

货车-两轮车前碰撞事故中骑行者运动学响应及损伤分析

张翔¹, 王丙雨^{1,2,3}, 杨焱¹, 聂进⁴, 王平^{1,2,3}

- (1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建, 厦门 361024;
2. 福建省客车先进设计与制造重点实验室, 福建, 厦门 361024;
3. 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心, 福建, 厦门 361024;
4. 娄底职业技术学院 汽车学院, 湖南, 娄底 417000)

摘要: 为探究货车-两轮车前部碰撞事故中参与双方速度对骑行者运动学响应与损伤的影响, 基于MADYMO软件开展事故重建并进行了分析。建立了货车和两轮车的多体碰撞模型, 对一起货车前部碰撞两轮车事故进行了事故重建; 使用验证后的模型进行了25组不同速度下的全因子仿真试验; 分析了不同碰撞速度和骑行速度对骑行者运动学响应和损伤的影响。研究表明, 骑行者身体旋转幅度会随着两轮车及货车车速的升高而增加; 当货车速度超过20 km/h时, 骑行者头部损伤指标(Head Injury Criterion, HIC)与胸部3 ms加速度将超过阈值; 而当货车速度超过25 km/h时, 骑行者下肢接触力也超过阈值; 货车速度处于30~40 km/h时, 相同货车速度下, 骑行者头部HIC值出现随着两轮车速度的增加而升高的趋势, 而胸部加速度出现相反的趋势。

关键词: 事故重建; 碰撞速度; 运动学响应; 头部损伤; 胸部损伤

中图分类号: U461.91 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.02.13

Analysis of Kinematic Responses and Injuries to Riders in Frontal Collisions Between Trucks and Two-Wheelers

ZHANG Xiang¹, WANG Bingyu^{1, 2, 3}, YANG Yao¹, NIE Jin⁴, WANG Ping^{1, 2, 3}

- (1. Xiamen University of Technology, School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen 361024, Fujian, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing of Coaches, Xiamen 361024, Fujian, China;
3. Fujian Collaborative Innovation Center for R&D of Coach and Special Vehicle, Xiamen 361024, Fujian, China;
4. Loudi Vocational and Technology College, Automotive School, Loudi 417000, Hunan, China)

Abstract: This paper aims to investigate the effects of speed on the kinematic response and injuries of riders in frontal collision accidents between trucks and two-wheelers. For this purposes, multi-body models of the truck and two-wheeled vehicle were established using MADYMO software to reconstruct a frontal collision involving these vehicles. Furthermore, 25 accident simulations were performed at different speeds by employing the validated model. The kinematic responses and injury metrics were analyzed for two-wheeler riders. The results indicate that the extent of body rotation in riders increases with the speed of both the two-wheeler and the truck. The riders face a high risk of severe head and chest injuries when the truck's

收稿日期: 2023-12-19 改稿日期: 2023-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705441); 福建省青年自然科学基金项目(2020J05235)

参考文献引用格式:

张翔, 王丙雨, 杨焱, 等. 货车-两轮车前碰撞事故中骑行者运动学响应及损伤分析[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(2): 294-303.

ZHANG Xiang, WANG Bingyu, YANG Yao, et al. Analysis of Kinematic Responses and Injuries to Riders in Frontal Collisions Between Trucks and Two-Wheelers[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(2): 294-303. (in Chinese)



impact speed exceeds 20 km/h, and a notable risk of serious lower extremity injuries when the truck speed exceeds 25 km/h. At truck speeds between 30 km/h to 40 km/h, there is a trend of increasing HIC values for the rider's head with an increase in two-wheeler speed, while the trend for chest acceleration is opposite.

Keywords: accident reconstruction; impact speed; kinematic response; head injury; chest injury

世界卫生组织报告指出,两轮车骑行者及行人等弱势道路使用者占全球交通死亡人数的49%,其中,两轮车骑行者占全球交通死亡人数的31%,其占比为各道路使用者中的第1位^[1]。同时,随着“绿色出行”理念的普及,我国已经成为世界上两轮车保有量最大的国家,致使我国两轮车骑行者伤亡人数从2016年的63 763人上升至2021年的71 259人,直接财产损失由9 927万元增至12 380万元^[2]。因此,两轮车骑行者在交通事故中面临的风险应该受到重视。

国内外多位学者已针对两轮车事故的高死亡率开展研究。胡林等^[3]基于CIDAS数据库提取了路口两轮车事故场景。DAS等^[4]收集了2015~2019年的摩托车致命事故数据,并研究了致命事故的影响因素。韩勇等^[5]基于两轮车事故视频对两轮车事故中的骑行者运动学响应和应急姿态进行了研究,结果显示骑行者落地姿态对骑行者身体落地时的各部位接触顺序有显著影响。HUANG Yuan等^[6]基于MADYMO对两轮车事故设计了一组考虑不同速度和碰撞位置的仿真矩阵,结果表明,两轮车骑行者的损伤风险随着碰撞速度的增大而升高。ZHAO Yuqing等^[7]通过行车记录仪视频和驾驶模拟器对不同参数对避免碰撞的影响进行了研究,发现制动反应时间是避免碰撞的重要参数。WEI Lihua等^[8]基于PC-Crash对右转货车碰撞两轮车事故中的碾压情况进行了讨论,研究结果表明,减慢货车速度可以提高骑行者的安全水平。

综上所述可知,国内外学者已经对两轮车事故进行了详细的研究与分析并取得了显著成果。但以往的学者们往往将轿车和SUV作为两轮车的碰撞对象进行研究,而对货车-两轮车事故的研究较少。

相关研究表明,2018~2021年间,两轮车与重型货车碰撞事故中骑行者死亡率高达75%,是两轮车与乘用车碰撞事故的2倍多,其事故严重程度和客观死亡人数不容小觑,需要针对性地对此类事故开展研究^[9]。目前,已有的研究多为对事故数据的分析,从而找出造成事故的原因^[10-12],而对骑行者动态响应过程以及损伤机制的探索较少。

因此,为了研究不同碰撞速度下骑行者的运动学响应和损伤分布,本文将采用MADYMO软件对一起货车前部碰撞两轮车事故进行重建,并在此基础上分析参与双方的速度对两轮车骑行者的运动学响应以及损伤风险的影响。

1 材料与方法

1.1 事故信息

一辆重型自卸货车沿路由东往西方向直行,途经路口地段时与沿另一条路由南往北方向直线行驶的一辆电动两轮车相撞,事故造成两车受损以及电动两轮车骑行者受伤。事故发生时,货车的行驶速度约为20~30 km/h,两轮车的速度约为10~30 km/h,并且货车驾驶员碰撞前未注意到两轮车。骑行者损伤为弥漫性轴索损伤、枕骨骨折、枕部头皮血肿、双侧多发肋骨骨折和双肺挫伤。事故中货车、电动两轮车以及骑行者的基本信息,见表1~3。

1.2 模型建立

1.2.1 货车模型

事故中货车的多刚体模型参照同型号货车几何模型建立,其主要技术参数见表1,整车以及碰撞发生处的车辆前部结构如图1所示。同时,根据文献[13]中测得的某款货车保险杠、前部面板、导

表 1 货车主要技术参数

长×宽×高/mm	第 1 轴距/mm	第 2 轴距/mm	保险杠离地高度/mm	整备质量/kg	碰撞时总重/kg	重心高度/mm
8 520×2 550×3 460	3 800	1 400	600	12 500	12 570	1 500

表 2 两轮车主要技术参数

长×宽×高/mm	轴距/mm	整备质量/kg	碰撞时总重/kg	车把离地高/mm	座位离地高度/mm
1 725×70×1 090	1 250	95	150	910	770

表 3 两轮车骑行者基本信息

性别	身高/cm	体重/kg	年龄/岁	伤情
男性	165	65	56	AIS4

流罩、前流水槽和挡风玻璃的接触特性曲线,定义货车前部各部分的接触特性,用以模拟货车前部的碰撞特性。

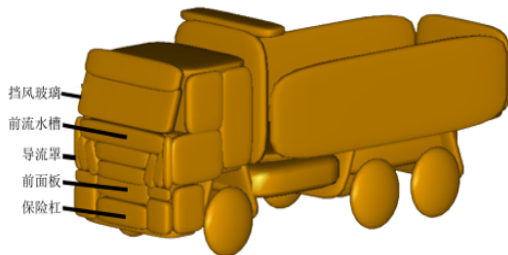


图 1 货车前部结构模型

1.2.2 电动两轮车模型

电动两轮车的多体模型是基于事故车辆同年份同车型的几何模型建立的。根据事故相关信息,电动两轮车的技术参数,见表 2。电动两轮车模型由车身和车头两部分组成,两部分采用转动铰链连接。该模型共有 20 个椭球和 4 个铰链组成,其中一个自由铰链用于描述整个两轮车的总运动,一个转动铰链描述两轮车车头与车身间的相对运动,其余

两个转动铰链用于描述电动两轮车前后轮相对车身的运动。电动两轮车的接触特性采用了参考文献中的部件试验数据来进行定义^[14-15]。事故电动两轮车及多体模型,如图 2 所示。

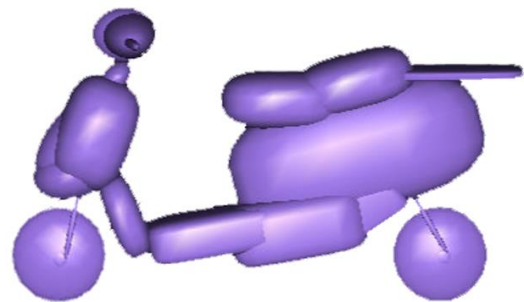


图 2 两轮车模型

1.2.3 电动两轮车模型

事故中两轮车骑行者的基本信息,见表 3。本文采用的骑行者多体模型是 MADYMO 软件自带的 Hybrid III 假人,根据伤员的身高和体重,在 GEBOD (Generator of Body Data) 程序中进行缩放,得到仿真重建所需的人体模型。通过调整假人位置以及各个关节的状态,使该假人能符合碰撞发生时的姿态并且能自然地骑行在两轮车上,最终的骑行者骑行姿态模型,如图 3 所示。

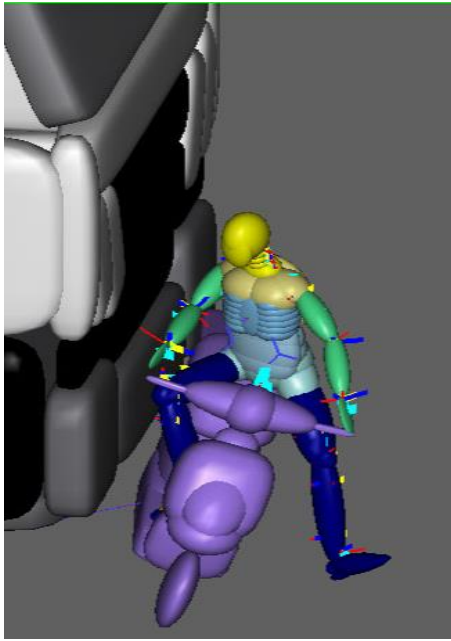


图3 碰撞前骑行者骑行姿态

1.3 事故重建及仿真设置

1.3.1 事故重建流程

多体模型事故重建是在MADYMO软件中完成的，其重建过程如图4所示。首先，要根据事故现场草图、货车信息、电动两轮车信息、骑行者信息、视频信息以及目击者的证词来初步设定碰撞参数。然后，参照所采集的信息在MADYMO中不断优化调整，直至软件输出的碰撞动态响应过程、货

车与电动两轮车及骑行者最终位置、骑行者损伤参数与事故调查信息相一致时，才能认定事故重建完成。

根据事故发生时的环境信息以及相关参考文献设置人与地摩擦因数为0.45，两轮车车身和地面摩擦因数为0.62，货车轮胎与地面摩擦因数为0.55，两轮车车身与人的摩擦因数为0.4^[16]。

1.3.2 仿真试验设计

基于上文所建立的事故重建模型，设计全因子仿真试验来探究货车-两轮车事故中不同速度对骑行者的运动学响应及伤害参数的影响。仿真初始状态如图5所示，根据以往对两轮车及货车事故的研究^[5, 9]，将货车速度限定在20~40 km/h之间，两轮车速度限定在10~30 km/h之间，见表4，采用5 km/h的增量对不同速度下的货车前部碰撞两轮车事故的运动学响应和运动学损伤指标进行研究。仿真试验中骑行者运动学损伤评价指标及其阈值见表5，其中，头部损伤主要与与撞击载荷大小和持续时间有关^[17]，使用HIC₁₅作为评价指标；胸部损伤程度使用3 ms合成加速度评价，其值大于588.399 m/s²，代表25% AIS4以上的胸部损伤风险^[19]；下肢损伤程度采用长骨能承受的冲击力来评价。

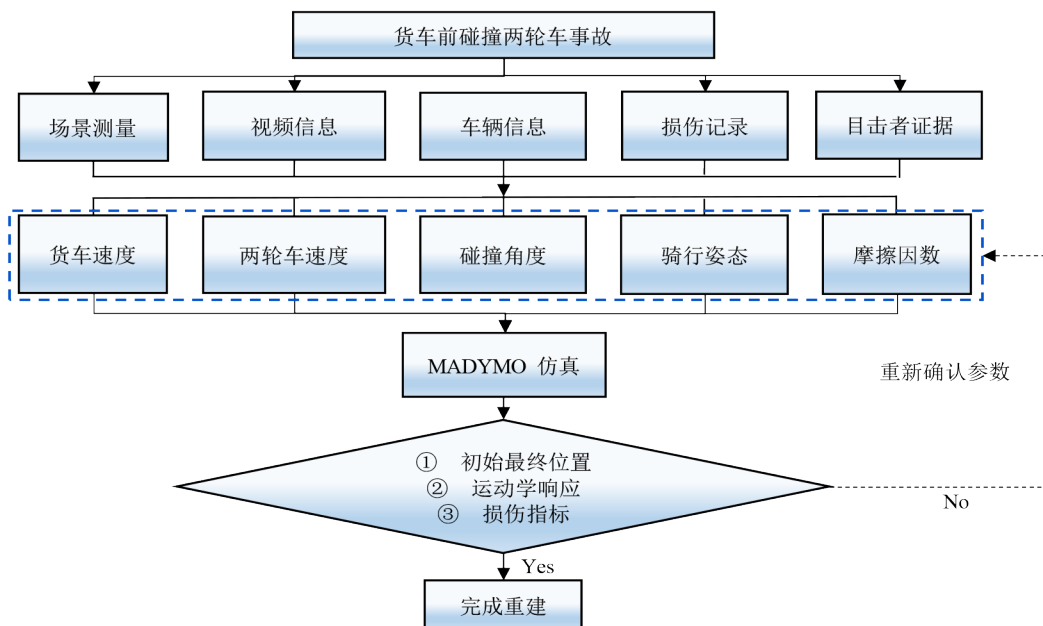


图4 事故重建流程



图5 仿真试验初始状态

表4 仿真矩阵

参数	值
货车速度/(km/h)	20, 25, 30, 35, 40
两轮车速度/(km/h)	10, 15, 20, 25, 30

表5 运动学损伤评价指标

部位	评价指标名称	阈值
头部	HIC ₁₅	1 000 ^[18]
胸部	胸部3 ms合成加速度/(m/s ²)	588.399 ^[19]
下肢	股骨接触力/kN	3~10 ^[20]
	胫骨接触力/kN	2.5~8.0 ^[21]

2 结果

2.1 事故重建结果

2.1.1 事故重建最终位置对比

结合视频信息, 并进行多次调整可知, 当货车车速设置为 19.9 km/h, 电动两轮车行驶速度为 15 km/h, 且货车与两轮车的碰撞角度为 92°时, 输出的仿真结果与实际情况最吻合。仿真得到的最终位置与案卷记录的对比, 如图 6 所示。图 6a 为货车最终位置对比, 图 6b 为两轮车最终位置对比, 图 6c 为人、两轮车、货车事故后相对位置对比, 仿真所得的人、车最终位置与案卷所记录的事故草图和现场照片中的货车、两轮车、两轮车骑行者的最终位置基本相符。

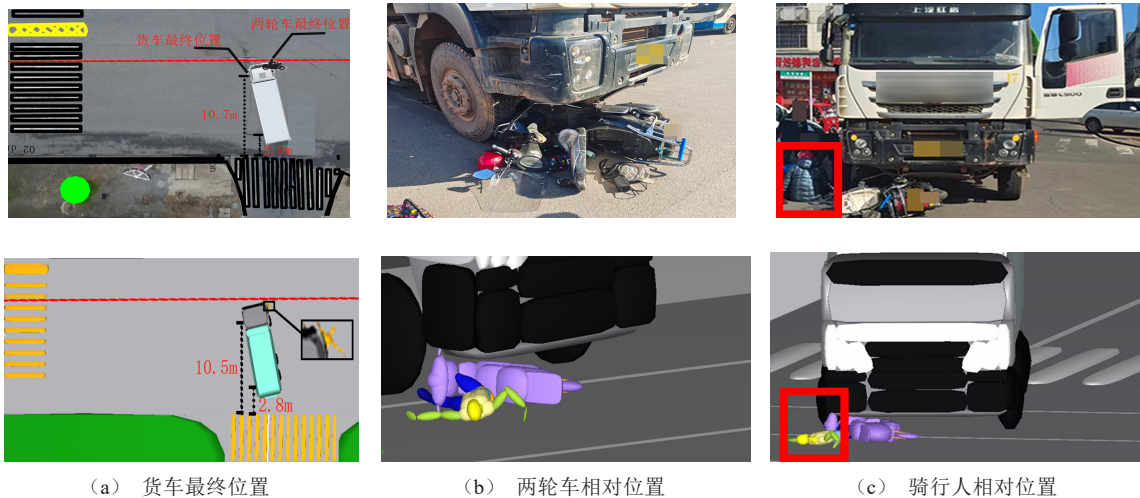


图6 事故中货车, 两轮车以及两轮车骑行者的最终位置

2.1.2 骑行者运动学响应对比

事故发生过程中的运动学响应, 如图 7 所示, 仿真开始后第 22 ms 两轮车与货车前部中央接触后失去平衡向右侧倾斜, 两轮车车头发生一定程度的偏转, 两轮车骑行者伸出脚应急避免; 随后第 475 ms 两轮车完全倒下并进入货车车头下方被拖行,

骑行者从两轮车上滑落, 并且上半身顺时针旋转; 最后, 两轮车骑行者盆骨、下肢、胸部和头部依次与地面接触, 至 1 100 ms 时身体不再有大运动。从两组图片的对比中可知, 碰撞发生中的骑行者运动学与仿真所得基本一致, 并且最终位置相对吻合。



图7 事故中两轮车及其骑行者运动学响应对比

2.1.3 骑行者损伤对比

重建所得的骑行者头部合成加速度、头部角速度、头部质心角加速度以及胸部加速度曲线，如图8所示。由图8a可知，头部合成加速度在629 ms时出现峰值为 $2\,438.39\text{ m/s}^2$ ，头部 HIC_{15} 为3102.4，超过颅骨骨折的阈值1000，与案卷中出现的枕骨骨折较切合。由图8b~c可知，头部角速度峰值为 52.356 rad/s ，头部角加速度峰值为 $19\,488.41\text{ rad/s}^2$ ，超过重度颅脑损伤发生的阈值 46.5 rad/s 和 $16\,000\text{ rad/s}^2$ ，这与案卷中记录的受害者出现颅脑弥散性轴索损伤较贴合^[22]。由图8d可知，胸部加速度于628 ms时出现 695.97 m/s^2 的峰值，胸部3 ms加速度为 608.012 m/s^2 ，超过损伤阈值 588.399 m/s^2 ，符合受害者胸部出现肋骨骨折的损伤状况。

综上所述，事故重建所得的碰撞速度，初始、最终位置、两轮车骑行者的运动学响应以及骑行者损伤均能较好地符合真实事故，可以认为事故重建有效并可用于损伤参数分析。

2.2 不同速度对头部运动学损伤指标的影响

从结果中提取了不同的货车和两轮车速度下的头部HIC值变化趋势，如图9所示，相同的两轮车速度下，HIC值随货车速度增加呈上升趋势，且两轮车速度的增大使HIC值随货车速度增大而上升的趋势更加明显。在相同的货车速度下，两轮车速度

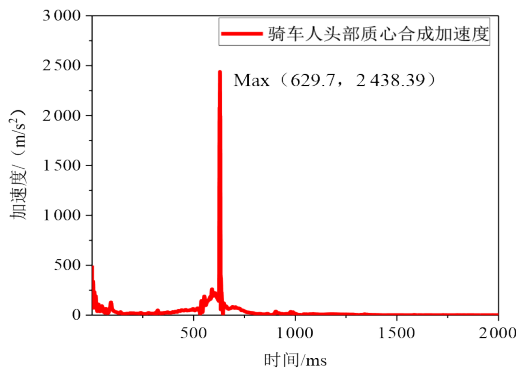
处于 $10\sim 20\text{ km/h}$ 时，对HIC值几乎没有影响。当货车速度为 40 km/h 时，HIC值从两轮车速度为 10 km/h 时的8710降低到两轮车速度为 15 km/h 时的7684，最后升高到两轮车速度为 20 km/h 时的10073。而当两轮车速度从 20 km/h 提高到 30 km/h 时，在各货车速度下的HIC值出现 $2\%\sim 40\%$ 的上升。

2.3 不同速度对胸部运动学损伤指标的影响

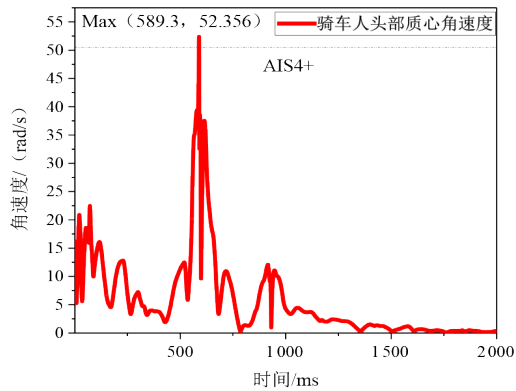
不同货车和两轮车速度下的胸部3 ms加速度的变化趋势，如图10所示。由图中横向变化趋势可知，胸部3 ms加速度随着货车速度的增加而上升，且上升趋势随着货车速度的升高变得更加明显。而从纵向变化趋势上可知，较高的货车速度（ $30\sim 40\text{ km/h}$ ）下，两轮车速度从 20 km/h 提高到 30 km/h 时，骑行者的胸部3 ms加速度会出现 $15\%\sim 20\%$ 的下降。

2.4 不同速度对下肢运动学损伤指标的影响

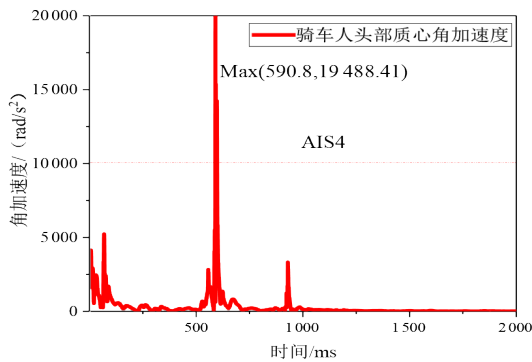
对仿真中股骨和胫骨的接触力峰值进行了提取，得到胫骨、股骨接触力峰值与货车速度及两轮车速度的关系曲线，如图11所示。由如图11a可知，股骨接触力受货车速度的影响显著，两轮车速度对股骨接触力的影响较小，当货车速度为 20 、 25 、 40 km/h 时，股骨接触力随两轮车速度增大有较明显的上升趋势；胫骨接触力随货车速度上升的趋势与股骨接触力类似。由图11b可知，两轮车速



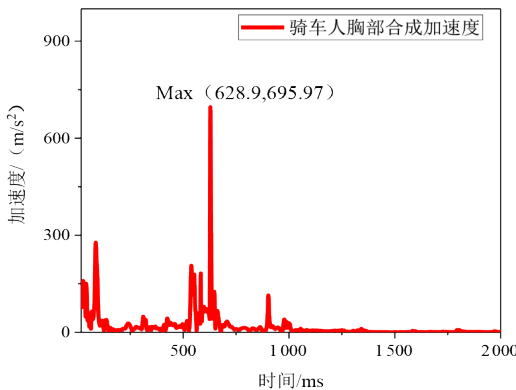
(a) 头部线性加速



(b) 头部角速度



(c) 头部角加速度



(d) 胸部线性加速度

图 8 骑行者运动学损伤指标

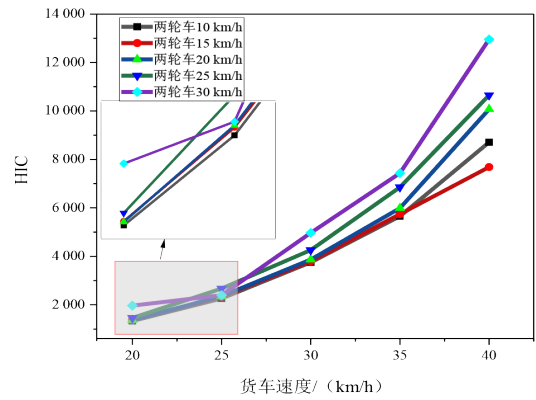


图 9 骑行者头部 HIC 值随速度变化趋势

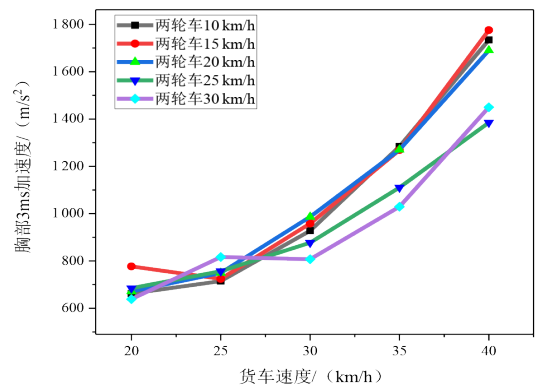
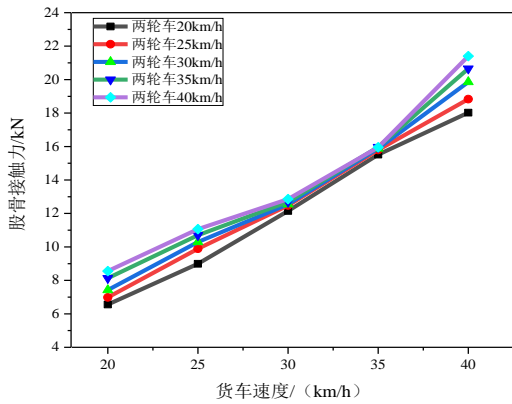


图 10 骑行者胸部 3 ms 加速度随速度变化趋势

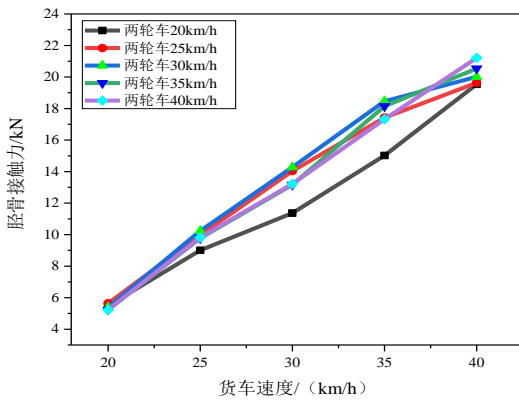
度在 20 km/h 时, 胫骨接触力处于较低水平, 而速度为 25~40 km/h 时, 两轮车速度对胫骨接触力无显著影响。总体来看, 股骨接触力和胫骨接触力均随货车、两轮车速度增大而呈上升趋势, 但是货车速度对上升趋势影响较大而两轮车速度则影响较小。

2.5 不同速度对骑行者运动学响应的影响

采用全因子试验对比分析不同速度下骑行者运动学响应与损伤差异。当货车速度为 20、40 km/h 和两轮车速度为 10、30 km/h 时的骑行者运动学响应, 如图 12 所示。由图可知, 所有速度下骑行者遭受撞击后均会发生旋转。对比所有货车速度与两轮车速度下, 碰撞后 50、150 ms 时骑行者的状态可知, 货车车速和两轮车车速的升高会使骑行者旋转的幅度增大。骑行者后续的运动基于旋转的幅度呈现出不同的状态, 由图 12a 和 b 可知, 两轮车低速时, 骑行者旋转约 90° 变为面向货车, 随后从货车上跌落, 盆骨、下肢、胸部和头部依次与地面接



(a) 股骨接触力



(b) 胫骨接触力

图 11 骑行者下肢接触力随速度变化趋势

触，其运动学相对一致。两轮车高速行驶时，骑行者的旋转幅度比低速大，由图 12c 和 d 可知，货车速度的提高会引起完全不同的骑行者运动学响应：货车速度为 20 km/h、两轮车速度为 30 km/h 时，骑

行者在 150 ms 时旋转至 90° 面向货车的位置，随后向两轮车的行驶方向倾倒，最后侧身落地；货车速度为 40 km/h、两轮车速度为 30 km/h 时，骑行者在 150 ms 时脱离两轮车并在空中大幅旋转直至落地。

3 讨论

为探究货车前部碰撞两轮车的事故特征，使用 MADYMO 软件重建了一起真实事故，并且仿真所得在最终位置、运动学响应、骑行者损伤上与真实事故均有较好的吻合度。然后在此模型的基础上更改输入速度，以观察参与方的双方速度对两轮车骑行者运动学响应及运动学损伤指标的影响。

由图 9 可知，当货车速度达到 25 km/h 时，HIC 值就完全超过了阈值，相对较低的速度碰撞也会使两轮车骑行者头部遭受较大的损伤风险。同时，在所有货车速度下，HIC 值均有随两轮车速度增大而上升的趋势，这一趋势随着货车速度的上升而显著。表 6 列出了货车速度 30 km/h 以上的骑行者 HIC 值及其出现时间，可以看到 HIC 值明显上升的发生时间较晚，这意味着 HIC 的上升趋势来自于地面的冲击而非货车的撞击，并且在相同的货车速度下，两轮车速度对货车撞击引起的头部线性加速度的影响较小，而可能对地面冲击引起的头部线性加速度存在影响。

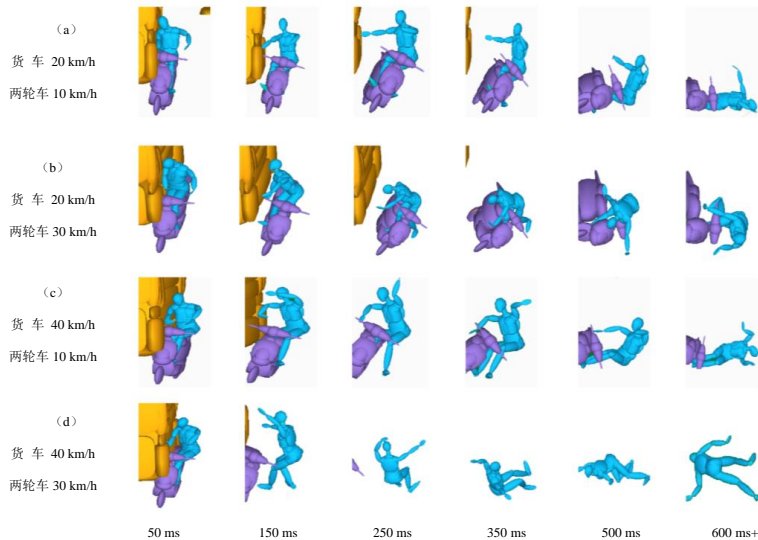


图 12 不同速度下的骑行者运动学响应

表6 参与方部分速度下骑行者HIC值及其出现时间

货车速度/ (km/h)	两轮车速度/ (km/h)	HIC ₁₅	发生时间/ms
30	10	3 750.9	28.9
30	15	3 792.0	28.3
30	20	3 870.1	28.1
30	25	4 259.2	484.9
30	30	4 968.5	451.9
35	10	5 652.4	24.8
35	15	5 742.5	24.5
35	20	5 990.6	24.3
35	25	6 851.2	474.1
35	30	7 433.0	463.6
40	10	8 710.0	21.8
40	15	7 684.5	23.7
40	20	10 073.0	511
40	25	10 649.0	487.7
40	30	12 954.0	467.3

观察胸部3 ms加速度的变化趋势可知,货车速度为20、25 km/h时,其峰值处于阈值附近,而货车速度大于30 km/h时,其值基本超过阈值。值得注意的是,货车速度为35、40 km/h时,其上升趋势明显减缓,从骑行者运动学响应的变化来看,对比图12c和d可知,相同的货车速度下,两轮车速度增加后,骑行者身体的旋转幅度明显增加,这可能分散了一部分货车的冲击力,从而使胸部受到的

冲击减缓,这体现在胸部3 ms加速度的上升趋势减缓上。

最后,本文仅仅探讨了货车、两轮车速度在货车前部碰撞事故中与骑行者头部、胸部、下肢运动学损伤指标的关系,而对于更多的损伤影响参数如碰撞角度、其他碰撞位置、两轮车骑行者应急姿态的采取情况等并没有进行探讨。因此,后续需要进一步增加不同的碰撞工况,分析不同工况下骑行者的运动学损伤指标的差异性。

4 结论

基于一个经过事故重建验证的MADYMO货车前碰撞两轮车事故模型,对不同货车、两轮车速度对骑行者运动学响应以及身体主要部位的运动学损伤指标的影响进行了研究,得到以下结论:

货车速度与两轮车的上升会使骑行者有旋转的趋势;头部、胸部、下肢的运动学损伤指标均随着货车速度增加而增大,且较低的货车速度依然会使两轮车骑行者遭受较大的损伤风险;头部和胸部相较于下肢损伤风险较大;当货车速度相同时,两轮车速度对下肢运动学损伤指标影响较小;货车速度相同且处于较高水平时,两轮车速度的上升会引起头部运动学损伤指标的上升和胸部运动学损伤指标的下降。

参考文献 (References)

- [1] WHO. Global Status Report on Road Safety 2018 [M]. Geneva: World Health Organization, 2018.
- [2] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018. (in Chinese)
- [3] 胡林, 李根, 王方, 等. 基于CIDAS事故数据的路口乘用车-两轮车测试场景研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(8): 1417-1427.
HU Lin, LI Gen, WANG Fang, et al. Research on Test Scenarios of Passenger Cars and Two-Wheelers at Intersections Based on CIDAS Accident Data [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(8): 1417-1427. (in Chinese)
- [4] DAS S, HOSSAIN M M, ASHIFUR R M, et al. Understanding Patterns of Moped and Seated Motor Scooter (50 cc or Less) Involved Fatal Crashes Using Cluster Correspondence Analysis [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2022, 19(2): 1-21.
- [5] 韩勇, 贺伟, 李泉, 等. 基于视频信息的汽车碰撞事故中骑行者运动学响应分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(4): 381-387.
HAN Yong, HE Wei, LI Quan, et al. Analysis of Two-Wheelers Kinematics Before/During/After Vehicle Collisions Based on Video Records [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(4): 381-387. (in Chinese)
- [6] HUANG Yuan, ZHOU Qing, KOELPER C, et al. Are Riders of Electric Two-Wheelers Safer Than Bicyclists in

- Collisions with Motor Vehicles? [J]. Accident Analysis and Prevention, 2020, 134: 105336.1-105336.10.
- [7] ZHAO Yuqing, MIYAHARA T, MIZUNO K, et al. Analysis of Car Driver Responses to Avoid Car-to-Cyclist Perpendicular Collisions Based on Drive Recorder Data and Driving Simulator Experiments [J]. Accident Analysis and Prevention, 2021, 150: 105862.1-105862.11.
- [8] WEI Lihua, TAN Yifan, LIU Haixu, et al. Accident Dynamic Response and Injury Mechanism of the Collision Accident Between Right-Turning Truck and Cyclist Straight [J]. International Journal of Crashworthiness, 2023, 28(4): 462-471.
- [9] 张道文, 李敏, 庞劭荣, 等. 重型货车与二轮车事故致因及其拓扑层级分析 [J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(2): 157-164.
ZHANG Daowen, LI Min, PANG Shaorong, et al. Accident Causes and Its Topological Hierarchy Analysis for Heavy-Duty Trucks and Two-Wheelers [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2023, 14(2): 157-164. (in Chinese)
- [10] POKORNY P, DRESCHER J, PITERA K, et al. Accidents Between Freight Vehicles and Bicycles, with a Focus on Urban Areas [J]. Transportation Research Procedia, 2017, 25: 999-1007.
- [11] HICKMAN J S, HANOWSKI R J, BOCANEGRA J. A Synthetic Approach to Compare the Large Truck Crash Causation Study and Naturalistic Driving Data [J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 112: 11-14.
- [12] 赵明明, 刘奇, 王宏雁, 等. 从交通事故研究看重型货车安全法规 [J]. 汽车与安全, 2019(1): 39-44.
ZHAO Mingming, LIU Qi, WANG Hongyan, et al. Heavy Truck Safety Regulations from Crash Studies [J]. Auto & Safety, 2019(1): 39-44. (in Chinese)
- [13] CHINNASWAMY G K, CHIRWA E C, NAMMI S K, et al. Benchmarking and Accident Characteristics of Flat-Fronted Commercial Vehicles with Respect to Pedestrian Safety [J]. International Journal of Crashworthiness, 2007, 12(3): 279-291.
- [14] MAKI T, KAJZER J. The Behavior of Bicyclists in Frontal and Rear Crash Accidents with Cars [J]. JSAE Review, 2001, 22: 357-363.
- [15] MCLUNDIC W M. Investigation of Two-Wheeled Road Traffic Accidents Using Explicit FE Techniques [D]. Bedford(UK): Cranfield University, 2007.
- [16] 郭磊. 汽车与两轮车碰撞事故的仿真研究及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
GUO Lei. Simulation Research on Collision Accidents Between Vehicle and Two-Wheelers and Its Application [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [17] 王幼复, 马和中. 人的头部受撞击时的生存界限 [J]. 力学进展, 1983, 12(3): 265-271.
WANG Youfu, MA Hezhong. Boundaries of Survival in the Event of a Human Head Impact [J]. Advances in Mechanics, 1983, 12(3): 265-271. (in Chinese)
- [18] WOOD D P, SIMMS C K, WALSH D G. Vehicle-Pedestrian Collisions: Validated Models for Pedestrian Impact and Projection [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2005, 219(2): 183-195.
- [19] HOLLOWELL W T, GABLER H C, STUCKI S L, et al. Updated Review of Potential Test Procedures for FMVSS NO. 208 [Z]. United States: National Highway Traffic Safety Administration, 1999.
- [20] KRESS T A, SNIDER J N, PORTA D J, et al. Human Femur Response to Impact Loading [J]. International Research Council on Biomechanics of Injury, 1993, 21: 93-104.
- [21] BUNKETORP O, ROMANUS B, HANSSON T, et al. Experimental Study of a Compliant Bumper System [C]// SAE Technical Papers, 831623, 1983.
- [22] MARGULIES S S, THIBAUT L E. A Proposed Tolerance Criterion for Diffuse Axonal Injury in Man [J]. Journal of Biomechanics, 1992, 25(8): 917-923.

作者简介



张翔 (1999-), 男, 浙江义乌人, 硕士研究生, 主要研究方向为车辆碰撞安全。
Tel: 18757684912
E-mail: 2221011047@xmut.edu.cn

通信作者



王丙雨 (1985-), 男, 山东聊城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为车辆碰撞安全、深入事故数据和人体损伤生物力学。
Tel: 13215912508
E-mail: 2016000075@xmut.edu.cn