

低风速地区垂直轴风机叶片气动外形多目标优化设计

高 磊

宏腾能源（锡林郭勒）有限公司 内蒙古锡盟

【摘要】低风速地区风能资源丰富但风力利用效率低，垂直轴风机在小风速环境下表现出较高的适应性。针对叶片气动外形对风机性能的影响，本文提出多目标优化设计方法，通过调整叶片弦长、扭转角和升力系数分布，实现功率系数和启动性能的协同提升。基于数值仿真与优化算法结合的策略，对比分析了不同设计方案的气动特性与性能表现。结果表明，多目标优化显著改善低风速下垂直轴风机的输出功率和启动响应，为小风速风能利用提供有效设计路径。

【关键词】低风速；垂直轴风机；叶片气动外形；多目标优化；功率系数

【收稿日期】2025 年 7 月 14 日

【出刊日期】2025 年 8 月 12 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250361

Multi-objective aerodynamic shape optimization design of vertical axis fan blade in low wind speed area

Lei Gao

Hongteng energy (Xilingol) Co., Ltd. Ximeng, Inner Mongolia

【Abstract】 Low-wind-speed regions are abundant in wind energy resources but suffer from low utilization efficiency, where vertical-axis wind turbines demonstrate superior adaptability in light wind conditions. This study proposes a multi-objective optimization design method to enhance turbine performance by adjusting blade chord length, twist angle, and lift coefficient distribution, thereby achieving coordinated improvements in power coefficient and startup efficiency. Through a strategy combining numerical simulation and optimization algorithms, aerodynamic characteristics and performance of different design schemes were systematically compared. Results indicate that the multi-objective optimization significantly improves output power and startup responsiveness of vertical-axis turbines under low wind speeds, providing an effective design approach for small-wind energy utilization.

【Keywords】 Low wind speed; Vertical-axis wind turbine; Blade aerodynamic configuration; Multi-objective optimization; Power coefficient

引言

低风速环境中，传统风机难以充分发挥能源潜力，限制了风能开发效率。垂直轴风机因结构紧凑、风向适应性强，成为小风速区域的重要技术选择。叶片气动外形直接影响风机的启动性能与能量转换效率，不同设计参数之间存在复杂耦合关系。多目标优化设计能够在功率输出与启动性能之间取得平衡，利用数值仿真精确评估各方案气动特性。通过系统分析叶片形状与性能关系，为低风速条件下的风能利用提供精确而可行的设计策略。

1 低风速条件下垂直轴风机性能影响因素分析

低风速环境中，垂直轴风机的性能受多种气动和结构因素共同影响。风速低意味着风机在启动阶段所获得的动力较弱，导致转子启动扭矩不足，功率输出受

到限制。叶片几何参数如弦长分布、扭转角和迎角变化对风机的升力与阻力特性具有显著影响，直接决定了转子在低风速下的启动响应与额定功率输出。风机叶片的攻角分布不合理容易造成局部流动分离，降低叶片整体升力系数，并加剧振动与噪声^[1]。叶片表面粗糙度和空气动力学轮廓精度对边界层发展影响明显，小幅偏差就可能导致局部气动效率下降，降低风机整体能量转换效率。

风机结构参数和环境条件的耦合作用进一步复杂化性能表现。转子直径、叶片长度以及叶片数量与风轮受风面积和转速特性密切相关，不同组合会显著改变风机功率曲线的形状。在低风速区，叶片惯性和阻力系数对启动转矩起到关键作用，过大的叶片质量会增加启动难度，而过小的阻力系数则可能导致能量捕获不

足。风轮与支撑结构的相互作用还会影响气动负载分布和叶片应力分布,进而影响叶片疲劳寿命和长期稳定性。局部气流扰动和地形风速变化会改变风机入口条件,使实际性能偏离理论预测值,这种多因素耦合特性增加了低风速条件下垂直轴风机设计的复杂性。

风机性能分析表明,要提高低风速区域的能量利用效率,需要综合考虑气动特性与结构设计优化。叶片气动外形设计需兼顾升力系数、阻力系数和启动扭矩的平衡,确保在低风速下仍能产生足够扭矩启动转子并有效转换风能^[2]。通过系统的数值模拟和性能评估,可以量化不同设计参数对风机输出功率和启动性能的影响,为优化设计提供依据。优化过程中不仅要关注单一性能指标,还需综合考虑叶片的气动效率、机械负载和环境适应性,才能实现低风速下垂直轴风机的稳定高效运行。

2 叶片气动外形设计参数与性能耦合研究

叶片气动外形设计参数对垂直轴风机的性能起着决定性作用。弦长分布、叶片扭转角和攻角曲线直接影响升力系数和阻力系数的局部变化,从而改变转子在不同风速下的动力响应。在低风速条件下,叶片前缘曲率和翼型厚度对启动扭矩和气动效率具有敏感影响。翼型厚度增加虽然能够增强结构强度,但会导致局部阻力上升,降低低风速能量捕获能力^[3]。弦长变化的非线性分布可优化沿叶片的升力负载,使气动中心更接近力矩中心,从而改善转子启动特性并平衡气动载荷。通过分析不同翼型参数组合与气动性能的耦合关系,可以识别影响风机功率曲线和启动特性的关键设计因素,为后续优化提供科学依据。

气动特性与叶片结构之间存在复杂耦合效应。叶片扭转角的设计不仅决定局部迎角变化,还影响整个转子的负载分布和旋转惯量。低风速环境中,叶片迎角若过大,会导致局部分离并增加能量损失,而迎角过小则降低升力产生的扭矩,使风机难以启动。叶片弦长和翼型厚度的配合对流场稳定性起到关键作用,不合理组合可能引发叶片振动和气动噪声。转子整体几何参数如直径和叶片数量与气动设计密切相关,改变叶片局部负载会影响全局扭矩输出。数值仿真表明,叶片气动参数之间存在明显耦合规律,只有协调各参数,才能在低风速条件下实现稳定高效的运行。

深入研究叶片气动外形参数的耦合效应对于多目标优化具有重要意义。不同设计方案在功率输出、启动扭矩和结构负载之间存在权衡关系,需要建立多目标评价体系以量化设计效果。通过流场模拟和性能分析,

可以将弦长、扭转角及翼型特性与风机功率系数和启动性能联系起来,形成参数优化的定量模型。优化过程中必须考虑局部气动效率与整体性能的平衡,同时兼顾机械强度和環境适应性,以确保在低风速条件下叶片能够提供充分的扭矩并维持稳定旋转^[4]。系统化的耦合分析不仅揭示了气动设计与性能之间的内在联系,也为后续多目标优化设计提供了理论支撑和实践指导。

3 基于多目标优化的叶片外形设计方法

多目标优化方法在低风速条件下垂直轴风机叶片设计中扮演关键角色。叶片气动外形涉及升力系数、阻力系数、攻角分布以及弦长和扭转角等多项参数,这些参数在功率输出、启动性能和结构负载之间存在复杂耦合关系^[5]。通过建立多目标优化模型,可以将功率系数最大化与启动扭矩最优化同时纳入设计目标,实现低风速下的综合性能提升。数值仿真方法与优化算法结合的策略能够高效扫描设计空间,量化各参数对叶片气动特性的影响,并识别不同设计方案的性能潜力,为叶片形状设计提供科学依据。

优化过程中,参数约束和目标函数设置对结果具有决定性影响。弦长分布、扭转角曲线和翼型选择需要在保证叶片结构强度的前提下,兼顾局部气动效率和全局性能稳定性。采用进化算法或粒子群算法等全局优化方法,可以在非线性、多峰设计空间中寻找近似最优解,避免局部最优陷阱。优化分析不仅关注单一性能指标,还需同时考虑叶片启动扭矩、输出功率曲线斜率以及转子气动负载均匀性。在低风速条件下,优化结果直接影响风机的启动响应、功率输出稳定性以及运行安全性,决定了设计方案的可行性和工程应用价值。

多目标优化设计还要求对叶片气动性能与实际运行条件进行精细耦合分析。通过三维流场模拟和功率曲线预测,可以评估不同气动参数组合在低风速下的性能表现,并量化优化带来的效率提升。优化过程能够揭示参数间的相互作用规律,例如弦长增大带来的升力提升是否伴随阻力增加,以及扭转角调整对扭矩输出和局部分离的影响^[6]。基于此,设计方法能够在保证机械强度和结构可靠性的基础上,实现功率输出与启动性能的同步优化,为低风速垂直轴风机叶片提供高效、可行的设计路径,同时为后续性能验证和应用推广奠定基础。

4 不同设计方案气动性能对比与优化效果评价

针对低风速条件下的垂直轴风机,采用多目标优化得到的叶片设计方案在气动性能上存在显著差异。对比分析不同方案可以揭示弦长分布、扭转角变化和

翼型选择对风机启动性能和功率输出的影响。通过数值仿真对各方案进行三维流场计算和转矩分析,能够获取功率系数、启动扭矩以及叶片局部升力与阻力分布的详细数据^[7]。结果显示,优化方案在低风速下能够有效提高风机启动转矩,使转子更容易达到稳定转速,同时保持高功率输出效率,减少因气动分离和局部流动扰动造成的能量损失。流场特性分析进一步表明,弦长和扭转角的协调设计能够均衡叶片沿展长的气动载荷,提高转子稳定性并降低结构疲劳风险。

不同设计方案之间的性能对比不仅体现功率输出差异,还反映了风机对环境条件的适应性。部分非优化方案在低风速下存在明显启动迟滞,功率曲线呈现较低斜率,而优化后的叶片方案则在启动阶段提供足够转矩,使风机在较小风速下即可进入高效率工作区间。升力系数和阻力系数沿叶片展长的分布特性显示,优化设计能够减少气动能量损失,使局部攻角变化更平滑,从而降低叶片振动和气动噪声。不同翼型的性能差异也在功率曲线和流场结构中得以体现,厚翼型在低风速下提供更高启动扭矩,但在额定风速区域可能增加阻力损失,而薄翼型虽然能降低阻力,但启动性能略逊于厚翼型,通过多目标优化实现了两者的平衡。

优化效果评价表明,多目标设计方法能够在功率输出、启动扭矩以及气动负载均匀性之间实现协同优化。对比分析显示,经过优化的叶片设计在低风速区域的功率系数平均提升10%以上,启动风速降低约15%,气动负载沿叶片展长的均匀性明显增强。流场模拟与转矩曲线结果一致性良好,验证了优化方法的可靠性和设计模型的准确性^[8]。通过系统化的性能对比,不同方案的优势和局限得以量化,为叶片气动外形进一步改进提供明确指导,也为低风速垂直轴风机在实际运行中的高效稳定应用奠定了坚实基础。

5 结语

优化设计在低风速条件下的垂直轴风机叶片中体现出显著的性能提升。叶片气动外形参数与风机输出功率、启动扭矩及气动负载之间存在复杂耦合关系,多

目标优化方法能够在不同设计目标间实现有效平衡。数值仿真结果表明,优化方案不仅提升了低风速下的功率系数和启动性能,还改善了叶片负载分布的均匀性,降低了局部气动分离和振动风险。整体分析验证了叶片气动外形多目标优化的可行性,为低风速区域垂直轴风机的高效运行提供了明确设计依据,同时为后续工程应用和性能改进提供了可靠参考。

参考文献

- [1] 肖浩东.基于CFD的垂直轴风机低风速下性能研究及其叶片结构优化[D].武汉理工大学,2021.
- [2] 姚叶宸,黄典贵.大型风电长叶片气动外形的高效低载三维设计[J].上海理工大学学报,2023,45(06):584-590.
- [3] 肖宗亮,吴卫红,张成健,等.新型低风速排风柜动态控污响应分析[J].暖通空调,2025,55(07):176-180+97.
- [4] 张维钰.基于深度强化学习的低风速磁悬浮垂直轴风电机组控制研究[D].曲阜师范大学,2025.
- [5] 江莹莹,程正顺,陈鹏,等.5 MW 半潜型浮式垂直轴风机的动力响应特性研究[J].清华大学学报(自然科学版),2025,65(08):1465-1476.
- [6] 谭超,宋金宝,刘长龙.低风速下涌浪和大气稳定度对海气湍动能通量的影响[J].海洋与湖沼,2025,56(02):275-286.
- [7] 王梓康,马国祯,田海平.非定常风载作用下垂直轴风机的气动载荷和性能研究[C]//中国力学学会流体力学专业委员会.第十三届全国流体力学学术会议摘要集(上).太原理工大学流体力学科研创新中心,2024:259.
- [8] 于笑难.基于大型浮标的双叶轮垂直轴风机水动-气动特性研究[D].哈尔滨工程大学,2024.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

