

文章编号:1004-7220(2013)02-0164-07

基于车人碰撞事故重建的行人头部动力学响应

冯成建¹, 王富平¹, 徐 臣¹, 樊 伟¹, 刘盛雄², 尹志勇¹

(1. 第三军医大学 大坪医院野战外科研究所, 全军交通医学研究所, 创伤、烧伤与复合伤国家重点实验室, 车辆/生物碰撞安全重庆市重点实验室, 重庆 400042; 2. 重庆理工大学 药学与生物工程学院, 重庆 400054)

摘要: **目的** 研究行人交通事故中,不同碰撞速度、不同车型及行人不同受撞击部位与行人头部损伤严重度的关系。**方法** 通过 MADYMO 多刚体动力学软件对一起有视频的行人交通事故进行事故重建,获得初始和边界条件,然后通过获得的边界和初始条件进行不同车速(20、30、40、50、60 km/h)、不同车型(轿车、SUV 型车、面包车)、行人不同受撞击部位(正面、侧面、背面)的模拟碰撞实验,对模拟碰撞实验中行人头部损伤情况进行分析,并利用两例真实行人交通事故对部分结果进行验证。**结果** 不仅车辆碰撞速度、车辆前置结构影响行人头部损伤严重度,行人受撞击部位也是影响行人头部损伤严重度的重要原因。在碰撞速度 ≤ 30 km/h 时,行人与地面接触造成的损伤可能比与车辆造成的损伤严重;碰撞速度 ≥ 40 km/h 时,行人头部损伤主要是与车辆接触所致。**结论** 利用监控录像能比较准确地开展行人交通事故重建,从而对行人动力学响应进行分析。在行人交通事故频发路段,对不同车型进行不同限速,能有效减小行人头部损伤的严重程度。

关键词: 事故重建; 动力学响应; 碰撞速度; 前置结构; 头部损伤

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Head dynamic response based on reconstruction of vehicle-pedestrian accidents with the video

FENG Cheng-jian¹, WANG Fu-ping¹, XU Chen¹, FAN Wei¹, LIU Sheng-xiong², YIN Zhi-yong¹ (1. Military Research Institute of Traffic Medicine, State Key Laboratory of Trauma, Burns and Combined Injury, Chongqing Key Laboratory of Vehicle/Bio Crash Safety, Daping Hospital & Institute of Surgery Research, Third Military Medical University, Chongqing 400042, China; 2. School of Pharmacy & Bioengineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Objective To study the relationship between the severity of pedestrian head injury and the impact speeds, the vehicle types and the impact positions in pedestrian-vehicle accidents by computer simulation based on the real accident video. **Methods** A pedestrian-traffic accident with the video was reconstructed by the MADYMO multi-body dynamics software to obtain the initial and boundary conditions. Experimental impact simulations were conducted on different vehicles (car, SUV and minibus) and pedestrian impact positions (front, side and back structure) by different speeds (20, 30, 40, 50 and 60 km/h) to analyze head injuries, and the simulation results were validated by two real pedestrian-vehicle accidents. **Results** Not only the impact speed and the front structure influenced the pedestrian head injury severity, but also the impact position of pedestrian was an important factor. At the collision speed ≤ 30 km/h, the pedestrian head injury caused by the contact with the ground could be possibly more serious than the contact with the vehicle; while at the collision speed ≥ 40 km/h, the pedestrian head injury was mainly caused by the contact with the vehicle. **Conclusions** The pedestrian traffic acci-

收稿日期:2012-11-29; 修回日期:2013-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31170908,31200709),重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2011jjA10022),汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放基金资助项目(NVHSL-2010001)。

通信作者:尹志勇,教授,博士研究生导师, E-mail:yinzhiyong68@126.com。

dent can be accurately reconstructed by using the real accident video to analyze the pedestrian head dynamic response. The severity of pedestrian head injuries can be effectively reduced by speed limitations on different types of vehicles at pedestrian traffic accident black-spots.

Key words: Accident reconstruction; Dynamic response; Impact speed; Front structure; Head injury

我国道路交通事故自 1970 年以后不断上升,到 2002 年左右达到顶峰,之后逐年下降,但与其他发达国家相比,我国万车死亡率、10 万人口死亡率仍然处于较高的比率^[1]。而行人在交通事故中处于弱势地位,再加上我国人车混杂的复杂道路环境,使我国成为行人交通事故多发的国家之一。颅脑撞击伤是行人交通事故中最常见的伤类,根据国外统计资料,颅脑撞击伤在交通事故中的发生率高达 54%^[2],是伤后致死、致残的首要原因。头部创伤在所有创伤中的比例约为 34%,在导致死亡的创伤中比例更高达 68%^[3]。在美国,每年大约发生 200 000 例脑部创伤^[4],治疗费用高达 90 ~ 100 亿美元。我国西部地区统计数据表明头部伤害在人体各部位伤害中所占比重最高,为 33.7%^[5]。颅脑撞击伤生物力学研究已成为撞击损伤生物力学领域的研究热点,其研究目的在于了解颅脑对撞击的力学响应,确定颅脑损伤与力学载荷的量效关系,进而阐明颅脑损伤机理,对于颅脑损伤的防护和伤害指标的制定提供理论基础。

用于撞击生物力学实验研究的生物模型包括人尸体模型、动物模型和物理模型,尸体具有和活体相同的解剖结构,人新鲜尸体是进行损伤生物力学研究的较好替代品,但是由于数量有限、成本昂贵,尸体实验不能广泛进行,可重复性较差^[6];且撞击实验研究是在理想情况下进行,而真实行人交通事故中,人、车、环境三者相互作用,影响因素很多,和实验室研究存在很大差异,故迫切需要一种重复性高、可控性高的方法进行相关研究。

近年来随着计算机科学的快速发展,数学模型越来越多地应用于交通事故研究中^[7-10],把数学模型和真实交通事故相结合开展行人交通事故研究是一种比较可靠的方法。利用数学模型开展行人损伤生物力学研究首先要进行事故重建,重建的质量决定了行人损伤生物力学研究结果的可靠性。近年来运用各种数学模型开展的大量行人交通事故的研究,其事故重建多是在保证最终时刻车辆、行人位置

和相对距离与真实情况相符的前提下,估算人车碰撞时刻的车辆速度、行人的姿态以及车辆与行人的相对位置来进行,缺乏事故过程中行人运动姿态等工况,不能准确重建事故发生过程,影响之后人体损伤生物力学的研究结果。利用有视频的行人交通事故进行重建能获得全面的事故细节,提高扩展研究的准确性。

为此,本文通过 MADYMO 动力学分析软件对收集到一起有视频的车人交通事故进行事故重建,将重建结果和视频以及获得的其他信息进行比较,直到相互吻合,从而获得边界和初始条件,然后通过获得的边界和初始条件进行不同车速、不同车型、不同接触部位的车人模拟碰撞实验,分析模拟碰撞结果,为行人安全防护提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 事故案例

2011 年 08 月 17 日上午 10 时 45 分许,北京现代牌 BH7167AY 型轿车与正在道路中作业的环卫工人正面发生碰撞,造成环卫工人当场死亡。由监控录像及交警提供的事故信息,确定事发时轿车与行人的碰撞速度为 12.96 m/s,行人的抛掷距离为 16.2 m。

事发当天对死亡行人进行尸检:行人右侧面部散在片状表皮剥脱,右颞部有一 8.0 cm × 6.0 cm 的头皮血肿;左顶枕部有一 12.0 cm × 9.0 cm 的头皮血肿,其间有一 0.6 cm × 0.1 cm 的裂口,叩击颅骨闻及破响声,枕骨大孔穿刺抽出血性液。行人系颅脑损伤死亡。

1.2 事故重建

1.2.1 事故重建基本理论 MADYMO 软件是由荷兰 TNO 道路汽车研究所 1975 年开发的多刚体计算软件,随着不同版本的升级和发展, MADYMO 逐步融合了多体动力学计算功能和显示动态有限元计算功能,由于其多刚体模型的计算高效和假人家族模型的完整性,目前该软件最为广泛的应用是整车约

束系统的开发和改进以及乘员安全的仿真分析,其除了能准确高效地再现真实交通事故过程,还能预测系统内人体各部分的动力学响应^[11]。因此,采用MADYMO多刚体计算软件进行车人事故重建以及人头部动力学响应的研究。

1.2.2 行人模型 根据案例中被撞行人的信息,调用MADYMO软件自带的已经验证的TNO行人假人模型,通过GEBOD程序在文件d_hyb305el.par的基础上对行人假人进行缩放,得到的行人假人模型身高为1.5 m,体重为55.6 kg,调节行人假人姿态(行人面向事故车车头站立,两膝弯曲,身体上部向前微弯)与案例中行人姿态相吻合^[12]。

1.2.3 车辆模型 车辆模型基于视频中事故车辆进行构建。在行人车辆交通事故中,只有汽车前部与行人发生接触,故车辆前部采用较为细致的构造,其余均进行简化设计。车辆前置结构刚度特性和车辆-行人-地面相互之间的接触特性采用文献[13-14]的研究成果。

1.2.4 头部损伤准则 头部损伤采用美国政府定义的头部损伤标准(head injury criterion, HIC)进行评估:

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

式中: $R(t)$ 为头部在 T_0 (模拟的起始时刻) $\leq t \leq T_E$ (模拟的结束时刻)时刻范围内的合成加速度(单位g,头部重心测量值); t_1 和 t_2 分别为积分时刻间隔内的起始时刻和结束时刻,在这段时间间隔内HIC值最大,定义1 000作为碰撞中冲击水平的HIC值^[15]。

1.2.5 事故重建方法 在保证车辆前部结构准确的情况下,车辆碰撞速度不变,反复调节行人与车辆及地面的摩擦系数及阻尼系数,根据视频微调行人姿态,直至仿真事故形态和视频中事故形态相吻合。

1.3 不同输入参数的模拟碰撞设计

在上述案例中仿真程序的初始条件设置(车辆刚度特性,人-车-地面的接触特性、摩擦系数、阻尼系数等)不变的情况下,设计不同车速(20、30、40、50、60 km/h)、不同车型(轿车、SUV型车、面包车)、不同撞击部位(行人正面、侧面、背面)的模拟碰撞实验45次。图1所示为3种车型与行人侧面碰撞的构建。

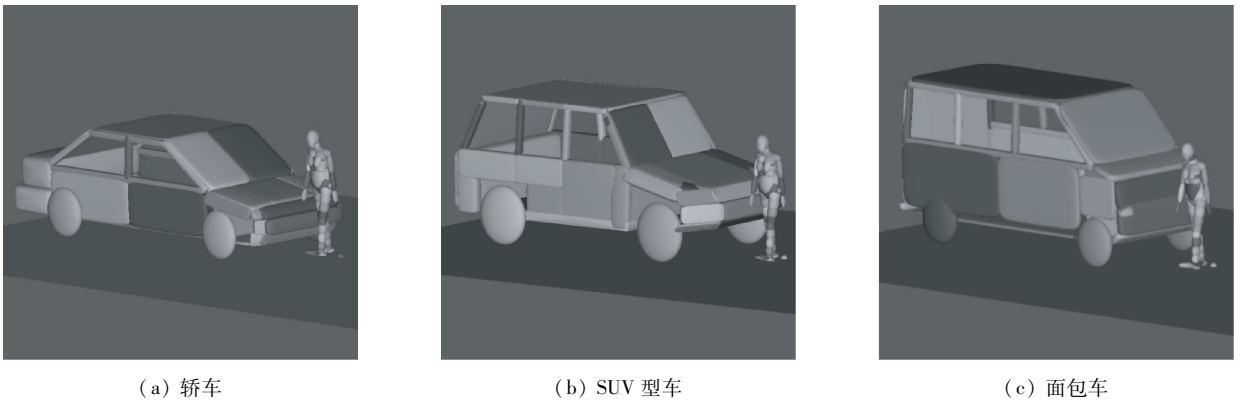


图1 不同车型与行人侧面碰撞

Fig.1 Impact of different vehicles with the lateral of pedestrian (a) Car, (b) SUV, (c) Minibus

1.4 计算结果验证

用两例真实的事故案例对模拟碰撞试验结果进行验证:案例1:1辆轿车以24 km/h的碰撞速度与行人左侧发生接触,造成行人右额、颞叶脑挫裂伤,右侧额、颞、顶部硬膜下血肿;案例2:1辆SUV型车以45 km/h的碰撞速度与行人左侧发生接触,造成行人左侧颞顶部出现22.0 cm×0.1 cm创口,且相

应部位颅骨缺失。利用相同的模拟仿真方法进行该两例事故重建,输出事故中行人头部HIC值以及线性加速度等结果。

2 结果

2.1 事故案例重建结果

(1)以车人发生接触瞬间为0 ms开始计时,经

过 99.9 ms 行人头部与轿车风挡发生接触,经过 485 ms 行人被撞旋转 180°,经过 2 135 ms 行人与车辆停止,两者的相对距离为 6.2 m,仿真中行人与车辆接触部位、行人运动姿态以及行人抛掷距离与视频中行人与车辆接触部位相吻合(见图 2)。

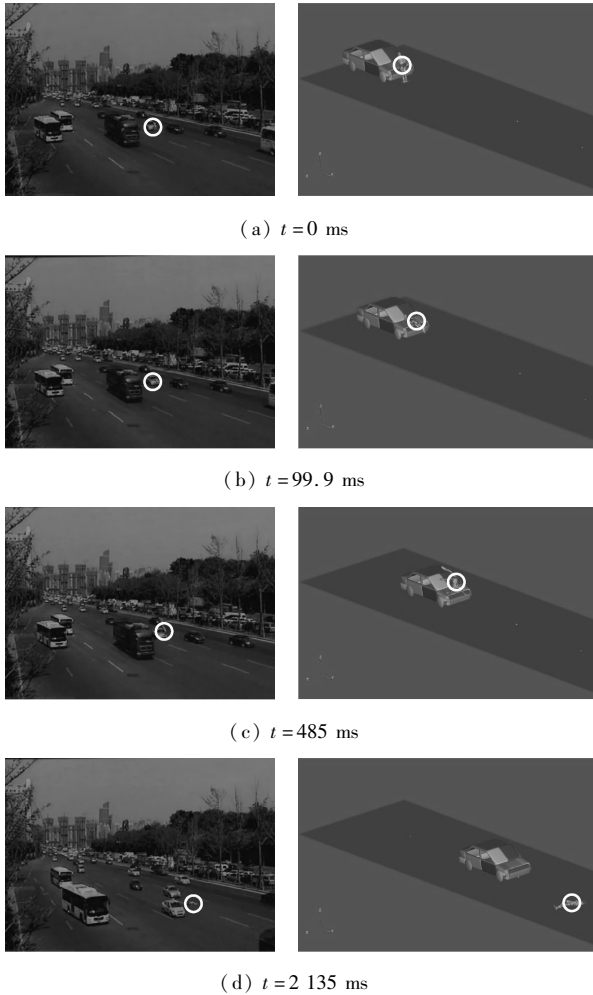


图 2 仿真中行人运动轨迹及姿态与视频相吻合
 Fig.2 Pedestrian movement trajectory and posture in the simulation coincide with the video

(2) 在行人头部线性加速度曲线输出中出现了两个较高的峰值(见图 3),第 1 峰值时刻(99.9 ms)行人右侧额面部与车辆前挡风玻璃下部接触,行人头部线性加速度为 $3\,522.1\text{ m/s}^2$,输出的行人头部 HIC 值为 1 187,超过冲击水平的 HIC 值 1 000;第 2 峰值时刻(1 044.2 ms)行人头枕部与地面接触,行人头部线性加速度为 $7\,412.9\text{ m/s}^2$ 。由表 1 尸检报告与仿真结果的比对可知,行人不但与车辆接触时

头部损伤严重,而且与地面接触头部损伤也很严重;在视频中能看到行人被轿车撞击在空中旋转一圈后头枕部与地面发生接触,与尸检报告结论(行人系颅脑损伤死亡)相吻合。

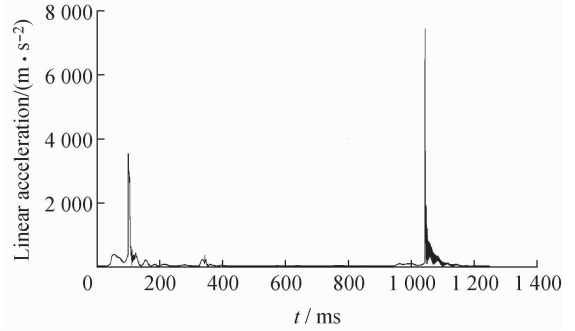


图 3 行人头部线性加速度
 Fig.3 Linear acceleration of the pedestrian head

表 1 尸检报告与仿真结果对比

Tab.1 Comparison of autopsy report with simulation results

接触部位	尸检报告	仿真结果
行人右面部及右颞部与车辆接触	行人右侧面部散在片状表皮剥脱,右颞部有 $8.0\text{ cm} \times 6.0\text{ cm}$ 的头皮血肿	第 1 峰值出现时刻(99.9 ms),行人头部线性加速度为 $3\,522.1\text{ m/s}^2$
行人顶枕部与地面接触	左顶枕部有 $12.0\text{ cm} \times 9.0\text{ cm}$ 的头皮血肿,其间有 $0.6\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ 的裂口	第 2 峰值出现时刻(1 044.2 ms),行人头部线性加速度为 $7\,412.9\text{ m/s}^2$

2.2 不同输入参数的模拟碰撞实验结果(见图 4)

(1) 行人头部损伤的严重度与车辆碰撞速度成正比,碰撞速度越高,行人头部损伤越严重。

(2) 图 4(a)显示不同车型撞击行人正面,碰撞速度 $\leq 40\text{ km/h}$ 时,轿车致行人头部损伤严重度大于 SUV 型车与面包车,面包车致行人头部损伤严重度最小,当碰撞速度 $> 40\text{ km/h}$ 时,SUV 型车致行人头部损伤严重度明显高于轿车与面包车。图 4(b)显示不同车型撞击行人侧面时,SUV 型车致行人头部损伤严重度依次大于轿车与面包车。图 4(c)显示不同车型撞击行人背面时,SUV 型车致行人头部损伤严重度依次大于轿车与面包车。

(3) 图 4(d)显示轿车撞击行人不同部位(正面、侧面、背面)时,行人正面受到撞击,头部损伤严

重度依次大于背面和侧面受到撞击。图4(e)显示SUV型车撞击行人不同部位时,行人正面受到撞击,头部损伤严重度依次大于背面和侧面受到撞击。

图4(f)显示面包车撞击行人不同部位时,行人背面受到撞击,头部损伤严重度依次大于正面和侧面受到撞击。

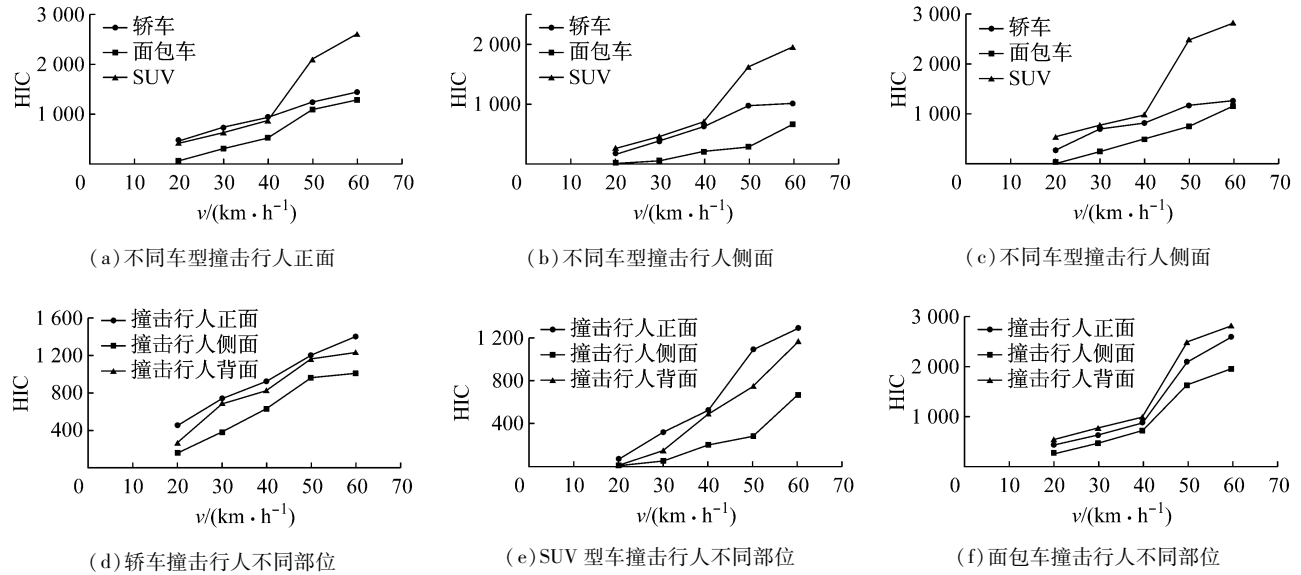


图4 行人头部与车辆接触 HIC 值

Fig. 4 Head HIC of pedestrian caused by contact with the vehicle (a) Contact of different types of vehicles with the front of pedestrian, (b) Contact of different types of vehicles with the side of pedestrian, (c) Contact of different types of vehicles with the back of pedestrian, (d) Car contact with different positions of pedestrian, (e) SUV contact with different positions of pedestrian, (f) Minibus contact with different positions of pedestrian.

2.3 真实案例验证结果

案例1:轿车以24 km/h的碰撞速度撞击行人左侧,行人头部左侧与车辆接触,HIC值为298.3,行人右侧与地面接触受伤严重,HIC值为1279.1;案例2:SUV型车以45 km/h的碰撞速度撞击行人左侧,行人头部左侧与车辆接触受伤严重,HIC值为1076.8,行人头枕部与地面接触受伤较轻,HIC值为845.6。

3 讨论

(1) 以往的行人交通事故重建多是在保证事故最终时刻车辆、行人的位置和车人相对距离与真实情况相符的前提下进行,但是行人运动姿态、车辆的制动情况、行人与地面的摩擦系数大小也会影响其结果,利用有视频的行人交通事故案例进行事故重建,能有效避免这些因素的影响,更准确地进行事故重建和人体损伤研究。

(2) 行人交通事故中,行人头部损伤严重度取决于车辆碰撞速度,降低车辆碰撞速度能有效减小

行人头部损伤的严重程度。试验中发现较低车速(20、30 km/h)撞击行人时,行人与车辆直接接触时头部的HIC值低于损伤标准值1000,但是与地面接触时头部的HIC值却高于损伤标准值1000,此结果能合理解释低速撞击致行人头部严重损伤的情况;而碰撞速度大于等于40 km/h时,行人头部损伤主要是与车辆接触所致,真实事故案例结果验证了这一结论。由表2可知,面包车撞击行人时,行人头部与地面接触HIC值高于与车辆接触HIC值的情况最多,这可能是由于轿车与SUV型车撞击行人时,行人均绕车头发生较大旋转而损伤能量,而面包车撞击行人时,行人与车头接触后发生较小的旋转便与地面直接接触,增加了行人头部与地面接触损伤的风险。

(3) 行人头部损伤严重度还取决于车辆前置结构,整体上SUV型车致行人头部损伤的严重度比轿车和面包车高,与文献[16]研究结果相符,这可能是由于SUV型车撞击行人时,行人头部直接与SUV型车引擎盖发生接触,而面包车与轿车撞击行人时,

行人头部直接接触的是风挡玻璃,引擎盖的刚度系数比风挡玻璃要高,造成行人头部损伤更严重。当碰撞速度达到 50 km/h 时,SUV 型车撞击行人,行人头部 HIC 值出现了一个跃变,而面包车与轿车较平稳。可以考虑在行人交通事故频发的路段对不同车型进行不同的限速,能有效降低行人头部损伤的严重度。

(4) 行人头部损伤严重度也取决于行人受撞击部位。在轿车与 SUV 型车撞击行人时,均是行人正面受撞击时头部损伤最严重,行人侧面受撞击时头部损伤最轻;而面包车撞击行人时,行人背面受撞击时头部损伤最严重。说明车辆撞击行人时,行人侧面受到撞击头部损伤严重度较正面和背面受撞击时低;船头车撞击行人正面时头部损伤严重度高于背面受撞击;平头车撞击行人背面时头部损伤严重度高于正面受撞击。此结果可为机动车行人保护装置的设计提供理论基础。

表 2 行人头部与地面接触 HIC 值高于与车辆接触 HIC 值的情况
 Tab. 2 Pedestrian's head HIC caused by contacting with the ground is higher than contacting with the vehicle

车型	碰撞速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	撞击部位	头部与地面 接触 HIC 值	头部与车辆 接触 HIC 值
轿车	20	正面	1 294.2	458.82
SUV	20	背面	1 737.6	17.894
面包车	20	正面	1 173	431.4
面包车	20	背面	1 139	542.78
轿车	30	背面	1 611.9	697.22
面包车	30	侧面	1 877	471.16

4 结论

行人交通事故中,行人头部损伤取决于诸多因素,如车辆碰撞速度、车辆前置结构、行人受撞击部位、行人姿态、行人行走速度^[17]等,其中车辆碰撞速度是造成行人头部损伤的主要原因;碰撞速度 $\leq 30 \text{ km/h}$ 时,行人头部 HIC 值明显减小;故在行人交通事故频发的路段可以降低车辆限速致 30 km/h ,能有效减小行人头部损伤严重度。车辆前置结构也是造成行人头部损伤的重要原因,可对车辆前置结构进行合理改进或对行人交通事故频发路段进行不

同车型的不同限速来减小行人头部损伤严重度。虽然利用多刚体动力学方法开展行人交通事故重建已被验证,且其具有建模简单、运行速度快等优点,但是与有限元模型比较,其人体模型过于简化;下一步计划利用 THUMS 全人体模型^[18]进行相关研究,可获得更多物理参数(应力波的传递、颅内压力等);且模拟仿真的结果需要大量真实事故案例进行验证,接下来将利用更多事故案例对本研究结果进行验证,丰富和完善本研究成果。

参考文献:

- [1] 王正国. 现代交通医学[M]. 重庆: 重庆出版社, 2011: 22.
- [2] 王正国. 交通事故伤研究近况[J]. 中华创伤杂志, 1996, 12(6): 12.
- [3] Gennarelli TA, Champion HR, Copes WS. Importance of mortality from head injury in immediate survivors of vehicular injuries [C]//Proceedings of the 1992 International IR-COBI Conference on the Biomechanics of Impacts. Verona, Italy: [s. n.], 1992: 167-178.
- [4] Kraus JF, McArthur DL. Epidemiologic aspects of brain injury [J]. Neurol Clin, 1996, 14(2): 435-450.
- [5] 许树耘, 董凯. 交通事故伤 1256 例分析[J]. 四川医学, 1999, 20(5): 458.
- [6] 刘宝松, 姜燕平. 颅脑创伤模型与生物力学机制研究新进展[J]. 创伤外科杂志, 2000, 2(1): 57-59.
- [7] Ruan JS, Prasad P. Head injury potential assessment in frontal impact by mathematical modeling [C]//Proceedings of 38th Stapp Car Crash Conference. Fort Lauderdale, USA: [s. n.], 1994.
- [8] Willinger R, Baumgartner D, Chinn B, et al. Head tolerance limits derived from numerical replication of real world accidents [C]//Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury. Montpellier, France: [s. n.], 2000: 209-221.
- [9] 李海岩, 赵伟, 阮世捷, 等. 第 95 百分位中国人头部颅脑相对位移的有限元评估[J]. 医用生物力学, 2012, 27(2): 198-206.
 Li HY, Zhao W, Ruan SJ, et al. Finite element evaluation on skull-brain relative displacement of the 95th percentile Chinese human head [J]. J Med Biomech, 2012, 27(2): 198-206.
- [10] 王成焱. 中国力学虚拟人[J]. 医用生物力学, 2006, 21(3): 172-178.
 Wang CT. Mechanical virtual human of China [J]. J Med Biomech, 2006, 21(3): 172-178.

- [11] 胡远志, 曾必强, 谢书港. 基于LS-DYNA和HyperWorks的汽车安全仿真与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 12.
- [12] TNO Automotive. MADYMO utilities manual [M]. Version 6.2.2. Netherlands: 2005.
- [13] Martinez L, Guerra LJ, Ferichola G, *et al.* Stiffness corridors of the European fleet for pedestrian simulation [C]// Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Lyon, France: [s. n.], 2007.
- [14] Yang JK, Lövsund P, Cavallero C, *et al.* A human-body 3d mathematical model for simulation of car-pedestrian impact [J]. J Crash Prev Inj Control, 2000, 2(2): 131-149.
- [15] TNO Automotive. MADYMO theory manual [M]. Version 6.2.2. Netherlands: [s. n.], 2005.
- [16] Han Y, Yang JK, Mizuno K, *et al.* Effects of vehicle impact velocity on pedestrian fatal injury risk [J]. Chin J Automot Eng, 2011, 1(4): 399-407.
- [17] Elliott JR, Simms CK, Wood DP. Pedestrian head translation, rotation and impact velocity: The influence of vehicle speed, pedestrian speed and pedestrian gait [J]. Accid Anal Prev, 2012, 5(4): 342-353.
- [18] TOYOTA Motor Corporation. The documentation of total human model for safety [M]. Version 4.0. Japan: [s. n.], 2011.

(上接第159页)

- [7] 赵彦峻, 徐诚. 人体下肢外骨骼设计与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(17): 4756-4759.
- [8] Martinez-Villalpando CE, Herr H. Agonist-antagonist active knee prosthesis: A preliminary study in level-ground walking [J]. J Rehab Res Develop, 2009, 46(3): 361-373.
- [9] Lawson BE, Varol HA, Goldfarb M. Standing stability enhancement with an intelligent powered transfemoral prosthesis [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2011, 58(9): 2617-2624.
- [10] Dollar AM, Hugh H. Lower extremity exoskeleton and active orthoses: Challenges and state-of-the-art [J]. IEEE Trans Robot, 2008, 24(1): 144-158.
- [11] Trallesi M, Porcaccia P, Averna T, *et al.* Energy cost of walking measurements in 96 subjects with lower limb amputations: A comparison study between floor and treadmill test [J]. Gait Posture, 2008, 27(1): 70-75.
- [12] Zielinska T, Chew CM, Kryczka P, *et al.* Robot gait synthesis using the scheme of human motions skills development [J]. Mech Mach Theory, 2009, 44(3): 541-558.
- [13] 徐生林, 刘艳娜. 两足机器人的SimMechanics建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(7): 1361-1367.