

基于水平轴风力机桨叶结冰的振动模态分析

毛君, 符春田, 陈洪月, 于妍鸿

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对水平轴风力机桨叶片, 在结冰条件下进行了三维有限元模态仿真, 并对桨叶片结冰后是否能引起桨叶片结构共振进行分析, 对桨叶片固有频率进行了对比。根据研究内容, 首先确定桨叶片的几何参数, 并通过 Pro/E 软件绘制叶片的三维实体图。主要通过 Fluent 软件对三维桨叶片进行结冰模拟, 之后采用 ANSYS 结构分析软件对结冰后的桨叶片进行仿真, 提出分块法 Block Lanczos 对叶片进行重力预应力模态分析, 应用多体动力学的方法, 材质采用玻璃钢, 确定叶片的各阶模态振型、频率、最大变形量, 得出了叶片的前 10 阶模态数值与分析结果, 并对结果进行了分析比较。结果显示结冰后叶片的主要振动形式为摆振和挥舞, 有较强的抗扭转能力, 设计中应加强叶片的弯曲刚度, 这为风力机叶片的设计和 optimization 提供了参考。

关键词: 风力机桨叶片; 多体动力学; Pro/E 建模; 有限元分析; 模态分析

中图分类号: TK 83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0918-04

Vibration mode analysis of blade based on the wind turbine with horizontal axis under icing conditions

MAO Jun, FU Chun tian, CHEN Hong yue, YU Yar hong

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In this paper, a three dimensional finite element model of the blade of wind turbine with horizontal axis was carried out under the icing conditions. The resonance of impeller blade structure was analyzed under the icing conditions and the natural frequency of blade was compared. According to the research content, the geometric parameters of the impeller blades were determined, and the 3D solid drawing of the blades was performed using the Pro/E software. The Fluent software was used to simulate the icing conditions of three dimensional blade, and the ANSYS structure analysis software was used to simulate the frozen blade. The Lanczos Block was used to perform the analysis of gravitational preload of the blade. The multi body dynamics method was used to determine the vibration type, mode, and maximum displacement of each order of blade. The numerical simulation and analysis results of the first 10 order of blade were obtained and compared. The results showed that the main vibration mode of the blade is shimmy and waving, and the blade has a strong resistance ability to torsion. Therefore, the design of blade should strengthen the bending rigidity, which provides reference for the design and optimization of wind turbine blade.

Key words: wind turbine blade; multi body dynamics; Pro/E modeling; finite element analysis; mode analysis

近年来随着当今社会科学技术的飞速发展, 能源的匮乏, 人们在努力寻找一种可再生、新型环保、绿色洁净的能源, 来替代煤、石油、天然气等传统能源。而风能作为一种绿色、可再生新能源, 被广泛应用于风力机发电等场合。然而, 风能作为一种可再生新型能源, 它是取之不尽用之不竭的能源^[1]。风能是风力发电的主要来源, 而风力机具有建设周期短、装机灵活, 被广泛应用到风力发电等场合^[2]。

但随着当今社会人们对用电量的急需, 越来越多的风力机机组设立在北方较寒冷或高海拔地区, 导致桨叶片经常遇到冰冻雨雪等恶劣天气, 使得叶片表面容易出现雾凇、结晶现象, 导致叶片表面覆盖冰层, 改变叶片的外部形状和气动

特性, 使风力机叶片粗糙度增加, 这不仅增大了叶片的重量, 也影响了翼型的气动效率, 结冰严重处, 将改变桨叶片翼型形状和气动特性, 导致桨叶的升力减小, 阻力增大, 效率降低等缺点。尤其在桨叶片前缘部位结冰较厚, 叶根处结冰厚度较小, 这样影响了全机的可操纵性、稳定性, 严重时可能导致桨叶片折断, 发生意外。这种危害需要停机等待融化, 不仅缩短了风力发电机组的运行时间, 减少了发电量, 也降低了机组的可利用率、缩短了桨叶片的使用寿命。

由于桨叶片是风力机的关键部件之一, 叶片的结构和强度对风力机的可靠性起着重要作用^[3], 所以, 本文针对玻璃钢桨叶片材料进行结构动力学特性分析, 并且在冰冻雨雪天

收稿日期: 2014-11-27 修回日期: 2015-01-30 网络出版时间: 2015-09-24
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2027.005.html>
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAF12B01)
作者简介: 毛君(1960), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士, 主要从事机械动态设计与仿真研究。E-mail: crazy890421@qq.com
通讯作者: 符春田(1988), 男, 辽宁沈阳人, 主要从事机电液一体化研究。E-mail: 15041872886@163.com

气下,对玻璃钢材质外部结冰条件下的结构稳定性、可靠性进行模态分析^[4]。为避免共振对风力机叶片产生的损坏,需对整机叶片进行模态分析,确定叶片的固有频率和振型^[5]。模态分析一般用来确定结构的振动特性^[6],即确定结构的固有频率。工程中,由于风力机在室外受冰冻雨雪、风速、转速不固定影响,所以导致结构破坏的一种重要的原因就是结构共振。风力机叶片在设计过程中^[7],应该要预防这种共振点的发生,就必须要做到结构固有频率远离结构的激振频率。通常采用坎贝尔图估计共振发生的情况,对于风力机系统,尽量提高风力机的固有频率^[8]。

1 风力机桨叶模型的建立

1.1 计算模型的建立

为了正确地评估风力机桨叶对气动性能评测,选取一直径为 17.2 m 的风机叶片作为计算模型,转速为 50.3 r/min,叶轮直径为 17.2 m,叶片型号为 LM8,叶片翼型为 NACA 63-215 系列的翼型^[9],叶尖安装角为 0°,桨叶片各截面的数据,见表 1,风力机叶片叶尖、叶根截面翼型分别见图 1、图 2。

表 1 叶片截面数据

Tab. 1 Cross section data of the blade

半径/m	翼型弦长/m	相对厚度/m	扭转角(°)
1.375	1.070	24.7	14.9
1.800	1.033	22.7	11.6
2.650	0.955	19.5	7.4
3.500	0.876	18.0	4.8
4.350	0.796	17.0	3.1
5.200	0.717	16.0	2.0
6.050	0.638	15.0	1.2
6.900	0.558	14.0	0.7
7.750	0.478	13.0	0.3
8.600	0.400	12.0	0.2

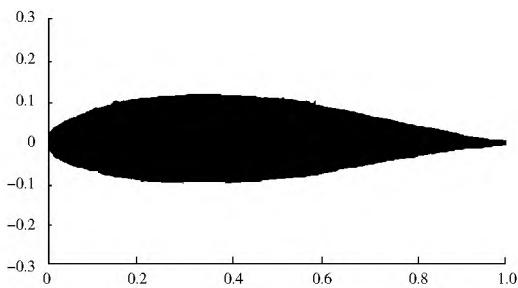


图 1 风力机叶片叶根翼型

Fig. 1 Airfoil of blade toe of wind turbine blade

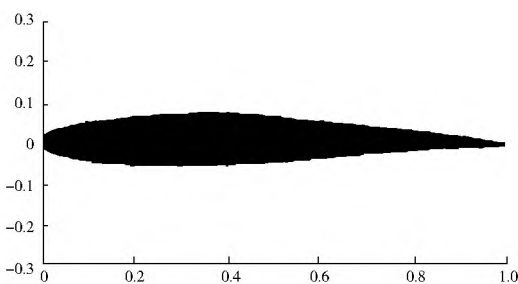


图 2 风力机叶片叶尖翼型

Fig. 2 Airfoil of blade tip of wind turbine blade

1.2 叶片各截面曲线的生成

为了更好地研究风力机叶片受力情况,采用三维实体建模,但是由于风力机叶片截面形状非常复杂,不同位置叶片截面翼型叶素不同,为了简化模型、节省时间只对风轮进行研究,故本文借助 Pro/E 软件进行三维建模。将表 1 各离散点的三维坐标数据保存到文件(.dat),将其导入 Pro/E 软件中进行绘制,并通过“三次 B 样条曲线”命令绘制翼型的每一个断面,见图 3。

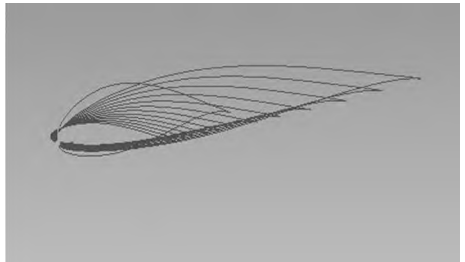


图 3 叶片线性外框轴向视图

Fig. 3 Axial view of linear casing of the blade

1.3 叶片实体模型的生成

绘制叶片实体模型的基本过程为:翼型截面的线框造型、曲面样条曲线造型和实体造型^[10]。首先绘制各截面的曲面,主要利用边界混合的方法生成曲面,结合叶片结构形状及尺寸^[11],在 Pro/E 软件中,分别在翼型的前缘点和后缘点绘制样条曲线,并以曲线作为引导主线,运用扫掠方式生成叶片的实体进行三维建模。单叶片见图 4,使用旋转阵列叶片生成风轮^[12],见图 5。

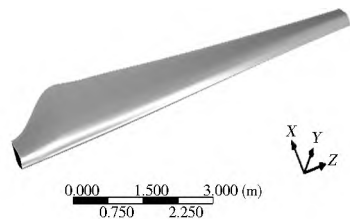


图 4 导入 ANSYS 叶片实体模型

Fig. 4 Entity model of import ANSYS blade

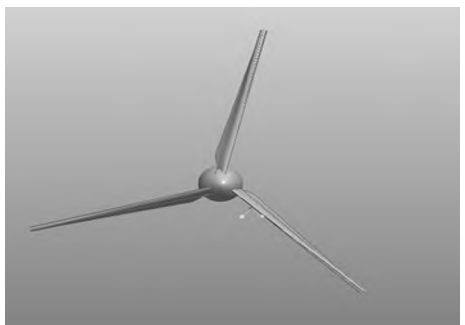


图 5 三维叶片实体图叶

Fig. 5 Three dimensional entity blade

1.4 结冰叶片实体模型的生成

通过应用 Fluent 软件, Eulerian 方程模型,采用气液两相流进行流场的数值模拟计算。来流边界为速度入口,马赫数为 $Ma=0.029$,速度取值定为 10 m/s,环境温度 260 K,

过冷水滴含量 $LWC = 1 \text{ g/m}^3$, 水滴有效直径为 0.02 mm , 冰的密度为 300 kg/m^3 , 攻角 $AOA \ 5^\circ$, 固体壁面采用非滑移条件。假设冰层与翼面间绝热, 流场出口为压力出口, 环境压力采用零, 数值求解 N-S 方程, 湍流模型 SA, 为了减少数值模拟的不稳定性, 采用 QUICK 迎风格式, 其余项采用 Second Order Upwind 二阶精度, 非稳态迭代时间为 60 s。得到叶片前缘结冰图, 见图 6。

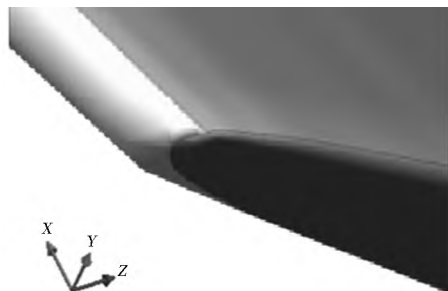


图 6 结冰叶片实体模型

Fig. 6 Entity model of frozen blade

2 桨叶片有限元分析模型

2.1 控制方程

在动力学研究中, 模态分析理论是基础, 它主要用于计算模型固有模态的 2 个基本参数^[13]: 固有频率和固有振型。通用运动方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[]$ 为所有点位移对时间的二阶导数的列向量^[14]; $\{\dot{u}\}$ 为结构整体所有点位移对时间的一阶导数的列向量; $\{u\}$ 为结构整体所有点位移的列向量; $[M]$ 为结构整体的质量矩阵; $[C]$ 为结构整体的阻尼矩阵^[14]; $[K]$ 为结构整体的刚度矩阵; $\{F(t)\}$ 为结构所有整体点的瞬变的节点力列向量。

假定自由振动并忽略阻尼则

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (2)$$

式(2)的解为如下简谐运动

$$\{u\} = \{U\} \sin \omega t \quad (3)$$

式中: $\{U\}$ 为模态形状; ω 为圆的频率^[15], 式(3)代入式(2)得

$$([K] - \omega^2 [M])\{U\} = \{0\} \quad (4)$$

方程(4)中 $\{U\}$ 要有非 0 解, 系数行列式为 0 得:

$$\det([K] - \lambda [M]) = 0 \quad (5)$$

其中, $\lambda = \omega^2$, 上述行列式为多项式, 有根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 。

2.2 叶片网格划分

由于水平轴风力机叶片本身的翼型结构复杂, 尤其开孔后对模型的网格划分^[12] 存在很大困难。本文通过 Workbench 功能软件对网格进行划分, 为节约时间, 采用自由划分来实现对边界形状不规则的物体进行网格划分^[6]。其中无孔叶片的网格为六边形, 网格质量比较好, 其有限元网格模型见图 7。

2.3 施加约束

本文桨叶片材料采用玻璃钢材, 因为玻璃钢具有翼型成形性较好、抗疲劳性较强、耐腐蚀性较好等特点, 并且能达到最佳的气动效应, 所以被广泛应用到风力机桨叶片中。在

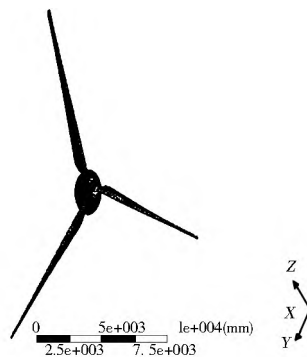


图 7 风轮整机网格

Fig. 7 Rotor machine mesh

ANSYS 软件中, 设置叶片的力学性能参数, 玻璃钢的力学性能参数^[10] 为, 桨叶片密度 $\rho = 1.7 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 纤维含量 50%, 屈服强度 $\sigma_{yt} = 139.7 \text{ MPa}$, 展向弹性模量 $E_1 = 25.5 \text{ GPa}$, 径向弹性模量 $E_2 = 11.8 \text{ GPa}$, 剪切模量 $G = 2.84 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.2$ 。

风力机桨叶片所受到的力包括空气动力, 叶片离心力和重力, 空气动力使弯曲, 产生扭转力; 叶片的离心力使其受到拉伸^[16]; 重力使叶片受到拉压、弯曲和扭转。选择约束条件, 把相应的约束进行简化, 对于整个根端截面采用完全约束。叶片与轮毂相连的根端截面上所有点不能沿 X、Y、Z 方向移动和转动。同样, 载荷的施加根据具体情况, 对约束进行相应的调整。为了简化计算, 将作用在叶片的气动力载荷以均布形式施加在迎风面的叶片上, 离心力载荷和重力载荷则直接加在叶片上。

3 有限元模态分析结果

根据玻璃钢的材料属性, 对桨叶片进行有限元分析, 得到整机叶片的前 10 阶模态频率, 见表 2。

表 2 风轮前 10 阶固有频率

Tab. 2 The first 10-order natural frequency of the wind wheel

模态数	1	2	3	4	5
频率/Hz	2.0169	2.0195	2.0232	6.4525	6.5643
模态数	6	7	8	9	10
频率/Hz	6.9867	12.4703	12.9842	16.1843	22.8342

图 8 为 4 个重要模态振型云图。

从图 8 可以看出, 第 1 阶振动形式主要是挥舞, 第 4 阶到第 8 阶振动形式主要是摆振、挥舞的结合, 从第 10 阶开始, 主要振动形式为叶片扭转、挥舞、摆振共同作用下的结果。所以叶片在较高频率情况下的振动形式变得复杂, 从而可以得出叶片的主要振动形式为挥舞和摆振, 有较强的抗扭转能力。

同时可观察到叶片振动各阶模态振型位移云图中, 在 Y 轴方向上的位移为 X、Y、Z 三方向中的最大。即叶片挥舞情况最严重, 因此在设计叶片时应重点加强叶片在挥舞方向上的弯曲刚度。

根据经验公式 $f = \frac{\omega}{2\pi} \times N$ 可知 (N 为叶片个数), 频率满足 $(f_1 - f) / f \geq 10\%$ 才能不引起共振, 而当 $(f_1 - f) / f \leq$

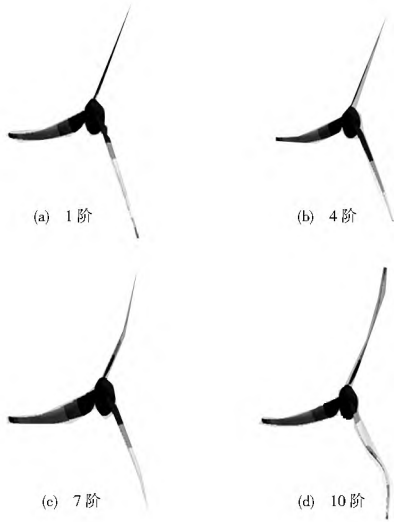


图 8 四阶重要模态振型云图

Fig. 8 Four important vibration modes

10% 时, 叶片在发电的激励下是产生共振的, 而共振对叶片的结构破坏特别大, 经过查文献得知^[17], 理论频率与计算频率在误差 10% 范围之内, 是合理的, 不会发生共振。

4 结论

(1) 通过 Fluent 软件对桨叶片数值模拟发现, 结冰位置主要发生在翼型前缘部位, 并且受攻角影响。

(2) 桨叶片振动阶次越高, 频率越大。并且桨叶片在较高振动频率的情况下, 振动形式变得相对复杂。但是, 从桨叶片的振动形式, 可以得出叶片的主要振动形式为挥舞和摆振, 但也要求桨叶片有较强的抗扭转能力。

(3) 桨叶片的材质是玻璃钢/复合材料, 其力学性质是各向异性的, 在结冰条件下, 风力机转速越大, 惯性力对刚度的影响也相应增大, 导致桨叶片固有频率的也增加越多, 对桨叶片挥舞振动频率的影响大于对摆振频率的影响。

本文以 30 kW 风力机叶片为对象对小型风力机叶片三维快速建模进行了研究, 对整机叶片在结冰条件下的振动模态进行分析, 设计中应加强叶片的弯曲刚度, 这为中小型风力机叶片的设计和优化提供参考。

参考文献(References):

[1] 李振邦. 展望 21 世纪风能的利用与发展[J]. 运筹与管理, 2002(06): 124-129. (LI Zhen bang . The use of wind energy in 21st century and development[J]. Journal of management and administration, 2002(06): 124-129. (in Chinese))

[2] 张希良. 风能开发利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (ZHANG Xi liang. The development and utilization of wind energy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))

[3] 李海波. 风力机桨叶机械动力学特性实验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012. (LI Hai bo. Wind turbine blade mechanical dynamics experiment research[D]. Changsha: Changsha university of science and technology, 2012. (in Chinese))

[4] 王起达. 结冰后飞机的纵向稳定性和操纵性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009. WANG Qi da. Freezes the aircraft's longitudinal stability and maneuverability research[D]. Nanjing: Nan

jing university of aeronautics and astronautics, 2009. (in Chinese))

[5] 高伟, 李春, 武玉龙, 等. 叶尖小翼对腹板中空型风力机叶片模态特性的影响[J]. 现代制造工程, 2013(9): 17-21. (GAO Wei, LI Chun, WU Yu long, et al. Tip winglet on web type hollow modal characteristics of wind turbine blades[J]. Modern manufacturing engineering, 2013(9): 17-21. (in Chinese))

[6] 张晓峰, 王建东, 刘赟. 基于 ANSYS Workbench 的大型风电机组塔架模态分析[J]. 风能, 2013(10): 76-80. (ZHANG Xiaofeng, WANG Jiandong, LIU Yun. Large wind turbine tower based on ANSYS Workbench modal analysis[J]. Journal of wind, 2013(10): 76-80. (in Chinese))

[7] 王小虎. 水平轴风力机气动阻尼特性分析与优化设计[D]. 汕头: 汕头大学, 2010. (WANG Xiaohu. Horizontal axis wind turbine aerodynamic damping characteristics analysis and optimization design[D]. Shantou: Shantou big science, 2010. (in Chinese))

[8] 吴寅广. 大型水平轴风力机刚柔耦合结构动力特性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013. (WU Yirguang. Large horizontal axis wind turbine coupled structure dynamic characteristics analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou university of technology, 2013. (in Chinese))

[9] 田德, 刁明光, 王海宽. 浓缩风能型风力发电机三与四叶片叶轮的风洞实验研究[J]. 太阳能学报, 2007(1): 74-80. (TIAN De, DIAO Mingguang, WANG Haikuan. Enrichment type wind turbines three and four impeller blades of wind tunnel experiment research[J]. Journal of Solar Energy, 2007(1): 74-80. (in Chinese))

[10] 李滨, 王欣. 3kW 风力机叶片三维设计[J]. 林业机械与木工设备, 2010(8): 33-35. (LI Bin, WANG Xin. 3 kW wind turbine blade 3 D design[J]. Journal of Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2010(8): 33-35. (in Chinese))

[11] 张慧珍. 1.5MW 水平轴风力机叶片结构性能分析[D]. 成都: 西华大学, 2011. (ZHANG Hui zhen. 1.5 MW horizontal axis wind turbine blade structure performance analysis[D]. Chengdu: Xihua University, 2011. (in Chinese))

[12] 李国宁, 杨福增, 杜白石, 等. 基于 MATLAB 与 Pro/E 的风力机风轮设计及造型[J]. 机械设计, 2009(6): 3-7. (LI Guoning, YANG Fuzeng, DU Baishi, et al. Based on MATLAB and Pro/E wind turbine rotor design and modeling[J]. Journal of mechanical design, 2009(6): 3-7. (in Chinese))

[13] 梁军华. 基于 ANSYS Workbench 的炮口制退器模态分析[J]. 机械设计与自动化, 2010(4): 80-81, 84. (LIANG Junhua. The muzzle is made based on ANSYS Workbench machine modal analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2010(4): 80-81, 84. (in Chinese))

[14] 赵明安, 孙大刚, 张海龙, 等. 大型风力机叶片三维建模及模态分析[J]. 太原科技大学学报, 2012(3): 190-193. (ZHAO Ming an, SUN Daga ng, ZHANG Hai long, et al. Large wind turbine blade 3 d modeling and modal analysis[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2012(3): 190-193. (in Chinese))

[15] 苑静. 用 matlab 实现行列式和矩阵基本计算[J]. 科技风, 2014(6): 6-8. (YUAN Jing. Matlab basic determinant and matrix calculation[J]. Science and Technology is not the Wind, 2014(6): 6-8. (in Chinese))

[16] 王萌. 大型水平轴风力机叶片载荷计算与疲劳分析[D]. 新疆: 新疆大学, 2013. (WANG Meng. Large horizontal axis wind turbine blade load calculation and fatigue analysis[D]. Xinjiang: Xinjiang big science, 2013. (in Chinese))

[17] LM Glasfiber A/S Company. Rotor blades for wind turbines > 150 kw stall control constant or variable speed[R]. Denmark: Rolles M bolevj 1 DK-6400, 1999.