

风切变效应对风力机叶片结构性能的影响分析

杨瑞, 全佩, 张康康

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:利用 ANSYS 软件的复合材料模块建立某 5MW 水平轴风力机叶片的铺层模型,通过静力分析和模态分析研究了风切变效应对叶片结构特性的影响。采用 Fluent 软件对风力机叶片在有风切变来流的情况下进行数值模拟,将数值模拟所获得的载荷加载到叶片铺层结构上,研究风切变效应对风力机叶片结构特性是否产生影响。结果显示:风切变效应使来流风速的均值减小,从而导致所获载荷降低,使叶片的最大应力和最大位移减小;当有预应力干扰时,叶片的模态频率和叶尖变形量都明显提高,这会对叶片的结构特性产生影响。

关键词:风切变;风力机;静力分析;模态分析

中图分类号:TH16;TK83 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3997(2021)05-0172-04

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2021.05.040

Analysis of Influence of Wind Shear Effect on Structural Performance of Wind Turbine Blades

YANG Rui, QUAN Pei, ZHANG Kang-kang

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou 730050, China)

Abstract:A 5MW horizontal-axis wind turbine blade layup model is established by using ANSYS composite module. The influences of wind shear effect on blade structural characteristics are studied by static analysis and modal analysis. Using Fluent software, the three-dimensional numerical simulation of the wind turbine blade with or without wind shear effect is carried out to obtain the load distribution on the blade surface. The load is applied to the blade structure to study the influence of wind shear effect on the structural characteristics of the rotor blade at the rated wind speed. The results show that the wind shear effect reduces the mean of the incoming wind speed, resulting in a decrease in the load and a decrease in the maximum stress and maximum displacement of the blade. When the prestressing force is applied, the modal frequency and tip deformation of the blade are obviously improved, which has an influence on the structural characteristics of the blade.

Key Words:Wind Shear; Wind Turbine; Static Analysis; Modal Analysis

1 引言

在大气层中,平均风速会随着高度的增加而增加,这种变化规律称为风切变。一般到距离地面(300-500)m以上的高度后,平均风速才会趋于常数^[1]。由于存在风切变效应,所以风力机叶片不可避免会受其影响。风力机叶片在运行一周的过程中会受到风速的周期性变化的影响,导致风力机在整个扫风面上受到的风载荷不均匀,而对风力机的使用寿命和运行安全产生影响。

目前,对于风切变效应的研究主要是在风力机叶片的气动性能方面^[2-4]。文献^[5]通过对风力机叶片进行数值模拟计算,发现风剪切使叶片在运行周期内经历变化的风速,从而使尾迹不对;非稳态来流时,尾迹结构非对称性更明显,载荷波动更明显。文献^[6]通过对风力机叶片的尾流研究,发现在没有风切变影响的时候,尾流内的叶尖涡和中心涡呈对称显示;当有风切变影响的时,尾

流内叶尖涡则呈非对称显示;当入流湍流强度一样时,有、无风切变入流对尾流内的湍流强度的变化没有影响,入流风切变对尾流内湍流强度的影响较小。文献^[7]使用非结构化网格以及滑移网格法,分析了不同风速轮毂线指数下的风力机的气动性能,结果表明载荷波动幅度随风速轮廓线指数的增大而增加,且出现根部载荷滞后现象。

风力机叶片的运行环境比较复杂,从而对风力机叶片结构的安全性要求越高。采用更适用于风力机叶片的流场计算的 $k-\omega$ SST 模型^[8],在风速入流条件为风切变效应的情况下,以某 5MW 大型风力机叶片为研究对象,对风轮叶片进行了结构特性研究。

2 风切变的分布

风切变效应可以采用对数律分布或指数律分布来进行描

来稿日期:2020-06-07

基金项目:甘肃省科技重大专项计划(17ZD2GA006);国家国际科技合作专项项目(2014DFR60990)

作者简介:杨瑞,(1970-),男,河南人,博士研究生,教授,主要研究方向:风力机空气动力学;

全佩,(1993-),女,湖北人,硕士研究生,主要研究方向:大型风力机叶片结构设计

述,用指数律分布计算风速轮廓线比较简单,风切变指数律分布表示为^[9]:

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_s)} = \left(\frac{z}{z_s}\right)^\alpha$$

式中: $\bar{V}(z)$ —离地高度 z 处的平均风速;

$\bar{V}(z_s)$ —离地参考高度 z_s 处的平均风速;

α —风切变指数。

风轮叶片在旋转一周的过程中,叶片某截面的高度 H_r 为:

$$H_r = H_g + r \cos \theta$$

式中: H_g —叶片轮毂中心的高度;

r —截面距风力机转轴中心的距离;

θ —叶片的方位角(叶片竖直向上时的方位角为 0°)

在考虑风切变条件时此截面上的风速大小 v_i 为:

$$V_i(r, \theta) = \left(1 + \frac{r}{H_g} \cos \theta\right)^\alpha V_g$$

式中: v_g —轮毂中心速度。

从中看出,风切变的大小除了与风轮轮廓线直接相关外,还与两点之间的高度差和高度有关。根据指数函数的关系式,高度越高,曲线的斜率越大,则风切变也越大。两点的高度差越大,风切变也越大。对于风力发电机组来说,风切变是指叶轮顶部和底部两个高度的风切变。以甘肃省金昌市某测风塔测得的 2009 年完整一年的测风资料,通过不同高度风速拟合得到风切变综合切变指数为 0.142。

3 计算模型与边界条件

采用某 5MW 风力机叶片为算例^[9]。其风力机叶片半径为 63m,切入风速为 3m/s,切出风速为 25m/s,额定风速为 11.4m/s,额定转速 12.1r/min。研究切变风速对风力机叶片的影响,该风力机轮毂高度为 87m,设计计算流体域的体积为 $4.5R \times 3R \times 9R$,如图 1 所示。设置边界来流条件时,切变来流风速则是通过编写 UDF 函数,使用 FLUENT 提供的接口读入 UDF 程序,来实现风力机叶片在风切变来流条件下的三维数值模拟。

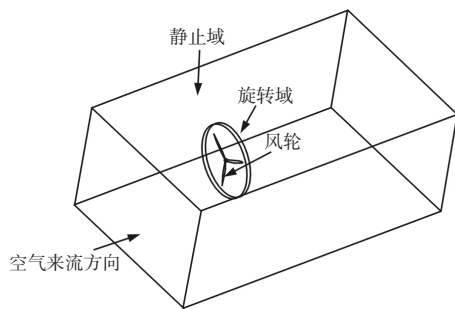


图 1 风力机计算流体域

Fig.1 Computational Fluid Domain of Wind Turbine

4 计算结果与分析

4.1 切变风速下叶片载荷分析

选取叶片竖直向上为 0° ,叶片旋转方向与方位角的增加方向相同,为顺时针旋转。截取的 $r/R=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 四个截面在叶片旋转一周上的轴向载荷和周向载荷的分布情况,如图 2(a)、图 2(b)所示;叶片在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 这四个特殊方位角下沿叶

展方向上的轴向载荷和周向载荷的分布情况,如图 3(a)、图 3(b)所示。

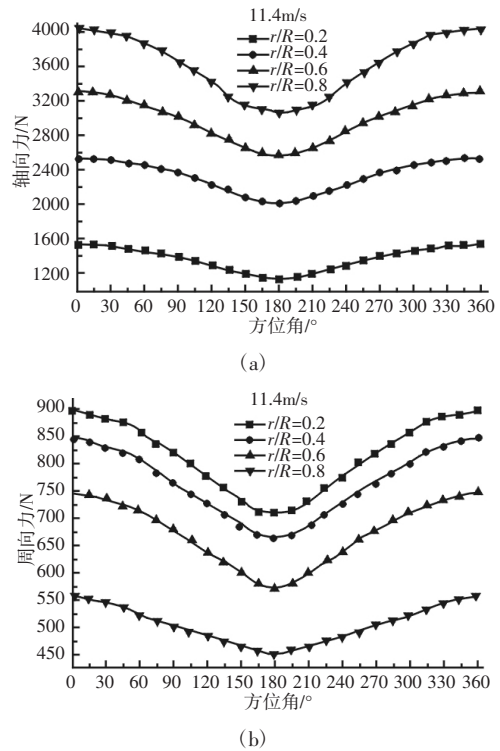


图 2 单个叶片各截面周向和轴向载荷的周期性对比
Fig.2 Periodic Comparison of Circumferential and Axial Load of Single Blade Section

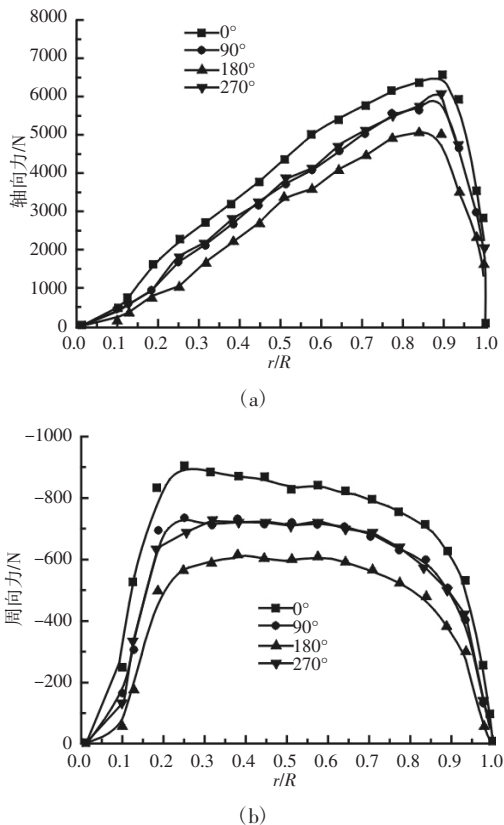


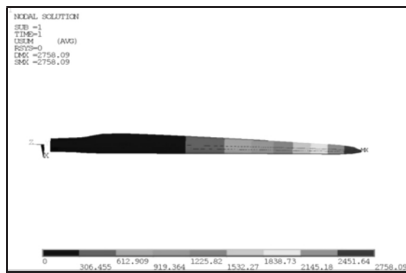
图 3 沿叶展方向的周向和轴向载荷分布
Fig.3 Distribution of Circumferential and Axial Loads Along the Spanwise Direction

展方向上,风速在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 这四个特殊方位角下沿叶

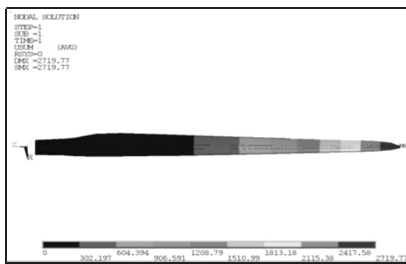
叶片的整个扫风面上的分布是不同的,从而导致叶片不同截面上的轴向载荷和周向载荷在不同方位角上的分布是不同的,且随着方位角从0°到180°逐渐减小,随着方位角从180°到360°逐渐增大,整体呈现余弦分布,可以明显看出风切变效应对叶片所受载荷的分布是有影响的。

(2)在风切变系数为定值时,叶片所受的轴向载荷和周向载荷在0°时明显大于180°,而在90°和270°时叶片所受的力几乎相同。从图3(a)中可以看出,叶片所受轴向载荷随叶展逐渐增大后减小,在 $r/R=0.85$ 处所受载荷最大。

4.2 叶片强度分析

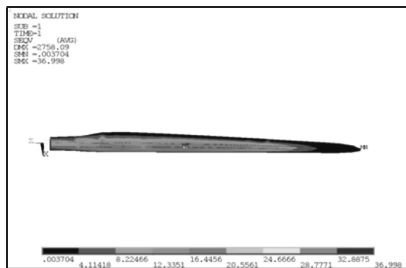


(a)

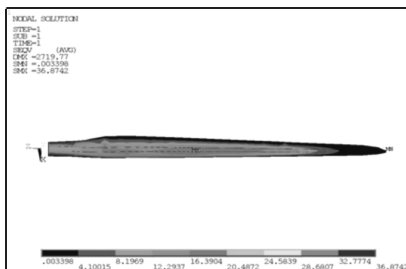


(b)

图4 额定风速和切变风速下叶片位移云图(m)
Fig.4 Cloud Displacement Diagram of Blade under Rated Wind Speed and Shear Wind Speed(m)



(a)



(b)

图5 额定风速和切变风速下叶片应力云图(Mp)
Fig.5 Stress Diagram of Blade under Rated Wind Speed and Shear Wind Speed(Mp)

把叶片做为悬臂梁处理,对叶片进行根部固定,并将所获得的载荷通过命名流方式施加到叶片的表面,对叶片进行静力加

载,获得图4(a)、图4(b)所示额定风速和切变风速下叶片位移云图和图5(a)、图5(b)所示额定风速和切变风速下叶片应力云图。

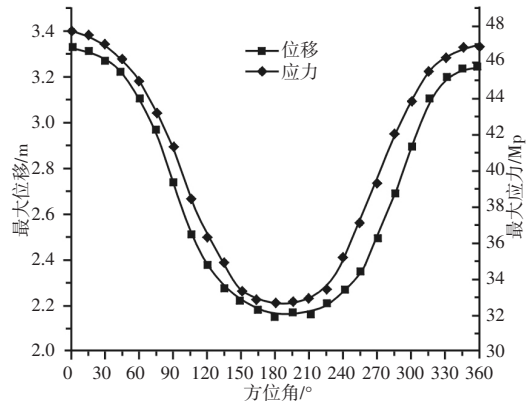


图6 叶片最大位移和最大应力值随方位角的变化曲线
Fig.6 Variation of Maximum Displacement and Maximum Stress of Blade under Different Azimuth Angle

(1)在额定风速和切变风速下,叶片受载后所产生的位移沿叶展方向逐渐增大,最大位移发生在叶片尖端,分别为2.758m和2.719m,满足叶片预弯设计。

(2)在这两种情况下叶片所受的最大应力均发生在叶片主梁约1/2处,分别为36.998Mp和36.8742Mp,而玻璃纤维叶片静强度许用应力为255Mp,所以叶片在额定工况时,满足设计要求。由于在不同方位角时所受的风速值时分布不均匀的,使得切边来流风速下所获得的载荷比均匀来流风速时所获得的载荷小,导致叶片在切变来流下的最大位移和最大应力都小于均匀来流下的最大位移和最大应力。

(3)风力机叶片上应力和位移都在0°方位角时出现最大值,此时风力机叶片旋转到最高点,最小值都出现在180°方位角,此时叶片旋转到最低点。在切变来流风速下位移的最大值和最小值分别为3.32419m和2.15024m,曲线幅值的变化为0.587m,且为平均值的21.4%;应力的最大值和最小值分别为47.7148Mp和31.8382Mp,曲线幅值的变化为7.938Mp,且为平均值的19.7%,这说明风切变效应对风力机叶片的结构是有影响的。

4.3 叶片模态分析

分别对叶片在无预应力和有无风切变载荷预应力下的三种情况进行模态分析,采用Block Lanczos方法,提取出叶片的前八阶模态频率,具体列出了这三种情况下前八阶模态频率和叶尖变形量,如表1、表2所示。

表1 有无预应力叶片前八阶模态频率(Hz)
Tab.1 The First Eight-Order Mode Natural Frequency of the Blade with or without Prestress(Hz)

	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶	七阶	八阶
无预应力	0.3539	0.7222	1.2397	2.7539	3.1684	5.1116	5.7454	7.5048
额定风速下	0.9585	2.8246	4.2363	4.9576	6.8089	9.4407	10.729	11.104
切变风速下	0.9724	2.8556	4.2788	4.9929	6.8528	9.5016	10.743	11.162

表2 有无预应力叶片前八阶模态下叶尖变形量(m)
Tab.2 Deformation of Blade Tip in the First Eight Modes of the Blade with or Without Prestressing (m)

	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶	七阶	八阶
无预应力	0.3693	0.2981	0.4142	0.4347	0.3879	0.4951	0.3777	0.5007
额定风速下	0.5833	0.2929	0.5576	0.2669	0.5296	0.3223	0.4443	0.5671
切变风速下	0.5848	0.2991	0.5528	0.2739	0.5243	0.3230	0.4565	0.5761

(1)叶片的前八阶模态频率在有预应力的情况下大于无预应力情况下的模态频率,且切变风速下的模态频率大于额定风速下的模态频率。叶片的固有频率随着阶数的增加而增大,所以阶数越大振动越剧烈。(2)叶片在无预应力情况下,最大的叶尖变形量发生在第八阶,而在有预应力的情况下发生在第一阶且大于无预应力情况下的叶尖变形量。切变风速下的叶尖最大变形量大于额定风速下的叶尖最大变形量,所以在切变风速下对叶片的结构破坏更严重,因此在结构铺层设计和材料选择中要考虑到风切变效应的存在。

5 结论

在风力机额定风速下,基于 UDF 函数加载对在不同的方位角时风力机叶片进行了三维数值模拟,并对叶片进行了结构特性分析,可以得出以下结论:(1)在风切变效应的影响下,叶片的轴向载荷和周向载荷在不同方位角上的分布是不同,且呈现周期性变化,从而导致风力机叶片所获得的整体载荷降低。(2)在有风切变情况下对叶片进行强度分析,风切变效应导致叶片最大位移和最大应力减小;在叶片旋转过程中叶片的最大位移和最大应力同样呈现周期性变化,从而对叶片的结构产生破坏。(3)叶片的模态频率在有预应力的情况下比没有预应力时大。受剪切流的作用,叶尖最大变形量大于均匀来流时的最大变形量,所以切变效应对叶片的结构特性影响不容忽视,因此在风力机叶片结构设计中应该考虑到风切变效应的影响。

参考文献

[1] 贺德馨.风工程与工业空气动力学[M].北京:国防工业出版社,2006.
(He De-xin.Wind Engineering and Industrial Aerodynamics[M].Beijing: National Defense Industry Press,2008.)

[2] Rareshide E,Tindal A,Johnson C.Effects of Complex Wind Regimes on Turbine Performance [A].AWEA Windpower Conference [C].Chicago, US,2009

[3] Sezer-Uzol N,Uzol O.Effect of Steady and Transient Wind Shear on the Wake Structure[R].AIAA09-1406,2009.

[4] 韩中合,李引,季剑.考虑风剪切的 1.3MW 风力机整机三维定常流动数值研究[J].动力工程学报,2011(10):779-783.
(Han Zhong-he,Li Yin,ji Jian,3-D steady flow numerical study of 1.3MW wind turbine considering wind shear [J].Journal of Power Engineering,2011(10):779-783.)

[5] 周文平,唐胜利,吕红.基于时间推进自由尾迹的水平轴风力机气动特性分析[J].中国电机工程学报,2011(29):124-130.
(Zhou Wen-ping,Tang Sheng-li,Lv Hong.Aerodynamic characteristics analysis of horizontal axis wind turbines based on Time-Driven free wake [J].China Journal of Electrical Engineering,2011(29):124-130.)

[6] 侯亚丽,汪建文,王强.风切变对风力机尾流湍流特征影响的研究[J].机械工程学报,2016(16):149-155.
(Hou Ya-li,Wang Jian-wen,Wang Qiang.Study on the influence of wind shear on turbulence characteristics of wind turbine wake [J].Journal of Mechanical Engineering,2016(16):149-155.)

[7] 刘磊,石可重,杨科.风切变对风力机气动载荷的影响[J].中国工程热物理学报,2010(10):1667-1670.
(Liu Lei,Shi Ke-zhong,Yang Ke.Effects of wind shear on aerodynamic loads of wind turbines[J].Chinese Journal of Engineering Thermophysics,2010(10):1667-1670.)

[8] 张宏洋,盛会霞,张玲.风剪切对水平轴风力机气动性能影响的研究[J].东北电力大学学报,2016(2):33-38.
(Zhang Hong-yang,Sheng Hui-xia,Zhang Ling.Study on the influence of wind shear on the aerodynamic performance of horizontal axis wind turbines[J].Journal of Northeast Electric Power University,2016(2):33-38.)

[9] COMMISSION I E T. IEC61400-1[M].2005.

[10] Jonkman J,Butterfield S,Musial W.Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[J].Office of Scientific & Technical Information Technical Reports;Golden,CO,USA,2009.

(上接第 171 页)

(2)借助离散元素法,得到铲斗受力,解决了传统铲斗有限元计算中载荷需要假设的难题,传统强度计算方法采用极限工况对铲斗进行校核导致设计和选材过于保守。

(3)提出的离散元-有限元耦合计算方法能为铲斗等工作装置的设计研究提供一套全新的设计理念,并且一定程度上可以代替实验验证环节。同时有利于实现产品精品化设计,尤其是在满足强度要求的前提下,可以进行轻量化、经济性等多目标优化设计。

参考文献

[1] 杜博聪.节能减排.中国工程机械企业任重道远[J].今日工程机械,2007(10):50-51.
(Du Bo-cong.Energy-saving and emission reduction.Chinese construction machinery enterprises have a long way to go [J].Today Construction Machinery,2007(10):50-51.)

[2] 张立荣.基于有限元法 ZL50 装载机铲斗强度分析与结构优化[D].淄博:山东理工大学,2008.
(Zhang Li-rong.Strength analysis and structure optimization of bucket of ZL50 loader based on finite element method[D].Zibo:Shandong University of Technology,2008.)

[3] 姚践谦,乐晓斌.装载机插入阻力与插入机理的探讨[J].工程机械,1990(3):15-18.
(Yao Jian-qian,Le Xiao-bin.Discussion on insertion resistance and insertion mechanism of loader [J].Construction Machinery,1990(3):15-18.)

[4] 万一品,贾洁,梁佳.装载机工作装置结构强度分析与试验研究[J].机械强度,2016(4):772-776.
(Wan Yi-pin,Jia Jie,Liang Jia.Structural strength analysis and exper-

iment study of loader working device [J].Mechanical Strength,2016(4):772-776.)

[5] 张重继,王海洋.基于 ANSYS 的装载机铲斗受力分析[J].煤矿机械,2014,35(11):130-131.
(Zhang Chong-ji,Wang Hai-yang.Analysis of loader bucket force based on ANSYS[J].Coal Mine Machinery,2014,35(11):130-131.)

[6] 刘秀丽.装载机工作装置关键零部件的动力分析及疲劳分析[D].济南:山东大学,2016.
(Liu Xiu-li.Dynamic analysis and fatigue analysis of key components of loader working equipment[D].Ji'nan:Shandong University,2016.)

[7] 石沛林,徐冠林,张立荣.ZL50 型装载机铲斗的应力分析与结构优化设计[J].工程机械,2008,39(6):29-33.
(Shi Pei-lin,Xu Guan-lin,Zhang Li-rong.Stress analysis and structural optimization design of ZL50 loader bucket [J].Construction Machinery,2008,39(6):29-33.)

[8] 钟丽萍.基于有限元分析的装载机铲斗结构优化[J].中国工程机械学报,2011,9(1):68-72.
(Zhong Li-ping.Optimization of loader bucket structure based on finite element analysis [J].Chinese Journal of Construction Machinery,2011,9(1):68-72.)

[9] 胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真:离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010:1-25.
(Hu Guo-ming.Analysis and Simulation of Particle System by Discrete Element Method:Industrial Application of Discrete Element Method and Introduction of EDEM Software[M].Wuhan:Wuhan University of Technology Press,2010:1-25.)

[10] 杨旭,李冰,徐武彬.装载机铲装过程仿真的物料堆建模方法研究[J].机械设计与制造,2018(5):124-126.
(Yang Xu,Li Bing,Xu Wu-bin.Research on modeling method of material stack of loader shovel loading process simulation [J].Machinery Design & Manufacture,2018(5):124-126.)