

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.005

基于稳健性和多目标优化的车顶 结构轻量化设计研究

周定智,王 霄*,刘会霞,苏占龙,高传玉
(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:针对国内外顶结构轻量化的研究多是单目标优化,且没有考虑不确定性因素影响的问题,提出了一种基于多目标优化和 6σ 稳健性设计的车顶结构轻量化设计方法。通过参数试验设计进行了灵敏度分析,筛选出了对车顶响应贡献量较大的结构件厚度作为设计变量;采用最优拉丁超立方设计和响应面法建立了车顶各响应的近似模型;以设计变量总质量、覆雪强度、抗凹性能为优化目标,前三阶模态频率为约束条件,基于近似模型,运用第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行了确定性多目标优化,得到确定性多目标优化结果;运用蒙特卡洛模拟技术对确定性多目标优化结果进行了 6σ 质量分析,并进行了 6σ 稳健性多目标优化。优化结果表明,车顶结构在满足各性能要求的情况下实现了轻量化,质量减轻 3.77 kg,且覆雪强度提高,同时车顶结构各工况性能的稳健性提高,达到 6σ 质量水平。

关键词:车顶结构;轻量化;多目标优化设计; 6σ 稳健性优化;试验设计;RSM

中图分类号:U463.82;TH164;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1170-06

Roof structure lightweight design based on robustness and multi-objective optimization

ZHOU Ding-zhi, WANG Xiao, LIU Hui-xia, SU Zhan-long, GAO Chuan-yu
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problem that research on lightweight of the roof structure at home and abroad are mostly single-objective optimization and do not consider the influence of uncertainty factors, a method of roof structure lightweight design based on multi-objective optimization and 6σ robustness design was presented. The sensitivity of design variable was analyzed through parameter study and the thickness of structural parts which contribute more to the response of the roof structure were selected as a design variable. Optimal Latin hypercube design and response surface methodology were applied to establish approximate models of each response of the roof. Total mass of design variables, strength of roof-snow and dent resistance as the optimization objectives, the first three modal frequencies as constraint, based on approximate models, deterministic optimal solution was obtained by using the Non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). With the using of monte carlo simulation techniques, 6σ quality of deterministic multi-objective optimization results of roof structure was analyzed and 6σ robustness multi-objective optimization of roof structure was conducted. The optimization results indicate that under the situation of meeting requirements of all performance, the mass of the total mass of design variables was reduced by 3.77 kg and the strength of roof-snow is increased. At the same time, the robustness of each working condition performance of the roof structure also was improved, reaching six sigma quality level.

Key words: roof structure; lightweight; 6σ robustness multi-objective optimization; DOE; RSM

0 引 言

面对日益恶化的环境状况和日益枯竭的能源状

况,轻量化设计已经成为汽车行业关注的焦点,是汽车公司的核心竞争力之一。车顶结构是汽车的大型覆盖件之一,在车身质量中占有较大比重,对车顶结构进行

收稿日期:2015-04-30

作者简介:周定智(1987-),男,湖南邵阳人,主要从事汽车结构优化设计方面的研究。E-mail:zd7855@163.com

通信联系人:王 霄,男,教授,研究生导师。E-mail:wx@ujs.edu.cn

轻量化研究,不仅能减少车身质量,而且可为整车轻量化研究提供支撑。轻量化优化设计过程中需要考虑产品的各项性能,找到系统整体的最优解,是一个多学科集成的优化设计过程。目前国内的轻量化优化设计主要是单目标^[1-4],把质量最小作为唯一优化目标,系统其他性能作为约束,这样并不能使系统其他性能尽可能达到最优。

现阶段绝大多数的车顶结构轻量化优化设计是在约束条件下寻找最优解,属于确定性优化,而并没有考虑不确定性因素。实际生产中存在许多不确定性因素,例如制造精度、材料特性和载荷状况等,引起性能指标的波动,可能使设计超出约束条件而致使设计失效。与确定性优化设计相比,6 σ 稳健性优化设计考虑不确定性因素对产品性能指标和质量水平的影响。通过将可靠性设计和基于容差模型的稳健性设计相结合,使响应均值远离约束,并减小响应偏差,可同时满足优化的可靠性和稳健性^[5-7]。当前,关于多学科集成优化与6 σ 稳健性设计已逐步在汽车开发中得以应用。周会锋等^[8]考虑了白车身的刚度、模态等对某车型的白车身进行多学科集成的轻量化设计,在保证性能要求的基础上实现白车身质量减小1.5%。文献^[9]中采用6 σ 稳健性优化方法对车门进行了轻量化研究,在实现轻量化的同时,提高了响应的稳健性。然而,多学科集成的多目标优化与6 σ 稳健性设计应用于车顶结构轻量化设计的研究,国内外文献中鲜有报道。

鉴于此,本研究将多学科集成的多目标优化与6 σ 稳健性设计应用于车顶结构轻量化设计。以车顶结构的模态特性、抗凹性能、覆雪强度多种工况性能最优以及设计变量总质量最小为优化目标,综合试验设计(DOE)、响应面法、优化算法和蒙特卡洛模拟技术,对某微型客车车顶结构进行6 σ 稳健性多目标轻量化设计。

1 车顶结构设计要求及优化设计流程

车顶结构在雪压作用下会产生凹陷变形,随着覆雪厚度增加,变形量增加,若变形过大,会造成整体结构失稳或顶盖局部的超大塑性变形^[10]。对车顶覆雪强度的评价,各国没有统一标准。本研究采用的评价准则是:车顶在一定厚度的覆雪作用下,车顶最大下陷位移 y_2 越小车顶覆雪强度越好,当车顶覆雪厚度达到1.58 m时,车顶最大下陷位移不超过20 mm为合格。

车顶结构的低阶弹性模态是控制汽车常规振动的关键指标,而且反映汽车车顶结构的整体刚度性能。

根据该车型模态规划表,车顶结构的1阶模态频率 f_1 、2阶模态频率 f_2 和3阶模态频率 f_3 应分别满足 $f_1 \geq 35$ Hz、 $f_2 \geq 40$ Hz和 $f_3 \geq 45$ Hz,以避免与激励频率接近而产生共振。

抗凹性能是反应覆盖件使用性能的一项重要特性,可分为静态抗凹性能和动态抗凹性能,而静态抗凹性能是指板件抵抗由静态载荷所引起永久变形的能力,这些载荷包括按压、触摸、置放行李时用手或肘部所施加的力等。静态抗凹性能是评价结构性能的基本标准,本研究仅考虑车顶静态抗凹性能。以检验载荷 F 作用下产生的凹陷位移 y_1 作为检验依据,当 $y_1 \leq y_c$ (y_c 是检验限定值)则合格,否则不合格。关于检验载荷 F 和限定位移 y_c ,各国还没有统一标准,本研究依照企业标准,即在40 N载荷作用下凹陷位移 y_1 不超过2 mm为合格,否则为不合格。

本研究基于稳健性设计理念,考虑车顶结构的模态特性、抗凹性能、覆雪强度多种工况,以车顶结构设计变量总质量、抗凹性能、覆雪强度作为优化目标,将试验设计、近似建模技术、Monte Carlo模拟技术和6 σ 稳健优化技术相结合,进行稳健性多目标优化。具体的优化流程分为5步:

- (1) 确定车顶结构设计要求,建立各工况有限元模型;
- (2) 通过解析试验分析,筛选出对车顶性能响应贡献量较大的设计变量;
- (3) 基于拉丁超立方试验设计,为确定性多目标优化和稳健性多目标优化构建精度满足分析要求的二阶响应面模型;
- (4) 在响应面模型的基础上,采用多目标遗传算法NSGA-II进行确定性多目标优化;
- (5) 对确定性优化方案进行6 σ 质量分析,如果没有达到6 σ 质量水平,则基于响应面模型对确定性优化方案进行稳健性优化。

基于响应面模型技术的车顶结构稳健性多目标优化流程如图1所示。

2 基于稳健性的车顶结构多目标优化设计

2.1 车顶结构各工况有限元模型

有限元模型中主要钣金间的连接方式为焊接。其中,钣金采用壳单元模拟,单元基本尺寸为10 mm,采用四边形单元,少量三角形单元用于过渡结构。本研究采用HyperMesh做前处理,点焊采用直径5 mm的Cweld单元模拟,顶盖与横梁之间的胶连接采用adhe-

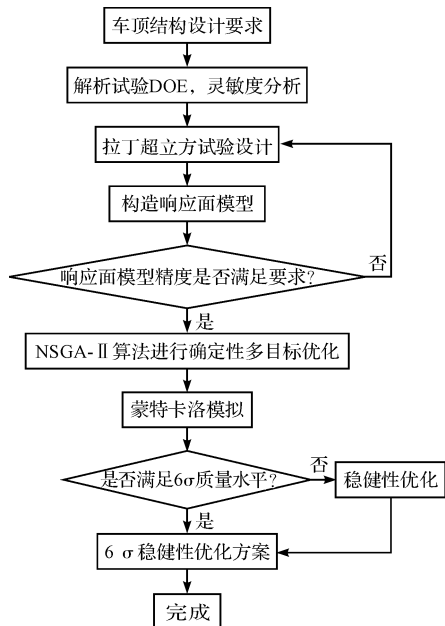


图 1 优化流程

sive(shell gap)单元模拟。

车顶覆雪强度分析的有限元模型包括白车身、前罩板、车门、及挡风玻璃等,车顶覆雪强度分析的有限元模型如图 2 所示。

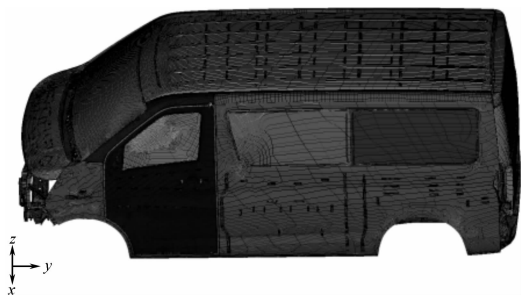


图 2 车顶覆雪强度分析的有限元模型

有限元模型中,车顶表面覆雪厚度—时间函数为:

$$H(t) = 2.26t, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

式中: $H(t)$ —覆雪厚度, t —时间。雪密度取 0.25 g/cm^3 。

车顶结构模态分析的有限元模型是整车有限元模型的截断部分,本研究根据需要截取车顶的主要结构,有限元模型如图 3 所示。笔者在车顶结构有限元模型的截断处约束全部自由度,截取的车顶结构有限元模型在这种约束条件下符合整车结构要求。



图 3 截取的车顶结构有限元模型

车顶结构抗凹性能分析的对象为整车截断的车顶结构,截断部分为全约束,在薄弱点处加载物体是直径为 12 mm 、倒角 0.5 mm 刚性柱,作用力为 40 N 。车顶抗凹分析加载点位置编号及加载刚性圆柱的有限元模型如图 4 所示。

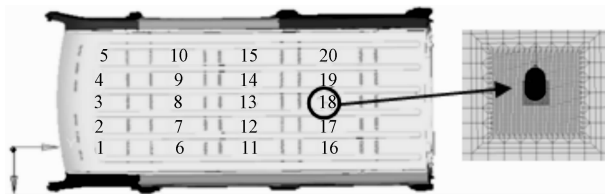


图 4 参考点位置及加载刚性圆柱的有限元模型

2.2 设计变量筛选

本研究选取对车顶性能影响较大的车顶结构件的厚度作为设计变量,设计变量示意图如图 5 所示,共 13 个设计变量。

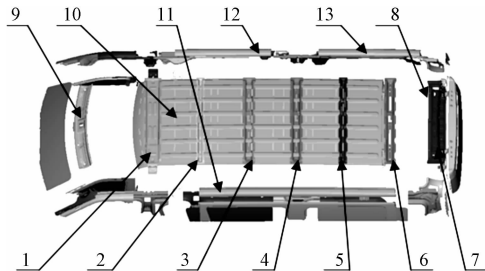


图 5 设计变量示意图

1— T_1 ; 2— T_2 ; 3— T_3 ; 4— T_4 ; 5— T_5 ; 6— T_6 ; 7— T_7 ; 8— T_8 ; 9— T_9 ; 10— T_{10} ; 11— T_{11} ; 12— T_{12} ; 13— T_{13}

为使优化设计更有效率,本研究对变量进行灵敏度分析并筛选出对车顶结构性能影响显著的设计变量。已知设计因子(钣金厚度)之间交互作用不显著,参数试验是很好的灵敏度分析方法。参数试验^[11]分析次数为:

$$1 + \sum_{i=1}^m n_i \quad (2)$$

式中: n_i —第 i 个因子的水平数, m —因子的个数。

本研究中 13 个设计变量 5 水平,试验次数为 65 次。笔者根据参数试验安排仿真分析计算,获取设计变量对各性能贡献量的排序,Pareto 图如图 6 所示。Pareto 图反映设计变量对每个响应的贡献程度百分比,白色的条表示正效应,黑色的条表示反效应。综合分析 Pareto 图,笔者选取对各响应贡献程度较大的梁 1 的厚度 T_1 、梁 2 的厚度 T_2 、梁 3 的厚度 T_3 、梁 4 的厚度 T_4 、梁 5 的厚度 T_5 、梁 6 的厚度 T_6 、后横梁的厚度 T_8 、顶盖的厚度 T_{10} 作为设计变量,并根据工程经验和工艺要求定义设计变量的取值范围,设计变量

如表 1 所示。考虑加工工艺因素,在实际加工过程中钣金的厚度存在一定的不确定性,本研究假设钣

金厚度服从以设计值为均值的正态分布,变异系数取值 0.01。

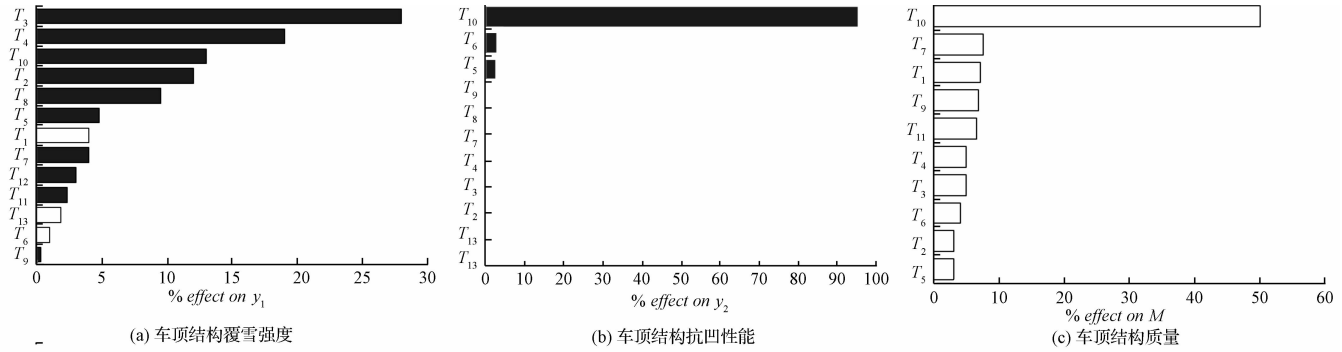


图 6 Pareto 图

2.3 响应面近似模型构建

RSM 是一种利用多项式函数拟合设计空间的近似模型方法,它可以通过较少的试验,在局部范围内比较精确地逼近函数关系,并用简单的代数式表达

出来,计算简单,设计优化方便,但不能保证响应面通过所有的样本点,存在一定的误差。如果响应面近似模型具有足够的精度,则可以使用近似模型替代仿真程序。

表 1 设计变量

设计变量	描述	初始值/mm	取值范围/mm	分布类型	变异系数
T_1	横梁 1	1.2	0.8,1.0,1.2,1.4,1.5	正态分布	0.01
T_2	横梁 2	1.2	0.8,1.0,1.2,1.4,1.5	正态分布	0.01
T_3	横梁 3	1.2	0.8,1.0,1.2,1.4,1.5	正态分布	0.01
T_4	横梁 4	1.2	0.8,1.0,1.2,1.4,1.5	正态分布	0.01
T_5	横梁 5	1.2	0.8,1.0,1.2,1.4,1.5	正态分布	0.01
T_6	横梁 6	1.2	0.8,1.0,1.2,1.4,1.5	正态分布	0.01
T_8	后横梁	0.7	0.5,0.6,0.7,0.8,1.0	正态分布	0.01
T_{10}	顶盖	0.8	0.5,0.6,0.7,0.8,1.0	正态分布	0.01

本研究通过最优拉丁超立方试验设计方法生成 64 个样本点,分别计算车顶结构 1 阶模态频率 f_1 、2 阶模态频率 f_2 、3 阶模态频率 f_3 、凹陷位移、最大下陷位移、设计变量总质量 M ,采用二阶响应面法拟合样本数据,构建近似模型。设计变量总质量 M 的数学表达式为:

$$M = 2.5509 + 2.2057T_1 + 1.1969T_2 + 1.5849T_3 + 1.5849T_4 + 1.1979T_5 + 1.4659T_6 + 1.8437T_8 + 32.484T_{10} \quad (3)$$

本研究采用决定系数 R^2 检验近似模型精度,决定系数 R^2 越接近 1,则说明响应面模型越接近真实模型,其精度值越高。若近似模型精度不满足要求,则增加样本点重新构造近似模型。近似模型精度如表 2 所示,其中列出了各响应的决定系数 R^2 ,其值达到可接受水平,近似模型满足精度要求。

表 2 近似模型精度

输出参数	f_1	f_2	f_3	y_1	y_2	M
R^2 值	0.998	0.985	0.999	0.996	0.967	1

2.4 确定性多目标优化

本研究以车顶结构设计变量总质量 M 最小,抗凹工况车顶凹陷位移最小、覆雪强度工况车顶最大下陷位移最小为优化目标,对车顶结构进行确定性多目标优化。确定性多目标优化模型表示为:

$$\begin{aligned} & \min M; \min y_1; \min y_2; \\ \text{s. t. } & y_1 \leq 2 \text{ mm}, y_2 \leq 20 \text{ mm}, f_1 \geq 35 \text{ Hz}, \\ & f_2 \geq 40 \text{ Hz}, f_3 \geq 45 \text{ Hz} \\ & T_i^L \leq T_i \leq T_i^U, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 \end{aligned}$$

由于多目标函数之间的矛盾性质,让每个目标函数同时达到各自的最优解是不存在的。解决多目标优化问题,最终只能是在各个目标之间进行协调权衡和折中处理,让各自目标尽可能达到最优,即所要找的并不是所有目标的最优解,而是所谓的 Pareto 解^[5]。本研究在响应面模型的基础上,采用 NSGA-II 进行确定性优化,极大的减少了计算时间,提高了多目标遗传算法实际应用的可行性,最终得到一个 Pareto 解集如图 7 所示。初始值、确定性最优解和稳健性最优解如表 3 所示。

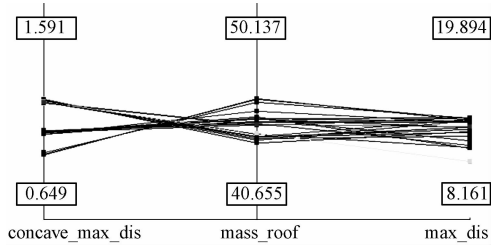


图 7 Pareto 解集

根据设计需求,笔者从 Pareto 解集中选取满意的最优解,如表 3 第 3 列所示确定性优化方案。车顶结构设计变量总质量 M 减轻 4.33 kg,减重达 12.1%,轻量化效果明显;车顶下陷位移 y_2 从 14.89 mm 减小到 5.59 mm,车顶覆雪强度优化效果显著;车顶凹陷位移从 1.04 mm 增大至 1.59 mm,但仍小于 2 mm,车顶抗凹性能虽然有所下降,但在可接受范围内。

表 3 初始值、确定性最优解和稳健性最优解

变量	初始值	确定性最优解				6 σ 稳健性最优解			
		结果	标准差 σ	σ 水平	可靠度	结果	标准差 σ	σ 水平	可靠度
T_1 /mm	1.2	0.8	0.008	8	1.000	0.8	0.008	8	1.000
T_2 /mm	1.2	1.0	0.01	8	1.000	1.0	0.01	8	1.000
T_3 /mm	1.2	1.0	0.01	8	1.000	1.2	0.012	8	1.000
T_4 /mm	1.2	0.8	0.01	8	1.000	1.0	0.01	8	1.000
T_5 /mm	1.2	1.5	0.018	8	1.000	1.2	0.012	8	1.000
T_6 /mm	1.2	0.8	0.012	8	1.000	1.0	0.01	8	1.000
T_8 /mm	0.7	0.5	0.007	8	1.000	0.6	0.006	8	1.000
T_{10} /mm	0.8	0.6	0.01	8	1.000	0.6	0.006	8	1.000
f_1 /Hz	35.22	35.33	0.187	2.01	0.956	35.558	0.117	8	1.000
f_2 /Hz	41.25	40.108	0.083	1.69	0.909	40.271	0.074	8	1.000
f_3 /Hz	47.02	45.656	0.231	3.09	0.998	45.798	0.141	8	1.000
y_1 /mm	1.04	1.59	0.194	2.37	0.982	1.58	0.111	8	1.000
y_2 /mm	14.89	5.59	3.019	8.0	1.000	9.66	1.352	8	1.000
M /kg	35.88	31.55	1.027	—	—	32.11	0.589	—	—

2.5 稳健性多目标优化

2.5.1 确定性优化方案质量分析

车顶结构的多目标确定性优化方案在至少一个约束条件下逼近约束边界,当输入参数(钣金厚度)发生扰动时,确定性优化方案极有可能违反约束条件,从而导致优化方案失效。因此有必要进行 6 σ 质量分析,评估该优化方案的可靠性和质量水平。

6 σ 质量分析的目的在于评价确定性优化方案的质量水平,是 6 σ 稳健性优化的基础,其基本思想是对当前设计点进行扰动,在其平均值周围生成一组样本点,然后通过统计分析估计单一设计点上的输出响应指标的 σ 质量水平、可靠度、失效率和百万不良品率等,同时统计各输出响应指标的均值和标准差。常用的算法包括基于可靠性评价、基于蒙特卡洛抽样和基于试验设计等。

本研究采用蒙特卡洛抽样法检验确定性优化方案的质量水平,选取确定性优化方案中的 8 个计变量作为噪声因素,并定义其方差,在前面建立的二阶响应面的基础上,采用描述性抽样方法采集样本点,抽样次数为 1 000 次,获得确定性优化方案的 σ 质量水平、标准差 σ 和可靠度,如表 3 第 4、5、6 列所示。车顶结构的 1 阶模态频率 f_1 、2 阶模态频率 f_2 、3 阶模态频率 f_3 和凹陷位移 y_1 没有达到 6 σ 质量水平,可靠性低于

99.999 999 8%,需要进行 6 σ 稳健性优化。

2.5.2 6 σ 稳健性多目标优化

为了提高该车结构响应的稳健性,本研究引入 6 σ 稳健性优化技术。稳健优化设计中,目标函数的稳健性与约束函数的稳健性都应该考虑,需要减小和控制目标函数和约束函数响应的波动,降低响应在设计点上的敏感性,即减小响应的均方差,实现均值达到目标和均方差最小化的目的。与确定性目标优化相对应的车顶结构 6 σ 稳健性多目标优化数学模型可表示为:

$$\begin{aligned}
 & \min \mu(M) + 6\sigma(M); \\
 & \min \mu(y_1) + 6\sigma(y_1); \\
 & \min \mu(y_2) + 6\sigma(y_2); \\
 \text{s. t. } & \mu(y_1) + 6\sigma(y_1) \leq 2 \text{ mm} \\
 & \mu(y_2) + 6\sigma(y_2) \leq 20 \text{ mm} \\
 & \mu(f_1) - 6\sigma(f_1) \geq 35 \text{ Hz} \\
 & \mu(f_2) - 6\sigma(f_2) \geq 40 \text{ Hz} \\
 & \mu(f_3) - 6\sigma(f_3) \geq 45 \text{ Hz} \\
 & T_i^l \leq T_i \leq T_i^u \\
 & i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10
 \end{aligned}$$

6 σ 稳健性优化依然基于前面构建的二阶响应面近似模型,采用描述性抽样方法采集样本点,抽样 1 000 次,选取 8 个设计变量和 8 个噪声因素,设计变

量和噪声因素的取值范围如表1所示,笔者采用多目标遗传算法 NSGA-II 进行稳健性优化。

本研究通过 6σ 稳健性多目标优化,使得车顶结构输入输出参数达到 6σ 质量水平,稳健性提高,获得的优化结构如表3第7、8、9、10列所示。相比确定性最优解, 6σ 稳健性最优解的车顶结构设计变量总质量 M 比确定性优化方案(31.55 kg)增加 0.56 kg,但比初始方案(35.88 kg)减小 3.77 kg,减重达 10.5%,轻量化效果显著。 6σ 稳健性最优解的车顶最大下陷位移 y_2 是 9.66 mm,较确定性优化方案的 5.59 mm 增大了 4.07 mm,但比初始方案 14.89 mm 减小 5.23 mm,车顶覆雪强度得到提高; y_2 的标准差从 3.019 mm 减小到 1.352 mm,覆雪强度对不确定性因素和设计变量波动的敏感性降低,稳健性提高。 6σ 稳健性最优解的车顶凹陷位移 y_1 是 1.58 mm,较确定性优化方案的 1.59 mm 减小了 0.01 mm,质量水平从 2.37σ 提高到 8σ ,且标准差减小,车顶抗凹性能对不确定性因素和设计变量波动的敏感性降低,稳健性提高。 6σ 稳健性最优解的车顶结构 1 阶模态频率、2 阶模态频率 f_2 和 3 阶模态频率 f_3 较确定性优化方案变化微小,但质量水平分别从 2.01σ 、 1.69σ 和 3.09σ 提高至 8σ ,且其标准差均减小,前三阶模态频率对不确定性因素和设计变量的波动的敏感性降低。

3 结束语

本研究根据基于多目标优化和 6σ 稳健性设计的车顶结构轻量化设计方法得出以下结论:

(1) 构建了满足精度要求的二阶响应面近似模型,结合第二代非支配排序遗传算法 NSGA-II 对车顶结构进行了优化设计,优化效率极大地得到了提高。

(2) 考虑车顶结构多工况性能的最优,采用多目标优化对车顶结构进行轻量化设计,得到了满意的设计结果,可以根据实际需要在 Pareto 解集中选择满意的最优化解。

(3) 通过 6σ 稳健性多目标优化,车顶结构各性能满足 6σ 质量水平,对不确定性因素和设计变量波动的敏感性降低。该方法为汽车轻量化设计提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 朱晓晶,籍庆辉,朱平. 基于多种工况下的自卸车车厢轻量化设计[J]. 机械设计,2014,31(5):47-51.
- [2] ZHU P, ZHANG Y, CHNE G L. Metamodel-based lightweight design of an automotive front-body structure using robust optimization[J]. *Proc Institution of Mech Engi, Part D: J Automobile Engi*,2009,223(9):1133-1147.
- [3] 张继游,门永新,彭鸿,等. 稳健性和轻量化在整车侧面碰撞性能优化中的应用[J]. 汽车安全与节能学报,2013,4(4):339-347.
- [4] 张伟,张鲲鹏,戴铁,等. 轻量化车身车顶抗压设计优化[J]. 计算机辅助工程,2012,21(2):46-49
- [5] 钱立军,丁玲,祝安定. 基于 iSIGHT 的薄壁梁件抗撞性多目标优化[J]. 合肥工业大学学报,2014,37(2) 145-149.
- [6] KOCH P N, YANG R J, GU L. Design for six sigma through robust optimization [J]. *Struc and Multidis Optim*,2004,26(3-4):235-248.
- [7] SINHA K. Reliability-based multi-objective optimization for automotive crashworthiness and occupant safety [J]. *Struc and Multidis Optim*,2007,33(3):255-268.
- [8] 周会锋,王光耀,李碧浩. 多目标优化设计方法在车身轻量化设计中的应用[J]. 机械设计与研究,2014,30(4):151-155.
- [9] 黄石华,成艾国. 基于 6σ 稳健性的拼焊板车门轻量化研究[J]. 汽车工程,2011,33(3):262-266.
- [10] 刘爽,高云凯,张鲲鹏. 轿车车顶结构的综合性能分析与评价[J]. 汽车技术,2012(1):17-21.
- [11] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

周定智,王霄,刘会霞,等. 基于稳健性和多目标优化的车顶结构轻量化设计研究[J]. 机电工程,2015,32(9):1170-1175.

ZHOU Ding-zhi, WANG Xiao, LIU Hui-xia, et al. Roof structure lightweight design based on robustness and multi-objective optimization [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(9):1170-1175.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>