

考虑粗糙地表的近地层风场仿真模拟 研究及误差分析

刘震卿^{1,*}, 张冲¹, 吴晓波², 李秋明¹

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074;

2. 中建国际投资(河南)有限公司, 郑州 450000)

摘要:基于 Fluent 流体计算平台,使用自编 UDF 程序实现根据地表粗糙度长度添加覆盖植被阻力源项来模拟精细化地表粗糙度,以 Askervein 山为例建立数值模型,选择了不同的湍流模型进行风场模拟,研究了湍流模型对复杂地形风场 CFD 模拟的影响,并与实测数据对比分析了湍流模型的适用性,进一步探讨了均一地表粗糙度的模拟效果。研究表明:相比于其他几种湍流模型,LES 模拟结果与实测值吻合最好,更适用于复杂地形的风场模拟。地表粗糙度长度对风场的影响在迎风面和背风面处有较大的差异性,合理设置单一地表粗糙度能有效减小模拟误差。

关键词:地表粗糙度;复杂地形;湍流模型;LES;UDF;风场模拟

中图分类号:V211.3

文献标识码:A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0172

Simulation and error analysis of wind field considering surface roughness

LIU Zhenqing^{1,*}, ZHANG Chong¹, WU Xiaobo², LI Qiuming¹

(1. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. China State Construction International Investments (Henan) Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on the Fluent fluid calculation platform, the self-editing UDF program is used to simulate the roughness according to the roughness length. Taking Askervein Mountain as an example, different turbulence models are selected to simulate the wind field. Compared with the measured data, The influence of turbulence model on CFD simulation of complex terrain wind field is studied, and the applicability of turbulence model is analyzed. The effect of single roughness length is further discussed. The results show that Compared with other turbulence models, LES simulation has higher precision, and is more suitable for wind field simulation of complex terrain. The influence of surface roughness length on the wind field shows great difference in the windward and leeward planes, and reasonable setting of a single surface roughness can effectively reduce the simulation error.

Keywords: roughness; complex terrain; turbulence model; LES; UDF; wind field simulation

0 引言

微地形上空紊流流场预测应用于许多重要工程,例如结构安全、农业风害、航空安全等,在绘制复杂地形风能分布中也发挥重要作用,其决定风力机排布位置。风资源在一些多山地区丰富,但风速分布复杂,因

此精确预测复杂地形的风速和紊流强度非常重要。地表粗糙度是反映近地层动力特征的一个重要指标,是研究风场竖向剖面分布的重要参数,因而地表粗糙度对复杂地形风场研究具有重要意义。实际地表大多覆盖植被或者村落城镇,若需准确预测这些区域的风能分布情况,首先需要模拟地表粗糙度对流场的影响^[1-4]。

收稿日期:2018-10-08; 修订日期:2018-12-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978307);国家重点研发计划(2016YFE0127900)

作者简介:刘震卿(1984-),男,山东枣庄人,副教授,从事结构、流体等方面的仿真分析研究。E-mail:liuzhenqing@hust.edu.cn

引用格式:刘震卿,张冲,吴晓波,等.考虑粗糙地表的近地层风场仿真模拟研究及误差分析[J].空气动力学学报,2020,38(4):715-722.
doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0172 LIU Z Q, ZHANG C, WU X B, et al. Simulation and error analysis of wind field considering surface roughness[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(4): 715-722.

地表粗糙度长度是边界层气象学中常用的一个重要参数,是指在边界层大气中,近地层风速向下递减到零时的高度。根据 Pattanapol 等^[5]对复杂地表粗糙度模拟方法的总结:对于复杂地表粗糙度的模拟方法包括两种,一种方法是基于湍流模型中的壁面函数法;另一种方法是在湍流模型输送方程中添加源项加以考虑。

对于壁面函数法,严格说来当且仅当计算区域入口处的来流边界条件与湍流模型及地表粗糙特性相协调时,才能得到水平均匀性的平衡大气边界层,但由于湍流的复杂性,在数值模拟中精确实现平衡大气边界层常存在困难。Richards 和 Hoxey^[6]基于 $k-\epsilon$ 湍流模型提出了满足平衡大气边界层的几个原则,给出了一组来流边界条件,并对湍流模型参数的取值进行了探讨,但在其研究中所给出的湍动能边界条件为一常数,这与实测以及试验结果不符。Yang 等^[7]从标准 $k-\epsilon$ 湍流模型方程出发,假设湍流在整个边界层内处于平衡态,推导出一组随高度变化的来流边界条件,并考虑壁面粗糙度,实现了边界层流场的平衡,但仅满足湍流能量在边界层内层范围才处于平衡。此外使用壁面函数法模拟地表粗糙度的还有 Daniel^[8]等、唐煜等^[9]、邓院昌等^[10]。对于在湍流模型输送方程中添加源项的粗糙度模拟方法,胡朋等^[11]提出通过在湍动能输送方程与耗散率输送方程中添加源项的方法,使来流边界条件与湍流模型相协调,但 SST $k-\omega$ 湍流模型中各系数很难确定。

另外 Fluent 提供了多种湍流模型,包括 $k-\epsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型和 LES 等等。但是不同的湍流模型对于求解的适用性也不同,湍流模型的选择同样对风场数值模拟结果的精度和资源耗费有着十分重要的影响。

本文基于 Fluent 流体计算平台,使用自编 UDF 程序模拟精细化地表粗糙度,该程序实现了根据由 WindPro 中下载得到的目标区域地表粗糙度长度文件自动添加覆盖植被阻力源项来模拟精细化地表粗糙度,考虑了计算域内湍流结构信息以及覆盖植被类型、叶面积密度等相关参数的影响。以 Askervein 山为例建立数值模型选择了不同的湍流模型进行风场模拟,与实测数据对比,研究了湍流模型对复杂地形风场 CFD 模拟的影响,分析了湍流模型的适用性,并进一步探讨了单一地表粗糙度长度的影响。

1 Askervein 山实测试验

Askervein 项目^[12]是在国际能源署主持下开展的一项关于低山丘陵大气边界层的合作研究。Askervein 位于苏格兰外赫布里底群岛南端的南尤

伊斯特的西海岸,该山经纬度坐标为(57°11'N,7°22'W),相对高度为 116 m,海拔高度 126 m。Askervein 山体示意图如图 1 所示,A 线与 B 线相交于 Askervein 山的最高点(HT-Hilltop),AA 线与 B 线相交于中心点(CP-Centre Point)。此外还在距离此处 3 km 的达利堡附近设置了一个参考点(RS-Reference Site),用于对与 Askervein 相遇之前未受干扰的流体运动进行详细测量。

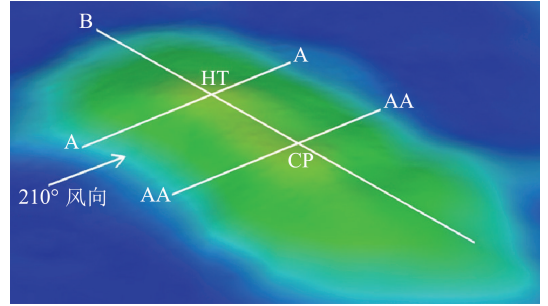


图 1 Askervein 山体示意图

Fig.1 Contour map of Askervein Mountain

在试验过程中,沿着 A、B 和 AA 三条线布置了 50 座以上的测风塔,大多数测风塔高 10 m,还有多座更高的测风塔。其中记录代号为 TU03-B 的测风数据发生在 1983 年 10 月 3 日的 14:00~17:00 风流稳定,风向约 210°,由于该山实测数据丰富、便于将数值模拟结果与实测值对比,故本文以 Askervein 山为研究对象建立地形模型。

PA Taylor 等^[12]表示,除了附近的一些建筑物以及位于海岸线附近的沙丘之外,Askervein 山和周围地区的地表粗糙度长度基本一致。地表粗糙度长度的初始估测值在 0.01~0.05 m,根据参考点 RS 处的风剖面测量数据表明,地表粗糙度长度的范围大多在 0.01~0.03m 的范围内。若作为单一的代表值,建议 z_0 取值 0.03 m。

2 数值模型与方法

2.1 湍流模型

数值模拟方法主要分为三种^[13],包括直接数值模拟 DNS、雷诺平均法 RANS 和大涡模拟 LES。作为最准确的湍流模拟方式,DNS 可以直接求解三维 N-S 方程组,而不需要平均或近似值来估计和控制误差,但其对网格精度要求很高,计算量很大,比较耗时;雷诺平均法不需要计算各尺度的湍流脉动,降低了计算量,但无法解析具有较强脉动特征的小尺度涡;大涡模拟直接模拟大尺度紊流运动,利用次网格尺度模型模拟小尺度紊流运动对大尺度紊流运动的影响,但较雷诺平均法更耗时。所以本文选取了后两

种数值模拟方法——雷诺平均和大涡模拟,因而选取了基于雷诺平均法而建立的 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型以及基于大涡模拟的 LES 模型。

(1) 标准 $k-\epsilon$ 模型

二维不可压缩流场质量方程和动量方程为:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_i} + f_{\bar{u},i} \quad (2)$$

式中, u_i 为平均速度, $\overline{u_i u_j}$ 为雷诺应力, μ 为黏性系数, ρ 为空气密度, p 为压强, $f_{\bar{u},i}$ 代表粗糙度阻力源项。湍动能 k 和湍动耗散率 ϵ 的运输方程分别如下式,其中湍流脉动能 k 方程为(3)式,湍流耗散率 ϵ 方程为(4)式:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon + f_k \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + f_\epsilon \quad (4)$$

平均速度梯度引起湍动能 k 产生了 G_k 项;标准 $k-\epsilon$ 湍流模型中的经验常数 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ϵ 一般取值如下: $C_{1\epsilon}=1.44$ 、 $C_{2\epsilon}=1.92$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\epsilon=1.3$ 、 μ_t 为湍流黏度,表示为 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ 。 C_μ 为经验常数 $C_\mu = 0.09$ 。式中 f_k 和 f_ϵ 为阻力源项,以模拟地表粗糙度对风场的影响。

(2) RNG $k-\epsilon$ 模型

RNG 模型考虑了湍流漩涡的影响,提供了一个考虑低雷诺数流动黏性的解析公式,这些均使得 RNG $k-\epsilon$ 模型有更高的计算精度和稳定性,其质量方程和动量方程如(1)、(2)式,湍动能方程和耗散率方程如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon + f_k \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \epsilon u_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\epsilon}}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + f_\epsilon \quad (7)$$

式中, $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数,一般取值 $C_{1\epsilon}=1.42$ 、 $C_{2\epsilon}=1.68$ 、 $C_{3\epsilon}=1.72$ 、 $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.393$ 、 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 、 G_b 为由浮动引起的湍动能。 R_ϵ 代表平均应变率对 ϵ 影响的附加项。式中 f_k 和 f_ϵ 为阻力源项,以模拟地表粗糙度对风场的影响。

(3) LES 模型

湍流运动可以看做是由很多尺度大小不同的涡组成的,大尺度涡比小尺度涡运动更剧烈,具有各向异性的特点,对于湍流的平均运动影响更明显,可以实现动量、质量和能量等的交换;小尺度涡相对通常较弱,主要通过非线性的作用对大尺度涡的运动产生影响,作用主要表现为耗散^[13],因为共性更多,近似于各向同性。不可压常黏性系数的连续性方程和 N-S 方程为:

$$\frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial (\gamma \cdot 2S_{ij})}{\partial x_j} \quad (9)$$

式中, S_{ij} 为拉伸率张量, $S_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$; ρ 为流体密度; γ 为分子黏性系数。滤波后的动量方程如(10)式,其中 $f_{\bar{u},i}$ 为考虑地表粗糙度阻力源项。

$$\rho \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_{\bar{u},i} \quad (10)$$

亚格子模型采用 Smagorinsky-Lilly, 亚格子应力 (SGS) 的表达式如下:

$$\tau_{ij} = -2\mu_t S_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij}; S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

$$\mu_t = \rho L_s^2 |S| = \rho L_s \sqrt{2S_{ij} S_{ij}};$$

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (12)$$

式中, L_s —亚格子的混合长度; κ —卡门常数, $\kappa = 0.42$; d —壁面网格到壁面的距离; V —控制体体积。

三种湍流模型使用 Fluent 求解三维非稳态 Navier-Stokes 方程,空间离散方式采用有限体积法,二阶中心差分格式用于对流项与黏性项,二阶隐式格式用于非稳态项的时间推进;压力的插值格式将选取标准格式;SIMPLE 算法用于压强速度解耦。

2.2 粗糙度模拟

本文采用在计算域内添加阻力源项的方法来模拟地表粗糙度。为了考虑地表粗糙区域对流场的阻碍作用,通过在 Navier-Stokes 动量方程中加入阻力源项加以考虑,在阻力源项的计算中,需要首先确定粗糙元的阻力系数,针对此参数已开展过相关试验研究,并给出了经验取值。由于 Askervein 山地表粗糙元为覆盖植被,根据 Enoki 和 Ishihara^[10] 的研究,当粗糙区域粗糙元为覆盖植被时,采用表达式:

$$f_i = -\frac{1}{2} \rho C_d \tilde{u}_{\text{mag}} \tilde{u}_i \quad (13)$$

其中 \tilde{u}_{mag} 表示风速大小, C_d 为阻力系数,表示为 C_d

$=C_{D,t} \cdot a_t$, $C_{D,t}$ 为抗力系数,根据土地类型确定; a_t 为叶面积密度根据 Robert N 等^[11]的相关研究,本文采用高斯分布函数模拟,函数形式为:

$$a_t = 0.1e^{-10(z/h-0.45)(z/h-0.45)} \quad (14)$$

上式中, z 为距离地表高度, h 为植被高度。对于不同地表覆盖情况,粗糙度长度 z_0 与覆盖植被高度 h 满足 $h=a \times z_0$, a 为两种粗糙度表征参数的转换系数。本文根据既有研究,选取转换系数 $a=20.0$ ^[12],抗力系数 $C_{D,t}=0.4$ ^[10]。

对于 $k-\epsilon$ 模型湍动能和湍动耗散率的运输方程中的阻力源项 f_k 和 f_ϵ 由 Enoki 与 Ishihara^[10]提出的阻力源项计算方法求得:

$$f_k = \frac{1}{2}\beta_p \rho C_{D,t} a_t |u|^3 - \frac{1}{2}\beta_d \rho C_{D,t} a_t |u| k \quad (15)$$

$$f_\epsilon = \frac{1}{2}C_{\rho\epsilon 1} \beta_p \rho \frac{\epsilon}{k} C_{D,t} a_t |u|^3 - \frac{1}{2}C_{\rho\epsilon 2} \beta_d \rho C_{D,t} a_t |u| \epsilon \quad (16)$$

式中, u 为速度大小, $\beta_p=1.0$, $\beta_d=4.0$, $C_{\rho\epsilon 1}=1.5$, $C_{\rho\epsilon 2}=0.6$ 。

2.3 网格模型

考虑到后续边界条件的设置以及最高点 HT 的高度,计算域长宽高设置为 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$,底面中心点为 Askervein 山的最高点 HT 如图 2(b)所示,为使地形平稳过渡到光滑地区,设置宽 0.4 km 的过渡区圆环如图 2(a)。建立网格模型时,参考 Askervein 山的尺寸,以最高点 HT 所在垂线为中心,半径 1 km 的圆柱体区域内进行网格细化加密,网格分辨率为 15 m 如图 2(c),以精确显示此地的地形地势。山体周围逐渐过渡到平坦地形,设置网格尺寸平稳的从加密区过渡到边界处,最大网格分辨率为

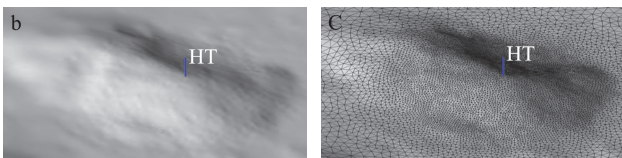
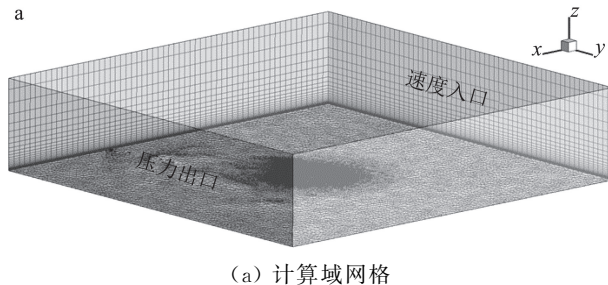


图2 CFD 三维实际地形模型及网格分布示意图
Fig.2 CFD three-dimensional actual terrain model and grid distribution diagram

80 m 。垂直方向上在近地面进行网格加密最小网格尺寸 0.05 m ,以准确捕捉近地面流场,采用相邻网格尺寸比值为一定值的 σ 网格;为减少由于网格尺寸急剧变化而带来的数值误差,计算域内网格最大生长率为 1.2 ;网格总量约为 200 万。采用非结构化三棱柱网格,以充分拟合几何边界,同时也可以保证每层单元拓扑结构的一致性。图2为 CFD 三维实际地形模型示意图。

2.4 边界条件

计算域左侧采用速度入口,右侧采用压力出口,四周壁面采用对称边界条件($\partial u / \partial n = 0, \partial w / \partial n = 0, v = 0$),底面采用无滑移边界条件($u = 0, v = 0, w = 0, \partial p / \partial n = 0$)。根据 Richards 等^[6]的大气边界层理论,入口处速度选择参考点 RS 处 210° 风向角时测风塔的风速,采用以下模型:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0} + 1\right) \quad (17)$$

式中, u^* 为摩擦速度, $\kappa=0.4$ ^[6]为卡门常数, z_0 为地表粗糙度长度。根据参考点 RS 测风数据得到: $u^*=0.618 \text{ m/s}$, $z_0=0.03$ ^[16]。使用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型时,入口边界的湍动能、耗散率依次设置为:

$$k = \begin{cases} \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \ln\left(\frac{z}{z_0} + 1\right), & z \leq h_g \\ 0.0001, & z > h_g \end{cases} \quad (18)$$

$$\epsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa(z + z_0)} \quad (19)$$

式中, $h_g=891.82 \text{ m}$,当高度超过界限值后,湍动能趋于零,取值 0.0001 。

3 湍流模型分析

3.1 风速比

Askervein 试验包括不同的来流风速,为了便于分析数值模拟的计算结果,在此便不能使用实际风速进行比较,通常使用一个无量纲参数风速比 S 来描述风加速效应。

$$S = \frac{U(z)}{U_0(z)} \quad (20)$$

上式中, $U(z)$ 表示距离地面高度 z 处的风速, $U_0(z)$ 为入口处距离地面 z 高度处的风速,取 $z=10 \text{ m}$ 。定义风速比标准偏差衡量计算结果与实测结果的偏差,风速比标准偏差由下式计算:

$$S_s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{ai} - S_{ei})^2} \quad (21)$$

式中, n 为测风点个数, S_{ei} 表示第 i 个测风点距离地

面 10 m 高度的风速实测值与入口基准点 RS 相同高度的风速实测值的风速比, S_{wi} 表示第 i 个测风点离地面 10 m 高度的 CFD 数值模拟风速值与入口基准点 RS 相同高度的风速实测值的风速比。

3.2 精细化粗糙地表模拟

从 WindPro 中下载包含 Askervein 山的计算域范围内的地表粗糙度长度文件, 通过自编程序插值得到计算域内网格节点处粗糙度长度。图 3 显示了计算域内地表粗糙度长度分布情况, 可以看出地表粗糙度长度分布在 0.01~0.05 m 范围内。

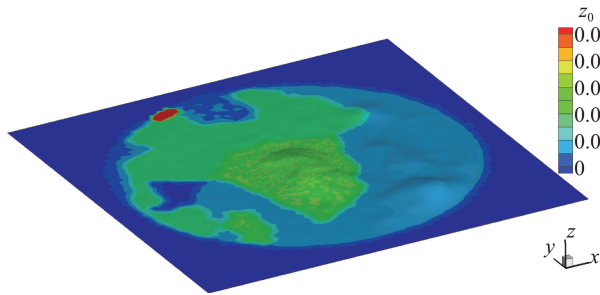


图 3 计算域内地表粗糙度长度分布图(单位:m)
Fig.3 Roughness length distribution in computational domain (unit: m)

3.3 10 m 高度处风速比

基于精细化地表粗糙度模拟, 选用三种不同湍流模型进行风场模拟。沿 AA 线和 B 线布置的 10 m 高测风塔, 均可以获得比较全面的数据, 由于 A 线和 AA 线之间具有几何地形的相似性, 因此仅对贯穿山体中心的 AA 线和 B 线进行 10 m 高度处风速比分析。图 4、5 分别显示了沿 AA 线和 B 线 10 m 高度处的风速比与实测数据^[17]的对比, 图中柱状图分别代表各湍流模型相比实测值的风速比标准偏差。

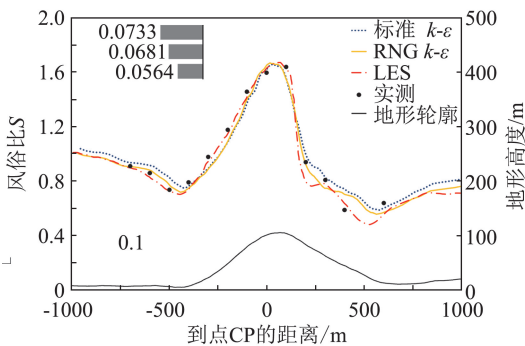


图 4 沿 A 线 10 m 高度的风速比
Fig.4 Wind speed ratio at 10 m along line A

从图 4 中可以看出, 沿 AA 线 10 m 高度处风速在遇到山体阻碍后风速降低, 到达山顶产生较大的风加速, 随后在背风面处风速迅速降低。三种湍流模型风速比计算结果在迎风面趋势一致, 均与实测值吻合较好, 其中 LES 模型吻合更好; 在背风面则显示出一

定误差, 主要由于在背风面发生流动分离, 导致误差产生, 但 LES 模型可以捕捉背风面风速迅速下降的现象。整体上 LES 计算结果标准偏差为 0.0564, 相比于标准 $k-\epsilon$ 模型结果 0.0733 和 RNG $k-\epsilon$ 模型 0.0681 误差均要小, 精度更高。

图 5 对比了三种湍流模型计算结果沿 B 线 10 m 高度处风速比和实测数据。B 线为山脊线, 可以发现随着山脊升高, 风速比也随之增大, 这是由来流方向垂直于 B 线, 山脊越高风加速效应越明显, 导致风速比越大。整体上 LES 计算结果相比于实测值偏差最小为 0.0758。而标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型结果偏差分别为 0.1412、0.1217, 两者计算结果差别不大, 但误差均大于 LES 模型。

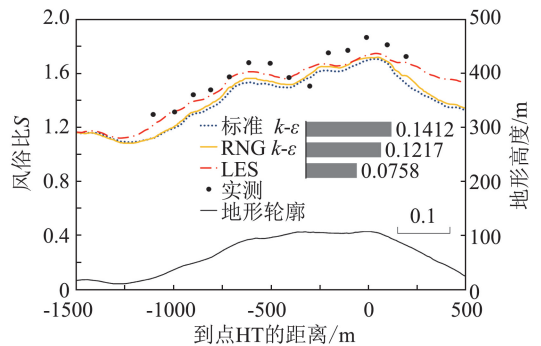


图 5 沿 B 线 10 m 高度的风速比
Fig.5 Wind speed ratio at 10 m along line B

表 1 列出了三种湍流模型沿 AA 线、B 线 10 m 高度处的模拟风速比与现场实测数据的偏差, 以及同一湍流模型两条线上所有测风点计算的标准偏差。总体来看, 使用标准 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ 模型得到的风速比标准偏差较大, 标准 $k-\epsilon$ 所有测点的标准偏差为 11.37%, 误差最大, RNG $k-\epsilon$ 偏差为 9.95%, 而 LES 偏差最小, 为 6.05%, 整体精度更高。

表 1 三种湍流模型风速比标准偏差分析

Table 1 Analysis of wind speed ratio standard deviation under

风向角	线路	标准 $k-\epsilon$	RNG $k-\epsilon$	LES
210°	AA	0.0733	0.0681	0.0564
	B	0.1412	0.1217	0.0758
	综合	0.1137	0.0995	0.0605

3.4 风剖面

三种湍流模型在点 HT 处风剖面风速比计算结果对比如图 6 所示。从图中可以看出三种湍流模型在 HT 处的风剖面风速比曲线与实测值基本一致, 但是在近地面, LES 的峰值大于其余两种湍流模型, 更接近实测值, 误差更小; 标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型在 5~20 m 高度时接近风速比实测值, 但在高处风速计算结果明显偏大。LES 模型计算结果与实

测值偏差 11.7%，相比于标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型偏差分别下降了 7.7% 和 2.7%，模拟误差更小。

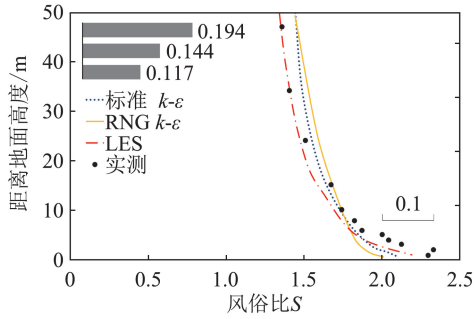


图6 HT处的垂直剖面风速比

Fig.6 Vertical wind profile wind speed ratio at HT

3.5 湍动能

Askervein 山布置的测风塔中沿 A 线分布的测风塔主要用于采集湍流数据,故将三种湍流模型模拟得到沿 A 线 10 m 高度处的湍动能分布于实测结果对比,如图 7 所示,其中湍动能标准偏差定义同式(17)。由图可以看出湍动能在山顶减小,随后在距离山顶大约 200 m 的背风面附近达到极大值。三种湍流模型计算结果中 LES 与实测结果吻合最好,标准偏差为 0.4191,相比于标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型 0.9376、0.8860 均要小。

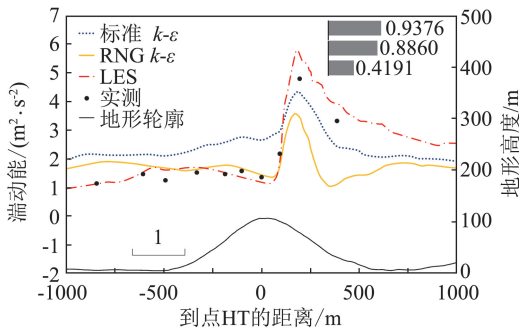


图7 A线10m高度处湍动能分布

Fig.7 Turbulent energy of line A at 10 m height

三种湍流模型在点 HT 处垂直方向上湍动能分布如图 8 所示。图 8 显示,虽然三者的趋势基本一

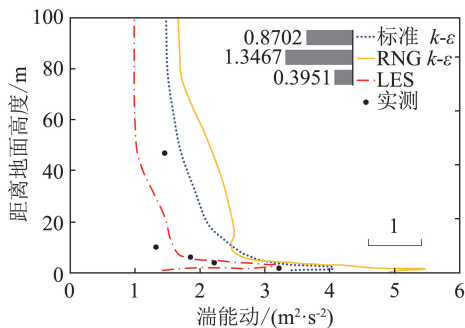


图8 HT处垂直方向的湍动能

Fig.8 Vertical turbulent energy at HT

致,但是标准 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ 模型计算结果明显比实测值大,由于标准 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ 无法解析具有较强脉动特征的小尺度涡,尤其在近地面处,表明在此处并不适用,而 LES 模型能较好捕捉近地面的小尺度涡进而模拟值与实测值基本吻合,误差更小。LES、RNG $k-\epsilon$ 和标准 $k-\epsilon$ 对点 HT 垂直方向的湍动能模拟结果的标准差分别为 0.3951、1.3467 和 0.8702,相比之下 LES 更为精确。

4 单一地表粗糙度

上一小节讨论了基于精细化地表粗糙度模拟下不同湍流模型的性能,结果表明,相比于其他几种湍流模型,LES 模型计算结果精度更高。但通常难以获得较精确的精细化地表粗糙度分布,本节为了探明模拟复杂地形风场时,单一地表粗糙度能否获得理想结果,选择 LES 湍流模型,设置地表粗糙度长度 z_0 分别为 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 工况设置如表 2 所示。

模拟不同工况下的风场,将距离地面 10 m 高度的风速转换为风速比,与实测值^[17]进行比较。图 9、图 10 和图 11 分别显示了沿 A 线、AA 线和 B 线距地 10 m 高度处模拟风速比与实测数据的对比,图中柱状图分别代表各湍流模型相比于实测值的风速比标准偏差。

从图 9~图 11 可以看出,地表粗糙度长度对实际地形的 CFD 数值模拟结果影响比较大。当地表粗糙度长度设置为 0.00 时,即采用光滑地表不考虑粗

表2 工况汇总表

Table 2 Summary of cases

粗糙类别	粗糙度长度 z_0	风向角/(°)	计算资源
光滑地表	0.00	210	处理器: Intelcore i9-7980 XE, 18 核内存: 64G
	0.01		
	0.02		
	0.03		
	0.04		
	0.05		
	0.06		
单一粗糙度			

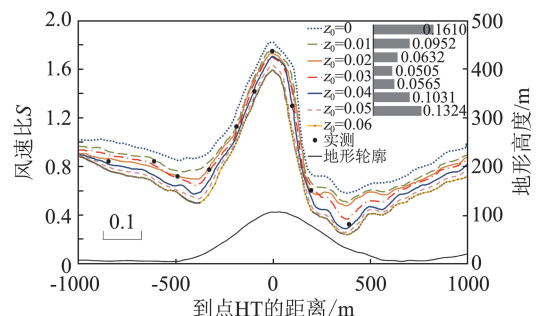


图9 沿A线10m高度的风速比

Fig.9 Wind speed ratio at 10 m along line A

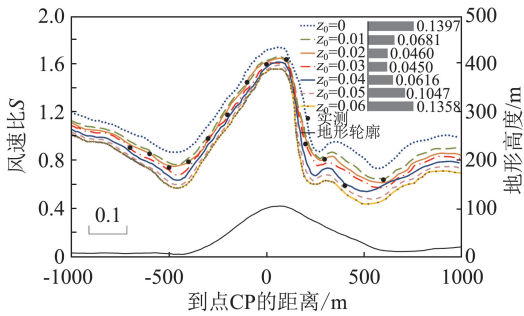


图 10 沿 AA 线 10 m 高度的风速比

Fig.10 Wind speed ratio at 10 m along line AA

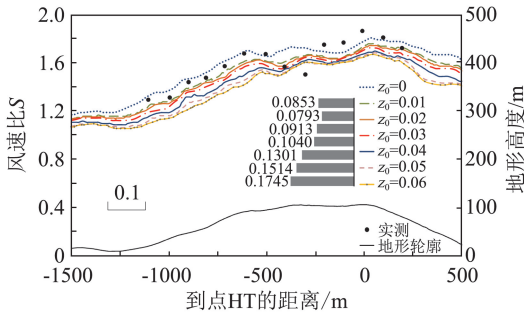


图 11 沿 B 线 10 m 高度的风速比

Fig.11 Wind speed ratio at 10 m along line B

糙度长度对风场的阻碍作用,在 A 线、AA 线的所有测风点以及 B 线大部分测风点处的数值模拟结果明显远大于实测风速值,同时也大于各个粗糙度工况的模拟结果。对于粗糙度长度的设置,从图 9~图 11 均可看出随着地表粗糙度长度的增大,各测点的数值模拟风速值逐渐降低。当地表粗糙度长度设置为 0.06 m 和 0.05 m 时,整体的风速模拟值远小于实测值,标准偏差较大。而当地表粗糙度长度设置为 0.02~0.04 m 时,整体的风速比曲线与实测值的吻合度较高,表明该地形的地表粗糙度长度的平均值接近 0.03 m,与实际地表植被被平均分布情况一致^[17]。

另外从图 9 和图 10 中,可以看到在迎风面山坡,地表粗糙度长度为 0.02 m 时风速比与实测值吻合较好;在背风面山坡,地表粗糙度长度为 0.04 m 时吻合较好,表明该地区地表粗糙度长度分布的差异性。

同时与采用单一地表粗糙度长度工况结果对比,统计各工况所有测点风速比相比于实测值的标准偏差如表 3 所示。由表 3 可以看出,当地表粗糙度长度设置为 0.02~0.03 时,模拟风速比误差为 0.0663~0.0784 相比于精细化地表粗糙下模拟误差 0.0620

表 3 各工况风速比标准偏差

Table 3 Wind speed ratio standard deviation of different cases

单一地表粗糙度 z_0/m							精细化地表粗糙度
0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	
0.1291	0.0804	0.0663	0.0784	0.0928	0.1241	0.1508	0.0620

十分接近,而当单一地表粗糙度长度小于 0.02 或大于 0.03 时,模拟风速比误差则过大,证明了模拟复杂地形风场时合理设置单一地表粗糙度能有效减小模拟误差,满足精度要求。

5 结论

本文基于计算流体力学方法,实现了通过自编 UDF 程序实现根据地表粗糙度长度添加覆盖植被阻力源项来模拟地表粗糙度,以 Askervein 山为例,研究了标准 $k-\epsilon$ 、RNG $k-\epsilon$ 和 LES 三种湍流模型对风场模拟的影响,进一步探讨了地表粗糙度长度的影响,得出以下结论:

1) 三种湍流模型均能捕捉迎风面风速变化,误差较小,而在背风面由于流动分离产生一定的误差,但 LES 模型可以捕捉到背风面风速迅速下降的现象。整体上 LES 模型偏差为 6.05%,相比于标准 $k-\epsilon$ 模型 11.37% 和 RNG $k-\epsilon$ 模型 9.95%,LES 模型误差最小;

2) 标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型模拟结果风剖面风速比与实测值偏差较大,LES 模型模拟结果相比于标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型结果误差分别减小了 7.7% 和 2.7%,与实测值最吻合,误差最小;

3) 湍动能在山顶达到极小,随后在距离山顶大约 200 m 的背风面湍动能出现极大值,相比于其他两种湍流模型,LES 模型能更准确捕捉近地面湍动能信息,与实测值吻合最好,误差最小;

4) 地表粗糙度长度对 CFD 数值模拟结果影响比较大。风速会随着地表粗糙度长度的增大而逐渐降低;地表粗糙度长度对风场的影响在迎风面和背风面处有较大的差异性;合理设置单一地表粗糙度能有效减小模拟误差,满足精度要求。

参 考 文 献:

[1] ZHANG Q, ZENG J, YAO T. Interaction of aerodynamic roughness length and windflow conditions and its parameterization over vegetation surface[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(13):1559-1567.

[2] ZHANG Q, YAO T, YUE P. Development and test of a multifactorial parameterization scheme of land surface aerodynamic roughness length for flat land surfaces with short vegetation[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(2):281-296.

[3] 张强, 李宏宇, 张立阳, 等. 陇中黄土高原自然植被下垫面陆面过程及其参数对降水波动的气候响应[J]. 物理学报, 2013, 62(1):522-532.

ZHANG Q, LI H Y, ZHANG L Y, et al. Responses of the land-surface process and its parameters over the natural vegetation underlying surface of the middle of Gansu in loess plateau to precipitation fluctuation[J]. Acta Phys Sinica, 2013, 62(1): 522-532.

- [4] 姚彤, 张强, 尹晗. 半干旱区榆中地表粗糙度年变化及影响机理[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4):454-462.
YAO W, ZHANG Q, YIN W. The annual variation and its influencing mechanism in the semi-arid area[J]. Journal of Applied Meteorology, 2014, 25(4): 454-462.
- [5] PATTANAPOL W, WAKES S J, HILTON M J, et al. Modeling of surface roughness for flow over a complex vegetated surface[J]. International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2008, 2(1): 18-26.
- [6] RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1993, 46,47:145-153.
- [7] YANG Y, GU M, CHENS, et al. New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2009, 97(2): 88-95.
- [8] DANIEL S ABDI, GIRMA T. Bitsuamlak. Wind flow simulations on idealized and real complex terrain using various turbulence models [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 75(8): 30-41.
- [9] 唐煜, 郑史雄, 赵博文, 等. 平衡大气边界层自保持问题的研究[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 129-135.
TANG Y, ZHENG S X, ZHAO B W, et al. Study on the self-maintaining problem of balanced atmospheric boundary layer [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 129-135.
- [10] 邓院昌, 刘沙, 余志, 等. 实际地形风场 CFD 模拟中粗糙度的影响分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(12):1644-1648.
DENG Y C, LIU S, YU Z, et al. Analysis of the influence of roughness in cfd simulation of actual terrain wind field[J]. Journal of Solar Energy, 2010, 31(12): 1644-1648.
- [11] 胡朋, 李永乐, 廖海黎. 基于 SST $k-\omega$ 湍流模型的平衡大气边界层模拟[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(6):737-743.
HU P, LI Y L, LIAO H L. Equilibrium atmospheric boundary layer simulation based on SST $k-\omega$ turbulence model[J]. Journal of Aerodynamics, 2012, 30(6): 737-743.
- [12] TAYLOR P A, TEUNISSEN H. The askervein hill project: Overview and background data [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1987, 39(1-2):15-39.
- [13] FERZIGER J H, PERIC M, LEONARD A. Computational methods for fluid dynamics[J]. Physics Today, 1997, 50(3): 80-84.
- [14] ENOKI K, ISHIHARAT. A generalized canopy model and its application to the prediction of urban wind climate[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser A1, 2012, 68(1):28-47.
- [15] TREUHAFT R N, ASNER G P, LAW B E, et al. Forest leaf area density profiles from the quantitative fusion of radar and hyperspectral data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(D21):ACL-1-ACL 7-13.
- [16] 王远, 陆志良, 郭同庆. 基于 $k-\epsilon$ 模型的实际地形风场 CFD 模拟研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4):1037-1042.
WANG Y, LU Z L, GUO T Q. CFD simulation of actual terrain wind field based on $k-\epsilon$ model[J]. Journal of Solar Energy, 2016, 37(4): 1037-1042.
- [17] TAYLOR P, TEUNISSEN H. The askervein hill project: report on the September/October 1983, main field experiment [R]. Technical Report MSRS-84-6, Meteorological Services Research Branch, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, Canada, 1985.