

文章编号: 1000 - 7598 (2014) 09 - 2651 - 08

# 透射边界-地基-风电结构地震响应与破坏模式

柳国环<sup>1,2</sup>, 练继建<sup>1,2</sup>, 于通顺<sup>1,2,3</sup>

(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.天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;  
3.中国海洋大学 工程学院, 青岛 266100)

**摘 要:** 近海风力发电结构是由无限域地基、基础及上部结构组成的体系, 有限域透射人工边界和地震动输入模式直接影响结构体系的动力响应。首先, 建立透射人工边界-地基-基础-塔筒结构和固定边界-地基-基础-塔筒结构的有限元模型; 然后, 简要澄清了透射边界地震动输入之所以采用外力而不采取地震动物理量(加速度、速度和位移)的原因所在; 最后, 对给出的 3 种作用模式:(1) 固定边界地震动输入,(2) 只考虑外源输入波作用,(3) 同时考虑外源输入波和内源振动的散射波作用, 分别进行计算分析和比较。通过数值计算并结合理论分析,(1) 澄清了对透射边界采用外力进行地震激励输入的方法的原因, 这种输入方法合理可靠, 符合实际情况;(2) 在地震波等效荷载的生成中, 针对圆形截面地基提出了一种阻尼力、刚度力的便捷性生成方法, 大大减小了工作量;(3) 从自身振动特点及阻尼设置角度, 解释了地震作用下采用透射边界比采用固定边界时风电结构响应减小的原因;(4) 指出了地震作用下透射边界地基模型在结构动力响应与倒塌计算中内源振动反射的不容忽视性。

**关 键 词:** 近海风力发电结构; 透射边界; 散射力; 破坏模式

**中图分类号:** TU 312.1

**文献标识码:** A

## Research on seismic response and failure modes of system of transmitting boundary-soil-wind power structures

LIU Guo-huan<sup>1,2</sup>, LIAN Ji-jian<sup>1,2</sup>, YU Tong-shun<sup>1,2,3</sup>

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

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

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

**Abstract:** Offshore wind power structure is the system of superstructure-foundation-infinite domain soil. Dynamic response of structure system is directly affected by transmitting boundary of the model and seismic motion input mode. Firstly, finite element models of tower tubes-foundation-soil-transmitting boundary and tower tubes-foundation-soil-fixed boundary are established. Then, the reason why force instead of acceleration, velocity and displacement is used for seismic input in the model while transmitting boundary is briefly clarified. At last, the following modes are analyzed, i.e. (1) seismic input of fixed boundary; (2) external source wave motion is considered only; (3) external source wave motion and scattering force caused by endogenous oscillation are both considered. Analysis results show that: (1) the reason why force is used for seismic motion input in the model with transmitting boundary is clarified; and the method of seismic motion input is in accord with the actual situation; (2) a convenient method of the generation of stiffness force and damping force is proposed for the foundation of circular cross-section; and it can greatly reduce the workload; (3) the reason that dynamic response of offshore wind power structure is smaller using transmitting boundary than using fixed boundary is explained from the viewpoint of vibration characteristics of model and the damping; (4) the indispensability of endogenous oscillation in seismic response and failure modes of structure using transmitting boundary is pointed out.

**Key words:** offshore wind power structure; transmitting boundary; scattering force; modes of failure

收稿日期: 2014-01-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(No. 2012AA051702); 国家国际科技合作专项资助(No. 2012DFA70490); 国家创新研究群体科学基金资助项目(No. 51021004)

第一作者简介: 柳国环, 男, 1980年生, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗震抗风方面的研究工作。E-mail: carecivil@sina.com

通讯作者: 于通顺, 男, 1986年生, 博士, 主要从事水利及海上风电新基础动力响应相关方面的研究工作。E-mail: yutongshun607@163.com

## 1 引言

近海风力发电结构在我国沿海地区已大规模建设,这些近海风电场有相当大一部分是建立在环太平洋地震带上。地震作用下近海风力发电结构的响应及安全受到越来越多的重视,近海风机结构地震响应有限元分析已引起越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。结构地震响应计算问题中,地震波动输入处理合理与否将直接影响到计算结果的精度和可信度。固定边界模型地震激励在有限元计算中的施加方法已得到广泛认可<sup>[3-4]</sup>,而透射边界模型地震激励的施加,现有文献<sup>[5-6]</sup>进行了详细介绍,但还存在一些问题需要澄清,尤其是透射边界模型中地震激励以外力而不采用地震动物理量(加速度、速度和位移)施加的原因尚含糊不清;相对于固定边界,透射边界对结构响应的影响程度如何等。这些问题的存在影响着透射边界模型中结构响应计算的可信度,也限制了透射边界在地震动结构响应计算中的广泛应用。因此,澄清透射边界模型关于地震荷载的施加中的一些问题很有必要。

基于以上分析,本文针对复合筒型基础风力发电体系,开展地震作用下响应及破坏模式的有限元研究。首先,分别建立了固定边界和黏弹性人工边界的风力发电塔筒-基础-地基体系模型,并分析了两种结构体系的振动特点;然后,具体说明了透射边界中,地震等效荷载的生成方法和地震荷载的实现过程;最后,比较了地震作用下固定边界模型与透射边界模型中风机结构的响应,并对比了考虑内源振动反射与否对地震反应与倒塌模式的影响。

本文只以天津波为例,进行了透射边界地震动输入及地震响应对透射边界敏感性的讨论。

## 2 数值模型建立

### 2.1 工程背景简述

单机装机容量为 2.5 MW,如图 1 所示。塔筒分 3 段,底部塔筒长 19.5 m、直径为 4.4 m,中段塔筒长 28.0 m、直径为 3.8~4.4 m,顶段塔筒长 30.0 m、直径为 2.7~3.8 m。塔筒材料为钢材,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>,建模中塔筒采用弹性模型。风机基础采用复合筒型基础<sup>[7]</sup>,由钢筋、预应力筋、混凝土、钢板(用作分仓板)材料构成。直径为 30 m,筒高 6 m,筒壁厚 0.4 m,筒顶厚 0.3 m。筒体为 C30 混凝土,弹性模量为 36.0 GPa,泊松比为 0.17,密度为 2 400 kg/m<sup>3</sup>,混凝土采用塑性损伤模型,所取参数与文献<sup>[8]</sup>相

同。软土海床以砂质粉土为主,浮重度为 9.6 kN/m<sup>3</sup>,压缩模量为 9.57 MPa,泊松比为 0.4,内摩擦角为 19.5°,黏聚力为 7.2 kPa,建模中土体采用 Mohr-Coulomb 模型。



图 1 风力发电结构

Fig.1 System of wind power structure

### 2.2 有无透射边界有限元模型建立与模态分析

分别建立固定边界和三维黏弹性人工边界的风力发电塔筒-基础-地基体系模型,如图 2 所示。参照 Bazeos 等<sup>[9]</sup>的方法对风电体系进行了简化,将整个体系看作一个顶部带有附加质量的锥形悬臂梁。其中,根据文献<sup>[10]</sup>的研究,当选取水平土体边界为 4.0 倍筒体直径时,附加应力对边界土体的影响率不大于 10%;当选取竖向土体边界为 2.0 倍筒体深度时,附加应力对边界土体的影响率不大于 5%。为尽量减小边界效应影响,在固定边界模型中,土体直径取基础直径的 4 倍,厚度取基础高度的 4 倍。人工边界等效物理系统的弹簧刚度系数  $K_B$  和阻尼系数  $C_B$ <sup>[11]</sup>分别如下:

#### (1) 切向边界

$$K_{BT} = \alpha_T G / R, C_{BT} = \rho c_s \quad (1)$$

#### (2) 法向边界

$$K_{BN} = \alpha_N G / R, C_{BN} = \rho c_p \quad (2)$$

式中: $K_{BT}$ 、 $K_{BN}$  分别为弹簧切向与法向刚度; $C_{BT}$ 、 $C_{BN}$  分别为弹簧切向与法向阻尼; $R$  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  $c_s=170$  m/s、 $c_p=300$  m/s; $G$  为介质剪切模量; $\rho$  为介质质量密度; $\alpha_T$  与  $\alpha_N$  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  $\alpha_N=1.333$ 、 $\alpha_T=0.667$ <sup>[12]</sup>。数值计算中海洋软土与筒型基础接触面的摩擦系数多采用经验值,范庆来等<sup>[13]</sup>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 0.3。

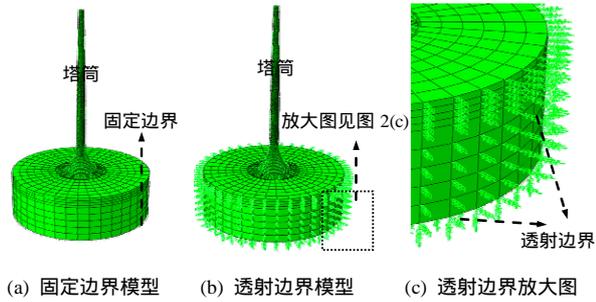


图 2 不同边界的风机结构有限元模型

Fig.2 Finite element model of wind turbine structure with different boundaries

对采用固定边界和透射边界地基的风力发电结构体系进行自振特性分析，选取固定边界条件下具有代表性的振型如图 3 所示。图示为模型的第 161 阶模态，其水平向振动的振型参与系数远大于其他各阶模态的振型参与系数，因此，在地基水平向响应中会有所体现，这在后面散射力频谱分析中会提及。提取了风机结构的前 8 阶模态如图 4 所示。

### 3 透射人工边界地震动输入模式理论

#### 3.1 透射边界地震动输入图解说明

建立采用透射边界的计算模型，如图 5 所示。采用透射边界模型地震动的输入由三部分组成：刚度力、阻尼力、散射力，如图 5(c)所示。

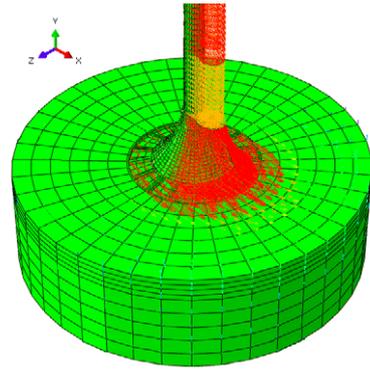


图 3 采用固定边界地基模型的自振特性（第 161 阶模态）

Fig.3 Vibration characteristics of model with fixed boundary (161th modal shape)

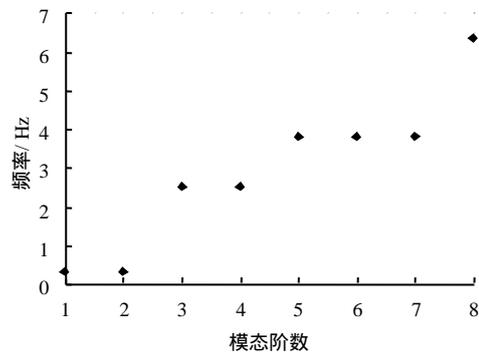


图 4 风力发电机结构的模态分析

Fig.4 Modal analysis of wind turbine structure

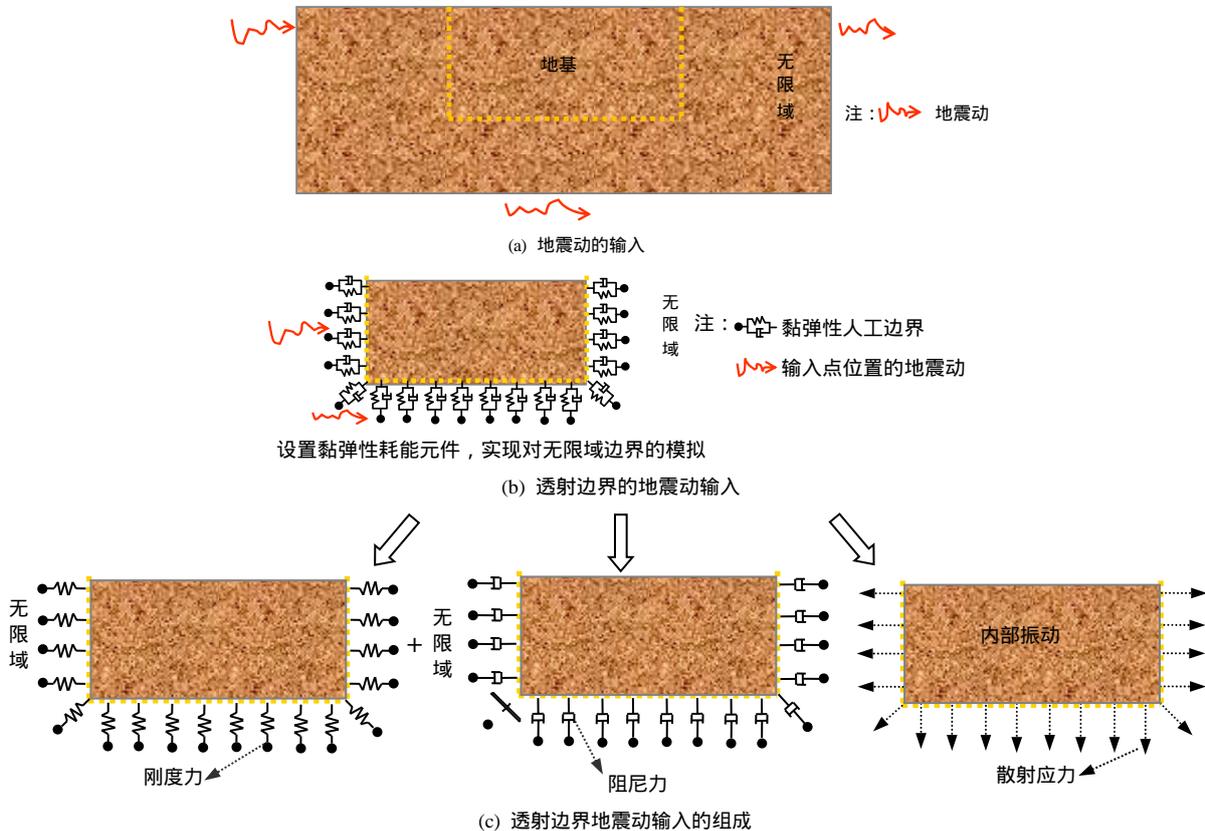


图 5 透射边界地震动的输入示意图

Fig.5 Sketches of transmitting boundary condition with earthquake input

### 3.2 外源力输入理论、原因与前提条件

有限元软件进行结构动力学计算时,荷载无外乎以位移、速度、加速度或以力(包括集中力、弯矩、压力等)形式施加。在固定边界模型中,地震动主要采用位移输入和加速度输入两种输入方式<sup>[14]</sup>。在透射边界模型中,若以位移、速度或加速度的形式施加地震荷载时,施加的位置可以在有限地基的边界和无限域地基边界(即地基最外围的节点)两个位置。若位移、速度或加速度施加到无限域地基边界时,阻尼和刚度成为了整体的一部分,计算结果不符合实际情况;若施加到有限地基边界时,计算结果与模型采用固结边界时完全相同。可以看出,黏弹性人工边界地震以位移、速度或加速度的形式施加时会引起较大误差,因此应该以力的形式施加,即将地震动转化为作用于边界上的等效荷载来进行输入。具体做法是所施加的等效荷载使人工边界上的位移、速度或加速度与原自由场相同,人工边界节点上应该施加的等效荷载  $F_B(t)$  可以为<sup>[5]</sup>

$$F_B(t) = n_w(x_B, y_B, t) + K_B w_0(x_B, y_B, t) + C_B \dot{w}_0(x_B, y_B, t) \quad (3)$$

式中:  $w_0(x_B, y_B, t)$  为已知入射波场  $w_0(x, y, t)$  在人工边界产生的位移;  $K_B w_0(x_B, y_B, t)$  为刚度力;  $C_B \dot{w}_0(x_B, y_B, t)$  为阻尼力;  $n_w$  为入射波引起内源振动而产生的应力,即散射力。

### 3.3 透射边界地震作用实现便捷方法提出与计算

本节以图 2(a)所示有限元模型为例来说明透射边界中地震作用的实现过程。具体过程如下:

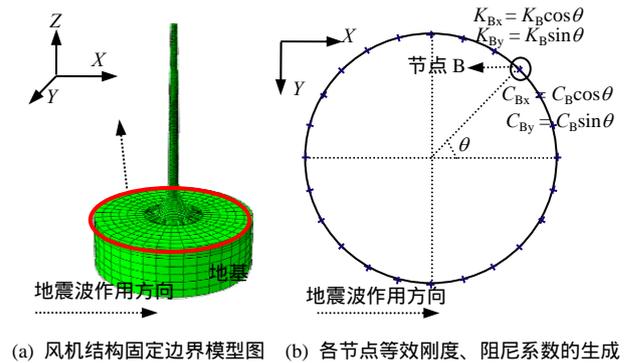
(1) 在模型底部和侧边界的节点上施加地震加速度时程,将地震波以加速度的形式加到模型中,提取地震波作用下模型底部和侧边界各节点的节点反力时程,即散射应力时程;

(2) 计算各节点刚度和阻尼系数,生成刚度力、阻尼力时程,将提取的散射应力时程与刚度力、阻尼力时程相加,生成透射边界模型的地震等效荷载;

(3) 将各节点的地震等效荷载施加到有限元模型中,提取计算结果。

相对于采用固定边界的模型,透射边界模型地震动输入过程复杂,具体体现在:针对同一模型需要两次进行地震波的加载计算;地震等效荷载的生成过程繁琐、工作量大。针对本模型地震等效荷载生成过程工作量大的问题,采取了一定的减少工作量的措施。同一高程上的各节点对应的弹簧刚度和阻尼器的阻尼系数是相同的,均垂直于边界或

沿边界切向。但是,等效到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向上的数值各不相同,与节点对应的角度  $\theta$  有关,如图 6 所示。鉴于此,为方便地震等效荷载的计算,将各节点对应的角度  $\theta$  引入到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的刚度与阻尼系数的计算中,结合地震波的速度、位移时程,批量生成模型底部和侧边界各节点在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向上的阻尼力与刚度力,进而生成地震等效荷载。



(a) 风机结构固定边界模型图 (b) 各节点等效刚度、阻尼系数的生成

图 6 地震等效荷载的生成

Fig.6 Generation of earthquake equivalent loads

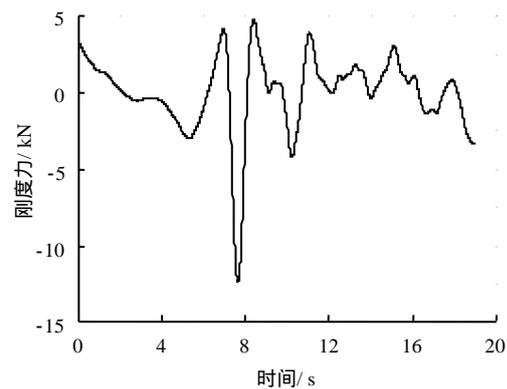
通过此方法生成的节点 B 在  $X$  方向上的刚度力、阻尼力、散射应力的时程曲线和功率谱如图 7 所示。刚度力、阻尼力分别与地震波的位移、速度有关,反映的是地震波的特点。散射力是内源振动产生的节点反力,反映的是结构的振动特性,因此,可能出现偏离零应力的情况,如图 7(c)所示。

## 4 地震反应与倒塌模式的敏感性分析

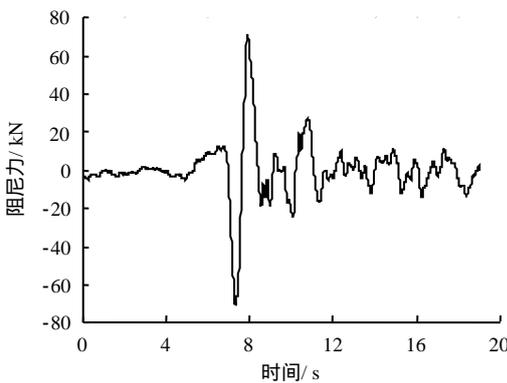
### 4.1 地震反应对有无透射边界的敏感性

对采用固定边界的风机结构体系模型施加峰值加速度为  $1 \text{ m/s}^2$  的天津波,提取风电结构塔筒顶点的加速度响应,如图 8 所示。通过计算可得,塔筒顶端加速度时程的均方根为  $0.698 \text{ m/s}^2$ 。由图 8(b)可以看出,天津波激励下塔筒加速度功率谱中最大功率谱峰值对应的频率为  $0.8417 \text{ Hz}$ ,与天津波的卓越频率 ( $0.8421 \text{ Hz}$ ) 几乎完全一样。可以认为,天津波激励下采用固定边界地基的风机结构体系模型中,塔筒加速度响应主要体现受迫振动的特点。另外,由图 8(b)中另一个功率谱峰值对应的频率为  $2.104 \text{ Hz}$  可以看出,风机结构的三阶模态体现的也比较明显。

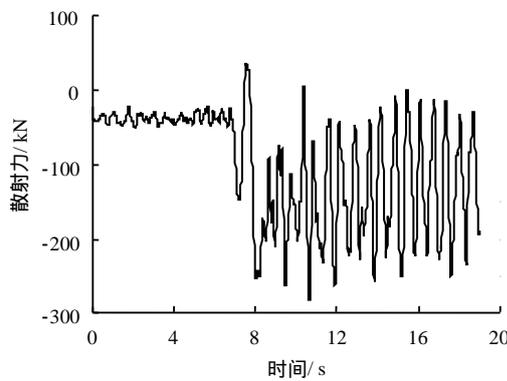
对采用透射边界模型施加峰值加速度为  $1 \text{ m/s}^2$  的天津波,提取风电结构塔筒顶点的加速度响应,如图 9 所示。通过计算可得,塔筒顶端加速度时程



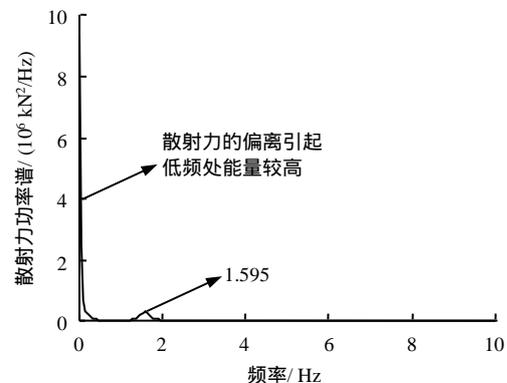
(a) 刚度力时程



(b) 阻尼力时程

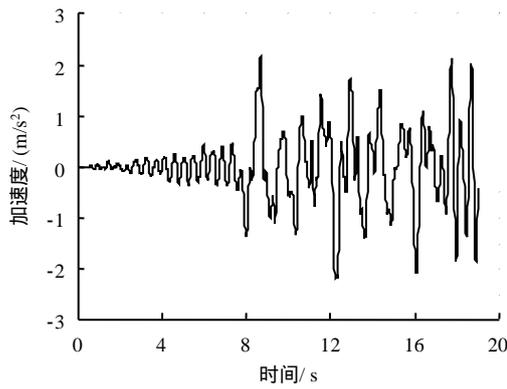


(c) 散射力时程

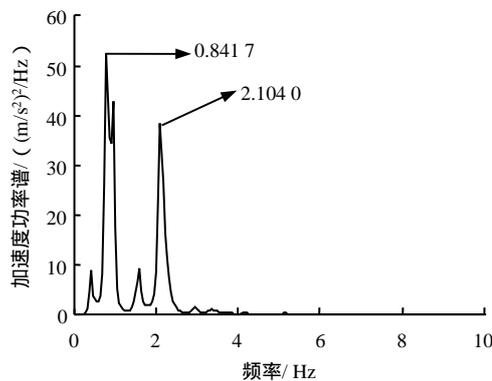


(d) 散射力频谱

**图 7 节点 B 在 X 方向的刚度力、阻尼力、散射力时程曲线和频谱图**  
**Fig.7 Time history and PSD of stiffness force, damping force and scattering force of node B in X-direction**



(a) 加速度时程



(b) 功率谱

**图 8 天津波激励下固定边界模型塔筒顶点加速度响应 (峰值加速度  $PGA = 1 \text{ m/s}^2$ )**  
**Fig.8 Acceleration response at tower tip of fixed boundary under Tianjin wave ( $PGA = 1 \text{ m/s}^2$ )**

的均方根为  $0.234 \text{ m/s}^2$ 。由图 9(b)可以看出,塔筒振动加速度功率谱中功率谱峰值对应的频率为 2.262、4.050 Hz,结合图 4 中风机结构的模态分析可以得出,2.262、4.050 Hz 分别与风机结构的 3 阶模态频率 (2.52 Hz)、5 阶模态频率 (3.81 Hz) 相差很小,因此采用透射边界时天津波激励下风机结构的振动主要体现风机结构自身的振动特点。比较图 8、9 可以看出,采用透射边界时塔筒顶端加速度时程的均方根减小到了采用固定边界时的 1/3 左右,原因包括:与采用固定边界相比,采用透射边界时结构体系更柔,结构的自振频率更偏离天津波的卓越频率,更难以引起共振;由于设置了阻尼,能量消耗较多,使得结构响应减小。由图 9(b)还可以看出,由于设置了地基阻尼,使得采用透射边界时风电结构振动频谱图中阻尼明显增大。

分别提取采用固定和透射边界时塔筒顶端位移时程,如图 10 所示。可以看出,在最大加速度为  $1 \text{ m/s}^2$  的天津波激励下,风电结构塔筒顶端的位移

都比较小,采用透射边界时塔筒顶端的最大位移要明显小于采用固定边界时塔筒顶端的最大位移。

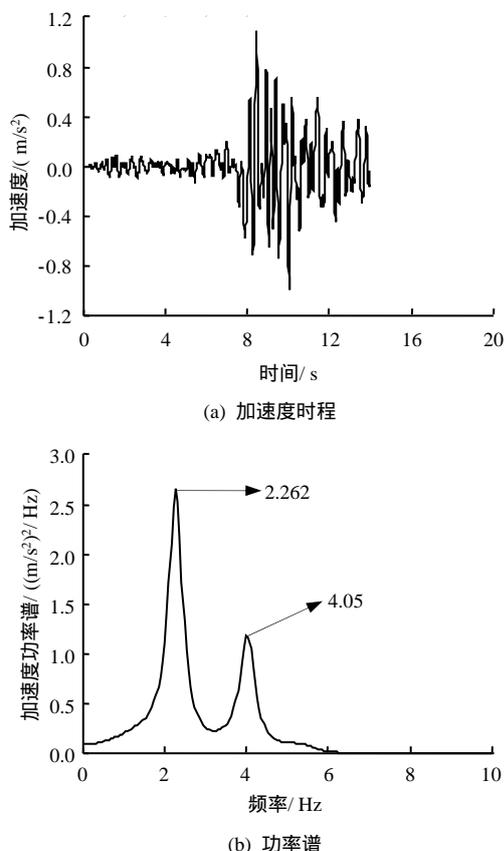


图9 天津波激励下透射边界模型塔筒顶点加速度响应 ( $PGA = 1 \text{ m/s}^2$ )

Fig.9 Acceleration response at tower tip of transmitting boundary under Tianjin wave ( $PGA = 1 \text{ m/s}^2$ )

#### 4.2 倒塌模式对有无透射边界的敏感性

采用固定边界的近海风电结构体系施加峰值加速度  $12 \text{ m/s}^2$  的天津波时程,复合筒型基础结构在地震过程中的变化如图 11 所示。从图中可以看出,

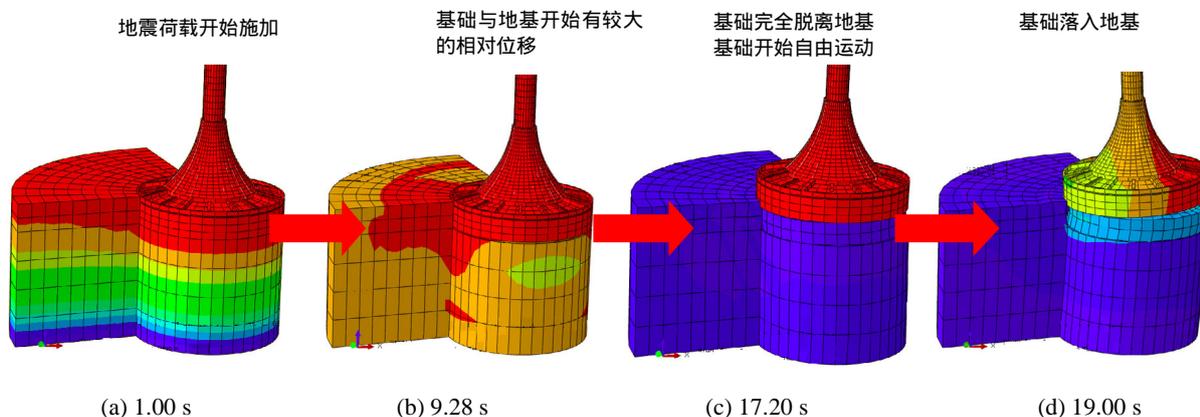


图 11 天津波激励下固定边界风机结构的振动过程 ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

Fig.11 Vibration process of wind power structure of fixed boundary under Tianjin wave ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

1 s 末地震荷载开始施加到风电结构体系上,基础不断振动,由于摩擦力的作用使得基础与地基之间发生较大的相对位移,在 9.28 s 复合筒型基础位置上移,并在 17.2 s 时基础完全脱离地基,最后复合筒型基础又下落到地基上。

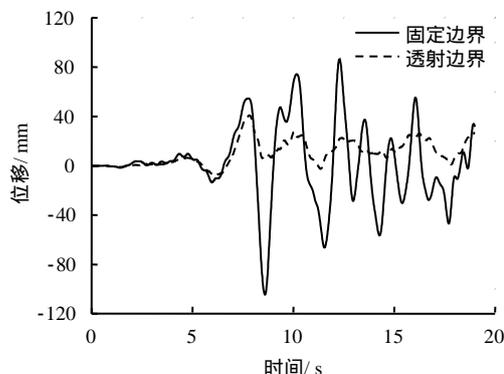


图 10 天津波激励下不同地基边界的塔筒顶端位移响应  
Fig.10 Displacement response at tower tip of different boundaries under Tianjin wave

当采用固定边界的模型施加峰值加速度超过  $12 \text{ m/s}^2$  的天津波时,模型不易收敛,不容易得到散射力时程,无法生成透射边界模型计算中的地震等效荷载。因此,在透射边界模型中只能施加峰值加速度最大为  $12 \text{ m/s}^2$  的天津波。复合筒型基础结构在地震过程中的变化及基础与地基的相对位移分别如图 12、13 所示。可以看出,在 1 s 末地震荷载开始施加到风电结构体系上,基础不断振动,由于摩擦力的作用使得基础与地基之间为发生较大的相对位移,在 17.45 s 复合筒型基础与地基的相对位移达到最大。

#### 4.3 内源振动反射对地震反应与倒塌模式的影响

只在透射边界模型中施加刚度力与阻尼力,忽略图 7 中的散射力,塔筒顶端加速度响应如图 14

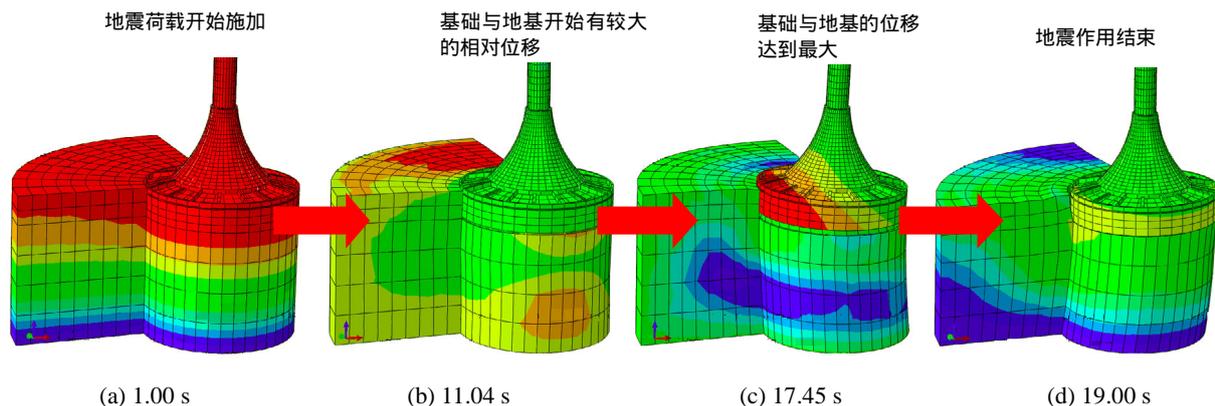


图 12 天津波激励下透射边界风机结构的振动过程 ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

Fig.12 Vibration process of wind power structure of transmitting boundary under Tianjin wave ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

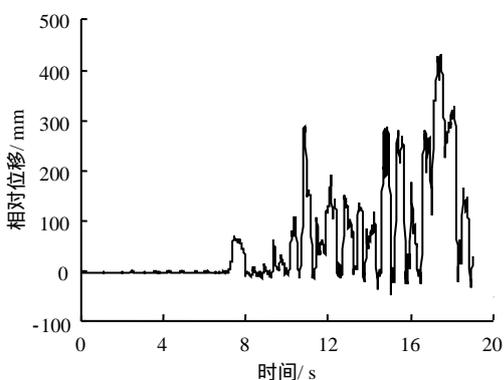


图 13 天津波激励下透射边界模型中基础与地基的相对位移变化 ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

Fig.13 Relative displacement of foundation and soil with transmitting boundary under Tianjin wave ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

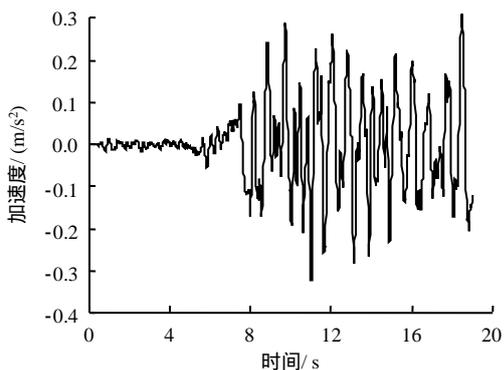


图 14 天津波激励下忽略散射力时塔筒顶点加速度响应 ( $PGA = 1 \text{ m/s}^2$ )

Fig.14 Acceleration response at tower tip under Tianjin wave with ignoring scattering force( $PGA = 1 \text{ m/s}^2$ )

所示。比较图 9(a)与图 14 可以看出,忽略内源振动的散射力,风机结构振动加速度明显减小。

结合图 12 的分析,为进行考虑内源振动反射与否对倒塌模式影响的比较,在忽略内源振动的前提下,在模型中施加峰值加速度  $12 \text{ m/s}^2$  对应的刚度力

与阻尼力,基础与地基的相对位移如图 15 所示。由图 13 与图 15 的比较可以看出,忽略内源振动时基础和地基的相对位移显著减小。

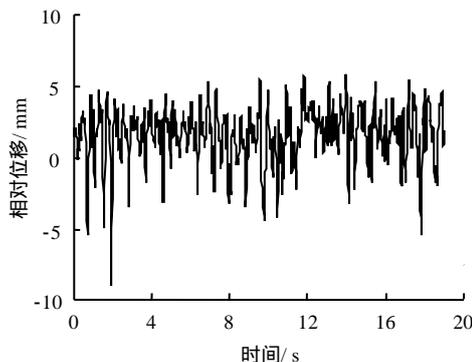


图 15 天津波激励下忽略散射力时基础与地基的相对位移变化 ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

Fig.15 Relative displacement of foundation and soil under Tianjin wave with ignoring scattering force ( $PGA = 12 \text{ m/s}^2$ )

通过对考虑内源振动反射与否对地震反应和倒塌模式影响的比较可以看出,忽略内源振动反射时地基与风机结构响应明显减小,这是因为构成地震等效荷载的刚度力、阻尼力、散射力中,散射力要远大于刚度力与阻尼力,散射力对地震作用下风电结构体系的响应起主要作用。

### 5 结 论

(1) 澄清了透射边界地震动以力的形式加载的原因,具体给出了在通用有限元软件中的实现方法。

(2) 提出了圆形横截面地基中地震等效荷载生成的简化方法。

(3) 解释了地震作用下采用透射边界比采用固定边界时风电结构响应减小的原因,包括:与采用固定边界相比,采用透射边界时结构体系更柔,结

构的自振频率更偏离地震波的卓越频率, 更难以引起共振; 由于设置了阻尼, 能量消耗较多, 结构响应减小。

(4) 分析并明确了地震作用下透射边界地基模型计算中内源振动反射的不容忽视性: 构成地震等效荷载的刚度力、阻尼力、散射力中, 散射力对地震作用下风电结构体系的响应起主要作用。

### 参 考 文 献

- [1] 戚蓝, 刘国威, 王海军. 近海风电筒型基础风机结构地震动力响应分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(7): 116 - 119.  
QI Lan, LIU Guo-wei, WANG Hai-jun. Analysis on seismic dynamic response of structure for offshore wind turbine with bucket foundation[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2012, 43(7): 116 - 119.
- [2] 杨锋. 近海桩式风机基础-塔架动载特性与响应及桩基优化研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [3] 王爱国, 石玉成, 马巍. 地震地表变形三维有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4124 - 4130.  
WANG Ai-guo, SHI Yu-cheng, MA Wei. A numerical analysis of seismic deformation in Mogao Geototes with 3D FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(24): 4124 - 4130.
- [4] 邱流潮, 刘桦. 混凝土坝-基岩地震动力相互作用时域有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3713 - 3718.  
QIU Liu-chao, LIU Hua. Finite element analysis of seismic concrete dam-foundation rock interaction in time domain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3713 - 3718.
- [5] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 黏弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(增刊): 37 - 42.  
LIU Jing-bo, DU Yi-xin, YAN Qiu-shi. Implementation of viscous-spring artificial boundary and seismic input in finite element software[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2007, 27(Supp.): 37 - 42.
- [6] 苑举卫, 杜成斌, 陈灯红. 基于 ABAQUS 的三维黏弹性边界单元及地震动输入方法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 9 - 13.  
YUAN Ju-wei, DU Cheng-bin, CHEN Deng-hong. Study of 3D viscoelastic boundary elements based on ABAQUS and earthquake input method[J]. **Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)**, 2010, 32(3): 9 - 13.
- [7] LIAN JIJIAN, DING HONGYAN, ZHANG PUYANG, et al. Design of large scale prestressing bucket foundation for offshore wind turbine[J]. **Transactions of Tianjin University**, 2012, 18(2): 79 - 84.
- [8] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127 - 130.  
ZHANG Jin, WANG Qing-yang, HU Shou-ying, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. **Building Structure**, 2008, 38(8): 127 - 130.
- [9] BAZEOS N, HATZIGEORGIOU G D, HONDROS I D. Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower[J]. **Engineering Structure**, 2002, (24): 1015 - 1025.
- [10] 杜杰, 丁红岩, 刘建辉, 等. 筒型基础有限元分析的土体边界选取研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(2): 110 - 112.  
DU Jie, DING Hong-yan, LIU Jian-hui, et al. Research on boundary selection of soil of bucket foundation with finite element analysis[J]. **Ocean Technology**, 2005, 24(2): 110 - 112.
- [11] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域黏弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46 - 51.  
LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. **Engineering Mechanics**, 2005, 22(6): 46 - 51.
- [12] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31 - 37.  
GU Yin, LIU Jing-bo, DU Yi-xin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24 (12) 31 - 37.
- [13] 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 Qing-lai, LUAN Mao-tian, 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.
- [14] 柳国环, 李宏男, 林海. 结构地震响应计算模型的分析[J]. 工程力学, 2009, (2): 10 - 15.  
LIU Guo-huan, LI Hong-nan, LIN Hai. Comparison and evaluation of models for structural seismic responses analysis[J]. **Engineering Mechanics**, 2009, (2): 10 - 15.