



智慧油田建设的思考与设计原则

刘合^{1,2,3}, 姚尚林^{2*}, 李欣², 苏健²

1. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 大庆 163000;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油天然气集团有限公司 煤岩气重点实验室, 廊坊 065007

摘要: 在全球能源转型与生态保护需求日益突出的背景下, 智慧油田建设成为石油行业突破传统开发模式瓶颈的必然选择。本文采用系统论、唯物辩证法和实践论相结合的方法, 分析了智慧油田建设在数据管理、平台技术、智能应用、组织管理与安全保障等方面的主要挑战, 并提出了以“聚能-赋能-释能”为主线的智慧油田生态系统设计原则。研究指出, 智慧油田建设需通过数据治理、模型构建、数字孪生融合和智能决策支持等多维度协同, 推动油田生产、管理与运营的全方位智能化升级。通过构建“三横、四纵、一门户”的生态系统架构, 提出了“天+地+人+物+事+运营”的智慧油田生态系统构想, 旨在实现从数据汇聚到智能决策的全链条贯通, 为石油行业的数字化转型提供理论框架与实践路径。作者还结合国内外智慧油田建设案例, 验证了“聚能-赋能-释能”框架的可行性, 为企业制定智慧油田建设战略提供了科学依据, 同时为学术界相关研究提供了新的视角与方法。

关键词: 智慧油田; 数据共享; 设计原则

中图分类号: TE49

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)02-0243-16

引言

当今世界正经历百年未有之大变局, 生态环境保

护与能源资源安全等全球性问题日益凸显; 数字化浪潮以前所未有的态势席卷各行业, 石油行业亦面临深刻而深远的变革转型。随着全球经济的不断发展, 能

收稿日期: 2025-03-22; **修回日期:** 2025-04-04

基金项目: 国家自然科学基金卓越研究群体项目: 数字经济时代的资源环境管理理论与应用 (72088101)

作者简介: 刘合 (1961—), 男, 博士, 中国工程院院士, 研究方向为油气藏增产改造、分层注水、油气人工智能。E-mail: liuhe@petrochina.com.cn

*姚尚林 (1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为油气人工智能。E-mail: yaoshanglin@petrochina.com.cn (通讯作者)

李欣 (1975—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为油气人工智能。

苏健 (1988—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为能源战略。

引用格式: 刘合, 姚尚林, 李欣, 等. 智慧油田建设的思考与设计原则[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(2): 243-258. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250039. CSTR: 32282.14.JES.20250039

Liu H, Yao S L, Li X, et al. Considerations and Design Principles for Smart Oilfield Construction[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(2): 243-258. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250039. CSTR: 32282.14.JES.20250039

源需求呈现出持续攀升的态势。石油作为一种至关重要的能源资源,在全球能源结构中始终占据着举足轻重的地位。然而,历经多年的大规模开采,传统油田正面临着一系列严峻的问题:低成本并有效益的开发难度不断加大,石油石化行业面临生态环境保护的问题凸显,必须采取更加严格的环保措施,减少污染物排放和环境破坏。同时,安全生产作为行业发展的基础保障,需健全管理体系、完善监管机制,同时提升员工安全意识和操作技能,确保生产安全稳定。油田开发正面临系列挑战:一是资源接替不充分、储采不平衡;二是资产创效不充分、不平衡;三是低成本发展不充分、不平衡;四是科技支撑不充分、精益管理不平衡。传统开发模式已难适应时代需求,随着人工智能、大数据、物联网等技术在能源领域的深入应用,开采成本将持续降低、效率显著提升,并推动清洁能源开发。在此背景下,智慧油田建设成为石油行业突破困境、顺应发展的必然选择^[1]。

当前,在智慧油田建设的进程中,尽管取得了一定的进展,但仍面临着诸多亟待解决的挑战。数据管理方面存在数据孤岛现象突出、跨部门共享困难、治理机制欠缺、数据湖建设不完善以及多模态数据融合不畅等问题。平台技术层面,表现为云计算资源分散且算力不足。应用层面面临人工智能(AI)应用局限性、通用AI基模型构建技术路径不明、多模态训练算法欠成熟、油气大脑建设中行业知识与AI模型融合困难等难题。组织管理方面需解决内部结构待优化、机构职责界定模糊、复合型人才短缺以及AI高端专业人才匮乏等问题。安全保障方面存在云化程度偏低、数据安全与隐私保护难度大、物联网设备安全隐患较高等挑战。

这些问题相互交织,严重制约了智慧油田建设的高效推进。数据孤岛造成信息流通阻滞,削弱了智能化决策的科学性与准确性;技术应用的局限阻碍智能化水平提升,难以满足油田生产对高效精准的需求;组织管理的不足增加了项目推进的难度,降低了工作效率;安全保障的薄弱则可能引发数据泄露、系统瘫痪等风险,危及油田的正常运行。因此,智慧油田建设需要从数据管理、平台技术、智能应用、组织管

理、安全保障等多方面入手,通过技术创新、资源整合、人才培养和安全保障等多方面努力加以解决,以推动智慧油田的可持续发展。

本研究旨在全面分析智慧油田建设进程中遇到的各类难题,通过多维度的深度剖析,提出切实可行的解决方案。探索并提出“天+地+人+物+事+运营”的新型智慧油田生态系统构想,为石油企业的数字化转型提供理论依据与实践指导,助力石油行业在第四次工业革命浪潮中实现跨越式发展。

1 智慧油田的概念与发展现状

1.1 定义

智慧油田由数字油田发展而来,是一个从量变到质变的演进过程。它在数字油田的基础上深度融合人类智慧,结合人工智能技术构建出高效强大的解决方案。智慧油田系统涵盖智能感知、控制、预警、协同、分析及科学决策等功能^[2]。与数字油田侧重于数据采集和基础分析不同,智慧油田更强调高维度数据分析、深度数据挖掘,以及从大数据中自动化提取知识,实现“数据”到“知识”的智变,基于数据与知识双轮驱动的AI大模型,能为油田生产决策和精益管理提供精准辅助,实现从静态孪生到动态孪生、从简单智能到复杂智慧、从被动应急到主动防控、从被动管理到主动管理的全面跨越,推动价值链系统性、整体性、协同性的重构变革^[3-6]。

智慧油田的核心在于立足油田特点,以全生命周期高效开发为目标,构建一个融合新理念、新技术、新工具及管理模式创新的新型生态系统。该系统深度应用新一代信息技术,全面透彻的感知、全方位互联互通、全域智能化,以及高效有效地集成油田生产运行核心系统的各项关键信息,最优化配置油田核心要素。通过监测各级要素的递进迭代、动态响应等指标,全面提升泛在化、可视化、智能化水平,并智能感知与响应油田生产、运营及居民生活等各层次需求。由此构建持续聚智创新的智慧油田经营模式,赋能科学安全高效管理,改善矿区居民生活品质,推动油田绿色环保与高质量可持续发展^[7]。

1.2 国内外智慧油田发展现状

1.2.1 国际石油公司在智能油田建设方面的实践 国际石油公司、油田服务公司在智能油田方面行动较早,在油田感知、分析、优化等不同环节实施了重要发展战略举措,近年来,通过与微软、谷歌等知名信息技术(IT)企业深化合作,积极引进并消化吸收其在大数据和人工智能领域的成熟技术,推动了数字技术与勘探开发核心业务的深度融合,取得一定的效果^{[8]69}。

壳牌(Shell)以一体化资产模型为核心,借助一系列智能化工作流应用,从历史实时数据库中同步更新一体化资产模型,从而支撑各项智能化应用。通过与NVIDIA合作,壳牌完成了数年前难以想象的突破:将复杂能源模拟的运行速度提升至传统方法的百万倍;其开发的人工智能机器学习模型,在地下储层二氧化碳储存研究方面的效率,较传统物理模拟提升约10万倍^{[8]70}。这一突破显著加速了碳捕获与封存项目在筛选阶段的地质评估效率,包括对注入速率和压力等参数的快速分析——这些正是实现“净零目标”的关键组成部分。

BP(British Petroleum,英国石油公司)采用先进的地震成像技术和数据处理方法,显著提升了油田勘探效率^{[8]69};挪威国家石油公司推进无人平台建设,其运营成本低于预算且项目盈亏平衡点由34 USD/桶(1桶≈159升)降至20 USD/桶以下^[9]。

埃克森美孚(Exxon Mobil)与微软展开合作,利用数据湖、机器学习和云计算等技术推进智能油气田建设,通过深度挖掘数据价值优化业务决策并实现工作流自动化。预计至2025年,该智能化技术将助力二叠纪盆地油田实现每日增产50000桶,并计划在未来十年内,借助分析能力提升与资产运行效率改进,创造数十亿美元的净现金流。该平台依托云计算与人工智能技术,在油田全生命周期中实施智能化生产管理,达成降本增效、增产减排目标^{[8]69}。

道达尔公司(Total Energies)开发建设的油气生产一体化协同研究平台,实现了油气藏-注采井-地面

集输等生产全系统的模拟与优化,支持多学科综合研究、跨部门协同工作、多模型集成共享、油气藏可视化管理和管理层辅助决策。油气藏、注采井、地面管网和设备各环节进行生产一体化动态模拟,将单个生产环节紧密连接起来,在投产前进行各种开发方案的对比评估,在投产后进行开发效果的跟踪与评价,优化整个生产运行系统,实现技术研究目标高度统一,为油气田开发的智能管理提供一体化模拟模型,提高了油气田开采效率和经济效益^{[8]70}。

1.2.2 国内油田企业在智能油田建设方面的实践 国内石油公司自2010年起陆续启动智能油田建设,虽起步较国际领先石油公司稍晚,但高度重视相关技术研发与建设工作。“十二五”期间,在推进数字化、网络化建设的基础上,国内油气企业将智能油田建设纳入企业转型升级发展战略,积极开展相关技术研究及试点场景应用^[10-11]。

中国石油天然气集团有限公司(后文简称中石油)“十三五”围绕智能油田发展,以“勘探开发统一数据湖、统一技术平台、通用应用环境”为核心,建设“勘探开发梦想云”,实现上游企业全业务链的数据互联、技术互通、业务协同,构建共创、共建、共享、共赢的信息化建设与应用新生态,支撑业务数字化转型、智能化发展。2019年11月,勘探开发梦想云2.0投入生产运营,融合了人工智能、大数据、云计算、物联网、移动应用等新技术,通过数据湖及统一技术平台工作的推进,突破了以往存在的“数据共享难、业务协同难”的瓶颈,为油气勘探、开发生产、协同研究、生产运行、经营管理、安全环保等六大业务领域提供智能化应用支撑,并在风险勘探、圈闭审查、油气水井生产管理中应用落地^[12-15]。中石油在长庆油田^①构建了一体化的智能生产管理平台,整合了地质、开发、生产等多部门的数据,实现了生产运行的实时监控与远程指挥。通过大数据分析技术对油井产量进行预测,预测准确率达到90%以上,有效指导了生产决策。

中国石油化工股份有限公司(以下简称“中石化”)智能油田建设规划于2013年启动,同步开展

① 长庆油田是中国第一大油气田,也是全球典型的低渗透、特低渗透油气田开发典范,由中石油主导运营,在保障国家能源安全、推动西部经济发展中发挥着关键作用。

关键技术攻关研究并取得显著成果, 始终保持快速发展势头。基于石油石化行业数字化、网络化、智能化的发展目标, 中石化与华为联合研发了石化智云工业互联网平台^{[8]70}, 开创了传统行业与信息技术深度融合的新模式, 在流程工业智能制造应用领域处于国内领先地位。“十三五”期间, 中石化重点推进智能油气田建设, 围绕生产运行、集成协同及示范工程等领域持续深化, 成功研发并推广了生产指挥系统(PCS)、勘探开发业务系统平台(EPBP)和勘探开发云平台(EPCP)等协同平台。通过构建全面感知、集成协同和全局优化三大能力, 实现了数据与专业软硬件的统一管理。示范项目在提升效率、降低成本方面成效显著, 为油田数字化、信息化和智能化发展奠定了坚实基础。

中国海洋石油集团有限公司(以下简称中海油)于2020年正式发布《中国海油数字化转型顶层设计纲要》和《智能油田顶层设计纲要》^[16], 提出以“云化+平台化+敏捷开发与交付+云边协同”为建设思路^[17]。该方案基于“数据+平台+应用”的云架构推进信息系统建设, 通过开发运维一体化(DevOps)实现系统研发, 运用“数据+算力+算法”的智能应用技术体系完成系统部署, 最终达成集成、协作与共享目标。面向勘探开发等主营业务场景, 开展智能油田功能设计、技术选型与实施、系统研发, 为油田智能化建设提供技术支撑。围绕油气田全生命周期, 基于综合研究、现场生产、业务管理、战略决策四个层级, 聚焦“透明油藏、无人作业、协同运营、智能决策”四类典型场景, 运用云计算、大数据、物联网、区块链、人工智能、5G、网络安全及北斗等信息技术赋能传统油田, 推动流程再造。2021年10月在渤海湾成功建成数字化、智能化的秦皇岛32-6油田^[18-19]。

国内外石油企业已逐步开展人工智能技术的应用, 包括地震数据解释处理、测井解释、油气层识别、钻完井、油藏动态分析与模拟以及油气地面工程等领域。总体而言, 油气行业的人工智能技术应用仍处于起步阶段, 目前还主要集中在各业务环节的智能化升级; 要实现人工智能技术与油气行业的深度融合, 并持续拓展完善应用场景, 仍需加大研发力度。

2 智慧油田建设面临的主要挑战与对策

2.1 数据汇聚和统一管理

在智慧油田的建设过程中, 高质量的数据基础扮演着至关重要的角色。通过集中采集多源异构数据、实现智能汇聚与统一管理, 能够为上层的智能分析与决策支持系统奠定坚实的数据基础。

2.1.1 数据来源多、类型复杂、采集系统不统一(采) 在智慧油田建设中, 数据采集是构建高质量数据基础的第一步。然而, 当前一体化数据采集面临诸多挑战。首先, 数据来源广泛且类型复杂。油藏、生产、设备和环境等数据在格式、产生方式和频率上存在显著差异。如何确保全面、准确地从众多数据源收集数据是一大挑战。其次, 油田构建了各类采集系统, 不同数据采集设备到分析系统处理存在断层, 无法实现横向贯通。例如, 油藏数据可能包括地质勘探报告和三维地震数据, 而生产数据则涵盖实时的井口压力、温度和产量读数。这些差异使得数据的统一采集变得复杂。再次, 采集系统不统一。油田内存在多种数据采集系统, 各自服务于不同的业务环节, 缺乏统一的标准和接口。这导致数据在采集后难以直接整合和利用。例如, 一些老旧的设备可能使用不同协议, 这种异构性增加了数据采集的难度。

为解决上述问题, 需要从多方面入手。首先, 部署智能终端和边缘计算设备, 尽量实现数据的自动采集和预处理。基于统一技术标准, 设备能够适应不同的数据源和协议, 将采集到的数据进行标准化处理, 减少数据传输量和延迟。例如, 通过在井场部署边缘计算节点, 可以实时处理井口传感器数据, 提取关键指标后再传输至云端。其次, 建立标准化的采集流程和规范。制定统一的数据采集标准, 涵盖数据格式、采集频率和传输协议等方面, 确保不同来源的数据在采集阶段就具备一致性和可比性。最后, 加强数据采集系统的整合。通过构建统一的数据采集平台, 将现有的多种采集系统纳入其中, 实现数据的集中管理和调度。这不仅可以提高数据采集的效率, 还能为后续的数据处理和分析奠定基础。

2.1.2 数据存储分散、交互困难(存) 在智慧油田

建设中, 数据存储面临的主要挑战包括存储分散和交互困难。尽管各油公司大多已构建了统一的数据湖, 但在实际应用中, 仍存在一些不足。首先, 数据湖在支持交互式、低延迟分析方面存在局限性。传统的数据湖架构侧重于大规模数据的存储和批处理, 难以满足实时分析和高频数据访问的需求。其次, 事务性保证不足。在数据写入和读取过程中, 缺乏有效的事务管理机制, 可能导致数据不一致或丢失。此外, 数据治理能力薄弱。数据湖中的数据往往缺乏统一的管理和质量控制, 难以保证数据的准确性和完整性。

为应对这些挑战, 需要构建湖仓一体的集成共享环境。这种架构整合了数据湖和数据仓库的优势, 既能支持多源异构数据的灵活存储, 又能提供高效的数据处理和分析能力。具体来说, 湖仓一体架构通过分层存储和索引机制, 提高了数据的查询性能和治理能力。同时, 引入事务性支持, 确保数据在写入和读取过程中的完整性和一致性。此外, 湖仓一体架构还支持数据的实时更新和增量加载, 满足智慧油田对实时数据的需求。

2.1.3 数据治理难度大、管理复杂(管) 数据治理在智慧油田建设中占据着至关重要的地位, 但同时也面临着多重挑战。首先, 数据质量方面存在显著差异。各业务领域在数据采集与质检管理上存在盲区, 这导致了数据质量的不统一。例如, 部分设备因维护失当或校准滞后, 可能会产生错误数据或数据缺失的问题。其次, 缺乏统一的治理组织和团队。各部门往往各自为政, 导致数据标准和管理体系不一致, 形成信息孤岛。例如, 不同部门或系统可能使用不同的数据格式和编码规则, 使得数据整合和共享变得困难^[20]。此外, 数据标准和治理体系不健全。在数据的采集、传输、存储和应用等环节中, 缺乏统一的规范和标准, 导致数据在不同系统间流转时容易出现错误和不一致。

为解决数据治理中的问题, 需要从组织、技术和流程等多个方面入手。首先, 建立专门的数据治理团队, 负责制定和执行数据治理政策。该团队应包括业务专家、技术专家、数据管理员、质量分析师等, 确保数据治理工作的专业性和持续性。其次, 搭建数据质量监控平台, 实现从数据采集源头到应用终端的闭

环质检流程。通过引入异常检测和自动清洗技术, 可以及时发现和纠正数据中的错误。例如, 可利用机器学习算法对数据进行实时监测, 自动识别异常值并进行修复。此外, 建立统一的数据质量评价指标体系, 定期开展数据健康度评估与整改。通过量化指标来衡量数据质量, 可以更直观地了解数据治理的效果, 并为持续改进提供依据。同时建议在企业级数据中台中, 集成元数据管理、数据资产目录、质量规则引擎等功能, 实现数据的自动归集与血缘追溯。通过这种措施执行, 可以确保数据在不同业务系统间的流转和使用过程中保持一致性和可用性。

2.1.4 数据融合分析应用(用) 在智慧油田的建设进程中, 数据应用是实现智能化转型的核心环节, 却也面临着诸多挑战。首要挑战在于数据整合的难度。如何将源自物联网、油气勘探、开发生产、工程技术、协同研究等多个业务领域的大量多源异构数据有效整合, 进而形成统一的数据视图, 是当前亟待攻克的一大难题。其次, 高效数据分析工具的缺失亦是一障碍, 这难以满足复杂数据挖掘与深度分析的需求。例如, 现有常用工具往往不支持大规模数据的并行处理或可视化分析功能, 从而限制了数据分析的深度与广度。同时, 数据价值的挖掘尚显不足。尽管在实际应用中已积累了海量数据, 但对数据的整体挖掘与分析尚不够深入, 未能充分挖掘数据的潜在规律与价值。例如, 在油藏动态变化的预测及生产优化方案的制定上, 仍过度依赖传统经验与模型, 而基于数据驱动的建模预测分析应用则相对较少。

为了应对这些挑战, 需要构建一个高效且灵活的数据挖掘分析环境。建议采用开源技术平台, 以搭建可扩展的大数据处理框架, 该框架应支持大数据的分布式存储与并行计算, 从而提升数据处理的效率和性能。接下来, 应专注于特定的业务问题, 结合智能可视化工具, 开发定制化的数据挖掘算法。这将增强数据分析的自主性与灵活性, 进而提升决策的科学性和时效性。举例来说, 可以运用聚类算法对油藏特性进行分类, 从而为制定开发策略提供有力依据。

2.2 一体化业务模型构建

利用通用人工智能技术(AGI)与传统专业模型

的结合, 构建智慧油田地上地下一体化的数字孪生系统, 从而形成智慧油气大脑, 这是智慧油田建设的核心所在。当前, 项目在实施过程中面临着数据处理、模型构建、数字孪生融合以及决策支持等多方面的挑战。

2.2.1 数据处理难 在智慧油田的建设过程中, 数据处理遭遇了诸多挑战。多源异构数据不仅来源广泛, 且格式多样, 对其进行高效整合、深度挖掘及精准分析存在不小的技术障碍。如何借助大数据分析和人工智能技术, 充分挖掘数据的潜在价值, 成为亟待解决的一大难题。为攻克这些难题, 建议充分利用大数据分析、机器学习等手段, 构建一个高效且灵活的大数据处理与建模分析环境。此环境应能整合物联网、油气勘探、开发生产、工程技术、协同研究等多个业务领域中的多源异构数据。同时, 借助开源技术平台, 融合大规模数据处理与可视化分析工具集, 开发出一系列数据预处理、建模分析、数据挖掘算法, 以有效支撑数据处理流程、数据分析工作及知识发现任务, 从而为智能决策提供坚实的支持。

2.2.2 模型构建复杂 构建智能模型与优化算法需依托深厚的专业知识及丰富的实践经验, 确保模型兼具准确性、可靠性与通用性实属不易, 且整合专业模型成果亦面临重重技术难关。为应对以上挑战, 可构建强大的AI能力支撑平台, 该平台将提供全方位的人工智能技术与工具, 助力智能模型的开发与应用。具体而言, 平台可采用主流AI框架, 配备统一的开发环境与工具链, 并结合高性能计算集群与云计算资源, 提供包括自然语言处理、计算机视觉等在内的多种AI服务与模型库, 全面支持数据建模、智能预测及决策优化工作。

2.2.3 大模型建设应用程度低 在智慧油田的建设进程中, 油气领域大模型的构建与应用遭遇了多重挑战。数据质量良莠不齐, 缺乏统一规范, 加之高质量的标签样本集构建不足, 导致模型训练数据可靠性差。同时, 模型构建过程需整合多学科知识, 开发高效架构与算法; 而模型的训练、验证及优化环节则需耗费大量计算资源, 进而推高了成本。此外, 专业人才的匮乏也制约了模型的开发与应用深度。实际工作中, 兼具石油工程与人工智能知识的复合型人才稀

缺, 传统工作模式与流程难以适配新技术, 员工对新模型的接纳度与信任度偏低, 这无疑阻碍了模型的推广进程。

为应对上述挑战, 需从数据治理、高质量数据集与样本集建设、模型开发、人才培养及推广应用等方面下功夫。具体而言, 要强化数据治理, 构建统一的数据标准与质量监控机制, 确保数据的准确性与一致性。通过数据清洗、转换及标注流程, 提升数据质量, 为模型训练奠定坚实基础。应统筹规划, 分类构建适用于模型训练的高质量数据集与标签样本集, 以供模型训练与验证之用。同时, 采用模块化开发策略与迁移学习技术, 降低模型开发的复杂性与成本, 结合预训练模型和开源资源, 针对油田实际数据进行微调, 以增强模型的准确性与适应性。

人才培养方面, 可与高校及科研机构携手, 共同培育复合型人才; 同时, 通过内部培训和实践项目, 不断提升员工的数据素养与技术能力, 为模型的开发与应用奠定坚实的人才基础。为展现模型的实际效果与价值, 须积极推动模型的试点应用与示范项目, 以此逐步转变员工的传统观念与工作方式。此外, 还须建立激励机制, 鼓励员工积极参与模型应用的优化工作, 促进模型的广泛应用与持续改进。

2.2.4 数字孪生融合难 将地上与地下各要素融合, 以构建一体化数字孪生体系, 需跨越不同系统与技术间的界限, 实现互联互通与协同作业, 其中, 如何破除系统间的壁垒与隔阂成为一项重大挑战。

为应对这些挑战, 需全方位整合地质、油藏、井筒、地面设施等领域的专业模型, 将这些专业软件模型成果融合为一体化耦合模型。同时, 采用数据驱动模型与专业模型“双轮驱动”的策略, 并嵌入代理优化模型, 依托多模型耦合与智能装备的联动, 构建包括智能盆地、智能油藏、智能井筒、智能管网、智能站场等在内的地上地下一体化数字孪生环境。这将有效支撑生产现场的全面感知、实时诊断、智能预测及自动优化等一体化智能应用, 进而逐步构建起智能油气大脑的决策中枢, 实现勘探开发生产各业务链的全面贯通, 促进油田整体运营效率与效益的提升。

2.2.5 智能决策支持弱 要实现对油田生产过程的智能决策与优化控制的有效支撑, 需构建完善的决策机

制和评估体系, 以灵活应对复杂多变的实际生产场景, 这无疑对技术和管理的综合能力提出了更高要求^[21]。为迎接这些挑战, 应结合实时数据与智能模型, 打造智能决策支持系统。该系统可利用大数据分析和人工智能技术, 对生产过程实施实时监控与预测, 为决策提供科学依据。同时, 通过智能算法与模型的应用, 实现对生产方案的优化与调整, 进而提升生产效率与经济效益。

2.3 智慧油田应用建设

智慧油田建设在智慧应用方面面临诸多挑战。AGI基础模型的构建缺乏明确的技术路径, 数据整合与模型优化工作困难重重; 多模态数据训练算法尚不成熟, 处理复杂数据的能力受限; 建模训练框架体系尚不完善, 预测与优化能力不足; 行业知识与AI模型的融合存在难度, 这严重阻碍了智慧应用与管理的推进。

2.3.1 通用人工智能基模型建设技术思路不清 在智慧油田的建设进程中, 通用人工智能(AGI)基模型的构建尚缺乏清晰的技术路径。企业面临着整合勘探、油藏、生产等多源数据并优化模型的难题, 且在模型架构设计、训练算法选择以及超参数调整等关键环节上, 缺乏系统性的研究与实践。为攻克这一挑战, 油气田企业应明确AGI基模型的建设技术路径, 并加大对多源数据整合与优化的力度。通过制定统一的数据标准和治理机制, 确保数据的精准性和一致性, 从而为模型训练奠定坚实的数据基础。同时, 企业应深化与高校、科研机构的合作, 携手推进算法研究与应用开发, 进而提升在AGI基模型建设领域的核心竞争力。

2.3.2 多模态训练算法尚不成熟、模训练框架和算法核心未掌握 在油田领域, 多模态数据呈现出数据量大、维度高及噪声多的特征, 这些特点使得传统的机器学习算法难以对其进行有效处理。研发多模态训练算法需要耗费大量专业人才和计算资源, 然而, 企业在这方面的投入却显得捉襟见肘, 这在一定程度上制约了算法的创新与发展步伐。此外, 国内油田企业对多模态建模训练框架及算法的理解与掌握尚显不足, 缺乏必要的经验和专业知识积累, 因此, 在开发高效

且准确的数据分析模型方面面临较大困难。

为应对这些挑战, 油气田企业应增加对多模态训练算法研发的投入, 致力于培养和引进既精通机器学习又了解石油行业的专业人才。同时, 企业应深入探索多模态建模训练框架与算法, 以期掌握核心技术, 增强建模实力。通过实践不断积累经验, 油气田企业应逐步提升对复杂数据的处理与分析能力。

2.3.3 行业知识与智能模型结合不足, 智慧应用落地难 当前, 油气领域中的专业知识大多通过复杂的数学公式或物理定律来阐述, 而现有的决策分析模型在直接融入石油行业专业知识方面面临挑战, 这致使智能化决策缺乏充分的信息支撑, 进而影响了决策的可靠性。尽管传统模型能够详尽描绘油藏的物理过程, 但它们依赖人工干预, 并消耗大量计算资源, 因此难以满足智慧自主决策所需的实时性和灵活性要求, 也难以构建出基于“油气大脑”概念的统一智慧油田应用场景。

为应对这些挑战, 应将石油行业的专业知识与智能模型相融合, 开发出能够支撑智能化决策的模型。通过精进模型架构与算法, 增强模型的实时响应能力和灵活性, 以实现智慧化的自主决策。与此同时, 积极促进模型的试点应用及示范项目落地, 展示其实际效果与价值, 从而逐步引导并改变员工的传统观念与工作方式。

建议依托一体化业务模型与智慧油气决策模型(即智慧油气大脑)的技术支撑, 全力打造覆盖全域的智慧应用, 实现智慧场景的具体化实施。在智慧勘探领域, 应运用智能分析技术, 迅速且精准地定位潜在油气藏, 从而提升勘探成功率, 有效缩减时间与成本。在智慧开发环节, 需实时监控油藏动态变化, 智能预判生产趋势, 并自动生成优化策略, 以提高采收率, 降低开发成本。通过构建一体化协同研究平台, 打破部门与专业间的数据壁垒, 促进多学科、多部门的协同作业, 进而提升研究效率与质量。在智慧生产运行方面, 应实时监控生产流程, 智能诊断设备故障, 优化生产参数配置, 以实现效率与质量的双重提升。在智慧经营决策层面, 则需智能分析市场与经营数据, 优化生产计划与资源配置, 从而提高经济效益与市场响应速度。此外, 还需实时监测环境数据,

智能预警环境风险, 并据此优化环保措施, 以降低环境影响, 推动智慧油田应用的全方位落地。

2.4 运营管理体系完善

2.4.1 政策制度体系 智慧油田的建设涵盖了多个领域的新技术和新业务, 因此, 完善相关制度的难度较大。配套的管理制度需要综合考量多方面的需求, 协调各方利益, 这导致了难以迅速构建出一个既全面又实用的制度体系。同时, 智慧油田对专业人才的要求高且需求量大, 在吸引和留住人才方面面临着激烈的竞争压力。此外, 智慧油田的建设需要大量的资金投入, 且回报周期较长, 如何探索出合理的建设运营与激励模式, 以保障资金的稳定投入, 也成为了颇具挑战性的问题。在智慧油田的改革创新过程中, 涉及多维度的成效评估, 由于评估指标难以量化, 且不同部门对评价重点的理解存在差异, 因此, 建立科学有效的创新效益评价体系困难重重。

为应对上述挑战, 需进一步完善智慧油田建设的政策制度, 并配套制定相应的管理制度, 以优化政策环境。应明确数据治理、技术应用等方面的标准规范, 并同步建立监督评估机制, 以保障政策制度的有效执行。同时, 制定涵盖数据治理、技术应用、项目管理等领域的标准规范, 确保智慧油田建设的规范化和标准化进程。此外, 还需建立健全政策制度的监督评估机制, 定期检查政策制度的落实情况, 以便及时发现并解决存在的问题, 从而确保政策制度得以切实有效地实施。

2.4.2 组织与运营管理体系 在组织与运营管理体系方面, 智慧油田建设同样面临着诸多挑战。传统油田的组织架构较为固化, 在调整为适应智慧油田生态的新架构过程中, 需要重新划分部门职责、进行权力重组, 这往往容易引发内部矛盾与协调上的难题。智慧油田建设项目不仅技术复杂, 而且关联性强, 制订科学合理的计划并确保其能够按时按质完成具有相当大的难度, 过程中还可能会遇到需求变更、技术难题等突发状况, 从而影响项目的进度与质量。此外, 智慧油田建设需要多部门、多专业的协同作战, 打破部门壁垒、实现信息共享与高效协作并非易事, 这往往容易导致沟通不畅、工作重复或衔接不当等问题的

出现。

为应对这些挑战, 建议设立统一的智慧油田建设管理机构, 该机构将专门负责整体规划、协调及监督工作, 并由企业高层领导直接负责, 其成员应囊括相关部门负责人及业务骨干。同时, 需调整组织架构, 成立专门的数智化部门, 专注于信息技术的研发与应用。此外, 还应组建一支专业团队, 该团队应涵盖数据管理、技术研发、系统运维、安全保障及业务应用等多个岗位, 并明确各岗位的职责与权限, 以确保各项工作的有效落实。人才培养方面, 建议与高校及技术公司携手, 致力于培养复合型人才, 并构建内部培训体系, 以激发员工的自主学习与创新精神。同时, 制定顶层规划, 明确智能油田建设的发展目标与实施路径, 形成详尽的实施路线图, 分阶段稳步推进。为保障投资与资源到位, 建议拟定专项投资计划, 并深化与政府和金融机构的合作。此外, 建立统一的运维体系, 才能确保系统稳定运行。

2.4.3 技术创新与标准规范体系 在技术创新与标准规范体系方面, 智慧油田建设同样面对着诸多挑战。智慧油田相关技术具备高度前沿性, 且研发成本高昂, 这要求企业不断投入巨额资金与人力资源。然而, 研发成果的不确定性使企业面临着较大的研发风险与资金压力。要在智慧油田领域实现技术突破, 企业不仅需要紧跟行业前沿, 克服现有的技术瓶颈, 还需将新技术与油田实际业务紧密结合, 这对技术创新能力提出了极高的要求。此外, 企业内部各部门、各系统间的原有标准规范存在差异, 因此, 在制定统一的智慧油田技术、业务等标准规范时, 需协调各方利益, 兼顾不同工作习惯, 推行过程中可能会遇到一定的抵触情绪。

为应对这些挑战, 需充分借鉴国际先进经验与国内现有标准, 结合智慧油田的特点与需求, 制定涵盖物联网设备接口、数据格式、通信协议、安全标准及系统架构等内容的全面统一标准。构建由网络通信与信息技术标准、数据标准及管理规章制度三大体系组成的规范框架, 实现技术、数据与管理的标准化。其中信息技术标准规范云计算、大数据及人工智能等技术的应用; 网络技术标准规定物联网、工业互联网等网络技术的应用要求; 开发技术标准涵盖软件模块

化、服务化敏捷开发及系统集成等技术规范。数据标准体系包含数据模型标准、采集规范、质检规范、处理规则及治理规范。管理标准体系贯穿智慧油田建设、运营、评估与运维全流程,确保项目实施的规范性与标准化。

2.4.4 安全保障体系方面 在安全保障体系方面,智慧油田建设仍面临诸多挑战。随着网络攻击手段不断翻新,安全威胁日趋复杂多样,防护技术需要持续升级更新,但往往难以跟上威胁变化的节奏。智慧油田产生的海量核心数据,在存储、传输和使用过程中易遭受黑客攻击或内部人员违规操作等风险,数据安全保障难度较大。此外,面对网络安全突发事件,系统需要快速响应并恢复正常运行,然而由于智慧油田系统结构复杂,应急演练与实际处置存在困难,这对应急机制的有效性构成了严峻考验。

为应对上述挑战,需全面强化智慧油田网络安全保障体系,构建包含防火墙、入侵检测系统及防病毒软件的多层次防护体系,有效防范外部网络攻击与恶意入侵^[22]。具体措施包括:采用数据加密技术保障重要数据的存储与传输安全;建立健全数据备份与恢复机制;加强数据访问审计与实时监控。同时,应构建完善的风险预警机制,运用大数据分析 with 智能算法实时监测系统运行状态及数据变化,确保异常情况得以及时发现和处理。

3 智慧油田生态系统总体设计原则

基于智慧油田面临的主要挑战及对策分析,提出智慧油田生态系统总体设计原则:以数据聚能构建“数字孪生体”的物质基础,依托AI赋能激活“智慧中枢”的认知革命,最终通过价值释能实现“人-技术-自然”的生态共生^[23]。该发展路径既契合黑格尔(Georg Wilhelm Friedrich Hegel)“正题-反题-合题”的辩证逻辑,又体现怀特海(Alfred North Whitehead)过程哲学中“现实缘现”的动态演化特征,为传统能源产业数字化转型提供了哲学范式。

生态系统以“聚能-赋能-释能”为主线,按照“三横、四纵、一门户”基本架构,横向融合、纵向贯通,有机统一。“三横”分别是智能数据汇聚——

聚能层,智能运行中枢——赋能层、智慧应用——释能层。“四纵”分别是政策制度体系、技术创新与标准体系、组织与运营管理体系和安全保障体系。“一门户”是智慧油田统一用户访问门户。

3.1 “聚能-赋能-释能”主线

智慧油田建设以“聚能-赋能-释能”为主线,聚焦“数据汇聚、运行中枢、应用创效”和AI赋能,通过多源异构数据的汇聚、构建地上地下一体化数字孪生,形成智慧油气大脑中枢,支撑八大智慧油田应用,逐步实现对智慧油田的全面赋能与价值释放。这是智慧油田建设的核心逻辑,新型智慧油田生态系统整体架构可参见图1。

3.2 “三横”体系设计

3.2.1 智能数据汇聚——聚能层 聚能层负责汇聚来自油田各个业务环节的多源异构数据,包括地下油藏数据、地面生产数据、设备运行数据、环境数据等。通过物联网技术实现数据的实时采集与传输,为智慧油田建设提供数据基础。同时对数据进行清洗、转换和存储,为智慧大脑中枢赋能层提供高质量的数据支持。

3.2.2 智能运行中枢——赋能层 赋能层作为智慧油田的核心,利用大数据分析、人工智能等技术,对多源异构数据进行深度挖掘与分析,构建智能模型和优化算法,融合专业模型成果一体化耦合和智能装备^[16],构建地上地下一体化数字孪生,逐步形成智慧大脑中枢,为智慧油田全业务链智能决策和优化控制提供技术支撑,推动油田业务的智能化升级。

3.2.3 智慧应用——释能层 释能层依托智慧大脑中枢赋能层提供的智能服务,开发了智慧勘探、智慧开发、智慧生产运行、智慧工程技术及智慧经营决策等各类智慧油田应用系统。这些系统的实施可对油田生产过程进行全面智能化管理与实时优化,从而提升生产效率、降低运营成本、增强安全性,助力智慧油田建设目标的实现。

3.3 “四纵”体系设计

3.3.1 政策制度体系 完善智慧油田建设的配套管理

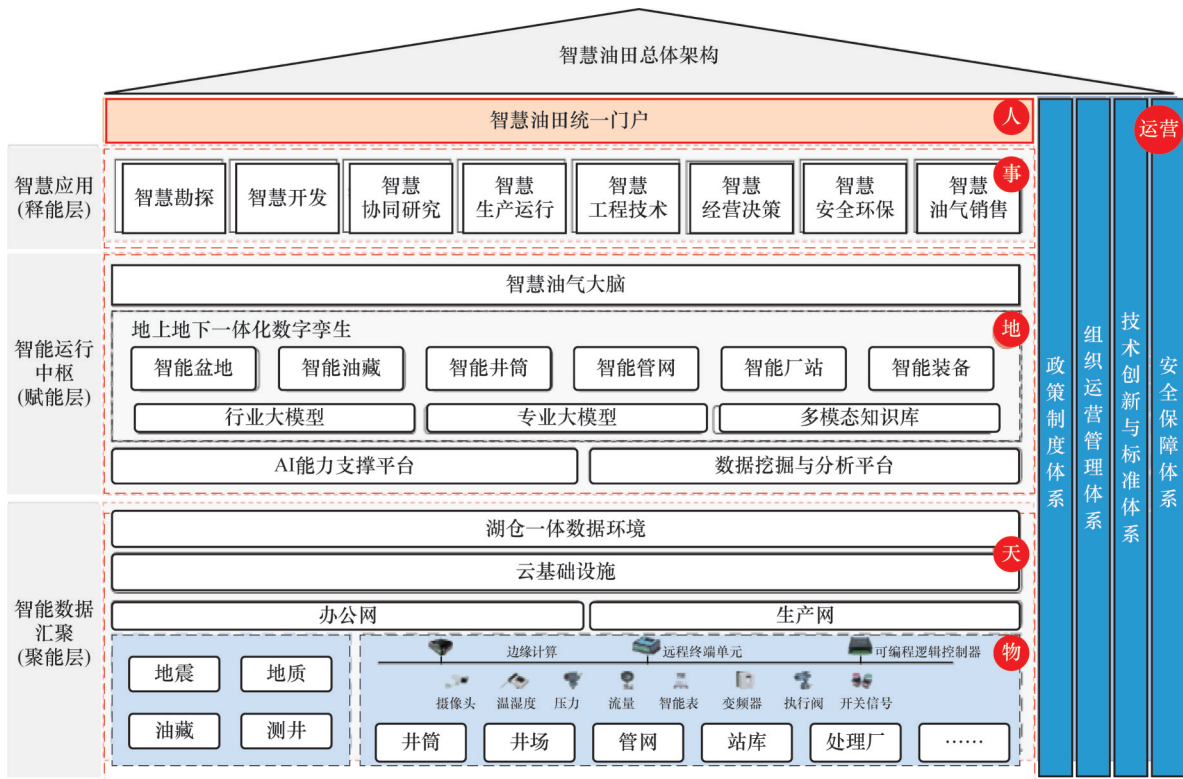


图1 智慧油田生态系统整体架构
Figure 1 Smart Oilfield Ecosystem architecture

制度，优化智慧油田政策环境。强化人才和资金保障，探索智慧油田建设运营和激励模式，建立健全智慧油田改革创新评价体系。

3.3.2 组织与运营管理体系 建立适应智慧油田生态系统的组织架构和运营管理模式，明确各部门和岗位的职责与权限，确保智慧油田建设的顺利推进。通过加强对智慧油田建设项目的管理和协调，制定科学合理的项目计划和实施步骤，确保项目按时、按质、按量完成。

3.3.3 技术创新与标准规范体系 加大对智慧油田相关技术的研发投入，鼓励创新，推动技术不断发展与进步。强化业务、技术和运行管理的标准规范，在企业内部制定统一的技术标准和规范，如：数据标准、业务标准、服务标准、应用规范、运维规范、安全规范等，提高系统的规范性、标准性、兼容性和扩展性。

3.3.4 安全保障体系 建立健全网络安全防护体系，强化安全管控、态势预警和应急机制，提高网络与信

息系统的威胁感知与应急处置能力，加强重要数据安全保护，防范关键数据和敏感信息泄露，确保系统安全高效有序运行。

3.4 “一门户”体系设计

智慧油田应用统一门户，为各类用户提供了一个便捷的入口，通过这个入口，领导决策者可以实时获取生产数据和决策支持，生产管理者可以监控和优化生产流程，科学研究者可以进行数据分析和研究，现场操作者可以获取实时操作指导和反馈，矿区居民可以享受智慧社区服务。这个统一门户整合了智慧勘探、智慧开发等多个智能应用，实现了数据的整合和业务的协同，提升了油田的整体运营效率和管理水平。

4 智慧油田建设愿景

在数字化与能源转型的浪潮中，智慧油田建设锚

定构建“天+地+人+物+事+运营”的新型生态系统这一宏伟愿景,全方位重塑智慧油田的生产、管理与运营模式,为油田企业高质量发展注入强劲动力。新型智慧油田愿景可参见图2。

4.1 天: 千姿百态的云, 赋能智慧决策

“天”代表云基础设施、湖仓一体数据环境支撑智慧油田大脑中枢,是智慧油田的“数据生态”。云基础设施为智慧油田提供海量数据存储管理与强大的计算能力,确保数据能快速处理与分析。湖仓一体数据环境则汇聚多源异构数据和敏捷分析环境,为管理决策提供精准可靠的数据基础。

4.2 地: 地上地下一体化数字孪生, 构建智慧油气大脑

“地”聚焦地下油藏与地上设施的一体化智能管理,利用先进的人工智能与机器学习算法,融合传统专业模型,构建智能盆地、智能油藏、智能井筒、智能管网及智能场站等地上地下一体化的数字孪生,形成智慧油气大脑,为油气勘探开发生产过程中的风险评价、实时诊断、智能预测、方案优化等全链业务提供科学决策依据,提升油田整体运营效率与效益。

4.3 人: 多样的参与者, 协同共创价值

“人”涵盖油田领导决策者、生产管理者、科学研究者、现场操作者与矿区居民等多样的参与者。智慧油田为他们搭建协同工作的数智化平台,打破信息孤岛,实现无缝沟通与协作。领导决策者可基于实时数据与智能分析做出战略决策;生产管理者能远程监控生产过程,通过专家交互系统和智能决策模型,及时优化作业调度和指挥决策;科学研究者利用大数据与人工智能技术,融合专业模型与智能工作流程,实现多学科协同研究,推动技术创新和价值增值;现场操作者借助智能设备与系统提高工作效率与安全性;矿区居民则通过智慧社区建设享受便捷生活,实现油田和谐发展。

4.4 物: 感知与设备层, 打造智能物联

“物”代表物联网、智能终端与边缘计算(EDGE),是智慧油田的“神经末梢”。基于物联网技术实时自动采集海量数据,实现对油田设备、生产过程的全面感知。智能终端如智能传感器、智能控制器等,具备数据采集、处理与传输功能,为设备上“智能芯”。边缘计算则在靠近现场数据源的边缘节点直接进行数据预处理与预测分析,减少数据传输延迟,提高响应速

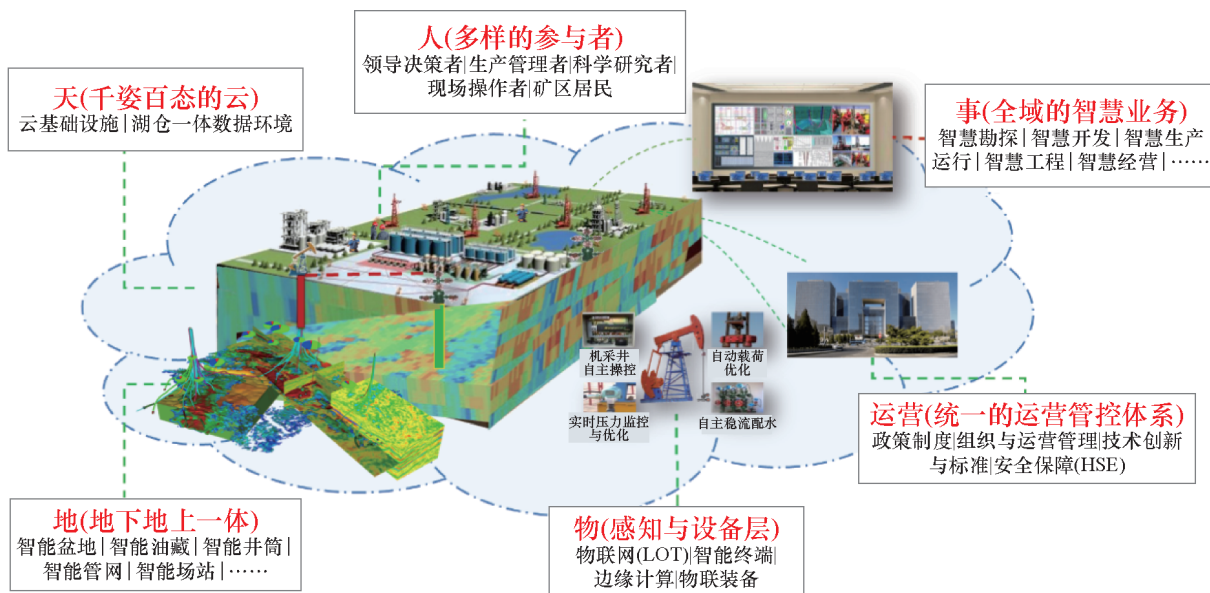


图2 “天+地+人+物+事+运营”的智慧油田愿景

Figure 2 The vision of Smart Oilfield, integrating “cloud + subsurface + people + IoT + business + operation”

度。通过“物”的智能化升级,智慧油田实现对生产过程的精准控制与智能优化,提升设备可靠性与运行效率。

4.5 事：全域的智慧业务，驱动产业升级

“事”涵盖智慧勘探、智慧开发、智慧生产运行、智慧协同研究、智慧工程技术、智慧经营决策和智慧安全环保等全域智慧业务。智慧勘探利用智能地震/测井资料处理解释等技术,打造智慧勘探应用场景,提高勘探成功率;智慧开发通过智能油藏模拟与开发方案优选、智能配产配注与精准分类治理、智能动态监测与优化分析,助力油田精益高效开发;智慧地面实现地面设施的智能运维与高效管理;智慧工程技术推动钻井、压裂等工程作业的自动化、智能化;智慧经营决策则从市场分析、成本控制到效益评估,全方位提升油田经营水平,为油田生产经营一体化管理决策提供科学依据。各智慧业务板块协同发力,推动油田生产方式与管理模式变革,驱动油田全域业务创新发展和智能升级。

4.6 运营：统一的运营管控体系，保障稳健运行

“运营”涵盖了政策制度体系、组织与运营管理、技术创新与标准、安全保障四大体系,为智慧油田稳健运行保驾护航。政策制度体系完善智慧油田建设的配套管理制度,优化智慧油田政策环境;组织与运营管理体系明确了各部门与岗位职责,优化了流程,提高了协同效率;技术创新与标准规范体系鼓励技术研发与创新,制定统一标准,确保系统兼容性与可扩展性;安全保障体系建立网络安全防护、数据加密与访问控制等机制^[2],防范安全风险。构建统一的运营管控体系,智慧油田生态系统将实现高效、安全、可持续的运营管理,为智能油田建设、油气企业的数智化转型和高质量发展树立行业标杆。

5 结论

智慧油田建设作为石油行业数字化转型的重要方

向,其核心在于通过数据驱动与智能技术的深度融合,推动油田生产、管理与运营的全面智能化升级。本文基于系统论、唯物辩证法和实践论的多维融合方法,结合工程生态新思维方式,对智慧油田建设的现状、挑战与对策进行了系统性分析,并提出了以“聚能-赋能-释能”为主线的智慧油田生态系统设计原则。

研究表明,当前智慧油田建设面临多方面的挑战,包括数据孤岛、多源异构数据融合困难、数据治理机制不完善;云计算资源分散、算力不足以及多模态数据训练算法不成熟;行业知识与AI模型融合不足、智慧应用场景落地难;以及复合型人才短缺、数据隐私保护与网络安全风险高等问题。为应对这些挑战,本文提出了“三横、四纵、一门户”的生态系统架构,通过智能数据汇聚、智能运行中枢与智慧应用的分层设计,实现从数据采集到智能决策的全链条贯通。同时,通过政策制度、组织管理、技术创新与安全保障体系的协同优化,为智慧油田建设提供全方位支撑。

本文提出了“天+地+人+物+事+运营”的智慧油田生态系统构想,旨在通过多维度协同与技术创新,推动油田生产方式与管理模式的全面变革。我们结合壳牌、BP、中国石油、中国石化等国内外智慧油田建设的典型案例,验证了“聚能-赋能-释能”框架的可行性和有效性,为企业制定智慧油田建设战略提供了科学依据,同时为学术界相关研究提供了新的视角与方法。

总之,智慧油田建设不仅是石油行业突破传统开发模式瓶颈的必然选择,更是实现绿色、高效与可持续发展的关键路径。目前智慧油田建设的研究尚处于初级阶段,但作为数字经济时代的重要研究课题,智慧油田建设体系的研究与创建迫在眉睫,希望本文的探索性研究起到抛砖引玉的作用。

参考文献

- [1] 刘合. 智慧油田建设任重道远 未来可期[N/OL]. 石油商报, 2022-08-30[2025-03-26]. <http://news.cnpc.com.cn/epaper/sysb/20220824/>

- 0154608004.htm.
- Liu H. The Construction of Smart Oilfields: A long journey ahead with promising prospects[N/OL]. Petroleum Business News, 2022-08-30 [2025-03-26]. <http://news.cnpc.com.cn/epaper/sysb/20220824/0154608004.htm>.
- [2] 刘合, 姚尚林, 张国生, 等. 智慧油田建设中数据治理的挑战与对策研究[J]. 北京石油管理干部学院学报, 2024, 31(1): 8-15.
- Liu H, Yao S L, Zhang G S, et al. Research on challenges and countermeasures for data governance in the construction of smart oil fields [J]. Journal of Beijing Petroleum Managers Training Institute, 2024, 31(1): 8-15.
- [3] 王权, 杨斌, 张万里. 数字油田及其基本架构[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(12): 47-48.
- Wang Q, Yang B, Zhang W L. Digital oilfield and its basic architecture[J]. Oil-gasfield Surface Engineering, 2004, 23(12): 47-48.
- [4] 赵贤正, 王洪雨, 刘计超, 等. 老油田实施数智油田建设研究与思考: 以大港油田为例[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(5): 1-8.
- Zhao X Z, Wang H Y, Liu J C, et al. Research and contemplation on how to build old oilfields into digital intelligent ones: Take Dagang oilfield for example[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(5): 1-8.
- [5] 李剑峰, 肖波, 肖莉, 等. 智能油田[M]. 北京: 中国石化出版社, 2020.
- Li J F, Xiao B, Xiao L, et al. Intelligent Oil Field[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020.
- [6] 姚尚林, 刘合, 苏健, 等. 智慧油田建设助推油气田企业"油公司"模式改革思考[J]. 世界石油工业, 2021, 28(3): 9-16.
- Yao S L, Liu H, Su J, et al. Thoughts on the construction of intelligent oilfields to promote the reform of the "oil company" model of oil and gas enterprises[J]. World Petroleum Industry, 2021, 28(3): 9-16.
- [7] 冯玉敏, 张辉, 谢文满, 等. 智慧油田是油田发展的未来[J]. 信息系统工程, 2012(6): 101-103, 105.
- Feng Y M, Zhang H, Xie W M, et al. Smart oilfield is the future of oilfield development[J]. CC News, 2012(6): 101-103, 105.
- [8] 聂晓炜. 智能油田关键技术研究现状与发展趋势[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(3): 68-79.
- Nie X W. Research status and development trend of core technologies of intelligent oilfields[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 68-79.
- [9] 王鹏. 5G技术在石化行业的应用场景及预期效益简析[J]. 当代化工研究, 2023(2): 182-184.
- Wang P. Application scenarios and expected benefits of 5G technology in petrochemical industry[J]. Modern Chemical Research, 2023(2): 182-184.
- [10] 杨剑锋, 杜金虎, 杨勇, 等. 油气行业数字化转型研究与实践[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 248-258.
- Yang J F, Du J H, Yang Y, et al. Research and practice on digital transformation of the oil and gas industry[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 248-258.
- [11] 郭以东, 马建国, 余洋, 等. 油气田企业能效数据融合研究与实践[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(5): 38-48.
- Guo Y D, Ma J G, Yu Y, et al. Research and practice of energy efficiency data fusion of oil and gas enterprises[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 38-48.
- [12] 杜金虎, 时付更, 张仲宏, 等. 中国石油勘探开发梦想云研究与实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 58-66.
- Du J H, Shi F G, Zhang Z H, et al. Research and practice of Dream Cloud for petroleum exploration and development of PetroChina[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 58-66.
- [13] 宋林伟, 王小善, 许海涛, 等. 梦想云推动地震资料处理解释一体化应用[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(5): 43-49.
- Song L W, Wang X S, Xu H T, et al. Application and practice of integrated seismic data processing and interpretation driven by E & P Dream Cloud[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(5): 43-49.
- [14] 石玉江, 王娟, 魏红芳, 等. 基于梦想云的油气藏协同研究环境构建与应用[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(5): 15-22.
- Shi Y J, Wang J, Wei H F, et al. Construction and application of oil and gas reservoir collaborative research environment based on E & P Dream Cloud[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(5): 15-22.
- [15] 梁文福. 油田开发智能应用系统建设成果及展望[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 283-289.
- Liang W F. Constructed achievements and prospects of the intelligent application system for the oilfield development[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 283-289.
- [16] 王同良, 杨梦露. 海洋油气工程数字化智能化发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(2): 105-120.
- Wang T L, Yang M L. Status and future of digital and intelligent development of offshore petroleum engineering[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 105-120.
- [17] 李进, 肖宇, 杨晨. 基于云边协同的海洋石油设备预测性维修技术研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2023, 31(3): 57-62.

- Li J, Xiao Y, Yang C. The research on collaborative predictive maintenance technology of offshore oil based on cloud computing and edge computing[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2023, 31(3): 57-62.
- [18] 林杨. 非数字原生企业数字化转型实践与认识: 以中海石油智能油田建设示范项目为例[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 552-558.
- Lin Y. Practice and understanding of digital transformation of non-digital original(traditional) enterprises: Taking the construction of CNOOC intelligent oilfield demonstration project as an example[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(4): 552-558.
- [19] 吴夏炎. 我国首个海上智能油田项目建成投用[J]. 中国石油企业, 2021(10): 60.
- Wu X Y. China's first offshore intelligent oilfield project was completed and put into use[J]. China Petroleum Enterprise, 2021(10): 60.
- [20] 甘秀颖. 发电企业实施业财融合的价值及路径探究[J]. 中国乡镇企业会计, 2024(15): 110-112.
- Gan X Y. Exploration on the value and path of power generation enterprises' integration of industry and finance[J]. China Township Enterprises Accounting, 2024(15): 110-112.
- [21] 任星兆, 张秋实, 王家骏, 等. 油田智能化辅助决策技术综述[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(4): 381-391.
- Ren X Z, Zhang Q S, Wang J J, et al. A review of intelligent decision support technologies in oilfield operations[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2024, 46(4): 381-391.
- [22] 吴嘉诚, 余晓. 网络安全风险评估方法研究综述[J]. 电子科技, 2024, 37(3): 10-17.
- Wu J C, Yu X. A review of research on cybersecurity risk assessment methods[J]. Electronic Science and Technology, 2024, 37(3): 10-17.
- [23] 刘合, 许建国, 苏健, 等. 采油采气工程智能化愿景[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 398-414.
- Liu H, Xu J G, Su J, et al. Prospects for intelligent oil and gas production[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 398-414.

Considerations and Design Principles for Smart Oilfield Construction

Liu He^{1,2,3}, Yao Shanglin^{2*}, Li Xin², Su Jian²

1. National Key Laboratory of Green Exploitation of Continental Shale Oil with Multi-resource Collaboration, Daqing 163000, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of Coalbed Methane, China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, China

Highlights

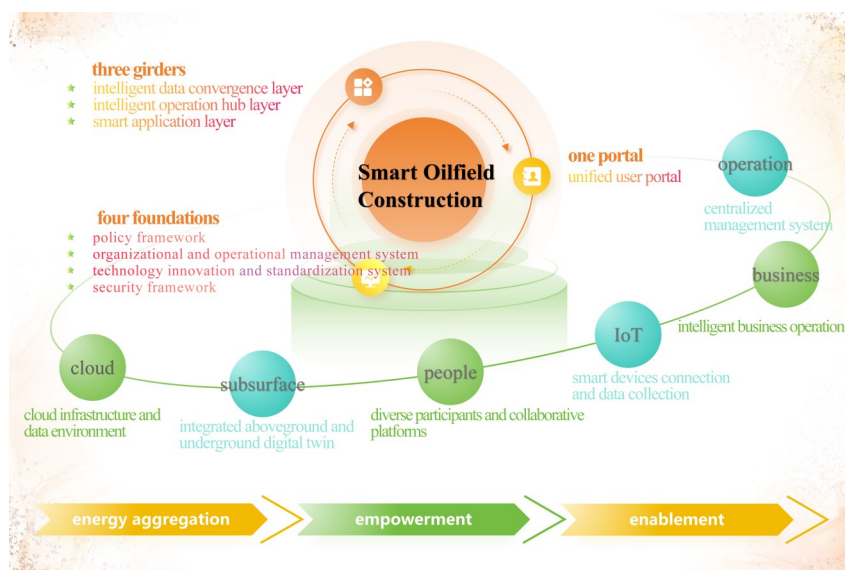
Smart Oilfield construction is essential for the petroleum industry to address energy transition and environmental protection.

This study proposes a “energy aggregation-empowerment-enablement” framework to enable data-to-decision integration.

It introduces a “cloud+ subsurface+ people+ IoT+ business+ operation” ecosystem vision to transform oilfield production and management.

By analyzing cases, the framework's feasibility is validated, supporting green, efficient, and sustainable industry growth.

Graphical Abstract



Abstract: This study focuses on the key issues in Smart Oilfield construction, proposing systematic solutions to provide theoretical foundations and practical guidance for the digital transformation of the petroleum industry.

This research adopts a multidimensional integration methodology combining system theory, materialist dialectics, and practical philosophy, along with an engineering-ecological perspective, to conduct an in-depth analysis of the current status and challenges of Smart Oilfield construction. Based on domestic and international practical experiences in Smart Oilfield development and the characteristics of the petroleum industry, the study proposes a "energy aggregation-empowerment-enablement" framework structured around a "three girders, four foundations, one portal" ecosystem architecture. Through the integration of multi-source heterogeneous data, the construction and optimization of intelligent models, the application of digital twin technology, and the implementation of Smart Oilfield application scenarios, the study comprehensively explores the pathways and methods for Smart Oilfield construction.

The research first analyzes the main challenges in Smart Oilfield construction, including data silos, limitations in technological applications, organizational inefficiencies, and security vulnerabilities. To address these issues, the study proposes solutions such as data aggregation and unified management, the construction of integrated business models, the development of smart applications, and the improvement of operational management systems. By building a lakehouse-integrated data environment, developing intelligent models and optimization algorithms, and promoting multimodal data training and the integration of industry knowledge, the study gradually validates the feasibility and effectiveness of the Smart Oilfield ecosystem. Additionally, through case studies of domestic and international Smart Oilfield projects, such as those by Shell, BP, PetroChina, Sinopec and CNOOC, the practical value of the proposed solutions is further demonstrated. The study draws the following key conclusions:

(1) Smart Oilfield construction is an inevitable choice for the petroleum industry to achieve digital transformation, with its core lying in the deep integration of data-driven and intelligent technologies to promote comprehensive intelligent upgrades in oilfield production, management, and operations. (2) Smart Oilfield construction faces multiple challenges, including data silos,

limitations in technological applications, organizational inefficiencies, and security vulnerabilities, requiring comprehensive measures in data management, platform technology, smart applications, organizational management, and security safeguards. (3) Building a "cloud+ subsurface+ people+ IoT+ business+ operation" Smart Oilfield ecosystem is the key pathway to the efficient advancement of Smart Oilfields. Here, "cloud" represents cloud infrastructure and data environments, "Subsurface" focuses on aboveground-underground integrated digital twins, "people" encompasses diverse participants, IoT enables the smart devices connection and data collection, "operations" drive comprehensive smart business activities, and "business" ensures the stable operation of the system. (4) Smart Oilfield construction relies on technological innovation, resource integration, talent development, and security safeguards to drive the transformation of production methods and management models, achieving green and high-quality development.

This study innovatively proposes the "energy aggregation-empowerment-enablement" framework and constructs the "cloud+ subsurface+ people+ IoT + business+ operation" Smart Oilfield ecosystem, providing a systematic solution for the digital transformation of the petroleum industry. The research not only enriches the theoretical system of Smart Oilfield construction but also offers actionable guidance for petroleum enterprises. At the policy level, the study emphasizes the importance of data governance, technological innovation, talent development, and security safeguards, providing references for governments to formulate relevant policies and industry standards. In academic exchange, this research, through multidisciplinary integration and empirical analysis, offers new perspectives and methods for the study of Smart Oilfield construction, demonstrating significant academic value and practical implications.

In summary, this study provides comprehensive theoretical support and practical guidance for Smart Oilfield construction, holding important practical significance and long-term value for promoting the digital transformation of the petroleum industry and achieving green and high-quality development.

Keywords: Smart Oilfield; data exchange; design principles