

# Research on Design Method of UAV arm Based on Multi-Scale Structural Topology Optimization

Ang Zhao

Shanghai Civil Aviation College, Shanghai, 200232, China

## Abstract

As a crucial carrier of China's new-quality productive forces, the low-altitude economy's core equipment, drones, has its endurance constrained by airframe weight. UAV structural design, as a key factor determining UAV performance, stability, and application scope. Reasonable structural design can not only improve the flight performance of UAVs but also enable them to better adapt to various complex application scenarios, thereby promoting the widespread application of UAV technology in military and civilian fields. Aiming at the limitations of traditional single-scale topology optimization design, this paper proposes a UAV structural lightweight design method based on the multi-scale finite element method. By constructing a macro-meso collaborative optimization model, it is possible to reduce the weight of structural components while maintaining stability and strength, improve the overall structural performance, and reduce costs. Multi-scale structural topology optimization can provide a new development path for improving UAV endurance.

## Keywords

Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Lightweight Design; Topology Optimization; Multi-Scale Finite Element; Endurance Capacity

## 基于多尺度结构拓扑优化的无人机机臂设计方法研究

赵昂

上海民航职业技术学院, 中国·上海 200232

## 摘要

低空经济作为我国新质生产力的重要载体,其核心装备无人机的续航能力受机身重量的制约。无人机结构设计作为决定无人机性能、稳定性以及应用范畴的关键因素。合理的结构设计不但能够提升无人机的飞行性能,还能使其更好地适配各类复杂的应用场景,进而推动无人机技术在军事与民用领域的广泛应用。本文针对传统单尺度拓扑优化设计的局限性,提出了一种基于多尺度有限元法的无人机结构轻量化设计方法,通过构建宏观-微观协同优化模型,可实现结构件在保持稳定性和强度的前提下减轻重量,提高结构整体性能、降低成本的目的,多尺度结构拓扑优化可为无人机续航的提升提供新的发展路径。

## 关键词

无人机;轻量化设计;拓扑优化;多尺度有限元;续航能力

## 1 引言

无人机作为集成航空工业、自动化控制、通信工程等多领域前沿技术的先进航空装备,近年来在全球范围内呈现出迅猛的发展态势。无人机结构设计及材料合成等研究和应用已经越来越广泛,尤其是通过运用碳纤维增强复合材料(CFRP),显著降低了无人机的结构重量,同时大幅提升

了结构的强度和刚度<sup>[1]</sup>。在金属材料方面,通过对铝合金进行微合金化处理和热加工工艺优化,研发的适用于无人机结构的高强韧铝合金材料,有效增加了无人机的航程与载荷能力<sup>[2]</sup>。采用结构拓扑优化设计方法,通过约束体积分数实现结构的轻量化设计,可以设计出具有先进气动外形的机翼翼型和旋翼桨叶,极大降低了气动阻力和噪声,提高了气动效率<sup>[3]</sup>。常用的拓扑优化方法主要包括均匀化法、变密度法、水平集法、渐进结构优化法等,这些拓扑优化方法已从单一尺度分析迈向多物理场耦合,并广泛应用于工程实践。

伴随着新型复合材料的不断涌现,人们对具备多相特性、展现多元物理性能的复合材料的性能诉求日益增加。其中,以呈现细、微观尺度特征的非均质多孔材料在工程应用中备受关注<sup>[4]</sup>,其性能优化研究也成为材料科学领域的重要

【基金项目】上海民航职业技术学院校级课题(项目编号: XJKT-2025-34);中国民用航空局民航发展基金教育人才类项目(项目编号: 102140210370000009001)。

【作者简介】赵昂(1990-),女,中国河南平顶山人,博士,讲师,从事高校无人机应用技术研究。

方向。多尺度建模作为材料性能研究的前沿方法，致力于实现各尺度模型的协同求解。该方法依托连续介质力学理论，通过建立不同尺度之间的耦合关系，构建多尺度有限元模型，从而能够精准预测材料在复杂工况下的力学行为与性能表现。Direct FE<sup>2</sup> 多尺度有限元模型便是其中的典型代表，它利用周期边界条件和多点约束来建立细观代表体积单元（RVE）与宏观单元之间的自由度耦合方程，并通过缩放宏观单元高斯积分点处的细观 RVE 尺寸，使得细观有限元的内部虚功与宏观有限元的内部虚功相等，最终实现宏观与细观尺度的统一计算，完成多尺度有限元的高效耦合<sup>[5]</sup>。

本文基于此背景，提出了一种基于 Direct FE<sup>2</sup> 法的多尺度拓扑优化方法，克服传统单尺度优化的局限性，构建了在指定体积约束条件下实现多尺度结构刚度最大化的设计模型，为无人机结构优化设计提供了新的技术路径与理论支撑。

## 2 多尺度拓扑优化方法

在拓扑优化研究中，基于密度法对结构进行拓扑优化是一种常用且有效的手段。该方法以结构柔度为目标函数建立拓扑优化方程，旨在寻找一种最优的材料分布，使结构在满足一定约束条件下柔度最小，即刚度最大。

基于多尺度有限元法进行多尺度结构数值模拟，可同时求解宏观与细观结构的响应，建立不同尺度之间的联系，从而研究单胞微结构与宏观性能之间的关系。此外，基于密度法对多尺度结构的拓扑优化的描述为：

$$\max_{\rho(\mathbf{x}) \in P_s} \min_{\mathbf{d} \in U_s} \left\{ \frac{1}{2} \int_V C_{ijkl}(\rho(\mathbf{x})) \epsilon_{ij}(\mathbf{d}) \epsilon_{kl}(\mathbf{d}) dV - l(\mathbf{d}) \right\} \quad (1.1)$$

其中， $C_{ijkl}$  为四阶弹性张量， $\epsilon_{ij}$  为应变张量， $-l(\mathbf{d})$  为外力势能。 $\mathbf{d}$  为位移向量， $U_s$  为位移约束容许的变分空间。 $\rho$  为设计变量，通过在设计域  $V$  中任意点  $x$  处取 0 或 1 来表示空隙或填充材料。 $P_s$  为满足体积约束条件的设计空间，式中内层的最小化问题遵循最小势能原理。将上述连续形式的方程离散后，拓扑优化问题可以表示为：

$$\begin{aligned} \min c(\boldsymbol{\rho}) &= \sum_e K_{ij}^e(\rho_e) d_i^e d_j^e \\ \text{s. t. } \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{d} &= \mathbf{F} \\ V/V_0 &= V_f \\ \rho_e &= 0 \text{ or } 1 \end{aligned} \quad (1.2)$$

其中， $c(\boldsymbol{\rho})$  为结构的柔度， $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{d}$  和  $\mathbf{F}$  为有限元中的总体刚度矩阵、节点位移向量和外力向量，上标  $e$  表示与单元  $e$  相关的变量， $V_f$  为给定的体积分数， $V_0$  为初始设计的体积， $V$  表示拓扑优化后结构的体积，体积约束条件  $V/V_0 = V_f$  保证了优化过程中材料用量符合设计要求。

Direct FE<sup>2</sup> 方法是一种并发多尺度有限元方法。该方法从能量角度出发，将宏观应变场通过周期边界条件施加给细

观代表体积单元。并对代表体积单元进行体积缩放，通过 Hill-Mandel 原理使宏观单元内高斯点处的代表体积单元总能量等于宏观单元的能量，最后通过一个线性矩阵将细观位移与宏观位移进行联系，建立起细观结构与宏观结构之间的能量关系。这种并发多尺度分析方法只需进行一次内部有限元求解，便可以大幅提升计算效率。

根据 Direct FE<sup>2</sup> 法的多尺度有限元理论，首先将式中结构的应变能离散为宏观单元应变能的和：

$$\frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon_{ij} \sigma_{ij} d\Omega = \frac{1}{2} \sum_e \sum_{\alpha} w_{\alpha} J_{\alpha} \sigma_{ij}(\mathbf{x}_{\alpha}) \epsilon_{ij}(\mathbf{x}_{\alpha}) \quad (1.3)$$

其中， $e$  为宏观单元编号， $\alpha$  为高斯积分点， $w_{\alpha}$  与  $\mathbf{x}_{\alpha}$  分别为高斯积分点  $\alpha$  的权重与物理坐标， $J_{\alpha}$  为雅可比行列式在高斯积分点  $\alpha$  处的值。根据 Hill-Mandel 原理，可得到基于 Direct FE<sup>2</sup> 法的多尺度拓扑优化方程：

$$\max_{\tilde{\rho}(\mathbf{x}) \in \tilde{P}_s} \min_{\tilde{\mathbf{d}} \in \tilde{U}_s} \left\{ \frac{1}{2} \sum_e \sum_{\alpha} \left( \tilde{w}_{\alpha} \int_{\Omega_{\alpha}} \tilde{\sigma}_{ij} \tilde{\epsilon}_{ij} d\Omega \right) - l(\tilde{\mathbf{d}}) \right\} \quad (1.4)$$

该方程进一步整合了宏观与细观尺度的信息，实现了多尺度拓扑优化的理论构建。进一步，将 RVE 的应变能与外力势能离散，同时，根据 Direct FE<sup>2</sup> 法的理论，可将多尺度拓扑优化问题表述为：

$$\begin{aligned} \min c(\tilde{\boldsymbol{\rho}}) &= \sum_e \sum_{\alpha} \sum_m \tilde{w}_{\alpha} (\tilde{\rho}_m)^p \tilde{k}_{ij}^m \tilde{d}_i^m \tilde{d}_j^m \\ \text{s. t. } \tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{d}} &= \mathbf{L} \mathbf{F} \\ \tilde{V}/\tilde{V}_0 &= V_f \\ 0 < \tilde{\rho}_{min} &\leq \tilde{\rho}_e \leq 1 \end{aligned} \quad (1.5)$$

其中  $\tilde{\rho}_{min}$  为防止刚度矩阵奇异设置的最小密度值，一般取为  $\tilde{\rho}_{min} = 0.001$ 。从式 (1.5) 中可以看出，为了实现基于 Direct FE<sup>2</sup> 法的多尺度拓扑优化，其设计变量为各细观单元的密度。因此在进行拓扑优化时，该模型的优化域为各高斯点处的细观单元，由于宏观单元在该模型中不直接贡献刚度，所以优化过程不涉及结构的宏观单元。

## 3 无人机机臂的多尺度结构拓扑优化设计流程

无人机机臂主要承受机身的重力作用和旋翼的升力作用，可以简化为悬臂梁结构进行优化设计。基于机臂刚度最大化的优化设计流程如图 1 所示。该拓扑优化设计流程大致可以分为四个主要步骤：

### 3.1 初始化

建立机臂的 Direct FE<sup>2</sup> 模型，包括建立机臂的宏观有限元模型和细观尺度的单胞模型，并对两个模型进行耦合。然后对设计变量进行初始化。由于拓扑优化设计过程中单元的位置和体积不发生改变，因此体积灵敏度和滤波矩阵不变，可以在初始化阶段对两者进行计算，避免优化过程中的重复计算，提升优化效率。

### 3.2 Direct FE<sup>2</sup> 分析

首先根据设计变量进行插值，例如采用经典的固体各

向同性材料惩罚方法,惩罚指数取为3。然后根据插值得到的材料杨氏模量对材料参数进行更新,只需对单胞单元的材料参数进行更新。最后对 Direct FE<sup>2</sup> 模型进行有限元求解,得到机臂在当前设计下的力学响应。

### 3.3 灵敏度分析

首先根据第2步中 Direct FE<sup>2</sup> 模型的计算结果对单元应变能进行计算,然后计算单胞中各个单元的灵敏度,根据灵敏度信息可以对设计变量进行更新。为了防止拓扑优化中的棋盘格问题,同时避免优化结果的网格依赖性,需要对灵敏度进行滤波,为了提升滤波的计算效率,只需将初始化中计算的滤波矩阵与灵敏度向量进行矩阵乘法即可。

### 3.4 设计更新

采用移动渐近线法对设计变量进行更新,将灵敏度信息提交给移动渐近线法的求解模型,得到更新后的设计变量。然后计算应变能变化的相对误差,当该误差小于给定的值后认为迭代收敛,停止迭代。否则,将更新后的设计变量代入步骤2中更新计算变量。

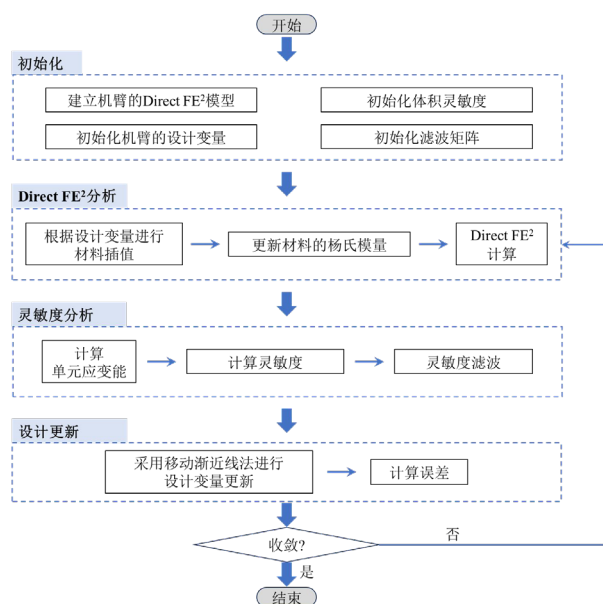


图1. 无人机机臂拓扑优化设计流程

该结构拓扑优化方法具有流程简单、计算效率高等优势,可以对无人机机臂进行快速的拓扑优化设计,进而提升

无人机机臂的设计效率,提升无人机的续航能力。

## 4 研究结论

本研究围绕无人机结构设计材料与材料优化,通过理论推导、模型构建,提出了一种基于无人机结构的多尺度拓扑优化方法,这种方法突破了传统单尺度拓扑优化的局限,将多尺度建模思想引入无人机结构设计领域。通过深入研究多尺度有限元法,利用周期边界条件和多点约束建立细观代表体积单元与宏观单元之间的自由度耦合方程,实现了宏观与细观尺度的有效整合。并以无人机机臂为研究对象,设计了一套完整且高效的多尺度结构拓扑优化设计流程。该流程涵盖初始化、Direct FE<sup>2</sup> 分析、灵敏度分析和设计更新四个关键步骤,从理论上解决了多尺度结构在给定体积约束下的刚度最大化问题。这种轻量化设计减轻了机臂重量,有效降低了无人机整体结构重量,从而提升了无人机整体性能,使其在实际应用中具备更广泛的适用性和更强的竞争力。

本研究仍存在一定的局限性。在模型方面,目前对无人机机臂的简化处理虽然有助于优化计算,但与实际复杂工况下的受力情况仍存在一定差异,未来研究可以进一步完善模型,考虑更多实际工况因素,同时探索人工智能技术与多尺度拓扑优化方法的融合路径,实现更高效、智能的无人机结构设计。

## 参考文献

- [1] 刘峰, 乔宇, 李雪江, 等. 轻木夹芯/碳纤维复合材料结构后推构型无人机机身设计与分析[J]. 复合材料科学与工程, 2024,(04): 56-62.
- [2] 刘坤, 张庆霞, 孙淑伟, 等. 无人机用航空铝合金材料激光毁伤特性缩比实验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 66-72.
- [3] 刘一宏, 马兴宇, 巩绪安, 等. 仿生覆羽控制固定翼无人机流动失速风洞实验[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(10): 52-60.
- [4] Yin H, Zhang W, Zhu L, et al. Review on lattice structures for energy absorption properties[J]. Composite Structures, 2023, 304(5): 116397.
- [5] Tan V B C, Raju K, Poh L.H. Direct FE<sup>2</sup> for concurrent multilevel modelling of heterogeneous structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 360: 112694.