方艳莹,徐海明,朱蓉,等. 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,2012,38(11):1378-1389.

# 基于 WRF 和 CFD 软件结合的风能资源 数值模拟试验研究<sup>\*</sup>

### 方艳莹<sup>1,2</sup> 徐海明<sup>2</sup> 朱 蓉<sup>1</sup> 王 鹏<sup>1,3</sup> 何晓凤<sup>1</sup>

Didier Delaunay<sup>4</sup> 付 斌<sup>4</sup> 王 黎<sup>4</sup>

1 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

2 南京信息工程大学,南京 210044

3 中国人民解放军理工大学,南京 210007

4 法国美迪有限公司,北京 100027

提 要:运用中尺度数值模式 WRF 与法国 CFD 软件 Meteodyn WT 相结合的方法(WRF/WT),进行了广东省海陵岛地区 的水平分辨率 100 m×100 m 的风能资源数值模拟试验,采用海陵岛上 7 座测风塔观测资料对 WRF/WT 模式的模拟风场进 行误差检验,并与 WRF/WAsP 模式系统对单点风能参数模拟误差进行对比,研究 WRF/WT 模式系统在风电场微观选址和 分散式风电开发利用中应用的可行性。结果表明:中尺度模式与 CFD 软件结合的数值模拟方法对区域风能资源分布趋势的 模拟比单纯应用 CFD 软件更准确;WRF/WT 模式系统应用于复杂地形风能资源数值模拟评估是可行的,其对区域风能资源 参数分布模拟的准确率与 WRF/WAsP 对 2 km 范围内风能资源参数模拟的准确率相当;WRF/WT 模式系统在风速频率分 布不满足 Weibull 分布的情况下和陡峭地形条件下有较好的模拟效果,相对 WRF/WAsP 有明显优势。今后需进一步研究中 尺度模式与 CFD 软件的衔接方法,以及对中尺度模式模拟结果的误差订正。

关键词: 中尺度数值模式, CFD模式, 复杂地形, 风电场微观选址, 分散式风电开发

# Study on Numerical Simulation of Wind Energy Resources Based on WRF and CFD Models

FANG Yanying<sup>1,2</sup> XU Haiming<sup>2</sup> ZHU Rong<sup>1</sup> WANG Peng<sup>1,3</sup> HE Xiaofeng<sup>1</sup> Didier Delaunay<sup>4</sup> FU Bin<sup>4</sup> WANG Li<sup>4</sup>

1 Public Meteorological Service Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007

4 Meteodyn China, Beijing 100027

Abstract: A combined model system (WRF/WT) of the mesoscale model WRF and the Meteodyn WT, a CFD model from France, was carried out the numerical simulation experiments of regional wind resources over Hailing Island of Guangdong Province with a horizontal resolution of 100 m  $\times$  100 m. The observational data from 7 wind towers in Hailing Island were used to test the results modeled by WRF/WT, and compared with the simulated errors to the single-point wind parameters, thus studying the feasibility of WRF/WT model system in micro-siting for wind farm and the application of distributed development of

 \* 科技部国际科技交流与合作专项(2010DFA62830)和科技部 863 课题(2007AA05Z424)共同资助 2011 年 11 月 1 日收稿; 2012 年 4 月 18 日收修定稿
 第一作者:方艳莹,主要从事风能资源数值模拟研究.Email:sjkfyy@163.com 通信作者:朱蓉,主要从事大气边界层和风能资源数值模拟研究.Email:rongzhu@cma.gov.cn wind power and utilization. The results showed that, the combined model system of mesoscale model and CFD model in simulating the trends of the regional wind energy resource distribution is more accurate than CFD model used only; the WRF/WT model system used in complex terrain for wind resource numerical simulated evaluation is feasible, and its accuracy in simulating the parameters of the regional wind energy resource distribution is close to the result of WRF/WAsP simulating within 2 km. The WRF/WT model system compared to WRF/WAsP has obvious advantages when the frequency distribution does not meet the Weibull distribution or in a steep terrain. In the future, we need to further research in the interface methods of mesoscale model and CFD models, and the error correction of mesoscale model simulations.

**Key words:** mesoscale numerical model, CFD model, complex terrain, micro-siting for wind farm, distributed development of wind power

# 引 言

风能资源评估技术自 20 世纪 70 年代以来,经 历了由基于观测资料统计分析的评估方法到应用数 值模拟技术的发展历程,目前在国内外风能资源数 值模拟已成为风能资源评估的主要技术手段<sup>[1-2]</sup>。

20世纪 90 年代,丹麦 Risoe 国家实验室在 Jackson he Hunt 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)[3],在随 后的 10 年中,又经过不断地改进[4-5]。进入 21 世 纪,美国 TrueWind Solutions 公司在应用数值模式 评估风能资源方面处于国际领先地位[6-7],其产品 MesoMap 和 SiteWind 风能资源评估系统在 20 多 个国家和地区应用于风能资源评估[8-9]。澳大利亚 科学院(CSIRO)也发展了类似的线性和非线性的小 尺度风场模型(WindScape)<sup>[10]</sup>。日本使用美国大气 边界层模式 RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)也开展了本国的高分辨率的风能资源 数值模拟<sup>[11]</sup>。近年来,计算流体力学模式(Computational Fluid Dynamics, CFD)开始被用来模拟复 杂地形风场,为风电场微观选址服务,如挪威的 WindSim 和法国的 Meteodyn WT 等<sup>[12-14]</sup>。我国也 开展了一些 CFD 用于复杂地形风能资源评估的研 究<sup>[15-16]</sup>。

中尺度数值天气预报模式与小尺度数值模式相结合的风能资源数值模拟系统已被广泛地用于高分辨率的风能资源评估。在联合国环境规划署 (NUEP)的 SWERA项目中,美国国家可再生能源 实验室用中尺度模式 MASS 与小尺度模式 MesMap结合的模式系统完成了美国、巴西、中国东部 等国家和地区水平分辨率1km×1km的风能资源 模拟<sup>[17-18]</sup>;法国能源部和环境部采用 CFD 模式 Meteodyn WT 结合美国中尺度模式 RAMS 对法国 Provence-Alpes-Cote-d'Azur 地区进行风能资源评 估<sup>[19]</sup>;王鹏等<sup>[20]</sup>采用 WRF 和小尺度动力诊断模式 CALMET 模式相结合的模式系统,对广东省海陵 岛地区进行了风能资源数值模拟;杨罡等<sup>[21]</sup>在鄱阳 湖地区对大气边界层特征进行过数值模拟研究,何 晓凤等<sup>[22]</sup>采用 MM5 与 WindSim 结合进行了鄱阳 湖区域风能资源的数值模拟研究。

当前,鉴于我国电网消纳能力对大规模风电开 发的制约,国家能源局发出了因地制宜、开展分散式 风电开发的通知。零散的可利用风能资源多位于复 杂地形地区,分布点众多且覆盖面积小,不可能用设 立测风塔的方式进行风能资源评估,中尺度模式的 模拟精度也不够。因此,本文将采用中尺度模式 WRF和法国 CFD 软件 Meteodyn WT 相结合的方 法(以下简写 WRF/WT)对复杂地形的风能资源进 行数值模拟实验,并与 WRF 与丹麦微尺度风能资 源模拟软件 WAsP 结合的模式系统(以下简称 WRF/WAsP)的模拟结果进行对比,探索服务于分 散式风电开发的风能资源数值模拟方法。

### 1 数值模式系统

Weather Research and Forecast(WRF)模式系统是由美国国家大气研究中心(NCAR),国家海洋与大气管理局[国家环境预报中心(NCEP)及预报系统实验室(FSL)、空军气象局(AFWA),海军研究实验室,奥克拉荷马大学及联邦航空管理局

Meteodyn WT 是法国美迪公司开发的一套计 算流体力学 (CFD)模式<sup>[23-24]</sup>。它以大气湍流动量 守恒方程和质量守恒方程(N-S 方程)为动力框架, 在定常不可压的情况下,方程变为

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}$$
(2)

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \quad (3)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z}$$
(4)

利用 K 理论对 $uv', uw', vw', u'^2, v'^2, w'^2$ 等 湍流通量用转换成梯度输送的方式进行参数化,即

$$-\overline{u'v'} = -v_T \frac{\partial U}{\partial y} - \overline{u'w'} = -v_T \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{v'w'} = 0$$
(5)

引入以下方程:

$$U_{j} \frac{\partial k}{\partial x_{j}} = P_{\lambda} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \left( \frac{v_{T}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right]$$

$$\stackrel{\texttt{I}}{=} \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = C_{\mu} \frac{v_{T}}{L_{T}} k \\ P_{\lambda} = v_{T} \left( \frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{i}} \right) \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{j}} \\ v_{T} = k^{1/2} L_{T} \end{array} \right.$$

$$(6)$$

根据 Yamada<sup>[25]</sup>和 Arritt<sup>[26]</sup>参数化方法,考虑 了热力层结中的稳定或不稳定情况下,计算湍流尺 度:

$$L_{T} = \sqrt{2} S_{m}^{3/2} l \begin{cases} \frac{1}{l} = \left(\frac{1}{l_{0}} + \frac{1}{kz}\right), & z = \bar{B} \not{E} \\ C_{\mu} = \frac{4S_{m}}{B_{1}} \\ S_{m} = \begin{cases} 1.96 \frac{(0.1912 - R_{if})(0.2341 - R_{if})}{(1 - R_{if})(0.2231 - R_{if})}, & R_{if} < 0.16 \\ 0.085, & R_{if} \ge 0.16 \end{cases} \\ B_{1} = 16.6 \\ l_{0} = 100 m \\ k = 0.41 \end{cases}$$
(7)

其中 R<sub>if</sub>为通量 Richarson 数;k 为卡门常数;L<sub>T</sub> 是 湍流混合长度;l<sub>0</sub> 是一个临界值,当空间高度很大 时,使 l 的值近似为一个常数;C<sub>µ</sub> 是湍流动能方程 里湍流动能转化为热内能的部分;B<sub>1</sub> 是从风动实验 得到的经验性参数。法国 Meteodyn WT 采用分块 结构对整个空间进行网格化。它在用户所定义的结 果点(即用户关心的地点)处进行笛卡尔网格加密, 网格单元维度的扩展以及长宽比受到控制,以避免 收敛的不稳定性。网格不会自动根据地形来选择加 密或者稀疏,如果想在一些变化复杂的地区提高准 确度,需要在此区域附近定义结果点,网格则会在此 处加密。如此的网格分布方式将显著地降低计算规 模,图 1 显示了本文研究区域的网格加密情况。

计算区域网格生成以后,采用与目前 CFD 软件

常用的算法。按照16个等分的风向角,假设入口风 速10m·s<sup>-1</sup>,根据中性风速廓线分别进行定向模 拟计算,由此得到标准入口风速、不同风向条件下的 风场分布,即定向计算结果。这时如果有测风塔观 测资料的话,将根据测风塔观测结果与计算区域内 相同位置定向计算结果之间的统计关系,推算用户 关心的结果点处的风速值和风能参数。Meteodyn WT模式可以允许输入多个测风塔的观测资料,模 拟出整个区域的风能资源分布。

WAsP 是由丹麦国家实验室(Risoe)开发出来 的微尺度风能资源数值模拟软件。该软件通过测风 塔观测资料计算地转风,假定一定范围内地转风速 不会变化,再根据周围地区的地表特征,由地转风推 算任意点的近地层风速和风能参数。由于是采用一





Fig. 1 The method of mesh generation of Meteodyn WT(a) the dots represent the defined points, and(b) the mesh distribution after the intensifying defined points in computational domain

个观测点外推,误差会随着与测风点距离的增加而 加大。因此,不建议将 WAsP 直接用于较大区域的 风能资源评估。另外,WAsP 本身采用线性模型计 算方法,有其一定的局限性,它会随着被计算流体经 地形的复杂而带来计算结果的不确定性。所以 WAsP 对地形相对简单、地势较平坦的地区较为适 用,但对较复杂地形,由于受许多边界条件等的限 制,不很适合采用该软件<sup>[27]</sup>。

WAsP 是利用对数公式,假设在平坦地形下,风速较大时的风廓线为:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$
(8)

式中,u(z)是z高度上的风速, $z_0$ 是地面粗糙度, $\kappa$ 

是卡曼常数,一般取值 0.40,u<sub>\*</sub>是摩擦速度,与地面 压力有关:

$$|\tau| = \rho u_*^2 \tag{9}$$

式中,ρ是空气密度。但即使是在正常的风速情况 下,当 z 超出边界值几十米,风速也会偏离风廓线。 发生偏离是由于浮力的动力扰动造成的,地面粗糙 度不再是地面特征的唯一影响因素,地表热通量也 会成为另一个影响地面特征的因子。在晚上,地面 冷却时,扰动减少,导致风廓线随高度快速增长;相 反,白天的加热作用使扰动增强,风廓线随高度基本 不变。廓线表达式可概括为:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln(z/z_0) - \psi(z/L) \right] \quad (10)$$

式中, $\phi$ 是经验函数,L是新引进的 Monin-Obukhov 长度:

$$L = \frac{T_0}{\kappa g} \frac{c_P u_*^3}{H_0} \tag{11}$$

式中,T<sub>0</sub>和 H 分别是地面的绝对温度和热通量,c<sub>p</sub> 是常压下空气的热容量,g 是重力加速度。

大气边界层的风主要由天气尺度系统造成气压 不同而形成,如高压和低压系统的过境,当受到气压 改变产生的强迫作用时,边界层结构也会发生变化, 气压梯度力和摩擦力会达到一个适当的平衡状态, 这个平衡是建立在静力稳定、均匀层结和正压的条 件下,这个结果通常称为地转曳力定律,摩擦速度 u,和地转风G之间的关系为:

$$G = \frac{u_*}{\kappa} \sqrt{\left[\ln(\frac{u_*}{fz_0}) - A\right]^2 + B^2} \qquad (12)$$

WAsP的基本思路是,根据测风塔的测风数据 推算出地转风,假设地转风在水平方向是不变的,因 此测风塔周围任一点的风能参数就可由地转风和地 表粗糙度推算出来。

### 2 数值模拟试验方案设计

本文选择广东省阳江市海陵岛为数值模拟试验 区。海陵岛四面环海,总面积约 108 km<sup>2</sup>,海岸线长 约 142 km。岛上多丘陵山地(图 2),西部和中部山 地高度超过 300 m,东部山地不足 200 m。岛上地 势较低的地方以农田和居住区为主,植被较少,地势 较高的山地上以大片的树林为主,另外全岛还分布 有零星的湖泊和池塘。2003 年 9 月 1 日至 2004 年 8 月 31 日广东省气候中心在海陵岛上开展了风能 观测实验,设置了7座测风塔(图3)。其中1号和2 号塔位于海陵岛西南侧接近山顶的地方,海拔高度 201 m左右;3号塔位于海陵岛西北,高度239 m左 右的山体顶部;4号塔位于海陵岛的北部海滩上;5 号塔位于海陵岛对岸的大陆沿岸,海拔高度5 m;6 号塔则位于海陵岛西部山体北侧的山腰上;7号塔 处于海陵岛西部山体南侧的山坳中。各测风塔的观 测高度和海拔高度见表1。

#### 表1 测风塔海拔高度和观测高度

 Table 1
 The elevation above sea level

and the observed height of towers		
测风塔编号	观测高度/m	海拔高度/m
1	60	160
2	40	161
3	40	209
4	60	9
5	60	5
6	60	68
7	60	49

WRF模式采用三重嵌套网格,网格距分别为 27、9和3km;地表类型资料采用美国地质测量局 USGS发布的30"全球资料,27和9km网格地形 资料采用USGS的10′数据,3km网格采用美国 SRTM3数据,分辨率为3″。同化全球环流模式再 分析资料(NCEP)和常规地面和探空气象资料,生 成WRF模式初值场和侧边界,边界层物理过程参 数化采用 Mellor-Yamada-Janjic 方案。模拟结果逐 小时输出,作为小尺度模式的输入数据。

法国 Meteodyn WT 模式水平分辨率设为 100 m×100 m,垂直分辨率为8 m,水平扩展系数为 1.1,垂直扩展系数为1.2,计算区域半径为18 km。 图 3 中的圆圈表示法国 Meteodyn WT 模式的计算 范围,圆圈内的黑点表示 WRF 模式第三重、格距 3 km 的网格点,地形数据采用美国 SRTM 的 30 m 分辨率的数据,土地利用分类借助 google earth 工 具手工设定。

在 Meteodyn WT 模式的计算范围内共有 121 个 WRF 模式网格点,将这 121 个网格点的数值模 拟风速作为观测风速输入 Meteodyn WT 模式,Meteodyn WT 模式具有综合分析计算范围内多个测 风塔数据的功能。由于 WAsP 接受一个测风塔数 据的输入和分析,所以将与实际测风塔距离最近的 WRF 网格点模拟风速输入 WAsP,计算分析实际测 风塔位置处的风能参数,再与实际测风数据进行对 比。

# 3 数值模拟结果与分析

#### 3.1 海陵岛风能资源数值模拟

Meteodyn WT 模式首先在大气中性层结条件 下进行16个方向的定向计算,得到不考虑天气背景 和环境风场、不同来向的气流在地形和地表作用下 产生的风速加速因子和湍流强度的空间分布。考虑 到3号塔位于海拔209m的山顶目周围地形平坦, 认为其相对于其他6个测风塔来说,对海陵岛所处 的区域环境风场的代表性更好一些。因此,采用3 号塔 60 m 高度观测的 2003 年 9 月 1 日至 2004 年 8 月 31 日的风向频率分布,对定向计算得到的 16 个 方位来向所产生的风速加速因子和湍流强度进行加 权平均,得到了风速加速因子和湍流强度分布(图 4)。从图 4 可以看出,在山顶区域风加速因子数值 较大,湍流强度较弱。由于海陵岛全年的盛行风向 以东北风和偏东风为主,因此在较高地形的西南侧 和西侧,湍流强度较其他地方强,这是背风坡湍涡的 作用。整个海陵岛基本呈东一西走向,但略偏一点 西南一东北走向,北偏西的风向使海陵岛的迎风面 最大,由于岛上山地较多,造成了岛的南偏东海域上 湍流强度较大。海陵岛的最西端地势平坦,因此湍 流强度不大。

由于中尺度模式网格点上的计算值表示的是网 格平均值,对于3km的格距,相当于代表9km<sup>2</sup>范 围的平均值。海陵岛地形复杂,离地面越近,风速分 布就越不均匀。采用 Meteodyn WT 模式计算范围 内 121 个 WRF 模式网格点的 2003 年 9月1日至 2004 年 8月31日逐小时输出的 100 m 高度风向和 风速输入 Meteodyn WT 模式,对定向计算结果进 行统计分析后,即可得到水平分辨率 100 m×100 m 的平均风速和风功率密度分布(图 5c 和 5d)。为了 分析中尺度模拟结果的作用,本文将海陵岛 7 个测 风塔 2003 年 9月1日至 2004 年 8月31日的观测 数据输入 Meteodyn WT 模式,同样得到了水平分 辨率 100 m×100 m 的平均风速和风功率密度分布 (图 5a 和 5b)。

从图 5 可以看出,WRF/WT 模式系统得到的 年平均风速和风功率密度值总体大于 Meteodyn WT 模式根据测风塔资料计算的结果,说明 WRF 的近地层风速模拟结果值偏大;两种方法模拟出的 岛内风能资源最大值出现的位置是相同的,都是位 于山区地形较高处。

将图 5 与图 6<sup>[28]</sup>对照来看,图 5c 和图 5d 整体 风能资源的分布形势与广东沿海及近海风能资源的



图 2 海陵岛地形图 Fig. 2 The topographic map of Hailing Island



图 3 Meteodyn WT 模拟范围(圆圈内) 和 WRF 模式网格点分布(黑点) 以及测风塔分布(黄色标记)

Fig. 3 Simulation domain of Meteodyn WT
(within circle), the mesh distribution of
WRF (black points), and the distribution
of observation towers (yellow marked)



图 4 Meteodyn WT 模式的定向计算结果(高度 60 m,水平分辨率 100 m×100 m) (a)风加速因子分布,(b)湍流强度分布 (图中右下角为3号塔年平均风玫瑰图)

Fig. 4 The oriented computing results of Meteodyn WT, with

height 60 m, and horizontal resolution 100 m×100 m

(a) the distribution of wind accelerating factor, and (b) the distribution of turbulence intensity

分布形势一致,都是从海上到陆上风速有明显减小的变化规律。这是由于中尺度模式 WRF 能够模拟 出海上到陆上风速的变化规律,输入进 WT 模式中 的 121 个 WRF 网格点资料中包含的中尺度风场背 景信息,因此图 5c 和图 5d 中海陵岛上面向外海一 侧的风能资源明显大于面向内陆一侧。

很显然,图 5a 和图 5b 中的风能资源分布与环境背景场没有关系。这是由于海陵岛东西向约 20 km、南北向约 12 km,仅仅 7 个测风塔不能把握

全岛范围的风速分布,况且这7个测风塔均分布在 面向内陆一侧和岛的东西两端,因此对于类似海陵 岛这样尺度10~20 km 的复杂地形精细化风能资 源评估,更适合采用中尺度模式与CFD模式相结合 的风能资源数值模拟方法。由于中尺度数值模拟误 差会影响CFD数值模拟准确率,因此,如果能根据 实际测风资料对中尺度模拟结果进行订正后再输入 CFD模式,定会明显减小模拟误差。



图 5 海陵岛 100 m 高度上 2003 年 9 月 1 日至 2004 年 8 月 31 日平均风速和风功率密度分布 (a)和(b)分别为 Meteodyn WT 模式根据测风塔观测资料模拟的年平均风速和风功率密度分布, (c)和(d)分别为 Meteodyn WT 模式根据 WRF 网格点上输出结果模拟的年平均风速和风功率密度分布 Fig. 5 The mean wind speed and power density of Hailing Island at 100 m height from 1 September 2003 to 31 August 2004. The mean wind speed (a) and power density (b) are modeled by Meteodyn WT according to the observating data of towers, and the mean wind speed (c) and power density (d) are modeled by Meteodyn WT according to the results of WRF



图 6 广东沿海及近海 100 m 高度年平均 风速分布(单位:m・s<sup>-1</sup>,引自文献[28]) Fig. 6 The distribution of average wind speed off China and the Guangdong coast at 100 m height (unit: m・s<sup>-1</sup>, from Ref. [28])

#### 3.2 模拟结果误差分析

分析风能资源数值模拟的准确率时,除了检验 平均风速以外,风速频率分布也是一个重要因素。 因为风力机是在风速达到一定大小(切入风速)时才 开始发电,随着风速的增大,发电量也增大,当风速 大到一定值(额定风速)时,发电量达到满发,之后风 速如何增加,发电量也不会变化。图7给出了一个 500 kW风力机发电量与风速的关系<sup>[29]</sup>。因此,发 电量与风速在各个风速值区间中出现的时间长短有 关,即一段时间内的发电量等于该时段内所有出现 的各档风速所对应输出功率乘以该风速出现时间的 总和。本文将根据图7给出的风力机输出功率曲线 计算发电量,以此检验模式系统对风速分布频率模 拟的准确率。

为了区分中尺度模式 WRF 与 Meteodyn WT 模式各自对 WRF/WT 模拟误差的贡献,本文采用 代表性较好的 3 号测风塔资料,输入 Meteodyn WT 模式进行模拟计算,然后对其余 6 个测风塔位置上 2003 年 10 月和 2004 年 1、4、7 月的各月平均风速 和发电量模拟值进行检验(图 8),得到月平均风速 和发电量的模拟值与实测值之间的相关系数R。





Fig. 7 The relationship of electric energy production and wind speed



图 8 采用 3 号测风塔资料的 Meteodyn WT 对其余 6 个测风塔位置风能参数模拟值的检验结果 Fig. 8 The test results of rest 6 towers' wind parameters modeled by Meteodyn WT according to the data of No. 3 tower

R 的绝对值越大,表示两个量之间的相关性程度越 高。从图 8 可以看出模拟风速值和发电量的模拟值 与实测值的相关系数分别为 0.80 和 0.77,平均相 对误差分别为 6.6% 和 19.1%。同时,在 Meteodyn WT模式根据 121 个 WRF 网格点数值模拟结果计 算得到的风能资源分布参数的基础上,计算7个测 风塔位置和各自观测高度上 2003 年 10 月和 2004 年1、4、7月的各月平均风速和发电量,然后与实测 月平均风速和发电量进行对比检验(图 9a 和 9b)。 结果表明 WRF/WT 得到的月平均风速和发电量模 拟值与实测值的相关系数分别为 0.86 和 0.79,平 均相对误差分别为 9.79%和 31.68%。为了研究 WRF/WT 应用于复杂地形区域风能资源评估的可 行性,本文还检验 WRF/WAsP 系统对测风塔位置 上的风能参数模拟准确率,将与测风塔距离最近的 WRF 网格点上的逐小时模拟风速输入到 WAsP 中,计算测风塔位置上的月平均风速和发电量 (图 9c和 9d)。结果表明 WRF/WAsP 得到的月平 均风速和发电量模拟值与实测值的相关系数分别为 0.90和 0.87,平均相对误差分别为 8.08%和 27.86%

从以上 WRF/WT 和 WRF/WAsP 的检验结果 对比可以看出,模拟值与实测值的相关都非常好, WRF/WAsP的相关系数较大。这是由于 WRF/ WAsP 并不进行大面积的计算,只是用距离测风塔 最近的 WRF 网格点上的模拟结果推算测风塔处的 风能参数。由于 WRF 模式最内重网格距是 3 km, 7个测风塔与最近 WRF 网格点的距离从 0.2~1.7 km 不等,因此 WRF/WAsP 模拟与实测的相关性 检验结果完全依赖 WRF 的模拟能力。另一方面从 图 9 可见,总体来讲 WRF 模拟的平均风速要明显 高于实际观测值,由此导致了 WRF/WT 和 WRF/ WAsP 模拟得到的月平均风速和发电量的相对误差 要高于图 8 中 Meteodyn WT 的结果,其中发电量 相对误差更大一些。这是因为发电量的模拟误差依 赖对每个风速段出现时间频率的模拟准确率,这对 模式的模拟能力要求更高。

以下通过个例分析进一步研究 WRF/WT 的模 拟能力。2003年10月,6号塔 WRF/WT 模拟的平 均风速相对误差是7.2%,WRF/WAsP则为0.2%, 明显低于 WRF/WT;但是对发电量的模拟,WRF/ WT 模拟误差为0.2%,反而远远小于 WRF/WAsP

塔的实测风速频率分布并不完全符合 Weibull 分布,



的 12.8%。图 10 是 2003 年 10 月 6 号塔观测的和 各个模式模拟的风速频率分布频率,可以看出 6 号

图 9 WRF/WT 和 WRF/WAsP 模式系统的风能参数数值模拟结果的检验

Fig. 9 The test of the wind parameters-modeled results by WRF/WT (a,b) and WRF/WAsP (c,d)



Fig. 10 The No. 6 tower's distributions of wind speed modeled by different models in October 2003 (a) observed, (b) by WRF/WT, (c) by WRF/WAsP and (d) by WRF 并不是直接模拟风速频率分布,而是假定风速频率 符合 Weibull 分布,通过求取 Weibull 参数的 A 和 K 值,间接得到风速频率分布,所以无法模拟出风速 频率不符合 Weibull 分布的情况。在此个例中, WRF/WT 成功地模拟出了风速频率一大一小双峰 分布的形态,因此发电量的模拟误差就很小。这也 说明,平均风速误差小,不一定代表发电量的预报也 一定准确。

2003年10月,7号塔处 WRF/WT 和 WRF/ WAsP模拟的平均风速相对误差分别为0.3%和 9.6%;对于发电量的模拟,WRF/WT 和 WRF/ WAsP的模拟相对误差分别为12.9%和31.5%,可 见WRF/WT的模拟效果均好于WRF/WAsP。这 可能是由于7号塔位于海陵岛西部高度172m山体 南侧的山坳里,塔基座海拔高度49m,只有东南方



向面对大海、地势开阔,其他方向均被山体阻挡 (图 11)。2003 年 10 月的主导风向为 NNE,此时 7 号塔就刚好处于山的背风坡,气流过山后,产生了较 大的湍流强度。WAsP 是线性模式,更适用于平坦 地形;而 Meteodyn WT 基于 N-S 方程采用有限元 方法求解,充分考虑了近地层大气湍流的作用,并适 用于陡峭地形,所以此时 WRF/WT 的模拟效果就 明显优于 WRF/WAsP。

2003年10月,1号塔处 WRF/WT和WRF/ WAsP模拟的平均风速相对误差分别为31.9%和 23.4%,发电量模拟结果相对误差分别为127.0% 和107.3%,两者的模拟误差都非常大。图12为 2003年10月1号塔处不同模式系统模拟的风向频 率分布,可以看到1号塔实际主导风向以偏东风为 主,但WRF模拟的主导风向则为偏北风。说明对



图 11 7 号塔周边地形及 NNE 方向定向计算的湍流强度分布结果 (图中黑色三角表示 7 号塔的位置)

(a)湍流强度分布,(b)地形高度分布

Fig. 11 The topography around No. 7 tower and the distribution of turbulence

intensity oriented computed at NNE

(a) the distribution of turbulence intensity, and (b) the topography (Dark triangle represents the location of No. 7 tower)



图 12 2003 年 10 月 1 号塔处不同模式系统模拟的风向频率分布 Fig. 12 The No. 1 tower's distributions of wind direction modeled by different models in October 2003 (a) observed, (b) by WRF/WT, (c) by WRF/WAsP and (d) by WRF 于复杂地形的地区,来流方向不同,所产生的风能资源参数分布的差异是非常大的,因此 WRF/WT 模式系统用于复杂地形风能资源数值模拟时,要保证WRF模式对主导风向预报的准确率。

# 4 结论与讨论

本文运用中尺度数值模式与 CFD 软件相结合的方法,在广东海陵岛地区开展复杂地形风能资源数值模拟研究,探讨针对风电场微观选址和分散式风电开发的风能资源数值模拟方法。通过采用海陵岛上7座测风塔观测资料对 WRF/WT 模式模拟风场的误差检验,以及与 WRF/WAsP 模式系统对单点风能参数模拟误差的对比,得到结论如下:

(1)中尺度模式与 CFD 软件结合的模式系统 应用于复杂地形风能资源数值模拟评估是可行的, 可以在没有测风塔观测的条件下,得到高分辨率的 区域风能资源分布,为风电场微观选址和分散式风 电开发的前期工作提供科学依据。

(2)中尺度模式与 CFD 软件结合的模式系统对 区域风能资源分布趋势的模拟比单纯应用 CFD 模 式更准确,因为中尺度模式为 CFD 模拟提供了环境 背景风场。

(3) WRF/WT模式系统对较大区域风能资源 参数分布模拟的准确率与WRF/WAsP对2km范 围内风能资源参数模拟的准确率相当。

(4)相对WRF/WAsP,WRF/WT模式系统在 风速频率分布不满足Weibull分布的情况下和陡峭 地形条件下有明显优势。

在中尺度数值模拟的基础上采用 CFD 软件进 行微尺度风场数值模拟,首先需要对中尺度数值模 拟误差有一定的评估或进行必要的订正,怎样对中 尺度数值模拟结果进行订正,尤其是在没有测风塔 的情况下根据历史气象观测资料进行订正,是需要 进一步研究的问题。此外,测风塔观测风速与中尺 度数值模拟风速没有直接的可比性,中尺度模式网 格点上的风速代表网格平均值,测风塔观测值只代 表测点周围区域,依赖于地形的复杂程度,因此简单 地将中尺度网格点作为测风塔放入 CFD 中进行数 值模拟也是不恰当的。本文考虑到离地面越远,受 下垫面影响越小,风速所代表的范围就越大,认为垂 直层数越高的风速模拟值与实际风速值的代表范围 越接近,所以采用 WRF 模式 100m 高度的风速模拟 结果代入 Meteodyn WT 模式中。但是,采用多少 高度的中尺度模拟结果合适,或者这种中尺度模式 与 CFD 软件的方式是否合适,也是需要进一步研究 的问题。

**致谢:**感谢宋丽莉研究员为本文提供广东海陵岛测风 资料。

#### 参考文献

- [1] 李泽椿,朱蓉,何晓凤,等.风能资源评估技术方法研究[J]. 气 象学报,2007,65(5):708-717.
- [2] Zhu Rong, Zhang De, Wang Yuedong, et al. Assessment of Wind Energy Potential in China[J]. Engineering Sciences, 2009, 7(2): 18-26, ISSN 1672-4178, Cn11-4985/N.
- [3] Ib Troen, Erik L P. European Wind Atlas [R]. Risoe National Laboratory, 1989.
- [4] Mortensen N G, Bowen A J, Antoniou I. Improving WAsP predictions in (too) complex terrain. // Proceedings (online).
   2006 European Wind Energy Conference and Exhibition, Athens (GR), 27 Feb-2 Mar 2006. (European Wind Energy Association, Brussels, 2006, 9.
- [5] Badger J, Mortensen N G, Hansen J C. The KAMM/WAsP numerical wind atlas-a powerful ingredient for wind energy planning. // Proceedings (CD-ROM). The Great Wall world renewable energy forum and exhibition 2006, Beijing (CN), 23-27 Oct 2007.
- [6] Brower M C, et al. 2001, Applications and validations of the MesoMap wind mapping system in different climatic regimes[C]. Proc Amer Wind Energy Assoc, Windpower 2001, 6.
- [7] Ayotte K W, Davy R J, Coppin P A. A simple temporal and spatial analysis of flow in complex terrain in the context of wind energy modelling [J]. Boundary-Layer Meteorology. 2001, 98: 275-295.
- [8] Manwell J F, Rogers A L, McGowan J G, et al. An offshore wind resource assessment study for New England [J]. Renewable Energy. 2011, 27(2):175-187.
- [9] Elliott D, Schwartz M. Development and validation of highresolution state wind resource maps for the United States [R]. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-500-38127, July 2005.
- [10] Coppin P A, Ayotte K A, Steggel N. Wind resource assessment in Australia-a planners guide, Wind Energy Research Unit, CSIRO Land and Water, 2003.
- [11] Atsushi Yamaguchi, Takeshi Ishihara, Yozo Fujino. An assessment of offshore wind energy potential using mesoscale model and GIS[R]. European Wind Energy Conference & Exhibition, 2004, 22-25 November, London, UK.
- [12] Serozhah Milashuk, William A. Crane. Wind speed prediction accuracy and expected errors of RANS equations in low relief inland terrain for wind resource assessment purposes
   [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(4):429-

433.

- [13] Palma J M L M, Castro F A, Rodrigues A H, et al. Linear and nonlinear models in wind resource assessment and wind turbine micro-siting in complex terrain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (12): 2308-2326.
- [14] Hwang Y, Paek I, Yoon K, et al. Application of wind data from automated weather stations to wind resources estimation in Korea[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(10):2017-2023.
- [15] 李磊、张立杰、张宁,等.FLUENT 在复杂地形风场精细模拟 中的应用研究[J].高原气象,2010,29(3):621-628.
- [16] 肖仪清、李朝、欧进萍,等.复杂地形风能评估的 CFD 方法 [J].华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(9):30-35.
- [17] U. S. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report Central America Wind Energy Resource Assessment, http://swera.unep.net, 2006-Aug-21.
- [18] U. S. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report - China Wind Energy Resource Assessment, http:// swera.unep.net, 2006-Aug-21.
- [19] 付斌.针对 PACA 复杂区域的风资源绘图中尺度方法与微观 尺度方法相结合.2009 第六届亚洲风能大会暨国际风能设备 展览会,2009 年 7 月 8-10 日,北京.

- [20] 王鹏、朱蓉、方艳莹. 广东海陵岛风能资源高分辨率数值模拟 研究[J]. 风能, 2011, No. 5, 53-61.
- [21] 杨罡,刘树华,朱蓉,等. 鄱阳湖地区大气边界层特征的数值 模拟[J]. 地球物理学报,2011,54(4):896-908.
- [22] 何晓凤,周荣卫,朱蓉. MM5 与 CFD 软件相结合对复杂地形 风资源模拟初探[J].资源科学,2010,32(4):650-655.
- [23] 法国美迪公司 Meteodyn WT 用户使用手册.
- [24] Delaunay D, Chantelot A, Guyader T, et al. Meteodyn WT: A software for wind resource assessment in complex terrain. European Wind Energy Conf., London (UK), November, 2004.
- [25] Yamada T. Simulations of nocturnal drainage flows by a q<sup>2</sup>l turbulence closure model[J]. J Atmos Sci, 1983, 40, 91-106.
- [26] Arritt R W. The effect of water surface boundary layers[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1987, 40:101-125.
- [27] 冯长青,杜燕军,包紫光,等.风能资源评估软件 WAsP 和 WT 的适用性[J].中国电力,2010,43(1);61-65.
- [28] 肖子牛,朱蓉,宋丽莉,等. 中国风能资源评估 2009[M].北 京:气象出版社,2010.
- [29] Joshua Earnest, Tore Wizelius. Wind power plants and project development. PHI Learning Private Limited, 2011, New Kelhi;58. ISBN-978-81-203-3986-6.