

文章编号:1009-9603(2022)03-0068-12

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202203035

智能油田关键技术研究现状与发展趋势

聂晓炜

(中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257001)

摘要:油田企业要应对高质量发展需求与外部严峻挑战,智能油田建设成为必然的发展方向。总结分析了中外油田企业在智能化建设中的先进实践,认为智能油田要具备全面感知、集成协同、预警预测、分析优化四项能力。在物联网建设全面推进的基础上,中国油气行业依托逐渐积累起的海量数据资源,结合智能化的技术手段在提高油气田勘探开发、生产运行的质量与效率方面开展了一系列探索与实践,在储层预测、油藏描述、工况诊断等业务场景中取得了良好的应用效果。为全面实现油田企业数字化转型、智能化发展,下步需要在生产现场动态自动监测与智能控制技术、新一代油田工业大数据智能化技术、油藏开发智能优化技术、油田数字孪生与智能运营指挥技术等方面深化攻关研究,形成具有领先水平的智能采集、全面感知、智能控制、预警预测等智能油田基础关键技术系列,支撑油田高质量发展,保障国家能源安全。

关键词:智能油田;大数据;人工智能;智能勘探开发;智能生产运行

中图分类号:TE34

文献标识码:A

Research status and development trend of core technologies of intelligent oilfields

NIE Xiaowei

(Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China)

Abstract: For oilfield enterprises, constructing intelligent oilfields is an inevitable development direction to meet the needs of high-quality development and severe external challenges. This paper summarizes the advanced practice of oilfield enterprises in China and abroad in intelligent construction and concludes that intelligent oilfields should have four abilities: comprehensive perception, integration and coordination, early warning and prediction, and analysis and optimization. On the basis of comprehensively promoting the construction of the Internet of things, China's oil and gas industry has conducted a series of explorations and practice by leveraging the massive data resources accumulated gradually and resorting to intelligent technologies to improve the quality and efficiency of the exploration and development and production operation of oilfields and gasfields. Favorable application results have been achieved in business scenarios of reservoir prediction, reservoir description, and working condition diagnosis. For the comprehensive implementation of digital transformation and intelligent development of oilfield enterprises, key research problems need to be further tackled for the technology of dynamic automatic monitoring and intelligent control on the production site, new-generation intelligent oilfield technology based on industrial big data, intelligent optimization technology for oil reservoir development, and digital twin and intelligent operation command technology for oilfields. The objective is to develop a leading series of basic key technologies of intelligent acquisition, comprehensive perception, intelligent control, and early warning and prediction for intelligent oilfields and thereby support the high-quality development of oilfields and ensure national energy security.

Key words: intelligent oilfield; big data; artificial intelligence; intelligent exploration and development; intelligent production operation

收稿日期:2022-03-24。

作者简介:聂晓炜(1974—),男,山东临沂人,高级工程师,硕士,从事油田勘探开发、生产运营管理工作。E-mail:niexiaowei.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化“十三五”重点科技攻关项目“勘探开发智能化关键技术及应用”(P14130)。

受全球政治经济形势和市场博弈等因素影响,油气能源行业震荡加剧,石油产业格局发生显著变化。全球能源趋向多元化、低碳化,随着油气需求增速下降,油田经营效益下滑,运营成本压力逐年增加,石油行业面临严峻挑战。同时,大数据、人工智能、5G、云计算等新一代信息技术驱动的全球第四次工业革命快速发展并推广应用,引发全社会和全产业链的颠覆性变革,给石油行业带来了新的发展机遇。数字化和智能化技术革命是开辟石油行业持续发展的新途径,建设智能油田既是石油行业降本提质增效的有效支撑,也是油田勘探开发等主营业务技术发展的必然趋势,能够解决油田高质量发展中面临的实际难题。

笔者在对智能油田的概念内涵进行基本描述的基础上,调研分析了中外油公司在智能油田建设方面的具体实践,重点针对我国油气田在智能化勘探开发、智能化生产运行方面开展的研究和形成的关键技术进行了介绍,并结合具体工作实际对胜利油田在相关领域的研究情况进行分析,对智能油田下步的发展方向和需要攻关的关键技术进行分析、预测与展望,以期对智能油田的建设与早日实现提供一定的借鉴与指导。

1 智能油田的概念内涵与建设实践

智能油田是数字油田的高级发展阶段,近年来,在经历了数字油田^[1-2]的建设,具备了基本的数据采集、管理等基础之后,中外石油公司围绕勘探开发等核心业务,积极探索智能化技术在油田的深入应用,智能化技术由点到面逐步推进,智能油田的概念逐渐明确、内涵不断丰富,智能油田建设取得了良好效果。

1.1 智能油田的定义及内涵

对于智能油田,中外诸多学者开展了分析探讨,但目前并无统一的定义。石崇东等提出智能油田是通过分析环境层、数据层、模型层、应用层等不同领域来综合制定与实施油田的合理高效开采^[3]。张凯等认为智能油田意味着面对开发过程中的动态分析、自动历史拟合、开发方案优化及提高采收率措施等主要生产问题,能够基于实时大数据“感知”油藏开发中的问题,利用先进的模型“分析”存在的问题,通过智能优化方案“思考”最佳策略与方案,最终辅助油田工程师“决策”现场实施^[4]。智能油田的建设就是让计算机或智能设备逐步代替或一定程度上代替人工脑力劳动的过程。石玉江等

认为数字油田代替了人的重复性的统计工作,是应用知识^[5]的过程,智能油田代替的则是人的部分分析归纳工作,是创造知识和知识共享的过程,是勘探开发技术、开采配套产业、油田生产及决策、现代信息技术应用等多种业务智能化协同发展的必然结果^[6]。

结合在胜利油田开展智能油田建设规划的经验认识,笔者认为智能油田的本质及目标就是在数字油田的基础上,围绕油田的油藏、油水井、管网、设备设施等核心资产,依托信息技术全面辅助资产管理和效益优化,构建全面感知、集成协同、预警预测、分析优化四项能力,助力高质量勘探、效益开发,实现油田资产价值最大化。从建设特点及内涵上来看,智能油田应该具备物联化、模型化、集成化、可视化四方面的特征。其中物联化是基础,利用传感器等装置实现油田所有资产对象及管理对象的感知及监控,同时将生产及管理相关的数据实时采集并及时传送到后台进行处理。模型化是核心,在对油藏、油水井、管网、重点设备设施等对象进行全面建模的基础上,通过数据、拓扑等各种关联关系进行一体化模拟,为各种方案、措施的优化奠定基础。集成化是关键,包括基于数据湖建设促进数据集成、通过工业互联网平台实现应用集成等,实现油田业务流程全生命周期的闭环式管理。可视化是将各个业务领域的静态及动态数据借助图形化、三维、移动等技术以直观形式随时随地按需展现,包括利用数字孪生技术实现生产过程、业务协同的透明可视,并支持交互处理。

1.2 国外油公司在智能油田建设方面的实践

国外油公司在智能油田方面起步较早,在油田感知、分析、优化等不同环节实施了相关的重要战略举措,特别是近两年来,通过加强与微软、谷歌等信息技术公司的合作,直接引进信息技术公司在大数据、人工智能方面的成熟技术,在勘探开发等核心业务智能化方面取得一定的效果。

埃克森美孚与微软合作,在其二叠纪盆地油田开发中应用数据湖、机器学习和云计算等技术,进行智能油气田建设。从广泛的传感器网络中收集数据(例如来自井口的压力和流量等)并存储在云平台中,科学家和分析人员可以从任何地方进行无缝、实时的访问,使用人工智能和机器学习等先进的数字技术,深入挖掘数据价值支持业务决策优化和工作流自动化。预计到2025年,智能化技术支持二叠纪盆地油田的产量增长50 000 bbl/d,并希望在未来十年通过改进分析和提高资产运行效率创造

数十亿美元的净现金流,在油田的整个生命周期中,实现降低成本、提高产量并减少甲烷排放。

壳牌在马来西亚 Borneo 海面的 SF30 油田开展智能油田试点建设,利用油井生产测试数据和地质油藏等数据,建立可靠的大数据模型,通过模型对生产状况进行精准预测,实时优化油井举升效率。基于预测结果更快地调整举升流量、温度与压力等参数,实现每 1~5 分钟调整一次,极大地提升了举升效率。井下压力和温度传感器与液压单元控制阀开关同时接入 DCS 系统,对井下流量进行实时监控;通过远程调节液压驱动各层段的控制阀,实时优化控制井下各层段的流量,实现油井多层段优化组合采油,提高采收率 0.25%。

道达尔公司通过搭建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。

1.3 国内油田企业在智能油田建设方面的实践

国内油田企业高度重视智能油田技术研究和建设工作,“十二五”以来,在开展数字化、网络化建设的基础上,将智能油田建设作为企业转型升级发展战略,先后启动了智能油田相关技术研究和试点应用^[7-8]。

中国石油“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 投入运行,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“数据难以共享、业务难以协同”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持,并在四川盆地风险勘探、塔里木油田圈闭审查、油气水井生产管理中开展了应用场景的实现^[9-12]。

中国石化 2013 年启动了智能油田建设规划工

作,同步开展了智能油田关键技术攻关研究,取得了明显的成果,并呈现快速发展之势。面向石油石化行业数字化、网络化、智能化的发展目标,联合华为研发推出了石化智云工业互联网平台,形成传统行业与信息技术深度融合的新模式、新业态,走在了中国流程工业智能制造应用领域前列。“十三五”以来,中国石化智能油气田建设重点围绕生产运行、集成协同、智能油田建设示范等稳步推进,研发并推广应用了生产指挥系统(PCS)以及勘探开发业务系统平台(EPBP)、勘探开发云平台(EPCP)等协同平台,打造了全面感知、集成协同和全局优化三项基本能力,实现了数据和专业软硬件的统一管理,先导示范见到了提高效率、降低成本的成效,为油田数字化、信息化和智能化发展奠定了基础。

中海石油 2019 年开展了数字化转型顶层设计工作,提出了以“云化+平台化+敏捷开发与交付+云边协同”为建设思路,基于“数据+平台+应用”的云架构开展信息系统建设,利用开发运维一体化协同(DevOps)体系进行系统研发,采用“数据+算力+算法”的智能应用技术体系进行系统部署,实现集成、协作、共享。面向勘探开发等业务场景,开展智能油田功能设计、技术实现、功能研发,为智能油田提供稳健的技术支撑。面向油气田全生命周期,从综合研究、现场作业、业务管理到战略决策四个层次,聚焦“透明化油藏、无人化操作、协同化运营、知识化决策”四类典型场景,利用先进信息技术手段,建设新型油气田勘探开发模式,实现油田高效运营和价值提升^[13]。

2 智能油田关键技术研究进展

当前,中外油田在数字化上已经有了长足的进步,尤其中国大庆、胜利等主力油田已经实现了生产现场数据的实时采集与处理,具备了对地面生产设备设施乃至井筒和油藏实时感知的条件,同时,积累的海量数据资源也为智能油田建设提供了较好的基础。围绕如何提高油气田勘探开发、生产运行的质量与效率,中国各大油田开展了一系列的探索与实践,取得了一定的成果。

2.1 智能化勘探技术

在油气勘探方面,中外学者围绕生、储、盖、运、圈、保六大要素的认识深化开展了多年的研究工作,近年来,随着相关算法和计算机软硬件的发展进步,应用大数据、人工智能技术解决勘探综合研究中遇到的难题成为热点研究方向,其中在 seismic 资

料处理、输导体系评价、地震构造及层位解释等方面进展较为显著,形成了一系列新的技术手段。

2.1.1 地震资料智能处理技术

地震资料处理是一项复杂的多环节系统工程,同时又是储层预测、油藏描述等工作的基础。传统的工作方式依赖于地震资料处理人员的经验,在处理精度与效率上存在诸多制约。应用大数据、人工智能技术解决地震资料数据处理问题为地震资料准确高效处理提供了新的技术方案。

目前针对地震资料的智能处理,主要的技术焦点集中在提高信噪比、减少噪音干扰方面。如高晗针对近地表可能存在于折射层上的低速风化层影响,以及地震观测数据信噪比低、存在噪音干扰等方面的问题,采用折射波走时计算剩余静校正值,并构建了空洞卷积、ResNet残差单元与跳跃连接相结合的空洞卷积残差连接网络,既增大了感知野,又加快了训练速度,提高了网络的细节学习能力和稳定性,达到了较好的去噪效果^[14]。向奎提出了一种基于卷积神经网络的地震资料智能化去噪方法,利用深度学习框架caffe对模型进行训练,将训练得到的模型用于地震道集去噪,并深入探讨了加快深度学习网络训练速度的六种方法^[15]。管西竹等针对海洋地震资料去噪处理问题,提出了基于残差卷积神经网络(ResNet)的随机噪声压制神经网络,通过增加归一化层和网络层的前馈传导过程来解决网络层数加深而导致的梯度弥散效应,可以有效压制海洋地震资料中的随机噪声,提高了网络模型的训练速度和去噪性能^[16]。

在地震资料处理方面,除了基于资料本身的去噪研究,减少资料处理过程中各个阶段的流程编排时间、参数实验次数,促进地震资料处理的经验共享和传承,也是提高地震资料处理效率的一个重要研究方向。为此,胜利油田采用大数据与人工智能领域的聚类分析技术,提出了一种地震资料处理流程智能推荐技术。利用采集的处理模块信息建立样本集合,根据大数据分析结果确定样本的分布规律,优选全局K-means聚类分析算法对样本集合进行聚类;为解决样本量过大的问题,使用MapReduce计算框架部署分布式K-means聚类算法,Map阶段将样本进行分割后聚类,形成多种聚类中心,在Reduce阶段进行聚类中心的评价和选择,确定最优聚类中心,最终实现全部样本的聚类分析。结合标准地震资料处理流程,从聚类结果中搜索最相似模块参数组合,提取信息以实现处理流程的智能推荐。地震资料处理流程智能推荐技术在地表一致性振

幅补偿、叠前炮域反褶积、剩余静校正等处理环节进行了应用,其中静校正是影响地震剖面信噪比和分辨率的关键技术,通过消除基准面静校正的剩余误差,调整共中心点道集的叠加相位,达到同相叠加的目的(图1),处理后断面清晰,资料分辨率和信噪比得到了有效提高。

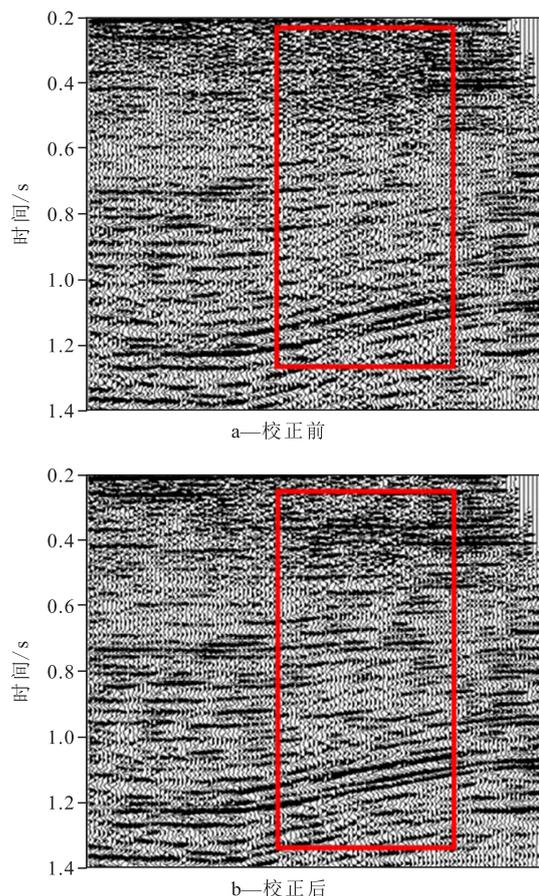


图1 剩余静校正前后叠加剖面效果对比

Fig.1 Comparison of stack section effects before and after residual static correction

2.1.2 油气运移智能分析技术

油气运移是石油地质学的基本理论课题之一,更是油气勘探开发中的关键问题。但油气运移与成藏一直是目前我国石油地质研究中较为薄弱的一环,传统人工、定性进行油气运移研究工作存在人工统计数据繁琐、工作量大,定性表征输导体系精度低,平面静态描述不直观等问题,难以实现定量评价^[17]。

在应用智能化的手段研究油气运移定量表征方面,先后有学者将传统动力学模拟与神经网络模拟相结合,在三维构造-地层体的动态模拟的基础上,基于单元体模型将非均质的复杂通道体系转化为有限个简单均质体,利用传统动力学模拟对相态和驱动力求解,利用神经网络等技术方法实现对单元体之间的油气运移方向、运移速率和运移量等要

素的求解,在三维油气运移定量模拟方面给出了一种解决方案^[18-19]。

输导体系作为连接烃源岩与圈闭的“桥梁”,在油气运聚成藏过程中起到了关键性作用。胜利油田通过分析流体压力、泥岩涂抹以及断面正应力等多因素对断层启闭性的影响,提出利用断层连通概率来定量评价断层在三维空间内不同位置启闭性的方法,通过分析骨架砂体输导要素与油气显示的关系,确定砂体输导性能的主控因素(倾角、物性)及其量化表征参数,形成了运移要素的定量评价公式和计算模型。在此基础上,基于骨架砂体、断层的输导能力,考虑输导层的非均质性影响,以及流体势、砂岩百分比等因素的影响,利用流线法可获得油气在输导层的运移强度、圈闭的模拟聚集量、油气运移轨迹等信息。这一方法在胜利油田勘探实践中开展了应用,其中在三合村-垦西斜坡带-渤南洼陷之间优势运移路径筛选方面,明确了渤南洼陷沙四段一沙三段烃源岩生成的油气在该区主要有2条优势运移路径(图2):一条是义633井—罗358井优势运移路径,一条是义96井—罗651井优势运移路径,从平面上看符合该区宏观油气运聚成藏认识^[20]。

2.1.3 地震层位自动解释技术

地震层位解释是油气勘探开发中的一项基础工作,而层位的识别和追踪是地震层位解释的一个重要环节,其准确性直接影响最终地震解释的合理性。目前应用人工智能方法对层位进行解释的思路主要有2种,其区别主要是在样本的构建方面,一种是基于测井解释结果与地震数据相结合的样本构建方法,一种是单独基于地震数据或测井数据本身的样本构建方法。在机器学习的方法上,以有监督学习为主,部分基于分类思想的无监督学习算法也有相关研究^[21-24]。

胜利油田提出了基于反射结构约束的层位自

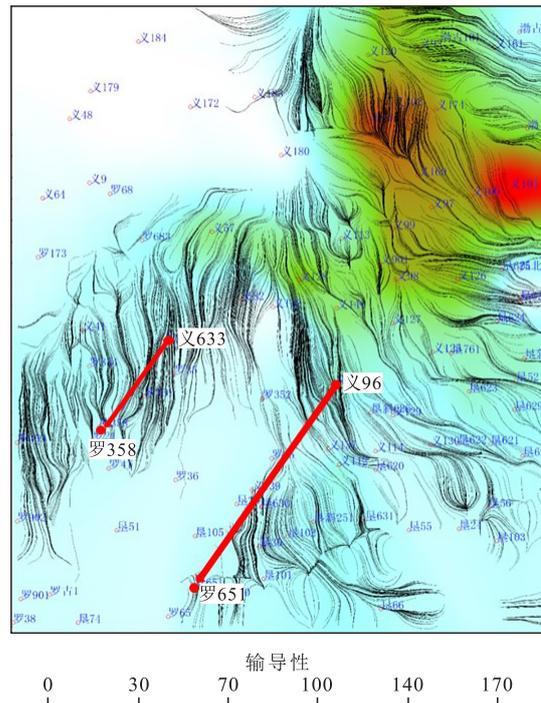


图2 垦西斜坡带油气优势运移路径轨迹

Fig.2 Trajectory of dominant migration path of oil and gas in Kenxi slope zone

动解释新方法,其本质上是一种基于地震数据的监督学习方法。主要思路是根据目标层位的地震数据进行波形单元划分,采用人工解释的方式获取部分层位解释成果,并将其作为样本标签标记至每个波形单元中。同时,对各个波形单元进行时频分析,将单个波形单元的一维时间序列信号提升至二维空间,以此为基础构建层位识别样本库,并利用DFCNN深度学习算法开展全区层位的自动识别,引入基于地层倾角的层位优化和基于地层趋势拟合函数的层位识别异常点判别等量化的反射结构约束信息,优化DFCNN自动识别结果。应用结果表明,基于反射结构约束的层位自动解释技术识别保证了地层倾角趋势的连续性及地层空间分布的趋势规律(图3),对比人工解释结果,自动解释结果的

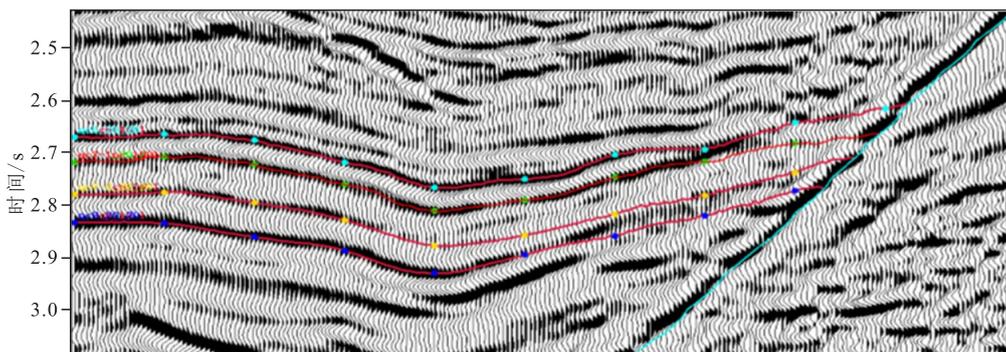


图3 基于反射结构约束的层位自动解释结果剖面

Fig.3 Result section of automatic horizon interpretation based on reflection configuration constraints

整体吻合率达到86%以上,相比常规层位自动解释方法,精度和可靠性都得到有效提升。

2.2 智能化开发技术

2.2.1 油藏模型智能更新技术

随着油藏开发的不断深入,油藏地质建模、数值模拟已经成为开发综合研究的主要技术手段^[25],目前我国大多数油田开发已经实现了建模数模一体化研究推广应用。然而,我国陆上老油田地质条件复杂,且多数已进入开发后期,各种工艺措施调整频繁,如何快速、动态、准确地更新油藏地质模型,指导剩余油的深化认识和开发方案的优化,已经成为影响油田开发质量的一个关键因素。传统的油藏地质模型更新及历史拟合方法主要通过人工方式开展,对人的经验依赖多,耗时长,模型跟踪及矿场应用时效性差,制约了高质量开发的步伐。近年来,针对油藏模型的智能更新,或油藏数值模拟的自动(或称辅助)历史拟合,中外开展了较为深入的研究,尤其是最优化的算法从传统的梯度类算法、进化类算法逐渐向神经网络法、集合卡尔曼滤波法甚至各种混合法过渡,智能算法越来越多地应用到自动历史拟合研究中,使得油藏模型的智能更新逐渐从理论探索走向了实际应用阶段^[26-29]。

在油藏模型的自动更新方法研究中,首先需要确定影响油藏模型计算指标拟合精度的相关静态、动态参数,然后研发面向不同优化目标的最优化算法。针对油藏数值模拟的自动历史拟合问题,胜利油田从实测的地层压力、油气水产量和流体PVT等油田基础数据入手,以油藏流动单元为对象,通过物质平衡计算获取储量及水体参数等全局敏感性参数,明确历史拟合调整方向及参数调整范围。在三维三相全隐式黑油模型的基础上,计算井底压力、生产油气比、含水率或者其他目标函数关于网格块渗透率、孔隙度、表皮因子和相对渗透率的敏感系数,并基于伴随系统理论,引入拉格朗日算子,建立伴随变量独立于模拟计算变量的伴随模型,避免直接求解梯度方程。根据贝叶斯统计理论建立了油藏模拟历史拟合数学模型,并分别基于无梯度优化方法和数据同化方法对历史拟合问题进行求解,解决了特高含水期油藏的自动历史拟合问题。在孤东油田七区Ng6³⁺⁴砂层组应用该技术(图4),数模计算结果与区块实际含水率变化曲线的形态和变化趋势一致,达到了较高的拟合精度,拟合效率可以提高3倍以上^[30]。

2.2.2 油藏开发综合研究流程化协同化技术

随着油藏开发研究的深入,专业分工越来越

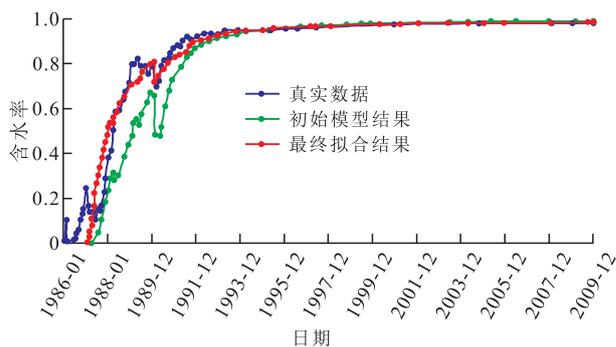


图4 孤东油田七区Ng6³⁺⁴砂层组综合含水率变化曲线对比

Fig.4 Comparison of comprehensive water cut curves of Ng6³⁺⁴ at Block 7, Gudong Oilfield

细,而从研究流程来看,多以线下串行式流程为主,数据与成果规范不统一、无法及时共享,从研究手段来看,地质研究、数值模拟、动态分析等不同的环节应用到的专业软件多样,研究人员调用不便,缺乏综合可视化分析手段,导致面向具体矿场区块的开发综合研究周期越来越长,影响了工作效率。针对这方面的问题,2006年刘贤梅等就提出研究并构建一个油田开发网络化协同工作系统^[31],但限于当时的研究手段,仅仅实现了网上方案签发、监督管理、资料验收等流程管理环节的计算机线上运行,没有针对开发综合研究开展进一步的攻关。多年来,我国油气田在这方面的工作进展鲜见文献报道,国外的大型石油服务公司却已持续开展一体化、协同化的软件平台研究,其中尤以斯伦贝谢公司的PetroRE最为成熟,实现了基于同一个软件平台的勘探、开发流程化、协同化研究,然而该模式并不适用于我国油气行业综合研究的现状,其中一个关键原因是我国勘探与开发专业划分、人员分工更细,各个流程、环节上研究人员掌握的软件并不一致,仅仅用一套PetroRE软件难以满足要求。

针对我国油气开发研究的人员、流程及软件现状,胜利油田在深入分析综合研究业务流程的基础上,按照规范流程、统一标准要求,建立了包含地层对比与划分、构造研究、储层研究、油层特征研究、油藏模型建立、开发效果评价、剩余油分析、方案优化部署等8个一级业务的油藏开发综合研究标准流程体系,针对各个流程的数据集成和成果转化等需求,设计了数据集成与处理和成果管理等功能模块,基于云共享模式将各个流程所应用的不同类型的专业软件虚拟化安装,实现了开发综合研究的全过程线上运行以及不同岗位的业务协同^[32]。油藏开发综合研究流程化、协同化技术支撑了胜利油田15个新老区方案编制与优化等工作,提高了开发综合研究的质量与效率。例如在丰深斜101块新区产

能建设方案等工作中,研究人员按照自定义的研究流程,调用平台功能、专业软件开展综合研究,各业务功能形成的成果数据实时共享、动态更新,相比传统的线下工作模式提高工作效率1倍以上。

2.2.3 油井工况智能诊断技术

油井工况监测与诊断对挖掘油井潜力、预判开发风险、优化开发措施具有重要意义。近年来,随着油田工业控制系统的快速发展,示功图、电功图等油井生产动态监测数据实现了实时采集。相比其他油气采集数据,示功图由于满足均匀性强、确定性强、干扰性小、实时性强等大数据通用行业的数据特点,因而基于示功图的工况智能诊断与预测技术成为大数据和人工智能技术在油气行业最先产生实际应用效果的方向。例如,王相等基于油井的历史动态数据与示功图采集数据,制备了涵盖5大类37种工况类型的油井工况诊断样本集,设计了专用的卷积神经网络(OWDNet)进行模型训练,在现场完成500余万次工况诊断,准确率达90%^[33]。

然而,从目前工况智能诊断的研究成果来看,对工况的诊断主要集中在根据示功图判断油井井筒或地层可能存在的问题方面,如管漏、活塞漏失、供液不足、出砂等,与油气开发指标相关的诊断与预测研究较少,如动液面测量,仍然以人工为主,虽然可进行示功图计算产液量,但现有方法存在计量误差大等问题,还需要人工干预,未实现真正的智能化采油。为此,基于电功图可反映抽油机井从地面到井筒的全部信息,且电参数测试精度高、数据准确、数据采集方便的特点,胜利油田研究形成了基于电功图的产液量和动液面智能计算方法。主要思路是通过电功图的波形分离及特征信息提取,并与正常工况下标准图版比较,实现抽油机井不同节点工况精细描述,作为油井工况智能诊断的判定依据;然后通过电功图使用小波信号分离计算有效冲程,通过上行功中举升液体做功相对变化量计算实时动液面,实现实时监控地层供液能力的变化。该算法在孤岛油田中一区进行现场应用,利用该块11口油井实时自动采集的生产数据,进行产液量和动液面计算分析(图5),电功图计算产液量符合率达到92.12%,电功图计算动液面误差为6.69%,精度较示功图方法大大提高。

2.3 智能化生产运行

物联化是智能油田建设的基础,我国大庆、胜利等主力油田基于多年的物联网建设已经实现了生产现场数据的实时采集与处理,具备了油藏生产

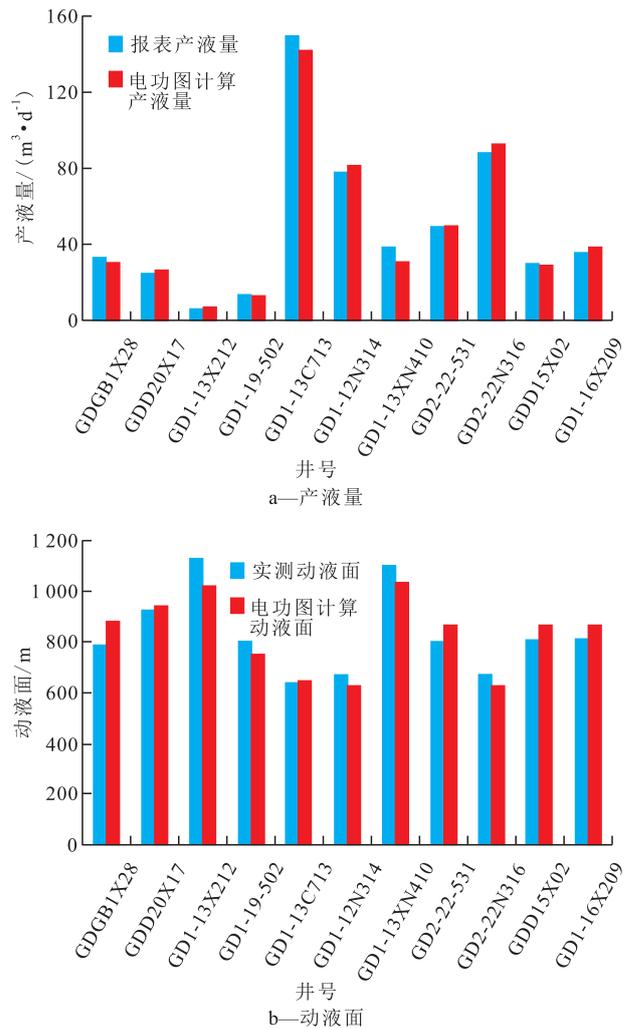


图5 基于电功图工况智能分析技术应用效果对比

Fig.5 Comparison of application effects of intelligent working condition analysis technology based on electrical diagram

运行数据实时感知的条件,并且基于实时生产大数据开展了一系列的智能应用研究。

2.3.1 油田生产现场智能预警技术

随着安防要求的不断提高和信息化手段的不断发展,中国各大油田生产现场都实现了视频监控的大面积覆盖,减少了现场巡井的时间和成本。然而,伴随而来的是多路海量视频数据不断产生,如果继续采用人工模式对视频进行分析研判,对监控人员的数量、个人经验和分析能力提出更高要求,将极大地影响视频应用的整体效能,因而基于视频大数据的智能识别技术快速发展。通过视频数据接口整合、视频数据解码及格式转换、虚拟矩阵架构技术、云存储技术、GIS技术以及自动识别等先进技术,可以实现视频系统的智能拓展应用^[34-35]。

由于缺乏油田特定场景和动作特征的识别模型,现有的视频智能分析功能受工况环境变化影响大,导致视频应用的时效性和准确性大幅降低。为

此,胜利油田聚焦特定的场景和动作特征,开展了智能视频应用研究。一是研究建立了基于运动目标检测与识别的综治反恐预警模型。根据综治反恐的具体业务特征,包括周界防范、区域入侵、车辆布控、人员布控等,确定每种场景下的分析目标的结构化特征。利用混合高斯模型的背景建模方法,提高背景建模算法的运行速度和识别精度,针对运动目标提高了检测效率。采用深度学习算法,对场景中的运动目标进行深层次的特征提取和交叉比对,通过多次迭代提高了识别的准确性。二是研究建立了基于直接作业环节规范检测的安全事件预警模型研究。通过对视频进行智能分析,对直接作业环节的安全隐患进行有效的预警。根据中国石化对盲板抽堵作业、高处作业、动火作业、动土作业、受限空间作业、临时用电作业、起重作业等7种直接作业环节的安全规范要求,建立各种作业场景中的结构化模型,将其作为视频智能分析的标准比对模板。通过深度学习算法,对直接作业现场的视频进行结构化处理,提取场景中的各种关键属性,与7类标准结构化模型进行比对分析,实现智能识别违规行为。在油田生产运行、安全环保、综治维稳、应急指挥等业务场景中进行应用,直接作业环节规范检测报警准确率为75%,区域入侵准确率为90%,行为识别分析准确率为65%,实现了安全事件的主动发现、快速研判、预警报警,设备运行异常的视频辅助分析,关键场所和要害部位综治反恐智能预警(图6)。

传统油井生产管理模式是出问题后再采取措施,如何利用海量生产实时数据实现生产异常问题的超前预警,是提升油田生产智能化管理的关键。基于采集的实时数据,采用趋势分析油井历史数据,建立生产故障多参数预警模型,利用偏移变量计算引擎快速存取海量实时数据,通过聚类分析、模型识别,智能筛选异常井进行故障预警。构建并应用了包括井筒工况、地面设备、地面管网3大类,抽油杆超应力、油井结蜡、抽油机皮带断等30项预警模型,累积应用油井约1.5万余口,实现了数据变化异常超限报警、多参数组合趋势跟踪预警。在进行油井时率优化的过程中,深入分析影响因素,分因素开展治理工作,针对油井结蜡、管线冻堵、设备故障等主要因素,研究参数趋势变化规律,应用多参数组合预警工具,构建载荷波动、油管漏失、机械设备传动失效3项预警模型,有效支撑问题早发现早治理,降低躺井“治未病”,油井躺井率由1.9%下降至1.7%,油井时率由96.8%提升至97.3%,为稳产增产做出较大的贡献。

2.3.2 油田重点设备预测性维护方法

柱塞式注水泵和离心式注水泵等是油田重点设备,因其高压运行,存在较大的安全隐患。日常管理过程中,一些故障隐患或故障发生初期,如果无法及时发现,持续发展,可能导致机泵设备的故障停机,甚至造成设备大修报废。目前监控手段仅有视频监控和单参数运行监控,往往泵运行状态难以准确全面的监控到位,部分故障仍然依靠现场巡

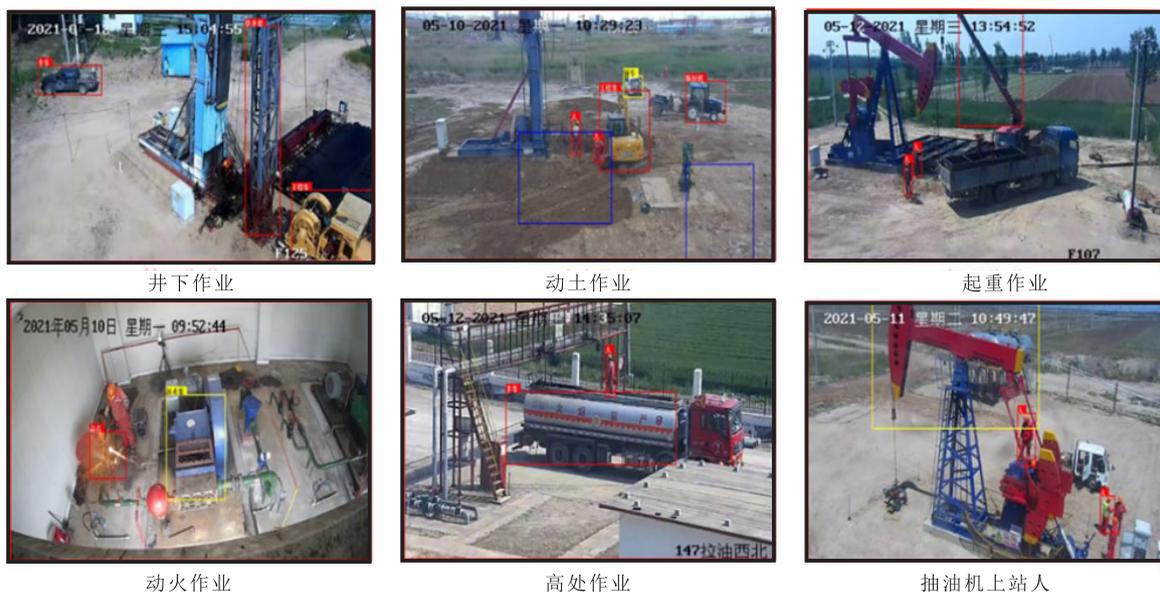


图6 多种油气作业场景下的视频智能识别

Fig.6 Intelligent video recognition in various oil and gas operation scenarios

检才能发现,人工现场巡检存在较大安全风险。为此,研究人员提出基于生产物联网数据开展数据挖掘方法研究的思路,以提高效率、降低成本。例如秦天飞等针对临修离心泵剩余寿命评估问题,通过特征提取和主成分分析得到反映离心泵健康状态退化过程的关键指标,提出了基于优化概率神经网络(PNN)的离心泵大修阈值模型和基于优化极限学习机(ELM)的离心泵剩余寿命评估模型,并通过数据降维处理和遗传粒子群算法对训练方法进行优化。通过实际案例应用表明所提出的方法在离心泵井的临修预判和剩余寿命评估方面具有较高的预测精度^[36-38]。

自2013年开始,随着生产实时数据的自动采集及大量积累,胜利油田针对注水泵的预测性维护开展了基于智能化手段的攻关研究。首先对高压注水泵实时数据中的异常数据自动甄别和处理,通过时域、频域等特征提取算法对标准差、均分根值、方差、峭度、特征频谱等状态特征信息进行提取,对近5年来油田注水泵设备故障进行了分析,建立了动力端故障、阀体总成故障、柱塞磨损或腐蚀、皮带故障等4类注水泵故障样本数据集;其次构建了专家知识与基于深度置信网络(DBN)的深度学习模型相结合的诊断模型,针对机理明确的动力端故障、阀体总成故障、皮带故障等问题,应用知识模型进行诊断,针对机理复杂的平衡盘磨损、柱塞磨损或腐蚀等问题,应用神经网络模型进行诊断。该方法在油田投入应用以来,诊断准确率不断提高,故障报警率为95%(总报警数/应报警次数),故障漏报率为5%(漏报次数/应报警次数),报警有效率为90%(实际发生故障次数/总报警数),单泵天报警频度为0.3(单台泵每天报警数量),已成为采油管理区技术人员注水泵管理的必备手段。

3 智能油田技术发展趋势

我国智能油田技术研究和试点建设虽取得了长足进展,但与国外先进水平相比仍存在一定差距,在支撑石油行业数字化转型、智能化发展方面仍存在较多技术问题需要攻关解决,主要体现在以下4个方面:一是油田生产现场动态自动监测与智能控制技术方面,生产前端物联网标识标准及解析体系尚未建立,油水井井筒高可靠物联化关键技术尚未突破,边缘智能及边云协同技术能力不足;二是新一代油田工业大数据智能化技术方面,我国统一的数据及成果共享应用标准尚未形成,海量勘探

开发数据高效管理和智能化服务技术能力不足,适应油田开发生产各环节诊断分析、预测预警、优化决策的大数据系列模型尚未完整建立^[39-41];三是油藏开发智能优化技术方面,高水平建模数模软件国外依赖程度高,基于大数据、人工智能的模型自动更新方法油藏适用性不足,开发方案缺乏自动优化、自动推送的技术手段;四是油田数字孪生与智能运营指挥技术方面,缺乏油田数字孪生模型自动构建和油藏、井筒、地面一体化协同智能诊断技术,生产经营融合技术薄弱、生产过程风险智能识别技术单一,尚未建立以生产经营异常管理为基础的生产运营指挥技术支撑体系。为此,笔者认为智能油田下步技术发展主要包括以下4个方面。

第一,油田生产现场动态自动监测与智能控制技术。紧跟物联网、人工智能、5G等新技术发展,聚焦油田智能开采能力发展需求,围绕油田生产现场无人、少人、自动化管理需要,研究油田工业互联网标识编码标准、标识载体标准和标识解析关键技术,支撑油田生产全流程、全过程、全节点物联化,实现油田生产动态实时感知和设备设施、物资物料等全生命周期管理;攻关油藏动态智能监测技术及现场电子巡检、无人管控技术手段,替代传统的人工操作,研究井筒举升、地面注采输生产全过程连锁控制和闭环优化控制系列模型,攻关油水井、站、管线等关键环节智能控制技术,为油田现场少人、无人管理提供技术保障;研究形成油田边缘计算技术系列,攻关边云协同关键技术,支撑油田远程实时管控体系高效运行,为大幅减少基层一线用工、提高劳动生产率、保障设备设施高效长寿命生产提供技术保障。

第二,新一代油田工业大数据智能化技术。以大数据、人工智能技术为切入点,以智能化技术与油气勘探开发领域深度融合为主要战略方向,在数据资源中心建设基础上,基于数据、业务、算法科学匹配,开展小任务、多数据、强关联、混合技术、大数据分析,实现人工智能学习、记忆、判识,让海量数据为生产实践赋能。结合石油大数据管理需求,利用数据湖、数据仓库等先进的数据管理技术,开展湖仓一体数据融合方法研究,建立我国石油行业统一的数据模型、数据服务和数据管理规范,实现数据资产化管理。根据跨专业数据共享和系统联动需求,研究勘探开发应用数据智能服务技术,支撑跨专业、跨类型的大数据应用,研究各类专业软件之间的共享标准,开展油田应用系统联动和流程整合智能化技术研究,支撑业务流程智能优化。开展

油田工业大数据挖掘分析模型研究,研究勘探开发核心专业领域的样本标定技术和规范、构建石油专业领域的大数据挖掘模型,支撑油田开发研究、分析、优化等智能化转型。研发基于人工智能的地震资料自动化处理,实现地震资料智能噪音压制、全自动化初至拾取、时频域井震融合智能学习提高分辨率、处理效果智能评价,开展基于三维地震体的地质目标智能识别、储层与流体智能描述评价、辅助勘探决策与探井井位部署优选等技术研究。

第三,油藏开发智能优化技术。研究地质建模知识体系,结合大数据、人工智能技术,构建储层建模新方法、新算法,形成油藏智能地质建模技术,提高建模效率和模型精度;在此基础上研究油藏智能数值模拟技术,突破油藏自动历史拟合技术瓶颈,研发新一代油藏井筒地面数值模拟器,提高油藏数值模拟自动化、智能化水平,为开发方案自动模拟优化提供支撑。研究油藏开发动态智能分析、方案智能优化、效果智能评价技术,实现油藏开发矛盾和潜力自动分析以及方案的智能推送,形成开发部署、分析、调整、优化、评价等油藏全生命周期管理模式,为优化油藏开发技术政策、动态实施综合调整、降低自然递减提供支撑。

第四,油田数字孪生与智能运营指挥技术。依托油气生产信息化建设成果,研究油藏、井筒、地面一体化“数字孪生体”构建技术,提升油田可视化监控能力。研究油田开发生产过程风险预警技术,实现指标变化、产量波动、安全环保、油藏经营等开发生产过程风险的预警预测。以油田开发生产业务为主线,聚焦油藏经营管理,覆盖油田生产经营全部业务,研发生产监控、动态管理、协同管理、评价考核、QHSE、应急处置等功能的智能运营指挥系统,发挥实时数据在可视化监控、异常诊断、预警预测、辅助决策、智能运营等方面的支撑作用,实现纵向层级贯通,横向业务协同,逐步由生产指挥向生产运营过渡。

4 结束语

智能油田是油田的必然发展方向,智能油田关键技术是解决油田勘探开发、生产运行等难题的必要手段,是推进油田业务数字化转型的基本支撑。通过人工智能、大数据、物联网等技术与勘探开发关键业务融合,形成具有领先水平的智能采集、全面感知、智能控制、预警预测等智能油田基础关键技术系列,支撑油田主体技术更新换代,变革传统

的油田勘探开发管理模式,提高劳动生产率、降低开发成本,提高应对和防控风险的能力,保障国家能源安全。

参考文献

- [1] 陈强,王宏琳.数字油田:集成油田的数据、信息、软件和知识[J].石油地球物理勘探,2002,37(1):90-96.
CHEN Qiang, WANG Honglin. Numeric oilfield: integrating data, information, software and knowledge of oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(1): 90-96.
- [2] 吴钧,于晓红.大庆油田生产经营管理与辅助决策系统设计与实施[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):294-300.
WU Jun, YU Xiaohong. Design and implementation of the production management and assistant decision-making system for Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 294-300.
- [3] 石崇东,李琪,张绍槐.智能油田和智能钻采技术的应用与发展[J].石油钻采工艺,2005,27(3):1-4.
SHI Chongdong, LI Qi, ZHANG Shaohuai. Application and development of the intelligent oil field and intelligent drilling and production technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(3): 1-4.
- [4] 张凯,赵兴刚,张黎明,等.智能油田开发中的大数据及智能优化理论和方法研究现状及展望[J].中国石油大学学报:自然科学版,2020,44(4):28-38.
ZHANG Kai, ZHAO Xinggang, ZHANG Liming, et al. Current status and prospect for the research and application of big data and intelligent optimization methods in oilfield development[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2020, 44(4): 28-38.
- [5] 石玉江.智能油田在中国的研究现状分析[J].海峡科技与产业,2016,(12):81-83.
SHI Yujiang. Analysis on the research status of intelligent oilfield in China[J]. Technology and Industry Across the Straits, 2016, (12): 81-83.
- [6] 刘万伟,刘瑞超,张鸣歌.石油勘探开发知识管理技术研究与应用[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):290-293.
LIU Wanwei, LIU Ruichao, ZHANG Mingge. Research on the knowledge management technique for petroleum exploration and development and its application[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 290-293.
- [7] 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 Jianfeng, DU Jinhui, YANG Yong, et al. Research and practice on digital transformation of the oil and gas industry[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 248-258.
- [8] 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 Yidong, MA Jianguo, YU Yang, et al. Research and practice of energy efficiency data fusion of oil and gas enterprises[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 38-48.
- [9] 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 Jinhu, SHI Fugeng, ZHANG Zhonghong, et al. Research and practice of Dream Cloud for petroleum exploration and development of PetroChina [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (1):58-66.
- [10] 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 Linwei, WANG Xiaoshan, XU Haitao, 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.
- [11] 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 Yujia, WANG Juan, WEI Hongfang, 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.
- [12] 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 Wenfu. 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.
- [13] 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 Yang. 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.
- [14] 高晗.地震数据剩余静校正与人工智能去噪研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- GAO Han. Study of seismic data residual statics and AI denoising [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [15] 向奎.基于卷积神经网络的地震资料去噪方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- XIANG Kui. Seismic data denoising method based on convolutional neural network [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [16] 管西竹,王建华,汪小将,等.基于ResNet的海洋地震资料智能去噪处理技术研究[C].西安:中国石油学会2021年物探技术研讨会论文集,2021:993-996.
- GUAN Xizhu, WANG Jianhua, WANG Xiaojia, et al. Research on intelligent denoising technology of marine seismic data based on ResNet [C]. Xi'an: Proceedings of 2021 Symposium of Geophysical Exploration Technology of China Petroleum Society, 2021:993-996.
- [17] 张厚福,金之钧.我国油气运移的研究现状与展望[J].石油大学学报:自然科学版,2000,24(4):1-3,20.
- ZHANG Houfu, JIN Zhijun. Present situation and the future of petroleum migration research in our country [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2000, 24 (4):1-3,20.
- [18] 吴冲龙,毛小平,刘海滨.基于人工智能的油气运移聚集模拟方法[C].广州:2009全国数学地球科学与地学信息学术会议论文集,2009.
- WU Chonglong, MAO Xiaoping, LIU Haibin. Simulation method of hydrocarbon migration and accumulation based on artificial intelligence [C]. Guangzhou: Proceedings of 2009 Mathematical Geoscience & Geoinformatics Conference of China, 2009.
- [19] 张列军.三维油气智能运移模拟系统研发与应用[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
- ZHANG Liejun. 3D petroleum intelligent migration simulation system of development and application [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [20] 宋国奇,宁方兴,郝雪峰,等.骨架砂体输导能力量化评价——以东营凹陷南斜坡东段为例[J].油气地质与采收率,2012,19(1):4-6,10.
- SONG Guoqi, NING Fangxing, HAO Xuefeng, et al. Study on quantitative evaluation of sandbody framework transporting capacity: case of southern slope of Dongying sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1):4-6,10.
- [21] 陈清华,章凤奇,孙述鹏,等.模式识别在地层划分中的应用[J].石油与天然气地质,2004,25(1):102-105,114.
- CHEN Qinghua, ZHANG Fengqi, SUN Shupeng, et al. Application of pattern recognition in stratigraphic division [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1):102-105,114.
- [22] 张文龙,李畅,王帅,等.地层智能划分与对比研究进展及发展趋势探讨[J].信息系统工程,2021,(5):132-135,138.
- ZHANG Wenlong, LI Chang, WANG Shuai, et al. Research progress and development trend of intelligent strata division and correlation [J]. CC News, 2021, (5):132-135,138.
- [23] 周翠英,张国豪,杜子纯,等.基于机器学习的地层序列模拟[J].工程地质学报,2019,27(4):873-879.
- ZHOU Cuiying, ZHANG Guohao, DU Zichun, et al. Stratigraphic sequence simulation based on machine learning [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4):873-879.
- [24] 王彪,杨巍,朱仕军,等.基于HHT与PCA及K-maxmin聚类的地层划分方法及其应用[J].地球物理学进展,2020,35(5):1861-1869.
- WANG Biao, YANG Wei, ZHU Shijun, et al. Application for sequence stratigraphy division based on Hilbert transform, principal component analysis and K-maxim clustering [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(5):1861-1869.
- [25] 于金彪.油藏数值模拟历史拟合分析方法[J].油气地质与采收率,2017,24(3):66-70.
- YU Jinbiao. History matching analysis method on reservoir numerical simulation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3):66-70.
- [26] 王鸣川,段太忠,孙红军,等.油藏自动历史拟合研究进展[J].科技导报,2016,34(18):236-245.
- WANG Mingchuan, DUAN Taizhong, SUN Hongjun, et al. Research progress in reservoir automatic history matching [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18):236-245.
- [27] 张凯,马小鹏,王增飞,等.一种强非均质性油藏自动历史拟合

- 混合求解方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2018,42(5):89-97.
- ZHANG Kai, MA Xiaopeng, WANG Zengfei, et al. A hybrid method for solving automated production history match of reservoirs with strong heterogeneity[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2018, 42(5): 89-97.
- [28] 肖太可. 基于地质知识库的河流相油藏自动历史拟合技术的研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- XIAO Taike. Research on automatic history matching of fluvial reservoir based on geological knowledge dictionary[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2019.
- [29] 袁子昊. 基于EnKF和ES-MDA的油藏自动历史拟合[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- YUAN Zihao. Automatic reservoir history-matching method based on EnKF and ES-MDA[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [30] 汪勇, 张璋, 孙业恒, 等. 基于伴随模型的历史拟合参数敏感性分析方法[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(2): 240-244.
- WANG Yong, ZHANG Zhang, SUN Yeheng, et al. Methods of parameter sensitivity analysis for history matching based on adjoint model[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(2): 240-244.
- [31] 刘贤梅, 汤磊, 王晓哲. 油田开发网络化协同工作系统研究与实现[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(12): 45-46.
- LIU Xianmei, TANG Lei, WANG Xiaozhe. Research and implementation of networked collaborative work system for oilfield development[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2006, 25(12): 45-46.
- [32] 杨耀忠, 谭绍泉, 孙业恒, 等. 油气勘探开发综合研究数字平台建设及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(4): 628-634.
- YANG Yaoshong, TAN Shaoquan, SUN Yeheng, et al. Construction and application of digital platform for comprehensive research of oil and gas exploration and development[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 628-634.
- [33] 王相, 杨耀忠, 何岩峰, 等. 基于深度学习的油井工况智能诊断技术研究及应用[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(1): 181-189.
- WANG Xiang, YANG Yaoshong, HE Yanfeng, et al. Research and application of intelligent diagnosis technology of oil well working conditions based on deep learning[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 181-189.
- [34] 吴军, 邓涛, 杨磊, 等. 物联网关键技术在采油厂的研究与示范应用[J]. 智能制造, 2021, (S1): 209-215, 230.
- WU Jun, DENG Tao, YANG Lei, et al. Research and demonstration application of key technologies of internet of things in oil production plant[J]. Intelligent Manufacturing, 2021, (S1): 209-215, 230.
- [35] 邹礼, 石雄, 丁玉珍. 基于云存储技术的视频监控系统在油田中的应用[J]. 中国管理信息化, 2021, 24(18): 111-112.
- ZOU Li, SHI Xiong, DING Yuzhen. Application of video monitoring system based on cloud storage technology in oilfield[J]. China Management Informationization, 2021, 24(18): 111-112.
- [36] 秦天飞. 临修离心泵剩余寿命评估方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- QIN Tianfei. Remaining life assessment method research for centrifugal pump approaching overhaul[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [37] 张宇. 油田设备信息化管理现状分析及优化建议[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(8): 101-104.
- ZHANG Yu. Status analysis and optimization suggestions of oilfield equipment management informatization[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(8): 101-104.
- [38] 姜明玉, 敖炜, 吕浩, 等. 智能数字化技术在油气井预测性维护中的应用[C]. 北京: 2021IPPTC国际石油石化技术会议论文集, 2021: 735-740.
- JIANG Mingyu, AO Wei, LÜ Hao, et al. Application of big data technology in predictive maintenance of oilfield development wells[C]. Beijing: Proceedings of International Petroleum and Petrochemical Technology Conference, 2021: 735-740.
- [39] 宋辉, 陈伟, 李谋杰, 等. 基于卷积门控循环单元网络的储层参数预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 73-78.
- SONG Hui, CHEN Wei, LI Moujie, et al. A method to predict reservoir parameters based on convolutional neural network-gated recurrent unit(CNN-GRU)[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 73-78.
- [40] 谷建伟, 周梅, 李志涛, 等. 基于数据挖掘的长短期记忆网络模型油井产量预测方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(2): 77-81, 131.
- GU Jianwei, ZHOU Mei, LI Zhitao, et al. Oil well production forecast with long-short term memory network model based on data mining[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 77-81, 131.
- [41] 侯春华. 基于长短期记忆神经网络的油田新井产油量预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(3): 105-110.
- HOU Chunhua. New well oil production forecast method based on long-term and short-term memory neural network[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(3): 105-110.