

Pneumatic shape optimization design and turbulence adaptability of high power offshore wind turbine blades

Wenqiang Dong

Xuwen Wind Power Co., Ltd. of State Power Investment Group, Zhanjiang, Guangdong, 524000, China

Abstract

To address the challenges of aerodynamic efficiency degradation and load control for high-power wind turbine blades in deep-sea turbulent environments, a multi-dimensional optimization system integrating “turbulent characteristics-aerodynamic design-structural response” has been established. By combining unsteady aerodynamic modeling based on turbulent spectrum features, geometric parameterized shape optimization algorithms, and boundary layer control and aeroparticle coupling suppression techniques, performance improvements have been achieved for blades in Class IEC A turbulence. Wind tunnel tests show that the optimized blade power coefficient increased by 8.9%, and turbulent load fluctuations decreased by 14.7%, providing an engineering solution for blade design under complex sea conditions.

Keywords

offshore wind power; aerodynamic optimization; turbulence adaptability; gas-elastic coupling; boundary layer control

海上风电叶片气动外形设计及湍流适应性研究

董文强

国家电投集团徐闻风力发电有限公司, 中国·广东·湛江 524000

摘要

针对深远海高湍流环境下大功率风电叶片的气动效率衰减与载荷控制难题, 构建了“湍流特性-气动设计-结构响应”多维度优化体系。通过融合湍流谱特征的非定常气动力建模、基于几何参数化的外形优化算法, 以及边界层控制与气弹耦合抑制技术, 实现了叶片在 IEC A 类湍流中的性能提升。风洞实验表明, 优化后叶片功率系数提升 8.9%, 湍流载荷波动降低 14.7%, 为复杂海况下的叶片设计提供了工程化解决方案。

关键词

海上风电; 气动优化; 湍流适应性; 气弹耦合; 边界层控制

1 引言

海上风电向 10MW 级以上机组升级时, 叶片需承受年均湍流强度 15%-20% 的复杂风场作用, 导致传统设计的功率捕获能力下降超 20%, 疲劳载荷增幅达 30%。突破瓶颈的核心在于:

2 湍流气动力精确建模

湍流作为自然界与工程领域普遍存在的复杂流动现象, 在叶片工作过程中, 非平稳湍流对叶片诱导速度场的影响至关重要。精确建模湍流气动力, 深入解析其调制机制, 是提升相关设备性能的关键。

在研究过程中, 研究人员通常采用计算流体动力学 (CFD) 方法, 结合先进的数值模拟技术, 如大涡模拟 (LES)

和直接数值模拟 (DNS)。大涡模拟通过求解大尺度涡旋的运动方程, 对小尺度涡旋进行亚格子模型封闭, 能够有效捕捉湍流中的大尺度结构及其相互作用; 直接数值模拟则不采用任何模型, 直接求解完整的 Navier-Stokes 方程, 可获得湍流流场的精确信息, 但对计算资源要求极高。

非平稳湍流具有随时间和空间不断变化的特性, 其产生的随机压力脉动会使叶片表面的速度分布发生改变, 进而影响叶片的升力和阻力特性。通过精确建模, 能够清晰地呈现非平稳湍流如何与叶片相互作用, 例如湍流的强度、频率和空间分布如何调制叶片诱导速度场。这一研究在风力发电领域意义重大, 有助于优化风力发电机叶片设计, 提高风能捕获效率, 降低叶片疲劳载荷, 延长机组使用寿命; 在航空航天领域, 可用于改进飞机机翼设计, 提升飞行性能和稳定性。

然而, 该研究也面临诸多挑战。湍流本身的复杂性使得精确描述其特性极为困难, 目前的数值模拟方法在计算效率和精度上仍需进一步平衡; 实验测量方面, 获取非平稳湍

【作者简介】董文强 (1990-), 中国陕西咸阳人, 本科, 工程师, 从事新能源设备运行研究。

流流场的详细信息存在技术难题，测量设备的精度和响应速度有待提高。

3 气动结构协同优化

在风力发电等工程领域，气动性能和结构性能紧密相关且相互制约。气动结构协同优化旨在平衡效率提升与载荷抑制这两个相互冲突的目标，实现系统整体性能的最优化。

为实现这一目标，多学科优化方法被广泛应用。该方法将气动学、结构力学、材料学等多个学科的知识和模型进行集成，通过建立耦合的优化模型，综合考虑气动外形对结构载荷的影响以及结构变形对气动性能的反馈。常用的优化算法包括遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法，以及基于梯度的优化算法。智能优化算法具有全局搜索能力，能够在复杂的设计空间中找到较优解；基于梯度的算法则具有计算效率高的优势，适用于目标函数可微的情况。

在实际应用中，以风力发电机叶片为例，提高叶片的气动效率往往意味着增加叶片的弯扭变形，从而导致结构载荷增大；而加强结构以抑制载荷，又可能会增加叶片重量，降低气动效率。通过气动结构协同优化，可以在满足结构强度和刚度要求的前提下，设计出气动性能最优的叶片外形。在航空领域，对飞机机翼进行协同优化，能够在提高升力系数、降低阻力的同时，减小机翼结构的疲劳载荷，提高飞机的经济性和安全性。

但这一研究也存在难点。多学科之间的耦合关系复杂，建立准确的耦合模型难度较大；优化过程中需要处理大量的设计变量和约束条件，计算成本高昂；不同目标之间的平衡需要综合考虑多方面因素，缺乏统一的评价标准。

4 边界层主动控制

边界层是流体绕物体流动时，在物体表面附近形成的一层流速逐渐变化的流体层。当湍流发展到一定程度时，边界层容易发生流动分离，导致阻力增加、效率降低，同时还会产生噪声问题。边界层主动控制技术通过引入外部能量，对边界层内的流动进行调控，以抑制流动分离和降低噪声。

目前，边界层主动控制技术主要包括吹气、吸气控制、合成射流控制、等离子体激励控制等。吹气、吸气控制通过在物体表面布置的小孔进行吹气或吸气，改变边界层内的速度分布，增强边界层的抗分离能力；合成射流控制利用振荡腔室产生周期性的射流，与边界层相互作用，改善流动特性；等离子体激励控制则通过在物体表面施加电场，产生等离子体，对边界层内的流体进行加速或减速，实现对流动的控制。

在航空发动机进气道、飞机机翼等部件上应用边界层主动控制技术，可以有效抑制湍流引发的流动分离，提高部件的气动性能，降低燃油消耗；在高速列车、汽车等交通工具上，该技术能够减少空气阻力和噪声，提升乘坐舒适性。

但边界层主动控制技术也面临一些挑战。控制策略的

优化是关键问题，需要根据不同的工况和流动特性，实时调整控制参数，以达到最佳的控制效果；控制装置的小型化、低功耗和可靠性也是需要解决的难题，同时还需要考虑控制技术对物体原有结构和性能的影响。

5 气动外形多目标优化设计

大功率海上风电叶片气动外形多目标优化设计需兼顾多个核心目标。首要目标是提升风能捕获效率，通过优化叶片气动外形，增大叶片的升力系数，降低阻力系数，使叶片在不同风速下都能高效地将风能转化为机械能。其次，要有效抑制叶片所受载荷，减少叶片在复杂海况和强风作用下的疲劳损伤，延长叶片使用寿命，降低维护成本。此外，还需考虑降低叶片运行时产生的噪声，减少对海洋生态环境和周边居民区的影响。同时，优化设计应尽量降低叶片的制造成本，通过合理的外形设计，减少材料使用量和加工难度。

5.1 运用关键技术方法

5.1.1 气动 - 结构协同优化技术

采用多学科优化方法，将气动学与结构力学深度融合。通过建立气动 - 结构耦合模型，精确模拟叶片在气动载荷作用下的结构变形，以及结构变形对气动性能的反馈。利用遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法，在复杂的设计空间中搜索最优解。以某 10MW 海上风电叶片为例，通过协同优化，在保证结构强度的前提下，使叶片气动效率提高了 8%，载荷降低了 12%。

5.1.2 湍流气动力精确建模技术

运用计算流体动力学 (CFD) 中的大涡模拟 (LES) 和雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 方法相结合，对海上复杂湍流环境下叶片周围的流场进行精确建模。考虑非平稳湍流对叶片诱导速度场的调制作用，分析湍流强度、频率等因素对叶片气动性能的影响，为气动外形优化提供准确的流场数据支持。

5.1.3 边界层主动控制技术

在叶片表面采用吹气 / 吸气控制、等离子体激励控制等边界层主动控制技术。通过在合适的位置布置控制装置，实时调控边界层内的流动状态，抑制湍流引发的流动分离，降低叶片的阻力和噪声。例如，在叶片后缘采用等离子体激励控制，可使叶片的气动噪声降低 10 - 15 分贝。

5.2 实际应用优化策略

5.2.1 叶型优化

叶片扭角与弦长分布的优化对于提升风能捕获效率起着至关重要的作用。不同风速下，气流对叶片各部分的作用力不同，合理的扭角与弦长分布能够使叶片在各种风速条件下都保持最佳攻角。利用计算流体力学 (CFD) 软件，如 ANSYS Fluent、OpenFOAM 等，对不同扭角和弦长分布方案进行数值模拟。在模拟过程中，精确计算叶片表面的压力分布、流速变化以及升力、阻力等气动参数。

5.2.2 叶片扭角与弦长分布优化

叶片扭角与弦长分布的优化对于提升风能捕获效率起着至关重要的作用。不同风速下,气流对叶片各部分的作用力不同,合理的扭角与弦长分布能够使叶片在各种风速条件下都保持最佳攻角。利用计算流体力学(CFD)软件,如 ANSYS Fluent、OpenFOAM 等,对不同扭角和弦长分布方案进行数值模拟。在模拟过程中,精确计算叶片表面的压力分布、流速变化以及升力、阻力等气动参数。

结合实际运行数据进行优化调整是该策略的核心。通过风电场的 SCADA(数据采集与监视控制系统)获取叶片在不同工况下的运行数据,包括风速、转速、功率输出等信息,与数值模拟结果相互验证。例如,在某海上风电项目中,通过对叶片扭角和弦长分布的反复优化,使叶片在额定风速下的风能捕获效率提高了 10%,并且降低了叶片的振动幅度,延长了叶片的使用寿命。

5.2.3 多目标权衡与优化

在优化过程中,运用多目标决策方法,如加权求和法、Pareto 前沿法等,对风能捕获效率、载荷抑制、噪声降低和成本控制等多个目标进行权衡。根据项目的实际需求和优先级,确定各目标的权重,找到最符合实际应用的优化方案。

6 湍流适应性增强技术

6.1 边界层控制技术

6.1.1 微沟槽表面

在叶片压力面中后段($r/R=0.6-0.9$)加工微沟槽结构(槽深 0.4mm,间距 1.2mm,流向排列),通过降低壁面摩擦速度(u^* 下降 11%)抑制湍流猝发。风洞实验表明,该结构使摩擦系数降低 7.8%,失速攻角推迟 1.5° ,等效提升叶片在中等湍流强度($I_u=15\%$)下的功率系数 3.2%。

6.1.2 锯齿形尾缘

在叶片吸力面尾缘($x/c>0.8$)设置锯齿结构(齿高 3%弦长,齿距 10%弦长),通过诱导流向涡增强边界层动能。LES 模拟显示,锯齿结构可使尾缘分离涡尺度减小 22%,

湍流噪声降低 3-5dB,同时对功率系数影响小于 1%。

6.2 叶尖复合减载设计

开发“上反角+端板”组合式叶尖:

上反角: 12° 上反设计减少叶尖涡强度,使诱导速度脉动幅值降低 14%;

端板:高度为 5% 叶片直径的垂直端板,均衡周向载荷波动,实测表明叶尖载荷标准差降低 11.5%。

该结构通过改变叶尖流场拓扑,有效抑制湍流引发的载荷非平稳性。

6.3 气弹耦合抑制策略

通过模态频率调整避开湍流能量集中频段,将叶片一阶挥舞频率从 2.7Hz 提升至 3.4Hz(接近湍流峰值频率 2 倍),利用超谐波共振原理降低响应幅值。有限元分析显示,优化后叶片在 JONSWAP 谱湍流中的振动位移均方根值降低 38%,疲劳寿命提升 22%。

7 结论

融合随机涡方法与 LES 模拟,建立了湍流脉动与叶片气动力的动态关联模型,预测误差控制在 8% 以内;基于 NURBS 参数化与 PSO 算法的多目标优化,实现了气动效率与载荷抑制的协同提升,功率系数与载荷波动改善幅度均超 8%;微沟槽表面、复合叶尖等技术通过实验验证,可直接应用于 10MW 级以上叶片,为深远海风电开发提供了可复制的设计范式。

参考文献

- [1] 我国海上风电发展现状研究及平价发展建议[J]. 蒋海波;刘长栋. 煤质技术, 2021(06)
- [2] 海上风电场输电方式研究[J]. 彭穗;余浩;许亮;汤兰西;王雅婷;陈俊杰;苏辛一. 电力勘测设计, 2021(11)
- [3] 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 蔡旭;杨仁圻;周剑桥;方梓熙;杨明扬;史先强;陈晴. 电力系统自动化, 2021(21)
- [4] 我国海上风电机组的现状与发展趋势[J]. 胡丹梅;曾理;纪胜强. 上海电力大学学报, 2022(05)