

山区湍流特征及其对风力机功率的影响

杨从新^{1,2}, 刘文杰¹, 李寿图^{1,2}, 岳念西¹, 王 强³, 赵 斌³, 仲生芳⁴

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省风力机研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524000; 4. 中广核新能源控股有限公司西北分公司, 甘肃 兰州 730099)

摘 要: 为研究山地地形大气湍流关键特征参数的变化规律及其对风力机功率的影响, 以云南某山地风电场山脊处一大型风力发电机组为研究对象, 采用遥感技术研究风力机来流的风速、风向、湍流强度、湍动能和湍流耗散率的分布特征, 并分析上述参数对机组功率的影响。结果表明: 山地地形中来流参数昼夜特征明显; 在垂直于来流方向, 地形的影响区域集中在距离地面 79 m 的范围内, 湍动能与湍流耗散率在垂直方向成反比; 风速与湍流耗散率具有良好的正相关性; 来流特征参数在不同风速区间对风力机功率的影响存在较大差异, 湍动能对风力机功率的影响程度最低, 为 1.49%, 但湍流强度对风力机功率的影响程度高达 4%。

关键词: 水平轴风力机; 复杂地形; 湍流特征; 功率特性

中图分类号: TK83 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2023)02-0028-11

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4346

Characteristics of Turbulence in Mountainous Areas and Its Effect on the Power of Wind Turbines

YANG Congxin^{1,2}, LIU Wenjie¹, LI Shoutu^{1,2}, YUE Nianxi¹,
WANG Qiang³, ZHAO Bin³, ZHONG Shengfang⁴

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China;

2. Gansu Province Technology Center for Wind Turbines, Lanzhou 730050 China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhanjiang), Zhanjiang 524000 China;

4. Northwest of CGN New Energy Holding Co., Ltd., Lanzhou 730099 China)

Abstract: In order to investigate the variation law of key characteristic parameters of atmospheric turbulence in mountainous terrain and its influence on wind turbine power, a large wind turbine at the ridge of a mountain wind farm in Yunnan Province was used as the research object. Remote sensing techniques were employed. The distribution characteristics of wind speed, wind direction, turbulence intensity, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate of the incoming wind turbine flow were studied and the influence of the above parameters on the unit power was analyzed. The results indicate that the diurnal characteristics of the incoming flow parameters in mountainous terrain are obvious. In the vertical direction of the incoming flow, the influence area of the terrain is concentrated in the range of 79 m from the ground, and the tur-

收稿日期: 2022-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12062012); 甘肃省风力机工程技术研发中心专项基金(071904)。

第一作者: 杨从新(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为流体机械流动分析与优化设计。

ORCID: 0000-0002-2455-0555 E-mail: ycxwind@163.com

引用格式: 杨从新, 刘文杰, 李寿图, 等. 山区湍流特征及其对风力机功率的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 28-38.

YANG Congxin, LIU Wenjie, LI Shoutu, et al. Characteristics of Turbulence in Mountainous Areas and Its Effect on the Power of Wind Turbines[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2023, 42(2): 28-38.

bulent kinetic energy is inversely proportional to the turbulent dissipation rate in the vertical direction. In mountainous terrain, the wind speed has a good positive correlation with the turbulent dissipation rate. The influence of the incoming flow characteristics on the wind turbine power varies greatly in different wind speed zones and the turbulent kinetic energy. The effect of turbulent energy on wind turbine power is 1.49%, but the effect of turbulence intensity on wind turbine power is as high as 4%.

Keywords: horizontal axis wind turbine; complex terrain; turbulence characteristics; power features

随着风电的发展,在复杂地形区域中的装机容量越来越大^[1]。与平原地区相比,复杂地形大气边界层特性复杂,导致风力机功率输出性能较低^[2]、机组动态载荷剧烈变化^[3]等问题。特别在山地地形中,由于近地面风加速效应^[4],山丘绕流与风力机诱导涡流的相互作用^[5],山地地形中的风力机来流条件复杂多变。文献[6]分析了山地地形中风力机的功率性能,得出不同位置机组功率性能差异较大。文献[7]分析了山地地形不同机组能量输出,认为山地风电场不同机组的功率曲线可能存在较大差异。文献[8]研究了复杂地形大气稳定度对机组功率性能的影响,结果表明不稳定的大气将导致机组输出降低约16%。同时,激光雷达(LiDAR)技术在复杂地形测量的可行性^[9]实现了对复杂地形来流高精度、大范围的测量。因此,LiDAR被广泛运用到复杂地形大气的各项研究中^[10-11]。但是,当前研究较少分析山地风力机来流湍流特征,而来流湍流特征对风力机的载荷和功率有重要影响。

综上,本文采用地面式激光雷达,测量了云南山地风电场某山脊机组来流,研究山区来流关键参数变化特征及其对风力机功率的影响。

1 试验方案

1.1 试验场地及试验设备

如图1(左)所示,试验风场位于风能资源丰富的云南省^[12]曲靖市富源县境内一条山脊上,平均海拔2500 m,系云贵高原中部乌蒙山脉,地表植被丰富。试验位置位于东经104°20'8.44",北纬25°47'47.29",处于风场北部,其西(W)方向有一条山谷,占地面积约0.08 km²,除东(E)侧有一座桁架式高压电力铁塔外,无明显障碍物,无较大地势变化。风场主风向为西南(SW)方向,因此LiDAR

应布置在机组SW方向,考虑实际地形的安装条件,最终布局如图1(右)所示,LiDAR安装在机组西偏南67°方向距离220 m(约2D)处。

试验机组额定功率2 MW,风轮直径111 m,轮毂中心高度80 m,详细参数如表1所示。试验中采用一台MOLAS B300脉冲式地面激光雷达实时监测试验机组来流信息,详细参数如表2所示。为了测量垂直来流方向上不同高度处风速的变化,在试验中LiDAR同时采集12个高度的风速信息,高度设置分别为40、49、59、69、79、89、99、109、119、129、139和149 m,如图2所示。

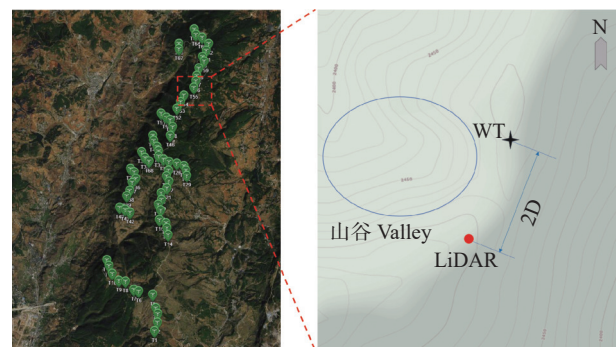


图1 试验机组位置及试验装置布局

Fig. 1 Experimental set-up

表1 机组主要参数

Tab. 1 Unit main parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	2	风轮直径/m	111
额定风速/(m/s)	9.5	轮毂高度/m	80
切入风速/(m/s)	3	切出风速/(m/s)	25
极端风速/(m/s)	52.5	额定转矩/(kN.m)	1590.6

1.2 来流特征参数

在山地地形下,不仅来流风速、风向直接影响风力机的气动性能,而且来流的湍流强度、湍动能和湍流耗散率也是描述来流特征的关键参数,对风

表 2 MOLAS B300 机组主要参数
Tab. 2 Main parameters of MOLAS B300 unit

参数	数值
测量范围/m	40~300
采样频率/Hz	1
测量高度层	12
探测间距	自定义
风速精度/(m/s)	0.1
风速测量范围/(m/s)	0~75
风向精度	1°

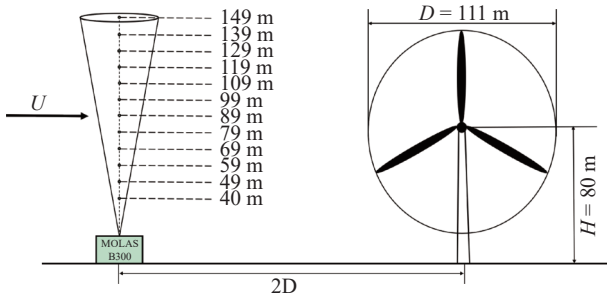


图 2 测量方案
Fig. 2 Lidar set-up

力机气动载荷有较大影响。在本文中,上述参数描述如下。

湍流强度计算公式为

$$TI = \frac{\sigma_u}{U} \quad (1)$$

式中: U 为高度 h 处水平风速 10 min 内平均值, $m \cdot s^{-1}$; σ_u 为高度 h 处 10 min 内水平风速标准差。

湍动能计算公式为

$$TKE = \frac{1}{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) \quad (2)$$

式中: σ_x^2 、 σ_y^2 、 σ_z^2 为 3 个方向风速分量的方差, $m^2 \cdot s^{-2}$ 。

本文采用由 Bodini 等^[11]改进的适合 LiDAR 的方法计算湍流耗散率,其计算公式为

$$\epsilon = 2\pi \left(\frac{2}{3a} \right)^{3/2} \left(\frac{\sigma_v^2 - \sigma_e^2}{L_N^{2/3} - L_1^{2/3}} \right)^{3/2} \quad (3)$$

式中: ϵ 为湍流耗散率, $m^2 \cdot s^{-3}$; a 为一维 Kolmogorov 常数, 本文取 0.52; σ_v^2 、 σ_e^2 为视线速度、LiDAR 测量误差的方差; L_N 、 L_1 均为长度尺度, N 为样本总数。

1.3 测量准确性验证

图 3 为不同高度处 LiDAR 数据的最小信噪比和数据可靠性。由图可知,信噪比 $CNR > 0.79$ dB,

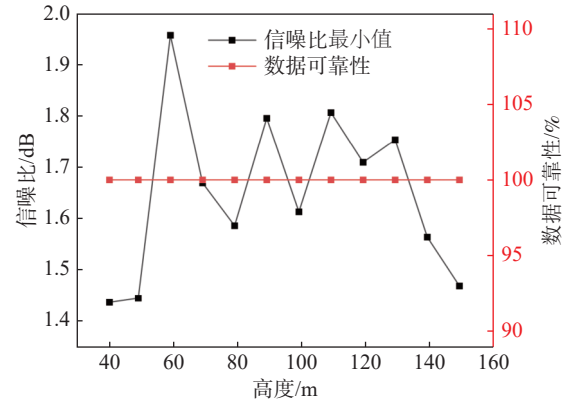


图 3 不同高度处数据信噪比与可靠性

Fig. 3 Data CNR and reliability at different heights

可见 LiDAR 测量数据是有效的^[13]。采样周期内,数据可靠性统计均为 100%,故 LiDAR 测量数据可信。

2 试验结果与分析

2.1 来流特征参数的分布规律

图 4 所示为来流特征参数在时间和空间上的分布,图中各参数均为 10 min 内计算的平均值。图 4(a) 为不同高度处风速随时间的分布规律。由图可知,风速分布具有明显的昼夜变化特征,一天中低风速集中在日中附近,风剪切小,夜间风速增大,风剪切增大。这主要是因为山地地形粗糙度大,在夜间,大气边界层较为稳定,对垂直方向上的水平来流扰动较小,故在夜间近地面风速明显低于高空,风剪切大;而在白天,太阳辐射较强,地面与大气的能量输运加剧,各高度大气动量交换增加,尤其是在日中附近,各高度风速趋于一致,风剪切减弱。

图 4(b) 和图 4(c) 所示为湍流强度和湍动能的分布规律。由图可知,试验周期内湍流强度平均值为 0.339,在 69 m 处湍流强度最高值达 0.527。根据文献 [14] 的研究结果,在 70 m 高度处,我国 6 种典型地形风电场中年湍流强度最大值均不超过 0.31。试验周期内平均湍动能为 $8.21 m^2 \cdot s^{-2}$,这比海平面最大值相差一个数量级^[15]。可见,山地地形对机组来流影响极大。同时,图 4(b) 和图 4(c) 表明,在距离地面 79 m 的范围内,来流湍流强度大,湍动能较高,可见地形是影响湍流变化的主要因素。在垂直方向上,湍流强度与湍动能存在随高度增加而减小的现象,该现象正好和海面环境中湍动

能随高度变化规律存在较大差异^[13]。在山地地形中,温度和风向的变化频繁是影响湍流强度与湍动能变化的主要因素,随着温度的增加,地面与大气的能量输运增加,大气边界层对流程度增加,稳定性变差,如图 4(b) 所示,接近日中时,各高度湍流强度明显增加,并持续到日落附近;图 4(c) 中湍动能也存在类似规律,对比湍流强度增幅较小。同时,由于试验点 W 方向是一条山谷,存在明显的局地地形影响。因此,在垂直方向上来流的湍流强度与湍动能变化较大。

图 4(d) 是不同高度处湍流耗散率分布规律。和海平面不同高度处湍流的耗散规律比较,图 4(d)

所示的湍流耗散率增加了两个数量级,而且在高度方向上,湍流耗散率的变化规律和湍动能的变化规律成反比。这主要是因为在地形中,下垫面干扰强,在近地表大气边界层中,湍流涡尺度较大,而在远离地表区域,湍流涡尺度相对小。同时,湍流的能量在惯性子区内由外尺度 L_0 逐渐转移到内尺度,最终通过小于内尺度 $l_0(l_0 \ll L_0)$ 的耗散区湍流(毫米级尺度)将其耗散。湍流的不稳定性导致大涡不断破碎为小涡,随着高度增加,耗散区的小尺度涡增多,湍流耗散率增加,而湍动能在近地面较大,因此在山地地形中,湍流的耗散率较海平面上湍流的耗散率大,湍动能与湍流耗散率成反比。

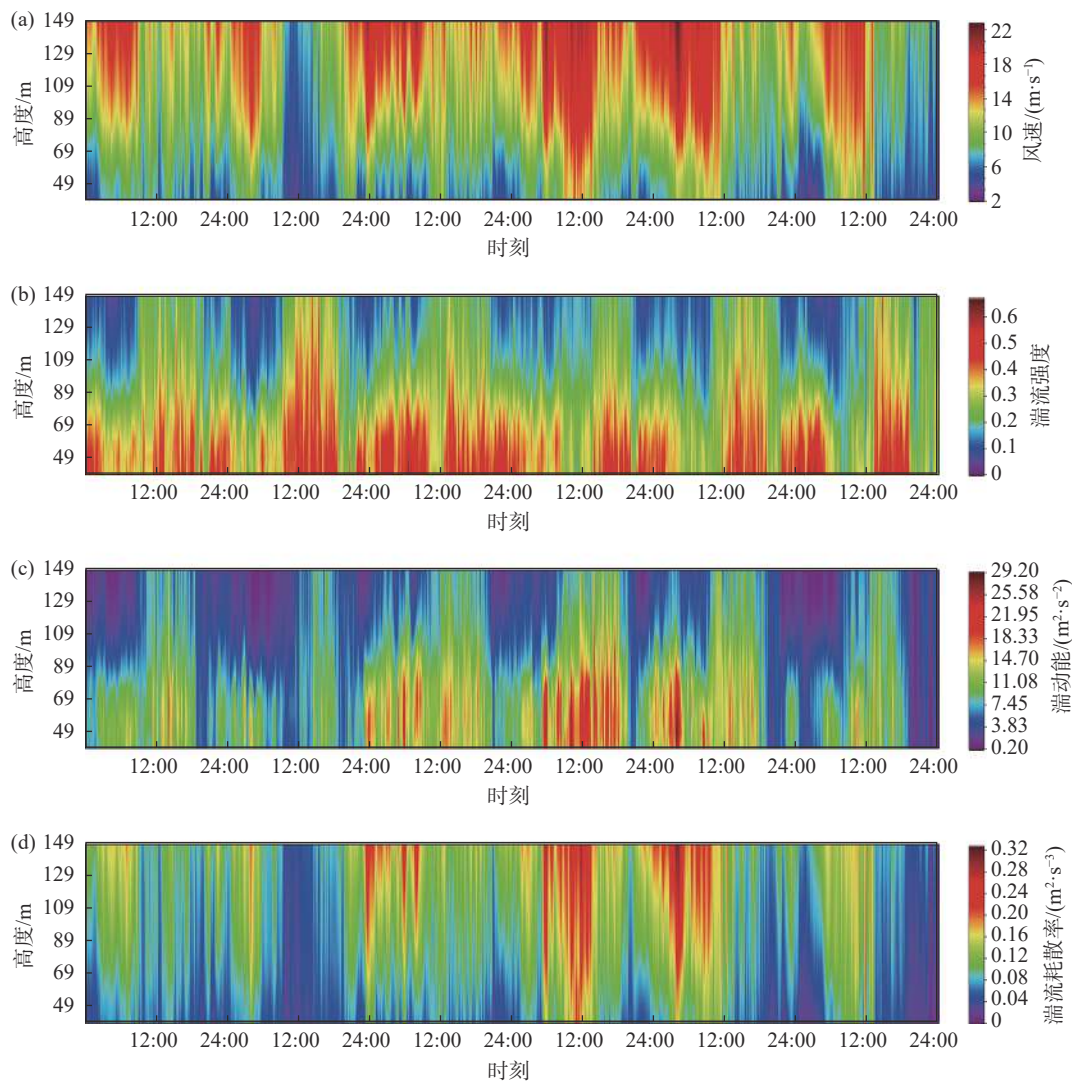


图 4 来流特征参数在时间和空间的分布

Fig. 4 Spatio-temporal distribution of incoming flow characteristic parameters

为了更进一步探明山地地形中来流特征参数的变化规律,图 5 给出了不同高度层风向时间序列分

布。图 5 表明,40 m 高度主风向为西北偏西(WNW)方向,40~79 m 高度范围内风转角较大,为风向变

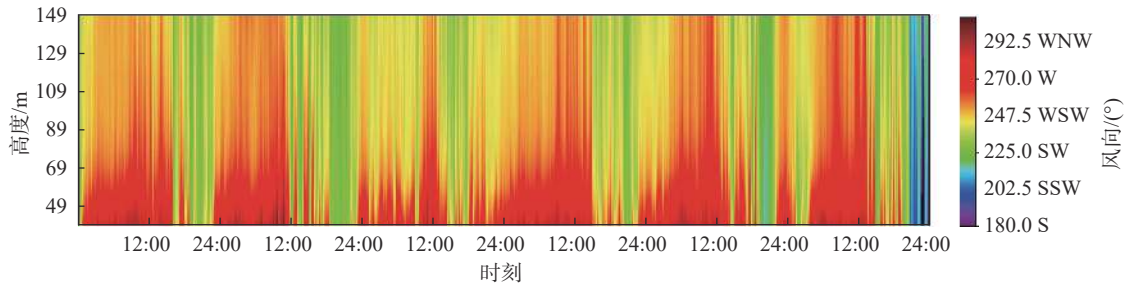


图 5 风向统计

Fig. 5 Spatio-temporal distribution of incoming flow direction

化的主要区域,而 79 m 及以上主风向稳定西南偏南 (WSW) 方向。

如图 6 所示,在 40~79 m 高度范围内风向的旋

转变化大,而 79 m 及以上风向分布稳定。同时,高风速主要分布于测量范围内较高的位置,并集中于 WSW 方向,低风速集中于 WNW-W 方向上。

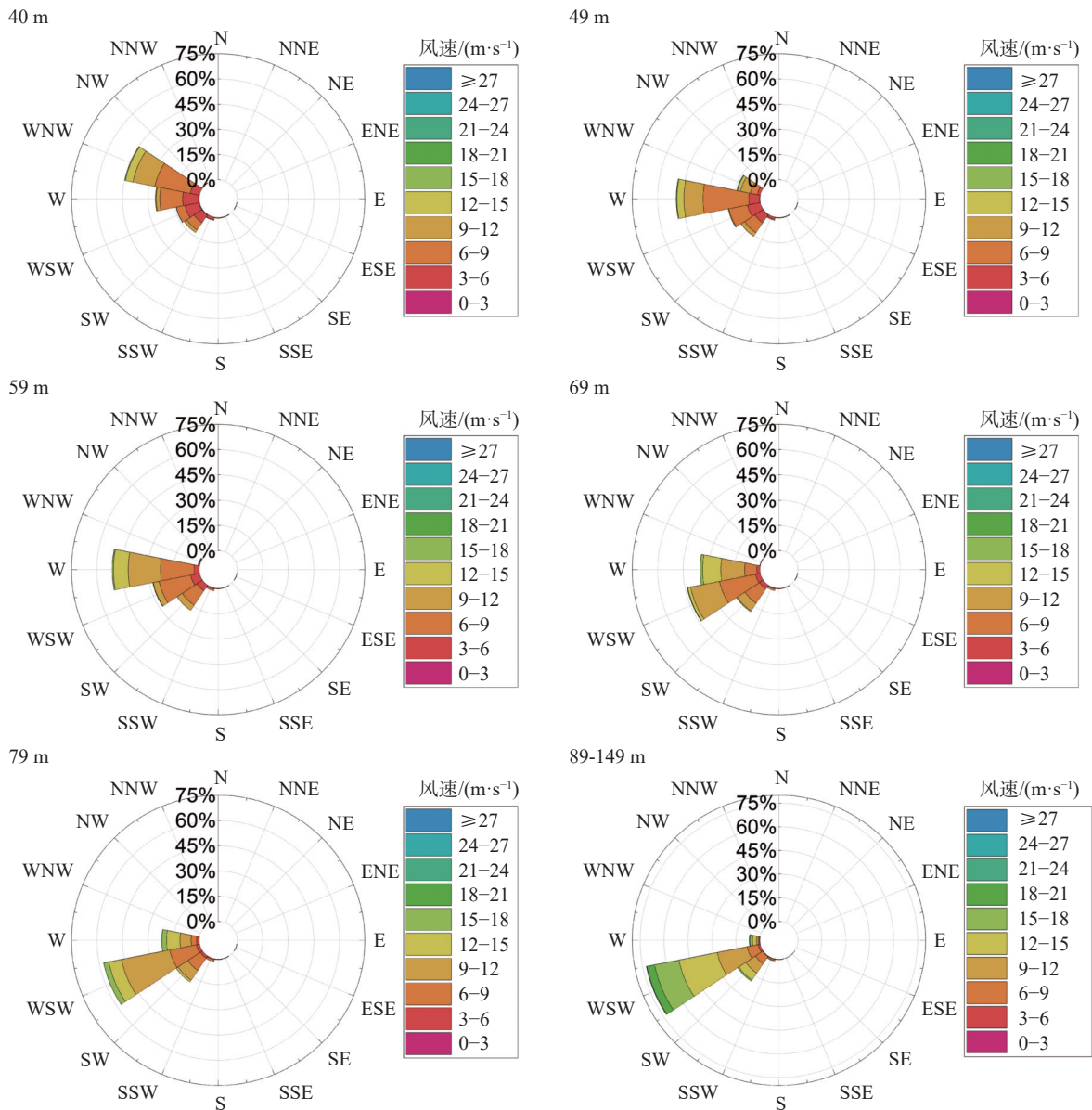


图 6 风向 - 风速玫瑰图

Fig. 6 Wind direction rose diagram with wind speed

各高度湍流强度在风向上的分布如图 7 所示,在 40~69 m 范围内 WNW-WSW 方向上出现湍流强度大于 0.5 的现象,最大值位于 W 方向,这是 W 方向山谷产生局地地形差异导致的。此外,如图 8 所示,在 40~69 m 范围内 WNW 以及 W 方向出现湍动能最大值。可见,在山地地形中,风向的急剧变化是造成来流参数特征较大改变的原因之一,故湍流耗散率与高度成正比,出现湍流耗散率随着高度以及方向的变化不断增加(如图 9 所示)。

2.2 来流特征参数相关性分析

图 10 所示为来流特征参数的相互关系。图中来流特征参数均为风轮平面内的等效参数,其计算方

法为

$$v_{eq} = \left(\sum_{i=1}^{n_h} v_i^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad (4)$$

式中: n_h 为风轮平面范围内测量高度层的数目; v_i 为第 i 个高度区间的实测风速; A 为风轮扫掠面积; 相邻测量高度层的中点为相邻高度区间的分界线,对风轮平面进行划分, A_i 为第 i 个高度区间的面积。

由图 10 可知,湍流耗散率表现出与风速最良好的正相关性,数据离散程度最低;湍流强度与风速呈弱负相关性,数据离散程度较高;湍动能与风速呈弱正相关性,数据离散程度与湍流强度相当。在湍流强度、湍动能、湍流耗散率相互对比中,数

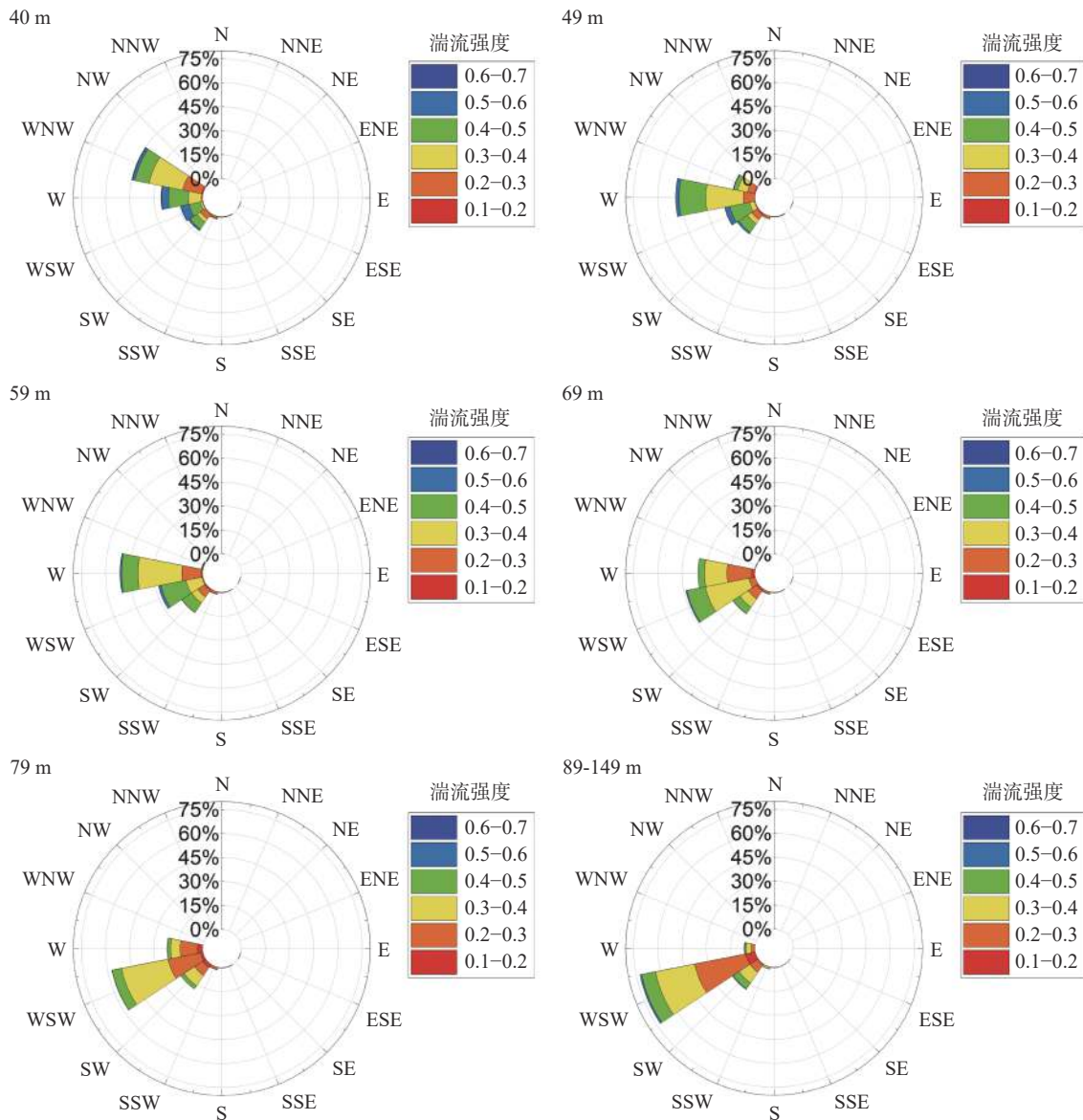


图 7 风向 - 湍流强度玫瑰图
Fig. 7 Wind direction rose diagram with turbulence intensity

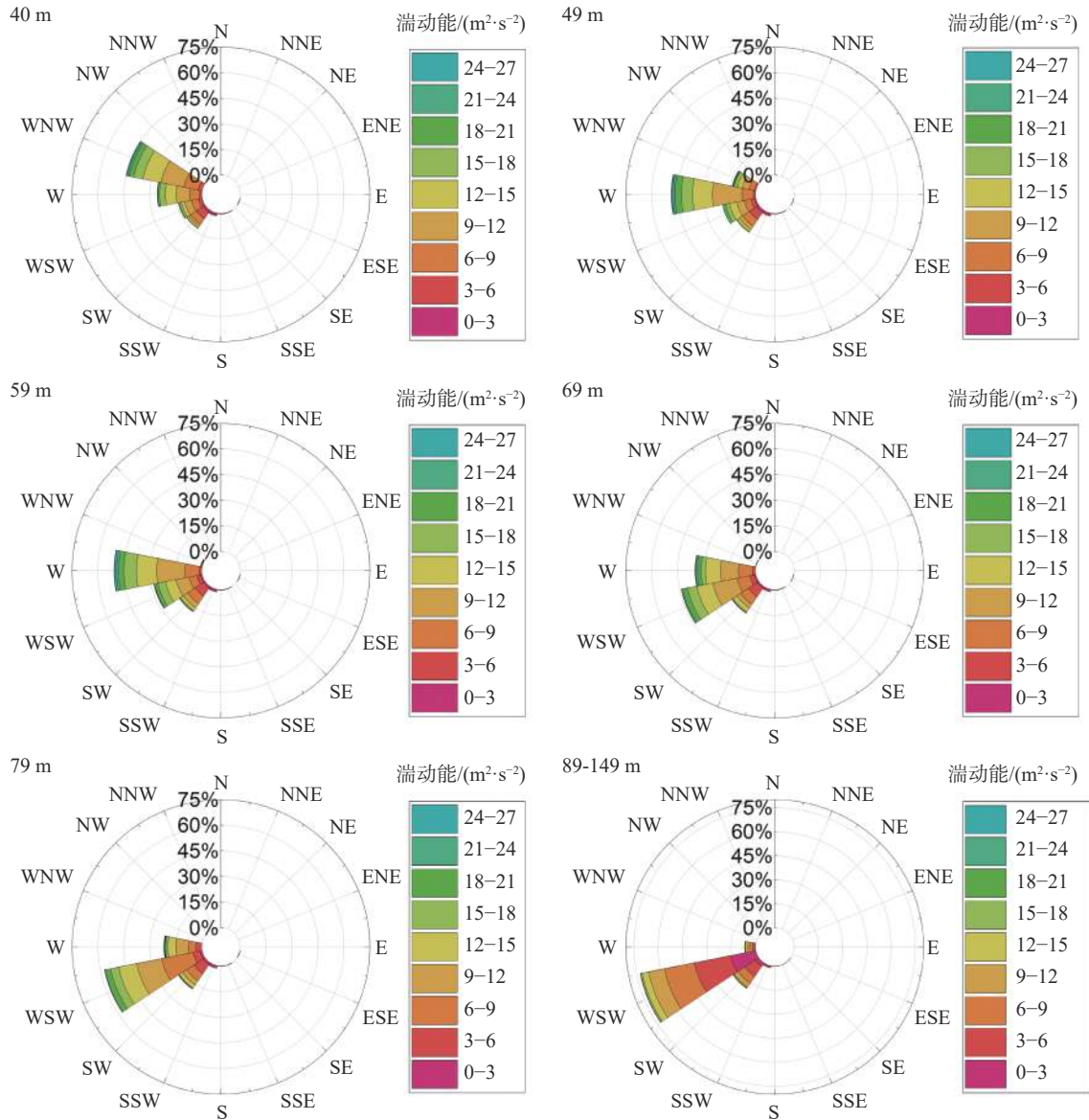


图 8 风向 - 湍动能玫瑰图

Fig. 8 Wind direction rose diagram with turbulent kinetic energy

据离散程度均较高,其中湍流强度与二者相关性较弱,随着湍流强度的增加,湍动能略有增加趋势,湍流耗散率略有减小趋势;湍流耗散率与湍动能有明显的正相关趋势,且可以看出湍流耗散率与湍动能的分布较为集中,湍流耗散率集中于 $[0.05,0.125]$,湍动能集中于 $[2.5,12.5]$ 。

2.3 来流特征参数对机组功率的影响

图 11 所示为不同来流特征参数对风力机功率的影响。其中,将功率进行归一化处理,并以平均值作为分界线,将来流特征参数分为大于平均值的 a 组和小于平均值的 b 组两部分。图 11(a) 为总体功率曲线,额定风速时机组并未达到额定功率,

在风速为 $14 m \cdot s^{-1}$ 时机组才完全满发,机组实际功率曲线出现推移或下降现象,因此对风速区间 $[3,14]$ 内的数据进行分析。

湍流强度对功率的影响如图 11(b) 所示, $7 m \cdot s^{-1}$ 风速以下的低风速区, a、b 两组曲线相互交叉,湍流强度强弱对功率影响不突出, $7 m \cdot s^{-1}$ 风速以上时,湍流强度明显降低了机组的功率输出。图 11(c) 描述了湍动能对功率的影响, a 组由于低风速湍动能普遍较低,因此 $5 m \cdot s^{-1}$ 风速以下没有分布,湍动能对功率的影响集中在 $8 m \cdot s^{-1}$ 风速以下,在 $8 m \cdot s^{-1}$ 风速以上 a、b 两组曲线互相掺混,湍动能对功率影响不突出。如图 11(d) 所示,以 $9 m \cdot s^{-1}$ 风速为分界

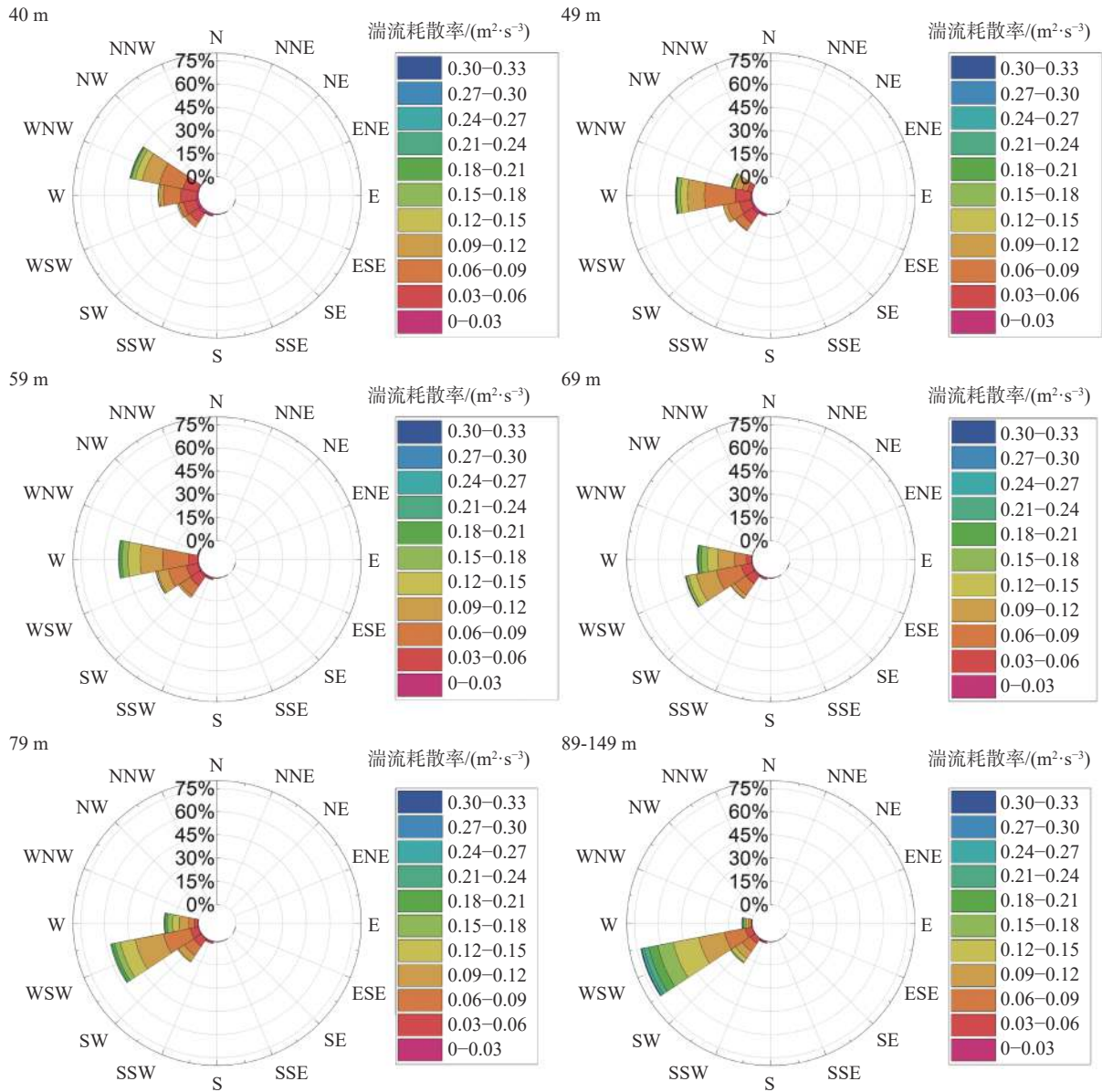


图 9 风向 - 湍流耗散率玫瑰图

Fig. 9 Wind direction rose diagram with turbulent Dissipation Rate

点, 低于 $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 b 组功率大于 a 组, 高于此风速时 b 组功率小于 a 组。总体来看, 湍流强度 a 组相对于 b 组功率降低 4%, 湍动能 a 组相对于 b 组功率增加 1.49%, 湍流耗散率 a 组相对于 b 组功率增加 2.3%。

a 组功率相对于 b 组功率的相对变化率如图 12 所示。相对变化率=(a 组-b 组)/b 组。各参数在不同风速下对功率的影响有较大差异, 相同风速下各参数对功率的影响也存在明显不同, 相对变化率的波动随风速增加逐渐归零。湍流强度在机组启动阶段以及最大跟风阶段到恒定功率阶段起负作用,

在最大跟风阶段增加了机组的输出。湍动能对机组功率的影响与湍流强度类似, 但其在最大跟风阶段的作用更加明显。湍流耗散率在启动阶段与最大跟风阶段均增加了机组的输出, 而在过渡阶段降低了机组的输出。

3 结论

1) 直接受地形影响的区域集中于距离地面 79 m 范围内, 湍流强度、湍动能最大值和较大值均位于此区域; 湍流耗散率、风速最大值则位于测量范围最高处; 此区域内风转角大, 风向由 W 方向

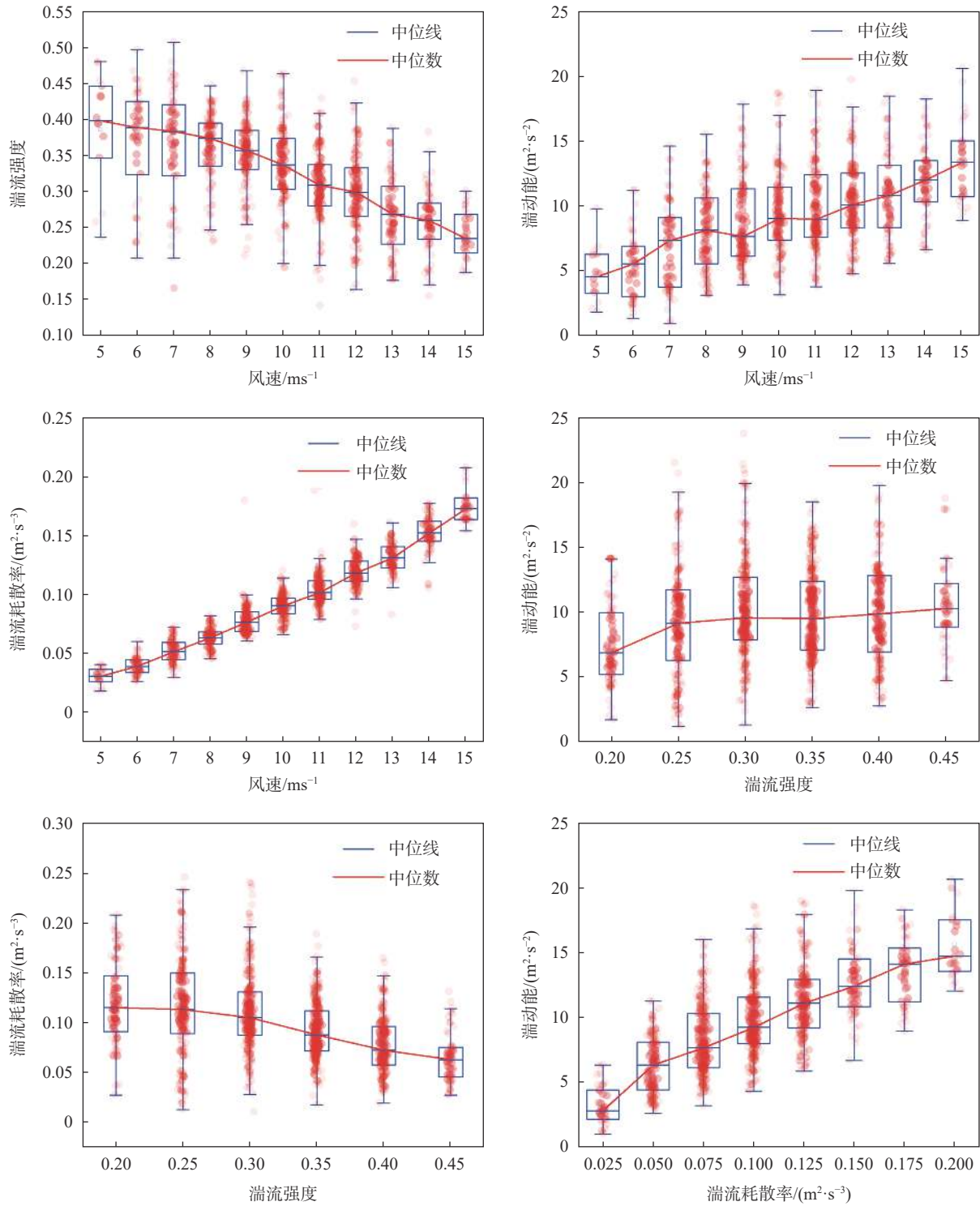


图 10 来流特征参数相互关系

Fig. 10 Interrelationship of incoming flow characteristic parameters

向 SW 方向变化,并在距离地面 79 m 以上时稳定在 SW 方向。

2)在来流特征参数相关性中,湍流耗散率与风速具有最强的正相关性。湍流强度与风速呈负相关,湍动能则与风速呈正相关。湍动能与湍流强度

相关关系较弱,湍流耗散率与湍流强度呈负相关。

3)机组静态功率曲线出现推移或下降现象。总体来看,湍流强度 a 组相对于 b 组功率降低 4%,湍动能 a 组相对于 b 组功率增加 1.49%,湍流耗散率 a 组相对于 b 组功率增加 2.3%。因此,湍动能

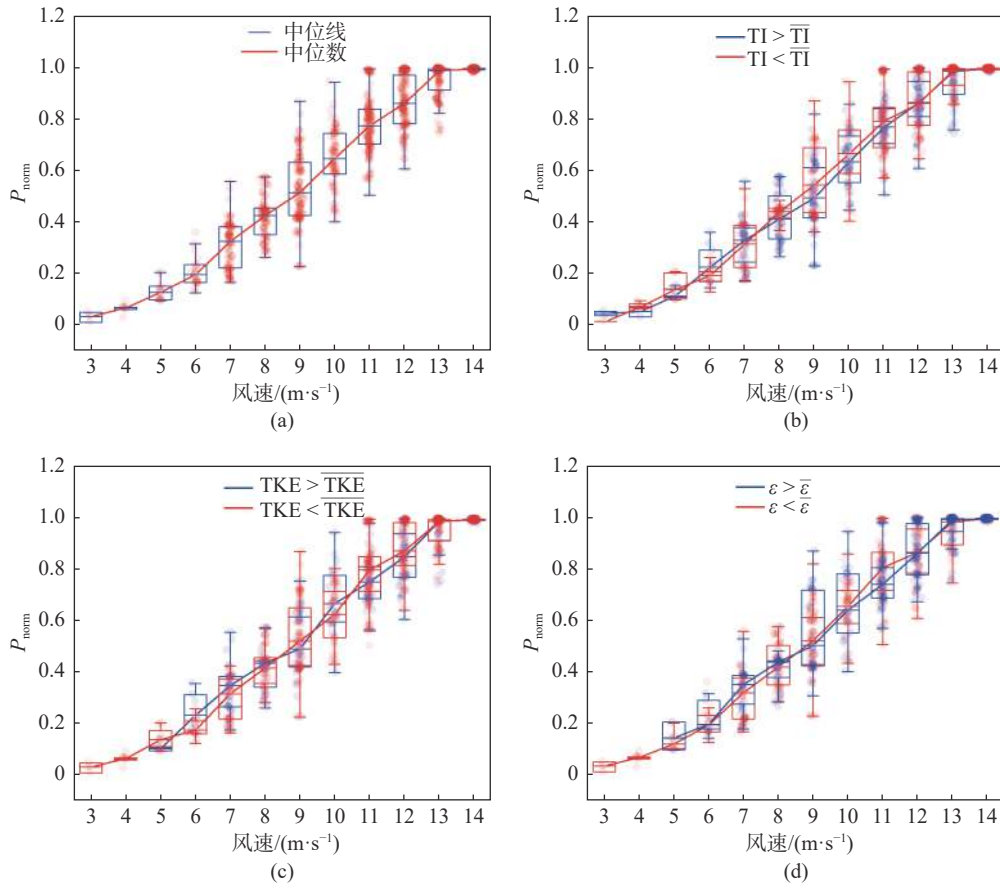


图 11 来流特征参数对机组功率的影响

Fig. 11 Influence of Incoming flow characteristic parameters on unit power

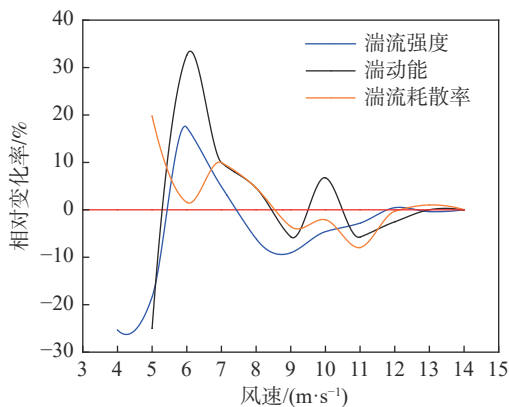


图 12 相对变化率

Fig. 12 Relative change rate of different data sets

对风力机功率的影响程度最低,为 1.49%,但湍流强度对风力机功率的影响程度高达 4%。

参 考 文 献

[1] 2015—2018 中国风电装机容量统计 [EB/OL]. [2020-08-13] (2022-01-10). http://www.cwea.org.cn/industry_data_2018.html.
2015-2018 Statistics on China's installed wind power

capacity[EB/OL]. [2020-08-13] (2022-01-10). http://www.cwea.org.cn/industry_data_2018.html.

[2] WHARTON S, LUNDQUIST J K. Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor - disk wind characteristics at an onshore windfarm[J]. Wind Energy, 2012, 4(15): 525 - 546.

[3] 巫发明, 杨从新, 王靓, 等. 湍流强度对风力发电机组动力学特性及载荷的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 48 - 55.

WU F M, YANG C X, WANG D, et al. Effects of turbulence intensity on dynamic characteristics and load of wind turbine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 48 - 55.

[4] 魏桢, 邓院昌. 连续山坡地形下风场的数值模拟 [J]. 可再生能源, 2013, 31(11): 56 - 59.

WEI Z, DENG Y C. Numerical simulation of wind field in the continuous hillside topograph[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(11): 56 - 59.

- [5] 史俊杰, 许昌, 雷娇, 等. 典型山丘地形与风力机诱导涡流耦合演变规律 [J]. 机械工程学报, 2020, 45(4): 85 – 94.
- SHI J J, XU C, LEI J, et al. Evolution law of coupling evolvement mechanism of vortex field induced by typical hilly terrain and wind turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,45(4): 85 – 94.
- [6] OH H, KIM B. Comparison and verification of the deviation between guaranteed and measured wind turbine power performance in complex terrain[J]. *Energy*, 2015, 85: 23 – 29.
- [7] DAI J C, TAN Y Y, SHEN X B. Investigation of energy output in mountain wind farm using multiple-units SCADA data[J]. *Applied Energy*, 2018, 239: 225 – 238.
- [8] HAN X X, LIU D Y, XU C, et al. Atmospheric stability and topography effects on wind turbine performance and wake properties in complex terrain[J]. *Renewable Energy*, 2018, 126: 640 – 651.
- [9] KOGAKI T, SAKURAI K, SHIMADA S, et al. Field Measurements of wind characteristics using LiDAR on a wind farm with downwind turbines in a complex terrain region[J]. *Energies*, 2020, 13(19): 5135.
- [10] 杨从新, 王强, 李寿图, 等. 高原风力机与来流湍流的多尺度结构响应关系 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 20 – 25.
- YANG C X, WANG Q, LI S T, et al. Multi-scale structural response relationship between wind turbine and turbulent inflow over the plateau[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2021, 40(5): 20 – 25.
- [11] BODINI N, LUNDQUIST J K, KRISHNAMURTHY R, et al. Spatial and temporal variability of turbulence dissipation rate in complex terrain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(7): 4367 – 4382.
- [12] 顾本文, 朱王明, 施晓辉. 云南风资源的特点 [J]. 太阳能学报, 2000, 4(1): 45 – 49.
- GU B W, ZHU W M, SHI X H. The characteristic of wind energy in Yunnan[J]. *ACTA Energy Solaris Sinica*, 2000,4(1): 45 – 49.
- [13] 王印. 青藏高原地区冬季来流对大型风力机功率及尾流的影响 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- WANG Y. Influence of inflow on power and wake of large scale wind turbine in tibet plateau in winter[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [14] 李鸿秀, 朱瑞兆, 王蕊, 等. 不同地形风电场湍流强度日变化和年变化分析 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(11): 2327 – 2333.
- LI H X, ZHU R Z, WANG R. Wind turbulence intensity of daily and yearly variation analysis in different kinds of terrain[J]. *ACTA Energy Solaris Sinica*, 2014,35(11): 2327 – 2333.
- [15] BODINI N, LUNDQUIST J K, KIRINCICH A. U. S. east coast lidar measurements show offshore wind turbines will encounter very low atmospheric turbulence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 64(10): 5582 – 5591.

(编校: 夏书林)