

程雪玲, 胡非, 曾庆存. 2015. 复杂地形风场的精细数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 1-10, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13225. Cheng Xueling, Hu Fei, Zeng Qingcun. 2015. Refined numerical simulation of complex terrain flow field [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (1): 1-10.

复杂地形风场的精细数值模拟

程雪玲 胡非 曾庆存

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 风能是一种重要气候资源, 随着我国风电规模的迅速增大, 发展风能资源评估系统和风功率预测系统已成为一项重要的研究内容。国内外对复杂地形风场结构的数值模拟有大量研究, 随着计算机能力增强, 以往用于空气动力学精细流场计算的计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模式越来越多地在气象领域得到应用, 人们开始研究中尺度预报模式和 CFD 模式结合进行复杂地形风场的数值模拟。本文的耦合模式系统采用中尺度气象模式 (WRF), 通过嵌套网格到内层尺度 (一般是几公里), 然后通过耦合 CFD 模式 Fluent 软件获得高分辨率 (水平 30~100 m, 垂直 150 m 高度以下 10 m) 的风速分布资料, 得到精细化的风场信息。通过对鄱阳湖北部区域和云南杨梅山复杂地形的风场模拟, 提供了风能评估和预报的一种可行的方法。

关键词 风能 大气边界层 复杂地形 WRF 模式 Fluent 软件

文章编号 1006-9585 (2015) 01-0001-10

中图分类号 TK89

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13225

Refined Numerical Simulation of Complex Terrain Flow Field

CHENG Xueling, HU Fei, and ZENG Qingcun

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Wind is an available main form of renewable energy. Following the development of installed capacity growth in China, an improvement is needed in wind resource assessment and wind power forecasting techniques. Numerous studies on the numerical simulation of complex terrain flow fields have been conducted worldwide. With the increasing capacity of numerical calculation, Computational Fluid Dynamics (CFD) models have been used in the meteorological field and are coupled with mesoscale models to simulate the flow fields on complex terrains. In this paper, a coupled model system for wind resource assessment was studied. In this study, a mesoscale meteorological model, the Weather Research and Forecasting (WRF) model, was used to downscale data from the global scale to the inner nested grid scale of a few kilometers and was then coupled with the Fluent method. High-resolution results of wind speed distribution data and refined wind farm information were obtained. The refined WRF/Fluent system was then applied to the complex terrain flow field of the Poyang Lake region and Yangmeishan in Yunnan. The results showed that this approach is viable for the assessment and forecasting of wind energy.

Keywords Wind energy, Atmospheric boundary layer, Complex terrain, WRF model, Fluent software

收稿时间 2013-12-18; 网络预出版日期 2014-01-20

资助项目 中国科学院大气物理研究所方向性任务 Y267014601, 科技部专项之专题“风能资源数值模拟专项复杂地形风能资源计算流体力学模式数值模拟研究”, 中国电力科学研究院实验室开放课题“基于 CFD 降尺度的风电场精细数值模拟”, 国家自然科学基金面上项目 41375018

作者简介 程雪玲, 女, 1971 年出生, 博士, 主要从事大气边界层湍流机理、流场模拟研究。E-mail: chengxl@mail.iap.ac.cn

1 引言

为了有效应对气候、环境变化和能源短缺,最近 20 年来世界上风能资源的开发利用得到了迅猛发展。我国幅员辽阔,风能资源极为丰富。随着风电产业的发展,对风能资源评估的精度要求越来越高,一般都采用数值方法分析风资源分布。国内外对复杂地形风场结构的数值模拟有大量的研究。归纳起来可分为诊断模式(diagnostic model)和预报模式(prognostic model)两大类。诊断模式是从实验观测数据出发构建稳定状态的流场,方程中不含时间项;预报模式是从初始流场开始,同时考虑边界条件,得到气象场的时间演化,方程中含有时间项。值得注意的是,如果预报模式用来计算定常过程,可以当作诊断模式。

诊断模式又可分为两种,一种是基于线性化方法简化 Navier-Stokes 方程的定常解,称为线性模式(linearized model);另一种是根据质量守恒定律分析气象场数据,称为质量守恒风场调整模式(mass consistent model)。线性模式最早是 Jackson and Hunt (1975) 提出来的,他们采用线性化和混合长理论分析了与二维小山的大小和形状有关的越山气流,将边界层分为 4 个子层,给出了相应的速度分布公式,但该结论有效的前提是需要山体坡度很小。随后, Hunt et al. (1988) 进一步分析了剪切流越过二维和三维小山的情况,并放宽了来流风速剖面 and 粗糙度的变化要求,但研究对象仍然仅限于缓坡度的小山,即要避免分离的产生。20 世纪 80~90 年代,丹麦 Riso 国家实验室在其理论基础上,发展了一个用于风电场微观选址的资源分析工具软件——WasP (Wind Atlas Analysis and Application Program),该软件适合较为平坦的地形、小范围的风资源调查 (Mortensen and Landberg, 1993)。Kaimal and Finnigan (1994) 研究认为此线性理论在计算未发生流动分离时的最大加速效应误差可以小于 15%~18%。Beljaars et al. (1987) 也在此线性理论的基础上开发了边界层数值模拟程序 MSFD 模式 (Mixed Spectral Finite Difference model), Taylor (1998)、Weng et al. (2000) 先后运用其研究了山体几何尺寸和地面粗糙度对加速比的影响,提出了可以考虑地面粗糙度影响的山顶加速比算法,称之为“新算法”(new guidelines)。质量守恒

风场调整模式通过近地面和探空观测资料构建三维风场。首先将观测资料插值到计算格点上,然后调整插值结果以满足质量守恒。其中,插值方法非常关键,相同的观测资料由于插值方法的不同,最后得到的风场会相差很大。而对插值结果的调整则要根据研究问题的不同而进行,比如对局地风场,可根据不可压连续方程调整;对污染物长程输运问题,则采用可压连续方程进行调整 (Ishikawa, 1994)。美国环保局推荐的空气质量扩散模式 CALPUFF (California Puff Model) 中的气象模块 CALMET (California Meteorological Model) 就是利用质量守恒原理对风场进行诊断的模式,包含了客观化的参数分析、陡坡地形的参数化处理、地形影响下的动力学流体效应、特殊地形对大气流体的阻滞效应、辐散散度最小化处理,以及专门为处理海陆边界层和大面积水体区域上空的气体扩散的微气象学处理算法 (Wang et al., 2008)。

预报模式则是通过质量、动量、热量、水汽以及其他如气溶胶等守恒方程的时间、空间积分预报大气系统的演化过程。各种预报模式之间最主要的区别在于守恒方程采用的近似方案,比如不可压、Boussinesq 假设、静力平衡等,以及对物理过程的参数化方案,比如云过程、沉降过程、湍流、通量等。各近似方案和参数化方案都有自己的局限性 (Thunis and Bornstein, 1996)。此外,不同模式数值求解非线性偏微分方程的方案也多种多样,包括网格划分、数值方法、初边界条件设置、坐标系的选择等均不相同。目前被广泛使用的预报模式有 WRF、MM5、RAMS、ARPS 等,其近地层、边界层、次网格参数化方案均对近地层风速模拟结果有较大影响,对于复杂地形则更多地采用的是地形追随、sigma 和 z^* 坐标系,而非笛卡尔坐标系,通过方程组的坐标变换来描述复杂地形,在数值计算方法上以差分格式为主,且在模拟的前处理阶段需要对地形进行不同程度的平滑,以获得计算上的稳定性,在近地面获得更高的精度,当遇到极为陡峭的地形时,有可能出现积分溢出的情况 (Finardi et al., 1997)。

为了满足复杂地形风场的精细化数值模拟,单纯用预报模式很难达到需求,即使能够实现精细化模拟的预报模式,对于区域性模拟需耗费大量机时,因此,需要通过动力降尺度的方法来实现精细化数值模拟,出现了预报模式和诊断模式相结合的

办法计算三维流场。美国 True Wind Solutions 公司将中尺度数值模式 MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System) 与小尺度质量守恒的风场线性模式 WindMap 结合, 发展成 MesoMap 应用于风能资源评估 (Brower et al., 2001), 分辨率达到 100~1000 m。加拿大气象局将中尺度模式 MC2 与小尺度模式 Ms-micro 相结合建立了精细化风能资源数值模拟评估模型 WEST (Wind Energy Simulation Toolkit), 并绘制了 5 km×5 km 分辨率的加拿大全国风能资源图谱 (Yu et al., 2006), 张德等 (2008) 用该模式对我国风能资源进行了模拟, 其模拟结果与气象台站观测资料对比分析的结果表明, WEST 在中国中东部海拔较低地区的模拟能力较好, 但对于中国西部高原地区的模拟结果不理想。周荣卫等 (2010) 利用中尺度气象模式 MM5 和微尺度模块 Calmet 组合建立了一个适用于区域性风能资源评估的数值模式系统, 用该模式系统分别对代表我国沿海风能丰富区的江苏省沿海地区和复杂地形条件下的北部风能丰富区的甘肃省酒泉地区的风能资源进行 1 km×1 km 高分辨率的逐时模拟, 并通过与模拟范围内测风塔观测资料的对比检验该模式系统对我国不同地形条件下的风能资源评估能力, 结果表明该模式系统对甘肃省酒泉地区的模拟值与实测值的对比结果要优于江苏省沿海地区的对比结果。

近年来, 随着计算机能力的增强, 以往用于空气动力学精细流场计算的 CFD 模式越来越多地在气象领域得到应用, 比如用于计算城市微尺度风场及污染扩散 (Cheng and Hu, 2005; Neophytou and Britte, 2005)。由于具有成熟的网格生成模块, 能够自适应地生成各种复杂地形上的贴体网格, 以及强大的后处理模块显示局部的复杂流动, CFD 模式更适应于复杂地形条件下的边界层精细流场的模拟。程雪玲和胡非 (2005, 2006) 利用地形高程的格点数据建立地形的计算网格模型, 输入 CFD 模式模拟大气边界层内复杂地形的羽流扩散。Stangroom (2004) 利用 CFX-5 对 Askervein 山的风场进行数值模拟, 结果优于 WASP, 与实验值吻合很好。Bechmann (2006) 基于 EllipSys3D 发展了大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 模式, 同样模拟 Askervein 山的绕流问题, 得到的平均风速和湍流脉动与实验均吻合。李磊等 (2010) 用商业 CFD 软件 Fluent 模拟了复杂地形的精细风场。在此基础

上, 人们开始研究用中尺度预报模式和 CFD 模式结合进行复杂地形风场的数值模拟 (何晓风等, 2010; 方艳莹等, 2012; Li and Chan, 2012; Li et al., 2013)。

2 WRF/Fluent 耦合模式系统

中尺度大气模式通常采用地形追随坐标, 通过方程组的坐标变换来描述复杂地形, 在数值计算方法上以差分格式为主, 且在模拟的前处理阶段需要对地形进行不同程度的平滑, 以获得计算上的稳定性 (Dudhia et al., 2005; Walko and Tremback, 2006), 当遇到极为陡峭的地形时, 有可能出现积分溢出的情况, 无法解决复杂地形的风能资源评估。

基于 CFD 方法的数值模式一直是用来进行空气动力学研究的, 更适应于复杂地形条件下的边界层精细流场的模拟, 2011 年 Riso 实验室组织了一次实验, 在长 130 m、宽 75 m 的 Bolund 岛上, 安装了 11 台测风仪, 实验进行了 30 d。这次实验对不同机构 57 个 CFD 模式, 包括线性类 CFD, 如 WASP、WindFarmer、雷诺平均 Navier-Stokes 方程 (RANS) 类 CFD、LES 类 CFD 等进行了盲比, 对平均风速的计算结果比较后, 发现线性 CFD 模式差, RANS 类 CFD 模式最好 (Bechmann et al., 2011; Berg et al., 2011)。Fluent 是国际知名的 CFD 模式, 集成了非常丰富的参数化方案和物理模型, 以及强大的建模和网格划分功能, 适用于模拟复杂地形的风场。Cabezón et al. (2007) 用 Fluent 和 WASP 计算了高度复杂地形的风场, 前者的计算精度更高。Sadek et al. (2011) 用 Fluent 和线性模式 Flowstar 计算了复杂地形的风场和浓度扩散, Fluent 的计算结果更准确, 特别是对于起伏的山地和陡坡形成的回流区。Mandas et al. (2004) 用 Fluent 以 Askervein 山为例对其计算精度进行检验, 其结果要优于其他模式。

利用 Fluent 模拟复杂地形的风场, 在边界条件的处理上缺乏灵活性, 通常只能假设边界上入流条件保持幂指数风廓线状态, 无法保证数值模拟中能正确地包含真实的中尺度环流信息。Li et al. (2004) 用 RAMS+Fluent 构造耦合模式系统成功地用于城市冠层气象场方面精细模拟的模拟研究。本文的耦合模式系统采用 WRF 模式, 通过嵌套网格到某一最小内层尺度 (一般是几公里), 然后通过耦合 CFD 模式 Fluent 获得高水平分辨率 (30~

100 m) 和高垂直分辨率 (150 m 以下每 10 m 一层) 的风速分布资料。得到的资料还将与观测站点 (气象塔) 的实测资料进行对比, 检验该系统的误差。

在计算风电场尺度的风场时, Fluent 假设空气运动是三维不可压缩流, 忽略地转科里奥力的影响, 且不考虑热对流的影响, 所有湍流都是因为机械作用产生的 (Versteeg and Malalasekera, 1995)。

空气运动可以分解为均值 \bar{u}_i 和脉动 u'_i :

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad (1)$$

同样气压也这样分解:

$$p = \bar{p} + p'. \quad (2)$$

Navier-Stokes 方程可以重新写为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial (-\rho \bar{u}'_i u'_j)}{\partial x_j}, \quad (4)$$

方程 (3) 和 (4) 就是 RANS 方程, 其中, t 为时间, u_i 、 u_j 分别为 i 、 j 方向速度, δ_{ij} 为 Kronecker delta 函数, ρ 为空气密度, μ 为动力粘性系数。方程 (4) 中多了一个未知项——雷诺应力张量, $-\rho \bar{u}'_i u'_j$ 代表速度脉动量的相关性, 需要被参数化。

有几种方法来参数化雷诺应力, 如 $k-\omega$ 、 $k-\varepsilon$ 、realizable $k-\varepsilon$ 方案、RNG $k-\varepsilon$ 方案、雷诺应力输送模型以及 LES 模型。LES 模型能够给出最好的参数化结果, 但太耗计算资源。Fluent 6.3 集成了 3 种基于 Reynolds 平均思想的湍流雷诺应力方案: 标准的 $k-\varepsilon$ 方案 (Launder and Spalding, 1972)、RNG $k-\varepsilon$ 方案 (Yakhot and Orszag, 1986) 和 realizable $k-\varepsilon$ 方案 (Shih et al., 1995), 其中 realizable $k-\varepsilon$ 湍流闭合方案被广泛地应用在风工程、污染物扩散和城市微尺度环境的研究, 此方案适当地调和计算精度和计算资源, 确保可靠的结果和稳定。本文采用中尺度气象模式耦合 CFD 软件 Fluent 的方法研究复杂地形的风场。

3 精细模拟

当前, 国际上关于复杂地形风场的模拟 (或预报) 大都采用的是中尺度气象模式 (例如 MM5、WRF 等), 通过嵌套网格到某一最小内层尺度 (一

般是几公里), 然后通过动力降尺度 (例如使用 CALMET 模式) 或统计降尺度的方法, 以及大气边界层风廓线分布理论或半经验公式, 获得高水平分辨率 (几百米到 1 km) 和高垂直分辨率 (一般要求 150 m 以下每 10 m 一层) 的风速分布资料。这样得到的资料要与观测站点 (气象塔) 的实测资料进行对比分析, 从而改进模式和模拟方法, 最终得到满足一定精度要求的数值模拟结果和风能资源分布图。本文则是把上述国际上流行方案中的动力降尺度部分, 改为 Fluent 精细模拟。

3.1 鄱阳湖地区风场模拟

鄱阳湖平原位于江西省北部、平原外侧, 低丘岗地广布, 地面波状起伏, 海拔在 50~100 m 之间, 内侧湖滨圩区, 海拔多在 20 m 以下, 地势低平, 港汊纵横草洲滩地连片, 鄱阳湖位居中央 (见图 1)。从湖口到吉山形成 90 km 长的狭管湖道, 南部大湖体水面广阔, 湖区周围地形复杂, 北侧紧邻庐山, 东侧为江西最高峰黄冈山海拔 2157 m, 其东北、西北和西侧均为山地。由地形、山谷风、湖陆风的相互作用, 形成复杂的大气边界层结构、局地气候和风能资源的分布。在其湖道地区, 由于风向稳定、风力资源优质, 建有多个风电场和测风塔。

首先使用 WRF 模式进行 6 km 分辨率的模拟; 然后将 WRF 模拟的结果作为 Fluent 的边界条件, 进行 CFD 计算得到测风塔周围 6 km×6 km 范围内水平 50 m 分辨率、150 m 高度以下垂直 10 m 分辨率的风能资源分布结果。WRF 采用 3 层网格嵌套, 网格格距分别为 54 km、18 km、6 km (如图 2 所示)。

鄱阳湖地区天气系统复杂, 对风场产生影响的环流系统较多: 冬季常受西伯利亚 (或蒙古) 冷高压影响, 盛行偏北风, 春季受季风影响, 夏季多为副热带高压的控制, 盛行偏南风 (见图 3), 有时受台风影响, 且局地强对流天气时常发生。图 4 给出了沙岭观测塔 70 m 高度上从冬季西北大风天气到夏季偏南风时模拟风速和观测风速的对比, 可见两者变化是一致的。图 5~8 给出了其他 4 座测风塔各层高度上从冬季到夏季模拟与观测风速月平均误差, 可以看到冬季由于大风天气较多, 经常会出现寒潮、冷峰等转折型天气, 模拟的误差较大, 而夏季风速平稳, 模拟的结果要相对较好, 这也能够满足风电场风功率预报的要求, 大风天气由于超过风电曲线的截止风速, 准确预报大风并不是必须

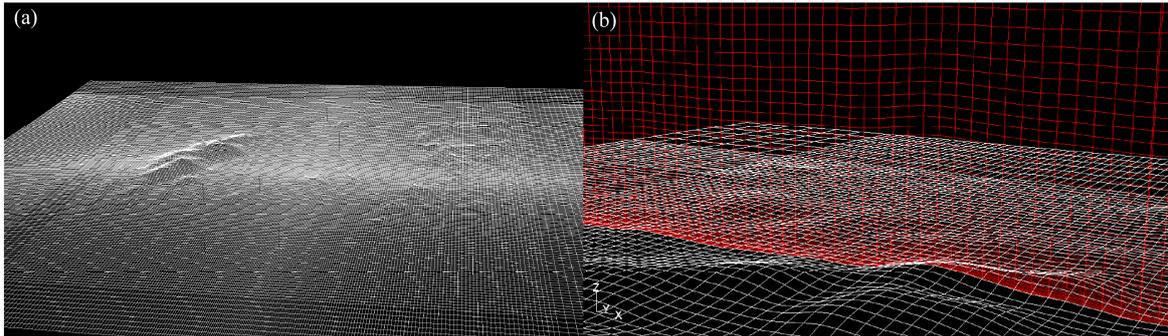


图 3 微尺度风场的水平和垂直网格
Fig. 3 Horizontal and vertical grids of the flow field

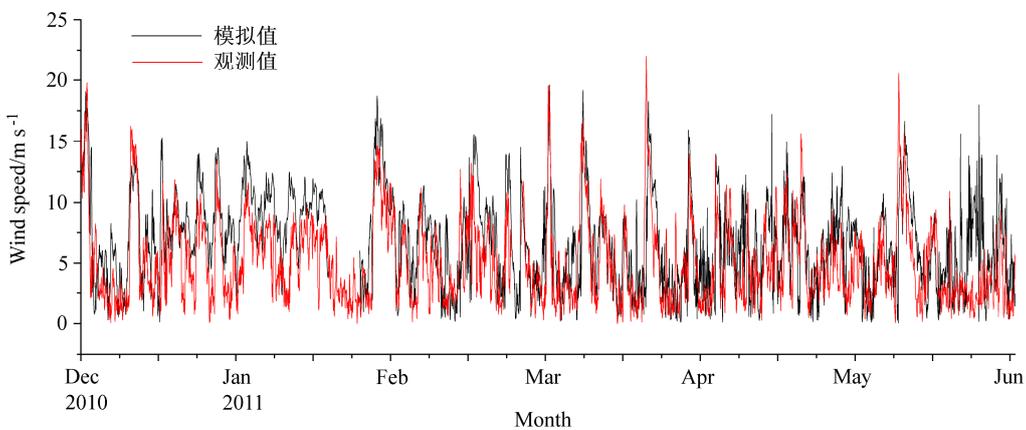


图 4 沙岭测风塔 70 m 高度上模拟与实测风速比较
Fig. 4 Comparison of simulated and observed velocities at 70-m height at Shaling tower

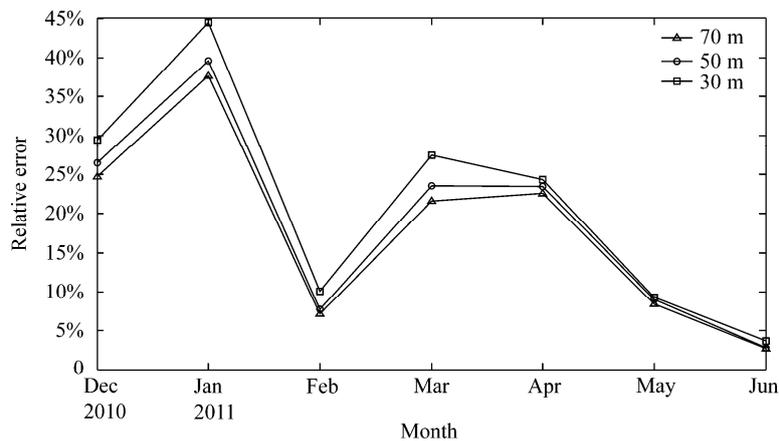


图 5 矾山月平均风速模拟与实测误差
Fig. 5 Errors of monthly average velocity between simulation and observation at Jishan tower

3.2 云南杨梅山风场模拟

云南省陆良县板桥镇杨梅山风电场位于 (25°6.95'N, 103°52.171'E), 平均海拔 2200 m。图 11a 中为风电场中 66 台风机的位置, 图 11b 是根据当地地形建立的精细网格, 其中的绿线为风机所在

的位置, 红线是测风塔所在位置。

图 12 是 66 台风机轮毂高度的风速模拟结果, 图 13 是模拟测风塔上的风速与观测结果的对比, 并与相似 Kalman 滤波 (MOS) 订正的结果进行了对比, 相似 Kalman 滤波适用于天气系统

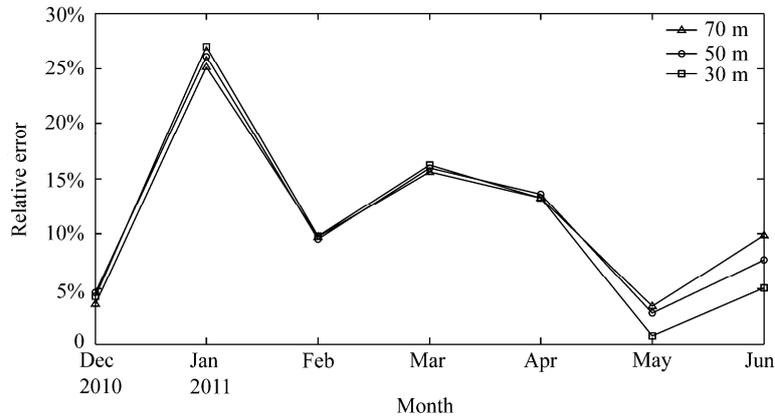


图6 同图5, 但为吉山
Fig. 6 Same as Fig. 5, but for Jishan tower

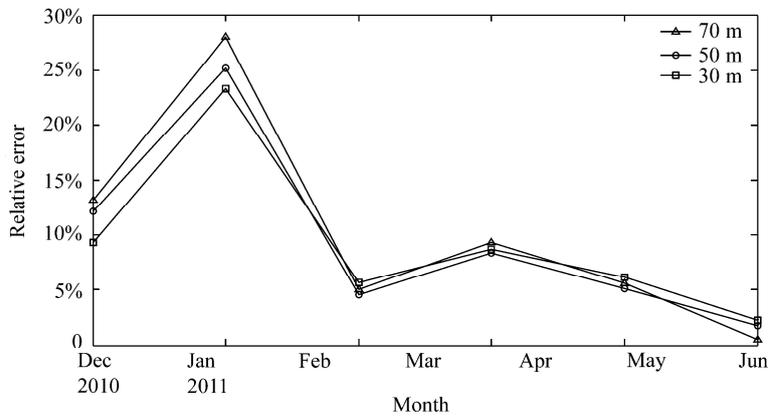


图7 同图5, 但为皂湖
Fig. 7 Same as Fig. 5, but for Zaohu tower

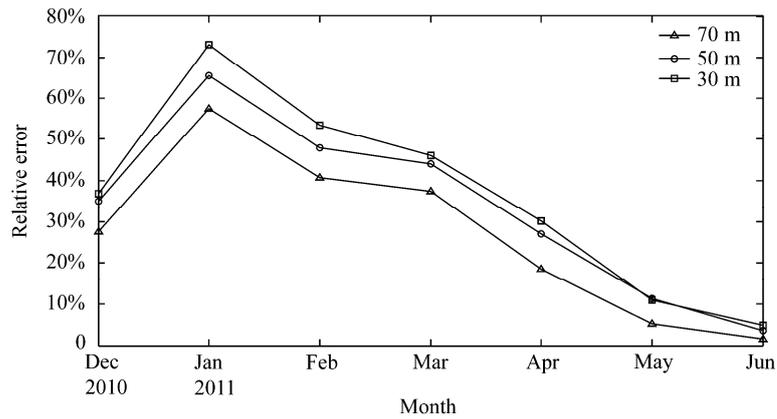


图8 同图5, 但为狮子山
Fig. 8 Same as Fig. 5, but for Shizishan tower

剧烈转变的情形, 可以看到数值模拟的结果、订正结果与观测的变化趋势是一致的, 但在风速发生突变的时候两者均有误差。因此, 可考虑将该耦合系统与统计预报模式组合, 在进行风电预报时针对

两种预报方法在不同的天气过程和不同风电场区域的预报表现, 进行细致分类, 建立集成预报系统。实际预报时根据分类选择统计预报还是动力预报。

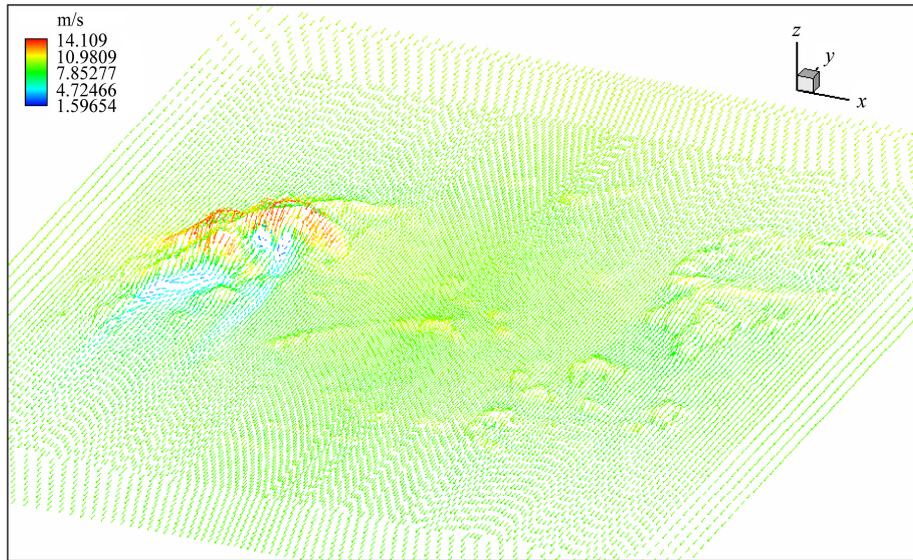


图 9 70 m 高度上流场风速矢量图
Fig. 9 Wind speed vectors at 70-m height

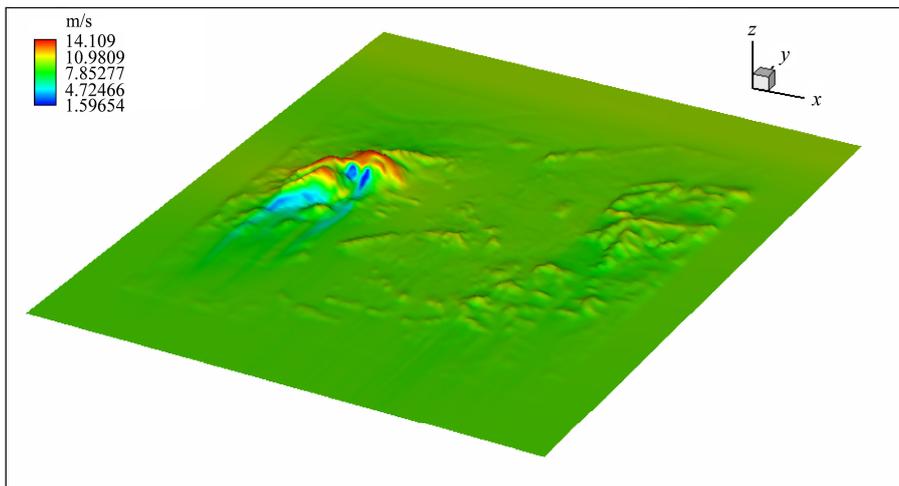


图 10 同图 9, 但为风速等值面
Fig. 10 Same as Fig. 9, but for wind speed contours

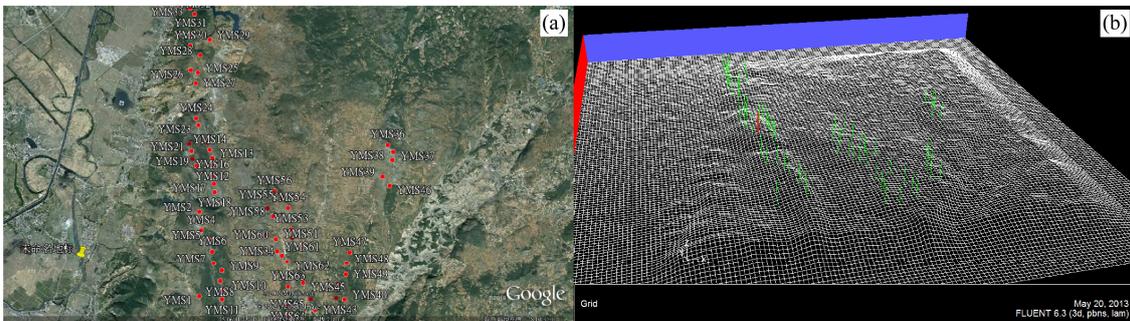


图 11 杨梅山风电场 (a) 实际地形和 (b) 精细网格
Fig. 11 (a) Complex terrain and (b) fine grid representation at Yangmeishan wind farm

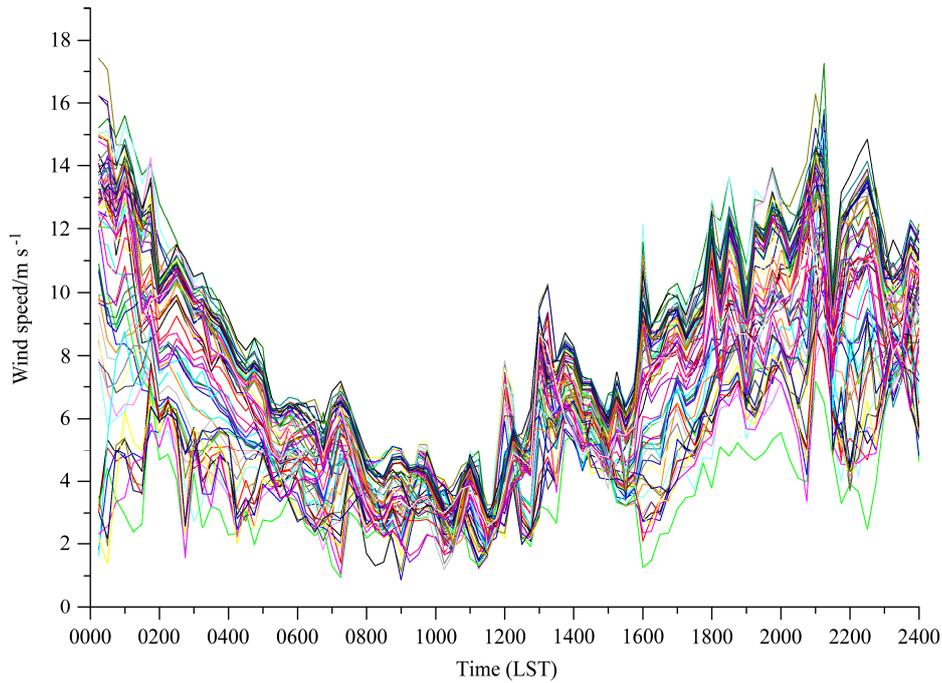


图 12 66 座风机轮毂高度的风速

Fig. 12 Wind speeds of the 66 turbines at the hub height

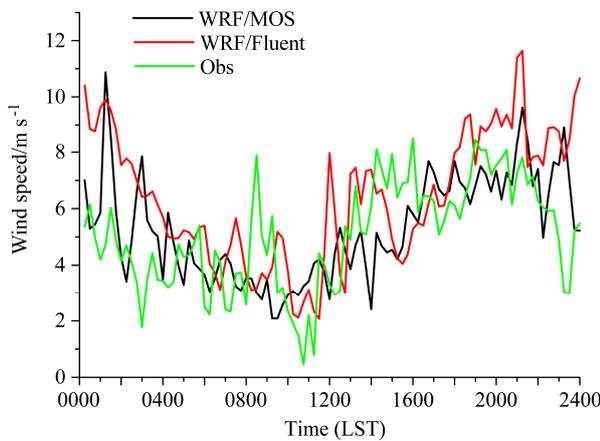


图 13 风速预报结果比较

Fig. 13 Comparison of wind speed between different forecasting results

4 总结

本文通过中尺度气象模式和计算流体力学模式耦合进行复杂地形风场精细模拟，得到水平分辨率 50 m、150 m 以下垂直分辨率 10 m 的精细风场，风机轮毂高度上的风速变化，同时比较了测风塔上模拟与观测的结果，进行了月平均的误差分析，效果令人满意。这两个模式是完全不同两个独立的模式，各自有各自的优点。风场范围内的大气运动不

仅受区域中尺度环流的影响，还与局地小尺度运动有关。耦合这两个模式真正考虑到了大尺度因素（全球模式提供边界条件给中尺度模式）、中尺度因素和小尺度因素对某个具体局地环境的影响，有巨大的应用前景，例如风能资源评估、城市污染预报、核扩散评估和大型建筑群小环境设计等。

参考文献 (References)

- Bechmann A. 2006. Large eddy simulation of atmospheric flow over complex terrain [D]. Ph. D. dissertation, Risø National Laboratory, Technical University of Denmark.
- Bechmann A, Sørensen N N, Berg J, et al. 2011. The Bolund experiment, Part II: Blind comparison of microscale flow models [J]. Bound.-Layer Meteor., 141 (2): 245–271.
- Beljaars A C M, Walmsley J L, Taylor P A. 1987. A mixed spectral finite difference model for neutrally stratified boundary-layer flow over roughness change and topography [J]. Bound.-Layer Meteor., 38 (3): 273–303.
- Berg J, Mann J, Bechmann A, et al. 2011. The Bolund experiment, Part I: Flow over a steep, three-dimensional hill [J]. Bound.-Layer Meteor., 141 (2): 219–243.
- Brower M C, Bailey B, Zack J. 2001. Applications and validations of mesomap wind mapping system in different climatic regimes [C]// Proc. of Windpower 2001. Amer. Wind Energy Assoc., Washington DC.
- Cabezón D, Iniesta A, Ferrer E, et al. 2007. Comparing WAsP and Fluent for highly complex terrain wind prediction [C]// Wind Energy, Proceedings of the Euromech Colloquium. Oldenburg, Germany, 275–279.

- Cheng Xueling, Hu Fei. 2005. Numerical studies on flow fields around buildings in an urban street canyon and cross-road [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22 (2): 290–299.
- 程雪玲, 胡非. 2005. 大气边界层内羽流扩散研究 [J]. *力学学报*, 37(2): 148–156. Cheng Xueling, Hu Fei. 2005. The research of plume dispersion in the atmospheric boundary layer [J]. *Acta Mechanica Sinica* (in Chinese), 37 (2): 148–156.
- 程雪玲, 胡非. 2006. 复杂地形网格生成研究 [J]. *计算力学学报*, 23 (3): 313–316. Cheng Xueling, Hu Fei. 2006. The study of grid formation on complex terrain [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics* (in Chinese), 23 (3): 313–316.
- Dudhia J, Gill D, Manning K, et al. 2005. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide: MM5 Modeling System Version 3 [M]// Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, USA.
- 方艳莹, 徐海明, 朱蓉, 等. 2012. 基于 WRF 和 CFD 软件结合的风能资源数值模拟试验研究 [J]. *气象*, 38 (11): 1378–1389. Fang Yanying, Xu Haiming, Zhu Rong, et al. 2012. Study on numerical simulation of wind energy resources based on WRF and CFD models [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 38 (11): 1378–1389.
- Finardi S, Morselli M G, Jeannot P, et al. 1997. Wind flow models over complex terrain for dispersion calculations [C]// European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST) Action 710: Pre-processing of Meteorological Data for Dispersion Models. Report of Working Group 4.
- 何晓凤, 周荣卫, 朱蓉. 2010. MM5 与 CFD 软件相结合对复杂地形风能资源模拟初探——以鄱阳湖地区为例 [J]. *资源科学*, 32 (4): 650–655. He Xiaofeng, Zhou Rongwei, Zhu Rong. 2010. A study on wind resources in complex terrain simulated by the combination of MM5 and CFD software [J]. *Resources Science* (in Chinese), 32 (4): 650–655.
- Hunt J C R, Leibovich S, Richards K J. 1988. Turbulent shear flows over low hills [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114 (484): 1435–1470.
- Ishikawa H. 1994. Mass-consistent wind model as a meteorological preprocessor for tracer transport models [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33 (6): 33–743.
- Jackson P S, Hunt J C R. 1975. Turbulent wind flow over a low hill [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 (430): 929–955.
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. *Atmospheric Boundary Layer Flows—Their Structure and Measurement* [M]. Oxford: Oxford University Press, 289pp.
- Launder B E, Spalding D B. 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence* [M]. London: Academic Press.
- Li Lei, Hu Fei, Cheng Xueling, et al. 2004. The application of computational fluid dynamics to pedestrian level wind safety problem induced by high-rise buildings [J]. *Chinese Physics*, 13 (7): 1070–1075.
- 李磊, 张立杰, 张宁, 等. 2010. FLUENT 在复杂地形风场精细模拟中的应用研究 [J]. *高原气象*, 29(3): 621–628. Li Lei, Zhang Lijie, Zhang Ning, et al. 2010. Application of FLUENT on the fine scale simulation of the wind field over complex terrain [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 29 (3): 621–628.
- Li L, Chan P W. 2012. Numerical simulation study of the effect of buildings and complex terrain on the low-level winds at an airport in typhoon situation [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 21 (2): 183–192.
- Li L, Chan P W, Zhang L J, et al. 2013. Numerical simulation of a lee wave case over three-dimensional mountainous terrain under strong wind condition [J]. *Advances in Meteorology*, Article ID 304321.
- Mandas N, Cambuli F, Crasto G, et al. 2004. Numerical simulation of the atmospheric boundary layer (ABL) over complex terrains [C]// EWEC 2004, London, UK.
- Mortensen N G, Landberg L. 1993. *Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP) User's Guide* [M]. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 133.
- Neophytou M K A, Britte R E. 2005. Modelling the wind flow in complex urban topographies: A computational-fluid-dynamics simulation of the Central London Area [C]// 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Limassol, Cyprus.
- Sadek R, Soulhac L, Brocheton F, et al. 2011. Evaluation of wind field and dispersion models in the presence of complex terrain [C]// 14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Kos, Greece, 32–36.
- Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. 1995. A new $k-\epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows—Model development and validation [J]. *Computers Fluids*, 24 (3): 227–238.
- Stangroom P. 2004. CFD modelling of wind flow over terrain [D]. Ph. D. dissertation, the University of Nottingham.
- Taylor P A. 1998. Turbulent boundary-layer flow over low and moderate slope hills [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74–76: 25–47.
- Thunis P, Bornstein R. 1996. Hierarchy of mesoscale flow assumptions and equations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53 (3): 380–397.
- Versteeg H K, Malalasekera W. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* [M]. Harlow: Longman Group, 67–77.
- Walko R L, Tremback C J. 2006. RAMS: The Regional Atmospheric Modeling System (version 6.0)—Model Input Namelist Parameters, Document Edition 1.4 [M]. ATEM Company, Boulder, Colorado, USA.
- Wang W G, Shaw W J, Seiple T E, et al. 2008. An evaluation of a diagnostic wind model (CALMET) [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47 (6): 1739–1756.
- Weng W, Taylor P A, Walmsley J L. 2000. Guidelines for airflow over complex terrain: Model developments [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 86 (2–3): 169–186.
- Yakhot V, Orszag S A. 1986. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory [J]. *Journal of Scientific Computing*, 1 (1): 3–51.
- Yu W, Benoit R, Girard C, et al. 2006. Wind energy simulation toolkit (WEST): A wind mapping system for use by the windenergy industry [J]. *Wind Engineering*, 30 (1): 15–33.
- 张德, 朱蓉, 罗勇, 等. 2008. 风能模拟系统 WEST 在中国风能数值模拟中的应用 [J]. *高原气象*, 27 (1): 202–207. Zhang De, Zhu Rong, Luo Yong, et al. 2008. Application of wind energy simulation toolkit (WEST) to wind energy numerical simulation of China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27 (1): 202–207.
- 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉. 2010. MM5/Calmet 模式系统在风能资源评估中的应用 [J]. *自然资源学报*, 25 (12): 2102–2113. Zhou Rongwei, He Xiaofeng, Zhu Rong. 2010. Application of MM5/Calmet model system in wind energy resource assessment [J]. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 25 (12): 2102–2113.