

大型水平轴风力机叶片气动弹性计算*

唐迪, 陆志良, 郭同庆

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘要: 给出了一种考虑几何非线性的大型风力机静、气动弹性一体化计算方法.采用涡尾迹方法进行风力机气动载荷计算.建立风力机风轮的三维壳模型.沿周向平均风力机叶片载荷并加载到结构模型进行非线性静气动弹性分析.基于动力学小扰动假设,在静平衡构型下进行动力学线性化,计算风轮固有振动特性.继而结合非定常涡尾迹方法计算风力机气动弹性响应.计算了NH 1500叶片考虑几何非线性的静气动弹性位移和气动弹性响应.结果表明,大型风力机叶片几何非线性较为明显地减小静气动弹性位移,同时降低气动弹性的响应幅值.大型风力机气动弹性响应计算需要考虑几何非线性.

关键词: 风力机; 气动弹性; 几何非线性; 涡尾迹方法

中图分类号: O355 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.009

引 言

大型风力机叶片展长大、弦长小,一般近似为梁模型^[1-2].然而,现代大型风力机叶片一般为复合材料构成的复杂薄壁结构,使用简化梁模型已经难以满足精度要求^[3].采用复合材料的三维有限元壳模型已经逐渐被用于进行大型风力机叶片的建模^[4].在气动力方面,动量叶素理论已广泛用于计算风力机的总体气动性能计算,但其没有考虑到风力机尾迹涡的相互干扰,难以精确计算出风力机非定常载荷.直接求解 Navier-Stokes/Euler 方程的 CFD (computational fluid dynamics) 方法可以更精确地计算出风力机非定常载荷,但由于其极大的计算量,紊流模型选取等尚不能实现风力机气动力的日常计算.预定涡尾迹方法,可以在给出较为精确的气动力同时计算量也不会明显增加^[5],适合于风力机气动弹性计算.风力机气动弹性涉及风力机空气动力学、结构动力学耦合计算.由于动量叶素理论计算量小,梁模型计算简单,基于动量叶素理论、梁模型耦合计算方法可以实现风力机气动弹性的快速计算,因而已被普遍采用^[6-8].然而动量叶素理论、梁模型过于简化,影响了叶片气动力和力学性能计算的精度^[9].基于 CFD/CSD (computational structure dynamics) 可以精确地计算风力机非定常气动力和风力机叶片的力学性能,可以用作风力机静气动弹性计算^[4].大型风力机结构复杂,准确分析叶片的性能需要大

* 收稿日期: 2013-04-23; 修订日期: 2013-09-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB046200);国家自然科学基金资助项目(11372135);江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 唐迪(1986—),男,江苏宿迁人,博士生(E-mail: tangdisg@163.com);

陆志良(1963—),男,教授,博士(通讯作者.Tel: +86-25-84892680; E-mail: luzl@nuaa.edu.cn).

量的气动网格和结构单元^[10].如果直接采用大型风力机有限元模型进行气动弹性分析,耗时巨大,在气动弹性计算中其庞大的计算量难以接受.

本文采用复合材料的三维有限元壳模型结合涡尾迹方法进行大型风力机非线性静气动弹性分析计算.在风力机平均静气动弹性位置,对动力学方程进行线性化,分析考虑几何非线性的模态.通过扣除风力机位移和载荷,在静气动弹性位置进行气动弹性分析计算.

1 预定涡尾迹方法^[5]

预定涡尾迹方法采用尾迹描述函数确定风力机的尾迹形状,在每根尾迹线上布置一定强度的涡,用于计算对叶片的诱导作用.叠加来流速度和诱导速度,采用 Beddoes-Leishman 模型计算叶片的非定常气动力.

1.1 叶片模型

为了得到沿展向分布的气动力,如图 1 所示,将叶片划分为 N 个叶素,在每个叶素展向中心、弦向四分之一弦线处布置控制点,叶素两端布置边界点.在每个边界点处拖出边界涡.在控制点和边界点计算得到的诱导速度分别用来确定叶片上的载荷和尾迹形状.

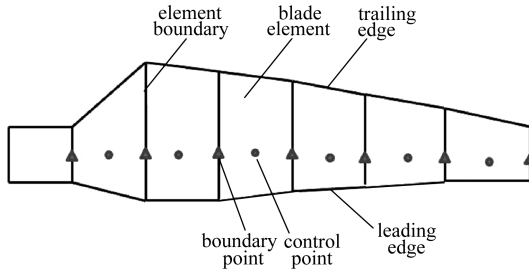


图 1 叶素模型

Fig.1 Blade element model

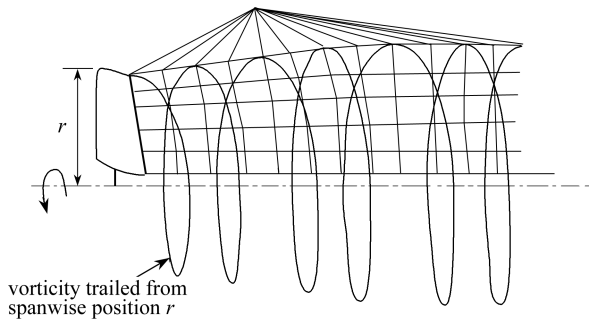


图 2 尾迹模型

Fig.2 Wake model

1.2 尾迹模型

当气流经过风轮时,风力机从中吸取能量,导致其轴向速度减少.随着气流继续向下游流动其轴向速度逐渐恢复.因此将风力机尾流分为近尾迹区和远尾迹区,其中尾迹形状主要在近尾迹区变化,远尾迹气流接近稳态尾迹形状基本不变.分别采用轴向尾迹形状函数、径向尾迹形状函数描述尾迹的形状.沿着周向将风轮一圈等分 N 份,每个叶素点处拖出一根涡线,形成风力机尾迹涡,如图 2 所示.每根涡线分布强度为 Γ 的涡,根据 Biot-Savart 定理计算出每个叶素处的诱导速度进而计算出叶片的气动力系数.

1.3 非定常气动力和动态失速模型

湍流风、偏航、风剪切等使得每个翼型剖面的迎角时刻变化,同时由于叶片的弹性振动,叶片的振动速度时刻改变翼型的有效迎角和速度^[11].因而,准确计算翼型的非定常气动特性是精确模拟风力机响应的前提.本文采用 Beddoes-Leishman 模型计算水平轴风力机的非定常气动力.Beddoes-Leishman 可以分为附着流模拟、分离流模拟以及动态失速 3 个部分.附着流模拟采用阶跃响应方法来模拟翼型的附着流动,其可以分为环量项和非环量项,而分离流模拟主要考虑翼型的后缘分离.翼型的后缘分离会导致有关的环量损失,引起升力、阻力以及俯仰力矩呈现非线性特征.同时,在非定常条件下,后缘压力与法向力系数存在延时.采用 Kirchhoff 理论模拟的静态分离,一阶滞后模拟动态分离效应.动态失速发生时,通常出现前缘涡并向下游流动.通过前缘失速的判定,计算动态失速涡诱导产生的气动力和力矩.

2 结构分析

2.1 有限元法和几何非线性

柔性较大的大型风力机叶片在受载后产生有限弯曲变形和扭转变形.此时认为结构材料特性仍然在线性范围内,但是小变形假设不再满足,产生几何非线性弹性力学方程^[12].依据弹性理论,Green 应变与位移的关系为

$$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}), \quad (1)$$

其中, $u_{i,j}$ 为位移 u_i 对 x_j 的偏导数, Kirchhoff 应力-应变关系 $\sigma_{kl} = D_{kl ij} \varepsilon_{ij}$. 采用更新 Lagrange 方法求解增量有限元方程,将 Green 应变分为线性部分和非线性部分 $\varepsilon_{ij} = e_{ij} + \eta_{ij}$, Kirchhoff 应变分解成增量形式, $\sigma_{ij}^{t+\Delta t} = \sigma_{ij}^t + \sigma_{ij}^{\Delta t}$, 其中 σ_{ij}^t 为 t 时刻的平衡应力, $\sigma_{ij}^{\Delta t}$ 为相应的应力增量. 则 $t + \Delta t$ 时刻的积分方程为

$$\int_v \sigma_{ij}^t \delta e_{ij}^t dv + \int_v \sigma_{ij}^{\Delta t} \delta \eta_{ij}^t dv = Q^{t+\Delta t} - \int_v \sigma_{ij}^{\Delta t} \delta e_{ij}^t dv, \quad (2)$$

其中 $Q^{t+\Delta t}$ 为外载荷. 引入形函数, 则应变与节点位移可以表示为

$$e = B_L u, \quad \eta = B_{NL} u. \quad (3)$$

代入方程(2), 得到相应的动力学方程

$$M \ddot{u} + (K_L + K_{NL}) u = Q - F, \quad (4)$$

其中, $F = \int_v \sigma_{ij}^{\Delta t} \delta e_{ij}^t dv$, K_L 是线性刚度矩阵, K_{NL} 为几何非线性引起的非线性刚度矩阵.

2.2 动力学方程线性化

大型风力机结构复杂, 如果直接求解有限元形式动力学方程计算耗时巨大, 因而一般采用模态法将动力学方程投影到模态空间进行求解. 同时, 由于叶片柔性很大, 受载后产生较大静位移. 直接采用模态法产生模态截断误差, 难以精确计算出位移以及叶片的力学性能. 本文采用动力学线性化方法^[12], 将动力学方程分为平均静力学求解和在平均静平衡位置的 dynamics 求解. 通过对方程线性化可以准确地计算出在平均静变形附近的动力学响应.

将随时间变化的外载荷 Q 分解为平均静态载荷 Q_s 和动态载荷 Q_d , 由外载荷引起的非线性位移 u 分解为静态大变形位移 u_s 和在静态大变形位移附近的振动位移 u_d

$$Q = Q_s + Q_d, \quad (5)$$

$$u = u_s + u_d. \quad (6)$$

式(5)、(6)代入式(4), 并扣除静平衡条件, 得到风力机系统在静平衡位置附近动态载荷作用

下的系统振动方程:

$$\mathbf{M}_T \ddot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{K}_T \mathbf{u}_d = \mathbf{Q}_d, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{M}_T, \mathbf{K}_T$ 分别为在静平衡位的切线质量矩阵和切线刚度矩阵. 对上述方程线性化, 求解各阶固有振动频率和阵型.

3 气动弹性计算

3.1 静气动弹性计算

叶片运行时受到空气动力的作用产生扭转变形, 扭转变形改变叶片的扭转角反作用于空气动力的作用, 因此风力机静气动弹性是空气动力与弹性力相互作用的结果. 本文通过插值方法完成叶片结构、气动之间的数据传递. 气动力计算得到风力机叶片沿着周向的载荷, 对其进行周向平均得到平均静态载荷. 采用 Nastran 软件, 利用多点约束 (multipoint constraint, MPC) 将叶片载荷作用到结构模型上, 计算出变形后的扭角分布. 提取叶片因弹性变形引起的桨距角变化并反馈到气动力计算中, 继而计算叶片扭转后的气动载荷. 交替计算气动力、弹性位移, 直到气动力和结构变形同时收敛, 实现非线性静气动弹性计算.

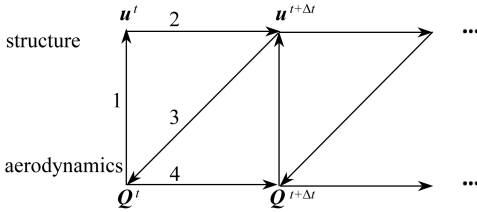


图3 气动弹性耦合计算方法
Fig.3 Aeroelastic coupling method

3.2 动气动弹性计算

在静气动弹性位置对其进行动力学线性化, 通过 Nastran 求解各阶固有振动模式和阵型. 扣除平均静态载荷和平均位移, 采用如图3所示的松耦合方法计算风力机气动弹性响应^[13]; 在每一个时间步内计算出气动力加载到结构模型并计算出结构响应, 结构振动速度反馈到涡尾迹非定常气动力计算中进行下一步非定常气动力计算.

4 数值算例及讨论

算例对象为 NH 1500 大型风力机叶片^[14], 风轮直径 83 m, 单个叶片长度 40.5 m, 重量 5 600 kg. 采用的三维壳模型进行结构建模, 如图4所示, 轮毂简化为梁模型连结3个叶片, 整个风轮单元数约11万. 每个叶片剖面的气动力, 通过 MPC 加载到结构模型上, 如图5. 计算状态为 11.0 m/s 稳态风、叶片桨距角 0°.



图4 风轮结构模型

Fig.4 Structural model of a rotor

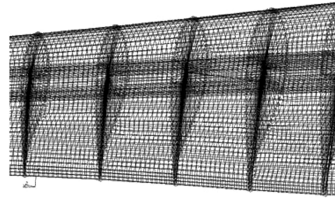


图5 MPC 施加载荷

Fig.5 Loads applied with MPC methods

图6给出了0°偏航气动力收敛后的叶片挥舞方向力系数 F_n 沿着叶片展向 r 的分布, 与 GH Bladed 软件的计算结果相近, 验证了本次结果的准确性.

本文计算了考虑几何非线性和不考虑几何非线性, 0°偏航的静气动弹性位移. 图7给出了两种情况下的叶片挥舞方向的静气动弹性位移 h 沿着叶片展向 r 的分布. 由图中所示, 考虑几

何非线性的叶尖位移为线性求解器所得结果的 79.1%。这是因为叶片变形很大,几何非线性比较明显。

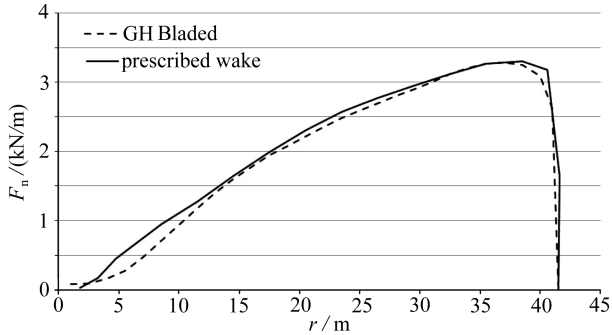


图6 法向力系数

Fig.6 Out of plane aerodynamic loading

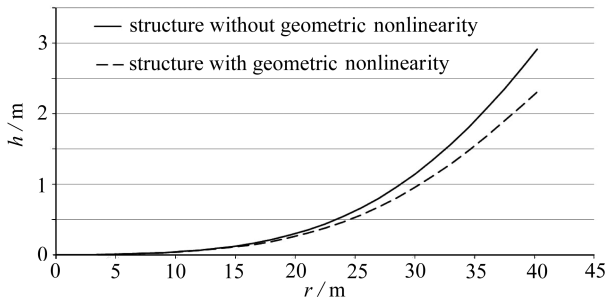


图7 叶片挥舞方向变形

Fig.7 The flapwise displacement of the blade

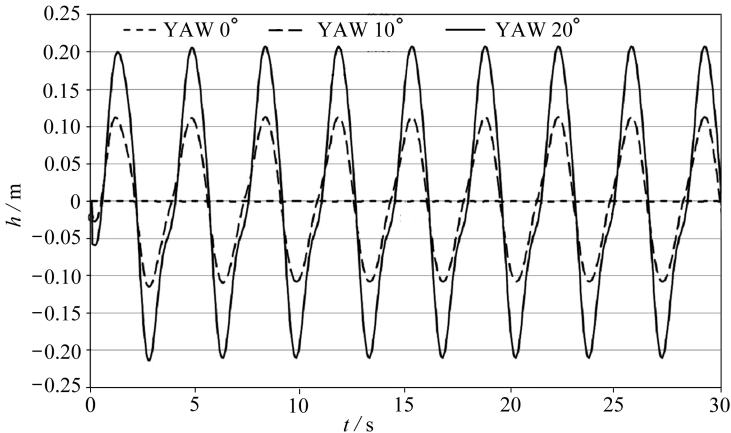


图8 不考虑几何非线性叶尖位移响应

Fig.8 The flapwise displacement response at the blade tip without geometrical nonlinearity

采用 3.2 节计算方法,计算了 0° 、 10° 、 20° 偏航状态下的动气动弹性响应。图 8、图 9 分别给出了叶尖处不考虑和考虑几何非线性的动气动弹性响应 h 随着时间 t 的变化曲线。从图 8、图 9 分别可以看出,在线性、非线性情况下 0° 偏航为定常载荷,而随着偏航角增加,载荷幅值增加,计算得到的响应也增加。对比图 8、图 9,可以看出考虑几何非线性的振动幅值比线性情况的振幅小, 10° 、 20° 偏航角下考虑几何非线性的振幅为不考虑几何非线性的 61%~65%。

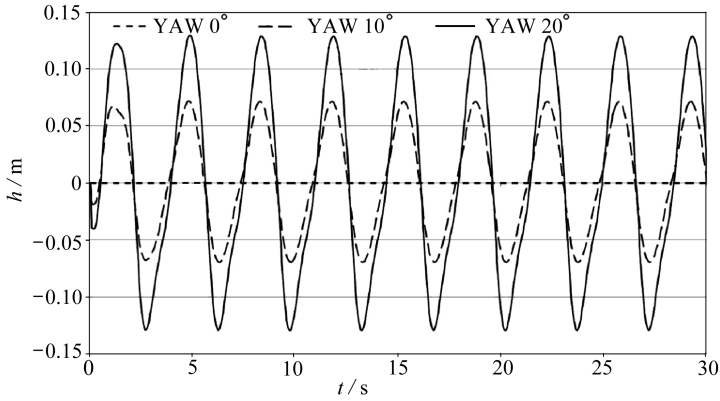


图9 考虑几何非线性叶尖位移响应

Fig.9 The flapwise displacement response at the blade tip with geometrical nonlinearity

5 结 论

本文给出了一种适合大型风力机快速计算的静、气动弹性一体化求解方法,并计算分析了几何非线性对NH 1500叶片静、气动弹性的影响.计算结果显示几何非线性明显地减少了静气动弹性的平均变形量以及气动弹性的响应幅值.在大型风力机静、气动弹计算中需要考虑几何非线性.

参考文献(References):

- [1] Larsen J W, Nielsen S R K. Non-linear dynamics of wind turbine wings[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2006, **41**(5): 629-643.
- [2] Younsi R, El-Batany I, Tritsch J, Naji H, Landjerit B. Dynamic study of a wind turbine blade with horizontal axis[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2001, **20**(2): 241-252.
- [3] YIN Jiang-cong, XIE Yu, CHEN Pu. Modal analysis comparison of beam and shell models for composite blades [C]//*Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Wuhan, China, 2009: 1-4.
- [4] 刘伟,尹家聪,陈璞,苏先越.大型风力机复合材料叶片动态特性及气弹稳定性分析[J].空气动力学学报,2011,**29**(3):391-395.(LIU Wei, YIN Jia-cong, CHEN Pu, SU Xian-yue. Dynamic analysis and aeroelastic stability analysis of large composite wind turbine blades[J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2011, **29**(3): 391-395.(in Chinese))
- [5] Coton F N, Wang T. The prediction of horizontal axis wind turbine performance in yawed flow using an unsteady prescribed wake model[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 1999, **213**(1): 33-43.
- [6] 陈佳慧,王同光.考虑气动弹性的风力机叶片性能分析[J].空气动力学学报,2011,**29**(3):396-400.(CHEN Jia-hui, WANG Tong-guang. Wind turbine performance analysis with aeroelastic effect[J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2011, **29**(3): 396-400.(in Chinese))
- [7] Dumitrache A, Dumitrescu H. An aeroelastic model for horizontal axis wind turbines [C]//*Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM*. Kos, Greece, 2012, **1479**: 1639-1642.
- [8] Cárdenasa D, Elizalde H, Marzocca P, Gallegos S, Probst O. A coupled aeroelastic damage

- progression model for wind turbine blades[J]. *Composite Structures*, 2012, **94**(10): 3072-3081.
- [9] Hansen A C, Butterfield C P. Aerodynamics of horizontal axis wind turbines[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1993, **25**: 115-149.
- [10] GUO Tong-qing, LU Zhi-liang, TANG Di, WANG Tong-guang, DONG Lu. A CFD/CSD model for aeroelastic calculations of large-scale wind turbines[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, **56**(1): 205-211.
- [11] 唐迪, 陆志良. 基于涡尾迹方法的风力机响应计算[J]. 空气动力学学报, 2011, **29**(5): 669-673. (TANG Di, LU Zhi-liang. Wind turbine aerodynamic load and response prediction based on vortex wake method[J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2011, **29**(5): 669-673. (in Chinese))
- [12] XIE Chang-chuan, YANG Chao. Linearization method of nonlinear aeroelastic stability for complete aircraft with high-aspect-ratio wings [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, **54**(2): 403-411.
- [13] Piperno S, Farhat C, Larrouturou B. Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems—part I: model problem, theory and two-dimensional application [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, **124**(1/2): 79-112.
- [14] WANG Tong-guang, WANG Long, ZHONG Wei, XU Bo-feng, CHEN Li. Large-scale wind turbine blade design and aerodynamic analysis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(5): 466-472.

Aeroelastic Analysis of Large Horizontal Axis Wind Turbine Blades

TANG Di, LU Zhi-liang, GUO Tong-qing

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, P.R.China)

Abstract: A nonlinear aeroelastic analysis method for large horizontal axis wind turbines was presented. A vortex wake method and a nonlinear finite element method were coupled to realize the approach. The vortex wake method was used to predict the wind turbine aerodynamic loads and the rotor model was built with 3D shell elements. The averaged aerodynamic forces along the azimuth angle were applied to the structure model and the nonlinear static aeroelasticity was computed. The wind rotor modalities were obtained in the static aeroelastic configuration through linearization of the coupled equations. The static aeroelasticity and dynamic aeroelasticity were calculated for the NH 1500 wind turbine. Results show that the structural geometrical nonlinearities will significantly reduce the displacements and vibration amplitudes of the wind turbine blades. The structural geometrical nonlinearities are non-negligible for both the static aeroelasticity and dynamic aeroelasticity.

Key words: wind turbine; aeroelasticity; geometric nonlinearity; vortex wake method

Foundation item: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2014CB046200); The National Natural Science Foundation of China (11372135)