

文章编号:1005-0930(2014)05-0976-013 中图分类号:TK83 文献标识码:A
doi:10.3969/j.issn.1005-0930.2014.05.013

黏弹性人工边界-地基-基础-塔筒风致响应特性分析

于通顺^{1,2}, 练继建¹, 柳国环¹, 董雪峰¹

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:首先,建立三维黏弹性人工边界和固定边界的地基-基础-风力发电机塔筒相互作用的有限元模型.然后,编制程序模拟了以 Davenport 谱为目标谱的脉动风场,并对其加以验证.最后,通过实测数据与数值结果比较,验证了本文所用数值模型的准确性,分析了不同边界条件下风机结构、地基的自振特性,进而对风振反应进行时域计算和频域内的功率谱分析,并考察了不同边界条件下整个结构体系的响应情况.数值与理论分析结果表明:(1)澄清和解释了风振响应谱峰的物理意义;(2)对于顺风向的振动,筒型基础内外地基土的振动情况基本相同;对于竖向振动,相对于筒外土,由于上部结构的压载及筒型基础的“环箍效应”筒内土的振动很小;(3)两种边界条件下塔筒顶端的响应几乎完全一致;采用黏弹性人工边界的地基,地基的振动频率明显减小.此外,还给出了可供工程分析的相关建议.

关键词:黏弹性人工边界;风力发电;塔筒-基础-地基;风荷载;响应功率谱

中国建设了大量的风电场,这些风机单机容量大都在 1.5—3MW 之间,有的甚至达到了 5MW.这些大型风机结构在风荷载作用下会产生很大的振动,振动经过基础传递到地基,引起地基的振动,可能会导致地基的弱化,引发风机结构安全事故.了解和掌握极限荷载作用下整个风机结构体系特别是地基的振动特性,是分析地基弱化问题的关键.目前对风荷载作用下风机结构地基振动特性的研究^[1]相对少见.动力荷载作用下结构与地基的动力响应有明显的非线性现象,现有的研究^[2-4]都是针对动力荷载作用下结构的响应特点,而忽略了非线性地基的响应特性.因此进行极限风荷载作用下风机结构体系振动尤其是地基振动特性的分析很有必要.

基于以上分析,本文借鉴有关专家对基础、地基中振动的研究方法^[5-6],以采用复合筒型基础^[7]为基础的风机为例,分析了风荷载作用下风机结构与地基的振动特性.首先,

收稿日期:2014-01-24;修订日期:2014-05-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA051702);天津市应用基础及前沿技术研究计划(青年基金项目)资助项目(12JQCQNJC04000);国家创新研究群体科学基金资助项目(51021004);中央高校基本科研业务费专项(201413002)

作者简介:于通顺(1986—),男,博士,讲师. E-mail: yutongshun607@163.com

通信作者:柳国环(1980—),男,博士,副教授. E-mail: liu_guohuan@sina.com

建立了采用三维黏弹性人工边界和固定边界的地基-基础-风机塔筒模型,采用实体单元模拟地基,考虑了地基和基础之间的摩擦和接触效应.然后运用 Davenport 法模拟了风机结构周围的脉动风速时程,并加以验证.最后,通过实测数据与数值结果比较,验证了本文所用数值模型的准确性,分析了风机结构及地基的振动时程,从频域范围内研究了风机结构和地基中的振动特性,并考察了黏弹性人工边界和固定边界对整个结构体系的影响.

1 力学模型

工程实例:单机装机容量 2.5MW,风力发电塔筒分 3 段,底部塔筒长 19.5m、直径 4.4m,中段塔筒长 28m、直径 3.8—4.4m,顶段塔筒长 30m、直径 2.686—3.8m.复合筒型基础结构由钢筋、预应力筋、混凝土、钢板(用作分仓板)材料构成.筒型基础直径 30m,筒高 6m,筒裙厚 0.4m,筒顶厚 0.3m,风力发电结构体系如图 1 所示.筒体为混凝土材料,弹模为 36.0GPa,泊松比 0.17,密度为 2400kg/m³.软土海床以砂质粉土为主,浮容重 960kg/m³,压缩模量 9.57MPa,泊松比 0.4,内摩擦角 19.5°,黏聚力 7.2kPa,建模中土体采用 Mohr-Coulomb 模型.

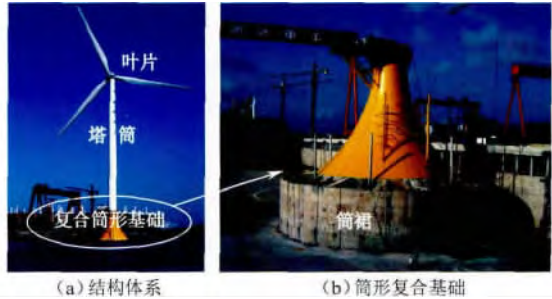


图 1 风力发电结构体系

Fig. 1 System of wind power structure

采用有限元软件 ABAQUS 分别建立三维黏弹性人工边界和固定边界的风力发电塔筒-基础-地基模型,三维黏弹性人工边界模型如图 2 所示. Bazeos 等^[8]研究风力发电机的振动特性时将塔筒发电机体系看作是一个顶部带有附加质量的锥形悬臂梁.本文在模型建立时也采用类似的简化.人工边界的弹簧系数 K_B 和阻尼系数 C_B 分别为

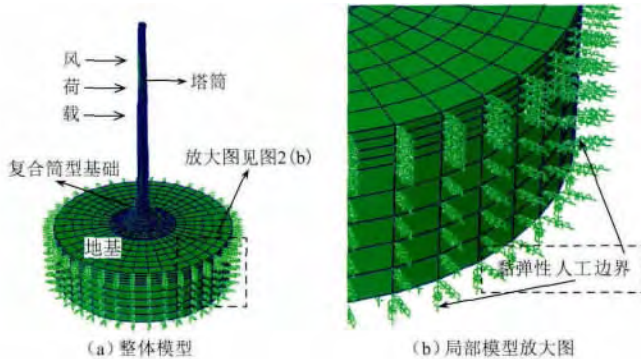


图 2 黏弹性人工边界的风力发电体系模型

Fig. 2 Model of system of wind power structure with visco-elastic artificial boundary

$$\text{切向边界: } K_{BT} = \alpha_T G/R, \mathcal{L}_{BT} = \rho c_s \tag{1}$$

$$\text{法向边界: } K_{BN} = \alpha_N G/R, \mathcal{L}_{BN} = \rho c_p \tag{2}$$

式中 K_{BT} 、 K_{BN} 分别为弹簧法向与切向刚度; R 为波源至人工边界点的距离; c_s 和 c_p 分别为 S 波和 P 波波速,本算例中分别取为 170m/s 和 300m/s; G 为介质剪切模量; ρ 为介质质量

密度; α_T 与 α_N 分别为切向与法向黏弹性人工边界参数, 经过数值分析推荐使用 $\alpha_N = 1.333$ 、 $\alpha_T = 0.667$ ^[9]. 数值计算中海洋软土与筒型基础接触面的摩擦因数多采用经验值, 范庆来等^[10] 在计算中选取摩擦系数在 0.2—0.5 之间, 本文摩擦系数取为 0.35.

2 极限风荷载的模拟

在风的顺风向时程曲线中, 包含平均风和脉动风两部分, 风荷载数据可通过风洞试验获取^[11-12], 也可通过典型风速谱进行模拟, 使用典型风速谱进行模拟的方法因其使用方便, 满足设计要求, 获得了广泛的应用. 本文采用 Davenport 水平脉动风速谱^[13] 对脉动风速进行模拟, 其形状函数为

$$\begin{cases} S_v(n) = \overline{v_{10}}^2 \frac{4kx}{n(1+x^2)^{4/3}} \\ x = 1200 \frac{n}{v_{10}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $S_v(n)$ 为脉动风速功率谱; n 为脉动风频率, Hz; k 为地面粗糙度系数; $\overline{v_{10}}$ 为高度 10m 处的平均风速, m/s.

根据以上参数及模拟理论, 以节点为风荷载作用点, 利用 MATLAB 程序语言编写模拟单点水平脉动风速曲线的程序, 进行风场仿真模拟, 各参数见表 1 所示.

10m 高度处脉动风时程及其功率谱与目标谱的对比曲线分别如图 3、图 4 所示. 得到极限工况下脉动风的时程后, 将计算点的平均风速与脉动风速加和, 可得到计算点的瞬时风速, 采用文献 [14] 中方法计算作用于叶片及整个风机结构塔架上的风荷载.

表 1 50 年一遇风速模拟计算主要参数

Table 1 Parameters of wind simulation once in 50 years

参数名称	10 米处风速 / $m \cdot s^{-1}$	频率等分数	截断频率	地面粗糙度系数	模拟采样间距 / s	总模拟时长 / s
参数值	37.5	512	4π	0.005	0.125	300

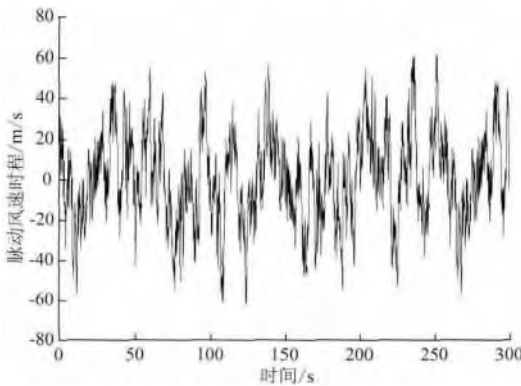


图 3 模拟的脉动风速时程

Fig. 3 Simulated fluctuating wind speed

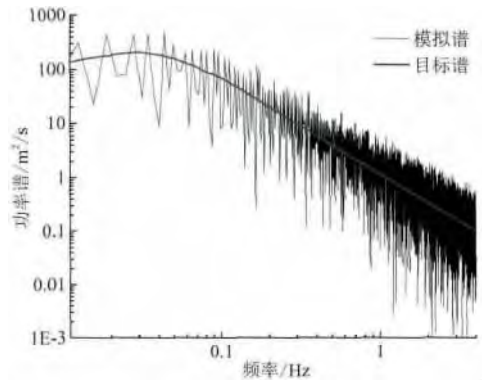


图 4 脉动风速的功率谱验证

Fig. 4 Spectrum verification of fluctuating wind speed

3 风机结构与地基的模态分析

模态分析用来确定结构的振动特性,是其它动力分析基础.采用振型叠加法对风机结构(塔筒及基础)进行模态分析,结果如表2所示.

地基模态分析相对于风机结构比较复杂.为比较不同边界条件地基振动的特点,分别对采用黏弹性人工边界和固定边界的地基土进行模态分析,为使数值模拟结果尽可能地接近原型,将地基划分的网格数量较多.分析结果如表3、表4所示.通过模态计算可以看出,地基土属于密频结构,相邻模态差别很小,达到 10^{-4} 量级甚至更小.由表3可以看出,采用黏弹性边界的复合筒型基础地基的前几阶模态振型参与系数较大,对地基的振动贡献较大(顺风向为X向,竖向为Y向).由表4可以看出,采用固定边界的复合筒型基础地基第135、206、211、972阶模态的振型参与系数远大于其它各阶的振型参与系数.地基的水平向的振动主要体现第135、211、972阶模态的振动特点,地基的竖向的振动主要体现第206阶模态的振动特点.通过表3和表4比较发现,采用固定边界时,地基的特征频率高于采用黏弹性人工边界的地基.

表2 风力发电机结构的模态分析

Table 2 Modal analysis of wind turbine structure

模态阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
频率/Hz	0.3208	0.3208	2.474	2.474	3.598	3.631	3.631	6.047

表3 黏弹性边界地基特征模态及振型参与系数

Table 3 Model analysis of soil and participation factors with visco-elastic artificial boundary

模态阶数	1	2	...	4	5	6	...	683	...	
频率/Hz	0.1955	0.1955	...	0.2549	0.2560	0.2560	...	2.1889	...	
参 数	X-component	2.8008	0.8527	...	-1.1×10^{-3}	-1.8702	-0.5546	...	9.4×10^{-7}	...
	Y-component	1.5×10^{-4}	-1.7×10^{-4}	...	1.0279	-0.0100	0.0120	...	0.1014	...
	Z-component	-0.8527	2.8007	...	2.3×10^{-3}	-0.5546	-1.870	...	$5.1E-06$	...

表4 固定边界地基特征模态及振型参与系数

Table 4 Model analysis of soil and participation factors with fixed boundary

模态阶数	1	...	135	136	...	206	...	211	212	...	972	...	
频率/Hz	0.81539	...	1.4225	1.481	...	1.605	...	1.6592	1.6592	...	3.527	...	
参 数	X-component	$-7.0E-08$	...	0.1575	-1.870	...	$-2E-06$	...	0.2839	1.4244	...	-0.255	...
	Y-component	$-2.2E-09$	...	$2.1E-07$	$7.4E-08$	...	1.6072	...	$2.0E-05$	$4.5E-05$	...	$3E-05$	...
	Z-component	$5.0E-07$	...	1.481	-0.1575	...	$2E-07$	...	1.4244	-0.2839	...	2.387	...

4 风机结构及地基的振动特性分析

4.1 实测数据与黏弹性边界模型结果的验证

为验证本文数值方法的准确性,选取了图1所示风机结构8.8、10.4、12.1m/s时塔筒顶端位移的实测数据与黏弹性边界模型的结果进行比较,如图5所示.比较发现,数值结果与实测结果相差不大,数值模拟结果具有较好的准确性.

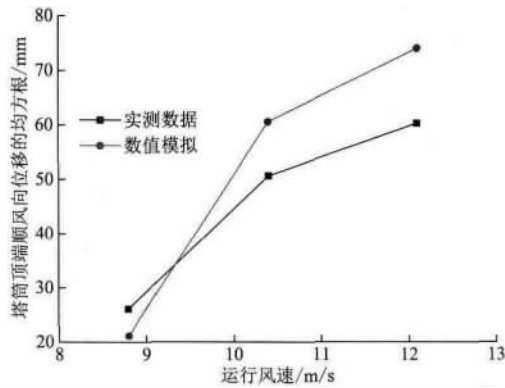


图5 实测数据与数值计算结果的比较

Fig. 5 Comparison between measured data and numerical calculation

4.2 采用黏弹性人工边界地基的模型响应

对极限风荷载作用下采用黏弹性人工边界地基的模型响应进行计算,塔筒顶端顺风向位移、速度响应分别如图6、图7所示.在极限风速下,塔筒顶点顺风向位移均方根值为232mm,塔筒顶点顺风向速度均方根值为224mm/s.由图6、图7中塔筒反应频谱分析结果可以看出,风荷载作用下风机结构振动中体现风机结构的一阶模态,其它阶模态体现的很不明显,风机结构的一阶频率为0.3067Hz.通过模态分析得到的风机结构一阶频率为0.3208Hz,比频谱分析得到的基频大,原因在于风致反应中风机塔筒重力二阶效应使得结构软化.由图6可以看出,在塔筒的位移响应中,低频能量很高,这是由于所施加的风荷载低频能量很高,风机结构在低频范围内产生了明显的受迫振动.由图7的速度频谱图可以看出,塔筒顶点的速度响应中未出现与位移响应类似的低频范围内的受迫振动.这种现象可以从随机振动的角度解释:尽管在远离结构基频的低频处传递函数 $|H(\omega)|^2$ 较小,但由于低频处风输入功率谱 $S_w(\omega)$ 较大,使得位移反应功率谱 $S_d(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_w(\omega)$ 较大^[15].对于速度响应,在低频阶段 ω^2 极小使得速度功率谱 $S_v(\omega) = \omega^2 S_d(\omega)$ 很小,因此速度功率谱图中远离结构基频的低频能量很小.

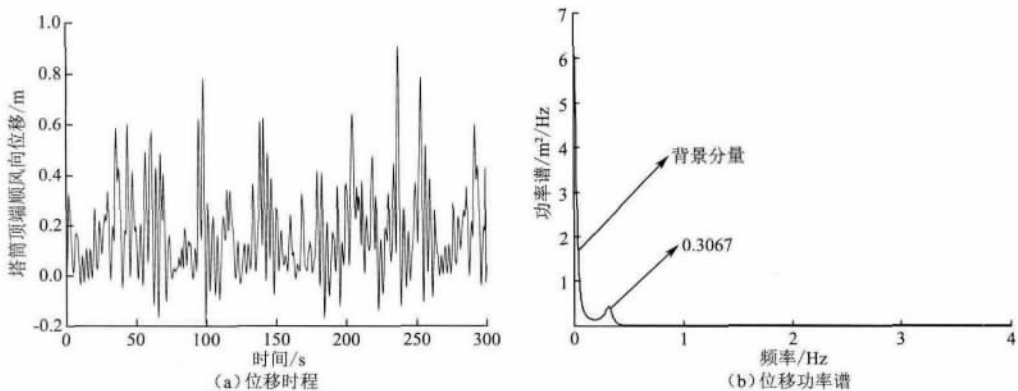


图6 黏弹性边界模型中塔筒顶点顺风向位移响应

Fig. 6 Along-wind displacement response at tower tip of model with visco-elastic artificial boundary

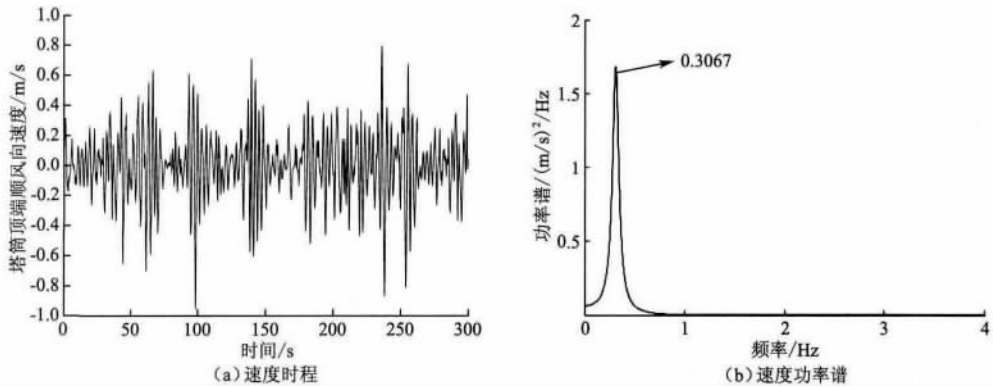


图 7 黏弹性边界模型中塔筒顶点顺风向速度响应

Fig. 7 Along-wind velocity response at tower tip of model with visco-elastic artificial boundary

考察筒裙最高点顺风向速度响应,如图 8 所示. 由图可以看出,筒裙最高点顺风向速度均方根值为 2.20mm/s. 从频谱图可以看出,筒裙响应中风机结构的一阶频率也有体现. 另外,在筒裙最高点的顺风向速度响应中在 0.1704Hz 处有峰值. 由地基土的模态计算可知,地基土前两阶模态(频率为 0.1955Hz,与图 8 中最大峰值相差很小)的振型参与系数较大,对水平向振动的贡献非常大. 因此可以看出,筒裙的顺风向振动中地基土的振动特性体现地也比较明显.

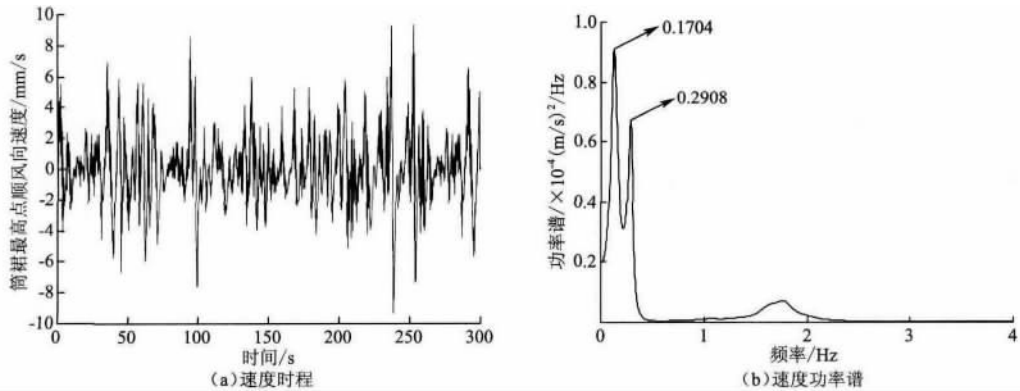


图 8 黏弹性边界模型中筒裙最高点顺风向速度响应

Fig. 8 Along-wind velocity response at the top of skirt of model with visco-elastic artificial boundary

取复合筒型基础内部与基础最低点平齐的地基中心点为 G 点,提取 G 点顺风向、竖向速度响应分别如图 9、图 10 所示. G 点的顺风向的速度响应中风机结构的一阶频率仍旧比较明显,在 0.1614Hz、0.2242Hz 处也有明显的峰值. 结合表 3 中地基模态分析结果,0.1614Hz 与地基土的一阶频率相差很小,0.2242Hz 与地基土的五阶频率相差很小. 因此可以看出,复合筒型基础内部地基土的振动中地基土自身的振动特性体现的非常明显. 另外,对地基土的振动来说,风荷载是最原始的振源,风荷载通过风机结构的振动传递到地基上,可以认为风荷载是地基振动的一级激励、风机结构的振动是二级激励,如图 2 (a) 所

示. 风机结构的振动作为一种激励源, 在地基振动中有所体现, 所以 G 点顺风向速度响应中风机结构的一阶频率体现的非常明显. 通过分析可以看出: 地基振动除了体现地基土自身的振动特性外, 还体现风机结构的振动特点. G 点竖向速度响应比较复杂, 也体现有风机结构的一阶频率. 从图 9、图 10 的频谱图比较可以看出, 筒型基础内部地基土的响应以水平向振动为主, 竖向振动很小.

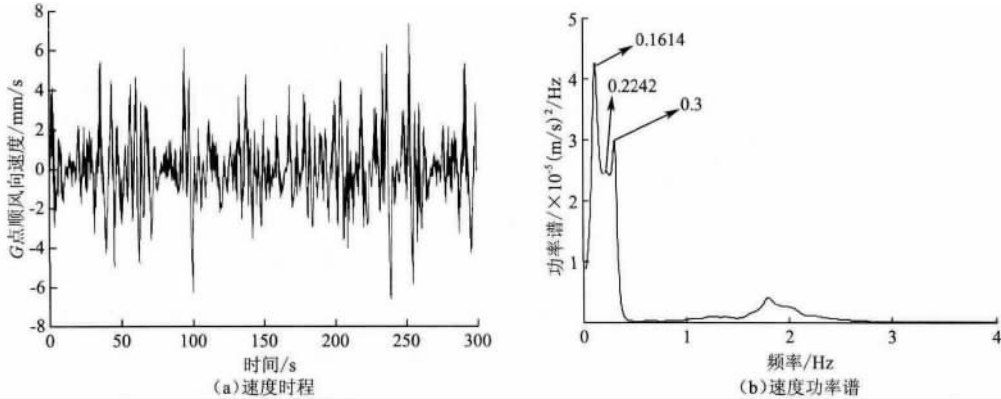


图 9 黏弹性边界模型中 G 点顺风向速度响应

Fig. 9 Along-wind velocity response at point G of model with visco-elastic artificial boundary

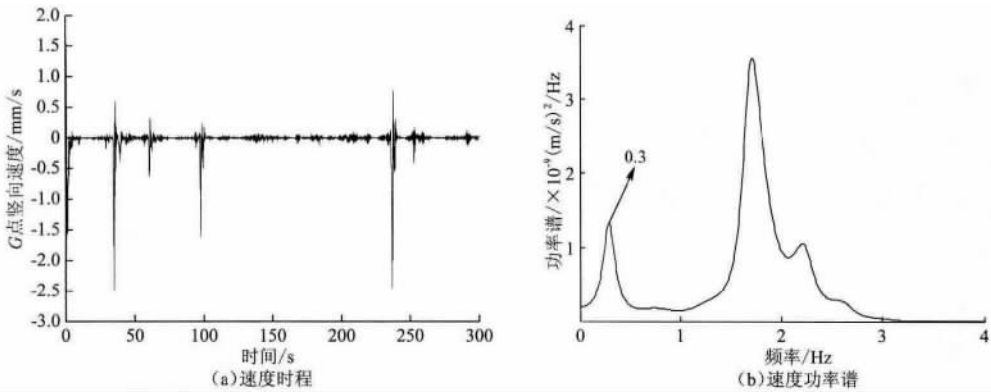


图 10 黏弹性边界模型中 G 点竖向速度响应

Fig. 10 Vertical velocity response at point G of model with visco-elastic artificial boundary

取复合筒型基础外部距离基础 12.5m 与 G 点在同一高程 A 点, 提取 A 点顺风向和竖向速度响应分别如图 11、图 12 所示. 可以看出, 复合筒型基础外部的地基土水平向的振动与筒内土的振动情况相差不大, A 点竖向的振动体现地基土的一阶振动特性和风机结构的一阶模态. 比较 G 、 A 两点的响应可以看出, 对于水平向的振动, 筒型基础内外地基土的振动情况基本相同; 对于竖向振动, 相对于筒外土, 由于上部结构的压载及筒型基础的环箍效应筒内土的振动很小.

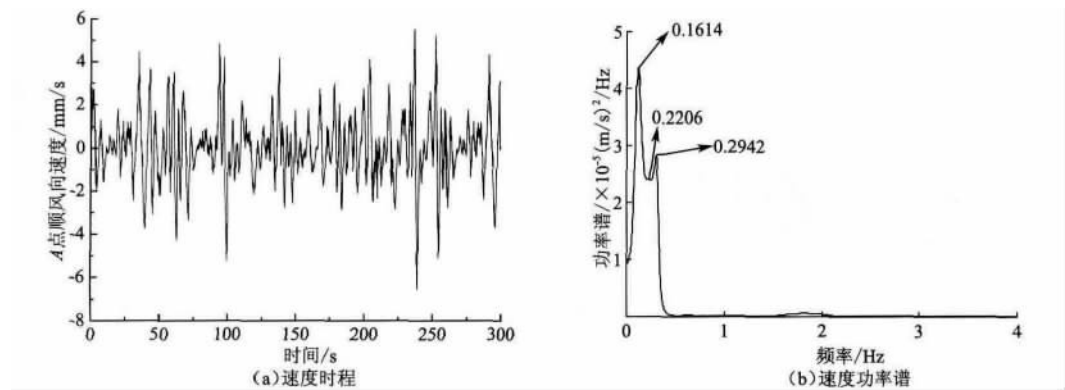


图 11 黏弹性边界模型中 A 点顺风向速度响应

Fig. 11 Along-wind velocity response at point A of model with visco-elastic artificial boundary

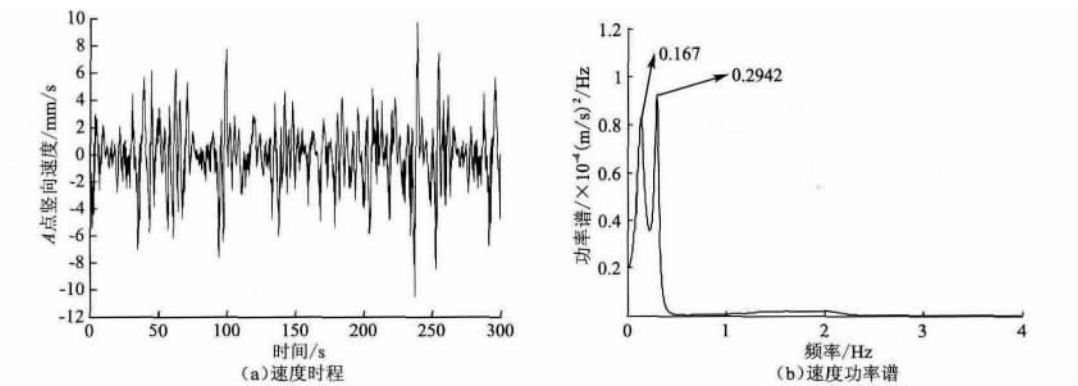


图 12 黏弹性边界模型中 A 点竖向速度响应

Fig. 12 Vertical velocity response at point A of model with visco-elastic artificial boundary

4.3 采用固定边界地基的模型响应

对极限风荷载作用下采用固定边界地基的模型响应进行计算,塔筒最高点顺风向位移、速度响应分别如图 13、图 14 所示。极限风速作用下,塔筒顶点顺风向位移均方根为 208mm,塔筒顶点顺风向速度均方根为 234mm/s。由反应频谱分析结果可以看出,风机结构的一阶频率为 0.3076Hz。采用固定边界的地基模型在风荷载作用下塔筒振动同样体现风机结构的一阶模态,其它阶模态体现的很不明显。

提取筒裙最高点顺风向速度响应如图 15 所示。由筒裙响应的时程图可以看出,筒裙最高点顺风向速度均方根为 1.95mm/s。从频谱图可以看出,筒裙顺风向响应中风机结构一阶频率有体现,地基土的振动特性体现地比较明显(1.401Hz、1.621Hz 分别与地基土第 135、211 阶模态频率对应)。

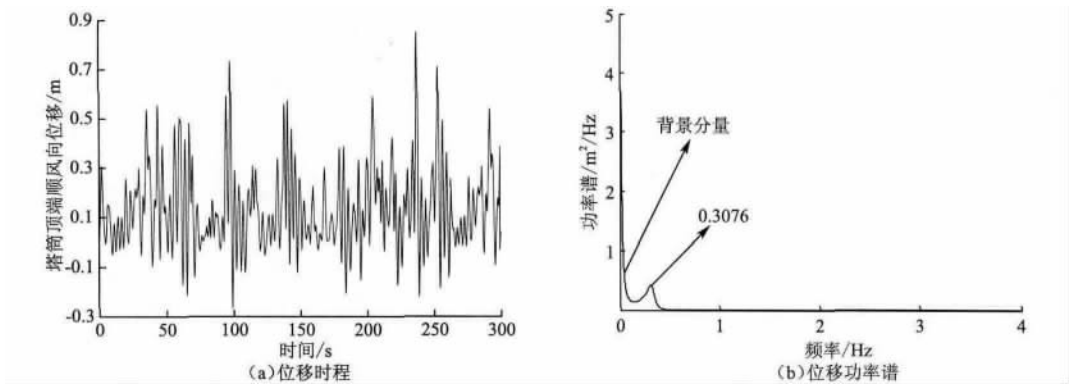


图 13 固定边界模型中塔筒顶点顺风向位移响应

Fig. 13 Along-wind displacement response at tower tip of model with fixed boundary

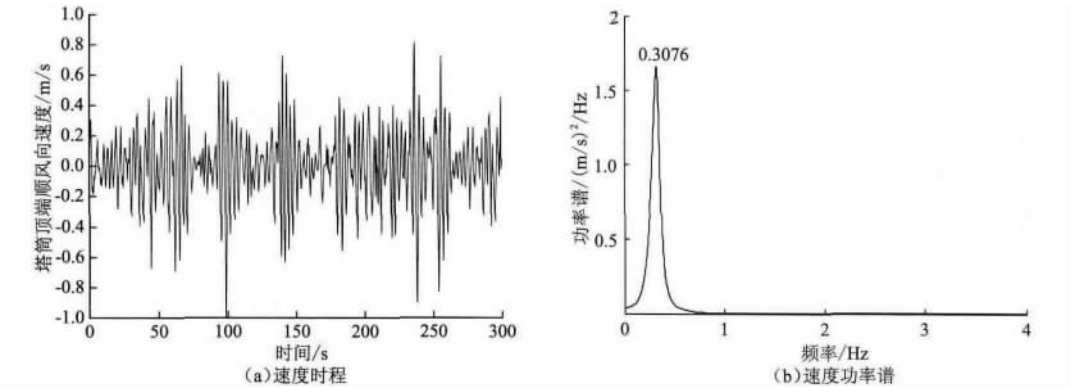


图 14 固定边界模型中塔筒顶点顺风向速度响应

Fig. 14 Along-wind velocity response at tower tip of model with fixed boundary

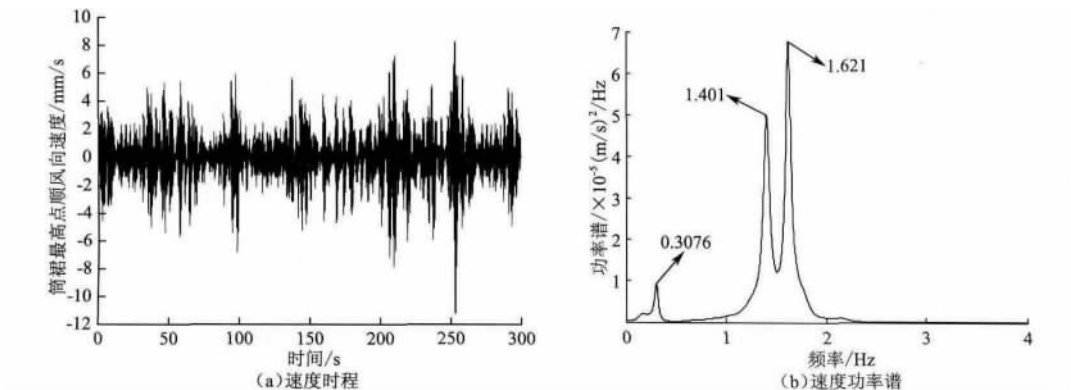


图 15 固定边界模型中塔裙最高点顺风向速度响应

Fig. 15 Along-wind velocity response at the top of skirt of model with fixed boundary

取复合筒型基础内部与基础最低点平齐的地基中心点为 G 点,提取 G 点顺风向、竖向速度响应分别如图 16、图 17 所示。 G 点的顺风向的速度频谱中的峰值频率 1.424Hz、1.672Hz 分别与地基土的第 135、211 阶模态频率对应。顺风向响应中主要体现地基的振动特点,风机结构的一阶频率也有所体现,但不明显。 G 点的顺风向的速度频谱中的峰值频率 1.609Hz 与地基土的第 206 阶模态相差很小,因此顺风向响应中同样主要体现地基的振动特点,风机结构的一阶频率同样体现的不明显。

提取 A 点顺风向和竖向速度响应分别如图 18、图 19 所示。从 A 点的速度响应谱中可以看出,复合筒型基础外部的地基土水平向的振动与筒内土的振动情况相差不大。比较 G 、 A 两点的响应可以看出,对于竖向振动,由于上部结构的压载及筒型基础的环箍效应筒内土的振动很小。

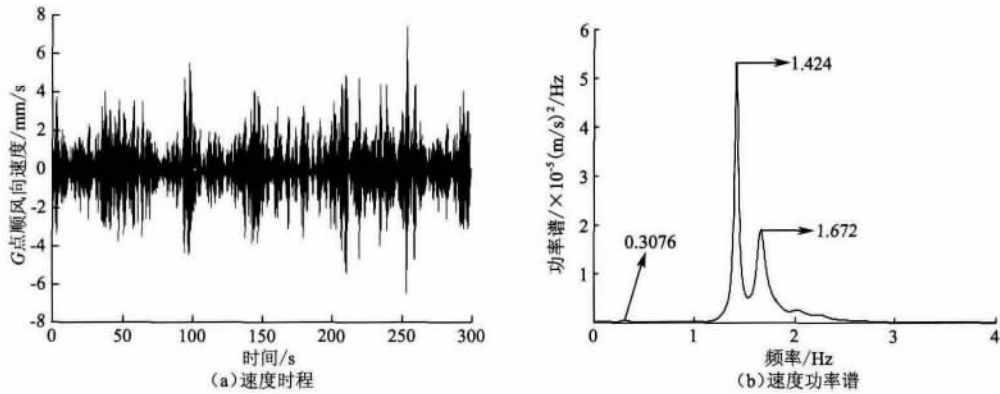


图 16 固定边界模型中极限工况下 G 点顺风向速度响应

Fig. 16 Along-wind velocity response at point G of model with fixed boundary

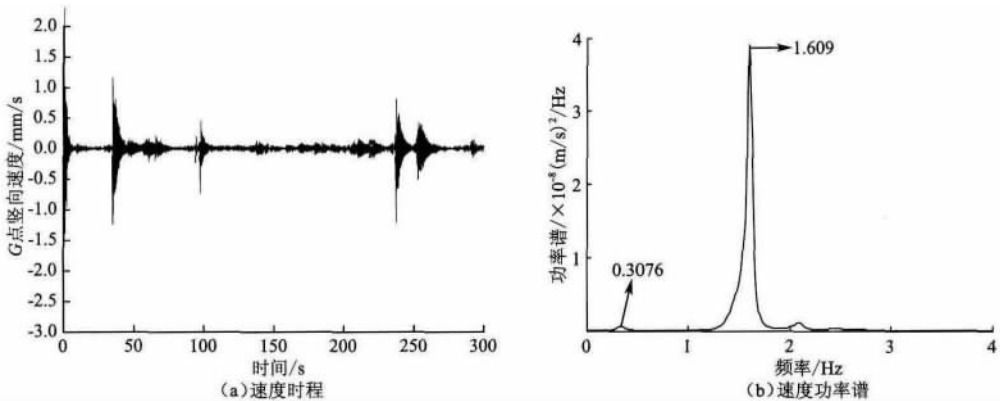


图 17 固定边界模型中极限工况下 G 点竖向速度响应

Fig. 17 Vertical velocity response at point G of model with fixed boundary

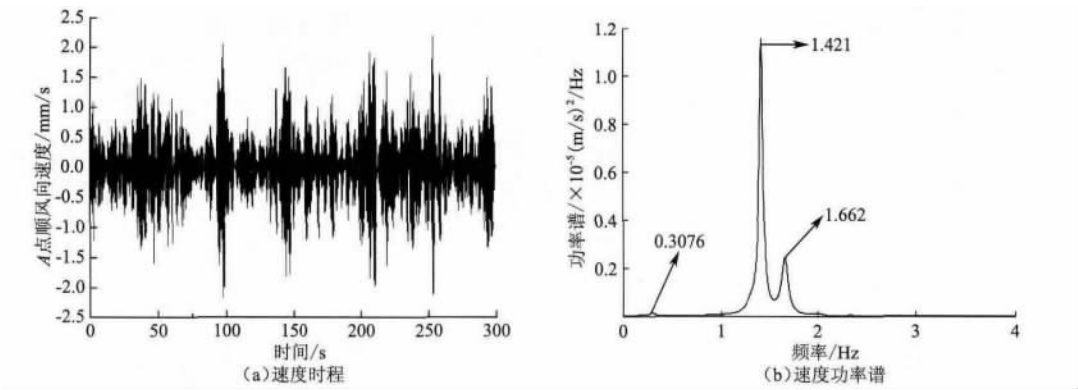


图 18 固定边界模型中 A 点顺风向速度响应

Fig. 18 Along-wind velocity response at point A of model with fixed boundary

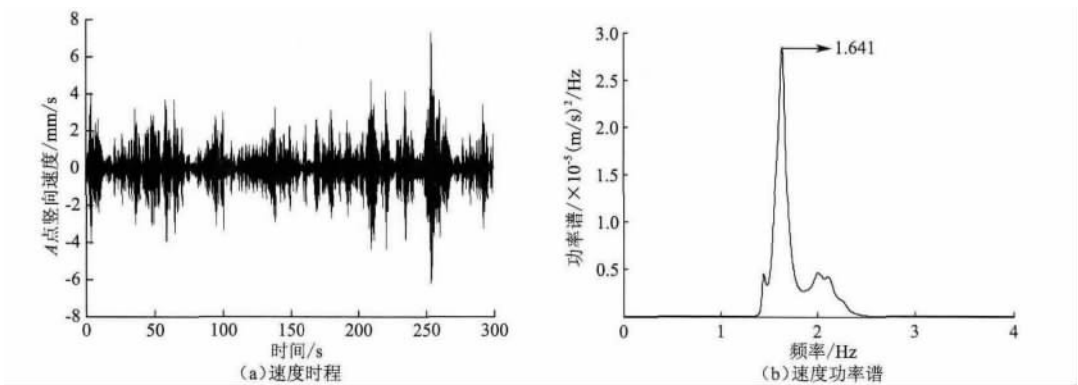


图 19 固定边界模型中 A 点竖向速度响应

Fig. 19 Vertical velocity response at point A of model with fixed boundary

5 结语

本文通过对极限风荷载作用下大型风力发电体系的数值计算,从频域范围内进行了一系列分析,简要总结如下:

(1) 指出了地基的自振特性:地基属于密频结构,相邻模态频率相差很小,达到 10^{-4} 量级甚至更小;

(2) 论述了风机塔筒在极限风荷载下的响应特点:塔筒的振动主要体现风机结构的一阶模态;

(3) 论述了复合筒型基础在极限风荷载下的响应特点:基础的振动除了体现有风机结构的一阶模态,同时还体现有地基土的振动特征;

(4) 明确了地基土在极限风荷载下水平向和竖向的响应特点:地基振动以 0.3Hz 以下低频振动为主,主要体现地基本身的振动特点;

(5) 对比了不同边界条件下风机结构及地基的振动特点,指出:两种边界条件下,塔筒顶端的响应计算结果几乎完全一致;采用固定边界时,地基的自振频率高于采用黏弹性人工边界的地基.在进行风荷载作用下地基响应时,建议采用黏弹性人工边界的地基.

参 考 文 献

- [1] 周健,金炜枫,金卫华,等. 风力发电机地基的现场加速度测试和数值模拟[J]. 西北地震学报, 2011, 33(B08): 257-260
Zhou Jian, Jin Weifeng, Jin Weihua, et al. Site acceleration test and digital simulation on the vibration of the wind turbine ground[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(B08): 257-260
- [2] 房营光. 非线性地基-结构系统的地震共振突变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1509-1514
Fang Yingguang. Seismic resonant catastrophe analysis of nonlinear foundation-structure systems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1509-1514
- [3] Soneji B B, Jangid R S. Influence of soil-structure interaction on the response of seismically isolated cable-stayed bridge[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28(4): 245-257
- [4] Assareh M A, Asgarian B. Nonlinear behavior of single piles in jacket type offshore platforms using incremental dynamic analysis[J]. American Journal of Applied Sciences, 2008, 5(12): 1793-1803
- [5] 黄菊花,何成宏,杨国泰,等. 地基中振动波传播的有限元分析[J]. 振动与冲击, 1999, 18(1): 38-43
Huang Juhua, He Chenghong, Yang Guotai, et al. Finite element analysis of vibration propagation in foundation soil[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(1): 38-43
- [6] 范存新,张毅,薛松涛,等. 桩-土-结构相互作用对高层建筑风振舒适度的影响[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 90-94
Fan Cunxin, Zhang Yi, Xue Songtao, et al. Effect of pile-soil-structure interaction on comfortable level of tall building to wind-induced vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 90-94
- [7] Lian J J, Ding H Y, Zhang P Y, et al. Design of large scale prestressing bucket foundation for offshore wind turbine[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(2): 79-84
- [8] Bazeos N, Hatzigeorgiou G D, Hondros I D, et al. Static seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower[J]. Engineering structures, 2002, 24(8): 1015-1025
- [9] 谷音,刘晶波,杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31-37
Gu Yin, Liu Jingbo, Du Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 31-37
- [10] 范庆来,栾茂田,杨庆. 软基上沉入式大圆筒结构的水平承载力分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 191-195
Fan Qinglai, Luan Maotian, Yang Qing. Numerical analysis of lateral load bearing capacity of large cylindrical structures on soft foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 191-195
- [11] 隋杰,孙树立,李燕,等. 脉动风荷载对公路防眩板结构抗风性能的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 899-907
Sui Jie, Sun Shuli, Li Yan, et al. Wind resistance performance of anti-glare panel under fluctuating wind loads[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 899-907
- [12] 冯宏,肖正直,李正良,等. 超高层建筑风荷载谱试验研究及数学模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 569-580
Feng Hong, Xiao Zhengzhi, Li Zhengliang, et al. Experimental study and mathematical model on wind load spectrum of rectangular super tall buildings[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(3): 569-580
- [13] 王吉民,李琳. 脉动风的计算机模拟[J]. 浙江科技学院学报, 2005, 17(1): 34-37
Wang Jimin, Li Lin. Digital simulation of turbulent wind field[J]. Journal of Hangzhou Institute of Applied Engineering, 2005, 17(1): 34-37
- [14] 于通顺,王海军. 循环荷载下复合筒型基础地基孔隙水压力变化及液化分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 820-826
Yu Tongshun, Wang Haijun. Pore water pressure fluctuation and liquefaction analysis of subgrade for composite bucket foundation under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 820-826
- [15] 柳国环,李宏男. 高压输电塔一线体系风致动力响应分析与优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 131-137
Liu Guohuan, Li Hongnan. Analysis and optimization control of wind-induced dynamic response for high-voltage transmission tower-line system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 131-137

Characteristic Analysis on Wind-induced Response for the System of Visco-elastic Artificial Boundary-soil-foundation-wind Turbine Tower

YU Tongshun^{1,2}, LIAN Jijian¹, LIU Guohuan¹, DONG Xiaofeng¹

(1. State Key Laboratory Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract

Firstly, the coupling models of soil-foundation-wind turbine tower with visco-elastic artificial boundary and fixed boundary were established. Then Davenport spectrum which was verified was composited to simulate the fluctuating wind load. At last the accuracy of numerical model was verified by comparing with measured data, and the analysis of the natural vibration characteristics of wind turbine structure and soil with different boundaries was done. And wind-induced vibration response in time domain and power spectrum in frequency domain was analyzed. Different responses of the entire system between visco-elastic artificial boundary and fixed boundary were further studied. Analysis results show that: (1) The physical meaning of the spectral peaks of wind-induced response is clarified and explained; (2) The along-wind vibration of soil inside bucket is almost the same as the vibration of soil outside, and the vertical vibration of soil inside of bucket is much smaller than the vibration outside because of the above ballast and cyclo-hoop effect; (3) The response at tower tip has no difference between the model using different boundaries, and the vibration frequency of the soil is much smaller in the model of visco-elastic artificial boundary than the model of fixed boundary. In addition, the recommendations for engineering application were proposed.

Keywords: visco-elastic artificial boundary; wind power; soil-foundation-wind turbine tower; wind load; power spectrum density