

海洋平台工艺管线智能化施工管理关键技术研究

迟海明 魏玉战 张荣磊 刘福领 杨海勇 (海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

摘要: 为解决海洋平台工艺管线施工过程中信息割裂、资源调度粗放和安全风险隐蔽等问题, 本文对工艺管线智能化施工管理关键技术开展研究, 构建基于 BIM 与数字孪生的全生命周期信息模型, 设计现场感知与高精度定位体系, 提出智能调度与协同控制、施工数据分析与知识图谱支撑、质量安全监测及风险预警技术路线, 以期海洋平台工艺管线工程的精细化建设与运维管理提供参考。

关键词: 海洋平台; 工艺管线; 智能化施工管理; 关键技术

中图分类号: TE95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0103-03

Research on Key Technology of Intelligent Construction Management of Offshore Platform Process Pipeline

Chi Haiming, Wei Yuzhan, Zhang Ronglei, Liu Fu Ling, Yang Hai Yong (Ocean Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In order to solve the problems of information fragmentation, extensive resource scheduling and hidden safety risks in the construction process of offshore platform process pipelines, this paper studies the key technologies of intelligent construction management of process pipelines, constructs a full life cycle information model based on BIM and digital twins, designs a site perception and high precision positioning system, and proposes intelligent scheduling and collaborative control, construction data analysis and knowledge map support, quality safety monitoring and risk warning technical routes. It is expected to provide reference for fine construction and operation and maintenance management of offshore platform process pipeline engineering.

Keywords: offshore platform; process pipeline; intelligent construction management; key technology

海洋油气开发向深水和复杂海况扩展, 海洋平台工艺管线规模与布局复杂度提高, 施工难度加大。传统施工管理依靠经验和分散资料, 信息传递缓慢, 现场状态难以掌握, 质量波动与安全隐患在多工序交叉中累积。构建以信息建模、现场感知和智能调度为支撑的施工管理体系, 成为提升海洋平台工艺管线建设质量与安全水平的重要研究意义。

1 智能化施工管理的内涵与基本原则

海洋平台工艺管线智能化施工管理, 以数字化设计模型为核心, 以感知数据驱动施工计划、质量控制与协同调度, 构成集成管理体系。内涵包括施工全过程数据闭环、虚实映射状态感知与基于规则的控制, 通过 BIM、物联网、数字孪生和边缘计算联动, 实现作业面可视化、工序可追溯、风险量化。基本原则强调安全冗余优先、标准化与模块化协同、数据唯一源管理及进度、质量与 HSE 目标协调统一。

2 海洋平台工艺管线智能化施工管理的关键技术

2.1 基于 BIM/ 数字孪生的工艺管线全生命周期信息建模技术

基于 BIM 与数字孪生的工艺管线全生命周期信息建模, 强调从工艺包设计开始建立统一语义模型, 将 P&ID、三维管线模型、应力分析模型与施工安装模型进行关联, 实现从 DN50~DN1500 不同管径、

PN1.6MPa~PN25MPa 不同压力等级的构件参数化表达。通过 LOD300 至 LOD500 分级精度控制焊口、支吊架、阀门组、补偿器等关键构件信息, 结合 ISO、ASME 等规范的属性库, 形成结构化数据集^[1]。数字孪生模型对现场工况进行动态映射, 引入温度 -20℃~50℃、波高 2m~6m、平台变形量 $\pm 15\text{mm}$ 等边界条件, 将设计状态、制造状态、安装状态与试压状态统一纳入时序模型, 为施工模拟、碰撞检查、工序排布与运维改造提供连续数据基础, 并为后续知识图谱与智能决策模块提供高质量数据源。

2.2 施工现场感知与高精度定位关键技术

施工现场感知与高精度定位技术体系围绕管段、构件、设备与作业人员的空间状态监控, 通过 RFID、二维码标识与条码系统对 DN80 至 DN1200 预制管段、阀门组件进行唯一编码, 实现入库、出库、吊装、对位全过程追踪。感知层布设 UWB 基站、RTK 基准站、三维激光扫描仪与工业相机, 构成厘米级空间测量网络, UWB 平面定位精度优于 10cm, RTK 控制点精度优于 $\pm 20\text{mm}$, 扫描点云密度可达 100 万点每秒。数据融合模块采用扩展卡尔曼滤波与 ICP 配准算法, 将实时坐标与 BIM 模型坐标系进行统一, 生成带时间戳的三维轨迹, 用于起重路径校核、吊装姿态修正与碰撞风险分析。终端通过防爆平板与头戴显示装置展示

偏差矢量、剩余空间距、作业禁入区等参数信息，支撑复杂海况下的精细化安装控制与安全管控。

2.3 工艺管线智能施工仿真与工序优化技术

工艺管线智能施工仿真与工序优化技术以三维管线模型和施工过程参数为基础，构建包含管段编号、焊口序号、支撑位置、吊点坐标等信息的工序网络，通过离散事件仿真与四维进度集成，对日均焊口数量、单次吊装重量、作业面数量等指标开展动态推演。仿真单元时间步长一般设定为 1s~5s，起重设备额定起重重量范围 100t~800t，结合作业半径曲线与风速 8m/s、平台加速度 0.1g 等环境工况，评估不同方案中吊装路径安全裕度。基于改进遗传算法、粒子群算法以及整数规划模型，对关键工序顺序、作业班组配置与管线预制批次进行优化，使资源利用率保持在 80%~90% 区间，焊接返修率控制在 2% 以下^[2]。仿真结果通过可视化界面映射至三维模型，形成工序节拍、空间占用与资源冲突的综合评价，为施工组织设计与现场调整提供量化依据。

2.4 质量与安全智能监测及风险预警技术

质量与安全智能监测及风险预警技术围绕焊接质量控制、结构响应监测与人员环境安全管理构建多层监控体系，在关键焊缝布设电弧电压、电流、焊接速度在线采集装置，采样频率设定为 100Hz~500Hz，通过与工艺规程窗口带宽对比识别偏离状态。对高压管

线试压阶段配置压力传感器与温度传感器，精度优于 0.5% F.S，配合声发射、相控阵超声检测与 TOFD 技术，实现对微小缺陷扩展趋势识别。结构安全方面在支撑节点、导管架节点与大跨距管段设置应变计与加速度传感器，监控应变幅值、振动频率与位移响应，将监测数据与有限元分析结果比对，建立超过设计裕度 10%~15% 的阈值。风险预警模块基于贝叶斯网络与模糊综合评判方法，对作业环境风速、浪高、能见度以及人员违章行为记录进行综合量化，输出分级预警信号，引导施工作业节奏调整与应急预案启动时间控制。海洋平台工艺管线质量与安全智能监测关键参数及控制指标见表 1。

2.5 智能调度与协同控制技术

智能调度与协同控制技术面向多工区、多工种并行施工场景，构建以作业分解结构 WBS、资源编码体系与四维进度计划为核心的调度模型。通过建立包含班组人数 5~15 人、设备利用时间间隔 15min、作业窗口长度 2~6h 等参数的约束集合，将起重机、焊接机组、检测设备与物流单元统一纳入资源池^[3]。调度引擎采用混合整数规划与启发式规则结合方式，针对关键管线安装工序设置优先级权重 0.6~0.9，以网络时延不超过 200ms 的现场总线与无线网络为载体，将指令下发至吊装指挥终端、焊接工作站和检测站点。协同控制层根据进度偏差比例、资源等待时间与作业

表 1 海洋平台工艺管线质量与安全智能监测关键参数及控制指标

监测对象	关键参数	典型范围 / 阈值	监测频率 / 精度
焊缝质量监测	电弧电压、电弧电流、焊接速度	电压 18~32V、电流 180~320A、速度 250~450mm/min；参数偏离工艺窗口 $\geq 10\%$ 触发预警	100~500Hz；在线采集、瞬态过程记录
试压过程监测	压力、温度、升压速率	压力 $1.5 \times$ 设计压力，稳压时间 ≥ 30 min；泄压速率 ≤ 0.5 MPa/min	1~5Hz；精度 $\leq 0.5\%$ F.S.
结构响应监测	应变、位移、振动频率	应变不超过屈服应变的 60%，位移阈值为设计值的 0.85~0.9；关键节点安全裕度 $\geq 10\%$	10~50 Hz；应变计 $\pm 5\mu\epsilon$ 、位移 ± 0.5 mm
环境安全监测	风速、浪高、能见度、甲板温度	风速 >12 m/s 或浪高 >3.5 m 黄预警；风速 >15 m/s 或浪高 >4.5 m 红预警	1Hz
人员安全监控	人员位置、区域停留时间、作业票证状态	危险区域停留时间 >10 min 触发语音提示；受限空间进入须匹配有效作业票	1~2s 刷新；UWB 定位误差 ≤ 0.3 m
气体检测	O ₂ 体积分数、H ₂ S 浓度、可燃气体浓度	O ₂ $<19.5\%$ 或 $>23.5\%$ ；H ₂ S ≥ 5 ppm；可燃气体 $\geq 10\%$ LEL 触发报警	1Hz；传感器精度 $\pm 2\%$ 读数
电源与通信监测	供电电压、网络时延、丢包率	供电波动幅度 $\leq \pm 10\%$ ；网络时延 <150 ms；丢包率 $<1\%$	1~10s

面拥挤度指数对原计划进行滚动修正,使关键设备负荷率稳定在 0.75 ~ 0.9 区间,非关键作业占用度维持在 0.5 ~ 0.7。

2.6 施工数据分析与知识图谱支撑技术

施工数据分析与知识图谱支撑技术围绕管线预制、现场安装、检测验收等环节构建统一数据仓库,将焊缝编号、工艺参数、检验结论与环境监测记录按时间粒度 1min 或 10min 存储,形成日增量在 5GB 以上的数据集。数据预处理阶段通过缺失值率、异常值比例与一致性指标对数据质量进行分级,对误差超过 $\pm 10\%$ 的记录执行剔除或修正策略。特征构建环节针对 DN50 ~ DN1500 不同管径、壁厚 6mm ~ 40mm、压力等级 PN1.6MPa ~ PN25MPa 等参数生成多维特征向量,结合焊接方法、坡口形式与检验结果标签,用于缺陷风险评估模型训练。知识图谱部分以“构件—工艺—环境—缺陷类型—处置方案”为主干结构,节点规模可扩展至 10^4 级,关系边类型不少于 30 种,通过图数据库存储与查询,实现对典型问题场景的快速检索与关联推理。施工管理系统在接收最新检测数据后,依据图谱相似度阈值 0.8 与风险评分阈值 0.6 触发针对性决策建议,为方案优化、工艺调整及经验复用提供结构化支撑。

2.7 智能施工装备与辅助系统技术

智能施工装备与辅助系统技术面向工艺管线预制加工、现场组对、焊接与检测辅助过程构建装备体系,在陆上预制场配置数控下料机、自动坡口机与管段定位平台,可覆盖管径 DN80 ~ DN1800、壁厚 8mm ~ 50mm 范围,切割尺寸公差控制在 ± 1 mm 以内。焊接环节引入轨道式或悬挂式焊接机器人,额定负载 20kg ~ 50kg,轨迹重复定位精度优于 ± 0.3 mm,通过与摆动电源、送丝系统和在线监控单元集成,实现对焊接速度、热输入与成形高度的闭环控制。现场组对采用带激光测距与姿态测量功能的对口辅助装置,可在间隙 1.5mm ~ 3mm、错边量不大于壁厚 10% 条件下完成精细调整^[4]。辅助系统部分配置可视化吊装指挥终端、智能扭矩工具与移动检验工作站,通过工业以太网与无线网络接入施工管理平台,保证控制指令与反馈数据往返时间不超过 300ms,提高复杂空间管段安装作业的操作精度与重复性。

3 关键技术应用风险分析与对策建议

3.1 海上环境条件、设备可靠性与通信条件带来的风险

海上环境对智能化施工管理体系构成多重风险,强风、涌浪、海雾与船舶干扰削弱传感器稳定性与定位精度,风速超过 15m/s、浪高大于 3.5m 时,吊装作

业裕度降低。高湿高盐气氛加速端部接插件与控制柜腐蚀,引发采集链路中断和测点漂移,设备无故障时间缩短。通信层面卫星链路时延常在 600ms 以上,无线网络丢包率易超过 3%,极端海况局部区域甚至出现通信盲区,对实时调度、远程监控与联动控制构成压力,需要通过冗余链路、边缘计算与本地安全联锁策略增强系统韧性。

3.2 海洋平台工艺管线智能建造的发展方向

海洋平台工艺管线智能建造发展方向集中于模型驱动、装备互联与运维融合。设计阶段基于三维模型与数字孪生同步构建,实现管线布置、应力校核与施工工法协同,目标设计变更率控制在 3% 以内。施工阶段配置机器人焊接、自动化测量与智能吊装系统,关键工序自动化率达到 70% 以上,焊接返修率降至 2% 以内^[5]。运维阶段通过在线监测数据回写设计与施工数据库,结合知识图谱与可靠性分析修订运行策略,使停产检修时长缩短 10%~15%,并依托云边协同架构推动多主体间数据共享。

4 结语

总而言之,海洋平台工艺管线智能化施工管理以数据贯通和模型驱动为核心,将 BIM、数字孪生、物联网感知、高精度定位与智能调度集成为一体,实现进度、质量、安全、成本的协同控制与可视化管理,提升复杂海上施工的可预测性与可控性,为高强钢管线、大水深工况和多专业交叉作业提供支撑。未来,面向更高自动化和无人化的智能建造体系将在海洋平台工程领域形成格局。

参考文献:

- [1] 史海峰,刘延亭,丁淑达,等.海洋平台工艺管线预制施工数据库智能化管控方案分析[J].石油和化工设备,2023,26(09):121-123.
- [2] 刘立坤,陈锐,李文辉,等.激光打码在工艺管线生产执行管理系统中的应用研究[J].石油和化工设备,2025,28(02):90-93+98.
- [3] 吴海恩.海洋石油平台工艺管线防腐措施分析[J].清洗世界,2025,41(04):190-192.
- [4] 孙晔.海洋石油平台工艺管线发生腐蚀的原因及防腐技术的应用[J].全面腐蚀控制,2024,38(02):122-124.
- [5] 毕祥元,刘果,任康,等.海洋平台工艺管线球阀在线维修技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(14):171-173.

作者简介:

迟海明,男,黑龙江人,大专,研究方向:海洋石油、工艺管道、智能化。