

风电机组塔筒结构绕流风场的数值模拟研究

戴益民¹, 闫旭光¹, 王相军¹, 吕卫华², 刘也¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 广东省茂名市 气象局, 广东 茂名 525000)

摘要:为研究风电机组塔筒结构的气动力特性,基于 ANSYS 软件,建立了塔筒结构的简化模型并对其进行绕流风场的数值模拟分析,主要探讨了塔筒结构表面风压分布特征,风场风速、湍流度及不同高度比对塔筒表面风压分布的影响.结果显示,圆锥塔筒结构背风面在绕流作用下沿高度方向由上向下形成连续几个回流区,导致背风面受到正压作用;不同风速只有对塔筒背风表面压力大小有较之明显影响,而对塔筒迎风面及侧面压力大小影响很小;湍流强度对模型表面风压系数大小有不同程度的影响,随着湍流强度的增加,模型侧面(大部区域)、背风表面的压力绝对值相应减小;不同高度比对模型表面风压分布有显著影响.研究结论可为风力发电机塔筒结构的设计提供参考.

关键词:风电机组;塔筒结构;数值模拟;风压

中图分类号: TU312⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9102(2013)03-0047-06

风能作为一种清洁的可再生能源,越来越受到世界各国的重视,其蕴量巨大,全球的风能约为 2.74×10^9 MW,其中可利用的风能为 2×10^7 MW,比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍.风力发电机组作为风力发电所需要的装置,大体上由风轮、发电机和塔筒 3 部分组成.随着现代风电技术的发展和不断提高,为了降低风力发电的成本和提高能源开发市场竞争力,风电机组正朝着大功率、大容量方向发展,由此作为风力机的重要支撑部件,风力机塔筒也朝着高耸化发展.塔筒高度的增加可以获得更有效的风荷载,但随之带来的是塔筒结构的变形将会增大,从而可能引起整机的破坏^[1].

风力发电机塔架设计需要考虑各种荷载情况.当风力发电机运行时,塔架结构在风荷载与自重等载荷的联合作用下发生一定程度的变形,当引起的塔架结构截面弯矩值超出其所能承受的屈服极限值时,塔架结构即会发生破坏,如图 1 所示.

风机塔筒结构属于高耸结构,在风荷载作用下



图 1 塔筒结构的实际破坏情况

Fig. 1 Wind-induced damage of the tower structure

会发生一定的变形,而变形体会对风荷载产生影响,即风机塔筒在风荷载作用下属于气固耦合问题, Hansen 等^[2]设计出一种既考虑空气动力学的影响,又能考虑到结构动力学干扰的计算模型,进而,用该模型研究了风力发电机组整个系统的耦合问题.基于计算流体动力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)技术的数值模拟方法应用于结构风工程

收稿日期:2013-05-16

基金项目:交通运输部重大科技项目(2011318824140);国家自然科学基金项目(51248001);湖南科技大学项目(E51257, J11216)

通信作者:戴益民(1972-),男,湖南新化人,博士,副教授,主要从事风工程方向研究. E-mail: dymzy@163.com

中的可靠性已被大量证实. 在风电机组气动特性方面, 国内外许多学者进行了探索并取得一定的进展, 得到一些有价值的资料^[3-5].

由于我国风电事业起步较晚^[6], 风机塔筒结构的设计一直以引进国外的设计为主^[7-8], 随着国内风力发电机塔筒的大型化, 有必要对风电塔筒结构进行详尽的分析, 为建立我国自己的设计规程标准奠定基础. 本文以风力发电机组所采用的圆锥型塔筒结构为研究对象, 基于流体动力学原理, 运用计算流体软件分析不同湍流度、不同风速条件下塔筒结构的气动力特性, 获得塔筒周围流场分布情况, 本文研究内容可为风电机组塔筒结构设计和改良提供一定参考.

1 圆锥型塔筒数值模拟

1.1 模拟工况

风电机组塔筒为圆锥型, 底面直径 1.5 m, 顶面直径 0.8 m, 模拟分析 20 m, 50 m 高度模型, 共设置 6 个工况, 具体如表 1 所示.

表 1 风机塔筒不同湍流度、不同风速工况

Tab. 1 Conditions for turbulence intensity and velocity

工况	高度 H/m	湍流度 I_u	风速 $U/ (m/s)$
工况 1	20	0.25	25
工况 2	20	0.25	15
工况 3	20	0.25	10
工况 4	20	0.10	25
工况 5	20	0.35	25
工况 6	50	0.25	25

坐标轴定义为沿来流顺风向为 X 轴, 垂直顺风方向为 Y 轴, 沿高度方向为 Z 轴, 由于简化计算模型为沿高度线性均匀变化的圆锥筒体, 考虑某一特定风向角(0° 风向角)研究, 沿塔筒高度方向每 2 m 截面上分别取 3 个典型测点, 共 33 个测点, 分别为迎风面测点 001 ~ 1001, 侧风面测点 002 ~ 1002、背风面测点 003 ~ 1003. 具体见图 2.

1.2 计算模型建立、网格划分

按实际尺寸建立计算模型, 计算域的选取需要同时考虑计算机硬件的条件以及计算精度要求. 本文, 计算域为 $75\text{ m} \times 20\text{ m} \times 40\text{ m}$ (50 m 模型计算域为 $75\text{ m} \times 20\text{ m} \times 80\text{ m}$), 塔筒置于计算域进口面 $1/3$ 处, 保证进口截面阻塞度 $\leq 5\%$. 对计算区域进行网格划分时主要采用具有良好拓扑性的非结构四面体网格, 在塔筒表面附近采用过渡的棱柱体网格, 在靠近塔筒表面采用加密的网格形式, 由内往外网格尺

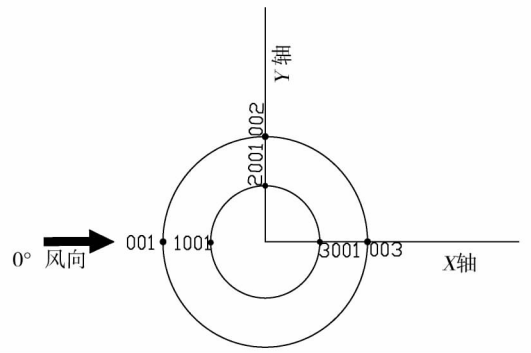


图 2 模型测点和风向角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring taps and wind angle

寸逐渐增大, 划分得到的网格总数为 86 万 (50 m 模型网格总数 103 万), 计算模型如图 3.

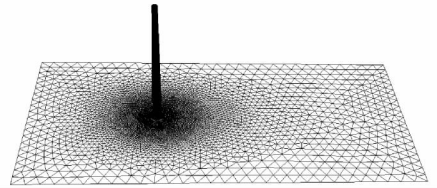


图 3 流域计算模型及网格划分

Fig. 3 Computational grid for model

1.3 边界条件设置

边界条件的合理设定对于流场分析至关重要^[9-10]. 针对风电机组塔筒结构绕流流场特点, 本文定义边界条件如下:

入口边界条件: 对于不可压缩空气流动, 将入口边界条件定义为速度入口 (velocity inlet), 考虑本文研究内容为不同风速及不同湍流条件影响下风电机组塔筒的气动特性, 在流域进口处通过设定恒定风速值建立入口风速模型.

出口边界条件: 自由出流 (outflow) 边界条件用于流域出口处压力和流速变量是未知的, 且流域出口充分发展的情况. 因此, 本文定义该出口边界.

壁面边界条件: 将流域的顶部、两侧、地面及塔架表面定义为无滑移壁面条件 (stationary wall).

1.4 求解参数的设置

在计算模型中, 粘度 μ 取为 $1.831 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, 计算采用的湍流特性参数见表 2:

表 2 湍流特性参数值

Tab. 2 Parameters of the turbulence characteristics

雷诺数 Re	积分尺度	湍动能 $K/(m^2/s^2)$	湍流耗散率 ε
$Re = \frac{vpl}{\mu}$	$L_x = 100(\frac{z}{30})^{0.5}$	$K = \frac{3}{2}(vI)^2$	$\varepsilon = 0.09 \frac{3}{4} \frac{k^2}{l}$

计算中,以直接给定湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的方式给定入流处的湍流参数. k 和 ε 采用 UDF 编程与 ANSYS 实现对接.

由于湍流模型对模拟稳定性及计算精度影响甚大,本文通过多次试算后选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用非平衡壁面函数来考虑壁面的影响. 考虑到计算的稳定和保证达到精度要求,离散控制方程对流项先采用一阶迎风格式,收敛后再用二阶迎风格式进行求解,欠松弛系数为 0.8,流场中压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法,计算至控制方程的相对迭代残余量均小于 10^{-4} 以下且房屋表面平均风压力值基本不再变化,即认为计算流场已稳定.

1.5 计算结果

结合本工程的实体模型,本文通过流场流速、压力分布情况来揭示风电机组塔筒结构绕流场特性. 以下给出计算模型表面的风压云图及塔筒结构周围风速矢量图.

由图 4(a),由于塔筒结构受到来流阻碍作用影响,使得迎风面正面压力较大. 其中,最大值出现在迎风表面竖向中间偏上位置. 随着来流遇阻碍向模型两侧绕流过程中,压力值也逐渐减弱. 由图 4(b),模型侧面在绕流涡旋的影响下,沿顺风方向形成负压区,随着绕流在模型侧面后端发生回流现象,使得侧面末端逐渐转为正压. 图 4(c),背风面在绕流作用下,使得模型后部形成漩涡回流现象,从而导致背风面形成正压区域. 从模拟结果得出,塔筒结构背风面上部区域由于受到流体脱落及回流现象,导致该区域存在大量的负压区域.

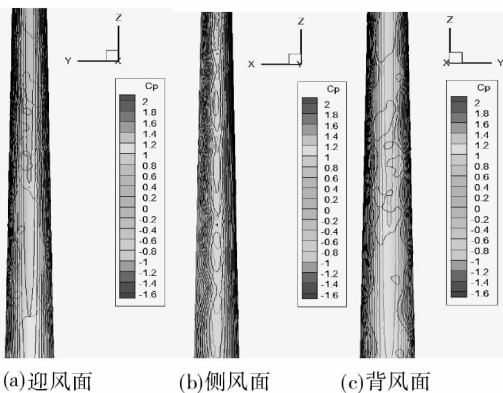
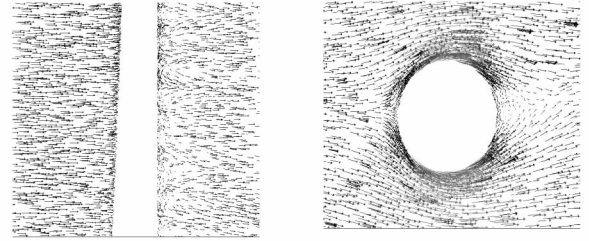


图 4 模型表面沿坐标各方向投影风压云图

Fig. 4 Pressure contours projected along the coordinates

由速度矢量图 5(a),模型迎风表面前的速度矢量基本不受模型干扰,速度矢量呈现均匀水平流向. 而在模型背风表面,由于来流气流分离及旋涡脱落

影响,使得沿模型高度方向由上而下形成连续回流区,绕流现象明显. 这与文献[11]结论是吻合的. 由速度矢量图 5(b),来流在遇到模型后形成驻点,以迎风面竖向中线为界,向两侧绕流,在模型背风面形成对称涡旋,随着流体继续向后流动,涡旋逐渐脱落. 距模型背风面一定距离后,风速矢量逐渐趋于均匀.



(a) X-OZ面流场中心截面

(b) X-OY面流场水平截面

图 5 模型周围流场速度矢量图

Fig. 5 Velocity vectors around the model

2 风场参数对塔筒表面风压的影响

建筑物表面风压通常用风压系数表示,其定义为: $C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$. 其中, P_i 为作用在结构表面某点 i 的静压力; ρ 为空气密度,本文均取 1.225 kg/m^3 ; U_{ref} 为参考高度处(本文取为塔筒顶部)远前方的平均风速; P_∞ 为参考高度处远前方的静压.

2.1 不同风速对塔筒表面平均压力系数的影响

通过考察工况 1, 2, 3, 分析不同风速 U 对塔筒表面压力变化的影响. 3 种风速下塔筒迎风表面、侧风面、背风面测点沿高度方向压力变化规律如图 6-图 8 所示. 其中,湍流强度 I_u 取定值为 25%.

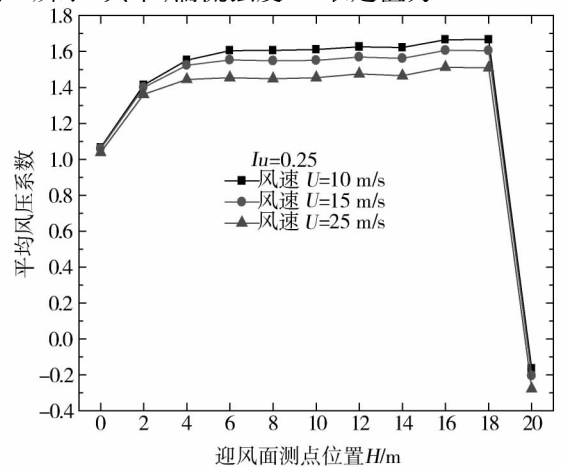


图 6 风速对迎风面测点风压值的影响

Fig. 6 Variation of mean pressure coefficient of windward wall with wind velocity

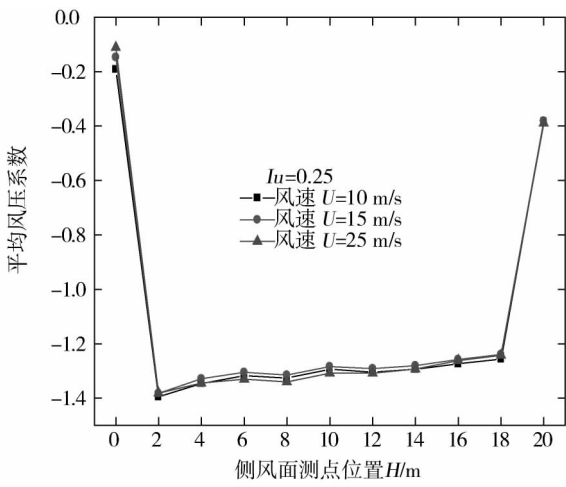


图7 风速对侧风面测点风压值的影响

Fig.7 Variation of mean pressure coefficient of side wall with wind velocity

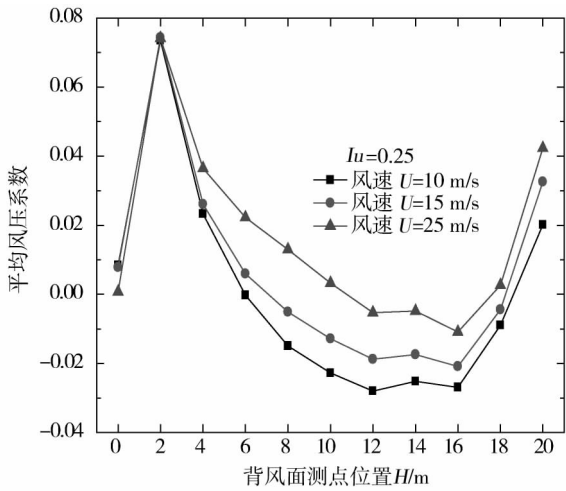


图8 风速对背风面测点风压值的影响

Fig.8 Variation of mean pressure coefficient of leeward wall with wind velocity

分析结论:

1) 由以上图可以看出不同风速只有对塔筒背风表面压力大小有较之明显影响,而对塔筒侧面及迎风面压力大小影响很小,原因可能与气流分离在背风面发生连续回流有关.

2) 3种风速下,模型底部和顶部背风面所受风压一致,而模型中间高度随着风速增大风压由负压变为正压,原因与风速增大导致背风面分离引起的回流强烈有关.

2.2 不同湍流度对塔筒表面平均压力系数的影响

通过考察工况 1, 4, 5, 分析不同湍流度 Iu 对塔筒表面压力变化的影响. 3 种湍流度下塔筒迎风表面、侧风面、背风面测点沿高度方向压力变化规律如图 9 - 图 11 所示, 其中, 风速 U 取定值为 25 m/s.

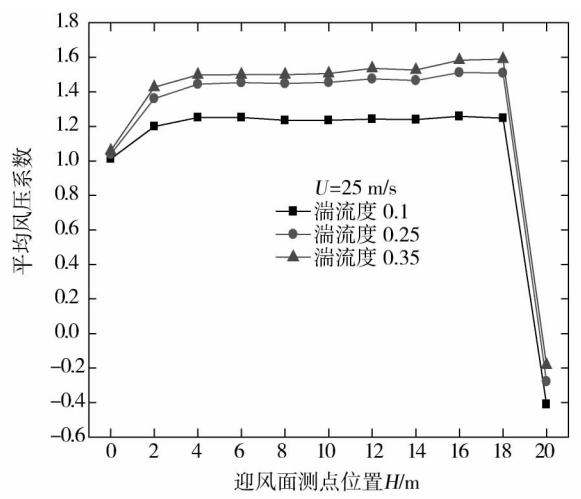


图9 湍流度对迎风面测点风压值的影响

Fig.9 Variation of mean pressure coefficient of windward wall with turbulence intensity

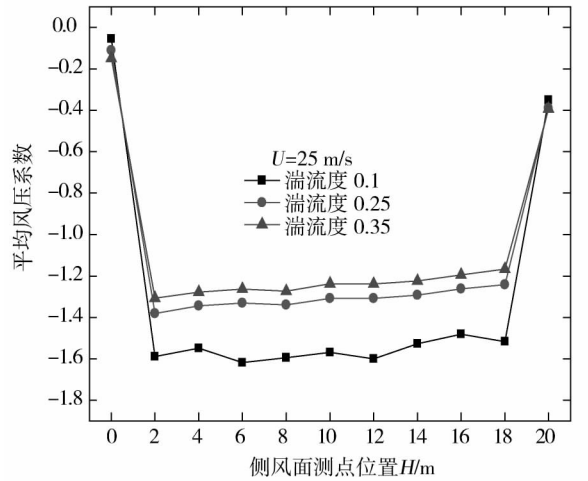


图10 湍流度对侧风面测点风压值的影响

Fig.10 Variation of mean pressure coefficient of side wall with turbulence intensity

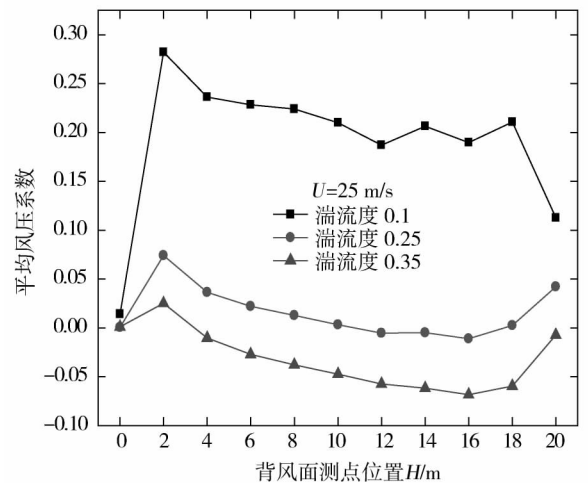


图11 湍流度对背风面测点风压值的影响

Fig.11 Variation of mean pressure coefficient of leeward wall with turbulence intensity

分析结论:

1)不同湍流度下,塔筒迎风表面均受正压影响,3种湍流度下风压最大值均出现在塔筒迎风面竖向中间偏上部位,不同湍流度对迎风面压力大小有一定影响,其中,当湍流度取为35%时,平均压力系数高出湍流强度为1%相应风压系数的20%.

2)塔筒侧表面由于受到气流分离,造成侧面受负压影响,3种湍流度下模型底部和顶部区域侧面风压系数一致,大部分区域侧风面的负压绝对值随湍流强度的增加相应减小,这可能是由于湍流强度的增大削弱涡旋形成及脱落造成的.

3)背风面由于形成回流区,压力分布较复杂,湍流度为10%,25%塔筒背风面为正压,而湍流度为35%塔筒背风面大部分区域出现负压,背风面的压力绝对值随湍流强度的增加相应减小,其中湍流度为10%时的压力系数值与其余2种高湍流度下风压系数差距较大,原因与2)相同.

2.3 不同高度比对塔筒表面平均压力系数的影响

通过考察工况1,工况6,分析不同高度比对塔筒表面压力变化的影响.2种高度(50 m和20 m)模型迎风表面、侧风面、背风面测点沿高度方向压力变化规律如图12所示,其中,湍流强度 Iu 取0.25,风速 U 取为25 m/s.

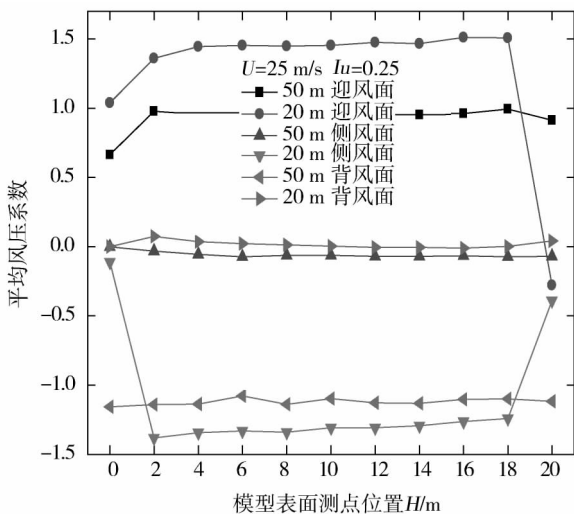


图12 不同高度比塔筒表面测点风压值变化规律图

Fig. 12 Variation of mean pressure coefficient of model surfaces with height ratio

结论分析:

1)不同高度比对模型表面风压分布有显著影响,20 m高度模型迎风面测点高出50 m高度模型相应测点风压的30%左右;2)侧风面和背风面差距

也很大,原因与50 m高度下测点位置相应于模型底部区域,受到的分离作用较轻,导致50 m高度模型测点压力平稳有关.

3 结论

本文对风电机组塔筒结构进行了绕流风场的数值模拟分析,探讨了流场风速、湍流度和不同高度比对塔筒结构表面风压的影响.结论有:风电机组塔筒这类高耸结构在风场作用下背风面由于风的绕流作用形成漩涡回流,使得背面形成很大的正压区域;不同风速只有对塔筒背风表面压力大小有较之明显影响,而对塔筒侧面及迎风面压力大小影响很小;不同湍流度下风压最大值均出现在塔筒迎风面竖向中间偏上部位,湍流度对迎风面压力大小有一定影响,模型底部和顶部区域侧风面风压系数一致,而大部分区域随着湍流强度的增加负压绝对值都是相应减小的,背风面由于形成回流区,压力分布较复杂,其压力绝对值随湍流强度的增加相应减小;不同高度比对模型表面风压分布有显著影响.研究结论可为风力发电机塔筒结构的设计提供一定参考.

参考文献:

- [1] 任翀,张巍,张富全. 巨型风力发电机塔架静动力学性能分析与研究[J]. 电机工程技术,2009,38(3):65-68.
Ren C, Zhang W, Zhang F Q. Research on statics and dynamics performance of giant wind generator tower [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2009, 38(3): 65-68.
- [2] Hansen M O L, Sorensen J N, Voutsinas S, et al. State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2006, 42(4):285-330.
- [3] Eelco H, Gustaaf B J, Asfaw B. Aero-elastic behavior of a flexible blade for wind turbine application: a 2D computational study[J]. Energy, 2010, 35:778-785.
- [4] 魏义力. 大型风力机叶片的外形设计与数值模拟分析[D]. 大连:大连理工大学,2010.
Wei Y L. The contour design and numerical simulation analysis of great wind turbine blade [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [5] 厉琦. 风力发电机载荷特性及传动系统动力学研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
Li Q. Study on load characteristics of wind turbine and dynamics of the transmission system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [6] 周燕莉. 风力发电的现状与发展趋势[J]. 甘肃科技,2008,24(3):9-11.
Zhou Y L. Current situation and development trend of wind power [J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24(3):9-11.

- [7] Tavner P. Wind power as a clean – energy contributor [J]. Energy Policy, 2008, 36(12):4397 – 4400.
- [8] Rahim A, Ahsanul A L, Kandlawalam F. Dynamic performance improvement of an isolated wind turbine induction generator [J]. Computers and Electrical Engineering, 2009, 35(4):594 – 607.
- [9] 黄本才, 汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 2版. 上海: 同济大学出版社, 2008.
- Huang B C, Wang C J. Theory and application against wind load of structures[M]. 2rd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2008.
- [10] 张果宇, 蒋劲, 刘长陆. 风力发电机整机气动性能数值模拟计算域仿真研究[J]. 华东电力, 2009, 37(3):449 – 452.
- Zhang G Y, Jiang J, Liu C L. Numerical simulation of aerodynamic performance for wind turbines [J]. East China Electric Power, 2009, 37(3): 449 – 452.
- [11] 胡伟. 高耸结构绕流与流固耦合的数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- Hu W. Numerical simulation of wind pass high – rise structure and fluid – solid coupling[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.

Numerical simulation of wind flow around wind turbine tower

DAI Yi – min¹, YAN Xu – guang¹, WANG Xiang – jun¹, LV Wei – hua², LIU Ye¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Maomin Meteorological Bureau, Maomin 525000, China)

Abstract: Based on ANSYS software, a numerical simulation of wind flow around the wind turbine tower was carried out on a simplified model to reveal the aerodynamic characteristics of wind turbine tower structure, the distribution characteristics of surface wind pressures, the influences of wind speed, turbulence intensity, and different height ratio on the tower surface pressures were discussed. Results show that, several continuous recirculation zones are formed on leeward along tower height from top to bottom, lead to pressure on the wall of leeward is positive; wind speed only has an obvious effect on leeward surface pressure of the tower, has little effect on the windward, side walls of tower; turbulence intensity has a different degree effect on model surface wind pressures, the absolute value of surface pressures on the side walls (large area), leeward are reduced with the increase of turbulence intensity; the height ratio has a significant influence on wind pressures on the model surface. The conclusions provide references for the designing of the wind turbine tower.

Key words: wind turbine; tower structure; numerical simulation; wind pressure