

钻井平台数字化运维数字孪生技术设计与应用研究

黄宇翔 程东东 唐涛 董伟 朱娜

中石化胜利石油工程有限公司培训中心

DOI:10.32629/jpm.v7i8.9025

[摘要] 本研究以山东省某海上钻井平台数字化升级工程为例，深入探索了一种基于数字孪生的钻井平台数字化运维系统技术。经过工程验证发现，该技术方案对于提升故障预警能力和运维管理效率具有明显的促进作用。实际应用数据显示，系统使平台非计划停机次数同比下降 46.7%，单次全面巡检耗时由 2.5 小时缩短至 1.2 小时，运维决策数据调取时间从超过 30 分钟缩短至 8 秒，预测性维修比例提升至 35%。由此可见，对于海上油气装备智能化运维的研究，可以解决传统模式中预警滞后、效率低下和数据孤岛等问题，对于推动海洋工程装备的数字化转型与智能化升级，具有一定的推广意义。

[关键词] 数字孪生；数字化运维；海上钻井平台；预测性维护；边缘计算

Research on the Design and Application of Digital Twin Technology for Digital Operation and Maintenance of Drilling Platforms

Huang Yuxiang Cheng Dongdong Tang Tao Dong Wei Zhu Na

Training Center, Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Using a digital upgrade project for an offshore drilling platform in Shandong Province as a case study, this research conducts an in-depth exploration of a digital operation and maintenance (O&M) system for drilling platforms based on digital twin technology. Engineering validation demonstrates that this technical solution significantly enhances the platform's fault early-warning capabilities and improves O&M management efficiency. Data from practical applications show that the system reduced unplanned downtime by 46.7% year-over-year; shortened the time required for a single comprehensive inspection from 2.5 hours to 1.2 hours; reduced the data retrieval time for O&M decision-making from over 30 minutes to 8 seconds; and increased the proportion of predictive maintenance to 35%. These results indicate that research into intelligent O&M of offshore oil and gas equipment can effectively address issues inherent in traditional models—such as delayed early warnings, low operational efficiency, and data silos—and holds significant potential for promoting the digital transformation and intelligent upgrading of marine engineering equipment.

[Key words] Digital twin; Digital Operations and Maintenance; Offshore drilling platform; Predictive maintenance; Edge computing

引言

数字孪生技术对于实现复杂工业装备全生命周期、透明化与智能化的运维管理，具有重要的现实意义^[1]。在传统的钻井平台运维模式中，比较容易出现关键设备故障预警滞后、运维作业过度依赖人工经验、多源数据分散、“数据孤岛”现象明显等若干问题，严重影响到项目的生产安全与运营效率。因此，针对钻井平台，进行数字孪生系统研究，尝试突破数据、模型与业务应用之间的壁垒，是实现状态先知、决策优化和效率提升的关键路径。

1 工程概况

本研究以山东省某海上钻井平台数字化升级工程为例，该平台位于渤海湾海域，平均作业水深约 22.5m，是一座拥有 8 口生产井的中型自升式钻井平台。平台主要配备一套额定钻井深度为 6000m 的钻机系统、三台输出功率为 2.2MW 的原油发电机组以及配套的泥浆循环与净化设备。该平台设计服役寿命为 20 年，目前已持续运行超过 8 年。此前，该项目在运维管理中存在以下问题：

(1) 关键设备故障预警滞后。近三年平台因机电系统突发故障导致的非计划停机年均达到 15 次，单次事件平均处置时间超过 36 小时，严重影响生产连续性。

(2) 运维作业依赖人工经验。日常巡检与维护主要依靠

技术人员现场判断，单次全面巡检平均耗时约 2.5 小时，且纸质记录易出错、难追溯，数字化巡检覆盖率仅为 35%。

(3) 多源数据分散形成“数据孤岛”。平台 SCADA 系统、设备档案管理系统与维护工单系统相互独立，数据格式不兼容，导致运维决策缺乏统一、实时的数据视图支撑。

因此，本研究需要设计并实施一套基于数字孪生技术的钻井平台数字化运维系统，以构建平台全要素三维可视化模型，实现运维数据的融合与实时映射，最终提升故障预测能力与运维管理效率。

2 钻井平台数字化运维数字孪生技术设计

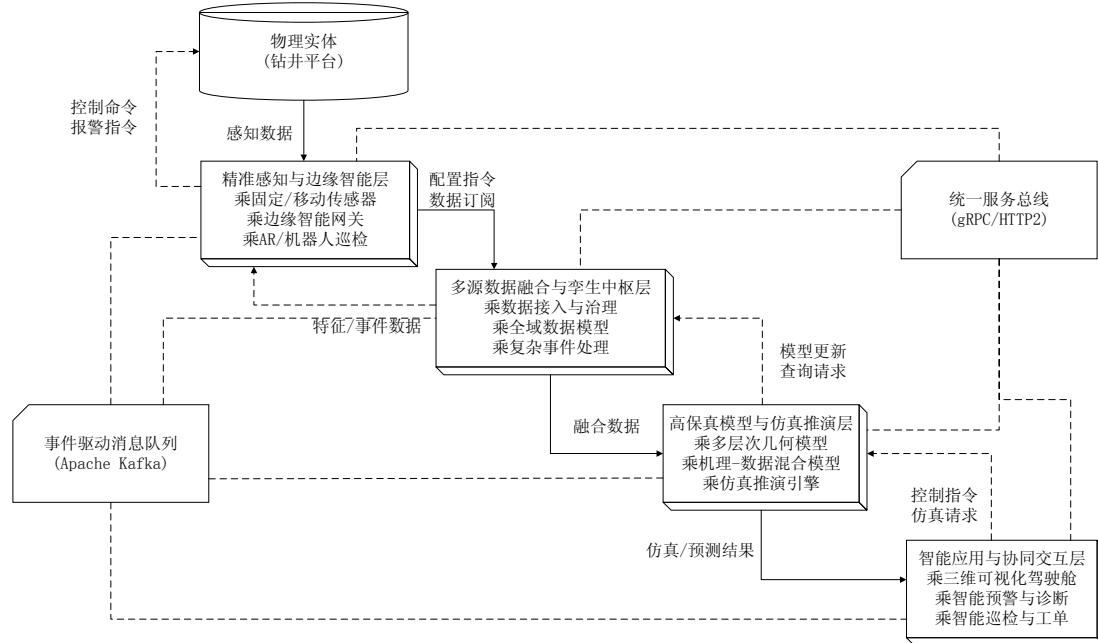


图1 系统整体技术架构图

该架构的核心设计指标包括：1) 数据实时性：从物理传感器数据采集到应用层可视化更新的端到端单向延迟 ≤ 2 秒；核心预警指令（如紧急停机建议）从生成到送达边缘控制器的闭环响应时间 ≤ 5 秒。2) 计算协同性：引入“边缘-云”协同计算框架。边缘侧（智能网关、本地服务器）负责高频率（ $\geq 1\text{kHz}$ ）原始数据的实时特征提取与阈值报警，将数据带宽降低 70% 以上；云端（或平台中央服务器）承载高保真模型仿真、大数据分析 & AI 模型训练/推理。3) 模型融合性：创新性设计“机理-数据”混合模型引擎。该引擎能并行驱动基于物理定律的白盒模型（如动力学方程）和基于历史数据训练的黑盒/灰盒 AI 模型（如 LSTM、XGBoost），通过证据理论或贝叶斯方法进行结果融合，提升状态评估与预测的置信度。

2.2 精准感知与边缘智能层详细设计

感知网络采用“固定式连续监测 + 移动式按需巡检”的异构混合架构，旨在实现关键设备无盲区覆盖。

2.2.1 固定监测传感网络设计

(1) 振动监测：针对旋转机械（如顶驱、泥浆泵、发电机组），选用 IEPE 型三轴加速度传感器（型号：PCB 356AXX），量程 $\pm 50\text{g}$ ，频率响应 $5\text{Hz} \sim 5\text{kHz}$ 。采样率遵循奈奎斯特定理，设置为 12.8kHz ，足以捕捉轴承、齿轮的早期高频故障特征（如外圈故障频率的 5 阶谐波）。传感器通过 $4 \sim 20\text{mA}$ 环路或以太网（IEEE 802.3af PoE）供电与通信^[2]。

2.1 整体技术架构设计

本系统采用基于数字孪生五维模型（物理实体、虚拟模型、孪生数据、服务应用、连接交互）的融合架构，并具体化为一个分层解耦、云边协同的技术实现框架。如图 1 所示，系统自下而上分为四个核心层次：精准感知与边缘智能层、多源数据融合与孪生中枢层、高保真模型与仿真推演层、智能应用与协同交互层。各层之间通过统一的服务总线（基于 gRPC/HTTP2 协议）和事件驱动消息队列（Apache Kafka）进行通信，确保系统的松耦合与高内聚。

(2) 温度监测：在 98 个关键热节点（如发电机轴承、变压器绕组、液压油箱）部署 A 级 PT100 铂热电阻，采用三线制接线以补偿引线电阻误差。温度变送器将电阻信号转换为 $4 \sim 20\text{mA}$ 模拟量信号，测量不确定度优于 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ （在 $0 \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内）。

(3) 转速与位置监测：对绞车、转盘等核心设备，采用激光测速探头（欧姆龙 E3S-X）与增量式光电编码器（海德汉 ECN 1123）双冗余配置。编码器每转输出 2048 个脉冲，通过高速计数器模块进行采集，提供 $\pm 0.1^\circ$ 的角位移分辨率。

2.2.2 边缘智能网关设计

为整合原有异构系统（SCADA, DCS, PLC）并减轻网络负载，设计了定制化边缘智能网关。其硬件核心为 ARM Cortex-A72 多核处理器，搭载轻量化 Linux 系统。

(1) 协议转换：内置协议栈支持 OPC UA（用于 SCADA）、Modbus TCP/RTU（用于电力仪表）、PROFINET（用于西门子 PLC）等，实现数据统一采集，周期可配置（默认 100ms ）^[3]。

(2) 边缘计算：集成轻量级 AI 推理引擎（如 TensorFlow Lite）。例如，对振动加速度时域信号 $x_i (i=1, 2, \dots, N, N \text{ 为一个计算窗口内的采样点数})$ 实时计算以下时域特征指标，用于设备状态的初步评估与健康基线比对：

$$\text{均方根值 (RMS): } x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}, \text{ RMS 值表征了}$$

振动信号的平均能量水平，是衡量设备总体振动烈度的核心指标。其数值大小直接对应于设备的整体运行状态，例如不平衡、不对中等故障通常会引发 RMS 值的显著上升。在工程应用中，常将其与 ISO 10816 等标准规定的振动烈度阈值进行比较，作为设备是否处于“良好”、“可接受”或“报警”状态的初步判据。

峰值因数 (Crest Factor)： $CF = \frac{|x_{peak}|}{x_{rms}}$ ，峰值因数是

信号峰值 (绝对值最大值) 与 RMS 值的比值。该指标对信号中是否存在瞬态冲击成分极为敏感。对于运行平稳的设备，其振动信号近似服从高斯分布，CF 值通常在 3~5 之间。当轴承出现点蚀、齿轮发生断齿等早期局部损伤时，会产生周期性冲击，导致信号峰值 x_{peak} 显著增大，而 RMS 值在初期可能变化不大，从而使 CF 值明显升高。因此，CF 是诊断早期冲击性故障的有效特征。

峭度 (Kurtosis)： $K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4 / \sigma^4$ ，峭度是描述

信号概率密度分布“尖锐”或“扁平”程度的四阶统计量。其中， μ 为信号均值， σ 为标准差。对于理想的正态分布信号，峭度值为 3。当信号中含有大量冲击成分时，其分布会在均值附近变得更加尖锐，同时尾部更厚，导致峭度值远大于 3。与峰值因数相比，峭度对冲击的统计特性更为敏感和稳定，尤其擅长检测信号中非高斯、非平稳的冲击事件，是滚动轴承和齿轮箱故障诊断中常用的早期预警指标。

网关持续计算上述特征值，并与预置的阈值或基于历史数据学习的动态基线进行比较。仅当特征值超过阈值，或经集成的轻量级 AI 模型 (如基于特征值训练的决策树) 推理判断为异常状态时，网关才会将特征数据包与事件警报上传至上层系统。该策略有效过滤了冗余的平稳状态数据，将网络传输带宽需求降低了 70% 以上，同时确保了关键预警信息的实时性。

2.2.3 移动巡检单元设计

(1) 巡检机器人：搭载双目视觉相机、FLIR 热像仪和 VOC 气体传感器。采用同步定位与地图构建 (SLAM) 算法 (基于 LiDAR+IMU 的 Cartographer) 实现自主导航，定位精度达 $\pm 0.05m$ 。UWB (Decawave DW1000) 信标提供全局校正，精度 $\pm 0.1m$ 。

(2) AR 辅助巡检头盔：采用 Microsoft HoloLens 2，通过其内置的深度摄像头实现设备识别与空间定位。开发了专用应用，将数字孪生模型中的检修步骤、历史缺陷 (3D 标注) 叠加于真实设备上。巡检人员可通过手势或语音命令记录异常。

2.3 高保真模型与仿真推演层详细设计

本层构建物理实体的数字化镜像，涵盖几何、物理、行为及规则多维属性。

2.3.1 多层次几何建模

采用四级细节层次 (LOD) 管理策略以平衡渲染效率与精度需求：

(1) LOD 0 (平台全局)：基于无人机倾斜摄影与激光点云 (Faro Focus S 150) 融合建模，生成网格模型，绝对定位误差 $< 0.1m$ 。

(2) LOD 1 (系统级)：如钻井架、发电房，基于 CAD 图纸进行轻量化重拓扑，保留主要结构。

(3) LOD 2 (设备级)：如泥浆泵、柴油机，导入精简后

的 CAD 模型，保留可运动部件 (如活塞、阀门) 的独立骨骼。

(4) LOD 3 (零件级)：针对故障高发部件 (如顶驱齿轮箱轴承)，使用高面数 CAD 模型，支持剖面查看与虚拟拆卸。

所有模型使用基于物理的渲染 (PBR) 流程，材质贴图分辨率不低于 2K，并在 Unity 引擎中烘焙全局光照与反射探针，确保视觉保真度。

2.3.2 “白盒-灰盒”混合物理模型

(1) 白盒机理模型：针对钻井提升系统，建立钻柱-井壁相互作用的多体动力学模型。其核心简化控制方程可表示为：

$$M(q) * \ddot{q} + C(q, \dot{q}) * \dot{q} + K(q) * q = F(t)$$

其中， q 为广义坐标 (位移/转角)， M 、 C 、 K 分别为质量、阻尼、刚度矩阵， $F(t)$ 为大钩载荷、转盘扭矩等外部激励。该模型以 1ms 步长进行数值积分 (龙格-库塔法)，实时输出井底钻压、钻柱摩阻及关键截面应力。

(2) 灰盒数据驱动模型：对于发电机组性能退化，采用基于注意力机制的双向 LSTM (Bi-LSTM) 网络预测剩余使用寿命 (RUL) [4]。模型输入为过去 24 小时、采样间隔 10 分钟的 14 维时序特征 (如振动频谱峰值、排气温度、机油压力、输出功率波动等)，经过 3 层 Bi-LSTM (每层 128 个单元) 与注意力层后，输出未来 7 天每一天的故障概率分布。模型使用历史故障数据训练，测试集上 RUL 预测的平均绝对百分比误差 (MAPE) 控制在 15% 以内。

2.3.3 仿真推演引擎

引擎基于离散事件系统 (DEVS) 与系统动力学混合仿真框架。用户可在虚拟环境中注入故障事件 (如“设定 2 号泥浆泵出口阀卡在开度 70%”)，引擎将自动调用关联的机理模型 (流体网络模型) 和数据模型 (泵效率模型)，以加速比 (如 10:1) 推演该事件对全系统压力、流量、乃至生产进度的影响链，并以可视化图表和动画呈现多个推演方案的对比结果。

2.4 多源数据融合与孪生中枢层详细设计

本层是数字孪生数据流转与价值提炼的核心。

2.4.1 流批一体数据接入与处理

(1) 接入层：采用 Apache Kafka 作为统一消息中枢，设立不同主题 (Topic) 分别接收传感器实时流 (sensor_raw)、边缘特征流 (sensor_feature)、业务事件流 (work_order) 等。集群设计吞吐能力为 100000 条消息/秒。

(2) 流处理层：使用 Apache Flink 对高频振动流进行实时窗口计算。例如，每 10 秒计算一个时间窗口内的频谱特征 (通过 FFT 变换)，并提取前 5 个幅值最大的频率成分及其幅值，写入时序数据库。

2.4.2 基于本体的全域数据建模

构建钻井平台运维本体 (采用 OWL 语言)，明确定义 Platform、System、Equipment、Component、Sensor、FailureMode 等类及其对象属性 (hasPart, isMonitoredBy, mayCause)。例如，三元组 (MudPump₃, hasBearing, Bearing₀₂₃) 和 (Bearing₀₂₃, isMonitoredBy, VibrationSensor₄₅) 明确了实体间的组成与监测关系。该本体为所有异构数据提供了统一的语义映射框架，是实现深度关联查询与推理的基础。

2.4.3 数据治理与融合

(1) 时间对齐：针对不同采样率的数据 (如 1ms 的振动与 1s 的温度)，采用动态时间规整 (DTW) 算法进行软对齐，找到最小累积距离的最佳匹配路径。

(2) 数据修复：对缺失或异常数据，采用卡尔曼滤波(KF)与长短期记忆网络(LSTM)结合的方法。KF用于短时预测与平滑，LSTM用于学习长期模式以估计复杂情况下的缺失值。

(3) 存储策略：高频原始数据(>1Hz)存储于InfluxDB时序数据库，保留策略为30天滚动存储。特征数据、事件日志及模型参数存储于PostgreSQL关系数据库，长期保存。

2.4.4 复杂事件处理(CEP)引擎

引擎基于Esper规则引擎开发。定义事件模式(Event Pattern)，例如：PATTERN[A->B within 10 min]WHERE A.vibration>7.0 mm/s AND B.temperature>85°C。当来自振动传感器A的事件与温度传感器B的事件在10分钟内依次发生时，CEP引擎将触发一个“轴承过热风险”的复合预警，其置信度高于单一阈值报警。

2.5 智能应用与协同交互层详细设计

应用层将底层能力封装为面向运维工程师的业务功能。

2.5.1 三维可视化驾驶舱

基于Unity 3D引擎开发，支持WebGL发布。实现数据驱动的可视化：

(1) 状态映射：设备温度T映射到模型颜色，采用线性插值：

$$Color = Lerp(Green, Red, (T - T_{min}) / (T_{max} - T_{min}))$$

(2) 虚拟传感器：用户可在三维模型任意位置拖放“虚拟测点”，系统自动关联最近邻的物理传感器数据或通过机理模型插值计算出该虚拟点的估计值(如应力分布云图中的某点应力)。

2.5.2 智能预警与诊断系统

采用三级递进式预警：

一级(阈值报警)：基于设备手册与历史数据设定静态/动态阈值。

二级(模型残差报警)：比较白盒机理模型的仿真输出 y_{sim} 与实际传感器读数 y_{real} ，计算残差 $e = |y_{real} - y_{sim}|$ 。当残差连续超过统计控制限(如 3σ)时报警，指示性能劣化。

三级(预测性预警)：由灰盒AI模型触发，输出故障概率与RUL。触发后，系统自动调用仿真推演引擎，评估不同维修策略(立即维修、观察运行、计划停机维修)的总体影响成本，生成决策报告。

2.5.3 智能巡检与工单闭环

(1) 路径优化：基于设备风险值(RPN=失效严重度S×发生频度O×检测难度D)和平台空间拓扑，采用改进的遗传算法规划最短且覆盖高风险设备的巡检路径。

(2) AR作业指导：通过AR头盔识别设备二维码或视觉特征后，从数字孪生模型中调取对应的三维动画拆装指引、扭矩标准等，叠加显示于真实视野中。

(3) 工单自动生成：发现缺陷后，通过语音输入“创建工单，3号泵轴承异响”，系统自动填充设备信息、关联历史工单与备件库存，并推送至相关维修人员移动终端，实现从发现到闭环的全流程数字化管理。

3 工程应用与效果评价

3.1 工程应用

本研究将所设计的钻井平台数字孪生运维技术方案，在山

东省渤海湾海域某海上钻井平台的数字化升级工程中进行了全面的工程部署和技术应用。应用过程严格遵循技术架构，首先完成了精准感知层的改造，为关键旋转机械、发电机组等加装了132个智能传感器与7台边缘智能网关，实现了全域数据采集与前端处理。随后，基于高精度激光扫描与CAD数据，构建了涵盖平台整体结构至核心设备内部零件的四级LOD可视化模型。最后，部署了集成了多源数据融合中枢、仿真推演引擎及智能应用模块的数字孪生软件平台，并与平台原有的SCADA、工单等系统完成了数据对接与业务集成，实现了物理平台向虚拟空间的完整、实时映射。

3.2 效果评价

在该钻井平台为期6个月(自系统上线后)的具体应用中，本研究设计的技术方案取得了显著且可精确量化的应用效果。故障预警能力得到根本性提升：系统成功预警了4起潜在重大故障(包括2起发电机轴承早期磨损、1起顶驱齿轮箱点蚀、1起泥浆泵阀箱内漏)，平均预警提前时间达到78小时。这使得平台非计划停机次数从应用前近三年的年均15次，下降至应用同期统计的8次，降幅达46.7%。运维效率大幅优化：基于AR眼镜与孪生模型指引的智能巡检，使单次全面巡检平均耗时从2.5小时精确缩短至1.2小时，同时因结构化数据录入，巡检记录差错率降至0.5%以下。多源数据融合中枢彻底打破了信息孤岛，运维人员调用并融合SCADA、工单、设备档案数据以进行决策的时间，从原来的超过30分钟缩短至平均8秒。此外，平台关键设备(发电机组、泥浆循环系统)的平均预测性维修实施比例提升至35%，相应降低了22%的应急维修成本。总体而言，数字孪生系统的应用使该平台的运维数字化覆盖率从35%提升至98%，有效保障了生产连续性与安全水平。

4 结语

在钻井平台数字化运维数字孪生技术研究的过程中，本研究发现，构建一个集“感、存、模、知、用”于一体的五维融合系统，对于打通物理世界与信息空间、实现运维业务的全流程闭环与智能化决策具有重要的支撑作用。工程应用效果表明，该系统能有效提升故障预警前瞻性、运维作业效率与决策科学性。因此，在未来的进一步研究中，需要充分发挥数字孪生数据闭环迭代优势，不断改善机理与数据混合模型的精度与自适应能力，从而提升系统在复杂多变工况下的泛化性与鲁棒性。

[参考文献]

- [1]赵修文,尹虎,李黔.钻进参数自适应调控数字孪生系统架构[J].石油钻探技术,2024,52(05):163-170.
- [2]刘佳,黄华.兼容IEEE802.3af的高功率以太网供电PD端设计[J].现代电子技术,2008,(05):160-162+164.
- [3]曹云华,燕国庆.Modbus-TCP转Modbus-RTU网关在工业自动化系统中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(04):25-27.
- [4]康守强,周月,王玉静,谢金宝,MIKULOVICH Vladimir Ivanovich.基于改进SAE和双向LSTM的滚动轴承RUL预测方法[J].自动化学报,2022,48(09):2327-2336.