

文章编号:1004-7220(2021)03-0353-06

·论 著·

6岁儿童行人-汽车碰撞中碰撞角度对头部损伤的影响

李海岩, 李 琨, 黄永强, 贺丽娟, 崔世海, 吕文乐, 阮世捷
(天津科技大学 现代汽车安全技术国际联合研究中心, 天津 300222)

摘要:目的 应用符合欧洲新车安全评鉴协会(the European New Car Assessment Programme, Euro NCAP)要求的6岁儿童行人有限元模型,探究不同碰撞角度对儿童头部损伤的影响。方法 应用符合Euro NCAP技术公告(TB024)并且具有详细解剖学结构的6岁儿童行人有限元模型,设置4组行人-汽车碰撞仿真试验,探究不同碰撞角度下儿童头部损伤情况。人体头部质心初始位置在车的纵向中心线上,轿车初速度为40 km/h,轿车分别与人体右侧、前侧、左侧、后侧碰撞(即 0° 、 90° 、 180° 、 270°)。比较不同碰撞角度下运动学差异和头部碰撞响应,同时分析面骨和颅骨的损伤情况。结果 通过分析儿童行人头部接触力、头部质心合加速度、头部质心相对于车的合速度、头部损伤标准(head injury criterion, HIC_{15})、面骨骨折情况以及颅骨应力分布发现,背面、正面碰撞下儿童头部骨折及发生脑组织损伤的风险大于侧面碰撞,其中背面碰撞下儿童行人头部损伤风险最高,侧面碰撞下儿童行人头部损伤风险最低。结论 背面碰撞下儿童行人头部损伤风险最大,研究结果对行人-汽车碰撞评估和防护装置研发具有重要的应用价值。

关键词:儿童行人;有限元模型;人车碰撞;头部损伤

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.03.009

Effects of Impact Angle on Head Injury in Six-Year-Old Child Pedestrian-Car Collision

LI Haiyan, LI Kun, HUANG Yongqiang, HE Lijuan, CUI Shihai, LÜ Wenle, RUAN Shijie
(International Research Association on Emerging Automotive Safety Technology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: **Objective** To explore the influence of child head injury at different impact angles by applying the finite element model of six-year-old child pedestrian as specified in the European New Car Assessment Programme (Euro NCAP). **Methods** Based on the finite element model of 6-year-old child pedestrian with detailed anatomical structure as specified by the Euro NCAP (TB024), four groups of simulation experiments were set up to explore the mechanism of head injury at different impact angles. The initial position for head mass center was on the longitudinal center line of the car. The initial speed of the car was 40 km/h. The car contacted with the model from the direction of the right (0°), the front (90°), the left (180°) and the back (270°). The kinematics differences and head impact responses were compared, and injuries of the facial bone and skull were analyzed. **Results** Through the analysis on head contact force, acceleration of head mass center, resultant velocity of head mass center relative to the vehicle, head injury criterion (HIC_{15}), facial bone fracture and skull stress distribution, it was found that the risk on head fracture and brain contusion under back impact and front impact was higher than

收稿日期:2020-07-08; 修回日期:2020-08-16

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0807203),国家自然科学基金项目(81371360,81471274,81201015)

通信作者:李海岩,教授,E-mail: lihaiyan@tust.edu.cn

that under side impact. The risk of head fracture and brain contusion was the highest under back impact, while the lowest under side impact. **Conclusions** Child pedestrian head injury was the largest under back impact. The results have important application values for the assessment and development of car-pedestrian collision protection device.

Key words: child pedestrian; finite element model; car-pedestrian collision; head injury

最新统计表明,全球每年有超过 135 万人在交通事故丧生,道路交通伤害是 5~29 岁儿童和青年死亡的主要原因^[1]。全球交通事故死亡者中,处于无保护状态的死亡者,即行人、骑自行车者和骑摩托车者占 50%。事故分析表明,超过 80% 的行人汽车碰撞事故发生在行人过马路时^[2]。在行人汽车碰撞中,66%~82% 的行人被乘用车撞伤,60%~77% 的行人被车的前端撞伤,造成严重损伤的速度在 25~55 km/h,超过 60% 的行人事故发生在 40 km/h 车速下,而保险杠、车盖和挡风玻璃的撞击被认为是主要原因^[3-5]。

儿童身体除了具有独特的结构特征外,还具有不同于成人的力学性能和损伤耐受能力。因此,儿童在车祸中的运动学响应和损伤情况需要单独分析,然而很少有研究对这些差异进行具体分析。虽然现阶段对行人保护的研究越来越详细,包括头型、大腿/小腿腿型的冲击器测试系统,但现阶段却只有头型冲击试验与儿童行人保护相关。

近年来,人体有限元模型被越来越多应用在碰撞运动学和损伤生物力学方面的研究中。儿童有限元模型的开发也在快速发展。Nishimura 等^[6]通过缩小虚拟人体模型(total human model for safety, THUMS)版本的 50% 美国男性整人模型,开发了 6 岁和 9 岁儿童有限元模型。Okamoto 等^[7]基于核磁共振(magnetic resonance imaging, MRI)扫描获取人体几何参数,开发了 6 岁儿童有限元模型,但该模型材料需要进一步改善。Mizuno 等^[8]通过缩小 THUMS Vision 1 中的 AM50 模型开发了 1 个 3 岁儿童模型。Ito 等^[9]建立儿童下肢步态有限元模型。Zhu 等^[10]利用计算机断层(computed tomography, CT)和 MRI 扫描数据,建立 10 岁儿童有限元模型。吕文乐等^[11]建立 6 岁儿童站姿有限元模型,并进行有效性验证。冯成建等^[12]通过重构交通事故,对行人头部损伤进行分析,但所应用的假人模型不能很好反映行人脑组织损伤特性。Liu 等^[13]通过事故重

构对行人在不同角度的碰撞进行分析,但主要考察汽车与成年行人在碰撞条件下的头部损伤。

欧洲新车安全评鉴协会(the European New Car Assessment Programme, Euro NCAP)在 2018 年 10 月发布的行人模型认证技术报告中,对行人姿态在 15 个参数上做了详细的要求,其中对 6 岁儿童行人高度和关节角度等均有明确的参数要求^[14]。基于此,天津科技大学现代汽车安全技术国际联合研究中心构建了 6 岁儿童行人走姿有限元模型。本文将该模型应用于车辆与行人碰撞仿真试验中,建立 4 种碰撞角度下 6 岁儿童行人-汽车碰撞仿真试验,结合运动学探究不同碰撞角度(即儿童身体与汽车前端部结构碰撞位置不同时)下头部损伤特征。

1 试验方案

现代汽车安全技术国际联合研究中心基于 1 个中国 6 岁儿童的医学检测 CT 数据,参照解剖学结构,先后构建头部、颈部、胸腹部及下肢等具有详细结构的有限元模型,并进行有效性验证^[11,15-18],最后通过共节点得到完整的 6 岁儿童行人站姿有限元模型[见图 1(a)]。该模型身高 113.5 cm,体质量 24.8 kg;节点数 1 057 830 个,单元数 1 558 836 个。在最新的 Euro NCAP 行人模型认证技术报告中对行人走姿模型的各个关节角度均有明确的要求^[14]。根据相关参数,对已有 6 岁儿童站姿模型相应关节处的角度进行调整,最后得到完整的 6 岁儿童行人走姿有限元模型[见图 1(b)]。该儿童模型节点数 1 092 366 个,单元数 1 576 733 个。仿真试验采用的汽车有限元模型来自美国国家碰撞分析中心 NCAC 汽车模型数据库。该款车型通过重构 NCAP 第 3 248 号刚性壁障正碰试验,验证了模型有效性^[19]。为了提高计算效率,对车进行简化,减少其单元数量。简化后的轿车模型节点数 238 839 个,单元数 246 182 个;质量 1 634.91 kg。图 1(c)为简化后的轿车有限元模型。

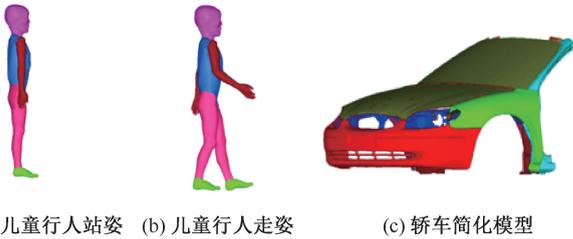


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model (a) Child pedestrian with standing posture, (b) Child pedestrian with walking posture, (c) Simplified vehicle model

在仿真试验中,人体头部质心初始位置在车的纵向中心线上,轿车的初速度为 40 km/h;人与车的摩擦因数为 0.3^[14],脚与地面的摩擦因数为 0.58^[14],仿真过程中施加重力场。在 Euro NCAP TB-024 行人模型认证技术报告要求中,汽车-行人碰撞试验撞击位置首先发生在行人模型的右腿处,故将此碰撞方位称为 0°碰撞仿真试验。在相同仿真试验条件下,进行 90°、180°及 270°碰撞仿真试验。0°碰撞是人体右侧与车发生侧面碰撞,汽车保险杠将首先撞击右侧大腿侧面;90°碰撞是人体正面与车发生正面碰撞;180°碰撞是人体左侧与车发生侧面碰撞,汽车保险杠将首先撞击前侧大腿;270°碰撞是人体背面与车发生背面碰撞(见图 2)。

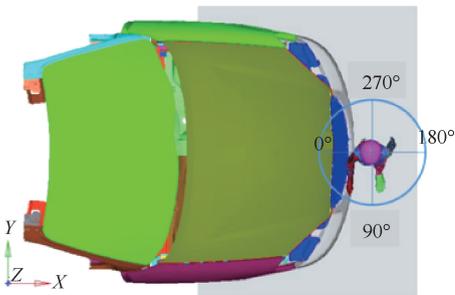


图2 不同碰撞角度下人车碰撞试验

Fig.2 Test of car-pedestrian collision at different impact angles

2 试验结果

2.1 行人碰撞运动学

图 3 所示为 4 组仿真试验中儿童行人在碰撞过程中的运动学响应。对于上肢体,首先,0°和 180°侧面碰撞下上肢体绕骨盆主要做左侧面弯曲运动;

而 90°正面碰撞是前屈运动;270°背面碰撞则是后仰运动。其次,0°和 180°侧面碰撞下上肢首先与车碰撞,随后是肩部,但因为摆臂的原因,其碰撞位置不一样,导致头部绕颈部运动时侧面弯曲运动不一样,最后与引擎盖撞击的头部的撞击位置不一样。相对于侧面碰撞,90°正面碰撞下行人首先是胸腹部与车发生碰撞,头部在绕颈部撞向引擎盖的过程中主要做弯曲运动,头部下颌骨首先与车的引擎盖撞击,随后是整个面部;而背面碰撞下行人背部首先与车接触,随后头部绕颈部做拉伸运动撞击引擎盖,头部的碰撞位置在枕骨部位。

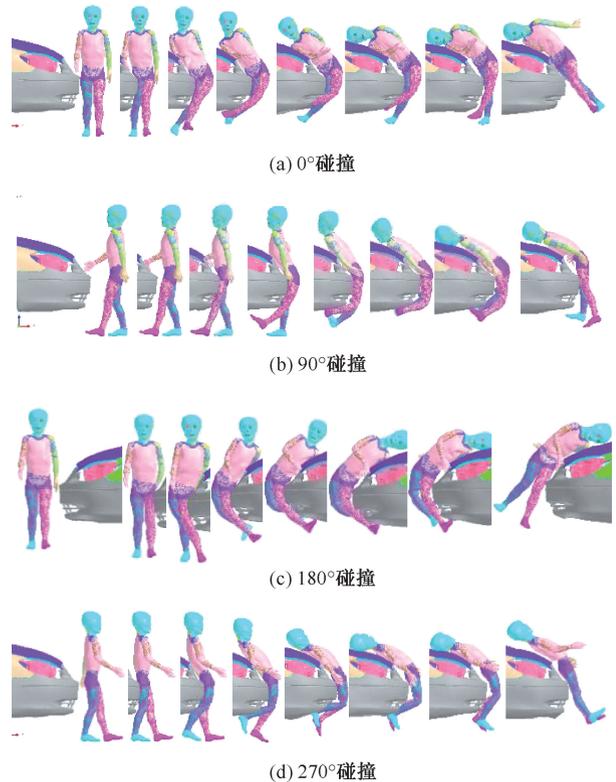


图3 不同碰撞角度下人车碰撞过程

Fig.3 Car-pedestrian collision at different impact angles

(a) 0° impact, (b) 90° impact, (c) 180° impact, (d) 270° impact

2.2 头部运动学响应

4 种不同碰撞角度仿真试验中头部碰撞时间(head impact time, HIT)、碰撞位置(wap around distance, WAD)、头部损伤标准(head injury criterion, HIC₁₅)如表 1 所示。HIT 定义为从人体模型开始接触轿车到头部撞击到轿车为止的时间。

0°、180°侧面碰撞下 HIT 要比 90°正面和 270°背面碰撞下 HIT 小 10 ms 左右。WAD 定义为头部在引擎盖上的碰撞距离,仿真试验 0°、90°和 180°碰撞下 WAD 相差不大,但 270°碰撞下 WAD 为 1 065 mm,与 0°碰撞下的 1 099 mm 相差 34 mm。270°碰撞下 HIC₁₅ 为 4 496,远大于其他 3 组碰撞试验。此外,0°碰撞下脑组织最大主应变为 0.549,为 4 种情况下的最大值。

表 1 不同碰撞角度下头部碰撞响应

Tab.1 Head response at different impact angles

参数	碰撞角度/(°)			
	0	90	180	270
HIT/ms	48	39	52	41
WAD/mm	1 099	1 117	1 105	1 065
HIC ₁₅	2 128	2 758	2 337	4 496

图 4 分别为头部与引擎盖的接触力时间曲线、头部质心合加速度时间曲线、头部质心相对于车的合速度时间曲线。头部质心合加速度峰值与接触

力峰值在大小及时间点上一一对应。其中,0°、180°及 270°碰撞下出现了两个比较大的峰值加速度,即出现了二次碰撞。0°、180°、90°及 270°碰撞下头部撞击引擎盖的初始碰撞速度分别为 7.4、8.7、12.8、13.1 m/s。0°碰撞下头部在 49 ms 时开始撞击引擎盖,在 51 ms 时出现了第 1 个加速度峰值;90°碰撞下头部在 52 ms 开始撞击引擎盖,62 ms 出现第 1 个加速度峰值;180°碰撞下头部在 52 ms 开始撞击引擎盖,在 55 ms 出现第 1 个加速度峰值;270°碰撞下头部在 42 ms 经过 1 ms 到 43 ms 时出现了第 1 个峰值加速度。0°、90°、180°及 270°碰撞下头部从撞击引擎盖开始到出现第 1 加速度所需时间分别 2、10、3、1 ms;270°碰撞下所用时间最短,而 90°碰撞下所用时间远大于其他 3 种碰撞。通过仿真试验数据可以发现,正面以及背面碰撞情况下头部相对于车的速度比其余两组侧面碰撞更大,这也造成了在碰撞时更大的头部接触力、HIC₁₅ 以及头部质心合加速度。

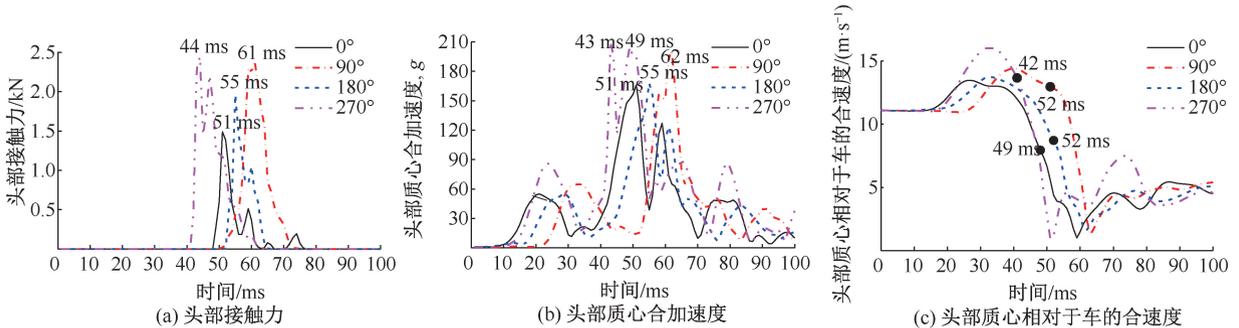


图 4 头部运动学响应

Fig.4 Kinematic response of the head (a) Contact force between head and hood, (b) Acceleration of the head mass center, (c) Resultant velocity of head mass center with the vehicle

2.3 面骨骨折

整个碰撞中,颅骨没有出现骨折,但面骨均出现骨折,骨折损伤程度不一样(见图 5)。270°和 90°碰撞下出现了大范围的面颅骨折,包括鼻骨、上颌骨、颧骨及眼眶周围的骨折,属于 LeFort III 级骨折,且 270°背面碰撞下的面骨损伤比 90°正面碰撞下更严重;0°和 180°碰撞下,只在两侧的颧骨出现骨折,且对撞侧的骨折比撞击侧严重。另外,因为撞击角度的不同,与车碰撞的头部位置也不一样,分别位于左顶骨、面骨、前额骨,右顶骨及枕骨。

2.4 颅骨应力分布

图 6 是 4 种碰撞角度下的最大 von Mises 应力分布。很明显,180°碰撞下有最大的应力(91 MPa);0°、90°及 270°碰撞下应力分别为 74、80、83 MPa。0°、90°、180°及 270°碰撞下应力集中部位分别位于右侧顶骨靠近冠状缝和顶颞缝处、鼻骨后方、左侧顶骨靠近顶颞缝处、枕骨。除了 90°碰撞下头部最大应力不是出现在颅骨的撞击处外,其他 3 种碰撞下应力均在颅骨的撞击处。

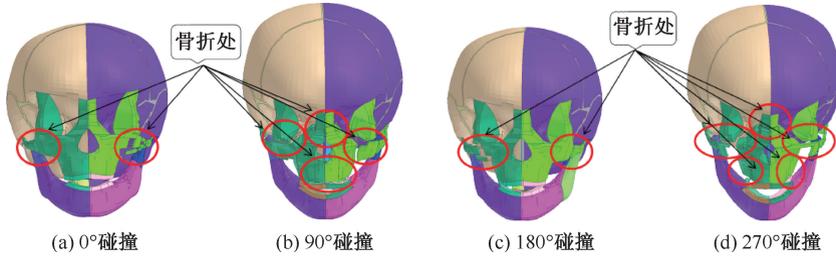


图5 不同碰撞角度下面骨骨折情况

Fig.5 Fracture of facial bones at different impact angles (a) 0° impact, (b) 90° impact, (c) 180° impact, (d) 270° impact

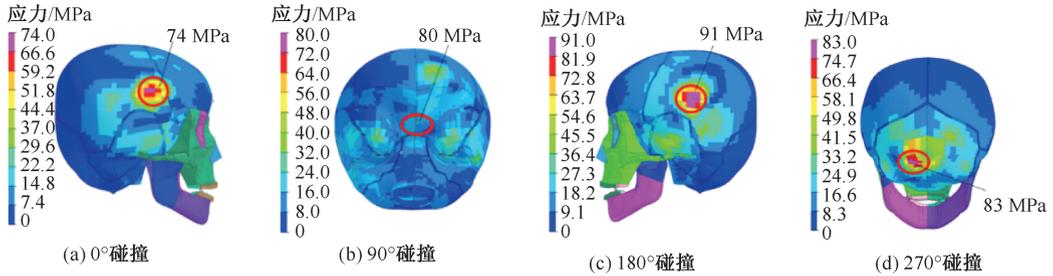


图6 不同碰撞角度下颅骨最大应力分布

Fig.6 Maximum stress distributions of the skull at different impact angles (a) 0° impact, (b) 90° impact, (c) 180° impact, (d) 270° impact

3 讨论

4种碰撞下 HIC_{15} 均大于 1 000, 其中正面和背面碰撞下 HIC_{15} 均大于侧面碰撞下, 270° 碰撞下的 HIC_{15} 为 4 496, 远大于其他 3 种碰撞。从 HIC_{15} 大小来看, 背面和正面碰撞下头部骨折及脑挫伤的损伤风险大于侧面碰撞, 其中背面碰撞下的损伤风险最高, 0° 侧面碰撞下的损伤风险最低, 推测原因是 4 种头部撞击引擎盖的初始速度不一样, 造成对头部的冲击不一样。两种侧面碰撞下头部撞击引擎盖的初始碰撞速度均小于车的初始碰撞速度 (11 m/s), 而正面和背面碰撞下头部撞击引擎盖的初始碰撞速度则均大于车的初始碰撞速度; 其中背面碰撞下最大 (13.1 m/s), 0° 碰撞下最小 (7.4 m/s)。另外, 头部在引擎盖上的撞击位置不一样。除了正面碰撞, 其他 3 种头部碰撞位置下端存在加强板, 其加速度均出现二次加速, 尤其是背面碰撞。从头部开始撞击引擎盖到出现第 1 个峰值加速度所用时间来看, 背面碰撞所用时间最少, 为 1 ms, 而正面碰撞为 10 ms, 表明背面碰撞下头部与引擎盖及下端的加强板发生剧烈碰撞。正面碰撞所用时间为 10 ms, 是因为头部面骨与引擎盖发生碰撞, 面骨发生骨折,

经过一段时间后才出现加速度峰值; 而其他 3 种碰撞均是颅骨与引擎盖发生碰撞。综合以上因素, 正面和背面碰撞下头部与引擎盖接触力、头部质心最大加速度均大于侧面碰撞, 尤其是头部质心加速度, 正面和背面碰撞下的最大加速度均是两种侧面碰撞下最大加速度的 1.2 倍左右。

4 结论

本文应用具有详细解剖学结构的 6 岁儿童行人有限元模型, 设置 4 组仿真试验以探究不同碰撞角度下儿童头部损伤情况。仿真结果表明, 4 组碰撞试验能够较好地模拟碰撞过程。通过对比头部碰撞引擎盖的 HIT、头部撞击引擎盖的位置、头部相对于车的速度、头部与引擎盖的接触力曲线、头部质心最大加速度曲线、 HIC_{15} 和头部碰撞位置来了解头部的损伤过程及损伤风险。侧面碰撞下 HIT 和正面、背面碰撞下 HIT 相差 10 ms 左右; WAD 同样出现差异, 背面碰撞情况下最靠近引擎盖前端, 正面碰撞下 WAD 最大, 两者之间的距离相差 38 mm; 而侧面碰撞的情况则在两者之间。两种侧面碰撞下, 头部撞击引擎盖的初始碰撞速度均小于车的初始碰撞速度; 正面、背面碰撞下, 头部撞击引擎盖的

初始碰撞速度则均大于车的初始碰撞速度。头部撞击车的初始速度及头部的撞击位置导致头部面骨和颅骨不同程度的损伤。背面和正面碰撞下,头部骨折及脑挫伤的损伤风险大于侧面碰撞。其中,背面碰撞仿真试验中,由于儿童的初始姿态以及关节特征等原因,儿童头部在撞击汽车前机盖时具有较高的速度,故在4组仿真试验中具有最大的头部接触力以及头部合成加速度,其头部损伤风险在4组试验中最大。

综上所述,本仿真研究很好地反映了汽车-行人碰撞的运动学响应和头部损伤情况。仿真试验结果表明,背部碰撞下的行人头部损伤更为严重。本文研究结果对行人-汽车碰撞评估和保护装置的研发具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] WHO. Road Traffic Injuries [EB/OL]. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.
- [2] Euro NCAP. Pedestrian Test Protocol v8.3 [EB/OL]. <https://cdn.euroncap.com/media/25840/euro-ncap-ped-estrian-testing-protocol-v83-december-2016.pdf>.
- [3] REITH G, LEFERING R, WAFSAISADE A, *et al.* Injury pattern, outcome and characteristics of severely injured pedestrian [J]. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*, 2015, 23(1): 56.
- [4] YANG J. Review of injury biomechanics in car-pedestrian collisions [J]. *Int J Veh Saf*, 2005, 1(1/2/3): 100-117.
- [5] CHEN H, FU L, ZHENG H. A comparative study between China and IHRA for the vehicle-pedestrian impact [J]. *SAE Int J Passeng Cars Mech Syst*, 2009, 2(1): 1108-1115.
- [6] NISHIMURA R, HASEGAWA J. Development of the human FEM model for child pedestrian [C] // *Proceedings of JSAE Spring Convention*. Tokyo: [s.n.], 2002.
- [7] OKAMOTO M. Development of finite element model for child pedestrian protection [C] // *Proceedings of the 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. Nagoya: [s.n.], 2003.
- [8] MIZUNO K, DEGUCHI T, FURUKAWA K, *et al.* Development of three-year-old child human FE model [C] // *Proceedings of IRCOBI Conference*. Graz: [s.n.], 2004: 335-336.
- [9] ITO O, OKAMOTO M, TAKAHASHI Y, *et al.* Validation of a human FE lower limb model for a child pedestrian against accident data [C] // *Proceedings of IRCOBI Conference*. Maastricht: [s.n.], 2007: 367-370.
- [10] ZHU F, JIANG B, HU J, *et al.* Computational modeling of traffic related thoracic injury of a 10-year-old child using subject-specific modeling technique [J]. *Ann Biomed Eng*, 2016, 44(1): 258-271.
- [11] LV W, RUAN J, Li H, *et al.* Abdominal injury analysis of a 6-year-old pedestrian finite element model in lateral impact [J]. *Int J Veh Saf*, 2016, 9(1): 85-100.
- [12] 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.
FENG CJ, WANG FP, XU C, *et al.* Head dynamic response based on reconstruction of vehicle-pedestrian accidents with the video [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(2): 164-170.
- [13] LIU W, SU S, QIU J, *et al.* Exploration of pedestrian head injuries-collision parameter relationships through a combination of retrospective analysis and finite element method [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2016, 13(12): 1250.
- [14] Euro NCAP. Technical bulletin of pedestrian human model certification [EB/OL]. <https://cdn.euroncap.com/media/34544/tb-024-pedestrian-human-model-certification-v101.pdf>.
- [15] 李向楠. 儿童行人头部有限元模型的碰撞仿真分析及颅脑损伤机理研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
- [16] 吕文乐, 阮世捷, 李海岩, 等. 6岁儿童全颈有限元模型的构建及验证 [J]. *医用生物力学*, 2016, 31(2): 95-101.
LV WL, RUAN SJ, LI HY, *et al.* Development and validation of finite element model for the 6-year-old pediatric neck [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(2): 95-101.
- [17] 李蓓. 6岁儿童行人下肢有限元建模及碰撞响应分析 [D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
- [18] 吕文乐. 6岁儿童行人胸腹部有限元碰撞损伤研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [19] National Crash Analysis Center. Finite element model archive 2007 [EB/OL]. <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>.