

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220122001

文章编号:1672-9331(2024)06-0087-09

引用格式:刘鑫,毛勇勇.基于代理模型更新管理策略的汽车乘员约束系统优化设计[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(6):87-95.

Citation: LIU Xin, MAO Yongyong. Optimization design of vehicle occupant restraint system based on surrogate model update management strategy[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(6): 87-95.

基于代理模型更新管理策略的汽车乘员约束系统优化设计

刘鑫^{1,2},毛勇勇²

(1.长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心,湖南长沙410114;
2.长沙理工大学 工程车辆安全性设计与可靠性技术湖南省重点实验室,湖南长沙410114)

摘要:【目的】探讨汽车乘员约束系统的安全性能。【方法】提出了一种基于代理模型更新管理策略的汽车乘员约束系统优化设计方法。建立乘员约束系统仿真模型,并检验该仿真模型是否准确可靠;对乘员损伤响应进行灵敏度分析,筛选出对损伤响应影响较大的模型参数;利用局部评估指数判断是否对代理模型的局部区域进行重采样,确定重采样区间,并采用最优拉丁超立方设计获得局部样本点;应用遗传拉丁超立方进行采样,获取全局样本点,通过加权欧式距离准则对局部和全局样本点进行筛选,并将筛选后合格的样本点添加到初始样本空间中以更新代理模型;通过隔代映射遗传算法搜寻潜在的最优解。【结果】该方法在保证代理模型精度下,减轻了乘员的损伤,保证了乘员的安全。【结论】该方法能较高效地确定乘员约束系统的最优解。

关键词:乘员约束系统;灵敏度分析;代理模型;更新管理策略;隔代映射遗传算法

中图分类号:U461.91

文献标志码:A

Optimization design of vehicle occupant restraint system based on surrogate model update management strategy

LIU Xin^{1,2}, MAO Yongyong²

(1. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Safety Design and Reliability Technology for Engineering Vehicle, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to explore the safety performance of a vehicle occupant restraint system. [Methods] An optimization design method of the vehicle occupant restraint system based on the surrogate model update management strategy was proposed. A simulation model of the occupant restraint system was established, and the accuracy and reliability of the simulation model were verified. The sensitivity analysis was performed on the occupant injury

收稿日期:2022-01-22;修回日期:2022-03-24;接受日期:2022-04-10

基金项目:湖南省杰出青年科学基金资助项目(2021JJ10040);湖南省教育厅科学研究资助项目(20K008);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(kfj170401)

通信作者:刘鑫(1981—)(OCRID:0000-0003-4766-3517),男,教授,主要从事汽车结构可靠性优化技术方面的研究。

E-mail:lxym810205@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

response, and the model parameters that had a greater impact on the injury response were screened out. The local evaluation index was used to judge whether to resample the local region of the surrogate model, and the resampling interval was determined. The local sample points were obtained by the optimal Latin hypercube design. Inherited Latin hypercube was employed in sampling, so as to obtain global sample points. The local and global sample points were filtered by the weighted Euclidean distance criterion, and the qualified sample points were added to the initial sample space to update the surrogate model. Finally, the potential optimal solution was searched by the intergeneration projection genetic algorithm. [Findings] The method can reduce the injury of the occupant and ensure the safety of the occupant while ensuring the accuracy of the surrogate model. [Conclusions] The proposed method can efficiently solve the optimal solution of the occupant restraint system.

Key words: occupant restraint system; sensitivity analysis; surrogate model; update management strategy; intergeneration projection genetic algorithm

Foundation items: Project (2021JJ10040) supported by Hunan Provincial Science Fund for Distinguished Young Scholars; Project (20K008) supported by Scientific Research Project of Hunan Provincial Department of Education; Project (kfj170401) supported by the Open Fund of Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education from Changsha University of Science & Technology

Corresponding author: LIU Xin (1981—) (OCRID: 0000-0003-4766-3517), male, professor, research interest: reliability optimization technology of automobile structure. E-mail: lxxym810205@163.com

0 引言

汽车碰撞通常会给乘员带来一定程度的损伤,甚至会危及乘员的生命安全,而汽车乘员约束系统在汽车发生碰撞时能有效地保护乘员。由实践可知^[1-2],良好的乘员约束系统可显著减轻乘员损伤并降低死亡率。

汽车碰撞的边界条件很复杂,而汽车乘员约束系统参数多,且模型参数每增加一个,计算量会成倍增加。因此,研究者在对乘员约束系统进行优化设计之前,应选取对人体损伤响应影响大的参数作为优化设计变量,以提高汽车乘员约束系统优化设计效率。郑建洲等^[3]在对乘员约束系统的座椅子系统进行优化设计之前,对11个参数进行了灵敏度分析,筛选出6个对损伤响应影响较大的参数,从而减少了变量的数量,提高了优化效率。在针对乘员约束系统安全性能的研究中,传统方法大多数是基于实车碰撞试验和计算机辅助工程技术对乘员约束系统进行优化的,其缺点是运算时间长,优化效率低,且乘员损伤响应与模型参数之间关系没有被揭示。因此,业界一般采用

代理模型^[4]和优化算法相结合的方法进行研究。但是,用代理模型代替原数值的分析模型会产生一定的误差,影响优化结果。因此,在运用代理模型和优化算法对乘员约束系统进行优化分析时,研究者要保证代理模型的精度较高。张海洋等^[5]在保证代理模型精度较高的情况下,将支持向量机代理模型与粒子群优化算法相结合,对乘员约束系统进行优化设计,减少了乘员的损伤。谷先广等^[6]在确保代理模型拟合误差较小的情况下,运用Kriging代理模型和灰狼优化算法对乘员约束系统进行优化设计,增强了乘员约束系统对乘员的保护作用。刘鑫等^[7]运用逆向形参数法快速获得了较高精度的代理模型,再结合隔代映射遗传算法(intergeneration projection genetic algorithm, IP-GA)对乘员约束系统进行优化,有效减少了乘员的损伤,保证了乘员的安全。

综上所述,本研究运用代理模型更新管理策略,结合IP-GA对乘员约束系统进行优化设计。具体步骤如下:①建立乘员约束系统仿真模型,并检验仿真模型是否准确可靠;②运用最优拉丁超立方试验设计(optimal Latin hypercube design, OLHD)方法^[8-9]获取样本点,并通过仿真模型获得

人体损伤响应值;③对乘员损伤响应进行灵敏度分析,筛选出对损伤响应影响较大的模型参数;④再次采用OLHD获取样本点,利用径向基代理模型构建乘员约束系统近似优化问题,并应用代理模型更新管理策略提高代理模型的精度;⑤通过IP-GA求解出潜在最优解,从而保证乘员的安全。

1 数值仿真模型的建立与验证

1.1 建立数值仿真模型

本研究采用MADYMO仿真软件对某型车的100%正面碰撞工况建立数值仿真模型,如图1所示。该数值模型主要由Hybrid III 50th假人模型、车体模型和三点式安全带组成。本研究利用该数值模型可获得假人头部、胸部、腿部的动态响应曲线和损伤评价指标。

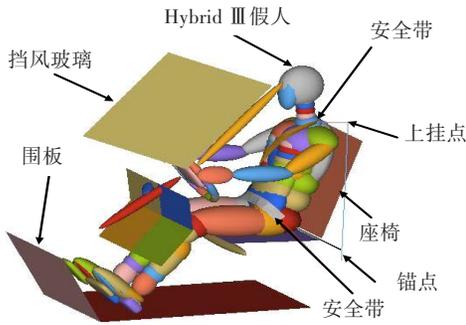
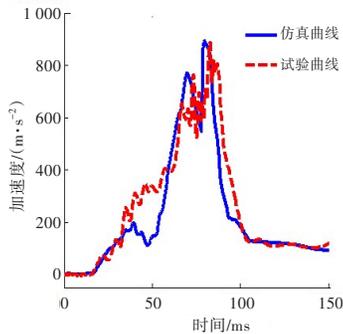


图1 乘员约束系统数值模型

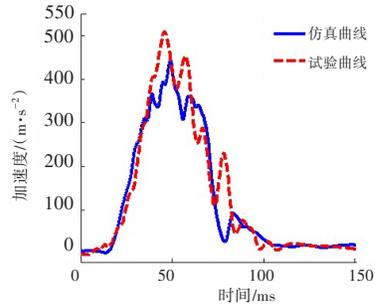
Fig. 1 Numerical model of occupant restraint system

1.2 模型验证

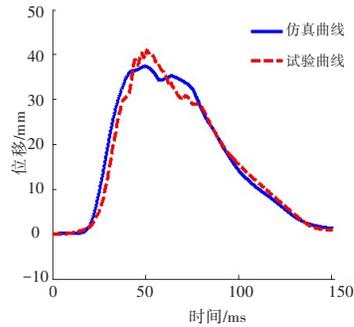
本研究依据《汽车正面碰撞的乘员保护》(GB 11551—2014)中规定的细则进行实车碰撞试验。实车碰撞试验中的假人头部、胸部、腿部动态响应曲线及其数值仿真曲线如图2所示。



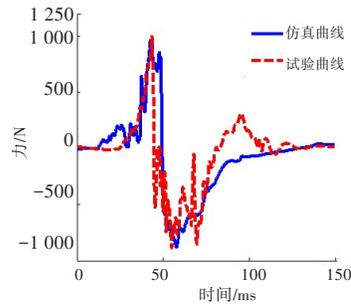
(a) 头部合成加速度



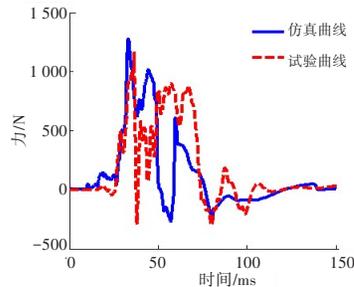
(b) 胸部合成3 ms加速度



(c) 胸部压缩量



(d) 左大腿轴向力



(e) 右大腿轴向力

图2 假人动态响应曲线仿真与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of simulated and test results of dynamic response curve of dummy

从图2可以看出,实车碰撞试验中的假人身体各部位动态响应曲线的峰值出现时间和变化趋势与相应的数值仿真结果吻合较好。这说明本研究构建的数值模型比较可靠,可用于优化设计。

2 乘员损伤模型的数学描述

业界一般采用加权损伤准则(weighted injury criterion, WIC)来综合评价乘员的损伤状况^[10]。相关计算公式为

$$W_{IC} = 0.6 \left(\frac{H_{IC}}{1000} \right) + 0.35 \left(\frac{C_{3ms}}{60} + \frac{D}{75} \right) / 2 + 0.05 \left(\frac{F_{FL} + F_{FR}}{20.0} \right) \quad (1)$$

式中: W_{IC} 为WIC的值; H_{IC} 为头部36 ms综合性能指标; C_{3ms} 为胸部3 ms加速度值, m/s^2 ; D 为胸部压缩量,mm; F_{FL} 为左大腿轴向压力,kN; F_{FR} 为右大腿轴向压力,kN。

本研究选取安全带上挂点所在Z轴位置为参数 X_1 、安全带锚点位置为参数 X_2 、座椅刚度系数为参数 X_3 、安全带初始应变为参数 X_4 、安全带上挂点所在X轴位置为参数 X_5 、安全带伸长率为参数 X_6 ,并以这6个参数为设计变量构建了函数 X 。

$$X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6]^T \quad (2)$$

式中: $0.82 \text{ m} \leq X_1 \leq 0.92 \text{ m}$; $-0.01 \text{ m} \leq X_2 \leq 0.02 \text{ m}$; $0.90 \leq X_3 \leq 1.00$; $-0.20 \leq X_4 \leq 0.00$; $-1.47 \text{ m} \leq X_5 \leq -1.37 \text{ m}$; $0.06 \leq X_6 \leq 0.15$ 。

3 汽车乘员约束系统灵敏度分析

灵敏度分析方法的本质是分析各变量对响应的贡献大小。本研究采用最优拉丁超立方设计获得包含100个汽车乘员约束系统样本的样本集,运用试验设计方法计算各变量对乘员损伤响应的灵敏度,并应用式(3)和归一化的方法求解得到各变量的灵敏度百分比。各变量对乘员损伤指标的影响如图3所示。

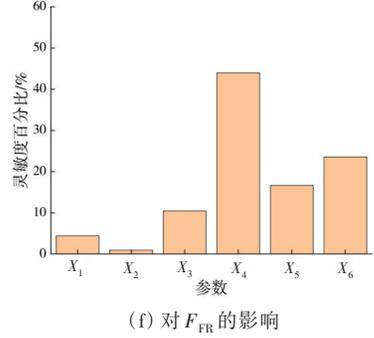
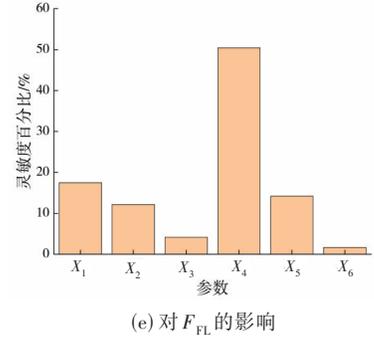
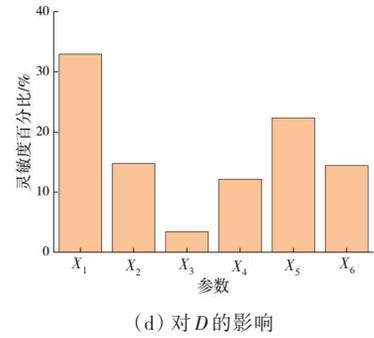
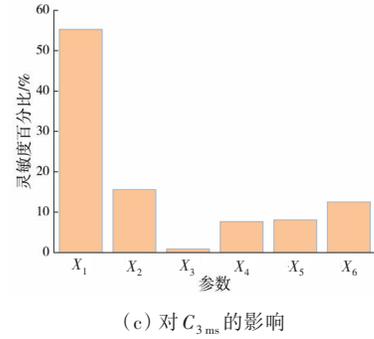
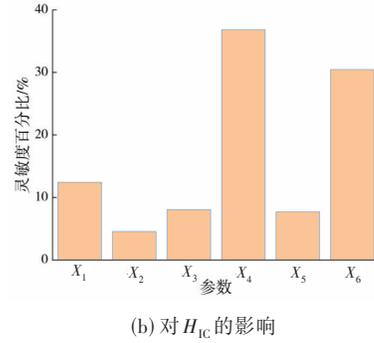
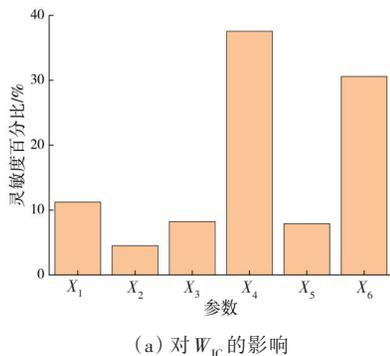


图3 各变量对乘员损伤指标的影响

Fig. 3 Effects of variables on occupant injury index

$$P_{x_i} = \left| S_{x_i} / \sum_{i=1}^{100} |S_{x_i}| \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中: S_{x_i} 为各变量的灵敏度; P_{x_i} 为各变量灵敏度的百分比; $\sum_{i=1}^{100} |P_{x_i}| = 1$ 。

从图 3 可以看出,各变量对应的不同响应值的灵敏度百分比各不相同。故研究者无法直接从中筛选出对响应值影响较小的变量。因此,本研究运用线性加权法将多个响应的灵敏度百分比转化为单个响应的灵敏度百分比,再将后者用于评价各变量对响应值的影响。汽车乘员损伤指标的灵敏度百分比的线性加权值为 Q_i 。本研究利用式(4)计算指标 i 对应的 Q_i 。

$$Q_i = \sum_{i=1}^m k P_{x_i} \quad (4)$$

式中: $\sum_{i=1}^m k = 1$,乘员损伤指标灵敏度百分比的权重 $k = 1/6$,乘员损伤指标的个数 $m=6$ 。

表 1 列出了乘员损伤指标灵敏度百分比与线性加权值 Q_i 。由表 1 可以看出, X_2 、 X_3 的线性加权值比另外 4 个变量的线性加权值小。这说明变量 X_2 、 X_3 对响应值的影响较小。因此,本研究选择 X_1 、 X_4 、 X_5 、 X_6 作为优化设计变量。

表 1 乘员损伤指标灵敏度百分比与线性加权值
Table 1 Sensitivity percentage and linear weighting value of occupant injury index %

变量	灵敏度百分比						Q_i
	H_{IC}	C_{3ms}	D	F_{FL}	F_{FR}	W_{IC}	
X_1	12.43	55.30	32.93	17.47	4.43	11.23	22.30
X_2	4.54	15.58	14.75	12.13	0.94	4.51	8.74
X_3	8.06	0.86	3.40	4.14	10.45	8.22	5.85
X_4	36.83	7.66	12.15	50.43	43.96	37.55	31.43
X_5	7.69	8.08	22.36	14.17	16.62	7.90	12.80
X_6	30.45	12.52	14.41	1.66	23.60	30.59	18.88

X_2 、 X_3 对响应值影响较小的原因为:① 三点式安全带锚点的作用主要是将安全带固定在座椅上,安全带锚点位置的变化只会改变乘员佩戴安全带的角度,同时一般安全带的锚点位置比较固定,变动范围较小,因此 X_2 对乘员损伤响应值的影响较小;② 在本研究关注的汽车正面碰撞发生时,乘员更容易与其前面的物体发生碰撞,故此时座椅对乘员损伤响应值的影响较小。

4 汽车乘员约束系统特性参数优化

4.1 汽车乘员约束系统优化问题的描述

本研究采用 W_{IC} 作为目标函数并对其进行优化设计。乘员约束系统优化问题可描述如下:

$$\min f_{W_{IC}}(X) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g_{H_{IC}}(X) \leq 1000 \\ g_{C_{3ms}}(X) \leq 60g \\ g_D(X) \leq 75 \text{ mm} \\ g_{F_{FL}}(X) \leq 10 \text{ kN} \\ g_{F_{FR}}(X) \leq 10 \text{ kN} \\ X = [X_1, X_4, X_5, X_6]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f_{W_{IC}}$ 为 W_{IC} 的函数; $g_{H_{IC}}$ 为 H_{IC} 的函数; $g_{C_{3ms}}$ 为 C_{3ms} 的函数; g_D 为 D 的函数; $g_{F_{FL}}$ 为 F_{FL} 的函数; $g_{F_{FR}}$ 为 F_{FR} 的值; g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

4.2 近似优化问题的建立

以高斯函数作为核函数的径向基函数具有结构简单、拟合误差小、计算方便等优点。因此,本研究选取径向基函数来构建乘员约束系统的代理模型,并且将式(5)、式(6)描述的汽车乘员约束系统优化问题转化为近似优化问题^[11-12]。后者可用式(7)、式(8)进行描述。

$$\min \tilde{f}_{W_{IC}}(X) \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \tilde{g}_{H_{IC}}(X) \leq 1000 \\ \tilde{g}_{C_{3ms}}(X) \leq 60g \\ \tilde{g}_D(X) \leq 75 \text{ mm} \\ \tilde{g}_{F_{FL}}(X) \leq 10 \text{ kN} \\ \tilde{g}_{F_{FR}}(X) \leq 10 \text{ kN} \\ X = [X_1, X_4, X_5, X_6]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\tilde{f}_{W_{IC}}$ 为目标函数的代理模型; $\tilde{g}_{H_{IC}}$ 、 $\tilde{g}_{C_{3ms}}$ 、 \tilde{g}_D 、 $\tilde{g}_{F_{FL}}$ 、 $\tilde{g}_{F_{FR}}$ 分别为乘员约束系统函数 $g_{H_{IC}}$ 、 $g_{C_{3ms}}$ 、 g_D 、 $g_{F_{FL}}$ 、 $g_{F_{FR}}$ 的代理模型。

4.3 基于局部评估指数和遗传拉丁的采样策略

本研究首先采用最优拉丁超立方设计获得初始样本点 $R_G = \{G_1, \dots, G_j, \dots, G_N\}$ (初始采样个数 $N=60$; $j=1, 2, \dots, N$; G 为采集点);然后,把初始样本点代入 MADYMO 仿真软件中进行计算,从而获得对应的仿真值;最后,通过 IP-GA 求解上述近似

优化问题,从而获得潜在最优解 X^* 。

$f_{w_{ic}}(X^*)$ 和 $g(X^*)$ 分别为乘员约束系统的目标函数和约束条件函数在 X^* 处的仿真值; $\tilde{f}_{w_{ic}}(X^*)$ 和 $\tilde{g}(X^*)$ 分别为乘员约束系统的目标函数和约束条件函数在 X^* 处的近似值; $u(X^*)$ 为在乘员约束系统的潜在最优解 X^* 处时, $f_{w_{ic}}(X^*)$ 、 $\tilde{f}_{w_{ic}}(X^*)$ 之间误差最大的目标函数和 $g(X^*)$ 、 $\tilde{g}(X^*)$ 之间误差最大的约束条件函数的仿真函数。为了掌握 $u(X)$ 在 X^*

$$h(X^*) = \frac{1}{M} \left(\left| \frac{u(X_1^{(K)}) - u(X^*)}{u(X^*)} \right| + \left| \frac{u(X_2^{(K)}) - u(X^*)}{u(X^*)} \right| + \dots + \left| \frac{u(X_M^{(K)}) - u(X^*)}{u(X^*)} \right| \right) \quad (9)$$

式中: $u(X^*)$ 为潜在最优解的实际值; $u(X_1^{(K)})$, $u(X_2^{(K)})$, \dots , $u(X_M^{(K)})$ 分别为与潜在最优解相邻的 M 个原始样本点 $R_G^{(K)} = \{G_1^{(K)}, G_2^{(K)}, \dots, G_M^{(K)}\}$ 的实际值。

本研究用 $h(X^*)$ 值的大小判断 $u(X)$ 在 X^* 附近的复杂程度。 $h(X^*)$ 值越大,表明 $u(X)$ 在 X^* 附近越复杂,并可能会导致代理模型在局部区域内与 $u(X)$ 的拟合误差较大。因此,本研究在此局部区域内进行重采样,并通过增加样本点的个数来提高代理模型的局部精度。

在对局部区域进行重采样时,乘员约束系统的潜在最优解 X^* 被定义为重采样空间的中心。针对四维空间乘员约束系统设计变量中的某个维度,乘员约束系统重采样区间 L_i 可表示为

$$L_i = S \cdot (X_{i,up} - X_{i,low}), i = 1, 4, 5, 6 \quad (10)$$

$$S = \begin{cases} \sigma \cdot \frac{d_{ist_{i1}}}{d_{ist_{i2}}}, & h(X^*) < \sigma \\ h(X^*) \cdot \frac{d_{ist_{i1}}}{d_{ist_{i2}}}, & \sigma \leq h(X^*) < 1 \\ \frac{d_{ist_{i1}}}{d_{ist_{i2}}}, & h(X^*) \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $X_{i,up}$ 、 $X_{i,low}$ 分别为乘员约束系统设计变量的上、下界; S 为乘员约束系统重采样区间的缩放系数; $d_{ist_{i1}}$ 为相邻原始样本集,即乘员约束系统样本集中 $R_G^{(K)} = \{G_1^{(K)}, G_2^{(K)}, \dots, G_M^{(K)}\}$ 两任意样本点之间的最大欧式距离; $d_{ist_{i2}}$ 为初始样本集,即乘员约束系统初始样本集中 $R_G = \{G_1, \dots, G_j, \dots, G_N\}$ 任意两样本点之间的最大欧式距离; σ 为阈值参数,可

附近样本点的复杂程度,本研究在 X^* 附近构造了 M 个局部采样点 $G_o^{(K)}(o = 1, 2, \dots, M)$,其中上标(K)用于区分与最优解相邻的原始样本点和其他原始样本点,即 $R_G^{(K)} = \{G_1^{(K)}, G_2^{(K)}, \dots, G_M^{(K)}\}$,且 $R_G^{(K)} \subseteq R_G$ 。此外,本研究还计算了乘员约束系统的局部评估指数(local evaluation index, LEI)。局部评估指数数值用 $h(X^*)$ 表示,其计算公式为

避免病态矩阵的出现或样本点的浪费。

当乘员约束系统重采样区间 L_i 的大小确定后,本研究采用最优拉丁超立方设计生成乘员约束系统局部样本集 R_{local} ,并将 R_{local} 添加到乘员约束系统测试样本集 R_{test} 中。

在保证代理模型局部精度的情况下,本研究还通过遗传拉丁超立方试验获得样本点,构成全局样本集 R_{global} ,以提高代理模型的全局精度,并将 R_{global} 添加到测试样本集 R_{test} 中。

4.4 基于加权欧式距离的筛选准则

当乘员约束系统中的局部样本集 R_{local} 中的样本点与全局样本集 R_{global} 中的样本点被添加到测试样本集 R_{test} 中时,与初始样本点高度相似或密度过大的样本点可能会存在。这不仅增加了计算成本,还可能导致病态矩阵的产生,从而造成优化精度和效率下降。因此,本研究采用有效的准则来评估测试样本集 R_{test} 中的样本点。

与传统欧式距离相比,加权欧式距离的优势在于,加权欧式距离除了可以计算出两样本点之间的距离,还考虑了样本点对应变量的差异,能更好地反映两样本点之间的相似性。因此,本研究采用加权欧式距离来定义两样本点之间的距离。在本研究中,乘员约束系统两样本点之间的加权欧式距离为

$$d_{ist}(X^{(B1)}, X^{(B2)}) = \sqrt{\sum_{d=1}^N \frac{\omega_d}{V} (X_d^{(B1)} - X_d^{(B2)})^2} \quad (12)$$

$$\omega_d = \exp(-|X_d^{(B1)} - X_d^{(B2)}|) \quad (13)$$

式中: $X^{(B1)}$ 、 $X^{(B2)}$ 为乘员约束系统样本空间中两样本点; $X_d^{(B1)}$ 、 $X_d^{(B2)}$ 分别为乘员约束系统对应变量的

样本点; d 为乘员约束系统的变量个数;归一化因子 $V = \sum_{d=1}^N \omega_d$,其中 ω_d 为权重系数。

加权欧式距离准则能够识别乘员约束系统样本集中相似的样本点。因此,本研究通过式(12)中的加权欧式距离准则对 \mathbf{R}_{test} 中的样本点进行筛选,使 \mathbf{R}_{test} 中的样本点与初始样本点有所不同。加权欧式距离准则为

$$d_{\text{ist}_{\min}} \geq \eta \cdot d_{\text{ist}_{\text{min}}} \quad (14)$$

式中: $d_{\text{ist}_{\min}}$ 为乘员约束系统中测试样本点和初始样本点之间的最小加权欧式距离; $d_{\text{ist}_{\text{min}}}$ 为乘员约束系统初始样本集中每两个样本点之间的最小加权欧式距离的平均值; η 为阈值参数。

本研究运用加权欧式距离准则评估乘员约束系统测试样本集 \mathbf{R}_{test} 中的样本点,将测试合格的样本点添加到样本空间中,并通过仿真模型获取 \mathbf{R}_{test} 中样本点相应的真实响应值,以更新径向基代理

$$\Delta_{\max} = \max \left(\left| \frac{f_{W_c}^{(s)} - \tilde{f}_{W_c}^{(s)}}{f_{W_c}^{(s)}} \right|, \left| \frac{g_{H_c}^{(s)} - \tilde{g}_{H_c}^{(s)}}{g_{H_c}^{(s)}} \right|, \left| \frac{g_{C_{3m}}^{(s)} - \tilde{g}_{C_{3m}}^{(s)}}{g_{C_{3m}}^{(s)}} \right|, \left| \frac{g_D^{(s)} - \tilde{g}_D^{(s)}}{g_D^{(s)}} \right|, \left| \frac{g_{F_{rl}}^{(s)} - \tilde{g}_{F_{rl}}^{(s)}}{g_{F_{rl}}^{(s)}} \right|, \left| \frac{g_{F_{rn}}^{(s)} - \tilde{g}_{F_{rn}}^{(s)}}{g_{F_{rn}}^{(s)}} \right| \right) \quad (15)$$

6) 根据局部评估指数 $h(\mathbf{X}^*)$ 确定重采样空间,采用最优拉丁超立方设计生成的局部样本集 $\mathbf{R}_{\text{local}}$,并将其存储到测试样本集 \mathbf{R}_{test} 中。

7) 采用遗传拉丁超立方采样并生成的全局样本集 $\mathbf{R}_{\text{global}}$,并将其存储到测试样本集 \mathbf{R}_{test} 中。

8) 利用加权欧式距离准则对测试集进行筛选,并将筛选出的合格样本点添加到初始样本空间中,然后跳转到步骤 2),并设置 $s = s + 1$ 。

5 优化结果与分析

本研究在优化过程中取允许误差 $\delta_{\max} = 5\%$ 。IP-GA 的参数为种群大小 $W = 5$,交叉概率 $p_c = 0.50$,变异概率 $p_m = 0.02$,迭代次数为 100。在代

理模型更新管理策略中,阈值参数 σ 和 η 分别设置为 0.30 和 0.20。各迭代步中的样本点个数与 Δ_{\max} 见表 2,各迭代步中设计变量的采样区间见表 3。

4.5 乘员约束系统优化设计流程

乘员约束系统优化设计步骤如下:

1) 运用最优拉丁超立方设计获取样本点,并设置最大允许误差 δ_{\max} 和初始迭代步数 $s = 1$ 。

2) 把初始样本点代入 MADYMO 仿真软件,获得 $f_{W_c}(\mathbf{X})$ 和 $g(\mathbf{X})$ 的仿真值。

3) 构建目标函数和约束函数的代理模型,得到如式(7)~(8)所示的汽车乘员约束系统近似优化问题,采用 IP-GA 求解该优化问题,并得到近似目标函数的最优解 $\tilde{f}_{W_c}^{(s)}(\mathbf{X}^*)$ 与近似约束函数值 $\tilde{g}^{(s)}(\mathbf{X}^*)$ 。

4) 利用 MADYMO 仿真软件计算目标函数的实际响应值 $f_{W_c}^{(s)}(\mathbf{X}^*)$ 和实际约束函数值 $g^{(s)}(\mathbf{X}^*)$ 。

5) 利用式(15)计算最优解 \mathbf{X}^* 对应的最大误差 Δ_{\max} 。如果 $\Delta_{\max} < \delta_{\max}$,则输出优化解 \mathbf{X}^* 。

本研究利用 IP-GA 求解式(7)、式(8)中的近似优化问题。表 4 为优化解与仿真值的误差对比。由表 4 可知,乘员损伤响应的优化值与仿真值之间的相对误差均小于 5.00%。这说明代理模型精度

表 2 各迭代步中样本点个数与最大误差

Table 2 Number of samples in each iteration step and Δ_{\max}

迭代步	局部新增样本点个数	全局新增样本点个数	总样本点个数	$\Delta_{\max}/\%$
1	0	0	60	61.51
2	3	2	65	62.16
3	3	2	70	4.77

表 3 各迭代步中设计变量的采样区间

Table 3 Sampling interval of design variables in each iteration step

迭代步	X_1	X_4	X_5	X_6
1	[0.82, 0.92]	[-0.20, 0.00]	[-1.47, -1.37]	[0.06, 0.15]
2	[0.87, 0.88]	[-0.20, -0.19]	[-1.38, -1.37]	[0.06, 0.07]
3	[0.88, 0.89]	[-0.01, 0.00]	[-1.46, -1.47]	[0.06, 0.07]

较高。优化设计解(0.89, 0.00, -1.46, 0.06)对应的乘员损伤值都没有超出安全范围,因此该优化解符合设计要求。

本文方法的仿真值与优化后的文献[7]方法的仿真值如表5所示。由表5可知,相对于优化后的文献[7]的结果,本文得出的 H_{IC} 、 W_{IC} 的仿真值分别下降了7.10%和4.11%,其他损伤响应仿真值略微上升。但因为本文的重点是 W_{IC} 仿真值的比较,故其他损伤响应仿真值的影响不大。由此可见,使用本文方法比使用文献[7]中的方法可以使

乘员约束系统对乘员的保护效果更好。

表4 优化值与仿真值对比

Table 4 Comparison of optimized and simulated values

损伤指标	仿真值	优化值	相对误差/%
H_{IC}	802.53	764.27	-4.77
$C_{3ms}/(m \cdot s^{-2})$	427.95	440.12	2.84
D/mm	37.60	38.40	2.13
F_{FL}/kN	1.02	1.02	0.00
F_{FR}/kN	1.26	1.27	0.79
W_{IC}	0.70	0.69	-1.43

表5 优化后的两种方法仿真值的对比

Table 5 Comparison of simulated values of two methods after optimization

损伤指标	优化后的文献[7]中的方法	本文方法	相对误差/%
H_{IC}	863.90	802.53	-7.10
$C_{3ms}/(m \cdot s^{-2})$	419.39	427.95	2.04
D/mm	37.42	37.60	0.48
F_{FL}/kN	1.00	1.02	2.00
F_{FR}/kN	1.25	1.26	0.80
W_{IC}	0.73	0.70	-4.11

6 讨论

6.1 本研究工作的依据与意义

目前,汽车已经融入人们的生活,成为人们快速、方便的交通工具,对人类社会的发展作出了举足轻重的贡献。我国汽车数量逐年增加,与此同时,汽车交通事故也频繁发生。这不仅给我国的道路交通带来了严峻挑战,还严重威胁乘员的生命和财产安全。研究表明,良好的乘员约束系统可有效地减少乘员损伤,降低乘员的死亡率。

因此,本研究针对乘员约束系统结构进行优化设计,求解出乘员约束系统的最优解,增强了乘员约束系统对乘员的保护性能。

6.2 本研究方法的优劣

本研究与文献[3,5,7]都是基于代理模型和优化算法对乘员约束系统进行优化设计,均增强了乘员约束系统对乘员的保护能力。但是,与实际应用中的一些新型乘员约束系统的配置相比,本研究提出的乘员约束系统的配置过低,并且存在优化解(0.89, 0.00, -1.46, 0.06)精度过高的问题,但该优化解可为实际工程中乘员约束系统参数的取值提供参考。

另外,实际加工误差导致实际加工与仿真优化的结果相差比较大。因此,后续研究应尽可能考虑实际应用中存在的问题。

7 结论

1) 本文建立了乘员约束系统仿真模型,并将仿真结果与基于实车碰撞试验数据进行对比,证实了该仿真模型的有效性。本研究通过灵敏度分析方法和线性加权法,成功筛选出了对乘员损伤响应影响较大的变量,并将其作为优化设计变量,从而提高了计算效率。

2) 为了提高优化效率和近似模型的精度,本文提出了包含局部评估指数、遗传拉丁超立方设计和加权欧式距离准则在内的多准则样本更新管理策略,并应用代理模型和IP-GA对乘员约束系统进行优化。该方法不仅能提高乘员的安全指数,减少试验次数和降低试验成本,还为实际工程设计分析提供了理论依据。

[参考文献]

- [1] GREENSTON M, WOOD R L, REINHART L. Clinical significance of the seat belt sign as evidence of a compromised occupant-seat belt relationship [J]. The Journal of Emergency Medicine, 2019, 56(6): 624-

632. DOI: 10.1016/j.jemermed.2019.01.035.
- [2] ZHANG J Y, WANG D Q, NI Y Y, et al. A two degrees of freedom model-based optimization method for occupant restraint systems in vehicle crash [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 60: 2597-2614. DOI: 10.1007/s00158-019-02340-5.
- [3] 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. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2019.011.011.
- ZHENG Jianzhou, CHEN Yousong, LYU Binbin, et al. A study on safety performance optimization of seat subsystem based on Kriging model [J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(11): 1301-1307. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2019.011.011.
- [4] 刘鑫,张远洋. 基于混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(1): 95-101. DOI: 10.19951/j.cnki.csldxzbzkb.2021.01.012.
- LIU Xin, ZHANG Yuanyang. Reliability-based design optimization for vehicle structural crashworthiness based on hybrid model [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(1): 95-101. DOI: 10.19951/j.cnki.csldxzbzkb.2021.01.012.
- [5] 张海洋,胡帅帅,周大永,等. 基于PSO-SVR近似模型的乘员约束系统稳健性优化[J]. *汽车工程*, 2020, 42(4): 462-467. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.04.007.
- ZHANG Haiyang, HU Shuashuai, ZHOU Dayong, et al. Robust optimization of occupant restraint system based on PSO-SVR approximation model [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(4): 462-467. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.04.007.
- [6] 谷先广,高梦琳,王笑乐,等. 基于GWO-KRG近似模型的乘员约束系统可靠性优化设计[J]. *汽车工程*, 2021, 43(6): 870-876, 884. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2021.06.010.
- GU Xianguang, GAO Menglin, WANG Xiaole, et al. Reliability optimization design of occupant restraint system based on GWO-KRG surrogate model [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(6): 870-876, 884. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2021.06.010.
- [7] 刘鑫,刘祥,周振华,等. 基于自适应代理模型的汽车乘员约束系统优化设计[J]. *汽车工程*, 2020, 42(7): 887-893. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.07.007.
- LIU Xin, LIU Xiang, ZHOU Zhenhua, et al. Design optimization of vehicle occupant restraint system based on adaptive surrogate model [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(7): 887-893. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.07.007.
- [8] WANG Q Y, NAKASHIMA T, LAI C G, et al. Modified algorithms for fast construction of optimal Latin-hypercube design [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 191644-191658. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032122.
- [9] PANG T H, WANG Y, YANG J F. Asymptotically optimal maximin distance Latin-hypercube designs [J]. *Metrika*, 2022, 85: 405-418. DOI: 10.1007/s00184-021-00833-2.
- [10] 刘鑫,陈德,周振华,等. 基于概率-区间混合模型的汽车乘员约束系统可靠性优化设计[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(20): 240-246. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.20.030.
- LIU Xin, CHEN De, ZHOU Zhenhua, et al. Reliability-based design optimization for an occupant restraint system based on a probability and interval hybrid model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(20): 240-246. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.20.030.
- [11] 荣见华,李政威,赵志军,等. 考虑地震荷载的框架结构拓扑优化设计[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(4): 74-82. DOI: 10.19951/j.cnki.csldxzbzkb.2021.04.011.
- RONG Jianhua, LI Zhengwei, ZHAO Zhijun, et al. Topology optimization design of frame structure considering seismic load [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(4): 74-82. DOI: 10.19951/j.cnki.csldxzbzkb.2021.04.011.
- [12] 王永雷,石宣,张文接,等. 穿越断层隧道留核心土开挖支护参数优化分析[J]. *公路与汽运*, 2024, 40(6): 132-138. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.026.
- WANG Yonglei, SHI Xuan, ZHANG Wenjie, et al. Optimization analysis of excavation and support parameters of retaining core soil in tunnel crossing fault [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2024, 40(6): 132-138. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.026.

(责任编辑:彭三军;校对:刘平)