

复合材料结构优化设计

毛海亮

广东汇天航空航天科技有限公司广州分公司 广东 广州 510000

摘要：面向复合材料结构在复杂服役环境下的多目标优化挑战，构建融合数字孪生与智能算法的动态闭环优化框架，实现铺层设计、疲劳寿命与可制造性协同优化。基于 Kriging 与注意力机制的混合代理模型显著提升高维非线性响应预测精度，误差控制于 6.2% 以内；结合 NSGA-II 与强化学习的自适应算法有效增强全局寻优能力，收敛速度提升 41%。集成多物理场耦合仿真与工业互联网平台，实现设计-制造-服役全过程数据闭环反馈，优化后结构重量降低 14.3%，疲劳寿命预测精度达 93.8%，可制造性达标率提升至 96.4%。该框架突破传统静态设计范式，为航空航天领域复合材料构件的智能设计与工程化应用提供可复用的技术路径。

关键词：复合材料；结构优化；设计

引言：复合材料结构优化设计作为先进制造与智能系统融合的关键技术方向，近年来在航空航天、新能源与高端装备领域实现快速发展。传统设计方法受限于单一性能目标与静态优化策略，难以兼顾轻量化、高强度、耐久性 & 可制造性等多维需求，尤其在复杂工况下易出现性能瓶颈。随着多学科设计优化与智能算法的深度融合，结构性能与制造成本的协同提升成为可能，为先进复合材料设计提供了新范式。

1 复合材料结构优化设计研究热点与技术路径

复合材料结构优化设计正经历从单目标静态优化向多目标动态闭环优化的范式转变，其技术路径呈现多维度、跨尺度与智能化特征，成为先进制造与结构工程领域的重要研究方向。随着航空航天、轨道交通及高端装备对结构性能要求的持续提升，传统基于经验或单一性能指标的设计方法已难以满足复杂工况下的系统集成需求。在此背景下，多目标协同优化、智能算法融合以及数字孪生驱动的闭环设计体系逐渐成为主流技术路径，推动复合材料结构设计从“性能导向”向“全生命周期智能协同”演进。

1.1 多目标协同优化研究进展

多目标协同优化通过平衡轻量化、强度、耐久性与成本等多重目标，实现系统性能全局最优，已成为复合材料结构设计的核心方向。在实际工程应用中，结构件往往需同时满足承载能力、疲劳寿命、热稳定性与制造可实现性等多重约束，单一目标优化难以兼顾系统综合效能。近年来，基于非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 的多目标优化框架被广泛应用于航空结构件的拓扑与

层合设计，显著提升了设计空间的探索深度与解集多样性。然而，目标函数间的非线性冲突与高维搜索空间带来的计算复杂性，仍导致优化过程收敛缓慢且易陷入局部最优。尽管多目标评价体系如熵权法与模糊综合评判已被用于权重分配与解集筛选，但其对多变工况下性能优先级动态调整的适应性仍存在局限，制约了优化结果在真实服役环境中的适用性。

1.2 智能算法融合发展趋势

智能算法融合通过集成遗传算法 (GA)、粒子群优化 (PSO)、NSGA-II 与强化学习等方法，显著提升优化搜索效率与全局寻优能力，推动算法自适应与动态调整能力发展。传统单算法在处理复杂非线性问题时易出现早熟收敛或搜索效率低的问题，而多算法协同机制通过互补优势，可在不同优化阶段动态切换策略。例如，强化学习与 NSGA-II 的协同优化框架在收敛性与解集多样性方面表现突出，能够依据历史迭代信息自动调整交叉与变异概率，实现更高效的搜索路径规划^[1]。然而，该类方法在实际应用中仍面临可解释性弱与泛化能力不足的挑战，其决策过程常被视为“黑箱”，难以满足工程设计中对过程透明与安全验证的需求。此外，算法融合模型对初始种群质量与参数配置敏感，缺乏统一的调参标准，限制了其在跨领域工程场景中的推广适用性。

1.3 数字孪生与多物理场耦合创新路径

数字孪生驱动设计依托工业互联网平台实现设计-制造闭环，结合多尺度-多物理场耦合仿真，突破计算瓶颈与仿真精度限制。通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射机制，数字孪生技术可实现结构在制造与服役全周

期中的状态感知与动态反馈，显著提升优化过程的闭环性与响应敏捷性。热-力-振动耦合分析与多学科设计优化（MDO）技术已被用于复杂复合材料结构的集成设计，有效解决了传统分步设计中各学科边界割裂的问题。然而，多物理场模型间的耦合算法复杂度高，尤其在非线性材料行为与瞬态载荷条件下的求解稳定性仍待提升。同时，跨尺度建模过程中存在信息传递失真与计算资源消耗过高的问题，制约了其在大型工程结构中的大规模部署。尽管部分研究尝试引入 Kriging 代理模型以降低仿真频次，但高维非线性响应预测中仍存在精度波动与泛化能力不足的挑战，需进一步结合注意力机制等先进建模方法以增强模型适应性。

2 复合材料结构优化设计核心研究热点与方法对比

2.1 多目标协同优化与智能算法融合

多目标协同优化旨在实现轻量化、刚度最大化、疲劳寿命延长与制造成本控制等多维目标之间的帕累托前沿求解。NSGA-II 算法因其良好的收敛性与多样性保持能力，已成为该领域主流工具。在典型航空结构件优化案例中，NSGA-II 在 200 代迭代内实现 Pareto 前沿覆盖率提升至 87.6%，显著优于传统遗传算法的 63.2%。MOEA/D 算法在非凸目标函数场景下展现出更优的解集分布均匀性，其均匀性指标（Spacing）较 NSGA-II 降低 19.3%。强化学习融合算法在动态环境适应性方面表现突出，基于 DQN（DeepQ-Network）的在线学习策略在载

荷突变工况下实现响应调整延迟时间缩短至 0.12 秒，较传统离线优化方案提升 62%。然而，智能算法在实际应用中仍面临可解释性差、参数敏感性高与动态调整机制缺失等挑战^[2]。研究表明，当目标权重发生 $\pm 15\%$ 波动时，NSGA-II 输出解集稳定性下降达 34.7%，表明其对主观权重设定高度依赖。

2.2 代理模型与混合优化框架适用性分析

代理模型在降低高维非线性结构响应仿真成本方面具有显著优势。Kriging 代理模型在低维连续函数建模中表现出高精度特性，其均方根误差（RMSE）可控制在 0.021 以内，适用于铺层角与刚度响应之间的映射建模。深度神经网络代理模型在高维非线性问题中展现出更强泛化能力，其在复合材料梁弯曲响应预测任务中，测试集 R^2 达 0.968，优于多项式回归模型的 0.831。然而，深度神经网络需依赖大规模高质量训练数据，典型模型训练样本量需超过 5000 组才能达到收敛，且存在“黑箱”特性，难以提供参数敏感性分析支持。混合优化框架通过融合 Kriging 模型与注意力机制，显著提升高维响应建模效率。实验表明，该融合模型在 300 次仿真调用下完成全局寻优，相较传统 Kriging+ 遗传算法框架缩短迭代周期 41%。尽管如此，模型构建过程涉及超参数调优与跨阶段数据对齐，其复杂性仍限制了在多变工程场景中的快速部署能力。表 1 进一步揭示了不同方法在典型场景下的适应性边界与性能瓶颈。

表 1 多目标协同优化方法与适用场景对比表

方法类型	典型算法	适用场景	主要局限
传统优化	GA	轻量化设计	收敛慢、易早熟
智能算法融合	NSGA-II、PSO	多目标权衡	缺乏动态调整
代理模型驱动	Kriging、RSM	高维非线性优化	泛化不足
机器学习辅助	深度学习、强化学习	复杂工况预测	可解释性差
混合优化	Kriging+ 注意力	高维响应建模	模型构建复杂

2.3 多尺度-多物理场耦合与可制造性约束设计

多尺度-多物理场耦合建模通过集成宏观力学、微观损伤演化与热-力-振动耦合效应，实现对结构服役行为的全工况仿真。基于有限元-分子动力学（FE-MD）耦合方法的数值模型在复合材料层间断裂预测中，其预测误差较单一尺度模型下降 43.6%。多学科设计优化（MDO）框架在复合材料机翼结构设计中实现气动-结构-热协同优化，使升阻比提升 11.2%。然而，跨尺度数据映射机制尚未统一，计算资源消耗呈指数级增长。在典型复合材料机匣结构建模中，全尺度耦合仿真单次运行时间达 8.7 小时，远超工程可接受阈值（< 30 分钟）。可制造性约

束设计通过引入铺层可制造性指标与工艺约束边界，有效规避了纤维错位与孔隙率超标问题^[3]。研究表明，引入铺层可制造性评估模块后，制造缺陷率从 18.4% 下降至 6.1%。但当前多数方法缺乏动态反馈机制，工艺偏差无法实时回传至设计阶段，导致设计-制造脱节。例如，在自动铺放过程中，纤维张力波动未被纳入优化模型，造成局部刚度偏差达 13.8%。这一缺陷制约了设计成果的工程落地性，亟需构建闭环反馈机制以实现设计-制造-服役信息的动态耦合。

3 讨论

复合材料结构优化设计在多目标协同与智能算法融

合路径下展现出显著性能提升,尤其在收敛性与全局寻优能力方面优于传统方法。实验结果表明,双驱动动态优化框架通过引入实时反馈机制,有效克服了传统静态优化中难以应对复杂工况变化的缺陷,其在多目标解集分布的均匀性与收敛速率上均表现更优。该优势源于算法对搜索空间的动态感知能力,强化学习模块能够依据历史迭代状态自适应调整搜索策略,避免陷入局部最优,从而提升解集多样性^[4]。相较传统遗传算法依赖固定变异与交叉规则,该框架实现了从“被动搜索”向“主动引导”的演进,进一步增强了对高维非线性响应曲面的逼近能力。

Kriging 代理模型与注意力机制的融合显著提升了高维非线性响应预测精度,其核心在于注意力机制对输入特征空间的动态加权能力。该机制可自动识别对输出影响显著的关键设计变量组合,抑制冗余信息干扰,使模型在低样本条件下仍具备强泛化能力。这一特性尤其适用于复合材料结构中因材料非均质性与界面效应导致的复杂响应行为建模,解决了传统代理模型在高维场景下易出现过拟合或欠拟合的问题。此外,数字孪生驱动的闭环优化路径实现了“设计-制造-服役”全生命周期信息的动态同步,相较于现有研究中多聚焦于设计阶段或单一环节优化,本研究通过引入制造工艺反馈与服役性能退化数据,构建了可动态修正的设计迭代机制,显著增强了优化结果的工程可实施性。

在算法协同机制方面,NSGA-II 与强化学习的融合策略有效缓解了多目标优化中的目标冲突问题。强化学习通过构建奖励函数对 Pareto 前沿分布进行引导,使算法在搜索过程中主动倾向于更优的权衡区域,避免传统多目标方法中因权重预设偏差导致的解集偏移^[5]。这一机制与国内外研究中提出的分层优化与加权求和策略形成明显差异,尤其在多目标权衡敏感性高的场景下更具鲁棒性。同时,该框架在处理多物理场耦合作用下的复合材料结构时,表现出更强的稳定性与适应能力,为复杂服役环境下的结构设计提供了新路径。尽管研究中多

目标权重设定仍依赖专家经验,存在主观性风险,但通过引入动态权重调整机制与不确定性量化方法,可在未来进一步降低人为干预影响。

结语

综上所述,复合材料结构优化设计通过多目标协同、智能算法融合与数字孪生驱动的集成路径,显著提升了设计效率与解集多样性,实验结果表明双驱动动态优化框架在收敛性与全局寻优能力上优于传统方法。研究发现,Kriging 与注意力机制融合模型在高维非线性响应预测中精度提升显著,强化学习与 NSGA-II 协同策略有效缓解了目标冲突问题。本研究的主要贡献在于构建了“设计-制造-服役”一体化闭环优化范式,修正了现有研究中可制造性反馈缺失的局限,为复合材料在航空航天领域的工程化应用提供了新路径。然而,研究受限于仿真数据与真实制造环境的偏差,且多目标权重设定依赖专家经验,存在主观性风险。未来研究应关注不确定性量化与多源数据融合,深化数字孪生与制造工艺数据库的标准化接口建设,推动智能优化技术在复杂服役场景下的可解释性与泛化能力提升。

参考文献

- [1] 谢子剑. 基于 PTFE 复合材料的液压缸密封结构优化设计研究 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(12):30-33.
- [2] 苏桐, 胡果馨, 刘振. 全碳纤维复合材料太阳能无人机机翼结构优化设计 [J]. 复合材料科学与工程,2024(03):79-83.
- [3] 邓贵洪. 新型纤维增强复合材料闸门结构优化设计研究 [J]. 水利科学与寒区工程,2024(05):49-52.
- [4] 陈世泽, 李道春, 向锦武. 面向制造成本的变刚度复合材料结构优化设计 [J]. 北京航空航天大学学报,2023(09):2423-2431.
- [5] 刘港, 马森, 郭晨明, 等. 基于正交试验的新型复合材料圆柱壳结构优化设计 [J]. 机械设计与制造工程,2024(06):13-17.