考虑塔架和叶片动力耦合的随机风载下风机结构动响应分析

郭双喜，陈伟民
（中国科学院 力学研究所，流固耦合系统力学重点实验室，北京 100190）

摘 要：考虑叶片和塔架的动力耦合作用，建立了 5 MW 风机整体结构的有限元模型，计算其在随机风速下的动响应。为分析叶片和塔架的动力耦合对风机结构动响应的影响，计算比较了刚性支撑的叶片、简化的风机和整体风机 3 种模型在风载下的动响应位移和应力。计算结果表明：由于叶片和塔架的耦合作用，叶片的位移响应最大增加约 20%，但是塔架的位移响应最大降低了约 60%。文章还分析了叶片旋转过程中方位角对塔架位移响应的影响。在叶片的一个旋转周期内，塔架的响应幅值会有较大的波动，最大响应幅值约为最小响应幅值的 3 倍。

关键词：响应；有限元；耦合系统；顺风向；随机风速
中图分类号：TK83 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2015)05-0649-07
DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2015.05.001

0 引言

水平轴风力机是一个刚柔耦合的多体系统：叶片和塔架是细长的柔性结构，为主要的弹性振动部件；机舱和轮毂主要以质量惯性参与振动。风机运行过程中，各部件间存在相互作用，叶片的振动会通过转轴传递到塔架。塔架受到风载、机组自重、偏心距等载荷产生的变形和振动，不仅会引起塔架的附加应力，影响其结构强度，而且还会影响顶端风轮的空间位置，对风轮的气动载荷产生影响，进而影响到叶片结构的变形和振动。随着风力机单机装机容量的加大，其结构尺寸也随之逐渐增大，叶片和塔架等细长体的柔性也因风机尺寸的增大而增大，进而使风机结构部件之间的耦合作用增强[1]。由于自然风速的随机性，风力机受到风载的作用非常复杂，为保证风机的运行安全和发电效率，提高其使用寿命，对随机风载作用下整体风机系统的动响应进行分析是十分必要的。

风机系统的动响应分析的解析方法有模态分析法和直接数值积分法等；风机系统的动响应分析的数值方法有有限元法和多体动力学方法等。振型叠加法、假设模态法等模态分析法可以使用相对较少的自由度对风力机的动态行为进行模拟，但仅适用于整机的设计阶段，对于叶片、塔架等变形较大的柔性构件，还无法准确地模拟其大变形等非线性行为。多体动力学方法主要以刚体运动为基础，不能考虑结构弹性变形的细节，建模较为复杂。有限元模型具有较多的自由度，计算精度高，可以较准确地模拟风力机中柔性结构的力学行为。

本文以 NREL 的 5 MW 风机[2]为研究对象，基于有限元软件 PATRAN/NASTRAN 建立了考虑叶片和塔架弹性变形相互影响的整体风机模型、简化风机模型（叶片、轮毂和机舱简化为集中质量）和刚性支撑的单独叶片模型等 3 种风机系统和部件模型；拟合了随机风速时程；计算叶片上的随机风载；用有限元数值模拟方法计算 3 种模型中风机各部件的顺风向响应；分析了风机部件间的耦合作用对叶片及塔架位移和应力响应的影响和叶片方位角等参数对塔架位移响应的影响规律。

1 数值计算模型

1.1 有限元模型

为分析系统的耦合作用对风机各部件响应的影响，建立了 3 种风机系统和部件的有限

收稿日期：2014-10-28。
基金项目：国家自然科学基金重点项目(11232012)；国家自然科学基金面上项目(11372320)。
作者简介：郭双喜(1989-)，男，硕士研究生，研究方向为风力发电设备与技术。E-mail：wenxinjiyi@126.com

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

元模型,计算其在随机风速下的响应。

整体风机模型:考虑叶片和塔架振动相互影响的整体风机,由于计算注重于叶片、塔架之间的相互耦合作用,因此暂不考虑机舱内部结构动力特性对风机响应的影响,将轮毂、机舱及内部结构简化为集中质量。另外,考虑到传动轴的刚度较大,机舱、叶片与塔架采用刚性梁连接。

简化风机模型:将叶片、轮毂和机舱简化为集中质量的简化风机,塔基固支约束。

单独叶片模型:刚性支撑的弹性叶片,认为叶片固定在刚性基础上,叶片根部固支约束。

图 1 为 3 种有限元模型的示意图。整体风机三叶片的位置:叶片 1 与 Y 轴正向夹角为 90°;叶片 2 与 Y 轴正向夹角为 210°;叶片 3 与 Y 轴正向夹角为 330°。整体风机模型中实现叶片上的离心力和重力的加载,保证刚性支撑叶片受到的力与整体风机叶片一致,可以分别计算刚性支撑叶片和整体风机中叶片的响应,分析塔架变形对叶片响应的影响。通过对比简化风机和整体风机塔架的响应,可分析叶片弹性变形对塔架响应的影响。

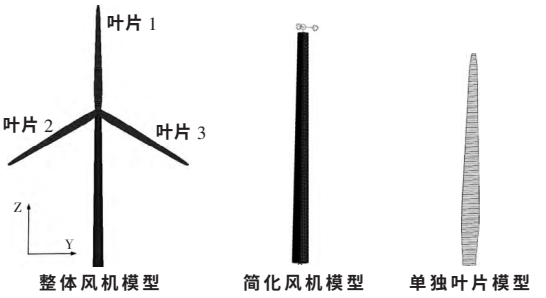


图 1 风机结构模型示意图

Fig.1 Schematic of turbine structures

1.2 环境载荷

在自然环境中工作的风机会受到风、雨、雪等多种载荷的作用,其中风载是陆上风机最主要的载荷来源。风速 $v(h)$ 随高度 h 的分布可用对数公式计算[3]:

$$\frac{v(z)}{v(h)}=\frac{\ln(z/z_0)}{\ln(h/z_0)} \qquad (1)$$

式中:$v(z)$ 为高度 z 处的风速,一般取 10 m 高度处的风速为参考;z_0 为与风速等环境条件有关的地面粗糙高度,海上常用的粗糙高度值为 0.003 m。

模拟空间范围的随机风速时程,须考虑不同空间位置风速的相关性。现代大型风机塔架高达 90 m,风轮半径超过 60 m,由式(1)计算得到的风速变化范围较小,在高度 30~150 m 的变化不超过 2 m/s。本文在计算动响应时,认为叶片扫过的空间范围内,各点的风速时程与轮毂处的风速时程相同,不考虑塔架上的风载,引入 Kaimal 谱模拟轮毂处的随机风速[4]:

$$PSD(f)=\frac{I^2 V_{10\,\min} l}{\left(1+1.5\frac{f l}{V_{10\,\min}}\right)^{5/3}} \qquad (2)$$

式中:I 为湍流强度;$V_{10\,\min}$ 为风速模拟点 10 min 内的平均风速;l 为尺寸因子,本文中取 l=600 m;f 为频率。

图 2 为平均风速 11.4 m/s,湍流强度为 0.1 时,时间步长为 0.02 s,总时长为 200 s 的风速时程,此风速时程为响应计算采用的随机风速。

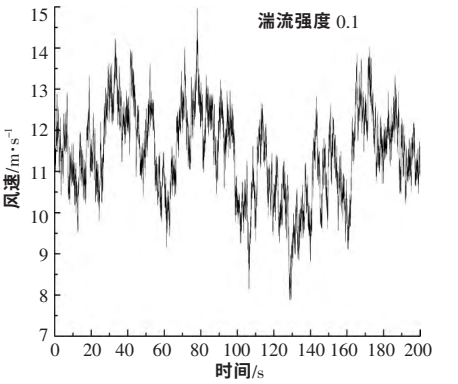


图 2 轮毂高度处风速

Fig.2 Wind speed at hub height

作用于叶片上的风载可分为顺风向载荷和垂直于风向的载荷,本文仅考虑系统顺风向的响应,顺风向载荷用拖曳力公式计算[5]:

$$F(t)=0.5C_D\rho Av(t)^2 \qquad (3)$$

式中:C_D 为拖曳力系数,计算中取 C_D=2.0;ρ 为空气密度,本文取 ρ=1.25 kg/m^3;A 为叶片的迎风面积;$v(t)$ 为即时风速。

1.3 算例风机

计算模型为 NREL 的 5 MW 迎风式风机。风机锥筒形塔架高 87.6 m,从塔基到塔顶,横截面尺寸线性变化(底部直径 6 m,厚度为 35.1 mm;顶部直径 3.87 m,厚度 24.7 mm)[2]。风机的主要参数见表 1。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　5 MW 风机参数

Table 1 Parameters of a 5 MW wind turbine

参数	数值
叶片数量	3
旋翼	126 m
轮毂直径	3 m
轮毂高度	90 m
额定风速	11.4 m/s
转速	12.1 r/min
旋翼质量	110 000 kg
机舱质量	240 000 kg
塔架密度	8 500 kg/m^3
塔架杨氏模量	210 GPa
塔架剪切模量	80.8 GPa

计算模型中叶片的几何参数是根据文献[6]所给出的弯曲刚度、质量分布等结构属性沿叶片展向的分布数据,用变截面的空心方梁拟合出来的。拟合出的梁宽度沿轴向的分布与实际叶片的弦长一致,且保证拟合出的模型梁的前两阶挥舞和摆振频率与文献中所给出频率的差值不超过 7%。表 2 为本文计算模型的叶片参数,动响应计算时,叶片和塔架的阻尼比均取 0.01[2]。

表 2　叶片参数

Table 2 Parameters of blade

参数	数值
长度	61.5 m
杨氏模量	14.8 GPa
密度	1 700 kg/m^3
厚度	0.015 m
泊松比	0.3

2　固有动力特性

风机工作时受到风载、离心力和交替变化的重力等载荷的作用，引起风机结构的振动。当外界激励的频率与风机系统的频率一致时,系统就会产生共振，会使结构产生较大的变形,甚至破坏,因此,结构设计时应使系统的频率尽量避开外界激振力的频率。系统的固有动力特性是风机结构设计中的重要考虑因素,分别计算了 3 个计算模型的固有动力特性,并与文献[2]给出的整体风机频率做了对比,最大误差不超过 5%。整体风机的前四阶顺风向振动模态如图 3 所示。

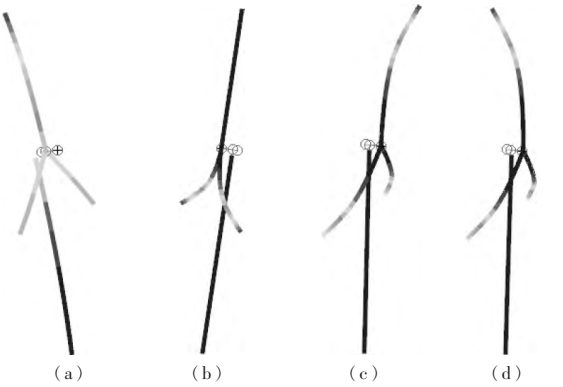


图 3　整体风机振型

Fig.3 Modes of integrated turbine

(a)塔架俯仰;(b)两叶片反对称挥舞;(c)三叶片反对称挥舞;(d)三叶片对称挥舞

模态计算时,叶片的离心力为风机额定转速下的离心力。由于旋转到不同位置受到的重力作用不同，在对单独叶片进行模态分析时,计算了重力为轴向应力和轴向拉力两种极端状态下的固有频率,分别对应于表 3 中的单独叶片的挥舞 1 和挥舞 2 模态。

表 3　不同模型固有频率

Table 3 Natural frequency of different models

模型	模态	频率/Hz	对照频率/Hz
单独叶片	挥舞 1(压力)	0.698	–
	挥舞 2(拉力)	0.709	–
简化风机	塔架俯仰	0.315	–
整体风机	塔架俯仰	0.311	0.320
	两叶片反对称挥舞	0.659	0.630
	三叶片反对称挥舞	0.689	0.669
	三叶片对称挥舞	0.722	0.702

对比表 3 中的叶片挥舞 1 和挥舞 2 两个频率可以看出，尽管由于重力的张力刚化作用，挥舞 2 的频率 0.709 Hz 略高于挥舞 1 的频率 0.698 Hz,两频率差不到 1.6%,因此重力对叶片振动频率的影响很小。对比简化风机和整体风机模型的塔架俯仰频率,两个频率很接近,差值仅约为 1.3%,因为塔架俯仰频率主要取决于塔架的弯曲刚度,所以叶片的弹性变形对其影响很小。须要注意的是,整体风机的叶片振动存在相互影响,叶片挥舞频率为风轮的振动频率,与单独叶片的挥舞频率不同;另外,由于叶片和塔架的耦合作用,出现了 3 种叶片的局部挥舞模态。

3　结构动响应

风载为陆上固定式风机受到的最主要环

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

境载荷,自然界中的风速是随时间变化的随机风速。本文进行结构响应计算时,由式(3)和图2所示的随机风速时程得到叶片单位面积上的变化风载如图4所示。

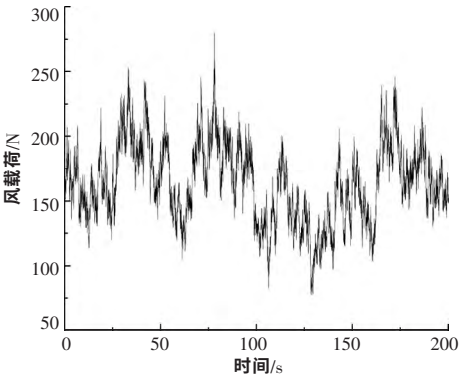


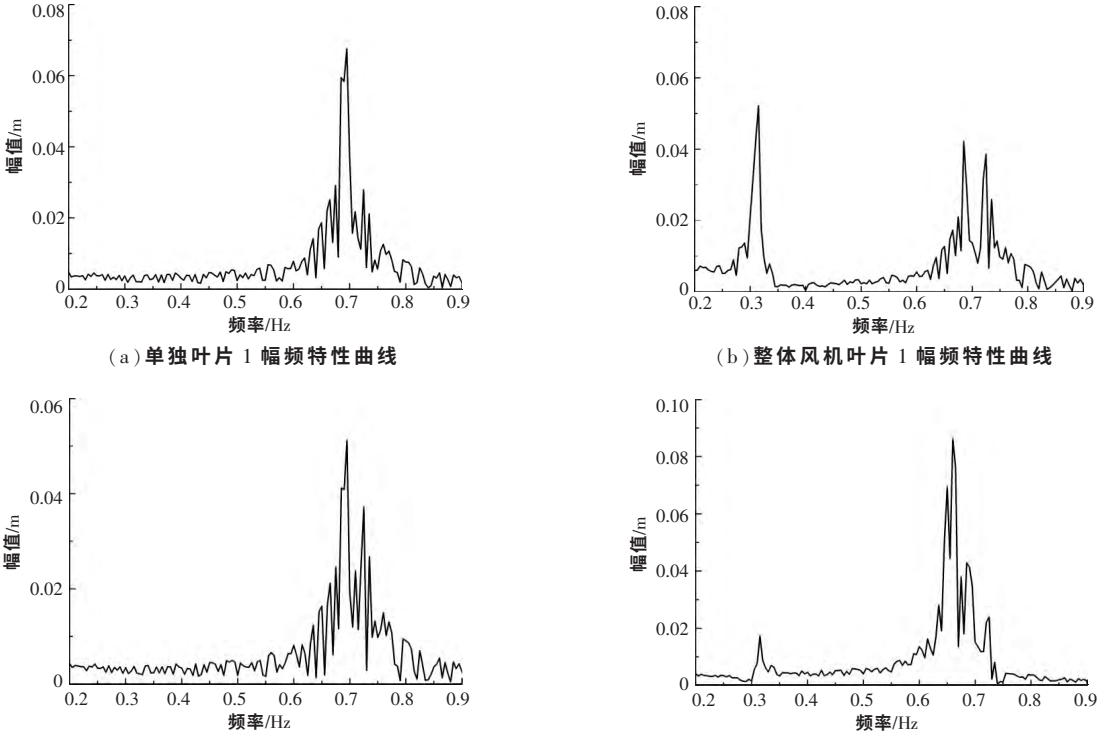
图4 单位面积载荷时程

Fig.4 Time history of load per unite area

3.1 叶片响应结果和分析

风力机叶片和塔架为细长柔性结构,两者的振动存在动力耦合作用,为分析系统耦合效应(这里主要考虑塔架的弹性变形效应)对叶片振动特性的影响,计算并对比了刚性支撑的单独叶片和有塔架弹性支持的整体风机叶片的位移、应力响应。计算中两种模型的叶片受到体力作用相同,整体风机叶片和单独叶片模型均实现叶片旋转产生的离心力和重力的加载。

图5为单独叶片和整体风机叶片叶尖响应的位移幅频特性曲线,其中,叶片1和叶片2分别指图1(a)所示的重力效应不同的两个位置。通过对比图5(a)、图5(b)和对比图5(c)、图5(d)所示的幅频特性曲线可见,整体风机叶片的响应包含一阶塔架俯仰运动;随机风载激起了整体风机系统的风轮模态,整体风机叶片的振动频率与单独叶片的振动频率不同。因此,分析风机叶片的动态特性时,应以整个风轮为研究对象。对比图5(c)和图5(d)所示的幅频特性曲线可见,整体风机叶片的位移响应较单独叶片模型增大约20%,这表明考虑塔架的弹性变形后叶片的响应增大。



(a)单独叶片1幅频特性曲线

(b)整体风机叶片1幅频特性曲线

(c)单独叶片2幅频特性曲线

(d)整体风机叶片2幅频特性曲线

图5 不同模型叶片的位移幅频特性曲线

Fig.5 Amplitude-frequency curve of the blade in different models

另外,对比图5(b)、图5(d)可知:整体风机的不同位置叶片在系统一阶俯仰频率0.311 Hz处响应的幅值不同,说明系统一阶塔架俯仰模态中不同位置叶片的变形量不同,叶片1

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的变形量较大;不同位置叶片响应幅值对应的频率不同,因为随机风载激发了图3(b)所示的风轮反对称挥舞模态,该模态下,仅下面两叶片产生挥舞振动,上面叶片不产生挥舞振动。采用不同计算模型得到的叶片根部最大弯曲应力的对比如表4所示。

表4　叶片最大弯曲应力

Table 4 Maximum bending stress of different blades

部件模型	应力/MPa
单独叶片1	6.82
整体风机叶片1	6.33
单独叶片2	6.68
整体风机叶片2	7.39

由表4数据可知,相对于单独叶片模型,整体风机中不同位置叶片弯曲应力值的变化不同,叶片1应力减小7.18%,叶片2应力增大10.63%,说明塔架弹性变形的耦合作用会使整体风机的部分叶片响应增大,同时也会有部分叶片的响应减小。这主要是因为随机风载会激起图3(b)~(d)所示的叶片挥舞模态,这3种模态下,不同位置叶片的响应不同。表4中的弯曲应力只是指风载引起的弯曲应力,此弯曲应力为结构总应力去除重力引起的轴向拉伸、压缩应力和弯曲应力后得到的。值得注意的是:当叶片旋转到水平位置时,重力引起的叶片根部弯曲应力达到最大值(16.26 MPa),超过计算考虑的风载引起弯曲应力的2倍,在进行强度核算时,不能忽略重力引起周期作用的弯曲应力。

3.2 塔架响应结果和分析

3.2.1 叶片弹性变形对塔架响应的影响

与简化风机塔架相比,整体风机模型中塔架的响应考虑了叶片弹性变形的影响。图6为简化风机和整体风机塔顶(塔架顶端)响应的位移幅频特性曲线。从图6可以看出,两种风机模型幅频响应的峰值对应的频率很接近。但是,整体风机塔顶响应的幅值远小于简化风机塔顶响应的幅值,其幅值约为后者的1/3。这是由于整体风机模型和简化风机模型的固有频率略有不同,而随机风载对应于风速的二次方;随机相角改变了不同频率成分的载荷幅值的相对大小,对应于简化风机固有频率的载荷幅值相对较大。

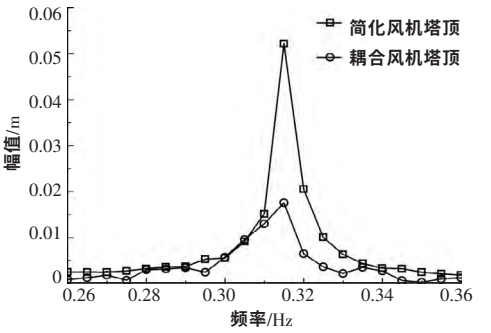


图6　塔顶响应幅频特性曲线

Fig.6 Amplitude-frequency curve of tower top

在计算考虑的随机风速激励下,简化风机和整体风机塔架根部的最大弯曲应力分别为29.83,10.11 MPa,可见考虑叶片的弹性变形后,塔架根部的最大弯曲应力减小了66.11%,叶片的弹性变形对系统频率的影响在很大程度上降低了塔架的应力。

为考察叶片柔性对塔架响应的影响,计算了整体风机系统在叶片材料的弹性模量不同时的响应。塔顶响应的位移幅频特性曲线见图7。从图7可知,随着叶片弹性模量的增大,叶片的刚性逐渐增大,叶片的弹性变形逐渐减小,对塔架响应的影响逐渐减小,塔架响应的幅值逐渐增大。

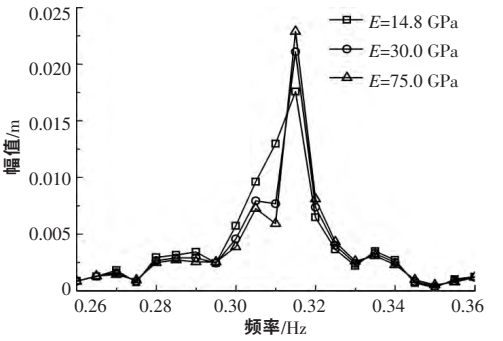


图7　叶片弹性模量对塔架响应的影响

Fig.7 Influence of blades´ modulus on tower´s response

另外,随着叶片柔度的改变,整体风机的一阶塔架俯仰频率基本不变,这也进一步证明了叶片的弹性变形几乎不影响塔架俯仰频率。随着叶片刚度的增大,整体风机塔顶的位移幅频特性将趋近于简化风机模型中塔顶的响应。

3.2.2 叶片方位角对塔架响应的影响

通过对整体风机系统响应的分析可知,由于不同位置叶片的弹性变形量不同,因此不同

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

位置叶片的响应不同,对塔架响应的影响也不同,3 个叶片上载荷的相位角也不尽相同。为考察叶片的方位角对塔架响应的影响,计算了叶片方位角取值不同时,系统的顺风向响应;同时为计入叶片载荷相位的影响,计算中使某一叶片载荷与其它两叶片载荷有一定相位差值。由于风机三叶片的固定相对位置,因此仅给出一个叶片(记为叶片 X)的位置即可(图 8)。表 5 列出了叶片 X 在一个旋转周期内的不同方位。

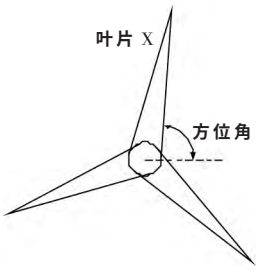


图 8 叶片方位角示意图
Fig.8 Schematic of blade's azimuth

表 5 不同模型的叶片方位角
Table 5 Blade azimuth in different models

叶片位置	方位号	叶片 X 与水平面夹角/(°)
两个叶片位置高于轮毂	方位角 1	0
	方位角 2	10
	方位角 3	20
	方位角 4	30
一个叶片位置高于轮毂	方位角 5	70
	方位角 6	80
	方位角 7	90

方位角 1~4 表示的范围内,有两个叶片处在轮毂水平面或其以上,塔顶响应的位移幅频特性曲线如图 9 所示。

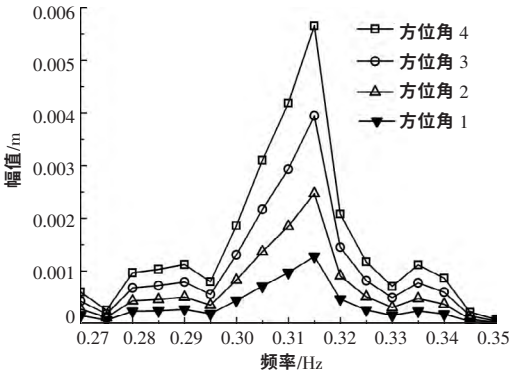


图 9 塔顶响应的位移幅频特性曲线
Fig.9 Amplitude-frequency curve of tower top

从图 9 可以看出,塔顶的响应幅值随着叶片 X 与水平面夹角的减小而减小;当叶片 X 与水平面夹角为零(方位角 1)时,塔顶的响应最小;随着方位角变化,塔顶响应的幅值变化范围很大,方位角 1 的模型中塔顶响应幅值仅为方位角 4 模型的 20%左右。方位角 5~7 表示的范围内,只有一个叶片的位置在轮毂以上,塔顶的位移幅频特性曲线如图 10 所示。

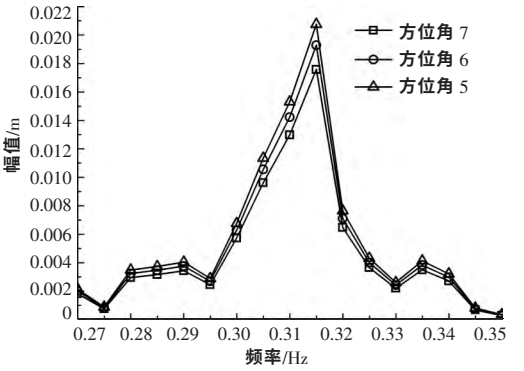


图 10 塔顶响应的位移幅频特性曲线
Fig.10 Amplitude-frequency curve of tower top

从图 10 可以看出,随着叶片方位角的变化,叶片响应的幅值变化相对较小,方位角 5、7 模型的塔顶响应幅值差约为 20%;某一叶片与水平面垂直时,塔架响应的幅值最小。

对比图 9、10 所示的不同叶片方位角模型的塔顶响应位移幅频特性曲线可见:叶片的方位角对塔顶的响应有明显影响,仅有一个叶片位置在轮毂以上时,塔顶响应的幅值较大;当有两个叶片位置高于轮毂时,塔架的响应明显降低,一阶塔架俯仰频率下的响应幅值不到前者的 1/3;某一叶片与水平面平行时,塔架的响应最小,这一位置也是区分轮毂以上有一个叶片或两个叶片的临界位置,当有叶片经过与水平面平行的位置时,塔架的响应幅值会出现较大的变化。另外,从图 9 和图 10 还可以看出,叶片的方位角对整体风机系统的一阶塔架俯仰频率几乎没有影响,这与文献[7]的研究结果一致。

4 结论

本文以 NREL 的 5 MW 风机为例,建立了 3 种风机系统和部件的有限元模型;模拟了 200 s 的随机风速时程;计算了不同模型在随机风载作用下的顺风向响应;分析了系统弹性部件(叶片和塔架)的耦合作用对风机部件响

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应的影响。整体风机模型中,随机风载主要引起叶片的挥舞振动,叶片在风轮的固有频率下振动,系统的一阶塔架俯仰运动参与量较小。在分析风机叶片的动态特性时,应以整个风轮为研究对象。

数值模拟结果表明:①整体风机塔架的弹性变形对不同位置叶片响应的影响不同,相对于单独叶片模型,整体风机中部分叶片的响应会增大,最大位移响应约增加20%,然而有的叶片响应减小。②考虑叶片的弹性变形后,塔架根部的最大弯曲应力和塔顶的位移响应幅度减小,随着叶片刚度的增加,塔架的响应逐渐增大。③尽管叶片的方位角几乎不影响系统的一阶塔架俯仰频率,但当考虑叶片载荷的相角不同时,叶片方位角会明显影响塔架的响应;两个叶片高于轮毂时,塔顶的响应幅值不到单个叶片高于轮毂时的1/3;某一叶片处于水平时,塔架的响应最小,这个位置是确定高于轮毂水平面的叶片数量的临界位置。

参考文献:

[1] Chen X, Li J, Chen J. Wind-induced response analysis of a wind turbine tower including the blade-tower coupling effect [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2009, 10(11): 1573-1580.

[2] Butterfield S, Musial W, Scott G. Definition of a 5MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development[M]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2009.

[3] Karimirad M. Dynamic response of floating wind turbine [J]. Transaction B: Mechanical Engineering, 2010, 17(2): 146-156.

[4] Hansen M O L. Aerodynamics of Wind Turbines [M]. London: EarthScan, 2008.

[5] Murtagh P J, Basu B, Broderick B M. Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading [J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1209-1219.

[6] Lindenburg C. Aeroelastic Modelling of the LMH64-5 Blade [M]. Petten: ECN, 2002.

[7] 刘旺玉,苏章明,陈龙,等.基于结构参数影响的风力机柔性多体系统的动力响应 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(7): 1088-1093.

[7] Liu Wangyu, Su Mingzhang, Chen Long, et al. Dynamic response of wind turbine compliance muti-body system based on influence of structure parameter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(7): 1088-1093.

Dynamic response analysis of wind turbine suffered interaction between blades and tower under random wind

Guo Shuangxi, Chen Weimin

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling System, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: An integrate finite element model of 5 MW wind turbine is developed. The dynamic responses of the wind turbine under random wind are analyzed while the dynamic interaction between the blades and tower is taken into account. In order to study the impact of blade-tower coupling, the dynamic responses of 3 models, i.e. an integrate wind turbine model, a simplified turbine model and a rigid supported blade are examined. The calculation results show that the blades´ displacement may be about 20% larger than that without blade-tower interaction. Meanwhile the tower´s displacement response is about 60% smaller than that without blade-tower interaction. In addition, the influence of blade azimuths on tower´s response is studied. It is shown that the tower´s displacement response amplitude may have a significant fluctuation during one rotation period, the maximum fluctuation of response amplitude is as much as 300%.

Key words: response; finite element; coupling system; along-wind; random wind

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net