

金属粉末颗粒阻尼复合舵面结构拓扑优化设计方法研究

李海东¹, 史晓鸣¹, 张横²

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 2. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 舵面结构的力学特性对飞行器的飞行性能具有重要影响, 而结构几何构型决定舵面的力学性能。提出一种金属粉末颗粒阻尼复合舵面结构拓扑优化设计方法, 通过优化舵面结构的加强筋实现承载, 并通过优化粉末颗粒阻尼器位置实现舵面结构的减振设计。采用自适应成长法对舵面结构内部加强筋分布进行拓扑优化, 运用均匀化法计算粉末颗粒阻尼器等效性能, 并基于等效参数对粉末颗粒阻尼器在舵面结构内部的位置分布进行优化, 实现具有承载和抑振功能结构的协同设计目标。仿真结果表明, 相较于原型舵面结构, 优化设计的金属粉末颗粒阻尼复合舵面结构其静力学性能提升 10.35%, 1 阶固有频率提高 22.10%, 1 阶固有频率处的幅频响应下降 22.88%, 马赫数为 4、5、6 时, 颤振速度提高 10% 以上。所提设计方法为轻质高刚且具有抑振功能的结构设计提供了一种新的解决方案。

关键词: 拓扑优化; 加强筋分布设计; 粉末颗粒阻尼器; 舵面结构

中图分类号: TJ 760.3 **文献标志码:** A

Topology optimization design method of metal powder particle damping composite rudder structure

LI Haidong¹, SHI Xiaoming¹, ZHANG Heng²

(1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The mechanical characteristics of the rudder structure have a critical impact on the flight performance of the aircraft, and these characteristics are governed by the structure's geometric configuration. A topology optimization method for designing the metal powder particle damping

收稿日期: 2025-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52375257); 上海市白玉兰人才计划浦江项目 (24PJJD073)

第一作者: 李海东 (1982—), 女, 高级工程师。研究方向: 飞行器结构设计。E-mail: lidongdongnuaa@163.com

通信作者: 史晓鸣 (1981—), 男, 研究员。研究方向: 飞行器结构动力学。E-mail: daybreakxmshi@126.com

引文格式: 李海东, 史晓鸣, 张横. 金属粉末颗粒阻尼复合舵面结构拓扑优化设计方法研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(3): 249-261.

Citation: LI Haidong, SHI Xiaoming, ZHANG Heng. Topology optimization design method of metal powder particle damping composite rudder structure[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(3): 249-261.

composite rudder structure was proposed. The load-bearing function was satisfied by optimizing the stiffeners of the rudder structure and the vibration suppression was achieved by optimizing the position distribution of the powder particle dampers. The internal stiffener distribution of the rudder structure was determined via the adaptive growth method, while the equivalent performance of the powder particle damper was evaluated using the homogenization method. Based on the homogenized parameters, the position distribution of the powder particle dampers within the rudder was optimized to realize a collaborative design that concurrently addressed both load-bearing and vibration suppression functions. The simulation results show that, compared to the original rudder structure, the static mechanical performance of the optimized metal powder particle damping composite rudder structure is improved by 10.35%, the first natural frequency is increased by 22.10%, the frequency response at the first natural frequency is reduced by 22.88%, and the flutter speed is increased by more than 10% when the Mach number is 4, 5, 6. The proposed design method provides a new solution for the design of lightweight, high-rigidity structures with vibration suppression functions.

Keywords: *topology optimization; stiffener distribution design; powder particle damper; rudder structure*

舵面结构是飞行器飞行过程中实现高速飞行和机动控制的核心部件之一，不仅要求其重量轻，还要求其具有较好的承载能力和抗振性能^[1]。目前的舵面结构多采用蒙皮-骨架结构形式，蒙皮与骨架通过铆钉、螺钉或钎焊连接在一起，骨架一般是辐射梁式或网格形式等相对规则的经验设计构型^[2]。然而，在日益严苛的飞行载荷作用下，这种经验设计的结构构型无法满足高速飞行器的高刚度设计要求。与此同时，如何有效提升飞行器的颤振边界也成为亟待攻克的技术难题^[3]。

轻量化设计方面，近年来，随着结构拓扑优化理论不断发展，国内外学者积极开展该理论在飞行器领域的研究与应用，在飞行器结构设计制造一体化方面取得了众多具有代表性的研究成果，推动了飞行器领域相关技术的飞速发展。王昕江等^[4]提出了一种基于拓扑优化的舵面结构轻量化设计方法，并验证了静气动弹性变形与强度。朱继宏研究团队^[5-6]将舵面作为独立部件，采用拓扑优化获取主传力路径，提取结构特征，通过尺寸参数优化对重构模型进行详细设计，实现结构减重。丁晓红研究团队^[7-9]结合仿生优化思想，通过研究自然界分支系统的形成机理，提出了一种结构加筋分布优化设计自适应成长法，并应用于高速飞行器舵面结构设计中，得到树状分布的骨架宏观构型，在实现 1 阶固有频率提升的同时，达到轻量化设计的目的^[10]。但是，目前针

对舵类结构优化设计的研究多以刚度为目标，未考虑结构振动设计问题。

针对提升颤振性能的设计，常用的手段有增加结构刚度、施加配重、增加阻尼等方式，其核心思想是通过控制空气动力、弹性力和惯性力的耦合作用，减小结构发生自激振动的振幅，提高自激振动趋于发散的颤振临界速度，达到提高颤振边界的目的。然而，施加配重会导致结构质量增加，与轻量化设计背道而驰。因此，对于提升颤振性能而言，如何在提高轻质结构刚度的同时提高结构的阻尼，显得尤为关键。

颗粒阻尼器通过颗粒与颗粒或颗粒与壁面之间的碰撞和摩擦耗能实现结构振动控制，具有耐久性好、对环境温度不敏感、可在多个方向和宽频域内使用等优点。因此，颗粒阻尼器在机械工程、建筑工程和高端装备制造等领域得到了广泛应用^[11]。近年来，将颗粒阻尼器与金属增材制造工艺相结合形成了一种创新技术，即在增材制造过程中特意保留结构内部未熔融的粉末，由此得到一种新型的金属粉末颗粒阻尼器（以下简称粉末颗粒阻尼器）^[12]。该阻尼器不仅兼具高刚度和高阻尼特性，还能实现与主结构的一体化成型。Scott-Emuakpor 等^[13]在悬梁臂结构中设置空腔，在增材制造过程中，将金属粉末留置于空腔内，形成粉末颗粒阻尼器。研究表明，含有粉末颗粒阻尼器的悬臂梁振动性能与完全熔融的悬臂梁相比，在

仅有 4% 未熔融金属粉末的情况下, 结构振动减小了 88%~95%。Scott-Emuakpor 团队还对粉末颗粒阻尼器进行了更为深入的研究, 他们认为: 增材制造方式以及扫描路径等因素对粉末颗粒阻尼器的阻尼性能影响较小^[14]; 弯曲阻尼器上的表面结构比平整阻尼器上的表面结构具有更高的阻尼性能^[15]; 粉末颗粒阻尼器的阻尼性能与粉末空腔体积之间有明显的相关关系^[16]等。Niedermeyer 等^[17]对粉末颗粒阻尼器在涡轮叶片上的应用进行了研究, 结果表明, 添加粉末颗粒阻尼器的叶片相较原始叶片具有更高的阻尼性能。Ehlers 等^[18]研究了激光打印方向、腔体尺寸等对结构阻尼性能的影响。Celli 等^[19]通过实验证明添加粉末颗粒阻尼器的结构在实现有效减振的同时不会显著降低结构的疲劳寿命。现有研究多是对粉末颗粒阻尼器的阻尼性能进行分析, 并未涉及粉末颗粒阻尼器在结构中分布位置的设计。

为了提升舵面结构的承载和颤振性能, 本文将舵面结构骨架分布设计与粉末颗粒阻尼器分布位置设计相结合。通过基于自适应成长法的高刚度骨架结构设计方法, 在实现结构轻量化目标的同时, 有效提高结构的承载能力。在此基础上, 对粉末颗粒阻尼器分布位置进行设计, 提高舵面结构阻尼性能, 实现抑振效果, 提升舵面结构的颤振边界。

1 粉末颗粒阻尼复合舵面结构设计流程

针对舵面结构的承载和抑振协同设计问题,

提出一种粉末颗粒阻尼复合舵面结构拓扑优化设计方法。通过对舵面结构内部骨架分布和粉末颗粒阻尼器位置的设计, 实现轻质高承载且具有高颤振边界的舵面结构设计目标, 设计流程如图 1 所示。具体设计步骤如下:

- a. 基于自适应成长法的骨架结构设计
- 舵面结构的内部骨架分布直接影响结构的整体性能。基于自适应成长法, 以刚度最大为目标, 以重心位置为约束, 对舵面结构的内部骨架分布进行优化, 以实现轻质高承载骨架结构的设计。
- b. 等效力学性能计算
- 由于粉末颗粒阻尼器中金属粉末颗粒直径非常小, 其平均直径一般为 30 μm , 直接通过离散元方法对整体结构进行设计的计算代价极高。因此, 基于均匀化方法, 计算粉末颗粒阻尼器等效力学性能, 包括刚度、质量和阻尼性能参数, 并在此基础上进行后续的阻尼器分布优化设计。
- c. 最优分布设计
- 采用密度法, 以粉末颗粒阻尼器的伪密度为设计变量, 对其等效力学性能进行插值计算, 构建基于密度法的拓扑优化模型。通过优化求解, 实现粉末颗粒阻尼器在舵面结构中的最优分布, 进一步提升结构阻尼性能。
- d. 工程化设计
- 基于优化结果, 对舵面结构进行几何重构, 建立粉末颗粒阻尼复合舵面结构三维几何模型。
- e. 性能验证
- 对优化后舵面结构静力学、模态、幅频响应和颤振等性能进行仿真分析, 验证优化后粉末颗

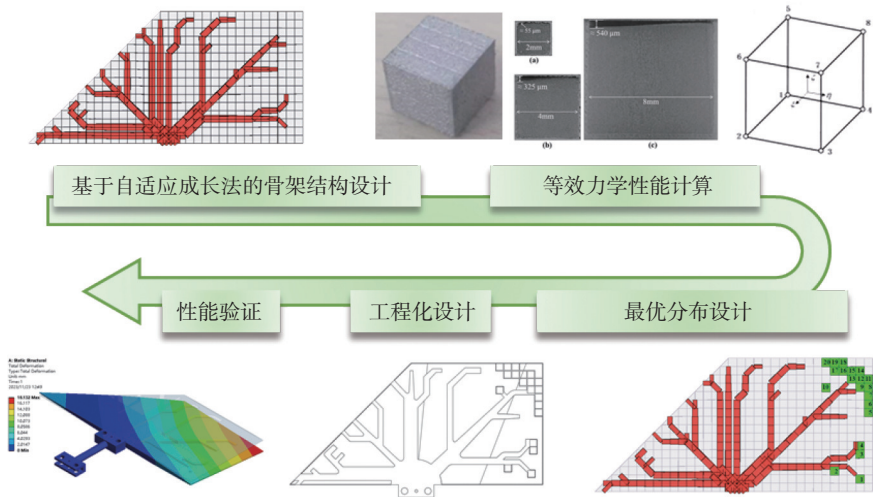


图 1 粉末颗粒阻尼复合舵面结构设计流程

Fig.1 Design process of the powder particle damping composite rudder structure

粒阻尼复合舵面结构的设计效果。

2 粉末颗粒阻尼复合舵面结构优化设计算例

2.1 基于自适应成长法的舵面结构骨架设计

经过亿万年的进化,植物等自然生物分支系统发展出了复杂的自适应机制,大多数分支系统都表现出最优的分支结构特征。这些特征使它们能够适应外部环境载荷,包括自重、附着物载荷(积雪、附冰、果实等)以及风载等。丁晓红研究团队^[7,20]通过研究自然生物分支系统中的生长机制,提出了自适应成长法。类比植物根系的生长过程,主根总是从种子出发,沿着能使其整体功能最优的方向成长。基于自适应成长法的结构加强筋分布优化设计,采用基结构法建立优化几何模型,如图2(a)所示。加强筋从选定的种子点开始根据一定的规则进行成长—分歧—退化。

a. 成长

生物分支系统的生长受到诸如水分或阳光等物质的引导,类比这种机制,自适应成长法中,加强筋从种子点开始,沿着对优化目标灵敏度最大的方向进行成长,如图2(b)所示。由于灵敏度不同,加强筋沿不同方向成长出具有不同厚度的新加强筋,如图2(b)中1、2、3所示的3个加强筋。

b. 分歧

当加强筋成长到一定厚度时,加强筋具有分歧能力,如图2(b)中加强筋1和2具有分歧能力,加强筋继续分歧成长,图2(c)为加强筋1和

2的分歧成长。

c. 退化

在分歧成长过程中,如果已生成的加强筋对设计目标的灵敏度变小,加强筋会退化甚至消失。如图2(c),加强筋3由于对设计目标贡献小,最终退化消失。

上述成长—分歧—退化过程反复进行,直到满足收敛条件,得到最优的加强筋分布形态。

舵面结构为一典型的薄壁三明治结构,本研究通过平板壳单元模拟蒙皮和内部加强筋骨架,采用八节点六面体线性完全积分单元模拟粉末颗粒阻尼器。平板壳单元由四边形膜元与剪应变混合插值板元耦合构造而成,详见文献[21]。原型舵面结构的外形尺寸如图3(a)所示。为降低网格质量对自适应成长法结果的影响,长宽方向上采用长宽比相近的四边形单元,边缘位置采用三角形单元,最终建立用于拓扑优化的舵面基结构模型,如图3(b)所示。采用自适应成长法对舵面结构内部骨架分布进行设计,种子点选取为舵轴位置,如图3(b)所示。在迭代中以筋板厚度为设计变量,通过厚度变化表示成长、分歧和退化,实现骨架分布设计。

舵面内部骨架的分布形态,不仅对其结构的刚度起着关键作用,还直接影响着舵面结构的重心位置,而重心位置又与舵面结构的操控性和抗颤振能力密切相关。通常来说,舵面结构的重心越靠近舵轴,结构的操控性越好,同时抗颤振能力也越强。因此,本研究在舵面的骨架分布设计中考虑重心位置对设计结果的影响,最终建立以静柔度为目标、以重心位置为约束的舵面骨架分布优化设计模型:

$$\begin{cases} \min F = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \\ \text{s.t.} \\ V_s(\mathbf{t}) - f_s V_0(\mathbf{t}) \leq 0 \\ C_{\text{cog}}(\mathbf{t}) - X_{\text{cog}} \leq 0 \\ 0 \leq t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max}, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为结构的静柔度; $\mathbf{U}$ 为位移矩阵; $\mathbf{K}$ 为总刚度矩阵; V_s 为加强筋总体积; f_s 为加强筋体积分数; $\mathbf{t}$ 为设计变量; V_0 为舵面结构的总体积; C_{cog} 为舵面结构的重心位置; X_{cog} 为重心约束位置坐标; t_i 表示第 i 个加强筋厚度; $t_{\max}$ 、 $t_{\min}$ 分别为加强筋厚度的最大值和最小值; n 为加强筋总数; 下标 s 表示加强筋。

设计目标静柔度对设计变量 t_i 的灵敏度为

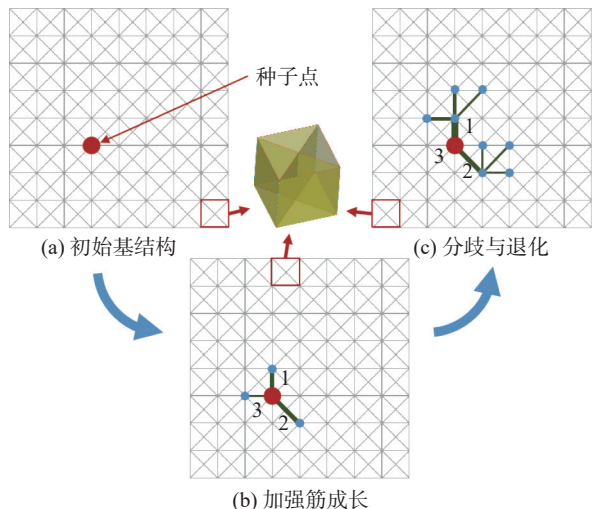


图2 自适应成长过程

Fig.2 Process of adaptive growth

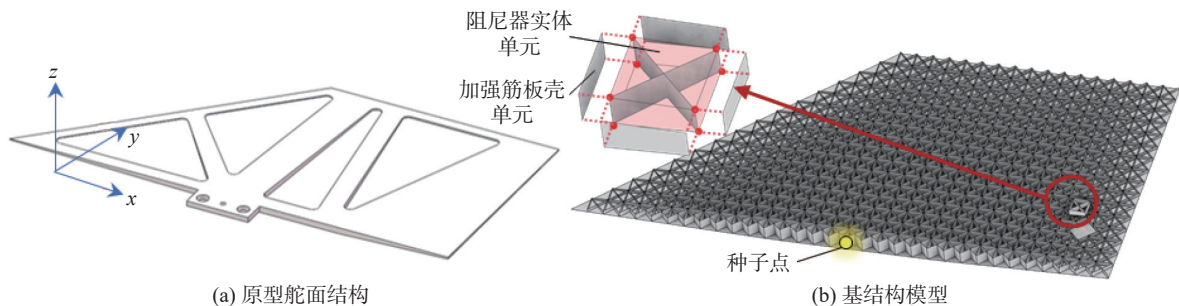


图3 原型舵面结构及基结构模型

Fig.3 Original rudder structure and basic structure of rudder

$$\frac{\partial F}{\partial t_i} = -\mathbf{u}_{s,i}^T \left(\frac{\partial \mathbf{k}_{s,i}}{\partial t_i} \right) \mathbf{u}_{s,i} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{k}_{s,i}$ 为第 i 个加强筋的刚度矩阵; $\mathbf{u}_{s,i}$ 为第 i 个加强筋的位移场向量。

基于自适应成长法和式(1)所示的优化模型, 以移动渐近线法 (method of moving asymptotes, MMA) 为寻优算法, 通过迭代更新准则对结构分布进行寻优, 具体流程如下:

步骤1 建立基结构, 设置设计域。

步骤2 选取种子点, 设置优化参数。参考结构的载荷和支撑情况, 选取基结构上若干节点作为种子点, 给定加强筋的初始厚度、分歧临界值、体积约束因子、收敛容差以及最大迭代次数。

步骤3 灵敏度分析。对结构进行有限元分析, 通过解析法计算活动加强筋的灵敏度。

步骤4 加强筋成长、分歧和退化。如果满足加强筋成长条件, 通过 MMA 算法更新加强筋厚度; 如果厚度达到分歧临界值, 则表明该加强筋具有分歧能力; 如果满足退化条件, 则该加强筋退化。

步骤5 收敛判断。计算目标函数, 如果满足收敛条件, 则优化结束, 否则返回步骤3, 继续迭代, 直至收敛条件得到满足。

基于图3所示的基结构, 对舵面结构骨架的分布形态进行优化设计。相关参数取值如下: 蒙皮厚度为 0.5 mm, 加强筋厚度最大为 9 mm, 最小为 0.1 mm, 分歧厚度为 0.3 mm, 过滤半径为 7 mm。舵轴处作为种子点, 加强筋结构体积约束为 30%。采用自适应成长法优化设计后的舵面结构骨架如图4所示, 呈现为典型的树状分支形态。该形态使得舵面结构具有较好的承载性能, 实现了轻质高刚骨架结构设计的目标。

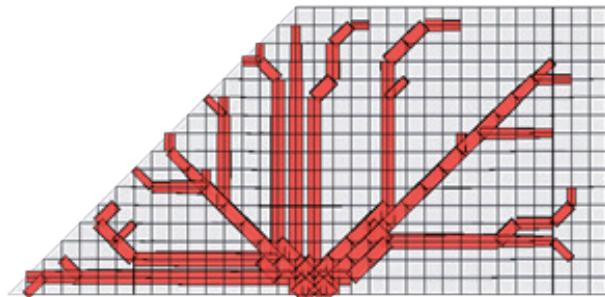


图4 自适应成长法优化设计后的舵面结构

Fig.4 Rudder structure optimized design by adaptive growth method

2.2 基于均匀化法的粉末颗粒阻尼器等效性能计算

如图5(a)所示, 在增材制造过程中, 通过在结构内部设置空腔, 在每一次铺粉过程中将未熔融的金属粉末逐层堆积于空腔结构内部, 如此往复, 可在结构内部直接嵌入生成一种具备高填充率且颗粒材料与主结构一致的颗粒阻尼器——金属粉末颗粒阻尼器。该阻尼器的阻尼机制与宏观的颗粒阻尼器类似, 图5(b)为颗粒阻尼器的工作原理, 结构体在发生振动时, 通过颗粒与颗粒之间以及颗粒与壁面之间的碰撞和摩擦耗能实现减振。

为了实现粉末颗粒阻尼器位置的优化设计, 基于均匀化法, 对阻尼器单元的等效性能进行计算, 然后基于密度法对等效性能进行插值, 通过对阻尼器伪密度的 0-1 分布设计, 实现阻尼器位置分布的优化。图6为粉末颗粒阻尼器等效性能计算过程示意图, 包括六面体单元刚度矩阵、质量矩阵以及阻尼矩阵的等效构建过程。

a. 等效刚度矩阵的计算

基于均匀化法求解得到粉末颗粒阻尼器单元结构的等效弹性本构矩阵 $\mathbf{D}^H$, 其第 r 行和第 s 列的 D_{rs}^H 为

$$D_{rs}^H = \frac{1}{|\Omega|} \sum \int_{\Omega} (\chi_e^{0(r)} - \chi_e^{(r)})^T \mathbf{k}_{p,e} (\chi_e^{0(s)} - \chi_e^{(s)}) d\Omega \quad (3)$$

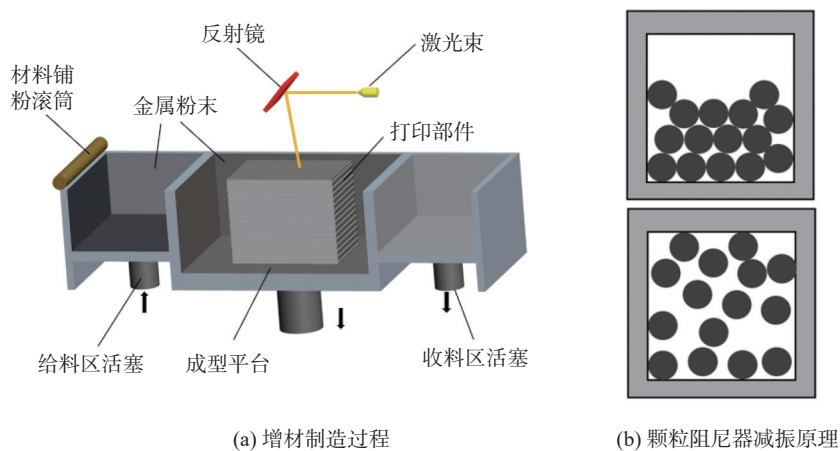


图 5 增材制造方式与颗粒阻尼器减振原理

Fig.5 Additive manufacturing and the vibration reduction mechanism of particle damper

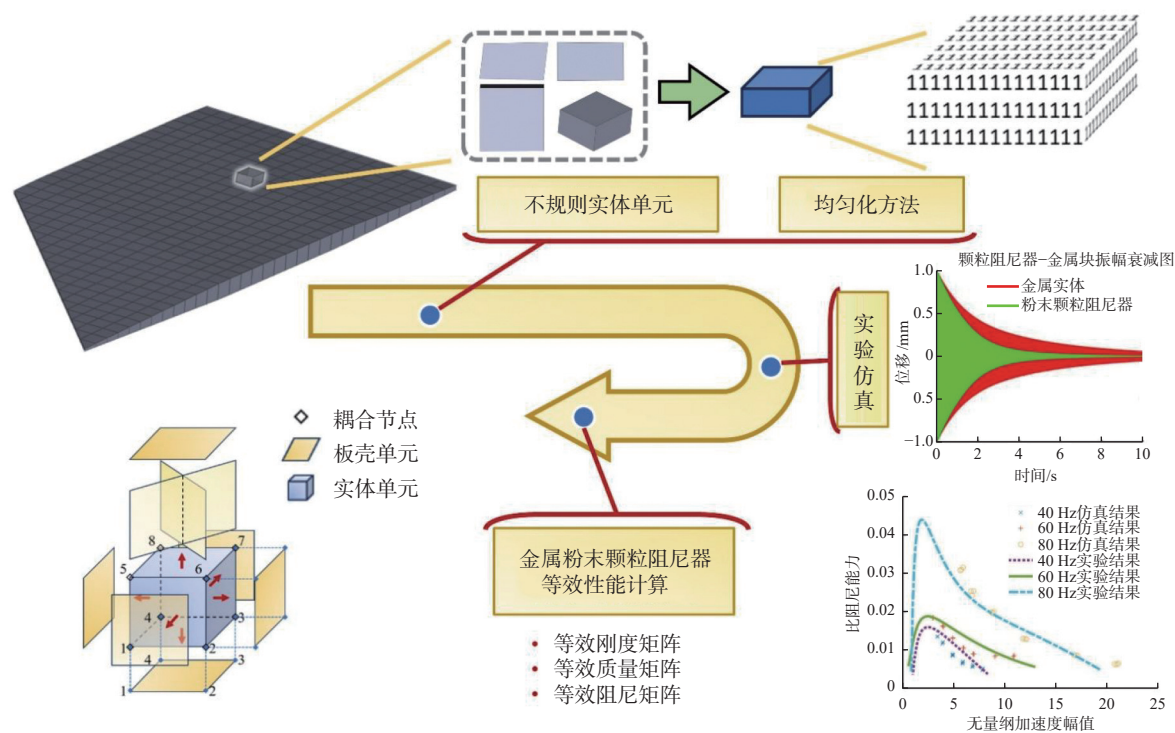


图 6 金属粉末颗粒阻尼器等效性能计算过程

Fig.6 Equivalent performance calculation process for the matal powder particle dampers

式中：上标 H 表示经过均匀化法得到的等效性能； Ω 为粉末颗粒阻尼器单元域； $k_{p,e}$ 为粉末颗粒阻尼器单元划分网格后对应的第 e 个单元的刚度矩阵； χ_e^0 为通过施加单位应变后计算得到的节点位移场向量； χ_e 为通过施加全局单位应变后计算得到的节点位移场向量； r 和 s 表示本构矩阵 D^H 中第 r 行和第 s 列， $r=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ， $s=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ；下标 p 表示粉末颗粒阻尼器。

对粉末颗粒阻尼器单元结构进行网格划分，

以宏观体积为 $10\text{ mm}\times10\text{ mm}\times10\text{ mm}$ 、壁厚为 1 mm 的单元颗粒阻尼器为例，如果以 1 mm 大小对其进行网格划分，将阻尼器划分为 $10\times10\times10$ 的空间体素矩阵。体素矩阵中 1 元素代表实体，0 元素代表空腔中的粉末，体素矩阵沿任意方向的每一层信息如 图 7 所示。

经过均匀化法求解后得到粉末颗粒阻尼器等效弹性本构矩阵 D^H ，则粉末颗粒阻尼器单元的等效刚度矩阵 k_p 为

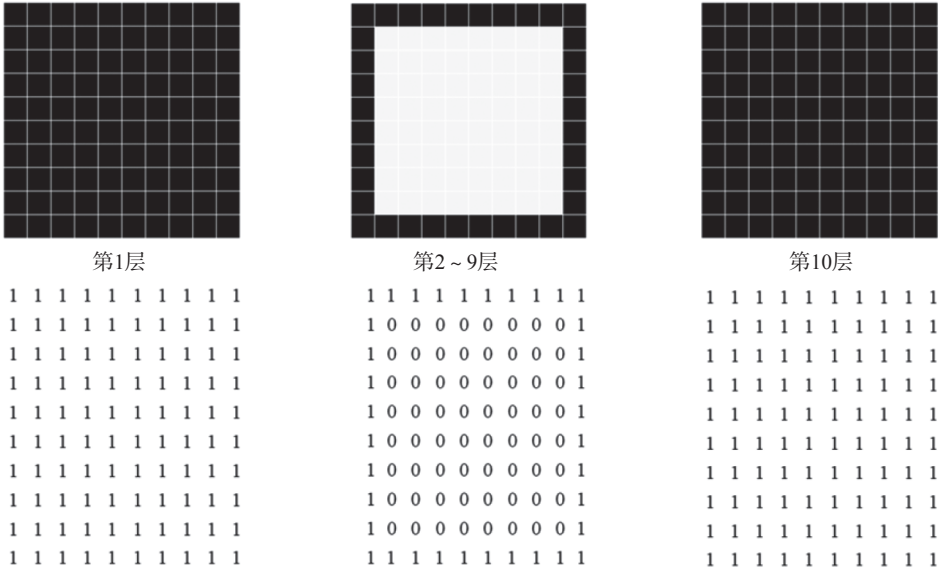


图 7 体素矩阵信息

Fig.7 Voxel matrix information

$$k_p = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}^H \mathbf{B} d\Omega = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^{*T} \mathbf{D}^H \mathbf{B}^* |\mathbf{J}| d\xi d\eta d\zeta \quad (4)$$

式中： $\mathbf{B}$ 为全局坐标系下的应力-应变矩阵； $\mathbf{B}^*$ 为局部坐标系 ξ - η - ζ 下的应力-应变矩阵； $\mathbf{J}$ 为坐标变换的雅克比矩阵。

b. 等效质量矩阵的计算

粉末颗粒阻尼器单元的等效质量矩阵 $\mathbf{m}_p$ 采用协调质量矩阵来计算，即

$$\mathbf{m}_p = \int_{\Omega} \rho^H \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho^H \mathbf{N}^{*T} \mathbf{N}^* |\mathbf{J}| d\xi d\eta d\zeta \quad (5)$$

$$\rho^H = 4.44 \frac{R_1}{R_e} + 2.62 \frac{R_0}{R_e} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{N}$ 为单元形函数矩阵； ρ^H 为粉末颗粒阻尼器单元的等效密度； R_e 为图 7 中体素矩阵的元素总数； R_1 为体素矩阵中 1 元素的个数，1 元素表示钛合金实体，对应的材料密度为 4.44 g/cm³； R_0 为体素矩阵中 0 元素的个数，0 元素表示钛合金粉末，对应的材料密度为 2.62 g/cm³。

c. 等效阻尼矩阵的计算

由于粉末颗粒阻尼器的特殊性，其阻尼能力由碰撞产生，阻尼能力主要在节点位移方向上体现，在剪切方向上不体现。本研究通过构建集中质量矩阵的思想来构造单元阻尼矩阵，即阻尼矩阵对角线元素不为 0，非对角线元素为 0。粉末颗粒阻尼器单元的等效阻尼矩阵 $\mathbf{c}_p$ 中的元素值为

$$c_{p,j} = \begin{cases} \frac{c_j^H}{8}, & r = s \\ 0, & r \neq s \end{cases} \quad (7)$$

$$c_j^H = \frac{c_k V_j}{V_k} \quad (8)$$

$$V_j = \bar{x} \bar{y} \bar{z} \quad (9)$$

式中： c_j^H 为第 j 个粉末颗粒阻尼器单元的阻尼系数； c_k 为参考粉末颗粒阻尼器的阻尼系数； V_k 为空腔体积； V_j 为第 j 个粉末颗粒阻尼器单元内部粉末的体积； $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 和 $\bar{z}$ 分别为单元在 x 、 y 和 z 这 3 个方向上的长度。

d. 不规则六面体单元的等效性能计算

如图 6 所示，实际的舵面结构中，由于其前缘、后缘和尖弦等部位较薄，而在舵轴处较厚，并不能用均匀的立方体单元进行网格划分。对于形状各异的六面体单元模型，需按上述方法对具有特殊形状的六面体单元进行等效性能计算。对每个单元的平均长度进行分析后发现，舵面结构模型等参单元具有以下特点：

(a) 六面体单元在 z 轴投影下近似为标准的正方形；

(b) 六面体单元关于 xy 平面对称；

(c) 六面体单元在 z 方向上尺寸差异较小，可近似为横置的扁平长方体。

舵面蒙皮及粉末颗粒阻尼器壁厚设置为 0.5 mm，构建体素矩阵，体素矩阵 x 、 y 向的单元长度设置为 0.5 mm，单层体素矩阵为方阵。体素

矩阵 z 向的层数 N_z 定义为 z 向平均长度 $\bar{z}$ 与0.5 mm相除的商,即

$$N_z = \left\langle \frac{\bar{z}}{0.5} \right\rangle \quad (10)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示求整运算。

根据式(3),采用均匀化法确定粉末颗粒阻尼器单元的等效弹性本构矩阵,进而根据式(4)确定单元的等效刚度矩阵。

文献[22]理论测试得到的边长为10 mm、壁厚为1 mm的正方体单元颗粒阻尼器的阻尼系数 c_k 为0.007 N·s/mm,其内部粉末空腔体积 V_k 为512 mm³。基于此,确定不同空腔体积的粉末颗粒阻尼器对应的等效阻尼系数后,由式(7)~(9)确定粉末颗粒阻尼器单元等效阻尼矩阵。最终,获得舵面不同位置处对应的粉末颗粒阻尼器单元的等效刚度、质量和阻尼矩阵。

2.3 粉末颗粒阻尼器分布位置设计

减小振动位移可以有效提高结构的颤振性能,而粉末颗粒阻尼器的分布位置对结构的振动位移影响很大。分布位置优化设计以动柔度为优化目标,以粉末颗粒阻尼器单元伪密度为设计变量,以粉末颗粒阻尼器体积分数为约束条件,对颗粒阻尼器在舵面内部的分布位置进行优化设计,优化模型为

$$\begin{cases} \frac{\partial \text{Re}(\bar{F}_d(\omega))}{\partial \rho_j} = \text{Re} \left(\mathbf{u}_{p,j}^T \left(\frac{\partial \mathbf{k}_{p,j}}{\partial \rho_j} + i\omega \left(\frac{\partial \mathbf{c}_{p,j}}{\partial \rho_j} + \frac{\partial \tilde{\mathbf{c}}_{p,j}}{\partial \rho_j} \right) - \omega^2 \frac{\partial \mathbf{m}_{p,j}}{\partial \rho_j} \right) \mathbf{u}_{p,j} \right) = \\ p\rho_j^{p-1} \text{Re} \left(\mathbf{u}_{p,j}^T \left((1+i\omega\beta) \mathbf{k}_{p,j} + i\omega \mathbf{c}_{p,j} + (i\omega\alpha - \omega^2) \mathbf{m}_{p,j} \right) \mathbf{u}_{p,j} \right) \\ \frac{\partial \text{Im}(\bar{F}_d(\omega))}{\partial \rho_j} = p\rho_j^{p-1} \text{Im} \left(\mathbf{u}_{p,j}^T \left((1+i\omega\beta) \mathbf{k}_{p,j} + i\omega \mathbf{c}_{p,j} + (i\omega\alpha - \omega^2) \mathbf{m}_{p,j} \right) \mathbf{u}_{p,j} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中: α 、 β 为瑞利阻尼系数; $\mathbf{c}_{p,j}$ 为第 j 个粉末颗粒阻尼器单元结构阻尼矩阵; $\tilde{\mathbf{c}}_{p,j}$ 为瑞利阻尼矩阵; p 为惩罚因子; i 为虚数; $\mathbf{u}_{p,j}$ 为第 j 个粉末颗粒阻尼器的位移场向量; $\mathbf{k}_{p,j}$ 为第 j 个粉末颗粒阻尼器的刚度矩阵; $\mathbf{m}_{p,j}$ 为第 j 个粉末颗粒阻尼器单元的质量矩阵。

在粉末颗粒阻尼器分布设计中,选择粉末质量占总质量的1.5%作为约束条件。对于图4中的舵面结构,粉末颗粒阻尼器的质量占结构总质量的比例为

$$0.015Mf_p = 2.62 \sum_{j=1}^{n'} V_j \quad (15)$$

式中: M 为舵面结构质量。解得 f_p 为3.4%,即优化模型式(11)中体积分数 f_p 设置为3.4%。

计,优化模型为

$$\begin{cases} \min \bar{F} \\ \text{s.t.} \\ V_p(\rho) - f_p V_0(\rho) \leq 0 \\ 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n' \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\bar{F}$ 为结构的动柔度; V_p 为粉末颗粒阻尼器单元的总质量; V_0 为舵面结构的总质量; f_p 为粉末颗粒阻尼器体积分数; ρ 为设计变量, ρ_j 为第 j 个粉末颗粒阻尼器单元的伪密度; n' 为粉末颗粒阻尼器单元总个数。

由于阻尼矩阵的存在,结构的响应为复数,相应的动柔度也为复数形式,表示为

$$|\bar{F}_d| = \sqrt{(\text{Re} \bar{F}_d)^2 + (\text{Im} \bar{F}_d)^2} \quad (12)$$

式中, $\text{Re} \bar{F}_d$ 和 $\text{Im} \bar{F}_d$ 分别表示设定频域内动柔度的实部和虚部。

ρ_j 关于结构动柔度的灵敏度为

$$\frac{\partial |\bar{F}_d|}{\partial \rho_j} = \frac{\text{Re}(\bar{F}_d(\omega)) \frac{\partial \text{Re}(\bar{F}_d(\omega))}{\partial \rho_j} + \text{Im}(\bar{F}_d(\omega)) \frac{\partial \text{Im}(\bar{F}_d(\omega))}{\partial \rho_j}}{|\bar{F}_d|} \quad (13)$$

式中, ω 为角频率。

对粉末颗粒阻尼器进行分布优化设计,设计结果如图8(a)所示,图中带编号的绿色单元为粉末颗粒阻尼器单元,编号对应阻尼器的阻尼系数如表1所示。由图可知,粉末颗粒阻尼器位置多分布于振动响应比较大的边缘区域,相对比较集中。阻尼器较为集中的分布形态可以在短时间内提供较大的耗能效果,对振动有着比较强的抑制作用,能够有效提高舵面的颤振性能。粉末颗粒阻尼器位置优化过程迭代曲线如图8(b)所示。优化迭代过程中,结构动柔度 $\bar{F}$ 与结构初始动柔度 $\bar{F}_0$ 的比值在前10次迭代中下降较快,随后,迭代结果逐渐趋于平缓,直至第58次时实现收敛。

2.4 工程化设计

对设计结果进行工程化,原型舵面结构如图3(a)所示,优化后并进行工程化设计的舵面结构如图9

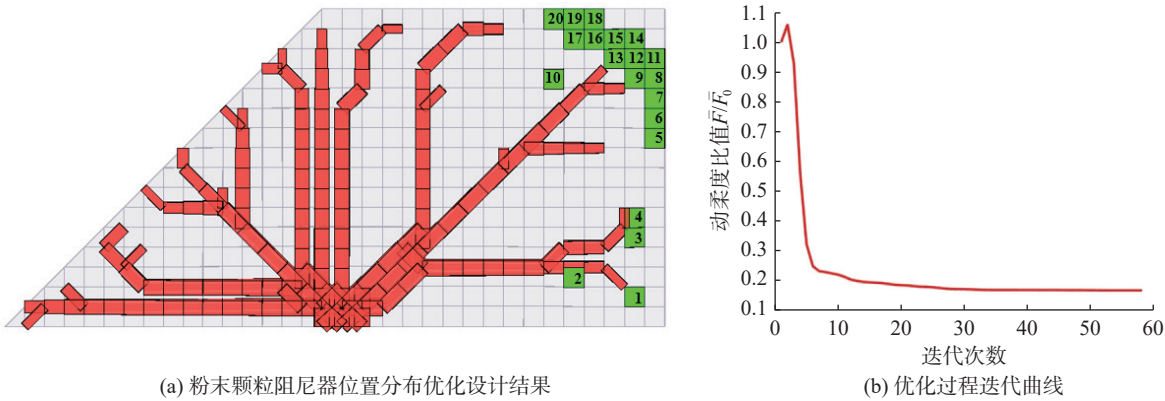


图 8 优化设计后粉末颗粒阻尼器位置及优化过程迭代曲线

Fig.8 Position of the powder particle damper after optimized design and the iteration curve of the optimization process

表 1 各单元粉末颗粒阻尼器阻尼系数

Tab.1 Damping coefficients of powder particle dampers for each unit

编号	阻尼系数/ $10^{-3}(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	编号	阻尼系数/ $10^{-3}(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	编号	阻尼系数/ $10^{-3}(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	编号	阻尼系数/ $10^{-3}(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$
1	5.94	6	3.19	11	2.11	16	5.63
2	10.13	7	2.90	12	3.77	17	5.58
3	5.51	8	2.20	13	5.31	18	4.39
4	5.32	9	3.82	14	3.08	19	4.40
5	3.37	10	7.51	15	3.64	20	4.39

所示。通过三维模型计算可得优化后舵面结构的质量相较于原型舵面结构的减少了 22%。

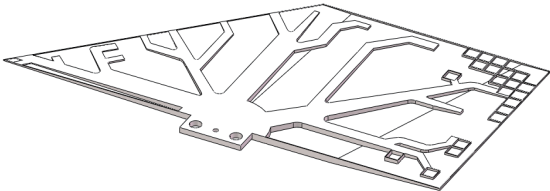


图 9 优化后工程化设计的舵面结构

Fig.9 Optimized rudder structure for engineering design

3 舵面力学性能评估

为验证优化设计后粉末颗粒阻尼复合舵面结构的性能，对原型和优化后舵面结构的静力学、模态、幅频响应和颤振等性能进行分析，通过这 4 个性能的对比，验证优化设计效果。

3.1 静力学性能

将工程化舵面结构导入有限元分析软件中进行建模，在舵轴末端施加固定约束，将气动载荷等效为一个垂直于表面的节点力，大小为 800 N，载荷位置为展向距根弦 74.3 mm，弦向距后缘 154.2 mm，如图10所示点 1 位置。舵面结构的材

料为钛合金，材料密度为 4.4 g/cm^3 ，弹性模量为 110 GPa，泊松比为 0.33。网格划分为四面体网格，原型舵面和优化舵面结构网格数分别为 221 403 和 203 706。求解得到原型舵面与优化舵面的位移云图如图 11 所示，最大位移分别为 19.62 mm 和 17.59 mm。相较于原型舵面结构，优化后的舵面结构最大位移值减少了 10.35%，显示出更好的静力学性能。

3.2 模态性能

模态频率对舵面综合性能有较大的影响，模态分析中结构的边界约束与 3.1 一致。经有限元分析求解，原型舵面和优化舵面结构前 4 阶模态振型如图 12 所示，具体模态频率结果如表 2 所示。由图和表可知：优化前后舵面结构各阶模态振型

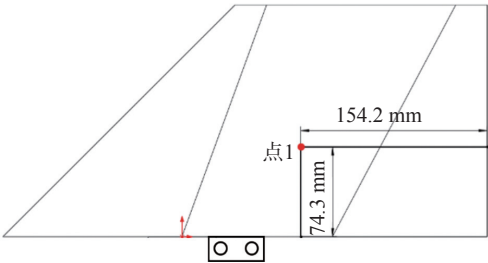


图 10 载荷位置示意图

Fig.10 Schematic diagram of load position

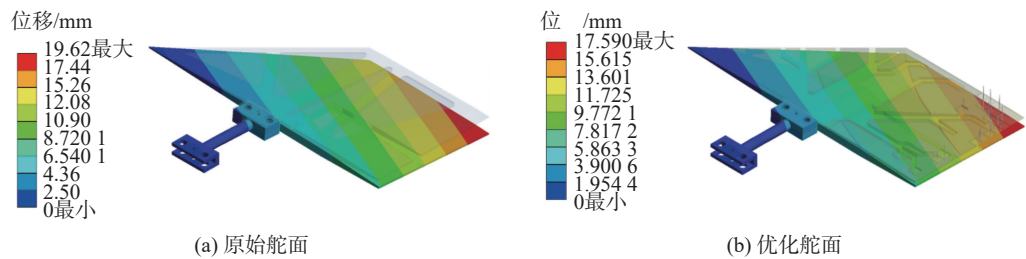


图 11 优化前后舵面静力学分析结果

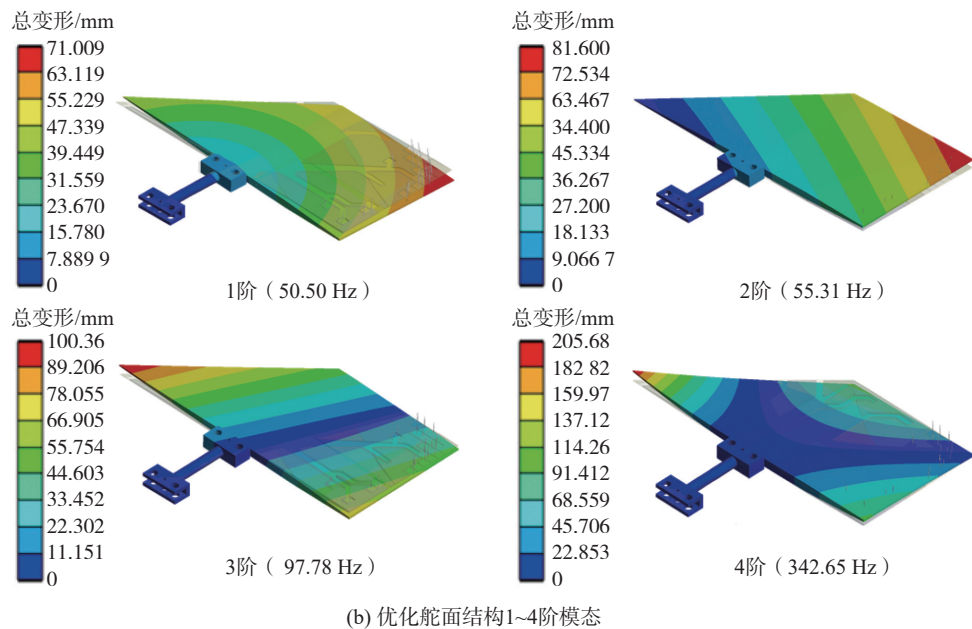
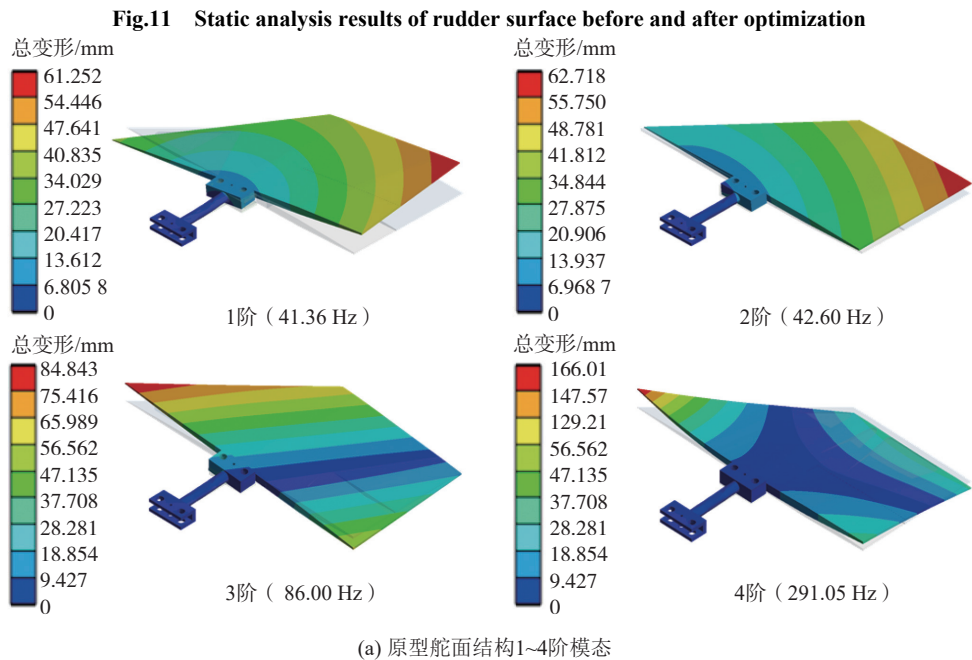


图 12 优化前后舵面结构前 4 阶模态振型

Fig.12 First four-order modal vibration modes of the rudder structure before and after optimization

基本相同，优化后舵面结构的 1 阶固有频率为 50.50 Hz，较原型舵面结构的 1 阶固有频率 41.36 Hz 提高了 22.10%，2~4 阶模态频率也都有不同程度

的提高。

3.3 幅频响应性能

在静力学以及模态分析中一般不考虑阻尼

表 2 优化前后舵面结构前 4 阶固有频率对比

Tab.2 Comparison of the first four-order natural frequencies of the rudder structure before and after optimization

阶数	原型舵面/Hz	优化舵面/Hz	变化率/%
1阶	41.36	50.50	22.10
2阶	42.60	55.31	29.83
3阶	86.00	97.78	13.70
4阶	291.05	342.65	17.73

项, 阻尼对静力学和模态性能影响较小。粉末颗粒阻尼器的阻尼特性采用 COMBIN14 弹簧阻尼单元进行简化。弹簧阻尼单元中设置弹簧刚度为 0, 阻尼值为表 1 中对应的阻尼系数值。在舵面舵轴位置处施加固定约束。设置分析频率区间为 0~500 Hz, 力值为 10 N, 采样间隔为 1 Hz, 振动测量点为后缘尖弦角点。幅频响应分析结果如图 13 所示, 纵坐标位移值为对数坐标, 取自然对数为底。结果显示, 原型舵面幅频响应最大位移为 15.3 mm, 优化舵面最大位移为 11.8 mm, 幅频响应最大位移减少了 22.88%。因此, 粉末颗粒阻尼器的存在有效提升了舵面的动力学性能。

3.4 颤振性能

采用 PK 法进行颤振边界搜索, 颤振分析时, 设置大气密度、飞行速度以及马赫数, 在粉末颗粒阻尼器处添加表 1 中对应阻尼系数的 COMBIN14 弹簧阻尼单元。PK 法通过求解系统特征值的实部(阻尼比)和虚部(频率), 判断能量状态。优化前后, 舵面在马赫数分别为 4、5、6 时的颤振速度如表 3 所示。由表 3 可见, 优化舵面在不同马赫数下颤振速度提高均大于 10%, 优化舵面结构显示出更好的颤振性能。舵面结构的颤振速度随着马赫数的增加而增大, 优化舵面相较于原型舵面在高速飞行时拥有更加良好的综合力学性能。取前 4 阶模态的速度与阻尼绘制成速度-阻尼图, 取前 4 阶模态的速度与频率绘制成速度-频率图。不同模态的固有频率(如弯曲模态和扭转模态)随速度变化的曲线若发生交汇和分叉, 则预示颤振发生, 对于速度-阻尼图, 阻尼为系统总阻尼(结构阻尼+气动阻尼)。当阻尼为 0 时, 系统处于临界稳定状态, 此时对应的速度为颤振速度的起始点。当阻尼从负(能量耗散)转为正(能量累积)时, 对应的速度即为颤振临界速度。在不同马赫数下对舵面进行颤振仿真, 图 14 为在马赫数为

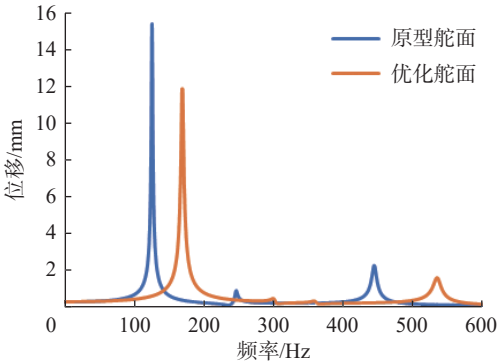


图 13 优化前后舵面幅频响应分析结果

Fig.13 Rudder amplitude-frequency response analysis results before and after optimization

表 3 优化前后舵面颤振性能对比

Tab.3 Comparison of the rudder flutter performance before and after optimization

马赫数	原型舵面/(m·s ⁻¹)	优化舵面/(m·s ⁻¹)	变化率/%
4	1 013.8	1 124.0	10.9
5	1 116.0	1 274.5	14.2
6	1 217.1	1 417.2	16.4

5 时原型舵面和优化舵面的速度-阻尼图和速度-频率图。由图可见, 在所有速度下, 舵面结构发生颤振的模态为两个弯扭模态。

4 结 论

提出一种金属粉末颗粒阻尼复合舵面结构优化设计方法。首先, 基于自适应成长法对舵面结构的内部骨架分布进行设计, 满足高承载要求。其次, 基于均匀化法进行粉末颗粒阻尼器刚度、质量、阻尼等效性能计算。在此基础上, 基于密度法, 以粉末颗粒阻尼器的伪密度为设计变量, 对得到的等效计算结果进行插值, 实现粉末颗粒阻尼器最优位置设计。最后, 对设计结果进行工程化建模, 并对其静力学、模态、幅频响应和颤振等性能进行分析, 验证设计效果。相关研究结果表明: 优化后的粉末颗粒阻尼器主要分布在结构振动位移较大的位置, 这种分布形式能够最大程度地激发粉末颗粒的运动状态, 通过颗粒间碰撞耗能实现减振, 从而实现提升舵面颤振性能的目的。通过性能对比可知, 相较于原型舵面, 优化舵面质量降低 22%, 最大位移减小 10.35%, 1 阶固有频率提升 22.10%, 马赫数在 4、5、6

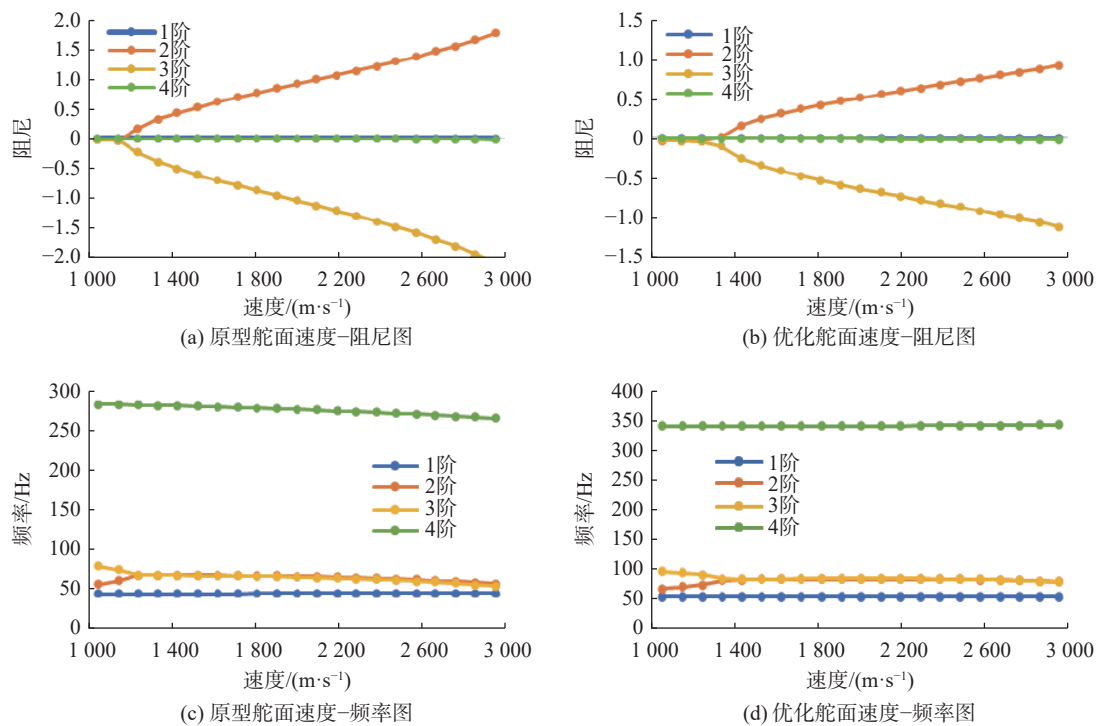


图 14 马赫数为 5 时优化前后舵面颤振结果

Fig.14 Rudder flutter results before and after optimization at Mach number 5

时，颤振速度提升均在 10% 以上。

点阵填充既可以提高结构的可制造性，还可以进一步增强结构的刚度，在未来的研究中，可进一步对共形点阵填充设计方法进行研究。此外，热失效是舵面结构的重要失效形式。因此，如何在考虑结构热防护的同时，实现舵面结构的承载、抑振、热控协同设计，这也是未来重要的研究方向。

参考文献：

[1] 钮耀斌. 高超声速飞行器机翼非线性颤振研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

[2] 池沛, 杨艳艳, 陈宗基. 空天飞行器建模分析与自主重构 [J]. 航空学报, 2008, 29(S1): S163–S169.

[3] 刘燕斌. 高超声速飞行器建模及其先进飞行控制机理的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[4] 王昕江, 郭力, 金朋, 等. 一种基于拓扑优化的舵面仿生多级分叉结构设计 [J]. 气体物理, 2020, 5(6): 45–51.

[5] WANG C, ZHU J H, WU M Q, et al. Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(5): 386–398.

[6] ZHU J H, ZHAO Y B, ZHANG W H, et al. Bio-inspired feature-driven topology optimization for rudder structure

design[J]. *Engineered Science*, 2019, 5: 46–55.

[7] DING X H, YAMAZAKI K. Stiffener layout design for plate structures by growing and branching tree model (application to vibration-proof design)[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, 26(1): 99–110.

[8] HU T N, DING X H, ZHANG H, et al. Geometry and size optimization of stiffener layout for three-dimensional box structures with maximization of natural frequencies[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(1): 324–341.

[9] 张德慧, 丁晓红, 胡天男, 等. 基于改进自适应成长法的薄壁结构频率优化设计 [J]. *航空学报*, 2023, 44(19): 228378.

[10] 郑昌隆, 丁晓红, 沈洪, 等. 基于自适应成长法的舵面结构动力学拓扑优化设计方法研究 [J]. *空天防御*, 2021, 4(2): 7–12.

[11] 鲁正, 吕西林, 闫维明. 颗粒阻尼技术研究综述 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(7): 1–7.

[12] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D 打印技术研究现状和关键技术 [J]. *材料工程*, 2016, 44(2): 122–128.

[13] SCOTT-EMUAKPOR O, GEORGE T, RUNYON B, et al. Investigating damping performance of laser powder bed fused components with unique internal structures[C]//*Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*.

Oslo: ASME, 2018.

[14] SCOTT-EMUAKPOR O, GEORGE T, RUNYON B, et al. Assessing manufacturing repeatability of inherently damped nickel alloy components via forced-response testing[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Phoenix: ASME, 2019.

[15] SCOTT-EMUAKPOR O, SCHOENING A, GOLDIN A, et al. Internal geometry effects on inherent damping performance of additively manufactured components[J]. *AIAA Journal*, 2021, 59(1): 379–385.

[16] SCOTT-EMUAKPOR O, BECK J, RUNYON B, et al. Determining unfused powder threshold for optimal inherent damping with additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101739.

[17] NIEDERMEYER J, EHLERS T, LACHMAYER R. Potential of additively manufactured particle damped compressor blades: a literature review[J]. *Procedia CIRP*, 2023, 119: 570–575.

[18] EHLERS T, TATZKO S, WALLASCHEK J, et al. Design of particle dampers for additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101752.

[19] CELLI D A, JANCZEWSKI T, SHERIDAN L, et al. Damping and fatigue performance of additive manufactured particle damper infused instrumentation rake[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2023: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Boston: ASME, 2023.

[20] DING X H, YAMAZAKI K. Adaptive growth technique of stiffener layout pattern for plate and shell structures to achieve minimum compliance[J]. *Engineering Optimization*, 2005, 37(3): 259–276.

[21] 王谦, 丁晓红, 张横. 厚薄通用四边形平板壳元在薄壁结构加筋布局优化中的应用 [J]. *空天防御*, 2023, 6(2): 55–61.

[22] 鲍泽源, 丁晓红, 李海东, 等. 粉末颗粒阻尼器阻尼性能的影响因素分析 [J]. *机械设计与研究*, 2024, 40(6): 110–115.

(编辑：丁红艺)