

基于线性模型的风电场发电量计算与分析

王远^{1,2} 陆志良¹ 郭同庆¹

(1. 南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京, 210016;

2. 广东省水利电力规划勘测设计研究院, 广州, 510635)

摘要: 针对相对平坦地形, 采用线性化流体方程描述流场, 并根据大气边界层特性进一步简化计算方法, 即利用所谓地形影响系数快速求解感兴趣点(一般为风机位置)的流动速度; 针对尾流影响, 采用工程上广泛使用的修正Park模型来求解, 尾流线性叠加并忽略较弱的尾流影响。文中介绍了一个已建典型海滨风电场的装机规模、地表粗糙度以及测风情况, 并以此风电场为算例采用不同测风数据进行发电量计算, 预测结果与实际发电量较好地吻合。最后探索了算例风电场各风机发电量不均衡原因, 提出地形图大小对风场模拟准确性的影响, 并从工程设计角度提出具体意见。

关键词: 风场模拟; 地形影响; 尾流影响; 测风数据; 发电量

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)05-0655-06

Calculation and Analysis of Output of Wind Farm Based on Linear Model

Wang Yuan^{1,2}, Lu Zhiliang¹, Guo Tongqing¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou, 510635, China)

Abstract: The flow field of simple terrain is described by a linearization of the flow equations. And the computational method is further simplified based on the characteristic of atmospheric boundary layer (ABL), namely, with a so-called topographic effects coefficient, the flow velocity is obtained quickly on the point (generally wind turbine's sites) being interested in. For wake effects, a modified Park model is used, which has been involved in wind farm design. The wake effects of wind turbines are linearly superimposed and the smaller ones are neglected. A typical-built seashore wind farm is introduced, including its total rated capacity, roughness of the ground and wind data measuring situation. Then as a calculating example, the power production of the wind farm is predicted by using different wind data. Most predicted values coincide well with the measured ones. Finally, it is explored why the output of each wind turbine is so different, and the conclusion presents that the size of topographic maps can influence the accuracy of wind field simulation. Also, definite suggestion about this is proposed for engineering design.

Key words: wind field simulation; topographic effects; wake effects; wind data; output

在风电场开发过程中, 风资源评估的准确性至关重要。风电场范围内至少立有一个测风塔, 地形

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600)资助项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期: 2011-04-29; **修订日期:** 2011-08-09

通讯作者: 陆志良, 男, 教授, 博士生导师, 1963年6月生, E-mail: luzl@nuaa.edu.cn。

越复杂需要的测风塔越多,根据测风塔的测风数据(测风周期一般为一年)进行微观选址,要将风力发电机尽可能布置在风能富集点,然后计算所有风电机组年发电量得到风电场的年产量。决定每个选取点风况的地理因素主要有3个:地形、粗糙度和障碍物。由于大多数风电场建在开阔地带,所以粗糙度和障碍物不是决定性因素,地形才是决定性因素,较高的地形会加大风速。模拟这个流场有两种方法,基于求解线性化流动方程的线性模型和基于求解雷诺平均N-S方程[还包括大涡模拟(Large eddy simulation, LES)、直接数值模拟(Direct numerical simulation, DNS)、真实气体]的非线性计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)模型^[1]。线性模型计算速度快,适用于模拟地形不太复杂的大型风场,所以实际中应用仍然最广泛。

对于一个风电场来说,每台风机的发电量还受周围其他风机尾流的影响,相对于自由来流,尾流使得流动情况发生了很大的变化,如风速减小、湍流强度增加、出现了明显的风剪切层等。风速减小会使下游风力机的输出功率降低,从而减少了该台机的发电量,风电场工程设计中一般要求尾流损失不超过8%。为了计算风电场风机之间的相互干扰,需要用到尾流模型。很多学者提出了一些简化的尾流模型,有些模型通过实验数据检验并进行修正后得到广泛应用,如修正的Park模型^[2]以及Ainslie提出的涡粘性尾流模型^[3]等。

风电场发电量预测的准确性除了取决于计算模型,还取决于计算输入条件,这些输入包括测风数据、地形图、风机功率曲线、风机推力系数以及地表粗糙度。输入条件有时需要进行合理性分析,比如Antoniou等专门研究了风机机舱上测风仪测风数据的修正问题^[4]。

本文采用线性模型模拟流场,尾流影响则采用修正的Park模型,计算了某已建风电场的发电量。同时针对计算输入条件,分析了采用不同测风数据和不同地形图对计算结果的影响。结果表明,本文的计算方法和对算例结果的分析对实际工程设计有较好的参考意义。

1 计算方法

1.1 流体模型

对于风电场内的大气边界层,一般可以根据其物理特性简化为无粘外场和粘性内场。靠近地表的内场由于受地面粗糙度影响大,流动较复杂,还可以再分为剪应力层和近地层,前者虽然剪应力比较

小,但还是决定了最大的扰动速度发生在这一层,后者为一薄层,层内剪应力梯度变化很快并且扰动速度趋向于0。离地表较远的外场则可以看作是完全无粘的位势流,这使得流场求解简化^[5]。图1所示为流过低山的流场结构图,图中各物理量介绍如下: δ 为大气边界层厚度; u_0 为平面地形上的基本流动,用对数方程(1)描述; l 为内场厚度,由式(2)确定; $z=f(x,y)$ 为障碍物形状函数; h 为障碍物高度; L 为障碍物特征长度。

$$u_0(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

$$l = \frac{z_0}{8} \left(\frac{L}{z_0}\right)^{0.9} \quad (2)$$

式中: z_0 为地面粗糙度系数; $\kappa \approx 0.4$,为冯·卡门常数; u^* 为表面摩擦速度,由来流雷诺数决定的常数^[6]。对一个典型例子, $L=500$ m, $z_0=0.1$ m,则内场高度 $l \approx 28$ m。风电场安装的风机轮毂离地面高度一般都在50 m以上,所以可以认为风机主要工作在无粘外场。

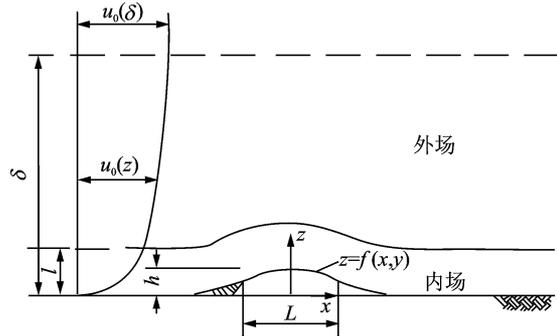


图1 流场结构图

在 $z > l$ 的外场,本模型假设地形影响足够小,可以忽略流动方程中的非线性项;并且人为地将流速分为两个部分:粗糙度一致为 z_0 平面地形上统一的基本流速 u_0 和因地形与粗糙度变化造成的扰动速度 Δu ,两者相加就得到真实流速 u ,即 $u = u_0 + \Delta u$ 。前者已由方程(1)规定,后者可以根据位势流特性,定义成与地形斜率成正比的一个分布,其两个水平分量分别为

$$\Delta u = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{l}{z_0}\right) \sigma(x, y, z) \quad (3)$$

$$\Delta v = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{l}{z_0}\right) \sigma'(x, y, z) \quad (4)$$

式中: Δu 为 x 方向(来流方向)的扰动速度; Δv 为另一个水平扰动速度,垂直于 Δu ; σ 和 σ' 代表量纲一的地形影响系数,分别为

$$\sigma(x, y, z) =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x-\xi)f_{\xi}(\xi,\eta)d\xi d\eta}{[(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+z^2]^{3/2}} \quad (5)$$

$$\sigma'(x,y,z) =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(y-\eta)f_{\eta}(\xi,\eta)d\xi d\eta}{[(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+z^2]^{3/2}} \quad (6)$$

式中 $\partial z/\partial x = f_x(x,y)$, 为障碍物的当地斜率。最大的增速发生在山顶附近, 高度恰好在内、外场分界线上, 即 $z=l$, 来流方向的最大扰动速度为

$$\Delta u_{\max} = \frac{u^*}{\kappa} \frac{\ln^2(L/z_0)}{\ln(l/z_0)} \sigma(x,y,l) \quad (7)$$

在 $l > z > 0$ 的内场流动很复杂, 描述这部分流场可以近似认为“增速因子” $S (S = u/u_0)$ 与 h/L 成正比^[7], 文献[7]给出了一些插值方程可以参考。

1.2 尾流模型

对于大型风电场, 垂直于主风向布置有多排风机, 这样下游风机处于上游风机尾流中。本模型要研究相对于自由来流, 尾流会发生什么变化。本文采用修正的 Park 模型, 该模型是由学者 Jensen 于 1984 年提出的, 模型计算原理图如图 2 所示。首先假设在风力机下游, 尾流是线性膨胀的, 然后分别利用一维动量、质量守恒定理推导出在风力机下游 x 位置处速度 u_w 。

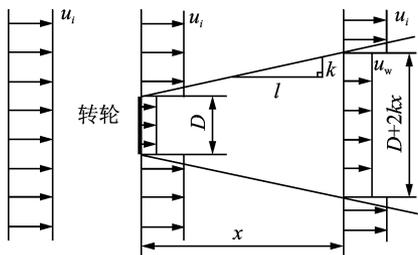


图2 Park 模型计算原理图

注意 Park 模型只是针对远尾流有效, 即一般要求 $x \geq 2D$ (D 为风轮直径)。风电场设计规范要求风机沿主风向间距大于等于 $5D$, 垂直于主风向间距大于等于 $3D$, 所以 Park 模型完全适用于风电场的设计计算, 且单台风机尾流速度由式(8)确定

$$u_w = u_i \left[1 - (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D}{D + 2kx} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中: u_i 为未受扰动的来流速度; C_t 为风机推力系数; k 为尾流衰减系数, 由式(9)定义

$$k = \frac{A}{\ln(h/z_0)} \quad (9)$$

式中: A 为常数 0.5; h 为风机轮毂高度。

风电场下游风机一般受上游多台风机尾流影响, 所以要考虑尾流叠加的问题。如果所研究风机

的风轮完全处在上游某台风机尾流中, 则本风机的入流风速 u_{in} 就是 u_w ; 如果风机的风轮只是部分处在尾流中, 那么其入流风速则是 u_w 和自由来流 u_0 乘以各自所占风轮面积百分比之和。多排布置风机的风电场中, 风机之间的间距一般相近, 使得下游风机的尾流可以由上游风机尾流直接推算

$$u_w = (u_{in}/u_0)u_{wi} \quad (10)$$

式中: u_{wi} 为上游风机相同轴向距离 x 处的尾流速度; u_{in} 为下游风机的平均入流速度。为简化计算, 在实际风电场计算中, 最多考虑其上游最近两台风机的尾流影响, 忽略其他较弱的尾流影响。

利用流体模型可以计算出风电场每个点的“增速因子”, 从而绘制出风资源分布图, 为微观选址提供依据。同样地, 利用尾流模型也可以计算出每个点(一般只计算机位点)的“增速因子”, 发电量计算时采用两个“增速因子”的乘积。

2 某海滨风电场

本风电场位于海岛西岸, 海岸线大致呈东西走向, 风电场长约 5 km, 宽约 1.5 km。海岸有约几十米宽的沙滩, 此外就是稀疏的防护林和一些虾塘。风电场北面是开阔的农田和一些村庄, 南面是大海。整片区域地势较平坦, 海拔都在几米到十几米之间。风机沿海岸线布置成两排, 原有测风塔位于 1 号风机西北方向的海边, 风电场总体布置见图 3。

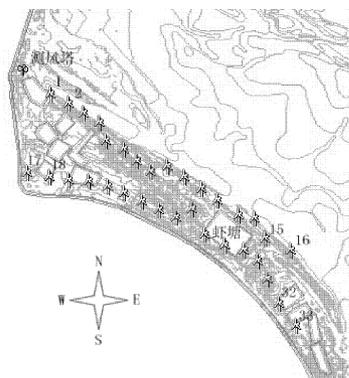


图3 风电场总体布置图

已知电子地形图比例尺为 1 : 2 000, 等高线间距为 1 m, 大部分区域表面粗糙度按防风林取为 $z_0 = 0.3$ m, 成片的虾塘区域定义 $z_0 = 0.01$ m, 开放的大海则取 $z_0 = 0$ 。

通过对测风数据的分析和参证当地气象站的长期气象资料, 判定本风电场属于 IEC II 类风电场, 所安装的风机要求能抵御最大 59.5 m/s 风速 (3 s 均值)。本风电场统一安装单机容量为

1 500 kW风机33台,风机轮毂高度65 m,风轮直径82.7 m。本风电场空气密度为 1.169 kg/m^3 ,厂家提供的此密度下风机功率曲线和推力系数曲线见图4。

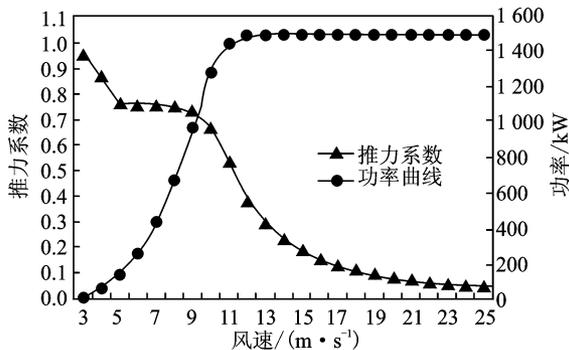


图4 风机功率和推力系数曲线图

风电场于2010年9月并网发电,现收集有2010年9月~2011年2月半年(181天)逐日的每台风机发电量。为了验证计算方法并对风电场进行后评价,需要收集与发电量统计同期的测风数据。首先考虑独立测风塔的测风数据,因为测风塔受干扰小,数据可靠。风电场立有一座测风塔,位置见图3,塔高70 m,分4层测风,记录有2005年5月~2007年5月逐10 min 风速、风向资料,但是没有同期测风数据。所以测风塔数据仅作参考,这里提取2006年9月~2007年2月测风数据与风机测风数据比照。其次考虑风机机舱上的测风仪,此测风仪由于受机舱和风轮干扰,测风数据一般需要修正才能使用。本文在无法修正测风数据情况下,尽量选择受尾流影响小的机舱测风仪,如处于风电场最外围的1,16,17和33号风机。机舱测风仪是用来控制风机的,所以风机一开始发电就记录有测风数据,这样本文可以采用上述4台风机2010年9月~2011年2月测风数据来进行验证计算。测风塔和1号风机65 m高度风向玫瑰图和风速频率威布尔拟合曲线见图5,可以看出两者风向有很好的相关性。

3 计算结果与分析

3.1 风资源分布

风电场设计需要根据风资源分布图进行微观选址,将风机尽量布置在风能富集点。风资源分布主要受地形和粗糙度影响,只需调用流体模型进行计算,图6为采用17号风机测风数据计算的结果。图上标示了已建33台风机位置,显示风机基本布置在风能较好点。另外从整体看,风资源由海中央向内陆衰减,风电场风资源则是西面优于东面,实测发电量也证明了这一点。

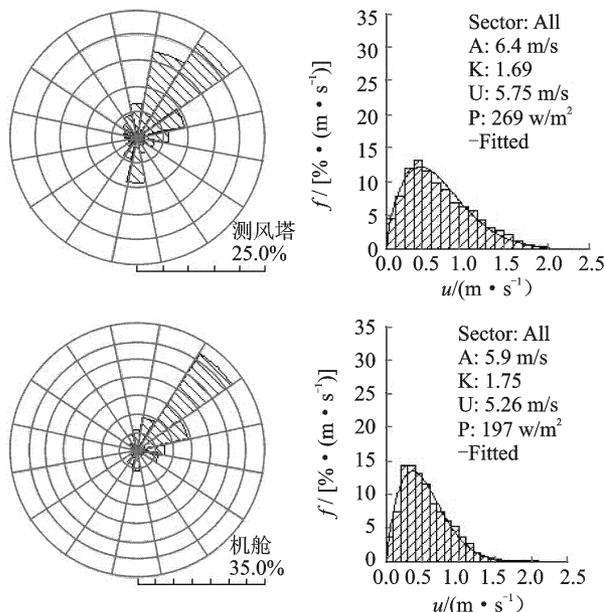


图5 风向玫瑰和威布尔拟合曲线图

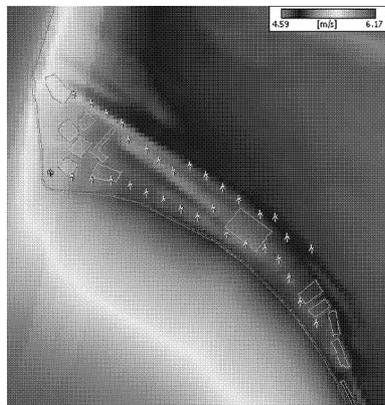


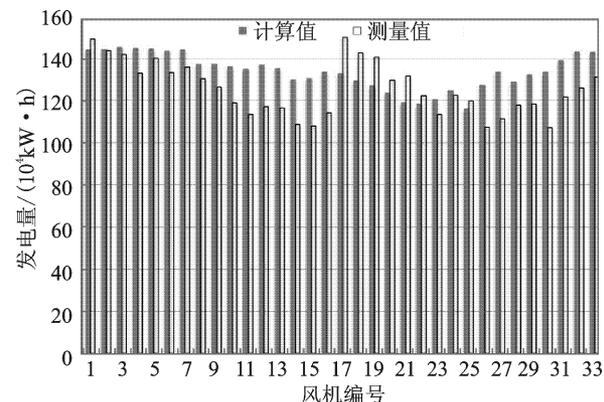
图6 风资源分布图

3.2 发电量

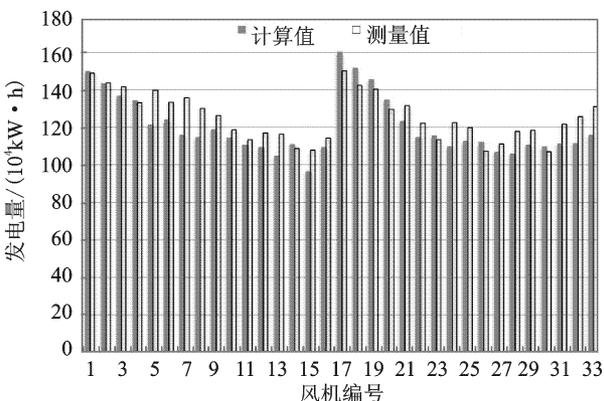
由于是新建风电场,风机停机检修次数不多,又在统计周期内气候稳定,没有因气候原因停机,使得全风电场风机可利用率达到98%以上。这里在预测计算风电场发电量时,并没有考虑风机停机检修日的损失,所以实际的发电量要合理地补上这些电量才能与计算结果比较。补充某日某台风机发电量的方法是取当日左右两台风机发电量的平均值,由于补充数据很少,所以可以认为最后得到的半年发电量统计值符合实际情况。

分别输入1,16,17和33号风机的测风数据,计算得到风电场2010年9月~2011年2月每台风机半年的发电量。不同测风数据下,每台风机发电量预测值和实测值比较见图7。图上显示采用16和17号风机测风数据得到的预测值与实测值吻合较好;而采用1和33号风机测风数据则误差较大,但其中

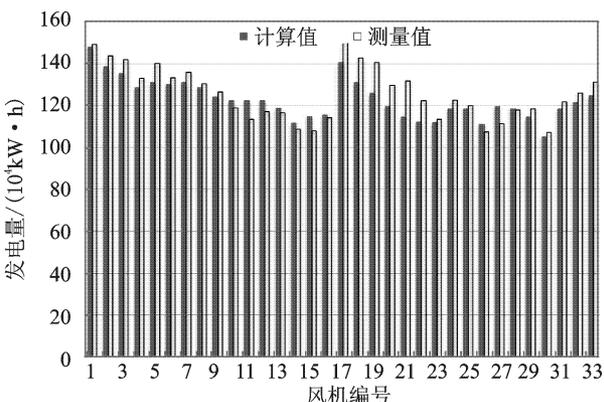
33号只是整体偏大, 变化趋势还是和实测值高度一致。



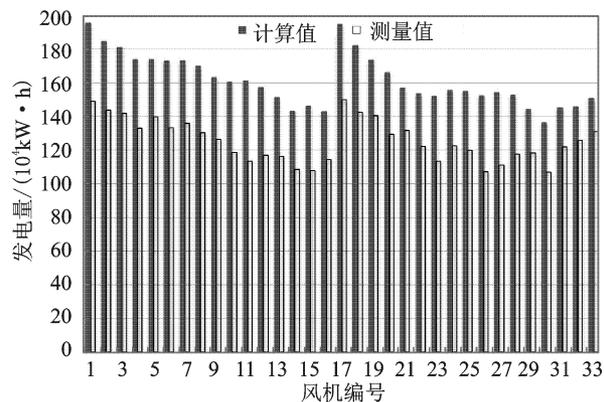
(a) 采用1号风机测风数据



(b) 采用16号风机测风数据



(c) 采用17号风机测风数据



(d) 采用33号风机测风数据

图7 风机发电量预测值与实测值比较图

采用33号风机测风数据算出的结果整体偏大可能与测风仪本身精度有关。33号风机测出的平均风速大于其他风机较多, 这可能由该风速仪测量值偏大造成, 显然偏大的风速数据计算出的发电量也会偏大。而采用1号风机算出的单台风机发电量与实测值吻合度较差, 但风电场总发电量误差还在工程设计可以接受的范围之内。4台风机自己预测自己时, 1和16号最准确, 17号有6.7%误差, 33号有14.5%误差且是偏大。

另外, 本风电场风机实际产量很不均衡, 最大与最小值相差近30%, 而且由图7可见, 其大小变化有规律可循, 即除了第2排末尾3台产量递增外大致按由西向东递减。第2排末尾3台产量递增是由其受第1排风机尾流影响逐渐减弱造成的, 而风机产量总体变化趋势则与大地形有关。从大地形图上看, 风电场西面延伸入大海, 而海边风资源特点是越往大海深处风资源越好, 所以在机组间距相近情况下, 西面机组产量较东面高。风电场设计时应尽量使风机产量均衡, 对于像本风电场这样的平坦地形可以通过调整风机间距实现。本文经过多次计算发现, 没有调整的原因之一可能是原设计者在设计本风电场时采用了范围较小的地形图, 没有体现出风电场的半岛效应。计算结果也印证了这一点, 图8所示左边是大地形图, 右边是较小地形图; 图9是采用同一个测风数据和不同地形图计算出的结果。为了清晰地表示出发电量变化趋势, 图9只列出第1排风机发电量, 可见采用小地形图预测的各风机



图8 范围不同的地形示意图

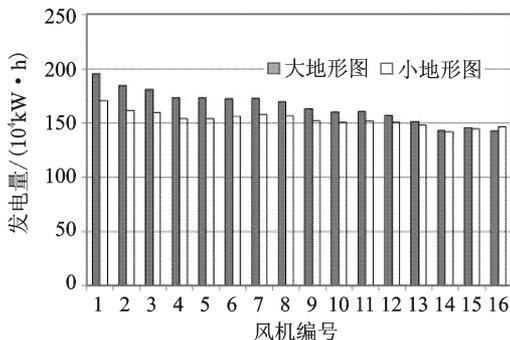


图9 第1排风机发电量对比图

发电量差别较小,而采用大地形图则差别明显且变化趋势与实际发电量一致。这里测风数据采用的是33号风机,采用其他测风数据得出的结果也相近。

4 结 论

本文根据一个已建风电场提供的测风数据、地形图、风机特性以及实际发电量等,验证了线性流体力学模型可以用来预测相对平坦地形风电场的发电量。算例主要选用了风电场4台风机机舱上的测风数据进行发电量预测计算,计算结果不同程度地与实测值相吻合;其中选用16和17号风机测风数据时,预测的风电场总发电量误差仅为4%和2%,单台最大误差也在15%以内;选用33号风机的预测值整体偏大,但和实测值保持一定的线性关系;而选用1号风机预测的总发电量误差也仅为6%。对于多排布机的风电场,尾流影响不容忽视,算例也同时证明了修正的Park模型简单、高效。本文的计算分析还表明,地形图作为输入条件,其范围大小会影响计算结果的准确性,风电场设计时应尽可能采用较大的地形图。一般风电场设计要求地形图范围为边界距离最近风机约5 km,而本文算例得到的经验要求距离10 km以上。

参考文献:

[1] Palma J M L M, Castro F A, Ribeiro L F, 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.

[2] Jensen N O. A note on wind generator interaction [R]. Risø-M-2411. Denmark: Risø National Laboratory, 1983.

[3] Ainslie J F. Development of an eddy viscosity model for wind turbine wakes [C] // Proceeding of 7th EWEA Wind Energy Conference. Oxford: EWEA, 1985:61-66.

[4] Antoniou I, Pedersen T F. Nacelle anemometry on a 1 MW wind turbine: comparing the power performance results by use of the nacelle or mast anemometer [R]. Risø-R-941 (en). Denmark: Risø National Laboratory, 1983.

[5] Migoya E, Crespo A, Garcia J, et al. Comparative study of the behavior of wind-turbines in a wind farm[J]. *ScienceDirect, Energy*, 2007,32(10):1871-1885.

[6] Kaimal J C. Horizontal velocity spectra in an unstable surface layer[J]. *J Atmos Sci*, 1977,35(1):18-24.

[7] Jackson P S, Hunt J C R. Turbulent wind flow over a low hill[J]. *Q J R Meteorol Soc* 1975, 101(430): 925-955.