

中文引用格式: 罗崧滔, 王文玲, 刘帅栋, 等. 海上风电机组高桩承台基础结构参数对结构动力响应规律的影响[J]. 特种结构, 2024, 41(4): 57-63

英文引用格式: Luo Yintao, Wang Wenling, Liu Shuaidong, et al. Influence of High-pile Cap Foundation Structure Parameters on the Dynamic Response of Offshore Wind Turbines[J]. Special Structures, 2024, 41(4): 57-63

海上风电机组高桩承台基础结构参数对结构动力响应规律的影响

罗崧滔^{1,2} 王文玲^{1,2} 刘帅栋³ 王宇航^{1,2} 陈成³ 梁佳俊³ 高光一^{1,2}

1. 重庆大学土木工程学院 400045

2. 重庆大学钢结构工程研究中心 400045

3. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司 南昌 330096

摘要: 随着“3060 双碳”目标的提出, 风能作为可再生能源的重要组成部分, 大力发展风电已成为了能源战略的重要组成部分。为达到降本增效的目标, 本文通过对高桩承台基础的结构参数开展进一步分析, 揭示其影响规律。采用 GH Bladed 软件分析当海上风电机组高桩承台基础结构的桩身直径、钢管桩壁厚和布桩半径变化时, 对塔顶动力响应规律的影响。结果表明: 在外部载荷和环境参数一定的条件下, 当桩径、壁厚和布桩半径变化时, 塔顶的最大位移和加速度均有不同程度的变化规律。总体而言, 随着桩身直径、壁厚和布桩半径的增加, 塔顶位移的动力响应均呈现逐渐减小的趋势。

关键词: 高桩承台基础 结构参数分析 动力响应 位移 加速度

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A

DOI: 10.19786/j.tzjg.2024.04.010

Influence of High-pile Cap Foundation Structure Parameters on the Dynamic Response of Offshore Wind Turbines

Luo Yintao^{1,2} Wang Wenling^{1,2} Liu Shuaidong³ Wang Yuhang^{1,2} Chen Cheng³ Liang Jiajun³ Gao Guangyi^{1,2}

1. School of Civil Engineering of Chongqing University, 400045, China

2. Research Center for Steel Structure Engineering, Chongqing University, 400045, China

3. PowerChina Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang 330096, China

ABSTRACT: With the proposal of the "3060 dual carbon" goal, wind energy has emerged as a crucial component of renewable energy sources. To achieve the objective of cost reduction and efficiency increasing, this paper investigates the structural parameters of high-pile cap foundations, aiming to uncover their influence. Utilizing GH Bladed software, the impacts of pile diameter, steel pipe pile wall thickness, and pile spacing on the dynamic response of offshore wind turbine towers are analyzed. The results indicate that, under specific external loads and environmental conditions, variations in pile diameter, wall thickness, and pile spacing lead to different degrees of change in maximum displacement and acceleration at the tower top. Generally, as pile diameter, wall thickness, and pile spacing increase, the dynamic response of tower top displacement exhibits a gradual decrease.

KEYWORDS: High-pile cap foundation Structural parameter analysis Dynamic response Displacement Acceleration

引言

风能作为可再生能源的重要组成部分, 因其

技术较为成熟, 目前已具有广阔的市场应用前景。而海上风电相比于陆上风电还具有风场质量

高、远离居民生活区、改善长距离输电等优势^[1-3]。对于50m以下的水深条件，通常采用固定式支撑结构，如单桩、导管式、桩基-承台等^[4]。高桩承台支撑结构通常采用斜桩，其具有传力路径良好、刚度大、施工工艺成熟等优点。

针对高桩承台基础，国内外学者已经开展了部分研究工作。在土体与支撑结构相互作用方面，Mardfekri等^[5]在分析土体与结构非线性相互作用时引入了概率模型，预测发电机组在发电条件下的变形和受力情况。邹彩云^[6]使用ANSYS分析软件对机组支撑结构进行了强度、疲劳及其在不同土体计算方法下的研究。李腾飞等^[7]在SACS软件中研究了桩倾斜率、布桩半径、承台高度等结构参数变化时结构的承载力和变形规律，对工程优化设计提出建议。莫继华等^[8]建立了ABAQUS模型，模拟风电机组单桩式支撑结构各工况在风浪流等环境参数下的疲劳载荷，为海上风力发电结构疲劳分析提供了依据。Marino等^[9]对不同工况下的发电机组开展了耦合响应分析，对线性和非线性的波浪模型进行了比较，结果显示在停机状态下，线性波浪模型所引起的疲劳载荷被低估。孙明明等^[10]在极端波浪载荷条件下对高桩承台基础的应力分布进行了研究，研究表明桩身与承台连接等部分有应力超限现象。沈晓雷等^[11]以实际工程为背景，建立了高桩承台ABAQUS有限元模型，针对结构的荷载-位移曲线开展分析，研究表明结构存在明显的弹性与屈服阶段。Escoffier等^[12]针对地震载荷工况对简化后的直桩和斜桩群桩基础进行了分析，通过对承台加速度、桩身轴向荷载及桩身弯矩等测量，揭示了其动力响应差异。

现有研究大多集中于高桩承台基础在环境载荷作用下的受力特征，而对高桩承台基础的结构参数缺乏系统性的研究，结构的动力响应尚不清晰，研究相关问题对高桩承台基础的工程优化具有重要意义。重庆大学钢结构研究中心团队在已有高桩承台及海上支撑结构的研究基础^[13, 14]上，对桩身直径、壁厚和布桩半径变化时整体结构的动力响应开展分析，给工程设计提供相关建议。

1 高桩承台基础动力分析模型建立

基于GH Bladed软件建立风电机组、塔筒、

基础结构的整体模型，探究其动力响应规律，对风机整体结构进行800s仿真分析。

(1)采用一公开参数的机组模型展开分析，其参数如表1所示。

表1 风电机组参数

Tab. 1 Wind turbine parameters

参数名称	数值
控制系统	变速、变桨
叶轮直径	118m
轮毂直径	2.5m
切入、额定、切出风速	3.5m/s、11.5m/s、25m/s
叶轮质量	138.13t
机舱质量	203.81t

在建模过程中考虑了几何外形、定义质量分布及刚度等参数，叶片建模如图1。

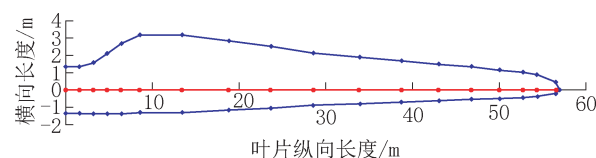


图1 叶片几何外形

Fig. 1 Geometric dimensions of blade

(2)根据表2建立塔筒模型，截面高度由塔筒底部起算。

表2 塔筒参数

Tab. 2 Tower parameters

截面	所处高度 /m	直径 /m	壁厚 /mm	单位长度质量 / (kg/m)	抗弯刚度 / (N·m ²)
1	0	5.50	39	6540.39	5.24 × 10 ¹¹
2	6.5	5.50	28	4705.14	3.78 × 10 ¹¹
3	11.5	5.50	27	4537.90	3.65 × 10 ¹¹
4	16.5	5.28	23	3715.00	2.76 × 10 ¹¹
5	21.5	5.13	23	3605.77	2.52 × 10 ¹¹
6	26.5	5.13	23	3605.77	2.52 × 10 ¹¹
7	31.5	4.82	22	3240.70	2.00 × 10 ¹¹
8	36.5	4.70	22	3160.02	1.86 × 10 ¹¹
9	41.5	4.54	20	2778.40	1.53 × 10 ¹¹
10	46.5	4.31	19	2503.92	1.24 × 10 ¹¹
11	51.5	4.15	18	2286.67	1.05 × 10 ¹¹
12	56.5	4.02	17	2089.25	8.99 × 10 ¹⁰
13	61.5	3.88	17	2018.03	8.10 × 10 ¹⁰
14	66.5	3.73	16	1823.73	6.75 × 10 ¹⁰
15	71.5	3.58	16	1753.54	6.00 × 10 ¹⁰
16	76.5	3.43	16	1675.04	5.23 × 10 ¹⁰
17	81.5	3.32	30	3027.29	8.78 × 10 ¹⁰
18	87.4	3.32	30	3027.29	8.78 × 10 ¹⁰

(3) 基于文献[13]建立的高桩承台基础结构如图2所示。边界条件由桩-土相互作用计算得到的各桩腿泥面处刚度矩阵代替。

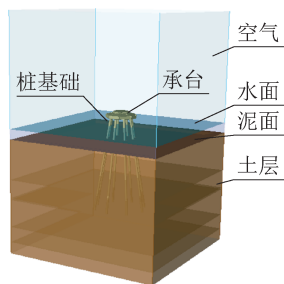


图2 高桩承台桩基础整体模型
Fig.2 Overall model drawing of pile foundation with elevated cap

(4) 环境载荷：同时考虑风、浪、流的耦合荷载作用，其中风谱采用IEC61400-3规范中的Kaimal风谱，其参数及时程曲线如表3和图3所示。

表3 动力计算工况参数

Tab.3 Dynamic calculation of operating condition

参数	风速/(m/s)	有义波高/m	谱峰周期/s	表面流速/(m/s)
数值	11.5	2.05	5.1	1.22

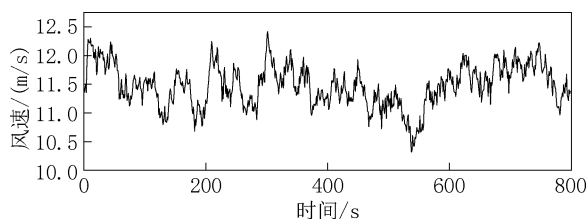


图3 风速时程曲线

Fig.3 Wind speed time history curve

波浪谱采用P-M谱，其参数及时程曲线如表3和图4所示。

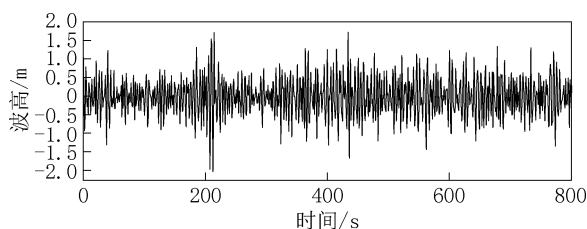


图4 波高时程曲线

Fig.4 Wave height time history curve

2 桩基结构参数对整体结构动力响应的影响

2.1 桩身直径的影响

为分析桩径对于结构动力响应的影响，在其他结构参数及荷载工况不变的情况下，分别选取1.0m、1.5m、2.0m、2.5m、3.0m桩径进行计算分析。在塔筒设计过程中，为保障材料的高效利用，通常截面尺寸较大，当风轮出现较大位移时会出现与塔筒碰撞的风险，故本文将重点分析塔筒顶部的位移。在风电领域中疲劳问题突出，

故在研究过程中也将重点分析塔筒顶部的加速度。

1. 塔顶位移响应

图5为桩径1.0m时高桩承台基础塔顶的位移时程曲线。

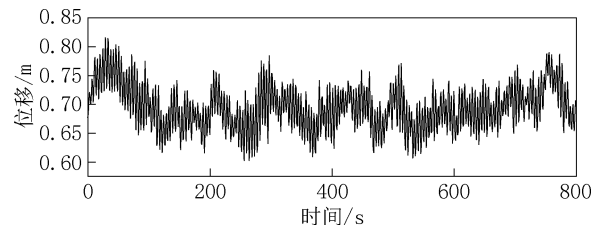


图5 桩径1.0m塔顶位移时程曲线

Fig.5 Time history curve of tower top displacement under 1m pile diameters

为探究结构响应对外部载荷的敏感性，将时程位移曲线通过快速傅里叶变化得到结构的响应频谱，如图6所示。

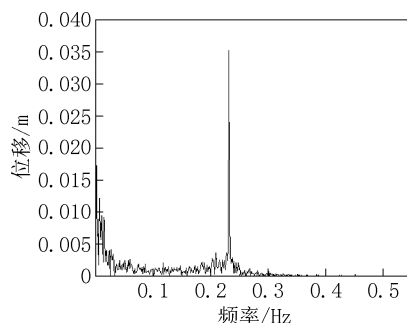


图6 桩径1.0m塔顶位移频谱

Fig.6 Frequency spectrum of tower top displacement under 1m pile diameters

由图6可知，当结构频率为0Hz时，塔顶有较大位移，这是由于风谱在0Hz处有一恒定分量，其与恒定海流的耦合作用使得结构位移较为明显。此外，当结构频率位于0Hz~0.1Hz之间时，结构的位移响应主要是由于风载在此区间有较大的响应，结构位移变化趋势与风频谱表现一致；波浪频率分布在0.2Hz，但结构整体响应较低，由此可见此结构对波浪频率不敏感；当结构频率达到0.24Hz时，结构响应达到最大，为结构的自振频率。

表4为不同桩径下的位移最大值及位移平均值。由表可知，随着桩径的逐渐增大，结构的最大位移与加速度均逐渐减小，塔顶最大位移减小了2.3%，塔顶平均位移减小了7.6%。可以认为桩径的增加对塔顶的最大位移和平均位移有一

定的改善，这是因为桩径的增加使得结构整体的刚度增大，其抵抗水平变形的能力增强，但效果并不显著。此外，桩径的增加对塔顶位移的标准差影响较小，可忽略其影响。

表4 不同桩径下位移统计值

Tab. 4 Displacement statistics under different pile diameters

桩径/m	位移最大值/m	位移平均值/m
1.0	0.8238	0.6958
1.5	0.8123	0.6908
2.0	0.8105	0.6642
2.5	0.8060	0.6492
3.0	0.8047	0.6425

2. 塔顶加速度

图7为桩径1.0m时高桩承台基础塔顶的加速度时程曲线。

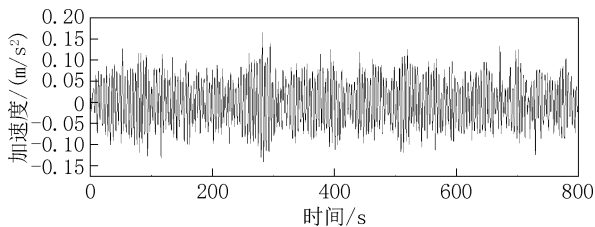


图7 桩径1.0m塔顶加速度时程曲线

Fig. 7 Time history curve of tower top acceleration under 1m pile diameters

同理，经过快速傅里叶变换得到塔顶加速度的频谱图如图8所示。

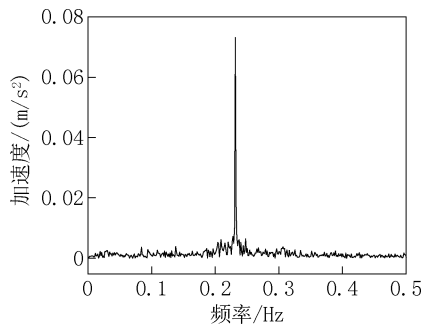


图8 桩径1.0m塔顶加速度频谱

Fig. 8 Frequency spectrum of tower top acceleration under 1m pile diameters

与桩径1.0m的位移频谱不同，塔顶加速度在0Hz~0.1Hz时并无明显变化规律，受风谱影响较小；但当结构频率达到0.2Hz时，结构受到波浪频率影响有小幅度的加速度提高。同样由于结构自振周期的原因，当结构频率为0.24Hz时，其加速度响应最大。通过对塔顶加速度的分析可

知，波浪荷载相比于风荷载对结构塔顶加速度影响更大。

将不同桩径下的塔顶加速度统计值进行对比，经过数据统计分析得到不同桩径下塔顶加速度的平均值几乎为0，加速度最大值及标准差如表5所示，随着桩径的增大，塔顶加速度最大值、标准差逐渐增大，3m桩径加速度最大值为桩径1m时的2.94倍，标准差为3.13倍。这是因为桩径的增大会使得结构整体刚度增大，又因为结构质量未发生改变，故直径的增加使得结构所受到的环境荷载增加，提高了塔顶加速度的最大值及标准差，使得塔顶的振动冲击力更大，在设计选型时应综合分析桩径提高所带来的利弊。

表5 不同桩径下加速度统计值

Tab. 5 Acceleration statistics under different pile diameters

桩径/m	加速度最大值/(m/s ²)	加速度标准差/(m/s ²)
1.0	0.1629	0.0581
1.5	0.2801	0.0903
2.0	0.3971	0.1248
2.5	0.4314	0.1539
3.0	0.4771	0.1626

2.2 钢管桩壁厚影响

为分析钢管桩壁厚对于结构动力响应的规律，在其他结构参数及荷载工况不变的情况下，分别选取了20mm、30mm、40mm、50mm、80mm、100mm壁厚进行计算分析。对不同桩壁厚下的风电机组进行风、浪、流荷载作用下的动力响应分析，同样重点对比风轮机舱所在的塔顶处动力响应情况。

1. 塔顶位移响应

图9为钢管壁厚20mm时高桩承台基础塔顶的位移时程曲线。

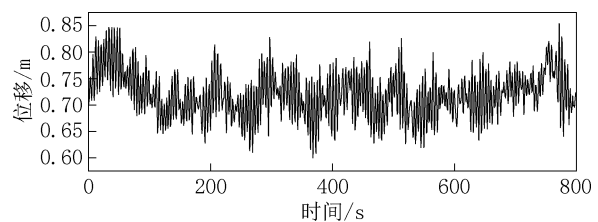


图9 壁厚20mm塔顶位移时程曲线

Fig. 9 Time history curve of tower top displacement under 20 mm pile thickness

为研究各外部荷载对结构响应的影响,利用快速傅里叶变换得到结构位移的频谱图如图 10 所示。由图 10 可以看出塔顶处位移的频率特性,其主要规律与桩径为 1.0m 时的规律相似,不再赘述。需要注意的是,0.24Hz 处为自振频率处的响应,由于自振频率与波浪频率相近导致了自振频率处的位移响应较其他频率处较大。

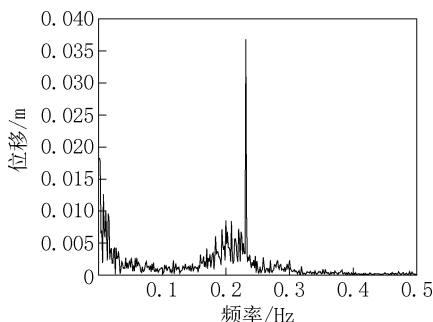


图 10 壁厚 20mm 塔顶位移频谱
Fig. 10 Frequency spectrum of displacement at tower top under 20 mm pile thickness

将不同壁厚下的塔顶位移统计值进行对比,位移最大值、平均值及标准差如表 6 所示。

表 6 不同壁厚下位移统计值

Tab. 6 Displacement statistics under different pile thickness

壁厚/mm	位移最大值/m	位移平均值/m	位移标准差/m
20	0.8539	0.7203	0.0456
30	0.8242	0.6917	0.0445
40	0.8172	0.6816	0.0444
50	0.8067	0.6686	0.0442
80	0.7997	0.6632	0.0437
100	0.7883	0.6537	0.0434

由表 6 可知,随着壁厚的增大,塔顶位移最大值、平均值、标准差均逐渐减小,最大影响情况下塔顶位移最大值减小了 7.8%,平均值减小了 9.2%,标准差略有减小,振动产生的位移与平均位移值的离散程度略有减小。壁厚的增大会使得结构整体刚度增大、自重增大,其水平承载能力及稳定性有所提高,因此壁厚越大其水平位移越小,结构振动的剧烈程度有所降低。

2. 塔顶加速度

图 11 为钢管桩壁厚 20mm 时高桩承台基础塔顶的加速度时程曲线。为研究各外部荷载对结构响应的影响,通过快速傅里叶变换得到结构加速度的频谱图如图 12 所示。

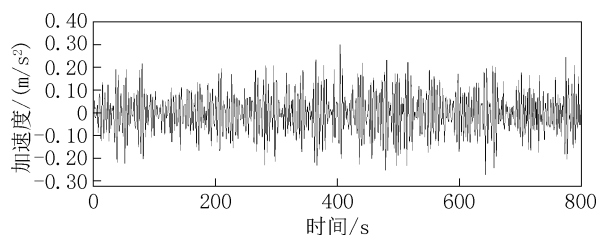


图 11 壁厚 20mm 塔顶加速度时程曲线
Fig. 11 Time history curve of tower top acceleration under 20mm pile thickness

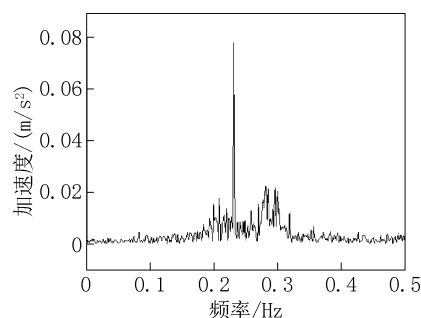


图 12 壁厚 20mm 塔顶加速度频谱
Fig. 12 Frequency spectrum of tower top acceleration under 20mm pile thickness

由图 12 可以看出,塔顶处加速度的频率特性与位移频谱不同,0.1Hz 附近为风机 1P 频率所在范围引起了小幅度的加速度响应,0.3Hz 附近为风机 3P 频率所在范围引起了加速度响应的升高。塔顶加速度在自振频率处有响应最大值。

为更清晰地分析壁厚对结构响应的情况,将不同壁厚下的塔顶加速度统计值进行对比,可以看到在不同壁厚条件下塔顶加速度的平均值几乎为 0,加速度最大值及标准差如表 7 所示,可以看出,壁厚的变化与结构塔顶加速度的变化没有一个明确的相关关系,因壁厚的改变不会改变结构所受外荷载,但是改变了自身刚度与重量,两者对结构的影响程度大小随着壁厚的变化暂未发现明显影响规律。

表 7 不同壁厚下加速度统计值

Tab. 7 Acceleration statistics under different pile thickness

壁厚/mm	加速度最大值/(m/s ²)	加速度标准差/(m/s ²)
20	0.3087	0.0953
30	0.2782	0.0912
40	0.3079	0.0922
50	0.2563	0.0805
80	0.2821	0.1002
100	0.7883	0.0922

2.3 布桩半径的影响

为分析钢管桩布桩半径对于结构动力响应的规律,在其他结构参数及荷载工况不变的情况下,分别选取了3.5m、4.5m、5.5m、6.5m、7.5m布桩半径进行计算分析。对不同布桩半径下的风电机组进行风、浪、流荷载作用下的动力响应分析,同样重点对比风轮机舱所在塔顶处的动力响应情况。

1. 塔顶位移响应

图13为布桩半径为3.5m时高桩承台基础塔顶的位移时程曲线。

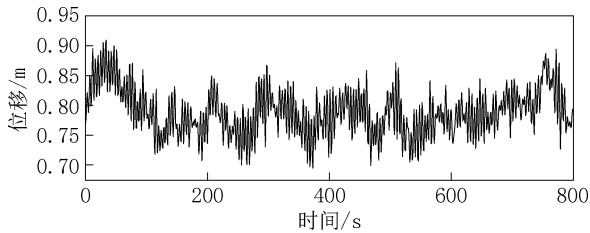


图13 布桩半径3.5m塔顶位移时程曲线

Fig. 13 Time history curve of tower top displacement under pile layout radius of 3.5m

同样通过快速傅里叶变换得到结构的位移频谱图如图14所示。其位移频谱的大致规律与桩径及钢管桩壁厚相似,不再赘述。需要注意的是,不同结构参数变换时对波浪载荷的敏感程度略有不同。

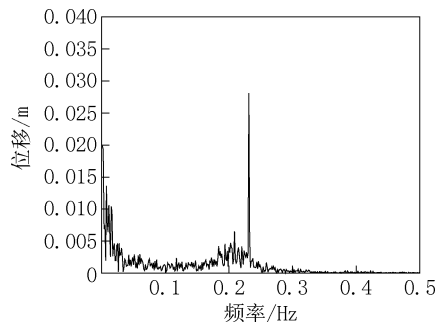


图14 布桩半径3.5m塔顶位移频谱

Fig. 14 Frequency spectrum of tower top displacement under pile layout radius of 3.5m

将不同布桩半径下的塔顶位移统计值进行对比,位移标准差差距小可以忽略,位移最大值及平均值如表8所示,随着布桩半径的增大,塔顶位移最大值、平均值逐渐减小,最大影响情况下塔顶位移最大值减小了16.5%,平均值减小了19.0%。布桩半径的增大会使得结构整体刚度增大、承台约束效应增大,其水平承载能力及稳定性有所提高,因此布桩半径越大其水平位移越小。

表8 不同布桩半径下位移统计值

Tab. 8 Displacement statistics under different pile layout radius

布桩半径/m	位移最大值/m	位移平均值/m
3.5	0.9070	0.7912
4.5	0.8651	0.7451
5.5	0.8419	0.7326
6.5	0.7814	0.6614
7.5	0.7628	0.6405

2. 塔顶加速度

图15为布桩半径3.5m时高桩承台基础塔顶的加速度时程曲线。为研究外部荷载对结构响应的的影响,通过快速傅里叶变换得到结构加速度的频谱图如图16所示。

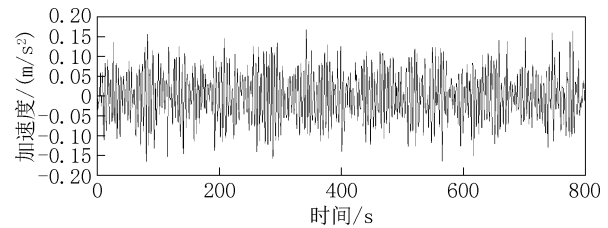


图15 布桩半径3.5m塔顶加速度时程曲线

Fig. 15 Time history curve of tower top acceleration under pile layout radius of 3.5m

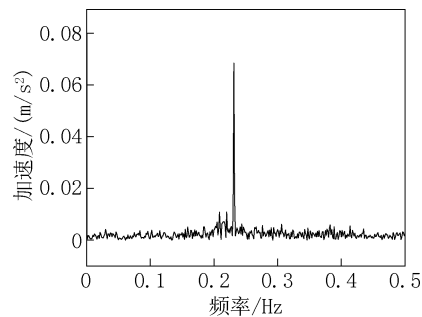


图16 布桩半径3.5m塔顶加速度频谱

Fig. 16 Frequency spectrum of tower top acceleration under pile layout radius of 3.5m

通过图16可知,塔顶加速度受波浪载荷影响较大,对风载荷的影响并不敏感。结构频率为0.24Hz时,达到其自振频率,结构动力响应明显。

将不同布桩半径下的塔顶加速度统计值进行对比,其中塔顶加速度的平均值都几乎为0,加速度最大值及标准差如表9所示,可以看出,随着布桩半径的增大,塔顶加速度最大值及标准差都略有增大,但加速度变化都在 0.01m/s^2 内,影响较小。布桩半径的增大会使得结构整体刚度增大,且因布桩半径的增大,减小了二次波浪激

励, 总体而言, 布桩半径的增大提高了加速度的最大值及标准差, 使得塔顶的振动冲击力更大。

表 9 不同布桩半径下加速度统计值

Tab. 9 Acceleration statistics under different pile layout radius

布桩半径/m	加速度最大值/(m/s ²)	加速度标准差/(m/s ²)
3.5	0.1663	0.0607
4.5	0.1675	0.0638
5.5	0.1688	0.0661
6.5	0.1725	0.0659
7.5	0.1913	0.0669

3 结论

1. 在桩径分别为 1.0m、1.5m、2.0m、2.5m、3.0m 五种情况下对结构进行动力性能研究发现, 桩基础的桩径增大会增加结构所受的波浪载荷, 塔顶位移和加速度动力响应呈现逐渐减小的趋势。

2. 在壁厚分别为 20mm、30mm、40mm、50mm、80mm、100mm 六种情况下对结构进行动力性能研究发现, 增大壁厚使得结构整体刚度提高, 在荷载作用下位移减小, 且振动的剧烈程度减弱。

3. 在布桩半径分别为 3.5m、4.5m、5.5m、6.5m、7.5m 五种情况下对结构进行动力性能研究发现, 布桩半径的增加一方面会改善塔顶的位移响应, 但对塔顶加速度无显著优化效应。

4. 通过对高桩承台基础的结构参数分析, 在工程设计与优化时优先增加钢管桩的壁厚对塔筒顶部的位移及加速度有明显增益。

针对高桩承台开展参数分析时仅考虑了单一变量改变时对结构的动力响应影响, 还可以分析两种或多个参数改变时结构的动力响应变化规律。目前的研究仍处于定性的理论分析, 后续可以增加模型数量、不同机组等参量, 开展定量的相关工作。

参考文献

- [1] 李晓燕, 余志. 海上风力发电进展[J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 78-84
Li Xiaoyan, Yu Zhi. Developments of Offshore Wind Power [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2004, 25(1): 78-84
- [2] 王徽, 黄成力. 海上风力发电技术[J]. 上海节能, 2007 (1): 23-26
Wang Hui, Huang Changli. Offshore Wind Power Generation Technology[J]. Shanghai Energy Conservation, 2007(1): 23-26
- [3] 宋础, 刘汉中. 海上风力发电场开发现状及趋势[J]. 电力勘测设计, 2006(2): 55-58
Song Chu, Liu Hanzhong. The Development and Trend of Wind Power Plant at Sea [J], Electric Power Survey and Design,

- 2006(2): 55-58
- [4] Arshad M, O Kelly B C. Offshore wind-turbine structures: a review[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy, 2013, 166(4): 139-152
- [5] Mardfekri M, Gardoni P. Probabilistic demand models and fragility estimates for offshore wind turbine support structures[J]. Engineering Structures, 2013, 52: 478-487
- [6] 郁彩云. 海上桩式风机基础结构设计与研究[D]. 大连理工大学港口、海岸及近海工程, 2009
Xun Caiyun. Design and Research of Pile-style Foundation Structures for Offshore Wind Turbine[D]. Dalian University of Technology. 2009
- [7] 李腾飞, 姜娟. 海上风机高桩承台基础结构及参数优化分析[J]. 内蒙古水利, 2018(10): 66-69
Li Tengfei, Jiang Juan. Optimization Analysis of Foundation Structure and Parameters of High Pile Cap for Offshore Wind Turbines[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2018(10): 66-69
- [8] 莫继华. 近海风电机组单桩式支撑结构疲劳分析[D]. 上海交通大学船舶与海洋结构物设计制造, 2011
Mo Jihua. Fatigue Analysis of Offshore Wind Turbine Mono-Pile Support Structure[D]. Shanghai Jiao Tong University, 2011
- [9] Marino E, Giusti A, Manuel L. Offshore wind turbine fatigue loads; The influence of alternative wave modeling for different turbulent and mean winds [J]. Renewable Energy, 2017, 102: 157-169
- [10] 孙明明, 李昕, 李炜. 海上风力机高桩承台基础反应特性研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 265-273
Sun Mingming, Li Xin, Li Wei. Study on Response of Offshore Wind Turbine With High-pile Cap Foundation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(7): 265-273
- [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
Shen Xiaolei, Chen Hongfei, Wang Xinyi. Numerical Simulation on the Bearing Characteristics of the High-pile Cap Foundation for Offshore Wind Power[J]. Water Power, 2021, 47(12): 72-75
- [12] Escoffier S, Chazelas J, Garnier J. Centrifuge modelling of raked piles[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6 (4): 689-704
- [13] 周绪红, 罗峻滔, 王文玲, 等. 海上风电机组高桩承台基础结构参数优化分析及实用变形分析方法研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(6): 1-12
Zhou Xuhong, Luo Yintao, Wang Wenling, et al. Optimizational Analysis on Structural Parameters and Study on Practical Deformation Analysis Methods for High-Rise Pile Cap Foundations of Offshore Wind Turbines [J]. Industrial Construction, 2023, 53(6): 1-12
- [14] 王宇航, 唐浩渊, 邹亮, 等. 海上风电机组固定式支撑结构环境敏感性分析及极限工况下的一体化设计[J]. 特种结构, 2020, 37(5): 1-6
Wang Yuhang, Tang Haoyuan, Zou Liang, et al. Environmental Sensitivity Analysis and Integrated Design on Extreme Situation of Fixed Support Structures for Offshore Wind Turbine[J]. Special Structures, 2020, 37(5): 1-6