

中文引用格式:洪亮,陈志豪,刘鹏. 面向中等身材儿童安全的校车智能气囊优化设计[J]. 中国安全科学学报,2025,35(12):78-87.

英文引用格式:HONG Liang, CHEN Zhihao, LIU Peng. Optimal design of school bus intelligent airbags for enhanced safety of middle-sized children[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 78-87.

面向中等身材儿童安全的校车智能气囊优化设计*

洪亮 副教授, 陈志豪, 刘鹏

(江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

中图分类号: X912.9

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.0140

基金项目: 国家自然科学基金资助(51805224); 中国博士后科学基金资助(2020M671307); 江苏省资助博士后研究人员计划项目(2019Z061); 江苏省博士后科研资助计划(2019K043)。

【摘要】 为减轻校车正面碰撞中, 中等身材儿童的生物力学损伤程度, 开展智能气囊的优化设计研究。首先, 基于台车试验, 构建、验证校车仿真模型; 其次, 确立 10 岁儿童全方位人体安全模型 (THUMS) 假人头部、胸部与腿部损伤指标的输出方法, 搭建校车-THUMS 假人-智能气囊耦合模型; 然后, 基于第三代非支配排序遗传算法 (NSGA-III), 提出自适应传播因子、引入高斯变异算子、融合粒子群进化机制、改变非支配排序方法, 从而提出改进型 NSGA-III; 最后, 利用改进型 NSGA-III, 开展优化设计, 获得气囊的最优配置。结果表明: 改进型 NSGA-III 的性能优于其他 3 种著名的优化算法; 正常、前倾 10 和 20°、右倾 5 和 10° 及躺卧坐姿下, 当充气阀的气体质量流率比例系数、泄气阀的开启压力和开度系数、气袋的安装点高度分别为 1.23、 1.37×10^5 Pa、2.10 与 478 mm 时, 中等身材儿童的头部伤害指标 (HIC_{15}), 颅内压力 (IP), 肝脏压力 (LP), 左、右大腿力 (F_L 、 F_R), 加权伤害指标 (WICC) 明显下降。

【关键词】 中等身材儿童; 校车; 智能气囊; 优化设计; 全方位人体安全模型 (THUMS) 假人; 改进型第三代非支配排序遗传算法 (NSGA-III)

Optimal design of school bus intelligent airbags for enhanced safety of middle-sized children

HONG Liang, CHEN Zhihao, LIU Peng

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to mitigate biomechanical injuries sustained by middle-sized children during frontal collisions of school buses, this study investigated the optimal design of intelligent airbags. Initially, a validated school bus simulation model was constructed based on sled test data. Subsequently, methods for determining head, thorax, and femur injury values for a 10-year-old THUMS dummy were established, and the model, including the school bus restraint system, THUMS dummy and intelligent airbag, was developed. Next, based on NSGA-III, the adaptive propagation factors were proposed, the Gaussian mutation operator and the evolutionary mechanism of the particle swarm optimization method were introduced, and the non-dominated sorting level was improved, thus putting forward the improved NSGA-III. Finally, the design optimization of the intelligent airbag was conducted using the improved NSGA-III.

to determine the optimal configuration of the airbag. The results demonstrate that the improved NSGA-III outperforms the other three state-of-the-art optimization algorithms. Under normal, 10° forward tilt, 20° forward tilt, 5° right tilt, 10° right tilt and lying sitting postures, the head injury criterion (HIC_{15}), intracranial pressure (IP), liver pressure (LP), left and right femur forces (F_L and F_R , respectively), and weighted injury criterion (WICC) for middle-sized children are significantly reduced when the proportional coefficient of the gas mass-flow rate of the inflation valve, the opening pressure and opening coefficient of the deflation valves, and the installation height of the air bag are set at 1.23, 1.37×10^5 Pa, 2.10, and 478 mm, respectively.

Keywords: middle-sized children; school bus; intelligent airbag; design optimization; total human model for safety (THUMS) dummy; improved non-dominated sorting genetic algorithm-III (NSGA-III)

0 引 言

校车碰撞中,校车约束系统是保护儿童的重要装置。当前校车约束系统难以有效保护儿童乘员^[1-2]。由于天性活泼好动,儿童常以非正常坐姿(简称离位坐姿)乘坐校车^[3-4]。处于离位坐姿的儿童乘员简称为离位儿童乘员。在正面碰撞中,传统安全气囊瞬间起爆会对离位儿童乘员造成严重或致命伤害^[5]。为改善儿童乘坐校车的安全性,提出智能气囊的原型设计,该气囊无瞬间起爆过程,能够基于儿童身材,实现对儿童的最优保护。校车智能气囊主要由视觉传感器、气袋、收纳装置、充气阀与2个泄气阀等构成。2个泄气阀安装于气袋的左右两侧。校车正常行驶时,气袋折叠存储于收纳装置中,收纳装置固定在前排靠背的背面。视觉传感器探测后排座椅上的儿童身材。校车正面碰撞无法避免前,根据儿童身材,充气阀将适量氮气充入气袋中,使气袋完全膨胀并位于后排儿童的前方。校车正面碰撞时,儿童前冲、挤压气袋,一旦气袋的内部压力达到泄气阀的开启压力,泄气阀开启以排出气袋内的氮气,从而利用空气阻尼缓冲儿童的前冲能量,以避免或减轻儿童伤害。现有研究主要利用多刚体假人与第三代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III, NSGA-III)开展校车约束系统的优化设计^[6-7]。

现有研究的不足之处是:①多刚体假人缺乏人体解剖结构,无法直接反映人体骨骼与内脏的生物力学损伤程度^[8-9]。②NSGA-III能够有效处理优化目标大于3的高维问题,此算法利用一组分布良好的参考点,保持多样性;然而,NSGA-III存在选择压力过低与优良个体易丢失等缺点^[10-11]。

鉴于此,笔者拟基于全方位人体安全模型

(Total Human Model for Safety, THUMS)假人与改进型 NSGA-III,开展校车智能气囊的优化设计研究。利用10岁儿童 THUMS 假人模拟中等身材的儿童乘员,基于 NSGA-III,提出自适应传播因子、引入高斯变异算子、融合粒子群进化机制、改变非支配排序方法,提出一种改进型 NSGA-III;采用该算法获得智能气囊关键设计参数的最优配置,以期增强儿童乘坐校车的安全性。

1 校车-THUMS 假人-智能气囊耦合模型构建

1.1 校车仿真模型

基于台车试验数据,建立校车仿真模型。具体步骤为:①建立前、后排座椅模型。②调用 Hybrid III 型第5百分位假人,将其定位在后排座椅右侧。③建立两点式安全带混合模型。④施加30 km/h 正面碰撞加速度和重力加速度。对比试验视频与仿真动画中假人运动姿态,对比试验与仿真中假人伤害响应曲线,如图1、图2所示。试验与仿真中假人运动姿态基本一致,伤害响应曲线之间拟合度较好。因此,校车仿真模型的可信度较高。

1.2 校车-THUMS 假人耦合模型

耦合校车仿真模型与10岁儿童 THUMS 假人,构建校车-THUMS 假人耦合模型。THUMS 假人具有人体骨骼和器官的真实解剖结构,能够准确反映汽车碰撞中骨骼和器官的损伤机制,输出损伤生物力学响应^[12-14]。具体步骤为:①基于台车试验中,Hybrid III 型第5百分位假人的H点坐标,利用10岁儿童 THUMS 假人替换校车仿真模型中的 Hybrid III 型第5百分位假人。②将10岁儿童 THUMS 假人的小腿和手臂所有节点分别设置成

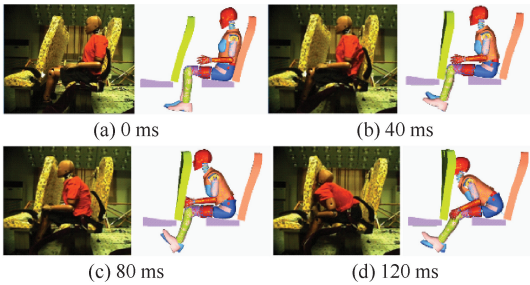


图1 试验与仿真中假人运动姿态的对比
Fig.1 Comparison of dummy motion postures between test and simulation

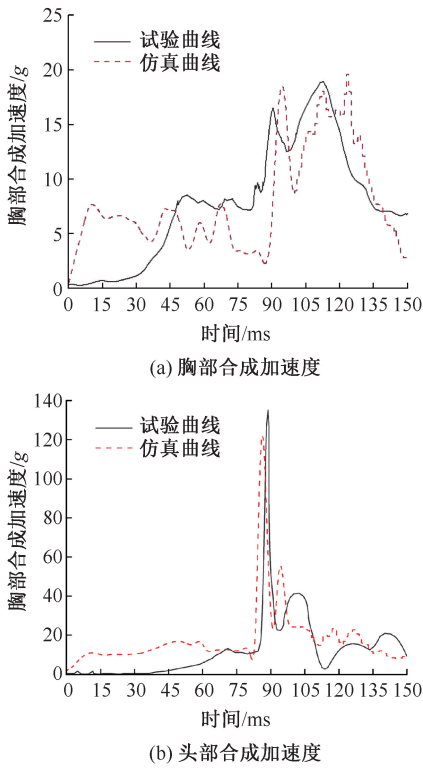


图2 试验与仿真中假人伤害响应曲线的对比
Fig.2 Comparison of dummy injury response curves between test and simulation

2个集合。③针对小腿和手臂集合施加旋转速度,使其分别绕膝关节和肩关节的中心节点旋转。④当小腿和手臂到达目标位置时,导出新的节点坐标,并使其代替原始节点坐标,最终获得正常坐姿。基于小身材成年女性 THUMS 假人头部质心坐标与比例缩放原理,确定 10 岁儿童 THUMS 假人头部质心坐标,如图 3 所示,从而输出头部合成加速度曲线,获得头部伤害指标 (Head Injury Criterion, HIC_{15})。图 3 中, D_1 与 D_2 分别为小身材成年女性 THUMS 假人头部最前端至最后端的距离、最上端至最下端的距离; D_3 与 D_4 分别为小身材成年女性 THUMS 假人头部质心至头部最后端、最上端的距离; D_5 与 D_6 分

别为 10 岁儿童 THUMS 假人头部最前端至最后端的距离、最上端至最下端的距离。选取胸骨和第四根肋骨相连区域的中心节点 N_1 与第 9 块胸椎的棘突末端节点 N_2 ; 计算碰撞过程中节点 N_1 和节点 N_2 间的最小距离; 将 2 节点间的初始距离减去最小距离, 最终获得胸部压缩量 (Thorax Performance Criterion, THPC)。依据小身材成年女性与 10 岁儿童 THUMS 假人股骨长度比值, 获得 10 岁儿童 THUMS 假人大腿力的输出截面与股骨前端的水平距离为 95 mm, 从而导出左、右大腿力 F_L 、 F_R 。

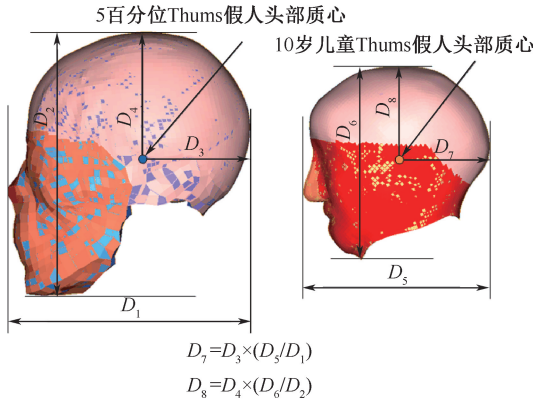


图3 10岁儿童 THUMS 假人头部质心的确定方法
Fig.3 Method for determining the head centroid coordinate of 10-year-old THUMS dummy

1.3 校车-THUMS 假人-智能气囊耦合模型

根据校车智能气囊的构成与工作机制,搭建校车-THUMS 假人-智能气囊耦合模型^[15]。具体步骤为:①在膨胀气袋的网格模型的左右两侧对称位置分别选取 3 个单元作为泄气单元,以模拟泄气阀的作用,如图 4 所示。②气袋折叠存储于收纳装置中,收纳装置固定在前排靠背的背面。收纳装置由金属制成,呈薄壁、单面开口盒状结构,其面向气袋膨胀方向开口。将前排座椅靠背的后表面设置为可变形单元;将气袋的前表面设置为刚性单元,用以模拟收纳装置的前表面;固定连接上述 2 个表面,从而完成前排座椅靠背与智能气囊的连接工作。③气袋采用 MAT34 号材料,厚度、弹性模量、泊松比与密度分别设置为 0.3 mm、 2.5×10^8 Pa、0.3 与 750 kg/m^3 。④设定充气阀的气体质量流率曲线,设定泄气阀的开启压力与开度系数分别为 1.5×10^5 MPa 和 1.0。⑤定义智能气囊的自接触刚度类型为 2;定义 10 岁儿童 THUMS 假人与智能气囊之间的双面接触刚度类型为 1。

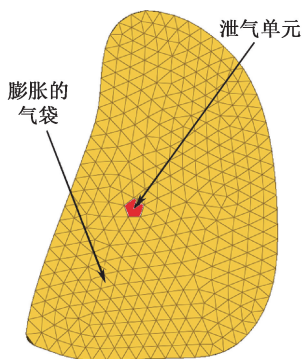


图 4 气袋的泄气单元

Fig. 4 Air bag deflation unit

2 典型离位坐姿

儿童天性活泼好动,导致儿童乘坐校车时,常处于离位坐姿,因而有必要探究当儿童处于多种离位坐姿时,智能气囊的保护功效。HAULT-DUBRULLE 等^[16]研究发现,处于前倾坐姿的儿童乘员所受伤害较为严重。BOSE 等^[17]研究表明:为获得良好的乘坐舒适性,乘员常以右倾、躺卧坐姿乘坐汽车。相对于正常坐姿(NP),选取前倾 10°坐姿(FP10)、前倾 20°坐姿(FP20)、右倾 5°坐姿(RP5)、右倾 10°坐姿(RP10)以及躺卧坐姿(SP)作为中等身材儿童乘员的 5 种典型离位坐姿。基于校车-THUMS 假人-智能气囊耦合模型中 10 岁儿童 THUMS 假人的 NP,调节 THUMS 假人的髋关节角度或躯干侧偏角,以获得 FP10、FP20、RP5、RP10;调整 THUMS 假人颈部与躯干的夹角以及髋关节、膝关节、踝关节的角度,从而获得 SP。针对 SP,THUMS 假人的臀部和下肢尽可能向前移动,以使膝盖尽可能靠近前排座椅的背面;躯干向后倾斜,使得头部、背部与后排座椅靠背相接触。所获得的 6 种坐姿如图 5 所示。

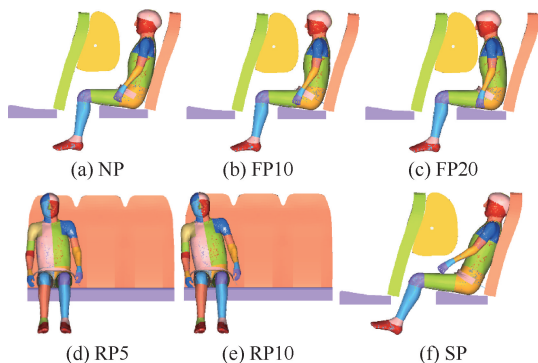


图 5 6 种坐姿

Fig. 5 Six sitting postures

3 改进型 NSGA-III

基于 NSGA-III,提出自适应传播因子、引入高斯

变异算子、融合粒子群进化机制以及改变非支配排序方法,从而提出改进型 NSGA-III。

3.1 自适应传播因子

自适应传播因子包括自适应交叉传播因子 β_c 与自适应变异传播因子 δ_m ,如下式:

$$u_c = u_c^{\max} - (u_c^{\max} - u_c^{\min}) \frac{I}{G_{\max}} \quad (1)$$

$$\beta_c = \begin{cases} (2u_c)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & \text{if } u_c \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2-2u_c}\right)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & \text{if } u_c > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

$$\varphi_c = \beta_c \varphi_p \quad (3)$$

式中: u_c 为交叉随机数; $u_c^{\max}$ 、 $u_c^{\min}$ 分别为 u_c 的最大值与最小值; I 为当前迭代次数; $G_{\max}$ 为最大迭代次数; η_c 为交叉分布指数; φ_p 为父代个体之间的最大距离; φ_q 子代个体之间的最大距离。

$$u_m = u_m^{\max} - (u_m^{\max} - u_m^{\min}) \frac{I}{G_{\max}} \quad (4)$$

$$\delta_m = \begin{cases} \left\{ 2u_m + [1 - 2u_m][1 - (p_i - l_i)/(u_i - l_i)]^{\frac{1}{\eta_m+1}} - 1, \right. \\ \quad \text{if } u_m \leq 0.5 \\ 1 - \{2[1 - u_m] + 2[u_m - 0.5][1 - (u_i - p_i)/(u_i - l_i)]^{\frac{1}{\eta_m+1}}\}, \\ \quad \text{if } u_m > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

$$q_i = p_i + \delta_m(u_i - l_i) \quad (6)$$

式中: u_m 为变异随机数; $u_m^{\max}$ 、 $u_m^{\min}$ 分别为 u_m 的最大值与最小值; η_m 为变异分布指数; p_i 为父代种群个体; q_i 为子代种群个体; u_i 与 l_i 分别为 p_i 的最大值与最小值。

自适应传播因子促使迭代前期种群进化速度加快,迭代后期保持父代种群与子代种群之间较高的相似度。 u_c 、 u_m 是随着种群迭代次数增加而减小的 0~1 之间的随机数。在种群迭代前期, u_c 较大,导致 β_c 较大,且 φ_q 大于 φ_p ;同时, u_m 较大,导致 δ_m 较大,且 q_i 与 p_i 的相似度较低;从而使得交叉与变异产生的子代种群与父代种群之间的相似度较低,以增强全局最优搜索能力,避免种群陷入局部最优的现象,加快种群进化速度。反之,在种群迭代后期, u_c 较小,导致 β_c 较小,且 φ_q 小于 φ_p ;同时, u_m 较小,导致 δ_m 较小,且 q_i 与 p_i 的相似度较高;从而使得交

叉与变异产生的子代种群与父代种群之间的相似度较高,以避免优良个体丢失,提升算法的收敛性。

3.2 高斯变异算子

NSGA-III 中,原有变异算子通过多项式分布生成一个变异值,叠加该变异值与父代种群中个体的基因值,从而实现染色体的变异,生成子代种群。高斯变异主要搜索原始个体周围的某个局部区域,利用标准正态分布的一个随机数替代原有的基因值。改进型 NSGA-III 中,引入高斯变异算子,基于父代种群中的个体,按照标准正态分布随机生成一个变异值,将该变异值添加到父代种群中,从而获得子代种群个体。

3.3 粒子群进化机制

改进型 NSGA-III 中,基于粒子群进化机制,增加子代种群数,以提高全局最优搜索能力。父代种群个体位置与全局最优位置之间的距离和方向,如下式。子代种群中个体的位置 X_i^{t+1} 由父代种群中个体的位置 X_i^t 与子代种群中个体的速度 V_i^{t+1} 构成,如下式:

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1r_1(P_i^t - X_i^t) + c_2r_2(\beta^t - X_i^t) \quad (7)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (8)$$

式中: X_i^{t+1} 为子代种群中个体的位置; X_i^t 为父代种群中个体的位置; V_i^{t+1} 为子代种群中个体的速度; w 为惯性权重; V_i^t 为父代种群中个体的速度; $c_1=1$, $c_2=1$; r_1 和 r_2 为 0~1 之间的随机数; P_i^t 、 β^t 为个体、全局最优位置。

3.4 非支配排序方法

传统非支配排序方法存在等级划分不明显的现象,如个体 i 和个体 j 的目标值同时比个体 h 的目标值小,但个体 i 的目标值远小于个体 j 的目标值,此时个体 h 支配个体 i 和个体 j 的次数相同,这导致 NSGA-III 过低的选择压力。

改进型 NSGA-III 改变了非支配排序方法,具体步骤为:①基于自适应传播因子生成的子代种群

Q_{i1} ,高斯变异算子生成的子代种群 Q_{i2} ,粒子群进化机制生成的子代种群 Q_{i3} ,合并 3 个子代种群($Q_i = Q_{i1} \cup Q_{i2} \cup Q_{i3}$);②合并父代种群和子代种群($R_i = P_i \cup Q_i$);③比较合并后的种群个体,若个体 i 任意一个目标值比个体 j 的 $1/g$ 倍还小,且个体 i 的所有目标值不大于个体 j 的所有目标值,如下式,那么个体 i 支配个体 j 的次数为 g ;④依次计算所有个体的被支配次数,根据被支配次数,由小至大获得非支配排序等级。此方法优点是靠前的等级中优良个体数量更多,能更加高效选择临界层中的个体。

$$F(x_{i*}) < F(x_{j*})/M, M > 1 \quad (9)$$

$$F(x_i) \leq F(x_j), M > 1 \quad (10)$$

式中: $F(x_{i*})$ 、 $F(x_{j*})$ 分别为个体 i 与 j 的任意一个目标值; $F(x_i)$ 、 $F(x_j)$ 分别为个体 i 与 j 的所有目标值; M 为常数。

3.5 改进型 NSGA-III 的优化性能测试

为验证改进型 NSGA-III 的优化性能,利用标准测试函数 DTLZ 系列 (DTLZ1-4 和 SDTLZ1-2),将其与基于距离更新策略与目标分解的多目标优化算法 (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition with a distance-based updating strategy, MOEAD-DU)、基于 R_2 指标的多目标元启发式算法 (Many-Objective Metaheuristic Based on the R^2 Indicator, MOMBI-II) 和 NSGA-III 进行对比分析。采用反向世代距离 (Inverted Generation Distance, IGD) 作为评价指标,IGD 越小,算法收敛性与多样性越好。为避免偶然性,改进型 NSGA-III 与其他 3 种算法在测试函数中独立运行 30 次,以获得 IGD 的均值与标准差,采用 Wilcoxon 秩和检验方法比较计算结果,见表 1。表 1 中,+、-、 $\approx$ 分别表示其他 3 种算法的性能显著优于、显著劣于、相似改进型 NSGA-III;“粗体”表示 IGD 的最优值,其中,IGD 的优劣性依据其均值而定;第 3—第 6 列中,左侧数值为 IGD 均值,右侧括号内数值为 IGD 标准差。

表 1 DTLZ 测试函数下改进型 NSGA-III 与其他算法的 IGD 均值与标准差

Table 1 IGD mean and standard deviation of improved NSGA-III and other algorithms under DTLZ

测试函数	目标	MOEAD-DU	MOMBI-II	NSGA-III	改进型 NSGA-III
DTLZ1	3	2.066 2×10 ⁻² (8.17×10 ⁻⁵) -	2.084 6×10 ⁻² (1.66×10 ⁻⁴) -	2.065 5×10 ⁻² (1.03×10 ⁻⁴) -	2.055 6×10⁻² (1.23×10⁻⁶)
	5	7.024 5×10 ⁻² (5.87×10 ⁻⁴) -	8.586 8×10 ⁻² (3.20×10 ⁻²) -	6.828 2×10 ⁻² (2.49×10 ⁻⁴) -	5.272 7×10⁻² (4.93×10⁻⁵)
	8	1.093 0×10 ⁻¹ (1.69×10 ⁻³) -	2.725 0×10 ⁻¹ (2.31×10 ⁻²) -	1.244 5×10 ⁻¹ (4.08×10 ⁻²) -	1.057 8×10⁻¹ (1.63×10⁻²)
	10	1.149 3×10 ⁻¹ (6.92×10 ⁻⁴) -	2.039 4×10 ⁻¹ (3.74×10 ⁻²) -	1.111 3×10⁻¹ (6.60×10⁻³) $\approx$	1.139 6×10 ⁻¹ (1.65×10 ⁻²)
	15	2.098 2×10 ⁻¹ (1.60×10 ⁻²) -	2.704 4×10 ⁻¹ (1.59×10 ⁻²) -	1.863 1×10⁻¹ (1.46×10⁻²) $\approx$	1.904 7×10 ⁻¹ (2.08×10 ⁻²)

续表 1

测试函数	目标	MOEAD-DU	MOMBI-II	NSGA-III	改进型 NSGA-III
DTLZ2	3	$5.585\ 5\times10^{-2}(6.17\times10^{-4})-$	$5.504\ 6\times10^{-2}(2.73\times10^{-4})-$	$5.448\ 4\times10^{-2}(1.01\times10^{-5})-$	$5.447\ 0\times10^{-2}(2.20\times10^{-5})$
	5	$2.216\ 2\times10^{-1}(1.74\times10^{-3})-$	$2.184\ 5\times10^{-1}(1.46\times10^{-3})-$	$2.123\ 0\times10^{-1}(5.74\times10^{-5})-$	$1.651\ 1\times10^{-1}(2.63\times10^{-5})$
	8	$3.899\ 8\times10^{-1}(1.59\times10^{-3})-$	$4.610\ 1\times10^{-1}(1.09\times10^{-1})-$	$4.366\ 8\times10^{-1}(7.85\times10^{-2})-$	$3.229\ 2\times10^{-1}(3.84\times10^{-2})$
	10	$4.314\ 0\times10^{-1}(8.69\times10^{-4})+$	$4.376\ 0\times10^{-1}(5.59\times10^{-3})-$	$4.224\ 3\times10^{-1}(9.30\times10^{-3})\approx$	$4.321\ 2\times10^{-1}(3.64\times10^{-2})$
	15	$6.369\ 8\times10^{-1}(1.24\times10^{-2})\approx$	$8.562\ 9\times10^{-1}(8.33\times10^{-2})-$	$6.412\ 5\times10^{-1}(2.03\times10^{-2})\approx$	$6.400\ 0\times10^{-1}(1.81\times10^{-2})$
DTLZ3	3	$5.482\ 4\times10^{-2}(2.84\times10^{-4})-$	$5.485\ 8\times10^{-2}(3.43\times10^{-4})-$	$5.462\ 5\times10^{-2}(1.72\times10^{-4})-$	$5.446\ 4\times10^{-2}(7.20\times10^{-7})$
	5	$2.210\ 2\times10^{-1}(2.18\times10^{-3})-$	$2.217\ 5\times10^{-1}(2.37\times10^{-2})-$	$2.130\ 3\times10^{-1}(5.42\times10^{-4})-$	$1.652\ 0\times10^{-1}(7.36\times10^{-5})$
	8	$3.932\ 2\times10^{-1}(1.50\times10^{-3})+$	$8.937\ 4\times10^{-1}(4.04\times10^{-2})-$	$6.816\ 6\times10^{-1}(6.60\times10^{-1})-$	$5.733\ 0\times10^{-1}(6.53\times10^{-1})$
	10	$4.307\ 2\times10^{-1}(7.21\times10^{-4})+$	$6.116\ 7\times10^{-1}(1.37\times10^{-1})-$	$4.802\ 2\times10^{-1}(8.20\times10^{-2})+$	$5.035\ 1\times10^{-1}(1.23\times10^{-1})$
	15	$6.300\ 0\times10^{-1}(1.34\times10^{-3})+$	$1.037\ 1\times10^0(2.39\times10^{-2})-$	$1.019\ 0\times10^0(7.49\times10^{-2})-$	$7.313\ 5\times10^{-1}(6.33\times10^{-2})$
DTLZ4	3	$5.461\ 5\times10^{-2}(7.11\times10^{-5})-$	$7.181\ 2\times10^{-2}(8.88\times10^{-2})-$	$1.491\ 2\times10^{-1}(2.26\times10^{-1})-$	$5.446\ 5\times10^{-2}(2.05\times10^{-6})$
	5	$2.173\ 5\times10^{-1}(1.31\times10^{-3})-$	$2.956\ 5\times10^{-1}(1.17\times10^{-1})-$	$3.144\ 6\times10^{-1}(1.20\times10^{-1})-$	$1.651\ 2\times10^{-1}(1.13\times10^{-5})$
	8	$4.493\ 0\times10^{-1}(5.90\times10^{-2})-$	$5.196\ 4\times10^{-1}(1.03\times10^{-1})-$	$4.887\ 4\times10^{-1}(8.95\times10^{-2})-$	$3.151\ 2\times10^{-1}(1.08\times10^{-4})$
	10	$4.324\ 4\times10^{-1}(1.77\times10^{-3})-$	$4.523\ 5\times10^{-1}(5.33\times10^{-4})-$	$4.287\ 6\times10^{-1}(2.98\times10^{-2})-$	$4.204\ 5\times10^{-1}(2.86\times10^{-4})$
	15	$6.318\ 6\times10^{-1}(5.09\times10^{-3})-$	$6.480\ 0\times10^{-1}(1.19\times10^{-2})-$	$6.417\ 5\times10^{-1}(1.87\times10^{-2})-$	$6.228\ 3\times10^{-1}(7.09\times10^{-3})$
SDTLZ1	3	$5.623\ 8\times10^{-2}(6.61\times10^{-4})-$	$5.234\ 7\times10^{-2}(4.47\times10^{-4})-$	$5.173\ 9\times10^{-2}(2.66\times10^{-4})-$	$5.148\ 2\times10^{-2}(2.79\times10^{-6})$
	5	$3.526\ 4\times10^{-1}(3.86\times10^{-3})+$	$3.854\ 8\times10^{-1}(2.18\times10^{-3})-$	$3.831\ 8\times10^{-1}(9.07\times10^{-4})\approx$	$3.831\ 1\times10^{-1}(4.21\times10^{-4})$
	8	$3.688\ 1\times10^0(1.11\times10^{-1})+$	$4.762\ 7\times10^0(1.44\times10^0)-$	$3.580\ 7\times10^0(7.50\times10^{-1})+$	$3.772\ 6\times10^0(9.80\times10^{-1})$
	10	$1.324\ 3\times10^1(3.06\times10^{-1})+$	$1.678\ 7\times10^1(3.11\times10^0)-$	$1.229\ 8\times10^1(1.89\times10^0)+$	$1.437\ 8\times10^1(3.17\times10^0)$
	15	$5.558\ 6\times10^2(3.73\times10^1)-$	$1.146\ 5\times10^3(5.80\times10^2)-$	$4.50\ 20\times10^2(9.46\times10^1)+$	$5.404\ 0\times10^2(9.91\times10^1)$
SDTLZ2	3	$1.420\ 2\times10^{-1}(2.13\times10^{-3})-$	$1.307\ 9\times10^{-1}(3.81\times10^{-4})-$	$1.299\ 3\times10^{-1}(6.82\times10^{-5})\approx$	$1.299\ 0\times10^{-1}(3.21\times10^{-5})$
	5	$1.047\ 8\times10^0(9.83\times10^{-3})-$	$9.854\ 9\times10^{-1}(4.37\times10^{-3})\approx$	$9.854\ 5\times10^{-1}(8.22\times10^{-4})\approx$	$9.858\ 2\times10^{-1}(1.83\times10^{-3})$
	8	$1.143\ 1\times10^1(2.66\times10^{-1})-$	$1.060\ 1\times10^1(1.39\times10^{-1})+$	$1.052\ 6\times10^1(4.03\times10^{-1})+$	$1.136\ 6\times10^1(2.80\times10^0)$
	10	$4.250\ 7\times10^1(8.25\times10^{-1})-$	$4.000\ 0\times10^1(8.42\times10^{-1})+$	$3.971\ 8\times10^1(3.07\times10^0)-$	$3.950\ 0\times10^1(2.02\times10^{-1})$
	15	$2.016\ 6\times10^3(7.98\times10^1)-$	$2.787\ 1\times10^3(7.26\times10^2)-$	$1.580\ 5\times10^3(2.10\times10^2)-$	$1.559\ 7\times10^3(1.91\times10^2)$
+/-/≈	—	7/22/1	2/27/1	5/18/7	—

DTLZ1 和 DTLZ2 的测试结果表明:改进型 NSGA-III 在 3、5 和 8 目标上获得的结果显著优于其他 3 种算法,其原因是改进型 NSGA-III 提出自适应传播因子,导致在迭代前期父代种群与子代种群间的相似度过低,能够加快全局最优搜索效率;迭代后期,父代种群与子代种群间的相似度过高,能够避免优良个体的丢失。改进型 NSGA-III 在 3 和 5 目标的 DTLZ3 测试函数上获得的结果显著优于其他 3 种算法。DTLZ4 的测试结果表明:针对 3—15 目标,改进型 NSGA-III 均获得最优,其原因是改进型 NSGA-III 基于自适应传播因子、高斯变异算子、粒子群机制生成 3 个子代种群,合并后的子代种群中优良个体的数目增加,同时,自适应传播因子使得子代种群与父代种群的相似度过低,导致种群个体的分布性较好。改进型 NSGA-III 在 3 目标的 SDTLZ1 测试函数上获得的结果显著优于其他 3 种算法。NSGA-III 在 8、10 和 15 目标上获得的结果显著优于改进型 NSGA-III,其原因是改进型 NSGA-III 生成的

子代种群和个体的数目大幅增加,导致迭代前期算法的收敛性下降。改进型 NSGA-III 在 3、10 和 15 目标的 SDTLZ2 测试函数上获得的结果优于其他算法。

综上,改进型 NSGA-III 在 DTLZ1—3 和 SDTLZ1 低维目标问题、DTLZ4 全部目标问题以及 SDTLZ2 高维目标问题上表现良好。总体上,改进型 NSGA-III 的优化性能优于其他 3 种算法。

4 校车智能气囊优化设计

4.1 优化目标

选取 6 种坐姿下,中等身材儿童乘员的加权伤害指标作为优化目标。比例缩放方法广泛用于获取成人与儿童的损伤阈值,此方法具备较高的精确度^[18]。第 50 百分位成年男性的损伤阈值完整、准确,且直接由生物力学试验获得^[19]。基于比例缩放方法,依据第 50 百分位成年男性头部、胸部与腿部的损伤阈值,获得中等身材儿童的 HIC₁₅、THPC 以

及左、右大腿力 F_L 、 F_R 的阈值分别为 415.3、42.1 mm、4 550.6 N 与 4 550.6 N。祁志楠^[20]研究表明:当颅内压力大于 173 kPa 时,脑组织的损伤概率急剧上升。RUAN 等^[21]研究表明:当肝脏压力超过 251 kPa 时,肝脏会受到较为明显的伤害。因而确定中等身材儿童的颅内压力 (Intracranial Pressure, IP) 与肝脏压力 (Liver Pressure, LP) 的阈值分别为 173 与 251 kPa。基于损伤阈值,利用层次分析法提出中等身材儿童乘员的加权伤害指标 (Weighted Injury Criteria of 10-year-old Children, WICC), 如下式:

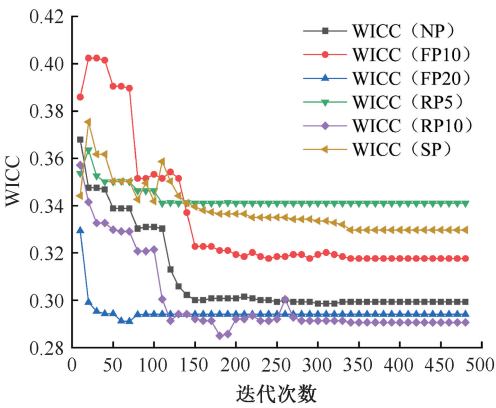
$$\begin{aligned} \text{WICC} = & 0.3 \left(\frac{\text{HIC}_{15}}{415.3} + \frac{\text{IP}}{173} \right) + 0.18 \left(\frac{\text{THPC}}{42.1} + \frac{\text{LP}}{251} \right) \\ & + 0.02 \left(\frac{F_L}{4\,550.6} + \frac{F_R}{4\,550.6} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

4.2 响应面代理模型

选取充气阀的气体质量流率比例系数 x_1 、泄气阀的开启压力 x_2 、泄气阀的开度系数 x_3 与气袋的安装点高度 x_4 作为优化参数。利用最优拉丁超立方试验方法,构建 6 个响应面代理模型。代理模型的决定系数 R^2 分别为 96.7%、97.8%、96.2%、95.3%、97.8%与 96.4%,因而代理模型具备较高的预测精度,能够代替仿真模型。

4.3 优化效果

利用改进型 NSGA-III 与熵权法,面向处于正常坐姿与 5 种典型离位坐姿的中等身材儿童乘员的安全性,开展智能气囊的优化设计。改进型 NSGA-III 的迭代过程如图 6 所示。



注:WICC (NP)、WICC (FP10)、WICC (FP20)、WICC (RP5)、WICC (RP10)与 WICC (SP)分别为当中等身材儿童乘员处于正常、前倾 10°、前倾 20°、右倾 5°、右倾 10°及躺卧坐姿时,儿童加权伤害指标。

图 6 改进型 NSGA-III 迭代过程

Fig. 6 Iteration figure of improved NSGA-III

优化参数初始值与最优值的对比见表 2。NP、FP10、FP20、RP5、RP10、SP 坐姿下,原工况、优化前和优化后,中等身材儿童头部、胸部与腿部损伤指标见表 3。表 3 中,原工况代表未安装智能气囊的工况;变化率 1 代表相对于原工况,优化后儿童损伤指标的变化情况;变化率 2 代表相对于优化前,优化后儿童损伤指标的变化情况。

表 2 优化参数的初始值与最优值

Table 2 Initial and optimal values of parameters		
优化参数	初始值	最优值
x_1	1.0	1.23
x_2/Pa	1.50×10^5	1.37×10^5
x_3	1.00	2.10
x_4/mm	460	478

表 3 6 种坐姿下中等身材儿童头部、胸部与腿部损伤指标

Table 3 Injury criteria of head, thorax and femurs of middle-sized children under six sitting postures							
儿童坐姿	HIC ₁₅	IP/kPa	THPC/mm	LP/kPa	F_L/N	F_R/N	WICC
NP(原工况)	807.38	372.9	2.81	198.0	474.55	477.68	1.3881
NP(优化前)	157.29	138.5	5.54	162.2	428.87	436.85	0.4976
NP(优化后)	51.19	90.5	1.70	132.7	379.27	390.65	0.2997
变化率 1/%	-93.66	-75.73	-39.50	-32.98	-20.08	-18.22	-78.41
变化率 2/%	-67.46	-34.66	-69.31	-18.19	-11.57	-10.58	-39.77
FP10(原工况)	754.25	293.9	1.04	151.6	459.92	462.98	1.1717
FP10(优化前)	75.88	144.1	3.60	125.8	420.11	414.50	0.4140
FP10(优化后)	26.18	108.7	4.95	122.4	377.51	368.91	0.3196
变化率 1/%	-96.53	-63.01	+375.96	-19.26	-17.92	-20.32	-72.72
变化率 2/%	-65.50	-24.57	+37.50	-2.70	-10.14	-11.00	-22.80
FP20(原工况)	501.12	242.2	2.85	230.4	442.75	450.52	0.9633
FP20(优化前)	30.17	129.7	10.87	135.5	406.12	401.47	0.3939
FP20(优化后)	14.49	90.5	11.28	101.8	356.12	358.81	0.2918

续表 3

儿童坐姿	HIC ₁₅	IP/kPa	THPC/mm	LP/kPa	F _L /N	F _R /N	WICC
变化率 1/%	-97. 11	-62. 63	+295. 79	-55. 82	-19. 57	-20. 36	-69. 71
变化率 2/%	-51. 97	-30. 22	+3. 77	-24. 87	-12. 31	-10. 63	-25. 92
RP5(原工况)	477. 99	326. 8	1. 34	140. 9	467. 74	451. 71	1. 0228
RP5(优化前)	198. 01	158. 2	6. 22	148. 6	412. 64	422. 29	0. 5542
RP5(优化后)	69. 24	107. 3	0. 67	137. 5	367. 68	371. 49	0. 3408
变化率 1/%	-85. 51	-67. 17	-50. 00	-2. 41	-21. 39	-17. 76	-66. 68
变化率 2/%	-65. 03	-32. 17	-89. 23	-7. 47	-10. 90	-12. 03	-38. 51
RP10(原工况)	450. 91	327. 8	2. 37	324. 7	492. 61	424. 51	1. 1412
RP10(优化前)	138. 79	154. 6	4. 19	147. 5	430. 15	408. 95	0. 4958
RP10(优化后)	36. 53	94. 3	0	136. 5	386. 71	369. 90	0. 2911
变化率 1/%	-91. 90	-71. 23	-100. 00	-57. 96	-21. 50	-12. 86	-74. 49
变化率 2/%	-73. 68	-39. 00	-100. 00	-7. 46	-10. 10	-9. 55	-41. 29
SP(原工况)	598. 67	291. 4	0	166. 5	413. 41	427. 02	1. 0609
SP(优化前)	167. 28	128. 3	7. 78	184. 8	389. 80	397. 52	0. 5123
SP(优化后)	97. 08	97. 0	2. 08	110. 0	349. 45	350. 20	0. 3292
变化率 1/%	-83. 78	-66. 71	N/A	-33. 93	-15. 47	-17. 99	-68. 97
变化率 2/%	-41. 97	-24. 40	-73. 26	-40. 48	-10. 35	-11. 90	-35. 74

由表 3 可知:相比于未安装智能气囊的原工况,当智能气囊优化后,中等身材儿童的 HIC₁₅、IP、LP、F_L、F_R、WICC 均显著降低,表明智能气囊的保护效果明显。NP、FP10、FP20、RP5、RP10 与 SP 这 6 种坐姿下,相比于优化前、优化后中等身材儿童的 HIC₁₅ 的下降幅度分别为 67.46%、65.50%、51.97%、65.03%、73.68%与 41.97%;IP 的下降幅度分别为 34.66%、24.57%、30.22%、32.17%、39.00%与 24.40%。优化后的 HIC₁₅ 与 IP 显著下降的原因是:当儿童头部接触气袋后,优化后的气袋对头部前冲能量的吸能效果越发明显,从而显著降低头部的前冲能量。6 种坐姿下,相比于优化前,优化后的 F_L 与 F_R 均显著降低,其原因是:优化后的气袋对头部、胸部前冲能量的吸能效果越发明显,从而当膝盖与前排座椅靠背接触时,腿部的前冲能量已明显降低,导致靠背对大腿骨的反作用力下降。此外,优化后的 IP 与 LP 远低于中等身材儿童对应的阈值 173 与 251 kPa;随着头部、胸部与腿部损伤指标的下降,加权伤害指标 WICC 随之降低,6 种坐姿下 WICC 的优化效果分别为 39.77%、22.80%、25.92%、38.51%、41.29%与 35.74%。表明智能气囊的优化效果明显。

基于简明损伤定级标准 (Abbreviated Injury Scale, AIS),中等身材儿童头部、腿部受到中等以上伤害概率的表达式如下:

$$P_H(AIS \geq 2) =$$

$$1 + \exp \left[\left(2.49 + \frac{200}{HIC_{15}} \right) - 0.004\ 83HIC_{15} \right]$$

(12)

$$P_L(AIS \geq 2) = 0.007\ 7F_L$$

(13)

$$P_R(AIS \geq 2) = 0.007\ 7F_R$$

(14)

NP、RP5、RP10 与 SP 下,相比于优化前,优化后中等身材儿童头部受到中等以上伤害的概率分别下降 95.62%、91.23%、98.88%与 68.81%;FP10 与 RP5,优化后头部受到中等以上伤害的概率为 0。所有坐姿下,相比于优化前,优化后左、右大腿受到中等以上伤害的概率分别至少下降 9.91%与 9.52%。表明优化后的智能气囊对头部、腿部的实际保护效果显著。

由表 3 可知:当儿童分别处于 FP10 与 FP20 时,相比于原工况,优化后的胸部压缩量 THPC 分别上升 375.96%与 295.79%,但此时 THPC 远小于中等身材儿童对应的阈值 42.1 mm,THPC 上升的原因是:①原工况中,靠背后表面未安装智能气囊,在校车正面碰撞中,儿童胸部未受到气袋的挤压力作用,导致 THPC 较低。②安装智能气囊后,气袋约束儿童胸部的前冲运动,并对胸部产生较大的挤压力,导致 THPC 较高。相比于优化前,优化后的 THPC 有所升高,其原因是相比于优化前,优化后的气袋安装点高度升高,导致儿童胸部恰好与气袋曲率较大的区域接触,此区域的内部压力与刚度较大,致使气袋对胸部前冲能量的缓冲效果不佳,胸部受到较大

的挤压力,因而 THPC 上升。当儿童分别处于 RP10 与 SP 时,THPC 存在为 0 的现象。THPC 为 0 的原因可能是在碰撞中,THUMS 假人的胸腔始终处于向外扩张状态,胸骨和第 4 根肋骨相连区域的中心节点与第 9 块胸椎的棘突末端节点之间的距离相比于碰撞前有所增大,因此,文中 THPC 记为 0。先前利用多刚体假人研究 THPC 的文献中,未出现此现象^[22-23]。

5 结 论

1) 确立 10 岁儿童 THUMS 假人头部、胸部与腿部损伤指标的输出方法;决选前倾 10 和 20°、右倾 5 和 10°及躺卧坐姿作为 5 种典型离位坐姿;提出中等身材儿童乘员的加权伤害指标;为增强中等身材儿童乘车安全性提供基础条件与研究目标。

2) 基于 NSGA-III,提出自适应传播因子、引入高斯变异算子、融合粒子群进化机制、改变非支配排序方法,进而提出改进型 NSGA-III;改进型 NSGA-III

具备良好的收敛性与多样性,为智能气囊的优化设计提供研究方法。

3) 当校车智能气囊充气阀的气体质量流率比例系数、泄气阀的开启压力和开度系数以及气囊的安装点高度分别为 1.23、 1.37×10^5 Pa、2.10 以及 478 mm 时,儿童乘员的损伤风险显著下降,优化效果明显。

4) 仅利用 10 岁儿童 THUMS 假人,研究优化后的校车智能气囊对中等身材儿童乘员的保护效果。由于儿童身材分布方差较大,今后将在合理范围内,缩放 10 岁儿童 THUMS 假人的身高与体重,以探究儿童身材对优化结果的影响。利用改进型 NSGA-III 仅解决单个优化问题,今后将针对处于多种坐姿的 6 岁小身材儿童或 14 岁大身材儿童的乘车安全性,利用改进型 NSGA-III,开展智能气囊的优化设计,以进一步探析改进型 NSGA-III 在实际应用中的可扩展性和稳定性。

参 考 文 献

- [1] PENG Qian, SUN Tingting, ZHU Pengpeng, et al. Occupant injury risk assessment and protective measures in frontal collision of a bus[J]. International Journal of Crashworthiness, 2019, 24(4): 429-441.
- [2] ANDERSON D M, SANDHOLT S. Are booster seats more effective than child safety seats or seat belts at reducing traffic fatalities among children? [J]. American Journal of Health Economics, 2019, 5(1): 42-64.
- [3] BOHMAN K, ARBOGAST K B, LOEB H, et al. Frontal and oblique crash tests of HIII 6-year-old child ATD using real-world, observed child passenger postures[J]. Traffic Injury Prevent, 2018, 19(S1): 125-130.
- [4] 唐灿, 李平飞, 黄海波, 等. 汽车正面碰撞中驾驶人坐姿对其损伤影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 54-58.
TANG Can, LI Pingfei, HUANG Haibo, et al. Research on effect of posture on injury to driver in frontal collision[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 54-58.
- [5] BENDJABALLAH D, BOUCHOUCHA A, SAHLI M L, et al. Numerical modelling and experimental analysis of the passenger side airbag deployment in out-of-position [J]. International Journal of Crashworthiness, 2017, 22(5): 527-540.
- [6] 葛如海, 赵越, 应龙. 校车 3 点式安全带肩带固定点位置优化[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 40-45.
GE Ruhai, ZHAO Yue, YING Long. Optimization of upper effective fixed point position for school bus three-point safety belt[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(3): 40-45.
- [7] HONG Liang, LIU Peng, LIU Gang, et al. Optimal design of continuously inflated airbags for 12-year-old child occupants with various sitting postures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2024, 238(7): 1 807-1 829.
- [8] YOGANANDAN N, HUMM J, GREENHALGH P, et al. Lower neck injury criteria for THOR and Hybrid III dummies in rear impact[J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21(S1): 176-178.
- [9] RIDELLA S A, BOJANOWSKI C. Comparison of response variation of THOR and Hybrid III dummy models in a controlled rollover impact model[J]. International Journal of Crashworthiness, 2017, 23(5): 549-560.
- [10] LIU Jiajie, WANG Weiping, LI Xiaobo, et al. Solving a multi-objective mission planning problem for UAV swarms with an improved NSGA-III algorithm [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2018, 11(1):

1 067-1 081.

- [11] CUI Zhihua, CHANG Yu, ZHANG Jiangjiang, et al. Improved NSGA-III with selection-and-elimination operator[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 49: 23-33.
- [12] DUARTE M R G, DUDDECK F, RAPONI E, et al. Pedestrian safety assessments via full human body models and advanced injury criteria[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(1): DOI:1007/s40430-022-03929-6.
- [13] SYBILSKI K, MAZURKIEWICZ Ł, JURKOJC J, et al. Evaluation of the effect of muscle forces implementation on the behavior of a dummy during a head-on collision[J]. Acta of Bioengineering and Biomechanics, 2021, 23(4): 1-21.
- [14] 武和全, 周惠来, 李羿辉, 等. 汽车正面碰撞中后排不同坐姿乘员损伤生物力学分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(6): 688-697.
WU Hequan, ZHOU Huilai, LI Yihui, et al. Biomechanical analysis of occupant damage in different sitting positions in the rear seat in a frontal collision[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2023, 14(6): 688-697.
- [15] HUANG Yuan, HUANG Yi, JI Peijun, et al. Re-optimisation of occupant restraint system for Chinese statures by reducing airbag inflator power[J]. International Journal of Vehicle Design, 2018, 77: 67-86.
- [16] HAULT-DUBRULLE A, ROBACHE F, PACAUX M P, et al. Determination of pre-impact occupant postures and analysis of consequences on injury outcome: part I: a driving simulator study[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(1): 66-74.
- [17] BOSE D, CRANDALL J R, UNTAROIU C D, et al. Influence of pre-collision occupant parameters on injury outcome in a frontal collision[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(4): 1 398-1 407.
- [18] YOGANANDAN N, BASS C R, VOO L, et al. Male and female cervical spine biomechanics and anatomy: implication for scaling injury criteria[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2017, 139: DOI:10.1115/1.4036313.
- [19] TANNOUS R, EPPINGER R, SUN E, et al. Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems-II[R]. National Highway Traffic Safety Administration, 1999.
- [20] 祁志楠. 基于 THUMS 模型低速碰撞气囊标定策略研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
QI Zhihan. Study on the calibration strategy of airbag based on the THUMS model in low-speed impact [D]. Zhengzhou: Hebei University of Technology, 2016.
- [21] RUAN J, EL-JAWAHRI R, CHAI L, et al. Prediction and analysis of human thoracic impact responses and injuries in cadaver impacts using a full human body finite element model[J]. Stapp Car Crash Journal, 2003, 47: 299-321.
- [22] MIZUNO K, NEZAKI S, ITO D. Comparison of chest injury measures of hybrid III dummy[J]. International Journal of Crashworthiness, 2017, 22(1): 38-48.
- [23] LIM J M. A method for predicting HIC₁₅, chest G's and chest deflection based on results of USNCAP frontal impact tests [J]. International Journal of Crashworthiness, 2021, 22(3): 657-663.



作者简介: 洪亮 (1986—),男,江苏镇江人,博士,副教授,主要从事汽车安全与人体生物力学方面的研究。E-mail:loudly1986@126.com。