



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.06.02.01

文章编号: 1674-5086(2022)04-0153-12

中图分类号: TE53

文献标志码: A

海上油田智能井技术发展应用及探讨

冯高城*, 尹彦君, 马良帅, 张亮, 王伟

中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 塘沽 300452

摘要: 海上油田进入开发中后期, 注采调整难度加大, 如何有效动用低深稠等边际储量已成为亟待解决的技术难题。目前, 国外智能井技术已经成功应用了二十余年, 而中国智能井驱油技术从引进跟跑已步入了跨越发展的最佳阶段。针对中国海上油田增储上产的客观需要与智能井升级的发展现状, 开展了国内外智能井技术理论及矿场应用的综述研究, 并依据陆相沉积的开发特点和生产难点, 分析了当前中国海上智能井技术跨越式发展的制约因素, 探讨了智能井技术发展的目标方向与潜在途径。研究表明, 海上智能井技术与数字油田联合升级的潜力巨大, 国内关键的技术突破已为系统性升级奠定了坚实基础。智能井技术的低成本发展, 对推动海上油田增储上产具有重要意义。

关键词: 海上油田; 数字新基建; 智能井; 装备升级; 数字油田

A Discussion on the Development of Intelligent Well Technology in Offshore Oilfield

FENG Gaocheng*, YIN Yanjun, MA Liangshuai, ZHANG Liang, WANG Wei

CNOOC Energy Technology & Services Ltd., Tanggu, Tianjin 300452, China

Abstract: As offshore oilfields gradually enter the middle and late stages of development, it is more difficult to adjust injection and production. How to effectively use such difficult and marginal reserves has become an urgent technical problem. At present, the overseas intelligent well technology has been successfully applied for more than 20 years, while China's intelligent well displacement technology has just stepped into the best stage of leapfrog development stage. Aiming at the needs of increasing production in offshore oilfield and the status of upgrading intelligent well, this paper reviews the theory and application of intelligent well technology at home and abroad. According to the development features and difficulties of continental sedimentary oilfield, the authors analyze the restriction in the leapfrog development of intelligent well technology in China offshore, and discuss the target direction and potential paths of the upgrading intelligent well technology. The studies have shown that it is of great potential for joint upgrading of intelligent well technology and digital oilfields. The breakthrough of technology has laid a solid foundation for systematic upgrade. The low-cost application of intelligent well technology has the great significance to increase the storage and production in offshore oilfield.

Keywords: offshore oilfield; new digital infrastructure; intelligent well; upgrade equipment; digital oilfield

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20220629.1043.020.html>

冯高城, 尹彦君, 马良帅, 等. 海上油田智能井技术发展应用及探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 153-164.

FENG Gaocheng, YIN Yanjun, MA Liangshuai, et al. A Discussion on the Development of Intelligent Well Technology in Offshore Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(4): 153-164.

* 收稿日期: 2020-06-02 网络出版时间: 2022-06-30

通信作者: 冯高城, E-mail: fenggch3@enooc.com.cn

基金项目: 海油发展重大专项(HFKJ-GJ2018-14, HFZXKT-GJ2020-02-05)

引言

自 1997 年北海 Snorre 油田成功完成世界上第一口智能井以来,智能井技术已经在北海、巴西等油气田得到广泛应用,满足作业者实时了解油藏动态、远程优化油气生产,具有极强的管理优势。随着开发进入中后期诸多问题的逐渐暴露,海上油田开发亟待更科学、更经济、更高效的技术解决手段,以缓解薄散小边际油藏经济难动用的困境、高含水期水平井过早水淹导致全井报废的窘境、注水开发层间干扰严重以致驱替不均衡的痛点。同时,深水、台风等恶劣的海洋环境条件,对常规生产方式和工程装备也提出了更高的挑战。

因此,针对复杂油藏开发的要求和海上工程应用的需求,中国海上亟待自主研发出与油气生产现状和特点相符合的智能井工程装备,并在人工智能、新型通讯、新兴材料等高新科技推动下^[1],逐步完成自动化与数字化油田的升级建设,打造油气勘探开发上游领域的核心装备重器,以解决油田开发所面临的复杂经济技术环境等一系列挑战。为此,有必要梳理国内外智能井技术进展与应用现状,分析智能井技术在海上油田深化应用存在的技术瓶颈,探讨未来进一步改造升级的潜力目标与应用方向,助力中国海洋石油开发的增储上产。

1 智能井国内外理论发展与应用

1.1 国外智能井技术发展现状

国外智能井技术作为一项前沿的、集成性的技术,其主流技术发展趋势:围绕井下监测数据的更有效采集与调节工具的更高效优化,进而提升获取数据的准确程度、提高智能工具的控制质量、保持油藏最佳的生产状态。

1.1.1 国外理论内涵与进展

国外智能井主要泛指智能完井技术,由井下状态监测系统、实时数据传输系统、数据优化处理系统以及生产流体控制系统等组成^[2],简单概况主要涵盖“监、传、优、控”4个层面。

(1) 智能井技术“监”方面,即感知系统。信号监测采集主要包含有近井监测技术和远井成像技术^[3-6],并在近井监测领域实现了规模化应用。近井监测指标涵盖温度、压力和流量 3 项主要参数,

信号感知监测提取了背向散射光谱中拉曼频段的核心参数,形成了单点、多点以及分布式光纤测量技术^[7];合理运用了石英晶体谐振器,量化了谐振频率与压力的函数关系,发展了以分布式光纤温度和布拉格光栅传感器为监测参数的技术载体^[8-10];基于伯努利方程求断面收缩压差的方法,演化形成了多相流量器嵌套的实时测量技术。2019 年,在有线传输信号的基础上,进一步突破了井底与完井段间的“作业禁区”,完成了永久型混合绝缘硅测量装置与无线监测技术的有机融合。

(2) 智能井技术“传”方面,即神经系统,涵盖了信号处理、解释与传送 3 个维度。在数据处理技术方面,建立了时间、深度与温度的热传导预测模型^[11],提出了注入热流体的传热系数简化方法^[12-13],完善了混合点处液流温度的喷嘴模型,模拟了高温气藏试井的井筒瞬态温度场,推导了井筒循环流动温度模型^[14-18],识别了压力多步处理的突变点与遗漏点^[19];在信号解释技术方面,深化了压力-产量反褶积试井解释方法,解决了变产量转化为定产量求解的关键问题^[20],进一步发展了多传感器的反演解释技术^[21-22];在信号传输技术方面,主流技术仍然是基于井口贯入、管内坐封、电缆断开及动力存储的有缆式传输方式。

(3) 智能井技术“优”方面,即大脑系统,是最能体现油藏智能化需求的领域。基于不同的目标函数优化油藏状态,延长生产井无水采油期,得到最大净现值。以 1987 年 Bang-Bang 优化方法与隐式微分控制理论为起点,直至 2000 年实验证实了优化控制理论在流体驱替优化中的应用价值,奠定了现代控制理论在油藏优化中的理论根基,发展了以油藏渗流力学为理论基础的智能优化控制技术^[23-24]。油藏优化控制理论围绕宏观与微观两条优化主线发展,宏观层面围绕油藏的系统性优化,解决剩余油挖潜的实时优化问题。微观层面围绕多段井近井地带的流量控制阀局部优化,解决均衡井筒压力减缓井段间干扰问题^[25-31]。近年来,围绕微观近井优化与宏观井间优化,二者向着协同耦合调控延伸^[32-33]。

(4) 智能井技术“控”方面,即控制系统。智能井控制系统先后经历了 3 代智能井技术的发展,目前正向第四代智能井技术演进。第一代是直接液控型智能井系统,多点液压控制及流量控制阀集成的液压

控制系统。第二代液控型智能井系统体现了过渡与集成的技术演化特点,即数液混控型智能完井系统,演化了全开全关式、精细可调式及步进式的流入控制阀。第三代全电控智能井系统,迭代升级了无级节流阀套、高精度的压力和温度传感器^[34-39]。目前,虽然全电式智能井系统已经成功获得了矿场应用,但在超深井等特殊环境下仍存在可靠性等问题。国外技术解决方法是通过引进航空领域技术及小型数据库修正等方法,增强集成电路的适应性^[40]。随着物联网等技术应用与发展,新型智能控制阀正逐步替代传统“导线控制”及“机械控制”的远程开关^[41],催生出第四代智能井控制技术。

1.1.2 国外应用现状与特点

智能井技术之所以具有突出的油气田开发优势,除了可以大幅提升数据传输效率,更主要的是在油气生产过程中可以控制气水指进与锥进的速度、减缓或避免层间的干扰、调节多层段或多分支的分采与合采、提高分布式注入的注水效率、降低产量分配不平衡的风险、提高净现值收益及重复回收使用等,以8个典型现场应用情况为例^[42-46]。

(1) 智能井控水提产领域。沙特 Ghawar 油田 28 口多分支智能完井,连续生产 2 a 平均含水率都保持在 1% 以内。(2) 智能井极限增油领域。科威特 4 级双分支智能完井净现值增长 100%,俄罗斯 5 级双分支智能水平井产量超过 51 000 bbl/d (1 bbl=159 L)。(3) 智能井多层合采领域。尼日利亚三段砾石充填智能完井有效释放单层段压力,累产油量超过 300×10^4 bbl。(4) 智能井可控回注领域。科威特油田利用 zubair 层天然能量闭式注入 minagish 层,达到了低碳式注水驱油目的。(5) 智能井二次开采领域。阿曼石油加强了对驱替前沿监测与控制裂缝闭合,提高水驱波及效率。(6) 智能井控气防窜领域。Brunei Swa 油田地层伴生气驱油与监视注气速度,生产 17 个月控气效果较好。(7) 智能井注气调剖领域。美国 SACROC 碳酸岩油藏 CO_2 混相驱替,阻止了 CO_2 气窜快速井间突破。(8) 智能井深水出砂领域。巴西深水油藏控制压力降低速度,减少地层脱砂与出砂风险。

虽然智能井已在海外深水领域取得了较好的技术应用,但仍需持续解决若干关键问题。目前,深水智能井开发面临的一大难题是水合物溢出对完井的影响^[47]。坐放水下采油树时,须在井口内注入

甲醇和乙二醇,减少后续对生产作业的影响;另一大问题是流量控制阀(ICV)在安装和运行过程中,可能会发生因 ICV 腐蚀或堵塞等原因的生产故障,从而导致无法完成关键控制装置的调节功能,例如 Snorre 油田中 ICV 失效率达到 39%。

1.2 中国智能井技术现状回顾

国外智能井技术经历了二十多年的发展历程,已在智能井相关理论研究与现场实践方面,取得了全面的发展与应用。中国从智能井概念与理论的引入,到关键技术消化、探索、起步的自主攻关,在近十年的技术发展历程中逐步达到了整体布局与多点开花的效果。

1.2.1 国内理论进展与迭代

2008 年,中国石油依托国家 863 计划“智能完井技术与装备”课题,率先启动智能完井技术的攻关与研发,形成了一套液压控制与光纤监测集成的 IC-Riped 系统。2011 年,中国石化也加强了智能井技术的研发力度,深化了低渗油气田智能完井关键技术的研发^[48]。2013 年,中海油启动“深水油气田智能完井关键技术”,解决了制约中国深海油气开发的技术装备等问题^[49]。

(1) 智能井数据采集。室内实验模拟了电导测量的含水率测量方法,矿场试验了压力或流量脉冲信号载波的双向传输技术,攻克形成了晶体吸收的光纤温度传感器等工具^[50-51],优先解决了传感器的高压密封和光纤保护问题^[52-53],加快改进了卧式横切的机械化光纤开槽装置,推广应用了无线信号与协议接口的双向信号传递采集系统^[54-55]。近年来,井下分布式光纤温度(DTS)和应力(DSS)传感监测技术已经相对成熟并得到了大量应用^[56]。但对于多相流体中单相流的量化解释与井筒固态沉积物的准确定位,尚存在较大的技术困难。

(2) 智能井信号解释。小波分析完成了长时井下监测的降噪处理^[57],探索提出了多层合采井筒温度场异常的解释方法^[58-59],量化分析了流量控制阀温度误差的原因^[60-66],解析建立了海上深水井筒的分段稳态传热模型^[67-68],理论推导了自动气举阀的井下流动方程^[69],实验对比了变产量反演表皮系数的数学模型,回归了压力损失与进油量的定量关系,对比重构了移动窗与正交设计的流量模型^[70],模拟反演了井筒没有安装井下测量计条件的分层含水率^[71]。当前阶段,井下监测数据解释的可靠性与准

确性尚有一定的提升空间。

(3) 智能井优化理论。中国优化理论研究以油田宏观产能规划起步,到 2010 年将油藏数值模拟与离散极大值原理相结合^[72-73],运用遗传或粒子群等算法加速收敛的特点,大幅提升了最优解的求取效率与运算速度,形成了与国际接轨的现代油藏闭环控制理论。微观层面,以分支多段井的智能阀附加降压模拟起步,依据二次规划算法调节井下阀孔面积,模拟累产油量和净现值的增长^[74]。当前,强化学习等人工智能尚处于起步阶段,也具有较高的研究潜力,须优先解决物理意义与样本采集方法等问题。同时,注采井间与近井耦合的大规模分区优化与代理提速算法研究较少,未来主动式生产控制理论已成为发展趋势。

(4) 智能井控制系统。设计研发了液控型流量控制阀和电控型流量控制阀、穿越式封隔器等关键器件,攻克了与国外同类封隔器性能水平接近的高强压缩式管外封隔器,形成了能够满足现场应用要求的遇油(水)自膨胀管外封隔器^[75-77],优选提出了井下流量微型液压控制解码器的设计方案,大幅减少了控制管线数量^[78-81]。深化了液控式调节阀控制,降低了长液控管线在动作时间、运行压力及可靠性等因素的不确定性,但仍需在井下流量控制阀设计结构与流量压力脉冲的无线控制上持续优化。

(5) 设备优选与相关标准。建立了深水智能井的设备组合数学模型,探讨不同工况下的智能完井最优设备组合方案。运用浴盆曲线深化评价了智能完井流量控制阀的适应性,降低流量控制阀开关动作的失效率^[82];同时,进一步发展了国家 ISO 及石油天然气行业 API 的采标标准^[83-84],制定了与智能完井密切相关的 18 项标准和规范,促进了中国智能井技术标准的发展。

1.2.2 国内探索应用与趋势

在智能井理论研究上已取得进展的同时,现场配套试验有序实施。对标国外智能井技术,中国石油起步较为迅速。2004 年,西南油气田实施了 J17、Z7 气井永置式井下压力温度监测的现场试验^[85],实现了对井下压力、温度状况的实时监测;2011 年,辽河油田 Lei632 现场试验智能分采,稠油热采开发的动态监测技术成功应用,试验表明,高含水期双层分采智能井的单井产油量提高了 10.5%^[86];2016 年,吐哈油田现场成功试验了电控智能完井系统,

同步实施了智能找堵水和分段生产^[87]。

中国海上油田以国外智能井技术引进与合作起步,摸索智能井对不同类型沉积储层的开发效果,并在海外印尼爪哇 NE Intan、南海礁灰岩 LH4-1 和渤海疏松砂岩油田尝试了智能完井技术^[88-90],实现了在不动管柱条件下对压力和温度等参数的实时采集。2017 年继续开发了液电混控型智能完井系统^[91-92],完成了智能井工艺系统的全部国产化,并于 2019 年在南海 P18-1 油田进行了现场测试。在历经了近十年的研究,中国智能完井系统技术突飞猛进,现场应用表明中国海上液控型智能完井系统已经基本成熟,可以对各层段进行井下生产流体调控,已达到了国际公司第一代智能完井系统技术水平。特别是近几年,智能井动力控制系统类型从液控型到液电混控型的过渡,逐步发展了区别于国外智能完井技术的智能分层注水装备,为克服现有技术瓶颈和数字化升级奠定了基础。

2 海上智能井瓶颈与制约

2020 年,中国已迈入数字技术发展的新时期,数字新基建必将催生 5G 等数字化技术进一步向各领域衍生应用^[93],智能井、智能油田建设将驶入高速发展的快车道,同时对现有油藏数字化技术提出了更高的要求。当前海上油田智能井应用主要围绕自主流量控制装置(AICD)、流量控制装置(ICD)等平衡控水技术^[94],调节流体流入水平井筒的流入剖面,合理分布水平段径向流量、均衡水平段产液产出,但其智能化程度仍远远不够。面对海上油田上产的有序实施,智能井技术与数字油田建设相结合,建立以油藏工程科学为基础的面向未来生产方式,形成一种高效的生产优化决策制定手段,平衡当前最佳产量和未来最终采收率之间经济矛盾。

海上油田智能井技术完成从实验研究到现场应用的蜕变,仍需克服诸多问题,特别是特殊类型油藏开发与配套技术应用问题。(1) 开发经济角度制约因素。未来世界油气总储量的 44% 将来自于深水,中国南海深水油气田有着广阔的开发前景。相比于常规油气藏,深水油气田开发投入和风险更高。通过智能井技术可提高开发动用储量的界限,合理降低边际储量动用的经济门槛,为日益增长的边际储量开发提供技术可能。(2) 井下温压角度制

约因素。海上水驱冷采技术对普通稠油的开发发挥了重要作用,稠油热采是未来重要的产量补充方式。由于注入热流体温度高,智能井需要解决井筒隔热、工具耐温、防砂工艺等问题,亟待设备极限性能的提升,以确保长期使用的寿命。(3) 技术融合角度制约因素。以蒸汽辅助重力泄油(SAGD)融合技术为例,通过蒸汽高效分配可均匀驱替稠油,最大限度地减少由于黏度指进造成的驱替不均衡,未来仍需针对具体油田特点,研发水平井蒸汽驱等为场景的定制化工具。

截至2019年,中国海洋石油自主研发的液控型智能井技术,与欧美国家的控制6个以上层段或分支井电控智能井技术相比较,在工程应用领域仍然有很大的差距。数字化关键环节缺少数据处理与解释,以及工艺装备与油藏模型直接结合的生产优化策略功能,致使智能井技术的核心优化功能不全,导致平台生产系统的海量数据仅仅是采集上来,而没有得到充分的挖掘利用;同时,由于关键技术的门槛较高,国内普遍缺乏核心油藏数值模拟器。当前,围绕模拟器的生产优化偏向于中长期产能规划且优化目标较为单一,缺少在油田综合调整阶段将生产制度与层系、井位、井网一体的综合性优化技术,以致与国内主流的注采平衡开发理念存在偏差,未来仍需进一步加强对控制指标的深入研究,以符合中国油田“陆相沉积”开发模式的生产特点。

3 海上油田突破与未来展望

中国油田主要为陆相沉积成因的储集层,储层非均质性严重、注水开发效果有限、提高采收率潜力较大。韩大匡指出^[95],在油田高含水后期剩余油呈总体高度分散,局部相对富集的格局。中国海上油田中高含水期的剩余油分布仍然符合此规律,亟待探索新的综合调整或剩余油挖潜策略,减缓产量递减。探索多分支井为突破口的智能井开发策略,完成产能接替与持续稳产。以LF13-1为例^[96],中高含水阶段部署2口水平分支井,生产表明分支井含水上升趋势缓慢,含水率50%前单井累产油量达 $5.57 \times 10^4 \text{ m}^3$,证实了海上油田多分支水平井提高采收率技术具有改造升级的潜力。

《Oil & Gas》杂志曾预测未来可能最具影响力的油气藏开发技术包括:数字油田技术、智能流动

控制技术、无源地震监测技术、千兆网格技术和极大储层接触技术等^[97-99],预示了数字化与智能化的油藏高效开发技术已呈必然趋势。随着国家“十四五”期间新基建领域的深化,为直接启动第四代智能井及相应的配套装备系统提供了可能,有序发展具有中国石油特色的智能油气田开发装备,形成中国智能井相关产品的设计标准、作业体系和安全规范,实现油田开发技术的弯道超车。建议以多层砂岩油藏中高含水期智能水驱为突破口,借鉴大庆、胜利等陆地油田分层注采技术的成熟经验,通过集群攻关与技术联合等途径,完成信号解释与模拟优化技术的海上升级,并适时拓展至智能调驱及闭式注水(气)等领域,打造符合中国海洋石油开发特色的数字化装备序列体系。

一方面,打造先进的智能优化生产决策系统平台。充分利用AI智能学习技术和油藏工程数字化手段量化经验关系式,逐步唤醒目前建设的数据库与数据湖等沉睡资源,催生新型工作方式以提高生产效率、缓解增储上产压力;自主攻关油藏数字型模拟器,摆脱传统数值型技术的制约,运用超算等新型工具大幅提高模拟速度,持续提高预测准确性和优化调整频次(胜坨不稳定注水试验已证明其技术价值);充分借鉴陆地油田部署固定监测井的成功经验,摸索出一种较为可行的永久型动态监测技术推广途径;探索提升人工智能等新手段的实用性,攻关具有物理意义的强化学习算法反演分层井间连通性,深度聚类算法研究与提升流场驱替效果的表征精度^[100-102],有效识别出无效驱替通道及有效增油区域;综合考虑均衡排液、注采平衡、分区优化等不同阶段的开发需求,将国外主流优化算法进一步自主化改进,满足水驱砂岩开发及在线化学驱开发的智能优化要求,为海上智能油田工业化建设奠定基石。

另一方面,开发井下无线智能流动控制应用系统。基于电感耦合原理研发井下特殊环境下的物联网技术,如边缘检测技术、无线频率发射与接收器等新型通信,将有线液控系统直接升级至无线控制系统。依靠流体能量的电磁场传播信号,建立主井眼对各分支井眼的无线控制,应用北斗卫星传输逐步替代GPRS无线传输网络,大幅提升数据传输系统的国产化应用。探索井筒内部可安装的无线信号微型处理芯片,实现对井下信息的信号处理、指令

传输和流量控制,实时预测井筒各层段的产能与含水,调节流量控制阀的闭合程度,优化近井流线分布与驱油效率。井下智能无线调控的关键是考虑井筒内部空间与稳定运行能力的电能产生单元,目前,可供探讨的无线供电方式有高性能电池、涡轮发电机、超声纳米发电机等^[103],其中,涡轮发电机研发进度较为迅速。智能井优化控制反馈至数字闭环系统平台,构建“智能井近井优化与智能油田注采优化”的嵌套耦合系统,推动海上油气生产系统的整体升级。

此外,针对海上油藏特点研发具有针对性的智能井工具,明确液控与数控智能井在油藏应用的范围,提高智能井在不同油藏开发的适用性。液控型智能井的井下装备具备较好的耐高温与耐高压特性,维持装备系统在恶劣井况条件下的稳定性是首要的,现阶段仍然具有技术持续升级的潜力,如南海西部异常温压气藏、渤海海域稠油热采油藏等;而对于冷采油藏应该充分发挥智能井普适性的技术优势,将智能井增油与特殊井型的水驱前缘控制相结合、智能井控水与工艺的极限增产相结合,通过规模化应用逐渐触及技术可行的经济门槛,提升数字化装备对合理开发油藏的解决能力,如渤海水驱与聚驱的碎屑岩油藏、南海天然能量较强的礁灰岩油藏、低渗油藏的注伴生气开发,以及由于经济因素限制的低品位油气藏等。

4 结 论

(1) 中国智能井技术目前已达到国外第一代智能完井水平,未来会继续围绕陆相储层油藏高效开发模式,在宏观与微观相结合的多智能井协调优化控制、分布式光纤 DTS、DAS 等测井技术解释与诊断、永久式电控压力监测系统和多相流量计采集装置、流量控制阀与控制管线的失效因素量化、井下特殊工况条件下耗材的耐温压等级提升等方向进一步发展。在吸收国外智能完井技术与持续攻关的同时,仍需完善矿场操作规范及管理标准,促使技术试验与现场安全紧密结合,加快关键技术的系统性突破推动工业化与规模化应用。

(2) 国外智能井技术已在海上油气藏开发有成功的案例,但在中国海上油田仅限于相对简单的分层注水和水平井分段控水。针对海上油藏中高含水

期二次开发及经济界限约束的难动储量的有效动用,可基于中国石油的液控光纤监测型智能完井系统与中海油的液控深水油气田智能完井系统升级,充分吸收 5G 数字时代的新型无线通讯、人工智能等新兴技术,直接研发第四代智能井技术力求弯道超车,论证多分支井水驱极限增产、富烃伴生气与多元热流体等新型智能井开发技术的适用性,完善智能井升级应用的油藏开发技术储备。

(3) 海上油田智能井技术应用潜力巨大,对于油田高效开发具有前瞻性与颠覆性的意义,智能装备将会是中国走出国门、保障国家能源安全的工业重器,符合数字技术深化发展的规律。建议以多层砂岩油藏智能水驱为突破口,集群式攻关智能井与数字油田的关键技术,力求关键数字技术的系统性突破,持续降低硬件技术应用的工业化成本,推动智能井技术向低品位油藏等领域纵向延展,形成符合中国海洋石油开发特色的核心装备序列体系。

参考文献

- [1] 黄昌武. 数字油田成功的关键[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 436.
HUANG Changwu. The key to the success of digital oil fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4): 436.
- [2] 张颖琦. WG 井智能完井技术应用研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
ZHANG Yingqi. Research and application of intelligent completion technology in WG well[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [3] KOELMAN J V. Fiber-optic sensing technology providing well, reservoir information- anyplace, anytime[J]. Journal of Petroleum Technology, 2015, 63(7): 22-24. doi: 10.2118/0711-0022-JPT
- [4] EDDIE P, PHIL A, BARBARA M, et al. Permanent fiber optic monitoring at northstar: System installation[C]. SPE 76748-MS, 2002. doi: 10.2118/76748-MS
- [5] KRAGAS T K, TURNBULL B F, FRANCIS M J. Permanent fiber-optic monitoring at northstar: Pressure/temperature system and data overview[J]. SPE Production & Facilities, 2004, 19(2): 86-93. doi: 10.2118/76747-MS
- [6] GINGERICH B L, BRUSIUS P G, MACLEAN I M. Reliable electronics for high-temperature downhole applications[C]. SPE 56438-MS, 1999. doi: 10.2118/56438-MS
- [7] KRAHENBUHL R A, LI Yaoguo, DAVIS T. 4D gravity monitoring of fluid movement at Delhi Field, LA: A feasibility study with seismic and well data[C]. SEG An-

- nual Meeting Denver: Society of Exploration Geophysicists, 2010. doi: 10.1190/1.3513747
- [8] WATTS G, GRIFFIN T A, BARKVED O I, et al. Permanent seismic arrays and their place in the digital oilfield[C]. SPE 99827-MS, 2006. doi: 10.2118/99827-MS
- [9] KLEEF V R, HAKVOORT R, BHUSHAN V, et al. Water flood monitoring in an oman carbonate reservoir using a downhole permanent electrode array[C]. SPE 68078-MS, 2001. doi: 10.2118/68078-MS
- [10] PETER A A. GPR methods for hydrogeological studies[J]. Hydrogeophysics, 2005, 50: 185–213. doi: 10.1007/140203102-5_7
- [11] RAMEY H J J. Wellbore heat transmission[J]. Journal of Petroleum Technology, 1962, 14(4): 427–435. doi: 10.2118/96-PA
- [12] WILLHITE G P. Over-all heat transfer coefficients in stream and hot water injection wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1967, 19(5): 607–615. doi: 10.2118/1449PA
- [13] HASAN A R, KABIR C S, AMEEN M M, et al. Heat transfer during two-phase flow in wellbores: Part I Formation temperature[C]. SPE 22866-MS, 1991. doi: 10.2118/22866-MS
- [14] HASAN A R, KABIR C S, AMEEN M M, et al. A fluid circulating temperature model for workover operations[J]. SPE Journal, 1996, 1(2): 133–144. doi: 10.2118/27848-PA
- [15] KABIR S, HASAN A R, JORDAN D L, et al. A wellbore/reservoir simulator for testing gas wells in high-temperature reservoirs[J]. SPE Formation Evaluation, 1996, 11(2): 128–134. doi: 10.2118/28402-PA
- [16] KABIR C S, HASAN A R, JORDAN D L, et al. A transient wellbore/reservoir model for testing gas wells in high-temperature reservoirs, part II-Field application[C]. SPE 28403-MS, 1994. doi: 10.2118/28403-MS
- [17] HASAN A R, KABIR C S, LIN D. Analytic wellbore temperature model for transient gas-well testing[C]. SPE 84288-PA, 2005. doi: 10.2118/84288-PA
- [18] SILVA M F, MURADOV K M, DAVIES D R. Review, analysis and comparison of intelligent well monitoring systems[C]. SPE 150195-MS, 2012. doi: 10.2118/150195-MS
- [19] ABDULELAH A B, HASSAN B Q, KHALED A K, et al. The use of real-time downhole pressure and distributed temperature surveying in quantifying the skin evolution and zonal coverage in horizontal well stimulation[C]. SPE 155723-MS, 2012. doi: 10.2118/155723-MS
- [20] MURADOV K M, DAVID R D. Zonal rate allocation in intelligent wells[C]. SPE 121055-MS, 2009. doi: 10.2118/121055-MS
- [21] YOSHIOKA K, ZHU D, HILL A D, et al. Interpretation of temperature and pressure profiles measured in multilateral wells equipped with intelligent completions[C]. SPE 94097-MS, 2005. doi: 10.2118/94097-MS
- [22] YOSHIOKA K, ZHU D, HILL A D. A new inversion method to interpret flow profiles from distributed temperature and pressure measurements in horizontal wells[C]. SPE 109749-MS, 2007. doi: 10.2118/109749-MS
- [23] LI Zhuoyi, ZHU Ding. Optimization of production with ICV by using temperature data feedback in horizontal wells[C]. SPE 135156-MS, 2010. doi: 10.2118/135156MS
- [24] BROUWER D R, JANSEN J D, STARRE S V D, et al. Recovery increase through water flooding with smart well technology[C]. SPE 68979-MS, 2001. doi: 10.2523/68979-MS
- [25] LOUIS J D, KHLID A. Optimization of smart well control[C]. SPE 79031-MS, 2002. doi: 10.2118/79031-MS
- [26] ARENAS E, DOLLE N. Smart waterflooding tight fractured reservoirs using inflow control valves[C]. SPE 84193-MS, 2003. doi: 10.2523/84193-MS
- [27] MOHAMMED S A M, AHMED H S, DREW E H, et al. Improved performance of downhole active inflow control valves through enhanced design: Case study[C]. SPE 117634-MS, 2008. doi: 10.2118/117634MS
- [28] HOLMES J A, BARKVE T, LUND O. Application of a multisegment well model to simulate flow in advanced wells[C]. SPE 50646-MS, 1998. doi: 10.2118/50646-MS
- [29] YETEN B, JALALI Y. Effectiveness of intelligent completions in a multiwell development context[C]. SPE 68077-MS, 2001. doi: 10.2118/68077-MS
- [30] GAI H. Downhole flow control optimization in the worlds 1st extended reach multilateral well at Wytech farm[C]. SPE 67728-MS, 2001. doi: 10.2118/67728-MS
- [31] KONOPCZYNSKI M, AJAYI A. Design of intelligent well downhole valves for adjustable flow control[C]. SPE 90664-MS, 2004. doi: 10.2118/90664-MS
- [32] ZHU Ding, FURUI K. Optimizing oil and gas production by intelligent technology[C]. SPE 102104-MS, 2006. doi: 10.2118/102104-MS
- [33] DENNEY D. Intelligent completions to optimize waterflood process in a mature North Sea Field[J]. Journal of Petroleum Technology, 2007, 59(1): 39–42. doi: 10.2118/0107-0039-JPT
- [34] 曲从锋, 王兆会, 袁进平. 智能完井的发展现状和趋势[J]. 国外油气田工程, 2010, 26(7): 28–31. doi: 10.3969/j.issn.1002-641X.2010.7.009
- QU Congfeng, WANG Zhaohui, YUAN Jinping. The present development and tendency of the intelligent well completion technology[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2010, 26(7): 28–31. doi: 10.3969/j.issn.1002-641X.2010.7.009

- [35] SUN Kai, GUO Boyun, SAPUTELLI L. Multinode intelligent well technology for active inflow control in horizontal wells[C]. SPE 130490-PA, 2011. doi: 10.2118/130490-PA
- [36] ALKHODHORI S M. Smart well technologies implementation in PDO for production & reservoir management & control[C]. SPE 81486-MS, 2003. doi: 10.2118/81486-MS
- [37] RAHMAN J, ALLEN C, BHAT G. Second generation interval control valve (ICV) improves operational efficiency and inflow performance in intelligent completions[C]. SPE 150850-MS, 2012. doi: 10.2118/150850-MS
- [38] BROCK W R, LINSKOTT J, OLEH E O, et al. Application of intelligent-completion technology in a triple-zone gravel-packed commingled producer[C]. SPE 101021-MS, 2006. doi: 10.2118/101021-MS
- [39] AJAYI A A, KONOPCZYNSKI M R. Theory and application of probabilistic method of designing customized interval control valves choke trim for multizone intelligent well systems[C]. SPE 110600-MS, 2007. doi: 10.2118/110600-MS
- [40] KONOPCZYNSKI M, AJAYI A, RUSSELL L A. Intelligent well completion: Status and opportunities for developing marginal reserves[C]. SPE 85676-MS, 2003. doi: 10.2118/85676-MS
- [41] 郭永峰. 智能完井工具的“远程控制开关”[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 258.
GUO Yongfeng. “Remote control switch” for intelligent completion tools[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(2): 258.
- [42] NIGEL S, RICHARD C, DEVARAJAN N, et al. Experience with operation of smart wells to maximize oil recovery from complex reservoirs[C]. SPE 84855-MS, 2003. doi: 10.2118/84855-MS
- [43] OGOKE V C, AIHEVBA C O, MARKETZ F. Cost-effective life-cycle profile control completion system for horizontal and multilateral wells[C]. SPE 102077-MS, 2006. doi: 10.2118/102077-MS
- [44] AI-KHELAIWI F T, BIRCHENKO V M, KONOPCZYNSKI M R, et al. Advanced wells: A comprehensive approach to the selection between passive and active inflow control completions[C]. IPTC 12145-MS, 2008. doi: 10.2523/IPTC-12145-MS
- [45] BRNAK J J, PETRICH B, KONOPCZYNSKI M R. Application of smartwell technology to the SACROC CO₂ EOR project: A case study[C]. SPE 100117-MS, 2006. doi: 10.2118/100117-MS
- [46] RAWDING J, AI-MATAR B S, KONOPCZYNSKI M R. Application of intelligent well completion for controlled dumpflood in West Kuwait[C]. SPE 112243-MS, 2008. doi: 10.2118/112243-MS
- [47] 石森, 白冶. 气体水合物的基本特征、形成条件及成因初探[J]. 矿物岩石, 1999, 19(3): 100–104.
- SHI Sen, BAI Ye. Study on the basic features, conditions of formation and origin of gas hydrates[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1999, 19(3): 100–104.
- [48] 余金陵, 魏新芳. 胜利油田智能完井技术研究新进展[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 68–72. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2011.02.013
YU Jinling, WEI Xinfang. New development of intelligent well completion technology in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 68–72. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2011.02.013
- [49] 廖成龙, 张卫平, 黄鹏, 等. 电控智能完井技术研究及现场应用[J]. 石油机械, 2017, 45(10): 81–85. doi: 10.16082/j.cnki.isnn.1001-4578.2017.10.016
LIAO Chenglong, ZHANG Weiping, HUANG Peng, et al. Study and application of electric intelligent well completion system[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(10): 81–85. doi: 10.16082/j.cnki.isnn.1001-4578.2017.10.016
- [50] 康学峰, 杨厚荣, 孙永兴. 永置式井下智能多参数监测装置[J]. 石油仪器, 2007, 21(2): 8–10. doi: 10.3969/j.issn.1004-9134.2007.02.003
KANG Xuefeng, YANG Hourong, SUN Yongxing. Permanent downhole intelligent multi-parameter monitoring device[J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(2): 8–10. doi: 10.3969/j.issn.1004-9134.2007.02.003
- [51] 张振奇, 童茂松, 曹庆芳, 等. 光纤传感器及其在石油钻探中的应用[J]. 石油仪器, 2007, 21(4): 1–6. doi: 10.3969/j.issn.1004-9134.2007.04.001
ZHANG Zhenqi, TONG Maosong, CAO Qingfang, et al. Optic fiber sensor and its application in drilling and exploration[J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(4): 1–6. doi: 10.3969/j.issn.1004-9134.2007.04.001
- [52] 许胜, 陈贻累, 杨元坤, 等. 智能井井下仪器研究现状及应用前景[J]. 石油仪器, 2010, 25(1): 46–48. doi: 10.3969/j.issn.1004-9134.2011.01.015
XU Sheng, CHEN Yilei, YANG Yuankun, et al. Research status and application prospects of downhole instruments for intelligent well system[J]. Petroleum Instruments, 2010, 25(1): 46–48. doi: 10.3969/j.issn.1004-9134.2011.01.015
- [53] 陈懿. 光纤光栅高温高压传感技术的研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2010. doi: 10.7666/d.y1709027
CHEN Yi. Study on high temperature and high pressure sensing technology based on fiber grating[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2010. doi: 10.7666/d.y1709027
- [54] 何明格, 马发明, 陈艳. 智能井下节流器控制系统设计[J]. 天然气与石油, 2013, 31(5): 82–85. doi: 10.3969/j.issn.1006-5539.2013.05.022
HE Mingge, MA Faming, CHEN Yan. Design of intelligent downhole throttle control system[J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(5): 82–85. doi: 10.3969/j.issn.1006-5539.2013.05.022

- [55] 何明格, 林丽君, 殷国富, 等. 井下智能节流及智能节流器系统开发[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(3): 151–157.
HE Mingge, LIN Lijun, YIN Guofu, et al. Study and design of an intelligent downhole throttle system[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(3): 151–157.
- [56] 刘均荣, 史伟新, 李博宇, 等. 分布式光纤声音传感技术在油田中的应用及发展前景[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 262–266. doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0537
LIU Junrong, SHI Weixin, LI Boyu, et al. Applications and development prospect of distributed acoustic sensing technology in oilfields[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(5): 262–266. doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0537
- [57] 刘均荣, 姚军, 于伟强. 长时井下压力监测数据流动过程识别方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 121–127. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086-2012.06.01.01
LIU Junrong, YAO Jun, YU Weiqiang. Study of identification method of transient flow from permanent downhole pressure data[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(2): 121–127. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2012.06.01.01
- [58] 张建军, 贾永禄, 张烈辉. 长时压力监测数据处理新方法与应用研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 133–137. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086-2010.02.026
ZHANG Jianjun, JIA Yonglu, ZHANG Liehui. A new method for processing of long-term pressure data and its application[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(2): 133–137. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2010.02.026
- [59] 杨顺辉, 豆宁辉, 赵向阳, 等. 多层合采智能井井筒温度场预测模型及应用[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(4): 83–91. doi: 10.11911/syztjs.2019049
YANG Shunhui, DOU Ninghui, ZHAO Xiangyang, et al. Temperature field prediction model for multi-layer commingled production wellbore in intelligent wells and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(4): 83–91. doi: 10.11911/syztjs.2019049
- [60] 石军太, 李骞, 张磊, 等. 多层合采气井产能指示曲线异常的原因与校正方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 50–59. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.03.006
SHI Juntao, LI Qian, ZHANG Lei, et al. An abnormality of productivity indicative curves for multi-layer gas wells: Reason analysis and a correction method[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 50–59. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.03.006
- [61] 廖锐全, 汪崎生, 张柏年. 斜井井筒中流动温度分布的预测方法[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 18(2): 73–76.
LIAO Ruiquan, WANG Qisheng, ZHANG Bainian. A model for predicting flowing temperature distribution in an inclined wellbore[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 18(2): 73–76.
- [62] 卢德唐, 曾亿山, 郭永存. 多层地层中的井筒及地层温度解析解[J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(3): 382–389. doi: 10.3969/j.issn.1000-4874.2002.03.015
LU Detang, ZENG Yishan, GUO Yongcun. Analytical solution of temperature in wellbore and formation in multi-layer[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(3): 382–389. doi: 10.3969/j.issn.1000-4874.2002.03.015
- [63] 曾祥林, 刘永辉, 李玉军, 等. 预测井筒压力及温度分布的机理模型[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2003, 18(2): 40–44. doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2003.02.011
ZENG Xianglin, LIU Yonghui, LI Yujun, et al. Mechanism model for predicting the distributions of wellbore pressure and temperature[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2003, 18(2): 40–44. doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2003.02.011
- [64] 魏立新, 刘扬, 杨建军, 等. 油井出油温度最优化拟和方法[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(2): 54–56. doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2004.02.018
WEI Lixin, LIU Yang, YANG Jianjun, et al. Optimization fitting method of oil well head flowing temperature formula[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004, 28(2): 54–56. doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2004.02.018
- [65] 陈军斌, 屈展, 沈建文, 等. 智能完井综合系统的数学模型研究[C]. 青岛: 中国智能自动化会议论文集, 2005.
CHEN Junbin, QU Zhan, SHEN Jianwen, et al. A study on mathematical model of intelligent complete comprehensive system[C]. Qingdao: Proceedings of the Chinese Intelligent Automation Conference, 2005.
- [66] 唐海雄, 张俊斌, 王堂青, 等. 海上高温油井的井筒温度剖面预测[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(3): 96–100. doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2010.03.022
TANG Haixiong, ZHANG Junbin, WANG Tangqing, et al. Prediction of wellbore temperature profile in offshore HT oil wells[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(3): 96–100. doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2010.03.-022
- [67] 刘晓娟, 肖伟, 闫健. 双分支智能水平井信息分析研究[J]. 钻采工艺, 2009, 32(5): 40–41. doi: 10.3969/j.issn.1006-768X.2009.05.014
LIU Xiaojuan, XIAO Wei, YAN Jian. Information analysis of bi-lateral intelligent horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(5): 40–41. doi: 10.3969/j.issn.1006-768X.2009.05.014
- [68] 隋微波, 张士诚. 多层合采油藏分层测试新方法可行性分析[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 90–94. doi:

- 10.3969/j.issn.1009-9603.2010.05.024
SUI Weibo, ZHANG Shicheng. Feasibility analysis of testing method on multilayer commingled oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 90–94. doi: 10.3969/j.issn.1009-9603.2010.05.024
- [69] 焉琳琳, 孙宝江, 王志远. 深水智能井多层合采的井筒温度场分布研究[C]. 青岛: 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集, 2013: 980–991.
YAN Linlin, SUN Baojiang, WANG Zhiyuan. Wellbore temperature field distribution of multi-layer co-production in deep water intelligent well[J]. Qingdao: Proceedings of the 13th National Hydrodynamics Conference and the 26th National Hydrodynamics Symposium, 2013: 980–991.
- [70] 张娇, 王浩, 谢天, 等. 智能完井自动气举理论研究[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 737–743. doi: 10.13639/j.-odpt.2017.06.014
ZHANG Jiao, WANG Hao, XIE Tian, et al. Theoretical study on the automatic gas lift of intelligent well completion[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(6): 737–743. doi: 10.13639/j.-odpt.2017.06.014
- [71] YIN Bangtang, LI Xiangfang, LIU Gang. A mechanistic model of heat transfer for gas-liquid flow in vertical wellbore annuli[J]. Petroleum Science, 2018, 15(1): 135–145.
- [72] 王子健, 申瑞臣, 王开龙, 等. 基于最优控制理论的智能井动态优化技术[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 887–891.
WANG Zijian, SHEN Ruichen, WANG Kailong, et al. Dynamic optimization techniques of smart wells using optimal control theory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 887–891.
- [73] 赵辉. 油藏开发闭合生产优化理论研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2011. doi: 10.7666/d.y1877014
ZHAO Hui. Theoretical research on reservoir closed-loop production optimization[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2011. doi: 10.7666/d.y1877014
- [74] 王浩. 智能完井生产优化方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
WANG Hao. Research on production optimization method of intelligent completion[J]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [75] 张宝岭, 王西录, 徐兴平. 高压封隔器密封胶筒的改进[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(1): 85–87. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2009.01.022
ZHANG Baoling, WANG Xilu, XU Xingping. Improvement of high pressure rubber barrel of packers[J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(1): 85–87. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2009.01.022
- [76] 盛磊祥, 许亮斌, 蒋世全, 等. 智能完井井下流量阀液压控制系统设计[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(4): 34–38. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2012.04.008
SHENG Leixiang, XU Liangbin, JIANG Shiquan, et al. Design of hydraulic control system for intelligent completion downhole flow valve[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(4): 34–38. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2012.04.008
- [77] 刘阳, 马兰荣, 郭朝辉, 等. 自膨胀封隔器技术在完井作业中的应用[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(3): 76–81. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2012.03.022
LIU Yang, MA Lanrong, GUO Zhaohui, et al. Researches and applications on expandable packers in well completion[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(3): 76–81. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2012.03.022
- [78] 杨继峰, 赵永瑞, 赵莅龙, 等. 智能完井流量控制设备技术及应用[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(3): 66–70. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2013.03.015
YANG Jifeng, ZHAO Yongrui, ZHAO Lilong, et al. Technologies and applications for inflow control equipments of intelligent well completion[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(3): 66–70. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2013.03.015
- [79] 张凤辉, 薛德栋, 徐兴安, 等. 智能完井井下液压控制系统关键技术研究[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(11): 7–10. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2014.11.002
ZHANG Fenghui, XUE Dedong, XU Xing'an, et al. Study of key technologies of down hole hydraulic control system in intelligent well completion[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(11): 7–10. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2014.11.002
- [80] 贾礼霆, 何东升, 卢玲玲, 等. 流量控制阀在智能完井中的应用分析[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(1): 18–21. doi: 10.16576/j.cnki.1007-4414.2015.01.007
JIA Liting, HE Dongsheng, LU Lingling, et al. Application analysis of flow control valve in intelligent well completion[J]. Mechanical Research & Application, 2015, 28(1): 18–21. doi: 10.16576/j.cnki.1007-4414.2015.01.007
- [81] 廖成龙, 黄鹏, 李明, 等. 智能完井用井下液控多级流量控制阀研究[J]. 石油机械, 2016, 44(12): 32–37. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.12.008
LIAO Chenglong, HUANG Peng, LI Ming, et al. Down-hole hydraulic operated multistage flow control valve for intelligent well completion system[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(12): 32–37. doi: 10.16082/j.cnki.-issn.1001-4578.2016.12.008
- [82] 柯珂, 王志远, 郑清华, 等. 深水智能完井关键设备组合优化模型的建立与应用分析[J]. 中国海上油气, 2015, 27(1): 79–85. doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2015.01.-013
KE Ke, WANG Zhiyuan, ZHENG Qinghua, et al. Establishment of optimization model for key devices combination in deep water intelligent well completion and analysis for its application[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(1): 79–85. doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.-2015.01.013
- [83] 相恒富, 孙宝江, 李鹏飞. 智能完井技术标准探析[J].

- 钻采工艺, 2017, 40(2): 52–55. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2017.02.16
- XIANG Hengfu, SUN Baojiang, LI Pengfei. Discussion on standards for intelligent well completion[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(2): 52–55. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2017.02.16
- [84] 尚凡杰. 考虑井下流入控制阀可靠性的智能完井数值模拟方法[J]. 钻采工艺, 2019, 42(5): 52–55. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.05.15
- SHANG Fanjie. A simulation method for intelligent completion with consideration of icv reliability[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(5): 52–55. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.05.15
- [85] 张华礼, 谢南星, 李少兵, 等. 气井永置式井下压力温度监测技术及其应用展望[J]. 钻采工艺, 2005, 28(1): 53–55. doi: 10.3969/j.issn.1006-768X.2005.01.017
- ZHANG Huali, XIE Nanxing, LI Shaobing, et al. The permanent downhole pressure & temperature monitoring technology in gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(1): 53–55. doi: 10.3969/j.issn.1006-768X.2005.01.017
- [86] 沈泽俊, 张卫平, 钱杰, 等. 智能完井技术与装备的研究和现场试验[J]. 石油机械, 2012, 40(10): 67–71. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2012.10.018
- SHEN Zejun, ZHANG Weiping, QIAN Jie, et al. Research on intelligent well system[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(10): 67–71. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2012.10.018
- [87] 李天君, 吕春雷, 李发荣. 智能技术优化油气生产[J]. 国外油田工程, 2009, 24(8): 37–40. doi: 10.3969/j.issn.2095-1493.2008.08.010
- LI Tianjun, LÜ Chunlei, LI Farong. Optimizing oil and gas production by intelligent technology[J]. Foreign Oil Field Engineering, 2009, 24(8): 37–40. doi: 10.3969/j.issn.2095-1493.2008.08.010
- [88] 韦红术, 张俊斌, 苏峰, 等. 流花4-1油田深水模式钻完井关键技术创新及应用[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2014.
- WEI Hongshu, ZHANG Junbin, SU Feng, et al. Innovation and application of key technologies of deep-water drilling and completion in Liuhua 4-1 Oilfield[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2014.
- [89] 马英文, 邓建明, 赵少伟. 海上老油田增产的工程技术发展方向探讨[J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 110–111. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.04.32
- MA Yingwen, DENG Jianming, ZHAO Shaowei. Discussion on development trend of offshore oilfield stimulation technology[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(4): 110–111. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.04.32
- [90] 谭绍棚, 宋昱东, 王宝军, 等. 渤海油田智能注水完井技术研究与应用[J]. 石油机械, 2019, 47(4): 63–68. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2019.04.010
- TAN Shaoxu, SONG Yudong, WANG Baojun, et al. Application of intelligent water injection and completion technology in Bohai Oilfield[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(4): 63–68. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2019.04.010
- [91] 单彦魁, 韦红术, 张俊斌, 等. 南海深水油田智能井修井挑战及对策[J]. 钻采工艺, 2017, 40(6): 63–65. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2017.06.19
- SHAN Yankui, WEI Hongshu, ZHANG Junbin, et al. Challenges and countermeasures for workover on deep-water smart well in South China Sea[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(6): 63–65. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2017.06.19
- [92] 张亮, 李瑞丰, 刘景超, 等. 智能完井技术地面控制系统研究[J]. 中国造船, 2019, 60(s1): 426–433. doi: 10.3969/j.issn.1000-4882.2019.z1.059
- ZHANG Liang, LI Ruifeng, LIU Jingchao, et al. Research on ground control system in intelligent completion technology[J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(s1): 426–433. doi: 10.3969/j.issn.1000-4882.2019.z1.059
- [93] 马荣, 郭立宏, 李梦欣. 新时代我国新型基础设施建设模式及路径研究[J]. 经济学家, 2019(10): 58–65.
- MA Rong, GUO Lihong, LI Mengxin. The mode of transforming china into new infrastructure construction and its path design in the new era[J]. Economist, 2019(10): 58–65.
- [94] 王利军, 刘传刚, 王丙刚, 等. 海上油田水平井控水完井技术现状及发展趋势[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(1): 86–89. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2017.01.020
- WANG Lijun, LIU Chuangang, WANG Binggang, et al. Status and development trend of horizontal well water-control completion technology for offshore oil field[J]. Oil Field Equipment, 2017, 46(1): 86–89. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2017.01.020
- [95] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 583–591.
- HAN Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 583–591.
- [96] 邹信波, 罗东红, 许庆华, 等. 海上特高含水老油田挖潜策略与措施——以珠江口盆地陆丰凹陷LFD13-1油田为例[J]. 中国海上油气, 2012, 24(6): 28–33, 37.
- ZOU Xinbo, LUO Donghong, XU Qinghua, et al. Some strategical measures to tap the potential in offshore mature oilfields with extra-high water cut: A case of LFD13-1 Field in Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(6): 28–33, 37.
- [97] 江怀友, 沈平平, 李相方, 等. 高含水期河道砂储层MRC技术应用机理研究[J]. 特种油气藏, 2008, 15(1):

- 46–51. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2008.01.012
 JIANG Huaiyou, SHEN Pingping, LI Xiangfang, et al. Application of MRC technology in channel sand reservoir in high water cut period[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(1): 46–51. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.-2008.01.012
- [98] 熊继有, 许红林, 徐坤吉, 等. 提高油藏最终采收率的极大储层接触技术[J]. 钻采工艺, 2012, 35(1): 10–13. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2012.01.04
 XIONG Jiyu, XU Honglin, XU Kunji, et al. Extreme reservoir contact technology for enhanced ultimate oil recovery[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(1): 10–13. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2012.01.04
- [99] 张卫东, 李国栋, 袁文奎, 等. 极大储层接触技术研究进展及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(3): 112–116. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2010.03.027
 ZHANG Weidong, LI Guodong, YUAN Wenkui, et al. Research and development of extreme reservoir contact wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(3): 112–116. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2010.03.027
- [100] 贾虎, 邓力琿. 基于流线聚类人工智能方法的水驱油藏流场识别[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 312–319. doi: 10.11698/PED.2018.02.14
 JIA Hu, DENG Lihui. Oil reservoir water flooding flowing area identification based on the method of streamline clustering artificial intelligence[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 312–319. doi: 10.11698/PED.-2018.02.14
- [101] 刘翔, 伊然, 周祥, 等. 贝叶斯网络方法在气井完井方式优选中的应用[C]. 福州: 全国天然气学术年会论文集, 2018. doi: 10.26914/c.cnkihy.2018.002770
 LIU Xiang, YI Ran, ZHOU Xiang, et al. Application of bayesian network method in optimization of gas well completion mode[J]. Fuzhou: Proceedings of the National Natural Gas Academic Annual Conference, 2018. doi: 10.-26914/c.cnkihy.2018.002770
- [102] 赵辉, 姚军, 吕爱民, 等. 利用注采开发数据反演油藏井间动态连通性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 91–94, 98. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.-2010.06.017
 ZHAO Hui, YAO Jun, LÜ Aimin, et al. Reservoir interwell dynamic connectivity inversion based on injection and production data[J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34(6): 91–94, 98. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.06.017
- [103] 党文辉, 刘颖彪, 石建刚, 等. 多节点智能完井技术

研究与应用[J]. 石油机械, 2016, 44(3): 12–17. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.03.003

DANG Wenhui, LIU Yingbiao, SHI Jiangang, et al. Research and application of multinode intelligent completion technology[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(3): 12–17. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.03.003

作者简介



冯高城, 1987 年生, 男, 汉族, 黑龙江鹤岗人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋油田开发方面的研究。
 E-mail: fenggch3@cnooc.com.cn



尹彦君, 1979 年生, 男, 汉族, 山东泰安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋油气田开发方面的研究工作。
 E-mail: yanyj@cnooc.com.cn



马良帅, 1993 年生, 男, 汉族, 山东青岛人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋油气开发方面的研究工作。
 E-mail: ex_malsh2@cnooc.com.cn



张亮, 1973 年生, 男, 汉族, 天津人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋石油钻完井及深水装备方面的研究工作。
 E-mail: zhangliang@cnooc.com.cn



王伟, 1990 年生, 男, 汉族, 山西晋中人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋信息化及数字化转型方面的研究工作。
 E-mail: wangwei173@cnooc.com.cn

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>