

基于大涡模拟的风力机尾流特性研究

杨从新^{1,2}, 张亚光¹, 张旭耀¹, 何攀¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要:耦合大涡模拟(Large-Eddy Simulation, LES)与致动线方法(Actuator Line Method, ALM),对均匀入流下的水平轴风力机作数值模拟研究,探究三种亚格子(Subgrid-Scale, SGS)模型下风力机的尾流特性。结果表明:雷诺应力与湍流切应力在叶尖涡与叶根涡区有明显的最大值与极大值,尾迹随下游位置的变化呈现出逐渐增大的各向同性;平均速度亏损比产生的湍流更持久。不同SGS模型在相同叶尖速比下得到的轴向速度干扰因子和速度环量沿叶片径向分布几乎相同。相同位置处的尾涡由不同强度的涡旋组成,能量较小的涡旋是尾涡组成中的主要部分;尾流发展的过程中,强度较大的涡集中在尾涡中心,强度较小的涡在尾涡外围分布。对于所使用的三种亚格子模型,能预测出相似的尾流效应,亚格子模型的选择对尾流的模拟影响较小; $v_{SGS}=0$ 时,求解过程只有数值耗散,仍能获得很好的模拟结果。

关键词:风力机尾流;大涡模拟;致动线;亚格子模型

中图分类号:TH16;TK83 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2021)10-0033-05

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2021.10.008

Study of Wake Characteristics of Wind Turbine Based on Large-Eddy Simulation

YANG Cong-xin^{1,2}, ZHANG Ya-guang¹, ZHANG Xu-yao¹, HE Pan¹

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

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

Abstract: In this paper, the Large-Eddy Simulation (LES) and the Actuator Line Method (ALM) were coupled to simulate the horizontal axis wind turbine under uniform inflow. The wake characteristics of wind turbine under three SGS models are discussed. The results show that reynolds stress and turbulent shear stress have obvious maximum and maxima values in the tip vortex and root vortex region. The wake increases isotropy gradually with the change of downstream position and the average velocity defect is more durable than the generated turbulence. The axial velocity interference factors and velocity circulation along the blade radial direction are almost the same when use different SGS models under the same tip velocity ratio. The wake vortex at the same position is composed of vortices with different strength, and the vortex with smaller energy is the main part of the composition of the wake vortex. During the development of the wake, the vortex with stronger intensity is concentrated in the center of the wake vortex, and the vortex of smaller intensity is distributed in the periphery of the wake vortex. It can predict similar wake characteristics for used three SGS models, and the choice of SGS model has less influence on the simulation of wake. The solving process only has numerical dissipation when v_{SGS} get the value of zero, and it still obtains good simulation results.

Key Words: Wind Turbine Wake; Large-Eddy Simulation; Actuator Line; Subgrid-Scale Model

1 引言

风力机尾流中存在叶尖涡、叶根涡等复杂的涡系,它们之间存在大尺度相干结构决定的分离流动,对风力机组的安全运行提出挑战,研究风力机尾流特性,对合理开发与研究新型风力机和合理利用风资源有重要指导作用。近年来,大涡模拟在风力机尾流与风场的高精度数值模拟中的应用越来越广泛。文献^[1]首次耦合大涡模拟与致动线方法研究风力机尾流。文献^[2]用致动线方法研究了均匀来流条件下的风力机近尾流特性,对涡结构、速

度亏损、拟涡能进行分析,验证了致动线模型的准确性。文献^[3]将致动线方法的数值模拟结果与BEM理论、CFD方法以及风洞实验进行了系统的比较,验证了致动线方法用于风力机气动数值模拟的可行性。文献^[4]基于Lagrangian动力亚格子模型对风力机尾流场进行数值模拟,分析了风力机近尾流场与远尾流场的流动特性。文献^[5]利用致动线方法分析了不同入流条件下风切变、湍流强度等因素对风力机尾流特性的影响。文献^[6]对充分发展的风电场边界层进行数值模拟,发现高雷诺数流比低雷诺数时对

来稿日期:2020-08-16

基金项目:国家重点基础研究发展(973计划)风力机非定常空气动力学机理和高精度数值模拟研究(项目编号:2014CB046201)

作者简介:杨从新,(1964-),男,陕西兴平人,博士研究生,教授,博士生导师,主要研究方向:流体机械的设计与研究;

张亚光,(1992-),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向:风力机空气动力学

SGS模型的选择更敏感。文献^[7]引入周期性扰动,研究了小型风力机叶尖涡的稳定性及其演变,发现周期性扰动的存在对涡旋的发展与破碎过程有明显的影响;在涡旋破裂前,还观察到了明显的涡旋配对现象,并通过改变强迫扰动的幅值和频率进行了参数研究,评价其对叶尖涡的影响。文献^[8]对水平轴风力机在水槽中的近尾流进行实验研究,探讨了水平轴风力机尾迹的旋涡相互作用及螺旋形涡丝的稳定性。文献^[9]对单台风力机进行数值模拟研究,受叶尖附近的低振幅激发源的扰动,沿螺旋运动的波的放大会触发不稳定,导致尾流破碎,重点研究了从叶片后缘脱落涡的稳定性。

以上研究使用单一湍流模型对风力机进行模拟,不同亚格子模型的选取会对研究对象数值模拟的结果产生影响。这里以流场中的单一风轮为研究对象,排除塔架、机舱等结构对风力机尾流的影响,探讨均匀入流条件下采用三种亚格子模型的风力机尾流特性。

2 研究对象与计算方案

2.1 研究对象

以一台 33kW 两叶片水平轴风力机为研究对象,由于尾流的旋转效应,叶尖使用 Glauert 修正,风力机基本参数如表 1 所示。

表 1 33 kW 风力机基本参数
Tab.1 The Parameters of 33 kW Wind Turbine

风轮直径 (m)	叶片数	额定风速 (m/s)	额定转速 (r/min)	翼型分布
14.8	2	11	85	NACA44 系列

2.2 计算方案

计算域及加密区域网格尺寸,如图 1 所示。图中: D -风轮直径。风轮位于进口后方 $2D$ 处,为减少壁面效应,根据文献^[10]提出的准则,设置计算域尺寸为 $22D \times 6D \times 6D$;同时,为减小流动方向网格加密界限处不同网格尺寸对计算结果的影响,网格加密区域为入口到出口,沿风轮径向经过二次加密后的六面体网格总数为 4.356×10^7 ,最小网格尺寸为 $0.25m$ 。

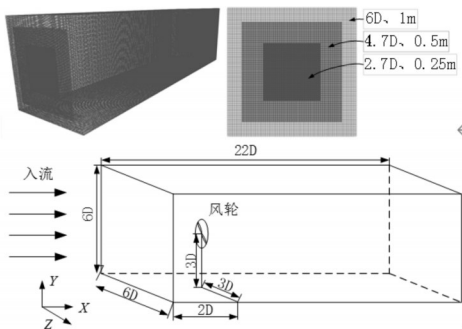


图 1 计算域及网格加密

Fig.1 Computing Domain and Mesh Refinement

计算时间步长为 $0.005s$;大涡模拟对亚网格尺度流动进行模拟,重点关注尾流涡结构,无需进行网格无关性验证。这里数值计算中风力机叶尖速比 λ 分别取值 13.17 、 8.23 、 5.98 ,对应入流速度分别为 5 、 8 、 $11 m \cdot s^{-1}$ 。

3 数值模型

耦合致动线与大涡模拟方法,采用开源 CFD 软件 Open-

FOAM 对处于均匀入流条件下的风力机做数值模拟研究。

3.1 致动线方法

风力机的模拟用致动线方法,其基本概念为每个风力机叶片用一条承受体积力的线表示,将叶片沿展向分割为若干叶素,分别求解叶素上的体积力。叶素上的升力、阻力由下式计算为:

$$f = (L, D) = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c (C_L e_L + C_D e_D) \quad (1)$$

式中: e_L -升力方向向量; e_D -阻力方向向量。

各致动元上离散的点力通过高斯正则化函数将致动力反作用于流体:

$$\eta_\varepsilon(d) = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (2)$$

点 (x, y, z) 处的体积力为:

$$f_\varepsilon(x, y, z, t) = f \otimes \eta_\varepsilon = \sum_{j=1}^n f(x_j, y_j, z_j, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_j}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中: d_i -第 i 个致动点 (x_i, y_i, z_i) 的中心与投射点 (x, y, z) 的距离; ε -高斯光顺参数。

致动点处网格尺寸为 $0.25m$,高斯光顺参数 $\varepsilon=0.5$,风轮直径上分布致动点个数为 $n=60$,以使致动点间的距离小于风轮处网格尺寸。

3.2 大涡模拟

对 Navier-Stokes 方程施加卷积过滤运算,滤波后的 LES 控制方程如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{u}_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_\varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

式中: ρ -空气密度; ν -分子粘度; \bar{u}_i -滤波后的速度分量; \bar{p} -修正压力; f_ε -由于风轮的存在作用于空气的体积力; τ_{ij} -SGS 应力,定义为 $\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j$ 。

3.3 湍流模型

3.3.1 Smagorinsky 模型

计算亚格子应力 τ_{ij} 有不同的方法,常用的方法是利用 Boussinesq 涡粘假设。将 τ_{ij} 表示为正应力与偏向应力,正应力部分被认为各向同性,求解 Smagorinsky 模型的表达式为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (6)$$

正应力和亚格子动能 k_{SGS} 联系起来, $k_{SGS} = \frac{1}{2} \tau_{kk}$, 则:

$$\frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} \tau_{kk} \right) \delta_{ij} = \frac{2}{3} k_{SGS} \delta_{ij} \quad (7)$$

所以,亚格子应力可表示为:

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} + \frac{2}{3} k_{SGS} \delta_{ij} \quad (8)$$

式中: δ_{ij} -克罗内克符号,当 $i=j$ 时 $\delta_{ij}=1$, $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=0$;

ν_{SGS} -亚格子尺度粘度; $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ -应变率张量。

Smagorinsky模型中, ν_{SGS} 表示为:

$$\nu_{SGS} = \rho C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \quad (9)$$

将上式代入方程(8),则方程封闭参数为 k_{SGS} ,

$$k_{SGS} = 2 \frac{C_k}{C_e} \Delta^2 \overline{S_{ij}^2} \quad (10)$$

式中: C_k 、 C_e -Smagorinsky模型无量纲系数, Sm模型取值 $C_k=0.0676$ 、 $C_e=0.93$; Δ -滤波器过滤尺度。

3.3.2 Lagrangian 动力模型

亚格子动力模型对 Navier-Stokes 方程施加两次过滤尺度不同的过滤运算,从解析流中动态计算模型参数,并允许模型参数在空间和时间上发生变化,亚格子动力模型基于 Germano 等式:

$$L_{ij} = T_{ij} - \hat{\tau}_{ij} \quad (11)$$

式中: $(\hat{\cdot})$ -在尺度 $\hat{\Delta}$ 上测试过滤,通常取值 $\hat{\Delta} = 2\Delta$; T_{ij} -类似 τ_{ij} ,是测试滤波尺度上对应的 SGS 应力; L_{ij} -Leonard 应力,是介于 Δ 和 $\hat{\Delta}$ 之间的尺度所引起的应力,可以从解析场中直接计算。

类似 Smagorinsky 模型,对 T_{ij} 建模:

$$T_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} T_{kk} = -2(C_s \hat{\Delta})^2 |\overline{S}| \overline{S}_{ij} \quad (12)$$

式中: \overline{S}_{ij} -在过滤尺度 $\hat{\Delta}$ 上的应变率张量。

求 SGS 模型系数 C_s 的动态过程使 Germano 等式误差最小化:

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij} &= T_{ij} - \tau_{ij} - L_{ij} \\ &= 2(C_s \Delta)^2 \left[\overline{|\overline{S}| \overline{S}_{ij}} - \left(\frac{\hat{\Delta}}{\Delta} \right)^2 |\overline{S}| \overline{S}_{ij} \right] - L_{ij} \\ &= (C_s \Delta)^2 M_{ij} - L_{ij} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{其中, } M_{ij} = 2 \left[\overline{|\overline{S}| \overline{S}_{ij}} - \left(\frac{\hat{\Delta}}{\Delta} \right)^2 |\overline{S}| \overline{S}_{ij} \right]$$

由文献^[11]等人提出的初始动态模型满足 $\epsilon_{ij} S_{ij} = 0$ 得到 C_s 。文献^[12]发现,当 ϵ_{ij} 在最小二乘法上最小化时,方程表现良好,从而得到结果:

$$(C_s \Delta)^2 = \frac{\langle L_{ij} M_{ij} \rangle}{\langle M_{ij} M_{ij} \rangle} \quad (14)$$

式中:“ $\langle \cdot \rangle$ ”-系综平均。

文献^[13]提出了 Lagrangian 动力亚格子模型,该模型沿流体质点运动轨迹做统计平均最小化 Germano 等式误差。

本次数值实验采用以下亚格子模型进行数值计算: Smagorinsky 模型(Smagorinsky model)、Lagrangian 动力模型(Lagrangian dynamic model);另外当 $\nu_{SGS}=0$ 时没有明确表示湍流粘性,此时引起动能耗散的唯一影响因素是数值耗散。以上三种模型在这里中分别以 Sm(Smagorinsky model)、dyL(Lagrangian dynamic model)、Nom(No model, $\nu_{SGS}=0$)表示。

3.3.3 数值离散与边界条件

采用开源软件 OpenFOAM 进行数值计算, N-S 方程中的原始变量用有限体积法进行离散,求解方程时使用瞬态压力全隐分离式(PISO)算法。时间项采用二阶有界隐式 Crank-Nicholson 格式,梯度项、散度项等空间项采用高斯线性离散。进口为速度入口,方向沿 X 轴,出口为压力出口,壁面处采用滑移边界条件。

4 计算结果分析

本次数值实验采用甘肃省计算中心高性能计算集群的两节点 48 核心计算,其中,计算工况 $\lambda=13.17$ 时,设置总计算时间为 110s,三种亚格子模型分别花费计算时间 180.7h(dyL)、140.2h(Sm)、158.8h(Nom)。亚格子动力模式需要进行统计平均,理论上需要进行系综平均,非常花费计算时间;但拉格朗日动力模式沿质点轨迹平均确定模型系数,增加的计算量不多。当尖速比 l 分别取值 13.17、8.23、5.98 时,对应的风轮输出功率为 8.016、16.623、33.267 kW,额定风速下的功率误差为 0.809%,满足计算要求。当叶尖速比 $l=13.17$ 时,三种 SGS 模型在计算过程中的最大库郎数 Co (Courant Number) 分别为 0.135(dyL)、0.136(Sm)、0.149(Nom)。

4.1 尾流发展

Lagrangian 动力模式允许在不调整任何参数的情况下,根据流动在时间和空间上的变化,对模型系数和参数进行动态计算。由于涡粘模型对涡生成的直接影响,不考虑轮毂、塔架、机舱等对风力机尾流的影响。

由图 2(a)可知,尾流从叶尖涡与叶根涡以近似对称的涡旋结构向下游传播,在远尾流区,由于流体具有粘性,在周围气体的作用下尾流的对称结构被打破。叶片失速前, $\lambda=8.23$ 、 $l=5.98$ 时随叶尖速比减小,攻角增大,叶片吸力面与压力面间的压差增大,导致叶尖涡更强具有较高的稳定性。 $\lambda=13.17$ 时,尾流区呈现完整的近尾流区、尾流发展区与远尾流区,从尾流发展的角度看具有代表性,将主要对此工况下不同 SGS 模型的风力机尾流进行研究。

如图 2(b)所示,为 $\lambda=13.17$ 时使用不同 SGS 模型获得的垂直于风轮旋转平面的涡旋云图。近尾流区,尾流从叶尖与叶根处向下游传播;之后三种亚格子模型下的叶尖涡均出现了 K-H(Kelvin Helmholtz)不稳定性现象,与文献^[14]中实验观测到的叶尖涡横截面尾迹相似;最后由于湍流的能量级串,大尺度尾流在远尾流区耗散变成小尺度涡。

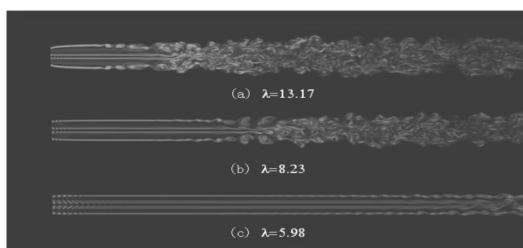
4.2 尾流速度分布及其湍流特性

实际流体中,由于流体具有粘性,尾流终将恢复;数值模拟中,由于数值耗散,尾流也终会恢复。由图 3 中使用 dyL 模型在不同叶尖速比下的速度分布曲线可知, $\lambda=5.98$ 时,直到风力机尾流下游 11D 处速度有微弱减小; $\lambda=13.17$ 时尾流恢复最快。由于周围空气的作用,尾流逐渐膨胀发展为完全湍流。从三种 SGS 模型预测的尾流速度分布曲线(图 4)可以看出, 0D-2D 之间的近尾流区,不同 SGS 模型预测的尾流速度廓线几乎相同,在尾流发展区与远尾流区,三种 SGS 模型预测的尾流速度廓线交替上升,不能说明哪种亚格子模型的尾流预测能力更突出,其中尾流速度廓线在 7D 后均由原来的“倒钟形”发展成为近高斯分布。

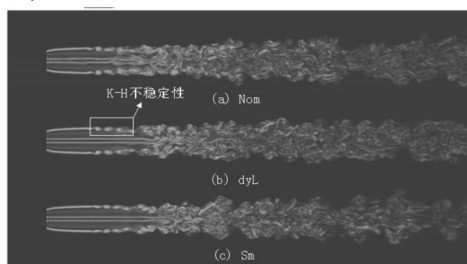
为分析尾流场中湍流的流动特性,引入无量纲的雷诺应力与湍流切应力分别定义为 $u'u'/V_{\infty}^2$ 、 $u'v'/V_{\infty}^2$,引入湍动能:

$$TKE = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2)$$

式中: u' 、 v' 、 w' -轴向脉动速度、横向脉动速度、垂向脉动速度。



(a)使用dyL模型在不同叶尖速比下垂直于风轮旋转平面的涡旋图



(b) $\lambda=13.17$ 时不同亚格子模型垂直于风轮旋转平面的涡旋图

图2 使用dyL模型垂直于风轮旋转平面的涡旋图

Fig.2 2D Snapshots with Vorticity Contour in the Vertical Plane in dyL Model

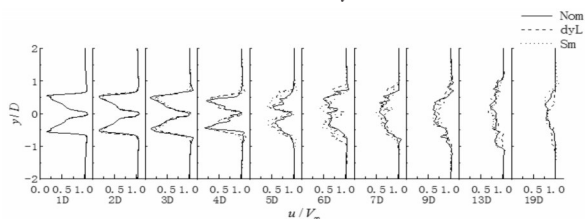


图3 使用dyL模型不同叶尖速比下风力机尾流时均轴向速度分布曲线
Fig.3 Profiles of the Time Averaged Axial Velocity for Different Tip-Speed Ratios in dyL Model

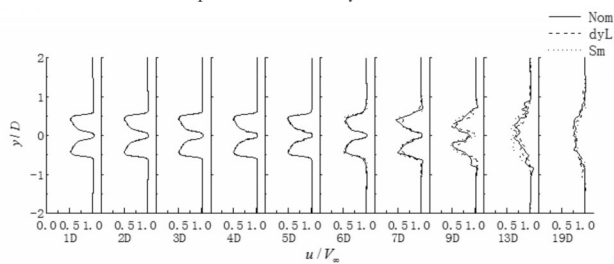
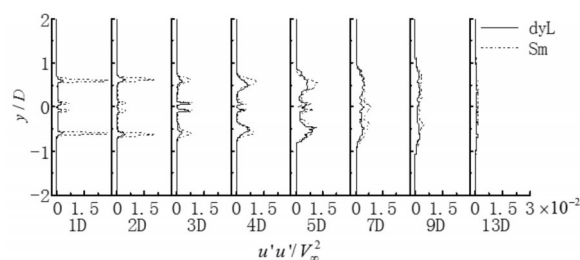
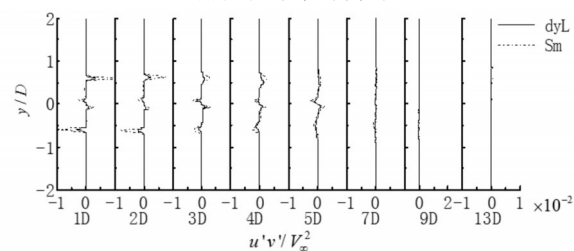


图4 $\lambda=13.17$ 时不同亚格子模型下风力机尾流均轴向速度分布曲线
Fig.4 Profiles of the Time Averaged Axial Velocity for Different SGS Models in Tip-Speed Ratio of $\lambda=13.17$

对于Nom模型, $v_{SGS} = 0$, 所预测的雷诺应力与湍流切应力为零, 图5中不显示。 $\lambda=13.17$ 工况下的风力机尾流中, 雷诺应力与湍流切应力在叶尖涡与叶根涡区有明显的最大值与极大值; 随着尾流向下游发展, 尾流逐渐恢复, 雷诺应力与湍流切应力逐渐变小; 湍动能与雷诺应力的变化趋势一致, 说明尾流场中正应力对湍动能的贡献最大, 含有更多的能量; 在近尾流区, 由dyL模型产生的雷诺应力与湍流切应力大于Sm模型产生的雷诺应力与湍流切应力, 随尾流发展两模型产生的应力趋于接近, 表明尾迹随下游位置的变化呈现出逐渐增大的各向同性。比较图4~图6, 在13D处, 雷诺应力与切应力接近于零, 平均速度亏损比产生的湍流更持久。



(a)雷诺应力分布曲线



(b)切应力分布曲线

图5 叶尖速比 $\lambda=13.17$ 时不同亚格子模型风力机尾流的雷诺应力(5a)切应力(5b)分布曲线

Fig.5 Profiles of the Reynolds Stress(5a) and Shear Stress(5b) for Different SGS Models in Tip Velocity Ratio of $\lambda=13.17$

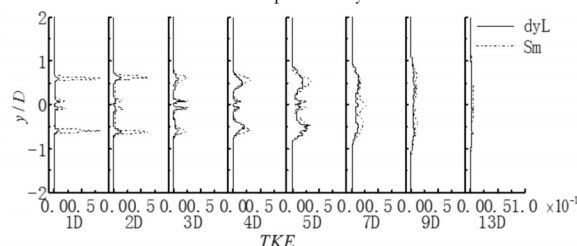


图6 $\lambda=13.17$ 时不同亚格子模型风力机尾流湍动能分布曲线

Fig.6 Profiles of the TKE for Different SGS Models in Tip Velocity Ratio of $\lambda=13.17$

4.3 轴向速度干扰因子与速度环量

如图7所示, 为轴向速度干扰因子 $\alpha_x=1-V_x/V_{x0}$ 沿叶片径向的时均分布曲线。由图可知, 叶尖速比 $\lambda=13.17$ 时轴向干扰因子从叶尖到叶根增大过快, 在0.85R处过大, 其值接近0.5, 此处的速度环量也最大, 此时流动处于湍流状态, 处理此问题通过传统的BEM理论无法解决, 只能通过经验进行修正; $\lambda=8.23$ 时, 在0.2R~0.9R的叶片重载区, 轴向干扰因子增长缓慢; $\lambda=5.98$ 时, 相比于大叶尖速比工况, α_x 变化范围最小。

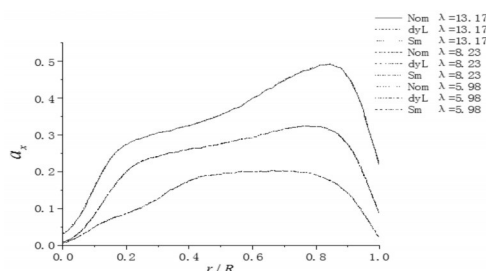


图7 轴向干扰因子沿叶片的径向分布

Fig.7 Radial Distribution of the Axial Interference Factor along the Blades

如图8所示, 为环量 $\Gamma=L/(\rho/V_{rel})$ 沿叶片径向的时均分布。图中, $\lambda=13.17$ 时叶尖与叶根部分存在较大速度梯度, 对应风轮处则

存在较强的叶尖涡与叶根涡;且 $\lambda=13.17$ 、 $\lambda=8.23$ 时叶片重载区的环量变化较小; $\lambda=5.98$ 时环量沿叶片展向不断变化,在叶片中部部分区域大于 $\lambda=8.23$ 工况,反映到风轮上表示两种工况下叶片推动风轮旋转的主要升力贡献区域发生变化,相比 $\lambda=13.17$ 工况,叶尖涡与叶根涡强度较弱。使用三种亚格子模型所得到的轴向干扰因子与环量沿叶片径向的分布几乎相同,在叶片重载区有微小波动,且与 $\lambda=8.23$ 、 $\lambda=5.98$ 工况下得到的结论一致。

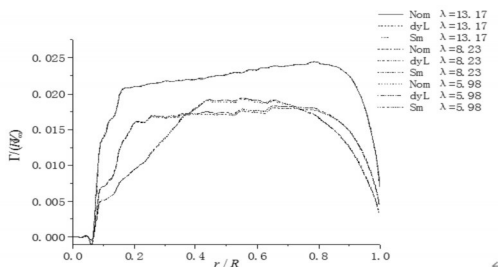


图8 环量沿叶片的径向分布

Fig.8 Radial Distribution of Circulation along the Blades

4.4 尾涡分布

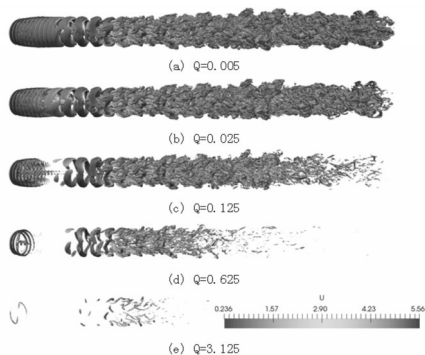


图9 $\lambda=13.17$ 时使用dyL模型尾流不同Q值三维等值面

Fig.9 3D Snapshots of Q Using dyL Models in $\lambda=13.17$

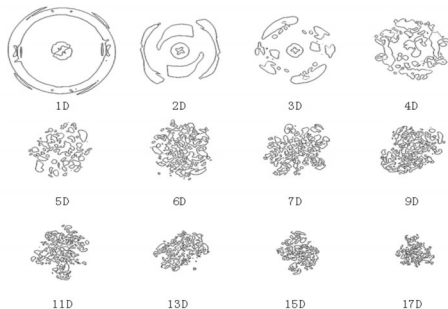


图10 使用dyL模型在 $\lambda=13.17$ 工况下风力机尾流不同位置处的速度梯度第二不变量Q值二维等值面($Q=0.005$)

Fig.10 2D Snapshots of Q at Different Downstream Positions Using dyL Models in $\lambda=13.17$ ($Q=0.005$)

使用三种亚格子模型均能很好地获得风力机尾流场结构。

如图9所示,为使用Q准则所得使用dyL模型在 $\lambda=13.17$ 工况下风力机速度梯度第二不变量的不同Q值三维等值面,由图可知随着Q值增大,尾涡的圆柱形膨胀区直径逐渐变小,位于尾涡内部的高流量层仍然能够被很好地捕捉,但风力机下游强度较弱的涡旋逐渐消失;相同位置处的尾涡由不同强度的涡旋组成,强度高涡旋其对应的涡管直径较小,尾涡膨胀之前能量较高,能量较小的涡旋是尾涡组成中的主要部分。

由曲线围成的闭环不规则图形(Q值二维等值面,图10)代表三维Q值等值面与Y-Z面的交线,其物理意义为涡量的模,适合提取边界层之外的涡结构;在远尾流区,根据其统计特性可以获得尾涡中各涡旋的大小与涡流间隙。

尾流从叶尖涡与叶根涡向下游传播,由图10可知在3D后尾涡开始溃散,不同Y-Z截面处的二维Q值等值面在均匀流下可视为近似圆形,随尾流位置的变化,圆的直径不断变小,说明尾流发展的过程中,强度较大的涡集中在尾涡中心,强度较小的涡在尾涡外围分布;若风力机在无限长区域内运行,随着尾流逐渐恢复,尾流中的湍流将逐步转化为入流状态的均匀流,不同强度的涡将逐渐消失。

5 结论

(1)雷诺应力与湍流切应力在叶尖涡与叶根涡区有明显的最大值与极大值,且由Lagrangian动力亚格子模型比Smagorinsky模型预测的应力大,随着尾流向下游发展,雷诺应力与湍流切应力逐渐变小,尾迹随下游位置的变化呈现出逐渐增大的各向同性;湍动能中正应力的贡献最大;在均匀入流条件下,平均速度亏损比产生的湍流更持久。

(2)相同位置处的尾涡由不同强度的涡旋组成,能量较小的涡旋是尾涡组成中的主要部分。尾流发展的过程中,强度较大的涡集中在尾涡中心,强度较小的涡在尾涡外围分布。

(3)对于所使用的三种亚格子模型,能预测出相似的尾流效应,亚格子模型的选择对尾流的模拟影响较小; $v_{SGS}=0$ 时,求解过程只有数值耗散,仍能获得很好的模拟结果。

参考文献

[1] Sorensen J N, Shen W Z. Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 393-399.

[2] 卞凤娇, 徐宇, 王强. 基于OpenFOAM的风力机致动线模型研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(1): 72-75.

(Bian Feng-jiao, XU Yu, WANG Qiang. Numerical study of actuator line model of wind turbine based on openfoam platform[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(1): 72-75.)

[3] 朱翀, 王同光, 钟伟. 基于致动线方法的风力机气动数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2014(1): 85-91.

(Zhu Chong, Wang Tong-guang, Zhong Wei. Numerical analysis of wind turbine aerodynamic performance based on actuator line method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014(1): 85-91.)

[4] 钟宏民. 综合Lagrangian动力大涡模拟与致动线法的风力机尾流数值模拟研究[D]. 桂林: 电子科技大学, 2015.

(Zhong Hong-min. Lagrangian dynamic large-eddy simulation of wind turbine wakes combined with an actuator line method[D]. Guilin: University of Electronic Science and Technology, 2015.)

[5] 王胜军. 基于致动线模型的风力机尾流特性研究[D]. 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014.

(Wang Sheng-jun. Study on wake characteristics of wind turbines based on actuator line model[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2014.)

(下转第41页)

图8给出了万向型压电换能器输出功率与外界激励力方向关系的实验曲线,因外界激励方向为 β 、 γ 时,较难对换能器施加激励力,故仅进行了外界激励方向为 α 时的测试实验。实验中将换能器压电梁1末端的铍青铜弹性金属基片固定在亚克力材料基座上,同时将压电梁4末端的铍青铜弹性金属基片弯成一定角度并夹持在激振器顶杆的末端,激振器的激励幅值为0.1 mm,激励频率为80Hz,负载阻值为30k Ω 。可以看到,万向型压电换能器在激振器激励方向变化时,输出功率的变化规律与理论分析结果吻合,最高输出功率达到约1.3mW,最低输出功率约为0.6 mW,压电换能器在不同的激励方向上能够输出较高的功率,说明其对不同方向振动源的激励具有较好的适应性,具备一定的多方向发电能力。

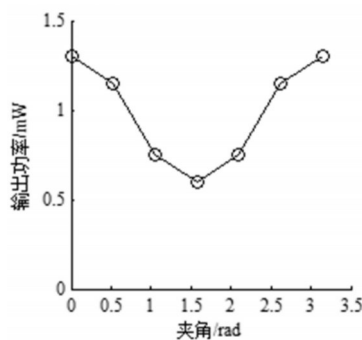


图8 输出功率与激励方向实验曲线

Fig.8 Experimental Curve of Output Power with Excitation Direction

5 结论

研究了一种万向型压电换能器的发电性能。理论研究表明,在外界激励力垂直于压电梁4右端面时,随着压电梁夹角的增加,压电换能器产生的电能则先增大后减小,在万向型压电换能器的多方向发电能力方面,随着外界激励力方向的变化,压电梁夹角为 $\pi/2$ 时,压电换能器产生的最大电能与最小电能之间约为2倍关系,压电梁夹角为 $\pi/4$ 时,压电换能器产生的最大电能与最小电能之间约为6倍关系。进一步的实验测试验证了万向型压电换能器具有一定的多方向发电能力,最高输出功率达到约1.3mW,最低输出功率约为0.6mW。

(上接第37页)

参考文献

[1] Tekkalmaz M, Korpeoglu I. Distributed power-source-aware routing in wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2016, 22(4): 1381-1399.

[2] Liu X J, Chen R W. Analysis on output power for multi-direction piezoelectric vibration energy harvester [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(6): 668-675.

[3] 王玉山, 龚立娇, 王锐. 考虑粘结层的悬臂压电振子发电性能分析[J]. 机械设计与制造, 2016(3): 171-174.
(Wang Yu-shan, Gong Li-jiao, Wang Rui. Generating capacity analysis of piezoelectric vibrators with adhesive layer [J]. Machinery Design and Manufacture, 2016(3): 171-174.)

[4] Savarimuthu K, Sankaranarajan R, Gulam N A M, et al. Design and analysis of cantilever based piezoelectric vibration energy harvester [J]. Circuit World, 2018, 44(2): 78-86.

[5] Sriram R, Pratap R. Scaling and performance analysis of MEMS piezoelectric energy harvesters [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(3): 679-690.

[6] 范兆凯, 刘军考, 陈维山. 宽频压电俘能技术的研究综述[J]. 机械设计与制造, 2014(1): 261-264.
(Fan Zhao-kai, Liu Jun-kao, Chen Wei-shan. A review of research in broadband piezoelectric power generation technology [J]. Machinery Design and Manufacture, 2014(1): 261-264.)

[7] Gedeon D, Rupitsch S J. Finite element based system simulation for piezoelectric vibration energy harvesting devices [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(7): 1333-1347.

[8] Roundy S, Leland E S, Baker J, et al. Improving power output for vibration-based energy scavengers [J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 28-36.

[9] 阚君武, 徐海龙, 王淑云. 多振子串联压电俘能器性能分析与测试[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 79-83.
(Kan Jun-wu, Xu Hai-long, Wang Shu-yun. Performance analysis and test of an energy harvester with serial-connected piezodiscs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 79-83.)

[10] 刘祥建, 闫鹤, 鞠全勇. 基于ANSYS的万向压电换能器仿真分析[J]. 压电与声光, 2017, 39(1): 56-59.
(Liu Xiang-jian, Yan He, Ju Quan-yong. Simulation analysis of the universal piezoelectric transducer based on ANSYS [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(1): 56-59.)

[11] Germano M, Piomelli U, Moin P. Erratum: A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model [J]. Physics of Fluids A Fluid Dynamics, 1991, 3(3): 1760-1765.

[12] Lilly D K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method [J]. Physics of Fluids A Fluid Dynamics, 1998, 4(4): 633-635.

[13] Meneveau C, Lund T S, Cabot W H. A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence [J]. Center for Turbulence Research Summer Program, 1994, 319(319): 353-385.

[14] Alfredsson P H, Dahlberg J A. A preliminary wind tunnel study of windmill wake dispersion in various flow conditions. Technical Note AU-1499, 1979, Part 7.