

海底管道穿越 FPSO 起始铺设技术研究

段宗祥, 翟凯淼, 赵锦山, 孙士垚, 胡占州

海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461

DOI:10.61369/ETQM.2026030023

摘 要 : 南海某油田海底管道发生严重腐蚀, 有泄露风险, 经评估需更换新的海管。由于新建海管路由平行位置存在已存管线, 且新海管位于浮式生产储卸油装置 (FPSO) 下方, 导致常规的铺设方法受限。本文提出了一种吸力桩 + 起始缆穿越 FPSO 的方案, 有效解决了铺管船铺设空间受限, 并且存在海管触碰系泊缆的风险。该方案在不影响 FPSO 正常生产的条件下, 可实现海底管道完全穿越 FPSO 系统, 为今后类似海洋管道工程的实施提供技术支持。

关 键 词 : 海底管道; 吸力桩; FPSO; 起始缆穿越

Research on the Initial Laying Technology of Subsea Pipeline Crossing FPSO

Duan Zongxiang, Zhai Kaimiao, Zhao Jinshan, Sun Shiyao, Hu Zhanzhou

China Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461

Abstract : A Subsea pipeline in an oilfield in the South China Sea has suffered severe corrosion, posing a leakage risk, and evaluation indicates the need for replacement. Due to the presence of existing pipelines along the proposed parallel route and the new pipeline's location beneath a Floating Production Storage and Offloading (FPSO) unit, conventional laying methods are constrained. This paper proposes a solution involving suction piles and an initial cable to traverse beneath the FPSO, effectively addressing space limitations for pipelaying vessels and mitigating the risk of pipeline contact with mooring lines. The solution enables complete pipeline crossing under the FPSO system without disrupting normal production, providing technical support for similar offshore pipeline projects in the future.

Keywords : Subsea pipeline; suction pile; FPSO; initial cable crossing

引言

随着海洋油气资源开发的不断深入, 海底管道作为油气输送的核心载体, 其安全稳定运行直接关系到油田生产效率与生产安全。然而, 服役海管因长期受介质腐蚀、海水侵蚀等因素影响, 易出现泄漏风险, 当逼近寿命时需进行整体更换^[1]。

新建海管路由上方有障碍物时, 存在铺管船空间受限, 易触碰系泊缆等风险, 给起始铺设带来巨大挑战。靳振刚等^[2]针对香港海域航道限制问题, 提出预铺设与底拖结合工艺, 通过非均匀浮筒绑扎、浮筒快速回收等技术创新, 实现了限制区域海管安全高效铺设; 刘凯^[3]以南海某油田冬季 CRA 海管铺设项目为依托, 针对海况恶劣、作业窗口短、海床松软导致的起始铺设效率低问题, 开发了抛锚、起始封头拉力试验结合的技术方案, 通过悬链线计算与创新算法精准确定调整缆长度, 填补了冬季松软海床 CRA 海管高效起始铺设技术空白; 姜宇飞等^[4]针对航道穿越场景, 开展水平定向钻铺管工艺研究, 为限制区域海管铺设提供多元技术路径; 夏日长等^[5]聚焦登陆海管设计技术, 为复杂环境下海管路由规划与结构优化奠定理论基础。

海底管道穿越 FPSO 铺设涉及多系统协同、高精度控制等技术难点, 现有的研究较少。本文基于南海某油田海管腐蚀更换背景, 针对穿越 FPSO 铺设的核心技术展开研究, 旨在为同类工程提供技术参考。

作者简介:

段宗祥 (1996.12-), 男, 河南省漯河市人, 汉族, 硕士, 助理工程师 研究方向: 能源动力;

赵锦山 (1998.02-), 男, 河北省衡水市人, 汉族, 硕士, 初级, 研究方向: 海洋石油开采;

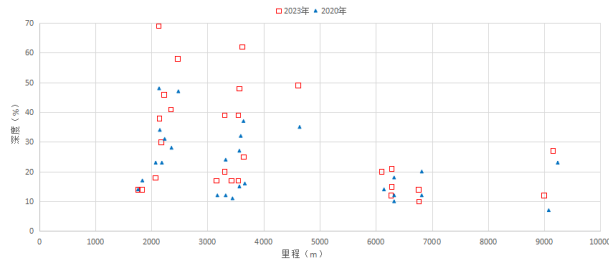
翟凯淼 (1998.10-), 男, 河南省漯河市人, 汉族, 硕士, 初级, 研究方向: 海洋石油开采

孙士垚 (1999.11-), 男, 河北人, 汉族, 硕士, 助理工程师;

胡占州 (1999.11-), 男, 安徽池州人, 汉族, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 海底管道安装设计及施工技术研究。

一、项目背景

该项目油田群位于中国南海，包括1艘已建 FPSO 和6座已建平台，油田区域平均水深约 100m。在 2020 年、2023 年对海管进行内检测，图 2-1 为 2023 年和 2020 年两次检测缺陷里程深度对比图，检测结果显示：2023 年该海管最深处腐蚀深度为 69%，较 2020 年增长 21%；腐蚀增长最快的点，在两年内腐蚀深度增长 25%。目前这条海管已接近设计寿命，且管道部分位置腐蚀严重，经过研究评估，需要对海管进行整体更换。

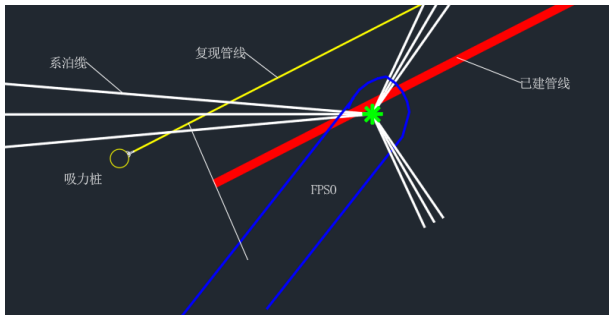


2-1 2023 年和 2020 年两次检测缺陷里程深度对比图

二、技术难点

图 3-1 为新建海管路由布置图，预计新建海管路由与旧海管路由距离 20-30m，新建海管铺设路线需穿越 FPSO 及其系泊系统，这一情况给铺设工作带来了诸多挑战。从实际施工角度来看，如果直接采用常规的铺设方式进行作业，铺管船在作业过程中会面临着铺设空间极为受限的难题。由于 FPSO 及其系泊系统本身占据了一定的海上空间，铺管船难以自由灵活地开展铺设操作，而且在铺设过程中还存在新建海管触碰系泊缆的风险。一旦发生触碰情况，极有可能导致系泊缆出现损伤，进而影响 FPSO 的系泊稳定性，甚至可能引发一系列连锁反应，威胁到整个海上油气生产系统的安全运行^[6]。

鉴于上述情况，本文提出了吸力锚作为托拽点，起始缆穿越 FPSO、拖拉海管穿越 FPSO 的施工工艺。它能够有效规避常规铺设方式下起始缆穿越 FPSO 及其锚泊、立管系统时所面临的诸多铺设风险。为新建海管穿越 FPSO 及其系泊系统这一复杂工程提供了切实可行的解决方案。



3-1 新建海管路由布置图

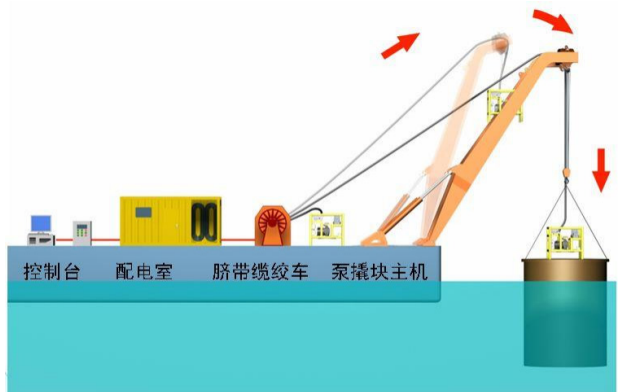
三、施工方案

施工过程分为：吸力桩安装、起始缆布置、海管拖拉以及正常铺设。FPSO 采用单点系泊，在风、浪、流、潮汐作用下会绕单点持续旋转，船体位置动态变化。为防止与施工船舶碰撞，其中前三个过程中需对 FPSO 进行限位。

（一）吸力桩布置

在海管起始铺设时需要提供一个反向的拉力，以克服张紧器的铺设张力，保证海管精确的铺设到设计位置，这就需要在海底面设定一个稳定的点以提供这个张力。海底管道穿越 FPSO 及其系泊缆时，吸力锚较抓力锚更具适配性：其一，FPSO 作业区水深通常较深，吸力锚可通过负压精准沉贯，突破抓力锚深水定位难的局限；其二，系泊缆密集布局构成严苛空间约束，吸力锚嵌入式结构外露尺寸小，有效规避缆锚干涉风险^[5]。

图 4-1 为吸力锚下放施工流程图。作业船集成吊机、泵撬及控制模块就位，以吊具起吊吸力锚至预设点位，下放至海底初接触。启动泵撬，通过脐带缆传输动力，抽排锚腔水体形成负压，驱动锚体竖直入土；施工中控制台实时监测锚腔压力、入土深度及姿态，调控抽水速率，直至锚体嵌入土层达设计锚固深度，完成下放。



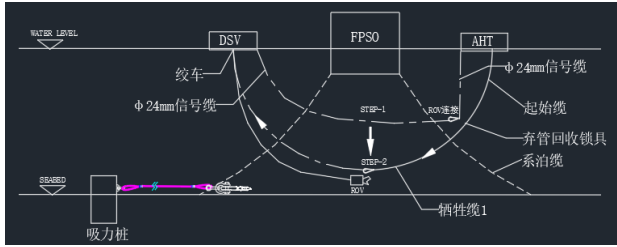
4-1 吸力锚下放施工流程图

（二）起始缆穿越 FPSO

在新建海管穿越 FPSO 及系泊系统的关键施工环节中，起始缆铺设需通过精准协同作业实现。图 4-2 起始缆施工流程图 1，施工以“双船协同引缆接驳+分级换缆”为核心逻辑，具体流程如下：

STEP1：AHT（锚作拖轮）作为动力与承载平台，精准下放一根带主连接环、 $\Phi 24\text{mm}$ 的引缆。这一引缆需具备轻质、高强度特性，适配海上复杂张力环境；同步地，DSV（潜水支持船）作为 ROV（水下机器人）作业母船，下放带吊钩、 $\Phi 24\text{mm}$ 的引缆，吊钩设计需满足 ROV 水下抓取的机械兼容性，确保接驳可靠性。

STEP2：接着 DSV 操控 ROV 精准定位并抓取 DSV 端引缆的吊钩，通过水下机械臂协同操作，将其与 AHT 引缆的主连接环进行对接。完成引缆接驳后，依托 DSV 船上绞车的恒张力回收系统，逐步收回引缆，同时 AHT 下放 $\Phi 64\text{mm} \times 8\text{m}$ 牺牲缆与 $\Phi 76\text{mm} \times 8\text{m}$ 弃管回收锁具。最终，弃管回收锁具与 $\Phi 76\text{mm} \times 650\text{m}$ 起始缆进行刚性连接，并逐渐下放^[7]。



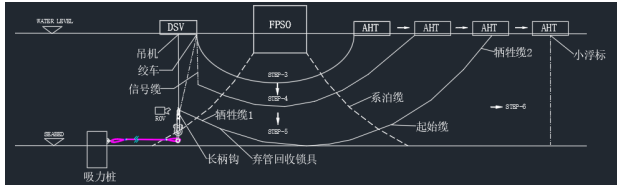
4-2 起始缆施工流程图1

STEP3: 当完成前期引缆接驳作业后, DSV 船上绞车启动精准收缆程序, 利用绞车的张力反馈系统, 将引缆平稳、匀速地全部回收至甲板。AHT 以预设轨迹向右移动, 在移动过程中, 逐步下放起始缆。下放时, 需通过船载张力仪实时监测缆绳张力, 匹配 AHT 移动速度与下放速率, 确保起始缆在水下处于可控悬垂状态, 直至 AHT 抵达施工方案预定的指定位置^[8]。

STEP4: 在 DSV 甲板上, 将信号缆与牺牲缆1连接, 通过绞车逐步下放至长柄钩附近。

STEP5: DSV 吊机启动液压起吊系统, 将长柄钩精准吊起并调整至预设接驳高度。ROV 通过机械臂将其与长柄钩进行刚性机械连接。接驳完成后, 切断信号缆, 随即 AHT 启动张力加载程序, 对起始缆、牺牲缆及长柄钩组成的缆绳系统施加预设安全张力, 确保缆绳在水下呈笔直紧绷状态, 消除缆绳松弛导致的缠绕隐患, 随后 AHT 按规划路径铺设剩余部分起始缆。

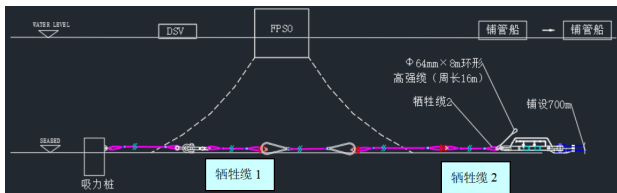
STEP6: 当起始缆全部铺设到位后, AHT 维持张力加载状态, 执行有序弃置操作: 通过绞车缓慢释放张力, 使缆绳以预设躺底姿态平稳落于海床, 避免因快速松缆导致缆绳弹跳、移位。弃置完成后, AHT 启用小浮标投放系统, 在起始缆末端上方海面精准投放小浮标。



4-3 起始缆施工流程图2

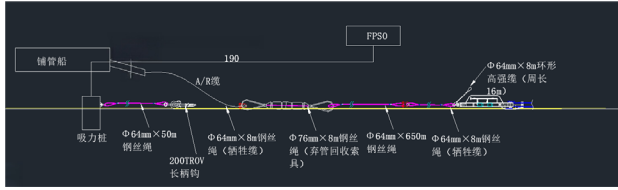
(三) 海管拖拉施工流程

图4-4为海管拖拉施工流程图1, 在起始缆布置完成后, 铺管船航行至预先设定的作业位置, 收回用于标识起始缆末端位置的小浮标, 将管道起始封头与牺牲缆2 进行连接。接着铺管船启动海管铺设程序, 将海管从托管架缓慢向海底推送, 完成700m 海管铺设任务。在铺设过程中, 需实时监测海管的状态、张力等参数。将铺设好的海管连接弃管回收装置并下放海管, 做好标识记录以备后续铺管准备^[9]。



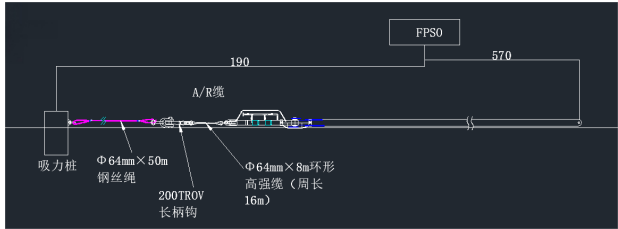
4-4 海管拖拉施工流程图1

图4-5为海管拖拉施工流程图2, 此时铺管船移动到 FPSO 另一侧, ROV 切断牺牲缆1, 下放 A/R 缆连接弃管回收索具, 拖拉海管650m, 拖拉过程中需严格控制海管精度。

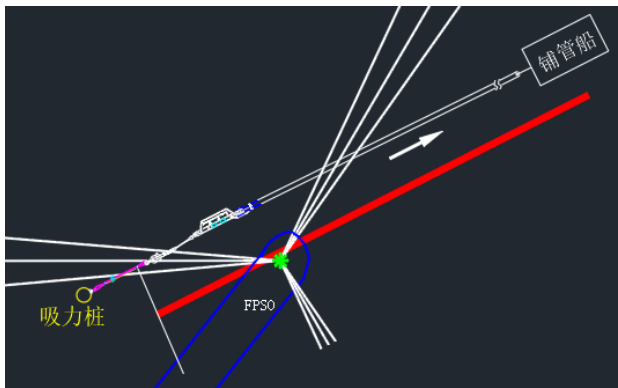


4-5 海管拖拉施工流程图2

图4-6为海管拖拉施工流程图3, 此时切断牺牲缆2, ROV 协助连接环形高强度缆与长柄钩, 完成海管拖拉。图4-7为铺管船正常铺设示意图, 铺管船移动到临时弃管封头, 回收海管至作业线, 开始正常铺设^[10]。



4-6 海管拖拉施工流程图3



4-7 铺管船正常铺设示意图

四、结论

本文围绕南海某油田海底管道穿越 FPSO 铺设工程, 针对施工区域存在的复杂限制条件与技术难题, 开展了系统性的技术研究与方案设计, 主要结论如下:

(1) 明确了海底管道穿越 FPSO 铺设的核心技术难点及解决方案。该项目面临海管路由平行位置存在已存管线导致无法布置大抓力锚、新建海管位于 FPSO 下方使铺管船铺设空间受限以及海管易触碰系泊缆等多重挑战。针对以上难题, 提出采用吸力桩 + 起始缆穿越 FPSO 的创新方案, 有效解决了复杂环境下的施工限制问题。

(2) 构建了起始缆穿越 FPSO 及海管拖拉的完整施工流程。通过 AHT 与 DSV 协同作业, 完成引缆连接、起始缆下放与连接等关键步骤, 实现了起始缆安全穿越 FPSO 及其锚泊系统。在海

管拖拉施工中，明确了拉力测试、海管连接、拖拉控制等环节的操作要点，确保了海管拖拉过程的精度与安全。

（3）该方案具有较强的工程实践价值与推广意义。本研究提出的铺设技术方案，在不影响 FPSO 正常生产的前提下，可成功

实现海底管道完全穿越 FPSO 系统，其形成的施工工艺与技术要点，为今后类似海洋管道穿越复杂结构物的工程实施提供了重要的技术参考与实践指导。

参考文献

[1] 丛军, 姚子敏. 某长期服役海底管道的腐蚀现状和腐蚀机理 [J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(12): 59-63.

[2] 靳振刚, 李建楠, 冷向林, 等. 海底管道穿越受限制海域铺管施工工艺创新应用 [J]. 天津科技, 2024, 51(11): 23-26.

[3] 刘凯, 李友行, 李昌华, 等. 冬季 CRA 海管起始铺设效率研究 [J]. 设备管理与维修, 2025, (09): 54-56.

[4] 夏日长, 邓合霞, 李庆, 等. 登陆海底管道设计技术 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25 (1): 55-57.

[5] 姜宇飞, 刘鹏, 成磊, 等. 海对海水水平定向钻跨越航道铺设海底管道施工工艺研究 [J]. 石油和化工设备, 2024, 27 (3): 105-109.

[6] 李明, 王强. 海底管道穿越浮式生产储油装置系统铺设工艺 [P]. 中国专利: CN 102269296 A, 2011-12-07.

[7] 国家能源局. SY/T 6788-2025 深水油田安装技术标准 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2025.

[8] 冷志, 秦立成. FPSO 油轮限位施工工艺 [J]. 石油化工设备, 2025, 54(6): 45-50.

[9] 全强, 刘广辉, 陈阳. 船舶海洋工程管线一体化建造工艺 [J]. 石油和化工设备, 2020, 23(8): 70-72.

[10] 张海波. 海底柔性管道的安装及应用 [R]. 北京: 海洋工程技术研究院, 2023.