

# 基于人车相互作用时间的人地 碰撞损伤防护新视角\*

邹铁方<sup>1</sup>, 刘期<sup>1</sup>, 刘朱紫<sup>2</sup>, 刘阳阳<sup>1</sup>

1. 长沙理工大学汽车与机械工程学院/湖南省工程车辆安全性设计与可靠性技术重点实验室, 湖南长沙 410114
2. 长沙民政职业技术学院医学院, 湖南长沙 410004

**摘要:** 采用PC-Crash再现145例人车碰撞事故视频案例, 通过调整车辆制动以延长案例中的人车相互作用时间, 采集行人抛距、人体各部位损伤及人车相互作用时间等参数并分析所得数据。结果显示: 人车相互作用时间与入地碰撞损伤显著负相关; 延长人车相互作用时间能显著降低地面所致头部、臀部损伤及车速 $\geq 40$  km/h的胸部损伤, 且不会明显增加地面所致四肢及车辆所致头、胸部和臀部的损伤。研究结果表明可从人车相互作用时间角度出发探索人地碰撞损伤防护的新方法。

**关键词:** 人地碰撞; 相互作用时间; PC-Crash; 事故再现

**中图分类号:** U491.2<sup>62</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)03-0153-09

## A new perspective of protecting pedestrian-ground contact injury based on the pedestrian-vehicle interaction time

ZOU Tiefang<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, LIU Zhuzi<sup>2</sup>, LIU Yangyang<sup>1</sup>

1. School of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology/Key Laboratory of Safety Design and Reliability Technology for Engineering Vehicle, Changsha 410114, China
2. Medicine School of Changsha Social Work College, Changsha 410004, China

**Abstract:** 145 accidents with videos were reconstructed by PC-Crash firstly, and then the vehicle braking is adjusted to prolong the pedestrian-vehicle interaction time in each case, finally parameters such as pedestrian throw distance, pedestrian injury and the interaction time were collected and analyzed by graphing and statistical method. Results shown that there is a significant negative correlation between the pedestrian-vehicle interaction time and the ground related injury; the ground related injury of the head, the pelvis and the torso (when the impact speed  $\geq 40$  km/h) can be reduced significantly by prolonging the interaction time; the ground related injury of four limbs and vehicle related injury of head, torso and pelvis will not change obviously when the interaction time were prolonged. This indicates that new approaches for protecting the ground related injury can be explored from the perspective of the pedestrian-vehicle interaction time.

**Key words:** pedestrian-ground contact; interaction time; PC-Crash; accident reconstruction

\* 收稿日期: 2020-04-12 录用日期: 2020-05-22 网络首发日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(51775056); 湖南省教育厅优秀青年项目(19B035)

作者简介: 邹铁方(1982年生), 男; 研究方向: 交通事故再现、交通安全; E-mail: tiefang@163.com

近年来我国行人乘车事故致死率一直高于其他类型事故致死率,这表明作为弱势道路交通使用者的行人在事故中需要重点保护。行人在交通事故中的伤害主要来源于第一次与车辆的碰撞及随后与地面的第二次碰撞,OTTE<sup>[1]</sup>、杨济匡<sup>[2]</sup>等通过事故深度调查数据发现车辆是造成行人损伤的主要原因,但地面所致损伤不能忽略。冯成建等<sup>[3]</sup>通过仿真发现,在碰撞速度 $\leq 30$  km/h时,地面所致损伤可能比车辆所致损伤更严重;但当碰撞速度 $\geq 40$  km/h时,行人头部损伤主要是车辆所致。同样,邹铁方等通过事故再现发现胸部直接损伤主要来源于地面碰撞<sup>[4]</sup>。这些成果均表明交通事故中的人地碰撞损伤不能忽略。近期有学者分析1 221例德国行人碰撞事故案例,发现在碰撞速度低于40 km/h时,如能消除地面相关损伤则可消除2/3的总伤害费用<sup>[5]</sup>,表明开展人地碰撞损伤防护的研究具有极高价值。

事实上,人们很早就利用仿真技术研究地面相关损伤,发现人地碰撞损伤不易预测,受到碰撞速度、车头形状、行人步态、行人尺寸(身高及体重)等因素的影响<sup>[6-11]</sup>。为更好地研究人地碰撞损伤,学者们又引入人地碰撞机制<sup>[12-13]</sup>、行人旋转角度<sup>[14-15]</sup>等参数,发现人地碰撞损伤与碰撞机制、旋转角度有高度相关性,这些参数可以用来评估人地碰撞损伤风险。相对于诸多聚焦于人地碰撞损伤机制的研究,关于人地碰撞损伤防护方法的研究较少。文献[1]中提出在车头设置多个安全气囊阻止或阻碍人体落地的设想,以阻止人体落地或降低人体坠地的速度。Khaykin等提出将事故后人体粘到车上的发明专利<sup>[16]</sup>。Guibing Li等提出了行人友好型车头<sup>[17]</sup>。在项目组前期交通事故再现过程中,偶然发现人车相互作用时间(人与车接触的所有时间段之和)与地面所致人体损伤有显著负相关性,表明此物理量或可作为一个类似行人旋转角度<sup>[14-15]</sup>的研究人地碰撞损伤防护的新参数。

为此,本研究先对145例真实人车碰撞事故视频进行再现,再通过控制车辆制动以延长人车相互作用时间,由此产生两组仿真,前者命名为真实案例组,后者则为时间延长案例组。然后,采集相关数据分析人车相互作用时间与入地碰撞损伤的关系,进而探索时间延长案例组与真实案例组中地面所致人体损伤的差异,以确定从人车相

互作用时间角度研究人地碰撞损伤防护的可能性。

## 1 基于PC-Crash软件的人车事故再现

### 1.1 视频数据

本研究中所选用的视频主要来源于课题组前期积累的鉴定案例及网络视频数据。然后对视频进行筛选,只选择绕射抛出、事故车为小轿车或多功能运动车且只一车撞一人的碰撞,最终得到145例人车碰撞事故视频。然后将事故视频用PC-Crash软件进行再现,并通过调整车辆制动以延长人车相互作用时间,以此获得两组数据,前者为“真实案例组”,后者为“时间延长案例组”。

### 1.2 事故再现

PC-Crash是一款国内外应用非常广泛的事故再现软件,其可靠性及精度在很多事故研究领域都已获得验证<sup>[18-19]</sup>,因而本研究选用该软件对事故进行再现。为使仿真尽可能真实地反映案例的客观实际,在事故再现过程中要求真实案例中的所有信息均能在仿真中得到合理解释。下面将通过一个真实的案例演示事故再现的流程,确保据此所得再现结果的可靠性。

**1.2.1 事故介绍** 由某车载行车记录仪拍摄的一段视频显示,在中国某城市道路的天桥下,一位年轻女性奔跑着穿过斑马线时,与道路左侧一辆黑色SUV发生碰撞。肇事车辆在碰撞发生时立即采取了制动措施,行人受到撞击后在空中翻滚一圈随即落地。图1为视频中事故发生前的人车相对位置图。



图1 视频中事故发生前的人车相对位置图

Fig. 1 Relative position map of vehicles and pedestrian before the accident in the video

**1.2.2 事故现场重建** 通过观看视频发现,仅肇事车辆、行人与路面参与与事故中,不涉及道路旁边的花坛及其他车辆,因此利用PC-Crash软件内的道路生成模块生成一条3车道的道路,每车道宽度为3.5 m。

根据视频中车辆信息确定其品牌进而结合网络确定车辆型号后再获得车辆侧视图、轴距、轮距、车重及长宽高等系列参数,将侧视图导入PC-Crash并利用软件自带的测量工具测量对人车碰撞事故再现影响最大的车头各参数<sup>[20]</sup>,最终获得本案例中肇事车辆的外形轮廓参数见图2。

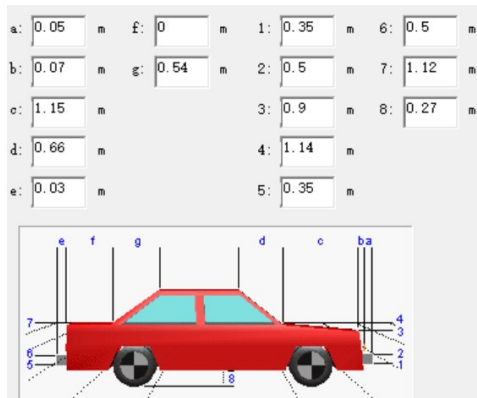


图2 车辆外形轮廓参数

Fig. 2 Vehicle profile parameters

行人模型通过PC-Crash内自带假人模型获得。将模型输入软件界面后,需对其身高、体重、姿态等参数进行修改。根据视频及中国人体实际参数将行人身高及体重设置为1.5 m、50 kg<sup>[21]</sup>,其碰撞瞬间的姿态通过与视频反复对比,最终调整结果如图3所示。

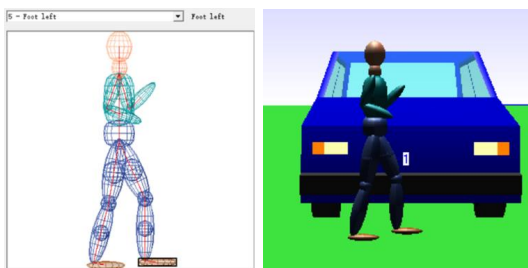


图3 碰撞时刻的行人姿态

Fig. 3 Pedestrian gait at the time of collision

**1.2.3 仿真及验证** 仿真前对车辆及行人的速度进行估算<sup>[22]</sup>。首先,根据车身长度 $L$ 和一段时间内车辆行驶过的车位数 $N$ ,计算出车辆在该段时间内的行驶距离

$$S = LN. \quad (1)$$

通过对视频逐帧播放,记录车辆驶过距离 $S$ 时所需的帧数,从而算出行驶时间

$$T = n/n_e, \quad (2)$$

式中 $T$ 为车辆驶过距离 $S$ 时所需的时间(s); $n$ 为车辆驶过距离 $S$ 时需要的帧数; $n_e$ 为视频里1 s需要

的帧数(视频格式不同其帧率也不同)。则

$$v = 3.6S/T, \quad (3)$$

式中 $v$ 为碰撞速度(km/h)。本案例中,碰撞发生时车辆的预估速度计算结果为48.6 km/h,行人的预估速度计算结果为6.54 km/h。

当各种参数初步确定后,便开始进行仿真分析。不断对所有参数(车辆制动、车辆速度、行人速度、姿态、身高体重以及碰撞瞬间人车相对位置)进行微调,以使人车碰撞过程与视频相吻合,并确保车辆与行人最终停止位置尽可能与视频中一致。通过多次迭代优化后,发现车辆车速取49 km/h,行人行走速度取6.5 km/h,车辆制动系统协调时间取0.2 s时,所得仿真信息与视频最吻合。事故再现的全过程如图4所示。图5-8给出了视频与仿真过程中,不同时刻的人车相对位置对比图。从图中可以看出,仿真中的车辆行驶轨迹、行人运动轨迹及姿态、车辆和行人最终停止位置等信息都与视频非常接近。

为了验证人体损伤等信息,导出人体头部减速曲线后计算获得车辆所致15 ms头部损伤准则HIC15为1 338,地面所致HIC15为133.9,根据行人头部损伤耐受极限( $< 700$ ),可推断在该例事故中行人死亡概率极高,这与新闻报道一致,行人因颅脑受伤而死亡。

从以上分析可知,仿真中行人的运动学响应及损伤均最大限度地与视频中信息吻合,可认为仿真能很好地反映实际事故发生的情况,进而使得从仿真中读取的相关数据与实际事故中相关数据高度接近,从而保证了数据的可靠性。对另外144个案例,均采用完全一致的标准进行再现,以保证了所有所得数据的可靠性。

## 2 损伤评价指标及研究方法

### 2.1 损伤参数及评价指标

1) 头部损伤指标 1971年美国运输部提出的头部损伤标准HIC定义为

$$HIC = \left[ (t_1 - t_2) \left( \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} \right]_{\max}, \quad (4)$$

式中 $a(t)$ 表示头部重心合成加速度; $t_2 - t_1$ 表示HIC达到最大值的时间间隔,取为15 ms。HIC15的安全界限值为700<sup>[23]</sup>。PC-Crash仿真后,将人体头部减速数据输出,再依式(4)计算获得HIC15。

2) 胸部损伤指标 采用胸部3 ms合成加速

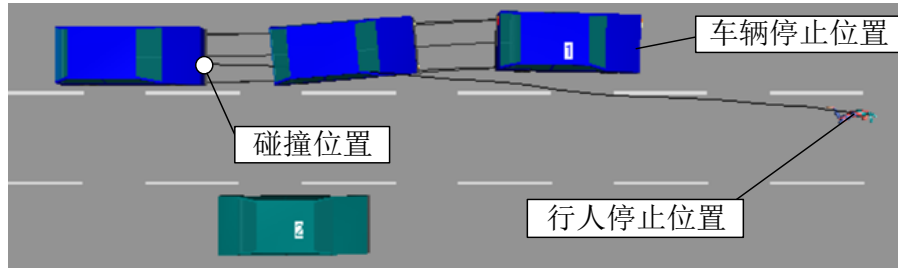


图 4 事故仿真全过程

Fig. 4 Whole process of accident simulation



图 5 0 s时刻人车相对位置

Fig. 5 The relative position of pedestrian and vehicles at 0 s



图 6 0.44 s时刻人车相对位置

Fig. 6 The relative position of pedestrian and vehicles at 0.44 s

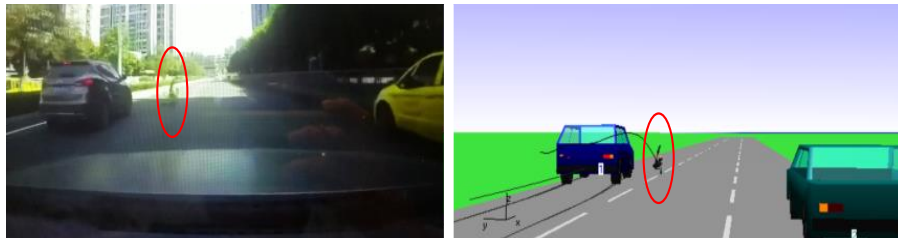


图 7 1.02 s时刻人车相对位置

Fig. 7 The relative position of pedestrian and vehicles at 1.02 s



图 8 2 s时刻人车相对位置

Fig. 8 The relative position of pedestrian and vehicles at 2 s

度作为胸部损伤指标,其安全界限值为 $60\text{ g}$ <sup>[23]</sup>。类似地,通过输出胸部减速数据计算获得胸部损伤指标。

3) 臀部损伤指标 采用碰撞力作为臀部损伤指标,文献[2]中给出的盆骨耐受极限为 $10\text{ kN}$ 。碰撞力可直接从PC-Crash仿真结果中获取。

4) 下肢损伤指标 采用碰撞力作为下肢损伤指标,大腿股骨耐受极限为 $6.3\text{ kN}$ <sup>[24-25]</sup>,小腿胫骨耐受极限为 $4\text{ kN}$ <sup>[24-26]</sup>。碰撞力可直接从PC-Crash仿真结果中获取。

## 2.2 数据分析方法

采用SPSS软件中的Mann-Whitney U检验方法对两组案例的人体损伤、人车相互作用时间等参数进行显著性检验,检验水平 $\alpha = 0.05$ ,根据检验结果 $P$ 值判断各参数在两组案例中是否具有显著统计学差异, $P < 0.05$ 表示有显著统计学差异、 $P < 0.01$ 表示有极其显著的统计学差异。采用SPSS软件中Spearman相关系数分析法对人车相互作用时间与碰撞速度、人体各部位损伤之间的相关性进行相关性检验。

## 2.3 延长人车相互作用时间的方法

本研究基于人车相互作用时间探索人地碰撞损伤降低的问题,提出一种较为简单的时间延长方法,即:当车辆碰撞到行人瞬间或之前,通过完全制动车辆以确保尽量降低人体头部与车体的碰撞速度;当行人头部与车辆发生碰撞之后(可认为人车第一次碰撞已结束),若行人被抛到空中,则松开车辆制动并控制其转向使车辆追上并接住行人(一般认为人体被抛出的速度与当时车速接近<sup>[27]</sup>,故松开制动可保证人车再次接触且因两者速度接近不会显著加重车对人的伤害),然后再完全制动使车辆停止;若行人没有被抛到空中,则控制车辆制动及转向使车辆保持与行人之间的接触,直到行人即将落地时再完全制动车辆以避免车辆碾压行人。在对车辆进行制动控制过程中,最基本的原则是不加速车辆,以保证在延长人车相互作用时间过程中不增加整个事故过程中的能量。

# 3 实验数据验证及相关性分析

## 3.1 案例基本信息

对145组案例的车速以及行人速度进行统计,将车速分为4个区间段,行人速度分为3个区间段,分别统计每个区间段内的案例数量。图9(a)

给出了车速分布情况,最低车速为 $9.4\text{ km/h}$ ,最高车速为 $75\text{ km/h}$ ,车速平均值为 $34.1\text{ km/h}$ 。图9(b)给出了行人速度分布情况,其中行人最低速度为 $0\text{ km/h}$ ,此时行人处于静止状态;最高速度为 $15\text{ km/h}$ ,此时行人处于奔跑状态。在实际碰撞发生瞬间,大部分行人都处于静止或者低速行走状态。

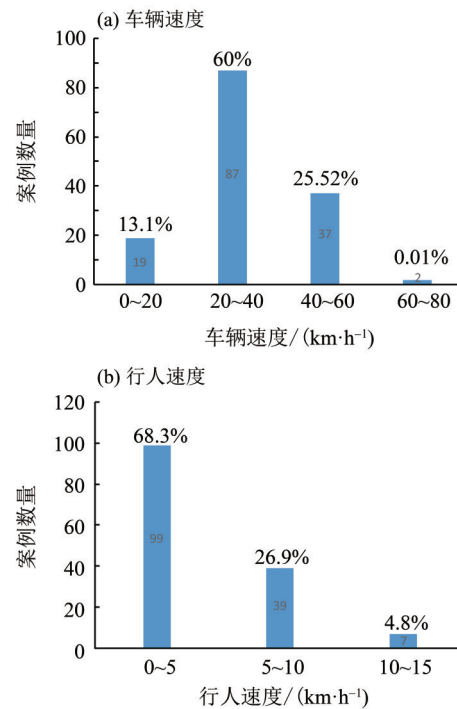


图9 车辆及行人速度分布图

Fig. 9 Vehicle and pedestrian speed distribution

## 3.2 行人抛距与车速的关系

图10给出行人抛距与车速的关系图。其中,文献[27]中的行人抛距与车速关系模型为

$$v_{\min} = 2.42 \sqrt{S_p}, \quad (5)$$

$$v_{\max} = 3.98 \sqrt{S_p}. \quad (6)$$

文献[28]的Fugger和Toor模型为

$$v_{\text{Fugger}} = 8.3604 S_p^{0.6046}, \quad (7)$$

$$v_{\text{Toor}} = 9.84 S_p^{0.57}, \quad (8)$$

式中 $S_p$ 为行人抛距; $v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 分别为模型所对应的最小车速和最大车速; $v_{\text{Fugger}}$ 为Fugger模型所对应的车速; $v_{\text{Toor}}$ 为Toor模型所对应的车速。

图10中,除9个数据点外,其余所有数据都落在了已有模型之间,这进一步验证了本研究中所采集的数据的可靠性。分析9个数据点所对应的案例后发现,其共同点为人车碰撞位置都处于车头左右两侧,且行人在碰撞过程中并没有被抛出,

而是在碰撞之后沿着车辆侧面滑落到地上,因此造成行人抛距过短。这说明在人车碰撞事故中,若行人在碰撞之后没有被完全抛出,则不宜利用已有模型依据行人抛距再现事故车辆车速。

### 3.3 相关性分析结果

本小节对人车相互作用时间、碰撞速度、行人各部位损伤(头部HIC15值、胸部3ms合成加速度值、臀部碰撞力、大腿碰撞力以及小腿碰撞力)进行相关性分析。结果如表1所示。

由表1可知,人车相互作用时间与行人头部、胸部损伤之间的相关系数分别为-0.509和-0.204,绝对数明显高于其与其他参数之间的相关系数,表明人车相互作用时间与行人头部、胸部损伤之间呈现出高度的负相关性。这表明,人车相互作用时间越长,则人地碰撞损伤特别是主要部位

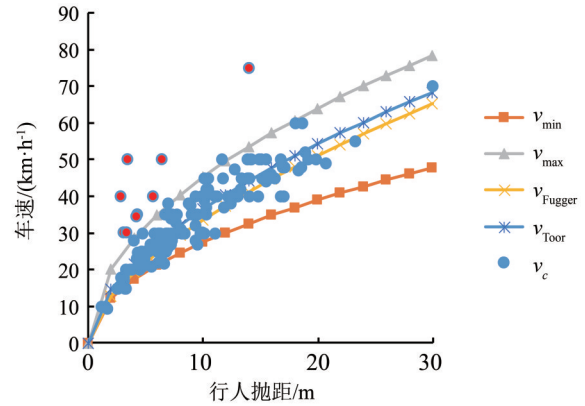


图10 车速-行人抛距图

Fig. 10 Vehicle speed vs pedestrian throw distance

(头、胸部)的损伤将会更低,这很好地说明人车相互作用时间可以选为分析人地碰撞损伤防护的新参数。

表1 人车相互作用时间与入地碰撞损伤的相关性<sup>1)</sup>

Table 1 Correlation between pedestrian-vehicle interaction time and pedestrian-ground collision injury

	速度	头部	胸部	臀部	大腿	小腿
相关性	-0.151*	-0.509**	-0.204**	-0.064	-0.006	-0.162**

1) \*\*表示具有显著统计学意义; \*表示具有一般统计学意义; 未标注则表示不具有统计学意义。

## 4 延长人车相互作用时间对人地碰撞损伤的影响

分析人车相互作用时间与其他参数的相关性,发现该参数与人地碰撞损伤(特别是头、胸部损伤)显著负相关,这表明该参数可以选作新的研究人地碰撞损伤防护的变量,且通过有效延长人车相互作用时间应能降低人地碰撞损伤。调整145个真实案例中的车辆制动,通过有效增加人车相互作用时间的同时不发生碾压事故,探索是否能通过延长人车相互作用时间降低人地碰撞损伤。

### 4.1 两组案例中人车相互作用时间对比

图11给出了两组案例中人车相互作用总时间的对比箱形图。统计分析结果显示,两组案例中的人车相互作用时间存在极显著的统计学差异( $P = 0.00 < 0.01$ )。在这145组案例中,每一个时间延长案例中的人车相互作用时间都要大于真实案例,且时间延长案例的人车相互作用时间整体上明显大于真实案例。这表明本文的方法成功实现了将人车相互作用时间延长的目标。

### 4.2 两组案例中地面所致HIC15值及臀部损伤对比

图12(a)给出了两组案例中地面所致HIC15对

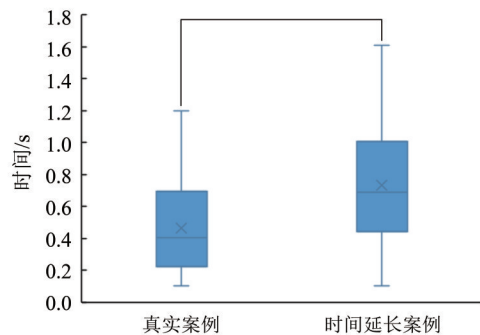


图11 人车相互作用时间对比箱形图

Fig. 11 Comparison of pedestrian-vehicle interaction time

比箱形图。结果显示,两组案例的HIC15值之间存在极显著的统计学差异( $P = 0.00 < 0.01$ ),且时间延长案例组的地面所致HIC15值明显低于真实案例组,表明延长人车相互作用时间能够大幅度降低行人与地面碰撞过程中的头部损伤。其中,所有案例都能通过延长人车相互作用时间达到降低头部损伤的效果,且121个时间延长案例的人地HIC15降到了真实案例的一半以下,占比83.45%。

图12(b)给出了两组案例中地面所致臀部碰撞力对比箱形图。结果显示,两组案例的臀部碰撞力之间存在显著统计学差异( $P = 0.00 < 0.05$ )。从

图中可看出,时间延长案例组中臀部碰撞力整体要比真实案例组小。其中,100个时间延长案例中的臀部碰撞力得到了降低,占比为69%;另外45个虽然没有降低,但碰撞力均低于损伤极限值,其占比为31%。这表明地面所致臀部损伤亦能从人车相互作用时间的延长过程中受益。

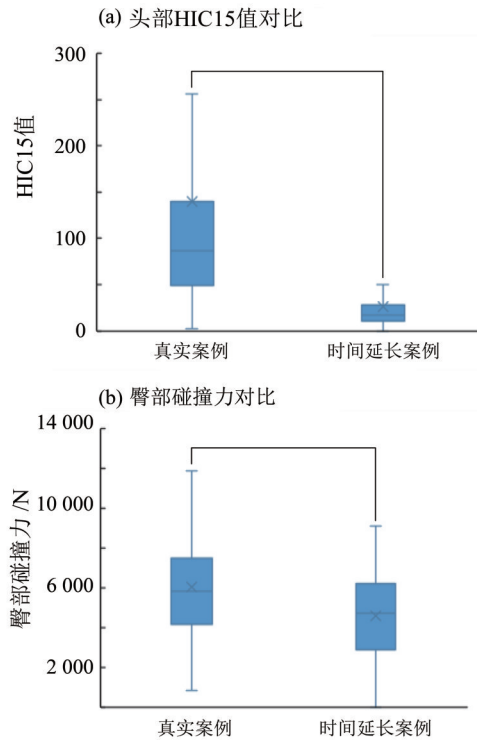


图12 人地碰撞中头部及臀部损伤对比箱形图  
Fig. 12 Comparison of head and pelvis injuries in pedestrian-ground collision

#### 4.3 两组案例中地面所致胸部损伤对比

以40 km/h作为分界点,图13给出两组案例中地面所致胸部损伤对比箱形图。结果显示,若车速不超过40 km/h,两组案例在人地碰撞胸部损伤方面没有显著统计学差异( $P = 0.649 > 0.05$ );而当车速在40 km/h及以上时,两组案例的人地碰撞胸部损伤之间存在显著统计学差异( $P = 0.038 < 0.05$ )。由此可知,如果碰撞速度 $< 40$  km/h,此时延长人车相互作用时间不会对人地碰撞胸部损伤造成显著的影响;如果碰撞速度 $\geq 40$  km/h,此时通过延长人车相互作用时间能够显著降低人地碰撞胸部损伤。因此,延长人车相互作用时间在高速碰撞下对行人胸部的保护效果较好,而在低速碰撞下则效果不明显。

#### 4.4 两组案例中地面所致下肢损伤对比

图14给出了两组案例中地面所致下肢损伤对

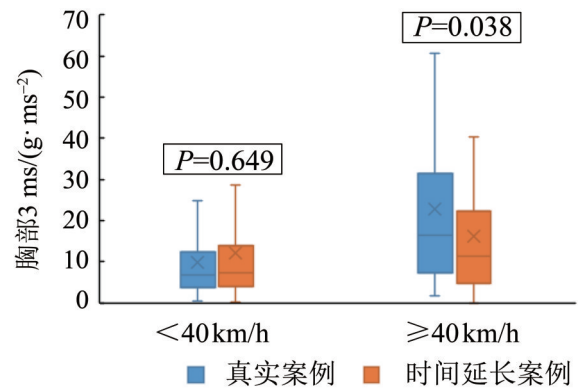


图13 人地碰撞中胸部损伤对比箱形图  
Fig. 13 Comparison of torso injury in pedestrian-ground collision

比箱形图。统计结果显示,在人地碰撞过程中,两组案例的大腿碰撞力之间没有显著统计学差异( $P = 0.407 > 0.05$ ),小腿碰撞力之间亦无显著统计学差异( $P = 0.088 > 0.05$ ),且时间延长案例组的大腿及小腿整体损伤要略低于真实案例组。因此,通过延长人车相互作用时间不会增加地面对行人下肢的损伤。

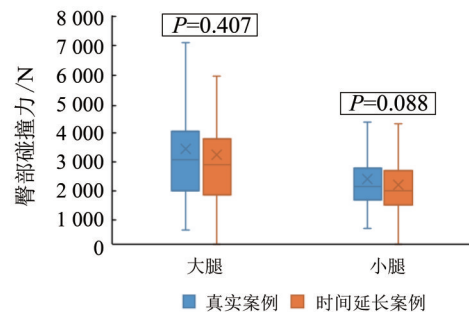


图14 人地碰撞中下肢损伤对比箱形图  
Fig. 14 Comparison of lower limb injuries in pedestrian-ground collision

#### 4.5 两组案例中车辆所致HIC15、胸部损伤及臀部损伤对比

图15中(a)、(b)、(c)分别给出了两组案例中车辆所致头部损伤、胸部损伤及臀部损伤对比箱形图。结果显示,在整个人车碰撞过程中,两组案例的头部损伤之间无显著统计学差异( $P = 0.659 > 0.05$ ),胸部损伤之间无显著统计学差异( $P = 0.560 > 0.05$ ),且臀部损伤之间亦无显著统计学差异( $P = 0.7 > 0.05$ )。以上结果表明,在延长人车相互作用时间的整个过程中没有增加车辆所致头部、胸部以及臀部损伤。

因此,延长人车相互作用时间后,因地面碰撞所致人体头部、臀部损伤显著下降,在高速碰

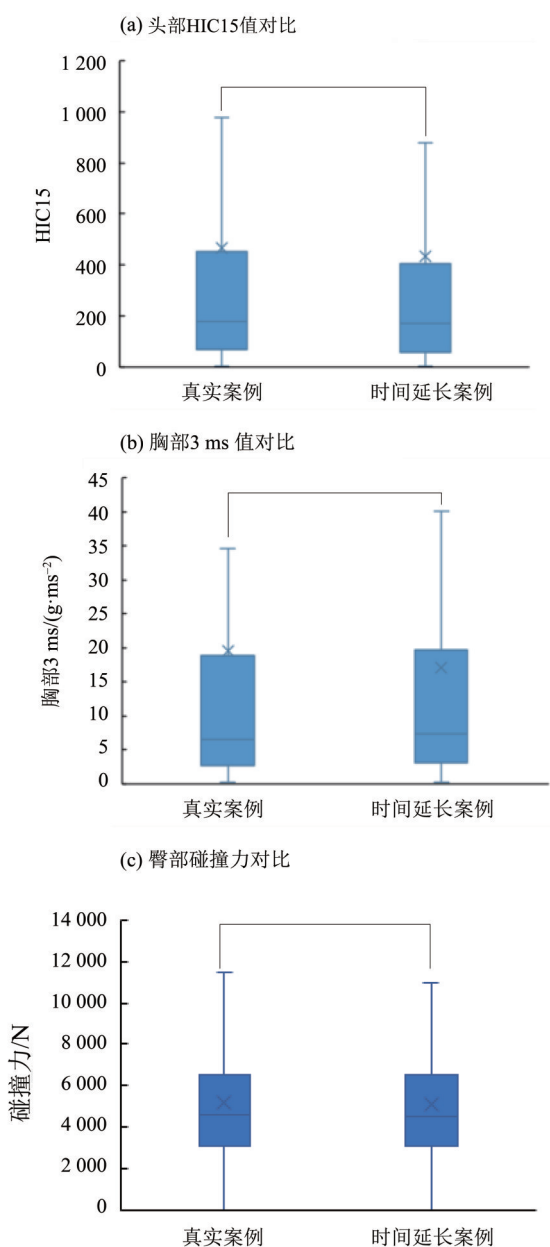


图 15 人车碰撞中头部、胸部及臀部损伤对比箱形图

Fig. 15 Comparison of head, torso and pelvis injuries in pedestrian-vehicle collision

撞中 ( $\geq 40$  km/h) 人体胸部损伤亦显著下降, 且其他部位的损伤未有显著性差异, 同时不会增加车辆对行人的伤害。总体而言, 可以认为通过延长人车相互作用时间确实能降低人地碰撞损伤。

## 5 结 论

通过再现 145 例真实人车碰撞事故并延长每一案例中人车相互作用时间, 以此获得真实案例组和时间延长案例组两组数据, 进而用作分析。主要结论如下:

(1) 本研究中绝大多数案例的行人抛距与车速关系与已有研究成果一致, 但有 9 例明显不一致。进一步分析这 9 例事故, 发现: 在人车碰撞事故中, 若行人在碰撞之后没有被完全抛出 (如掉落车两边), 则不宜利用已有模型依据行人抛距再现事故车辆车速。

(2) 人车相互作用时间与行人头部损伤、胸部损伤之间呈现出高度的负相关性。表明人车相互作用时间越长, 则人地碰撞损伤特别是主要部位 (头部、胸部) 的损伤将越低。

(3) 延长人车相互作用时间能够显著降低人地碰撞损伤中的头部、臀部损伤及车速  $\geq 40$  km/h 时的胸部损伤, 但不会增加地面所致下肢损伤及车辆所致头部、胸部及臀部损伤。这些结果表明, 后续研究中可从人车相互作用时间角度探索人地碰撞损伤防护的新方法。

(4) 通过一定规则可延长人车相互作用时间, 但暂无在智能汽车中实现的解决方案。从时间延长角度降低地面相关伤害具有可行性, 文献 [29] 的仿真结果亦很好地验证这一点。研究成果基于 145 例真实人车碰撞事故再现数据, 虽在再现过程中已尽可能保证再现的客观、可靠性, 但部分事故数据不完整, 但仍需更多数据支撑相关结论。

### 参考文献:

- [1] OTTE D, POHLEMANN T. Analysis and load assessment of secondary impact to adult pedestrians after car collisions on roads [C]// Proceedings of the International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Trauma, 2001: 143-157.
- [2] YANG J K. Overview of research on injury biomechanics in car-pedestrian collisions [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(2): 81-93.
- [3] 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.
- [4] 邹铁方, 肖璟, 胡林, 等. 轿车-行人事故中人体损伤来源与相关性分析 [J]. 汽车工程, 2017, 39(7): 748-753+747.

- [5] SHANG S, OTTE D, LI G, et al. Detailed assessment of pedestrian ground contact injuries observed from in-depth accident data [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2018, 110: 9-17.
- [6] TAMURA A, DUMA S. A study on the potential risk of traumatic brain injury due to ground impact in a vehicle-pedestrian collision using full-scale finite element models [J]. *International Journal of Vehicle Safety*, 2011, 5(2), 117-136.
- [7] SIMMS C K, ORMOND T, WOOD D P. The influence of vehicle shape on pedestrian ground contact mechanisms [C]// *Proceedings of the Proceedings of IRCOBI Conference*. Poland, 2011, 11:282-286.
- [8] SIMMS C K, WOOD D P. Effects of Pre-impact pedestrian position and motion on kinematics and injuries from vehicle and ground contact [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2006, 11(11):345-355.
- [9] HAMACHER M, ECKSTEIN L, PAAS R. Vehicle related influence of post-car impact pedestrian kinematics on secondary impact [C]// *Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury Conference*, 2012:717-729.
- [10] TAMURA A, KOIDE T, YANG K H. Effects of ground impact on traumatic brain injury in a fender vault pedestrian crash [J]. *International Journal of Vehicle Safety*, 2014, 8(1): 85-100.
- [11] 周青, 夏勇, 聂冰冰, 等. 汽车碰撞安全与轻量化研发中的若干挑战性课题 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(7): 1-14.
- [12] CROCETTA G, PIANTINI S, PIERINI M, et al. The influence of vehicle front-end design on pedestrian ground impact [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2015, 79:56-69.
- [13] YIN S, LI J, XU J. Exploring the mechanisms of vehicle front-end shape on pedestrian head injuries caused by ground impact [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2017, 106:285-296.
- [14] SHI L, HAN Y, HUANG H, 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.
- [15] HAN Y, LI Q, WANG F, et al. Analysis of pedestrian kinematics and ground impact in traffic accidents using video records [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2019, 24(2):211-220.
- [16] KHAYKIN A, LARNER D L. Adhesive vehicle front end for mitigation of secondary pedestrian impact: United States, US9340178B1 [P]. 2016-03-17.
- [17] LI G, YANG J, SIMMS C. Safer passenger car front shapes for pedestrians: a computational approach to reduce overall pedestrian injury risk in realistic impact scenarios [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 100:97-110.
- [18] 邹铁方, 张勇刚, 陈元新. 基于PC-Crash的车辆侧滑事故再现方法 [J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(1): 77-82.
- [19] 邹铁方, 余志, 蔡铭, 等. 基于PC-Crash的车-人事故再现 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(3): 215-219.
- [20] 李华, 李岳林, 邹铁方, 等. 车人碰撞事故中车头参数敏感性分析 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(4): 367-373.
- [21] 国家体育总局. 2010年国民体质监测公报 [R]. 北京: 国家体育总局, 2010.
- [22] 韩勇, 贺伟, 李泉, 等. 基于视频信息的汽车碰撞事故中骑车人运动学响应分析 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(4): 381-387.
- [23] 中国国家标准化管理委员会. GB11551-2014汽车正面碰撞的乘员保护 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [24] 赵志杰, 金先龙, 张晓云, 等. 面向人体损伤的人车碰撞事故再现 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(5): 95-98.
- [25] YANG J K. Review of injury biomechanics in car-pedestrian collisions [C]// *Goteborg: Report to European Passive Safety Network*, 2002: 1-19.
- [26] NYQUIST G W, CHENG R, EL-BODY A A R, et al. Tibia bending: strength and response [R]. *SAE Paper*, 2008.
- [27] ZOU T, YU Z, CAI M, et al. Analysis and application of relationship between post-braking-distance and throw distance in vehicle - pedestrian accident reconstruction [J]. *Forensic Science International*, 2011, 207(1/2/3):135-144.
- [28] TOOR A, ARASZEWSKI M. Theoretical vs. empirical solutions for vehicle/ pedestrian collisions [R]. *SAE Technical Paper*, 2003.
- [29] ZOU T, SHANG S, SIMMS C. Potential benefits of controlled vehicle braking to reduce pedestrian ground contact injuries [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 129: 94-107.