

# 紧急制动下驾驶员的坐姿仿真变化及损伤研究

楚小兰<sup>1</sup>, 张进杰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海工程技术大学, 机械与汽车工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海汽车集团股份有限公司商用车技术中心, 上海

收稿日期: 2023年2月17日; 录用日期: 2023年3月21日; 发布日期: 2023年3月28日

## 摘要

本文建立了车辆约束系统模型, 以NAIS统计的座椅角度数据为基础, 在FRB和MPDB两种碰撞工况下, 通过LS-DYNA利用THOR假人模型仿真对比分析三种初始驾驶坐姿在紧急制动下乘员的运动学响应及假人头部、颈部和胸部的损伤风险。最后采用NSGA-II算法的多目标优化方法求解乘员座椅部分位置的最优参数值。结果表明: 以综合假人评价指标WIC值最小为目标获得数据是座椅角度 $100.1^\circ$ , 踏板到坐垫前端水平距离 $0.48\text{ m}$ , 方向盘中心到靠背上端水平距离 $0.66\text{ m}$ , 座椅坐垫高度 $0.18\text{ m}$ 。这组数据将进一步提高乘员座椅的正面碰撞防护能力和未来主被动安全一体化的开发策略提供参数依据。

## 关键词

紧急制动, 乘坐姿态, 正面碰撞, 多目标优化

# Research on Driver's Sitting Posture Simulation Change and Injury under Emergency Braking

Xiaolan Chu<sup>1</sup>, Jinjie Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

<sup>2</sup>Commercial Vehicle Technology Center of Shanghai Automobile Group Company Limited, Shanghai

Received: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

This paper establishes restraint system model of vehicle, based on the seat angle data of NAIS statistical; under the two impact conditions of FRB and MPDB, LS-DYNA uses the THOR dummy model to simulate and compare the kinematics response of passengers in three initial driving sitting po-

sitions under emergency braking and the injury risk of the dummy head, neck and chest. Finally, the multi-objective optimization method of NSGA-II algorithm is used to solve the optimal values of some position parameters of the passenger seat. The results show that the data obtained with the objective of minimizing the damage value of the integrated dummy are the seat angle of  $100.1^\circ$ , the horizontal distance from the pedal to the front end of the seat cushion with 0.48 m, the horizontal distance from the steering wheel center to the upper end of the backrest of 0.66 m, and the seat cushion height of 0.18 m. This set of data will provide parameter basis for further improving the frontal collision protection capability of the passenger seat and the development strategy of the integration of active and passive safety in the future.

## Keywords

Emergency Braking, Sitting Posture, Frontal Collision, Multi-Objective Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着高级驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)的不断发展,国内外学者都对乘员的乘坐姿态是否会加剧损伤做了大量的研究。碰撞测试室在对车内乘员的碰撞保护的不断探索过程中,通常使用 ATD (人体测量测试设备)以标准化的坐姿进行碰撞测试。然而,车辆乘员在正常驾驶期间和紧急制动条件下都不会保持与碰撞 ATD 完全相同的姿势[1]。因此,不同初始驾驶坐姿造成碰撞时离位状况是不同的,由此造成的损伤情况不容忽视。

在国外,Östh J 等人进行志愿者实车紧急制动试验,记录了在紧急制动过程中驾驶员身体各个部位的位移变化情况[2]。Timothy T L 等人利用美国汽车采样系统数据,调查了事故中车内乘员的离位频率、人员特征以及损伤情况,其结果表明只有 0.5%的乘员在碰撞时处于离位状态,针对损伤结果分析可知,离位情况越严重其乘员损伤越严重[3]。Kang M 等人通过定义正常坐姿和三种离位坐姿,并选取了 6 名志愿者进行实车试验,研究在紧急制动作用下的运动反应差异,其研究表明:当乘员在离位坐姿中 AEB 被激活时,会对乘员造成潜在的伤害或不适风险[4]。

在国内,任立海等人利用 PreScan 和 Simulink 联合仿真搭建了基于模糊控制的紧急制动模型,结果表明运用基于模糊控制的紧急制动模型,在制动过程中乘员头部和胸部位移量分别减小 62%和 80% [5]。文箫建立三种不同类型假人模型的驾驶员侧约束系统,对比分析了三种乘员在低中高速下紧急制动对乘员安全的影响,结果表明:主动人体模型的运动学相响应与实车试验较为一致[6]。李月明等人采用 50 百分位 Hybrid III 假人进行加/减速滑台和安全带预紧肩带的主被动融合试验,研究结果表明:若 AEB 制动减速度小于  $6.0 \text{ m/s}^2$ ,约束系统匹配方式保护功能不会降低,若 AEB 制动减速度达到  $8.0 \text{ m/s}^2$ ,假人头部将发生“气囊不稳定接触”,胸部有“触底”风险[7]。

综上所述,国内外车企及各高校专家、学者都对碰撞假人的离位情况进行了深入的研究。本文结合国家车辆事故深度调查体系(National Automobile Accident In-depth Investigation System, NAIS)松江站点采集到的真实道路交通事故案例,通过对比分析驾驶员在不同初始乘坐姿态,研究紧急制动和碰撞过程中驾驶员坐姿变化以及对乘员损伤的影响。最后,将案例进行事故重建分析,并结合事故资料,说明本文

仿真试验结果的有效性, 可以为汽车乘车人员特别是新手驾驶员的坐姿提供一定的参考意义。

## 2. 模型与方法

首先, 选取 NAIS 松江站点 2016~2020 年的事故案例统计出的实际常用座椅角度应用到假人初始坐姿中。然后, 通过有限元软件 HyperWorks 和 Primer 建立了带 THOR 假人模型的驾驶员侧约束系统模型, 包括座椅, 安全带, 安全气囊等模型。最后, 列出事故中人体主要部位的损伤风险。

### 2.1. 座椅参数分析

#### 座椅角度选取

座椅角度指的是座椅坐垫表面与座椅靠背表面  $K$  之间的夹角。统计出的座椅角度分布如图 1 所示, 从座椅角度来看,  $[90^\circ, 100^\circ)$  占比接近一半, 座椅角度  $[90^\circ, 100^\circ)$ 、 $[100^\circ, 110^\circ)$  和  $[110^\circ, 120^\circ)$  总共占比超过 90%。因此, 将如图 2 所示的座椅靠背角度分别为  $95^\circ$ 、 $105^\circ$  和  $115^\circ$  的实际常用座椅角度应用到假人初始坐姿中。

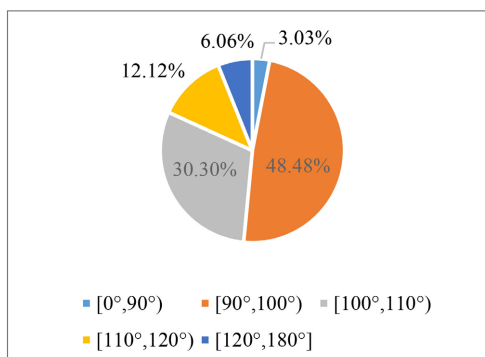


Figure 1. Seat angle statistics of NAIS

图 1. NAIS 座椅角度统计

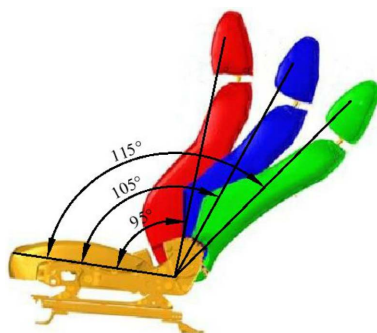


Figure 2. Definition of sitting angle

图 2. 坐姿倾角定义

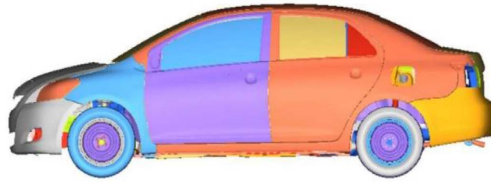
根据 52 辆安全带有划痕的事故车辆当中统计得到, 安全带划痕长度分布的占比最多为 20~100 mm。通过事故后车辆安全带的划痕长度, 来判断驾驶员身体前倾的程度, 通过模拟试验来换算制动过程中驾驶员头部重心位置偏移量。基于 5 组安全带的拉伸试验, 安全带划痕与头部位移之间的具体数据如表 1 所示, 其驾驶员头部位移一般在 10 cm 以下, 随着安全带划痕长度的增加, 头部位移量也逐渐增大, 通过安全带划痕来反推 NAIS 事故案例中驾驶员的乘坐姿态变化情况。

**Table 1.** The relationship between seat belt scratches and head displacement  
**表 1.** 安全带划痕与头部位移之间的关系

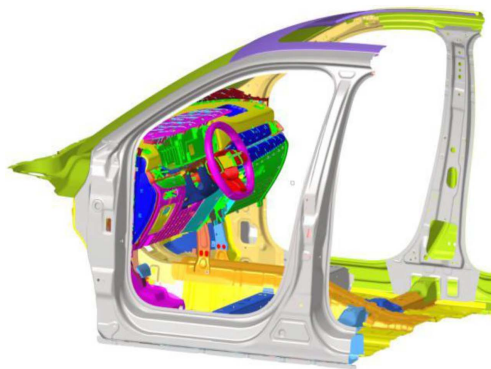
组别	安全带划痕长度/cm	头部位移/mm
1	无明显变化	100
2	5	200
3	10	300
4	20	400
5	30	500

## 2.2. 有限元约束系统建模

本研究采用的整车模型是美国国家碰撞中心根据 2006 年款丰田雅力士车型所建立的有限元模型[8], 模型如图 3 所示。为了便于计算及后处理, 将图 4 所示的整车有限元模型进行简化处理。



**Figure 3.** Yaris finite element model  
**图 3.** Yaris 有限元模型



**Figure 4.** Establishment of cockpit model  
**图 4.** 驾驶舱模型建立

采用 THOR-50M 假人模型做仿真试验, 其对标的人体模型为平均体重为 77 公斤、身高 1.76 米的成年男性。THOR 假人与传统的 Hybrid III 假人相比, 其生物逼真度更高, 且 THOR 假人更便于调节假人的坐姿。并运用 DYNA 方法建立了安全带 Routing 模型, 如图 5 所示。

运用 LS-DYNA 提供的自动单面接触和自动面面接触, 其中自动单面接触用到的是 \*CONTACT\_AIRBAG\_SINGLE\_SURFACE 关键字, 自动面面接触用到的是 \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE 关键字[9]。将有限元的模型与零部件接触起来, 带有假人模型的驾驶员侧有限元约束系统模型就建立完成, 如图 6 所示。



**Figure 5.** Seat belt FE models  
**图 5.** 安全带有限元模型



**Figure 6.** Simulation model of driver restraint system model  
**图 6.** 驾驶员约束系统仿真模型

### 2.3. 模型验证

将 NHTSA 进行的试验编号为 5677 的实车碰撞的试验数据与本研究所建立的模型仿真得出的驾驶员受力和损伤信息对比。从表 2 可以看出仿真结果中各项损伤值误差均在 10% 以内, 表明本研究所建立的仿真模型与试验驾驶员数据具有较好的一致性, 此模型能够用于后续的研究。

**Table 2.** Comparison between simulation value and test value  
**表 2.** 仿真值与试验值对比

损伤参数	仿真	试验	误差
头部X向加速度(g)	58.65	55.61	5.47%
胸部X向加速度(g)	46.50	48.09	-3.31%
骨盆X向加速度(g)	68.42	63.88	7.11%
左大腿力(KN)	5.16	4.90	5.31%
右大腿力(KN)	2.95	2.85	3.51%

## 2.4. 人体主要损伤部位风险

在 1969 年, 美国医学会和美国汽车医学会结合他们的医疗实践经验, 并查阅损伤资料, 设定了不同程度损伤级别数字, 这就是简明损伤分级标准 AIS (Abbreviated Injury Scale) [10], AIS 根据对生命的危害程度将损伤排序, 分为了不同的损伤等级, 具体如表 3 所示。

**Table 3.** Damage level AIS  
**表 3.** 损伤等级 AIS

AIS 等级	严重程度	致死概率%
0	无损伤	0
1	轻度损伤	0
2	中度损伤	1~2
3	重度损伤	8~10
4	严重损伤	5~50
5	危重损伤	5~50
6	极重损伤	100

对于本研究涉及的车辆碰撞安全, 损伤等级仅限于 AIS4 及以下等级, 不研究 AIS5 及以上的等级的乘员保护, 因为 AIS5 及以上乘员基本无生还可能, 研究没有意义。以下列出头部、颈部及胸部的损伤风险评价准则, 为后续仿真结果中人体损伤的分析作为参考。

可能发生头盖骨骨折(AIS ≥ 3)的概率  $p$  可以由下面的公式(1)计算得到, 即:

$$p(\text{AIS} \geq 3) = \Phi \left[ \frac{\ln(\text{HIC}_{15}) - 7.45231}{0.73998} \right] \quad (1)$$

$N_{ij}$  是将颈部轴向力和弯矩联系起来, 它是评价正碰中导致严重颈部损伤而提出的一个损伤准则。颈部的 AIS 等级大于等于 2 和大于等于 3 的损伤概率如公式(3)和(4)所示。

$$N_{ij}(t) = \frac{F_z}{F_{zc}} + \frac{M_y}{M_{yc}} \quad (2)$$

式中,  $F_z$  为枕髁所受的轴向力;  $M_y$  为枕髁所受的弯矩;  $F_{zc}$  为轴向力的极限值;  $M_{yc}$  为弯矩的极限值。

$$p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(4.3085 - 5.4079 N_{ij})}} \quad (3)$$

$$p(\text{AIS} \geq 3) = \frac{1}{1 + e^{(4.9372 - 4.5294 N_{ij})}} \quad (4)$$

AIS 等级大于等于 3 时涉及胸部最大压缩量的损伤概率公式如下所示:

$$p(\text{AIS} \geq 3) = 1 - e^{-\left(\frac{R_{\max}}{59.865}\right)^{2.7187}} \quad (5)$$

式中:  $R_{\max}$  为胸部最大压缩量。

## 3. 仿真试验

以驾驶员受正面碰撞为基础, 参考 2021 版 C-NCAP 中关于车辆正面 100% 重叠冲击固定刚性壁障(100% overlapping frontal impact fixed rigid barrier, FRB)和 50% 重叠移动渐进变形壁障(Front 50% overlap moving progressive deformation barrier, MPDB)的试验要求[11], 并将 95°, 105°和 115°三种假人乘坐姿态的仿真模型分别导入两种碰撞工况下进行计算求解, 获得碰撞过程中驾驶员运动学响应及受伤害情况。

### 3.1. FRB 工况下驾驶员损伤风险分析

#### 3.1.1. FRB 工况下驾驶员运动姿态变化

将三种乘坐姿态的仿真模型分别导入 LS-DYNA 中进行计算求解, 在 LS-Prepost 中查看其动画, 得到三种乘坐姿态下 0 ms (汽车碰撞的初始时刻)、40 ms (安全气囊持续充气的时刻)、80 ms (假人身体与气囊接触的时刻)、120 ms (碰撞结束时刻)时刻假人的运动学响应侧视图, 如图 7 所示。

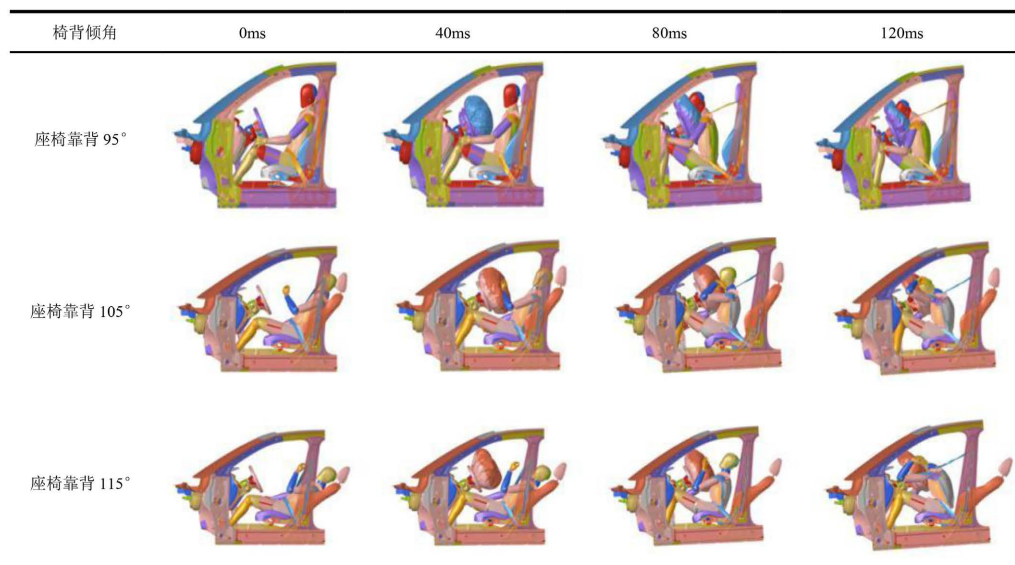


Figure 7. Driver's motion attitude under FRB condition

图 7. FRB 工况下驾驶员运动姿态

#### 3.1.2. FRB 工况下不同坐姿下潜风险

乘员下潜是造成乘员腹部损伤 AIS3+的主要原因之一。图 8 为三种乘坐姿态下驾驶员的躯体的运动响应情况, 可以看出在座椅靠背角度为 95°的情况下, 假人未出现下潜现象; 在座椅靠背角度为 105°的情况下, 假人模型在 100 ms 的时刻已经出现了下潜的现象; 而在座椅靠背角度为 115°的情况下, 假人模型在 75 ms 的时刻已经出现了下潜的现象。结果表明座椅靠背角度越大, 驾驶员在车辆碰撞过程中导致下潜的风险就越高, 即对假人造成损伤的风险也越高。

#### 3.1.3. FRB 工况下不同坐姿下潜风险

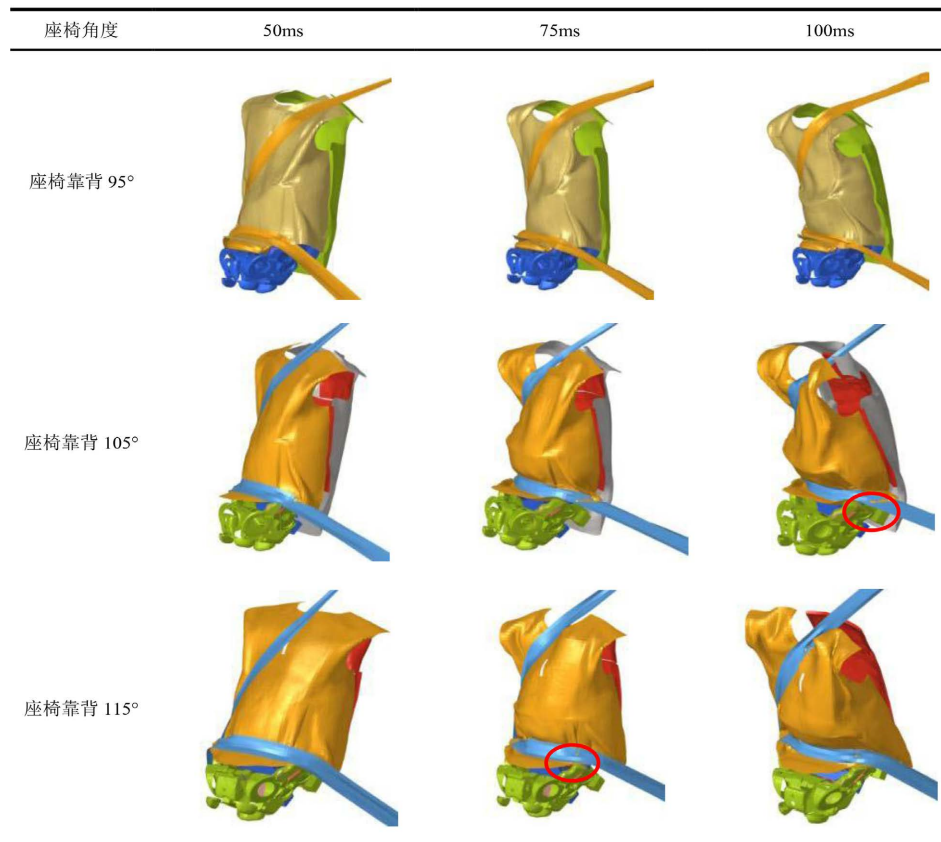
将三种乘坐姿态的仿真模型导入 LS-DYNA 中进行计算之后得到的结果在 LS-Prepost 中查看其头部、颈部以及胸部的损伤风险曲线, 其损伤指标的最大值列在表 4 中, 并根据已经列出的头部、颈部和胸部损伤风险的公式, 计算得出三者的 AIS 损伤风险概率, 其结果如图 9 所示。

结合表 4 和图 9 可以看出, 在 FRB 工况下三种坐姿中, 105°和 115°头部损伤几率最高, AIS3+头部损伤几率为 7.6%。颈部损伤最高的是 115°, AIS3+颈部损伤几率最高为 9.4%。胸部损伤最高的是 95°, AIS3+胸部损伤几率高达 29.7%。

### 3.2. MPDB 工况下驾驶员损伤风险分析

#### 3.2.1. MPDB 工况下运动姿态变化

如图 10 所示, 得到在 MPDB 工况下三种乘坐姿态 0 ms、40 ms、80 ms、120 ms 时刻假人的运动学响应侧视图。

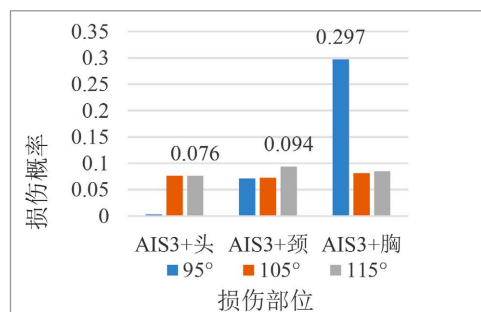


**Figure 8.** Driver dive risk under FRB condition  
**图 8.** FRB 工况下驾驶员下潜风险

**Table 4.** Comparison of injury indexes of different occupant sitting positions under FRB condition

**表 4.** FRB 工况下不同乘员坐姿的损伤指标对比

座椅靠背角度	95°	105°	115°
$HIC_{15}$	223.2	596	596.3
大脑损伤指标(BrIC)	0.66	0.91	1.16
颈部损伤指标( $N_{ij}$ )	0.27	0.32	0.49
胸部最大压缩量	51.7 mm	34.9 mm	35.8 mm



**Figure 9.** Driver dive risk under FRB condition  
**图 9.** FRB 工况下不同乘员坐姿的损伤风险



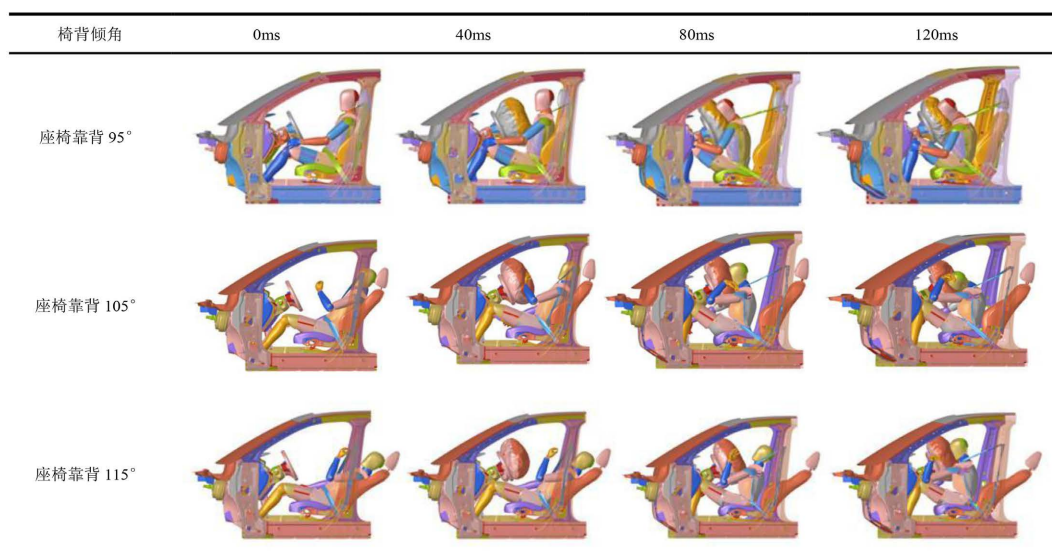


Figure 10. Driver's motion attitude under MPDB condition

图 10. MPDB 工况下驾驶员运动姿态

### 3.2.2. MPDB 工况下不同坐姿下潜风险

图 11 为三种不同乘坐姿态下驾驶员的躯体的运动响应情况,可以看出在座椅靠背角度为 105°的情况下,假人模型在 75 ms 的时刻已经出现了下潜的现象,而在第三种乘坐姿态即座椅靠背角度为 115°的情况下,假人模型在 50 ms 的时刻已经出现了下潜的现象。结果表明座椅靠背角度越大,驾驶员在车辆碰撞过程中导致下潜的风险就越高,即对假人造成损伤的风险也越高。

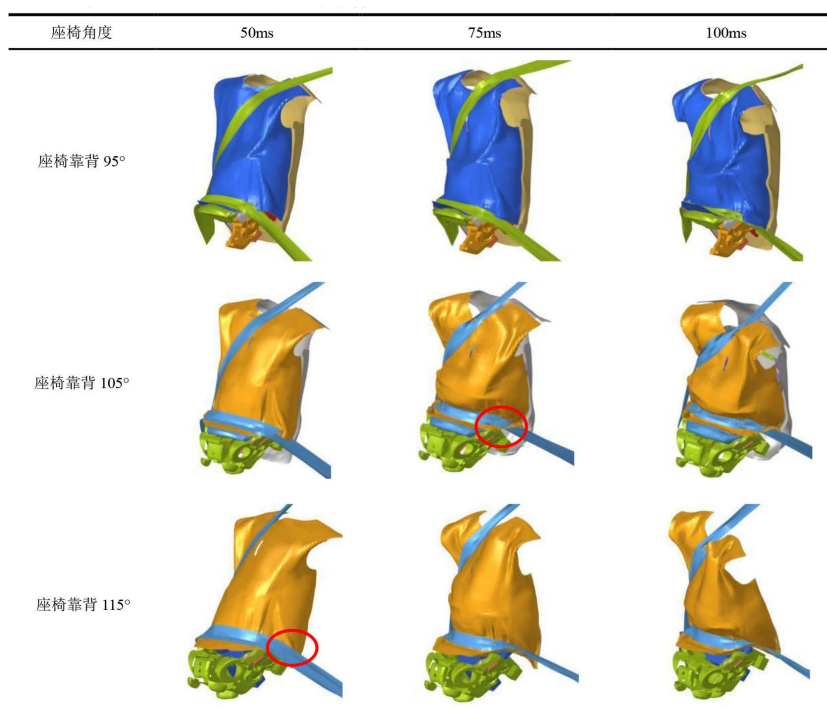


Figure 11. Driver dive risk under MPDB condition

图 11. MPDB 工况下驾驶员下潜风险

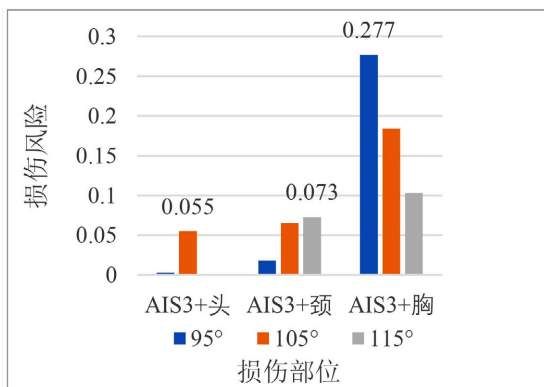
### 3.2.3. MPDB 工况下不同坐姿损伤风险

将 MPDB 工况下三种乘坐姿态的仿真模型导入 LS-DYNA 中进行计算之后得到的结果在 LS-Prepost 中查看其头部、颈部以及胸部的损伤风险曲线, 其损伤指标的最大值列在表 5 中, 并由已列的损伤风险概率公式计算得出三者的 AIS 损伤风险概率, 其结果如图 12 所示。

**Table 5.** Comparison of injury indexes of different occupant sitting positions under MPDB condition

**表 5.** MPDB 工况下不同乘员坐姿的损伤指标对比

座椅靠背角度	95°	105°	115°
$HIC_{15}$	246.5	529.2	157
大脑损伤指标(BrIC)	0.72	0.98	1.04
颈部损伤指标( $N_{ij}$ )	0.26	0.23	0.35
胸部最大压缩量	50.7 mm	45 mm	38 mm



**Figure 12.** Driver dive risk under MPDB condition

**图 12.** MPDB 工况下驾驶员下潜风险

结合表 5 和图 12 可以看出, 在 MPDB 工况下三种坐姿中, 头部损伤最高的是 105°, 颈部损伤最高的是 115°, 胸部损伤最高的是 95°。

## 4. 真实案例分析及优化

### 4.1. 案例概要

该事故信息如下: 在 2017 年 1 月 11 日 13 时 25 分许, 在某十字路口, 直行的蒙迪欧与左转的荣威发生正面碰撞, 事故导致蒙迪欧的车头左侧和荣威的车头右侧严重变形, 蒙迪欧的驾驶员未受伤, 荣威的驾驶员轻微受伤, 副驾驶乘客严重受伤。根据事故回访资料以及 PC-Crash 12.0 碰撞仿真图 13 显示, 两车在碰撞前均采取了制动措施。

福特蒙迪欧和荣威安全气囊展开情况均正常, 如表 6 所示。

根据事故车辆勘验结果显示, 荣威车内驾驶员安全带划痕约为 12 cm, 根据表 1 总结的规律, 推测其头部位移量在 300 mm 左右。驾驶员座椅角度为 100°, 副驾驶位置座椅角度为 120°, 其他具体数据如图 14 和表 7 所示。

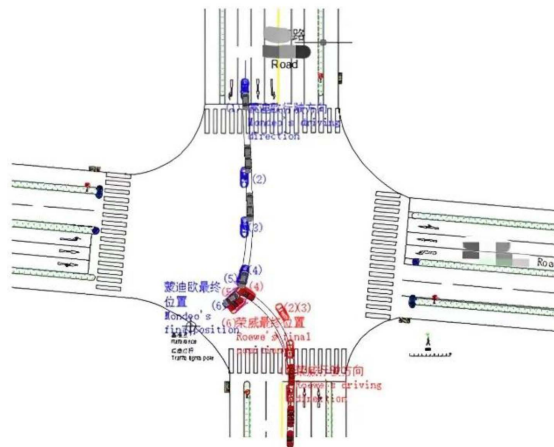
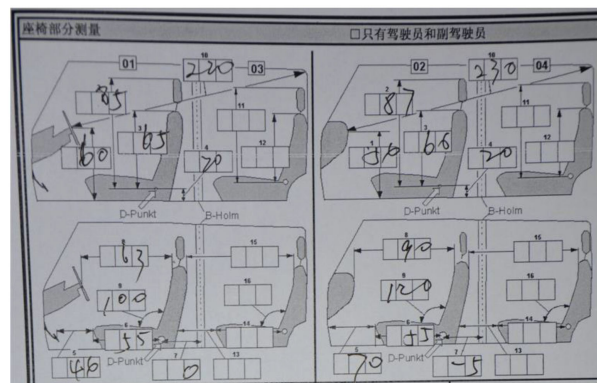


Figure 13. Accident reconstruction process diagram  
图 13. 事故重建过程图

Table 6. Airbag information  
表 6. 气囊信息

参与方	装备气囊	DAB	PAB	KAB	前左侧	前右侧	左气帘	右气帘
蒙迪欧	是否展开	是	是	是	是	是	是	是
荣威	是否展开	是	是	/	/	/	/	/



注：图中长度单位为 cm，角度单位为°。

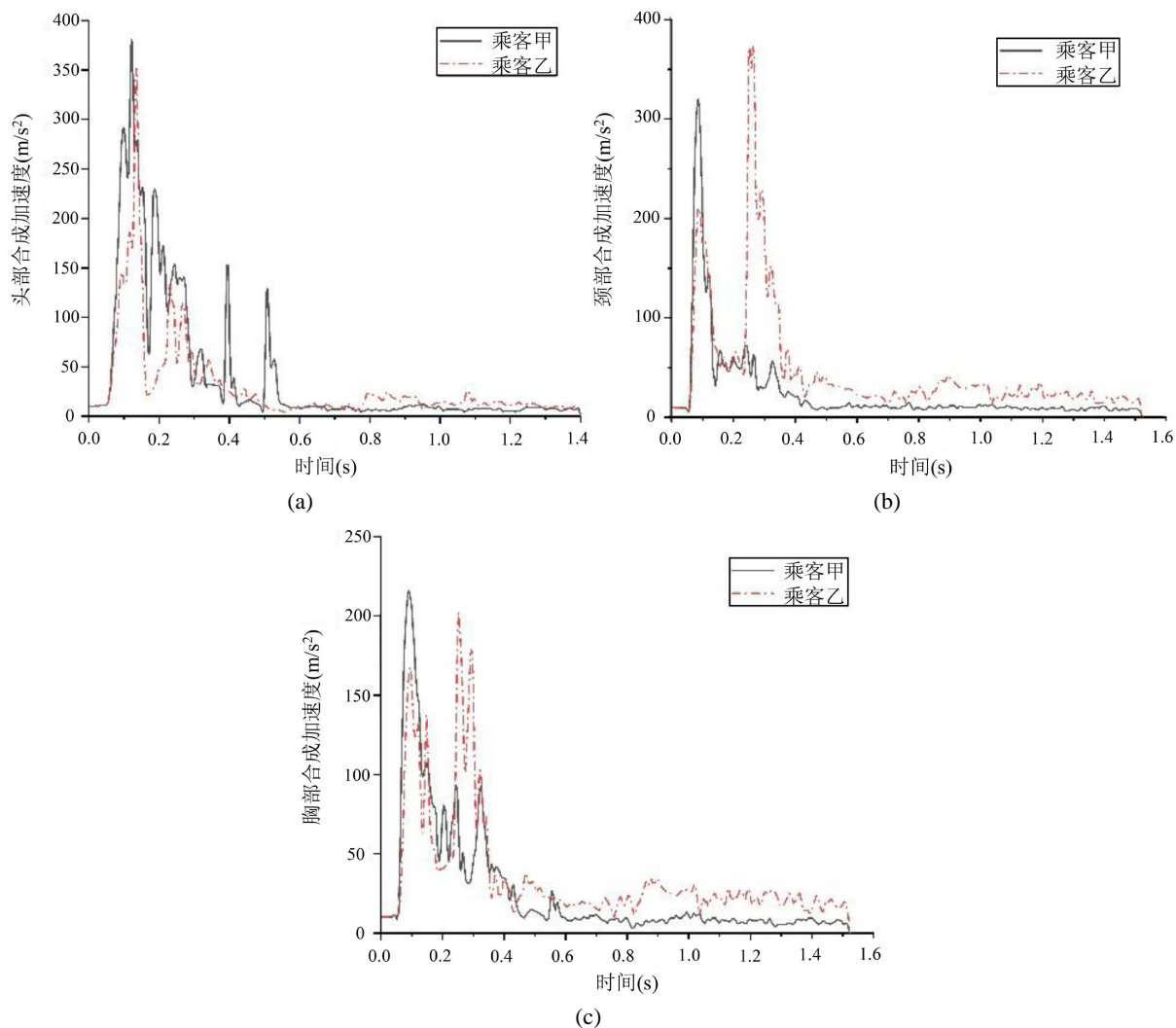
Figure 14. Roewe front seat position parameters  
图 14. 荣威前排座椅位置参数

Table 7. Seat position parameters  
表 7. 座椅位置参数

座椅位置参数	驾驶员位置	副驾驶位置
座椅角度/°	100	120
踏板到坐垫前端水平距离/mm	440	700
方向盘中心到靠背上端水平距离/mm	630	900
坐垫高度/mm	200	200

## 4.2. 人体主要部位加速度变化分析

根据 PC-Crash 事故重建显示, 本次碰撞时间总共持续了 1.4 s 左右, 其中 0~0.4 s 为两车主要碰撞阶段, 在此时间段内荣威车内两人的速度变化及能量变化很剧烈, 具体情况如图 15 所示荣威车内两人的头、颈、胸部的变化情况, 以下“乘客甲”、“乘客乙”分别代指荣威车内驾驶员、副驾驶乘客。



**Figure 15.** Head, neck and chest resultant acceleration. (a) Head resultant acceleration; (b) Neck resultant acceleration; (c) Chest resultant acceleration

**图 15.** 头部、颈部和胸部的加速度变化曲线图。(a) 头部合成加速度; (b) 颈部合成加速度; (c) 胸部合成加速度

综合头部、颈部和胸部三方面的加速度曲线来看, 乘客乙受到损伤的时刻要明显晚于乘客甲, 且乘客乙受到的损伤比乘客甲较为严重。其原因可能是由于车辆右前侧受到撞击, 冲击更大, 因此副驾驶位乘客乙在碰撞过程中产生的离位更加严重, 导致其遭受的损伤也更严重。

## 4.3. 优化试验设计

本文以降低假人头部、颈部和胸部损伤值为优化目标, 由于优化目标之间会相互冲突, 因此三个优化目标不可能同时达到最优值。通过仿真模型计算得到乘员损伤的响应值, 最后利用综合评价指标 WIC

最小值得出最优解, 并对其进行验证。

基于 NAIS 统计的 52 起大变形案例中驾驶员座椅位置参数数值差异较大的部分参数, 对这部分限制驾驶员坐姿的座椅位置参数进行优化分析。最终选取了 4 个相关参数作为优化变量, 其参数值范围如表 8 所示。

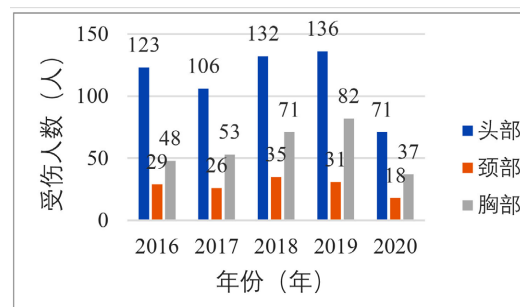
**Table 8.** Optimization variables and variation range  
**表 8.** 优化变量及变化范围

优化变量	变化范围
A 座椅角度/°	80~130
B 踏板到坐垫前端水平距离/m	0.300~700
C 方向盘中心到座椅靠背上端水平距离/m	400~1200
D 座椅坐垫高度/m	200~500

本文利用辅助评价指标 WIC 来寻求最优解, 以解决多目标优化中难以抉择的问题。本文所建立的 WIC 表达式如下所示:

$$WIC = \frac{0.57}{2} \times \left( \frac{HIC_{36}}{1000} + \frac{A_{3ms}}{80} \right) + 0.14 \times N_{ij} + \frac{0.29}{2} \times \left( \frac{C_{3ms}}{60} + \frac{C_{comp}}{63} \right) \quad (7)$$

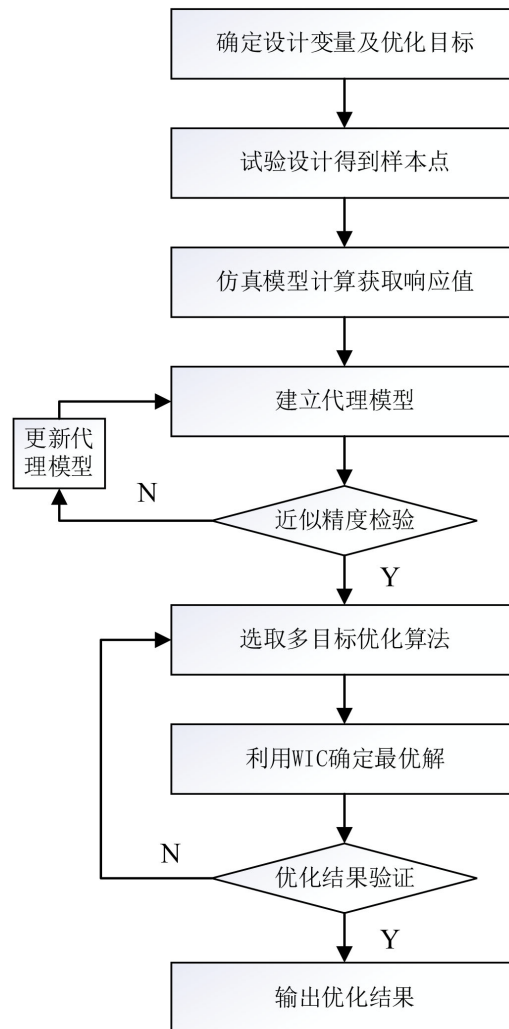
上式为更加全面的加权综合损伤指标, 各个损伤值的权重系数来源于 NAIS 松江站点车辆事故中车内乘员身体各部位发生损伤的统计概率, 如图 16 所示。



**Figure 16.** Injury statistics of each part  
**图 16.** 各部位受伤统计

图 17 所示为本文设计的优化流程。对多目标进行优化求解是利用拉丁超立方抽样实验对已经选取的驾驶员坐姿的座椅位置参数, 头部、颈部和胸部损伤值以及伤害评价指标 WIC 进行随机抽样试验, 再使用 NSGA-II 算法对 4 个座椅相关参数进行多目标优化。将仿真结果与算法优化模型结果进行对比分析, 从中选取 WIC 值最小时作为最优解, 座椅相关参数结果如表 9 所示。由结果得出误差均在 10% 以内, 说明了此优化模型的有效性。

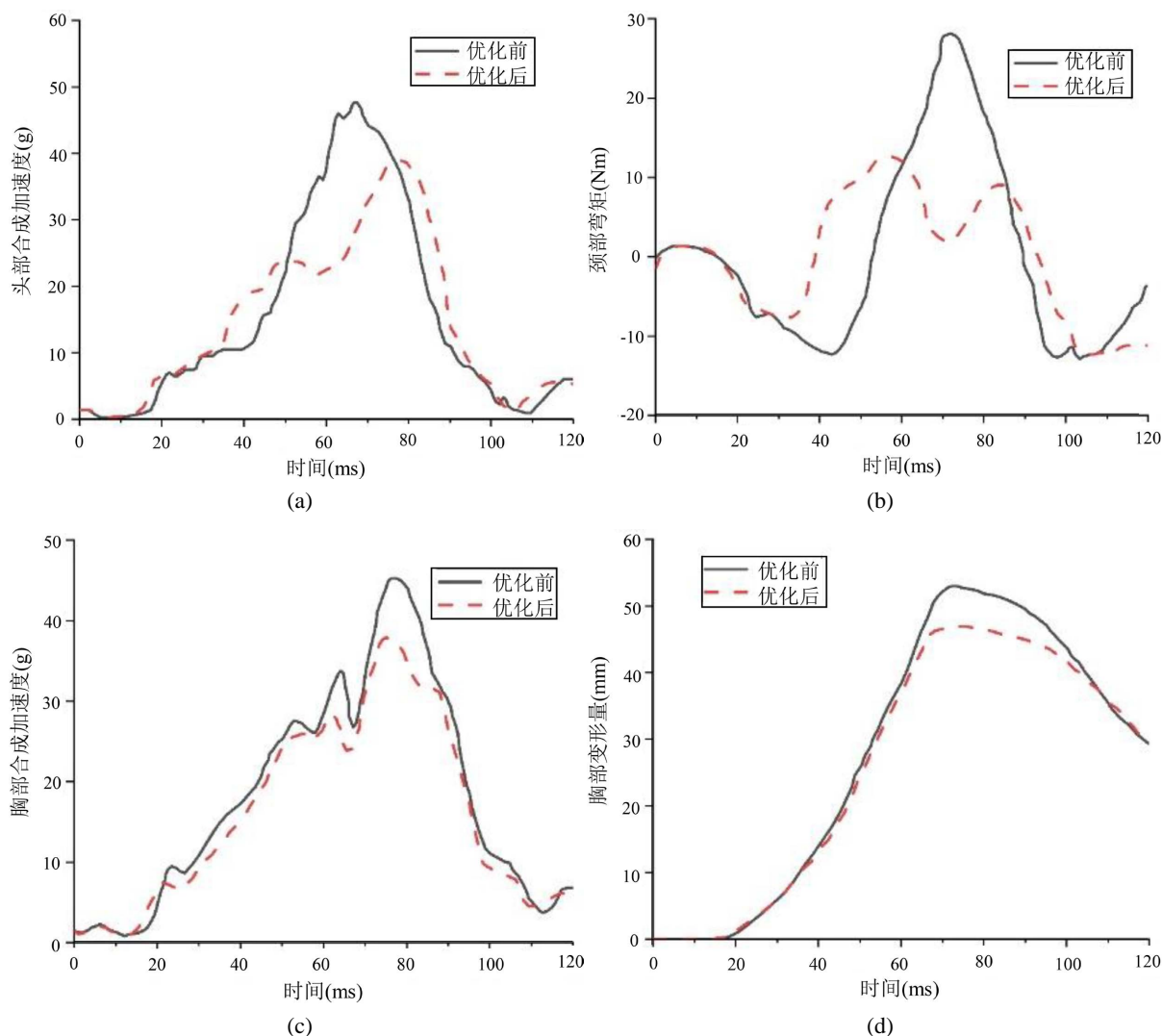
如图 18 所示, 将上章的座椅角度为 105° 的仿真试验与本章算法优化后乘员各部位响应曲线对比分析。可以看出, 通过改变座椅位置参数影响到驾驶员坐姿, 假人头部合成加速度峰值由 48 g 降低到 40 g, 颈部的弯矩值峰值由 28 Nm 下降到了 13 Nm。胸部合成加速度峰值由 45 g 下降到 38 g, 胸部变形量由 53 mm 下降到 46 mm。以上结果都表明本文所进行的优化研究效果良好。



**Figure 17.** Multi objective optimization process  
**图 17.** 多目标优化流程

**Table 9.** Comparison of optimization results of three sitting positions  
**表 9.** 三种坐姿优化结果对比

组	算法优化值	仿真值	误差
A/°	100.1		
B/m	0.48		
C/m	0.66		
D/m	0.18		
头部损伤值 $C_{head}$	0.7794	0.8105	3.99%
颈部损伤值 $C_{neck}$	0.1727	0.1842	6.66%
胸部损伤值 $C_{chest}$	1.1075	1.2064	8.93%
WIC	0.4069	0.4317	6.1%



**Figure 18.** Comparison diagram of pre-optimization and post-optimization curves. (a) Comparison of occupant head acceleration before and after optimization; (b) Comparison of occupant neck bending moment before and after optimization; (c) Comparison of chest acceleration before and after optimization; (d) Comparison of chest deformation of passengers before and after optimization

**图 18.** 优化前后化曲线对比图。(a) 优化前后乘员头部加速度对比；(b) 优化前后乘员颈部弯矩对比；(c) 优化前后乘员胸部加速度对比；(d) 优化前后乘员胸部变形量对比

## 5. 结论与展望

本文参照 C-NCAP 中 FRB 和 MPDB 两组正面碰撞试验工况，共六组仿真试验。得出以下结论：

1) 在相同乘坐姿态下，MPDB 工况假人受到的损伤比 FRB 工况的要高，同时随着座椅靠背角度的增加，头部损伤几率会增大，颈部损伤几率无明显变化，胸部损伤几率则有所降低。在六组试验中，FRB 工况，座椅角度为  $105^\circ$  状态下，假人整体的损伤风险最低，头部 AIS3+、颈部 AIS3+、胸部 AIS3+ 的损伤概率分别为 7.6%、7.3% 和 8.1%。

2) 运用第二代多目标遗传算法 NSGA-II 对汽车座椅位置参数：座椅角度、踏板到坐垫前端水平距离、方向盘中心到靠背上端距离和座椅坐垫高度共 4 个参数进行优化匹配。得出起最优解为：座椅角度  $100.1^\circ$ ，踏板到坐垫前端水平距离 0.48 m，方向盘中心到靠背上端水平距离 0.66 m，座椅坐垫高度 0.18 m。

本文只在正面碰撞两种工况下, 分析和比较了紧急制动下初始坐姿对驾驶员损伤的影响研究。后续可以延伸到其他的碰撞类型, 例如侧面碰撞、追尾碰撞等, 并在这些碰撞类型下进一步研究紧急制动措施对乘员安全的影响。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目资助(81571851); 产品安全召回技术支持——基于车辆事故深度调查的车辆缺陷分析判定技术应用研究(上海松江)项目(ZL-ZHGL-2020015); 上海市司法鉴定专业技术服务平台资助项目(19DZ2292700)。

## 参考文献

- [1] Carlsson, S. and Davidsson, J. (2011) Volunteer Occupant Kinematics during Driver Initiated and Autonomous Braking When Driving in Real Traffic Environments. *Proceedings of the IRCOBI Conference*, Calgary, 19-22 June 2011, 125-136.
- [2] Osth, J., Olafsdóttir, J.M., Davidsson, J., *et al.* (2013) Driver Kinematic and Muscle Responses in Braking Events with Standard and Reversible Pre-Tensioned Restraints: Validation Data for Human Models. *Stapp Car Crash Journal*, **57**, 145-158. <https://doi.org/10.4271/2013-22-0001>
- [3] Mcmurry, T.L., Poplin, G.S., Shaw, G., *et al.* (2018) Crash Safety Concerns for Out-of-Position Occupant Postures: A Look Towards Safety in Highly Automated Vehicles. *Traffic Injury Prevention*, **12**, 1-19. <https://doi.org/10.1080/15389588.2018.1458306>
- [4] Kang, M., Lee, I., Jung, J., *et al.* (2021) Motion Responses by Occupants in Out-of-Seat Positions during Autonomous Emergency Braking. *Annals of Biomedical Engineering*, **23**, 217-231.
- [5] 任立海, 李星月, 覃祯员, 等. 基于模糊控制的汽车自动紧急制动乘员离位仿真分析研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(4): 32-38.
- [6] 文箫. 紧急制动工况下主动安全带对乘员安全的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
- [7] 李月明, 王鹏翔, 张毅, 习波波, 杨海燕. 自动紧急制动对约束系统保护功能影响的研究[J]. 汽车技术, 2022(10): 16-23.
- [8] Antona, J., Ejima, S. and Zama, Y. (2011) Influence of the Driver Conditions on the Injury Outcome in Front Impact Collisions. *International Journal of Automotive Engineering*, **2**, 2788-2790.
- [9] 胡远志, 曾必强, 谢书港. 基于 LS-DYNA 和 HyperWorks 的汽车安全仿真与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [10] 陈勇. 行人和自行车交通事故中头部动力学响应和损伤机理研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [11] 中国汽车技术研究中心. C-NCAP 管理规则(2021年版) [R]. 天津: 中国汽车技术研究中心. <http://www.c-ncap.org.cn/cncap-regulation-2021.pdf>