

数字化转型下油田注水开发的智能经济决策系统构建

赵青高杰 (延长油田股份有限公司志丹采油厂, 陕西 延安 717500)

摘要: 数字化时代的新热潮后, 建立油田注水开发智能经济决策系统的关键是把握物联网、大数据与人工智能技术机遇, 优化注水开发的每一个环节的经济效益。注水开发智能经济决策系统集成“动态”数据感知、“智能”分析模型和经济综合决策于一体, 既能根据注水方案实时自适应, 又能实时把控注水开发的成本和效益。其核心目的就是提升油田开发决策科学性和精诚度, 帮助企业降低注水开发成本, 提高开发效益; 更为能源行业智能化升级做出脚踏实地的指导与实践路径的参考。基于此, 论文中探讨了数字化时代建立油田注水开发智能经济决策系统方法, 供相关技术人员参考。

关键词: 数字化; 油田注水开发; 智能经济决策系统; 构建要点

中图分类号: TE357.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0079-03

Construction of intelligent economic decision-making system for oilfield water injection development under digital transformation

Zhao Qing, Gao Jie (Zhidan Oil Production Plant of Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan' an Shaanxi 717500, China)

Abstract: Under the background of digital transformation, the core of the construction of intelligent economic decision-making system for oilfield water injection development lies in the integration of Internet of Things, big data and artificial intelligence technologies to optimize the economic benefits of the whole process of water injection development. The system integrates dynamic data perception, intelligent analysis model and economic evaluation module, which can not only adjust the water injection scheme adaptively, but also balance the cost and benefit in real time. Its core value lies in improving the scientificity and accuracy of oilfield development decision-making, helping enterprises reduce costs and improve efficiency; It can provide a practical path for the intelligent upgrading of the energy industry. Based on this consideration, this paper studies the construction of intelligent economic decision-making system for oilfield water injection development under the digital transformation, for the reference of relevant practitioners.

Keywords: digitalization; Oilfield water injection development; Intelligent economic decision-making system; Key points of construction

油田注水开发是提高油田原油采收率的重要途径, 是能源保障的重要支撑点。近年来在世界范围内推动新一轮数字化的浪潮已经兴起, 传统的油田注水开发所存在的数据孤岛、决策滞后、经济性差等问题逐渐暴露出来。智能经济决策系统的实施是顺应数字化大趋势的一种尝试, 是利用智能化手段解决注水开发各个环节的种种问题的创新。智能经济决策系统以经济指标与智能算法深度融合为依托, 为油田注水开发进行实时优化, 为油田注水经济性更好的开发和提高油田本身的市场竞争力和可持续经营性, 引领未来油田注水走向了高效、智慧的征途。

1 油田注水开发的背景

油田注水开发是提高油田原油采收率的重要技术手段, 在石油工业中是举足轻重的技术。但油田进入开发的中后期, 地层自然能量越来越弱, 原油产量也逐步下降, 注水开发是为了给油层注入水维持油层压力, 驱使原油向井内流动, 不但可以提高油藏的最终采收率, 而且可以延长油田的生产寿命, 这项技术在

20世纪中期开始应用, 到如今已成为世界上油田开发的常用手段, 并且对注水开发对象含水度高、原油黏度大的油藏来说, 注水开发可以把效果更好的发挥出来。目前随着能源需求的增加、资源开采难度的不断提高, 提高注水开发的效益对于能源安全稳定供应、保障企业利润来说非常重要。另一方面数字化转型为注水开发创造了新的发展机遇, 智能决策支持系统又能有效解决注水开发中传统方法效率不高、成本过高等问题, 从而带动注水开发向高效化、智能化发展不断升级。

2 数字化转型对油田开发的驱动作用

数字化推动油田开发迈入新的历史机遇期, 利用物联网、大数据、人工智能技术颠覆了传统的作业方式。数字化转型实现了油田全生产过程数据实时采集和互通互联, 使地质研究、生产动态和设备状态得以有机融汇, 为决策提供智能可信的依据; 智能算法对注采方案、设备故障预报、模拟开发方案进行优化, 提高了原油采收率和油田整体效率; 同时数字化管理

助推了开发成本精细化控制、油田资源高效利用率,从经济效益上推动油田开发向降本提质、安全清洁、智能化转型方向不断深入。

3 智能经济决策系统的系统架构分层

3.1 数据感知与集成层

数据感知与集成层是整个系统架构的基础支撑,通过在井场、管线及设备上部署各类传感器与物联网终端,实时采集地层压力、注水流量、水质参数、设备运行状态等多源异构数据,依托工业互联网与通信网络完成数据的可靠传输与集中汇聚。该层的核心作用是搭建统一的数据集成平台,对来自实时数据库、历史数据库及各类业务系统的信息进行标准化清洗、关联与融合,打破长期存在的信息孤岛,形成高质量、可追溯的数据资源池,为上层智能分析环节提供准确、及时且完整的数据支撑。

3.2 智能分析与管理层

智能分析与管理层是系统的核心处理中枢,基于下层提供的统一数据资源,构建并运行一系列智能分析模型与算法。该层运用机器学习与数字孪生技术,实现对注水开发动态的实时模拟、趋势预判与效果评估,同时将经济评价指标深度嵌入分析全过程。其管理功能体现在多目标优化方案的生成、比较与优选,以及开发风险的智能识别与预警,通过协同技术参数与经济目标,为上层决策输出兼具科学性、时效性与经济性的综合研判结果及策略建议。

3.3 经济优化与决策层

经济优化和决策层是系统的总决策层,它不仅获得智能分析层给出的综合判断结果,而且还结合油价、投资支出、生产费用等各类市场或经济参数的动态变化,它把技术可行的候选方案集合建立在多目标决策优化模型基础上,能够准确定量计算出各方案经济效益的比较和综合,获得短期和长期综合经济效益都最优的开发决策方案,并以可视化指令或方案集方式下发;还能根据市场的行情变化和开发活动本身的动态变化进行自我反馈调整决策过程,决策过程总是向经济发展最佳的目标方向发展。

3.4 人机协同与应用层

人机协同与应用层是系统与用户交互的终端界面,将下层生成的优化方案与经济决策转化为直观的可视化看板、预警信号及可操作指令,精准适配管理、技术与现场操作等不同角色的用户需求。该层借助交互式仪表盘、三维数字孪生体及移动应用等载体,支持用户对决策方案进行确认、微调或授权执行,并实时反馈现场执行状态。其核心价值在于搭建起双向闭环的协同 workflow,既实现人类专家经验与机器智能的

深度融合,又能将智能决策结果有效落地于生产实际,完整打通从数据采集到决策制定、再到现场行动的价值闭环。

4 油田注水开发的智能经济决策系统的关键技术

4.1 基于机器学习与深度学习的注水开发动态预测

机器学习和深度学习的注水开发动态预测,则通过训练随机森林、梯度提升树等集成学习算法,长短期记忆、卷积神经网络等深度学习算法实现,这些算法模型以历史和实时的注水压力、井口注入量、出液量、含水率、地震属性、测井解释等数据信息为参数特征,发掘数据与油藏响应的复杂非线性映射关系。核心预测目标主要为今后一定时期地层压强变化、含水量提升规律、单井或区块的产液递减率等,以及最终采收率、注入参数、生产动态顺序的深入时序对挖掘注入参数与生产动态预测可以实现精确的短期滚动预测、中长期情景模拟,为注水调整方案提供超越动态、动态之外的生产规律的、超前的数据解剖与决策依据。

4.2 数字孪生技术在注水开发模拟中的应用

数字孪生在注水开发模拟中的应用最核心的是建立一个与物理油藏实时映射、对应、联动的虚拟数字化数字孪生模型。数字孪生结合了地质建模、油藏数值模拟和物联网技术形成高保真动态地质模型,即孔隙度、渗透率、饱和度、断层分布参数等多因素数字化地质模型;同时实时接入井场注入压力、流量、生产等数据,驱动多物理场耦合的模拟,可以实时模拟反映地下水、水等流体在井场的渗流状态、压力变化。工匠还可以在这个虚拟空间上进行现场“无损”测试,优化不同注采方案——调整注水井网、注入速度或周期等,事先了解不同注采方案对采收率 and 经济效益的影响,超前预警和干预投产开发风险,实现降本增效的闭环。

4.3 多目标优化算法与经济动态评估模型

在油田注水开发智能决策中,多目标优化算法常采用非支配排序遗传算法或粒子群优化,同步处理最大化净现值、控制综合含水率与最小化吨油操作成本等相互冲突的目标,核心是生成并权衡帕累托最优解集。与之协同的经济动态评估模型,通过嵌入油价、贴现率与投资成本等时变参数,构建涵盖现金流折现、内部收益率与投资回收期的动态财务模型,运用蒙特卡洛模拟开展不确定性下的敏感性分析。二者深度耦合,使系统能在开发动态与市场条件不断变化的情况下,对海量方案自动寻优、量化比选,进而推荐出技术可行且全生命周期经济效益最优的开发策略。

5 油田注水开发的智能经济决策系统应用场景

5.1 注水方案智能优化

油田注水开发的智能经济决策系统可同时使用油藏

模拟、实时油藏测量数据与经济预测研究,对注水方案实现智能优化。该系统使用随机森林和卷积神经网络等机器学习算法,处理日注水量、注水压力、产液含水率及油藏物性参数(孔隙度、渗透率)等数据,精确预测水驱油前缘位置及采收率变化;日注水量范围在 $500 \sim 2000 \text{m}^3/\text{d}$,注水压力为 $10 \sim 30 \text{MPa}$ 。经济决策系统内用净现值和内部收益率建模,结合实时油价格、注水费用和设备折旧等数据,对采收率和经济效益最大化这两个目标做多目标优化。可自动变化注水网布置和注入剖面,如针对非均质油藏推广分层注水形式,高渗层注水井控在 $800 \text{m}^3/\text{d}$ 左右,低渗层注水井提高至 $1200 \text{m}^3/\text{d}$ 左右,从而提高波及系数;还要将井底压力控制在 $15 \sim 25 \text{MPa}$ 内,降低水窜风险等,配合蒙特卡罗方法进行不确定性的分析,计算油价变化对边际收入的影响,保护方案的稳健性,争取可持续最优全寿命性的开发,实现采油的高效和绿色性。

5.2 生产成本动态控制与效益分析

生产成本动态控制与效益分析场景中,系统依托数字孪生体与物联网实时数据,构建涵盖电力、药剂、维护及人工成本的作业成本法精细化模型。通过实时监控注水单耗、设备运行效率与维护周期,系统能够动态预测未来季度吨油操作成本变化趋势,比如精准识别特定泵组效率下降对单位注水成本的影响。在此基础上,集成强化学习算法自动生成成本控制策略,优化集群泵的启停时序与加药方案,实现单位能耗的有效降低。效益分析模块同步关联生产动态与油价,通过蒙特卡洛模拟量化不同成本控制方案对内部收益率与净现值的边际贡献,助力管理者在成本与增油效益间做出精准权衡,确保经济极限产量条件下的利润最大化。

5.3 风险预警与应急决策支持

油田注水开发智能经济决策系统的风险预警与应急决策支持模块,依托大数据实时分析平台,对注水动态进行连续监控与早期风险识别。系统集成单井日产液量、瞬时含水率、井口套压与流压、注入剖面测井数据及微地震监测信号等多源数据流,其中瞬时含水率 85% 以上骤升、套压超过 20MPa 均设定为异常预警阈值;运用时间序列分析与LSTM网络等深度学习模型,实时预测水窜、套管损坏及裂缝性水淹风险。当系统检测到关键指标异常,如注水井流压突降 5MPa 、对应油井含水率 24h 内大幅上升,或套压异常升至 22MPa 时,将自动触发黄至红色四级预警,并启动应急决策树。决策支持引擎同步调用堵水调剖经济优化模型,结合当前油价与深部调驱作业等措施成本,在秒级内比对注入调剖剂、实施周期注水或关停高渗

层段等多种应急方案的预期效果与经济性,量化评估不同措施对控制含水率、恢复日增油产量及净现值的影响,推荐净现值损失最小、风险控制最快的综合方案,如优先实施“调剂+注采参数动态调整”组合策略,将非计划产量损失降至最低,保障注水开发的经济与安全边际。

5.4 系统集成与实际部署建议

油田注水开发智能经济决策系统的集成与部署,核心是搭建统一的数据中台与业务平台,打破传统多源数据孤岛,实现实时监测、油藏模拟与经济评价模块的无缝衔接。实际部署可采用分阶段迭代上线策略,优先整合生产动态与关键经济指标,同步建立跨地质、油藏、工程及财务领域的多专业协同 workflows 与可视化决策中心;通过持续的模型训练与反馈优化算法性能,配套制定标准操作规程与人员培训体系,确保系统在全油田范围内完成从单点智能到整体协同的闭环管理,真正落地应用价值。

6 结束语

综上所述,智能经济决策系统的构建,标志着油田注水开发迈入数字化与智能化深度融合的新阶段。该系统既强化了经济目标与技术应用的协同联动,又为油田管理提供了具备扩展能力的决策框架。未来,随着自适应算法的持续优化与绿色低碳理念的深度融合,系统有望进一步拓展至多能源协同开发场景,持续为油田高质量发展赋能。这一实践探索,将为整个能源行业的数字化转型贡献关键经验。

参考文献:

- [1] 曲陆峰,李姗姗,肖健.油气田地面工程智能化建设研究与应用[J].油气田地面工程,2025,44(12):88-94.
- [2] 刘润,朱贵琦.高含水井采油效率提升与成本控制策略研究[J].石化技术,2025,32(11):404-406.
- [3] 褚金金.油田数字化实施后适应性分析探讨[J].油气田地面工程,2025,44(10):79-85.
- [4] 郭龙飞,等.油水井分级管理提高油田开发水平的策略[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(14):66-68.
- [5] 李志鹏.注水开发油藏的水驱油效率及影响因素分析[J].全面腐蚀控制,2025,39(07):283-285.
- [6] 王石.S油田地面系统节能管理实践[J].油气田地面工程,2025,44(03):65-72.

作者简介:

赵青(1988-),女,汉族,陕西铜川人,本科,中级工程师,研究方向:石油注水。

高杰(1987-),男,汉族,陕西甘泉人,本科,初级工程师,研究方向:石油注水。