

# 高端油气钻探装备智能安全运维关键技术研究

孙雪皓<sup>1,2</sup> 张凤丽<sup>1,2\*</sup> 张毅<sup>4</sup> 王金江<sup>2,3</sup>

1. 中国石油大学（北京）机械与储运工程学院，北京昌平 102249
2. 中国石油大学（北京）安全与海洋工程学院，北京昌平 102249
3. 国家市场监督管理总局重点实验室（油气生产装备质量检测与健康诊断），北京昌平 102249
4. 中国地质科学院科学钻探技术研究部，北京西城 100032

**摘要：**随着深层-超深层能源资源勘探需求增加，高端油气钻探装备面临着环境严苛、工况极限、故障耦合、维保困难的挑战，现有的运维模式多依赖于人工经验和定期检查，无法实现故障早期预测与及时处理，安全问题突出。针对高端油气钻探装备在运维过程中面临的问题与挑战，本文提出了一种创新的智能安全运维技术，以全过程、全要素、全生命周期运行维护为目标，以全生命周期管理和主动运维优化构建智能运维闭环流程，通过融合信息化赋能技术及运维本体技术推动油气钻探装备运维从传统运维模式向智能安全运维模式转型。开发了具备状态监测、健康评估、故障诊断以及智能决策功能模块的智能安全运维系统，实现某海上钻井平台关键设备智能运维，为智能安全运维技术在油气领域快速应用提供思路。

**关键词：**油气钻探装备；智能安全运维；全生命周期管理；主动运维优化

**中图分类号：**TE922

**收稿日期：**2025-12-2

## Research on key technology of intelligent and safe operation and maintenance of high-end drilling equipment

Sue Xuehao<sup>1,2</sup>, Zhang Fengli<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yi<sup>4</sup>, Wang Jinjiang<sup>2,3</sup>

1.College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China

2.College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China

3. Key Laboratory of Oil and Gas Production Equipment Quality Inspection and Health Diagnosis, State Administration for Market Regulation, Beijing 102249, China

**基金项目：**地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项（项目编号. 2024ZD1000800, 2024ZD1000806）；国家自然科学基金面上项目（52474274）

**作者简介：**孙雪皓（1996-），男，博士研究生，主要从事钻探装备安全监测与智能诊断技术研究。E-mail: easysxh@163.com; ORCID: 0000-0002-5856-6037.

**\*通讯作者：**张凤丽（1983-），女，副教授，博士生导师，博士，主要从事钻探装备智能安全运维技术等方面的研究工作。E-mail: fengliz14@163.com; ORCID: 0000-0003-0720-8202.

4. Scientific Drilling Technology Research Department, Chinese Academy of  
Geological Sciences, Beijing 100032, China

**Abstract:** As the demand for deep and ultra-deep energy resource exploration continues to rise, high-end oil and gas drilling equipment faces significant challenges, including harsh environmental conditions, extreme operating scenarios, fault coupling, and maintenance difficulties. The current operation and maintenance practices largely rely on manual experience and periodic inspections, which fail to enable early fault prediction and timely response, leading to prominent safety concerns. To address the issues and challenges encountered during the operation and maintenance of high-end oil and gas drilling equipment, this paper proposes an innovative intelligent and safe operation and maintenance technology. Aiming for comprehensive, element-wide, and full life cycle operation and maintenance, the study constructs a closed-loop intelligent operation and maintenance process based on life cycle management and proactive maintenance optimization. By integrating digital empowerment technologies with domain-specific operation and maintenance technologies, the approach promotes the transformation from traditional to intelligent and safe operation and maintenance models for oil and gas drilling equipment. An intelligent and safe operation and maintenance system for drilling equipment is developed, incorporating functional modules for condition monitoring, health assessment, fault diagnosis, and intelligent decision-making. The system is successfully applied to the intelligent operation and maintenance of drilling equipment on an offshore drilling platform, providing a valuable reference for the rapid application of intelligent and safe operation and maintenance technologies in the oil and gas industry.

**Keywords:** Oil and gas drilling equipment; Intelligent safety operation and maintenance; Full-lifecycle management; Proactive operation and maintenance optimization

## 引言

随着能源开发向深海、深地探索,环境与工况日益恶劣(宁波等,2025),高端油气钻探装备作为一种可以适应深层-超深层复杂工况能力的智能化、自动化装备,机-电-液-控高度耦合,包括钻井绞车、泥浆泵、顶驱、防喷器、钻柱以及底部钻具组合等关键设备和工具,通过电子司钻系统智能控制不同设备进行钻进、接/卸单根、起/下钻、划眼、下套管等(和婷婷,张强,2024),实现井下钻孔,服役过程面临超深井深、超高泵压、超大负荷、超长周期的挑战,故障失效机理不清,检测手段不足,导致装备故障、结构损伤等问题频发,极易引发井壁垮塌、

井喷失控等重大事故(Yang et al., 2023), 因此深层-超深层复杂环境下高端油气钻探装备安全运维保障挑战日益凸显(何登发等, 2023; 黄福喜等, 2024; Ran et al., 2025)。

为了应对这些挑战, 国外的 Drillmec 公司生产的 Ahead 375 自动化钻机(王定亚等, 2017), 配备了数据采集系统、钻井监控系统以及连续循环系统, 实现高效和高安全性钻井。Nabors 公司研发的 PACE-R800 自动化钻机配备 Smart Suite 智能控制系统, 能够大幅减少人员干预, 实现全流程自动化作业。斯伦贝谢公司的未来钻机(杨斌等, 2024)内置 1 000 多个传感器, 能够监测超过 350 项钻机活动, 还具有离线操作、远程监控设备运行状态和故障辅助诊断功能。哈里伯顿、斯伦贝谢、贝克休斯等公司均构建了智能钻机数字化平台(王建龙等, 2024), 具备钻中实时优化、钻后协同分析的功能, 实现了多源数据的深度挖掘与利用, 降低了钻机作业的风险。NOV 公司研发了钻机远程自动运维系统, 实现地面和井下装备闭环优化(高永德等, 2022)。eDrilling 公司推出了具有自动监测与实时优化等功能的智能运维平台, 覆盖钻机风险预测、评估、优化全流程钻井作业(高德利, 黄文君等, 2024)。国内中石油宝石机械研制的 12000m 特深井自动化钻机(王维旭等, 2024)配备远程监测系统, 实现关键钻井设备运行监测, 具有维保提醒、辅助诊断等功能。中石化开发了 Drill Adviser 系统(肖莉等, 2015), 主要功能包括钻机工况实时监控、数据同步采集传输、风险智能预测等。中海油研发了深海钻井平台关键装备远程监测系统并集成于智慧油服平台, 在钻井装备数字化管理方面取得成效。目前大多数油气钻探装备已经具备基本运行参数监测、故障辅助诊断等功能, 但还未形成包括多源信息融合监测评估、故障精准诊断、运维风险预测预警以及智能维护决策(张来斌, 王金江 2022)完整的智能安全运维技术体系。减少对人员的依赖, 逐步信任装备本身, 实现钻探装备的自判、自断和自决是智能安全运维的最终目标。

综上所述, 智能安全运维技术是保障高端油气钻探装备在深层-超深层环境下安全可靠运行的关键, 但是现有公开工作尚未探讨基于信息化、数字化、智能化技术的智能安全运维技术框架, 也未形成从理论内涵揭示、技术体系建立到工程应用的完整研究链条。针对以上不足, 本文的主要贡献如下:

(1) 构建了钻探装备智能安全运维的双向闭环实现流程, 明确了技术内涵与实施路径。该流程将全生命周期正向管理与主动运维优化逆向反馈相融合, 解决了现有运维模式缺乏完整闭环路径的问题。与常见以定期维修为主的线性管理模式不同, 该流程通过“前瞻性规划”与“后向性补偿”的双向融合, 实现了从故障发生后再处理向故障发生前主动预防的转变, 为油气钻探装备从传统运维模式向智能安全运维模式的数字化转型提供了清晰的理论依据与实施路径。

(2) 建立了信息化赋能技术与运维本体技术深度融合的技术体系, 解决了关

键技术之间相互割裂、难以协同的难题。该体系将知识工程、机器学习、数字孪生等信息化技术与故障诊断、智能决策等本体技术进行系统性整合,明确了各技术在闭环流程中的定位与协同关系。区别于现有研究多聚焦于单点技术突破,该技术体系为后续系统研发提供了完整的模块化技术基础,使状态监测、健康评估、故障诊断、智能决策等功能能够有机集成、协同工作,为后续系统研发与工程应用奠定了技术基础。

(3) 研发了覆盖状态监测、故障诊断、异常预警、智能决策全功能的智能安全运维系统并实现工程验证,实现了从数据采集到维护决策的完整闭环。与现有系统多局限于数据展示或离线分析不同,该系统实现了从“感知”到“诊断”再到“决策”的闭环联动,使现场运维人员能够依据系统生成的维修建议采取针对性措施,显著提升了设备运行可靠性与维护资源配置效率。实际运行表明,该系统已累计运行 10 个月,运行状态良好,能够显著提升设备运行可靠性、降低非计划停机风险、优化维护资源配置效率,验证了所提技术的工程实用性与推广价值。

## 1 高端油气钻探装备运维存在的问题与挑战

随着智能化技术的引入,油气钻探装备在提高钻井效率的同时也带来了新的风险挑战(许益民等, 2019)。如图 1 所示,智能化高端油气钻探装备的运行依赖于监测和数据处理系统,智能分析决策系统可能因网络延迟或计算误差未能及时发出警报,从而错失关键的风险干预窗口。电子司钻系统内控制算法的鲁棒性和适应性不足可能导致对异常信号的误判。因此,有必要深入分析智能化技术赋能的油气钻探装备在深层-超深层复杂工况下,设备本身、作业环境、作业数据、算法模型以及决策策略层面面临的运维难题,为后续智能安全运维技术体系构建明确技术方向与攻关重点。

### 1.1 设备层面“诊不透”

油气钻探装备是典型的机-电-液-控高度耦合的复杂系统,在深层-超深层作业中面临超高温、超高压、高应力等多重极端负荷,存在复杂的层级关系与交互行为,故障模式呈现多物理场耦合、故障传播具有高度复杂性和非线性特征。在传统运维中,设备故障分析通常依赖于分系统的独立检测和分析,着重于基于历史故障数据的故障表层行为,无法有效解析故障的连锁传播机制,导致故障诊断精度低、响应滞后(Yin et al., 2020)。

### 1.2 环境层面“测不全”

油气钻探装备在深层-超深层钻井面临多套压力体系、复杂岩性组合、高盐腐蚀性流体等不可控环境因素,存在非线性、强耦合、大时滞、强干扰等特点(胜亚楠等, 2019)。高温、高压或腐蚀性流体也会加剧设备的损耗,加速设备老化并降低其性能,井下环境受限,传感器等井下信息采集装置难以布置和正常使用,

数据缺失、异常等问题加大了真实反映钻探装备健康状态的难度。

### 1.3 数据层面“看不清”

油气钻探装备在作业过程产生多种异构数据源，包括设备传感器数据、地质勘探数据、工艺参数以及操作日志等，在数据格式、采集频率、时空分辨率的差异形成“信息茧房”，许多重要的关联性信息无法被及时捕捉和利用，从而无法为全局性状态评估、故障诊断以及运维决策提供支持(马志忠等, 2023)。

### 1.4 模型层面“算不准”

现有的油气钻探装备运维系统中配置了关于设备诊断与事故预测的算法模型，设备诊断分析模型依赖简化物理方程，忽略了多物理场的非线性、动态特性(Muhammad et al., 2024)。异常工况辨识和故障诊断模型采用纯数据驱动方法，依赖大量的历史数据训练，但缺乏物理规律约束，无法准确捕捉钻探作业中的动态特性，致使模型结果在复杂工况下呈现不可解释的黑箱特性，模型泛化能力不足。

### 1.5 决策层面“控不住”

现阶段油气钻探装备出现参数波动或者异常工况时往往依赖经验判断和离线分析。整个决策过程受限于专家判断，决策速度较慢，尤其在深井-超深井环境下，由于专家经验少，人工干预容易导致参数设定错误，从而引发设备故障或作业风险(Tang et al., 2015)。此外，维修决策的延迟可能导致生产停机时间延长，进而引发钻井作业周期的延长，难以平衡效率、安全、成本等多目标之间的冲突。

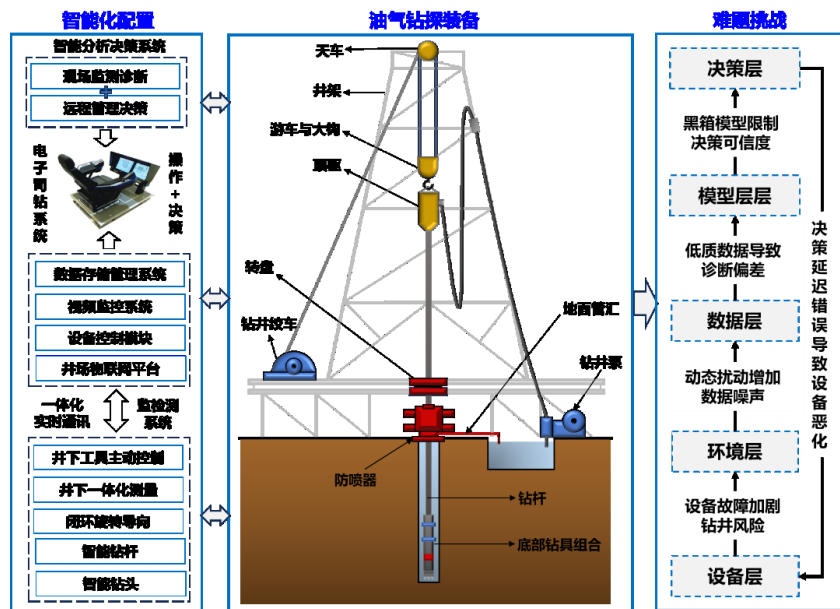


图 1 高端油气钻探装备组成及面临的难题挑战

Fig. 1 Composition and challenges of high-end oil and gas drilling equipment

## 2 高端油气钻探装备智能安全运维的技术内涵

### 2.1 智能安全运维技术的定义

智能安全运维是指以“云大物智”(云计算、大数据、物联网、人工智能)(Suvarna et al., 2021)等信息化技术为手段，对装备进行智能监测、评估诊断、预

测预警、干预处置、效能评估和优化设计，实现高端油气钻探装备全生命周期的运行维护。以数据管理为关键，以算法模型为基础，以运维服务为平台，不断提高钻机数字化、网络化、智能化水平，实现从传统运维模式向智能安全运维模式的数字化转型，从而达到本质安全、提质增效的目标。

## **2.2 智能安全运维的实现流程**

围绕全过程、全要素、全生命周期需求，建立智能安全运维实现流程框架，如图 2 所示。从设备本体出发，经历研发设计、生产制造和施工建造三个阶段，实现从“虚拟模型”到“实体设备”的过渡，然后以油气钻探装备的安全高效运行为核心，从安装调试到运行维护，再到延寿与回收报废实现全生命周期价值的最大化，建立全生命周期正向管理流程。从故障预防出发，识别潜在风险点，辨识薄弱风险屏障，追溯故障原因，制定最优维修策略，反馈实现设备寿命延长和设计优化，建立高端油气钻探装备主动运维优化逆向流程，形成一个完整的智能安全运维闭环框架，实现“前瞻性规划”与“后向性补偿”的双向融合。

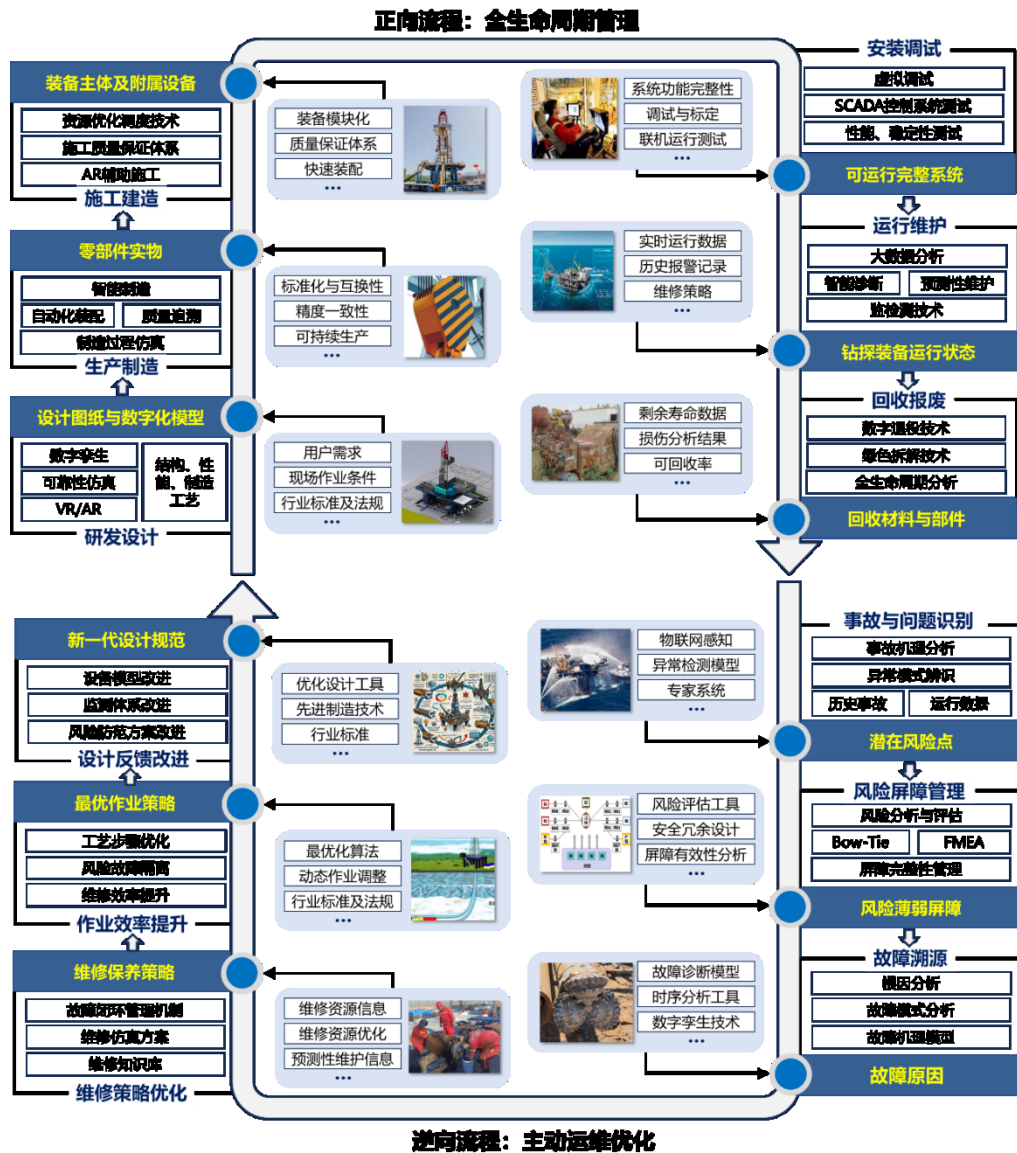


图 2 智能安全运维实现流程

Fig. 2 Implementation process of intelligent security operation and maintenance

1) 正向流程：全生命周期管理

全生命周期管理贯穿设计研发到回收的全过程。在油气钻探装备生命初期，综合考虑用户特定需求、行业规范标准以及供应链的实际状况，运用数字化建模技术与仿真手段开展各个设备的设计工作，利用智能制造技术实现零部件标准化、模块化生产。在钻探装备生命中期，通过工况模拟技术评估设备的调试状态，运行过程中运用智能化监测与诊断手段识别故障模式与异常事件，同时构建工况识别、轨迹预测、故障诊断与风险预警模型，用于评估失效模式及严重程度，以采取预防性维护、视情维护和事后维修等策略。在钻探装备生命末期，综合评估设备性能，合理调剂资源，挖掘设备剩余价值，对老化严重、性能急剧下降或存在安全隐患的设备进行报废处理，确保资源回收与环境影响最小化。

## 2) 逆向流程：主动运维优化

主动运维优化(任杉等, 2024)是在设备发生故障或者钻井过程发生事故之前建立的运维保障手段, 分析可能导致的故障或事故的因素, 设置成本最低、效率最高的维保策略, 保障钻探装备的安全性。首先, 建立感知监测关键技术, 制定有效的监测与大流量数据高效传输方案, 构建多源异构数据处理、存储与管理策略, 实现设备状态参数与工艺参数全面覆盖; 其次, 基于得到的数据分析设备正常运行参数范围, 建立典型故障/事故与监测参数之间的关联图谱, 实现异常设备识别与事故损害设备辨识; 然后, 研究异常设备危害性及扩展范围, 建立异常设备联动图谱, 考虑时间、经济等因素制定钻井作业最优策略与故障预测方法, 实现提前预测; 最后, 根据装备状态以及故障提前预测时间制定合理的维保策略, 缩短停机时间。

## 3 高端油气钻探装备智能安全运维的关键技术

### 3.1 智能安全运维技术体系

智能安全运维技术包含信息化赋能技术及运维本体技术, 两大技术相互融合支撑, 实现钻探装备数字运维、互联运维、智慧运维。如图 3 所示, 知识工程、机器学习、边缘计算、数字孪生、大数据以及系统开发等信息化赋能技术支撑钻探装备智能安全运维, 实现失效机理分析、一体化智能监测、数据交互管理、异常识别预警、设备健康诊断、事故智能预测、工艺优化分析以及智能维修决策, 最终建立钻探装备智能安全运维系统平台, 实现统一监视判断、统一联动应急、统一推送处理, 提升运维管理水平。

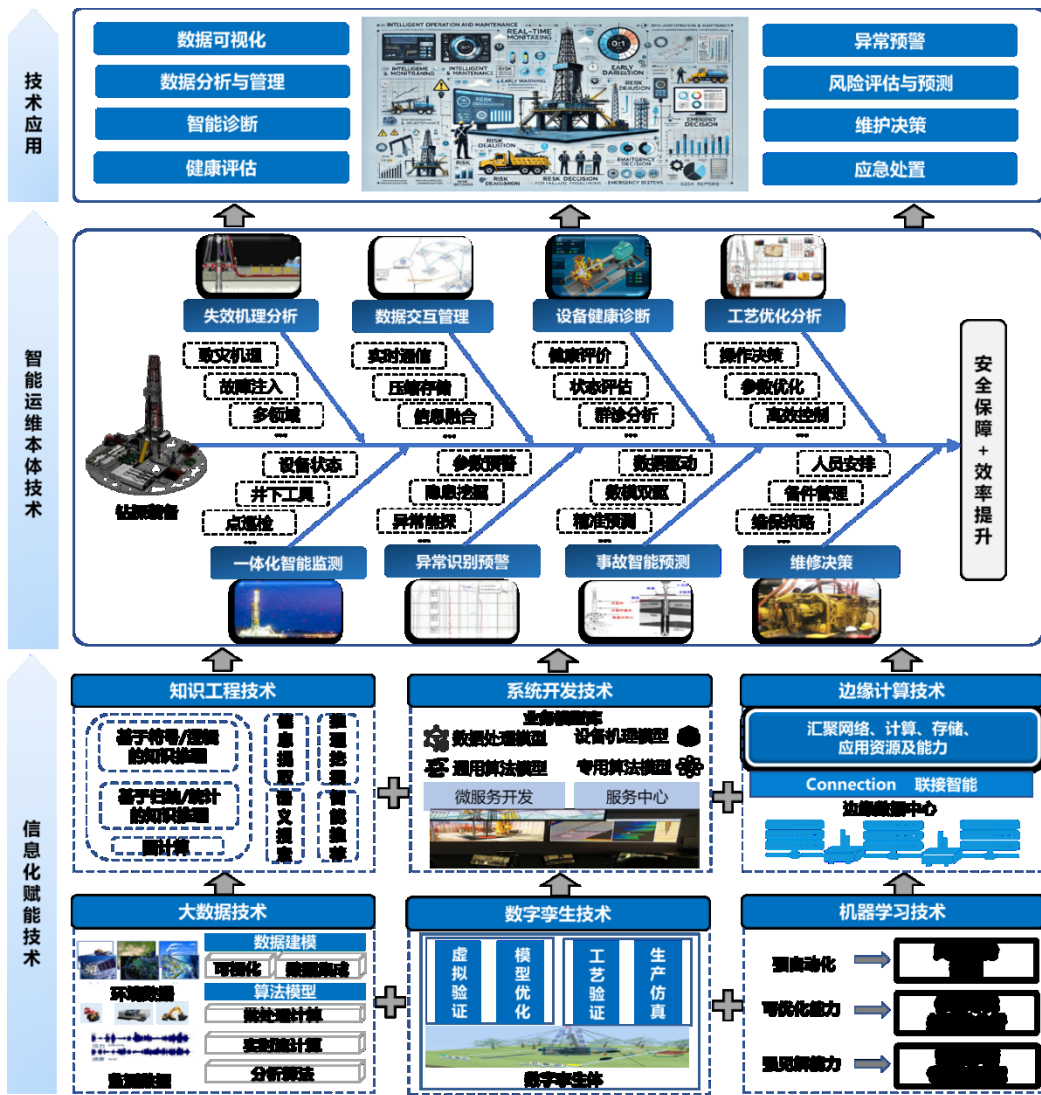


图3 智能安全运维技术体系

Fig.3 Intelligent security operation and maintenance technology system

### 3.2 信息化赋能技术

#### 1) 大数据技术

大数据技术是一种捕获、发现和分析信息化数据处理、外部跨界数据和工业物联网数据的技术，从超大规模结构化、非结构化数据中提取有价值的信息(耿黎东, 2021)。钻探装备作业过程中会产生海量数据，涵盖各类静态结构化表格、非结构化的视频和图片、各类工业格式数据等(赵春兰等, 2022)，为大数据技术的应用奠定了良好的数据基础。

#### 2) 机器学习技术

机器学习技术是从现有的复杂数据中学习基本规律，并根据数据和所得到的规律对未来的行为结果和趋势进行预测，根据学习方式可以将机器学习分为有监督学习、无监督学习和强化学习(闵超等, 2024)。钻探装备的各种故障诊断、监测预警问题都可以通过决策树、神经网络、支持向量机、集成学习、聚类 and 深度学

习等机器学习算法建立相关模型，有效地克服这些问题。

### 3) 数字孪生技术

数字孪生技术可实现数字空间中孪生模型与现实空间中的物理实体的实时交互映射，反映一个复杂系统的整个生命周期。国外的西门子、通用等公司利用其各自的数字孪生平台进行了油气钻探开发相关设备的孪生建设(Carpenter et al., 2021)。通过创建数字孪生体，可以用来模拟、监控真实设备在生产环境中的状态和行为(Liu et al., 2020)。

### 4) 知识工程技术

知识工程技术可以从多源大数据中挖掘碎片知识，融合成人类可理解、机器可表征与可推理的知识库和知识图谱(郑庆华等, 2023)，并在此基础上进行相应的推理计算，提高了知识组织管理的智能化水平(Xu et al., 2023)。因此，需要构建钻探装备知识库及知识管理系统、积累故障知识，发掘海量数据中的有用信息，实现知识的快速查询和智能匹配，辅助钻探装备进行科学决策。

### 5) 边缘计算技术

边缘计算主要是将计算和存储功能移至网络边缘，在边缘处进行计算和资源管理，为任务处理提供更低的延迟和更高的带宽(侯祥鹏等, 2024)。随着勘探开发技术的不断进步，设备运行产生的数据量呈指数级增长。传统的中心化数据处理模式面临着网络带宽压力大、实时性差、计算资源浪费等问题。边缘计算将计算任务下沉到数据源附近，为解决这些挑战提供了新的思路(王建胜等, 2024)。

### 6) 系统开发技术

系统开发技术基于微服务容器化与数据中台为工业智能应用的快速构建提供了高效、灵活和可扩展的开发环境。微服务容器化通过将复杂的系统架构拆分为独立、可部署的服务单元，极大地提升了系统的开发效率、维护便捷性和部署灵活性(厉瞳瞳等, 2026)。数据中台则通过数据的集中管理与共享，打破数据孤岛，实现数据资源的高效流通与深度挖掘(张来斌, 王金江, 2023)。

## 3.3 智能运维本体技术

### 1) 多领域钻探装备模型构建及物理失效分析技术

为实现钻探装备早期故障演化分析，建立多领域钻探装备模型构建及物理失效分析技术，通过构建提升系统、泥浆循环系统等关键子系统的机-电-液多领域耦合的数字孪生模型，实现多种故障注入条件下参数演化分析。以提升系统为例，通过数学方程描述钻井绞车、游车、大钩、顶驱、钻柱的动力学行为，结合液压力传递与多级减速机传动特性，以及控制信号响应与电机负载特性，建立多物理场统一仿真框架。在模型构建过程中，融入启机、停机、备机等不同运行模式的辨识逻辑，使模型能够根据实际工况动态调整边界条件。基于故障注入技术模拟传动装置疲劳、刹车装置磨损、钢丝绳断裂等失效行为，输出大钩位移、大钩

速度、绞车液压盘制动力、钢丝绳总拉力等仿真参数，观察不同故障模式下各参数的变化规律。最终将仿真结果与历史故障数据融合，形成涵盖典型故障模式及其关联关系的全局知识图谱，为后续状态监测与诊断提供可对比的健康基准。

## 2) 钻探装备一体化监测与数据实时传输技术

为全面获取钻探装备运行状态参数，在装备层面，首先接入电子司钻系统获取控制参数与已有传感参数，通过 Modbus/Profibus 从控制系统读取设备转速、温度、压力等状态数据。对于顶驱、钻泵、钻井绞车等重点设备加装振动、冲击脉冲、电流等传感器，通过嵌入式控制器、采集卡和保护模块实现实时高频数据采集，由光纤交换机将数据传输至服务器。所有数据还需要进行降噪以及缺失值补全等处理，经处理之后存储至数据库中。针对井下环境受限、直接测量困难的场景，引入地质力学反演与岩石物理建模技术，通过地面监测数据反推井下状态。数据传输方面，远程通信可通过工业网闸发送至卫星，按 MQTT 数据传输协议获取通信权限，并设计断网缓存与自动续传机制，确保通信不稳定时的数据完整性，为云端深度分析提供高质量数据源。

## 3) 数据与模型融合的故障精准诊断技术

为提升复杂工况下故障诊断的准确性与可解释性，构建了多模型融合的混合诊断架构。首先，在离线阶段基于历史健康数据，采用灰色关联分析方法筛选与工况敏感的关键参数，并利用 LSTM 网络提取正常状态下的时序特征，构建设备健康记忆矩阵。在线诊断阶段，通过滑动窗口实时计算当前数据与记忆矩阵的偏离度，并依据动态阈值准则判断是否发生异常。一旦触发异常，进一步采用累积贡献率法计算各监测参数对异常的贡献程度，快速定位引发异常的关键部位。同时，引入知识图谱对故障传播路径进行推理，将诊断结果与历史案例、维修记录关联，形成从异常发现到故障溯源的闭环流程。

## 4) 钻探装备多目标智能决策优化技术

为实现钻探装备运行参数的自适应调控与维护策略的动态优化，构建了基于深度强化学习的多目标决策框架。以机械钻速提升、能耗降低、装备寿命延长为优化目标，采用人工神经网络与卷积神经网络构建代理模型，拟合钻压、转速、转矩等操作参数与目标函数之间的非线性关系。通过蒙特卡洛树搜索算法预演不同参数组合的长期影响，评估各决策路径的风险概率，并生成帕累托最优解集。针对钻井异常工况预警决策需求，引入多变量时间延迟嵌入与多变量状态估计技术，将钻井参数之间的时滞关联与动态耦合关系显式纳入状态空间建模过程。其次，引入机械比能模型作为物理知识约束，将钻井能量利用状态显式融入异常判决过程，通过指标的偏离模式辅助调整检测灵敏度并对异常类型进行初步推断。最后，通过构建数据驱动重构误差与物理一致性指标相结合的判决策略，提升异常工况识别的准确性与合理性。

### 5) 云-边-端异构资源协同系统构建技术

为满足智能安全运维系统的实时性与可靠性需求，设计了云-边-端分层协同的系统架构。边缘端部署于钻井现场，基于容器化技术封装数据采集、传感回路自检、实时特征提取、边缘报警等功能模块，支持断网自治运行，确保极端工况下基础监测与控制功能不中断。云端部署于远程数据中心，承担大规模仿真推演、个性化算法模型训练与管理、多平台数据融合分析等任务，通过数据学习不断优化模型，并通过指令下达实现边缘端模型的动态更新。两端基于 MQTT 卫星通信协议进行数据同步，并设计断网缓存与自动续传机制，保障数据完整性。在软件实现上，采用微服务架构与前后端分离设计，支持功能模块的独立部署与扩展。

## 4 高端油气钻探装备智能安全运维系统构建及应用

基于前文中提到的高端钻探装备智能安全运维技术体系及关键技术，以某海上半潜式钻井平台为运维对象，开发智能安全运维系统，监测钻井平台关键设备运行情况，钻井平台关键设备智能安全运维系统框架如图 4 所示。系统分为平台端与陆地端，平台端系统利用边缘计算、数据感知技术实现报警管理，减轻云端数据中心平台的运算负荷，并将设备数据通过卫星通讯传输至陆地端系统。陆地端系统构建了平台关键设备监测、诊断、预警和趋势分析等业务模型，并对不同业务模型进行模块化、组件化封装与调用，实现关键设备状态监测、故障诊断、趋势分析、系统管理和远程运维等功能。两端协同可以全方位监控平台整体运行状况，实现设备监测维护和远程管理人员运维管理与决策。

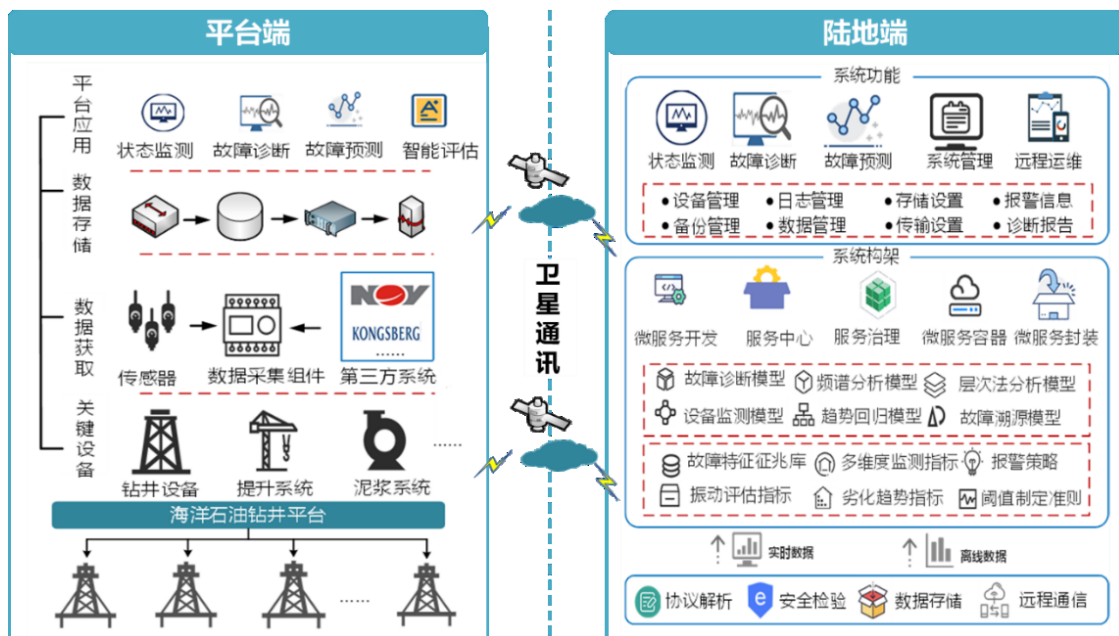


图 4 钻井平台关键设备智能安全运维系统框架

Fig.4 Framework of intelligent safety operation and maintenance system for key equipment of drilling platform

### 4.1 钻井平台关键设备智能监测方案

钻井平台关键设备智能监测方案如图 5 所示，具备传感回路自检、变频采样、边缘数据分析等功能。首先通过 Modbus/Profibus 以及硬接线从平台现有控制系统读取设备转速、温度、压力等状态数据，实现与平台现有控制系统的互通互联，全方位整合平台海量的多源异构数据。对于顶驱、钻井泵、钻井绞车等重点设备加装振动、冲击脉冲、电流等传感器，通过嵌入式控制器、采集卡和保护模块实现实时高频数据采集，由光纤交换机将数据传输至服务器并集成存储，实现平台关键设备的实时监测。边缘采集器对数据预处理之后传输至平台服务器中，利用边缘服务器预置的算法模型对设备运行参数及状态进行快速评估。同时，平台端的数据将通过卫星实时同步至陆地服务器中，利用陆地端强大算力对数据进一步的挖掘，实现设备的远程管理和智能运维。

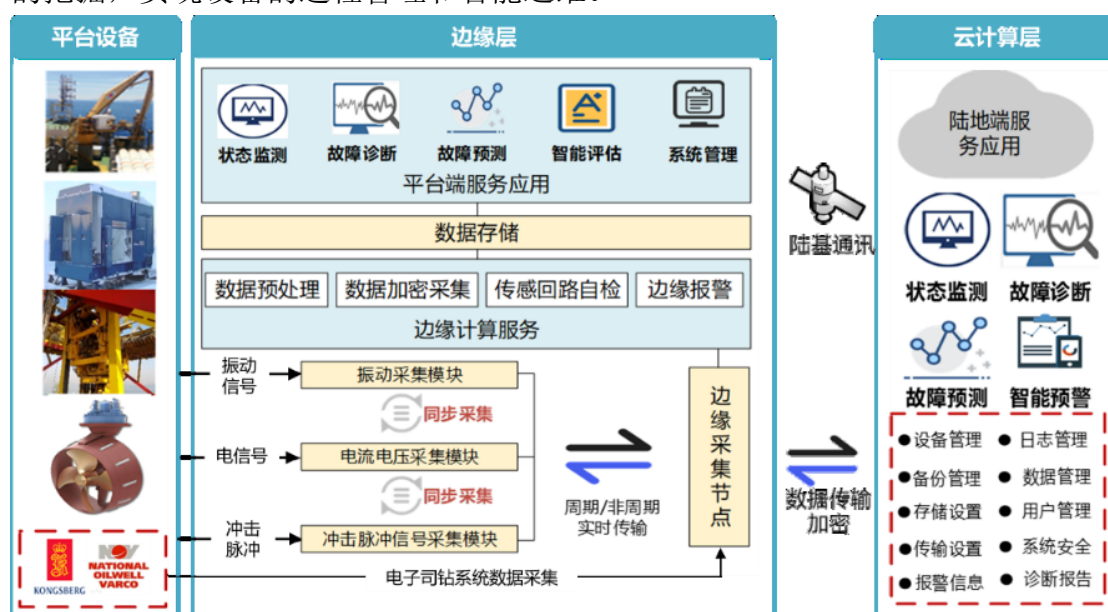


图 5 平台端关键设备全方位智能监测方案

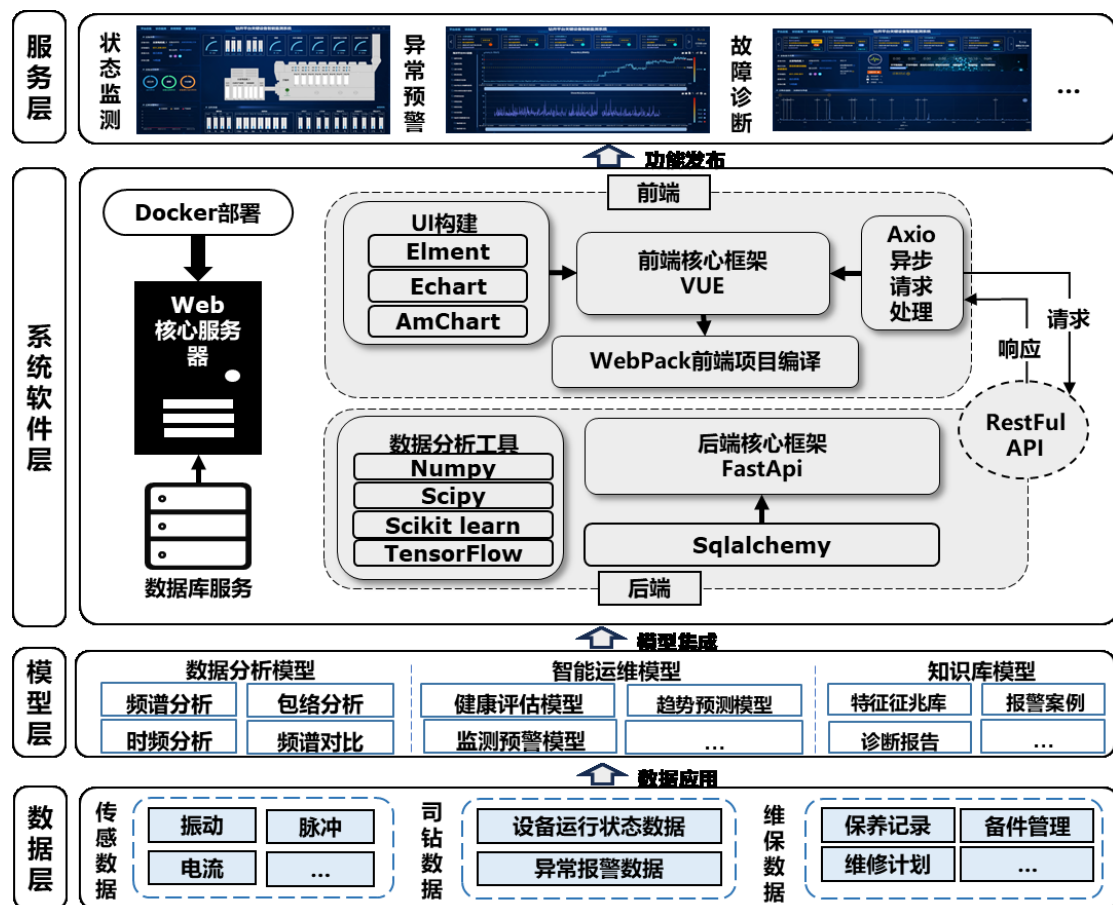
Fig.5 Comprehensive intelligent monitoring solution for key equipment on the platform

#### 4.2 智能安全运维系统软件开发方案

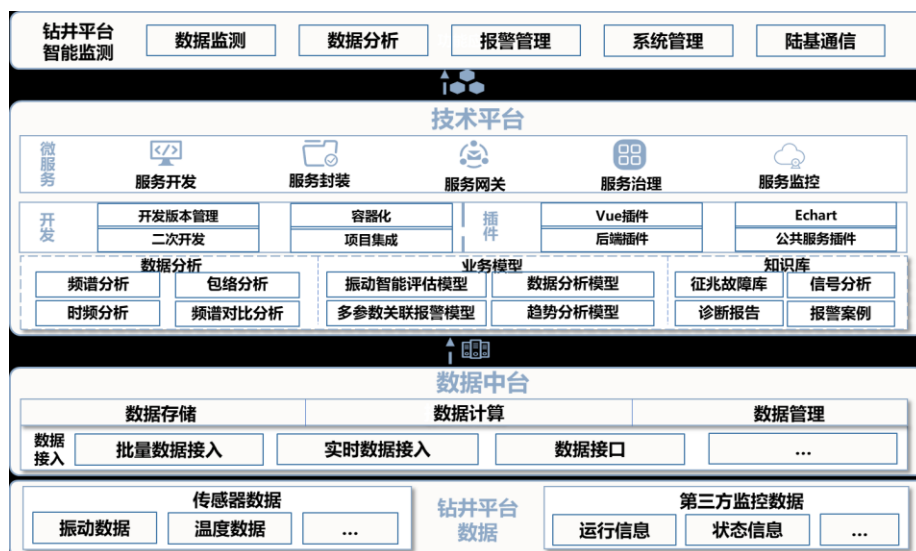
在前述 4.1 节所述的硬件监测方案基础上，本节进一步阐述支撑数据深度处理与智能分析的系统软件开发方案。平台端和陆地端系统软件均采用前后端分离 B/S 的开发方式构建，相比传统的 C/S 架构，所构建系统具备功能集成性高、系统维护简便，可支持多用户远程浏览、监看等功能。除此之外，考虑到本系统可能会应用于多台套钻探装备，采用 B/S 架构可以较为方便地集成其他设备。系统软件开发方案如图 6(a)所示，分为数据层、模型层、系统软件层以及服务层。系统软件采用 Python 语言进行核心算法与应用程序的开发，以 Flask 为核心 Web 服务框架，编写应用程序编程接口 (Application Programming Interface, AP) 供前端 Web 页面调用，同时集成 Numpy、Scipy 等第三方工具库实现高性能数值计算。在系统实现层面，前端采用 Vue 框架，使用异步 JavaScript 和 XML 与后端

实现数据交互，通过数据与页面展示组件双向绑定实现动态 Web 页面。同时，前端也集成 Echart、Element UI 等控件库，构建用户友好、流畅的各类组件及数据可视化图表，将其发布至服务层，实现钻探装备的智能运维安全管理。

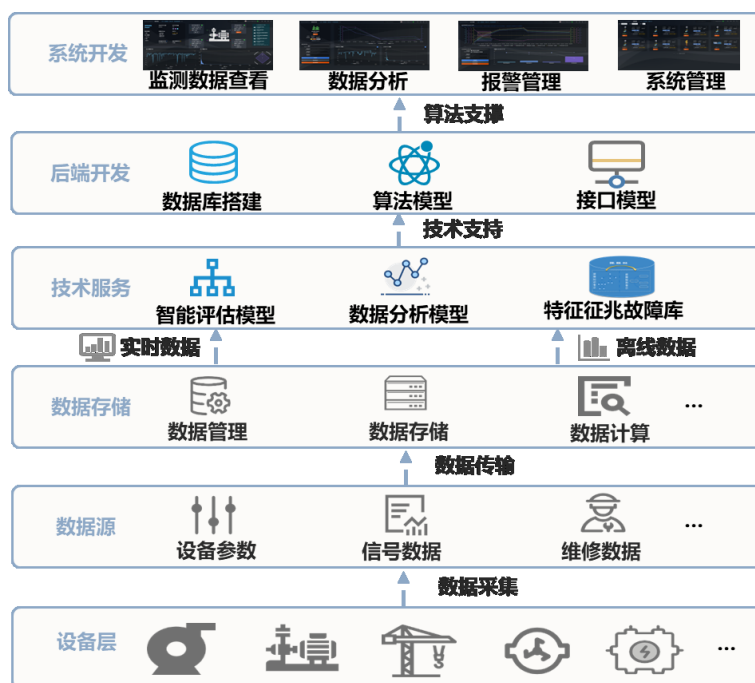
在具体部署中，平台端与陆地端系统虽基于同一套开发方案，但两套系统存在明确的分工部署策略，其技术架构分别如图 6(b)和图 6(c)所示。平台端承担现场级数据采集与实时监测任务，系统部署于平台本地服务器，负责记录该平台内部所有设备、部件的基本信息，并完整存储设备运行的原始数据、边缘预处理结果及实时监测预警信息。陆地端承担多平台集成管理与深度分析职能，系统部署于陆地数据中心，负责集成各海上平台上传的设备、部件基本信息，集中存储各平台的监测预警记录、故障诊断结果及运维报告，并定时抽取关键设备运行数据进行异地备份。两端系统通过标准化的 API 接口实现数据交互，确保系统的一致性与可扩展性。最终将系统发布至服务层，实现钻探装备的智能运维安全管理。



(a)



(b)



(c)

图 6 智能安全运维系统开发方案：(a)平台端和陆地端系统软件开发方案；(b) 平台端系统技术架构；(c)陆地端系统技术架构

Fig.6 Intelligent safety operation and maintenance system development scheme: (a) Software development scheme for platform-side and land-side systems; (b) Technical architecture of platform-side system; (c) Technical architecture of land-side system

### 4.3 应用实践

基于前述系统架构与关键技术，开发的钻井平台关键设备智能安全运维系统已在南海某海洋钻井平台投入使用，其核心配置与规模如表 1 所示。系统覆盖全平台 105 台套设备的 200 余处测点及控制运行参数，共计 5000 余项数据，功能模块包括数据大屏、设备概览、状态监测、异常预警、健康评估、故障诊断、智

能决策以及后台管理。本节通过具体应用案例，展示系统在状态监测、故障诊断、预警预测及智能决策等方面的实际效果，验证所提技术方法的有效性。

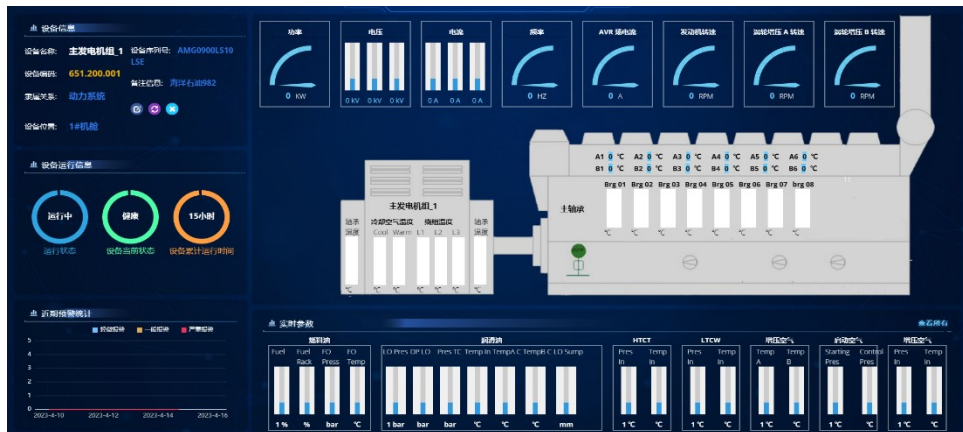
表 1 智能安全运维系统规模与关键配置

Table 1 Scale and key configuration of intelligent safety operation and maintenance system

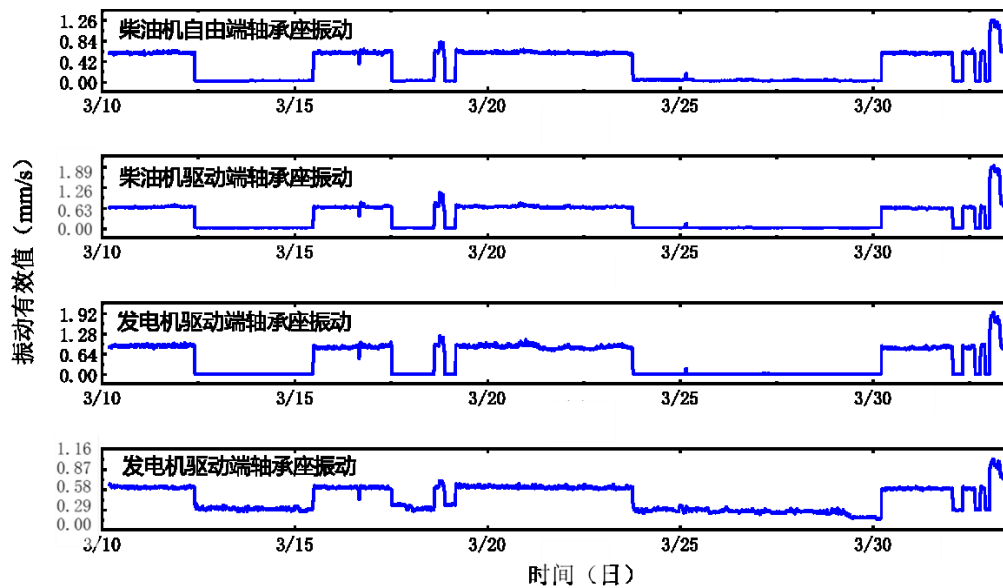
配置项	参数/描述
覆盖设备	105 台套
监测测点	216 处
数据项总数	5023 项
采样频率	振动、电流：10 kHz；电子司钻数据：0.5Hz
数据类型	连续型、布尔型、文本型
边缘端功能	实时数据采集、预处理、本地存储、实时报警、断网自治
云端功能	多源数据融合、健康评估、故障诊断、趋势预测、智能决策
通信方式	平台：光纤/Modbus/Profibus；平台-陆地：MQTT 卫星通信
数据存储	边缘端：原始数据本地缓存 30 天；云端：历史数据长期存储

### 1) 状态监测

以钻井平台主力发电机为例，图 7 展示了智能安全运维系统的状态监测功能。其中，图 7(a)为状态监测界面，该界面集成了主力发电机所有关键监测参数，如振动、温度、压力等参数，并可根据操作手册及相关标准预设报警阈值，实现参数的实时可视化监控与超限报警。图 7(b)为发电机关键测点在连续 30 天内的振动烈度趋势图，各测点振动信号同步变化，符合设备正常运行时的振动机理，表明传感设备工作正常。通过与振动标准 ISO 10816-3 进行对比分析，各测点振动烈度均处于“良好”区间，进一步确认主力发电机运行状态稳定，为现场运维提供数据支撑。



(a)



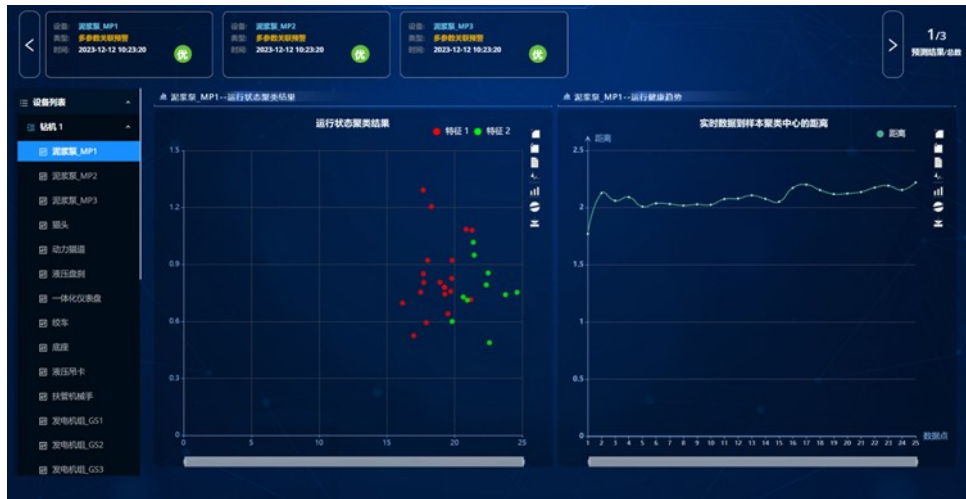
(b)

图 7 智能安全运维系统的状态监测功能：(a)主力发电机状态监测界面；(b)主力发电机关键振动测点的振动烈度趋势图

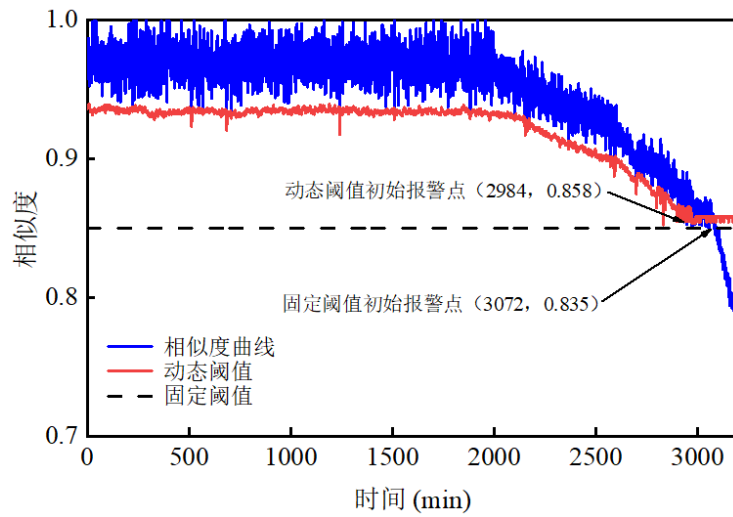
Fig.7 Condition monitoring functions of the intelligent safety operation and maintenance system: (a) Condition monitoring interface of the main power generator; (b) Vibration severity trend chart of key vibration measurement points of the main power generator

## 2) 故障诊断

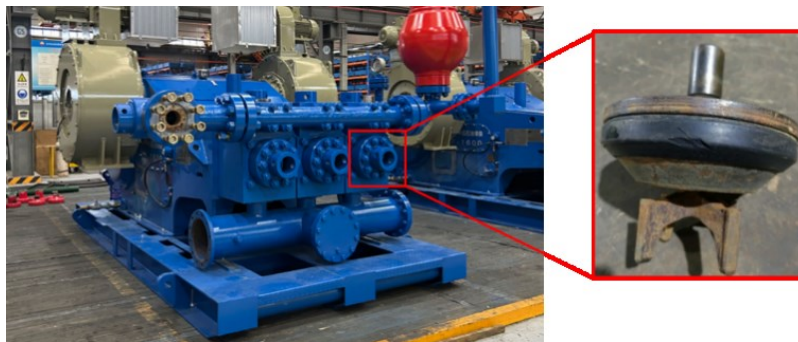
以钻井平台的钻井泵为例，图 8 展示了智能安全运维系统的故障诊断功能。其中，图 8(a)为故障诊断界面，动态显示钻井泵运行状态的聚类结果及实时数据到聚类中心的距离，以不同颜色点区分不同设备的工况分布，直观反映设备偏离正常工况的程度，辅助识别潜在故障模式。当偏离度大于动态阈值后，系统进一步通过计算累积异常贡献率快速定位引发异常的关键参数，从而锁定故障源，实现从状态感知到故障诊断与定位的闭环。通过计算吸入支管振动、曲轴轴承座振动、吸入液缸振动、排出压力等实时监测参数与健康基准的相似度图，得到图 8(b)所示的对比曲线，该系统有效识别出钻井泵液力端异常，并根据异常参数贡献率将故障定位至吸入液缸，在对钻井泵左侧液缸进行拆解检查后，发现左液缸吸入阀有明显磨损，存在吡漏现象，如图 8(c)所示。验证了该功能能有效识别故障部位，实现早期故障诊断，避免钻井泵因故障造成更大损失，为钻井泵的预测性维护提供了有效支撑。



(a)



(b)



(c)

图 8 智能安全运维系统的故障诊断功能：(a)钻井泵故障诊断界面；(b)相似度偏离程度；(c)磨损的钻井泵吸入阀阀体

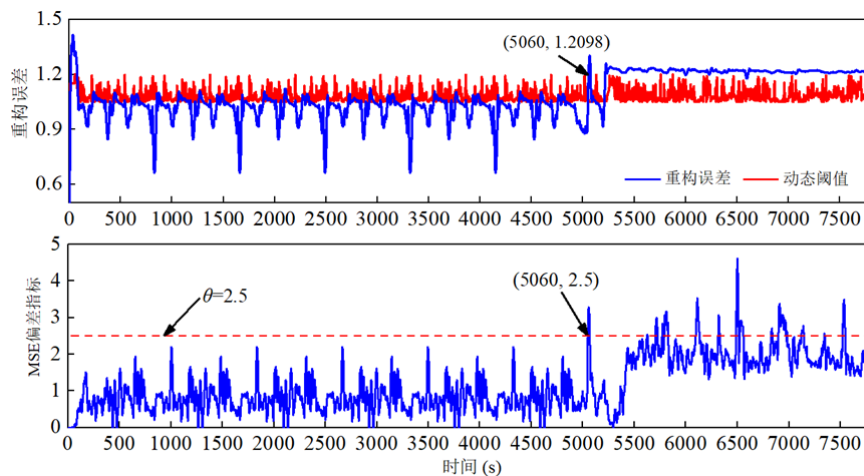
Fig.8 Fault diagnosis functions of the intelligent safety operation and maintenance system: (a) Fault diagnosis interface of the drilling pump; (b) Similarity deviation degree; (c) Worn suction valve body of the drilling pump

### 3) 异常预警

以钻井异常工况为例，图 9 展示了智能安全运维系统的异常预警功能。其中，图 9(a)为钻井异常工况预警界面，该界面可以直观展示重构误差与动态阈值对比曲线以及 MSE 偏离度指标，并用垂直标记线标出检测点，同时支持人工干预调整阈值，为钻井异常智能预警提供有效支撑。具体来说，该功能利用多远状态估计技术计算重构误差，同时基于机械比能模型构建动态阈值，建立数据模式异常与物理状态异常的双重判据条件，实现在线的自适应预警。对钻头泥包异常工况的检测预警结果如图 9(b)所示，通过重构误差与 MSE 偏离度两个判断依据，在正常钻进阶段未产生误报警。随着钻进过程继续，钻压发生波动后升高，转速基本不变，扭矩先下降再上升，在第 5060 秒时重构误差与 MSE 偏离度分别超过阈值。与现场司钻工作日志记录时间对比，至少提前 240 秒发现异常，为现场人员采取预防性措施提供了宝贵的窗口期。



(a)



(b)

图9 智能安全运维系统的异常预警功能：(a)钻井异常工况判断界面；(b)异常双重判断条件

Fig.9 Abnormal warning function of intelligent safety operation and maintenance system: (a) Drilling abnormal working condition judgment interface; (b) Abnormal double judgment condition

#### 4) 智能决策

以钻井平台的钻机为研究对象，图 10 展示了智能安全运维系统的智能决策功能及界面，基于历史故障案例以及故障诊断与异常预警结果，生成针对性的维修策略与备件推荐，并支持维护工单的闭环管理。该海上平台钻机停机成本约为 30 万美元/日，历史平均故障间隔时间约为 17.5 天，表 2 汇总了各效益指标的理论计算结果。结果表明，平均故障间隔时间提升至约 20-21 天，非计划停机时间从 28 天减少至约 24 天，降幅为 10-15%，年度成本节约 100 万美元，有效降低维护成本。



图 10 智能安全运维系统的智能决策功能界面

Fig.10 Intelligent decision-making function interface of intelligent safety operation and maintenance system

表 2 理论工程效益

Table 2 Theoretical engineering benefits

效益指标	主要计算依据	基线值	结果
平均故障间隔时间提升	关键设备故障率降低对系统整体故障率的贡献权重	17.5 天	提升 15-20%，达 20-21 天
年度非计划停机时间减少	故障传播概率降低 × 平均修复时间	28 天	减少 20%，降至 24 天
年度维护相关成本降低	优化资源配置效率，减少突发维修及相关生产损失	/	成本降低 8-12%，节约约 100 万美元

## 5 结论

本文详细讨论了高端油气钻探装备在运维过程面临的问题和挑战,提出了智能安全运维技术内涵及实现流程,构建了钻探装备智能安全运维技术体系,开发了钻探装备智能安全运维系统,集成关键技术,构建了状态监测、健康评估、故障诊断以及智能决策功能模块,实现某海上钻井平台钻机设备智能运维。主要研究成果如下:

1) 提出了以全过程、全要素、全生命周期运行维护为目标的钻探装备智能安全运维技术和以生命周期管理和主动运维优化相融合的智能运维实施路径,形成完整的智能安全运维闭环框架;

2) 明确了以知识工程、机器学习、边缘计算、数字孪生、大数据以及系统开发等信息化赋能技术为支撑的钻探装备智能安全运维技术体系,开发了钻井平台关键设备智能安全运维系统,充分发挥智能监测、数据交互、健康诊断以及维修决策等本体技术在运维中的能动性,提升运维管理水平。

尽管现阶段已有一些支撑高端油气钻探装备智能安全运维技术的研究结果,但仍存在智能运维应用的局限性。未来研究可聚焦于提升数据采集精度与传输速率,结合边缘计算和云计算平台,优化数据存储与处理方式,同时深入探索深度学习与传统算法的结合方式,提升自主决策能力,推动智能安全运维技术的实际落地应用。

## References

- Carpenter C, 2021. Digital-twin Approach Predicts Fatigue Damage of Marine Risers. *Journal of Petroleum Technology*, 73(10): 65–66.
- Gao, Y. D., Wang, S. Y., Chang, B. T., et al, 2022. An Integrated Identification Approach of Abnormally High-Pressure Gas Zones Based on the Look-Ahead While Drilling Technology. *Natural Gas Industry*, 42(10): 98-106 (in Chinese).
- Gao, D. L. and Huang, W. J., 2024. Basic Research Progress and Prospect in Deep and Ultra-deep Directional Drilling. *Natural Gas Industry*, 44(01): 1-12 (in Chinese).
- Geng, L. D., 2021. Application Status and Development Suggestions of Big Data Technology in Petroleum Engineering. *Petroleum Drilling Techniques*, 49(2): 72-78 (in Chinese).
- He, D. F., Jia, C. G., Zhao, W. Z., et al, 2023. Research Progress and Key Issues of Ultra-deep Oil and Gas Exploration in China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(6): 1162-1172(in Chinese).
- He, T. T. and Zhang, Q., 2024. Application Status and Development Trend of Knowledge Graph in Petroleum Exploration and Development. *Natural Gas*

- Industry*, 44(09): 55-67(in Chinese).
- Hou, X. P., Lan, L., Tao C. L., et al, 2024. Edge Intelligence and Collaborative Computing: Frontiers and Advances. *Control and Decision*, 39(7): 2385-2404 (in Chinese).
- Huang, F. X., Wang, S. Y., Li M. P., et al, 2024. Progress and Implications of Deep and Ultra-deep Oil and Gas Exploration in Petrochina. *Natural Gas Industry*, 44(01):86-96(in Chinese).
- Li, T. T, Zhang, Y., Lei, B., et al, 2026. A cloud-edge-end collaborative architecture for intelligent operation and maintenance of high-end drilling equipment. *Earth Science*(in Chinese).
- Liu, C., Jiang, P., Jiang, W., 2020. Web-based Digital Twin Modeling and Remote Control of Cyber-physical Production Systems. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 64: 101956.
- Ma, Z. Z., Yuan, Z. M., Jia, Y., et al, 2023. Development of Offshore Oil Real-time Intelligent Drilling Auxiliary Decision-making Technology. *Offshore oil*, 43(3): 84-89(in Chinese).
- Min, C., Wen, G. Q., Li, X. G., et al, 2024. Research progress and application prospect of interpretable machine learning in artificial intelligence of oil and gas industry. *Natural Gas Industry*, 44(09): 114-126(in Chinese).
- Ran, C. Q., Zhang, X. B., Han, S., et al, 2025. TPDNet: A Point Cloud Data Denoising Method for Offshore Drilling Platforms and its Application. *Measurement*, 241: 115671.
- Ren, S., Wang, J., Zhao, X., et al, 2024. “Doubly-fed” Manufacturing Service of Intelligent Design and Preventive Maintenance for Complex Products. *Journal of Mechanical Engineering*, 60(6): 127-136 (in Chinese).
- Suvarna M, Yap K S, Yang W, et al, 2021. Cyber–physical Production Systems for Data-driven, Decentralized, and Secure Manufacturing—A Perspective. *Engineering*, 7(9): 1212-1223.
- Sheng, Y. N., Guan, Z. C., Luo, M., et al, 2019. A Quantitative Evaluation Method of Drilling Risks Based on Uncertainty Analysis Theory. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 43(02): 91-96(in Chinese).
- Tang, Y., Zou, Z., Jing, J., et al, 2015. A framework for making maintenance decisions for oil and gas drilling and production equipment. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26: 1050-1058.
- Muhammad H, Even F, Filippo S, 2024. Exploring the Synergies Between

- Collaborative Robotics, Digital Twins, Augmentation, and Industry 5.0 For Smart Manufacturing: A State-of-the-Art Review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89: 102769.
- Ning, B., Sha, Z. B., Li, J., et al, 2025. The Development Status and Development Trends of Deep-sea Drilling Technology. *Earth Science* (in Chinese).
- Wang, D. Y., Wang, Y. H., Yu, X. J., et al, 2017. Research and Development Trend of Domestic Automated Drilling Rig. *China Petroleum Machinery*, 45(5): 23-27(in Chinese).
- Wang, J. L., Wang, Y. Z., Qiu, W. H., et al, 2024. Drilling Intelligent Decision Support System Based on Big Data and Fusion Model. *Petroleum Drilling Techniques*, 52(5): 105–116(in Chinese).
- Wang, J. S. and Kang, F. L., 2024. Implementation and Optimization of Edge Computing in Drilling Data Stream Processing. *Information System Engineering*, (11): 119-122(in Chinese).
- Wang, W. X., Cao, X. Y., Ma, J. G., et al, 2024. Development and Application of Automatic Drilling Rig for 12000m Extra-deep Wells. *Drilling Engineering*, 51(4): 7-13(in Chinese).
- Xiao, L., Yang, C. S., Zhao, J. H., et al, 2015. Key Technologies of Drilling Engineering Decision Support Systems. *Petroleum Drilling Techniques*, 43(02): 38-43(in Chinese).
- Xu, Y. M., Liu, Z. P., Gao, M., et al, 2019. Key Technology of 9000 m Intelligent Drilling Rig. *China Petroleum Machinery*, 47(9): 57-62(in Chinese).
- Xu, Z. G., Dang, Y. Z., 2023. Data-Driven Causal Knowledge Graph Construction for Root Cause Analysis in Quality Problem Solving. *International Journal of Production Research*, 61(10): 3227-3245.
- Yang, A. X., Wu, M., Yu, W. K., et al, 2023. Fault Diagnosis of Drilling Process Based on Multi-Scale Decomposition and Decision Fusion. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2): 8079-8084.
- Yang, B., Li, B. Y., Yang, D. G., et al, 2024. Development and Application of Fully Integrated Upgrading of Rigs. *China Petroleum Machinery*, 52(12): 17-22(in Chinese).
- Yin, Q., Yang, J., Hou, X., et al, 2020. Drilling Performance Improvement in Offshore Batch Wells Based on Rig State Classification Using Machine Learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 92: 107306.
- Zhang, C., Li, X., Ye, M., et al, 2024. Application of Physics-informed Neural Network

in Two-phase Flow. *CIESC Journal*, 75(11): 3835-3856(in Chinese with English abstract).

Zhang, L. B. and Wang, J. J., 2022. Intelligent Operation and Maintenance Technology of Oil & Gas Storage and Transportation Equipment Based on Industrial Internet. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 41(06): 625-631(in Chinese).

Zhang, L. B. and Wang, J. J., et al, 2023. Intelligent Safe Operation and Maintenance of Oil and Gas Production Systems: Connotation and Key Technologies. *Natural Gas Industry*, 43(02): 15-23(in Chinese).

Zhao, C. L., Qu, Y., Wang, B., et al, 2022. A New Method for Predicting Drilling Accident Level Based on 2D-CNN Deep Learning. *Natural Gas Industry*, 42(12): 95-105(in Chinese).

Zheng, Q. H., Liu, H., Gong, T. L., et al, 2023. Development and Prospect of Big Data Knowledge Engineering. *Strategic Study of CAE*, 25(02): 208-220(in Chinese).

#### 附中文参考文献

高永德, 王世越, 常波涛, 等, 2022. 基于随钻前视探测技术的异常高压气层综合识别方法. *天然气工业*, 42(10): 98-106.

高德利, 黄文君, 2024. 深层、超深层定向钻井中若干基础研究进展与展望. *天然气工业*, 44(01): 1-12.

耿黎东, 2021. 大数据技术在石油工程中的应用现状与发展建议. *石油钻探技术*, 49(2): 72-78.

何登发, 贾承造, 赵文智, 等, 2023. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题. *石油勘探与开发*, 50(06): 1162-1172.

和婷婷, 张强, 2024. 知识图谱在油气勘探开发中的应用现状与发展趋势. *天然气工业*, 44(09): 55-67.

侯祥鹏, 兰兰, 陶长乐, 等, 2024. 边缘智能与协同计算: 前沿与进展. *控制与决策*, 39(07): 2385-2404.

黄福喜, 汪少勇, 李明鹏, 等, 2024. 中国石油深层、超深层油气勘探进展与启示. *天然气工业*, 44(01): 86-96.

厉瞳瞳, 张毅, 雷彪, 等. 2026. 云边端协同高端钻探装备智能运维体系架构. *地球科学*.

马志忠, 袁则名, 贾雍, 等, 2023. 海洋石油实时智能钻井辅助决策技术进展. *海洋石油*, 43(03): 84-89.

闵超, 文国权, 李小刚, 等, 2024. 可解释机器学习在油气领域人工智能中的研究进展与应用展望. *天然气工业*, 44(09): 114-126.

- 任杉, 王晋, 赵欣, 等, 2024. 复杂产品智能设计与主动运维“双馈式”制造服务方法体系. 机械工程学报, 60(06): 127-136.
- 胜亚楠, 管志川, 罗鸣, 等, 2019. 基于不确定性分析的钻井工程风险定量评价方法. 中国石油大学学报(自然科学版), 43(02): 91-96.
- 宁波, 沙志彬, 李晶, 等, 2025. 深海钻探技术现状及发展动态. 地球科学.
- 王定亚, 王耀华, 于兴军, 2017. 我国管柱自动化钻机技术研究及发展方向. 石油机械, 45(5): 23-27.
- 王建龙, 王越支, 邱卫红, 等, 2024. 基于大数据与融合模型的钻井智能辅助决策系统. 石油钻探技术, 52(5): 105-116.
- 王建胜, 康芳玲, 2024. 边缘计算在钻井数据流处理中的实现与优化. 信息系统工程, (11):119-122.
- 王维旭, 曹晓宇, 马继光, 等, 2024. 12000 m 特深井自动化钻机研制与应用. 钻探工程, 51(04): 7-13.
- 肖莉, 杨传书, 赵金海, 等, 2015. 钻井工程决策支持系统关键技术. 石油钻探技术, 43(02): 38-43.
- 许益民, 刘占鹏, 高猛, 等, 2019. 9000 m 智能钻机关键技术. 石油机械, 47(09): 57-62.
- 杨斌, 李博洋, 杨德刚, 等, 2024. 石油钻机全集成化升级的开发与应用. 石油机械, 52(12): 17-22.
- 张来斌, 王金江, 2022. 工业互联网赋能的油气储运设备智能运维技术. 油气储运, 41(06): 625-631.
- 张来斌, 王金江, 2023. 油气生产智能安全运维: 内涵及关键技术. 天然气工业, 43(2): 15-23.
- 赵春兰, 屈瑶, 王兵, 等, 2022. 一种基于 2D-CNN 深度学习的钻井事故等级预测新方法. 天然气工业, 42(12): 95-105.
- 郑庆华, 刘欢, 龚铁梁, 等, 2023. 大数据知识工程发展现状及展望. 中国工程科学, 25(02): 208-220.