

# 数字化转型下储气库智能运维体系构建与实践

袁德辉 李德康 杜贺威 刘青  
中石化中原油田分公司储气库管理中心  
DOI:10.32629/etd.v6i11.17492

**[摘要]** 为响应能源行业数字化变革,本文构建以四层架构为核心的储气库智能运维体系。体系以设备层为基础,经数据层融合多源数据,依托平台层数字孪生与AI技术,通过应用层实现场景落地。关键技术支撑设备预测性维护、运行调控等应用,实施采用分阶段策略,同步强化组织保障与网络安全。体系推动运维模式从被动转主动,实现效率与安全提升,为行业提供实践参考。

**[关键词]** 储气库; 智能运维; 数字化转型; 数字孪生; 数据融合  
**中图分类号:** TE822 **文献标识码:** A

## Construction and Practice of Intelligent Operation and Maintenance System for Gas Storage Facilities Under Digital Transformation

Dehui Yuan Dekang Li Hewei Du Qing Liu

Gas Storage Management Center, Sinopec Zhongyuan Oilfield Company

**[Abstract]** In response to the digital transformation of the energy industry, this paper constructs an intelligent operation and maintenance system for gas storage facilities centered around a four-layer architecture. The system is based on the equipment layer, integrates multi-source data through the data layer, relies on digital twin and AI technologies in the platform layer, and implements scenario-specific applications through the application layer. Key technologies support applications such as predictive maintenance and operational control of equipment. Implementation follows a phased strategy while strengthening organizational support and cybersecurity. The system shifts the operation and maintenance model from reactive to proactive, improving efficiency and safety, and provides a practical reference for the industry.

**[Key words]** Gas Storage Facilities; Intelligent Operation and Maintenance; Digital Transformation; Digital Twin; Data Fusion

### 引言

能源结构转型与数字技术革新下,储气库传统运维依赖人工与经验,存在数据分散、响应滞后等问题,难适配精细化管理需求。数字化转型提供突破路径,整合物联网、大数据等技术可实现运维智能化升级。本文聚焦储气库智能运维体系构建与实践,探索技术融合与应用落地方法,为提升运行安全性与经济性提供支撑。

### 1 储气库智能运维体系的核心架构

#### 1.1 体系设计目标与原则

储气库智能运维体系以提升运行效率、保障安全管控、优化资源配置为核心目标。通过数字化技术实现全生命周期动态监测与智能决策,推动运维模式从被动响应向主动预防转变。设计遵循标准化、模块化、开放性原则,确保系统兼容性与可扩展性,兼顾技术先进性与经济合理性,为不同规模储气库提供灵活适配方案。体系强调数据全流程贯通,打破信息孤岛,实现从地

质勘探到生产运营的数据深度融合,支撑运维决策的科学性与精准性。

#### 1.2 分层架构模型

智能运维体系采用四层架构模型,自下而上分别为设备层、数据层、平台层与应用层。设备层作为物理基础,集成高精度传感器、智能仪表与自动化控制装置,实现压力、温度、流量等关键参数的实时采集与设备状态监测。数据层构建统一数据中台,通过数据清洗、特征提取与时空对齐技术,将多源异构数据转化为结构化知识,形成涵盖地质模型、井筒状态、地面工艺的完整数据资产库。平台层部署工业互联网平台,集成数字孪生引擎、大数据分析模块与人工智能算法库,提供模型训练、仿真推演与决策优化能力<sup>[1]</sup>。应用层面向具体业务场景,开发智能调度、故障诊断、风险预警等专业化工具,形成覆盖运维全流程的智能应用集群。

#### 1.3 各层级功能与协同关系

设备层与数据层通过物联网协议实现无缝对接, 传感器数据经边缘计算节点预处理后上传至数据中台, 确保数据时效性与完整性。数据层为平台层提供标准化数据接口, 支撑数字孪生模型实时更新与风险传播路径模拟。平台层通过微服务架构向应用层输出计算能力, 智能调度模块根据气藏动态调整注采方案, 故障诊断模块基于设备振动频谱分析提前识别潜在故障, 风险预警模块结合地质变形监测数据评估井筒完整性。应用层反馈运行效果至平台层, 驱动模型迭代优化, 形成“数据驱动-模型支撑-应用反馈”的闭环协同机制, 最终实现储气库运维的智能化升级与效能跃升。

## 2 智能运维体系的关键技术支撑

### 2.1 全面感知与物联技术

全面感知是智能运维体系的基础能力, 依托高精度传感器网络与物联网平台实现多维数据实时采集。传感器类型涵盖压力、温度、流量、振动、腐蚀监测等类别, 部署范围覆盖井口装置、压缩机组、输气管线及地下储气空间, 形成从设备单体到工艺系统的全要素监测网络。物联网平台通过低功耗广域网、5G等通信技术实现数据高速传输, 支持千万级设备接入与毫秒级响应, 确保关键参数无遗漏采集。针对地下储气库特殊环境, 研发耐高温高压、抗电磁干扰的专用传感器, 突破复杂地质条件下的数据传输瓶颈。感知层数据经边缘计算节点预处理后上传至云端, 既减轻中心服务器压力, 又提升异常事件响应速度, 为后续分析提供可靠数据源。

### 2.2 数据融合与集成技术

多源异构数据融合是构建智能运维体系的核心环节。数据来源包括地质勘探数据、生产运行数据、设备监测数据及环境气象数据, 格式涵盖结构化表格、非结构化文本、时序流数据及三维模型数据。通过数据清洗技术剔除噪声与异常值, 采用数据治理工具统一数据标准与编码规则, 解决因系统异构导致的数据冲突问题。时空对齐技术将不同时间尺度、空间坐标的数据映射至统一基准, 实现地质模型与生产数据的精准匹配。融合后的数据存储在分布式数据库, 形成涵盖气藏动态、设备状态、工艺参数的统一数据底座, 支撑上层应用快速调用与分析。数据集成过程强调开放性与扩展性, 预留标准化接口便于接入新型监测设备或外部数据源。

### 2.3 数字孪生与建模技术

数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟映射, 实现储气库运行状态可视化与模拟推演。建模过程融合地质力学、流体力学与热力学等多学科知识, 建立气藏-井筒-地面工艺全链条耦合模型。模型参数实时同步物理实体监测数据, 动态反映储气库压力分布、气水界面移动及设备性能衰减等变化<sup>[2]</sup>。基于数字孪生体可开展虚拟注采实验, 模拟不同工况下的运行效果, 优化生产制度调整方案。故障注入功能通过预设设备故障场景, 验证应急预案有效性, 提升风险处置能力。数字孪生平台集成三维可视化引擎, 将抽象数据转化为直观图形界面, 辅助运维人员快速定位异常点并制定决策。

### 2.4 人工智能与大数据分析技术

人工智能算法为智能运维提供核心决策能力。设备预测性维护模块采用机器学习分析振动、温度等时序数据, 识别故障早期征兆并预测剩余使用寿命。风险预警系统通过关联地质监测数据与生产参数, 构建风险传播模型, 提前发现井筒完整性破坏、气藏水侵等潜在风险。运行优化算法基于强化学习技术, 在调峰需求、能耗限制等多目标约束下, 自动生成最优注采方案。大数据分析技术挖掘历史数据中的隐藏规律, 建立设备故障模式库与工艺操作知识图谱, 为智能决策提供经验支撑。算法模型部署于云端与边缘端协同的混合架构, 兼顾计算效率与实时性要求, 持续提升运维智能化水平。

## 3 智能运维的核心应用场景

### 3.1 设备预测性维护

设备预测性维护通过深度分析设备运行数据, 提前识别潜在故障风险, 推动维护模式从被动响应转向主动预防。传感器网络持续采集压缩机组振动频谱、电机温度、阀门开度等关键参数, 结合设备历史运行记录构建特征数据集。机器学习算法对数据流进行实时分析, 通过异常模式识别技术捕捉参数偏移趋势, 在故障发生前数周甚至数月发出预警。针对不同设备类型定制预测模型, 例如对往复压缩机建立活塞环磨损预测模型, 对离心式压缩机开发叶轮积垢监测算法。维护策略根据预测结果动态调整, 对高风险设备安排提前检修, 对低风险设备延长巡检周期, 显著减少非计划停机时间。预测性维护系统还提供维修方案推荐功能, 根据故障类型自动匹配备件清单与操作流程, 缩短维修准备时间, 提升维护工作标准化水平。

### 3.2 运行智能调控与优化

运行智能调控系统依托数字孪生模型与优化算法, 实现注采策略的动态优化。系统实时同步地质模型参数与地面工艺数据, 构建覆盖气藏-井筒-管网的虚拟运行环境。基于强化学习算法的优化引擎在调峰需求、能耗限制、设备能力等多约束条件下, 自动生成最优注采方案。例如在调峰期间, 系统通过模拟不同井组配产方案对库容利用率的影响, 优先选择既能满足峰值需求又避免压力波动过大的操作策略。智能调控系统还具备自适应调整能力, 当监测到实际运行参数与模型预测值出现偏差时, 自动触发模型修正机制, 通过反馈数据迭代更新参数, 确保调控策略始终与实际工况匹配。优化后的运行方案使储气库调峰能力提升, 能耗指标下降, 同时延长设备使用寿命。

### 3.3 安全风险智能预警与应急决策

安全风险智能预警系统整合多源监测数据, 构建覆盖地质、设备、工艺的全维度风险识别网络。地质监测模块通过分析微地震信号与地表位移数据, 实时评估断层活化风险; 设备监测模块利用气体检测仪与压力传感器, 及时发现管线泄漏征兆; 工艺监测模块通过流量平衡分析识别非法入侵行为。风险预警系统采用多级告警机制, 根据风险等级自动触发不同响应流程, 对重大风险立即推送至决策终端并启动应急预案。应急决策支持模块内置知识图谱与案例库, 当风险发生时, 系统快速匹配历史相

似场景,提供处置方案推荐与资源调配建议。虚拟演练功能支持预案动态推演,通过模拟不同处置措施的效果,辅助决策者选择最优应对策略,显著提升应急响应效率与处置成功率。

### 3.4 资产全生命周期管理

资产全生命周期管理系统实现设备从采购入库到退役处置的全流程数字化跟踪。系统建立设备电子档案,记录设计参数、安装位置、维护历史等完整信息,形成可追溯的资产台账。运行阶段通过物联网传感器自动采集设备状态数据,结合预测性维护结果生成健康度评估报告,为资产更新决策提供数据支撑。维护管理模块支持工单自动生成与闭环跟踪,从故障报修到维修验收全程留痕,确保维护工作规范执行。退役处置阶段系统评估设备剩余价值与环保要求,推荐再利用或报废方案,并生成合规处置证明。全生命周期管理使资产利用率提升,库存成本降低,同时满足审计追溯与合规管理需求。

## 4 体系实施路径与组织保障

### 4.1 分阶段实施策略

智能运维体系建设采取分步推进方式,以基础建设为起点逐步向深度智能化延伸。基础建设聚焦感知层与平台层搭建,在储气库关键设备部署高精度传感器,构建全场物联网通信网络,确保设备状态、环境参数等数据实时采集传输<sup>[3]</sup>。同时搭建数据中台,制定治理规则,完成历史数据清洗与结构化存储,为后续分析提供可靠基础。系统集成重点实现跨系统互联,将地质建模、生产自动化等异构系统接入统一平台,通过接口标准化改造与流程再造,打通信息孤岛,形成数据驱动协同机制。智能应用深化围绕核心场景升级,在设备维护部署预测性维护算法,运行调控开发智能优化引擎,安全管控建立风险预警模型,推动运维决策从经验转向数据智能驱动。

### 4.2 组织架构与人才队伍转型

组织架构调整以适应智能化转型需求,设立跨部门推进小组统筹技术、业务、管理三条线工作。技术团队负责数据治理、算法开发与系统运维,业务团队推动传统流程与智能工具融合,管理团队强化数据安全与合规管控。人才队伍建设注重复合型能力培养,通过内部培训提升运维人员数据分析技能,使其掌握基础模型应用方法;组织技术人员参加人工智能研修班,培养算法开发与优化能力;开展管理人员数字化转型培训,强化数据决策意识。建立人才激励机制,将智能应用成效纳入绩效考核,对

在模型优化、流程创新等方面表现突出的个人给予奖励,激发团队创新活力。

### 4.3 管理制度与标准规范建设

管理制度围绕数据、流程、安全三个维度构建。数据管理制度明确采集、存储、使用规则,建立数据质量追溯机制;流程管理制度规范智能工具嵌入巡检、维修等环节的操作步骤;安全管理制度制定应急响应预案,定期开展安全演练。标准规范聚焦技术接口与数据格式统一,制定传感器通信协议、数据交换接口、模型评估测试等标准文件,为系统集成与智能应用提供技术依据,并建立动态更新机制保持标准先进性。

### 4.4 网络安全与数据隐私保障

网络安全防护采用分层防御策略,在感知层部署终端安全加固模块,防止传感器被非法控制;在网络层构建加密通信通道,确保数据传输过程保密性;在平台层实施访问控制与入侵检测,阻止未授权访问与恶意攻击。数据隐私保护遵循最小必要原则,仅采集与运维直接相关的数据,对敏感信息进行脱敏处理后再用于分析。建立数据使用审批流程,任何数据调取需经多级审核并留存操作日志。采用联邦学习等隐私计算技术,在数据不出域前提下实现模型联合训练,既保障数据安全性又发挥数据价值。定期开展网络安全评估与渗透测试,识别潜在风险点并及时修复,确保智能运维体系安全稳定运行。

## 5 结束语

储气库智能运维体系构建是数字化转型的重要实践,通过四层架构与关键技术融合,实现运维全流程升级。体系在设备维护、运行调控等场景的应用,有效提升效率与安全水平。实施中需依托分阶段策略,强化组织、人才与安全保障。未来可深化新技术融合,推动体系向更智能、更高效方向发展,为能源保供提供坚实支撑。

### [参考文献]

- [1]徐高,谢芳毅,曹振瑞,等.压缩空气储能盐穴储气库技术及其智能建造工艺技术研究[J].热力发电,2024,53(9):48-59.
- [2]吴云,张凯,张雪辉.废弃巷道地下储气库复合结构变形特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(6):1299-1310.
- [3]黄平,马科笃,林波,等.储气库注气压缩机组精益管理探索与实践[J].压缩机技术,2024(6):45-49.