

基于 ANSYS 的垂直轴风力机塔架的力学分析及结构优化

王印军,任勇生,孙丙磊,宋玉璧

(山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:基于 ANSYS 对大型垂直轴风力机塔架进行静力学分析、动力学分析及结构优化。首先,根据风力机的功率确定塔架的大体尺寸;然后,对塔架进行静力分析,并对塔架承受最大载荷时的最大应变进行强度校核;对塔架的动力学分析包括有预应力的模态分析和地震谱响应分析。ANSYS 优化主要是通过改变塔架的厚度提高其固有频率,避免因塔架在发电机的激励下共振而产生的破坏。对塔架的力学分析能够在满足力学性能的前提下使塔架的质量最轻,降低塔架的制造成本。

关键词:垂直轴风力机塔架;静力学分析;动力学分析;地震谱响应分析;结构优化

中图分类号:TK83

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0096-07

Mechanical Analysis and Structural Optimization of Tower Frame of Vertical Axial Fan Based on ANSYS

WANG Yinjun, REN Yongsheng, SUN Binglei, SONG Yubi

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The statics analysis, dynamics analysis and structural optimization of tower frame of large vertical axial fan were presented based on ANSYS. First of all, the size of tower frame was determined according to the power of fan. Then, statics analysis for the tower frame was carried out. And, the strength check for the maximum strain of the tower frame under the maximum load was discussed. Dynamics analysis including prestressed modal analysis, seismic response spectrum analysis was performed. The optimization based on ANSYS was obtained by changing the thickness of the tower frame to increase the inherent frequency so as to avoid the damage of tower frame induced by the resonance of generator excitation. The mechanical analysis of the tower frame can ensure the lightest weight of the tower frame under the premise of mechanical properties and reducing the manufacturing cost of tower frame.

Key words: tower frame of vertical axial fan; statics analysis; dynamics analysis; seismic response spectrum analysis; structural optimization

风能资源主要集中在 50 m 以上的高空,大容量的风力机机组便于大规模风能的开发利用,具有很好的发展前景。结构振动导致的材料疲劳是塔架损坏的主要原因之一,振动还会产生噪音,影响周围环境,所以塔架的力学分析对于研究风力机的安全性能具有重要意义。

目前,对风力机的研究大都集中在叶片、发动机性能等方面,对于塔架的研究很少,尤其是针对大型塔架的研究更为少见^[1],垂直轴风力塔架的分析在国内尚未见报道。本研究在水平轴风力机塔架分析的基础上,根据垂直轴风力机的实际受力对塔架进行加力分析,为大型垂直轴的风力机塔架的制造提供了理论依据。

收稿日期:2011-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(10872118);山东省自然科学基金项目(Y2006F37)。

作者简介:王印军(1986—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事计算机辅助工程方面的研究。E-mail:wyjaaaaaa@163.com.

1 垂直轴风力机塔架的计算模型

垂直轴风力机塔架的受力与水平轴有很大不同,垂直轴风力机塔架的扭矩是垂直于地面的,水平轴的是平行于地面,塔架上风压的计算方式不一样。大型风力机组大都采用圆锥形塔柱,本研究分析的是 1 MW 的垂直轴风力机的塔柱,根据《高耸机构设计规范 GB50135-2006》,选择塔柱的尺寸如图 1 所示:塔高 $H = 70\text{ m}$,底外径 $D_1 = 4.5\text{ m}$,顶外径 $D_2 = 3\text{ m}$,底端壁厚 $B_1 = 30\text{ mm}$,顶端壁厚 $B_2 = 20\text{ mm}$,底座长 $L = 0.5\text{ m}$,材料为 Q345 钢,材料弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11}\text{ Pa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 7.850 \times 10^3\text{ kg/m}^3$,许用应力 $\sigma = 237\text{ MPa}$,许用抗拉强度 $\sigma_1 = 425\text{ MPa}$ 。此塔架为变截面的圆锥体,由于底端是固定的,可以看成悬臂梁结构,塔架的主要载荷有风轮的水平推力 F ,风压 P_z ,机舱、叶片和轮毂的重力 G_1 ,塔架的自重 G_2 ,轮毂的扭矩 M ,如图 2 所示。

1) 风轮的水平推力

$$F = \frac{1}{2} C_p V^2 A. \quad (1)$$

其中: ρ —空气密度, 1.293 kg/m^3 ; V —风速,定为 30 m/s ; A —风轮的扫风面积,取 1700 m^2 ; C —推力系数,一般切入风速处 $C \approx 1.0$,切出风速处 $C \approx 0.5$,根据贝茨公式计算^[2], $C = 8/9$ 。

2) 机舱、叶片和轮毂的重力

$$G_1 = mg. \quad (2)$$

其中: m —机舱、叶片和轮毂的总质量,取 $3.9 \times 10^4\text{ kg}$; g —重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

3) 塔架的自重 G_2 。

4) 轮毂扭矩

$$M = P/n. \quad (3)$$

其中: P —发电机的输出功率, W ; n —风轮的转速, r/s 。

5) 作用在塔架上的风压

$$P_z = \frac{1}{2} \rho V_z^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Z}{H_0} \right)^{2a} V_0^2. \quad (4)$$

其中: P_z —风压分布载荷, N/m ; ρ —空气的密度, kg/m^3 ; Z —塔架的高度, m ; V_z —高度为 Z 处的风速, m/s ; $H_0 = 10\text{ m}$; V_0 —高度为 10 m 处的风速, m/s ; a —地面粗糙度和地面风的切变系数(在风能资源丰富的西北部,一般取 0.156)^[3]。

由式(1)可得 $F = 879\,240\text{ N}$,由式(2)可得 $G_1 = 3.822 \times 10^5\text{ N}$ 。把 $P = 1 \times 10^6$, $n = 1/3$ 带入式(3)可得 $M = 3 \times 10^6\text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2 对塔架的静力分析

2.1 建模、加载与分析

根据图 1,在 ANSYS 软件的 DM 模块中画出塔架的二维模型,然后以中心轴为旋转轴进行旋转就得到了塔架的模型,建模完成。

进入静力分析模块对模型进行网格划分然后施加边界条件和载荷,步骤如下:

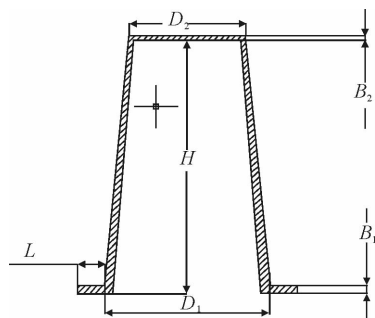


图 1 塔架结构模型图

Fig. 1 The structural model of tower frame

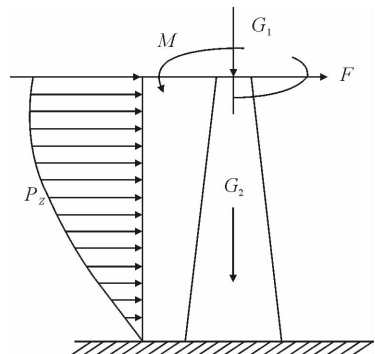


图 2 塔架受力简图

Fig. 2 The bearing sketch of tower frame

- 1) 固定塔架的底端;
 - 2) 在塔架顶部加载力 F 和机舱、叶片和轮毂的重力 G_2 以及轮毂扭矩 M ;
 - 3) 在塔架上加载塔架的重力 G_2 和风压 P_z , 结果设置为查看总体的应力和总体的应变, 最后进行求解。
- 由图 3 可以得到塔架的最大位移为 0.699 65 m, 由图 4 得到塔架的最大应力为 155.18 MPa。

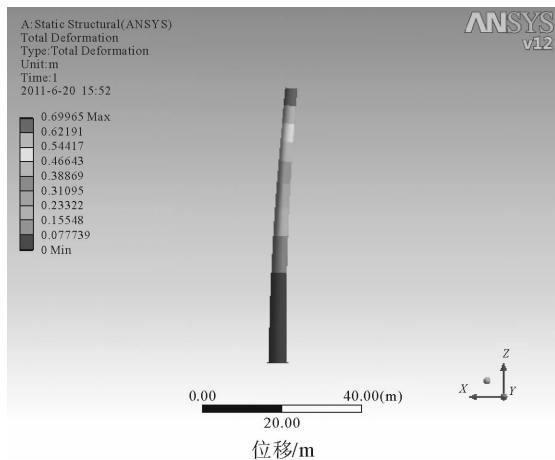


图 3 塔架的位移图

Fig. 3 The displacement of tower frame

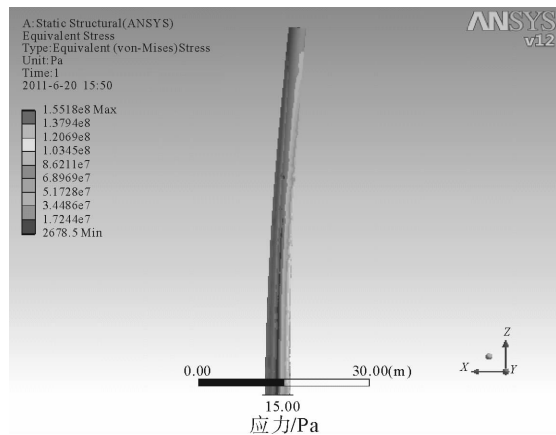


图 4 塔架的应力图

Fig. 4 The stress of tower frame

2.2 结果与讨论

根据材料的刚度要求, 塔架的最大变形小于高度^[4] ($H = 70 \text{ m}$) 的 1%, 即

$$D_{\max} \leq \frac{H}{100} = 0.7 (\text{m})。 \quad (5)$$

图 3 计算得出的 $0.699 65 < 0.7$, 不超出最大变形的要求; 图 4 计算得到的最大应力为 $155.18 \text{ MPa} < 237 \text{ MPa}$ ^[5], 符合强度要求, 所以塔架结构和静力学性能满足正常工作的要求。

3 塔架的模态分析

塔架的模态分析对塔架的稳定性非常重要, 模态分析主要是计算塔架的固有频率和振型, 它是动力学分析的基础, 也是结构参数优化的目标, 如果塔架受力, 就应该进行有预应力的模态分析。塔架的低阶模态对稳定性的影响比较大, 因此本研究分析塔架的前 6 阶模态。

3.1 塔架的有限元动力学方程

动力学分析同静力学分析都是把塔架离散成有限个单元体, 动力学分析在考虑单元特性的同时还考虑单元的惯性力和阻尼力等因素。动力学方程为^[6]

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F。 \quad (6)$$

其中: M —塔架的质量矩阵; C —塔架的阻尼矩阵; K —总体刚度矩阵; X —节点位移; F —塔架受的外力。

3.2 ANSYS 对塔架模态分析的结果

图 5—图 10 为塔架的 1—6 阶模态振型及各阶振型下产生的最大位移和固有频率。如图 5 中得到塔架的 1 阶模态振型, 最大位移在塔架的顶端为 $5.676 9 \times 10^{-3} \text{ m}$, 1 阶固有频率为 $1.036 3 \text{ Hz}$ 。塔架前 6 阶模态的固有频率如表 1 所示。

表 1 塔架的前 6 阶模态固有频率

Tab. 1 The first six order natural frequency of tower frame

模态	1	2	3	4	5	6
f	1.036 3	1.039 7	4.953 8	4.969 9	12.427 0	12.463 0

Hz

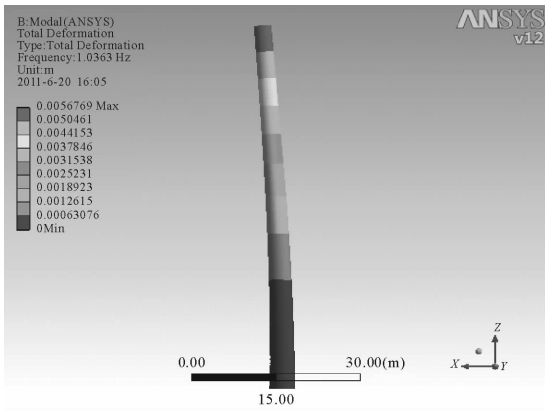


图 5 塔架的 1 阶模态振型图

Fig. 5 The first order modal shape of tower frame

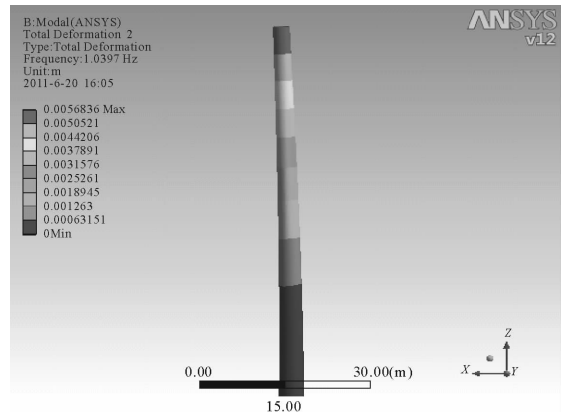


图 6 塔架的 2 阶模态振型图

Fig. 6 The second order modal shape of tower frame

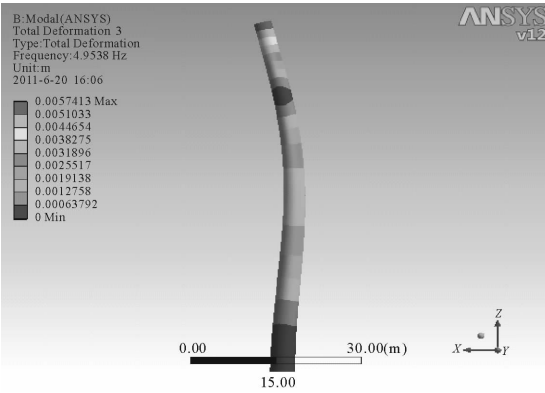


图 7 塔架的 3 阶模态振型图

Fig. 7 The third order modal shape of tower frame

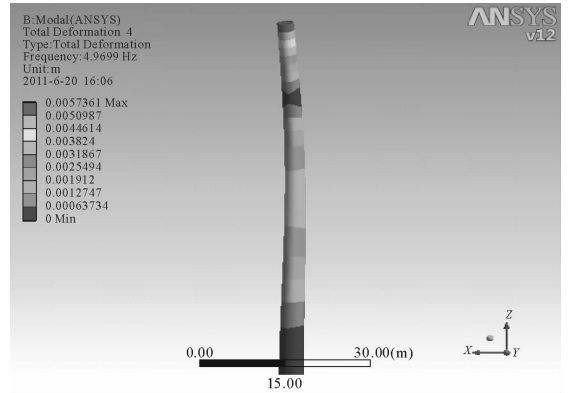


图 8 塔架的 4 阶模态振型图

Fig. 8 The fourth order modal shape of tower frame

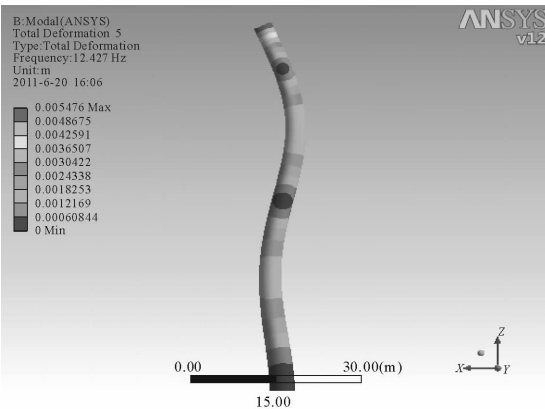


图 9 塔架的 5 阶模态振型图

Fig. 9 The fifth order modal shape of tower frame

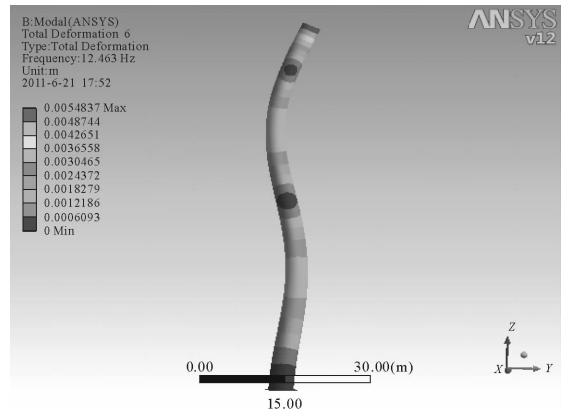


图 10 塔架的 6 阶模态振型图

Fig. 10 The sixth order modal shape of tower frame

3.3 结果与讨论

根据公式 $f = \frac{\omega}{2\pi} \times N$ 可知,当风力发电机以 20 r/min 的转速运行时,风轮旋转产生的频率为 0.333 3

Hz, 风叶数 $N=3$, $f=1$ Hz, 由表 1 可知, 这个频率十分接近塔架的第 1、2 阶固有频率。频率要满足公式 $(f_1 - f)/f \geq 10\%$ ^[4], 才能不引起塔架的共振, 而 $f_1 = 1.036 3$, $(f_1 - f)/f = 0.036 3 < 10\%$, 所以塔架在发电机的激励下是产生共振的, 共振对结构的破坏非常大, 因此要对塔架的结构进行优化, 使它的前 2 阶频率得到提高, 降低共振引起的破坏。

4 塔架的地震谱响应分析

地震谱响应就是把模拟地震的波动加载到模型得到的响应。地震对于大型塔架有着毁灭性的破坏, 进行地震谱响应分析是十分必要的。应用表 2 的数据进行模拟。由图 11 可得, 地震谱响应的最大应力值为 7.483 8 MPa, 远小于材料的许用应力 $\sigma=237$ MPa, 塔架安全可靠。

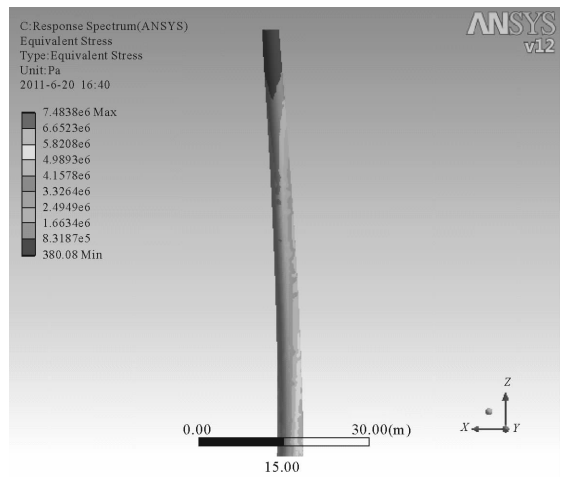


图 11 谱响应的塔架应力图

Fig. 11 The stress of tower frame in spectrum response

表 2 地震模拟数据表

Tab. 2 The simulation data of earthquake

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
频率/Hz	0.10	0.11	0.13	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	0.67	1.00	1.11	1.25	1.43	1.67
加速度/(m/s ²)	0.002	0.003	0.003	0.005	0.006	0.006	0.010	0.021	0.032	0.047	0.070	0.088	0.105	0.110	0.130
序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
频率/Hz	2.00	2.50	3.33	4.00	5.00	6.67	10.00	11.11	12.50	14.29	16.67	20.00	25.00	50.00	
加速度/(m/s ²)	0.150	0.200	0.255	0.265	0.255	0.200	0.165	0.153	0.140	0.131	0.121	0.111	0.100	0.100	

5 塔架结构的优化分析

从结构的模态分析可以看出, 风力机结构的安全性存在巨大的隐患, 需要对塔架进行结构优化, 优化应同时满足结构的安全性和经济性。提高钢塔柱的固有频率可以有效避免结构共振。

$$|K - Mf^2| = 0. \quad (7)$$

其中: K —刚度; f —固有频率; M —质量。

由式(7)可知, 固有频率取决于结构自身的质量和刚度, 材料的质量越轻, 刚度越大, 固有频率就越高。但是, 对于风力机钢塔柱, 其刚度的提高与质量的增加几乎是等比的, 优化效果极不明显^[7]。因此, 减小塔架自身的质量是提高固有频率最有效的方法。

本次结构优化的目的, 是在满足结构安全性的前提下, 尽可能提高塔架的固有频率并且减少材料用量, 从而避免共振引起的破坏并降低制造成本。由于风力机的功率已定, 所以塔架的高度不变, 可以作为设计参数的是塔的外底半径、外顶半径、塔底壁厚和塔顶壁厚, 分别用 R_1 、 R_2 、 B_1 和 B_2 表示。优化采用目标搜索法, 设计的搜索目标是塔架的 1 阶频率、塔架的质量、塔架的最大位移和最大应力。由表 3 可以看出优化搜索的范围和基本的取值点, 优化的方法是把表内数据进行数据拟合并搜索出最佳的方案。由图 12 可以看出各个参数对目标的敏感度, 图分为 4 栏, 第 1 到第 4 栏分别是设计参数对第 1 阶频率、塔架质量、最大应力和最大变形的敏感度, 从第 1 栏可以看出, 对 1 阶频率敏感的是塔底壁厚 R_1 和塔顶壁厚 R_2 并且 R_1 与频率成正比, R_2 与频率成反比。

图 13 给出了 3 个最佳的优化方案, 方案 1 虽然频率最大, 但塔架的质量较大, 不经济; 方案 3 塔架的第 1

阶固有频率不满足公式 $(f_1 - f)/f > 10\%$, 使塔架在发电机的激励下产生共振, 影响塔架的使用寿命; 方案 2 频率符合塔架的要求, 且方案 1 塔架的质量为 1.6544×10^5 kg, 方案 2 为 1.5904×10^5 kg, 方案 2 比方案 1 轻 6.4×10^3 kg, 最大应力为 130 MPa, 小于材料的许用应力 237 MPa, 最大位移也在允许的范围, 并且 B_1 和 B_2 很接近, 都取 25.5 mm, 便于制造, 所以方案 2 是最佳方案。因而, 塔架的结构尺寸取: 塔高 $H=70$ m; 底外径 $D_1=5.084$ m; 顶外径 $D_2=2.023$ m; 底端壁厚 $B_1=25.5$ mm; 顶端壁厚 $B_2=25.5$ mm。

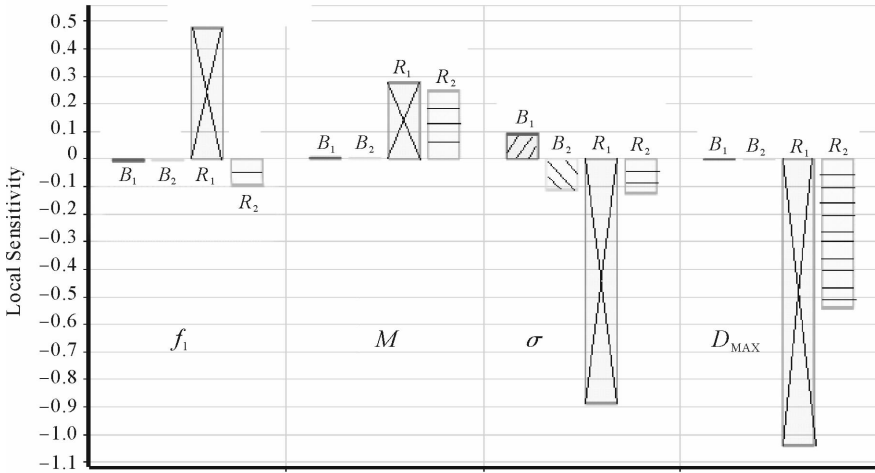


图 12 各设计参数对目标函数的敏感度图

Fig. 12 The sensitivity of various design parameters on the objective function

A	B	C	D	E	F	G	H	I
	P1- B_1	P2- B_2	P3- R_1	P4- R_2	P5-Total Deformation	P6-Geometry Mass (kg)	P7-Equivalent Stress Maximum	P8-Total Deformation Maximum(m)
■ Optimization Study								
Objective	No Objective ▼	No Objective ▼	No Objective ▼	No Objective ▼	Maximize ▼	Maximize ▼	No Objective ▼	No Objective
Target Value								
Importance	Default ▼	Default ▼	Default ▼	Default ▼	Higher ▼	Higher ▼	Default ▼	Default
■ GDO Sample Set 1								
Candidate A	=0.022 51	=0.024 854	= 2.692 9	= 1.002 1	★ 1.330 7	= 1.654 4 E+05	= 1.224 2 E+08	= 0.629 52
Candidate B	=0.025 51	=0.025 674	= 2.542	= 1.011 7	★ 1.252 8	★ 1.570 4 E+05	= 1.302 5 E+08	= 0.711 92
Candidate C	=0.020 51	=0.021 885	= 2.380 1	= 1.008 5	★ 1.167 5	★ 1.509 5 E+05	= 1.433 4 E+08	= 0.839 68

图 13 最佳优化方案界面图

Fig. 13 The best optimization scheme

表 3 优化数据表

Tab. 3 The optimization data

参数 序号	B_1 /m	B_2 /m	R_1 /m	R_2 /m	1 阶频率/ Hz	塔架质量/ ($\times 10^5$ kg)	最大位移/ m	应力/ MPa
1	0.030 000	0.020 000	2.250 0	1.500 0	1.036 30	1.658	0.699 65	155.18
2	0.020 000	0.020 000	2.250 0	1.500 0	1.033 00	1.652	0.700 06	142.37
3	0.040 000	0.020 000	2.250 0	1.500 0	1.023 90	1.664	0.698 06	157.07
4	0.030 000	0.010 000	2.250 0	1.500 0	1.030 30	1.653	0.700 43	154.31
5	0.030 000	0.030 000	2.250 0	1.500 0	1.028 70	1.663	0.700 26	136.48

续表

参数 序号	B_1/m	B_2/m	R_1/m	R_2/m	1阶频率/ Hz	塔架质量/ ($\times 10^5 \text{ kg}$)	最大位移/ m	应力/ MPa
6	0.030 000	0.020 000	1.750 0	1.500 0	0.770 03	1.424	1.227 70	240.05
7	0.030 000	0.020 000	2.750 0	1.500 0	1.260 70	1.892	0.441 30	98.61
8	0.030 000	0.020 000	2.250 0	1.000 0	1.096 00	1.451	0.952 35	163.19
9	0.030 000	0.020 000	2.250 0	2.000 0	0.991 99	1.868	0.559 28	143.09
10	0.022 958	0.012 958	1.897 9	1.147 9	0.875 52	1.341	1.267 80	202.64
11	0.037 042	0.012 958	1.897 9	1.147 9	0.888 24	1.349	1.263 70	202.47
12	0.022 958	0.027 042	1.897 9	1.147 9	0.879 66	1.346	1.270 70	197.69
13	0.037 042	0.027 042	1.897 9	1.147 9	0.879 91	1.353	1.250 70	209.96
14	0.022 958	0.012 958	2.602 1	1.147 9	1.264 50	1.670	0.616 06	126.38
15	0.037 042	0.012 958	2.602 1	1.147 9	1.262 70	1.680	0.611 09	124.81
16	0.022 958	0.027 042	2.602 1	1.147 9	1.258 90	1.674	0.612 00	123.5
17	0.037 042	0.027 042	2.602 1	1.147 9	1.255 70	1.684	0.612 38	124.5
18	0.022 958	0.012 958	1.897 9	1.852 1	0.837 08	1.632	0.863 74	205.74
19	0.037 042	0.012 958	1.897 9	1.852 1	0.831 50	1.639	0.875 98	206.16
20	0.022 958	0.027 042	1.897 9	1.852 1	0.821 59	1.643	0.863 07	206.89
21	0.037 042	0.027 042	1.897 9	1.852 1	0.809 03	1.651	0.871 77	206.35
22	0.022 958	0.012 958	2.602 1	1.852 1	1.166 80	1.960	0.432 15	104.99
23	0.037 042	0.012 958	2.602 1	1.852 1	1.169 90	1.970	0.432 48	107.36
24	0.022 958	0.027 042	2.602 1	1.852 1	1.151 00	1.972	0.431 75	105.04
25	0.037 420	0.027 042	2.602 1	1.852 1	1.164 50	1.981	0.435 88	112.35

6 结论

应用有限元软件 ANSYS 对大型垂直轴风力机塔柱进行静力学分析、动力学分析及结构优化,静力学分析得到了最大应力 155.18 MPa,小于材料的屈服应力,模态分析计算出塔架的前 6 阶频率,并在模态分析的基础上进行了地震谱响应分析,而且通过优化塔架上下两端的壁厚和直径改善了塔架的固有频率,降低了因共振导致的破坏,减轻了塔架的质量,也为设计和制造大型垂直轴风力机塔架提供了理论依据。

参考文献:

- [1]钟方国,赵鸿汉. 风力发电发展现状及复合材料在风力发电上的应用[J]. 纤维复合材料,2006,23(3):65-72.
ZHONG Fangguo,ZHAO Honghan. Development status of wind power-generation and application of composites in wind power-generation[J]. Fiber Composites,2006,23(3):65-72.
- [2]单蕾. 风力机塔架结构选型与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [3]张玉良,程兆雪,杨从新,等. 风力机风轮设计中风速的处理[J]. 沈阳工业大学学报,2006,12(28):687-689.
ZHANG Yuliang,CHENG Zhaoxue,YANG Congxin,et al. Treatment of wind speed in design of wind turbine rotor[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2006,28(6):687-689.
- [4]宋曦,戴建鑫. 水平风力机塔架力学建模及 ANSYS 仿真分析[J]. 甘肃科学学报,2011,23(1):91-95.
SONG Xi,DAI Jianxin. Mechanical modeling and ANSYS simulation analysis of horizontally axial wind turbine tower[J]. Journal of Gansu Sciences,2011,23(1):91-95.
- [5]ALTAN B D,ATILGAN M. An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor[J]. Energy Conversion and Management,2008,32:10-22.
- [6]龙驭球. 新型有限元论[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [7]MENET J L. A double-step Savonius rotor for local production of electricity: A design study[J]. Renewable Energy,2004,29:1843-1862.