

复杂条件下海底管道设计的体系建设和技术创新研究

季文峰 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257200)

摘要: 在全球能源需求增长和海洋油气开发向深海、远海及复杂区域推进的背景下, 海底管道面临深海环境、剧烈洋流、地质灾害、腐蚀介质等多重挑战。本文针对复杂条件下海底管道设计, 构建了以风险导向、全生命周期管理为核心的设计体系, 并探讨了数字孪生平台、地质灾害防控、深水流动保障、智能监测及高精度安装等关键技术。研究表明, 通过体系创新与技术融合, 可显著提升管道在极端工况下的安全性与长期服役性能, 为海洋油气资源高效开发提供支撑。

关键词: 海底管道; 风险导向设计; 全生命周期管理; 数字孪生

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 004-0088-03

Research on the Establishment of a System and Technological Innovation for Submarine Pipeline Design under Complex Conditions

Ji Wenfeng (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257200, China)

Abstract: Against the backdrop of global energy demand growth and the advancement of offshore oil and gas development towards deep-sea, remote waters, and complex areas, subsea pipelines face multiple challenges such as deep-sea environments, intense ocean currents, geological disasters, and corrosive media. This paper focuses on subsea pipeline design under complex conditions, constructs a design system centered on risk-oriented and full lifecycle management, and discusses key technologies such as digital twin platforms, geological disaster prevention and control, deepwater flow assurance, intelligent monitoring, and high-precision installation. The research shows that through system innovation and technology integration, the safety and long-term service performance of pipelines under extreme operating conditions can be significantly improved, providing support for the efficient development of offshore oil and gas resources.

Keywords: Submarine pipeline; Risk-oriented design; Full lifecycle management; Digital Twin

伴随着全球能源需求的不断增长以及近海石油天然气资源的日渐枯竭, 海洋石油天然气开发正逐渐向深海、远海以及地质条件复杂的区域发展。海底管道是海洋油气资源运输的主要通道, 其稳定可靠运行十分重要, 直接关系到能源供应是否稳定、海洋生态系统是否安全。但是在深海环境、剧烈洋流、活跃地质风险、极端低温高压、腐蚀性介质等多重复杂因素交错影响下, 传统的海底管道设计策略遭遇严峻考验。目前的设计规范对于极端动态负载、地质长期变化、多相流安全防护等都存在不足, 要求海底管道工程设计进行全方位的技术创新。因此, 研究复杂环境下海底管道的设计体系和创新技术, 具有重要的理论意义和实际工程应用价值。

1 工程案例

本次案例是一个设在深海、地质条件极为复杂的海底管道项目, 工程所处海域水深大于 1500m, 全年受到内波流和明显的季节性海流的频繁影响, 水动力环境十分严峻。海底地形特征明显, 起伏变化大, 有明显的沙波, 局部陡峭斜坡, 穿行在地质活跃区, 存在海底滑坡和轻微地震的风险。输送介质为富含二氧化碳、硫化氢的酸性多相流, 对管材抗腐蚀性能和流体安全传输都设置了非常严格的要求。

寒冷的海底环境大大增加了水合物和蜡沉积的风险, 该项目集深水、集强劲洋流、复杂不稳定的海底地形、频繁的地质灾害活动、极端的环境条件于一体。本次项目基本涵盖了目前海底管道设计所面临的全部关键复杂性问题, 为构建系统架构、推动技术革新提供了极具象征意义的全面案例, 其架构设计需要全面应对在位稳定性、疲劳寿命、地质灾害防护、流体安全、材质选择、安装便利性等各方面的复杂问题, 难度系数很高。

2 复杂条件下海底管道设计的体系建设要点

2.1 工程设计理念

本次深水复杂环境管道工程项目中, 传统的以确定性安全系数为依据的设计方法, 已经不能很好地应对多种不确定性因素的耦合影响。工程设计理念正由确定性分析转向风险导向、可靠性设计的范式转变, 将地质灾害概率、极端海洋环境载荷、材料性能退化等不确定性因素系统地纳入定量风险评价体系中, 按照全生命周期内失效概率和结果, 确定不同的设计标准和安全等级。核心理念扩展到全生命周期完整性管理, 即在设计阶段就要为以后的在位监测、检测、维护、弃置建立技术接口和决策依据, 在工程全寿命周期内实现安全性和经济性的最佳协调^[1]。

2.2 标准规范体系的完善与适应性研究

面对深海复杂的地质和水文学特征时，目前国际通行的规范对于海底管道的设计形成了极大的考验。以 DNVGL-ST-F101、APIRP1111 为代表的标准框架为典型设计打下了坚实的基础，但在负载模式、地质反应评价、安全系数等方面主要依靠以往的经验 and 理想化的假设。对于本案例中所遇到的剧烈内部波流和极端海洋流动复合负载、动态沙丘地形长期发展效应、地质活跃区地表位移，目前规范没有对以上现象进行充分细化和解析。

对于地震和滑坡共同作用下的管道应变设计，现行规范主要给出的是原则性的指导，具体的分析方法、荷载组合系数和容许准则，很大程度上依靠工程师的专业判断，因此制定适应性补充技术规范势在必行。此需求以海洋气象数据的地域性、地质地球物理勘探成果的精细化、高级的计算流体力学和地质力学数值仿真技术为依托，为特定灾害情况设计出相应的设计负荷序列与动态反应评价方法。该策略将海洋工程、地质工程、土力学、结构力学等多学科知识融合起来，形成一套从数据获取、风险评价、荷载界定到极限状态检验的全过程技术规范，弥补现有通用规范的不足，保证设计方案在科学合理的基础上，也保证经济、安全。

2.3 全生命周期风险评估与管理体系统构建

由于本案例工程具有很高的复杂性，其风险管理策略要覆盖从最初的概念设计到最终的弃置整个生命周期，而且这种策略应该成为所有关键技术决策的核心基础，构建该体系的起点是深入的场地特征刻画，目的是识别内波流冲击、沙波移动、海底滑坡、地震活动等多元风险因素。规划阶段采用定量风险评估技术，对各种灾害做概率评估和影响仿真，从而得到管道路径最佳化方案、材料优选、防腐措施设计、关键组件，如过渡接头、膨胀弯以及安全等级差异化策略，在识别为滑坡高风险的区域使用应变设计的方法，同时提高监测的频率。该体系的核心就是建立并设计一份和文件集成的风险记录手册，并实现和运营阶段完整性管理规划的动态连接。为了保证风险控制措施能够切实执行并且资源得到高效配置，需要建立以风险

为基础的检测、维护、维修决策支持矩阵，将风险等级同相应的监测方法、检测周期、维护方案联系起来，具体如表 1 所示。

利用该框架将设计阶段的风险识别变成实际的运行和维护程序，从而实现风险的循环管理，提高管道系统的刚性。

2.4 数字化设计平台与协同工作模式

由于本案例存在多源异构数据、高度耦合的物理过程，传统的串行、离散的设计模式效率低，容易造成信息孤岛，所以建立集成化的数字孪生设计平台，是实现精细化设计、高效协同的必然选择^[2]。该平台以统一的地理空间数据库为枢纽，把高分辨率海底地形、浅地层剖面、土工实验数据、长期海流观测和波浪统计信息、输送介质特性参数整合在一起。根据以上数据基础，平台集成了管道力学分析模块、多相流动保障模拟模块和地质力学评价模块，创建一个可以进行多物理场耦合仿真的虚拟环境。

设计团队可以在该平台上进行路由方案的比较，同时对各种路径的水动力稳定性、热力学特性、地质灾害风险暴露程度和安装可行性进行评价，从而达到多目标协同优化的目的。

3 复杂条件下海底管道设计的关键技术创新研究

3.1 抗地质灾害与特殊地质条件的设计技术

针对本案例中遇到的强活动性地质构造和复杂的海底地貌，传统设计方法已经存在明显的局限性，需要构建起抗地质灾害的韧性工程技术体系，关键在于将地质过程的动态演变纳入管道结构响应分析时域体系。对于滑坡区和断层带，需要建立管道-土体大变形耦合的非线性有限元模型，结合概率地震危险性分析和岩土体强度退化模型，定量分析断层错动和斜坡失稳对管道造成的累积塑性应变，据此确定基于应变的设计准则^[3]。

材料选取时应选用高均匀延伸率、优良止裂韧性的应变基管线钢，针对海底沙波迁移问题，需要依靠长期海流观测和泥沙运移模拟，建立沙波形态演变和管道自由悬跨发展之间的动态预测模型，进而提出主动干预方案。在沙波背流侧设置导流板来调节局部流场，抑制沙波的扩展，或者使用可以随海床冲刷而自

表 1 基于风险的检测与维护策略决策矩阵示例

风险等级	主要威胁	监测手段	检测间隔	主要维护策略
高	海底滑坡、活动断层	实时光纤应变 / 振动监测，定期多波束与侧扫声呐调查	1-2 年（或根据监测数据触发）	预备应急修复方案，如机械连接器；考虑预置防护结构
中	沙波迁移、局部冲刷	定期多波束测深与管道轨迹测量	3-5 年	监测发展速度，规划周期性砾石回填或安装稳管设施
低	均匀腐蚀、常规疲劳	阴极保护电位监测，智能清管器内检测	按标准周期（如 5-10 年）	基于检测结果的计划性维护

动下沉的智能稳管结构,实时保持管道和海床的贴合。该类技术目的是使管道系统具有适应地形变化、抵御突然的地质扰动的能力,由被动防护变为主动适应。

3.2 深水与低温环境下的流动保障与材料技术

深水低温高压、腐蚀性多相流介质,给本案例管道的长期流动安全性以及结构耐久性造成了根本性的难题。流动保障技术革新重点在于创建全生命周期热力学-水力学的集成化管理方案,急需创建高精度多相流瞬态模拟工具,耦合管内流体相态演变、传热过程和管道周围海水温度场,精确预估水合物生成区域和蜡沉积速率。在此基础上设计了主动保温和被动保温相结合的复合系统,使用相变材料做智能保温层来适应输送负荷的变化,同时用分布式的光纤测温技术进行实时的热场监测。

在材料领域,技术进步主要是特种管材及涂层体系的开发,在酸性介质环境中,应该选择抗点蚀、抗应力腐蚀开裂性能好的超级双相不锈钢或者冶金复合管。对于深水高压工作环境而言,应该选择经过严格冶金控制、有细晶组织和优良低温韧性的厚壁管线钢,同时亟需构建长效稳定的保温、防腐、机械防护一体化的多层复合涂层,在工厂预制并且保证铺设过程中不破损,以维持管道全生命周期的完整性。

3.3 智能管道与健康监测技术

为了有效应对本案例中复杂的、不确定的风险,实现精细化的完整性管理目标,将传统管道升级为具备感知、诊断、预警功能的智能化基础设施,已经成为技术进步的必然趋势,关键是建立空、天、海、底全方位监控网络与智能化数据处理中心。在感知层的设计上,全线路部署有应变、温度、声波、振动监测能力具备的分布式光纤网络,同时在地质灾害易发区布置海底观测网络站点,可以及时捕获并记录微小形变和微小应变信号^[4]。

数据传输需借助于水下声学调制解调器与漂浮于水面的接收器之间建立的通信通道,将信息输送至数据中心,诊断和预警模块的技术革新核心就是动用数字双胞胎技术,创建与实体管道同步仿真并且不断校正的虚拟原型。该模型集成了地质力学、结构动力学和流体力学的算法,通过机器学习来整合大量的数据集,不仅能识别出异常的行为模式,揭示损伤发生的机理,还可以预测悬索的疲劳寿命、腐蚀速率等重要参数的变化趋势。此种创新方法将维护策略从被动的应对转变为前瞻性预测管理,大幅度提升安全控制的主导力以及经济效益。

3.4 先进施工安装与防护技术创新

复杂的海洋环境以及恶劣的海床地质条件,为本

案例管道安装精度和长期在位稳定性带来了极限考验,促使施工安装及防护技术朝着高精度、智能化、自适应方向发展。安装阶段的技术创新主要在动态环境下对精确作业进行控制,需要依靠实时的气象海洋预报以及船舶运动响应模拟,对铺管船、托管架和管道的形态做耦合动力学分析,对铺管作业窗口期做动态控制和路径实时优化^[5]。

铺设时采用集成惯性导航和声学信标的智能监测系统,对管道的离底情况和触地点应力做连续的反馈调节,防护与稳管方面要开发新型功能化防护材料和结构,对软弱地基开发负泊松比特性的轻质高强多孔混凝土垫块,在受压时侧向膨胀可以增大与海床的摩擦力^[6]。对于冲刷区,用智能材料自愈合固沙涂层或可降解聚合物网格进行生态化滩体稳固,这些新技术可以保证管道在恶劣的安装工况下成功就位,在复杂的水动力和地质作用下保持几十年结构稳定、功能完好。

4 结语

综合研究结果表明,在复杂的海底管道设计中,需要从传统的确定性设计方法转变为全生命周期风险韧性管理的设计,创建以风险为导向、标准和工程实际相一致、数字协同的设计体系,融合地质灾害动态防控、深水流动保障、特种材料、智能监测预警、高精度安装防护等关键技术,有效应对深水、强洋流、活动地质、腐蚀介质等多因素的影响,可以有效改善管道在极端工况下的安全稳定性以及长期服役性能,而且给海洋油气资源的高效开发赋予了重要的技术支持。

参考文献:

- [1] 曹聚杭,张婕,李健,等.海底管道机械测径与水压试验标准对比分析[J].海洋工程装备与技术,2025,12(04):64-71.
- [2] 刘纯.油田海底管道变径球阀漏磁内检测技术应用[J].中国科技信息,2025(22):93-95.
- [3] 孙碧君,常连庚,曹晟,等.考虑路由水深变化的海底管道铺管施工设计方法[J].建筑技术开发,2025,52(08):103-105.
- [4] 金永平,石子木,万步炎,等.海底管道检测遥控水下机器人发展现状与关键技术[J].中国机械工程,2025(11):1-20.
- [5] 孟小雨.动力定位船海底管道S形铺设施工作业分析[J].设备管理与维修,2025(16):34-38.
- [6] 燕晖,陈建长,陈永新,等.海底管道回收工具适应性优化改进设计[J].石油工程建设,2025,51(04):70-74.

作者简介:

季文峰(1979-),男,汉族,山东临邑人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:海洋工程。