

深部钻探装备智能运维实践探索

厉瞳瞳¹, 张毅^{1*}, 汪伟¹, 王倩男¹, 胡文财²

(1. 中国地质科学院深地探测与矿产勘查全国重点实验室, 北京 100037; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要: 深部钻探作业环境极端, 关键部件易产生磨损、疲劳与密封失效等问题, 传统以定期检修和事后维修为主的运维模式难以满足连续作业与安全运行要求。本文面向深部钻探装备智能运维需求, 系统分析了用户角色、系统部署、数据采集与传输、应用场景及功能配置等关键需求; 提出了多源异构数据集成与传输技术方案, 形成了WITSML/ETP、OPC UA与Kafka协同的集成方法; 构建了“云-边-端”协同的分布式弹性架构, 引入K3s与KubeEdge实现边缘服务部署与边云协同, 采用时序数据库与图数据库支撑数据与知识管理。在此基础上, 完成智能运维系统原型软件实现, 集成数字孪生、实时监测与故障预警等功能, 并以钢丝绳电磁检测为例验证了系统在工程条件下的适用性。研究为深部钻探装备智能运维提供了可落地的技术架构与实现路径, 对提升极端工况下装备运行可靠性与运维效率具有工程参考价值。

关键词: 深部钻探; 钻探装备; 智能运维; 云边协同; 数据集成; 数字孪生; 边缘计算; 故障预警

中图分类号: P634.9; TE928 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0064-10

A practical exploration of intelligent operation and maintenance system for deep drilling equipment

LI Tongtong¹, ZHANG Yi^{1*}, WANG Wei¹, WANG Qiannan¹, HU Wencai²

(1. State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: The operating environment for deep drilling is extreme, where critical components are prone to issues such as wear, fatigue, and seal failure. Traditional operation and maintenance (O&M) models, primarily based on scheduled maintenance and reactive repair, struggle to meet the requirements for continuous operation and operational safety. Addressing the intelligent O&M requirements for deep drilling equipment, this paper systematically analyzes key requirements including user roles, system deployment, data acquisition and transmission, application scenarios, and functional configuration. It proposes a technical scheme for multi-source heterogeneous data integration and transmission, establishing an integrated approach that coordinates WITSML/ETP, OPC UA, and Kafka. A distributed and elastic "cloud-edge-device" collaborative architecture is constructed, introducing K3s and KubeEdge for edge service deployment and cloud-edge collaboration, while employing time-series databases and graph databases for data and knowledge management. Based on this, a prototype software for the intelligent O&M system is developed, integrating functions such as digital twin, real-time monitoring, and early fault warning. The applicability of the system under engineering conditions is validated using steel wire rope electromagnetic inspection as a case study. This research provides an implementable technical architecture and pathway for intelligent O&M of deep drilling equipment, offering engineering reference value for enhancing equipment operational reliability and O&M efficiency under extreme conditions.

收稿日期: 2026-01-10; 修回日期: 2026-02-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.05.007

基金项目: 国家重点研发计划项目课题“高端钻探装备智能运维系统样机研制及示范应用”(编号: 2024YFB3409304)

第一作者: 厉瞳瞳, 女, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 博士, 从事钻探装备与工艺研究工作, 北京市西城区百万庄大街26号, litongtong@cags.ac.cn。

通信作者: 张毅, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 地质工程专业, 博士, 从事钻探技术与装备研究工作, 北京市西城区百万庄大街26号, zyi@cags.ac.cn。

引用格式: 厉瞳瞳, 张毅, 汪伟, 等. 深部钻探装备智能运维实践探索[J]. 钻探工程, 2026, 53(5): 64-73.

LI Tongtong, ZHANG Yi, WANG Wei, et al. A practical exploration of intelligent operation and maintenance system for deep drilling equipment[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 64-73.

Key words: deep drilling; drilling equipment; intelligent operation and maintenance; cloud-edge collaboration; data integration; digital twin; edge computing; early fault warning

0 引言

随着钻探作业向深部延伸,井下温度与压力显著升高,钻探装备在高载荷条件下长时间运行,部件磨损、疲劳与密封失效等问题更易发生,若缺乏有效监测与及时干预,可能会导致非计划停机,甚至影响作业安全。在此背景下,以定期检修和事后维修为主的传统运维模式比较依赖人工经验,早期异常识别能力不足,运维知识也不易被沉淀和复用,难以满足深部钻探连续作业的需求。研究指出,面向复杂与深部钻探工程,推动钻探技术与装备向智能化、数字化方向发展,已成为行业提升安全性与作业效率的重要发展方向^[1]。与此同时,工业互联网、边缘计算与云计算等基础设施的发展,结合人工智能与数字孪生等方法的应用,使装备运行状态的实时感知、故障预警和运维决策支持成为可能^[2]。

中石油建立了工程作业智能支持系统(EISC),面向钻完井作业开展远程监测、异常识别、会商决策与生产组织联动,形成从总部到区域的支撑体系^[3]。中石化研发了智能装备平台(SOFELink),面向油气装备全生命周期管理,提供状态监测、故障预警与运维服务数字化。哈里伯顿推出云端软件套件(DecisionSpace 365),依托开放地下数据空间(Open Subsurface Data Universe, OSDU),实现跨企业数据与应用的互操作与协同开发,优化多源异构数据管理与共享能力^[4]。威德福开发了生产优化平台(ForeSite),基于历史数据分析与模型计算,为生产运行的持续优化与设备健康管理提供支撑。总体来看,现有平台普遍采用云端部署的平台化架构技术,在多业务系统数据管理、多源异构数据集成及远程协同方面有了较成熟的工程实践。这类平台在集中监控、全生命周期管理及数据标准化方面具有明显优势,但在面向深部钻探等复杂工况时,仍普遍面临弱网络环境适应性不足、多源算法与模型集成灵活性有限,以及装备实时数据和运维流程能力不足等问题。因此,从系统集成与运行机制角度,探索面向深部钻探场景的智能运维体系架构具有现实意义。

本文面向深部钻探场景,开展数据集成、云边协同、数字孪生及验证评估等关键技术研究,构建

了“云-边-端”协同的分布式架构方案,并完成智能运维系统原型软件开发,为深部钻探装备智能运维系统的工程应用提供技术支撑。

1 钻探装备运维现状与挑战

传统运维以定期检修和事后维修为主,较为依赖个人经验,容易出现干预不及时或不必要的检修和更换。深部钻探工况复杂,早期异常往往不易通过巡检及时识别,容易错过最佳处置窗口,风险可能由局部隐患扩展为停机事件。与此同时,故障机理呈多因素耦合特征,症状与原因不完全对应,诊断结论受人员差异影响,维修策略的准确性与一致性不足。运维经验缺少规范化记录与复用机制,难以沉淀为可继承的知识资产,现场与后方协同处置效率也受到限制。上述因素共同导致非计划停机风险上升,并叠加固定周期检修带来的资源消耗,难以满足深部钻探对安全与连续作业的要求。

与此同时,工业数字化转型为改进钻探装备的运维方式提供了新的技术手段。工业互联网、边缘计算、云计算、人工智能、数字孪生等技术的协同发展,使设备状态在线监测、数据分析、故障预警、决策支持与运维管理具备了工程实现条件。这不仅是技术发展的必然趋势,更是行业降本增效、安全绿色发展的现实需求。当前,智能运维已成为高端装备制造业发展的重要方向^[5]。相关研究表明,基于数据分析的预测性维护可在一定程度上减少非计划停机,提升设备可用性与运维效率^[6]。在此背景下,深部钻探装备运维正在由以经验和计划检修为主的方式,逐步转向以状态监测、预测预警与协同决策为特征的智能运维模式^[7],如图1所示。

2 深部钻探装备智能运维需求分析

随着深部钻探作业向极端环境拓展,传统运维在实时性、精准性和协同性等方面的不足更加突出。深部地层井下温度与压力水平高,介质腐蚀与振动冲击更强,装备状态变化更难通过巡检及时捕捉。为保障钻探作业安全,有必要构建面向深部钻探场景的智能化运维体系,实现状态监测、故障预警与运维决策支持的集成应用。围绕深部钻探典

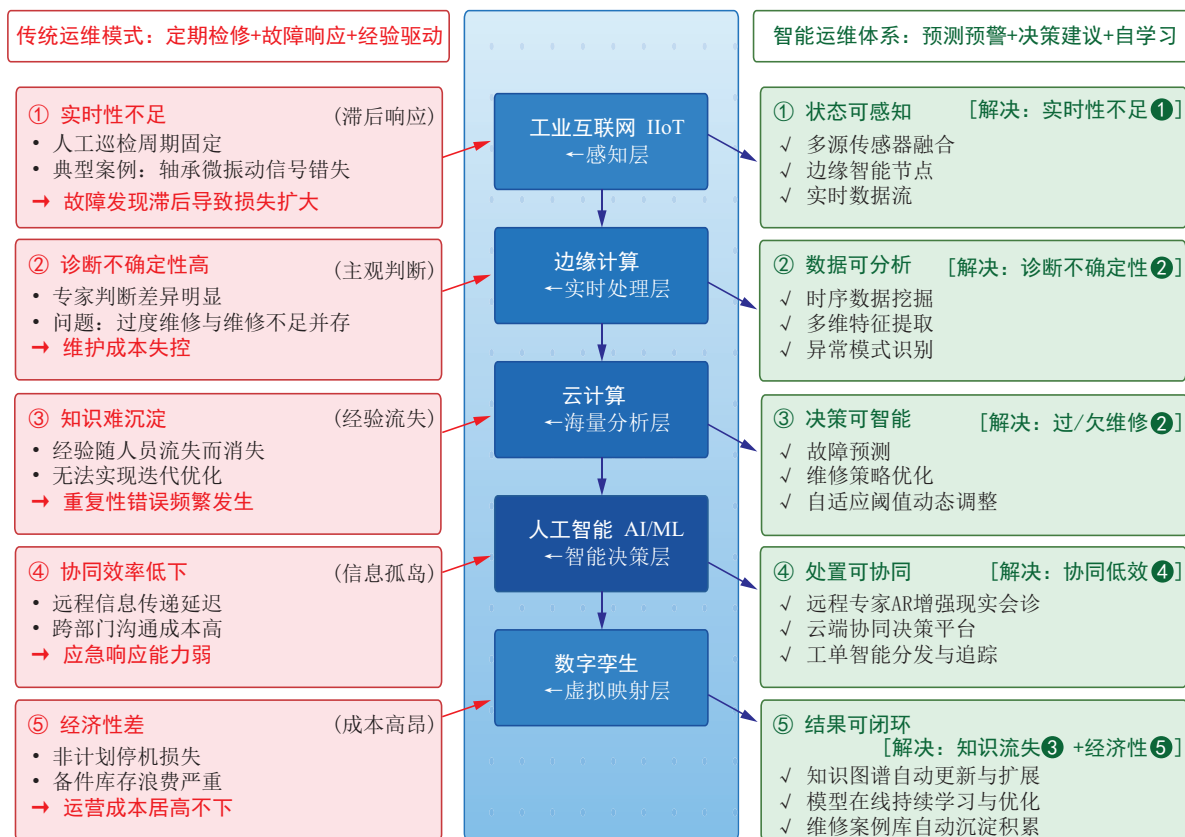


图1 深部钻探装备传统运维转向智能运维发展趋势

Fig.1 Trend of transition from traditional to intelligent O&M for deep drilling equipment

型场景,从用户角色、系统部署方式、数据采集与传输、应用场景及功能模块5个方面梳理需求要点,为后续系统设计与实施提供依据。

2.1 用户角色

系统用户主要包括钻井现场维护操作人员与远程支持决策人员两类群体。前者负责日常监控、操作执行和常规的故障处理,需要井场的数据处理与数据展示终端作为支撑;后者侧重于深度分析、诊断支持与决策监督,通常通过企业内网开展协作,以满足数据安全要求^[8]。

2.2 系统部署方式

考虑到不同井场通信保障条件存在差异,海上或偏远地区可能出现带宽限制或间歇性通信中断等情况,系统应采用分布式部署方式。在井场侧部署边缘计算节点,承担数据预处理、异常检测与关键告警等任务;远程端部署中心管理系统负责历史数据管理、模型训练与跨井场分析。已有研究提出云边协同框架,通过在云端与边缘分别部署适配的模型与算法来优化资源分配,并提升实时推理能力

和系统运行效率^[9]。

2.3 数据采集与传输

数据采集需覆盖顶驱、绞车、泥浆泵等动设备,以及井架、管汇、关键承载构件等静设备,重点监测振动、温度、压力、扭矩等参数,并满足高温高压与防爆等工程要求。在采样频率与传输方式方面,需要兼顾现场干扰、功耗条件与通信质量,支持有线与无线混合接入,形成可用于趋势分析与建模的历史数据基础^[10]。在电磁干扰明显的场景下,可采用抗干扰性能更强的传感方案,以保障数据质量。

2.4 应用场景

应用场景主要集中在状态监测、故障诊断与预测预警,利用长短时记忆网络(LSTM)等算法实时分析设备状态,提前预测典型故障,避免非计划停机。同时,系统支持远程视频交互与专家指导,可在关键风险事件中触发分级预警,提升整体安全水平与响应效率^[11]。

2.5 功能配置

在功能配置上,系统应集成实时监控、故障诊

断、预测维护与远程支持等模块。监控界面结合数字孪生模型实时呈现设备状态展示与趋势分析,诊断界面提供原因分析与可信度评估,预测界面提供剩余寿命评估与运维策略,远程支持可满足跨地域一体化决策。系统遵循ISO 27001标准,实施传输存储加密与基于角色的权限控制。

3 深部钻探装备智能运维体系关键技术

3.1 数据集成与传输技术

深部钻探装备智能运维系统需要实现多源异构数据集成,包括钻进工况参数、高频设备监测数据、视频和维护记录等。由于数据类型、采样频率与语义描述差异较大,数据集成与传输环节需要同时兼顾接口统一、时序对齐、实时传输与可靠接入等要求。现有研究与工程实践表明,采用行业数据标准与通用工业互联协议结合,并引入分布式消息中间件进行缓冲与分发,是较为可行的技术方案^[12]。

3.1.1 行业数据标准

WITSML (Wellsite Information Transfer Standard Markup Language)是由国际油气行业标准组织 Energistics(现已并入 OSDU™论坛)发起并维护的一套专为井场信息交换设计的开放标准,其作用是对钻探领域数据的对象、字段与含义进行统一,减少不同系统之间因格式不一致造成的数据割裂。WITSML早期以可扩展标记语言(XML)与基于简单对象访问协议(SOAP)的网页服务为主,交互方式以请求-响应为主,实时性相对受限。为适应实时化需求,2.x版本引入更轻量的数据表示方式,并配套采用 Energistics 传输协议(Energistics Transfer Protocol, ETP)实现基于 WebSocket 通信协议的双向流式传输。在深部钻探场景下,WITSML/ETP更适用于钻井工艺参数等作业数据的标准化交换,但对非装备类监测数据的覆盖有限,通常需要与通用工业互联协议配合使用。

3.1.2 通用工业互联协议

开放平台通信统一架构(OPC Unified Architecture, OPC UA)是面向工业场景的通用互联标准,强调信息模型与安全通信的统一,支持历史数据访问与报警事件等常用功能。在钻探装备运维系统中,OPC UA可用于对接现场控制系统与监测设备,实现多厂商、多类型设备数据的统一接

入与语义描述。发布/订阅机制(Pub/Sub)为实时数据分发提供了适配方式,有利于在边缘节点侧开展异常检测与告警推送等低时延任务。

3.1.3 分布式消息中间件

分布式流处理平台(Kafka)具备高吞吐、可扩展与容错等特性,适用于多源异构数据并发接入与数据峰值波动场景^[13]。在智能运维系统中,Kafka作为数据流缓冲与分发通道,可将现场采集数据按主题进行组织,支持同一数据流被多个应用模块同时读取,实现数据传输与上层应用相互独立处理。Kafka先将现场数据统一接收并暂存,再按需要将数据分发给监测、告警、决策等不同模块,为实时监测与预警提供支撑。系统实现中通常由边缘节点采集数据并写入Kafka消息队列,远程端再进行存储与分析处理,从而在通信不稳定的条件下也可保证数据传输的可靠性^[14]。

3.2 云边协同架构与数字孪生

为兼顾现场响应与远程协同分析,工程上多采用云边协同的分层部署方式。通过边缘侧的就地处理与云端的模型训练相结合,并通过数据同步与模型更新机制,保证边缘侧与云端的一致性^[15]。针对网络条件不稳定的情形,已有研究提出云端复杂模型与边缘轻量模型协作的运行方式,由边缘侧完成关键诊断,云端承担模型训练与更新,并在通信中断时保持必要的在线监测与告警功能^[14]。该架构通过明确现场侧与远程侧的任务界定,降低对通信链路连续性的依赖,同时为长期趋势分析与模型迭代提供数据与算力支撑。

此外,单纯依赖数据的方法在采样数据不足或工况变化明显时,适用范围可能受限,通过引入机理信息可提高模型对关键物理过程的敏感性。相关研究将机理驱动与数据驱动结合,并在数字孪生框架下实现虚实映射与动态校准,用于状态评估、故障演化分析与运维策略推演^[16]。例如,通过引入物理关系提升预测结果的准确率,可用于寿命趋势评估与预测性维护相关研究^[17]。

3.3 数据治理与体系验证

为实现深部钻探装备智能运维系统应用,还需开展数据治理与验证评估工作。如图2所示,数据治理覆盖数据采集、传输、存储与使用过程,包括统一的设备对象与测点标识规则、关键数据的时间一致性保障、数据质量校验与异常标记、元数据记录

与追溯机制等^[18],为后续诊断与预测模型的训练、部署与评估提供稳定的数据基础。

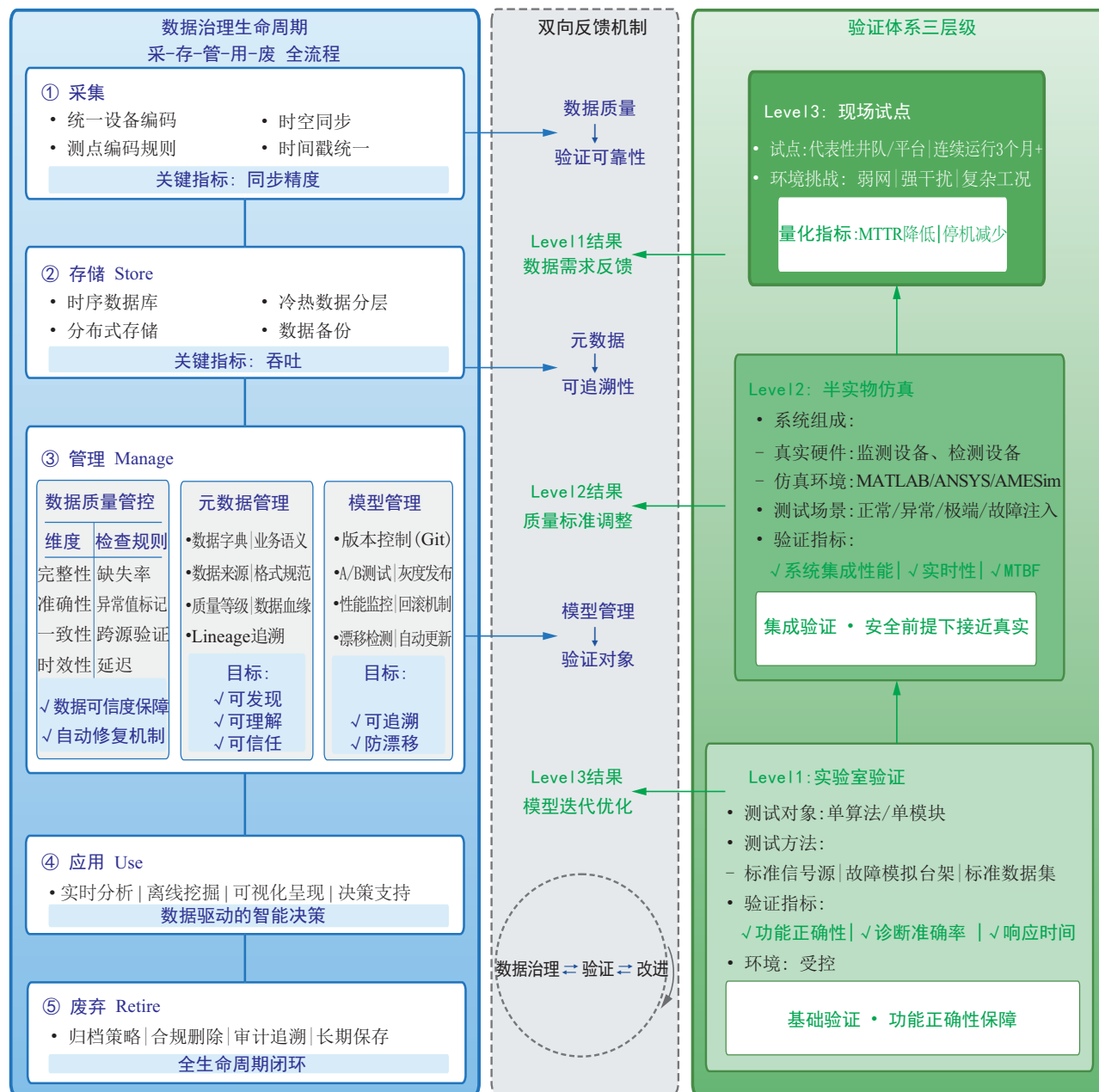


图2 钻探装备数据治理与体系验证

Fig.2 Data governance and system validation for drilling equipment

智能运维系统的验证评估应按照实验室、半实物仿真与现场验证3个阶段逐步推进,各阶段均按照数据准备、系统运行、结果记录与复核的基本步骤组织实施,重点检验数据链路完整性、平台运行稳定性与响应能力,以及在典型工况下的工程适用性与应用效果^[19]。在实验室阶段,可利用标准信号源或故障模拟台架等方式构建可重复的测试输入,

重点考虑诊断准确率、误报漏报、响应时间等指标。半实物仿真验证以钻探装备健康状态监测、检测设备作为硬件接入仿真环境,通过数据回放、通信条件构造等方式模拟不同运行条件,评估系统在接近真实工况下的数据传输、实时处理与运维策略的可靠性。现场试验验证阶段选择代表性深部钻探井场开展长周期运行验证,利用巡检记录进行复核,重点

检验弱网、强干扰与工况变化条件下的稳定性和可用性,并结合非计划停机、平均修复时间等运维指标对应用效果进行量化评估。验证样本优先选取连续采集的数据段,并保留时间戳、空间位置及设备标识等关键信息,以保证验证过程的可追溯性。

除此之外,系统层面还需评估端到端数据时延、吞吐能力、边缘节点资源占用、网络中断场景下的运行稳定性与数据补传能力,以及告警推送与协同处置链路的完整性。对评估结果应形成可追溯记录,为后续模型优化与系统迭代提供依据。

4 深部钻探装备智能运维体系构建与实现

4.1 智能运维体系框架

钻探装备智能运维系统不仅应实现监测数据采集与可视化展示,更是一个深度融合机理知识、数据科学与信息技术且贯穿钻探装备全生命周期的综合技术体系。该体系以设备运行数据为基础,核心目标在于推动运维方式由故障后处理逐步转向以健康管理为核心的前置预警,并在安全、成本与作业目标约束下持续优化运维策略^[20]。一个成熟可靠的智能运维体系,应具备四个层面的核心功能,如图 3 所示。



图 3 钻探运维系统核心架构

Fig.3 Core architecture of the drilling operations and maintenance system

4.1.1 感知层

该层是系统的“神经末梢”,通过在关键部位布置监测与检测设备,可获取振动、温度、压力、扭矩、电流等运行信息,为状态评估提供数据基础。该环节的实

现难点主要体现在监测、检测设备选型与可靠性保障、有限空间内的布设合理性及多源数据的时间一致性等方面,为后续诊断与预警提供可靠的数据输入。

4.1.2 分析层

该层是系统的“大脑”,针对监测、检测数据,开展去噪处理、异常识别、特征提取、状态判别、故障定位与寿命趋势评估等分析任务。考虑到深部工况复杂,单一的数据驱动模型在不同工况下的适应性有限,因此需要同时引入机理模型。例如,在齿轮箱等部件故障分析中,可将典型频率特征与数据模型相结合,以增强对早期损伤的识别能力。此外,采用知识组织技术将模型输出结果与设备结构、故障模式、维修流程与历史案例建立关联,为诊断推理与结果解释提供支撑。

4.1.3 决策层

该层是系统的“肢体”,将分析结果转化为可执行的运维策略,包括风险分级、告警管理、检修建议与工单信息,以及备件与人员需求提示,必要时基于设备健康状态给出运行参数调整建议。运维决策执行环节同时兼顾现场与远程协同,通过统一的信息呈现提高紧急情形下的响应效率,并为后续评估与改进保留完整记录。

4.1.4 学习层

该层是系统的“基因”,对运维事件、处置过程与效果评价进行规范化记录,并将记录用于规则更新、阈值调整和模型迭代。通过持续的数据回传与效果评估,逐步完善故障库与诊断库,使运维能力随系统的应用积累而不断提升,从而提高运维决策的准确性与可复用性^[1]。

4.2 “云-边-端”协同分布式架构

由于深部钻探井场的通信保障条件存在差异,在海上或偏远地区可能出现带宽受限、延迟高和稳定性差等情况,连续高频原始数据难以稳定回传。因此,有必要采用“云-边-端”协同的分布式弹性架构,通过任务分层与数据分级传输实现整体可用性与工程适配性,如图4所示。

4.2.1 感知层(端)

该层负责多源异构数据的稳定接入与时间同步,优先采用工业通用协议(如MQTT、OPC UA),确保数据“采得全、采得准”,需重点关注工业协议转换与接口标准化问题。

4.2.2 边缘层(边)

该层部署于井场本地服务器或加固型边缘计算网关(常采用ARM+FPGA或X86架构),承担数据预处理、实时特征提取、在线异常检测与初级告

警等任务。其核心任务在于减轻网络传输压力,保障关键告警的低延迟,并在网络中断时依靠本地缓存与计算能力维持最小功能集运行,待网络恢复后进行数据回补。边缘节点的部署需充分考虑井场环境,如防爆、抗振、散热等。

4.2.3 云端层(云)

该层负责海量历史数据的存储治理、复杂模型的训练优化、跨井场的知识复用与挖掘,以及全局性的决策支持与可视化呈现。云端具备完善的计算能力与存储资源,用于完成边缘无法承担的计算任务。

4.2.4 应用层

该层面向不同角色用户提供个性化的可视化监控、报警管理、诊断报告、远程会商、决策支持等应用服务。通过高效的数据同步与任务协同机制,即使在网络不稳定的情况下,仍能保证现场的快速预警能力,同时兼顾远程端对历史数据和复杂模型的支撑能力。

4.3 钻探装备智能运维系统实现

针对深部钻探装备运行环境复杂、井场网络条件不稳定及多源异构数据协同处理的工程需求,系统实现阶段重点关注平台的可部署性、云边协同能力与模块解耦性,优先采用轻量化容器编排、边缘计算框架、时序数据管理与知识关联存储等通用技术组件,以支撑多层级部署与持续演进的系统架构。

本系统采用前后端分离的开发模式,通过容器化封装与模块化拆分保证部署的一致性。云边协同框架采用轻量级容器编排工具K3s,同时引入KubeEdge完成边云应用分发,实现边缘端服务的自动部署,并支持版本更新与系统运行状态维护。钻探现场采集的实时传感数据存储于时序数据库InfluxDB中,并采用图数据库Neo4j存储知识图谱实体与关系,业务数据由分布式关系数据库存储管理。时序数据库主要承载装备运行状态监测、检测数据,知识图谱用于表达装备结构、部件关联与运维知识之间的关系,不同类型数据通过服务接口进行解耦管理。在系统运行过程中,监测、检测数据首先由边缘节点完成采集与初步处理,并通过云边协同机制上传至云端平台。云端服务对数据进行统一入库与管理,并向上层应用提供标准化数据接口。诊断与分析功能以服务形式接入系统,通过接

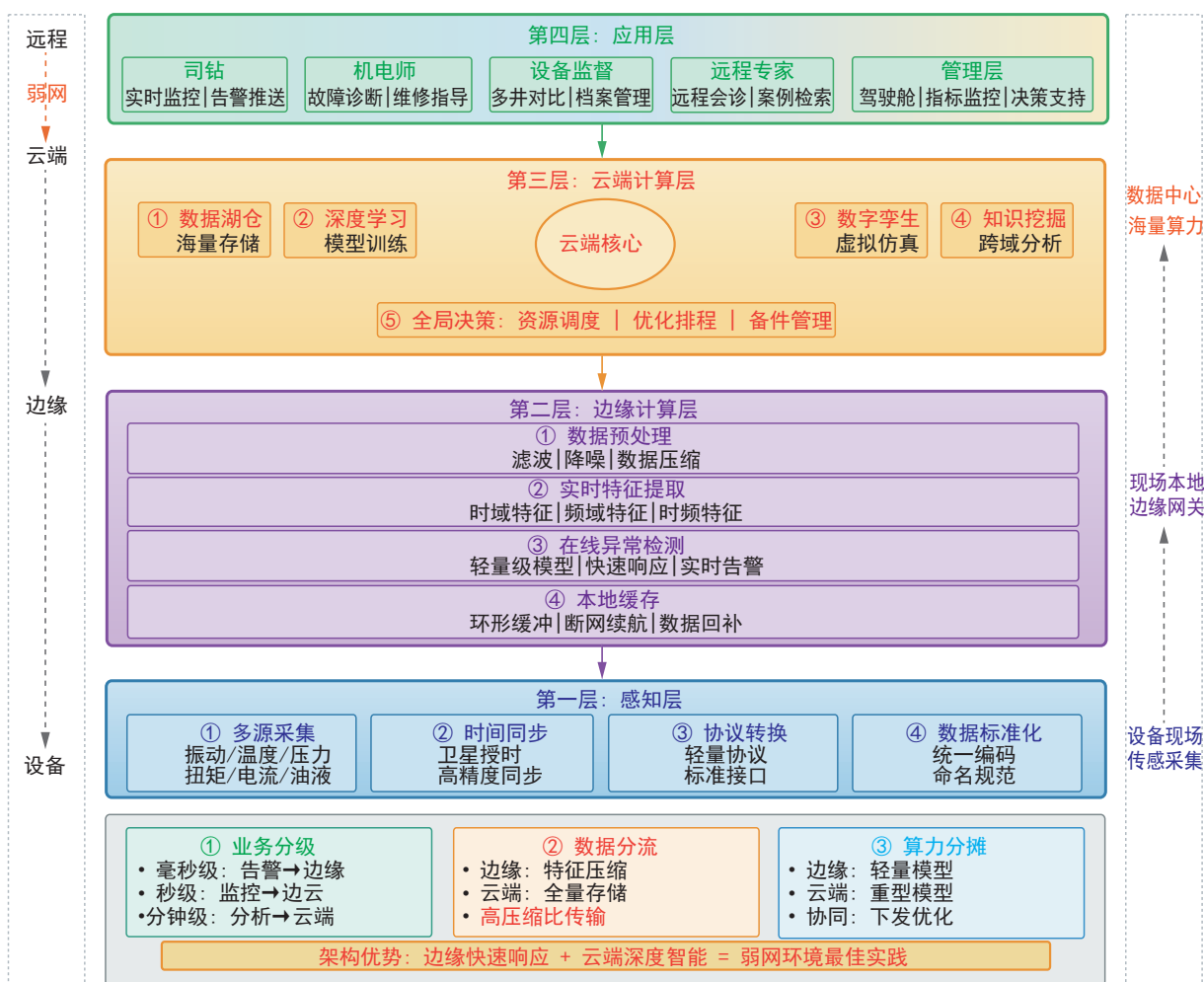


图4 “云-边-端”协同的分布式弹性架构

Fig.4 Distributed elastic architecture diagram for cloud-edge-device collaboration

口获取所需数据并将结果以提示信息形式返回应用层。各功能模块之间通过服务调用与消息机制协同工作,形成从数据采集、分析处理到运维处置的完整业务链。

前端基础框架基于Vue.js构建前端页面,搭配Element UI组件库实现设备监测、工单管理等业务界面的快速开发。数字孪生渲染功能采用Three.js加载glTF格式的设备三维模型,结合WebSocket实现孪生体状态的实时更新。数据可视化采用ECharts展示频谱、健康评分趋势等典型图表,同时适配PC端、高清显示大屏等多终端显示,如图5所示。

本文选取钢丝绳电磁检测作为典型应用对象,系统实现了检测数据的统一接入与可视化图谱展示,并实现检测告警信息与运维管理流程的关联,

反映了智能运维系统在运行中的实现效果,如图6所示。

5 结论

本文面向深部钻探装备在极端工况下的长期运行可靠性保障需求,围绕智能运维体系构建与实现开展实践探索,主要得到以下结论。

(1)面向深部钻探装备运维实际需求,设计了面向深部钻探装备的智能运维体系,围绕用户角色、系统部署方式、数据采集与传输、应用场景与功能配置等方面开展需求分析,明确了从状态监测、诊断预警到协同决策的业务流程,为体系架构与实现提供依据。

(2)构建了深部钻探多源异构数据接入与传输的技术方案,形成了以行业数据标准 WITSML/

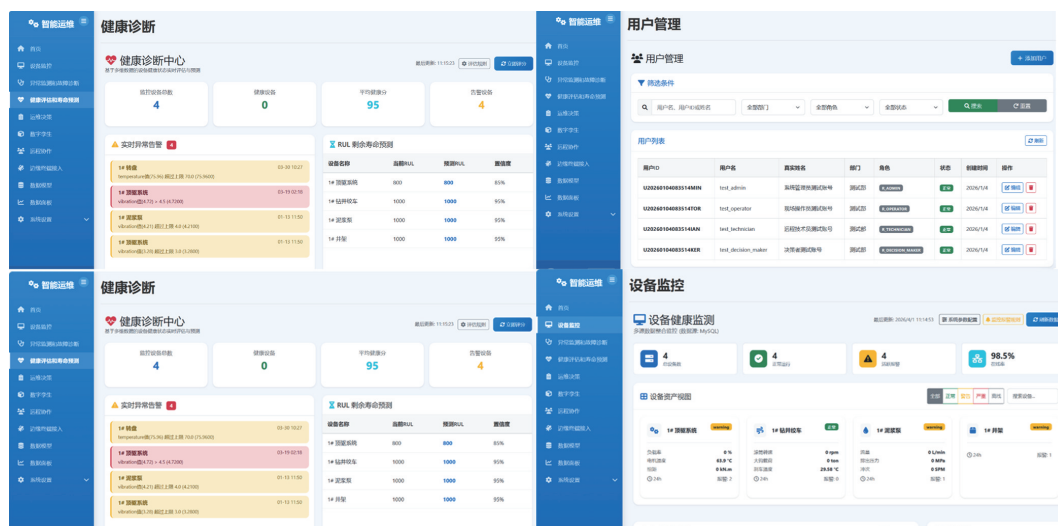


图5 钻探装备智能运维系统界面

Fig.5 Interface of the intelligent operation and maintenance system for drilling equipment



图6 钢丝绳电磁检测在智能运维系统中的应用示例

Fig.6 Application example of steel wire rope electromagnetic inspection in the intelligent operation and maintenance system

ETP、通用互联协议 OPC UA 与分布式消息中间件 Kafka 协同的集成方法,实现了多源异构数据语义统一、现场设备接入与数据流可靠分发,并提出了结合实验室、半实物仿真与现场试验的三阶段验证评估方法。

(3)完成了深部钻探装备智能运维系统软件实现,在云边协同框架中引入 K3s 与 KubeEdge 实现边

缘服务与边云应用部署,使用 InfluxDB、Neo4j 实现多源数据与知识组织管理,并采用 Vue、Three.js 与 ECharts 实现监测展示、诊断分析、运维支撑与数字孪生可视化等核心功能。

本文围绕深部钻探装备在极端工况下的运维效率与运行安全问题,形成了可实现的智能运维技术体系,并完成了系统原型软件实现,为故障预警、

维修决策与远程协同提供支撑。通过“云-边-端”协同架构,实现多源数据接入、故障预警与运维流程的联动,结合典型对象应用,验证了该体系在工程条件下的可实现性与适用性。本文的技术实现与验证以现有工程数据与试验条件为基础,在跨井场跨工况适应性、长周期运行稳定性及数字孪生在线校准方面仍待进一步验证。后续工作可结合更长周期的现场数据与运维记录,进一步优化边云任务部署与运维策略,提升复杂工况下的预警准确性与诊断一致性,为降低深部钻探装备停机风险、提升运维决策水平提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 张永勤.论地质钻探技术的担当使命及智能化与绿色发展[J].钻探工程,2023,50(1):5-9.
ZHANG Yongqin. Discussion on aspiration and mission and AI & green development of the drilling techniques[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):5-9.
- [2] Garcia J, Rios-Colque L, Peña A, et al. Condition monitoring and predictive maintenance in industrial equipment: an nlp-assisted review of signal processing, hybrid models, and implementation challenges[J]. Applied Sciences, 2025,15(10):5465.
- [3] 高健,汪海阁,宋世贵,等.中国石油工程作业智能支持中心模式改革与初探[J].钻采工艺,2025,48(1):37-45.
GAO Jian, WANG Haige, SONG Shigui, et al. Reform and preliminary study on the mode of CNPC engineering intelligent support center[J]. Drilling & Production Technology, 2025,48(1):37-45.
- [4] 和鹏飞,韩耀图,林家昱,等.基于DecisionSpace的海上丛式井平台位置优选方法[J].石油工程建设,2017,43(4):29-32.
HE Pengfei, HAN Yaotu, LIN Jiayu, et al. Location optimization method of offshore platform for cluster wells based on DecisionSpace [J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43(4):29-32.
- [5] Achouch M, Dimitrova M, Ziane K, et al. On predictive maintenance in industry 4.0: overview, models, and challenges [J]. Applied Sciences, 2022,12(16):8081.
- [6] Wang M, Su X S, Song H F, et al. Enhancing predictive maintenance strategies for oil and gas equipment through ensemble learning modeling[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2025,15(3):46.
- [7] 张一茗,金喜洋,李少华,等.面向数字孪生的变电站开关设备综合监测系统设计[J].高压电器,2025,61(6):59-67.
ZHANG Yiming, JIN Xiyang, LI Shaohua, et al. Design of a digital twin-oriented integrated monitoring system for substation switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2025,61(6):59-67.
- [8] Federici F, Martintoni D, Senni V. A zero-trust architecture for remote access in industrial IoT infrastructures [J]. Electronics, 2023,12(3):566.
- [9] Duan S J, Wang D, Ren J, et al. Distributed artificial intelligence empowered by end-edge-cloud computing: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 591-624.
- [10] 李振宝.基于深度学习的典型液压泵智能故障诊断与寿命预测方法[D].秦皇岛:燕山大学,2022.
LI Zhenbao. Intelligent fault diagnosis and life prediction method for typical hydraulic pump based on deep learning[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [11] 许萌萌,张成伟,梅顺峰,等.基于数据大脑的船岸一体机舱智能运维系统研究设计[J].中国舰船研究,2022,17(6):79-87.
XU Mengmeng, ZHANG Chengwei, MEI Shunfeng, et al. Research and design of ship-shore integrated engine room intelligent operation and maintenance system based on data brain [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022,17(6):79-87.
- [12] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions [J]. Future Generation Computer Systems, 2013,29(7):1645-1660.
- [13] Kreps J, Narkhede N, Rao J. Kafka: a distributed messaging system for log processing[EB/OL]. (2011-06-12) [2025-12-10]. <https://notes.stephenholiday.com/Kafka.pdf>.
- [14] Zhou Z, Chen X, Li E, et al. Edge intelligence: paving the last mile of artificial intelligence with edge computing [J]. Proceedings of the IEEE, 2019,107(8):1738-1762.
- [15] Satyanarayanan M. The emergence of edge computing [J]. Computer, 2017,50(1):30-39.
- [16] 陆梅,吴春生,刘天宇,等.抽油机井云计算功图计产模式较边缘计算功图计产模式提高投资回报率[J].石油钻采工艺,2024,46(6):766-782.
LU Mei, WU Chunsheng, LIU Tianyu, et al. The ROI of cloud computing mode is higher than that of edge computing mode in pumping well production calculate by dynamometer cards[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024,46(6):766-782.
- [17] Kim S, Choi J H, Kim N H. Data-driven prognostics with low-fidelity physical information for digital twin: physics-informed neural network[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2022,65(9):255.
- [18] Otto B. Organizing data governance: findings from the telecommunications industry and consequences for large service providers[J]. Communications of the Association for Information Systems, 2011,29(3):45-66.
- [19] Majdara A, Wakabayashi T. Component-based modeling of systems for automated fault tree generation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009,94(6):1076-1086.
- [20] 徐余明,黎家靖,张宁,等.基于云-边-端架构的城市轨道交通智能运维系统[J].都市快轨交通,2022,35(6):145-150,157.
XU Yuming, LI Jiajing, ZHANG Ning, et al. Intelligent operation and maintenance system of an urban rail transit based on cloud-edge-terminal [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(6):145-150,157.

(编辑 王跃伟)