

海上风力发电机组塔架海波载荷的分析

王湘明, 陈亮, 邓英, 王婀娜

(沈阳工业大学 风能技术研究所, 沈阳 110023)

摘要: 由于海上风力发电机组的外界载荷条件比陆地上的风力发电机组更加复杂, 因此在机组设计中要考虑到海上风机载荷条件. 在研究海波性能和运动规律的基础上, 给出了海水中的塔架载荷的计算公式; 针对海上风力发电机组的结构特点, 将研究的海波载荷计算方法用于风机的塔架载荷计算, 以 1.0 MW 风力发电机组为例, 对塔架所承受的海波载荷和风载荷进行了计算, 经过对比分析可知, 风载荷大于海波载荷并为同一数量级的载荷, 因此, 在设计中更应注意这两种载荷的耦合作用.

关键词: 海上风力发电机组; 海波载荷; 风轮载荷; 海波性能; 运动规律

中图分类号: TK 81

文献标志码: A

Analysis on wave loads of offshore wind turbine

WANG Xiang-ming, CHEN Liang, DENG Ying, WANG E-nuo

(Wind Energy Institute of Technology, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: The load condition of offshore wind turbine is more complicated than that on land, and must be considered in design. In view of the wave feature and its moving rule, the formulas of tower loads on offshore wind turbines were presented. Based on the structure feature of offshore wind turbines, the computation method of the wave loads was applied to calculate the tower loads. The wave loads and wind loads of 1.0 MW wind turbine on tower were obtained. By means of analysis and contrast, it is concluded that wind loads are heavier than wave loads, but both are in same order. Therefore, the coupling action between two loads should be paid a more attention in design.

Key words: offshore wind turbine; wave loads; wind loads; wave feature; moving rule

1 海上风力发电机组载荷计算

通常海上风力发电机组的外界载荷条件比陆地上的风力发电机组更加复杂, 其原因是除了受到通常的风载荷以外, 更主要的是受到海波和海浪的影响, 而海上风机主要是受风轮载荷的影响, 此外还受到海浪和海波的影响, 这样海水下面塔架的外界载荷就变得比较复杂. 因此在机组设计中, 除了要考虑陆上风机的风作用下的 21 种载荷工况之外, 还要考虑到 42 种海上风机载荷条件^[1]. 如果风机装在渤海湾的某一浅海滩上, 如图 1 所示, 设海平面为起始位置 0, 则塔架在海平

面以下的部分为 0 到 $(-h)$, 在海面以上部分为 0 到 h_0 .

塔架总载荷包括风轮载荷、风载载荷和海波载荷. F_{wind} 表示风轮载荷, F_{h0} 表示风载载荷, F_h 表示海波载荷. 以风机塔架计算为例, 风轮载荷为

$$F_{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_t \rho_{\text{air}} v_s^2 A \cdot B \cdot S \quad (1)$$

式中: C_t ——扭矩系数;

ρ_{air} ——空气密度;

v_s ——风速;

A ——风轮扫掠面积;

B ——叶片的支数;

S ——安全系数.

收稿日期: 2007-06-20.

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA5Z429).

作者简介: 王湘明(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 副教授, 硕士, 主要从事风力发电技术等方面的研究.

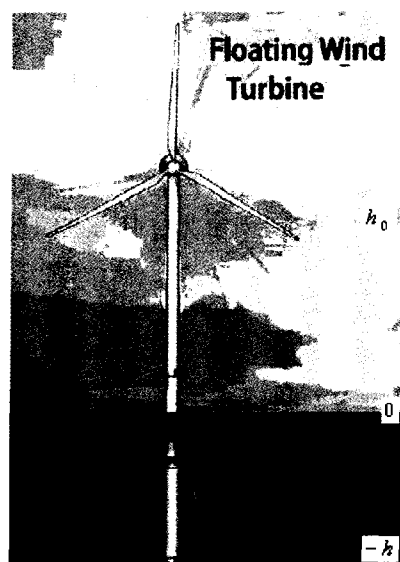


图 1 海上风力发电机组结构图

Fig.1 Structure of offshore wind turbine

塔架的风载载荷为

$$F_{ho} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_w v_{tw}^2(h_0) \quad (2)$$

式中: A_w ——风吹到塔架的投影面积;

$v_{tw}(h)$ ——海平面上高度为 h 的平均风速.

则塔架总风载载荷为 $F_{wind} + F_{ho}$, 用 blade 软件对风机 25 m 风速时功率运行工况进行模拟得到塔架的总风载载荷, 如图 2 所示.

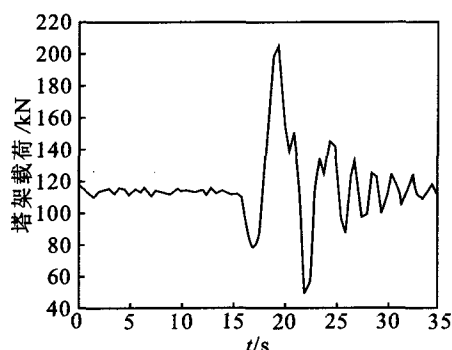


图 2 发电时塔架水平方向风载荷图

Fig.2 Wind load of tower in horizontal direction under generating

根据文献[1], 海波载荷为

$$F_h = (C_m - 1) \rho \frac{\pi D^2}{4} L \dot{v}_t + \rho \frac{\pi D^2}{4} L \dot{v}_D + \frac{1}{2} C_d \rho D L v_t |v_t| \quad (3)$$

式中: F_h ——作用在直径为 D , 长度为 L 的截断面上的正常作用力;

ρ ——海水密度;

C_m ——惯性系数;

C_d ——阻力系数.

则塔架所受的最大弯曲应力

$$\delta = \frac{F_{wind}(h_0 + h) + F_{h_0} \left(\frac{h_0}{2} + h \right) + F_h \frac{h}{2}}{\frac{\pi(D^4 - D_1^4)}{32D}} \quad (4)$$

式中: D ——塔架外径;

D_1 ——塔架内径.

塔架的风载荷计算直接参考机械设计手册[4], 海流的载荷计算直接与海波条件相关, 计算比较复杂, 可按参考文献[2]的方法进行计算.

2 海波载荷的计算

2.1 海波载荷的计算公式

在时间 t 时海波中点 (x, y, z) 处的波粒子速度和加速度矢量分别用 \underline{v}_D 和 \underline{a}_D 表示. 相同地点的总的海流速度矢量用 \underline{v}_c 表示, 塔架结构本身的速度和加速度分别用 \underline{v}_s 和 \underline{a}_s 表示.

则海波相对于塔架结构流动的速度 \underline{v}_t 和加速度 \underline{a}_t 分别为

$$\underline{v}_t = \underline{v}_D + \underline{v}_c - \underline{v}_s$$

$$\underline{a}_t = \underline{a}_D + \underline{a}_s$$

在塔架受海波载荷的研究中, 如果塔架的衍射参数 D/λ 的值小于 0.2 (D 为塔架的直径, λ 为海波的波长), 塔架在水平方向上实际的海波载荷可用 Morison 方程式(3)求得. 要计算塔架作用力, 可以把塔架近似为相等高度的 10 个子圆柱体. 使用 Morison 相对运动方程可计算子圆柱体轴上的作用力.

把各个参数代入方程(3)就可以计算出塔架的海波载荷. 阻力系数和惯性系数可以参考海上风力发电机组相关文献, 也可通过海波实验确定, 同时, 还要考虑海波的结构动力的总衰减, 总的衰减包括波辐射衰减、阻力衰减和结构衰减.

2.2 计算公式系数的确定

在方程(3)中, 阻力系数 C_d 和惯性系数 C_m 是未知参数, 需要得到海波粒子的速度和加速度的测量值. 在参考文献[3-5]中采用很多方法给出了不同 C_d 和 C_m 的数值, 本文按期望的方差确定系数的准确值[6]. 在参考文献[3]中给出了确定阻力系数和惯性系数的两种方法.

第一种方法是当流体的速度和加速度为零时解出莫里森方程. 当速度为零时可以确定惯性系数 C_m , 当加速度为零时可以确定阻力系数 C_d . 这种方法的缺点是只用到了少量的测量数据, 并且

对相移误差比较敏感^[4];第二种方法是基于最小二乘法,这样可以使压力的测量值和计算值的平方差 ϵ^2 最小.为了消除计算误差,本文要用近似的雷诺数将计算值和测量值的数据进行分组,从而确定 C_m 和 C_d 的值.

2.3 典型的系数值

根据文献[4],阻力系数和惯性系数取值见表1.

表1中的雷诺数为

$$R_n = \frac{v_a D}{u} \quad (5)$$

式中: v_a ——水流速度的幅值,m/s;

u ——粘性系数, m^2/s .

表1中的KC为Keulegan Carpenter数

$$KC = \frac{v_a T}{D} \quad (6)$$

式中, T 为震荡周期.

表1 系数值

Tab.1 Coefficient value

KC	$R_n < 10^5$		$R_n > 10^5$	
	C_d	C_m	C_d	C_m
≤ 10	1.2	1.2	2.0	1.5
≥ 10	0.6	0.6	2.0	1.5

2.4 海波速度的计算

海波包括深水海波和过渡海波,因此研究海波速度也应该从这两方面考虑.对于深水波周期 T 应该满足条件 $d/(gT^2) > 0.8$;对于过渡海波周期 T 应该满足条件 $0.002 < d/(gT^2) < 0.08$.其中 d 为水深, g 为重力加速度.起源波的参数包括波粒子的速度和加速度,在这里用线性波理论来定义这些参数^[7].

2.4.1 深水区的波粒子速度

首先建立一个 x - y - z 右手坐标系,用 x - y 座标轴所在的平面表示不受干扰的海平面, z 轴垂直向上,那么参考速度可以表示为

$$v_R = 0.5H_D \cdot \omega_D \cdot \exp\{i(\omega_D t - K_D \xi)\} \quad (7)$$

式中: $\omega_D = 2\pi/T_D$, $K_D = \omega^2/g$, $\xi = x \cdot \cos \mu +$

$y \cdot \sin \mu$, $i = \sqrt{-1}$;

ξ 轴——海波沿地平线传播的方向;

μ —— x 轴和 ξ 轴之间的夹角.

在海平面下坐标为 (x, y, z) 点的合成速度矢量 v_D 为

$$v_D = (v_{Dx}, v_{Dy}, v_{Dz}) =$$

$$(i \cos \mu, i \sin \mu, -1) \cdot v_R \cdot \exp\{K_D \cdot z\}$$

这样可以用相位纠正的方法来计算 $v_{Dx/y/z}(x/y/z$

指 x 轴, y 轴或 z 轴的方向),也就是实部和虚部的相移为 $T_D/4$ 时,实部在 $t = T/4$ 时达到波峰.

在一个海波周期中最大的速度幅度值为

$$v_{Dx/y/z\max} = \sqrt{[\operatorname{Re}(v_{Dx/y/z})]^2 + [\operatorname{Im}(v_{Dx/y/z})]^2} \quad (8)$$

2.4.2 过渡海波波粒子的速度

用参考速度 v_R 来定义过渡海波的参考速度为

$$v_{Rs} = v_R(K_{Ds})/\sin h(K_{Ds} \cdot d) \quad (9)$$

式中, K_{Ds} 为分布方程得解,分布方程为

$$K_{Ds} \cdot |\tanh\{K_{Ds} \cdot d\}| = \omega^2/g \quad (10)$$

因此,过渡海波在海面下的坐标为 (x, y, z) ,点的速度矢量为

$$v_{Ds} = (v_{Dsx}, v_{Dsy}, v_{Dsz}) =$$

$$(i \cos h\xi, i \cos \mu, i \cos h\xi, \sin \mu, -\sin \xi) \cdot v_{Rs}$$

式中, $\xi = K_{Ds} \cdot (z + d)$ 最大值为

$$v_{Dsx/y/z\max} = \sqrt{[\operatorname{Re}(v_{Dsx/y/z})]^2 + [\operatorname{Im}(v_{Dsx/y/z})]^2} \quad (11)$$

2.4.3 海波粒子的加速度

深水区的波粒子加速度用 a_D 表示,过渡区波粒子的加速度用 a_{Ds} 表示,则

$$a_D = i\omega_D \cdot v_D, a_{Ds} = i\omega_D \cdot v_{Ds} \quad (12)$$

那么加速度的最大值

$$a_{Dsx/y/z\max} = |\omega_D| \cdot v_{Dsx/y/z\max}$$

$$a_{Dsx/y/z\max} = |\omega_D| \cdot v_{Dsx/y/z\max} \quad (13)$$

3 海波载荷计算举例

下面以渤海湾实际数据为例来计算塔架单位长度的海波载荷.取 $T=9$ s, $D=8$ m, $v_a=1.4$ m/s, $\rho=1.022 \times 10^3$ kg/m³, $C_d=1.2$, $C_m=2.0$.将这些数据代入公式(3)中,用matlab计算可得结果如图3所示.

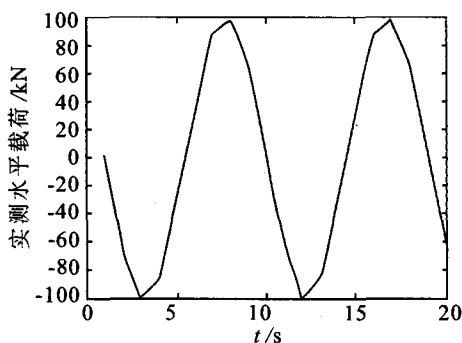


图3 塔架水平方向的海波载荷

Fig.3 Wave load of tower in horizontal direction

由此看出塔架的海波载荷为周期性变化的载荷.以1.0MW风力发电机组为例,取塔架根部外径为4.2m,内径为4.156m,塔架海平面以上高

度为 70 m,海平面以下高度为 10 m,则得出塔架的最大应力为 32.7 MPa.塔架海面上的风轮的载荷计算如图 2 所示,最大为 212.5 kN.海面下的海波载荷如图 3 所示,最大为 100 kN.因此,海波载荷加上风的载荷等于塔架的总载荷.从计算结果可知,海波载荷对塔架的载荷影响很大,设计时还应特殊考虑海波极端工况的塔架载荷.

4 结 论

1) 对海浪和海波的运动规律进行了描述,给出了海波载荷的计算公式和计算结果,同时,也给出了塔架风载荷的计算公式和计算结果.

2) 假设 1.0 MW 风机装在渤海湾近海的海滩上,按照 matlab 软件计算结果(见图 2),塔架在海平面以下的海波载荷为 100 kN,且为周期性载荷,当海流速度比较大时海波载荷至少为正常情况时的 2 倍.同样,根据 blade 软件计算塔架的风载荷(见图 3)为塔架所受阻力,正常发电时的海面以上塔架载荷为 120 kN,发生最大风速扰动时至少也为 2 倍以上.所以,在设计时,应重点考虑风流和海流的极端载荷工况.

3) 采用以上的计算公式,对 1.0 MW 风机为例计算了海波载荷和风载荷,经过对比分析可知,风载荷与海波载荷是同一数量级的载荷.它们之

间的耦合作用较大,将会影响机组的稳定性运行.

参考文献(Reference):

- [1] 全国风力机械标准化技术委员会.风力机械标准汇编 [M].北京:中国标准出版社,2006.
(Wind Power Machine Standard Institute. Wind power machine criterion assembly [M]. Beijing: Standard Press of China, 2006.)
- [2] Peeringa J M. Wave loads on offshore wind turbines [J]. Electronic Communication Network, 2004(4): 7-10.
- [3] Dean R G, Dalrymple R A. Water wave mechanics for engineers and scientists [M]. India: World Scientific Publishing Co Ltd, 1991.
- [4] Journée. Offshore hydromechanics [D]. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [5] Sarpkaya T, Isaacson I. Mechanics of wave forces on offshore structures [J]. Electronic Communication Network, 2004(4): 17-19.
- [6] Grundlehner G J. Systematic model tests on a harsh environment jack-up in elevated conditions [C]//Proceedings of 5th International Conference on Jack-up Platforms. City University, London, 1995.
- [7] Frost W. Regulations for the certification of offshore wind Energy conversion systems [J]. Wind Engineering, 1994(1): 11-15.
- [8] 徐灏,邱宣怀,蔡春源,等.机械设计手册 [M].北京:机械工业出版社,1992.
(XU Hao, QIU Xuan-huai, CAI Chun-yuan, et al. Machine design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1992.)

(责任编辑:邓美艳 英文审校:杨俊友)

(上接第 23 页)

- [5] Bertotti G. Dynamic generalization of the scalar preisach model of hysteresis [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1992, 28: 2592-2601.
- [6] Mayergoyz I D. Vector preisach hysteresis models [J]. Appl Phys, 1988, 63(8): 2995-3000.
- [7] Nakata T, Takahashi N, Kawase Y. Finite element analysis of magnetic fields taking into account hysteresis characteristics [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1985, 21

(5): 1856-1858.

- [8] 王小平.遗传算法——理论、应用与软件实现 [M].西安:西安交通大学出版社,2002.
(WANG Xiao-ping. Genetic algorithms—theories, application and software implementation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.)
- [9] Kumada M. Development of a model 4 tesla permanent magnet [C]// Proceedings of Particle Accelerator Conference. Chicago, 2001: 3221-3223.

(责任编辑:邓美艳 英文审校:杨俊友)