

基于行人落地碰撞的车辆前部结构参数分析

石亮亮¹, 韩勇^{2†}, 王丙雨², 黄红武^{1,2}, 周大永^{3,4}, 杨震^{3,4}

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门理工学院 机械与汽车学院, 福建 厦门 361024;

3. 浙江省汽车安全技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315336;

4. 浙江吉利汽车研究院有限公司, 浙江 宁波 315336)

摘 要:在行人-车辆碰撞事故中, 行人头部损伤不仅源于行人与车辆的一次碰撞, 而且还有与地面的二次碰撞. 为了综合分析车辆前部结构参数对一、二次碰撞中行人运动学及头部损伤的影响, 本文在 MADYMO 中对车辆前部结构(挡风玻璃角度(WA)、发动机罩角度(BA)、发动机罩长度(BL)、发动机罩前沿高度(BLEH)和离地间隙(GC))进行参数调整, 构建一系列行人-车辆碰撞多体模型, 并采用多元线性回归方法分析车辆参数对行人运动学和头部损伤的影响. 结果表明, 一、二次碰撞中, BLEH 对行人头部 HIC 值(车)和行人旋转角度的影响均最为显著($p < 0.01$), BA 对头部角加速度(车)的影响较 BLEH 更为显著, WA、BL 和 GC 对行人运动学与损伤的影响均较小. 较低的 BLEH 对一次碰撞中行人头部的保护更好, 但 BLEH 过低易导致二次碰撞中行人头部首先与地面碰撞, 这会增大头颈部的损伤风险. 本文定量分析了车辆前部结构参数对行人一、二次碰撞的影响, 研究结果可为车辆安全性设计提供理论参考.

关键词:行人安全; 车辆前部结构; 头部损伤; 多元线性回归分析

中图分类号:U461.91

文献标志码:A

Analysis of Vehicle Front-end Structure Parameters Based on Pedestrian Landing Impacts

SHI Liangliang¹, HAN Yong^{2†}, WANG Bingyu², HUANG Hongwu^{1,2},

ZHOU Dayong^{3,4}, YANG Zhen^{3,4}

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

3. Key Laboratory of Automobile Safety Technology of Zhejiang Province, Ningbo 315336, China;

4. Geely Automobile Research Institute, Ningbo 315336, China)

Abstract: In the pedestrian-vehicle collision accident, pedestrian may suffer head injury not only from the pri-

* 收稿日期:2018-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31300784, 51675466), National Natural Science Foundation of China(31300784, 51675466); 国家外专局高端团队项目(GDT20173600037), National Foreign Experts Agency High-end Team Project(GDT20173600037); 福建省科技创新平台项目资助(2016H2003), Fujian Science and Technology Platform Project, China(2016H2003)

作者简介:石亮亮(1988—), 男, 山东德州人, 厦门大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: Yonghan@xmut.edu.cn

mary impact with the vehicle but also from the secondary impact with the ground. In order to comprehensively analyze the influence of vehicle front-end structure parameters on pedestrian kinematics and head injury in primary and secondary impacts, in this paper, a series of multi-body models of pedestrian-vehicle collisions were constructed by utilizing the MADYMO code, with adjusting parameters of windshield angle(WA), bonnet angle(BA), bonnet length(BL), bonnet leading edge height(BLEH) and ground clearance(GC). The influence significance of vehicle parameters on the pedestrian kinematics and injury was analyzed by using multiple linear regression analysis. The results indicate that BLEH is the most significant influence factor on head HIC value (car) ($p < 0.01$) and pedestrian rotation angles in the primary and secondary impact, respectively. The influence of BA on the head angle acceleration (car) is more significant than that of BLEH. WA, BL and GC show a less influence on the kinematics and injuries of pedestrian. The lower BLEH provides better protection of the head in the primary collision, but it can easily lead to the head to collide with the ground firstly in the secondary impact, which increases the risk of head and neck injury. A quantitative analysis of the effect of vehicle front-end structure parameters on the primary and secondary impact was also conducted in the study, and the results can provide some reference for vehicle safety design.

Key words: pedestrian safety; vehicle front-end structure; head injury; multiple linear regression analysis

一直以来,国内外学者对行人交通安全的研究主要集中在行人与车辆碰撞阶段^[1-4],即一次碰撞阶段,而对行人与地面碰撞(二次碰撞)的研究较少。在以往的研究中,研究人员对车辆前部结构参数与头部-地面碰撞损伤的关系有不同的认识,Cavallero 等人^[5]提出车辆前部结构参数不会对行人头部-地面碰撞造成影响,而 Ashton 等人^[6]认为存在相关性并发现在车辆速度较低的碰撞中,地面造成的头部损伤比车辆更加严重。

人-车发生碰撞后,行人的运动学响应会受到多种变量的影响,这导致研究行人的落地损伤机理比较困难。研究人员通常采用多体或有限元仿真的方法来研究碰撞过程中以及碰撞后行人的运动学响应。比如:文献[7]通过构建车辆-行人碰撞模型,得出 SUV 碰撞中,地面对行人头部造成的损伤更为严重。文献[8]利用 MADYMO 仿真软件构建了约 1 000 例车辆-行人碰撞模型,研究了行人初始姿态和碰撞位置对人体的抛射角度、速度以及飞行高度的影响,以及行人下肢和手臂的姿势对行人在空中运动响应的影响。文献[9]采用有限元方法对行人落地碰撞进行重建,研究了地面对行人头部和颅脑损伤的影响,发现即使车辆速度降到 25 km/h,当行人头部首先着地时,也会对颅脑造成严重损害。随着研究的深入,学者们开始分析车辆前部结构参数与二次碰撞的关系。文献[10]研究了车辆外形与行人落地姿态和落地速度之间的关系。文献[11]通过对比不同车辆

前部结构,得出行人与地面碰撞的角度随 BLEH 的增大而减小。

车辆前部结构参数既会影响一次碰撞又会影响二次碰撞过程中行人头部损伤,因此在设计汽车前部结构参数时,应该综合考虑其对两种碰撞过程中头部损伤的影响,从而设计出人-车友好型汽车,来减少行人头部损伤。本研究对车辆前部结构参数进行定量调整,综合分析各参数变化对行人一次、二次碰撞响应与头部损伤的影响,利用多元线性回归方法对前部结构参数与行人运动学响应和损伤值之间的关系进行分析,得到了车辆前部结构参数对行人 HIC 值(车)、头部角加速度(车)和行人旋转角度的影响显著性概率 p 值。分析了车辆前部结构对行人一次、二次碰撞的影响机制,找出了综合影响因子,并对车辆前部结构参数改进提出了意见。

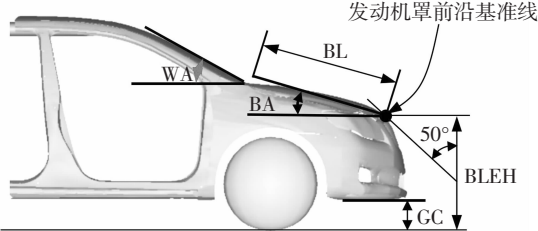
1 方法

1.1 车辆模型

车辆类型选取带有典型发动机罩结构形式的普通家用型轿车。该模型的前部结构尺寸参考有限元模型表面^[12]在 MADYMO 中参数化地生成,所建模型的前部主要几何结构为:挡风玻璃角度(WA)、发动机罩长度(BL)、发动机罩角度(BA)、发动机罩前沿高度(BLEH)、离地间隙(GC)(如表 1 所示)。采用与文献[13-14]相同的研究方法对于车辆与行人

表 1 车辆前部结构几何尺寸
Tab.1 Geometry of the front-end of vehicle

结构参数	尺寸
WA:挡风玻璃角度/(°)	32
BA: 发动机罩角度/(°)	15
BL:发动机罩长度/cm	86
BLEH:发动机罩前沿高度/cm	74
GC:离地间隙/cm	22



发生接触的部位进行刚度特性的设置,通过头槌、腿部冲击器模型分别对已经过验证的有限元车辆^[12]的保险杠、发动机罩中部和尾部、挡风玻璃中部和下缘部位进行碰撞仿真(如图 1 所示),碰撞速度为 40 km/h,将仿真所得的各部位刚度曲线(如图 2 所示)赋予到多刚体车辆模型中。

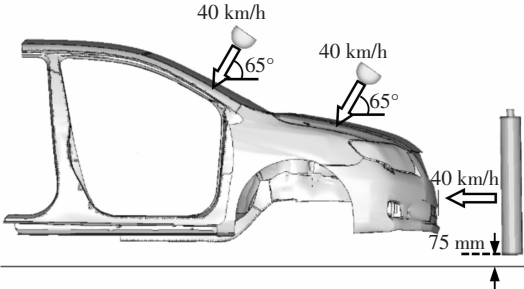


图 1 头槌、腿部冲击器有限元仿真
Fig.1 The configurations of the FE simulations for the headform and lower legform impacts

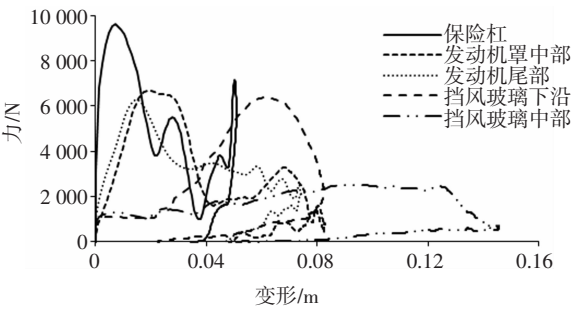


图 2 车辆各部位刚度曲线
Fig.2 The vehicle deformations vs. the contact force

1.2 仿真设置

本文所用行人模型为 50 th 男性假人,该模型由 Yang 等人开发和验证^[15-16],模型身高 1.75 m,体重 78 kg. 车辆-行人碰撞时行人为步行姿态的情况较普遍,本文选取行人右腿在前左腿在后的步态,步行速度为 5 km/h^[17].由于道路事故中,行人侧面受到撞击的情况更普遍^[18],因此本研究设定行人与车

辆的接触部位为行人身体右侧面与车头中间部位(见图 3),车辆速度为 40 km/h.人车之间的接触摩擦系数设为 0.2,人与地面间的摩擦系数为 0.58,地面定义为刚体,所有车辆接触部位的迟滞斜率设置为 10⁸^[10].

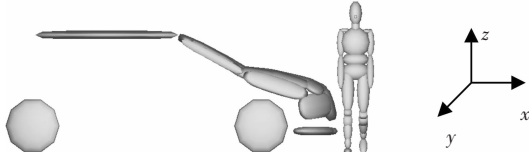


图 3 碰撞形态
Fig.3 Collision configuration

1.3 分析矩阵

为分析车辆前部各结构参数对行人运动响应及损伤的影响,分别对挡风玻璃角度(WA)、发动机罩角度(BA)、发动机罩长度(BL)、发动机罩前沿高度(BLEH)、离地间隙(GC)进行单因素定量调整分析,以原始车辆结构尺寸为基准值,各尺寸参数调整的取值范围参照文献[10, 19],调整情况见表 2.

表 2 车辆前部结构几何参数调整,
“-”为减小,“+”为增加

Tab.2 Parameter adjustment of the vehicle front structure,“-” to reduce, “+” to increase								
几何参数	原始尺寸	调整值						
挡风玻璃角度/(°)	32	-15	-10	-5	+5	+10	+15	+20
发动机罩角度/(°)	15	-10	-5	+5	+10	+15		
发动机罩长度/cm	86	-15	-10	-5	+5	+10	+15	
发动机罩前沿高度/cm	74	-15	-10	-5	+5	+10	+15	+20
离地间隙/cm	22	-10	-5	+5	+10			

1.4 数据统计

本文主要研究行人与车辆碰撞阶段和行人与地面碰撞阶段的运动学响应与损伤情况. 大量研究表明^[20-22]头部在碰撞过程中承受线性和旋转载荷的复杂影响. 本文选取最常用的线性损伤准则 HIC 和旋转损伤参数头部旋转角加速度作为头部损伤风险的评价指标. 此外, 行人头部与车辆相对碰撞速度也是一次碰撞中重要的研究参数^[12,23]. 二次碰撞的研究表明行人与车辆接触至行人与地面接触的时间段内身体绕 y 轴旋转过的角度(行人旋转角度)对行人二次碰撞损伤有显著影响^[14,24], 因此, 本文选取行人旋转角度、头部 HIC(地)、头部角加速度(地)作为地面碰撞阶段的研究参数. 另外, 采用多元线性回归分析方法, 分别构建以车辆前部结构参数为自变量, 头部损伤相关参数为因变量的回归模型, 分析行人一次碰撞与二次碰撞中的影响因子, 认为 $p < 0.01$ 为统计上显著^[25].

2 结果

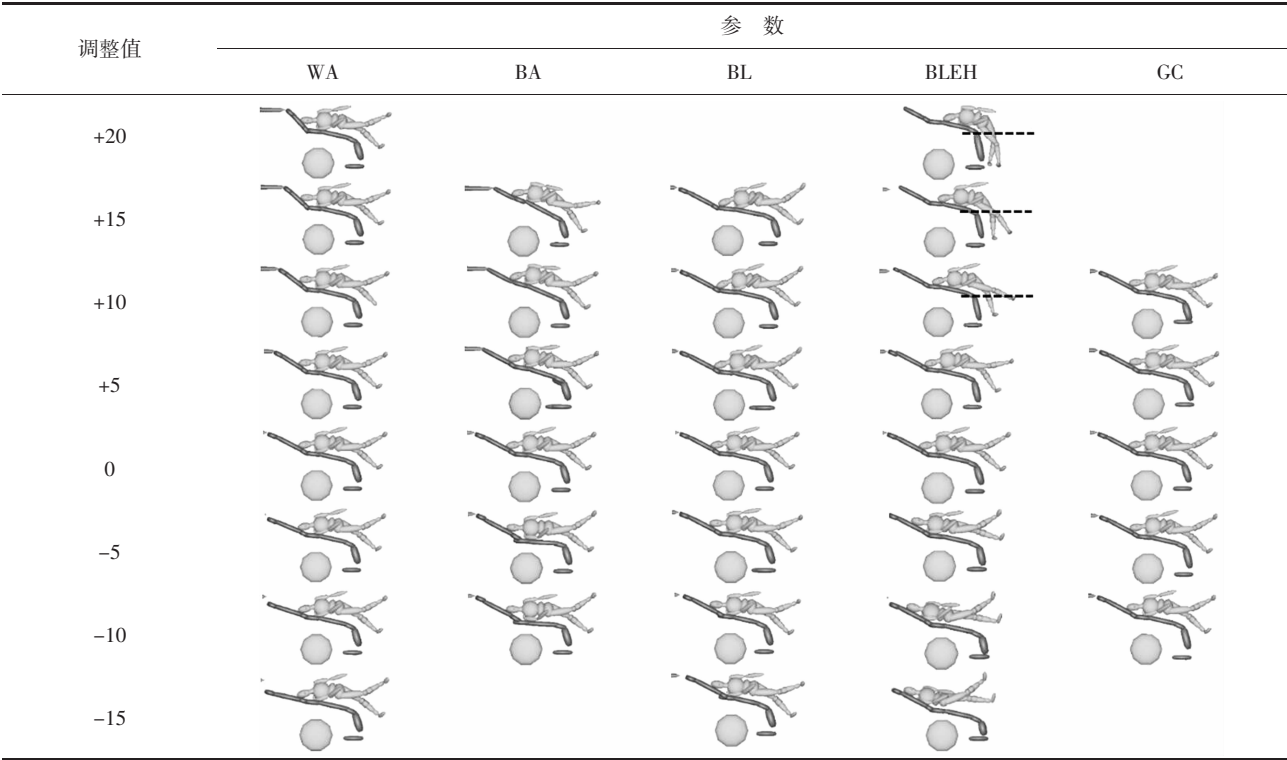
2.1 行人运动学响应

表 3 分别展示了车辆前部结构参数对一次碰

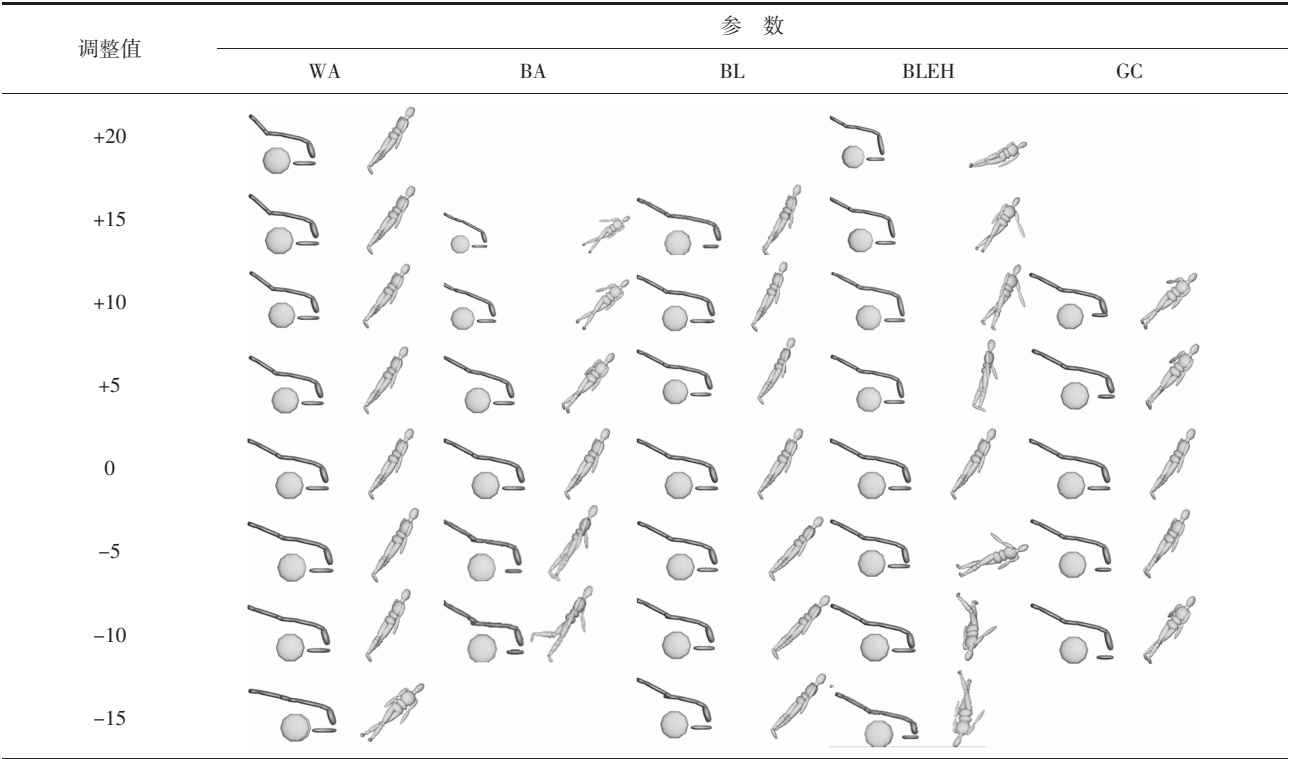
撞与二次碰撞中行人运动响应的影响, 其中, 表 3 (a) 为一次碰撞中行人头部与车辆碰撞时刻的运动学姿态, 可以看出, 车辆前部结构参数 WA、BA、BL 和 GC 的变化对行人头部与车辆碰撞姿态的影响较小, 即无明显差异, 而 BLEH 的改变对行人姿态的影响较大, 主要表现在行人下肢的旋转高度存在明显差异: 随着 BLEH 的升高行人下肢旋转高度逐渐减小, 如 BLEH+10 cm、+15 cm、+20 cm 的碰撞中, 头部与车辆碰撞时刻行人下肢旋转高度均未超过发动机罩前沿. 另外, 车辆前部结构参数对行人头部与车辆的碰撞部位存在影响, 在 BL 和 BLEH 的调整中, 随着参数尺寸的增加, 行人头部与车辆的碰撞部位由挡风玻璃逐渐向发动机罩移动. 对 WA、BA 和 GC 调整时, 行人头部与挡风玻璃的接触部位均无明显改变.

表 3 (b) 为二次碰撞中行人与地面碰撞时刻的运动学姿态, 可以看出 WA、BA、BL 和 GC 的变化对行人落地姿态的影响均较小, 行人下肢首先着地, 行人旋转角度差别不大, 而 BLEH 的改变对行人落地姿态的影响显著. 随着 BLEH 的降低, 行人旋转角度逐渐减小, 行人身体与地面的碰撞部位发生明显改变. 当 BLEH+0 cm、+5 cm、+10 cm、+15 cm 时, 行

表 3 行人一次碰撞与二次碰撞的运动学响应
Tab.3 Kinematics of primary and secondary impact
(a)行人头部与车辆碰撞时刻的运动学姿态



续表 3 行人一次碰撞与二次碰撞的运动学响应
Tab.3 Kinematics of primary and secondary impact
(b) 行人落地时刻的运动学姿态

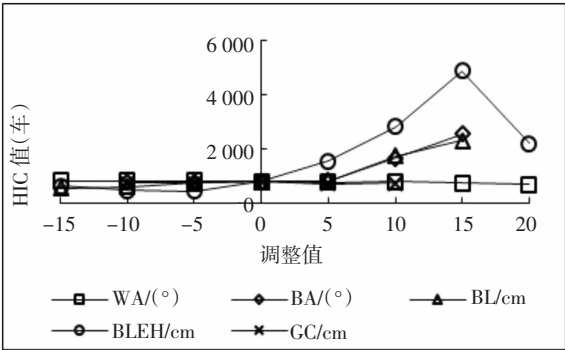


人下肢首先与地面碰撞；当 BLEH-10 cm,-15 cm 时,行人头部首先与地面碰撞。

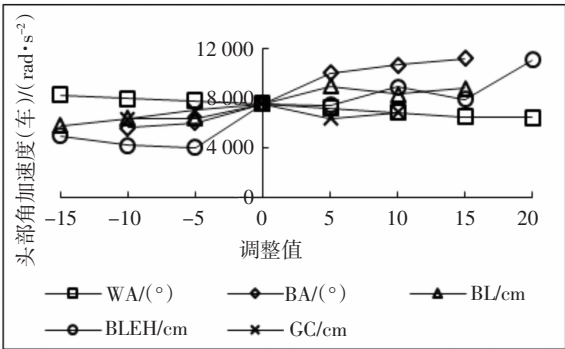
2.2 车辆前部结构对行人-车辆碰撞阶段的影响

图 4 为车辆前部结构对一次碰撞中行人运动响应与损伤的影响情况.其中,图 4(a)为车辆前部结构对行人头部-车辆相对碰撞速度的影响,可见各参数的变化对头部-车辆相对碰撞速度的影响较小,头部-车辆的相对碰撞速度主要集中在 6~7 km/h 的范围内.其中 BLEH 和 BA 对头部碰撞速度的影响相对较大,BL、WA 和 GC 的影响均较小。

图 4(b)为车辆前部结构参数对行人头部 HIC 值(车)的影响.可见 BLEH 的改变对 HIC 值(车)的



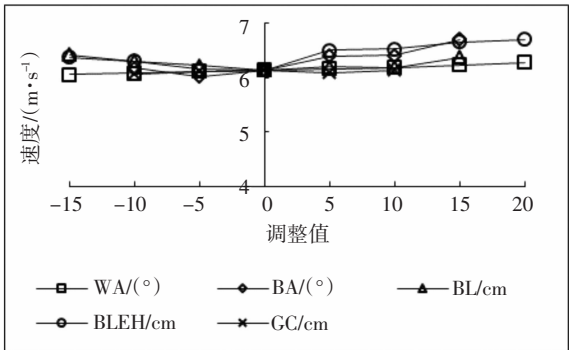
(b) 头部 HIC 值(车)



(c) 头部角加速度(车)

图 4 车辆前部结构对行人-车辆碰撞阶段的影响

Fig.4 Effect of vehicle front-end structure on pedestrian-vehicle collision



(a) 头部-车辆相对碰撞速度

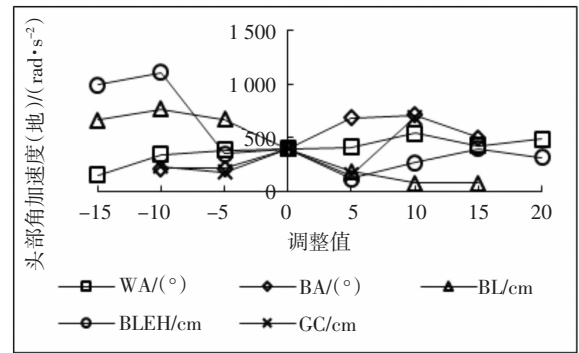
影响最大,其次,BA 与 BL 对 HIC 值(车)的影响也较明显.以原车型尺寸为基准,当各参数减小时,头部 HIC 值(车)均无明显变化,而在车辆前部结构参数增加时,头部 HIC 值(车)有增大的趋势.对于参数 WA 和 GC,无论其增大或减小,行人头部 HIC 值(车)始终无明显变化.

图 4(c)为车辆前部结构参数对行人头部角加速度(车)的影响.整体可见行人头部角加速度变化范围较大.BA、BLEH 和 BL 与行人头部角加速度呈一定的正线性关系,相关性分别为 $R^2=0.95$ 、 0.81 和 0.86 .WA 与头部角加速度呈线性负相关($R^2=0.99$).

2.3 车辆前部结构参数对行人-地面碰撞阶段的影响

图 5 为车辆前部结构参数对行人旋转角度、头部 HIC 值(地)和头部角加速度(地)的影响.由图 5(a)可见,BLEH 对行人旋转角度的影响最大,当 BLEH-10 cm 和-15 cm 时,行人旋转角度约为 180° ;BA、WA、BL 和 GC 对行人旋转角度的影响均较小,行人旋转角度在 315° 左右.

由图 5(b)与图 5(c)可见,行人头部 HIC(地)和头部角加速度(地)的变化较为复杂,缺少特征性,主要因为行人落地损伤除了受到行人旋转角度的影响外,还与落地速度、人体的朝向、身体各部位着地顺序等有关.如 BA+5 cm、+10 cm、+15 cm 和



(c) 头部角加速度(地)

图 5 车辆前部结构参数对行人-地面碰撞阶段的影响

Fig.5 Effect of vehicle front-end structure on pedestrian-ground collision

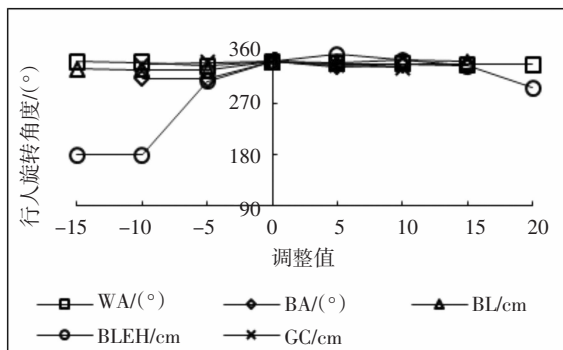
GC-10 cm、+5 cm、+10 cm 时,行人落地时面朝 y 轴负方向(垂直屏幕向内)(见表 3(b)),该落地工况导致行人头部 HIC 值(地)较大.影响因素的多样导致行人头部-地面碰撞损伤差异较大.

2.4 车辆前部结构参数对行人一次碰撞与二次碰撞的影响显著性

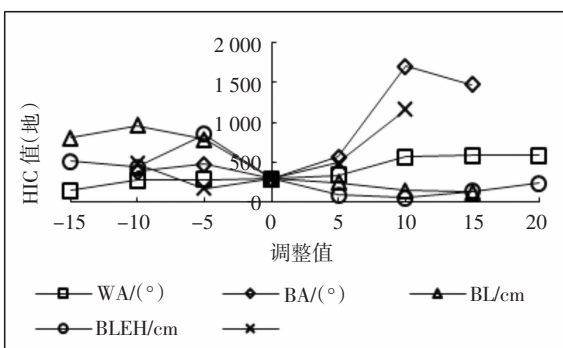
采用多元线性回归方法构建以车辆前部结构参数为自变量,头部 HIC 值(车)、头部角加速度(车)和行人旋转角度为因变量的回归模型.假设行人头部 HIC 值(车)、头部角加速度(车)和行人旋转角度分别受到 WA、BA、BL、BLEH 和 GC 五个因素的影响,且分别与五个影响因素构成多元线性回归关系,可得出回归模型:

$$y = \beta_0 + \beta_{WA} \times WA + \beta_{BA} \times BA + \beta_{BL} \times BL + \beta_{BLEH} \times BLEH + \beta_{GC} \times GC$$

其中, y 分别代表行人头部 HIC 值(车)、头部角加速度(车)和行人旋转角度的因变量, β_{WA} 、 β_{BA} 、 β_{BL} 、 β_{BLEH} 、 β_{GC} 分别为自变量 WA、BA、BL、BLEH、GC 的系数.将各变量数据代入回归模型得出 WA、BA、BL、BLEH、GC 对头部 HIC 值(车)的影响显著性概率 p 值依次为 0.655、0.040、0.037、 <0.01 、0.974,说明这五个影响因素中,BLEH 对行人头部 HIC 值(车)的影响最为显著,各因素的影响性从大到小依次为 BLEH>BL>BA>WA>GC.同理,WA、BA、BL、BLEH、GC 对头部角加速度(车)影响显著性概率 p 值依次为 0.077、 <0.01 、0.003、 <0.01 、0.895,BLEH 和 BA 的显著性概率 p 值均小于 0.01,说明这两个因素对头部角加速度(车)影响最为明显,再对各影响因素的系数做归一化处理得出 BA 对头部角加速度(车)的影响大于 BLEH,五个因素的影响性为 BA>



(a) 行人旋转角度



(b) 头部 HIC 值(地)

BLEH > BL > WA > GC.WA、BA、BL、BLEH、GC 对行人旋转角度的影响显著性概率 p 值分别为 0.21、0.91、0.341、<0.01、0.91,说明 BLEH 对行人旋转角度的影响最为显著,而其他影响因素统计特征不显著,即对行人旋转角度的影响程度较小,分析结果如表 4 所示.

表 4 回归模型的拟合回归系数和 p 值
Tab.4 Fitting regression coefficient
and p value of regression model

因变量	自变量	拟合回 归系数	标准 误差	显著性 概率 p 值	归一化 系数
Baseline(β_0) -11 985.284					
头部 HIC 值(车)	WA	-8.936	19.836	0.655	
	BA	65.559	30.242	0.040	
	BL	54.421	24.710	0.037	
	BLEH	104.769	19.836	<0.01	
	GC	-1.340	41.347	0.974	
Baseline(β_0) -17 496.507					
头部角 加速度 (车)	WA	-50.020	27.043	0.077	-0.082
	BA	275.705	41.230	<0.01	0.45
	BL	110.550	33.688	0.003	0.18
	BLEH	169.116	27.043	<0.01	0.276
	GC	7.500	56.371	0.895	0.012
Baseline(β_0) -174.840					
行人 旋转 角度	WA	-0.129	1.174	0.210	
	BA	1.093	1.790	0.910	
	BL	0.436	1.463	0.341	
	BLEH	6.136	1.174	<0.01	
	GC	-0.129	2.448	0.910	

3 讨 论

由回归分析结果可以看出在所选车辆前部结构参数中,BLEH 对行人一次碰撞与二次碰撞的影响显著性最大,因此在汽车前部结构参数设计中,应重点关注 BLEH 对一、二次碰撞中行人运动学与损伤的影响,其对一、二次碰撞中行人运动响应与损伤的影响机制讨论如下.

3.1 BLEH 对一次碰撞中行人运动学的影响

由图 4 可见车辆前部结构参数的改变对行人一次碰撞中头部-车辆相对碰撞速度的影响较小,而对头部 HIC 值与角加速度的影响较大,主要原因

在于车辆前部结构参数的改变直接导致头部与车辆的碰撞部位的变化.当 BLEH 增大时,行人头部与车辆的碰撞部位由挡风玻璃中部逐渐向挡风玻璃下缘或发动机罩移动,由于各部位刚度的不同,从而导致行人头部损伤的差异.

图 6 将行人头部与车辆碰撞部位分为四个区域: A 为挡风玻璃中部,B 为挡风玻璃下沿,C 为发动机罩尾部,D 为发动机罩中部.行人与原始车型碰撞中,头部与车辆的碰撞点位于 A 区域内(见表 3(a)),BLEH+5 cm 时,头部与挡风玻璃的碰撞点移至 B 区域,B 区域的刚度较 A 区域大,因此造成行人头部 HIC 值(车)升高,随着 BLEH 的继续增大,头部将与发动机罩发生碰撞,当 BLEH+10 cm 和 BLEH+15 cm 时,头部与发动机罩的碰撞点进入 C 区域,由于 C 区域刚度较 B 区域高,从而导致头部 HIC 值(车)继续增大.同样,对于参数 BL,当 BL+5 cm 和 BL+10 cm 时,行人头部碰撞位置在区域 B 内,BL+15 cm 时,头部碰撞位置在区域 C 内,因此,头部 HIC 值(车)有逐渐增大的趋势.当车辆前部结构参数比原始尺寸减小时,行人头部与车辆的碰撞部位始终位于挡风玻璃中部,因此头部损伤无显著变化.



图 6 头部碰撞区域
Fig.6 Head contact regions

3.2 BLEH 对行人落地响应的影响

表 5 为 BLEH 分别为+15 cm、0、-15 cm 后的行人运动响应对比情况.可见行人运动响应共分为一次碰撞、飞行和二次碰撞三个阶段,其中一次碰撞阶段又细分为 I、II 和 III 三个阶段,I 为车辆撞击行人下肢阶段,II 为行人上半身与车辆碰撞阶段,III 为行人反弹阶段.

阶段 I 中,车辆前端(主要为保险杠)与行人下肢发生碰撞,行人以 BLEH 上边缘为支点进行旋

转,旋转中心以下部位由于受到车辆冲击,开始逆时针旋转,旋转中心以上肢体由于惯性开始逆时针向下旋转运动,行人整体呈逆时针转动.阶段Ⅱ中,行人上半身与发动机罩或挡风玻璃碰撞,由于 BLEH 高度的不同,行人头部与车辆的碰撞部位存在差异.发动机罩和挡风玻璃的阻挡与冲击使得行人上半身停止旋转,而行人下半身由于不受阻碍,继续保持逆时针旋转的趋势.阶段Ⅲ中,车辆继续向前运动,行人上半身由于受到挡风玻璃或发动机罩部位的冲击开始反弹并与车辆分离,此时行人上半身具有顺时针旋转的势能,而行人下半身由于无碰撞阻碍,仍保持逆时针旋转,最终,顺时针旋转的上半身与逆时针旋转的下半身相互作用并形成行人在飞行阶段的旋转方向.

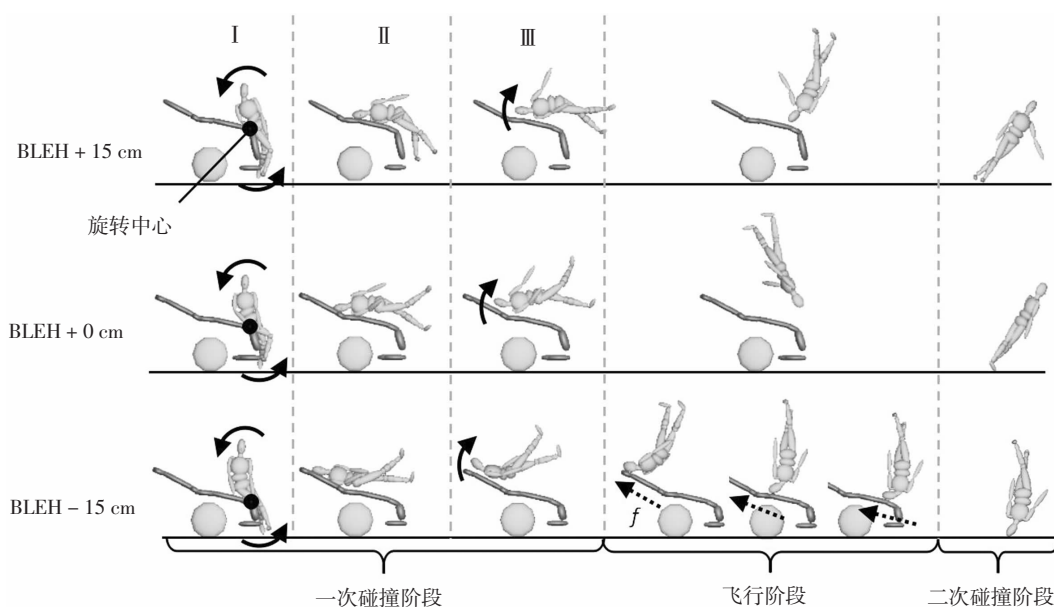
如表 5 所示,BLEH-15 cm 时,车辆直接撞击行人下肢的范围最小,因此旋转中心以下肢体的转动能量最小,这导致行人在阶段Ⅱ和Ⅲ中下肢逆时针向上的旋转动能不足以让行人上半身与车辆彻底

分离,从而在飞行阶段,行人头部与车辆挡风玻璃和发动机罩易发生接触,这将对行人头部产生摩擦阻力,进一步减小行人逆时针旋转的趋势,最终导致行人在二次碰撞阶段中头部首先着地的几率增大,行人头颈部将出现严重损伤.当 BLEH+0 和 +15 cm 时,行人在飞行阶段中身体始终未与车辆发生接触,因此行人落地角度不受影响.综合考虑 BLEH 对一、二次碰撞的影响,虽然 BLEH 的降低对行人 HIC 值(车)和头部角加速度(车)均有降低的趋势,但 BLEH 过低时将导致行人出现较危险的落地角度,行人身体各部位与地面的碰撞顺序将发生变化,从而产生不同的地面碰撞损伤风险.

目前 MADYMO 假人模型尚无落地损伤的实验验证数据,本研究只关注 HIC 值的分布趋势而非绝对值.另外,本研究中行人仅位于车辆前端中间位置,后续研究需对不同碰撞位置的行人运动及损伤响应进行分析.

表 5 行人运动响应对比

Tab.5 Comparison of the kinematics of pedestrian



4 结 论

本文通过对车辆前部各结构参数进行定量调整,对行人一次碰撞与二次碰撞中各参数进行了研究,可以得出以下结论:

1)行人-车辆碰撞中,BLEH 对行人头部 HIC 值(车)的影响显著性最大($p < 0.01$);BA 对头部角加

速度(车)的影响较 BLEH 更为显著.行人-地面碰撞中,BLEH 对行人旋转角度的影响显著性最大($p < 0.01$).WA、BL 和 GC 对一、二次碰撞中的行人运动学及损伤的影响均较小.

2)车辆 BLEH 较高将导致一次碰撞中行人头部与车辆发动机罩碰撞,易产生较严重的头部损伤,相反,较低的 BLEH 对一次碰撞中行人头部的保护

效果更好。

3) BLEH 对二次碰撞中行人运动学的影响主要是改变行人的旋转角度。虽然较低的 BLEH 在一次碰撞中造成的行人头部损伤较轻,但 BLEH 的降低会导致二次碰撞中行人旋转角度的较大变化,这将增加行人头颈部的损伤风险。

参考文献

- [1] YANG J. Mathematical simulation of knee responses associated with leg fracture in car-pedestrian accidents[J]. International Journal of Crashworthiness, 1997, 2(3):259—272.
- [2] HAN Y, YANG J, MIZUNO K, *et al.* A study on chest injury mechanism and the effectiveness of a headform impact test for pedestrian chest protection from vehicle collisions [J]. Safety Science, 2012, 50(5):1304—1312.
- [3] HAN Y, YANG J, NISHIMOTO K, *et al.* Finite element analysis of kinematic behavior and injuries to pedestrians in vehicle collisions [J]. International Journal of Crashworthiness, 2012, 17(2):141—152.
- [4] 兰凤崇, 黄伟, 陈吉清, 等. 行人下肢高精度数值模型与损伤参数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(10):42—51.
LAN F C, HUANG W, CHEN J Q, *et al.* Development and injury parameters research of a FE model of lower limb with high precision for adult pedestrians[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(10):42—51. (In Chinese)
- [5] CAVALLERO C, CESARI D, RAMET M, *et al.* Improvement of pedestrian safety: influence of shape of passenger car-front structures upon pedestrian kinematics and injuries: evaluation based on 50 cadaver tests[R]. SAE Technical Paper, 1983.
- [6] ASHTON S J, MACKAY G M. Benefits from changes in vehicle exterior design—field accident and experimental work in Europe[R]. SAE Technical Paper, 1983.
- [7] 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 World Congress & Exhibition. 2006.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] SIMMS C K, ORMOND T, WOOD D P. The influence of vehicle shape on pedestrian ground contact mechanisms [C]// Proceedings of IRCOBI Conference. Poland, 2011.
- [12] ITO D, YAMADA H, OIDA K, *et al.* Finite element analysis of kinematic behavior of cyclist and performance of cyclist helmet for human head injury in vehicle-to-cyclist collision [C]// IRCOBI Conference. 2014: 14—21.
- [13] MIZUNO K, KAJZER J. Head injuries in vehicle-pedestrian impact[R]. SAE Technical Paper, No.2000-01-0157.
- [14] SHI L L, HAN Y, HUANG H W, *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.
- [15] YANG J K, LÖVSUND P. Development and validation of a human-body mathematical model for simulation of car-pedestrian collisions[C]// Proceedings of the International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts. 1997: 133—149.
- [16] YANG J K, LÖVSUND P, CAVALLERO C, *et al.* A human-body 3D mathematical model for simulation of car-pedestrian impacts [J]. Traffic Injury Prevention, 2000, 2(2):131—149.
- [17] 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(4): 345—355.
- [18] YAN X, MA M, HUANG H, *et al.* Motor vehicle-bicycle crashes in Beijing: Irregular maneuvers, crash patterns, and injury severity [J]. Accident Analysis & Prevention, 2011, 43(5): 1751—1758.
- [19] LYONS M, SIMMS C K. Predicting the influence of windscreen design on pedestrian head injuries [C]// Proceedings of the IRCOBI Conference. 2012.
- [20] LI F, LI H, XIAO Z, *et al.* A Review on injury mechanism of intracerebral hemorrhage in vehicle accidents [J]. Curr Pharm Des, 2017, 23(15):2177.
- [21] KING A I, YANG K H, ZHANG L, *et al.* Is head injury caused by linear or angular acceleration? [C]// Proceedings of the IRCOBI International Research Council on the Biomechanics of Impact Conference. Lisbon, Portugal, 2003.
- [22] JIN N, FAN L, YANG J. Evaluation of pedestrian kinematics and head-injuries by reconstruction of accidents with one-box vehicles and passenger cars [C]// INFATS—the 7th International Forum of Automotive Traffic Safety. Changsha, China, 2009.
- [23] HAN Y, YANG J, MIZUNO K, *et al.* Effects of vehicle impact velocity, vehicle front-end shapes on pedestrian injury risk[J]. Journal of Crash Prevention & Injury Control, 2012, 13(5):507—518.
- [24] YIN S, LI J, XU J. Exploring the mechanisms of vehicle front-end shape on pedestrian head injuries caused by ground impact [J]. Accid Anal Prev, 2017, 106:285—296.
- [25] ZHANG G, CAO L, HU J, *et al.* A field data analysis of risk factors affecting the injury risks in vehicle-to-pedestrian crashes[C]// Ann Adv Automot Med. 2008:199.