

文章编号:1005-9865(2015)03-0057-06

浮式风机极限载荷与疲劳载荷对比分析

张友文,王迎光

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘 要:根据 IEC61400-3 设定工况,采用 NREL 开发的 5 MW 风机基础模型,应用 FAST,以 Aero-Hydro-Servo-Elastic 耦合仿真技术对风机进行研究。对时域仿真得到的短期载荷,应用分块极大值法联合 Gumbel 分布外推计算风机极限载荷;以雨流计数法、线性累积损伤理论和 S-N 曲线为理论基础应用 MLife 软件,计算风机疲劳载荷。对比分析不同工况下浮式风机、近海单桩风机和陆上风机的极限载荷与疲劳载荷,进而探讨影响浮式风机动态响应的因素。结果表明,对于陆上风机和近海单桩风机,风是其主要载荷来源;而波浪是浮式风机主要载荷来源。对风机进行设计要根据特定海域统计的海洋气候条件,避免风机及其支撑结构的固有频率与波浪频率近似而产生共振;风机制造装配在一定误差范围内,质量不平衡对风机载荷几乎没有影响。

关键词:FAST;浮式风机;极限载荷;疲劳载荷;质量不平衡

中图分类号:P753; TM315 **文献标志码:**A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2015.03.008

Comparison analysis about ultimate load and fatigue load of floating wind turbines

ZHANG Youwen, WANG Yingguang

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: According to the load cases in IEC61400-3, a 5 MW wind turbine developed by NREL will be used as a basic model for the research, and a FAST code will be applied in order to conduct the Aero-Hydro-Servo-Elastic coupled analysis of the wind turbine. For the short-term loads resulted from simulation in time domain, a Block-Maximum method coupled Gumbel distribution will be applied to predict the ultimate load of the wind turbine; The MLife software, the rain flow counting method, the linear cumulative damage law and the S-N curve as the background theory are used to calculate the fatigue load of the wind turbine. Under different working conditions, the floating wind turbine, monopile offshore wind turbine and onshore wind turbine's ultimate and fatigue loads are compared, and the effect factors of floating wind turbine's dynamic response are discussed. The results show that for land-based wind turbines and monopile offshore wind turbines, wind is the main load source. But in terms of floating wind turbines, wave is the main load source; wind turbines' design should be based on the specific environmental (metocean) data to avoid resonation; within a certain range of assembly error, mass imbalance hardly has any impact on the loads.

Keywords: FAST; floating wind turbine; ultimate load; fatigue load; mass imbalance

当前海上风能是风电发展的重要方向,应用前景良好^[1]。针对海上风机设计标准的 IEC 61400-3^[2]要求对风机进行全面的载荷分析。Jonkman 和 Buhl^[3]采用 5MW ITI Energy barge 支撑平台浮式风机和陆上风机为研究模型,应用 FAST^[4],以 Aero-Hydro-Servo-Elastic 耦合仿真技术,在特定海况下对风机极限载荷进行计算,分析影响风机极限载荷的因素,但是没有对风机的疲劳载荷进行分析。Jonkman 和 Matha^[5]对三种浮式风机概念模型进行了初步的动态响应分析。

收稿日期:2014-04-16

基金项目:上海交通大学海洋工程国家重点实验室自主研究课题(GKZD010038)

作者简介:张友文(1988-),男,江苏徐州人,硕士生,主要从事浮式风机载荷方面的研究。E-mail:zywsina1988@126.com

通讯作者:王迎光。E-mail:wyg110@sjtu.edu.cn

文中将应用 FAST,以 Aero-Hydro-Servo-Elastic 耦合仿真技术,采用外推计算方法计算风机 20 年一遇极限载荷,并以此为基础计算风机的疲劳载荷。进而探讨影响浮式风机极限载荷和疲劳载荷的因素,同时对对比分析风载荷和波浪载荷分别对浮式风机的影响程度。另外,也将研究质量不平衡对风机极限载荷和疲劳载荷的影响,以探讨风机在制造安装中的误差对风机运行的影响,为风机实际设计提供参考。

1 仿真

1.1 仿真模型

以陆上风机(onsshore)、近海单桩式(monopile)固定风机和浮式风机为研究模型。陆上风机为 NREL 开发的 5 MW 基础式风机^[6]。Monopile 风机将 5 MW 风机安装在弹性基础的单桩(monopile)上,水深为 20 m。浮式风机将 NREL 5 MW 风机安装在海洋浮式平台上,采用由 8 根锚链线系泊的 40×40×10 m ITI Energy 驳船式支撑平台,Jonkman^[3]对其属性有详细说明。

1.2 仿真方法

应用仿真工具 FAST 研究风机系统的动态响应。对于环境载荷,应用 FAST 的前处理软件 TurbSim 进行入流湍流风的仿真。研究中加载的外部条件为 IEC61400-3 规定的正常湍流风(NTW)和正常海况(NSS)。文中风机轮毂处 10 min 平均风速 $v_{ave} = 12\text{ m/s}$,接近额定风速,应用 Kaimal 风力频谱。图 1 为 TurbSim 仿真得到的 10 min 湍流风的时域序列。其横坐标为仿真时间,纵坐标为瞬时风速。FAST 仿真过程中应用 AeroDyn 模块进行风机气动载荷的仿真;应用 HydroDyn 进行塔筒及支撑平台水动力载荷的仿真。本文海况采用的有义波高 $H_s = 5\text{ m}$,其对应的谱峰周期 $T_{pmin} = 7.04\text{ s}$, $T_{pmax} = 19.71\text{ s}$,应用 JONSWAP/Pierson-Moskowitz 波谱。研究中分别取 $T_p = 8, 12.4, 18\text{ s}$ 三种海况进行计算分析浮式风机。取 $T_p = 12.4\text{ s}$ 计算分析近海单桩风机。图 2 为有义波高 $H_s = 5\text{ m}$,谱峰周期 $T_p = 12.4\text{ s}$ 时 HydroDyn 仿真得到的波浪时域序列,其横坐标为仿真时间,纵坐标为瞬时波高。

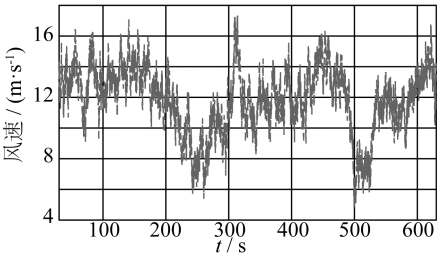


图 1 湍流风时域序列
Fig. 1 Time series plots of wind velocity

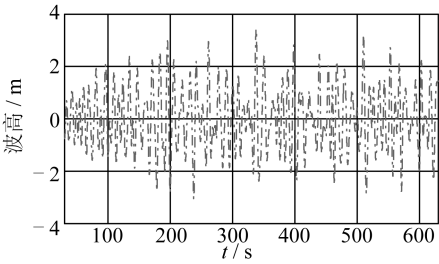


图 2 波浪时域序列
Fig. 2 Time series plots of wave elevation

2 数值计算

陆上风机与浮式风机极限载荷与疲劳载荷的预测分别依据 IEC 61400-1 和 IEC 61400-3 工况 DLC1.1, 1.2 进行计算。为便于对比分析,仿真过程中轮毂处平均风速皆取 $v_{ave} = 12\text{ m/s}$,应用 Kaimal 风力频谱。风机桨叶根部,偏航轴承处及塔筒底部为高应力集中区。因此文中主要对这些部位进行极限载荷与疲劳的计算分析,选取风机的面外叶根部弯矩(RootMyc1)、偏航轴承首尾弯矩(YawBrMyp)、塔筒基底侧向弯矩(TwrBsMxt)、塔筒基底首尾弯矩(TwrBsMyt)进行极限载荷与疲劳载荷的计算。

2.1 极限载荷计算方法

IEC61400 推荐应用统计外推方法根据短期载荷预测长期载荷。其基本原理为采用直接积分法预测风机载荷 L_T 和目标超越概率 P_T , T 为风机设计寿命:

$$P_T = P[L > L_T] = \int_X P[L > L_T | X = x] f_x(x) dx \tag{1}$$

其中, $f_x(x)$ 为环境随机变量 X 的联合概率密度函数; L 为风机载荷随机变量,对各种不同环境随机变量下的短期载荷超越概率 $P[L > L_T | X = x]$ 进行积分即可得到长期载荷超越概率,从而得到目标条件下的名义载荷。直接积分法原理简明,但是计算量较大,需要整合计算所有环境随机变量的各种可能。

这里研究仿真计算 20 组 10 min 短周期载荷。风机设计寿命 20 年。20 年共有 $20 \times 365 \times 24 \times 6 = 1\,051\,200$ 个 10 min 段数。则风机失效概率(例如 $L_{10min} > L_T$) $p_f \leq 1/1\,051\,200 = 9.513 \times 10^{-7}$ 。计算采用分块极值法联合 Gumbel 分布^[7-8]进行外推计算极限载荷。即将每组短周期载荷以时间序列分成 N 块(每块相互独立)并取极大值,得到一个含 $20N$ 个极大值的数组 M 。进而应用 Gumbel 分布拟合数组 M ,根据风机失效概率可计算得到设计寿命下的风机极限载荷。式(2)和(3)分别为 Gumbel 分布函数和密度函数:

$$F(x;\mu,\beta) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\beta}}} \tag{2}$$

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{(x-\mu)}{\beta}} e^{-\frac{(x-\mu)}{\beta}} \tag{3}$$

式中: x 为所需求解的参数极限载荷; μ,β 为 Gumbel 分布中的参数。

式(4)为分块极值法求解风机的超越概率函数:

$$F = \left(1 - \frac{1}{p_f}\right)^{\frac{1}{N}} \tag{4}$$

则极限载荷预测值表达式:

$$L_{ult} = \mu - \beta \ln(-\ln(F)) \tag{5}$$

研究表明采用极大似然法的 Gumbel 分布可得到精确稳定的估算值,因此式(4)中参数 μ,β 利用极大似然法拟合求解。

2.2 疲劳载荷计算方法

研究以雨流计数法、线性累积损伤理论和 S-N 曲线为理论基础^[9],以 MATLAB 为计算工具,应用 NREL 研发的 MLife^[10] 计算风机的疲劳载荷。

根据 Miner 累积损伤理论,风机总损伤的累积 D 为

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \tag{6}$$

式中: n_i 为第 i 个工况载荷循环次数; N_i 为 S-N 曲线上对应于载荷幅值的可循环次数。

结构构件在承载交变载荷时,载荷的平均值对载荷的疲劳破坏也有很大影响^[9]。应用 MLife 进行疲劳载荷计算时,可以采用 Goodman 平均应力修正使计算结果更精确,如式(7):

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i(L_i^{RF})} \tag{7}$$

其中, L_i^{RF} 为对应于固定载荷平均值的载荷范围。 N_i 与 L_i^{RF} 关系:

$$N_i = \left(\frac{L_i^{ult} - L_i^{MF}}{\frac{1}{2}L_i^{RF}} \right)^m \tag{8}$$

$$L_i^{RF} = L_i^R \left(\frac{L_i^{ult} - L_i^{MF}}{L_i^{ult} - L_i^M} \right) \tag{9}$$

其中, L^{ult} 为风机极限载荷; L^{MF} 为载荷平均值; m 为 Whöler 指数; L_i^M 为第 i 个循环周期载荷平均值; L_i^{RF} 为第 i 个循环周期载荷范围。对于 Whöler 指数,在计算桨叶根部疲劳载荷时取 $m=10$,计算偏航轴承和塔筒底部疲劳载荷时取 $m=3$ 。

在研究风机疲劳载荷时主要计算风机的等效破坏载荷(DEL, Damage Equivalent Load)。DEL 即为等效波动载荷以固定频率和平均值的形式加载在风机构件上的恒幅值疲劳载荷,即:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n^{eq}}{N^{eq}} \tag{10}$$

$$n^{eq} = f^{eq} T \tag{11}$$

$$N^{eq} = \left(\frac{L_i^{ult} - L_i^{MF}}{\frac{1}{2}DEL} \right)^m \tag{12}$$

其中, f^{eq} 为 DEL 频率; T 为载荷施加时间; n^{eq} 为载荷等效循环次数; N^{eq} 为 S-N 曲线上对应于载荷幅值的等效循环次数。应用 Goodman 平均应力修正由式 (12) 得:

$$DEL = \left(\frac{\sum_i (n_i (L_i^{\text{RF}})^m)}{n^{\text{eq}}} \right)^{\frac{1}{m}}$$

(13)

考虑精度以及计算时间成本,取 FAST 仿真的 10 组数据构成数组进行疲劳计算分析,则:

$$DEL_{\text{agg}} = \left(\frac{\sum_j \left(\sum_i (n_i (L_i^{\text{RF}})^m) \right)}{\sum_j n_j^{\text{eq}}} \right)^{\frac{1}{m}}$$

(14)

3 数值分析

3.1 计算结果

应用 1.1 节的仿真模型,1.2 节的仿真方法以及 2.1 节的极限载荷计算方法计算得到的各参数极限载荷如表 1 所示,单位皆为 $\text{kN} \cdot \text{m}$,其中 A—Onshore, B—Monopile, C—ITIBarge_8 s, D—ITIBarge_12.4 s, E—ITIBarge_18 s(下同);根据 2.2 节疲劳载荷计算方法,应用 Mlife 计算得到的等效破坏载荷如表 2 所示。

表 1 风机极限载荷

Tab. 1 Ultimate loads of wind turbines (kN · m)

工况	RootMyc1	YawBrMyp	TwrBsMxt	TwrBsMyt
A	2.208e+04	1.201e+04	2.397e+04	1.352e+05
B	2.190e+04	1.120e+04	2.851e+04	2.273e+05
C	2.368e+04	1.653e+04	8.239e+04	5.207e+05
D	2.741e+04	2.373e+04	1.294e+05	7.253e+05
E	2.449e+04	1.722e+04	1.150e+05	5.470e+05

表 2 风机疲劳载荷

Tab. 2 Fatigue loads of wind turbines (kN · m)

工况	RootMyc1	YawBrMyp	TwrBsMxt	TwrBsMyt
A	6.34e+03	2.66e+03	4.69e+03	1.35e+04
B	6.21e+03	3.39e+03	7.54e+03	2.16e+04
C	8.90e+03	3.83e+03	1.95e+04	1.05e+05
D	1.18e+04	4.66e+03	2.47e+04	1.31e+05
E	9.86e+03	3.78e+03	2.26e+04	9.40e+04

3.2 结果分析

将结果以直方图的形式如图 3、4 所示。

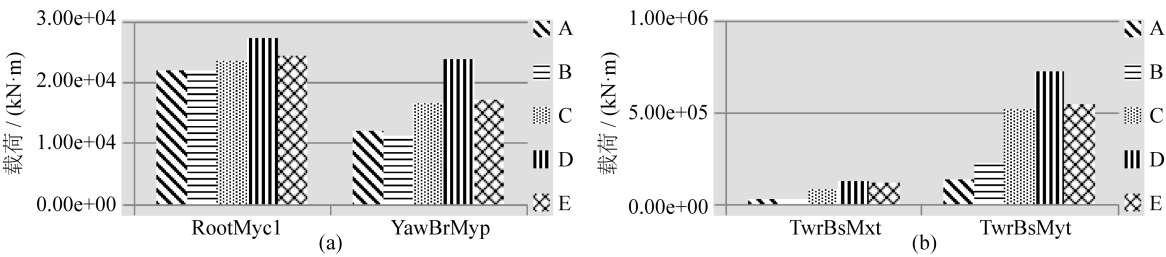


图 3 风机极限载荷
Fig. 3 Ultimate loads of wind turbines

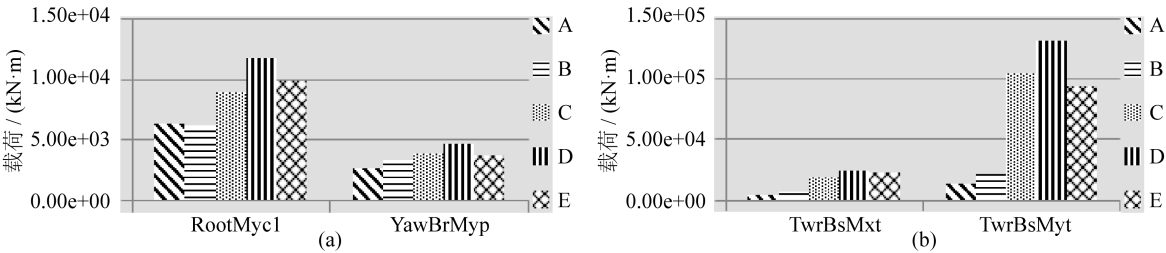


图 4 风机疲劳载荷
Fig. 4 Fatigue loads of wind turbines

图 3~4 显示陆上风机与近海单桩风机的各参数极限载荷与疲劳载荷(除塔基载荷)偏差不大,近海单桩风机的塔基载荷大于陆上风机;浮式风机各参数极限载荷与疲劳载荷普遍大于陆上风机和近海单桩风机,这一趋势在塔基载荷处表现尤为明显;浮式风机在海况 $H_s = 5\text{ m}$, $T_p = 12.4\text{ s}$ 工况下,各参数极限载荷与疲劳载荷要大于其他两种海况。

- 以上结果可由以下原因解释:
- 1) 波浪作用于塔筒,引起塔筒震动,因此单桩固定式风机塔基载荷大于陆上风机,同时塔筒的振动引发机舱等构件的振动,使承载载荷波动加剧,从而增大疲劳载荷,由图 3(a) 和图 4(a) 可以看出陆上风机的偏航轴承首尾弯矩大于近海单桩风机,而其偏航轴处的疲劳载荷小于近海单桩风机。
- 2) 相比于近海单桩风机,风浪共同作用造成浮式支撑平台的纵摇(pitch),升沉(heave)等运动更为剧烈。平台的升沉运动和纵摇运动直接增大了风机各构件承受的载荷,使浮式风机的偏航轴承与塔基处极限载荷和疲劳载荷大于其他两种风机,在塔基处载荷表现尤为明显;同时平台的纵摇运动引起风机机舱的移动,使转子处的相对风速不断变化,造成入流风的震荡,加剧了浮式风机的载荷波动,使疲劳载荷增大。
- 3) ITI Energy 驳船式支撑平台的自然频率为 0.086 Hz,即固有周期为 11.6 s。当波浪的频率和支撑平台的自然频率接近时,会产生共振,导致剧烈的平台运动。因此三种海况下,当设定入射波浪 $T_p = 12.4\text{ s}$ 时,风机各参数极限载荷和疲劳载荷最大;为更精确分析产生共振的结果及其可能性,研究中以塔筒基底首尾弯矩为例分析了不同谱峰周期海况下的极限载荷,图 5 为塔筒基底首尾弯矩的极限载荷 TwrBsMyt 随谱峰周期 T_p 变化的曲线。从中可看出当 T_p 在支撑平台固有周期附近($11.6\pm 1\text{ s}$)时,极限载荷偏大,远离峰值区域($11.6\pm 1\text{ s}$)时,曲线近似呈线性变化。

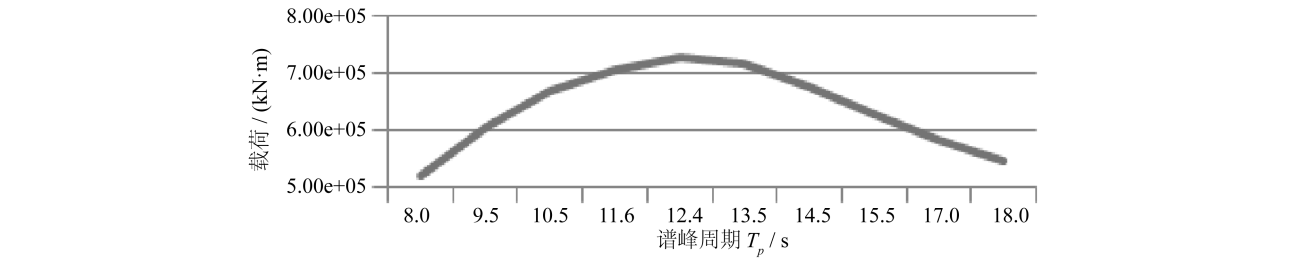


图 5 极限载荷 TwrBsMyt—谱峰周期 T_p 曲线

Fig. 5 The curve of TwrBsMyt— T_p

- 4) 参照风机的面外叶根部弯矩、偏航轴承首尾弯矩、塔筒基底首尾弯矩分别探究风、浪对 ITI Energy 驳船式浮式风机载荷的影响。将陆上风机承载载荷近似视为湍流风对风机的作用力矩 F_{wind} :
- $$F_{\text{onshore}} = F_{\text{wind}} \tag{15}$$
- 将浮式风机承载载荷 F_{ITIBarge} 近似视为风载荷 F_{wind} 及风浪耦合造成的平台运动产生的载荷 F_{couple} :
- $$F_{\text{ITIBarge}} = F_{\text{wind}} + F_{\text{couple}} \tag{16}$$
- 则:
- $$F_{\text{couple}} = F_{\text{ITIBarge}} - F_{\text{wind}} \tag{17}$$

计算结果见表 3 所示。

仿真中将风速和风机初始转速皆设为 0,以计算仅有波浪载荷($H_s = 5\text{ m}$, $T_p = 12.4\text{ s}$)的理想环境条件下 ITI Energy 驳船式浮式风机的载荷 F_{wave} ,其与风浪共同作用条件下仿真结果的对比见表 4 所示。其中, F_{wave} 为仅有波浪载荷条件下的极限载荷; $F_{\text{wind\&wave}}$ 为风浪共同作用条件下的极限载荷。

表 3 风机极限载荷				表 4 风机极限载荷			
Tab. 3 Ultimate loads of wind turbines				Tab. 4 Ultimate loads of wind turbines			
极限载荷	RootMyc1	YawBrMy	TwrBsMy	极限载荷	RootMyc1	YawBrMy	TwrBsMy
$F_{\text{wind}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	22 080	11 970	135 200	$F_{\text{wave}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	1.279e+04	3.148e+04	9.178e+05
$F_{\text{couple}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	5 330	11 720	590 100	$F_{\text{wind\&wave}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	2.741e+04	2.373e+04	7.253e+05

从表 3 可以看出对于浮式风机,桨叶根部主要承受风载荷作用,偏航轴承处风载荷和风浪耦合作用产生的载荷相当,而在塔筒底部风浪耦合作用产生的载荷要远大于风载荷,因此相应海域要避免塔筒固定频率与波浪频率接近而发生共振。

从表 4 可以看出理想环境条件下偏航轴承与塔基载荷处极限载荷大于额定风速时风浪共同作用条件下的极限载荷。因为风浪共同作用条件下,风机旋转空气动力产生阻尼,一定程度上缓解了支撑平台的运动,从而使极限载荷值偏小。在其他风速时,风机载荷不大于额定风速下的载荷^[3],因此对于 ITI Energy 驳船式浮式风机波浪是其主要载荷来源,尤其在偏航轴承处和塔筒底部。

4 质量不平衡的影响

仿真过程中为实现风机实际运行时的质量不平衡,将其中一个桨叶设置为标准质量,另一个较其大 0.5%,一个小 0.5%。仿真时海洋气候条件均采用 1.2 节叙述的条件。表 5、6 分别列出了 ITIBarge 驳船式浮式风机质量不平衡和标准情况下的极限载荷与疲劳载荷。单位皆为 $\text{kN} \cdot \text{m}$,其中 D 为不考虑质量不平衡的状况;F 为考虑质量不平衡的状况。

表 5 风机极限载荷					表 6 风机疲劳载荷				
Tab. 5 Ultimate loads of wind turbines					Tab. 6 Fatigue loads of wind turbines				
状况	RootMyc1	YawBrMyp	TwrBsMxt	TwrBsMyt	状况	RootMyc1	YawBrMyp	TwrBsMxt	TwrBsMyt
D	2.741e+04	2.373e+04	1.294e+05	7.253e+05	D	1.18e+04	4.66e+03	2.47e+04	1.31e+05
F	2.741e+04	2.377e+04	1.293e+05	7.258e+05	F	1.18e+04	4.66e+03	2.47e+04	1.31e+05

表 5、6 反映出质量不平衡对风机极限载荷与疲劳载荷几乎没有影响。原因可能为设定桨叶质量时偏于保守。理论上风机实际运行中质量不平衡可能会造成风机重心的严重偏移,产生附加偏心力,加剧风机叶片、塔筒及支撑平台的振动。从仿真结果可以推断出若装配误差不超过一定范围则能够保证风机的安全运行。

5 结 语

应用 FAST 软件,以 NREL 开发的陆上风机 (onshore)、近海单桩式 (monopile) 固定风机和浮式风机 (ITIBarge) 为研究模型在风机正常工作状态下进行模拟仿真计算风机的极限载荷和疲劳载荷,并进行分析探究对海上风机载荷的影响因素。研究表明风机要针对特定海域的海洋气候条件进行合理结构设计,避免风机及其支撑平台与风浪产生共振影响风机的正常工作与寿命。还可以增加结构的阻尼以降低振动响应;设置专门的减振或吸振装置,如动力吸振器,阻尼仓等以减缓振动。对于浮式风机,波浪是主要的载荷来源,因此设计浮式支撑平台时要增大其阻尼以减小平台的纵摇、升沉等运动。在桨叶根部,偏航轴承,塔筒底部等高应力集中区,尤其是塔筒底部要增大其强度,防止发生疲劳破损或断裂。

对于风机的其他相关因素,如风机桨叶尖端的振动、位移,浮式支撑平台的升沉 (heave)、横荡 (sway)、纵荡 (surge)、横摇 (roll)、纵摇 (pitch)、首摇 (yaw) 运动等对风机的具体影响以及风机在停机等状态下的极限载荷和疲劳载荷有待进一步研究。

参考文献:

[1] MUSIAL W, RAM B. Large-scale offshore wind power in the United States: Assessment of opportunities and barriers [R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2010.

[2] Wind turbines: Part 3: Design requirements for offshore wind turbines [M]. IEC, 2009.

[3] JONKMAN J M, BUHL JR M L. Loads analysis of a floating offshore wind turbine using fully coupled simulation [C] // Windpower 2007 Conference and Exhibition. California: [s.n.], 2007.

[4] JONKMAN J M, BUHL JR M L. FAST user's guide [R]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2005.

- [13] BARNESLEY M F. Fractal functions and interpolation [J]. Constr. Approx., 1986, 2:303-329.
- [14] WANG H Y, YU J S. Fractal interpolation functions with variable parameters and their analytical properties [J]. J. Approx. Theory, 2013, 175:1-18.
- [15] 刘德平. 分形理论在水文过程形态特征分析中的应用[J]. 水利学报, 1998(2):20-25. (LIU Deping. The application of fractal theory in hydrologic process shape characteristic analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(2):20-25. (in Chinese))
- [16] 马宗伟, 许有鹏, 李嘉峻. 河流形态的分维与洪水关系的探讨[J]. 水科学进展, 2005, 16(4):530-534. (MA Zongwei, XU Youpeng, LI Jiajun. River fractal dimension and the relationship between river fractal dimension and river flood [J]. Advance in Water Science, 2005, 16(4):530-534. (in Chinese))
- [17] NIKORA V I. Fractal structures of river plan forms [J]. Water Resources Research, 1991, 27(6):1327-1333.
- [18] 钟亮, 许光祥. 床面粗糙形态的二元分形插值模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(5):662-668. (ZHONG Liang, XU Guangxiang. Bivariate fractal interpolation for estimating rough channel bedform [J]. Advance in Water Science, 2011, 22(5):662-668. (in Chinese))
- ~~~~~

(上接第 62 页)

- [5] JONKMAN J M, MATHA D. Dynamics of offshore floating wind turbines—analysis of three concepts[J]. Wind Energy, 2011, 14(4):557-569.
- [6] BUTTERFIELD S, MUSIAL W, SCOTT G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [7] 夏一青, 王迎光. 应用统计外推求解近海风机面外叶根部弯矩最大值[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(12):1968-1973. (XIA Yiqing, WANG Yingguang. Calculation of out-of-plane bending moment at the blade root of offshore wind turbines by statistical extrapolation[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(12):1968-1973. (in Chinese))
- [8] XIA Y, WU K, ZHANG Y. Prediction of extreme loads acting on offshore wind turbines by statistical extrapolation[C]//The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013.
- [9] NWTC design codes (MLife by Greg Hayman)[ED/OL]. <http://wind.nrel.gov/designcodes/postprocessors/MLife/>, 2012-10-22.
- [10] 莫继华, 何炎平, 李勇刚, 等. 近海风电机组单桩式支撑结构疲劳分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(4):565-569. (MO Jihua, HE Yanping, LI Yonggang, et al. Fatigue analysis of wind turbine monopile support structure[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(4):565-569. (in Chinese))