

# 水平风的垂直风切变对风力机荷载影响的数值模拟研究

陈进贵<sup>†</sup> 刘希彬 程双宝

(福清海峡发电有限公司, 福州 350309)

**摘要** 风电作为可再生能源之一已经逐步成为我国达成“双碳”目标的重要支撑之一,而海上风电常面临着台风等极端风况的影响.本文开展了台风引起的水平风垂直风切变对风力机影响的数值模拟研究.分别建立了不考虑风切变影响的无风切变计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模型以及考虑风切变的有风切变模型.计算结果表明:水平风在垂直风向上的切变不仅会使得尾流呈现出非对称性,同时也会使得风力机的尾流效应增强;风切变对风力机基底荷载影响明显,其导致了各方向的力和力矩均有不同程度的增大或减小.

**关键词** 风力机, 风向切变, 数值模拟, 尾流, 基底荷载

**中图分类号**:O313;TM315

**文献标志码**:A

## Numerical Simulation Study on the Influence of Vertical Wind Veering of Horizontal Wind on Wind Turbine Loads

Chen Jingui<sup>†</sup> Liu Xibin Cheng Shuangbao

(Fuqing Haixia Power Generation Co., Ltd., Fuzhou 350309, China)

**Abstract** As one of the renewable energy sources, wind power has gradually become one of the important supports for China to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals, and offshore wind turbine is often affected by extreme wind conditions such as typhoons. In this paper, the numerical simulation study on the influence of vertical wind veering of horizontal wind on wind turbine caused by typhoon is carried out. The computational fluid dynamics (CFD) model without wind veering and the model considering wind shear are established respectively. The simulation results show that the vertical wind shear in the horizontal wind not only causes asymmetry in the wake but also enhances the wake effects of the wind turbine. At the same time, wind veering has obvious influence on the base load of wind turbine, which leads to the increase or decrease of force and moment in all directions.

**Key words** wind turbine, wind veering, computational simulation, wind-turbine wake, base load

### 引言

风电作为可再生能源的核心主体之一,天然具有不可替代的禀赋优势和规模性优势.随着化石能

源不断消耗以及近年来环保意识的增强,发展风能等可再生能源已成为当前工业发展的新趋势.伴随着我国“双碳”目标的提出,风电也成了助力我国碳达峰碳中和战略目标的重要支撑.

据中国气象局风能资源详查<sup>[1]</sup>结果,我国 5~25 m 水深线以内近海区域、海平面以上 50 m 高度,风电可装机容量约  $2 \times 10^8$  kW。但发展海上风电仍面临着许多困难<sup>[2]</sup>。特别是受到全球变暖的影响,我国东南沿海的台风强度呈上升趋势。台风引起的强风、低空风切变对风力机的安全产生较大的威胁<sup>[3,4]</sup>。

风切变指的风矢量在水平或垂直方向的变化。风切变按风向可分为水平风的水平切变、水平风的垂直切变、垂直风的切变。风切变既包含了风速大小的变化,也包含了风向的转向<sup>[5]</sup>。产生风切变的原因主要有两大类:一类是大气运动本身造成的变化,例如台风、下击暴流等;第二类是地形的影响。Shu 等<sup>[6]</sup>通过多普勒风廓线雷达和地面气象站的长期观测,成功捕捉到水平风切变随地形条件、风速和风暴类型(如季风和台风)的变化特征。结果表明,在台风情况下风向沿垂直方向的变化可达  $20^\circ$ 。

国内外针对风切变对结构的影响也开展了相应的研究。杨从新等<sup>[7]</sup>基于 CFD 方法分析了风剪切留下的塔影效应对风力机叶片与风轮的气动荷载、空间流场的影响。郑金雨等<sup>[8]</sup>则通过建立简化模型,对风切变和塔影效应开展分析,结果表明塔影效应和风切变对风力发电系统存在显著影响。侯亚丽等<sup>[9]</sup>采用 LES 模拟了有无风切变情况下的风力机尾流,结果表明在不同尾流区域风切变的影响程度不同。陈晓明和康顺<sup>[10]</sup>采用基于滑移网格技术的三维非定常 CFD 方法探讨了风切变以及偏航条件下水平轴风力机风轮的气动特性。白文彬通过多物理场的流固耦合分析了风切变下风力机的最大位移、应力及应变情况。此外, Lu 和 Li<sup>[11]</sup>通过 CFD 模拟研究了风切变对超高层结构荷载的影响。

现有的研究大部分都是针对风速的切边开展的研究,对水平风的垂直风向切变对风力机的影响的研究还比较缺乏。因此本文将采用 CFD 技术分别建立了不考虑风切变影响的无风切变计算模型以及考虑风切变的有风切变模型;通过比较二者的风压分布情况、基底荷载等结果,研究台风引起的水平风的垂直风向切变对风力机的影响。

## 1 CFD 数值模拟

目前基于平均 N-S 方程的著名湍流模型有  $k$ - $\epsilon$  双方程模型(模型中表征涡黏性系数的两个特

征量湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\epsilon$  都由相应的偏微分方程控制和求解)、改进的  $k$ - $\epsilon$  模型(如: LK 模型, MMK 模型)和雷诺应力方程模型等。

CFD 中最常用的湍流模型是标准的  $k$ - $\epsilon$  模型,其控制方程为:

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中  $U_i$  为平均速度分量,  $P$  为压力,  $\rho$  为空气密度,  $\nu$  为气流运动粘性系数;  $\overline{u'_i u'_j}$  为 Reynold 应力项,为使方程封闭,需要建立它与平均速度分量之间的关系。在标准  $k$ - $\epsilon$  模型中,有:

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中  $k$  为湍动能,  $\epsilon$  为湍流耗散率,  $C_\mu$  为经验常数。

### 1.1 无风切变模型

图 1 为本次模拟采用的 5 MW 风机模型,风机塔筒位置高 80 m,叶轮半径为 63 m。切入风速为 3 m/s,切出风速为 25 m/s。考虑到网格生成以及计算精度,本研究对除叶片和塔筒外的其余部分进行了简化建模,在保证迎风面积相同的情况下省去了部分细节。

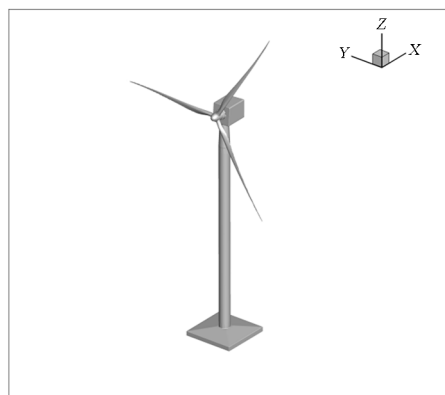


图 1 风机几何模型示意图

Fig. 1 Geometry model of wind turbine

计算域大小为 1700 m(长)  $\times$  1200 m(宽)  $\times$  600 m(高),风速入口距离风机中心为 600 m,出口距离风机中心为 1100 m,该计算域大小足以保证流场充分发展并且消除回流对计算结果的影响。具体设置如图 2 所示,CFD 计算域缩尺比为 1 : 500。

计算流域入流处采用 FLUENT 中的速度进口边界条件(velocity-inlet). 该边界条件适用于不可压缩流动. 模拟大气边界层风速剖面指数分布, 其速度随高度的变化服从指数律:

$$U_z=U_0(Z/Z_0)^{\alpha}$$

(4)

式中  $Z_0=10\text{ m}$ ,  $U_0$  为  $10\text{ m}$  高度处的风速, 为还原台风临近时的大风情况, 本算例取为  $25\text{ m/s}$ .  $U_z$  和  $Z$  分别为目标位置的风速和高度;  $\alpha$  为地面粗糙度系数, 根据中国荷载规范<sup>[12]</sup>按 A 类地貌取值为  $0.12$ . 按式(4)计算得风机轮毂高度处的风速为  $42.30\text{ m/s}$ , 大于风机切出风速, 此时风机处于停机状态. 入口处的湍流强度沿高度按下式计算:

$$I_u=I_{10}\left(\frac{Z}{10}\right)^{-\alpha}$$

(5)

计算中  $I_{10}$  为  $10\text{ m}$  高名义湍流度常数, 按 A 类地貌取为  $0.12$ .

出口采用完全发展出流边界条件(outflow). 流边界条件用于出流边界上的压力或速度都未知的情况, 适用于出口处流动是完全发展的情况. 计算流域顶部和两侧采用对称边界条件(symmetry), 在垂直对称面的方向上物理量梯度为零. 风力机表面和地面是固定不动, 不发生移动的, 故采用无滑移的壁面条件(wall).

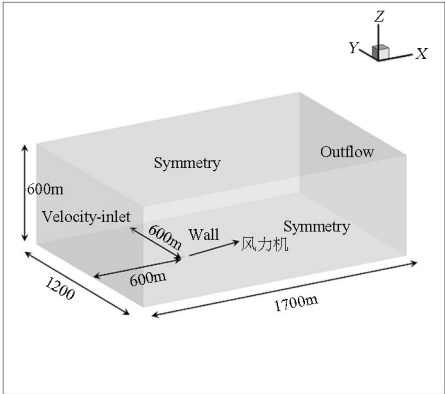


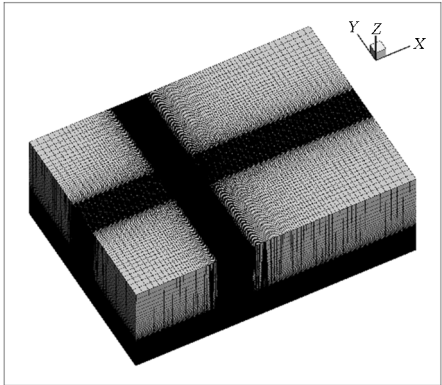
图 2 CFD 计算域示意图

Fig. 2 Computational domain of CFD simulation

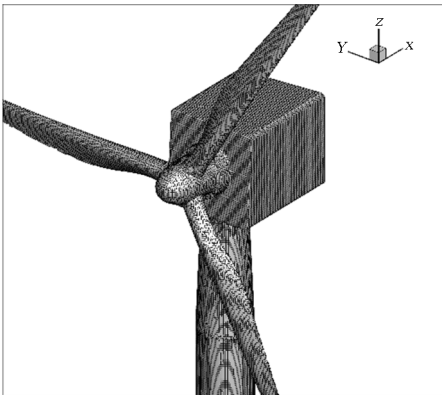
在湍流模型方面, 本文采用标准  $k-\epsilon$  模型, 同时选用标准壁面函数(standard wall functions, SWF)处理近壁面的湍流状态. 采用 SIMPLEC 算法进行压力-速度耦合求解, 压力欠松弛系数取  $0.3$ , 其他项取  $0.7$ .

网格的类型和网格的数量对计算结果的准确性具有很大的影响. 网格划分时, 网格的数量较少会使得计算的精度得不到保证, 然而数量太多, 求

解时间太长, 不能满足实际需要. 本研究针对三种不同的网格方案开展了网格敏感性研究: 方案一网格总数约 700 万, 最小网格尺寸为  $0.625\text{ m}$ ; 方案二网格总数为 1000 万, 最小网格尺寸为  $0.31\text{ m}$ ; 方案三网格总数为 1300 万, 最小网格尺寸为  $0.2\text{ m}$ . 三种网格方案的计算结果如表 1 所示, 以风力机基底反力  $F_x$ 、 $F_y$  为指标进行比较. 可以看到方案二与方案三的计算结果相近, 方案一的计算结果与其余两个方案相差较多, 说明此时网格数量继续增加对计算精度基本没有影响, 因此本研究选择方案二作为网格方案. 图 3 给出了整体计算域的网格方案以及风机周边的网格情况.



(a) 计算域网格示意图  
(a) computational domain



(b) 风机表面网格  
(b) wind turbine

图 3 网格方案

Fig. 3 Grid of CFD simulation

表 1 网格敏感性分析				
Table 1 Sensitivity analysis of mesh size				
网格方案	网格总数/万	最小网格尺寸/m	$F_x/\text{kN}$	$F_y/\text{kN}$
方案一	700	0.625	220.2	-3.1
方案二	1000	0.31	243.3	-4.0
方案三	1300	0.2	246.0	-3.9

如图 4 所示, 提取塔筒  $10\text{ m}$  高度处的风压系

数与余文林等<sup>[13]</sup>开展的数值模拟结果进行对比。可以看到风压系数随环向角度的变化趋势与文献结果一致,并且在各环向角度下本文模拟结果均与文献结果吻合较好。以上结果验证了本文采用的数值模拟模型的可靠性。

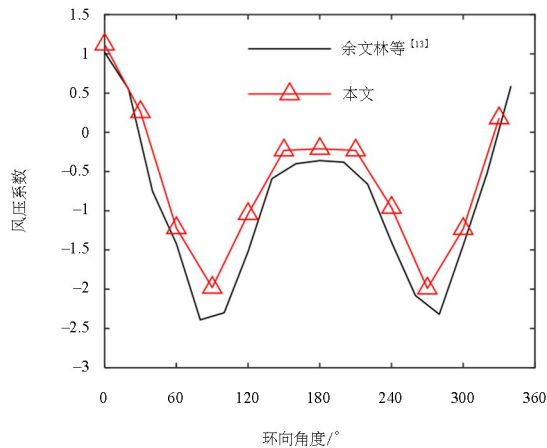


图 4 风压系数对比验证  
Fig. 4 Comparative verification of wind pressure coefficient

1.2 有风切变模型

如图 5 所示为有切变模型的 CFD 计算域示意图,可以看到相较于无切变模型,其  $y$  轴方向的长度由 1200 m 增长至 1700 m,同时两个对称边界分别调整为速度入口和自由出流。这是由于在考虑水平风的垂直风向切变时风速矢量将产生垂直于两个侧边界的分量,此时采用对称边界条件将不再合理<sup>[12]</sup>。

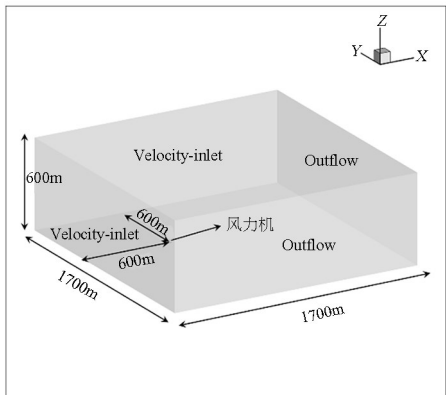


图 5 有风切变模型计算域示意图  
Fig. 5 Computational domain of CFD simulation with wind veering

根据文献[5]的实测结果,设置入口的风向沿高度的变化如图 6 所示,风向以绕  $z$  轴顺时针旋转为正,剖面上最大风向变化约为  $16^\circ$ 。入口位置处的速度大小以及湍流度大小和无风切变模型保持一致。

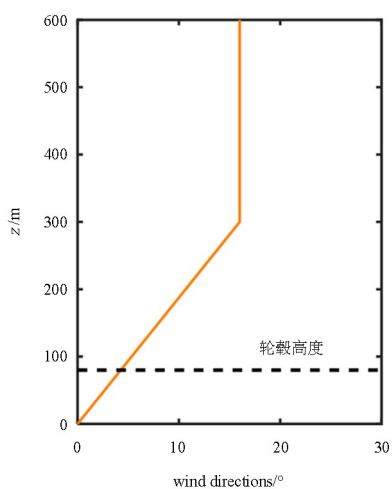


图 6 入口风向角示意图  
Fig. 6 Wind direction of inlet boundary

有切变模型的网格方案与无风切变模型保持一致,最小网格尺寸为 0.31 m,网格总数 1200 万,整体网格如图 7 所示。由于有切变模型仅增加了侧边网格的数量,未改变核心区域的网格精度,因此此处无需再次进行网格敏感性分析。有切变模型其余计算设置均与无切变模型保持一致。

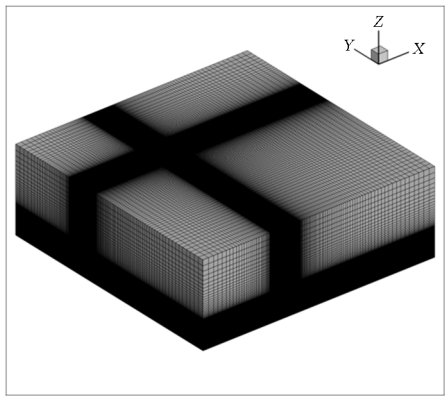


图 7 有切变模型整体网格示意图  
Fig. 7 Grid of CFD simulation with wind veering

2 计算结果分析

如图 8 所示为 CFD 模拟所得各个剖面的风速云图,图中左侧为无切变模型的计算结果,右侧为有切变模型的计算结果。图 8(a)、(b)给出了 10 m 高度处以及轮毂高度 80 m 位置处的风速剖面,可以看到风切变对风机的尾流有明显的影响,有风切变入流时风机的尾流呈现出非对称性,这种尾流的非对称性可能对后方风机的发电效率等产生影响。此外由于随着高度的增加风向角的切变增大,尾迹的偏移也更加明显。

如图 8(c)所示为  $X-Z$  剖面的风速情况,可以



看到在有无风切变的情况下风力机尾流均出现了明显的轴向速度亏损区域,有风切变情况下速度沿  $y$  向的亏损相较于无风切变情况更加显著. 综上所述,水平风在垂直风向上的切变不仅会使得尾流呈现出非对称性,同时也会使得风力机的尾流效应增强. 因此,在台风风况或者部分良态风风况下风电场尾流干扰研究中应适当地考虑风向切变的影响已保证模拟的合理性.

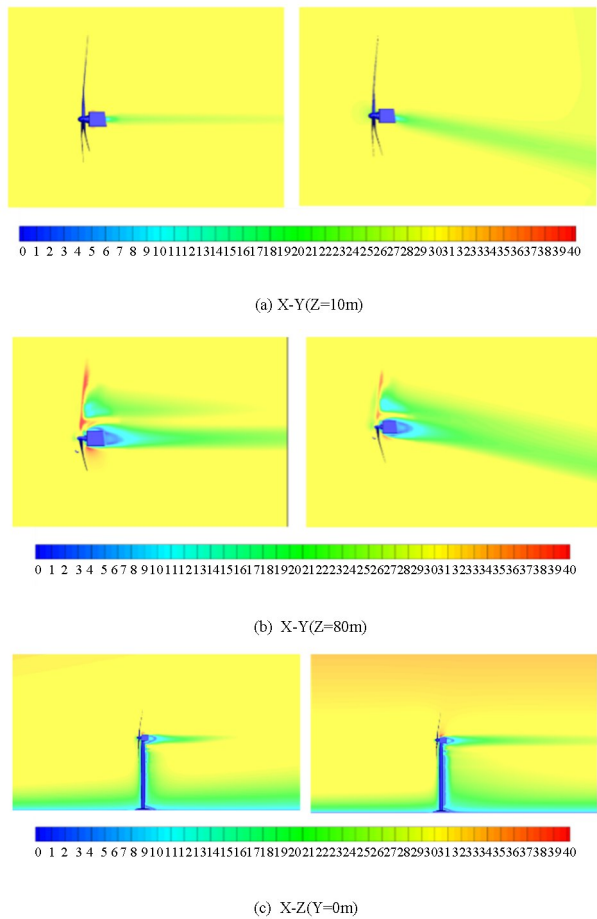


图 8 风速云图(单位: m/s)  
Fig. 8 Wind velocity contour (unit: m/s)

图 9、图 10 分别为无风切变模型和有风切变模型的风压云图,可以看到水平风在垂直风向上的切变对风机表面风压有较大影响. 从侧视图可以看到两种情况下塔筒位置的风压分布有较大不同,在无风切变的情况下塔筒表面在迎风侧风压为正值且风压随着高度的增加均匀增大,塔筒侧面由于漩涡的脱落表面均为负压. 在有风切变的情况下,正视图和后视图的风压分布与无风切变的情况下差别不大,但是二者侧面的风压差别较大,由于风向的变化侧表面的风压分布不均匀,在塔顶位置由于风向的转变出现了正压.

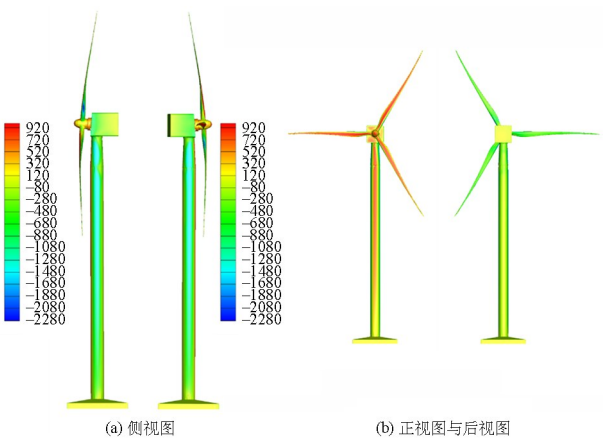


图 9 无风切变模型风压云图(单位: Pa)  
Fig. 9 Wind pressure contour of the case without wind veering (unit: Pa)

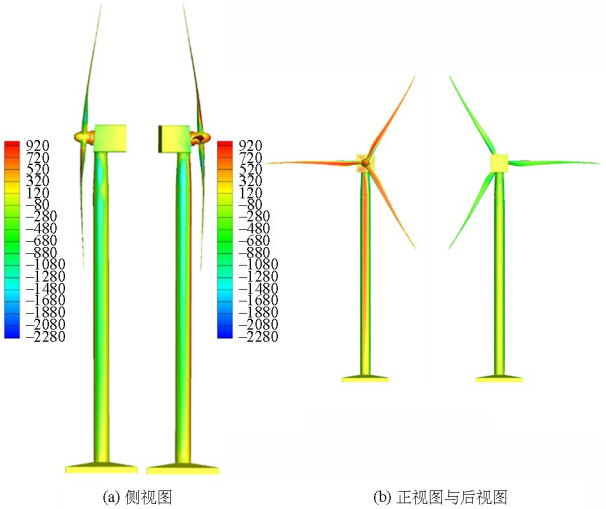


图 10 有风切变模型风压云图(单位: Pa)  
Fig. 10 Wind pressure contour of the case with wind veering (unit: Pa)

对于叶片的表面风压,比较二者的结果可以看到水平风在垂直风向上的切变对风机叶片表面的风压分布无较大影响,仅在风压数值上略有不同,迎风侧呈现出明显的正压,背风侧为负压.

为进一步的比较水平风的风向风切变对风机的影响,提取了两种工况下的风机基底荷载情况,结果如表 2 所示. 从结果可以看到水平风的风向切变对基底各个方向的力和力矩均有不同程度的影响. 由于沿高度方向上风向的变化,  $y$  方向风速分量增大、 $x$  方向风速分量减小,导致了有风切变模型的  $F_x$  小于无风切变模型而  $F_y$  大于无风切变模型,其中  $F_y$  的变化达到了 171.29%; 有无风切变的  $F_z$  的数值相差不大,但合力方向发生改变,这也是风机抗风设计时需要重视的.

水平风的风向切变对两种工况的对于基底弯矩也有较大影响,可以看到有风切变模型的基底弯矩  $M_x$  明显增大,为无风切变模型的两倍. 此外,

$M_z$  有一定程度的增加,同时  $M_y$  相应地发生了减小, $M_y$  的减小也降低了风机发生倾覆的概率.因此,水平风的垂直风切变引起的风力机基底荷载方向的变化,数值的增大或减小均应该在风力机抗台风设计时做相应的考虑.

表 2 基底荷载比较  
Table 2 Comparison of base load

参数	无风切变模型	有风切变模型	变化百分比
$F_x$	243.28 kN	216.14 kN	-11.15%
$F_y$	-4.04 kN	-10.96 kN	171.29%
$F_z$	11.29 kN	-12.14 kN	-207.52%
$M_x$	283.16 kN·m	575.92 kN·m	103.39%
$M_y$	15 596.94 kN·m	13 903.07 kN·m	-10.86%
$M_z$	-13.54 kN·m	-34.12 kN·m	151.99%

3 结论

本文开展了台风引起的水平风的垂直风向切变对风力机的影响研究.分别建立了无风切变影响以及有风切变影响的 CFD 模型,通过数值模拟手段开展了研究分析,得到以下结论:

(1)水平风的垂直风向切变对风力机的尾流有明显的影 响,有风切变入流时风机的尾流呈现出非对称性.同时风切变也会使得风力机的尾流效应增强,因此在风电场尾流效应的研究中可以适当地考虑水平风的垂直风向切变的影响.

(2)水平风在垂直风向上的切变对风机塔筒表面风压有较大影响.塔筒表面的风压分布变化明显,风向的变化导致侧表面的风压分布不均匀.而水平风在垂直风向上的切变对叶片表面的风压分布规律基本没有影响.

(3)水平风的风向切变对基底各个方向的力和力矩均有不同程度的影响,其导致基底力  $F_y$ 、基底弯矩  $M_x$  有一定程度的增大, $F_x$  和  $M_y$  相应的减小;同时  $F_z$  发生了方向上的变化.这些风向切变引起的基底荷载的变化均应在风机抗台风设计中做相应的考虑.

本文算例默认在台风期间风力机的叶片平面始终与风向垂直.但是实际情况中一些风力机可能会偏航,使叶片平面不再与风向垂直.为了充分指导工程设计,仍然需要在后续的研究中设置多种工况进行对比、分析,得到风力机荷载明确的变化规律.

参考文献

[1] 中国气象局风能太阳能资源评估中心. 中国风能资源的详查和评估[J]. 风能, 2011,8: 26-30.

[2] 陈为飞. 近海风机塔架风浪荷载分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 3-4.

CHN W F. Analysis of wind and wave loads offshore wind turbine towers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010:3-4. [3] 王景全, 陈政清. 试析海上风机在强台风下叶片受损风险与对策: 考察红海湾风电场的启示[J]. 中国工程科学, 2010, 12(11): 32-34.

WANG J Q, CHEN Z Q. Analysis of risks and measures on the blade damage of offshore wind turbine during strong typhoons: enlightenment from Red Bay wind farm [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(11): 32-34. (in Chinese)

[4] 王博特, 王宇楠, 郑涛, 等. 大型风力发电机叶片振动测试与分析[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 253-258.

WANG B T, WANG Y N, ZHENG T, et al. Vibration test and analysis of large-scale wind turbine generator blades [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 253-258. (in Chinese)

[5] 张银昌, 黄菲. 一次低空水平风切变的小尺度特征分析[J]. 气象, 2007, 33(2): 10-14.

ZHANG Y C, HUANG F. Analysis of a small-scale low level horizontal wind shear process over Qingdao Airport [J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(2): 10-14. (in Chinese)

[6] SHU Z R, LI Q S, HE Y C, et al. Observational study of veering wind by Doppler wind profiler and surface weather station [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 178: 18-25.

[7] 杨从新, 张建梅, 王印, 等. 风切变下塔影效应对大型水平轴风力机气动性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 144-150.

YANG C X, ZHANG J M, WANG Y, et al. Effect of tower shadow effect on aerodynamic performance of large horizontal-axis wind turbine under wind shear [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(2): 144-150. (in Chinese)

[8] 郑金雨, 卢爽瑄, 申周. 风切变和塔影效应的影响分析[J]. 科学技术创新, 2019(30): 35-37.

[9] 侯亚丽, 汪建文, 王强, 等. 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, 52(16): 149—155.  
HOU Y L, WANG J W, WANG Q, et al. Effect of wind shear on the wake turbulence characteristics of the wind turbine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 149—155. (in Chinese)

[10] 陈晓明, 康顺. 偏航和风切变下风力机气动特性的研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1105—1111.  
CHEN X M, KANG S. Research on wind turbine aerodynamic characteristics under yaw and shear [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1105—1111. (in Chinese)

[11] LU B, LI Q S. Investigation of the effects of wind veering and low-level jet on wind loads of super high-rise buildings by large eddy simulations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 227: 105056.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[13] 余文林, 柯世堂, 余玮. 典型兆瓦级风力机塔架气动性能对比研究[J]. 特种结构, 2016, 33(3): 13—19.  
YU W L, KE S T, YU W. Contrast research of aerodynamic performances for typical megawatt wind turbine towers [J]. Special Structures, 2016, 33(3): 13—19. (in Chinese)