

# 风电机组结构动力响应研究

饶吉来<sup>1,2</sup>

(1.中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039; 2.煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037)

**摘要:** 针对风电机组动力响应引起的稳定性问题, 文章研究了不同风速下的叶片与塔架一体化风力机数值响应情况。基于 SolidWorks 建立风力机三维结构模型, 提取叶根和叶尖质点, 利用有限元分析法, 分析不同风速变化情况下的应力及位移变化趋势。对风力机摆振方向与挥舞方向的风速衰减进行研究, 探讨了叶片表面附近流场剪应力分布。结果表明: 在不同风速下, 叶尖、叶根应力及位移变化呈现一定的规律性; 在自然风经过风力机时, 风能可有效捕获, 进而呈现规律性衰减。研究结果为风力机运行动力学提供了参考。

**关键词:** 风速; 应力; 位移; 数值分析; 风能捕获

**中图分类号:** TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)01-0051-06

## 0 引言

叶片是风力机的重要组成部分, 其在旋转过程中所受的应力和位移变化直接影响整个风力发电机组的稳定运行。作为风力发电机的能量捕获装置, 叶片的材料质量和良好的气动性能对于确保风力发电机的长期稳定运行至关重要。因此需要对其进行动力响应研究, 评价其可靠性以及评估其寿命。

李万润<sup>[1]</sup>对风力发电机进行风沙载荷作用下的动力响应分析, 利用动量守恒定律和风沙密度建立风沙荷载力学计算模型, 得出风力发电结构在风沙荷载作用下响应较大的结论。张立<sup>[2]</sup>为研究不同运行方式对湍流风及地震作用下海上超大型风力机结构动力学响应及稳定性的影响, 进行了结构模态、动力学及屈曲分析, 发现塔架模态振型以扭转和弯曲振动为主, 湍流风是对塔顶位移影响最显著的因素, 而地震对塔顶的侧向位移影响远远超过了湍流风的影响。顾煜炯<sup>[3]</sup>提出了考虑机组损耗特性的双馈风电机组运行指标基准值的方法, 主要用于风电机组在运行时出现有功功率较低、运行状态不佳等工况。宋子秋<sup>[4]</sup>研究冰载荷在其全生命周期内对海上风力机性能的影响, 发现风力机输出功率在 MPPT 策略下会随着冰载荷的增大而减小, 风力机机械载荷随着冰载荷的增大而增大。魏东泽<sup>[5]</sup>概念性地设计了一种新型

半潜式海上风力机基础, 确定了结构的型式和尺寸, 计算分析了风力机基础的水动力系数、幅频运动以及动力响应特性。高靖<sup>[6]</sup>研究了一种适用于 100 m 水深的新型浅吃水 SPAR 型浮式风力机在不同情况下断缆后的动力响应, 发现该浮式风力机能适应在 100 m 水深海域的正常工作。朱莹<sup>[7]</sup>研究了风力机在运行过程中因来流风速的空间不均匀性、时间上的非稳定性, 以及风切变、强湍流等特性影响下发生的变化。

现有研究指出, 叶片的应力集中部位和变形疲劳易断点多出现在叶片根部圆弧段与翼型过渡位置。通过采用不同风剪切指数的入口条件进行数值模拟, 显示叶片主要承受轴向载荷的作用, 且叶片载荷的最大值出现在叶片展向 85%~90% 截面段。李治国<sup>[8]</sup>提出了一种高效数值模型, 用于快速计算风力机叶片在非定常载荷下的模态特征参数以及结构动态响应。郑小波<sup>[9]</sup>基于攻角变化相似性, 进行了叶片正弦俯仰振动的比拟试验, 发现在弦长雷诺数  $O(10^5)$  范围内尾流存在 3 种涡型结构, 即前缘离散涡、蜿蜒尾流和反卡门涡街。钱晓航<sup>[10]</sup>选取了 NREL 5 MW 和 IEA 15 MW 两种风力发电机作为案例, 在全工况下分别采用线性模态叠加法和非线性几何精确梁方法计算 61.5 m 和 117 m 两种叶片在稳态风和湍流风条件下的动态响应。朱钰雍<sup>[11]</sup>对承受弯曲载荷的叶片进行了

收稿日期: 2023-08-23。

基金项目: 国家科技重大专项项目(2016ZX05045004002)。

作者简介: 饶吉来(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为轴流式风机流体动力学。E-mail: 29769302@qq.com

动态响应分析,发现载荷会使叶片整体刚度有所增加。倪晨锋<sup>[12]</sup>对大型风力机柔性叶片的设计方法及其在随机风载荷作用下的动态响应与载荷特性进行了研究。王旭东<sup>[13]</sup>根据风力机叶片受力特性,基于对叶片载荷特性的深入研究,构建了叶片动力学响应模型,同时提出了计算叶片振动速度和振动加速度的数值模拟方法。

虽然一些学者对于风力机的动力响应开展了大量研究,取得了一定成果,然而,将叶片的叶尖及叶根同时进行应力及位移分析的研究甚少,尤其缺少对叶片挥舞与摆振方向的流场变化研究以及叶片表面流场的剪应力分析,无法为风电场布置以及叶片优化提供相应参考。本文以 5 MW 风力机叶片为研究对象,利用有限元法提取叶尖及叶根两个质点进行叶片应力及位移分析,探讨其动力学参数变化规律,为风力机稳定运行提供参考;对风力机叶片挥舞与摆振方向的流场变化进行分析,为风电场布置提供参考;研究了叶片表面流场剪应力,评估了叶片的进一步优化方向。

### 1 风力机三维结构模型

本文以 5 MW 风力机为例,对风力机进行参数化建模,三维结构见图 1,结构参数见表 1。

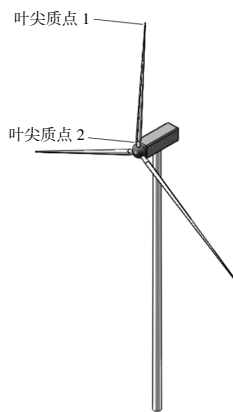


图 1 大型风力发电机组的三维结构模型

Fig.1 A three-dimensional structural model for large-scale wind turbines

表 1 5 MW 风力机的结构参数

Table 1 Structural parameters of 5MW wind turbine

参数	数值	参数	数值
塔架高度/m	124	机舱高度/m	6
塔顶直径/m	3.0	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	17
塔底直径/m	3.5	叶片数量	3
机舱长度/m	18	叶片直径/m	60
机舱宽度/m	6	叶片泊松比	0.3

叶尖和叶根易受到载荷作用发生破坏,从而影响整个叶片的稳定运行,分析叶尖和叶根的动力响应情况,结合叶片整体的云图变化,能够为叶片的旋转运行提供参考。

### 2 边界条件

#### 2.1 气动载荷

气动载荷主要是指风载荷,该载荷通过轮毂和主轴传递到塔架顶部,风载荷也直接作用在塔架表面上。风载荷作为风力机的动力来源,同时也造成了风力机结构破坏、疲劳损伤及失稳。因此,建立风载荷数学模型对于研究风力机动力响应具有重要意义。

施加风载荷,并对风力机在不同风速下的叶片转速进行求解。叶尖速比的计算式为

$$TSR = \frac{\omega R}{V} \quad (1)$$

式中:TSR 为叶尖速比,本文取值为 6; $\omega$  为叶片旋转角速度,rad/s; $R$  为叶片旋转半径,m; $V$  为风速,m/s。

风力机叶片结构中的变形可以用一组无穷级数表示。

$$\begin{cases} u_{j1} = \sum_{k=1}^{\infty} a_k f_k [f_k = f_k(x_1, x_2, x_3)] \\ u_{j2} = \sum_{k=1}^{\infty} b_k g_k [g_k = g_k(x_1, x_2, x_3)] \\ u_{j3} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k h_k [h_k = h_k(x_1, x_2, x_3)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_{j1}, u_{j2}, u_{j3}$  均为耦合结构的某点  $(x_1, x_2, x_3)$  的变形分量; $a_k, b_k, c_k$  均为时间  $t$  系数; $f_k, g_k, h_k$  均为基函数,该基函数满足耦合结构的边界条件。

#### 2.2 边界条件

使用 Solidworks 软件对叶片进行网格划分时,必须综合考虑叶片的内部结构和复合材料的特性。通过 Simulation 网格划分工具自动生成了一个网格(图 2),其大小为 786.031 mm。网格共有 30 974 个单元和 55 085 个节点。

为确保风力发电机叶片在风场中稳定运行,需要在 3 个方向上的 6 个自由度上施加约束。这些约束将被放置在塔架底部,进行刚性固定。

施加的风载荷为 Davenport 脉动风速谱(图 3),风速时刻变化,结合风剪切,计算时间为 200 s,时间步长为 10 s。

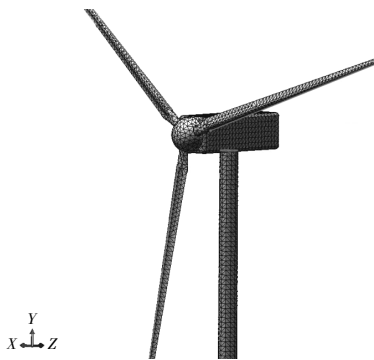


图2 网格划分  
Fig.2 Meshing

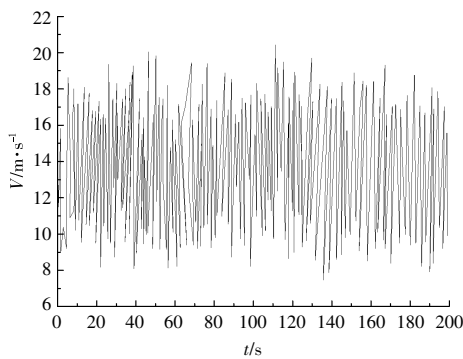


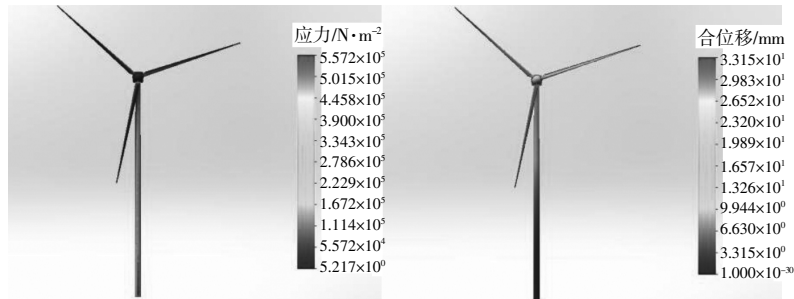
图3 脉动风速谱  
Fig.3 Fluctuating wind velocity spectrum

### 3 结果分析与讨论

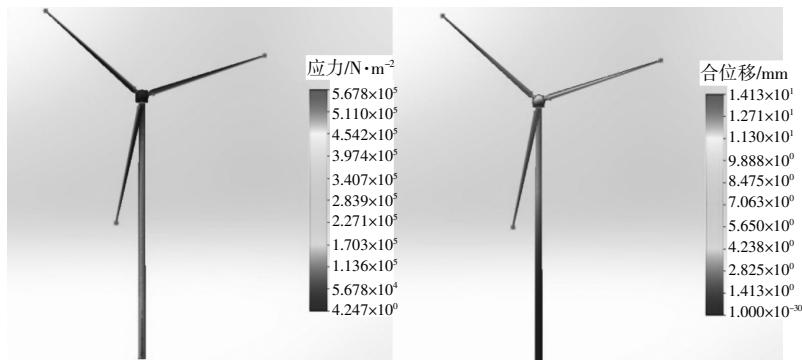
由于自然流动的风具有多变性,因此风力机结构受到的风载荷影响非常复杂。风速在时间与空间上不断变化,从而引起风力机结构的变形及失稳,影响风力机性能,因此设计风力机结构时,必须分析风力机动力响应。

风力机在运行过程中,塔架受到的主要载荷有塔架自重、机舱和风轮的重力,以及来自风轮的轴向载荷和风载荷。提取风速 3.0,3.5,6.0,10.0 m/s 和 13.8 m/s,分析其中的位移偏移及应力变化情况,不同风速下风力机的应力及位移变化云图如图 4 所示。

由图 4 可知,当风速分别为 3.0,3.5,6.0,10.0 m/s 和 13.8 m/s 时,塔架底部受应力集中影响,应力值较高,风力机最大应力值分别为  $5.572 \times 10^5$ ,  $5.680 \times 10^5$ ,  $4.927 \times 10^5$ ,  $1.291 \times 10^6$  Pa 和  $2.527 \times 10^6$  Pa,应力值随塔架高度方向逐渐降低,叶片及机舱位置应力值相对较低,叶尖位置在来风方向位移最大,分别为 33.15, 14.31, 9.02, 24.25 mm 和 48.18 mm,位移量随着与轮毂距离的减小而逐渐降低。



(a)风速为 3.0 m/s



(b)风速为 3.5 m/s

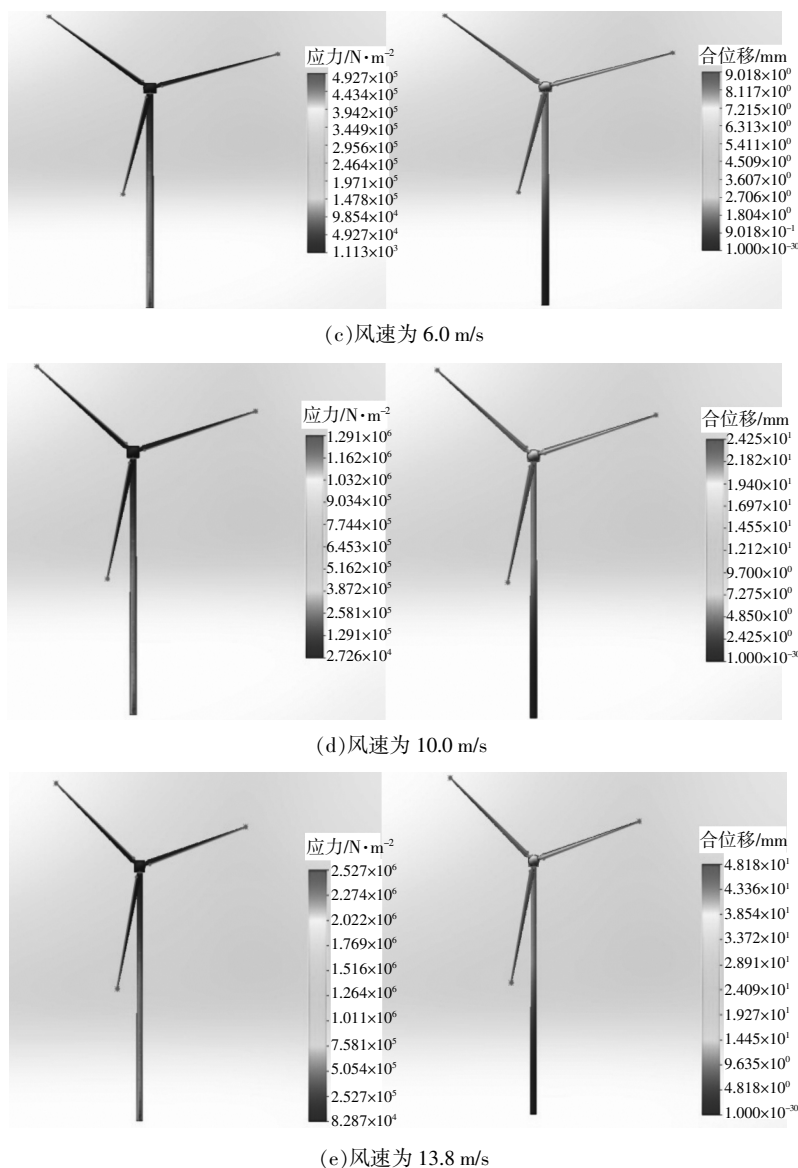


图 4 应力及位移变化云图

Fig.4 Nephogram of stress and displacement changes

图 5 为来风方向风速变化云图。图中 Z 方向为来风方向(图中左上角刻度显示 Z 方向), 深

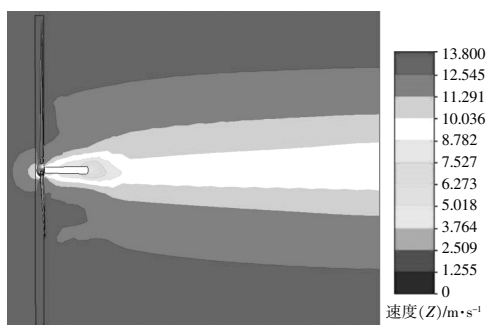


图 5 来风方向风速变化

Fig.5 Wind speed variation in wind direction

色方框位置为叶片, 白色方框位置为风力机机舱。

由图 5 可知, 在自然风经过风力机之后, 风速由来风时的 13.8m/s 迅速下降, 在风力机后形成较长的低速风区域, 机舱后方出现了不规则环形风速阶梯降低, 且离机舱最近的位置风速下降到最低。风力机对风力的削弱作用较强, 尤其在正后方位置, 风速最高降低了 1/3 左右, 因此在布置风电场时, 考虑到风力机群组的气动特性, 应当选择合适的布机间距, 以增强群组互耦效应, 提高功率密度。

图 6 为风速为 13.8 m/s 时风力机叶片表面流体的剪应力云图。



图6 叶片表面流体的剪应力  
Fig.6 Shear stress of fluid on blade surface

由图6可知,在叶片尖端至叶片二分之一处出现了较强的剪应力,位置较为集中,可能对风力机叶片造成严重的损伤。因此在叶片制造工艺中,可在剪应力集中区域进行叶片强化处理或改变叶片薄弱处结构,从而提高叶片的抗损伤能力,增加风力机的正常工作时间。在叶片根部区域,剪应力普遍较小,可对此区域结构进行优化,降低叶片重量。叶片附近流体剪应力分布不均匀,在叶片挥舞方向可能引起激烈振动,导致气弹性失稳。

风速为13.8 m/s时的风力机外流场速度分布如图7所示。



图7 风力机外流场速度分布  
Fig.7 Velocity distribution of wind turbine outflow field

由图7可知,从风力机叶片尖端至旋转中心,流体速度逐渐减小,并形成了形状较规则的环形速度分布,旋转中心到叶片2/3处流体速度低于13.271 m/s,叶片2/3到叶片尖端流体速度为13.271~13.906 m/s。流体速度降低说明风力机在高风速下对风能的捕获能力良好,可实现风力机的稳定运转。因此可对风力机进行更高风速条件的试验,测试风力机达到不稳定状态时风速的具体数值,为风力机正常工作运转提供参考。

#### 4 结论

本文对风力机运行过程中不同风速下的叶尖及叶根的应力及位移参数变化趋势进行了分析,

得出以下结论。

①在不同风速下,叶片应力的变化趋势呈现特定的规律。随着风速的递增,叶片应力和位移不是单调地增加或减少,而是存在某一特定风速作为临界点,叶片的应力和位移会在一个特定区间内呈现出单边递增或递减的趋势。非单调的变化模式揭示了叶片与风速之间的复杂相互作用,对于优化风力发电机的设计和运行具有重要意义。

②风力机叶片在高风速条件下的捕获能力对于提升风能利用尤其重要,叶片保持稳定运转,提升了风电场整体的风能捕获效率。此外,对风力机叶片尖端至二分之一部位进行合适的优化,可以增强叶片的结构稳定性,有助于提高能源产出。

#### 参考文献:

- [1] 李万润,黄杰,丁明轩,等.风力发电结构在风沙荷载激励下的动力响应分析[J].兰州理工大学学报,2022,48(2):107-114.
- [2] 张立,闫阳天,李春,等.海上超大型风力机结构动力学响应及稳定性研究[J].机械强度,2022,44(1):175-183.
- [3] 顾煜炯,邢月,马丽.计及损耗的风电机组运行指标基准值研究[J].自动化仪表,2018,39(11):1-5,10.
- [4] 宋子秋,刘吉臻,胡阳,等.考虑冰载荷的近海固定桩风电机组运行特性建模与分析[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4144-4153.
- [5] 魏东泽,阙小玲,付图南,等.新型半潜式海上风力机基础水动力特性研究[J].海洋工程,2022,40(1):82-92.
- [6] 高靖,李焱,李耀隆,等.新型浅吃水SPAR型浮式风力机断缆情况下动力响应分析[A].第十四届全国振动理论及应用学术会议(NVTA2021)摘要集[C].天津:中国振动工程学会,2021.
- [7] 朱莹.来流条件对风力机叶片流固耦合动力响应特性的影响[D].兰州:兰州理工大学,2021.
- [8] 李治国,陈永艳,高志鹰,等.风力机柔性叶片结构动态响应数值模型研究[J].工程热物理学报,2022,43(9):2374-2381.
- [9] 郑小波,王红亮,徐文浩,等.不同涡脱落模式下垂直轴风力机叶片的气动响应[J/OL].空气动力学学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1192.TK.20220520.1624.004.html>,2022-11-09.
- [10] 钱晓航,郜志腾,王同光,等.百米级大柔性风电叶片非线性气弹响应分析[J].空气动力学学报,2022,40(4):220-230.

- [11] 朱珏雍,周洁,励争.大型风力机叶片的动态响应分析 [A]. 北京力学会第二十四届学术年会会议论文集[C]. 北京:北京力学会,2018.94-96.
- [12] 倪晨锋,李德源,汪显能,等.10 MW 风力机叶片设计 及其在随机风载荷下的响应分析 [J]. 新能源进展, 2016,4(3):206-212.
- [13] 王旭东,王立存,夏洪均.风力机叶片动力学响应的数值模拟研究[J].现代制造工程,2016(2):103-107.

## The research on structural dynamic response of wind turbine

Rao Jilai<sup>1,2</sup>

(1.China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China; 2.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** In response to stability issues caused by the dynamic response of wind turbines, in order to study the numerical response of the wind turbine under different wind speeds, a three-dimensional structural model of the wind turbine is established based on SolidWorks, the blade root and tip particles are extracted, and the stress and displacement trends under different wind speeds are analyzed by using the finite element analysis method. The wind speed attenuation in the pendulum direction and the brandishing direction of the wind turbine is studied and the shear stress distribution of the flow field near the blade surface is discussed. The results show that the stress and displacement of blade tip and blade root have certain regularity under different wind speeds. When the natural wind passes through the wind turbine, the wind energy is effectively captured, and then shows regular attenuation. This study provides reference value for the dynamic parameters of wind turbine operation and improves the stability of wind turbine operation.

**Keywords:** wind speed; stress; displacement; numerical analysis; wind energy capture