

无掩护海域施工船舶的作业天数分析方法研究及应用

尹剑锋¹, 刘清君^{2,3}, 闻云呈^{2,3}, 王登婷^{2,3}

(1. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315200; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 3. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 海上施工是海上工程建设面临的重要挑战, 作业天数是海上施工重点关注的内容。为解决工程区风浪资料缺乏时作业天数分析的困难, 文章将长期海洋站风、浪观测资料分析与数值模拟相结合, 提出一种实用的海上施工作业天数分析方法。该方法应用于涂茨海上风电工程施工作业天数分析以及船型选择分析表明, 波高变化对风电工程作业天数的影响最为敏感, 若要作业天数达到 300 d 以上, 建议选择抵抗风力不小于 6 级, 波高不小于 1.5 m, 波周期不小于 8.0 s 的施工船舶。相较于传统的单因素分析, 该方法考虑了风、波高、波周期三者的联合作用, 计算结果更符合工程实际, 对施工前期阶段的船机选型具有指导意义。

关键词: 海上施工; 作业天数; 施工船舶

中图分类号: U692; U615.35 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2025)04-0009-06

doi: 10.7640/zggwjs202504002

Research and application of operation days analysis method for construction vessels in unshielded sea area

YIN Jian-feng¹, LIU Qing-jun^{2,3}, WEN Yun-cheng^{2,3}, WANG Deng-ting^{2,3}

(1. Ningbo Branch of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315200, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of M.O.T., Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Offshore construction is an important challenge facing the offshore engineering construction, and the operating days are the key content of offshore construction. In order to solve the difficulty of operating days analysis when wind and wave data are lacking in project area, a practical method of days analysis for offshore construction is proposed by combining wind and wave observation data analysis with numerical simulation. The application of this method to the analysis of construction days and ship type selection of the Tuci offshore wind power project shows that the influence of wave height change on the operating days of the wind power project is the most sensitive. If the operating days are more than 300 days, it is recommended to select a construction vessel with wind resistance of no less than 6, wave height of no less than 1.5 m, and wave period of no less than 8.0 s. Compared with the traditional single factor analysis, the method proposed in this paper considers the combined effect of wind, wave height and wave period, and the calculation results are more in line with the engineering practice, which has guiding significance for the type selection of ship in the early stage of construction.

Key words: offshore construction; operating days; construction vessel

收稿日期: 2024-07-16 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 福建省交通运输科技项目 (JC202311); 江苏省水利科技项目 (2022027); 水利部重大科技项目 (SKS-2022025); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y224004)

作者简介: 尹剑锋 (1978—), 男, 江苏连云港人, 高级工程师, 副总经济师, 研究方向为海上风电基础及风机安装施工与技术。E-mail: 5192973@qq.com

0 引言

近年我国海上工程建设迅速发展,海上风电、海洋牧场、海洋桥梁需求巨大。预计2032年,我国年度海上风机的装机量为15 000 MW,而2022年我国年度海上风机的装机量仅为3 610 MW^[1];至2025年我国将建设178个国家级海洋牧场示范区,引领全国海洋牧场科学发展^[2]。

海上施工是当前海上工程建设面临的重要挑战。海上施工难度大、成本高,受天气影响明显,作业天数是施工组织重点考虑的内容,决定着施工船舶的选择。如若对作业天数的估计过低,则将导致选择的施工船型过大,造成资源浪费;若对作业天数的估计过高,则将导致选择的施工船型过小,增加施工风险。由此可见,合理分析作业天数具有重要的意义。

影响海上船舶施工及作业的因素较多,包括降雨、雾、雷暴、流、风、浪等,其中风和浪是影响作业天数的最重要因素^[3-4]。刘亚平等^[5]利用风浪预报结果对长江口深水航道治理二期工程水上作业天数进行分析,并基于经验折减,得到大型专用施工船的有效作业天数。沈文君等^[6]基于实测波浪资料、波浪数学模型和船舶系泊数学模型结果,分析波浪对某码头损失作业天数的影响。张婕等^[7]针对洋山港北侧拟建防波堤建立波浪数学模型,对港区内的波浪要素进行了模拟计算,并结合波浪观测站点的频率分析,统计计算波浪影响的码头作业天数。

由于工程海域风浪资料十分有限,在工程建设前期常面临风浪资料缺乏的困难。如何利用附近长期海洋站观测资料合理确定工程区的作业天数,指导施工船舶的选择,是海上施工前期筹备阶段亟需解决的难题。为此,本文基于海洋站长期实测资料,提出一种考虑风、浪联合影响下的工程区作业天数统计分析方法,并将该方法应用于涂茨海上风电工程作业天数分析,进一步指导其施工船舶选择,以期为今后同类工程提供指导和借鉴。

1 考虑风、浪联合影响的作业天数分析方法

1.1 基础资料

我国在近海的海洋观测站实现了对风、浪等不同要素的逐时观测。国家海洋科学数据中心(<https://mds.nmdis.org.cn/>)对部分海洋站点的数据进行公开。本文分析依据的风速、波高、波周

期逐时数据均来自国家海洋科学数据中心网站。

1.2 海洋站与工程区之间风、浪相关性分析

工程区与海洋站之间存在一定的距离,受地形地貌影响,两者间的风、浪要素常存在差别,故需对海洋站与工程区之间的风、浪相关性进行分析。在相关性分析时可选择多个海洋站,经对比后选择相关性最佳的海洋站作为基础海洋站。

对于风速的相关性,目前海上施工对风力要求较为明确,风力超过6级时不可作业^[8]。因此可利用海洋站与工程区短期(数天至数月不等)同步风速观测数据,建立6级及以上不同风速之间的相关关系,将海洋站6级及以上大风风速换算至工程海域风速。

对于波高和波周期的相关性,除可利用海洋站与工程区短期(数天至数月不等)的同步波高和波周期观测数据外,也可通过构建大范围波浪数值模型,计算海洋站与工程区不同方向的波浪要素,建立两者之间的波高和波周期相关关系,将海洋站波高和波周期换算至工程海域的波高和波周期。

本文采用综合考虑波浪折射、绕射、反射和底摩擦影响的缓坡方程数学模型^[9]。考虑波能损耗和风能输入的抛物形缓坡方程。

定常:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + (k^2 CC_g + i\omega F) \Phi = 0 \quad (1)$$

非定常:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + (\omega^2 - k^2 CC_g - i\omega F) \Phi = 0 \quad (2)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; C 、 C_g 分别为波速和波群速; Φ 为波势; k 为波数; ω 为角频率; F 为波能变化因子,包括底摩擦损耗项及风能输入项; i 为虚数单位; t 为时间。

该数学模型具有计算效率高,适用于大范围波浪折射、绕射联合计算的优点,具有可靠的准确性,已应用于长江口深水航道整治工程^[10]、宁波港北仑港区四期工程、上海洋山深水港工程等多项工程中。

对得到的工程海域风速进行高度订正,对波高、波周期进行累积频率或特征值换算,得到工程海域海面10 m高度处10 min平均风速 $U_{10 \text{ min}}$ 、累积频率4%的波高 $H_{4\%}$ 和平均波周期 \bar{T} 。

1.3 作业天数分析方法

目前统计风浪影响作业天数的方法并未统一,

本文采用的方法基于逐时或 3 h 数据统计某一时段内满足可作业情况的次数, 取其 1/24 或 1/8 得出某一时段内作业天数; 取其与该时段内总次数的比值为出现频率。

实际中大风与大浪多相伴发生, 故需考虑风、浪之间的相关性, 以风速、波高和波周期逐时(或 3 h)同步数据为基础进行联合统计分析, 得到某一时段内(1 整年或某月)可作业情况的出现次数 $N_u(X_u \leq U \cap Y_H \leq H \cap Z_T \leq T)$ 。

则可作业情况的出现频率 P 为:

$$P = N_u(X_u \leq U \cap Y_H \leq H \cap Z_T \leq T) / N_{u\text{总}} \quad (3)$$

式中: $N_u(\cdot)$ 为某一时段内(1 整年或某月)可作业情况的出现次数; $N_{u\text{总}}$ 为该时段内的总次数; X_u 为风速测量值, m/s; Y_H 为波高测量值, m; Z_T 为波周期测量值, s; U 为可作业情况允许的风速值, m/s; H 为可作业情况允许的波高值, m; T 为可作业情况允许的波周期值, s。

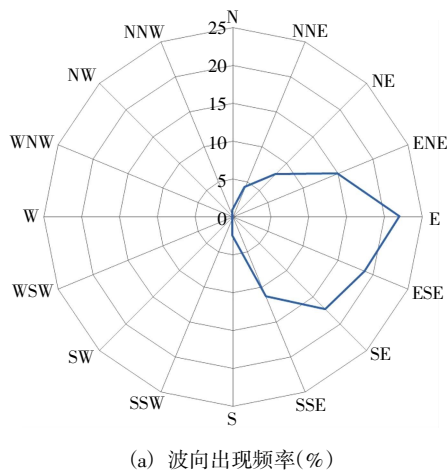
作业天数 W 为:

逐时同步数据

$$W = N_u(X_u \leq U \cap Y_H \leq H \cap Z_T \leq T) \times 1/24 \quad (4)$$

3 h 同步数据

$$W = N_u(X_u \leq U \cap Y_H \leq H \cap Z_T \leq T) \times 1/8 \quad (5)$$



式中: W 为作业天数, d。

2 涂茨海上风电场工程作业天数分析

2.1 依据资料

涂茨海上风电场工程位于浙江省宁波市象山县东北部海域, 场区中心坐标 122.07°E 、 29.54°N , 离岸距离约 8.2 km, 西北距东屿山岛 2.7 km, 东距普陀 6 号海上风电场 5 km。工程区除 N 向—NE 向受六横岛掩护影响、SE 向受韭山列岛掩护影响外, 基本为开敞海域。工程区波浪玫瑰图如图 1 所示。由图 1 可知, 工程区常浪向为 E 向, 出现频率为 22.1%, 强浪向为 ENE 向。工程区处于浙中地区, 可参照大陈海洋站(121.9°E , 28.5°N)的观测资料进行波浪要素推算。大陈海洋站属于国家级海洋测站, 位于大陈岛外侧, 受岛屿掩护影响小, N 向—S 向较为开阔, 直接受外海波浪作用。大陈海洋站常浪向为 ENE 向, 次常浪向为 E 向, 多年出现频率分别为 28.1% 和 15.3%; 强浪向为 E 向, 次强浪向为 ESE 向。由此可以看出, 工程区和大陈海洋站的常浪向和强浪向基本一致, 大都出现在 E 向或 ENE 向。本文收集了大陈海洋站 2018 年 8 月 1 日—2019 年 7 月 31 日的风速、波高、波周期逐时观测资料。

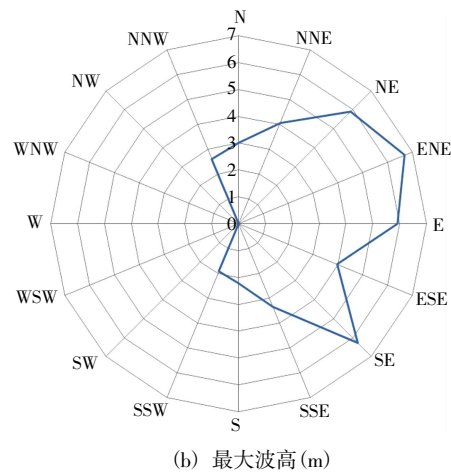


图 1 工程区波浪玫瑰图

Fig. 1 Engineering area wavy rose map

2.2 大陈海洋站与工程区风速相关性分析

由于缺乏工程区实测风速资料, 为验证大陈海洋站与工程区风速的相关性, 本文收集了工程区南侧石浦气象站(122.96°E , 29.20°N)和北侧嵎山海洋站(122.8°E , 30.8°N)的同期风速统计资料。石浦气象站位于岸边, 嵎山海洋站位于嵎山岛上, 两站 N 向—S 向均较为开敞。由于 6 级以下的风

速受下垫面(如局部地形、树木丛林、建筑物等)的影响较为敏感, 且对海上施工船舶不起控制作用, 因此本文仅对同期 6 级及以上大风进行相关性分析。大陈海洋站与石浦气象站、嵎山海洋站 6 级及以上大风风速对比结果见图 2。由图 2 可知, 对于 6 级及以上大风, 大陈海洋站与石浦气象站和嵎山海洋站均具有较好的相关性, 判定系

数 R^2 分别为 0.68 和 0.70, 可通过式(6)将大陈海洋站 6 级及以上大风风速换算至工程区风速。

$$U_{\text{工程区}} = 0.88U_{\text{大陈}} - 1.60 \quad (6)$$

式中: $U_{\text{工程区}}$ 为工程区风速值, m/s; $U_{\text{大陈}}$ 为大陈海洋站风速测量值, m/s。

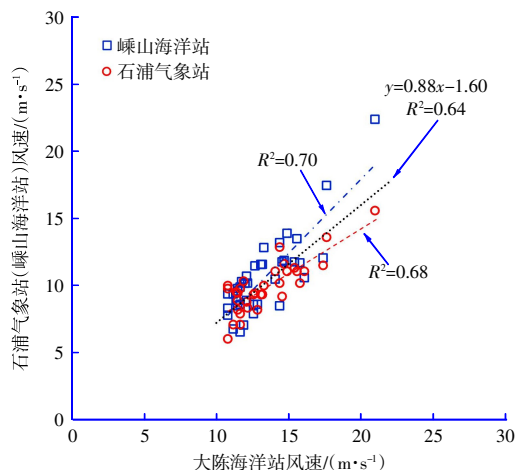


图 2 大陈海洋站与工程区附近 6 级及以上风速对比

Fig. 2 Comparison of wind speed of level 6 and above in Dachen Ocean Station and near the project area

2.3 大陈海洋站与工程区波浪相关性分析

采用 1.2 节中的缓坡方程建立工程区大范围波浪数值模型, 各向计算区域均约为 $130 \text{ km} \times 280 \text{ km}$ 。沿波浪传播方向的计算网格空间步长取为 50 m , 垂直于波浪传播方向的空间步长取为 70 m 。N 向—S 向外海入射波浪作用下工程区和大陈海洋站附近水域的波高分布见表 1。

表 1 大陈海洋站与工程区波高对比

Table 1 Comparison of wave height between Dachen Ocean Station and project area

方向	大陈海洋站 波高/m	工程区波高/m	工程区波高/ 大陈海洋站波高
N	1.21	0.61	0.50
NNE	1.30	0.70	0.54
NE	1.75	1.05	0.60
ENE	1.68	1.37	0.82
E	1.68	1.39	0.83
ESE	1.68	1.35	0.80
SE	1.68	1.32	0.79
SSE	1.68	1.28	0.76
S	1.58	1.10	0.70

由表 1 可知, 在相同外海波浪(有效波高 $H_s = 1.7 \text{ m}$, 平均波周期 $\bar{T} = 7 \text{ s}$)条件下, 各方向波浪传

播至大陈海洋站和工程区处时, 受岛屿掩护影响, 两位置处的波高存在一定差别。其中, N 向—NE 向工程区的波高为大陈海洋站处的 0.5~0.6 倍, ENE 向—ESE 向工程区的波高为大陈海洋站处的 0.8 倍左右, SE 向—S 向工程区的波高为大陈海洋站处的 0.7~0.8 倍左右。由此可见, N 向—NE 向受六横岛掩护所致, 波高换算系数较其它方向要小。

按上述各方向两者波高关系, 将大陈海洋站波高换算至工程区。为验证上述换算方法的有效性, 将换算后的波高与工程区实测波高进行对比分析, 见图 3。由图 3 可知, 换算后的波高统计分析结果与实测结果基本一致, $H_{4\%} < 0.6 \text{ m}$ 的出现频率均在 24% 左右; $0.6 \text{ m} \leq H_{4\%} < 1.2 \text{ m}$ 的出现频率在 58% 左右; $1.2 \text{ m} \leq H_{4\%} < 1.8 \text{ m}$ 的出现频率在 12% 左右。对于 $H_{4\%} < 1.8 \text{ m}$ 的出现频率, 换算后的波高统计分析结果与实测结果分别为 96.2% 和 94%, 由此可见, 波高($H_{4\%}$)在 1.8 m 以下, 采用换算后的波高进行统计分析具有很好的代表性, 可以此进行工程区作业天数分析。

根据统计, 大陈海洋站 N 向—S 向的多年平均波周期在 $5.4 \sim 6.6 \text{ s}$ 之间^[1], 工程区 N 向—S 向平均波周期在 $5.0 \sim 7.0 \text{ s}$, 由此可见, 大陈海洋站与工程区波周期较为接近, 可直接采用大陈海洋站的波周期。

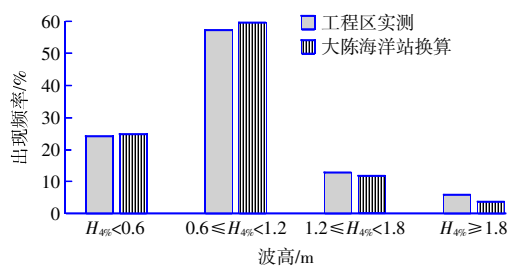


图 3 工程区实测波高与大陈海洋站换算波高不同波级出现频率对比

Fig. 3 Comparison of occurrence frequency of different wave classes with measured wave height in project area and converted wave height in Dachen Ocean Station

2.4 工程区作业天数分析

根据上述分析, 通过对大陈海洋站实测风速、波高和波周期逐时数据的换算, 得到工程区风速、波高和波周期逐时数据。对得到的工程区逐时数据进行风、浪联合统计分析, 不同控制标准下的作业天数统计结果见表 2。

表 2 工程区不同控制标准条件下年平均作业天数统计分析结果(风力≤6 级)

Table 2 Statistical analysis results of the annual average operating days under different control standard conditions in the project area(wind scale≤6)

波高/m	不同波周期下作业天数/d			
	$\bar{T} \leq 5.0 \text{ s}$	$\bar{T} \leq 6.0 \text{ s}$	$\bar{T} \leq 7.0 \text{ s}$	$\bar{T} \leq 8.0 \text{ s}$
$H_{4\%} \leq 0.7$	33.5	112.1	144.9	153.0
$H_{4\%} \leq 0.8$	38.5	137.0	179.7	191.3
$H_{4\%} \leq 0.9$	45.0	165.1	217.8	231.8
$H_{4\%} \leq 1.0$	49.5	185.5	247.3	263.9
$H_{4\%} \leq 1.2$	52.7	199.8	270.6	290.8
$H_{4\%} \leq 1.5$	55.6	213.2	291.5	315.3

由表 2 可知, 波高是影响作业天数的重要因素, 且波高变化对作业天数的影响较为敏感。以

平均波周期 $\bar{T} \leq 8.0 \text{ s}$ 为例, 在允许作业波高 $H_{4\%} \leq 0.7 \text{ m}$ 条件下, 作业天数仅为 153.0 d, 而当允许的作业波高为 $H_{4\%} \leq 0.8 \text{ m}$ 时, 作业天数达到 191.3 d, 作业天数增加了约 40 d。当允许的作业波高为 $H_{4\%} \leq 1.0 \text{ m}$ 时, 作业天数达到 263.9 d, 接近全年天数的 3/4, 较 $H_{4\%} \leq 0.9 \text{ m}$ 时作业天数增加了约 30 d。当允许的作业波高增大至 $H_{4\%} \leq 1.2 \text{ m}$ 时, 作业天数达到 290.8 d, 基本达到全年天数的 4/5。随着允许的作业波高进一步增大至 $H_{4\%} \leq 1.5 \text{ m}$ 时, 作业天数达到 315.3 d。

3 基于作业天数的施工船型选择

起重船在海上施工中应用最为广泛, 类型包括半潜式起重船、全回转浮吊船及固定桅杆浮吊船。国内主要船舶的基本参数及可作业海况如表 3 所示^[3]。

表 3 国内海上风电施工主要起重船基本参数及可作业海况评估

Table 3 Basic parameters and operational sea state assessment of major cranes for offshore wind power construction in China

船舶名称	船舶基本参数	可作业海况
华电中集 01 半潜式起重船	船长 137.75 m, 船宽 81 m, 型深 39 m, 最大吃水 26.4 m	风速≤13.8 m/s, 波高≤1.5 m, 平均波周期≤8 s
博强 2300 固定桅杆浮吊船	船长 141.8 m, 船宽 44.6 m, 型深 9.6 m, 设计吃水 5.7 m	风速≤10.7 m/s, 波高≤1.25 m, 平均波周期≤8 s
华景 001 全回转浮吊船	船长 194.6 m, 船宽 41.6 m, 型深 13.5 m, 船舶吃水 11 m	风速≤13.8 m/s, 波高≤1.5 m, 平均波周期≤10 s
宇航 29 全回转浮吊船	船长 165 m, 船宽 45 m, 型深 9.8 m, 船舶吃水 7 m	风速≤10.7 m/s, 波高≤1.5 m, 平均波周期≤9 s
创力号全回转浮吊船	船长 198.8 m, 船宽 46.6 m, 型深 14.2 m, 船舶吃水 11 m	风速≤13.8 m/s, 波高≤1.5 m, 平均波周期≤12 s

根据表 3 中各起重船正常作业要求的海况, 各起重船的作业天数计算结果见图 4。由图 4 可知, 在施工船机选型阶段, 若要求作业天数达到 300 d 以上时, 则可选择抵抗风力不小于 6 级, 波高不小于 1.5 m, 波周期不小于 8.0 s 的施工船型, 如华电中集 01、华景 001 和创力号; 若要求作业天数达不少于 250 d 时, 则施工船型也可选择博强 2300 和宇航 29。

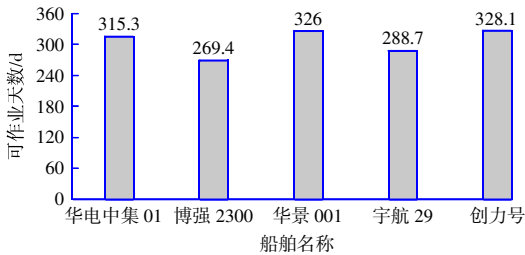


图 4 不同起重船作业天数对比

Fig. 4 Comparison of operating days of different crane vessels

4 结语

海上风电施工易受风力、波高、波周期影响。本文提出一种基于海洋站风、浪观测资料的海上施工作业天数分析方法, 解决了工程区风浪资料缺乏时作业天数分析的困难。该方法考虑了风、波高、波周期三者的联合作用。采用该方法时需对工程区与基础海洋站之间风、浪要素的相关性进行分析, 必要时可借助数值模型建立工程区与基础海洋站的风、浪要素各方向相关关系, 将基础海洋站的数据换算至工程区。本文提出的作业天数分析方法仅是理论上可能最大的作业天数, 实际中受船舶防台撤离、归位以及维修等影响, 有效作业天数会少于本文计算值, 但本文方法对施工前期船机选择仍具有重要指导意义。

致谢: 感谢中国国家科技资源共享服务平台——国家海洋科学数据中心(<https://mds.nmdis.org.cn/>)提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 金晶哲,高震.海上风电机组安装施工方法现状、研究进展与展望[J]. 船舶, 2024, 35(3): 1-20.
JIN Jing-zhe, GAO Zhen. State-of-the-art and prospects of installation methods for offshore wind turbines[J]. Ship & Boat, 2024, 35(3): 1-20.
- [2] 杨红生,章守宇,张秀梅,等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 1255-1262.
YANG Hong-sheng, ZHANG Shou-yu, ZHANG Xiu-mei, et al. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(4): 1255-1262.
- [3] 林逸凡,刘玉飞,王小合,等. 复杂海况条件下海上风电施工主作业船适用性分析[J]. 船电技术, 2023, 43(9): 47-50.
LIN Yi-fan, LIU Yu-fei, WANG Xiao-he, et al. Applicability analysis of main operating vessels for offshore wind power construction under complex sea conditions[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2023, 43(9): 47-50.
- [4] 刘晋超. 海上风电施工窗口期对施工的重要性[J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 16-18.
LIU Jin-chao. Importance of window phase for offshore wind power construction[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(2): 16-18.
- [5] 刘亚平,张琦岩. 长江口航道整治工程大型专用作业船舶作业天数的统计和分析[J]. 中国港湾建设, 2006, 26(4): 39-41, 70.
LIU Ya-ping, ZHANG Qi-yan. Statistics and analysis of operational days of large-sized purpose-built working vessels for waterway regulation works in Changjiang estuary[J]. China Harbour Engineering, 2006, 26(4): 39-41, 70.
- [6] 沈文君,许可,陈汉宝,等. 波浪对某沿海码头作业天数影响分析研究[J]. 水道港口, 2020, 41(5): 545-549, 563.
SHEN Wen-jun, XU Ke, CHEN Han-bao, et al. Study on the wave influence on the jetty downtime analysis for a certain coastal power plant[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2020, 41(5): 545-549, 563.
- [7] 张婕,梁颖瑜,于芸. 洋山港拟建码头波浪影响下作业天数统计分析[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(10): 38-43.
ZHANG Jie, LIANG Ying-yu, YU Yun. Statistical analysis of operation days under influence of waves at proposed wharf of Yangshan Port[J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(10): 38-43.
- [8] GB/T 50571—2010, 海上风力发电工程施工规范[S].
GB/T 50571—2010, The code for construction of offshore wind power project[S].
- [9] 潘军宁,洪广文,左其华. 一种推广的缓坡方程[J]. 海洋工程, 2001(1): 24-31.
PAN Jun-ning, HONG Guang-wen, ZUO Qi-hua. An extended mild-slope equation[J]. The Ocean Engineering, 2001(1): 24-31.
- [10] 王红川,左其华,潘军宁. 长江口水域波浪数值计算[J]. 海洋工程, 2004(3): 25-29.
WANG Hong-chuan, ZUO Qi-hua, PAN Jun-ning. Numerical simulation of wave propagation in the water area of the Yangtze River estuary[J]. The Ocean Engineering, 2004(3): 25-29.
- [11] 国家海洋局东海分局. 东海区海洋站海洋水文气候志[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
State Oceanic Administration East Sea Branch. Marine hydroclimatology of Donghai Ocean Station[M]. Beijing: The Ocean Press, 1993.
- (2): 86-89.
- [17] 梅振宇,项贻强. 城镇化进程中的农村公路网布局规划方法研究[J]. 华东公路, 2006(4): 70-73.
MEI Zhen-yu, XIANG Yi-qiang. Research on planning Method of Rural Road Network Layout in Process of Urbanization[J]. East China Highway, 2006(4): 70-73.
- [18] 张盈盈. 交通运输现代化指标体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
ZHANG Ying-ying. Study on the index system of modernization of transportation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [19] 张宇. 城市绿色交通的灰色模糊综合评价研究[D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2017.
ZHANG Yu. Research on grey fuzzy comprehensive evaluation of urban green transportation[D]. Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2017.
- [20] Deng J L. Control Problems of Grey Systems[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.
- [21] 王琳琳,郑晓杰,余孝军. 基于模糊综合评价法的贵州机场服务质量研究[J]. 交通运输研究, 2016, 2(1): 65-70.
WANG Lin-lin, ZHENG Xiao-jie, YU Xiao-jun. Service quality of airport in Guizhou Province based on fuzz comprehensive evaluation method[J]. Transport Research, 2016, 2(1): 65-70.
- [22] 田万利,祁帅,陈景,等. 公路工程建设阶段 BIM 平台适用性评价指标及方法[J]. 交通运输研究, 2022, 8(5): 75-83.
TIAN Wan-li, QI Shuai, CHEN Jing, et al. Evaluation index and method of BIM platform applicability at highway engineering construction stage[J]. Transport Research, 2022, 8(5): 75-83.

(上接第 8 页)