

DOI: 10.11779/CJGE2022S2004

# 砂土中大直径单桩风机动力响应模型试验

张陈蓉<sup>1,2</sup>, 田抒平<sup>1,2</sup>, 张纪蒙<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 采用电机伺服随机动力加载设备开展了一系列 1g 模型试验, 研究砂土中大直径单桩基础的风机模型在风暴条件下的动力响应特性。试验结果表明: 叶片风机模型, 其位移响应极值相比集中质量风机模型大约偏小 4%~8%。相比顶部集中质量模型 5 Hz 左右的单共振峰值, 叶片风机模型频响分布含 4 Hz 与 6 Hz 对应的 2 个固有频率共振峰值, 分别为塔身固有频率与叶片塔筒耦合固有频率。风暴条件下随着平均风速的提高, 风机位移响应极值呈现非线性增长的趋势。采用固定底端的风机模型相比单桩基础, 其塔顶位移响应极值偏低约 45%, 固有频率偏高约 11%; 能量水平更高、高频分布更多的风谱, 其对应风机动力响应极值更高, 频域能量水平更高。

**关键词:** 海上风机; 大直径单桩基础; 动力响应; 1g 模型试验

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0016-04

**作者简介:** 张陈蓉(1982—), 女, 副研究员, 主要从事桩基工程科研与教学工作。E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn。

## Model tests on large-diameter monopile-supported offshore wind turbine in sand

ZHANG Chen-rong<sup>1,2</sup>, TIAN Shu-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-meng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Using the motor servo random dynamic loading equipment, a series of 1g model tests are carried out to investigate the dynamic response characteristics of the monopile-supported wind turbine model in sand under storm conditions. The experimental results indicate that the extreme displacement response of the blade-coupled model is about 4%~8% smaller than the lumped model. The lumped model contains a single resonance peak corresponding to 5 Hz. However, the blade-coupled model contains two natural frequency resonance peaks 4Hz and 6Hz, which are corresponding to the natural frequencies of the tower and the blade-tower coupling respectively. With the increase of the average wind speed under storm conditions, the extreme displacement response shows a non-linear growth trend. For the bottom-fixed model, the extreme displacement response of the tower tip is about 45% lower, and the natural frequency is about 11% higher compared with the monopile foundation model. For the wind spectrum with higher energy level and more high-frequency distribution, the corresponding extreme dynamic response and the energy level in the frequency domain are higher.

**Key words:** offshore wind turbine; large-diameter monopile; dynamic response; 1g model test

## 0 引言

风暴条件下, 飓风具有极强的脉动性, 且作用时间短, 瞬时极值大, 方向多变等特点。海上风机承受大攻角、强风荷载作用, 产生较大的变形与内力响应, 进而导致倒塔等严重事故。大直径单桩基础的海上风机在风暴条件下的动力响应特性研究具有重要意义。

针对海上风机模型试验, 目前主要关注以下两个方面的内容: 一个是基于风扇与造波设备分析风浪荷载对动力响应特性的影响规律, 如 Hu 等<sup>[1]</sup>、Naqvi<sup>[2]</sup>的试验研究; 另一个是考虑地基基础作用的风机共振特性变化规律, 如 Adhikari 等<sup>[3]</sup>、Lombardi 等<sup>[4]</sup>的理论和试验研究。

现有试验主要是采用恒定风速的稳态风荷载加载, 未考虑自然条件下的风荷载特性; 主要关注基础-土体相互作用对共振特性的影响, 忽略了叶片的影响。为此, 本文开展了一系列砂土中大直径单桩基础风机在风暴条件下的风载时程动力加载的 1g 模型试验, 分析了单桩基础风机风暴条件下的动力响应特性。

## 1 气动荷载计算

工程中一般将来流风速视为平均风和脉动风的叠加。平均风速指数模型如式(1)所示:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779175)

收稿日期: 2022-12-06

$$u(z)=u_{10}\left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha}, \quad (1)$$

式中,  $z$  为高度,  $u_{10}$  为 10 m 高处平均风速,  $\alpha$  为受地貌影响的常数, 对于开阔海平面,  $\alpha$  取 0.11。

本文采用的脉动风速功率谱包含 Kaimal 等<sup>[5]</sup>提出的常规风谱, 以及 Yu 等<sup>[6]</sup>、Li 等<sup>[7]</sup>在飓风条件下观测到的风谱, 其功率谱密度分布如图 1 所示。图 1 中, 规范化频率  $f_0=nz/u$ , 规范化功率谱密度  $S_0=nS_u/\sigma^2$ 。基于谐波叠加法可以计算得到风场各点处风速。

叶片上的风荷载采用叶素动量理论计算得到。作为高耸结构, 作用于塔筒上的顺风向风荷载的计算式为

$$F=\frac{1}{2}C_D\rho A\left[V_m+v'(t)\right]^2, \quad (2)$$

式中,  $C_D$  为气动系数, 圆柱形高耸结构取 0.8,  $\rho$  为空气密度,  $V_m$  和  $v'$  分别为平均风速和脉动风速,  $A$  为塔筒有效迎风面积。

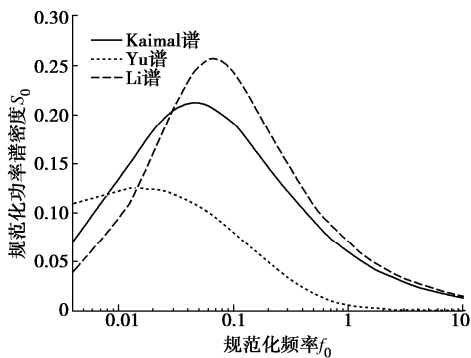


图 1 3 种风速功率谱密度分布

Fig. 1 Distribution of three kinds of power spectral densities of wind

2 试验设备与方案

2.1 加载系统

本试验采用自定义波形动力荷载控制加载系统, 主要由直线电机激振器、采集仪、电机驱动器构成, 其示意图如图 2 所示, 可以实现随机动力荷载输入。

2.2 单桩基础风机模型及地基土制备

本试验采用 NREL-5MW 标准风机的几何缩尺模型, 几何比尺  $n$  为 1:100, 实物图见图 2。王文华等<sup>[8]</sup>提出基于环境荷载作用下海上风机结构主要以弯曲振动为主的特性, 弹性模量比尺为  $n$ 。模型的主体弯曲变形部分采用 PC 材料制成。机舱采用铝合金质量块。叶轮拆下后可采用等效集中质量块; 除采用可埋置于砂土中的单桩基础外, 考虑了采用混凝土底座以模拟固定底端的边界条件。

试验采用日本丰浦砂。采用砂雨法分层对土体进行填筑, 测得制备后砂土的平均密度为 1451 kg/m<sup>3</sup>,

孔隙比  $e=0.819$ , 相对密度  $D_r=0.315$ 。

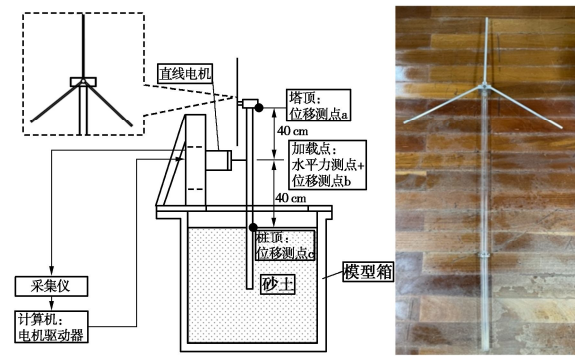


图 2 试验装置图

Fig. 2 Test device

2.3 试验安排

为研究风谱、叶片、基础形式等因素对动力响应的影响, 采用表 1 所示的试验分组安排, 共分为 8 组。E1~E5 为风荷载时程加载的模型试验, 采用图 1 的三种风谱, 根据 Siffir-Simpson 飓风等级分类<sup>[9]</sup>, 对应 1~5 级飓风, 分别在来流平均风速为 30~70 m/s 的条件下按照气动荷载计算方法各生成一条 60 s 的气动荷载时程, 单向加载; E6~E8 是 1~20 Hz、1 N 幅值正弦荷载加载的扫频试验, 以探究模型共振特性。

表 1 试验安排

Table 1 Experimental arrangement

结构		风谱			正弦激励试验
		Kaimal 谱	Yu 谱	Li 谱	
固定	集中质量	E1	—	—	E6
底端	叶片模型	E2	—	—	E7
单桩	集中质量	—	—	—	E8
基础	叶片模型	E3	E4	E5	—

3 试验结果分析

3.1 有无叶片 (试验 E1 与 E2、E6 与 E7)

图 3 为有无叶片下塔顶最大响应位移与动力荷载的平均风速的关系。叶片风机模型得到的塔顶位移响应极值大约偏小 4%~8%。图 4 为塔顶位移功率

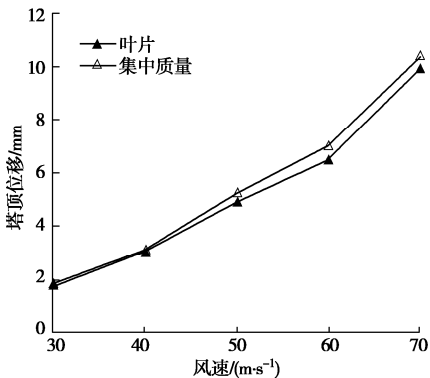


图 3 位移响应极值与平均风速的关系

Fig. 3 Relationship between extreme displacement response and average wind speed

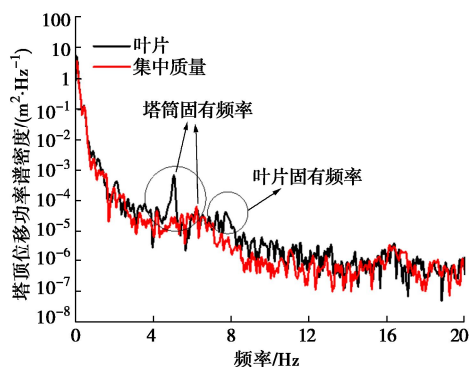


图4 塔顶位移功率谱密度 (70 m/s)

Fig. 4 Power spectral densities of displacement at tower tip

(70 m/s)

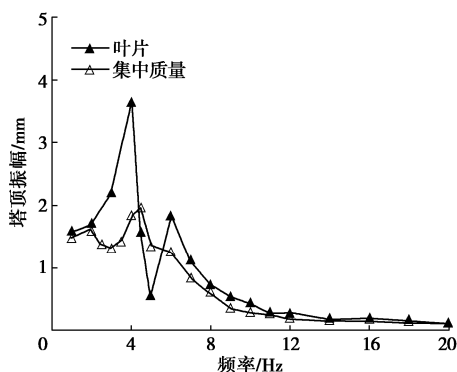


图5 塔顶振幅与加载频率的关系

Fig. 5 Relationship between amplitude of tower tip and loading frequency

谱密度分布。叶片模型在 10 Hz 内含较为明显的 2 个共振峰值,集中质量模型在 5 Hz 左右有 1 个共振峰值。扫频试验的塔顶振幅随加载频率的变化如图 5 所示,叶片模型包含了两个较为明显的共振峰值,塔筒固有频率 4 Hz 对应的共振峰值最高,6 Hz 出现了另一个共振峰值,为叶片-塔筒动力耦合产生。

### 3.2 固定端和有桩条件 (试验 E2 与 E3、E6 与 E8)

图 6 为塔顶位移极值随平均风速的变化。随着平均风速的提高,塔顶位移极值呈现非线性增长的趋势。固定底端的风机模型塔顶位移极值在不同风速条件下的位移响应大约偏低 45%。图 7 为 70 m/s 风速对应的塔顶位移功率谱密度分布。由于风机模型叶片的存在,谱密度分布图上两种基础形式在 10 Hz 以内均有二个共振峰值,但固定底端模型在 5 Hz 左右的共振峰值更明显,而单桩基础模型的共振峰值相对较弱一些,出现在 4 Hz 左右。图 8 为扫频试验塔顶振幅随荷载频率的变化。固定底端模型与单桩基础模型,其固有频率分别为 4.5 Hz、4 Hz,后者偏低约 11%,表明固定底端模型会高估海上风机的固有频率;且相比单桩基础,固定底端的共振峰值显著偏低,与 Veletsos 等<sup>[10]</sup>的结论一致,基础土体相互作用降低了结构的固有频率。此外,在 2 Hz 左右,固定底端模型出现了一个不明显

的共振峰值,可能是由于模型与加载设备的连接形成的系统干扰,单桩基础则未出现该峰值。

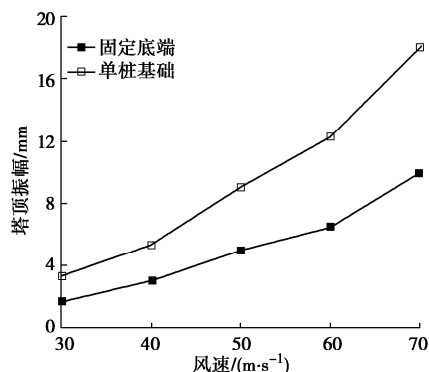


图6 位移响应极值与平均风速的关系

Fig. 6 Relationship between extreme displacement response and average wind speed

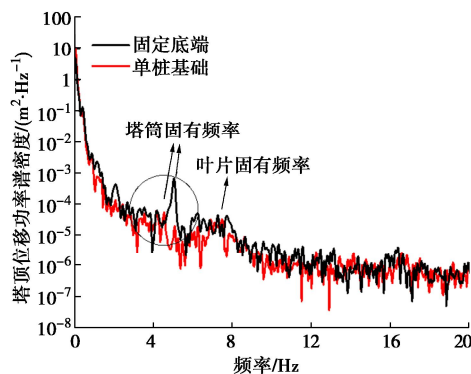


图7 塔顶位移功率谱密度 (70 m/s)

Fig. 7 Power spectral densities of displacement at tower tip (70 m/s)

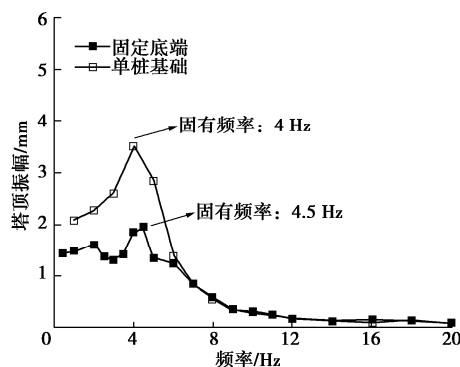


图8 塔顶振幅与加载频率的关系

Fig. 8 Relationship between amplitude of tower tip and loading frequency

### 3.3 不同输入风谱 (试验 E3、E4、E5)

本组试验对比了 3 种不同风速功率谱 (见图 1) 的风载对风机塔顶位移的动力响应。在 3 种风速功率谱中, Yu 谱整体能量水平最低,且在低频范围内分布明显更多, Li 谱整体能量水平最高,且在高频范围内分布明显更多,而 Kaimal 谱介于两者之间。塔顶位移极值随来流风速的变化如图 9 所示。结果表明, Yu 谱对应的组别,其塔顶位移极值要明显低于 Li 谱与

Kaimal 谱的组别, 表明能量水平较低且低频分布更多的风谱, 其对应风荷载对风机激振产生的动力响应极值越低。70 m/s 风速条件下, 3 个风谱对应的位移功率谱密度分布如图 10 所示, 塔筒固有频率与叶片固有频率对应的共振峰值均较为明显, 差异表现在功率谱整体能量水平, 低频分布更多的 Yu 谱, 风机塔顶位移功率谱密度能量水平明显低于其它两者。

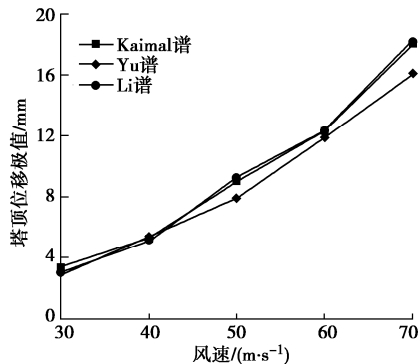


图 9 位移响应极值与平均风速的关系

Fig. 9 Relationship between extreme displacement response and average wind speed

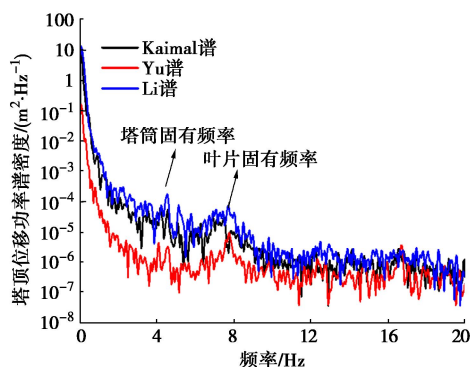


图 10 塔顶位移功率谱密度 (70 m/s)

Fig. 10 Power spectral densities of displacement at tower tip (70 m/s)

## 4 结 论

本文开展了一系列砂土中大直径单桩基础的风机风暴条件动力响应 1g 模型试验。基于试验结果主要得出以下结论:

(1) 风暴条件下, 随着平均风速的提高, 风机位移响应极值呈现非线性增长的趋势。

(2) 叶片风机模型, 其位移响应极值比集中质量风机模型大约偏小 4%~8%, 考虑集中质量形式对结构整体响应可能偏安全; 相比顶部集中质量模型的 5 Hz 对应的单共振峰值, 叶片风机模型频响分布含 4 Hz 与 6 Hz 对应的 2 个固有频率共振峰值, 其中第 1 个共振峰值对应的固有频率与顶部集中质量模型对应, 为

塔身固有频率, 第 2 个为叶片塔筒耦合作用产生, 叶片的存在改变了风机共振特性。

(3) 桩土相互作用对风机的动力响应特性有重要影响。在本试验条件下, 相比单桩基础, 采用固定底端的风机模型的塔顶位移响应极值在不同风速条件下的位移响应大约偏低 45%, 固有频率偏高约 11%。

(4) 风速功率谱的能量水平与频域分布对风机动力响应特性有影响, 能量水平更高、高频分布更多的风谱, 其对应风机动力响应极值更高, 频域能量水平更高。

## 参考文献:

- [1] HU Y, YANG J, BANIOTOPOULOS C, et al. Dynamic analysis of offshore steel wind turbine towers subjected to wind, wave and current loading during construction[J]. Ocean Engineering, 2020, **216**: 108084.
- [2] NAQVI S K. Scale model experiments on floating offshore wind turbines[D]. Worcester Polytechnic Institute, 2012.
- [3] ADHIKARI S, BHATTACHARYA S. Vibrations of wind-turbines considering soil-structure interaction[J]. Wind and Structures, 2011, **14**(2): 85 - 112.
- [4] LOMBARDI D, BHATTACHARYA S, WOOD D M. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, **49**: 165 - 180.
- [5] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, **98**(417): 563 - 589.
- [6] YU B, GAN CHOWDHURY A G, MASTERS F J. Hurricane wind power spectra, cospectra, and integral length scales[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2008, **129**(3): 411 - 430.
- [7] LI L, XIAO Y, KAREEM A, et al. Modeling typhoon wind power spectra near sea surface based on measurements in the South China sea[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, **104/105/106**: 565 - 576.
- [8] 王文华, 李 昕, 孔宪京. 地震作用下固定式海上风机动力模型试验及耦合数值研究[J]. 大连理工大学学报, 2020, **60**(5): 513 - 529.
- [9] SIMPSON R H, SAFFIR H. The hurricane disaster-potential scale[J]. Weatherwise, 1974, **27**(4): 169 - 186.
- [10] VELETSOS A S, VERBIČ B. Vibration of viscoelastic foundations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1973, **2**(1): 87 - 102.

(编校: 明经平)