

天然气地下储气库智能化建设关键技术及其发展趋势

糜利栋¹,曾大乾¹,刘华¹,郭艳东¹,李彦峰²,李遵照³,孙旭东⁴,张广权¹,鲁春华¹,王佩弦³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100026;2. 山西能源学院,山西太原 030600;3. 中国石化大连石油化工有限公司,辽宁大连 116045;4. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100026)

摘要:中国储气库在数字化转型和智能化建设方面已经取得了重要成果,储气库智能化建设发展了油气藏-井筒-管网一体化耦合模拟和数字孪生等关键技术。搭建了智能储气库云平台框架,采用“数据+平台+应用”的建设模式,充分利用数据中心、物联网和工业互联网等新型基础设施,支撑各业务板块管理、研究、生产和服务等需求。储气库智能化建设研发了储气库信息化管理平台、储气库一体化综合管理平台、基于数字孪生一体化仿真的决策系统和储气库全生命周期数字化平台。智能储气库未来建设将重点发展地质体数字孪生、高精度建模、可视化动态展示、智能运营、实时智能风险预警、工业软件国产化以及北斗卫星导航系统、卫星互联网等新技术。

关键词:数字孪生;协同优化;工业物联网;地理信息系统;智能储气库;天然气

中图分类号:TE822

文献标识码:A

Key technologies and development trends for intelligent construction of underground gas storage facilities

MI Lidong¹, ZENG Daqian¹, LIU Hua¹, GUO Yandong¹, LI Yanfeng², LI Zunzhao³, SUN Xudong⁴, ZHANG Guangquan¹, LU Chunhua¹, WANG Peixian³

[1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100026, China; 2. Shanxi Institute of Energy, Taiyuan, Shanxi 030600, China; 3. Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Co., Ltd. (Dalian), SINOPEC, Dalian, Liaoning 116045, China; 4. Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Beijing 100026, China]

Abstract: Remarkable achievements have been attained in the digital transformation and intelligent construction of China's underground gas storage (UGS) facilities, shown as follows. (1) Key technologies, including the hydrocarbon reservoir-wellbore-pipeline network integrated coupling simulation and digital twins, have been developed for the intelligent construction of UGS facilities. (2) An intelligent cloud platform framework for UGS facilities has been established in the mode of data + platform + application. This platform fully utilizes new-type infrastructure like data center (DC), Internet of Things (IoT), and Industrial Internet of Things (IIoT), aiming to meet the demand for the management, research, production, and services of various business segments. (3) The intelligent construction of UGS facilities has led to the R&D of a UGS information management platform, UGS integrated management platform, decision support system using digital twin-based integrated simulation, and a digital platform covering the entire lifecycle of UGS facilities. The future intelligent construction of UGS facilities will focus on the development of new technologies, encompassing digital twin technologies for geological bodies, high-precision modeling, dynamic visual representations, intelligent operation, real-time intelligent risk warning, industrial software localization, and technologies based on the Beidou Navigation Satellite System (BDS) and satellite internet.

收稿日期:2023-07-12;修回日期:2024-02-26。

第一作者简介:糜利栋(1987—),男,博士、高级工程师,气藏工程及数值模拟、地下储气库建设及运行优化、油气大数据人工智能。E-mail: mild158@163.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技部项目(324052)。

Key words: digital twin, collaborative optimization, Industrial Internet of Things (IIoT), geographic information system (GIS), intelligent underground gas storage (UGS), natural gas

引用格式: 糜利栋, 曾大乾, 刘华, 等. 天然气地下储气库智能化建设关键技术及其发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 581-592. DOI: 10.11743/ogg20240220.

MI Lidong, ZENG Daqian, LIU Hua, et al. Key technologies and development trends for intelligent construction of underground gas storage facilities[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 581-592. DOI: 10.11743/ogg20240220.

国家能源局2023年发布的《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》^[1]中针对油气行业提出了以数字化智能化技术助力油气绿色低碳开发利用, 推动油气管网的信息化改造和数字化升级, 推进智能管道、智能储气库建设, 提升油气管网设施安全高效运行水平和储气调峰能力的意见。

中国石化积极应对数字革命挑战、加快数字化转型, 全面推进智能油气田、智能工厂、智能加油站、智能研究院等一系列智能化建设^[2]。在智能油气田方面超前布局, 2013年编制完成了智能油气田整体规划和总体设计; 2015年开展的油气生产信息化、勘探开发业务协同系统(EPBP)建设, 提升了油气田开发生产的数字化、自动化程度; 2017年提出“一切系统皆上云, 一切开发上平台”的工作思路^[3], 构建了基础是数据, 核心是平台, 应用是轻量化APP的“数据+平台+应用”云服务建设新模式; 2018年, 在西北油田采用该模式开展了首个智能油气田试点建设^[4]; 2020年, 胜利油田基于石化智云, 构建了平台服务体系和数据治理体系, 应用数据湖技术提供统一的数据服务, 共同打造企业APP应用集群, 实现了由传统的“竖井式单体模式”向“数据+平台+应用”的云服务建设模式的转变^[3], 智能油气田试点建设已初见成效。

中国储气库信息化和自动化程度较高, 基本实现了自动化远程监测、控制和管理^[5], 但储气库数字化转型基础薄弱, 升级难度大。中国数字化储气库建设尚处于起步阶段, 目前实现了注采气量、温度、压力等常规生产动态数据的采集与传输, 但储气库作为系统工程, 涉及数据类型多, 信息采集难, 现有数据分散在不同专业系统中, 无法有效整合共享^[6], 仍存在核心网络、数据库、数据分析不完善, 数据使用率低等问题, 与数字化、智能化仍存在巨大差距^[7]。储气库“地质体-井筒-地面设备-管网-市场”一体化孪生技术尚未形成, 全流程数字化模拟、多方联动优化运行、安全预警等系统及库群优化智能注采等软件平台仍处于空白。现有系统不能满足智能化、智慧化储气库的发展要求^[8-11], 储气库智能化建设任重而道远。本文系统介绍了中国储气库智能化建设现状, 展望了未来储气库智能化建设的发展方向。

1 储气库智能化建设现状

1.1 智能化技术发展现状

1.1.1 油气藏-井筒-管网一体化耦合模拟

全生产流程模拟分析、可视化再现技术是建设智能油气田生产一体化的重要内容。中国石油建立了油气藏-井筒-管网一体化耦合模拟方法, 通过不同专业模拟器的无缝耦合, 实现油藏、采油、储运3个不同专业学科模型之间的数据流转和联动计算, 形成了同时满足地下产能、井筒及地面设备等约束的全生产流程一体化模拟技术, 使不同专业的工程师紧密合作, 打破专业壁垒, 从一体化的角度剖析3个专业环节对整体生产流程的制约和影响, 统一地下、地面认识, 为制定合理的生产运营方案提供了一致的理论根据, 达到降本增效的目的, 形成更真实、更自动化、更智能的智慧油气田解决方案^[12]。

1.1.2 数字孪生技术

数字孪生作为前沿关键智能技术^[13], 在油气行业的发展中具有广阔的前景。数字孪生技术指利用多源、多时空、多尺度、多概率动态数据, 构建虚拟空间模型, 模拟刻画真实油气物理世界, 实现从物探、测井、钻井、油气开采、管道、炼化和销售等领域全生命周期映射, 实现降本增效, 提高运营安全水平。数字孪生贯穿了油气行业全生命周期中的不同阶段, 目前通过构建数字孪生体收集站场各类数据, 实现了油气田的智能化管理。中国油气行业数字孪生的实践应用主要体现在勘探开发数字化、石油工程装备数字化、地质-工程一体化, 以及钻完井数字孪生体^[14]和管道数字孪生体建设等方面^[13]。建立基于web分布和应用的数字化盆地综合管理平台, 对不同探区数据进行统一描述和网页管理, 形成数字盆地可视化, 支持web 3D调用, 实现盆地结构整体剖析。

1.2 储气库智能化建设现状

1.2.1 中国石化储气库智能化建设进展

中国石化在储气库智能化建设方面开展了大量工作。研发了储气库信息化管理平台、综合管理平台、数字孪生系统和全生命周期数字化平台。

1) 储气库信息化管理平台

储气库信息化管理平台^[15]是建立在SCADA系统之上的综合性解决方案,运用了多协议工业物联网技术,实现了储气库实时运行数据的集成与可视化展示,从而确保了对储气库运行状态的实时感知与动态分析。结合注采站的关键运行参数,平台构建了异常诊断模型,识别关键设备参数的异常情况,并实现自动报警功能。通过SCADA系统,平台对集注站及井场的注采全过程进行数据采集、集中管理、远程监视与控制,实现了网络通信的智能化集中管理,使得管理人员能够及时了解生产状态和设备运行状况,为制定合理的注采方案提供指导,从而保障安全生产^[16-17]。此外,该平台充分利用工业物联网技术,实现了储气库现场设备实时数据的全面接入。为此,研发了数据接入中间件、规则引擎与数据库,确保实时数据的高吞吐桥接,为储气库的动态模拟提供及时、高精度的数据支撑。基于对储气库重点设备运行参数及工况的相关性分析,平台还构建了温度、压力等参数的动态变化模型。应用多参数异常诊断分析技术,并结合现场实时数据采集成果,建立了用户可配置、可优化的设备异常诊断模型。同时,研发了重点设备异常工况诊断系统,进一步增强了诊断分析能力。该平台还深入研究了储气库在不同工况场景下的感知、监控、诊断技术,旨在提升储气库生产运行的实时感知能力、监控能力和诊断分析能力。基于储气库实时数据的集成及可视化展示成果,结合石化智云和SpringBoot技术,研发了储气库信息化管理平台。这一平台不仅实现了储气库运行的优化,还实现了一体化模拟的信息化管理和可视化展示,为储气库的高效、安全运行提供了强有力的技术支持。

2) 储气库一体化综合管理平台

储气库一体化综合管理平台^[17-20]基于地理信息系统(GIS),利用“云技术+微服务”体系架构,形成了面向云环境的具有自主能力的技术架构体系,采用多进程架构,开发了一套集权限管理、模块集成、应用管理于一体的综合性平台,实现了对储气库选址优化、方案设计跟踪、生产运行管理及动态跟踪分析全流程一体化管理与研究,包括储气库总览、选址优化、方案设计、

生产运行、动态分析及数据管理6大子系统(图1)。

储气库总览子系统(图1a)基于GIS,通过地图的形式展示库址资源潜力、分布、运行、调峰等储气库概况,实现了储气库全流程关键参数实时动态展示。

选址优化子系统(图1b)在基于C/S架构开发的“储气库选址综合筛选信息平台V1.0”^[21]上升级成基于B/S架构版本,并根据需要将原来库址筛选评价功能进行完善优化,新增储气库库址信息导航、库址资源管理以及库址评价成果管理3个功能,并基于GIS建立起了储气库与油田企业关联信息,优化后的选址优化子系统界面简介,操作更加便捷,方便用户快速入手。

方案设计子系统(图1c)负责储气库方案设计的索引与管理工作。该系统通过建立储气库方案文档、关键参数和数据体等信息的详细台账,以图表形式直观地展示各类储气库方案的设计概况及关键参数,从而实现对储气库在不同阶段设计情况的全面追踪。此外,该系统还能有效管理不同专业方向的储气库方案文档、关键参数、数据体及图件。各专业方向的方案编制单位可上传相关文档和关键参数,经审核单位审核通过后,形成储气库方案案例库,为用户提供了多维度储气库方案的检索、查询和应用功能。实现了方案报告、关键参数、地质模型、数值模型的数字化管理;搭建了从分公司上报-储气库中心-油田部-发展计划部全流程方案审核流程,满足方案审核进度全流程跟踪及监控。

生产运行子系统(图1d)实现了对不同地区储气库群及储气库生产运行信息的全面整合与展示。该系统为管理层提供了一个便捷的GIS导航平台,使他们能够实时了解储气库的生产状态、调峰能力以及气体注入情况。此外,该系统还跟踪监测储气库的资产状况、调峰表现以及注采井的运行状态,并深入分析储气库每日的气量计划与实际入库量,展示阶段性的气量变化情况。通过汇总不同储气库的注采峰谷运行动态,并依托GIS技术展示各储气库的气源及市场流向,该系统为管理层提供了一个全面、直观的生产运行监控平台。实现了储气库(单库)注采完成情况、生产运行参数,注采井、监测井、压缩机等数据的统计分析及管理;搭建了气源-储气库-消费市场的一体化调峰优化管理系统。

动态分析子系统(图1e)全面展示储气库动态分析成果及动态分析需求。实现了储气库单井钻、测、录静态信息管理;可开展注采井、监测井等生产动态对比分析,基于气源-库存-消费市场的储气库智能配产配注,实时评价不同类型储气库库存。

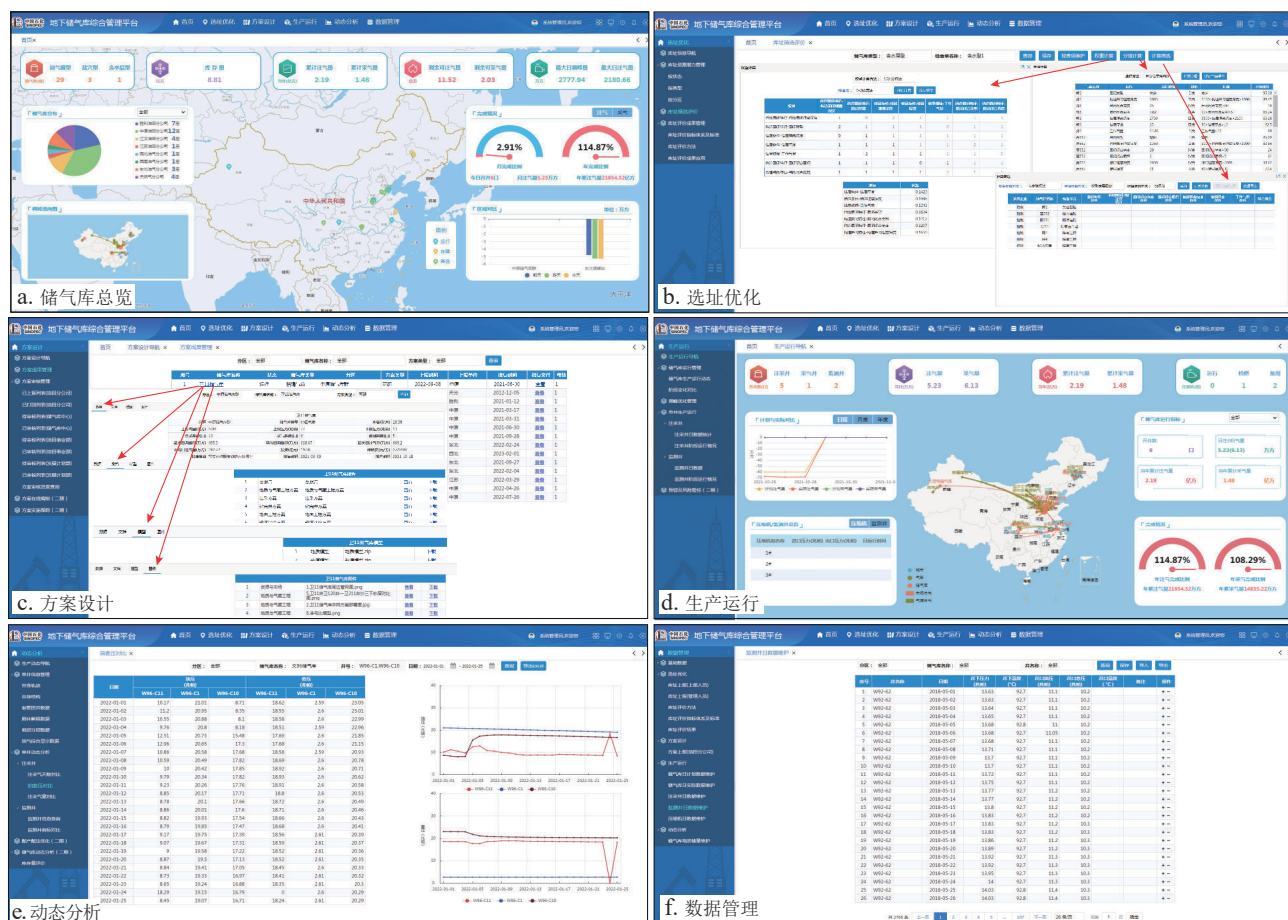


图1 储气库一体化综合管理平台

Fig. 1 An integrated management platform for UGS facilities

数据管理子系统(图1f)是平台的基础,支撑平台的运行,按照统一数据标准和规范对数据分类维护、采集和管理,提高了数据的管理效率和水平。

3) 基于数字孪生一体化仿真的决策系统

基于储气库生产工艺仿真建模技术,构建“注采井/注采管道—注采站”全工艺仿真模型,针对关键参数设计自动校正逻辑,依据生产数据校调全工艺模型,基于全工艺仿真模型,研发开发辅助生产决策系统智能化应用平台(图2),实现实时模拟计算与虚拟计量、注采气产能规划分析、生产工艺优化及风险监测预警等,提供储气库全生命周期的动态模拟解决方案。

一体化工艺仿真建模包括注采井工艺模型,注采站工艺模型以及一体化模型集成与校调。注采井工艺模型从上到下包括井口装置、完井管柱和井底结构3个部分,注采井建模数据如下表1所示。基于井筒的TVD(垂直深度)和MD(测量深度)数据,构建井筒的物理结构;基于注采井表层套管、技术套管、油层套管和油管尺寸数据,构建注采井物理模型;经生产数据校核与验证,确定井筒管壁粗糙度、井筒总传热系数、流体

物性数据等,并确定环境温度与压力。注采站工艺模型包括注气工艺模型和采气工艺模型。注气工艺模型主要包括来气计量工艺模型、生产分离/计量分离工艺模型、过滤分离工艺模型、注气增压工艺模型、注气阀组工艺模型、井口/管线工艺模型;采气工艺模型主要包括井口/管线工艺模型、采气阀组工艺模型、采气分离/计量分离工艺模型、脱水脱烃工艺模型、TEG再生工艺模型及外输计量工艺模型。将注采井工艺模型和注采站工艺模型一体化集成,采用现场实际生产数据进行系统调试,确保模型在动态模拟状态下与现场生产工况保持一致,保证计算的稳定性与准确性。根据生产现场已知的数据条件,进行注采气流程调节逻辑的调试,实现注采井模型、注采管线及注采工艺模型集成的一体化动态机理模型模拟计算。

以生产数据为基础,一体化模型为核心,开发了储气库辅助生产决策系统(图2),包括注采井与注采管线虚拟计量、水合物风险监测与抑制剂量优化、关键设备实时监测与预警及注采气产能规划分析子系统,实现了储气库实时生产监控、工艺操作优化、注采气方案

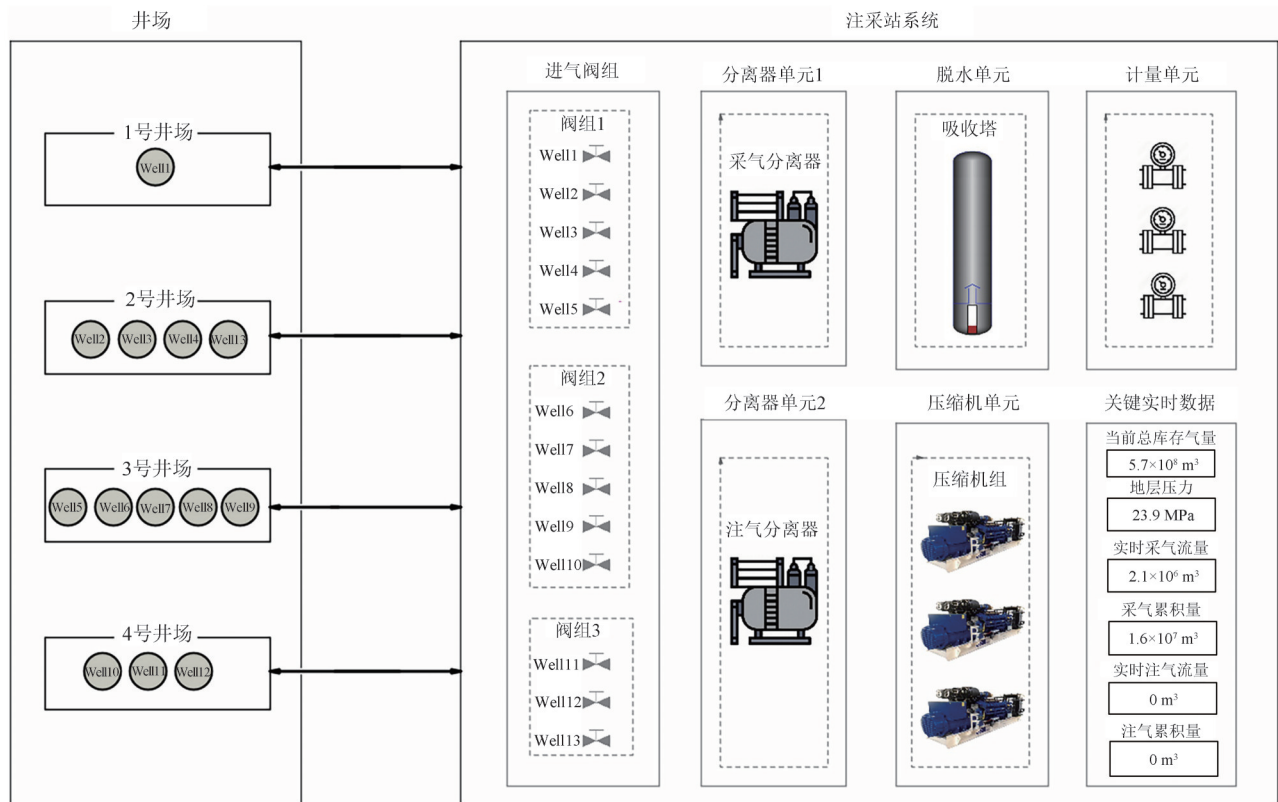


图2 储气库辅助生产决策系统

Fig. 2 A production decision support system for UGS facilities

表1 注采井建模数据分类

Table 1 Classification of data for modeling of injection and production wells

序号	高程	构造	流体物性	设备参数	环境
具体参数	管道沿线高程、井眼轨迹	管道内径、粗糙度、管壁设置	流体组分、流量、入口温度等	阀门、温压计、节流喷嘴等	沿线温度、传热系数、风速

规划、压缩机能耗分析、水合物监测和虚拟计量等综合管理,有效解决地下储气库复杂多变的注采切换操作流程及生产工艺优化。储气库辅助生产决策系统集成单井、脱水、过滤分离等全工艺流程以及单井监测和虚拟计量、水合物风险监控、关键设备及工艺监测等功能于一体,通过界面穿透及实时数据显示,实现储气库全流程、全工艺的数字化再现。

4) 储气库全生命周期数字化平台

储气库全生命周期数字化平台^[22]按照“全球视野、国际标准、石化特色、高点定位”的要求,围绕储气库地质、工程、设计“一体化”的总体目标,形成选址、设计、施工、生产等全方位储气库建设运营软件群,固化建设与生产程序,推进地下储气库建设的数字化转型。在统一数据模型、统一云平台、统一三维场景的基础上,将现有的专业软件群与储气库管控工作流软件群进行连接,提出了地下储气库全生命周期数字化平台的总体架构和关键技术(图3),构建了地下储气库全

生命周期业务平台。通过储气库一体化数据汇聚,形成了储气库储备、协同设计、规范建设、智能运行的全流程一体化管控平台,实现储气库的流程管控、协同设计、检测优化、运行调控功能,支撑储气库多部门、多专业的一体化协同研究与管控。

1.2.2 中国石油储气库智能化建设进展

中国石油针对储气库建设运行存在的问题,在大港储气库群、相国寺等储气库开展了智能化建设顶层设计和研究,并在实践方面取得了一定成果。

1) 大港储气库群数智化创新与实践

大张坨储气库作为中国第一座商业储气库(2000年投产)属于大港储气库群,已安全运行24年,目前大港储气库群包含大张坨、板南、驴驹河等11座储气库,峰值日采气量达 $3\,050\times 10^4\text{ m}^3$ 。大港储气库群在推动储气库业务数智化创新和实践方面取得一定成果^[23]。开展数智储气库顶层设计,搭建了数据综合管理平台,形

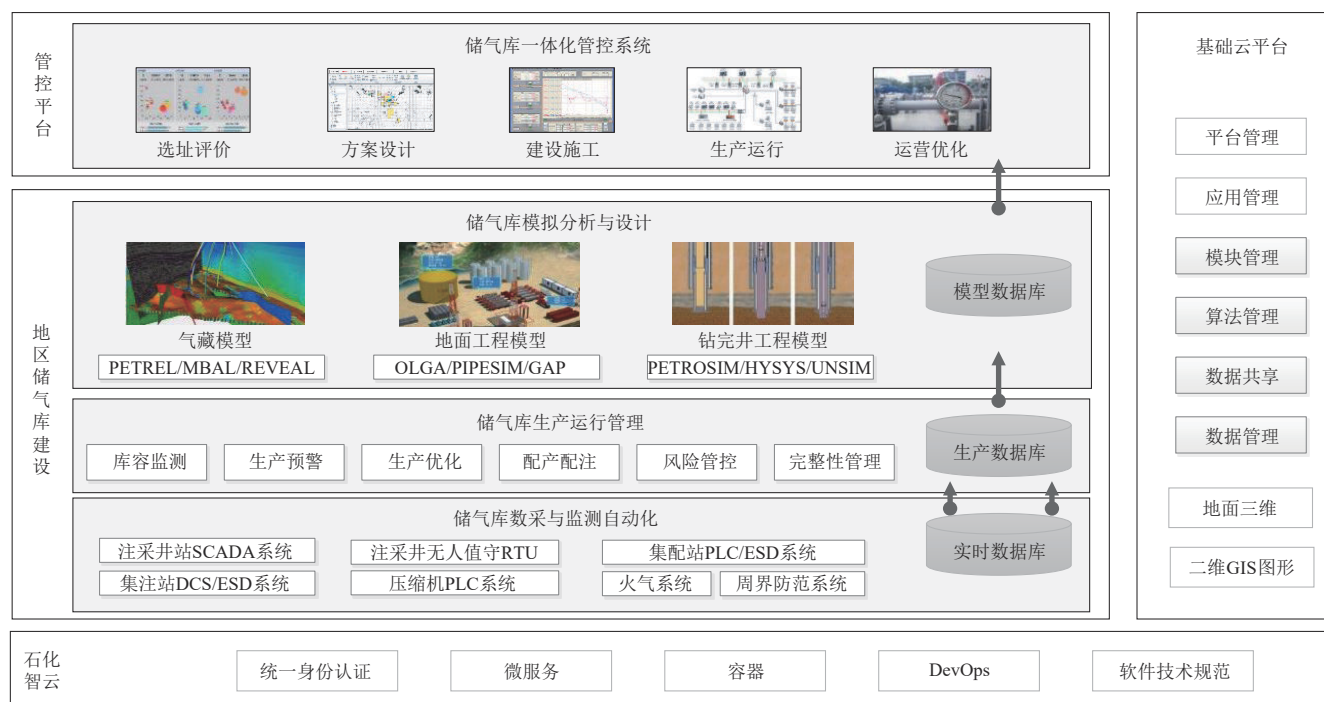


图3 中国石化地下储气库数字化平台总体架构

Fig. 3 Overall architecture of SINOPEC's digital platform for UGS facilities

成了多专业、多维度、全范围的信息化数据环境；基于云平台创建了方案设计、工程施工、注采方案设计等业务环节一体化协同研究环境；依托数智决策中心软件平台，实施数智决策与应急响应，实现储气库运行、钻井现场、管道及站场完整性管理的实时跟踪决策；基于物联网技术，开展无人值守的数智储气库建设，实现自动化操控；基于数字化交付平台，提升建库效率与建库质量，为储气库研究、设计、生产、运营及维护提供保障。

2) 相国寺储气库智能化探索与实践

相国寺储气库论证完成了智能储气库总体架构体系^[24]。业务架构概括为“一个平台、三个级别、五个方面”，一个平台指气藏-井筒-地面一体化数值模拟平台，三个级别指集注站、储气库管理处和研究院，五个方面指生产管理、运行优化、安全管控、员工培训和经营管理；技术架构采用云计算技术架构，搭建了“边缘层、基础设施层(IaaS)、平台层(PaaS)、应用层(SaaS)”4层智能储气库云平台UGS-PaaS。结合储气库关键业务目标和“分步实施、边建边用、以用促建”的实施原则，目前已开发实施了智能配产配注系统，主要包括基础数据管理、生产数据管理、模型管理、方案设计、生产运行5大功能模块。

3) 基于一体化平台的数智化建设策略

大庆油田在围绕储气库生产运行成本高、工作效率低、数据共享难、数据价值难以有效发挥、控制系统

分散且相互独立、业务覆盖不全、新增功能需求扩展困难等难题，提出了储气库一体化平台的数智化建设策略^[25]。以“数据全采集、管线防泄漏、集注站自动化、注采井智能化、气藏智能化、地面智能化”为目标，通过优化提升基础设施夯实数智化储气库建设基础，按照“一体化模型—生产与科研双向协同工作流—可视化系统—智能应用”的逐级递进方式，构建统一的在线协同环境，实现以一体化专业模型为核心、以工作流为支撑，将各个专业专家基于同一平台、同一数据、同一工作流，实现储气库安全运营的监测，高效研究与快速决策，建设数智化储气库。储气库一体化平台包括一体化仿真模型、一体化数智管理系统、可视化管理系统和数智化应用建设。

1.2.3 存在的问题

目前不同储气库公司都在布局储气库智能化工作，但没有统一标准规范可遵循，且智能化建设均处在起步阶段，重复性工作较严重，实质性进展缓慢，整体顶层设计有待完善。

2 储气库智能化建设系统架构设计

针对储气库智能化建设存在的问题，基于“云平台”架构^[25]，搭建智能储气库云平台框架(图4)，采用

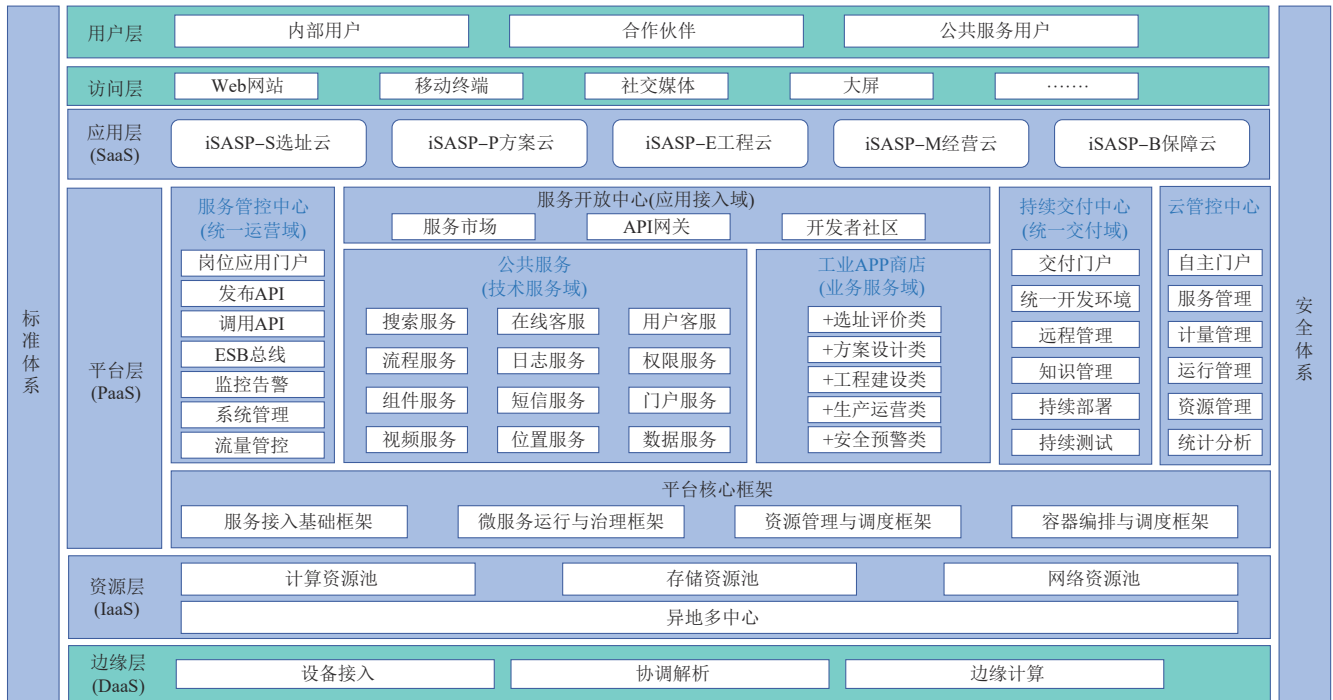


图4 智能储气库云平台架构

Fig. 4 Architecture of the intelligent cloud platform for UGS facilities

“数据+平台+应用”的建设模式,充分利用数据中心、物联网和工业互联网等新型基础设施,支撑各业务板块管理、研究、生产、服务等需求。实现资源优化配置,生产协同高效,提升全面感知、协同优化、预测预警和科学决策能力,实现储气库全生命周期-全业务链智能化升级,推动智慧储气库建设。

3 储气库智能化建设核心功能模块

3.1 “石化智云”工业互联网平台

中国石化按照“平台+应用”的架构设计理念,打造了“石化智云”工业互联网平台(图5),实现数字化改造、智能化升级。“石化智云”通过提供集中管控、实时计算、智能分析、物联网接入等统一标准的公共技术服务,考虑不同业务板块业务特点,打造多方协同的持续交付中心^[25],建立面向业务的APP和组件应用商店,解决信息孤岛难以根本消除、业务功能重复开发等问题。基于工业互联网平台,建设智能储气库,聚焦系统优化、协同生产和智能运营,建设储气库智能运营中心。

3.2 数据管理系统

数据管理系统能够实现不同业务板块、不同来源的数据统一管理,包括地质数据、测试数据和运行数据

等动、静态数据,解决数据格式多样、互通性和利用率不高的问题,实现海量数据整合及高效安全传输、推送,消除数据鸿沟和信息孤岛。①数据管理方面,将数据按照不同用途分类管理,使得数据更加有序,易于查找和使用,通过数据维护功能分开,可以更好地保证数据的准确性和完整性;②数据统一方面,通过制定统一的数据标准和数据规范,使得不同模块之间的数据无缝对接,设置数据校验功能,进一步保证数据的正确性;③数据安全方面,建立数据加密、备份和恢复等完善的数据安全机制,防止数据泄露和非法访问,可以有效地保护数据的安全性和完整性,设置不同等级的数据权限管理,确保不同用户之间的数据安全性;④数据共享方面,通过数据接口、数据推送的共享方式,方便不同用户共享和使用数据,促进了信息的互通和共享,设置数据导出和导入功能,方便用户进行数据交互和整合,提高数据的利用价值。该系统的的功能管理功能具有分类有序、准确性和完整性高、安全性好、共享方便等优点,大大提高数据的管理效率和管理水平,为系统和用户提供了强大的数据支持。

3.3 储气库全流程、全生命周期管控决策系统

储气库全生命周期包括选址、设计、建设、运行及报废等环节。针对储气库全生命周期各个环节,面向不同层级管理决策者,满足储气库规划部署、投资、选

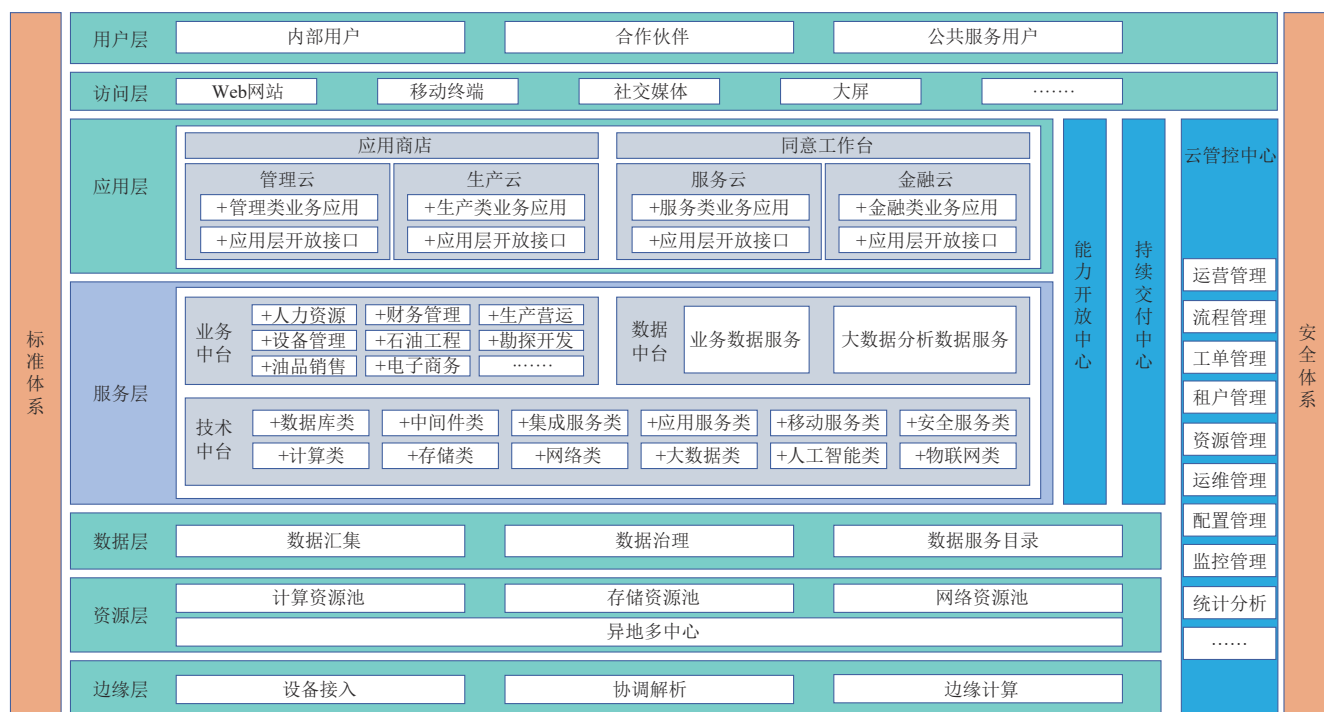


图5 “石化智云”平台技术架构

Fig. 5 Technical architecture of SINOPEC's SICII platform

址评价、方案审查审批、施工建设、注采运行、调峰运营等决策,实现实时高效管控,为管理决策者提供依据。规划部署包括储气能力建设情况和不同类型储气库建设计划安排。投资包括各储气库建设投资计划。选址评价包括储气库筛选评价指标、标准、方法以及筛选评价综合得分排队情况。方案审查审批包括储气库整体及各专业方案参数、报告上报,各级管理技术、管理部门审查、审批台账及审批结果等。施工建设包括钻井、注采气、老井、地面以及盐穴储气库排卤造腔等工程进度追踪,全面掌握储气库施工建设情况。注采运行根据储气库注采运行方案及实时库存、压力变化情况,明确注采井、注采气量等参数。调峰运营根据储气库运营方案,结合实时气价、注采气量及库存等变化,部署储气库购销气量。

3.4 地理信息系统

地理信息系统(GIS)作为一种集空间数据管理、数字地图制作、空间分析与模拟功能为一体的信息技术,具有强大的空间数据采集、管理、分析和表达能力。通过整合多源异构数据,将分布在不同地理位置的空间数据进行集成和量化处理,综合考虑地形、管网分布影响,利用智能算法给智能储气库选址评价、方案设计、工程建设、生产运营、安全检测等方面提供更全面、精细、定量的技术支撑。

3.5 储气库一体化协同研究系统

储气库一体化协同研究系统包括一体化建设协同系统和一体化生产运营协同系统。一体化建设协同系统将储气库选址评价、方案设计(地质与气藏工程、钻井工程、老井利用及封堵、注采工程、地面工程、经济评价等)、工程建设等阶段通过统一工作平台进行链接,充分考虑局部对整体的影响,实现储气库选址及各专业方案协同研究和工程建设进展跟踪及分析。一体化生产运营协同研究系统将油气藏、井筒、管网、经济、决策等模型之间的数据流、软件流、业务流在统一的协同研究环境中耦合成为一体化数字模型,消除不同专业软件之间的数据壁垒,建立起一体化调峰决策-注采优化工作模式,充分考虑全流程各系统各环节自身变化对整体的影响,为调峰调度、经营决策、管网优化、智能配注配产、跟踪与预警优化等业务场景提供基础数据和决策依据。

3.6 储气库数字孪生系统

储气库是个系统工程,数字孪生系统包括“地质体-井筒-地面-管网-市场”等系统,采用“基础数据—一体化模型—智能决策—智慧应用”的逐级递进方式,形成“数据层+模型层+逻辑层+应用层”多层级储气库数字孪生体。建立“地质体-井筒-地面设备-管网-市场”全流程、全工艺一体化仿真模型,还原现场工艺流

程,通过自动获取实时数据,实时监测和分析一体化仿真模型,对比跟踪模型与真实生产系统,实现数据与模型双向沟通,通过自动调整和优化,确保模型与真实生产动态保持一致,支撑储气库全系统各工艺单元高精度模拟。

4 储气库智能化建设发展趋势

4.1 建设思路

按照“整体规划,分步实施,以点带面,统筹推进”的策略,基于工业互联网平台,采用“数据+平台+应用”的云服务模式构建智能储气库技术架构。基于物联网技术,实现多维度数据资料标准化、数字化统一管理,攻关地质体数字孪生技术和储气库“地质体-井筒-地面”高精度动态建模技术,深化应用大数据、人工智能、卫星互联网等新兴信息技术,构建全面感知、自动操控、趋势预测、智能优化、协同运营以及可视化动态展示的智能化储气库,提高储气库建设管理水平和生产运营效益,推动智慧储气库建设。

4.2 关键技术

4.2.1 储气库地质体数字孪生技术

数字孪生是智能化建设的重要技术之一,在油气行业的发展中具有广阔前景。油气行业数字孪生技术是利用多源、多时空、多尺度、多概率动态数据,构建虚拟油气行业空间模型,刻画真实油气物理世界^[13]。目前通过开展“无人机三维倾斜摄影技术建模”与“基于场站模型的多数据融合”技术研究,以物联网系统实现建模与应用实验,实现了管网数字孪生体的研究。地质模型更新速度和数值模型计算效率是制约储气库一体化研究的两个最重要因素,而数字孪生技术在建模速度、模型运行效率、模型真实性以及模型交互扩展方面具有较大优势,突破传统油气藏三维地质建模思路束缚^[26-28],通过确定性规则和完整机制的模型转换,与虚拟调试、虚拟监控结合实现地质体数字孪生,加速储气库实时动态仿真模拟,助力储气库“地质体-井筒-地面设备-管网-市场”一体化孪生技术发展。

4.2.2 高精度动态建模技术

为了在虚拟环境中反映和镜像储气库在现实环境中的真实状态与行为,需要建立高精度的储气库动态

仿真模型,它可以复现现场工艺与控制,精确反映各类参数的动态波动情况,解决由于储气库注采气等工艺存在生产波动、关键参数发生较大变化、注采需求变化频繁等给实际生产带来的低效率、高能耗、高风险等问题,可有效快速提供辅助优化方案,提高现有工艺的操作水平、降低能耗水平等。

4.2.3 基于机器学习的一体化仿真技术

基于传统数值模拟的一体化模型,其集成模块冗杂、模拟运行耗时耗力,不适宜辅助决策中短期储气库的注采运行。以机器学习为智能算法基础,建立储气库地质体-井筒-地面一体化的数字孪生体,开发高精度动态模型与机器学习智能算法耦合的储气库生产优化模型,实现全工艺工况实时动态监测、实时调峰能力预测的储气库数字化管理。

4.2.4 一体化动态优化技术

传统的生产优化技术一般以稳态模型或离线模型为基础,与数字孪生技术强调的实时动态和数据双向流动是相矛盾的。以一体化动态模型为基础,根据实际的生产数据工况,实时进行生产工艺优化,提供基于此工况下的推荐值,比如储气库地面工艺最优的三甘醇的注入量、甲醇注入量,并根据实时优化值控制泵的转速以及阀门的开度,虚、实双向地实时交互及动态优化,为储气库生产提供更加精准的应用服务。

4.2.5 储气库全生命周期可视化动态展示技术

GIS地图分析和可视化作为一种潜在的新方法,在资产管理、管道选线和灾害管理等方面具有很大的应用潜力。基于GIS将数据和信息转化为可视化地图,通过储气库一体化数字孪生体,实现储气库全系统一体化动态仿真模拟和虚拟化展示,达到储气库资源、库存、注采、市场等生产经营指标跟踪及可视化动态展示的目的。以生产数据、工艺仿真数据和SCADA系统为支撑,开发储气库智能三维数字孪生可视化平台、系统及应用模式。

4.2.6 储气库智能运行运营技术

基于孪生储气库,围绕储气库(群)全局优化注采运行及一体化运营管理,以全局优化模拟、智能 workflows 和可视化监控展示等技术为手段,解决储气库生产管理中的注采调配和日常运营需求,保障安全生产,辅助注采、购销方案设计,支撑应急调峰,实现长期安全运行。

1) 储气库注采智能优化技术

结合气藏工程和数值模拟方法对储气库注采能力的分析与优化成果,基于历史注采动态数据,通过大数据、机器学习等方法,计算库容动用状况、工作气量和垫底气量等参数,分析储气库运行特征,预测库容、调峰气量、达容率、达产率、注气(采气)末地层压力、合理注采压差以及应急调峰能力等运行指标,为储气库运行指标优化与运行方案调整提供技术支持。

2) 储气库智能配产技术

考虑储气库气藏特征、市场需求、调峰气量、天然气销售价格、管输能力和生产设备系统效率等影响,结合单井采出能力和地层压力变化情况,建立地下储气库智能配产优化模型,搭建基于一体化孪生模型的自动配产 workflow,进行全局优化,实现储气库智能配产。根据市场需求实时变化,基于一体化孪生模型,在“地质体-井筒-地面”协调运行状态下,自动快速形成配产方案,实现储气库和采气井智能配产。根据产量和压力实时跟踪,实时调整优化配产方案,保障储气库采气调峰任务的落实。

3) 储气库智能配注技术

考虑储气库气藏特征、气源、年度注气任务、天然气购气价格、管输能力以及注气设备系统效率等影响,结合单井注入能力和地层压力变化情况,搭建基于一体化孪生模型的自动配注 workflow。根据气源实时变化,基于一体化孪生模型,自动快速形成实时有序的配注方案,实现储气库、单井智能配注,根据注气井监测情况,实时调整优化配注方案,保证平稳高效的自动注入。

4.2.7 储气库实时智能风险预警技术

储气库“地质体-井筒-管网”实时风险预警是储气库安全运行和管控的重要保障。突破微地震监测系统高温、高压、高灵敏度三分量检波器芯体制造技术,攻关大阵列带道采集及实时预警技术,研制微地震监测系统及处理软件;攻关大井眼、宽壁厚套管超声测距波场表征技术,研制套管-固井水泥环质量一体化检测系统,实现井筒完整性精确检测与监测^[29];基于储气库多周期注采数据,通过大数据分析技术,提取储气库风险特征并进行分类和识别,利用人工智能方法,研发风险智能识别系统,实现风险实时智能预警。

4.2.8 工业软件国产化替代技术

多年来,油气藏地质建模、数值模拟、SCADA 系统、微地震监测及处理等核心工业软件系统被国外巨

头垄断,中国智能化建设项目落地在一定程度上依赖国外产品和技术。中国石化自主研发了页岩气数值模拟软件 COMPASS,2022 年该软件已成功在中国石化勘探开发云平台(EPCP)完成了线上部署,进入准商业化运营阶段。中国石油自主研发了地质-工程一体化压裂优化设计软件 FrSmart 1.0,该软件已具备地质力学建模、压前分析、压裂测试、压裂模拟、产能模拟、经济评价、实时决策和数据库 8 个模块,能够解决多种井型及平台井工厂化的压裂模拟和产能模拟,计算结果与国际商业化软件基本一致。国家管网“十四五”规划重点项目,突破油气调控领域核心技术“卡脖子”问题,打破国外技术垄断,自主研发的 PCS 软件,推动了 SCADA 系统国产化,到 2025 年底将实现自研软件 PCS 对国外 SCADA 软件的全部替代。工业软件的国产化将加速推进储气库智能化建设进程。

4.2.9 卫星互联网等新技术

工业物联网技术迭代升级,以 5G/6G、云计算、区块链、物联网、大数据、人工智能和卫星互联网等为代表的新兴信息技术基础设施的建设,北斗精准时空技术的应用将是未来储气库智能化建设不可或缺的重要抓手。

4.3 预期效果

通过智能储气库的建设,形成储气库智能化建设信息技术标准体系。实现多源数据数字化、标准化统一管理;以工业互联网平台为基础,实现“工业互联网+注采运行”和“工业互联网+安全检测”等“工业互联网+”应用,建设成选址云、方案云、建设云、运营云等专业云平台,实现多专业一体化协同办公;基于数字孪生技术,建成“地质体-井筒-地面设备-管网-市场”一体化数字孪生体,通过 GIS 将数据和信息转化为可视化地图,实现储气库全系统一体化动态仿真模拟和虚拟化展示;结合大数据和人工智能技术,建成基于数据驱动的管理决策平台,实现储气库运营和决策智能化,推动储气库智能化关键技术和产品国产化。

5 结束语

1) 能源行业数字化转型、智能化升级是落实“四个革命、一个合作”能源安全新战略和建设新型能源体系的有效举措。国家能源局对油气行业提出了“推动油气管网的信息化改造和数字化升级,推进智能管道、智能储气库建设,提升油气管网设施安全高效运行水

平和储气调峰能力”的具体要求。通过数字赋能、协同高效、融合创新助力储气库智能化建设,推动储气库高质量发展。

2) 中国石化和中国石油等能源企业积极应对数字革命挑战,加快数字化转型,全面推进智能油气田、智能工厂、智能加油站、智能研究院和智能储气库等一系列智能化建设。在智能储气库建设方面,开展了工业互联网平台、信息管理系统、决策优化系统、地理信息系统、协同研究以及数字化孪生等研究。

3) 地质体数字孪生、高精度建模、可视化动态展示、智能运营、实时智能风险预警、工业软件国产化以及北斗、卫星互联网等新技术将是未来智能储气库建设的重点方向。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见[J]. 大众用电, 2023, 38(4): 11-14.
National Energy Administration. Several opinions on accelerating the development of digital and intelligent energy [J]. Popular Utilization of Electricity, 2023, 38(4): 11-14.
- [2] 张玉卓. 以数字化转型促进能源化工产业高质量发展[J]. 中国产经, 2021(2): 58-60.
ZHANG Yuzhuo. Promoting high-quality development of the energy and chemical industry through digital transformation [J]. Chinese Industry & Economy, 2021(2): 58-60.
- [3] 马承杰. 胜利油田“数据+平台+应用”信息化建设新模式构建与应用[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(2): 73-80.
MA Chengjie. Construction and application of new informatization model-“data + platform + application”-at Shengli Oilfield [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(2): 73-80.
- [4] 乔泉熙, 蒋勇, 徐建军. 平台模式的智能气油田试点建设实践与成效[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(1): 137-139.
QIAO Quanxi, JIANG Yong, XU Jianjun. Practice and effectiveness of pilot construction of intelligent gas oilfield in platform mode [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(1): 137-139.
- [5] 叶康林. 地下天然气储气库信息化建设现状与探讨[J]. 信息系统工程, 2019(7): 124-126.
YE Kanglin. Current situation and discussion on informationization construction of underground natural gas storage [J]. China CIO News, 2019(7): 124-126.
- [6] 丁国生, 王云, 完颜祺琪, 等. 不同类型复杂地下储气库建库难点与攻关方向[J]. 天然气工业, 2023, 43(10): 14-23.
DING Guosheng, WANG Yun, WANYAN Qiqi, et al. Construction difficulties and research directions of various complex UGSs [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(10): 14-23.
- [7] 万旸. 地下天然气储气库数字化建设现状[J]. 化学工程与装备, 2021(10): 216-217, 220.
WAN Yang. Current status of digital construction of underground natural gas storage facilities [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(10): 216-217, 220.
- [8] 糜利栋, 顾少华, 薛亮, 等. 基于数据驱动技术的智能试井解释方法——以有水气藏产水气井为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 119-124.
MI Lidong, GU Shaohua, XUE Liang, et al. An intelligent well test interpretation method based on data driven technology: A case study from one water-producing gas well of water-bearing gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 119-124.
- [9] 刘烨, 何刚, 杨莉娜, 等. “十四五”期间我国储气库建设面临的挑战及对策建议[J]. 石油规划设计, 2020, 31(6): 9-13, 62.
LIU Ye, HE Gang, YANG Lina, et al. Challenges and suggestions to gas storage development during the 14th Five-Year Plan period [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2020, 31(6): 9-13, 62.
- [10] 马新华, 郑得文, 魏国齐, 等. 中国天然气地下储气库重大科学理论技术发展方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 93-99.
MA Xinhua, ZHENG Dewen, WEI Guoqi, et al. Development directions of major scientific theories and technologies for underground gas storage [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 93-99.
- [11] 张刚雄, 郑得文, 张春江, 等. 地下储气库信息数据管理平台开发及应用[J]. 油气储运, 2015, 34(12): 1284-1287.
ZHANG Gangxiong, ZHENG Dewen, ZHANG Chunjiang, et al. Development and application of information and data management platform for underground gas storage [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(12): 1284-1287.
- [12] 石海磊, 赵迎, 杨勇, 等. 油气藏-井筒-管网一体化耦合模拟方法研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(10): 92-94, 97.
SHI Hailei, ZHAO Ying, YANG Yong, et al. Research on the integrated coupling simulation method of oil and gas reservoir wellbore pipeline network [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(10): 92-94, 97.
- [13] 金镭, 秦雪伦, 江如意, 等. 油气行业数字孪生研究述评与展望[J]. 世界石油工业, 2022, 29(5): 17-25.
JIN Lei, QIN Xuelun, JIANG Ruyi, et al. Review and prospect of digital twin research in oil and gas industry [J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(5): 17-25.
- [14] 赵汭凡, 孙键. 综合应用数字孪生技术助力油气上游转型[J]. 中国石化, 2019(10): 36-38.
ZHAO Gufan, SUN Jian. Integrated application of digital twin technology to assist upstream transformation of oil and gas [J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2019(10): 36-38.
- [15] 张晓冉, 薛辉, 张磊, 等. 文96地下储气库SCADA系统[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(10): 90-91.
ZHANG Xiaoran, XUE Hui, ZHANG Lei, et al. Wen 96 underground gas storage SCADA system [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(10): 90-91.
- [16] 孙迪. 文96地下储气库SCADA系统应用探究[J]. 中国石油和

- 化工标准与质量, 2013, 33(7): 101.
- SUN Di. Research on the application of SCADA system in Wen 96 underground gas storage [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(7): 101.
- [17] 糜利栋, 曾大乾, 李遵照, 等. 中国石化地下储气库智能化建设进展及展望[J]. 世界石油工业, 2023, 30(6): 88-95.
- MI Lidong, ZENG Daqian, LI Zunzhao, et al. Progress and prospect of intelligent of Sinopec underground gas storage [J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(6): 88-95.
- [18] 糜利栋, 曾大乾, 张广权, 等. 地下储气库智能化平台开发及应用[C]//第三届中国储气库科技创新与产业发展国际高峰论坛论文集.
- MI Lidong, ZENG Daqian, ZHANG Guangquan, et al. Development and application of intelligent platform for underground gas storage [C]//Proceedings of the 3rd International Summit Forum on Technological Innovation and Industrial Development of China Gas Storage.
- [19] 糜利栋, 曾大乾, 刘华, 等. 中国石化地下储气库一体化综合平台研发与应用[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(6): 781-788.
- MI Lidong, ZENG Daqian, LIU Hua, et al. Development and application of Sinopec integrated management platform for underground gas storage [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 781-788.
- [20] 曾大乾, 胡宗全, 糜利栋, 等. 不同类型地下储气库库址评价标准体系及筛选平台[J]. 天然气工业, 2022, 42(增刊1): 117-124.
- ZENG Daqian, HU Zongquan, MI Lidong, et al. Evaluation standard system and screening platform for different types of underground gas storage sites [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(S1): 117-124.
- [21] 孙伟, 孙旭东, 杨传书, 等. 中国石化地下储气库全生命周期数字化平台建设[C]//第三届中国储气库科技创新与产业发展国际高峰论坛论文集.
- SUN Wei, SUN Xudong, YANG Chuanshu, et al. Construction of a digital platform for the full life cycle of sinopec underground gas storage [C]// Proceedings of the 3rd International Summit Forum on Technological Innovation and Industrial Development of China Gas Storage.
- [22] 殷美惠, 李炳辉, 王权国, 等. 大港储气库数智化创新与时间[C]//第三届中国储气库科技创新与产业发展国际高峰论坛论文集.
- YIN Meihui, LI Binghui, WANG Quanguo, et al. Innovation and time of digital intelligence in Dagang gas storage [C]// Proceedings of the 3rd International Summit Forum on Technological Innovation and Industrial Development of China Gas Storage.
- [23] 廖浩然, 任科, 禹贵成, 等. 相国寺储气库智能化建设探索与实践[C]//中国石油学会天然气专业委员会. 第32届全国天然气学术年会(2020)论文集. 成都: 中国石油学会天然气专业委员会, 2020: 3005-3014.
- LIAO Haoran, REN Ke, YU Guicheng, et al. Exploration and practice of intelligent construction of Xiangguo Temple gas storage [C]//Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Society. Proceedings of the 32nd National Natural Gas Academic Annual Conference (2020). Chengdu: Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Society, 2020: 3005-3014.
- [24] 孙璿. 基于储气库一体化平台的数智化建设策略研究[C]//第三届中国储气库科技创新与产业发展国际高峰论坛论文集.
- SUN Jin. Research on digital construction strategy based on integrated gas storage platform [C]//Proceedings of the 3rd International Summit Forum on Technological Innovation and Industrial Development of China Gas Storage.
- [25] 李剑峰, 肖波, 肖莉, 等. 智能油田[M]. 北京: 中国石化出版社, 2020.
- LI Jianfeng, XIAO Bo, XIAO Li, et al. Intelligent oil field [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020.
- [26] 彭博, 杨辉廷, 彭云晖. 油气藏三维地质建模研究进展[J]. 石化技术, 2023, 30(12): 175-177.
- PENG Bo, YANG Huiting, PENG Yunhui. Review of research progress in 3D geological modeling of oil and gas reservoirs [J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(12): 175-177.
- [27] 刘彦锋, 段太忠, 黄渊, 等. 沉积过程模拟驱动下的深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 226-237.
- LIU Yanfeng, DUAN Taizhong, HUANG Yuan, et al. Deep learning-based geological modeling driven by sedimentary process simulation [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 226-237.
- [28] 赵向原, 游瑜春, 胡向阳, 等. 基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法——以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 213-225.
- ZHAO Xiangyuan, YOU Yuchun, HU Xiangyang, et al. Classified-staged-grouped 3D modeling of multi-scale fractures constrained by genetic mechanisms and main controlling factors: A case study on biohermal carbonate reservoir of the Upper Permian Changxing Fm. in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 213-225.
- [29] 完颜祺琪, 王云, 李东旭, 等. 复杂地质条件下储气库建设安全运行技术进展[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1092-1099.
- WANYAN Qiqi, WANG Yun, LI Dongxu, et al. Technical progress of construction and safe operation of underground gas storage under complex geological conditions [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1092-1099.

(编辑 张玉银)