

近海风电场风能参数模型及其应用研究

潘航平¹, 许 昌¹, 薛飞飞¹, 胡 义^{1,2}, 雷 娇¹, 郝辰妍¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 中国电建集团 西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘 要: 针对近海风电场风资源评估的众多影响因素,利用风资源评估软件 WAsP,结合某近海风电场工程实际并根据实测风数据,采用单变量分析方法对海面粗糙度模型、尾流耗散系数模型、逆温层模型、热通量模型等进行理论意义、取值原则和敏感性研究,旨在提升软件预测精度,提高风资源评估的准确性。结果表明:合理的风能参数模型和修正后的参数值可减小建模误差,提高风资源评估的精度,可为工程实际提供参考。

关键词: 近海风电场; 粗糙度; 逆温层; 热通量; 尾流耗散系数

中图分类号: TK81

文献标识码: A

0 引 言

海上风电场不占用土地资源^[1],比陆上风电场具有更丰富的风能资源,更具规模化开发^[2],因此成为近年来的研究热点。WAsP 是丹麦科技大学 Risø 国家实验室开发的一款风资源评估软件,它可根据测风数据和地形图生成风图谱,并估算风电机组和整个风电场的发电量。因其具有理论体系成熟、计算速度较快、评估较准确等优点被广泛应用于风电项目中^[3]。在评估海上风电场风资源的过程时,因缺少对关键参数的理论意义、取值原则、敏感性的研究,在实际工程中常采用软件推荐的参数值,导致风资源评估的预测值与实际值之间存在一定误差。所以需针对具体参数的理论意义进行研究,提出取值原则和修正方法,提高风资源评估的准确性。

Charnock^[4]针对海面粗糙度提出了 Charnock 模型,模型中参数 z_{ch} 取常数适用于远海;Johnson 等^[5]引入波龄来修正近海情况下的 Charnock 模型。在尾流耗散系数研究方面,Frandsen^[6]认为它只与风力机轮毂高度和机位处的粗糙度相关;Peña 等^[7]认为还需要考虑热稳定性的影响。在逆温的研究方面,Csanady^[8]引入无量纲的浮力参数 Bu 来判断逆温的形成,并对逆温层离地高度进行研究,但该模型适

用于离岸 30 km 以外的远海;Allulli 等^[9]对近海海面形成逆温的条件进行研究,引入无量纲的总体稳定性参数 S 来判断逆温的形成;Lange 等^[10]认为总体稳定性参数 S 可理解为浮力参数 Bu 在有限离岸距离下的扩展;基于此,Allaerts 等^[11]提出了近海海面的逆温层模型。

本文基于 Johnson 等^[5]修正的 Charnock 模型,提出将近海海面粗糙度转化为与海水深度相关的函数,进一步修正 Charnock 模型;引入莫宁-奥布霍夫长度(莫-奥长度)和梯度理查德森数 Ri ,应用于文献[7,9,11]的模型中,间接求解尾流耗散系数、逆温参数;并利用莫-奥长度与热通量的关系反演求解热通量参数。计算结果表明,进一步修正的 Charnock 模型可较准确地反映实际近海海面粗糙度状况;引入莫-奥长度和梯度理查德森数间接求解尾流耗散系数、逆温参数、热通量参数,可解决直接测量这些参数的困难,且能更准确地评估近海风电场风资源实际情况。

1 风电场简介

某近海风电场位于江苏东部沿海,其海岸线走向大致为西北至东南,与风电机组排布方向垂直,测风塔位于陆地上。在风场内布置有 3 种机

收稿日期: 2017-04-25

基金项目: 中丹国际科技合作专项(2014DFG62530); 南通市科技项目(BK2014028)

通信作者: 许 昌(1972—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事风电场空气动力学和微观选址方面的研究。zhufengxu@163.com

组,其中 WTG1 有 17 台,WTG2 有 20 台,WTG3 有 21 台。具体的海陆状况和风力机布置状况如图 1 所示。

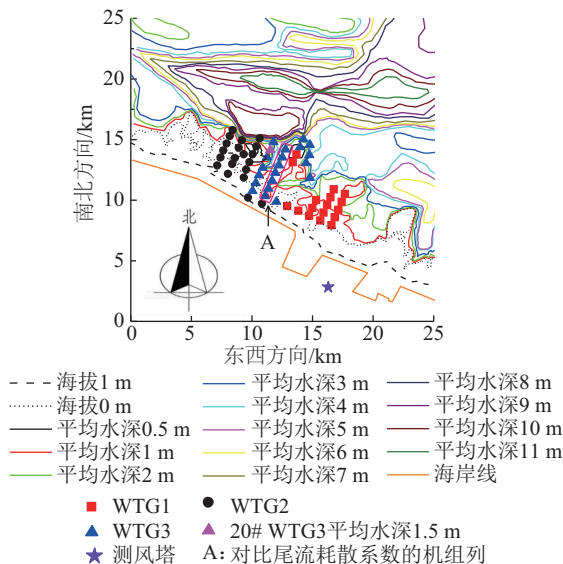


图1 某近海风电场示意图
Fig. 1 Diagram of offshore wind farm

采集 2014 年 11 月 01 日~2015 年 10 月 31 日的实测数据,数据间隔为 10 min,包括测风塔不同高度的风速、风向、气温及 WTG3 的机舱风速、风向、气温、输出功率。在 WTG3 中选择水深最接近机位平均水深的 20#机组的实测数据,作为海上 80 m 实测环境数据,用于本文相关运算。具体采集的数据如表 1 所示。

表1 数据采集高度表				
Table 1 Heights of the collected data				
参数	风速	风向	气温	输出功率
测风塔	80 m/10 m	80 m/10 m	10 m	无
WTG3	80 m	80 m	80 m	有

2 海面粗糙度模型

与陆地粗糙度相比,海面粗糙度较低。为计算简便,WAsP 软件推荐海面粗糙度取定值 $z_0=0.0002\text{ m}^{[12]}$ 。实际近海海面粗糙度不同于可看作定值的陆地粗糙度,它与风速、上游离岸距离、水深等相关^[10]。

Charnock^[4]模型指出:
$$z_0 = z_{ch} \cdot u_*^2 / g \tag{1}$$
式中, z_0 ——海面粗糙度, m; z_{ch} ——Charnock 参

数,取值为 $0.0185^{[13]}$; u_* ——摩擦速度, m/s; g ——重力加速度, $g=9.8\text{ m/s}^2$ 。

Johnson^[5]指出,Charnock 模型在远海恒定的 z_{ch} 很适用;而在近海时 z_{ch} 不能再视作定值,它跟波龄(波速与摩擦速度的比值)存在以下经验关系:

$$z_{ch} = A \left(c_p / u_* \right)^B \tag{2}$$

式中, A ——经验常数,取值为 1.89; c_p ——波速, m/s, $c_p = L_w / T$, 其中 L_w 为波长, m; T 为波周期, s; c_p / u_* ——波龄; B ——经验常数,取值为 -1.59。

根据近海水文相关知识有:

$$c_p = \frac{gT}{2\pi} \cdot \tanh \left(\frac{2\pi h}{L_w} \right) \tag{3}$$

式中, h ——水深, m。

浅水条件下, $\tanh(2\pi h / L_w)$ 可近似为 $2\pi h / L_w$, 而该风场布置的风力机全位于近海,机位处最大年平均水深不超过 5 m,符合浅水条件,由此可得:

$$c_p = \sqrt{gh} \tag{4}$$

由此,结合式(1)、式(2)、式(4),可将近海海面粗糙度 z_0 近似转化为与水深 h 相关的函数:

$$z_0 = f(h) = A \left(\frac{\sqrt{gh}}{u_*} \right)^B \frac{u_*^2}{g} \tag{5}$$

由此,根据海面平均等水深线,利用 WAsP Map Editor,在“Edit line properties”中输入对应的粗糙度值可将其相应转化成粗糙度变化线。具体取值如表 2 所示。

表2 平均水深对应的粗糙度值			
Table 2 Roughness values correspond to average depths			
h/m	z_0/mm	h/m	z_0/mm
0.5	1.00	1.0	0.58
2.0	0.33	3.0	0.24
4.0	0.19	5.0	0.16
6.0	0.14	7.0	0.12
8.0	0.11	9.0	0.10
10.0	0.09	11.0	0.09

用相同测风数据,输入不同海面粗糙度值进行对比。由于风力机测得的风速是机舱风速,而软件模拟得到的是入流风速,因此以风速作对比无参考价值,故将 2 种模型计算得到的平均输出功率与实际值进行对比(同理,下文对比的也都是平均输出功率),结果如图 2 所示。由图 2 可知,修正海面粗

糙度后,风电场总输出功率的相对误差由 12.89% 降至 9.19%,下降了 3.70%;各机组输出功率的平均相对误差将由 12.56% 降至 8.97%,下降了 3.59%;修正海面粗糙度模型后的曲线比推荐模型曲线更接近实际曲线。

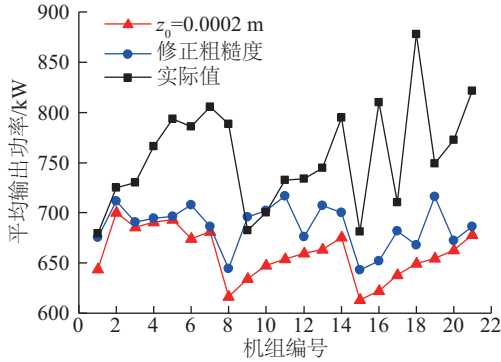


图2 不同海面粗糙度模型的计算结果与实际值对比

Fig. 2 Comparison of calculated results from different sea surface roughness models with actual values

3 尾流耗散系数模型

Jensen 尾流模型通常被用于风电场发电量计算。该模型^[14]认为,下游机组受上游机组尾流影响而折减的入流风速与尾流耗散系数 k 相关,其他条件相同的情况下, k 值越小,入流风速折减越大,因此机组损失的功率也越大。WAsP 软件推荐在陆上使用 $k=0.075$,在海上使用 $k=0.05$ 。但常数值的 k 显然不适用于复杂的海面状况。

Frandsen^[6]提出用经验公式(6)修正 k 值:

$$k \approx 0.5 / \ln(H_{\text{hub}}/z_0) \quad (6)$$

式中, H_{hub} ——风力机轮毂高度, m。

式(6)只考虑了粗糙度对 k 值的影响,并未考虑热稳定性。Peña 等^[7]提出用经验公式(7)修正 k 值:

$$k \approx \frac{\kappa}{\ln(H_{\text{hub}}/z_0) - \psi(H_{\text{hub}}/L)} \quad (7)$$

式中, κ ——冯·卡门常数, $\kappa=0.4$; ψ ——热稳定性修正函数; L ——莫-奥长度, m。

莫-奥长度的定义为:

$$L = -\frac{T_0}{\kappa \cdot g} \cdot \frac{\rho_0 \cdot c_p \cdot u_s^3}{H_0} \quad (8)$$

式中, T_0 ——表面绝对温度, K; ρ_0 ——当地空气密度, kg/m^3 ; c_p ——空气的定压比热容, $c_p=1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; H_0 ——表面热通量, W/m^2 。

在缺少热通量数据的情况下, L 可通过梯度理查德森数 Ri 与 L 的关系间接求取^[15]:

$$\begin{cases} L = Z/Ri, & Ri < 0 \\ L = Z|1 - 0.19Ri|/Ri, & Ri > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, Z ——上、下气层的几何平均高度, m, $Z=(z_1 \cdot z_2)^{1/2}$, 其中 z_1 、 z_2 分别为上、下气层的高度。

近地层中 Ri 的计算公式为^[15]:

$$Ri = \frac{g \times Z}{\bar{T}} \cdot \frac{T_2 - T_1}{(u_2 - u_1)^2} \cdot \ln \frac{z_2}{z_1} \quad (10)$$

式中, T_2 ——上层气层的绝对温度, K; T_1 ——下层气层的绝对温度, K; \bar{T} ——上、下气层的平均温度, K; u_2 ——上层气层的风速, m/s; u_1 ——下层气层的风速, m/s。

假设在整块区域中,底层风速的差异并不大,因此认为陆上测风塔 10 m 处的风速可代表整块区域 10 m 处的风速。对于式(7)中的 $\psi(H_{\text{hub}}/L)$, Jensen^[16]给出的经验公式为:

$$\psi(H_{\text{hub}}/L) = \begin{cases} (1 - 16 \cdot H_{\text{hub}}/L)^{1/4} - 1, & L < 0 \\ -4.7 \cdot H_{\text{hub}}/L, & L > 0 \end{cases} \quad (11)$$

由此,根据式(7)、式(9)~式(11)修正 k 值。由于 k 值主要影响尾流损失,所以针对图 1 中列 A 这 7 台 WTG3 机组,筛选与排布方向大致平行的风向扇区($191.25^\circ \sim 213.75^\circ$)数据,计算得该风向扇区的 k 值为 0.03345。用同样的数据,在 WTG3 风力机群中进入“Settings”,在“Wake effects modelling”中分别设置该风向扇区的 $k=0.03345$, $k=0.05$,进行对比,结果如图 3 所示。由图 3 可知,当修正 k 值后,该列机组总输出功率的相对误差将由 11.02% 降至 9.37%,

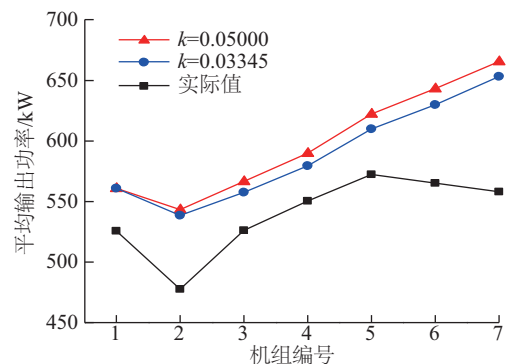


图3 不同尾流耗散系数模型的计算结果与实际值对比

Fig. 3 Comparison of calculated results from different wake-decay coefficient models with actual values

下降了 1.65%;各机组输出功率的平均相对误差由 11.01%降至 9.39%,下降了 1.62%;修正尾流耗散系数模型后的曲线相比于推荐模型曲线,更接近实际曲线。

4 逆温层模型

一般情况下近地层中气温随高度的升高而降低,而气温随高度的升高而升高的现象称为逆温^[17]。当陆地较暖的空气平流至较冷的海面时,海面上就可能形成逆温层^[18]。逆温层对区域风速的影响主要取决于逆温层离地高度和逆温强度,高度越低,强度越大,影响越大。当高度超过 1000 m 时,影响可以忽略不计^[10]。所以 WAsP 软件推荐将逆温层离地高度设为 1000 m,强度设为零。而在近海海面上形成的逆温层离地高度通常约为 200 m^[19],因此在评估近海风资源时逆温是一个不可忽略的因素。形成稳定的逆温层后,其标志为陆地上较低处的位温可当作逆温层最上方的位温;海面上一定高度的位温可当作逆温层最下方的位温^[18]。逆温层最上方和最下方的位温差 $\Delta\theta$ 即为逆温层的强度。在平衡条件下,Csanady^[8]指出可用无量纲的浮力参数 Bu 来判断逆温层的形成:

$$Bu = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{f \cdot V_g} \quad (12)$$

式中, ρ ——地转风层的空气密度, kg/m^3 ; $\Delta\rho$ ——地转风层和海面的空气密度之差(海面的空气密度为 $\rho + \Delta\rho$), kg/m^3 ; f ——当地科里奥利参数, $f = 2\omega \cdot \sin\varphi$, 其中 ω 为地球自转角速度, $\omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$; φ 为当地纬度($^\circ$); V_g ——地转风速, m/s 。

地转风速的计算式为^[20]:

$$V_g = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{u_*}{f \cdot z_0} \right) - a \right]^2 + b^2 \quad (13)$$

式中, a 、 b ——经验常数,取值为 $a = 1.8$, $b = 4.5$ 。

研究表明^[8],当 $Bu > 30$ 时,会形成逆温层,可通过经验公式(14)来求解逆温层离地高度 h_{inv} :

$$h_{\text{inv}} = \frac{C}{g} \cdot \frac{\rho}{\Delta\rho} \cdot u_*^2 \quad (14)$$

式中, C ——经验常数, $C = 500$ 。

式(12)、式(14)只适用于离岸距离大于 30 km 的远海,对于本算例这样的近海,Allulli 等^[9]指出可用无量纲的总体稳定性参数 S 来判断逆温层的

形成:

$$S = \sqrt{\frac{X}{V_g}} \cdot f \cdot \frac{\theta}{\Delta\theta} \quad (15)$$

式中, X ——上游离岸距离, m ; θ ——参考位温, $\theta = 288.15 \text{ K}$; $\Delta\theta$ ——逆温层最上方和最下方的位温差,即逆温层的强度, K 。

研究表明^[9],当 $S > 75$ 时,会形成逆温层,可通过经验公式(16)来求解逆温层离地高度 h_{inv} ^[11]:

$$h_{\text{inv}} = \frac{C}{g} \cdot \frac{\theta}{\Delta\theta} \cdot u_*^2 \quad (16)$$

计算表明,未饱和湿空气位温与气温的差别不大,故用气温代替式(15)、式(16)中的位温,可得到式(17):

$$\begin{cases} S = \sqrt{\frac{X}{V_g}} \cdot f \cdot \frac{T}{\Delta T} \\ h_{\text{inv}} = \frac{C}{g} \cdot \frac{T}{\Delta T} \cdot u_*^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中, T ——参考气温, $T = 288.15 \text{ K}$; ΔT ——逆温层最上方和最下方的气温差,即逆温层的强度, K 。

摩擦速度需通过一般的风廓线表达式求解^[20]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \psi \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (18)$$

式中, z ——测风高度, m 。

为确保发生逆温,必须针对每台机组,筛选出各自受逆温影响的时间段数据,即筛选出: $\Delta T > 0$ (即陆上 10 m 气温大于海上 80 m 气温),且上游离岸距离 $< 30000 \text{ m}$,且 $S > 75$ 的时间段。各机组的平均逆温层离地高度和逆温强度如表 3 所示。

表 3 各机组的平均逆温层离地高度和逆温强度

Table 3 Average inversion height & strength of each turbine

机组	h_{inv}/m	$\Delta T/\text{K}$	机组	h_{inv}/m	$\Delta T/\text{K}$
1#	163.03	0.77	2#	225.60	0.87
3#	190.57	0.93	4#	200.67	0.90
5#	194.94	0.94	6#	166.64	0.95
7#	212.60	0.93	8#	170.78	0.75
9#	191.60	0.79	10#	189.39	0.84
11#	194.58	0.89	12#	156.40	0.91
13#	200.42	0.90	14#	195.09	0.94
15#	181.96	0.74	16#	163.48	0.80
17#	233.29	0.81	18#	195.29	0.86
19#	202.39	0.88	20#	119.83	0.99
21#	212.53	0.90	—	—	—

在“Edit project configuration- WAsP wind modelling”中输入修正后的逆温参数与推荐值对比,结果如图 4 所示。由图 4 可知,修正逆温参数后,各机组输出功率的平均相对误差由 11.91% 降至 9.74%,下降了 2.17%;修正逆温层模型后的曲线相比于推荐模型曲线,更接近实际曲线。由于每台机组筛选得到的数据不同,因此图 4 中曲线的走势无实际意义。至于实际值为何远低于两次模拟值,主要是因为发生在逆温的时间段内,计算得到的海面热通量参数远小于软件推荐值。因基于单变量分析原则,故两次模拟无修正热通量参数。

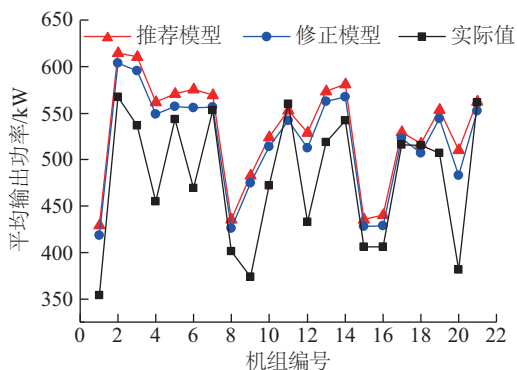


图 4 不同逆温层模型的计算结果与实际值对比

Fig. 4 Comparison of calculated results from different inversion models with actual values

5 热通量模型

在已计算得到莫-奥长度 L 和摩擦速度 u_* 的情况下,热通量 H_0 可通过式(8)反演求得:

$$H_0 = -\frac{T_0}{\kappa \cdot g} \cdot \frac{\rho_0 \cdot c_p \cdot u_*^3}{L} \quad (19)$$

WAsP 软件推荐的海面热通量平均值为 15 W/m^2 , 均方根值为 30 W/m^2 。计算发现,在发生逆温的时间段内,海面热通量的平均值约为 6 W/m^2 , 均方根值约为 15 W/m^2 , 远小于推荐值。故热通量模型的对比应排除逆温的影响,针对各机组筛选出不发生逆温的时间段。

各机组的海面热通量平均值和均方根值如表 4 所示。在“Edit project configuration- WAsP wind modelling”中输入修正后的热通量参数并与推荐值对比,结果如图 5 所示。

表 4 各机组的海面热通量平均值和均方根值

Table 4 Average values & root mean square values of sea surface heat flux of each turbine

机组	平均值/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	均方根值/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	机组	平均值/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	均方根值/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
1#	24.09	42.80	2#	24.11	42.95
3#	23.99	42.66	4#	23.60	42.31
5#	23.66	42.50	6#	24.12	42.84
7#	24.20	43.13	8#	23.46	42.13
9#	24.04	42.78	10#	24.23	42.98
11#	24.01	42.74	12#	24.43	43.13
13#	24.22	43.08	14#	24.20	43.11
15#	23.65	42.25	16#	23.63	42.31
17#	23.87	42.65	18#	23.88	42.65
19#	23.72	42.55	20#	24.34	42.94
21#	24.07	42.99	—	—	—

由图 5 可知,修正热通量参数后各机组输出功率的平均相对误差由 8.82% 降至 5.59%,下降了 3.23%;修正热通量模型后的曲线相比于推荐模型曲线更接近实际曲线。同图 4、图 5 中曲线的走势无实际意义。

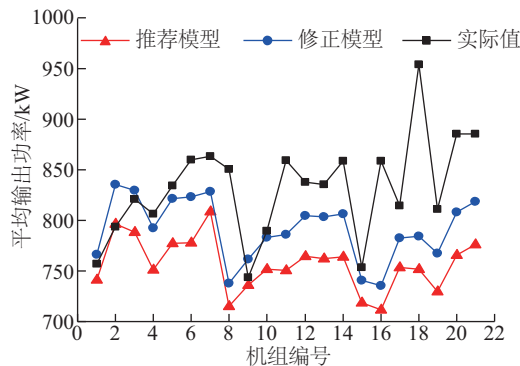


图 5 不同热通量模型的计算结果与实际值对比

Fig. 5 Comparison of the calculated results from different heat flux models with the actual values

6 综合分析

同时采用 2~5 节的方法修正风能参数模型,用同样的测风数据,与全部取推荐模型进行对比。由于逆温参数只在发生逆温的情况下有意义,因此筛选各台机组发生逆温的时间段,输入按前文所述方

法修正后的海面粗糙度、尾流耗散系数、逆温参数、热通量参数,与全部取推荐模型的情况以及只修正逆温参数的情况(图4中的修正模型)进行对比。修正的各机组逆温参数和热通量参数取值如表5所示。

表5 各机组的逆温参数、热通量参数取值				
Table 5 Inversion & heat flux parameters of each turbine				
机组	h_m/m	$\Delta T/K$	H_0 平均值/ $W \cdot m^{-2}$	H_0 均方根值/ $W \cdot m^{-2}$
1#	163.03	0.77	4.73	16.66
2#	225.60	0.87	8.17	21.01
3#	190.57	0.93	6.51	18.74
4#	200.67	0.90	7.35	19.95
5#	194.94	0.94	7.38	20.87
6#	166.64	0.95	5.52	17.12
7#	212.60	0.93	7.92	20.63
8#	170.78	0.75	4.23	15.03
9#	191.60	0.79	5.92	18.27
10#	189.39	0.84	6.46	19.60
11#	194.58	0.89	6.49	19.05
12#	156.40	0.91	4.76	15.91
13#	200.42	0.90	7.71	21.22
14#	195.09	0.94	7.09	20.27
15#	181.96	0.74	5.05	17.18
16#	163.48	0.80	4.58	16.13
17#	233.29	0.81	9.08	24.14
18#	195.29	0.86	6.89	20.01
19#	202.39	0.88	7.87	21.29
20#	119.83	0.99	2.64	10.99
21#	212.53	0.90	7.74	21.17

各扇区尾流耗散系数取值如表6所示,对比的结果如图6所示。由图6可知,修正各风能参数后,各机组输出功率的平均相对误差由11.91%降至8.41%,下降了3.50%;将图4与图6对比可知:图4修正模型的误差仍有9.74%,而综合修正模型的误差仅为8.41%,比图4修正模型低1.33%,综合的修正模型曲线比图4的修正模型曲线更接近实际曲线,说明按前文所述方法综合修正风能参数模型是合理的。

表6 各机组的尾流耗散系数取值								
Table 6 Wake-decay coefficients of each turbine								
机组	扇区/(°)							
	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5
1#	4.49	4.25	4.16	4.18	4.24	4.09	4.16	4.31
2#	3.53	3.41	3.42	3.39	3.44	3.32	3.39	3.48
3#	3.64	3.51	3.50	3.45	3.52	3.43	3.45	3.58
4#	3.61	3.47	3.48	3.43	3.48	3.38	3.49	3.57
5#	3.64	3.55	3.60	3.54	3.53	3.46	3.52	3.59
6#	4.20	4.05	4.01	3.98	4.02	3.96	3.96	4.12
7#	3.57	3.45	3.46	3.43	3.44	3.35	3.40	3.54
8#	4.14	3.92	3.95	3.86	3.94	3.82	3.82	3.97
9#	3.93	3.72	3.69	3.73	3.78	3.66	3.66	3.78
10#	4.23	4.05	3.98	4.04	4.09	3.96	4.01	4.10
11#	3.97	3.79	3.74	3.72	3.73	3.68	3.70	3.87
12#	3.72	3.56	3.51	3.50	3.51	3.49	3.50	3.60
13#	3.75	3.62	3.58	3.60	3.61	3.50	3.58	3.66
14#	3.85	3.70	3.68	3.67	3.74	3.59	3.66	3.73
15#	4.15	3.94	3.86	3.88	3.91	3.83	3.86	4.03
16#	4.33	4.12	4.09	4.03	4.14	3.98	4.03	4.14
17#	4.01	3.82	3.78	3.84	3.81	3.73	3.79	3.86
18#	3.73	3.57	3.56	3.52	3.57	3.49	3.51	3.58
19#	4.36	4.18	4.13	4.14	4.21	4.06	4.08	4.24
20#	3.77	3.59	3.54	3.53	3.56	3.51	3.56	3.63
21#	3.63	3.52	3.51	3.50	3.53	3.43	3.47	3.56

注:表中扇区数值表示该扇区的中间风向,实际扇区范围为该数值 $\pm 11.25^\circ$;表中的尾流耗散系数都应 $\times 10^{-2}$ 。

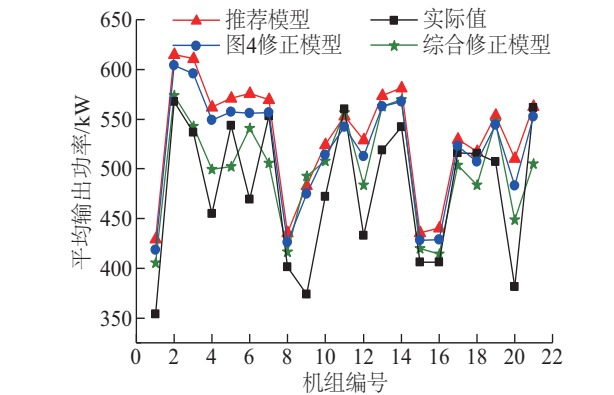


图6 不同风能参数模型的计算结果与实际值对比

Fig. 6 Comparison of calculated results from different wind energy parameter models with actual values

7 结 论

针对近海风电场风资源评估精细化的目标,提出将近海海面粗糙度转化为与海水深度相关的函数,进一步修正 Charnock 模型;引入莫-奥长度和梯度理查德森数求解尾流耗散系数、逆温参数;并利用莫-奥长度与热通量的关系反演求解热通量参数。通过本文提出的风能参数模型选取及参数修正方法评估近海风电场风资源,对比计算可得到以下结论:

1) 将近海海面粗糙度转化为与海水深度相关的函数,可较准确地反映实际海面粗糙度状况。

2) 缺少直接数据时,可引入莫-奥长度和梯度理查德森数,间接求解尾流耗散系数、逆温参数和热通量参数,可比软件推荐值更准确地评估实际风资源。

3) 评估近海风电场风资源时,需至少在海、陆同时布置一座测风塔,除测量不同高度的风速、风向外,还需测量不同高度的气温,利用这些数据可得到更准确的风资源评估结果。

4) 逆温会明显降低近海风电场的输出功率。相比于按全部数据建模,按一年中是否发生逆温分别建模,可得到比较符合实际的年发电量。

[参考文献]

- [1] 练继建, 燕 翔, 王海军. 新型重力式海上风力机基础结构动力特性分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1624—1630.
- [1] Lian Jijian, Yan Xiang, Wang Haijun. Dynamic characteristic analysis of new type gravity infrastructure for offshore wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1624—1630.
- [2] 彭秀芳, 王秀杰, 辜晋德. 海上风电场风能计算中关于海面粗糙度问题的探讨[J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 226—229.
- [2] Peng Xiufang, Wang Xiujie, Gu Jinde. Discuss on the sea surface roughness of the wind energy assessment in the offshore wind farm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(2): 226—229.
- [3] Giebel G, Gryning S E. Shear and stability in high met masts, and how WAsP treats it[A]. Special Topic Conference on the Science of Making Torque from Wind [C], Delft, Netherland, 2004.
- [4] Charnock H. Wind stress on a water surface[J].

- Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1955, 81(350): 639—640.
- [5] Johnson H K, Højstrup J, Vested H J, et al. On the dependence of sea surface roughness on wind waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 1998, 28(9): 1702—1716.
- [6] Frandsen S. On the wind speed reduction in the center of large clusters of wind turbines[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1992, 39(sup1-3): 251—265.
- [7] Peña A, Rathmann O. Atmospheric stability-dependent infinite wind-farm models and the wake-decay coefficient [J]. Wind Energy, 2014, 17(8): 1269—1285.
- [8] Csanady G T. Equilibrium theory of the planetary boundary layer with an inversion lid[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1974, 6(1): 63—79.
- [9] Allulli S, Massucci M A, Tomassini N. Evolution of stable internal boundary layers over a cold sea[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1997, 102(C1): 1091—1099.
- [10] Lange B, Larsen S, Højstrup J, et al. Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2004, 92(11): 959—988.
- [11] Allaerts D, Meyers J. Large eddy simulation of a large wind- turbine array in a conventionally neutral atmospheric boundary layer[J]. Physics of Fluids, 2015, 27(6): 39—53.
- [12] Troen I, Mortensen N G, Petersen E L, et al. WAsP—Wind atlas analysis and application program, user's guide (Release 1.0) [M]. Roskilde: Risø National Laboratory, 1987.
- [13] Wu Jin. Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions—A revisit[J]. Journal of Physical Oceanography, 1980, 10(5): 727—740.
- [14] 许 昌, 钟淋娟. 风电场规划与设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014, 128—136.
- [14] Xu Chang, Zhong Linjuan. Wind farm planning and design [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2014, 128—136.
- [15] 邓 奕, 范绍佳. 沿海大气稳定度分类莫宁-奥布霍夫长度 L 分类标准研究[A]. 中国气象学会 2003 年年会“大气气溶胶及其对气候环境的影响”分会[C], 北京, 2003.
- [15] Deng Yi, Fan Shaojia. Research on the classification

- criteria of Monin-Obukhov length and costal atmospheric stability [A]. China Meteorological Society 2003 Annual Meeting "Atmospheric Aerosol and its Impact on the Climate and Environment" Branch [C], Beijing, 2003.
- [16] Jensen N O, Petersen E L, Troen I. Extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy applications [R]. WMO World Climate Programme Report No.WCP-86, 1984.
- [17] 何 强. 环境科学导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [17] He Qiang. Introduction to environmental science [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [18] Lange B, Larsen S, Højstrup J, et al. The Influence of thermal effects on the wind speed profile of the coastal marine boundary layer [J]. Boundary- Layer Meteorology, 2004, 112(3): 587—617.
- [19] Allaerts D, Meyers J. Effect of inversion- layer height and Coriolis forces on developing wind- farm boundary layers [A]. 34th Wind Energy Symposium [C], San Diego, California, 2015.
- [20] Troen I, Petersen E L. European wind atlas [M]. Roskilde: Risø National Laboratory, 1989.

STUDY ON WIND ENERGY PARAMETER MODEL OF OFFSHORE WIND FARM AND ITS APPLICATION

Pan Hangping¹, Xu Chang¹, Xue Feifei¹, Hu Yi^{1,2}, Lei Jiao¹, Hao Chenyan¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. POWERCHINA Xibei Engineering Corporation, Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: In view of the various factors that affect wind resource assessment in offshore wind farm, using univariate analysis combined with an actual offshore wind farm and its measured data, the wind resource assessment software WAsP is used to carry on the research on theoretical significance, valuefetching principle and sensitivity of sea surface roughness model, wake-decay coefficient model, inversion model and heat flux model, which aims at improving the accuracy of software prediction and wind resource assessment. The results show that reasonable wind energy parameter models and modified parameters can reduce the modelling error, and improve the accuracy of wind resource assessment, which could provide reference for actual project.

Keywords: offshore wind farms; surface roughness; inversion layers; heat flux; wake-decay coefficient