

风剪切来流下风力机流场特性与 风轮气动载荷研究

张旭耀¹, 杨从新^{1,2}, 李寿图^{1,2}, 郜志腾¹, 罗 颂¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 以某 33 kW 两叶片水平轴风力机的风轮为研究对象, 采用 CFD 方法, 研究风剪切来流下水平轴风力机流场特性与风轮气动载荷的分布规律。结果表明: 在剪切来流下, 风轮上游来流风速随方位角的波动曲线偏离由理论计算得到的风速波动曲线; 尾流区轴向速度呈现非对称性分布, 轮毂上方叶尖涡和叶根涡的移动速度大于轮毂下方叶尖涡和叶根涡的移动速度; 同时, 风力机叶片和风轮的气动载荷随方位角呈现正余弦的变化趋势, 风轮气动载荷功率谱曲线的峰值对应的频率与叶片通过频率的整数倍相关。当风剪切指数由 0.1 增大到 0.5 时, 风轮转矩和推力的均方根分别减小 2.28% 和 1.43%, 但其波动幅值随风剪切指数的增大而增大, 并且风轮转矩和推力随方位角的波动曲线存在相位偏移现象, 风剪切指数越大, 相位偏移现象越明显; 风轮偏航力矩和倾覆力矩的均方根分别增大 4.07 倍和 4.04 倍, 且其波动幅值随风剪切指数的增大而增大。

关键词: 风剪切; 风力机; 流场特性; 气动载荷

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

由风剪切引起的风载荷的非均匀分布对风力机的使用寿命和运行安全产生影响^[1]。同时, 剪切来流的不均匀性不仅导致风力机产生更复杂的尾流结构^[2], 而且对风力机叶片产生不利的载荷和变形^[3]。随着风力机风轮直径的增大, 风剪切对风力机的影响越来越明显^[4]。

文献[5~7]对风力机尾流特性和气动载荷进行研究, 均基于均匀来流条件下进行; 文献[8~10]考虑来流剪切效应的影响, 通过风洞实验研究风力机近尾流流场特性, 得到的结果为风力机数值模拟提供一定的参考, 但由于实验条件的限制, 实验以较小的风力机模型为研究对象; 文献[11~13]采用自由涡尾迹方法, 研究风剪切对风力机尾迹和气动性能的影响, 然而研究中未考虑不同风剪切来流对气动载荷的影响; 文献[14, 15]采用致动线模型研究剪切来流下风力机的尾流特性, 相比 CFD 方法, 致

动线模型节省计算资源, 但致动线模型的准确性受翼型气动数据的影响。

鉴于此, 本文采用 CFD 方法, 在确认数值计算方法准确性的基础上, 在不同剪切来流条件下, 对某 33 kW 两叶片水平轴风力机的风轮进行全三维非定常数值计算, 研究剪切来流下风力机流场特性和不同剪切来流下风轮气动载荷的变化规律。

1 计算模型

计算模型采用 NREL Phase VI 风力机风轮和某 33 kW 水平轴风力机风轮, 风轮的几何参数见表 1。

表 1 风轮几何参数

Table 1 Geometric parameters of rotor

几何参数	某 33 kW 风轮	NREL Phase VI
风轮直径/m	14.8	10.058
风轮锥角/(°)	0	0
翼型分布	NACA44XX	S809
叶片个数	2	2

收稿日期: 2017-05-17

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(51566011)

通信作者: 杨从新(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事流体机械设计方面的研究。yexwind@163.com

2 数值计算方法及边界条件

以剪切来流下的计算模型为例介绍数值计算方法。数值计算求解基于雷诺时均的三维不可压 N-S 方程, 方程的离散均采用二阶迎风格式, 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, 采用如式(1)所示的指数律来描述风速随高度的变化规律, 剪切来流及方位角示意图如图 1 所示。

$$V(H) = V(h) \left(\frac{H}{h} \right)^\alpha = V(h) \left(\frac{r \cos \theta + h}{h} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, $V(H)$ ——离地面高度 H 处的风速; h ——轮毂高度; $V(h)$ ——轮毂高度处的风速; α ——风剪切指数; θ ——方位角, r ——离风轮中心的距离。

在剪切来流时, 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, 轮毂高度处的风速为 11 m/s, 风剪切指数分别取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5。来流湍流强度为 10%, 出口设为压力出口, 静压设置为 0 Pa, 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(从风轮上游看)。非定常计算的时间步长设为 0.00392157 s, 即叶片旋转 2° 用时。

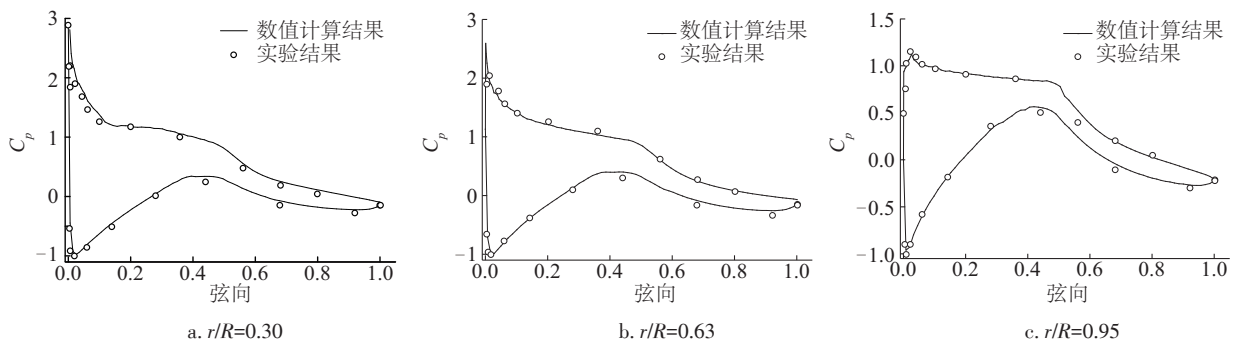


图2 叶片展向截面处表面压力系数的数值结果与实验结果的比较

Fig. 2 Pressure coefficient distribution at spanwise locations by numerical results and experimental results

4 结果分析

4.1 风轮上游轴向速度在不同方位角下的分布

以风剪切指数为 0.5 的来流条件为例研究剪切来流下的流场特性。

图 3 为风剪切指数为 0.5 时, 在风轮上游垂直于旋转轴的 XY 平面($Z/D=0.1、1.0$)内, 轴向速度在不

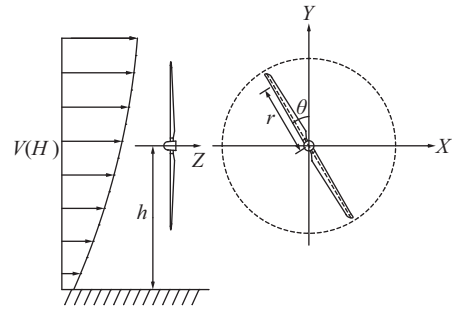


图1 剪切来流及方位角示意图

Fig. 1 Schematic of shear inflow and azimuth angle

3 数值计算方法的验证

因 NREL Phase VI 风力机实验数据全面可靠, 国内外学者将其作为验证风力机数值计算方法和程序的依据。鉴于此, 本文也采用 NREL Phase VI 风力机实验数据验证数值计算方法的准确性。在均匀来流风速为 7 m/s, 风轮转速为 72 r/min 时, 数值计算得到叶片展向不同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 2 所示, 由图 2 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[16]计算结果相似, 证明本文所采用的数值计算方法的可靠性, 因此, 采用上述数值计算方法得到的结果可作为进一步分析的依据。

同径向位置($r/R=0.25、0.5、0.85$)处的分布, 图中理论值表示由式(1)计算得到的不同位置处的风速值。由图 3 可知, 在上游靠近风轮的位置, 旋转风轮的诱导作用使得来流风速随方位角的波动曲线偏离由理论计算所得到的风速波动曲线, 诱导后的来流风速随方位角呈现出不规则的正余弦的变化趋势, 使得风速最值出现的方位角偏离由理论计算所得到的风速最值的方位角, 越靠近风轮, 偏离程

度越大。对比图 3 可知,越靠近叶根的位置,诱导效应越明显,这是因为在不同的径向位置,叶片的

旋转线速度不同,越靠近叶根的位置,叶片的旋转线速度越小。

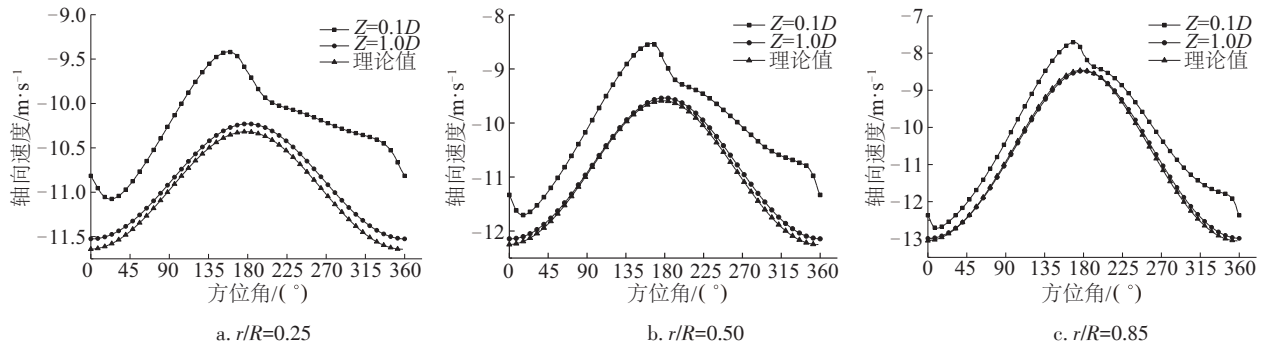


图3 风轮上游轴向速度随方位角的变化

Fig. 3 Variation of axial velocity with azimuth angle at upstream location

4.2 攻角随方位角的变化

在剪切来流下,由于来流风速在风轮平面内发生周期性变化,导致攻角随方位角也发生变化。图 4 为风剪切指数为 0.5 时,叶片展向 7 个截面位置处的攻角随方位角的变化趋势。由图 4 可知,剪切来流下,叶片展向截面处的攻角随方位角呈现正余弦的变化趋势,但由于旋转风轮对来流的诱导作用,攻角并不是在理论风速最值所在的方位角出现最值,而是相对方位角存在滞后现象。越靠近叶根的位置,诱导效应增强,滞后现象越明显。

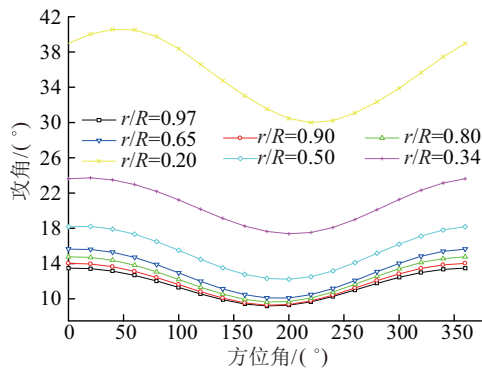


图4 攻角随方位角的变化

Fig. 4 Variation of attack angle with azimuth angle

4.3 尾流区轴向速度分布

图 5 为风剪切指数为 0.5 时,通过旋转轴的垂直面(YZ 平面)和水平面(XZ 平面)内的轴向速度分布云图。由图 5 可知,在垂直平面内,轮毂上方的轴向速度大于轮毂下方的轴向速度;在水平面

内,轮毂左边(从风轮上游看,下同)的轴向速度小于轮毂右边的轴向速度。在剪切来流下,来流风速沿高度方向存在速度梯度,导致风力机尾流区轮毂上方的轴向速度明显大于轮毂下方的轴向速度;风力机尾流的旋转效应使得尾流区轮毂上方的高速流体和轮毂下方的低速流体发生混合,导致在水平面内,虽然来流风速相同,但风力机尾流区轮毂左右的轴向速度并非对称分布。同时,离风轮下游越远的区域,由于尾流发生黏性耗散,混合效应增强,水平面内轮毂左右的轴向速度差异越明显。

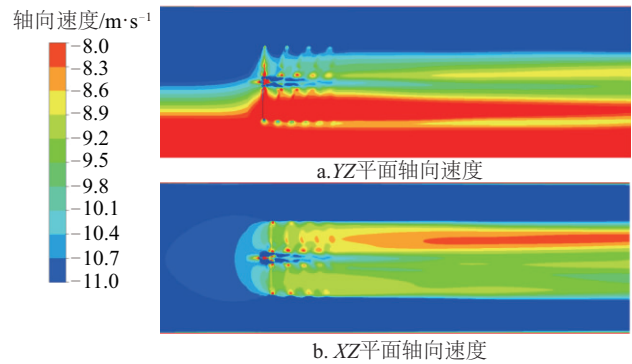


图5 垂直面和水平面内轴向速度云图

Fig. 5 Contours of axial velocity in vertical and horizontal plane

叶尖涡是水平轴风力机尾流结构最明显的特征,它们从每个叶片尖部脱落,并向下游移动,最终耗散^[8]。从图 5 可明显观察到叶尖涡和叶根涡的脱落。在垂直平面内,轮毂上方叶尖涡和叶根涡的移动速度大于轮毂下方叶尖涡和叶根涡的移动速

度。而在水平面内,观察不到明显的差别。相比均匀来流,剪切来流下叶尖涡不再是等距的螺旋线分布。从图 5 也可看出,随着离风轮下游距离的增加,叶尖涡和叶根涡都有耗散的趋势。

4.4 气动载荷的变化规律

在剪切来流下,风轮转矩(M_z)、推力(F_T)、偏航力矩(M_{yaw})、倾覆力矩(M_{tilt})示意图如图 6 所示。

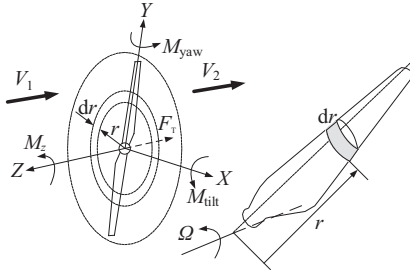


图 6 风轮气动载荷示意图

Fig. 6 Schematic of rotor aerodynamic loads

根据动量定理,作用在风轮环形区域($r, r+dr$)上的推力和转矩分别为:

$$dF_T = dm(V_1 - V_2) = 4\pi\rho r V(y)^2(1-a)adr \quad (2)$$

$$dM = mr^2\omega = 4\pi\rho r^3 V(y)\Omega(1-a)bdr \quad (3)$$

在剪切来流下,来流风速随着半径位置 r 和方位角 θ 发生变化,结合式(1)可知对两叶片风轮而言,在环形区域内,第 i 个叶片在方位角 θ_i 下的推力、偏航力矩、倾覆力矩和转矩分别为:

$$dF_T^i = k(r \cos \theta_i + h)^{2\alpha} r dr \quad (4)$$

$$dM_{yaw}^i = dT_i r \sin \theta_i = k(r \cos \theta_i + h)^{2\alpha} r^2 \sin \theta_i dr \quad (5)$$

$$dM_{tilt}^i = dT_i r \cos \theta_i = k(r \cos \theta_i + h)^{2\alpha} r^2 \cos \theta_i dr \quad (6)$$

$$dM_z^i = m(r \cos \theta_i + h)^{2\alpha} r^3 dr \quad (7)$$

式中, $k = 2\pi\rho(1-a)a\left(\frac{V(h)}{h^\alpha}\right)^2$; $m = 2\pi\rho(1-a)b\Omega\left(\frac{V(h)}{h^\alpha}\right)^2$

两叶片风轮的推力、偏航力矩、倾覆力矩和转矩分别为:

$$F_T = k \sum_{i=1}^2 \int_0^R [h + r \cos \theta_i]^{2\alpha} r dr \quad (8)$$

$$M_{yaw} = k \sum_{i=1}^2 \int_0^R [h + r \cos \theta_i]^{2\alpha} \sin \theta_i r^2 dr \quad (9)$$

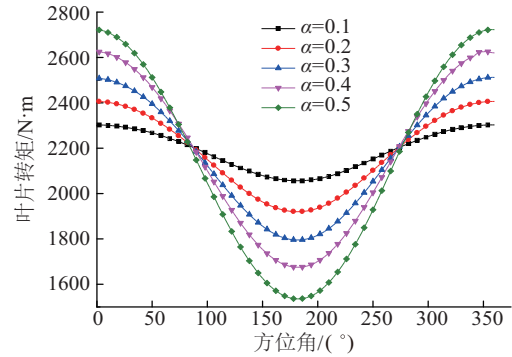
$$M_{tilt} = k \sum_{i=1}^2 \int_0^R [h + r \cos \theta_i]^{2\alpha} \cos \theta_i r^2 dr \quad (10)$$

$$M_z = m \sum_{i=1}^2 \int_0^R [h + r \cos \theta_i]^{2\alpha} r^3 dr \quad (11)$$

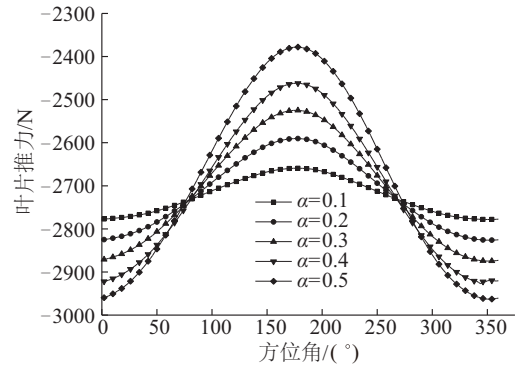
式中, $\theta_2 = \theta_1 + \pi$ 。

由以上分析可知,剪切来流下叶片和风轮的推力、偏航力矩、倾覆力矩和转矩随方位角和风剪切指数发生变化。因此,下文分析风剪切指数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 时,叶片和风轮的气动载荷随方位角的变化规律。

图 7 和图 8 分别为不同风剪切指数下,叶片和风轮的转矩和推力随方位角的变化趋势,并可知转矩和推力随方位角呈现正余弦的变化趋势。当风剪切指数由 0.1 增大到 0.5 时,叶片的转矩和推力的均方根分别减小 0.56%、1.23%,风轮的转矩和推力的均方根分别减小 2.28%、1.43%,但叶片和风轮的转矩和推力的波动幅度逐渐增大。从图 7 和图 8 也可看出,转矩和推力随方位角的波动曲线存在相位偏移现象,风剪切指数越大,风轮转矩和推力波动曲线的相位偏移角度越大。剪切来流下,旋转风轮的诱导作用使得来流风速的最值偏离理论风速的最值位置。引起叶片展向不同截面位置处的攻角发生相位偏移,导致转矩和推力的波动曲线相对方位角存在相位偏移现象。



a. 叶片转矩



b. 叶片推力

图 7 叶片的转矩和推力随方位角的变化

Fig. 7 Variation of blade torque and axial force with azimuth angle

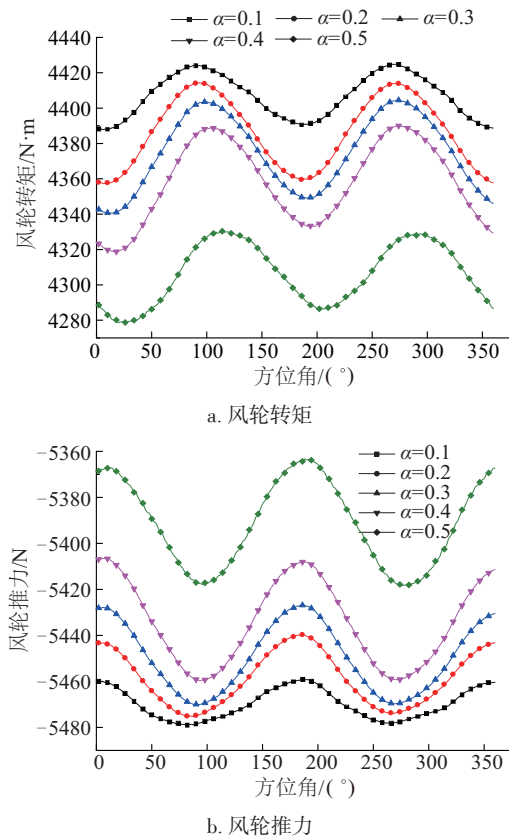


图8 风轮的转矩和推力随方位角的变化

Fig. 8 Variation of rotor torque and axial force with azimuth angle

在剪切来流下,不同叶片在轮毂左右受力的非均匀性导致风轮产生偏航力矩,在轮毂上下受力的非均匀性导致风轮产生倾覆力矩。图9和图10分别为不同风剪切指数下,叶片和风轮的偏航力矩和倾覆力矩随方位角的变化趋势,并可知偏航力矩和倾覆力矩随方位角呈现正余弦的变化趋势。当叶片分别旋转至水平位置和竖直位置时,叶片的偏航力矩和倾覆力矩随风剪切指数的变化出现较明显的差异,在其他方位角下,叶片的偏航力矩和倾覆力矩几乎不随风剪切指数的变化而发生变化。相比单个叶片,风轮的偏航力矩和倾覆力矩随风相比单个叶片,风轮的偏航力矩和倾覆力矩随风剪切指数发生明显的变化,当风剪切指数由0.1增大到0.5时,风轮偏航力矩和倾覆力矩的均方根分别增大4.07倍、4.04倍,并且其波动幅度也随风剪切指数的增大而增大。从图10还可看出,当两叶片处在竖直或水平位置时,偏航力矩的大小约为零,在其他方位角时偏航力矩的大小经历正负交替的变化,

说明偏航力矩的方向在发生变化;当叶片处在水平位置时,倾覆力矩的大小约为零,在其他方位角时倾覆力矩的大小始终为负值,即其方向未发生变化。在剪切来流下,风轮平面内轮毂左右的风速接近对称分布,当两叶片处在水平位置时,风轮在轮毂左右受力平衡,偏航力矩的大小约为零;轮毂上方的风速始终大于轮毂下方,因此,倾覆力矩的大小始终为负值,当两叶片处在竖直位置时,倾覆力矩取得最大值。

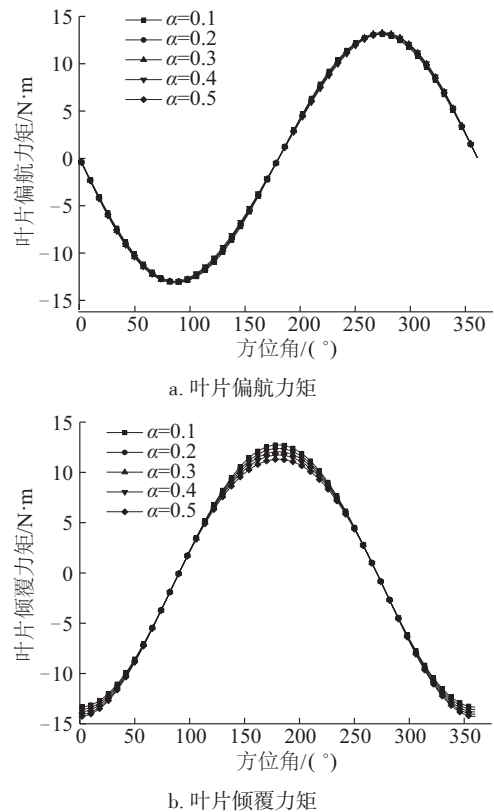
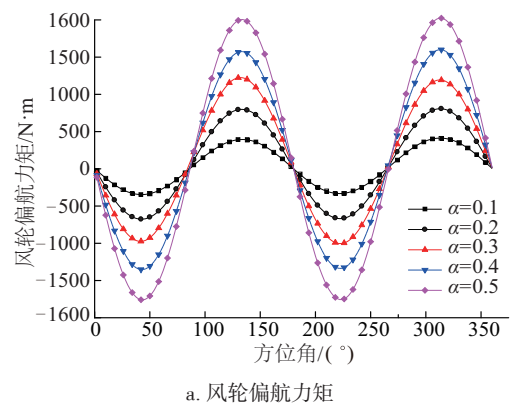
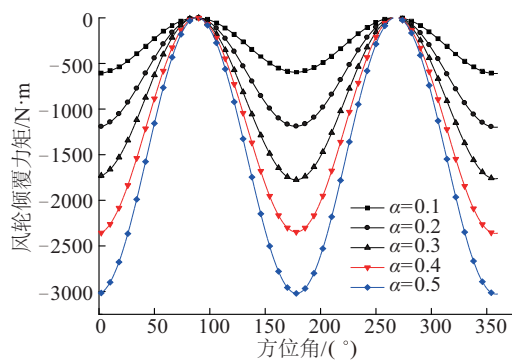


图9 叶片的偏航力矩和倾覆力矩随方位角的变化

Fig. 9 Variation of blade yaw moment and tilt moment with azimuth angle





b. 风轮倾覆力矩

图 10 风轮的偏航力矩和倾覆力矩随方位角的变化

Fig. 10 Variation of rotor yaw moment and tilt moment with azimuth angle

以风剪切指数为 0.5 为例分析剪切来流下风轮气动载荷的功率谱特性,风轮转速为 85 r/min,故其旋转频率 f_n 为 1.4167 Hz,对于两叶片风轮,叶片的通过频率为 $f=2f_n=2.8334$ Hz。图 11 为采用快速傅里叶变换得到的风轮转矩、风轮推力、风轮偏航力矩和倾覆力矩的功率谱特性曲线。由图可知,风轮气动载荷功率谱曲线的峰值对应的频率与叶片通过频率的整数倍相关。

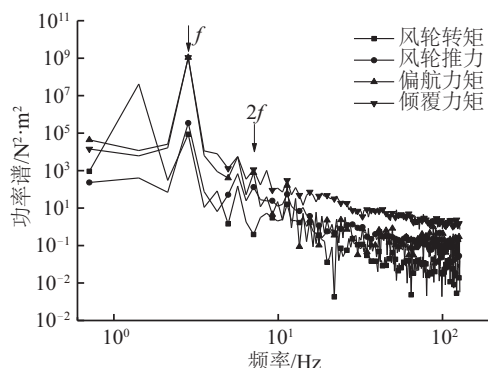


图 11 风轮气动载荷的功率谱特性

Fig. 11 Power spectra of rotor aerodynamic loads

5 结 论

本文在确认数值计算方法的基础上,研究剪切来流下风力机流场特性和不同剪切来流下风轮气动载荷随方位角的变化规律,得出以下主要结论:

1) 剪切来流下,旋转风轮的诱导作用使得风轮上游来流风速相对方位角的波动曲线偏离由理论计算所得到的风速波动曲线;叶片展向不同截面的攻角随方位角呈现正余弦的变化趋势,同时,攻角

随方位角的变化存在相位滞后现象。

2) 剪切来流下来流风速沿高度方向的速度梯度以及尾流的旋转效应,导致风力机尾流结构呈现非对称分布,尾流区轮毂上方叶尖涡和叶根涡的移动速度大于轮毂下方叶尖涡和叶根涡的移动速度。

3) 剪切来流下风力机叶片和风轮的气动载荷随方位角呈现正余弦的变化趋势,风轮气动载荷功率谱曲线的峰值对应的频率与叶片通过频率的整数倍相关。当风剪切指数由 0.1 增大到 0.5 时,风轮转矩和推力的均方根分别减小 2.28%、1.43%,但其波动幅度逐渐增大,并且,转矩和推力随方位角的波动曲线存在相位偏移现象,风剪切指数越大,风轮转矩和推力波动曲线的相位偏移角度越大。除特殊方位角下,叶片的偏航力矩和倾覆力矩不随风剪切指数的变化而变化,但风轮的偏航力矩和倾覆力矩随风剪切指数发生明显的变化,当风剪切指数由 0.1 增大到 0.5 时,风轮偏航力矩和倾覆力矩的均方根分别增大 4.07 倍、4.04 倍,并且其波动幅度也随风剪切指数的增大而增大。

[参考文献]

- [1] 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.
- [1] 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.
- [2] Sezer-Uzol N, Uzol O. Effect of steady and transient wind shear on the wake structure and performance of a horizontal axis wind turbine rotor[J]. Wind Energy, 2013, 16(1): 1—17.
- [3] 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.
- [4] 孔屹刚,王 杰,顾 浩,等. 基于风剪切和塔影效应的风力机风速动态建模[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1237—1244.
- [4] Kong Yigang, Wang Jie, Gu Hao, et al. Dynamics modeling of wind speed based on wind shear and tower shadow for wind turbine [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(8): 1237—1244.

- [5] Whale J, Anderson C G, Bareiss R, et al. An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84 (1): 1—21.
- [6] 陈秋华, 赖旭. 基于SPIV的风力机叶尖涡与尾流流场相关性研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 297—302.
- [6] Chen Qiuhua, Lai Xu. SPIV analysis of correlation of tip vortex and wake flow of horizontal axis wind turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(2): 297—302.
- [7] Moshfeghi M, Song Ya Jun, 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.
- [8] Zhang Wei, Markfort C D, Porté-Agel F. Near-wake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer[J]. Experiments in Fluids, 2011, 52 (5): 1219—1235.
- [9] Hu Hui, Yang Zifeng, Sarkar P. Dynamic wind loads and wake characteristics of a wind turbine model in an atmospheric boundary layer wind[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52: 1277—1294.
- [10] Chamorro L P, Porté-Agel F. Effects of thermal stability and incoming boundary-layer flow characteristics on wind-turbine wakes: A wind-tunnel study[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 136(3): 515—533.
- [11] Shen Xin, Zhu Xiaocheng, Du Zhaohui. Wind turbine aerodynamics and loads control in wind shear flow[J]. Energy, 2011, 36(3): 1424—1434.
- [12] 周文平, 唐胜利, 吕红. 风剪切和动态来流对水平轴风力机尾迹和气动性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 122—127.
- [12] Zhou Wenping, Tang Shengli, Lyu Hong. Effect of transient wind shear and dynamic inflow on the wake structure and performance of horizontal axis wind Turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 122—127.
- [13] 王泉, 曹九发, 王同光. 复杂工况下的大型风力机气动性能和尾迹研究[J]. 计算力学学报, 2016, 33 (3): 343—350.
- [13] Wang Xiao, Cao Jiufa, Wang Tongguang. Investigation of aerodynamic performance and wake of the large scale wind turbine in complicated conditions[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33 (3): 343—350.
- [14] 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.
- [14] 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.
- [15] Troldborg N, Sørensen J N, Mikkelsen R F. Actuator line modeling of wind turbine wakes[D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2009.
- [16] 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.
- [16] Chen Xiaoming, Kang Shun. Research of wind turbine aerodynamic characteristics under yaw and shear[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1105—1111.

STUDY ON FLOW FIELD CHARACTERISTICS AND AERODYNAMIC LOADS OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE IN SHEAR INFLOW

Zhang Xuyao¹, Yang Congxin^{1,2}, Li Shoutu^{1,2}, Gao Zhiteng¹, Luo Song¹

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

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A rotor of 33 kW two-blade horizontal axis wind turbine is simulated under the shear inflow conditions. The flow field characteristics and the aerodynamic loads of the horizontal axis wind turbine are studied by CFD method. The results show that the fluctuation curves of velocity with azimuth angle at the upstream of rotor deviate from the curves obtained from the theoretical calculation in shear inflow, and the axial velocity of wake region presenting asymmetry distribution. The moving speed of the tip vortex and root vortex above the hub is faster than that of below the hub. Meanwhile, the aerodynamic loads of wind turbine blade and rotor vary with azimuth angle in a sine or cosine way and the frequency corresponding to the peak of the power spectrum of the rotor load are related to the integral multiples of the blade passing frequency. When the wind shear exponent increases from 0.1 to 0.5, the average torque and axial force of rotor decrease 2.28% and 1.43% respectively, but the fluctuation amplitude increases gradually. Moreover, a phase shifting of the torque and axial force as functions of azimuth angle is found, and the larger the wind shear exponent, the more obvious of the phase shifting. The root mean square of yaw moment and tilt moment of rotor is increased by 4.07 times and 4.04 times respectively, and the fluctuation amplitude of rotor yaw moment and tilt moment increases gradually with the increase of wind shear exponent.

Keywords: wind shear; wind turbine; flow field characteristics; aerodynamic loads