

文章编号:0254-0096(2018)01-0240-07

# CFRP 拉索型风电结构抗震性能研究

章子华<sup>1</sup>, 楼志挺<sup>2</sup>, 诸葛萍<sup>1</sup>

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘 要:** 基于 Davenport 脉动风功率谱和自回归(AR)法模拟并验证沿海某风电场的常态风风场。建立 CFRP 拉索型风电结构的有限元模型,采用宁河天津波作为地震输入,进行考虑风荷载和地震荷载共同作用的结构非线性动力时程分析。结果表明,拉索型风电结构前三阶自振频率较传统型风电结构增加约 20%。风荷载和地震荷载同时作用下,其轮毂水平位移、塔筒底部等效应力和最不利单桩轴力等关键性指标均比传统型风电结构显著减小,CFRP 拉索内力也留有足够的设计裕度。因此,提出的拉索型风电结构是一种有效可行的风电抗震体系。

**关键词:** 风能; 自回归模型; 地震; CFRP; 索  
**中图分类号:** TU352.2 **文献标识码:** A

## 0 引 言

目前,风电已成为我国新能源产业的重要组成部分。据调查,我国已建成的风电场中有相当一部分位于地震活跃区,风电场遭受地震灾害的情况也屡有发生。例如,2012 年 9 月 7 日,云南省昭通市彝良县、贵州省毕节市威宁彝族回族苗族自治县交界处发生 5.7 级地震,马摆大山风电场、西凉山风电场和支锅山风电场受到影响。2012 年 10 月 21 日,吐鲁番市发生 4.6 级地震,大唐托克逊风电场有轻度震感。2013 年 3 月 3 日,云南省大理白族自治州洱源县先后发生 3 级、2.8 级与 5.5 级 3 次地震,大唐洱源风电场震感强烈<sup>[1]</sup>。东南沿海是我国风电的重点发展区域,处于环太平洋地震带。虽然目前未有沿海风电场遭遇地震灾害的情况发生,但仍有必要未雨绸缪,对在地震荷载作用下的风电结构安全性进行深入研究,并提出相应的防治对策。

从失效机理上看,在竖向和水平地震荷载作用下,风电结构轮毂处水平位移加大,各段塔筒联接处、塔筒底部、塔筒与基础环联接处的应力增大,可能发生塑性变形,从而导致风电结构的失稳破坏。另一方面,在存在液化土的风电场中,地震液化后造成桩基承载力下降,风电结构可能发生倾覆破

坏。目前,已有国内外学者展开了风电结构的抗震研究。曹 青等<sup>[2]</sup>利用有限元法建立用弹簧阻尼单元近似模拟土-结构相互作用的风电结构模型,发现土-结构相互作用对风电结构地震响应的影响不容忽视,在材料线弹性范围内竖向地震荷载和  $P-\Delta$  效应对结构的动力特性影响较小。贺广零等<sup>[3]</sup>、刘海卿等<sup>[4]</sup>的研究也得出类似结论。目前,大部分研究仅考虑地震荷载,与实际情况并不相符。由于地震的突发性,地震发生时风电机组一般仍处于工作状态,即风电结构在承受地震荷载的同时还承受风荷载。鉴于风电结构对水平荷载的敏感性,两种荷载的叠加更易造成结构倾覆、弯折。因此,本文在风电结构地震时程分析时同时考虑了常态风荷载的影响。

为提高风电结构在地震作用下的生存能力,借鉴桅杆的结构型式,可采用给风电结构加斜拉索的方法来实现。拉索只能承受张力而无弯矩,可有效分担水平荷载,减小塔筒截面弯矩,从而达到节省材料、降低造价的目的。本文通过在传统的水平轴风力发电机的基础上,增设 CFRP 拉索(carbon fiber reinforced plastics),结合复合式丝股锚固体系,以提高风电结构抗震性能。建立包含下部桩基、承台、上部风电结构、CFRP 拉索的风电结构有限元模型,

收稿日期: 2015-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(51308307); 宁波市自然科学基金(2014A610169); 宁波大学校科研项目(XYL14010)

通信作者: 章子华(1984—), 男, 博士、副教授, 从事新型结构和组合结构方面的研究。zhangzihua@nbu.edu.cn

计算结构自振特性以及地震荷载和风荷载共同作用下的结构动力响应,验证在震区应用该结构体系的可行性。

## 1 风电结构

### 1.1 传统型风电结构

本文研究的风电结构为 1.5 MW 级风力机。塔筒包含上、中、下三段和基础环,各部分尺寸列于表 1。塔筒全高 62.75 m,轮毂高度 65 m,材料参数列于表 2。风力机采用桩基础,混凝土承台内外圈分别布置 6 根和 24 根预应力高强混凝土(PHC)桩。通过单桩试验获得的单桩水平和竖向刚度分别为  $E_h=1.8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ,  $E_v=1.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

表 1 塔筒尺寸

Table 1 Dimensions of tower

塔筒部件	上径×下径×高/m	筒壁厚度/m
下段	$\Phi 3.6 \times \Phi 4.0 \times 17.6$	上部 0.022
		下部 0.026
中段	$\Phi 3.0 \times \Phi 3.6 \times 22.4$	上部 0.016
		下部 0.022
上段	$\Phi 3.0 \times \Phi 3.2 \times 22.4$	上部 0.018
		下部 0.016
基础环	$\Phi 4.0 \times \Phi 4.0 \times 0.6$	0.06

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

部件	弹性模量 $E/\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比 $\mu$	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$
机舱 (含叶轮)	$2.1 \times 10^{11}$	563	0.3	—
塔筒	$2.1 \times 10^{11}$	7850	0.3	345
承台	$3.25 \times 10^{10}$	2500	0.167	—

### 1.2 拉索型风电结构

文献[5]提出一种带 CFRP 丝胶粘结型锚固体系的拉索型风电结构。拉索可承担部分水平荷载,有效减小风力机塔筒的水平位移和应力,防止塔筒的屈曲失稳。由塔筒和拉索组成的桅杆型结构在水平荷载作用下,易发生大变形破坏,故在结构的动力分析中必须考虑几何非线性效应[6]。拉索

型风电结构如图 1 所示,为避免加设的 CFRP 拉索对叶轮的工作造成影响,拉索与塔筒的夹角不宜过大。CFRP 索的极限抗拉强度为 2200 MPa,密度为  $1700 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $1.3 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,单索截面面积取  $1000 \text{ mm}^2$ 。

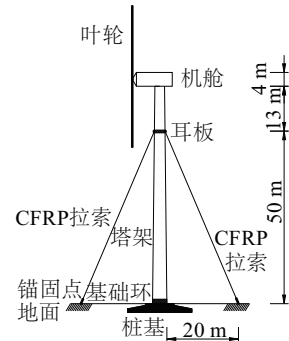


图 1 拉索型风电结构

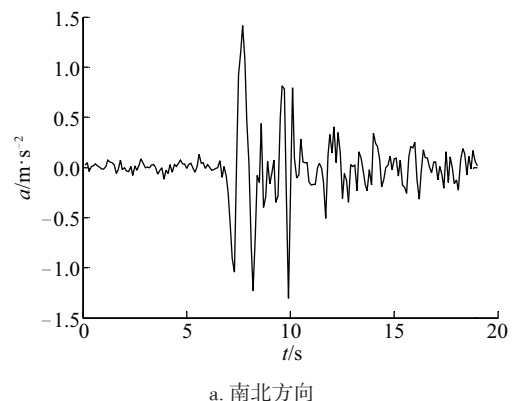
Fig. 1 Wind power structure with cables

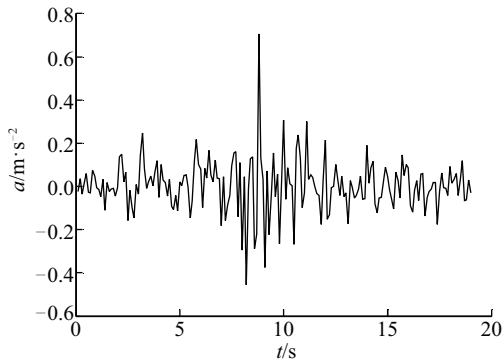
## 2 荷载计算

一般情况下,地震发生时风电机组仍处于正常工作状态,即风电结构同时承受地震荷载和风荷载作用。为实现这两种荷载的同时加载,并在时域内进行结构动力响应分析,需获得可靠的地震加速度时程曲线和风荷载时程曲线。

### 2.1 地震加速度

本文采用宁河天津波作为输入地震波,取其竖直方向和南北方向的记录,记录时长为 19.0 s,时间间隔为 0.1 s。选取该地震波基于以下两点考虑:1) 本身是沿海地区的天然波,继承了良好的地震特性;2) 此波水平方向(南北方向)的峰值为  $0.15g$ ,与本文所研究的风电场所地区的地震动峰值一致。地震动曲线如图 2。





b. 垂直方向

图2 地震加速度曲线

Fig. 2 Time history curve of seismic acceleration

## 2.2 风荷载

### 2.2.1 风速时程

本文所研究的风电场位于江苏省东台市,由当地测风资料知,风电场代表年 10 m 高度处的平均风速为 5.12 m/s,50 年一遇 10 min 最大平均风速为 23.48 m/s。考虑对结构较不利情况,计算时取后者。

常态风由平均风和脉动风两部分组成。平均风风速不随时间变化,而脉动风则被视为一个随机高斯过程。本文基于 Davenport 脉动功率谱模拟脉动风风速时程<sup>[7]</sup>,即:

$$\begin{cases} S_v(n) = 4k\bar{v}_{10}^2 x^2 / [n(1+x^2)^{4/3}] \\ x = 1200n/\bar{v}_{10} \\ n = \omega/2\pi \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $S_v(n)$  ——脉动风速功率谱;  $k$  ——地面粗糙系数,根据文献[8]推算得  $k=0.00215$ ;  $\bar{v}_{10}$  ——该地 10 m 高度处的平均风速;  $n$  ——脉动风频率;  $x$  ——湍流积分尺度系数。

自回归法具有计算量小、计算速度快的特点,广泛用于结构风场模拟<sup>[9]</sup>。AR 模型中  $M$  个点的脉动风速可表示为:

$$V(t) = \sum_{k=1}^p \psi_k V(t-k\Delta t) + N(t) \quad (2)$$

式中,  $p$  ——模型阶数;  $\Delta t$  ——模拟风速时程的时间步长;  $\psi_k$  ——自回归系数矩阵;  $N(t)$  ——均值为零且具有给定协方差的正态分布随机过程向量。

基于 AR 法在 Matlab 平台上模拟生成风电场 7 个不同高度处的常风脉动风速时程。鉴于篇幅限制,仅给出 65 m 高度处(即轮毂中心)的模拟脉动风速时程曲线(图 3)。

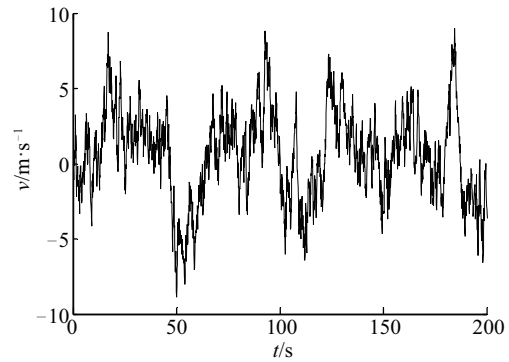


图3 65 m处模拟脉动风速时程

Fig. 3 Simulated fluctuating wind at the height of 65 m

通过比较模拟脉动风功率谱与目标功率谱发现(见图 4),两者吻合度较高,说明模拟风谱在频域内的能量分布与实际风谱基本一致,可用于模拟结构的风振响应分析。

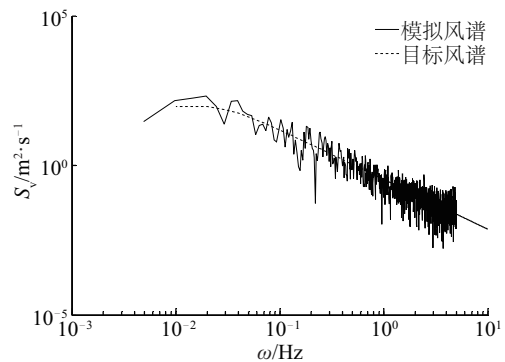


图4 脉动风功率谱密度

Fig. 4 Power spectral density of fluctuating wind

### 2.2.2 风荷载时程

作用于叶片的水平轴向力按式(3)推算<sup>[10]</sup>:

$$F_h = C_D \rho v^2 A \quad (3)$$

式中,  $C_D$  ——叶片阻力系数,取 1.1;  $\rho$  ——空气密度;  $v$  ——风速;  $A$  ——叶片迎风面积。

基于塔筒不同高度处的风速时程曲线、风速风压关系、体型系数和迎风面积可计算获得各高度的风荷载时程曲线。

## 3 结构动力分析

### 3.1 有限元模型

风电结构有限元模型中,塔筒、机舱、PHC 桩分别采用 SHELL63 单元、SOLID45 单元和 COMBIN14 单元模拟。CFRP 拉索则采用 LINK10 单元,并假设

其仅可承受拉力(tension-only)。有限元模型共包含15592个单元,如图5所示。

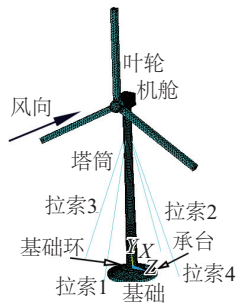


图5 CFRP拉索型风电结构有限元模型

Fig. 5 FE model of the presented structure

### 3.2 结构自振特性

通过 Block Lanczos 法对结构进行模态分析。由表3可见,CFRP拉索的锚固作用显著改善了结构的整体刚度,前三阶自振频率比传统型风电结构提高约20%,这对减小结构风振和地震响应较为有利。

表3 风电结构自振频率

Table 3 Natural vibration frequency of wind power structures

振型	自振频率/Hz		(1)/(2)
	传统型(1)	拉索型(2)	
1	0.4093	0.4927	83.07%
2	0.4150	0.5001	82.98%
3	1.6073	2.0800	77.27%
4	2.1899	2.1984	99.61%
5	2.4607	2.4644	99.85%

### 3.3 结构动力响应

为验证本文所提结构的抗震性能,分别在传统型和拉索型风电结构上同时施加水平地震加速度、竖向地震加速度和风荷载,并进行时程分析。从对结构不利的角度考虑,假设水平地震方向垂直于叶轮扫略面(即图2中水平向右方向)。对拉索型结构而言,需在塔底和拉索锚固点同时输入地震加速度激励。

#### 3.3.1 轮毂水平位移

轮毂水平位移是风电结构整体稳定性和安全性的控制性指标之一。根据《高耸结构设计规范》(GB 50135—2006)规定计算,该风力机轮毂水平位移限值为0.65 m。由图6可见,CFRP拉索有效限

制了塔架的水平位移,其轮毂水平位移仅为-0.025~0.201 m,满足要求。

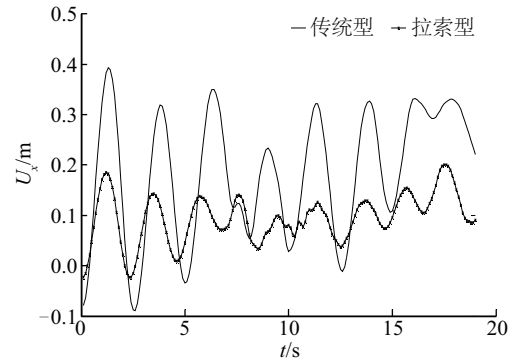
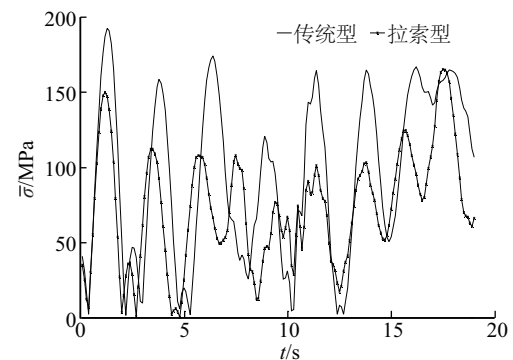


图6 轮毂水平位移时程

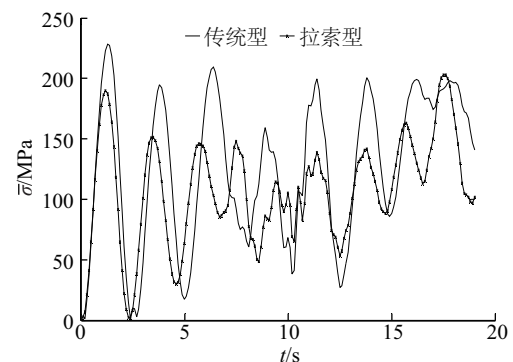
Fig. 6 Horizontal displacement history of the hub

#### 3.3.2 塔筒应力

水平荷载作用下,塔筒应力分布呈上小下大的特点,下段塔筒是屈曲破坏的危险区域。选取塔筒底端迎风面和背风面两处单元为研究对象,两单元应力时程曲线如图7所示。由图7可知,在整个计算时长内,CFRP拉索型风电结构的塔筒底端应力均在钢材屈服强度345 MPa以下,显著降低了塔筒



a. 迎风面



b. 背风面

图7 塔筒底端等效应力时程

Fig. 7 Von-Mises stress history of tower bottom



屈服的可能性。塔筒底端最大应力值出现在  $t$  为 17.5 s 时,比传统型结构的塔筒最大应力降低约 11%。由该时刻塔筒底部的等效应力分布图(图 8)可见,屈服区域位于塔筒下段与基础环衔接处,主要原因是此处弯曲应力较大且存在由于厚度突变导致的应力集中。

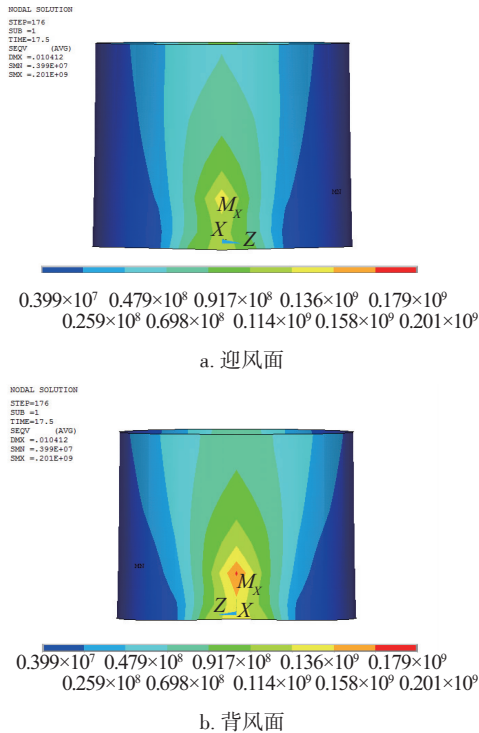


图 8 塔筒底部等效应力分布( $t=17.5$  s)

Fig. 8 Von-Mises stress of the tower bottom while  $t=17.5$  s

### 3.3.3 单桩轴力

在水平荷载作用下,风电结构的桩基础通过部分单桩受拉,部分单桩受压来提供弯矩抵抗倾覆弯矩。此时,外圈桩迎风面单桩(沿风速方向的轮毂竖向剖面上)竖向拉力达到最大,同一剖面的背风面单桩竖向压力达到最大,故上述 2 桩为最不利单桩(若上部结构自重较大,则有可能出现全部单桩受压的情况)。由两桩的轴力时程(图 9)可知,拉索型风电结构迎风面桩的轴力为 226~413 kN,背风面桩的轴力为 380~571 kN。据设计资料知,该结构单桩竖向极限承载力标准值为 1250 kN,单桩桩身正截面受拉承载力标准值为 2500 kN,故最不利单桩的轴力均在安全范围内。与传统型结构相比,CFRP 拉索不仅降低了最不利单桩内力,而且减小了单桩内力变化幅度,可提高其抗疲劳性能,同时减小对桩周土体的扰动。背风面单桩内力平均值降低约 3%。

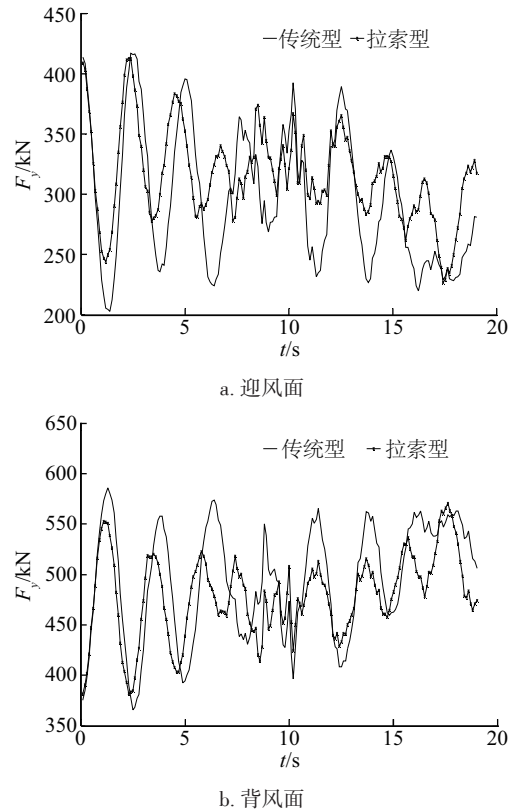


图 9 最不利单桩轴力时程

Fig. 9 Axial force of unfavorable piles

### 3.3.4 拉索内力

在风荷载及地震荷载共同作用下,水平荷载主要由拉索 1 分担,拉索 2 内可能出现拉应力,而拉索 3 和拉索 4 与塔筒组成的面与水平荷载的方向垂直,故拉索 3、4 的轴向应力均可忽略不计。由拉索 1 和拉索 2 锚固端轴向拉应力时程曲线(图 10)可知,拉索 1 的最大轴向拉应力约为 209 MPa,仅为其极限抗拉强度的 9.5%,留有足够的设计裕度。在本文假定风向下,拉索 2 内的拉应力很小,仅在  $t$  为 2~3 s 内出现。

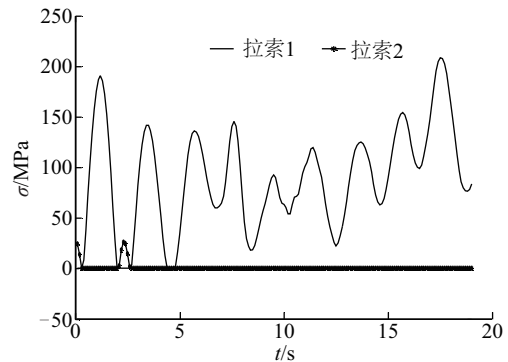


图 10 CFRP 拉索锚固端轴向拉应力时程

Fig. 10 Axial tensile stress of CFRP cables at the anchor end

## 4 结 论

通过自振特性分析发现,拉索型风电结构的整体刚度较传统型风电结构有显著提高。通过对比计算上述两类结构在常态风荷载和地震荷载共同作用下的结构动力响应发现,由于拉索有效分担了水平荷载,风电结构的轮毂水平位移、塔底应力和最不利单桩内力等控制性指标均有效降低,CFRP拉索内力显著小于其抗拉极限强度。因此,CFRP拉索型风电结构不失为一种高性价比的抗震风电结构,具有良好的应用前景。需要指出的是,本文所提结构是通过直接在传统型风力机上加设 CFRP拉索实现的,后期有必要在风致拉索振动、结构优化等方面进一步展开研究。

### [参考文献]

- [1] 王长尧. 风电场如何应对地震灾害[N]. 中国能源报, 2013-04-29.
- [1] Wang Changyao. How do the wind farms deal with the earthquake disaster[N]. China Energy News, 2013-04-29.
- [2] 曹 青, 张 豪. 考虑土-结构相互作用的风电机组塔架地震响应分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 62—66.
- [2] Cao Qing, Zhang Hao. Seismic response analysis of wind turbine tower with soil-structure interaction[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1): 62—66.
- [3] 贺广零, 周 勇, 李 杰. 风力发电高塔系统地震动力响应分析[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 72—77.
- [3] He Guangling, Zhou Yong, Li Jie. Seismic analysis of wind turbine system[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7): 72—77.
- [4] 刘海卿, 杜 岩, 于春艳. 考虑土-结构相互作用锥形管风电塔架地震响应分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(增刊): 116—118.
- [4] Liu Haiqing, Du Yan, Yu Chunyan. Considering soil-structure interaction tapered pipe wind power tower earthquake response analysis [J]. Building Structure, 2010, 40(Sup): 116—118.
- [5] 章子华, 李俊华, 诸葛萍, 等. CFRP锚索型风电结构抗台风性能研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1966—1972.
- [5] Zhang Zihua, Li Junhua, Zhuge Ping, et al. Study on the typhoon resistance performance of wind power structure with CFRP cables [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2017, 38(7): 1966—1972.
- [6] 瞿伟廉, 李 波, 周 强. 桅杆结构风振响应及控制研究综述[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(11): 53—56.
- [6] Qu Weilian, Li Bo, Zhou Qiang. A survey of wind responses and control of guyed mast[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(11): 53—56.
- [7] 章子华, 王振宇, 刘国华. 风电场脉动风模拟及风力机塔架动力响应研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 992—998.
- [7] Zhang Zihua, Wang Zhenyu, Liu Guohua. Simulation of fluctuating wind in wind farm and dynamic response of wind turbine tower [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(7): 992—998.
- [8] 王修琼, 崔剑峰. Davenport谱中系数 $K$ 的计算公式及其工程应用[J]. 同济大学学报, 2002, 30(7): 849—852.
- [8] Wang Xiuqiong, Cui Jianfeng. Formula of coefficient  $K$  in expression of Davenport spectrum and its engineering application [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(7): 849—852.
- [9] 沈国辉, 黄俏俏, 郭 勇, 等. 脉动风场的模拟方法及其在输电线路风振计算中的应用[J]. 空气动力学报, 2012, 31(1): 69—74.
- [9] Shen Guohui, Huang Qiaoqiao, Guo Yong, et al. Simulation methods of fluctuating wind field and its application in wind-induced response of transmission lines [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 31(1): 69—74.
- [10] 李庆宜. 小型风力机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [10] Li Qingyi. Design of small wind turbine [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.

## STUDY ON THE SEISMIC RESISTANCE PERFORMANCE OF WIND POWER STRUCTURE WITH CFRP CABLES

Zhang Zihua<sup>1</sup>, Lou Zhiting<sup>2</sup>, Zhuge Ping<sup>1</sup>

(1. *College of Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;*

2. *Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

**Abstract:** Wind power structures are prone to overturn or bending under the seismic disaster, due to the sudden of seismic and the sensitivity of the wind power structure to the horizontal load. Based on a power-spectrum-density (PSD) model of Davenport and the auto-regressive (AR) method, the regular wind field of a coastal wind farm is simulated and verified. A finite element model of the wind power structure with CFRP cables is established. Ninghe Tianjing seismic wave is employed as the input seismic wave. Modal analysis and nonlinear transient dynamic analysis with regular wind load and earthquake load are conducted not only on the conventional wind power structure but also on the presented structure. The results showed that the first three natural frequencies of the presented structure are higher than the conventional one, increasing about 20%. The horizontal displacement of the hub, the equivalent stress of the tower bottom and the anchor ring, and the axial force of the most unfavorable piles are reduced significantly for the presented structure. Moreover, the axial tensile stress in cables is much less than its ultimate tensile strength. The presented wind power structure with cables is an effective and feasible type of anti-seismic structure system.

**Keywords:** wind power; auto-regressive model; earthquake; CFRP; cable