

海上升压站节点强度结果验证分析

Verification Analysis and Optimization of Strength Results of Platform Jacket Structure

孙嘉徽

Jiahui Sun

国家电投集团综合智慧能源科技有限公司 / 国核电力规划设计研究院有限公司 中国·北京 100089

SPIC Integrated Smart Energy Science & Technology Co., Ltd./State Nuclear Electric Power Planning Design & Resherch Institute Co., Ltd., Beijing, 100089, China

摘要: 随着中国海上风电的迅猛发展, 升压站的设计也逐渐趋于完善, 如何能够在保证设计强度满足安全性的前提下, 完成海上升压站优化设计以及降低经济成本的设计目标就成为各设计院的下一步发展方向, 论文以广东省某海上风电场的地质条件以及水文报告等作为环境荷载, 通过 SACS 软件进行整体计算, 并针对 SACS 软件自带的网格模型进行主节点的强度校核, 提取出整体计算中的内力与位移, 并在 ANSYS 中进行建模分析, 对比分析 SACS 中 JointMesh 功能的准确性, 通过结果表明, 该方法能够为较为准确的分析出节点的局部受力情况, 便于对相应节点进行优化。

Abstract: With the rapid development of offshore wind power in China, the design of the booster station area also gradually improve, how to ensure that the design strength satisfy the premise of safety, complete sea booster station better optimization design content of the economy becomes the next development direction of the designing institute, based on the geological conditions of an offshore wind farm in guangdong province as well as hydrological report as environmental load, the overall calculation was carried out by SACS software, and the strength of the master node was checked according to the Mesh model of SACS software. The internal force and displacement in the overall calculation were proposed, and the modeling analysis was carried out in ANSYS to compare and analyze the accuracy of JointMesh function in SACS. The results show that, this method can accurately analyze the local forces of the nodes and facilitate the optimization of the corresponding nodes.

关键词: 结构强度; 海上升压站平台; SACS 软件; ANSYS Workbench 软件

Keywords: structural strength; offshore booster station platform; SACS software; ANSYS Workbench software

DOI: 10.12346/edwch.v1i1.6931

1 引言

随着中国经济的不断发展, 沿海城市的能源紧缺问题也逐渐暴露了出来。由于传统的石油化石燃料已在习近平总书记提出的碳中和以及碳达峰的目标下逐渐降低了能源占比, 而陆上的光伏、风电以及海上风电甚至深远海的漂浮式海上风电开始展现出勃勃的生机^[1]。由于降低补贴电价的政策下达之后, 如何能在平价上网的同时确保收益率就是业主单位以及各设计院不断追寻的目标。对于海上风电, 由于近几年的发展目前获批的风电场都在走向深海(离岸距离通常都超过 10 km)^[2], 目前海上风电场建设处的平均水深为 27.5 m,

平均离岸距离达到 41 km, 长途运输会产生电力的损失, 因此需要升压站将风机所发的 110 kV 电压提升至 220 kV 以减小损失量, 并送至岸上的变电站后再输送至用户手中^[3]。目前海上升压站的设计已经趋于成熟, 如何对细节加以完善, 做到既能保证结构整体稳定性, 又能减少钢材用量, 最终达到降本增效的效果就成了完善设计的下一步重点^[4]。只有能正确的模拟升压站在环境荷载中的受力效果, 才能由宏观到细节的对各节点的受力情况进行分析。论文以一工程案例的升压站模型为基础, 研究采用 SACS 软件进行静力计算, 并利用有限元软件 ANSYS 对主节点网格计算的结果进行对比

【作者简介】孙嘉徽(1994-), 男, 中国辽宁本溪人, 硕士, 助理工程师, 从事海上风电结构设计、海工结构物设计研究。

分析,得出该主节点受力的特性。并通过两者的结果来验证上述方法的可行性,为以后的升压站的整体优化设计,以及细节的完善提供参考。

2 工程案例概述

2.1 工程概述

采用某海上风电场的地质以及环境条件作为环境荷载,该场址涉海面积约为 56 km^2 ,水深范围 $34\sim 39 \text{ m}$,场址中心离岸距离约为 25 km ,项目建设容量为 400 MW ,安装 50 台单机 8 MW 风电机组。

2.2 工程布置

由于海上的气候条件差,施工窗口期短等因素,海上升压站上部组块均采用路上建造、安装、调试等工作,力争降低升压站的总重量便于海上施工^[5]。本升压站上部组块采用四层平面布置,平面尺寸为 $35.8 \text{ m} \times 30.5 \text{ m}$,底层甲板至顶层梁顶高度约为 18 m 。一层甲板为海缆层,布置事故油罐、临时休息室、污水处理设备室, 220 kV 和 35 kV 电缆穿越该层,本层高 7 m 。二层甲板布置主变室、 220 kV GIS

室、 35 kV 开关柜室、低压配电室、继保室、蓄电池室,层高 4.0 m 。三层甲板布置柴油机房、应急配电室、接地变室、通信机房、暖通机房、中控室,层高 5.0 m 。四层甲板布置暖通机房、细水雾系统和淡水储存室、备品备件间,层高取 4.0 m 。顶层甲板布置悬臂吊机 (5 T)、空调室外机、通信天线、气象测风雷达等。

升压站下部导管架采用 4 腿斜桩式导管架结构,表观斜度为 $1:8$,主腿采用直径为 2216 的开口变壁厚圆管,壁厚由 $4.5\sim 7 \text{ cm}$ 不等。上部组块与下部导管架连接点处高程为 15.5 m 。采用 4 根 $\Phi 2000$ 变壁厚开口钢管桩,初步设计桩长为 90 m 入泥深度达 70 m ,壁厚由 $5\sim 8.5 \text{ cm}$ 不等,主腿以及钢管桩均采用 DH36 钢材。

海上升压站的设计主要参考挪威船级社 DNVGL 的一系列相关资料,并配合中国 JTS167—2018 《码头结构设计规范》等国内编制的规范^[6],一般初步设计时主要考虑吊装 Lift 、装船 Loadout 、拖航 Tow 以及在位分析 Inplace 、以及地震 Eqk 等计算。需要包括舾装、地勘、水文、电气、总图等多个专业相互配合。升压站整体结构模型如图 1 所示。

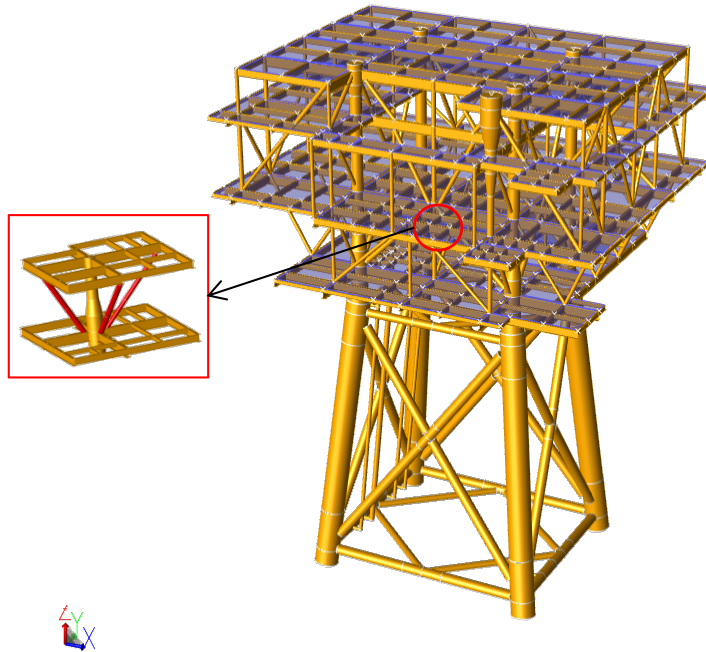


图 1 升压站整体结构模型及 #1003 节点

3 工程实例软件计算方法

3.1 计算软件

整体计算采用了 SACS14.0 海工结构计算软件,能够通过 Joint Mesher 功能划分封闭区域网格,并生成对应的网格 .oci 文件,通过 .oci 文件来直接进行静力计算并分析该点的受力情况。

此次海上升压站平台的主节点受力计算分析采用

$\text{ANSYS Workbench 2020 R1}$,该软件是融合了静力、流体、声场、热立场等众多功能的大型通用有限元分析计算软件,具备强大的建模、网格划分和边界条件设定、线性材料求解、多场耦合分析、后处理以及二次开发的能力^[7]。

3.2 计算方法

首先通过 SACS 软件来计算海上升压站平台的整体受力情况,具体方法为采用 Joint Mesher 功能进行网格划分,将计算节点的上下环板、加劲板均通过此功能绘制出来,采

用 Utilities 功能生成网格模型 .oci 文件, 此文件为进行下一步计算的输入文件, 通过生成的 oci 文件配合海况文件进行静力计算得到该模型整体受力的输出结果。通过查找结果文件, 提取该主节点对应的边界条件输入值, 本次计算采用内力、弯矩与位移作为结构受力的边界条件, 将其加载到模型中来得到 ANSYS 分析结果。

3.3 工程实例计算分析

3.3.1 SACS 整体静力计算

根据海上升压站模型, 针对工程重点关注的主节点的受力情况进行分析, 本次计算采用 #1003 号主节点进行模拟分析。根据水文地质等专业提供的地勘以及水文资料, 通过 SACS 软件计算, 共采用 40 种不同的工况组合情况进行计算, 找出最不利工况来进行模拟分析, 分别包括: 操作高水位 +1 年风 / 波浪 / 海流; 操作低水位 +1 年风 / 波浪 / 海流; 百年极端高水位 + 百年风 / 波浪 / 海流; 百年极端低水位 + 百年风 / 波浪 / 海流以及在不同系数下, 八个方向上的环境工况。再根据之前通过 Joint Mesher 功能得到的含网格的 oci 文件, 进行静力计算得到的结果如图 2 所示。

通过图 2 可以看出, 在这 40 组工况中, 最不利工况出现在 LC=2003, 即极端高水位 + 百年一遇风 + 百年一遇波浪 + 百年一遇海流, 在 90° 方向上作用到升压站平台时产生的荷载组合中, 在此工况下最大的 Mises 应力为 235.5 Mpa, 出现在上环板与腹板连接处, 此处的板单元号为 AD00。该节点其余部位的主要受力情况可以描述为: 在斜撑与上环板的连接处, 形成了一道应力环区域, 由于存在加劲板的效果, 在斜撑下方附近的腹板受力较大, 由腹板与主柱连接根部向传入梁方向其应力作用效果呈现逐渐降低的效果, 各传入梁的受力较小。同时通过查看结果文件来提取

在 2003 工况下, 主节点各边界上的内力、弯矩以及位移来作为接下来 ANSYS 计算的输入边界条件, 得到的输入条件经过整理如表 1 所示。

3.3.2 ANSYS 节点计算分析

海上升压站上部组块主节点 ANSYS 受力计算过程如下:

①通过建模软件制作主节点 #1003 的壳单元模型; ②在 ANSYS 中进行模型的整理, 加载材料属性、网格划分、边界受力条件的设定以及各类约束; ③进行结构的力学计算, 并分析 Von-Mises 应力结果分析。

建立 #1003 壳单元模型导入 ANSYS Workbench 后划分网格, 由于该模型部分结构厚度较薄, 若采用实体单元进行网格划分则需要大量的网格参与计算, 故采用壳单元来进行模拟, 并将模型导入 Workbench 后手动添加材料厚度, 并可以采用较大的网格来进行分析计算, 能够在保证精度的同时节省计算时间, 本次计算主要采用四边形网格, 共计 91932 处节点, 91528 个单元。通过手动控制将不连接的网格进行连接确保计算的准确性, 网格生成结果如图 3 所示。通过不断试算, 最终边界条件采用传入梁部分采用内力与弯矩作为边界条件, 若将内力以及弯矩荷载直接作用到主柱以及斜撑上一方面会引起集中荷载施加处的截面产生应力集中现象, 另一方面会导致整体刚度矩阵的不同, 引起应力奇异, 从而导致模拟效果不理想。针对以上问题采用位移作为边界条件, 并且模拟的斜撑长度达到 3 倍的直径 D, 传入梁长度达到 3 倍的梁高 H, 从而避免边界效应的影响可得到较为准确的模拟结果。

根据上述方法, 将应力与位移加载到各边界条件上, 进行计算并整理得出 Mises 应力结果如图 4 所示。

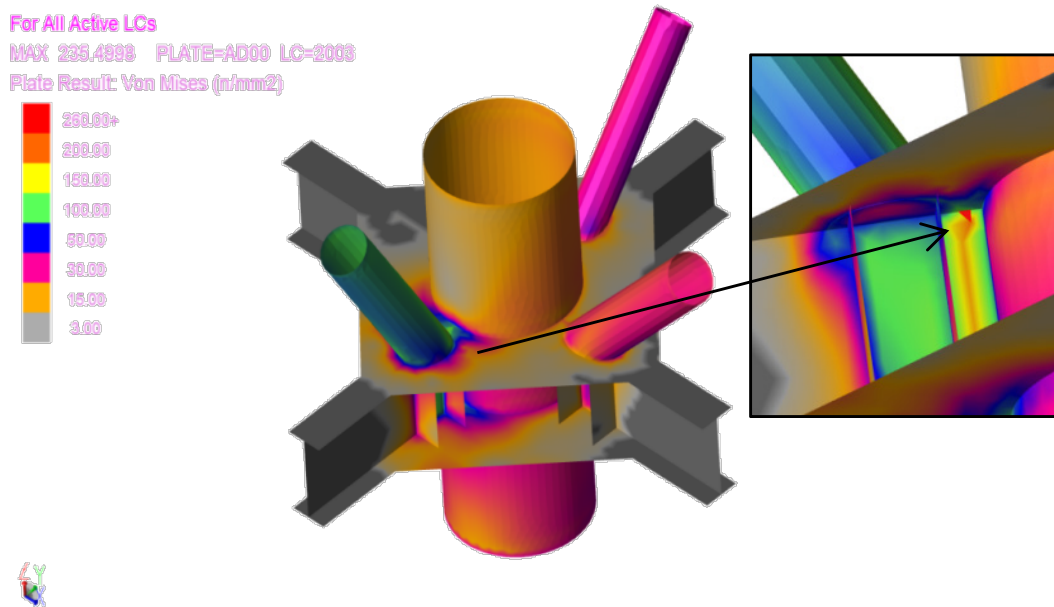


图 2 海上升压站 #1003 节点 SACS 计算结果图

表 1 各边界计算结果整理

节点 #1003	F(KN)			M(KN*M)			D(CM)		
	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z	D _x	D _y	D _z
ANS1	-3712.08	36.51	-58.84	-49.82	-7.97	-11.89	0.024	1.531	-0.239
ANS2	-949.88	-0.73	3.32	-0.67	11.65	-1.35	0.087	1.37	-0.287
ANS3	-156.97	-0.57	136.81	0.04	1.77	-1.24	0.065	1.309	-0.358
ANS4	-647.77	2.71	-226.17	-0.07	95.87	-5.51	0.034	1.311	-0.397
ANS5	-7852.79	584.32	211.24	-155.71	935.13	337.59	0.043	1.156	-0.128
ANS6	-1995.25	10.51	-25.23	-5.47	18.24	-0.02	-0.007	1.362	-0.324
ANS7	-823.98	2.49	3.08	-1.75	2.5	-1.5	0.051	1.403	-0.358
ANS8	-475.52	5.41	265.61	0.02	151.38	11.3	-0.011	1.26	-0.371
ANS9	14.52	0.31	68.82	0.12	-138.3	0.24	0.05	1.294	-0.399

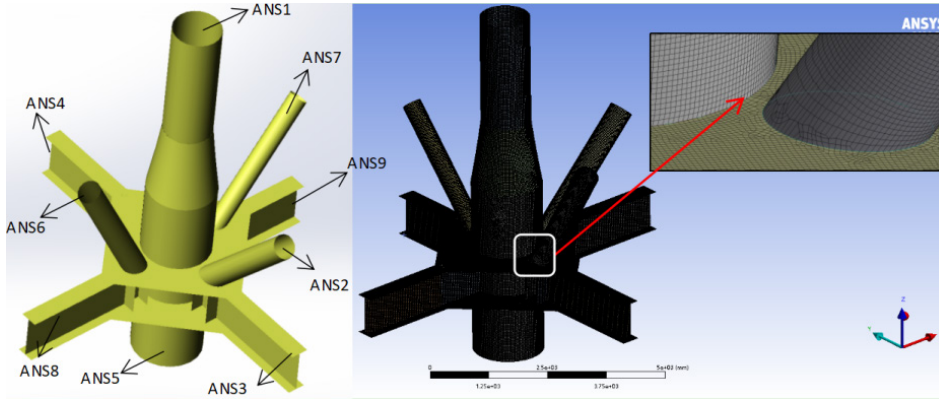


图 3 整体建模及网格划分情况

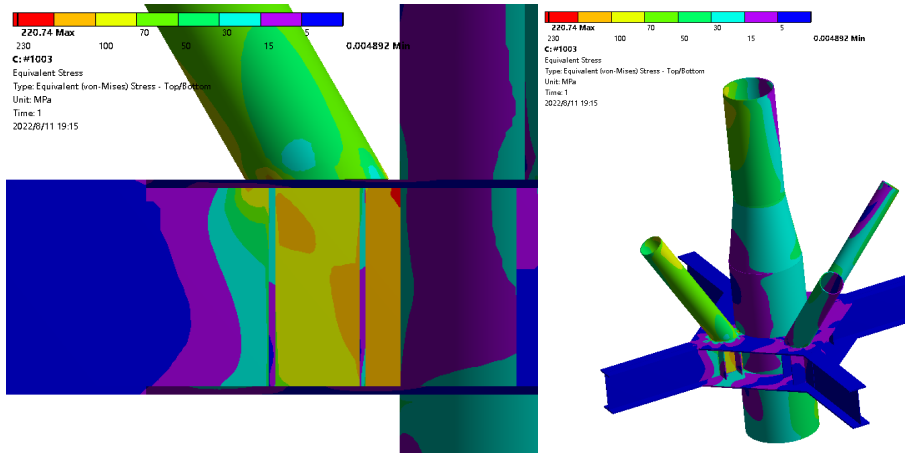


图 4 ANSYS 应力计算结果

4 计算结果对比分析

通过 SACS JointMesher 功能得到的应力结果与 ANSYS 计算得到的结果对比可以看出，两者的应力分布趋势较为一致。由于 LC=2003 工况的外力作用方向为 90° 方向，该节点的主要受力部位为 ANS6 斜撑管与上环板以及主柱连接处，因此应主要关注此处结构的受力结果的验证与特性。在 ANSYS 分析计算中，得到的应力极值出现在 ANS6 斜撑杆与主柱连接处位置，应力极值为 220.08 Mpa，上述结果

与 JointMesher 计算得出的最大极值以及作用位置基本相同。并且在斜撑杆与上环板连接处存在应力渐变扩散区域，变化幅值由斜撑杆根部附近的 50 Mpa 逐渐向上环板外扩散减小至 15 Mpa，由此可见此处 ANSYS 与 JointMesher 两者模拟的应力变化趋势基本相同，在工程设计中，可以将腹板适当进行加厚来进行焊接，通过增厚腹板的操作，来降低腹板所受的应力作用影响。而在上环板、腹板与主柱连接处建议进行挖孔处理，避免产生局部应力集中现象，降低应力作用。

在第一道加劲板与腹板相连接的部分产生了由上环板

至下环板逐渐收窄的应力渐变区域,此处的应力幅值由 100 Mpa 减小至 15 Mpa。通过图 5a) 可以看出, JointMesher 计算结果在加劲板上部存在对称的作用应力区域大小在 50 Mpa 左右,由斜撑柱根部向外扩散,并向下延伸至加劲板底部,加劲板底部两侧区域基本不受力或者受力很小,应力基本在 10 Mpa 以内;在图 5b) 的 ANSYS 分析中同样存在 50 Mpa 左右的应力作用区域,并且可以看出其作用范围延伸至加劲板边缘相比于 JointMesher 的作用范围更大,加劲板底部同样受很小的应力作用,形成两道基本对称的半圆形应力作用区域,由此可以看出,针对此次设计内容,在斜撑焊接投影位置加设两道加劲肋就足够满足受力需求,无需增设更多受力结构。对于加劲板的模拟 ANSYS 与 JointMesher 得到的结果趋势基本相同,可以证明此处应力模拟较为准确。

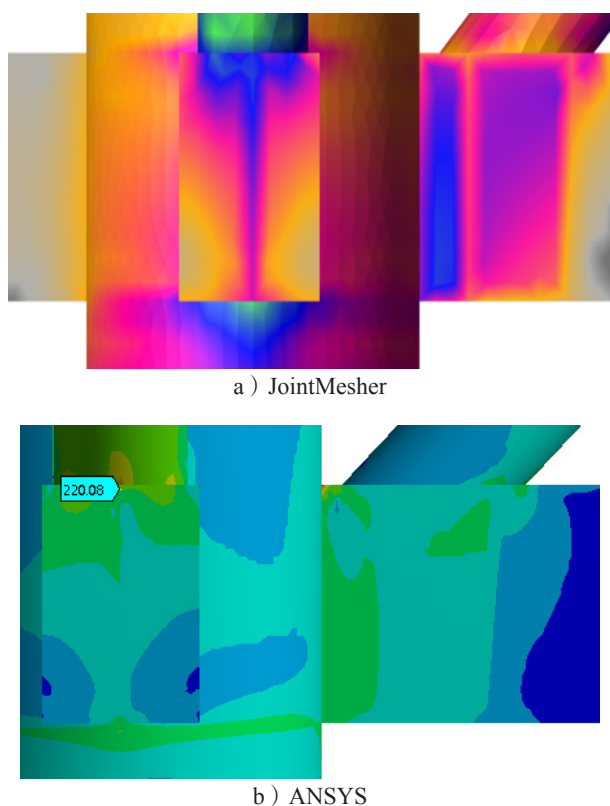


图 5 ANS6 加劲板正视图

虽然两者的应力变化趋势基本相同,但是我们能看出 ANSYS 计算得到的结果应力变化更为细致,究其原因大致分为以下两点:

① ANSYS 是较为专业的有限元分析软件,其采用的有限元数值模拟求解过程会直接影响后续数值计算分析结果的精确性。网格划分涉及的形状及其拓扑类型、单元类型、网格生成质量都会影响计算的求解过程,ANSYS 对于等效点的应力、刚度矩阵、质量矩阵均采用数值积分生成,连续的壳、板、梁的面内采用的是高斯 Gauss 积分,而壳、板、梁单元的厚度则采用了辛普生 (Simpson) 积分^[8]。反

观 SACS 14.0 软件,其主要研究的是结构整体的静力计算,有限元分析并不是其发展的主方向,采用 Joint Mesher 功能划分网格时,软件将体模型全部转化为面网格,且由于软件本身的原因,无法进行更细致的网格调节,导致划分的网格尺寸较大,在进行局部受力分析时精度不及 ANSYS 的分析结果。

② SACS 在进行应力求解时,均是通过对点的作用通过两个点 Joint 之间的杆件模型 Member 将各点的应力及位移相互传递来进行迭代计算,而对于 JointMesher 所采用的网格模型则是将应力由一个点 Joint 延伸出来至划网格后的各网格节点,由于一个点的作用力对整体的影响有限,作用效果不及 ANSYS 将外部条件加载至整个输入界面上,通过整个截面的受力、位移来进行整体静力计算得到的结果更精细,因此会有一些的偏差。

5 结语

通过以上分析可以得出以下结论:虽然 JointMesher 得到的受力结果较为粗糙,但由上述计算结果可以看出,其结构受力大小与应力变化趋势和 ANSYS 计算得到的应力基本相似,在不需要特别精细的结构计算中,JointMesher 功能能够满足设计需求,并给出较为粗略的计算结果。

如果需要出具较为精细的节点计算书或者一些重要结构的设计方案(如吊耳设计)等内容,更甚者需要提取相应结构上精确到一个点处的应力值模拟结果,可以通过上述方法即: SACS 来进行整体计算,得到所需的边界输入条件,再通过建模导入 ANSYS 中进行局部节点的精细计算分析,通过两者相互验证可以得到较为准确的应力变化范围以及各结构处的应力作用值,以便于对结构进行加固和优化设计。

参考文献

- [1] 赵岩,王涛.中国海上风电发展瓶颈及解决措施[J].风能,2015(11):56-59.
- [2] 马悦.海上升压站结构设计及强度分析[J].船舶标准化工程师,2021,54(5):44-52.
- [3] 袁建中,贾献林,汤群益,等.海上升压站平台桩和上部结构柱腿连接强度分析[J].中国海洋平台,2020,35(4):75-80.
- [4] 廖君.海上升压站平台结构极限强度分析[J].建筑结构,2020,50(S1):230-233.
- [5] 范少涛,张力,王立鹤,等.海上升压站的抗震性能分析[J].南方能源建设,2019,6(4):101-105.
- [6] 左晶晶.冰区海上升压站整体结构安全评价[D].大连:大连理工大学,2016.
- [7] 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.
- [8] 许滨,申仲翰.海洋导管架平台的极限强度分析[J].海洋工程,1994(3):8-16.