面向风险智能管控的陆上油气安全智慧站场建设研究

陈壮志[1] 宋 旭[2] 张健威[2] 阎红巧[2] 田 琨[2] 樊志强[2]

1. 国家应急管理部， 北京 100054；

2. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司， 北京 102200

摘 要：为应对中国陆上石油天然气开采企业装备规模庞大，且呈现连续生产、点多线长、分布广泛及不间断运行等特点带来的突出本质安全风险，开展陆上油气安全智慧站场建设研究。结合油气行业特殊工况与安全监管需求，提出安全智慧站场的定义和内涵，构建了融合边缘智能、多源数据融合、平台化服务与业务场景驱动的四层架构体系。体系针对油气站场高风险、多干扰、强耦合的生产环境，在边缘计算及物联网层引入轻量化人工智能模型与实时协议适配机制，在数据存储与治理层建立基于行业标准的多源异构数据融合与冲突消解模型，在平台服务层封装可复用的安全预警与诊断微服务，在业务应用层实现覆盖“监测—预警—处置—优化”的全流程闭环管理。在此基础上，设计了包括基于多参数趋势关联与机理模型的生产过程异常预警、基于小样本迁移学习的作业现场视频智能识别、基于振动频谱与健康度模型的动设备故障预警、基于自然语言处理与知识图谱的风险隐患大数据分析等典型智能应用。研究实践表明，通过构建“感知—分析—决策—执行”一体化的智能安全管控体系，可推动基层站场安全生产管理模式从静态分析向动态感知、从事后应急向事前预防、从单点防控向全局联防的深刻转变，实现全流程风险的精准识别、超前预警与自适应优化，显著提升本质安全水平。

关键词：石油天然气；安全智慧站场；监测预警；智能分析；风险管控

DOI：10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2026. 04. 014

Research on the construction of onshore oil and gas safety and intelligent stations for risk intelligent control

Chen Zhuangzhi[1], Song Xu[2], Zhang Jianwei[2], Yan Hongqiao[2], Tian Kun[2], Fan Zhiqiang[2]

1. Ministry of National Emergency Management, Beijing, 100054, China;

2. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology Co., Ltd., Beijing, 102200, China

Abstract: To address the prominent intrinsic safety risks arising from the large equipment scale, continuous production, numerous sites distributed over long distances, wide geographic spread, and uninterrupted operation characterizing China's onshore oil and gas extraction enterprises, this study investigates the construction of intelligent safety stations for onshore oil and gas. Combining the special working conditions and safety supervision requirements in the oil and gas industry, the paper proposes the

收稿日期：2026-02-07

基金项目：应急管理部重点科技计划项目“陆上油气田安全生产智能风险防控关键技术研发与示范应用”（2024EMST090901）

作者简介：陈壮志（1980-），男，工程师，硕士，主要从事石油天然气开采安全监管等方面的研究工作。E-mail：13910951017@gwmail. com. cn

通信作者：宋 旭（1982-），女，高级工程师，硕士，主要从事油气田开发生产及安全环保数智化建设等方面的研究工作。E-mail：songx_dod@ petrochina. com. cn

definition and connotation of safety smart stations and constructs a four-layer architectural system integrating edge intelligence, multi-source data fusion, platform services, and business scenario-driven design. Targeting the high-risk, interference-prone, and strongly coupled production environment in oil and gas stations, the system introduces lightweight AI models and real-time protocol adaptation mechanisms in the edge computing and IoT layer; establishes a multi-source heterogeneous data fusion and conflict resolution model based on industry standards in the data storage and governance layer; encapsulates reusable safety early warning and diagnostic microservices in the platform service layer; and achieves full-process closed-loop management covering the entire workflow of "monitoring-early warning-disposal-optimization" in the business application layer. On this basis, typical intelligent applications were designed, including production anomaly early warning based on multi-parameter trend correlation and mechanistic models; on-site video intelligent recognition via few-shot transfer learning; dynamic equipment fault warning based on vibration spectrum and health index models; and risk and hazard big data analysis leveraging natural language processing and knowledge graphs. Research practice shows that by constructing an integrated intelligent safety control system incorporating "perception-analysis-decision-execution," the safety production management mode at grassroots stations can be fundamentally transformed from static analysis to dynamic perception, from post-event emergency response to preemptive prevention, and from isolated prevention to coordinated global defense. This enables precise risk identification, proactive early warning, and adaptive optimization throughout the entire process, significantly enhancing intrinsic safety levels.

Keywords: Oil and gas; Safety and intelligent station; Monitoring and early warning; Intelligent analysis; Risk management and control

0　前言

中国陆上石油天然气开采企业遍布全国 30 个省级行政区,分布领域广,气候与地域特征差异显著;中国石油、中国石化、中国海油、延长石油等企业油气装备规模庞大,具有连续生产、点多线长面广、不间断运行等特点,本质安全风险高[1]。其生产作业面临高温高压、易燃易爆、有毒有害、井喷失控、油气泄漏等极高安全风险,"三高一超"油气井生产和大型压裂等高风险作业占比大,加之劳动人员密集、承包商流动性强,导致各类事故隐患与安全风险交织叠加、易发多发。

"十四五"以来,国家层面高度重视陆上石油天然气开采安全治理体系与能力现代化,工业互联网、大数据、人工智能(Artificial Intelligence,AI)等新一代信息技术快速发展,为油气行业安全生产的数字化转型与智能化升级奠定了坚实的技术基础。特别是《"工业互联网 + 安全生产"行动计划(2021—2023 年)》《安全生产治本攻坚三年行动方案(2024—2026 年)》等一系列文件的出台,以"深入实施工业互联网创新发展战略"和"提升应急管理体系和能力现代化"为主线,着力推动构建"工业互联网 + 安全生产"新型能力,为行业坚持源头防范、提升本质安全水平与安全监管效能,从根本上消除事故隐患,提供了明确的实施路径[2-4]。

在此背景下,以"数智强安"为核心的安全智慧站场建设,成为推动油气行业安全生产模式根本性转变的关键举措。其核心目标在于融合先进管理理念与数智化技术,构建具备对生产全要素及全过程安全风险的全面感知、实时分析、动态管控和自适应优化能力的站场新形态。

本研究聚焦于陆上油气安全智慧站场的体系构建与关键技术应用。首先,在厘清安全智慧站场定义与内涵的基础上,结合油气生产工艺复杂、环境苛刻、风险耦合性强等特点,提出具有行业适应性的四层总体架构。其次,针对传统风险管控手段不足、单一的问题,重点研究并设计了涵盖工艺过程、作业行为、设备状态及宏观风险等多个维度的智能预警与分析模型,阐明其技术原理与实现逻辑。最后,通过典型油气企业的试点应用,验证所提架构与模型的可行性与有效性,分析其实践成效与推广价值,以期为陆上油气企业的安全智慧化转型提供系统的理论参考与实践借鉴。

1　安全智慧站场的定义与内涵

安全智慧站场建设以提升油气站场本质安全水平为核心目标,以工业互联网为数字底座,深度融合物联网、大数据、AI 等新一代信息技术,通过构建"全面感知、实时分析、智能决策、精准执行"的闭环管控体系,实现对人员、设备、环境、管理等多维安全要素的智能化监控、预警、改进与优化,通过"数智驱动"重塑油气站场的风险管控范式。

为清晰界定安全智慧站场与现有数字化站场、智能站场的差异化特征,本研究从技术内核、核心能力、管控模式三个维度进行对比分析。数字化站场主要实现数

据的采集与展示，依赖人工经验决策；智能站场在数字化基础上引入部分分析功能，但仍以单点智能为主；而安全智慧站场则以本质安全为目标，通过 AI 驱动的主动认知、跨系统协同与闭环优化，形成“感知—分析—决策—执行”一体化能力。安全智慧站场的“智慧”特质主要体现在基于数据驱动的主动认知、判断与决策能力，通过对历史数据与实时数据的深度分析，学习安全运行的内在规律，识别偏离正常状态的异常模式，并提出干预建议或自动执行控制策略，从而实现安全管理的自适应与自优化[5]。其核心内涵主要体现在以下三方面。

1）技术融合层面基于油气生产工艺流程与安全风险特征，实现边缘感知、网络传输、平台支撑与智能应用之间的有机协同。例如，在边缘侧部署轻量化 AI 模型实现实时视频违章识别与泄漏初步判断，在平台侧整合多源数据进行深度关联分析与风险研判，形成“边缘快速响应 + 平台深度分析”的协同机制。

2）业务赋能层面聚焦油气站场重要工艺环节（如脱硫、脱碳、脱水等功能单元）、关键设备（如压缩机、泵、压力容器等设备设施）、高风险作业（如动火、受限空间、高处作业等）安全管控需求，将智能化手段嵌入作业许可、巡检监控、风险预警、应急指挥等核心业务流程中，推动安全管理从事后被动响应向事前主动预防、从经验决策向数据决策转变。

3）能力提升层面构建四种核心安全能力：一是全面精准的感知能力，通过智能传感器、视频监控、无人机 / 机器人等扩大监测范围、提升监测精度；二是超前智能的预警能力，基于机理模型、数据驱动模型或混合模型，实现风险隐患的早期识别与趋势预测；三是高效协同的处置能力，通过流程引擎与移动应用实现预警信息的自动推送、处置任务的闭环跟踪与跨部门协同；四是持续优化的学习能力，利用大数据分析挖掘风险规律与管理短板，推动安全策略与管控措施的动态优化[6-7]。

2 安全智慧站场建设架构设计

针对陆上油气站场环境复杂、数据异构、风险耦合等痛点问题，本研究设计了一套松耦合、可扩展的四层安全智慧站场架构体系，在工业互联网架构的基础上，充分考虑油气行业高风险特性、现有自动化基础与安全监管业务流程，进行针对性的优化与增强，构建从数据到价值、从风险到控制的完整闭环。安全智慧站场建设架构体系见图 1。

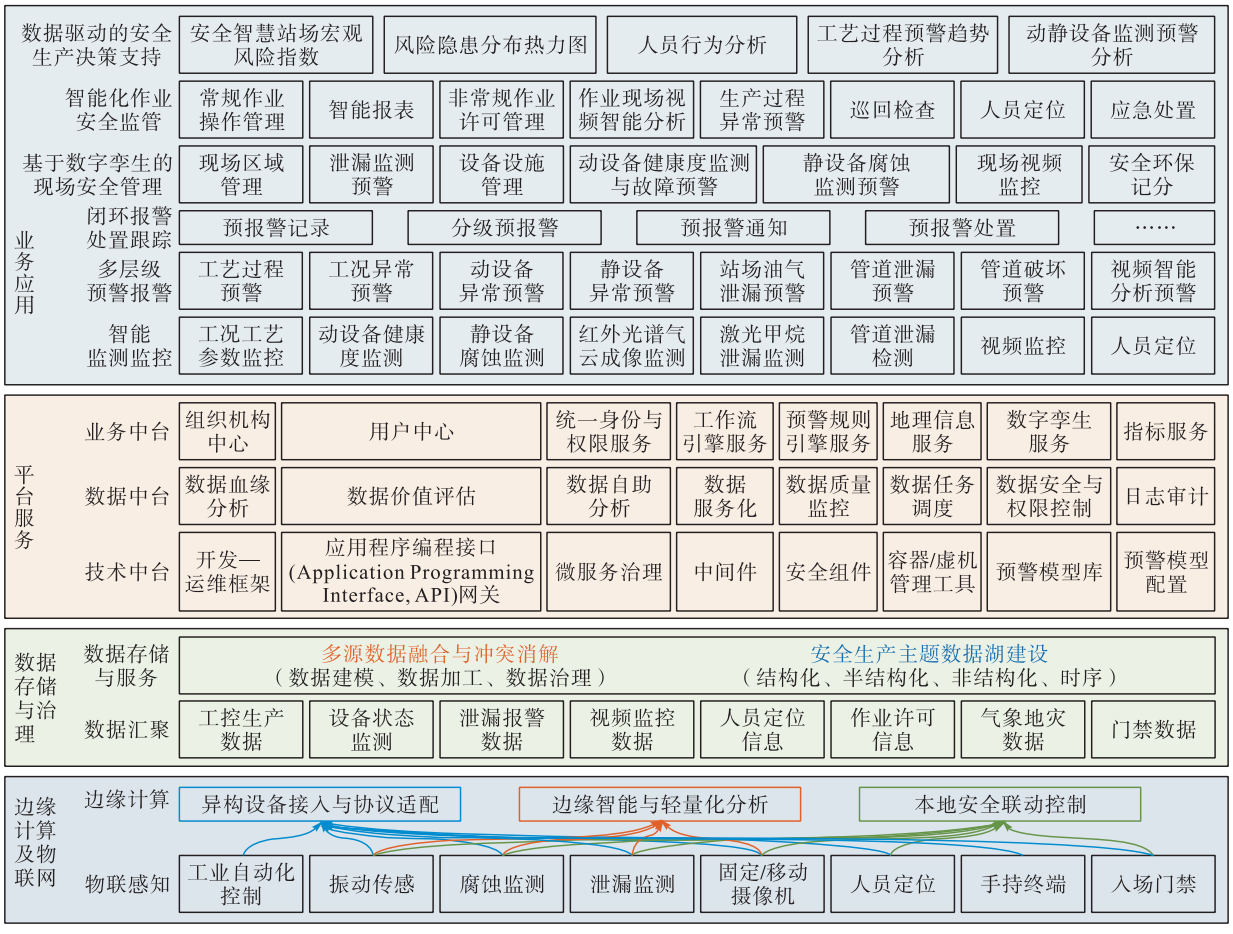

图 1 安全智慧站场建设架构体系图

Fig. 1 Framework of the safety and intelligent station construction

2.1　边缘计算及物联网层

本层的核心任务是完成现场各类安全相关数据的采集、处理与边缘侧快速响应。针对油气站场防爆、高低温、强电磁干扰等严苛环境,以及数据传输带宽与实时性要求,重点解决异构设备接入与协议适配、边缘智能与轻量化分析、本地安全联动控制等行业痛点。

1)异构设备接入与协议适配:兼容串行通信协议(Modbus)、开放平台通信统一架构(OPC Unified Architecture)等多种工业协议,针对激光甲烷检测仪、火焰探测器、振动传感器等油气行业专用设备开发专用接入驱动,实现安全监测设备与生产控制系统的数据统一接入。

2)边缘智能与轻量化分析:在边端 AI 计算设备中部署轻量化 AI 算法模型,实现视频流中的安全帽 /工服穿戴、烟雾火焰、人员入侵等违章行为的实时识别与报警,以及振动信号的初步频谱特征提取,减少无效视频上传,降低网络负载,并实现亚秒级本地告警响应,满足高风险作业场景的即时性要求。

3)本地安全联动控制:对于识别出的明火、可燃气体浓度超限等紧急风险,边缘层根据预设逻辑直接触发声光报警器、启动消防设备并向控制系统发送联锁停机信号,形成第一道快速安全屏障。

2.2　数据存储与治理层

本层主要负责对来自边缘层、控制系统[分散控制系统(Distributed Control System,DCS)/数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition,SCADA)]、管理信息系统(如作业许可系统、设备管理系统等)以及外部数据(如气象、地质灾害数据)的多源异构、海量数据进行汇聚、治理、融合与存储,为上层应用提供高质量、一致性的数据服务,重点解决多源数据融合与冲突消解问题,并构建安全生产主题数据湖。

1)多源数据融合与冲突消解:针对不同信息系统间同一监测点数据可能不一致问题,建立基于“五性”(如完整性、唯一性、准确性、时效性、规范性)数据质量评估的权重分配与冲突消解模型,输出最可信的“黄金数据”。如在储罐液位监测中,综合 DCS 读数、现场仪表数据和视频液位尺识别结果,通过置信度融合算法得出最终液位值。

2)安全生产主题数据湖建设:围绕“人、机、环、管”安全要素,构建设备健康、作业风险、泄漏监测等主题域模型,对清洗融合后的数据重组与聚合,形成面向安全生产分析的数据服务,支撑上层场景化应用的快速迭代。

2.3　平台服务层

本层通过微服务架构将通用的安全管控能力封装成可独立开发、部署、升级和复用的服务包,提升系统灵活性与可扩展性,重点搭建技术中台、数据中台、业务中台。

1)技术中台提供微服务治理、API 网关、容器编排、分布式事务等底层技术支撑,保障系统的高可用、高并发与安全性;重点构建预警模型库,对机理模型、数理模型、AI 模型等各类预警模型实行统一管理、版本控制与在线发布,支持模型的动态加载与热更新。

2)数据中台提供数据开发、数据服务、数据质量管理等能力,构建安全数据分析引擎,集成统计分析、机器学习、自然语言处理等算法框架,提供从数据预处理、特征工程、模型训练到服务发布的流水线工具。

3)业务中台沉淀油气站场安全管理的通用业务能力,形成可复用的微服务群。关键业务服务包括:统一身份与权限服务,实现用户、角色、岗位的精细化管理,支持与站场现有系统的单点登录;工作流引擎服务为作业许可、报警处置、变更管理等业务流程提供可视化编排与驱动能力;预警规则引擎服务支持对“预警模型库”中的模型进行参数配置、阈值设定、告警等级与通知策略的灵活编排;地理信息服务(Geographic Information Service,GIS)提供站场地图、人员 /设备定位、电子围栏等空间分析能力;数字孪生服务集成三维模型,实现站场物理实体的可视化映射,为风险展示与模拟演练提供支撑。

2.4　业务应用层

本层直接面向油气站场管理人员、操作人员和安全监督人员,基于下层提供的标准化数据与服务,构建覆盖安全风险防控全流程的智能业务应用。

1)智能监测监控中心:集成 DCS 画面、视频监控、气体监测、人员定位、设备状态等信息,实现“一屏观全站”。区别于传统监控,基于规则或模型,自动标记异常视频画面、高浓度气体区域、超员作业区域等,并关联展示相关参数趋势。

2)多层级的预警报警平台:接收来自边缘侧快速报警和平台侧深度分析预警,按照“预警(早期异常)—报警(确认异常)—事故报警(已发生事件)”进行分级分类。预警模型融合工艺机理与数据驱动,有效识别潜在风险,并通过报警风暴抑制与根因分析功能,辅助现场人员从海量报警中定位关键问题。

3)闭环报警处置跟踪系统:实现从报警生成、任务派发、现场处置、结果反馈到效果评估的全流程数字化管理,确保每条报警均有记录、有跟踪、有结果,形成管理闭环。

4)基于数字孪生的现场安全管理:在三维可视化环境中,实现设备资产的健康状态监控与预防性维修提醒等全生命周期管理、高风险作业的虚拟仿真与安全措施符合性检查、巡检机器人的路径规划与任务管理。

5)智能化作业安全监管系统:集成作业许可、视频智能分析、人员定位、气体检测数据,对高处、动火、受限

空间等特殊作业进行全过程监督，同时，自动检查作业票证与现场条件（如气体浓度、监护人到位情况）的符合性，并对违章行为进行实时抓拍与告警。

6）数据驱动的安全生产决策支持系统：通过安全风险驾驶舱，融合展示宏观风险指数、风险隐患分布热力图、预警趋势分析、人员行为分析等多维度信息。利用大数据分析模型，识别重复性隐患、管理薄弱环节和系统性风险，为管理层提供科学的决策依据。

3 典型业务场景的风险智能管控技术研究

3.1 基于多参数趋势关联与机理模型的生产过程异常预警

传统基于单点阈值的报警方式易导致报警泛滥且难以揭示深层次风险。与传统的纯机理模型或纯数据驱动方法相比，本研究提出机理约束下的多模态数据融合预警方法，以质量守恒、能量平衡、流体力学为先验约束，以长短期记忆网络（Long Short-Term Memory，LSTM）、随机森林、自适应卡尔曼滤波为数据驱动工具，构建“机理定边界、AI 挖规律”的混合模型，实现对工艺异常的早期识别、趋势预判、根因定位、低误报。如在管线冻堵预警中，机理模型提供压差—温度耦合的趋势基线，而 LSTM 则学习历史正常工况下的残差分布。该方法能够辅助现场人员高效排查异常工况成因，并在 DCS 系统触发报警之前发出预警信号，从而实现对风险更超前、更精准的管控[8-10]。部分适应于陆上石油天然气站场生产过程异常预警模型见表 1。

表 1 安全智慧站场生产过程异常预警模型表

Tab. 1 Abnormal warning model for production process of safety intelligent station

模型类别	模型名称	模型规则	基础原理
联合站	储罐溢油监测预警	储罐液位达到安全液位后，外输泵运行状态未启动，或泵启动后罐液位未出现下降	液位—泵状态逻辑状态机模型，结合时序控制与异常模式识别算法
	储罐泄漏监测预警	基于进出口流量计算理论液位，并对比 DCS 系统实时监测液位，差值大于阈值	质量平衡原理，采用自适应卡尔曼滤波算法处理噪声
	剩余应急存储能力预警	外输泵异常停机后，基于液位、进出口流量等数据，预测站库的剩余储存能力及可用应急时间	流体力学与质量守恒原理，构建实时动态预测模型
	泵气蚀预警	电流和压力波动变大，泵体振动变大	振动频谱分析与电流谐波检测，提取特征频率幅值等指标；采用随机森林分类器进行故障模式识别与预警
	加热炉原油管线堵塞	在一定时间范围内，进口压力升高，出口压力下降，压差增大	热力学能量平衡模型与压差—流量耦合分析
	外输泵空转预警	罐液位处于低限时，泵处于运转状态或液位持续下降	液位—泵运行状态逻辑判断与流量—液位关联分析
	沉降罐破损预警	罐液位低于限值时，液位持续下降	质量守恒与渗流模型，结合历史泄漏数据训练异常检测模型
天然气处理厂	管线冻堵预警	在一定时间范围内，进口温度低于限值，且出口压力呈快速上升趋势，上升速度超过限值	热力学模型与压力—温度耦合分析
	联锁预警	同时判断多个触发紧急停车的参数变化率	多参数变化率协同分析模型，采用模糊逻辑或贝叶斯网络进行风险概率计算
	脱乙烷塔进料冻堵预警	脱乙烷塔压力上升、脱甲烷塔底液烃流量下降	多塔系统物料平衡与热力学关联分析
	脱甲烷塔顶冻堵	压差上升，塔顶温度持续降低	塔器压差—温度耦合机理模型，采用小波变换检测趋势突变点
	脱甲烷塔底凝液中甲烷含量高	脱甲烷塔底温度低，液位上升，压力升高	气液平衡与组分分布模型，采用多元回归分析识别异常操作条件
	脱乙烷塔顶 C_3 超标	脱乙烷塔顶温度高，回流量低	精馏塔操作线方程与组分分布模型
	液化气塔底稳定轻烃不合格	液化气塔底温度低，回流量高	产品质量指标与操作参数关联模型
	液化气塔顶液化气 C_5 超标	液化气塔顶温度高，回流量高	塔顶组分与温度—回流比关联模型
	脱乙烷塔底乙烷含量高	脱乙烷塔底温度低，液位上升，液化气塔压力升高	多塔系统物料与能量平衡模型

续表

模型类别	模型名称	模型规则	基础原理
天然气净化厂	脱硫塔安全阀起跳预警	压力连续上升,一段时间内将触发安全阀起跳	压力趋势预测模型,结合安全阀起跳压力阈值与上升速率判断
	闪蒸罐安全阀起跳预警	压力连续上升,一段时间内将触发安全阀起跳	闪蒸过程压力—温度—流量耦合模型,采用时间序列分析与回归预测
	脱硫塔液位超低联锁预警	同时判断多个触发紧急停车系统联锁的参数变化率	多变量协同变化率检测模型,采用模糊综合评价与风险概率计算
	脱硫塔发泡预警	脱硫塔差压波动大;闪蒸气量增大,系统液位波动大;再生塔塔顶温度波动,酸气量波动	气液两相流与泡沫形成机理模型,采用多尺度特征提取与隐马尔可夫模型进行发泡状态识别
	高温蒸汽发生器管束串漏	高温循环泵压力波动,流量波动,高温导热油膨胀罐液位上升,压力上升	热力系统能量与质量平衡模型,采用多传感器数据融合与异常模式匹配算法
	导热油炉超温预警	对比正常运行温度,导热油炉出口温度明显持续上升;热媒循环泵压力出现波动,泵压降低	传热模型与流体动力学分析,采用温度—压力—流量多变量关联分析
	甲醇回收装置塔底水异常	进料量增大,进料温度偏低;回流量增大;原料水含醇量增大;塔底温度偏低	甲醇—水体系相平衡与操作线模型,采用主成分分析与聚类算法识别异常操作区间

1)模型中的阈值(如压差上升速度、温度变化率等)并非固定值,而是基于历史正常操作数据均值的 $\pm 3\sigma$ 统计分布、设备设计参数、工艺安全限制(如安全阀起跳压力)以及专家评估综合确定,并根据站场负荷等因素动态调整。

2)多参数关联分析引入参数间的逻辑与时序关系。如储罐泄漏监测预警不仅会对比进出流量差与液位变化,还能结合温度对密度的影响进行补偿计算,并使用卡尔曼滤波算法对测量噪声进行平滑处理,提高小泄漏识别灵敏度。

3)重点关注参数的变化趋势与变化速率,而非瞬时值。如管线冻堵预警同时监测进口温度的下降趋势和出口压力的上升速率,当两者组合模式符合冻堵初期特征时即发出预警,远早于压力达到高高报警限。

4)每个预警模型均对应明确的工艺异常模式,预警时不仅提示结果,还通过关联参数的趋势图展示异常演变过程,辅助现场技术人员快速定位。

3.2　基于小样本迁移学习的作业现场视频智能分析

针对油气站场生产与作业环境的特定需要,研发基于小样本迁移学习的智能违章识别模型,重点对站场生产区域、高频率施工作业活动、风险突出的特殊及非常规作业中违规违章行为,实现实时监测、智能分析与主动预警,从而构建起一道由 AI 驱动的“主动防御”屏障,从根本上削减现场安全隐患,降低安全事故发生概率,提升站场安全监管的效率和精准度。部分适应于陆上石油天然气站场作业现场视频智能分析模型见表 2,技术关键点如下。

1)针对油气站场光照变化、视角多样、目标遮挡等复杂视觉挑战,选用轻量化且高精度特性的 YOLOv8 目标检测算法作为基础框架[11-12];为攻克静电释放器、便携式气体检测仪等特定小目标及关键安全设施的检测难题,模型在架构层面深度融合了注意力机制,使算法能够像人眼一样“聚焦”于关键区域,抑制复杂背景干扰;同时引入特征金字塔网络(Feature Pyramid Network,FPN),实现多尺度特征的深度融合,确保微小目标在远距离或低分辨率下依然能被精准锁定,提升模型对站场环境的强鲁棒感知能力。

2)使用站场现场图片和视频帧数据对预训练模型进行微调;针对罐区、特殊作业现场等高风险复杂场景,采用深度学习小样本扩充方法[13],利用生成对抗网络(Generative Adversarial Networks,GANs)或元学习策略,对现场采集的有限图片和视频帧进行样本扩充与场景增广,训练出高度适配特定复杂背景的专用识别模型,以解决油气行业高危场景样本稀缺的痛点,同时,使模型具备认知泛化能力,能够在从未见过的复杂背景中准确识别出违章行为,实现从“记住图像”到“理解场景”的跃升。

3)对于关键高风险行为,探索视频分析与传感器数据时空对齐的多模态融合验证。对于进入含硫场所未佩戴便携式气体报警仪等高危行为,本研究创新性地探索多模态融合认知算法,打破数据孤岛,将视频流分析结果与固定式硫化氢传感器的实时浓度数据、人员的精确定位信息进行时空对齐与交叉验证。通过构建多源信息融合决策模型,AI 能够综合判断:在特定区域、特定

时间，若人员未佩戴设备且区域硫化氢浓度超标，则触发最高级别报警，降低了误报率，提升了风险研判的精准度。

4）在试点应用中，针对安全帽、工服等通用识别场景，模型的准确率稳定在 95% 以上，召回率超过 90%，有效平衡了漏报与误报。在计算效率上，得益于模型剪枝与推理加速优化，单帧图像处理时间低于 200 ms，满足实时视频流分析的需求。

表 2　安全智慧站场作业现场视频智能分析模型表

Tab. 2　Intelligent video analysis model for safety and intelligent station operation site

模型类别	模型名称	适用场景	识别准确率
常规算法	人员佩戴安全帽识别	站场生产区、作业区	≥95%
	人员穿着工服识别	站场生产区、作业区	≥95%
	明火识别	站场生产区、作业区	≥95%
	烟雾识别	站场生产区、作业区	≥95%
	吸烟识别	站场生产区、作业区	≥95%
	接打手机识别	站场生产区、作业区	≥95%
	油品泄漏识别	站场生产区、作业区	≥95%
	区域入侵	站场生产区、作业区	≥95%
	睡岗识别	站场生产区、办公区	≥95%
	脱岗识别	站场生产区、办公区	≥95%
特定场景算法	上罐前触摸静电保护装置	站场生产区、罐区	≥90%
	进入含硫场所未佩戴便携式气体报警仪	含硫站场生产区、作业区	≥90%
	管线周边机械作业或重型车辆通过识别	管道高后果区	≥90%
	作业现场监督人、监护人检测	特殊作业现场	≥90%
	监控画面遮挡	特殊作业现场	≥95%
	高处作业未正确佩戴安全带	高处作业现场	≥90%
	人员佩戴绝缘手套识别	临时用电区域或高压配电室	≥90%
	装卸场站装卸作业	装卸作业现场	≥90%
	受限空间未佩戴便携式气体报警仪检测	受限空间作业现场	≥85%
	吊臂下站人检测	吊装作业现场	≥85%

3.3　基于振动频谱与健康度模型的动设备故障预警

泵、压缩机等机械设备健康监测有利于保障设备安全稳定运行、减少生产事故、避免人员伤亡[14-15]，传统设备监测依赖人工看谱、固定阈值，难以在早期发现微弱故障，易导致非计划停机。本研究构建机理频谱特征、深度学习健康评估、剩余寿命预测的混合驱动模型，形成“监测—诊断—预测”一体化动设备健康管理方案，可实现早发现微弱故障、精准预测劣化趋势、量化支撑维修决策。技术方案通过提取峭度、包络谱峰值等早期敏感特征，并结合健康度指数（Equipment Health Index，EHI）时序预测模型，能够捕捉到从正常到早期故障的转折点，为预防性维修提供可靠依据。以天然气净化厂为例，在循环泵、增压泵及助燃空气鼓风机等关键动设备上部署振动传感器，实时监测其运行过程中三轴向振动、温度、电流、转速及转子轨迹等多维参数，并基于实时频谱分析技术，及时识别电机与泵体的潜在故障；通过设备健康状态的联动监控，实现预防性维修，并根据设备的故障类型、性质与发生部位，制定更具针对性的维修与保养策略，从而最大限度提高机泵设备的运行效率，防范设备事故的发生。核心逻辑如下。

1）在关键设备上部署振动、温度、转速、电流等多参数传感器，采集高频振动信号与工艺运行参数，构建多维度状态感知环境。

2）对振动信号进行时域、频域和时频域（如小波变换）分析，提取与故障相关的特征值（如振动总量、特征频率幅值、峭度、包络谱峰值等）；基于专家知识库与机器学习分类器（如支持向量机、随机森林等），构建故障诊断模型，可识别不平衡、不对中、轴承损坏、齿轮磨损等典型故障模式。

3）健康度评估与趋势预测：构建设备 EHI 模型，该

指数由多个关键特征指标加权计算得出。具体计算公式见式(1)。

$$X_{EHI} = \sum i = 1nw_i \cdot f_i(x_i) \quad (1)$$

式中：X_{EHI}为设备综合健康度指数；x_i 为第 i 个特征参数的实测值(如振动速度有效值、温度、峭度等)；f_i 为第 i 个特征参数归一化函数(将各参数映射到 0 ~ 100 分)；w_i 为第 i 个特征参数权重系数(满足 $\sum w_i = 1$)；n 为参与设备健康评估的指标数量，个。

通过层次分析法结合多位资深设备专家的打分确定权重，如振动烈度权重 0.4、温度权重 0.3、特征频率幅值权重 0.2、电流谐波权重 0.1。设备健康等级划分为：正常($X_{EHI} \geqslant 90$)、良好($75 \leqslant X_{EHI} < 90$)、可容许($60 \leqslant X_{EHI} < 75$)、不满意($X_{EHI} < 60$)。通过对 EHI 的历史趋势进行回归、深度学习分析，预测其劣化轨迹，实现剩余可用寿命的初步估算，为预防性维修提供决策支持[16]。

4)系统能够捕捉到设备从正常状态到早期故障(如轴承轻微损伤)的转折点，预警时间可比传统振动监测提前数周。试点应用中，通过早期预警安排计划性维修，避免了多起因设备故障导致的非计划停车和潜在泄漏风险。

3.4　基于自然语言处理与知识图谱的风险隐患大数据分析

本研究以地区企业健康、安全与环境(Health，Safety and Environment，HSE)体系为基础，依据国家标准、行业规范及企业内部管理制度，搭建“知识图谱 + 深度学习”混合分析框架，构建涵盖设备设施、特殊作业、承包商管理等 10 余个业务环节的风险—隐患多维分类标签体系。该体系包含 700 余项问题表现和 10 000 多个细粒度问题标签，并同步构建油气站场安全风险隐患知识图谱，为风险隐患的多维度精细化分析提供了结构化的知识底座，实现隐患自动标引、重复聚类、根因挖掘、管控措施符合性评估。油气生产安全风险隐患大数据分析模型主要有重复隐患识别模型、隐患热词分析模型、隐患辅助判标模型、智能语义检索模型、线性回归趋势分析模型、特殊作业管控措施符合度评估模型、重大危险源管理风险评估模型、重大危险源设备风险指数模型、特殊及非常规作业管理风险评估模型、井筒监督管理风险评估模型、安全环保监督风险评估模型、双重预防风险评估模型，其核心技术如下。

1)依据 HSE 管理体系文件、国家标准、行业规范，构建包含“设备设施—作业活动—管理要素—问题表现”的多维分类标签体系，并对标签进行标准化编码，形成油气站场安全风险隐患知识图谱[17-18]。标签体系采用五级分类：一级为专业领域(如设备、作业、管理)，二级为具体类别(如泵、压缩机、动火作业)，三级为问题类型(如泄漏、失效、违章)，四级为具体表现(如密封泄漏、接地不良)，五级为细节描述(如介质、部位)。油气站场安全风险隐患知识图谱的实体包括风险源、设备、作业活动、人员、管理措施等；关系包括导致、发生、涉及、采取等。

2)基于双向编码器表征法预训练模型对隐患描述进行语义向量化编码，构建高维语义空间，支持用自然语言描述的问题(如“机泵附近有油味”)直接检索历史隐患库，即使表述方式不同，也能精准召回语义相似的案例，极大提升历史数据的复用价值；通过训练文本分类模型，对新录入的隐患描述进行自动归类与标签匹配，降低人工标注负担 60% 以上，同时确保数据标准化的一致性，为后续分析奠定数据质量基础；通过词频统计与主题模型定期挖掘文本中的高频词与潜在主题，及时识别苗头性、倾向性风险。

3)通过跨域数据融合，将隐患数据与生产、设备、作业、环境等多源数据进行时空对齐与关联建模，构建多层次的隐患智能分析模型，基于聚类分析算法，自动识别不同地点、不同时间发生的隐患中具有相同根本原因的“重复隐患簇”，通过自然语言处理技术解析特殊作业票证中的管控措施描述，并与现场视频智能分析结果、传感器实时反馈数据进行比对验证，自动评估作业管控措施的实际执行符合度，实现管理要求与现场执行的闭环校验[19-20]。

4)基于上述分析结果，为站场、作业区及地区企业生成动态安全风险综合画像，从隐患数量、类型分布、重复率、整改时效、高风险作业占比等多个维度进行量化评估与趋势展示，直观揭示管理薄弱环节。

4　安全智慧站场建设实践成效

中国石油、中国石化、延长石油按照《陆上石油天然气安全智慧井队站场建设指南》要求，遴选 14 座信息化、数字化基础较好的油气站场，优先开展安全智慧站场试点建设。以中国石油为例，以 2022—2023 年为基准期，2024—2025 年为试点统计期，从管控能力、运营效率、经济效益、站场适配性方面开展对比验证。

1)管控能力方面，统一平台融合支撑全场景智能应用。通过三大中台深度融合，共同支撑一系列面向油气站场安全管理的智能化应用，将中台能力转化为一线可感知的管控效能。在试点建设中，技术中台的预警模型库实现对设备故障、环境异常、行为违章等近百类预警模型的统一版本管理与在线热更新，支持机理模型、数理统计模型与深度学习模型的动态加载与组合调用，使预警响应速度提升 30% 以上；数据中台的安全数据分析

引擎则通过内置的机器学习与自然语言处理流水线，对历史隐患、作业票证、传感器时序数据等进行多维度挖掘，自动识别重复隐患簇与管控措施执行偏差，为管理层提供动态安全风险画像与趋势预测，隐患根因定位准确率提高 25%，同时结合视频智能分析实现生产区域 7×24 h 不间断监控，人工监控工作量减少 70% 以上；业务中台沉淀的统一身份与权限服务、工作流引擎、预警规则引擎、GIS 与数字孪生服务，支持上层智能作业许可、电子巡检、应急模拟演练等应用灵活调用，如在特殊作业场景中，通过数字孪生服务实时映射作业现场三维态势，结合 GIS 电子围栏与人员定位数据，自动比对作业票证措施与视频智能分析结果，当检测到气体检测仪未佩戴或区域硫化氢浓度超标时，预警规则引擎立即触发多级联动告警，并通过工作流引擎驱动处置任务闭环流转，实现从感知、分析、决策到执行的秒级响应与全局联防，显著提升站场安全监管的精准度与自动化水平。

2）运营效率方面，风险管控能力显著提升。生产过程异常预警模型在三类站场应用效果差异化明显、针对性突出：在联合站重点突破储罐溢油 /泄漏、泵气蚀、管线堵等风险，预警准确率达 86% 以上，异常预警时间平均提前 2 ~ 3 h；在天然气处理厂重点突破冻堵、塔器液泛、联锁误动作等风险，预警准确率达 84% 以上，异常预警时间平均提前 3 ~ 4 h；在天然气净化厂重点突破脱硫塔发泡、串漏、超温等风险，预警准确率达 88% 以上，异常预警时间平均提前 2 ~ 4 h。其中，中国石油长庆油田试点净化厂应用后，关键工艺参数异常预警时间平均提前 2 ~ 4 h，预警准确率达 85% 以上，有效避免多起潜在的工艺波动事件。视频智能分析在中国石油西南油气田试点净化厂实现生产区域 7×24 h 不间断自动监控，日均自动识别并告警违章行为 20 余起，人工抽查监控视频的工作量减少 70% 以上。动设备健康监测与预警结合检维修数字化管理，实现设备运行趋势预测、状态实时跟踪、异常智能预警及静设备腐蚀实时监控，支撑净化装置“两年一修”，设备完好率保持在 99.7% 以上，一类设备故障率同比下降 30%，维修成本降低约 80 万元。

3）经济效益方面，社会经济效益初步显现。通过超前预警与精准干预，有效避免安全事故、环境事件及其带来的停产、赔偿、声誉损失等潜在风险，社会效益显著。通过试点统计期与基准期成本对比测算，试点站场年均可量化经济效益构成如下：设备预防性维修与非计划停机每年节约费用 65 万元 /站，能耗与工艺参数优化每年节约费用 18 万元 /站，人工巡检成本每年减少 21 万元 /站，事故风险规避每年节约费用 8 万元 /站，试点站场年均产生可量化的经济效益达百万元以上。以中国石油西南油气田试点净化厂为例，项目共接入 28 台动设备温度、振动测点 158 个，7 台静设备腐蚀监测点 288 组；基于频谱分析与健康评估模型累计触发提前预警 4 次，推送预防性检修与周期性维护建议 2 次，降低运维成本 80 余万元，设备运行整体受控率提升 36%；人工巡检成本年均减少约 25 万元。

4）站场适配性方面，多类型站场适用性与推广价值。针对油田联合站储罐、泵机组、加热炉集中的场景特点，适宜优先部署液位 /流量 /压力混合预警、视频智能分析，具备投入低、见效快的应用优势；针对天然气处理厂低温、冻堵风险突出的工况，可重点强化温度—压力—流量耦合预警，经济效益突出；针对天然气净化厂高含硫、塔器与动设备密集的生产特征，优先部署设备健康 EHI 模型、发泡 /串漏混合预警，能够实现安全管控与经济效益双优。中国石油长庆油田依托一体化智能管控平台，打破了工艺、设备、安全等专业间数据壁垒，实现跨部门风险信息共享与协同处置，有效提升管理决策的协同性和科学性；集成 GIS 地图、人员定位和视频监控的应急指挥系统，使试点站场应急响应时间平均缩短 60%。中国石油西南油气田应用智能巡检机器人及视频分析，试点站场减少常规巡检人工投入约 50%，技术人员可更专注于风险分析与决策工作。安全智慧站场建设可基本实现风险预警精准化、操作控制智能化、危险作业无人化三个目标，推动安全生产管理形成从被动反应到主动保障、从事后处理到事前预防、从静态孤立到动态连续的三大转变，有效提升本质安全水平。

5 结论

本研究聚焦陆上石油天然气安全智慧站场建设，开展了系统性的技术研究与实践探索。一是明确安全智慧站场的定义与内涵，构建融合边缘智能、多源数据融合、平台化服务与业务场景驱动的四层架构体系，可有效支撑油气站场高风险环境的智能化安全管控，为油气站场安全智慧建设提供了理论框架；二是研发涵盖工艺过程异常预警、作业现场视频智能分析、动设备故障预警、风险隐患大数据分析等典型智能应用，并在多个油气田试点验证技术可行性与有效性，实践表明可显著提升风险感知与管控能力；三是构建“感知—分析—决策—执行”一体化的智能安全风险管控体系，将安全风险的动态管控与站场生产运行有机结合，推动安全生产管理模式从静态分析向动态感知、从事后应急向事前预防、从单点防控向全局联防的深刻转变；四是实践成效显著，社会效益、经济效益初显，通过超前预警、预防性维修和智能化管理，试点站场在避免事故、降低能耗、减少人工成本等方面产生了可量化的经济效益，为油气行业数智化转型升级提供了可复制、可推广的范例。

当前,陆上石油天然气安全智慧站场建设仍处于起步与示范探索阶段,其全面推广与深度应用面临诸多挑战。未来研究与实践应围绕以下方向重点展开:一是深化技术融合与创新,重点攻关适用于油气严苛环境的低功耗、高可靠智能传感技术;研究视频、声学、红外、气体等多模态数据融合感知与联合诊断方法,探索数字孪生与物理模型的深度融合以实现更精准的模拟预测与虚拟调试;加强 AI 模型可解释性研究以提升预警结果的可信度与可接受度。二是推动“产学研用”协同与人才培养,建立企业、高校、科研院所、技术服务商共同参与的创新联合体,针对行业痛点开展联合攻关,同时加强既懂油气工艺又懂信息技术的复合型人才培养,为安全智慧站场的长期运营与优化提供人才支撑。三是强化数据安全与系统韧性,在推进智能化进程中同步重视工业控制安全、数据隐私保护与网络安全防护,建立健全一体化安全防护体系。四是建立“研发—示范—推广”全链条成果转化机制,建设一批可复制、可推广的安全智慧站场示范项目。通过技术创新与成果转化双轮驱动,推动安全智慧站场建设实现从规模扩张向质量效益的根本转变,为油气行业高质量发展构建数智化安全新防线。

参考文献:

[1] 陈壮志,那慧玲,阎红巧,等. 数字化技术提升陆上油气开采本质安全水平[J]. 油气田环境保护,2025,35(4):55-59.
Chen Zhuangzhi, Na Huiling, Yan Hongqiao, et al. Enhancing the intrinsic safety level of onshore oil and gas extraction through digital technology [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2025, 35 (4): 55-59.

[2] 邓　辉. 传统化工企业安全环保数字化工作探索与思考[J]. 数字化转型,2025,2(4):94-99.
Deng Hui. Exploration and reflections on digitalization of safety and environmental protection in traditional chemical enterprises [J]. Digital Transformation, 2025, 2 (4): 94-99.

[3] 张林鲁. 智能油田系统在油田企业安全管理中的应用[J]. 现代企业文化,2023(16):25-28.
Zhang Linlu. Application of intelligent oilfield system in safety management of oilfield enterprises [J]. Morden Enterprise Culture, 2023 (16): 25-28.

[4] 杨武艳,吴顺成,刘洪太,等. “工业互联网 + 安全生产”平台在集团级企业中的应用探究[J]. 信息化研究,2024(4):59-61.
Yang Wuyan, Wu Shuncheng, Liu Hongtai, et al. Research on the application of “industrial Internet plus safe production” platform in group-level enterprises [J]. Informatization Research, 2024 (4): 59-61.

[5] 马　涛,许增魁,常冠华,等. 数字、智能与智慧油气田价值模型[J]. 信息技术与标准化,2020(12):58-63.
Ma Tao, Xu Zengkui, Chang Guanhua, et al. Value model of digital, intelligent and smart oil and gas field [J]. Information Technology & Standardization, 2020 (12): 58-63.

[6] 陈庚晓. 基于石油石化企业的智能工厂建设思考[J]. 化工管理,2021(34):184-186.
Chen Gengxiao. Thinking about intelligent factory construction based on petroleum and petrochemical enterprises [J]. Chemical Enterprise Management, 2021 (34): 184-186.

[7] 滕奇刚,马维儒,熊立为. 油气田智能站场建设研究[J]. 信息系统工程,2024(3):113-116.
Teng Qigang, Ma Weiru, Xiong Liwei. Research on the construction of intelligent stations in oil and gas fields [J]. Information System Engineering, 2024 (3): 113-116.

[8] 王　刚,彭远春,金雪梅,等. 石油企业生产安全智能预警系统研究[J]. 石化技术,2022,29(10):72-74.
Wang Gang, Peng Yuanchun, Jin Xuemei, et al. Research on intelligent early warning system of production safety in petroleum enterprises [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29 (10): 72-74.

[9] 阎红巧,曹　瑜,吴顺成,等. 天然气净化厂过程风险监测预警模型构建方法研究[J]. 化工管理,2023(34):61-66.
Yan Hongqiao, Cao Yu, Wu Shuncheng, et al. Research on the construction method of process risk monitoring and early warning model for natural gas purification plant [J]. Chemical Enterprise Management, 2023 (34): 61-66.

[10] 王金江,关鹏婷,陈　卓,等. 基于深度学习的检修作业过程风险智能预警[J]. 中国安全科学学报,2023,33(10):16-22.
Wang Jinjiang, Guan Pengting, Chen Zhuo, et al. Intelligent warning of risk during maintenance operations based on deep learning [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (10): 16-22.

[11] 李承烨,张　震,梁哲恒,等. 目标检测模型综述[J]. 计算机研究与发展,2025,62(12):2895-2928.
Li Chengye, Zhang Zhen, Liang Zheheng, et al. Survey on object detection models [J]. Journal of Computer Research and Development, 2025, 62 (12): 2895-2928.

[12] 杨晨红,高振刚,杨瑞鹏,等. 轻量化目标检测模型算法综述[J]. 机电工程技术,2025,54(6):84-95.
Yang Chenhong, Gao Zhengang, Yang Ruipeng, et al. Survey of lightweight object detection model methods [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54 (6): 84-95.

[13] 章　瑞,许　斌,张　亮,等. 数智油田建设中的小样本数

据处理方法研究[J]. 中国管理信息化, 2025, 28(15):231-235.
Zhang Rui, Xu Bin, Zhang Liang, et al. Research on small sample data processing method in the construction of Shuzhi Oilfield [J]. China Management Informationization, 2025, 28 (15): 231-235.

[14] 雷亚国,贾 峰,周 昕,等.基于深度学习理论的机械装备大数据健康监测方法[J].机械工程学报,2015,51(21):49-56.
Lei Yaoguo, Jia Feng, Zhou Xin, et al. A deep learning-based method for machinery health monitoring with big data [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (21): 49-56.

[15] 王 冬,侯炳昌,王玉婷,等.稀疏测度和复杂性测度及其在设备健康监测中的研究进展[J].机械工程学报,2025,61(1):123-139.
Wang Dong, Hou Bingchang, Wang Yuting, et al. Advances in sparsity measures and complexity measures for machine health monitoring [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61 (1): 123-139.

[16] 杨艳芳,邢亚辉,舒 亮,等.基于孪生数据的设备健康度评估方法研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(6):97-103.
Yang Yanfang, Xing Yahui, Shu Liang, et al. Research on equipment health assessment method based on twin data [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50 (6): 97-103.

[17] 马端祝,孙秉才,刘春昕,等.智能化赋能石油石化行业本质安全[J].石油科技论坛,2025,44(3):66-75.
Ma Duanzhu, Sun Bingcai, Liu Chunxin, et al. AI technology empowers petroleum and petrochemical industry improve intrinsic substantial safety [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2025, 44 (3): 66-75.

[18] 宋 旭,李宏斌,单吉全,等.基于知识图谱和机器学习的油气田地面方案智能平台建设[J].天然气与石油,2025,43(1):30-37.
Song Xu, Li Hongbin, Shan Jiquan, et al. Development of an intelligent platform for oil and gas field surface development scheme based on knowledge graph and machine learning [J]. Natural Gas and Oil, 2025, 43 (1): 30-37.

[19] 利锐欢,谢玉祺.基于大数据的安全生产人工智能应用分析[J].科技资讯,2022,20(14):76-78.
Li Ruihuan, Xie Yuqi. Application analysis of safety production artificial intelligence based on big data [J]. Science & Technology Information, 2022, 20 (14): 76-78.

[20] 牛明勇,左振涛,徐思宁,等.基于文本挖掘的油气事故隐患精细化分析[J].工业安全与环保,2025,51(9):25-30.
Niu Mingyong, Zuo Zhentao, Xu Sining, et al. Fine-grained analysis of oil and gas accident hazards based on text mining [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2025, 51 (9): 25-30.

中国石油首个“地热+生物气”制工业蒸汽项目投用

2026 年 6 月 28 日,由冀东油田作为项目建设主体的中国石油首个“地热+生物气”制工业蒸汽项目在山东省东营市东营经济技术开发区投用,标志着冀东油田“地热+”产业创新模式已形成,为新能源在工业供热领域的规模化应用树立了标杆。

山东东营经济技术开发区“地热+生物气”综合供能项目,是冀东油田公司控股的绿色能源耦合示范工程。项目采用“地热+生物气”双绿色能源耦合工艺,通过中深层地热对锅炉给水预加热,再结合生物质气化燃烧补能,生产 1.6 兆帕、250 摄氏度过热蒸汽,配套建设 2 台 35 吨/小时蒸汽锅炉、1 台燃炭渣锅炉、6 台 15 吨/小时气化炉及 5 800 米蒸汽管网,形成 74 吨/小时蒸汽供应能力,年供热量可达 118 万吉焦,折合供暖面积为 472 万平方米,可为东营经济技术开发区新材料产业园提供集中供蒸汽服务。

项目坚持“采灌平衡、同层回灌”原则,充分利用区域稳定地热资源与充足生物质原料,实现资源高效循环利用。投产后年可节约标煤 4.03 万吨,年减排二氧化碳 8.73 万吨,蒸汽价格较燃气锅炉大幅降低,兼具显著的环保效益与经济竞争力。

作为中国石油首个“地热+生物气”制工业蒸汽项目,该项目技术路线成熟可靠,形成了可推广、可复制的“绿色能源+工业供能”开发模式。

(杨 寒 摘编自中国石油新闻中心 http://center.cnpc.com.cn/bk/system/2026/07/01/030196963.shtml)