

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240621003

考虑运转工况的风力机结构体系抗风沙性能 对比研究*

于蛟, 李钢, 余丁浩

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:我国规划在荒漠化区域建设4.5亿千瓦风电光伏基地,而这些区域又是多风沙地区,风力发电机在此类地区有1/10到1/6的时间都处于沙尘环境,导致风力机支撑结构所受荷载种类和失效风险增加,因此,对风力机支撑结构的抗风沙性能进行研究对于荒漠化地区的风力机建设具有重要意义。不同风速不仅导致支撑结构所受风沙荷载存在差异,还将引起风力机发电控制系统对叶轮转速进行调整,而不同运转工况的差异主要体现在叶轮转速上,不同转速引起叶轮不同程度的离心刚化效应,进而影响整机的动力响应,而现有风力机抗风沙性能相关研究并未考虑风力机运转工况的影响,且仅针对锥桶式风力机支撑结构,并未涉及其他形式的支撑结构体系。针对上述问题,分别建立了锥桶式和钢管混凝土格构式1.5 MW典型风电结构整机模型,并通过直接模拟叶轮转动复现叶轮在运转工况下的离心刚化效应,进一步考虑叶轮引起的不同刚化效应和不同等级风沙荷载变化共同耦合后对支撑结构的影响,对比研究了不同风力机支撑结构考虑其在运转工况下的抗风沙性能。结果表明:三肢柱式支撑结构由于刚度较大,其位移和加速度响应相比于锥桶式支撑结构更小;叶轮旋转对锥桶式支撑结构位移响应的影响较小,但对三肢柱式支撑结构的位移有一定影响;此外,考虑叶轮旋转导致的离心刚化效应后计算出的塔顶加速度、叶片变形和应力均较不考虑叶轮旋转情况显著降低,且在较低风速下叶轮旋转效应的影响更为明显。

关键词:风力机支撑结构; 运转工况; 离心刚化效应; 抗风沙性能; 动力响应

中图分类号: TU871 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0350-10

Comparative Study on Wind and Sand Resistance Performance of Wind Turbine Structural Systems Considering Operating Conditions

YU Jiao, LI Gang, YU Dinghao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: China plans to build 450 GW wind and solar power bases in desertified areas, which are characterized by frequent wind and sand activities. Wind turbines in such areas are exposed to sand and dust environments for 1/10 to 1/6 of the time, leading to an increase in the types of loads on wind turbine support structures and higher failure risks. Therefore, studying the wind and sand resistance performance of wind turbine support structures is of great significance for their future construction in desertified areas. Different wind speeds not only result in differences in the wind and sand loads on the support structures, but also cause the wind turbine power generation control system to adjust the im-

* 收稿日期:2024-06-21;修回日期:2024-07-10

基金项目:国家自然科学基金(52225804,52378219)资助

作者简介:于蛟(1993—),男,博士研究生。主要从事恶劣环境下的风电结构体系抗灾害性能研究。

E-mail:gremojzcondonhc@hotmail.com

impeller speed. The differences between various operating conditions are mainly reflected in the impeller speed. Different speeds lead to varying degrees of centrifugal stiffening effect of the impeller, which in turn affects the dynamic response of the entire turbine. However, existing research on the wind and sand resistance performance of wind turbines has not considered the impact of wind turbine operating conditions, and has focused only on the conical wind turbine support structure, without involving other forms of support structures. To address the above problems, this study established full-scale models of typical 1.5 MW wind turbine structures, namely the conical type and concrete-filled steel tubular lattice type, respectively. The centrifugal stiffening effect of the impeller under operating conditions was reproduced by directly simulating the impeller rotation. Furthermore, the coupled influence of different stiffening effects caused by the impeller and the different levels of wind and sand load changes on the support structures was considered. Additionally, a comparative analysis was conducted on the wind and sand resistance performance of different wind turbine support structures under operating conditions. The results showed that compared with the conical support structure, the three-legged column support structure exhibited smaller displacement and acceleration responses due to its higher stiffness. The impeller rotation had a relatively small impact on the displacement response of the conical support structure, but exerted certain influence on the displacement of the three-legged column support structure. In addition, the calculated tower-top acceleration, blade deformation, and stress when considering the centrifugal stiffening effect were significantly lower compared to those without considering impeller rotation, and the influence of impeller rotation was more pronounced at lower wind speeds.

Keywords: wind turbine support structure; operating conditions; centrifugal stiffening effect; wind and sand resistance performance; dynamic response

0 引言

我国风资源丰富的西北地区往往存在较为严重的地表荒漠化问题,对于处于戈壁、沙漠等多风沙环境下的风力发电机,常受到沙尘暴侵袭,在风沙环境下常处于运转工况。根据近几年的相关报告,风力发电塔结构在沙尘天气下服役的时间占全年总时长的 $1/10-1/6$ ^[1],导致风力机支撑结构存在较高的失效风险。因此,针对坐落于多风沙区域的风力发电机,其在风携沙作用下所存在严重的安全隐患已受到沙漠周边国家重点关注。

现阶段国内外风力机支撑结构以锥筒式为主,但此类结构的倒塔事故频发,常引起较大的经济损失,因此,优化既有结构体系,推动新型风力机支撑结构体系的研发势在必行。近年来,格构式风力机支撑结构因其具有制造简单、耗材少、成本低、运输方便、刚度大等优势正逐渐受到重视,众多学者对其在动荷载作用下的受力变形特点也进行多方面的研究。刘新喜等^[2]基于Abaqus建立了四种不同形式风力机一体化模型,并对四种不同形式模型的

抗台风性能进行了对比研究。杨有福^[3]建立了四肢柱钢管混凝土格构柱非线性有限元模型,并利用该模型确定了此类结构的稳定承载力计算公式。黄志等^[4]为了了解钢管混凝土格构柱的地震损伤情况,通过对4组模型进行了低周往复荷载试验,模拟了在地震动作用下此类结构易出现的破坏形态和构建损伤特征。

即有对风力机支撑结构力学特性和抗灾害性能相关研究中,大多在建立结构模型时将上部风力机及叶片简化为集中质量点,此类建模方法虽然可显著降低计算复杂度,但无法考虑不同风速条件下的运转工况及其对支撑结构的影响,如叶轮转动引起交变荷载和离心刚化效应、风荷载作用下叶轮与支撑结构的复杂相互作用等。为研究考虑运转工况下的风力机支撑结构力学特性和振动响应,众多学者进行了多方面探索,例如,马跃强^[5]提出了考虑整机的建模方法,并探讨了整机模型在停机和运转工况下的动力特性;柯世堂等^[6]采用改进后的叶素-动量理论模拟了整机模型在随机风荷载作用下的动力响应特征,并与上部简化等效质点模型进行了对比分析,最后得出在抗风设计时应考虑叶轮对支

撑结构影响的研究结论;戴靠山等^[7]使用 OpenFAST 与 Abaqus 软件双向联动方法,完成风力发电塔结构在运转工况下的风震耦合响应分析,并研究了不同风震组合角对结构振动响应的影响;李万润等^[8]修正了叶素动量理论的理论模型,结合塔筒位置的尾流模型,计算了考虑旋转效应下的风载荷,并通过 Abaqus 所建立的简化模型,对其模型进行了风-震耦合的研究。席仁强等^[9]在 OpenFAST 软件中完成了 5 WM 风力发电塔结构在运转工况下的风-震耦合响应分析;陈小波等^[10]给出了叶轮和支撑结构在运转过程中的运动方程,并使用谐波叠加法生成各点风速时程,最后完成对运转工况的定义,并实现了在运转工况下的风振响应分析。

上述研究并未考虑风沙环境,目前已有部分学者针对风沙荷载及风力机支撑结构的抗风沙性能进行了研究,在风携沙荷载方面,朱文智等^[11]将沙粒流视作连续性流体,通过沙浓度换算沙粒的流体密度,采用动量守恒的方法计算沙粒流体对结构物产生的压力,进行近似计算,并给出虽沙粒冲击力不大,但由于沙粒与结构的接触面积较大,故沙粒的冲击压强是不可忽视的结论;A. Rao 等^[12]基于能量守恒原则将沙粒对结构的碰撞视为弹性碰撞,以此来确定沙荷载;逯博等^[13]提出了采用了光滑粒子流体力学(SPH)方法对风沙流进行了数值模拟,假定气流对沙粒的紊动效应、气流中的电场力、沙粒运动中的转动对试验结果没有影响。在风力机支撑结构的抗风沙性能方面,张卓群等^[14]利用 SAP2000 软件模拟了输电塔结构在风荷载和风沙荷载作用下的动力响应,并比较了有无沙尘荷载对结构体系的影响,并最后给出在风沙频发区应关注沙尘荷载的建议;蒲鸥等^[15]对沙尘天气的沙粒运动和冲击行为研究现状进行了归纳总结,并提出了现阶段对风沙领域研究所存在的问题。然而,现有风力机支撑结构抗风沙性能相关研究依然较为简化,大多局限于锥桶式风力机支撑结构,导致缺少不同类型结构体系抗风沙性能的对比,也未考虑运转工况的影响,因此,有必要综合考虑结构体系、运转工况等因素影响,开展风力机支撑结构的抗风沙性能研究。

本文聚焦我国甘肃、新疆、内蒙等多风沙地区的风电场,首先分别建立了 1.5 MW 锥桶式和格构式三支柱支撑结构有限元分析模型,并通过有限元

软件模拟叶轮旋转过程考虑离心刚化效应影响,随后,结合叶素动量理论,对结构施加不同风速下的风沙荷载,并考虑不同风速下运转工况的差异性,通过对比分析研究了不同类型结构在不同风沙环境下的动力响应,揭示了风沙环境、结构类型、运转工况等因素对风力机支撑结构性能的影响规律。

1 结构分析模型

选用 1.5 MW 锥桶式和钢管混凝土格构式三支柱风力机结构为研究对象,两者的风轮、机舱等设计对标参数相同,其中,风轮直径均为 78 m,单根叶片长度和重量分别为 38 m 和 4.8 t,轮毂处总质量为 15 t,机舱外形简化为长方体,尺寸为 3.4 m×3.4 m×3.7 m,总重量为 60 t。对于锥桶式支撑结构,其塔高为 72 m,塔身结构由多段锥筒组成,其中塔顶直径为 2.5 m,底部直径为 4.2 m,塔筒壁厚沿高度呈线性变化,最大值为 25 mm,出现在塔底位置,最小值为 18 mm,出现在塔筒顶部,塔筒材料使用 Q345 钢材。对于三支柱式支撑结构,使用参考文献[16]优化的设计参数,其高度为 60 m,结构总重为 130 t,柱肢圆钢管($\varphi 500 \times 16$)和腹杆($\varphi 160 \times 10$)均使用 Q345 钢材,使用 C30 混凝土作为核心混凝土,同层腹杆与主要肢柱间采用 X 型交叉链接,共计包含 136 根腹杆以及 3 根肢柱,属于巨型多节点组合结构。采用 Abaqus 分别建立上述两种风力机结构的精细化有限元模型,其中锥桶式支撑结构的塔筒和三支柱支撑结构的腹杆与肢柱钢管均采用壳单元建模,三支柱柱肢钢管内置核心混凝土采用实体单元模拟,两个风力机结构的叶片均采用壳单元进行精细化建模,机舱和轮毂假设为刚性体,其尺寸和重量与实际结构一致,叶片与轮毂刚接,轮毂与机舱间采用 Abaqus 中的虚拟线轴承代替传统的 Part 间的面接触,用以模拟叶轮旋转引起的离心刚化效应及建立叶轮与支撑结构之间的相互作用,本文两种风电有限元模型考虑了结构自身材料非线性,几何非线性和接触非线性。该模型的加载方式实现了可以考虑运转工况下收敛任意数量动载荷的耦合分析(载荷类型包括风、沙、雨、地震以及深海复杂悬浮体系的波动载荷),可应用于风电结构在抗多灾害领域的研究。本文的研究重点在于结构的抗风沙性能,气动阻尼对整体结构动态响应的

影响较小,因此忽略了气动阻尼影响,参考相关领域本文风电结构两个结构阻尼比设为1%较为合适。图1为本文建立的两种风力机结构的整机有限元分析模型。为方便介绍本文后续将钢管混凝土格构式风电塔筒称为三支柱风力机。

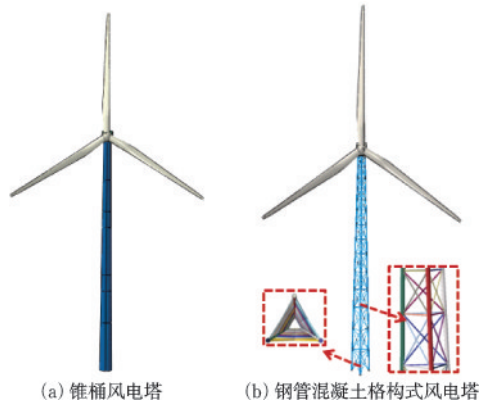


图1 风力机结构分析模型

Fig.1 Structural analysis models of wind turbines

分别对建立的两个风力机结构进行停机和运转工况下的模态分析,其中锥桶式风力机和三支柱风力机在停机条件下的一阶频率分别为0.398和0.576,本文所研究的1.5 WM风力机风轮的额定转速为21 r/min,此转速下锥桶式风力机和三支柱风力机的一阶预应力模态频率分别为0.404和0.577,其中的预应力模态在机组控制叶轮最大的转速下求解,不同结构在不同条件下的一阶振型如图2所示。参照规范风力发电机组塔架^[17],两个体系风力机均满足设计要求,且避开了叶轮转动引起的外荷载1P [0.2167-0.35]和3P [0.65-1.050]频率区间。根据模态分析结果可知,两类风力机结构的一阶预应力模态频率和停机条件下的一阶频率相差不大,这主要是由于叶片质量相对于塔筒较小,同时叶轮刚化效应一定程度上耦合了叶片的振动形式(挥舞,摆振,扭转),故叶轮转动引起的离心刚化效应对整机结构自振特性影响较小。结构自身的动力特性与质量矩阵和刚度矩阵相关,叶轮在旋转过程中叶片除了受到风载荷外,还受到自身重力和旋转时离心力的作用,在运动过程中叶片重力和旋转时离心力沿叶片轴向方向提供了一个额外的合力,额外的力提供了一个附加的刚度矩阵,同时离心力与转速相关,故叶轮在运转过程中改变了整个风力机结构的动力特性^[18]。

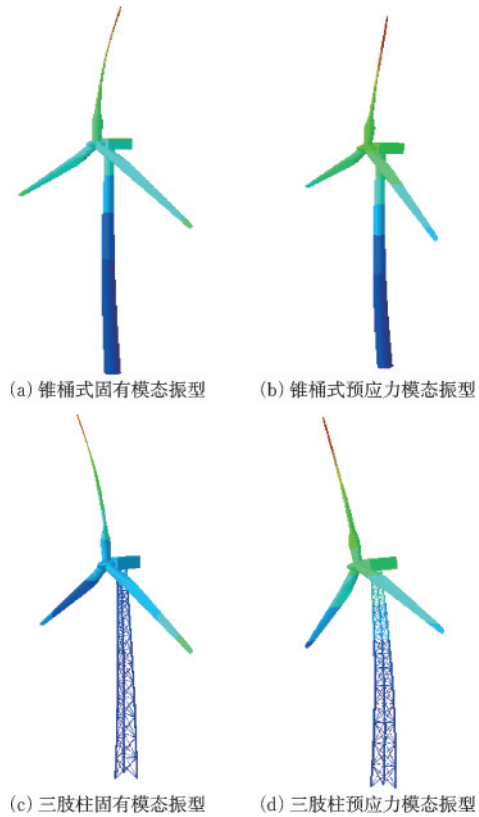


图2 不同风力机结构的一阶固有模态振型和预应力振型

Fig.2 First-order natural mode shapes and pre-stressed mode shapes of different wind turbine structures

2 风沙荷载计算模型

为确定风力机结构在不同工况下所受风荷载及风携沙荷载,首先基于Davenport谱确定不同平均风速条件下的目标谱,进一步采用线性滤波法和AR自回归模型构造脉动风速时间序列,通过此种方法同时参照10 m高平均风速可以预测生成高耸结构在不同高度处的风速(平均风速+脉动风速)时程曲线,选取表1中等沙尘暴条件下10 m高的平均风速推算沙尘环境下不同高度处的风速时程曲线,图3即为中等沙尘环境下塔顶轮毂位置的脉动风速时程曲线,图4对比了生成的脉动风速所得功率谱与目标谱之间的差异,最终结果表明生成的脉动风速时程可较好的描述结构所处的风环境特征,满足结构抗风计算的使用需求^[19]。

叶素-动量理论是叶素理论结合动量理论后的一个方法,用于迭代求解各叶素段最优诱导因子的方法,叶素理论计算效率较高的原因是其采用查表的方式寻找翼型升阻力系数,本文采用叶素动量理

表 1 荷载工况

Table 1 Load operating conditions

风沙环境	水平能见度/ km	10 m 高 平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	$\rho_{TSP}/$ ($mg \cdot m^{-3}$)
浮尘	10	3	0.3
扬沙	1-10	6	1
弱沙尘暴	1	10	6
中等沙尘暴	0.75	15	15
强沙尘暴	0.5	20	25
特强沙尘暴	0.05	25	100

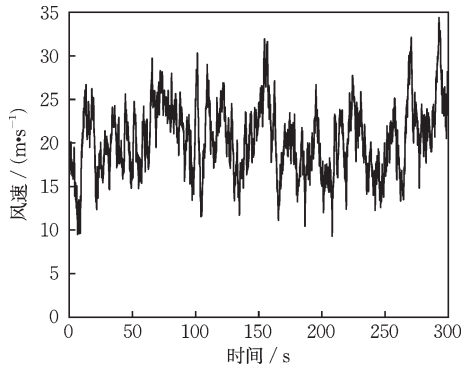


图 3 生成脉动风速时程

Fig.3 Generation of pulsating wind speed time history

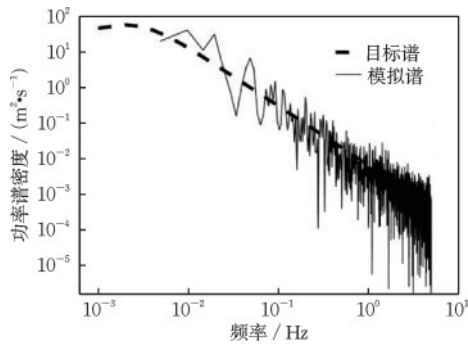


图 4 功率谱密度对比

Fig.4 Comparison of power spectral density

论(BEM)计算结构所受风荷载,但考虑到传统BEM方法存在一定局限性,如叶尖位置的动量损失和叶根位置的不均匀气动损失,此外,当诱导因子较大时,分析的精确性不足,故本文使用曾庆川等^[20]考虑的修正BEM方法。由于研究对象为百米以下风电塔结构,因而忽略风力机叶轮的风剪效应影响^[21],并取轮毂高度处风速作为基本风速计算叶片各叶素段所受风荷载,故模型可以在同一时间节点下对叶根、叶尖以及塔筒在动载荷作用下的瞬时响应进行提取和分析。

为考虑沙尘环境下风携沙对结构的影响,采用文献[14]所推导的基于动量守恒定理的沙荷载计算公式,此公式对风携沙流场的浓度进行了适当简化,同时考虑了沙尘在不同高度处流通的积沙量,最后对多个子公式进行拟合后得出沙尘荷载公式:

$$F_s(t) = 4\rho_{TSP}v_s(t)^2 A \quad (1)$$

式中, ρ_{TSP} 代表空气中直径不大于的颗粒物质量浓度,本文代表整个风携沙流场的总悬浮微粒密度; v_s 为考虑动量守恒定律后假定的单位体积沙尘颗粒的平均飞跃速度,取顺风方向需求高度的平均风速; A 为风机迎风面积。为简化计算,采用将风荷载和沙荷载直接叠加方式确定风沙荷载,即分别求出不同高度处的风荷载和沙尘荷载进行叠加^[14]。最后,将叶片和塔身进行分段,基于上述步骤可计算出叶片每一叶素段和塔身分段的总风沙荷载,并以等效压强和集中力的形式将计算得到不同分段处风沙荷载并施加到不同部件模型上,从而实现在风沙荷载条件下的整机结构动力响应模拟。图5所示为载荷两种风力发电塔结构不同高度风速模拟点。

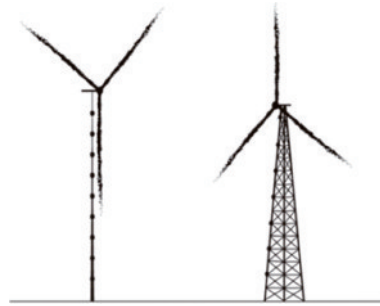


图 5 两种风力发电塔结构不同高度风速模拟点

Fig.5 Wind speed simulation points at different heights of two types of wind turbine structures

3 考虑运转工况的风机结构抗风沙性能研究

3.1 工况设置

为模拟不同沙尘天气下结构的动力响应,本文考虑6种荷载条件,分别代表所考虑的6种不同工况条件,参考文献[14]和GB/T20480—2006^[22]沙尘暴天气等级综合分析数据可知,不同荷载条件所对应的风沙环境和相关参数见表1。根据表1所提供

的10 m高平均风速并结合前文生成风速的方法,可求解出风力机在不同沙尘环境下不同高度的风速时程曲线,其中荷载时程总时长设为300 s,时间步长为0.1 s,截止频率为5 Hz,假设地面为A类地貌,对应地面粗糙度指数等于0.12,Davenport谱中系数为0.001 29,脉动风频率分割点数取为2 048^[23]。

风力机在不同风速下,叶轮会以不同的转速运行,其中切入风速(3 m/s)至额定风速(10.5 m/s)区间为低风速区,额定风速至切出风速(25 m/s)之间为高风速区,当风力机塔顶机组识别到不同风速变化时,发电控制系统会按照当前风速值驱动叶轮以不同转速适配目前风速以保持风力机在此工况下达到最佳输出功率。当轮毂处风速处于低风速区时,风力机将以最优尖速比运行,以维持最高的气动效率;当轮毂处风速处于高风速区时,叶轮将以额定转速20 r/min转动,在该风速区间叶轮转速可设为此常数;当轮毂处风速超过切出风速时,风力机处于停机工况。图6为本文两种风力机的尖速比与气动效率间关系, C_p 为风力机转化风能的气动效率。尖速比与叶轮转速和轮毂高度处平均风速的关系为:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_n} \quad (2)$$

式中, ω 为叶轮转速; R 为叶轮半径; V_n 为轮毂高度处的平均风速。根据上式可确定叶轮在低风速下的转速,以此转速模拟该工况下的离心刚化效应。

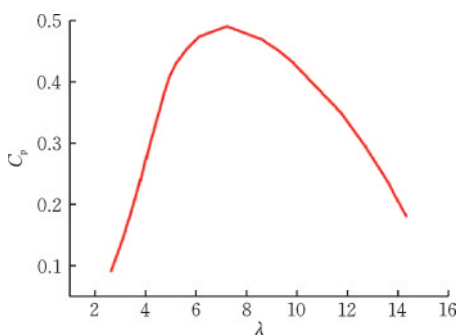


图6 尖速比与气动效率的关系

Fig.6 Relationship between tip speed ratio and aerodynamic efficiency

通过表1所提供的不同沙尘情况下10 m高的平均风速,求解出轮毂高度的总风速时程,并通过此风速时程曲线确定不同沙尘环境下风力机所处的工况情况(低风速区和高风速区),通过计算轮毂

处风速,当风力机在浮尘、扬沙、弱沙尘暴和中等沙尘暴环境下叶轮处于运转工况,为考虑不同风速条件下的叶轮旋转效应,进而模拟运转工况下叶轮与支撑结构间的相互作用,结合式(2)确定低风速环境下的叶轮转速,并在结构分析时将计算的旋转弧度赋予在整个叶轮,模拟叶轮在低风速时域内不同程度的离心刚化效应。

而在强沙尘暴和特强沙尘暴环境下,由于轮毂处风速超过切出风速(25 m/s),风力机处于停机工况,此时叶轮桨距角固定为90°顺桨状态,风轮所受风载假设为零,仅考虑塔身所受风荷载^[24]。通过上述方法完成对风力机在低风速和高风速工况条件下荷载的设置。图7为刚化效应示意图。图7(a)中 θ 为叶轮旋转的方位角, G 、 G_1 和 G_2 分别代表叶片重力和重力沿叶展和垂直叶展方向的分力。图7(b)为支撑结构在同一高度下仅考虑刚化效应作用下的应力响应对比。

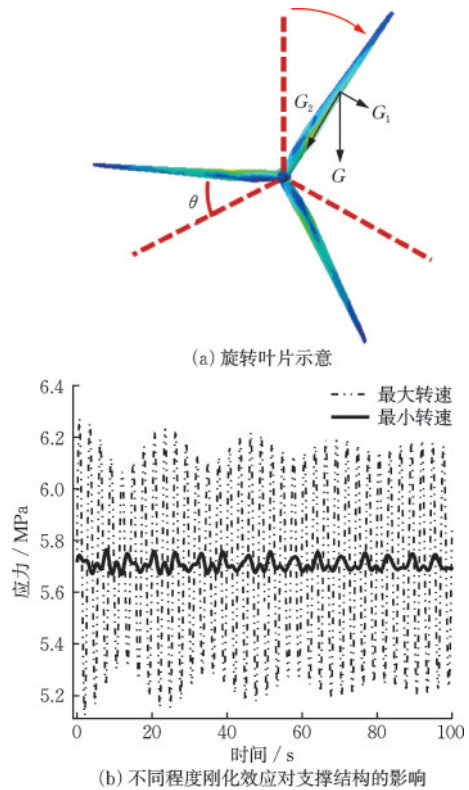


图7 刚化效应示意

Fig.7 Schematic diagram of stiffening effect

3.2 结果分析

表2和表3分别给出了两种风力机结构在不同风沙环境下考虑和不考虑运转工况时分析得到的

支撑结构塔顶峰值水平位移。从表中可知,考虑运转工况后,由于离心刚化效应的存在,导致两种结构峰值位移减小,对锥桶式风电结构的影响程度不大,而对三肢柱式支撑结构的影响较为显著,如在扬沙天气下考虑运转工况时的计算结果相比于不考虑运转工况降低 16.1%。此外,当出现强沙尘暴和特强沙尘暴天气时,由于风力机处于停机状态,结构位移响应将显著减小。对比两种结构在相同荷载条件下的计算结果可知,锥桶式风力机支撑结构的峰值位移相较于三肢柱式支撑结构更大,这主要是因为锥桶式结构柔度更大。

表 2 不同荷载工况下锥桶式风力机支撑结构塔顶峰值位移对比

Table 2 Comparison of peak displacement at top of conical wind turbine support structure under different load operating conditions

荷载工况	锥桶式-考虑 运转工况/mm	锥桶式-不考虑 运转工况/mm	变化率/ %
浮尘	60.85	61.28	0.7
扬沙	184.93	188.65	2.0
弱沙尘暴	370.8	379.41	2.3
中等沙尘暴	429.42	438.75	2.1
强沙尘暴	—	153.7	—
特强沙尘暴	—	229.42	—

表 3 不同荷载工况下三肢柱式风力机支撑结构塔顶峰值位移对比

Table 3 Comparison of peak displacement at top of three-legged column wind turbine support structure under different load operating conditions

荷载工况	三肢柱式-考虑 运转工况/mm	三肢柱式-不考虑 运转工况/mm	变化率/ %
浮尘	14.97	15.76	5.0
扬沙	55.85	66.55	16.1
弱沙尘暴	197.86	210.13	5.8
中等沙尘暴	297.96	321.31	7.3
强沙尘暴	—	142.71	—
特强沙尘暴	—	199.67	—

图 8 给出了两种风力机支撑结构考虑运转工况并在不同荷载条件下的水平位移沿塔高的位移变化图,从图中可以看出两个风力机在各个工况条件下的顺风方向位移从塔底至塔顶呈非线性增加。其中两个结构体系在浮尘环境下的顺风方向位移

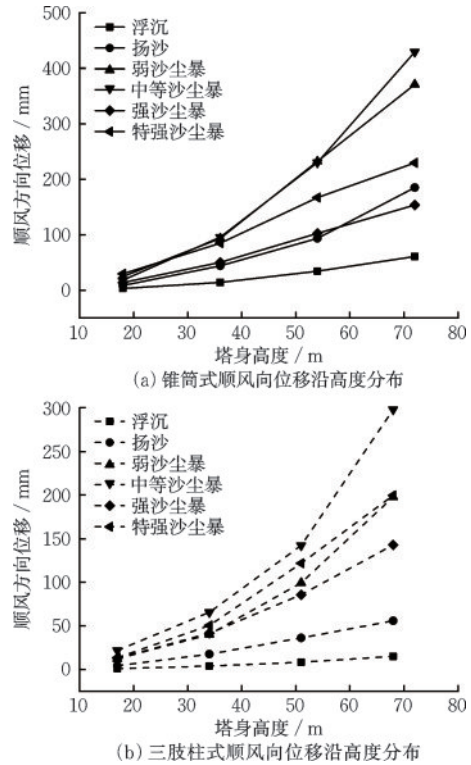


图 8 考虑运转工况的顺风方向塔身位移示意图

Fig.8 Schematic diagram of tower displacement in downwind direction considering operating conditions

变化的相对平稳,是因为在低风速条件下叶片为主要受力部件,叶片自身的刚度抵消了大部份外荷载作用,且支撑结构具备更大刚度,所以塔身位移变化趋势比较平缓,对比两个结构在浮尘环境下变化趋势也可看出,钢管混凝土格构式三肢柱的刚度要大于锥桶式钢结构支撑。表 4 和表 5 分别给出了两种风力机结构在不同风沙环境下考虑和不考虑风力机运转工况时分析所得到的支撑结构塔顶峰值水平加速度。可以看出,考虑运转工况时叶轮转动对两种结构体系在风沙环境下的加速度响应均有显著影响,对于锥桶式支撑结构,浮尘、扬沙、弱沙尘暴和中等沙尘暴天气下,考虑运转工况计算得到峰值加速度相较于不考虑运转工况时分别降低 7.9%、8.9%、11.4% 和 10.9%,对于三肢柱式风力机支撑结构,考虑运转工况后计算所得加速度响应的减小幅度总体上较锥桶式结构更为显著,除浮尘天气仅为 2.4% 外,扬沙、弱沙尘暴和中等沙尘暴天气下峰值加速度降低幅度分别为 28.4%、11.4% 和 17.7%。此外,由于强沙尘暴和特强沙尘暴天气条件下风力机处于停机状态,结构加速度响应显著减小。对比两种结构在相同荷载条件下的加速度响

表4 不同荷载工况下锥桶式风力机支撑结构塔顶峰值加速度对比

Table 4 Comparison of peak acceleration at top of conical wind turbine support structure under different load operating conditions

荷载工况	锥桶式-考虑 运转工况/ (mm·s ⁻²)	锥桶式-不考虑 运转工况/ (mm·s ⁻²)	变化率/ %
浮尘	107.54	116.7	7.9
扬沙	342.34	375.76	8.9
弱沙尘暴	645.62	728.74	11.4
中等沙尘暴	1 075.99	1 207.14	10.9
强沙尘暴	—	477.53	—
特强沙尘暴	—	629.90	—

表5 不同荷载工况下三肢柱式风力机支撑结构塔顶峰值加速度对比

Table 5 Comparison of peak acceleration at top of three-legged column wind turbine support structure under different load operating conditions

荷载工况	三肢柱-考虑 运行工况/ (mm·s ⁻²)	三肢柱-不考虑 运行工况/ (mm·s ⁻²)	变化率/ %
浮尘	32	32.34	2.4
扬沙	68.31	95.40	28.4
弱沙尘暴	360.78	407.39	11.4
中等沙尘暴	529.67	643.75	17.7
强沙尘暴	—	187.93	—
特强沙尘暴	—	357.73	—

应可知,锥桶式风力机支撑结构的峰值加速度显著高于三肢柱式支撑结构,如当考虑运转工况时,中等沙尘暴天气条件下,锥桶式风力机支撑结构的值加速度响应是三肢柱式支撑结构的2倍,通过上述结果表明由于钢管混凝土格构柱的自身刚度较大导致其风沙响应较小。

表6和表7分别给出了两种风力机结构在不同风沙环境下考虑和不考虑风力机运转工况时分析得到叶片的叶尖与叶根相对位移峰值和平均值,其中平均值与结构所受平均风速有关,从表中可以看到,两种结构在考虑运转工况时计算出的叶片相对位移峰值和平均值相较于不考虑运转工况时均将显著减小,且浮尘天气和扬沙天气时的降低幅度最为明显,对于锥桶式风力机,考虑运转工况时计算得到的叶片峰值相对位移相较于不考虑运转工况

表6 不同荷载工况下锥桶式风力机叶片的叶尖与叶根相对位移峰值(平均值)

Table 6 Peak relative displacement between tip and root of conical wind turbine blades under different load operating conditions (average value)

荷载工况	锥桶式-考虑 运转工况/ mm	锥桶式-不考虑 运转工况/ mm	变化率/ %
浮尘	45(17)	161(127)	72.0(86.6)
扬沙	183(55)	240(184)	23.8(70.1)
弱沙尘暴	290(126)	312(233)	7.1(45.9)
中等沙尘暴	484(254)	604(364)	19.9(30.2)
强沙尘暴	—	143(83)	—
特强沙尘暴	—	185(100)	—

表7 不同荷载工况下三肢柱式风力机叶片的叶尖与叶根相对位移峰值(平均值)

Table 7 Peak relative displacement between tip and root of three-legged column wind turbine blades under different load operating conditions (average value)

荷载工况	三肢柱-考虑 运行工况/ mm	三肢柱-不考虑 运行工况/ mm	变化率/%
浮尘	49.05(20.20)	183.25(159.86)	73.2(87.4)
扬沙	108.29(61.98)	277.97(218.79)	61.0(71.7)
弱沙尘暴	282.57(176.5)	369.54(212.3)	23.5(16.9)
中等沙尘暴	456.62(312.5)	650.53(376.3)	29.8(16.9)
强沙尘暴	—	165.30(103.38)	—
特强沙尘暴	—	236.73(133.56)	—

时降低72.0%、23.8%、7.1%和19.9%,平均值降低86.6%、70.1%、45.9%、30.2%,对于三肢柱式风力机,考虑运转工况时计算得到的叶片峰值相对位移相较于不考虑运转工况时降低73.2%、61.0%、23.5%和29.8%,平均值降低87.4%、71.1%、16.9%、16.9%。对比表2和表3中支撑结构的位移响应可知,叶轮旋转对叶片的影响显著高于支撑结构。

图9以中等沙尘暴环境(叶轮产生最大刚化效应)为例,给出了两种风力机考虑和不考虑运转工况时计算得到的叶根处应力时程曲线,从图中可以看到,由于考虑运转工况后计算出的叶片振动响应更小,叶根处应力也更小,说明不考虑叶片旋转将高估叶片振动响应和应力。故建议在今后对风电结构进行抗多灾害领域的研究时,应将刚化效应考虑在内。

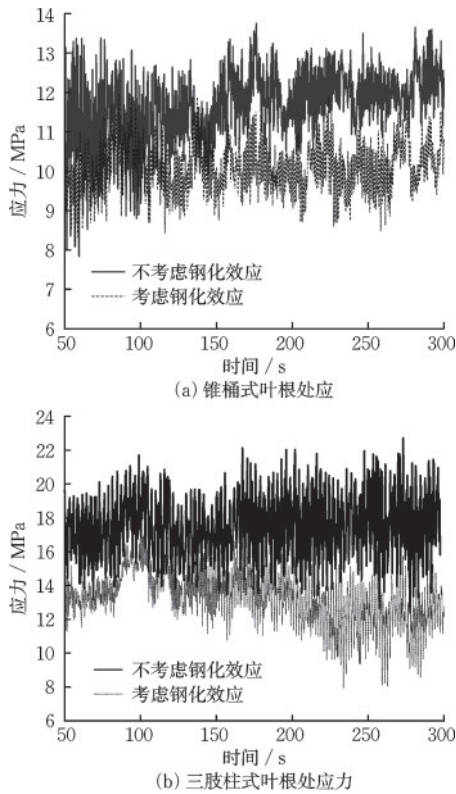


图9 两种风电结构考虑和不考虑刚化效应的叶根处某点应力时程曲线

Fig.9 Stress time history curves at a certain point at blade root of two types of wind turbine structures with and without consideration of stiffening effect

4 结 论

通过建立两种风电塔结构的静动分离一体化力学模型,对两种结构体系开展了在不同风沙环境下考虑运转工况的动力响应分析,提出了考虑不同程度刚化效应对不同结构抗风沙性能的影响规律,所得结论如下:

(1)锥桶式风力机支撑结构相较于三肢柱式支撑结构柔度更大,在考虑沙尘载荷后,两种支撑结构的位移响应和加速度响应均有增加。

(2)叶轮旋转产生的离心刚化效应对锥桶式支撑结构位移响应的影响较小,但对三肢柱式支撑结构的位移响应有较大影响,其中在扬沙天气下刚化效应对三肢柱结构影响最大,此时考虑运转工况的计算结果相比于不考虑运转工况降低16.1%。

(3)考虑叶轮旋转产生的离心刚化效应将导致两种结构体系计算出的塔顶加速度响应和叶片位移与应力响应显著降低,且根据研究的6种沙尘环

境,在低风速沙尘环境下考虑叶轮旋转效应比高风速环境下考虑旋转效应对支撑结构的影响更加显著。

(4)如果只关心结构在灾害载荷作用下的瞬态响应,刚化效应能增加整体的刚度并提升结构抗风沙性能,使风电结构在恶劣环境下可靠运行能力更强,但刚化效应在全寿命期间对不同结构体系的影响则有待进一步探究。

参 考 文 献:

[1] 李德顺,刘念爽,马高生,等. 风力机对沙尘运输影响的风洞试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(7):104-109.
Li D S, Liu N S, Ma G S, et al. Wind tunnel experimental study on the impact of wind turbines on sand and dust transport [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(7):104-109. (in Chinese)

[2] 刘新喜,邓宗伟,高乾丰. 基于时域法的不同塔架风力机抗台风分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(11):81-87.
Liu X X, Deng Z W, Gao Q F. Analysis of Typhoon Resistance of Wind Turbines with different towers based on time domain method [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2017, 44(11): 81-87. (in Chinese)

[3] 杨有福,刘敏,别雪梦. 四肢格构式钢管混凝土轴压构件承载力研究[J]. 建筑钢结构进展,2022,24(5):18-26.
Yang Y F, Liu M, Bi X M. Research on the bearing capacity of four limb lattice steel tube concrete axial compression members [J]. Progress in Building Steel Structures, 2022, 24(5):18-26. (in Chinese)

[4] 黄志,俞科辰,陈俊焯,等. 四肢钢管混凝土格构柱-箱梁节点抗震性能试验研究与优化分析[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(1):1-10.
Huang Z, Yu K C, Chen J Y, et al. Experimental study and optimization analysis of seismic performance of four limb steel tube concrete lattice column box beam joints [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 2024, 44(1):1-10. (in Chinese)

[5] 马跃强. 风力发电塔系统整体建模与模态分析研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2010,23(4):21-25.
Ma Y Q. Research on overall modeling and modal anal-

- ysis of wind power tower systems[J]. Journal of Shijiazhuang Railway University (Natural Science Edition), 2010, 23(4):21-25. (in Chinese)
- [6] 柯世堂,曹九发,王珑,等. 风力机塔架-叶片耦合模型风致响应时域分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(4):87-93.
Ke S T, Cao J F, Wang L, et al. Time domain analysis of wind induced response of wind turbine tower blade coupling model[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2014, 41(4):87-93. (in Chinese)
- [7] 戴靠山,赵志,易正翔,等. 运转工况下风电塔抗震分析[J]. 工程科学学报, 2017, 39(10):1598-1605.
Dai K S, Zhao Z, Yi Z X, et al. Seismic analysis of wind power towers under operating conditions [J]. Journal of Engineering Science, 2017, 39(10):1598-1605. (in Chinese)
- [8] 李万润,范科友,杜永峰. 考虑叶片旋转效应的风力发电塔架结构风-震耦合响应分析[J]. 工程力学, 2023, 40(4):193-204, 256.
Li W R, Fan K Y, Du Y F. Wind seismic coupling response analysis of wind power tower structures considering blade rotation effect [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(4):193-204, 256. (in Chinese)
- [9] 席仁强,许成顺,杜修力,等. 工作状态对风力发电机地震响应的影响[J]. 工程力学, 2019, 36(4):80-88.
Xi R Q, Xu C S, Du X L, et al. The influence of working state on the seismic response of wind turbines [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(4):80-88. (in Chinese)
- [10] 陈小波,李静,陈健云. 考虑离心刚化效应的旋转风力机叶片动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1):117-122.
Chen X B, Li J, Chen J Y. Analysis of dynamic characteristics of rotating wind turbine blades considering centrifugal stiffness effect [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1):117-122. (in Chinese)
- [11] 朱文智,程建军,张云鹏,等. 土堤式挡风墙加高挡板稳定性分析及研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(1):16-20.
Zhu W Z, Cheng J J, Zhang Y P, et al. Analysis and research on the stability of earth embankment wind-break wall with high dam board [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(1):16-20. (in Chinese)
- [12] Rao A, Curtis J S, Hancock B C, et al. Numerical simulation of dilute turbulent gas-particle flow with turbulence modulation [J]. Aiche Journal, 2012, 58(5):1381-1396.
- [13] 逯博,买买提明·艾尼,金阿芳,等. 基于SPH的风沙运动的数值模拟[J]. 力学学报, 2013, 45(2):177-182.
Lu B, Maimaiting A, Jin A F, et al. Numerical simulation of wind and sand movement based on SPH [J]. Journal of Mechanics, 2013, 45(2):177-182. (in Chinese)
- [14] 张卓群,李宏男,李士锋,等. 输电杆塔在风沙荷载激励下的动力响应分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(3):506-511.
Zhang Z Q, Li H N, Li S F, et al. Dynamic response analysis of transmission towers under wind and sand load excitation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(3):506-511. (in Chinese)
- [15] 蒲鸥,吴红华,李正农,等. 风沙对结构冲击作用的研究进展与展望[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2):146-161.
Pu O, Wu H H, Li Z N, et al. Research progress and prospects on the impact of wind and sand on structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 41(2):146-161. (in Chinese)
- [16] 李斌,吴益阳,高春彦. 不同腹杆形式三肢柱钢管混凝土格构柱滞回性能研究分析[C]//2021年工业建筑学术交流会议论文集. 北京:中冶建筑研究总院有限公司, 2021:394-398.
Li B, Wu Y Y, Gao C Y. Research and analysis on the hysteretic performance of three limb column steel tube concrete lattice columns with different web member forms [C]//Proceedings of the 2021 Industrial Architecture Academic Exchange Conference. Beijing: China Metallurgical Construction Research Institute Co., Ltd. 2021:394-398. (in Chinese)
- [17] 风力发电机组塔架:GB/T 19072—2022[S]. 北京:中国标准出版社, 2022.
- [18] 单光坤,王晓东,姚兴佳,等. 兆瓦级风力发电机组的稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2008(7):786-791.
Shan G K, Wang X D, Yao X J, et al. Stability analysis of megawatt level wind turbines [J]. Journal of Solar Energy, 2008(7):786-791. (in Chinese)
- [19] 黄盼盼,胡艳. 脉动风时程模拟及应用[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(5):158-161.
Huang P P, Hu Y. Simulation and application of pulsating wind time history [J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(5):158-161. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)

(下转第 378 页)