

DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.20250525049

基于拓扑-响应面协同的电子设备壳体轻量化设计*

李航*, 贾青萍, 秦勇
(北京计算机技术及应用研究所, 北京 100854)

摘要:文中针对航天电子设备结构壳体轻量化需求,提出一种拓扑优化与响应面优化的协同设计方法。基于冲击响应谱采用变密度法完成拓扑设计,使壳体质量降低了28.1%;针对拓扑设计后支耳应力集中的问题,建立Kriging代理模型,通过多目标遗传算法优化支耳连接处壁厚、支耳高度、圆角半径等参数,使壳体质量较初始设计降低了21.1%,最大等效应力下降了0.38%,满足安全系数 ≥ 1.5 的工程要求。该方法通过两阶段优化策略兼顾全局与局部,为冲击载荷下航天电子设备的轻量化设计提供了高精度、高效解决方案。

关键词:结构轻量化;拓扑优化;响应面优化;冲击响应谱;Kriging模型

中图分类号:V243 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2025)05-0054-08

引用格式:李航,贾青萍,秦勇.基于拓扑-响应面协同的电子设备壳体轻量化设计[J].电子机械工程,2025,41(5):54-61.

LI H, JIA Q P, QIN Y. Lightweight design of electronic device shell based on topology-response surface collaboration[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2025, 41(5): 54-61.

Lightweight Design of Electronic Device Shell Based on Topology-Response Surface Collaboration

LI Hang*, JIA Qingping, QIN Yong
(Beijing Institute of Computer Technology and Applications, Beijing 100854, China)

Abstract: A collaborative design method of topology optimization and response surface optimization is proposed to meet the lightweight requirements of the structural shell of aerospace electronic devices. Based on the impact response spectrum, the topology design is completed using the variable density method and the mass of structural shell is reduced by 28.1%. A Kriging surrogate model is established to solve the issue of stress concentration in the support ears after topology design. Multi-objective genetic algorithm is used to optimize parameters such as wall thickness, height of the support ear and fillet radius at the connection of the support ears. As a result, the shell mass is reduced by 21.1% compared to the initial design, the maximum equivalent stress is reduced by 0.38% and the engineering requirement of a safety factor (≥ 1.5) is satisfied. This method takes into account both global and local optimization through a two-stage optimization strategy, which provides an efficient and highly precise solution to lightweight design of aerospace electronic devices under impact loads.

Key words: structural lightweight; topology optimization; response surface optimization; shock response spectrum; Kriging model

引言

轻量化设计作为航空航天领域的核心研究方向,可显著降低发射成本并延长服役寿命^[1-2]。早期轻量化手段多依赖材料替换或尺寸优化,往往难以突破材料力学性能与几何构型的双重限制。随着计算力学的发展,结构优化方法展现出突破性潜力^[3]。拓扑优化通过材料空间分布的智能重构,在概念设计阶段即可实现零件刚度的全局优化。响应面优化能借助参数化建模与代理模型,针对局部应力集中的问题开展高精度修正。二者协同形成多尺度优化框架,为动态载荷

工况下的航天电子设备的轻量化设计提供兼具创新性与可靠性的解决方案。本文以弹载电子设备壳体为研究对象,针对冲击响应谱下的结构性能需求,提出拓扑优化与响应面优化相结合的轻量化设计方法,旨在破解减重与力学能力协同提升的技术难题。

拓扑优化是一种轻量化结构设计方法,其在满足指定载荷和刚度约束条件下,通过对设计区域内材料的合理分布,获得最佳的构型设计^[4-5]。大部分与应力相关的拓扑优化问题都基于固体各向同性材料惩罚法(Solid Isotropic Material with Penalization, SIMP)^[6]。SIMP法通过将设计区域离散为有限单

* 收稿日期:2025-05-25

元,以单元密度作为设计变量,结合惩罚因子抑制中间密度值,实现材料分布的优化[7-8]。基于SIMP法的拓扑优化在航空航天轻量化设计领域得到了广泛应用。文献[9]提出蒙皮点阵一体化拓扑优化方法,结合可移动变形组件法与SIMP算法,优化三维点阵布局,使某相机支撑结构减重50%,基频提高35%,并成功应用于在轨航天器。文献[10]采用SIMP方法优化轴流压气机叶型,结合Kriging响应面模型提升其气动性能。通过优化设计,其压力恢复率提升了12%,质量减少了8%。文献[11]以某航炮弹箱传动尺寸为对象,以柔度最小为目标函数,以体积分数结构平衡为约束,建立SIMP模型进行拓扑优化。优化后齿轮质量减少了15.4%,最大变形降低了14.2%。

响应面法(Response Surface Methodology, RSM)是指通过一系列确定性的试验拟合一个响应面以模拟真实极限状态曲面的方法。响应面法应用于多学科、多目标的优化设计问题[12-13]。在航空航天轻量化设计领域,文献[14]针对航空重油活塞发动机飞轮毂盘的疲劳断裂问题,通过Kriging响应面模型与非参数回归模型进行多目标优化。优化后毂盘质量减轻了3.3%,疲劳寿命提升了87.5%,为发动机减重提供了新思路。文献[15]采用响应面法,结合正交试验设计,对航空发动机机匣螺栓连接结构进行了多目标优化,构建最大等效应力和质量的响应面模型,使结构的最大应力下降了23.5%,质量减轻了6.2%。文献[16]运用多目标驱动算法对发射装置进行多目标优化,得到其最优解集,最终实现其抗冲击性能提高14.9%、发射装置整体质量降低2.1%的目标。文献[17]采用仿真计算研究喷注器支架结构参数对支架热阻和结构强度的影响,并基于响应面法对喷注器支架进行了结构优化设计。

拓扑优化属于全局优化,通过改变材料分布探索结构构型,而响应面优化属于局部细化,基于拓扑优化的结果提取关键几何参数,通过响应面模型实现尺寸调整。从拓扑优化到响应面优化是从整体到局部的设计过程。在现有工程应用中,协同使用拓扑优化与响应面优化的实例很少。本文提出“拓扑粗优化+响应面细优化”两阶段的轻量化设计流程,以某航天控制设备为例,在实现轻量化目标的同时保证其力学性能。

1 问题描述

1.1 飞行管理模块的组成

飞行控制组合作为武器系统的核心单元,其主要作用是信息处理与系统控制[18]。某型号飞行控制组

合的爆炸图如图1所示。飞行控制组合由上壳体、下壳体、电路板1和电路板2组成。其中上壳体与下壳体采用镁合金ZK61M-T5材料整体加工而成,上壳体质量为90.2 g,下壳体质量为104.5 g,上壳体与下壳体的几何尺寸如图2所示,图中 R_1 为圆角半径。电路板1和电路板2分别通过螺装形式固定在壳体上,两块电路板通过栈接连接后,设备通过若干长螺钉紧固为一体。

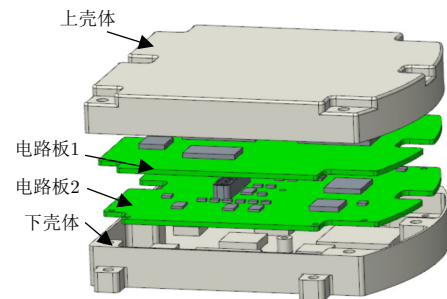


图1 爆炸图

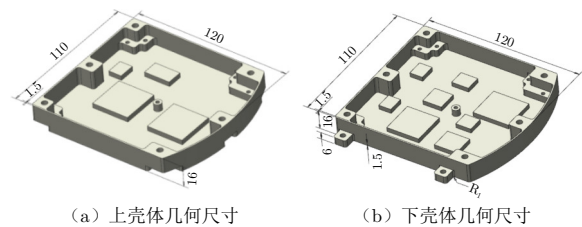


图2 上壳体与下壳体的几何尺寸图

1.2 基于模态的冲击响应谱分析

本次分析采用ANSYS Workbench分析软件,根据结构的三维模型及力学参数建立模型,再基于模态响应对飞行控制组合的冲击响应谱过载进行力学分析。将上壳体和下壳体上的螺纹隐含,去掉装配体内所有标准件,简化元器件和对外连接器,去掉插孔信息以提高计算速度。结构件和印制板采用四面体网格划分,为提高计算精度,增加下壳体支耳处的网格密度,生成高质量的全六面体网格。核心处理单元有114 605个节点和53 901个单元。飞行控制组合简化后模型及网格模型如图3所示。

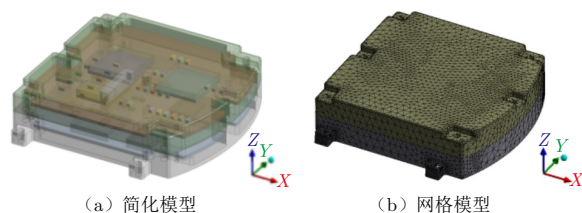


图3 简化模型及网格模型图

材料仿真的参数见表1。上壳体与下壳体选用镁合金ZK61M-T5,电路板材料为FR4,金属封装的

元器件材料选用二氧化硅和铜，塑料封装的元器件材料选用二氧化硅和聚乙烯。

表 1 仿真材料参数表

名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
镁合金	1 830	45.0	0.35
FR4	2 000	24.0	0.28
铜合金	8 300	110.0	0.34
二氧化硅	2 330	70.0	0.20
聚乙烯	950	1.1	0.42

模态分析的目的是获取固有频率，为冲击响应谱仿真提供数据基础。对飞行控制组合的4个安装支耳处施加固定约束，计算设备的模态频率，处于冲击响应谱覆盖频域(20~5 000 Hz)的振型如图4所示，频率见表2。由计算结果可知，飞行控制组合的前9阶固有频率处于冲击响应谱覆盖频域，基频为2 178.3 Hz。各阶固有频率均由电路板主导，其主要原因是电路板刚度低于外壳，模态分析符合刚柔耦合中柔性部分主导低频模态的规律，结果合理。工艺设计时应针对性地进行打胶处理以增加弹性支撑，降低冲击的失效风险。

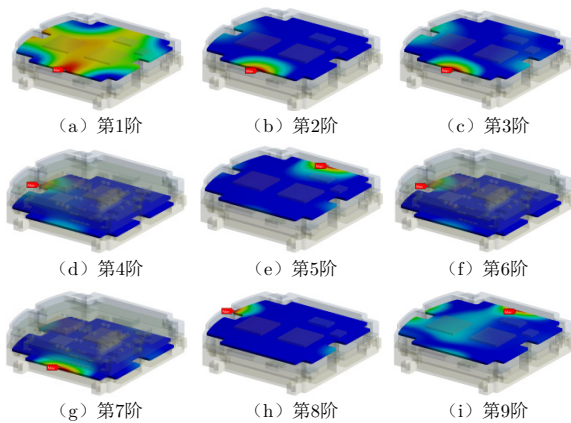


图 4 前 9 阶模态固有振型

表 2 前 9 阶模态固有频率

阶数	固有频率/Hz
1	2 178.3
2	3 064.1
3	3 179.9
4	3 992.7
5	4 256.2
6	4 323.6
7	4 611.8
8	4 726.1
9	4 907.4

在飞行过程中，结构壳体承受的冲击载荷主要源于发动机点火瞬态激励、分离碰撞、高速气流等。为精准表征此类动态载荷特性，依据 GJB 150.18A—2009 中相关冲击响应谱规范，构建了覆盖宽频域(20~5 000 Hz)的冲击响应谱模型。该模型通过能量等效原则，将飞行过程中模拟的瞬态冲击信号转化为标准的冲击响应谱，如图5所示。

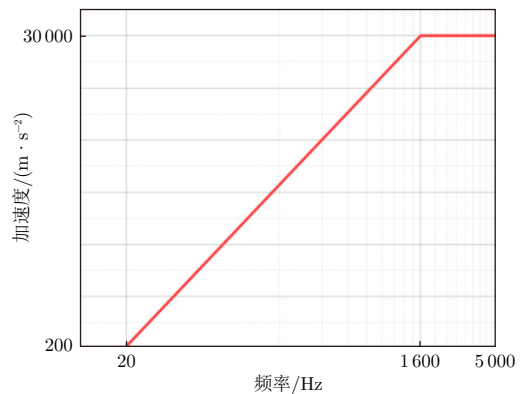
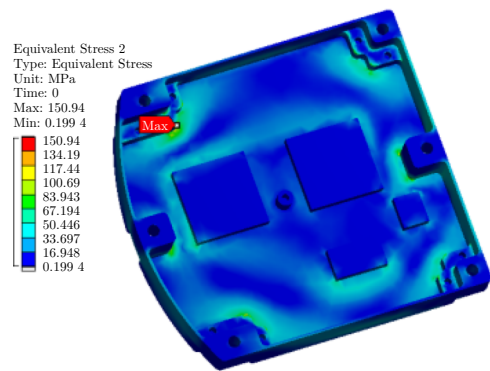
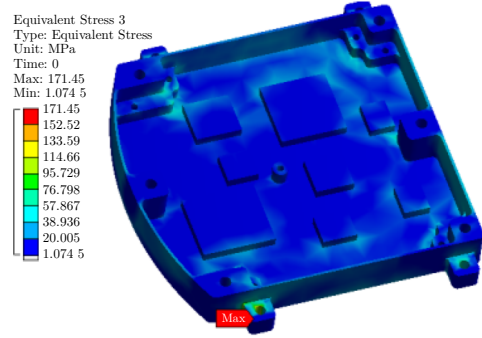


图 5 冲击响应谱

计算 X、Y、Z 三个方向的冲击响应，其中 Z 向(航向)的响应最为敏感，故以产品 Z 向的等效最大应力为优化基准。Z 向产品的等效应力云图如图6所示。从图6可以看出，冲击响应在 Z 向时，最大应力为 171.45 MPa，发生在下壳体安装支耳与框架连接处，



(a) 上壳体应力云图



(b) 下壳体应力云图

图 6 冲击响应云图

最大等效应力小于镁合金 ZK61M-T5 的安全许用值 260 MPa, 安全系数大于 1.5, 因此认为飞行控制组合可以在冲击响应环境下通过试验。

为了在确保力学性能的前提下实现结构的轻量化, 本研究提出两阶段的轻量化设计流程, 如图 7 所示。基于应力分布响应, 通过拓扑优化重构材料宏观分布路径, 达成主体减重; 结合应力云图定位敏感区域, 采用 Kriging 代理模型驱动响应面优化, 抑制局部应力峰值, 完成轻量化目标。

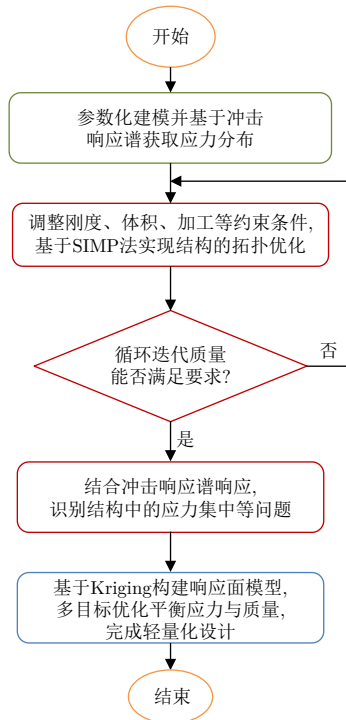


图 7 轻量化设计流程图

2 基于质量最小化的拓扑设计

2.1 数学模型和理论基础

拓扑优化的核心是通过数学方法确定材料在空间中的最优分布。本文采用变密度法, 其核心思想是将连续的设计空间离散为有限单元, 为每个单元赋予一个密度变量 $\rho \in [0,1]$, 通过优化算法确定每个单元的密度值, 最终得到轻量化结构。变密度法因其计算效率高、能处理大型结构而成为结构设计的首选。

设计变量为每个单元的密度 ρ_e 以及 N 个单元对应的 N 个变量。

通过 SIMP 模型将密度映射到材料弹性模量^[19], 以定义材料属性差值。该密度对应的等效模量为:

$$E_e(\rho_e) = E_{\min} + \rho_e^p (E_0 - E_{\min}) \quad (1)$$

式中: $E_e(\rho_e)$ 为该密度对应的等效弹性模量; E_0 为实体材料的弹性模量; E_{\min} 为弹性模量的极小值, 用于防止刚度矩阵因精度不够出错; p 为惩罚因子, 迫使中间密度趋向 0 或 1。

目标是使结构总质量最小化:

$$\min_{\rho} m(\rho) = \sum_{e=1}^N \rho_e V_e \quad (2)$$

式中: m 为质量; V_e 为单元体积。

约束条件 1: 刚度最大化即柔顺度最小化。柔顺度 C 定义为外力做功, 需满足:

$$C(\rho) = \mathbf{U}^T \mathbf{K}(\rho) \mathbf{U} \leq C_{\max} \quad (3)$$

式中: \mathbf{K} 为全局刚度矩阵; \mathbf{U} 为位移向量, $\mathbf{U} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F}$ (\mathbf{F} 为载荷向量); C_{\max} 为最大柔顺度。

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^N E_e(\rho_e) \mathbf{K}_e^0 \quad (4)$$

式中, \mathbf{K}_e^0 为单位刚度矩阵。

约束条件 2: 体积分数约束, 保留材料体积不超过初始体积分数阈值 f_{vol} , 即:

$$\frac{\sum_{e=1}^N \rho_e V_e}{V_0} \leq f_{\text{vol}} \quad (0 < f_{\text{vol}} < 1) \quad (5)$$

式中, V_0 为初始体积。

约束条件 3: 制造约束, 需要设置最小尺寸约束, 避免过薄结构, 保证其可制造性和工艺性。

2.2 拓扑优化建模

初始结构壳体通过计算机辅助设计软件(Computer-Aided Design, CAD)建模, 保存为 STEP 格式并导入 ANSYS Workbench。上壳体和下壳体采用四面体单元进行网格划分, 局部加密支耳安装区域的网格。将支耳安装孔、结构安装孔、散热台阶、外边缘材料等起到结构安装、散热、屏蔽等功能的区域作为非设计区域(红色区域), 其余材料均作为设计区域(蓝色区域), 如图 8 所示。

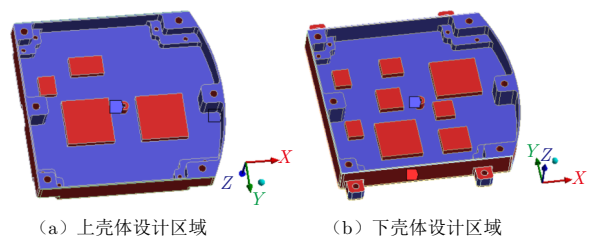


图 8 拓扑优化设计区域示意图

2.3 拓扑优化求解过程

对下壳体支耳固定孔处施加固定约束, 基于冲击响应谱的结果对相应节点施加载荷。基于 SIMP 法的经典取值^[20], 令惩罚因子 $p = 3$, 用于抑制中间密度单元, 便于后续工艺实现。以最小化总质量为目标函数, 依据工程经验以及文献^[21-22], 约束结构柔顺度的 85% 为刚度下限, 约束体积分数的 70% 为体积分数下限, 同时对各结构部分设置尺寸约束以保证其可制造性和工艺性。设置收敛准则为目标函数变化率 $\Delta m/m < 0.5\%$, 持续 5 次迭代, 最大迭代次数为 50 次。启用过滤半径抑制棋盘格现象。计算后上壳体和下壳体的密度云图如图 9 所示, 灰色为保留区域, 黄色为过渡区域, 红色为移除区域。

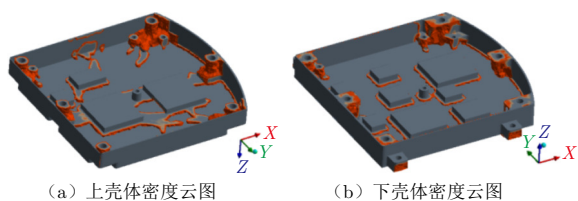


图 9 上壳体和下壳体的密度云图

从图 9 可以看出, 拓扑优化的结构与原始方案相比, 不仅去除了印制板安装面、结构安装面的部分多余材料, 还对支耳处进行了倒角处理, 壳体底面和立面仅保留了最小壁厚。拓扑优化后上壳体的质量为 70.4 g、下壳体的质量为 69.4 g。导出拓扑优化的结构模型, 设置阈值密度, 生成 CAD 模型。对 CAD 模型的孔、圆角、倒角等结构特征进行重构后的上壳体与下壳体如图 10 所示。

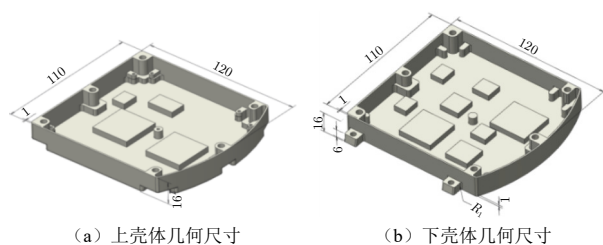


图 10 拓扑优化后上壳体和下壳体示意图

2.4 拓扑优化验证

将优化后的 CAD 模型重新保存为 STEP 格式并导入 ANSYS Workbench。基于模态分析计算冲击响应谱工况的最大等效应力。图 11 给出了拓扑优化后上壳体和下壳体的等效应力云图。

优化后上壳体的质量由 90.2 g 下降到 70.4 g, 最大等效应力由 150.94 MPa 增加到 170.79 MPa, 拓扑优化实现了减重目标, 并且未因刚度提升引起最大等

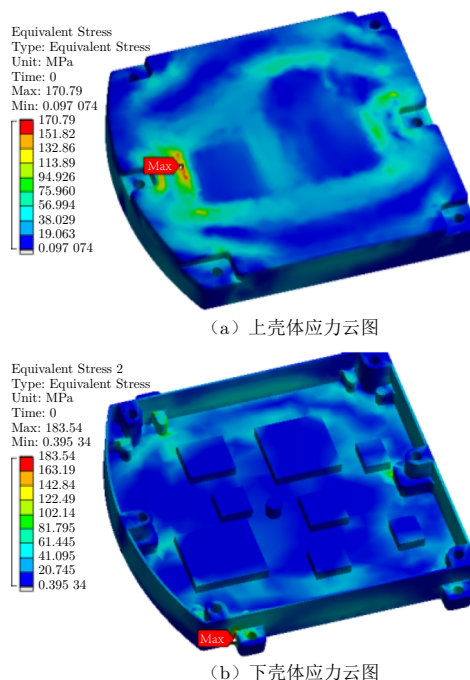


图 11 拓扑优化后壳体的等效应力云图

效应力的安全系数低于 1.5。下壳体质量由 104.5 g 下降到 69.4 g, 最大等效应力由 171.45 MPa 增加到 183.54 MPa, 实现了减重目标, 但应力的安全系数为 1.4, 低于 1.5。由图 11 可知, 其主要原因是安装支耳处与侧壁过渡区域出现了应力集中情况。通常在冲击响应谱引发的位移控制场景下, 刚度提高会增大等效应力。在本案例中, 对支耳部位的结构进行了调整, 进行了倒角处理, 减少了连接侧壁的厚度, 从而影响了应力分布, 引入了局部应力, 需通过响应面优化来调整支耳相关尺寸以降低并消除集中的应力。

3 响应面优化

3.1 数学模型和理论基础

响应面优化是通过构建代理模型, 实现快速参数优化, 本文采用 Kriging 模型, 因其能同时提供预测值及不确定性估计。实验设计采用拉丁超立方采样, 确保设计空间均匀覆盖, 样本数 n 满足 $n \geq 2k+1$ (k 为设计变量的个数)。

Kriging 模型将应力和质量的预测响应值 $y(x)$ 分解为局部趋势项与局部偏差项^[23]:

$$y(x) = f^T(x)\beta + Z(x) \quad (6)$$

式中: $f(x)$ 为多项式基函数; $Z(x)$ 为高斯随机过程; β 为回归系数向量。通过广义最小二乘法估计 β 得:

$$\beta = (H^T B^{-1} H)^{-1} H^T B^{-1} Y \quad (7)$$

式中: H 为样本点的基函数向量 ($a \times b$), a 为样本点数

量, b 为基函数的数量; \mathbf{B} 为相关矩阵 ($a \times b$); \mathbf{Y} 为观测相应向量。矩阵 \mathbf{B} 中第 i 行第 j 列元素 B_{ij} 的计算式为:

$$B_{ij} = \exp\left(-\sum_{l=1}^k \theta_l |x_{il} - x_{jl}|^2\right) \quad (8)$$

式中: θ_l 为计算参数, 通过最大似然法估计优化, 下标 l 为设计变量个数; x_i 和 x_j 为两个不同的样本点。

式(6)中的 $Z(x)$ 为高斯随机过程, 其协方差矩阵为:

$$\text{Cov}(Z(x_i), Z(x_j)) = s^2 B_{ij} \quad (9)$$

式中, s^2 为计算参数, 通过最大似然法估计优化。

响应面优化模型为:

$$\begin{cases} \min m(x) \\ \text{s.t. } \sigma_{\max}(x) \leq \sigma_{\text{allow}} \\ x_1 \leq x_i \leq x_{i1} (i = 1, 2, \dots, k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_1 和 x_{i1} 为设计变量的下限和上限; σ_{\max} 为最大等效应力; σ_{allow} 为许用应力。

3.2 设计参数与优化目标选取

基于拓扑优化的结果, 安装支耳的区域应力较大, 容易出现变形、开裂等问题, 可以通过优化支耳区域的结构参数来降低集中应力。本文选出了安装支耳结构的 3 个可优化变量: 连接侧壁的厚度 d_1 、台阶高度 d_2 和支耳圆角半径 d_3 。

将 d_1 、 d_2 和 d_3 作为设计变量。考虑到零件的可制造性以及系统在与其他设备的干涉情况, 每个设计变量均设置了取值范围。 d_1 、 d_2 和 d_3 的取值范围分别为 0.8~2.0 mm, 4~8 mm 和 1~5 mm。

3.3 实验设计与响应面构建

采用拉丁超立方方法开展实验设计, 生成 17 组样本点。提取每个样本点的质量 m 并进行冲击响应谱分析, 得到最大等效应力 σ_{\max} 。输入变量为 $[d_1, d_2, d_3]$, 输出变量为 $[m, \sigma_{\max}]$ 。响应面优化的目标是在尽可能少增加质量 m 的同时降低支耳处的最大等效应力 σ_{\max} 。为确保产品的整体性能, 还应该避免共振即产品固有频率, 避开冲击响应谱拐点频率, 同时结构形式满足工艺要求。

决定系数 R^2 用于量化代理模型对实际响应的拟合精度, 反映模型预测值与真实值的接近程度。 R^2 越接近 1, 模型拟合越好。训练集用于反映模型对已知数据的拟合能力; 测试集用于反映模型对未知数据的泛化能力。响应面构建后的决定系数见表 3。模型对质量的预测精度略高于应力(因质量与几何参数呈线

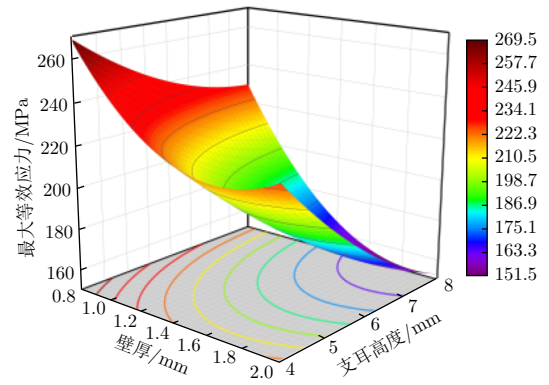
性关系, 应力涉及非线性效应)。测试集 $R^2 > 0.94$, 满足工程优化要求(误差 < 6%)。

表 3 决定系数表

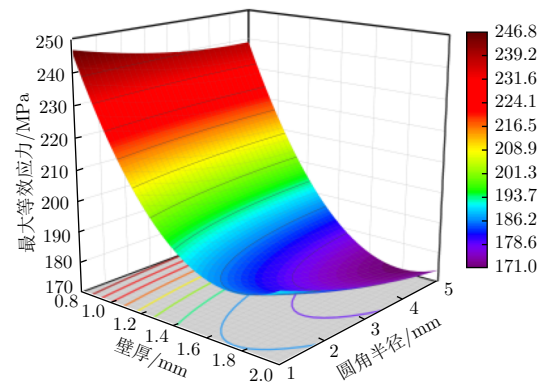
指标	训练集 R^2	测试集 R^2
质量/g	0.993	0.991
最大应力/MPa	0.972	0.951

3.4 响应面可视化与分析

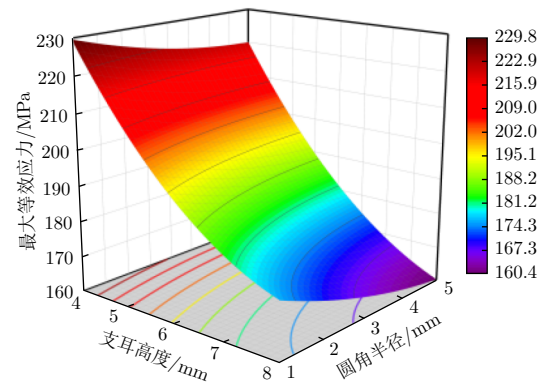
根据实验数据绘制最大等效应力的响应曲面图(图 12), 设计变量包括连接侧壁的厚度、支耳的高度和支耳的圆角半径。从图 12 可以看出: 壁厚、支耳的高度和支耳圆角半径的增加可使最大等效应力逐步降低; 侧壁厚度小于 1.5 mm 后, 最大等效应力迅速增



(a) 壁厚和支耳高度对最大等效应力的影响



(b) 壁厚和圆角半径对最大等效应力的影响

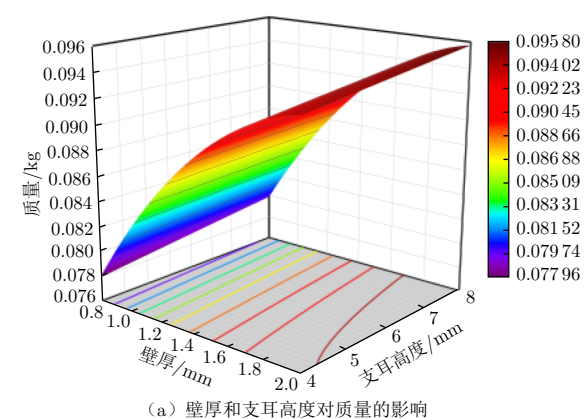


(c) 支耳高度和圆角半径对最大等效应力的影响

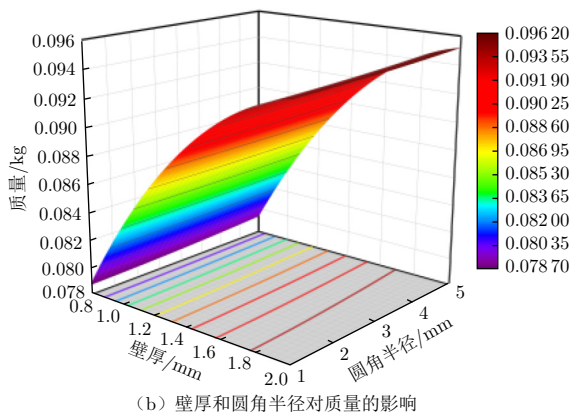
图 12 最大等效应力的响应曲面图

大,侧壁厚度对最大等效应力的影响程度高于支耳的高度和圆角半径对最大等效应力的影响程度。因此,不考虑质量因素,应优先增大壁厚以缓解应力集中。以最大等效应力为目标寻求最优解时,候选点的值应落在冷色区域。

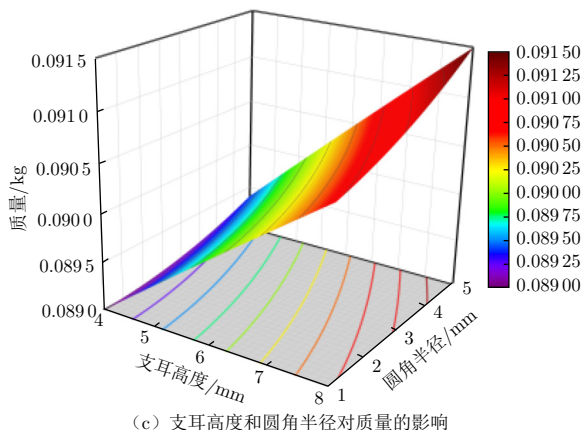
根据实验数据绘制下壳体质量的响应曲面图(图13),设计变量包括连接侧壁的厚度、支耳的高度和圆角半径。从图13可以看出:壁厚、支耳的高度和圆角半径的降低可使下壳体的质量逐步变小;侧壁厚度对下壳体质量的影响程度远远高于支耳高度和圆角半径对下壳体质量的影响程度。因此,不考虑最大等效应力因素,应优先降低壁厚来实现减重。以下壳



(a) 壁厚和支耳高度对质量的影响

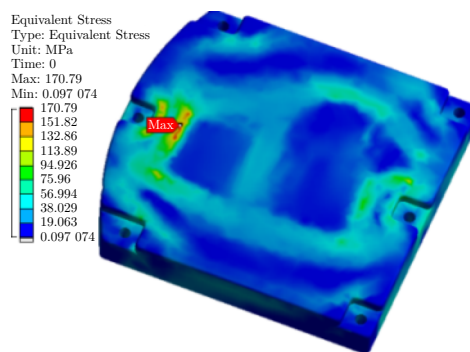


(b) 壁厚和圆角半径对质量的影响

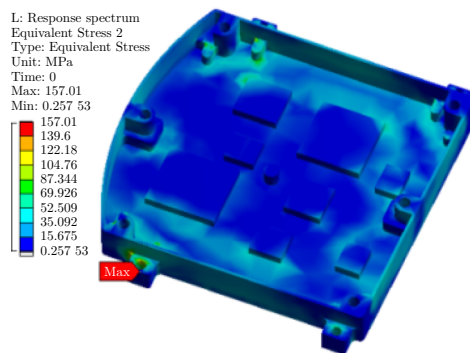
(c) 支耳高度和圆角半径对质量的影响
图13 下壳体质量的响应曲面图

体质量为目标寻求最优解时,候选点的值应落在冷色区域。

基于响应面,在ANSYS Workbench中以最大等效应力最小和下壳体质量最小为目标寻求最优解。在软件提供的方案中筛选最优解:连接侧壁的厚度由1 mm增加至1.2 mm、支耳的高度由6 mm增加至8 mm、支耳的圆角半径由1 mm增加至2.2 mm。将优化后的参数作为下壳体的设计尺寸重新建模并导入ANSYS Workbench展开冲击响应谱分析。图14为优化后壳体的等效应力分布云图。由图14可以看出,下壳体的最大等效应力由183.54 MPa降低至157.01 MPa,安全系数高于1.5,应力集中的位置由支耳与侧壁过渡区域转移到安装孔处。本次优化通过加高支耳高度和增大圆角半径来缓解连接处几何突变造成的影响,并通过增加连接侧壁的厚度增加了支耳的强度,拓宽了传力路径,分散了局部载荷,用局部质量的增加换取了应力的安全余量。上下壳体在优化前后的性能参数和变化率对比见表4和表5。相比于拓扑优化后,响应面优化后的结构总质量上升了9.8%,最大等效应力降低了6.9%,通过少量增加高应力区域的材料,消除了支耳处应力过大的隐患;相比于原始方案,最终结构质量降低了21.1%,最大等效应力降低了0.38%,拓扑-响应面联合优化方法有效实现了轻量化设计,同时保证了零件的结构性能。



(a) 上壳体应力云图



(b) 下壳体应力云图

图14 响应面优化后壳体的等效应力云图

表4 优化前后参数对比

状态	质量/g	最大等效应力/MPa
原方案	194.7	171.45
拓扑优化后	139.8	183.54
响应面优化后	153.6	170.79

表5 优化前后变化率对比 %

状态	质量	最大等效应力
拓扑优化后 变化率	↓28.10 (相对原方案)	↑7.05 (相对原方案)
响应面优化后 变化率	↑9.80 (相对拓扑)	↓6.90 (相对拓扑)
最终变化率	↓21.10 (相对原方案)	↓0.38 (相对原方案)

4 结束语

本研究通过拓扑优化与响应面优化的有机结合,成功实现了弹载电子设备结构壳体的轻量化设计。在拓扑优化阶段,通过材料的智能分布,使质量显著降低;在响应面优化阶段,针对应力集中问题,进行精细化改进,在保证结构安全性的前提下,实现了轻量化目标。研究发现:1) 拓扑优化对主承载结构轻量化效果显著,但需关注局部应力突变;2) 响应面法可有效解决特定区域的应力集中问题,具有参数敏感性分析优势;3) 两阶段优化策略兼顾全局与局部特征,综合优化效率提升明显。该研究结果为高冲击环境下航天电子设备的结构设计提供了重要参考,后续可进一步开展工艺可行性验证与试验测试。

参考文献

- [1] LAKES R. Materials with structural hierarchy[J]. *Nature*, 1993, 361: 511-515.
- [2] 韩钟剑, 汪婕, 赵宇博, 等. 某机载电子设备轻量化设计研究[J]. *电子机械工程*, 2024, 40(3): 50-54, 64.
- [3] PLOCHER J, PANESAR A. Review on design and structural optimization in additive manufacturing: towards next-generation lightweight structures[J]. *Materials & Design*, 2019, 183: 1-43.
- [4] ZHU J H, ZHANG W H, XIA L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2016, 23(4): 1-28.
- [5] ZHU J H, ZHOU H, WANG C, et al. A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 91-110.
- [6] LUO Y J, ZHANG K. Topology optimization of

continuum structures with Drucker-Prager yield stress constraints[J]. *Computers & Structures*, 2012, 90-91: 65-75.

- [7] VERBART A, LANGELAAR M, KEULEN F V. A unified aggregation and relaxation approach for stress-constrained topology optimization[J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*, 2017, 55(2): 1-17.
- [8] 文桂林, 刘杰, 陈梓杰, 等. 非线性连续体拓扑优化方法综述[J]. *力学学报*, 2022, 54(10): 2659-2675.
- [9] 张啸雨, 刘畅, 施丽铭, 等. 蒙皮点阵一体化支撑结构的移动可变组件优化设计及空间站应用[J]. *固体力学学报*, 2022, 43(5): 551-563.
- [10] 李恒, 严文凯, 陈逸豪, 等. 基于拓扑优化的四旋翼无人机机身轻量化设计[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(2): 60-66.
- [11] 黄观明, 刘明敏, 杨宏亮, 等. 基于 SIMP 材料插值模型的某航炮弹箱传动齿轮轻量化设计[J]. *机械传动*, 2019, 43(2): 55-58.
- [12] KLEIJNEN J P C. Regression and Kriging meta-models with their experimental designs in simulation: a review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 256(1): 1-16.
- [13] 王多笑, 罗浩, 梁清清. 基于响应面法的电源组件散热结构优化设计[J]. *电子机械工程*, 2022, 38(2): 42-45, 55.
- [14] 卢俊文, 王斌, 王倩莹. 基于多目标优化的航空重油活塞发动机双质量飞轮毂盘结构轻量化设计[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(11): 202-211.
- [15] 陈勇. 航空发动机静子机匣螺栓连接结构优化设计与研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
- [16] 李四超, 卫超. 基于响应面法的潜载导弹垂直发射装置多目标优化[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(7): 127-130.
- [17] 邱鑫, 白梅杉, 陆文杰, 等. 基于响应面法的单元发动机喷注器优化设计[J]. *上海航天*, 2024, 41(2): 130-136, 153.
- [18] 张磊. 基于 DSP 的飞行器控制系统设计与研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- [19] 王磊佳. 面向结构轻量化的拓扑优化方法及应用研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023.
- [20] KAVEH A, KALATJARI V. Topology optimization of trusses using genetic algorithm, force method and graph theory[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2003, 58(5): 771-791.
- [21] ROZVANY G I N, LEWIŃSKI T. Topology optimization in structural and continuum mechanics[M]. Vienna: Springer, 2014.
- [22] 庄绪法, 翁俊. 一种机载雷达新型结构设计模式的研究与应用[J]. *电子机械工程*, 2018, 34(6): 6-8, 12.
- [23] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. *航空学报*, 2016, 37(11): 3197-3225.

李航男, 1991年生, 工程师, 主要从事航天电子设备结构设计、热设计和力学设计工作。