一种应用于海上浮式风机疲劳分析的堆集方法

谭慧娟,宋健,吴俊逸

(江苏省船舶设计研究所有限公司, 江苏 镇江 212003)

摘要:随机环境荷载作用下的海上浮式风机疲劳评估一直是风机设计阶段的一个重要问题。传统的海洋结构物 疲劳评估方法通常只考虑水动力载荷,而不考虑风浪相关性。本文提出了一种改进的堆集方法,其中考虑了特定地 点的风浪的联合概率分布。采用全耦合动力分析方法对风机疲劳损伤进行计算,采用雨流计数技术得到风机塔架基 座的应力范围,并根据S-N曲线确定不同应力范围下的破坏周期,然后通过与北海相关的风浪联合概率密度函数求出 各区块的风浪联合概率。最后,将单位损伤按相应概率缩放,得到各单位的真实疲劳损伤。本文通过对5兆瓦柱体式 浮式风机进行实例疲劳分析,验证了该方法的有效性。

关键词: 疲劳分析 堆集方法 风浪联合概率 浮式风机

An Improved Lumping Approach for Fatigue Analysis of a Spar-type Wind Turbine

Huijuan Tan, Jian Song, Junyi Wu Jiangsu Ship Design & Research Institute Co., Ltd

ABSTRACT: Fatigue assessment for offshore floating wind turbines subjected to random environmental loads has been a crucially important issue in design phase. The traditional lumping approach for fatigue assessment of offshore structures is normally applied in the pure hydrodynamic loading rather than taking wind-wave correlations into account. An improved lumping approach is proposed in the present paper in which the joint probability distribution of wind and wave climates of a specific site is accounted for. The unit fatigue damage is calculated by means of fully coupled dynamic analysis, and then the stress ranges on the wind turbine tower base are achieved through rainflow counting technique which is subsequent in compliance with S-N curves to determine cycles to failure at different stress range levels. After that, the joint probability of each block is figured out through joint probability density function of wind and waves linked to North Sea. Finally, the damage for each unit is obtained by scaling the unit damage with the corresponding probability. An example application is given in the paper to calculate fatigue damage for a 5MW spar-type wind turbine tower base.

Key words: fatigue analysis; lumping approach; joint probability of wind and waves; floating wind turbine

0 引言

在浮式结构上安装风力发电机是组件海上风电场的必然趋势。然而,由于恶劣的环境条件,这些海上浮式结构物的设计面临着许多技术挑战。如何保证结构在疲劳极限状态下具有足够的疲劳强度是一个关键问题。为了解决这一问题,通常在设计阶段会采用了各种疲劳寿命预测方法来实现这一目标。结构疲劳评估一般采用时域分析法并结合雨流计数技术^[1]。采用该方法可获得结构的动态响应,并能较为准确的捕捉到结构中的非线性因素。然后采用雨流计数法对动态响应进行处理,生成应力谱,并将其应用于 S-N 疲劳曲线,以确定不同应力范围下的破坏周期。最后,采用 Miner 法则^[2]来评估结构疲劳寿命。作为一种复杂的海上结构系统,浮式风力发电机在服役期间会受到风、浪、流和冰等各种环境载荷的影响。不同环境载荷的组合使浮式风力发电机系统处于强非线性状态。因为时域分析是一个相当耗时的过程,所以从实际应用的角度来看,对波浪区块统计表的每个海况进行疲劳分析是不可行的。为了提高计算效率,Sheehan 等^[3]提出了一种"堆集方法",几个海况被合并到了同一个区块中,以此减少计算中工况的数量。为了进一步提高计算效率,本文提出了一种改进的堆集方法,其中考虑了特定地点风、浪气候的联合概率分布。并以某 5 兆瓦柱体式风力发电机 塔基基座的疲劳损伤预测为例,验证了该方法的有效性。

1 堆集方法在工业界的应用

一般来说,传统的堆集方法被工业界用于海上结构物长期疲劳分析。为了减少高昂的计算成本,挪威船级社^[4]建议将几个海况集中到一个更小的区块中。该法规规定将波浪区块统计表细分为若干 代表性区块,然后在每个区块中选择一个单一的海况,并将所有海况的发生概率集中到所选的代表 性区块中。Sheehan等^[3]详细介绍了用堆集法进行锚链系统疲劳分析的步骤。类似的,Sen^[5]对锚链系 统进行了疲劳分析,并建议每个区块的海况用一个特定周期和等效波高来代替。Seidel^[6]提出了一种 波浪区块堆集的新方法,并运用频域分析法计算出疲劳载荷。为提高准确性,Passon和Branner^[7]提 出了一种等效损伤的计算方法,此方法可以保持水动力疲劳损伤的分布,但这种方法并不能体现风浪 联合作用的影响,同时研究表明,此方法对计算水动力疲劳载荷准确性有重要影响。此外,这种方法 相当复杂和费时。Passon^[8]阐述了一种新的堆集方法,该方法将风浪相关性考虑在内,并验证了单桩 式风机系统中不同位置的疲劳损伤等效性准则,但没有给出计算每种海况概率的任何细节。

从上述文献综述中可以清楚地看到,堆集方法在除海上浮式风机外的海上结构物疲劳评估中具 有广泛的应用和良好的表现。然而,传统的堆集方法并没有考虑到风的影响,而风在海上浮式风机 的疲劳设计中是一个非常重要的组成部分。为了解决这一问题,本文提出了一种基于风浪联合概率 的堆集方法。该方法将特定海域的风浪联合概率分布与传统的堆集法相结合进行风机疲劳损伤预测。

2 风浪联合概率

Li 等^[9]对选取的 5 个北海气候测试点的 2001 - 2010 年的原始数据进行分析, 10 米高度的每 小时平均风速遵循双参数 Weibull 分布,其概率密度函数定义为:

$$f_{U_{W}}(u) = \frac{\alpha_{U}}{\beta_{U}} \left(\frac{u}{\beta_{U}}\right)^{\alpha_{U}-1} exp\left[-\left(\frac{u}{\beta_{U}}\right)^{\alpha_{U}}\right]$$
(1)

 α_U 和 β_U 分别表示形状和尺度参数。通常情况下,在动态响应分析中,可以通过风速剖面得到风机轮 毂高度的平均风速为:

$$U(z) = U_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha} \tag{2}$$

z表示轮毂高度,而 U_{10} 表示 10米高度处的参考平均风速。 在此条件下有义波高 H_s 也可以描述为双参数Weibull分布,

$$(h|u) = \frac{\alpha_{HC}}{\beta_{HC}} \left(\frac{h}{\beta_{HC}}\right)^{\alpha_{HC}-1} exp\left[-\left(\frac{h}{\beta_{HC}}\right)^{\alpha_{HC}}\right]$$
(3)

 α_{HC} 和 β_{HC} 分别为形状和尺度参数。这两个参数通过数据拟合可得:

$$\begin{aligned}
\alpha_{HC} &= a_1 + a_2 u^{a_3} \\
\beta_{HC} &= b_1 + b_2 u^{b_3}
\end{aligned} \tag{4}$$

a₁, a₂, a₃, b₁, b₂ 和 b₃的数值可通过对原始数据进行非线性曲线拟合来获得。

在给定条件下的有义波高 H_s和 和平均风速U_w,峰值周期Tp表示为对数正态分布:

$$f_{Tp|Uw,Hs}(t|u,h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln(Tp)}t} exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu_{\ln(Tp)}}{\sigma_{\ln(Tp)}}\right)^2\right)$$
(6)

 $\mu_{\ln(Tp)}$ 和 $\sigma_{\ln(Tp)}$ 是对数正态分布的参数。可以通过公式(7)-(9)计算:

$$\mu_{\ln(Tp)} = \ln \left[\frac{\mu_{Tp}}{\sqrt{1 + v_{Tp}^2}} \right]$$
(7)

$$\sigma_{\ln(Tp)}^2 = \ln\left[v_{T_p}^2 + 1\right] \tag{8}$$

$$v_{T_p} = \frac{\sigma_{T_p}}{\mu_{T_p}} \tag{9}$$

 μ_{T_p} 和 σ_{T_p} 分别是峰值周期Tp的均值和标准差。 v_{T_p} 为方差系数。 μ_{T_p} 的计算公式由 Johannessen 等^[10] 提出:

$$\mu_{T_p} = \overline{T_p}(u,h) = \overline{T_p}(h) \cdot \left[1 + \theta \left(\frac{u - \overline{u}(h)}{\overline{u}(h)} \right)^{\gamma} \right]$$
(10)

T_p(h)和 ū(h)分别为给定有义波高下的峰值周期和平均风速。这两个参数由下式可得: $\frac{1}{T}(h) = a + a + h^{\ell_3}$

$$\overline{T_p}(h) = e_1 + e_2 \cdot h^{e_3}$$

$$\overline{u}(h) = f_1 + f_2 \cdot h^{f_3}$$
(11)
(12)

此外, v_{T_n} 可以由公式(13)得出,并且只与 H_s 有关。

$$v_{T_p}(h) = k_1 + k_2 \cdot exp(hk_3) \tag{13}$$

根据公式(7)-(13),风浪的联合分布 U_W , H_s 和 T_p 可以推导出:

$$f_{Uw,Hs,Tp}(u,h,t) = f_{Uw}(u) \cdot f_{Hs|Uw}(h|u) \cdot f_{Tp|Uw,Hs}(t|u,h)$$
(14)

由于原始数据表明,平均风速的分布对
$$T_p$$
分布参数影响有限因此,公式(14)可简化为:
 $f_{Uw,Hs,Tp}(u,h,t) \approx f_{Uw}(u) \cdot f_{Hs|Uw}(h|u) \cdot f_{Tp|Hs}(t|h)$ (15)
由上述公式可以求出每个区块的风浪联合概率。

3 堆集方法的应用

通过对风浪联合分布的分析,提出了改进的集总方法。每个块都可以用时域方法实现。对于单 个区块,给定海况的离散概率可由公式(16)得出

$$p(U_w, H_s, T_p) = \int_{H_s - \Delta H}^{H_s + \Delta H} \int_{T_p - \Delta T}^{T_p + \Delta T} \int_{U_w - \Delta U}^{U_w + \Delta U} f_{Uw, H_s, T_p}(U_w, H_s, T_p) dH_s dT_p dU_w$$
(16)

然后在每一个区块中选择一个具有代表性的海况(u,h,t)进行疲劳分析。

对于单个区块的疲劳评估,可以通过时域或频域方法获得结构动态响应。为方便起见,本研究 以时域分析为基础进行说明。FAST 软件给出了应力时间历程,再通过雨流计数技术计算出不同应力 水平下的循环次数。最终,给定时长内的疲劳损伤损害 D_{i,j}可由 Miner 准则规则和 S-N 疲劳曲线确 定。最后,真实的疲劳损伤 $D_{i,i}^*$ 由每个区块的风浪联合概率 $p_{i,i}$ 进行缩放。

$$D^*_{i,j} = p_{i,j} \cdot D_{i,j} \tag{17}$$

总的结构疲劳损伤 D,可以推导如下:

$$D = \sum D^*{}_{i,j} \tag{18}$$

综上所述,此堆集方法可以通过以下步骤来执行:

- 1) 计算各区块的单位疲劳损伤 D_{i,j}。
- 2)确定每个区块的风浪联合概率分布 p_{i,j}。
- 3)用相应的概率对单位疲劳损伤进行缩放,得到各海况下的实际疲劳损伤。
- 4)将所有可能的海况下的实际疲劳损伤相加,来得到总的疲劳损伤。

4 实例分析

本文采用风浪联合概率下的堆集方法对某单柱式浮式风机塔基基座进行了疲劳评估。该浮式风机系统对应的参数可以从Jonkman^[11]获得。FAST软件则用来进行非线性时域分析。风机塔架及基座的尺寸可见于表1。同时,选取美国船级社规范^[12]中推荐的S-N曲线进行疲劳寿命预算,相关参数如表2所示。因为疲劳损伤主要发生在焊缝处,而不是材料表面,所以在此选择空气中管状节点的S-N曲线。

表 1. 5 兆瓦浮式风机塔架尺寸

高度(米)	77.65
塔基直径(米)	6.5
塔底厚度(米)	0.027
塔顶直径(米)	3. 87
塔顶厚度(米)	0.019

表 2. 空气中管状节点 S-N 曲线的参数

S-N 曲线	А		С	
	MPa	m	MPa	I.
T (A)	1.46×10^{12}	3.0	4.05×10^{15}	5.0

本实例中,风浪数据来源于 National Kapodistrian University of Athens 执行的 Marina Platform 项目,风浪联合分布的相关参数参考了北海海域第 14 号站点^[9]。需要指出的是,本研究只考虑了同一方向的风浪条件,即风浪皆由同一方向作用于风机结构。不规则波浪由 JONSWAP 波浪谱 生成,全区域的风况由 TurbSim^[13]软件并参考 IEC61400-3 规范^[14]生成。



图 1. 北海 14 号站点平均风速的概率密度分布

在目前的研究中,建立一个三维散点图来说明这种新方法,单位有义波高为1米,单位波峰周期为 1 秒,单位平均风速为2米/秒,并且只有当区块风浪联合概率高于0.1%时,才选择为有效海况。 通过公式(1)可以计算出该站点的风速概率密度函数,从图1可以看出,当平均风速达到24米/秒 时,该概率降低到一个非常小的值(小于0.1‰)。因此,本研究的平均风速范围定义为0米/秒-24 米/秒。基于公式(1)-(16),计算出14号场地风浪联合分布,如图2所示。



Joint Probability 16 <uw≤18 [m="" s]<="" th=""></uw≤18>												
	Hs[m]	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0
	Hs,i[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
Tp[s]	Tp,j[s]											
0.0-1.0	0.5											
1.0-2.0	1.5											
2.0-3.0	2.5											
3.0-4.0	3.5											
4.0-5.0	4.5											
5.0-6.0	5.5		0.015%	0.016%								
6.0-7.0	6.5		0.012%	0.036%	0.022%							
7.0-8.0	7.5			0.047%	0.061%	0.028%						
8.0-9.0	8.5			0.042%	0.095%	0.084%	0.029%					
9.0-10.0	9.5			0.028%	0.098%	0.143%	0.093%	0.023%				
10.0-11.0	10.5			0.016%	0.076%	0.157%	0.161%	0.076%	0.013%			
11.0-12.0	11.5				0.046%	0.123%	0.175%	0.128%	0.042%			
12.0-13.0	12.5				0.024%	0.075%	0.132%	0.129%	0.064%	0.014%		
13.0-14.0	13.5				0.011%	0.038%	0.075%	0.087%	0.056%	0.018%		
14.0-15.0	14.5					0.016%	0.034%	0.043%	0.031%	0.012%		
15.0-16.0	15.5						0.013%	0.016%	0.012%			
16.0-17.0	16.5											
17.0-18.0	17.5											

图 2. 风速 16 米/秒到 18 米/秒下的风浪联合概率

	Unit Damage 16 <uw≤18 [m="" s]<="" th=""></uw≤18>											
	Hs[m]	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0
	Hs,i[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
Tp[s]	Tp,j[s]											
0.0-1.0	0.5											
1.0-2.0	1.5											
2.0-3.0	2.5											
3.0-4.0	3.5											
4.0-5.0	4.5											
5.0-6.0	5.5		1.41E-05	1.86E-05								
6.0-7.0	6.5		1.46E-05	2.36E-05	4.26E-05							
7.0-8.0	7.5			2.28E-05	4.17E-05	8.27E-05						
8.0-9.0	8.5			2.32E-05	4.15E-05	7.93E-05	1.47E-04					
9.0-10.0	9.5			2.46E-05	4.50E-05	7.97E-05	1.35E-04	2.16E-04				
10.0-11.0	10.5			2.58E-05	4.80E-05	8.90E-05	1.64E-04	2.91E-04	4.94E-04			
11.0-12.0	11.5				4.85E-05	8.90E-05	1.63E-04	3.02E-04	5.34E-04			
12.0-13.0	12.5				4.66E-05	8.48E-05	1.50E-04	2.61E-04	4.61E-04	7.87E-04		
13.0-14.0	13.5				4.30E-05	7.75E-05	1.36E-04	2.29E-04	3.73E-04	5.82E-04		
14.0-15.0	14.5					6.92E-05	1.20E-04	2.00E-04	3.22E-04	5.00E-04		
15.0-16.0	15.5						1.05E-04	1.75E-04	2.80E-04			
16.0-17.0	16.5											
17.0-18.0	17.5											

图 3. 风速 16 米/秒到 18 米/秒下的单位疲劳损伤

	Actual Damage 16 <uw≤18 [m="" s]<="" th=""></uw≤18>											
	Hs[m]	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0
	Hs,i[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
Tp[s]	Tp,j[s]											
0.0-1.0	0.5											
1.0-2.0	1.5											
2.0-3.0	2.5											
3.0-4.0	3.5											
4.0-5.0	4.5											
5.0-6.0	5.5		2.05E-09	2.93E-09								
6.0-7.0	6.5		1.81E-09	8.50E-09	9.45E-09							
7.0-8.0	7.5			1.07E-08	2.55E-08	2.30E-08						
8.0-9.0	8.5			9.68E-09	3.95E-08	6.69E-08	4.24E-08					
9.0-10.0	9.5			6.98E-09	4.43E-08	1.14E-07	1.25E-07	5.05E-08				
10.0-11.0	10.5			4.14E-09	3.63E-08	1.39E-07	2.64E-07	2.20E-07	6.61E-08			
11.0-12.0	11.5				2.25E-08	1.10E-07	2.84E-07	3.85E-07	2.22E-07			
12.0-13.0	12.5				1.13E-08	6.39E-08	1.98E-07	3.37E-07	2.95E-07	1.07E-07		
13.0-14.0	13.5				4.79E-09	2.94E-08	1.02E-07	2.00E-07	2.09E-07	1.02E-07		
14.0-15.0	14.5					1.13E-08	4.06E-08	8.50E-08	1.01E-07	6.10E-08		
15.0-16.0	15.5						1.34E-08	2.79E-08	3.37E-08			
16.0-17.0	16.5											
17.0-18.0	17.5											

图 4. 风速 16 米/秒到 18 米/秒下的实际疲劳损伤

理论上从 11 个有义波高、18 个波峰周期、12 个风速所构成的 2376 种组合中,只有 614 种海况的概率在 0.1%以上。这些海况所发生的概率总和为 98.2%,所以用这些海况进行结构疲劳计算是可行的。图 3 为结构在风浪联合概率大于 0.1%的海况中产生的单位疲劳损伤。然后,通过对单位疲劳损伤和对应的风浪联合概率进行缩放,即可得到各组合的实际疲劳损伤,如图 4 所示。最后,将不同平均风速下的所有实际疲劳损伤相加,即可得到总疲劳损伤。

5 结语

本文提出了一种基于风浪联合概率分布的堆集方法来进行海上浮式风机的疲劳分析。该方法为 海上浮式风机疲劳分析提供了一种新的思路。通过FAST软件对浮式风机进行全耦合动态响应模拟, 并运用雨流计数法进行应力后处理,得到相应应力范围和循环计数,并通过对5兆瓦柱体式浮式风机 进行实例疲劳分析,验证了该方法的有效性。值得注意的是,此风浪联合概率仅适用于风浪来自同 一方向的海况,故所得疲劳寿命应比实际疲劳寿命保守。但是实际海况中,风浪方向处于随机状态, 所以考虑不同方向的风浪联合概率值得继续研究。

6 参考文献

- [1] Matsuishi, M. & Endo, T. 1968. Fatigue of metals subjected to varying stress. Proceedings of the Kyushu Branch of Japan Society of Mechanics Engineering. Fukuoka, Japan, pp. 37-40.
- [2] Miner, M. A. 1945. Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics. 12, A159-A164.
- [3] Sheehan, J. M. Grealish, F. W. Harte, A. M. & Smith, R. J. 2006. Charaterizing the wave environment in the fatigue analysis of flexible risers. *Journal of Mechanics and Arctic Engineering*. Vol. 128(2), pp. 108-118.
- [4] Det Norske Veritas. 2015. Riser Fatigue. Technical Report. No. DNV-RP-F204.
- [5] Sen, T. 2006. Probability of fatigue failure in steel catenary risers in deep water. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 132, Issue 9.
- [6] Seidel, M. 2014. Wave induced fatigue loads on monopiles new approaches for lumping of scatter tables and sitespecific interpolation of fatigue loads. *Conference proceedings*. IWEC: Hannover.
- [7] Passon, P. & Branner, K. 2015. Condensation of long-term wave climates for the fatigue design of hydrodynamically sensitive offshore wind turbine support structures. *Journal of Ships and Offshore Structures*.
- [8] Passon, P. 2015. Damage equivalent wind-wave correlations on basis of damage contour lines for the fatigue design of offshore wind turbines. *Renewable Energy*. Vol. 81, pp, 723-736.
- [9] Li, L. Gao, Z. & Moan, T. 2013. Joint environmental data at five European offshore sites for design of combined wind and wave energy devices. Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Nantes: France.
- [10] Johannessen, K. Meling, T. S. & Haver, S. 2001. Joint distribution for wind and waves in the Northern North Sea. *ISOPE*, Stavanger: Norway.
- [11] Jonkman, J. 2010. Definition of the floating system for phase IV of OC3. Technical Report. NREL/TP-500-47535.
- [12] Guide for fatigue assessment of offshore structures. 2003. Houston: American Bureau of Shipping.
- [13] Jonkman, B. 2009. TurbSim User's Guide: Version 1.50. National Renewable Energy Laboratory. *Technical Report*. No. NREL/TP-500-46198.
- [14] International Electrotechnical Commission (IEC). 2009. Wind turbines: Part 3: Design requirements for offshore wind turbines. *Technical Report*. No. IEC61400-3.

谭慧娟 女 1988- 工程师,硕士,从事船舶与海洋工程结构设计 江苏省船舶设计研究所有限公司

宋 健 男 1976- 高级工程师,硕士,从事船舶与海洋工程结构设计 江苏省船舶设计研究所有限公司

吴俊逸 男 1991- 工程师, 博士, 从事船舶与海洋工程结构设计 江苏省船舶设计研究所有限公司



江苏船舶微信公众号, 欢迎关注, 欢迎投稿!