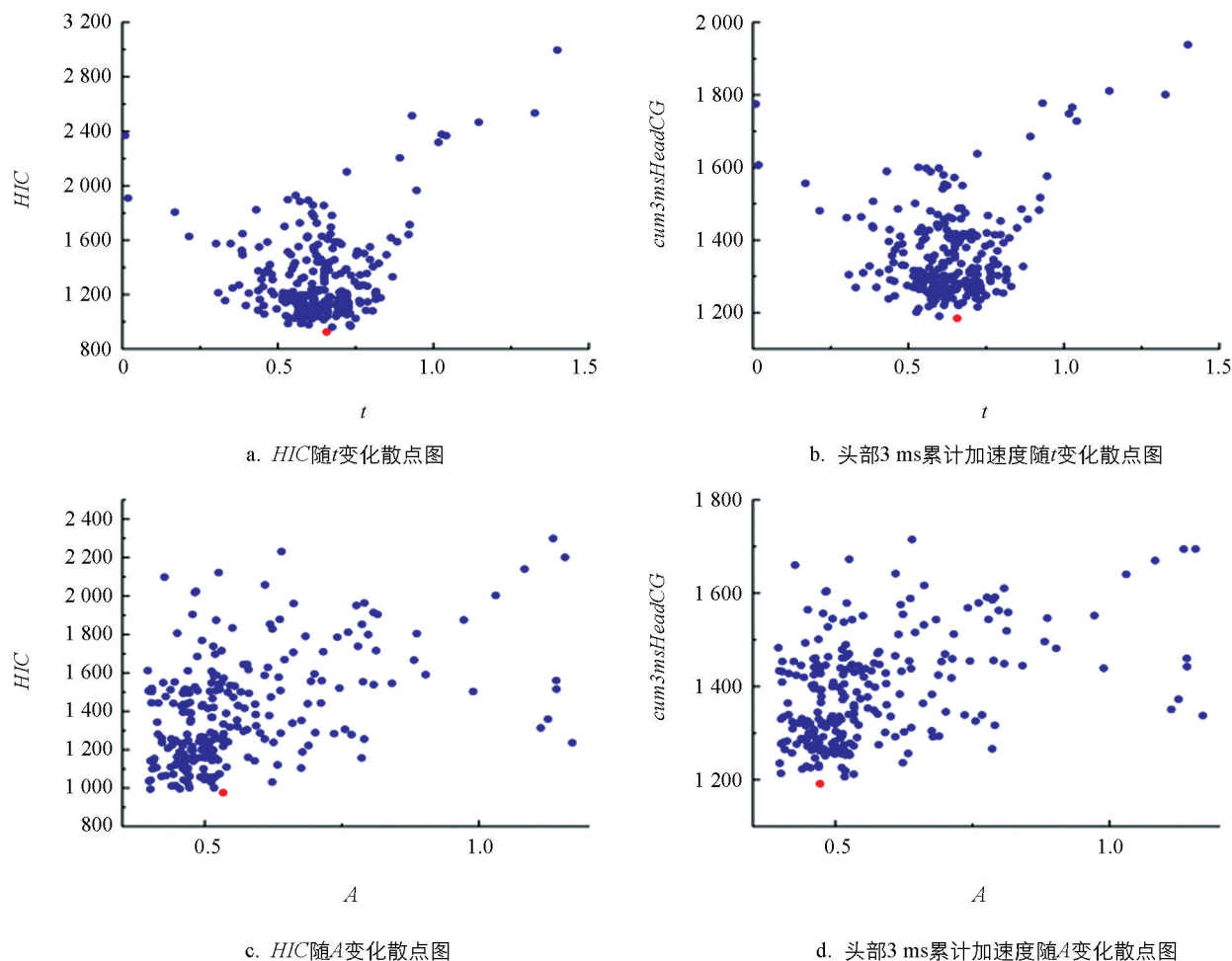


图 7 损伤参数散点图

将完全制动曲线、控制制动曲线和优化后的控制制动曲线产生的 HIC 值进行交叉对比,如图 8 所示。研究结果发现,车辆采用预设余弦曲线作为制动控制策略相较于车辆完全制动策略,行人头部 HIC 值降低 26.36%;车辆采用经本研究构建的车辆紧急制动优化框架获得的制动策略,以相位 t 作为优化变量时行人头部 HIC 值比优化前的控制制动策略降低 8.54%,相较于车辆完全制动时的头部 HIC 值降低了 32.65%。以振幅 A 作为优化变量时行人头部 HIC 值比优化前的控制制动策略降低 3.47%,相较于车辆完全制动时的头部 HIC 值降低了 28.92%。研究结果说明了本研究构建的车辆紧急制动策略优化框架的有效性。

4 结论

本研究以降低行人头部损伤为目标,提出了结合 ISIGHT 和 MADYMO 仿真平台的车辆制动避撞策略的优化框架,并基于 CIDAS 数据库中某车型与行人碰撞案例,对比分析车辆完全制动、控制制动及通过

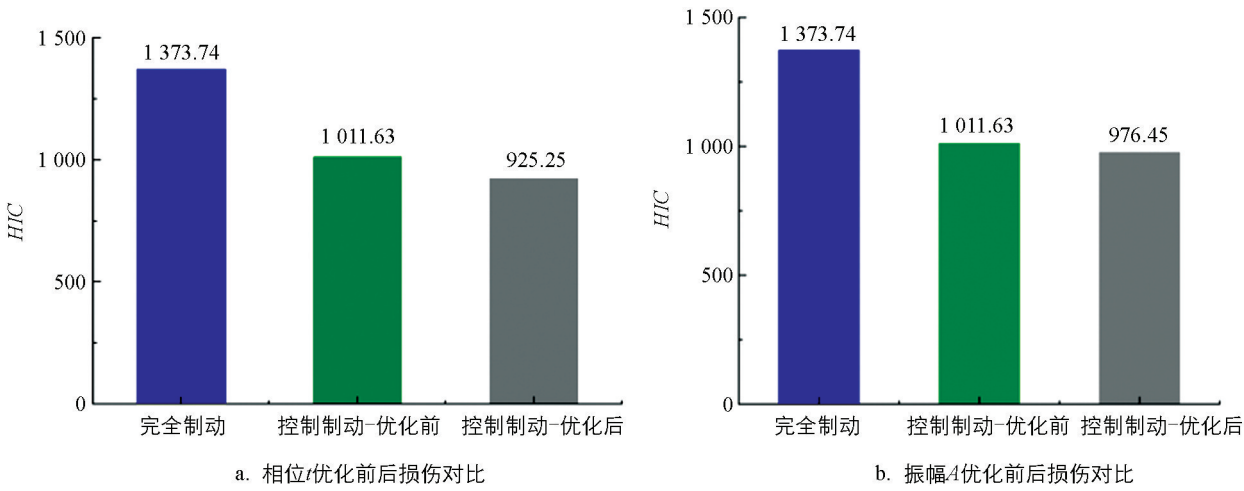


图 8 3 种制动曲线损伤对比图

构建的框架优化后的制动方案对案例中行人碰撞历程和头部损伤的影响关系，研究结果验证了本研究提出的车辆制动策略和优化框架的有效性。主要结论如下：

- 1) 通过对比真实案例中优化前控制制动策略对车头前方 3 种位置的行人造成的头部损伤发现，行人位于右侧，制动曲线策略对头部损伤 HIC 值影响并不明显，当行人位于左侧位置时，会略微改善行人的头部损伤结果，当行人位于中间位置时，能够从头部与车辆接触加速度峰值 ACC_1 、头部与地面接触加速度峰值 ACC_2 和 HIC 值 3 方面有效降低损伤结果，证明提出的余弦形式控制制动曲线在降低行人碰撞损伤方面的有效性。
- 2) 通过对比控制制动曲线的振动频率、振动幅度和相位变化对行人损伤的影响，研究结果表明，振幅 A 从 0.393 增大到 0.786 再增大到 1.179 时， HIC 值从 1011.630 上升至 1910.670 再上升至 2045.200。当行人位于车头前方中间和左侧位置时随振动幅度的增大， ACC_2 和 HIC 值先增大，后在一定区间内保持稳定慢速增长，而相位的变化对行人损伤无明显趋势，而振动频率和相位变化对损伤结果存在不确定性。
- 3) 通过基于 ISIGHT 和 MADYMO 结合基于带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)的联合自动化仿真对相位变化以及振幅变化分析结果，当原函数相位变化 t 向左平移 0.656 721 786 7 时，优化后控制制动曲线产生的 HIC 值为 925.25，相对于优化前控制制动策略降低的 HIC 值进一步降低了 8.54%，较车辆完全制动时降低了 32.65%，有效优化了行人头部损伤。 HIC 值随着振幅的增大，总体存在升高趋势，但是并不绝对，例如根据以振幅为输入变量的最优仿真分析结果可知，当振幅 A 为 0.533 511 860 3 时，优化后控制制动曲线的 HIC 值最低，为 976.45，行人头部 HIC 值比优化前的控制制动策略降低 3.47%，相较于车辆完全制动时的头部 HIC 值降低了 28.92%。

本研究探讨了车辆紧急制动策略对降低车辆与行人碰撞事故中行人损伤的潜力，为智能驾驶汽车紧急避险策略的设计和开发提供了理论和方法参考。

参考文献：

[1] 国家统计局. 中华人民共和国统计法 [M]. 北京：中国统计出版社，2024.

[2] Global Status Report on Road Safety 2023 [R]. Switzerland：World Health Organization，2023：4-9.

[3] MAKI T, KAJZER J, MIZUNO K, et al. Comparative Analysis of Vehicle-Bicyclist and Vehicle-Pedestrian Accidents in Japan [J]. Accident Analysis & Prevention, 2003, 35(6): 927-940.

[4] YANG J K. Review of Injury Biomechanics in Car-Pedestrian Collisions [J]. International Journal of Vehicle Safety,

2005, 1(1/2/3): 100.

[5] LIU D, LI Y, ZHAO H, et al. Relativity Analysis of Pedestrian Head Injuries and the Headform to Bonnet Top Test Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(1): 98-101.

[6] 郑建明, 华一丁, 张宇飞, 等. 考虑风险场景的驾驶员紧急制动模型研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 219-231, 253.

[7] HU L, LI H B, YI P, et al. Investigation on AEB Key Parameters for Improving Car to Two-Wheeler Collision Safety Using In-Depth Traffic Accident Data [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1): 113-124.

[8] 韩勇, 李永强, 许永虹, 等. 基于 VRUs 深度事故重建的 AEB 效能对头部损伤风险的影响 [J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(4): 490-498.

[9] 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.

[10] 冯成建, 王富平, 徐臣, 等. 基于车人碰撞事故重建的行人头部动力学响应 [J]. 医用生物力学, 2013, 28(2): 164-170.

[11] 叶美婷, 韩勇, 皇甫倍玉, 等. 汽车制动策略参数对行人头部落地损伤的定量分析 [J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 43-50.

[12] LI H Q, ZHENG T X, XIA F H, et al. Emergency Collision Avoidance Strategy for Autonomous Vehicles Based on Steering and Differential Braking [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 22647.

[13] PARK J, KIM D, HUH K. Emergency Collision Avoidance by Steering in Critical Situations [J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22(1): 173-184.

[14] VERSACE J. A Review of the Severity Index [C] //SAE Technical Paper Series. Pittsburgh: SAE International, 1971.

[15] CHAWLA A, MOHAN D, SHARMA V, et al. Safer Truck Front Design for Pedestrian Impacts [J]. Journal of Crash Prevention and Injury Control, 2000, 2(1): 33-43.

[16] MARJOUX D, BAUMGARTNER D, DECK C, et al. Head Injury Prediction Capability of the *HIC*, *HIP*, *SIMon* and *ULP* Criteria [J]. Accident Analysis & Prevention, 2008, 40(3): 1135-1148.

[17] 刘煜, 万鑫铭, 许伟, 等. 基于自动化仿真与 NSGA-II 算法的动力两轮车事故智能化重建方法研究 [J]. 机械工程学 报, 2023, 59(24): 197-208.

[18] WANG D Q, DENG W G, WU L T, et al. Impact of Vehicle Steering Strategy on the Severity of Pedestrian Head Injury [J]. Biomimetics, 2024, 9(10): 593.

责任编辑 张枸
柳剑