

“深海一号”能源站建设实践与创新

尤学刚¹, 周守为², 张秀林¹, 刘孔忠¹, 徐化奎¹, 刘新宇¹, 曾冬¹

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570311; 2. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100028)

摘要:“深海一号”大气田是我国首个自主发现和勘探开发的超深水大气田, 探明天然气储量超千亿立方米。为经济高效地开发该气田, 我国首次采取“半潜式生产储卸油平台+水下生产系统+海底管道”的全海式开发模式, 通过自主设计、优化组织与管理、强化技术攻关与创新, 成功建造了全球首座10万吨级深水半潜式生产储卸油平台——“深海一号”能源站。本文在简要阐述“深海一号”大气田开发的建设背景和面临的挑战基础上, 介绍了深水气田开发模式的优选与突破, 深入总结了“深海一号”能源站在设计与建设过程中的半潜式平台立柱储油、超大吨位开口结构物预斜回正荷载横向转移、超大结构物半漂浮精准合拢等重大技术创新突破与价值经验, 以期为今后我国深水、超深水油气田高效开发及半潜式平台高水平建设提供有益参考。

关键词: 超深水; 半潜式; 能源站; 立柱储油; 横向转移; 半漂浮合拢

中图分类号: TE42 **文献标识码:** A

Construction Practice and Innovation of “Deep Sea One” Energy Station

You Xuegang¹, Zhou Shouwei², Zhang Xiulin¹, Liu Kongzhong¹, Xu Huakui¹,
Liu Xinyu¹, Zeng Dong¹

(1. China National Offshore Oil Corporation China Ltd., Hainan Branch, Haikou 570311, China; 2. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100028, China)

Abstract: The “Deep Sea One” energy station is the first ultra-deep-water large-scale gas field that is independently explored and developed by China and its proven reserves of natural gas exceed hundreds of billions of cubic meters. This energy station is also the first 100 000-ton deep-water semi-submersible production, storage, and offloading platform worldwide; it adopts a whole sea development mode that integrates a semi-submersible production, storage, and offloading platform, a subsea production system, and submarine pipelines. Moreover, the energy station is built by conducting independent design, optimizing organization and management, and strengthening technical research and innovation. This paper first reviews the construction background and challenges, introduces the optimization and breakthroughs of the development modes of deep-water gas fields, and then summarizes the major technological breakthroughs and experiences during the design and construction of this energy station, including oil storage in columns of semi-submersible platforms, load lateral transfer of super-tonnage open structures via pre-inclination and return, and half-floating integrated precisely of super large structures. This study is hoped to provide a useful reference for efficient development of deep-water and ultra-deep-water oil and gas fields and for high-level construction of semi-submersible platforms.

Keywords: ultra-deep water; semi-submarine; energy station; oil storage in column; lateral transfer; half-floating integrated

收稿日期: 2022-04-05; 修回日期: 2022-05-06

通讯作者: 尤学刚, 中海石油(中国)有限公司海南分公司高级工程师, 研究方向为海洋工程; E-mail: youxg@cnooc.om.cn

资助项目: 工业和信息化部高技术船舶与科研项目“深水半潜式生产储卸油平台工程开发”(MC-202030-H04)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

海洋油气具有极大的勘探开发潜力，深海已成为全球油气储量接替的重点区域，也是勘探开发技术创新的热点和前沿 [1]。从探明程度来看，海洋石油、天然气的资源总体探明率分别为 23.7%、30.6%，尚处于勘探早期阶段；其中，浅水、深水、超深水的石油资源探明率分别为 28.1%、13.8%、7.7%，天然气分别为 38.6%、27.9% 和 7.6% [2]。当前，深海油气逐渐成为我国油气资源勘探开发的重点领域与方向 [3]。加大对深海油气资源的勘探开发，是未来增储上产的关键，对保障我国能源安全意义重大。

20 世纪末至 21 世纪初，我国曾与国外两次合作勘探南海莺琼盆地深水区 [4]，但均未成功。为此，深刻认识到粗放式的深海勘探不符合我国实际，并坚持自主创新、精细勘探与深化研究，经过近 10 年的反复探究和摸索，最终落实了南海陵水 17-2 区块（“深海一号”大气田）的含油气构造。2014 年，通过钻探探井，进一步明确了油气成藏、含油气性、储层、构造及油气田产能等数据，摸清了莺琼盆地深水区天然气成藏机理，中海石油（中国）有限公司最终对外公布发现了储量超千亿立方米、最大水深超 1500 m 的南海超深水大气田。

面对如此水深的气田开发，前期研发设计团队坚持创新导向，一方面全面对标国际上典型深水气田的开发模式、技术方案、建设实践经验与教训，另一方面充分调研、了解国内建造资源并进行定制化设计，以期大幅降低工程投入，带动国内产业链发展，最终创造性提出了在深水区部署一座带立柱储油功能的半潜式生产储卸油平台进行气田开发的模式。本文在简要介绍大气田和“深海一号”能源站概况的基础上，系统介绍在工程设计中创立的半潜式深水多立柱生产储卸油平台理论研究方法和设计技术、陆地建造中首创的世界最大吨级开口结构物预斜回正荷载横向转移技术以及 5 万吨级超大结构物大变形半漂浮精准合拢技术。这些技术的创立和成功应用，丰富了我国现有深水油气田开发工程装备的核心技术体系，可为我国今后深水油气田开发提供有力的借鉴和参考。

二、深水气田开发模式的优选与突破

“深海一号”气田的气藏分布分散，具体表现为：有 7 个井区、11 口开发井；稳产年限为 10 年；累产气为 $5.615 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，累产凝析油为 $3.491 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，最大日产水量为 $668 \text{ m}^3/\text{d}$ ；井位距离跨度达 58 km（纵向为 30.4 km，横向为 49.4 km）。“深海一号”气田井位分布情况如图 1 所示。在气田开采方案设计时，如果采用干树平台最多只能钻两口井，水下生产系统回接将成为必然；而“深海一号”气田若采用回接至深水浮式平台开发方案，凝析油的去向将成为难点。因为若选择通过崖城（YC）13-1 气田输送至海南南山终端处理合格后再外输销售，凝析油管道将长达 180 km，这种跨越深水区 and 浅水区的输油管道成本极其高昂，经济效益不佳。为此，考虑到凝析油外输海底管道的建设成本，技术团队创造性地提出了将凝析油储存在浮式平台上，再通过穿梭油轮进行外输的方案。

（一）浮式平台的方案比选

国际上通常采用 5 种深水浮式平台，主要包括：张力腿式平台（TLP）、半潜式生产平台（SEMI）、单立柱深吃水平台（SPAR）、常规船型浮式生产储油轮（FPSO）和圆筒形 FPSO。根据工程应用经验与初步技术评估，TLP 适合干树 [5]，目前 TLP 的极限水深为 1500 m，该水深的张力腿系统费用非常高，且平台不适合储油，平台投资远高于其他方案。我国具备丰富的常规船型 FPSO 建造运营经验，但由于常规船型 FPSO 无法适应本项目的钢制立管，需要新建单点转塔系统，立管方案需改为柔性立管，增加的单点和立管投资较高，总体上缺乏技术和经济上的优势。

前期研发团队针对剩余 3 种不同的浮体类型（见图 2）进行了经济技术研究，如表 1 所示。①在技术方面，SEMI、SPAR、圆筒形 FPSO 在技术上都可以满足大尺寸钢制悬链线立管（SCR）的要求，其中，SPAR 的立管方案技术最优，SEMI 和圆筒形 FPSO 都须为大尺寸 SCR 量身定做。②在建造方面，SPAR 平台国内无建造安装经验，圆筒形 FPSO 受制于结构形式无法实现整体吊装合拢，建造周期较长。SEMI 由于可以将下部浮体和上部模块分开建造并在场地合拢，因此建造最为简单、工

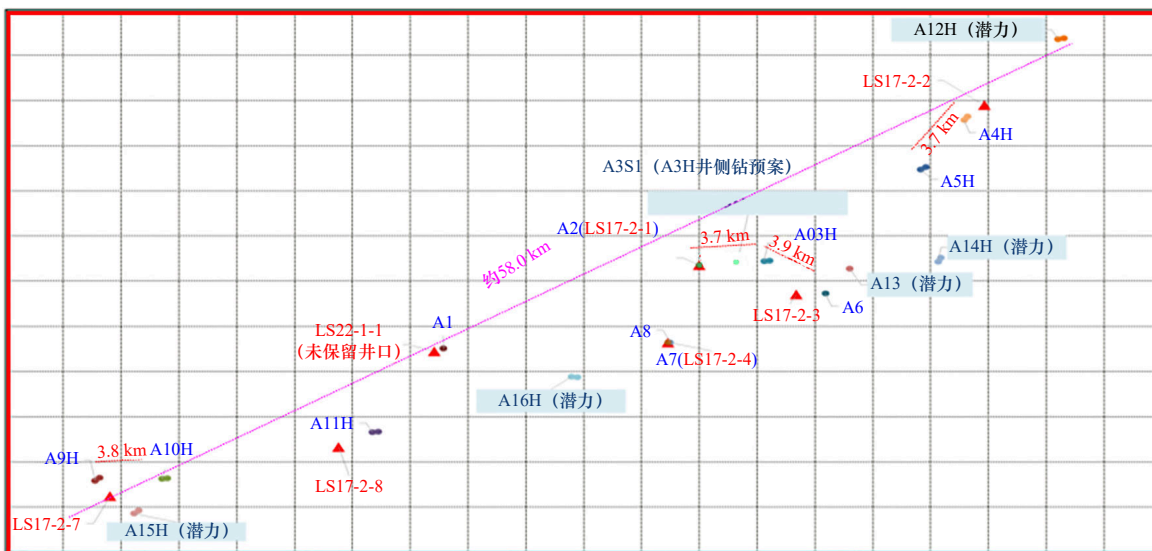
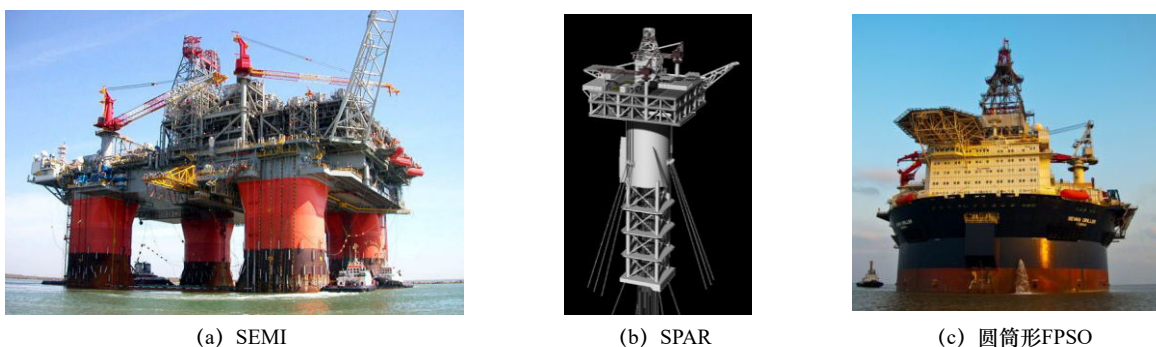


图1 “深海一号”气田井位分布示意图



(a) SEMI

(b) SPAR

(c) 圆筒形FPSO

图2 适用于“深海一号”气田的浮式生产平台型式

表1 3种深水浮式平台的情况对比

平台情况	SEMI	SPAR	圆筒形FPSO
设计能力	具备设计能力的公司超过5家	仅法国德西尼布 (Technip) 集团公司1家	仅挪威塞旺海事 (Sevan Marine) 公司1家
水深和SCR的适应性	可适应, 下部浮体深吃水	立管友好型	无应用先例, 但技术上可行
储油功能	技术上可实现	技术上可实现	技术上有优势
平台建造	下部浮体采用整体建造, 上部模块实行整体建造, 在船厂通过大型龙门吊或码头吊合拢; 国内的船厂建造经验丰富	下部浮体采用整体建造、上部模块需分开建造; 并在海上完成合拢安装, 我国无建造经验	下部浮体采用整体建造, 上部模块实行分块建造, 在船厂通过大型龙门吊或码头吊合拢; 我国仅少数船厂有建造经验
海上安装	整体拖航、海上回接	下部浮体整体拖航、海上扶正并与系泊系统回接; 模块在海上分块吊装和海上调试	整体拖航、海上回接
建造安装调试工期	短	长	中
投资	低	中	中
深水气田应用情况	分散深水气田最常用	干树应用最常见	无应用先例, 但技术可行

期最短,且国内船厂的SEMI建造经验最为丰富。③在投资方面,SEMI工程量最小,资金投入最小,具备更好的经济优势;且SEMI相比于SPAR和圆筒形FPSO,具有更好的议价能力。

(二) 创新解决凝析油的储运难题

凝析油储运是“深海一号”气田项目开发过程中需重点考虑解决的问题,相比专门建设180 km长的海底管道外输,在平台上存储是最优选择。目前,在世界上已投产的SEMI中,墨西哥湾的Na Kika平台在浮箱设计了储油功能,适合存储数量变化较慢较少的死油,最多能够储存6400 t死油。根据工艺要求,“深海一号”能源站凝析油舱为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。但凝析油的储存量是频繁变化的,如果储存在浮箱内,扣除规范要求的隔离舱尺寸1.5 m后,舱室高度仅为6 m,最大设计舱容刚好是 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,其面临的主要问题有:①进舱和外输管线布置、惰气和透气管线布置、量舱系统距离立柱顶较远,凝析油输送管线需完整穿过平台立柱,轮机系统设计面临安全风险;②凝析油外输更加困难,对外输泵的性能要求更高,能耗更大;③凝析油舱外隔离舱的检查 and 检修异常困难,给海上作业带来不便;④压载水舱需设置在立柱,由于破舱要求,压载舱需上下布置,不利于排载系统设计和排载作业;⑤在压载工况时,立柱将装载 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的

压载水,这将导致平台操作重心大幅度提高,平台稳定性不足又将导致主尺度显著增加,进而带来工程投资的大幅度上涨;⑥频繁的浮箱装卸作业将使浮箱与立柱间的载荷分布更加不均,为在位关键结构的可靠性带来新的挑战。

为此,“深海一号”气田项目的技术团队创新性地提出了采用半潜平台立柱储油的方案,很好地解决了上述难题。综合考虑设计、建造、安装、工期等因素,“深海一号”气田在世界上首次提出并成功实施了深水半潜式生产储卸油平台(“深海一号”能源站)和远程水下生产集输系统的全新深水气田开发模式,相比回接浅水,大大节约了资金投入,并能实现多生产约 $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 天然气。

三、“深海一号”大气田工程建设概况

(一) “深海一号”大气田概况

“深海一号”大气田位于琼东南盆地北部海域,距离海南三亚约150 km,距现役YC13-1气田约160 km,气田所处海区属低纬度热带海洋气候,海况受台风和季风影响,最大潮差为2.24 m,气田最大水深超1500 m。“深海一号”大气田的开发方案采用的是浮式平台方案。该方案的工程设施是由一套水下生产系统、一座浮式半潜式生产储卸油平台(“深海一号”能源站)和海底管道构成(见图3)。

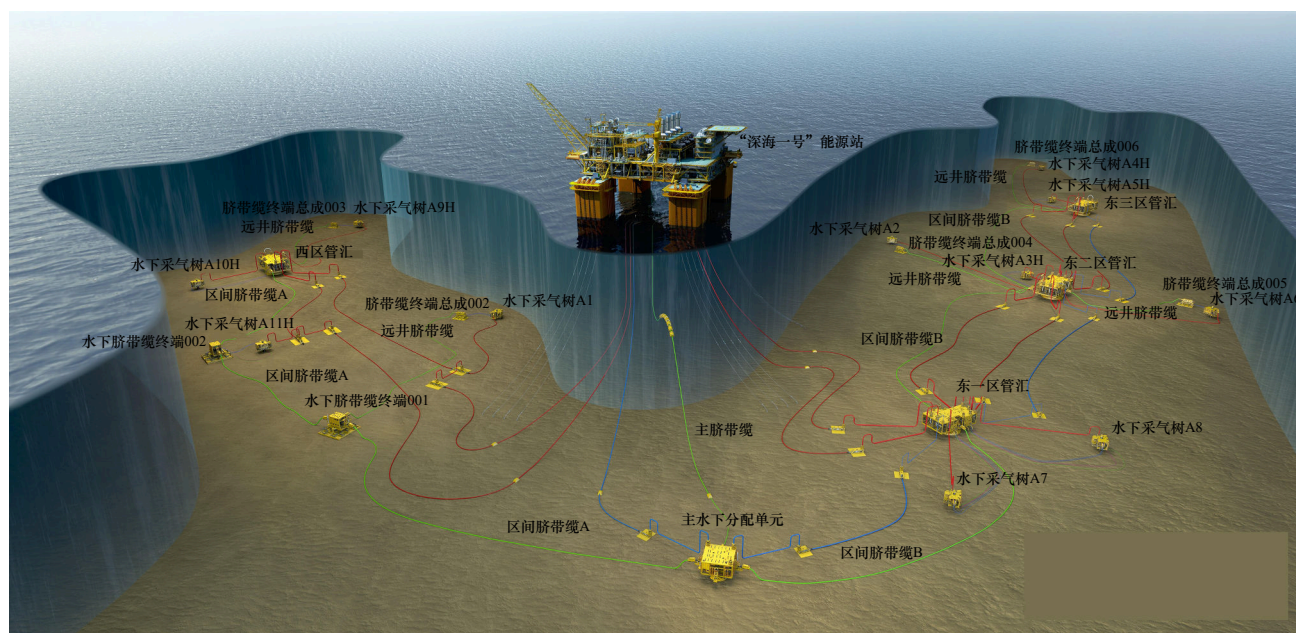


图3 “深海一号”气田开发项目枢纽示意图

其中，“深海一号”能源站是整个气田的大脑和 中枢，是项目成功建产最核心、最关键的设施。气田投产后，每年可为粤港琼输送约 $3.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的优质清洁天然气。项目的建成也标志着环海南岛并辐射香港、广东、广西的海上天然气大管网最终成型。

（二）“深海一号”能源站简介

“深海一号”能源站是“深海一号”大气田开发工程项目的核心和枢纽，来自东、西区水下井口的油气水等物流分别通过2条10英寸（1英寸=25.4 mm）、2条12英寸的海底管道和SCR，源源不断地输送上平台，进入平台主工艺系统进行高效的油气水分离。经过处理、干燥和增压的天然气通过约90 km的18英寸干气管道输送到YC13-1平台至香港的海底天然气管道中；经处理合格的凝析油存储在能源站的4个立柱储油舱内，定期通过动力定位（DP）油轮外输。

“深海一号”能源站是全球首座采用立柱储油舱存储凝析油且兼具油气处理、油气外输功能的深水半潜式生产作业平台。这一平台由上部模块和下部浮体两部分组成，总重量为 $5.3 \times 10^4 \text{ t}$ ，总高度为120 m，按30年不回坞检修的高标准来设计、建造，部分关键结构设计的疲劳寿命高达300年，可抵御百年一遇的超强台风。其中，上部模块是世界上最大的整装桁架式半潜平台组块，由23个甲板片组成，装配了近200套关键油气处理设备，并包含一个可以容纳120人的生活楼。上部模块的设计重量近 $2 \times 10^4 \text{ t}$ ，敷设电缆总长达 $4.3 \times 10^5 \text{ m}$ ；下部浮体自重约为 $3.3 \times 10^4 \text{ t}$ ，长为91.5 m，宽为91.5 m，高为59 m；由“回”字形底浮箱和4个立柱组成，最大排水量为 $1.05 \times 10^5 \text{ t}$ ，4个凝析油舱分别位于下部浮体4个立柱内（见图4），可储存凝析油约为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

（三）工程建设难点分析

“深海一号”大气田是我国首次自主开发建设的深水气田，国内尚无先例，经验匮乏，在部分关键技术和设备被国外市场高度垄断的情况下，在如此短的工期内首次自主完成全球首座10万吨级深水半潜式生产储卸油平台的设计、建造和安装，被业界普遍认为是“不可能完成”的投产目标。该工程在项目进度、技术、风险、安全、质量、费用等方

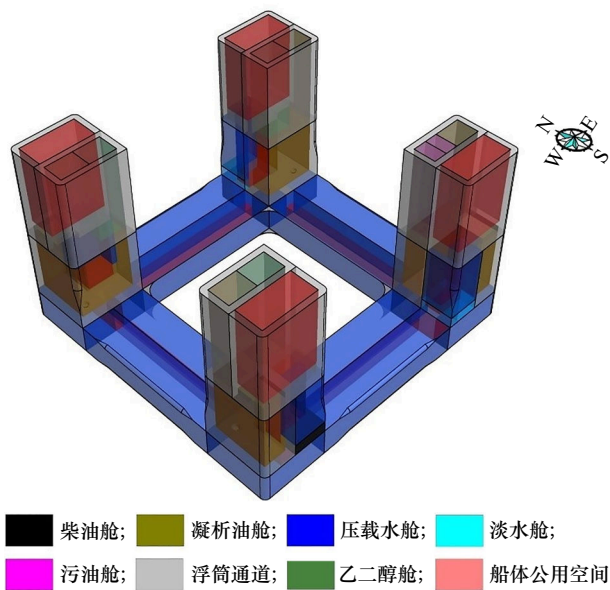


图4 “深海一号”能源站首创的半潜平台立柱储油技术示意图

面面临的难点与挑战如下。

1. 工程技术难题多

“深海一号”能源站的建设面临诸多工程技术难题，需攻克10万吨级半潜式深水多立柱生产储卸油平台设计与建造技术、5万吨级超大结构物大变形半漂浮精准合拢技术、3万吨级结构物预斜回正荷载横向转移技术等前所未有的难题；需要攻克半潜式生产储卸油平台船型开发与设计技术、50米级跨距整体桁架式组块设计及建造技术、30年不进坞维修的浮体结构疲劳设计与检测技术等多项国内、行业顶级技术难题。

2. 建造质量和精度要求高

由于气田所在海域水深最深达1500 m，平台与系泊缆、SCR的连接多且技术难度高，出于技术风险和经济性考虑，“深海一号”能源站制定了30年不回坞检修的设计要求，特别是部分关键区域按300年疲劳寿命的高标准设计，上部模块和下部浮体建造的结构、涂装、管线等都遵循极严苛的技术标准和精度要求。下部浮体更是叠加了数项世界级建造难度要求：底部“回”字形浮箱长、宽各为91.5 m，4个立柱高为59.5 m，因而对浮体立柱总装搭载所在的场地及其承载力有着超高要求；4个立柱自由开口式浮体形式对变形控制及上下合拢带来巨大挑战，因而59.5 m高的立柱对角建造最大允许偏差仅为 $\pm 13 \text{ mm}$ ，比国际船级社协会

(IACS) 标准 [6] 要求的 $\pm L/1000$ mm 还高出 4 倍。

3. 安全管控难度大

项目工期紧张、建造现场施工人员最多时超 3000 人, 组块甲板总装、浮体分段装卸驳船、浮体滑道总装搭载等大型作业频繁, 更有上部模块和下部浮体整体吊装合拢这种世界级难度的大型作业; 高空作业、有限空间作业、大型浮吊与履带吊的交叉作业、潜水作业等高风险作业多, 施工作业船舶多, 加上突如其来的新型冠状病毒肺炎疫情, 无论是施工机具还是人员管控, 在健康安全环保(HSE) 管理上都面临巨大挑战。

4. 内外影响因素多

项目建设过程面临诸多内部、外部影响因素。例如, 气田在开发建造过程中, 受中美贸易摩擦影响, 一些关键设备、关键核心技术等的引进受到制约, 极大影响了项目的实施; 新型冠状病毒肺炎疫情影响的大流行使外籍人员入境、出境, 设备的建造、交货、进出口清关等环节都有不同程度的延误, 这对本就紧张的建造工期以及刻不容缓的建造进度都带来了极大的影响; 水下生产系统管汇、电液分配终端安装, 海管、脐带缆铺设、锚桩安装, 系泊缆和钢悬链线立管铺设等海上安装工程量巨大, 施工船舶机具资源少且紧张等。

四、“深海一号”能源站的设计与建造技术创新

“深海一号”能源站是我国在世界上首创的深水半潜式生产储卸油平台开发模式的核心装备, 大幅提升了气田开发的效益和可行性, 然而要建成“深海一号”能源站, 面临多项设计和建造难题: ①没有“水下生产系统回接半潜式生产储卸油平台”开发模式可供参考; ②“深海一号”集成功能多、结构复杂, 给结构设计带来巨大挑战; ③缺乏深水半潜储油平台自主建造经验; ④起吊重量大, 能进行整体吊装合拢的资源稀缺; ⑤全球范围内尚没有 3 万吨级开口大变形结构物的横向装船经验。为此, 陵水 17-2 气田开发工程项目的技术团队勇攀技术高峰, 相继攻克了多项世界级难题, 创造了 3 项世界级创新、13 项国内重大技术突破以及 10 多项行业技术难题, 本文选取其中最具有代表性的技术突破予以阐述。

(一) 世界首创 10 万吨级半潜式深水多立柱生产储卸油平台设计与建造技术

1. 首次提出了半潜式生产储卸油平台母型船设计分析方法

半潜式储卸油平台的特点与难点是舱容要求高、载荷变化大而带来的不稳定性, 合理的船型设计是最关键的第一步。突破阻尼对马修不稳定性 [7] 的抑制机理, 在“深海一号”能源站上, 创新性开展了扁平浮箱设计, 深入研究深水小水线面浮式结构稳定性与低频运动耦合技术, 建立了南中国海的波流耦合、高波陡特性下低频运动的预报方法。

在“深海一号”能源站作业期间, 凝析油舱时刻与浮箱中的压载舱进行装载置换, 舱室的位置差异导致平台的整体重心总是处于变化状态, 对平台的横摇周期产生显著影响。横摇固有周期如果落在 2 倍垂荡固有周期上, 会产生潜在的马修不稳定性, 这是“深海一号”半潜式生产储卸油平台在设计中面临的一个重要挑战, 必须要通过低频响应预报技术予以解决 [8]。

针对半潜式平台不同的装载工况, 首次建立了半潜式生产储卸油平台设计分析方法, 以 37 m 吃水的满载工况为重点研究工况, 计算平台的运动性能。通过控制平台主尺度来改善水动力性能, 垂荡固有周期(见图 5) 为 22.5 s, 最大横摇固有周期为 42.4 s (满载), 将横摇固有周期控制在 2 倍垂荡固有周期以下, 有效避开了马修不稳定区域。同时, 通过模型试验对“深海一号”的运动特性进行了验证, 确保了运动性能预报的准确性。此项技术克服了半潜式生产储卸油平台重心急剧变化带来的技术难题。

2. 创立了带大型储油舱的多立柱半潜式平台下部浮体设计技术

“深海一号”能源站作为世界首个具有储油和

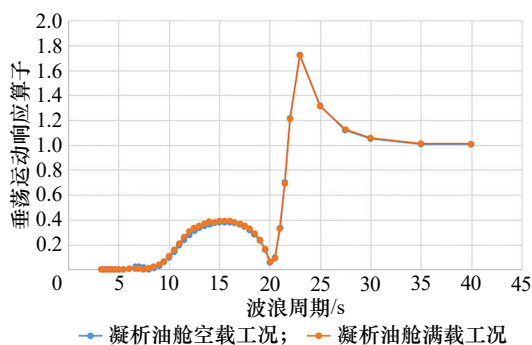


图5 “深海一号”能源站垂荡运动特性研究

外输功能的SEMI，在下部浮体的内部结构设计时，在布置储油舱的同时，还需布置压载舱、设备舱、污油舱等多种舱室，结构十分复杂。在结构设计上，需要应对储油安全需求、外输作业安全需求和储卸油引起的平台吃水改变。为确保储油安全，在凝析油舱周围设置了一圈隔离舱；为确保外输作业安全，对水面附近的下部浮体结构采用了防撞设计；为确保满足平台吃水的改变，在平台飞溅区范围和外板结构均采取了特殊设计，整体结构也在不同吃水条件下分别进行了设计分析。

在立柱设计中，为保证有足够的储存容积，立柱尺寸设计为21 m×21 m，如此大的尺度需要充分考虑内部的结构支撑。从确保疲劳寿命考虑，支撑结构的连续性越大越好，但由于内部储存的凝析油需要实现比较好的流通性，这就要求支撑结构不能太封闭。经过多轮优中选优的设计迭代，最终确定了大开孔形式的舱壁结构（见图6），通过多立柱大型储油舱大跨距结构支撑技术，实现了舱室中部区域较好的流通性和舱壁连接区域较好的连续性。

为保证凝析油舱室在外输作业期间的结构安全，在立柱结构设计中采用了全新的双层壳体结构设计（见图7），利用一道水平板替代内外壳体上的强梁支撑，新型防撞技术在节省钢材用量的同时，提升了结构连续性。在设计中通过运用数值分析手段，模拟了船舶碰撞下部浮体的结构受力和变形情况，验证了立柱结构的防撞能力。此外，在平台外壳上，还专门设置了防撞的保护框架和橡胶护舷，能够为平台提供很好的缓冲保护。

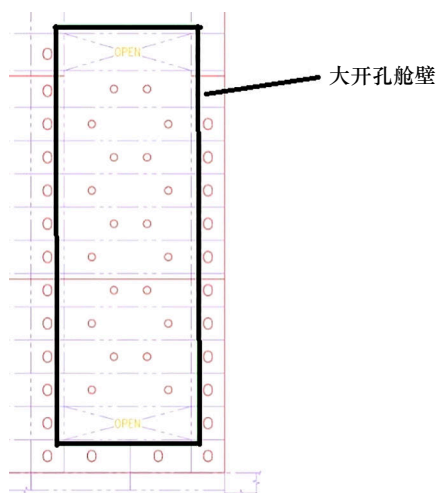


图6 多立柱大型储油舱大跨距结构支撑设计

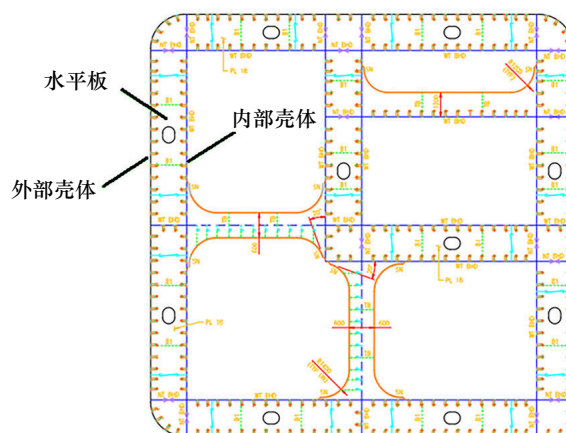


图7 双壳体加水平板结构的防撞设计

3. 国内首次应用半潜平台下部浮体滑道总装搭载技术

常见的SEMI下部浮体建造都是在船坞内进行，通过龙门吊进行总段搭载合拢，坞内漂浮下水。陵水17-2气田项目在没有适用船坞的情况下，海洋石油工程（青岛）有限公司建造场地通过改造5号滑道，提高场地承载力，合理调配场地资源，发挥自有资源特长，创新地在滑道上铺设滑道块，通过重载运输车/自行式模块化运输车（SPMT）进行L形总段运输就位、采用履带吊和浮吊联合吊装搭载浮体立柱总段的方式，高效完成了“深海一号”能源站下部浮体的建造。该施工技术创造了半潜平台下部浮体的码头滑道建造方式，解决了没有船坞、坞底承载力不够等场地受限难题，并在以下方面取得了改进和创新。

(1) 垫墩重复使用，节省材料费用。基于场地能力、施工流程、设备使用要求、下部浮体结构形式、装船方式等因素，设计了可重复使用的装船垫墩和运输垫墩。在码头建造时，装船垫墩提前摆放在总装滑道，用于建造支撑；在装船阶段，则用于液压滑靴顶升支撑；在海上运输阶段，则用于海固运输支撑。数量众多的垫墩在总段预制、运输、精度调整、总装搭载阶段均重复利用，节省了大量的材料费用。

(2) 大型总段运输就位，提高建造工效。下部浮体底部节点和浮箱划分了2个3000吨级大型L形总段（见图8）。在2个总段分别建成后，可以直接运输就位，增加了在车间安全稳定环境下的作业量，减少了在总装场地的露天高空作业，大幅提高

了作业品质和生产效率。

(3) 履带吊和浮吊吊装搭载下部浮体立柱总段, 缩短项目工期。在滑道进行总装, 场地限制较少, 可以使用多台大型吊机协同或与浮吊并行开展总段搭载合拢 (见图9), 突破了船坞吊机额定起重量和吊机数量的限制。一方面, 可以增大总段重量, 减少总段数量, 从而减少高空焊接和脚手架搭建的工作量, 节省人力成本, 也使得施工更具安全性; 另一方面, 可以开展并行吊装作业, 提高工作效率, 大幅缩减了项目工期。

基于以上优化和改进措施, “深海一号” 能源站下部浮体的建造总装工期由原来的12个月减少到6个月, 创造了国内外相近规模的SEMI建造总装周期的最快纪录。

(二) 世界首创5万吨级超大结构物大变形半漂浮精准合拢技术

“深海一号” 能源站的半潜式平台由整装桁架式的上部模块和多立柱式带储油舱的下部浮体组成, 为约5万吨级的超大结构物选择合理的合拢方案是关系到项目成败的关键。海洋工程界SEMI的合拢方式通常有分块吊装合拢、整体吊装合拢、顶



图8 大型L形总段及滑道搭载



图9 海陆同时吊装搭载作业

升合拢、浮托合拢等 [9], 不同的方式各有优缺点。项目技术团队经过长时间论证, 综合考虑技术成熟度、施工工期、作业风险等方面, 最终选择了整体吊装合拢方式。

“深海一号” 能源站选择使用国内2万吨级泰山吊进行吊装合拢作业, 双吊梁的间距为 (42.5 ± 7.0) m, 合拢时的吊装跨距不超过 49.5 m, 这也成为平台总体设计的最大跨距。同时, 受船坞水深限制, 选择了坐底合拢的方式, 在实际作业时需要着重解决好精确坐底安全和对接主动控制两项关键技术难题。

1. 下部浮体坞内精确定位及坐墩技术

为保证顺利合拢, 实现下部浮体与上部模块的精确定位是关键一环。整套精度定位作业涉及建造精度、安装精度、就位精度等多个环节, 要保证每个环节都在精度允许的范围内并实现最终的精度匹配, 是一项复杂的系统工程。以往合拢项目通常采用绞车牵引下部浮体定位, 精度为 100 mm, 无法满足 ± 13 mm 的精度控制要求, 为此, 在方案设计时, 提出增加定位辅助装置。定位辅助装置的作用是增加下部浮体定位精度、限制合拢过程中的下部浮体倾斜等。在结构设计时, 既要考虑该装置本身的结构强度, 又要保证在接触位置不能对平台结构造成损伤, 最终在北侧和西侧各布置了2套大坞限位装置 (见图10), 配以液压千斤顶用于合拢时下部浮体精度调整。为避免限位装置与下部浮体外部结构干涉, 限位装置设计为外探式, 在干坞布墩阶段安装完成, 定位时以大坞样线为基准进行现场定位; 同时增加胶皮以防止与下部浮体结构的碰撞损坏。

2. 大开口式下部浮体变形分析及控制技术

通常情况下, 半潜平台合拢作业中的下部浮体需要设置专用支撑框架用于控制运输和合拢阶段的下部浮体变形 [10], 但因为跨距较大和波浪拍击的影响, 支撑框架需要大量的结构用钢, 同时管节点的连接位置会造成局部的应力集中, 在服役过程中存在失效风险。“深海一号” 能源站在立柱内储存凝析油, 客观上造成下部浮体重量集中在4个立柱上, 下部浮体在运输和合拢过程中将变形更甚 (见图11), 如遵循先例设置水平支撑, 不但会造成结构浪费, 还会增加服役期间的失效风险。经过缜密分析和确认, 取消了水平支撑设计, 运输阶段下部浮体强度可以满足要求, 且在合拢作业时下部浮体的变形可以通过调整压载水的方案来满足合拢精度

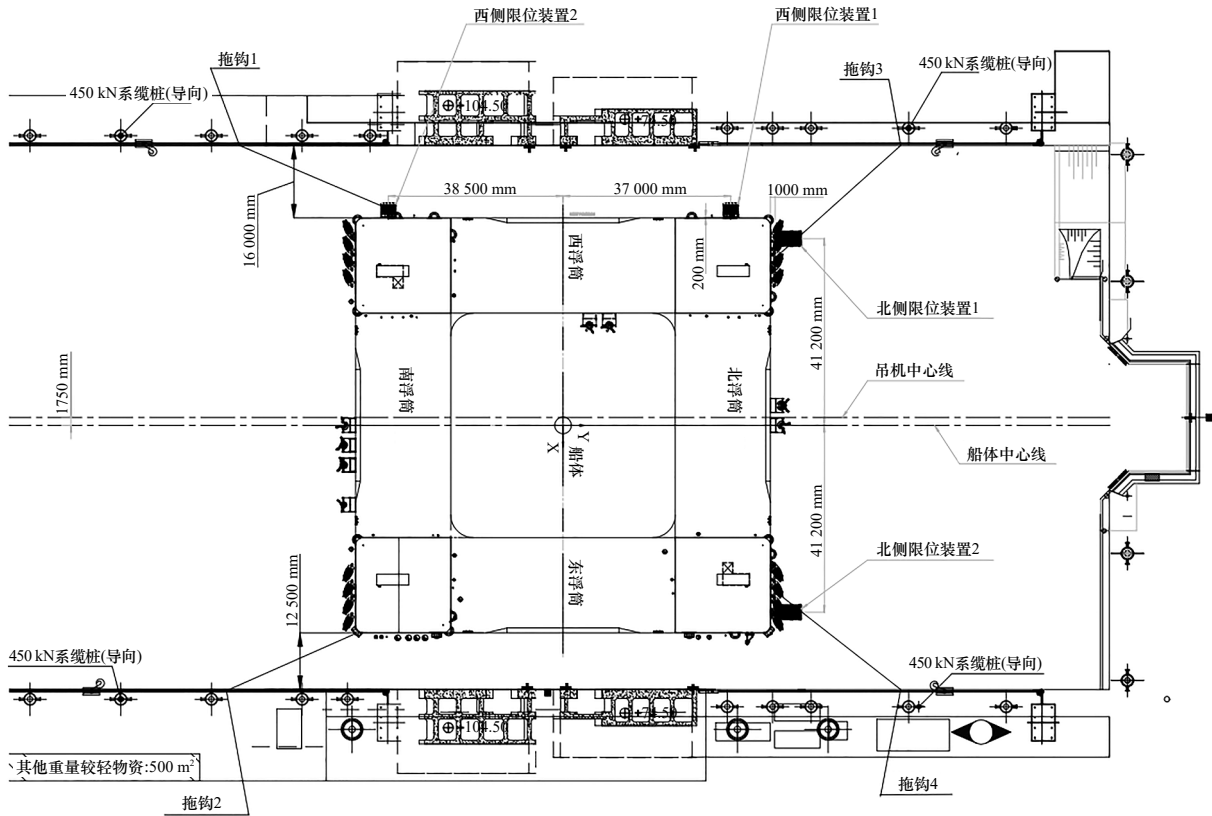
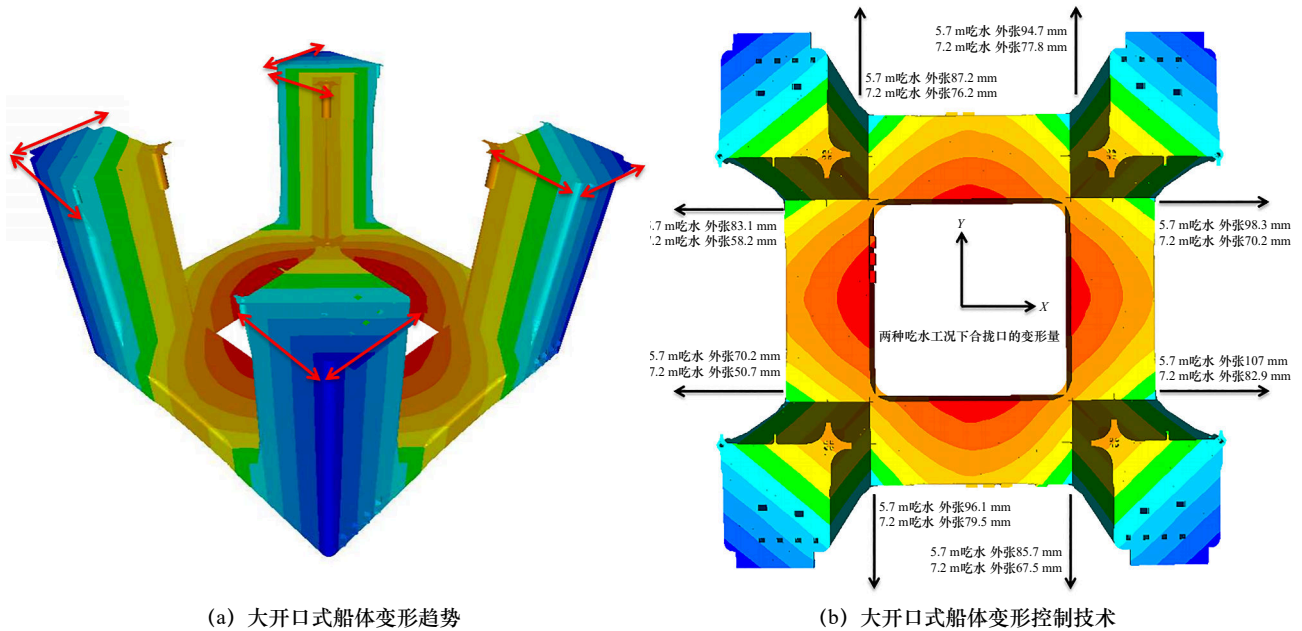


图10 精准坐墩限位装置及布置



(a) 大开口式船体变形趋势

(b) 大开口式船体变形控制技术

图 11 大开口式船体变形分析及控制技术

要求。在合拢实施前一周，持续监测对接点的变形随压载、气温的动态变化情况，确保合拢作业可顺利实施。

3. 大合拢对接结构设计及分析技术

大合拢对接结构设计采用 pin-post 的插针形式 [11]，共设置4组。合拢临时导向系统采用锥形十

字结构, 在水下前完成导向系统的安装和打磨以确保精度合格, 易于对位时滑动; 导向楔块(见图11)的强度和硬度根据实际操作工况进行分析, 并有一定的裕量, 以确保在误差控制范围内能够承受对接载荷。正式作业前, 通过专用软件进行了计算机模拟搭载分析(见图12), 该合拢对接结构捕捉范围可达250 mm, 配合精确操船控制方案, 使得在大变形的情况下通过上部模块的自重将变形调整回位, 巧妙实现了精准合拢。除此之外, 合拢对接结构作为下部浮体和上部模块的连接结构, 可以承担上部模块重量静载和海上动力载荷。合拢对接结构在设计时考虑了建造阶段的便利性和合拢后双面熔透焊接可行性, 也兼顾了在位服役期间的检测和维护。

通过技术攻关和精心组织, “深海一号”能源站大合拢作业于2020年10月28—29日顺利实施, 实现了合拢总体实施方案、结构设计、下部浮体变形控制、精度控制、干涉管理、风险管理、作业仿真等一系列技术和管理创新, 成功实施了漂浮对接, 坐墩焊接的整体吊装合拢, 首创了5万吨级超大结构物大变形半漂浮精准合拢技术。

(三) 世界最大吨级大开口结构物预斜回正荷载横向转移技术

“深海一号”能源站的下部浮体在滑道上建造,

重约 3.3×10^4 t, 长、宽各为91.5 m, 高为59 m; 采用扁平浮箱设计, 立柱之间没有连接, 为大型开口板壳结构物, 其局部强度较弱、立柱变形量大。若采用传统的纵向装船, “新光华号”半潜驳船的甲板强度面临极限挑战, 且装船轨道偏长, 效率较低; 若采用横向装船, 没有甲板强度的问题且装船轨道短, 作业效率会显著提升, 但半潜驳船的压排载的操作难度相对较大。横向装船方式的最大难点为在码头潮汐不断变化的情况下, 要不断调整驳船的吃水以保持码头滑道与驳船滑道的相对齐平, 同时还要控制好驳船的姿态以平衡载荷转移上船所带来的倾斜力矩, 载荷转移的重量越大、速度越快, 则难度越高。为此, 技术团队研发了板壳式结构物载荷转移与变形控制工装, 以替代传统的滑移牵引装备(如拉力千斤顶、液压滚筒绞车等)。解决了大尺寸板壳式结构物在滑移装载过程中的变形与应力控制难题; 首创了世界最大吨级大开口结构物预斜回正荷载横向转移技术, 顺利实现下部浮体横向装载上半潜驳船、并在开阔海域浮卸下水的大型作业; 开发了创新性的半潜驳船预斜回正姿态控制技术, 规避了半潜驳船失稳倾覆的风险, 同时研究选定了最优、最经济可行的装船下水方案。

1. 研发板壳式结构物载荷转移与变形控制工装
该工装由多用途的轻量化支撑结构、液压滑靴

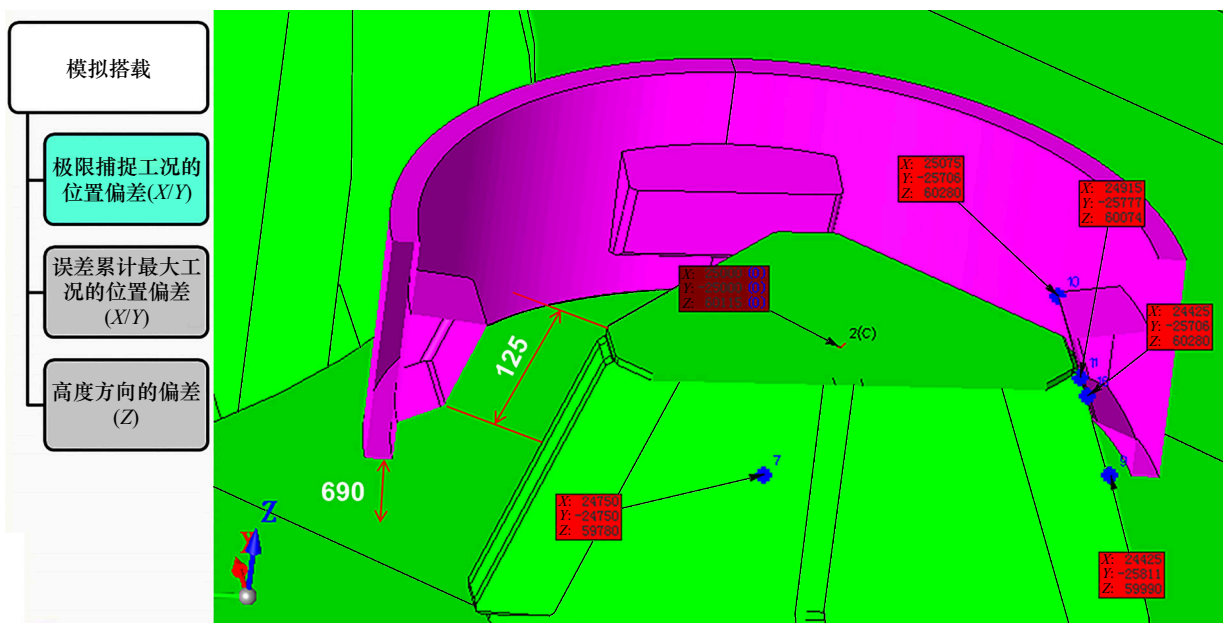


图 12 大合拢对接结构设计及计算机模拟搭载

注: X代表南北方向距离船体中心距离; Y代表东西方向距离船体中心距离; Z代表距基线高度。

系统和低摩擦分体式靠船件组成。多用途的轻量化支撑结构用于平衡板壳式结构由于自身重量所产生的变形，在其建造、装船及运输过程中起支撑作用；液压滑靴系统可以在装船过程中补偿驳船与陆地的高差，以控制板壳式结构的变形；低摩擦分体式靠船件大大降低了驳船与码头之间的摩擦力，可实现载荷从陆地到驳船的平滑转移。

(1) 创新性地研发了一种多用途一体化支撑结构。该支撑结构是一种由钢板拼接而成的箱形结构，在顶部安装具有高抗压强度的木材，可以同时实现大型浮体在陆地建造、滑移装船和驳船运输阶段的支撑作用，还可以在大型浮体的浮卸过程中起到碰撞缓冲的作用。而以往项目多是在不同施工阶段使用不同形式的支撑结构，造成了资源浪费，同时也增加了大型板壳式结构在不同类型的支撑结构之间转换过程中易发生的局部损伤风险。

(2) 优选了液压滑靴系统。该系统是一种可以调整（液压控制）垂直方向上的支撑高度，同时又具备水平推进能力的滑移装船设备。该系统包括液压滑靴、爬行器、专用滑轨、跨接梁、铰支座、动力站和控制系统等。其中液压滑靴系统和爬行器需要根据结构物的重量、尺寸以及预安装的支撑结构的数量和布置位置进行选型与配置设计。

(3) 研发了低摩擦分体式靠船件。该工装可以降低驳船舷侧与码头之间的摩擦，实现驳船姿态的顺滑调整，保证荷载的顺利转移。低摩擦分体式靠船件，包括码头靠船件和驳船靠船件两个部分，由钢制靠船件主体和特氟龙板组合而成，分别安装在码头和驳船靠泊时互相接触的部位。根据驳船和码头的形式，设计制作靠船件，并在驳船靠泊前分别安装到驳船舷侧和码头。一是驳船侧靠船件（见图13），由型钢拼接而成，型钢在船上的位置需与驳船的强框架和强结构位置对应，通过筋板焊接固定在驳船上；靠船件的外侧竖直面安装一块钢板，钢板表面安装特氟龙板。二是码头侧靠船件（见图14），比驳船侧靠船件宽度略大，也是由型钢拼接而成，用筋板固定在码头预埋件上；靠船件外侧竖直部分贴紧码头，竖直表面安装一块钢板，钢板表面需打磨光滑。

2. 装载半潜驳船的姿态实时监控技术

常规的滑移装船作业均为人工使用全站型电子测距仪进行驳船的横纵倾测量。该测量方式在测量

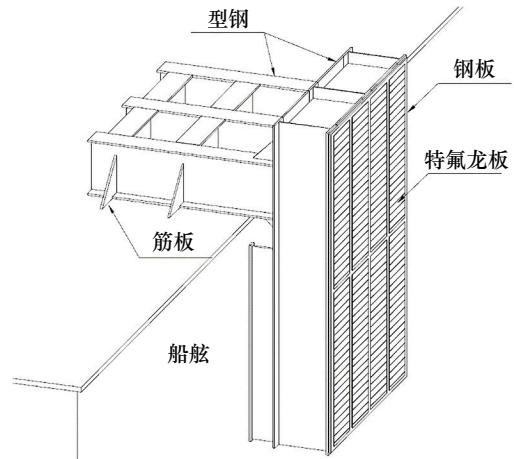


图13 低摩擦分体式靠船件——驳船部分

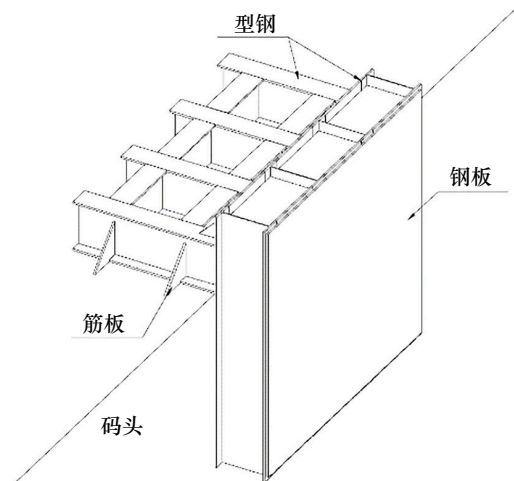


图14 低摩擦分体式靠船件——码头部分

准确性、速度与数据传递的可靠性方面，受测量人员技能水平、作业现场光线与噪音等因素影响较大，尤其是在大吨位的载荷横向转移作业中，微小的测量差错、数据测量缓慢和数据传递延时将大大影响驳船的调载操作，甚至导致整个装船作业的失败。

为安全、高效地实施超大吨位的载荷横向转移作业，基于全站型电子测距仪，创新性地开发了一套驳船的姿态实时监控系統（见图15），可实现对驳船的横倾、纵倾、四角吃水的24 h监控，测量数据刷新速度约为20 s/次（理想状态下，人工使用全站型电子测距仪进行驳船姿态测量的单次速度约为2 min）。该套系統具有如下特点：①配备自动激光视线和定位系統；②运用笔记本电脑可以实现全站型电子测距仪的远程操作；③测量有效距离高达1000 m；

④测量精度高达 0.5 mm；⑤可以实时显示驳船的横倾、纵倾；⑥可以实时监控结构物滑移距离。

3. 半潜驳船的预斜回正压排载技术

“深海一号”能源站下部浮体横向滑移装船的示意图如图 16 所示。整个滑移距离为 91.56 m，而发生载荷转移的滑移距离仅为 31.2 m，液压滑靴系统的爬行速度约为 0.25 m/min，要完成 33 450 t 荷载的转移，相当于每分钟有 268 t 的荷载传递到驳船上。

对于超大吨位结构物横向滑移装船作业，因短时间内转移至驳船的载荷过大，会给驳船施加一个

极大的横斜力矩：①当结构物的载荷在驳船近岸端转移时（载荷未传递至驳船的船舳），会使驳船产生较大的近岸倾角（靠岸这一舷低、另一舷高），进而造成驳船与码头的高差加大，最终使结构物产生大变形、损伤结构物；②当结构物的载荷开始在驳船的远岸端转移时（载荷传递通过驳船的船舳），会使驳船产生较大的远岸倾角（靠岸这一舷高、另一舷低），同样会造成驳船与码头的高差加大，最终使结构产生大变形、损伤结构物。另外，最为严重的是极易产生结构物加速向驳船的远岸侧滑动，

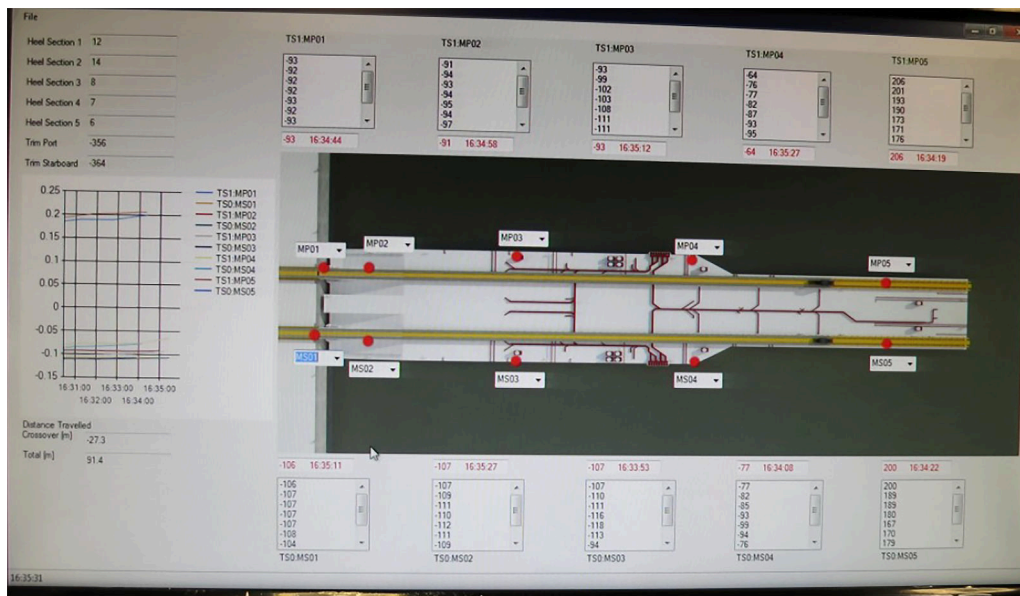


图 15 全自动半潜船姿态监控系统显示界面

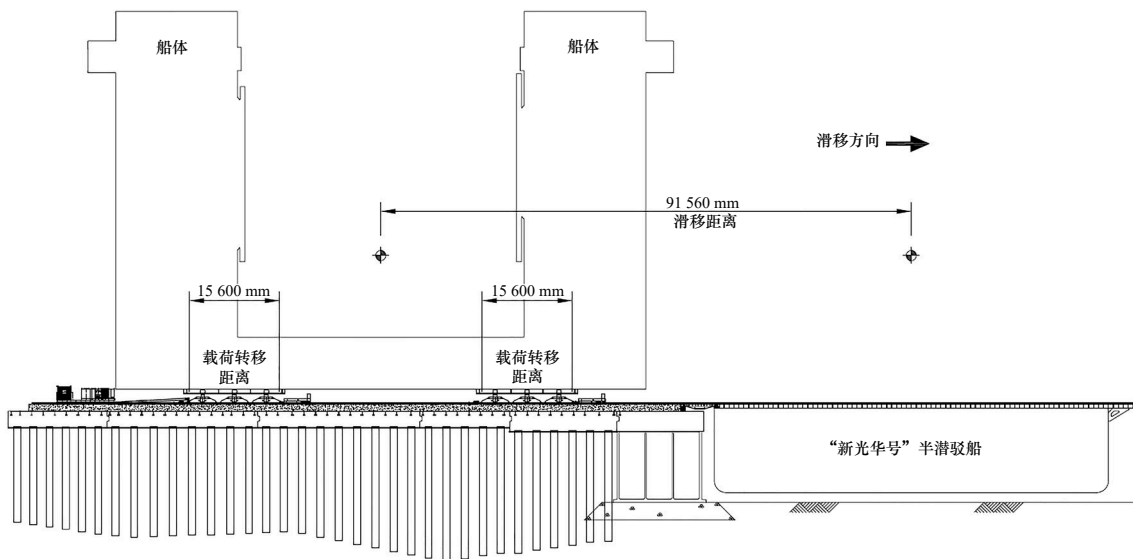


图 16 “深海一号”能源站下部浮体横向滑移装船示意图

最终造成驳船倾覆、结构物坠落到海里的情况。在较小吨位的载荷横向转移作业中，可通过精确控制的驳船调载来规避以上风险。但对于超大吨位的载荷横向转移作业，仅凭精确控制的驳船的调载是无法完全避免上述风险发生的。

针对这种情况，基于“新光华号”半潜驳船的空压机调载系统，打破常规调载思路，首次提出了预斜回正的压排载技术 [12]。该方法可以成功解决载荷转移过大及过快造成的结构物变形较大与损坏、驳船大倾角甚至倾覆的难题，具体原理如下：①当结构物的载荷在驳船近岸端转移时（载荷未传递至驳船的船舳），提前将驳船调整成向离岸端倾斜，倾斜角度为此次载荷转移会给驳船造成的倾角（见图 17）；②当结构物的荷载转移至驳船远岸端时（载荷传递通过驳船的船舳），提前将驳船调整成向近岸端倾斜，倾斜角度为此次载荷转移会给驳船造成的倾角。

超大重量、超大尺寸的“深海一号”能源站的下部浮体在滑移装船过程中，创造了结构物横向滑移装船的最大吨级世界纪录，研制集成了多用途一体化支撑结构、低摩擦分体式靠船件以防止结构物应力损伤，并优选了液压滑靴系统等技术，填补了国内技术空白。

五、结语

“深海一号”大气田开发工程项目是我国首次自主勘探发现、设计、建造和安装的大型超深水项目，开创了世界首例深水 10 万吨级半潜平台储油和远程水下生产集输系统的全新深水气田开发模式。“深海一号”能源站的设计与建造是在没有任何可

参考的先例下开展的，工程团队在面临中美贸易摩擦、新型冠状病毒肺炎疫情突发、工期紧张等严峻挑战下，成功解决了技术、管理、施工等诸多难题，安全、优质、高效地完成了“深海一号”能源站的建设。“深海一号”能源站建设过程中取得的有益实践具体如下。

(1) 敢于突破常规的管理模式。在项目实施阶段，采用设计与建造一体化，大胆创新五大控制管理模式，运用多项激励政策，为工程建设注入超强精神动力。

(2) 前期研究团队勇攀技术高峰，突破阻尼对马修不稳定性的抑制机理，创新扁平浮箱设计，研发了首个深水多立柱生产储卸油平台母型船，实现了立柱的安全储油。

(3) 工程技术团队因地制宜，攻克了 3 万吨级开口多立柱式下部浮体的装船难题，创建了大型浮体液压滑靴横向滑移装船分析与设计技术，实现了世界首个 3 万吨级结构物预斜回正荷载横向转移。

(4) 工程建造团队各方通力合作，取长补短，首创了船坞内湿式半坐墩大合拢技术，实现了世界首个重量 5 万吨级超大结构物半漂浮精准大合拢。

(5) 工程项目团队在推进项目进度与实施的过程中，注意组织过程中资产的收集与整理，在项目建成的同时沉淀出先进的理论研究方法、标准技术体系和宝贵的的施工经验。

“深海一号”大气田于 2021 年 6 月正式建成并投产，使中国海油在南海的天然气生产供应能力提升到每年 $1.3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以上，相当于海南省全年用气量的 2.6 倍，为保障国家能源安全、改善能源结构、推进能源转型、助力实现“双碳”目标，具有重要的促进作用。“深海一号”能源站的建成与成功投

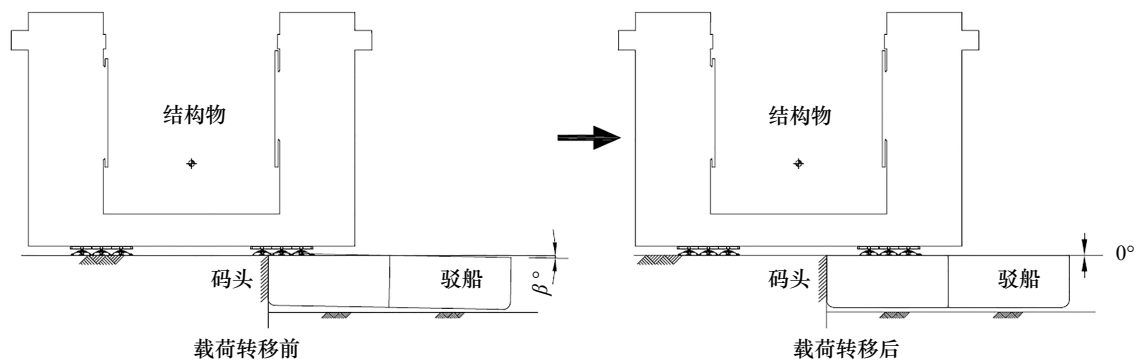


图 17 预斜回正压排载技术的驳船姿态控制示意图

用, 标志着我国由此掌握了一套适应深水复杂海域、具有自主知识产权的半潜式生产储卸油平台总体技术, 形成了一整套我国海上深水气田高效开发技术体系, 填补了多项国际、国内技术空白; 同时, 也是我国深海工程发展史上的里程碑, 标志着我国海洋石油工业进入超深水时代, 同时也向全世界郑重宣告我国掌握了全海域油气开发主动权, 具备进军南海中南部超深水海域的技术实力, 改变了深水油气开发依赖欧美国家的现状, 为在南海建设“和平之海、合作之海”奠定了基础; 此外, 对提升我国海洋深水工程装备建设能力、支撑“一带一路”建设及“中国制造 2025”、保障国家能源安全、建设海洋强国具有重要意义。

参考文献

- [1] 张功成, 屈红军, 张凤廉, 等. 全球深水油气重大新发现及启示 [J]. 石油学报, 2019, 40(1): 1–34, 55.
Zhang G C, Qu H J, Zhang F L, et al. Major new discoveries of oil and gas in global deep waters and enlightenment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(1): 1–34, 55.
- [2] 江文荣, 周雯雯, 贾怀存. 世界海洋油气资源勘探潜力及利用前景 [J]. 天然气地球与科学, 2010, 21(6): 989–995.
Jiang W R, Zhou W W, Jia H C. Potential of global offshore petroleum resource exploration and utilization prospect [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 989–995.
- [3] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129–136.
Jia C Z, Zheng M, Zhang Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129–136.
- [4] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域 [J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15–21.
Zhang G C, Mi L J, Wu S G, et al. Deepwater area—The new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 15–21.
- [5] 武震华, 倪学利, 王屹. 张力腿平台(TLP)上部组块设计深入研究 [J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(S1): 428–432.
Wu Z H, Ni X L, Wang Y. A profound study of tension leg platform topside engineering [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(S1): 428–432.
- [6] International Association of Classification Societies. Shipbuilding and repair quality standard: IACS Rec.1996/Rev.8 2017 [S]. London: International Association of Classification Societies, 1996.
- [7] 李彬彬. 新型深吃水多立柱平台的水动力与运动响应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 2011.
Li B B. Investigation on hydrodynamics and motion performance of an innovative deep draft multi-spar platform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(Doctoral dissertation), 2011.
- [8] 宋红宝. 船舶结构中低频线谱振动噪声时频预报方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(硕士学位论文), 2015.
Song H B. The research for temporal-frequency prediction method of Medium-low frequency line spectrum Vibration and Noise of ship [D]. Harbin: Harbin Engineering University(Master's thesis), 2015.
- [9] 陈广宁, 李勇, 冯丽梅. 一种张力腿平台的陆地顶升滑移合拢方法 [J]. 中国海洋平台, 2016, 31(6): 34–41, 47.
Cheng G L, Li Y, Feng L M. The TLP's integration method of jack-up and skidding [J]. China Offshore Platform, 2016, 31(6): 34–41, 47.
- [10] 嵇春艳, 于雯, 沈晴晴. 半潜式平台总体强度计算和关键结构极限强度计算方法研究 [J]. 造船技术, 2012 (1): 8–12.
Ji C Y, Yu W, Shen Q Q. Study on global strength calculation method and ultimate strength calculation method of key structure of semi-submersible platforms [J]. Marine Technology, 2012 (1): 8–12.
- [11] 范模, 李达, 马巍巍, 等. 南海超大型组块浮托安装总体设计与关键技术 [J]. 中国海上油气, 2011, 23(4): 267–270, 274.
Fan M, Li D, Ma W W, et al. The overall solution design and key technology for float over installation of ultra-large topside in South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(4): 267–270, 274.
- [12] 许旻. 半潜船性能计算与重大件运输 [D]. 大连: 大连理工大学(硕士学位论文), 2015.
Xu Y. Function of semi-submersible heavy lift vessel and heavy-lift transportation [D]. Dalian: Dalian University of Technology (Master's thesis), 2015.