

# 风力发电机组叶片气动与结构优化设计方法研究

杨锦霖

国投广西新能源发展有限公司 广西 南宁 530200

**摘要:** 本文探讨了风力发电机组叶片的气动外形与结构优化设计方法。叶片作为风力发电机组的关键部件,其设计优劣直接影响到整个风力发电系统的性能。本文首先介绍了叶片气动与结构设计的基本要求,随后详细讨论了气动外形优化设计与结构优化的方法。最后,总结了叶片优化设计的重要性及未来发展方向。

**关键词:** 风力发电机组; 叶片; 气动设计; 结构设计; 优化设计

## 引言

风力发电作为一种清洁、可再生的能源形式,正逐渐成为全球能源结构中的重要组成部分。叶片作为风力发电机组的关键部件,其设计质量直接关系到风能利用效率和风力发电系统的经济效益。因此,对叶片进行气动与结构优化设计具有重要意义。

### 1 风力发电机组叶片设计基本要求

#### 1.1 高效率

叶片设计的首要目标是提高能量转换效率,即尽可能多地将风能转化为电能。这要求设计师在保证叶片结构强度的同时,优化叶片的气动外形,以减少空气阻力、提高升力系数,并合理分布叶片上的载荷,从而达到更高的风能捕获效率。通过精确的数值模拟和实验验证,可以不断优化叶片的气动性能,使其在各种风速条件下都能保持较高的发电效率。

#### 1.2 轻量化

轻量化是叶片设计中的一个重要方面,它直接关系到风力发电机组的整体重量和制造成本。在保证叶片具有足够刚度和强度的前提下,通过采用先进的材料和技术手段,如使用高强度、低密度的复合材料,以及优化叶片的内部结构,可以显著减轻叶片的质量。这不仅有利于降低风力发电机组的运输和安装成本,还能减少运行过程中的能耗和磨损,延长叶片的使用寿命。

#### 1.3 高可靠性

叶片作为风力发电机组中承受最大风载的部件,其可靠性至关重要。设计师需要确保叶片在复杂多变的气候条件下,如强风、暴雨、雷电等极端环境下,都能保持稳定的运行状态。这要求叶片具备良好的耐久性和抗疲劳性能,能够经受住长期的风力作用而不发生损坏或变形。通过合理的材料选择、结构设计和制造工艺控制,可以提高叶片的可靠性和使用寿命。

#### 1.4 低成本

降低成本是风力发电行业持续发展的关键驱动力之一。在叶片设计中,通过优化设计方案、采用经济合理的材料和工艺、提高生产自动化水平等措施,可以降低叶片的生产成本。同时,还需要考虑叶片的维护成本和更换周期,以确保在整个生命周期内,叶片的总成本保持最低。通过综合考虑性能、质量和成本等多个因素,可以设计出性价比更高的叶片产品,为风力发电行业的可持续发展贡献力量。

### 2 风力发电机组叶片气动外形优化设计

#### 2.1 叶片剖面形状优化

##### 2.1.1 非对称剖面设计

在风力发电机组叶片的设计中,传统上多采用对称剖面,这种设计虽然结构简单,但在风能转换效率上存在局限。相比之下,非对称剖面设计能够更高效地捕捉风能,减少因气流分离和涡流产生的气动损失<sup>[1]</sup>。为了实现最佳的非对称剖面形状,需采取以下具体步骤:利用先进的计算流体力学(CFD)软件,对多种非对称剖面形状进行数值模拟,评估其升力系数、阻力系数以及整体气动效率。通过对比不同设计方案的模拟结果,初步筛选出性能优异的剖面形状。在数值模拟的基础上,选取若干代表性剖面形状进行风洞实验。通过精确测量叶片在不同风速和风向下的气动性能,验证数值模拟结果的准确性,并进一步优化剖面形状,以确保在实际运行条件下达到最佳气动效果。结合数值模拟和风洞实验的结果,综合考虑叶片的升力、阻力、稳定性以及制造成本等因素,最终确定最适合的非对称剖面形状。

##### 2.1.2 变桨距设计的精细化实施

变桨距设计是叶片气动优化中的另一项关键技术,它能够使叶片根据风速变化自动调整桨距角,从而在不同风速下都能保持最佳的气动性能。实现这一目标的具体方法包括:开发一套高精度的叶片桨距角控制系统,该系统能够根据风速传感器的实时数据,快速、准确地

调整叶片的桨距角。控制系统应具备良好的稳定性和可靠性，以确保在恶劣天气条件下仍能正常工作。在风力发电机组上安装高精度的风速传感器，实时监测风速和风向的变化。传感器应具备快速响应和高精度测量的能力，以便为控制系统提供准确的风速数据。利用先进的优化算法，如遗传算法、粒子群优化算法等，对叶片的桨距角调整策略进行优化。通过算法迭代计算，找到在不同风速条件下使叶片气动性能最佳的桨距角调整方案。

## 2.2 叶片翼型优化

### 2.2.1 翼型参数化设计

翼型参数化设计是叶片翼型优化的重要手段，它通过对叶片翼型进行参数化描述，为优化算法提供可操作的变量空间。具体实施步骤如下：首先，根据叶片翼型的几何特征，选择合适的参数化方法，如贝塞尔曲线、NURBS曲线等，构建叶片翼型的参数化模型。该模型应能够准确描述翼型的几何形状，并便于后续的优化计算。针对参数化模型，选择适合的优化算法进行参数寻优。遗传算法、粒子群算法等全局优化算法在叶片翼型优化中表现出色，它们能够在庞大的参数空间中快速找到气动性能最佳的翼型参数组合。对优化后的翼型参数进行数值模拟验证，评估其气动性能是否达到预期目标。若未达到预期，则需根据数值模拟结果对参数进行进一步调整，并重新进行优化计算。通过多次迭代优化，逐步逼近气动性能最佳的翼型。在每次迭代后，都需对优化结果进行收敛判断，以确保优化过程的高效性和准确性。

### 2.2.2 翼型修型技术的精细化应用

翼型修型技术是在叶片制造过程中，通过调整翼型的局部形状来改善叶片的气动性能。这一技术的实施需要精细的数值模拟和分析支持，具体步骤如下：首先，对原始叶片翼型进行流场数值模拟，分析其在不同风速和风向下的气动性能，如升力、阻力、涡流等。通过模拟结果，识别出翼型上存在的气动问题区域。根据流场数值模拟结果，针对气动问题区域设计修型方案<sup>[2]</sup>。修型方案应能够改善叶片的气动性能，同时考虑制造工艺和成本等因素。在叶片制造过程中，按照修型方案对翼型进行局部调整。调整完成后，再次进行流场数值模拟验证，评估修型效果是否达到预期目标。若未达到预期，则需根据模拟结果对修型方案进行进一步调整。

## 3 风力发电机组叶片结构优化设计

### 3.1 典型叶片结构形式

在风力发电机组中，大型风电叶片的结构设计通常采用蒙皮主梁形式，这种结构形式以其高效的承载能力

和良好的气动性能而备受青睐。蒙皮是叶片的外层结构，主要由双轴复合材料层增强而成。这种设计不仅为叶片提供了光滑的气动外形，以确保风能的有效捕捉和转换，同时还承担了叶片在运转过程中产生的大部分剪切载荷。双轴复合材料层的应用，显著增强了蒙皮的强度和刚度，使其能够抵御复杂风况下的各种力学挑战。主梁是叶片的骨架，也是主要的承载结构。它通常由单向复合材料层增强而成，这些材料层按照特定的方向排列，以最大化地承受叶片在运转过程中产生的拉伸和压缩载荷。主梁的设计不仅关乎叶片的结构强度，还直接影响到叶片的整体刚度和稳定性。因此，在主梁的设计过程中，工程师们会综合考虑材料的性能、叶片的受力特点以及制造工艺等多种因素，以确保主梁能够满足叶片在长期使用过程中的结构要求。腹板作为主梁的重要支撑结构，通常采用夹芯设计。这种设计不仅减轻了叶片的重量，还提高了叶片的抗弯能力和整体稳定性。腹板中的夹芯材料通常具有良好的隔热性能和隔音效果，这有助于降低叶片在运转过程中产生的噪音和热量传递，从而提高叶片的耐久性和可靠性。此外，蒙皮主梁形式的叶片结构还便于制造和维修。由于蒙皮和主梁可以分别进行制造和组装，这大大提高了生产效率和质量可控性。同时，在叶片需要维修或更换时，这种结构形式也便于拆卸和更换受损部件，降低了维护成本和时间。

## 3.2 结构优化方法

### 3.2.1 材料选择与复合材料设计

高性能材料的应用与选择：首先，对候选的高性能材料进行全面的性能评估，包括强度、模量、韧性、耐腐蚀性、可加工性等。对于风力发电机组叶片而言，碳纤维增强塑料(CFRP)因其高强度、高模量和良好的轻量化特性而成为首选材料。除了考虑材料的性能外，还需综合考虑材料的成本、可获得性以及生产过程中的环境影响。选择性价比高的材料，同时注重材料的可回收性和可持续性，以降低叶片的整体生命周期成本。根据叶片的不同部位和受力情况，选择最合适的材料<sup>[3]</sup>。例如，在叶片的根部和受力较大的区域，可以使用更高强度和模量的复合材料，以确保叶片的承载能力和稳定性；而在叶片的尖部等受力较小的区域，则可以选择相对较轻的材料，以降低叶片的重量。

复合材料铺层优化：复合材料的铺层顺序对其力学性能有重要影响。通过精确计算叶片在不同工况下的应力和应变分布，设计合理的铺层顺序，以确保叶片在承受各种载荷时都能保持良好的结构完整性。根据叶片的受力特点和制造工艺要求，对复合材料的铺层厚度和角

度进行优化。通过调整铺层的厚度和角度，可以精确控制叶片的刚度和强度分布，同时降低制造成本。例如，在叶片的受力集中区域，可以增加铺层的厚度和采用更有利的铺层角度，以提高叶片的承载能力；而在其他区域，则可以适当减少铺层的厚度和简化铺层角度，以降低材料和制造成本。在铺层设计时，还需充分考虑复合材料的制造工艺要求。例如，采用自动化铺层设备可以提高生产效率和稳定性；同时，优化铺层设计以减少材料浪费和加工难度，也是降低制造成本的重要途径。

### 3.2.2 叶片结构布局与连接方式优化

**模块化设计：**模块化设计是提高叶片组装效率和可维护性的重要手段。通过将叶片分为多个模块，可以简化制造和组装过程，降低运输和安装难度，同时提高叶片的可维护性。首先，根据叶片的几何形状、受力特点和制造工艺要求，合理划分模块。模块之间的接口设计应确保连接牢固、易于组装和拆卸。可以采用标准化的接口尺寸和连接方式，以提高组装效率和互换性。每个模块应独立制造，并进行严格的质量控制。通过采用先进的制造技术和检测设备，确保每个模块的尺寸精度和力学性能满足设计要求。同时，在模块制造过程中，可以引入自动化和智能化技术，提高生产效率和降低成本<sup>[4]</sup>。在模块化组装过程中，应确保各模块之间的精确对位和牢固连接。可以采用专用的组装工具和设备，提高组装效率和精度。组装完成后，应进行全面的性能测试，包括静力测试、动力测试等，以确保叶片的整体性能满足设计要求。

**加强筋与支撑结构设计的优化：**加强筋与支撑结构是提高叶片承载能力和抗疲劳性能的关键要素。通过合理的布局和设计，可以显著提高叶片的结构强度和刚度，延长叶片的使用寿命。利用先进的数值模拟技术，如有限元分析(FEA)，对叶片的受力情况进行精确计算和分析。根据分析结果，优化加强筋和支撑结构的布局、

尺寸和形状，以确保叶片在承受各种载荷时都能保持良好的结构完整性。在选择加强筋和支撑结构的材料时，应充分考虑其强度、模量、韧性等力学性能。对于高强度和模量的需求，可以采用碳纤维等复合材料。同时，通过复合材料的铺层设计和优化，可以进一步提高加强筋和支撑结构的力学性能。加强筋和支撑结构的制造工艺应确保结构的精确度和一致性。可以采用模具成型、自动化加工等先进技术，提高制造效率和精度。在制造过程中，应进行严格的质量控制，包括材料检验、尺寸测量、力学性能测试等，以确保加强筋和支撑结构的质量满足设计要求。在设计完成后，应进行实验验证和疲劳评估。通过实验测试，验证加强筋和支撑结构的实际性能是否满足设计要求。同时，进行疲劳评估，预测叶片在使用过程中的疲劳寿命，为叶片的维护和更换提供科学依据。

### 结语

叶片的气动与结构优化设计是提高风力发电机组性能的重要手段。通过合理设计叶片的气动外形和结构形式，可以显著提高风能利用效率、降低制造成本并提高叶片的可靠性和使用寿命。未来，随着材料科学和计算机技术的不断发展，叶片优化设计方法将更加先进和高效，为风力发电产业的发展提供有力支持。

### 参考文献

- [1]赵凯龙.2MW风力发电机叶片气动特性及尾流研究[D].河北工程大学,2019.
- [2]刘晓禹.偏航状态下风力发电机气动性能及叶片表面结构优化研究[D].内蒙古工业大学,2020.
- [3]李震,万涛,郝宇超,等.S809风力发电机叶片翼型雾凇覆冰程度及气动性能模拟[J].内蒙古科技大学学报,2021,40(02):162-167.
- [4]唐海.大型水平轴风力发电机叶片结构优化设计与分析[D].四川轻化工大学,2021.