

雷诺数对粗糙表面翼型气动性能的影响

李仁年 陈寅

(兰州理工大学甘肃省风力机工程技术研究中心,兰州,730050)

摘要:采用Spalart-Allmaras湍流模型研究风力机专用翼型DU00-W-212的气动性能。在雷诺数小范围变化的情况下,应用数值模拟的方法对粗糙翼型和光滑翼型的气动特性进行对比。探讨雷诺数小范围变化对粗糙翼型气动特性的影响,并分析升阻力的变化机理。比较升阻力曲线,发现粗糙度对升力系数影响最大的区域在迎角 10° 附近。小迎角的情况下,前缘粗糙度会使得翼型的升力系数下降,阻力系数反而上升。在大迎角失速的情况下,粗糙翼型的阻力系数反而小于光滑翼型的阻力系数。为了增加叶片适应恶劣沙尘环境的能力,在叶片设计和翼型排布的过程中应该尽量避开升力系数最大的迎角处。

关键词:风力机;翼型;粗糙度;雷诺数

中图分类号:TK83

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)05-0693-04

Effects of Surface Roughness and Reynolds Number on Aerodynamic Performance of Wind Turbine Airfoil

Li Rennian, Chen Yin

(Gansu Province Wind Turbine Engineering Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

Abstract: The Spalart-Allmaras turbulence model is used to investigate the aerodynamic performance of a wind turbine airfoil DU00-W-212. Numerical simulation results show different performances both rough and smooth airfoil when Reynolds number changes in a small region. The effect of Reynolds number on aerodynamic performance of rough airfoil are studied. The curve of lift-drag coefficients reveals that the roughness is an important influencing factor upon the lift coefficient at attack angle of approximately 10° . Lift coefficient will descend and drag coefficient will ascend because of the rough leading edge at a small attack angle. However, the drag coefficient of a smooth airfoil is higher than that of the rough airfoil when the airfoil has gone into stall conditions. The region of the attack angle with the highest lift coefficient has to be avoided in the design proposal, thus improving the capability of the blade adapted to the harsh dust storm.

Key words: wind turbine; airfoil; roughness concentrations; Reynolds number

DU00-W-212翼型主要应用在离叶根75%左右的位置。在西北多风沙的地区,风力机叶片表面易形成积灰和沙粒堆积。由于叶轮旋转离心力的作用,叶片表面的积灰和积冰改变了做功段的翼型表面。这些都严重影响了叶片的出力和叶轮的功率。风力机运行在低空环境,桨叶容易受到粉尘污染、昆虫污染和风蚀而破坏表面光洁度,随着翼型前沿

粗糙度的增加,风力机的输出功率会大幅下降,降幅可达25%^[1]。在低风速时昆虫遗骸对风力机的性能没有明显的影响,但是当风速较大时($V > 12$ m/s),其影响十分明显^[2]。由于上述原因,要使得叶片工作在最佳状态,只能对叶片表面进行清洗,因此大幅度增加了运行成本。大型2 MW风力机叶片做功段的翼型通常工作在雷诺数 $[2 \times 10^6, 4 \times 10^6]$ 附

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714605)资助项目。

收稿日期:2011-04-27; **修订日期:**2011-08-18

通讯作者:李仁年,男,教授,博士生导师,1963年1月生, E-mail: lirn@lut.cn。

近。因此,分析该雷诺数范围内粗糙翼型的气动特性和流场变化,对于叶片翼型的选择和叶轮气动设计具有较为重要的意义。

1 研究对象

DU00-W-212 翼型是荷兰 Delft 大学推出的 DU 系列中的一种主要应用在叶片径向 75% 处的翼型。该翼型在 $x/c=33.7\%$ 有最大厚度 $0.212c$, 在 $x/c=74.9\%$ 达到最大弯度 1.75% 。首先选择适当的湍流模型和边界条件保证数值模拟的精度,在其他边界条件不变的情况下,在距前缘 $0.3c$ 处的翼型上表面设置宽为 2 mm , 高为 3.5 mm 的方形凸起。通过对比进而分析表面粗糙度对 DU00-W-212 的气动性能的影响。为了研究特定迎角下的翼型气动性能系数随雷诺数的分布,翼型的数值模拟计算参数由雷诺数确定

$$Re = \rho v c / \mu$$

式中: c 为弦长; v 为来流速度; 来流密度 $\rho = 1.225\text{ kg/m}^3$; 流体动力粘性系数 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

2 理论模型和数值方法

2.1 湍流模型

Spalart-Allmaras (S-A) 湍流计算模型是由 Spalart 和 Allmaras 于 1992 年提出的一种通过求解输运方程得到湍流运动粘度的、相对简单的单方程湍流模型。它包含了一组新的方程,在这些方程里不必去计算和剪应力层厚度相关的长度尺度。在模型中近壁的变量梯度比在 $k-\epsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型中的要小得多,这也许可以使模型对于数值的误差变得不敏感。S-A 适用于带有层流流动的固壁湍流流动的方程模型^[3],专门被用于处理具有壁面边界的空气流动问题。同时, S-A 湍流模型还有易收敛、收敛快的优点。

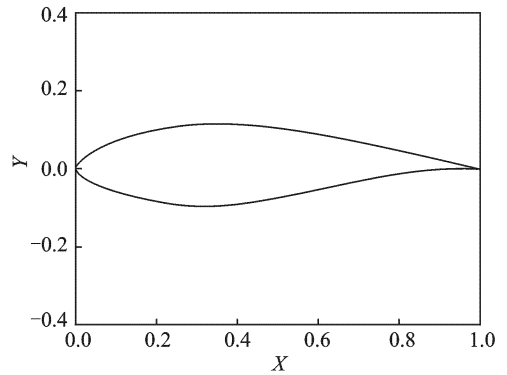
2.2 数值模拟方法

利用 Gambit 进行几何建模,采用 C 型拓扑结构。在翼型表面添加粗糙凸起的前后,采用相同的网格划分。总共近有 8 万个网格,第一层网格距壁面距离大约 10^{-4} 倍的弦长,具体翼型外形和局部网格,如图 1 所示。

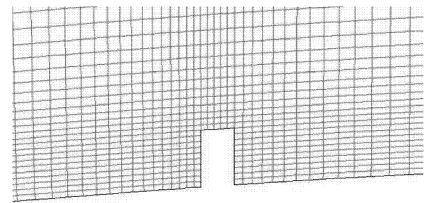
利用 Fluent 软件进行模拟,进口设置为速度入口,出口设为压力出口,表压给定为 0 Pa , 压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法,湍流修正值 (Modified turbulence viscosity) 设为 0.8 。各个方程均采用一阶迎风格式。

2.3 计算方法的验证

首先对 DU00-W-212 的光滑翼型进行数值模



(a) 翼型量纲尺寸



(b) 粗糙度局部网格

图 1 翼型和粗糙翼型的局部网格

拟,并与实验值比较吻合。由图 2 可以看出,试验所得的升力系数 C_l 在迎角 $[9^\circ, 20^\circ]$ 范围内较计算所得的要大,阻力系数 C_d 在 $[5^\circ, 20^\circ]$ 迎角范围内存在偏差较大,但是总体变化趋势和实验结果相似,不影响对翼型气动线性变化的判断。

通过计算流体力学 (Computational fluid dynamic, CFD) 方法与风洞试验数据的对比可以得出 (图 2): Spalart-Allmaras 湍流模型的二维气体模拟结果与试验值基本吻合,部分误差不会影响气动性能的分析,能很好地反映出性能曲线的走势。

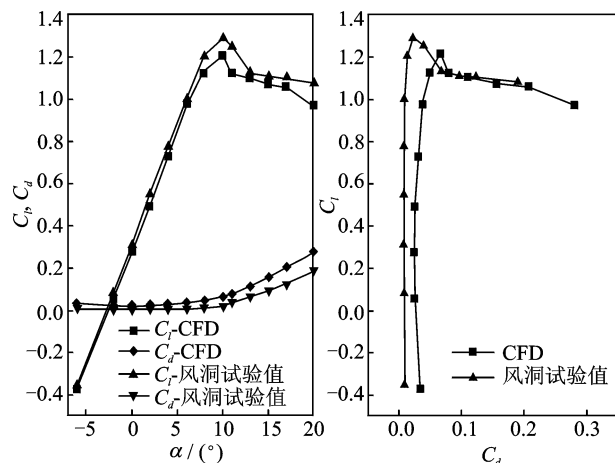


图 2 翼型 DU00-W-212 的升阻力系数

3 计算结果分析

3.1 粗糙度对升阻力系数的影响

在翼型的上表面 $0.3c$ 处添加宽为 2 mm , 高为 3.5 mm 的方形凸起。取雷诺数 $Re=3 \times 10^6$ 时,迎角在 $[-6^\circ, 20^\circ]$ 的升阻力系数。

在图3中明显可以看到,在层流区,粗糙翼型的升力系数(C_l -Rough)与光滑翼型的升力系数(C_l -Smooth)相近,减小并不明显。随着来流迎角的不断增大,粗糙翼型的升力系数提前进入失速区。光滑翼型的临界迎角出现在 9° 附近,而粗糙翼型的临界迎角提前到 7° 。在进入失速区后,粗糙翼型的升力系数下降,远小于光滑翼型的升力系数;阻力系数[粗糙翼型阻力系数(C_d -Rough)、光滑翼型阻力系数(C_d -Smooth)]变大不是很明显。可以推测:粗糙凸起的作用区主要集中在翼型的失速区。由于凸起的存在,提前了临界迎角,降低了最大升力系数,并影响着失速区的升力系数曲线的走势。因此,对于应用于多风沙和易污染地方的变桨距风力机叶片设计,在选择翼型的时候,应尽量避免把设计迎角选择在最大升力系数处。

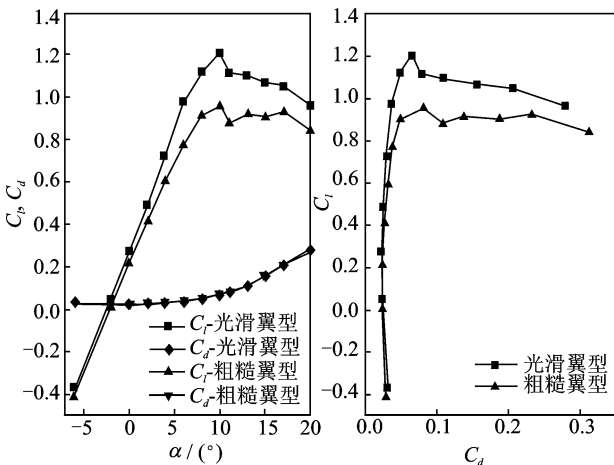


图3 光滑翼型和粗糙翼型的升阻力系数比较

3.2 粗糙翼型的气动性能随雷诺数的分布

已知 $Re = \rho v c / \mu$,翼型弦长为1 m,因此雷诺数的大小决定于来流风速。分别取迎角为 4° 和 20° ,比较雷诺数在 $2.25 \times 10^6, 2.5 \times 10^6, 2.75 \times 10^6, 3 \times 10^6, 3.25 \times 10^6$ 和 3.5×10^6 (对应于来流风速32.87, 36.52, 40.17, 43.82, 47.47 m/s和51.13 m/s)情况下的气动性能系数变化趋势。

在同一迎角下(图4),随着雷诺数的增加,翼型的升力系数和阻力系数都逐渐增加。当弦长不变,雷诺数与来流的相对速度成正比,而升阻力均与相对速度的平方成正比,因此翼型的升阻力系数随着雷诺数的增长而增加。在翼型工作的雷诺数区间内,升阻力系数的增长呈近线性变化。对于粗糙翼型气动性能系数,变化趋势与光滑翼型相近;但是可以看出,在迎角 4° 的时候,粗糙翼型的升力系数明显小于光滑翼型;阻力系数变化不明显,略大于光滑翼型。在迎角 20° 时,粗糙翼型的阻力系数反而比光滑翼型小。

阻力系数主要由粘性压阻系数和诱导阻力系

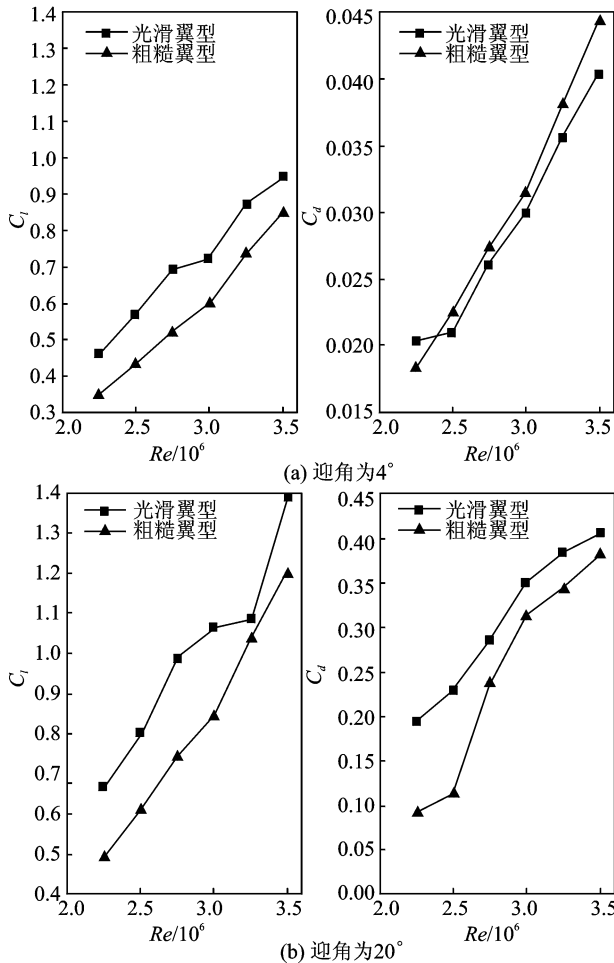


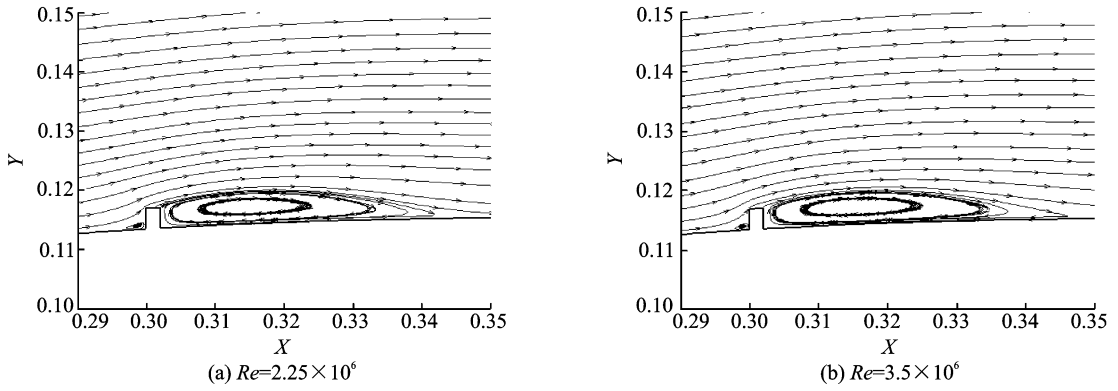
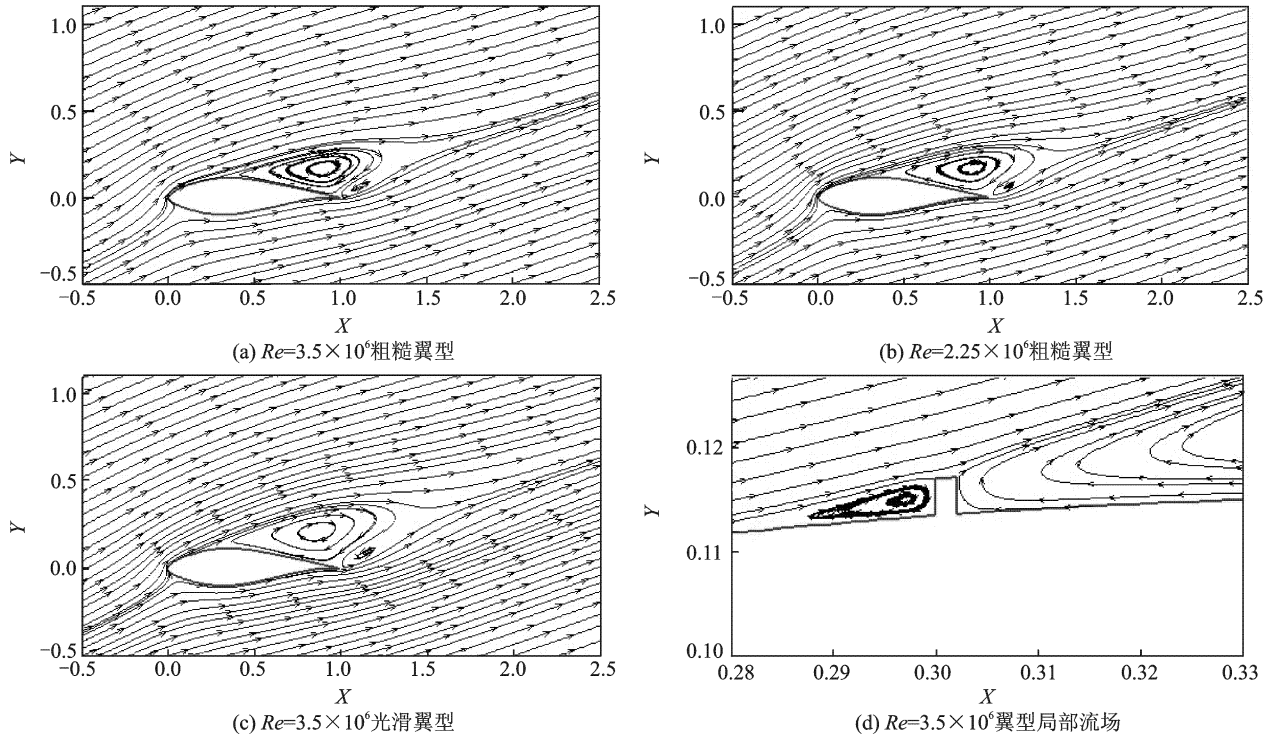
图4 同迎角下翼型性能系数随雷诺数的分布

数组成。粘性压阻力主要体现在层流区,与翼型表面的边界层密切相关;诱导阻力主要由尾涡引起的。因此,在迎角为 4° 时,翼型的阻力系数主要由压阻力体现,粗糙度改变了翼型表面边界层,强化了阻力。在迎角为 20° 时,诱导阻力取决于翼型尾涡的变化。因此,可以得出:粗糙度的存在改变了尾涡的结构,改变了诱导阻力。

3.3 翼型表面的流场分析

从图5可以看出(X, Y 表示量纲长度):在层流阶段,粗糙凸起破坏了翼型表面的边界层,进而影响翼型的升阻力系数。凸起后形成的涡流大小保持一定,因此在迎角为 4° 的情况下,升阻力系数近似线性变化。

由图6(a,b)可得出,迎角确定后,粗糙翼型的尾涡也随之确定,雷诺数的增大并不改变尾涡的形状。由图6(c,d)得出,光滑翼型的尾涡要大于粗糙翼型,造成了粗糙翼型的诱导阻力小于光滑翼型。由图6(c)得出,在进入失速区后,由于翼型表面凸起的存在,造成尾涡的提前形成。由于涡是成对存在的,凸起前方的涡流消耗了尾涡的能量,使得尾流的主涡形状变小,弱化了诱导阻力。因此,造成粗糙翼型的阻力小于光滑翼型。

图5 迎角为 4° 流场图谱图6 迎角为 20° 流场图谱

4 结 论

(1)对于应用于多风沙和易污染的地方的风力机叶片设计,在选择翼型的时候,应尽量避免把设计迎角选择在最大升力系数处。

(2)相同雷诺数,小迎角的情况下,前缘粗糙度会使得翼型的升力系数下降,阻力系数上升。

(3)同一迎角下,雷诺数小范围变化的情况下,翼型的升阻力系数呈线性增长。

(4)在进入失速后,翼型的阻力系数变化主要受诱导尾涡的影响;前缘粗糙度使得边界层提前分离,尾涡的形状较光滑翼型变小。

(5)失速型风力机专用翼型的设计,应该着重于尾涡优化。

(6)小范围雷诺数的增大,并不改变粗糙翼型尾涡的形状分布,只改变尾涡的流动强度。

参考文献:

- [1] Madsen H A. Aerodynamics of a horizontal-axis wind turbine in natural conditions [R]. Risø-m-2903. Denmark: Risø National Laboratory, 1991.
- [2] Corten G P, Veldkamp H F. Insects can halve wind-turbine power[J]. Nature, 2001, 412(5):42-43.
- [3] 张果宇,冯卫民,刘长陆,等. 6种风力机叶片翼型的气动性能数值模拟研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(4):11-15.
- [4] 李德顺,李仁年. 雷诺数对风力机专用翼型气动性能影响的研究 [J]. 流体机械, 2009, 12(37):31-34.
- [5] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT—流体工程仿真计算实例与应用[M]. 2版. 北京:北京理工大学出版社, 2009.
- [6] 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.
- [7] Timmer W A, Schaffarczyk A P. The effect of roughness at high Reynolds numbers on the performance of aerofoil DU 97-W-300Mod[J]. Wind Energy, 2004, 7(4):295-307.