

文章编号: 1004-7220(2023)02-0346-07

# 基于多种优化算法的交通事故精准化重建与 颅脑损伤风险评估

范颖<sup>1,2</sup>, 王成铭<sup>3</sup>, 王金明<sup>2</sup>, 李正东<sup>2</sup>, 邹冬华<sup>1,2\*</sup>, 黄江<sup>1\*</sup>

(1. 贵州医科大学 法医学院, 贵阳 550004; 2. 上海市法医学重点实验室 司法鉴定科学研究院, 上海 200063;

3. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:**目的 探究不同优化算法对精准化重建交通事故的影响。方法 应用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)、邻域培养遗传算法(neighborhood cultivation genetic algorithm, NCGA)以及多目标粒子群优化算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)对1例真实案件的多刚体动力学重建进行优化,研究不同优化算法对收敛速度与最优近似解的影响,并将优化所得的最优初始碰撞参数作为有限元模拟的边界条件,将仿真得到的颅脑损伤预测结果与实际损伤进行比较。结果 NCGA算法在优化过程中收敛速度更快,结果更优,最优近似解重建所得行人-车辆碰撞的运动学响应与监控视频相符,颅脑损伤预测情况与尸体检验基本一致。结论 通过优化算法和多刚体、有限元方法结合可以完成交通事故精确化重建,减少人为因素的影响。

**关键词:** 事故重建; 多刚体动力学; 多目标遗传算法; 颅脑损伤

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.02.021

## Accurate Reconstruction of Traffic Accident Based on Multiple Optimization Algorithms and Evaluation of Cranio-cerebral Injury Risk

FAN Ying<sup>1,2</sup>, WANG Chengming<sup>3</sup>, WANG Jinming<sup>2</sup>, LI Zhengdong<sup>2</sup>, ZOU Donghua<sup>1,2\*</sup>, HUANG Jiang<sup>1\*</sup>

(1. School of Forensic Medicine, Guizhou Medical University, Guiyang 550004, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Forensic Medicine, Academy of Forensic Science, Ministry of Justice, Shanghai 200063, China; 3. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** **Objective** To investigate the effect of different optimization algorithms on accurate reconstruction of traffic accidents. **Methods** Non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II), neighborhood cultivation genetic algorithm (NCGA) and multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) were used to optimize the

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(82171872), 上海市自然科学基金项目(21ZR1464600), 司法部司法鉴定重点实验室项目, 上海市法医学重点实验室项目(21DZ2270800), 上海市司法鉴定专业技术服务平台(19DZ2292700), 中央级科研院所基本科研业务费项目(GY2020G-4, GY2021G-5), 大学生创新创业训练计划项目(S202110660012)

通信作者: 黄江, 教授, E-mail: mmm\_hj@126.com; 邹冬华, 副研究员, E-mail: zoudh@ssfd.cn

\* 为共同通信作者

multi-rigid body dynamic reconstruction of a real case. The effects of different optimization algorithms on convergence speed and optimal approximate solution were studied. The optimal initial impact parameters were simulated as boundary conditions of finite element method, and the simulated results were compared with the actual injuries. **Results** NCGA had a faster convergence speed and a better result in optimization process. The kinematic response of pedestrian vehicle collision reconstructed by the optimal approximate solution was consistent with the surveillance video. The prediction of craniocerebral injury was basically consistent with the cadaver examination. **Conclusions** The combination of optimization algorithm, rigid multibody and finite element method can complete the accurate reconstruction of traffic accidents and reduce the influence of human factors. **Key words:** accident reconstruction; rigid multi-body dynamics; multi-objective genetic algorithm; craniocerebral injury

道路交通事故已经成为一个重要的社会公共安全问題。根据世界卫生组织的统计,全球每年交通事故死亡人数超过 135 万人,已成为青年和儿童最主要的死亡原因<sup>[1]</sup>。道路交通事故的处理包括事故现场勘测、事故分析和责任认定三部分。传统交通事故鉴定主要通过死因分析、痕迹检验等综合判断来推断事故发生过程,很多事故现场提供的信息不能得到有效分析和综合应用。近年来,多刚体、有限元等数字化仿真方法逐渐应用于交通事故重建,为重建交通事故过程提供了条件,为交通伤研究提供了新方法。冯成建等<sup>[2]</sup>应用 Madymo 多刚体动力学软件研究了行人交通事故中不同车辆碰撞速度、不同车型与行人头部损伤程度的关联。Lalwala 等<sup>[3]</sup>应用多刚体人体模型耦合 THUMS 有限元人体模型对 1 例真实交通事故进行重建,仿真运动学响应和损伤响应与实际相符。Gao 等<sup>[4]</sup>应用 Madymo 软件重建 1 起电动车事故并获取受害者头部运动学参数,将相应的头部初始边界条件代入有限元仿真中完成对受害者的损伤预测。但目前数字化仿真方法多采用“试错式”的求解方式,应用现有事故信息,如车辆和人体最终位置等来判断事故仿真的准确性,效率低且易受人为因素影响。近年来,一些学者在交通事故重建的优化方面进行探索。Costin 等<sup>[5]</sup>使用优化算法和多刚体模型建立一种可以通过车辆受损部位和受害者碰撞点位置关联信息识别受害者事故发生时步态、车辆速度等初始碰撞参数的方法。孙杰等<sup>[6]</sup>应用 3D 激光扫描技术对车辆进行测量,结合多刚体模型和遗传算法对 1 起轻型客车、自行车、人体碰撞的交通事故进行优化重建,模拟结果与真实情况吻合,证明多刚体重

建和遗传算法优化技术在交通事故鉴定中的有效性和准确性。刘文君等<sup>[7]</sup>将有限元仿真和遗传神经网络相结合,对人车碰撞参数及损伤预测进行研究。因此,如何构建最接近真实事故的人-车仿真模型并获取准确的初始碰撞参数,同时避免人为主观因素的影响,从而保证事故重建的准确性,成为应用仿真方法重构交通事故所面临的关键问题。

针对以往人车碰撞重建方法的不足,本文提出通过比较多种多目标算法对多刚体仿真结果收敛速度和最终近似解的影响,以期得到与真实事故情况最相符的初始碰撞参数,使事故重建结果更为精确;同时,使用运动学和组织学参数进行交通事故中行人颅脑损伤风险的预测。

## 1 材料与方 法

### 1.1 案例资料

在司法鉴定科学研究院案例资料库中选取 1 例典型人车碰撞交通事故,包括完整事故过程视频。简要案情如下:某日,1 辆斯柯达小型轿车由南向北行驶至某路口时,与步行沿此处东西向人行横道线行走的王某相撞,造成小型轿车损坏,王某因颅脑损伤抢救无效于当日死亡。

尸体检验:女性,68 岁,尸长 157 cm。死者枕部头皮血肿;右额顶部及右颞部颅骨骨折伴凹陷;双上肢可见散在皮肤青紫,右侧大腿外侧见大片皮肤青紫伴片状擦伤。

事故车辆检验:斯柯达小型轿车风窗以距其下沿 6 cm、距其中线偏左 20 cm 处为中心呈蛛网状碎裂,且局部黏附花白色毛发组织;发动机罩左前端区域大面积凹陷变形伴漆面剥脱及擦撞痕。

## 1.2 多刚体仿真

**1.2.1 车辆模型** 应用事故车辆同款车型扫描点云数据(来自 Hum3D 车辆数据库)进行逆向重构,依次得到车辆的实体模型、有限元模型和多面片模型,最终建立车辆多刚体模型[见图 1(a)]。通过该方法得到的车辆模型比以往通过椭球体拼接所得模型在外形匹配上精度更高。车辆模型前部的接触刚度特性主要参考 Euro-NCAP 相同类型类似车辆的测试结果,根据 Martinez 等<sup>[8]</sup>研究中汽车前部部件的接触刚度曲线进行加载[见图 1(b)]。

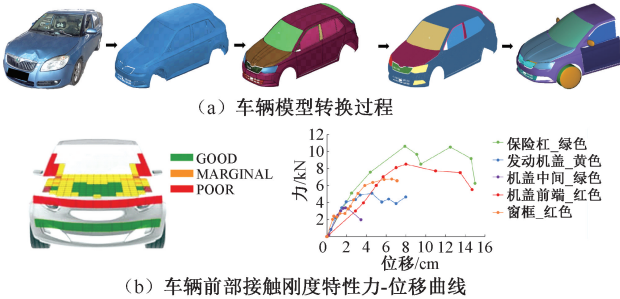


图 1 车辆模型建立

Fig. 1 Establishment of the vehicle model (a) Transformation process of vehicle model, (b) Force-displacement curves for the front of the vehicle with selected contact stiffness characteristics

**1.2.2 基于视频解算碰撞车速** 本案例监控视频图像连续,使用视频播放软件视侦通 1.9.2 (杭州海康威视数字技术股份有限公司)对监控视频进行处理,显示以下内容:在碰撞前,第 1 帧中的车辆与第 14 帧中的车辆移动参考距离  $l$  约为 5.9 m,帧率为 25 帧。碰撞时车辆速度的计算公式如下:

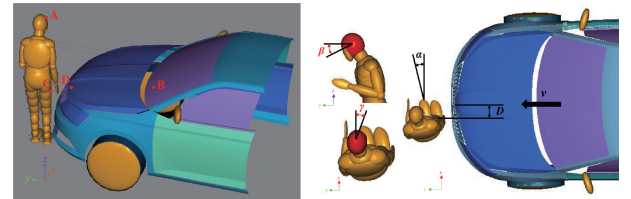
$$v = \frac{l}{t} = \frac{5.9}{(14 - 1) \times \frac{1}{25}} \approx 11.35 \text{ m/s}$$

**1.2.3 人体模型** 行人模型采用荷兰国家应用科学研究院(TNO)开发的 50 百分位成年男性行人模型<sup>[9]</sup>。为匹配事故死者身高和体重,利用 GEBOD 法对假人模型进行缩放<sup>[10]</sup>,并根据视频中车辆撞击行人的前一帧画面对行人姿态进行调节,通过对肩、肘、髌、膝、踝关节以及头颈部连接处的铰链角度进行调整,调整后行人姿态与事故中行人姿态(左手臂向前,双足站立,身体向右微倾)相符。

**1.2.4 摩擦因数设置** 本案例事故发生在雨天,路面为潮湿的沥青路面,参考文献<sup>[6]</sup>中汽车-行人碰撞模型的摩擦因数,设置车辆与地面、行人与地面、行人与车辆之间的摩擦因数分别为 0.55、0.6 和 0.3。

## 1.3 多目标算法优化求解

根据车辆损坏痕迹和尸检信息,在碰撞模型中设置两对碰撞标志点。第 1 组为人体模型头部损伤位置 A 和车辆风窗碎裂中心 B,代表死者头部与车辆挡风玻璃的初始碰撞位置;第 2 组为假人右侧大腿皮肤青紫处 C 和车辆发动机盖凹陷处 D,代表车辆发动机盖与行人右侧大腿的初始碰撞位置,通过视频资料调整行人与车辆初始相对位置,最终碰撞模型如图 2(a)所示。



(a) 碰撞标志点

(b) 优化参数

图 2 碰撞标志点及优化参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of collision markers and optimization parameters (a) Collision markers, (b) Optimization parameters

为得到更精确的事故碰撞时的行人姿态,确保碰撞边界条件的准确性,以车辆前进方向为  $Y$  轴正方向建立空间坐标系,设置 5 项优化变量[见图 2(b)],分别为:① 车辆沿  $Y$  轴的前进速度( $v$ );② 假人模型的 H 点(左、右髌关节铰链的中点)相对于车辆沿  $Y$  轴方向对称轴的横向距离( $D$ );③ 行人朝向与  $X$  轴间夹角( $\alpha$ );④ 人体头部椭球质心沿半径切向与  $Y$  轴夹角,即上下转动的角度( $\beta$ );⑤ 人体头部椭球质心沿半径切向与  $X$  轴夹角,即左右转动的角度( $\gamma$ )。以两组碰撞标志点之间的相对距离之和为目标函数,分别应用非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)、邻域培养遗传算法(neighbourhood cultivation genetic algorithm, NCGA)以及多目标粒子群优化算法(multiobjective particle swarm optimization, MOPSO)对参数进行优化,每种算法均迭代 20 代,每次产生 20 个个体,每种方法均进行 400 次模拟,

优化变量的取值范围均如表 1 所示。

表 1 优化变量取值范围

Tab. 1 The range of the optimization parameters

优化变量	最小值	最大值
$v/(m \cdot s^{-1})$	10.00	14.00
$D/m$	-0.15	0.15
$\alpha/rad$	0.30	0.70
$\beta/rad$	-0.15	0.15
$\gamma/rad$	-0.30	-0.10

### 1.4 有限元仿真

为研究事故中行人颅脑损伤状况,本研究采用丰田中央研发室研发的虚拟人体模型(total human model for safety, THUMS)第 4 代人体有限元模型<sup>[11]</sup>,该模型头部详细的解剖结构包括颅骨、头皮、脑膜、大脑、小脑、脑干等,其高逼真度的生物力学特性已经过尸体实验验证。本研究中,车辆模型使用与事故车辆前部结构较为相似的车辆前部有限元模型,其中车辆车窗采用 3 层壳单元进行建模,内外两层模拟玻璃本体,中间一层模拟聚乙烯醇缩丁醛(polyvinyl butyral, PVB)材料。有限元地面模型采用刚性墙关键字进行模拟,行人模型与车辆模型之间的接触设置为自动面面接触,静、动摩擦因数分别为 0.3 和 0.2,碰撞过程的计算时间为 0.15 s<sup>[12]</sup>,并将车辆碰撞速度及行人与车辆角度等碰撞边界条件设置为优化后的最优解的参数。

### 1.5 颅脑损伤风险评估

通过从仿真结果中获得相应的脑损伤参数对颅脑损伤风险进行评估。头部损伤评价准则(head injury criterion, HIC)是评估交通事故中颅脑损伤的重要指标,并已被广泛应用于相关研究<sup>[13]</sup>。交通事故中,弥漫性轴索损伤(diffuse axonal injury, DAI)是最常见的脑损伤之一。已有学者将脑组织应变与 DAI 相联系,采用最大主应变(maximum principal strain, MPS)<sup>[14]</sup>和累计应变损伤测量(cumulative strain damage measure, CSDM)标准<sup>[15]</sup>对颅脑损伤进行分析。因此,本文采用颅内压、von Mises 应力、HIC、MPS 和 CSDM0.25 来预测车辆-行人事故中行人颅脑损伤的风险。

## 2 结果

### 2.1 多刚体模拟结果

通过多刚体重建结果,可以动态直观地显示事

故过程中行人与车辆先后发生接触的情况,并与实际事故中的车辆和人体损伤情况进行对比。图 3(a)所示依次为基于视频信息得到的行人颅脑与车辆的碰撞位置关系、事故车辆检验中有毛发组织附着的挡风玻璃碎裂处以及 Madymo 重建所得行人颅脑与车辆碰撞位置关系。模拟结果表明,假人模型头部 HIC 为 1 031.5,头部最大角加速度为 5 645.54 rad/s<sup>2</sup>。根据李充等<sup>[16]</sup>的研究结果,HIC 预测头部遭受 AIS 3 级损伤概率为 56%,头部角加速度超过 4 500 rad/s<sup>2</sup>就可造成 AIS 5 级损伤,与本事故中行人因严重颅脑损伤导致死亡相符。行人右腿胫骨与车辆保险杠相撞,胫骨峰值弯矩为 176.3 N·m,未超过胫骨动态弯矩耐受极限[(308±79)N·m]<sup>[17]</sup>,有较大可能不会发生骨折,与实际事故相符。同时,重建结果中行人颅脑与车辆挡风玻璃碰撞情况及行人被碰撞后在空中的姿态与事故视频较为吻合。

### 2.2 多目标算法优化结果

将 Madymo 7.5(荷兰国家应用科学研究院)和 Isight 2017(Engineous 公司,美国)相耦合,将人车碰撞模型分别经过 NSGA-II、NCGA 及 MOPSO 3 种算法优化后,在第 16 次、19 次、11 次迭代产生最优近似解。结果显示,优化后的目标函数值相比于优化前都有了明显缩小(见表 2);且根据“目标函数值越小,碰撞边界条件与真实事故越接近”的原则,NCGA 算法优化后最优解值最小,故将其作为最佳的碰撞边界条件。

表 2 优化前后结果

Tab. 2 Results before and after optimization

参数	优化前	NSGA-II	NCGA	MOPSO
$v/(m \cdot s^{-1})$	12	12.336	12.467	10.388
$D/mm$	0	105.9	101.9	136.2
$\alpha/mrad$	500	671.4	611.9	620.1
$\beta/mrad$	0	35.8	106	90.6
$\gamma/mrad$	-200	-161.2	-149.4	-243.1
$d_{AB}/mm$	43.6	18.3	10.3	18.6
$d_{CD}/mm$	52	16.5	23.9	17.3
$d_{AB+CD}/mm$	95.6	34.8	34.3	35.9

### 2.3 有限元模拟结果

将得到的最优近似解作为初始碰撞边界条件进行有限元仿真。事故发生时,行人下肢与车辆发生碰撞后,行人因撞击向车辆前进的反方向做旋转

运动,直至行人颅脑与车辆发生碰撞。图3(b)显示不同时刻 Madymo 仿真和 Ls-Dyna 仿真的运动学响应。结果表明,Ls-Dyna 仿真结果与 Madymo 仿真结果中人车碰撞运动学响应过程基本一致,且与实际案例中视频信息相符合。同时,仿真结果中事故车辆变形情况和位置与事故车辆损坏痕迹相匹配,且与视频信息中行人颅脑撞击到挡风玻璃相一致[见图3(c)]。

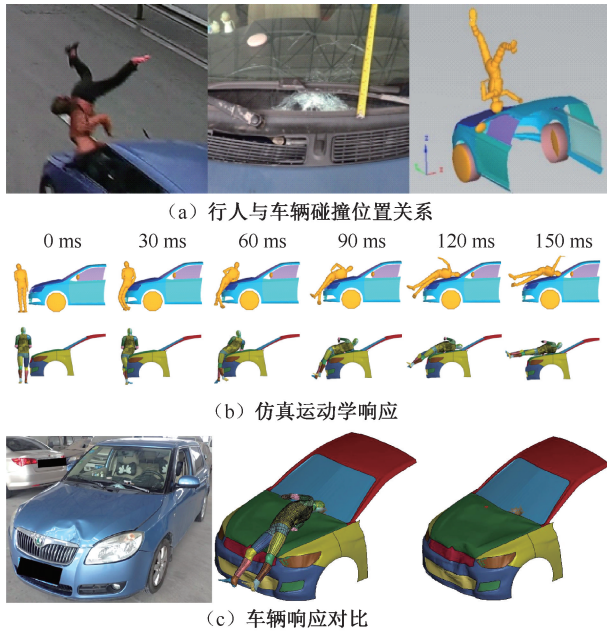


图3 行人-车辆运动学响应结果

Fig. 3 Results of pedestrian-vehicle kinematic response

(a) Location relationship between pedestrian and vehicle collision, (b) Simulated kinematic response, (c) Comparison of vehicle response

## 2.4 颅脑损伤预测

事故重建后行人颅脑损伤情况如图4所示。碰撞模拟结果表明,颅脑右侧颞叶处压力最大,最大正负压分别为1127、-631.7 kPa;最大 von Mises 应力和剪切应力分别为24.4、14.08 kPa, MPS 为1.163,均超过颅脑损伤的阈值<sup>[18]</sup>,与视频信息中右侧颞骨与车窗玻璃发生碰撞导致严重颅脑损伤相符。

图5所示为各损伤指标与损伤风险之间的对应关系。结果表明,假人模型头部 HIC 为1054.13,代表死者有50%以上概率会遭受 AIS 3 级颅脑损伤;根据 Takhounts 等<sup>[15]</sup>得出的 MPS 与

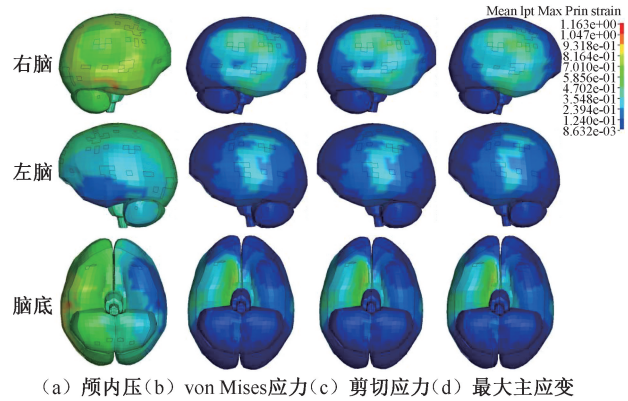


图4 行人脑组织应力、应变分布

Fig. 4 Stress and strain of pedestrian brain (a) Intracranial pressure, (b) Von Mises stress, (c) Shear stress, (d) Maximum principal strain

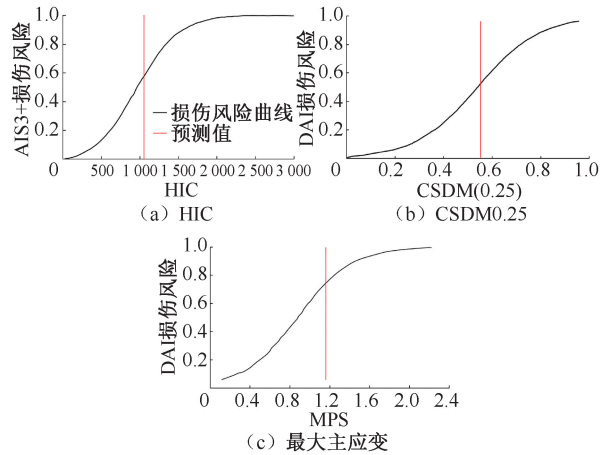


图5 颅脑损伤风险预测

Fig. 5 Craniocerebral injury risk prediction (a) HIC, (b) CSDM0.25, (c) Maximum principal strain

CSDM 不同损伤等级风险曲线,在本案例中,CSDM0.25 和 MPS 分别为0.5519 和1.163,代表行人遭受 DAI 的概率分别为52%和74%<sup>[19]</sup>。

## 3 讨论

目前数字化仿真技术已越来越多地应用到交通事故重建工作,但如何确保重建的精确性依然是我们面临的重要问题。近年来,已有学者进行了一系列的仿真研究<sup>[2-7]</sup>。目前基于多体仿真软件的事故重建主要是通过验证事故中人、车初始碰撞位置及最终位置与仿真是否一致作为重建运动学的判定依据,并在此基础上对行人的损伤机制进行分析。

为保证事故重建的精确性,有必要对碰撞初始参数进行优化设计研究,同时考虑多种参数,即对车人碰撞模型进行多目标优化设计。多目标优化方法在军工、汽车、船舶、航空航天等领域已得到广泛应用并表现出其优势性。大体可以分为归一化和非归一化两种方法。加权法是较具代表性的归一化方法,主要将多个优化目标转化为一个目标函数,同时可以根据不同目标的不同重要性赋予其不同的权重系数。但在优化设计中,归一化算法也有不足之处:权重系数在指定区域中的等值面的关系会随目标函数增多而增多且不明显;当 Pareto 前沿形状太简单,存在没有突出部分的区域,便无法得到此区域的 Pareto 最优解。非归一化方法可采用 Pareto 机制直接处理多个目标,无须将多个目标归一,可让所求解集的前沿与 Pareto 前沿尽量接近,避免了归一化方法的缺点。NSGA-II 算法和 NCGA 算法是较常用的非归一化方法。NSGA-II 方法在非支配排序中可选择贴近 Pareto 前沿的个体使 Pareto 的前进能力明显增强;并可对组内的个体进行匹配和比较将其划分为若干个 Pareto 边界层依次进行控制,探索性能良好,计算效率较高。但当目标函数为多峰或涉及变量数量较大(大于 100)时,

NCGA 算法优于 NSGA-II 算法<sup>[20]</sup>。MOPSO 算法倾向于集中在有限的区域,很难在大的空间目标中完整覆盖不同的部分<sup>[21]</sup>;且不考虑非支配解的规模,会导致解的质量下降和多样性与收敛性较差。

本文首先构建车-人碰撞模型,添加两对碰撞标记点对。理想状态是行人头部骨折处与车辆风窗碎裂中心以及行人右侧大腿皮肤青紫处与车辆发动机盖凹陷处相吻合。本文利用监控视频确定车人碰撞时的速度范围,结合视频信息设置多项优化参数,通过 NSGA-II、NCGA 和 MOPSO 3 种多目标优化算法分别对初始碰撞参数进行优化。根据“两对碰撞标志点之间的距离之和越小,碰撞结果与实际事故越相符合,重建结果越精确”的原则,对比确定最贴合实际的结果,确保事故重建的精确性。由表 2 可知,NCGA 算法计算后得到的目标函数取值最小,初始碰撞速度最大;MOPSO 算法目标函数取值最大,初始碰撞速度最小。图 6 所示为 3 种优化算法每次模拟值的分布情况,红色圆圈处为优化过程所产生的最优近似解。可以看出,NSGA-II 算法和 NCGA 算法相较于 MOPSO 算法,有较好的收敛效果。本文结果表明,NCGA 算法得到的目标函数值最低,且收敛性较好,说明其更符合实际事故。

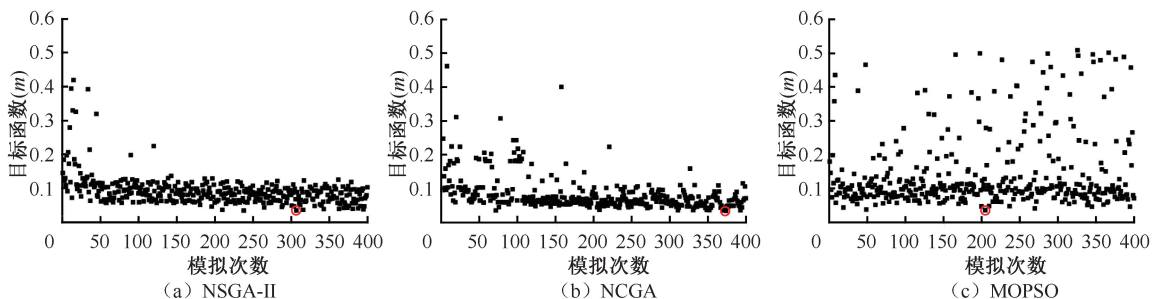


图 6 优化结果

Fig. 6 Optimization results (a) NSGA-II, (b) NCGA, (c) MOPSO

通过多刚体技术和多种优化算法的联合应用,得到较为精确的边界条件并对人体损伤进行预测。通过运动学响应结果:车辆和行人的碰撞位置、行人被撞后在空中的姿态以及车辆和行人的损伤情况等与真实事故基本一致,进一步验证了算法的精确性和有效性。基于较为精确的重建结果,将得到的最优解作为边界条件进行有限元模拟。本文发现,应力、应变主要集中在大脑的右半球和大脑左半球部分区域(见图 4),推测原因是当行人因车辆

碰撞导致颅脑右颞部与车辆挡风玻璃相撞时,在着力的对侧区域即左颞部产生对冲伤。本文提取不同的损伤参数,使用相应伤害风险曲线对颅脑损伤进行预测,预测结果与真实案例中颅脑损伤情况相符,重建效果较好。

本研究的局限性如下:① 车辆有限元模型和事故车辆在刚度上存在一定差异,可能会影响损伤预测的准确性;② 只考虑本次事故案例中较为明显两对碰撞标志点的优化,标志点的选择和优化参数设

置存在影响优化结果的可能;③只使用1个案例对更适合此案例的优化算法进行说明,未来需要更多的案例以及更多样的优化算法来进行算法的精确性和适用性研究。

## 4 结论

在交通事故重建过程中,碰撞边界条件设置对重建结果精确性具有十分重要的影响。为提高事故重建的精度,本文使用多刚体技术重建人车事故过程,通过NSGA-II、NCGA和MOPSO算法分别对碰撞参数进行优化,将不同算法得到的最优近似解进行对比得到与实际事故最相符的结果,再将此结果参数作为输入信息进行有限元计算,预测人车事故中颅脑损伤风险。本研究对1例真实事故进行重建,得到与真实事故情况最相符的初始碰撞参数,可以更真实准确地重现道路交通事故中行人和车辆的运动学响应以及预测行人损伤风险。本研究方法可以优化交通事故重建过程,提高事故重建的精度。

## 参考文献:

- [ 1 ] WHO. Global status report on road safety [ R ]. Geneva: World Health Organization, 2018.
- [ 2 ] 冯建成,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.
- [ 3 ] LALWALA M, CHAWLA A, THOMAS P, *et al.* Finite element reconstruction of real-world pedestrian accidents using THUMS pedestrian model [ J ]. Int J Crashworthines, 2019, 25(4): 360-375.
- [ 4 ] GAO W, BAI Z, LI H, *et al.* A study on cyclist head injuries based on an electric-bicycle to car accident reconstruction [ J ]. Traffic Inj Prev, 2020, 21(8): 563-568.
- [ 5 ] UNTAROIU CD, MEISSNER MU, CRANDALL JR, *et al.* Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques [ J ]. Int J Impact Eng, 2009, 36 (2): 210-219.
- [ 6 ] 孙杰,王涛,李正东,等.基于3D激光扫描、多刚体重建和遗传算法优化的车-人碰撞事故再现模拟与损伤分析[J].法医学杂志,2017,33(6):575-580.
- [ 7 ] 刘文君,李奎,苏森,等.基于有限元仿真和遗传神经网络的轿车-行人事故重构[J].医用生物力学,2015,30(2): 125-130.
- [ 8 ] LIU WJ, LI K, SU S, *et al.* Car-pedestrian accident reconstruction based on finite element simulation and genetic neural network [ J ]. J Med Biomech, 2015, 30 (2): 125-130.
- [ 9 ] MARTINEZ L, GUERRA L J, FERICHOLA G, *et al.* Stiffness corridors of the european fleet for pedestrian simulations [ C ]//Proceedings of Enhanced Safety of Vehicles Conference. Lyon: ESV, 2007: 07-0267.
- [ 10 ] BHALLA K, MONTAZEMI P, CRANDALL J, *et al.* Vehicle impact velocity prediction from pedestrian throw distance: Trade-offs between throw formulae, crash simulators, and detailed multi-body modeling [ C ]// Proceedings of IRCOBI Conference. Munich: IRCOBI, 2002: 263-276.
- [ 11 ] HOOF JV, LANGE RD, WISMANS J. Improving pedestrian safety using numerical human models [ J ]. Stapp Car Crash J, 2003, 47(10): 401-436.
- [ 12 ] Toyota Motor Corporation. Total human model for safety (THUMS) AM50 pedestrian/occupant model academic version 4.02\_20150527 [ Z ]. 2015.
- [ 13 ] 王成铭,范颖,邹冬华,等.基于遗传算法的高精度事故重建与损伤分析[J].汽车工程,2021,43(12):1787-1792.
- [ 14 ] Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. Federal motor vehicle safety standards; occupant crash protection [ R ]. USA: Federal Register, 2012; 29247-29249.
- [ 15 ] GABLER LF, CRANDALL JR, PANZER MB. Investigating brain injury tolerance in the sagittal plane using a finite element model of the human head [ J ]. Int J Automot Eng, 2016, 7(1): 37-43.
- [ 16 ] TAKHOUNTS EG, CRAIG MJ, MOORHOUSE K, *et al.* Development of brain injury criteria (BrIC) [ J ]. Stapp Car Crash J, 2013, 57(10): 243-66.
- [ 17 ] 李充,朱海涛.行人头部保护试验规程研究及对比[J].交通标准化,2009,17(9):75-79.
- [ 18 ] YAMADA H. Strength of biological material [ M ]. Baltimore: the Williams&Wilkins Company, 1970: 19-280.
- [ 19 ] HUANG J, PENG Y, YANG J, *et al.* A study on correlation of pedestrian head injuries with physical parameters using in-depth traffic accident data and mathematical models [ J ]. Accid Anal Prev, 2018, 119: 91-103.
- [ 20 ] SAHOO D, DECK C, WILLINGER R. Brain injury tolerance limit based on computation of axonal strain [ J ]. Accid Anal Prev, 2016, 92: 53-70.
- [ 21 ] 沈锴君.新型负泊松比电池保护系统耐撞性分析与多目标优化设计[D].南京:南京航空航天大学,2020.
- [ 22 ] ZHENG Z, LIU HL, CHEN L. An evolutionary many-objective optimization algorithm based on population decomposition and reference distance [ J ]. IEEE T Evolut Comput, 2015, 19(5): 694-716.