

某近海风电场风机基础选型设计

李保洋[✉]

(江苏省国信集团有限公司, 江苏南京 210005)

摘要: [目的]自2022年起,海上风电的国家补贴将全面退出。海上风电机组基础是风电机组的支撑结构,对海上风电场的安全运行起着至关重要的作用。在平价上网、“30·60”双碳目标和国家“十四五”能源规划等政策的指导下,合理地选择、设计海上风电机组基础,是海上风电场降本增效的有效手段。[方法]文章以某近海风电场风机基础选型设计为例,综合国内海上风电场的建设经验,进行基础型式比选;首先选择单桩基础、导管架基础和高桩承台基础3种基础型式进行初选,然后结合该近海风电场的海洋水文和地质条件,分析不同风机基础型式的适用水深及优缺点,从结构安全性、施工可行性、工期及工程经济性等方面进行了综合比选。[结果]研究表明:风机基础型式的选择与水深、土层地质条件、风电机组固有频率、施工安装设备能力、施工工期、工程造价等几个因素有关。单桩基础结构型式优良、施工可行、工期最短、经济性最优,优势明显。[结论]推荐该近海风电场风机基础采用单桩基础方案。

关键词: 降本增效; 风机基础设计; 海上风电机组地基基础设计软件 FDO; 单桩基础; 高桩承台基础
中图分类号: TK89; TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2023)04-0166-08

开放科学(资源服务)二维码:



Selection and Design of Wind Turbine Foundation for an Offshore Wind Farm

LI Baoyang[✉]

(Jiangsu Guoxin Investment Group Limited, Nanjing 210005, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] From 2022, the state subsidies for offshore wind power has been fully withdrawn. The foundation of offshore wind turbines is the supporting structure of wind turbines and plays a crucial role in the safe operation of offshore wind farms. Reasonable selection and design of the offshore wind turbine foundation is an effective way to reduce costs and increase efficiency of offshore wind farms under the guidance of such policies as the "30·60" dual-carbon target and the national "14th Five-Year Plan" energy plan. [Method] The article took the selection and design of a wind turbine foundation for a certain offshore wind farm as an example, and combined the construction experience of domestic offshore wind farms to compare and select the foundation types; firstly, preliminary selection was made among three foundation types, namely monopile foundation, jacket foundation and high pile cap foundation; then, combined with the marine hydrological and geological conditions of the offshore wind farm, the applicable water depths and advantages and disadvantages of different wind turbine foundation types were analyzed, and a comprehensive comparison was conducted from the aspects of structural safety, construction feasibility, duration and engineering economy. [Result] Research has shown that the selection of wind turbine foundation type is related to several factors such as water depth, soil geological conditions, natural frequency of wind turbines, capacity of construction and equipment installation, construction duration, and engineering cost. The monopile foundation has excellent structural type, construction feasibility, the shortest construction duration and the best economy. [Conclusion] The monopile foundation is recommended for the wind turbine foundation of this offshore wind farm.

Key words: cost reduction and efficiency increase; wind turbine foundation design; foundation design of offshore wind turbines(FDO); monopile foundation; high pile cap foundation

2095-8676 © 2023 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

随着国家能源局《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》的出台,2022年起,海上风电的国家补贴将全面退出。“国补”的退出意味着海上风电平价时代正式来临,海上风电将直面“降本增效”的挑战。而“30·60”双碳目标的实现需要新能源产业提供更多的助力。海上风电作为一种绿色可再生能源,对发展低碳经济、推动能源转型、减少CO₂排放具有重要意义。2022年1月,国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》,明确提出要大力开发东南部沿海地区海上风电,积极推进海上风电规模化建设。

海上风电机组基础是风电机组的支撑结构,对海上风电场的安全运行起着至关重要的作用。近年来,随着我国海上风电的蓬勃发展,各设计院及许多学者对海上风机基础的开发和应用展开了多项研究。黄俊^[1]对我国海域风能资源、海洋水文、工程地质进行了系统的介绍,提出海上风电机组基础型式的确定应紧密结合我国海域特点。张强^[2]、曾雨欣等^[3]结合工程实例研究了单桩基础竖向承载力特性。李聪等^[4]通过对比研究发现单桩基础锥段位置会对风机的疲劳荷载产生影响,设计时需要根据海床地质条件选择合适的桩形及锥段位置。毕明君^[5]以实际工程为例,详细介绍了单桩基础设计的流程和要点。马兆荣^[6]、徐荣彬等^[7]对风机导管架基础疲劳分析、灌浆分析等关键技术进行了介绍。明小燕^[8]、李炜等^[9]对海上风机三脚架基础结构及基频敏感性开展了相关研究。沈晓雷^[10]、彭潜等^[11]对海上风电高桩承台基础的承载特性及监测技术进行了实例验证。

海上风电机组重心高,传递给风机基础的水平荷载和倾覆弯矩较大;工程海域海床的地质情况、海洋水文条件等诸多因素都会对风机基础产生不利影响,因此,海上风电机组基础造价一般较高。陈皓勇等^[12]对海上风电成本的构成进行了详细的剖析,指出海上风电基础结构建设的成本是造成海上风电建设总投资远高于陆上风电的主要原因之一。金长营^[13]指出,在江浙海域,风机基础及施工成本占建设成本的24%。面对平价竞争上网带来的降本压力,很多学者就风机基础优化、塔基及基础一体化设计、施工成本控制展开了研究^[14-16]。但技术的研发和成

熟需要长期的探索,短期内主要是通过设计和施工过程的优化。从设计方面来说,就是要慎重地选择和合理地设计海上风电机组基础结构型式。

本文综合国内海上风电场的建设经验,结合某近海风电场的水文、地质条件,不同风机基础型式的适用水深及优缺点,本着设计优化的原则对该风电场的风机基础型式进行了详细的设计比选,最后综合结构安全性、施工可行性及工期、工程经济性等方面因素确定了该海上风电场的基础型式。

1 设计输入条件

1.1 海洋水文、地质条件

某近海风电场中心离岸距离约19.0 km,理论水深19.0~23.0 m,场区平均海平面高程为0.49 m(1985国家高程)。设计高水位为3.09 m,对应的波高为7.93 m,周期为11.65 s;设计低水位为-2.75 m,对应的波高为6.60 m,周期为11.58 s;50年一遇极端高水位为4.54 m,对应的波高为8.23 m,周期为11.66 s;50年一遇极端低水位为-3.85 m,对应的波高为6.32 m,周期为11.56 s。海流表面流速为1.081 m/s,底部流速为0.514 m/s。初步选定单机容量为8.5 MW风力发电机组,轮毂中心高度为130 m,塔筒高度为117.04 m,塔筒底高程为12.0 m。工程场地类别为IV类,抗震设防烈度为VI度,特征周期为0.75 s,设计地震分组为第二组。场址区揭露的地层主要为:海积淤泥质粉质粘土、粉土、粉砂、粉质黏土或粉土夹粉质黏土等。土层特性及地质参数如表1所示。

表1 土层特性及地质参数一览表

Tab. 1 List of soil layer characteristics and geological parameters

土层名称	层厚 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	不排水剪切 强度C _v /kPa	e ₅₀ /%	内摩 擦角 φ/(°)
淤泥质粉质 黏土夹粉土	1.9	17.2	12	0.055	—
粉土	8.0	18.6	20	0.050	23
粉质黏土	6.1	18.2	35	0.045	—
粉土	2.7	18.9	25	0.045	28
粉质黏土	14.4	18.2	35	0.045	—
粉质黏土	6.5	19.0	62	0.035	—
粉砂	10.6	19.7	—	—	37
粉质黏土	18.8	19.1	64	0.036	—
黏质粉土	20.0	19.3	—	—	29

1.2 风机荷载

厂家提供的作用在塔架底部法兰面处的风机荷载如表 2 所示,塔架坐标系如图 1 所示。单桩基础的整机自振频率限制范围为 0.21~0.30 Hz,多桩基础的整机自振频率限制范围为 0.24~0.33 Hz。

表 2 法兰面风机荷载标准值(不带安全系数)

Tab. 2 Standard load value of wind turbine on the flange surface (without safety factor)

基础型式	荷载工况	F_{xy} /MN	F_z /MN	M_{xy} /(MN·m)	M_z /(MN·m)
单桩基础	正常运行工况	1.678	-11.143	186.979	-1.579
	极端工况	2.678	-10.505	276.622	14.000
多桩基础	正常运行工况	1.628	-11.100	185.878	-1.398
	极端工况	2.614	-10.500	267.532	13.556

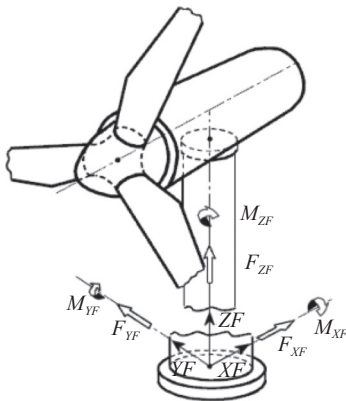


图 1 塔架坐标系

Fig. 1 Coordinate system of tower

2 基础型式比选

2.1 基础结构型式初选

海上风电机组基础型式的选择主要考虑水深、土层地质条件、风机运行要求、施工安装设备能力、施工工期、工程造价等几个方面的因素^[17]。

海上风电机组基础按照与海床固定方式的不同,分为重力式基础、桩承式基础、浮式基础 3 类^[18]。不同基础形式适用的水深范围如表 3 所示。

该近海风电场场地上部土层地基承载力低,物理力学性质差,海域理论水深 19~23 m,同时该风电场拟采用 8.5 MW 大功率风机,风机荷载较大,因此,桩承式基础更适合该风电场。常用的桩承式海上风电基础优缺点如表 4 所示。

表 3 海上风电机组基础适用水深范围表

Tab. 3 Applicable water depth range of offshore wind turbine foundation

基础型式	适用水深 ^[18]	
重力式基础	<15 m	
桩承式基础	单桩	<30 m
	多脚架	<30 m
	导管架	20~60 m
	高桩承台	<30 m
浮式基础	≥50 m	

表 4 常用桩承式海上风机基础形式的优缺点

Tab. 4 Advantages and disadvantages of commonly used pile supported offshore wind turbines foundation

基础类型	优点	缺点
单桩基础	结构传力模式简单、加工制造简单、运输安装方便、海上施工速度快、工期短	桩径大,安装时需要专用的沉桩设备;受冲刷影响大;整体刚度偏柔
多脚架基础	结构体系刚度大,海床冲刷对结构刚度影响较小	过渡段疲劳问题较难处理;斜撑位于飞溅区,不利于基础的防撞设施布设
导管架基础	结构整体刚度大,抗倾覆能力强,对地质条件要求不高	节点多,疲劳问题突出;过渡段结构复杂,建造较困难
高桩承台基础	施工设备与经验成熟,整体刚度大,抗倾覆能力强	打桩工作量大,大体积混凝土承台施工周期长,基础重心高、造价高

单桩基础结构简单、安装方便、海上作业时间短、效率高,是目前使用最为广泛的一种基础型式。曾雨欣等^[3]通过对大量海上风电项目进行分析发现,采用单桩基础的海上风电场约占总量的 53%,已建成的海上风机基础中,75% 都是单桩基础。李志川等^[19]指出,单桩基础在江苏海域的应用占比高达 92%,在广东海域的应用占比达 55%。

导管架基础,是固定式海上风机基础结构中适用水深最深的一种结构^[20]。李志川等^[19]指出,东海及南海海域水深较深,导管架基础的应用占比较高,其中广东海域占 34%,福建海域占 15%。

高桩承台基础承载力高、整体刚度大,抗倾覆能力强,在上海、浙江、福建等海域的应用占比较高,分别为 75%、63%、49%^[19]。

多脚架基础具有单桩基础的优点,同时结构体

系抗倾覆能力强,几乎不需要进行冲刷防护。但该基础形式主要受力节点非常复杂,应力集中现象明显,过渡段的疲劳问题较难处理。而且,根据该风电场的水文条件进行方案初步计算分析后发现,斜撑导管位于飞溅区,安装或运维船舶有可能会与其发生碰撞,容易造成安全隐患。

综上所述,本次设计选择单桩基础、导管架基础、高桩承台基础3种基础型式作为初选基础方案进行后续方案设计和比选。

基础结构分析计算采用海上风电机组基础设计软件FDOW进行,有限元模型中土的非线性特性通过非线性土弹簧来模拟^[21-23]。水平方向、竖向及桩端非线性弹簧刚度分别采用考虑循环荷载的 P - Y 曲线法、 t - z 曲线法和 Q - z 曲线法确定^[22-23]。所有计算结果均应满足规程、规范及风机厂家的要求。

2.2 单桩基础方案计算分析

单桩基础采用大直径钢管桩,桩顶法兰与风机塔筒底法兰通过螺栓连接,附属构件采用集成式套笼结构,待单桩沉桩完成后,整体吊装安装于钢管桩上。

根据上部结构风机荷载、海洋水文、工程地质资料,经计算分析,钢管桩单桩设计方案为:桩径7.5~8.6 m,壁厚75~90 mm,入土深度为70 m,总桩长105 m。结构模型如图2所示,计算结果如表5所示。

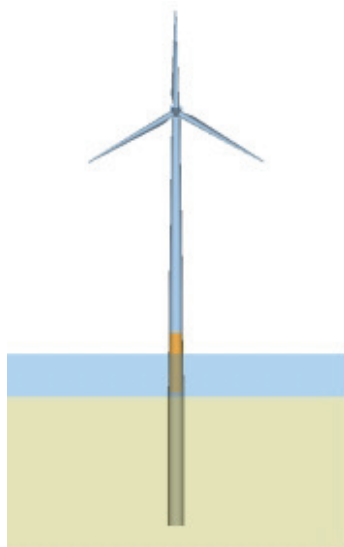


图2 单桩基础计算模型

Fig. 2 Calculation model of monopile foundation

表5 单桩基础计算结果汇总表

Tab. 5 Summary of calculation results of monopile foundation

项目	最大值/设计值	允许值 ^[23-25]	是否满足要求
桩身强度应力UC值	0.624	1.0	是
单桩抗压承载力/MN	36.170	48.373	是
泥面处转角/‰	4.18	4.36	是
沉降/mm	16.68	100	是
第一阶自振频率/Hz	0.214 5	0.21~0.30	是

2.3 导管架基础方案计算分析

导管架基础一般由4根钢管桩支撑在海底,钢管桩呈正方形均匀布设,导管架腿插入钢管桩并与钢管桩之间采用高强灌浆料连接。导管架承受环境荷载及风机荷载,并将荷载传递给4根钢管桩。

根据上部结构风机荷载、海洋水文、工程地质资料,经计算分析,导管架基础设计方案为:桩径3.0 m,壁厚为40~50 mm,桩中心间距为20.0 m,泥面以下桩长为88.0 m,总桩长约为94 m。主导管管直径为1.5~2.0 m,壁厚为40~65 mm;插入段直径为2.5 m,壁厚为75 mm。斜撑导管直径为0.8~1.1 m,壁厚为25~40 mm,结构计算模型如图3所示,计算结果如表6所示。

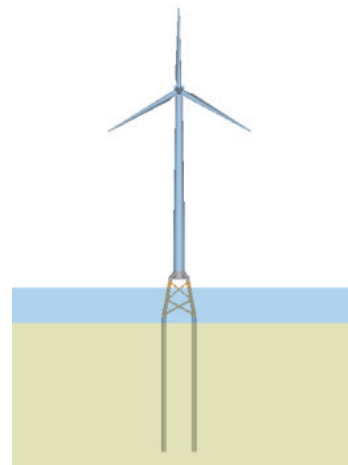


图3 导管架基础计算模型

Fig. 3 Calculation model of jacket foundation

2.4 高桩承台基础方案计算分析

承台采用圆柱体现浇钢筋混凝土结构。顶部通过预埋的风机基础过渡段与风机塔筒相连,底部支撑在钢管桩上。

根据上部结构风机荷载、海洋水文、工程地质

表 6 导管架基础计算结果汇总表

Tab. 6 Summary of calculation results of jacket foundation

项目	最大值	允许值 ^[23-25]	是否满足要求
杆件应力UC值	0.798	1.0	是
桩身强度应力UC值	0.589	1.0	是
节点冲切校核	0.868	1.0	是
单桩抗压承载力/MN	24.627	25.378	是
单桩抗拔承载力/MN	15.393	23.248	是
基础顶最大转角/‰	2.92	4.36	是
最大沉降/mm	66.01	100	是
第一阶自振频率/Hz	0.243 4	0.24~0.33	是

资料,经计算分析,高桩承台基础设计方案为:基础承台钢筋混凝土强度等级为 C50,承台顶高程为 8.80 m,高为 5.6 m,直径为 16.60 m。承台底部设 8 根钢管桩,在承台底部沿 12.6 m 直径的圆周均匀分布。钢管桩直径为 2.1~3.1 m,壁厚为 42~38 mm,设计桩长为 104~114 m,斜度为 1:0.2。结构模型如图 4 所示,计算结果如表 7 所示。

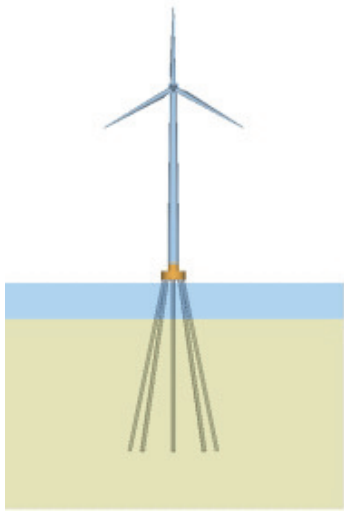


图 4 高桩承台基础计算模型

Fig. 4 Calculation model of high pile cap foundation

2.5 基础设计方案综合比选

1) 结构安全性

根据本文 2.2~2.4 节的分析表明,单桩基础、导管架基础、高桩承台基础的结构强度、桩基承载力、变形验算均满足相关规程规范的限制要求,整机自振频率也能满足现阶段风机厂商的要求。因此,从结构安全性的角度考虑,各基础方案均是可行的。

表 7 高桩承台基础计算结果汇总表

Tab. 7 Summary of calculation results of high pile cap foundation

项目	最大值	允许值 ^[23,25]	是否满足要求
桩身强度应力UC值	0.867	1.0	是
承台柱的冲切/MN	26.822	481.801	是
承台抗剪/MN	35.569	172.018	是
钢管桩的冲切/MN	18.580	111.222	是
桩基抗压承载力/MN	24.315	26.589	是
桩基抗拔承载力/MN	18.278	19.589	是
基础倾斜率/‰	2.77	4.36	是
最大沉降/mm	74.3	100	是
第一阶自振频率/Hz	0.242	0.24~0.33	是

2) 施工可行性及工期

高桩承台基础是海岸码头和跨海大桥桥墩中的常见结构,施工工艺成熟,大多数海上施工单位都有能力施工。据了解,福建省莆田平海湾 50 MW 海上风电项目、莆田南日岛 4 台样机工程等都采用了此基础型式。施工具备可行性,但是高桩承台基础桩数较多,施工工序复杂,上部现浇混凝土承台养护周期较长,工期为 3 个方案中最长。

导管架基础借鉴了海洋石油平台的结构型式,采用先桩法设计,自首次在珠海桂山海上风电场示范项目中应用,国内外的应用日渐增多,目前施工技术已相当成熟,具备施工可行性。但由于导管架基础节点数量多,加工制作工作量大,使得导管架基础的建造周期相比于单桩基础长。同时,导管架基础需要进行水下灌浆,灌浆养护时间不少于 7 d,然后方可安装上部风机,工期较长。

单桩基础,桩径 7.5~8.6 m,平均桩长约 105 m,桩重约 1 820 t。其制作可在国内大型钢结构厂、造船厂内预制完成,海上运输通过 5 000 t 级甲板驳船即可实现。目前,国内近海风电场工程的单桩基础施工主要采用浮式起重船+辅助工艺定位导向架设施进行施工。根据钢管桩桩长、桩重的要求,采用“滨舟起 1”“博强 2300”等起重船配备 MHU-3500S 液压冲击锤或 IHC S-3600 液压冲击锤,可满足本项目单桩基础沉桩施工需求。国内国信如东 350 MW 项目、中广核如东 150 MW 项目、中电投 100 MW 项目均采用了单桩基础方案,施工经验较为成熟。此外,单桩基础结构简单、制作方便,施工工序简单,

施工便捷,工期最短。

3) 工程经济性

3种基础方案的主要工程量及经济性比较如表8所示。

经投资估算,单桩基础方案总用钢量约为1 910 t,综合造价约0.249亿元;导管架基础总用钢量约为2 225 t,综合造价约0.312 2亿元;高桩承台基础总用钢量约2 470.6 t,综合造价约0.31亿元。

从工程经济性的角度看,单桩基础最优,导管架基础次之,高桩承台基础经济性最差。

4) 综合分析

高桩承台基础虽能满足结构安全性要求,但是与单桩基础相比,工程经济性较差,投资较大,桩数较多,施工工序复杂,施工周期长,因此不推荐采用高桩承台基础型式。

导管架基础的刚度和稳定性好,具有较高的结构安全性,但与单桩基础相比,导管架基础用钢量较大,工程经济性较差,同时导管架杆件较多,加工制作和焊接工作量大,建造施工周期较长,因此,不推荐采用导管架基础型式。

表8 3种基础方案主要工程量及经济性比较(单台风机)

Tab. 8 Comparison of main engineering quantities and economies of three schemes for foundation (single wind turbine)

基础方案	主要项目	工程量	综合造价/亿元
单桩基础	钢管桩制作 DH36	1 820 t	0.249
	钢管桩安装(海上运输、安装)	1根	
	附属结构(包括内平台、外平台、爬梯、靠船件、电缆护管、栏杆等)制安 Q355C/Q235B	90 t	
	牺牲阳极块重量 铝-锌-铜合金	10 t	
	钢管桩防腐(大气区930 μm , 浪溅区1 130 μm , 水下区800 μm)	1 620 m^2	
	抛石防护($D_{50}=200$ mm)	1 850 m^3	
导管架基础	导管架制作 DH36/DH36-Z35	980 t	0.312
	导管架安装(含海上运输)	1套	
	钢管桩 DH36	1 150 t	
	钢管桩安装(海上运输、安装)	4根	
	附属结构(包括内平台、外平台、爬梯、靠船件、电缆护管、栏杆等)制安 Q355C/Q235B	95 t	
	高强水泥基灌浆料	42 m^3	
	牺牲阳极块重量 铝-锌-铜合金	15 t	
钢管桩防腐(大气区930 μm , 浪溅区1 130 μm , 水下区800 μm)	2 260 m^2		
高桩承台基础	承台混凝土 C50	1 385 m^3	0.300
	承台钢筋 HRB400	208 t	
	墩台防腐	767 m^2	
	钢管桩制作 DH36	1 920 t	
	钢管桩安装(海上运输、安装)	8根	
	桩内填芯混凝土 C40	120 m^3	
	填芯砼钢筋笼制安 HRB400	12.6 t	
	基础环及过渡段制安	230 t	
	附属结构(包括内平台、外平台、爬梯、靠船件、电缆护管、栏杆等)制安 Q355C/Q235B	100 t	
	钢管桩防腐	3 593 m^2	
	牺牲阳极块重量 铝-锌-铜合金	30 t	

单桩基础既能满足结构安全性的要求,而且工程经济性最优,工期最短,因此,推荐单桩基础作为该近海风电场的风机基础方案。

3 结论

本文通过对某近海风电场风机基础选型设计进行研究,可以得到以下结论:

1)海上风电机组基础型式的确定,应充分考虑水深、土层地质条件、风电机组固有频率、施工安装设备能力、施工工期、工程造价等几个方面的因素。

2)单桩基础结构型式优良、海上施工工序少、工期短、工程经济性较优,具有明显优势,因此,推荐单桩基础方案作为本工程风电机组基础方案。

3)选择单桩基础作为该近海风电场风机基础方案后,应继续开展主体结构疲劳分析、桩身可打性分析、附属结构详细设计和钢管桩防腐蚀设计等工作。

参考文献:

- [1] 黄俊. 海上风电基础特点及中国海域的适用性分析 [J]. *风能*, 2020(2): 36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2020.02.013.
HUANG J. Basic characteristics of offshore wind power and applicability analysis of China's sea area [J]. *Wind energy*, 2020(2): 36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2020.02.013.
- [2] 张强,葛畅,沈晓雷,等. 竹根沙海域单桩基础竖向承载力特性数值模拟研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 44-50. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.006.
ZHANG Q, GE C, SHEN X L, et al. Numerical simulation research on the vertical bearing capacity of the single pile foundation in Zhugensha sea area [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 44-50. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.006.
- [3] 曾雨欣,施伟,张礼贤,等. 10 MW大型单桩式海上风机桩土作用研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 1-12. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.001.
ZENG Y X, SHI W, ZHANG L X, et al. Research on pile-soil interaction of 10 MW large monopile offshore wind turbine [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 1-12. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.001.
- [4] 李聪,刘东华,王洪庆. 海上风机单桩基础桩形影响因素分析 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(4): 93-100. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.015.
LI C, LIU D H, WANG H Q. Configurational influence factor analysis of offshore wind turbine monopile foundation [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(4): 93-100. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.015.
- [5] 毕明君. 海上风机单桩基础选型设计方法 [J]. *南方能源建设*, 2017, 4(增刊1): 56-61,72. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011.
- [6] BI M J. Design flow of monopile foundation for offshore wind turbine [J]. *Southern energy construction*, 2017, 4(Suppl. 1): 56-61,72. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011.
- [7] 马兆荣,刘晋超,元国凯. 珠海桂山海上风电场风电机组基础设计 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(3): 72-75. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.014.
MA Z R, LIU J C, YUAN G K. Design of wind turbine supporting structure in Zhuhai Guishan offshore wind farm [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(3): 72-75. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.014.
- [8] 徐荣彬,元国凯,刘晋超,等. 海上风机导管架基础灌浆连接段受力分析 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(3): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.016.
XU R B, YUAN G K, LIU J C, et al. Analysis of grouted connection in offshore wind turbine jacket foundation [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(3): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.016.
- [9] 明小燕. 海上风机三脚架基础结构分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
MING X Y. Analysis of tripod support structure of offshore wind turbine [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [10] 李炜,张敏,刘振亚,等. 三脚架式海上风电基础结构基频敏感性研究 [J]. *太阳能学报*, 2015, 36(1): 90-95. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2015.01.014.
LI W, ZHANG M, LIU Z Y, et al. Fundamental structural frequency analysis for tripod-type offshore wind turbine [J]. *Journal of solar energy*, 2015, 36(1): 90-95. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2015.01.014.
- [11] 沈晓雷,陈洪飞,王欣怡. 海上风电高桩承台基础承载特性数值模拟研究 [J]. *水力发电*, 2021, 47(12): 72-75. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.12.016.
SHEN X L, CHEN H F, WANG X Y. Numerical simulation on the bearing characteristics of the high-pile cap foundation for offshore wind power [J]. *Water power*, 2021, 47(12): 72-75. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.12.016.
- [12] 彭潜,张晗,徐兵. 海上风电高桩承台风机基础安全监测技术 [J]. *水电与新能源*, 2022, 36(5): 65-71. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2022.05.017.
PENG Q, ZHANG H, XU B. Safety monitoring technology of high-pile cap wind turbine foundation in offshore wind farm [J]. *Hydropower and new energy*, 2022, 36(5): 65-71. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2022.05.017.
- [13] 陈皓勇,席松涛. 海上风电成本构成及价格机制 [J]. *风能*, 2022(1): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.01.012.
CHEN H Y, XI S T. Cost composition and price mechanism of offshore wind power [J]. *Wind energy*, 2022(1): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.01.012.
- [14] 金长营. 海上风电项目全寿命周期的成本构成及其敏感性分析 [J]. *太阳能*, 2022(3): 10-16. DOI: 10.19911/j.1003-0417.

- tyn20201230.01.
JIN C Y. Cost composition of whole life cycle and sensitivity analysis of offshore wind power project [J]. *Solar energy*, 2022(3): 10-16. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20201230.01.
- [14] 吴艳崇. 海上风机超大直径单桩基础承载性能及桩身优化设计研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2020.001470.
WU Y C. Study on bearing capacity and optimal design of super large diameter single pile foundation for offshore fan [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2020.001470.
- [15] 周跌鸣, 闫姝, 姚中原. 海上风机塔架和单桩一体化试验设计方法 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(4): 16-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.003.
ZHOU Y M, YAN S, YAO Z Y. Design of experiment for integrated offshore windturbine tower and monopile [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(4): 16-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.003.
- [16] 马宁. 海上风电工程基础设施效率优化措施 [J]. *中国设备工程*, 2020(6): 246-248. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2020.06.147.
MA N. Measures to optimize the efficiency of offshore wind power engineering foundation construction [J]. *China equipment engineering*, 2020(6): 246-248. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2020.06.147.
- [17] 顾明. 某近海风电场风机基础结构选型分析 [J]. *规划与设计*, 2018(21): 77-78. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0038.2018.21.060.
GU M. Analysis of wind turbine foundation structure selection for an offshore wind farm [J]. *Planning and design*, 2018(21): 77-78. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0038.2018.21.060.
- [18] 刘爽, 束加庆, 吴兆和, 等. 波浪作用下海上风机导管架基础静力分析 [J]. *工程技术研究*, 2021, 6(14): 135-136. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2021.14.062.
LIU S, SHU J Q, WU Z H, et al. Static analysis of offshore wind turbine jacket foundation under wave and current action [J]. *Engineering equipment and materials*, 2021, 6(14): 135-136. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2021.14.062.
- [19] 李志川, 胡鹏, 马佳星, 等. 中国海上风电发展现状分析及展望 [J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 229-236. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.05.026.
LI Z C, HU P, MA J X, et al. Analysis and prospect of offshore wind power development in China [J]. *China offshore oil and gas*, 2022, 34(5): 229-236. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.05.026.
- [20] 侯法奎. 海洋风电导管架结构对桩径变化位置的敏感性分析研究 [J]. *工程与试验*, 2019, 59(4): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2019.04.010.
HOU F L. Sensitivity analysis of offshore wind power jacket structure to changing position of pile diameter [J]. *Engineering and test*, 2019, 59(4): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2019.04.010.
- [21] 郭政. 宁德霞浦某海上风电场基础选型研究 [J]. *能源与环境*, 2022(2): 16-19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2022.02.005.
GUO Z. Research on foundation selection of an offshore wind farm in Xiapu, Ningde [J]. *Energy and environment*, 2022(2): 16-19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2022.02.005.
- [22] 国家能源局. 海上风电场工程风电机组基础设计规范: NB/T 10105—2018 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
National Energy Administration. Code for design of wind turbine foundations for offshore wind power projects: NB/T 10105—2018 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 码头结构设计规范: JTS 167—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design code for wharf structures: JTS 167—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [25] DNV GL AS. Support structures for wind turbines: DNVGL—ST—0126 [S]. [S. l.]: DNV GL AS, 2018.

作者简介:



李保洋

李保洋 (通信作者)

1967-, 男, 高级工程师, 工商管理硕士, 主要从事海上风电投建营研究及管理工作 (e-mail)405566216@qq.com。

(编辑 孙舒)