

文章编号: 1000-4750(2015)07-0136-07

# 风机塔筒流固耦合分析与受力监测研究

彭文春<sup>1</sup>, 邓宗伟<sup>2</sup>, 高乾丰<sup>3</sup>, 董 辉<sup>3</sup>

(1. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 湖南, 长沙 410014; 2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南, 益阳 413000;

3. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南, 湘潭 411105)

**摘 要:** 为研究大型风力机塔筒在随机风荷载下的受力和变形特性, 用 AR 法模拟脉动风, 基于 ABAQUS 协同仿真平台对风力机进行流固耦合分析, 得到了塔筒的内力和变形, 并与常规静力计算结果和实测结果做了相关对比。分析表明: 塔筒最大应力出现在底、中段塔筒的连接部位, 门洞因洞轴线与主风向垂直并设有门框, 其周围未出现明显应力集中; 忽略塔身风荷载会对塔筒最大应力控制点的位置造成偏差, 考虑脉动风的流固耦合分析所得结果与实测结果接近, 可较真实地反映塔筒内力和变形随时间的变化特性。

**关键词:** 风机塔筒; 流固耦合; 脉动风模拟; ABAQUS 仿真; 现场监测

中图分类号: TK83; TU317 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1229

## FLUID-SOLID INTERACTION ANALYSIS AND STRESS MONITORING RESEARCH OF WIND TURBINE TOWER

PENG Wen-chun<sup>1</sup>, DENG Zong-wei<sup>2</sup>, GAO Qian-feng<sup>3</sup>, DONG Hui<sup>3</sup>

(1. Mid-South Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Changsha, Hunan 410014, China;

2. Hunan City University, College of Civil Engineering, Yiyang, Hunan 413000, China;

3. Xiangtan University, School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan, Hunan 411105, China)

**Abstract:** In order to study the stress and deformation characteristics of a large-scale wind turbine tower under stochastic wind loads, the time-history curve of fluctuating wind was simulated by an AR model. Based on an ABAQUS co-simulation platform, fluid-solid interaction analysis was carried out on wind turbine. Thus, the internal force and deformation of a wind turbine tower were obtained, and contrast analysis was made among calculated and monitored results. Research shows that the maximum stress is concentrated on the connected section of the bottom and middle tower, while no obvious stress concentration is found because of the perpendicularity between doorway axis and the prevailing wind direction, and the door frame being installed. It will cause the deviation of the maximum stress controlling points by ignoring the wind load on the tower. The results calculated by FSI method considering fluctuating agree well with the measured results. Therefore, it can accurately reflect internal forces and displacement variation characteristics with time.

**Key words:** wind turbine tower; fluid-solid interaction; fluctuating wind simulation; ABAQUS simulation; field monitoring

现代风力发电机组正朝着轻型、高效及大型化方向发展, 这就需要设计出更高更可靠的风机塔

架, 以捕获更多的风能。但在实际工程中因环境的多变性和机组运行机制的复杂性, 要准确计算各工

收稿日期: 2013-12-30; 修改日期: 2014-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308198); 湖南省科技计划项目(2013GK3086); 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院科技项目(YJ2012.2.6)

通讯作者: 邓宗伟(1972—), 男, 湖南安化人, 副教授, 博士, 主要从事岩土与基础工程方面的研究工作(E-mail: teapotd@163.com).

作者简介: 彭文春(1974—), 男, 湖南新化人, 高工, 硕士, 主要从事岩土与基础工程方面的研究工作(E-mail: pwch1@163.com);

高乾丰(1989—), 男, 湖南安化人, 硕士生, 从事风力机结构与土的相互作用研究(E-mail: gaoqianfeng2008@163.com);

董 辉(1976—), 男, 湖南安乡人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程、防灾工程方面的研究工作(E-mail: aneurin.h.d@gmail.com).

况下塔架的受力和变形比较困难。目前已有众多学者对风机塔架做了很多静态或动态的强度分析、疲劳分析和屈曲分析等研究,其中许多学者在考虑风对塔筒的作用时,按风载规范、空气动力学理论或 GH Bladed 软件等进行计算,并将风荷载以静节点力的形式施加在塔筒壁上<sup>[1-3]</sup>,有的甚至未做任何说明而直接忽略了塔身风载的影响<sup>[4-5]</sup>。事实上,塔筒整个壁面都要受到风荷载,且风载在时间和空间上都是变化的,因此以上简化方法所得结果的准确性有待进一步讨论。近来有学者从流固耦合(FSI)的角度研究风场对塔筒的作用,其分析结果比较理想。如:贺文山<sup>[6]</sup>用 ADINA 软件对匀速风和脉动风作用下的风电塔结构进行了流固耦合分析,发现匀速风下塔筒各高度处应力的 FSI 模拟值均小于解析结果,考虑脉动风后塔筒应力明显增大,得到随风速的增大 FSI 模拟结果也越精确的结论;Hsu 和 Bazilevs<sup>[7]</sup>对 5MW 大型海上风力机整机进行了流固耦合分析,重点研究了风轮的受力及其与塔筒的相互影响,得到了一些有益结论,但未对塔筒的受力和变形进行分析。

综上所述,当前对于如何准确考虑风对塔筒的作用没有一个可靠的表述,脉动风对塔筒结构受力和变形的影响亦未受到足够重视。针对以上问题,本文基于流固耦合原理,采用 ABAQUS 软件建立塔筒-基础-地基固体模型和流体模型,分忽略塔身风载、塔身风载以节点力施加、只考虑静风的 FSI 和考虑脉动风的 FSI 四种情况展开分析,获得相应条件下塔筒的应力、应变及位移结果,并与实测值进行对比分析,研究随机风荷载作用下塔筒的受力和变形特性,探讨风载的不同施加方式对计算结果的影响,为风机塔筒的设计和计算提供指导。

## 1 ABAQUS 流固耦合分析

流固耦合问题包括两大类<sup>[8]</sup>:第 1 类问题的两相域相互重叠难以明显区分,耦合效应通过描述问题的微分方程来反映;第 2 类问题的耦合作用仅发生在两相交界面上,需要分别建立流体和固体的控制方程,然后通过两相交界面数据的传递进行耦合。

本文利用 ABAQUS/CAE 提供的协同仿真(Co-Simulation)平台实现对风力机的流固耦合分析,属第 2 类流固耦合问题,耦合计算时采用了弱耦合算法<sup>[9]</sup>。ABAQUS 协同仿真分析步骤为<sup>[10-11]</sup>:

首先用 ABAQUS/CFD 求解流体域,将流体域计算结果作为结构域的约束条件;其次通过 ABAQUS/EXPLICIT 求解结构域,使流体域的边界能够随结构域的形变而发生变形,并反馈给流体域,以计算结构域变形对流场的影响,如此反复计算,直至子步的结果达到要求的稳定值。图 1 为 ABAQUS 流固耦合分析的流程图。

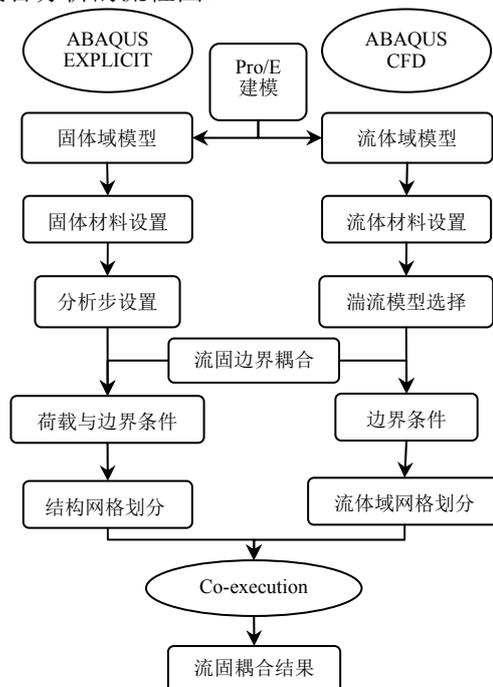


图 1 ABAQUS 流固耦合分析流程图

Fig.1 The flow chart of ABAQUS FSI simulation

## 2 塔筒流固耦合计算

### 2.1 建立塔筒模型

#### 2.1.1 基本资料

本文以湖南郴州桥市风电场 XE93-2000 型 3 叶片 2 MW 水平轴风力机为对象进行分析,其轮毂高 80.0 m,风轮直径 93.4 m,额定风速 11.0 m/s。风机基础采用钢筋混凝土扩展基础,基础底板直径 18.4 m,埋深 3.0 m。塔筒为分段变截面钢锥筒,塔筒总高 77.5 m,共分 3 段,底段塔筒高 19.5 m,外直径 4.4 m,壁厚 30 mm~20 mm;中段塔筒高 28.0 m,外直径 4.4 m~3.8 m,壁厚 20 mm~16 mm;顶段塔筒高 30.0 m,外直径 3.8 m~2.646 m,壁厚 16 mm~14 mm,塔筒间由法兰连接。底段塔筒开设门洞并安置门框,门洞高 2.2 m,宽 0.75 m。塔筒材料为 Q345D 钢材,基础环采用特种钢材料,基础为钢筋混凝土,砼强度等级为 C35,垫层为 C15 素混凝土,地基土为残坡积粘性土,材料特性汇总表 1。

表 1 材料特性汇总表

Table 1 Summary of material characteristics

材料名称	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	内摩擦角 $\psi/(\text{°})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	承载力 特征值 $f_a/\text{kPa}$
地基土	1800	12	0.40	18	20	220
钢材	7850	206000	0.30	—	—	—
基础水泥	2400	31500	0.20	—	—	—
垫层水泥	2400	22000	0.20	—	—	—

为了考虑脉动风对塔筒受力和变形的影响,选取Davenport风速谱用自回归(AR)法对脉动风速进行模拟,并借助MATLAB编程实现,模拟时风速 $v_{10}=7.565 \text{ m/s}$ ,地面粗糙度系数 $k=0.003$ ,自回归阶数 $p=4$ ,时间步长 $\Delta t=0.2 \text{ s}$ ,时距取60 s。图2为轮毂高度处的脉动风时程模拟结果。

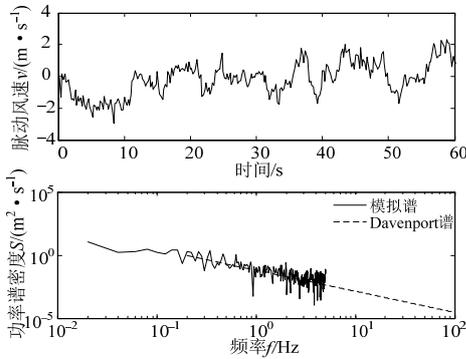


图 2 脉动风时程模拟结果

Fig.2 Time-history simulation results of fluctuating wind

2.1.2 计算模型与荷载

考虑塔筒与地基基础共同工作的塔筒体系的计算模型如图3所示。当风力机正常运行时,塔筒顶部受到的荷载有风轮、机舱自重 $G_1$ 与相应附加力矩 $M_1$ 、风轮水平推力 $F$ 及其附加力矩 $M_2$ 、风轮旋转产生的扭矩 $M_3$ 和风轮俯仰力矩 $M_4$ 等,对于整个体系还有塔筒自重 $G_2$ 、塔身风荷载 $P$ 、基础自重 $G_3$ 、地基自重 $G_4$ 等作用。表2列出了风力机在 $v_{10}=7.565 \text{ m/s}$ 风速条件下正常运行时塔筒顶部的荷载值,其中, $F$ 、 $M_3$ 和 $M_4$ 由动量-叶素理论计算确定, $P$ 以节点力施加时用空气动力学理论求解,计算式分别如下<sup>[1,12]</sup>:

$$F(t) = \frac{1}{2} C_F(\lambda) \rho A V^2(t) \quad (1)$$

$$M_3(t) = \frac{1}{2} C_M(\lambda) \rho A R V^2(t) \quad (2)$$

$$M_4 = \frac{4}{27} \cdot \frac{\rho}{B} \pi R^3 (V_2^2 - V_1^2) \quad (3)$$

$$P_i = \mu_s A_i v_{0i}^2 / 1600 \quad (4)$$

式中: $C_F$ 、 $C_M$ 分别为与叶尖速比 $\lambda$ 相关的推力系数和扭矩系数; $\rho$ 为空气密度; $V(t)$ 为运行风速(考虑脉动风时, $V(t)=v_0+v(t)$ , $v_0$ 为平均风速, $v(t)$ 为脉动风速); $R$ 、 $A$ 分别为风轮直径与扫掠面积; $B$ 为叶片数量; $V_1$ 、 $V_2$ 分别为风轮扫掠中心上、下各2/3叶片半径处的风速; $\mu_s$ 为塔筒体型系数; $A_i$ 为塔筒段 $i$ 迎风面积; $v_{0i}$ 为塔筒节点 $i$ 处的平均风速。

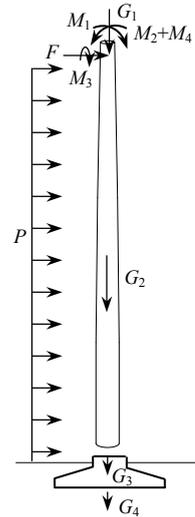


图 3 塔筒-基础-地基体系计算简图

Fig.3 Calculation sketch of tower-foundation-ground system

表 2 风力机塔筒顶部荷载

Table 2 Loads at the top of wind turbine tower

序号	荷载名称	符号	数值	是否计脉动风
1	塔顶重量	$G_1/\text{kN}$	1392.52	是/否
2	风轮水平推力	$F/\text{kN}$	268.99	否
		$\bar{F}/\text{kN}$	271.65	是
3	塔顶重量附加力矩	$M_1/(\text{kN} \cdot \text{m})$	4325.67	是/否
		$M_2/(\text{kN} \cdot \text{m})$	583.70	否
4	风轮推力附加力矩	$\bar{M}_2/(\text{kN} \cdot \text{m})$	589.47	是
		$M_3/(\text{kN} \cdot \text{m})$	1848.70	否
5	风轮轴向扭矩	$\bar{M}_3/(\text{kN} \cdot \text{m})$	1866.97	是
		$M_4/(\text{kN} \cdot \text{m})$	674.69	是/否

2.1.3 ABAQUS模拟

先分别建立塔筒-基础-地基固体模型和塔筒周围流体模型(如图4),然后利用ABAQUS进行常规结构计算和流固耦合分析。固体模型的塔筒、基础和垫层均按实际尺寸建模,塔筒底部设置轴线与主风向垂直的门框,但忽略如爬梯、平台等其他附属结构,地基土模型为直径80 m、高30 m的圆柱体。塔筒、门框采用壳单元模拟,基础钢筋用梁单元模拟,基础、垫层和地基采用实体单元模拟。基础、垫层与地基土间采用摩擦型硬接触,钢筋与基础混凝土间为嵌入接触,其他部件之间均采用绑定接触连

接。固体部分边界为约束地基模型底面的竖直、水平位移以及侧面的水平位移。流体模型为挖去塔筒结构的长方体，其尺寸为50 m×50 m×150 m，流体模型进口边界为速度入口，平均风沿高度呈指数型分布，风切变指数取0.18，平均风 $v_{10}=7.565$  m/s，脉动风时程曲线见图2；假定出口处气流恢复正常，即出口压力为0；设置流体域与固体域的交界面为流固耦合边界，其他界面均采用无滑移壁面边界。钢材和混凝土采用弹性本构模型，地基土采用摩尔-库伦模型，空气用理想气体模拟，密度取 $1.225$  kg/m<sup>3</sup>，动力粘性系数 $\mu=1.79\times 10^{-5}$  kg·(m·s)<sup>-1</sup>，湍流模型选用重整化群RNG  $k-\epsilon$ 模型。

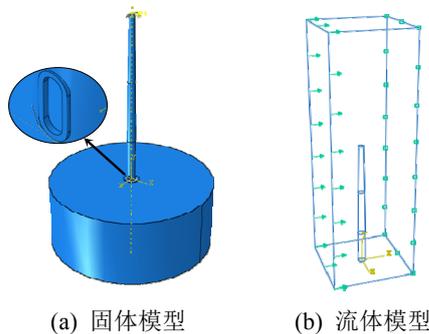


图4 风力机流固耦合计算模型

Fig.4 FSI calculation model of WTGS

## 2.2 塔筒计算结果与分析

### 2.2.1 塔筒常规静力分析

对图4(a)所示的固体模型进行静力分析，风荷载对塔筒的影响分2种情况加以考虑：1) 忽略塔身风荷载，只考虑风载对风轮的作用力；2) 用式(4)算得塔身风荷载后以节点力的形式施加在塔筒的16个节点上。经计算得到塔筒的内力和变形如表3所列，从结果可知，忽略塔身风荷载和风载以节点力施加得到的计算结果十分接近，两者最大应力和最大水平位移的数值均相差不到4.0%。但忽略塔身风荷载时的最大应力点位于中段塔筒，而考虑风载节点力后最大应力点在底段塔筒与中段塔筒的连接处，两者的位置存在20.4%的偏差。因此，在做静力分析时，塔身风荷载对塔筒受力和变形数值大小的影响较小，但会造成塔筒最大应力控制点位置的偏移。

表3 塔筒常规静力计算结果

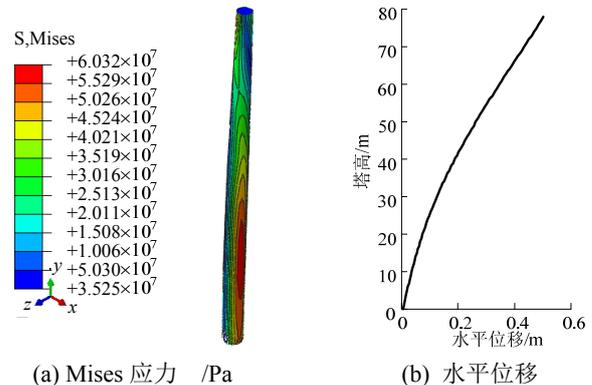
Table 3 Conventional static results of wind turbine tower

塔身风荷载 施加方式	最大Mises应力		最大水平位移	
	数值/MPa	距塔底高/m	数值/m	位置
忽略塔身风载	58.12	24.50	0.485	塔顶
以节点力施加	60.28	19.50	0.501	塔顶

### 2.2.2 塔筒流固耦合分析

#### 1) 考虑静风的流固耦合。

不考虑脉动风影响而将风速看成静风对塔筒进行流固耦合分析，得到塔筒的应力和变形如图5所示。由图5可知，在各种荷载的组合作用下，底段塔筒中上部和中段塔筒中下部背风面的Mises应力较大，最大值为60.32 MPa，在距塔底19.50 m高处；而门洞因轴线与主风向垂直，并设有门框进行加劲，其附近应力相对较小，未出现应力集中。塔筒位移从塔底到塔顶逐渐增大，位移最大值在塔筒顶部，为0.502 m。与常规静力分析相比较，用流固耦合方法考虑塔身风荷载所得的塔筒内力和变形结果与将风荷载以节点力施加得到的结果不管是大小还是分布情况都十分接近。因此，当不考虑脉动风的影响时，塔身风荷载以节点力的形式施加即可满足较高的精度要求。



(a) Mises 应力 /Pa

(b) 水平位移

图5 考虑静风时塔筒的流固耦合分析结果

Fig.5 FSI analysis results of tower with static wind

#### 2) 考虑脉动风的流固耦合。

当风轮和塔筒所受风荷载均计入脉动风的影响时，塔筒最大应力和最大水平位移的变化时程曲线分别如图6、图7所示。分析可知，脉动风作用下塔筒的应力和位移均随时间呈无规则的动态变化，且变化幅度均较大，说明受脉动风的影响显著。塔筒最大Mises应力变化范围为51.0 MPa~101.8 MPa，最大水平位移变化范围为0.17 m~0.82 m，应力和位移的最大值都出现在脉动风作用的第56 s。按非线性分析时高耸结构的水平位移限值为 $H/50$ <sup>[13]</sup>，Q345钢材的屈服强度为345 MPa。显然，考虑脉动风影响后塔筒的应力和位移均在允许范围之内，满足安全性和适用性要求。

图8(a)、图8(b)分别给出了脉动风作用60 s时间内塔筒各截面最大应力和水平位移沿塔高的分布情况。由图8可知，塔筒最大应力沿高度分布比较

复杂,从塔底到塔顶表现为先增大后减小再增大的变化,塔顶和塔底均存在一定应力集中,其中应力最大值在距塔底19.8 m处,最小值在65.4 m位置。水平位移从塔底至塔顶呈非线性增加,最大值位于塔顶。与只考虑静风时的FSI分析结果相比,考虑脉动风影响后,塔筒最大应力点和最大水平位移点的位置基本不变,但最大应力放大了1.69倍,水平位移放大了1.63倍。需要说明的是,本文在对脉动风进行输入时,假设脉动风沿高度不发生变化,均采用塔筒顶部脉动风的时程曲线,此简化可能会造成计算结果一定程度的偏大。

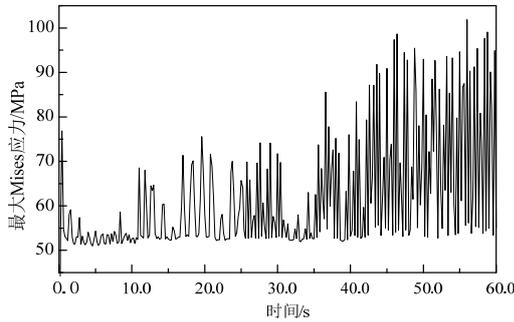


图 6 塔筒最大应力时程曲线

Fig.6 The time-history curve of tower maximum stress

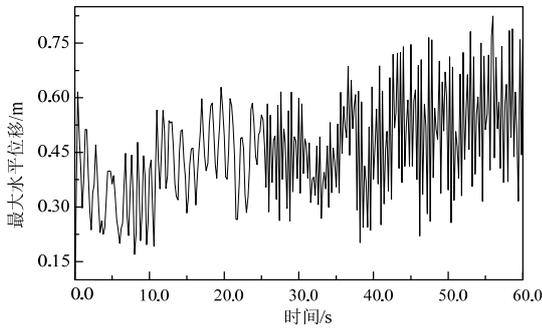


图 7 塔筒最大水平位移时程曲线

Fig.7 The time-history curve of tower maximum displacement

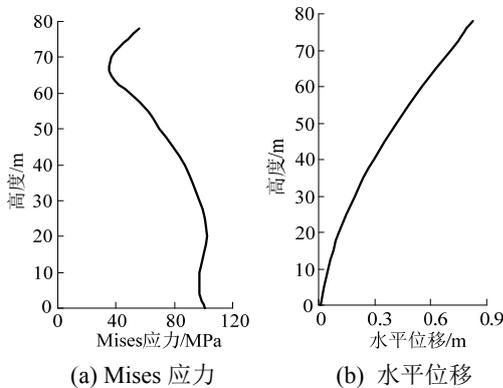


图 8 塔筒 Mises 应力和水平位移沿高度分布

Fig.8 Distribution of Mises stress and horizontal displacement along with the height of tower

### 3 塔筒受力实测分析

#### 3.1 现场应变计布置

采用振弦式表面应变计对风力机塔筒的竖向应变进行现场监测。应变计在塔筒吊装前处于水平地面时进行安装,沿塔筒轴线方向布置在底段塔筒内壁,共布置2个监测断面,分别位于距塔底5.2 m、19.2 m处。考虑到风机塔筒360°方向受力的特点,从主风向起绕塔筒中轴线每隔45°角布设一个测试点,每断面8个测点。图9为塔筒应变计布置示意图。

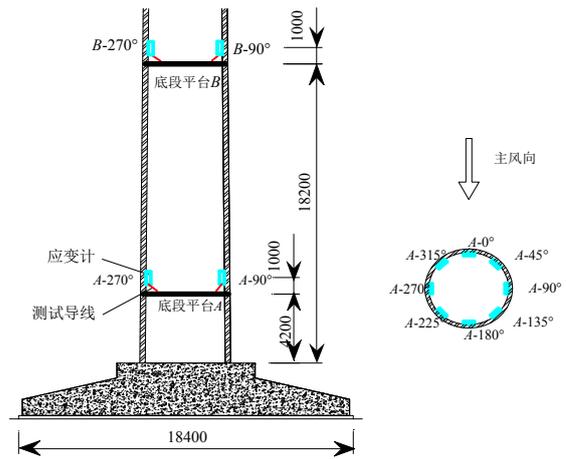


图 9 塔筒应变计布设示意图 /mm

Fig.9 Layout diagram of strain gauge on wind turbine tower

#### 3.2 应变结果对比分析

经过长期观测得到一系列塔筒竖向应变的监测成果。图 10 给出了 7 月 25 日上午 10:00 和 10:10 时刻(该时段内 10 m 高处 10 min 平均风速约为 7.57 m/s)底段塔筒平台 A、平台 B 处竖向应变沿塔筒环向的分布图,其中主风向为 0°→180°。从图 10 可知,平台 A 处实测竖向正应变的最大值为 258  $\mu\epsilon$ , 负应变最大值为-303  $\mu\epsilon$ ; 平台 B 处正应变最大值为 281  $\mu\epsilon$ , 负应变最大值为-329  $\mu\epsilon$ 。塔筒最大正应变均位于 0°方向, 最小负应变均位于 180°方向,说明风力机受风荷载产生的倾覆力矩较大,不仅抵消了上部结构重力引起的附加力矩,而且还在下风向产生了偏心作用。由于风的随机性,使塔筒同一截面不同时刻的竖向应变变化较大,但同一时刻底段塔筒上下不同截面处的竖向应变比较接近,即各截面钢材的强度利用率相当,说明底段塔筒壁厚的设计合理。

将塔筒平台 A、平台 B 处竖向应变的实测值与 2.2 节用不同方法得到的塔筒相应位置的应变计算结果进行比较,见图 11。经对比分析可知,无塔身

风载、节点风载和静风 FSI 这 3 种情况的塔筒应变结果十分接近, 实测值则在以上 3 种计算值的上下变化, 但又处于脉动风 FSI 结果最大值与最小值的范围之内。由此说明, 通常情况下, 静力分析即可满足对塔筒的计算要求, 有时不考虑塔身风荷载亦不会对计算结果造成过大影响; 而流固耦合分析方法, 尤其是考虑脉动风后, 所得计算结果能够更为真实地反映塔筒的受力和变形随时间的变化特性, 因此, 对于处在复杂场地环境中的大型风力机的计算建议采用考虑脉动风影响的流固耦合分析方法。

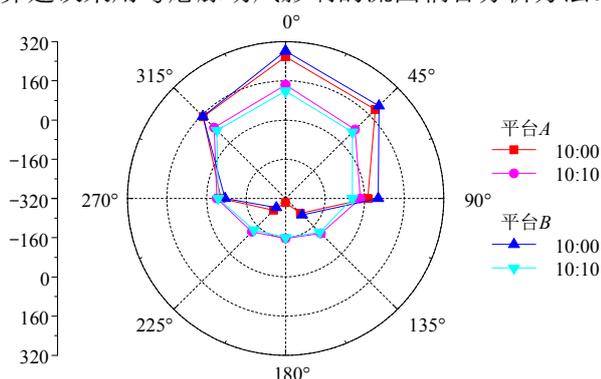


图 10 塔筒竖向应变实测值 / $\mu\epsilon$

Fig.10 The measured longitudinal strain of tower

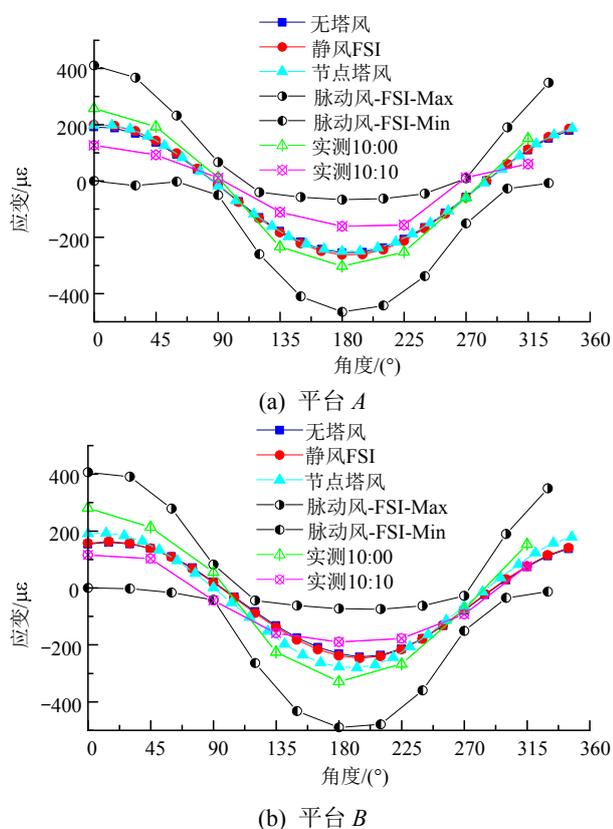


图 11 塔筒应变实测值与计算值比较

Fig.11 Comparison of measured and calculated strain of tower

## 4 结论

(1) 用多种方法得到的塔筒应力较大区域均出现在底段塔筒与中段塔筒的连接部位, 说明该处为塔筒强度的薄弱环节, 进行塔筒设计时应对该部位进行适当加强, 并保证底、中段塔筒的可靠连接。门洞除设置门框进行加劲外, 将其轴线与主风向垂直设置也能很好地减小门洞附近的应力集中。

(2) 在做静力分析时, 塔身风荷载对塔筒内力和变形大小的影响较小, 但会造成最大应力控制点位置的一定偏移。不考虑脉动风时塔身风荷载以节点力的形式施加即可获得与静力流固耦合分析一致的结果, 达到较高的精度要求, 而不考虑塔身风荷载会影响塔筒最大应力控制点的位置。

(3) 考虑脉动风影响后, 塔筒的应力和位移随时间呈无规则的动态变化, 塔筒最大应力仍出现在底、中段塔筒的连接部位, 但应力和位移的大小均有较大提高。考虑脉动风的流固耦合分析方法能较为真实地反映塔筒内力和变形随时间的变化特性, 对于处在复杂场地环境中的大型风力机的计算建议采用此方法。

## 参考文献:

- [1] 宋俊杰. 1.5MW 风力发电机塔筒与塔架的对比研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012: 13—17.  
Song Junjie. The study of comparative 1.5-MW taper cylinder tower with lattice wind turbine tower [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012: 13—17. (in Chinese)
- [2] 刘胜祥, 李德源, 黄小华. 风波联合作用下的风力机塔架疲劳特性分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(10): 1250—1256.  
Liu Shengxiang, Li Deyuan, Huang Xiaohua. Fatigue characteristic analysis of the offshore wind turbine tower under combined wind and wave [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(10): 1250—1256. (in Chinese)
- [3] 徐蕊璇, 吕超. 风切变对风机塔架的载荷和结构分析的影响[J]. 太阳能学报, 2012, 33(7): 1117—1122.  
Xu Bixuan, Lü Chao. Effect of wind shear on the load and structural analysis of the tower for wind turbine [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(7): 1117—1122. (in Chinese)
- [4] 赵世林, 李德源, 黄小华. 风力机塔架在偏心荷载作用下的屈曲分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 901—906.  
Zhao Shilin, Li Deyuan, Huang Xiaohua. Buckling analysis of wind turbine tower under eccentric loading [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(7): 901—906. (in Chinese)

- [5] 陈严, 田鹏, 刘雄, 等. 水平轴风力机锥形塔筒的静动态特性研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(10): 1360—1365.  
Chen Yan, Tian Peng, Liu Xiong, et al. Research on static and dynamic characteristics of cone-shaped tower of HAWTs [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(10): 1360—1365. (in Chinese)
- [6] 贺文山. 考虑流固耦合效应的风电塔结构动力特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2011: 48—69.  
He Wenshan. Study on the dynamic characteristics of wind power tower with fluid-structure interaction [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2011: 48—69. (in Chinese)
- [7] Hsu M C, Bazilevs Y. Fluid-structure interaction modeling of wind turbines: simulating the full machine [J]. Computing Mechanics, 2012, 50: 821—833.
- [8] 朱洪来, 白象忠. 流固耦合问题的描述方法及分类简化准则[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 92—99.  
Zhu Honglai, Bai Xiangzhong. Description method and simplified classification rule for fluid-solid interaction problems [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 92—99. (in Chinese)
- [9] 王彬, 杨庆山. 弱耦合算法的实现及其应用[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 48—59.  
Wang Bin, Yang Qingshan. The realization and application of loosely coupled algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 48—59. (in Chinese)
- [10] Abaqus6.12 CAE user's manual [M]. USA: ABAQUS Inc, 2012: 26.1—26.7.
- [11] Abaqus6.11 analysis user's manual [M]. USA: ABAQUS Inc, 2011: 16.1.1—16.1.5.
- [12] 陈法波. 海上风机结构动力反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 33—34.  
Chen Fabo. Dynamic response analysis for offshore wind turbine structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 33—34. (in Chinese)
- [13] GB 50135-2006, 高耸结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.  
GB 50135-2006, Code for design of high-rising structure [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)

(上接第 117 页)

- [6] Griffiths G, Thom N. Concrete pavement design guidance notes [M]. London: Taylor & Francis, 2007: 77—78.
- [7] JTG D40-2011, 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2011.  
JTG D40-2011, Specifications for Design of Highway Cement Concrete Pavement [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2011. (in Chinese)
- [8] 李思李, 于蕾, 田波, 等. 我国公路荷载的车轴-轮型分类和几何参数研究[J]. 公路, 2011(7): 1—7.  
Li Sili, Yu Lei, Tian Bo, et al. Research on axle-wheel type and geometric parameters of heavy load vehicle in China [J]. Highway, 2011(7): 1—7. (in Chinese)
- [9] 王秉纲, 郑木莲. 水泥混凝土路面设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 204—206.  
Wang Binggang, Zheng Mulian. Design and construction of cement concrete pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 204—206. (in Chinese)
- [10] 李宇峙, 崔鹏, 邵腊庚. 超薄白色罩面(UTW)结构设计方法[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 123—127.  
Li Yuzhi, Cui Peng, Shao Lageng. Design method for ultra-thin white topping (UTW) structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 123—127. (in Chinese)
- [11] 曾攀. 有限元分析及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 262—263.  
Zeng Pan. Finite element analysis and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 262—263. (in Chinese)
- [12] 石小平, 姚祖康, 李华, 顾敏浩. 水泥混凝土的弯曲疲劳特性[J]. 北京: 土木工程学报, 1990, 23(3): 11—22.  
Shi Xiaoping, Yao Zukang, Li Hua, Gu Minhao. Study on flexural fatigue behavior of cement concrete [J]. Civil Engineering Journal, 1990, 23(3): 11—22. (in Chinese)
- [13] JTG E60-2008, 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2008.  
JTG E60-2008, Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2008. (in Chinese)
- [14] ACI Committee 360. Design of slabs-on-ground [R]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2006: 8—10.