

引用格式: 唐道贵, 柯耀, 张乾能, 等. 港口实景下大型风电机组工程化设计分析 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(1): 64-72. TANG Daogui, KE Yao, ZHANG Qianneng, et al. Engineering design analysis of large-scale wind turbine in a port [J]. Southern energy construction, 2024, 11(1): 64-72. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.07.

港口实景下大型风电机组工程化设计分析

唐道贵^{1,2,3,✉}, 柯耀⁴, 张乾能⁴, 李将渊⁴, 俞浩煊⁴, 朱琳杰⁴

- 浙江省海港投资运营集团有限公司, 浙江 宁波 315100;
- 宁波舟山港集团有限公司, 浙江 宁波 315100;
- 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430073;
- 宁波北仑第三集装箱码头有限公司, 浙江 宁波 315100)

摘要: [目的] 港口面临着巨大的生产用电需求和碳减排压力, 港区丰富的风能资源使得风电在港口具有较大应用前景。风电机组选址及选型设计将直接影响电站的经济效益和港区生产安全, 在风能系统工程化设计中具有重要的研究意义。[方法] 以宁波舟山港穿山港区为例, 研究了港口特定环境下大型风电机组的工程化设计原则与限制因素, 分析了港区风能资源情况与风资源能源化潜力, 基于历史统计信息, 分析了影响港区的特殊气候; 基于港区实景, 考虑港区特定环境下的限制因素, 对风电机组的选址设计进行分析; 研究了风电机组的选型设计方法, 并以市场上4种主流机型为例, 从多个维度对港区风机选型设计进行了分析。[结果] 最终, 选用IEC I类及以上且具备抗台特别设计的WTG2型风电机组风机, 年发电量可达24.53 GWh, 节约用电成本0.233亿元, 减少CO₂排放约1.425 1万t。[结论] 所提出的港口实景下大型风电机组工程设计方法经验证可行, 且可以实现较大的经济和生态效益, 助力港口实现碳达峰和能源自给, 对港口风电场工程设计具有一定的借鉴参考价值。

关键词: 绿色港口; 风能; 风资源评估; 风机选型; 风机选址

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)01-0064-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.07

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Engineering Design Analysis of Large-Scale Wind Turbine in a Port

TANG Daogui^{1,2,3,✉}, KE Yao⁴, ZHANG Qianneng⁴, LI Jianguyuan⁴, YU Haohuan⁴, ZHU Linjie⁴

- Zhejiang Provincial Seaport Investment & Operation Group Co., Ltd., Ningbo 315100, Zhejiang, China;
- Ningbo Zhoushan Port Group Co., Ltd., Ningbo 315100, Zhejiang, China;
- School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China;
- Ningbo Beilun Third Container Terminal Co., Ltd., Ningbo 315100, Zhejiang, China)

Abstract: [Introduction] Ports are facing significant electricity demand and carbon reduction pressure. The abundant wind energy resources in port areas make wind power highly promising for port applications. The site selection and design of wind turbines directly impact the economic benefits of power plants and production safety in the port area, thus, it has important research significance in the engineering design of wind energy systems. [Method] Taking Chuanshan port area of Ningbo-Zhoushan Port as an example, this study investigated the engineering design principles and limiting factors for large-scale wind turbines in port areas and analyzed the wind resources and the potential for wind energy utilization in the port and the special weather affecting the port area based on statistic history data; based on the actual conditions of the port, the site selection and design of wind turbines were analyzed considering the limiting factors of the port area. The study also examined the selection and design methods of wind turbines and analyzed the selection and design

收稿日期: 2023-06-13 修回日期: 2023-07-06

基金项目: 国家重点研发计划“水运港-船多能源融合技术及集成应用”(2021YFB2601600); 博士后国际交流计划引进项目“多源数据驱动的港-船多能源融合系统能量管理策略研究”(YJ20220162)

from multiple dimensions, taking four mainstream models on the market as examples. [Result] Ultimately, the WTG2 wind turbine that meets at least IEC Class I standards and has been specially designed to withstand typhoons is selected. The annual electricity generation can reach 24.53 GWh, resulting in cost savings of 0.233 hundred million and a reduction in CO₂ emissions of approximately 1.425 1 ten thousand tons. [Conclusion] The proposed engineering design method for large-scale wind turbines in port areas, based on actual conditions, has been verified as feasible and can achieve significant economic and ecological benefits. It can contribute to carbon peaking and energy self-sufficiency in ports, providing valuable references for the engineering design of wind farms in port areas.

Key words: green ports; wind energy; wind energy resource assessment; wind turbine selection; wind turbine site selection

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

近年来,与全球气候变化密切相关的极端天气、自然灾害频发,为应对气候变化,世界各国纷纷制定碳中和、碳中和气候目标,积极应对气候变化成为全球共同性议题^[1]。中国也提出了 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和的目标^[2]。大力推动可再生能源发展是应对当前能源危机和环境问题的重要手段。

风力发电技术是一项经过充分验证且具有较大效益的技术,对于促进地区治理大气污染、转变经济发展方式具有重要意义^[3-5]。截至 2022 年年底,全国风电累计装机超过 18 万台,容量突破 390 GW^[6]，“十四五”期间,新能源仍将继续快速发展,装机和发电量占比仍将持续提高^[7-8]。国家能源局指出未来几年我国的风电发展模式为:在大型风电地区促进风电规模化发展的基础上,支持风资源不太丰富的地区,发展低风速风电场,倡导分散式风电开发模式。风电场逐渐由传统地区向东南沿海地区发展,如福建、两广等低风速地区^[9-12],而港口风电场是介于陆上和海上风电场的一个特例。柳成等^[13]针对低风速区的风电场的建设,通过实测数据,采用柱状图以及气象玫瑰图对风电场场址风能资源进行综合评价,以确定场址、风机型号以及风机的布置。IEC 61400-1:2019 也规定了确保风力涡轮机结构完整性的基本设计要求^[14]。Olabi 等介绍了可用风力发电机组技术的一般选择指南,详细讨论了与风能转换系统相关的各种组件的前景及其局限性^[15]。上述研究主要侧重于陆上或海上风电机组选址或选型,即通过分析有代表性的测风塔资料,系统分析不同地区的风资源特性^[16-19],为风电机组选址及选型等提供重要参考。但大多数研究都致力于陆上或海上风电场选

址和风电机组选型^[20-22],没有针对港口这一特殊场景进行设计^[23-24]。对于港口大型风电机组选址和选型而言,如何在不影响港口安全生产的前提下充分利用港区周边闲置地块,并使得所选风电机组型号满足高安全性、低噪声、高耐腐蚀性等要求,对港口分散式风电场开发、风电机组选址及选型提出了更大的挑战。本文以宁波舟山港穿山港区为例,分析了港口风力发电机组的限制性因素和设计原则,结合港区实景,对港口大型风力发电机组选址及选型进行工程化设计分析,为港口风电场设计提供参考。

1 工程简介

穿山港区海拔高度 0~3 m。港区区廓呈长方形,东西端最长 3.75 km,南北端最宽 1.5 km。港区内设立一座激光雷达,坐标为 29°53'9.69"N, 122°1'41.48"E,于 2022 年 1 月 4 日开始正式测风。本文根据 MERRA-2 再分析数据对港区的风能资源进行较长时间尺度上的分析,再分析港区一年的风能数据进行港区近期风能资源情况分析。

风电场的勘测设计工作主要包括场址地质勘查、风能资源评估、微观选址和财务评价等^[25-26]。由于港口风电场的风能资源存在不均匀性,且港区内人类活动频繁,存在较多制约风电机组布置的因素,选择经济技术指标相对较优的风电机组以及布置位置就显得尤为重要。因此,本文重点对港口风电场的风能资源评估、风电机组选址及选型等进行分析。通过分析穿山港区风资源潜力以及港区基础设施能源化潜力的基础上,建立港区多能源融合系统仿真模型,评估穿山港区多能源融合系统的经济与排放特性。通过数字模拟和港区测得的数据进行风资源分析,明确港区的风发电潜力,并为后续风出力的计

算以及多能源融合系统的评估、设计和运行管理等提供决策支持。

2 穿山港区风能资源评估

穿山港区沿岸陆域以低山丘陵为主,间隔分布小型海积平原,岸外有舟山群岛星罗棋布。区属亚热带季风气候,温和湿润,四季分明。风向季节性变化强,夏季盛行东南风,冬季盛行西北风。通过对该区域的风能资源分析发现,场址区域内风速、风向差异较大。因此,准确掌握区域内风能资源分布情况,对风电场工程设计起着决定性作用^[27]。

2.1 风能资源分析

对于风能情况的分析,采用天气研究及预报(Weather Research and Forecasting, WRF)中尺度数值模式初步分析场区风资源水平,同时参考 MERRA-2 再分析数据,根据其他测风塔数据进行模型检验。MERRA-2 长序列及测风年平均风速统计数据如表 1 所示。

表 1 MERRA-2 长序列及测风年平均风速统计表

Tab. 1 MERRA-2 long sequence and annual average wind speed statistical datas

MERRA-2	平均风速/(m·s ⁻¹)	与测风年差值/(m·s ⁻¹)
1983 ~ 2022(近40 a)	6.52	0.07
1993 ~ 2022(近30 a)	6.51	0.08
2003 ~ 2022(近20 a)	6.52	0.07
2013 ~ 2022(近10 a)	6.42	0.17
2022.01 ~ 2022.12(测风年)	6.59	—

穿山港区代表年 125 m 高度风能和风向情况如图 1 所示。从图中可以看出,场区轮毂高度主要风向分别为 NNE、N 和 S,相应频率分别为 12.6%、11.7% 和 10.1%;轮毂高度主要风能方向分别为 NNW、N 和 S,相应频率分别为 16.3%、15.9% 和 14.9%。

港区代表年 125 m 高度各月风向和风能玫瑰图如图 2 所示。从图中可以看出,港区的风向夏季和冬季较为单一,夏季主要风向为 SSW、S,冬季主要风向为 N、NNW;春秋季节风向较为杂乱。对于港区的风能,夏季主要集中在 S、SSW;其他季节主要分布在 NNW、N 和 NNE。

穿山港区代表年 125 m 高度风速和风功率年变化曲线、日变化曲线分别如图 3(a)、图 3(b)所示。

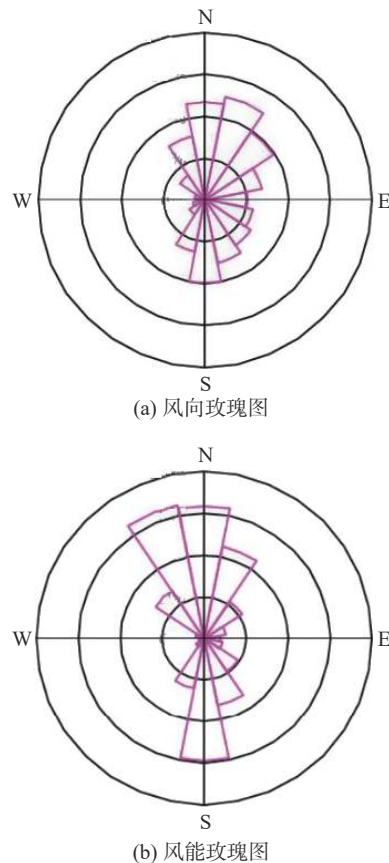


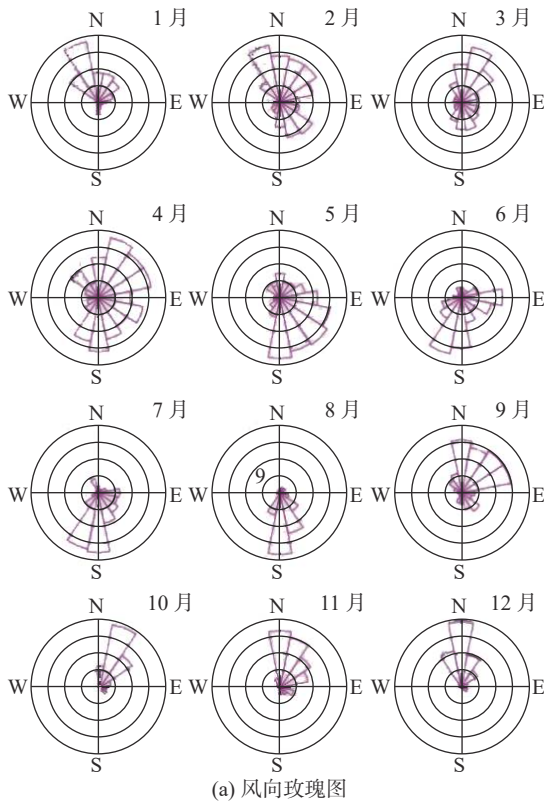
图 1 港区代表年 125 m 高度风向和风能玫瑰图

Fig. 1 Rose diagram of wind direction and wind energy at 125 m height in representative year of port area

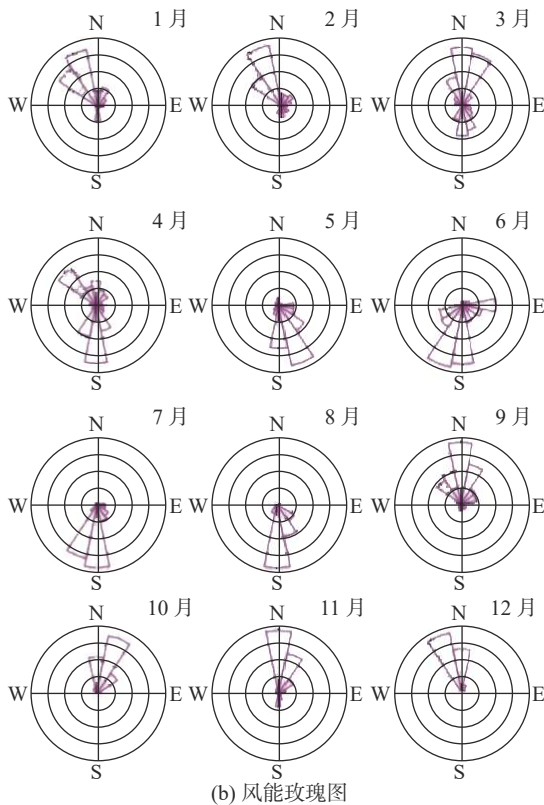
从图中可以看出,港区的风速呈现出一定的季节性特点但是变化较为缓和,在冬季和夏季风速较大,最大月平均风速出现在 8 月,月平均风速为 6.8 m/s,最小月平均风速出现在 6 月,月平均风速 5.22 m/s。风功率呈现出较强的季节性特点,变化较大,最大月平均风功率密度出现在 12 月,月平均风功率密度为 343 W/m²,最小风功率密度出现在 6 月,风功率密度为 133 W/m²。从风速和风功率日变化曲线上看,港区风速和风功率日变化较为平稳。清晨 8 时至午后 1 时风速处于较低水平,下午至傍晚逐渐增加,晚间 8 时达到最高点,而后开始缓慢下降,在深夜至次日凌晨风速变化趋于平缓。风功率密度的日变化情况与风速基本一致。

2.2 特殊气候

穿山港区位于浙江东南海港区域,对风电场造成影响的特殊气候主要是热带气旋和大风等。其中,区域热带气旋以穿山港区中心为圆形,设置半径



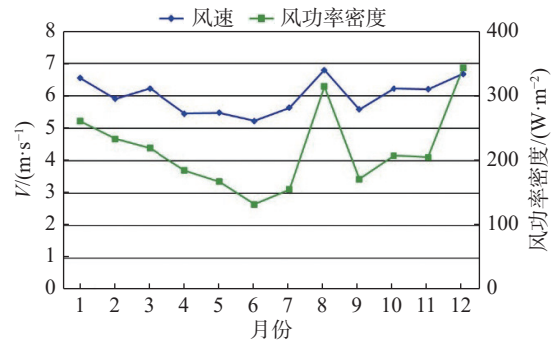
(a) 风向玫瑰图



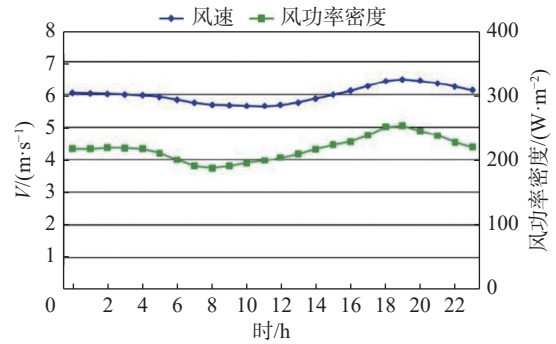
(b) 风能玫瑰图

图 2 港区代表年 125 m 高度各月风向和风能玫瑰图

Fig. 2 Monthly wind direction and wind energy rose diagram at a height of 125 m in a representative year of the port area



(a) 年变化曲线



(b) 日变化曲线

图 3 港区代表年 125 m 高度风速和风电功率年变化和日变化曲线

Fig. 3 Annual and daily changes of wind speed and wind power at a height of 125 m in a representative year of the port area

100 km 为区域为本区域热带气旋统计区域。根据国家气象观测站点数据, 所有进入统计区域的热带气旋的路径显示, 影响本次统计区域的热带气旋路径主要为转向类路径。1949~2021 年期间, 影响本次统计区域的热带气旋年均 0.4 个, 每年热带气旋影响本次统计区域的时间在 5~9 月。

通过历史数据分析, 港区 65 m 高度处 50 年一遇最大风速在 52.1 m/s 左右。根据 IEC61400-1: 2019 风力发电机组第 1 部分: 设计要求 (Wind energy generation systems—Part1: Design requirements) 的设计标准^[4], 风力发电机组选型的基本参数如表 2 所示。结合表 2 以及风资源、特殊气候等分析, 本风电场宜选用 IEC I 类及以上且具抗台特别设计的风电机组或满足抗台要求的 S 类风电机组。结合数值模型及港区周边项目实测成果初步判断, 平均风速为 15 m/s 时, 港区 125 m 高度湍流强度低于 C 类(0.12)。

3 风电发电系统设计

风电场微观选址是一个复杂的系统工程, 涉及

表 2 台风型风力发电机组等级基本参数

Tab. 2 Basic parameters of typhoon-resistant wind turbine grade

风电机组等级	I	II	III	S
$V_{Tref}/(m \cdot s^{-1})$	57	55	50	
$A I_{ref}$	—	0.16	—	由设计者确定各参数
$B I_{ref}$	—	0.14	—	
$C I_{ref}$	—	0.12	—	

注: V_{Tref} : 轮毂高度处 50 年一遇 10 min 平均极端风速; I_{ref} : 平均风速为 15 m/s 时轮毂高度处湍流强度的特征值; 定义同 IEC61400-1: 1999; A: 表示较高湍流特性等级; B: 表示中等湍流特性等级; C: 表示较低湍流特性等级。

风能资源、地质、机组布置等, 对于风电场建设、运行而言至关重要, 也是风电场取得良好经济效益的关键^[28]。而风电机组选址及选型过程、发电量估算等又是微观选址工作的中心内容及评判依据。文章将结合港区实际情况, 着重分析风力发电机组选址过程及选型问题。

3.1 风电机组选址分析

风电场通过每台风电机组把风能转化为电能, 风经过风电机组转轮后速度下降并产生紊流, 沿着下风向一定距离后, 才能消除前 1 台风电机组对风速的影响。在布置风电机组时, 应充分考虑风电机组之间相互的尾流影响, 确定各风电机组的间距, 把尾流影响控制在合理范围内, 同时兼顾工程集电线路和道路的投资, 使项目经济性达到最优。

在风力发电机组的工程化设计中, 首先, 应充分考虑场址内盛行风向、风速、地形地貌等条件, 在同等风况条件下, 选择地质及施工条件较好的场地; 其次, 既要尽量减小风电机组之间的尾流影响, 又要充分利用场区内的土地资源, 同时兼顾工程集电线路和道路的投资, 并且要考虑风电场区内限制条件, 避免风电机组布置与噪声控制^[29-31]、港区土地利用规划等相冲突。风电机组布置需考虑机组安全性, 将风电机组的尾流影响控制在合理范围内。

3.1.1 风电机组布置限制性因素

1) 海塘: 机位点在海塘管理范围内, 对于海塘的影响, 其安全性已通过了水利部门的审查。

2) 场区办公楼: 风电场区域内分布有办公楼等房屋。风电机组布置时, 尽可能远离, 满足安全距离和避免风电机组的噪声影响。

3) 电力线路: 为避免风电场施工及运行期间对电力线路的影响, 布置时尽量避让。根据《风电场工程微观选址技术规范》(NB/T 10103—2018), 距离

35 kV 以上等级架空输电线路不宜小于风电机组倒塔距离的 1.0 倍。

4) 道路: 白中线位于场区南侧, 为避免风电场施工及运行期间对道路的影响, 根据《风电场工程微观选址技术规范》(NB/T 10103—2018), 风电机组的塔筒中心与国道及高速公路、省道的避让距离宜分别大于 1.5 倍倒塔距离、1.0 倍倒塔距离。

5) 其他: 港区内可能还存在其他限制性因素。

经过综合分析, 穿山港区共有 3 个风力发电机组安装机位, 如图 4 所示。



图 4 风电机组可安装点位

Fig. 4 Wind turbine installation points

3.1.2 港口风电机组选址的特殊性

机位选址需充分考虑对于港口运营活动的影响, 港口通常是繁忙的运输和贸易中心, 机组选址时需要考虑港口的运营活动, 特别是港区岸桥、龙门吊作业的影响以及堆场的正常运营, 需要确保风电机组的选址不会对港口运营造成干扰或安全风险。

机位选址还需提前考虑风机接入电网的方案, 港口通常有完善的基础设施和电网接入, 需要考虑到电网容量、传输线路、变电站等因素, 以确保风电机组能够有效地并入电网。由于 N01、N02 和 N03 号机位靠近港区已有的变电站, 符合经济性的要求。

所有机位平均风速、入流角、风切变、湍流强度满足机组安全性要求, 且所有机位和周边建筑均满足安全距离要求。N01 号机位相对位置示意图及其

三维示意图如图 5、图 6 所示, N02 和 N03 号机位相对位置示意图及其三维示意图如图 7、图 8 所示。

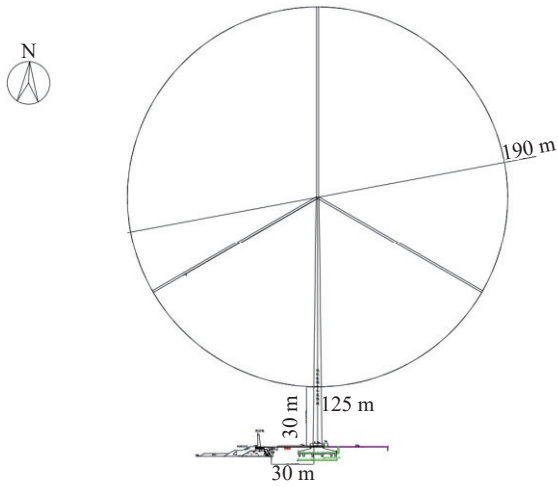


图 5 N01 机位(190 m 叶轮/125 m 轮毂高度机型)相对位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the relative position of N01 positions (190 m impeller/125 m hub height model)

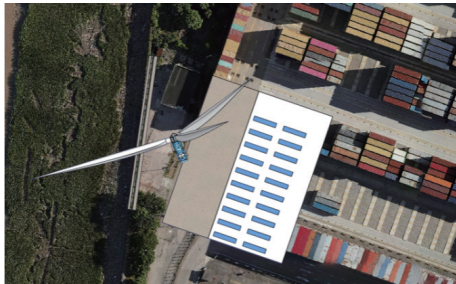


图 6 N01 机位三维示意图

Fig. 6 3D schematic diagram of N01 position

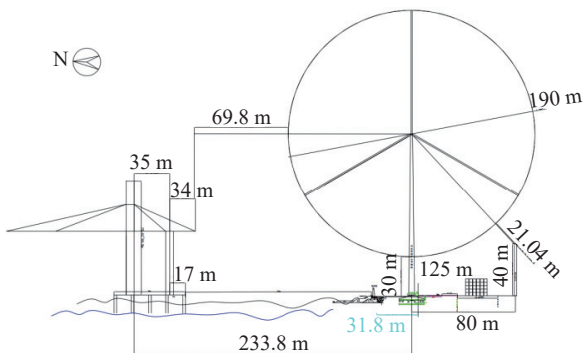


图 7 N02、N03 机位(190 m 叶轮/125 m 轮毂高度机型)相对位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the relative position of N02 and N03 positions (190 m impeller/125 m hub height model)

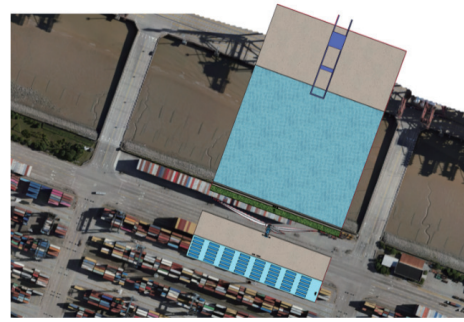


图 8 N02、N03 机位三维示意图

Fig. 8 3D schematic diagram of N02 and N03 position

3.2 风力发电机组选型分析

目前, 陆上风电机组单机容量在 4.0~6.5 MW 之间不等, 总体来说, 目前陆上风电机组呈现出以 4.00 MW 以上机组为主流, 机组单机容量逐渐大型化的趋势。在选择风电机组时, 根据电网公司对风电场接入电网的技术要求、各机型的技术成熟性、风电场风资源和安装运输等条件进行综合比较^[32]。根据目前风电机组产业状况, 选择单机容量在 4.50~6.25 MW 之间且满足 IEC I 类及以上具抗台特别设计的 4 种主流风电机组进行比选。结合机型的配套轮毂高度及周边限制性因素, 按轮毂高度 125 m 进行分析。4 种比选机型的技术特性如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, WTG1~WTG4 4 种比选机型的 IEC 等级均为 S, 满足本项目抗台要求的 S 类风电机组要求。本文进一步从发电量、工程投资和经济指标等方面对以上 4 种方案进行比较, 如表 4 所示。

从发电量上看, WTG1~WTG4 4 种机型方案年上网电量分别为 25.62 GWh、24.53 GWh、17.44 GWh 和 19.75 GWh; WTG1 年上网电量最高, WTG2 机型方案次之。从工程投资上看, WTG1~WTG4 4 种比选机型方案的单位千瓦静态投资(不含送出)分别为 9042 元/kW、8522 元/kW、6302 元/kW 和 8299 元/kW, WTG3 机型方案的单位千瓦静态投资最低, WTG4 机型方案次之。从经济性上看, WTG1~WTG4 4 种比选机型方案的项目投资财务内部收益率(所得税前)分别为 17.29%、19.19%、13.21% 和 14.68%, 资本金财务内部收益率(所得税后)分别为 15.38%、17.15%、11.43% 和 12.97%。综合来看, WTG2 机型方案经济性最优, WTG1 机型方案次之。通过以上分析, 采用 WTG2 型每年上网电量可达 24.53 GWh, 每年可减

表 3 不同型号方案风电机组技术特性表

Tab. 3 Table of technical characteristics of wind turbines with different model schemes

指标	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4
额定功率/MW	4.50	6.25	5.50	6.25
装机台数/台	3	2	2	2
功率调节	变桨变速	变桨变速	变桨变速	变桨变速
转轮直径/m	156	190	190	172
风轮扫风面积/m ²	19 113	28 353	28 353	23 235
单位千瓦扫风面积/[m ² ·(kW) ⁻¹]	4.25	4.54	4.54	3.72
切入风速/(m·s ⁻¹)	2.5	2.5	2.5	2.5
额定风速/(m·s ⁻¹)	9.5	9.5	10	10.5
切出风速/(m·s ⁻¹)	20~25	20~25	20~25	25
IEC等级	S	S	S	S
极端(生存)风速(3 s极大值)/(m·s ⁻¹)	70	73.5	70	70
极端(生存)风速(10 min最大值)/(m·s ⁻¹)	50	52.5	50	50
运行温度/°C	-30~45	-30~45	-30~40	-30~40
生存温度/°C	-40~50	-40~50	-40~50	-40~50

表 4 各比选机型方案技术经济性比较表

Tab. 4 Technical and economical comparison of schemes of various models

评价维度	指标	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4
发电量	年理论发电量/GWh	33.88	32.15	23.10	26.15
	年设计发电量/GWh	33.71	31.91	22.96	25.99
	综合折减系数	0.76	0.76	0.76	0.76
	年上网电量/GWh	25.62	24.53	17.44	19.75
工程投资	工程静态总投资/亿元	1.220 7	1.065 3	0.845 2	1.037 4
	单位千瓦静态投资/[万元·(kW) ⁻¹]	9 042	8 522	6 302	8 299
经济指标	项目投资财务内部收益率(所得税前)/%	17.29	19.19	13.21	14.68
	资本金财务内部收益率(所得税后)/%	15.38	17.15	11.43	12.97

少 CO₂ 排放约 1.425 1 万 t, 节约用电成本 0.233 亿元, 实现较大的经济和生态效益。

4 结论

1) 分析了穿山港区风资源潜力, 场区 125 m 高度主要风向分别为 NNE、N, 主要风能方向分别为

NNW、N; 港区风向和风能呈现出季节变化规律和日间不同时刻的变化规律, 最大月平均风功率密度出现在 12 月, 为 343 W/m², 最小风功率密度出现在 6 月, 风功率密度为 133 W/m²; 港区风速和风功率在清晨 8 时至午后 1 时风速处于较低水平, 下午至傍晚逐渐增加, 晚间 8 时达到最高点。

2) 对港口风力发电机组的选址进行了分析, 综合考虑海塘、港区办公楼、电力线路和道路以及港区现有堆场布置等限制因素, 选择了 3 个适宜建设风力发电机组的位置。

3) 对港口风力发电机组的选型进行了分析, 选择市场上满足要求的 4 种主流机型进行分析, 从技术特性、发电量、工程建设成本以及经济性等因素进行了分析, 最终选择 WTG2 机型。

4) 对风力发电机组的效益进行了分析, 采用 WTG2 机型风力发电机组, 每年上网电量可达 24.53 GWh, 可减少 CO₂ 排放 1.425 1 万 t, 节约用电成本 0.233 亿元, 实现较大的经济和生态效益。

参考文献:

- [1] IPCC Working Group. AR6 climate change 2021: the physical science basis [EB/OL]. (2021-08-24) [2021-10-15]. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- [2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [N]. 人民日报, 2020-09-23(03).
XI J P. Speech at the general debate of the seventy-fifth session of the United Nations general assembly [N]. People's daily, 2020-09-23(03).
- [3] 马丽梅, 史丹, 裴庆冰. 中国能源低碳转型(2015~2050年): 可再生能源发展与可行路径 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 8-18. DOI: 10.12062/cpre.20170916.
MA L M, SHI D, PEI Q B. Low-carbon transformation of China's energy in 2015~2050: renewable energy development and feasible path [J]. China population, resources and environment, 2018, 28(2): 8-18. DOI: 10.12062/cpre.20170916.
- [4] LI J Y, LI S S, WU F. Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on life cycle assessment theory [J]. Renewable energy, 2020, 155: 456-468. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.133.
- [5] DUAN H B. Emissions and temperature benefits: the role of wind power in China [J]. Environmental research, 2017, 152: 342-350. DOI: 10.1016/j.envres.2016.07.016.
- [6] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2022年中国风电吊装容量统计简报 [J]. 风能, 2023(4): 40-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2023.04.009.

- Wind Energy Professional Committee of China Renewable Energy Society. Statistical report on wind power lifting capacity in China in 2022 [J]. *Wind energy*, 2023(4): 40-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2023.04.009.
- [7] AMANO R S. Review of wind turbine research in 21st century [J]. *Journal of energy resources technology*, 2017, 139(5): 050801. DOI: 10.1115/1.4037757.
- [8] 黄碧斌,张运洲,王彩霞.中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J].*中国电力*,2020,53(1):1-9. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201911140.
- HUANG B B, ZHANG Y Z, WANG C X. New energy development and issues in China during the "14th five-year plan" [J]. *Electric power*, 2020, 53(1): 1-9. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201911140.
- [9] 时智勇,王彩霞,李琼慧.“十四五”中国海上风电发展关键问题[J].*中国电力*,2020,53(7):7-17. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202004096.
- SHI Z Y, WANG C X, LI Q H. Key issues of China's offshore wind power development in the "14th five-year plan" [J]. *Electric power*, 2020, 53(7): 7-17. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202004096.
- [10] 李铮,郭小江,申旭辉,等.我国海上风电发展关键技术综述[J].*发电技术*,2022,43(2):186-197. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22028.
- LI Z, GUO X J, SHEN X H, et al. Summary of technologies for the development of offshore wind power industry in China [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(2): 186-197. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22028.
- [11] 舟丹.中国风电行业发展趋势[J].*中外能源*,2019,24(11):42.
- ZHOU D. Development trend of China's wind power industry [J]. *Sinoforeign energy*, 2019, 24(11): 42.
- [12] 商立峰,解百臣.我国不同省份的风电发展趋势研究[J].*可再生能源*,2014,32(2):191-195. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2014.02.022.
- SHANG L F, XIE B C. Research on development trend of wind power in selected provinces of China [J]. *Renewable energy resources*, 2014, 32(2): 191-195. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2014.02.022.
- [13] 柳成,王天宇,曲永印,等.风电场的风力资源分析以及场址选择[J].*太阳能学报*,2016,37(11):2835-2842. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2016.11.016.
- LIU C, WANG T Y, QU Y Y, et al. Wind resource analysis and site selection of wind power plant [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2016, 37(11): 2835-2842. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2016.11.016.
- [14] IEC. Wind energy generation systems-part 1: design requirements: IEC—TC MT—1 [S]. Geneva: IEC, 2019.
- [15] OLABI A G, WILBERFORCE T, ELSAID K, et al. Selection guidelines for wind energy technologies [J]. *Energies*, 2021, 14(11): 3244. DOI: 10.3390/en14113244.
- [16] 赵坤,江滢,李存斌,等.中国3个典型地区风能长期变化特征研究[J].*可再生能源*,2015,33(12):1853-1860. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2015.12.017.
- ZHAO K, JIANG Y, LI C B, et al. Research on the long-term changes of wind characteristics in three typical areas of China [J]. *Renewable energy resources*, 2015, 33(12): 1853-1860. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2015.12.017.
- [17] MURTHY K S R, RAHI O P. A comprehensive review of wind resource assessment [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 72: 1320-1342. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.038.
- [18] DAI J C, TAN Y Y, YANG W X, et al. Investigation of wind resource characteristics in mountain wind farm using multiple-unit SCADA data in Chenzhou: a case study [J]. *Energy conversion and management*, 2017, 148: 378-393. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.05.075.
- [19] 张智伟,张建平,刘明,等.芦潮港海上风资源变化特性分析[J].*发电技术*,2022,43(2):260-267. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22010.
- ZHANG Z W, ZHANG J P, LIU M, et al. Analysis on variation characteristics of offshore wind resources in Luchao port [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(2): 260-267. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22010.
- [20] 李保洋.某近海风电场风机基础选型设计[J].*南方能源建设*,2023,10(4):166-173. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.017.
- LI B Y. Selection and design of wind turbine foundation for an offshore wind farm [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 166-173. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.017.
- [21] REDISKE G, BURIN H P, RIGO P D, et al. Wind power plant site selection: a systematic review [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2021, 148: 111293. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111293.
- [22] CHAMANEHPUR E. Site selection of wind power plant using multi-criteria decision-making methods in GIS: a case study [J]. *Computational ecology and software*, 2017, 7(2): 49-64. DOI: 10.0000/issn-2220-721x-compuecol-2017-v7-0005.
- [23] ABDEL-BASSET M, GAMAL A, CHAKRABORTTY R K, et al. A new hybrid multi-criteria decision-making approach for location selection of sustainable offshore wind energy stations: a case study [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 280: 124462. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124462.
- [24] ERYILMAZ S, NAVARRO J. A decision theoretic framework for reliability-based optimal wind turbine selection [J]. *Reliability engineering & system safety*, 2022, 221: 108291. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108291.

- [25] 吴晓平. 利用闲置地块开发分散式风电的风机选址与选型研究 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(2): 46-51. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.007).
WU X P. Research on wind turbine site and type selection for distributed wind power development based on idle land [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(2): 46-51. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.007).
- [26] 张长存. 风电场建设中的勘测设计工作及其优化方法分析 [J]. 风能, 2014(1): 66-69. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2014.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2014.01.020).
ZHANG C C. Analysis of survey design and optimization method about wind farm construction [J]. *Wind energy*, 2014(1): 66-69. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2014.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2014.01.020).
- [27] HERBERT-ACERO J F, PROBST O, RÉTHORÉ P E, et al. A review of methodological approaches for the design and optimization of wind farms [J]. *Energies*, 2014, 7(11): 6930-7016. DOI: [10.3390/en7116930](https://doi.org/10.3390/en7116930).
- [28] 李良县, 任腊春. 高海拔山地风电场风能资源分析与微观选址 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(4): 427-430, 436. DOI: [10.13244/j.cnki.jiwhr.2014.04.015](https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.2014.04.015).
LI L X, REN L C. Wind resource analysis and micro-siting for high altitude mountain wind farm [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, 12(4): 427-430, 436. DOI: [10.13244/j.cnki.jiwhr.2014.04.015](https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.2014.04.015).
- [29] HANSEN C, HANSEN K. Recent advances in wind turbine noise research [J]. *Acoustics*, 2020, 2(1): 171-206. DOI: [10.3390/acoustics2010013](https://doi.org/10.3390/acoustics2010013).
- [30] DESHMUKH S, BHATTACHARYA S, JAIN A, et al. Wind turbine noise and its mitigation techniques: a review [J]. *Energy procedia*, 2019, 160: 633-640. DOI: [10.1016/j.egypro.2019.02.215](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.215).
- [31] RASPET R, WEBSTER J, DILLION K. Framework for wind

noise studies [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2006, 119(2): 834-843. DOI: [10.1121/1.2146113](https://doi.org/10.1121/1.2146113).

- [32] BORTOLOTTI P, TARRES H C, DYKES K, et al. IEA Wind TCP Task 37: systems engineering in wind energy-WP2.1 reference wind turbines [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019. DOI: [10.2172/1529216](https://doi.org/10.2172/1529216).

作者简介:



唐道贵

唐道贵(第一作者, 通信作者)

1991-, 男, 博士后研究员, 法国巴黎萨克雷大学计算机专业博士, 主要从事智能电网的绿色化和韧性分析工作(e-mail)tangdaogui@gmail.com。

柯耀

1994-, 男, 机械工程专业硕士, 主要从事港口机械方面的研究工作(e-mail)499581287@qq.com。

张乾能

1983-, 男, 高级工程师, 机械设计制造及自动化专业硕士, 主要从事港口设备和创新管理工作(e-mail)zqn18166@126.com。

李将渊

1981-, 男, 机械电子控制工程专业学士, 主要从事港口供配电、设施电气工作(e-mail)lijy@nbport.com.cn。

俞浩煊

1981-, 男, 自动化专业学士, 主要从事港口电气方面的研究工作(e-mail)676702898@qq.com。

朱琳杰

1979-, 男, 高级工程师, 电力系统及其自动化专业学士, 主要从事港口电气工作(e-mail)574192885@qq.com。

(编辑 孙舒)