

# 低风速风电场风电机组的粗糙度取值研究

袁 万, 彭秀芳, 胡 煜

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京 211102)

**摘 要:** 基于风资源分析软件 WAsP 中的粗糙度理论, 推导风电机组粗糙度的计算公式, 通过与建立风电机组模型的结果比较验证公式有效性, 据此分析低风速风电场中风电机组粗糙度的影响因素, 结果表明, 设置风电机组粗糙度和建立风电机组模型对发电量的影响机理不同, 风电机组的粗糙度与风电场平均风速、叶轮直径和轮毂高度呈正相关, 与风电机组额定风速和风电机组间距呈负相关。

**关键词:** 风速; 风电机组; 粗糙度; 风电场; 均匀布置

**中图分类号:** TK89

**文献标识码:** A

## 0 引 言

已建风电场中的风电机组类似于地形地貌中的植被、民房等, 通常在实际地形图制作中未对植被、民房等进行建模, 因此须在地形图文件中设置粗糙度来考虑其对风电场发电量的影响。同理, 已建风电场中的风电机组也可按此考虑。

现有风资源分析软件中(如 WAsP、Metodyn WT 等)可增加已建风电机组的模型进行分析, 仅需指定已建风电场中风电机组的坐标及轮毂高度, 即可与规划风电场风电机组共同分析计算。然而实际工程中, 规划风电场和周围已建风电场的投资主体可能不同, 要获取周围已建风电机组坐标有一定难度; 另外, 规划风电场周围可能存在多个已建风电场, 要对每个已建风电机组均进行建模工作量较大。本文提出将已建风电场当作一种特定地貌, 通过设置其粗糙度来考虑对规划风电场发电量的影响, 操作方法简单, 具有良好工程适用性。

1954 年, Monin-Obukhov<sup>[1]</sup>提出 M-O 相似理论, 其中区域粗糙度可通过中性大气稳定度下的风廓线计算, 但实际工程中区域平均风廓线很难获得; Lettau<sup>[2]</sup>得出量化粗糙度的经验公式, 在 WAsP 软件中得到很好应用; Bou-Zeid 等<sup>[3]</sup>推导了粗糙度与弯曲高度的量化表达式, 但其表达式中特征变量尺  $L_p$  的计算较繁琐。本文主要基于 Lettau 的理论进行

研究。

已建风电场粗糙度的取值与其位置、风电机组之间的间距、风电机组轮毂高度、叶轮直径等有关, 本文采用 WAsP 软件来分析各因素对已建风电场粗糙度的影响, 并给出低风速风电场中已建风电机组粗糙度取值参考, 风电场粗糙度的确定采用比对增加已建风电机组模型后的发电量和尾流。

## 1 理 论

### 1.1 WAsP 中粗糙度概念

WAsP 中采用的粗糙度主要基于 Lettau 得出的经验公式, 根据 Lettau 单个粗糙度单元的值与其高度  $h$  及迎风面面积  $S$  有关。对多个粗糙度单元均匀分布的区域, 粗糙度单元密度可根据每个单元在平面内的平均占用面积  $A_H$  来衡量,  $A_H$  与区域的平面总面积  $A_s$  和粗糙度单元个数  $n$  有关, 粗糙度长度具体表达式为<sup>[4]</sup>:

$$z_0 = \frac{hS}{2A_H} \quad (1)$$

若  $A_H$  远大于  $S$  时, 式(1)可得相对合理的结果; 若  $A_H$  与  $S$  数量级接近时, 式(1)对粗糙度的计算值偏高, 即当每个粗糙度单元距离较近、分布较密时, 气流会被抬升, 此时仅  $S$  和  $h$  对粗糙度有贡献, 气流的抬升作用类似于实际地面向上位移动了某

一距离,可通过考量粗糙度单元顶部到其一半高度之间某处的离地距离实现,一般可取粗糙度单元高度的 60%~80%<sup>[5]</sup>,这个高度通常被称作位移长度,也叫零平面位移。森林、城市和高大植被区域必须考虑位移长度。

表达式中假定孔隙率接近零,即粗糙度单元为实体。对于多孔粗糙度单元,  $z_0$  需乘以孔隙率。

## 1.2 风电机组粗糙度推导

风电机组轮毂高度为  $H_{hub}$ , 叶轮直径为  $D$ , 间距为  $L$ 。对于风电机组均匀布置的风电场,区域平面总面积  $A_s$  与风电机组数量  $n$  和风电机组平均间距  $L$  有关,近似取  $A_s = nL^2$ 。

由于风电机组叶轮为动态,实际迎风面面积采用纯静态三叶轮面积或拟静态叶轮盘面积均不合适,实际迎风面面积与风电场风速  $V$  及风电机组输出功率有关。由风电机组功率曲线可知,在风电机组切入风速至额定风速  $V_r$  之间,风电机组输出功率逐渐增加,在达到额定风速  $V_r$  后,输出功率保持不变。额定风速时风电机组满负荷运转,假定此时风电机组迎风面面积为叶轮盘面积,即  $\pi D^2/4$ ,从风能密度等效考虑,则风电场风速  $V$  时,风电机组的迎风面面积可划为  $(V/V_r)^3 \pi D^2/4$ ,由此可得:

$$\begin{cases} h = H_{hub} + \frac{D}{2} \\ S = \frac{\pi D^2}{4} \left( \frac{V}{V_r} \right)^3 \\ A_H = L^2 \end{cases} \quad (2)$$

一般情况下,  $L$  为  $D$  的 5~10 倍,对低风速风电场  $V$  约为 6 m/s,风电机组额定风速  $V_r$  约 9 m/s,则  $A_H$  与  $S$  之比为 100~400,两者不在同一数量级,因此根据式(1)可得相对合理的结果。将式(2)代入

式(1)可得均匀布置风电场的整体粗糙度计算公式,如式(3):

$$z_0 = \frac{\pi}{8} \left( \frac{V}{V_r} \right)^3 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \left( H_{hub} + \frac{D}{2} \right) \quad (3)$$

另应注意,某一地貌单元的粗糙度有一定影响范围,超过此范围后,地貌单元的粗糙度对要分析的风电场影响可忽略不计,因此要研究已建风电机组粗糙度对规划风电场的影响,必须设置合理的距离。根据王 丰等<sup>[6]</sup>的研究,3~4 排风电机组在风电场区域无限制的情况下,上游风电机组与下游风电机组间距大于  $15D$  时,可认为上游风电机组尾流风速恢复至 90%以上,即上游风电机组对下游风电机组影响较小,当风电机组排数增多时,间距还应加大。本文研究中已建风电场排数为 4,可将规划风电场看作已建风电场排数的延续,据此认为当已建风电场与规划风电场两者最边缘风电机组相距  $20D$  ( $D$  为已建风电机组叶轮直径)时,已建风电场对规划风电场影响可忽略不计,这可通过以下实际计算结果得到佐证(已建风电场与规划风电场最边缘风电机组相距 2250 m,  $20D = 2300$  m),计算结果通过建立已建风电机组模型得到。

由表 1 可见,已建风电机组间距、轮毂高度、叶轮直径的改变对规划风电场发电量影响很小,发电量最大影响 0.1%。因此要研究已建风电场粗糙度设置的影响,需将其与规划风电场最外边缘的风电机组距离控制在  $20D$  以内,否则风电机组粗糙度的影响难以体现,综合考虑本文设置为  $10D$ 。

为验证推导的公式(3)合理性,根据公式(3)计算结果,采用 WAsP 软件设置已建风电场粗糙度,将其计算结果与 WAsP 中直接建立已建风电机组模型结果进行对比。

表 1 规划风电场考虑尾流发电量变化表

Table 1 Varying results of generated electrical energy considering wake effect in planning wind farm

风力机间距 $L$ /m	发电量 $\times 10^4$ /kWh	轮毂高度 $H_{hub}$ /m	发电量 $\times 10^4$ /kWh	叶轮直径 $D$ /m	发电量 $\times 10^4$ /kWh
600	15167.4	80	15173.5	110	15180.4
700	15173.6	90	15173.6	115	15173.6
800	15178.7	100	15174.0	120	15166.6
900	15182.6	110	15176.8	—	—

注:  $L$ 、 $H_{hub}$ 、 $D$  均为已建风电场的参数。

## 2 本文算例及结果验证

已建风电场位于规划风电场上风向,两者均布置 25 台风电机组,最边缘风电机组相距 1150 m,已建风电场采用单机容量 2.0 MW 机型,叶轮直径 115 m,轮毂高度 90 m,额定风速 9.0 m/s,风电机组平均间距 700 m,风电场平均风速 6.05 m/s,据此代

入式(3)计算得已建风电场粗糙度为 0.47 m。计算结果对比如表 2。表 2 中“既不建模也不设粗糙度”项目模拟的是规划风电场上风向无其他风电场的情形,以此为基础来研究设置风电机组粗糙度和建立风电机组模型这 2 种方法对区域风资源的影响效果。对比结果发现,设置风电机组粗糙度和建立风电机组模型对发电量的影响属 2 种完全不同的

表2 计算结果

Table 2 Calculation results

风电 机组 编号	风速/ m·s <sup>-1</sup>	计算粗糙度 0.47		建立风电机组模型			既不建模也不设粗糙度		
		考虑尾流发电 量×10 <sup>4</sup> /kWh	尾流/%	风速/ m·s <sup>-1</sup>	考虑尾流发电 量×10 <sup>4</sup> /kWh	尾流/%	风速/ m·s <sup>-1</sup>	考虑尾流发电 量×10 <sup>4</sup> /kWh	尾流/%
T1	5.90	6.260	3.06	5.91	6.252	3.67	5.91	6.293	3.05
T2	5.88	6.172	4.07	5.92	6.182	4.93	5.92	6.241	4.04
T3	5.87	6.145	4.21	5.94	6.167	5.56	5.94	6.260	4.14
T4	5.85	6.118	4.22	5.95	6.147	6.10	5.95	6.276	4.12
T5	5.84	6.098	4.31	5.96	6.130	6.66	5.96	6.293	4.18
T6	5.85	6.103	4.32	5.97	6.122	7.00	5.97	6.307	4.18
T7	5.88	6.148	4.32	5.98	6.135	7.11	5.98	6.328	4.19
T8	5.92	6.214	4.20	5.99	6.205	6.22	5.99	6.344	4.11
T9	5.95	6.272	4.12	5.99	6.280	5.25	5.99	6.360	4.06
T10	5.97	6.318	3.99	6.00	6.329	4.63	6.00	6.374	3.95
T11	5.99	6.372	3.63	6.00	6.374	4.09	6.00	6.406	3.6
T12	6.01	6.489	2.44	6.01	6.487	2.75	6.01	6.508	2.43
T13	5.84	6.221	2.12	5.85	6.223	2.37	5.85	6.239	2.13
T14	5.84	6.171	3.00	5.86	6.184	3.31	5.86	6.205	2.98
T15	5.83	6.130	3.41	5.87	6.152	3.96	5.87	6.189	3.39
T16	5.83	6.111	3.52	5.88	6.146	4.28	5.88	6.197	3.48
T17	5.82	6.097	3.64	5.89	6.149	4.64	5.89	6.218	3.57
T18	5.82	6.085	3.72	5.90	6.145	4.90	5.90	6.228	3.62
T19	5.83	6.097	3.69	5.91	6.156	4.89	5.91	6.240	3.6
T20	5.85	6.134	3.66	5.91	6.179	4.69	5.91	6.252	3.58
T21	5.88	6.193	3.51	5.92	6.214	4.26	5.92	6.266	3.46
T22	5.91	6.249	3.37	5.93	6.262	3.75	5.93	6.288	3.34
T23	5.92	6.284	3.19	5.93	6.287	3.42	5.93	6.304	3.17
T24	5.94	6.335	2.76	5.94	6.334	2.95	5.94	6.346	2.75
T25	5.95	6.454	1.35	5.94	6.447	1.45	5.94	6.455	1.33
平均	5.89	6.211	3.52	5.93	6.227	4.51	5.93	6.297	3.46
合计		15527.0			15568.8			15741.7	

机理,设置粗糙度对风电场区域风速分布产生影响,对尾流影响很小;建立风电机组模型对风电场尾流产生影响,对风速分布无影响,但二者对最终净发电量的影响几乎一致,证明本文推导式(3)合理有效。

粗糙度一般代表风速为零的高度<sup>[7]</sup>,WAsP中粗糙度的设置属于地形信息输入,因此对某个区域设置粗糙度,则这个区域的地形地貌发生改变,风速分布也相应改变;而建立实际风电机组模型是在地形信息输入之后进行,对地形地貌信息无影响,因此区域风速不改变,但风电机组模型的建立会打破原有风场的稳定性,风经过风电机组后会发生方向和速度的变化,使得风速中的湍流成分增加,即尾流效应。

### 3 粗糙度影响分析

本节探讨风电机组粗糙度的影响因素,由式(3)可知,风电机组的粗糙度主要与以下 5 个因素有关:风电场平均风速  $V$ 、风电机组额定风速  $V_r$ 、叶轮直径  $D$ 、风电机组间距  $L$ 、轮毂高度  $H_{hub}$ 。

为更清楚探究各因素对风电机组粗糙度的影响,采用单一变量法绘制各因素与粗糙度的关系图,研究某一变量,其余变量取值如表 3 所示。

表 3 各因素取值

Table 3 Values of factors

因素	取值
$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	6
$V_r/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	9
$D/\text{m}$	115
$L/\text{m}$	700
$H_{hub}/\text{m}$	90

由图 1 可见,随着风电机组间距增大,风电机组粗糙度变小。并且,当风电机组间距较小时,叶轮直径对粗糙度的影响较大;反之,风电机组间距较大时,叶轮直径对粗糙度的影响较小。叶轮直径越大,风电机组粗糙度越大。一般风电机组规划布置时,风电机组间距  $L$  按照  $5\sim 10D$  布置,现有低风速风电机组叶轮直径为  $105\sim 125\text{ m}$  之间,此时风电机组粗糙度数值在  $0.20\sim 0.80\text{ m}$  之间。根据《风电场工程技术手册》<sup>[8]</sup>中 WAsP 平坦地形粗糙度等级及对应粗糙度表,风电机组的粗糙度等级为 3 级,地

形特点类似于多树木灌木~森林,风电机组虽然远比树木或森林高,但其分布密度远小于树木或森林,所以风电机组粗糙度与多树木或森林地貌类似。

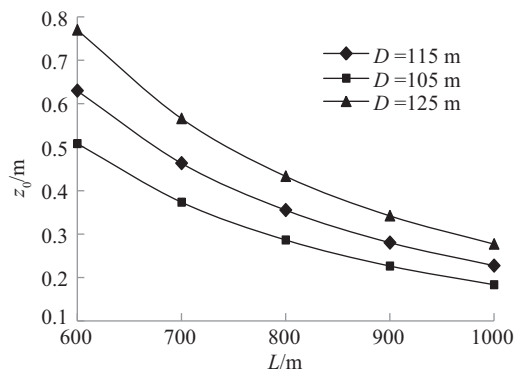


图 1 风电机组间距与叶轮直径影响

Fig. 1 Influences of vane diameter and distance between WTGs

在某些情况下粗糙度长度与风速有关,如强风时风会吹弯长草、风速强度不同时海面波浪高度不同<sup>[7]</sup>及本文中风速改变叶片迎风面面积改变等。由图 2 可见,随着风电场平均风速增大,风电机组粗糙度增加;且当风电场平均风速较大时,风电机组额定风速对粗糙度的影响较大;但额定风速越大,风电机组粗糙度越小。一般低风速风电场的平均风速在  $5.0\sim 7.0\text{ m/s}$  之间,低风速风电机组额定风速在  $9.0\sim 10.0\text{ m/s}$ ,此时风电机组粗糙度数值也在  $0.20\sim 0.80\text{ m}$  之间,风电机组粗糙度与多树木或森林地貌类似。

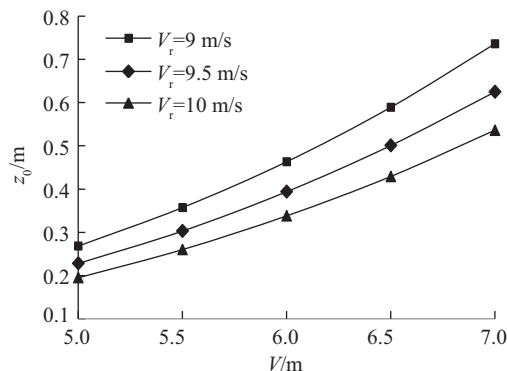


图 2 平均风速与额定风速影响

Fig. 2 Influences of average wind speed and rated wind speed

由图 3 可见,风电机组粗糙度与轮毂高度基本呈线性关系,随着轮毂高度的增加,风电机组粗糙



度增大;一般低风速风电场轮毂高度 80~120 m 不等,叶轮直径在 105~125 m,此时风电机组粗糙度计算值在 0.3~0.7 m 之间。

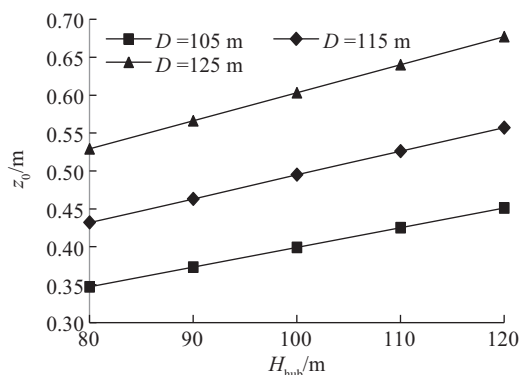


图3 轮毂高度影响

Fig. 3 Influences of hub height

风电场规划时,周围已建风电场对其发电量具有一定的影响,如何有效评估已建风电场对规划风电场的影响很重要。通过将周围已建风电场简化为一定范围的粗糙度设置,理论依据充分,操作简单,可为工程项目提供参考。

## 4 结 论

本文探讨风资源分析软件 WAsP 中通过设置粗糙度考虑已建风电场对规划风电场的影响,推导了已建风电场粗糙度的计算公式,并通过实例进行验证,对影响低风速风电场中已建风电机组粗糙度的因素进行分析,结论如下:

1)已建风电机组可被看作一种特定地貌类型,通过本文推导公式计算设置其粗糙度来考虑对周边风电场的影响。

2)设置风电机组粗糙度和建立风电机组模型对发电量的影响属 2 种完全不同的机理,设置粗糙度对风电场区域风速分布产生影响,对尾流几乎无影响;建立风电机组模型对风电场尾流产生影响,对风速分布无影响,但二者最终对净发电量的影响几乎一致。

3)风电机组的粗糙度主要与风电场平均风速、风电机组额定风速、叶轮直径、风电机组间距和轮毂高度有关,与风电场平均风速、叶轮直径和轮毂高度呈正相关,其数值越大相应风电机组粗糙度越

大;与风电机组额定风速和风电机组间距呈负相关,其数值越大相应风电机组粗糙度越小。

4)低风速风电场中已建风电机组的粗糙度为 0.2~0.8 m,风电机组的粗糙度等级为 3 级,地貌特点类似于多树木灌木~森林。

## [参考文献]

- [1] Monin A S, Obukhov A M. Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniyav prizemnom sloe atmosfery (Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground)[J]. Trudy geofiz. inst. AN SSSR, 1954, 24(151): 163—187.
- [2] Lettau H. Note on aerodynamic roughness- parameter estimation on the basis of roughness-element description [J]. Journal of Applied Meteorology, 1969, 8: 828—832.
- [3] Bou-Zeid, E., C. Meneveau, M. B. Parlange. 2004: Large-eddy simulation of neutral atmospheric boundary layer flow over heterogeneous surfaces: Blending height and effective surface roughness[J]. Water Resour. Res., 40, W02505, DOI:10.1029/2003WR002475.
- [4] WAsP 帮助文件[EB/OL]. www.wasp.dk, 2016-11-02.
- [4] WAsP help document[EB/OL]. www.wasp.dk, 2016-11-02.
- [5] Wieringa J. Does representative wind information exist? [J]. Wind Engineering, 1996, 65: 1—12.
- [6] 王 丰, 刘德有, 曾利华, 等. 大型风电场风机最优布置规律研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 472—478.
- [6] Wang Feng, Liu Deyou, Zeng Lihua, et al. Characteristics of optimal placement of wind turbines in large scale wind farms [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(4): 472—478.
- [7] 李 军, 胡 非, 刘 磊, 等. 风能资源评估中地表粗糙度的研究[J]. 能源科学, 2011, 33(12): 2341—2348.
- [7] Li Jun, Hu Fei, Liu Lei, et al. On estimation of surface roughness for wind energy resources assessment [J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2341—2348.
- [8] 宫靖远, 贺德馨, 孙如林, 等. 风电场工程技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004, 36—37.
- [8] Gong Jingyuan, He Dexin, Sun Rulin, et al. Engineering technical manual for wind farm [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004, 36—37.

## RESEARCH ON ROUGHNESS VALUE FOR WIND TURBINE GENERATORS IN LOW WIND-SPEED FARM

Yuan Wan, Peng Xiufang, Hu Yu

*(China Energy Engineering Group, Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)*

**Abstract:** Based on the roughness theory of wind energy analysis software WAsP, the roughness calculation expression for wind turbine generator (WTG) is derived and the expression is validated by comparing with the results of WTG built model. Then the roughness factors of WTG are analyzed for low wind speed farm. It's revealed that the mechanism of setting WTG roughness is different from that of building WTG model. WTG roughness is positively correlated with average wind speed of wind farm, WTG vane diameter and hub height. However, the roughness is correlated negatively with rated wind speed and distance between WTGs.

**Keywords:** wind speed; wind turbine; roughness; wind farm; equally distributed