



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108694277 A

(43)申请公布日 2018.10.23

(21)申请号 201810423536.2

(22)申请日 2018.05.06

(71)申请人 北京工业大学

地址 100124 北京市朝阳区平乐园100号

(72)发明人 贾奇峰 张建宇 杜晓钟 咸玉聪

贾文强 张侣俱

(74)专利代理机构 北京思海天达知识产权代理
有限公司 11203

代理人 沈波

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

F03D 13/30(2016.01)

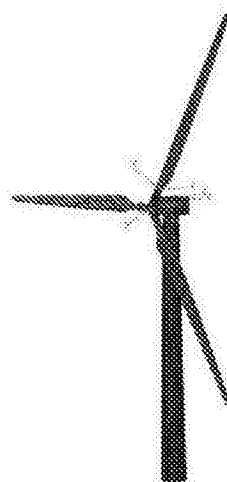
权利要求书1页 说明书11页 附图17页

(54)发明名称

基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法

(57)摘要

本发明公开了基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,属于风力发电机技术领域。针对风力发电机的结构部件,通过Creo平台完成三维实体建模,并将Creo模型导入到ABAQUS有限元平台中;根据实际工况对ABAQUS中机组整体的有限元模型设置各部分正确约束关系,仿真获得叶轮组件和机组整体的固有频率和模态振型。考虑风力机承受的风剪切效应,在叶轮和塔架的不同区段内施加相应的风压载荷。通过响应仿真讨论机组内部即叶轮和塔架之间的耦合响应。采用有限元仿真手段研究关键部件及机组整体的固有振动特性,并以时变风压分布作为主激励载荷获得了风力发电机的动力学响应特征,对于改善机组结构设计、制定有效诊断策略具有重要意义。



1. 基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,其特征在于:该方法包括以下步骤,

首先,针对风力发电机的结构部件,通过Creo平台完成三维实体建模,并将Creo模型导入到ABAQUS有限元平台中;在ABAQUS有限元平台中风力发电机的机组各部分结构相互耦合,形成机组整体的有限元模型;机组整体的有限元模型包括叶片、轮毂、塔架、主轴和机舱,机舱和主轴处理成刚性体,叶片、轮毂和塔架处理成柔性体;

其次,根据实际工况对ABAQUS中机组整体的有限元模型设置各部分正确约束关系,仿真获得叶轮组件和机组整体的固有频率和模态振型;

然后,在Matlab仿真平台下建立随机风速模型,并计算与之对应的风压分布曲线;考虑风力机承受的风剪切效应,在叶轮和塔架的不同区段内施加相应的风压载荷;

最后,基于模态叠加法实现风力机的动力响应仿真,获取额定风速和极限风速两种工况下的结构响应数据,进而得到叶轮的尖端和塔架不同位置的振动位移、速度及加速度曲线;改变机组整体的有限元模型的约束条件,通过响应仿真讨论机组内部即叶轮和塔架之间的耦合响应。

2. 根据权利要求1所述的基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,其特征在于:机组整体的有限元模型的叶片三维实体建模中,首先获得叶片各截面的翼型参数,然后基于点坐标的几何变换获得叶片各截面在空间实际位置的三维坐标,再通过Creo软件的混合扫描法生成叶片实体模型,并且叶片的实体模型以壳体的形式导入有限元软件中。

3. 根据权利要求1所述的基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,其特征在于:机组整体的有限元模型是根据各部分的结构特点和工作特性相互耦合形成的,即叶片、塔架选择壳单元加以模拟;轮毂采用三维实体单元模拟;主轴系统与机舱采用惯性质量块加以模拟。

4. 根据权利要求1所述的基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,其特征在于:在ABAQUS中设置各部分正确的约束关系是指叶片与轮毂之间,轮毂与主轴之间以及机舱与塔架顶端之间通过绑定命令进行约束,对塔架底部进行固定连接,主轴与机舱之间进行铰接。

5. 根据权利要求1所述的基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,其特征在于:在Matlab平台下建立的随机风速是用谱估计方法建立的,所述的考虑风力机风切变效应是指根据塔架和叶轮的實際高度将其分成不同区段,分段加载。

6. 根据权利要求1所述的基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,其特征在于:在额定风速和极限风速两种工况的模拟是通过求解两种风速对应的风压,并按照加载方案添加到整机模型来实现的;所述的讨论机组内部耦合响应是分为两种情况:在塔架全约束和塔基约束的情况下对比叶轮响应的差异;在独立塔架和整机模型中对比塔架的响应,讨论叶轮对塔架的影响。

基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及到一种动力学响应的分析方法,具体涉及到大型风电机组的三维实体建模、激励风载建模,以及整机的有限元分析,属于风力发电机技术领域。

背景技术

[0002] 由于环境污染、能源短缺问题日益加剧,我国在新能源领域的开发、应用获得了突飞猛进的发展。截止2015年底,我国投入运行的风电装机总量达到1亿kW,年发电量高达1900亿千瓦时,无论是装机总量还是年发电量均为世界第一。目前,投入使用的主力机型均为兆瓦级以上。

[0003] 我国已俨然成为风电大国,但远非风电制造的强国,一些技术瓶颈有待突破。随着风力机功率的不断增加,机组的结构尺寸也随之增大,几十乃至上百米的叶片已经成为常态。叶片和塔架等弹性体部件尺寸的增加导致系统的柔性增大,系统的振动响应突出,叶轮的挥舞、摆振、叶片扭转以及塔架和主轴振动的相互耦合增强,导致系统破坏的可能性大大提高,风电机组的稳定性面临重重考验。

[0004] 从国内外风力机的实际应用情况来看,由于设计中对结构动力学问题研究不足,造成机组不能正常运转,甚至失效、损毁的案例时有发生。风力发电机不仅在运行过程中会出现损毁的状况,有些样机甚至在试运行期间就被迫终止,严重阻碍了风力发电机的技术革新,大功率风电机组的动力学分析成为风电装备制造面对的首要问题。

[0005] 我国的风力发电虽然发展迅速,但与国外先进水平相比仍有较大差距。许多理论模型以及设计标准均直接参考国外产品,风力机结构动力学方面的短板非常突出。随着叶片翼展和塔架高度的日益增加,导致二者的柔性增强,在随机风载的扰动与激励下,风力机的动态响应表现出强烈的耦合特征,给机组的优化设计和运行安全带来巨大挑战。

[0006] 国内外很多学者针对叶片、塔架等结构以及整机模型都进行了动力学分析的研究。刘雄等采用二节点梁对叶片进行离散化,同时将叶片旋转所产生的离散刚化作用和气动阻尼作用考虑在内,运用Newmark法和模态叠加原理计算叶片的动态响应。姜福杰采用大型有限元软件SAP2000对塔架的受力、模态和屈曲进行分析,初步探讨了塔架的优化设计问题。Donghoon Lee等将风力机视为刚性体和柔性体组成的耦合系统。通过数值模拟,研究了多柔性风力机系统的固有频率和模态。赵学勇等提出一种新的基于壳梁联结模式的风力机多体系统动力学建模方法,利用万向关节、圆柱关节和弹簧阻尼单元,对风力机塔架、叶片、机舱、轮毂、转轴和传动部分进行建模,并运用Timoshenko理论和拉格朗日方程对风力机系统进行了多体动力学分析。

[0007] 但是目前已公开的专利中,大多是针对单独的风机构件展开研究,或是对于风电整机做一些初步的仿真模拟,很少从整机建模的角度来考虑风载建模以及求解动态响应。考虑到上述一些因素以及风力发电机结构的复杂性,如何通过以风力发电机整机动力学为核心的动态响应分析来解决这方面问题是本发明亟待解决的课题。

发明内容

[0008] 本发明的目的是针对大型风力发电机由于动力学设计不足而引发故障的问题,提出一种兆瓦级风力发电机整机动力学分析方法,为了研究兆瓦级风电机组在随机风载激励下的工作特性,以及机组内部的振动耦合关系,本发明采用了“刚柔耦合建模—结构模态仿真—风载激励建模—动态响应仿真—耦合特性分析”的研究思路。结合Creo、MATLAB和ABAQUS等多个仿真平台,完成风力发电机的动力学求解,为风力发电机的优化设计和性能评估提供依据。

[0009] 为实现上述目的,本发明采用的技术方案为基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,该方法包括以下步骤,

[0010] 首先,针对风力发电机的结构部件,通过Creo平台完成三维实体建模,并将Creo模型导入到ABAQUS有限元平台中;在ABAQUS有限元平台中风力发电机的机组各部分结构相互耦合,形成机组整体的有限元模型。机组整体的有限元模型包括叶片、轮毂、塔架、主轴和机舱,机舱和主轴处理成刚性体,叶片、轮毂和塔架处理成柔性体。

[0011] 其次,根据实际工况对ABAQUS中机组整体的有限元模型设置各部分正确约束关系,仿真获得叶轮组件和机组整体的固有频率和模态振型。

[0012] 然后,在Matlab仿真平台下建立随机风速模型,并计算与之对应的风压分布曲线;考虑风力机承受的风剪切效应,在叶轮和塔架的不同区段内施加相应的风压载荷。

[0013] 最后,基于模态叠加法实现风力机的动力响应仿真,获取额定风速和极限风速两种工况下的结构响应数据,进而得到叶轮的尖端和塔架不同位置的振动位移、速度及加速度曲线。改变机组整体的有限元模型的约束条件,通过响应仿真讨论机组内部即叶轮和塔架之间的耦合响应。

[0014] 机组整体的有限元模型的叶片三维实体建模中,首先获得叶片各截面的翼型参数,然后基于点坐标的几何变换获得叶片各截面在空间实际位置的三维坐标,再通过Creo软件的混合扫描法生成叶片实体模型,并且叶片的实体模型以壳体的形式导入有限元软件中;

[0015] 机组整体的有限元模型是根据各部分的结构特点和工作特性相互耦合形成的,即叶片、塔架选择壳单元加以模拟;轮毂采用三维实体单元模拟;主轴系统与机舱采用惯性质量块加以模拟。

[0016] 在ABAQUS中设置各部分正确的约束关系是指叶片与轮毂之间,轮毂与主轴之间以及机舱与塔架顶端之间通过绑定命令进行约束,对塔架底部进行固定连接,主轴与机舱之间进行铰接。

[0017] 在Matlab平台下建立的随机风速是用谱估计方法建立的,所述的考虑风力机风切变效应是指根据塔架和叶轮的實際高度将其分成不同区段,分段加载。

[0018] 在额定风速和极限风速两种工况的模拟是通过求解两种风速对应的风压,并按照加载方案添加到整机模型来实现的。所述的讨论机组内部耦合响应是分为两种情况:在塔架全约束和塔基约束的情况下对比叶轮响应的差异;在独立塔架和整机模型中对比塔架的响应,讨论叶轮对塔架的影响。

[0019] 与现有技术相比较,本发明的有益效果是:采用有限元仿真手段研究关键部件及

机组整体的固有振动特性,并以时变风压分布作为主激励载荷获得了风力发电机的动力学响应特征,初步揭示了机组弹性部件之间的耦合工作特性,通过本发明即基于多平台联合仿真的风力发电机动力响应分析方法,完成其整机模型的动态响应仿真,预测风力机在不同风况下的动力学响应,对于改善机组结构设计、制定有效诊断策略具有重要意义。

附图说明

[0020] 图1为风力发电机的各个主要部件以及整机装配的三维模型。

[0021] 图2为整机模型导入ABAQUS里的有限元分析模型。

[0022] 图3为叶轮组件的各阶振型,其中(a)为一阶振型,(b)为二阶振型,(c)为三阶振型,(d)为四阶振型,(e)为五阶振型,(f)为六阶振型,(g)为七阶振型,(h)为八阶振型,(i)为九阶振型,(j)为十阶振型。

[0023] 图4为塔架不同高度处的实际风速变化图。其中(a)为塔架高度为40m截面处的实际风速,(b)为塔架高度为30m截面处的实际风速,(c)为塔架高度为40m截面处的实际风速。

[0024] 图5为塔架不同高度处的实际风压变化图。其中(a)为塔架高度为40m截面处的实际风压,(b)为塔架高度为30m截面处的实际风压,(c)为塔架高度为40m截面处的实际风压。

[0025] 图6为塔架和叶片的具体风载施加方案图。其中(a)为叶片的加载方案,(b)为塔架的加载方案。(c)为整机模型加载效果图。

[0026] 图7为额定转速下叶片在垂直叶轮旋转平面上的动力学响应。(a)为叶尖响应位移,(b)为叶尖响应速度,(c)为叶尖响应加速度。

[0027] 图8为在切入风速下叶片在垂直叶轮旋转平面上的动力学响应。(a)为叶片顶部位移,(b)为叶片顶部速度,(c)为叶片顶部加速度。

[0028] 图9为在额定风速下塔架在垂直叶轮旋转平面上的振动位移,(a)为塔架顶端位移,(b)为塔架中部位移,(c)为塔架末端位移。

[0029] 图10为在额定风速下塔架在垂直叶轮旋转平面上的响应速度,(a)为塔架顶端速度,(b)为塔架中部速度,(c)为塔架末端速度。

[0030] 图11为在额定风速下塔架在垂直叶轮旋转平面上的加速度响应,(a)为塔架顶端加速度,(b)为塔架中部加速度,(c)为塔架末端加速度。

[0031] 图12为塔架全约束情况下的叶尖动态响应,(a)为叶尖位移,(b)为叶尖速度,(c)为叶尖加速度。

[0032] 图13为塔基约束情况下的叶尖动态响应,(a)为叶尖位移,(b)为叶尖速度,(c)为叶尖加速度。

[0033] 图14为塔架约束情况下的顶端节点动态响应,(a)为顶端节点位移、(b)为顶端节点速度、(c)为顶端节点加速度。

具体实施方式

[0034] 下面将结合附图和具体实施方式对本发明作进一步描述。

[0035] 通过附图可以看出本发明涉及一种兆瓦级风力发电机的整机动力学分析方法,具体实施过程如下:

[0036] (1) 本发明实例所涉及的风力发电机主要参数如下表1所示:

[0037] 表1风力发电机组的主要参数

	参数名称	数值
	额定功率 (KW)	1000
	额定风速 (m/s)	12
	切入风速 (m/s)	3
	切出风速 (m/s)	25
	叶片数目	3
[0038]	叶片长度 (m)	29
	风轮直径 (m)	60
	风轮转速 (rpm)	12~21.5
	轮毂高度 (m)	45
	叶片重量 (kg)	4000
	轮毂重量 (kg)	14000
	机舱重量 (kg)	47000
	塔架重量 (kg)	61900

[0039] (2) 通过Creo软件对风力发电机组的主要零部件进行三维实体建模,如图1所示,该三维模型包括对风力发电机的叶片、轮毂、塔架、主轴和机舱的建模,其中叶片的建模是比较关键的步骤,下面详细介绍一下叶片建模,风力发电机叶片翼型选用NACA4412。表2给出了通过Profili软件获得的NACA4412翼型数据。

[0040] 表2NACA4412的翼型数据

[0041]

上翼面x 坐标	上翼面y 坐标	下翼面x 坐标	下翼面y 坐标
1.00000	0.00130	0.00000	0.00000
0.95000	0.01470	0.01250	-0.01430
0.90000	0.02710	0.02500	-0.01950
0.80000	0.04890	0.05000	-0.02490
0.70000	0.06690	0.07500	-0.02740
0.60000	0.08140	0.10000	-0.02860
0.20000	0.08800	0.40000	-0.01800
0.15000	0.07890	0.50000	-0.01400
0.10000	0.06590	0.60000	-0.01000
0.07500	0.05760	0.70000	-0.00650
0.05000	0.04730	0.80000	-0.00390
0.02500	0.03390	0.90000	-0.00220
0.01250	0.02440	0.95000	-0.00160
0.00000	0.00000	1.00000	0.00000

[0042] 在得到上表翼型的二维平面坐标点后,然后结合表1中提供的弦长和扭角等主要参数,即基于点坐标的几何变换来求出叶片各截面在空间实际位置的三维坐标。

[0043] 在通过上述点坐标的几何变换得到各个截面点的三维坐标后,在草绘中输入每个截面的点的三维坐标,得到18个截面的轮廓线,连接每个叶片截面的前缘端点绘制一条样条曲线,并将其作为引导曲线,通过混合扫描法即可生成如图1(a)的叶片的实体造型。在Creo中将叶片的实体模型以壳体的形式保存为x_t格式文件,其它主要部件均为实体并导入到ABAQUS软件中。

[0044] 通常轮毂的形状为球型或者三角型,本发明所用轮毂选用球型球墨铸铁结构的轮毂,轮毂的建模过程如下:在Creo中先建立一个直径为2m的球体,然后在轮毂与主轴连接端建立一个平面以便于主轴连接,然后再使用抽壳命令,抽壳厚度为100mm,然后在垂直于主轴连接端面并且过球心的平面上建立三个互成120°的辅助平面,并在三个平面上分别建立一个高出球体表面200mm的凸台。再用拉伸命令分别在三个凸台上建立直径为900mm的沉孔,用来连接叶片的根部。再将轮毂内部连接地方倒圆角处理即可得到如图1(b)所示的轮毂实体造型。

[0045] 本发明所涉及的风力机塔架选择锥筒式结构,为了提高有限元分析的计算速度,对塔架模型进行了简化处理。与塔架整体质量相比,其内部爬梯以及底部舱门对整机的动力特性影响很小,因此这部分结构在本发明实例的塔架有限元模型中均忽略不计。

[0046] 表3给出了塔架的主要结构参数。

[0047] 表3塔架结构参数

	顶端外径	顶端壁厚	高度	底端外径	底端壁厚
[0048]	2.2	100	45	3.3	200

[0049] 根据表3结构参数在Creo中首先绘制上下截面草图,然后进行360°旋转建模即可得到如图1(d)所示的塔架实体造型。

[0050] 对于大型的风力发电机,叶片和塔架的高径比较大,加之均为空心结构,因此在工作过程中,结构柔性异常突出。而机舱(包含传动轴系、增速箱、发电机等部件)轴向尺寸较小、整体刚度较高,与叶片和塔架相比,可视为刚性体,因此,本发明实例在整机模型中将机舱结构简化为一惯性质量块。主轴是用两个拉伸形成的圆柱体构造的,主轴前端的直径为900mm,长度为4000mm,后端直径为1200mm,长度为150mm。机舱总体简化为长宽高为2500mm、2500mm和4400mm的长方体。通过以上步骤建成的主轴和机舱的实体造型如图1(c)和(e)所示。

[0051] (3)将整机模型导入ABAQUS中,根据仿真分析的要求,定义材料属性、创建分析步、零部件间的约束关系以及施加载荷和划分零件网格,采用Block Lanczos法对风力发电机整机模型进行有限元模态分析。整机模型导入ABAQUS里的有限元分析模型如图2所示。

[0052] (3.1)进一步,本发明有限元仿真相关材料属性设置如下:

[0053] 叶片结构特点选择ABAQUS单元库中S4R四结点曲面薄壳单元,全局尺寸控制为120mm。叶片材料为玻璃钢,其弹性模量为 $E=42.6\text{Gpa}$,泊松比 $\mu=0.22$,密度 $\rho=1950\text{kg/m}^3$;

[0054] 轮毂的结构特点选择单元库中的C3D10二次四面体单元进行自由网格划分。轮毂材料为QT400,其弹性模量为 $E=160\text{Gpa}$,泊松比 $\mu=0.275$,密度 $\rho=7300\text{kg/m}^3$;主轴、机舱和塔架的结构特点选择ABAQUS单元库中的C3D8R六面体单元,它们的材料为钢,其弹性模量为 $E=210\text{Gpa}$,泊松比 $\mu=0.3$,密度 $\rho=7850\text{kg/m}^3$ 。

[0055] (3.2)本发明有限元仿真中约束关系定义如下:

[0056] 在ABAQUS中将叶片与轮毂之间、轮毂与主轴之间以及机舱与塔架顶端之间通过绑定命令进行约束。塔架与基础之间通过金属螺杆连接,在有限元软件中对塔架底部进行固定连接,其自由度为零。叶轮绕主轴以一定角速度旋转,因此将主轴与机舱之间进行铰接,使叶轮保持唯一的旋转自由度。

[0057] (3.3) 本发明有限元仿真模态分析步设置:

[0058] 在初始步之后创建一个新的分析步命名为Step-1,分析步设置中的程序类型为线性摄动,频率,用来分析叶轮组件或者整机模型的振型和固有频率。

[0059] 在求解叶轮模态过程中,保留叶轮工作平面内的旋转自由度,其他5个自由度全部约束,并在轮毂中心添加19r/min的角速度。其它设置和上述一样,仿真得到叶轮组件的前十阶固有频率以及相关模态振型信息如下表4所示。

[0060] 叶轮组件的各阶模态阵型如图3中的各图所示,为了描述振型方便,本发明实例将最上方的叶片编号为叶片1,按照逆时针方向称其他叶片为叶片2、3。

[0061] 表4叶轮组件的模态信息

[0062]

阶数	固有频率	振型
第一阶	0.47561	叶片1 与叶片2 异向挥舞振动, 叶片3 保持不动
第二阶	0.47566	叶片1 与叶片2 基本不动, 叶片3 挥舞振动
第三阶	0.47743	三个叶片同向挥舞振动
第四阶	1.3485	三个叶片同向挥舞振动, 且叶片2 与叶片3 摆动振动
第五阶	1.3766	叶片1 与叶片2 异向挥舞振动, 且摆动振动
第六阶	1.3766	叶片3 挥舞振动, 叶片1 与叶片2 异向摆动振动
第七阶	2.1397	叶片1 与叶片2 异向挥舞, 且发生扭转振动
第八阶	2.1401	叶片1、2 与叶片3 异向挥舞, 且三个叶片扭转振动
第九阶	2.1522	三个叶片同向挥舞, 且三个叶片扭转振动
第十阶	5.0165	叶片1 与叶片2 挥舞与扭转振动, 叶片3 保持不动

[0063] 结合表4以及图3中的各图分析可得,风力发电机叶轮振动的前六阶振型主要以挥舞、摆振为主,第七阶后开始出现扭转振动。

[0064] 分析整机的有限元模型时约束关系设置如下:塔架基底施以固定约束,叶片与轮毂之间、轮毂与主轴之间以及机舱与塔架顶端之间添加绑定约束,叶轮与机舱之间进行铰接,使其保持一个相对机舱旋转的自由度。仿真得到整机的固有频率如下表5。

[0065] 表5整机的模态信息

阶数	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
固有频率	0.47561	0.47566	0.47743	1.3485	1.3766

[0067] (4) 在Matlab仿真平台下建立随机风速模型,并计算与之对应的风压分布曲线;

[0068] 自然风的风速大小、方向都在随时随地变化,这种随机特性会对风力发电机组的运行产生重要影响。因此,要进行风力发电机的动态响应分析,不仅要建立风电机组的动力学模型,也要建立反映实际风况的风速模型。

[0069] 目前,常用的建立风速模型的方法主要有三种:风速的统计规律模型、组合风速模

型、基于谱估计方法的风速模型。但是风速的统计规律模型在数学上可以符合统计规律却不能描述风速的实际变化规律；组合风速模型相对统计方法来说，能够体现风速的变化趋势，但是对于风速的随机性描述不够充分；基于谱估计方法的风速模型采用平均风速与脉动风之和来模拟实际风速，以随机风速的谱特征为依据，应用随机信号的谱估计或预测方法来建立风速模拟模型，它能够同时描述风速的随机特性和脉动特性。

[0070] 对比以上三种风速建模方法，本发明实例选用谱估计方法建立风速模型。

[0071] 下面对基于谱估计方法建立风速模型以及求解风压展开描述。

[0072] 在三维风场中任意一点的风速V可以表示为平均风速与脉动风速之和，表达式如下：

$$[0073] \quad V = \bar{V} + V'$$

[0074] 式中 \bar{V} ——平均风速，m/s；

[0075] V' ——脉动风速，m/s。

[0076] (4.1) 脉动风功率谱密度

[0077] 脉动风速的变化可视为平稳随机过程，本发明采用Davenport谱，用于风速建模。

$$[0078] \quad S(n) = 4K^{-2}V_{10} \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}}$$

[0079] 式中 $x=1200n/v_{10}$ 为湍流积分尺度系数；

[0080] n ——脉动风频率；

[0081] $s(n)$ ——脉动风速功率谱。

[0082] V_{10} ——标准高度10米处的平均风速；

[0083] K ——与地面粗糙程度相关的常数。

[0084] (4.2) 脉动风的空间相关性

[0085] 脉动风的空间相干性是指在结构多个点之间，其中一点的风压达到最大时另一点的风压一般不会同时达到最大。在一定范围内，两点相距越远，脉动风在两点同时达到最大值的可能性越小。空间相关性用相干函数表示，对于空间垂直方向，相干函数的Coh(n)的指数形式的经验公式为：

$$[0086] \quad Coh(n) = \exp\left(-\frac{2n\sqrt{C_z^2(z_i - z_j)^2}}{V(z_i) + V(z_j)}\right)$$

[0087] 其中， $V(z_i)$ 、 $V(z_j)$ 为i和j点的风速，m/s。衰减系数一般取 $C_x=16$ ， $C_y=10$ ， $C_z=8$ 。

[0088] (4.3) 谐波叠加法模拟风谱

[0089] 根据Shinozuka理论，随机过程g(t)的样本可由下式来模拟：

$$[0090] \quad g(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S(\omega)\Delta\omega} \cos(\omega_j t + \phi_j)$$

[0091] 其中，风谱在频率范围内划分成N个相同部分， $S(\omega)$ 为随机过程g(t)的功率谱密度谱密度函数； $\Delta\omega$ 为频率增量， θ_j 为介于0和 2π 之间均匀分布的随机数。

[0092] 利用以上公式在MATLAB软件中编程可以得到20s内的塔架不同高度处的脉动风速变化图。

[0093] (4.4) 平均风速求解

[0094] 在实际应用中,模拟风速随高度变化的规律最常用的方法主要有两种,即指数律和对数律,其中指数律更加简单、实用,因此本发明选择指数律作为风力发电机基本风速的表达形式,其基本的表达式如下:

$$[0095] \quad \frac{\bar{v}}{v_b} = \left(\frac{z}{z_b} \right)^a$$

[0096] 式中 \bar{v} 、 z ——任一点的平均风速和高度;

[0097] v_b 、 z_b ——标准高度处的平均风速和高度,大部分国家取标准高度为10m;

[0098] a ——风切变系数。

[0099] 上式中切变系数 a 的取值范围通常为0.1~0.4, a 的值随表面粗糙值的增加而增加,我国陆上一般取 $a=0.146$ 。

[0100] 根据上面的表达式可以求出额定风速时塔架的每一个截面的平均风速,结果如表6所示。

[0101] 表6塔架上各截面的基本风速

[0102]

各点高度	45m	40m	35m	30m	25m	20m	15m	10m	5m
基本风速 (m/s)	12	11.79	11.56	11.31	11	10.66	10.22	9.63	8.7

[0103] 进而可以根据脉动风速与各截面的平均风速之和求出实际风速。用MATLAB程序编程画出实际风速变化图如图4所示,其中(a)、(b)、(c)分别为塔架40m、30m、20m处的三个截面的实际风速。

[0104] (4.5) 基本风压求解

[0105] 风压就是垂直于气流方向的平面所受到的风的压力。根据伯努利方程得出风的动压力表达式如下:

$$[0106] \quad p = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} r v^2$$

[0107] 式中 p ——风压;

[0108] ρ ——空气密度,kg/m³;

[0109] v ——风速,m/s;

[0110] g ——重力加速度,m/s²;

[0111] r ——重度,N/m³。

[0112] 在标准状态下(大气压为 $P=0.1013\text{MPa}$,温度为 $T=15^\circ\text{C}$),空气重度 $r=12.25\text{N/m}^3$,重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。因此,可以推出:

$$[0113] \quad p = \frac{v^2}{1.6} (\text{Pa})$$

[0114] 上式为风速估计风压的通用公式。由上述可知,作用在风力机上的风压是随结构位置不同而变化分布的。然后以轮毂中心处风速为基准,根据上面的公式即可以求出塔架各截面的实际风压。分别提取距地面40m、30m、20m处三个截面的实际风压,结果如图5中的

各图所示。

[0115] (5) 把建立的随机风载施加到风力发电机上,即根据叶轮和塔架的结构特点,把叶轮和塔架分为不同的截面,分别施加风载以模拟叶轮和塔架上的风切变,这是为了描述风剪切效应,使计算的结果更合理。图6为本发明所用的风力发电机塔架和叶片的具体风载施加方案。

[0116] (5.1) 叶片的加载方案:本发明涉及的风力发电机经Croc软件绘制出的实体模型一共有18个叶素段。因此以轮毂中心为起始位置,每两个叶素段假设为一个环面,将叶片分为9份。在加载时以轮毂中心风压为基准,按照叶片长度展向依次在每个环面上施加相对应的基本风压,近似模拟叶轮上的风切变,如图6(a)所示。

[0117] 根据空气动力学理论即距离轮毂中心越远,在叶片上部垂直位置的风速越大。如表1所示,本发明涉及的风力机叶片总长29m,表7为从上到下的每一个环面在额定风速工况下的基本风速。

[0118] 表7叶片各环面的基本风速

[0119]

各点高度 (m)	74	70.7	67.5	64.3	61.1	57.9	54.7	51.5	48.3	45
基本风速 (m/s)	12.89	12.81	12.73	12.64	12.54	12.44	12.34	12.23	12.12	12

[0120] 已知各环面的基本风速,根据风压转换方程可以求出叶片各环面的的实际风压。叶轮除考虑迎风面的风压载荷外,还计入重力和离心力载荷,加载原理如下:风力发电机在工作过程中始终承受重力的作用,本发明的重力载荷通过在有限元软件中加载一个 9.8m/s^2 的惯性加速度来模拟重力作用;叶轮绕主轴旋转会产生离心载荷,在求解额定风速工况下的风力发电机动态响应时,在轮毂中心加载一额定转速来模拟惯性力作用。

[0121] (5.2) 塔架的加载方案:本发明涉及的风力发电机塔架的高度为45m,以轮毂中心为起始位置将风力机塔架从轮毂中心到地面等分为9份,在ABAQUS中以轮毂中心为基准,每个截面上依次施加相对应的基本风压,近似模拟塔架上的风切变,如图6(b)所示。

[0122] (5.3) ABAQUS软件中的相关设定:在步骤(3.3)中创建的Step-1后再创建一个新的分析步Step-2,分析步设置中的程序类型是线性摄动,模态动力学,分析步的时间长度是20s,时间增量是0.02,这一分析步是为了求解整机模型的动态响应。

[0123] 以塔架为例,塔架共分为9段,即创建9个风载荷幅值时间表,然后在载荷设置中选择在分析步Step-2中创建类别为力的表面载荷,然后依次给各个截面施加相应的风载荷。具体施加效果图如图6(c)所示。

[0124] (6) 基于模态叠加法实现风力机的动力响应仿真,研究额定风速和极限风速两种工况下的结构响应特点,获得叶轮尖端、塔架不同位置的振动位移、速度及加速度曲线。

[0125] (6.1) 额定工况下的动态响应(风速介于12m/s和25m/s之间)

[0126] 在ABAQUS中将额定转速时的风压按照步骤(5)的加载方案添加到整机模型上,完成动力学求解,分别提取叶片最尖端(节点618号)在垂直叶轮旋转平面方向上的位移、速度以及加速度如图7所示。

[0127] (6.2) 极限工况下的动态响应(风速高于25m/s)

[0128] 切出风速工况的基本风压也可以按照风压的通用公式求解出来,并按照加载方案添加到整机模型上进行动力学求解,分别提取叶片最尖端(节点618号)在垂直叶轮旋转平面方向上的位移、速度以及加速度如图8所示。

[0129] 对比额定工况和极限工况下的图7、图8中各图可见,额定风速下叶尖的最大位移为0.595m,速度为1.52m/s,加速度为25.56m/s²;切出风速时叶尖的最大位移为2.508m,速度为6.625m/s,加速度为122m/s²;

[0130] 对比可见,随着风载增大,叶片的位移、速度以及加速度随之增加。

[0131] (6.3) 塔架的动态响应

[0132] 分别在塔架顶部、中部以及距离塔底5m处选择节点,提取额定风速下各节点在垂直叶轮旋转平面方向上的振动位移、响应速度、加速度响应,结果如图9、图10、图11中(a)(b)(c)所示。

[0133] 对比图9、图10和图11中各图可见,额定风速工况下塔架顶端的位移为0.02m、中部的位移为0.0028m、距离塔底5m处的位移为0.00008m;塔架顶端的振动速度为0.036m/s、中部为0.024m/s、距离塔底5m处的振动速度为0.0009m/s;塔架顶端的加速度为0.455m/s²、中部为0.89m/s²、距离塔底5m处的振动加速度为0.035m/s²。

[0134] 由以上分析可见,塔架的位移、速度随着塔架高度的降低而减小,而塔架中间位置的加速度大于顶端以及塔底的加速度,这是因为一是中间位置面积比较大,承受的风载荷总体大于顶部,二是塔架底部末端位置弹性不足。

[0135] (7) 风力发电机组是由叶片、轮毂、主轴、机舱和塔架等主要部件组成的刚柔耦合多体系统。作为机组最核心的弹性组件,叶轮与塔架在机组工作过程中存在强烈的耦合作用。耦合因素的存在,既影响风力机的固有振动特性(即模态),也影响风载作用下的响应结果。

[0136] 因此我们有必要在风力发电机响应分析的基础上,研究一下叶轮和塔架之间的耦合作用,可以分以下两种情况来讨论:在塔架全约束和塔基约束的情况下对比叶轮响应的差异;在独立塔架和整机模型中对比塔架的响应,讨论叶轮对塔架的影响。

[0137] (7.1) 在塔架全约束和塔基约束的情况下对比叶轮响应的差异。在ABAQUS中将整机模型的塔架表面施加全约束,加载方案同步骤(5),即将额定转速时的风载加载到叶轮上,而塔架不添加任何载荷,进行仿真求解。在ABAQUS中提取位于最上方叶片尖端(618号节点)的位移、速度、加速度响应,结果如图12所示。

[0138] 再在ABAQUS中将整机模型的塔基固定,其余加载方式与步骤(5)一致。提取位于最上方叶片尖端(618号节点)的位移、速度、加速度响应,结果如图13所示。

[0139] 对比图12和图13中的各图,在给叶轮施加额定风速,塔架表面全约束的整机模型中,叶片的最大位移为0.584m,最大速度为1.612m/s,最大加速度为36.87m/s²。而塔基固定的整机模型中,叶片最大位移为0.574m,最大速度为1.532m/s,最大加速度为31.67m/s²,均小于塔架表面全约束时叶片的各项指标,因此可以得出,塔架与叶片的相互耦合减小了叶片的动态响应。

[0140] (7.2) 在独立塔架和整机模型中对比塔架的响应,讨论叶轮对塔架的影响。在ABAQUS中单独建立塔架模型,按照额定工况对塔架加载,并且考虑塔顶的结构自重,在塔架顶部中心位置加一个质量点,大小为65t。然后提取塔架顶端节点的位移、速度、加速度如图

14。

[0141] 将得到的独立塔架的响应结果与步骤(6.3)中额定工况下整机模型中的塔架响应做对比,即将图14的响应结果和图9、图10、图11中塔架顶端的响应对比分析可得,独立塔架的最大位移为0.4013m,最大速度为0.3329m/s,最大加速度为 1.3399m/s^2 ,而整机模型中的塔架最大位移为0.02m,最大速度为0.036m/s,最大加速度为 0.455m/s^2 ,小于独立塔架的各项指标。

[0142] 分析可得塔架与叶片的相互耦合同样减小了塔架的动态响应。

[0143] 以上结合附图实施例对本发明进行了详细说明,本领域中普通技术人员可根据上述说明对本发明做出种种变化例。因而,实施例中的某些细节不应构成对本发明的限定,本发明将以所附权利要求书界定的范围作为本发明的保护范围。

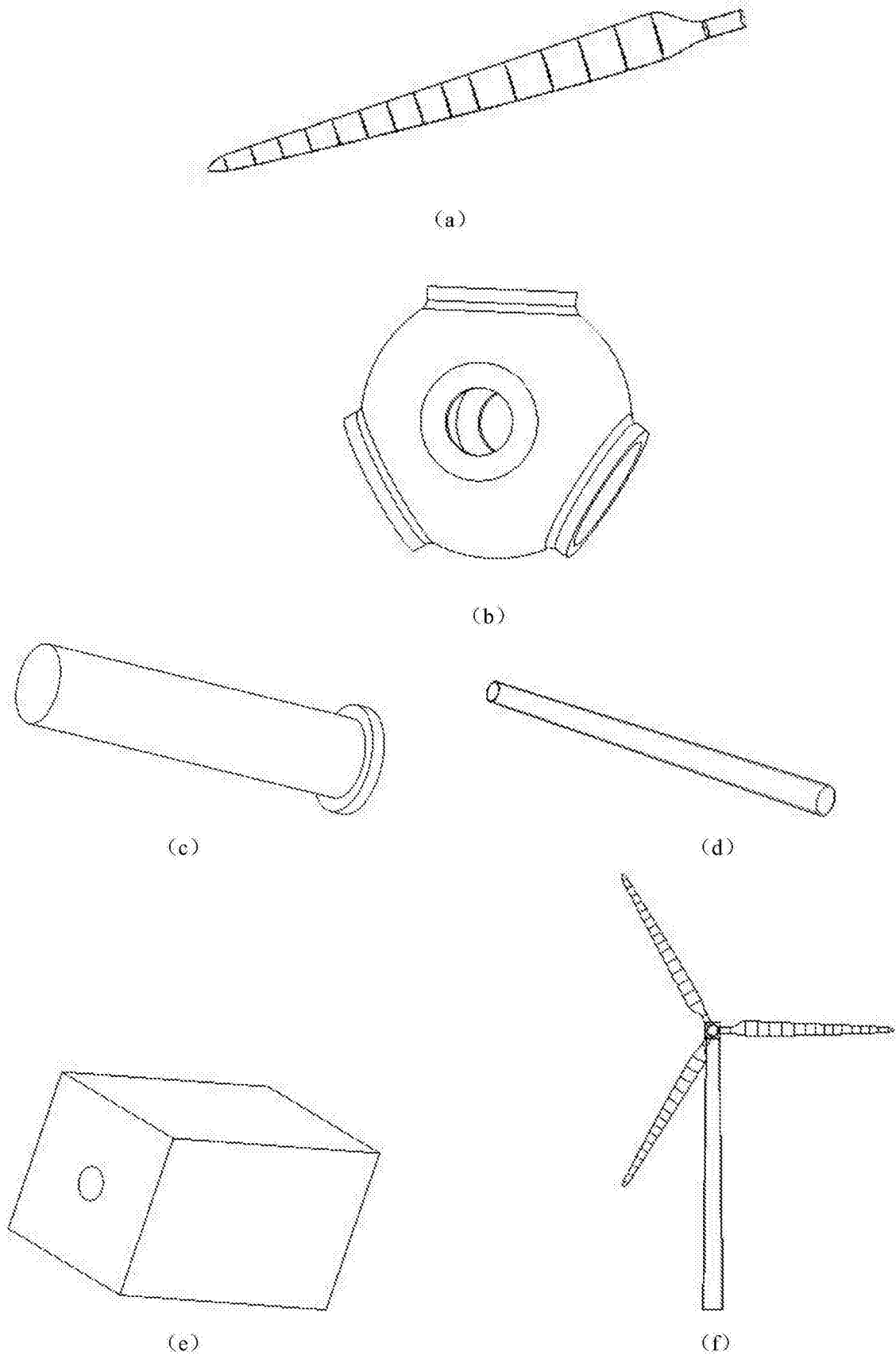


图1

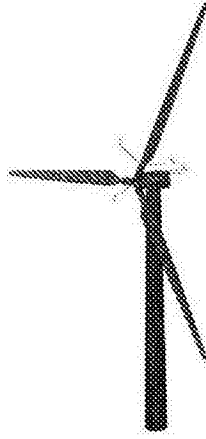
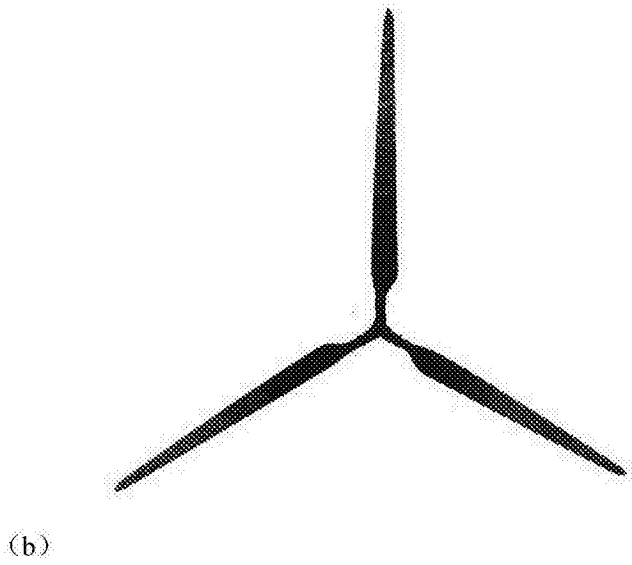
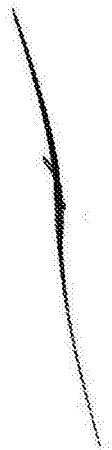
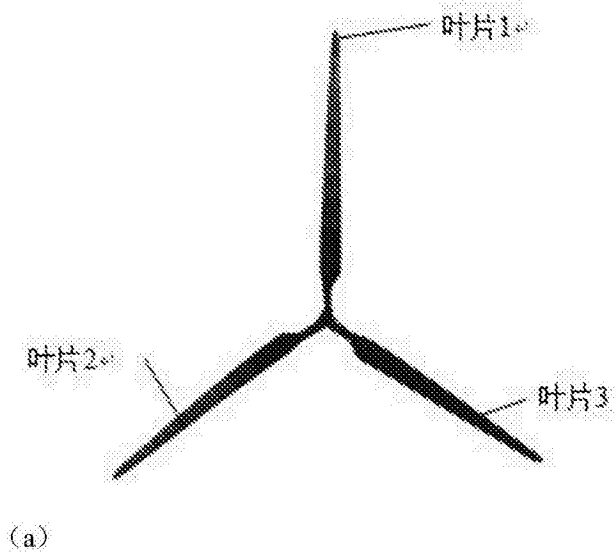
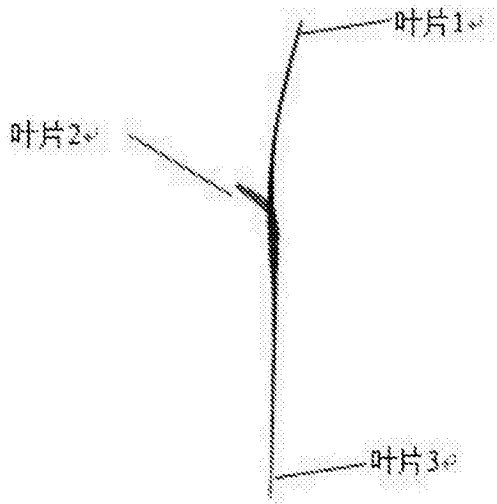
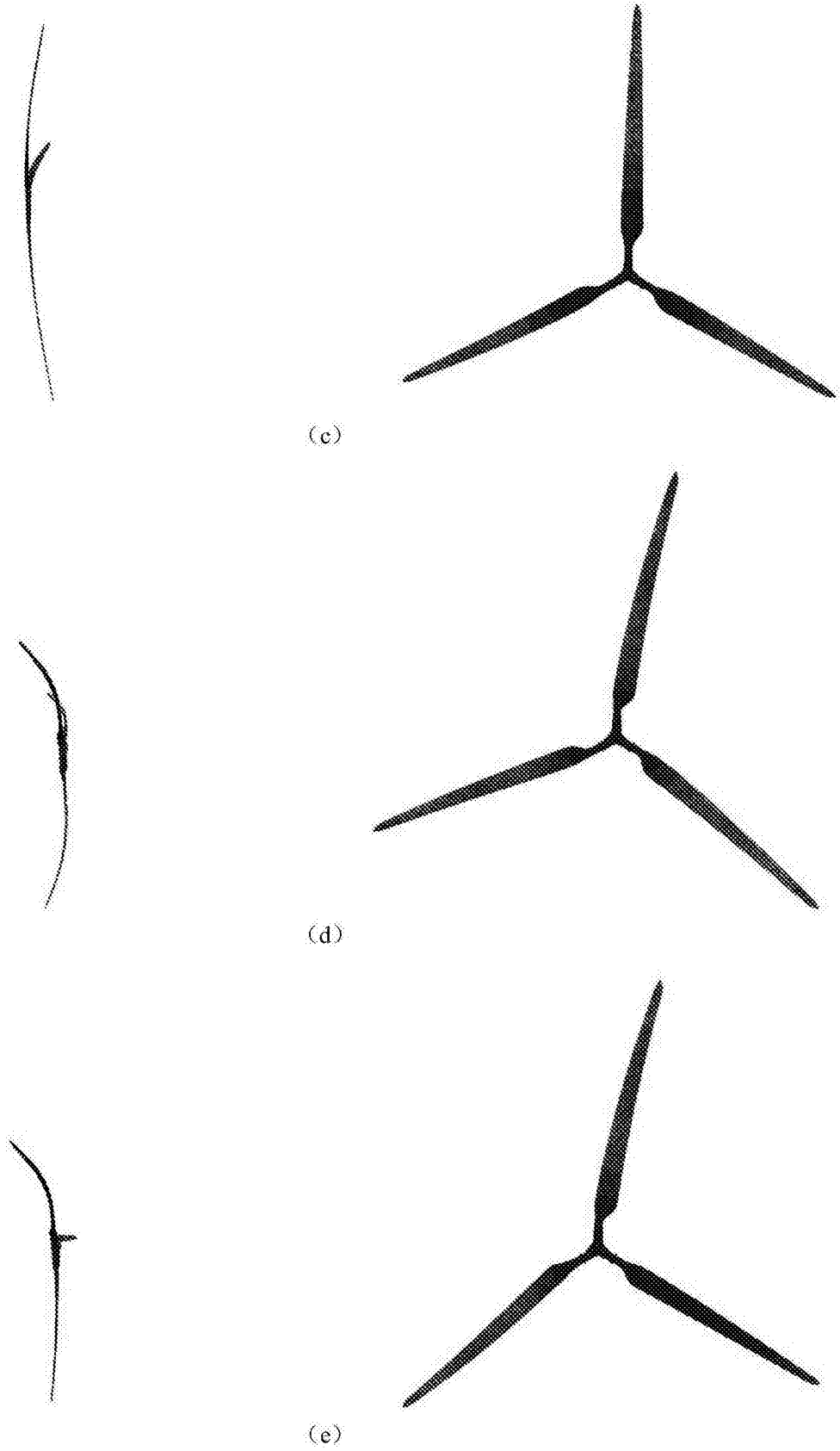


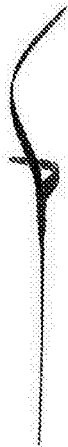
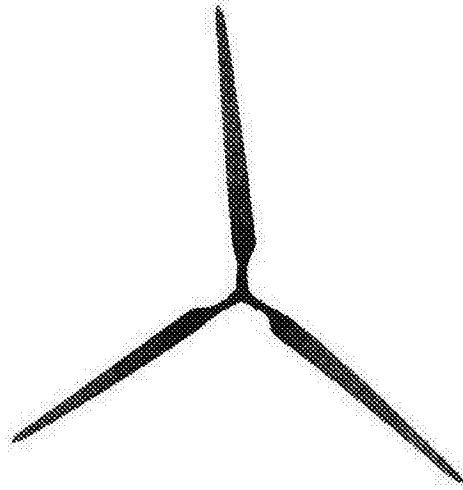
图2



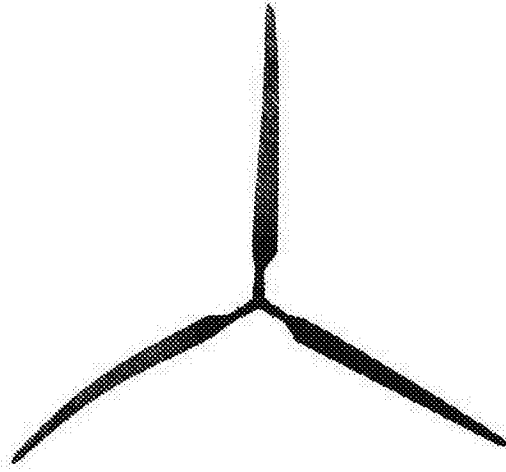




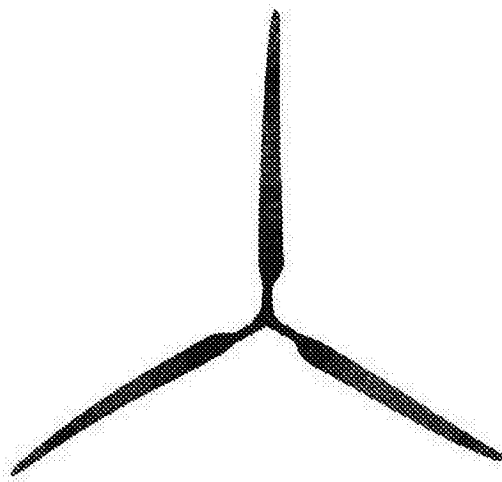
(f)



(g)



(h)



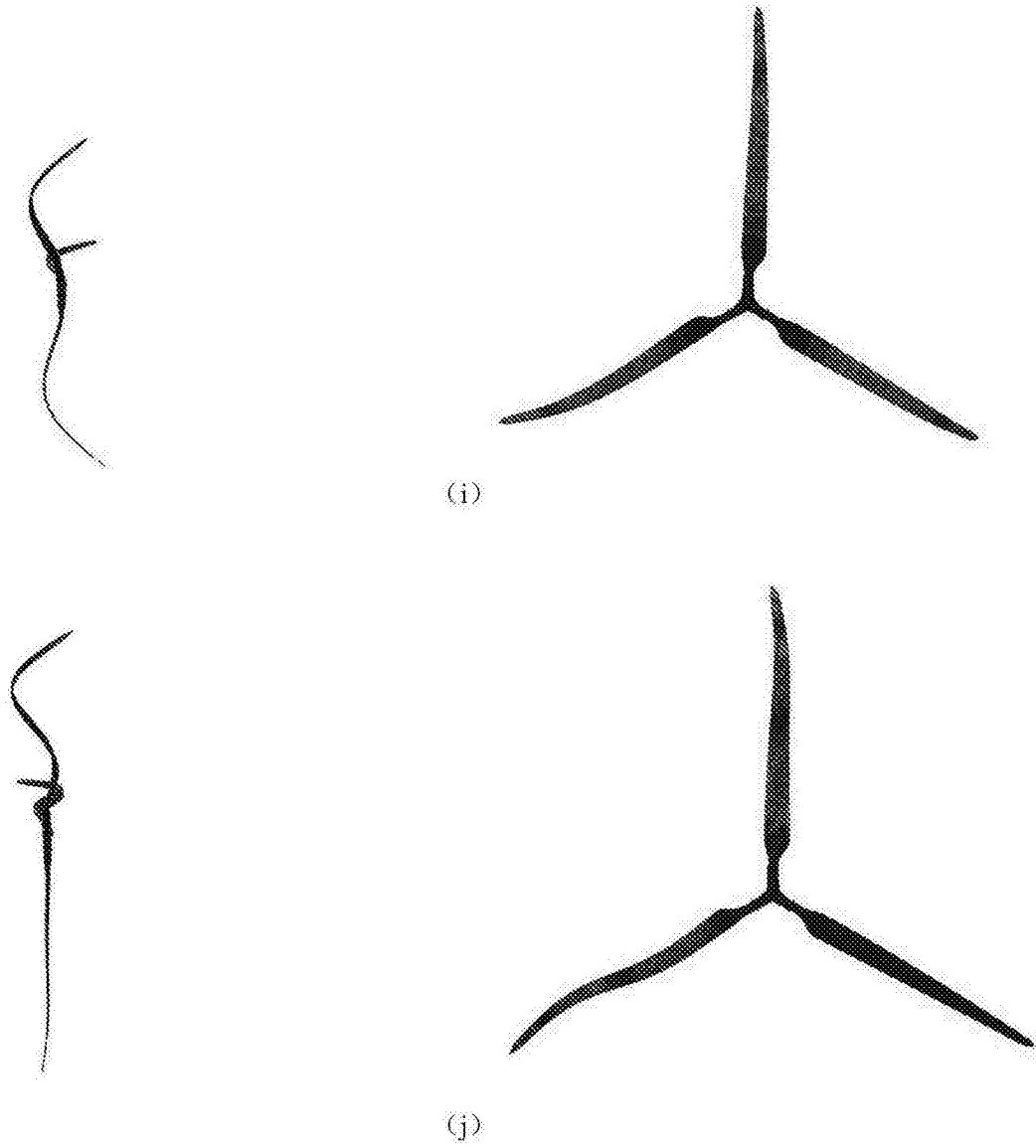
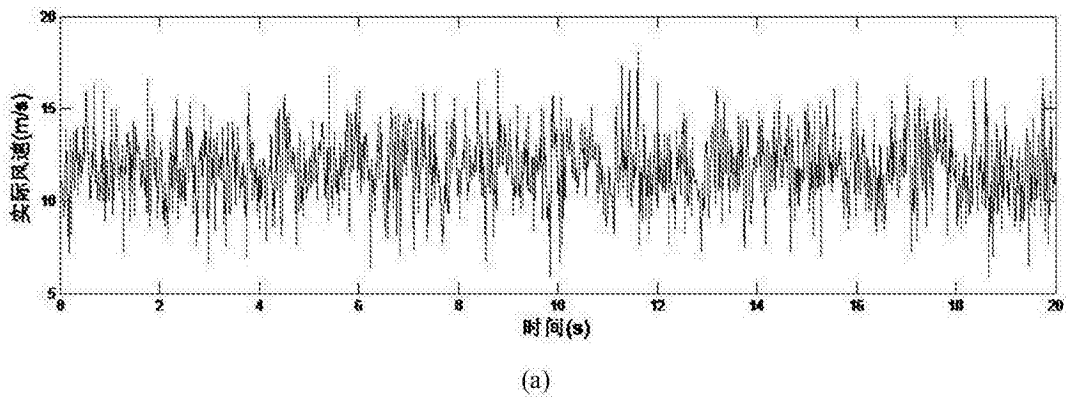
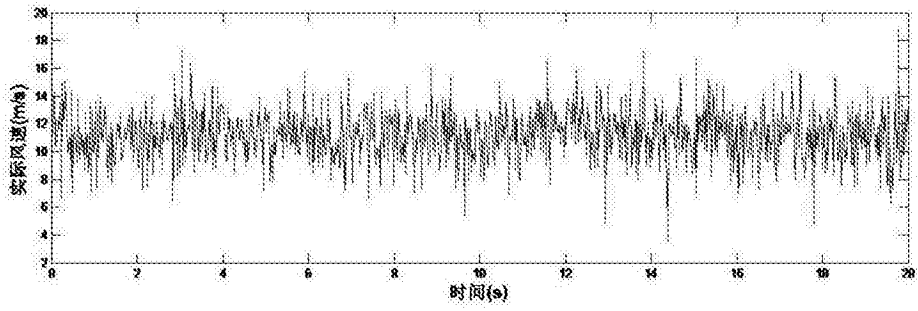
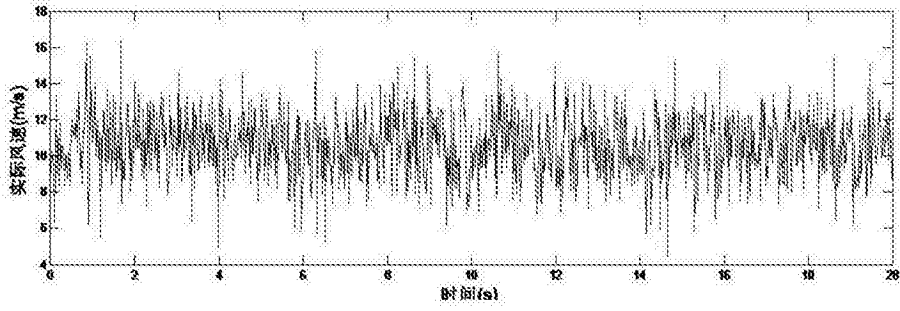


图3





(b)



(c)

图4

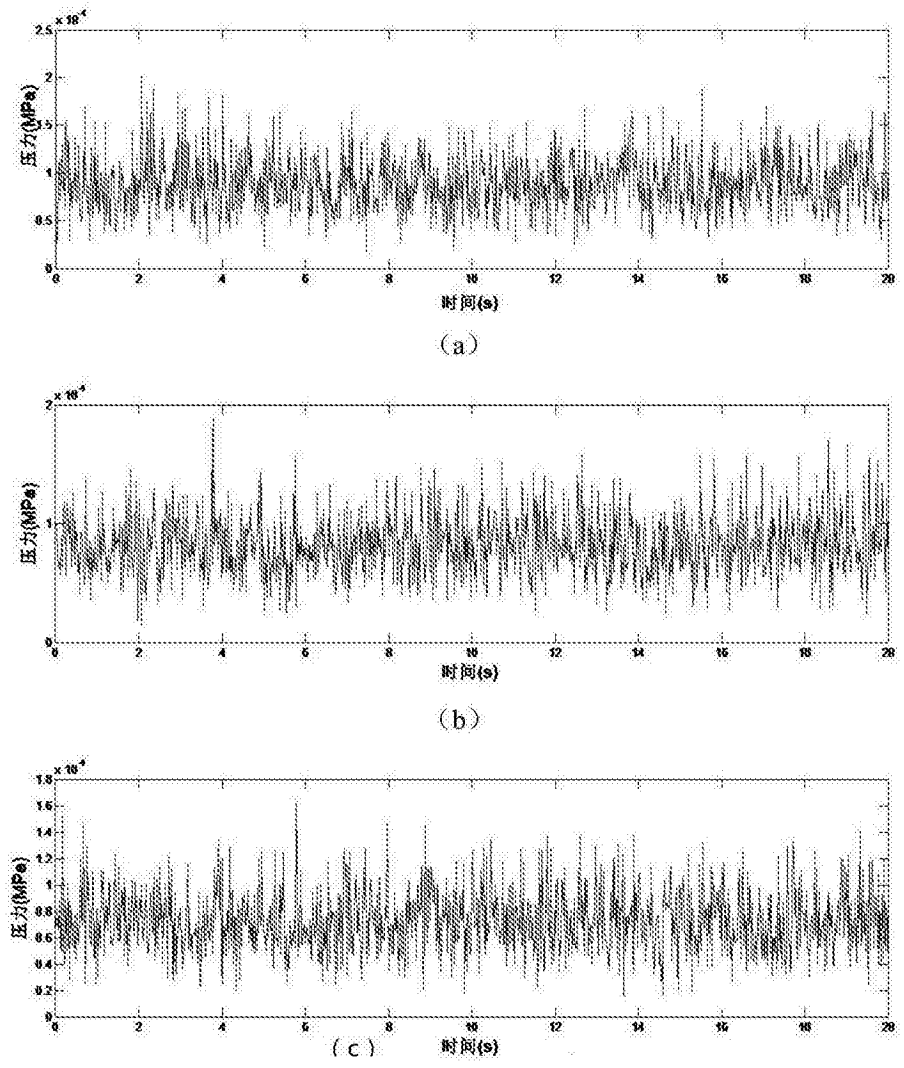


图5

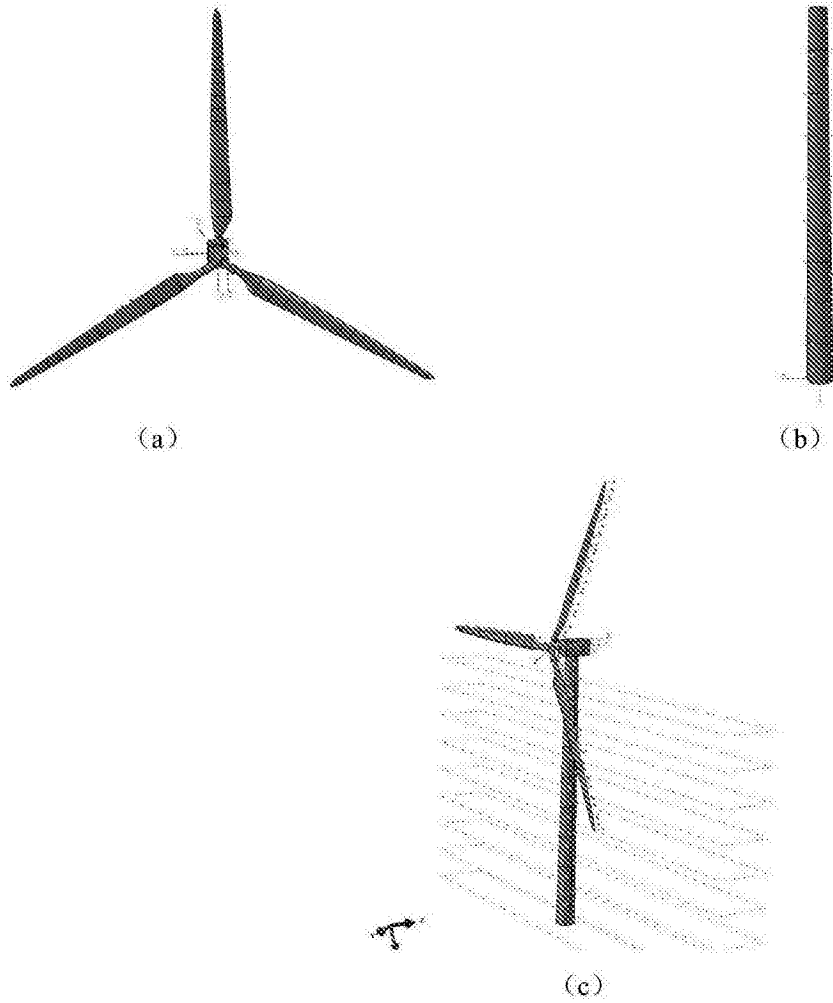
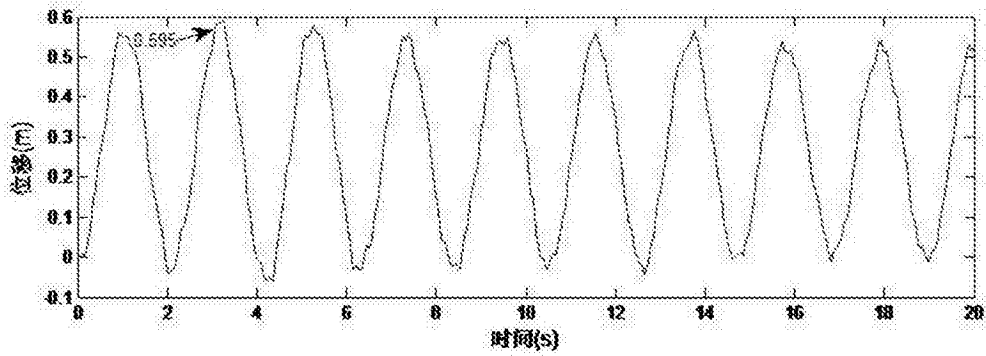
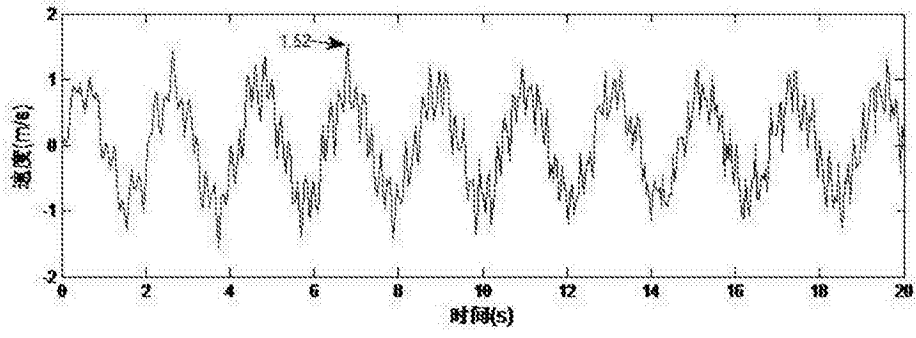


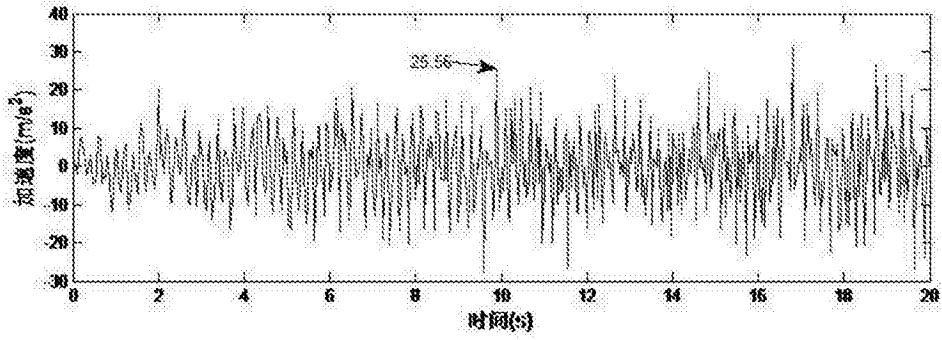
图6



(a)



(b)



(c)

图7

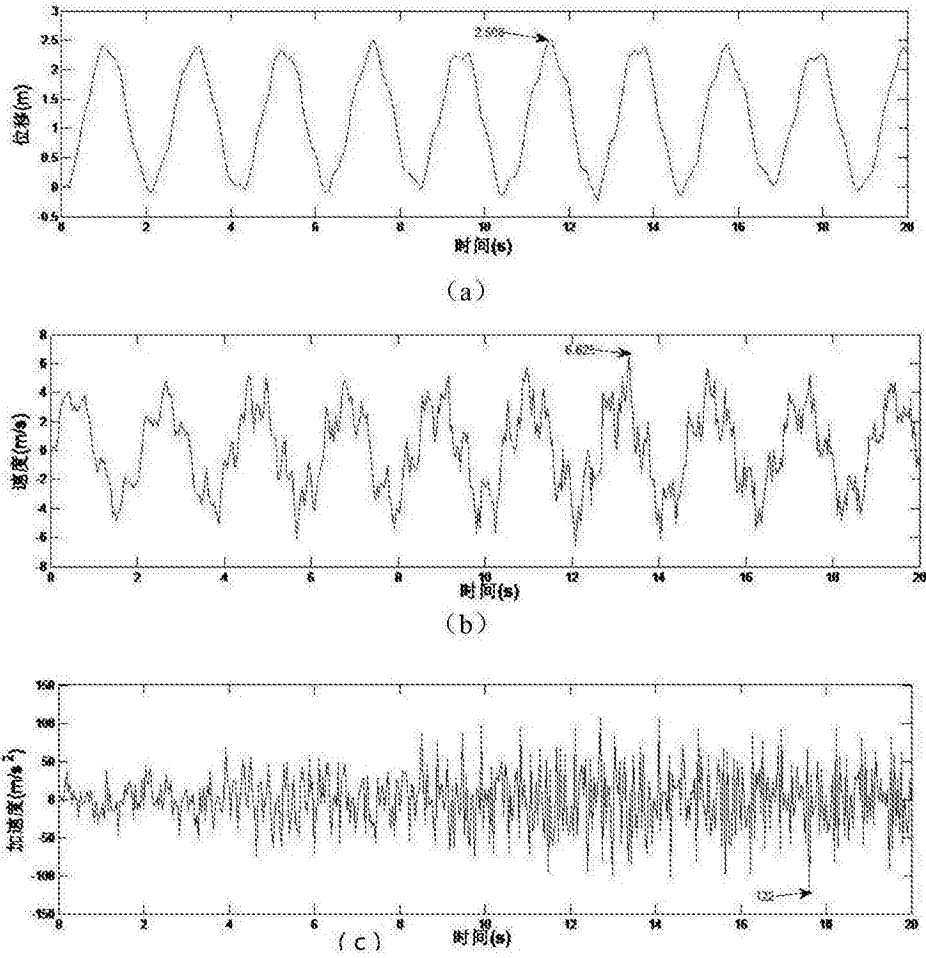
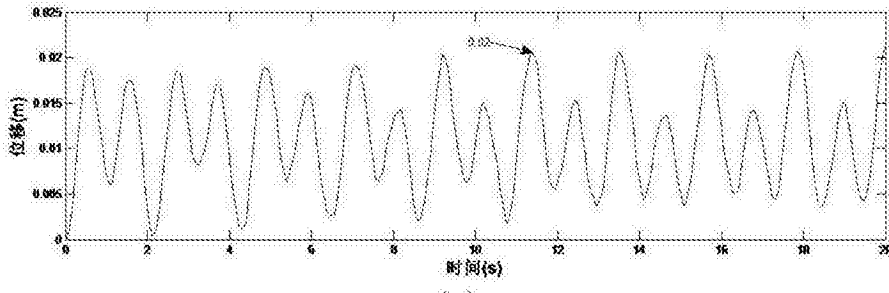
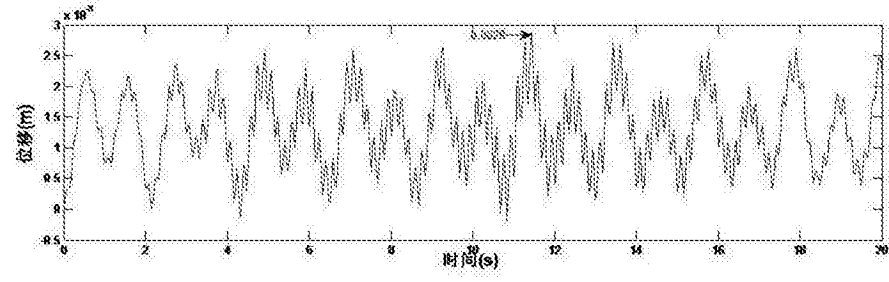


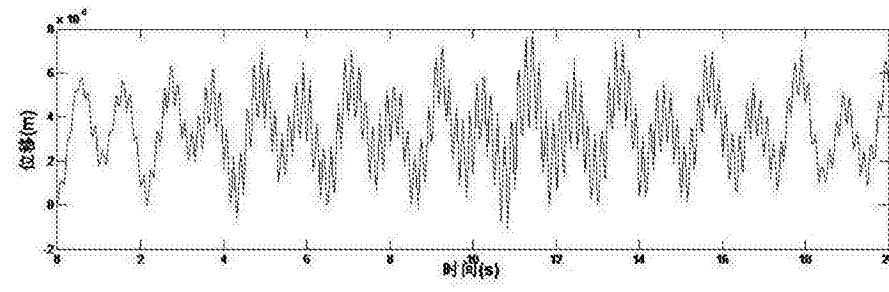
图8



(a)

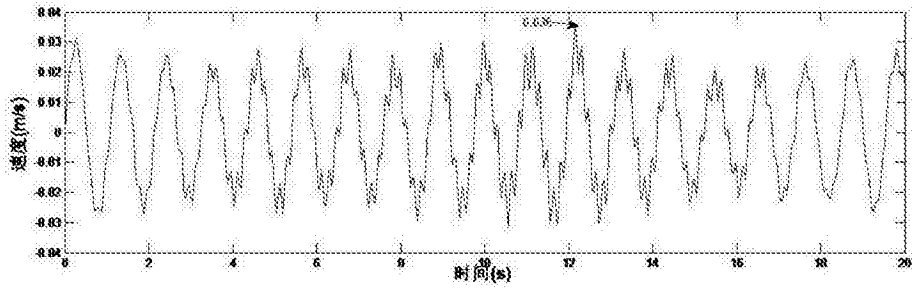


(b)

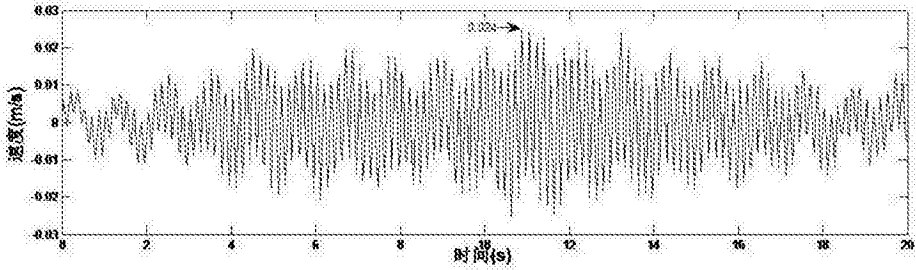


(c)

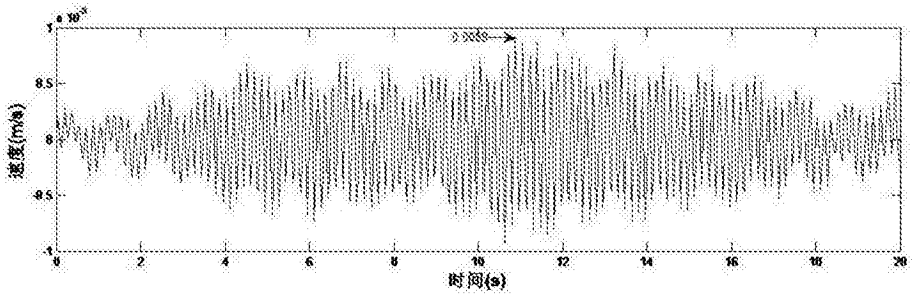
图9



(a)

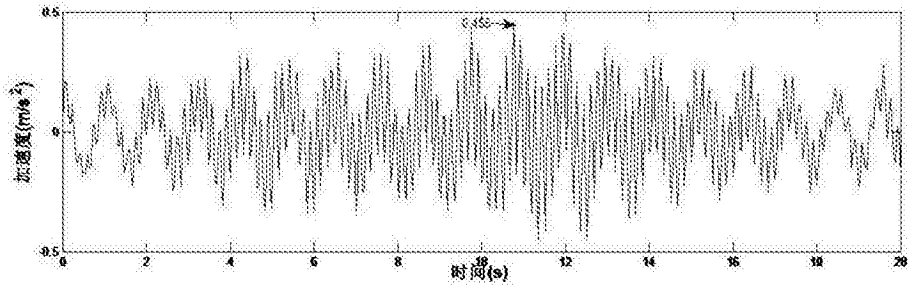


(b)

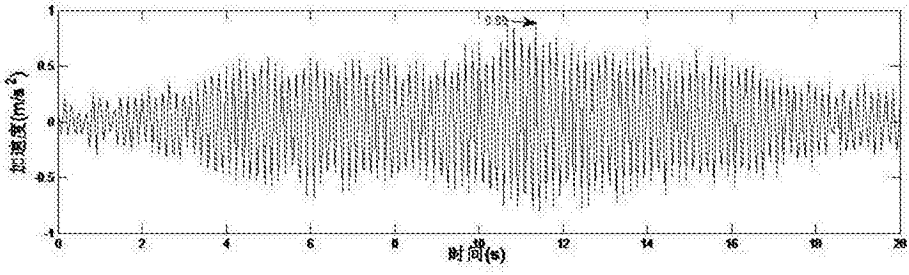


(c)

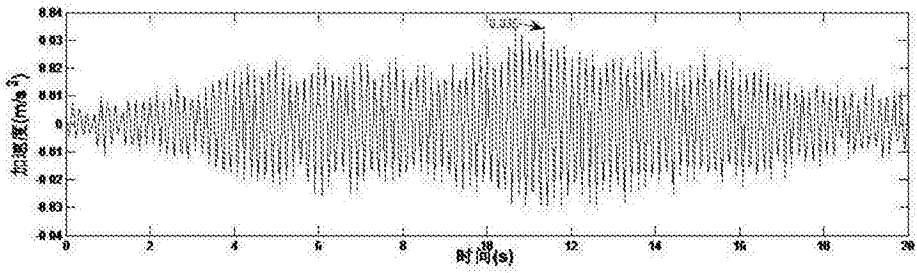
图10



(a)

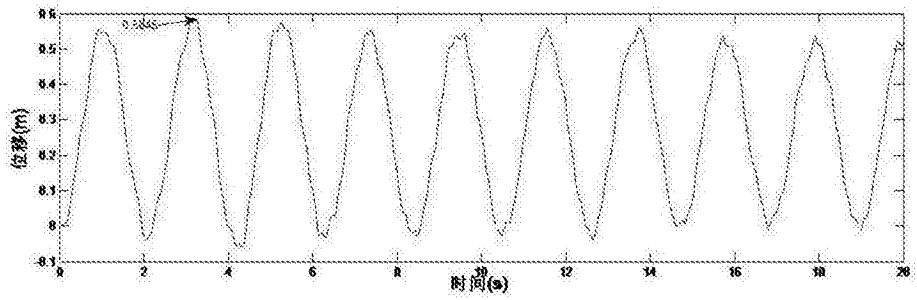


(b)

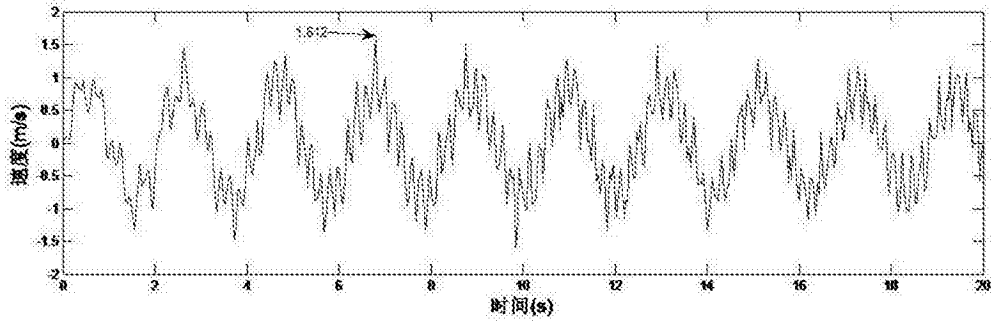


(c)

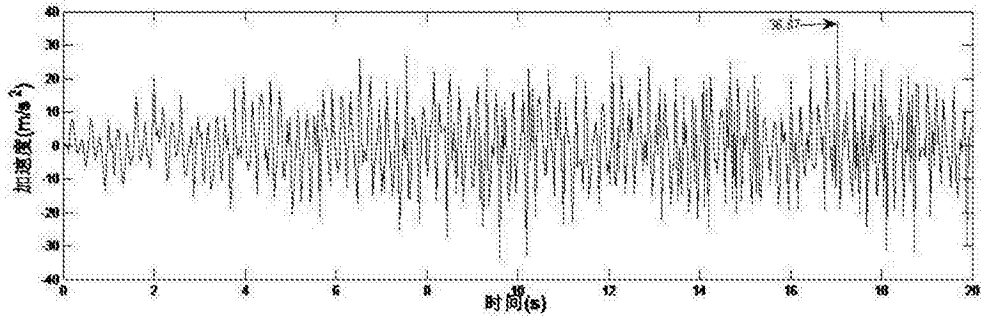
图11



(d)

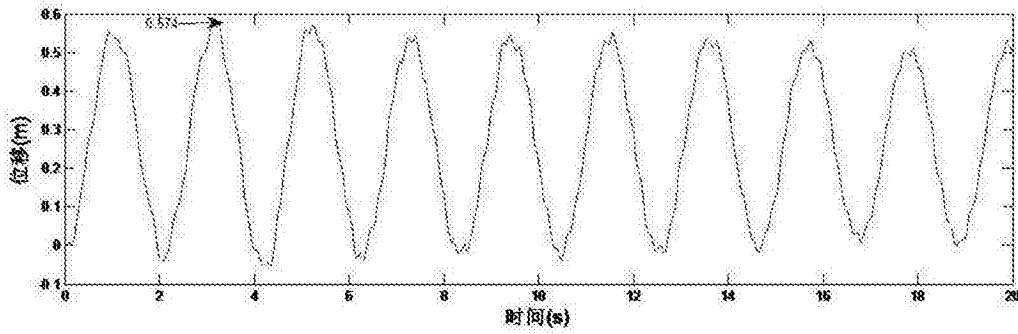


(b)

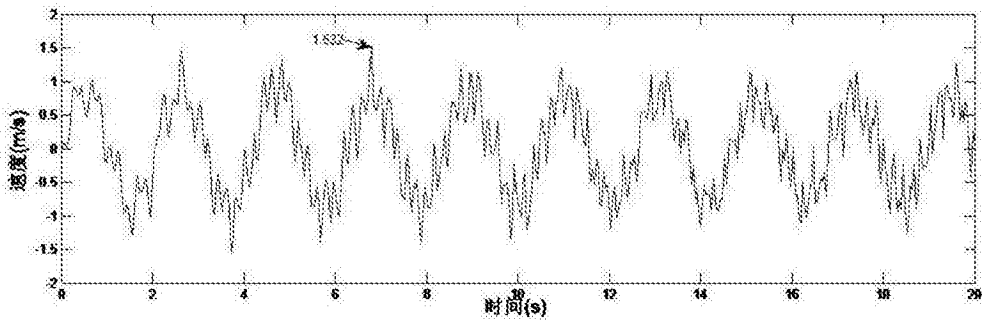


(c)

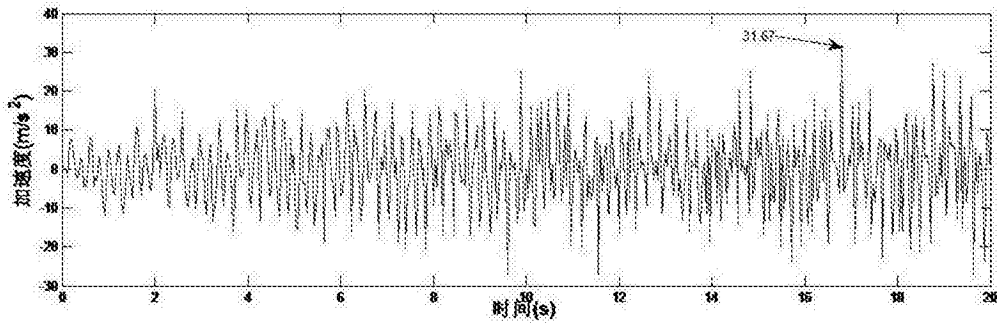
图12



(a)

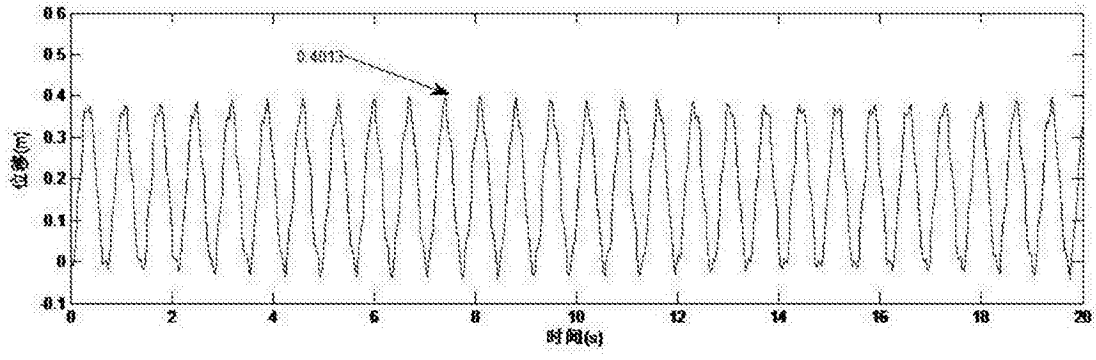


(b)

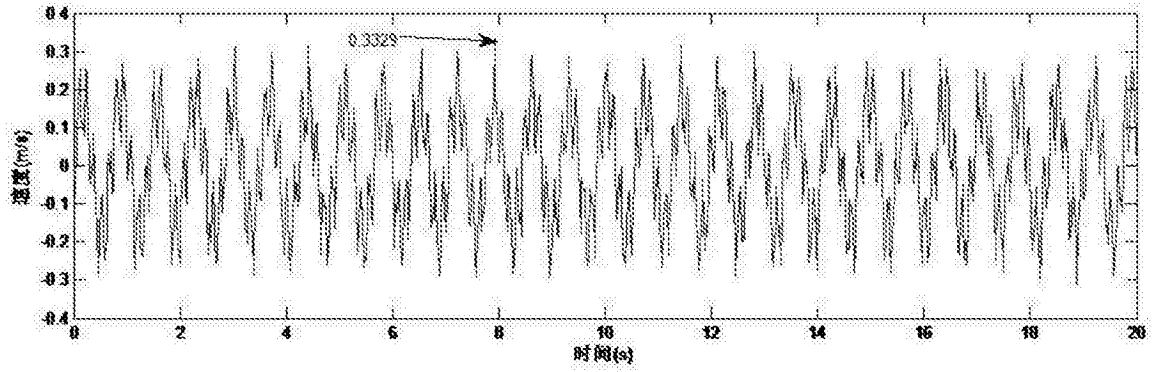


(c)

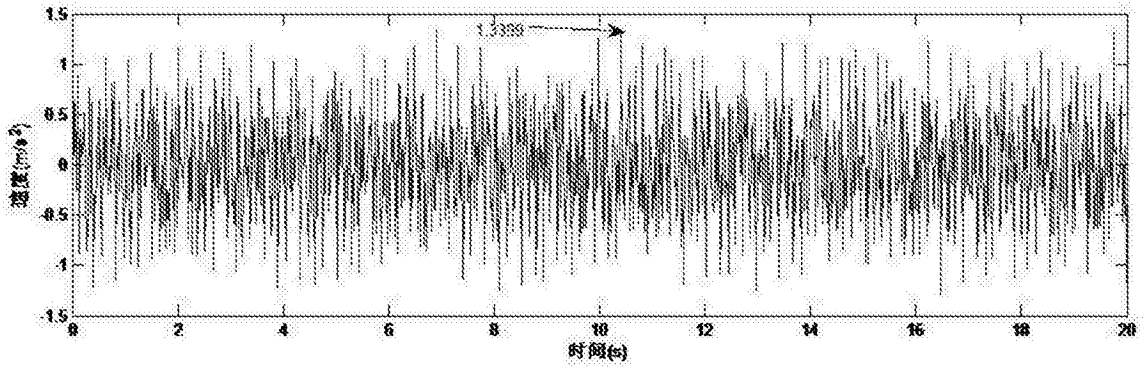
图13



(a)



(b)



(c)

图14