

# 海上升压站导管架基础的冲刷试验研究

李亚军<sup>1</sup>, 毕明君<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设股份有限公司, 北京 100022; 2. 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]海上风电开发的一个重要环节是建造合适的海上升压变电站, 近年来, 海上风电场升压站基础的主要形式为导管架结构。[方法]结合拟建于砂质海岸的某风电场工程, 设计了不同比尺的导管架基础波浪流局部冲刷物理模型试验, 分析了波浪、水流对局部冲刷深度的影响, 研究了波浪流联合作用下桩基基础局部冲刷的范围、深度, 以及砂被和沙袋的防护效果。[结果]研究结果表明: 对于升压站导管架基础, 冲刷最深处均在基础的迎水面, 最大冲刷深度为桩基直径的1.75倍。[结论]研究方法及有关结论可为同类工程冲刷试验和工程设计提供参考。

**关键词:** 砂质海床; 导管架基础; 局部冲刷; 模型试验

中图分类号: TK89; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0123-06

## Study on Scour Test of Jacket Foundation for Offshore Substation

LI Yajun<sup>1</sup>, BI Mingjun<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Corporation Limited, Beijing 100022, China;

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

**Abstract:** [Introduction]The important part for offshore wind power development is the construction of a suitable offshore booster substation. In recent years, the main form of the foundation for offshore wind station is jacket structure. [Method]In this paper, the physical model tests were carried out to study the local scour of the base wave flow for the jacket foundation with different scale in combination with a wind farm project to be built on the sandy coast. On this basis, the influence of wave and water flow on local scour depth were analyzed, and the scope and depth of local scour of pile foundation under the combined action of wave flow were studied. Finally, the protective effect of sand cover and sandbag was studied. [Result]The results show that the most depth of scouring for the jacket foundation of the booster station is at the water face of the foundation, and the maximum depth is 1.75 times of the diameter of the pile foundation. [Conclusion]The research methods and related conclusions in this paper can provide references for similar engineering scour test and engineering design.

**Key words:** sandy seabed; jacket foundation; local scour; model test

海上风能作为一种清洁的可再生能源, 越来越受到世界各国的重视。海上风电开发的一个重要环节是建造合适的海上升压变电站, 海上升压站的基础形式主要有单桩基础、多桩基础以及导管架基础。从国内的实践看, 四桩导管架基础结构成为近年来海上风电场海上升压站基础的主要结构型式<sup>[1]</sup>, 其适用范围广泛, 设计及施工经验较多。

海上风电场导管架基础长期处于恶劣的海洋环

境中, 长期遭受复杂的波浪、水流的作用, 结构物周围的局部冲刷现象往往十分显著, 会对风机结构的稳定性造成极为不利的影 响。目前对于基础基局部冲刷的研究主要通过数值模拟、现场实测以及物理模型试验来进行。国家海洋局第一海洋研究所<sup>[2]</sup>曾对胜利埕岛油田两个海上石油平台基础周围(淤泥质海岸)的水下地形进行现场测量, 实测桩基最大局部冲刷深度为 3.0~3.5 m。韩海寰<sup>[3]</sup>就钱塘江河口及杭州湾的几座桥梁进行了模型试验, 并通过量纲分析和多元回归法等方法, 建立了适用于相关河口海湾地区的潮流作用下的墩柱冲刷计算公式, 已得到了一定的应用。此外, Jones & Sheppard

收稿日期: 2018-10-22 修回日期: 2018-11-13

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电吸力桶基础受力机理与变形控制关键技术研究”(EV04631W)

公式<sup>[4]</sup>和王汝凯公式<sup>[5]</sup>也有一定的应用。张玮等<sup>[6]</sup>对常用的三种桩基局部冲刷公式进行了验证比较,推荐了较为适宜的计算公式,在此基础上,提出了考虑波浪作用的改进方法,并对基础的局部冲刷深度进行了计算。

本文结合拟建于砂质海岸的某风电场工程,对不同比尺的导管架基础波浪流局部冲刷进行物理模型试验研究,分析波浪、水流对局部冲刷深度的影响,研究波浪流联合作用下桩基基础局部冲刷的范围和深度,并对砂被、沙袋防护效果进行研究,可为类似工程的设计提供参考。

### 1 工程概况

本工程升压站导管架底高程 -8.5 m,平面结构中心尺寸为 18.8 m × 16.0 m,导管架立面图与平面图分别如图 1 和图 2 所示。

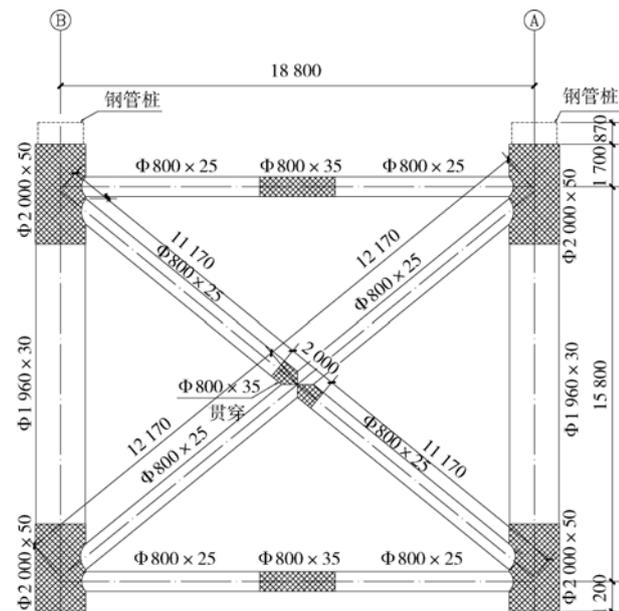


图 1 海上升压站基础导管架结构立面图  
Fig. 1 Elevation of jacket foundation for offshore substation

工程海域内主要有三类沉积物,粉砂质砂、细砂和中细砂,本次研究区域内的泥沙粒径处于 0.1 ~ 0.2 mm。工程海域的极端高水位(50 年一遇高潮位)、设计高水位(累积频率 1% 潮位)、设计低水位(累积频率 98% 潮位)和极端低水位(50 年一遇低潮位)分别为 3.88 m、2.10 m、-0.43 m 和 -1.73 m。工程区潮流属不正规日潮流性质,由于工程位

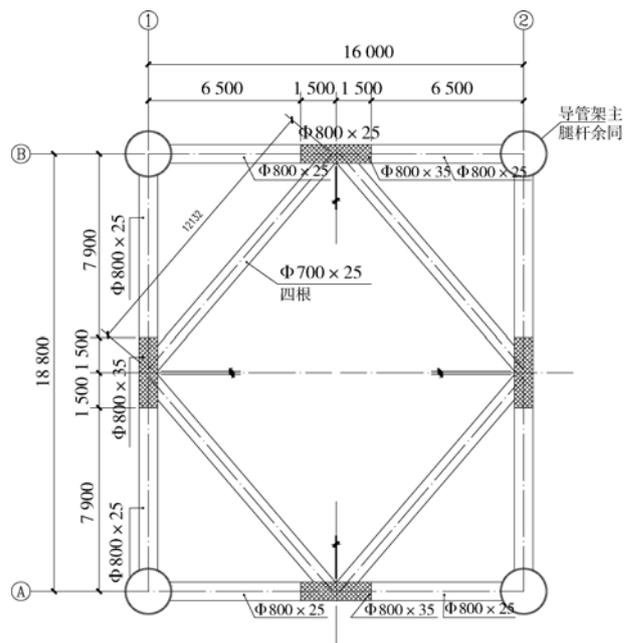


图 2 海上升压站基础导管架平面图

Fig. 2 Layout of jacket foundation for offshore substation

置所在海域潮汐的比较复杂,因此潮流特征也相对比较复杂。本次试验流速采用 2012 年 8 月至 9 月观测期间最大流速叠加 50 年一遇风海流,因此针对 50 年一遇情况,本次冲刷试验拟选取流速为 2.48 m/s。此时冲刷坑形成试验的流速采用 2012 年 8 月至 9 月观测期间最大流速 1.47 m/s 进行。工程所处海域面向开阔的南中国海,全年的波浪以风浪为主,年风浪频率达 90%,受季风的影响,最多风浪向为 ENE 和 E。试验波浪重现期为 50 年一遇和 2 年一遇。

### 2 物理模型试验

#### 2.1 模型设计

波浪作用下桩基周围局部冲刷坑的形成是一个三维问题,垂向水流运动是决定冲刷深度和形态的重要因素之一,因此,通常采用正态动床模型来预测桩基局部冲刷形态和深度。动床模型中要想实现模型冲刷地形与原型相似,除了满足几何相似、动力相似等条件外,模型沙的相似尤为重要。本次试验采用系列模型延伸法<sup>[7]</sup>进行研究,即通过做一系列不同比尺的正态模型,将试验结果延伸来消除模型和原型由于泥沙运动不完全相似而带来的试验结果偏差。

结合本工程特点及试验室条件,本次系列模型

试验比尺分别为 40、60 和 80。

在模型相似方面满足水流运动相似、波浪运动相似, 及泥沙运动相似。

由水流平面二维运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u^2}{C^2 H} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v^2}{C^2 H} \quad (2)$$

可得, 重力相似(流速比尺)  $\lambda_u = \lambda_h^{1/2}$ 。

进行波浪物理模型试验时, 必须使模型中的波浪传播速度、水质点运动、波浪折射、绕射、反射及破碎等波况与原型相似。满足上述相似条件的比尺关系分别为: 波速相似  $\lambda_c = \lambda_h^{1/2} = \lambda_L^{1/2}$ , 波周期相似  $\lambda_c = \lambda_h^{1/2} = \lambda_L^{1/2}$ , 水质点运动相似  $\lambda_u = \lambda_v = \lambda_h^{1/2} = \lambda_L^{1/2}$ 。

为保证墩柱前的冲淤相似, 模型与原型中泥沙的运动状态应保持一致, 即模型中泥沙在墩柱周围波浪作用下起动或悬浮, 原型中泥沙也应起动或悬浮。因此, 应使波浪产生的速度与泥沙沉降速度成比例, 则有  $\lambda_w = \lambda_v = \lambda_u = \lambda_c^{1/2}$ , 式中  $w$  为泥沙沉速。

对于系列模型延伸法, 需按水流相似条件  $\lambda_v = \lambda_h^{1/2}$  和水流、波浪泥沙起动相似  $\lambda_{vc} = \lambda_v$  来计算符合相似条件的模型比尺  $\lambda_{h0}$ 。本工程区域内泥沙粒径处于 0.1 ~ 0.2 mm, 由经武汉水院起动流速公式

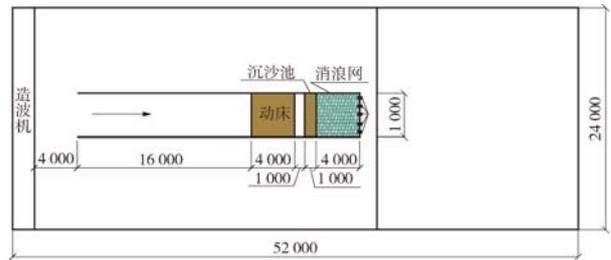
$$[V_c = (\frac{h}{d})^{0.14} (17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{d^{0.72}})^{1/2}]$$

计算, 无论对于原型还是模型, 起动流速均在泥沙粒径为 0.2 mm 时最低, 因此本次试验选取底质代表粒径为 0.2 mm。试验采用天然沙作

为模型沙, 中值粒径  $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$ ,  $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$ 。对于波浪作用下泥沙起动, 本次试验选用周益人<sup>[8]</sup>提出的公式进行计算。通过计算, 本次试验采用的模型沙与原型沙起动流速完全相等, 确定  $\lambda_{h0} = 1$ 。

### 2.2 模型布置

试验港池长 50 m、宽 24 m、高 1.2 m, 港池配有相邻两边布置的 L 型不规则波造波机, 由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。对于本次试验, 为了避免边壁影响, 基础压缩比:  $B/b$  必须大于 8 ( $B$  为水槽宽,  $b$  为基础宽), 因此在港池内修建长度 30 m, 宽度为 4 m 的水槽, 在距离造波板 20 m 处布置 4 m × 4 m 动床, 具体布置如图 3 所示。



注: 单位为 mm。

图 3 波流局部冲刷模型布置

Fig. 3 Layout of local scour model under wave current

### 2.3 组次安排

本次研究针导管架基础, 在 50 年一遇波流条件下冲刷深度进行试验, 模型试验比尺分别采用 1:40、1:60 和 1:80, 通过系列模型延伸法研究其冲刷深度。对于防护措施研究, 基础周边防护分别就 200 kg 沙袋防护以及 200 kg 沙袋与 200 kg 块石防护对比, 模型比尺采用 1:40。试验组次如表 1 所示。

表 1 试验组次

Tab. 1 Group of test

研究内容	代表底高程/m	水位 /m	重现期 /年	流速 / (m · s <sup>-1</sup> )	H <sub>1%</sub> /m	H <sub>13%</sub> /m	T <sub>p</sub> /s	模型比尺
导管架基础局部冲刷	-8.50	3.98	50	2.59	7.21	6.07	12.2	40, 60, 80
		-1.83			2.52	1.92	10.0	
导管架基础防护冲刷坑形成	-8.50	3.98	2	1.47	4.55	3.49	8.6	40
		2.20			4.83	3.72	11.6	
		-0.53			3.30	2.53	10.6	
导管架基础 200 kg 沙袋	-8.50	-1.83	50	2.59	2.52	1.92	10.0	40
		3.98			7.21	6.07	12.2	
导管架基础 200 kg 沙袋 + 200 kg 块石	-8.50	3.98	50	2.59	7.21	6.07	12.2	40

注: 坐标系为 85 高程。

### 2.4 试验方法

冲刷试验开始前，首先在试验段周围布置波高仪，率定港池内无结构物时的试验要求波要素。试验采用的不规则波浪谱为 JONSWAP 谱。进行局部冲刷试验时，放水前先在试验段的中部分别放置不同桩基结构物，将模型沙平铺于试验段。进行波流共同作用下桥墩局部冲刷试验时，先调试水流条件，当水流平均流速达到要求值时，再迭加波浪。

### 3 不同比尺模型对局部冲刷深度的影响

在极端高水位情况叠加 50 年一遇波流条件下，对升压站导管架开展了波流对其周围局部冲刷试验，如图 4 所示，模型比尺分别为 1:40、1:60 和 1:80。采用各种桩基不同比尺的模型冲刷深度进行延伸，可分别得出升压站导管架原型最大冲刷深度。



图 4 升压站导管架模型受极端高水位 + 波流作用  
Fig. 4 Jacket of substation model under extremely high water level and action of wave current

试验简图及波流方向如图 5 所示，迎水面两根桩 A 和桩 B 在同一排，试验结果类似，因此只给出 A 桩最大冲刷深度，如图 6 和图 7 所示。图 7 为升压站导管架桩基极端高水位及波流作用后周围不同位置冲淤变化云图。由于受到导管架底部防沉板的影响，升压站导管架结构桩基及其中间区域均有不同程度冲刷。由图可知在极端高水位及其 50 年一遇波流作用后，A 桩最大冲刷深度为 3.12 m，对于导管架结构有四根桩，根据试验结果，迎浪侧两根桩冲刷深度大于背浪侧。

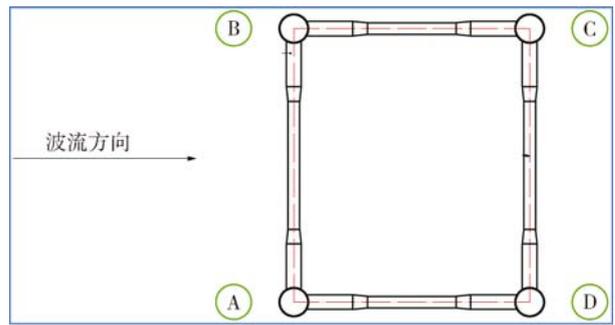


图 5 升压站导管架桩标号

Fig. 5 Label of jacket pile of substation

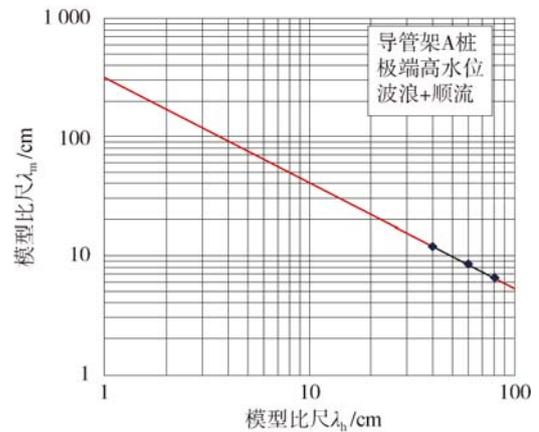


图 6 升压站基础 A 桩系列模型延伸

Fig. 6 Extension of series model for pile a of substation

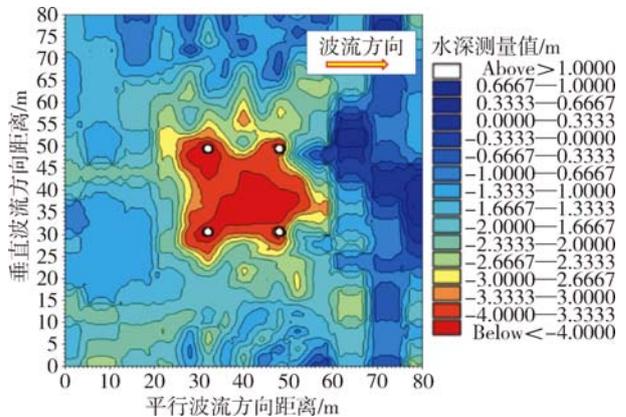


图 7 升压站导管架基础冲淤变化云图

Fig. 7 Cloud diagram of scour and deposition for substation

### 4 升压站导管架基础防护冲刷试验

根据设计和施工方案，对于升压站导管架基础结构进行防护冲刷试验。待导管架结构施工完毕后，在进行整个风电场开展防护施工的时候对导管架结构在波流作用下所形成冲刷坑进行 200 kg 沙袋回填。为此对于升压站导管架结构的防护研究，首

先采用 2012 年观测期间最大流速叠加 2 年一遇波浪条件对其进行作用并形成冲刷坑, 然后采用重量 200 kg 沙袋进行回填, 然后开展各级水位及相应 50 年一遇波浪条件进行作用, 验证其稳定性。2 年一遇波浪 + 观测期间最大流速作用后形成冲刷坑后铺设 200 kg 沙袋现场照片如图 8 所示。采用沙袋防护后在各级水位及相应 50 年一遇波浪要素作用后冲刷坑情况如图 9 所示。从照片可见, 由于冲刷坑形成动力条件较弱, 因此所形成冲刷坑较浅而导致只能铺设较薄一层沙袋, 但是所铺设沙袋处波流条件作用较强, 当 50 年一遇波浪叠加水流作用时将沙床附近 200 kg 沙袋冲走, 因此最后导致 200 kg 沙袋在波流作用后几乎没有保留, 升压站导管架迎波、流面桩冲刷深度与未设防护较为接近。

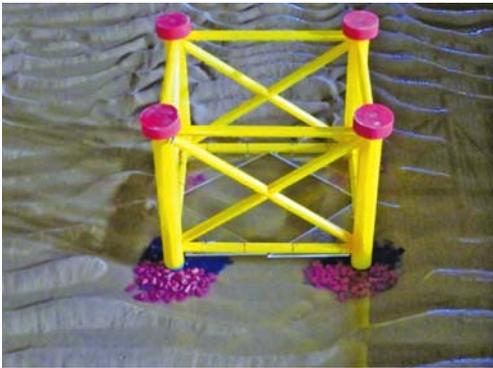


图 8 采用沙袋对导管架冲刷坑进行防护

Fig. 8 Using sandbags to protect the scour pit of jacket



图 9 铺设沙袋后的冲刷情况

Fig. 9 Scour condition after laying sandbags

基于上述冲刷坑, 一根桩采用 200 kg 块石回填, 一根桩采用 200 kg 沙袋进行回填进行试验, 试验前情况如图 10 所示。各级水位及相应波流条件作用后, 块石和沙袋情况如图 11 所示。总体来讲块石防护效果优于沙袋防护效果, 但是由于块石边

缘处泥沙发生淘刷而使得块石范围有扩大的趋势而导致块石回填高度有所降低。对于沙袋尤其是表层沙袋, 在波流作用下较容易发生滚动, 因此波流作用后只有原冲刷坑底部残留少量沙袋。

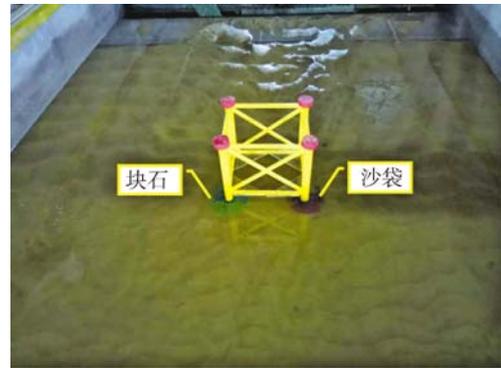


图 10 采用块石、沙袋对导管架冲刷坑进行防护

Fig. 10 Using sandbags and stones to protect the scour pit of jacket

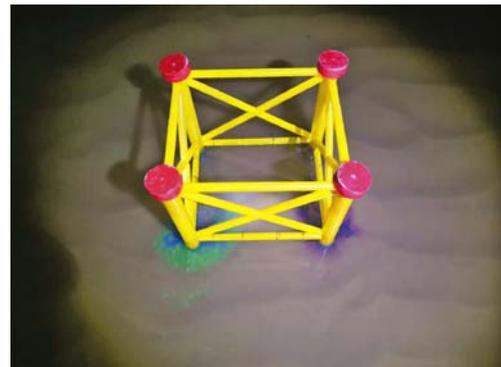


图 11 铺设块石和沙袋后的冲刷情况

Fig. 11 Scour condition after laying sandbags and stones

## 5 结论

本文结合拟建于砂质海岸的某风电场工程的海上升压站构筑物, 通过物理模型试验对海上升压站导管架基础波流局部冲刷特征和防护措施进行了研究, 研究表明:

1) 对于本工程桩基及动力条件, 波流联合作用下导管架基础局部冲刷更为不利, 从最大冲刷深度来讲, 在极端高水位及其波流条件下局部冲刷值稍大。

2) 在极端高水位及其 50 年一遇波流作用后, 迎水面基础最大冲刷深度为 3.12 m, 且迎浪侧两根桩冲刷深度大于背浪侧。

3) 块石防护效果优于沙袋防护效果, 但是由于

块石边缘处泥沙发生淘刷而使得块石范围有扩大的趋势而导致块石回填高度有所降低。

#### 参考文献:

- [1] 杨建军, 俞华锋, 赵生校, 等. 海上风电场升压变电站设计基本要求的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3781-3789.  
YANG J J, YU H F, ZHAO S X, et al. Research on basic requirements of offshore substation design [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3781-3789.
- [2] 仲德林, 刘建立. 埕岛油田海上石油平台基础冲刷研究 [J]. 海岸工程, 2003, 22(2): 37-43.  
ZHONG D L, LIU J L. Scouring study of offshore oil platform-foundation in the Chengdao oil field [J]. Coastal Engineering, 2003, 22(2): 37-43.
- [3] 韩海骞. 潮流作用下桥墩局部冲刷研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
HAN H Q. Research on local scour at bridge piers under tidal current action [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [4] JONES J S, SHEPPARD D M. Scour at wide bridge piers [C]//ASCE. Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, Minnesota, United State, July 30 to Aug. 2, 2000. USA: ASCE, 2014.
- [5] WANG R K, HERBICH J B. Combined current and wave produced scour around a single pile [R]. Texas: Texas Engineering

Experiment Station, 1983.

- [6] 张玮, 濮勋, 廖迎娣. 淤泥质海岸近海风电塔基局部冲刷计算研究 [J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 105-109.  
ZHANG W, PU X, LIAO Y D. Calculation of local scour around piles of offshore wind power on muddy coast [J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 105-109.
- [7] 沙玉清. 系列模型延伸法 [J]. 水利学报, 1963, 10(5): 13-21.  
SHA Y Q. Extension method of series models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963, 10(5): 13-21.
- [8] 周益人. 波浪作用下的泥沙起动 [J]. 水利水运科学研究, 1998(4): 338-346.  
ZHOU Y R. Sediment threshold under wave action [J]. Hydro-Science and Engineering, 1998(4): 338-346.

#### 作者简介:



LI Y J

李亚军(通信作者)

1983-, 男, 河北唐山人, 工程师, 硕士, 主要从事电力工程技术和政策研究工作(e-mail)258367459@qq.com。

(责任编辑 郑文棠)

## 能源知识

### 广东省首座 220 kV 海上升压站顺利发运

2018年12月26日,中国能建广东院EPC总承包建设的广东粤电湛江外罗海上风电项目220 kV海上升压站在海工集团海工平台事业部码头举行发运仪式。该升压站的顺利发运预示着广东省首座海上升压站全面完成陆上联调,即将进入海上安装阶段。

海上升压站是海上风电场的电能汇集中心,风力发电机发出的所有电能在此升压后,通过220 kV送出海底电缆接入外罗陆上集控中心,再转架空线接入电网,输送至千家万户。针对外罗项目所在海域台风多发、雷暴活动剧烈、海洋腐蚀严重等气候特点,中国能建广东院充分考虑了安全性、可靠性和可维护性,开展了整体结构优化设计创新:(1)升压站内部设置T型内走廊,方便设备检修和人员安全疏散;(2)全站电缆桥架及暖通、消防管道优化。电路、设备、管路等均隐藏在站内,外立面无管线和空调室外机,充分防风,减少恶劣海洋环境影响的同时,也降低了海上运维的成本;(3)设置海上风电场大孤岛备用电源,以备风电场与大陆电网连接中断后风电机组的应急用电。

(中国能建广东院)

