

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.013

基于灵敏度分析的机动方舱轻量化设计

范永见¹,周大庆¹,邢通²,陈建康²,邓志涛²,左敦稳¹,李军¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 鹤壁天海电子信息系统有限公司,河南 鹤壁 458030)

摘要:轻量化设计可提高方舱机动性与快速响应性,基于某方舱动静态分析结果,发现方舱存在刚度冗余,开展轻量化设计研究。在保证结构安全的条件下,采用高强度铝合金作为骨架材料,对方舱进行材料优化。以质量和变形最小为目标,以强度为约束,通过灵敏度分析确定优化设计变量,采用拉丁超立方方法构建响应面近似模型,基于多目标遗传算法对方舱进行多目标尺寸优化。结果表明:方舱质量减少 337.7 kg,减质量 15.7%,轻量化效果良好。

关键词:轻量化;机动方舱;灵敏度分析;响应面;尺寸优化

中图分类号:TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0067-04

Lightweight Design of Mobile Shelter Based on Sensitivity Analysis

Fan Yongjian¹, Zhou Daqing¹, Xing Tong², Chen Jiankang², Deng Zhitao², Zuo Dunwen¹, Li Jun¹(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Hebi Tianhai Electronic Information System Co., Ltd., Hebi 458030, China)

Abstract: Lightweight design can improve the mobility and rapid response capability of shelters. Based on the dynamic and static analysis results of a certain shelter, stiffness and strength redundancy were identified, leading to a study on lightweight design. Under the premise of ensuring structural safety, high-strength aluminum alloy was adopted as the skeleton material for material optimization of the shelter. The objectives are to minimize both mass and deformation, with strength constraints. With mass and deformation minimization as objectives and strength as constraints, sensitivity analysis was conducted to determine the optimal design variables. A response surface approximation model was constructed using the Latin hypercube sampling method, and multi-objective dimensional optimization of the shelter was performed based on a multi-objective genetic algorithm. The results show that the shelter mass was reduced by 337.7 kg, achieving a 15.7% weight reduction, demonstrating a favorable lightweighting effect.

Keywords: lightweight; mobile shelter; sensitivity analysis; response surface; dimensional optimization

0 引言

方舱指为人员及设备提供适宜的工作环境的刚性箱式工作间^[1],以其较强的机动性和环境适应性被广泛应用于救灾、医疗、工程现场和野外作战等领域。方舱主要由蒙皮、骨架和聚氨酯泡沫制成的多块复合大板拼接而成,整体结构较为笨重。在保证方舱结构性能的前提下,对方舱进行轻量化,可有效降低方舱质量,从而提升其机动性和快速响应性。

常见的轻量化方法包括材料轻量化和结构尺寸优化。方舱轻量化设计多体现出材料优化。代晋等^[2]将方舱的骨架材料替换为玻璃钢,材料优化后的方舱质量减轻 20%~25%,轻量化方舱骨架刚度降低。范晋博^[3]针对方舱大板的夹芯结

构,设计了一种分层梯度蜂窝夹芯板,通过了试验和仿真验证,方舱质量减轻 13.46%。

方舱部件数量较多,采用灵敏度分析筛选出对结构性能影响较大的因素,提高结构尺寸优化效率^[4]。秦强等^[5]利用灵敏度分析,发现导弹舱体内径对舱体结构可靠度影响最大。周长鹤^[6]采用灵敏度分析筛选潜水器非耐压骨架厚度设计变量,优化后骨架质量降低 15.7%。王旭飞等^[7]以转弯和制动工况对纯电动客车骨架进行轻量化设计,基于灵敏度分析以减小设计变量的数量,客车骨架质量减小 339 kg。王登峰等^[8]对某纯电动客车骨架进行多目标轻量化设计,使用相对灵敏度分析筛选出了对骨架性能不敏感但对减质量敏感的车身壁厚设计变量,使用尺寸优化和多目标遗传算法在满足车身结构性能的前提下,实现减质

基金项目:江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(JXQC-010)

第一作者简介:范永见(1999—),男,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为轻量化设计,2512509263@qq.com。

通信作者简介:李军(1979—),男,教授,博士,研究方向为精密超精密加工,junli@nuaa.edu.cn。

量 11 %。

本文基于某方舱的动静态分析,在保证方舱性能合理的情况下,开展方舱材料优化研究。以满足质量和变形要求为目标,采用灵敏度分析筛选设计变量,构建响应面近似模型,通过多目标遗传算法开展方舱骨架壁厚的尺寸优化。

1 方舱动静态特性分析

1.1 方舱有限元模型建立

方舱由蒙皮、方管骨架和夹芯粘接固定的复合大板组成,所研究的方舱侧板和顶板设置多处功能分区以满足不同使用工况需求。为保证结构性能,骨架材料均采用 Q235,蒙皮材料为铝合金,夹芯材料为聚氨酯泡沫,门框材料为铝合金。主要材料的力学属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)	屈服强度/MPa
钢	200 000	0.30	7 800	235
铝合金	70 000	0.33	2 700	170
镁合金	44 800	0.35	1 800	140
聚氨酯泡沫	10	0.30	45	—

采用 SolidWorks 建立方舱的三维参数化几何模型,如图 1 所示。方舱骨架和蒙皮为薄壁型结构,采用抽取中面的方法将其简化为壳单元,方舱内部负载以质量点的形式添加,其余使用实体单元建模,忽略小孔、圆角和螺栓等结构。

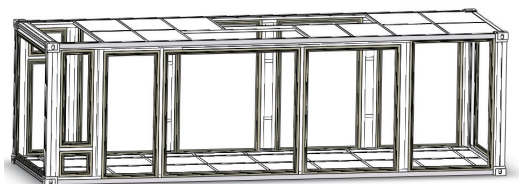


图 1 方舱三维模型

1.2 载荷工况仿真结果

方舱通常采用多种方式运输及快速装卸吊装,以实现机动性和快速响应性,其中越野汽车运输是方舱的重要转运方式。车载方舱的常见工况为弯曲、扭转、制动和转弯 4 种典型工况。

方舱在吊装、弯曲、转弯和制动工况下方舱的最大变形结果接近,而扭转工况下方舱的变形最大,如图 2 所示,最大变形为 7.794 mm,在设计要求范围内^[9]。吊装、弯曲、转弯和制动工况下方舱应力分布近似,也是扭转工况下方舱应力最大,如

图 3 所示,最大应力为 181.89 MPa,均位于底部钢制角件区域,小于材料许可应力。扭转工况下方舱骨架应力分布如图 4 所示,应力主要分布在底板骨架,多数侧板和顶板骨架应力较小,骨架最大应力为 101.96 MPa(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

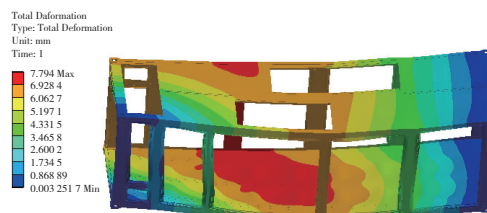


图 2 扭转工况下方舱变形云图

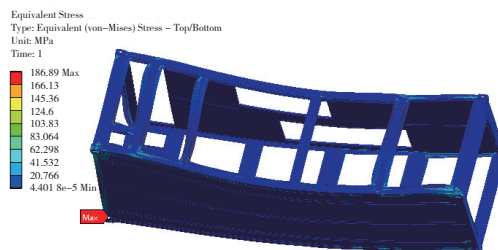


图 3 扭转工况下方舱应力云图

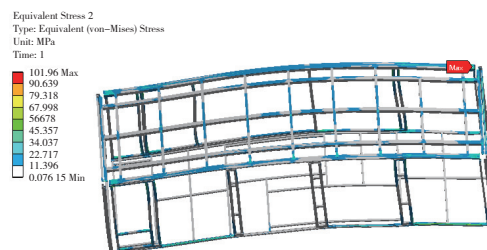


图 4 扭转工况下方舱骨架应力云图

方舱应用领域特殊,使用环境恶劣,所处道路环境复杂。方舱的前 6 阶固有频率范围为 21.711~40.079 Hz,方舱使用过程中可能的激振源主要包括路面激振和发动机激振,路面激励频率约 1~3 Hz,车载方舱发动机激振频率为 60~100 Hz,避开了常见的激振频率区间,不会产生共振现象。

方舱存在一定的刚度冗余,多数骨架承受应力较小,具有较大的轻量化空间。

2 方舱轻量化设计

2.1 骨架材料优化

方舱顶板、侧板和端板骨架承受的应力相对

较小,对于方舱结构性能贡献有限,存在较大的强度冗余。方舱骨架由矩形管焊接而成,采用材料优化可取得明显的轻量化效果。将侧板、顶板和端板应力较小的骨架材料替换为 6061-T6 铝合金。6061-T6 密度为 $2\,713\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $69\,040\text{ MPa}$,泊松比为 0.33。

优化后弯曲工况下方舱的变形云图如图 9 所示,最大变形为 7.732 mm ,替换前弯曲工况最大变形为 6.223 mm ,变形增幅较大。材料优化后方舱刚度下降,为满足方舱性能要求,还需要开展优化。

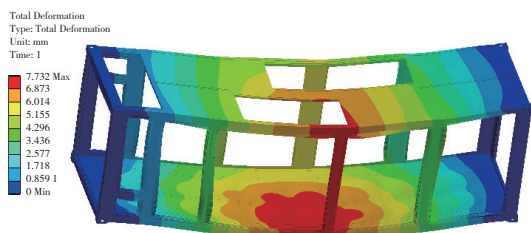


图 5 材料替换后弯曲工况下方舱变形云图

2.2 多目标尺寸优化

1) 灵敏度分析

方舱骨架由方管焊接而成,以方管厚度为设计变量。骨架数量较多,以全部厚度属性作为设计变量进行优化时计算量过大。灵敏度分析通过计算参数变化对目标函数的偏导数,可以评估出设计参数的改变对所关注的结构响应特性的变化程度,筛选出对结构性能影响较大的变量,提高优化效率。

以 109 个方舱骨架方管厚度作为设计变量,并对其进行编号。以方舱骨架方管厚度作为输入变量,以方舱总质量、一阶模态频率和扭转工况最大变形作为响应输出,对方舱骨架进行灵敏度分析。采用 ANSYS Workbench 进行中心复合试验设计,基于 Spearman 秩相关方法计算灵敏度值。在保证方舱结构性能的前提下,为更好的筛选设计变量,将变形灵敏度和一阶模态灵敏度分别除

以质量灵敏度,得到相对灵敏度结果,如图 6 所示。

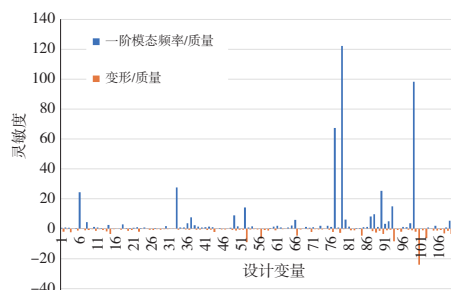


图 6 相对灵敏度结果

其中,2 号、4 号、31 号、44 号、70 号、73 号、85 号、86 号、96 号、103 号设计变量对质量和变形影响较大,且对一阶模态频率的影响较小。将这 10 个参数作为设计变量。

2) 响应面优化

为保证方舱结构性能,在骨架材料替换的基础上,以方舱质量和变形最小化为目标,以强度为约束条件,对方舱骨架进行多目标尺寸优化设计。多目标优化数学模型为

$$\begin{cases} \min \{f_1(x), f_2(x)\} \\ \text{s.t. } g_i(x) \leq [\sigma], \quad i=1,2,\dots,p \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, x=(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 分别为方舱总质量和在扭转工况下的最大变形; $g(x)$ 为扭转工况下方舱各材料的最大应力; $[\sigma]$ 为许用应力; p 为方舱内材料的种类数; x 为设计变量; n 为设计变量数; $x_{\min}$ 与 $x_{\max}$ 为设计变量取值上限与下限。

响应面模型是一种用于描述多个因素对某个响应变量的影响关系的数学模型。采用拉丁超立方试验完成样本点采集,基于 kriging 插值法建立响应面模型。设计变量与方舱质量、最大应力和最大变形的响应面分布如图 7 所示。随着 P_1 和 P_2 的增加,方舱的质量也随之增加; P_2 不变时,随着 P_1 的增加,方舱的最大应力先增加后减小;当 P_2 减小, P_1 增加时,方舱的变形减小。

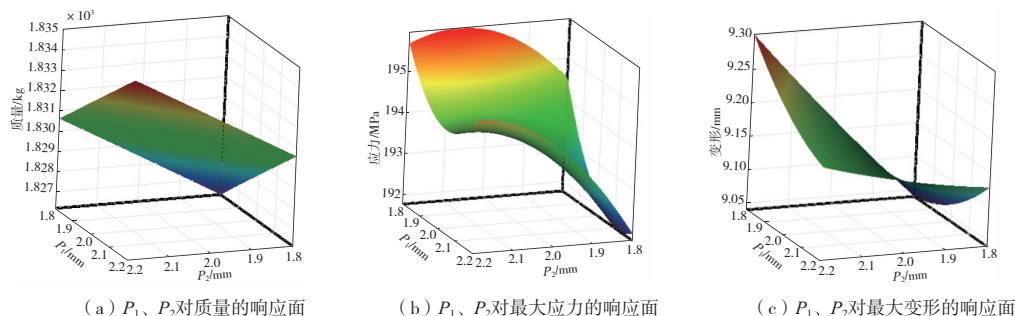


图 7 部分设计变量和响应输出的响应面

以决定系数 R^2 和均方根误差来评估模型精度。经计算,决定系数为 1,均方根误差为 4.36×10^{-13} ,说明响应面模型可靠。

采用多目标遗传算法求解进行优化求解。设置初始样本点为 10 000,每次迭代的样本数为 2 000,最大允许的 Pareto 解集为 70%,收敛稳定性为 2%。基于遗传算法经过迭代求解后得到多组 Pareto 解集,以减小方舱质量为主要目标,确定优化方案如表 2 所示。

表 2 优化前后骨架方管厚度对比 单位:mm

编号	初始值	优化后	圆整
P_1	2.0	1.808	1.8
P_2	2.0	1.834	1.8
P_3	3.0	2.778	2.5
P_4	3.0	2.701	2.5
P_5	4.0	3.601	3.5
P_6	4.0	3.925	4.0
P_7	4.0	3.608	3.5
P_8	4.0	3.600	3.5
P_9	4.0	3.736	3.5
P_{10}	4.0	3.610	3.5

2.3 优化前后对比

对材料和尺寸优化后的方舱进行动静态仿真分析,对比结果如表 3 所示。

表 3 优化前后仿真结果对比

参数	优化前	优化后
方舱质量/kg	2 146.0	1 808.3
一阶模态频率/Hz	21.711	21.859
吊装工况	最大变形/mm	6.478
	最大应力/MPa	121.52
弯曲工况	最大变形/mm	6.223
	最大应力/MPa	103.23
扭转工况	最大变形/mm	7.794
	最大应力/MPa	186.89
转向工况	最大变形/mm	6.228
	最大应力/MPa	101.96
制动工况	最大变形/mm	6.332
	最大应力/MPa	104.85

优化后方舱质量减小了 337.7 kg,减质量率为 15.7 %,轻量化效果明显。优化后的方舱一阶模态频率变化较小,各工况下的最大应力增加,增幅较大,强度冗余减小,方舱最大变形增加,但增幅较小,弯曲工况下的最大变形小于材料优化后最大变形。

3 结语

1)对方舱在常见载荷工况分析时,发现方舱存在刚强度冗余,部分骨架存在较大的优化空间。方舱模态分析得到了方舱前 6 阶固有频率和振型,不会与外界激振源发生共振。

2)在保证结构安全的条件下,对方舱骨架进行材料优化。以灵敏度分析结果筛选设计变量,以质量和变形最小为目标,利用响应面法进行多目标尺寸优化。

3)在保证方舱结构性能的前提下,通过材料和尺寸的优化,方舱质量减轻了 337.7 kg,轻量化减质量率为 15.7 %。

参考文献:

- [1] 李岳彬,魏世丞,盛忠起,等. 方舱技术发展综述[J]. 机械设计,2019,36(4):5-11.
- [2] 代晋,补辉,吴贤. 轻量化方舱与传统方舱的力学性能分析[J]. 电子科学技术,2017,4(1):64-69,76.
- [3] 范晋博. 分层梯度蜂窝夹芯板结构性能优化与大方舱轻量化研究[D]. 北京:军事科学院,2023.
- [4] 胡琦,陶彦瑾,韩世东,等. 高速无人飞行器伞吊点隔框拓扑优化设计[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):221-224.
- [5] 秦强,赵朋飞,张文伟,等. 基于自动改进 Kriging 方法的导弹舱体结构可靠性分析[J]. 导弹与航天运载技术,2020(6):16-22.
- [6] 周长鹤. 小型观光潜水器结构设计及推力分配策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [7] 王旭飞,焦登宁,谭飞,等. 基于灵敏度分析的客车骨架轻量化设计[J]. 现代制造工程,2021(9):52-57.
- [8] 王登峰,毛爱华,牛妍妍,等. 基于拓扑优化的纯电动大客车车身骨架轻量化多目标优化设计[J]. 中国公路学报,2017,30(2):136-143.
- [9] SJ 20379—1993 CAF60PD 集装箱型方舱规范[S].

收稿日期:2024-02-02