

# 一种风力机专用翼型气动特性的非定常数值模拟

李德顺, 李仁年, 杨从新, 杨 瑞, 赵伟国

(兰州理工大学风能技术研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 基于 N-S 控制方程, 对 NREL 的 S827 翼型进行了非定常数值模拟, 得到了雷诺数为  $2 \times 10^6$  时, 该翼型在不同攻角下的升力系数和阻力系数曲线以及速度分布图, 数值模拟结果与 NREL 所提供的气动数据吻合良好。同时, 在  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$  雷诺数范围内, 对  $0^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $10^\circ$  等攻角下该翼型的升力系数和阻力系数随雷诺数的变化规律进行了数值模拟研究, 为工程实际提供了一些有意义的参考。

**关键词:** 风力机; 翼型; S827; CFD; 非定常流动

**中图分类号:** TK83

**文献标识码:** A

传统的风力机叶片多采用航空翼型, 然而由于风力机的工作环境和运行工况的不同, 传统的航空翼型不能很好地满足风力机气动性能要求。为适应风力机特殊的运行工况, 美国、丹麦、瑞典等国推出了适用于风力机的专用翼型, 如: 美国 NREL 的 S 系列翼型、丹麦的 RISO A 系列翼型和瑞典的 FFA W 系列翼型等, 这些翼型都具有对前缘粗糙度不敏感、有较高的升阻比等风力机的气动性能特点<sup>[1]</sup>。对于失速控制型风力机叶片, 一般在不同截面位置采用不同的翼型以综合考虑风轮的气动性能和结构强度要求。一般认为, 在叶片尖部 (0.9 倍的风轮半径) 处选用薄翼, 以保证具有较低的最小阻力和最大升力系数, 并减小叶片尖部的弦长以控制转子尖部的负荷; 在主要外部位置 (0.75 倍的风轮半径) 处为对功率系数贡献最大的区域, 应选用中等厚度翼型, 有最大的升阻比, 以保证风力机具有较高的功率系数; 而在叶片根部 (0.2 倍的风轮半径) 处, 应选用厚翼型, 以保证风轮结构强度要求并具有较高的最大升力系数<sup>[2]</sup>。

S827 翼型为 NREL 推出的 S 系列翼型中的一种用于风力机叶片的主要外部位置 (0.75 倍的风轮半径) 处的翼型, 主要用于风轮直径为 40~50m 的风力机叶片, 该翼型相对厚度为 21%, 具有较高的升阻比, 对前缘粗糙度也不敏感<sup>[3]</sup>。本文取弦长为 1m 的 S827 翼型为几何模型, 如图 1 所示。通过对

该翼型的非定常和定常绕流进行数值模拟, 得到了  $Re$  为  $2 \times 10^6$  时升力和阻力系数随攻角变化的曲线, 并与 NREL 公司所提供的数据进行对比, 验证了所采用非定常数值模拟方法来得到升力和阻力系数的可行性; 同时得到了升力系数和阻力系数随雷诺数变化的曲线。



图 1 S827 翼型

## 1 理论模型和数值模拟方法

### 1.1 翼型绕流的理论模型

由于风力机一般工作在  $Ma < 0.3$  的范围, 因此, 可假设翼型的绕流问题为不可压缩流动, 控制方程采用二维不可压缩 N-S 方程和二维连续性方程。

二维不可压缩 N-S 方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

收稿日期: 2008-02-21

基金项目: 甘肃省科技攻关项目 (No. 2GS052-A52-004-03)

作者简介: 李德顺 (1980-), 男, 甘肃甘谷人, 讲师, 主要从事风力机设计与数值模拟、流体机械理论与设计方面的研究。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

## 1.2 数值模拟方法

动量、湍流动能均采用二阶迎风格式离散, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 利用 FLENT 软件的前处理软件 GAMBIT 进行几何建模, 采用有限体积法, 网格采用结构化的 C 型网格, 网格数为 25300 (如图 2 所示)。利用 FLENT 软件进行数值模拟, 以无穷远来流风速作为进口的边界条件, 压力为一个大气压, 进口气流的湍流度可根据具体风场状况确定, 这里选用常用值 3%; 采用自由出流作为出口边界条件; 壁面为翼型表面, 根据选定的湍流模式, 把风 (气流) 作为粘性流体来处理, 所以在翼型近表面处使用无滑移条件和无渗透条件。时间步长为 0.001, 选用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型, 该湍流模型来源于严格的统计技术, 与标准  $k-\epsilon$  模型相似, 有如下改进: RNG  $k-\epsilon$  湍流模型在  $\epsilon$  方程中加了一个条件, 有效地改善了精度; 考虑了湍流旋涡, 提高了这方面的精度; RNG 理论为 Prandtl 数提供了一个解析公式, 而标准  $k-\epsilon$  模型使用的是用户提供的常数; 标准  $k-\epsilon$  模型是一种高雷诺数模型, RNG 理论提供了一个考虑雷诺数流动粘性的解析公式。这些特点使得 RNG  $k-\epsilon$  模型比标准  $k-\epsilon$  模型在更广泛的流动中有更高的可信度和精度<sup>[4]</sup>。

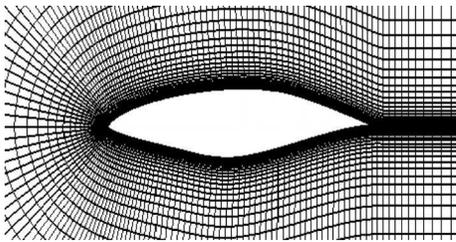


图 2 翼型网格化方案

## 2 计算结果及分析

### 2.1 所采用数值模拟方法的验证

翼型升力和阻力系数的计算公式如下:

$$C_l = \frac{L}{0.5\rho V_r^2 c} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{D}{0.5\rho V_r^2 c} \quad (5)$$

其中:  $C_l$  和  $C_d$  分别为翼型的升力和阻力系数,  $L$  和  $D$  分别为翼型所受的升力和阻力,  $\rho$  为空气密度,  $V_r$  为空气流过翼型时的相对速度,  $c$  为翼型的弦长。

竖直方向的速度分量为速度入口参数来改变攻角。变化雷诺数为  $2 \times 10^6$  时, 对 S827 翼型的气动特性进行非定常和定常数值模拟, 得到了翼型升力系数和阻力系数随攻角  $\alpha$  的变化曲线, 将非定常数值模拟结果和 NREL 所提供数据进行对比, 如图 3 所示, 同时将非定常数值模拟结果和定常数值模拟结果进行对比, 如图 4 所示。可知非定常的模拟方法比定常的方法更加接近已知数据, 定常的方法仅能在  $-8^\circ \sim 12^\circ$  的攻角范围内进行数值模拟, 随着攻角的进一步增大或减小偏差会越来越大, 也就是说, 随着分离点的进一步前移, 漩涡范围的扩大, 尤其当接近或超过失速点后, 甚至会出现数值模拟不收敛的现象; 非定常数值模拟结果则跟已知数据吻合良好, 最大误差为 5.2%; 因此, 本文采用非定常数值模拟的方法来研究 S827 翼型的气动特性, 得到了攻角  $\alpha$  在  $-16^\circ \sim 22^\circ$  之间变化时, 翼型的升力系数和阻力系数随攻角  $\alpha$  的变化曲线, 如图 3 所示。升力系数和阻力系数的极曲线, 如图 5 所示。由图可知: 该翼型具有较高的升阻比, 失速点出现在  $14^\circ$  攻角附近, 最大升阻比大约为 46.5, 出现在  $6^\circ$  攻角附近。

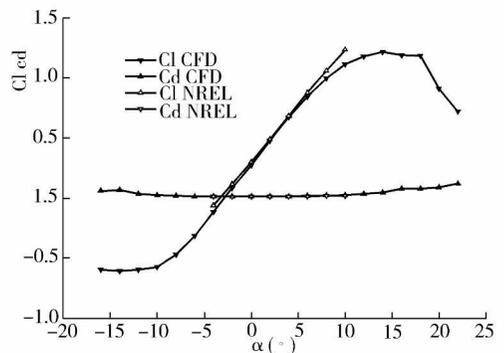


图 3 升力、阻力系数随攻角  $\alpha$  的变化

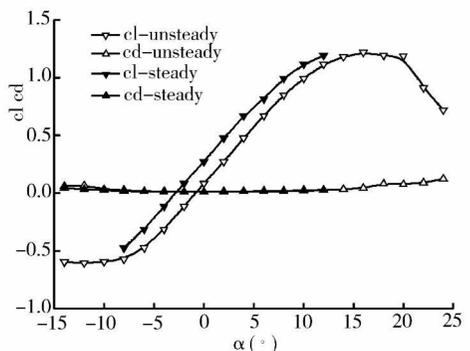


图 4 非定常、定常数值模拟结果对比

通过给定不同攻角时对应的来流风速在水平和

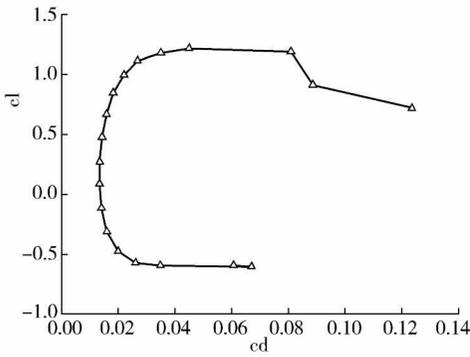


图 5 极曲线

### 2.2 分离点随攻角的变化

雷诺数为  $2 \times 10^6$  时,对 S827 翼型在不同攻角下的速度矢量图进行分析,分别如图 6~图 9 所示。

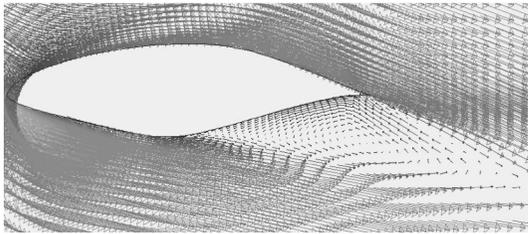


图 6  $-16^\circ$  攻角时的速度矢量图

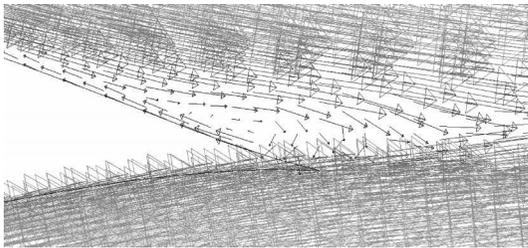


图 7  $8^\circ$  攻角时的速度矢量图

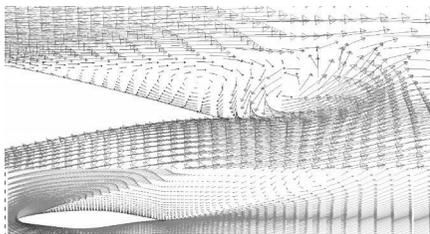


图 8  $16^\circ$  攻角时的速度矢量图

由图可知,攻角为  $-6^\circ \sim 4^\circ$  范围,流动基本未发生分离;攻角为  $6^\circ$  时,分离点大约出现在上表面距尾缘  $1/10$  的弦长处,随着攻角的增大分离点前移,涡的范围和强度增大,在  $16^\circ$  攻角时,在尾缘处可明显观察到两个负压区,形成了两个反方向旋转的漩涡,分离点出现在上表面距尾缘大约  $1/3$  的弦长处,当攻角为  $24^\circ$  时,分离点已前移至上表面距尾缘约

$5/6$  弦长处,涡的范围进一步扩大;攻角为负角度并进一步减小时,翼型的下表面发生流动分离,攻角为  $-8^\circ$  时,翼型下表面出现流动分离,分离点出现在下表面距尾缘大约  $1/30$  的弦长处,随着攻角的进一步减小,分离点前移,涡的范围增大,强度增大,当攻角为  $-16^\circ$  时,分离点移至下表面距尾缘大约  $1/2$  的弦长处。

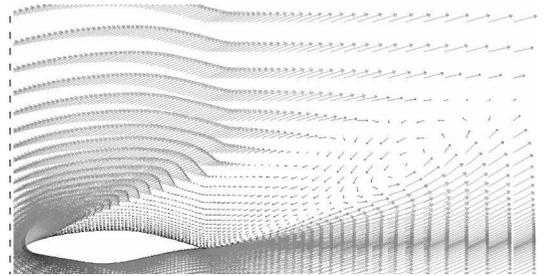


图 9  $24^\circ$  攻角时的速度矢量图

### 2.3 气动参数随雷诺数的变化

同一攻角时,当雷诺数在  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$  范围内变化时,对 S827 翼型在攻角  $\alpha$  为  $0^\circ, 6^\circ, 10^\circ$  时的气动特性随雷诺数的变化情况进行数值模拟,得到该翼型的升力系数和阻力系数随雷诺数的变化曲线,如图 10 所示。

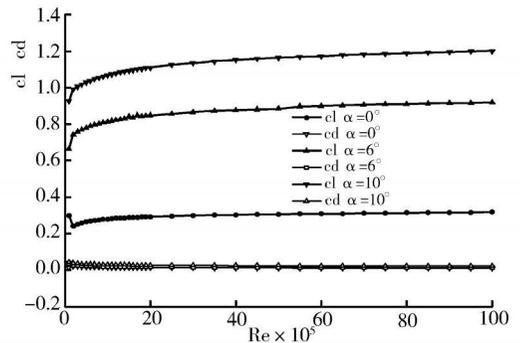


图 10 升力、阻力系数随雷诺数的变化

由图 10 可知,当攻角  $\alpha$  为  $0^\circ, 6^\circ, 10^\circ$ ,雷诺数大于  $0.5 \times 10^6$  时,升力系数曲线和阻力系数随雷诺数的变化曲线基本成线性变化,可以通过分段线性化的方法,逐段求出其斜率来完善翼型气动数据和简化风力机叶片的设计过程,雷诺数小于  $0.5 \times 10^6$  时,升力系数曲线和阻力系数曲线随雷诺数的变化较大,不符合线性规律,在这个范围中,湍流的变化、翼型自身的振动或翼型表面的粗糙度都会引起翼型性能的很大变化,由于风力机翼型雷诺数范围一般为  $0.7 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ ,因此风力机一般不运行在这个敏感范围内<sup>[5]</sup>。

### 3 结论

(1) S827翼型是 500 kW 以上大型风力机所采用的翼型,翼型的气动参数比较缺乏;通过对 S827翼型数值模拟结果与 NREL所提供数据进行对比,验证了所采用数值模拟方法的可行性,可进一步扩充该翼型的气动数据。

(2)当雷诺数大于  $5 \times 10^5$ ,攻角  $\alpha$  为  $0^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $10^\circ$  等较小攻角时,升力系数和阻力系数随雷诺数的变化曲线基本成线性,可以通过分段线性化的方法,逐段求出其斜率来完善翼型气动数据,简化风力机叶片的设计过程。数值模拟方法是翼型气动性能研究的主要方法之一,可作为实验方法的重要补充。

### 参 考 文 献

[1]叶枝全,黄继雄,陈 严,等.适用于风力机的新翼型气动性能的试验研究[J].太阳能学报,2003.  
 [2]Snel H.·Review of the Present Status of Rotor Aerodynamics [J]. Jour. of Wind Energy Pilot Issue 1998.  
 [3]D·M·Somers.The S827 and S828 Airfoils[M].NREL/SR-500-36292.2005.  
 [4]王福军.计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.  
 [5]黄继雄.风力机专用新翼型及其气动特性研究[D].汕头大学硕士学位论文,2001.

(编校:李晓丽/李 蓝)

(上接 18页)

中的某个位,取值范围 0~15)。

在“图形”菜单下开发监控画面,针对轧机设备工序和控制要求,开发了“运行主界面”、“直流传动状态”、“铝箔穿带条件判断”、“参数设定”、“趋势”和“报警”等七个画面。“运行主界面”显示各种设备如开卷机、轧辊传动系统和卷取机的状态,以及张力、应力、前滑量和后滑量等参数值,如图 3 所示;“趋势”界面显示主传动系统中各台电机参数变化,以及张力、应力等重要参数变化趋势;在“报警”画面中设置报警汇总,罗列出故障类型、发生时间等,以便指导操作员及时排除。

### 4 结束语

铝箔轧机监控系统运用 OPC 方式,上位机通过专用用于与 AutoMax DCS 系统通信的 PC Link 卡,解决了与控制系统的通信问题,实现了对设备过程状态参数的采集。然后通过在上位机 RSVIEW32 上设置与设备的各种状态参数对应的变量,定义各种变量的属性,和开发人机界面。这样则极大地方便了操作员对系统的使用和维护。该系统自 2008 年 3 月份运行以来,运行稳定,该系统在 OPC 技术具体应用项目的实施上具有一定的参考价值。

### 参 考 文 献

[1]杨培保. AutoMax DCS 控制系统的分析与应用 [J]. 设备管理与维修, 2003(3): 17-18.  
 [2]刘锦善. 分布式数字控制系统 [J]. 冶金丛刊, 1997(6): 27-31.  
 [3]陈在平,姚晓伟,贾 超. OPC 技术在 DeviceNet 总线中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 372-374.  
 [4]王保军,杜大川. 美国 C itistee 公司轧钢厂四辊轧机自动轧钢系统 [J]. 冶金自动化, 2000, 24(1): 31-34.

(编校:夏书林)

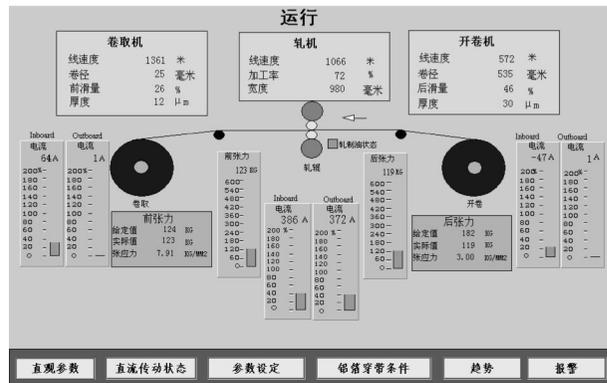


图 3 监控系统主界面

## Development of Monitoring System for Aluminum Foil Mill Based on RSView32

DONG Gui-hua (Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051), ZHANG Shou-ming. JOURNAL OF XIHUA UNIVERSITY. v 27, no.5. PP.17-18, 4/2008. (ISSN 1673-159X; In Chinese)

**Abstract** This paper proposes the use of OPC technology to realize the data exchange between RSView32 and AutoMax DCS system, in which the RSView32 is employed as OPC Client and the RSServer as OPC Server. The real-time acquisition of equipment status and important parameters of the aluminum foil rolling mill control system are obtained. The excellence supervisory performance of RSView32 is utilized. The monitoring pictures for the rolling process are developed. The structure of the monitoring system is introduced and the equipment communication method and the development steps of the system are described.

**Key words** monitoring; OPC; RSView32; RSServer; AutoMax

## Study on the Discrimination of Three Typical Confined Reservoirs

ZHANG Xiao-li (Graduate School of Xihua University, Chengdu 610039 China), LI Shun-chu et al. JOURNAL OF XIHUA UNIVERSITY. v 27, no.5. PP.19-20, 4/2008. (ISSN 1673-159X; In Chinese)

**Abstract** This paper presents a study on the discrimination of three typical confined reservoirs, i.e. homogeneous reservoir, dual porosity reservoir, composite reservoir. Based on the confined outer-boundary and the similar-structure theory of non-dimensional dynamic Laplace Space Solution for these reservoir models, in which the bottom-hole well bore pressure is related to well bore storage and skin affection in inter-boundary, the corresponding comparative analysis charts are drawn out using the programming tool in Matlab. These reservoir models' discrimination is achieved by using these charts. The results obtained from the study are of benefit for making a plan in the development of oil reservoirs.

**Key words** typical reservoir; Laplace Space Solution; similar-structure; Matlab

## Unsteady Numerical Simulation of Aerodynamic Performance for the Special Airfoil of a Wind Turbine

LI De-shun (Investigation Center of Wind Power, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China), LI Ren-nian et al. JOURNAL OF XIHUA UNIVERSITY. v 27, no.5. PP.21-24, 4/2008. (ISSN 1673-159X; In Chinese)

**Abstract** An unsteady flow field of airfoil S827 in NREL S series is simulated based on N-S control equation. The lift and drag coefficients and pressure distribution are obtained at the different angle of attack at the time when  $Re = 2 \times 10^6$ , and the re-

sults obtained from computation have better agreement with the aerodynamic data offered by NREL. Within the Reynolds number from  $4 \times 10^5$  to  $1 \times 10^7$ , the variation of lift and drag coefficients with  $Re$  is also studied at different angle of attack such as  $0^\circ$ ,  $6^\circ$  and  $10^\circ$ . The results obtained from the study provide useful reference information for engineering application.

**Key words** wind turbine; airfoil S827; CFD; unsteady flow

## The Intelligent Controlling System of a Solar Heater Based on MCU

ZHANG Jing-wen (College of Fluid Power and Control, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050 China), WANG Zhen-hong et al. JOURNAL OF XIHUA UNIVERSITY. v 27, no.5. PP.25-27, 4/2008. (ISSN 1673-159X; In Chinese)

**Abstract** Aiming at the drawbacks of current single function domestic solar water heaters such as complicated to operate and control high price, this paper presents a new design of the intelligent controlling system for a solar heater. According to the requirements and characteristics of the control system for solar water heaters, the solar heater control system is designed with MCU as central detecting and control unit by adopting DS12C887 lining control clock. It has the functions of time, temperature and water level selection, and the advantages of better control and anti-jamming.

**Key words** solar heater; MCU; automatic control; real-time control clock

## Research on District Division and Design of Water Supply for Mountainous Cities

ZHANG De-xiang (School of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu 610039 China), LIU Xiao-bing et al. JOURNAL OF XIHUA UNIVERSITY. v 27, no.5. PP.28-31, 4/2008. (ISSN 1673-159X; In Chinese)

**Abstract** Considering scattered mountainous cities and the difficulty to form unified characteristics of water supply system, the water supply division is used to ensure water supply reliability for mountain cities. The adopted measure can save construction investment, reduce operating cost management. The authors use the theory of regional water supply, put forward the regional water supply design principles and methods for mountain city water supply networks to optimize the project design combining with the finished water supply project for water supply networks division of three mountain cities. The good practical results are achieved.

**Key words** Mountainous city; water supply network; district water supply

## Study on Closed-loop Power Control Based on TD-SCDMA System

LI Peng (Computer and Communication Engineering College, China