

水平轴风力发电机塔架模态影响因素分析

许庆春, 刘林

河海大学力学与材料学院, 南京 210098

摘要 以某个大型水平轴风力发电塔架为例, 采用四因素三水平试验对影响水平轴风力发电机塔架模态的因素进行分析; 运用矩阵分析法对塔架进行模态计算, 并利用大型有限元软件 ABAQUS 完成了塔架的数学建模和模态分析, 分别考虑了塔架底部门洞、风轮(含轮毂)和机舱的质量、风轮(含轮毂)及机舱的整体偏心、塔架的壁厚及直径对塔架模态的影响。结果表明, 风轮(含轮毂)及机舱的整体质量、塔架的壁厚以及直径对塔架的模态影响最为显著, 而塔架底部的门洞对塔架模态的影响很小, 可以忽略; 塔架顶部风轮(含轮毂)及机舱的整体偏心对塔架模态的影响情况由风轮(含轮毂)及机舱的整体偏心程度决定, 偏心越大受影响的程度越大。

关键词 水平轴风力发电机塔架; 有限元; 模态分析; 影响因素

中图分类号 TK89

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.11.006

Modal Analysis on the Impact Factors of Horizontal-axis Wind Turbine Tower

XU Qingchun, LIU Lin

College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract Taking a large tower of horizontal-axis wind turbine as an example, the factors affecting horizontal-axis wind turbine tower are analyzed by the test of four factors and three levels, the modals are calculated using matrix analysis. The finite element model is built and the modal analysis is completed by using the finite element software of ABAQUS. The factors including bottom of the tower openings, the total mass of the cabin and wind wheel (with hubs), the overall eccentric of the cabin and wind wheel (with hubs), and the wall thickness and diameter of the tower are considered in the modal analysis. Through the research of the factors on horizontal-axis wind turbine tower, the results show that the significant factors are the total mass of the cabin and wind wheel (with hubs), and the wall thickness and diameter of the tower, however the factor of the bottom of the tower openings could be ignored; the impact of the overall eccentric of the cabin and wind wheel (with hubs) on horizontal-axis wind turbine tower is determined by the degree of the overall eccentric of the cabin and wind wheel (with hubs), the bigger bias is, the bigger affected degree is.

Keywords horizontal-axis wind turbine tower; finite element; modal analysis; impact factor

0 引言

风力发电是新能源技术中最成熟、最具规模开发条件和商业化发展的发电方式。中国风能资源丰富, 主要集中在三北地区及东部沿海风能丰富带^[1]。较其他国家而言, 中国对于风能的开发和利用起步相对较晚, 20 世纪 60 年代开始小批量生产, 70 年代末, 中国开始研发小型风能发电机并投入使用, 1986 年, 在山东荣成建成了中国第一座并网运行的风电场, 从此并网运行的风电场建设进入了探索和示范阶段, 但

其规模和单机容量均较小。90 年代后, 中国从小型风力发电机组的广泛应用走向大型风力发电机组的开发、引进、创新之路。随着政府支持力度的加大, 中国风电建设进入了一个新的规模化发展时期^[1]。

风力发电机至关重要的一个核心部分就是塔架, 塔架用于把风轮等部件举到设计高度处运行。塔架主要承受两个载荷: 一是风力机的重力, 二是风吹向风轮等部件的压力(阻力), 其主要功能是支撑风力发电的机械部件和发电系统, 承

收稿日期: 2012-02-25; 修回日期: 2012-04-05

作者简介: 许庆春, 教授, 研究方向为结构优化设计, 电子信箱: qcxu@hhu.edu.cn

受风轮的作用力和风作用在塔架上的力;塔架还要求其有足够的疲劳强度,从而能够承受风轮引起的振动荷载。所以如何提高风力机塔架的运行性能,直接关系着风力机的使用寿命和发电效益。

目前,国内外许多学者和专家主要通过计算机模拟和模型实验来研究如何提高风力机塔架的运行性能,多年的发展已使德国、丹麦、荷兰、美国、希腊等国分别拥有了自己的检测机构,制定了相关的国际标准,建立了资格认证体系等。对塔架的分析研究主要包括静力分析和动力分析,国内外对塔架的静力分析已经形成了一个比较完善的理论体系,但对塔架的动力分析研究尚欠缺,尤其对塔架动态屈曲的研究国内成果尚少。塔架的圆柱薄壳结构在受压时,其承载力取决于屈曲强度,对屈曲强度的可靠预测人们一直极为关注。国外对塔架屈曲问题的研究起步较早,18世纪中期,Euler对细长压杆的稳定性作了开创性的研究,形成了弹性结构屈曲的经典理论。1911—1934年,Lorenz, Southwell, von Mises, Flugge, Schwerin 和 Donnell 等将经典理论用于分析轴心受压圆柱壳的屈曲,并得到了轴压圆柱壳屈曲应力的经典解;1945年,Koite提出了关于弹性稳定的非线性理论,该理论可以判定分枝点附近平衡路径的稳定性^[2]。国内对塔架的屈曲研究较少,虽然赵世林等^[3]对塔架的屈曲问题进行了一系列的分析研究,但国内在塔架屈曲研究这一方面尚未建立比较完善的理论体系,而在塔架的模式分析,尤其是固有频率的研究方面相对成熟。周勃^[4]、赵荣珍^[5]、王朝胜^[6]、刘勇^[7]等对塔架的模式都进行了较为完善的研究,并且对塔架模型的整体简化比较合理,尤其是王朝胜等对塔架各段连接部位法兰的连接、塔架顶部以及底部模型、地基等均做了相应的简化,富有创新性,但均局限于塔架的整体模型研究,而对影响塔架模式的各个因素的研究尚欠缺。

本文从影响风力机塔架固有频率的因素入手,以某一大型水平轴风力发电塔架为例,利用大型有限元分析软件ABAQUS对该塔架进行数学建模和振动模式分析,主要研究塔架底部门洞、风轮(含轮毂)及机舱的总质量、风轮(含轮毂)及机舱的整体偏心、塔架的壁厚和直径等因素对塔架固有频率的影响,为塔架的动态设计提供有效依据。

1 固有频率计算方法

结构的固有频率是其本身所固有的性质,与外荷载无关,在结构自由振动时动力学方程可写成

$$[M]\{\ddot{\delta}\}+[C]\{\dot{\delta}\}+[K]\{\delta\}=\{0\} \quad (1)$$

其中, $[M]$ 为系统的质量矩阵, $[C]$ 为系统的阻尼矩阵, $[K]$ 为系统的刚度矩阵, $\{\ddot{\delta}\}$ 为系统的加速度向量, $\{\dot{\delta}\}$ 为系统的速度向量, $\{\delta\}$ 为系统的位移向量。

结构在自由振动时,阻尼频率 ω_0 和无阻尼频率 ω 之间存在如下关系:

$$\omega_0=\omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (2)$$

其中 ξ 为阻尼比,一般典型结构体系的阻尼比 $\xi<20\%$ ^[8]。由式(2)可见,阻尼对结构自振频率的影响很小,一般可忽略,式(1)可写成

$$[M]\{\ddot{\delta}\}+[K]\{\delta\}=\{0\} \quad (3)$$

假设结构的自由振动是简谐运动,即 $\{\delta\}=\{\Phi\}\sin(\omega t+\theta)$,代入式(3)得到结构的广义特征值方程为

$$([K]-\omega^2[M])\{\Phi\}=\{0\} \quad (4)$$

其中 ω 为结构的自振频率, $\{\Phi\}$ 为振型向量。

只有当系数行列式 $|[K]-\omega^2[M]|=0$ 时才能得到非零解,解此行列式得结构的频率向量 ω_i ,代入式(4)可以得到对应的振型 $\Phi_i^{\text{[9]}}$ 。

2 塔架模型及计算参数

2.1 塔架实体模型及材料参数

塔架为圆筒型,总高62.4m,一共分为上、中、下3段,其中上段包含了塔架与机舱的连接段。具体尺寸见表1。

表1 塔架模型各段数据
Table 1 Data of the tower model

塔架构件	部位	高度/m	壁厚/m	底部直径/m	顶部直径/m
上段	上部	1.6	0.018	2.696	2.696
	下部	20.8	0.014	2.990	2.696
中段		22.4	0.020	3.556	2.990
下段		17.6	0.024	4.000	3.556

风轮质量(含轮毂) $2.8\times 10^4\text{kg}$,机舱质量 $3.7\times 10^4\text{kg}$,风轮转速 18.5r/min ,塔架筒身材料为Q345钢,密度 $7.85\times 10^3\text{kg/m}^3$,弹性模量 $2.06\times 10^{11}\text{Pa}$,泊松比0.3。

2.2 塔架的有限元模型

2.2.1 结构简化

风力发电机组塔架除塔筒本身外,还有一些其他的附属设备,如平台、爬梯、门洞等。分析计算时,塔架几何模型简化的原则是在保证计算精度的前提下,对一些与塔架强度、自振特性、稳定性没有显著关系或者承受载荷情况并不关键的部位作简化,这样既减轻了建模的工作量,又不会影响分析结果的精确性^[1]。本文对上述模型做以下简化。

(1) 塔架简化为底部固定、顶端自由的空间薄壁锥筒型结构,考虑门洞的影响;

(2) 不考虑爬梯、休息平台等附属结构,将其质量附加到塔筒上;

(3) 不考虑法兰上的螺栓;

(4) 在各段塔架变厚度连接的塔壁处,仅将焊接后的形状模拟出来,使塔架焊接连接处呈现实体模型中的渐变,不考虑焊接后焊缝缺陷及残余应力等因素对塔架模式的影响;

(5) 整体模型中考虑法兰,但不考虑法兰之间的接触影响,将法兰与法兰视为固接;

(6) 风轮与机舱简化为作用在塔架上方的偏心质量块,保证该质量块的重心与实际结构的重心重合;塔架各段之间

的连接采用固接,机舱与风轮简化为 3.3m×3.3m×0.76m 的质量块,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$,并且与塔顶中心偏心 0.2m。塔架三维实体模型见图 1。



图 1 塔架三维实体模型

Fig. 1 3D solid model of the tower

2.2.2 单元选择

为了减小数学仿真模型与实际模型的差异,本实例采用三维建模,并采用 SolidC3D8R 实体单元,一共划分为 7860 个实体单元,塔底门洞放大效果见图 2,塔架有限元模型见图 3。

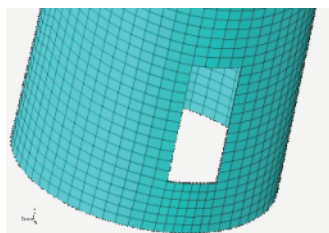


图 2 塔底门洞放大图

Fig. 2 Enlarged view of the openings

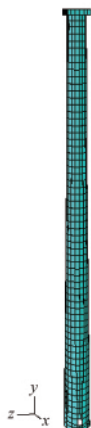


图 3 塔架有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the tower

3 计算结果与分析

根据上述方法,利用 ABAQUS 有限元软件对塔架进行模

态分析,在使用 ABAQUS 提取模型频率时,为了保证提取足够数量的模态,主要运动方向上的总有效质量要超过模型中可运动质量的 90%^[9]。本实例提取了模型的前 20 阶模态,在 x, y, z 3 个方向上的有效质量最小为 100841kg,而本实例模型总质量为 110667kg,超过了 90%的标准,因此提取 20 阶振型是足够的,结果如下。

(1) 有无门洞对塔架模态的影响,计算结果见表 2。由表 2 可知,塔架底部门洞的设置对塔架的低阶固有频率影响不大,可以忽略,而对塔架的高阶固有频率有一定的影响。

表 2 门洞对塔架模态的影响

Table 2 Impact of the openings of tower bottom on tower modality

固有频率阶数	有门洞/Hz	无门洞/Hz
1	0.37774	0.37883
2	0.38128	0.37884
3	3.9876	4.0230
4	4.0230	4.0243
5	7.2643	7.3170
⋮	⋮	⋮
16	21.115	22.391
17	25.552	28.312
18	27.784	30.109
19	29.044	32.744
20	29.618	32.766

(2) 风轮(含轮毂)与机舱的总体偏心对塔架模态的影响,计算结果见表 3。由表 3 可知,风轮与机舱的整体偏心对塔架的固有频率有一定的影响但不是很大,但不排除风轮与机舱对塔架的整体偏心过大导致对塔架固有频率带来的显著影响。

表 3 风轮(含轮毂)与机舱的总体偏心对塔架模态的影响

Table 3 Impact of the overall eccentric of the cabin and wind wheel (with hubs) on tower modality

固有频率阶数	偏心/Hz	不偏心/Hz
1	0.37774	0.37903
2	0.38128	0.37968
3	3.9876	3.9889
4	4.0230	4.0253
5	7.2643	7.2697
⋮	⋮	⋮
16	21.115	21.116
17	25.552	25.553
18	27.784	27.979
19	29.044	29.127
20	29.618	29.614

(3) 风轮(含轮毂)与机舱的总体质量对塔架模态的影响。在大型水平轴风力发电机的组成中,塔架顶部的风轮和

机舱的质量占整个风电机总质量的 60%, 甚至更高, 不同的风电塔架风轮和机舱的质量占整个风电塔架质量的比重也不尽相同。为了更确切地了解风轮和机舱对塔架模态的影响, 本文分别选取了 9 组不同的质量进行分析。一般大型风力发电塔架其一阶固有频率与叶轮的激励频率较近, 而高阶的固有频率要远大于叶轮的激励频率 f 和 $3f$, 不会与叶片发生共振现象, 因此对塔架进行模态分析时主要研究其一阶固有频率即可, 计算结果见图 4。由图 4 可以看出, 机舱和风轮的总质量对塔架固有频率的影响很大, 塔架的一阶固有频率随着机舱和风轮的总质量的增加而显著递减。

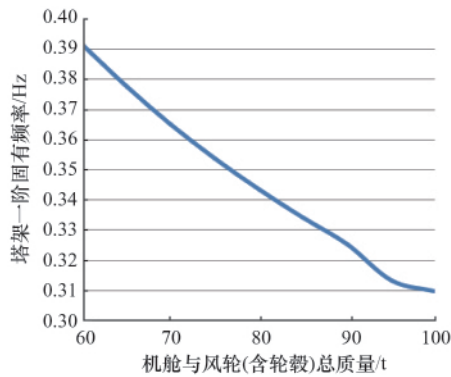


图 4 风轮(含轮毂)和机舱总质量与塔架一阶固有频率关系
Fig. 4 Plot of the total mass of the cabin and wind wheel (with hubs) vs. the first natural frequency of the tower

(4) 塔架壁厚及直径对塔架模态的影响。一般大型水平轴风力发电机塔架呈锥筒形, 由于交通运输、生产制造、装配等因素影响均将塔架分为若干段, 而每段塔筒的半径不尽相同, 筒壁的薄厚及塔架的直径一定程度上影响了塔架的模态。本文选择 4 个影响塔架模态的因素: 塔底的外径 $R_{底}$ 、塔顶的外径 $R_{顶}$ 、塔底的壁厚 $t_{底}$ 、塔顶的壁厚 $t_{顶}$ 来进行分析, 可将本次的试验确定为四因素三水平正交试验^[7], 结果见表 4。

表 4 四因素三水平试验
Table 4 Test of four factors and three levels

因素	$R_{底}/m$	$t_{底}/m$	$R_{顶}/m$	$t_{顶}/m$
1	3	0.02	2	0.014
2	4	0.024	2.5	0.028
3	5	0.028	3	0.022

由表 4 可得出 9 种组合(表 5), 计算结果见表 6。由表 6 可知, 塔架壁厚和直径对塔架固有频率的影响显著。

4 结论

(1) 由于在塔架的正常运行中, 引起塔架与顶部装置共振的频率一般均在低阶频率范围内波动, 在动力分析和工程

表 5 试验数据组合表
Table 5 Group table of test data

因素	$R_{底}/m$	$t_{底}/m$	$R_{顶}/m$	$t_{顶}/m$
1	3	0.020	2.0	0.014
2	3	0.024	2.5	0.018
3	3	0.028	3.0	0.022
4	4	0.020	2.5	0.022
5	4	0.024	3.0	0.014
6	4	0.028	2.0	0.018
7	5	0.020	3.0	0.018
8	5	0.024	2.0	0.022
9	5	0.028	2.5	0.014

表 6 塔架壁厚及直径对塔架模态的影响
Table 6 Impact of the wall thickness and diameter of tower on tower modality

阶数	1	2	3	4
1	0.25515	0.26108	2.9329	2.9714
2	0.30210	0.30425	3.1933	3.2351
3	0.33904	0.34418	3.4339	3.4774
4	0.40057	0.40378	3.7947	3.8277
5	0.43679	0.44092	4.1525	4.1891
6	0.41052	0.41407	3.6322	3.6653
7	0.53694	0.54159	4.7222	4.7530
8	0.52092	0.52386	4.1938	4.2220
9	0.56071	0.56324	4.5979	4.6298

设计中, 塔架底部有无门洞对高阶频率的影响可以不予考虑, 因此在塔架的设计和计算中可忽略塔架底部门洞对塔架固有频率的影响。

(2) 在实际的工程设计中, 应尽量减少风轮与机舱对塔架的整体偏心, 如若风轮机舱对塔架的大偏心在技术上不可解决, 也可尝试加大塔架的整体直径。

(3) 在对塔架设计和计算的过程中要着重考虑机舱和风轮装置对塔架整体模态的影响, 在条件允许的情况下尽可能减少机舱和风轮的总质量, 从而减少机舱和风轮装置的总质量对塔架固有频率带来的影响。

(4) 从四因素三水平试验可以看出, 适当增加塔底直径可以显著提高塔架的一阶固有频率; 在塔底直径一定的情况下, 适当增加塔底的壁厚、减小塔顶的直径和壁厚可提高塔架的一阶固有频率, 但在减少塔顶直径和壁厚时需考虑该处应力的变化情况, 以免发生破坏。

(5) 本文还有许多不足的地方, 如由于实际物理模型的复杂性, 简化后的实体模型多少会有误差; 塔架是薄壁结构, 如采用三维实体模型划分单元时, 要划分足够多的单元否则会影响计算的精度等, 还需要做更深入的分析研究工作, 以期获得更为理想的结果。

参考文献 (References)

- [1] 姜福杰. 大型水平轴风力发电机锥筒型塔架的有限元分析及优化设计[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2009.
 Jiang Fujie. Finite element analysis and optimization design of the taper cylinder tower for large horizontal-axis wind turbine [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2009.
- [2] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
 Qian Yiji. Dynamics of aero[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.
- [3] 赵世林, 李德源, 黄小华. 风力机塔架在偏心载荷作用下的屈曲分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 901-906.
 Zhao Shilin, Li Deyuan, Huang Xiaohua. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(7): 901-906.
- [4] 周勃, 费朝阳, 陈长征. 风力机塔架的振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2004, 17(S2): 903-905.
 Zhou Bo, Fei Chaoyang, Chen Changzheng. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(S2): 903-905.
- [5] 赵荣珍, 吕钢. 水平轴风力发电机塔架的振动模态分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(2): 33-36.
 Zhao Rongzhen, Lu Gang. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(2): 33-36.
- [6] 王朝胜, 黄东胜, 邹富顺. 风力机塔架模态分析及应用 [J]. 电力学报, 2009, 24(6): 463-466.
 Wang Zhaosheng, Huang Dongsheng, Zou Fushun. Journal of Electric Power, 2009, 24(6): 463-466.
- [7] 刘勇. 基于有限元法的风力发电机塔架模态分析 [J]. 装备制造技术, 2011(3): 41-43.
 Liu Yong. Equipment Manufacturing Technology, 2011(3): 41-43.
- [8] Clough R W, Penzien J. 结构动力学[M]. 王光远译. 北京: 科学出版社, 1981.
 Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. Wang Guangyuan, trans. Beijing: Science Press, 1981.
- [9] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
 Shi Yipin, Zhou Yurong. The example explanation of finite element of ABAQUS[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

(责任编辑 马宇红,代丽)

·学术动态·

“2012 重金属污染治理与生态 修复论坛”征文

“2012 重金属污染治理与生态修复论坛”将于 2012 年 5 月 30—31 日在北京市召开。
 本次大会由中国科学院地理科学与资源研究所主办。

征文范围如下。(1) 重金属污染治理修复技术、方法与实践: 重金属污染环境风险评估体系与监测技术及应用; 重金属污染源控制技术及应用; 重金属污染联合修复技术及工程实践。(2) 重金属污染治理修复工程案例: 矿区及周边重金属污染土壤修复; 矿山尾矿库和废渣场治理; 农产品产地重金属污染防治; 涉重工业污染场地土壤及地下水修复; 重金属污染流域生态修复; 历史遗留重金属污染修复工程案例等。(3) 重金属污染相关法规、政策与管理: 国际、国内的重金属相关法律、法规、制度、政策分析建议; 土壤污染防治法、重金属污染防治法等专项法律法规建设; 重点防控区域重金属管理及相关规定等。(4) 重金属污染治理与生态修复融资机制创新及商业模式探讨: 资本与融资平台构建; 企业参与模式探讨; 环境服务产业化市场化机制建议。

摘要截稿日期: 2012 年 5 月 20 日。

联系电话: 010-62670766, 010-82873217。

电子邮箱: service@er-china.com。

会议网站: www.er-forum.org。