

海上升压站裙桩型导管架基础设计分析

陈珂, 马兆荣

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]随着国内市场能源供给逐渐往新能源方向发展,海上风电在国家的大力支持下,逐步发展。作为海上风电的核心构筑物,海上升压站有着举足轻重的作用。由于导管架对水深的适应范围较广,目前国内及国际上主流的海上升压站平台,大部分采用导管架结构。根据导管架与桩的连接方式的不同,分为水下裙桩导管架以及常规的桩腿打入式导管架,根据以往经验,裙桩基础一般应用在深水区域(超过40 m)。[方法]针对导管架海上升压站裙桩基础,从施工及设计两个方面进行介绍,在某工程的区域性地质条件下,与常规打入式导管架腿进行了设计计算对比。[结果]分析表明:海上升压站带裙桩的导管架相比目前浅水区常规导管架,减小了桩长以及导管架杆件截面,降低了用钢量,节约了海上升压站的成本。[结论]研究成果对海上升压站的模块化开发具有重要的应用意义。

关键词: 导管架; 海上升压站; 裙桩; 桩靴连接段

中图分类号: TM614; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0093-06

Design Analysis of Offshore Substation with Skirt Pile Jacket Foundation

CHEN Ke, MA Zhaorong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] Offshore wind farm has been gradually developed with the strong support of China government. As the most important structure of offshore wind farm, offshore substations should be paid attention. Due to the wide range adaptability to water depth, most of the foundation of offshore substations has been currently used as jacket. According to the different connection between the jacket and pile, it was divided into skirt pile jacket and conventional jacket. [Method] Based on past experience, the skirt pile jacket was generally used in the deep water area (more than 40 m). In this paper, based on the construction and design of skirt pile jacket, the author compared the design with the conventional jacket under the regional geological conditions of one project. [Result] The results show that compared with the conventional jacket, the skirt pile jacket of offshore substation can reduce the length of the pile and the section of the jacket bar, thus the steel material is reduced and the cost is saved. [Conclusion] The research results have much significance in modularization development of offshore substation.

Key words: jacket; offshore substation; skirt pile jacket; pile shoe

随着国家“十三五”规划中对国家能源政策的指引,海上风电因其清洁、安全、开发效率高等优势在新能源领域迎来了蓬勃发展。当风电场容量在200~300 MW,离岸距离在15 km以上时,一般需设置海上升压站,以更高等级的电压通过海缆输电至陆上电网,目前常规的海上升压站以导管架基础为主。

对于导管架基础来说,根据导管架与桩的连接方式的不同,分为水下裙桩导管架以及常规的桩腿打入式导管架,目前在风电领域,水下裙桩导管架较少,普遍为桩腿打入式导管架,裙桩导管架主要用于深水石油平台^[1]。而对这两种形式的导管架基础进行系统的介绍以及比较的相关文献较少,在目前施工设备取得进步的大环境下,因此有必要针对地质情况不佳的浅水区域研究裙桩导管架基础的适用性,以降低海上升压站的成本。本文将主要对裙桩导管架基础进行简单的介绍及分析,并在设计与施工方面与常规导管架基

收稿日期: 2018-01-29 修回日期: 2018-04-18

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上升压站的设计、故障可靠性分析及设备选型”(EX01601W)

础进行相关的比较。^[2-6]

1 海上升压站导管架基础简介

本文以一特定的导管架基础作为方案介绍的模型,并且在一定范围内具有代表性。裙桩导管架基础与普通导管架基础布置分别如图1、图2所示。考虑上部组块结构布置形式完全一致,并且其主腿与导管架或桩的连接处,在两个方向的间距均为 $16\text{ m} \times 16\text{ m}$,为便于比较,在两种导管架基础布置图中,导管架底部根开均为 $26\text{ m} \times 26\text{ m}$,其海况与地质均保持一致。考虑到常规导管架形式已经非常普遍,下面主要就裙桩导管架的关键位置进行一些介绍,其余位置均与常规导管架类似。^[7]

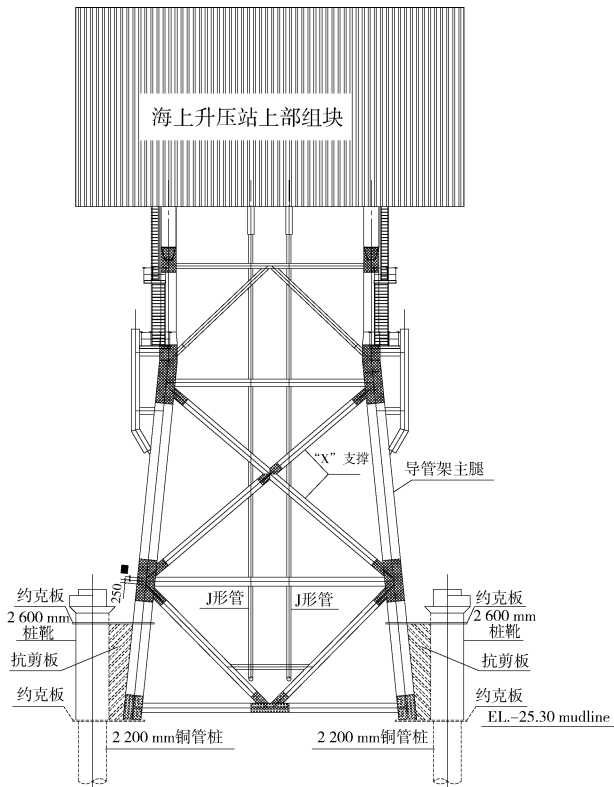


图1 裙桩导管架基础布置图

Fig. 1 Foundation layout of skirt pile jacket

裙桩导管架相比常规导管架,其最大的不同点为增加了裙桩系统^[8],其主要由5大部分组成:套管及支撑结构;灌浆及其控制系统;封隔器及其控制系统;卡桩器及其控制系统;桩管结构。这5部分的构成在文献[8]中已经进行了详细阐述,在此不再进行赘述,不过在海上风电领域,

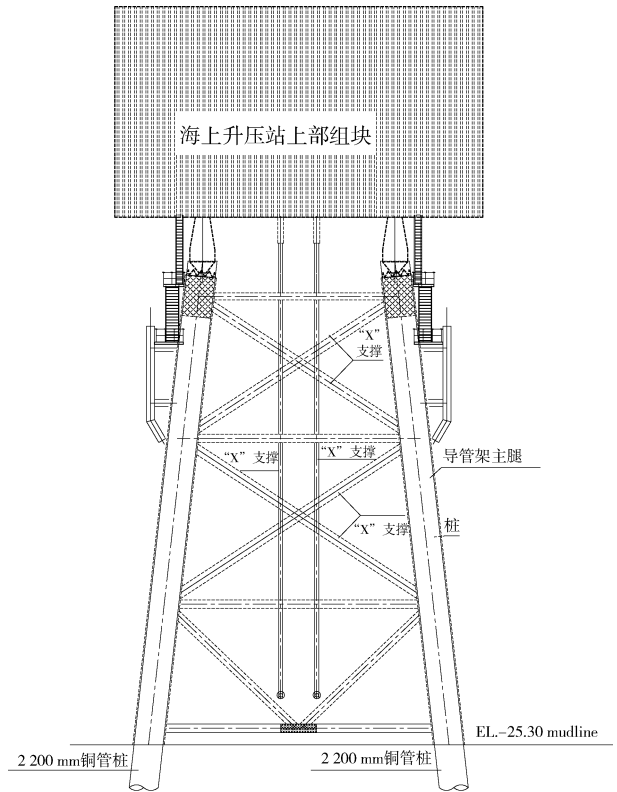


图2 常规导管架基础布置图

Fig. 2 Foundation layout of conventional jacket

随着灌浆系统的发展,其中一些领域得到了改进。套管及支撑结构中的套管筒体、剪力板、YOKE板和裙板在受力过程中,其应力状态较为复杂,应力集中明显,板件及焊缝均需要进行详细的有限元计算,包括极限强度,疲劳使用年限等,通常情况下该处焊缝在焊接完成后需要在一定长度内打磨,以满足平台疲劳使用年限的要求。裙装套筒与钢管桩之间采用灌浆链接,套筒内部设置的导向块用以避免打桩过程中,对灌浆系统的破坏。剪力键虽然是作为套筒的一部分,但其主要作用是为了增大灌浆后环形空间浆体与套管和桩管之间的附着力,为灌浆连接段提供承载能力。封隔器主要用于保证灌浆过程中高强灌浆材料的封堵,避免漏浆,造成浪费以及保证灌浆连接段的质量,在海上风电领域,目前常用的封隔器均为自适应形式的橡胶材料,不需要采用特别的装备对其进行充气,在灌浆过程中能够自行膨胀,封堵套筒与钢管桩之间的空隙。目前灌浆管线、灌浆控制系统、套管环形空间一般为1用1备。石油平台常见的裙装系统中,每个主导管处的裙

装套管均安装液压控制的卡桩器,由于石油平台主要在深水区域进行裙装系统的设计,考虑采用卡桩器进行调平比较方便。但在海上风电领域,目前25~35 m水深左右的海上升压站在南海比较常见,并且近年来,海上风电蓬勃发展也带动了一大批船级设备以及施工装备的发展,在此种情况下,采用裙装套筒上的喇叭口进行桩的导向之后,待桩进入套筒之后,利用套筒内的一些导向块也能保证桩的垂直度以及定位精度,后续调平还可以利用灌浆段浆体的厚度进行调整,因此卡桩器在不考虑其使用的情况下,如果也能满足施工定位以及精度的要求,可以考虑取消,以便节省成本。

常规导管架基础与裙桩导管架基础均采用后桩法^[9],常规导管架在导管架定位之后,桩从导管架腿打入之后,进行桩腿与导管架之间的连接;对于裙桩导管架,在导管架就位之后,采用桩从桩靴中打入的方式,待到达设计桩长之后,进行桩靴与桩之间的连接。

对于裙桩导管架基础来说,需考虑水下灌浆,在施工时需要考虑水下作业,并且桩基定位上所需花费的时间也更长,同时在桩靴这个位置,其相对常规导管架来说,更加复杂,施工周期更长。常规导管架目前在海油领域施工也更加成熟,在施工安装方面还是具有明显的优势。但在海上风电领域,灌浆技术为常规操作项目,技术和施工都比较成熟,同时,考虑目前海上升压站如果在地质构造较差区域,表层淤泥土较厚,导致桩径比较大,如果此时采用常规导管架基础,将导致导管架的主腿直径较大,相应的也不得不将斜撑的直径加大,对于水深越来越深的情况,整个导管架在材料工程量上增大较多,并且在安装制作上增大了难度,在地质较差区域对裙桩导管架的使用有着更迫切的需求^[10]。目前裙桩导管架海上升压站在国内还没有已建工程,对在浅水区域采用裙桩导管架基础的介绍也相对较少;而在国外目前已经有少部分风场在20~30 m水深区域采用了裙桩导管架基础,英国2013年建成的West of Duddon Sands风场海上升压站水深为19 m,德国2014年建成的Borkum Riffgrund I风场海上升压站水深约为24 m,因此有必要对裙桩导管架基础进行进一步的分析,以确定其适用性,经济性以及施工性能。

2 模态分析

本文分别对相同上部组块的海上升压站采用两种基础进行振型分析,根据地质情况以及计算的承载力,选用2 200 mm的钢管桩进行对比,下图分别列出了两种导管架基础的前两阶模态,如图3~图6所示:

MODE 1 FREQ. 0.748 HZ PERIOD 1.337 SECS
MAX GLOBAL DEFL. AT 5001 WITH DX = 2.989, DY = 1.606, DZ = -0.068

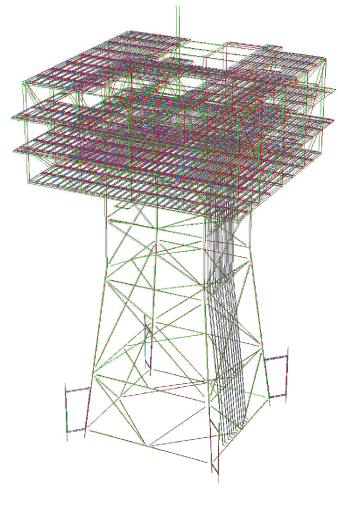


图3 裙桩导管架 第一振型($t = 1.337$ s)

Fig. 3 First mode of skirt-pile jacket ($t = 1.337$ s)

MODE 2 FREQ. 0.750 HZ PERIOD 1.334 SECS
MAX GLOBAL DEFL. AT 5001 WITH DX = -1.531, DY = 2.574, DZ = -0.536

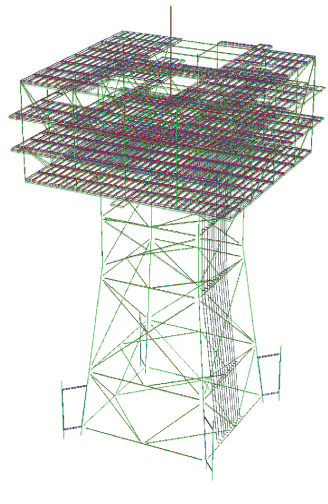


图4 裙桩导管架 第二振型($t = 1.334$ s)

Fig. 4 Second mode of skirt-pile jacket ($t = 1.334$ s)

Active Structure
MODE 1 FREQ. 0.811 HZ PERIOD 1.234 SECS

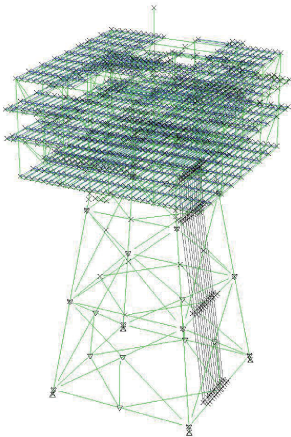


图5 常规导管架 第一振型 ($t = 1.234 \text{ s}$)

Fig. 5 First mode of conventional jacket ($t = 1.234 \text{ s}$)

Active Structure
MODE 2 FREQ. 0.844 HZ PERIOD 1.185 SECS

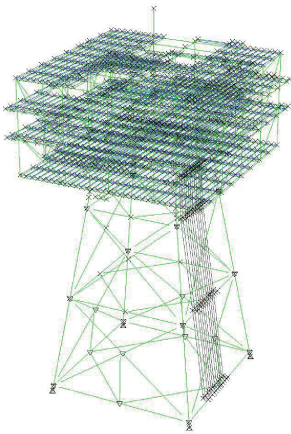


图6 常规导管架 第二振型 ($t = 1.185 \text{ s}$)

Fig. 6 Second mode of conventional jacket ($t = 1.185 \text{ s}$)

从图中可以看出,两种导管架在根开基本差不多的情况下,桩径、桩长及对应的地质钻孔情况也相同的情况下,常规导管架的刚度相对应的会增大,但相差不太远,都能满足结构的受力要求。本项目按照极端工况下,主要杆件(包括主腿以及斜撑)的UC值在0.8左右进行控制,在考虑疲劳使用年限均满足设计要求最小值的前提下,仅仅从模型钢材用钢量考虑,在25 m水深的情况下,裙

桩导管架约比普通导管架用钢量少200 t左右(包括桩的用钢量)。

3 裙桩导管架基础详细分析

对于裙桩导管架基础来说,其桩靴处的详细分析是非常重要的,本文对桩靴处的节点在一定的海况条件下进行分析,以证明裙桩导管架在浅水区域的适用性。

3.1 桩靴连接段节点设计

本工程在可研阶段考虑钢管桩嵌岩打入的风险,考虑增大桩的直径,减少桩的打入长度来满足桩的抗压抗拔要求,为了减少桩腿的直径以及桩本身的长度,考虑在与导管架连接区域采用桩靴的形式,钢管桩通过桩靴打入岩层,因此有必要对桩靴连接部分进行有限元分析。

3.2 有限元模型的建立

钢管桩套筒与导管架的主腿连接,采用一块竖向抗剪板以及一对约克板分别布置在抗剪板的上下层,用来连接导管架主腿与钢管桩套筒。由于该节点处比较复杂,采用SACS不能对节点区域进行准确的计算,因此采用大型通用有限元软件ANSYS对局部进行分析,采用SHELL181以及SOLID185单元对模型中的杆件进行模拟,SHELL181用于模拟钢材,SOLID185用于模拟套筒与桩之间的灌浆料,单元切分尺寸按照 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 进行划分。对于有限元模型中的边界条件,考虑在导管架主腿处固定其6个自由度,其余位置均自由,如下图所示。具体建模过程在此不再进行赘述,模型建立如图7所示。

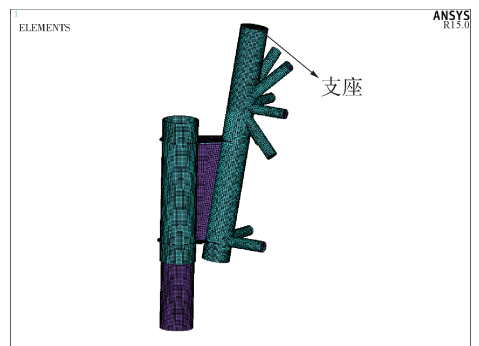


图7 桩靴连接节点有限元模型

Fig. 7 FE model of connection joint

3.3 有限元模型荷载施加

采用SACS中杆件的内力,选取最不利工况,

桩头处荷载(轴力)最大时的工况为 1314 号工况, 通过对 SACS 模型中局部杆件进行截取, 对图中模型杆件处以及桩头处进行荷载施加, 具体节点位置如图 8 所示, 荷载列表如表 1 所示。

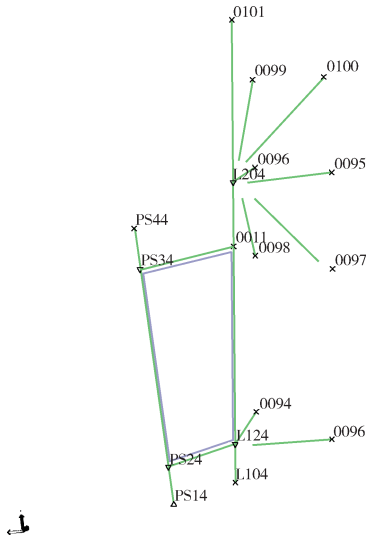


图 8 SACS 模型节点编号

Fig. 8 SACS model node number

3.4 有限元模型计算结果

通过对 ANSYS 有限元模型进行计算, 计算结果中的 UC 值最大为 $203.3/345 = 0.589$, 满足强度要求。最大变形为 16 mm, 与整体模型中桩顶位移基本一致, 满足桩顶的变形要求。具体计算结果如图 9~图 11 所示。

由计算可知, 结构在极限承载能力状态下, 应力及变形均满足设计安全性能的要求。

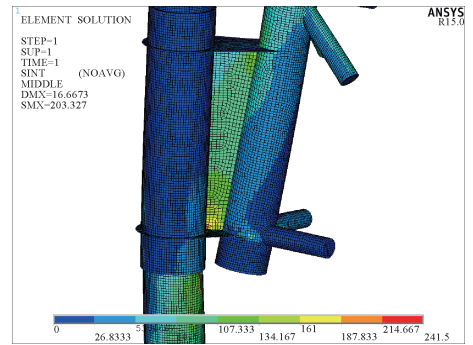


图 9 局部应力云图

Fig. 9 Local stress contour

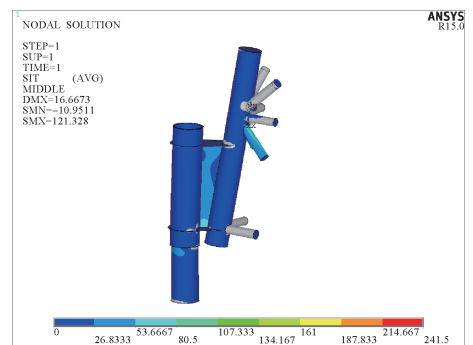


图 10 整体应力云图(均值)

Fig. 10 Global stress contour(mean value)

4 结论

本文通过对裙桩导管架进行介绍, 并与常规导管架在构成以及刚度上进行对比, 在此基础上对裙桩导管架裙桩基础部分在极限承载能力状态下进行详细分析, 证明其适用性。采用裙桩导管架基础,

表 1 桩头以及各杆件处荷载

Tab. 1 Load on pile head and other relative joint

节点	工况号	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	$M_x/(kN \cdot m)$	$M_y/(kN \cdot m)$	$M_z/(kN \cdot m)$
桩头处(PS14)	1 314	-5 874.500	5 187.4	-22 133.0	17 601.7	18 668.6	0.311 0
杆件处(93)	1 314	-1 090.270	-28.581 5	-8.763 0	38.060 1	-49.905 4	-14.047 2
杆件处(94)	1 314	-1 931.840	-8.603 4	7.442 2	-30.442 0	-81.820 4	35.006 7
杆件处(95)	1 314	-1 281.130	-63.109 1	-15.913 8	-56.090 2	-93.833 4	-55.010 0
杆件处(96)	1 314	-1 505.660	-64.384 7	21.603 6	60.265 6	-130.046 0	75.323 8
杆件处(97)	1 314	2 068.196	25.719 5	14.778 9	30.592 9	-79.890 6	-48.167 6
杆件处(98)	1 314	2 990.172	-21.615 3	4.949 5	-4.986 0	-42.375 6	17.308 8
杆件处(99)	1 314	-4 036.830	-97.527 8	-2.524 8	41.807 6	-131.996 0	100.863 7
杆件处(100)	1 314	-3 367.670	78.347 5	-4.448 1	-64.752 1	-110.040 0	-63.073 3
杆件处(101)	1 314	-12 409.400	-20.935 5	103.715 3	419.564 8	-1 866.300 0	298.308 6

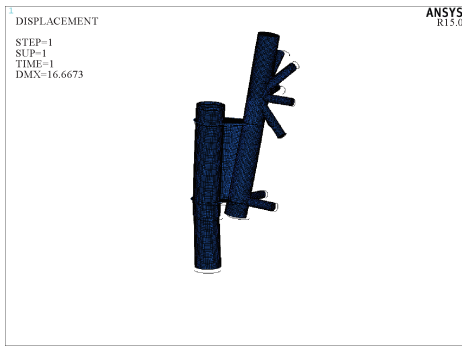


图 11 结构变形图

Fig. 11 Structural deformation

对海上升压站的开发具有模块化的意义,在水深及海况变化不大的情况下,只需根据地质情况改变桩径以及桩长的参数,导管架的主体部分修改较小。后续将继续对裙桩部分的疲劳进行下一步的分析,同时对裙桩部分的卡桩器以及灌浆部分的连接进行优化,以节省成本,提高导管架本身的使用效率。

参考文献:

- [1] 陈建民, 娄敏, 王天霖. 海洋石油平台设计 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
CHEN J M, LOU M, WANG T L. Offshore oil platform design [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [2] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel structures: GB 50017—2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [3] 挪威船级社. 海上变电站: DNVGL-ST-0145 [S]. 挪威船级社, 2016.
DNVGL. Offshore Substations; DNVGL-ST-0145 [S]. DNVGL, 2016.
- [4] 挪威船级社. 海上钢结构设计方法: DNVGL-OS-C101 [S]. 挪威船级社, 2017.
DNVGL. Design of offshore steel structures, general-LRFD method; DNVGL-OS-C101 [S]. DNVGL, 2017.
- [5] 国际标准化组织. 石油和天然气工业固定海上钢结构: ISO 19902—2007 [S]. 国际标准化组织, 2007.
ISO. Petroleum and natural gas industries-fixed steel offshore structures: ISO 19902—2007 [S]. ISO 2007, 2007.
- [6] 国家经济贸易委员会. 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——荷载抗力系数设计法(增补): SY/T 10009—2002 [S]. 北京: 国家经济贸易委员会, 2002.

National Economic and Trade Commission. Supplement 1 to recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platform-load and resistance factor design: SY/T 10009—2002 [S]. Beijing: National Economic and Trade Commission, 2002.

- [7] 刘全刚, 连鑫, 冯英磊. 导管架裙桩套筒的吊装安装 [J]. 石油化工建设, 2016, 47(3): 47-49.
LIU Q G, LIAN X, FENG Y L. Erection and installation of sleeve of skirt pile jacket [J]. Petrochemical Construction, 2016, 47(3): 47-49.
- [8] 李强. 导管架裙桩系统及其现场安装检验控制 [J]. 船舶标准化工程师, 2014, 37(3): 37-39.
LI Q. Jacket skirt pile system and its on-site installation inspection control [J]. Ship Standardization Engineer, 2014, 37(3): 37-39.
- [9] 惠丹, 王进. 浅水裙桩导管架的安装工艺 [J]. 中国修船, 2013, 26(6): 46-49.
HUI D, WANG J. Installation technology of skirt pile jacket in shallow water [J]. China Ship Repair, 2013, 26(6): 46-49.
- [10] 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(增刊1): 84-88.
ZHANG L, LIU J C. Discussion on structural design method of offshore substation [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 84-88.

作者简介:



CHEN K

陈珂(通信作者)

1985-, 男, 湖南衡东人, 高级工程师, 硕士, 主要从事土建、水工、海工结构的工作(e-mail)chenke@gedi.com.cn.



MA Z R

马兆荣

1970-, 男, 广东广州人, 教授级高级工程师, 水工结构专业硕士研究生, 主要从事水工结构设计研究工作(e-mail)mazhaorong@gedi.com.cn.

(责任编辑: 李辉)