

风剪切来流下风力机叶片表面压力的分布规律

杨从新¹, 张旭耀¹, 李银然¹, 郜志腾¹, 张 静²

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 兰州 730050)

摘 要: 以某 33 kW 两叶片水平轴风力机的风轮和 NREL Phase VI 风力机叶片为研究对象, 数值模拟得到均匀来流条件下 NREL Phase VI 风力机叶片表面压力系数的分布规律并与实验值进行对比, 验证数值计算方法的有效性。在此基础研究不同风剪切来流对风力机叶片表面压力的影响及风剪切来流下叶片表面压力随方位角的变化规律。结果表明: 当风剪切指数由 0.3 增至 0.5 时, 叶片表面压力在不同方位角下发生不同的变化; 剪切来流下, 在叶片压力面和吸力面未发生流动分离的区域, 压力随方位角呈现正余弦的变化趋势, 越靠近尾缘, 压力的波动幅度越小; 在吸力面压力最小值的位置压力随方位角的波动幅度最大; 在叶片吸力面发生流动分离的区域, 压力随方位角的波动不稳定; 无论是压力面还是吸力面, 压力随方位角的变化均存在相位滞后现象, 越靠近叶根, 滞后现象越明显。

关键词: 风剪切; 风力机; 表面压力; 分布规律

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

随着风能开发规模的加大, 水平轴风力机逐渐向大型化趋势发展, 风剪切对风力机的影响越来越明显。风力机空气动力学是当前研究的热点^[1]。风力机叶片表面压力的研究是风力机风轮气动研究的重点内容^[2]。通过叶片的表面压力分布可以计算叶片的气动载荷, 求出风轮的转矩和风轮的输出功率。因此, 有必要在剪切来流下对风力机叶片表面压力的分布规律进行研究。文献[3~7]在均匀来流条件下对风力机的气动性能和载荷进行了研究。文献[8]运用数值模拟的方法, 在剪切来流下对风力机的气动特性进行了研究, 研究表明, 剪切来流下轴向力和轴向速度相对相位角存在相位偏移现象。王胜军等^[9]利用致动线模型对剪切来流下风力机尾流结构进行了研究, 得出剪切来流下风力机尾流存在明显的非对称特征。文献[10~13]在剪切入流条件下对风力机的气动载荷和气动性能进行了研究。

以上在剪切来流条件下对风力机的研究, 主要

集中在对载荷和流场结构的分析, 并未明确反映出剪切来流下风力机叶片表面压力分布的非定常特性。本文在剪切来流下, 采用基于滑移网格的非定常数值计算方法, 研究不同风剪切来流对风力机叶片表面压力的影响及叶片表面压力在不同方位角下的分布规律。

1 数值计算

1.1 计算模型及网格分布

以某 33 kW 两叶片水平轴风力机的风轮为研究对象, 如图 1 所示, 其叶片采用 NACA44XX 系列翼型, 风轮锥角和倾角都为 0°, 风轮直径为 14.8 m, 轮毂高度为 15.4 m。数值计算区域分为圆柱形的静止域和旋转域, 静止域直径为 2D, 风轮距离入口的距离为 2D, 距离出口的距离 5D, 其中 D 为风轮直径。计算域如图 2 所示。



图1 风轮几何模型

Fig. 1 Rotor geometry model

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2014CB046201); 国家自然科学基金(11262011; 51566011)

通信作者: 张旭耀(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事风力机空气动力学方面的研究。zxy0932@163.com

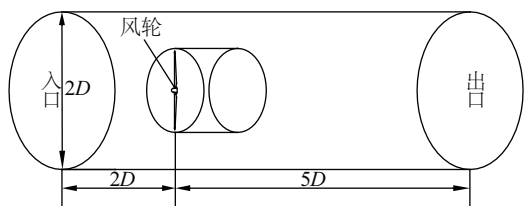


图2 计算域示意图

Fig. 2 Schematic of the computational domain

采用六面体网格对整个计算域进行划分,经过网格的无关性验证,最终确定沿叶片弦长向布置 80 个节点,展向布置 210 个节点,对叶尖、叶根及叶片周围进行了加密处理,整个计算域网格总数约为 4200 万。部分计算域网格分布如图 3 所示。

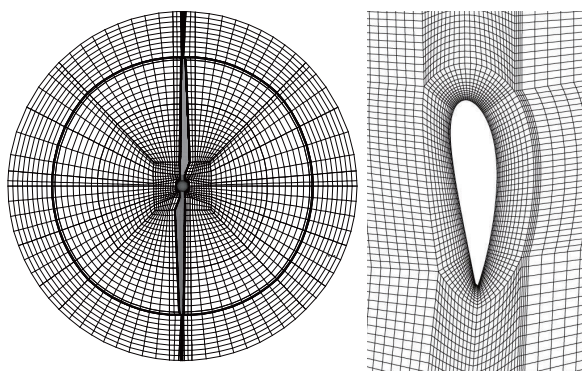


图3 部分计算域的网格分布

Fig. 3 Mesh configurations of the computational domain

1.2 数值计算方法及边界条件

采用 Fluent 求解基于雷诺时均的三维不可压 N-S 方程,方程的离散均采用 2 阶迎风格式,压力和速度的耦合采用 SIMPLEC 算法,选用 $k-\omega$ SST 湍流模型。在剪切来流下,采用指数律来描述风速随高度的变化规律,风剪切指数分别取 0.3、0.4、0.5,轮毂高度处的风速为 11 m/s。计算域入口通过用户自定义函数(UDF)的形式给定剪切入流速度,来流湍流强度为 10%,出口设为压力出口,静压设置为零,风轮表面为无滑移壁面,风轮转速为 85 r/min,风轮逆时针旋转。静止域和旋转域的交界面设置为 Interface 面。非定常计算时间步长为 0.00392157 s,即叶片旋转 2° 所用的时间。

2 数值计算方法验证

以 NREL Phase VI 风力机为例,采用上述数值

计算方法,在均匀来流风速为 7 m/s,风轮转速为 72 r/min 时,计算得到叶片展向 3 个截面处表面压力系数的分布并与实验结果进行对比,结果如图 4 所示,由图 4 可知,数值计算结果与实验结果吻合较好,所得到的结果与文献[13]中的结果相似。因此,本文所采用的数值计算方法能够模拟风力机的流动特性,所得到的计算结果可以作为进一步分析的依据。

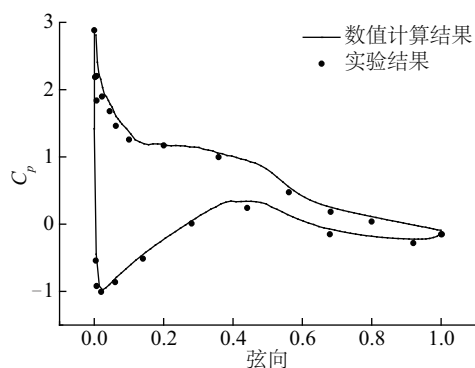
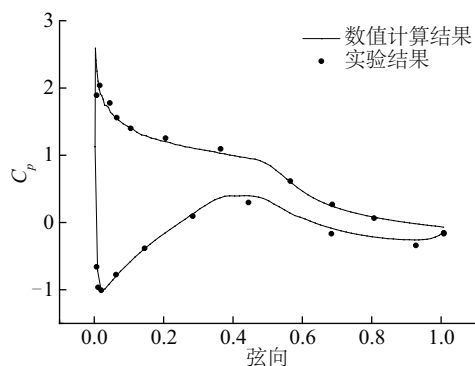
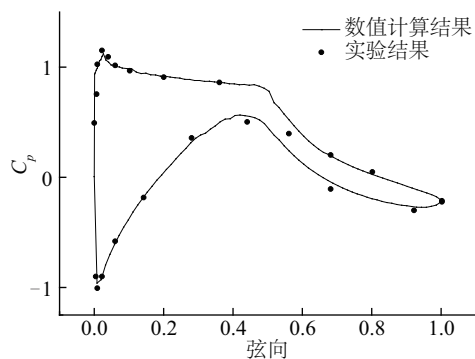
a. $r/R=30\%$ b. $r/R=63\%$ c. $r/R=95\%$

图4 叶片展向截面处表面压力系数的数值结果与实验结果的比较

Fig. 4 Pressure coefficient distribution at the spanwise locations by numerical results and experimental results

3 结果分析

以叶片旋转至轮毂正上方时的方位角为 0° 。风剪切来流及叶片方位角示意图如图 5 所示。

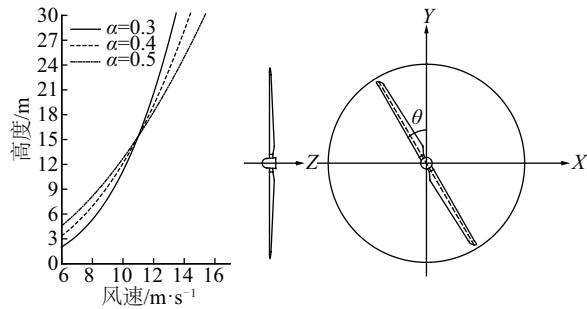
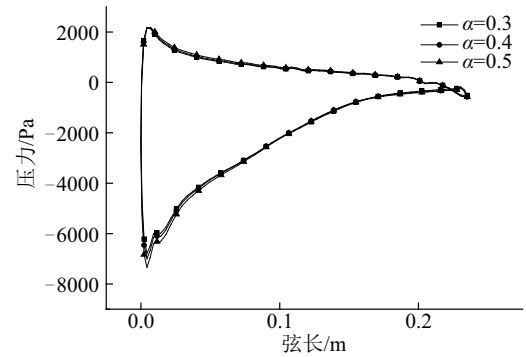


图 5 风剪切来流及叶片方位角示意图

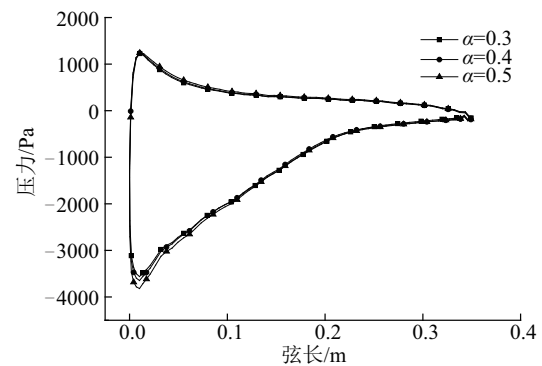
Fig. 5 Schematic of shear inflow and blade azimuth angle

3.1 不同风剪切来流对风力机叶片表面压力的影响

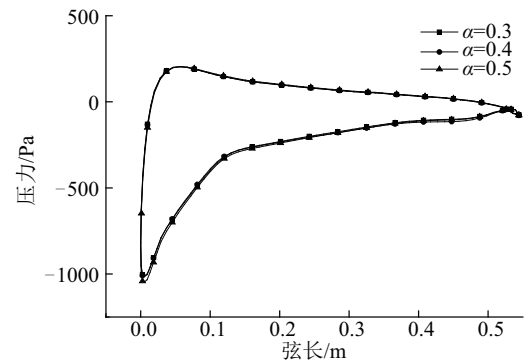
在典型方位角 (0° 、 90° 、 180° 、 270°) 下, 比较不同的风剪切来流对风力机叶片表面压力的影响。在 0° 和 180° 方位角下, 风剪切指数分别为 0.3、0.4、0.5 时叶片表面压力的分布如图 6 所示。由图 6 可知, 在 0° 方位角, 随着风剪切指数的增大, 叶片表面压差逐渐增大, 在叶片前缘部分压差变化明显。风剪切指数由 0.3 增至 0.5, 在靠近叶尖的 $r/R=89.84\%$ 位置吸力面压力最小值的位置表面压力减小了 8.18%。对比不同截面的压力分布可以知, 越靠近叶根, 不同风剪切指数下叶片表面压力差异逐渐减小。在 180° 方位角, 叶片压力的变化趋势与 0° 方位角下的相反。风剪切指数由 0.3 增至 0.5, 在靠近叶尖的 $r/R=89.84\%$ 位置, 吸力面压力最小值的位置表面压力增加了 10.83%。为节省篇幅, 文中未给出 90° 和 270° 方位角下的分布趋势。在 90° 和 270° 方位角, 不同风剪切来流下, 由于来流速度相同, 叶片表面压力没有发生变化。在 0° 方位角, 叶片处在轮毂正上方, 在此位置来流风速随着风剪切指数的增加而增加, 越靠近叶尖, 风速的差异越大。在 180° 方位角, 叶片处在轮毂正下方, 在此位置来流风速随着风剪切指数的增加而减小。越靠近叶尖, 风速的差异也越大。因此, 叶片表面压力在不同方位角下呈现如上所述的变化趋势。



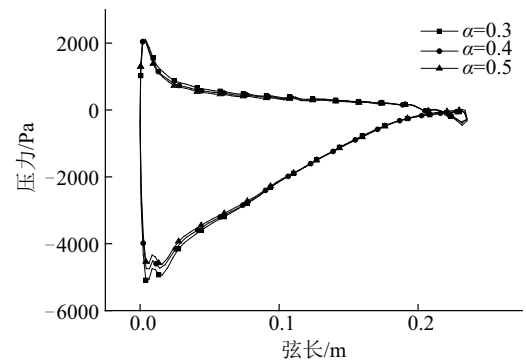
a. $\theta=0^\circ$, $r/R=89.84\%$



b. $\theta=0^\circ$, $r/R=64.84\%$



c. $\theta=0^\circ$, $r/R=19.84\%$



d. $\theta=180^\circ$, $r/R=89.84\%$

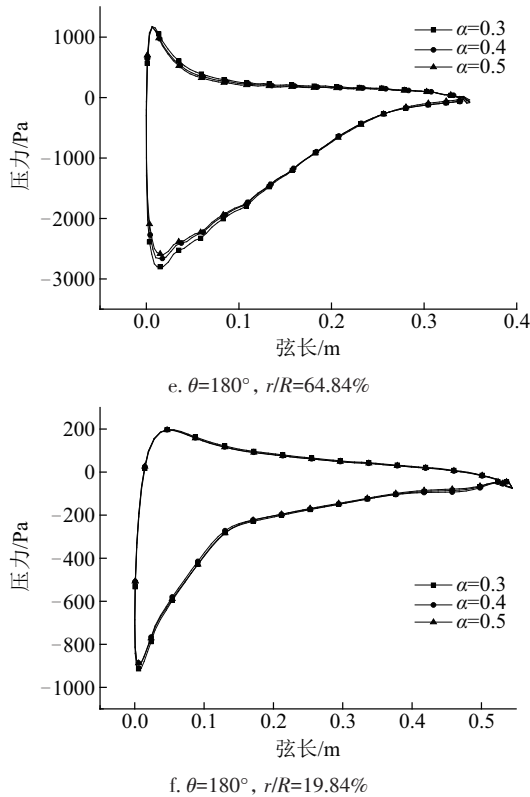


图6 不同风剪切指数下,0°和180°方位角的叶片表面压力分布

Fig. 6 Pressure distribution of blade at 0° and 180° degrees azimuth position under different wind shear exponent

3.2 叶片表面压力在不同方位角下的分布

比较剪切来流下叶片表面压力在不同方位角下的分布规律。图7为风剪切指数为0.5时,在叶片展向3个不同截面位置,叶片表面压力在不同方位角下的分布趋势。由图7可知,在同一截面位置,叶片表面压力在不同方位角下的分布不同。从0°~180°方位角,叶片从较高风速区过渡到较低风速区,叶片压力面的压力逐渐减小,吸力面的压力逐渐增大,压力面和吸力面的压差逐渐减小;相反,从180°~360°方位角,叶片从较低风速区过渡到较高风速区,压力面和吸力面的压差逐渐增大。从图7也可以看出,从叶片前缘到尾缘,叶片压力面的压力在不同方位角下的差异逐渐减小;而吸力面的差异先减小,然后出现无规律的波动。即在吸力面,压力在不同方位角下的变化曲线存在交汇点,在此点压力的波动幅度较小,而在吸力面压力最小值的位置压力在不同方位角下的差异最大。比较3个不同截面位置处的压力分布可知,不论是压力面还是吸力面,越靠近叶根的位置,压力在不同方位角下

的差异越小,这是由于在剪切来流下,越靠近叶根,叶片旋转过程中风速的波动越小。对比90°和270°方位角下的压力分布可知,虽然叶片处在同一高度位置,来流风速相同,但压力分布并不一致,特别在吸力面的位置,越靠近叶根,差异越大。在剪切来流下,旋转风轮对来流的诱导作用引起的风速滞后效应可以为这种现象提供解释,即剪切来流下旋转风轮导致轴向来流偏离原来方位角的位置。在90°方位角时,叶片由高速旋转到低风速区域,而在270°方位角时,叶片由低速旋转到高速区域,由

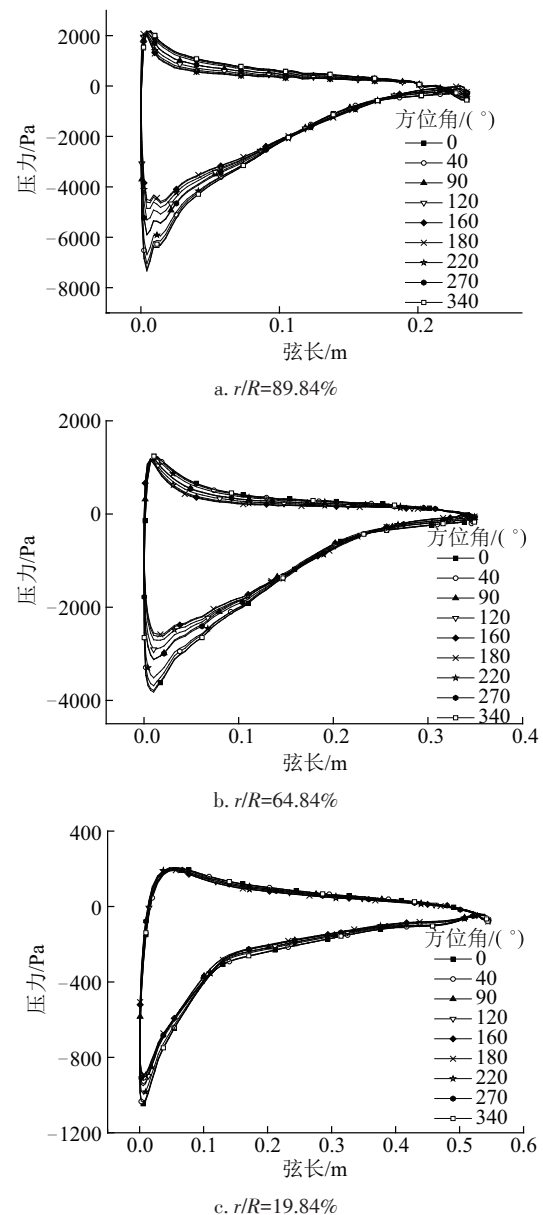


图7 叶片展向3个截面位置处的压力在不同方位角下的分布趋势

Fig. 7 Pressure distribution of three spanwise locations at different azimuth angle

于不同风速下风轮对来流的诱导作用不一样,故叶片表面压力在 90° 和 270° 方位角下有差异,越靠近叶根,叶片旋转的线速度越小,风轮对来流的诱导作用越明显,压力的差异也就越大。此外,该叶片几何模型是通过数码扫描获得,由于靠近叶尖吸力面前缘附近几何模型不光滑,在同一方位角下,截面 $r/R=89.84\%$ 处吸力面靠近前缘附近的压力呈现锯齿状分布。

在叶片压力面和吸力面展向 7 个截面位置处的 3 个弦向位置($x/C=0.3, 0.5, 0.7$)布置叶片表面压力监测点,监测点的示意图如图 8 所示。叶片展向截面 $r/R=96.53\%, 89.84\%, 79.84\%, 64.84\%, 49.77\%, 34.23\%, 19.84\%$ 依次命名为 1#、2#、3#、4#、5#、6#、7# 截面。

图 9 为压力面监测点压力随方位角的变化趋势。由图 9 可知,所有监测点的压力随方位角呈现正余弦的变化趋势。在同一弦向位置,越靠近叶根,监测点压力的波动幅度越小。并且,在叶片

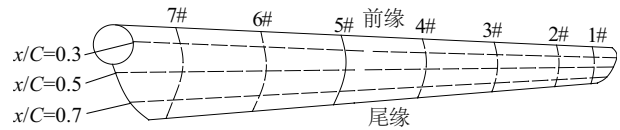


图8 叶片表面压力监测点示意图

Fig. 8 Schematic of pressure monitoring points at blade surface

旋转一周的过程中,除了叶尖处截面位置,越靠近叶根,压力均值越小。在靠近叶尖的截面,由于存在较强的三维流动,压力面的流体绕过叶尖流向吸力面,使得压力面靠近叶尖的截面处的压力值小于与其临近的截面的压力,比较图 9 可以看出,越靠近前缘和尾缘的位置,叶尖三维流动的影响越明显,特别是在靠近尾缘的位置。分析具体的结果还可以得出,监测点的压力波动曲线相对方位角存在滞后现象,即压力的最值并不是出现在风速最值方位角的位置。越靠近叶根的位置,滞后效应越明显。

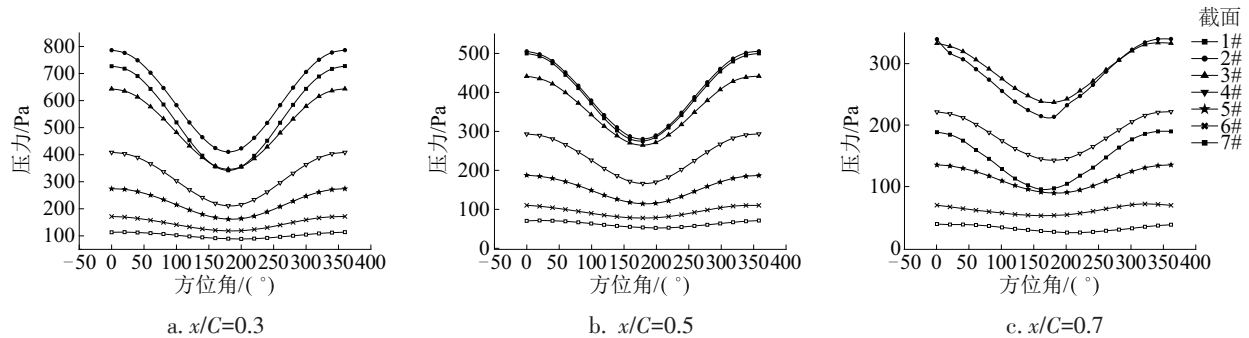


图9 压力面监测点压力随方位角的变化

Fig. 9 The variation of pressure at pressure surface with the azimuth angle

图 10 为吸力面监测点压力随方位角的变化趋势。由图 10 可知,在离前缘 $0.3C$ 的弦向位置,除了靠近叶根的两个截面位置,压力随方位角呈现正余弦的变化趋势;在离前缘 $0.5C$ 和 $0.7C$ 的弦向位置,压力随方位角呈现无规律的变化,特

别是靠近叶尖的位置。同叶片压力面一样,吸力面压力的最值同样存在明显的滞后现象。为分析这一现象,提取来流风速相对较小的 180° 方位角下的叶片吸力面的极限流线,结果如图 11 所示。

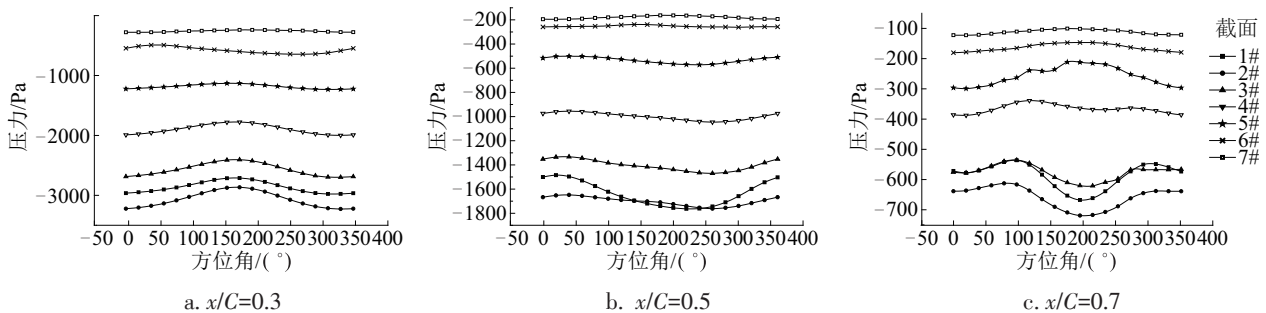


图10 吸力面监测点压力随方位角的变化

Fig. 10 The variation of pressure at suction surface with the azimuth angle

由图 11 可知,在此计算工况下叶片吸力面展向方向都发生了流动分离,叶片展向存在明显的流动分离线,越靠近叶根,流动分离点越接近前缘;同时,由于叶片三维旋转效应的影响,在发生流动分离的区域存在由叶根向叶尖的展向流动。因此,整个叶片吸力面靠近尾缘的位置,流动变得很复杂,导致吸力面压力呈现无规律的波动。从图 10 也可以看出,叶片吸力面靠近叶尖的压力分布也受到三维流动的影响,使得叶尖的流动变得复杂,压力分布更加紊乱。

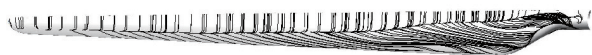


图 11 叶片吸力面的极限流线

Fig. 11 Limiting streamline of blade suction surface

4 结 论

在确认数值计算方法的基础上,研究不同风剪切来流对风力机叶片表面压力的影响,以及叶片表面压力在不同方位角下的分布规律,得出以下结论:

1)当风剪切指数由 0.3 增至 0.5 时,叶片表面压力在不同方位角下发生不同的变化。在 0° 和 180° 方位角,在吸力面压力最小值的位置压力的变化最明显;在 90° 和 270° 方位角,叶片表面压力未发生变化。

2)剪切来流下,在叶片旋转过程中,从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 方位角,叶片展向截面的压差逐渐减小;从 $180^\circ \sim 360^\circ$ 方位角,叶片展向截面的压差逐渐增大。越靠近叶根,压差的波动越小。

3)剪切来流下,在叶片压力面和吸力面未发生流动分离的区域,压力随方位角呈现正余弦的变化趋势,越靠近尾缘,压力的波动幅度越小;在吸力面压力最小值的位置压力随方位角的波动幅度最大;在叶片吸力面发生流动分离的区域,由于流动分离和三维旋转效应的影响,压力随方位角的波动不稳定;同时,压力随方位角的变化存在相位滞后现象,越靠近叶根,滞后现象越明显。

致 谢:甘肃省计算中心为本文提供了计算资源,在此表示衷心的感谢。

[参考文献]

- [1] 王 珑, 王同光. 风力机设计及其空气动力学问题[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(12): 1579—1588.
- [1] Wang Long, Wang Tongguang. Wind turbine design and its aerodynamic issues[J]. SCIENTIA SINICA: Physics, Mechanics & Astronomy, 2013, 43(12): 1579—1588.
- [2] 李仁年, 袁尚科, 魏列江, 等. 风力机叶片表面压力的计算与外场测试分析[J]. 实验流体力学, 2012, 26(5): 52—56.
- [2] Li Rennian, Yuan Shangke, Wei Liejiang, et al. Measurement and calculation of blade surface pressure for a wind turbine in field[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(5): 52—56.
- [3] Yelmule M M, Anjuri E R. CFD predictions of NREL phase VI rotor experiments in NASA/AMES wind tunnel[J]. International Journal of Renewable Energy Research, 2013, 3(2): 261—269.
- [4] Moshfeghi M, Song Yajun, Xie Yong Hui. Effects of near-wall grid spacing on SST- $k-\omega$ model using NREL phase VI horizontal axis wind turbine[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2012, 107-108: 94—105.
- [5] 李宇红, 张庆麟. 风力机叶片三维流动特性与气动性能的数值分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(9): 1172—1176.
- [5] Li Yuhong, Zhang Qinglin. Numerical simulation of flow field and aerodynamic performance of a wind turbine blade[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2008, 29(9): 1172—1176.
- [6] 李德顺, 李仁年, 王秀勇, 等. 基于外场实验的风力机叶片三维效应研究[J]. 应用数学和力学, 2013, 34(10): 1073—1082.
- [6] Li Deshun, Li Rennian, Wang Xinyong, et al. Investigation of three-dimensional effect on blades of a wind turbine based on field experiments[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(10): 1073—1082.
- [7] 范忠瑶, 康 顺, 王建录. 风力机叶片三维数值计算方法确认研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 279—285.
- [7] Fan Zhongyao, Kang Shun, Wang Jianlu. The validate and research on 3D numerical simulation of the aerodynamic performance of wind turbine blades[J].

- Acta Energaie Solaris Sinica, 2010, 31(3): 279—285.
- [8] Sørensen N N, Johansen J. Up wind, aerodynamics and aero-elasticity rotor aerodynamics in atmospheric shear flow [A]. Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition[C], Milan, Italy, 2007.
- [9] 王胜军, 张明明, 刘梦亭, 等. 切变入流风况下风力机尾流特性研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(8): 1521—1525.
- [9] Wang Shengjun, Zhang Mingming, Liu Mengting, et al. Study of wake characteristics of wind turbine operating in shear inflow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(8): 1521—1525.
- [10] Jeong Min-Soo, Kim Sang-Woo, Lee In, et al. Wake impacts on aerodynamic and aeroelastic behaviors of a horizontal axis wind turbine blade for sheared and turbulent flow conditions[J]. Journal of Fluids & Structures, 2014, 50: 66—78.
- [11] 刘 磊, 石可重, 杨 科, 等. 风切变对风力机气动载荷的影响[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1667—1670.
- [11] Liu Lei, Shi Kezhong, Yang Ke, et al. Effect of wind shear on the aerodynamic load of wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(10): 1667—1670.
- [12] Shen Xin, Zhu Xiaocheng, Du Zhaohui. Wind turbine aerodynamics and loads control in wind shear flow [J]. Energy, 2011, 36(3): 1424—1434.
- [13] 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.
- [13] Chen Xiaoming, Kang Shun. Research of wind turbine aerodynamic characteristics under yaw and shear [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1105—1111.

DISTRIBUTION LAW OF SURFACE PRESSURE OF WIND TURBINE BLADE UNDER WIND SHEAR FLOW

Yang Congxin¹, Zhang Xuyao¹, Li Yinran¹, Gao Zhiteng¹, Zhang Jing²

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Lanzhou Lanshi Energy Equipment Engineering Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking the wind rotor of a 33 kW two-bladed horizontal-axis wind turbine and the NREL Phase VI wind turbine blade as the research object, the distribution law of surface pressure coefficient of NREL Phase VI wind turbine blade under uniform flow condition was obtained through numerical simulation, the result was compared with the experimental value to verify the validity of the numerical calculation method. Based on this, the effects of different wind shear flow on the surface pressure of the wind turbine blade and the variation law of the surface pressure of the blade with the azimuth angle under wind shear were studied. The results show that when the wind shear exponent increases from 0.3 to 0.5, the surface pressure of blade has different changes under different azimuth angle; In the shear inflow, in the area where the pressure surface and the suction surface of the blade do not separate, the pressure exhibits a positive cosine variation with the azimuth angle, the closer to the trailing edge, the smaller the pressure fluctuation is. At suction surface pressure minimum position, the pressure fluctuation with azimuth angle is the largest. In the region where flow separation occurs on the suction surface of the blade, the pressure fluctuation with the azimuth angle is unstable; No matter the pressure surface or suction surface, there is phase lag phenomenon in the pressure change with the azimuth angle. The closer to the blade root, the more obvious the hysteresis phenomenon is.

Keywords: wind shear; wind turbine; surface pressure; distribution law