

在不同约束条件下复合材料风力涡轮机叶片的结构拓扑优化 MDPI Wind

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40824.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

在不同约束条件下复合材料风力涡轮机叶片的结构拓扑优化 MDPI Wind。论文标题：Structural Topology Optimisation of a Composite Wind Turbine Blade Under Various Constraints

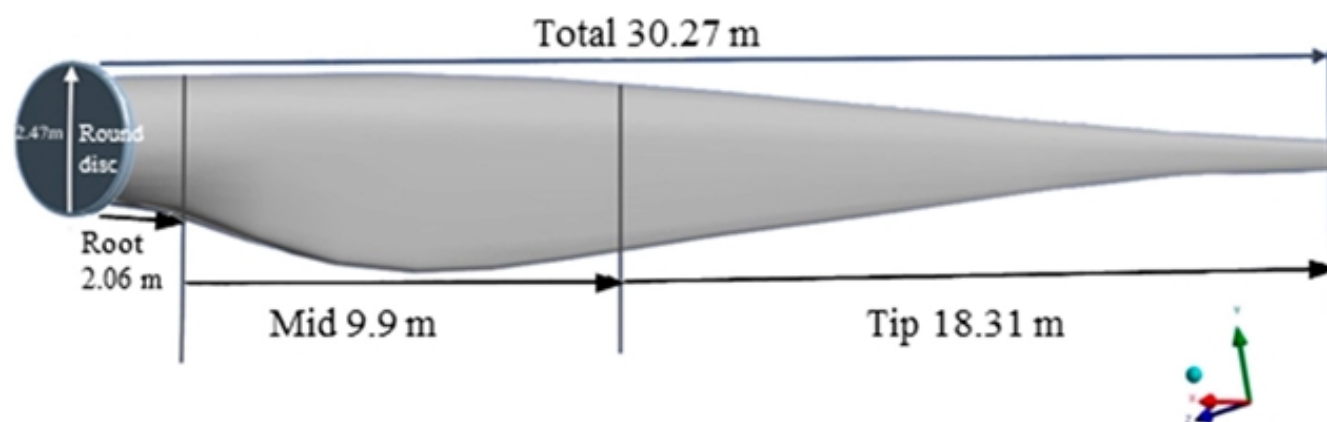
论文链接：<https://www.mdpi.com/2674-032X/5/4/23>

期刊名：Wind

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/wind>

一、引言

风力涡轮机叶片是利用风能并将其转化为机械能的关键部件。随着风电行业的发展，对更大、更高效叶片的设计和优化面临着重大的工程挑战。本研究针对复合材料风力发电机叶片进行了拓扑优化，旨在改善其在静态和动态约束条件下的结构性能。研究采用了基于静态变形极限和模态频率提升的优化策略，以在保持或提升机械性能的同时实现减重。优化后的设计将叶片的基频从2.32 Hz提升至2.99 Hz，并将总质量降低了约49%，从 $4.55 \times 10^5 \text{kg}$ 降至约 $2.34 \times 10^5 \text{kg}$ 。研究发现凸显了约束驱动拓扑优化在提升风力涡轮机叶片设计结构性能及减少用材方面的有效性。



风力涡轮机叶片模型

二、风力涡轮机叶片描述

叶片的几何结构：

所选风力涡轮机叶片几何形状的总长度为 30.27 米。叶片根部为圆形截面，直径为 2.47 米，并通过一个圆形盘状连接件过渡。根部延伸超过 2.06 米后逐渐变细至中部。中部跨度为 9.9 米，并采用流线型设计过渡至叶尖。剩余的 18.31 米为锥形叶尖，叶片在此处变细以提升空气动力性能。

材料的力学性能：

叶片材料采用碳纤维增强塑料（CFRP），纤维体积分数约60%，单层厚度0.327 mm，总厚度为32.7 mm，重复使用(0/45/90/-45/0)这一代表性铺层顺序。分析中将复合材料蒙皮均质化为各向同性材料，密度为2000 kg/m³，杨氏模量为110 GPa，泊松比为0.3。

叶片的机械特性：

在保持原始空气动力学外表面不变的前提下，首先使用ANSYS Workbench软件将有限元分析与结构拓扑优化相结合，同时纳入静态和模态约束，以评估叶片在10,000 Pa、20,000 Pa和30,000 Pa（在优化阶段提高至50,000 Pa）的空气载荷压力下的力学性能。最终通过评估结构变形、方向变形、冯·米塞斯应力以及最大弹性应变等关键参数，来确定叶片对所施加载荷的响应。

三、风力涡轮机叶片的拓扑优化

研究的主要目标是在不影响结构完整性和动态性能的前提下，通过减小铝芯尺寸来优化风力涡轮机叶片的拓扑结构。为此，使用 ANSYS Workbench 软件进行了静态和模态分析。优化目标是在静态载荷条件下最大限度地降低叶片的柔度，并在模态分析中提高叶片的第一阶固有频率。

初始设计与约束：

进行网格收敛性分析，采用最大单元尺寸为0.2米的有限元网格进行划分，共生成101,627个节点和64,410个单元。采用混合网格划分策略是：在轮毂区域应用四边形单元，以更好地适应几何形状的规则拓扑结构和结构连接界面；而在叶片长度方向上，则采用三角形单元，以便灵活地捕捉复杂的曲率和变化的横截面过渡。

带静态约束和模态约束的优化过程：

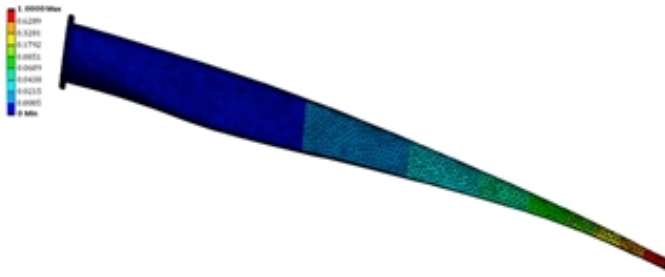
在静态分析中，主要目标是在对最大允许位移施加约束的前提下，降低叶片质量；而在模态分析中，目标依然是质量最小化，但约束条件转向叶片的基频。通过评估静态分析与模态分析的目标函数和约束响应函数，来监控优化过程中的收敛情况。在静态分析中，当后续迭代导致质量减少可忽略不计时即达到收敛，且未超过最大允许位移；在模态分析中，当第一自然频率达到目标值的20%时即视为收敛，且后续迭代不再产生显著的频率提升。

四、结果与讨论

在对初始几何形状进行基准评估后，在以下两个主要约束条件下进行了拓扑优化：(1)

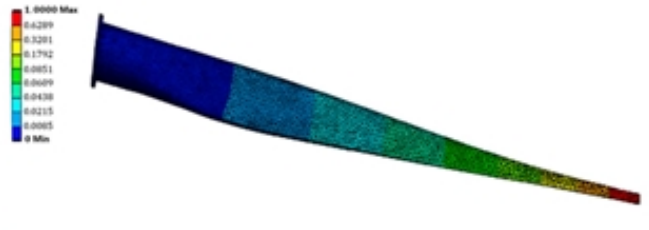
针对最大位移约束下的最小质量进行的静力分析；(2) 旨在将叶片的基频提高到指定阈值以上的模态分析。最终形成的拓扑结构证实，叶片的外缘和根部区域承担了主要的结构载荷。只要高应力路径保持完整，去除次要的内部截面并不会对刚度产生不利影响。从静态角度看，优化后的叶片保留了约一半的原始体积，从58 m³减少至约29.76 m³。相应地，质量从 4.55×10^5 kg降至 2.34×10^5 kg，近50%。在模态约束条件下，叶片的最终体积为29.47 m³，与之前结果相似但略小，质量则降至约 2.31×10^5 kg。尽管基于模态的优化可能提高特定固有频率，但选择基于静态的方案，因为采用静态方法时，最终设计展现出显著更优的翼面方向刚度，这是维持气动效率和防止叶尖过度偏转的关键因素；而且尽管未直接以提高频率为目标，但经静态优化的叶片仍保持了相对较高的基本固有频率。第一模态（翼面方向弯曲）频率接近3 Hz，与典型的运行激励范围保持着安全距离。此外，扭转模态频率始终远高于30 Hz，从而最大限度地降低了共振风险。

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 0.8132 Hz
Unit: m



(a) Mode-1

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 4.3979 Hz
Unit: m



(b) Mode-2

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 6.6732 Hz
Unit: m



(c) Mode-3

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 12.004 Hz
Unit: m



(d) Mode-4

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 13.277 Hz
Unit: m



(e) Mode-5

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 22.538 Hz
Unit: m



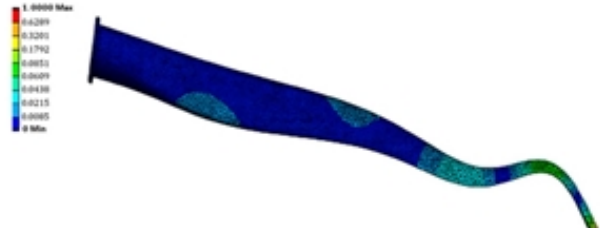
(f) Mode-6

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 24.918 Hz
Unit: m



(g) Mode-7

B: Model
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 36.978 Hz
Unit: m



(h) Mode-8

叶片的各模态形状

五、研究结论

拓扑优化可在不改变气动外形的前提下显著减轻复合材料风力涡轮机叶片质量（约50%），同时

保持或提升结构性能。静态约束优化强调弯曲刚度与均匀应力分布，模态约束优化提升动态稳定性，但均实现了质量效率、应力管理和振动完整性的平衡。未来工作需引入先进复合材料模型，将研究范围扩展至瞬态载荷工况，通过物理测试进行验证，以及采取生命周期评估以提升评估拓扑优化叶片设计在可持续性方面的影响。

期刊介绍

主编：Prof. Dr. Horia Hangan

Wind (ISSN 2674-032X) 是开放获取期刊，专注于风相关领域的科学研究。期刊目标是为展示与风相关的跨学科领域的最新研究成果提供一个动态的平台，涵盖概念开发、设计工具、工程技术、能源市场、经济学、政策、社会和环境的影响以及生态等方面。Wind定期发表研究文章、综述、通讯、项目报告、社论和关于各种与风能相关主题的特刊。

2025 Impact Factor : 2.7

2025 CiteScore : 4.5

Time to First Decision : 23.7 Days

Acceptance to Publication : 9.6 Days

来源：Wind

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发