

# 风电机组主轴疲劳特性与可靠性评估

周德生

内蒙古龙源蒙东新能源有限公司 内蒙古赤峰 024000

**摘要:** 本文对风力发电机组主轴的疲劳特性与可靠性评估方法进行了深入研究。风电机组主轴作为传递转矩和承载载荷的关键部件,其疲劳性能与可靠性直接影响机组的安全运行和使用寿命。文章首先分析了风电机组主轴的载荷特性和失效机理,然后详细介绍了主轴疲劳损伤评估的理论基础和计算方法。基于有限元分析和实验数据,本文提出了一种结合载荷谱分析、疲劳累积损伤理论和可靠性理论的综合评估方法。通过案例分析验证了该方法的有效性和准确性,为风电机组主轴的设计优化和寿命预测提供了理论依据和实用工具。研究结果表明,风电机组主轴的疲劳损伤主要受载荷谱、材料特性和结构设计的影响,采用概率可靠性模型能够更加科学地评估其疲劳寿命和失效风险。

**关键词:** 风力发电; 主轴; 疲劳特性; 可靠性评估; 载荷谱; 寿命预测

## 一、风电机组主轴载荷特性分析

### 1. 主轴结构与功能

风电机组主轴是连接风轮与齿轮箱的核心传动部件,它将风轮捕获的风能转化为机械能并传递给发电系统。在制造材料上,主轴多采用42CrMo、34CrNiMo6等高强度合金钢,以应对恶劣的工作环境。结构上,主轴包括轴颈、轴身和法兰连接部分,轴颈与轴承紧密配合支撑巨大的风轮;粗壮的轴身则像一条钢铁臂膀,默默承受扭矩和弯矩;法兰部分则通过高强度螺栓与轮毂和齿轮箱紧密连接。在近年来的大兆瓦风机中,主轴直径通常达到500-800mm,长度在3-4米左右,重量可达十几吨。设计师们需要平衡强度与重量的矛盾,既要保证安全系数,又不能让整个机头部过重导致塔架造价飙升,这种权衡体现了风电设计的精妙之处。

### 2. 主轴载荷特性

风电机组主轴承受的载荷就像山区天气一样变幻莫测。每一阵突如其来的阵风、每一次风向的急剧变化,都给主轴带来不同方向和大小的应力冲击。在典型工况下,主轴承受的主要载荷包括风轮产生的扭矩(可达数百千牛·米)、自重引起的弯矩,以及那些令设计师头疼的交变载荷。特别是当风速从4米/秒猛增到25米/秒时,或者当一片叶片从塔影区域瞬间进入到强风区时,主轴会像被猛拉一样受到巨大冲击。在冬季结冰地区,叶片不均匀结冰引起的不平衡载荷更是雪上加霜。一位经验丰富的风场运维主管曾说:“看似平静旋转的风机,其主轴却在不停地‘呻吟’,承受着我们看不见的各种折

磨。”这种不断变化的载荷环境,使得主轴的设计必须考虑最坏情况下的安全余量。

### 3. 主轴失效机理分析

风电机组主轴的失效往往是一场无声的悲剧,等到发现时已造成巨大损失。最常见的失效形式是疲劳断裂,就像一根反复弯折的铁丝最终会断裂一样,主轴在长期的“弯-拉-扭”交变应力作用下,从轴颈过渡处或键槽等应力集中区域开始出现细小裂纹。这些微小的裂纹像顽强的杂草,在每次载荷循环中悄然扩展,直到某个风高浪急的日子,主轴突然折断,造成整机停摆甚至倒塌。某沿海风场曾发生过这样的案例:一台运行7年的风机在台风过后突发断轴事故,检查发现断口处有明显的贝壳状疲劳纹路,源头是加工过程中未完全去除的一处细小划痕。此外,轴承座配合面的磨损、轴向窜动引起的磨粒脱落,以及过载导致的塑性变形等,都是常见的失效形式。通过对这些事故的分析研究,工程师们不断改进设计、优化材料、完善工艺,提高了主轴的可靠性和使用寿命。

## 二、主轴疲劳特性与寿命预测

### 1. 疲劳基本理论

风电机组主轴疲劳问题的研究离不开疲劳基本理论的支撑。疲劳是指材料在循环应力作用下,经历一定次数后产生的损伤和失效现象。对于主轴这类关键部件,其疲劳过程通常分为裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂三个阶段。应力-寿命(S-N)曲线是描述材料疲劳特性的基本工具,它反映了不同应力水平下材料能够承受的循

环次数。对于风电主轴常用的合金钢材料，其S-N曲线在高循环区域通常呈现疲劳极限特性，但在腐蚀环境下这一特性可能消失。主轴疲劳设计中还需考虑尺寸效应、表面质量、环境因素等对疲劳强度的影响。近年来，断裂力学理论被广泛应用于主轴疲劳分析，通过研究裂纹扩展规律，能更准确地预测主轴的剩余寿命，为风机安全运行提供可靠保障。

## 2. 载荷谱构建方法

风电机组主轴载荷谱的构建是疲劳分析的基础和前提。载荷谱即是对主轴在全寿命周期内所承受载荷的统计表征。构建主轴载荷谱主要有三种方法：现场实测法、风况统计推导法和标准载荷谱法。现场实测法是通过在主轴上安装应变片、扭矩传感器等测量设备，长期采集实际运行数据，然后利用雨流计数法进行统计分析，得到最贴近实际的载荷谱，但成本高且周期长。风况统计推导法是利用风场风况数据结合风机动力学模型，通过FAST、Bladed等仿真软件计算得到主轴在不同风况下的载荷，再结合风速概率分布函数合成载荷谱。

## 3. 疲劳累积损伤理论

疲劳累积损伤理论是连接载荷谱与寿命预测的桥梁。在风电主轴这类承受变幅载荷的部件中，Miner线性累积损伤理论因其简单实用而被广泛采用。该理论假设损伤以线性方式累积，当损伤值达到1时，构件即发生疲劳失效。具体计算时，先将载荷谱分解为不同应力水平的循环，对每一应力水平计算其损伤分量，再求和得到总损伤。然而，Miner理论忽略了加载顺序效应，在载荷变化剧烈的工况下可能导致预测误差。针对这一问题，学者们提出了多种非线性累积损伤理论，如Marco-Starkey理论、Corten-Dolan理论和双线性损伤理论等，通过引入非线性参数来描述损伤演化过程。近年来，基于连续损伤力学（CDM）的累积损伤模型也逐渐应用于风电主轴分析，它将材料损伤视为内部微观结构演化的宏观表现，能够更准确地描述材料退化过程和残余强度变化，为主轴寿命预测和可靠性评估提供了新思路。

## 4. 多轴疲劳评估方法

风电机组主轴在运行过程中同时承受弯曲和扭转载荷，呈现典型的多轴应力状态，这使得疲劳评估变得复杂。多轴疲劳评估方法主要有等效应力法、临界面法和能量法三类。等效应力法是将多轴应力状态转化为等效的单轴应力，常用的准则有vonMises准则、Tresca准则和Sines准则等，其中Sines准则考虑了平均应力效应，在工程中应用较广。临界面法认为疲劳裂纹总是在特定面

上萌生，通过搜索各个可能面上的应力或应变状态，找出最危险平面并在该平面上进行评估，McDiarmid准则和Fatemi-Socie准则都属于这一类。能量法则是基于材料吸收的应变能来评估疲劳损伤，Smith-Watson-Topper（SWT）参数是其中的代表。对于风电主轴这类大型构件，通常将有限元分析与多轴疲劳准则相结合，首先通过有限元法获取关键部位的应力-应变响应，然后应用适当的多轴疲劳准则进行寿命评估。实践表明，不同准则在不同应力状态下的预测精度存在差异，选择合适的评估方法对准确预测主轴寿命至关重要。

## 三、主轴可靠性评估方法

### 1. 可靠性基本概念

风电机组主轴的可靠性是衡量其在规定条件下、规定时间内完成规定功能的能力。在可靠性工程中，主轴的可靠度定义为在给定条件下和给定时间内正常运行的概率。失效率函数 $\lambda(t)$ 描述了单位时间内发生失效的概率，它与可靠度 $R(t)$ 之间存在指数关系。主轴的失效模式主要包括疲劳断裂、过载断裂、磨损和变形等，而失效机制则是从材料学和力学角度解释失效过程的物理本质。平均失效间隔时间（MTBF）和平均修复时间（MTTR）是评价主轴可靠性的重要指标，前者反映了主轴的耐久性，后者则反映了主轴的可维修性。在风电机组全寿命周期中，主轴失效率通常呈现出典型的浴盆曲线特征，即早期失效期、偶然失效期和磨损失效期三个阶段。可靠性目标的确定需要综合考虑技术可行性、经济合理性和风险可接受程度，通常要求大型风电机组主轴的设计寿命达到20年以上，可靠度不低于0.9995。

### 2. 确定性可靠性评估方法

确定性可靠性评估方法是风电主轴工程设计中最常用的方法，它基于安全系数的概念，通过比较主轴的承载能力与实际载荷来评估安全裕度。这种方法包括许可应力法、极限状态法和失效安全法等。许可应力法是最传统的方法，它将材料的许用应力定为屈服强度或极限强度除以安全系数，然后确保工作应力不超过许用值。安全系数的选取通常基于经验，考虑材料性能离散性、载荷不确定性、计算模型精度和失效后果等因素。极限状态法则考虑了结构在不同状态下的安全要求，分为承载能力极限状态和使用性能极限状态，前者关注主轴断裂、屈服等灾难性失效，后者关注主轴变形、振动等影响使用功能的状态。失效安全法则通过预设可能的失效模式，确保即使部分结构发生失效，整体功能仍能维持。尽管确定性方法操作简单直观，但它难以充分考虑随机

因素的影响,因此在关键部件设计中通常需要更科学的评估方法作为补充。

### 3. 概率可靠性评估方法

概率可靠性评估方法将风电主轴的承载能力和载荷效应视为随机变量,通过概率论和数理统计方法定量描述其不确定性。这种方法的核心是建立可靠性指标与失效概率之间的关系,常用的指标包括可靠度指标 $\beta$ 和失效概率 $P_f$ 。一级二阶矩法(FORM)是最常用的方法之一,它通过将随机变量转换到标准正态空间,寻找原点到极限状态面的最短距离来计算可靠度指标。二级二阶矩法(SORM)进一步考虑了极限状态面的曲率,提高了非线性问题的计算精度。对于复杂的极限状态函数,通常采用蒙特卡洛模拟法,通过大量随机抽样来估计失效概率。响应面法则是通过少量有限元计算构建极限状态函数的近似表达式,提高计算效率。概率可靠性评估中的关键问题是随机变量的统计特性确定,包括概率分布类型和参数估计,通常需要结合主轴材料试验数据和现场运行监测数据。近年来,随着计算能力的提升,基于多尺度随机有限元的可靠性分析方法在风电主轴研究中得到了广泛应用。

### 4. 基于模糊理论的可靠性评估

基于模糊理论的可靠性评估方法适用于风电主轴中那些难以用精确概率描述的不确定性问题。在实际工程中,由于观测数据有限、环境条件复杂或认知理解不足,主轴材料性能、载荷特性和边界条件等信息往往呈现出模糊性特征。模糊理论通过隶属函数描述变量的模糊性,将不确定性引入到可靠性分析中。模糊可靠性评估主要包括基于 $\alpha$ 切法的模糊可靠性分析和基于模糊随机理论的可靠性分析两类。前者将主轴承载能力和载荷效应表示为模糊数,通过求解不同 $\alpha$ 水平下的可靠性指标,得到可靠度的模糊描述;后者则将模糊理论与概率统计相结合,既考虑随机不确定性,又考虑模糊不确定性。在风电主轴模糊可靠性评估中,可靠度隶属函数的构建是关键,它不仅反映了主轴的安全程度,还提供了不确定性的定量度量。模糊理论的引入使得工程师能够在数据不充分的情况下,基于专家经验和工程判断进行合理的可靠性评估,为风电主轴的设计优化和使用决策提供更全面的参考。

### 5. 基于贝叶斯理论的动态可靠性评估

基于贝叶斯理论的动态可靠性评估是一种将先验信

息与实时监测数据结合的方法,特别适合风电主轴这类服役期长、运行环境复杂的部件。贝叶斯理论的核心思想是通过贝叶斯公式将先验概率与似然函数相结合,计算后验概率,实现可靠性评估的动态更新。在实际应用中,首先基于设计参数、试验数据和专家经验建立主轴可靠性的先验分布,然后随着运行监测数据的不断积累,利用贝叶斯更新不断修正模型参数,使评估结果越来越接近真实情况。马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)方法是求解复杂贝叶斯模型的有效工具,能够处理高维参数空间和非线性模型。基于贝叶斯网络的动态可靠性评估则通过概率图模型描述主轴各个子系统之间的因果关系,能够综合考虑多种失效模式之间的相互影响。在风电主轴寿命预测中,贝叶斯参数估计与退化过程模型的结合尤为重要,通过对退化轨迹的实时更新,可以准确预测剩余使用寿命。这种动态可靠性评估方法为风电场的预测性维护和资产管理提供了科学依据,有效降低了运维成本,提高了风机的可用率。

### 结束语

本文系统阐述了风电机组主轴的载荷特性、疲劳分析方法及可靠性评估技术。从主轴结构功能到疲劳理论、从载荷谱构建到累积损伤分析、从可靠性基本概念到先进评估方法,再到基于有限元的疲劳分析技术,形成了一个完整的技术体系。随着风电机组向大型化、智能化发展,主轴作为关键传动部件将面临更严峻的工作环境,与更高的可靠性要求。未来研究应着重于多尺度疲劳机理探索、数字孪生技术应用及智能监测与预警系统开发,推动风电主轴技术不断创新与进步,为风电产业的可持续发展提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 吴佳梁, 王广良, 魏振山等. 风力机可靠性工程. 北京: 化学工业出版社.
- [2] 冯琴, 张先鸣. 风电机组中的风电轴承电器制造.
- [3] 王瑞闯, 林福洪. 风力发电机在线监测与诊断系统研究. 华东电力.
- [4] 于虹, 田振亚, 邹荔兵. 大型风电机组主轴轴承承载能力分析. 广东电力.
- [5] 杨校生, 何家兴, 刘东远等. 风力发电机组设计导则. 北京: 机械工业出版社.