

油田分层测试工艺及数智化技术

赵增权¹, 曹刚², 曹钰宣²

1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司 天津 300283

2. 中国石油大庆油田有限责任公司第一采油厂 黑龙江大庆 163001

通讯作者: Email: 157353794@qq.com

引用: 赵增权, 曹刚, 曹钰宣. 油田分层测试工艺及数智化技术[J]. 油气井测试, 2024, 33(2): 65-71.

Cite: ZHAO Zengquan, CAO Gang, CAO Yuxuan. Layered testing process and digital intelligence technology in oilfield[J]. Well Testing, 2024, 33(2): 65-71.

摘要 为解决油田传统注入井分层测试工艺效率低、精度差和成本高的问题,研究了一种基于油田数智化推进发展的新技术。该技术整合了智能管柱测调技术、预制电缆以及智能配水器和封隔器等技术,实现了对注入井的分层测试过程的自动化和智能化;通过使用由智能管柱组成的多功能装置,实时监测和采集地质资料;借助可视化界面展示测试数据,增强了数据分析和管理的可视化程度;通过远程控制可实时检测和重新设定每层注水量、查看注水层位的压力和温度,以及进行封隔器密封性检测等;井口智能校准自检仪还能定期对井下仪器参数进行重新标定和校准。该技术为智能化测试技术在油田行业的应用提供了新的思路 and 方向。

关键词 智能管柱测调;数智化技术;注入井;分层测试;优化;实时检测;自动化测试**中图分类号**: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.02.011

Layered testing process and digital intelligence technology in oilfield

ZHAO Zengquan¹, CAO Gang², CAO Yuxuan²

1. Downhole Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300283, China

2. No. 1 Oil Production Company of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163001, China

Abstract: In order to address the issues of low efficiency, poor accuracy, and high cost associated with traditional layered testing techniques in injection wells in oilfields, a new technology based on the advancement of digital intelligence in oilfields was studied. This technology integrates intelligent pipe string measurement and adjustment techniques, prefabricated cables, intelligent water distributors, and intelligent packers, achieving automation and intelligence in the layered testing process of injection wells. By utilizing the multifunctional devices composed of intelligent pipe strings, real-time monitoring and collection of geological data can be realized. Through visualization interfaces, the testing data were displayed, which enhances the visualization degree of data analysis and management. Through remote control, real-time detection and resetting of injection rates for each layer, viewing of pressure and temperature in injection layers, and conducting packer sealing tests can be performed. In addition, the intelligent calibration self-checking instrument at the wellhead can periodically recalibrate and calibrate the parameters of downhole instruments. This technology provides a new idea and direction for the application of intelligent testing technology in oilfield industry.

Keywords: intelligent pipe string measurement and adjustment; digital intelligence technology; injection well; layered testing; optimization; real-time detection; automated testing

油田在开发后期数智化测调技术对分层测试的需求日益增长。传统的分层测试方法存在测试时间长,人力物力资源投入大等问题,引入数智化测调技术成为提高测试效率和准确性、降低测试成本的重要方向。智能管柱测调数智化技术是一种新型分层测试技术,具有数字化、自动化和智能化管理等特点。该技术通过使用智能管柱等装置,在

注入井分层测试中得到了广泛应用^[1-2]。它能够实现数据的数字化采集和传输,并利用自动化算法对数据进行分析处理,提供准确的地层结构和储油性质等信息,为生产调整和井下操作提供指导^[3]。相较于传统的试采式测试方法,智能管柱测调技术具有更高的效率和精度,能够显著提升油田开采效果。实践中,智能管柱测调技术已经在油田工业中

得到了推广和应用。智能管柱测调技术在注水井分层测试中的应用包括智能管柱测调技术的实现、井下环境的数字化、提高单井测试频次、减少人为因素干扰等多方面^[4-6],对数字化油田时代注水井分层测试技术的研究和应用,具有一定参考价值。

1 油田分层测试工艺技术形势分析

油田分层测试工艺技术与注入井智能测调管柱存在关联性,分层测试有助于确定油层产能和特征,为智能管柱提供输入参数,优化注入井运行效率^[7-9]。两者的关联促进油田开发技术协同发展,共同提升油田开发效率和可持续发展能力。

1.1 油田后期开发形势对数智化测调技术的需求

传统的开采工艺和设备效率下降、成本增加,亟需引入新的技术^[10-11]。数智化测调技术作为一种新兴的技术手段,以实时数据采集、智能分析和远程控制为基础,可以有效地满足这些需求。

(1)数智化测调技术可以通过实时监测和智能调整,优化注入井的运行效率,提高生产效率。

(2)该技术可以实现精细化管理^[12-13],帮助优化注入井的运行参数,降低能耗并降低生产成本。

(3)数智化测调技术能够提供详细的注入井运行情况和趋势分析,为油田后期开发的决策提供科学依据,支持数据驱动决策,从而提高油田开发的效益和可持续发展能力。

1.2 数智化测调技术在分层测试行业的应用前景

该技术能够根据油层的不同特征和需求,实现全过程的数字化、自动化和智能化管理,从而提高测试效率和准确性,降低测试成本(见图1)。数智化测调技术在分层测试行业的应用体现在以下几个方面:

(1)提高测试效率。数智化测调技术通过数字化数据采集和传输,实现了实时监测和远程控制,减少了人工操作和时间成本,大大提高了分层测试的效率。

(2)提高测试准确性。数智化测调技术利用先进的传感器和算法,能够实现对注入井各项参数的高精度监测和分析,为决策提供准确的数据支持,提高了测试准确性。

(3)降低测试成本。相较于传统的试采式方法,数智化测调技术减少了对人力和物力资源的依赖,降低了测试成本。此外,数智化测调技术能够避免因过程中的人为错误和设备故障导致的重复测试和资源浪费,进一步降低了测试成本。

(4)实现可视化管理。数智化测调技术通过数据传输和处理软件,可以将测试结果以直观、清晰的形式展示出来,实现了分层测试数据的可视化管理,方便决策和评估^[14-15]。

(5)推动行业转型升级。数智化测调技术的应用将促进大庆油田注水井分层测试行业的数字化、智能化转型升级,提升整个行业的竞争力和发展水平。

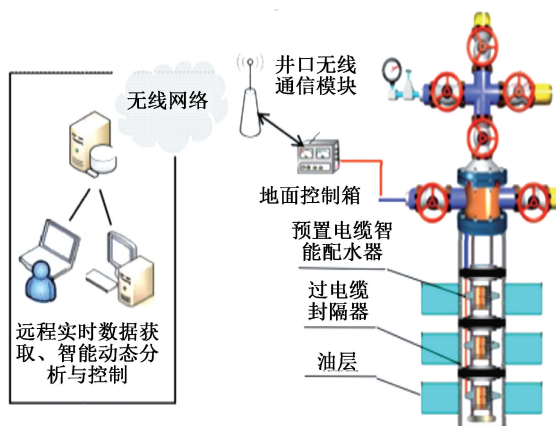


图1 预置电缆智能分注工艺管柱、地面控制系统、无线远程控制系统

Fig.1 Preset cable intelligent injection process string, ground control system, wireless remote control system

2 数智化技术在分层测试行业的应用

数智化技术通过使用数据分析和人工智能算法,可以更准确地识别需要进行测试的区域和问题,从而提高测试效率。利用传感器和自动化设备,可以实现对测试过程的监控和管理,减少人为失误的可能性,保证测试数据的准确性。

2.1 数智化技术的概念和特点

注入井智能管柱测调数智化技术,是指通过引入数字化和智能化技术,对注入井的管柱进行实时监测和分析,以提高测试效率和精度的一种新型测试方法。

(1)数据实时性强。注入井智能管柱测调数智化技术可以实现对注入井管柱的实时监测和数据采集,从而可以及时跟踪井口情况,提高测试数据的实时性和准确性。

(2)智能化程度高。注入井智能管柱测调数智化技术采用先进的传感器和智能算法,自主识别并排除异常数据,提高测试效率和精度。

(3)数据处理信息化。注入井智能管柱测调数智化技术将测试结果以图像、表格等形式的数据可视化呈现,将大量繁琐的数据处理工作转化为信息

化的方式,提高数据处理效率和可视化程度。

(4)灵活性和高效性。注入井智能管柱测调技术可以针对不同的注入井进行灵活的部署,同时具有高效的测试速度和准确性,可以大幅提高测试效率。

同时,注入井智能管柱测调数智化技术适用于大规模分层测试的场景,其优势在于实时性强、智能化程度高、数据处理信息化、灵活性和高效性等特点,可以大幅提高测试效率和精度,为油田提供更加稳定和可靠的数据支撑(见图 2)。

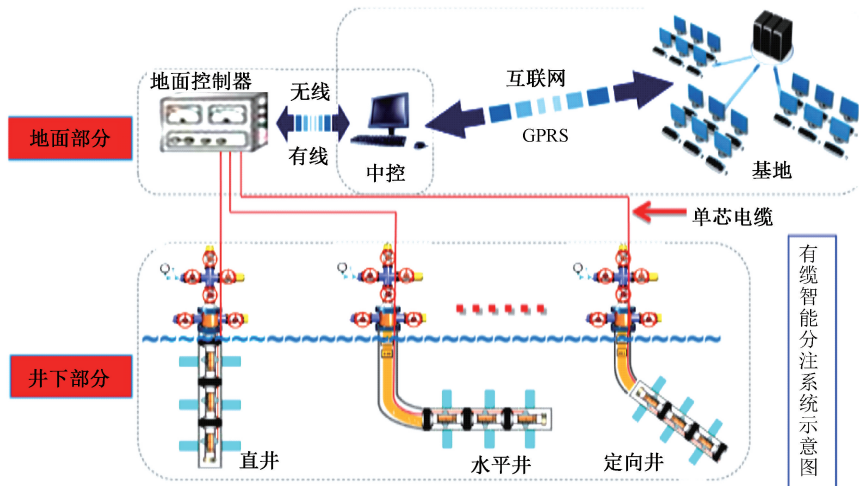


图 2 有缆智能测调分注系统
Fig. 2 Cable intelligent measuring and dispensing system

2.2 数智化技术在油田企业的应用现状

利用数智化技术可以实现分层测试数据的快速、准确和自动化处理,注入井智能管柱测调技术是近年来在大庆油田注水井分层测试行业中的一种新技术。

(1)技术整体水平已经提高。推广智能化测试技术在注入井智能管柱测调技术方面投资和研发较多,使得智能测调技术的整体水平得到了提高,技术领先。

(2)已经逐步取代传统试采式测试方法。注入井分层智能测调技术相对于传统方法,具有效率高、测试费用较低、测量精度高等优势,已经开始逐步取代传统的试采式测试方法,在大庆油田第一采油厂已和勘探研究院开始推广注入井智能管柱测调数智化技术,但总体应用还不普及,处于推广阶段。

(3)还存在技术改进和创新的空间。尽管注入井分层智能测调技术已经在大庆油田得到部分应用,但在实际应用中仍然存在一些问题,测试时需要保证现场设备运行稳定等,需要加强技术创新,随着油田行业信息化建设不断深入,注入井智能管柱测调数智化技术有望在行业内进一步推广应用,提高油田测试的精准度和效率。

(4)需要加强人才培养。注入井分层智能测调

技术需要专业技能和实际操作经验的人才支撑,因此还需要加强人才培养。应该通过建立专业化的技术培训机制,增加培训课程和实践实验,提高从业人员的技能水平和实际操作经验。

注入井智能管柱测调数智化技术在大庆油田行业内的应用现状还需要进一步推广和完善,技术的创新和应用仍需加强。但随着信息化建设的深入和技术的不断升级,注入井智能管柱测调数智化技术有望在未来得到更为广泛的应用。

2.3 数智化技术的应用对于分层测试行业的发展影响

智能管柱测调数智化技术的应用对于油田注水井分层测试行业的发展影响是非常显著的。

(1)提高了测试效率和精度。采用智能管柱测调数智化技术对井口进行实时监测和数据采集,通过数字化和智能化技术对数据进行处理和分析,自动排除异常数据,提高了测试效率和精度。

(2)降低了测试成本。采用智能管柱测调数智化技术实现数字化和智能化的测试过程,大幅减少了人工干预,降低了测试成本,并提高了测试效率和精度。

(3)增强了测试数据的可视化程度。采用智能管柱测调数智化技术将测试结果以图像、表格等形式可视化呈现,增加了测试数据的可视化程度,使

得测试结果更加直观和易于理解。

(4) 提高了对油田储量的评估和预测。采用智能管柱测调数智化技术对油田进行分层测试, 可以获得更加准确和精细的测试数据, 进而提高对油田储量的评估和预测的准确性。

3 智能管柱测调数智化技术的技术原理及应用

智能管柱测调数智化技术的技术原理是基于传感器、数据采集系统和人工智能算法的结合。通过安装在管柱上的传感器, 实时采集并传输各种参数数据, 如压力、温度、流量等。然后利用数据采集系统对这些数据进行处理和分析, 并运用人工智能算法进行模型建立和预测, 从而实现对管柱运行状态的监测、故障诊断和智能调控。

3.1 智能管柱测调数智化技术的技术结构

智能管柱测调数智化技术将压力与流量监测系统、控制系统及通信系统等置于预置电缆智能配水器中, 地面控制箱通过单芯钢管电缆供电并实时传输数据; 通过无线远程控制系统, 实现办公室内对注水井远程监控。工艺主要由三部分组成: 预置电缆智能分注工艺管柱、地面控制系统、无线远程控制系统。

(1) 预置电缆智能分注工艺管柱

由井口取压密封装置、预置电缆智能配水器、过电缆封隔器、电缆、电缆保护器组成 (见图 3)。

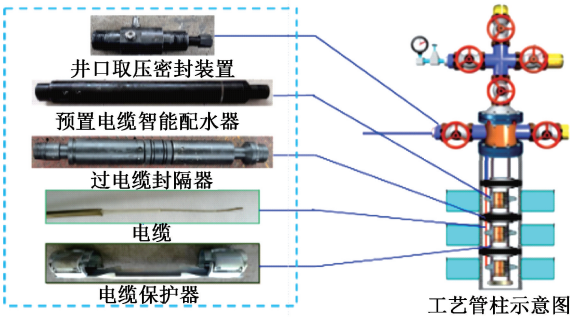


图 3 工艺结构图

Fig. 3 Process structure diagram

预置电缆智能配水器: 由流量控制模块、流量监测模块和压力监测模块组成, 通过电缆与地面控制箱通信, 接收地面控制指令及数据上传, 实现流量、嘴前嘴后压力等数据的采集和流量控制。

过电缆封隔器: 由坐封、锁紧、解封、洗井等机构组成, 采用悬挂方式, 液压坐封, 上提解封, 具备电缆穿层、洗井及逐级解封等功能。

电缆: 保护封隔器以下电缆采用 $\phi 4.0\text{ mm}$ 单芯钢管电缆, 保护封隔器以上电缆采用 $\phi 8.0\text{ mm}$ 单芯铠装电缆, 外铠为绝缘橡胶, 有效防磕碰, 并可重复使用。

电缆保护器: 采用卡扣自锁方式, 适应 $\phi 3.2 \sim \phi 8.0\text{ mm}$ 电缆, 有效保护油管接箍处的电缆。

(2) 地面控制系统

地面控制系统主要由地面控制箱、无线通信模块组成。

地面控制箱: 为井下智能配水器供电, 具备与无线通信模块和预置电缆智能配水器通信、井下生产数据存储、多层段自动测调等功能。

无线通信模块: 在地面控制箱与远程控制系统之间建立无线通信信道, 实现数据的远程传输。

(3) 无线远程控制系统

无线远程控制系统由生产无线网、服务器、远程操作平台组成。

远程控制平台部署在服务器上, 可通过生产无线网定时下发指令, 采集井下分层数据, 并对不合格分注井进行自动测调, 用户通过登陆远程控制平台可查看数据、手动测调。平台具备注水井信息管理、多线程远程测调、采集测调信息图表展示、分层测试、验封、静压测试等功能。

3.2 智能管柱测调数智化技术的技术应用

油田注水井采用注水井智能管柱测调数智化技术, 通过传感器对井口进行实时监测和数据采集, 对数据进行处理和分析, 并将测试结果以图像、表格等形式可视化呈现, 大幅提高了测试精度和效率。

(1) 自动化测试智能系统实现了网络在线调整。

预置电缆智能分层注水技术现场试验 113 口井, 最高层段数 7 层, 实现了井下流量、压力等参数的远程实时监测与注水量调节, 7 层段井平均单井测调时间 1 h 以内, 每天采集 2~12 次数据。

(2) 自动化数据采集功能。可直观显示相关注水参数及了解分层注水状况。

(3) 数据可视化读取功能。可直接读取分层水量、压力、水嘴开度和合格等信息。

(4) 数据处理信息化功能。从水嘴前水嘴后压差及水嘴开度直观判断层段吸水能力。

通过连续监测, 可得到任意时间段单层段累计注入量, 为优化注水方案提供指导; 通过监测井下

数据,及时发现不合格层段,快速调整层段流量,保证注水合格率长期达标。

3.3 可人机联作调整或按照方案手动调整分层注水量

采用智能化分层测试技术,通过数字化和智能化技术对井口的管柱进行实时监测和分析,自主识别并排除异常数据,提高测试效率和精度。同时,将测试结果通过信息化方式呈现,提高了数据处理效率和可视化程度。

(1)可实时调整功能。调整目的层段时,可观察其它层段水量、压力变化,根据实际生产情况实时调整控制策略,提高生产效率和产量。

(2)自动化预警功能。利用数智化技术可以实现注水井的自动化预警,当出现异常情况时及时报警并采取相应的措施,超差自动报警功能,可对不合格层段即时调整,保证生产安全和稳定性。

(3)可存储数据功能。测试调整过程、注水参数变化数据记录留痕。

中区西部高台子油层位于萨尔图构造顶部,萨中开发区中部,北起中三排水井排,南至中七排水井排。中区西部54口试验区从2016年11月开始施工,到2018年8月完成全部工作量。由于井况问题等原因实际施工83口井,终止29口井,完工54口井(2016年10口井、2017年38口井、2018年6口井),注水层段316个,平均单井5.8个层,五段及以上占94.0%

4 试验区效果分析

预置电缆智能分层注水技术现场试验。通过预置电缆智能分层注水技术,成功实现了对井下流量、压力等参数的远程实时监测和注水量的调节。利用该技术进行的103口井的现场试验中,最高层段数达到了7层,测调时间控制在1h以内,每天可采集2~12次数据。

4.1 该技术实现了对流量和压力的连续监测,并具备快速调整注水量的能力

(1)单层段累计注入量与注水方案优化。通过连续监测井下数据,该技术得到任意时间段单层段的累计注入量,为优化注水方案提供了指导。可根据需求灵活调整注水方案,以达到更好的注水效果。

(2)及时发现不合格层段与调整。通过井下数据监测,能够及时发现不合格层段,并快速调整层段流量,确保注水合格率长期达标。有效提高了注

水过程的准确性和有效性。

4.2 通过预置电缆智能分层注水技术,实现了封隔器在线验封功能,提高了验封效率并降低了测试成本

(1)标准验封与封隔器状态判断。利用该技术实现了标准验封的功能,通过控制阀门关闭配水器控制阀,进行井口的“开—关—开”操作,并通过压力曲线判断封隔器的密封状态。

(2)快速验封与判断。该技术实现了快速验封的功能,通过开关单层配水器控制阀,比对流量及压力对应关系,能够快速判断封隔器的密封状态(见图4)。

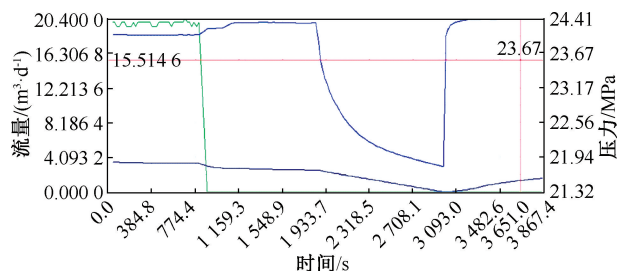


图4 验封曲线
Fig. 4 Sealing curve

4.3 通过预置电缆智能分层注水技术,成功实现了注水井停层不停井分层静压测试,减少了对生产井产量的影响

(1)改变传统静压测试方法。利用该技术改变了传统的静压测试方法,通过远程控制单层段关闭,实现了通过嘴后压力监测进行静压测试,并可以根据资料解释需求随时终止压力测试,从而及时恢复正常生产。

(2)减少停产时间和成本。通过不停井分层静压测试,预置电缆智能分层注水技术有效减少了停产时间和成本,提高了生产效率。

(3)提高测试的准确性和可靠性。通过远程监测和控制,预置电缆智能分层注水技术实时获取注水井各层段的静压数据,减少了测试中人为操作的误差,提高了测试的准确性和可靠性。

4.4 通过预置电缆智能分层注水技术,实现了分层实际注水指示曲线和吸水能力测试功能,在注水方案的制定和调整中提供了有力的指导

(1)实时监测流量和压力变化。该技术通过控制井口阀门,同时监测流量和水嘴前、水嘴后压力的变化,可以得到常规注水指示曲线和实际注水指示曲线。准确评估地层的吸水能力,确定合理的注入方案。

(2)优化注水方案。通过分层实际注水指示曲线和吸水能力测试,可以更准确地评估地层的吸水能力,并根据测试结果优化注水方案,达到更好的注水效果。

(3)提升生产井的产能。通过准确评估地层吸水能力并优化注水方案,预置电缆智能分层注水技术提升生产井的产能,实现更高的采收率和经济

效益。

(4)实现智能化管理和远程操作。预置电缆智能分层注水技术支持智能化管理和远程操作,提高了工作效率和安全性。

试验区共现场试验 54 口井,与常规注水相比,检配合格率提高 13.8%,测试合格率提高 3.1%,±20%以内精准配注层占比提高 18.2%(见表 1)。

表 1 试验区 54 口井智能测调完成情况表

Table 1 The completion of intelligent testing of 54 wells in the test area

方法	井数 /口	层段数 /层	测调 次数	检配合格 率/%	测试合 格率/%	合格层/个			不合格层/个	±20%以内合 格层占比/%
						±10%	±20%	±30%	超过±30%	
智能	54	316	346	85.2	95.6	104	89	67	12	71.0
常规	50	231	117	71.4	92.5	36	69	79	15	52.8

5 智能管柱测调数智化技术存在的不足

智能管柱测调数智化技术在提高油气钻采效率、降低成本和减少人为操作失误等方面发挥着重要作用,然而,也存在一些不足之处。这些不足包括但不限于:技术成本较高、对环境适应能力有限、数据安全性和隐私保护问题等。

5.1 智能配水工具的稳定性问题

在 2020 年~2022 年在试验、应用过程中频繁出现配水器密封失效和电缆连接器短路等故障,针对这些问题,进行了系列的技术改进,返工率由 90.3%将至 27.5%,起到一定效果。但仍不断出现各种问题,智能配水工具稳定性还需进一步提高。

5.2 故障井影响注水合格时率问题

(1)返工井等待作业时间长,主要原因是智能配水器库存不足,不能及时提供,另外每作业一口井,分析引起井下故障的原因,逐步改进。

(2)智能管柱井内一个层开关不动或失联的故障可能会导致管柱监测系统无法准确获取该层段的数据,从而影响到井的合格率。

(3)发生井下水嘴堵塞、反复开关解堵不成功的情况,不能通过投捞堵塞器解决,只能通过重配作业的方式解决。

5.3 网络系统操作问题

(1)不能多人多井同时调整。目前系统的数据传输通道是唯一的,因此目前只能单口井进行调整,建议增加数据传输通道,实现多机多井多通道同时调整。

(2)不能连续记录和存储数据。系统为减少电子元件负担,日常为休眠状态,只能每隔 4 h 唤醒通

电录取一次数据。

(3)电力系统断电导致传输中断时,无法及时通电,数据不能连续录取和保存。建议增加显示累计注水量和停电后估算注水量数据及存储功能。

(4)系统数据量庞大影响其它软件的正常使用。由于智能测调软件系统访问数据库次数过多,由于影响其它软件运行,计算机室已经停用智能测调软件系统,只能现场检调,无法实现网上数据的共享和实时监测。

5.4 软件系统应用问题

(1)没有智能自动调整功能,层段水量超差不能自动调整。建议增加自动调整功能,出现超差井系统及时自动调整。

(2)软件系统井口与配水间的压力和水量有误差。系统显示的井口油压为深度折算压力,全井水量为各小层水量之和,与配水间压力和水量有误差。建议配水间安装监测及控制水量、压力系统,以减少误差。

6 结论

(1)实现了实时监测、数据采集和处理的自动化和智能化,显著提高了测试效率和精度,降低了成本。

(2)技术的数字化手段增强了对测试数据的可视化程度,为油田储量评估和预测提供更准确的数据支持,进一步提升了技术的应用价值。

(3)随着技术的不断完善和应用,预计其在油田行业中的作用将进一步扩大,为行业发展注入新的活力和动力,具有重要的应用价值,为智能化测试技术在油田行业的应用提供了新的思路和方向。

致谢:在完成本篇论文的过程中,大庆油田有限责任公司和渤海钻探公司提供的数据和资源,在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 曹正宇. 数字化油田技术中的地质模型[M]. 石油工业出版社,2019,46.
- [2] 雷雨萌,许红云. 数字化油田时代注水井分层测试的现状与研究[J]. 大庆油气地质与采收率,2022,29(2):30-36.
- LEI Yumeng, XU Hongyun. Current situation and research on layered testing of injection wells in the era of digital oilfields[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 29(2): 30-36.
- [3] 程凤才,张兆勇,刘惠民. 智能管柱技术在注水井测试中的应用[J]. 石油钻采工艺,2020,42(3):73-77.
- CHENG Fengcai, ZHANG Zhaoyong, LIU Huimin. Application of intelligent drill pipe technology in testing of injection wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(3): 73-77.
- [4] 李文铭,张永进. 数字化油田环境下注水井分层测试技术的应用及展望[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2021,36(1):1-8.
- LI Wenming, ZHANG Yongjin. Application and prospect of layered testing technology for injection wells in the context of digital oilfields[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2021, 36(1): 1-8.
- [5] 周广华,尹成万,王艳清. 数字化油田时代注水井分层测试的现状和趋势[J]. 中国石油勘探,2019,24(5):1-7.
- ZHOU Guanghua, YIN Chengwan, WANG Yanqing. Current situation and trends in layered testing of injection wells in the era of digital oilfields[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 1-7.
- [6] 杨彩英,王硕,王涛. 基于智能管柱的油气井分层测试研究[J]. 油气储运, 2019, 38(10): 1182-1187.
- YANG Caiying, WANG Shuo, WANG Tao. Research on layered testing of oil and gas wells based on intelligent drill pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(10): 1182-1187.
- [7] 林声涛,贺策. 数字化油田背景下的注水井地层测试技术[J]. 石油勘探与开发,2020,47(6):63-70.
- LIN Shengtao, HE Ce. Formation testing technology for injection wells in the context of digital oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 63-70.
- [8] 马艳莉,王子妍,李志刚. 数字化油田采用智能管柱进行注水井分层测试的应用实践[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(2):106-111.
- MA Yanli, WANG Ziyang, LI Zhigang. Application practice of using intelligent drill pipe for layered testing of injection wells in digital oilfields[J]. Journal of China University of

Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 106-111.

- [9] 张高明,卫东娜,李丽华. 基于数字化油田的注入井多层测试技术研究与应用[J]. 中国石油勘探,2020,25(5):76-83.
- ZHANG Gaoming, WEI Dongna, LI Lihua. Research and application of multilayer testing technology for injection wells based on digital oilfields[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(5): 76-83.
- [10] 徐通,陈毅,李新. 油田注水井分层测试技术[J]. 大庆油气地质与采收率,2020,27(4):89-92.
- XU Tong, CHEN Yi, LI Xin. Layered testing technology for oilfield injection wells[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 27(4): 89-92.
- [11] 李彦鹏,李飞,李建国,等. DAS技术在井中地震勘探的应用[J]. 石油物探,2020,59(2):242-249.
- LI Yanpeng, LI Fei, LI Jianguo, et al. Application of distributed acoustic sensing in borehole seismic exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 242-249.
- [12] 于泳. 预置电缆式分层注水测调工艺研究[D]. 哈尔滨理工大学,2023.
- YU Yong. Research on the process of preset cable-type layered water injection measurement and adjustment[D]. Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [13] 石亮亮,王磊,孟令浩,等. 水平井分层智能注水工艺管柱研究与应用[J]. 石化技术,2017,24(1)200-201.
- SHI Liangliang, WANG Lei, MENG Linghao, et al. Research and application of intelligent water injection process pipe string for horizontal well layering[J]. Petrochemical Technology, 2017, 24(1) 200-201.
- [14] 程英姿,贺东,汪团员,等. 一种新型油井智能分层开采与测试技术[J]. 钻采工艺,2015,38(3):46-48.
- CHENG Yingzi, HE Dong, WANG Yuanyuan, et al. A new intelligent layered production and testing technology for oil wells[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(3): 46-48.
- [15] 梁洁. 注水井分注管柱优选及智能测调[D]. 长江大学,2014.
- LIANG Jie. Optimal selection and intelligent measurement and adjustment of injection well diversion string[D]. Yangtze University, 2014.

编辑 穆立婷

第一作者简介:赵增权,男,1976年出生,1999年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,目前主要从事油田井下作业工作,电话:15802206906, Email: 157353794@qq.com。通信地址:天津市滨海新区大港油田井下技术服务分公司,邮政编码:300283。