

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.08.005

复杂海况下风力发电机建模与动态特性仿真分析

贾文强¹, 金鑫², 李浪², 唐帅²

(1.太原重工股份有限公司, 山西 030024; 2.重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要:考虑到海上风力发电机可能会受到冰载荷的影响,将随机冰力函数模型添加到风力发电机模型中,利用莫里森方程模拟海浪作用,建立复杂海况下多体动力学联合仿真模型,进行多场耦合作用下的风力机动力学特性分析,以此评估风力机系统在复杂工况下的运行风险。结果表明:风力机塔顶位移的波动主要受风载的影响;波浪、海冰对塔基载荷性能影响较大,会使塔筒产生持续振动并引发疲劳破坏,风冰联合作用时振动更为剧烈;由于海冰的持续撞击作用会使塔基载荷普遍大于无海冰作用情形,因此,针对海冰工况下风力发电机的设计要有所修正及完善。

关键词:海上风力机;波浪载荷;海冰模型;多体动力学;塔筒

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)08-037-08

Wind turbine modeling and dynamic characteristics simulation analysis under complicate sea conditions

JIA Wenqiang¹, JIN Xin², LI Lang², TANG Shuai²

(1. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Shanxi 030024, P.R.China; 2. College of Mechanical and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: Considering offshore wind turbines may be affected by ice load, random ice force model was added to wind turbine model and wave action was simulated by using Morison equation. In order to assess the risk of wind turbine system operation, multi-body dynamics model was established with sea ice action to conduct dynamic characteristics analysis of wind turbine under multi-field coupling. The results show that tower displacement fluctuations are mainly affected by wind load. Wave or ice can directly impact tower foundation load performance, making tower continuously vibrate and causing fatigue damage. When wind and ice come together, tower vibration becomes more intense. Since sea ice's continuous strike makes tower foundation load generally greater than that without sea ice case, the design of wind turbine for ice conditions should be corrected and improved.

Keywords: offshore wind turbine; wave load; ice load; multi-body dynamics modeling; tower foundation

收稿日期: 2017-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005255);重庆市基础与前沿研究计划一般项目(cstc2013jcyj90018)。

Supported by Natural Science Foundation of China (5100 5255) and Natural Science Foundation Project of Chongqing (cstc2013jcyj90018).

作者简介: 贾文强(1964-),男,高级工程师,主要从事风力发电设计技术研究,(E-mail)jwq_2008@126.com。

金鑫(联系人),男,副教授,博士,主要从事风力发电技术方面研究。(E-mail)jinxin191@hotmail.com。

海上风力发电机组环境载荷比陆上机组更加复杂,设计前期必须详细评估海洋环境参数。海冰会对风力机性能产生重大的影响,因此,包含冰荷载的计算工况成为风机设计的重要控制工况,而冰对塔筒负载将是一个重要的考虑因素。

国内外学者对风力机动力学特性进行了广泛研究。Yao 等^[1]根据疲劳载荷进行了塔筒疲劳分析,采用定量可靠性理论计算塔筒平均故障时间;Mitsumasa 等^[2]对比了不同控制策略对海上风力机的影响;金鑫等^[3-4]基于动力学模型研究了独立变桨控制策略对风电机组的影响;Bazeos 等^[5]把风力机塔筒看作悬臂梁并进行了地震波作用下的动力学分析及稳定性研究;Murtagh 等^[6]研究了风力机基础在风载荷作用下的动力反应以及叶片刚化效应的影响;Arka-diusa 等^[7]研究了风力机在冰载作用下的整体动力响应;何玉林^[8]证明了风机叶片覆冰时,叶片气动性能将会受到影响;刘强等^[9]分析了风浪作用对机组的运动特性和发电性能的影响;岳前进等^[10]对锥体结构上的冰力作用形式进行观测分析,提出了随机冰力时程的概念。

笔者运用多体动力学方法建立了详细的风力发电机动力学模型,并借鉴随机冰力函数模型,将冰载荷添加到风力发电机模型中,建立了海冰作用下的风力机动力学模型并进行仿真,仿真结论对后期风电机组塔基载荷优化控制研究具有重要意义。

1 海上风力机塔筒受载描述

海上风电机组的外界载荷比较复杂,与陆上风机最大的区别是要考虑海上载荷条件。海上风力机塔筒可能受到的载荷有:风力发电机组的重力、气动载荷、波浪载荷、冰载荷等。

2 海上风力机多柔体动力学模型

在柔性多体系统动力学建模中,柔性体的位移通过使用动参考系和弹性变形两组广义坐标来描述。因此,基于拉格朗日方程的柔性多体系统控制方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + \left(\frac{\partial C}{\partial \xi} \right)^T \lambda = Q, \\ C(\xi) = 0; \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为拉格朗日量; F 为能量耗散方程; λ 为拉格朗日算子; Q 为广义作用力; $C(\xi, t)$ 为约束方程。

柔性体叶片采用铁木辛柯梁建模并综合考虑了叶片的刚度硬汉效应。根据叶片长度将整个叶片分成若干段,每段采用柔性梁建模,通过每段单元的预弯、面内外刚度、扭角等参数生成叶片模型。

轮毂、主轴、主机架等复杂柔性体零部件的建模思路为:根据部件三维模型划分网格,采用模态综合法进行子结构的缩减,完成模态计算,生成符合要求的输入文件,输入文件包含了有限元模型节点单元材料等信息和子结构分析后生成的质量矩阵、刚度矩阵等信息,最后将输入文件导入多体动力学软件中生成柔性体文件,完成柔性体的建模。

齿轮建模通过参数化方式进行,齿轮轴考虑为柔性体轴建模。齿轮啮合力元根据 DIN3990^[11] 标准完成模拟,该标准可以计算齿轮啮合的切向力、径向力和轴向力等参数。发电机建模类型为刚体,发电机箱体通过力元模拟 4 点弹性支撑。塔筒建模过程直接视为梁单元处理,通过建立一系列标记点,添加各截面的属性和参数,自动生成柔性体文件即可。

依据风力发电机认证规范要求,表 1 所示为风力机系统各主要零部件刚柔属性要求及建模自由度。

表 1 风电机组各主要零部件及建模要求

Table 1 Major component and model requirement of wind turbine

主要零部件	零部件建模要求	自由度数
叶片	柔性体	挥舞、拍打
轮毂	刚体	六自由度

续表 1

主要零部件	零部件建模要求	自由度数
主轴	柔性体	六自由度
齿轮轴	柔性体	六自由度
齿轮	刚体	六自由度
发电机联轴器	刚体	六自由度
发电机转子	刚体	六自由度
发电机箱体	刚体	扭转、移动
主机架	柔性体	六自由度
塔筒	柔性体	固联

图 1 所示为风电机组整机多柔体动力学系统拓扑图,包含了风力发电机组的主要零部件,零部件之间载荷传递路线以及载荷传递实现方法等。风力机通过气动力元添加风载荷驱动,发电机定子和转子之间的反馈力矩由力元实现。控制系统主要由变桨系统、偏航系统和发电机系统组成。

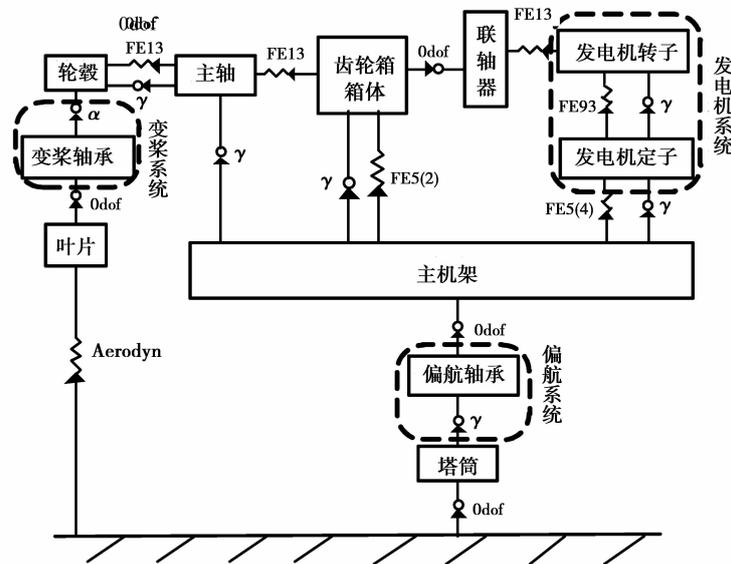


图 1 风电机组整机拓扑图

Fig.1 Topology of wind turbine

风电机组由于自身机械结构强度的限制,当风速超过额定风速后,需要进行变桨距控制来降低风能利用率,使机组稳定在正常工作范围之内,不至于使风力发电机过载运行,以此保护发电机组。变桨距控制策略是通过将发电机转速反馈信号作为控制系统的输入变量来计算桨距角实现变桨控制。图 2 所示为在 Simulink 中搭建的控制系统模型并与多体动力学模型模块实现了接口连接。

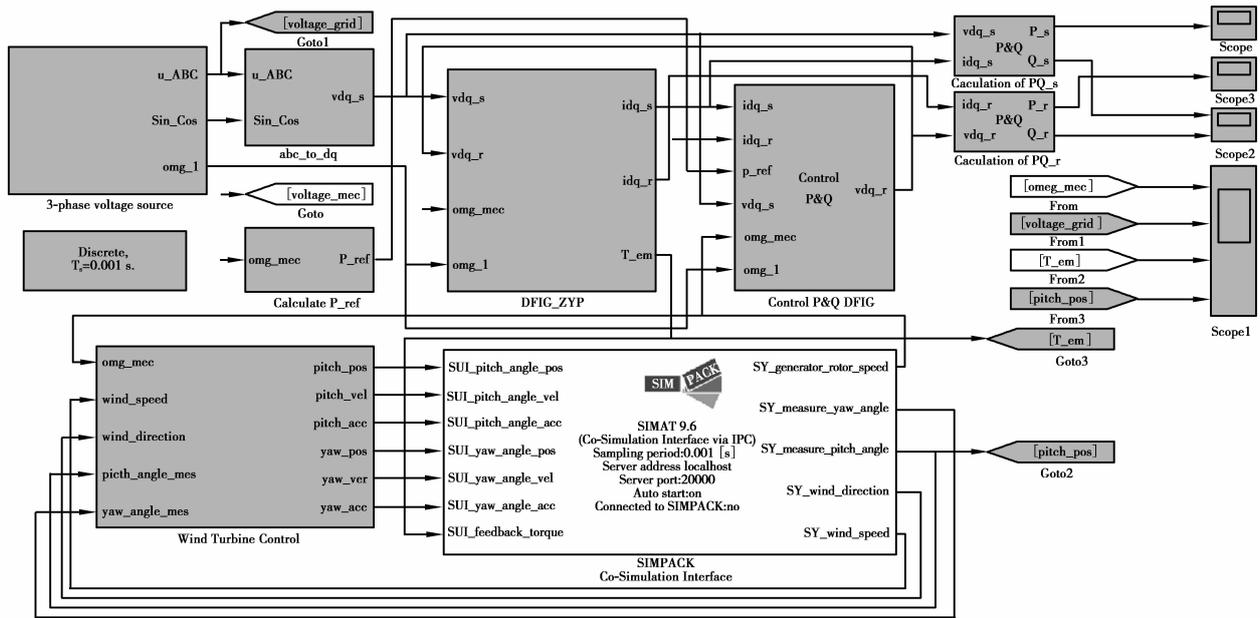


图 2 风电机组多体动力学联合仿真模型

Fig.2 Multi-body dynamic co-simulation model of wind turbine

3 海洋环境载荷模型

3.1 波浪载荷模型

利用线性波浪理论求解水质点速度和加速度时,水平方向水质点的速度 v_m 为

$$v_m = A_m \omega \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sin(kh)} \sin(\omega t), \tag{2}$$

式中: A_m 为波浪幅值; ω 为角速度; h 为海水深度; k 为波浪数目; z 为水面高度; t 为波浪周期。

波浪大小通常由波浪力水平分量决定,对于小直径圆柱塔筒,柱体对波浪运动无显著影响,常采用莫里森(Morison)公式^[12]计算。Morison 方程中,作用在柱体上的水平力是水平速度和加速度的函数,作用在风力机塔筒的水平波浪力包括惯性力和阻力两部分,则塔筒任意高度处的水平波浪力为

$$dF = C_m \rho_w \frac{\pi D^2}{4} v dz + C_d \rho_w \frac{D}{2} |v_m| v_m dz, \tag{3}$$

式中: C_m 为惯性力系数; C_d 为阻力系数; D 为波浪作用处直径; ρ_w 为海水密度。

3.2 冰载荷模型

在结冰环境中,作用于海上结构物的冰载荷远大于其他载荷,因此,可将冰载荷当作结构物的控制荷载。根据海冰作用于结构的形式不同,海冰可能发生挤压、弯曲和屈曲形式破坏。当冰排作用于垂直结构时,冰以挤压的方式破碎;当冰排与锥体结构作用时,冰排主要发生弯曲破碎,使得冰排对结构的作用比挤压冰破坏作用要小得多。

海冰以弯曲这种形式的破坏,研究者对原型冰锥进行了大量测量,并分析锥体与冰作用过程中冰力大小变化及冰排破坏形式后得出结论:冰与锥体作用的冰力时间历程实际上是若干个脉冲函数,进一步对冰力时程做简化得到了确定性冰力函数。后来发现,冰与锥体结构实际破坏过程是一个随机过程,振动也是随机振动。Qu Yan 等^[13]对实测的多条冰力时程分析中引入随机冰力函数的概念,并统计发现幅值和周期服从正态分布,将随机过程分为若干周期的组合,并给出了任意周期 i 内的冰力函数表达式:

$$f_i(t) = \begin{cases} \frac{6F_i^m}{T_i}, 0 < t < \frac{T_i}{6}, \\ 2F_i^m - \frac{6F_i^m}{T_i}t, \frac{T_i}{6} < t < \frac{T_i}{3}, \\ 0, \frac{T_i}{3} < t < T_i; \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_i^m 为第 i 个周期内的冰力幅值; T_i 第 i 个冰力周期。

一般认为作用在锥体上的最大静冰力即为动冰力幅值的大小,文献[14]对锥体的冰力模型进行了总结:锥体水平静冰力主要由冰弯曲强度和推动碎冰上爬力两部分决定,对于窄锥体,一般不考虑上爬力,取 Hirayama-Obara 静冰力计算公式^[15],冰力幅值为

$$F^m = K\sigma_i h^2 \left(\frac{d}{L_b}\right)^{0.34}, \quad (5)$$

式中: K 为待定系数; σ_i 为冰的弯曲强度; h 为冰厚; d 为冰作用处锥体直径; L_b 为冰的破碎长度。

冰排弯曲破坏时,冰力周期由破碎长度和冰速决定,此时冰力周期表达式为

$$T = \frac{L_b}{v_{ice}}, \quad (6)$$

式中: v_{ice} 为冰速,短时间内为恒定值。因此,冰力周期主要由破碎长度决定,破碎长度是锥体几何形状、冰厚等参数的函数,当结构尺寸一定时,破碎长度主要由冰厚决定。根据冰力时程曲线统计结果,冰与锥体结构作用的时间大约占整个周期的 1/3。

4 仿真实例分析

采用多体动力学软件进行风力发电机系统建模。使用 NREL 提供的 5 MW 近海水平轴单桩固定式风力机为研究对象进行仿真分析,塔架结构为圆筒型。

根据风力机认证规范 IEC61400-3 设计典型载荷工况,如表 2 所示。波浪载荷通过水动力力元添加,完成多体动力学与水动力学耦合;海冰载荷通过力元实现,将载荷时间历程输入到力元中。把波浪载荷和海冰载荷作为模型输入控制量,图 3 为风力发电机仿真过程图。冰厚为正常冰厚,取 8 cm;参考文献[16],冰速取值为 0.3 m/s,图 4 为在 Matlab 中生成的冰载荷时间历程曲线。

表 2 风电机组仿真运行工况

Table 2 Simulation operating conditions of wind turbine

工况	类型描述
工况 1	风单独作用
工况 2	风波联合作用
工况 3	风冰联合作用



图 3 风力发电机组仿真过程

Fig.3 Simulation procedure of wind turbine

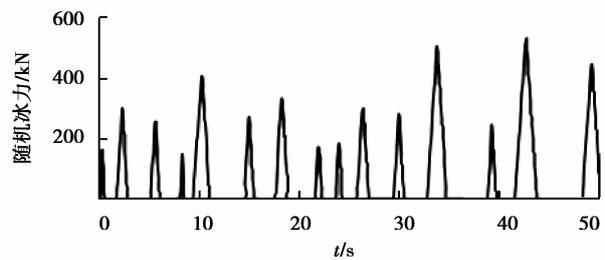


图 4 冰力时程曲线

Fig.4 Ice force-time curve

4.1 风力发电机固有频率验证

整机模态分析过程按质量分布和刚度参数进行,由于风力机主要工况处于低频率状态,对风力发电机影响较大的是前几阶模态,表 3 分别是整机模型在 SIMPACK 和 Bladed 中计算的前 3 阶固有频率,由表可以看出两者计算结果很接近,相对误差最大为 2.21%,小于 5%。根据 GL2010 规范要求,证明该模型合理。

表 3 风力发电机固有频率对比

Table 3 Natural frequency comparison of wind turbine

阶次	1 阶	2 阶	3 阶
Simpack 结果/Hz	0.498	4.018	11.23
Bladed 结果/Hz	0.487	4.004	11.15
相对误差/%	2.21	0.35	0.71

4.2 塔筒顶部动力特性响应

图 5 分别为风载荷、波浪载荷和海冰载荷单独作用下塔顶位移响应曲线。由图 5 可知,风载荷作用下塔顶位移均值为 0.21 m,开始阶段波动幅度比较大,运行稳定后,波动幅值逐渐变小,这与实际情况吻合。波浪载荷和海冰载荷作用下塔顶的位移幅值分别为 0.047 0 m 和 0.003 9 m,两者差别较大,但均远小于风载荷作用对顶部位移的影响。因此,风波、风冰联合作用时,由于风力作用对顶部位移影响更大,因此,计算塔顶位移主要由风载荷决定,波浪和海冰作用可忽略不计。

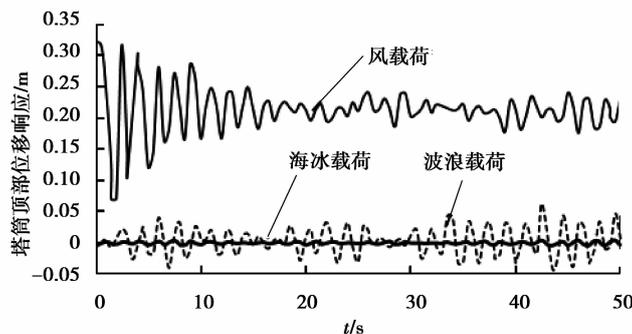


图 5 塔筒顶部位移响应对比

Fig.5 The top of tower displacement response comparison

4.3 塔基载荷计算比较

将无海冰情况风力发电机的计算结果纳入比较,分析塔基载荷变化情况。图 6(a)-(f)分别为塔基受力及力矩的时域响应。在海冰作用下,塔基各个方向的振动特性均有明显的提高,其中 F_x 的幅值增大最多, M_z 的载荷波动变化最为显著,分析可知载荷波动突变的原因是由于海冰对塔基的正面持续撞击作用所导致,撞击作用会使塔基在机舱前后、垂直方向的力和机舱左右方向的力矩普遍大于无海冰作用时的塔筒受载。

塔基等效疲劳载荷结果如图 7 所示。由图可知,联合作用下的疲劳载荷介于各自单独作用下的疲劳载荷之间,因此,联合作用在一定程度上可降低疲劳载荷。分析图 7 可知,风冰联合作用下的疲劳载荷大于风波联合作用下的疲劳载荷,说明海冰对风力机塔筒疲劳载荷的影响大于波浪的影响。单独冰载荷作用对塔基的疲劳载荷最大,海冰联合作用下载荷也比较大,可见海冰对塔筒的疲劳影响不容忽视。

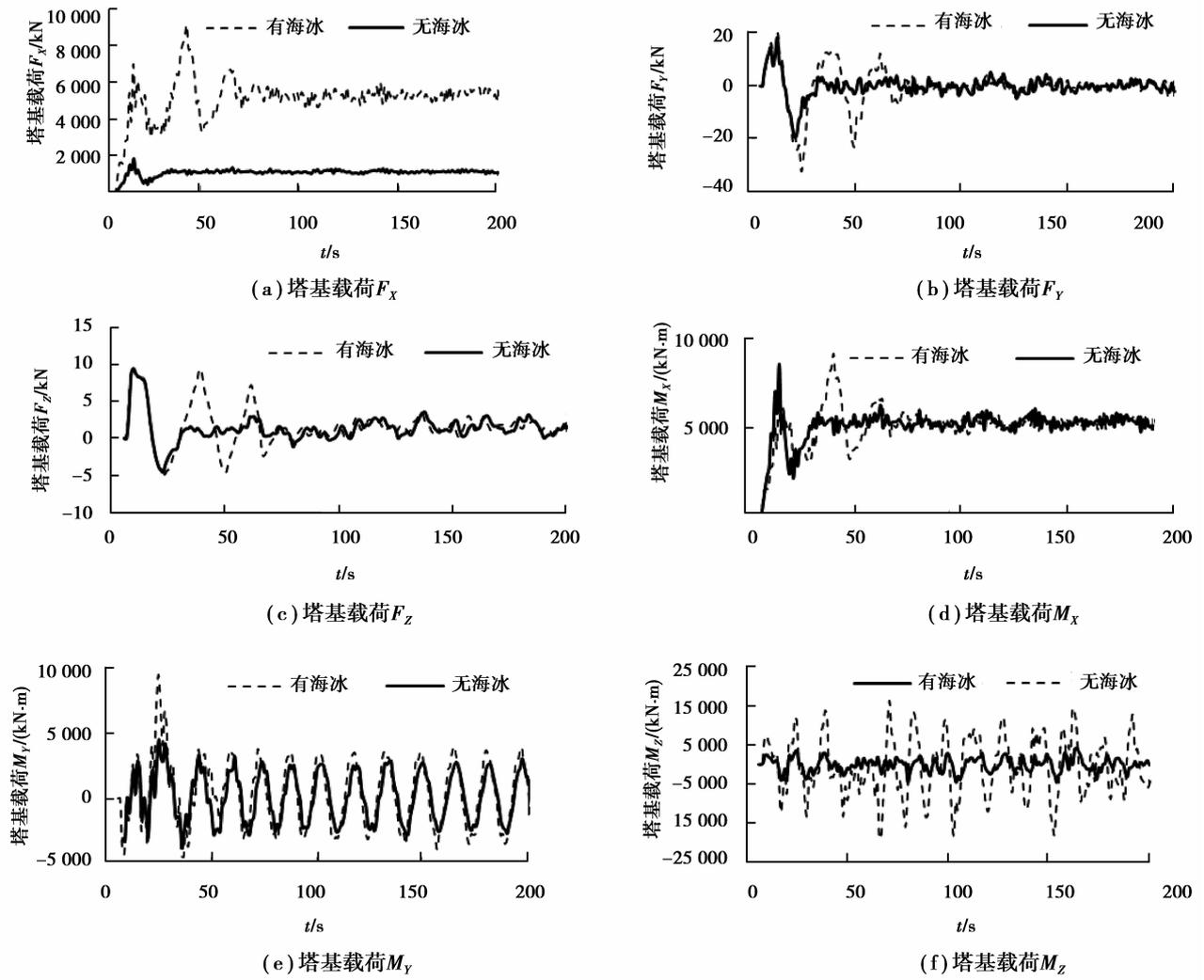


图 6 有海冰与无海冰时塔基载荷比较

Fig.6 Tower foundation loads comparison with ice load and without ice load

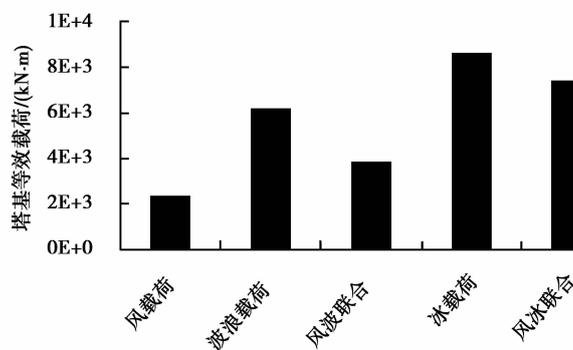


图 7 塔基等效疲劳载荷

Fig.7 Equivalent fatigue loads of tower bottom

5 结 语

将波浪载荷和冰载荷施加到风力机多体动力学模型中,建立海上风力机多体动力学仿真模型,并对部分典型工况进行仿真对比,结果表明:波浪和海冰对风力机塔顶的位移波动相对于风的影响比较小,一般忽略

不计,塔顶位移主要受风载作用;但海冰对风电机组塔基载荷性能的影响显著,海冰的撞击作用会使塔基在机舱前后、垂直方向的力和机舱左右方向的力矩普遍大于无海冰作用时的塔筒受载。本文结论将为风力机塔架结构的改进和载荷优化提供技术参考,尤其是在破冰期,海冰对塔筒基础的破坏作用更为显著。

参考文献:

- [1] Yao H, Wu W F, Chang Y C. Reliability analysis of wind turbine towers[J]. *Procedia Engineering*, 2014(79): 218-224.
- [2] Iino M, Chujo T, Iida M, et al. Effect of forced excitation on wind turbine with dynamic analysis in deep offshore wind in addition to Japanese status of offshore projects[J]. *Energy Procedia*, 2012(24): 11-17.
- [3] 金鑫,巨文斌,何玉林,等.独立变桨控制对大功率风力发电机受载的影响[J].*重庆大学学报*,2014,37(4):1-7.
JIN Xin, JU Wenbin, HE Yulin, et al. Influence of individual pitch control on the load of large-scale wind turbine[J]. *Journal of Chongqing university*, 2014, 37(4): 1-7. (in Chinese)
- [4] 金鑫,李浪,何玉林,等.兆瓦级风力发电机独立变桨控制策略分析[J].*重庆大学学报*,2015,38(1):61-67.
JIN Xin, LI Lang, HE Yulin, et al. Individual pitch control strategy analysis of MW wind turbine[J]. *Journal of Chongqing university*, 2015, 38(1): 61-67. (in Chinese)
- [5] Bazeos N, Hatzigeorgiou G D, Hondros I D, et al. Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(8): 1015-1025.
- [6] Baumgart A. A mathematical model for wind turbine blades[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 251(1): 1-12.
- [7] Mróz A, Holnicki-Szulc J, Kärnä T. Mitigation of ice loading on off-shore wind turbines: feasibility study of a semi-active solution[J]. *Computers and Structures*, 2008, 86(3/4/5): 217-226.
- [8] 何玉林,李俊,董明洪,等.冰载对风力机性能影响的研[J].*太阳能学报*,2012,33(9):1490-1496.
HE Yulin, LI Jun, DONG Minghong, et al. Research on the effect of wind turbine performance under icing conditions[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(9): 1490-1496. (in Chinese)
- [9] 刘强,杨科,黄宸武,等.漂浮式风力机动态响应特性研究[J].*工程热物理学报*,2013,34(7):1256-1261.
LIU Qiang, YANG Ke, HUANG Chenwu, et al. Study on the dynamic response of floating wind turbines[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(7): 1256-1261. (in Chinese)
- [10] 岳前进,毕祥军,于晓,等.锥体结构的冰激振动与冰力函[J].*土木工程学报*,2003,36(2):16-19.
YUE Qianjin, BI Xiangjun, YU Xiao, et al. Ice-induced vibration and ice force function of conical structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(2): 16-19. (in Chinese)
- [11] Hauptmann S, Mulski S, Khn M, et al. Advanced drive train modeling in a virtual wind turbine using the multi-body simulation code Simpack[C]//*Proceeding European Wind Turbine Energy Conference*, Milan, Italy, 2007.
- [12] Najafian G. Probability models for offshore structural response due to Morison wave loading part I: drag-only response[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(17/18): 2277-2288.
- [13] Yue Q J, Qu Y, Bi X J, et al. Ice force spectrum on narrow conical structures[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 49(2): 161-169.
- [14] 许宁.锥体海洋结构的冰荷载研究[D].大连:大连理工大学,2011.
XU Ning. Pyramidal ocean structure ice load research[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [15] Kolymbas D. Ice forces on inclined structures[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1987, 60(2): 217-231.
- [16] 吴龙涛,吴辉碇,李万彪,等.渤海冰漂移对海面风场、潮流场的响应[J].*海洋学报*,2005,27(5):15-21.
WU Longtao, WU Huiding, LI Wanbiao, et al. Sea ice drifts in response to winds and tide in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(5): 15-21. (in Chinese)