DOI: 10.3901/JME.2020.04.085

典型山丘地形与风力机诱导涡流耦合演变规律^{*}

史俊杰¹ 许 昌¹ 雷 娇¹ 李林敏¹ 薛飞飞² 韩星星²

(1. 河海大学能源与电气学院 南京 211100;

2. 河海大学水利水电学院 南京 211100)

摘要: 风电场空气动力场是以涡流形式产生和演变,采用能够提供涡流演变细节特征的大涡模拟(Large eddy simulation, LES)方法模拟典型山丘地形的涡流结构,通过风洞试验数据验证湍动能输运(Kinetic energy transport, KET)模型模拟结果的准确性,并探讨不同入流风速对山丘地形风电场瞬时特性的影响。随后探索地形诱导涡与风力机尾涡耦合的时空演化机制,发现单台风力机与两台并列风力机工况的尾涡结构的耦合演变机理存在差异,单台风力机工况是由于二次涡的形成及其与尾涡的耦合作用,两台并列风力机则归因于二次涡与尾涡的耦合及两机组间涡流耦合的共同作用。针对复杂地形涡流演变的研究可以为风电场规划设计与运行提供参考。

关键词: 致动盘; 涡流耦合; 大涡模拟(Large eddy simulation, LES); 数值模拟

中图分类号: TK89

Evolution Law of Coupling Evolvment Mechanism of Vortex Field Induced by Typical Hilly Terrain and Wind Turbine

SHI Junjie¹ XU Chang¹ LEI Jiao¹ LI Linmin¹ XUE Feifei² HAN Xingxing²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 211100)

Abstract: The aerodynamics field of wind farm is generated and evolved in the form of vortex. Large eddy simulation(LES) method, which can provide evolution characteristics of vortex, is used to simulate the vortex structure of typical hilly terrain. The accuracy of the simulation results of kinetic energy transport(KET) model is verified through wind tunnel test data, and the influence of different inflow wind speeds on the instantaneous characteristics of wind field of hilly terrain is discussed. Subsequently, the temporal and spatial evolution mechanism of the coupling between terrain-induced vortex and wind turbine wake vortex is explored. It is found that the coupling evolution mechanism of the wake vortex structure of single wind turbine and two parallel wind turbines is different. The mechanism of single wind turbine is due to the formation of secondary vortex and its coupling with wake vortex, while the two parallel wind turbines are due to the coupling of secondary vortex and wake vortex and the joint effect of vortex coupling between the two units. The research on evolution of vortex in complex terrain can provide reference for planning design and operation of wind farms.

Key words: actuator disk; vortex coupling; large eddy simulation(LES); numerical simulation

0 前言

随着风电市场的不断开拓,风电场已不再局限于平坦地形,行将着眼于低风速风电场、近海风电场乃至远海风电场。考虑到低风速风电场多处于复杂地形,其中陡峭山体会引起流动分离^[1],激发出多尺度涡流和附加湍流^[2],加之其与风力机尾流的相互耦合作用等,都会对风力机的运行状态和使用寿命产生影响^[3]。而当前对于风力机尾流的研究大

多是在理想状态下进行的,如 HUSSEIN 等^[4]及 SERT 等^[5]均基于致动盘模型对平坦地形风电场尾流结构进行模拟研究,关于地形流场特性的研究大多采用数值模拟方法,如魏帧等^[6]及姚剑锋等^[7]采用数值模拟方法研究了复杂地形条件下近地面风场分布及风加速效应影响因素。由于目前针对地形与风力机诱导涡流相互耦合作用的研究较少,同时考虑到雷诺时均(Reynolds average navier-stokes, RANS)方法难以提供涡流演变的细节特征^[8],本文将典型山丘地形为研究对象,采用 LES 方法探索地形诱导涡与风力机尾涡耦合的时空演化机制,以揭示复杂地形风电场涡流结

^{*} 中丹国际科技合作专项(2014DFG62530)和国家自然科学基金(U1865101)资助项目。20190413 收到初稿,20191106 收到修改稿

构初生、合并、衰减和湮灭的动力学机制, 可为复杂地形风电场风资源评估、微观选址及风力机运行安全等提供理论依据。

1 数值方法及计算模型

1.1 结合致动盘理论的 LES 控制方程

致动盘模型将风轮等效为空气可穿透的圆盘, 通过引入动量源项代替风轮轴向力 T 施加到致动盘区域, 以模拟风轮对流场的影响。在 LES 控制方程中加入风轮和机舱动量源项

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_u + S_{u,nac} \quad (2)$$

式中, 上划线表示滤波后的场变量, 需要注意的是, 滤波后的场变量仍包含时均量和脉动量; ρ 为流体密度; μ 为流体的动力黏性系数; $\bar{p}$ 为平均压力; 未知项 $\tau_{ij} = \rho(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$ 为亚格子应力张量, 是可解尺度脉动和小尺度脉动之间的动量输运, 需要建立亚格子模型予以封闭; S_u 和 $S_{u,nac}$ 分别为作用在致动盘区域的风轮动量源项和机舱动量源项, 根据轮毂高度入流风速 U_0 计算

$$S_u = -\frac{T}{V} = -\frac{\rho C_T U_0^2}{2\Delta l} \quad (3)$$

$$S_{u,nac} = -\frac{\rho C_{D,nac} U_0^2}{2\Delta l} \quad (4)$$

式中, Δl 为致动盘厚度; V 为致动盘体积; C_T 为风力机推力系数; $C_{D,nac}$ 为机舱阻力系数, 由于机舱对流场的作用可近似为圆柱绕流, 则 $C_{D,nac}$ 的取值范围为 0.8~1.0, 在模拟中取 1.0。

为使致动盘模型能够考虑地形及尾流对风轮前端入流风速的影响, 本文采用韩星星等^[9]提出的只依赖于风轮平均风速和推力系数曲线的动量源项计算方法。由诱导因子 a 的定义式及其与推力系数 C_T 的关系知

$$\bar{u}_d = (1-a)U_0 = \frac{1}{2}(1+\sqrt{1-C_T})U_0 \quad (5)$$

令 $\bar{u}_d = f(U_0)$ 。通过证明可知, 平均风速 $\bar{u}_d$ 和轮毂高度入流风速 U_0 存在正相关性且一一对应, 则存在反函数

$$U_0 = f^{-1}(\bar{u}_d) \quad (6)$$

故将式(5)和(6)代入式(3), 得

$$S_u = 2\rho \bar{u}_d (f^{-1}(\bar{u}_d) - \bar{u}_d) / \Delta l \quad (7)$$

1.2 湍动能输运模型

亚格子模型是对亚格子涡和大尺度涡相互作用的描述, 可采用 Boussinesq 假设将亚格子应力张量与可解尺度的应变率张量关联

$$\tau_{ij} = -2\mu_{\text{sgs}} \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij} \quad (8)$$

式中, μ_{sgs} 为亚格子涡黏系数, 代表亚格子模型的耗散特性; τ_{kk} 为亚格子应力各向同性部分; $\bar{S}_{ij}$ 为可解尺度应变率张量, 定义为

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

以各向同性湍流为基础, 将亚格子涡黏系数 μ_{sgs} 设为

$$\mu_{\text{sgs}} = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (10)$$

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (11)$$

式中, $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$; L_s 为亚格子尺度的混合长度; d 为计算单元到壁面的最近距离; V 为计算单元的体积; κ 为冯卡门常数, 取 0.4; C_s 为 Smagorinsky 常数, 取为 0.1。

本文采用 KET 模型^[10]来对亚格子尺度的湍流进行求解, 该模型中, μ_{sgs} 由亚格子湍动能求解

$$\mu_{\text{sgs}} = C_k \rho k_{\text{sgs}}^{1/2} \Delta_f \quad (12)$$

式中, C_k 为模型常数, 本文取值 0.094, Δ_f 为过滤尺度, 根据控制体体积求解

$$\Delta_f = V^{1/3} \quad (13)$$

式(12)中的亚格子湍动能 k_{sgs} 需要求解其输运方程

$$\frac{\partial(\rho k_{\text{sgs}})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j k_{\text{sgs}}) = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_\epsilon \rho \frac{k_{\text{sgs}}^{3/2}}{\Delta_f} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial k_{\text{sgs}}}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

式中, C_ϵ 为模型常数, 本文取值 1.048。

1.3 物理模型

采用风洞试验常用的典型山丘模型, 其最大坡度约 32°, 该山丘轮廓的表达式为

$$z(x, y) = H \cos^2 \left(\frac{\pi(x^2 + y^2)^{1/2}}{2L} \right) \quad (15)$$

式中, H 为山体高度, 取 40 m; L 为山体半坡长度, 取 100 m。山体轮廓及坐标系如图 1 所示。计算域大小为 $30H \times 20H \times 10H$, 以山丘中心为上下游区分界

线, 上游取 $10H$, 下游取 $20H$, 采用四边形网格划分计算域, 山体表面网格划分较密, 垂直方向第一层网格的高度为 0.01 m , 梯度分布比为 1.05 。总网格数约 410 万, 山丘地形网格划分如图 2 所示。

图 1 典型山丘山体轮廓及坐标系

图 2 山丘地形网格划分

1.4 边界条件与求解

风廓线采用中性大气来流模型^[11], 通常情况下, 已知入口条件有轮毂高度处的参考风速 $U_{\text{REF}}(h)$ 和湍流强度 $I_{\text{REF}}(h)$, 则其他入口参数可处理为

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (16)$$

$$u_* = \lambda^{0.5} C_{\mu}^{0.25} U_{\text{REF}}(h) I_{\text{REF}}(h) \quad (17)$$

$$z_0 = h / \exp[\kappa U_{\text{REF}}(h) / u_*] \quad (18)$$

$$k = \lambda [U_{\text{REF}}(h) I_{\text{REF}}(h)]^2 \quad (19)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad (20)$$

式中, u_* 为地面摩擦速度; z_0 为地面粗糙度长度; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; λ 为模型常数, 各向同性湍流取值 1.5 ^[12]。

计算采用商用软件 Fluent18.1 进行计算, 将入口参考风速设定为 6.5 m/s , 入流湍流强度 10% , 流场出口选用压力出口边界条件, 流场顶部和左右两面采用对称边界条件, 山体表面和地面采用无滑移壁面条件。二阶中心差分(Second-order central difference)方案用于对流项和黏性项, 对于非稳态项采用二阶隐式(Second-order implicit)方案, 并使用压力的隐式算子分割算法(Pressure implicit with splitting of operators, PISO)来求解离散方程。时间步长取为 0.01 s , 在流动达到稳定阶段后采样。

2 山丘地形绕流结构演变规律

2.1 LES 方法验证

将 LES 计算得到的结果与 ISHIHARA 等^[13]的风洞数据进行比较, 坐标和风洞数据分别由山高和参考风速进行标准化, 如图 3 所示。在山顶上风向的风廓线与测量数据具有很好的一致性, 在山顶处能显示出明显的风加速效应, 但模拟结果略高估了山顶上方 $1.5H$ 以内的风加速因子大小, 且略低估了该范围内的湍流强度。在山丘背风面和下游处, 模拟的速度恢复情况稍快于测量数据, 是由于 LES 方法略微高估了这些位置处的湍流强度, 表明该方法在湍流流动模拟过程中耗散稍微偏大, 但 LES 方法的模拟结果与测量数据的整体吻合度很高。因此表明, LES 方法适用于模拟山丘等复杂地形的风场分布情况, 并可以考虑结合致动盘理论来研究地形与风力机耦合涡流结构的演变规律。

图 3 山丘地形的平均速度和湍流强度的垂向分布曲线

2.2 瞬时流场分析

针对山丘地形 $z/H=0.1$ 和 $z/H=1$ 两个离地高度, 分别监测 $x/H=1.25$ 、 2.5 、 3.75 三个位置的流向速度随时间的变化, 将 $(z/H=0.1, x/H=1.25)$ 标记为 1 号监测点, $(z/H=0.1, x/H=2.5)$ 标记为 2 号监测点, 以此类推,

共6个监测点。通过对速度监测时程进行快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT),分析山丘绕流涡旋脱落的卓越频率和风速功率谱,从而得到山丘绕流涡旋结构的时空演变规律。从图4中可以看出,一组监测点的幅值明显大于二组,说明距离山丘表面越远,涡旋脱落现象越不激烈。各监测点的涡脱卓越频率均不相同,一组监测点的涡脱卓越频率 f_s 在0.01 Hz附近,说明在山丘尾流区近地面产生的涡流尺度较为集中;处于较高位置的二组监测点在相对高频区中的幅值明显大于处于较低位置的一组监测点,尤其是位置较高的4号监测点,出现一个次主导频率0.19 Hz,表明该位置的涡旋并不只是由地形扰动而直接生成的大尺度涡,也包含了涡旋在上下转动振荡过程中产生的不可忽略的较小尺度涡。

(a) 一组监测点

(b) 二组监测点

图4 山丘地形不同监测点流向速度频谱分析

2.3 入流风速对山丘绕流的影响

图5给出了6.5 m/s、8.5 m/s和10.5 m/s三个参考风速条件下2号和5号两个监测点的风速功率谱。结果显示,近地面位置的2号监测点($z/H=0.1$, $x/H=2.5$)的速度波动具有比处于较高位置的5号监测点($z/H=1$, $x/H=2.5$)更高的频率能量,即涡脱运动更为激

烈。当入流风速增大时,山丘背风面脱落的低频大尺度涡及振荡过程中产生的高频小尺度涡所携带的能量也增大,且位置离地面越高,上述趋势越明显。

(a) 2号监测点

(b) 5号监测点

图5 不同风速下2号和5号监测点的风速功率谱

3 山丘地形与风机诱导涡流耦合演变

以单台和两台并列风力机为例,采用结合致动盘理论的LES方法研究山丘地形与风力机耦合涡流的时空演变机理,并探索在这两种工况下的涡流发展机理及其差异性。

3.1 单台风力机

3.1.1 耦合涡流时空演变

将风力机布置于山顶位置,通过涡量与速度两者随时间的变化来表征地形与风力机涡流结构的耦合作用,如图6所示。结果表明,风力机尾涡结构由于二次涡的形成及二次涡与主涡间的相互作用而发生衰减,衰减效果在山丘背风面及近尾流区更为明显,原因在于,二次涡是由风力机涡流与环境流(受地形影响)相互作用引起的剪切条件而形成的,而背风面和尾流区是地形效应最为突出的地方。另外,风力机尾流发生弯曲和大范围扩张也是由于风力机与地形之间的复杂相互作用,由于风力机尺寸与山

丘高度相当, 且山体坡度仅为 32° , 因此, 随着坡顶后山丘高度的降低, 流动发生膨胀并增强尾流效应, 山丘后方的流动特性则由风力机尾流占主导地位。

图 6 山丘地形与风力机涡流耦合结构发展过程

3.1.2 频谱分析

首先分析山丘地形后方 6 个监测点处的流动特性, 研究风力机尾涡对山丘地形后方流场的影响, 以探索山丘地形诱导涡流与风力机尾涡耦合演变机理。将 6 个监测点的流向脉动速度时程进行 FFT, 结果如图 7 所示, 在布置风力机之后, 两组监测点

图 7 不同监测点流向脉动速度的频域分布

的速度脉动幅值无明显差别,各监测点的涡脱频率均集中在 0.05 Hz 以下。通过与图 4 的对比发现,在风力机尾流加持下,处于地形诱导涡与风力机尾涡耦合作用较强区域的二组监测点的速度脉动尤为强烈,使得二组监测点在频域中的速度脉动幅值显著大于未布置风力机的情况。

针对山丘地形对风力机尾流区域中涡流结构演变的影响,对尾流区中 $x/D=1, 2, 8$ 三个下游位置处的流向脉动速度时程作 FFT,其中,各 x/D 下游位置处均监测 $y/D=0, 1, 3$ 三个径向位置,FFT 结果如图 8 和图 9 所示。从图中可以看出,在三个下游位置均出现:随着径向距离的增大,即与风轮中心线距离的增大,脉动速度振幅急剧减小的规律,能量谱亦然。说明二次涡与尾涡之间的相互耦合作用使得风力机尾流区中的涡流逐渐衰减湮灭,且离风轮中心线较远的位置,该耦合作用更明显。从 $x/D=1, 2$ 两个下游位置的 $y/D=3$ 径向位置处的风速功率谱在整个频域中几乎均遵守 $-5/3$ 定律(根据 Kolmogorov 理论,在大气边界层近地区域,对于足够大的波数 $K=2\pi/\lambda$,其中 λ 为波长,湍流脉动功率谱 $S(K)$ 应该满足下列条件: $S \rightarrow K^{-5/3}, K \rightarrow \infty; S \rightarrow \text{const}, K \rightarrow 0$ 。下同),无明显峰值甚至波动,说明这些位置几乎不存在剧烈的大尺度涡旋结构脱落运动。

(a) $y/D=0$ 监测点 (b) $y/D=1$ 监测点 (c) $y/D=3$ 监测点

图 8 不同监测点流向脉动速度的频域分布

(a) $x/D=1$ 监测点 (b) $x/D=2$ 监测点 (c) $x/D=8$ 监测点

图 9 不同监测点流向脉动风速功率谱

3.2 两台并列风力机

3.2.1 耦合涡流时空演变

将两台风力机对称布置在山丘两侧, 两风力机间距为 120 m。图 10 显示了可用于描述地形与风力机耦合涡流结构时空演变动力学特性的一系列涡量和速度分布图。发现两台风力机的尾流涡旋结构脱落运动并不同步, 基本呈交替脱落的状态, 是因为在山丘背风面会形成方向相反、交替脱落的马蹄涡, 使风力机早期涡流结构脱落及衰减均受到山体诱导涡的作用而形成上述现象。与单台风力机工况一样, 通过二次涡的形成及其与主涡的耦合作用, 使风力

图 10 山丘地形与风力机涡流耦合结构发展过程

机尾涡结构发生衰减, 加之涡流结构自身失稳和大气湍流的作用, 使风力机尾涡结构逐渐破碎湮灭, 最终并入到湍流结构中。

3.2.2 频谱分析

首先对山丘后方 6 个监测点的流向脉动速度时程进行 FFT, 以分析两台风力机尾涡对山丘地形后方流场的影响, 结果如图 11 和图 12 所示。两台风力机工况的两组监测点的速度脉动幅值与未布置风力机工况相当, 卓越涡脱频率 f_s 均在 0.025 Hz 以下, 说明位于山丘两侧的风力机对处于山丘正后方中心

图 11 不同监测点流向脉动速度的频域分布

(a) 2号监测点

(b) 5号监测点

图 12 2号和5号监测点的风速功率谱

线上监测点的影响很小, 两组监测点位置处并未发生显著的涡流耦合行为。从图 12 可以看出, 2号监测点的风速功率谱在三种工况下基本相同, 说明近地面处的涡流特性仍由地形诱导涡占主导地位, 而对于 5号监测点处的风速功率谱, 两台风力机工况与无风力机工况基本一致, 单台风力机工况则高出两者约 3 个数量级, 再次阐明: 在山体正后方, 单台风力机工况的地形与尾涡结构的耦合作用显著, 而两台风力机工况则未发生引人关注的地形与风力机涡流耦合运动。

针对山丘地形对风力机尾流区域中涡流结构演变的影响, 对尾流区中 $x/D=1, 2, 8$ 三个下游位置处的流向脉动速度时程作 FFT, 其中, 各 x/D 下游位置处均监测 $y/D=1.5, 1, 0.5, 0$ 四个径向位置, 结果如图 13 和图 14 所示。以 $x/D=1$ 下游位置的速度脉动情况作为参考, 对于 $y/D=1$ 径向位置, $x/D=2, 8$ 两个下游位置的速度脉动幅值均明显增大, 对于 $y/D=0.5, 0$ 两个径向位置, 则只有 $x/D=8$ 下游位置出现显著增大的现象, $x/D=2$ 下游位置与 $x/D=1$ 参考位置差别不大, 需要注意的是, $x/D=8$ 下游位置的四个径向位置的脉动幅值均在 10^{-1} 数量级上。表明在两台风力机工况下, 由于机位与单台风力机工

(a) $y/D=1.5$ 监测点 (b) $y/D=1$ 监测点 (c) $y/D=0.5$ 监测点

图 13 不同监测点流向脉动速度的频域分布

况相差很大, 使两个工况的涡流发展及湮灭特性存在差异, 不再是二次涡与尾涡的耦合作用占绝对主导地位, 而是二次涡与尾涡的耦合及两机组间涡流耦合的共同作用下实现风力机尾涡结构的衰减湮灭, 两机组间的涡流结构耦合作用在远尾流区更为显著。

从图 14 可以看出, 随着下游距离的增大, 四个径向位置的风速功率谱差值在低频段中逐渐缩小, 最终使 0.01 Hz 对应能量均在 0.01 以上。在惯性子区段中, 所有位置的功率谱基本遵循-5/3 定律, 除表示风轮中心线的 $y/D=1.5$ 径向位置以外, 其他三

图 14 不同监测点流向脉动风速功率谱

个径向位置的功率谱在尾流区中先增大后减少, 但 $y/D=0$ 位置的功率谱却在 $x/D=8$ 下游位置反常地增大, 并大于 $y/D=1, 0.5$ 两位置的功率谱。功率谱反映出的上述现象进一步证明, 在涡流向下流发展过程中二次涡与风力机尾涡间的耦合作用, 加上两机组间的涡流结构耦合作用, 使速度脉动更为激烈, 且随着下游距离的增大, 两机组间的涡流耦合作用逐渐呈现主导优势。

4 结论

通过对地形绕流及地形与风力机诱导流场的 LES 模拟和分析, 得到以下结论。

(1) 入流风速增大时, 山丘地形诱导涡流所携带的能量增大, 大尺度涡撕裂破碎成小尺度涡及小尺度涡衰减耗散至湮灭所需时间延长, 近地面位置的涡流能量更大, 涡脱运动也更为激烈。

(2) 对于单台风力机工况, 在二次涡的形成及其与尾涡的耦合作用下, 风力机尾流区的涡流结构逐渐衰减湮灭, 衰减效果在山丘背风面及近尾流区更为明显, 且离风轮中心线较远的位置, 耦合作用更明显, 而近地面处的涡流特性仍由地形诱导涡决定。

(3) 对于两台风力机工况, 在山丘诱导涡的作用下, 两台风力机的尾涡结构脱落运动不同步, 基本呈交替脱落的状态; 其风力机尾涡结构的衰减与单台风力机工况不同, 归因于二次涡与尾涡的耦合及两机组间涡流耦合的共同作用, 且两机组间的涡流结构耦合作用在远尾流区更为显著。

参 考 文 献

- [1] 雷娇, 许昌, 薛飞飞, 等. LES 不同模型对陡坡风场的空气动力场研究[J]. 水电能源科学, 2018(1): 203-207.

LEI Jiao, XU Chang, XUE Feifei, et al. Study on

- aerodynamic field of steep hill wind farm by different models of LES[J]. *Water Resources and Power*, 2018(1): 203-207.
- [2] TAMURA T, OKUNO A, SUGIO Y. LES analysis of turbulent boundary layer over 3D steep hill covered with vegetation[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(9): 1463-1475.
- [3] 李涛, 赵振宙, 陈景如, 等. 考虑转捩的风力机涡流发生器数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 149-154.
- LI Tao, ZHAO Zhenzhou, CHEN Jingru, et al. Numerical simulation of wind turbine vortex generators with transition modeling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 149-154.
- [4] HUSSEIN A S, EL-SHISHINY H E. Modeling and simulation of micro-scale wind farms using high performance computing[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2012, 9(2): 1240025-28.
- [5] SERT I O, CAKMAKCIOGLU S C, TUGLUK O, et al. The CFD investigation of two non-aligned turbines using actuator disk model and overset grids[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 524: 012144-12.
- [6] 魏桢, 邓院昌. 连续山坡地形下风场的数值模拟[J]. *可再生能源*, 2013, 31(11): 56-59.
- WEI Zhen, DENG Yuanchang. Numerical simulation of wind field in the continuous hillside topography[J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(11): 56-59.
- [7] 姚剑锋, 沈国辉, 姚旦, 等. 峡谷和垭口地形风场特征的 CFD 数值模拟[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(12): 165-171.
- YAO Jianfeng, SHEN Guohui, YAO Dan, et al. CFD-Based numerical simulation of wind field characteristics on valley and col terrain[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(12): 165-171.
- [8] CARVALHO D, ROCHA A, SANTOS C S, et al. Wind resource modelling in complex terrain using different mesoscale-microscale coupling techniques[J]. *Applied Energy*, 2013, 108(8): 493-504.
- [9] 韩星星, 许昌, 刘德有, 等. 基于风轮平均风速的风电场致动盘模型[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(3): 501-506.
- HAN Xingxing, XU Chang, LIU Deyou, et al. Actuator disk model of wind farms based on the rotor average wind speed[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(3): 501-506.
- [10] YOSHIKAWA A, HORIUTI K. A statistically-derived subgrid-scale kinetic energy model for the large-eddy simulation of turbulent flows[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1985, 54(8): 2834-2839.
- [11] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, CARMELIET J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(2): 238-252.
- [12] KIM H G, PATEL V C, LEE C M. Numerical simulation of wind flow over hilly terrain[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2000, 87(1): 45-60.
- [13] ISHIHARA T, HIBI K, OIKAWA S. A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1999, 83(3): 95-107.
-
- 作者简介: 史俊杰, 男, 1993 年出生。主要研究方向为风电场微观选址和空气动力学。
E-mail: snvren@163.com
- 许昌(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为风电场空气动力学和优化控制。
E-mail: zhufengxu@163.com