

# 自密实混凝土-钢管组合结构风电塔架 模型静力试验

马新伟<sup>1</sup>,李承霖<sup>2</sup>,郭院成<sup>2</sup>,杜昊<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 山东 威海 264209; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要** 目的 对自密实混凝土-钢管组合新型的塔架组合结构进行模型设计, 得出模型的变形规律, 为该方案用于真实的大型组合结构塔架的生产提供一定的理论依据. 方法 以小型风电塔架为使用对象, 通过对钢管混凝土组合结构的优化设计得到经济合理的结构设计方案, 对制作缩小模型进行了强度、刚度、稳定性的测试试验数据进行分析. 以 1.0 mm 厚普通钢板制成内外锥筒, 成内外锥筒, 在夹层中灌自密实混凝土的制作方案. 结果 试件顶部在水平力下应变是增加的趋势, 在受拉底部变化较为剧烈且受拉应变远远大于受压应变, 当加载大于最不利工况 3.345 kN 时结构并未屈服, 满足《风力发电机组设计要求》(JB/T10300—2001)要求. 结论 混凝土可形成自密实的效果并充满钢筒夹层. 该方案可用于真实的大型组合结构塔架的生产.

**关键词** 自密实混凝土; 组合结构; 风电塔架; 缩尺模型

中图分类号 TU398

文献标志码 A

## Static Test of Wind Turbine Tower Model for Self Compacting Concrete-Steel Tube Composite Structure

MA Xinwei<sup>1</sup>, LI Chenglin<sup>2</sup>, GOU Yuancheng<sup>2</sup>, DU Hao<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, China, 264209; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001)

**Abstract:** A new type of self-compacting concrete filled steel tubular tower structure model was designed to study the deformation law of model. It product the theoretical basis for the real large composite structure of the tower. Taking the small model as the test object, an economical and reasonable structural design scheme is obtained through the optimization design of the concrete-filled steel tube composite structure and the strength, stiffness and stability of the scale model are analyzed. The inner and outer cone of the model is made of 1.0 mm thick steel plate, and self-compacting concrete is poured into the interlayer. The test suggests that the strain on the top of the specimen increases under horizontal force, and varies sharply on the tensile side at the bottom and the tensile strain is far greater than the compressive stain. When the load is greater than the most

收稿日期: 2018-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378158)

作者简介: 马新伟(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土木工程材料方面的研究.

unfavorable condition 3.345 kN, the structure does not yield and meet the requirements of code JBT10300-2001. The scheme can be used for the production of large composite structure towers.

**Key words:** self compacting concrete; composite structure; wind turbine tower; scale model

随着高功率风机的高速发展,风电塔架结构需要的高度越来越高,刚度越来越大. 由于结构设计不当事故时有发生. 故对新型的塔架结构的需求迫在眉睫. 然而目前水平轴风力发电机塔架结构主要可分为钢筋混凝土结构<sup>[1-2]</sup>、桁架结构<sup>[3-4]</sup>和锥台型<sup>[8-9]</sup>钢制塔架等<sup>[10-15]</sup>. 早在1994年国外的J. D. HOLMES等<sup>[16]</sup>已对风电塔架进行了动力学分析,考虑了塔架和风轮的耦合效应,运用模态分析的方法对塔架和风轮进行部分建模,阐述了二者的耦合关系对于塔架整体力学性能和稳定性的影响,不过由于未能加入风轮转动,因此其分析结果的适用性不强;K. RY-AN等<sup>[17]</sup>采用相同的方法对其进行了模态分析,但增加了叶片柔度对塔架与风轮的耦合效应的影响,分析结果较为合理. D. J. PO-

LYZOISA等<sup>[18]</sup>材料采用玻璃钢制作了4.88 m高的两个风电塔架缩尺模型进行试验,分析了塔架模型刚度和极限承载能力,在极限承载力下其破坏形式为受压侧剪切破坏和屈曲破坏. 笔者针对自密实混凝土套筒钢管组合这种新型的塔架组合结构进行模型设计,缩尺模型静力试验,进而得出模型的变形规律,为该方案用于真实的大型组合结构塔架的生产提供一定的理论依据.

1 风电塔架模型荷载计算

1.1 模型设计

1.1.1 200W 风力发电机组技术参数

试验采用200W小型风力发电机作为模型,风力发电机组技术参数如表1所示.

表1 风力发电机组技术参数

Table 1 Technical parameters of wind turbine

风轮直 径/m	机舱净 重/kg	风轮净 重/kg	轮毂净 重/kg	法兰净 重/kg	额定转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	启动风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	风轮直 径/m	叶片数/ 片	切出风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	安全风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	额定风速/ (m·s <sup>-1</sup> )
1.35	5.425	0.945	0.475	0.69	400	2.5	1.35	3	25	55	11

1.1.2 塔架模型尺寸

根据所设计的风机容量和叶片尺寸,确定所设计的风电结构形式为锥台型,内外钢管套筒与混凝土形成组合结构,截面为圆环形. 风电塔架模型初步设计高度为1.2 m,外径从顶端的1.2 m处105 mm到底部0 m处202 mm,内径从顶端1.2 m处55 mm到底部0 m处133.5 mm(见图1). 由于风机在正常运行使用过程中通过自动偏航装置随风向的变化改变风轮叶片的朝向,风机下方的支撑体系即风电塔架在风机运行过程中将承受来自不同方向的荷载工况,故考虑风电塔架为对称结构. 孟冉<sup>[19]</sup>对正多边形截面的风电塔架进行研究,得出正四边形风电塔架随荷

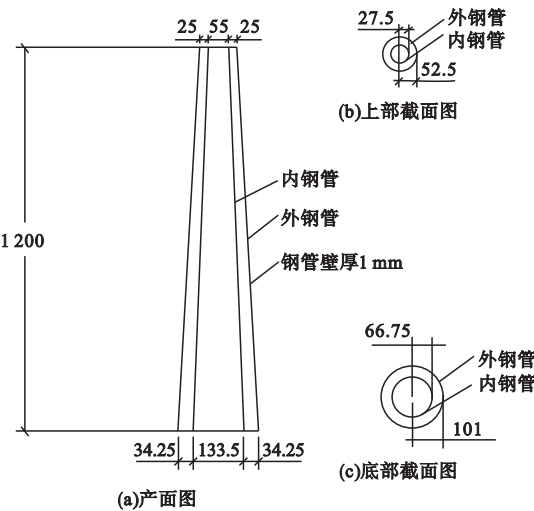


图1 塔架形状

Fig. 1 The shape and size of the tower

载的风向变化其最大应力偏差可达到40%,正多边形塔架截面的边数越多,其受力越均匀。当边数 $\geq 6$ 之后,最大应力偏差可控制在10%以内。圆形截面结构在个方向上拥有一支的稳定性和刚度,这对于工程实际是有利的。笔者设计的风电塔架体型适中,浇筑支模等施工步骤均可在工厂预制完成运送现场拼装,故将混凝土结构的截面形式设计为圆形。根据设计参数,风电塔架结构形式为锥台型,套筒混凝土组合结构,塔段直径考虑国家现行的公路桥梁形式法则中规定的限高,在运输过程中应高率塔段最大外径加上车身最小高度小于4.5 m的缩尺尺寸,故外径从顶部出105 mm到底部处202 mm,内径从顶部55 mm到底部133.5 mm。

## 1.2 荷载计算

根据《风力发电机组设计要求》(JBT10300—2001)规范要求,在设计风机叶片、塔架时考虑到风电机组受到的几种荷载:①惯性荷载和重力;②空气动力荷载;③运动荷载;④其他荷载。所需考虑设计荷载情况见《风力发电机组设计要求》(JBT10300—2001)规范表2。参考《风力发电机组设计要求》(JBT10300—2001)附录D近似偏保守的荷载计算方法,将荷载分为:①正常运行荷载;②阵风荷载;③斜风流或风梯度引起的荷载;④由陀螺力引起的荷载;⑤刹车荷载;⑥由发电机短路引起的荷载。根据规范对这些工况下的荷载进行正常状态下3种组合、极限状态下2种组合与特殊状态下的2种组合方式。通过比较得出最不利情况下的荷载工况。

### 1.2.1 正常运行荷载

(1)作用在风轮上的气动荷载 $P_H$ 。

$$P_H = \frac{\rho}{2} C_{FB} V_r^2. \quad (1)$$

式中: $C_{FB} = 0.89$ ,根据贝茨公式计算; $\rho$ 为空气密度; $V_r$ 为额定风速。

(2)作用在塔架顶部的力 $F_{XH}$ 。

$$F_{XH} = P_H A. \quad (2)$$

式中: $A$ 为风轮扫掠面积。

(3)利用气动力距风轮中心的偏心距 $e_w$ 来考虑湍流以及风斜流和塔尾流的影响,偏心距 $e_w$ :

$$e_w = \frac{wR^2}{2V_r}. \quad (3)$$

式中: $R$ 为风轮半径,m; $w$ 为任一方向风的极端风梯度。

(4)扭矩 $M_{XH}$ 由最大输出功率 $P_{el}$ 确定。

$$M_{XH} = \frac{P_{el}}{\omega\eta}. \quad (4)$$

式中: $\omega$ 为风轮转动角速度; $\eta$ 为发电机和增速器的总效率系数。

### 1.2.2 阵风荷载

作用在风轮上的气动荷载。

阵风速度 $V_b$ 为

$$V_b = k_b V_r. \quad (5)$$

式中: $k_b$ 为阵风系数, $k_b = 1.67$ 。

### 1.2.3 斜风流或风梯度引起的荷载

作用在风轮叶片上的气动荷载如式(1)所示,如果风相对风力机斜向吹来,则假定作用在风轮上的荷载。

$$F_{XH} = P_H A \cos\alpha, \quad (6)$$

$$F_{YH} = P_H A \sin\alpha. \quad (7)$$

式中: $\alpha$ 为风力角。

### 1.2.4 由陀螺力引起的荷载

由陀螺力引起风轮荷载由式(1)求得。风机正常运行中迅速偏转和偏转变化可能对塔架和每叶叶片产生很大荷载。背向、自由转动的风轮有效力矩 $M_{ZT}$ 。

$$M_{ZT} = \pm p_H A e_w. \quad (8)$$

式中: $e_w$ 为气动力距风轮中心的偏心距。

装主动偏航机构的风力发电机组,如果知道塔架的扭转角固有频率 $\omega_T$ ,则可假定:

$$M_{ZT} = I_M \omega_T \Omega. \quad (9)$$

式中: $I_M$ 为风机转动惯量。

如果假定塔架是扭转刚硬的, $M_{ZT}$ 则为偏航系统施加的最大力矩。在偏转运动开始时 $\Omega = \pm M_{ZT}/I_M$ 及 $\Omega = 0$ ,除 $M_{ZT}$ 外还得到的

作用力  $F_{YT}$ .

$$F_{YT} = m_M e_M \Omega. \tag{10}$$

式中: $m_M$  为机舱与风轮的总质量; $e_M$  为质量  $m_M$  的重心距塔轴的距离.

1.2.5 刹车荷载

由最大刹车力矩  $M_b$ ,得轮轴角加速度  $\omega$ :

$$\omega = \frac{M_B}{ZI_B + I_0}. \tag{11}$$

式中: $I_b$  为叶片相对风轮轴的惯性矩; $I_0$  为包括轮毂、风轮轴、变速器和发电机在内的系统有效惯性距; $Z$  为风轮叶片数.

1.2.6 由发电机短路引起的荷载

发电机短路可引起刹车力矩增大.若不知道发电机短路力矩,则必须假设在发电机一侧作用  $N$  倍的工作力矩,根据式(4)计算.

1.2.7 作用在塔架上的风荷载

垂直作用于塔架表面单位面积上的风荷载标准值  $W_k$  为

$$W_k = \beta_s \mu_s \mu_z W_0 = \mu_s \mu_z W_0. \tag{12}$$

式中:空气密度  $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ;  $W_0$  为基本风压,  $W_0 = 0.5 \rho V^2$ .

1.3 荷载工况组合

表 2 内力包络计算结果

Table 2 Internal force envelope data table

正常运行状态 1			正常运行状态 2			正常运行状态 3		
$N/\text{kN}$	$V//\text{kN}$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N/\text{kN}$	$V//\text{kN}$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N/\text{kN}$	$V//\text{kN}$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
0.577	0.670	0.816	0.577	1.240	2.232	0.577	2.170	2.63

1.3.2 极限运行状态

根据《风轮机组》(JBT10194—2000)规范对正常荷载情况的规定,极限运行状态荷载组合与 0 m 截面内力包络的轴力  $N$ 、剪力  $V$ 、弯矩  $M$  计算结果如表 3 所示.其中状态 1 考虑气动力、结冰、控制力、自重的组合,状态

根据《风轮机组》(JBT10194—2000)中的要求将各种荷载组合工况分为正常荷载情况、极限荷载情况以及特殊荷载情况.其中正常荷载情况是由正常外界条件和正常运行组成的;极限荷载情况是由正常运行状态和极限外界条件组合构成;特殊荷载情况通常是由故障运行状态和正常外界条件组成.根据《风轮机组》(JBT10194—2000)对所述荷载工况分类,最终得出 7 种荷载工况.将 7 种荷载工况按设计参数分别进行计算,得到 0 m 截面内力包络的轴力  $N$ 、剪力  $V$ 、弯矩  $M$  值.

1.3.1 正常运行状态

根据《风轮机组》(JBT10194—2000)规范对正常荷载情况的规定,正常运行状态荷载组合与 0 m 截面内力包络的轴力  $N$ 、剪力  $V$ 、弯矩  $M$  计算结果如表 2 所示.其中荷载组合计算时,气动力、自重、操作力的组合系数均为 1.35.状态 1 的风速取切出风速或额定风速 + 9 m/s;状态 2 的风速取切向风速;状态 3 的风速取 0.8 倍风速 + 13 m/s.风阻力的计算均按掠扫面积计算,不考虑偏心.

2 考虑气动力、结冰和自重的组合,除状态 2 气动力的组合系数为 1.5 外,其余荷载的组合系数均为 1.35.状态 1 和状态 2 的气动力计算时风速分别取额定风速 + 13 m/s 和极值风速 + 13 m/s.状态 1 考虑偏心,状态 2 不考虑偏心.

表 3 内力包络数据表

Table 3 Internal force envelope data table

极限运行状态 1			极限运行状态 2		
$N/\text{kN}$	$V//\text{kN}$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N/\text{kN}$	$V//\text{kN}$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
0.597	0.618	1.361	0.656	3.345	4.528

1.3.3 特殊运行状态

根据《风轮机组》(JBT10194—2000)规范对正常荷载情况的规定,特殊运行状态荷载组合与0 m截面内力包络的轴力 $N$ 、剪力 $V$ 、弯矩 $M$ 计算结果如表4所示.其中状态1考虑气动力、控制力、操作力1、操作力2、地震

力、自重的组合.操作力1是指同步电机、感应电机形式的扭矩.状态2是气动力、控制力、操作力1、操作力2、重力的组合.所有荷载的组合系数均为1.0,状态1计算时风速取切向风速;状态2的风速取0.8倍的极值风速+13 m/s,状态1考虑偏心,状态2不考虑偏心.

表4 内力包络数据表

Table 4 Internal force envelope data table

特殊状态1			特殊状态2		
$N/\text{kN}$	$v//\text{kN}$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$N/\text{kN}$	$v//\text{kN}$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
0.428	0.555	1.428	0.428	1.340	2.036

2 风电塔架模型制作

2.1 混凝土材料

试验所采用的自密实混凝土材料和配合

表5 C40 自密实混凝土配合比

Table 5 Mixture ratio of C40 self-compacting concrete

						$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho(\text{水泥})$	$\rho(\text{粉煤灰})$	$\rho(\text{矿渣粉})$	$\rho(\text{石子})$	$\rho(\text{砂子})$	$\rho(\text{水})$	
377	54	108	789	837	197	

2.2 塔架模型钢筒制作

钢筒采用薄钢板卷筒,并在交界处进行焊接.钢筒制作完成后开始进行混凝土的浇筑和养护,通过计算钢筒夹层的体积为13.8 L,塔架自重为36.557 kg.浇筑完成后如图2所示.

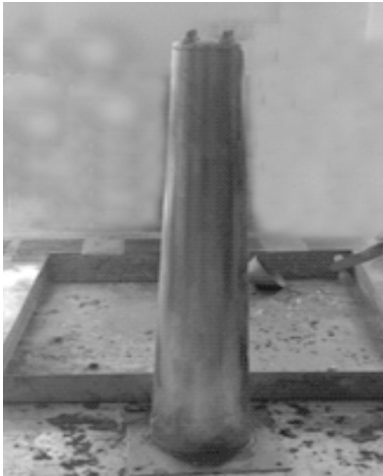


图2 试验塔架模型

Fig. 2 Tower structure model

比依据《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)采用C40自密实混凝土土配合比如表5所示.

3 风力塔架模型静力试验

3.1 试验方法

试验现场布置如图3所示.

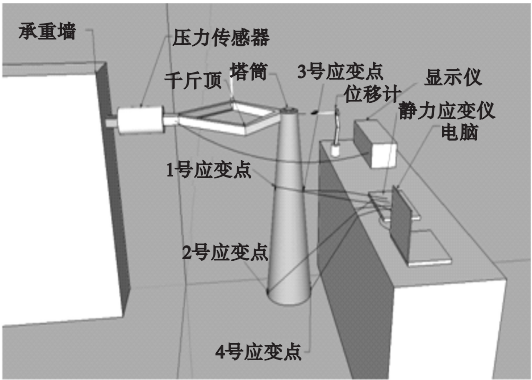


图3 试验现场布置图

Fig. 3 Site layout of test

试验用千斤顶进行水平力的加载,并通过压力传感器将所受力数据化并记录下来,同时在塔架前后上下对称粘贴4个应变片通过静力应变仪得出受不同力的应变值再用千



分表位移计记录下每次加载时对应的侧向位移。在加载时应分级,多次加载,尽量多测数据,并且保持每次加载力的数值平稳均匀上升,加一次荷载,读一次位移计读数,测一次4个应变点的应变值,千斤顶以半圈为单位平稳加载,尽量保持均匀加载。多次测量后应再多次加载小幅力值,以保持数据尽可能的准确性。加载时应保持压力传感器、千斤顶、试验试件在一条直线上对心加载,以防产生偏心荷载引起弯矩。试件底部尽量保持与地面的固结,以减少受力时侧移产生的误差。

### 3.2 试验结果分析

笔者在对数据的处理时首先将试验坏点去除,然后利用 matlab 矩阵计算软件将散点画出,通过最小二乘法来实现对实验数据的回归,拟合出一条最为合适的曲线,并将同类曲线画在一张图像中进行比较分析。对试验数据进行拟合,不同部位受拉、压的应变值与上端部水平荷载的关系如图4所示,正为拉负为压。1号应变点为中部受拉、2号应变点为底部受拉、3号应变点为中部受压、4号应变点为底部受压。

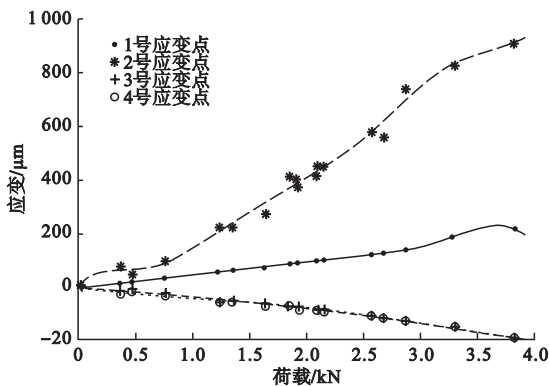


图4 拉、压的应变与上端部水平荷载的关系

Fig. 4 Relations between the horizontal load and strains

从图4中可以看出:从图像变化趋势上看。在受不同静力水平荷载的作用下,应变点1、2、3、4处产生的应变的大小随着荷载的加大而增加。从大小来看应变点2大于应变点1,应变点4大于应变点3。说明试件底部应

变要大于上部应变,说明试件底部所受静力荷载较大的影响。从大小来看应变点2与应变点4大于应变点1和应变点3。由于受拉区底部拉力主要由钢筒承担,混凝土已退出工作,而受压区由筒和混凝土共同承担,所以不会像纯钢构件一样出现拉压应变接近的情况。故底部受拉的试验应变要远远大于受压应变。

## 4 结论

(1)根据现行《风力发电机组设计要求》(JB/T10300—2001)规范进行小型风电机塔架设计,该小型塔架可作大型风电塔架的模型,对风电塔架的受力进行了力学性能研究。

(2)以1.0 mm厚普通钢板制成内外锥筒,成内外锥筒,在夹层中灌自密实混凝土的制作方案,混凝土可形成自密实的效果,并充满钢筒夹层。该方案可用于真实的大型组合结构塔架的生产。

(3)通过试验证明了试件顶部在水平力下应变大小是增加的趋势并在受拉底部变化较为剧烈且受拉应变远远大于受压应变,当加载大于最不利工况3.345 kN时结构并未屈服满足规范要求。

## 参考文献

- [1] 李正超. 预应力混凝土-钢组合风电塔架钢箱混凝土连接段性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.  
(LI Zhengchao. Study on the performance of concrete-filled steel box connection of prestressed concrete-steel hybrid wind turbine tower [D]. Changsha: Hunan University, 2015.)
- [2] LIANG S, ZOU L, ZHAO L, et al. Mathematical models of dynamic wind loads on lattice towers[J]. Journal of tongji university, 2008. 36(2): 166-171.
- [3] 闻洋, 屈琳琳, 管丽佩. 格构式钢管混凝土风电塔架KT型节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9): 110-116.  
(WEN Yang, QU Linlin, GUAN Lipei. Experimental study on mechanical behavior of KT-type joints of latticed concrete-filled steel tubu-

- lar wind turbine tower[J]. Journal of building structures, 2015, 36(9): 110 – 116. )
- [ 4 ] BJORK T, HEINILA S, MARQUIS G. Assessment of subzero fracture of welded tubular K-joint [ J ]. Journal of structural engineering, ASCE, 2008, 134(2): 181 – 188.
- [ 5 ] 姜顺先, 王存堂, 于浩源. 格构式钢管混凝土风力发电塔架设计[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 202 – 205.  
( JIANG Shunxian, WANG Cuntang, YU Haoyuan. Design of wind turbine tower using lattice concrete-filled steel tube[J]. Journal of Liaoning technical university( natural science ), 2012, 31(2): 202 – 205. )
- [ 6 ] 韩中周. 钢管混凝土格构式三肢柱风力发电机塔架受力性能研究[D]. 包头: 内蒙古大学, 2011.  
( HAN Zhongzhou. Steel pipe concretes trellis type three extremity column wind-driven generator tower stress performance research [ D ]. Baotou: Inner Mongolia university of science and technology, 2011. )
- [ 7 ] 刘延翔. 钢 – 混凝土组合结构风电塔架设计关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
( LIU Yanxiang. Refined research of steel-concrete composite structure for wind turbine tower [ D ]. Harbin: Harbin Industrial University, 2016. )
- [ 8 ] 董崇海. 钢 – 混凝土组合结构风电塔架力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
( DONG Chonghai. Research on mechanical performance of steel-concrete composite structure for wind turbine tower [ D ]. Harbin: Harbin Industrial University, 2015. )
- [ 9 ] BOTZ M, OBERLÄNDER S, RAITH M, et al. Monitoring of wind turbine structures with concrete-steel hybrid-tower design [ C ]. European Workshop on Structural Health Monitoring, 2016.
- [ 10 ] QUILLIGAN A, O'CONNOR A, PAKRASHI V. Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers [ J ]. Engineering structures, 2012, 36(4): 270 – 282.
- [ 11 ] TRACY L, TOM C A. new tower technology for reducing cost of energy [ J ]. North American wind power, 2005, 48(4): 48 – 53.
- [ 12 ] 单蕾. 风力机塔架结构选型与受力性能研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
( SHAN Lei. Selection and mechanical properties of wind turbine tower structure [ D ]. Harbin: Harbin Industrial University, 2011. )
- [ 13 ] ZHAO Z Y, YAN H, ZUO J, et al. A critical review of factors affecting the wind power generation industry in China [ J ]. Renewable & sustainable energy reviews, 2013, 19 ( 3 ): 499 – 508.
- [ 14 ] WANG Jinfu, HAN Linhai. Hysteretic behavior of flush end plate joints to concrete-filled steel tubular columns [ J ]. Journal of constructional steel reasearch, 2009, 65(8): 164 – 167.
- [ 15 ] 孙海磊. 风力发电塔筒受力性能的试验研究 [ D ]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.  
( SUN Hailei. Experimental study of wind turbine tower by force performance [ D ]. Baotou: Inner Mongolia university of science and technology, 2012. )
- [ 16 ] HOLMES J D. Along-wind response of lattice tower: part I-derivation of expressions for gust response factors [ J ]. Engineering structures, 1994, 16(4): 287 – 292.
- [ 17 ] RYAN K, JASON C. FEMA 356 the Seismic Rehabilitation of Buildings [ J ]. Federal emergency management agency, 2000, 23 ( 3 ): 4 – 6.
- [ 18 ] POLYZOISA D J, RAFTOYIANNIS B I G, UNGKURAPINAN N. Static and dynamic characteristics of multi-cell jointed GFRP wind turbine towers [ J ]. Composite structures, 2009, 90 ( 1 ): 34 – 42.
- [ 19 ] 孟冉. 预应力混凝土风电塔架优化设计研究 [ D ]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
( MENG Ran. Optimal design of pretressed concrete wind turbine towers [ D ]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. )
- [ 20 ] 牛家兴. 预应力混凝土 – 钢组合风电塔架结构性能研究 [ D ]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
( NIU Jiaxing. Research on the structural performance of pretressed concrete-steel hybrid wind turbine tower [ D ]. Changsha: Hunan University, 2014. )