

文章编号: 1673-1506(2025)05-0173-10

DOI: 10. 11935/j. issn. 1673-1506. 2025. 05. 017

引用: 付殿福, 孙友义, 宋峥嵘, 等. 中国深水导管架平台工程技术发展现状与展望[J]. 中国海上油气, 2025, 37(5): 173-182.

FU Dianfu, SUN Youyi, SONG Zhengrong, et al. Current development status and prospects of engineering technologies for China's deep-water jacket platform[J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37(5): 173-182.

中国深水导管架平台工程技术发展现状与展望*

付殿福¹ 孙友义¹ 宋峥嵘² 黄怀州² 张 勇³ 谢波涛¹
李书兆¹ 张力昂¹ 周远航^{1,4}

(1. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100028; 2. 海洋石油工程股份有限公司 天津 300461; 3. 中海石油(中国)有限公司
深圳分公司 广东深圳 518000; 4. 浙江大学工程师学院 浙江杭州 310015)

摘 要 随着中国南海油气资源大规模开发的战线逐步向深水区域推进,对深水导管架平台的需求更加迫切。笔者对中国深水导管架平台工程技术发展现状进行了分析总结,并对未来发展趋势进行了展望。介绍了“海基”系列 3 个典型平台(“海基一号”、陆丰 12-3、“海基二号”)的应用案例,分析总结了深水导管架平台研发应用中涉及的海洋环境、海洋岩土、结构设计、建造安装、结构监测及数字孪生等关键领域的技术进展;结合中国对深水导管架平台在更深水域的应用需求,指出下一步需要加强深水导管架结构设计、高性能结构材料研发、数字及智能化等核心技术的自主研发,从而为中国深水导管架平台工程技术的不断进步提供支撑。

关键词 深水导管架;关键工程技术;海基系列;结构设计;安装建造;高强度钢;智能化;发展现状;发展方向
中图分类号: TE54; TE863; U662. 2; P751 **文献标识码**: A

Current development status and prospects of engineering technologies for China's deep-water jacket platform

FU Dianfu¹ SUN Youyi¹ SONG Zhengrong² HUANG Huaizhou² ZHANG Yong³ XIE Botao¹
LI Shuzhao¹ ZHANG Li'ang¹ ZHOU Yuanhang^{1,4}

(1. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China; 2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;
3. CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518000, China; 4. Polytechnic Institute,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

Abstract: As the large-scale development of oil and gas resources in the South China Sea gradually advances into deep-water areas, the demand for deep-water jacket platforms has become increasingly urgent. The current status of engineering technologies for deep-water jacket platforms in China was analyzed and summarized, and the future development trends were prospected. Application cases of three typical platforms from the “Haiji” series (“Haiji-1,” Lufeng 12-3, and “Haiji-2”) were introduced. Technical progress in key areas related to the research and application of deep-water jacket platforms, including marine environment, marine geotechnics, structural design, construction and installation, structural monitoring, and digital twin technologies, was concluded. In light of China's growing demand for deep-water jacket platforms in even deeper waters, it is necessary to further strengthen independent research and development in core technologies, including deep-water jacket structural design, high-performance structural materials, and digital/intelligent technologies, thereby providing strong support for the continuous advancement of engineering technologies for China's deep-water jacket platforms.

* 国家科技重大专项“深水油气干式生产处理平台关键技术与装备”课题 4“桩基式深水干式油气生产处理平台工程关键技术研究(编号: 2024ZD1403304)”、中国海洋石油有限公司综合科研课题“400 米水深级导管架平台关键技术研究(编号: KJZH-2024-2401)”部分研究成果。

第一作者简介: 付殿福,男,高级工程师,2010 年毕业于哈尔滨工程大学船舶与海洋结构物设计制造专业,获硕士学位,主要从事海上油气田开发工程设计研究工作。地址:北京市朝阳区太阳宫南街 6 号院中海油大厦 B 座(邮编:100028)。E-mail: fudf@cnooc.com.cn。

Key words: deep-water jacket platform; key engineering technology; Haiji series; structural design; construction and installation; high-strength steel; intelligent technology; current development status; development direction

导管架平台是海上油气开采中的常用平台型式。该类平台数量占中国全部海上油气资源开发平台的 95% 以上,在中国海洋油气开发领域占据着主导地位。南海北部陆坡区十多个富含油气的凹陷均位于水深 200~400 m 的海域。导管架平台因其经济性、安全性和良好的功能拓展性,是该水深范围最具竞争力的油气开发装备^[1]。目前全球水深超过 200 m 的导管架平台共 28 座,其中 3 座位于中国海域。世界上水深最深的导管架平台为 Bullwinkle 平台,工作水深为 412 m^[2]。中国水深最深的导管架平台为“海基二号”,工作水深为 324.4 m。

随着中国南海油气资源大规模开发的战线逐步向深水区推进,对深水导管架的需求更加旺盛。基于此,本文对中国深水导管架平台工程技术现状及发展趋势进行深入阐述,详细介绍“海基”系列 3 个典型平

台(“海基一号”、陆丰 12-3、“海基二号”)的应用案例,回顾深水导管架平台研发应用中涉及的海洋环境、海洋岩土、结构设计、建造安装、结构监测及数字孪生技术等领域的关键进展,结合中国对深水导管架平台在更深水域的应用需求,提出若干技术发展方向与建议,以期为中国深水导管架平台的发展提供参考。

1 中国深水导管架平台应用典型案例

中国海洋石油集团有限公司(以下简称“中国海油”)将工作水深大于 200 m 的深水导管架平台定义为“海基”系列深水导管架平台。目前,中国的 3 座在役“海基”系列深水导管架平台,分别是“海基一号”平台、陆丰 12-3 井口平台以及“海基二号”平台(图 1),平台设计参数见表 1。



(a) 海基一号



(b) 陆丰12-3



(c) 海基二号

图1 “海基”系列深水导管架平台

Fig. 1 Deep-water jacket platforms from “Haiji” series

表1 “海基”系列深水导管架平台设计参数

Table 1 Design parameters of deep-water jacket platforms from “Haiji” series

平台	作业水深/m	导管架高度/m	钢材强度最高等级/MPa	导管架质量/t	组块最大操作质量/t	井槽数	最大腿径/mm	最大壁厚/mm	钢桩规格(根数×桩径)/mm	桩入泥深度/m	投产时间
海基一号	286.0	302.0	355	30 200	17 000	16	4 000	85	12×2 590.8(102 in)	115	2022年9月
陆丰 12-3	240.8	265.0	355	24 300	17 300	20	4 000	95	12×2 590.8(102 in)	122	2023年9月
海基二号	324.4	338.5	420	36 200	19 500	24	4 200	100	16×2 743.2(108 in)	134	2024年9月

围绕“海基”系列深水导管架设计、建造、安装、运维过程,中国“海基”系列深水导管架在海洋环境与岩土勘察解释技术、总体规划与结构设计技术、陆地建造与海上安装技术、结构监测与数字孪生技术以及关键材料与机具国产化研制进展等方面出现了

一系列创新性成果,实现了在 300 米级水深范围内采用干式井口进行油气生产作业,集成钻井、采油、处理、生活等功能,有效降低开发投资并大幅减少后续钻完井和生产操作成本,显著提升油田采收率及经济性。

2 中国深水导管架平台工程技术进展

2.1 海洋环境与岩土勘察解释技术

2.1.1 海洋环境技术

导管架平台结构设计依赖于所处位置的详细环

境条件。为了全面获取海洋环境数据,中国海油构建了一套立体化海洋动力环境监测系统^[3],系统相关性指标见表2。采集的数据以关系型数据库采用二维表方式存储,并通过卫星通信设备定时传输至通信与岸站系统保存,实现对现场数据的实时监控、分析。

表2 海洋环境监测系统性能指标

Table 2 Performance metrics of marine environmental monitoring system

子系统名称	设备组成	观测对象	性能指标
气象监测系统	风矢量传感器	梯度风	2层(105 m、75 m),每1 s记录
	温度传感器	气温	1 h输出一次
	气压传感器	气压	
	湿度传感器	湿度	
浮标监测系统	测波浮标	波高	1 h一次,每次持续测量20 min
	波浪骑士	波向	
测波雷达	测波雷达	周期	
有缆潜标监测系统	声学多普勒海流计	流剖面	150 kHz的ADCP向上,空间分辨率5 m,每5 min记录
		底层流	600 kHz的ADCP向下,空间分辨率1 m,每5 min记录
	温盐深测量仪	水温	空间分辨率5 m、10 m,每5 min记录
通信与岸站系统	通信主机 岸站管理系统	盐度	在深度20 m、100 m、180 m位置测量CTD,每5 min记录

内波是南海的一种特殊的海洋现象,根据2021年秋季观测数据显示,其平均振幅为31 m,传播速度为1.55 m/s^[4]。内波引起的强流给海上安装和钻井作业带来巨大的风险。中国海油提出一种依托现场守护船的内波单体式检测、识别技术,并采用 Korteweg-de Vries (KdV)理论模型实现内波预警^[5]。守护船位于内波上游10 km处,搭载75 kHz的声学多普勒流速剖面仪(ADCP)和温盐深仪(CTD),观测海流及温盐数据。通过守护船的现场监测数据识别出内波信号后,基于CTD数据对背景场温盐剖面进行修正,并得到跃层深度及浮力频率剖面,基于ADCP数据提取背景流和内波流,并得到最大内波流及其传播方向,利用KdV理论模型预测内波传播过程,实现对工程区域的内波预警。在该系统识别到的450次内波中,约93%内波预警时刻小于10 min,最大误差小于25 min,平均误差为±3.90 min,有效保障了工程作业安全。

南海陆坡区由于特殊的水深和地形,沙波现象较为普遍^[6],这对深水油气设施安装及在位安全构成了严重影响。例如,陆丰15-1油田的海底地形起伏较大,沙波波长可达50~150 m,波高最高可达5.1 m。深水沙波潜在的运动特性,直接关系到工程设施选择的安全性。中国海油开发了一套综合性深水沙波精细化监测方法,采用大范围地形扫测结合重点区域自主水下载具(AUV)精细调查,配合沙波监测和迁移

研究,实现在中深水复杂地质条件下的精细勘察。基于陆丰海域多次测量的高精度水深数据,建立耦合潮流、风暴潮、内波等多种环境因素的复杂水动力模型,提供该区域高精度的流场预测结果,预测误差在10%以内。基于高精度水动力预测结果,综合考虑泥沙分级等特征,建立水动力-泥沙地貌演化模型,对陆丰区域沙波的形态、迁移等特征进行精确预测,反映沙波的增长演化特征,辅助实现“海基一号”平台场址(图2,图中A、B、C、D表示导管架主腿位置)的优选。

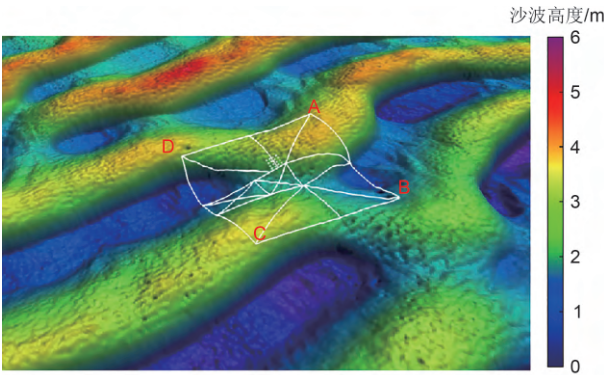


图2 “海基一号”导管架场址

Fig. 2 Site of “Haiji-1” jacket platform

2.1.2 岩土勘察解释技术

南海深水区广泛分布着超固结、高灵敏、低塑性黏性土,随深度增加土体抗剪强度线性增长,海床下

深度 100 m 以上时抗剪强度可达 200~300 kPa, 全球不同海域海床沉积物特性对比见表 3。由于海底沉积物灵敏度为 4~8, 其扰动后抗剪强度远小于原状土强度, 桩基打入后桩-土相互界面土体扰动严重, 其扰动后的抗剪强度及其恢复特性直接影响桩基的设计尺寸和长期稳定性。通过结合已有的南海沉积物静力触探测试(CPT)和土工试验结果, 对南海土体的基础物性和力学性质进行了深入分析。结果表明, 南海深水北部区域的沉积模式主要为以细粒为主的深水沉积模式^[7]。通过落锥试验进一步证明, 南海不同海域的黏土具有明显的触变恢复特性^[8], 为南海深水导管架桩基设计提供了可靠的岩土参数。在南海特殊土质的影响下, 桩基承载力备受关注。基于“海基二号”岩土设计参数, 相关研究利用数值模拟方法分别探究了桩基阻力在均质黏土和砂土、黏土混合土体中的差异, 发现均质黏土中桩端塑性区不随土体剪切强度及桩端到土体底面的距离变化, 桩基阻力影响范围为桩端上方 0.12 D (D 为桩直径) 至桩端下方 0.83 D ^[9]。该研究结果为深水超长桩的精细化打桩阻力和可打入性分析奠定了基础。

表3 各海域黏土物性参数对比

Table 3 Comparison of clay's physical property parameters in different sea areas

地区	含水率/%	塑性指数	黏粒含量/%
南海北部浅水区	约 35	约 15	<30
南海北部深水区	70~160	50~80	约 60
几内亚湾海域	106~137	87~104	65~75
墨西哥湾海域	70~150	55~105	—
地中海海域	100~160	40~75	50~75
孟加拉湾海域	75~150	45~70	50~80
挪威海海域	80~140	51~54	43~50

2.2 结构总体规划与设计技术

2.2.1 平台结构总体规划技术

与 200 m 以浅导管架结构相比, “海基”系列深水导管架在结构总体规划方面做出了多项突破。

传统导管架结构体系(图 3a)依靠主水平层为隔水套管提供支撑, 水平层间距小, 通常小于 35 m。“海基”系列导管架构型(图 3b)提出井口区与下水桁架一体化设计理念, 依托下水桁架内部平面实现对隔水管的加密支撑, 实现了主水平层层间跨距设置与隔水管支撑跨距需求的解耦。

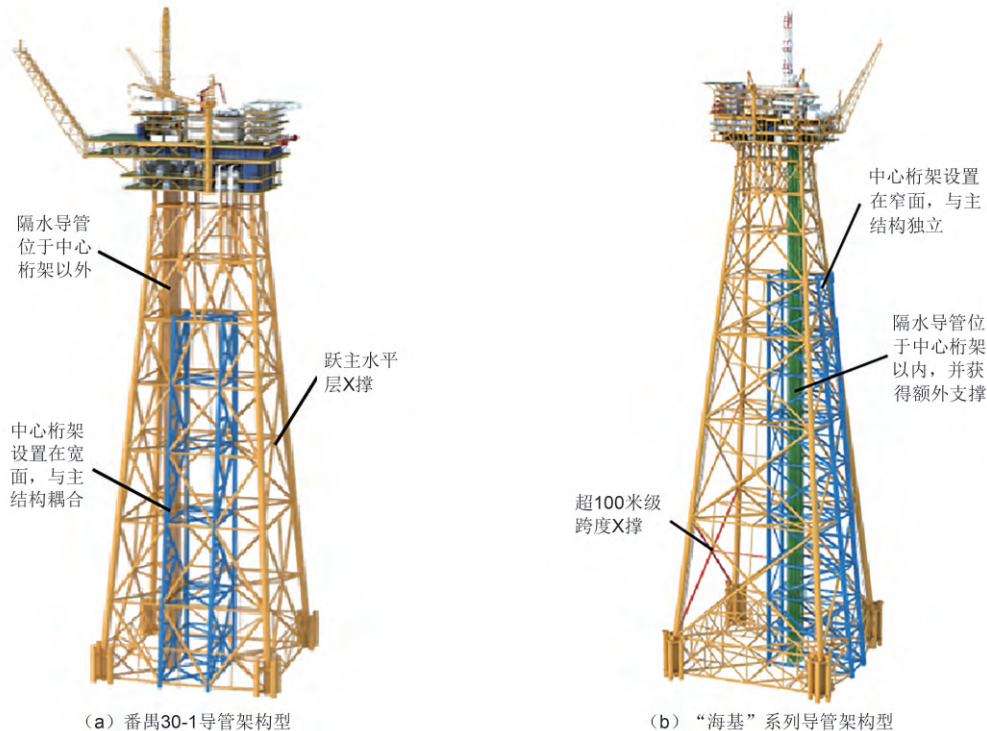


图3 深水导管架构型

Fig. 3 Deep-water jacket types

下水桁架是实现深水导管架滑移下水安装的核心结构, 传统下水桁架与主结构耦合, 在位工况下与主结构共同受力, 显著增加了主结构受力。“海基”系

列导管架构型研发了浮动式下水桁架结构, 实现导管架“在位态”与“施工态”功能解耦, 从本质上改善了深水导管架结构的在位受力状态。

导管架主立面上的X撑是支撑导管架主腿并传递环境荷载的关键结构。“海基”系列导管架构型依托浮动式下水桁架为主立面X撑提供平面外支撑,形成具有平面外支撑的X撑空间桁架结构^[10]。基于牛顿迭代算法与正交试验方法揭示了其整体屈曲能力,并提出有效长度修正方法,实现X撑支撑跨距突破至120 m,主水平层跨距突破至80 m,构建了超大跨距结构承载体

系。全新的“海基”系列导管架构型,相比传统导管架构型,实现导管架减重超15%。

2.2.2 结构在位设计关键技术

随着水深的增加,导管架平台刚度降低,导致自振周期增大(图4),结构动力响应更加显著^[11],节点疲劳问题更加严峻。传统的技术分析方法和手段,无法解决深水导管架结构的强度和疲劳问题。

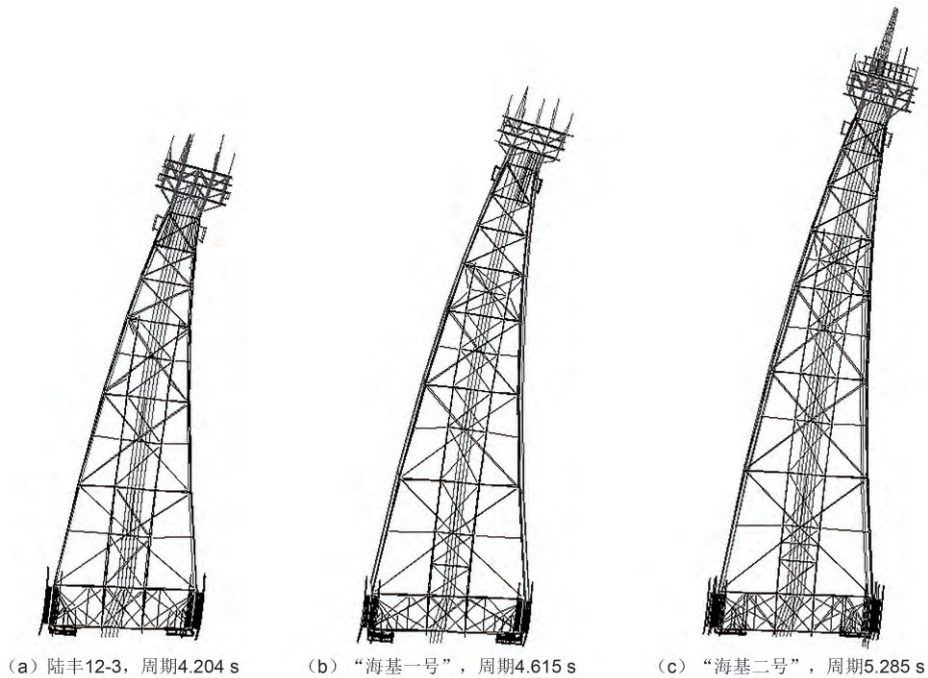


图4 深水导管架疲劳工况1阶自振周期

Fig. 4 First-order natural vibration period of deep-water jacket under fatigue conditions

为了预测300米级深水导管架在极端波浪作用下的动力响应,构建了深水导管架随机波时域动力分析方法^[12]。该方法采用Jonswap波浪谱理论开发非平稳随机波合成算法,重构台风极端随机波浪条件,并筛选出符合条件的20~30组时程波浪;通过Newmark- β 隐式积分法求解结构在随机波浪作用下的动力响应,基于剪力与弯矩动力放大系数,构建反应波浪动力效应的惯性荷载。与传统的频域线性分析方法相比,该方法预测精度更高,惯性荷载降低20%,显著优化了深水导管架设计荷载。

结构疲劳分析通常采用谱疲劳分析方法^[13],通过计算节点的应力集中系数,并结合S-N曲线和Miner疲劳累计损伤理论来预测节点的疲劳寿命。为解决300米级深水导管架高疲劳损伤难题,基于失效后果、疲劳敏感度、可检测性原则,建立了深水导管架疲劳安全分区设计原则与方法^[14]。构建了疲劳多尺度联合分析方法,建立全局-局部耦合模型,

实现识别疲劳热点区域、关键节点应力分布与焊缝细节应力集中的多级目标。

2.3 陆地建造与海上安装技术

2.3.1 陆地高精度建造技术

随着导管架工作水深由200 m突破至300 m等级,导管架陆地卧式建造难度大幅提升。卧式建造高度突破120 m,传统的旋转法和扣片法面临吊索具资源限制、吊装过程重心较高、高空组装与焊接难度高、风致涡激振动^[15]等问题。“海基一号”建造采用了新型吊装技术,通过优化分片方案及建造顺序,吊点标准化等措施,将2个A形片与其下方的下水桁架扣片一起预制,再利用外桁架扣片上的纵向拉筋将2个A形片连成一体,形成吊装单元“篮状结构”^[16];将扣片上的水平杆件划入水平片,采用临时拉筋将水平片拉筋连成上部封口的“水平层W片”;将2个正交平面结构组成空间结构,形成“叉状结构”等易于吊装的结构片,确保了施工精度。

“海基二号”卧式建造总长为 341 m,建造过程受到场地不均匀沉降以及地球曲率影响。为确保总装过程中的精确尺寸控制^[17],建造单位采用了一系列新型总装建造技术^[18]。例如,“海基二号”共布设了 90 个沉降监控点,并在其中 28 个节点位置采用可调节式垫墩,以解决建造过程中的不均匀沉降问题;在建造场地内建立高精度测量控制网,将三维坐标控制网与导管架设计模型匹配,形成深水导管架三维坐标控制网模型,修正地球曲率半径影响、归算改正主结构高程和水平数据(图 5),并基于相近站点进行数据复核,以控制单片吊装定位尺寸和结构整体合拢尺寸精度;依托高精度测量机器人、移动智能终端以及自主研发的平差处理系统,有效解决了因视线遮挡带来的测量误差问题;考虑温度补偿,根据相关经验公式及设计温度,同时为统一施工和验收时的标准进行温度换算,确保工程建设的精准确度。

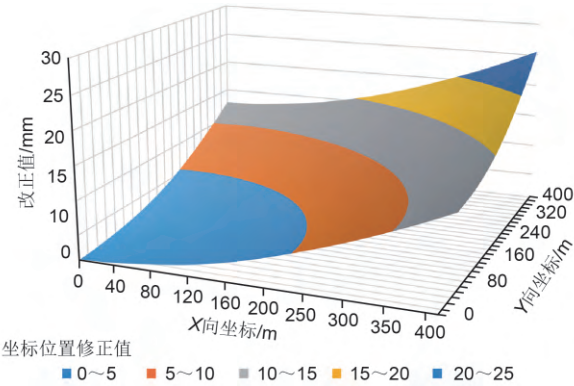


图5 地球曲率改正趋势
Fig. 5 Trend chart for earth curvature correction

2.3.2 海上高效安装技术

国内最大导管架下水安装驳船“HYSY229”船长仅 215 m,远低于 300 米级导管架卧式装船长度。中国海油首创了深水导管架“双跨”装船方案^[18-19],在船首设置 8 个钢绞线锚固点,在导管架滑靴前端安装 8 套拉力千斤顶,在滑靴后端安装 4 套助推千斤顶;启动时,拉力千斤顶与助推千斤顶共同推动导管架开始滑动;导管架滑动后,依靠拉力千斤顶绞拉钢绞线牵

引导管架逐渐前进,直至最终位置,以“海基二号”为例,导管架最终悬出船首 19 m,悬出船尾 107 m。

“海基”系列导管架的海上安装采用了多项创新技术。在充分考虑船体柔性变形的前提条件下,由拖航驳船与导管架运动耦合分析,提出一种柔性船体的导管架拖航分析方法^[20]。首次实现带压注水扶正设计及实施,研发了带压注水作业工艺,扶正作业期间不放空,通过放空管线压力精确判断注水量,安装作业完成后集中放空,大幅优化了扶正作业流程。首次实现水下灌浆设计及实施,研发水下灌浆材料选型配比、关键工艺及配套工装,解决了深水管线长、重量大、下放难、易堵管风险高等施工难题,形成了深水水下灌浆作业技术。

针对“海基一号”平台场址存在高差超 5 m 巨型沙波的问题,采用了“阶梯式”防沉板设计^[21]来主动适应海底地貌。与传统防沉板相比,阶梯式防沉板根据防沉区域标高,分区域确定防沉板高程,并考虑水平标高对水平荷载产生的倾覆力矩的影响;同时辅以姿态仪辅助就位系统,该系统可实时读取导管架姿态,给予现场直观决策,实现了导管架就位过程实时跟踪及引导就位,确保导管架能够在巨型沙波海床下顺利就位并进行精确调平。

2.4 结构监测与数字孪生技术

2.4.1 结构监测技术

结合南海的海洋环境特点及结构响应特性,中国海油建立了一套导管架结构健康管理系统^[22]。该系统根据导管架设计时的模型结构状态以及待测物理量的特性需求,在“海基一号”和“海基二号”的关键部位选取适用的传感器进行系统布设,检测其结构响应与海洋环境信息。结构响应监测包含导管架结构应力/应变监测、动态加速度监测、位移监测、倾角监测、上部组块重量重心监测(表 4);为了确保监测数据的准确性,特别关注水下载传感器的耐压密封技术,采用了水下光纤光栅传感器与主光缆(多芯光纤)的一对一高效熔接方式^[23],不仅便于施工操作,还显著提升了系统的冗余性和可靠性,成功实现了海上端结果的实时展示,进一步增强了系统的实用性。

表4 结构响应监测组成

Table 4 Composition of structural response monitoring

模块名称	监测设备	安装部位
应力/应变监测模块	光纤光栅应变传感器	计算中 UC 值较大的杆件及节点
动态加速度监测模块	三轴加速度传感器	导管架主腿
位移监测模块	振动式位移传感器	导管架主腿
倾角监测模块	倾角传感器	导管架带缆走道层
上部组块重量重心监测模块	载荷应变传感器	主腿上部与组块连接处

2.4.2 数字孪生技术

随着“海基”系列深水导管架的发展,首次采用了一套针对深水导管架的孪生方案(图6),侧重于模型修正、数据计算以及智能分析。一级孪生体是基于导管架有限元模型构建的数字孪生模型,借助实测加速和位移信号识别平台模态参数,通过调整模型上部载荷重量重心、桩土参数,修正孪生模型固有频率,并将实测前三阶固有频率作为模型验证标准,保证一级孪生体贴合平台实际在位状态,为后续数字孪生提供准确的模型基础。二级孪生体基于一级孪生体模型以

及综合监测子系统的海量实测数据,对平台展开仿真计算,结合有限测点的计算结果,反演整体结构的实际响应情况^[24],并采用多维空间线性插值(IDW)技术,结合孪生种子库,有效映射实际随机工况下的结构响应^[25],从而实现了通过有限测点反演整体结构、通过有限种子库的插值形成无限随机工况响应映射的预测能力。三级孪生体的核心是数据驱动的智能化深度学习,主要实现在位信息缺失时的导管架整体反演、精准结构损伤评估以及智能化预测,逐步替代二级孪生体模型。

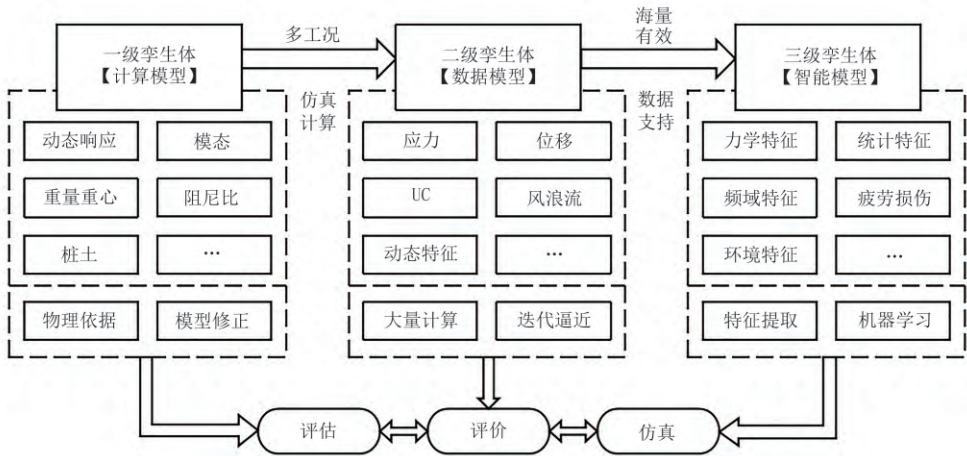


图6 三级孪生体技术示意图

Fig. 6 Diagram of three-level digital twin technology

以部署于“海基一号”的管理系统为例,自2022年7月试运行以来,已采集近4.0 TB数据。根据近年实际遭遇海况监测数据显示,风、浪、流数据远小于一年一遇设计海况,其中有效波高约为设计值50%,最大风速约为设计值的78%;平台实际位移约为设计值的15%,杆件轴力约为设计值的20%,真实监测结果显示实时杆件UC值只有个别杆件超过0.5。初步探究原因在于上部重量尚未达最大设计重量,环境条件未达设计一年一遇极值条件,初始就位工况结构尚未腐蚀减薄、海生物尚未长满等。此外,岩土的水平刚度、结构物在水中的阻尼、多柱结构波流系数等其他因素对其也有贡献。

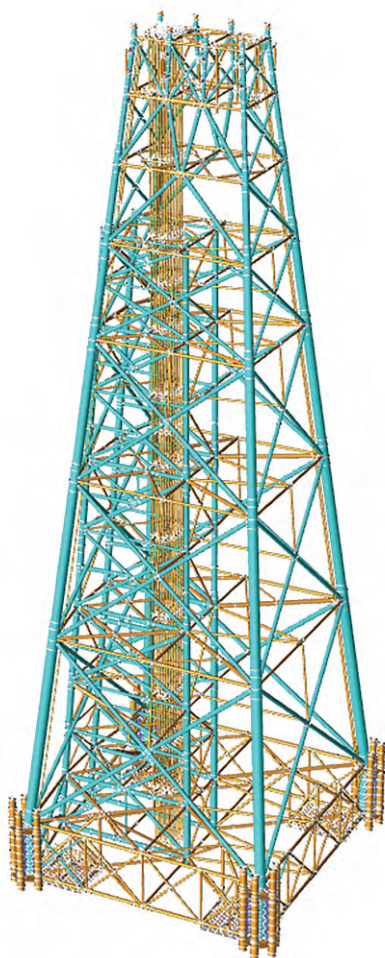
2.5 关键材料与安装工机具国产化研制

2.5.1 高性能结构材料及防护

深水导管架使用的钢材量巨大,整体重量显著增加,提高钢材强度是深水导管架减重的最直接方法。在国内所有深水固定平台的导管架结构中,中国海油首次在“海基二号”深水导管架上大规模应用了约20 000 t国产420 MPa屈服强度调制态交付的超高强钢,主要应用于导管架主腿、主立面X撑及下水桁架

节点等关键受力部位(图7绿色区域),钢板最大厚度达100 mm,实现了导管架质量减少约4 000 t^[26],并达到100 mm大厚度焊接接头断裂韧性CTOD值达到 $\geq 0.30 \text{ mm}@-10^\circ\text{C}$ 的高技术标准。

导管架防腐方法主要有牺牲阳极法和外加电流阴极保护法。与牺牲阳极保护法相比,外加电流阴极保护法通过电缆使导管架结构阴极极化,是一种主动防腐技术,能够精细调节各区域的保护效果,具有工期短、成本低、无金属离子溶解等优点^[27]。“海基二号”深水导管架首次应用牺牲阳极+外加电流双阴极保护方案,导管架内部设置4根张紧式外加电流(ICCP)复合缆,每根复合缆设置25组辅助阳极,牺牲阳极与ICCP联合保护时,每组辅助阳极额定输出60 A,ICCP系统总输出6 000 A,导管架整体电位为 $-1\ 100\sim -800 \text{ mV}$;若阳极耗尽后,仅采用ICCP保护时,导管架整体电位仍可达到 $-1\ 100\sim -800 \text{ mV}$,均处于良好的保护状态。双阴极腐蚀防护方案使系统防护冗余度提升100%,可有效保障30年超长服役期深水导管架的本质安全。



注:绿色区域为超高强钢。

图7 420 MPa超高强钢分布

Fig. 7 Distribution of 420 MPa ultra-high-strength steel

2.5.2 安装工机具

导管架安装工机具是海上安装的关键设备,包括注水与放空系统、夹桩器、封隔器(含阻泥环)、隔膜、灌浆系统、调平等。长期以来,这些设备完全依赖进口,被国外垄断长达30多年。为解决深水导管架安装工机具的国产化问题,中国海油联合国内厂商,开展了一系列导管架安装工机具国产化研发工作。

2024年3月,随着“海基二号”深水导管架工程的推进,首次完成1套2 743 mm(108″,夹持能力2 500 t)夹桩器,1套水深350 m、2 743 mm(108″)封隔器的应用,以及2 743 mm(108″)调平能力3 000 t、适用最大水深500 m调平器的首次海试。2024年7月,在西江30-2导管架工程中,完成了注水放空系统(液压注水阀、ROV注水阀、液压放空阀、手动放空阀、控制缆和动力站),4套2 438 mm(96″)国产夹桩器(图8a)^[28],4套2 438 mm(96″)国产封隔器(图8b)^[29],灌浆系统(51 mm(2″)单向阀、爆破片和

应急接头)的示范性应用。通过这些海上安装相关工机具的国产化生产和工程应用,中国成功打破了国外在这一领域的技术垄断。



(a) 夹桩器



(b) 封隔器

图8 国产工机具

Fig. 8 Tools and equipment developed by China

3 中国深水导管架平台工程技术发展方向及建议

中国已掌握300米级深水导管架平台全套工程技术,处于世界前列,并首次实现了深水导管架在线监测与数字孪生系统建设。未来,将着力拓展其在350 m以深海域应用的关键技术。

3.1 结构设计

结构动力响应与疲劳响应设计技术是拓展深水导管架平台应用水深边界的关键技术。未来需要突破超大型空间桁架结构的承载机理,优化空间复杂承载杆件的布置,提高结构的承载能力;开发考虑流体-结构-土体耦合的三维非线性数值模型,解决常规动力分析技术无法考虑桩土非线性作用导致动力响应高估的问题,并研究工程适用的深水导管架动力响应抑制技术;开展基于国产高强度大壁厚材料和焊接工艺的管节点疲劳测试分析,研究测试工程适用的焊趾打磨、超声冲击等疲劳改善技术并形成对应的疲劳改善S-N曲线。

3.2 结构材料

更高强度和更大厚度的高性能钢材是导管架进一步突破应用水深的关键材料,未来需要突破国产 420~460 MPa 级别极厚规格超高强钢板成套工业技术。发展超高强钢极限规格厚板(100~150 mm)的批量稳定化生产技术,研究超高强钢厚板材料设计技术,研究高变形渗透性、质量均匀性的特厚板轧制控制技术,开发高强韧性、良好截面均匀性的特厚板调质热处理工艺。发展国产超高强钢厚板的高效应用技术,构建超高强钢厚板的综合性能与应用特性评价指标,研发超高强钢厚板焊接工艺评价与应用评估技术。

3.3 智能化

优化设计智能化、建造安装智能仿真、数字孪生体升级是未来深水导管架进一步发挥价值的关键。深水大型导管架为多杆系空间桁架结构,其建模与设计优化工作量巨大,基于实测数据反演的智能优化建模求解可大幅提升结构优化设计水平^[30];深水大型导管架安装作业仿真系统对环境耦合作用、结构-装备-施工动态交互的建模,可大幅提升海上安装精度与效率,保障深水重大作业安全;构建振动频谱监测系统与时变刚度识别系统,研发符合力学规律的结构状态智能重构技术、时频域联合反演算法与高阶智能孪生体,可进一步释放“海基”系列深水导管架在海洋能源开发中的贡献价值。

4 结束语

中国深水导管架平台工程技术经过 40 多年发展,已在 300 米级水深内达到了国际领先水平。随着海洋油气资源的进一步开发,尤其是面向 400 米级水深的挑战,深水导管架平台技术仍需不断创新和进步。结合目前深水导管架技术发展情况,中国需要进一步加强核心技术的自主研发,实现海洋环境与岩土技术、结构设计技术、材料技术、数字及智能化技术的不断突破,推动深水导管架平台技术向更深水域、更高性能目标迈进,为中国南海陆坡区中深水油气与新能源开发提供经济、安全的地基,整套工程技术亦可为全球中深水能源开发提供解决方案。

参 考 文 献

- [1] 尹汉军,付殿福. 300 米级深水导管架在南海陆坡区应用的挑战与关键技术研究[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 147-154. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.01.018.
YIN Hanjun, FU Dianfu. Challenges and key technology research on the application of 300-meter deep-water jacket in the South China Sea continental slope[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 147-154. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.01.018.
- [2] 谭越,李新仲,王春升. 深水导管架平台技术研究[J]. 中国海洋平台, 2016, 31(1): 17-22.
TAN Yue, LI Xinzong, WANG Chunsheng. Research on deep water jacket platform [J]. China Offshore Platform, 2016, 31(1): 17-22.
- [3] 谢波涛,雷方辉,王俊勤. 平台基海洋环境立体监测系统的研制及应用[J]. 海洋技术, 2013, 32(1): 16-20.
XIE Botao, LEI Fanghui, WANG Junqin. Development and application of the Platform-Based marine environment monitoring system[J]. Ocean Technology, 2013, 32(1): 16-20.
- [4] 谢波涛,黄必桂,杨威,等. 南海北部东沙岛以西陆坡区 2021 年秋季内波特征统计与分析[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(6): 29-41.
XIE Botao, HUANG Bigui, YANG Wei, et al. Characteristic statistics and analysis of internal waves in the continental slope area West of the Dongsha Plateau on the northern South China Sea in the autumn of 2021 [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2023, 42(6): 29-41.
- [5] 王火平,陈亮,郭延良,等. 海洋内孤立波预警监测识别技术及其在流花 16-2 油田群开发中的应用[J]. 海洋工程, 2021, 39(2): 162-170.
WANG Huoping, CHEN Liang, GUO Yanliang, et al. Observing, identification and early warning technology of internal solitary wave and its application in Liuhua 16-2 oilfield group development project [J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(2): 162-170.
- [6] 冯湘子,李昱霏,王微微,等. 南海深水工程勘察挑战与案例分析[J]. 热带海洋学报, 2025, 44(1): 200-210.
FENG Xiangzi, LI Yufei, WANG Weiwei, et al. Challenges and case analysis of deepwater engineering investigation in the South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2025, 44(1): 200-210.
- [7] 李书兆,王忠畅,贾旭,等. 南海北部区域沉积黏土基本工程特性及打桩分析[J]. 中国海上油气, 2018, 30(5): 151-158. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2018.05.020.
LI Shuzhao, WANG Zhongchang, JIA Xu, et al. Fundamental engineering characteristics of cohesive sediments and pile driving analysis in northern South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(5): 151-158. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2018.05.020.
- [8] 李书兆,付殿福,张晖,等. 海洋典型粘性土触变强度恢复特性试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 59-66.
LI Shuzhao, FU Dianfu, ZHANG Hui, et al. Experimental study on recovery characteristics of thixotropic strength of typical marine clayey Soil [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 59-66.
- [9] FU Dianfu, LI Shuzhao, ZHANG Hui, et al. The influence depth of pile base resistance in Sand-Layered clay [J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7221.
- [10] 付殿福,陈景杰,张梦竹,等. 超大跨度空间 X 撑结构屈曲强度特性研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(3): 542-549, 598.
FU Dianfu, CHEN Jingjie, ZHANG Mengzhu, et al. Study on buckling strength characteristics of the super-span space X-brace structure [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 542-549, 598.
- [11] 冷建成,庞哲,宋立志. 极端风暴载荷下导管架平台的动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 10023-10029.

- LENG Jiancheng, PANG Zhe, SONG Lizhi. Dynamic response analysis of jacket platform under extreme storm load [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(23): 10023-10029.
- [12] 黄怀州, 胡永明, 袁玉杰, 等. 深水导管架时程动力响应分析技术[J]. 石油和化工设备, 2022, 25(7): 25-28, 33.
- HUANG Huaizhou, HU Yongming, YUAN Yujie, et al. Deep water jacket time history dynamic analysis technique [J]. Petro-Chemical Equipment, 2022, 25(7): 25-28, 33.
- [13] 田凯, 杜皓文, 刘杰, 等. 考虑桩基循环弱化的深水导管架谱疲劳分析[J]. 石油工程建设, 2024, 50(3): 6-10.
- TIAN Kai, DU Haowen, LIU Jie, et al. Spectral fatigue analysis of deep-water jacket considering cycle degradation of pile foundation [J]. Petroleum Engineering Construction, 2024, 50(3): 6-10.
- [14] 王琳, 丁果林, 柴俊凯, 等. 超大型深水导管架疲劳损伤精准分析技术[J]. 中国航海, 2024(增刊1): 179-186.
- WANG Lin, DING Guolin, CHAI Junkai, et al. Accurate fatigue damage analysis technology for ultra-large deepwater jacket [J]. Navigation of China, 2024(S1): 179-186.
- [15] 胡文韬, 刘利琴, 罗超, 等. 导管架圆管风致涡激振动对总体疲劳性能的影响[J]. 海洋工程, 2023, 41(2): 12-21.
- HU Wentao, LIU Liqin, LUO Chao, et al. Effect of wind-induced vortex vibration on the fatigue performance of circular tubes on jacket platforms [J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(2): 12-21.
- [16] 林天威, 胡智. 海基一号导管架总装方法选择与实践[J]. 装备制造技术, 2023(8): 204-207.
- LIN Tianwei, HU Zhi. Selection and practice of assembly methods for Haiji-1 jacket [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(8): 204-207.
- [17] 马光耀, 焦方利, 赵鹏志, 等. 300 m级深水导管架总装精度控制工法探讨[J]. 广东造船, 2024, 43(3): 82-84, 48.
- MA Guangyao, JIAO Fangli, ZHAO Pengzhi, et al. Discussion on the precision control method for the final assembly of 300-meter deep water jacket [J]. Guangdong Shipbuilding, 2024, 43(3): 82-84, 48.
- [18] 王彪, 崔广亮, 邱炜, 等. 深水导管架滑移装船技术研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(21): 20-23.
- WANG Biao, CUI Guangliang, QIU Wei, et al. A study of slip loading technology of deep-water jacket [J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(21): 20-23.
- [19] 邱炜, 崔广亮, 于文太, 等. 300m级超大型深水导管架装船关键技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(11): 196-198.
- QIU Wei, CUI Guangliang, YU Wentai, et al. Research on key loading technology for 300m-class super-large deepwater jackets [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(11): 196-198.
- [20] 张艳芳, 赵佳宁, 黄怀州, 等. 300m水深级深水导管架拖航分析方法[J]. 船海工程, 2023, 52(2): 102-104, 136.
- ZHANG Yanfang, ZHAO Jianing, HUANG Huaizhou, et al. On the towing analysis method of 300 m deep-water jacket [J]. Ship & Ocean Engineering, 2023, 52(2): 102-104, 136.
- [21] 傅健. 阶梯式防沉板在深水导管架安装中的应用[J]. 中国海洋平台, 2020, 35(4): 91-94.
- FU Jian. Application of stepped mud-mat in installation of deep-water jacket [J]. China Offshore Platform, 2020, 35(4): 91-94.
- [22] 王火平. 基于数字孪生技术的南海深水导管架平台健康管理系统[J]. 中国海洋平台, 2024, 39(6): 62-71.
- WANG Huoping. Health management system of deep-water jacket platform in the South China Sea based on digital twin technology [J]. China Offshore Platform, 2024, 39(6): 62-71.
- [23] 张奇, 孙道青, 李晓明, 等. 光纤传感技术在海洋平台结构监测中的应用[J]. 石油和化工设备, 2022, 25(5): 131-133, 136.
- ZHANG Qi, SUN Daoqing, LI Xiaoming, et al. Application of optical fiber sensing technology in offshore platform structure monitoring [J]. Petro-Chemical Equipment, 2022, 25(5): 131-133, 136.
- [24] 闫天红, 王维刚, 赵海峰, 等. 现役导管架平台结构监测系统开发与数字孪生技术[J]. 中国机械工程, 2021, 32(20): 2508-2513.
- YAN Tianhong, WANG Weigang, ZHAO Haifeng, et al. Development of structure monitoring systems and digital twin technology of active jacket platforms [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(20): 2508-2513.
- [25] 张艳芳, 程丛志, 周雷, 等. 基于数字孪生的深水导管架杆件轴力反演方法[J]. 科技导报, 2023, 41(15): 97-105.
- ZHANG Yanfang, CHENG Congzhi, ZHOU Lei, et al. Axial force inversion method of deepwater jacket platform based on digital twin method [J]. Science & Technology Review, 2023, 41(15): 97-105.
- [26] 王春升, 陈国龙, 孙友义, 等. 南海流花11-1油田二次开发工程方案及关键技术[J]. 中国海上油气, 2024, 36(3): 181-189. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.03.019.
- WANG Chunsheng, CHEN Guolong, SUN Youyi, et al. Secondary development engineering scheme and key technologies of LH11-1 oilfield in South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(3): 181-189. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.03.019.
- [27] 纪蒙生, 张延军, 刘登辉, 等. 外加电流防腐技术在导管架平台的应用研究[J]. 石油和化工设备, 2022, 25(10): 147-148.
- JI Mengsheng, ZHANG Yanjun, LIU Denghui, et al. Application of impressed current cathode protection technology in jacket platform [J]. Petro-Chemical Equipment, 2022, 25(10): 147-148.
- [28] 马德强, 李楠, 王伟, 等. 油气用深水导管架夹桩器测试技术研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2024, 11(1): 37-41.
- MA Deqiang, LI Nan, WANG Wei, et al. Research on testing technology of deep water jacket pile gripper for oil and gas applications [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2024, 11(1): 37-41.
- [29] 李怀亮, 李新超, 孙建帮, 等. 大型较深水导管架封隔器结构设计和制作工艺[J]. 山西建筑, 2021, 47(9): 27-28, 39.
- LI Huailiang, LI Xinchao, SUN Jianbang, et al. On structural design and manufacturing technology of packer for large deep water jacket [J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(9): 27-28, 39.
- [30] 王翀. 基于智能设计系统的海上导管架平台结构设计[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊1): 451-454.
- WANG Chong. Structure design of offshore jacket platform based on intelligent design system [J]. Ship Engineering, 2023, 45(S1): 451-454.

收稿日期:2025-04-22 录用日期:2025-07-22

(编辑:吕欢欢)