

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2026.01.012

基于 Python-SACS 循环优化方法的海上变电站 导管架结构轻量化研究

马煜祥^{1,2}, 何小花^{1,2}, 刘兵³, 蔡东³

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311122; 3. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司江苏分公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 海上变电站作为整个海上风电场的电力传输与信息通讯枢纽, 其安全运行具有至关重要的意义。在当前海上变电站的设计过程中, 为保障结构在复杂海洋环境中的安全性, 往往采用较大的安全余量, 但这会导致工程建造成本增加, 显著降低项目的经济效益。因此, 本文针对某海上变电站, 以极端荷载条件下的在位分析工况为研究基础, 开展了导管架结构轻量化设计研究。首先, 基于结构安全性与轻量化效果的双重原则, 利用 SACS 软件对变电站导管架基础的所有杆件组进行减重效果敏感性分析, 遴选出对结构重量影响较大且对安全性影响较小的杆件组, 并提出三种轻量化设计方案。其次, 提出了海上变电站结构的 Python-SACS 循环优化方法, 基于 Python 程序语言调用 SACS 软件进行循环迭代计算, 通过对不同轻量化设计方案进行优化以获得最佳方案。最后, 针对轻量化设计方案, 对在位分析、吊装分析、坐底稳定性分析、靠船碰撞分析及疲劳分析 5 种工况进行验证, 论证了海上变电站导管架结构优化设计方案具有良好的安全性和可行性。

关键词: 海上变电站; 轻量化; 敏感性分析; Python 优化; 安全校核

中图分类号: P751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2026) 01-0104-10

海上变电站作为海上风电场与陆上电网的枢纽, 具有电压变换与电能传输功能, 能够有效降低电能在线路传输过程中的损耗。随着我国海上风电事业的不断发展, 建设能够安全稳定输出电能的海上变电站, 已成为海上风电开发中的重要环节^[1-4]。现有海上变电站导管架平台的主要结构形式为桩式(单桩、多桩)、重力式、吸力筒式及浮式等^[4]。随着海上变电站基础结构形式建造技术的不断成熟, 海上变电站的应用也在逐渐增多。然而, 在当前设计过程中, 为确保海上变电站能够抵御复杂的海洋环境荷载, 往往设计采用较大的安全余量, 但这也造成工程建造成本的增加。因此, 为了保证工程结构的安全性与经济性, 需要对结构进行轻量化设计, 去除结构的安全冗余^[5]。

目前, 国内外已有较多关于海上变电站结构轻量化设计的研究。KLEIBER M 等^[6]利用结构优化设计软件, 以导管架平台的单元尺寸等作为优化参数, 对导管架平台的结构型式进行了优化设计, 缩短了有限元分析的计算时间, 提升了海洋平台整体优化过程的求解速度。CUI Y 等^[7]提出了一种改进的 k-medoids 聚类方法来寻找轻量化变电站的位置, 并建立了电力系统全寿命周期成本模型。结果表明, 轻量化变电站可以降低海上风电场电气系统的经济成本。REN Z X 等^[8]提出了一种新型海上变电站轻量化技术, 并提出了一种改进的 k-medoids 聚类方法, 优化了不同电压水平的采集系统, 可有效提高海上风电场集电系统的综合性能。ZHANG C 等^[9]提出海上风力机导管架结构概念阶段的拓扑优

收稿日期: 2025-07-23

基金项目: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技立项项目 (KY2021-XNY-02-08)

作者简介: 马煜祥 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海上风电场结构物设计与研究。E-mail: ma_yx3@hdec.com

化设计方法, 并验证了所提出的拓扑优化技术在海上风力机导管架结构设计中的可行性和优越性。王兴国等^[10]在对导管架平台进行优化设计过程中, 将导管架海洋平台视为钢框架结构, 并把多目标优化设计方法用于结构的设计中, 结果表明此方法对海洋平台的设计具有一定参考意义。谭慧^[11]将巨型框架理论与传统导管架平台设计方法相结合, 构建巨型框架平台, 并对其性能、影响因素进行深入研究, 在此基础上, 确定了平台最优参数。夏昊^[12]采用多目标粒子群算法, 同时结合支持向量机技术, 显著提高了优化效率与计算精度, 为大型复杂工程结构的优化问题提供了一种有效的解决思路和方法。万胜利^[13]在国内外海洋工程设计规范及有限元软件的基础上, 通过对平台数据分析、安全评估以及检验技术的研究, 设计了针对钢制导管架海洋平台的结构完整性管理系统的界面, 建立了海洋平台结构优化模型, 并基于代理模型的优化理论完成了优化求解, 优化结果可为海洋平台结构的改造提供理论依据。黄邵军等^[14]采用有限元分析软件 ANSYS 对双层平台进行优化设计, 在满足强度的条件下实现整橇的轻量化, 为工程实践提供设计方案参考。闫斌^[15]依托某深水导管架平台, 采用 ANSYS 有限元分析软件拓扑优化模块, 提出了深水导管架平台逐步迭代拓扑优化方法, 并基于结构分析软件 SACS 进行优化结果验证, 达到了预期的轻量化技术指标。梅华东等^[16]从固定式导管架中心平台组块结构单重的统计数据出发, 通过数值分析方法, 提出海洋平台组块结构重量优化的几种途径。杨飞等^[17]结合 iSIGHT 多学科优化设计软件, 开展水下平台基于船舶规范的轻量化优化工作, 结构优化结果表明大长宽比、大宽深比结构总体变形是在结构设计时需要重点考虑的问题。张宾瑞等^[18]对海上升压站的运行模式分析、环保要求等方面提出了设计优化建议, 海上升压站的设计优化建议可为后续新的海上升压站设计提供参考。

当前大多数轻量化设计的方法是建立在特定优化算法及特定有限元分析软件的基础上, 操作过程复杂, 同时需要掌握一定的理论基础, 对于复杂的模型而言总体来讲耗费时间较长。针对上述问题,

本文提出了一种 Python-SACS 循环优化方法, 对海上变电站导管架结构进行轻量化设计, 并将轻量化后的结构进行多工况下的安全校核, 结果表明轻量化后的海上变电站导管架结构能够满足安全要求。

1 工程概况

1.1 平台概况

本工程项目场址位于广东省惠州市惠东县港口镇附近海域, 场址面积约 64 km², 距离陆地最近距离约 25 km。本工程建设的 220 kV 海上变电站由三部分组成: 桩基础、导管架和上部组块。海上变电站平台共布置 4 根钢管桩, 桩径 3 000 mm, 壁厚 50~100 mm; 导管架由主立柱、撑杆和桩套筒组成, 主立柱采用直径为 1 200~2 300 mm、壁厚 35~70 mm 的钢管, 撑杆采用直径为 356~1 400 mm、壁厚 30~50 mm 的钢管, 套筒直径为 3 300 mm, 壁厚 65 mm。导管架上设置靠船构件、登船平台、J 型管等。上部平台组块 (包括甲板层和电气设备层) 由型钢、槽钢、钢管、钢板等组成, 为三层布置。本工程所在位置海域宽阔, 场区内未见岛屿与礁石分布, 场址中心距离陆域约 28 km。场区水深在 30~42 m 之间, 水下滩面地形较平缓。海上变电站区域的主要环境荷载见表 1。

表 1 环境荷载

编号	参数	数值
1	平均海平面水深/m	40.79
2	百年一遇高水位水深/m	43.21
3	百年一遇低水位水深/m	39.00
4	百年一遇的 10 min 平均风速/(m·s ⁻¹)	47.763
5	百年一遇的最大波高/m	20.500
6	对应百年一遇的周期/s	16.500
7	百年一遇的垂向平均流速/(m·s ⁻¹)	1.110

1.2 结构建模

根据平台实际结构, 在 SACS 中建立如图 1 所示的变电站整体结构模型。建模过程中对关键结构部件进行了如下处理: 上部组块考虑铺板对整体刚度的贡献, 但忽略墙板围护作用以避免低估结构响应; 钢构件节点处的撑杆偏置在其值超过构件直径或高度 1/4 时, 在模型中对其予以精确模拟。导管

架基础中 J 型管、靠船件、内走道等附属构件也在模型中直接建立, 防沉板、牺牲阳极与吊耳等非主体结构部分则通过等效质量的方式施加于相应位置。下部桩基与土体的相互作用通过 SACS PSI 模块模拟, 依据《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法 工作应力设计法》(SY/T 10030—2004) 选用相应的 p - y 、 t - x 、 q - z 曲线模拟桩土相互作用。所有构件的截面属性、材料性质、边界条件均按实际设计资料进行输入。



图 1 海上变电站裙桩式导管架基础示意图

2 轻量化设计思路

本文以极端荷载条件下的在位分析工况为基础, 对导管架结构进行轻量化设计研究, 以该工况下结构的最大应力使用率 (Max Unity Check, Max UC) 为优化阈值, 主要研究思路如下。

(1) 通过对所有杆件组 (Group, GRUP) 进行减重敏感性分析, 筛选出对结构的重量影响较大而且对结构安全性影响较小的杆件组, 然后提出三种轻量化设计方案。

(2) 将每种方案所包含的杆件组通过 Python-SACS 循环优化程序迭代减重, 每迭代循环一次, 杆件组的壁厚 (Wall Thickness, WT) 减去 0.2 cm。在调用程序迭代计算时, 需要保证杆件组的壁厚减少量不得大于原壁厚的 70%; 此外, 杆件组在减重

过程中出现应力使用率 (Unity Check, UC) 大于等于 0.8 的杆件时, 该杆件组退出循环迭代, 壁厚不再减小。

(3) 最终对轻量化设计方案开展多工况安全验证, 涵盖在位分析、吊装分析、坐底稳定性分析、靠船碰撞分析及疲劳分析这五大典型工况, 确保轻量化后的结构模型在所有工况下的 UC 均不超过 1.0, 验证其全工况安全可靠。

针对 Python-SACS 循环优化程序, 本文选取 Python 编程语言实现程序自动调用 SACS 以进行模型优化, Python 作为一个外部端口实现对 SACS 模型的输入数据改写、分析引擎控制及输出信息读取, 建模及计算仍依托 SACS 软件本身进行。

3 轻量化设计

3.1 杆件选取原则

本文对于海上变电站导管架结构杆件的选取原则主要包括两个: 一是减重效果明显, 壁厚变化对结构总重影响显著; 二是结构安全性影响小, 即杆件组 UC 应在壁厚优化前后增长平缓, 强度储备充足, 避免局部刚度削弱影响结构正常运行。在这两个原则基础上, 以极端荷载条件下的在位分析工况为研究基础, 选取相应杆件进行轻量化设计研究。

3.2 减重敏感性分析

根据海上变电站结构信息, 在 SACS 软件中建立有限元模型, 该模型中共有 37 个杆件组, 若全部用来做轻量化分析则会出现计算繁琐等一系列问题, 而且程序调用时由于其约束条件过多难以实现。因此, 需要利用 SACS 软件的 Redesign 预处理试算功能来对所有 GRUP 进行减重敏感度分析, 其中有些杆件组 GRUP 随着壁厚的减小, 其对整体结构减重效果甚微, 有些则减重效果明显。此外, 在利用 SACS 软件 Redesign 功能进行预处理试算时, 需要同时考虑 GRUP 在壁厚减小过程中的 Max UC 是否超限, 若出现 UC 过大的情况, 则该杆件组不可作为减重杆件组。

经过对所有杆件组的预处理试算分析, 每组杆

件的减重效果与减重后的安全性如表 2 所示。

表 2 杆件组减重汇总

GRUP	UC 差值	重量差值/kN	UC 起始值	UC 最终值
Z01	0.15	636.275	0.57	0.72
JX4	0.32	556.197	0.67	0.99
PG3	0.27	438.177	0.71	0.98
JX1	0.33	437.144	0.62	0.95
PG4	0.23	344.933	0.72	0.95
TP6	0.27	319.353	0.52	0.79
JH3	0.32	272.050	0.66	0.98
JX2	0.06	233.753	0.88	0.94
JH1	0.21	205.586	0.37	0.58
TP2	0.19	168.406	0.33	0.52
JH2	0.38	166.390	0.41	0.79
PG0	0.39	159.822	0.47	0.86
TP8	0.19	118.406	0.33	0.52
PG6	0.15	111.200	0.29	0.44
L01	0.25	99.582	0.50	0.75
TP7	0.15	98.416	0.31	0.46
PG2	0.13	92.685	0.82	0.95
PG5	0.15	82.628	0.27	0.42
JH6	0.22	82.404	0.32	0.54
JX5	0.24	82.261	0.47	0.71
PG1	0.37	79.681	0.51	0.88
K01	0.32	63.086	0.24	0.56
JH8	0.28	52.785	0.43	0.71
JH5	0.14	52.586	0.28	0.42
JH4	0.06	46.666	0.11	0.17
PG8	0.30	36.564	0.44	0.74
JX3	0.21	34.730	0.29	0.50
JH7	0.18	28.654	0.33	0.51
PG7	0.32	26.097	0.66	0.98
K04	0.36	22.535	0.45	0.81
L04	0.22	12.974	0.45	0.67
JX6	0.25	11.287	0.51	0.76
K03	0.24	11.138	0.51	0.75
JX7	0.10	11.054	0.27	0.37
TP1	0.01	6.826	0.01	0.02
TPA	0.01	3.052	0.01	0.02
TP9	0.03	2.464	0.05	0.08

由表 2 可知, 杆件组 Z01、JX4、PG3、JX1、PG4、TP6、JH3、JX2、JH1、TP2、JH2 对重量影响较大, 减重均在 160 kN 以上, 从减重效果的角度出发, 应当优先考虑; 而 PG0 以下杆件组优化后减重效果相对较差, 且个别杆件组优化后 Max UC 较大, 因此不再考虑。

从安全性与减重效果的角度去综合考虑, 最终选定 Z01、JX1、JX4、PG3、TP2、TP6、JH1、JH2 八个杆件组为考虑对象, 其余杆件组不再进行处理。

3.3 轻量化设计方案

经过上述分析, 从安全性与轻量化效果两方面出发, 本文总结出几组减重方案, 优化杆件组见图 2。

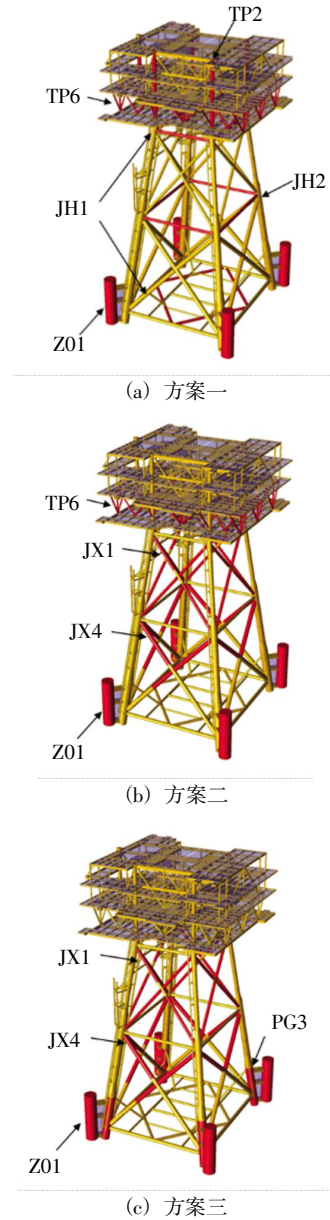


图 2 各方案优化杆件组示意图

方案一, 从安全性的角度出发, 选定 Z01、TP2、TP6、JH1、JH2 杆件组为减重对象, 代入程序进行循环迭代, 每循环一次五个 GRUP 的壁厚同时减少 0.2 cm。在循环过程中, 当任一 GRUP 的 Max UC 达到或者超过 0.8 时, 该 GRUP 退出循环。此外, 无论对于哪个杆件组, 在循环的过程中, 壁厚的减少量最多为原壁厚的 70%。

方案二, 从轻量化效果和安全性角度出发, 本文选定 Z01、JX1、JX4、TP6 杆件组为减重对

象，写入 Python 程序，然后调用 SACS 进行循环计算。

方案三，从轻量化效果的角度出发，本文选取 Z01、JX1、JX4、PG3 杆件组进行轻量化设计。

从三个方面确定不同的减重方案之后，利用第 2 节中的 Python 程序调用 SACS 软件进行循环迭代计算，以获得最佳优化结果。

3.4 轻量化结果

3.4.1 方案一

由表 3 可知，方案一优化后模型重量减少了 1 391.451 kN。综合 JH1、JH2、TP2、TP6、Z01 来看，优化后 MaxUC 为 0.8，对应的壁厚为 2 cm。根据具体计算结果文件可知结构是安全的。减重后在位极端工况的应力云图如图 3 所示。

表 3 方案一减重效果

GRUP		优化前	优化后	差值
JH1	MaxUC 值	0.37	0.49	0.12
	WT 值/cm	2.4	1.6	0.8
JH2	MaxUC 值	0.41	0.8	0.39
	WT 值/cm	3	2	1
TP2	MaxUC 值	0.33	0.47	0.14
	WT 值/cm	2.8	1.8	1
TP6	MaxUC 值	0.52	0.67	0.15
	WT 值/cm	2	1.4	0.6
Z01	MaxUC 值	0.57	0.7	0.13
	WT 值/cm	6.5	4.5	2
自重/kN		29 561.544	28 170.093	1 391.451

For All Active LCs
Mem Result Combined UC

- 1.000+
- 0.750~0.999
- 0.500~0.749
- 0.250~0.499
- 0.00~0.249

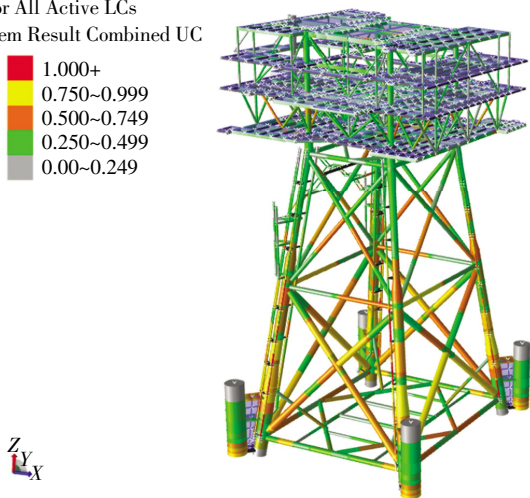


图 3 按照方案一减重后的应力云图

3.4.2 方案二

通过表 4 可以看出，方案二总共减重 1 611.486 kN

(约合 164.27 t)，四个 GRUP 中，Max UC 为 0.87，出现在 JX1 杆件组，结构是安全的。按照方案二对结构进行轻量化设计之后其在位分析极端工况的应力云图如图 4 所示。

表 4 方案二减重效果

GRUP		优化前	优化后	差值
JX1	Max UC 值	0.62	0.87	0.25
	WT 值/cm	3.2	2.4	0.8
JX4	Max UC 值	0.67	0.83	0.16
	WT 值/cm	4.5	3.3	1.2
TP6	Max UC 值	0.52	0.63	0.11
	WT 值/cm	2	1.4	0.6
Z01	Max UC 值	0.57	0.7	0.13
	WT 值/cm	6.5	4.5	2
自重/kN		29 561.544	27 950.058	1 611.486

For All Active LCs
Mem Result Combined UC

- 1.000+
- 0.750~0.999
- 0.500~0.749
- 0.250~0.499
- 0.00~0.249

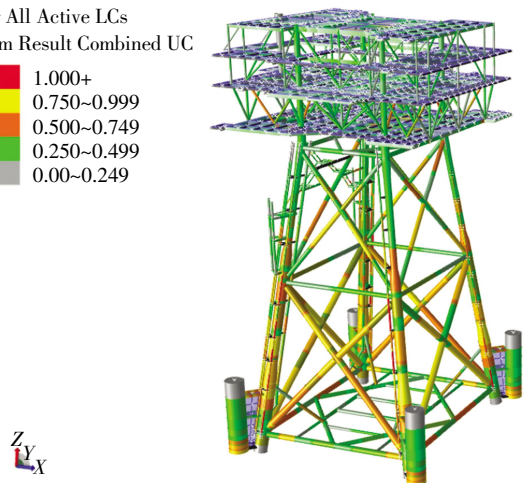


图 4 按照方案二减重后的应力云图

3.4.3 方案三

由表 5 可知，对于方案三而言，经过程序迭代之后重量总共减轻了 1 611.597 kN (约合 164.28 t)，被优化组杆件组的 Max UC 为 JX1 的 0.87，结构是安全的。按照方案三对结构进行轻量化设计之后其在位分析极端工况的应力云图如图 5 所示。

表 5 方案三减重效果

GRUP		优化前	优化后	差值
JX1	Max UC 值	0.62	0.87	0.25
	WT 值/cm	3.2	2.4	0.8
JX4	Max UC 值	0.67	0.83	0.16
	WT 值/cm	4.5	3.3	1.2
PG3	Max UC 值	0.71	0.82	0.11
	WT 值/cm	6.5	5.5	1
Z01	Max UC 值	0.57	0.7	0.13
	WT 值/cm	6.5	4.5	2
自重/kN		29 561.544	27 949.947	1 611.597

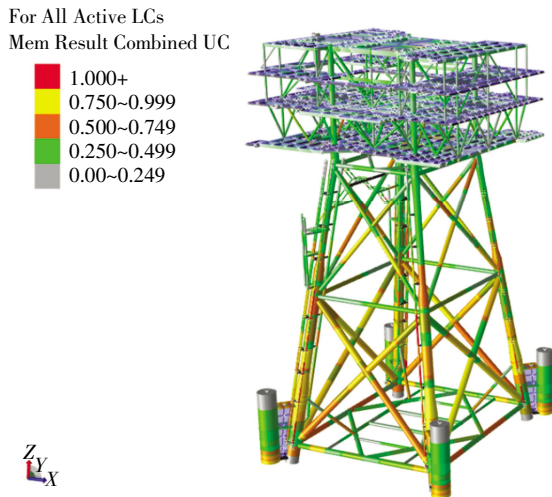


图 5 按照方案三减重后的应力云图

3.4.4 建议方案

由表 6 各方案减重量对比可知, 方案二与方案三的轻量化效果最为理想, 减重效果相对方案一有较大优势 (方案一减重 141.84 t; 方案二减重 164.27 t; 方案三减重 164.28 t)。除此之外, 方案二选取 JX1、JX4、TP6、Z01, 方案三选取 JX1、JX4、PG3、Z01, 方案二与方案三仅 TP6 和 PG3 不同, 但是方案二中杆件组 TP6 的 Max UC 为 0.63, 而方案三 PG3 中杆件的 Max UC 为 0.82, 在减重效果相同的情况下, 从安全性角度出发, 应选择 Max UC 较小的杆件组。

表 6 各方案减重效果对比

方案	优化前自重/kN	优化后自重/kN	差值/kN
方案一	29 561.544	28 170.093	1 391.451
方案二	29 561.544	27 950.058	1 611.486
方案三	29 561.544	27 949.947	1 611.597

综上所述, 在实际工程中, 可以根据实际情况选择方案二或者方案三, 但是从相对更加安全的角度出发, 方案二呈现出更优情况。

4 安全校核

为了验证轻量化设计后结构的安全性, 需依次对优化模型开展在位分析、吊装分析、坐底稳定性校核、靠船碰撞分析及疲劳分析等多工况安全性评估。针对各类失效模式, 应分别明确其极限状态, 主要包括承载能力极限状态 (Ultimate Limit State,

ULS) 与正常使用极限状态 (Serviceability Limit State, SLS)。本工程海上变电站结构在各工况下的设计计算均采用荷载抗力系数法 (Load and Resistance Factor Design, LRFD), 并统一按承载能力极限状态进行校核, 其荷载效应系数取值详见表 7。

表 7 承载能力极限状态下的荷载效应系数

极限状态	固定荷载	可变荷载	环境荷载	变形荷载
ULS-a	1.3	1.3	0.7	1.0
ULS-b	1.0	1.0	1.3	1.0
SLS	1.0	1.0	1.0	1.0

4.1 在位分析

根据方案二基于在位分析极端工况进行迭代计算之后, 对整体结构的受力情况, 杆件的 Max UC 在计算结果文件中进行了查看, 可以发现结构杆件 UC 均小于 1, 说明杆件是安全的, 所反映的结构受力云图如图 4 所示。

此外, 在位分析中, 对结构进行了模态分析, 前十阶模态计算结果如表 8 所示。

表 8 结构自振频率计算结果

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
频率/Hz	0.55	0.705	0.813	1.216	1.414	1.924	2.679	2.805	3.063	3.081

除了结构自振频率之外, 结构的一阶振型沿 X 轴平动, 二阶振型沿 Y 轴平动, 三阶振型绕 Z 轴转动。同时结构 X、Y、Z 三个方向前 100 阶累计质量参与系数接近 100%, 说明对结构进行轻量化设计之后模态的计算是正确的, 结构 X、Y、Z 三个方向的振型图如图 6 所示。

4.2 吊装分析

导管架构件整体 UC 处于较低水平。针对吊点及其贴覆件的校核时, 需计入永久荷载、可变荷载、环境荷载并考虑失效后果系数 $\gamma = 1.3$, 此时荷载组合值最大, 计算可得 Max UC 为 0.53, 上部组块各模块和导管架构件 UC 均未超过 1, 满足安全要求。上部组块和导管架的应力云图如图 7 所示。

4.3 坐底稳定性分析

导管架坐底稳定性主要考虑导管架沉放后, 未打桩情况下的抗倾覆、抗滑移、防沉计算及导管架防沉结构本身的结构强度分析。

以导管架结构底部节点的反力为衡准进行预分

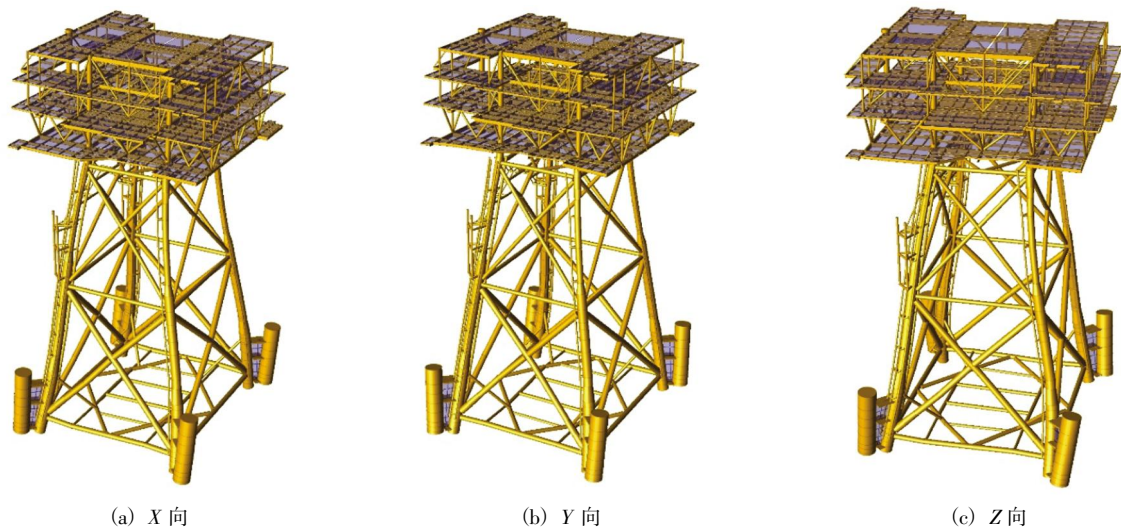


图 6 结构整体一阶二阶三阶振型图

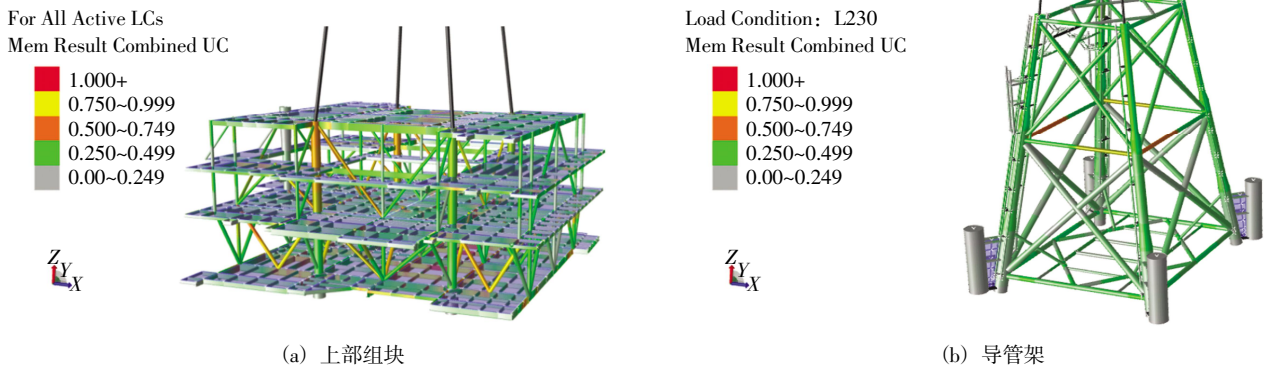


图 7 吊装分析应力云图

析, 试算结果表明, 未插桩状态下导管架坐底稳定性最为危险, 因此取其作为控制构型进行坐底稳定性校核。经过安全验算可知, 结构满足坐底稳定性要求, 结构应力云图如图 8 所示。

4.4 靠船碰撞分析

海上变电站结构靠船工况的碰撞荷载分析采用撞击能量加载的非线性推覆分析方法。由于没有可用数据, 因此采用 SACS 内置的 DNV TN A 202 船舶碰撞力-凹陷变形曲线, 其中对顶靠处采用船舶碰撞曲线 DNV1 来确定靠船碰撞作用力的大小。

正常运营性碰撞工况下, 结构校核为承载能力极限状态; 事故性碰撞工况下, 结构校核为偶然事故极限状态。事故性碰撞工况下, 直接进行倒塌分析, 无杆件和节点发生塑性变化。将靠船碰撞作用力与环境荷载组合施加到结构上进行计算, 应力云图如图 9 所示。

4.5 节点疲劳分析

海上变电站的运营寿命为 30 年, 疲劳设计系数依据《Offshore substations》(DNVGL-ST-0145) 规

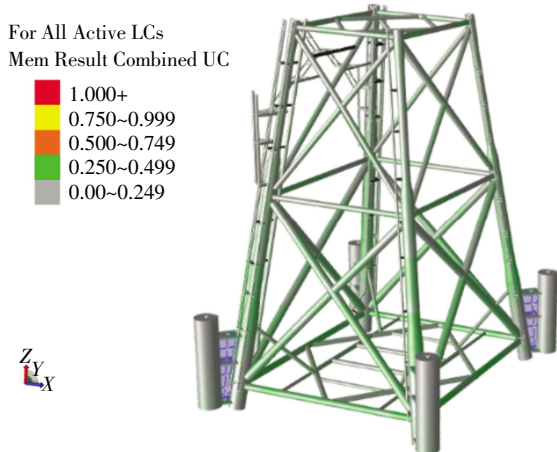


图 8 坐底稳定性分析应力云图

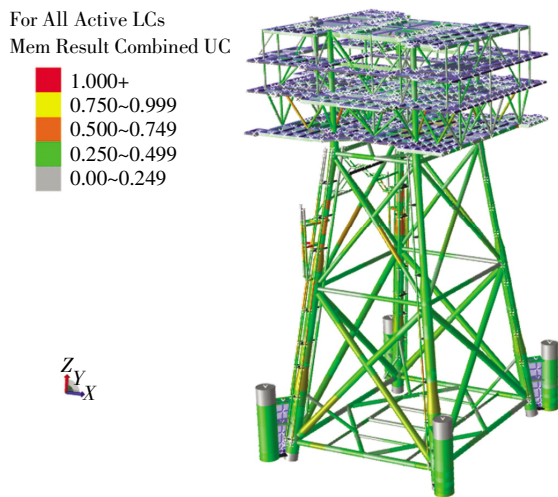


图 9 海上变电站整体最大组合 UC 云图

定, 按无法检修考虑取为 10.0, 则海上变电站结构的疲劳寿命不得小于 300 年。结构的疲劳分析我们一般只考虑主节点, 采用 SACS 软件基于 S-N 曲线和 Miner 线性累计损伤准则进行波浪谱疲劳分析。

结构主节点如图 10 所示, 主节点损伤计算结果云图如图 11 所示。

同时也需要对桩节点进行疲劳校核, 计算可知桩头节点的疲劳寿命最小值为 464.825 9 年, 桩头以下节点的最小疲劳寿命为 264 672.5 年, 均满足设计寿命要求。同时, 对海上变电站导管架结构在疲劳荷载工况下的强度进行了分析校核, 校核结果表明, 平台导管架结构疲劳寿命在设计寿命期内满足要求。



图 10 疲劳计算节点

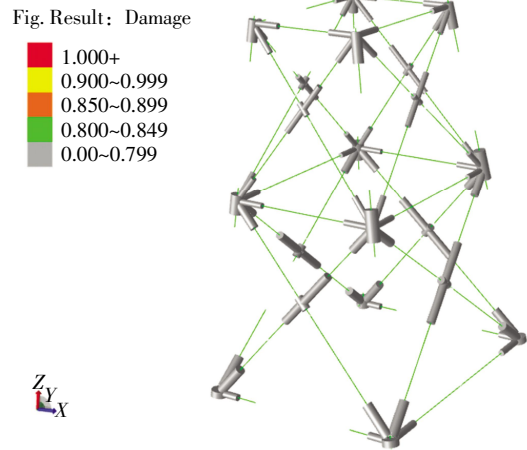


图 11 主节点损伤结果

5 结 论

本文针对海上变电站因安全余量较大导致结构自重增加、建造成本升高的问题, 提出了利用 Python 程序语言调用 SACS 软件对结构进行循环迭代计算的方法, 开展了海上变电站轻量化设计研究, 得到主要结论如下。

(1) 通过 Python 调用 SACS 软件来对结构进行轻量化设计的方法具有良好的实用性, 利用程序语言将需优化的杆件组输入程序进行迭代计算, 能够根据预先设定的量化减重约束原则对结构进行最大程度的减重计算。

(2) 对所有杆件组进行减重敏感性分析之后, 遴选出 8 组对导管架结构重量影响较大且对结构安全影响较小的杆件组, 提出了三种轻量化设计方案: 方案一从安全性的角度考虑; 方案二从轻量化效果与安全性双重原则考虑; 方案三从轻量化效果的角度考虑。结果表明, 方案一减重 141.84 t, 方案二减重 164.27 t, 方案三减重 164.28 t。综合对比分析之后, 最终选定方案二来进行轻量化设计, 该方案能够充分保证结构安全性且减重效果明显, 具有较好的经济效益。

(3) 对模型进行轻量化设计之后, 对在位分析、吊装分析、坐底稳定性校核、靠船碰撞分析、疲劳分析 5 种工况进行了相应的安全校核。校核结果表明, 轻量化设计后的主体结构均满足安全要求, 轻量化设计结果是可靠的。

参考文献:

- [1] 戴琦伟, 於刚节, 殷贵, 等. 海上交流升压变电站轻量化研究[J]. 电工技术, 2021, 23: 1-3.
- [2] 吕国儿, 何俊生, 汤群益, 等. 基于多尺度有限元模型的海上变电站管轴式吊耳强度分析[J]. 中国海洋平台, 2022, 37(6): 96-100, 106.
- [3] 黄玲玲, 汤华, 曹家麟, 等. 交流海上变电站设计相关研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1351-1360.
- [4] 张力, 刘晋超. 海上变电站结构设计探讨[J]. 南方能源建设, 2015, 2(S1): 83-87.
- [5] 张建波. 安全冗余: 海洋石油安全保障的根本原则[J]. 现代职业安全, 2021, 244(12): 68-71.
- [6] KLEIBER M, SIEMASZKO A, STOCKI R. Interactive stability-oriented reliability-based design optimization[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 1999, 168(1-4): 243-253.
- [7] CUI Y, ZHANG K, ZHANG Z, et al. Optimization of electric system for offshore wind farm based on lightweight substation[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 186(5): 012023.
- [8] REN Z X, SONG S, YAN M F, et al. Game optimization of environmental friendly new offshore wind farm power collection system[C]//2021 3RD International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES 2021). Shanghai: IEEE, 2021: 246-251.
- [9] ZHANG C, LONG K, ZHANG J, et al. A topology optimization methodology for the offshore wind turbine jacket structure in the concept phase[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266(4): 112974.
- [10] 王兴国, 周晶, 康海贵, 等. 基于稳定的导管架海洋平台的多目标优化设计[J]. 中国海洋平台, 2001, 16(5-6): 7-11.
- [11] 谭慧. 巨型框架海洋平台设计及优化研究[D]. 济南: 济南大学, 2011.
- [12] 夏昊. 基于粒子群算法和近似模型的结构多目标优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [13] 万胜利. 导管架海洋平台结构安全评估及优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [14] 黄邵军, 赵刚, 马成, 等. 基于有限元分析的双层成橇平台结构优化设计[J]. 石油化工设计, 2020, 37(4): 27-29, 33.
- [15] 闫斌. 深水导管架平台轻量化技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [16] 梅华东, 胡性涛, 文志飞, 等. 海洋平台结构单重及优化[J]. 中国海洋平台, 2022, 37(3): 95-99.
- [17] 杨飞, 汤婧. 基于船舶规范的水秀平台结构优化设计[J]. 结构工程师, 2022, 38(3): 172-178.
- [18] 张宾瑞, 王小刚, 苏磊. 海上升压站设计优化研究[J]. 南方能源建设, 2022, 10(1): 105-111.

Research on Lightweighting of Offshore Substation Jacket Structure Based on Python-SACS Cyclic Optimization Method

MA Yuxiang^{1,2}, HE Xiaohua^{1,2}, LIU Bing³, CAI Dong³

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. Key Laboratory of Far-Shore Wind Power Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 311122, China; 3. China Three Gorges New Energy (Group) Co., Ltd. Jiangsu Branch, Nanjing 210019, China)

Abstract: As the power transmission and information communication hub of the entire offshore wind farm, the safe operation of the offshore substation is of vital importance. In the current design process of offshore substations, large safety margins are often adopted to ensure structural safety in the complex marine environment, which leads to increased construction costs and significantly reduced economic benefits of the project. Therefore, in this study, a lightweight design study was carried out on the jacket structure of an offshore substation based on in-situ analysis under extreme load conditions. First of all, considering the dual principles of structural safety and lightweight efficiency, the SACS software was used to conduct a sensitivity analysis of the weight reduction effect of all the member groups of the substation conduit frame. Member groups with a greater impact on structural weight and a lesser impact on safety were selected, and three lightweight design schemes were proposed. Second, a Python-SACS cyclic optimization method for offshore substation jacket structures was developed, based on invoking the SACS software for cyclic iterative calculations by the Python programming language to obtain the best solution after optimizing different lightweight design. Finally, for the lightweight design scheme, the five working conditions of in-situation analysis, lifting analysis, bottom stability analysis, leaning ship collision analysis and fatigue analysis were verified, and the optimized design scheme of the jacket structure of the offshore substation is proven to exhibit good safety and feasibility.

Keywords: offshore substations; lightweighting; sensitivity analysis; Python optimization; safety calibration