

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.03.016

循环荷载作用下基础阻尼变化 对海上风机单桩基础疲劳寿命的影响分析

李玉韬, 马宏旺*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要: 在长期风浪循环荷载作用下, 海上风机单桩基础的基础阻尼会发生变化, 疲劳寿命受到影响。对于此问题, 目前还缺乏足够的研究。本文针对砂性土中海上风机单桩基础, 基于 Abaqus 软件平台建立其疲劳损伤分析模型, 桩-土相互作用采用非线性弹簧模拟, 风和波浪荷载由 FAST 程序分别基于 Kaimal 谱和 Jonswap 谱计算, 最后采用 $S-N$ 曲线和 Miner 线性疲劳累积损伤原则计算单桩基础在风机运行和停机等不同工况下的疲劳损伤和疲劳寿命。结果表明: 基础阻尼由 2% 减小到 0.5%, 海上风机单桩基础的疲劳寿命从 27.3 年减少到 17.7 年。在停机状态下, 基础阻尼的减小对海上风机单桩基础的疲劳寿命的不利影响更为显著。在设计使用期内, 额定风速附近工况导致的疲劳损伤较大。在海上风机单桩基础疲劳设计时, 考虑长期循环荷载作用下基础阻尼减小的不利影响是非常有必要的。

关键词: 单桩基础; 海上风机; 基础阻尼; 疲劳寿命

中图分类号: TM315; P752 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2021) 03-0111-08

海上风电基础在设计使用期内, 需要承受长期风浪动荷载的作用, 容易产生疲劳损伤。因此, 疲劳寿命往往是基础设计的重要控制参数^[1]。在计算结构疲劳寿命时, 阻尼是一个关键参数, 需要合理确定。但由于海上风电单桩基础承受长期循环动荷载的受力特点, 其基础阻尼会随着循环荷载作用次数发生变化, 疲劳寿命受到影响。然而, 长期循环荷载导致单桩基础阻尼变化^[2], 从而影响海上风机单桩基础疲劳寿命, 目前还缺乏足够的研究。

对于长期循环荷载对基础阻尼的影响和阻尼对海上风机单桩基础疲劳寿命的影响, 已有学者做了一些研究。ABADIE C N 等^[3]对砂性土中刚

性桩在长期循环荷载作用下的性能进行了试验研究, 试验结果表明阻尼随荷载作用次数的增加而逐渐降低, 最后趋于稳定。REZAEI R 等^[4]以 5 MW 单桩基础支撑的海上风机为例, 用非线性弹簧模拟桩土相互作用, 对海上风机单桩基础疲劳寿命进行了敏感性分析, 研究了阻尼对疲劳寿命的影响, 指出风机停机时气动阻尼消失, 会产生较大的疲劳损伤。MARINO E 等^[5]发现风机处于不同的运行状态时, 气动阻尼也会有所不同, 这会影响疲劳损伤的计算结果。AASEN S 等^[6]运用四种不同的基础模型对 5 MW 单桩基础支撑的海上风机进行了疲劳分析, 相比无阻尼的基础模型, 有阻尼基础模型最大减小了 22% 的疲劳损伤。FONTANA

收稿日期: 2020-10-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFB1503700)

作者简介: 李玉韬 (1995—), 男, 硕士, 主要从事海上风电单桩基础研究。E-mail: 1325463275@sjtu.edu.cn

通讯作者: 马宏旺 (1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事海上风电基础研究。E-mail: hwma@sjtu.edu.cn

C M 等^[7]对单桩基础支撑的海上风机进行了阻尼敏感性分析,运用 FAST 软件模拟计算了海上风机单桩基础的疲劳寿命,表明停机情况下,气动阻尼的缺乏引起基础阻尼的变化对疲劳损伤的影响更大。

前期研究主要集中于总体阻尼水平的变化对海上风机单桩基础疲劳寿命的影响,很少考虑长期循环荷载导致基础阻尼变化对疲劳寿命的影响。为了研究长期循环荷载作用下,基础阻尼的变化对海上风机单桩基础疲劳寿命的影响,本文建立了 5 MW 单桩基础支撑的海上风机数值模型,根据参考文献和模型试验结果确定基础阻尼,进行了疲劳分析,计算了不同基础阻尼水平下海上风机单桩基础的疲劳寿命。

1 疲劳分析模型

1.1 风机模型

本文以美国国家可再生能源试验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)提出的 5 MW 单桩基础支撑的海上风机为原型^[8],此风机被广泛应用于海上风机研究^[4,6-7],风机参数见表 1,风机塔架、单桩基础和桩周土体情况见图 1。

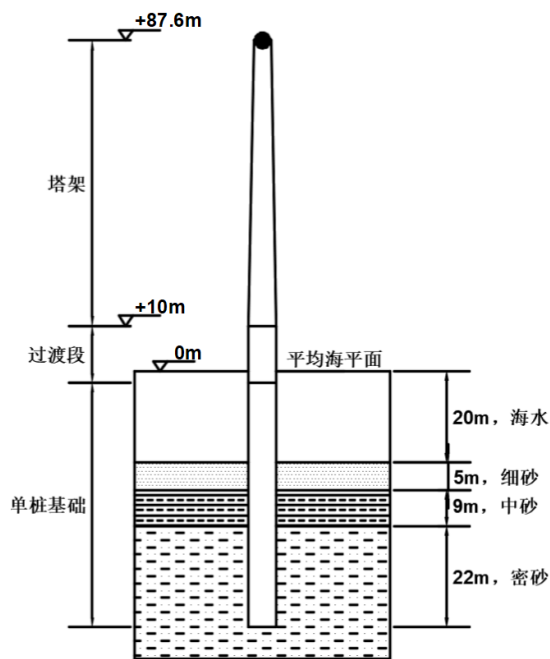


图 1 风机结构及所处环境

表 1 5MW 风机参数

风机参数	数值	风机参数	数值
功率 /MW	5	风机质量 /kg	350 000
叶片数	3	塔底直径 /m	6
风机直径 /m	126	塔底厚度 /m	0.027
额定风速 /m/s	11.4	塔顶直径 /m	3.87
额定转速 /r/min	12.1	塔顶厚度 /m	0.019

通过 Abaqus 有限元软件建立海上风机有限元模型,数值模型包括风机、塔架、过渡段、单桩基础和土体弹簧五部分。风机以集中质量的形式设置在塔顶,塔架、过渡段和单桩基础采用 S4R 壳单元线弹性模型进行建模,钢材材料参数为密度 7.85 t/m^3 ,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,过渡段保持刚度不变,采用纯钢管代替组合结构等效建模,整体有限元模型如图 2 所示。

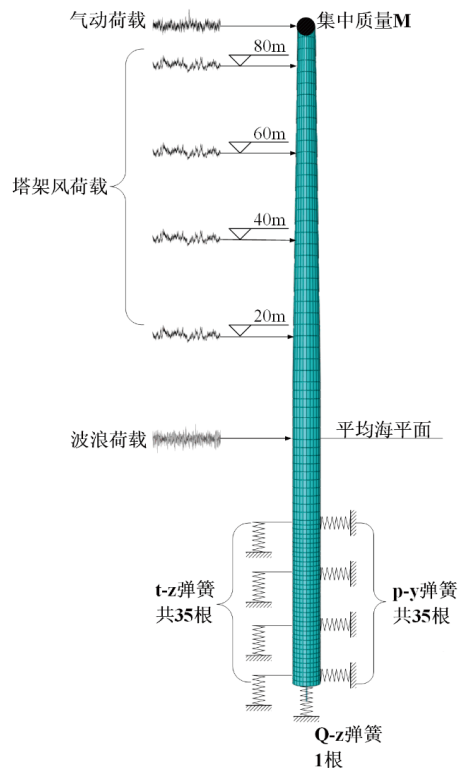


图 2 5MW 风机整体有限元模型

1.2 土体模型

本文基于 p - y 、 t - z 和 Q - z 曲线的非线性弹簧模拟单桩基础和土体之间的相互作用,采用 API 规范^[9]中 p - y 曲线模拟桩周土体水平反力, t - z 曲线模拟桩侧摩阻力, Q - z 曲线模拟桩端阻力,土体参

数^[10]如表2所示。

表2 土体参数

密实度	深度/m	有效重度/kN/m ³	内摩擦角/(°)
松砂	0~5	10	33
中砂	5~14	10	35
密砂	14~36	10	38.5

砂土 p - y 曲线由式(1)计算:

$$p=A \times P_u \times \tanh\left(\frac{kH}{Ap_u} \times y\right) \quad (1)$$

式中: A 为荷载条件系数, 长期循环荷载取 0.9; p 为桩周土体水平反力; y 为桩体水平位移; k 为土体初始模量; P_u 为桩周土体极限水平抗力, 由式(2)或(3)确定:

$$p_{us}=(C_1 \times H+C_2 \times D) \times \gamma \times H \quad (2)$$

$$p_{ud}=C_3 \times D \times \gamma \times H \quad (3)$$

式中: p_{us} 、 p_{ud} 分别为浅层和深层土体极限水平反力; C_1 、 C_2 和 C_3 根据 API 规范由土体内摩擦角确定; D 为单桩基础的直径; γ 为土体有效重度, 浅层和深层土体分界深度 H 由式(4)确定:

$$H=\frac{(C_3-C_2)D}{C_1} \quad (4)$$

本文单桩基础处于浅层土体, 水平抗力均由式(2)计算。 t - z 曲线计算公式如下:

$$t=\frac{z}{2.54} \times t_{max}, z \leq 2.54 \text{ mm} \quad (5)$$

$$t=t_{max}, z > 2.54 \text{ mm} \quad (6)$$

式中: t 为桩侧摩阻力; t_{max} 为最大桩侧摩阻力, 按式(7)计算:

$$t_{max}=K \times p_0 \times \tan \delta \quad (7)$$

式中: K 为侧向土压力系数; p_0 为所求点处土体自重应力; δ 为土壤内摩擦角。 Q - z 曲线由表3确定:

表3 Q - z 曲线

z/D	Q/Q_p
0	0
0.002	0.25
0.013	0.50
0.042	0.75
0.073	0.90
0.100	1.00
0.100	1.00

其中, z 为桩的竖向位移, Q 为桩端阻力, Q_p 为桩端极限承载力, 按式(8)计算:

$$q=p_0 \times N_q \quad (8)$$

式中: N_q 为与土体密实度相关的无量纲承载力因子。在有限元模型中, 弹簧设置在单桩轴线上参考点处, 参考点与同一高度的桩周单元节点以 Coupling 相互作用耦合, p - y 弹簧与 t - z 弹簧布置位置相同, 沿单桩基础竖直方向间距 1 m 布置, Q - z 弹簧在桩端设置, 弹簧设置情况见图2。

1.3 荷载计算

海上风机受到自重荷载、风荷载和波浪荷载的作用, 荷载布置见图2。本文中风荷载和波浪荷载的方向一致, 均为叶片迎风方向, 通过 FAST 程序仿真模拟得到。FAST 程序由 NREL 开发, 广泛应用于海上风机模拟研究^[4,7,11]。

1.3.1 自重荷载 塔架、过渡段和单桩基础的自重荷载通过施加重力的方式实现, 风机叶片、轮毂和机舱等自重荷载简化为集中力施加于塔架顶部。

1.3.2 风荷载 风机叶片所受气动荷载由 FAST 程序根据叶素动量理论计算, 叶素-动量理论将叶片沿展向分为若干叶素, 不同叶素之间无相互干扰, 单独计算每个叶素上的荷载。运用 NREL 开发的 Turbsim 程序, 输入风场参考高度处的风速, 就可以根据 Kaimal 谱计算风场文件, FAST 程序在进行仿真计算时, 会调用这一风场文件计算气动荷载, 气动荷载以集中荷载的形式施加到塔顶。

塔架所受风荷载根据式(9)^[12]计算:

$$F_{tower}=\frac{1}{2} \rho_a C_{D,T} D(z) V^2(z) \quad (9)$$

式中: ρ_a 为空气密度; $C_{D,T}$ 是塔架牵引阻尼系数, 取为 1.0; D 为高度 z 处塔架的外径; V 为所求荷载处的风速, 由式(10)^[12]确定:

$$V=V_r\left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (10)$$

式中: V_r 为风机塔顶处风速, 由 FAST 程序根据 Kaimal 谱计算; z_r 为塔顶高度; α 为场地粗糙度系数, 海上风机所在场地取为 0.115。本文将计算所得塔架均布风荷载分为 4 部分集中荷载, 施

加在塔架 20 m、40 m、60 m 和 80 m 处单元节点。

1.3.3 波浪荷载 根据 DNV OS J101 规范^[13], 采用莫里森公式计算出作用在单桩基础上的波浪荷载, 波浪荷载包括拖曳分力 F_D 和惯性分力 F_I 。

$$F = F_D + F_I \quad (11)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| dz \quad (12)$$

$$F_I = \frac{\pi}{4} C_M \rho D^2 \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad (13)$$

式中: $\frac{\partial u}{\partial t}$ 为波动加速度; C_D 为速度力系数; C_M 为惯性力系数; ρ 为水密度; D 为单桩基础直径; u 为波动速度。

本文在 FAST 程序中输入有效波高 H_s 和谱峰周期 T_p , 程序采用 Jonswap 谱和莫里森公式计算出单桩基础所受的波浪力, 单桩基础所受波浪荷载施加到桩身海平面处的单元节点。

1.4 阻尼参数

1.4.1 基础阻尼变化 在长期循环荷载作用下, 单桩基础的基础阻尼会发生变化。ABADIE C N^[2] 在研究砂性土中刚性桩基在长期循环荷载作用下的性能时, 进行了长期循环荷载作用的模型试验, 试验结果表明, 基础阻尼比会随着长期循环荷载循环次数的增加而减少, 变化范围为 8% 到 0.07%, 在循环次数达到 10 000 次时, 基础阻尼比已经为初始基础阻尼比的 1/50, 并用式 (14) 估计了 10 000 次循环荷载内阻尼比的变化:

$$D_N = \tau D_{a0} N^{-m_d} \quad (14)$$

式中: D_N 为阻尼比; D_{a0} 为初始阻尼比; τ 为经验阻尼循环系数, 随循环荷载大小线性增加, m_d 取为 0.31, 为根据试验结果确定的指数。

芦直跃等^[14] 在土体密度为 1.60 g/cm³ 的砂性土中进行了模型桩循环荷载试验, 根据 Christelle 文献中的阻尼公式, 试验的荷载位移结果可以拟合为式 (15):

$$D_N = 3.753 N^{-0.702} \quad (15)$$

在 $N=10\ 000$ 时, 由 (12) 式得到阻尼为 0.584%, 图 3 为芦直跃等的试验数据拟合出的阻尼比曲线。

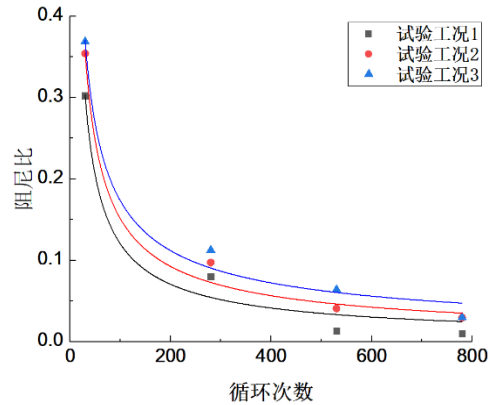


图3 阻尼比拟合曲线

参考文献^[4,15] 中基础阻尼比的取值范围在 0.17% ~ 1.3%, CHRISTELLE 的试验结果中阻尼变化范围为 8% 到 0.07%, 芦直跃等的试验结果拟合, 10000 次循环荷载作用后阻尼为 0.584%。综合考虑, 本研究中基础阻尼比由 2% 变化到 0.5%, 基础阻尼比分别设置为 2%、1.5%、1% 和 0.5%。

1.4.2 阻尼设置 海上风机属于低阻尼结构, 总体阻尼低于临界阻尼的 10%, 气动阻尼占阻尼的大部分。不同文献中阻尼比取值有很大差别, 气动阻尼比取值范围在 3% ~ 9%, 结构阻尼比取值范围在 0.19% ~ 1.5%^[15]。REZAEI R 等^[4] 在研究中将气动阻尼比设置为 5% ~ 7%, 结构阻尼比和波浪阻尼比设置为 1.2%。

本研究中气动阻尼比工作状态设置为 5%, 停机状态设置为 0, 结构阻尼比和波浪阻尼比设置为 1%。气动阻尼以阻尼器的形式施加到模型塔顶, 结构阻尼、基础阻尼和波浪阻尼以只考虑一阶振型的瑞利阻尼的形式施加, 计算方法如下^[16]:

$$\alpha = \xi \omega \quad (16)$$

$$\beta = \frac{\xi}{\omega} \quad (17)$$

式中: α 、 β 为阻尼系数; ξ 为阻尼比; ω 为海上风机的一阶自振圆频率。

1.4.3 阻尼验证 设置气动阻尼为 5%, 结构阻尼比和波浪阻尼比为 1%, 基础阻尼为 2%, 总阻尼为 8%, 在塔顶位置施加 700 kN 的集中力, 进行自由振动分析。图 4 为塔顶位移自由振动曲线,

对塔顶位移运用式 (18)^[16] 进行阻尼计算:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right) \quad (18)$$

式中: x_n 为第 n 次塔顶自由振动振幅。由计算结果得阻尼为 8.036%, 计算值与目标值误差为 0.5%, 可见模型的阻尼能够满足研究要求。

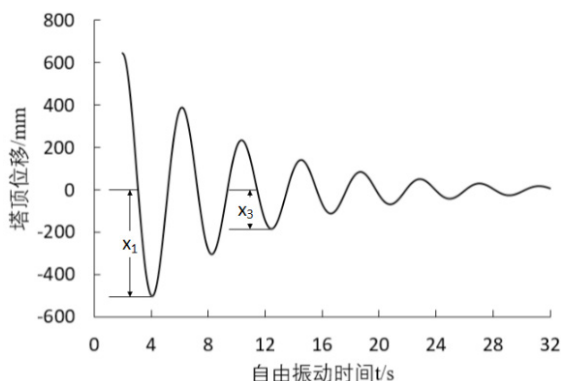


图4 自由振动曲线

1.5 疲劳分析方法

基于已建立的 5 MW 单桩基础支撑的海上风机有限元模型, 对海上风机进行模拟, 根据计算结果, 采用时域疲劳评估方法对海上风机单桩基础进行疲劳分析。首先对海上风机结构进行动力学分析, 得到单桩基础泥面处应力时程, 采用雨流计数法对应力幅值进行计数, 选用合适的 $S-N$ 曲线, 对海上风机单桩基础的疲劳损伤和疲劳寿命进行计算, 图 5 为疲劳寿命计算流程。

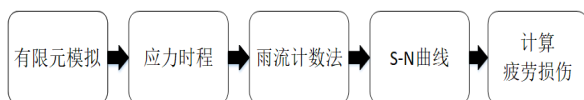


图5 疲劳寿命计算流程

1.5.1 $S-N$ 曲线 $S-N$ 曲线是表示一定循环特征下标准试件的疲劳强度与疲劳寿命之间关系的曲线, 单桩基础属于海水中有阴极保护的构件, 参考规范 DNV RP C203^[17] 和相关文献^[18], 选用海水中有阴极防护的 $S-N$ 曲线 D, 公式如下:

$$\lg N = \lg a - m \lg \left(\Delta \sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right) \quad (19)$$

式中: N 为疲劳寿命; m 为 $S-N$ 曲线的负斜率; $\lg a$ 为 $S-N$ 曲线在坐标轴 $\lg N$ 的截距; $\Delta \sigma$ 为应力幅值; t 为裂缝发生处厚度; t_{ref} 为参考厚度; k 为

厚度指数。表 4 为选用的 $S-N$ 曲线参数。

表4 $S-N$ 曲线参数

$N \leq 10^6$		$N \geq 10^6$		k	t_{ref}
m_1	$\lg a_1$	m_2	$\lg a_2$		
3	11.764	5	15.606	0.2	25 mm

1.5.2 线性疲劳损伤理论 Miner 线性疲劳累积损伤理论认为相同应力循环产生的疲劳损伤相同, 疲劳损伤之间相互独立, 可以线性累加^[19]。根据雨流计数法所得应力循环数据, 在一个应力循环 S_i 内, 对应的循环次数为 n_i , 根据 $S-N$ 曲线, 可以得到应力范围 S_i 下的疲劳寿命 N_i , 则疲劳累积损伤为:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (20)$$

在一种工况下, 疲劳寿命累积损伤为:

$$DC_j = \sum D_i \quad (21)$$

根据不同工况发生的概率, 即可得到单桩基础的总疲劳损伤:

$$D = \sum p_j DC_j \quad (22)$$

式中: p_j 为工况 j 发生的概率。单桩基础的设计寿命为 T_s , 单桩基础的疲劳寿命 T_f 可由下式进行计算:

$$T_f = T_s / D \quad (23)$$

2 工程案例

为研究长期循环荷载作用下基础阻尼变化对海上风机单桩基础疲劳寿命的影响, 运用前文有限元模型进行数值模拟, 基础阻尼比分别设置为 2%、1.5%、1% 和 0.5%。针对单桩基础支撑的海上风机的场地, 选取了 17 种不同的实际荷载工况^[20], 包括了海上风机在使用过程中的所有环境状况, 荷载工况具体参数见表 5。在工况 1 时, 风速未达到切入风速, 海上风机停机, 风机叶片为顺桨状态; 在荷载工况 2 ~ 12 条件下, 海上风机处于正常工作状态; 在荷载工况 13 ~ 17 条件下, 风速超过切出风速, 海上风机停机, 风机叶片顺桨, 工况 1 和工况 13 ~ 17 中风机气动阻尼为 0。对每种阻尼和工况进行 650 s 模拟, 去除前 50 s 以防止激振影响, 运用基于 $S-N$ 曲线和线性疲劳累积损伤理论的计算方法, 根据式 (20) 至式 (23), 计算

海上风机单桩基础的疲劳损伤和疲劳寿命。

表5 荷载工况

工况	m/s	m	s	概率
1	2	1.07	6.03	0.062 39
2	4	1.1	5.88	0.118 98
3	6	1.18	5.76	0.154 94
4	8	1.31	5.67	0.164 79
5	10	1.48	5.74	0.151 30
6	12	1.70	5.88	0.1228 5
7	14	1.91	6.07	0.089 32
8	16	2.19	6.37	0.058 58
9	18	2.47	6.71	0.034 80
10	20	2.76	6.99	0.018 78
11	22	3.09	7.40	0.009 22
12	24	3.42	7.80	0.004 13
13	26	3.76	8.14	0.001 68
14	28	4.17	8.49	0.000 63
15	30	4.46	8.86	0.000 21
16	32	4.79	9.12	0.000 07
17	38	4.90	9.43	0.000 03

3 疲劳结果分析

根据有限元计算结果,取单桩基础泥面处应力进行疲劳分析,分析结果如下。图6为20年海上风机单桩基础在各工况下的疲劳损伤情况。风机的疲劳损伤总体上随着风速和浪高的增大而增大,海上风机停机时,风机气动阻尼消失,疲劳损伤随风浪增大的提升更为显著。基础阻尼的减小在所有工况均导致了疲劳损伤的增大,基础阻尼由2%变化到0.5%,工作工况6的疲劳损伤由0.86增加到1.17,增加了36.2%;停机工况14的疲劳损伤由17.85增加到42.36,增加了137.4%。基础阻尼每降低0.5%,停机状态疲劳损伤平均增加32.89%,运行状态疲劳损伤平均增加12.26%。这是由于停机时气动阻尼消失,基础阻尼占总体阻尼的比重较大,基础阻尼的减小对单桩基础的疲劳寿命更加不利。

工况1的风速小于切入风速,此时风速和浪高最小,疲劳损伤为0.31~0.99。但由于风机停机,气动阻尼为0,疲劳损伤整体大于工况5的疲

劳损伤0.37~0.51。

图7为考虑工况发生概率后,各工况对风机总疲劳损伤的贡献,表明风速接近额定风速的工况6和7对疲劳损伤的贡献较大,占总体损伤的27.0%~32.2%。风速大于切出风速之后的工况虽然疲劳损伤较大,但由于工况发生概率较低,对疲劳损伤的贡献不大。工况1虽然风浪最小,但由于气动阻尼的消失和发生概率较大,对总疲劳损伤的贡献也不可忽略,占总损伤的2.7%~5.5%。

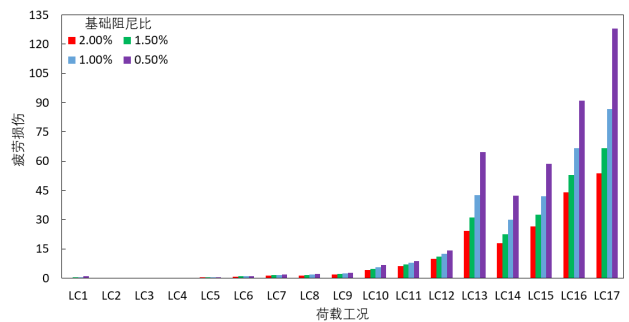


图6 不同基础阻尼比条件下20年风机疲劳损伤

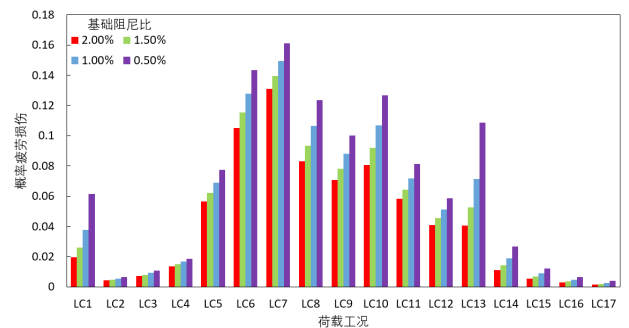


图7 不同基础阻尼比条件下考虑工况概率风机疲劳损伤

图8为工作状态和停机状态单桩基础疲劳损伤的贡献占比。工作状态下,海上风机单桩基础的疲劳损伤占总损伤的大部分,在阻尼减小时,停机状态下的疲劳损伤占总损伤的比例增加,由基础阻尼2%时的11.1%增加到基础阻尼0.5%时的19.5%。

根据式(20)至式(23),计算海上风机单桩基础的疲劳寿命,结果如表6所示。随着基础阻尼的减小,海上风机单桩基础的疲劳损伤会增大,基础阻尼为2%时,疲劳损伤为0.733,疲劳寿命为27.3年,在基础阻尼为0.5%时,疲劳损伤为1.128,疲劳寿

命为 17.7 年，疲劳寿命减少了 35%。由此可见，长期循环荷载作用下基础阻尼减小对海上风机单桩基础的疲劳寿命有不利影响，危及单桩基础的安全性，需要在单桩基础设计时加以重视。

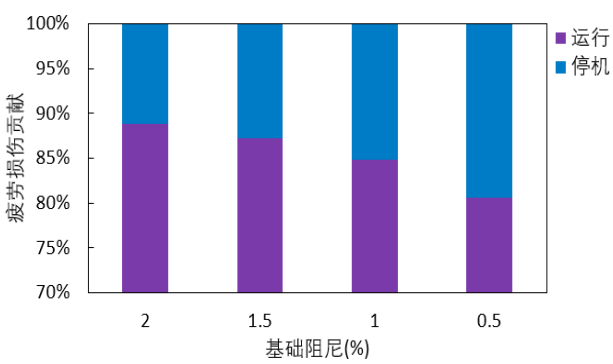


图 8 工作状态和停机状态疲劳损伤占比

表 6 单桩基础疲劳损伤和疲劳寿命

基础阻尼比 / %	2	1.5	1	0.5
总疲劳损伤	0.733	0.824	0.946	1.128
疲劳寿命 / 年	27.3	24.3	21.1	17.7

4 结 论

本文研究了长期循环荷载作用下基础阻尼的变化对单桩基础疲劳寿命的影响，可以得出以下结论：（1）在长期循环荷载作用下，海上风机单

桩基础的基础阻尼会减小，当基础阻尼比由 2% 减小到 0.5% 时，疲劳损伤由 0.733 增加到 1.128，增加了 54%，海上风机单桩基础的疲劳寿命由 27.3 年变化为 17.7 年，减少了 35%；（2）海上风机工作时的疲劳损伤占总疲劳损伤的大部分，在基础阻尼由 2% 减小到 0.5% 时，停机状态下的疲劳损伤占总疲劳损伤的比例由 11.1% 增加到 19.5%；

（3）疲劳损伤集中在风速接近额定风速的工况 6 和 7 附近，工况 6 和 7 对疲劳损伤的贡献较大，占总体损伤的 27.0% ~ 32.2%；（4）工况 1 和工况 13 ~ 17，海上风机处于停机状态，气动阻尼消失，基础阻尼占总体阻尼中的主要地位，此时基础阻尼减小，疲劳损伤增加幅度相比工作状态更大，对海上风机单桩基础疲劳寿命更加不利；（5）长期循环荷载作用下，基础阻尼的减小会减少单桩基础的疲劳寿命，影响海上风机的安全性。在对海上风机单桩基础进行疲劳设计时，应当考虑长期循环荷载作用下基础阻尼减小的不利影响。

本文研究中，不考虑风机检修等停机情况，也没有考虑风荷载和波浪荷载不沿同一方向的情况，这些还需要在今后的工作中进一步研究。

参考文献：

[1] 夏露. 海上风机基础在风浪作用下的动力分析与疲劳分析 [D]. 大连：大连理工大学, 2012.

[2] ABADIE C N. Cyclic lateral loading of monopile foundation in cohesionless soils[D]. Oxford: St Catherine’s College, University of Oxford, 2015.

[3] ABADIE C N, BYRNE B W, HOULSBY G T. Rigid pile response to cyclic lateral loading: laboratory tests[J]. Géotechnique, 2018, 69(10):1-41.

[4] REZAEI R, FROMME P, DUFFOUR P. Fatigue life sensitivity of monopile foundation of offshore wind turbines to damping[J]. Renewable Energy, 2018, 123(AUG):450-459.

[5] 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.

[6] AASEN S, PAGE A M, SKAU K S, et al. Effect of foundation modelling on the fatigue lifetime of a monopile-based offshore wind turbine[J]. Wind Energy science ,2017, 2(2):361-376.

[7] FONTANA C M, CARSWELL W, ARWADE S R, et al. Sensitivity of the Dynamic Response of Monopile foundation of offshore wind turbines to Structural and Foundation Damping[J]. Wind Engineering, 2015, 39(6):609-628.

[8] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2009.

[9] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platformsworking stress design: API RP2A WSD[S].American Petroleum Institute, 2007.

- [10] MA H W, YANG J. A novel hybrid monopile foundation for offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2020(198):106963.
- [11] GENTILS T, WANG L, KOLIOS A. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm[J]. *Applied Energy*, 2017(199):187-204.
- [12] JONKMAN B J, BUHL J M L. FAST User's Guide[R]. Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [13] Det Norske Veritas. Design of offshore wind turbine structures:DNV OS J101[S]. Oslo: Det Norske Veritas,2014.
- [14] 芦直跃, 马宏旺, 李玉韬, 等. 台风对海上风电单桩基础累积变形影响试验研究 [J]. *海洋技术学报*, 2019,38(6):75-82.
- [15] 赵俭斌, 席义博, 王振宇. 海上风机单桩基础疲劳损伤计算方法 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2019,53(9):1-9.
- [16] 克拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] Det Norske Veritas. Fatigue design of offshore steel structure:DNV RP C203[S].Oslo:Det Norske Veritas,2012.
- [18] 樊惠燕. 风浪作用下海上风机单桩基础动力学与疲劳分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [19] 彭兆春. 基于疲劳损伤累积理论的结构寿命预测与时变可靠性分析方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [20] FISCHER T, VRIES W, SCHMIDT B. Upwind design basis WP4: Offshore foundations and support structures[R]. Brussels: Upwind, 2010.

Influence of Foundation Damping on Fatigue Life of Monopile Foundation of Offshore Wind Turbines under Long-term Cyclic Loading

LI Yutao, MA Hongwang

School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Under long-term wind and wave cyclic loading, the fatigue life of monopile foundation of offshore wind turbines will be affected by varying foundation damping. For the monopile foundation of offshore wind turbines in sand, the fatigue damage analysis model was established based on the Abaqus software platform, the nonlinear spring simulation was used for the pile-soil interaction, and the wind and wave loading is calculated by the FAST based on the Kaimal spectrum and the Jonswap spectrum. Finally fatigue damage and fatigue life of monopile foundation under operation and shutdown conditions were calculated based on the $S-N$ curve and Miner linear fatigue damage cumulative theory. The results show that, the foundation damping was reduced from 2% to 0.5%, and the fatigue life of offshore wind turbines was reduced from 27.3 to 17.7 years. Moreover, the reduction of foundation damping has a more significant adverse effect on the fatigue life of shutdown offshore wind turbines. During the design service period, the fatigue damage caused by working conditions near the rated wind speed is relatively large. The study shows that the adverse effects of reduced foundation damping under long-term loads should be considered in the fatigue design of offshore wind turbines.

Key words: monopile foundation; offshore wind turbine; foundation damping; fatigue life