

基于流固耦合的垂直轴风机受力分析

丁琳^a, 郑源^b, 张福星^a

(河海大学 a. 水利水电学院; b. 能源与电气学院, 南京 211100)

摘要: 为了通过流固耦合分析, 探讨风机建筑一体化中垂直轴风力机叶片和主轴的受力情况, 结合实际工程, 在结构分析软件 ANSYS Workbench^[1] 中运用单向流固耦合的方法分别对风速是 10 m/s 和 50 m/s 时的风机叶片和主轴的静应力进行了计算分析和比较。结果表明: 各种工况下, 风力机叶片的最大静应力出现在叶片与主轴连接处, 风力发电机叶片和主轴的最大静应力随着风速的增加而变大。静应力最高值远小于材料的屈服极限, 所以静应力不会使风机叶片和主轴结构产生破坏。叶片与主轴的连接处都出现了应力集中现象, 为了防止疲劳破坏, 可以适当加厚叶片和主轴连接处的厚度。

关键词: 垂直轴风力机; 风机建筑一体化; 流固耦合; 静应力; 结构分析; 主轴; 叶片
中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0084-05

Stress Analysis of Vertical Axis Wind Turbine Based on Fluid-Structure Coupling

DING Lin^a, ZHENG Yuan^b, ZHANG Fuxing^a

(a. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering;

b. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Upon the analysis of fluid solid coupling, the forces on the blades and spindle of the building integration wind turbine were discussed. Based on an actual project, the one way fluid structure coupling method in the structure analysis software ANSYS Workbench was used to calculate and analyze the static stresses of the blades and spindle under the wind speed of 10 m/s and 50 m/s. The results showed that the maximum static stress of the wind turbine blades occurs at the connection between the blades and spindle under different working conditions, and the maximum static stress increases with the increasing of wind speed. The maximum static stress is far less than the yield limit of material, thus it will not destroy the wind turbine blades and spindle structure. The connection between the blades and spindle has the stress concentration phenomenon, and the thickness of the connection area can be increased to prevent fatigue failure.

Key words: vertical axis wind turbine; building integration wind turbine; fluid solid coupling; static stress; structure analysis; spindle; blade

近年来, 风力发电技术已经越来越被人们所重视, 新型的风力机不断涌现, 并被广泛的应用和推广。随着全球风电需要的不断增加, 风力机与建筑一体化结合越来越受到人们的关注^[1]。小型风力机与建筑的结合既可以满足人们对可再生能源的需求, 又可以为建筑物提供充足的电能, 其中的垂直轴风力机占地面积小, 并且可以低风速启动、无噪音运行, 比同类型风力发电机效率高出 10%~20%^[2-4], 安全系数相对较高, 而且可以不受风向改变的影响, 安装和维护较简单, 因此被广泛应用于城市中。

城市中的风力机主要应用于高楼之间和楼顶区域, 而垂

直轴风力机因其独特的造型, 一般被应用在建筑物顶部, 它可以作为一个独立的电源为建筑物提供电能。由于节能减排和发展生态型社会的需求, 垂直轴风力机与建筑一体化已经越来越受到人们重视^[5]。

本文结合实际工程, 在一座高为 12 m 的建筑物顶端安装 500 W 的小型垂直轴风力机, 通过数值模拟, 分析风力机在正常风速的工作环境下叶片和支架的整体安全性。研究工作运用流固耦合的原理, 首先通过 CFD 分析分别计算在额定风速和最大安全风速下风机周围流场的风压分布情况, 然后利用流固耦合的方法将风压力载荷精确地加载到风机

收稿日期: 2013-04-23 修回日期: 2013-07-17 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1311.046.html>

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAA01A273); 国家“863” 计划项目(2009AA05Z429)

作者简介: 丁琳(1987-), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事风力发电方面研究。E-mail: growingroots@sina.com

通讯作者: 郑源(1964-), 男, 山东日照人, 教授, 博士生导师, 主要从事水轮机机械、风力发电方面研究。E-mail: zhengyuan@hhu.com

结构表面,对风机叶片和主轴进行应力结构计算。

1 计算原理和方法

1.1 紊流模型

紊流是日常生活中最常见的流动类型。其特征是各层流体互相混掺,流体质点作不规则运动,而这种不规则表现为流动参数随时间和空间随机变化,所以,只能根据这些参数的统计平均值来区别各种紊流流态^[6,7]。紊流的基本特征有:不规则性、扩散性、高雷诺数、涡度脉动的三维性、耗散性和连续性。水轮机流道内的流动大多是紊流,所以需要紊流模型来描述。

本文采用 SST k- ω 模型。标准 k- ω 模型是在考虑低雷诺数、可压缩性和剪切流传播等因素而对 Wilcox k- ω 模型做的修改^[8]。Wilcox k- ω 模型预测了自由剪切流传播速率,像尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流和放射状喷射,因而可以适用于墙壁束缚流动和自由剪切流动。SST k- ω 模型是标准 k- ω 模型的一个变形,由 Menter^[9] 在 1994 年提出,它可以独立于 k- ϵ 模型,使得在靠近壁面的自由流中 k- ω 模型有广泛的应用范围和精度。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2)$$

式中: G_k 为湍流的动能; G_ω 为 ω 方程; Γ_k 和 Γ_ω 分别为 k 与 ω 的有效扩散项; Y_k 和 Y_ω 分别为 k 与 ω 的发散项; D_ω 为正项; S_k 和 S_ω 为用户自定义源项。

叶片是风机的核心部件,具有复杂的弯曲形状的三维叶片。风机运行时处在高度复杂的流场中,这就导致了其应力分布状况十分复杂。叶片的应力状态是设计、运行和事故分析中的重要参数,故叶片应力计算的精确与否直接关系到转轮应力分析的准确性^[10,11]。由于叶片处在流场中工作,叶片的表面会受到风压力的作用,风压力从进口边到出口边逐渐变化。

本文采用弱流固耦合的方法对垂直轴风力机叶片和主轴进行了强度分析,计算了叶片和主轴的稳态应力、应变和变形,并对此作了分析。

1.2 流固耦合计算

单向流固耦合主要用于流场与固体相互作用后,固体变形不大,就是说流场的边界条件改变较小,不影响流场的分布情况。安装在建筑物顶端的垂直轴风力发电机正好适用于此种分析方法^[12]。

主要的计算思路是首先考虑流体对固体的影响,对流体域进行 CFD 数值模拟,计算出风力发电机结构表面风压载荷,然后将风压载荷加载到风机结构表面^[13],对其加载适当的约束后进行有限元分析。

1.2.1 流体运动方程

对于一般的三维问题,利用 Galerkin 法离散化,则流场内任一点的压力分布^[14]为:

$$p^*(x, y, z, t) = N^T(x, y, z)p(t) = \sum_{m=1}^M N_m(x, y, z)p_m(t) \quad (3)$$

其中:

$$N = \begin{bmatrix} N_1(x, y, z) \\ \vdots \\ N_m(x, y, z) \end{bmatrix} \quad \text{为形状函数矢量}$$

$$p = \begin{bmatrix} p_1(t) \\ \vdots \\ p_m(t) \end{bmatrix} \quad \text{为压力矢量}$$

离散化之后的流体运动方程可以表示为:

$$H\dot{p} + A\ddot{p} + E\dot{p} + \rho B\dot{r} + q_0 = 0 \quad (4)$$

其中:

$$H = \iiint_{\Omega} N \cdot N^T d\Omega$$

$$A = \frac{1}{C} \iint_{S_f} NN^T dS_f$$

$$E = \frac{1}{C^2} \iiint_{\Omega} N^T d\Omega + \frac{1}{g} \iint_{S_f} NN^T dS_f$$

$$B = \left(\iint_{S_j} NN^T dS_j \right) \Lambda$$

式中: N 为形状函数矢量; N_s 为结构系统的插入函数矢量; S 为流体域的边界面积; H, A, E, B 为流体元特征矩阵, Ω 为流体域体积; ρ 为流体的密度; p 为流体动压力; C 为流体的压缩波速度; g 为重力加速度; Λ 为坐标变换矩阵; S_l, S_f, S_r 为流固交界处,自由表面处,无限远边界处的表面积; q_0 为输入激励矢量,可以是爆炸冲击、波浪等动压力或者是给定的边界运动。

1.2.2 结构运动方程

与流体接触的结构的运动方程为:

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + K_r r - B^T p + f_0 = 0 \quad (5)$$

式中: r 为位移矢量; M 为结构的质量矩阵; C 为结构的阻尼矩阵; K_r 为结构的刚度矩阵; f_0 为外界激励矢量。

可以得出式(4)与(5)是相互耦合的。这两个方程就是流场与结构固体所组成的流固耦合系统的求解方程。

对于风力机来说,单向流固耦合计算能较好地模拟出风机所处的环境受力情况,可以大大的节省计算资源和时间^[5]。计算流程图见图 1。

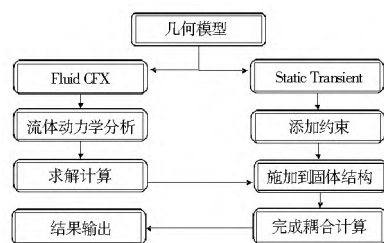


图 1 CFX 和 ANSYS Workbench 的耦合计算流程

Fig. 1 Flow chart of coupling calculation of CFX and ANSYS Workbench

2 模型建立与计算

2.1 工程实例简介

工程实例中,垂直轴风力机的额定功率为 500 W。风力机主要由叶片、主轴和底座三部分通过法兰相互组装而成。

叶片数为 5 片,叶片直径 2 m,高 2.4 m,叶尖速比 $\lambda = 5.5$,额定转速为 150 r/min;翼型型号选取 NACA 0015,材质

为玻璃钢。风机额定设计风速为 10 m/s,所能承受的最大安全风速为 50 m/s。

主轴为钢管型,高为 4 m。主轴的材料为 45 型钢,其强度较高,并且具有良好的塑形和韧性。杨氏模量为 210 GPa,泊松比约为 0.3,密度为 7 850 kg/m³,屈服强度取 355 MPa,抗拉强度为 600 MPa。

2.2 风机模型与流场模型

利用工程绘图设计软件 PRO/E 对 500 W 的垂直轴风力机进行建模。模型主要包括风机叶片和主轴。考虑到计算简化和节省资源,适当省略一些工业设计的细节,有利于最后计算结果的收敛。简化后的风机模型见图 2。将模型导入 Ansys Workbench 中,并在 Geometry 模块中为模型设计相应的流体域。

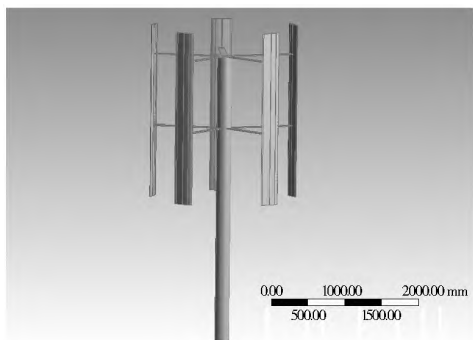


图 2 500 W 垂直轴风力发电机模型

Fig. 2 500-W vertical axis wind turbine model

由于该风机安装的环境周围没有很高的建筑物,并且建筑物分布比较稀疏,所以流场可以简化为立方体型的外流场,保证有足够大的空间。与此同时设置好风机周围的旋转域,此旋转域必须包含一部分叶片和主轴,流场和旋转域的设计见图 3。

由于本文的计算模型比较复杂,风机叶片模型是不规则的曲面,所以采用自动网格划分法,将设置好的模型导入到 Mesh 模块进行网格划分。在本计算中风机模型与其外部的流场尺寸相差较大,所以在风机模型附近进行了尺寸细化,而在其他区域相对粗化。对旋转域外表面和风机叶片主轴外表面设置 size 为 100 mm,并对叶片设置了边界层网格属性。因为风机形状较为复杂,所以采用四面体网格划分。网格划分共产生 270 346 个四面体单元和 89 416 个节点,见图 3。

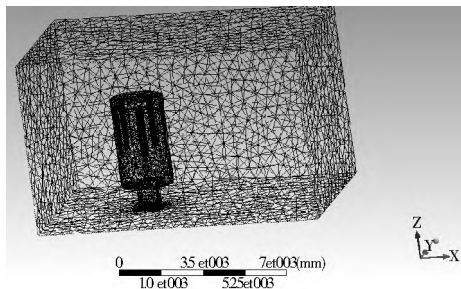


图 3 CFX 计算流场和旋转域网格划分

Fig. 3 CFX computational flow field and spin field mesh discretization

2.3 流体分析

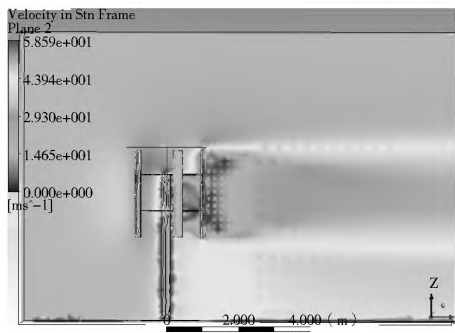
在 Workbench 中,一般利用 CFX 进行流体动力学分析。CFX 分析包括 3 个程序模块:CFX-Pre、CFX-Solver 和 CFX-

Post。即前处理器、求解器和后处理器。

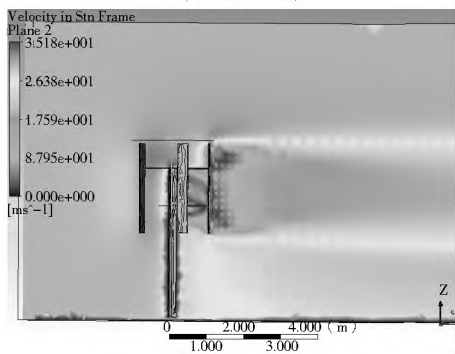
首先,将划分好的 Mesh 文件导入到 CFX-Pre。流体域主要包含外流场域和旋转域,旋转域的角速度采用风机的额定转速 150 r/min,一个标准大气压。

然后,设置进出口边界条件。把立方体流场的前后两个表面分别设置为进口和出口,并设置其他 3 个面为自由面。然后在进出口上给定相应的湍流强度。不同于内流场,外流场的湍流强度不能用默认的 5% 或 10% 等百分比设置,必须根据来流速度与入口尺寸进行计算得到。需要考虑的边界条件还有地面边界条件以及风机叶片边界条件和旋转域外表面边界条件。

最后,进行流场计算。流场分析结果见图 4(a)、4(b),分别为风速 10 m/s 和 50 m/s 时流场中心面速度分布。



(a) 风速 10 m/s 时



(b) 风速 50 m/s 时

图 4 风速为 10 m/s 和 50 m/s 时流场中心面速度分布

Fig. 4 Distribution of face velocity in the center of flow field under the wind speed of 10 m/s and 50 m/s

2.4 结构分析

将流体分析的结果与结构模型一起导入到静力分析模块中去,并对风机模型进行网格划分,最终产生 26 227 个节点和 829 289 个单元,见图 5。

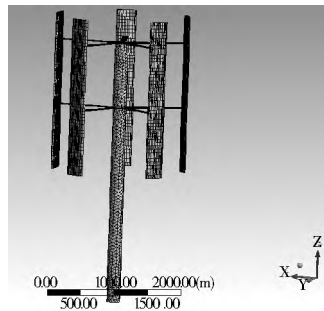


图 5 风机结构体网格划分

Fig. 5 Mesh discretization of the wind turbine structure

划分好网格之后对风机加载约束,主要是底部的固定约束。由于计算的是风机在工作状态下的受力情况,所以还要加载一个旋转速度 150 r/min,加载完后就可以进行受力求解。

2.5 计算结果输出

在求解器中插入垂直轴风机受的主应力 Equivalent Stress 和总形变 Total Deformation,运行求解器得出结果。图 6(a)为风速 10 m/s 时风机的整体变形量,图 6(b)为风速 50 m/s 时风机的整体变形量,图 7(a)所示为风速 10 m/s 时风机的应力分布,图 7(b)为风速 50 m/s 时风机的应力分布。

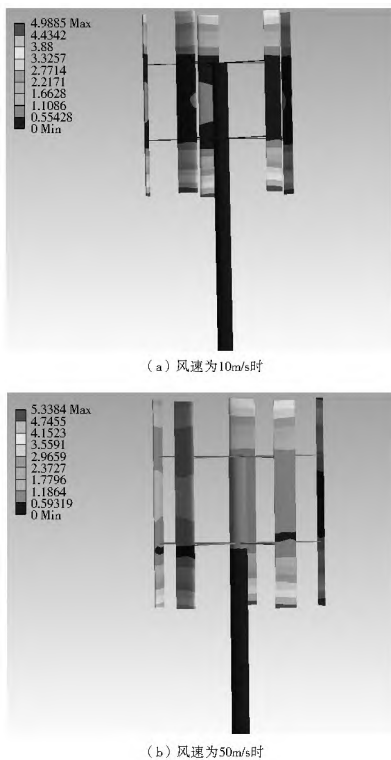


图 6 风速为 10 m/s 和 50 m/s 时风机整体变形量

Fig. 6 Integral deformation of wind turbine under the wind speed of 10 m/s and 50 m/s

3 计算结果分析

通过 CFX 分析得到在加载额定风速和最大风速情况下,流场风压的分布情况见图 4。将风压代入结构分析模块中,对风机结构进行受力分析,得到了额定风速和最大安全风速下,风机主轴和叶片的应力分布情况,见表 1。

表 1 风机叶片和主轴的应力

Table 1 The stresses of the blades and spindle

工况	风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶片最大静应力 /MPa	主轴最大静应力 /MPa
额定风速	10	47.523	15.842
最大安全风速	50	55.001	23.576

3.1 流场结果分析

对流场结果进行分析,可以得到如下结论:(1)叶片的迎风面上的压强为正压,背风面会有负压出现;(2)风速改变时叶片表面的压力分布基本相同,只是最大值发生了变化。

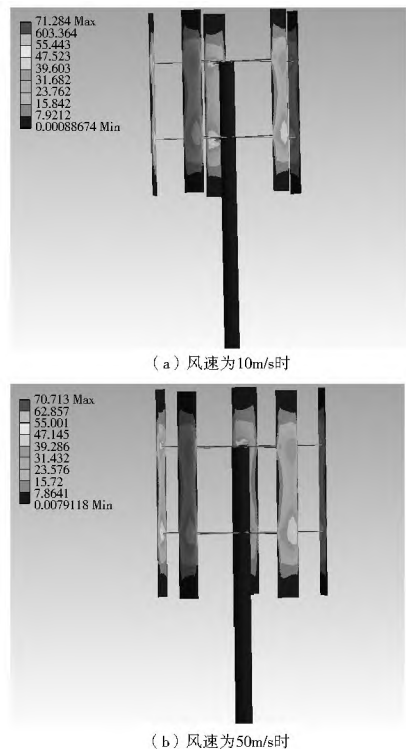


图 7 风速为 10 m/s 和 50 m/s 应力分布

Fig. 7 Stress distribution under the wind speed of 10 m/s and 50 m/s

3.2 应力结果分析

由图 7 可以看出,风力机叶片的最大静应力出现在叶片与主轴连接处。这是因为叶片可以看成是一个简支梁,在加载了表面压力载荷的情况下,两个支撑处的应力最大;相反,两端的自由端应力最小。

由表 1 可以看出,风力发电机叶片和主轴的最大静应力随着风速的增加而变大,这是由于加载在它们表面上的风压力载荷随着风速的增大而增大,但是风机叶片和主轴结构所受的静应力值较小,小于材料的屈服极限 200 MPa。

风机叶片和主轴结构的最大静应力均远小于材料的屈服强度,所以静应力不会使风机叶片和主轴结构产生破坏。静应力的分布图中风机叶片与主轴的连接处都出现了应力集中现象,应力集中若周期循环出现则会对结构产生疲劳破坏。为了防止疲劳破坏,需要尽可能减弱应力集中,可以在不影响风场的前提下适当地加厚叶片和主轴连接处的厚度,以提高其刚度。

参考文献(References):

- [1] 邢景棠,周盛.流固耦合的力学概述[J].力学进展,1997,27(1):19-38.(XING Jing tang, ZHOU Sheng. Overview of the Mechanics of Fluid Solid Coupling[J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(1): 19-38. (in Chinese))
- [2] 秦生升.风力发电在建筑中的应用[J].建筑节能,2010,10(3):44-46.(QIN Sheng sheng. Wind Power Applications in Construction[J]. Construction Energy Conservation, 2010, 10(3): 44-46. (in Chinese))
- [3] 黄典贵.理想流场中流固耦合作用下叶片的动态特征分析[J].汽轮机技术,1998,40(4):235-238.(HUANG Diang ui. Under Ideal Flow Flow-Solid Coupling Dynamic Characteristics of

- Leaves[J]. Turbine Technology, 1998, 40(4): 235-238. (in Chinese))
- [4] 梁权伟, 王正伟, 方源. 考虑流固耦合的混流式水轮机转轮模态分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 116-119. (LIANG Quanwei, WANG Zhengwei. Considering Fluid-Structure Coupled Modal Analysis of Francis Turbine Runner[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2004, 23(3): 116-119. (in Chinese))
- [5] 李建锋, 刘小兵, 王宏伟, 等. 基于 ADINA 的混流式水轮机流固耦合分析[J]. 水力发电, 2010, 36(4): 67-69. (LI Jianfeng, LIU Xiaobing, WANG Hongwei. Based on ADINA Analysis of Francis Turbine Coupled Fluid-Solid[J]. Hydropower, 2010, 36(4): 67-69. (in Chinese))
- [6] 王征等. 流固耦合力学的数值研究方法的发展及软件应用概述[J]. 机床与液压, 2008, 36(4): 192-195. (WANG Zheng. Mechanics of Fluid-Solid Coupled Numerical Study on Development of Methods and Software Applications[J]. Machine with Hydraulic Pressure, 2008, 36(4): 192-195. (in Chinese))
- [7] Q. W. Liang a, C. G. Rodríguez a, E. Egusquiza, et al. Numerical Simulation of Fluid Added Mass Effect on a Francis Turbine Runner[J]. Computers & Fluids, 2007, 36(6): 110-118.
- [8] PENG Guangjie, WANG Zhengwei, YAN Zongguo, et al. Strength Analysis of a Large Centrifugal Dredge Pump Case[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 321-328.
- [9] 雷凡. 水下柔体结构流固耦合动力效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. (LEI Fan. Flexible Underwater Structure Study on Fluid-Solid Coupling Dynamic Effect[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese))
- [10] 宋学官, 蔡林, 张华. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (SONG Xueguan, CAI Lin, ZHANG Hua. ANSYS Engineering Example for Fluid-structure Coupling Analysis[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))
- [11] Saeed Moaveni, Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS(second edition)[M]. 2005.
- [12] 庞强. 风力机结构组件的有限元模拟与优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. (PANG Qiang, Wind Machine Finite Element Simulation and Optimal Design of Structural Components[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [13] 肖燕娟, 唐俊. 风力机翼型外形图的计算机辅助设计[J]. 电脑知识与技术, 2008, (5): 967-968. (XIAO Yanyuan, TANG Jun. Wind Airfoil Shape of the Computer Aided Design[J]. Computer Literacy and Technology, 2008, (5): 967-968. (in Chinese))
- [14] 司徒钧, 郑源, 赵振宙, 等. 基于 ANSYS 风力机塔架的结构计算分析[J]. 中国新能源, 2009, (53): 9-11. (SI Jijun, ZHENG Yuan, ZHAO Zhenzhou, et al. Based on ANSYS Structural Analysis of Wind Turbine Tower[J]. China New Energy, 2009, (53): 9-11. (in Chinese))
- [15] 苏丽杰, 郭星辉, 聂义勇. 一维流固耦合振动问题的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2004, (5): 84-85. (SU Lijie, NIE Yiyong, GUO Xing. One Dimensional Finite Element Analysis of Fluid-Structure Interaction Vibration[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2004, (5): 84-85. (in Chinese))

(上接第 83 页)

- [8] 雒文生, 王祥三, 宋星源, 等. 受水利水电工程影响流域产流预报方法的探讨[J]. 水电能源科学, 1990, 8(8): 242-250. (LUO Wen sheng, WANG Xiang san, SONG Xir yuan, et al. The Approach of Forecast Method of Yield Runoff In Basins Influenced by Hydraulic and Hydroelectric Engineering[J]. International Journal HYDROELECTRIC ENERGY, 1990, 8(8): 242-250. (in Chinese))
- [9] 冯相明. 黄河三花区间水利工程对洪水、径流的影响[J]. 人民黄河, 1994, 3(3): 9-11. (FENG Xiang ming. The Influence of Flood and Runoff by The Yellow River Sanhua interval Hydraulic engineering [J]. Yellow River, 1994, 3(3): 9-11. (in Chinese))
- [10] 郭生练, 王金星, 彭辉, 等. 考虑人类活动影响的丰满水库洪水预报方案[J]. 水电能源科学, 2000, 18(2): 14-17. (GUO Shenglian, WANG Jinxing, PENG Hui, et al. A Flood Forecast Model Taking into Account the Human Activity Impact [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000, 18(2): 14-17. (in Chinese))
- [11] 曹明亮, 周惠成, 张弛, 等. 基于遥感数据的小水库塘坝拦洪计算方法研究与应用[J]. 中国科学, 2011, 41(8): 1063-1069. (CAO Mingliang, ZHOU Huicheng, ZHANG Chi, et al. Research and Application of Flood Detention Modeling for Ponds and Small Reservoirs Based on Remote Sensing Data[J]. Sci China Ser E Tech Sci, 2011, 41(8): 2138-2144. (in Chinese))
- [12] 水利部松辽水利委员会. 东北地区实用洪水预报方案[R]. 2003. (Songliao Water Resources Commission. Northeast Practical Flood Forecasting Program[R]. 2003. (in Chinese))
- [13] 彭勇, 韩永日, 李文龙, 等. 基于 WebService 的丰满水库防洪调度系统[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 46-49. (PENG Yong, HAN Yongri, LI Wenlong, et al. Development of Fengman Reservoir Flood Control Decision Support System Based on Web Service[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(4): 46-49. (in Chinese))
- [14] 房国忠, 王永峰, 范永思, 等. 丰满水库汛限水位的变迁及思考[J]. 大坝与安全, 2009, (4): 31-34. (FANG Guozhong, WANG Yongfeng, FAN Yongsi, et al. Change of Flood Control Level of Fengman Reservoir[J]. Dam and Safety, 2009 (4): 31-42. (in Chinese))
- [15] 尤芳, 袁帅. 丰满流域可能最大暴雨与可能最大洪水分析研究[J]. 吉林水利, 2008, (11): 33-35. (YOU Fang, Yuan Shuai. Analysis and Research for the Probable Maximum Flood and Storm in Fengman Basin[J]. Jilin Water Resources, 2008, (11): 33-35. (in Chinese))