

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.001

引用格式: 谭雯霄, 贺永龙, 郭庆祥, 等. 整车多乘员约束系统参数灵敏度分析与多目标优化研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 1-8.

Citation: TAN Wenxiao, HE Yonglong, GUO Qingxiang, et al. Research on multi-objective optimization and parameter sensitivity analysis of vehicle multi-occupant restraint system[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 1-8.

整车多乘员约束系统参数灵敏度分析与 多目标优化研究

谭雯霄^{1,2}, 贺永龙¹, 郭庆祥¹, 郑艳婷¹, 刘委坤¹, 赵子开¹

(1. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300; 2. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 对某车型 100% 正面碰撞工况下整车多乘员约束系统进行参数灵敏度分析与多目标优化。搭建多乘员约束系统仿真模型并通过正面碰撞试验验证模型的准确性, 确定约束系统参数及范围; 采用最优拉丁超立方进行取样, 建立参数与各部位损伤响应的 Kriging 代理模型, 对约束系统参数进行灵敏度分析, 结果表明安全带与气囊的点火时刻对整车约束系统性能的影响最大; 采用多目标遗传算法(NSGA-II), 在代理模型的基础上对整车约束系统进行多参数多目标优化, 优化结果可使假人头部、胸部损伤满足《中国新车评价规程》(C-NCAP) 的五星要求。

关键词: 汽车; 正面碰撞; 乘员约束系统; 参数灵敏度; 多目标优化

中图分类号: U463.836

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0001-08

汽车发生碰撞事故时, 保护乘员或减轻乘员碰撞损伤的装置称为乘员约束系统, 主要由安全带、安全气囊、座椅和转向管柱等组成。由于约束系统参数众多, 在复杂的汽车碰撞工况下, 各参数与约束系统最终开发目标之间为非线性关系, 且各参数之间存在强烈的交互影响。整车约束系统是多参数非线性系统, 必须综合考虑各参数的影响, 筛选关键参数进行多目标优化。乘员约束系统参数的合理匹配可以在有效范围内将乘员伤害降到最低。约束系统的参数灵敏度分析与参数优化是整车安全性能开发的关键环节之一。

Dubois D. 等将多目标优化软件与多刚体动力学分析软件(Mathematical Dynamic Model, MADYMO) 进行耦合建模, 研究安全带的预紧性能, 结果表明预紧参数合理匹配可以降低碰撞中乘员胸部压缩量^[1]。Chen G. F. 等对自适应吸能管柱进行研究, 发现通过优化乘员约束系统参数匹配值能实现对男女乘员较好的碰撞保护效果^[2]。Fu Y. 将鲁棒性设计方法应用于约束系统的匹配优化, 达到了较好的优化效果^[3]。白中浩等利用 Isight 优化软件进行试验设计, 并利用响应面法建立近似模型, 根据优化数据提出了儿童约束系统匹配方法^[4]。张学荣等利用

试验设计(Design of Experiment, DOE)对某乘用车乘员约束系统参数进行了优化, 同时对其稳健性进行了分析^[5]。雷刚等结合试验设计、近似代理模型技术和自适应响应面法, 利用多目标优化软件 Hyperstudy 优化乘员约束系统, 在保证优化精度的前提下加权伤害指数(Weighed Injury Criterion, WIC)下降 24.37%^[6]。蒋小晴等对正面碰撞下约束系统对乘员胸部的保护性进行研究, 采用正交试验设计和多目标遗传算法优化了某车型的约束系统, 提高了该车在《中国新车评价规程》(C-NCAP) 正面 100% 刚性壁碰撞中的胸部得分^[7]。杨琦通过正交试验对乘员约束系统结构性能参数进行匹配设计, 利用近似模型代替有限元仿真模型, 对乘员约束系统进行了优化^[8]。目前研究大多针对单一乘员在多工况下约束系统参数灵敏度分析与多目标优化, 将整车约束系统视为整体进行优化的研究不多见。本文以某车型驾驶员、乘员与后排乘员约束系统为研究目标, 建立该车型在 100% 正面碰撞工况下整车约束系统仿真模型, 利用 Kriging 代理模型对该车型整体约束系统参数进行灵敏度分析, 筛选敏感参数, 在此基础上采用多目标遗传算法(NSGA-II) 对整车约束系统进行多目标多参数优化, 研究多乘员

约束系统参数最佳匹配方式。

1 整车约束系统模型的建立与验证

1.1 约束系统模型的建立

运用 MADYMO 软件搭建正面碰撞整车约束系统模型,该模型主要由车体模型、假人模型和约束系统模型组成。其中:车体模型主要包括风窗、A 柱、地板、防火墙等结构;假人模型包括前排两个 50 百分位男性假人和后排 5 百分位女性假人;约束系统模型主要包括安全带模型、安全气囊模型、座椅模型、转向管柱模型等。

假人模型采用 MADYMO 软件中 d_hyb350el_Q_inc.xml 假人(混三 50 百分位男性假人文件)和 d_hyb305el_Q_inc.xml 假人(混三 5 百分位女性假人文件),根据试验测量所得车身参考点、假人 H 点和假人空间尺寸,通过单元 INITIAL.JOINT. POS 对假人模型各铰链的相对位置和角度进行调整,使其与正面碰撞试验假人摆放位置尽量贴合。

驾驶员、前排乘员与后排女性乘员安全带模型均采用混合法建立,安全带与假人胸部、腹部接触的

部分为有限元单元,安全带与车体接触的部分用多体(MB)安全带模型连接。模型中共包含两个安全气囊,分别为驾驶员侧气囊 DAB 和乘员侧气囊 PAB。图 1 为整车约束系统仿真模型。

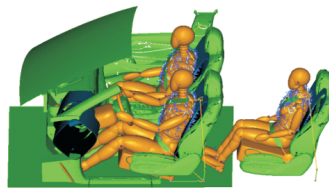


图 1 整车多乘员正面碰撞约束系统仿真模型

1.2 约束系统模型的验证

约束系统模型计算结果输出的驾驶员头部和胸部损伤响应与试验结果对比见图 2,驾驶员运动姿态与正面碰撞试验过程中假人姿态对比见图 3,取 60 ms 与 120 ms 运动姿态进行对比。前排乘员头部和胸部损伤响应与试验结果对比见图 4,运动姿态与试验过程中假人姿态对比见图 5。后排女性乘员的损伤响应与试验结果对比见图 6,运动姿态与试验过程中假人姿态对比见图 7。

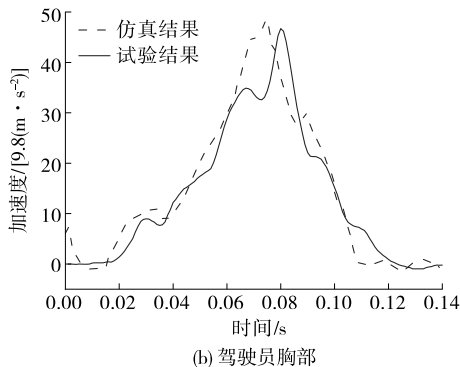
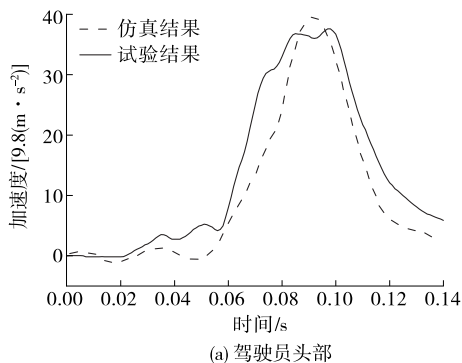


图 2 驾驶员头部和胸部加速度仿真结果与试验结果对比

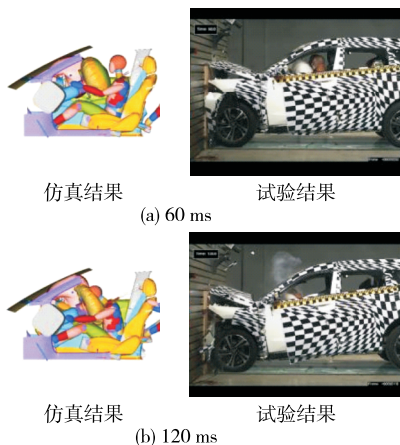


图 3 60 ms、120 ms 时驾驶员运动姿态仿真结果与试验结果对比

假人运动损伤与运动行程是碰撞分析的基础^[9]。从图 2~7 可以得出:仿真模型假人运动姿态与实车试验一致,车内乘员关键部位损伤响应拟合率达到 85%,且变化趋势一致,假人运动姿态吻合,模型符合要求,可以用于后续研究。

2 整车约束系统参数灵敏度分析

2.1 参数选择

在正面碰撞中,影响乘员伤害的约束系统因素有很多,各因素存在于约束系统的各子系统中。选取在安全带子系统、座椅子系统和安全气囊子系统中对乘员损伤有影响的 15 个参数,这些参数的初始值和取值范围见表 1。

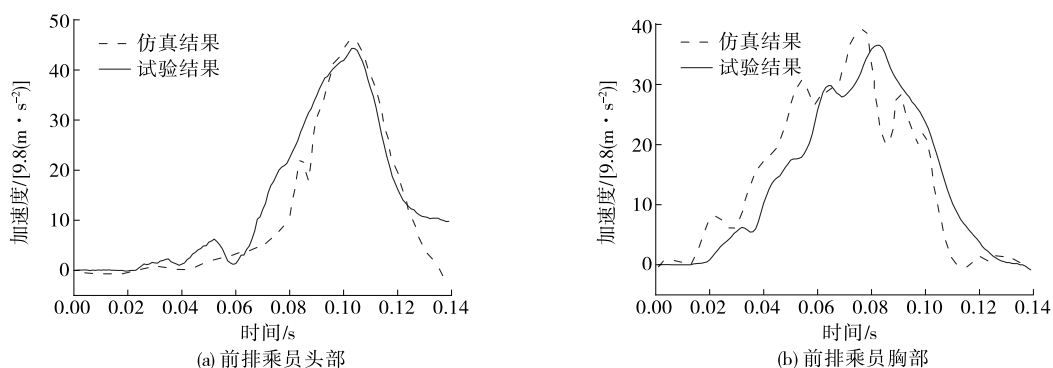


图 4 前排乘员头部和胸部加速度仿真结果与试验结果对比

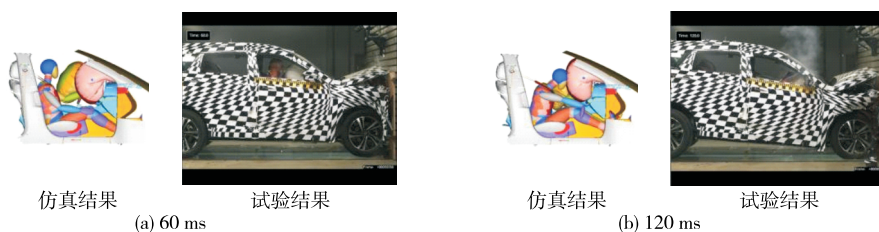


图 5 60 ms、120 ms 时前排乘员运动姿态仿真结果与试验结果对比

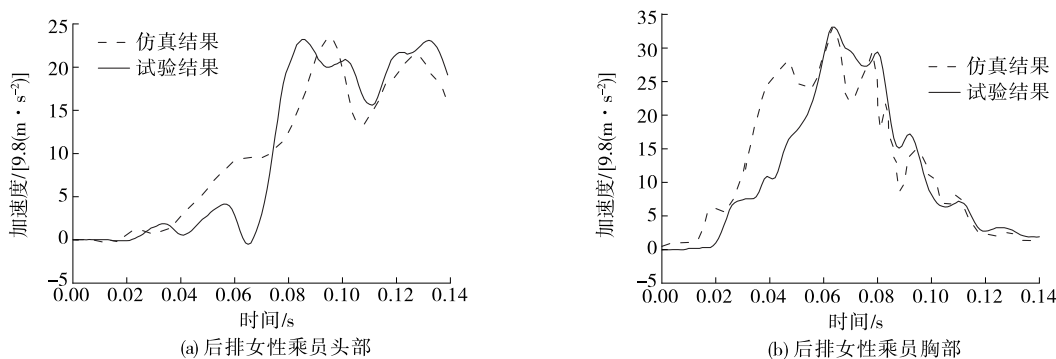


图 6 后排女性乘员头部和胸部加速度仿真结果与试验结果对比

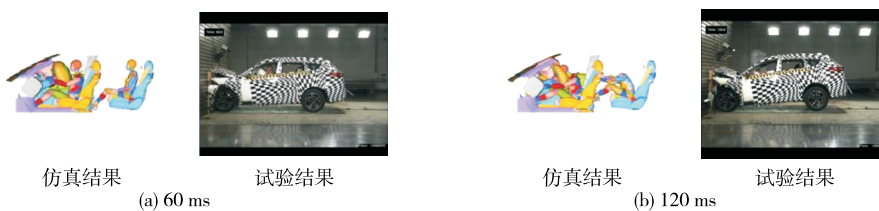


图 7 60 ms、120 ms 时后排女性乘员运动姿态仿真结果与试验结果对比

2.2 试验设计

根据表 1 中试验因素及取值范围,利用 Isight 软件中 DOE 模块建立试验设计方案,选取最优拉丁超立方设计方法,将参数取值范围和初始值输入步骤 Factors 中,运行得到基于 15 个参数的 50 组处理组合,这 50 个组合即为在设计空间内利用最优拉丁超立方设计方法抽取的 50 个样本点。利用 MATLAB 软件将 50 组参数样本点的值写入相关 xml 文件中,并提交 MADYMO 进行计算,得到

50 组结果,从结果中提取假人损伤值。

在 2021 版 C-NCAP 中,100%正面碰撞前排假人伤害主要分为头部、颈部、胸部、大腿和小腿 5 个部位;后排假人伤害主要分为头部、颈部和胸部 3 个部位。根据工程经验,前后排假人头部和胸部伤害较大且失分较高。前排假人腿部伤害随车身侵入的增大而增大,受前围板、加速踏板、歇脚板及地毯等结构的影响大,对于约束系统安全带与气囊参数的改变并不敏感;前后排假人颈部伤害大都满足满分

表 1 参数的取值范围

分组	参数名称	初始值	下限值	上限值
安全带子系统	安全带点火时间 x_1/s	0.014	0.010	0.020
	安全带与 D 环摩擦因数 x_2	0.3	0.15	0.5
	安全带与假人摩擦因素 x_3	0.3	0.2	0.5
	主驾驶安全带出口力系数 x_4	1.0	0.6	1.8
	副驾驶安全带出口力系数 x_5	1.0	0.6	1.8
	后排安全带出口力系数 x_6	1.0	0.6	1.8
座椅子系统	安全带织带刚度系数 x_7	1.0	0.5	2.0
	座椅与假人摩擦因数 x_8	0.3	0.2	0.5
	座椅发泡刚度系数 x_9	1.0	0.5	2.0
安全气囊子系统	气囊点火时间 x_{10}/s	0.014	0.010	0.020
	主驾驶排气孔直径系数 x_{11}	1.0	0.49	2.50
	副驾驶排气孔直径系数 x_{12}	1.0	0.44	2.25
	主驾驶气囊内部温度 x_{13}/K	850	800	950
	气囊与假人摩擦因数 x_{14}	0.3	0.2	0.5
	副驾驶气囊内部温度 x_{15}/K	850	800	950

条件。因此,选择驾驶员、前排乘员和后排女性乘员的头部损伤指数 I_{HIC15} 、累积 3 ms 合成加速度、胸部压缩变形量和黏性指数 I_{VC} 作为试验指标,进行整车约束系统参数灵敏度分析与多目标优化。

2.3 参数灵敏度分析

运行基于 50 组样本点的代理模型,得到参数与响应的帕累托图。帕累托图可直观反映不同输入参数对每个响应的整体影响程度^[10]。

各参数对主驾驶假人头部损伤、胸部损伤的影响分别见图 8、图 9。从图 8、图 9 可以看出:1) 气囊点火时间(x_{10})对主驾驶假人头部损伤的影响最显著,其次是安全带点火时间(x_1),这两个参数对主驾驶假人头部损伤是最敏感的参数;安全带与 D 环摩擦因数(x_2)和主驾驶安全带出口力系数(x_4)对于主驾驶头部伤害指数 I_{HIC15} 和 3 ms 合成加速度是较敏感参数,气囊与假人摩擦因数(x_{14})对 3 ms 合成加速度的影响较大。2) 与头部损伤不同的是,对主驾驶假人胸部损伤最敏感参数为安全带点火时间(x_1),安全带与假人摩擦因数(x_3)是较敏感参数,其余参数对主驾驶假人胸部损伤的影响很小。

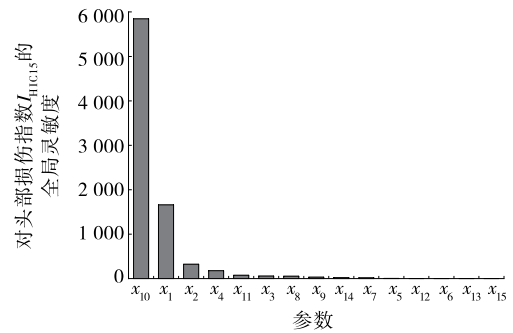
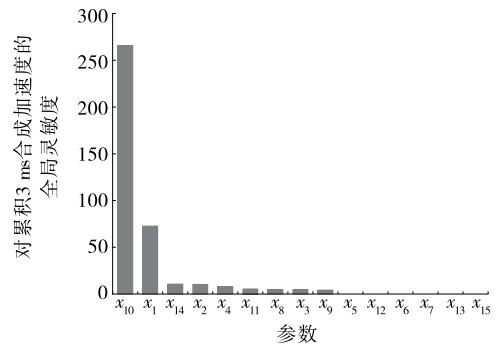
(a) 对主驾驶假人头部损伤指数 I_{HIC15} (y_1) 的影响(b) 对主驾驶假人累积 3 ms 合成加速度 (y_2) 的影响

图 8 各参数对主驾驶假人头部损伤的影响

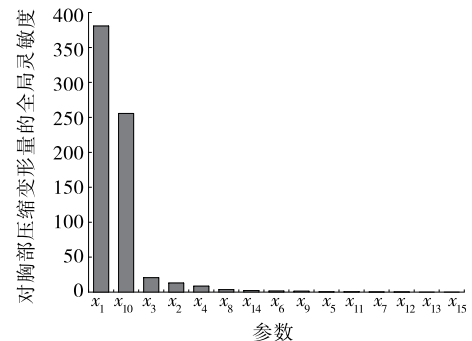
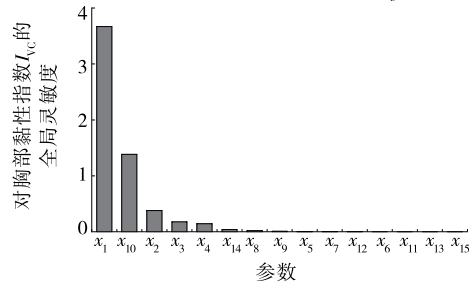
(a) 对主驾驶假人胸部压缩变形量 (y_3) 的影响(b) 对主驾驶假人胸部黏性指数 I_{VC} (y_4) 的影响

图 9 各参数对主驾驶假人胸部损伤的影响

各参数对前排乘员假人头部损伤、胸部损伤的影响分别见图 10、图 11。从图 10、图 11 可以看出:1) 与主驾驶假人相似,气囊点火时间(x_{10})对前排乘员假人头部损伤的影响最显著,其次是安全带点火时间(x_1);安全带与 D 环摩擦因数(x_2)和安全带与假人摩擦因数(x_3)、气囊与假人摩擦因数(x_{14})及

副驾驶安全带出口力系数(x_5)对乘员头部损伤指数 I_{HIC15} 和累积 3 ms 合成加速度的影响较大。2) 与主驾驶假人略不相同的是,安全带点火时间(x_1)与气囊点火时间(x_{10})都对前排乘员假人胸部损伤有较大影响,其余参数对前排乘员假人胸部损伤的影响很小。

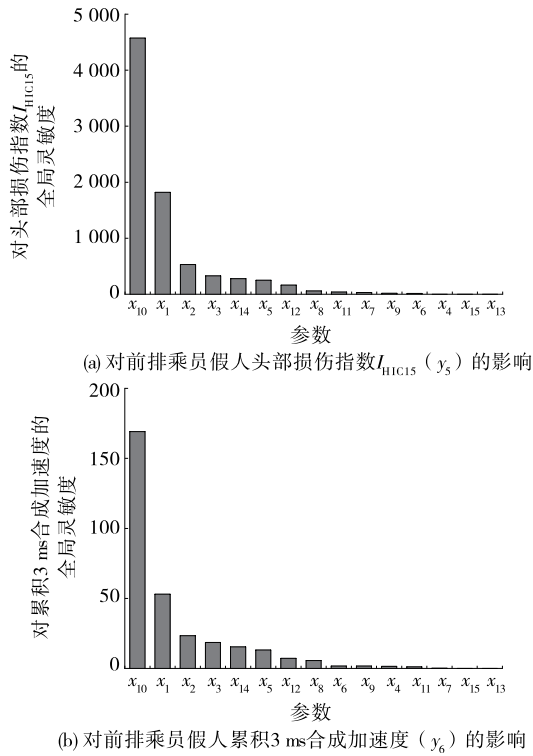


图 10 各参数对前排乘员假人头部损伤的影响

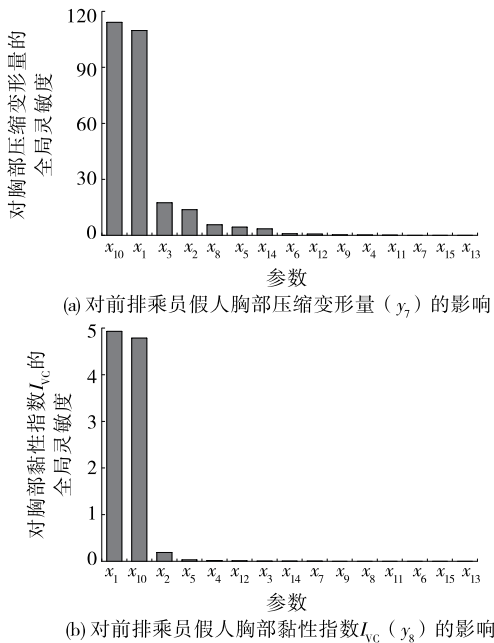


图 11 各参数对前排乘员假人胸部损伤的影响

对于后排女性乘员,由于没有气囊参与,安全带

的保护尤为重要。各参数对后排女性乘员假人头部损伤、胸部损伤的影响分别见图 12、图 13。从图 12、图 13 可看出:安全带点火时间(x_1)对后排女性乘员假人损伤的影响最显著;安全带与 D 环摩擦因数(x_2)、安全带与假人摩擦因数(x_3)、后排乘员安全带出口力系数(x_6)和座椅与假人摩擦因数(x_8)

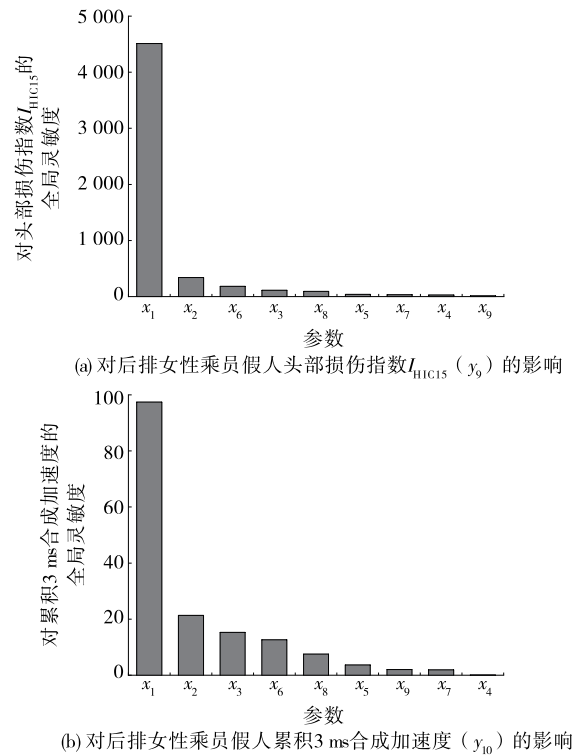


图 12 各参数对后排女性乘员假人头部损伤的影响

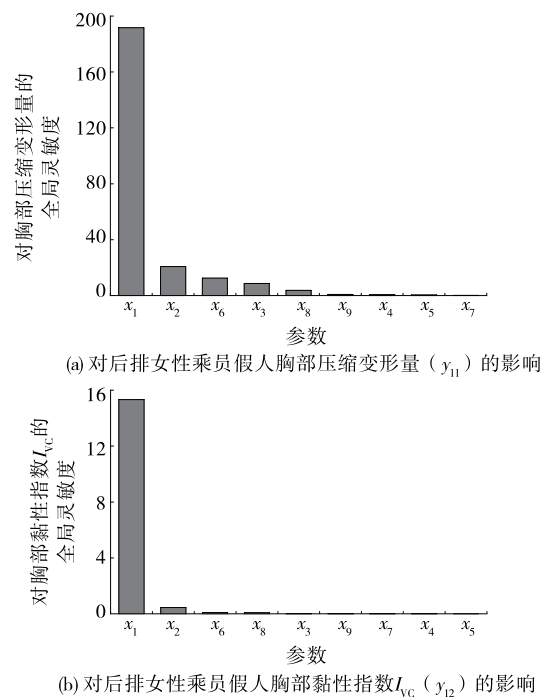


图 13 各参数对后排女性乘员假人胸部损伤的影响

对后排女性假人损伤的影响较显著。

综上,安全带与气囊的点火时间对整车约束系统的影响最大,灵敏度最高;安全带点火时间主要影响胸部损伤,气囊点火时间对头部损伤有较大影响;安全带限力大小、安全带与 D 环和假人的摩擦对胸部损伤的影响较大;座椅参数中座椅与假人的摩擦对于整车约束系统有一定影响;气囊与假人的摩擦对于假人头部损伤有较高的灵敏度;气囊的气孔大小与气囊内部温度的影响没有预期的大,可能是由于取值的上下限设置过小。

3 整车约束系统多目标优化

3.1 基于 NSGA-II 算法的多目标优化

通过参数灵敏度分析可以直观地看出各参数对约束系统不同指标的影响程度,但如何选择参数让约束系统达到最优仍然需要进一步分析和研究。NSGA-II 算法由 NSGA 算法改进而来,是一种解集分布性好、运算效率高且鲁棒性较好的算法^[11]。本文采用 NSGA-II 算法对整车多乘员约束系统进行多目标优化。

选取前排假人头部与胸部得分总和、后排假人头部与胸部得分总和、总体头部与胸部得分总和为优化目标。根据 C-NCAP 的规定,前排假人头部和胸部最高得分为 10.0 分,后排假人头部和胸部最高得分为 3.6 分,整体得分总和最高为 13.6 分。以 15 个设计变量的取值范围作为约束条件,多目标优化问题的数学表达式如下:

$$\begin{cases} \max G_1(x) = g_1[\text{model}(x_1, x_2, \dots, x_{15})] \\ \max G_2(x) = g_2[\text{model}(x_1, x_2, \dots, x_{15})] \\ \max G_3(x) = G_1(x) + G_2(x) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0.01 \leq x_1 \leq 0.02; 0.15 \leq x_2 \leq 0.50 \\ 0.2 \leq x_3 \leq 0.5; 0.6 \leq x_4 \leq 1.8 \\ 0.6 \leq x_5 \leq 1.8; 0.6 \leq x_6 \leq 1.8 \\ 0.5 \leq x_7 \leq 2.0; 0.2 \leq x_8 \leq 0.5 \\ 0.5 \leq x_9 \leq 2.0; 0.01 \leq x_{10} \leq 0.02 \\ 0.49 \leq x_{11} \leq 2.50; 0.44 \leq x_{12} \leq 2.25 \\ 800 \leq x_{13} \leq 950; 0.2 \leq x_{14} \leq 0.5 \\ 800 \leq x_{15} \leq 950 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $G_1(x)$ 为前排假人头部和胸部得分; $G_2(x)$ 为后排假人头部和胸部得分; $G_3(x)$ 为整体头部和胸部得分,即以前后排假人得分作为目标函数; $(x_1, x_2, \dots, x_{15})$ 为一组设计变量; model 为代理模型函数,输出为假人损伤变量 $(y_1, y_2, \dots, y_{12})$ 。

在 Isight 软件中搭建基于 NSGA-II 算法的优化流程(见图 14),其中 Approximation 模块用于建立响应 $(y_1 \sim y_{12})$ 与设计变量 $(x_1 \sim x_{15})$ 的 Kriging 代理模型, Calculator 模块用于假人得分计算, Optimization 模块用于 NSGA-II 参数设置。

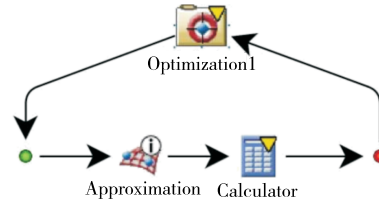


图 14 基于 NSGA-II 算法的约束系统优化流程

3.2 多目标优化结果分析

运行设置好的优化流程,经过 241 次迭代计算,得到一个帕累托解集。根据实际需要,从帕累托解集中选取 3 组优化解,其中方案一为总得分最优的解,方案二为前排假人得分最优的解,方案三为后排假人得分最优的解。3 种方案的设计变量取值见表 2,3 种方案代理模型计算结果和仿真结果见表 3。

表 2 帕累托解集优化解的设计变量取值

参数	各方案的设计变量取值			
	初始方案	方案一	方案二	方案三
x_1/s	0.014 0	0.015 3	0.0152 0	0.015 6
x_2	0.300	0.240	0.240	0.217
x_3	0.300	0.426	0.468	0.317
x_4	1.000	0.867	0.869	1.338
x_5	1.000	0.981	0.980	1.196
x_6	1.000	0.846	0.896	0.910
x_7	1.000	0.739	0.736	0.753
x_8	0.300	0.381	0.381	0.370
x_9	1.000	1.091	1.091	0.613
x_{10}/s	0.014	0.013	0.013	0.015
x_{11}	1.000	1.684	1.540	2.107
x_{12}	1.000	1.793	1.598	1.496
x_{13}/K	850.000	865.129	866.194	867.760
x_{14}	0.3000	0.305	0.305	0.310
x_{15}/K	850.000	820.010	820.027	843.514

从表 3 可看出:1) 以前后排假人总得分为优化目标的方案一代理模型对各指标 $(y_1 \sim y_{12})$ 的计算结果与仿真结果的误差为 0.9%~12.5%,代理模型的计算结果比较可信。方案一代理模型的前排、后

表 3 各方案近似模型计算结果与仿真结果对比

参数	初始方案	方案一		方案二		方案三	
	仿真结果	模型计算结果	仿真结果	模型计算结果	仿真结果	模型计算结果	仿真结果
主驾驶头部损伤指数 $I_{HIC15}(y_1)$	548.843	388.099	344.846	387.519	359.899	338.858	333.089
主驾驶 3 ms 合成加速度 $(y_2)/[9.8(m \cdot s^{-2})]$	73.608	55.473	58.671	56.839	59.506	56.875	58.077
主驾驶胸部压缩量 $(y_3)/mm$	28.287	21.543	21.145	21.265	21.045	32.879	29.154
主驾驶胸部黏性指数 $I_{VC}(y_4)$	0.140 0	0.071 0	0.065 0	0.077 0	0.072 3	0.232 0	0.241 0
副驾驶头部损伤指数 $I_{HIC15}(y_5)$	524.288	385.781	372.863	375.120	384.497	470.572	433.825
副驾驶 3 ms 合成加速度 $(y_6)/[9.8(m \cdot s^{-2})]$	69.037	57.213	58.741	58.536	59.593	64.701	63.000
副驾驶胸部压缩量 $(y_7)/mm$	21.558	18.619	18.838	18.917	18.519	23.308	23.239
副驾驶胸部黏性指数 $I_{VC}(y_8)$	0.085 0	0.089 0	0.092 9	0.086 0	0.084 0	0.087 0	0.084 7
后排乘员头部损伤指数 $I_{HIC15}(y_9)$	326.261	239.709	225.891	244.984	233.610	252.606	233.174
后排乘员 3 ms 合成加速度 $(y_{10})/[9.8(m \cdot s^{-2})]$	58.629	49.308	50.041	49.360	50.474	49.260	48.955
后排乘员胸部压缩量 $(y_{11})/mm$	33.313	29.988	30.253	30.069	31.987	29.615	31.220
后排乘员胸部黏性指数 $I_{VC}(y_{12})$	0.136 0	0.122 0	0.127 0	0.121 0	0.127 0	0.121 0	0.132 0
前排假人得分	8.370 0	10.000 0	10.000 0	10.000 0	10.000 0	8.057 4	8.720 0
后排假人得分	2.770 0	3.029 4	3.040 0	3.023 7	2.880 0	3.056 1	2.940 0
假人总得分	11.140 0	13.029 4	13.040 0	13.023 7	12.880 0	11.113 5	11.660 0

排假人得分和总得分分别为 10.000 0 分、3.029 4 分、13.029 4 分,方案一仿真结果的前排、后排假人得分和总得分分别为 10.000 0 分、3.040 0 分、13.040 0 分,模型计算结果与仿真结果的误差分别 0.0、0.3%、0.08%,代理模型以总得分为优化目标合理。相比于初始方案,方案一仿真结果的总得分高 1.900 0 分。

2) 以前排假人得分为优化目标的方案二代理模型对各指标($y_1 \sim y_{12}$)的计算结果与仿真结果的误差为 1.0%~7.7%,代理模型的计算结果比较可信。方案二代理模型的前排、后排假人得分和总得分分别为 10.000 0 分、3.023 7 分、13.023 7 分,方案二仿真结果的前排、后排假人得分和总得分分别为 10.000 0 分、2.880 0 分、12.880 0 分,模型计算结果与仿真结果的误差分别为 0.0、5.0%和1.1%,代理模型以前排假人得分为优化目标合理。相比于初始方案,方案二仿真结果的总得分高 1.740 0 分。

3) 以后排假人得分为优化目标的方案三代理模型对各指标($y_1 \sim y_{12}$)的计算结果与仿真结果的误差为 0.3%~12.8%,代理模型的计算结果比较可信。

方案三代理模型的前排、后排假人得分和总得分分别为8.057 4 分、3.056 1 分、11.113 5 分,仿真结果的前排、后排假人得分和总得分分别为 8.720 0 分、2.940 0 分、11.660 0 分,模型计算结果与仿真结果的误差分别为 7.6%、3.9%和 4.7%,代理模型以后排假人得分为优化目标合理。相比于初始方案,方案三仿真结果的总得分高 0.520 0 分。

对比 3 种优化方案,以假人总得分为优化目标的方案一最优。相比于原始方案,方案一的前排假人得分高 1.630 0 分,后排假人得分高 0.270 0 分,总得分高 1.900 0 分。方案一仿真结果总得分 13.040 0 分,相较于头部和胸部满分 13.600 0 分,得分率为 95.9%。

4 结论

本文综合运用 MADYMO 软件和 Isight 软件对整车约束系统进行仿真模型建立、对标,同时在工程项目经验的基础上,运用最优拉丁超立方设计方法与 Kriging 代理模型建立约束系统参数与响应之

间的数学关系,并进行多参数多目标优化,优化结果可以达到 C-NCAP 五星要求。

安全带与气囊的点火时间对约束系统整体得分的影响最大,灵敏度最高;安全带点火时间主要影响假人胸部损伤,气囊点火时间对假人头部损伤有较大影响;安全带限力大小、安全带与 D 环和假人的摩擦对假人胸部损伤较灵敏;座椅参数中座椅与假人的摩擦对整体得分有一定影响;气囊与假人的摩擦对假人头部损伤较灵敏。

基于 NSGA-II 算法对约束系统进行优化,分别以假人总得分、前排假人得分和后排假人得分为目标进行优化,并进行代理模型计算结果和仿真结果对比,模型计算结果与仿真结果的最大误差为 11.1%,代理模型精度较高,优化结果可信。综合比较,以假人总得分为优化目标的方案最优,相比于原始方案,该方案仿真结果中假人头部和胸部总得分高 1.90 分,提升幅度为 17.1%,假人头部、胸部总体得分率为 95.9%,达到 2021 版 C-NCAP 五星标准。

参考文献:

- [1] DUBOIS D, ZELLMER H, MARKIEWICZ E. Experimental and numerical analysis of seat belt bunching phenomenon[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(6): 763-774.
- [2] CHEN G F, LINK T M, SHI M F, et al. Modeling of material orientation effects on AHSS crush and fracture behavior in axial crush tests[J]. Traffic Injury

Prevention, 2013, 14(Sup1): S23-S29.

- [3] FU Y, ABRAMOSKI E. Robust design for occupant restraint system[C]//SAE Technical Paper Series, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. SAE International, 2005.
- [4] 白中浩, 卢静. 基于多目标优化的儿童座椅匹配方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(3): 52-58.
- [5] 张学荣, 苏清祖. 侧面碰撞乘员损伤影响因素分析[J]. 汽车工程, 2008, 30(2): 146-150.
- [6] 雷刚, 罗强, 刘意. 基于 HyperStudy 的乘员约束系统参数优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2011, 25(5): 1-5.
- [7] 蒋小晴, 杨济匡, 肖志. 基于车身结构与约束系统集成优化的乘员胸部保护研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(4): 369-374+384.
- [8] 杨琦. 基于 LS-DYNA 汽车正面碰撞乘员约束系统仿真分析及参数优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [9] 郭庆祥, 谭雯霄, 郑艳婷, 等. 用于车辆碰撞试验分析的头部行程计算方法研究[J]. 公路与汽运, 2021(3): 1-3+45.
- [10] 郑建洲, 陈有松, 吕斌斌, 等. 基于 Kriging 模型的座椅子系统安全性能优化研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(11): 1301-1307.
- [11] 钱立军, 丁玲, 祝安定. 基于 iSIGHT 的薄壁直梁件抗撞性多目标优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(2): 145-149.

收稿日期: 2023-09-08

《公路与汽运》杂志 2024 年征订启事

《公路与汽运》杂志由长沙理工大学主办,是一份介绍汽车、道路、桥梁等公路交通领域科技信息的面向国内外公开发行的技术类科技期刊。为首届(2006 年)中国高校特色科技期刊、《公路运输领域高质量科技期刊分级目录》收录期刊、RCCSE 中国准核心学术期刊(B⁺)、湖南省一级期刊、JST 日本科学技术振兴机构数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊,被中国期刊全文数据库及中文科技期刊数据库全文收录、万方数据-数字化期刊群全文上网,并荣获首届《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊奖。

本刊立足公路交通系统,报道国内外汽车与公路交通领域的最新研究成果,荟萃汽车运用与维修技术,传播公路交通安全知识,介绍公路运输行业的新技术与管理经验,刊登公路交通工程的新工艺、新技术、新材料。2024 年拟设主要栏目:“智能车辆与交通”专栏;汽车工程;交通规划与管理;运输与物流;道路工程;桥隧工程;工程经济与管理。

本刊为双月刊,逢单月 25 日出版。国内邮发代号:42-95。每期定价 15 元,全年 90 元。读者可在当地邮局订阅,也可直接向本刊编辑部索取订单订阅,订阅款请汇至本刊编辑部或银行账号。

通信地址:长沙理工大学云塘校区 8 号信箱

邮编:410114

联系电话:0731-83528400, 85258189

开户行:工商银行长沙银迅支行

户名:长沙理工大学

账号:1901016009109888886