

文章编号:0254-0096(2018)11-3215-09

海上大功率风力机固定式支撑结构方案比较分析

孟 珣^{1,2}, 刘 萌¹, 唐小惠¹, 刘潇涵¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 青岛 266100)

摘 要: 基于大功率的海上风力机(OWTs)的动力特性约束, 优化确定不同水深范围内柔性、刚柔性及刚性设计方案下3种典型固定式海上风电支撑——单立柱、单立柱三桩和导管架式结构主尺度; 进一步分析动力特性可行结构方案相应外环境激励及抗力特征不确定分布下结构强度、刚度性能的可靠度指标。研究表明: 大功率风力机固定式支撑结构水深拓展到100 m, 导管架支撑刚柔性设计为经济可行方案, 相应方案的单立柱及单立柱三桩存在过大位移及应力。该方法可用于海上风电支撑结构选型和方案决策。

关键词: 海上风力机; 结构优化; 可靠性分析; 固有频率; 单立柱支撑; 单立柱三桩支撑; 导管架式支撑

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

化石能源短缺现状及其所带来的环境污染困扰, 使得绿色清洁能源开发受到世界各国重视。海上风力发电成为大规模商业化推广热点。远离岸、相对深水域由于其良好的风能密度、空间可利用性及低噪音干扰、弱视觉污染等诸多优点日益成为海上风电场理想选址点^[1,2]。

海上风电场支撑结构设计建造和并网等费用巨大, 一般占总投资的一半左右。早期海上风电开发仅限于近海区域(≤ 50 m), 其核心技术多借鉴陆上风电经验和海洋油气固定式平台的工作原理。根据现有设计经验^[3], 浅水域风电支撑结构主要包括以下几种形式: 1) 重力式基础(≤ 5 m); 2) 单立柱(≤ 20 m); 3) 单立柱三桩和导管架式支撑(20~50 m)。为降低成本增加产出, 改变海上风力机单机容量、材料的物理力学及机械操控性能成为了当前的研究趋势, 10 MW 以及更大功率风力机将用于海上风电场^[4]。

为适应大功率风力机深水开发技术需求, 越来越多的研究致力于对现有风电支撑结构新的适用范围的探讨^[5-7]。其中, 基于风电支撑结构体系自身特点的整体设计和控制优化成为寻找特定风电场经济可行的支撑结构方案有效途径^[8,9]。然而上述

工作多针对某种特定结构类型, 比较选型研究相对较少。本文提出的海上固定式大功率风电支撑结构评价技术可用于指导海上风电支撑结构选型和方案决策。

1 研究目标

根据业已投入商业化运营的海上风电场统计资料^[10]统计, 单立柱支撑类型是目前采用数量最多的固定式支撑结构, 其负荷风力机达到约3 MW。更高功率级别的海上风力机(5 MW)采用的支撑类型为导管架式支撑结构或单立柱三桩支撑结构。重力式和其他拓展类型的桩基础有一定的使用数量。不同类型固定式支撑结构统计比较如图1所示。

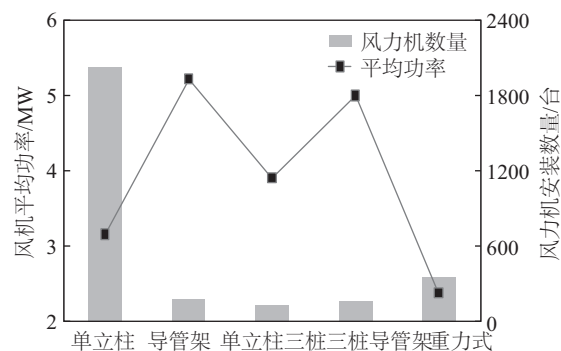


图1 固定式风电支撑结构风力机应用统计

Fig. 1 Turbine capacity and numbers of installed of bottom-fixed OWT concepts

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51309209); 国家自然科学基金重大项目(51490675)

通信作者: 孟珣(1973—), 女, 博士、副教授, 主要从事海洋工程结构物力学特性及综合评价方面的研究。mengxun@ouc.edu.cn

本文选取 3 种典型固定式支撑——导管架支撑、单立柱三桩和大直径的单立柱支撑为研究对象,对大功率风力机深水开发结构性能进行分析比较。其中,导管架式支撑结构类型早在海洋油气资源开发的初期就得到广泛使用;单立柱三桩支撑类似于简易轻质的导管架平台,通过分布梁将中心柱荷载分配到三角分布的 3 个桩基础上;单立柱支撑结构受力明确,荷载传递主要是通过大直径的桩土相互作用完成,可施工的直径范围是该种形式支撑大功率风力机应用及深水开发的局限点。3 种典型固定式支撑结构示意图如图 2 所示。

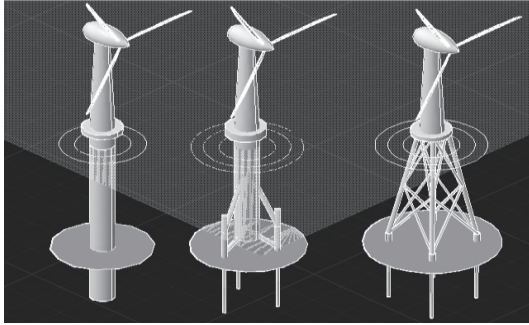


图 2 海上大功率风力机 3 种典型固定式支撑结构示意图

Fig. 2 Configurations of three typical bottom-fixed OWT (offshore wind turbine) structure concepts

2 基础理论

2.1 广义多自由度模型

单自由度体系是结构动力学中最简单的描述系统运动和动力性质的模型。由于真实结构的复杂性,往往需要有效简化模型来把握实际系统的典型特征。海上风电固定式支撑塔架部分主要以单一挠度弯曲模式变形为主,通过对该单位移的形式简化,可将不同支撑结构的力学模型统一用广义单自由度体系运动方程表述:

$$m^* Z''(t) + c^* Z'(t) + k^* Z(t) = p^*(t) \quad (1)$$

式中, m^* 、 c^* 、 k^* 和 $p^*(t)$ ——体系的广义质量、广义阻尼、广义刚度矩阵和激励荷载; $Z(t)$ 、 $Z'(t)$ 、 $Z''(t)$ ——描述体系运动的广义位移、速度、加速度, t 为时间。

应用虚功原理,系统主要动力学要素描述如下:

$$\begin{aligned} m^* &= \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx + \sum m_i \psi_i^2 + \sum j_i \psi_i'^2 \\ c^* &= \int_0^L c(x) \psi(x)^2 dx + a_1 \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx + \sum c_i \psi_i^2 \\ k^* &= \int_0^L k(x) \psi(x)^2 dx + \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx + \sum k_i \psi_i^2 - \int_0^L N(x) \psi'(x)^2 dx \\ p^*(t) &= \int_0^L p(x, t) \psi(x) dx + \sum p_i(t) \psi_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\psi(x)$ 、 $\psi'(x)$ 、 $\psi''(x)$ ——体系中连续结构的形状函数、其一阶导数、二阶导数; x ——连续结构上一点与原点的相对距离; L ——连续结构的长度; E ——弹性模量; $I(x)$ ——惯性矩; a_1 ——与阻尼有关的参数; $m(x)$ 、 $c(x)$ 、 $k(x)$ ——体系中的连续质量、阻尼、弹簧刚度; m_i 、 j_i 、 c_i 、 k_i ——体系中第 i 个集中质量及其转动惯量、第 i 个局部阻尼、第 i 个局部弹簧刚度; ψ_i 、 ψ_i' ——体系中集中结构的形状参数、转动参数; $N(x)$ ——内部轴向荷载; $p(x, t)$ ——连续的横向荷载; $p_i(t)$ ——集中的横向荷载。

固定式风电支撑系统主要由海上风力机、塔架、下部支撑(基础)3 部分组成,其广义多自由度简化模型如图 3 所示。

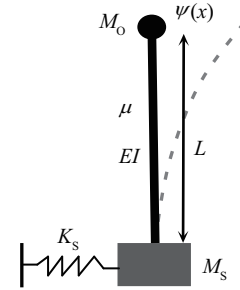


图 3 固定式支撑结构广义单自由度体系模型

Fig. 3 GSDOF model of Bottom-fixed OWT concepts

根据式(2),固定式风电支撑结构系统广义质量 m^* 和刚度 k^* 可进一步用式(3)描述:

$$\begin{aligned} m^* &= \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx + M_s \psi(0)^2 + M_0 \psi(L)^2 \\ k^* &= \int_0^L EI(x) \psi''(x)^2 dx + K_s \psi(0)^2 - \int_0^L M_0 g \psi'(x)^2 dx \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $EI(x)$ 、 $m(x)$ ——沿塔架单位长度的抗弯刚度和质量; M_s 、 K_s ——支撑结构的等效质量和刚度; M_0 ——风力机的质量(包括转子); g ——重力加速度; μ ——单位长度密度。

假设系统一阶模态为主振型,其变形可表示为余弦函数 $\psi(x)$ 形式:

$$\psi(x) = \alpha + (1 - \alpha)(1 - \cos \frac{\pi x}{2L}), \quad 0 \leq x \leq L \quad (4)$$

式中, α ——塔架底端位移; x ——塔架上一点相对于原点的高度差。

取塔架质量和刚度参数为常数, 单位长度密度为 μ , 线性刚度为 EI , 将式(4)代入式(3)有:

$$\begin{aligned} m^* &= (0.5\alpha^2 + 0.2732\alpha + 0.2268)\mu L + M_s\alpha^2 + M_0 \\ k^* &= (1 - \alpha)^2 \frac{3.044EI}{L^3} + \alpha^2 K_s - (1 - \alpha)^2 \frac{1.2337M_0g}{L} \end{aligned} \quad (5)$$

则体系固有频率 ω^* 可表述为:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{(1 - \alpha)^2 \frac{3.044EI}{L^3} + \alpha^2 K_s - (1 - \alpha)^2 \frac{1.2337M_0g}{L}}{(0.5\alpha^2 + 0.2732\alpha + 0.2268)\mu L + M_s\alpha^2 + M_0}} \quad (6)$$

如果支撑结构/基础刚度很大, 塔架底端位移非常小或无, 此时 α 接近 0, 式(5)、式(6)可写成式(7)、式(8)。

$$\begin{aligned} m^* &= 0.2268\mu L + M_0 \\ k^* &= \frac{3.044EI}{L^3} - \frac{1.2337M_0g}{L} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\omega^* = \sqrt{\frac{\frac{3.044EI}{L^3} - \frac{1.2337M_0g}{L}}{0.2268\mu L + M_0}} \quad (8)$$

此时支撑结构/基础为整个体系的理想固定端。如果支撑结构/基础刚度非常小(如浮式支撑系统), 近似为 1。忽略轴向力影响, 支撑体系固有频率 f 可表述为式(9), 与文献[11]所得结果一致。

$$f^2 \cong \frac{3.04}{4\pi^2} \frac{EI}{(M_0 + 0.2268\mu L)L^3} \quad (9)$$

上述简化模型给出影响系统整体动力性质的物理参数构成。实际结构体系 α 多介于 0~1 之间, 其参数值依赖具体支撑结构/基础的质量和刚度分布决定。

2.2 支撑系统设计方案

海上风电支撑系统主要动力激励源为塔架顶端风力机运转和海洋环境荷载, 如风荷载、波浪和海流荷载等。最为明显的 OWT 激励源是风力机转子, 它能够在风电场中产生对 1P 和 NP(轮机旋转频率与 N 叶片通过频率)频率下的风电场的湍流漩涡激增。以三叶片风力机为例, 为了避免共振, 支撑结构设计应使其自然频率落在 1P 和 3P 之外。根据风力机动力特性约束, 典型支撑体系设计分为柔性方案、刚柔性方案和刚性方案 3 种。考虑一定

的安全储备, 柔性设计方案体系固有频率小于 1P, 由于海洋环境荷载的主要能量区间多小于 1P, 此时要注意校核海洋环境荷载动力激励影响; 刚性设计方案体系固有频率大于 3P; 刚柔性结构方案固有频率介于 1P 和 3P 之间。3 种方案的支撑系统频带范围参见图 4。

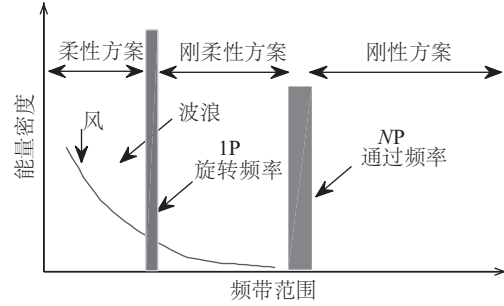


图4 安全设计频带范围

Fig. 4 Safe frequency zone

2.3 海洋环境荷载

海上风电支撑结构受到风力机和海洋环境多种随机荷载联合作用。通常用弹性空气负载模型来计算转子和塔架的空气动力荷载。不同的弹性空气模型程序也随着理论发展出来, 比如 HAWC2、Flex5、Simo-Riflex、Bladed 和 FAST, 这些代码和程序正在不断完善以满足离岸风力机的技术发展需要。由于风力机叶片和塔架是细长的结构, 根据叶片元素理论, 升力和阻力系数可参与到空气动力模型应用中来。如果风力机叶片处于静止, 可通过施加相对风速计算空气荷载; 对于正在运转的风力机, 对于叶片的诱导速度影响和唤醒作用可通过叶片元素表征。本文假设极限响应出现在正常使用工况, 通过 Bladed 软件输出风力机荷载作为支撑结构外荷载。

塔架风荷载可以通过升力理论计算。作用在垂向圆柱上的水平向风力荷载 F_{WIND} 可表达为:

$$dF_{WIND} = \left(\frac{\rho_{air}}{2} \right) C_s V_{wind}^2 D dz \quad (10)$$

式中, ρ_{air} ——空气密度; D ——圆柱直径; C_s ——形状系数; V_{wind} ——垂向为 z 的风速。

海洋环境中的波浪荷载主要施加在支撑结构上。对于细长的离岸构建结构来说, 在组件尺寸远小于波长的情况下, 比如单立柱、钢质导管架和三桩腿结构, 可采用 Morison 方程来计算包括水质点

的惯性和速度加速度激振力。对于垂向高度为 dz 的圆柱体来说,水平波浪力 dF_{WAVE} 表述为:

$$\begin{aligned}dF_{\text{WAVE}} &= dF_m + dF_d \\ &= C_m \rho_{\text{water}} \pi \frac{D^2}{4} V_w' dz + C_d \rho \frac{D}{2} |V_w| V_w dz\end{aligned}\quad (11)$$

式中, dF_m —— 惯性力; dF_d —— 拖曳力; C_m 、 C_d —— 惯性力系数和二次阻力系数; ρ_{water} —— 海水密度; D —— 圆柱体直径, V_w 、 V_w' —— 水质点的水平速度、加速度。

海流的耦合作用通过将海流流速 V_c 引入波浪速度描述的拖曳力项 dF_d , 则水平波浪力 dF_{WAVE} 可表述为:

$$\begin{aligned}dF_{\text{WAVE}} &= dF_m + dF_d \\ &= C_m \rho_{\text{water}} \pi \frac{D^2}{4} V_w dz + C_d \rho \frac{D}{2} |V_w + V_c| (V_w + V_c) dz\end{aligned}\quad (12)$$

式中, V_c —— 深度 z 处的水平水流速度。

3 工程案例

3.1 5 MW 海上风力机

研究选用美国可再生能源委员会的近海 5 MW 风力发电机组作为本文的参考原型。这种离岸风力机已被较多研究作为模型使用。5 MW 风力机的技术参数见表 1。

表1 5 MW 风力机详细参数
Table 1 5 MW OWT parametric specification

参数	数值
额定功率/MW	5
转子直径/m	130.0
轮毂高度/m	90
1P 正常频率/Hz	0.115~0.202
切入、额定、切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3.0、11.4、25.0
切入、额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	6.9、12.1
转子系统、机舱质量/t	110.0、240.0
设备质量/t	12
塔顶直径、壁厚/m	3.87、0.019
塔底直径、壁厚/m	6.0、0.027
OWT 推力/kN	750
OWT 倾覆力矩/ $\text{kN}\cdot\text{m}$	1000
OWT 扭矩/ $\text{kN}\cdot\text{m}$	6000
塔架拖曳力/kN	30

3.2 结构参数化 FEM 模型

海上风电支撑结构系统主要由塔架、不同类型支撑及相应形式的基础 3 部分组成。设计参数与最佳优化方案相关,根据可行方案的质量和优化变量决定。有些参数可能与其他初步设计状况有关。表 2 给出 3 种结构支撑结构变量定义及变化范围。举例来说,一旦风电场选址确定,风力机型号和相应的轮毂高度和塔顶直径都由风电场风况决定,即风力机质量 W_{OWT} 、设备质量 $W_{\text{Equipment}}$ 、塔顶壁厚 T_{Top} 、塔顶直径 D_{Top} 均为常量。与此同时,一

表2 结构设计变量

Table 2 Structural design variables

项目	参数/m	变化范围
塔架	塔底外径 D_{Bottom}	3.87~6.00
	塔底壁厚 T_{Bottom}	0.019~0.027
单立柱 支撑	单桩外径 D_{Monopile}	6.0~10.0
	单桩壁厚 T_{Monopile}	0.06~0.10
	过渡段外径 $D_{\text{Transition}}$	6.0~10.0
	过渡段壁厚 $T_{\text{Transition}}$	0.06~0.10
	主立柱高度 H_{Tripod}	5.0~10.0
	主立柱外径 D_{Tripod}	6.0~10.0
	主立柱高度 T_{Tripod}	0.06~0.10
	斜撑外径 SD_{Brace}	0.3~2.0
	斜撑壁厚 ST_{Brace}	0.03~0.2
	斜撑角度 A_{Brace}	30.0~60.0
导管架 支撑	横撑外径 LD_{Brace}	0.3~2.0
	横撑壁厚 LT_{Brace}	0.03~0.20
	过渡段撑杆外径 $SD_{\text{Transition}}$	0.3~2.0
	过渡段撑杆壁厚 $ST_{\text{Transition}}$	0.03~0.20
	过渡段主柱壁厚 $MT_{\text{Transition}}$	0.027~0.600
	过渡段高度 $H_{\text{Transition}}$	5.0~10.0
	平台宽度 L_{Platform}	10.0~15.0
	侧弦外径 D_{Chord}	0.3~2.0
	侧弦壁厚 T_{Chord}	0.03~0.2
	撑杆外径 D_{Support}	0.3~2.0
桩基础	撑杆壁厚 T_{Support}	0.03~0.2
	桩腿外径 D_{Pile}	1.0~3.0
	桩腿壁厚 T_{Pile}	0.03~0.30

注:表 2 中的所有参数性质均为变量。

些环境因素,如水深、海洋环境荷载、土壤性质等,也是水动力学的重要组成部分。此外,壁厚可看作构件直径的比例伴随变量。对于不同支撑系统,其塔架参数及桩基础参数定义相同。具体变化范围依据施工技术及材料特征设定。

结构示意图参见图 5。主要参数在图中标注,其中, W_{OWT} 、 $W_{\text{equipment}}$ 分别为风力机质量、设备质量, L_{Platform} 为平台宽度, H_{Hub} 、 H_{Platform} 、 $H_{\text{Transition}}$ 分别为轮毂高度、平台高度、过渡段高度, T_{Top} 、 T_{Bottom} 、 T_{Monopile} 、 $T_{\text{Transition}}$ 、 T_{Tripod} 、 ST_{Brace} 、 LT_{Brace} 、 T_{Pile} 、 T_{Chord} 、 T_{Support} 分别为塔顶壁厚、塔底壁厚、单桩壁厚、过渡段壁厚、三桩结构主立柱壁厚、三桩结构斜撑壁厚、三桩结构横撑壁厚、桩腿壁厚、导管架结构侧弦壁厚、导管架结构撑杆壁厚, D_{Top} 、 D_{Bottom} 、 D_{Monopile} 、 $D_{\text{Transition}}$ 、 D_{Tripod} 、 SD_{Brace} 、 LD_{Brace} 、 D_{Pile} 、 D_{Chord} 、 D_{Support} 分别为塔顶外径、塔底外径、单桩外径、过渡段外径、三桩结构主立柱外径、三桩结构斜撑外径、三桩结构横撑外径、桩腿外径、导管架结构侧弦外径、导管架结构撑杆外径, A_{Brace} 为三桩结构斜撑与主立柱夹角; ϕ 代表外径符号。

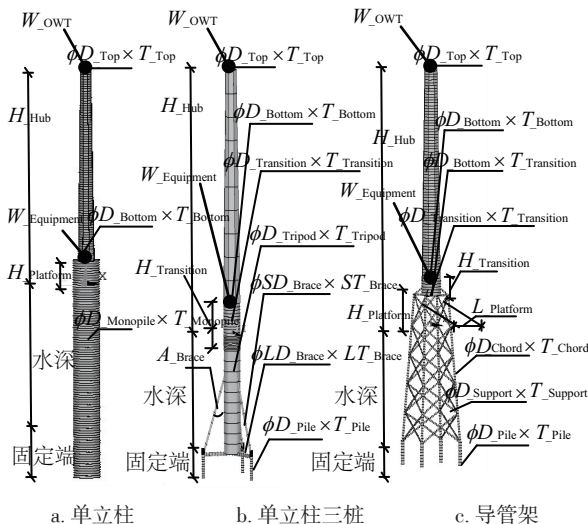


图5 固定式OWT的优化设计变量示意

Fig. 5 Parametric definition of bottom-fixed OWT concepts

3.3 拟建风电场海洋环境设计参数

海洋环境特性参数选取中国南海北部区域,该地区人口密集,能源需求高,传输成本低。详细参数见表 3。

表3 中国南海海洋环境数据

Table 3 Marine environment data of the South China Sea

项目	数值
有效波高(5 a重现期)/m	5.9
有效周期(5 a重现期)/s	8.8
流速(表层,5 a重现期)/(m·s ⁻¹)	1.21
流速(100 m水深,5 a重现期)/(m·s ⁻¹)	0.63

该海域长期海洋统计数据表明:海域波浪主能量激振周期在 4~10 s 范围内。这是评价结构动力激励特征范围的依据之一。

4 优化设计

设计变量、约束条件及目标函数构成研究问题的优化设计的数学模型。

4.1 设计变量

结构优化设计中,结构方案是用一组结构参数来表达的。这些参数中,有些是给定的,称为已知量。另一些是要在设计中确定的,称为设计变量。设计变量是能够用来描述结构方案特征的独立变量,通常用 x_1, x_2, \dots, x_n 表示,它们构成一个 n 维的列向量 X , 即:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T \quad (13)$$

从数学意义上讲设计变量代表的是一个 n 维空间 E^n , 每个分量 x_i 分别代表 n 维空间的一维。而 X 的任一取值 X' 代表该空间的一个点。而从设计的角度来看, X 是所有可行设计方案的综合,它构成一个 n 维的设计空间。凡 X 内的任意一点 X' 代表一个可行设计方案。工程实际中,设计变量的变化区间是有限的。即有:

$$x_{iup} \geq x_i \geq x_{idown} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

其中,由各设计变量的变化区间所界定的空间为探索空间,或称为变量空间。 x_{iup} 为区间上限, x_{idown} 为区间下限,研究问题的设计变量及变量空间范围定义见表 3,由结构特点确定。

4.2 约束条件

工程实际中,任何一个设计几乎都是有限制条件的。这些限制条件在优化设计中称为约束条件。只有满足所有约束条件的设计方案才是可行方案。优化问题总的约束条件可一般性表达为:

$$g_i(X) \leq 0 \text{ 或 } \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

所有约束条件将设计空间分为满足约束条件和满足约束条件两部分, $\bar{g}_i(x) \leq 0$ 是它们的边界。满足约束条件的设计空间(可行设计空间)是一个闭集。记作:

$$R = \{X/g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m\} \quad (16)$$

对设计变量的优化设计将在 R 内进行。

根据风力机动力激励特征,研究问题约束条件如下:

$$\text{柔性设计方案: } f_1 \leq 0.162 \text{ Hz} \quad (17)$$

$$\text{刚柔性设计方案: } 0.242 \leq f_1 \leq 0.485 \text{ Hz} \quad (18)$$

$$\text{刚性设计方案: } f_1 \geq 0.727 \text{ Hz} \quad (19)$$

4.3 目标方程

确定评价设计方案优劣的指标是优化设计的重要决策,它直接影响到优化设计结果的实际价值。海洋工程结构物的建造、施工、安装成本与结构重量密切相关,研究设定结构总重量最小作为优化目标,优化问题整体表述如下,通过非线性规划方法迭代求解。

$$\min f(X), X \in R$$

$$R = \{X/g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m\} \quad (20)$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$$

4.4 优化结果

基于风力机动力约束特征所得到的 3 种固定风电支撑结构可行设计方案下结构优化重量如图 6 所示。

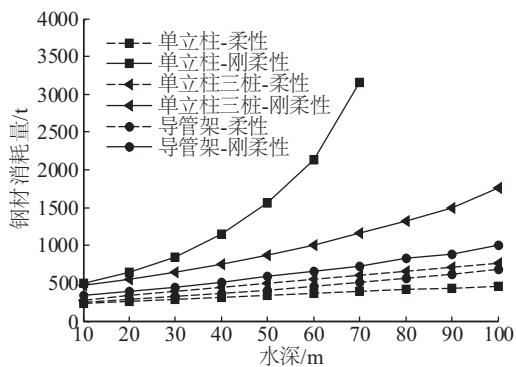


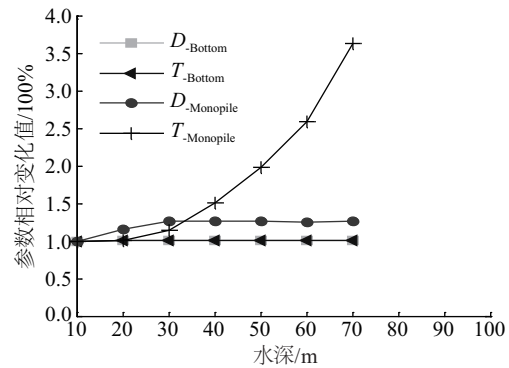
图 6 可行优化方案结构重量

Fig. 6 Optimal weights of feasible schemes

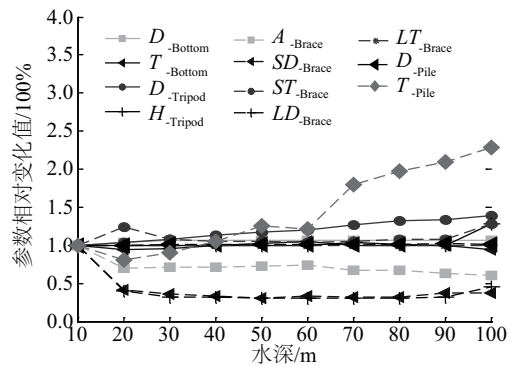
由图 6 可见,3 种支撑体系柔性方案均可得到优化设计的可行解,钢材消耗量接近。刚柔性方案中,单立柱支撑在水深超过 70 m 时不能满足动力特性约束条件,钢材用量增幅明显;导管架式支撑

体系整体用钢量增幅不大,水深适用性良好;单立柱三桩钢材用量随水深增长幅度介于上述两者之间。不同支撑设计参数随水深调整规律如图 7 所示。

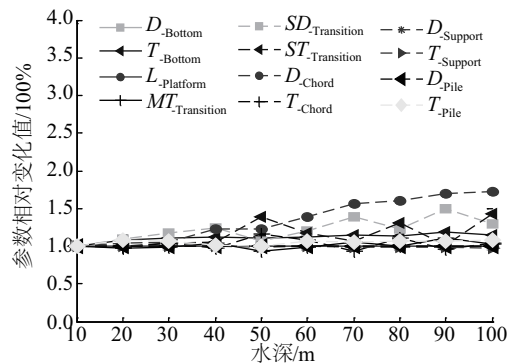
由图 7a 可知,除克服水深所带来的结构用钢量增长外,在刚柔性设计方案中,大功率风力机单立柱结构在 50 m 水深立柱的外径取值接近优化变量设置上限,随水深的增加壁厚大幅增加;图 7b 中单立柱三桩中心柱外径和泥面下桩壁厚为主要增量;



a. 单立柱支撑



b. 单立柱三桩支撑



c. 导管架支撑

图 7 刚柔性方案风电支撑设计参数随水深变化

Fig. 7 Parameters' variation of supports with water depth variation

对于导管架结构,图 7c 所示导管架主腿柱外径为主要增长变量,其次为过渡段的撑杆外径。

5 可靠性评价

5.1 可靠度理论

结构可靠度作为结构性能的量化指标定义为在规定的时间内和规定的条件下,完成预定功能的概率。极限状态是评价结构物处于正常功能状态还是失效状态的标志。整个结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求。其实质是结构工作状态的一个阈值,当工作状态超过这一阈值的时候,则判断结构处于不适用、不耐久或不安全的状态;反之,则结构处于安全、耐久、适用的状态。结构的安全裕度 Z 与结构能力 R 和载荷效应 S 有关,可通过表示 $Z=g(X)=R-S$,其判断标准为:

$$\begin{aligned} Z=R-S < 0, & \text{失效状态} \\ Z=R-S = 0, & \text{极限状态} \\ Z=R-S > 0, & \text{可靠状态} \end{aligned} \tag{21}$$

定义计算失效概率 P_f :

$$P_f=P[g(X)<0]=\int_{g(X)<0}f(X)dX \tag{22}$$

5.2 抽样计算

蒙特卡罗法是目前结构可靠性计算中广泛应用的相对精确方法之一。其求解思路为根据概率的定义用大量试验中该事件发生的频率来估算某事件的概率,对影响可靠性的随机变量进行大量抽取试样,将随机变量 x_i 代入功能函数 $g(x)$ 中,得出一个函数值,若 $g(x)\leq 0$,则在程序中记一次失效,反之不计入,完成一次计算,再产生下一个随机数,重复直至完成预定实验次数。此时失效概率为:

$$P_f=P[g(x)\leq 0]=\lim_{n\rightarrow\infty}\frac{k}{n} \tag{23}$$

结构失效次数占总抽样数的频率即为失效概率。

5.3 可靠性结果

根据优化设计可行方案所确定的结构尺度,假设结构抗力参数:结构外径 D 、壁厚 t 、材料弹性模量 E 和泊松比 ν 符合标准差为 1% 的 Normal 分布;载荷参数 F_x 、 M_x 、 M_y 、 M_z 符合标准为 10% 的 Normal 分布,不同优化可行设计方案下 3 种支撑结构体系对应刚度和强度可靠性指标计算结果分别列于表 4。

表 4 支撑结构可靠性指标

Table 4 Reliability results of support structures

水深/ m	单立柱支撑可靠度/%				单立柱三桩支撑/%				导管架支撑/%			
	柔性		刚柔性		柔性		刚柔性		柔性		刚柔性	
	刚度	强度	刚度	强度	刚度	强度	刚度	强度	刚度	强度	刚度	强度
10	0.00	0.42	46.22	100.00	0.00	0.00	98.74	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00
20	0.00	0.04	79.99	100.00	0.00	0.00	99.91	99.48	0.00	0.00	100.00	100.00
30	0.00	0.00	47.83	100.00	0.00	0.00	100.00	99.86	0.00	0.00	100.00	100.00
40	0.00	0.00	51.37	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00
50	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	99.90	0.00	0.00	100.00	100.00
60	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00
70	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	95.20	0.00	0.00	100.00	100.00
80	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00	100.00	70.07	0.00	0.00	100.00	100.00
90	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00
100	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00

假定工程许用可靠度指标为 95%,由表 4 可见,刚柔性设计方案中,导管架支撑结构体系刚柔性设计方案所确定的结构尺度满足环境荷载作用

下强度和刚度可靠性指标要求。单立柱支撑在 70 m 水深范围内动力特性可行,但结构在外环境荷载作用下刚度不满足要求,过大塔顶位移将影

响风力机工作性能;单立柱三桩支撑体系刚柔性方案刚度满足要求,80 m 水深结构强度可靠性指标低于 95%;研究选用的 3 种典型支撑体系柔性设计方案确定的优化设计可行解强度和刚度都不满足要求。

6 结 论

研究基于 5 MW 大功率风力机动力特性约束,优化确定 10~100 m 水深范围内柔性、刚柔性及刚性设计方案下 3 种典型固定式海上风电支撑——单立柱、单立柱三桩和导管架式结构主尺度。进一步通过概率分析给出优化可行方案在环境激励及抗力特征不确定分布下结构强度、刚度性能可靠度指标,用于综合对比评价。

根据现有施工技术及材料特征所假定的结构参数范围,得到以下结论:

1)导管架式、单立柱三桩支撑结构(水深<100 m)刚柔性设计方案存在优化可行解。导管架式支撑体系整体用钢量增幅不大,水深适用性良好;单立柱支撑在水深超过 70 m 时不能满足风力机动力特性约束条件,且钢材用量增幅明显;单立柱三桩钢材用量介于两者之间。

2)基于风力机动力特性约束所优化确定的单立柱、单立柱三桩及导管架式支撑结构柔性设计方案,其强度和刚度都不满足海洋环境荷载作用下的结构可靠度指标要求。即 5 MW 大功率海上风力机,柔性方案不适用于研究选用的 3 种典型固定式支撑结构设计选型。

3)刚柔性方案为海上固定式大功率风力机支撑结构设计首选。导管架支撑结构随水深增加整体用钢量增幅最小,强度和刚度可靠度指标满足要求,是大功率风力机深水开发的经济可行支撑结构;单立柱三桩强度可靠度指标离散,应注意主要构件连接处结点应力分布特征。单立柱支撑(水深<70 m)刚度控制为设计重点。下一步工作目标为分析基于动力特性优化及结构可靠度指标的结构腐蚀疲劳特性,根据海区长期环境分布特征优化结构参数,并将该方法推广到浮式海上风电支撑选型和方案决策的前期设计中。

[参考文献]

- [1] Athanasia A, Anne- Bénédicte G, Jacopo M. The offshore wind market deployment: Forecasts for 2020, 2030 and impacts on the european supply chain development[J]. *Energy Procedia*, 2012, 24: 2—10.
- [2] Zhang Da, Zhang Xiliang, He Jiankun, et al. Offshore wind energy development in China: Current status and future perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 4673—4684.
- [3] DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine structures[S].
- [4] Ederer N. The right size matters: Investigating the offshore wind turbine market equilibrium[J]. *Energy*, 2014, 68: 910—921.
- [5] Scharff R, Siems M. Monopile foundations for offshore wind turbines-solutions for greater water depth[J]. *Steel Construction*, 2013, 6(1): 47—53.
- [6] Chen I-Wen, Wong Bao-Leng, Lin Yu-Hung, et al. Design and analysis of jacket substructures for offshore wind turbines[J]. *Energies*, 2016, 9(4): 264.
- [7] 李 伟, 张 敏, 刘振亚, 等. 三脚架式海上风电基础结构基频敏感性研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 36(1): 90—95.
- [7] Li Wei, Zhang Min, Liu Zhenya, et al. Fundamental structural frequency analysis for tripod-type offshore wind turbine[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2014, 36(1): 90—95.
- [8] Muskulus M, Schafhirt S. Design optimization of wind turbine support structures—A review[J]. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 2014, 1(1): 12—22.
- [9] Fischer T, Vries W, Rainey P, et al. Offshore support structure optimization by means of integrated design and controls[J]. *Wind Energy*, 2012, 15(1): 99—117.
- [10] Karimirad M. Offshore energy structures for wind power, wave energy and hybrid marine platforms[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014, 33—50.
- [11] Tempel J V, Molenaar D P. Wind turbine structural dynamics—A review of the principles for modern power generation, onshore and offshore[J]. *Wind Engineering*, 2002, 26(4): 211—220.

COMPARATIVE ANALYSIS OF BOTTOM-FIXED SUPPORTS OF LARGE-CAPACITY OFFSHORE WIND TURBINES

Meng Xun^{1,2}, Liu Meng¹, Tang Xiaohui¹, Liu Xiaohan¹

(1. *College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Ocean Engineering Key Laboratory of Shandong Province, Qingdao 266100, China*)

Abstract: The paper presents an evaluation method to assess different design schemes of support structures for large-capacity OWT. Monopile supports, tripod supports as well as lattice supports at different water depths up to 100 m are used as models of optimization based on dynamic excitation of OWT. The reliability properties are calculated by probabilistic design system on account of uncertainty distributions of environmental excitations and structural resistance parameters. According to the research results, the soft-stiff design schemes for fixed OWT supports are economical and feasible compared with soft-soft and stiff-stiff design schemes. Jacket support turns to the best, while there is excessive deflection in monopile support and excessive stress in tripod support. The method would contribute effectively towards selection of different structures and decision of design schemes

Keywords: offshore wind turbines (OWTs); structural optimization; reliability analysis; natural frequencies; monopile supports; tripod supports; lattice supports