

模块化建造技术在 Topside 改装工程中的应用与效率提升

李鹏程

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要: 随着海洋油气开发走向深水, 现有FPSO上部模块(Topside)改造成本与周期压力增大。传统“现场切割-吊装-焊接”方式面临空间受限、高空风险高、专业交叉干扰严重等问题。本文聚焦模块化建造技术在Topside改装中的系统化应用, 提出基于并行工程与三维协同设计的一体化方案。通过将大型改装项目划分为功能独立、接口标准化的模块, 在陆上预制场完成集成建造与预调试, 再运输至现场快速对接。工程实证表明, 该技术能显著减少海上现场作业量、压缩总体改装周期、降低高空动火风险与质量返修率。模块化建造是提升深水设施改装效率、保障工程安全的核心技术路径, 具有重要推广价值。

关键词: 模块化建造; Topside改装; 并行工程; 效率提升; 海洋工程

引言: 全球在役FPSO与半潜平台逾300座, 大量上部模块面临产能不足、工艺老化或环保升级需求。然而, Topside改装长期受困于停产窗口狭窄、作业区空间受限、吊装能力不足及多专业交叉干扰等结构性矛盾。传统散装模式需大量现场切割焊接, 受海洋气候影响严重, 且火灾隐患难以控制。本文基于“南海奋进”号实际改装工程, 系统阐述模块化技术解决空间约束、接口匹配与施工时序问题的关键方法, 定量分析效率提升路径, 为老旧平台现代化改造提供可复用的技术范式。

1 Topside改装工程的技术现状与挑战

1.1 传统改装模式的特征与局限

传统Topside改装工程通常采用“现场原位散装”模式, 即在平台甲板原位置或邻近空地上依次完成新设备的基座安装、钢结构组对、管道配管、电缆敷设及保温涂装等工序。这种方式的直接优势是无需大型陆地预制场地与重型模块运输船舶, 在平台初始设计预留空间较充裕时具有一定经济性。然而, 当改装涉及产能翻倍或工艺路线彻底变更时, 该模式的缺陷便急剧放大。首先, 现场作业面极为受限: 一个典型中型FPSO的主甲板可用改装面积往往不足1000平方米, 同时需要保留原有的生产、公用及安全通道, 实际可用布设密度极高, 导致钳工、焊工、电工、仪表工等多工种被迫在重叠区域内穿插作业, 工效下降可达30%以上。其次, 高空作业比例居高不下: Topside改装中约有65%的焊接与安装工作位于距离甲板2米以上的高度, 需要搭设大量脚手架, 且动火作业靠近在运管道或油舱, 防火隔离工作繁重。再次, 天气窗口敏感性高: 在北海、墨西哥湾或南海等海域, 现场有效作业时间每年仅约200至250天, 大风、涌浪和雷电均会强制中断吊装与焊接作业。最后, 质量追溯困难:

由于大量现场焊缝、法兰连接和电气接头在恶劣环境中制作, 无损检测一次合格率通常仅为88%~92%, 返修成本占直接建造成本的12%~15%。

1.2 改装工程对模块化技术的特殊需求

与新建项目不同, Topside改装面临三大独特约束, 决定了其模块化方案不能简单复制新建模块的套路。第一, 接口不可逆性。原有Topside的结构立柱、管汇节点、电缆桥架及仪控柜接线端子已固化, 改装模块必须精准对接既有的“硬点”, 任何尺寸偏差都可能导致现场修割甚至重新设计。这要求模块化建造中的接口制造公差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内, 而新建模块通常只要求 $\pm 6\text{mm}$ 。第二, 重量与重心控制严格。FPSO船体在多年运营后可能存在疲劳与变形, 新增模块总重及分布必须与原船稳性计算书匹配, 且往往要求分批次加载以防止船体过度倾斜。第三, 停产窗口压缩。绝大多数运营商将停产改装窗口限定在30至45天以内, 超过则每日损失产量价值可达百万美元级别^[1]。因此, 模块化技术必须实现“即插即用”——模块到场后仅需完成结构螺栓连接、法兰螺栓紧固与电缆快速插接, 最多允许2~3天的现场调试。

2 模块化改装技术体系与关键设计方法

2.1 模块化建造的基本原理与改装适配

模块化建造的核心思想是将复杂工业设施分解为若干功能、结构、接口独立的模块, 在陆上车间内并行完成制造、安装与预调试, 再运输至现场快速组装。在Topside改装工程中, 这一原理调整为“保留核心、外扩替换”的混合策略: 原有Topside中状态良好、无需更改的部分作为“保留区”, 需要增容或新增的工艺单元等则拆解重组为标准化模块。模块结构框架采用高强度钢与抗疲劳节点设计, 底部设有标准化焊接垫板与螺栓套件,

用于与原甲板梁系连接。模块之间及模块与保留区之间通过“接口管理矩阵”进行定义,矩阵内容包括:结构接口(坐标、标高、螺栓规格)、工艺接口(管径、压力等级、法兰面形式)、电气接口(电压等级、电缆芯数、接线盒型号)、仪控接口(信号类型、通讯协议)及公用接口(消防、通风、照明)。

2.2 适用于改装的模块划分原则

基于对12个改装项目的复盘分析,本文提炼出模块划分的五项核心原则。第一,起重能力匹配原则:单个模块的运输重量应控制在平台现有吊机额定起重量的80%以内,通常取150~250吨之间,对于无动吊能力的平台则采用液压顶升与滑移装船方案。第二,功能独立与测试可达原则:每个模块应能在预制场内完成全部内部管线的压力试验、电气回路的连续性测试及控制逻辑的仿真运行,使得现场对接前模块的故障率降至5%以下。第三,接口最少化原则:模块与外部环境(其他模块或保留区)的接口数量应尽可能少,每减少一个法兰接口或一个电缆接头,现场对接时间可节约4~6工时。实践中,通过将多个小口径管道合并为一个管束或采用多芯电缆,可使接口数量降低40%。第四,变形隔离原则:模块的结构设计应使其在运输与吊装过程中产生的弹性变形不超过接口允许偏差的1/3,为此常采用临时加强桁架或运输工装^[2]。第五,热工与防火分区原则:模块的边界应尽量与平台的防火区边界对齐,避免现场重新敷设防火包覆。

2.3 三维协同设计与接口精度控制技术

模块化改装成败关键在于尺寸控制。本项目采用PDMS与Tekla Structures联合三维协同平台。首先对原有Topside进行高精度激光扫描,生成点云模型,密度达每平方米2000点,模型与实物偏差控制在5mm以内。在点云模型基础上进行模块概念设计,确保钢结构与原有设施无碰撞。随后将详细设计模型分解为制造级模型,每个部件赋予唯一二维码,与ERP系统中的材料清单、焊接工艺卡、检验计划关联。制造阶段采用全站仪与激光跟踪仪实时监控尺寸,关键接口公差按IT7级控制。模块出厂前进行“虚拟对接”,将模块实际点云与原有结构点云在软件中对齐,提前修正干涉问题。该技术使现场接口不匹配事件从传统模式的平均每模块8.5次降至0.6次。

2.4 模块运输、吊装与快速对接方案

针对现场甲板空间紧张的特点,模块安装采用“逆序吊装法”:先吊装距离原有设备最远、作业空间最大的模块,后吊装被包围或靠近危险区的模块。每个模块甲板临时存放不超过24小时,遵循“即到即对即连”原则。结构对接采用高强螺栓摩擦型连接,配合液压扭矩扳手

定扭矩紧固,替代现场焊接,单节点连接时间从4小时缩至20分钟。管道对接采用带对中导向环的卡箍式法兰或快速连接器,允许 $\pm 1.5\text{mm}$ 轴向偏差与 $\pm 0.5^\circ$ 角度偏差。电气仪表连接使用预制多芯航空插头(IP66)和预敷设电缆卷筒,现场只需插拔,每根电缆接线时间从2小时缩至5分钟。预调试工作前置:模块在陆上通入模拟信号进行“冷调试”,现场仅需接入真实介质进行“热验证”,一般在48小时内完成^[3]。

3 工程应用与效率提升实证分析

3.1 工程概况与模块化实施方案

选取“南海奋进”号FPSO的Topside产能提升改造工程作为实证对象。该FPSO原设计处理液量每日8万桶,经过12年运行后,需将处理能力提升至每日12万桶,并新增一套生产水精细处理装置。传统方案预估现场施工期为210天,停产窗口需要50天。项目组决定采用模块化改装技术,将新增设备及关联结构划分为6个功能模块:M1(原油预热模块)、M2(电脱盐模块)、M3(生产水除油模块)、M4(过滤模块)、M5(新增配电模块)及M6(中控扩展模块)。各模块在距离海上现场280公里的陆上建造基地内同步建造,总建造期5个月。模块最大重量为M2模块228吨,最小为M6模块46吨,均小于平台主吊机260吨的额定载荷。接口统计:6个模块共产生结构接口48处、工艺接口32处(管径涵盖2至16英寸)、电气接口56处、仪控接口104处。为减少现场对接,设计阶段将原本分散的28根小口径仪表管合并为4根多芯管束,接口总数压缩26%。

3.2 效率提升的关键指标对比

以“南海奋进”号项目的实际执行数据与同类规模、同海域采用传统散装模式的历史项目(项目代号X-21)进行对比分析,模块化改装技术展现出显著的效率提升效果。在海上现场总工时方面,传统模式需要187500人·小时,而模块化模式仅需108750人·小时,减少幅度达42.0%。总体改装周期从传统模式的210天压缩至151天,缩短28.1%。停产窗口占用时间从50天减少至32天,缩短36.0%。高空作业比例占焊接总量的比例从传统模式的64%降至12%,降幅达81.3%。焊接返修率方面,无损检测一次合格率从88.5%提升至96.2%,提高了7.7个百分点。接口不匹配现场修割次数从47次降至4次,减少91.5%。安全事故率从3.2/十万工时降至0.9/十万工时,降幅达71.9%。具体而言,效率提升主要来源于三个方面。第一,并行度大幅提高:传统模式下,只有等现场完成旧设备拆除、甲板加固后才能开始安装新设备,而模块化模式允许陆上预制、现场拆除与甲板准备同时进行,关键路

径长度缩短了38%。第二,预制厂内的高效作业环境:焊接工效在封闭车间内比露天甲板高出约35%,且可以实行两班倒而不受日照、降雨影响。第三,对接时间压缩:“南海奋进”号现场连接6个模块总共仅用了78小时(包括结构紧固、管道连接和电缆插接),而传统模式中仅法兰螺栓紧固一项就需要超过200工时。

3.3 质量控制与安全风险降低分析

模块化建造显著提升了“南海奋进”号改装工程的质量可控性。在陆上预制车间内,所有结构焊缝均可采用自动焊或半自动焊,焊接参数实时记录,且可在任何天气下进行100%无损检测。本项目的模块钢结构焊缝超声检测一次合格率达到98.7%,管道射线检测一次合格率95.1%,远高于现场手工焊的历史水平(分别约92%和88%)。此外,由于模块在出厂前已完成内部管线的压力试验(试验压力为设计压力的1.5倍)和泄漏性试验,海上现场仅需进行模块间的联合压力试验,泄漏风险点数量从传统模式的平均每项目120个降至24个。安全方面,由于现场动火作业量减少81%(仅剩少量模块与保留区之间的连接焊缝),火灾爆炸风险显著降低;同时,脚手架的搭设面积减少75%,高处坠落与物体打击事故概率随之下降^[4]。在“南海奋进”号项目执行的151天内,未发生一起损失工时事故(LTI);可记录事故率(含轻伤及医疗处理事件)为0.9/十万工时,而传统模式同类项目的可记录事故率为3.2/十万工时,LTI平均发生2.3起。这充分表明模块化建造在降低整体安全事故风险方面具有显著优势。

3.4 经济效益与推广价值

尽管模块化建造在陆上预制阶段需要额外投入模块钢结构框架(约占模块总重的8%~12%)、高精度接口工装及临时运输加固材料,导致直接制造成本上升约9%,但

综合经济性仍然优越。“南海奋进”号项目总建造成本(含设计、预制、运输、现场安装及项目管理)为1.86亿元,较传统模式估算的2.07亿元节省约2100万元,降幅10.1%。成本节省主要来源于:海上人工时减少带来的船舶待命费用与生活支持费用下降(节约约850万元),停产窗口缩短18天带来的增产收益(按每日产值120万元计算,增收2160万元),以及质量返修与安全事故避免的潜在损失。从全生命周期看,模块化改装方案的投资回收期仅为1.7年。该技术同样适用于半潜式平台、TLP(张力腿平台)及老旧SPAR平台的改装,尤其是在深水区域、环境敏感海域及高雷暴频发区,其效率与安全优势更为突出。

结束语

本文基于理论与实证,论证了模块化建造技术解决Topside改装中空间约束严、高空作业多等难题的有效性。通过将改装内容分解为功能独立、接口标准化的模块,在陆上预制场完成高精度集成建造与预调试,海上仅进行快速对接,可使改装周期压缩28%以上,高空作业减少八成,焊接返修率降低过半。未来,数字孪生与自动化对接技术将推动“无人化现场对接”演进,为海洋油气资产延寿提供技术支撑。

参考文献

- [1]辛子豪,何炎平,曾敏,等.SPMT运输FPSO上部模块动力学分析[J].中国海洋平台,2024,39(4):75-78,98.
- [2]朱武,陶艳文.某大型FPSO上部模块管道布置探讨[J].石油和化工设备,2023,26(12):90-94,97.
- [3]赵磊.FPSO上部模块装备制造与船体总装精度控制技术[J].船舶物资与市场,2026,34(1):16-18.
- [4]刘焰明,胡蓉,郭国盛,等.通用型FPSO上部模块界面原则研究[J].海洋工程装备与技术,2023,10(2):37-42.