

油田注水井数字化节能建设研究



寇秋涣*, 夏蓉, 修丽群

大庆油田设计院有限公司总体规划室, 黑龙江大庆 163418

摘要: 随着已开发油气田面临生产设施老化问题, 老油田进入高含水、特高含水期开采阶段, 生产成本显著增加。必须进行数字化节能建设, 全面提升管理水平, 提升生产效益, 实现从传统生产向精益生产的转变。本文以某大型油田的注水井为切入点, 研究其注水工艺及站外工艺, 探索不同工艺注水井数字化建设的方式: 单干管单井配水工艺的注水井, 井口进行数字化建设; 单干管单井配水的注水井控制阀组位于相应的配水间内, 因此单井井场不进行数据采集, 在配水间内进行数字化建设。进一步将单干管单井配电方式由太阳能供电还是就近引接其他电源的距离界限精确至 140m。为全面推进数字化进程奠定一定的基础。

关键词: 数字化建设; 注水工艺; 配电方式; 节能

DOI: [10.57237/j.se.2024.02.003](https://doi.org/10.57237/j.se.2024.02.003)

Research on Digital Energy Saving Construction of Oil Injection Well

Qiuhuan Kou*, Xia Rong, Xiu Liquan

Daqing Oilfield Design Institute Corporation, Daqing 163418, China

Abstract: As the developed oil and gas fields face the aging problem of production facilities, the old oil fields enter the high water cut and extra high water cut stage of exploitation, and the old gas fields enter the pressurized exploitation stage, and the production cost increases significantly. It is necessary to carry out digital energy-saving construction, comprehensively improve management level, enhance production efficiency, and realize the transformation from traditional production to lean production. This paper takes the injection well of a large oilfield as the entry point, studies its injection process and off-site process, and explores the digital construction of injection well with different technologies: the injection well with single pipe and single well water distribution process, well head digital construction; The water injection well control valve group of single pipe and single well water distribution is located in the corresponding water distribution room, so data collection is not carried out in the single well site, and digital construction is carried out in the water distribution room. Further, the distance limit of the single pipe and single well distribution mode is accurate to 140m, whether it is powered by solar power or connected to other power sources nearby. Lay a certain foundation for promoting the digital process in an all-round way.

Keywords: Digital Construction; Water Injection Process; Distribution Mode; Energy Saving

*通信作者: 寇秋涣, kouqiuhan@petrochina.com.cn

1 引言

油田数字化建设以油气田开发生产管理的业务流程为主线,通过自动检测控制、通信网络、数据交换等技术手段,实现井场、站场、管道等生产过程实时监控,为油气田数字化管理提供基础数据。传统的油气田生产管理层级多、用工多、管理效率低、生产成本高等问题突出。

随着已开发油气田面临生产设施老化问题,老油田进入高含水、特高含水期开采阶段,老气田进入增压开采期,生产成本显著增加。新发现的油气田资源劣质化严重,新增探明石油/天然气储量绝大部分为低-特低丰度、低-特低渗透。与常规油气田相比,油气井数和地面设施成倍增加,控制投资成本的压力大。必须应用先进技术,全面提升管理水平,提升生产效益,实现从传统生产向精益生产的转变。力推上游业务可持续发展,推进主营业务转型升级,达到世界一流国际能源公司水平。

2003~2011年, MES (Manufacturing Execution System 制造执行系统) 的建设和推广阶段。实现自主研发的 MES 在中国石化的炼化企业全覆盖; 对企业生产管控水平的提高起到很大作用, 为石化行业的数字化、网络化和智能化奠定了一定的基础

2012~2015年, 智能工厂规划与试点阶段。完成智能工厂总体规划和设计, 在燕山石化、镇海炼化、茂名石化和九江石化这4家下属企业开展试点, 打造了石化“智能工厂1.0”, 形成了相关理论、解决方案和核心软件产品, 九江石化还被国家树立为智能制造试点示范; 启动“智能油气田1.0”总体规划设计;

2016年至今, 智能工厂升级、智能油气田规划与试点及 ProMACE 石化智云建设阶段。启动“智能工厂2.0”建设, 镇海炼化和茂名石化分别被国家树立为智能制造试点示范。启动“智能油气田1.0”试点建设, 并推动智能油气田升级。部分油气田开展了不同程度的数字化建设, 提高了油气生产效率、降低了生产成本。

本文以某大型油田的注水井为切入点, 探索不同工艺注水井数字化建设更为节能的方式, 为全面推进数字化进程奠定一定的基础。

2 注水工艺

某大型油田的外围注水系统普遍具有以下特点: 一是注水压力高, 一般在 14.0~21.0MPa 之间, 局部可

达到 25.0MPa 以上; 二是注入水质要求高, 油田地层平均空气渗透率多处于 $10\sim 100\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 范围内, 局部区块小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$, 对于注入水中的含油量和悬浮固体含量、粒径中值都有严格的要求; 三是单井注水量低, 一般外围油田平均单井注水量多在 $20\sim 50\text{m}^3/\text{d}$, 局部区块达到 $10\text{m}^3/\text{d}$ 以下, 水量调节比较困难; 四是同一地区地质条件差异大, 注水压力、注水量和注入水质有较大差别; 五是开发区块分布零散、可依托设施较少。从开发生产的角度看, 外围油田地面注水系统工程的宗旨是为油田开发提供合格的注水条件, 包括满足油田注水量、注水压力、注水水质以及注水时效的要求。并在满足开发要求的前提下, 通过优化简化地面设施实现外围油田的经济有效开发。

针对该油田分布零散、区块相对独立, 注水压力高、不同区块之间压差大、单井注水量低、对水质要求高的特点, 注水工艺通常分为集中注水工艺、分散注水工艺、集中分压注水工艺。

(1) 集中注水工艺

集中注水工艺是在一个或多个区块集中建设注水站统一对来水进行增压, 然后通过站外高压注水管道将高压水输至配水间或井口。但由于高压水需长距离输送, 注水管道数量多、地面工程建设投资偏高。集中注水工艺适用于布井相对集中、注水量相对较大、注水压力和水质要求差别不大的低渗透低产油田。有如下特点:

- 1) 集中建站, 管理方便, 易于与油气处理站或阀组间联合设置, 便于集中供热、通信和管理, 有利于集中控制。采用大排量注水泵, 泵的数量少, 设备维护的工作量也相应比较小。
- 2) 由于系统相对较大, 各井之间干扰小, 适应性强, 便于对注水井网进行调整。
- 3) 采用集中建站、大口径厚壁钢管高压输送方式建设, 投资比较高; 注水泵压力相对于部分注水井来说可能过高, 不利于分压注水, 泵、管之间压差大, 系统效率低, 单耗较高, 运行成本也较高。

(2) 分散注水工艺

分散注水工艺针对各区块注水井压力分布特点, 分散建设注配间, 注配间内用柱塞泵增压后输至注水井井口, 从而减少注水管道数量、降低地面建设投资, 同时节约能耗。分散注水适应多断块、较分散油田的开发, 由于各断块的注水量和注水压力差异较大, 如果统一由一个注水站供高压水则管网效率、系统效率

必然很低，分散建设小站的方式则可有针对性的选择注水泵，提高注水系统效率达到节电的目的。主要有以下特点：

- 1) 泵设置台数较多，运行可靠性能要求较高，日常管理及维护工作量大。
- 2) 注水泵分散靠近注水井口，合格水采用低压供水管道输送至注配间，从而较大幅度降低管道的基建投资，运行成本也较低。
- 3) 泵效高，单泵辖注入井数少，工况状态接近，易于达到最佳的能量利用状态，系统效率高，单耗较低。

(3) 集中分压注水

针对外围部分油田不同区块之间压差大的特点，采用传统的集中注水工艺时，为满足少数压力高的注水井，必须整体提高系统压力，能耗高，同时站外采用高压注水管道输送高压水，投资也较高。为简化外围低渗透油田注水系统工艺流程，节省投资、降低能耗，一般采用集中分压注水方式。

集中分压注水指对于同一油田或同一注水区块，针对不同的注水压力等级，在注水站建设不同压力系统的注水泵，实施分压注水，以降低注水能耗。适用于同一油田或同一区块中，注水井注入压力相差较大的地区[1]。

3 注水井类别

(1) 单干管多井配水

单干管多井配水工艺进行注水，即在区块中心集中建设注水站，在距离相近的一定井数的注水井的中心建设多井配水间；注水站统一升压后高压水由高压注水干线输送至各个多井配水间，并在配水间内进行计量调节，再通过单井注水管线输至各注水井注入地层[1]。

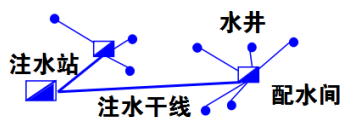


图1 单干管多井配水示意图

Figure 1 Schematic diagram of water distribution in multiple Wells with single pipe

(2) 单干管单井配水

注水站升压后的高压水通过单干管输出，再通过与干管相连的各注水支线输至井口，在井口进行计量

调节后注入地层。该工艺要求注水干线内的注水压力基本满足所有注水井的压力需求，对于个别高压注水井可采取在井口增压的方式，该工艺尤其适用于油田开发区块中的行列井网布井型式以及丛式井集中分布地区，具有工艺简化、节省投资的优点。但由于该工艺需要在井口计量调节，如果注入量小或变化幅度较大会对生产管理带来不便[1]。

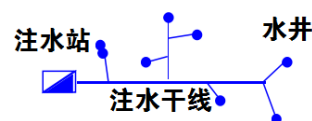


图2 单干管单井配水示意图

Figure 2 Water distribution diagram of single pipe and single well

4 主要注入设备

(1) 活动供、注水装置

活动注水装置就是采用车载式、橇装式供注水装置进行注水。可缩短注水井投注时间，方便灵活，利于低渗透区块早期注水开发，保持地层压力。与常规注水技术的区别在于不用建设供、注水管网、配水间等，可以节省投资，简化流程。

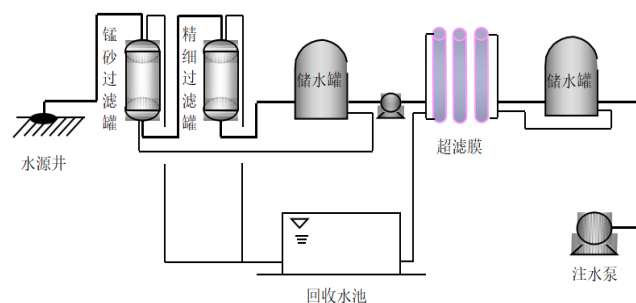


图3 流程示意图



图4 高压集成注水装置

(2) 高压离心泵

高压离心泵又称多级离心泵，目前大庆外围油田在用的多级离心泵多为8~11级泵，排量在100m³/h~300m³/h之间。具有排量均匀、压力平稳、结构简单、流量可用阀门调节，维护费用低且管理方便

等优点。适用于区块注水量大、注水压力较低的区块，运行效率一般在 70~80%左右。在注水压力高而排量小的工况下，效率低、能耗高。

(3) 高压柱塞泵

为适应外围低产油田所具有的注水量小、注水压力高、区块间注水压力不均衡等特点，注水系统普遍应用了高压柱塞泵，目前某油田在用的高压柱塞泵排量在 1.0~50m³/h 之间。高压柱塞泵与高压离心泵相比，排量较低，水力性能好，可实现高扬程运行，其泵效一般比离心泵高，实际运行效率可达 85%以上。同时采用小排量注水泵，在工艺上更容易实现分压注水、清污分注等工艺要求。因此，对于外围低产油田注水

量小、注水压力高的小区块，采用高效柱塞泵更具有优越性。

5 注水井数字化节能建设方式

某油田采油厂各作业区共有注水井 3145 口，其中单干管单井配水的注水井有 775 口，单干管多井配水的注水井有 2370 口。井场采集的数据通过 WIA-PA 无线通讯技术汇聚到附近小型站场后，然后采用 WIA-FA 方式将数据继续传输至附近大中型站场，再依托光缆有线通信网络将数据传至作业区生产管理中心[2-5]。

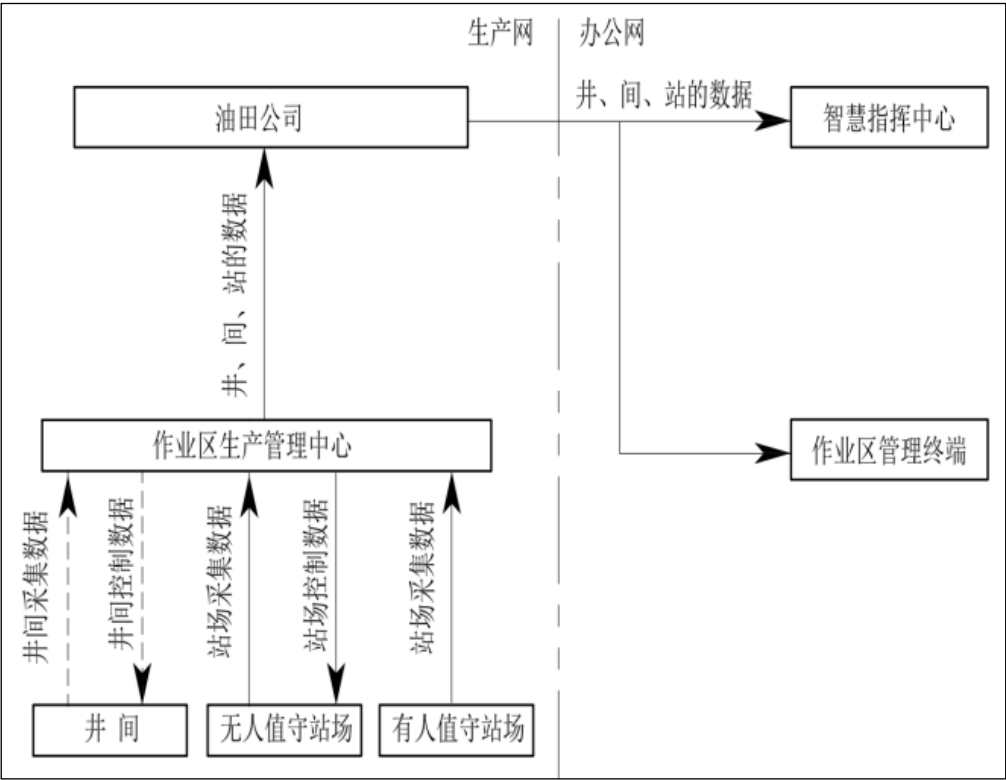


图 5 数据接入组织架构图

(1) 单干管单井配水的注水井

对于单干管单井配水的注水井，需要在井场进行数字化建设，实现压力、瞬时注入量、累计注入量的采集及数据上传。

注水压力采用 WIA-PA 压力变送器采集数据；注水流量控制采用 WIA-PA 无线流量自动控制装置，装置包括电磁流量计、控制器及电动调节阀，实现恒流配水。以上数据采用无线方式接入 WIA-PA 智能无线网关。井场压力变送器采用直接螺纹安装，流量装置

采用法兰安装，井场现场控制器安装在支架上。

井场供电电源可选太阳能供电或就近引接电源。

(2) 单干管多井配水的注水井

对于单干管单井配水的注水井控制阀组位于相应的配水间内，因此单井井场不进行数据采集，在配水间内进行数字化建设[6-8]。

配水间内每口注水井都要进行流量测量、记录等。对来水压力、每口单井压力、单井流量均进行采集。

每座配水间设置 WIA-PA 智能无线远程数据采集

与控制终端单元，完成配水间内生产过程中工艺参数的采集、控制和数据上传功能。控制器设置于控制箱内，控制箱采用壁挂式安装。来水干管压力、单井注水压力采集采用 WIA-PA 压力变送器；单井流量计量控制采用 WIA-PA 无线高压流量自动控制装置，装置包括电磁流量计、控制器及电动调节阀，实现恒流配水。压力变送器采用电池供电，流量装置采用 220VAC 供电。对一部分已建的高压流量自动控制装置，通过 RS485 信号接入配水间 WIA-PA 智能无线远程数据采集与控制终端单元。

配水间配电，电源可引自新建的配电箱，采用电力电缆敷设引接至用电设备。每座小型站场实现电量及上传，计量配电箱入户端设智能电度表，电度表采集电流、电压、电量等参数，信号采用串口 RS485 方式上传，接入小型站场设置的智能远程自动采集与控制终端单元后，通过通信网络将数据上传至作业区管理中心的实时数据库服务器[9-10]。

6 单干管单井注水井配电方式

某油田采油厂共有 775 口单干管单井配水的注水井，各作业区注水井建设见表 1。

表 1 注水井建设情况统计表

Table 1 Statistical table of water injection well construction

作业区名称	单干管单井注水井（口）
一区	106
二区	78
三区	254
四区	65
五区	57
六区	162
七区	53
合计	775

单干管单井注水井设置高压流量控制装置，高压流量控制装置为间歇运行，按照每天运行 24 次，每次运行 2 分钟，调节时功率为 65W，待机功率为 15W 进行计算，连续运行平均功率为 16.7W。

单干管单井注水井供电电源可采用由太阳能光储装置引接的方式和由附近油井引接的方式，两种供电方式如下。

方式一：由太阳能光储装置引接

根据大庆地区的日照情况，按连续阴天 4 天考虑，利用太阳能光储装置为仪表设备供电。每口井设光储

设备 1 套，包括 250W 太阳能板 1 块，200AH 蓄电池 2 块（蓄电池埋地）、控制箱 1 套、支架 1 套，根据大庆地区气候情况，按照连续阴雨天 4 天考虑，蓄电池备用时间 4 天，采用电力电缆敷设至注水井高压流量控制装置。随着光伏供电技术的发展变化，光储装置市场价格也随之波动，根据目前光储装置报价，采用太阳能供电单井投资约 1.55 万元。

每口单干管单井注水井太阳能供电主要工程量及单井投资见表 2。

表 2 单干管单井注水井太阳能供电主要工程量及投资表

Table 2 Main projects and investment of solar power supply for single pipe and single well injection well

序号	名称	数量
一	工程内容	
1	光储装置	20W
	主要包含：	
(1)	太阳能板	1×250W
(2)	智能充电控制箱	1 套
(3)	逆变器	1 套
(4)	蓄电池	2×200AH
(5)	支架	1 套
2	电缆	1 项
3	接地	1 套
二	估算投资	
	注水井/口	1.55 万元

方式二：由附近油井引接电源

根据该采油厂区域内油水井的布置情况，注水井距油井电源距离 10m~2000m 不等。注水井用电负荷为高压流量控制装置，采用由油井引接电源方式，需要 1 回电力电缆供电，在与太阳能供电方式同等投资（1.55 万元/口）的情况下，注水井距可引接电源距离为 140m，由油井配电箱设断路器，电缆敷设至注水井高压流量控制装置。

与太阳能供电方式同等投资的情况下，每口单干管单井注水井电网供电主要工程量见表 3。

表 3 与太阳能供电方式同等投资的情况下电网供电主要工程量

Table 3 Main engineering quantities of power grid under the condition of the same investment as solar power supply

序号	名称	数量
一	工程内容	
1	配电箱改造	1 项
2	电力电缆	1 项
3	接地	1 套
二	投资估算	
	注水井/口	1.55 万元

经过上述对比分析，距离可引接电源不超过 140m 的注水井采用电网供电方式投资更低；距离可引接电源超过 140m 的井场采用太阳能供电方式投资更低。

各作业区单干管单井注水井附近电源情况统计见表 4。

表 4 注水井电源情况统计表

Table 4 Statistical table of power supply of water injection well

作业区名称	单干管单井注水井（口）		合计
	距附近电源距离≤140m	距附近电源距离≥140m	
一区	101	5	106
二区	78	-	78
三区	64	190	254
四区	52	13	65
五区	25	32	57
六区	148	14	162
七区	48	5	53
合计	516	259	775

优缺点：采用由附近油井引接电源的方式，由于电缆截面较小，存在低温易碎易断的问题，但相对太阳能供电，电网供电可靠性更高，适用于可就近引接电源的水井。采用太阳能供电方式，供电稳定性受天气影响较大，同时存在易被偷盗、电池寿命短等问题，但太阳能供电方式利用绿色能源，可减少碳排放，适用于偏远无电源的水井。

综上，经过经济对比及优缺点分析，从节约投资的角度，该采油厂 775 口的单干管单井配水的注水井中有 516 口距附近可引接电源距离不超过 140m，考虑采用电网供电方式，由附近油井引接电源；259 口注水井距附近油井距离超过 140m，考虑采用太阳能光储装置供电，由新建的太阳能光储装置引接电源。

7 节能降耗效果

数字化建设后，对应注水井数，理论上可减少用工 200 人，人员工资按 15 万元/人，年可节约人员工资 3000 万元。按每辆通勤车荷载 45 人，可减少约 4 辆车。该采油厂地处偏远，平均一天的费用约 1580 元/台，按 365 天运行计算，年均节省燃油费 230.7 万元。

实现多环节节能降耗，及时掌握压力、调控注水量，故障率可降低 1.0 个百分点，全年可减少少作业 10 口井，节约作业及材料费用 80 万元。

8 结论

- (1) 对于分布零散、区块相对独立的油田，注水压力高、不同区块之间压差大、单井注水量低、对水质要求高的特点，注水工艺通常分为集中注水工艺、分散注水工艺、集中分压注水工艺。注水井的站外工艺分为单干管单井配水工艺和单干管多井配水工艺。
- (2) 单干管单井配水工艺的注水井，井口进行数字化建设；单干管单井配水的注水井控制阀组位于相应的配水间内，因此单井井场不进行数据采集，在配水间内进行数字化建设。
- (3) 单干管单井配电方式由太阳能供电还是就近引接其他电源的距离界限精确至 140m。
- (4) 研究区块 1340 口注水井实施数字化节能建设后可节省用工 200 人，节省燃油费 230.7 万元，节约作业及材料费用 80 万元。

参考文献

[1] 赵雪峰, 李福章等. 大庆低渗透油田地面工程简化技术 [M]. 石油工业出版社, 北京: 石油工业出版社, 2014: 77-79. Zhao Xuefeng, Li Fuzhang et al. Simplification Technology of Surface Engineering in Daqing Low Permeability Oilfield [M]. Petroleum Industry Press, Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 77-79.

[2] 陈丽辉, 寇伟龙, 常涛涛. 数字化预警系统的应用与认识[J]. 化工管理, 2018(15): 98. Chen Lihui, Kou Weilong, Chang Taotao. Application and cognition of digital early warning system [J]. Chemical Industry Management, 2018(15): 98.

[3] 岳祥琦, 范映潭, 全江, 毛娅丽, 宋涛. 注水精细化管理与信息化管理的深度融合 [J]. 中国管理信息化, 2017, 20(18): 50-51. Yue xiangqi, Fan Yingtan, Quanjiang, Mao Yali, Song Tao. The deep fusion of water injection fine management and information management [J]. China management informatization, 2017, 20(18): 50-51.

[4] 王宁. 姬塬油田注水工况在线分析和预测研究 [D]. 中国石油大学 (北京), 2017. Wang Ning. On-line analysis and prediction of water injection conditions in Jiyuan oilfield [D]. China University of Petroleum (Beijing), 2017.

[5] 张乃禄, 胡伟, 郭永宏, 黄平良, 孙国鹏, 庞诚. 油田注水井生产工况智能分析与诊断 [J]. 油气田地面工程, 2011, 30(09): 54-55. Zhang Nailu, Hu Wei, Guo Yonghong, Huang Pingliang, Sun Guopeng, Pang Cheng. Intelligent analysis and diagnosis of production condition of water injection well in oil field [J]. Oil and gas field surface engineering, 2011, 30(09): 54-55.

- [6] 于世春, 李永长, 赵晓龙, 李明江, 邱亮, 张彬. 油田注水井工况实时分析及管理系统开发与应用[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(04): 88-90. Yu Shichun, Li Yongchang, Zhao Xiaolong, Li Mingjiang, Qiu Liang, Zhang Bin. Development and application of real-time analysis and management system for water injection wells in oil field [J]. Automation and applications, 2014, 33(04): 88-90.
- [7] 陈超, 赵天福. 应用 KingSCADA 系统, 提高精细注水管理[J]. 石油化工应用, 2016, 35(01): 77-79. Chen Chao, Zhao Tianfu. Application of Kingscada system to improve fine water injection management [J]. Petrochemical applications, 2016, 35(01): 77-79.
- [8] 王贵友, 车德超, 王兵, 冯亚丽. 注水井调剖数字化管理系统的用户访问控制研究 [J]. 黑龙江科技信息, 2016(09): 146-147. Wang Guiyou, Che dechao, Wang Bing, Feng Yali. Research on user access control of digital profile control management system for water injection wells [J]. Heilongjiang science and Technology Information, 2016(09): 146-147.
- [9] 吕高峰, 吴明, 张金华等. 原油含水率测量技术现状分析

[J]. 当代化工, 2011, 40(2): 147-149. Lu Gaofeng, Wu Ming, Zhang Jinhua, etc.. Analysis of present situation of water cut measurement technology in crude oil [J]. Contemporary chemicals, 2011, 40(2): 147-149.

- [10] 曾小明, 夏如君, 李伟, 金云智, 魏峰. 数字化技术在油田注水精细管理中的实践与成效 [J]. 中国管理信息化, 2022, 25(01): 100-104. Zeng Xiaoming, Xia Rujun, Peric Lee, Jin Yunzhi, Wei Feng. Practice and effect of digital technology in fine management of oilfield water injection [J]. Management informatization in China, 2022, 25(01): 100-104.

作者简介

寇秋涣

1982 年生, 高级工程师. 研究方向为石油规划设计.

E-mail: kouqiuhan@petrochina.com.cn