

文章编号:1000-582X(2007)05-0091-05

失速型风力发电机系统振动仿真分析

何婧,何玉林,金鑫,刘桦

(重庆大学机械工程学院,重庆 400030)

摘要:采用叶素动量理论进行风力机气动力学的计算分析,并对风轮和塔架进行了有限元模态分析,建立风力机 ADAMS 柔性多体动力学仿真模型,并在 MATLAB/Simulink 环境下建立风力机传动链的数学模型,同时进行传动链系统的编程运算,充分考虑了气弹耦合特性以及传动系统的影响,最终实现在 MATLAB/Simulink 和 ADAMS 基础上对风力机系统振动性能的联合仿真。仿真数据同国际有名的风力机分析软件 Bladed 计算数据比较表明,该联合仿真方法可以较好地模拟风力机的振动特性。

关键词:叶素动量理论;联合仿真;风力机;ADAMS;MATLAB/simulink

中图分类号:TP391

文献标志码:A

随着风力机功率的越来越大,为了从风中吸取更多的能量,叶片必须设计成足够长的尺寸,这使其柔性进一步增加,对其运行精度的控制要求越来越高,需要准确地了解叶片工作过程中的动力学响应。风力机工作时,叶片绕中心轴转动,叶片的变形使其绕转轴的转动惯量及质量分布等发生改变,从而影响叶片的转动形态,而叶片的转动形态的改变,必然使叶片的弹性变形发生改变,叶片的转动与柔性叶片弹性变形是相互耦合的,可见,旋转叶片的动力学分析不同于传统的不考虑结构的刚体位移的结构动力学分析,它需要考虑叶片的转动与其弹性变形间的相互耦合关系及其所导致的动力学效应,该问题属于现代柔性多体动力学的分析范畴。而且,大型水平轴风力发电机系统为强非线性流刚柔耦合的周期时变多体系统,结构和运动非常复杂。力学建模必须考虑桨叶的几何非线性和大变形运动,机舱的刚体运动,塔架的弹性变形,气动载荷等因素。因此理论推导和数值计算都比较困难。文献[1]利用有限元法研究了桨叶、耦合转子/机舱/塔架系统的动力响应。文献[2]研究了风机气动性能和结构动力学特性,建立了桨叶半刚性模型。文献[3]给出了桨叶非线性运动方程。文献[4]推导了桨叶挥舞、摆振和扭转运动相耦合的运动方程。文献[5-6]利用有限元法对桨叶进行建模,文献[5]采用2节点10自由度梁单元离散桨叶,根据 Hamilton 原理推导运

动方程。文献[6]采用三维梁单元离散桨叶,考虑了桨叶的剪切、翘曲和弹性变形。文献[7]研究了大型水平轴风力发电机耦合转子/塔架气弹响应与稳定性,但是忽略了机舱对稳定性的影响。

仿真设计技术是目前国际上流行的一种先进设计技术,它广泛吸收了现代数学、力学等学科的理论基础,并借助于计算机技术而发展起来的一门新兴学科。通过这项技术,可对许多工程中的实际问题进行数值建模仿真,从而加快了设计的速度,是现代工程学形成和发展的重要推动力之一^[8-15]。1983年美国,P. M. Anderson 等人将仿真方法,用于 MOD-2 型的研究之中,此后国内外不少学者对风力机模拟的方法进行了研究^[1-8],并成功地应用于工程实践。但是上述研究的重点是考察或模型的转矩/转速、或局部强度有限元分析、或转动模态分析,并未从风力机系统振动性能分析入手,目前国内对风力机系统振动性能研究主要采用国际有名的风力发电分析软件 Bladed 来完成。

将联合仿真技术应用于风力机模型的建立中,并对某失速型风力机进行系统振动性能分析,是一种新的尝试。自主编程计算风力机空气动力学,在 ADAMS 环境下进行风力机结构动态仿真分析,在 MATLAB/simulink 环境下进行传动系统仿真,采用 ADAMS、MATLAB/simulink、自主编程进行风力机系统动力学的联合仿真。为风力机动力学性能分析进行了一次有

收稿日期:2007-01-09。

作者简介:何婧(1980-),女,重庆人,重庆大学硕士研究生,研究方向为系统仿真、虚拟样机技术。何玉林(联系人),教授,博士生导师,(Tel)023-65102409;(E-mail)heyuling@cqu.edu.cn。

益的探索,现以 700 kW 风力机为例进行具体分析。试验结果验证了该模型的正确性,这对风力发电机组的进一步优化设计、优化控制等均具有指导意义。

1 风力机动力学模型原理

风力机动力学模型包括空气动力学模型、结构动力学模型和控制模型。空气动力学模型计算风力机气动性能和气动载荷,结构动力学模型包括风力机风轮、塔架和传动链的结构动力学,控制模型包括变桨气动控制和电机控制。空气动力学模型根据风场输入计算出叶片载荷作用到结构动力学上,同时结构动力学模型又将结构的运动反馈到空气动力学模型上;控制模型通过获取传感信息,根据需要,对机构进行控制,使风力机发出最大电量。各模型关系如图 1 所示。

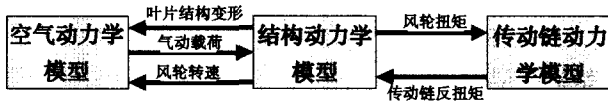


图 1 风力机模型各子系统关系图

2 风力机气动载荷分析

风力机气动性能计算方法采用叶素动量方法(BEM),它综合了动量理论和叶素理论,考虑了叶尖损失、叶栅效应、失速修正、间隙修正及偏航角等因素的影响,可以比较精确地计算风轮转子的气动性能,所以在风力机设计和气动计算中得到广泛的应用。另外,还考虑了风剪、偏航、风轮的结构参数和风力机安装参数等。

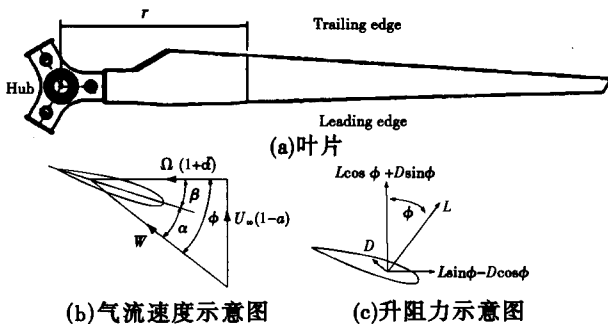


图 2 叶素气动载荷

图 2 a 所示为一个叶素上的风速分量,假设叶素在桨叶上处于半径 r 的位置,来流风速为 U_∞ ,叶素旋转角速度为 Ω 。引入轴向和切向速度诱导因子 a, a' ,通过叶素的气流轴向速度为 $U_\infty(1-a)$,在风轮旋转平面内,该叶素处气流的切向速度为 $\Omega r(1+a')$,轴向速度和切向速度合成了相对速度 W ,由于风速方向的改变,将导致攻角 α 改变,定义叶素来流角 $\phi = \alpha + \beta$, β 为桨叶安装角和截面扭角之和。 L 和 D 是桨叶坐标上叶素的升力和阻力,见图 2(b)。应用叶素动量理论,考虑叶尖和轮

毂损失 F ,考虑风力机实际工作时的结构参数,速度诱导因子求解公式变为:

$$g_1 = \frac{BCC_x H}{8\pi r F \sin^2 \phi + BCC_x H}$$

$$g_2 = \frac{BCC_y}{8\pi r F \sin \phi \cos \phi - BCC_y}$$

$$a = g_1 / (1 + g_1)$$

$$a' = g_2 / (1 - g_2) \tag{1}$$

$$C_x = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi$$

$$C_y = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \tag{2}$$

$$\tan \varphi = \frac{U_\infty(1-a) + v_{e-op}}{\Omega r(1+a') + v_{e-ip}} \tag{3}$$

式中 B 为桨叶数量, c 为截面弦长, v_{e-op}, v_{e-ip} 为叶素上面内和面外的变形速度。由以上各式对给定 a 和 a' 初始值进行迭代计算可求出单个叶素的速度诱导因子,在每次的迭代计算中,根据攻角从翼型数据库提取翼型升阻系数 C_L, C_D ,并进行叶尖和轮毂损失计算,由叶栅理论修正攻角改变量。由于 $\alpha = \phi - \beta$,在高风速时,可以通过改变 β 来改变攻角 α ,从而改变翼型的升阻系数 C_L, C_D ,使桨叶失速运行,以保证风轮在最大允许功率之下运行。根据叶素理论,叶素上法向力和切向力分别为

$$dL = 1/2 \rho W^2 c C_L(\alpha) dr \tag{4}$$

$$dD = 1/2 \rho W^2 c C_D(\alpha) dr \tag{5}$$

叶素上的推力和转矩分别为

$$dF = \frac{1}{2} \rho W^2 c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \tag{6}$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho W^2 c (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) dr \tag{7}$$

因此,对于半径为 R 的风轮,风轮推力 F 、转矩 T 和产生的功率 P 分别为

$$F_i = \int_0^R dF$$

$$T_i = \int_0^R r dF \tag{8}$$

风力机的推力系数 C_T 和功率系数 C_p 分别为

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^B P_i}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3}$$

$$C_T = \frac{\sum_{i=1}^B F_i}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^2} \tag{9}$$

3 传动系统动力学模型

传动系主要是由风轮转子、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机转子构成。传动系的建模分为风轮、传动

装置和电机。低速端传动模型为

$$J_r \frac{d\Omega}{dt} = T_r - T_D - vT_m, \quad (10)$$

$$T_r = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{U_\infty^3}{\Omega}. \quad (11)$$

其中: J_r 为风轮转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, Ω 为风轮转动角速度, rad/min ; T_r 为风轮吸收的动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_D 为能量传递装置中的全部阻力矩, 假定全部集中在风轮处 Nm ; 齿轮传动比; T_m 为高速轴上的扭矩; λ 为尖速比; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; U_∞ 为上风向风速 m/s 。

高速端传动模型为

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_m - T_e \quad (12)$$

其中: J_g 为电机转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, ω_g 为电机转动角速度, rad/s ; T_m 为高速轴上的扭矩, T_e 为发电机上的反扭矩。 T_m 、 T_e 的计算见下一节。

4 感应电机模型

感应电机的等效电路图见图 3。

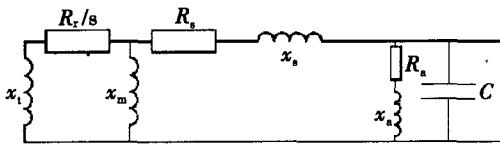


图 3 感应电机的等效电路图

其中: R_s 为定子阻抗, x_s 为定子电抗, R_r 为转子阻抗, x_r 为转子电抗, x_m 为互感, C 为功率修正系数, R_a 为辅助载荷阻抗, x_a 为辅助载荷感抗, s 为滑差。

$$\tau = \frac{X_s X_r - x_m^2}{X_s R_r \omega_s}, \quad (13)$$

其中: $X_s = x_s + x_m$, $X_r = x_r + x_m$, ω_s 是电网频率(rad/s)。

$$\frac{x_s x_r - x_m^2 d}{\omega_s} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_r r_s + jx_m^2(1+s) & -x_m r_r + jx_m x_r(1+s) \\ -x_m r_s - jx_m x_s(1+s) & x_s r_r - jx_s x_r(1+s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_r \\ -x_m \end{bmatrix}, \quad (14)$$

失速控制风力发电机组采用的电机主要是定速感应电机, 其特性由斜率 h 和 τ 短路瞬态时间常数描述。电机反作用扭矩 T_e 为:

$$\dot{T}_e = \frac{1}{\tau} [h(\omega - \omega_0) - T_e]. \quad (15)$$

其中 ω 为电机转速, ω_0 为同步电机转速。

$$h = \frac{P_r}{\varepsilon \omega_r (\omega_r - \omega_0)}, \quad (16)$$

其中 ω_r 是电机在额定功率 P_r 下的电机转速, ε 为电机满载效率。

5 风力机动力学性能仿真模型的建立

5.1 风轮塔架模态分析

模态分析是结构动态分析的核心, 是进行风力机结构动力学分析的基础。进行风力机的性能分析时, 首先要进行模态分析, 通过模态分析可以获得结构动态特性等方面的可靠数据, 可以了解结构之间的关系和整个系统的动特性, 从而为结构动态设计、改进提供科学依据。

风轮塔架模态分析在 MSC. Patran/Nastran 环境下进行, 然后生成模态中性分析文件, 最终导入到 ADAMS 中, 进行结构柔性多体动力学分析。

模态分析主要是求模型的固有频率和各固有频率下的振型。为了验证计算结果的正确, 用国际上流行的风力发电机组性能分析软件 Bladed 计算结果进行比较, 比较结果见表 1。

表 1 风力机自振频率分析结果

对比项	风轮前三阶频率			塔架前三阶频率		
计算结果	1.719	2.852	3.170	2.61	11.23	27.11
Bladed 计算结果	1.65	2.93	3.30	2.59	11.16	26.71

5.2 风力机系统建模

风力机总体性能仿真模型主要部件包括风轮、塔架、低速轴、高速轴、齿轮箱、电机等部件模型。其中风轮和塔架均为实体模型, 齿轮箱和电机只需要考虑传动比和电机反应扭矩就可以了, 不必建立详细模型。将 5.1 节分析的风轮塔架模型生成 MNF 文件, 然后导入到 ADAMS 环境中, 生成柔性体。在上述假设的基础上, 在 ADAMS 系统中完成了风力机的装配, 生成了风力机仿真数字模型, 如图 4 所示。

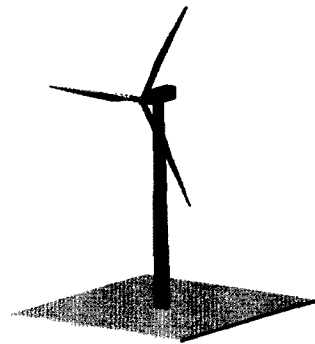


图 4 风力发电机组仿真模型

5.3 风力机性能分析

来流风速输入 Simulink 数学模型, Simulink 数学模型获取 ADAMS 中风轮模型的实时转速 ω 和叶片变形位移 dx, dy 等参数, 根据公式(1)-(8)迭代生成的空气动力学数据, 同时根据公式(10)-(16)计算出电机的反转扭矩 T_e , 然后将上述空气动力学数据参数传递给 ADAMS 模型中气动载荷 F_i , 并将上述电机反扭矩 T_e 通过参数传递加载到 ADAMS 模型的风轮中心, 从而建立了

ADAMS 和 MATLAB / Simulink 的联合仿真模型,如图 5 所示。ADAMS 结构动力学分析模型在气动载荷 F_i 和电机反扭矩 T_e 的共同作用下运转,由于风轮是柔性结构,本身的结构变形和风轮的转速将导致气动力 F_i 的变化,变化的气动力又重新作用在 ADAMS 结构动力学模型上,这就是气弹耦合现象;ADAMS 结构动力学模型又向传动系统 Simulink 模型输入风轮扭矩 T_e ,传动系统 Simulink 又向 ADAMS 结构动力学模型反馈一个电机扭矩。这就是联合仿真的整个过程。

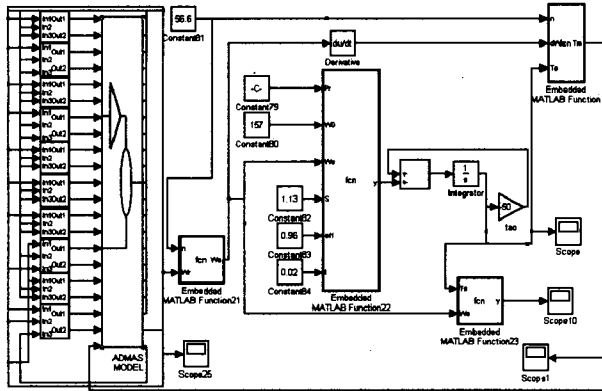
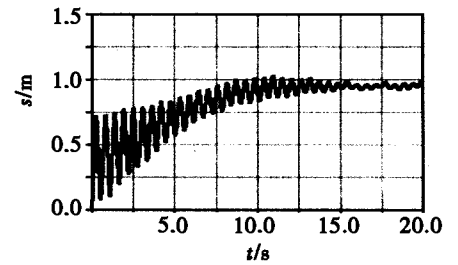


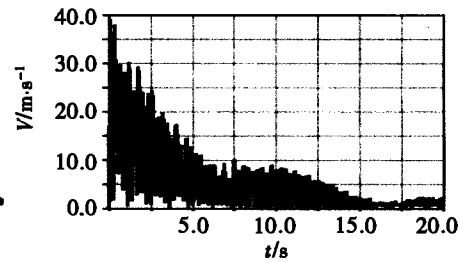
图 5 联合仿真模型

可知,风速约为 17 m/s 时达到额定功率 700 kW。在风轮转速恒定的条件下,风速增加超过额定风速时,风流与叶片分离,叶片将处于“失速”状态,风轮输出功率降低。分析在变风速下,叶片变形、塔架变形等震动特性的变化情况。

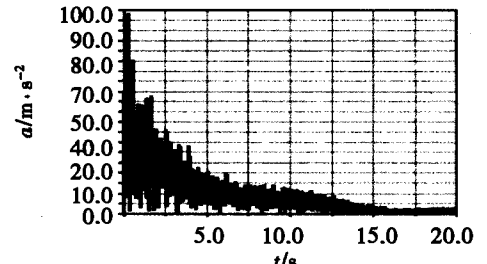
在图 7 中,(a)为叶尖处的变形量,(b)为叶尖变形速度,(c)为叶尖变形加速度,(d)为塔架顶端处的变形量,(e)为塔架顶端处变形速度,(f)为塔架顶端



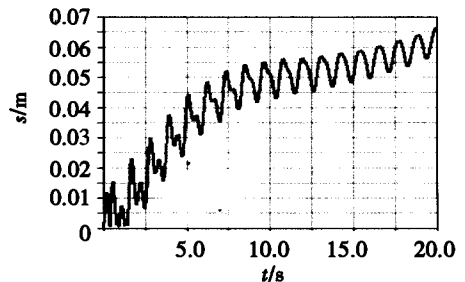
(a)叶尖变形量—时间



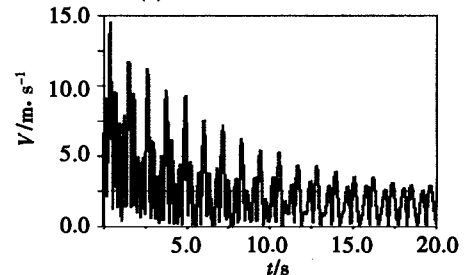
(b)叶尖变形速度—时间



(c)叶尖变形加速度—时间



(d)塔架顶端处变形量—时间



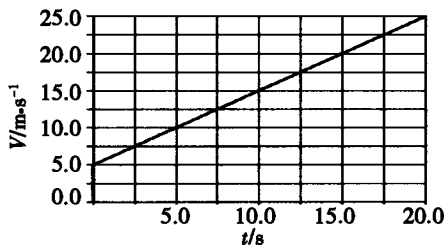
(e)塔架顶端处变形速度—时间

6 仿真分析结果及数据对比

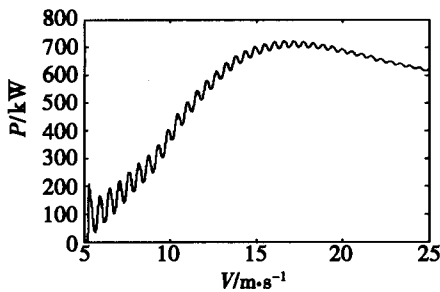
6.1 工作特性

对 700 kW 风力机进行仿真,风机基本结构采用三叶片上风向,叶轮直径 43.4 m,轮毂高度为 40 m,功率调节方式为失速调节,叶轮定速转动,额定转速为 2.813 rad/s。

在图 6 中,(a)为风速,(b)为电动率曲线。从图中



(a)风速—时间



(a)电功率—风速

图 6 风速,风力机电功率曲线

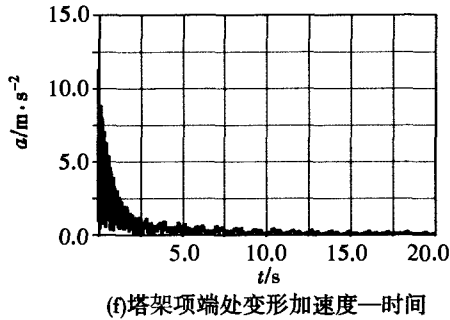


图7 风力机振动特性曲线

处变形加速度。从图7可以看出,在变风速下叶尖的振动较大,而塔架顶端(机舱处)的振动相对较小。随着时间的增长叶尖和塔架顶端的变形量趋近于某一稳定值,变形速度和加速度逐渐减小并趋近于某一稳定值,这与实际情况是相符合的。

该计算数据同国际风力发电专用计算软件 Bladed 计算比较结果见表3,从表3可以看出,两者计算结果是很接近的,证明该模型是有效的。

表3 风力机振动分析结果比较

对比项		稳定变形量/m	稳定变形速度/ $m \cdot s^{-1}$	稳定变形加速度/ $m \cdot s^{-2}$
叶尖	计算结果	0.98	0.11	2.75
	Bladed 计算结果	0.95	0.9	2.5
塔架	计算结果	0.067	0.005	0.092
	Bladed 计算结果	0.05	0.0025	0.08

7 结论

1) 由于叶片是一个柔性构件,风力机在工作中,尤其是在极端风况时叶尖处的变形速度、变形加速度是很大的,该处振动较剧烈。同时叶片上的气动载荷和叶片的运动是耦合的,因此叶尖处的振动加速度也是一个变化的量,该振动加速度是和叶片变形、叶片旋转运动耦合的。

2) 风力机叶片处受到来自叶片的载荷,叶片的载荷随转速是一个周期性变化的过程,因此作用在塔顶处的位移、速度、加速度是一个周期变化的,由于塔架

本身刚度较大,因此其振动相对叶片来说是很小的。

在风力机真动性能的研究中应用联合仿真技术,可以准确、实时地分析风力机在振动情况。以某型风力机为仿真对象,通过仿真,并与实验测试数据对比,表明本文的方法是有效的,为我国风力机产品的更新换代及优化设计进行了有益的探索。

参考文献:

- [1] 王介龙,陈彦,薛克宗.大型水平轴风力机桨叶稳定性研究[J].工程力学,2002,19(2):83-86.
- [2] 窦秀荣.水平轴风力机气动性能及结构动力学特性研究[D].济南:山东工业大学,1995:6.
- [3] HODGES EH, DOWEL LEH. Nonlinear Equations of Motion for Elastic Bending and Torsion of Twisted Nonuniform Blades[R]. NASATND-7818, 1974.
- [4] KOTTAPILLI SBR, FRIDMAN NTP P. Aeroelastic stability and response of horizontal axis wind turbine blades[J]. AIAAJ, 1979, 17(12):1381-1389.
- [5] NITIAN TISIVANERI. Dynamic stability of rotor blade using finite element analysis[J]. AIAAJ, 1981, 20(5):716-723.
- [6] BAUCHAU OH. Finite element approach to rotor blade modeling[J]. J Am Helicopter Soc, 1987, 21(1):73-96.
- [7] WILLIAM WARBRODT, PERETZ FRIEDMANN. Coupled rotor/tower aeroelastic analysis of large horizontal axis wind turbines[J]. AIAAJ, 1980, 18(9):1118-1124.
- [8] 谢峰,赵吉文,沈维蕾.600kW风力机塔架结构的仿真设计[J].系统仿真学报,2004,16(1):70-72.
- [9] 林勇刚,徐立,李伟,等.电液比例变桨距风力机半物理仿真试验台[J].中国机械工程,2005,16(8):607-670.
- [10] 李德源,叶枝全,包能胜,等.风力机旋转风轮振动模态分析[J].太阳能学报,2004,25(1):72-77.
- [11] 李德源,叶枝全,陈严,等.风力机叶片载荷谱及疲劳寿命分析[J].工程力学,2004,21(6):118-123.
- [12] 陆城,许洪华.风力发电用双馈感应发电机控制策略的研究[J].太阳能学报,2004,25(5):724-728.
- [13] 陈学顺,许洪华.双馈电机变速恒频风力发电运行方式研究[J].太阳能学报,2004,25(5):582-586.
- [14] 刘其辉,贺益康,赵仁德.变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J].电力系统自动化,2004,27(20):62-67.
- [15] 孙耀杰,康龙云,史维祥,等.风机模拟器研究[J].系统仿真学报,2005,17(3):1438-1440,1444.

Vibration Analysis and System Simulation for a Stalled Wind Turbine

HE Jing, HE Yu-lin, JIN Xin, LIU Hua

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The aerodynamic characteristic of wind turbine is calculated by applying the Blade Element Momentum (BEM) theory. Also finite element mode analysis is done for the tower and the rotor. Then the multi-dynamic model of the wind turbine is built in Adams. Also the drive chain is calculated by applying state space method and programmed in Matlab/Simulink. With that the combined simulation of vibration characteristics is carried out on the base of MATLAB/Simulink and ADAMS, in which the transmission effects and aero-elasticity coupling is fully considered. The results show that the method is able to simulate the vibration characteristic almost the same as software Bladed, which is well-known for analyzing performance and loads for the design and certification of wind turbines.

Key words: BEM theory; combined simulation; wind turbine; ADAMS; MATLAB/Simulink

(编辑 张小强)