

# Influence of Roughness and Wake Attenuation Coefficient on Power Generation of Offshore Wind Farm

Lingfeng Meng<sup>1</sup> Haoming Xu<sup>2</sup>

1. Guodian Electric Power Comprehensive Energy Inner Mongolia Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 1017010, China

2. China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610095, China

## Abstract

Offshore wind farms are ushering in a period of accelerated development, and accurate assessment of power generation is crucial to the economic benefits of the project. The estimated power generation of offshore wind farms is very close to the actual value, but there is still a gap between the estimated power generation of offshore wind farms and the actual value. In order to find a model that can accurately evaluate the power generation of offshore wind farms, this paper studies the commonly used wind farm power generation calculation software WasP to explore the impact of different parameter values on power generation. This study focuses on the roughness and wake attenuation coefficient, two parameters whose values have a significant impact on the power generation, and calculates the impact of the roughness in the range of 0~0.005 and the wake attenuation coefficient in the range of 0.03~0.05 on the power generation, and gives value suggestions according to the actual project. The results show that the power generation decreases with the increase of roughness, and increases with the increase of wake attenuation coefficient. Through the research of this paper, the data basis and theoretical support are provided for the evaluation of power generation of offshore wind farms, which has certain scientific significance and application value.

## Keywords

roughness; wake attenuation coefficient; offshore wind farm; power generation

## 粗糙度与尾流衰减系数对近海风电场发电量影响

孟令峰<sup>1</sup> 徐浩铭<sup>2</sup>

1. 国电电力综合能源内蒙古有限公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017010

2. 中国航空规划设计研究总院有限公司, 中国·四川 成都 610095

## 摘 要

海上风电场正迎来加速发展期, 准确评估发电量对项目的经济收益至关重要。远海风电场的发电量预估值已与实际值十分接近, 但近海风电场发电量预估值与实际值还有一定差距。为了寻找能准确评估近海岸风电场发电量的模型, 论文对常用的风电场发电量计算软件WasP进行研究, 探究不同参数取值对发电量的影响。本研究围绕粗糙度、尾流衰减系数这两个取值对发电量有重大影响的参数展开研究, 测算了粗糙度在0~0.005范围内的粗糙度及0.03~0.05范围内的尾流衰减系数对发电量的影响, 并根据实际项目给出了取值建议。结果表明, 随着粗糙度的增大发电量减小, 而随着尾流衰减系数的增大发电量增大。通过论文的研究, 为近海岸风电场发电量评估提供了数据基础和理论支撑, 具备一定的科学意义和应用价值。

## 关键词

粗糙度; 尾流衰减系数; 近海风电场; 发电量

## 1 引言

中国海岸线长、海上风能资源丰富, 相比于陆上风电项目, 海上风电具有发电利用时数高、不占用陆上土地资源、靠近东部负荷中心、利于就近消纳等优点。“十三五”期间, 中国逐步加大对陆上风电、海上风电等新能源的政策支持力度, 极大地促进了新能源行业的发展, 使得海上风电的相关设备技术和研发不断进步, 风机等主要设备造价和系统投资

逐步减低, 相关上下游配套产业日趋成熟, 海上风电迎来加速发展期。截至目前, 中国在沿海地区已建成了多个海上风电场示范性工程, 并进入商业化运营。

海上风电项目前期设计阶段以及后评估阶段, 都有计算发电量的需求, 以对设计、施工、运行等进行评估考量。远海风电场指离海岸线 10km 以外的风电场, 而离海岸线 10km 以内的风电场则可以视为近海风电场。由于风能资源受海陆环境影响变化明显, 非稳态大气迫使低层气流在海陆交界调和, 至离岸 5~10km 以外的海区才能达到平衡<sup>[1]</sup>。因此, 准确评估 10km 内的近海风电场发电量常是工程设计的难点。

【作者简介】孟令峰(1974-), 男, 中国辽宁桓仁人, 本科, 工程师, 从事风电、太阳能等新能源发电研究。

目前, 中国的风电场发电量计算主要借助于其他国家的相关设计软件, 常用的设计计算软件有 Windsim、WT、WAsP、Windfarm 等多种。上述软件各有特点, 如 Windsim<sup>[2]</sup> 软件更适用于复杂地形计算; WT 软件<sup>[3]</sup> 在 Windsim 软件的基础上解决了大气边界层的问题; 基于线性模型的 WAsP<sup>[4]</sup> 软件更适用于研究地形起伏变化较小的区域; Windfarm<sup>[5]</sup> 软件与 WindPRO<sup>[6]</sup> 软件则以 WAsP 软件为计算引擎, 更适合于平坦地形分析。因此, 根据上述各种不同软件的特点和应用场景, 论文采用对海上风电场具有较好适应性的 WAsP 软件<sup>[7-8]</sup>, 进行近海风电场发电量计算研究。

H.Bergstrm 等学者的研究表明, WAsP 软件在深远海区域误差仅为 ±3%, 但在近岸区域风速误差却可达 10%~20%, 主要是因为在海陆交接处, 地表粗糙度和大气稳定度造成了复杂的风场, 是影响风资源分布的重要因素<sup>[9]</sup>。波罗的海的相关实验表明, 软件简化的处理方式与实际存在一定偏差, 往往需要对计算模型进行优化, 为了更加准确的计算风电场发电量, 就需要根据实际情况对 WAsP 进行参数设置调整, 以此得到更准确的发电量<sup>[10]</sup>。

论文研究了近海处海面粗糙度的计算方法, 通过对中国福建省某地的风电场风资源和发电量情况进行分析, 研究了风资源和发电量的变化规律及内在关系。并围绕粗糙度、尾流衰减系数这两个取值对发电量有重大影响的参数展开研究, 测算了粗糙度在 0~0.005 范围内的粗糙度及 0.03~0.05 范围内的尾流衰减系数对发电量的影响, 并根据实际项目给出了取值建议。通过论文的研究, 为近海岸风电场发电量评估提供了数据基础和理论支撑, 具备一定的科学意义和应用价值。

## 2 计算方法及取值

### 2.1 粗糙度计算及取值

海面粗糙度可用于定量描述海面的粗糙程度, 而近海处海面粗糙度可采用如下方法进行计算, 粗糙度  $z_0$  满足如下关系式:

$$z_0 = \alpha_c u^2 / g \quad (1)$$

式中:  $\alpha_c$  为 Charnock 常数;  $u$  为摩擦风速, m/s;  $g=9.81\text{m/s}^2$ 。

而摩擦风速  $u$  与海面 10m 高处风速  $u_{10}$  满足下式:

$$u_{10}/u = 1/k \ln z/z_0 \quad (2)$$

式中:  $k$  为 Vonkarman 常数, 取值接近 0.35;  $z$  为经验值, 一般取 10。

摩擦风速  $u$  可以通过雷诺应力  $\tau$  测定:

$$\tau = \rho u_1 w = \rho u^2 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $u_1$  和  $w$  分别为海面上气流的水平和垂直速度分量。

雷诺应力同时可以用下式计算:

$$\tau = C_{10} \rho u_{10} \quad (4)$$

式中:  $C_{10}$  为阻尼系数。

$C_{10}$  的定义公式为:

$$C_{10} = [k/\ln(z/z_0)]^2 \quad (5)$$

研究员们给出了  $C_{10}$  计算的公式:

$$C_{10} = 0.5 u_{10}^{1/2} \times 10^{-3} \quad (6)$$

通过式 (1)~(6) 的公式, 可由海面 10 m 高度处的风速估算海面粗糙度:

$$z_0 = 10 e^{20\sqrt{5} k u_{10}^{-1/4}} \quad (7)$$

WAsP 软件给出了各种特征地形粗糙度在软件中的取值, 其中城市为 1, 城镇为 0.5, 光滑的土地为 0.005, 雪地为 0.001, 地形中水域为 0.0002, 开阔的海洋、湖泊、入海口等为 0.0001。

### 2.2 尾流衰减系数及取值

尾流效应造成风电场内风速分布不均, 影响风电场内风电机组运行状况, 从而进一步影响风电场运行工况及输出。尾流效应受风电场拓扑、风轮直径、推力系数、风速和风向等因素影响。而尾流模型是描述风力发电机组尾流的数学模型, 用于计算尾流区域的速度损失。现有的尾流模型主要有以下三类: 基于涡流理论的理论解析模型、基于 N-S 方程的 CFD (computational fluid dynamics) 模型和半经验尾流模型。

在尾流半经验模型中, 应用最广的是丹麦 N.O.Jensen 等人于 1983 年提出的 Jensen 尾流模型。而 WAsP 软件中的 Park 尾流模型是在 Jensen 模型计算单台风力机尾流的基础上, 考虑尾流速度衰减平方和叠加所得, 用于计算风电场发电量受尾流的影响, 因此主要适用于安装在平坦地形下的风电场。

尾流衰减系数  $k_s$  可以通过下式确定:

$$k_s = A/\ln(h/z_0) \quad (8)$$

式中:  $A$  为常数;  $h$  为风机轮廓高度, m。

从上述计算式可以看出, 尾流衰减系数是与地表粗糙度、风机轮毂高度有关的函数, 表示尾流的膨胀斜率, 在来流通过风电机组向下游传播的过程中, 尾流的膨胀与速度的损失与尾流的传输距离呈线性关系, 而根据 WAsP 软件用户手册, 陆上风电场的尾流衰减系数推荐取值为 0.075, 海上风电场推荐取值为 0.05。

但是, 海上风电场研究中大气往往被假定为中性, 未考虑热稳定性的影响。热稳定性对海上风电场风资源有重要影响, 尤其是对于平均风速较低 (< 6m/s) 的风电场, 热效应对大气的影 响开始变得非常显著。所以尾流损耗系数还需要根据不同热稳定性下的情况对 Jensen 公式进行修正取值。

## 3 案例分析

### 3.1 场址基本情况

风电场基本信息:

①地理位置: 福建省某地。

②地形地貌：为潮间带海域，风电场区域海底高。

③测风塔：场区中心点偏东北侧。

④风机布置情况：该风电场的机组布置间距为 5~10D，风机的单机额定容量为 16MW，且风电场周边已有建成投运的类似项目。

### 3.2 风资源条件分析

风电场址区域在 140m 高度处年平均风速 8.97m/s，风功率密度 689.95W/m<sup>2</sup>。主风能为 NNE，次主风能为 N，分别占总风能的 65.24% 和 18.64%；主风向为 NNE，次主风向为 SSW，分别占总频率的 43.73% 和 14.82%，具体如图 1 和图 2 所示。

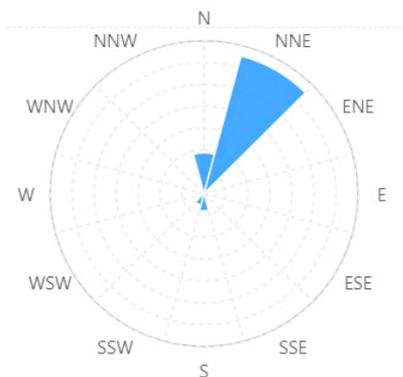


图 1 140m 高度风能玫瑰图

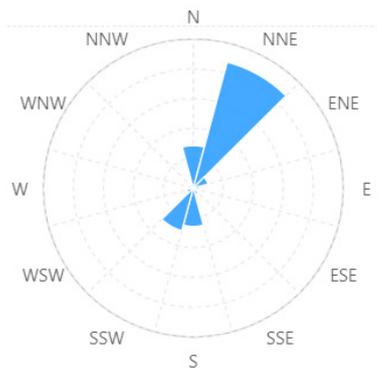


图 2 140m 高度风向玫瑰图

## 4 发电量计算及分析

### 4.1 参数设置

WAsP 软件推荐海面粗糙度取定值为 0.0002m。但近海粗糙度不同于可看做远海的粗糙度，它与水深、离岸距离都息息相关。

论文设置范围为 0~0.005 的粗糙度值进行验证。其中，表 1 为粗糙度方案设置参数数据。

在大规模风电场中的尾流影响是年度发电量（AEP）计算中损失最大的因素，尤其在海上风电场的影响尤为明显，因海上风电场较大的风机尺寸和阵列大小以及较少的湍流会导致尾流消散较慢。由于潜在的较大阵列影响和大气稳

定度的影响，海上风电场的尾流会远远大于陆上风电场。海上的尾流影响较于陆上也不被很好地理解。无论对于大规模的海上风电场还是具有邻近风电场的海上风电场，对于理解引起海上尾流的不同因素及尾流恢复机制都是很有必要的。

表 1 粗糙度方案设置参数表

方案	风电场粗糙度
1	0.001
2	0.002
3	0.003
4	0.004
5	0.005

根据学者研究，海域不同尾流衰减系数应设置不同方案，以江苏地区为例，WAsP 推荐尾流值为 0.05，实际上设计值为 0.04 与实际测出来的发电量更加吻合，但总体而言，在不考虑热通量、热稳定性等影响因素时中国海域内尾流衰减系数在 0.03~0.05 范围。

为比较尾流对发电量的影响，以粗糙度方案 1 进行分析，共设置 3 个方案：尾流 0.05、尾流 0.04 以及尾流 0.03 进行验证尾流对发电量的影响。其中，表 2 为尾流衰减方案设置参数数据。

表 2 尾流衰减方案设置参数表

方案	粗糙度	衰减系数
1	0.001	0.03
2	0.001	0.04
3	0.001	0.05

### 4.2 发电量计算

根据不同粗糙度，不同尾流衰减系数计算后的发电量如表 3 所示。

表 3 不同粗糙度下的发电量

方案	粗糙度	尾流衰减系数	发电量（GWh）
1	0.001	0.03	71.473
2	0.002	0.03	70.302
3	0.003	0.03	69.646
4	0.004	0.03	69.148
5	0.005	0.03	68.783

从表 3 可以看到，粗糙度对发电量有影响，这是因为粗糙度的不同会影响风资源变化的计算，从 0.001 到 0.005，发电量变化了 3.9%。根据对比文献记载的泉州附近风场实测发电量，折算为利用小时数，建议近海风电场粗糙度系数取 0.005。

尾流衰减系数对发电量的影响如表 4 所示。

表 4 不同尾流衰减系数下的发电量

方案	粗糙度	尾流衰减系数	发电量 (GWh)
1	0.001	0.03	69.358
2	0.001	0.04	70.447
3	0.001	0.05	71.473

可以看到,风电场的发电量随尾流衰减系数的增大而增大,尾流衰减系数从 0.03 到 0.04,发电量增长了约 1.6%。严格来说,风电场的尾流衰减系数应该是一个取值范围而不是定值常数。结合上述衰减系数敏感性分析及算例中风电场的验证,建议此处风电场尾流衰减系数取 0.04。而根据文献资料<sup>[11]</sup>,当热稳定性分别为稳定、中性、不稳定、极不稳定时,尾流衰减系数的值需要微调至 0.05、0.08、0.09、0.100 附近。热稳定性可以请专门的机构进行测定。

## 5 结论

论文研究了近海处海面粗糙度的计算方法,通过对中国福建省某地的风电场风资源和发电量情况进行分析,研究了风资源和发电量的变化规律及内在关系。同时,围绕粗糙度、尾流衰减系数这两个取值对发电量有重大影响的参数展开研究,测算了粗糙度在 0~0.005 范围内的粗糙度及 0.03~0.05 范围内的尾流衰减系数对发电量的影响,并根据实际项目给出了取值建议。

研究结果表明:随着粗糙度的增大发电量减小,而随着尾流衰减系数的增大发电量增大。通过论文的研究,为近海岸风电场发电量评估提供了数据基础和理论支撑,具备一

定的科学意义和应用价值。

## 参考文献

- [1] 姜鹏飞.国内发展海上风电的前景和经济分析[J].机电信息, 2009,60(24):96-97.
- [2] Barthelmie R J. Modelling and measurements of coastal wind speeds[M].Majumdar S K, Miller E W, Panah A I, eds. Renewable energy: trends and prospects. Easton: Pennsylvania Academy of Science, 2001:961-975.
- [3] 王美琳,罗勇,周荣卫.WindSim软件在复杂地形风电风能资源评估中的应用[J].气象,2010,36(2):113-119.
- [4] Barrios R, Cerdón. Checking the capabilities of commercial software for numerical site calibration[R].EWEC, 2007.
- [5] 李雪,李桂敏,李伟宏,等.WEPAS和WAsP在复杂地条件下的适用性[J].电网与清洁能源,2011,27(10):87-92.
- [6] Hassan G. GH Windfarmer theory manual[R]. Garrad Hassan and Partners Ltd., 2005.
- [7] Nielsen P. WindPRO2.5 manual[M]. EMD InternationalA/S, 2006.
- [8] 孙唯宓,周力炜.浅论WAsP软件在近海风力资源预测上的应用[J].能源与环境,2008(2):3.
- [9] 代元军,汪建文,温彩凤,等.利用WAsP软件对风力发电量的预测[J].可再生能源,2011,29(1):103-106.
- [10] Bergström H, Barthelmie R J. Offshore boundary-layer modelling [C]. Proceedings of the Global Windpower Conference, 2002.
- [11] Killstrand B, Bergström H, Højstrup J, et al. Mesoscale windfield modifications over the Baltic Sea[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2000(95):161-188.