

中文引用格式:尚诗,王国丰,王宁珍,等. 人车前端高度比对行人被撞后落地损伤的影响[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11): 172-179.

英文引用格式:SHANG Shi, WANG Guofeng, WANG Ningzhen, et al. Influence of normalized bonnet leading edge height on pedestrian ground contact injuries after being impacted[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 172-179.

人车前端高度比对行人被撞后落地损伤的影响^{*}

尚诗¹讲师, 王国丰¹, 王宁珍¹副教授, 魏巍²高级工程师,

李泉³助理研究员, 唐亮^{**1}教授

(1 北京林业大学 工学院, 北京 100083; 2 艾克斯-马赛大学/古斯塔沃-艾菲尔大学
应用生物力学实验室, 法国 马赛 13015; 3 清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1623

基金项目: 国家自然科学基金资助(52402441); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(BLX202336); 北京市自然科学基金资助(3244034)。

【摘要】 为优化车辆设计和改进道路安全, 探讨人车前端高度比(NBLEH)对行人落地头部损伤的影响, 筛选简明损伤等级(AIS)1+的行人落地损伤碰撞案例, 并进行数据分析和多重共线性检验。结果表明: 随着NBLEH的增大, 行人头部损伤严重程度增加。逻辑回归分析进一步揭示, 对于AIS 2+级别的成年行人头部损伤, 可由车速、年龄以及NBLEH共同预测, 具体而言, NBLEH值越大、车速越快、年龄越高, 则损伤风险相应增加。真实事故视频分析结果证明: 当NBLEH较小时, 行人的全身旋转角度会增大; 然而, 一旦NBLEH超过0.9, 旋转角度则显著减小。不同大小的NBLEH会改变碰撞力传递、落地姿态。此外, 选用2种不同前端高度的车辆形成不同NBLEH工况开展尸体碰撞试验, 结果显示, NBLEH不仅影响头部的落地时间, 而且头部落地的姿态与碰撞速度之间存在相互作用, 这进一步加剧头部损伤的复杂性。参数化仿真研究进一步证实, NBLEH对行人头部与地面接触时的姿势、角度、时间和速度等因素有显著影响, 从而增加损伤机制的复杂性与不确定性。仿真结果显示, 车速和NBLEH都会影响行人翻转角, NBLEH取值小于1时, 会得到比NBLEH大于1更大的行人翻转角。

【关键词】 人车前端高度比(NBLEH); 行人被撞; 落地损伤; 简明损伤等级(AIS); 道路交通; 头部损伤

Influence of normalized bonnet leading edge height on pedestrian ground contact injuries after being impacted

SHANG Shi¹, WANG Guofeng¹, WANG Ningzhen¹, WEI Wei², LI Quan³,
TANG Liang¹

(1 School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Laboratoire de Biomécanique Appliquée, UMRT24, Aix Marseille Université/
Université Gustave Eiffel, Marseille 13015, France; 3 School of Vehicle and

Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* 文章编号: 1003-3033(2025)11-0172-08; 收稿日期: 2025-07-14; 修稿日期: 2025-09-15

** 通信作者: 唐亮(1981—), 女, 湖北十堰人, 工学博士, 教授, 主要从事汽车碰撞安全方面的研究。E-mail: happyliang@bjfu.edu.cn。

Abstract: To optimize vehicle design and improve road safety, the effect of the NBLEH on pedestrians head injuries during ground contact was investigated. The impact with the ground AIS 1+ pedestrian landing injury cases was selected, and data analysis along with multicollinearity tests was conducted. The results show that as the NBLEH increases, the severity of pedestrian head injuries exhibits a corresponding upward trend. Through Logistic regression analysis, it is further revealed that for AIS 2+ head injuries in adult pedestrians can be jointly predicted by vehicle speed, age, and NBLEH. Specifically, the risk of injuries is increased with higher values of NBLEH, faster speeds, and older ages. Analysis of real accident videos demonstrates that a smaller NBLEH results in increased full-body rotation angles of pedestrians. However, once NBLEH surpasses 0.9, the rotation angle notably diminishes. The collision force transmission and the pedestrian's landing posture are altered by different values of NBLEH. Additionally, cadaver crash tests were conducted using two types of vehicles with different front-end heights to establish test conditions with different NBLEH values. The results indicate that NBLEH not only influences the timing of head contact with the ground, but also that there is an interaction between head landing posture and collision speed, further complicating head injuries. Parametric simulation studies reinforced that NBLEH significantly influences factors such as posture, angle, timing, and speed during pedestrian head-to-ground contact, thereby increasing the complexity and uncertainty of surrounding injury mechanisms. The simulation results show that both vehicle speed and NBLEH influence the pedestrian flip angle, with NBLEH values less than 1 producing larger pedestrian flip angles than values greater than 1.

Keywords: normalized bonnet leading edge height (NBLEH); pedestrian struck; pedestrian-ground contact injuries; abbreviated injury scale (AIS); road traffic; head injury

0 引言

世界卫生组织数据显示,全球每年约 119 万人死于道路交通事故,其中,行人占 23% (约 27 万)^[1]。我国因道路交通环境复杂、人车混行普遍,人车碰撞事故频发^[2-3],是亟待解决的安全问题。学术界已深入探讨了车辆碰撞速度等要素与行人损伤的关联性,这些要素也体现在相关法规和测试协议中。由于车辆设计与行人体征对行人落地损伤存在显著耦合效应,因此,探究其碰撞机制及损伤特性,对优化防护措施、提升道路安全性具有重大意义。

人车碰撞中,行人可能因与车辆直接撞击及随后与地面二次碰撞受伤^[4-5]。德国深度事故数据研究(German In-depth Accident Study, GIDAS)显示,65%的行人损伤由地面接触造成^[6]。但相比车辆直接碰撞损伤,地面接触损伤及预防研究关注度较低。准确区分损伤来源极具挑战^[7-8](如头部先触车再触地时机制难辨析),但事故数据分析仍凸显地面接触损伤的重要性。行人与地面碰撞机制复杂,真实事故视频分析是直观理解其碰撞形式的方法,但目前相关视频研究较少。

数值仿真为车辆-行人碰撞事故的重建与参数化分析提供了高效灵活的途径,可优化汽车安全技

术、减轻事故伤害^[9]。YIN Sha 等^[10]依托 MADYMO 平台开展人车碰撞参数化仿真,探究车辆前端尺寸参数对行人头部落地损伤的影响,比较发动机罩前缘高度等多种参数对行人落地姿势及头部损伤准则(Head Injury Criterion, HIC)的影响,揭示发动机罩前缘高度是最关键因素。此外,基于仿真研究发现,“行人身高与发动机罩高度之比”可用于预测人体落地机制^[11]。

鉴于此,笔者拟提出人车前端高度比(Normalized Bonnet Leading Edge Height, NBLEH)这一关键参数,研究其对行人碰撞落地损伤的影响。首先,从事故统计数据出发,用数据挖掘与相关性分析揭示二者潜在关联;其次,筛选真实事故视频分析行为特征,进一步验证细化关联;然后,设计不同 NBLEH 值的实车尸体碰撞试验,分析相关参数关系;最后,借助多刚体模型开展参数化仿真,量化影响特征。以期车辆设计和道路安全改进提供科学依据。

1 人车碰撞事故统计数据分析

1.1 GIDAS 事故数据集

利用 2000—2015 年 GIDAS 数据库的相关人车碰撞案例分析行人损伤,案例筛选仅限单一车辆与

站立、行走或奔跑的行人碰撞,排除损伤成因不明或信息缺失的,且仅选行人与车辆前端碰撞的。研究团队用PC-crash平台重建事故场景,记录多项关键动态参数。GIDAS按内部编码系统及简明损伤等级(Abbreviated Injury Scale,AIS)标准评估损伤^[12],AIS1-6级对应从轻微到无法抢救的伤害程度,损伤记录涵盖从现场到医院救治的全过程。通过比对车辆损毁模式与行人损伤特征等,鉴别损伤来源(车辆、地面或未知)。

1.2 统计数据分析方法

为探究行人落地损伤与车辆发动机前盖前缘高度(Bonnet Leading Edge Height,BLEH)的关联性,依据相关规范,通过Blueprint系统提取车辆轮廓数据计算BLEH^[13];参考人体测量学模型,按GIDAS数据库中行人身高的0.55倍估算髋部高度^[14],进而得出NBLEH为BLEH与髋部高度的比值。选择髋部高度计算NBLEH,髋部高度作为人体关节点,能精准反映碰撞关键力学点,影响行人运动学响应,而身高缺乏针对性。图1为BLEH及NBLEH的测量与计算方法。

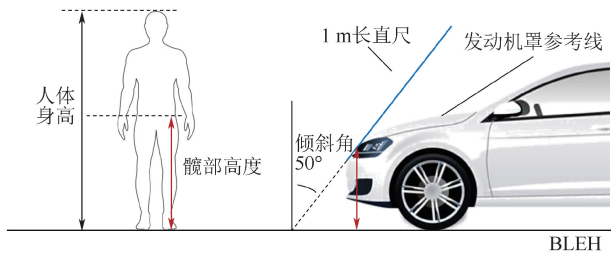


图1 BLEH及NBLEH的测量计算方法
Fig.1 Measurement and calculation methods for BLEH and NBLEH

为验证车速、行人年龄、NBLEH等对行人落地损伤严重性的影响,以Shapiro-Wilk检验判断损伤数据是否正态分布,正态数据用方差分析评估均值差异及效应,非正态数据用Kruskal-Wallis检验对比中位数差异。采用Logistic回归分析及比值比

(Odds Ratios,OR)评估NBLEH对地面撞击引发的头部损伤等级的影响,损伤概率 p 与相关预测因子 x_i 及回归系数 β_i 相关。通过容忍度(Tolerance,Tol)和方差膨胀因子(Variance Inflation Factor,VIF)进行多重共线性检验(VIF最大阈值2.5),并以OR量化预测变量单位变化对伤害概率的相对影响(设95%置信区间评估OR估计值不确定性)。

1.3 NBLEH对行人落地头部损伤的影响

筛选出1221起行人损伤达AIS1+且含落地损伤的碰撞案例,图2为NBLEH与行人落地后头部损伤严重程度(AIS2、AIS3、AIS4-5)的关系。结果显示,随NBLEH中位数从0.86升至0.95(对应AIS4-5),头部损伤严重性呈趋势性增长,但经Kruskal-Wallis检验,差异未达显著水平($P=0.366$)。多重共线性检验结果表明:成年行人的AIS2+落地头部损伤风险可通过速度、年龄和NBLEH的函数进行逻辑回归分析,且所有变量的VIF均小于2.5,符合模型稳健性的要求。碰撞速度、行人年龄和NBLEH对成人(年龄18岁+)落地AIS2+头部损伤的逻辑回归结果见表1,对于成年行人,速度、年龄以及NBLEH均为AIS2+级别头部落地损伤的重要且显著的统计因素($P<0.05$)。

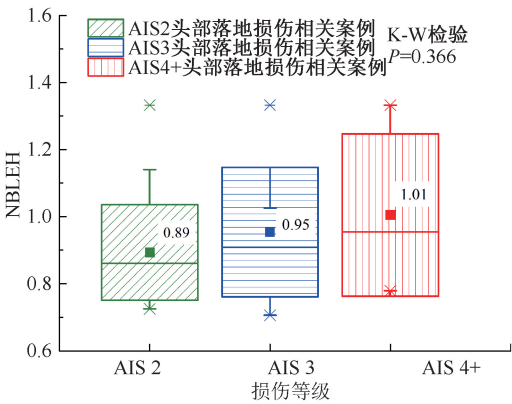


图2 AIS2、AIS3、AIS4-5落地头部损伤案例对应的NBLEH分布

Fig.2 Distribution of NBLEH corresponding to AIS 2, AIS 3 and AIS 4-5 landing head injury cases

表1 碰撞速度、行人年龄和NBLEH对成人(年龄18岁+)落地AIS2+头部损伤的逻辑回归结果

Table 1 Logistic regression results of collision speed, age and NBLEH on adult (age 18+) head injuries of AIS 2+ head injuries at ground impact

参数	边界值	回归系数 β	P 值	OR (95% CI)
常数	—	-9.665	—	—
速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	3~116	0.029	0.019	1.029 (1.005~1.055)
年龄/岁	18~96	0.025	0.030	1.026 (1.002~1.050)
NBLEH/%	67~133	4.963	0.011	109.234 (2.910~4 100.470)

在特定车速(分别为 20 和 40 km/h)及行人年龄(选取数据集中行人的最小年龄 18 岁与最大年龄 96 岁作为代表)条件下,NBLEH 对预测 AIS 2+级别落地头部损伤风险概率的影响,如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着 NBLEH 值的增大,行人发生头部落地损伤的风险概率呈现增长趋势。此外,在较高的车速条件下,以及当行人年龄较大时,其遭受损伤的风险也会相应提升,从生理机制层面分析,高龄行人由于身体机能出现自然衰退,骨骼强度、肌肉韧性等方面均有所下降,在面对碰撞冲击时,更难以通过自身的动态调整来维持身体平衡,也难以有效缓冲碰撞产生的伤害,使得损伤发生的可能性和严重程度增加。从物理作用角度来看,高速碰撞过程中会赋予行人更大的初始动能,当行人落地,这部分动能转化为冲击力会急剧增大,同时,NBLEH 的改变会直接影响碰撞力在行人身体上的传递路径及身体运动轨迹的变化,这些因素相互耦合、共同作用,进一步提高头部落地损伤的风险。

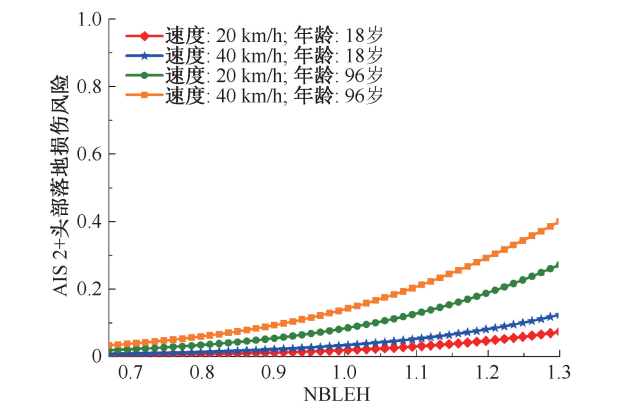


图 3 AIS 2+落地头部损伤风险与 NBLEH 的函数关系
Fig. 3 Functional relationship between AIS 2+ head ground related injury risk and NBLEH

2 基于事故视频的 NBLEH 与行人被撞关系分析

2.1 事故视频分析方法

事故统计数据很难展现碰撞动态过程,而真实事故视频可直观呈现相关动态信息,确认 NBLEH 与行人落地损伤的关系,通过分析发现的典型模式还能后续研究提供现实依据。从在线平台搜集人车事故视频,按单辆汽车与行人碰撞、车辆外形清晰可辨、行人先被车辆前部撞击且碰撞全程完整记录的标准,筛选出 29 个案例。车辆速度、行人抛射距离的估算方法与先前研究一致,同时,记录车辆速

度、行人旋转角度等多项参数,参数获取借助比例关系、已知信息等,时间间隔和车速通过视频帧速率、特定距离与时间间隔计算得出。

2.2 NBLEH 与行人被撞落地前转角的关系

分析真实事故视频显示,车辆-行人碰撞及行人落地过程主要有 2 类情形,即车辆转弯时与行人碰撞,或行人突然冲出与行驶车辆碰撞。29 个案例中,15 例行人在碰撞前有停止、后退等主动行为。落地机制多样,13 例为头部先接触地面;多数情况下,行人被撞大腿或髋部后身体前旋,头部接触车辆风挡,随后直接摔落或被撞至空中旋转后落地。

多项仿真研究表明:BLEH 对行人落地碰撞机制及损伤有显著影响^[15-16]。聚焦 NBLEH 与行人落地前全身旋转角度的关系,经±10%误差分析(图 4)发现,当 NBLEH 较小时,旋转角度较大,超过 0.9 后,旋转角度急剧下降。但此趋势不等同于落地损伤程度变化,因 NBLEH 不同时,碰撞力传递、落地姿态等均有变化(如 NBLEH 超 0.9 后可能增加内脏损伤风险),故评估损伤需综合多因素,不能仅依据旋转角度。

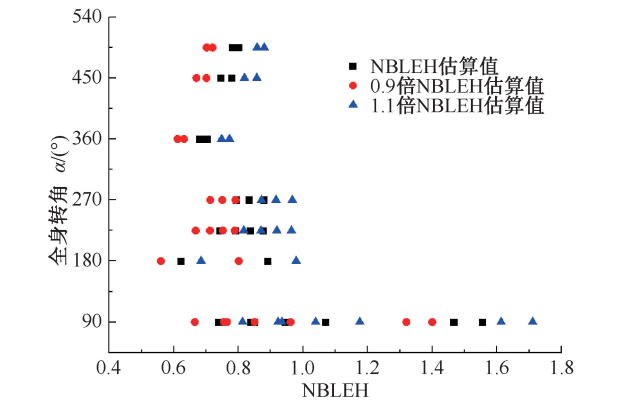


图 4 考虑+10%或-10%估算误差的 NBLEH 影响分析
Fig. 4 Impact analysis of NBLEH on rotation angle considering an estimation error of ±10%

3 NBLEH 对行人被撞后落地损伤影响的尸体碰撞试验

3.1 人车碰撞试验

为深入探究 NBLEH 对行人落地损伤的影响,前期在艾克斯-马赛大学/古斯塔沃-艾菲尔大学应用生物力学实验室开展了一系列人车尸体碰撞试验^[17],试验获合法资质及伦理委员会批准。研究选用 2 种不同前端高度的车辆形成不同 NBLEH 工况,每种车型在相似环境下进行 2 次独立测试,人体

样本身高和初始姿态大致一致,且每次测试后更换受损车辆部件,相关碰撞试验的基本信息见表2。试验场地有标线便于视频分析,用5台高速摄像机记录碰撞过程,行人通过磁锁系统悬吊并在人车接

触前自动释放(图5)。车辆碰撞速度为20或30 km/h,接触后立即全制动。被试体内植入6个高精度三轴加速度传感器,头部、四肢、骨盆及胸部等关键部位作标记,以追踪相对位置。

表2 碰撞试验基本信息

Table 2 Basic information of cadaver impact tests

编号	速度/(km·h ⁻¹)	车辆信息	行人特征	NBLEH
1	30.5	标志 307 	1.74 m;66 kg	0.7
2	30.4		1.72 m;69 kg	0.7
3	30.1	雷诺 Kangoo II 	1.58 m;38 kg	1.2
4	30.4		1.62 m;69 kg	1.1



图5 碰撞前场景
Fig.5 Pre-impact scenario

3.2 基于模型的图像匹配方法

基于所记录的人体运动视频序列,通过每10 ms追踪额头标记点的位置估算人体头部在X轴(即车辆行进方向)和Z轴(即垂直方向)上的运动轨迹。利用中心差分法,计算得出头部的线性加速度。在头部与车辆及地面接触的过程中,其旋转运动学特性采用基于模型的图像匹配方法进行估算,该方法在运动学重建领域已得到广泛应用。

3.3 损伤评价指标

HIC广泛用于颅骨骨折风险评估,但因传感器置于口腔而非头部重心,无法直接精确计算HIC,故引入近似HIC(approximate HIC, aHIC),该指标通过将口腔传感器数据代入HIC公式计算得出,主要评估线性载荷引起的头部损伤。头部接触时多伴随旋转运动,为评估旋转性脑损伤风险,采用脑损伤准则(Brain Injury Criterion, BrIC)^[18]评估相关期间的脑损伤,其与创伤性脑损伤(Traumatic Brain Injuries, TBI)相关,广泛应用于相关领域,文中用于评估AIS 3+级脑损伤风险,计算公式详见文献[18]。

3.4 碰撞全过程中的行人运动学

图6为碰撞事件的整体人体运动学特征、关键碰撞时刻以及各阶段的时序间隔,其中,关键时间点是通过分析头部加速度数据与视频图像确定的。在此,将车辆与行人之间的初次接触时刻定义为 t_0 。进入阶段1,行人遭受碰撞后旋转并落至发动机罩上。在此旋转过程中,头部首次与车辆发生碰撞的时刻标记为 t_1 。随后,在阶段2中,行人随车辆一同前进。由于车辆实施制动,行人在 t_2 时刻与车辆分离。接着,行人进入一段飞行期(阶段3),直至 t_3 时刻,身体的任意部位首次与地面接触。特别地, t_4 代表头部首次与地面接触的时间点(在特定情况下, t_4 与 t_3 重合)。此后,行人进入滑行/翻滚及反弹阶段(阶段4),直至 t_5 时刻,运动完全停止。



图6 尸体碰撞试验中的车辆-行人碰撞序列
Fig.6 Vehicle-pedestrian impact sequences in cadaver impact tests

图7为4例尸体碰撞试验中,人体头部Z轴(垂直方向)位置随时间的变化,时间起点为人体与车辆首次接触时刻。头部运动呈现清晰阶段特征,初次碰撞后,受车辆撞击力与人体自身运动惯性共同作用,头部随人体旋转向下;当与发动机罩或风挡

玻璃接触,反作用力使其短暂上移,形成轨迹中的小幅度波峰;至最高点后,重力与人体抛射运动主导,头部随人体空中滑行再度下落,直至触地;触地瞬间,地面反作用力又让头部短暂反弹,随后因重力最终落地。该趋势完整呈现碰撞过程中头部在垂直方向的运动轨迹,反映人体与车辆、地面的碰撞力学关系,为解析碰撞时人体头部动力学响应和损伤机制,提供关键的位置-时间数据支撑。

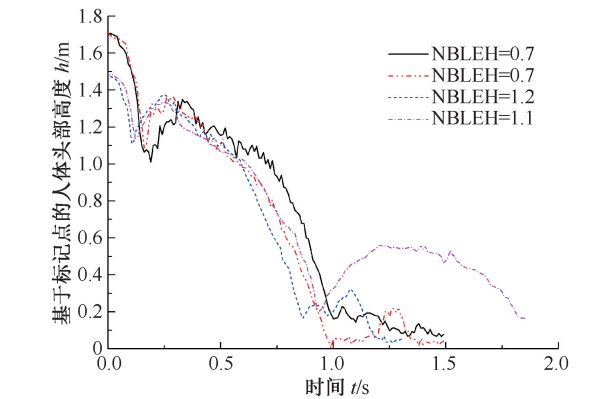


图 7 尸体碰撞试验中人体头部 Z 方向位置-时间曲线
Fig. 7 Z direction position-time curve of pedestrian head marker in cadaver impact tests

3.5 头部损伤风险评估

行人头部触地损伤评估结果见表 3,分析 4 例尸体碰撞试验数据,发现 NBLEH 与头部触地损伤评价指标间无显著相关性,可能因样本量偏小,难以精准反映变量关联,导致结论存在不确定性。此外,头部触地损伤严重程度受车速等多种因素综合影响,NBLEH 只是其中一个潜在因素,像碰撞瞬间的冲击力分布、行人身体姿态初始条件等其他因素,或对损伤的作用更直接,从而掩盖了 NBLEH 的影响。不同试验中行人头部触地姿态(图 8)、碰撞速度均存在差异,这些差异也可能干扰 NBLEH 与损伤关联的呈现。

表 3 头部落地损伤评估				
Table 3 Assessment of head injuries at ground impact				
编号	速度/ (km·h ⁻¹)	NBLEH	基于 aHIC ₁₅ 的 AIS 3+风险/%	基于 BrIC 的 AIS 3+风险/%
1	30.5	0.7	34	20
2	30.4	0.7	81	7
3	30.1	1.2	40	8
4	30.4	1.1	—(加速度 传感器损坏)	18

在 NBLEH 一致的情况下,aHIC₁₅ 值未随碰撞速度提升而递增。试验 1 的 aHIC₁₅ 值低于试验 2,

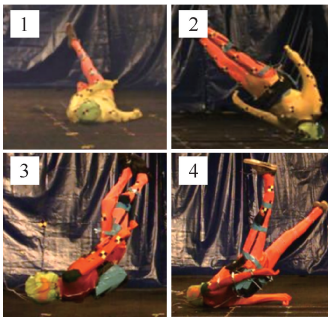


图 8 各组尸体碰撞试验中的行人头部落地姿态
Fig. 8 Pedestrian head landing postures in different groups of cadaver impact tests

但 BrIC 值更大,提示不同头部触地姿态可能导致不同受力模式与损伤机制,且触地姿态与碰撞速度可能存在交互作用,加剧头部受力复杂性。因此,无法明确人车高度比对头部损伤有直接影响,需进一步研究以理解相关复杂机制及影响因素。

4 NBLEH 对行人被撞后落地损伤影响的仿真研究

4.1 汽车-行人碰撞模型

尸体碰撞试验虽能提供真实数据,但受个体差异和试验条件限制,难控变量且难提炼普遍规律。仿真模拟具有可重复性和灵活性,便于修改与优化。Madymo 软件能精确刻画人车碰撞动态交互,支持参数化配置与批量仿真,便于调整参数或控制变量针对单一参数多组模拟,可精确预测身体受力、加速度及潜在损伤,深化对碰撞机制和损伤特征的理解,且计算效率高于有限元模型,在汽车安全领域应用广泛^[19-20]。

采用 Madymo 软件的人体模型,结合基于尸体试验的车辆简化模型,构建汽车-行人碰撞模拟场景,如图 9 所示,其中,车辆保险杠、发动机罩等关键部件的刚度特性曲线参照文献[21]设定。

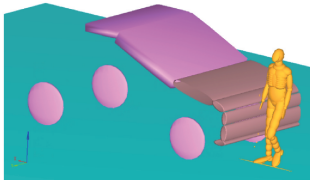


图 9 基于 MADYMO 平台的汽车-行人多刚体仿真模型
Fig. 9 Multi-body simulation model of vehicle-pedestrian collision based on the MADYMO platform

为探究 NBLEH 对行人落地损伤的影响,构建仿真矩阵。BLEH 设 0.64、0.69、0.74、0.79、0.84 m 这 5 个变量(参考 GIDAS 数据,覆盖不同车型);纳

入五十百分位男性、五百分位女性、六岁儿童3类行人模型;汽车碰撞速度设20、30、40、50 km/h等4个变量(覆盖城市常见速度)。共60个仿真案例,用于分析相关因素对损伤的影响。

4.2 NBLEH 对行人落地碰撞的影响

图10为不同碰撞条件下行人被撞后的运动姿态

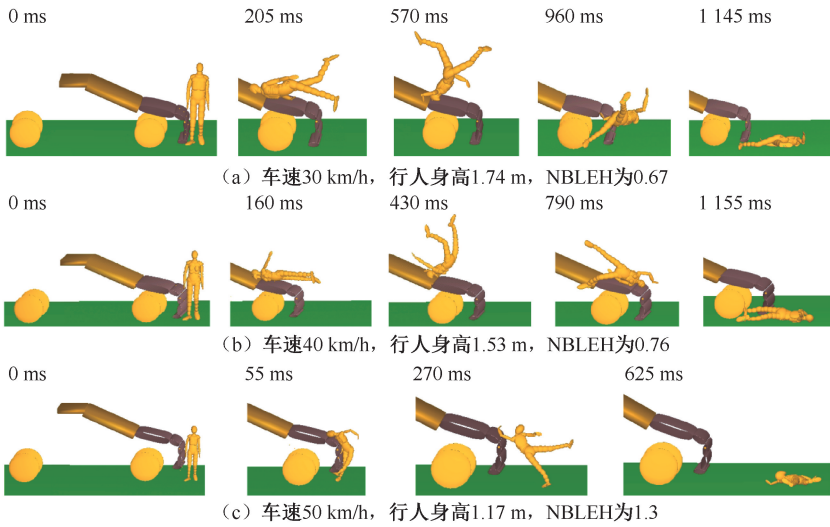


图10 不同碰撞条件下行人被撞后的运动姿态序列

Fig. 10 Pedestrian kinematic sequences after impact under different collision conditions

图11为Madymo仿真得出的NBLEH与行人被撞后全身转角的关系。NBLEH小于1时,行人较大翻转角多于NBLEH大于1的情况,且30 km/h车速即导致180~270°的较大翻转角;NBLEH大于1时,较大翻转角基本来自40、50 km/h较高车速;20 km/h低速下,行人翻转角均为90°。可见:车速与NBLEH共同影响行人被撞后全身反转角度。灰度关联性分析显示,车速与翻转角关联度为0.76,

NBLEH与翻转角关联度为0.58,均大于分辨系数0.5。可见二者均与人体被撞后旋转角度相关,且车速的影响更显著。在一定范围内,车速和NBLEH增大时,旋转角度均呈增大趋势。

5 结 论

1) NBLEH与损伤严重程度有正向关联趋势,成年行人AIS 2+级别头部损伤可依车速、年龄及NBLEH预测,高NBLEH、高车速与年长行人损伤风险更高。

2) NBLEH影响行人身体旋转角度,低值通常导致更大旋转。头部落地姿态与碰撞速度之间存在交互效应,其对头部损伤的直接影响路径尚不明确。

3) NBLEH可改变行人头地碰撞速度、角度、碰撞位置等关键损伤因素,致损伤机制复杂且不确定,但NBLEH与车速对行人全身转角有耦合作用,在一定范围内,低NBLEH较高NBLEH会导致行人更大的全身旋转角度。

4) NBLEH与头部损伤风险显著相关,此关系在车速和年龄协同作用下增强。研究成果可为安全措施及车辆设计优化提供依据。

5) 由于数据与试验样本量有限,未涵盖所有事

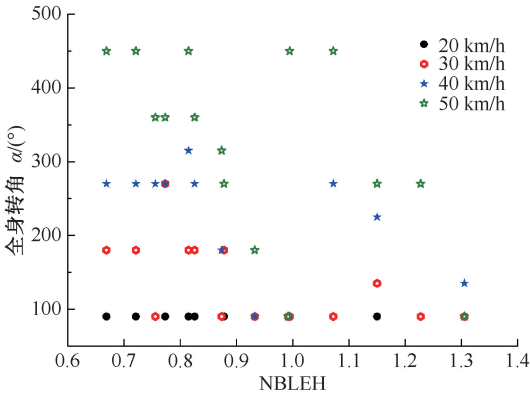


图11 不同车速碰撞后NBLEH对行人全身翻转角的影响

Fig. 11 Influence of NBLEH on the whole-body rotation angle of pedestrians after collisions at different vehicle speeds

故场景;实车尸体碰撞试验因复杂性与伦理限制,难以模拟事故多样性。未来需扩大样本规模增强结论普遍性,探索先进仿真技术与高精度虚拟人体模型以深入模拟分析。

参 考 文 献

[1] World Health Organization. Global status report on road safety 2023[R], 2023.

[2] 戴晓峰, 李金, 卢梦媛, 等. 考虑乡镇集市影响的穿村镇公路事故风险因素辨识[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 214-222.

[3] JI Xiaofeng, LI Jin, LU Mengyuan, et al. Identification of risk factors for through-village highway accidents considering influence of township fairs[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 214-222.

[4] 向巍, 吴绍斌, 林绪泽, 等. 面向校园复杂环境的无人驾驶场景库生成方法[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(7): 170-177.

[5] XIANG Wei, WU Shaobin, LIN Xuze, et al. Generation method of unmanned driving scenario library for complex campus environment[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(7): 170-177.

[6] HUSSAIN Q, FENG Hanqin, GRZEBIETA R, et al. The relationship between impact speed and the probability of pedestrian fatality during a vehicle-pedestrian crash: a systematic review and meta-analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 129: 241-249.

[7] SHI Liangliang, HAN Yong, HUANG Hongwu, et al. Analysis of pedestrian-to-ground impact injury risk in vehicle-to-pedestrian collisions based on rotation angles[J]. Journal of Safety Research, 2018, 64: 37-47.

[8] SHANG Shi, OTTE D, LI Guibing, et al. Detailed assessment of pedestrian ground contact injuries observed from in-depth accident data[J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 110: 9-17.

[9] GUILLAUME A, HERMITTE T, HERVÉ V, et al. Car or ground: which causes more pedestrian injuries? [C]. Proceedings of the 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration, 2015.

[10] 郑金子, 杨奇, 刘君, 等. 道路交通事故现场实景三维建模技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 1): 138-144.

[11] ZHENG Jinzi, YANG Qi, LIU Jun, et al. Research on 3D real scene reconstruction for road traffic accidents[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 138-144.

[12] WDÓWICZ D, PTAK M. Numerical approaches to pedestrian impact simulation with human body models: a review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(8): 4 687-4 709.

[13] YIN Sha, LI Jiani, XU Jun. Exploring the mechanisms of vehicle front-end shape on pedestrian head injuries caused by ground impact[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 106: 285-296.

[14] 邹铁方, 罗鹏琛, 彭培能, 等. 基于人体落地机制预测的人地碰撞损伤防护方法[J]. 中国公路学报, 2025, 38(3): 165-176.

[15] ZOU Tiefang, LUO Pengchen, PENG Peineng, et al. Pedestrian-ground collision injury protection method based on pedestrian landing mechanism prediction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(3): 165-176.

[16] GENNARELLI T A, WODZIN E. AIS 2005: a contemporary injury scale[J]. Injury, 2006, 37(12): 1 083-1 091.

[17] European Enhanced Vehicle-Safety Committee. Improved test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars[R], 1998.

[18] PHEASANT S, HASLEGRAVE C. Bodyspace: anthropometry, ergonomics and the design of work, third edition[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016:239-242.

[19] CROCETTA G, PIANTINI S, PIERINI M, et al. The influence of vehicle front-end design on pedestrian ground impact[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 79: 56-69.

[20] MONFORT S, HU Wen, MUELLER B. Vehicle front-end geometry and in-depth pedestrian injury outcomes[J]. Traffic Injury Prevention, 2024, 25(4): 631-639.

[21] SHANG Shi, MASSON C, TEELING D, et al. Kinematics and dynamics of pedestrian head ground contact: a cadaver study[J]. Safety Science, 2020, 127: DOI:10.1016/j.ssci.2020.104684.

[22] TAKHOUNTS E G, CRAIG M J, MOORHOUSE K, et al. Development of brain injury criteria (BrIC)[J]. Stapp Car Crash Journal, 2013, 57: 243-266.

[23] BENEÀ B, SOICA A. The contact phase in vehicle-pedestrian accident reconstruction[J]. Applied Sciences, 2023, 13(16): DOI:10.3390/app13169404.

[24] HU Jingwen, FLANNAGAN C, GANESAN S, et al. Understanding the new trends in pedestrian injury distribution and mechanism through data linkage and modeling[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 188: DOI:10.1016/j.aap.2023.107095.

[25] MARTINEZ L, GUERRA L, FERICHOLA G, et al. Stiffness corridors of the European fleet for pedestrian simulation[C]. Proceedings of the Experimental Safety Vehicles Conference, 2007.



作者简介: 尚诗 (1990—),男,山西大同人,博士,讲师,主要从事道路交通安全、交通参与者安全防护、损伤生物力学等方面的研究。E-mail:sshang@bjfu.edu.cn。