

Numerical Analysis of the Pedestrian Head Injury in Car-to-Pedestrian Crashes for the Road Speed Limits

Lihai REN¹, Bingyu WANG¹, Jikuang YANG^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China

² Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Gothenburg, Sweden

Email: lihai.ren@hotmail.com, jikuang.yang@chalmers.se

Abstract: The objective of this study was to investigate the effect of the vehicle impact speed on the severe pedestrian head injury risks associated with car-to-pedestrian crashes for the road speed limits. Multi-body models for two family vehicle and two vans were developed based on the measurement of vehicle front-end shapes; and multi-body models for a 50 percentile Chinese male pedestrian and a six-years old pedestrian scaled from a previous developed and validated pedestrian model. Car-to-pedestrian impact simulations were performed with vehicle impact speed varied from 15 km/h to 60 km/h, while the pedestrian models were assigned with different walking posture before the impacts. Pedestrian head injury risks were evaluated with respect to the Head Injury Criteria (HIC). Simulations demonstrate that, the possibility for the adult pedestrian sustained severe head injury will exceed 50% if the impact speeds of the family vehicle and vans are higher than 42 km/h and 46.8 km/h, respectively; for the child pedestrian, the corresponding vehicle impact speeds are 49.3 km/h and 41.2 km/h, respectively. Road speed limits are suggested as 35 km/h - 40 km/h for the areas where pedestrian accidents are likely to happen. Furthermore, a speed restriction of 30 km/h is proposed for the van in the areas where child pedestrian are appeared frequently.

Keywords: vulnerable road user; pedestrian safety; traumatic head injury; road traffic accidents

基于汽车-行人碰撞事故中行人颅脑损伤风险的道路限速研究

任立海¹, 王丙雨¹, 杨济匡^{1,2}

¹ 湖南大学, 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 410082

² 查尔莫斯理工大学, 哥德堡, 瑞典, SE-412 96

Email: lihai.ren@hotmail.com, jikuang.yang@chalmers.se

摘要: 本研究的目的是通过汽车-行人碰撞仿真分析, 研究我国汽车-行人碰撞事故中汽车碰撞速度对行人严重颅脑损伤风险的影响, 同时为基于行人保护的道路上限速设定提供理论依据。采用 MADYMO 软件分别建立了两款家用型轿车、两款厢式车多体模型, 并通过对行人多体模型缩放得到我国 50 百分位成年男子、6 岁儿童的多体模型。建立了汽车-行人多体碰撞模型, 并进行汽车碰撞速度在 15 km/h 到 60 km/h 间、行人处于多种行走姿态下的汽车-行人碰撞仿真分析。选用行人头部损伤评价准则 (HIC15), 并结合 HIC15 值与颅脑损伤的风险关系, 评估不同类型汽车的汽车碰撞速度分别对成年行人、儿童行人遭受严重颅脑损伤风险的影响。仿真分析结果显示: 对应成年行人 50% 严重颅脑损伤风险的家用型轿车碰撞速度为 42 km/h、厢式车碰撞速度为 46.8 km/h; 对应于儿童行人 50% 的严重颅脑损伤风险的家用型轿车碰撞速度为 49.3 km/h、厢式车的碰撞速度为 41.2 km/h。基于本文的研究结果, 提出的道路限速参考值为: 在行人较为集中的商业区、学校周边以及居民区附近, 家用型轿车以及厢式车的最高行驶速度均应限定在 35 km/h-40 km/h 左右。考虑在遭受厢式车碰撞下儿童行人较高的颅脑损伤风险, 在儿童行人密集区域厢式车的最高行驶速度应限定在 30 km/h。

关键词: 易受伤害道路使用者; 行人安全; 头部外伤; 道路交通事故

1 引言

行人作为最易受伤害的道路交通使用者，在道路交通事故伤亡人员中占有较大比重。我国 2010 年道路交通事故统计数据^[1]显示，在所有因道路交通事故受伤的人员中，行人受伤人数为 44,629，占交通事故受伤总人数的 17.575%；而在全部交通事故死亡人员中，行人的比例高达 24.96%。在汽车-行人碰撞事故中行人颅脑损伤占身体各部位损伤总数的 40%左右，而严重颅脑损伤是导致行人死亡的主要原因^[2,3]。

在汽车-行人碰撞事故中，车辆的碰撞速度、车辆的类型、行人的行走姿态以及行人身高等都直接影响着行人颅脑损伤风险^[4-6]。其中，汽车碰撞速度是决定行人头部与汽车前部结构碰撞强度的主要原因，因此汽车碰撞速度对行人颅脑损伤的影响一直是汽车与交通安全领域的研究热点。Peng 等^[7]对德国 GIDAS 数据库中行人事故进行分析，并对其中 22 例汽车-行人碰撞事故进行了重建研究。事故重建结果显示，行人遭受 AIS2+和 AIS3+*头部伤害的风险高于 50%时，对应的汽车碰撞速度分别为 38.87 km/h 和 54.39 km/h。Yao 等^[8]对 23 例汽车-儿童行人碰撞事故进行了分析和事故重建。结果表明：当汽车碰撞速度为 30 km/h 时，儿童行人遭受 AIS2+头部伤害的风险高于 23%。（*AIS：简明损伤准则；AIS3+：严重损伤）

应用多体模型，国内外研究人员对不同类型汽车撞击下，行人的响应过程以及损伤风险进行了大量的研究。Mizuno^[9]采用汽车-行人碰撞多体模型，仿真分析了家用型轿车、SUV 以及厢式车撞击下行人的运动学响应过程以及颅脑风险。同样采用多体仿真模型，Peng 等^[10]分析了行人的行走姿态、汽车前部结构几何特征对行人头部动力学响应的影响。Mizuno 和 Kajzer^[11]对比分析了家用型轿车和厢式车碰撞下行人的头部动力学响应和损伤风险。

综上所述，国内外的研究人员从事事故数据统计分析、事故重建研究以及仿真分析等方面对汽车-行人碰撞事故中行人的颅脑损伤风险以及影响因素进行了评估。但是，具体针对我国的道路交通情况，分析汽车碰撞速度对行人颅脑损伤风险的研究较少。因此本文将通过建立汽车-行人碰撞的多体模型，仿真分析汽车-行人碰撞事故中不同类型汽车的碰撞速度对成年行人和儿童行人遭受严重颅脑损伤风险的影响。本文的仿真分析结果也可为中国道路限速提供提供参考依据。

2 方法和材料

2.1 行人多体模型

本文采用由杨济匡等^[12]开发的行人多体模型进行汽车-行人多体碰撞仿真。该模型通过了汽车-行人碰撞实验的验证，具有较高的生物逼真度。湖南大学汽车与交通安全研究中心的深入交通事故调查数据（IVAC）显示，汽车-行人碰撞事故中男性占有遭受严重伤害的行人总数的 67.7%^[13]。国际协调研究组织 IHRA 的行人事故数据显示，6-10 岁行人占行人事故总人数的比重 14%左右；而在人口密度较高的日本，这一数据达到了 20%^[14]。马文军等^[15]对儿童行人事故进行了流行病学分析，认为 5-9 岁儿童行人交通伤害风险较高。因此，本文选取我国 50 百分位成年男子和 6 岁儿童作为研究对象。其中 50 百分位成年男子模型依据《GB 10000-88 中国成年人人体尺寸》^[16]公布的数据原始模型进行缩放。6 岁儿童模型依据 MADYMO 软件中集成的 GEBOD 人体测量学数据库数据对原始模型缩放，同时按照儿童特点更改行人模型中的关节特性参数和身体各部分的刚度特性^[17]。缩放得到的成年行人模型身高和体重分别为 1678 mm 和 59 kg；6 岁儿童行人模型的身高和体重分别为 1150 mm 和 21.3 kg。

2.2 汽车多体模型

本文选择在行人碰撞事故中占有较高比重的家用型轿车和厢式车（以微型客车为主）作为研究对象^[11]。首先，在 MADYMO 软件中利用椭球对车辆的外形进行拟合得到多体汽车模型，图 1 所示为建立的具有代表性的两款家用型轿车模型和两款厢式车模型。参照相关行人子部件冲击器实验结果^[11, 18, 19]，对在汽车-行人碰撞过程中与行人发生接触的汽车前部结构定义“力-位移”刚度特性。

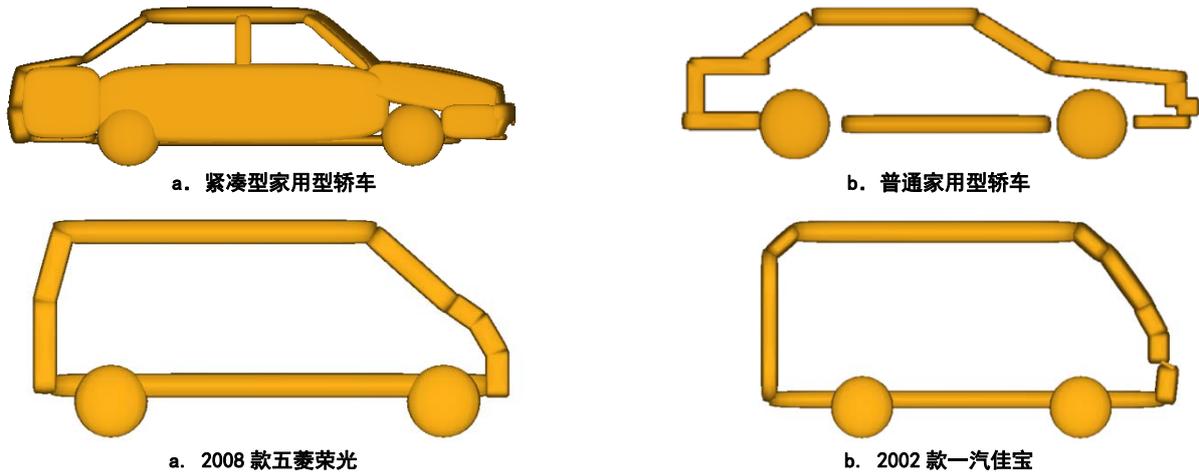


Figure 1. Multi-body vehicle models
图 1. 汽车多体模型

2.3 汽车-行人碰撞仿真模型

行人事故统计数据表明，在 90% 以上的汽车-行人碰撞事故中汽车碰撞速度低于 60 km/h^[20]；且行人碰撞事故以汽车从行人侧面撞击为主要形态^[8, 21, 22]。因此，本文在建立汽车-行人碰撞仿真模型时，设定汽车碰撞速度最高为 60 km/h、最低碰撞速度 15 km/h、速度间隔为 5 km/h；在仿真的初始时刻，行人模型放置于车辆的前部中间位置，汽车从行人的右侧进行撞击。同时，设置行人模型分别处于站立、正常行走和跑动三种姿态（如图 2 所示），相应的行走速度分别为：0 m/s、1.55 m/s 以及 3.15 m/s^[23]。

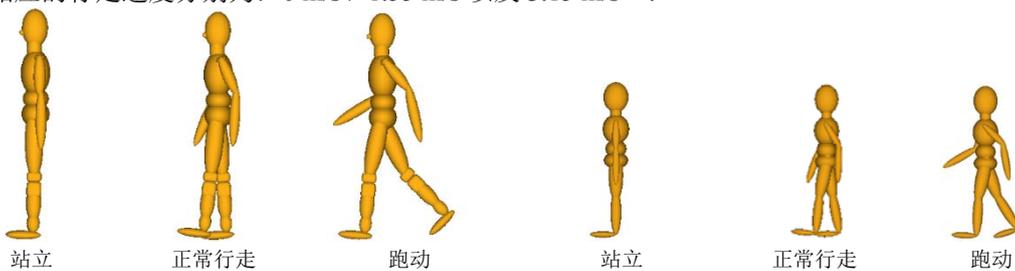


Figure 2. Walking posture of pedestrian models
图 2. 行人模型的行走姿态

2.4 行人头部损伤准则

本文采用行人法规头部损伤准则 HIC15 评估行人头部损伤风险。Prasad 和 Mertz^[24]对大量的尸体试验数据进行分析，并利用 Mertz/Weber 方法得到了基于 54 例尸体试验结果的 HIC15 值与颅骨骨折的对应关系以及基于 43 例尸体试验结果的 HIC15 值与脑损伤的对应关系，其方程均可表示为：

$$P = \Phi\left(\frac{HIC15 - \mu}{\sigma}\right) \quad (1)$$

在 HIC15 值与颅骨骨折风险的关系方程中， $\mu=1400$ ， $\sigma=450$ ；在 HIC15 值与脑损伤风险的关系方程中， $\mu=1433$ ， $\sigma=450$ 。考虑两组结果参数相近且原始实验数据中有脑损伤等级记录的案例，除一例为 AIS2 级脑损伤外，其余均为 AIS3+ 损伤。本文采用 Prasad 和 Mertz 研究结果中 HIC15 值与脑损伤的关系曲线作为行人 AIS3+ 颅脑损伤的预测模型。

3 结果

3.1 行人运动学响应

以 40 km/h 的碰撞速度下行人处于行走状态的 4 组仿真为例，展示碰撞过程中行人在汽车前部的碰撞位置（如图 3 所示）。在这 4 组仿真中，行人头部碰撞位置分别为前挡风玻璃下沿、发动机罩前部、前挡风玻璃中间区域以及发动机罩中间区域。图 4 所示为相应的行人头部质心与汽车的相对速度时间历程曲线，其中标记点

为行人头部与汽车前部结构发生碰撞时刻。在家用型轿车-成年行人、厢式车-成年行人、家用型轿车-儿童行人以及厢式车-儿童行人碰撞仿真中，头部碰撞速度分别为 35.7 km/h、22 km/h、19.1 km/h 以及 24.2 km/h。

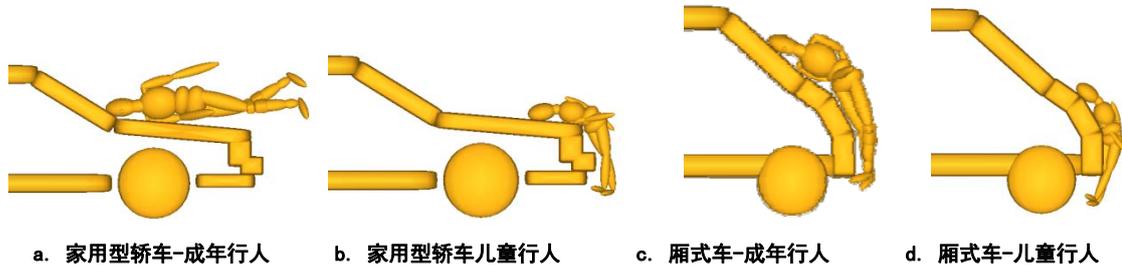


Figure 3. Samples of the kinematic responses of pedestrian models
图 3.行人运动学响应示例

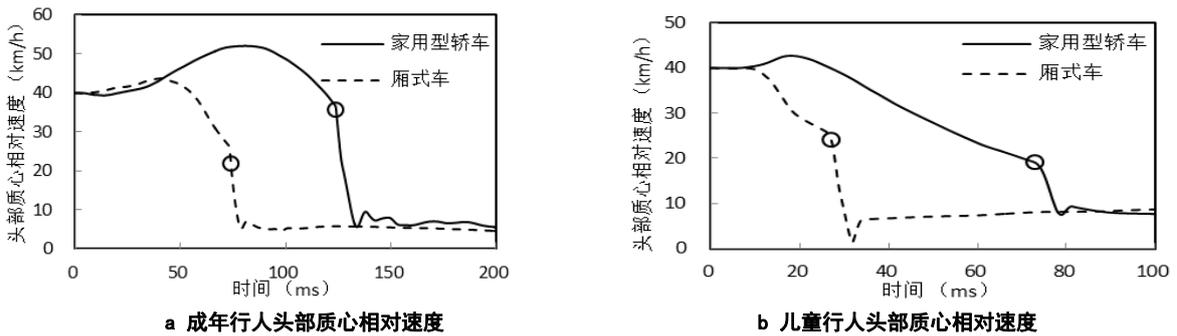


Figure 4. Samples of the resultant relative velocities between the pedestrian head and car
图 4. 行人头部质心与汽车相对速度示例

3.2 仿真计算的行人 HIC15 值

仿真结果显示当家用型轿车碰撞速度在 30 km/h 以下时，儿童行人 HIC15 值小于 100。因此在评估家用型轿车碰撞速度对儿童严重颅脑损伤风险的影响时，仅考虑 30 km/h 至 60 km/h 的汽车碰撞速度范围。计算同一汽车碰撞速度下两款家用型轿车、3 种行走姿态下得到的行人头部 HIC15 均值，在 Excel 软件中开展回归分析可以得到行人 HIC15 值与家用型轿车碰撞速度的回归方程，如下：

$$y = 133.26e^{0.0571x} \quad (2)$$

$$y = 0.0002x^{4.0912} \quad (3)$$

方程 (2, 3) 分别代表家用型轿车碰撞速度与成年行人、儿童行人 HIC15 值的关系；其中 x 为碰撞速度， y 为行人头部 HIC15 值，回归方程的相关系数 R^2 分别为 0.985 和 0.9878；方程所确定的回归曲线如图 5 所示。当成年行人和儿童行人的 HIC15 值为 1000 时，对应的家用型轿车碰撞速分别为 35.3 km/h 和 45 km/h。随着家用型轿车碰撞速度的增加，行人 HIC15 值显著上升；且相同碰撞速度下的成年行人 HIC15 值高于儿童行人行人。

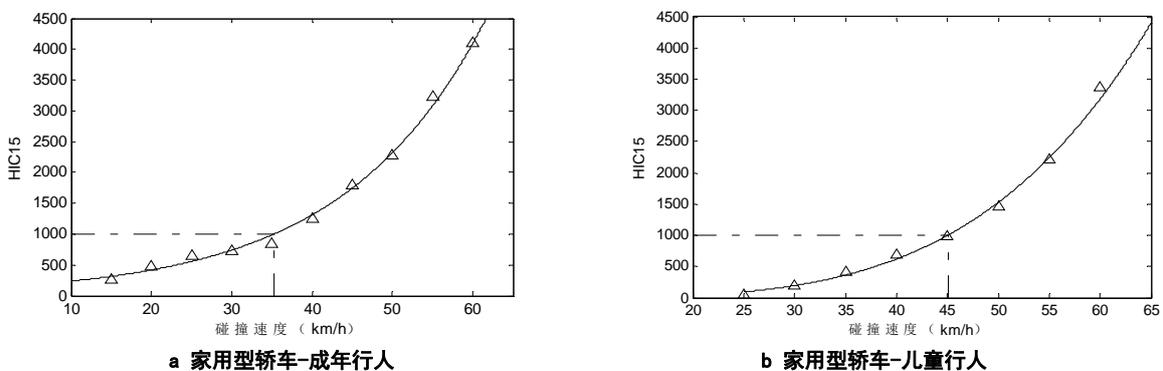


Figure 5. Regression curves of impact velocities of the family car vs. mean HIC15 values
图 5. 家用型轿车碰撞速度与行人模型 HIC15 值的回归曲线

同样地，计算同一碰撞速度下两款厢式车、3种行走姿态下得到的行人 HIC15 均值，进行回归分析可以得到行人 HIC15 值与厢式车碰撞速度的回归方程：

$$y = 0.6508x^2 + 3.6768x - 166.93 \quad (4)$$

$$y = 0.0735x^{2.6899} \quad (5)$$

方程（4，5）分别代表厢式车碰撞速度与成年行人、儿童行人 HIC15 值的关系；其中 x 为碰撞速度， y 为行人头部 HIC15 值，回归方程的相关系数 R^2 分别为 0.998 和 0.9899；方程所确定的回归曲线如图 6 所示。当成年行人和儿童行人的 HIC15 值为 1000 时，对应的厢式车碰撞速分别为 39.1 km/h 和 36 km/h。随着厢式车碰撞速度的增加，行人 HIC15 值显著上升；且相同碰撞速度下的儿童行人 HIC15 值高于成年行人。

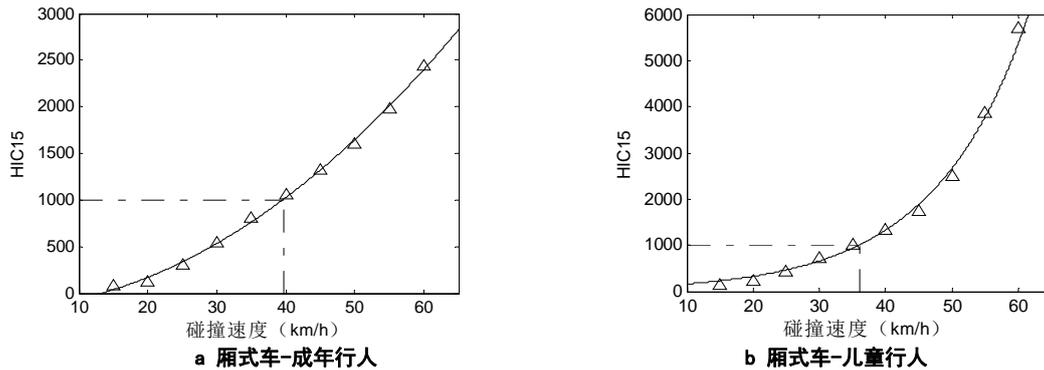


Figure 6. Regression curves of the impact velocity of the van of the van vs. mean HIC15 values
图 6. 厢式车碰撞速度与成年行人头部 HIC15 值

3.3 汽车碰撞速度与行人头部严重伤害风险曲线

分别将 4 个汽车碰撞速度与行人头部 HIC15 值的回归关系方程（2-5）代入公式（1），可以得到分别表示家用型轿车-成年行人、家用型轿车-儿童行人、厢式车-成年行人、厢式车-儿童行人碰撞中汽车碰撞速度与行人遭受 AIS3+颅脑损伤风险的方程：

$$P = \Phi\left(\frac{133.26e^{0.0571x} - 1433}{450}\right) \quad (6)$$

$$P = \Phi\left(\frac{0.0002x^{4.0912} - 1433}{450}\right) \quad (7)$$

$$P = \Phi\left(\frac{(0.6508x^2 + 3.6768x - 166.93) - 1433}{450}\right) \quad (8)$$

$$P = \Phi\left(\frac{0.0735x^{2.6899} - 1433}{450}\right) \quad (9)$$

4 组方程对应的损伤风险曲线如图 7 所示：在家用型轿车-成年行人、家用型轿车-儿童行人、厢式车-成年行人、厢式车-儿童行人 4 组仿真中，对应于 50%的行人 AIS3+颅脑损伤风险的汽车碰撞速度分别为 42 km/h、49.3 km/h、46.8 km/h、41.2 km/h；对应于 5%的行人 AIS3+颅脑损伤风险的汽车碰撞速度分别为 30 km/h、41.2km/h、33.6 km/h、30.8 km/h；而对应于 95%的行人 AIS3+颅脑损伤风险的汽车碰撞速度分别为 50 km/h、54.6 km/h、57.2 km/h、47.1 km/h。

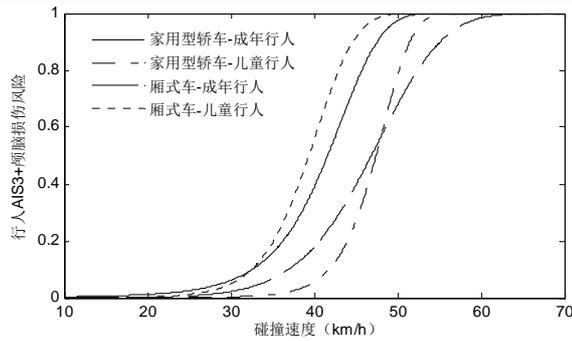


Figure 7. Regression curves of the vehicle impact velocity vs. AIS3+ head injury risk
图 7. 汽车碰撞速度与行人头部 AIS3+损伤风险曲线

4 讨论

4.1 行人头部损伤风险分析

对比成年行人 AIS3+颅脑损伤风险，在相同汽车碰撞速度下，家用型轿车撞击致伤的可能性高于厢式车。这是由于在低速碰撞下，成年行人头部分别与厢式车的前挡风玻璃中间区域以及家用型轿车的发动机罩后部区域接触。前挡风玻璃中间区域刚度较低、造成行人头部严重伤害的风险相对较小。在高速碰撞时时，家用型轿车撞击下的成年行人头部碰撞速度高于厢式车撞击时成年行人的碰撞行人头部碰撞速度，从而造成行人较高的颅脑损伤风险。从图中时间历程曲线（图 4a）来看，在家用型轿车碰撞下成年行人的绕转运动所产生头部对汽车前部结构的锤击效应加大了头部碰撞速度。这与已有文献研究结果相符^[26]。

而对于儿童行人 AIS3+颅脑损伤风险，结果与成人行人的情况相反：在相同汽车碰撞速度下，厢式车撞击造成的儿童头部严重伤害的风险高于家用型轿车。由图 3b 和图 3d 可知，由于儿童行人身高较低，其头部在厢式车、家用型轿车的碰撞位置均为发动机罩。但是在厢式车-行人碰撞中，发动机罩近乎直接撞击行人头部，头部碰撞速度较高；而在家用型轿车-儿童行人碰撞中，由于儿童行人头部高于发动机罩前缘，所以头部经过一定绕转后撞击到发动机罩，头部碰撞速度较低。

4.2 汽车碰撞速度与行人 AIS3+颅脑损伤文献结果对比

表 1 中列出了采用不同方法得到的汽车碰撞速度与成年行人 AIS3+颅脑损伤风险的关系。其中 Peng 等^[7]对德国 GIDAS 数据中 22 例家用型轿车-行人碰撞事故进行仿真重建，得到汽车碰撞速度与行人 AIS3+颅脑损伤风险的逻辑回归关系曲线；Mizuno 等^[14]整理了 IHRA 数据中 220 例存在 AIS3+颅脑损伤的汽车（包括家用型轿车，SUV 以及厢式车）-行人碰撞事故，得到汽车碰撞速度与行人 AIS3+颅脑损伤风险的累计分布；Kendall 等^[27]采用与本文相似的方法，建立了汽车-行人碰撞的多体模型，得到汽车碰撞速度与行人 AIS3+颅脑损伤的风险曲线。

Table 1. AIS3+ head injury risks at different vehicle impact velocities
表 1. 汽车碰撞速度与成年行人颅脑 AIS3+损伤风险

	汽车碰撞速度对应的行人 AIS3+颅脑损伤风险			50%的 AIS3+颅脑损伤风险对应的汽车碰撞速度
	30 km/h	40 km/h	50 km/h	
Peng	5.8%	16.2%	37.7%	54.39 km/h
Mizuno	20%	36%	58%	46km/h
Kendall	47%	89%	93%	32km/h
本文-家用型轿车	6.15%	39.06%	97.5%	42 km/h
本文-厢式车	2.23%	18.02%	68.04%	46.8 km/h

对比 50%的 AIS3+颅脑损伤风险对应的汽车碰撞速度,本研究结果与 Mizuno 的结果相近;而 Kendall 和 Peng 的结果则分别对应较低和较高的碰撞速度。本文与 Kendall 的结果显示行人遭受 AIS3+颅脑损伤风险随汽车碰撞速度的增加上升较快。在 50 km/h 的碰撞速度下,相比 Peng 和 Mizuno 的研究,对应着较高的行人 AIS3+颅脑损伤风险。本文与 Kendall 均采用了 Prasad 和 Mertz 的 HIC15 值与颅脑损伤的关系曲线,虽然该曲线是通过对尸体实验数据整理得到,但是与真实事故相比,实验条件相对较为简单且, HIC 值变化范围较小,且出现严重颅脑损伤时 HIC 值较低。

4.3 展望

通过对比文献研究结果揭示:在评估汽车-行人碰撞事故中汽车碰撞速度与行人颅脑损伤风险的影响时,采用 Parasad 和 Mertz 的 HIC15 值与颅脑损伤的关系曲线转化得到的结果中存在高速碰撞下汽车碰撞速度对应着过高的颅脑损伤风险。为了能够较好的评价汽车-行人碰撞中的颅脑损伤风险,需要在今后的研究中采用基于行人事故重建、损伤重建的方法对 HIC15 值或其他损伤准则与颅脑损伤的风险关系进行评估。李凡^[29]、陈勇^[30]等均采用了事故重建和损伤重建相结合的方法,评价了多个行人损伤准则对颅脑损伤的预测性能,并得到了各损伤准则与颅脑损伤的回归关系。但是由于事故量较少且没有进行颅脑损伤的分类研究,所以相关研究工作需要继续深入。

5 结论

本文通过建立汽车-行人碰撞仿真模型,分析了我国道路交通中家用型轿车、厢式车的碰撞速度分别于成年行人和儿童行人严重颅脑损伤的关系。结果显示,家用型轿车-成年行人、家用型轿车-儿童行人、厢式车-成年行人、厢式车-儿童行人 4 组仿真中对应于 50%的行人 AIS3+颅脑损伤风险的汽车碰撞速度分别为 42 km/h、49.3 km/h、46.8 km/h、41.2 km/h。同时,仿真结果显示家用型轿车造成的成年行人 AIS3+颅脑损伤风险高于厢式车;而对于儿童行人,结果相反。基于本文的研究结果,提出的道路限速参考值为:在行人较为集中的商业区、学校周边以及居民区附近,家用型轿车以及厢式车的最高行驶速度均应限定在 35 km/h-40km/h 左右;而考虑厢式车对应的较高的儿童行人颅脑损伤风险,在儿童行人密集区域该车型的最高行驶速度应低于 30km/h。

参考文献

- [1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2010 年度)[R]. 北京: 公安部交通管理局, 2011.
- [2] YANG J, OTTE D. A Comparison Study on Vehicle Traffic Accident and Injuries of vulnerable Road Users in China and Germany[C]//The 20th ESV conference Proceedings. 2007: 07-0417.
- [3] ZHAO H, YIN Z, CHEN R, et al. Investigation of 184 Passenger Car-Pedestrian Accidents[J]. International Journal of Crashworthiness, 2010, 15(3): 313-320.
- [4] 李凡, 杨济匡. 基于车辆-行人碰撞颅脑损伤防护的参数研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(9): 1125-1130.
- [5] 王飞, 金先龙, 张晓云. 人车碰撞事故中行人步态影响的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(3): 217-221.
- [6] ELLIOTT J R, SIMMS C K, WOOD D P. Pedestrian Head Translation, Rotation and Impact Velocity: The Influence of Vehicle Speed, Pedestrian Speed and Pedestrian Gait[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 45: 342-353.
- [7] PENG Y, CHEN Y, YANG J, et al. A Study of Pedestrian and Bicyclist Exposure to Head Injury in Passenger Car Collisions Based on Accident

-
- Data and Simulations[J]. Safety Science, 2012, 50(9): 1749–1759.
- [8] YAO J, YANG J, OTTE D. Head Injuries in Child Pedestrian Accidents—In-Depth Case Analysis and Reconstructions[J]. Traffic Injury Prevention, 2007, 8(1): 94–100.
- [9] MIZUNO Y. Summary of IHRA Pedestrian Safety WG Activities (2003) – Proposed Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars[C]//The 18th ESV Conference Proceedings. Nagoya, Japan: 2003: 580.
- [10] PENG Y, DECK C, YANG J, et al. Effects of Pedestrian Gait, Vehicle-Front Geometry and Impact Velocity on Kinematics of Adult and Child Pedestrian Head[J]. International Journal of Crashworthiness, 2012, 17(5): 553–561.
- [11] MIZUNO K, KAJZER J. Head injuries in vehicle-pedestrian impact[C]//SAE. 2000: 2000–01–0157.
- [12] YANG J K, LÖVSUND P, CAVALLERO C, et al. A Human-Body 3D Mathematical Model for Simulation of Car-Pedestrian Impacts[J]. Journal of Crash Prevention and Injury Control, 2000, 2(2): 131–149.
- [13] 孔春玉. 孔春玉-博士论文-车辆碰撞行人事故与损伤流行病学调查研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2010.
- [14] MIZUNO Y. Summary of IHRA Pedestrian Safety WG Activities (2005) - Proposed Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars[C]//The 19th ESV Conference Proceedings. Wasington D.C., USA: 2005: 05–0138.
- [15] 马文军, 郭巧芝, 严青华. 儿童行人交通伤害流行特征及影响因素[J]. 中华流行病学杂志, 2010, 31(1): 100–102.
- [16] GB 10000-88, 中国成年人人体尺寸[S].
- [17] LIU X J, YANG J K. Development of Child Pedestrian Mathematical Models and Evaluation with Accident Reconstruction[J]. Traffic Injury Prevention, 2002, 3(4): 321–329.
- [18] MARTINEZ L, GUERRA L J, FERICHOLA G, et al. Stiffness Corridors of the European Fleet for Pedestrian Simulation[C]//The 20th ESV conference Proceedings. Lyon, France: 2007: 07–0267.
- [19] 韩勇. 车辆碰撞行人的动力学响应及胸部和下肢损伤机理研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2011.
- [20] KONG C, YANG J. Logistic Regression Analysis of Pedestrian Casualty Risk in Passenger Vehicle Collisions in China[J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42(4): 987–993.
- [21] ZHAO H, YANG G, ZHU F, et al. An Investigation on the Head Injuries of Adult Pedestrians by Passenger Cars in China[J]. Traffic Injury Prevention, 2012: 121212114151003.
- [22] YANG J. Review of Injury Biomechanics in Car-Pedestrian Collisions[J]. International Journal of Vehicle Safety, 2005, 1(1): 100–117.
- [23] 孔春玉, 杨济匡, 聂进. 基于真实事故形态分析的行人探测模型研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(11): 977–983.
- [24] PRASAD P, MERTZ H J. The Position of the United States Delegation to the ISO Working Group 6 on the Use of HIC in the Automotive Environment[C]//SAE. 1985: 851246.
- [25] GB / T 24550-2009, 汽车对行人的碰撞保护[S].
- [26] HAN Y, YANG J, MIZUNO K, et al. Effects of Vehicle Impact Velocity, Vehicle Front-End Shapes on Pedestrian Injury Risk[J]. Traffic Injury Prevention, 2012, 13(5): 507–518.
- [27] KENDALL R, MEISSNER M, CRANDALL J. The Causes of Head Injury in Vehicle-Pedestrian Impacts: Comparing the Relative Danger of Vehicle and Road Surface[C]//SAE. 2006: 2006–01–0462.
- [28] 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.
- [29] 李凡. 基于真实车辆-行人交通事故的颅脑损伤风险分析研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2009.
- [30] 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]. 湖南长沙: 湖南大学, 2010.