

文章编号:1004-7220(2015)02-0125-06

# 基于有限元仿真和遗传神经网络的 轿车-行人事故重构

刘文君, 李奎<sup>1</sup>, 苏森<sup>1</sup>, 王雪蕊<sup>2</sup>, 范箫翔<sup>3</sup>, 尹志勇<sup>1</sup>

(1. 第三军医大学 大坪医院野战外科研究所, 全军交通医学研究所, 创伤、烧伤与复合伤国家重点实验室, 车辆/生物碰撞安全重庆市重点实验室, 重庆 400042; 2. 解放军第十五医院 医务处, 乌苏 833000;  
3. 重庆理工大学 药学与生物工程学院, 重庆 400054)

**摘要:** **目的** 为充分利用轿车-行人碰撞中行人损伤信息对事故过程进行重构,提出采用有限元仿真和遗传神经网络逆向推导轿车-行人事故中碰撞参数的新方法。**方法** 利用 Hyperworks 和 LS-DYNA 软件进行不同碰撞速度(25、40、55 km/h)和接触角度(背面、左侧、正面、右侧)的碰撞仿真,获取行人头部伤害指标(head injury criterion, HIC)和胸壁最大运动速度。根据损伤生物力学判据分析行人头部及胸部的损伤程度,并以行人头部和胸部损伤程度以及位置信息作为预测变量,采用遗传神经网络求取碰撞参数的预测值。最后利用两起具有确切碰撞参数的轿车-行人视频案例对该方法进行验证。**结果** 两起视频案例中轿车碰撞行人速度分别为 54、49 km/h,行人接触轿车角度均为 180°。根据行人损伤信息得到轿车碰撞行人速度的预测值分别为 51、43 km/h,行人接触轿车角度的预测值分别为 184°和 169°,两起事故重构准确度分别为 0.94 和 0.88。**结论** 利用行人损伤信息可以准确有效地对轿车-行人事故中的碰撞参数进行预测,既能为轿车-行人交通事故成因分析及责任认定提供新的方法,也为进一步提高轿车-行人碰撞中行人头部及胸部损伤的防治效果提供了理论依据。

**关键词:** 有限元仿真; 遗传神经网络; 行人损伤; 事故重构; 损伤生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.02.125

## Car-pedestrian accident reconstruction based on finite element simulation and genetic neural network

LIU Wen-jun<sup>1</sup>, LI Kui<sup>1</sup>, SU Sen<sup>1</sup>, WANG Xue-rui<sup>2</sup>, FAN Xiao-xiang<sup>3</sup>, YIN Zhi-yong<sup>1</sup>

(1. Military Research Institute of Traffic Medicine, State Key Laboratory of Trauma, Burns and Combined Injury, Chongqing Key Laboratory of Vehicle/Bio-impact and Traffic Safety, Institute of Surgery Research, Daping Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400042, China; 2. Division of Medical Affairs, the No. 15 Hospital of the People's Liberation Army, Wusu 833000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 3. School of Pharmacy and Bioengineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract: Objective** In order to fully reconstruct the accident by utilizing pedestrian injuries information gained from the car-pedestrian collision, a new method based on finite element simulation and genetic neural network to deduce the car-pedestrian collision parameters in reverse is proposed. **Methods** Crash simulations from different contact angles (back, left, front, right) at different impact speeds (25, 40, 55 km/h) were conducted by using Hyperworks and LS-DYNA, so as to obtain the head injury criterion (HIC) value and the maximum velocity of the thoracic wall. According to the criteria of injury biomechanics, the severities of the pedestrian head and thorax

收稿日期:2014-11-08; 修回日期:2015-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31170908),“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG01B05)。

通信作者:尹志勇,教授,博士研究生导师, Tel:(023)68816153; E-mail:zy.yin@qq.com。

and corresponding injury locations were analyzed and set as predictors, and the predictive values of collision parameters were then acquired by using genetic neural network. Finally, this method was verified by two car-pedestrian accidents with the video and exact collision parameters. **Results** For both cases of the car-pedestrian accidents, the car speeds at the collision of pedestrian were 54 and 49 km/h, respectively, and the car-pedestrian contact angles were both  $180^\circ$ . While according to the pedestrian injuries information, the predictive values of the car speeds at the collision of pedestrian were 51 and 43 km/h, and the predictive values of the car-pedestrian contact angles were  $184^\circ$  and  $169^\circ$ , respectively. The reconstruction accuracies of two cases were 0.94 and 0.88. **Conclusions** The proposed method in the study can be used to predict car-pedestrian collision parameters efficiently and accurately by utilizing the pedestrian injuries information, which provides a new method for cause analysis and responsibility recognition, as well as theoretical references for the treatment and protection of head and thoracic injuries occurred in the car-pedestrian collision.

**Key words:** Finite element simulation; Genetic neural network; Pedestrian injury; Accident reconstruction; Injury biomechanics

随着我国机动化程度的不断提高,每年约有2.3万名行人死于车祸事故,占车辆交通事故死亡总数的26%。人车碰撞交通事故所引发的司法、纠纷、诉讼等社会问题日益严峻,而基于车辆制动痕迹、车身散落物、行人抛距等信息的传统事故重构方法越来越难以满足现今对人车事故鉴定效率和准确度的新要求。虽然近年来国内已引入PC-CRASH、MADYMO等动力学软件进行轿车-行人碰撞过程重构研究,并取得一定成果,但从行人损伤及生物力学响应角度开展轿车-行人碰撞过程重构的研究则较少。

本课题组提出将有限元仿真和遗传神经网络相结合进行轿车-行人碰撞过程重构的新方法。通过有限元仿真得到行人头部及胸部的生物力学响应参数,依据人体头部及胸部的损伤生物力学判据分析仿真实验中行人头部及胸部损伤程度。以行人头部及胸部损伤信息作为预测变量,建立3层前馈神经网络,得到碰撞参数与行人头部及胸部损伤的非线性映射关系,采用遗传神经网络进行寻优求解,获得轿车-行人碰撞时的碰撞参数。最后通过两起具有视频的轿车-行人事故典型案例,验证该方法的可行性和有效性。

## 1 材料与方法

### 1.1 事故案例

**案例1** 2014年3月某日,一辆小型轿车正前部与从车行方向由右至左横过道路的行人发生碰撞,造成行人受伤后抢救无效死亡[见图1(a)]。根据警方提供的视频,确定事发时轿车与行人碰撞

速度约为54 km/h。交通事故损伤法医学尸体检验鉴定行人所遭受车辆碰撞伤为左颞顶部  $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$  头皮血肿伴擦挫伤,左胸背部至左腰部  $35\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  大片状擦挫伤,左腋后线7~10肋骨骨折。

**案例2** 2014年10月某日,一辆小型轿车正前部与从车行方向由右至左横过道路的行人发生碰撞,造成行人当场死亡[见图1(b)]。根据警方提



(a) 案例1



(b) 案例2

图1 事故案例相关视频资料

Fig. 1 The relevant video material of two accident cases

(a) The first case, (b) The second case

供的视频,确定事发时轿车与行人碰撞速度约为 49 km/h。交通事故损伤法医学尸体检验鉴定行人所遭受车辆碰撞伤为左颞部头皮 2.4 cm × 1.5 cm 头皮血肿伴擦挫伤,左胸背部 5.8 cm × 2.5 cm 擦挫伤,双侧胸腔出血,左侧肋骨多发骨折。

## 1.2 事故重构

### 1.2.1 事故重构基本理论

随着生物力学机制的深入性研究,有限元仿真技术在国内得到广泛运用。轿车-行人碰撞过程有限元分析能够准确模拟车身和人体受载时的位移、变形、应变和应力<sup>[1-2]</sup>。本研究利用显式动力分析软件 LS-DYNA 实现行人头部及胸部力学响应的精确分析。遗传神经网络可以实现 BP 神经网络和遗传算法的有效结合,先利用遗传算法自动搜索最优阈值和权值,再利用 BP 神经网络对问题进行求解。

### 1.2.2 行人模型

行人有限元模型采用日本丰田汽车公司和丰田技术中心共同开发设计和验证的 THUMS 4.0 人体有限元模型<sup>[3]</sup>。在该模型的建模过程中,使用高分辨率 CT 扫描仪对人体进行扫描,得到人体结构相关参数,建立能够准确反映人体解剖特征的人体数字模型。THUMS 4.0 行人模型共计约有 200 万个有限元网格单元,其材料和属性的定义符合基本法规要求,可以对人体局部损伤进行精确的生物力学分析。

### 1.2.3 车辆模型

车辆模型采用经由美国国家汽车碰撞分析中心(national crash analysis center, NCAC)验证的轿车模型<sup>[4]</sup>。该模型共计约有 167 万个有限元网格单元,其材料和属性的定义符合基本法规要求,可用于汽车动力学仿真研究。

### 1.2.4 损伤判据

Mertz 等<sup>[5]</sup>提出的头部伤害指标(head injury criterion, HIC)评价是使用最为广泛的一种人体头部损伤标准。若能获取 HIC 值,就可以把 HIC 值与简明创伤分级标准(abbreviated injury scale, AIS)进行关联。根据 Axelsson 等<sup>[6]</sup>对内脏损伤严重度评分(injury severity score, ISS)与人体生物力学响应的相关研究,通过简易分级可得到胸壁最大运动速度与 AIS 的关联性(见表 1)。

### 1.2.5 事故重构方法

利用 THUMS 4.0 站姿人体模型头部的质心加速度和胸壁水平面与矢状面 4 等

表 1 HIC、胸壁最大运动速度与 AIS 代码的关联性

Tab.1 The relevance of HIC value, the maximum velocity of the thoracic wall with AIS code

AIS 代码	严重程度	HIC	$v/(m \cdot s^{-1})$
0	无损伤	—	<3.6
1	轻度损伤	<250	<4.0
2	中度损伤	<750	<5.9
3	严重损伤	<1 250	<8.6
4	剧烈损伤	<1 750	<13.4
5	临界死亡	<2 500	<16.9
6	极大限度损伤	>2 500	>16.9

分面相交节点的速度,分别求得 HIC 和胸壁最大运动速度。利用人体头部及胸部损伤生物力学判据分析行人头部及胸部的损伤程度。以行人头部及胸部损伤程度和位置信息作为输入,以碰撞参数作为神经网络输出建立 3 层前馈神经网络,设定训练最大次数和学习率分别为 5 000 和 0.3,通过训练神经网络在精度达到 0.01 后得到碰撞参数与行人头部及胸部损伤的非线性映射关系:

$$[v, a] = f(I_h, L_h, I_t, L_t) \quad (1)$$

式中: $v$  为碰撞速度, $a$  为接触角度, $I_h$  为头部损伤 AIS, $L_h$  为头部损伤位置, $I_t$  为胸部损伤 AIS, $L_t$  为胸部损伤位置, $f(\cdot)$  为非线性映射关系。最后采用遗传神经网络进行寻优求解,获得事发时的碰撞参数。

根据研究需要,将碰撞速度和接触角度作为重构评价指标,定义碰撞速度实际值为  $v_r$  和接触角度实际值为  $a_r$ ;利用遗传神经网络得到碰撞速度预测值  $v_c$  和接触角度预测值  $a_c$ 。碰撞速度实际值与预测值的偏差记为  $D_v$ 、接触角度实际值与预测值的偏差记为  $D_a$ :

$$D_v = \left| \frac{v_r - v_c}{v_r} \right| \quad (2)$$

$$D_a = \left| \frac{a_r - a_c}{a_r} \right| \quad (3)$$

定义轿车-行人碰撞重构准确度

$$E = 1 - \max(D_v, D_a) \quad (4)$$

式中: $E$  越接近 1,说明轿车-行人碰撞重构结果越接近真实情况。

## 1.3 碰撞仿真实验设计

事故统计分析表明,95% 的行人交通事故发生

在低于 60 km/h 的撞击速度。在低于 25 km/h 的冲击速度条件下,行人通常只产生轻微伤;而在 25 ~ 55 km/h 速度范围内,行人常发生严重损伤<sup>[7]</sup>。利用 Hyperworks 建立轿车-行人碰撞再现模型的初始边界条件,主要为碰撞速度和接触角度,实验设计中设定碰撞速度为 25、40 和 55 km/h,接触角度为

90°、180°、270°和 360°(分别代表行人背面、左侧、正面、右侧)。轿车与行人的接触方式定义为面面接触,动摩擦因数取值为 0.65。图 2 所示为利用 Hypermesh 构建的轿车与行人在不同接触角度下碰撞仿真。

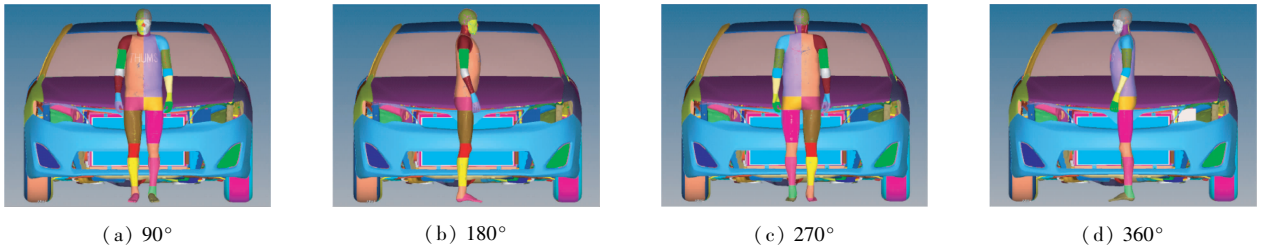


图 2 轿车与行人不同接触角度的碰撞

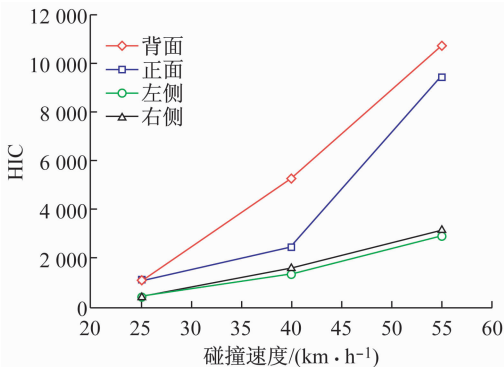
Fig. 2 The car-pedestrian collisions from different contact angles

## 2 结果

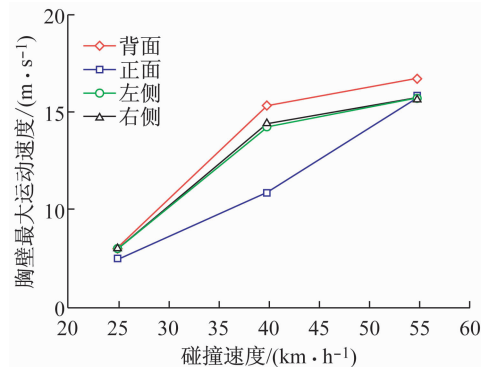
### 2.1 有限元碰撞仿真实验结果

图 3 所示为轿车-行人碰撞过程中行人 HIC 和胸壁最大运动速度与碰撞速度的关系曲线。结果表明,行人头部及胸部损伤程度与轿车碰撞行人速度

之间存在相关性。轿车碰撞行人速度越高,行人头部及胸部损伤越严重。同时,行人头部及胸部损伤程度与行人接触轿车角度之间存在相关性。轿车从不同接触角度撞击行人时,行人背面受到撞击,头部损伤严重度依次大于正面、侧面受到撞击,胸部损伤严重度依次大于侧面、正面受到撞击。



(a) HIC



(b) 胸壁最大运动速度

图 3 轿车与行人碰撞的有限元数据

Fig. 3 The finite element data of car-pedestrian collisions

### 2.2 遗传神经网络预测结果

由事故案例 1、2 相关视频资料可确定轿车碰撞行人的速度分别为 54 和 49 km/h,行人接触轿车角度均为 180°。根据行人损伤信息进行预测碰撞参数,结果显示轿车碰撞行人速度预测值分别为 51 和

43 km/h,行人接触轿车角度预测值分别为 184°和 169°,两起案例重构准确度分别为 0.94 和 0.88。

### 2.3 事故案例碰撞重构结果

根据遗传神经网络对案例 1 的预测结果,设定轿车碰撞行人速度为 51 km/h、行人接触轿车角度

(a) HIC, (b) The maximum velocity of the thoracic wall



为  $184^\circ$  进行碰撞仿真,得到行人头部质心加速度为  $2.683 \text{ km/s}^2$ ,行人胸壁最大运动速度为  $13.17 \text{ m/s}$ ;行人肋骨最大应力出现在左侧胸部,应力为  $1.916 \text{ MPa}$ 。行人接触轿车开始时刻记为  $t = 0$ ,  $t = 75 \text{ ms}$  时,行人左侧胸腰部和发动机罩形成接触,与尸体检验结果中左胸背部至左腰部  $35 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  大片状擦挫伤、左腋后线  $7 \sim 10$  肋骨骨折的伤情相吻合; $t = 85 \text{ ms}$  时,行人头部左侧和发动机罩形成接触,与尸体检验结果中左颞顶部  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$  头皮血肿伴擦挫伤的伤情相吻合[见图 4(a)、(b)]。

根据遗传神经网络对案例 2 的预测结果,设定

轿车碰撞行人速度为  $43 \text{ km/h}$ 、行人接触轿车角度为  $169^\circ$  进行碰撞仿真,得到行人头部质心加速度为  $1.307 \text{ km/s}^2$ ,行人胸壁最大运动速度为  $12.75 \text{ m/s}$ ;行人肋骨最大应力出现在左侧胸部,应力大小为  $1.826 \text{ MPa}$ 。行人接触轿车开始时刻记为  $t = 0$ ,  $t = 90 \text{ ms}$  时,行人左侧胸腰部和发动机罩形成接触,与尸体检验结果中左胸背部  $5.8 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$  擦挫伤、左侧肋骨多发骨折的伤情相吻合; $t = 100 \text{ ms}$  时,行人头部左侧和发动机罩形成接触,与尸体检验结果中左颞部头皮  $2.4 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$  头皮血肿伴擦挫伤的伤情相吻合[见图 4(c)、(d)]。

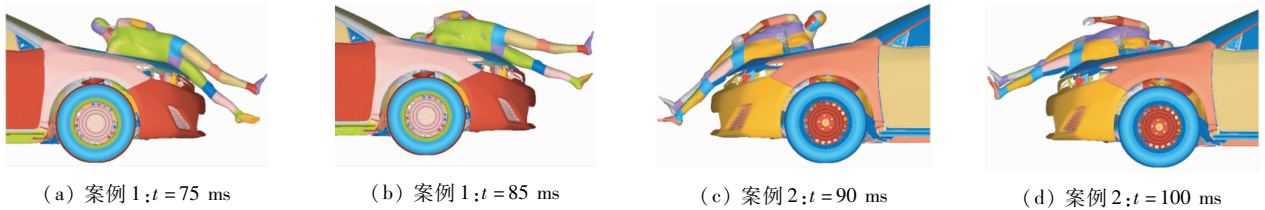


图 4 两起事故案例仿真碰撞过程

Fig. 4 Simulation of the car-pedestrian collision for two accident cases  
(c)  $t = 90 \text{ ms}$  in the second case, (d)  $t = 100 \text{ ms}$  in the second case

(a)  $t = 75 \text{ ms}$  in the first case, (b)  $t = 85 \text{ ms}$  in the first case,

### 3 讨论

PC-CRASH、MADYMO 等软件的人体模型常采用十几个刚体和铰链描述行人三维运动,本课题组采用具有 200 万个有限元网格单元的 THUMS 4.0 人体模型,弥补了多体行人模型在模型精度上的不足。此外,目前对于轿车-行人碰撞事故重构研究主要采用手工优化的方法,人为判断是否满足最优条件并调整参数,这种人工方法无法满足事故重构客观性、高效性和可操作性等要求。采用遗传神经网络替代人工操作进行轿车-行人事故重构完成迭代过程,既提高了重构计算效率,也保证了事故重构结果具有较高精度。该方法还能实现良好的可视化效果,可以对具有严重行人损伤的轿车-行人事故进行直观准确的分析。

刘纪涛等<sup>[8]</sup>在汽车-行人撞击人体动力学仿真研究中应用 ADAMS 软件建立多体行人模型,并利用 PMHS 轨迹运动数据对不同速度下轿车碰撞行人右侧过程的模拟数据进行验证,当碰撞速度为 25 和

$40 \text{ km/h}$  时,行人 HIC 分别为 740.2 和 1 779.9。在本研究中,轿车以 25 和  $40 \text{ km/h}$  速度碰撞行人右侧时,行人 HIC 分别为 670.2 和 1 647.3。考虑到建模方法和模型之间的差异,两者体现了较好吻合,验证了本研究获取的有限元计算结果具有较好准确性。此外,本研究中采用 3 种碰撞速度和 4 个接触角度进行正交实验设计,利用遗传神经网络得到两起事故案例的重构准确度分别为 0.94 和 0.88。为了提高碰撞参数预测的准确性及稳定性,适当增加碰撞速度和接触角度进行更细致化的仿真实验设计是有效的方法和途径。

研究表明,若能获取行人的损伤判据,就可以用威胁-载荷-损伤模型建立三者之间的相互关系,对行人响应所对应的损伤情况进行定量评估<sup>[9]</sup>。但行人局部各器官在轿车碰撞冲击下有其特定的损伤机制及损伤响应,因而也具有不同的损伤水平和耐受性。考虑到需将行人损伤进行定量评价,本研究采用能与 AIS 代码相关联的 HIC 和胸壁最大运动速度进行实验设计。然而,头部和下肢是行人在交

通事故中最常受伤的部位,通过假人、动物、人体尸体等相关试验获取行人下肢及其他部位冲击损伤的力学判据,对提高事故重构准确度十分必要。此外,考虑行人姿态和行走速度等其他相关因素进行碰撞实验设计,将会进一步丰富和完善轿车-行人事故重构的理论和实验研究。

通过有限元仿真研究行人头部及胸部损伤与碰撞参数之间的关系发现,轿车碰撞行人速度越高,行人头部及胸部损伤越严重;相同碰撞速度下,行人背面受到撞击时头部和胸部损伤均较受到侧面和正面撞击时严重。该分析结果提示,临床在轿车-行人碰撞致行人头部及胸部损伤的救治时需要考虑碰撞参数的影响与作用,为指导和规范行人头部及胸部损伤防护和诊治、提高行人头部及胸部损伤治疗和预防效果提供了理论依据。

#### 4 结论

本文提出将有限元仿真和遗传神经网络相结合进行轿车-行人碰撞过程重构的新方法。依据碰撞冲击损伤的力学判据,对有限元仿真中行人头部及胸部所受伤害进行量化评价,做到“以人中心”开展轿车-行人碰撞过程重构研究。将遗传算法和神经网络相结合,所建立的预测系统对事故案例的碰撞参数预测结果较好,能对轿车-行人碰撞事故做出正确分析,可为轿车-行人交通事故成因分析及责任认定提供新的方法。通过有限元技术研究轿车-行人碰撞中行人头部及胸部损伤与碰撞参数之间的关系,为进一步提高行人头部及胸部损伤的防治效果提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 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研究[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.
- [2] 李海岩,赵伟,阮世捷,等. 第95百分位中国人头部颅脑相对位移的有限元评估[J]. 医用生物力学, 2012, 27(2): 198-206.  
Li HY, Zhao W, Ruan SJ, *et al.* Finite element evaluation on skull-brain relative displacement of the 95th percentile Chinese human head [J]. J Med Biomech, 2012, 27(2): 198-206.
- [3] TOYOTA Motor Corporation. The documentation of total human model for safety [R]. Japan: 2011-26-29.
- [4] National Crash Analysis Center. 2012 Toyota Camry finite element model Version 1 [R]. Japan: 2014 -2-7.
- [5] Mertz JH, Prasad P, Irwin AL. Injury risk curves for children and adults in frontal and rear collisions [C]//Proceedings of 41st Stapp Car Crash Conference. Warrendale: SAE, 1997.
- [6] Axelsson H, Yelverton JT. Chest wall velocity as a predictor of nonauditory blast injury in complex wave environment [J]. J Trauma, 1996, 40(3): 31-40.
- [7] 杨济匡. 汽车与行人碰撞中的损伤生物力学研究概览[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(2): 81-93.
- [8] 刘纪涛. 汽车-行人撞击中的人体动力学仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2006.
- [9] Internal TNO. Methods for human body response after being exposed to a threat. Phase 1: Inventory and future approach [R]. The Netherlands: 2005.
- [25] Finn MA, Brodke DS, Daubs M, *et al.* Local and global subaxial cervical spine biomechanics after single-level fusion or cervical arthroplasty [J]. Eur Spine J, 2009, 18(10): 1520-1527.
- [26] Bowden A. Finite element modeling of the spine [M]//Kurtz SM, Eddin AA ed. Spine technology handbook. USA: Elsevier Inc., 2006: 443-471.
- [27] Griffin MJ. The validation of biodynamic models [J]. Clin Biomech, 2001, 16(S1): S81-S92.
- [28] Dmitriev AE, Cunningham BW, Hu N, *et al.* Adjacent level intradiscal pressure and segmental kinematics following a cervical total disc arthroplasty: An in vitro human cadaveric model [J]. Spine, 2005, 30(10): 1165-1172.

(上接第 117 页)