

# 海上升压站施工技术综述

帅小根<sup>1</sup> 张瑜<sup>1</sup> 张族炎<sup>2</sup>

1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430000

2. 水利水电工程绿色建造技术创新中心 湖北 武汉 430000

**摘要:**海上升压站是整个海上风电场的“心脏”，作为连接海上风电场与陆上电网的重要中转站，起到将海上风机所发电能汇集、升压输送至陆上电网的关键作用。海上升压站作为整个风电场并网发电的关键线路，确保升压站施工期（建造、导管架基础施工、升压站海上运输、升压站上部组件吊装）安全稳定与进度要求是核心。本文对从海上升压站施工从各方面进行了研究分析，为类似项目施工提供借鉴。

**关键词:**海上风电；升压站；运输安装；建造

## 引言

2002年丹麦建成Horns Rev海上风电场（装机容量为160MW，离岸14~20km），是当时全球第一个海上升压站。随着海上风电场的开发逐步成熟，海上升压站容量、规模、重量等方面不断提高，2023年6月27日，粤电青洲一、二项目海上升压站上部组块（1000MW）完成安装，成为国内容量最大、重量最大（水深45米，离岸近60公里，上部组块尺寸为52.3m×46.8m×22.9m，6382t）。海上升压站施工存在建造工期长、长距离大件运输、海上施工、大件吊装等特点。施工内容主要包括钢结构制作、基础施工、上部组块安装三大部分。一般来说，主要施工工艺流程为：钢结构加工与制作→电气设备安装、调试→导管架沉放→钢管桩沉桩施工→上部平台整体安装→电气设备联动调试<sup>[1]</sup>。

本文将从建造、基础施工、海上运输、上部组件吊装、船舶选型和吊重分析、精确的施工部署等多方面对海上升压站全过程的施工技术要点进行研究，为确保施工工期安全、质量与进度要求提供技术服务。如图1



图1 国内最重海上升压站（粤电阳江青洲一、青洲二海上风电项目）吊装

## 1 海上升压站施工主要技术

### 1.1 升压站建造

近年来，海上升压站多采用了多主变、多回出线，

同时配套设备不断增加进入，因此海上升压站重量和体积不断增加，上部模块的整体重量超过3000t。伴随着更高等级电压和更大容量的要求出现，升压已无法满足海上风电场电能输送的要求，交流电转化为直流电，会更加减少输变电的电能损耗，因此第三代海上升压站的完善会加快深远海风电资源的开发。2023年5月9日国内首个模块化海上升压站（Slim-SO™-500-A2）宁波象山1#海上风电场二期工程吊装完成（容量504MW，重量2500t），为模块化升压站建造提供了思路。采用模块化、一体化设计方案（通过深化三维建模，在充分解决构件碰撞、甲板分片超重、建造精度误差等难题的基础上，根据功能区块拆分模块，将电气、暖通、消防等相关设备划分为不同模块单独建造。在陆上组装厂完成整个升压站的制造、设备安装和调试，然后整体运至现场，采用大型起重船整体安装）。

对模块组装布局进行优化，通过一体化建造方式与标准化管理手段，达到减轻设计重量近15%，节约工期（两个月）的目标，依托长江设计集团自主创新项目（模块化海上升压站的建造关键技术研究及应用、海上风电项目智慧管控平台建设及应用研究）开展了相关工作。如图2

### 1.2 海上升压站基础施工

海上升压站作为一种特殊的海洋平台结构，兼具海洋平台和电气设备属性。通过调研分析可知，海上升压站的主要基础型式有单桩、重力式、导管架等基础型式。对于离岸距离较近，水深较浅的海域，上部结构重量在1000t以下的海域建设海上升压站，可采用单桩基础型式<sup>[2]</sup>。对于地质条件好，地形平缓的海域，可采用重力式基础。对于深水较大，离岸距离较远的海域建设升压站，可采用导管架基础。目前导管架是采用最多的一种

基础型式。如图3



图2 国内首个模块化海上升压站（宁波象山1#海上风电场二期）吊装

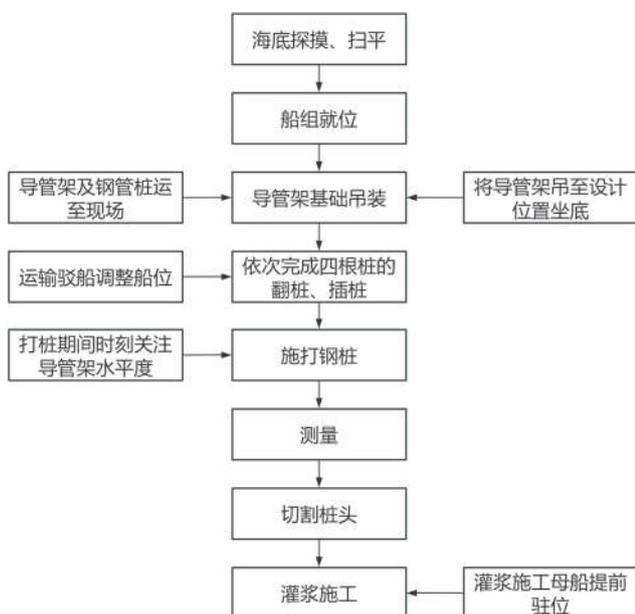


图3 升压站桩基础导管架施工流程

在建造厂重装码头利用吊机将导管架吊装至5000t自航式平板驳固定好上，并与平板驳船固定后，运至施工海域。所有准备工作完成后，将导管架运输船抛锚定位，利用3000t以上起重船整体吊装到位，导管架安装到位后，应及早跟进沉桩施工，以免导管架在风浪作用下滑移，超出偏差要求。如图4



图4 导管架吊放示意图

基础沉桩系统包括打桩船、运桩船、抛锚艇、拖轮与交通艇等船舶组合，其中以打桩船为主要施工设备。

为充分利用大型船舶，钢管桩沉桩施工一般考虑采用程导管架沉放所采用的浮式起重船进行施工。桩锤系统根据海上升压站工程基础管桩的设计参数，选用S-1200型液压打桩锤作为首选桩锤。龙源振华、中交三航局、中铁大桥局、中海油等海上施工单位具有此种级别大型液压打桩锤可供选择，施工设备的来源较为广泛。如图5

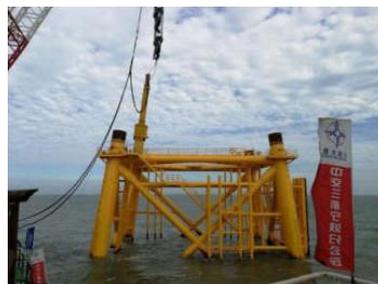


图5 起重船吊打施工示意图

### 1.3 海上升压站平台出运

目前大尺寸、超重量的海洋工程结构组块大部分属于海洋石油类设施，此种设施体形庞大，重量多超过5000t级，采用滑道滑移装船的方式，滑移装船过程中，需要不断对驳船进行调载，使驳船顶面与滑道处于同一高度上。此种装船运输方式多与结构组块调试方案所选用的场地设施能力、组块预估生产周期、施工能力等条件相关联，根据对国内主要海工结构大件物资的调研分析，对于5000t级以下的组块结构，因其重量相对较轻，尺寸面积相对有限，也可采用大型的起重类船只进行陆—水浮式起重吊装的模式，不仅施工费用相对较低，同时对安装调试所配套的场地设施资源要求较低，使用时间短，因此采取起重船陆—水浮式起重吊装的模式进行升压站上部组块的装船工序。

运输用船舶应尽量保证升压站上部组块的整体边界在船舶型宽范围内，尤其应保证底部四根主柱位置在船舶型宽有效范围内。船舶有效型宽应不小于底部四根主柱位置间距，根据上述对运输船舶尺寸数据的要求并参考同类海工结构组块实际选用运输船舶的情况，推荐选用10000t级甲板驳船进行运输。

海上运输条件复杂，升压站组块为大尺寸、超重量的构件，运输过程中受天气、海况等影响较大，船身可能出现横倾晃动的危险，因此需要根据升压站尺寸与重量等条件，统筹规划生产基地，选择有利的天气时机，并对运输船舶增加临时辅助固定装置，降低运输过程中的风险，增加运输过程中的可靠性。

海上升压站上部组块通常采用SPMT滚装方式落驳，主要装船、运输流程如下：滚装前组织安全技术交底向港务、海事报备滚装作业信息确定SPMT行走路线栈桥安

装SPMT（自行式模块化拖车）就位SPMT顶起上部组块SPMT缓缓通过栈桥SPMT行驶至预定位置SPMT车缓缓下降运输工装与船板点焊加固SPMT撤回驳船调载清驳驳船启航，如图6



图6 海上升压站整体运输示意图

1.4 海上升压站整体安装

根据钢桁架组合体上部结构整体吊装尺寸要求，选择7000t级及以上起重能力的浮式起重船进行组合体的安装工作。目前国内多艘起重船可满足本升压站上部组块的起吊工作，按照此种对起重船的参数需求，目前不经改造就可应用于400t以上的吊装设备有中海油的“蓝鲸”号（7500t）、振华重工“SAMSUNG5号”（8000t）等，需要根据施工进度计划提前与船机设备供应方沟通。上部组块转运时，可以采取起重船陆—水浮式起重吊装的模式进行升压站上部组块的装船工序。目前国内已成功吊装的多个海上升压站均无障碍一次性吊装成功，积累了比较丰富的经验。

1.5 海上升压站施工主要船机设备

表1 220kV海上升压站施工主要船机配置表

序号	机械设备名称	型号规格	单位	数量	备注
1	浮式起重船	1600t级及以上（起重能力）	艘	1	导管架基础施工，配置S-800型以上液压打桩锤
2	起重船	4000t级及以上	艘	1	组合体安装
3	甲板驳船	5000t级	艘	1	钢管桩、导管架运输、灌浆施工
4	甲板驳船	10000t级	艘	1	上部组块运输
5	拖轮	3000HP	艘	2	拖运船舶
6	抛锚艇		艘	2	打桩船、起重船等抛锚
7	交通艇		艘	2	
1	浮式起重船	1600t级及以上（起重能力）	艘	1	导管架基础施工，配置S-800型液压打桩锤作为首选桩锤，S-1200型液压打桩锤作为备选桩锤
2	起重船	4000t级及以上	艘	1	组合体安装
3	甲板驳船	5000t级	艘	1	钢管桩、导管架运输、灌浆施工
4	甲板驳船	10000t级	艘	1	上部组块运输

2 关键技术

2.1 海上升压站提前建造

海上升压站作为首批风机投产的一个关键节点，对于需要尽早进行首批风机发电情况下，一般考虑在项目开始8-10个月之后完成海上升压站的吊装，海上升压站的安装制造过程一定需要提前进行准备工作以及备料，在项目开始的时候就开始建造海上升压站的上部组块，把设备的到货时间与钢结构加工时间有机的结合起来，升压站吊装完成之后，尽快完成电气调试，使之具备倒送电的条件。

2.2 升压站海上运输稳定性验算

建模分析软件采用Ansys18.0，采用三维有限元模型，模型纵向范围从艏封板到Fr190肋位，宽度范围为整个船宽，垂向范围从甲板板向下3000mm。其中甲板、舱壁以及甲板下平台等平板结构用板单元模拟，甲板桁、甲板强横梁、舱壁水平/垂直腹板等用板单元模拟，

面板用梁单元模拟，其他小的骨材用梁单元模拟，支墩等绑扎结构采用板单元模拟<sup>[3]</sup>。

总结

海上升压站的设计、制作、运输、安装、运行维护是一项复杂的系统工程，任一环节出现问题，都会对整个风电场的并网造成影响。结合国内施工能力，对关键技术进行研究，为海上升压站经济、可靠建设提供良好的工程指导。

参考文献

[1]王亚锋,超大型海上风电升压站施工技术研究[J].科技资讯,2023,21(23).4(70-73)  
 [2]陈健,胡永伟,张峰,海上330 kV升压站建设施工技术研究[J].建筑技术开发,2025,52(1),3(44-46)  
 [3]王海斌,王霄,孙烜,张恒.海上升压站基础导管架及上部组件灌浆连接施工技术[J].水电与新能源.2021,35(4),5(55-59)