

风力机塔筒的三维有限元抗台风分析

汤炜梁^{1,2}, 袁奇¹, 高锐¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049; 2. 华北电力大学能源与动力工程学院, 保定 071003)

摘要: 本文采用三维有限元方法, 对 1.5MW 风力机塔筒进行了静态强度和模态分析, 建模时考虑了地基土壤、混凝土和机舱的影响。静态强度分析考虑的最大风速为 75m/s, 风力机完全侧面迎风这一恶劣工况, 从而为风力机的抗台风设计提供了依据。模态分析计算了塔筒的前三阶固有频率和振型, 计算结果和实测值很接近, 机舱质量和地基刚度对塔筒固有频率有较大影响, 而土壤对塔筒固有频率影响不大。

关键词: 风力机; 塔筒模型; 位移; 有限元方法; 等效应力

中图分类号: TK83 **文章标识码:** A

0 引言

塔筒是风力发电机组的主要承重结构, 尤其是大型风力发电机组, 其高度一般都在数十米以上^[1], 大型水平轴风力机塔筒多为细长的圆锥状结构^[2]。一个优良的塔筒设计, 可以保证整机的动力稳定性^[3], 故塔筒的设计不仅要满足其空气动力学上的要求, 还要在结构、工艺、成本、使用等方面进行综合分析^[3]。当风力机运行时, 塔筒受力状态极为复杂, 主要载荷包括风载荷、机组自重以及由机组重心偏移引起的偏心弯矩等^[4], 在这些载荷的共同作用下, 塔筒因疲劳而失效的情况较为少见, 但因其顶端位移(挠度)过大, 引起机组强烈共振, 最终导致机组不能正常运行的事例却较多^[5]。因此对塔筒进行各种载荷下的静态强度和模态分析是风力机稳定性计算的一项重要内容。

随着我国风电事业的大力发展, 有限元理论和方法已经成功应用于风力机结构设计中^[6]。借助有限元方法对塔筒进行静态强度和模态分析, 可以比较精确地计算出各种载荷作用下塔筒的位移、应力状况及固有频率^[7]。通过对计算数据进行后处理, 可以比较准确直观地描述出塔筒的位移、应力情况, 为进一步对塔筒进行优化设计提供依据。本文就是借助 ANSYS 大型有限元软件, 对 1.5MW 风力机塔筒, 在台风工况下(风速 75m/s), 进行了静态强度分析和模态分析, 从而为风力机的抗台风优化设计提供了依据。

1 塔筒有限元计算模型

1.1 塔筒原始数据

本文计算的 1.5MW 风力机塔筒为变截面的筒型结构, 塔筒总高 61.15m, 塔底和塔顶直径分别为 4m 和 2.955m。塔筒分三段, 第一段高 25.4m, 第二段高 19.25m, 第三段高 16.5m。沿高度方向, 塔筒壁厚是变化的, 变化情况见图 1。塔筒共有四个螺栓结合面, 由塔顶往下, 各结合面上的螺栓个数分别为 84, 120, 136, 144。螺栓材料 DIN6914, 其屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为 900MPa, 螺栓螺纹小径为 35.38mm。塔筒材料采用 Q345-D 钢材, 筒壁最小厚度 10mm, 最大厚度 24mm, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为 345MPa。塔筒地基混凝土为正八边形结构, 边长 5.3m, 混凝土

厚度 2.65m。塔筒顶上承受的机舱、轮毂和叶片总重量为 88t，机舱、轮毂和叶片的质量中心向前偏离塔筒中心线 0.763m。机舱侧面面积为 27m²，宽度为 3.7m。叶片平均宽度为 1.976m，长度为 34m，故叶片平均迎风面积约 67.2m²。

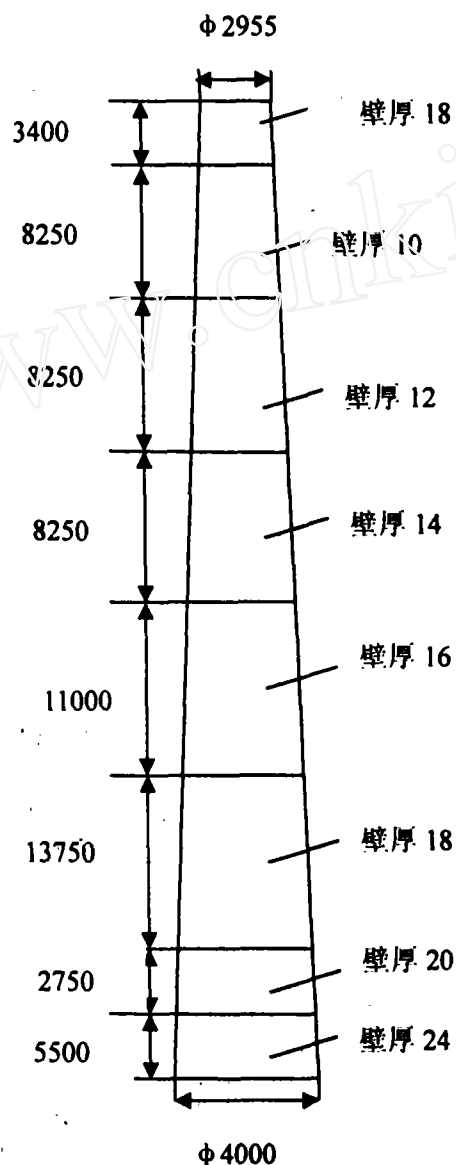


图1 塔筒结构示意图(单位: mm)

Fig.1 Sketch of the tower structure (unit, mm)

1.2 塔筒有限元模型

有限元分析首先要将实际工程系统描述为相应的数学模型,分析必须针对一个物理原型建立准确的有限元模型。有限元模型是通过节点、单元、材料属性、实常数、边界条件等,来表现物理原型特征的^[1]。风力发电机塔筒除塔筒本身外,还有一些其它附属设备,如平台、爬梯、通风口、门洞等。分析计算时,对塔筒几何模型作了适当简化,简化的原则是在保证计算精度的前提下,对一些与塔筒静态强度无关或者承受载荷情况并不关键的部分作简化,以提高计算速度^[1]。建立的塔筒三维有限元模型如图 2 和图 3 所示。

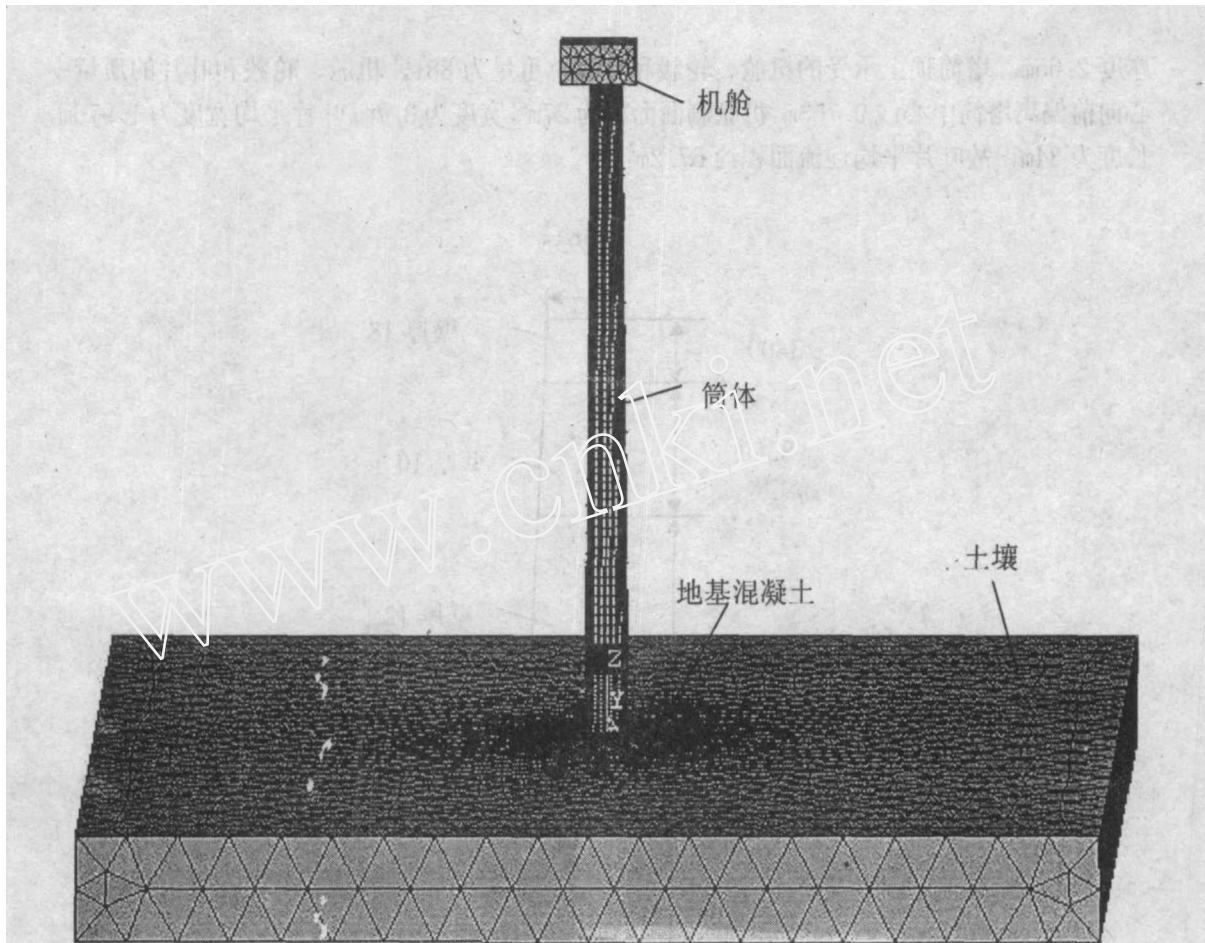


图2 塔筒整体有限元模型

Fig.2 The finite element model of tower

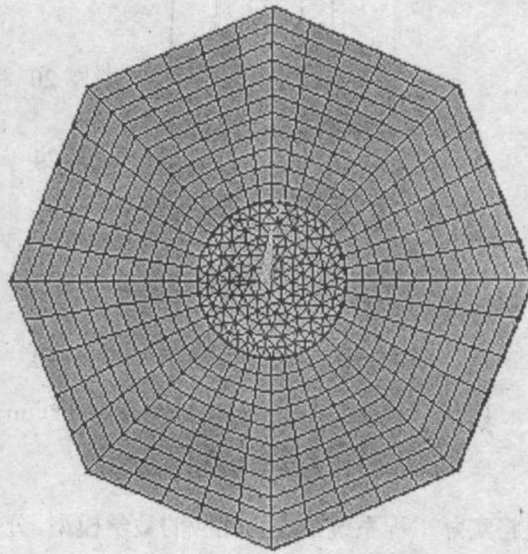


图3 混凝土地基有限元模型

Fig.3 The finite element model of concrete foundation

如图2所示，建模时在塔筒筒体上加了机舱，这样做的好处是可以很好地模拟筒体顶上承受的集中质量，机舱质量中心偏移也可以很好地计算在内，而且塔筒顶上承受的横向载荷也可以通过在相应的机舱面上加风压来实现。机舱的尺寸为 $3.7 \times 3.7 \times 7.3\text{m}$ ，与实际尺寸一

致, 建模时机舱重心向前偏离塔筒中心线0.763m。考虑到筒体顶上总重量为88t, 所以机舱

$$\text{模型的当量密度 } \rho = \frac{88 \times 10^3}{3.7 \times 3.7 \times 7.3} = 880.55 \text{ kg/m}^3。$$

塔筒筒体和地基混凝土建模均按实际尺寸, 筒体按不同壁厚共分为8段。土壤地基长、宽按混凝土尺寸的7倍选取, 深度是混凝土深度的4倍。在有限元软件中建立模型并进行网格划分, 机舱、筒体和地基混凝土之间为粘合关系, 混凝土和土壤之间为接触关系, 摩擦系数取0.2。单元类型均为SOLID95实体单元, 各个体的物性参数如表1所示。

表1 塔筒材料的物理性能

Table 1: The physical characteristics of tower materials

名称	密度/ kgm^{-3}	弹性模量/GPa	泊松比
机舱	880.55	210	0.3
筒体	7850	210	0.3
地基混凝土	2551	60	0.22
岩石性土壤	2700	50	0.17

1.3 塔筒模型的优化选择

建立三维有限元模型是一个复杂的过程, 如果模型过于复杂庞大, 不但要占用较多的计算机资源, 而且计算时间较长, 所以有必要对模型进行优化选择, 在保证足够准确性的前提下, 尽量节省资源和计算时间。本文以塔筒模态计算为依据, 对塔筒模型进行了优化选择。各种塔筒模型的前两阶模态计算结果见表2。

表2 各种模型模态计算结果

Table 2 The results of modal analysis for different models

项目	第一阶固有频率/Hz	与仅有机舱、筒体的模型比较的变化/%	第二阶固有频率/Hz	与仅有机舱、筒体的模型比较的变化/%
仅有机舱、筒体的模型	0.47861	0	0.47968	0
有机舱、筒体、混凝土的模型	0.47234	-1.31	0.47279	-1.44
有机舱、筒体、混凝土、土壤的模型	0.47200	-1.38	0.47234	-1.53

由表2可知, 模型带混凝土与不带混凝土在固有频率上是有一定差异的, 但是带混凝土地基与带土壤地基比较, 在固有频率上差别小于0.1%, 所以在风力机塔筒模型的优化选择上, 选取带机舱和地基混凝土的筒体模型即可保证结果的准确性, 又可以使计算简化。

2 塔筒静态强度分析

2.1 静态强度分析的加载方法

对于塔筒筒体而言, 需要考虑以下四个载荷: 塔筒顶端的重力(G)、横向力(P)、弯矩(M)和沿其高度方向作用的风力(q)^[1], 如图4所示。因为已经在塔筒顶端加了机舱, 故重力可自

动施加。而弯矩(M)为机舱重量(G)的偏心弯矩和横向力(P)在塔筒顶端产生的合弯矩。即:

$$M = Ph_1 - Gh_2 \quad (1)$$

h_1 为轮毂中心线到塔筒顶端的距离/m

h_2 为集中重量重心偏离塔筒中心的距离/m

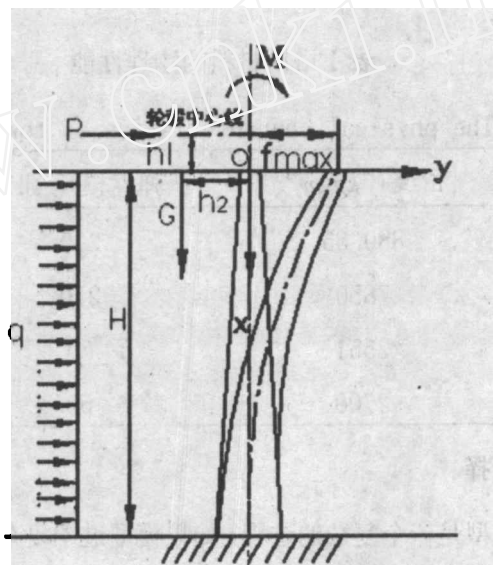


图4 风力机塔筒力学模型图

Fig.4 The mechanical model of a wind turbine tower

也就是说弯矩(M)的设定可以在模型中考虑机舱高度尺寸和偏心的方法来完成。所以在静态分析时需要施加的与风速有关的载荷只有横向力(P)和沿高度方向作用的风力(q)。

台风最大风速一般为 $18 \sim 60\text{m/s}$ ^[21], 而2006年的“桑美”台风最大风速达到了 $70 \sim 75\text{m/s}$, 给浙江苍南风电场带来了毁灭性的破坏, 同时也对风力机的抗台风设计提出了新的课题。所以本文静态强度分析选择的风速条件为 75m/s , 运行工况是在此风速条件下, 风力机顺桨停机成功, 但风向突然偏转 90° , 风力机侧面迎风这一最危险工况。计算得到此工况下, 塔筒顶端横向力 $P = 7.94276 \times 10^5\text{N}$ 。在有限元分析中加载此横向力是通过将横向力转换成机舱上的风压, 然后把风压加载在相应的面积上。沿高度方向作用的风力(q)也是通过风压的形式来施加的, 塔筒筒体上风压计算公式为^[21]:

$$p = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \quad (2)$$

上式中:

p 为塔筒筒体上的风压/Pa;

C_D 为筒体绕流阻力系数, 取 0.7;

ρ 为空气密度/ kgm^{-3} ;

V 为风速/m. s⁻¹。

将计算得到的风压加载在相应的筒体迎风面积上即可。

2.2 静态强度计算结果

模型加载后, 在地基混凝土侧面加全约束, 进行静态强度计算。计算结果见图 5 至图 8。

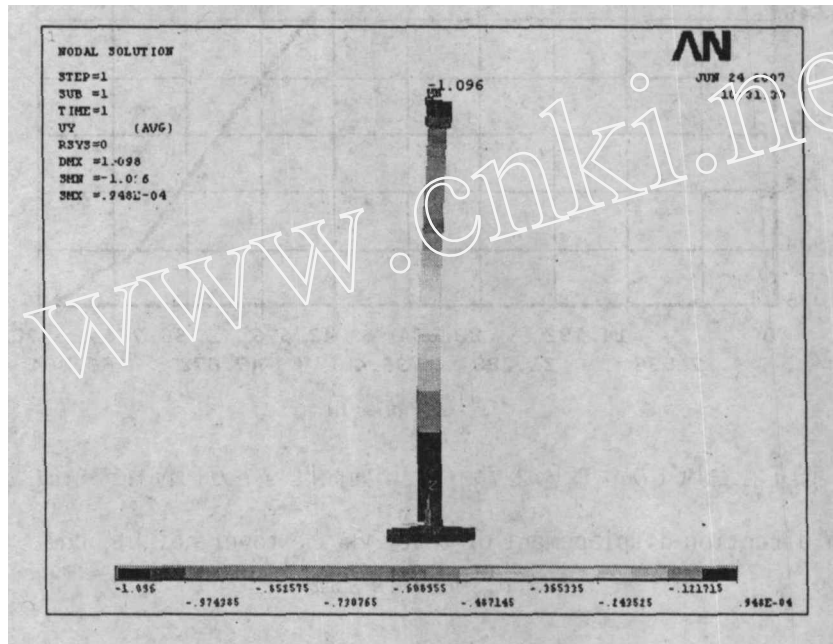


图 5 塔筒在台风工况下 (风速 75m/s) Y 方向位移云图

Fig. 5 The contour of tower's Y direction displacement under typhoon (the wind speed is 75m/s)

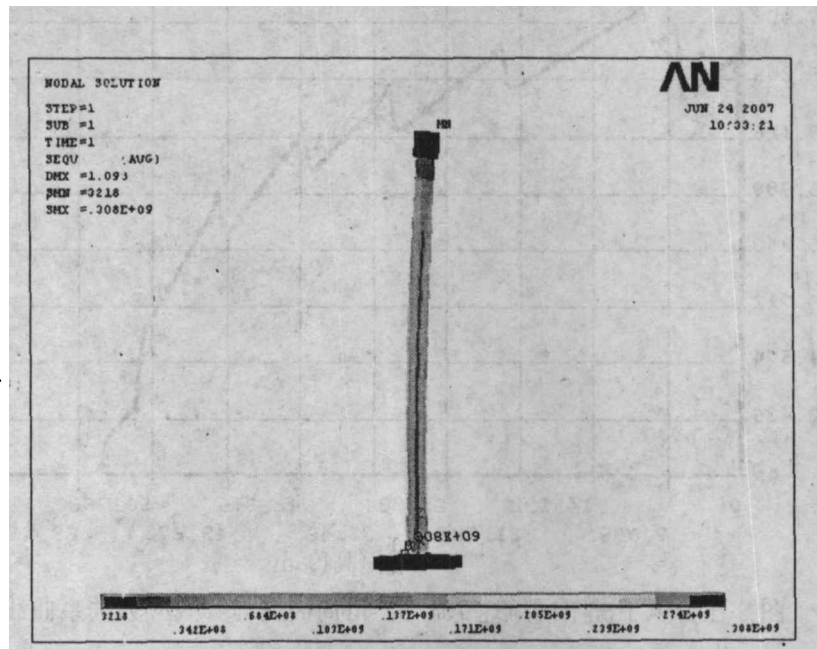


图 6 塔筒在台风工况下 (风速 75m/s) 等效应力云图

Fig. 6 The contour of tower's equivalent stress under typhoon (the wind speed is 75m/s)

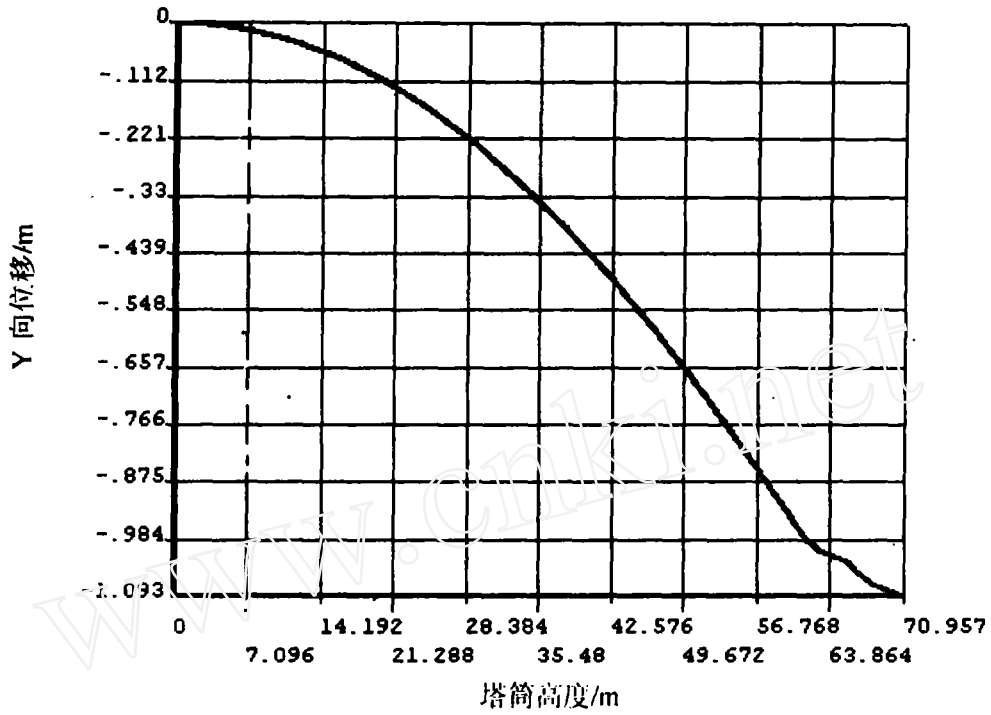


图 7 在台风工况下 (风速 75m/s) 塔筒高度与 Y 方向位移关系曲线

Fig. 7 The Y direction displacement of tower vs the tower height under typhoon (the wind speed is 75m/s)

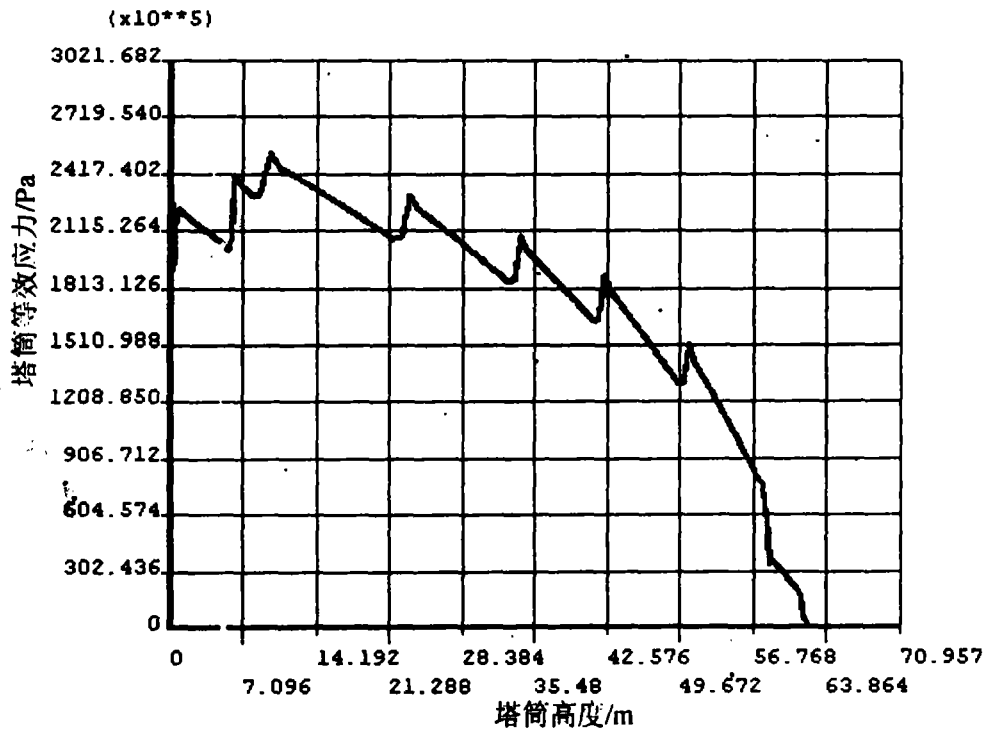


图 8 在台风工况下 (风速 75m/s) 塔筒高度与等效应力关系曲线

Fig. 8 The equivalent stress of tower vs the tower height under typhoon (the wind speed is 75m/s)

2.3 静态强度计算结果分析

由图 5、图 7 可知,在同一载荷情况下,,塔筒位移随高度增加,且为规则的抛物线分布^[6],最大位移在塔筒顶端,风速为 75m/s 时,最大位移量为 1.098m,这与常规计算的结果一致。

由图 6 可知,塔筒的最大等效应力出现在塔筒筒体根部,为 308MPa,这说明塔筒底端钢板厚度最大(为 24mm)这一设计是合理的。Q345-D 钢材的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为 345MPa,略高于最大等效应力,塔筒设计满足抗强台风的静态要求,但是塔筒设计所涉及的并不仅仅只有静态强度问题,还要考虑动态载荷、塔筒稳定性、固有频率、疲劳等影响^[4]。

由图 8 可知,塔筒等效应力随高度增加总体上是下降的,但应力变化并不规则,存在突跳,这不仅是因为不同高度处塔筒的筒径、厚度不同,更重要的是由于两段不同厚度的筒体焊接处存在应力集中,所以为了增加塔筒的抗台风能力,不同厚度的筒体焊接时,过渡区域应尽量光滑平缓,减小应力集中。

3 塔筒模态分析

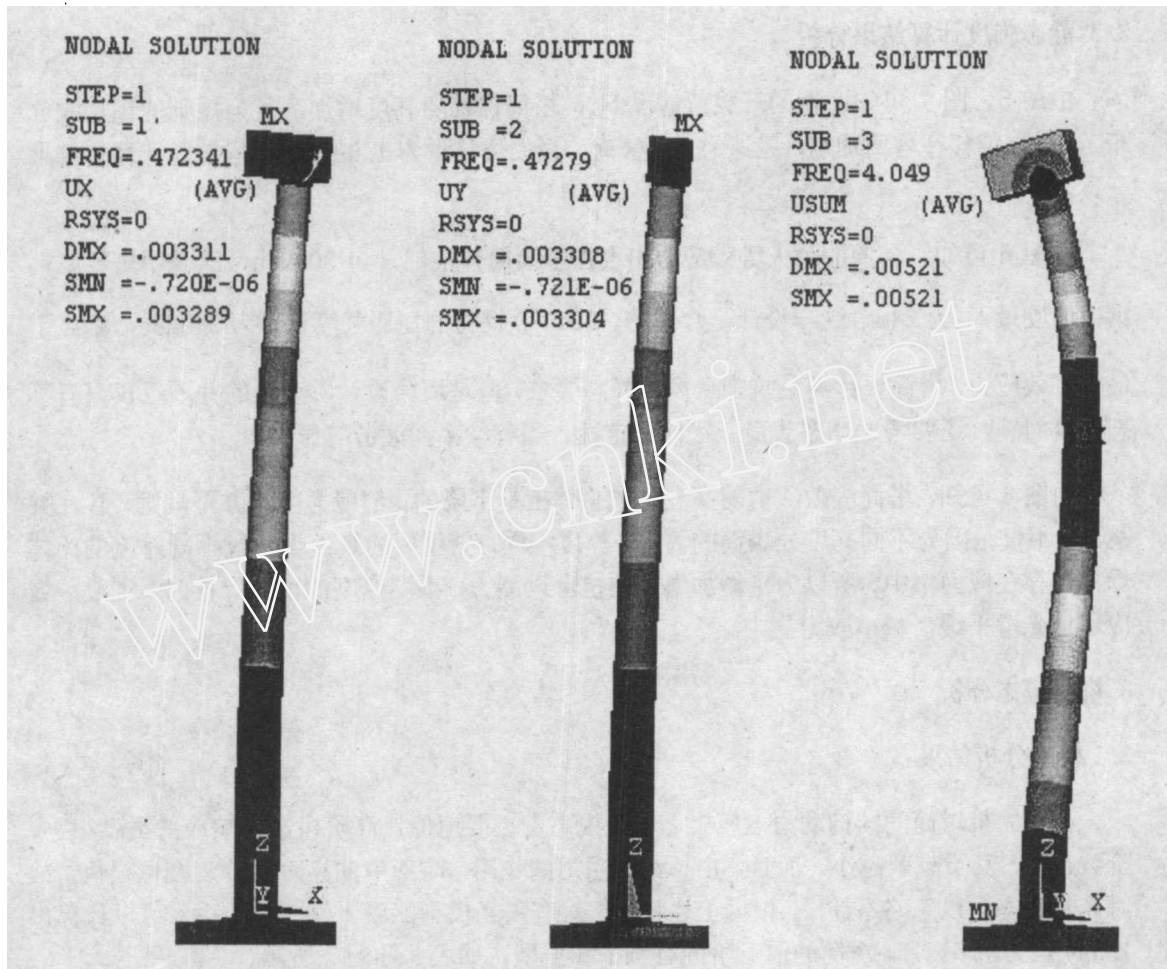
3.1 模态分析结果

在风力机塔筒的结构动力响应中,低阶模态占主要地位,高阶模态对响应的贡献很小,阶数越高,其贡献就越小。而且,由于结构阻尼的作用,响应中的高阶部分衰减也很快,故对高阶模态可以忽略不计^[7]。根据上述特点,对有限元模型混凝土侧面加约束,可以计算出 1.5MW 风力机 61.15m 塔筒的前三阶固有频率和振型,如表 3 和图 9 所示。

表 3 塔筒固有频率计算结果

Table 3 The results of tower's natural frequencies

阶次	固有频率/Hz	激振力频率/Hz	频率避开率/%
1	0.4723	0.531	11.05
2	0.4728	0.531	10.96
3	4.0488	1.045	287.44



(a) 塔筒第一阶振型
(b) 塔筒第二阶振型
(c) 塔筒第三阶振型

图9 塔筒前三阶振型

Fig.9 The modal shape of tower's first three natural frequencies

3.2 模态计算结果分析

由表2可知,由于塔筒结构上基本对称,第一阶固有频率和第二阶固有频率很接近。第一阶固有频率计算值为0.4723Hz,与实测值0.45Hz是接近的。塔筒固有频率大小除与塔筒材料、结构尺寸及机舱质量有关外,与基础刚度也有密切关系,在有限元计算中,模型底端加的是刚性全约束,约束刚度大于实际情况,这是造成计算值偏高的主要原因。

该风力机的转速范围是10.6~20.9r/min,也就是转动频率范围为0.177~0.3483Hz。对于三叶片风力机,塔筒共振主要激励源为1倍转动频率和3倍转动频率^[4],3倍转动频率范围为0.531~1.045Hz。而塔筒第一阶和第二阶固有频率刚好处于这两个范围之外,并且满足工程上避开±10%的要求^[4]。第三阶固有频率更是远高于这个范围,因此塔筒在固有频率上的设计是合理的。

由图9可知,塔筒的第一阶振型为X方向的整体弯曲振动;第二阶振型为Y方向的整体弯曲振动;第三阶振型为整体扭转的二阶弯曲振动。

4 结论

通过对1.5MW风力塔筒采用三维有限元方法进行的静态强度分析和模态分析,可以得到如下结论:

(1) 在进行塔筒有限元分析建模时, 选择带机舱和地基混凝土的塔筒模型可以保证足够的计算精度; 筒体带上机舱, 可以很好地模拟筒体顶上承受的集中质量和机舱质量中心偏移塔筒中心线引起的力矩, 而且塔筒顶上的横向载荷。

(2) 在塔筒三维有限元计算模型中, 选取带机舱和地基混凝土的筒体模型是合理的。它可以保证模态计算结果的准确性: 塔筒第一阶和第二阶固有频率略高于实测值, 满足与1P和3P激振力频率的避开率要求, 因此该风力机在振动特性上的设计是合理的。

(3) 静态强度计算结果表明塔筒的最大位移发生在塔筒顶端, 并且随高度的增加而增加, 且呈规则的抛物线分布, 与常规计算的结果是吻合的。

(4) 塔筒的最大合应力出现在筒体根部, 台风工况下(风速为75m/s), 筒体钢材屈服强度略高于最大等效应力(+37MPa), 说明该风力机在静强度上是满足抗台风要求的, 但是塔筒设计还要考虑塔筒稳定性、动态应力、振动疲劳等。

(5) 塔筒等效应力随高度增加是下降的, 但变化是不规则的, 存在明显突跳, 这不仅是因为不同高度处塔筒的筒径、厚度不同, 更重要的是由于两段不同厚度的筒体焊接处存在应力集中; 故为增加塔筒的抗台风能力, 不同厚度的筒体焊接时, 过渡区域应尽量光滑平缓。

[参考文献]

- [1] 王峰, 陈棋, 余国城. 大型风力发电机组塔架刚度的研究[J]. 新能源及工艺, 2005, 20(6):38-39.
- [1] F. Wang, Q. Chen, G. C. Yu, Research on tower stiffness of large scale wind turbine unit [J], *New energy and technology*. 1997, 20 (6): 38-39.
- [2] 窦修荣, 黄珊秋, 宋宪耕. 大型水平轴风力机塔架的风诱发振动响应[J]. 太阳能学报, 1997, 18(2):205-206.
- [2] X. R. Dou, S. J. Huang, X. G. Song, Response induced by wind of the tower for large horizontal-axis wind turbine [J], *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1997, 18 (2): 205-206.
- [3] 陈松利, 王海宽, 辛海升. 200W 浓缩风能型风力发电机抗台风塔架的设计[J]. 内蒙古农业大学学报, 2001, 22(4):28-30.
- [3] S. L. Chen, H. K. Wang, H. S. Xin, Design of tower withstanding typhoon of 200W concentrated wind turbine [J], *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*. 2001, 22 (4): 28-30.
- [4] 李华明. 基于有限元法的风力发电机组塔架优化设计与分析: [硕士学位论文][D]. 新疆: 新疆农业大学, 2004: 10-20.
- [4] H. M. Li, Optimization design and analysis for wind turbine tower based on finite element method [D], Xinjiang: *Xinjiang Agricultural University*, 2004: 10-20.
- [5] 曾杰. 大型水平轴风力机载荷计算和强度分析的方法研究: [硕士学位论文][D]. 新疆: 新疆农业大学, 2004: 4-8.
- [5] J. Zeng, The research on method of horizontal axis wind turbine load calculation

and intensity analysis [D], Xinjiang: *Xinjiang Agricultural University*, 2004: 4-8.

- [6] 陆萍. 风力机塔架结构通用前后处理系统[J]. 太阳能学报, 2000, 21(3):288-290.
- [6] P. Lu, General preprocess and postprocess of the tower structure for wind turbine [J], *Acta Energiæ Solaris Sinica*. 2000, 21(3):288-290.
- [7] 黄珊秋, 陆萍. ZOND-40 风力机塔架的模态分析[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2):153-154.
- [7] S. J. Huang, P. Lu, Modal analysis of the tower for wind turbine ZOND Z-40 [J], *Acta Energiæ Solaris Sinica* 2001, 22 (2): 153- 154.
- [8] 陆萍, 黄珊秋, 张俊. 风力机筒形塔架结构静动态特性的有限元分析[J]. 太阳能学报, 1997, 18(4):359-400.
- [8] P. Lu, S. J. Huang, J. Zhang, The finite element analysis on static and dynamic characteristics of the conical tube tower structure for the wind turbine [J], *Acta Energiæ Solaris Sinica*. 1997, 18 (4): 359 - 400.

3-D FINITE ELEMENT ANALYSIS OF WIND TURBINE TOWER UNDER TYPHOON

Tang Weiliang^{1, 2}, Yuan Qi¹, Gao Rui¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract:

This paper has analyzed 1.5MW wind turbine tower's static strength and modal characteristics by three-dimension finite element method. The soil, concrete foundation and nacelle have been considered during establishing the finite element model. The most dangerous operating condition has been chosen for static strength analysis, in which the wind speed is 75m/s, and the wind completely side blows across the wind turbine. It provides a good knowledge for the wind turbine withstanding typhoon. The tower's first three natural frequencies and modal shapes have been calculated in modal analysis. The result is close to the value of actually measured. The mass of nacelle and the stiffness of foundation are greatly affecting the tower's natural frequencies. But the soil foundation can be neglected during modal analysis.

Keywords: Wind turbine; Tower model; Displacement; Finite element method; Equivalent stress