

海上风机支撑结构整体优化设计

周映鸣¹, 李晓勇¹, 陈晓庆²

(1. 江苏金风科技有限公司, 盐城 224100; 2. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100089)

摘要: [目的]当前国内海上风电项目在投标阶段通常采用分步迭代设计(Sequentially Iterated Approach, 缩写为 SIA)方法和流程, 风机厂家给出塔架设计并担保工程量, 但最终得到的设计往往是塔架最轻的局部最优设计而不是整体支撑结构最轻的设计。为了降低海上风电平准化度电成本(Levelized Cost of Energy, 缩写为 LCoE), 提出了整体优化设计(Integrated Design Optimization, 缩写为 IDO)的流程和优化列式, 建议在海上风电项目招标阶段业主可要求风机厂家联合设计院编制并提交整体设计投标方案, 把设计域扩大到整体支撑结构进行优化设计, 寻找全局最优的设计。[方法]为了说明 IDO 方法和流程的优势, 以某海上单桩基础项目为例, 分别计算不同塔架直径和单桩基础直径的共 18 种设计方案, 比较了采用 SIA 方法与 IDO 方法获得的结果。[结果]结果表明: IDO 相比 SIA 可在塔架质量增加较小时大幅减少整体支撑结构的质量。[结论]在今后的海上风电工程项目应用中, 可通过 IDO 优化设计方法和流程给出整体支撑结构最轻的设计方案, 为降低海上风电 LCoE 提供可行的解决方案。

关键词: 海上风电; 整体支撑结构; 整体优化设计; 局部最优设计; 全局最优设计

中图分类号: TK83; TK89

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0086-07

Integrated Design Optimization of Offshore Support Structure

ZHOU Yiming¹, LI Xiaoyong¹, CHEN Xiaoqing²

(1. Jiangsu Goldwind Science & Technology Corporation, Yancheng 224100, China;

2. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100089, China)

Abstract: [Introduction] Currently the SIA (Sequential Iterated Approach) method and process are used in China's offshore wind projects bidding stage. The wind turbine manufacture usually presents the tower's design and guarantees the quantity. The whole support structure is hardly the lightest design. This paper aims to present the IDO (Integrated Design Approach) to search for the global optimum for the whole support structure. It also suggests that the wind turbine manufacture and the design institute could present the whole design plan together in the bidding stage to find the global optimum and reduce the offshore LCoE (Levelized Cost of Energy). [Method] To investigate the mechanisms of IDO, this paper compared the results of 18 designs with different tower bottom diameters and monopile diameters. [Result] The results we obtained demonstrate that by IDO the mass of the whole support structure is greatly lighter than the lightest tower design which is obtained by SIA. [Conclusion] This work provides some guidance for the further offshore wind project bidding plan. To reduce the LCoE of offshore wind projects, the IDO method and process could be adopted to obtain the feasible solution with the lightest whole support structure design.

Key words: Offshore wind turbine, whole support structure, integrated design approach, local optimum, global optimum

我国海上风能资源丰富, 近海风能可供开发资

源巨大。海上风场距离负荷中心较近, 消纳能力强, 风电发展逐渐向海上转移。2019年5月24日, 国家发展改革委印发《关于完善风电上网电价政策的通知》(发改价格[2019]882号)^[1], 将海上风电标杆上网电价改为指导价, 新核准海上风电项目全部通过竞争方式确定上网电价, 逐步降低新核准近

收稿日期: 2019-06-08 修回日期: 2019-08-09

基金项目: 金风科技集团创新项目“iDO 海上支撑结构一体化设计开发创新项目”(CX-01-2018-0003); 中国政府/世界银行/全球环境基金“海上风电场度电成本下降技术研究项目”(A5-SG-2018-01)

海风电补贴。这要求整个行业通过产业链协同, 加快技术创新, 打破行业壁垒, 继续完成技术经验积累, 最终达到降低海上风电的平准化度电成本 LCoE 的目的。

受益于风电的技术进步和规模扩大, 风电机组价格、风电开发投资成本及运行维护成本呈现不断下降趋势。从风电机组价格来看, 海上风机支撑结构包括塔架和基础两部分: 风机塔架成本约占海上风电项目投资成本 8%, 海上风机基础主要包括单桩、导管架、高桩承台等不同基础形式, 一般占海上风电项目投资成本的 14% 左右, 即整体支撑结构成本在总建设成本中占比 22% 左右^[2]。因此, 降低海上风电支撑结构成本能够有效降低 LCoE。

欧洲作为海上风电的发源地经过 20 多年的发展, 行业内的参与者都逐渐受益于将“风机-塔架-基础”进行一体化设计对成本的降低。各研究机构、船级社、风机厂商及海工设计制造单位都是一体化设计的积极参与者。RAMBOLL 通过与风机制造商、丹麦技术大学和国家可再生能源中心合作, 用顺序耦合的方式完成基础设计, 考虑海上风机整机系统的动力学行为, 研究了海上风机支撑结构一体化优化设计的方法。DNV GL 在 2014 年 7 月完成并发布 FORCE (FOR Reduced of Cost of Energy) 海上风机基础一体化设计理念, 主要包括了整体设计和放宽频率约束两个方面。研究成果显示, 通过将海上风电机组和基础作为整体的一体化设计方法, 可使 LCoE 至少降低 12%。

当前国内海上风电项目通常采用分步迭代设计 SIA 方法, 风机厂家对海上风机支撑结构进行建模, 考虑风、浪、流等环境因素对风机的作用, 通过载荷计算提取塔架各个截面的极限和疲劳载荷进行塔架的结构校核; 提取基础顶的极限和疲劳载荷给设计院。设计院在基础结构上施加风机厂家提供的极限和疲劳载荷, 并再次考虑浪和流的作用进行载荷计算, 最后进行基础结构校核。在此过程中风机厂家和设计院重复考虑了浪和流的作用。金风科技提出适用于国内的一体化设计方法, 即由风机厂家对海上风机支撑结构进行一体化建模(同时考虑风、浪、流等环境因素对风机的作用)和一体化载荷计算, 提取塔架各个截面的极限和疲劳载荷进行塔架的结构校核; 提取基础各个截面的极限和疲劳

载荷给设计院进行基础的结构校核^[3]。在此过程中不会重复考虑浪和流的作用, 可有效地优化结构尺寸, 降低海上风电支撑结构的重量。

国内采用的分步迭代法和一体化设计方法都是由风机厂家先进行载荷计算和塔架优化设计, 再由设计院进行基础的优化设计。在这种设计流程中, 一般由风机厂家给出塔架设计并担保塔架工程量, 评标过程中会对塔架重量进行排名和评分; 标后详细设计阶段时风机厂家和设计院依次分别对塔架和基础进行优化设计。风机厂家可能会给出塔架最轻的局部最优设计方案, 而塔架最轻的设计往往并不是整体支撑结构最轻的全局最优设计方案。目前已有的研究往往也只对整体支撑结构的一部分(塔架或者基础)进行优化设计, 并且都只考虑某几个典型工况的载荷计算^[4-5], 因此得到的结果具有一定局限性。

本文提出了海上风机支撑结构整体优化设计 IDO 的设计流程和优化列式, 以整体支撑结构为研究对象, 对塔架和基础两个设计域同时进行优化设计。本文以某实际海上工程项目为研究对象, 对海上风机的全部工况进行载荷计算, 比较了 IDO 和 SIA 方法得到的设计结果, 说明 IDO 相比 SIA 可获得整体支撑结构更轻的设计, 有效减少整体工程造价, 为降低海上风电 LCoE 提供可行的解决方案。

文章的组织结构如下: 第一章介绍海上风机载荷计算及塔架、基础结构设计方法, 第二章给出当前海上风电采用的 SIA 分步迭代设计流程, 第三章提出支撑结构 IDO 整体优化设计流程, 第四章根据某海上工程项目比较通过 IDO 和 SIA 得到的设计结果, 最后一章给出了结论和展望。

1 海上风机载荷计算及结构设计

SIA 方法和 IDO 方法在设计海上风机支撑结构时都包含了三部分: 载荷计算、塔架设计和基础设计。

1.1 载荷计算

海上风电支撑结构受到风、浪、流等多种环境载荷的联合作用。行业内大部分风机厂家采用 GH-Bladed 进行一体化建模和载荷计算。

一体化建模包含环境条件输入和整体支撑结构模型搭建两方面^[6-7]。其中, 环境条件包括风资源

参数、海洋水文参数、工程地质参数及其他特殊工况(海冰、地震、台风等);整体支撑结构模型包括机头、塔架、泥面以上结构和基础(也可统称为基础结构)。

载荷计算中考虑了风浪异向作用,根据 IEC 规范需要考虑正常发电、紧急停机、开机、正常停机、空转、维修等多种工况,根据风浪联合分布可分成多达 2 万多个工况。本文在对研究对象进行载荷计算时即对全部工况进行了计算,以保证本文的结论具有一般性应用价值。

1.2 塔架设计

塔架设计中,需要根据 Eurocode、DNVGL 规范及有限元分析对塔架主体及局部结构的极限强度、屈曲强度和疲劳强度校核^[8-9]。极限强度校核包括塔架筒体、塔架法兰、门洞及海缆孔、锚栓笼等局部结构的校核;屈曲强度校核包括塔架筒体和门洞海缆孔等结构的校核;疲劳强度校核包括塔架筒体焊缝、法兰连接螺栓、门框及海缆孔、顶法兰、锚栓笼等结构的校核。

1.3 基础设计

在基础结构主体设计中,需要根据 API 和 DNVGL 规范主要包含极限海况下的强度承载力分析、正常服役工况分析、船撞分析、地震工况分析等^[10-12]。荷载组合中考虑可能出现的最不利水位下的波浪、海流与风机运行载荷的极端组合作用。疲劳强度分析利用 $S-N$ 曲线与 Miner 线性累计损伤理论进行疲劳计算。分别计算各个管节点在疲劳荷载作用下累积损伤程度,利用累积损伤程度评估结构的抗疲劳设计安全性。

2 分步迭代设计流程

当前国内风电行业大都采用的是分步迭代设计 SIA 方法。图 1 给出了海上单桩基础整体支撑结构的示意图。如图 1 所示,整体支撑结构以设计界面为分界,界面以上为塔架,界面以下为基础结构。分步迭代设计 SIA 方法的流程如图 2 所示。首先由设计院提供项目的环境输入;风机厂家根据环境输入给出塔架和基础的初始构型并进行整体建模和载荷计算,在得到最优的塔架后把设计界面处的载荷、塔架构型和频率要求提给设计院;接着设计院在给定载荷和塔架构型的前提下对基础结构进行校核和优化设计,并满足风机厂家给出的频率

要求;最后风机厂家在得到优化的基础结构后判断是否收敛,如果满足则迭代结束,如不满足则重新建模并进行载荷计算。在这里收敛准则包含两类:一类是根据规范对塔架和基础校核的设计准则;另一类是本轮和上轮得到的优化设计的质量和频率差别是否在 1% 以内。

在 SIA 方法中,塔架和基础的设计和优化是依次先后进行的,是两个独立的设计域,目标都是找到各自设计域(塔架或基础)中的最优设计。由于载荷计算和塔架设计在前,因此 SIA 方法的优化目标是塔架最轻的局部最优设计,而不是整体支撑结构最轻的全局最优设计。

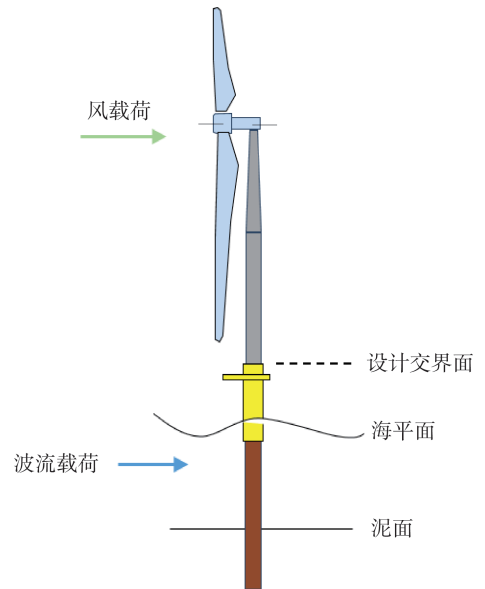


图 1 海上支撑结构示意图

Fig. 1 Offshore support structure

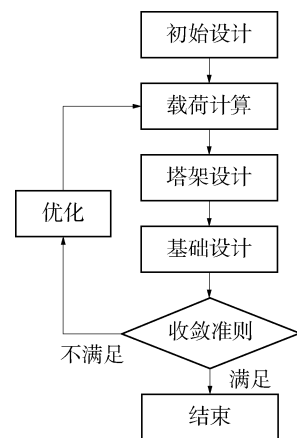


图 2 分步迭代设计方法流程图

Fig. 2 Flow chart of sequential iterative approach

3 整体优化设计流程

图 3 给出了支撑结构整体优化设计 IDO 方法的流程图。如图 3 所示, IDO 与 SIA 方法最大的不同是在载荷计算后同时对塔架和基础结构进行校核和优化设计, 在整个设计域(包括塔架和基础)中寻找整体支撑结构最轻的全局最优设计。因此, 风机厂家和设计院在得到载荷后同时对塔架和基础结构进行优化设计, 站在寻找全局最优设计的角度进行设计。通过 IDO 方法可以降低整体支撑结构的质量, 当前海上支撑结构的材料的采购费基本只考虑质量因素, 因此可以达到降低海上风电 LCoE 的目的。

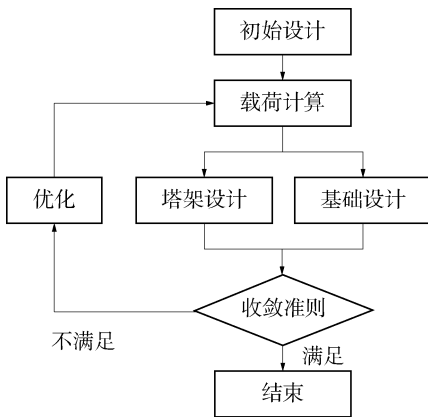


图 3 整体优化设计方法流程

Fig. 3 Flow chart of integrated design approach

4 工程算例

4.1 项目概况

本文以某海上工程项目作为研究对象, 该项目的�主要环境参数如表 1 所示。该项目采用单桩基础无过渡段设计, 塔架材料采用 Q355 钢板, 单桩材料采用 DH36 钢板。本文使用 GH-Bladed 进行建模和载荷计算, 全工况考虑风浪异向作用共含 20 012 个工况; 使用基于 Python 开发的 iDO Tower(由金风科技自主开的塔架设计软件)进行塔架主体结构校核; 使用 SACS 软件进行单桩基础主体结构校核。本项目使用本地云 LCC 载荷计算集群(CPU 共计 5 THz)对全工况进行计算, 平均一轮迭代需要 26 h, 每个设计需要 3~4 轮迭代完成优化设计。

表 1 项目主要环境参数

Tab. 1 Project environment parameters

参 数	数值
年平均空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.163
水深/m	8.3
轮毂中心高度 H/m	101
50 年一遇极限风速 $V_{50}(10 \text{ min 平均值})/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	33
50 年一遇极限风速 $V_{e50}(3 \text{ s 平均值})/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	46.2
年平均风速 $V_{ave}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6.54
15 m/s 风速下湍流强度有效值 I_{eff}	0.143
50 年一遇极端有义波高 H_{s50}/m	3.19
50 年一遇极端谱峰周期 T_{s50}/s	8.52
50 年一遇极端波高 H_{50}/m	4.19
50 年一遇极端波周期 T_{50}/s	8.52
最高天文潮位 HAT/m	2.18
最低天文潮位 LAT/m	-2.12

4.2 实验设计方法

本文对不同塔架构型在设计域选取不同的塔架和单桩直径分别进行设计。一般来说, 风机厂家对不同机型的塔架都有固定的直径选择, 不可随意指定。本文的优化目标为塔架质量最轻(采用 SIA 方法)和整体支撑结构质量最轻(采用 IDO 方法), 设计变量为塔底直径和单桩直径, 分别考虑了一直三锥和三直一锥两种塔架构型。公式(1)为本文采用的优化列式:

$$\text{find: } D_{\text{tower_bottom}}, D_{\text{monopile}}, \text{thickness}$$

$$\text{min: } M_{\text{tower}} \text{ or } M_{\text{tower+monopile}}$$

$$\text{subject to: } \text{SRF}_{\text{ULS_tower}} \geq 1$$

$$\text{SRF}_{\text{FLS_tower}} \geq 1$$

$$\text{UC}_{\text{ULS_foundation}} \leq 1$$

$$\text{Damage}_{\text{FLS_foundation}} \leq 1$$

$$\text{Designed compression force} \leq \text{Allowable}$$

$$\text{Compression bearing capacity}$$

$$\text{Designed deflection of pile} \leq$$

$$\text{Allowable deflection of pile}$$

(1)

式中: $D_{\text{tower_bottom}}$ 为塔底直径; D_{monopile} 为单桩直径; thickness 为塔架和单桩的壁厚; M_{tower} 为塔架质量, 当采用 SIA 方法时为目标函数; $M_{\text{tower+monopile}}$ 为支撑结构质量, 当采用 IDO 方法时为目标函数; $\text{SRF}_{\text{ULS_tower}}$ 和 $\text{SRF}_{\text{FLS_tower}}$ 分别为塔架极限强度和疲劳

强度的强度抵抗系数, 大于 1 表示安全; $UC_{ULS_foundation}$ 为单桩基础的极限校核指数, 小于 1 表示安全; $Damage_{FLS_foundation}$ 为单桩基础的疲劳损伤, 小于 1 表示安全; 约束条件还包括单桩基础的抗压承载力和变形均应小于许用值。

海上塔架一般采用钢制塔筒设计, 由若干段塔筒通过法兰连接而成, 一般顶段为锥段, 底端为直段。图 4 给出了海上钢制塔架的不同构型, 包括一直三锥和三直一锥两种构型。本文采用正交实验抽样方法, 选取不同的塔底直径(5.0 m, 5.5 m 和 6.0 m)和不同的单桩直径(6.0 m, 6.5 m 和 7.0 m)的组合, 单桩直径不小于塔底直径, 当两者直径不一致时采用变径段进行过渡。共计 18 个设计方案进行比较, 所有设计方案的收敛准则相同。公式(2)给出了收敛准则:

$$\frac{(f^n - f^{n-1})}{f^{n-1}} \leq 1\%$$

$$\frac{(M_{xy}^n - M_{xy}^{n-1})}{M_{xy}^{n-1}} \leq 1\% \quad (2)$$

式中: f 为整体支撑结构频率; n 为迭代轮次; M_{xy} 为基础顶弯矩。

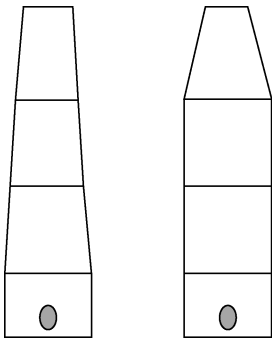


图 4 塔架构型: 一直三锥和三直一锥

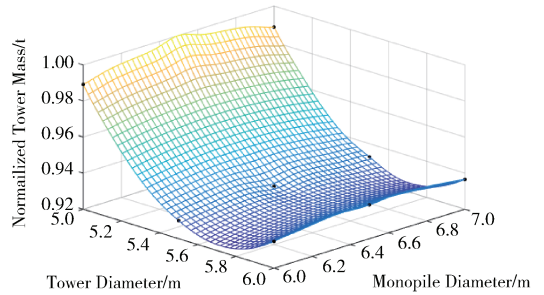
Fig. 4 1-straight-3-conical tower configuration and 3-straight-1-conical tower configuration

4.3 设计结果

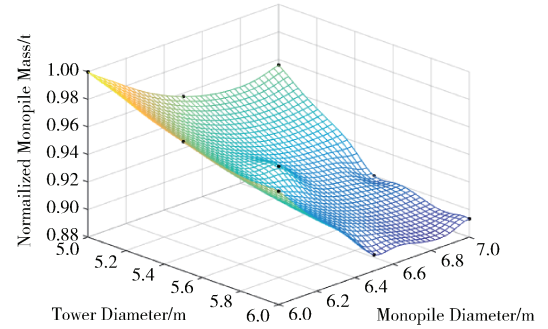
4.3.1 一直三锥塔架构型

一直三锥塔架构型的 9 个设计结果的归一化的质量分布图如图 5 所示。由图 5 可以看出, 塔架最轻的方案不是单桩基础最轻的方案。在一直三锥塔架构型的 9 个设计中, 塔架最轻的方案: D 塔架 = 5.5 m, D 单桩 = 6.0 m, 塔架质量为 213.7 t, 单桩质量为 752.2 t, 整体支撑结构质量为 965.9 t; 整体支撑结构最轻的方案: D 塔架 = 6.0 m, D 单

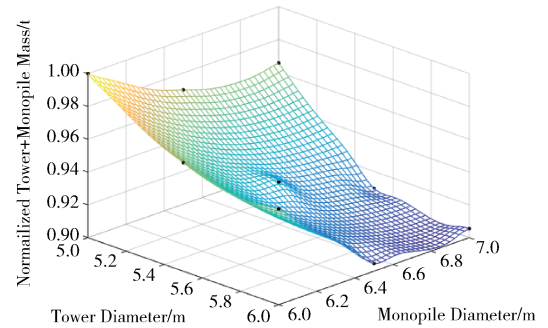
桩 = 6.5 m, 塔架质量为 215.7 t, 单桩质量为 688.8 t, 整体支撑结构质量为 904.5 t。



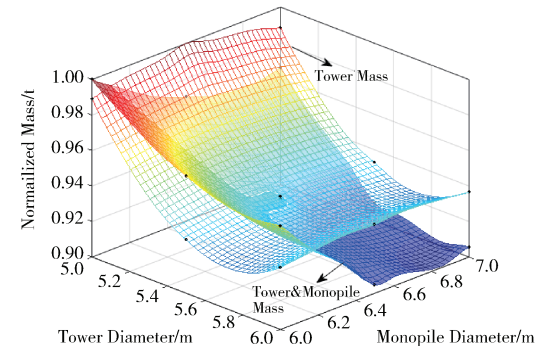
(a) 归一化的塔架质量



(b) 归一化的单桩质量



(c) 归一化的整体支撑结构质量



(d) 归一化的塔架质量 v.s. 整体支撑结构质量

图 5 一直三锥塔架构型结果

Fig. 5 Results of 1 straight 3 conical tower configuration

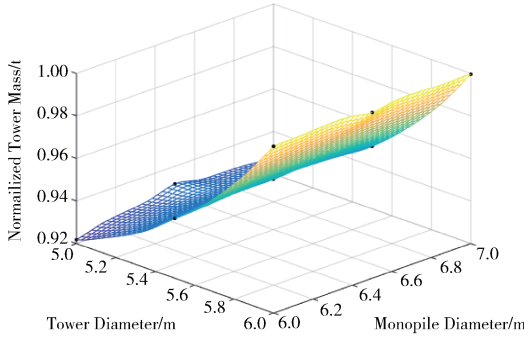
4.3.2 三直一锥塔架构型

三直一锥塔架构型的 9 个设计结果的归一化的质量分布图如图 6 所示。由图 6 可以看出, 塔架最

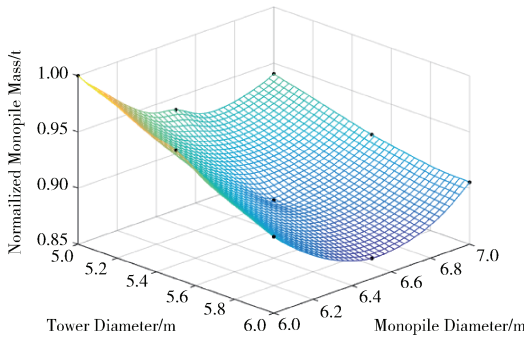
轻的方案也不是单桩基础最轻的方案。在三直一锥塔架构型的 9 个设计中, 塔架最轻的为 D 塔架 = 5.0 m, D 单桩 = 6.0 m, 塔架质量为 224.0 t, 单桩质量为 782.3 t, 整体支撑结构质量为 1 006.3 t; 整体支撑结构最轻的方案: D 塔架 = 6.0 m, D 单桩 = 6.5 m, 塔架 242.5 t, 单桩 679.1 t, 共计 921.6 t。

4.3.3 最优设计比较

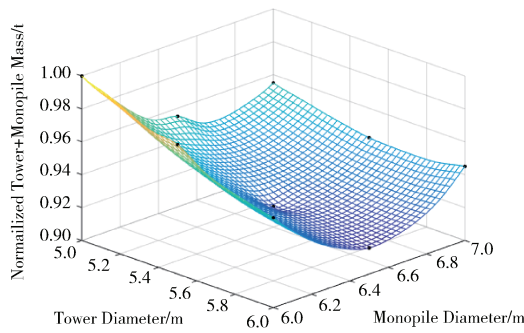
一直三锥和三直一锥两种塔架构型的 18 个设计如图 7 所示。由图 7 可以看到, SIA 方法的目标是找到塔架最轻(局部最优)的设计方案: 一直三锥塔架构型中的 D 塔架 = 5.5 m, D 单桩 = 6.0 m, 对应的塔架质量为 213.7 t, 单桩质量为 752.2 t, 整体支撑结构质量为 965.9 t。IDO 方法的目标是找到整体支撑结构最轻(全局最优)的设计方案: 一直三锥构型中的 D 塔架 = 6.0 m, D 单桩 = 6.5 m, 塔架质量为 215.7 t, 单桩质量为 688.8 t, 整体支撑结构质量为 904.5 t。在本文所研究的项目中通过 SIA 和 IDO 方法得到的塔架最轻的和整体支撑结构最轻的设计的塔架构型都是一直三锥。



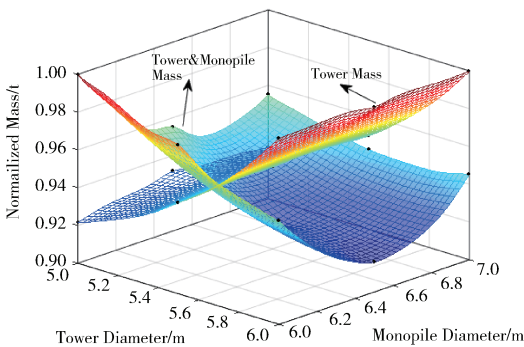
(a) 归一化的塔架质量



(b) 归一化的单桩质量



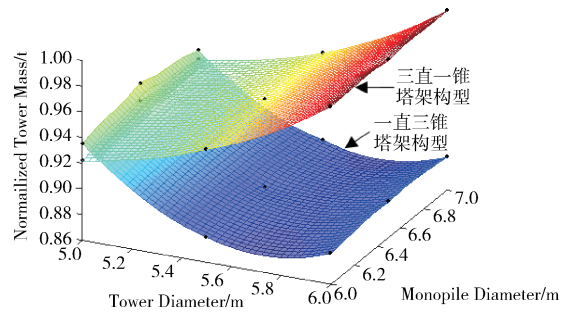
(c) 归一化的整体支撑结构质量



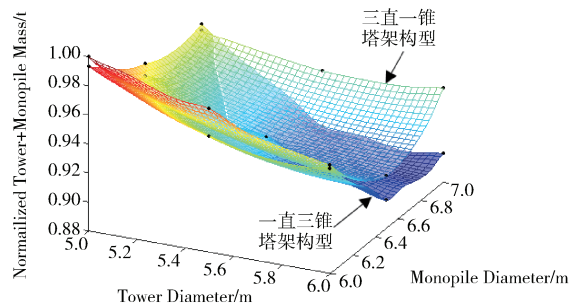
(d) 归一化的塔架质量v.s.整体支撑结构质量

图 6 三直一锥塔架构型结果

Fig. 6 Results of 3 straight 1 conical tower configuration



(a) 归一化的塔架质量



(b) 归一化的整体支撑结构质量

图 7 不同塔架构型的设计对比

Fig. 7 Comparison of all designs with different configuration

当前海上项目招标方法中塔架往往由风机厂家负责采购,单桩由业主负责采购。采用SIA方法比IDO方法获得的设计塔架质量只减少了2 t,整体支撑结构重了61.4 t。以1.2万元/t的材料采购价测算,业主需要为每台风机的支撑结构多支出73.68万元。如果整个风场含50台风机,则共需多支出3 684万元。因此,通过IDO方法寻求整体支撑结构质量最轻的设计可有效降低支撑结构成本,可以有效降低海上风电LCoE。

5 结论

本文针对国内海上风电项目分步迭代方法的弊端,提出了整体优化设计方法和流程,把整体支撑结构作为设计域,站在寻找全局最优设计的角度对塔架和单桩基础同时设计优化,得到了整体支撑结构最轻的设计方案。根据某海上风电项目比较了塔架最轻和整体支撑结构最轻的不同设计方案,结果表明IDO方法相比SIA方法可在塔架质量增加较小时大幅度降低整体支撑结构质量。

通过本文的研究成果,业主在海上风电招标阶段可组织各风机厂家、设计院等根据风机机型及风电场的地质、风资源等情况,对风机及布置、风机基础、塔架的尺寸和构型等进行整体优化设计,给出整体支撑结构最优方案,提交整体设计投标方案并对相关工程量做出承诺。通过IDO方法寻找整体支撑结构最轻的全局最优设计是降低海上风电LCoE的有效方法。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委关于完善风电上网电价政策的通知:发改价格[2019]882号[EB/OL].(2019-5-21)[2019-11-24].http://www.ndrc.gov.cn/zfwz/zfdj/jggg/201905/t20190524_936696.html.
- [2] 翟恩地,张新刚,李荣富.海上风电机组塔架基础一体化设计[J].南方能源建设,2018,5(2):1-7.
- [3] 胡德芳,高俊松.海上风电项目风电机组招标方案及评标办法研究[J].项目管理技术,2019,17(4):125-128.
HU D F, GAO J S. Study on bidding scheme and bidding evaluation method of wind turbine in offshore wind power project[J]. Project Management Technology, 2019, 17(4): 125-128.
- [4] 曹春潼.海上风电机组单桩支撑结构和基础设计研究[J].机电设备,2018,35(6):34-39+45.

CAO C T. Study on Design methods of monopile supporting structure and foundation for offshore wind energy converters [J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2018, 35(6): 34-39+45.

- [5] 田德,陈静,罗涛,等.基于柔性基础模型的海上风电机组支撑结构优化[J].太阳能学报,2019,40(4):1185-1192.
TIAO D, CHEN J, LUO T, et al. Optimization of offshore wind turbine support structures based on flexible foundation models [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica. 2019, 40(4): 1185-1192.
- [6] 赵向前,黄松苗,赵梓杭.一体化理念在国内海上风电开发建设上的应用探究[J].南方能源建设,2014,1(1):1-6.
ZHAO X Q, HUANG S M, ZHAO Z H. Application study of integration concept in domestic offshore wind power construction [J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 1-6.
- [7] International Electrotechnical Commission. Wind turbines: part3: design requirements for offshore wind turbines: IEC 61400-3 [S]. UK: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [8] HERRMANN H, BUCKSCH H. Eurocode 3-design of steel structures [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [9] International Electrotechnical Commission. Wind turbines: part 1: design requirements; IEC 61400-1 [S]. UK: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [10] DNV-GL. Support structures for wind turbines; DNV GL-ST0126 [S]. Norway: DNV-GL, 2016.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.港口工程结构可靠性设计统一标准:GB 50158-2010 [S].北京:中国计划出版社,2010.
- [12] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API RP 2A-WSD [S]. America: API, 2005.

作者简介:



ZHOU Y M

周昶鸣(通信作者)

1985-,男,江苏苏州人,江苏金风科技有限公司海上风电设计研究院工程师,工程力学专业,博士,研究方向:海上风电工程项目设计交付,海上风机支撑结构一体化设计(e-mail)zhou19851014@hotmail.com。

(责任编辑 郑文棠)