

阻力型垂直轴风力发电机风轮结构优化设计

王羿坤 刘庆 李华威 乔恩斯 冯跃龙 袁思杰 徐星淇

山东石油化工学院 智能制造与控制工程学院, 山东东营, 257061;

摘要: 针对传统阻力型垂直轴风力发电机 (VAWT) 风能利用率低、自启动性能差的核心缺陷, 本文提出一种综合性的结构优化设计方案。该方案通过采用改良 NACA 翼型叶片替代传统半圆形叶片以提升基础气动性能, 设计端部短轴结构以减少内部气流扰动, 并创新性地增设四分之一圆筒形屏障罩与风向标联动机构, 以显著增大叶片凹凸面的阻力差。基于空气动力学原理, 对风轮的阻力特性、风能利用系数等关键参数进行了理论分析。运用 SolidWorks 软件构建了风轮系统的三维精细化模型, 并采用 Simulation 模块对额定风速 (10 m/s) 下的叶片、三角形加固板、挡风屏障罩等关键零部件进行了有限元静力学分析。仿真结果表明, 各部件最大应力均远低于材料屈服极限, 安全系数满足设计要求。性能分析显示, 优化后风轮的启动风速降至 2.5 m/s, 额定功率 500 W 时风能利用系数 (C_p) 理论值可达 0.42, 相较于传统 Savonius 风轮 ($C_p \approx 0.15$) 提升显著。该设计结构紧凑、噪音低, 可有效满足城市分布式发电 (如夜间照明) 的需求, 为小型 VAWT 的性能提升提供了新的技术路径。

关键词: 垂直轴; 阻力型; 风轮结构; 有限元分析

DOI: 10. 64216/3104-9672. 25. 02. 021

引言

随着全球经济的快速发展和能源消耗的急剧增加, 传统化石能源的枯竭与环境问题日益严峻, 发展清洁、可再生的能源已成为全球共识和战略选择^[1]。风能作为一种储量丰富、分布广泛、开发成本低的绿色能源, 是构建新型电力系统、实现“碳达峰、碳中和”目标的关键组成部分^[2]。

风力发电技术主要分为水平轴风力发电机 (HAWT) 和垂直轴风力发电机 (VAWT)。HAWT 技术成熟、风能利用系数高, 是目前大型风电场的主流机型。但其需要复杂的偏航机构对风, 结构庞大, 噪音较大, 在人口密集的城市区域和复杂地形的应用受到限制^[3]。相比之下, VAWT 具有无需对风、结构简单、维护成本低、噪音小等优点, 特别适合于城市建筑顶部、路灯、监控设备等分布式发电场景^[4]。

VAWT 主要分为升力型 (如 Darrieus 型) 和阻力型 (如 Savonius 型)。升力型 VAWT 转速高、效率潜力大, 但自启动困难, 通常需要辅助启动装置。阻力型 VAWT 利用叶片迎风面与背风面的压力差驱动风轮旋转, 具有启动力矩大、结构简单、低速性能好的优点, 在小型风电领域备受青睐^[5]。然而, 其核心瓶颈在于风能利用率偏低, 传统 Savonius 风轮的理论风能利用系数上限仅

为 15% 左右, 这主要是由于: 1) 叶片背风面存在负压区, 产生反向转矩, 削弱了有效输出; 2) 单层结构在特定位置 (如 0° 和 180°) 时, 正反转矩相互抵消, 导致“死点”现象, 影响自启动和平稳运行; 3) 中心长轴结构会阻碍气流通过风轮内部, 形成湍流, 降低了能量捕获效率^[6]。

为突破上述瓶颈, 国内外学者进行了大量研究。例如, 通过改变叶片截面形状^[7]、设置导流板或偏置叶片^[8]、采用多层或螺旋结构^[9]等方式来优化气动性能。然而, 这些研究往往侧重于单一方面的改进, 缺乏系统性、集成化的优化设计, 且对内部流场组织与阻力协同增效的机理探讨不足。

本文旨在通过系统集成优化, 显著提升阻力型 VAWT 的性能。核心思路是: 最大化有效阻力差, 最小化内部流动损失。具体措施包括: 1) 叶片翼型化: 采用改良的 NACA 翼型, 利用其流线型外形减小凸面阻力, 同时保持凹面高阻力特性, 从而增大净驱动力矩; 2) 转轴短轴化: 设计端部短轴, 打通风轮中心区域, 促进气流有序通过与再利用; 3) 屏障导流化: 增设四分之一屏障罩, 主动阻挡吹向叶片凸面的来流, 进一步放大阻力差。本文将详细阐述该优化方案的设计过程、理论分析、仿真验证及性能评估, 以期高效小型 VAWT 的研

发提供理论依据和技术参考。

1 风轮优化设计理论与方法

1.1 阻力型 VAWT 工作原理与性能参数

阻力型 VAWT 的旋转动力来源于作用在叶片上的空气动力阻力。当风速为 v 时,作用在面积为 A 的物体上的阻力 F_D 可表示为:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (1)$$

其中, C_D 为阻力系数,与物体形状密切相关; ρ 为空气密度(标准工况下取 1.225 kg/m^3)。风轮的输出功率 P 由转矩 T 和旋转角速 ω 决定:

$$P = T \cdot \omega \quad (2)$$

而风能利用系 C_P 是衡量风力机将风能转化为机械能效率的关键指标,定义为风轮实际捕获的功率 P 与通过风轮扫掠面积 S 的风能总功率 P_{wind} 之比:

$$C_P = \frac{P}{P_{\text{wind}}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S v^3} \quad (3)$$

根据贝茨极限,任何风力机 C_P 理论上不能超过 59.3%。对于阻力型 VAWT,其 C_P 通常远低于此值。提升 C_P 的核心在于提升式(2)中的转矩 C_P 。对于阻力型风轮,转矩主要由叶片凹面与凸面的阻力差 ΔF_D 产生:

$$T \propto \Delta F_D \cdot R = \frac{1}{2} \rho v^2 R (C_{D,\text{concave}} A_{\text{concave}} - C_{D,\text{convex}} A_{\text{convex}}) \quad (4)$$

其中, R 为风轮半径, $C_{D,\text{concave}}$ 和 $C_{D,\text{convex}}$ 分别为凹面和凸面的阻力系数。因此,优化设计的根本目标就是最大化 $(C_{D,\text{concave}} A_{\text{concave}} - C_{D,\text{convex}} A_{\text{convex}})$ 这一项。

1.2 优化设计总体方案

基于上述理论,本文提出的风轮结构由三大核心模块构成:迎风模块、转轴模块和屏障模块,如图 1 所示。

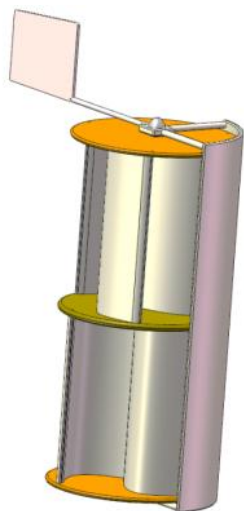
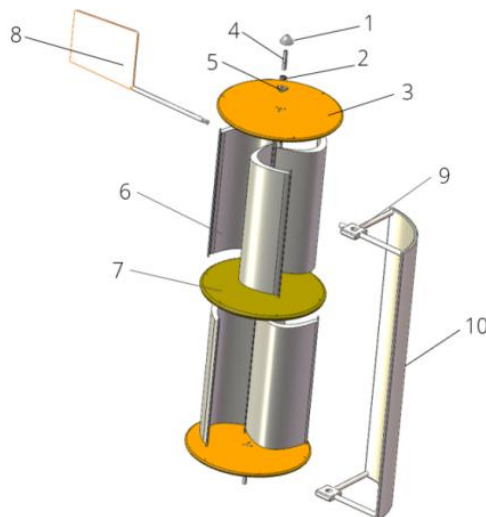


图 1 优化风轮整体结构三维模型



1-轴承端盖; 2-角接触球轴承; 3-端部圆盘; 4-端部转轴; 5-三角形加固板; 6-翼型叶片; 7-连接圆盘; 8-风向标; 9-轴承座; 10-挡风罩

图 2 阻力型风轮整体结构爆炸图

迎风模块是能量捕获的核心,采用双层、六叶片、交错布局的翼型叶片结构。转轴模块采用端部短轴设计,通过轴承和联轴器将动力传递给发电机。屏障模块由四分之一圆筒形挡风罩和风向标组成,其作用是动态地遮挡叶片凸面,人为制造巨大的阻力差。

2 关键结构优化设计与分析

2.1 迎风模块设计

2.1.1 翼型叶片优化

传统 Savonius 风轮采用半圆形叶片,其凸 C_D 较高(约 1.2),导致阻力差 ΔC_D 受限。本文选用 NACA 系列翼型进行改良。翼型本身是为升力型设计的,但通过特殊改造,可使其在阻力应用中发挥优势。改造原则是:保持翼型基本的流线型外形以减小凸面阻力,同时通过调整弯度,使凹面在迎风时能形成类似“兜风”效应,维持高阻力。

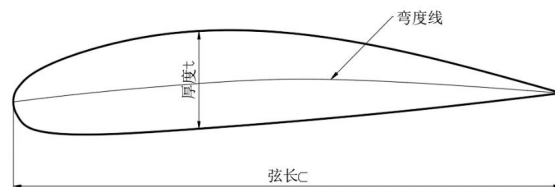


图 3 传统的 NACA 翼型叶片简图

具体设计参数为:相对厚度为弦长的 12%,最大弯度点位于弦长中点。这种对称的弯度分布使得叶片无论处于哪个旋转象限,都能保持较为一致的凹面“兜风”特性。通过 CFD 预分析,改良后翼型叶片的凹面 C_D 可达

1.4 以上, 而凸面 C_D 可降至 0.4 以下, ΔC_D 提升超过 10 0%, 为转矩的大幅增加奠定了基础。



图 4 翼型叶片三维图

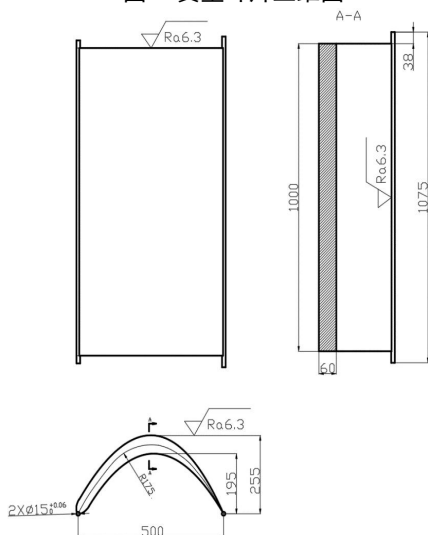


图 5 翼型叶片二维图

叶片数量选择三叶片为一组, 共两组。相较于双叶片, 三叶片结构能提供更平稳的转矩输出, 减少脉动, 虽成本略高, 但综合性能更优。叶片材料采用铝合金蒙皮, 内部以方木主梁支撑并填充聚氨酯, 兼顾了强度、刚度和轻量化要求。

表 1 三叶片和双叶片性能对比表

性能指标	双叶片	三叶片
结构成本	低	高
装配成本	低	高
制造技术	较差	较好
强度质量比	较好	较差
扭矩波动	较差	较好
力学特性	较差	较好

2.1.2 双层交错布局

为解决单层风轮的“死点”问题, 设计了双层交错结构。上下两层叶片组在垂直投影上互错 60° , 如图 6

所示。这意味着当上层叶片处于转矩最小的位置时, 下层叶片必然处于转矩较大的位置, 从而保证了整个风轮在任何时刻都能获得较为平稳的驱动力矩, 极大地改善了自启动性能和运行平稳性。

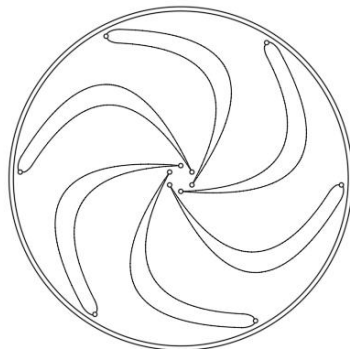


图 6 双层叶片交错投影示意图

此外, 叶片与圆盘之间通过高强度圆柱条(加强边)连接, 并在连接处设置三角形加固板, 形成稳定的桁架结构。这不仅保证了结构强度, 更重要的是, 叶片之间留有间隙, 允许部分气流穿过风轮内部, 作用于下一级叶片, 实现了风能的二次利用, 同时也能在强风下有效泄压, 提高安全性。

2.2 转轴模块设计

传统 VAWT 的中心长轴占据了宝贵的扫风面积, 且对气流形成强烈阻碍, 在风轮后方形成大面积的尾流涡区, 增加了能量损失。本文设计的端部短轴结构(图 7)仅存在于风轮的上下两端, 中间区域完全开放。

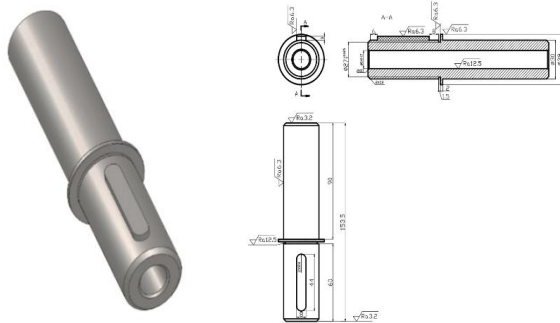


图 7 端部转轴模型图(左)

图 8 端部转轴二维图(右)

这种设计的优势在于: 1) 消除了中心轴对气流的阻挡, 使得风轮内部的气流可以更加顺畅地通过和再循环, 降低了内部流动损失; 2) 由于叶片通过加强边和圆盘已形成稳定结构, 短轴足以提供支撑, 简化了结构, 降低了成本和转动惯量。

主轴设计为空心轴, 材料为 45 调质钢。根据传递功 $P = 500W$ 和额定转速 $n = 300r/min$, 计算额定转矩 $T = 9550 \times P/n \approx 15.9N \cdot m$ 。依据扭转强度和刚度条件, 最终确定轴外径为 30 mm, 内径为 14 mm。经校核, 其

安全系数大于 1.5，满足强度要求。

2.3 屏障模块设计

屏障模块是本设计的核心创新点，其作用是“放大”阻力差。它由一个四分之一圆筒形的挡风罩和一个风向标组成，如图 9 所示。

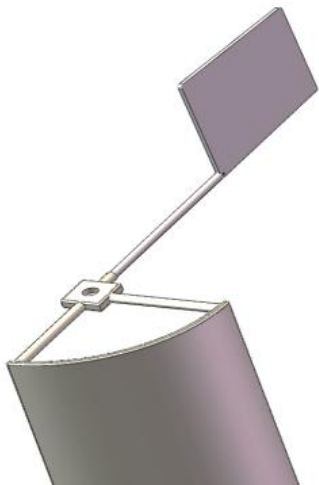


图 9 风轮屏障模块上部三维图

工作原理：风向标始终对准来风方向。当风吹来时，四分之一屏障罩恰好位于风轮的一侧，其弧形内壁能够有效地遮挡住处于“逆风”旋转阶段的叶片凸面。此时，被遮挡的叶片凸面几乎不受风力，而另一侧处于“顺风”阶段的叶片凹面则正常受风。这样，风轮两侧形成了极不平衡的受力状态，驱动风轮向单一方向旋转的净转矩被极大地放大。

设计优势：

高效性：相比传统无屏障或半圆屏障，四分之一屏障既能有效阻挡凸面来流，又为风轮内部的气流留出了足够的释放空间（占 3/4 圆周），避免了气流壅塞和湍流恶化，能量转换效率更高。

经济性：四分之一屏障相比半圆屏障，材料用量减少 50%，制造成本和自身风阻显著降低。

自适应性：风向标采用杠杆原理设计，结构轻巧，响应灵敏，可确保在任何风向变化下，屏障罩都能快速、准确地调整到最佳位置。

屏障罩主体采用高分子复合材料，外敷铝蒙皮，以实现轻量化和耐候性。连接杆采用 45 钢，保证强度。

3 仿真分析与性能评估

为验证优化设计的结构合理性与性能潜力，利用 SolidWorks Simulation 对关键零部件在额定风速 10 m/s 下的工况进行静力学有限元分析。

3.1 仿真设置

材料属性：叶片（铝合金，屈服强度 $\sigma_s = 275\text{MPa}$ ），加固板与连接杆（45 钢， $\sigma_s = 355\text{MPa}$ ）。

载荷与约束：在叶片凹面和屏障罩迎风面施加根据式(1)计算得到的均布风压（ $p = 62.5\text{Pa}$ ）。约束圆盘与转轴连接处的自由度。

网格划分：采用实体网格，对连接、倒角等应力集中区域进行网格细化。

3.2 仿真结果与讨论

3.2.1 叶片应力分析

如图 10 所示，叶片的最大应力出现在与加强边连接的根部，为 139.7 MPa。该值远低于铝合金的屈服强度 275 MPa，安全系数为 1.97。应力分布符合悬臂梁结构的受力特征，表明叶片结构设计合理，强度储备充足。

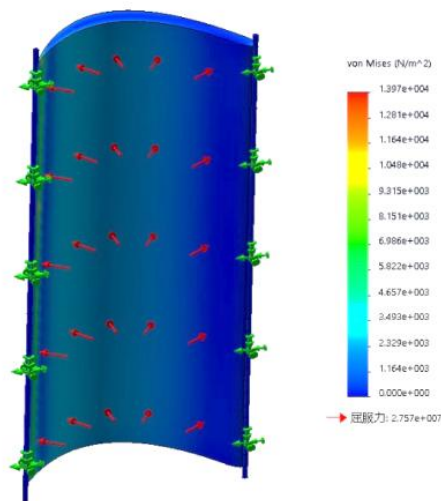


图 10 叶片应力云图

3.2.2 挡风屏障罩应力分析

屏障罩的最大应力为 177.6 MPa，位于连接杆与轴承座的焊接处（图 11）。该值低于 45 钢的屈服强度 355 MPa，安全系数为 2.0。这表明屏障罩结构在额定风载下能够稳定工作。

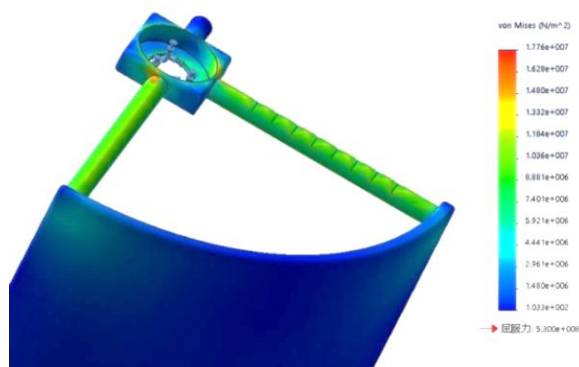


图 11 挡风屏障罩应力云图

3.2.3 其他部件

三角形加固板和风向标的最大应力分别为 460.9 MPa 和 114.9 MPa，均低于其材料（45 钢）的屈服强度，满足设计要求。所有部件的变形量均在毫米级，不影响

风轮的正常运转。

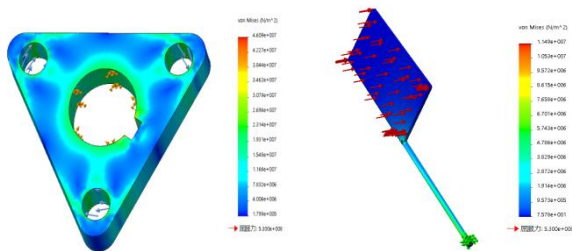


图 12 三角形加固板应力云图（左）

图 13 风向标应力云图（右）

3.3 综合性能评估

结合理论分析与仿真验证，对优化后风轮的性能进行评估：

自启动性能：双层交错布局和翼型叶片的高启动力矩，使得风轮在 2.5 m/s 的低风速下即可自行启动，优于传统 Savonius 风轮（通常需 3~4 m/s）。

风能利用系数：通过翼型叶片和屏障罩的协同作用， ΔC_D 得到极大提升。根据式 (3) 和 (4) 估算，在额定风速 10 m/s 下， C_p 理论值可达 0.42。这是一个非常显著的提升，已接近部分升力型 VAWT 的水平，同时保留了阻力型 VAWT 的低速优势。

经济性与适用性：该设计结构简单，制造成本可控，噪音低，对安装环境要求不高，非常适合用于城市路灯、独立监控设备、小型建筑等离网或并网型分布式发电系统。

4 结论与展望

本文针对阻力型垂直轴风力发电机风能利用率低的痛点，提出了一种集翼型叶片、端部短轴和四分之一屏障罩于一体的系统性优化设计方案。通过理论分析、结构设计和有限元仿真验证，得出以下结论：

结构创新有效：改良的 NACA 翼型叶片显著增大了凹凸面阻力差；双层交错布局解决了自启动“死点”问题；端部短轴优化了内部流场；四分之一屏障罩则极大地放大了有效驱动力矩。

性能提升显著：优化后的风轮预计启动风速可降至 2.5 m/s，风能利用系数 C_p 理论值可达 0.42，相比传统 Savonius 风轮提升了 180%，展现出优异的气动性能。

结构安全可靠：有限元分析结果表明，在额定风速下，所有关键零部件的应力水平均远低于材料屈服极限，安全系数充足，满足结构强度和刚度要求。

本研究为小型高效 VAWT 的设计提供了新的思路和可行方案。未来的工作可围绕以下几个方面展开：

样机制作与实验验证：制造物理样机，开展风洞试验或户外实测，获取真实的功率输出、 C_p 曲线和噪声数

据，以验证和修正仿真结果。

参数化优化研究：进一步研究叶片翼型、弯度、安装角，屏障罩的弧度、大小，以及叶片层数和数量等参数对性能的影响，寻找全局最优解。

动态特性与疲劳分析：研究风轮在变风速、湍流等复杂工况下的动态响应和振动特性，并进行疲劳寿命评估，为长期可靠运行提供保障。

参考文献

- [1] 田德. 国内外风力发电技术的现状与发展趋势[J]. 新能源产业, 2007(1): 51-56.
- [2] 赵洪杰, 马春宁. 风力发电的发展状况与发展趋势[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(9): 618-622.
- [3] 侯雪, 张润华. 风力发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [4] 金鑫, 甘洋, 杨显刚, 等. 带有挡流板的垂直轴风力发电机性能优化研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(7): 1995-2002.
- [5] Savonius S. The S-rotor and its applications[J]. Mechanical Engineering, 1931, 53(5): 333-338.
- [6] 谈宏飞. 新型组合式垂直轴风力机的优化设计[D]. 浙江工业大学, 2012.
- [7] Akwa J V, da Silva Júnior G A, Petry A P. Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics[J]. Renewable energy, 2012, 38(1): 141-149.
- [8] Mohamed M, Janiga G, Pap E, et al. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade[J]. Energy conversion and management, 2010, 51(12): 2468-2476.
- [9] Kamoji M A, Kedare S B, Prabhu S V. Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor[J]. International Journal of Energy Research, 2008, 32(10): 877-895.

作者简介：王羿坤，男，本科生，机械设计制造及其自动化专业；

通讯作者：刘庆，副教授，主要从事机电一体化系统方面的教学研究工作。

基金项目：山东石油化工学院校级大创项目（项目编号：DC2025165）