

Bolund 岛对风场流动影响的数值模拟研究

李德顺^{1,2,3}, 董彦斌¹, 傅学刚¹, 何婷¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省风力机工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了更准确、真实地描述复杂地形风场流场特性, 该文以 Risø 实验室开展的 Bolund 岛实验结果为依据, 采用雷诺时均 (RANS) 与大涡模拟 (LES) 方法对 Bolund 岛进行数值模拟。研究表明: 针对 Bolund 岛的数值模拟, 在 Line B 特征线上 5 m 高度处模拟值比 2 m 处更接近实验值, 在岛前位置模拟结果比岛后位置模拟结果更准确; LES 方法能够有效揭示 Bolund 岛地形周围流动的绕流特征和尾流区涡特征。

关键词: Bolund 岛; 湍流风场; 大涡模拟; 复杂地形

中图分类号: TH137; TH312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-0813(2021)05-0006-04

Numerical Simulation of Bolund Island's Influence on Wind Flow

LI De-shun^{1,2,3}, DONG Yan-bin¹, FU Xue-gang¹, HE Ting¹

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

2. Gansu Wind Turbine Engineering Technology Research Center, Lanzhou 730050, China;

3. Gansu Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to more accurately and realistically describe the characteristics of the wind field flow in complex terrain, this paper uses the Reynolds time average (RANS) and large eddy simulation (LES) methods to numerically simulate Bolund island based on the Bolund island experiment results carried out by the Risø laboratory. The study shows that the simulated value of Bolund island is closer to the experimental value at the height of 5 m on the Line B characteristic Line than at the height of 2 m. The simulation results of the pre-island position are more accurate than those of the post-island position. Moreover, LES method can effectively reveal the characteristics of flow around the topography of Bolund island and the vortex characteristics of wake area.

Key words: Bolund island; turbulent wind field; large eddy simulation; complex terrain

0 引言

目前风电行业对于复杂地形中风资源评估标准仍没有达成共识^[1], 且可用于风场模拟验证的实验数据十分有限。在风资源的研究中, 现场实测是最为直接有效的方法, 但是对于体型巨大的山地地形很难进行全尺寸的实测。由于自然风条件多变, 同时满足所需的风速和风向的情况并不多, 所以现场实测往往只能进行为数不多的几次成功测试, 得到的实测数据是非常具有价值的, 它是各种模型试验、理论模型的有效检

验标准。国外针对风速的现场实测实例主要有加拿大的 Kettles 山^[2]、威尔士的 Sirhowy 峡谷^[3] 和苏格兰的 Askervin 山^[4] 等测风试验。2008 年丹麦 Risø 实验室完成的 Bolund 岛测风实验^{[1]、[5]}, 获得了较为详尽的复杂地形风资源实测数据, 为复杂地形 CFD 模拟方法的验证提供了实验支撑。

本文采用雷诺时均 (Reynolds Averaged Navier-Stokes method) 方法与大涡模拟 (Large Eddy Simulation) 方法, 对 Bolund 岛进行数值模拟, 并与实验值进行对比, 通过来流风廓线、Line B 特征线上 2 m 与 5 m 高度处速度分布、流场速度云图, 研究 Bolund 岛地形周围的流场特性。

1 Bolund 几何模型的简介

Bolund 岛位于哥本哈根厄勒海峡, 丹麦 Risø 实验室北侧。海拔为 12 m, 东西长 130 m, 南北长 75 m, 如

收稿日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(51766009, 51566011); 国家基础研究计划(973 计划)(2014CB046201)

作者简介: 李德顺(1980-), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 博士, 主要从事风力机空气动力学、气固两相流及其磨损方向的研究。

图1所示。由丹麦 Risø 实验室完成现场测风实验,实验开展于2007~2008年期间,为期3个月^[6]。在该岛安装10座测风塔(记为M0~M9),安装位置如图2所示。其中M0用于测量来流风特征参数,其余测风塔(除M9外),均布置在特征线 Line A 和 Line B 上。两条特征线的方向坐标线分别为239°和270°。为便于标记,转换岛屿坐标,采用相对坐标。设置小岛中心为坐标原点(0,0),与测点M3重合。岛屿西侧为一个陡峭的悬崖,顶部矮草覆盖,四周为海面,岛屿地表粗糙高度为0.015 m,海平面粗糙高度为0.0003 m。测风期间,主风向为西风 and 西南风,由于岛屿西侧数公里均为开阔的海面,可认为M0测得的来流风为不受干扰的海风,Berg 等人在2011年通过实验验证了这一假设的有效性。



图1 Bolund 岛全景

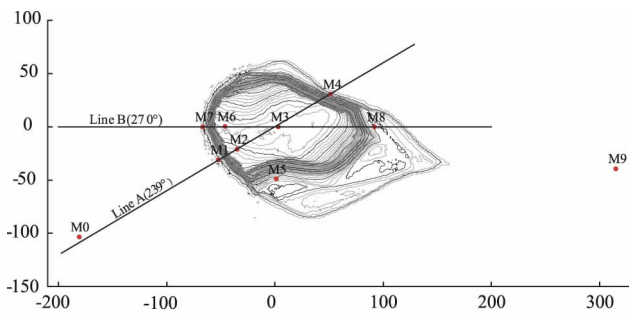


图2 Bolund 岛的地形、测风塔位置及特征线

2 数值模拟

2.1 网格划分

由于 Bolund 岛的实验数据最为详细的是 239° 方向和 270° 来流风速数据,本文针对 270° 来流方向的实验工况开展数值模拟。Bolund 岛地形网格按照 1:1 比例建模,为使流动充分发展,对原始地形进行拓展,计算域尺寸为 800 m × 600 m × 200 m,首层网格高度为 0.1979 m,网格总数为 8179329,对 Bolund 岛地形表面附近网格局部加密。

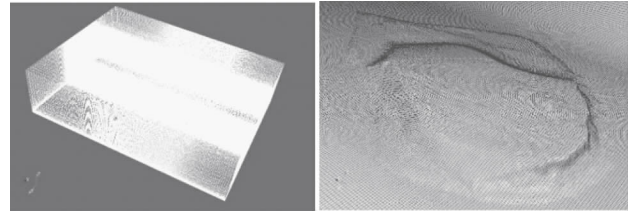


图3 Bolund 岛计算域与表面网格示意

2.2 数值方法

数值模拟时将岛屿中心坐标设置为(0,0),风从正北吹来时方向角为0°,顺时针方向为正方向。定义距离地面20 m高度处,风速为8 m/s,入口风廓线设置为实验要求的风廓线,本文所有高度均以海平面为基准,定义海平面高度为0 m。10分钟平均风速矢量为 $u = (u, v, w)$,风速大小定义为:

$$s = (u^2 + v^2 + w^2)^{0.5} \quad (1)$$

入口风廓线函数采用对数风廓线:

$$s = \frac{u_{*0}}{\kappa} \log\left(\frac{z_{agl}}{z_0}\right) \quad (2)$$

冯卡门常数 κ 取 0.4,海平面粗糙高度 z_0 为 0.0003 m,摩擦速 u_{*0} 为 0.4, z_{agl} 为距离海平面的高度。湍动能设置如下:

$$\frac{TKE}{u_{*0}^2} = 5.8 \quad (3)$$

计算中,为保证计算域内处处库朗数 $Co < 1$,取 δt 时,取网格最小值和速度场的最大值;算法采用 pimpleFoam 算法,计算时间步长为 0.03。

$$Co = \frac{\delta t |U|}{\delta x} < 1 \Rightarrow \delta t < \frac{\delta x}{|U|} \quad (4)$$

空气性质参数为: $\rho = 1.229 \text{ kg/m}^3$,动力黏度 $\mu = 1.73 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$,温度 $T = 15^\circ\text{C}$,重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

根据 Bolund 岛实验提供的测风塔位置设置监测点,在 M7、M6、M3、M8 测风塔位置对应风速仪高度处设置速度监测点。M0 处监测点监测来流风廓线特征;M7、M6、M3、M8 处监测点监测 Bolund 岛 Line B 上对应高度处风速,并与实验值进行对比。

3 数值模拟结果与分析

3.1 M0 监测点处风廓线

图4为M0处风速廓线对比。Bolund 岛数值模拟的入口风廓线按式(2)定义,目标入口风廓线函数为橘黄色曲线,蓝色和红色曲线为M0处不同高度监测数据的平均值拟合风廓线,黑点为实验值。在M0处数值模

拟所得风廓线与目标风廓线基本吻合,由此可知,数值模拟条件基本满足实验条件,可进行 Bolund 的数值模拟。

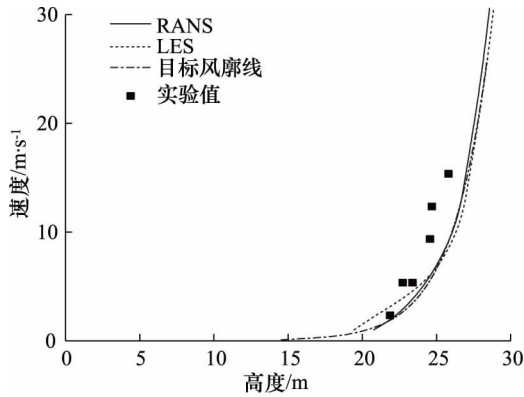


图4 M0 测风塔位置风廓线

表1为M0监测点不同高度处平均风速模拟值与实验值误差对比,由表1可知,在M0处模拟值与实验值最大误差为差在9%以内,表明流场中不同高度处,流动从入口发展至M0处没有发生明显衰减。

表1 M0 测风塔不同高度误差对比

(a) RANS			
高度 H(m)	实验值(m/s)	数值模拟(m/s)	误差(%)
2.3	8.752	8.95	2.33
5.3	9.356	9.75	4.30
9.3	9.828	10.38	5.63
12.3	9.876	10.65	7.88
15.3	10.328	10.78	4.42
(b) LES			
高度 H(m)	实验值(m/s)	数值模拟(m/s)	误差(%)
2.3	8.752	8.33	4.78
5.3	9.356	9.78	4.57
9.3	9.828	10.48	6.66
12.3	9.876	10.75	8.92
15.3	10.328	10.88	5.41

3.2 Line B 特征线不同高度平均速度分布

图5为270°方向来流条件下,Line B特征线上对应2m和5m高度处平均速度分布图,数值模拟对应高度处平均速度与实验值变化趋势一致,2m高度处,除M8点偏差较大,偏差为25%,M7、M6、M3处平均速度分布与实验值基本吻合;5m高度处,除了M8处偏

差较大外,M7、M6、M3处平均速度模拟值与实验值有良好吻合。总体来看,在Line B特征线上,5m高度处模拟值比2m处更接近实验值,岛前位置模拟结果比山后位置模拟结果更准确。

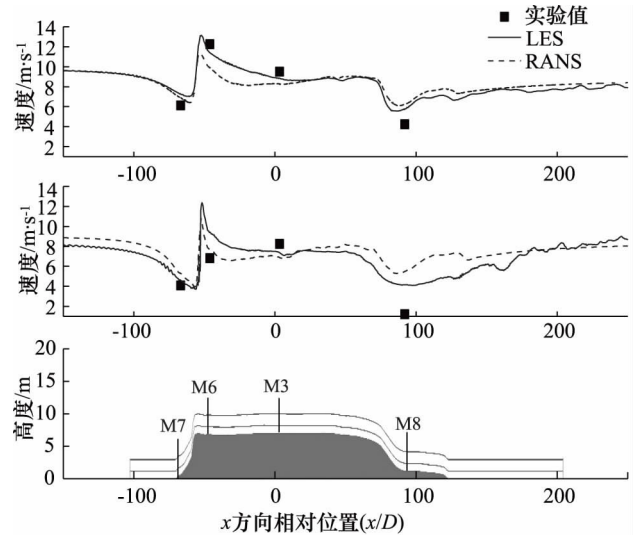


图5 Line B上2m(中)和5m(上)高度处速度分布

M1测风塔位于岛前海平面处,流场发展过程中受岛的影响,在来流区约100m处开始减速,在M1附近平均速度最低,2m高度处平均速度为初始来流平均速度的50%,5m高处平均速度为初始来流平均风速的64%;M2测风塔位于悬崖边缘位置,流场从M1处向M2发展过程中,由于在Bolund岛与高空之间形成纵向狭管区域,在悬崖顶部速度激增,2m高度处平均速度增大了50%,5m高度处平均速度增大了40%;M3位于岛中央,流场在M2之前发生激增后速度逐渐恢复,发展到M3处时,2m和5m高度处平均速度基本恢复至来流平均速度水平;M4位于岛后山脚处,湍流风绕流小岛发展到后悬崖处时,在小岛背面形成尾流区,平均速度降低。流动沿着Line B经过M4以后,便是海平面,小岛后尾流逐渐发展、耗散,平均速度开始逐渐恢复。

3.3 流场速度云图分析

图6为RANS与LES方法模拟Bolund岛周围风速分布云图,由图可知,岛周围形成绕流区,LES方法与RANS方法均反映出了Bolund岛周围的绕流特征;由于Bolund岛的绕流和阻碍作用,在Bolund岛前悬崖顶部加速特征明显,对比两种数值模拟可知,RANS方法所得云图只反映出Bolund岛周围速度的平均分布特征;相比RANS方法,LES更清晰的反映出Bolund岛周围的绕流特征,以及由于Bolund岛的扰流与阻塞作用引起尾流区较为紊乱的湍流流动。

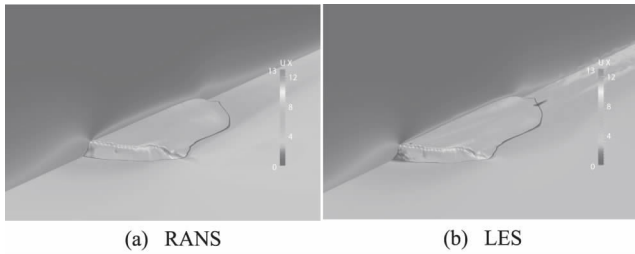


图6 Bolund 岛周围风速分布

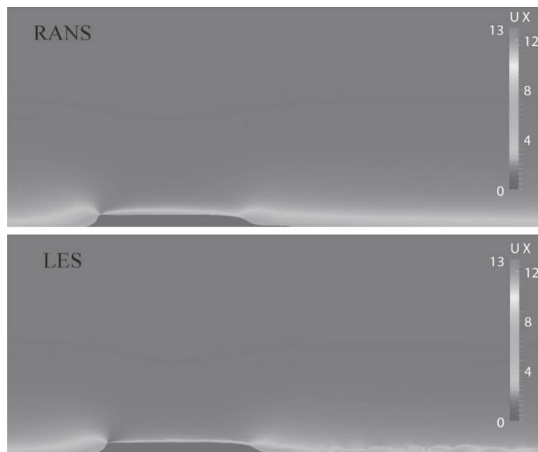


图7 不同时刻 Line A 所在平面速度云图

图7为LineB所在截面流场速度云图,由图可知,在来流区,RANS方法与LES方法所得速度分布规律基本一致;由于岛体的阻塞效应,在岛前海平面流动开始减速,流动从海平面向岛面运动时,由于狭管效应,岛前悬崖处加速效应明显,悬崖周围边界层变薄,悬崖位置速度增大。随着流动继续向后发展,地面边界层厚度逐渐增大,岛表面上速度逐渐减小。当流体流过岛面以后,由于岛的绕流作用与岛的地形特征共同作用,岛后尾流区产生大量细碎的小尺度湍流结构。

图8分别为某一时刻2 m、5 m、9 m、13 m高度处流场速度云图,由图可知,针对Bolund岛的数值模拟,LES方法可反映出Bolund岛周围尾流区的涡系分布;受Bolund岛的影响,在岛后尾流区,尾流呈现扩张的发展趋势,并呈现出现大量小尺度湍流结构;在13 m高度处,受岛前悬崖表面的不规则影响,岛上流动分布较为紊乱,在岛后悬崖区,由于边界层变薄,速度出现增大现象。

4 结论

(1) 通过Bolund的数值模拟,在Line B特征线上5 m高度速度分布比2 m处更接近实验值,在岛前位置M7、M6、M3处模拟结果比岛后M8处模拟结果更准确,主要由于地面边界层和岛后尾流的影响。

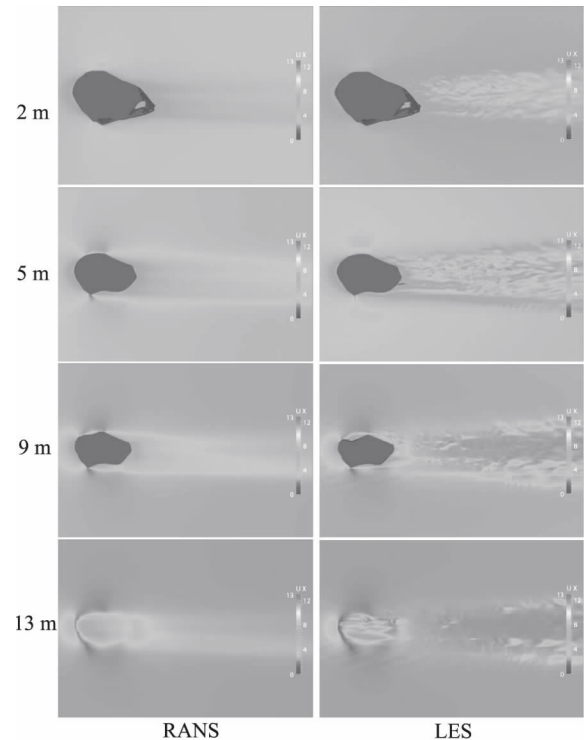


图8 某一时刻不同高度流场速度云图

(2) 对比两种数值模拟可知,RANS方法所得云图只反映出Bolund岛周围速度的平均分布特征;相比RANS方法,LES更清晰的反映出Bolund岛周围的绕流特征,以及由于Bolund岛的扰流与阻塞作用引起尾流区较为紊乱的湍流流动。ES数值模拟能够充分捕捉地形周围流动绕流特征和尾流区涡系分布。

参考文献

- [1] Bechmann A., Berg J., Courtney M., et al. The Bolund Experiment: Blind Comparison of Models for Wind in Complex Terrain [R]. San Francisco: AGU Fall Meeting, 2009.
- [2] Mickle, R. E., Salmon, J. R., Taylor, P. A.. Velocity Profile Measurements Over a Low Hill [Z]. Toronto: Atmospheric Environment Service, 1984.
- [3] Mason P. J.. Diurnal Variations In Flow Over A Succession of Ridges and Valleys [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1987, 113(478): 1117 - 1140.
- [4] Walmsley J. L., Taylor P. A.. Boundary-Layer Flow Over Topography: Impacts of the Askervein Study [J]. Boundary Layer Meteorology, 1996, 78: 291 - 320.
- [5] J. Berg, J. Mann, Bechmann A., et al. The Bolund Experiment, Part I: Flow Over a Steep, Three-Dimensional Hill [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 141(2): 219 - 243.
- [6] Bechmann A., Sørensen N. N., Berg J., et al. The Bolund Experiment, Part II: Blind Comparison of Microscale Flow Models [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 141(2): 245 - 271.