

风力机翼型动态气动特性粗糙度敏感性研究

周 正, 李 春, 叶 舟, 杨 阳
(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 利用 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟光滑 S809 翼型风力机正弦振荡时动态气动特性, 并同 OSU(俄亥俄州立大学) 风洞试验数据进行对比, 表现出良好一致性, 证明了所用方法有效性。对不同粗糙度 S809 翼型正弦俯仰振荡时动态气动特性进行数值模拟, 得到了升力系数和阻力系数迟滞回环, 分析得出该翼型动态气动特性临界粗糙度为 0.4 mm。进一步对粗糙度为 0.4 mm 的粗糙带位于翼型压力面和吸力面不同位置时的动态气动特性进行模拟和分析, 指出翼型动态气动特性对吸力面前缘 10% 位置粗糙带最为敏感, 随粗糙带高度增加, 翼型动态气动性能大幅降低, 动态失速攻角提前。

关 键 词: S809 翼型; 动态气动特性; 粗糙度; 数值模拟

中图分类号: TK83 文献标识码: A

引 言

风力机叶片表面遭受不同程度腐蚀和污染作用时, 对其气动性能影响很大^[1]。风力机二维翼型气动性能是风轮叶片设计基础。因此, 有必要研究表面粗糙度对风力机翼型气动特性影响。包能胜等通过风洞实验证明在叶片压力面尾缘适当增加一定宽度和粗糙度的粗糙带可增大叶片有效升力系数^[2]。任年鑫等利用 SST $k-\omega$ 模型对 NACA 63-430 风力机翼型粗糙度敏感性进行了数值研究^[3]。李德顺等利用 SST $k-\omega$ 模型研究了粗糙度对 DU 95-W-180 风力机翼型气动特性影响, 指出前缘和压力面尾缘对粗糙带最为敏感^[4]。尽管国内外很多学者用实验和数值模拟方法研究了粗糙度对风力机翼型静态气动特性影响^[5-9], 但风力机翼型静态气动特性和动态气动特性有很大差异, 失速后尤其明显。仅依据粗糙度对风力机翼型静态气动特性相关研究并不足以准确计算其对翼型动态气动特性影响。本研究利用 SST $k-\omega$ 模型, 研究了粗糙度对风力机翼

型动态气动特性影响。

1 数值计算方法

1.1 数值模拟工况

利用 CFD(计算流体力学) 软件 FLUENT 流体工程商用软件包, 采用 SST $k-\omega$ 模型分别对光滑和粗糙 S809 翼型绕 1/4 弦长处周期性正弦俯仰振荡进行数值模拟。其中 S809 翼型尺寸和模拟条件与 OSU(俄亥俄州立大学) 风洞试验设计保持一致^[10]。研究中所有正弦俯仰振荡数值模拟中, 弦长雷诺数为 1.0×10^6 , 平均攻角为 14° , 振荡幅度为 10° , 振荡频率为 1.2 Hz, 对应衰减频率 k 为 0.052(衰减频率 $k = \pi f c / u_\infty$)。翼型俯仰振荡正弦规律为:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

式中: $\alpha(t)$ —瞬时攻角 ($^\circ$); α_0 和 α_1 —平均攻角和振荡幅度 ($^\circ$); f —振荡频率, Hz; t —时间, s。

1.2 湍流模型和粗糙度定义

对逆压梯度和分离流动, 选取湍流模型非常重要。因 SST $k-\omega$ 模型对逆压梯度流计算精度较高^[11], 故本研究选用该湍流模型。

考虑壁面粗糙度影响, 必须明确两个参数, 即粗糙度 K_s 和粗糙常数 C_s 。粗糙度为零对应光滑壁面情况。对均匀沙粒粗糙度, K_s 可取为沙粒高度。对非均匀沙粒, 可用平均直径代替粗糙度 K_s 。对其它类型粗糙度, K_s 可取值为等效沙粒粗糙高度。粗糙常数 C_s 主要由粗糙度类型决定。对均匀沙粒, 通常取 C_s 为 0.5; 对非均匀沙粒, C_s 可取 0.5-1。但目前并无对所有类型粗糙度通用的 C_s 计算方法。本研究用粗糙度为均匀沙粒, $C_s = 0.5$ 。

1.3 网格及计算条件

使用 Gambit 2.2.20 软件对计算域进行非结构

收稿日期: 2013-07-15; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176129); 上海市教育委员会科研创新(重点)项目(13ZZ120); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20123120110008)

作者简介: 周 正(1989-), 男, 重庆人, 上海理工大学硕士研究生。

网格划分,整个计算域如图 1 所示,长为 20 倍弦长 (图中弦长为 c) 宽为 28 倍弦长,入口半径为 14 倍弦长,流场边界条件设置:整体上下边界及前端设置为速度进口,后端设置为压力出口,且表压为零,翼型表面设置为无滑移固体壁面。为准确捕捉翼型周围流动特征,在其周围布置 500 个节点,边界层首层厚度为 0.000 1 m,增长因子为 1.08, y^+ 值小于 1,以捕捉边界层流动特征,并进行了网格无关性验证。利用 C 语言编写用户自定义函数,控制包含翼型的内部圆形计算域做正弦振荡运动。在数值模拟时使用滑移网格技术,圆形计算域和外部计算域之间设置为交界面(interface)进行数据传输。经时间无关性验证,时间步长设为 0.001 s,收敛残差均为 10^{-6} ,经过 4 个周期计算,得到周期性稳定流场。

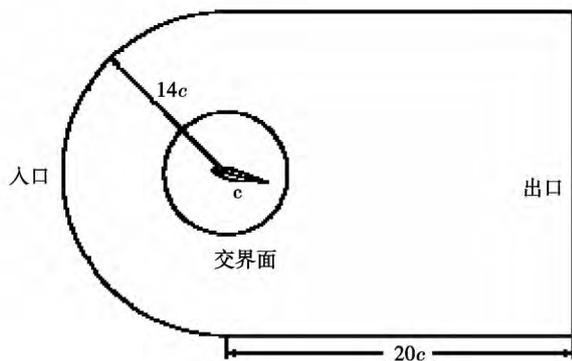


图 1 边界条件

Fig. 1 Boundary conditions

2 计算结果和分析

2.1 光滑翼型计算结果

弦长雷诺数为 10^6 ,对光滑 S809 翼型攻角在 4° - 24° 范围以正弦振荡工况数值模拟得到的升力系数 C_l 、阻力系数 C_d 和俯仰力矩系数 C_m 迟滞回环如图 2 所示。由图可知,数值模拟结果和 OSU 风洞试验结果吻合较好,趋势基本一致,证明了所用方法有效性。

2.2 粗糙高度对翼型动态气动特性影响

若整个翼型表面均匀分布粗糙度为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.8 和 1.5 mm 的粗糙带,分别对上述翼型做正弦振荡进行数值模拟,并同光滑翼型动态气动特性比较,得到升力系数和阻力系数迟滞回环如图 3 所示。

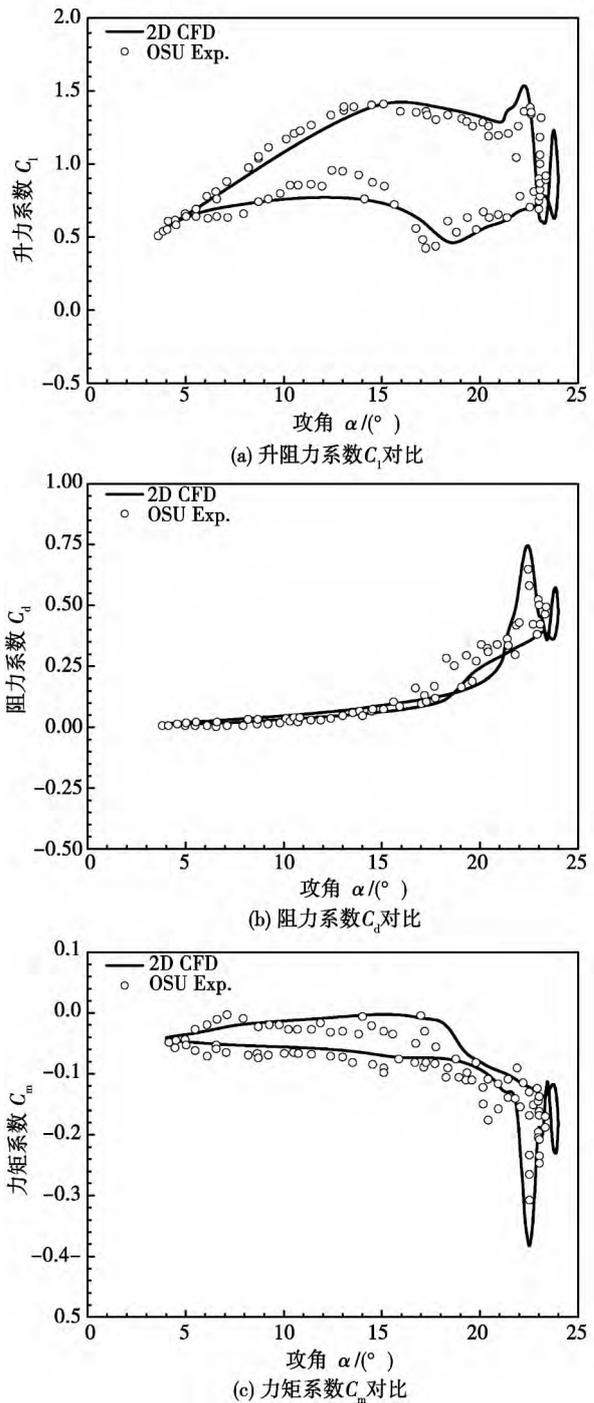


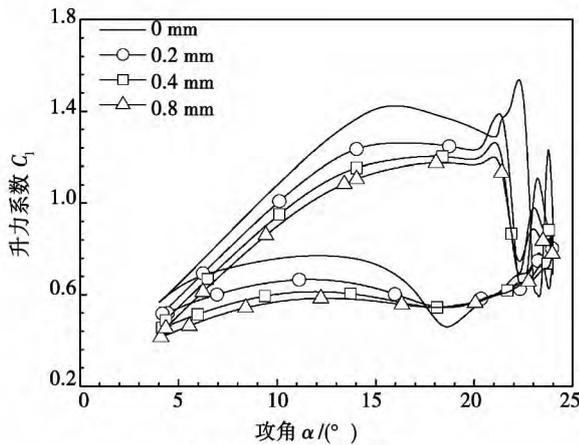
图 2 光滑 S809 翼型动态气动特性

Fig. 2 Dynamic aerodynamic characteristics of smooth S809 airfoil

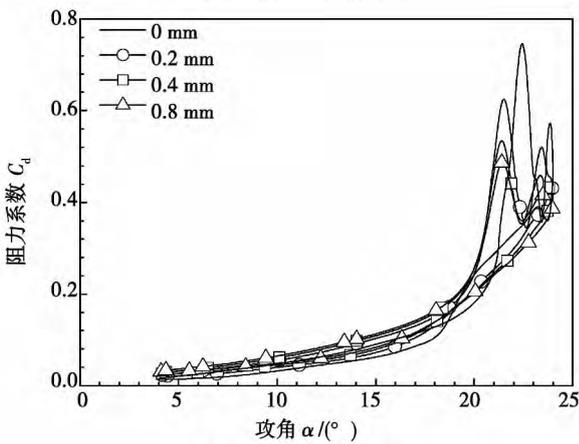
由图 3 可知,随着粗糙度逐渐增大,整个振荡过程最大升力系数和阻力系数均减小,上仰过程升力线性增长段范围变窄。由于粗糙度影响,使得翼型表面提前进入湍流和分离状态,动态失速主涡发展不如光滑情况。由于尾缘逆向小涡发展,升力系数在攻角超过 15° 后稍有下降,而光滑情况较粗糙时

降低更多,表明光滑时尾缘小涡发展更充分。当攻角仰至 20°时,不同程度二次涡发展,导致不同升力系数提升。粗糙度越小,二次涡发展越充分,升力系数提升越大,失速攻角越大。在动态失速区,阻力系数表现出与升力系数不同增长趋势。粗糙度越大,阻力系数越小,该现象与翼型静态阻力系数随粗糙度变化趋势相反。翼型阻力包括形状阻力和压差阻力,由于粗糙度促进翼型周围流场进入湍流状态,使压差阻力减小。

动态失速迟滞回环有相近的结构,最大升力系数和阻力系数很大程度上可反映出翼型动态气动特性。故本研究采用振荡周期中最大升力系数和最大阻力系数作为衡量动态气动特性的标度。



(a) 升力系数迟滞回环



(b) 阻力系数迟滞回环

图 3 不同粗糙高度翼型动态气动特性
Fig. 3 Dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil with various roughnesses

图 4 为不同粗糙度正弦振荡翼型最大升力系数和最大阻力系数。粗糙度小于 0.1 mm 时,最大升力系数和阻力系数变化平缓,翼型动态气动特性变

化轻微,可知其具有小粗糙度不敏感性。随后,动态气动特性随粗糙度增加快速降低;当粗糙度超过 0.4 mm,最大升阻力系数曲线逐渐恢复平缓,翼型动态气动特性基本稳定。故将 0.4 mm 定为该翼型动态气动特性临界粗糙度。

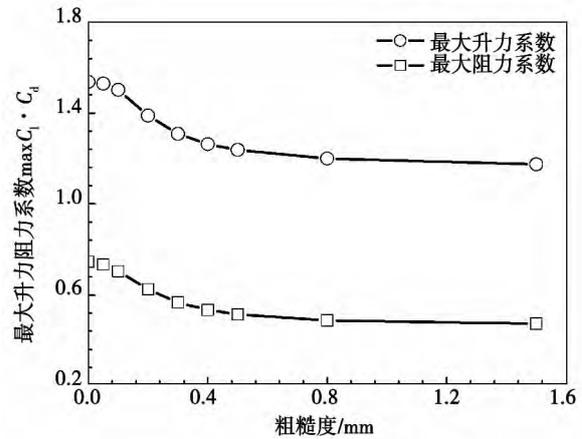


图 4 最大升力系数和阻力系数随粗糙度变化曲线

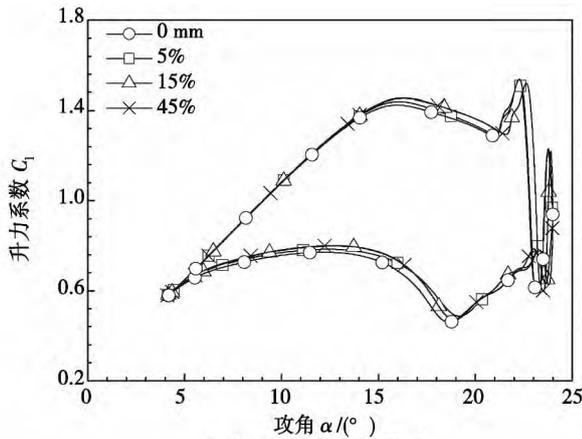
Fig. 4 Curves showing changes of the maximum lift coefficient and drag coefficient with the roughness

2.3 粗糙带位置对翼型动态气动特性影响

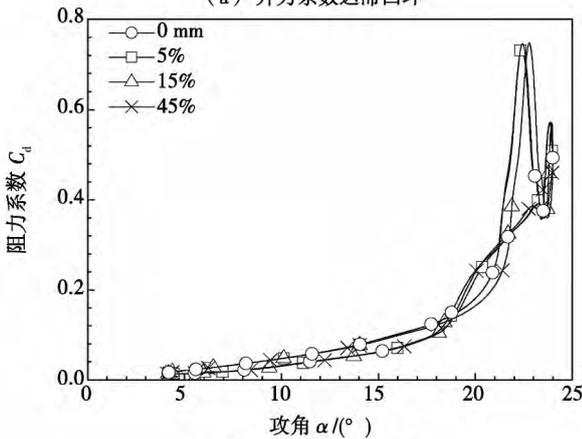
将翼型压力面和吸力面分别均分为 10 段,从前缘开始,用每段中心位置标记该段,即 5%、15%、25%、35%、45%、55%、65%、75%、85%、95% 等。每次将翼型其中一段设为粗糙度为 0.4 mm 的粗糙带,并模拟该翼型正弦振荡动态气动特性,结果如图 5 - 图 8 所示。

2.3.1 压力面粗糙带位置对翼型动态气动特性影响

图 5 和图 6 分别为 0.4 mm 粗糙带位于不同压力面位置翼型气动特性迟滞回环和最大升力、阻力系数曲线。图 5 中,当粗糙带为压力面前 10% 时,其迟滞回环与光滑时几乎重合,可知压力面前缘对翼型动态气动特性影响很小;当粗糙带位于压力面其它位置时,最大升力系数和阻力系数与光滑时差异并不明显,但由于不同位置粗糙带影响,动态失速攻角较光滑时稍有延后。总体而言,压力面粗糙度对翼型动态气动特性影响不大,其中,前缘 10% 影响最小。为方便同光滑情况比较,图 6 和图 8 中横坐标为 0 时对应为光滑时翼型正弦振荡过程最大升力系数和阻力系数。



(a) 升力系数迟滞回环



(b) 阻力系数迟滞回环

图5 压力面不同粗糙带位置翼型动态气动特性
Fig.5 Dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil in various rough belts on the pressure surface

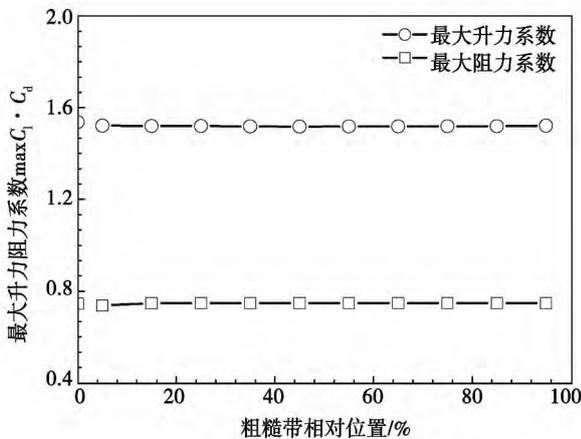
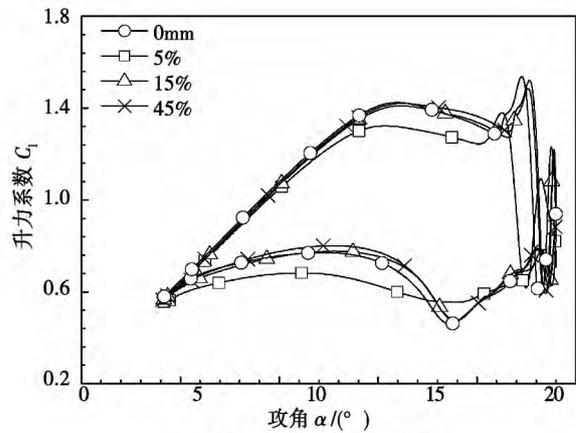


图6 最大升力系数和阻力系数随压力面粗糙度位置变化曲线

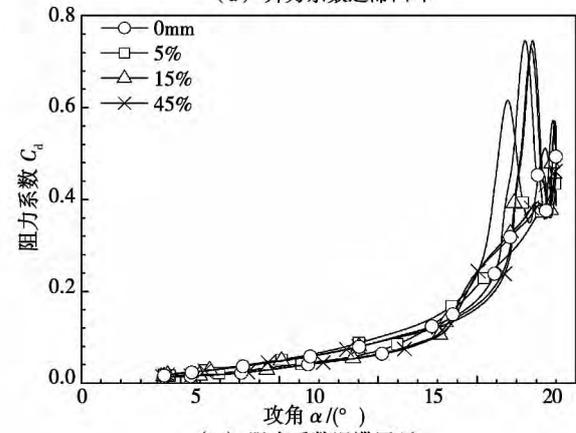
Fig.6 Curves showing changes of the maximum lift coefficient and drag coefficient with the location of the rough belt on the pressure surface

2.3.2 吸力面粗糙带位置对翼型动态气动特性影响

图7和图8所示为0.4 mm粗糙带位于不同吸力面位置气动迟滞回环和最大升力、阻力系数曲线。图7中,当粗糙带位于10% - 100%时,吸力面粗糙度为0.4 mm粗糙带位置对翼型动态气动特性影响不大,推迟了动态失速攻角,最大升力系数和阻力系数受影响很小;而当粗糙带位于吸力面前缘10%处,整个正弦俯仰振荡过程最大升力系数和最大阻力系数较光滑时有大幅降低,分别达0.130和0.157,占后者比例为17.4%和10.2%。上仰过程中,翼型吸力面前缘粗糙度使翼型周围流动提前进入湍流状态,抑制了动态失速涡及二次涡发展,使失速后升力系数和阻力系数都有较大下降,且动态失速攻角相对光滑情况提前近1.4°。该现象充分表明吸力面前缘10%粗糙带对翼型动态气动特性至关重要。风力机运行普遍存在动态失速现象,为避免环境影响风力机出力,必须定期清除吸力面前缘粗糙污染物。



(a) 升力系数迟滞回环



(b) 阻力系数迟滞回环

图7 吸力面不同粗糙带位置翼型动态气动特性
Fig.7 Dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil in various rough belts on the suction surface

图8为吸力面不同位置0.4 mm粗糙带对翼型动态气动特性影响,当粗糙带位于前10%时,最大升力系数和阻力系数相对光滑情况时降低较多,当粗糙带位置超过10%以后,最大升力系数和阻力系数曲线平缓,翼型动态气动特性基本稳定。

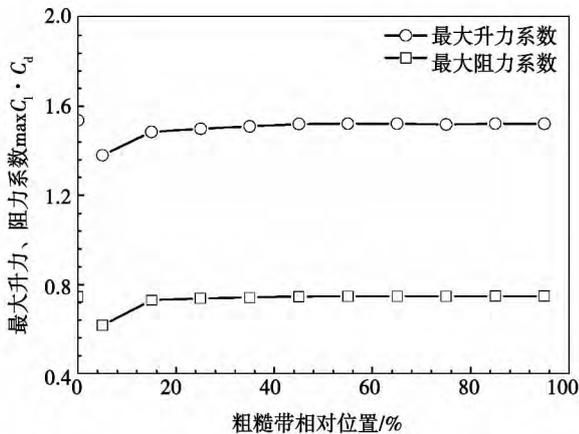


图8 最大升力系数和阻力系数随吸力面粗糙度位置变化曲线

Fig. 8 Curves showing changes of the maximum lift coefficient and drag coefficient with the location of the rough belt on the suction surface

3 结论

利用 SST $k-\omega$ 模型模拟不同粗糙度、不同位置粗糙带对正弦俯仰振荡 S809 翼型动态气动特性影响,得出结论:

(1) 对 S809 翼型,其动态气动特性临界粗糙度为 0.4 mm,粗糙度小于 0.4 mm 时,翼型气动特性随粗糙度增加下降,且对 0.1 mm 以下粗糙度不敏感;超过 0.4 mm,翼型动态气动特性变化很小。

(2) 对 S809 翼型,粗糙吸力面对动态气动特性影响远大于粗糙压力面。吸力面前缘 10% 影响最大,失速区升力系数和阻力系数均随粗糙度增加而快速下降,且动态失速攻角提前。压力面前缘 10% 影响最小,气动迟滞回环与光滑时几乎重合。在其余位置,粗糙度对翼型最大升力系数影响不大,仅动态失速攻角稍有延后。

参考文献:

- [1] Standish K, Rimmington P, Laursen J, et al. Computational prediction of airfoil roughness sensitivity [J]. AIAA Paper, AIAA 2010, 460: 1-12.
- [2] 包能胜, 霍福鹏, 叶枝全, 等. 表面粗糙度对风力机翼型性能的影响 [J]. 太阳能学报 2005, 26(4): 458-462.
BAO Neng-sheng, HUO Fu-peng, YE Zhi-quan, et al. Influence of the surface roughness on the performance of the airfoil in a wind turbine [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2005, 26(4): 458-462.
- [3] Ren Nianxin, Ou Jinping. Dust effect on the performance of wind turbine airfoils [J]. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications, 2009, 1(2): 102-107.
- [4] 李德顺, 李仁年, 杨从新, 等. 粗糙度对风力机翼型气动性能影响的数值预测 [J]. 农业机械学报 2011, 42(5): 111-115.
LI De-shun, LI Ren-nian, YANG Cong-xin, et al. Numerical prediction of the effect of the surface roughness on the aerodynamic performance of the airfoil in a wind turbine [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 111-115.
- [5] 包能胜, 倪维斗. 风力机翼型前缘表面粗糙度对气动性能影响 [J]. 太阳能学报 2008, 29(12): 1465-1470.
BAO Neng-sheng, NI Wei-dou. Influence of the surface roughness at the leading edge of the airfoil in a wind turbine on the aerodynamic performance [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(12): 1465-1470.
- [6] Potapczuk M G, Bragg M B, Kwon O J, et al. Simulation of iced wing aerodynamics [R]. NASA TM-104362, 1991.
- [7] Cebece T. Effects of environmentally imposed roughness on airfoil performance [R]. NASA CR-179639, 1987.
- [8] Cebece T, Besnard E. Prediction of the performance degradation of an aircraft in natural icing conditions [J]. AIAA Paper 94-0487, 1994.
- [9] Van R R, Timmer W A. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(4): 468-478.
- [10] Ramsay R R, Hoffman M J, Gregorek G M. Effects of grit roughness and pitch oscillations on the S809 airfoil [R]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [11] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.

(丛敏 编辑)

temperature of water outgoing from the cooling tower proposed was a new method for calculating the temperature of water outgoing from the tower. The temperature of water outgoing from a cooling tower of a 300 MW unit in a power plant was calculated and compared with the actually measured results. It has been found that the maximum deviation between the on-line calculation result and the actually measured one is about 2%. The method in question can accurately calculate the temperature of water outgoing from a tower. The method under discussion was used to study the off-design operating condition characteristics of a cooling tower and plot the curves of its off-design operating condition characteristics. It has been known from a sensitivity analysis of the meteorological parameters from the outside world influencing the temperature of water outgoing from the tower that the atmospheric pressure has very little influence on the temperature of water outgoing from the tower and can be neglected. It has been also learned from the off-design operating condition characteristics of the tower that the temperature of water outgoing from the tower will increase with an increase of the dry-ball temperature and relative humidity and the influence of the relative humidity on the temperature of water outgoing from the tower will also increase with an increase of the dry-ball temperature.

Key words: thermal power generator unit ,circulating cooling water system ,cooling tower ,temperature of water outgoing from a cooling tower ,weather condition

风力机翼型动态气动特性粗糙度敏感性研究 = **Study of the Sensitivity of the Dynamic Aerodynamic Characteristics of an Airfoil in a Wind Turbine with Roughness** [刊, 汉] ZHOU Zheng ,LI Chun ,YE Zhou ,YANG Yang (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai , China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(3) . - 333 - 337

The SST turbulent flow model was used to simulate the dynamic sinusoidal oscillation aerodynamic characteristics of S809 smooth surface airfoil. A comparison with the test data measured from the wind tunnel in Ohio State University shows that the simulation results are in good agreement with the test ones ,proving that the method in question is feasible and effective. The dynamic aerodynamic characteristics of S809 airfoil at various levels of roughness were numerically simulated when it was being pitched and oscillated ,during which the hysteresis loop of the lift and drag coefficient was obtained. It has been concluded from an analysis that for the dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil ,the critical roughness is regarded as 0.4 mm. Furthermore ,the dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil were simulated and analyzed when the rough band having a roughness of 0.4 mm is located at various places on the pressure and suction surface of the airfoil. It has been pointed out that the dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil are most susceptible to the rough band being located at the place of 10% away from the leading edge on the suction surface. With an increase of the height of the rough band ,the dynamic aerodynamic performance will deteriorate by a big margin and the dynamic stall attack angle will be in advance. **Key words:** S809 airfoil ,dynamic aerodynamic characteristics ,roughness ,numerical simulation