

# 风力发电塔系统整体建模与模态分析研究

马跃强

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为了判断风力发电塔系统是否能避开共振, 需对其进行模态分析。提出了考虑“桨叶—轮毂—机舱—塔筒”耦合的整体建模的方法, 可用于风力发电塔系统模态的计算。分别进行了停机阶段、运行阶段和切出阶段的模态分析, 对比其频率和固有振型。对比结果表明: 三个阶段的频率基本相同, 只须验算停机状态下的频率满足规范即可; 塔筒的振动形式主要为侧向弯曲振动、前后弯曲振动和扭转振动; 桨叶在前十阶的振动形式主要为挥舞振动和摆振, 且三桨叶振动存在一定的规律; 相对于停机阶段, 运行阶段时振型基本相同, 切出阶段时振型有较大差异。

**关键词:** 风力发电塔系统; 共振; 整体建模; 模态分析

**中图分类号:** TU 279.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)04-0021-05

随着人们对能源和环境问题的关注, 风力发电技术得到迅速发展, 我国风能资源丰富, 有巨大发展潜力。目前, 兆瓦大型风力发电机得到越来越广泛的应用, 大型风机具有转动惯量大, 工作风速范围广泛, 桨叶和塔筒柔性较大等特点<sup>[1]</sup>, 为了风力发电机的安全性, 风力发电机就需要具有良好的动态特性。模态分析用于分析结构固有特性, 即确定频率和结构的固有振型。通过对风力发电塔系统进行模态分析, 以了解它的动态特性, 从而可以判断风力发电塔系统固有频率是否避开了桨叶旋转频率或者穿越频率一定的范围<sup>[2]</sup>, 即是否能避开共振, 因此对于风力发电塔系统模态分析的研究具有重要的工程意义。

风力发电塔系统主要构件有桨叶、轮毂、机舱和塔筒, 它们之间的耦合作用对塔筒的模态分析有很大的影响, 考虑耦合能更为准确的反映系统的动态特性。但目前风力发电塔系统有限元模型多采用将桨叶和机舱凝聚成塔顶的质量块的简化处理方法<sup>[3]</sup>, 此方法无法准确体现桨叶与塔筒的耦合机制, 也无法体现桨叶的旋转效应, 桨叶与塔筒之间相互作用的不确定性也可能带来经济上的浪费或者安全上的隐患, 其合理性有待进一步研究。MURTAGH 等提出了一种基于剪力传递的桨叶和塔筒的耦合机制, 虽然考虑桨叶和塔筒之间的耦合<sup>[4]</sup>, 但忽略了两之间弯矩、扭矩和轴力的传递。依据风力发电塔系统主要构件的特点, 并在已有模型的基础上, 提出了考虑“桨叶—轮毂—机舱—塔筒”耦合的整体建模的方法, 体现了桨叶旋转效应和桨叶—塔筒耦合机制, 可用于风力发电塔系统模态的计算。

风力发电塔系统的模态与风力发电机运行状态休戚相关, 这与一般建筑结构不同之处, 故进行模态分析时必须了解风力发电机运行全过程的模态情况<sup>[5]</sup>。对内蒙古京能乌兰伊利更项目风力发电机进行了停机阶段、运行阶段和切出阶段的模态分析, 对比了三个阶段风力发电塔系统的频率和振型, 得到一些有益的结论。

## 1 风力发电塔系统的整体建模

### 1.1 整体建模方案

整体建模时, 不仅要风力发电塔系统进行一些简化处理, 还要考虑塔顶上方机舱和轮毂总质量及转动惯量、桨叶的合理化建模、构件之间的耦合方法以及单元类型的选择。

收稿日期: 2010-06-23

作者简介: 马跃强 男 1982 年出生 博士研究生

(1)塔筒建模。大中型水平轴风力发电机塔筒主要用于支撑桨叶和机舱,多为圆筒型或锥筒型的结构,忽略法兰连接,可认为塔筒是连续的变截面壳体。根据其几何主要受力特性,可采用板单元或壳单元,由于壳单元除了弯曲变形还有中面变形,而且壳体的弯曲内力和中面内力相互联系、相互影响,但板单元的变形只为弯曲变形,因此,塔筒采用壳单元 SHELL181最为合理。

(2)桨叶建模。风力发电机桨叶截面形状复杂,不同位置处截面形状与变桨距角都不同,给结构建模带来极大困难。由于桨叶的长度和宽度之比很大,根据刚度等效原则将不规则的桨叶转化为规则形状,可视为中空矩形的变截面悬臂梁,采用 beam 189 梁单元模拟,这种简化对风力发电塔系统整体模态分析影响很小<sup>[4]</sup>。桨叶材料为玻璃钢,把桨叶看作正交各向异性材料赋予属性。

(3)机舱和轮毂建模。机舱和轮毂是风力发电塔系统中主要的承载部件,对机舱内的所有设备及桨叶起到固定和支撑作用。虽然机舱和轮毂内部非常复杂,但在整体分析时由于并不关注其细部特征,主要以质量和质量惯性参与振动,因此可以把机舱和轮毂分别简化为质量点,采用 mass21 质量单元模拟,设置单元参数考虑其质量、质量转动惯量和偏心位置,然后将质量单元节点、塔筒顶部和桨叶通过 CERIG 命令刚性连接。

(4)爬梯和平台及附属结构。由于它们的质量较轻,并且与塔筒之间的连接时软连接,因此不考虑它们的结构,只把其质量加到塔筒中。

(5)由于塔顶底舱的回转下支座刚度大,与之相连的塔筒变形小,因此在塔筒顶部附加一定厚板,采用 shell181 单元模拟。

(6)由于基础相对上部结构刚度很大,可以认为结构底部完全固结,不考虑土体对结构影响<sup>[6]</sup>。

## 1.2 算例

对内蒙古京能乌兰伊利更风电场 1 500 kW /77 直驱式风力发电进行建模。该风力发电塔系统轮毂高度为 65 m,塔筒由三节塔段构成,塔底直径为 4 m,厚度为 26 mm,塔顶直径为 2.57 m,厚度为 12 mm,弹性模量为  $2.1 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>。风轮直径为 77 m,根据刚度等效原则,叶底截面为 3 m × 0.8 m × 0.01 m,叶尖截面为 0.3 m × 0.08 m × 0.01 m,密度为 2 100 kg/m<sup>3</sup>,展向模量为  $6.25 \times 10^{10}$  Pa,径向模量为  $1.65 \times 10^{10}$  Pa,剪切模量为  $5.5 \times 10^9$  Pa,泊松比为 0.22。机舱质量为 54 400 kg,转动惯量为  $2.436 \times 10^6$  kg·m<sup>2</sup>,轮毂质量为 13 850 kg。

根据上述方法,利用 ANSYS 有限元软件对其进行整体建模,得到本风力发电塔系统整体有限元模型,见图 1。



图 1 风力发电机整体有限元模型

## 2 风力发电塔系统的模态分析

### 2.1 模态分析的理论基础

结构有限元离散化处理后,应用瞬时最小势能原理,忽略阻尼的影响,则得到系统的自由振动方程<sup>[7]</sup>为

$$M\ddot{q} + Kq = 0 \quad (1)$$

式中,  $M$  为总体质量矩阵;  $K$  为总体刚度矩阵;  $q$  为节点位。无阻尼模态分析求解基本方程是经典的特征值问题:

$$K\Phi_i = \omega_i^2 M\Phi_i \quad (2)$$

式中,  $\Phi_i$  为第  $i$  阶模态振型向量;  $\omega_i$  是第  $i$  阶模态的固有频率。

### 2.2 风力发电塔系统的模态分析

总体上,风力发电机运行过程主要分为三种:(1)启动前停机阶段。当风速小于切入风速时,风力发电机因风速过小而无法运行;(2)运行阶段。当风速大于切入风速而小于切出风速时,风力发电机处于变功率或常功率于运行阶段;(3)切除后停机阶段。当风速大于切出风速时,为了保证安全,风力发电机将

通过控制系统强制刹车停机。依据上节算例的整体有限元模型,采用广泛使用的子空间法分别对三种阶段进行了模态分析,分别提取三种情况下的前十阶频率,见表 1。

表 1 三种阶段下风力发电塔系统前十阶频率

				H z			
阶数	停机阶段	运行阶段	切出阶段	阶数	停机阶段	运行阶段	切出阶段
1	0.435 7	0.438 9	0.434 49	6	1.402 5	1.451 3	1.361 6
2	0.437 5	0.442 7	0.439 0	7	2.339 8	2.341 2	2.590 9
3	1.052 4	1.020 3	1.153 7	8	3.202 0	3.202 7	3.253 8
4	1.176 2	1.136 5	1.201	9	3.457 2	3.458 5	3.432 4
5	1.232 2	1.362 5	1.216 4	10	3.476 9	3.481 5	3.468 3

由表 1 可知,运行阶段和停机阶段的频率基本相同,这是由于桨叶旋转过程中存在的轴向惯性力使得桨叶刚度增大,造成频率增大;但又由于桨叶旋转与其变形的耦合将导致其刚度的“弱化”,综合二者因素,频率从数值来看基本接近。可见,桨叶旋转的“刚化效应”对风力发电塔系统虽有影响,但影响很小。切出阶段和停机阶段的频率基本相同,这是由于叶片虽然处于不同的位置,但叶片的质量相对风力发电塔系统所占的比例很小,对整个结构的频率影响也很小。总之,三个阶段的风力发电塔系统频率基本相同。GL 规范规定风力发电塔系统自振基频必须远离桨叶旋转频率和桨叶穿越频率,以避免共振,验算时只需使停机状态下的频率满足规范即可。

### 2.2.1 停机阶段下的模态分析

图 2 为风力发电塔系统停机阶段前十阶振型图,主要振型描述见表 2。由图 2 和表 2 可知,风力发电塔系统的振型主要表现为桨叶和塔筒的振动,主要表现为以下特征:

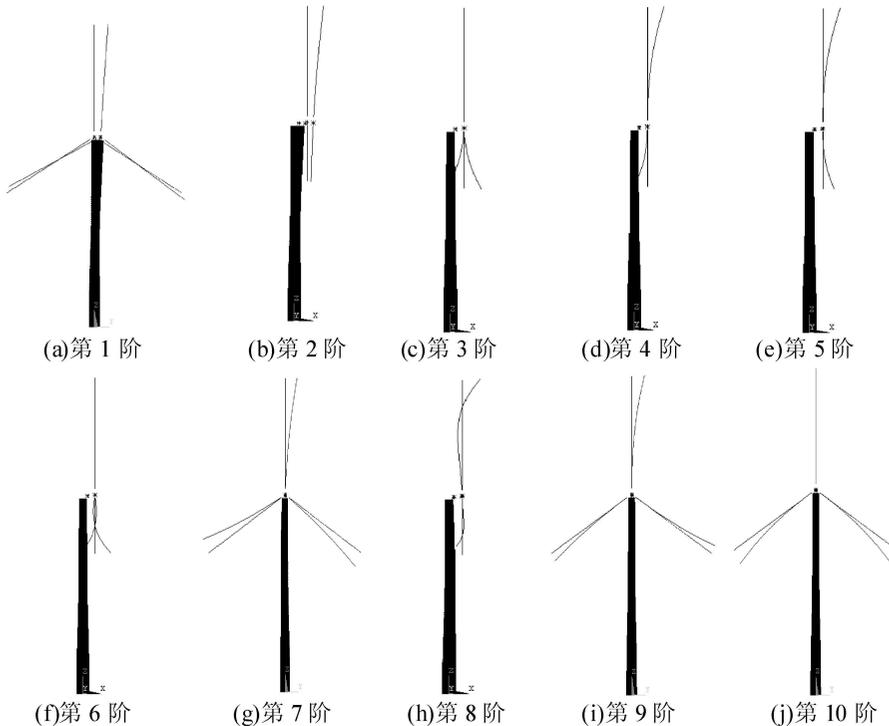


图 2 停机阶段前十阶振型图

(1) 风力发电机塔筒的振动形式主要表现为侧向弯曲振动、前后弯曲振动和扭转振动。第一阶和第二阶分别为风力发电机塔筒的一阶侧向弯曲振动和一阶前后弯曲振动,频率分别为  $0.4357 \text{ Hz}$  和  $0.4375 \text{ Hz}$ 。叶片振动较小;第五阶时塔筒出现一阶扭转振动,频率为  $1.2322 \text{ Hz}$ 。第九阶和第十阶时塔筒分别为二阶侧向弯曲振动和二阶前后弯曲振动,频率分别为  $3.4572 \text{ Hz}$  和  $3.4769 \text{ Hz}$ 。由此可得到风力发电机塔筒的频率。

(2) 桨叶在前十阶的振动形式主要为垂直于旋转平面方向上的挥舞振动和在旋转平面方向上的摆

振。三桨叶在前十阶振型中出现了一阶挥舞振动、二阶挥舞振动和一阶摆阵。三个桨叶在同一阶振动中,总是表现为三种情况:①三个桨叶同向振动;②上方桨叶与下方两桨叶异向振动;③上方桨叶不动,下方两桨叶异向振动。

表 2 停机阶段风力发电塔系统前十阶振型描述

阶数	振型描述
1	塔筒一阶侧向弯曲振动。
2	塔筒一阶前后弯曲振动。
3	叶片挥舞方向一阶:上方叶片保持不动,下方两叶片挥舞异向振动。
4	叶片挥舞方向一阶:上方叶片与下方两叶片挥舞异向振动。
5	叶片挥舞方向一阶:三叶片挥舞同向振动;塔筒一阶扭转振动。
6	叶片挥舞方向二阶:上方叶片保持不动,下方两叶片挥舞异向振动。
7	叶片摆振方向一阶:三叶片摆阵同向振动。
8	叶片挥舞方向二阶:上方叶片保持不动,下方两叶片挥舞异向振动;叶片摆振方向一阶:上方叶片保持不变,下方两叶片摆振异向振动。
9	叶片摆振方向一阶:上方叶片与下方两叶片摆振异向振动。塔筒侧向二阶振动,节点位于与上方部件连接处附件。
10	叶片挥舞方向二阶:上方叶片与下方两叶片挥舞异向振动;叶片摆振方向一阶:上方叶片保持不变,下方两叶片摆振异向振动;塔筒前后二阶振动,节点位于与上方部件连接处附件。

### 2.2.2 运行阶段下的模态分析

风力发电塔系统正常运行时,假定桨叶按照额定转速  $19.3 \text{ r/min}$  旋转,承受离心力作用。在停机阶段的有限元模型中,创建一个包含桨叶所有单元的组件,通过在所建的组件上施加一个绕中心轴转动的角速度的方式来完成离心力的加载,实现桨叶的旋转。风力发电塔系统运行阶段的振型图和振型描述不再列出,通过对比可知,运行阶段和停机阶段振型基本相同。

### 2.2.3 切出阶段下的模态分析

风力发电机运行时,随着风速等外部因素的变化,变桨距会自动调节节距角的大小,使叶片的相对位置发生变化,当节距角等于  $90^\circ$  时,桨叶将处于顺桨位置,此时风力发电塔系统处于停机状态<sup>[8]</sup>。表 3 为风力发电塔系统切出阶段下前十阶的主要振型描述,对应的振型图不再列出。由表 3 可知,三桨叶在在前十阶振型中出现了一阶摆振、二阶摆振和一阶挥舞振动。和表 2 对比,桨叶振型不同,停机阶段时桨叶先挥舞振动后摆振,而运行阶段时桨叶先摆振后挥舞振动;但低阶时振型变化趋势相同,高阶时振型差异加大,这是桨叶与塔筒等其它部件间的相互耦合逐渐复杂导致。由此可见,风力发电塔系统切出阶段相对于停机阶段时,频率几乎没影响,但振型差异较大。

表 3 运行阶段风力发电塔系统前十阶振型描述

阶数	振型描述
1	塔筒一阶侧向弯曲振动。
2	塔筒一阶前后弯曲振动。
3	叶片摆振方向一阶:上方桨叶与下方两桨叶摆振同向振动。
4	叶片摆振方向一阶:上方桨叶保持不动,下方两桨叶摆振异向振动。
5	叶片摆振方向一阶:上方桨叶与下方两桨叶摆振异向振动;塔筒一阶扭转振动。
6	叶片挥舞方向一阶:上方桨叶保持不动,下方两桨叶挥舞异向振动。
7	叶片挥舞方向一阶:三桨叶挥舞同向振动。
8	叶片摆振方向二阶:上方桨叶与下方两桨叶摆振同向振动。
9	叶片挥舞方向一阶:上方桨叶与下方两桨叶挥舞异向振动。塔筒侧向二阶振动,节点位于与上方部件连接处附件。
10	叶片摆振方向二阶:上方桨叶保持不动,下方两桨叶摆振异向振动;塔筒前后二阶振动,节点位于与上方部件连接处附件。

## 3 结语

提出了一种考虑“桨叶—轮毂—机舱—塔筒”耦合的整体建模的方法,对风力发电塔系统在停机阶段、运行阶段和切出阶段进行了模态分析,并对其频率和固有振型进行对比分析,得出了以下几点结论:

(1) 考虑“桨叶—轮毂—机舱—塔筒”耦合的整体建模的方法可用于风力发电塔系统模态分析;

(2) 三个阶段的风力发电塔系统频率基本相同;

(3) 塔筒的振动形式主要为侧向弯曲振动、前后弯曲振动和扭转振动; 桨叶在前十阶的振动形式主要为挥舞振动和摆振, 且三桨叶振动存在一定的规律; 相对于停机阶段, 运行阶段时振型基本相同, 切出阶段时振型有较大差异。

## 参 考 文 献

- [1] 陈小波, 陈健云, 李静. 海上风力发电塔脉动风速时程数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(32): 111-116
- [2] Burton T, Sharpe D, Jenkins N. Wind energy handbook[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [3] 蒋香梅. 有限单元法在风力发电机组开发中的应用研究 [D]. 新疆: 新疆农业大学农业机械化工程学院, 2002
- [4] Murtagh P J, Basu B, Broderick B M. A long wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading [J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1209-1219.
- [5] 贺广零. 风力发电高塔系统风致随机动力响应分析与抗风可靠度研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009
- [6] Lavassas I, Nikolaidis G, Zervas P, et al. Analysis and design of the prototype of a steel FMW wind turbine tower [J]. Engineering Structures, 2003, 25(8): 1097-1106
- [7] 赵荣珍, 吕刚. 水平轴风力发电机塔筒的振动模态分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(2): 33-35.
- [8] 李声艳. 大型风力发电机组的动力学特性计算分析 [D]. 天津: 天津工业大学机械电子工程学院, 2007

## Research on Inherent Characteristics of Wind Turbine Tower

Ma Yueqiang

(Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Modal analysis must be carried out in order to judge whether the wind turbine tower system can avoid resonance. A coupling method of the overall model of blade, hub, nacelle and tower is put forward and is used for the modal computation of wind turbine tower system. The modal analyses are carried out respectively in outage state, running state and feathering state, and the frequencies and modes of running state and feathering state are compared with the test results in outage state. The results show that the frequencies in the three stages are basically the same, and the frequency in outage state need only to satisfy the design requirements of Germanischer Lloyd guideline; the main vibration styles of the wind turbine tower appear lateral bending vibration, forth-and-back bending vibration and torsion vibration; the main vibration styles of the blades in the previous ten phrases appear out-of-plane vibration and in-plane vibration, and the three blade vibration has certain rule. Through comparison with the modes in outage state, the modes in running state are consistent basically on the whole and the modes in feathering state have remarkable differences.

**Key words** wind turbine; resonance; overall modeling; modal analysis