

双叉式叶尖结构风力发电机的设计与外特性分析

辛雁锋

国投广西新能源发展有限公司 广西 南宁 530200

摘要: 随着人口增长和工业现代化发展,能源需求逐渐增大,风力发电作为一种清洁能源,备受青睐。风力发电叶片的气动性能直接影响其输出功率。本文采用Wilson设计法,选择NACA4412翼型,应用MATLAB软件设计了300 W双叉式叶尖结构风力发电机。通过风洞实验验证了其外特性,并与未改型叶尖结构风力发电机进行了对比。

关键词: 风力发电机; 叶片结构设计; 外特性; Wilson设计法; 双叉式叶尖结构

引言

风能作为一种清洁、可再生的能源,在全球能源结构中的重要性日益凸显。风力发电机的叶片设计是提升其性能的关键环节。双叉式叶尖结构作为一种新型的叶片设计思路,旨在通过改进叶尖形状来提高风力发电机的气动性能。

1 设计理论与方法

1.1 Wilson设计法

Wilson设计法是一种先进且系统的风力发电机叶片设计方法,其核心理念在于综合考虑叶尖损失效应以及升阻比对叶片整体性能的影响。该方法通过精确的数学模型和计算,旨在优化叶片的几何形状,从而提升风力发电机的能量转换效率。在本研究中,依托MATLAB这一强大的数值计算与仿真平台,开发了基于Wilson设计法的风力发电机叶片设计程序。该程序能够自动调整叶片的弦长、扭角等关键参数,确保在不同风速条件下,叶片都能保持最佳的气动性能状态。

1.2 NACA4412翼型选择

翼型作为风力发电机叶片的基础轮廓,其选择直接决定了叶片的气动效率和结构强度。NACA4412翼型,源自美国国家航空咨询委员会(NACA,现为NASA)的经典翼型系列,因其具有低阻力、高升力系数的特点,在小型风力发电机领域得到了广泛应用。该翼型的设计兼顾了厚度分布与曲率,能够在较宽的风速范围内保持稳定的空气动力学性能,减少能量损失。本研究之所以选用NACA4412翼型,正是基于其在提高风力发电机发电效率、降低噪音以及增强结构稳定性方面的显著优势^[1]。此外,NACA4412翼型的数据丰富且公开,便于进行精确的数值模拟和实验验证,为叶片的优化设计提供了坚实的基础。

2 双叉式叶尖结构风力发电机叶片设计

2.1 风轮直径计算

在风力发电机的设计中,风轮直径的确定是关键步骤之一,它直接影响到风能的捕获效率与发电机的输出功率。针对本研究中设计的300W额定功率、额定风速为10m/s的小型风力发电机,采用了以下方法进行风轮直径的计算。

首先,基于风能的基本原理,知道风力发电机的输出功率P与风轮扫掠面积A、风速V以及风能利用系数Cp之间存在如下关系:

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$

其中,P为风力发电机的输出功率(300W), ρ 为空气密度(标准状况下取 1.225kg/m^3),V为风速(10m/s),A为风轮扫掠面积,Cp为风能利用系数,它反映了风轮将风能转换为机械能的效率。

为了求解风轮直径D,需要先确定风轮扫掠面积A。将上述公式进行变换,得到:

$$A = P / (0.5 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p)$$

由于风能利用系数Cp受多种因素影响,包括叶片数量、叶尖速比、叶片形状等,其精确值需通过专业软件模拟或实验数据获得。在本设计中,我们参考了同类小型风力发电机的设计经验,选取了一个较为合理的Cp值进行初步计算。

随后,利用风轮扫掠面积A与风轮直径D之间的关系:

$$A = \pi \cdot (D/2)^2$$

将A的表达式代入上式,经过化简与计算,最终确定了风轮直径为1.3m,对应的风轮半径为0.65m。这一尺寸的选择,既考虑了风力发电机在额定风速下的高效运行,也兼顾了叶片的设计与制造难度,为后续的双叉式叶尖结构设计奠定了坚实的基础。

2.2 叶尖速比设计

叶尖速比,定义为叶片尖端线速度与设计风速的比值,是风力发电机叶片设计中的一个核心参数。其选择

需基于深入的理论分析与实践经验，以确保风力发电机能在各种风速条件下高效运行。在本设计中，叶尖速比被精心设定为4.08。这一数值的确定，首先依据了风力发电领域广泛接受的空气动力学原理，即存在一个最优的叶尖速比范围，能够最大化风能捕获效率。通过参考大量文献与研究成果，结合本设计所针对的小型风力发电机的特点，4.08的叶尖速比被认定为能够在额定风速下实现较高能量转换效率的优选值。此外，叶片数量的选择同样对风力发电机的性能产生深远影响。在综合考量了结构稳定性、气动性能、制造成本及安装便捷性后，本设计最终采用了三叶片配置。三叶片设计在提供足够结构强度的同时，能够更均匀地分布风力，减少因叶片数量过少导致的湍流和噪声问题；相比更多叶片的设计，三叶片在制造成本和安装复杂度上也更具优势^[2]。通过细致入微的叶尖速比设计与合理的叶片数量选择，本设计旨在实现风力发电机在气动性能、结构稳定性和经济性之间的最佳平衡，从而确保其在不同风速条件下都能保持高效、稳定的运行状态。

2.3 三维建模与制作

在风力发电机叶片的设计至制造过程中，三维建模是至关重要的一环，它直接关联到叶片的最终形状与性能。为确保叶片设计的精确实现，本研究采用了以下具体步骤：首先，利用Profili软件，根据预设的叶片参数和空气动力学原理，精确生成了叶片的各个截面轮廓。这一步骤中，Profili软件通过复杂的算法，综合考虑了叶尖速比、翼型选择以及叶片的整体气动性能，从而确保了每个截面轮廓的准确性和优化性。接着，这些截面数据被无缝导入到Unigraphics三维建模软件中。在Unigraphics中，通过先进的曲面建模和拟合技术，各个截面被平滑且精确地连接起来，形成了完整的叶片三维模型。在此过程中，特别注重了叶片表面的光滑度和连续性，以最大程度地减少空气流动时的阻力，提升叶片的气动效率。同时，还利用Unigraphics的强大功能对叶片模型进行了详细的检查和优化，确保模型在几何上的准确性和可制造性。最后，将经过精心设计和优化的叶片三维模型导出为适用于三维加工设备的文件格式，并交由专业的制造团队进行精密加工。在加工过程中，采用了高精度的数控加工技术，如五轴联动加工等，以确保叶片形状的精确度和一致性。此外，还进行了严格的质量检测，包括但不限于尺寸测量、表面粗糙度检测以及气动性能测试等，以确保叶片完全满足设计要求，并能在实际运行中展现出卓越的性能。

3 双叉式叶尖结构风力发电机外特性测试与分析

3.1 风洞实验设置

为了深入且精确地评估双叉式叶尖结构风力发电机的气动性能与外特性，本研究精心选择了在B1/K2型低速直流风洞中进行测试。B1/K2风洞以其卓越的风速控制精度（误差小于±0.5%）、极低的湍流度（小于0.5%）以及高度的测试重复性而著称，为风力发电机的性能测试提供了理想的环境。在实验的具体规划与执行上，为了全面覆盖风力发电机可能遇到的风速条件，特别设定了三个关键的风速测试点：6 m/s、8 m/s和10 m/s。这三个点分别代表了低风速、中风速和高风速的运行状态，旨在全面揭示风力发电机在不同风速环境下的性能变化规律和特点。在实验准备阶段，风力发电机被精确地安装在风洞的实验段内，使用了专门设计的固定架和校准装置，以确保其在高速气流中的稳定性和安全性。同时，为了准确测量风力发电机的各项性能参数，实验配备了高精度、高灵敏度的测量设备。其中，风速计用于实时监测风洞内的风速变化，功率计用于测量风力发电机的输出功率，扭矩传感器则用于检测叶片的受力情况。这些设备均经过严格的校准和验证，以确保测量结果的准确性和可靠性。实验过程中，严格遵循了标准的测试流程和规范。首先进行预热运行，使风力发电机达到稳定的工作状态；然后，在每个设定的风速点下，稳定运行一段时间，以确保数据的稳定性和可靠性；接着，通过测量设备实时采集和记录风力发电机的输出功率、转速以及受力情况等关键数据；最后，对采集到的数据进行后续处理和分析，以得出准确的性能测试结果^[3]。通过这些精细的实验设置、严格的测试流程和先进的测量设备，本研究获得了双叉式叶尖结构风力发电机在不同风速下的详细性能数据，为深入分析和优化其性能提供了坚实且可靠的实验基础。

3.2 输出功率对比

实验对双叉式叶尖结构风力发电机在不同风速条件下的输出功率进行了全面测试，并与传统叶尖结构的风力发电机进行了对比。具体测试数据和对比分析如下表1所示：

表1 双叉式叶尖结构风力发电测试数据

| 来流风速 (m/s) | 双叉式叶尖结构输出功率(W) | 传统叶尖结构输出功率(W) | 输出功率提高量(W) | 输出功率提高百分比 (%) |
|------------|----------------|---------------|------------|---------------|
| 6 | 589 | 516 | 73 | 14.15 |
| 8 | 1023 | 978 | 45 | 4.60 |
| 10 | 1568 | 1468 | 100 | 6.84 |

从表中数据可以看出,在6 m/s的风速下,双叉式叶尖结构的风力发电机输出功率达到了589 W,相比传统叶尖结构的516 W提高了73 W,提升百分比为14.15%;在8 m/s的风速下,双叉式叶尖结构的输出功率为1023 W,相比传统叶尖结构的978 W提高了45 W,提升百分比为4.60%;而在10 m/s的风速下,双叉式叶尖结构的输出功率为1568 W,相比传统叶尖结构的1468 W提高了100 W,提升百分比为6.84%。这些数据不仅展示了双叉式叶尖结构在不同风速条件下对风力发电机输出功率的显著提升,还揭示了其提升效果的稳定性和一致性。尤其在低风速条件下(如6 m/s时),双叉式叶尖结构的优势更为明显,输出功率的提升量达到了73 W,提升百分比也最高,为14.15%。这充分说明了双叉式叶尖结构在改善风力发电机气动性能、提高风能利用效率方面的显著效果和优势。此外,从表中还可以看出,随着风速的增加,虽然输出功率的提升量有所变化,但双叉式叶尖结构始终保持着对传统叶尖结构的优势。这进一步验证了双叉式叶尖结构设计的合理性和有效性,也为其在实际应用中的推广提供了有力的数据支持。

4 讨论

4.1 双叉式叶尖结构对输出功率的具体影响

双叉式叶尖结构对风力发电机输出功率的显著提升,主要源于其对气流动力学的优化。具体而言,双叉式叶尖结构通过改变叶尖的形状,使得叶片在旋转过程中能够更好地引导气流,减少气流分离和涡流损失,从而提高叶片的气动效率。此外,双叉式叶尖结构还可能增加了叶片的有效受风面积,使得叶片能够捕捉更多的风能并将其转化为电能。这种设计不仅适用于小型风力发电机,对于大型风力发电机同样具有潜在的优化效果。大型风力发电机的叶片尺寸更大,叶尖形状对气动性能的影响更为显著。因此,将双叉式叶尖结构的设计理念应用于大型风力发电机,有望进一步提高其输出功率和发电效率。

4.2 双叉式叶尖结构对振动性能的具体影响

双叉式叶尖结构对风力发电机振动性能的潜在改善,主要基于以下几个方面:双叉式叶尖结构通过优化气流动力学,减少了气流对叶片的冲击和扰动。这种优化使得叶片在旋转过程中更加平稳,降低了因气流不稳定引起的振动。双叉式叶尖结构的设计可能增加了叶片的刚性,使得叶片在受到外力作用时更加不易变形。这种刚性的增加有助于提高叶片的抗振能力,减少因振动引起的疲劳和损坏^[4]。双叉式叶尖结构还可能通过改变叶片的振动频率,使其远离共振区。当叶片的振动频率与系统的固有频率相近时,容易发生共振现象,导致振幅显著增大。而双叉式叶尖结构通过调整振动频率,可以有效避免共振现象的发生,从而降低叶片的振动幅度。传统的叶尖结构在高速旋转时,往往会在叶尖处产生应力集中现象。而双叉式叶尖结构通过其独特的形状设计,能够更有效地分散应力集中,减少因应力集中引起的振动和损坏。

结语

本文设计了一种双叉式叶尖结构风力发电机,并通过风洞实验验证了其外特性。实验结果表明,双叉式叶尖结构显著提高了风力发电机的输出功率,具有良好的气动性能。这一设计思路为风力发电机的叶片设计提供了新的方向,有望在未来得到更广泛的应用。

参考文献

- [1]郑清伟,代元军.双叉式叶尖结构风力发电机的设计与外特性分析[J].机械制造,2019,57(01):11-14+17.
- [2]代元军,贺凯,翟明成.双叉式叶尖结构对风力发电机叶片固有频率影响的试验研究[J].机械制造,2020,58(05):86-89.
- [3]代元军,贺凯,李保华,等.双叉式叶尖结构对风力机功率与振动的影响研究[J].机械设计与制造,2024,(09):146-149.
- [4]翟明成.叶尖结构变化对风力机流场特性的影响研究[D].新疆农业大学,2020.