

偏航工况下水平轴风力机气动性能数值分析

戴丽萍, 周 强, 姚世刚, 康 顺, 王晓东

(华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 基于计算流体力学方法(CFD),通过求解URANS方程与SST湍流模型,对Tjæreborg 2 MW风力机风轮在偏航角 0° 、 10° 、 30° 工况下的气动特性进行计算,结果表明数值计算的功率与实验值吻合较好。分析不同偏航角下风轮的功率、推力、叶片各截面切向力、法向力载荷和压力分布的变化规律。偏航工况下一个旋转周期内风轮功率、推力呈现3P波动性质,叶片气动载荷沿旋转方向呈现正弦交变性质,最大载荷发生在方位角 90° 附近区域。

关键词: Tjæreborg风力机; 叶片; 偏航; 气动性能; 数值模拟

中图分类号: TK89

文献标识码: A

0 引 言

偏航是水平轴风力机运行中存在的一种典型动态工况。风力机偏航运行将使叶片产生较大的交变气动载荷,严重影响叶片的结构变形^[1]。自然界中风向无时无刻不发生变化,现有水平轴风力机无法及时跟踪;此外自然风垂直方向的分量、风轮仰角的存在以及高风速时的强制偏航等因素,均使得风轮处于偏航状态^[2,3]。深入了解偏航工况下风轮的气动性能对提高风力机动态特性的预测精度及安全运行至关重要。

关于偏航工况下风力机气动性能的实验研究多基于风洞试验进行。Noura等^[4]对直径为0.5 m的Rutland 503风轮进行测试,得到偏航角为 15° 和 30° 时的风力机 C_p - λ 曲线,并通过粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)测试分析偏航对尾迹的影响;Ozbay^[5]对风轮直径为0.382 m的ERS-100缩小风力机在偏航工况下的功率及气动载荷进行实验测试,并探究前排风力机偏航角对串联放置的2台风力机功率的影响规律;DTU的Verelst等^[6]在荷兰TU Delft大学的风洞对风轮直径为0.8 m的下风向三叶片风力机在固定和自由偏航下的挥舞应力和稳定性进行了实验测试。此外,美国可再生

能源实验室(NREL)开展Phase VI 19.8 kW风力机实验^[7],获得了偏航工况下风力机载荷随方位角的变化曲线。

数值计算方面,Tongchitpakdee等^[8]、Yu等^[9]及陈晓明等^[10]分别采用CFD方法对偏航工况下NREL Phase VI风力机的气动性能进行计算,验证数值计算方法的有效性。姚世刚等^[11]对Tjæreborg风力机进行流固耦合分析,验证叶片载荷集中出现在叶展50%~85%范围处。近年来随着计算机性能的提升以及对数值计算精度的要求提高,大涡模拟(large-eddy simulation, LES)和分离涡模拟(detached-eddy simulation, DES)得到了迅速发展,文献[12]采用LES模型研究简化的风力机模型在偏航状态下的尾涡偏转特性及其对下游风轮的影响;文献[13]利用动网格方法,采用RANS和DES模型对NREL Phase VI气动性能进行分析。上述研究为解偏航工况下的风力机气动性能的变化规律提供了参考,但对偏航下产生气动性能变化的机理讨论较少。

本文采用CFD方法,对Tjæreborg风力机在偏航下的气动性能进行计算,并通过与轴流时的风力机气动性能的对比,详细分析偏航工况下风力机气动性能变化机理及其规律。

收稿日期: 2016-11-08

基金项目: 自然科学基金(51576065); 中央高校基本科研业务费专项(2018MS015); 中央高校基本科研业务费专项(2015RCY05)

通信作者: 戴丽萍(1979—), 女, 博士、讲师, 主要从事风力机空气动力学方面的研究。dailiping@ncepu.edu.cn

1 计算模型、网格划分与数值方法

1.1 计算模型

Tjæreborg 风力机为三叶片、上风向水平轴、定速变桨型风力机,叶片截面采用 NACA 44XX 系列翼型族,风轮直径为 61.1 m,额定轴功率为 2200 kW,额定风速为 14 m/s,额定转速为 22.36 r/min,风轮锥角为 0° ,倾角为 3° ,为简化分析计算,计算设置风轮倾角为 0° ,并忽略塔架、机舱和轮毂的影响。

1.2 网格划分

计算域及边界条件如图 1 所示,采用圆柱型流场。为削弱流场尺寸对数值模拟结果的影响,流场区域中风轮前后及径向均延伸 $10D$,其中 D 为风轮直径。计算中整个流场划分为静止域和旋转域两个部分。进口设定为速度边界条件,3 个坐标方向的速度分量可根据来流速度 V_∞ 与偏航角 β 求出,外圆柱壁边界为自由滑移壁面,叶片是无滑移壁面,出口边界给定大气压力。

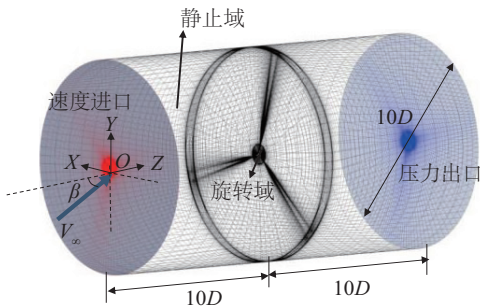


图1 计算域及边界条件

Fig. 1 Domain and boundary conditions

网格划分:采用 AutoGrid5 网格自动生成器划分流场三维网格,叶片附近网格采用 O4H 拓扑结构,生成适应性较好的结构网格。风轮局部网格如图 2 所示。



图2 风轮局部网格

Fig. 2 Grid around wind wheel

风轮中叶片的实际位置用方位角 ψ 来标识,从来流方向看,叶片垂直向上为 0° ,顺时针为正,如图 3 所示。

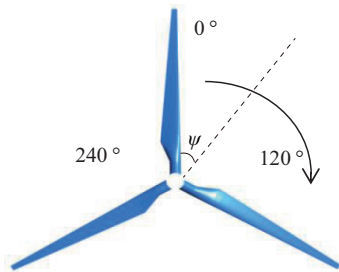


图3 叶片方位角

Fig. 3 Definition of azimuth angle

1.3 数值方法有效性验证

轴向来流均匀风条件下,分别计算 4 种风速下的风力机功率,并与实验值进行对比,如图 4 所示。由图 4 可见,计算值与实验值吻合较好,5 m/s 风速下误差较高,约为 19%,主要是由于小攻角下的翼型升阻比高度依赖于网格分布所引起的;其余风速误差下均在 3% 以内。该结果表明采用的 CFD 方法在中、高风速区是准确有效的。

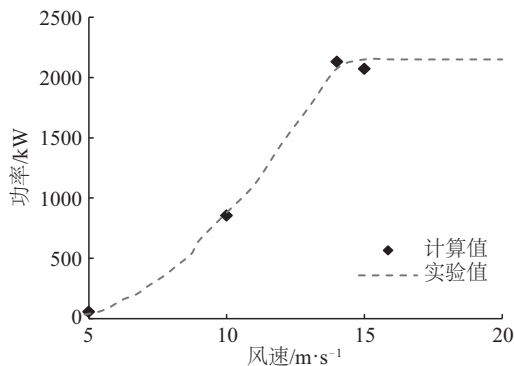


图4 计算功率值与实验值对比

Fig. 4 Comparison of computed power curve

2 结果与分析

2.1 功率及载荷整体性能分布

图 5 为 3 个偏航角下风力机在 1 个周期内的功率变化曲线。与轴向来流工况相比,偏航工况下风轮的输出功率有所降低:偏航 10° 时,风轮输出功率小幅下降,约 1.7%;偏航 30° 时,风轮输出功率下降 19.7%。该结果表明虽然偏航工况下,垂直风轮的速度是以 $\cos\beta$ 规律下降的,而功率并非按照 $\cos^3\beta$

规律下降,而是以介于 $\cos\beta \sim \cos^2\beta$ 之间的规律下降的。此外,还可看出偏航 10° 和 30° 时,风轮输出功率均呈现 $3P$ 波动性质(P 为风轮旋转频率),偏航 10° 时功率波动幅值非常小,约为 0.1% ;偏航 30° 幅值较大,约为 0.4% 。

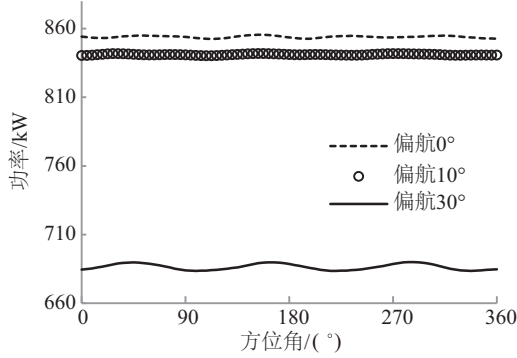


图5 偏航 0° 、 10° 、 30° 功率随方位角变化

Fig. 5 Azimuth variation of power under 0° , 10° , 30° yaw angles

图 6 为 3 个偏航角下风轮推力的分布曲线。与轴向相比,偏航 10° 和 30° 下推力分别下降约 1% 和 11% ,此外风轮推力同样呈现 $3P$ 波动性质。

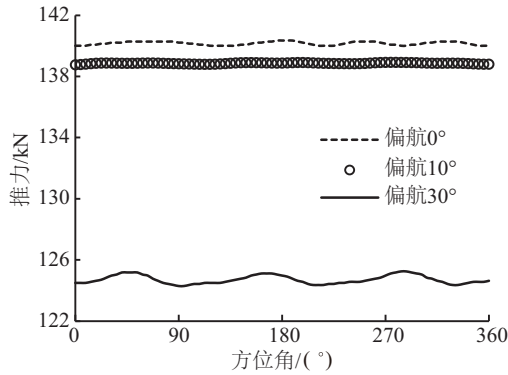
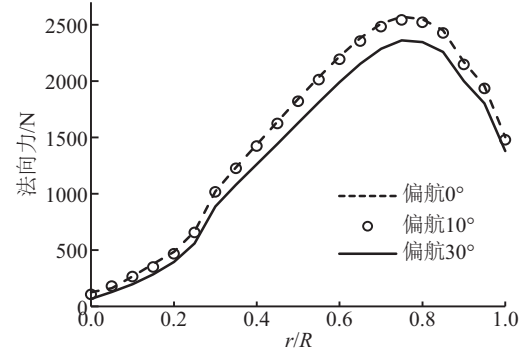


图6 偏航 0° 、 10° 、 30° 风轮推力随方位角变化

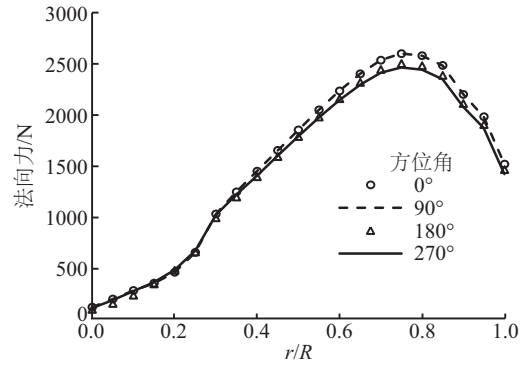
Fig. 6 Azimuth variation of thrust under 0° , 10° , 30° yaw angles

2.2 非定常气动载荷变化规律分析

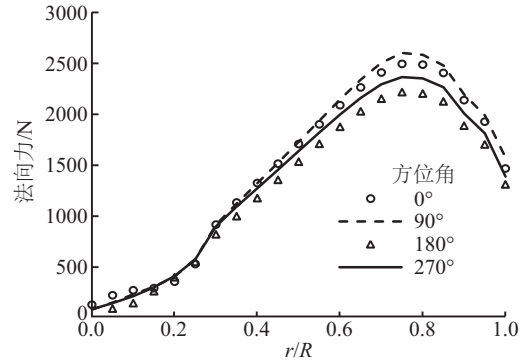
偏航工况下,叶片气动载荷为非稳态参数。各个偏航角下的周期平均法向力及 2 个偏航角下典型方位角下的法向力分布如图 7 所示。由图 7 可见:1)偏航 10° 时法向力变化很小,随着偏航角的增加,差距逐渐增大,偏航 10° 和 30° 下平均法向力分别下降约 1% 和 10% ;2)各个方位角下法向力沿径向的变化趋势一致,均为在 $0.75R$ (R 为叶片展长)位置附近达到最大值;3)在同一个偏航角下,法向力



a. 偏航 0° 、 10° 、 30° 平均法向力分布



b. 偏航 10° 各方位角的法向力分布



c. 偏航 30° 各方位角的法向力分布

图7 法向力径向分布

Fig. 7 Normal force distribution along spanwise direction

在各个方位角的分布有所不同: 0° 方位角和 90° 方位角下的法向力接近,高于另外 2 个方位角。气动载荷的分布与当地入流速度、攻角或入流角的分布有关,忽略轴向和周向诱导因子的情况下,入流角 Φ 和相对入流速度 V_{rel} 的变化可分别用式(1)和式(2)计算。

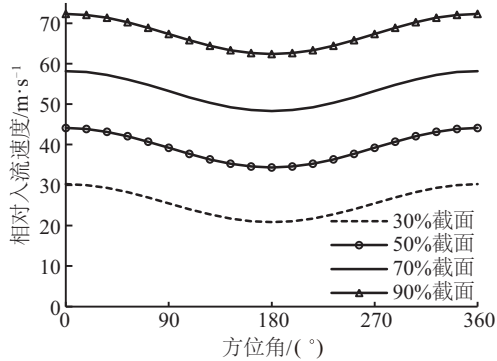
$$\Phi = \arctan\left(\frac{V_\infty \cos\beta}{V_\infty \sin\beta \cdot \cos\psi + \Omega \cdot r}\right) \quad (1)$$

$$V_{rel} = \sqrt{(V_\infty \cos\beta)^2 + (V_\infty \sin\beta \cdot \cos\psi + \Omega \cdot r)^2} \quad (2)$$

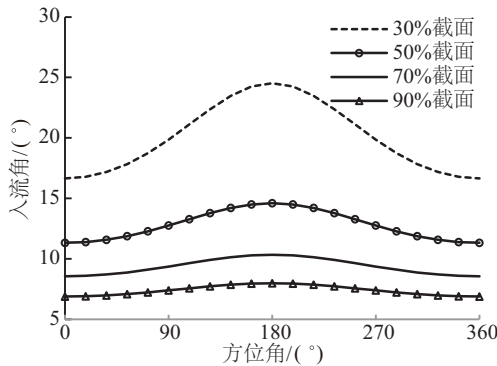
式中, Ω ——风轮旋转角速度, rad/s; r ——所在截

面对应的叶片半径, m ; ψ ——风轮方位角, rad 。

根据式(1)、式(2)计算得到的 30° 偏航角下 4 个典型半径处的入流角和相对入流速度如图 8 所示。可看出, 0° 方位角下风轮叶片正对来流速度的切向分速度方向, 因此入流速度较大, 180° 方位角下叶片远离来流速度的切向分速度, 入流速度较小。入流角或攻角的分布趋势与此相反, 气动载荷为二者共同作用的结果, 表现为 0° 和 90° 方位角的法向力高于另外 2 个方位角下的法向力。



a. 相对入流速度分布



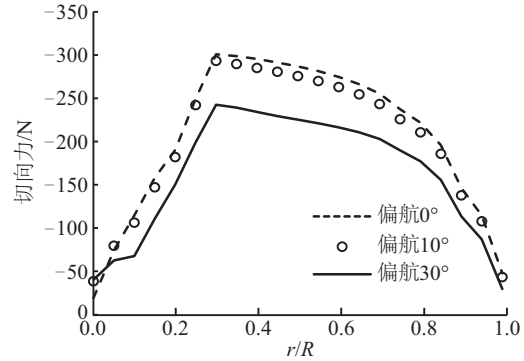
b. 入流角分布

图 8 偏航 30° 工况下相对入流速度及入流角分布

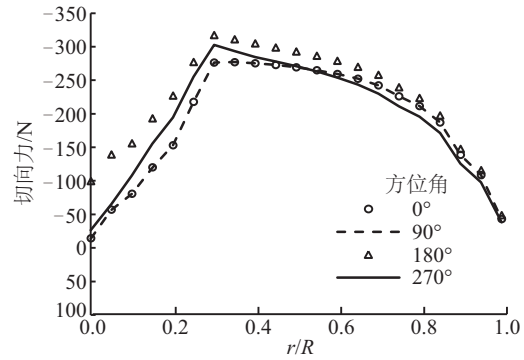
Fig. 8 Relative velocity and flow angle distribution under yaw angle of 30° condition

图 9 为平均切向力、偏航 10° 和 30° 下的各方位角的切向力分布。可看出, 各个偏航角下的切向力均为在 $0.3R$ 附近达到最大, 对应叶片弦长最大位置处。偏航 10° 和 30° 下平均切向力分别下降约 3.7% 和 21% 。比较图 8 和图 10 法向力和切向力的瞬时分布, 可看出, 法向力在 0° 方位角下的值高于 180° 方位角, 切向力则相反, 说明法向力更多取决于入流速度的变化, 而切向力更多取决于入流角的变化。 90° 方位角和 270° 方位角下当地入流速度和入流角相同, 其气动载荷的差别应与来流风速在风轮

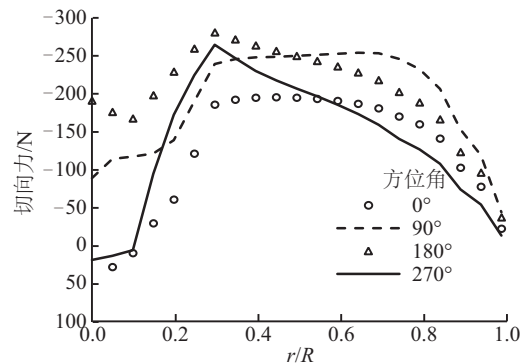
平面的分量有关。此外, 根据切向力和法向力沿径向上的分布可知总的气动载荷沿径向分布。由于法向力载荷远大于切向力载荷, 因此叶片总的气动载荷集中在叶片 $50\% \sim 80\%$ 截面处。



a. 偏航 0° 、 10° 、 30° 平均切向力分布



b. 偏航 10° 各方位角的切向力分布



c. 偏航 30° 各方位角的切向力分布

图 9 切向力径向分布

Fig. 9 Tangential force along spanwise direction

图 10 为偏航 30° 时 70% 叶展截面处气动载荷的周向分布。可看出, 随方位角的变化法向力和切向力都产生一定的振荡变化, 法向力在约 60° 方位角附近最大, 切向力在约 110° 方位角附近最大。总的来看, 90° 方位角附近是气动载荷较高的区域。

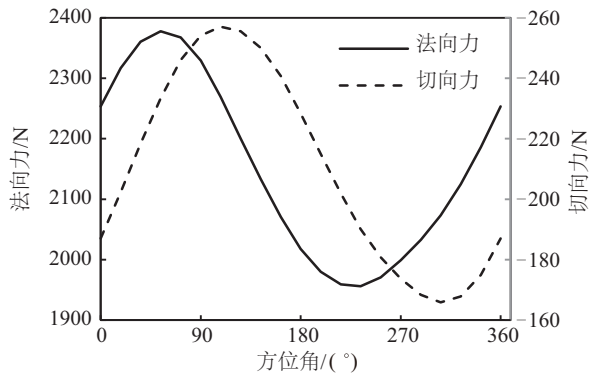


图 10 偏航 30°叶展 70%截面 1 个周期内气动载荷分布
Fig. 10 Aerodynamic load distribution at spanwise 70% section under yaw angle of angle of 30°

2.3 叶片极限流线与表面压力分布

90°方位角及 270°方位角下的气动性能差别与来流风的切向分速度有关。关于切向速度对流动的影响,可通过图 11 所示的叶片表面极限流线分布来进行了解。由图 11 可见除了叶根大攻角区域产生分离外,叶片其余区域流动附着良好。90°方位角和 270°方位角时,来流风切向分速度分别产生指向叶片内侧和叶片外侧的径向流动,使得根部的分离区分别压缩和拉长。0°和 180°方位角下根部分离区主要是由前所述的攻角变化所支配的,即 0°方位角下攻角最小,分离区对应最小,180°方位角与之相反。因此,0°和 90°方位角下的分离区较小,仅存在分离线,而 180°和 270°方位角下的分离区较大,分离线前移并伴随有再附区域和再附线的存在。各个方位角下离心力和哥氏力均指向外侧,因此叠加来流切向风后 270°方位角下沿径向流向外侧趋势要比 90°方位角下流动内侧的趋势更加明显,导致基本相同的入流速度下 90°方位角的压力和气动载荷略高于 270°。

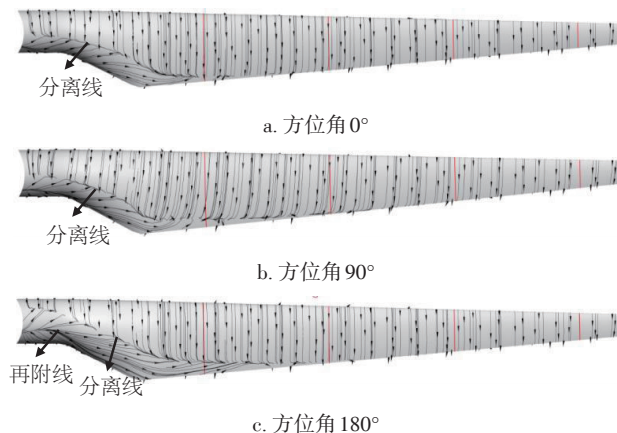


图 11 偏航 30°压力、流线与叶片表面极限流线分布
Fig. 11 Pressure, streamline and limiting streamline distribution on surface at different azimuth angle under yaw angle of 30°

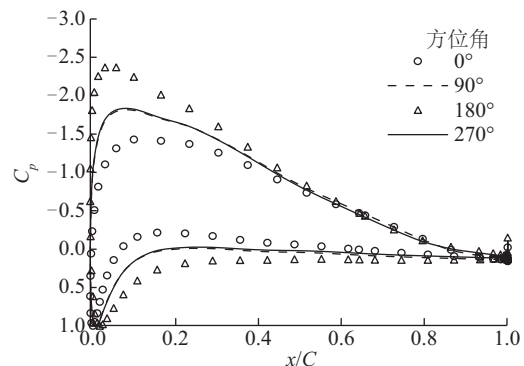
在前面的分析中,忽略了轴向和切向 2 个诱导因子的变化。实际流动中,二者可能会对流动产生一定影响。攻角与无量纲压力系数分布有着紧密联系,叶片表面无量纲压力系数可由式(3)计算得到:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q} \quad (3)$$

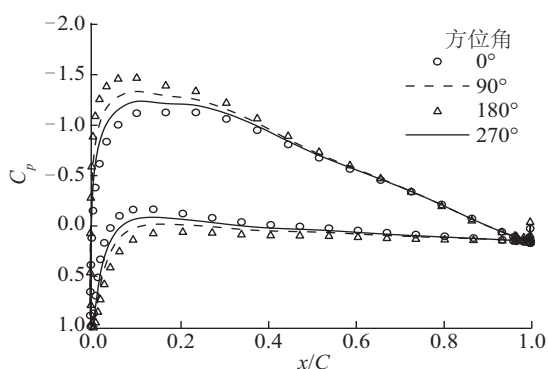
$$q = \frac{1}{2} \rho \left[(V_\infty \cdot \sin \beta \cdot \cos \psi + \Omega \cdot r)^2 + (V_\infty \cdot \cos \beta)^2 \right] \quad (4)$$

式中, C_p ——无量纲压力系数; p ——截面静压, Pa; p_∞ ——来流风压强, Pa; q ——入流动能, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$; ρ ——空气密度, kg/m^3 。

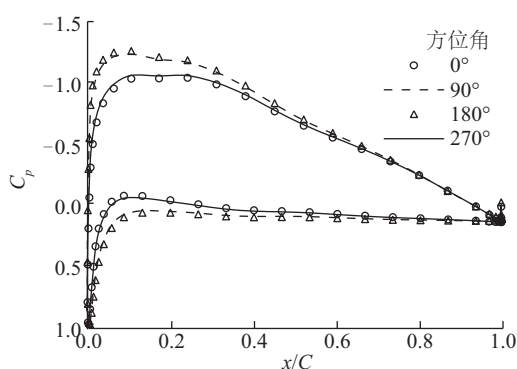
图 12 为偏航 30°时叶片的不同截面(30%、50%、70%、90%)在不同方位角(0°、90°、180°、270°)下的压力系数分布曲线(图中 x/C 为相对弦向位置, C 为弦长)。由图 11 可见,方位角 90°和 180°对应的吸力面峰值较高,表明攻角也较大;0°和 270°方位角对应吸力面峰值较低,攻角较小。这与前面入流角及来流切向分速度对载荷的影响是一致的。此外,从叶根到叶尖,方位角 90°的吸力面峰值逐渐超过 180°对应峰值,方位角 270°的吸力面峰值逐渐低于 0°对应峰值,表明来流风引起的径向流动对外叶展的影响要高于对内叶展的影响。



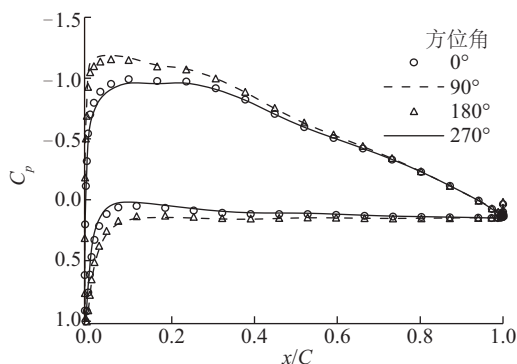
a. 偏航 30°下 30%截面不同方位角的压力分布



b. 偏航 30°下 50%截面不同方位角的压力分布



c. 偏航 30°下 70%截面不同方位角的压力分布



d. 偏航 30°下 90%截面不同方位角的压力分布

图 12 偏航 30°各截面的压力分布

Fig. 12 Pressure coefficient distribution at different spanwise sections under yaw angle of 30°

3 结 论

通过对 Tjæreborg 2 MW 风力机风轮在偏航 0°、10°、30°工况下的气动特性进行分析,可得出以下结论:

1)与轴流工况相比,偏航时功率平均值以介于 $\cos\beta \sim \cos^2\beta$ 之间的规律下降。偏航运行时,风轮特性(如功率、推力)在旋转周期内呈现 3P 波动特性,偏航角越大,波动幅值越大。

2)偏航运行时,由于切向分速度的存在,使得入流角、入流速度产生周期性变化,并进一步影响气动载荷分布。对 Tjæreborg 风力机而言,90°方位角附近区域是气动载荷最大区域。

3)偏航中来流风切向分速度产生指向内径的流动时,根部分离区减小,气动载荷增大;产生指向外径的流动时,根部分离区增大,气动载荷减小。沿叶展方向,径向流动对叶尖的影响较叶根的大。

【参考文献】

- [1] 何玉林,刘卫,李奇敏,等. 稳态偏航状态的风力机风轮气动研究[J]. 机械设计, 2010, 27(4): 79—83.
- [1] He Yulin, Liu Wei, Li Qimin, et al. Research on the aerodynamic of the wind turbine in the state of steady yaw[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(4): 79—83.
- [2] Jeong Min-Soo, Kim Sang-Woo, Lee In, et al. The impact of yaw error on aeroelastic characteristics of a horizontal axis wind turbine blade[J]. Renewable Energy, 2013, 60: 256—268.
- [3] 徐浩然,杨华,朱卫军,等. 偏航工况下水平轴风力机叶片气动变形数值模拟研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(5): 51—55.
- [3] Xu Haoran, Yang Hua, Zhu Weijun, et al. Numerical study on horizontal wind turbine blades deflections under yaw conditions[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(5): 51—55.
- [4] Noura B, Dobrev I, Dizene R, et al. Experimental study of yawed inflow around wind turbine rotor[J]. Journal of Power and Energy, 2012, 226 (5): 664—673.
- [5] Ozbay A. An experimental investigation on wind turbine aeromechanics and wake interferences among multiple wind turbines[D]. Iowa: Iowa State University, 2014.
- [6] Verelst D R S, Larsen T J, Van Wingerden J W. Wind tunnel tests of a free yawing downwind wind turbine[A]. Journal of Physics: Conference Series (Volume 753), The Science of Making Torque from Wind [C]. Oldenburg (Oldb), Germany, 2012.
- [7] Hand M M, Simms D A, Fingersh L J, et al. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns[R]. NREL/TP-500-29955, 2001.
- [8] Tongchitpakdee C, Benjanirat S, Sankar L. Numerical simulation of the aerodynamics of horizontal axis wind

- turbines under yawed flow conditions [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(4): 464—474.
- [9] Yu Dong Ok, You Ju Yeol, Kwon Oh Joon. Numerical investigation of unsteady aerodynamics of a horizontal-axis wind turbine under yawed flow conditions [J]. *Wind Energy*, 2013, 16: 711—727.
- [10] 陈晓明, 康 顺, 左 薇. 基于 FlowVision 的水平轴风力机偏航气动性能研究 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(9): 1758—1761.
- [10] Chen Xiaoming, Kang Shun, Zuo Wei. Research of yaw aerodynamic characteristic of horizontal-axis wind turbine based on FlowVision [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(9): 1758—1761.
- [11] 姚世刚, 戴丽萍, 康 顺. 风力机叶片气动性能及流固耦合分析 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5): 988—992.
- [11] Yao Shigang, Dai Liping, Kang Shun. Aerodynamic performance and fluid-structure coupling analysis of wind turbine blades [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(5): 988—992.
- [12] Ángel J, Antonio C, Emilio M. Application of a LES technique to characterize the wake deflection of a wind turbine in yaw [J]. *Wind Energy*, 2009 (13): 559—572.
- [13] Li Yuwei, Paik K-J, Xing Tao, et al. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics [J]. *Renewable Energy*, 2012, 37: 285—298.

NUMERICAL SIMULATIONS ON AERODYNAMIC PERFORMANCE OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE UNDER YAW CONDITIONS

Dai Liping, Zhou Qiang, Yao Shigang, Kang Shun, Wang Xiaodong

(MOE's Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The aerodynamic characteristics of the Tjæreborg 2 MW wind turbine rotor were researched under yaw angles of 0° , 10° , 30° based on computational fluid dynamics method (CFD) by solving the URANS equations with the SST turbulence model. Numerical results of power agree well with the experimental values. Under yaw conditions, wind wheel power and thrust behave $3P$ properties in one rotational period. The azimuthal variation of aerodynamic loads is characterized by alternating properties of approximate sine curve with the maximum value occurred in region near azimuth angle of 90° .

Keywords: Tjæreborg wind turbine; blade; yaw condition; aerodynamics performance; numerical simulation