

兆瓦级水平轴风力机叶片铺层设计参数影响分析

张立, 闫阳天, 李春, 刘青松

(上海理工大学 能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要:为研究主梁材料及铺层角度对风力机叶片结构特性影响,基于三维建模软件NX二次开发建立风力机叶片几何模型,结合铺层设计并通过CFD方法获取叶片表面压力分布,采用有限元方法对叶片进行结构模态、强度及屈曲分析。结果表明:碳纤维主梁叶片质量较玻璃钢减轻约8.08%,主梁材料对模态振型影响较小,主梁铺层角度对挥舞方向运动影响更大;0°铺层主梁叶片共振破坏风险低且应力应变峰值均最小,碳纤维主梁叶片较玻璃钢应力及应变峰值降幅最大约20.57%、26.51%;主梁0°铺层时叶片屈曲因子最大,而60°铺层时最小,碳纤维主梁叶片较玻璃钢临界屈曲载荷增幅最大约17.84%,有效降低屈曲失稳风险;额定工况下,叶片局部屈曲域在近叶尖处尾缘区和近叶根处最大弦长截面前缘区。

关键词:风力机叶片;参数化建模;结构特性;模态;屈曲

中图分类号:TK83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.06.020

[引用本文格式]张立,闫阳天,李春,等.兆瓦级水平轴风力机叶片铺层设计参数影响分析[J].热能动力工程,2021,36(6):133-142. ZHANG Li, YAN Yang-tian, LI Chun, et al. Analysis on the influence of layup design parameters of megawatt horizontal axis wind turbine blades[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6):133-142.

Analysis on the Influence of Layup Design Parameters of Megawatt Horizontal Axis Wind Turbine Blades

ZHANG Li, YAN Yang-tian, LI Chun, LIU Qing-song

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to study the influence of spar cap's material and ply orientation angle on the structure characteristics of wind turbine blades, the model of wind turbine blades is established based on the secondary development of three-dimensional modeling software NX, combined with layup design and obtained the surface pressure distribution of the blades by CFD method. The finite element method is used to analyze the structural modal, strength and buckling of the blades. The results show that the weight of the blade with CFRP in spar cap is reduced by about 8.08% compared with GFRP in spar cap. The spar cap's material has less effect on the modal vibration mode. The ply orientation angle of the spar cap has a greater impact on the flapping direction of the blade. The 0° laminating of spar cap can reduce the risk of blade resonance damage and has the smallest maximum stress and strain. The maximum stress and strain of the blade with CFRP in spar cap are reduced by about 20.57% and 26.51%, lower than those of GFRP. The blade buckling factor is the largest when the spar cap is laid at 0°, and the smallest when the spar cap is laid at 60°. Compared with GFRP in spar cap, the blade with CFRP in spar cap can increase

收稿日期:2020-09-04; 修订日期:2020-09-17

基金项目:国家自然科学基金(51976131, 51676131);上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51976131, 51676131); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介:张立(1993-),男,上海人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:李春(1963-),男,北京人,上海理工大学教授。

the critical buckling load by up to 17.84%, and effectively reduce the risk of buckling failure. Under rated conditions, the local buckling region of the blade is located at the trailing edge near the blade tip and the leading edge of the maximum chord section near the blade root.

Key words: wind turbine blade, parametric modeling, structural characteristics, modal, buckling

引 言

风力机叶片作为捕获风能的核心部件,其结构性能优劣将直接影响风力机使用寿命及发电效率^[1]。叶片的质量转强度高亦是提高风力机单机功率的必要条件^[2]。叶片质量增加,旋转产生的重力交变载荷不仅会对叶片、机舱、轮毂及塔架等产生负面影响,还将对叶片运输、安装、维护及拆卸等各环节造成不利影响^[3]。因此,通过采用新型材料及优化铺层结构等措施实施叶片轻量化设计势在必行。因复合材料具有质量轻、比强度高、耐疲劳及耐腐蚀等优势而被广泛采用,现代大型风力机叶片多采用玻璃纤维、碳纤维等复合材料制造。

目前,国内外学者针对复合材料风力机叶片开展了诸多研究。SCOTT S 等人^[4]分别建立了材料耦合及几何-材料耦合叶片模型,对比分析不同弯扭耦合叶片对于减载、发电量和变桨系统等影响。BOTTASSO C L 等人^[5]基于气动弹性剪裁方法,研究比较部分材料耦合及全材料耦合叶片对减载能力的影响。LOBITZ 等人^[6]将弯扭耦合叶片与主动变桨控制系统结合,基于叶片结构多级分析模型研究两者组合后的叶片降载性能。LAGO L I 等人^[7]采用开源软件 FAST 对几何耦合叶片进行气动弹性分析,研究该叶片对于缓解载荷剧烈震荡及减少风力机主要部件结构疲劳的影响。文献[8]考虑叶片离心刚化及气动阻尼作用,通过自编有限元程序研究叶片弯曲振动的固有动力特性及动态响应。文献[9]基于气动弹性剪裁并采用节点位移法,研究铺层结构对弯扭耦合叶片整体结构特性影响。

现有研究中结构响应计算时常采用线性梁模型,其基于小变形及低旋转运动学假设^[10],无法获取详细叶片结构信息,如叶片结构不稳定屈曲及复合材料纤维断裂^[11]等。气动载荷计算采用叶素动量理论,忽略叶片展向流动,且无法提供详细气动信息,如叶片周围流场可视化及风力机尾迹特性^[12]

等。忽略重力载荷作用,叶片长度随风力机大型化发展不断增加,而叶片质量与长度呈立方关系急剧增加^[13]。NREL 最新发布的 15 MW 叶片质量已达 65 t^[14],可见重力载荷不可忽略。

基于此,以 NREL 5 MW 参考风力机叶片为研究对象,通过对三维建模软件 NX 的二次开发,建立三维叶片几何模型,结合铺层设计并采用 CFD 方法计算叶片表面压力分布,研究主梁材料及铺层角度对其结构模态、强度及屈曲的影响。

1 计算方法及叶片建模

1.1 计算方法

采用数值仿真软件 ANSYS 中 CFX 和 Mechanical 模块分别求解流体侧及结构侧,将流体侧叶片表面压力分布加载至结构侧有限元模型后,结合有限元方法对其进行结构响应计算,分析过程如图 1 所示。

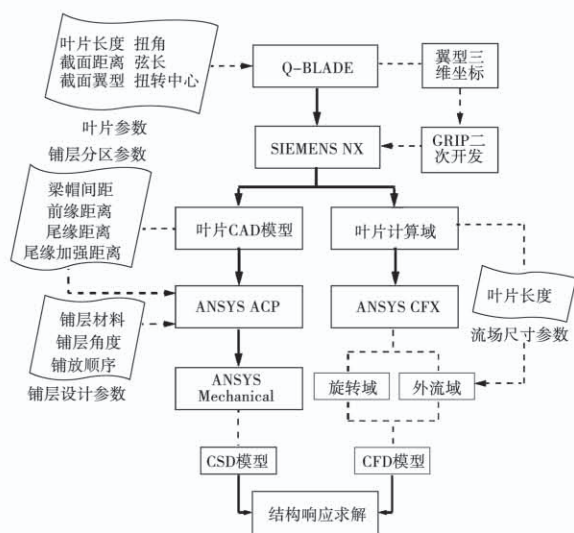


图 1 分析流程图

Fig. 1 Flowchart of analysis process

1.2 叶片模型参数

以美国可再生能源实验室公开的 5 MW 风力机样机作为研究对象^[15],基本参数如表 1 所示。

表 1 NREL 5 MW 风力机参数

Tab.1 Parameters of NREL 5 MW wind turbine

参 数	数 值
额定功率/MW	5.0
额定风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	11.4
额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	12.1
叶片长度/m	61.5
机舱长度/m	14.286
轮毂质量/kg	56 780
切入风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3.0
切出风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	25.0
风轮直径/m	126
叶片质量/kg	17 740
机舱高度/m	3.5
塔架质量/kg	347 000

NREL 5 MW 风力机叶片由 6 种翼型设计而成,翼型参数如表 2 所示。叶片沿展向分为气动区、过渡区及叶根区,叶尖区选用 NACA 翼型以获得更大气动力,近叶根区选用 DU 翼型保证叶片根部的结构刚度,叶根采用圆截面以与轮毂更好的连接。叶片内部布置双腹板以承受叶片所受剪切与扭转力矩,腹板始于距叶根 1.37 m 处,止于距叶根 60.13 m 处^[16]。

表 2 风力机叶片参数

Tab.2 Parameters of wind turbine blade

序号	风轮半径/m	叶片截面翼型	扭角/°	弦长/m	扭转中心
1	1.5	Cylinder	13.308	3.386	0.5
2	2.87	Cylinder	13.308	3.386	0.5
3	11.75	DU 4050	13.308	4.557	0.38
4	15.85	DU 35	11.48	4.652	0.36
5	24.05	DU 97 - W - 300	9.011	4.249	0.35
6	28.15	DU 91 - W2 - 250	7.795	4.007	0.35
7	32.25	DU 91 - W2 - 250	6.544	3.748	0.35
8	36.35	DU 93 - W - 210	5.361	3.502	0.35
9	40.35	DU 93 - W - 210	4.188	3.256	0.35
10	44.55	NACA 64 - 618	3.125	3.010	0.35
11	48.65	NACA 64 - 618	2.319	2.764	0.35
12	52.75	NACA 64 - 618	1.526	2.518	0.35
13	56.17	NACA 64 - 618	0.863	2.313	0.35
14	58.90	NACA 64 - 618	0.37	2.086	0.35
15	61.63	NACA 64 - 618	0.106	1.419	0.35
16	63	NACA 64 - 618	0	0	0.35

1.3 叶片建模

鉴于不同兆瓦级叶片建模存在一定相似性,为此采用 NX/Open Grip 语言对三维 CAD 软件 NX 进行二次开发,建立风力机翼型数据库,内置 NREL - S、DU、NACA、Riso 及 FFA - W 系列等常用翼型,可实现叶片几何模型的快速构建。图 2 为运用 NX/Open Grip 语言对风力机叶片参数化建模的流程图。

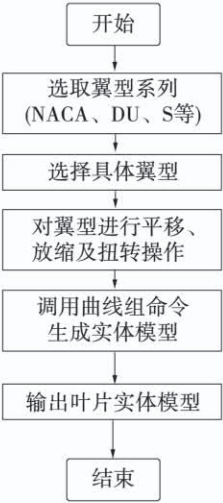


图 2 二次开发程序流程图

Fig.2 Flow chart of secondary development program

选取翼型类型并进行平移、放缩及扭转后,可确定此翼型展向位置、弦长及扭角,自动调用 NX 内部曲线组命令后可获得叶片几何模型。较之现有 Nu-MAD、GH Blade 等叶片建模软件,该参数化建模程序可导出多种通用格式,以便进行相应的结构及流场分析等,可大幅度提高叶片建模效率且通用性较好。图 3 为 NX 参数化建模程序创建的风力机叶片几何模型。

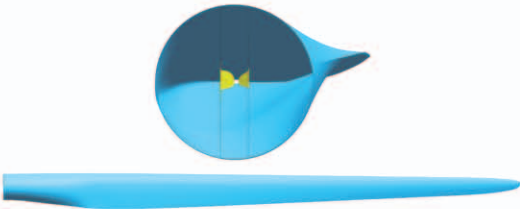


图 3 叶片几何模型

Fig.3 Model of the blade

2 叶片气动载荷求解

2.1 湍流模型

湍流数值模拟方法主要分为直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)和基于时均统计的雷诺时均法(RANS)等。其中,DNS和LES方法需占用大量计算资源,对计算性能要求较高,实际工程应用中较少使用。因此计算量相对较小的RANS法在实际工程应用中占主导地位。RANS法需用湍流模型以使N-S方程封闭,此法在N-S方程基础上增加粘性项,不同子模型对粘性项处理不同。其中,SST $k-\omega$ 湍流模型被誉为目前最适合风力机流场特征的湍流模型。Johansen等人^[17]研究发现风力机气动载荷模拟中,SST $k-\omega$ 湍流模型和DES-SST $k-\omega$ 湍流模型的计算结果无显著区别。因此采用SST $k-\omega$ 湍流模型模拟叶片气动载荷。

2.2 计算域及网格划分

叶片流场计算域分为外流域与旋转域,参考文献[9]设置计算域进、出口长度及展向长度。流场入口设为速度入口(取额定速度11.4 m/s),流场出口设为压力出口(取出口静压为0 Pa),计算域两侧矩形区设为周期性边界,旋转域施加转速以模拟叶片旋转(取额定转速12.1 rpm),叶片表面设为无滑移壁面,计算域及边界条件如图4所示。

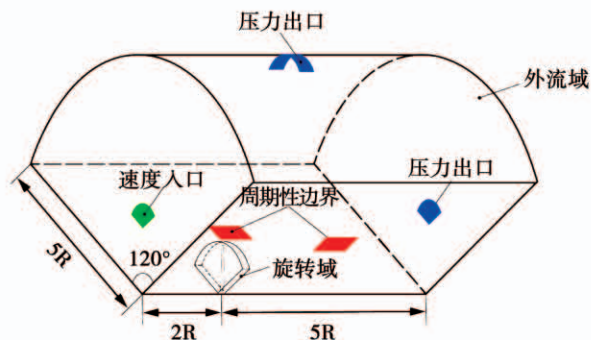


图4 流场计算域及边界条件

Fig.4 Computational domain and boundary condition

叶片表面为重点分析对象,故需对其表面及附近网格进行加密。较之旋转域,外流域对最终计算结果影响较小,因此可适当加大网格尺寸,减小计算资源占用。边界层取20层,近壁面网格高度取

0.000 5 m,叶片壁面网格取0.2 m,旋转及外流域网格分别取0.5和6 m,划分网格后整体网格正交质量为0.887 28,可满足数值模拟计算要求,网格数约1 900万。

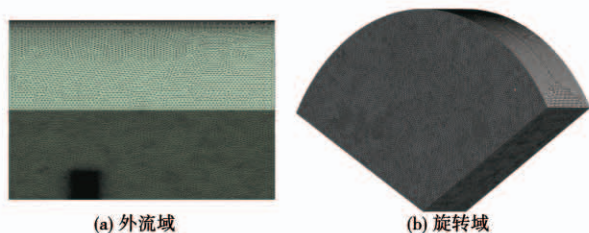


图5 流场网格划分

Fig.5 Meshing of fluid domain

3 叶片铺层设计

纤维增强复合材料基本元素为层合板,其由多层单层板叠合而成,单层板的纤维类型、铺层方向、铺层厚度及铺层顺序将影响层合板力学性能^[18]。为对叶片进行铺层设计,借助ANSYS中的复合材料模块(ACP),采用适用于层合板线性、非线性及大扭转分析的SHELL181单元,铺设层数最多可达250层,通过设置调整真实叶片厚度距离偏置和层压板铺层角度,共计划分网格节点数为93 251,网格单元数为94 747,网格划分如图6所示。

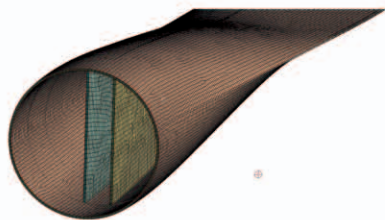


图6 结构网格划分

Fig.6 Meshing of the structure

风力机叶片上下表面采用对称式铺层方法^[9]。铺层方案:(1)叶片表面及双腹板两侧铺设蒙皮,为三明治夹心结构;(2)前缘镶板、尾缘镶板及腹板核心层为PVC泡沫;(3)主梁核心层分别采用碳纤维及玻璃钢;(4)尾缘加强核心层为玻璃钢和PVC泡沫两种;(5)为加强叶根性能,在叶片根部铺设有多层三轴向蒙皮;(6)为防止叶片受紫外线长期照射

而老化,并避免其受海洋环境腐蚀,外表面铺设一层具有良好附着力、高弹性、耐磨性和低吸水性 的胶衣。叶片具体铺层如图 7 所示,其中各区域左侧材料为外层铺层材料。

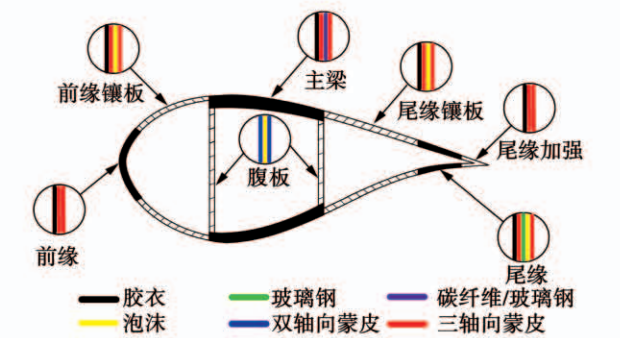


图 7 叶片截面铺层分区

Fig. 7 Cross section and laminated structure of the blade

叶片铺层材料主要力学性能参数如表 3 所示^[19]。其中, E_x 、 E_y 分别为叶片展向、弦向弹性模量, G_{xy} 为展弦面剪切模量, ν_{xy} 为展弦面泊松比, ρ 为层合板材料密度, UCS_L 为极限纵向抗压强度, UTS_L 为极限纵向拉伸强度。层合板展向厚度变化如图 8 所示。

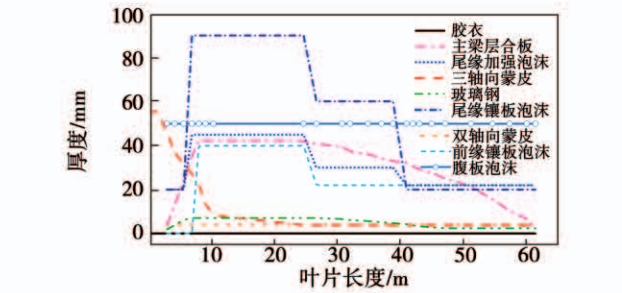


图 8 叶片展向层合板厚度

Fig. 8 Thickness of laminate layers along spanwise of the wind turbine blade

表 3 层合板材料力学性能

Tab. 3 The mechanical properties of laminate									
层合板	材料	E_x /GPa	E_y /GPa	G_{xy} /GPa	ν_{xy}	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	UCS_L	UTS_L	
胶衣	Gelcoat	3.44	3.44	1.38	0.3	1 235	—	—	
玻璃钢	E-LT-5500(UD)	41.80	14.00	2.63	0.28	1 920	702	972	
碳纤维	Carbon(UD)	114.50	8.39	5.99	0.27	1 220	1 047	1 546	
泡沫	Foam	0.256	0.256	0.022	0.3	200	—	—	
双轴向蒙皮	Saertex(DB)	13.60	13.30	11.80	0.49	1 780	213	144	
三轴向蒙皮	SNL(Triax)	27.7	13.65	7.2	0.39	1 850	\	700	

玻璃钢及碳纤维主梁叶片质量分别为 18 876 和 17 351 kg。采用碳纤维作为主梁铺层材料后,叶片整体质量降低 8.08%,近 1 525 kg。两者均与 NREL 5 MW 理论质量较为接近,误差分别为 6% 和 2%,可见复合材料叶片模型较接近真实情况。

4 结果与分析

风力机叶片受气动载荷、离心载荷及重力载荷等同时作用,其中重力载荷为周期性载荷,文献[20]以 y 轴正方向施加重力加速度。叶片主梁作为其主要承载结构,主梁部分通常采用玻璃钢或碳纤维且为单向复合材料层,故主梁铺层角度 θ 以 15° 为间隔从 0° 变化至 90° ,定义如图 9 所示。

4.1 模态分析

模态指与外部条件无关的结构固有属性,如固有频率、振型及阻尼比等。对模态参数进行实验及计算分析的过程称模态分析^[21]。



图 9 叶片主梁铺层角度

Fig. 9 Ply orientation angle of spar cap of the blade

风力机叶片的固有频率是重要性能参数,可验证设计叶片的内部振动性能。若固有频率与激励频率较为接近或重合,将产生共振并造成一定破坏^[22]。为此在固体域中将叶片根部添加完全约束,

分别获得玻璃钢与碳纤维主梁叶片前六阶固有频率,并以 $\theta=0^\circ$ 叶片为例与文献[23]所获固有频率对比,如图 10 所示。

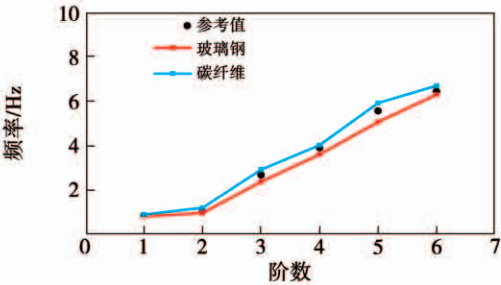


图 10 叶片固有频率

Fig. 10 The natural frequency of the blades

由图 10 可见,玻璃钢主梁叶片各阶频率均低于碳纤维主梁叶片,对比参考文献结果,三者数值较为吻合且趋势一致,可知所建复合材料叶片模型准确可信。由表 1 可知,NREL 5 MW 风力机额定转速为 12.1 r/min,则其对应的叶片旋转频率 1P、通过频率 3P 分别为 0.202 和 0.605 Hz。而玻璃钢及碳纤维主梁叶片一阶固有频率分别为 0.815 1 和 0.898 9 Hz,两者均与 1P、3P 频率相差大于 10%,可判断叶片不会发生共振破坏。

图 11 为 $\theta=0^\circ$ 玻璃钢及碳纤维主梁叶片前六阶振型。其中,一阶振型为挥舞振动,二阶振型为摆振振动,三、四阶振型为二阶挥舞及摆振振动,五阶振型为三阶挥舞振动,六阶振型首次出现扭转振动,可见该叶片抗扭转能力较强。此外,前五阶均属弯曲振动,表明弯曲振动为引起叶片疲劳破坏的主因。两叶片主梁材料有所不同,但模态振型仍较为相似,仅第三阶振型略有不同。由于碳纤维密度较小,碳纤维主梁叶片模态相对位移略大于同阶玻璃钢主梁叶片。

图 12 为不同铺层角度主梁叶片固有频率相对变化量,分别以相应材料 $\theta=0^\circ$ 叶片固有频率为基准。采用玻璃钢作为主梁铺层材料时,随铺层角度增加,各阶固有频率先下降后上升, $\theta=45^\circ$ 时叶片各阶固有频率降幅最大,约 14.0%。较之玻璃钢,主梁铺层材料选用碳纤维时,各阶固有频率变化趋势不同,其随铺层角度增加不断下降, $\theta=90^\circ$ 时降幅最

大,较之 0° 铺层降幅最大约 24.8%。这主要是由于主梁铺层角度的变化使叶片整体抗弯刚度改变,进而影响叶片结构刚度矩阵,最终影响叶片模态参数。此外,铺层角度变化对叶片二、三、五阶固有频率影响较大,而三阶及五阶模态振型为挥舞振动,表明铺层角度对挥舞方向运动较为敏感。同时, $\theta=0^\circ$ 叶片一阶频率最高,其与叶片 1P 及 3P 相差最大,因此对叶片进行铺层设计时,从模态方面考虑,主梁材料铺层角度应选用 0° ,以尽可能远离激励频率变化范围,减小叶片共振破坏风险。



图 11 叶片前六阶振型

Fig. 11 First six vibration modes of the blades

4.2 强度分析

对叶片进行强度分析,可从整体上分析叶片结构应力应变分布规律,为叶片铺层设计作一定参考。图 13 为各铺层角度下玻璃钢及碳纤维主梁叶片表面最大应力及应变值。

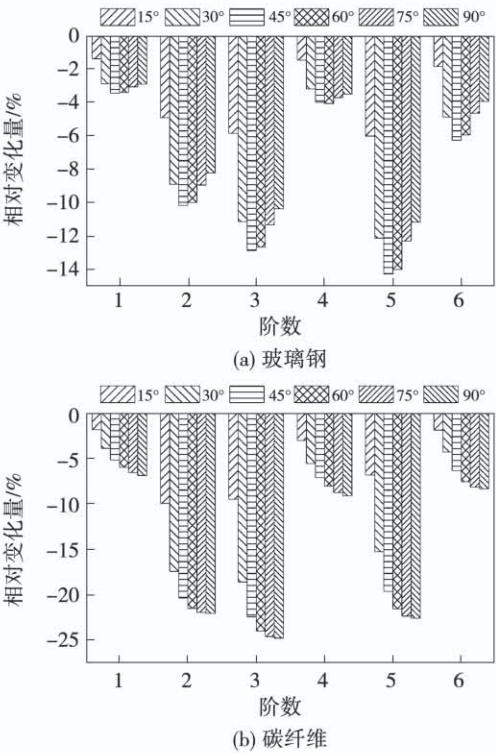


图 12 不同铺层角度下固有频率相对变化量
Fig. 12 Relative variation in natural frequency with different ply orientation angles

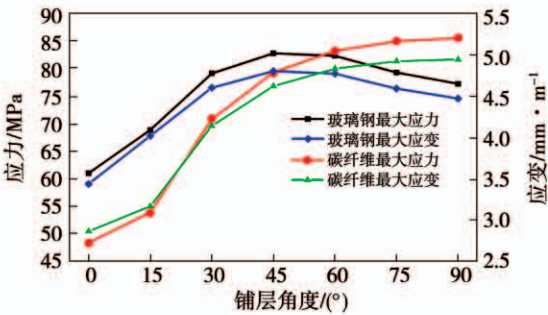


图 13 不同铺层角度下叶片表面最大应力及应变值
Fig. 13 Maximum stress and maximum stain of blades' surface with different ply orientation angles

由图 13 可知:当 $\theta \leq 45^\circ$ 时,采用碳纤维作为主梁材料可有效降低叶片表面最大应力及应变值,最大降幅为 21.71% ($\theta = 0^\circ$);当 $\theta \geq 60^\circ$ 时,较之玻璃钢,碳纤维主梁叶片表面最大应力及应变值均有一

定上升, $\theta = 90^\circ$ 时最大提升约 10.7% 及 10.4%。同种主梁材料下,玻璃钢主梁叶片表面最大应力及应变均随铺层角度先增加后减小,而碳纤维主梁叶片最大应力及应变与铺层角度呈正相关, $\theta = 90^\circ$ 时其最大应力及应变分别增加 76.26% 及 71.90%。

叶片主梁部分铺层材料改变不仅会引起表面应力应变变化,还将对腹板应力应变产生一定影响。图 14 为各铺层角度下玻璃钢及碳纤维主梁叶片腹板最大应力及应变值,其中最大应力及应变均位于靠近前缘腹板处(15% 弦长处)。碳纤维替代玻璃钢作为主梁材料后,腹板最大应力及应变值变化趋势与表面相同。 $\theta \leq 45^\circ$ 时,碳纤维主梁叶片有效降低腹板最大应力及应变值,最大降幅为 26.25% 及 20.59% ($\theta = 0^\circ$)。 $\theta \geq 60^\circ$ 时,碳纤维主梁叶片最大应力及应变值均有一定上升,最大增幅为 9.31% 及 13.7%。同种主梁材料下,玻璃钢主梁叶片腹板最大应力及应变随铺层角度增加先增大后减小,而碳纤维主梁叶片腹板随铺层角度增加逐渐增大。碳纤维主梁叶片随铺层角度变化最大,应力及应变值最大增幅约 83.93% 及 86.17% ($\theta = 90^\circ$)。综上, 0° 铺层的碳纤维主梁叶片结构整体最大应力及应变值均最小,叶片结构性能明显增强。

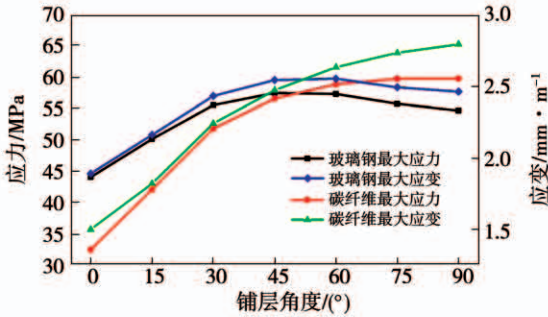


图 14 不同铺层角度下叶片腹板最大应力及应变值
Fig. 14 Maximum stress and maximum stain of blades' webs with different ply orientation angles

4.3 屈曲分析

细长结构受外载荷作用,未达到强度极限而产生侧弯或坍塌称为屈曲。通过屈曲分析可获得结构内部抵抗力间的不稳定状态。较之叶片强度不足导致的断裂失效及疲劳失效,叶片结构屈曲失稳失效更为重要^[24]。故有必要对叶片结构进行屈曲稳定性分析,确定叶片屈曲失稳的临界屈曲载荷。表 4 及表 5 为玻璃钢及碳纤维主梁叶片前 6 阶屈曲

因子。

表 4 玻璃钢主梁叶片屈曲因子

Tab.4 Buckling factors of the blades with GFRP in spar cap

阶数	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1 阶	2.164	2.159	2.134	2.058	2.020	2.047	2.115
2 阶	2.175	2.166	2.139	2.065	2.028	2.057	2.124
3 阶	2.653	2.473	2.307	2.254	2.271	2.322	2.346
4 阶	2.672	2.484	2.315	2.261	2.277	2.329	2.354
5 阶	2.676	2.578	2.373	2.301	2.311	2.369	2.404
6 阶	2.689	2.581	2.375	2.302	2.313	2.371	2.406

表 5 碳纤维主梁叶片屈曲因子

Tab.5 Buckling factors of the blades with CFRP in spar cap

阶数	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1 阶	2.550	2.431	2.264	2.190	2.166	2.178	2.195
2 阶	2.564	2.441	2.269	2.194	2.171	2.184	2.202
3 阶	3.155	2.992	2.738	2.566	2.488	2.452	2.442
4 阶	3.161	3.017	2.749	2.574	2.494	2.457	2.446
5 阶	3.553	3.104	2.775	2.625	2.526	2.481	2.467
6 阶	3.574	3.120	2.797	2.627	2.528	2.484	2.470

由表 4 及表 5 可知,玻璃钢及碳纤维主梁叶片屈曲因子均随阶次升高而逐渐增大。据 GBT 25383-2010 标准^[25]所述,当稳定性分析为线性分析时,

应附加安全系数 1.25,而对叶片各铺层角度一阶屈曲因子附加 1.25 的安全系数后其值仍大于 1,即叶片所受初始载荷 F_0 均未达到临界屈曲载荷 F_{cr} ,可判断玻璃钢及碳纤维主梁叶片均不会产生整体屈曲失稳现象。相同铺层角度下,由于碳纤维优良的力学性能,碳纤维主梁叶片各阶屈曲因子均大于玻璃钢主梁叶片对应阶屈曲因子,其中 $\theta = 0^\circ$ 时屈曲因子增大最为明显, $\theta = 90^\circ$ 时玻璃钢及碳纤维主梁叶片屈曲因子最为接近,即采用碳纤维替代玻璃钢作为主梁铺层材料后,叶片临界屈曲载荷最多可提高约 17.84% ($\theta = 0^\circ$),进一步提高叶片稳定性。同种主梁材料下,叶片屈曲因子均随铺层角度增大而先减小后增加,但 $\theta = 90^\circ$ 时屈曲因子仍小于 $\theta = 0^\circ$,可知铺层角度会影响叶片抗屈曲能力。从屈曲稳定性方面考虑, 0° 铺层的碳纤维主梁叶片性能最优,可提高叶片临界屈曲载荷,降低屈曲失稳风险。

由两种叶片屈曲因子可见,叶片均不会发生整体屈曲失稳,但仍可能出现局部屈曲现象,可能会进一步引起整个叶片结构不稳定,局部屈曲亦是诱发叶片结构失效最常见原因之一^[26]。为分析叶片局部屈曲域,以 $\theta = 0^\circ$ 及 $\theta = 90^\circ$ 下玻璃钢及碳纤维主梁叶片为例,分别导出前三阶屈曲模态图,如图 15 所示。

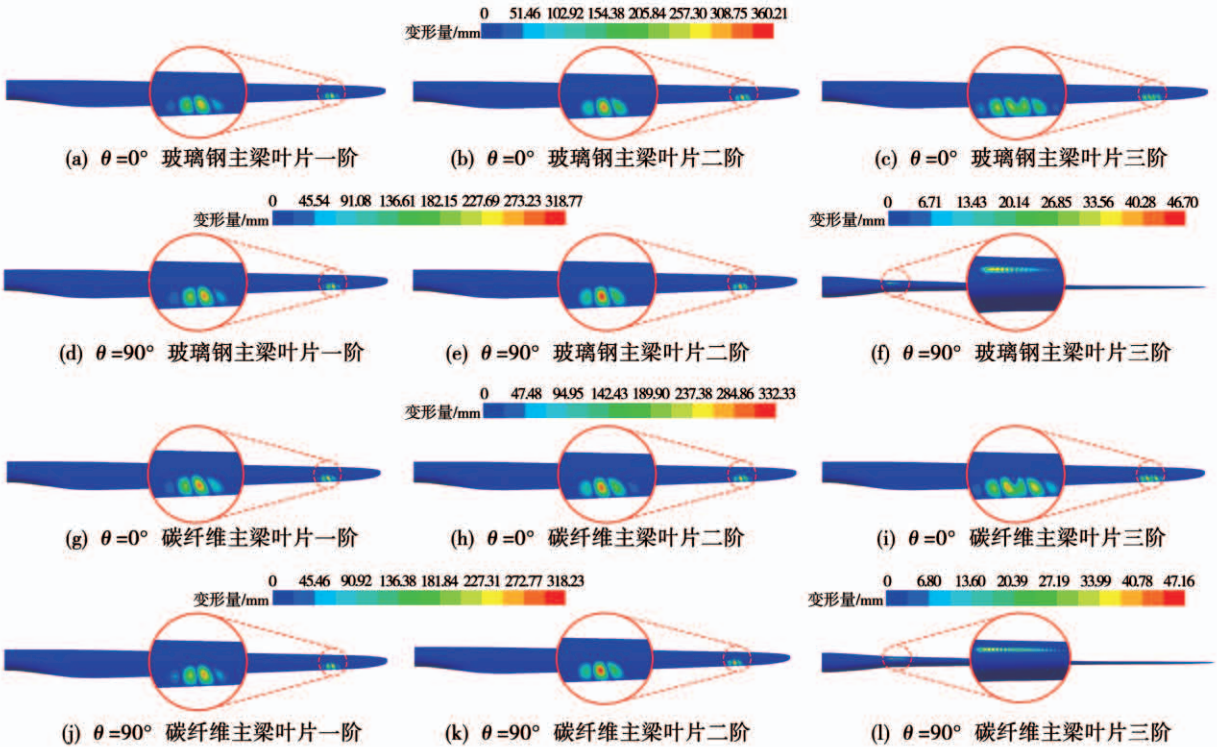


图 15 叶片屈曲模态

Fig.15 Buckling modes of the blades

由图 15 可知,随着屈曲阶数升高,叶片局部屈曲区域面积也有一定增大。由于叶片主梁并非其局部屈曲区域,玻璃钢及碳纤维主梁叶片各阶屈曲模态均类似,可知主梁材料对叶片屈曲模态影响相对较小。较之玻璃钢,碳纤维主梁叶片各阶最大屈曲变形量均有一定减小。除 $\theta = 90^\circ$ 叶片三阶屈曲模态外,叶片易屈曲区域主要集中于距叶尖 $1/7$ 处的尾缘区域,此处叶片厚度较薄,难以铺设足够材料保证其强度,同时此处为吸力面及压力面的粘合连接处,属风力机叶片最薄弱区域,受外载荷作用时易发生局部屈曲失稳。而主梁材料以 90° 铺层时,叶片三阶局部屈曲区域集中于近叶根处最大弦长截面前缘区,最大变形量分别为 46.70 及 47.16 mm,均低于其他阶屈曲最大变形量。此区域叶片弦长较长,几何外形及刚度急剧变化,且前缘与主梁间空腔宽且缺少一定支撑,导致此处易于发生失稳。因此对 NREL 5 MW 叶片进行结构设计时,应重点关注这两处局部屈曲区域,通过对其采取一定优化设计,增强叶片整体结构的抗屈曲能力。

5 结 论

以 NREL 5 MW 参考风力机叶片为研究对象,基于建模软件 NX 二次开发建立几何模型,通过 CFD 方法求解叶片气动载荷,并结合铺层设计分析主梁材料及铺层角度对叶片结构特性影响,得出结论:

(1) 较之玻璃钢,碳纤维主梁叶片质量减轻约 8.08%,达 1 525 kg。玻璃钢及碳纤维主梁叶片模态振型相似,弯曲振动是引起叶片疲劳破坏的主因,第六阶振型时叶片出现扭转振型,该铺层叶片抗扭转能力较强。

(2) 较之玻璃钢,碳纤维主梁叶片各阶频率均有一定提升。主梁铺层角度会对叶片模态参数产生一定影响,且对挥舞方向运动影响较大。主梁采用 0° 铺层可使叶片远离激励频率范围,降低叶片共振破坏风险。

(3) 主梁铺层角度会对叶片最大应力及应变产生影响,主梁采用 0° 铺层的叶片整体结构应力及应变均最低,而采用碳纤维其下降更为明显,最大应力及应变最大降幅约 20.57% 及 26.51%,叶片结构性

能明显增强。

(4) 主梁铺层角度会对叶片屈曲因子产生影响, $\theta = 0^\circ$ 时屈曲因子最大, $\theta = 60^\circ$ 时屈曲因子最小。 0° 时,采用碳纤维作为主梁材料最多可使叶片临界屈曲载荷提高 17.84%,可有效降低屈曲失稳风险。

(5) 额定工况下,叶片仅发生局部失稳现象,局部屈曲区域主要在近叶尖处尾缘区和近叶根处最大弦长截面前缘区,结构设计时应重点关注这些区域,增强结构抗屈曲能力。

参考文献:

- [1] 李 春,叶 舟,高 伟,等.现代大型风力机设计原理[M].上海:上海科学技术出版社,2013.
LI Chun, YE Zhou, GAO Wei, et al. Modern large-scale wind turbine design principle[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013.
- [2] 戴春晖,刘 钧,曾竟成,等.复合材料风电叶片的发展现状及若干问题的对策[J]. 玻璃钢/复合材料,2008(1):54-57.
DAI Chun-hui, LIU Jun, ZENG Jing-cheng, et al. Current development of composite wind turbine blades and proposals to several problems[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(1): 54-57.
- [3] 胡燕平,戴巨川,刘德顺.大型风力机叶片研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报,2013,49(20):140-151.
HU Yan-ping, DAI Ju-chuan, LIU De-shun. Research status and development trend on large scale wind turbine blades[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 140-151.
- [4] SCOTT S, CAPUZZI M, LANGSTON D, et al. Effects of aeroelastic tailoring on performance characteristics of wind turbine systems[J]. Renewable Energy, 2017, 114: 887-903.
- [5] BOTTASSO C L, CAMPAGNOLO F, CROCE A, et al. Optimization based study of bend-twist coupled rotor blades for passive and integrated passive/active load alleviation[J]. Wind Energy, 2013, 16(8): 1149-1166.
- [6] LOBITZ D, LAINO D. Load mitigation with twist-coupled HAWT blades[C]. 1999 ASME wind energy symposium. 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno., 1999: 112.
- [7] LAGO L I, PONTA F L, OTERO A D. Analysis of alternative adaptive geometrical configurations for the NREL-5 MW wind turbine blade[J]. Renewable Energy, 2013(59): 13-22.
- [8] 刘 雄,李钢强,陈 严,等.水平轴风力机叶片动态响应分析[J]. 机械工程学报,2010,46(12):128-134.
LIU Xiong, LI Gang-qiang, CHEN Yan, et al. Dynamic response analysis of the blade of horizontal axis wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 128-134.

- [9] 刘宇航,王渊博,李 春,等.应用于气动弹性剪裁的大型风力机叶片弯扭耦合性能研究[J]. 动力工程学报,2018,38(12): 1016-1021.
- LIU Yu-hang, WANG Yuan-bo, LI Chun, et al. Research on bend-twist coupling properties of twisted composite blades for large wind turbines based on aeroelastic tailoring[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(12): 1016-1021.
- [10] SABALE A K, GOPAL N K V. Nonlinear Aeroelastic Analysis of Large Wind Turbines Under Turbulent Wind Conditions[J]. AIAA Journal, 2019, 57(10): 1-17.
- [11] TANG J, CHEN X. Experimental investigation on ultimate strength and failure response of composite box beams used in wind turbine blades[J]. Composite Structures, 2018, 198: 19-34.
- [12] ZHE Ma, PAN Zeng, LI Pinglei. Analysis of the coupled aeroelastic wake behavior of wind turbine[J]. Journal of Fluids and Structures, 2019, 84: 466-484.
- [13] MENON M. . The role of active flow-control devices in the dynamic aeroelastic response of wind turbine rotors[D]. Houghton; Michigan Technological University, 2017.
- [14] GAERTNER E, RINKER J, SETHURAMAN L, et al. Definition of the IEA wind15-megawatt offshore reference wind turbine[R]. Golden; National Renewable Energy Laboratory, 2020.
- [15] 张 立, 丁勤卫, 李 春, 等. 风波耦合作用下风载荷对两种漂浮式风力机平台动态响应影响[J]. 热能动力工程, 2020, 35(6): 205-215.
- ZHANG Li, DING Qin-wei, LI Chun, et al. Effects of wind load on dynamic response of two floating wind turbine platform under wind wave coupling[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 205-215.
- [16] LAGO L I, PONTA F L, OTERO A D. Analysis of alternative adaptive geometrical configurations for the NREL-5 MW wind turbine blade[J]. Renewable Energy, 2013, 59: 13-22.
- [17] JOHANSEN J, SORENSEN N, MICHELSEN J, et al. Detached-eddy simulation of flow around the nrel phase-vi blade[C]. ASME 2002 Wind Energy Symposium, Reno, American Society of Mechanical Engineers, 2002: 106-114.
- [18] 桂良进, 寇长河. 缝绉层合板的本构关系研究(II)——缝绉层合板刚度分析与试验[J]. 复合材料学报, 2002, 19(1): 101-106.
- GUI Liang-jin, KOU Chang-he. Study on constitutive relationship of stitched laminates(II)——analytical and experimental study on stiffness of stitched laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(1): 101-106.
- [19] GRIFFITH D T, ASHWILL T D. The Sandia 100-meter all-glass baseline wind turbine blade; SNL100-00[R]. New Mexico; Sandia National Laboratories, 2011.
- [20] 张 立, 缪维跑, 闫阳天, 等. 考虑自重影响的大型风力机复合材料叶片结构力学特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 1-13.
- ZHANG Li, MIAO Wei-pao, YAN Yang-tian, et al. Analysis of mechanical properties of large wind turbine composite blade considering weight of blade[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 1-13.
- [21] 陈 克, 田国红. 车辆有限元与优化设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- CHEN Ke, TIAN Guo-hong. Vehicle finite element and optimization design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015.
- [22] 李本立. 风力机结构动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- LI Ben-li. Structural dynamics of wind turbines [M]. Beijing: Beihang University Press, 1999.
- [23] MIAO Wei-pao, LI Chun, YANG Yang, et al. Study of adaptive blades in extreme environment using fluid-structure interaction method[J]. Journal of Fluids and Structures, 2019, 91: 102734.
- [24] COX K, ECHTERMEYER A. Effects of composite fiber orientation on wind turbine blade buckling resistance[J]. Wind Energy, 2014, 17(12): 1925-1943.
- [25] GB/T 25383-2010, 风力发电机组风轮叶片[S].
- GB/T 25383-2010, Wind turbine generator system rotor blades [S].
- [26] HASELBACH P U, BITSCHKE R D, BRANNER K. The effect of delaminations on local buckling in wind turbine blades[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 295-305.

(金圣迪 编辑)