

钢管与预应力混凝土组合式风电塔筒受力分析

屈成忠, 汪伟

(东北电力大学建筑工程学院, 吉林 132012)

摘要: 随着风电机组大型化的发展趋势及海上风机的应用, 塔架的高度和截面尺寸越来越大, 使得钢制塔筒在加工、防腐和运输等方面的问题日益突出。混凝土塔筒在交通运输、防腐性能等方面的具有优势, 使得混凝土结构在风电机组中的应用成为可能。本文借助 ANSYS 的有限元分析平台, 对钢管-预应力混凝土组合塔筒进行静力分析、模态分析及动力分析, 得出该组合式结构在风电应用中的性能优于钢制塔筒的结论, 从而为钢管-预应力混凝土组合塔筒在风力发电应用这种高耸结构提供了理论依据。

关键词: 风电塔筒; 预应力混凝土; 钢管; 静力分析; 动力分析

中图分类号: TK83

Analysis on the stress of steel tube and prestressed concrete composite wind power tower

QU Chengzhong, WANG Wei

(Civil Engineering and Architecture School, Northeast Dianli University, Jilin 132012)

Abstract: With the development trend of the application of large scale wind turbines and offshore wind turbine, tower height and section size increasing, the steel tower in processing, preservation and transportation issues have become increasingly prominent. Concrete tower can be used in transportation and corrosion protection, which makes it possible to apply the concrete structure in the wind turbine. In this paper, the static analysis, modal analysis and dynamic analysis of the steel tube and prestressed concrete composite tower are carried out by using the finite element analysis platform of ANSYS.

Key words: Wind power tower; prestressed concrete; steel pipe; static analysis; dynamic analysis

0 引言

风能作为绿色环保的新能源, 是一种普遍的、可再生的清洁能源。在能源危机日益凸显的今天已越来越受到人们的重视, 尤其是在发达国家, 譬如美国、德国等。我国的风力资源丰富^[1], 目前还处于开发阶段, 利用风力资源对我国的可持续发展战略、西部大开发战略都有现实而深远的影响^[2]。随着全球风力发电机组安装容量的持续增长, 风机的平均高度从最初的 15m, 发展到现在的 70m、80m, 甚至达到 150m。目前使用最多的锥式钢制塔筒因阻尼较小、动力性能较差^[3]。当塔身超过一定高度后, 往往导致塔顶在水平荷载作用下变形过大, 塔身与上部风机产生共振, 在正常使用过程中塔身还容易发生疲劳破坏。70m-80m 高度的锥式钢制塔筒直径范围处于 4-4.5m 之间, 未来随着 5-10MW 的风电机组的投入使用, 底部塔筒直径也将会越来越大^[4]。

对于塔筒这种细长比较大的结构, 保证其具有足够的强度、刚度、稳定性和抗震性能^[5], 才能保证风力发电机在各种荷载作用下都能够正常和安全的工作。组合式风电塔筒下层为预应力混凝土塔筒, 上层为钢制塔筒。这种塔筒克服了传统的钢管塔运输问题, 同时也能满

作者简介: 屈成忠 (1967-), 男, 教授, 主要研究方向: 高层钢筋混凝土结构设计理论及设计方法研究; 建筑结构施工技术 & 施工方法研究; 输电杆塔结构设计理论及设计方法研究等. E-mail: quchengzhong@126.com

足目前风机发展趋势对于塔筒高度的需求,并且这种组合式钢管与预应力混凝土塔筒在稳定性、安装、耐久性具有一定优势^[6],这种新的塔筒形式克服了钢制塔筒缺陷,对于风能的发展和具有重大意义。

1 塔筒模型

风力发电机为 SIEMENS 3.6 MW 水平轴发电机,机械参数如下表 1。风机塔架原型为全钢制塔筒^[7],塔筒全高为 90m,分为四段,各个截面参数如下表 2。

表 1 风机参数

Tab.1 Wind turbine parameters

SIEMENS 3.6MW	
桨叶 B58	全跨距变桨
额定功率	3.6MW
转子直径	107m
塔顶总质量	210t
转速	5-13r/m

表 2 全钢制塔筒截面参数

Tab.2 Steel tower Cross section parameter

高度 (m)	半径 (mm)	厚度 (mm)
0-17.6	3830	42
17.6-40	3758	34
40-65.4	3655	28
65.4-90	3566	24
90	3457	24

根据《高耸结构设计规范》(GB50135-2006),将原全钢制塔筒下部 40m 替换为预应力钢筋混凝土,在建立钢管与预应力组合式风电塔筒的有限元模型时,底部预应力混凝土塔筒包含混凝土和钢筋两种材料,而钢筋又有预应力钢筋、纵向钢筋,径向钢筋和箍筋。由于塔筒里面钢筋布置复杂,若四种钢筋都分别分开建模,会对后续的单元网格划分增加一定的难度,并且会增加塔筒的计算时间。因此对于纵向钢筋,径向钢筋和箍筋,采用体配筋的方式。对于预应力钢筋,由于需要模拟预应力的实际情况,采用 link8 单元来进行建模,预应力钢筋和混凝土通过生成约束方程进行耦合。底部的混凝土采用 ANSYS 中的 SOLID95 单元来模拟,上部钢管采用 shell93 单元模拟,顶部的 3.6MW 风力发电机组等效质量点采用 mass21 单元。对于预应力混凝土和钢管的接触部位,通过约束方程创建刚性连接。顶部的 mass21 单元通过 MPC184 刚性杆单元和钢管 shell93 单元模拟连接。风力发电机产生的水平推力、弯矩及扭矩等,通过顶部 mass21 质量点加载。塔筒受到的风荷载,通过 surf154 单元施加。

2 塔筒受力分析

在静力分析时,主要的荷载包括:叶轮受到的额定风速、切出风速、极端风速等工况下的气动推力、机舱和叶轮带来的垂直重力、塔筒表面受到的均布风荷载以及塔筒的自重等^[8]。在风叶运行过程中以及由于风速超出切出风速而停机时,风叶和机舱的荷载作用都将由风荷载和自身运转而产生的集中力和力矩传递给塔筒。由于风叶在不同的风速工况下旋转的速度不同,风叶和机舱传递给塔筒的荷载不同。因此,作用于塔筒顶端的荷载效应应分额定风速、切出风速和极限风速 3 种工况计算。荷载计算公式如下:

(1) 水平推力荷载

风力机组正常工作时:

$$F_x = 1/2 \times \rho C_t V^2 S \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度, 单位 kg/m^3 ; C_i 为风能利用系数; V 为额定风速 (m/s); S 为叶片扫风面积, 单位 m^2 。其中 C_i 风能利用系数, 额定风速时取 0.89, 切出风速时取 0.5。

风力机组停机时:

$$F_y = 1/2 \times \rho C_n V_s^2 S' n \quad (2)$$

式中, C_n 为空气动力系数; S' 叶片投影面积; n 为叶片个数, $n=3$; V_s 为极限风速, 单位 m/s 。

(2) 垂直荷载

由风轮和机舱的质量引起的垂直力:

$$F_z = (m_1 + m_2) g \quad (3)$$

式中, m_1 为风轮质量, m_2 为机舱质量。

(3) 转矩:

$$M_y = 14 P_{el} / n \quad (4)$$

式中, P_{el} 为风机功率 (kW); n 为风轮转速 (rpm)。

85 (4) 俯仰力矩

由于风速分布不均匀而产生的俯仰力矩:

$$M_x = \frac{4}{27} \cdot \frac{\rho}{B} \pi R^3 (V_2^2 - V_1^2) \quad (5)$$

式中, B 为风叶数量; V_1 、 V_2 分别为风轮扫掠中心上、下各 $2/3$ 风叶半径处的风速 (m/s)。

表 3 塔架顶部荷载

90 Tab.3 Tower top load

	工况 1.额定风速	工况 2.切出风速	工况 3.极限风速
$M_x(\text{kN} \cdot \text{m})$	-1454.28	-6314.79	343.91
$M_y(\text{kN} \cdot \text{m})$	3880.00	3880.00	0
$F_y(\text{kN})$	1398.30	3414.48	0
$F_z(\text{kN})$	-2100	-2100	-2100

(5) 垂直作用于塔筒表面风荷载

在对塔筒的风荷载计算之前, 要把他按照高耸结构考虑, 参见建筑结构荷载规范, 对风压的基本分布进行计算, 得到具体形式如公式:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (6)$$

95 式中, w_k 为在高度 Z 处的风压; μ_z 为风压高度变化系数; μ_s 为结构体型系数, β_z 为 Z 处的风振系数; w_0 为基本风压。

本文针对的是钢管与预应力混凝土组合式风电机组用预应力钢筋混凝土组合塔架中钢管、预应力混凝土段的承载能力分析, 目的是为了确定截面尺寸及高度对承载能力的影响, 该组合式风力发电塔筒的强度、稳定性和刚度满足《高耸结构设计设计规范》的要求, 进而为这种组合风电塔架在新能源的发展应用中提供理论依据。

100

3 塔筒 ANSYS 静力分析

ANSYS 有限元分析软件是一个多用途的有限元法计算机计算设计程序, 可以用来求解结构、流体、电力、电磁场等问题。因此它可应用于桥梁、建筑、航空航天、汽车工业、电子产品、重型机械、运动器械系统等。静力分析是结构分析的基础, 目的是在静载荷作用下

105 求出结构的应力分布、 变形(刚度分析) 、 及极限载荷等。

3.1 组合式塔筒受力分析

最不利工况为切出风速，钢管与预应力混凝土组合式塔筒沿高度未出现拉应力，即该组合式塔筒未产生裂缝。塔筒预应力混凝土段最大压应力 17.3MPa，满足混凝土的抗压强度设计要求。

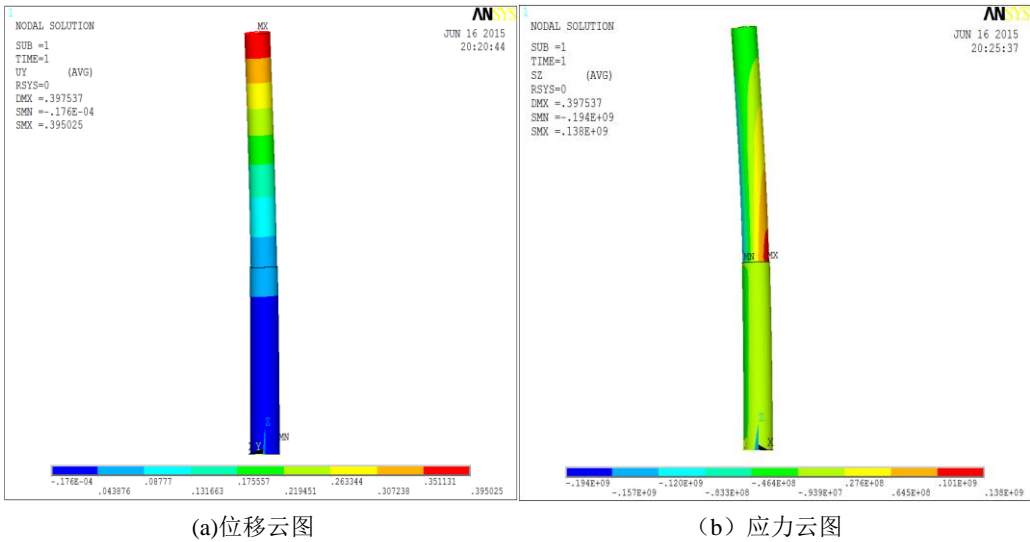


图 1 组合式塔筒在切出风速下的应力及位移云图
Fig.1 The stress and displacement of the composite tower with cut out wind velocity

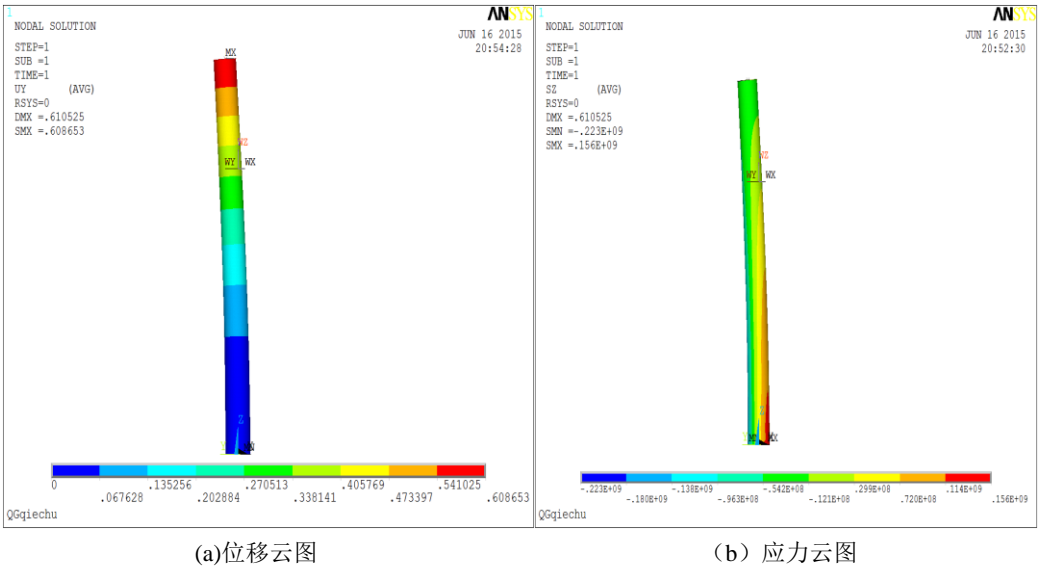
表 4 组合式塔筒三种工况下最大应力
Tab.4 Maximum stress of combined tower with three working conditions

工况	额定风速	切出风速	极限风速
钢管段最大拉应力（MPa）	53.7	138	-20.7
钢管段最大压应力（MPa）	110	194	40.4
混凝土段最大压应力（MPa）	12.85	17.3	7.98

3.2 全钢制塔筒受力分析

ANSYS 模拟计算结果表明，在最不利工况一切出风速工况下，全钢制塔筒在顶部荷载及塔身风荷载共同作用，塔筒底部出现最大压应力为 223MPa，最大拉应力为 156MPa；塔筒的挠度随高度的增加而增大，最大位移发生在塔顶处，为 610.52mm。

综合比较全钢制塔筒和钢-混组合式塔筒的静力分析，两种塔筒在最不利工况下，塔顶挠度均满足设计规范要求（全高的 0.8% 以内），全钢制为 610.52mm，组合式为 397.75mm。由于组合式塔筒下部为预应力混凝土，在相同的工况荷载下，塔顶位移为全钢制的 65.1%，塔筒变形控制的更好一些。组合式塔筒钢管部分的最大压应力 194MPa，全钢制塔筒最大压应力为 223MPa；组合式塔筒钢管部分最大拉应力为 138MPa，全钢制塔筒最大拉应力为 151MPa。



(a) 位移云图 (b) 应力云图

图 2 全钢制塔筒在切出风速下的应力及位移云图

Fig.2 The stress and displacement of the steel tower with cut out wind velocity

表 5 组合式塔筒三种工况下最大应力

Tab.5 Maximum stress of combined tower with three working conditions

工况	额定风速	切出风速	极限风速
钢管段最大拉应力 (MPa)	49.3	156	-9.29
钢管段最大压应力 (MPa)	121	223	59.7

4 组合式塔筒模态分析

模态分析时，对塔筒底部的位移进行约束，各个自由度均设为零。由于组合式风电塔筒下部为预应力混凝土，所以进行模态分析时先打开预应力开关，进行静力分析把预应力加到结构上，再用一次命令 PRSTES,ON 打开预应力效应，才能该组合式风电塔筒进行模态分析 [9]。

表 6 两种塔筒前 3 阶模态分析

Tab.6 Modal analysis of two kinds of tower

阶次	全钢制塔筒				组合式塔筒			
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	频率(Hz)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	频率(Hz)
1	0	0	0.00218	0.12E-8	1.34E-5	0.00188	1.34E-4	0.8516
2	0.00267	8.19E-4	1.45E-4	0.9965	0.00338	3.02E-6	2.16E-4	1.6168
3	1.35E-6	0.00267	1.45E-4	0.9965	0.00391	0.00392	2.33E-4	3.5770

设计塔架时，应避免其固有频率与叶片旋转频率发生共振，这就要求塔架固有频率应在风轮旋转的 1 倍和 3 倍频率的±10% 范围之外 [10]。本文中 3.6MW 风力发电机含 3 片桨叶，风机最大转速为 13r/min。故风轮旋转频率为 0.22Hz，过桨频率为 0.66 Hz。由表 8 中可以看出，全钢制与组合式塔筒的模态值均大于风轮旋转的 3 倍频率，处于安全范围，满足工程要求。因此,风机正常工作时塔架不会与叶片发生共振。钢管与预应力混凝土组合式塔筒的三阶模态值均大于 0.66Hz，组合式塔筒相较于全钢制能承受转速更快的风力发电机，即能允许更大的装机容量。

5 组合式塔筒动力分析

塔筒在动力荷载作用下响应分析主要是用以确定结构的承载能力和动力特性,为合理进行设计、改善结构性能提供依据。塔筒的动力分析不仅考虑动荷载和响应随时间而变化,还要考虑结构因振动而产生的惯性力和阻尼力^[11]。脉动风是随着时间和空间在不断变化的,因此脉动风作用下,结构会产生动力效应。本文只研究由顺风向脉动风引起的结构振动,忽略结构与风之间的相互作用。采用频谱表示法仿真得到脉动风速时程样本,在此基础上,采用时程分析方法分析风电塔筒的风振响应。

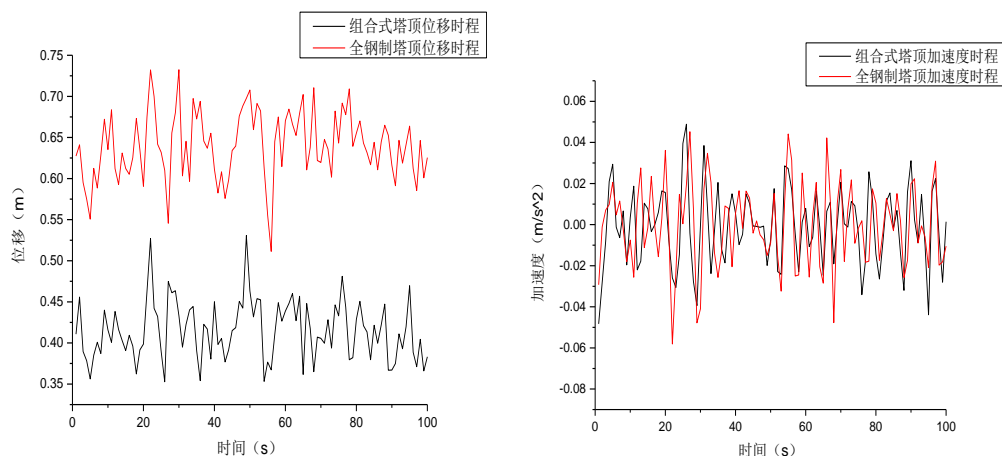


图3 两种塔筒最大位移、加速度时程

Fig.3 The maximum displacement and acceleration time history of two kinds of tower

在切出风速脉动风的作用下,组合式塔筒塔顶最大位移为0.531m,与静力分析相比增大0.134m,处于《高耸结构规范》允许的范围,结构安全。全钢制塔筒的最大位移为0.732m,超过规范规定的塔筒全高的0.8%。

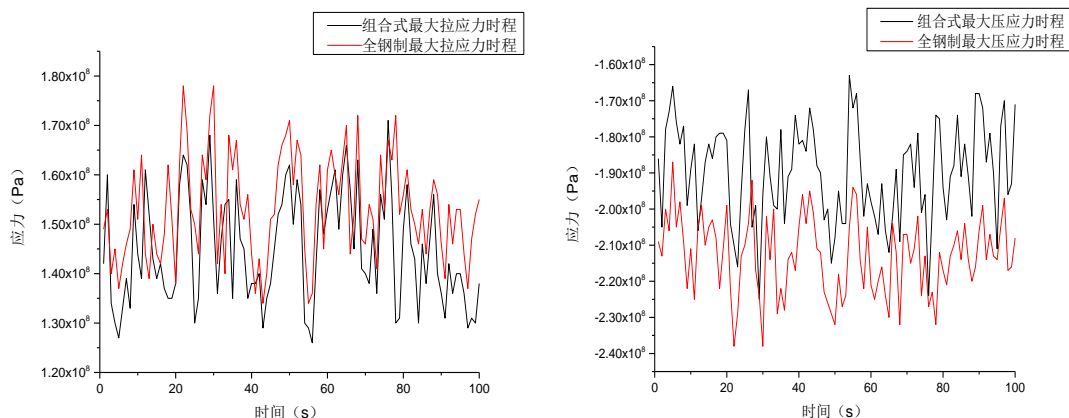


图4 两种塔筒最大拉、压应力时程

Fig.4 The maximum Tensile and compressive stress time history of two kinds of tower

最不利工况下,组合式塔筒的最大应力出现在上、下截面相接处,切出风速脉动风作用下,最大拉应力为167MPa,最大压应力为163MPa。对于全钢制塔筒,最大应力出现在塔筒底部,最大拉应力为178MPa,最大压应力为187MPa。两种塔筒结构的最大拉、压应力均为超过设计值,符合要求。

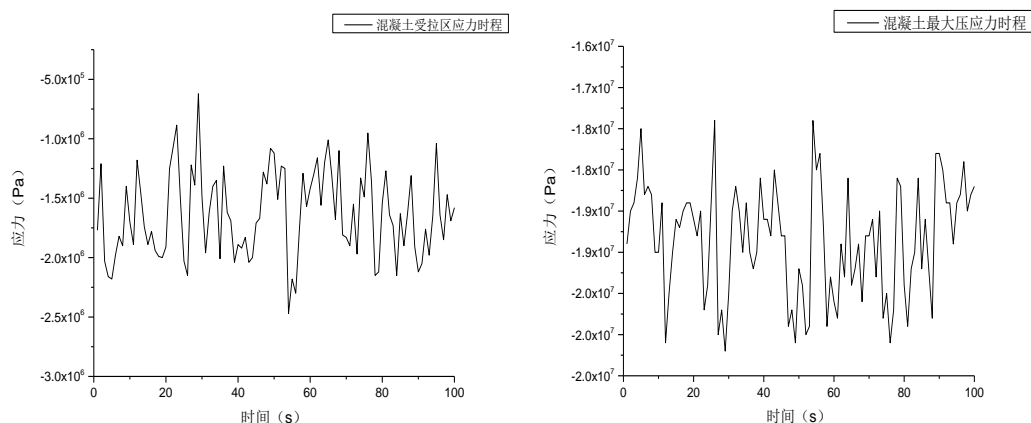


图 5 组合式塔筒混凝土段最大拉、压应力

Fig.5 The maximum tension and compression stress of composite tower concrete section

预应力混凝土段最小压应力为 0.6MPa，为出现拉应力，不会产生裂缝。混凝土段的最大压应力为 20.2MPa，未超过 C50 混凝土的抗压强度设计值。

6 结论

钢管与预应力混凝土组合式塔筒上部采用钢管，下部采用混凝土。组合式塔筒的静力性能优于钢管塔，动力性能满足要求。本文为钢管与预应力混凝土这种组合式结构在风电机组塔筒这种高耸结构中的应用提供了理论依据。钢管与预应力混凝土组合式风电塔筒克服了传统的钢管塔运输问题，塔筒的整个施工过程将花费 2 到 3 个星期就可以完成。未来随着组合结构在复杂受力状态下的性能及设计方法，温度、徐变和收缩效应及残余应力的影响、整体性能和施工力学问题研究的完善，钢管与预应力混凝土组合式风电塔筒会有更好的发展前景。

[参考文献] (References)

- [1] 李声艳,徐玉秀,周晓梅. 风力发电机组风轮的动态特性分析[J].天津工业大学学报, 2006(1):25.
- [2] D.J.Malcolm.WindPACT Rotor Design Study:Hybrid Tower Design.Subcontrator Report,2004(4):3.
- [3] Jairo A. Paredes, Alex H. Barbat, Sergio Oiler. A compression - tension concrete damage model, applied to a wind turbine reinforced concrete tower[J]. Engineering Structures, 2011(33):3559-3569.
- [4] Thresher RW.Structural dynamic analysis of wind turbine systems [J].Solar Energy Engineering,1982(104):89-95.
- [5] 毕继红,任洪鹏,尹元彪.预应力钢筋混凝土风力发电塔筒的地震响应分析[J].天津大学学报,2011(44):126-133.
- [6] 李志梅,赵东标.风电技术现状及发展趋势[J].电气技术,2007(6):48-50.
- [7] 孙海磊.风力发电机塔筒受力性能的试验研究[D].内蒙古科技大学,2009:29-35.
- [8] 李静平.预应力混凝土及钢塔筒的受力分析与优化[D].北京交通大学,2011:23-24.
- [9] 单光坤,姚兴佳.兆瓦级风力发电机组的模态分析[J].沈阳工业大学学报, 2008, 30(3): 276-279.
- [10] 严科飞,万家军,任伟华.大型风电机组塔筒材料的现状和发展[J].风能,2013:6.
- [11] 单蕾.风力发电机塔筒结构选型与受力性能研究[J].哈尔滨工业大学学报,2009:63.