

文章编号:0258-1825(2011)05-0669-05

基于涡尾迹方法的风力机载荷与响应计算

唐迪, 陆志良, 王同光, 吴永健

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:采用涡尾迹方法计算准定常气动性能, 结合 Leishman-Beddoes 动态失速模型计算叶片的非定常气动力。应用有限元分析软件, 分析风力机在不同转速下的风轮模态, 塔架的前后、左右振动模态。基于非定常气动力和结构振动模态, 针对风力机风轮, 建立其结构运动方程。求解出的叶片振动速度加入到非定常气动力的计算中, 从而建立了考虑叶片振动的风力机载荷、响应计算模型。分析了 Phase VI 叶片和某 1.5MW 风力机各个叶片截面的气动力、振动位移和振动速度随时间的响应曲线, 表明该方法能够较好地计算出风力机的气动性能、载荷和响应。

关键词:风力机; 预定涡尾迹方法; 动态失速; 模态

中图分类号:TK83

文献标识码:A

0 引言

风剪切、大气湍流、偏航等都会使得风力机叶片在运行过程中受到非定常气动力。研究结果表明^[1-2], 在偏航情况下会存在迟滞环甚至动态失速现象。另一方面, 随着风力机的不断大型化, 风力机叶片表现出大柔性的特点, 使得气动弹性的影响越来越明显。这些都为风力机运行过程中的气动力的准确计算提出挑战。目前工程上常用的风力机载荷计算软件如 Bladed 等均使用动量叶素理论方法。动量叶素理论以及其修正模型计算量小, 可以较好地计算风力机总体性能, 从而被用在日常计算中。但它没有直接考虑风力机尾迹对叶片的影响, 较难精确地计算出随时间变化的载荷^[3]。随着计算机技术和计算方法的发展, 数值求解 Navier-Stokes/Euler 方程的 CFD 方法越来越多地应用于风力机气动研究, 但是由于其计算量大, 紊流模型选取复杂, 尚不能作为风力机设计和性能计算的日常工具^[4]。本文的气动力采用改进的预定涡尾迹方法, 相对动量叶素理论能够更准确地计算出叶片随时间变化的气动性能, 同时计算量也比 CFD 方法小很多。在结构方面, 必须考虑由风轮转动带来的动力刚度效应, 同时要考虑叶片、轮毂耦合带来的影响^[5-6]; 塔架很高, 振动的固有频率较低, 须要考虑塔架振动对风轮的影响。

本文采用涡尾迹方法计算准定常气动性能, 结合 Leishman-Beddoes 模型计算叶片的非定常气动力。为了分析风力机气动载荷与响应, 建立了风轮和塔架的复杂有限元模型, 分析了由于塔架振动和风轮转动的风轮模态。在风轮坐标系下将气动力模型和复杂的结构有限元模型进行耦合, 求解结构运动方程, 计算气动载荷和响应, 分析了风力机各个叶片截面的气动力、振动位移和振动速度随时间响应的特性。

1 气动力模型

本文的气动力采用预定涡尾迹方法^[3], 这里主要介绍在该方法上加入叶片振动速度和在载荷计算上对该方法的改进。对于弹性叶片, 由于叶片振动会对叶片截面的迎角和来流速度有影响。用预定涡尾迹方法计算叶片准定常处的入流角 ϕ 和入流速度 $V_{\text{inflow}} = (\overline{V_{r1}}, \overline{V_{\psi1}}, \overline{V_{z1}})$, 作为必须的参数输入 Lishman-Beddoes 模型^[7-8]。本文加入叶片振动对入流速度和有效迎角的影响:

$$\begin{aligned} W &= V_{\text{inflow}} - (\overline{V_{r2}}, \overline{V_{\psi2}}, \overline{V_{z2}}) \\ \phi &= \arctan \frac{\overline{V_{\psi1}} - \overline{V_{\psi2}}}{\overline{V_{z1}} - \overline{V_{z2}}} \\ \alpha &= \phi - \theta_{\text{pitch}} - \theta_{\text{vib}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $(\overline{V_{r2}}, \overline{V_{\psi2}}, \overline{V_{z2}})$ 为叶片振动速度, ϕ 为入流角, θ_{pitch} 、

* 收稿日期:2010-04-25; 修订日期:2011-06-05

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划项目(2007CB714600); 江苏省创新学者攀登项目(BK2008044)

作者简介:唐迪(1986-), 男, 江苏宿迁人, 博士研究生, 主要从事风力机气动弹性研究. E-mail: tangdisg@163.com

θ_{rib} 分别为叶片桨距角和振动的扭转角。

在预定涡尾迹计算尾迹形状和涡量,并结合 Leishman-Beddoes 模型计算出气动力系数后,用该计算的气动力系数重新计算涡量和诱导速度,进而计算出改进后的非定常气动载荷。

2 结构模型

与涡尾迹相对应的叶片结构模型为一维梁模型,本文将叶片简化为梁,根据叶片的线刚度、线质量以及轮毂、塔架结构分布建立有限元模型。表1分析了某1.5 MW 风力机在 17.22rpm 下的风轮模态^[5-6],图1为风力机模态振型图。

表1 风力机模态分析

Table 1 Modal analysis of wind turbine

挥舞一阶	反对称振型	0.90851 Hz
	反对称振型	0.90851 Hz
	对称振型	0.90851 Hz
挥舞二阶	反对称振型	2.3845 Hz
	反对称振型	2.3845 Hz
	对称振型	2.3853 Hz
摆振一阶	反对称振型	1.3777 Hz
	反对称振型	1.3777 Hz
	对称振型	1.3693 Hz
摆振二阶	反对称振型	4.302 Hz
	反对称振型	4.302 Hz
	对称振型	4.2778 Hz
塔架一阶	前后振型	4.302 Hz
	左右振型	4.302 Hz

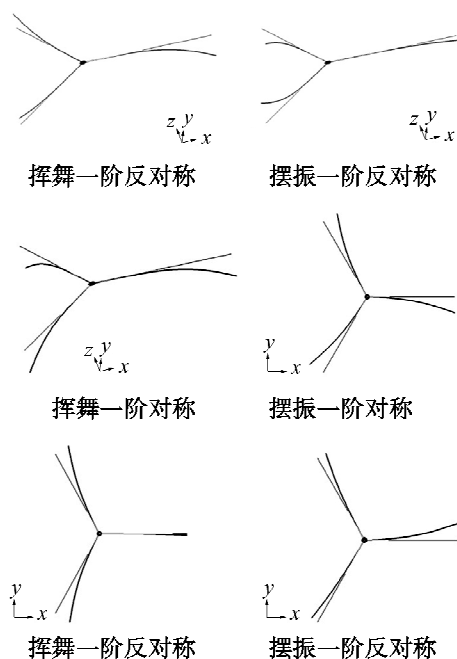


图1 风力机模态振型图

Fig.1 Modal shape of wind turbine

3 气动结构耦合模型

正常发电状态下,大型风力机的转速一般在 20rpm 左右,属于低转速范围。本文将风轮所在的坐标系近似为惯性坐标系,叶片主要承受离心力、重力,以及气动力。在模态坐标系下,建立其结构运动方程:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{A\} \quad (2)$$

其中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $[A]$ 分别为广义质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和广义气动力矩阵。为了方便求解第 $N+1$ 步叶片振动速度,引入状态变量 $\{q\} = [\{x\}^T, \{\dot{x}\}^T]^T$,将方程变为一阶常微分方程组:

$$\begin{aligned} \dot{\{q\}} = & \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{q\} + \\ & \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1} \end{bmatrix} \{A\} \end{aligned} \quad (3)$$

采用四步 Runge-Kutta 方法求解结构运动方程组。

由风轮的第 N 时间步的气动载荷、状态变量 $\{q_n\}$ 计算出第 $N+1$ 步的状态变量 $\{q_{n+1}\}$,进而求得第 $N+1$ 步风轮的位移、速度和加速度。将叶片振动速度通过公式(1)加入叶片的入流速度和有效迎角,计算出第 $N+1$ 步的气动力。循环上述步骤直至计算结束。

图2显示了气弹耦合计算过程。

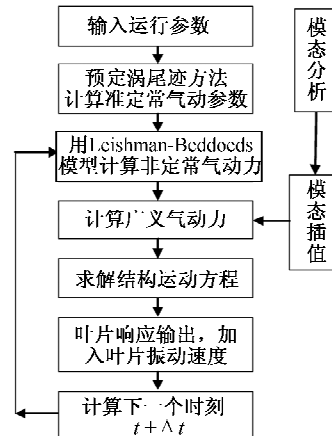


图2 计算流程图

Fig.2 Flow chart of calculating

4 算例与分析

首先,对美国可再生能源国家实验室(NREL)第六期(Phase VI)非定常空气动力学实验^[9]的风力机进行计算,并与实验结果作比较。本文分别对比了 Phase VI 叶片在来流速度为 10m/s、13m/s、15m/s,偏航角为 0°、10°、30°的径向位置分别为 30%、47%、63%、80%、95% 截面的法向力系数,均和实验结果能够较好地符合;并计算了叶尖随时间的响应曲线。图 3~图 7 给出了来流速度为 10m/s、30°偏航下,考虑叶片振动速度和不考虑叶片振动速度时计算结果以及实验值之间的比较,并给出了叶尖的响应曲线。

由图 3 可以看出法向力系数和实验的结果基本吻合。而从图 4~图 7 叶片在转一圈过程中作微幅振动。挥舞振动的激励主要来自方位角不同的气动力,而摆振振动的激励主要来自叶片自身重力与切向力。考虑和

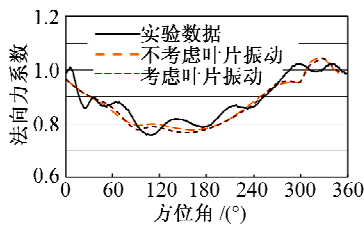


图 3 80%截面法向力系数

Fig. 3 Normal force coefficients at 80% span

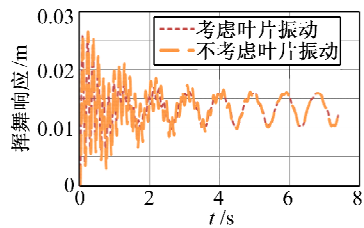


图 4 叶尖挥舞响应

Fig. 4 The flapwise displacement response at the blade tip

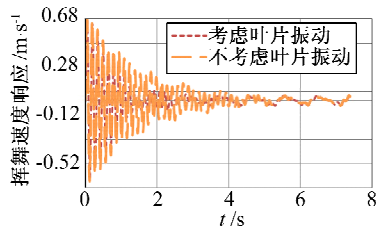


图 5 叶尖挥舞速度响应

Fig. 5 The flapwise velocity response at the blade tip

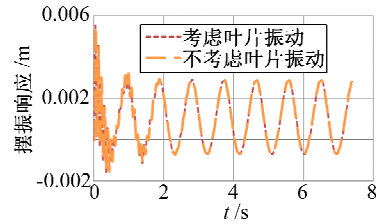


图 6 叶尖摆振响应

Fig. 6 The edgewise displacement response at the blade tip

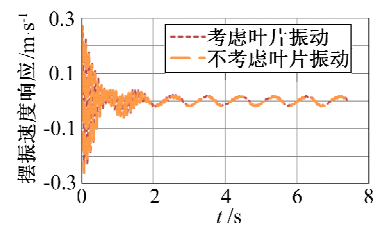


图 7 叶尖摆振速度响应

Fig. 7 The edgewise velocity response at the blade tip

不考虑叶片振动的气动力系数和响应基本相同,这主要是叶片刚度较大和风轮直径较小的原因,这也与 Danish DS472 标准中建议的当风轮直径小于 25m 时可以不要考虑气动弹性的结论相一致^[10]。

本文还计算了某 1.5MW 风力机在额定功率、转速 17.22rpm、11m/s 稳态风下的考虑和不考虑叶片振动的气动力和响应,并与 Bladed 软件计算结果进行对比(图 8~图 14)。通过对比,在计算稳定后各个时刻叶片展向的气动力都与 Bladed 基本相同。

图 8 和图 9 给出了风轮运行 34.85s 时的轴向力和切向力沿着叶片展向分布。从中可以看出,本文计算结果与 Bladed 基本相同;且随着方位角的变化,考虑叶片振动的轴向力和切向力分布在不考虑叶片振动的结果上上下下浮动。

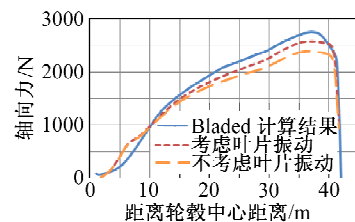


图 8 轴向力分布

Fig. 8 Axial force distribution along the blade

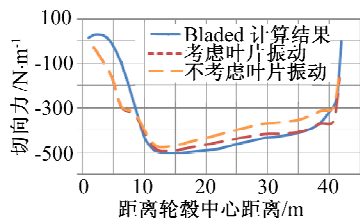


图 9 切向力分布

Fig. 9 Tangent force distribution along the blade

图 10 ~ 图 13 描绘了叶片叶尖随着时间的振动响应。由图 10 和图 12 叶尖的挥舞、摆振的位移响应与 Bladed 计算结果基本相同,且考虑叶片振动的挥舞幅值小于不考虑的幅值。其可能的原因可以从图 10 和图 11 的对比中看出,当顺流向挥舞,挥舞变形逐渐加大时,叶片具有顺流向的挥舞速度,这使得对应叶片截面的有效来流速度和迎角对应都减少,从而气动力也比不考虑叶片振动的小;相反,当逆流向往复时,气动载荷较大,该两者综合作用使得挥舞变形较小,起到了气动阻尼的作用。

另外,从图 10、图 11 看出本文速度响应的计算结果的相位与位移响应能够保持 90° ,而且更接近正弦变化。图 14 给出了 34.85s 时刻叶片的挥舞变形沿着展向分布,与 Bladed 的计算结果基本相同。

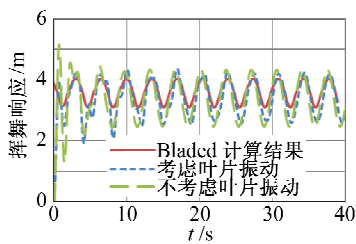


图 10 叶尖挥舞响应

Fig. 10 The flapwise displacement response at the blade tip

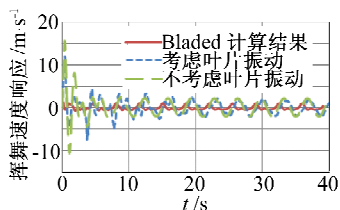


图 11 叶尖挥舞速度响应

Fig. 11 The flapwise velocity response at the blade tip

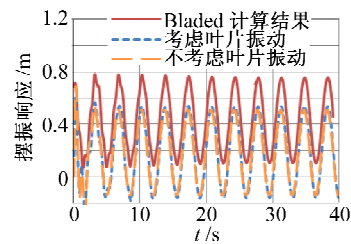


图 12 叶尖摆振响应

Fig. 12 The edgewise displacement response at the blade tip

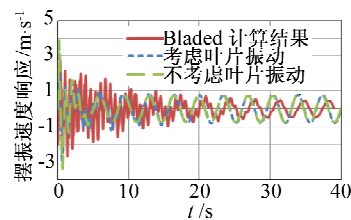


图 13 叶尖摆振速度响应

Fig. 13 The edgewise velocity response at the blade tip

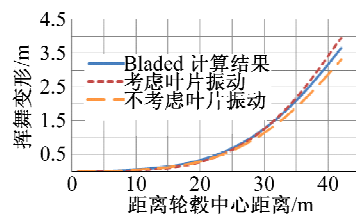


图 14 34.85s 的叶片挥舞变形

Fig. 14 The flapwise deflection distribution along the blade at 34.85s

5 结 论

基于预定涡尾迹方法和 Leishman-Beddoes 动态失速模型,加入叶片结构的振动速度,并改进了气动载荷计算方法,同时结合基于复杂有限元分析的结构模型,从而建立了气动结构耦合模型,并用于风力机叶片气动载荷和响应的计算。计算结果表明,该方法能够较为准确地计算气动力,计算的响应比 Bladed 软件有所改善。在计算大型风力机叶片载荷时必须考虑叶片的弹性影响。结果还显示出,叶片振动在某风速下可能起到气动阻尼的作用,从而减小挥舞响应的振幅。

参 考 文 献:

- [1] HUYER S A D, SIMMS D, ROBINSON M C. Unsteady aerodynamics associated with a horizontal-axis wind turbine[J].

- AIAA Journal, 1996, 34(7):1410-1419.
- [2] SHIPLEY D E, MILLER M S, ROBINSON M C. Dynamic stall occurrence on a horizontal-axis wind turbine[A]. Wind Energy 1995-Proc. Energy Source Technology Conf. [C]. Houston TX, USA: ASME Solar Energy Division, 1995, 16, 167-173.
- [3] WANG T, COTON F N. Prediction of the unsteady aerodynamic characteristics of horizontal axis wind turbines including three dimensional effects[J]. *Journal of Power and Energy*, 2000, 214(5):385-400.
- [4] 伍燕, 王同光. 风力机叶片的三维非定常气动特性估算[J]. 计算力学学报, 2008, 25(1):100-103.
- [5] 李德源, 叶枝全, 包能胜, 陈严. 风力机旋转风轮振动模态分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2):222-225.
- [6] 汪建文, 赵志渊, 刘博. 三叶片风轮动力学特性的分析[J]. 太阳能学报, 2008, 26(4):90-92.
- [7] LEISHMAN J C, BEDDOES T S. A semi-empirical model for dynamic stall[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1989, 34(3):3-17.
- [8] 刘雄, 张宪民, 陈严, 叶枝全. 基于 BEDDOES_LEISHMAN 动态失速模型的水平轴风力机动态气动载荷计算方法[J]. 太阳能学报, 2008, 29(12):1449-1455.
- [9] HAND M M, SIMMS D A, FINGERSH L J, et al. Unsteady aero-dynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns [R]. NREUTP-500-29955, 2001.
- [10] Last og sikkerhed for vindmollekonstruktioner[R]. DAN-SK STANDARD DS 472, in Danish.

Wind turbine aerodynamic load and response prediction based on vortex wake method

TANG Di , LU Zhi-liang , WANG Tong-guang, WU Yong-jian

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

Abstract: The vortex wake method is used to predict the quasi-steady aerodynamic forces, which are subsequently input to the Leishman-Beddoes dynamic model to calculate the unsteady aerodynamic forces. The structural dynamic equations are obtained for wind turbine rotor. The modal analysis of wind turbine rotor is calculated based on blades flapwise stiffness, edgewise stiffness, and mass properties of hub and tower structure using FEM approach. The wind turbine aerodynamic forces and response calculation model is constructed by adding the contribution of blade vibration speeds to unsteady aerodynamic forces. The time-responses of aerodynamic forces, vibration deflection and vibration speed are calculated both for the NREL Phase VI turbine and for a 1.5 MW wind turbine, showing certain useful results and conclusion with analysis in detail to some extent.

Key words: wind turbine; prescribed vortex wake method; dynamic stall; modal shape