

智能油田油藏动态调控开发策略优化路径及经济效益研究

刘 宇 (中国石化胜利油田技术检测中心, 山东 东营 257000)

摘要: 智能油田的动态调控开发策略, 是油田开发模式向精细化、智能化转型的一个重要方向。当下, 此策略在落地过程中, 面临着诸如数据质量不一、模型精度有限等一系列多重挑战。为了更好的应对这些挑战, 本文提出了一套分层优化路径。结合物联网、大数据分析、智能模型等技术, 对原来的动态调控方案进行了优化升级。优化路径的应用, 可以全面提升智能油田的开发效率, 降低原来的开发成本, 提前发现潜在风险, 提升项目整体的经济效益。

关键词: 智能油田; 油藏动态调控; 优化路径; 经济效益; 数字孪生

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0044-03

Research on the Optimization Path and Economic Benefits of Dynamic Regulation and Control Development Strategy in Smart Oilfields

Liu Yu (Technical Inspection Center, Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: The dynamic regulation and control development strategy of smart oilfields is an important direction for the transformation of oilfield development models towards refinement and intelligence. Currently, in the implementation process of this strategy, there are a series of multiple challenges such as inconsistent data quality and limited model accuracy. To better address these challenges, this paper proposes a hierarchical optimization path. By integrating Internet of Things, big data analysis, and intelligent models, the original dynamic regulation and control plan has been optimized and upgraded. The application of the optimization path can comprehensively enhance the development efficiency of smart oilfields, reduce the original development costs, detect potential risks in advance, and improve the overall economic benefits of the project.

Keywords: smart oilfield; reservoir dynamic regulation and control; optimization path; economic benefits; digital twin

当前, 油田开发已进入智能化发展的关键时期。以实时感知、动态分析和自主优化为核心的智能油藏动态调控策略, 正推动油气生产管理向精细化模式深刻转变^[1]。然而, 在落地实施过程中, 由于数据质量不一、模型精度有限、实时决策效率不足以及系统协同程度不高等原因, 容易出现调控响应滞后、决策依据不充分、执行效果偏离预期等问题, 直接影响开发效率与经济效益。因此, 系统研究其优化路径并评估经济效益, 对克服现有困难、切实推进油田智能化建设具有重要的参考价值。

1 智能油田油藏动态调控开发概述

智能油田背景下的油藏动态调控, 代表着油田开发与管理模式的一次重要演进。其核心在于应用物联网、数据分析和智能算法, 构建一个能够对油藏进行实时感知、分析并自动调整的完整技术体系^[2]。这一开发策略一定程度上改变了传统上依赖静态地质认识和周期性人工干预的工作方式。把整个开发模式, 转向了一个基于动态数据、能够持续自我优化的闭环管理过程。

技术架构上, 该策略采用的是“感知-分析-决策-执行”循环模型。系统首先会通过井下、井筒和地面的各类传感器, 持续获取像压力、温度、流量等一系列关键生产数据。这些实时信息在收集后, 会经

高速网络送到统一数据平台, 整合处理后, 系统会用预设好的智能模型, 对油藏的当前状态进行分析和刻画。在数据分析的基础上, 系统会对油藏的未来短期动态进行预测。根据这个预测结果, 智能算法会视情况, 依据预定的开发目标, 持续的自动生成各种优化调控方案。例如, 适当的加减注水量或产液量等等。而最终, 这些指令都会发送到各种自动化设备, 像智能完井工具、可调阀门等, 然后在现场执行各种调整要求。这样就能直接改变井下的流动环境, 对整个生产过程, 进行动态精准调控。

2 智能油田油藏动态调控开发策略的现实挑战

智能油田油藏动态调控策略的有效实施, 是一个涉及多环节、多层次的系统工程。从概念验证走向规模化应用, 该策略在实践中面临着来自数据、模型、决策执行及系统支撑等多维度的现实挑战, 这些因素共同影响着其最终成效。

2.1 数据层挑战

高质量、高可信度的数据是实现精准动态调控的前提条件。当前阶段, 数据的采集、管理与融合环节仍存在若干制约因素。在数据采集方面, 井下高温高压等苛刻环境对传感设备的长期可靠性提出了挑战, 导致部分关键动态参数的实时、连续监测存在技术瓶颈, 历史数据也常因不同时期的技术标准差异而质量

不一。在数据传输与处理方面,海量实时数据的稳定传输受限于油田现场复杂的网络环境,其存储与计算成本亦构成经济性考量。此外,来自地质、钻井、测井、生产等多源、多格式、多尺度的异构数据,在语义统一、时空对齐与深度融合方面存在困难,这阻碍了形成能够全面支撑智能分析的高价值数据资产。

2.2 模型与认知层挑战

构建能够准确反映并预测油藏动态的认知模型,是核心的技术难点。首先,创建高保真油藏数字孪生模型面临基础数据不足、关键机理认识不完善等限制,模型参数的确定往往具有多解性。其次,油藏系统随开发过程持续动态演变,使得静态或周期性更新的模型难以准确跟踪实际状态,模型的在线实时校准与更新技术尚不成熟。最后,地下储层极强的非均质性及多相流体复杂的相互作用,导致基于模型的生产动态预测,尤其是中长期预测,普遍存在较大的不确定性,这为依赖预测结果进行前瞻性调控带来了风险。

2.3 决策与执行层挑战

从智能模型生成优化决策到现场设备的可靠执行,这一闭环链路尚未完全贯通,需要持续推进。比如,在决策层面,许多先进的实时优化算法,其计算复杂度高,因此求解速度往往就比较慢,这与油田生产的调控时效性要求之间,就容易出现难以平衡的问题。而在流程层面,现有基于专业分工、顺序作业的传统生产管理流程,与智能化所倡导的跨专业实时协同、闭环优化的新型工作模式之间,也存在一定的适配鸿沟。在执行层面也有一定的问题,比如现有井筒与地面设施的自动化、可远程精确调控的程度,还是有些参差不齐,部分关键节点还是要依赖人工进行操作,所以整个的优化方案就无法完全自动、精准地付诸实施,智能决策闭环也就难以真正形成。

2.4 系统与支撑层挑战

系统化的集成框架与相应的组织能力是可持续发展的保障。在技术系统层面,缺乏行业广泛认可的统一数据标准、通信协议与开放架构,使得不同来源的软件系统与硬件设备集成困难,容易形成“数据孤岛”与“系统烟囱”,提升了整体集成与运维成本。在人力资源与组织支撑层面,同时精通油气藏工程、数据科学与工业自动化技术的复合型人才储备不足。此外,传统科层制组织架构下的部门壁垒,与智能化项目所需的跨部门敏捷协作、快速迭代的运行机制之间存在矛盾,这构成了推进转型的深层组织障碍。

3 智能油田油藏动态调控开发策略优化路径

3.1 数据层:构建高质量一体化数据基座

数据层的优化是整体策略得以实施的先决条件。

油田开发企业需要联合技术供应商,在数据采集端持续投入,研发并部署耐受极端井下环境、具备更高精度与可靠性的新型传感设备,以扩大对压力、温度、流量及流体相态等关键动态参数的实时监测覆盖范围。

同时,技术团队也要对存量历史数据出手,进行系统的标准化清洗与质量提升工作。在数据传输与基础设施层面,企业需规划并建设工业级物联网网络。这其中需要融合多种通信技术,必须覆盖整个油田生产区域,保障海量监测数据的稳定、低时延传输。同时,还要配套构建一种具备弹性扩展能力的数据库或数据仓库平台。

在此基础上,建立并严格执行一套体系化的数据治理框架。比如,由专门的数据管理团队牵头,形成各种各样数据的统一定义、质量标准和融合规范。并且,依托数据中台等技术手段,对多源异构数据做好语义对齐、时空同步与深度整合等数据整合工作。最终,才能形成统一、可信、高质量的数据资产,为上层智能应用,提供坚实基础。

3.2 模型与认知层:发展高保真动态认知与预测能力

模型与认知层的优化目标是提升对油藏动态行为的精准描绘与前瞻性预测水平。研究机构与企业应合作推进“物理机理+数据驱动”的混合建模技术路线。具体而言,建模团队应以油藏渗流物理等机理知识构建模型的基本骨架,确保模型具有良好的外推性和物理可解释性;同时,利用实时回传的生产与监测数据,通过数据同化、自动历史拟合等技术,持续、动态地校准与更新模型参数,使构建的数字孪生体能够同步追踪油藏的真实演化状态^[3-5]。

在动态预测与解释方面,技术团队可积极引入并定制机器学习、深度学习算法。这些算法能够处理高维非线性关系,有效辅助提升生产动态历史拟合的效率、短期产量预测的精度,并对诸如水淹、气窜等复杂生产现象进行智能诊断与反演解释,从而显著降低油藏认知的不确定性,为后续的优化决策提供更为可靠的依据。

3.3 决策与执行层:实现闭环自适应智能调控

决策与执行层的优化,会直接关系到智能调控的价值,及其能否在现场进行实现。因此,在决策算法研发层面,算法工程师需要针对油田实时调控对时效性的严苛要求,着力开发计算效率更高、更适合嵌入式系统部署的实时优化算法。

同时,可以探索应用强化学习等自适应算法,使其能够在与油藏“环境”的交互中自主学习优化策略,以更好地应对模型存在不确定性的复杂调控场景,从

而在决策的科学性与计算的实时性之间取得更好平衡。

在 workflow 层面,企业管理层必须主导对传统线性作业流程的数字化重构,设计并推行基于“云平台+边缘计算+现场设备”协同的智能工作模式。例如,可将资源消耗大的复杂数值模拟与长期策略优化任务放置在云计算中心,而将轻量化的实时分析、快速闭环控制逻辑部署在井场边缘服务器,从而实现数据流与业务流的无缝衔接与自动化流转。

在执行装备层面,企业与设备制造商需共同努力,加大智能完井系统、井下可调式节流阀、智能变频控制系统等先进装备的研发、测试与规模化应用力度,切实提升生产管柱的井下可调、可控、可测能力,确保由算法生成的优化策略能够被准确、可靠、自动地执行,最终形成完整的“感知-分析-决策-执行”智能闭环。

3.4 系统与支撑层:构建开放协同的保障生态

系统与支撑层的优化,本质上是要为智能调控的长期发展,营造良好的内外部环境。因此,在行业系统架构层面,需要由行业协会、主要企业与领先厂商共同推动,制定并推广开放、统一的数据交换标准、通信协议与系统接口规范,鼓励采用微服务、容器化等开放式技术架构,从根本上降低不同系统与设备的集成难度,避免形成新的“信息孤岛”。在组织与人才支撑层面,企业人力资源部门需制定专项计划,加快培养和引进既懂油气藏开发、又掌握数据科学、软件工程及自动控制知识的复合型人才,并组建跨学科的专职项目团队。同时,企业高层必须同步推动组织与管理模式的深度变革,例如通过设立跨部门的数字化委员会或采用项目制敏捷团队等方式,打破传统的部门职能壁垒,建立起一种鼓励快速试验、持续迭代和跨领域协作的组织文化与配套管理机制,为智能调控技术的持续创新与深度融合应用,提供坚实的组织保障。

4 优化路径的经济效益

4.1 数据治理与精准预测提升产量并优化成本

通过构建高质量数据基座与发展高保真认知模型,生产管理可以获得更可靠的决策支持。而有效的数据治理能够消除信息盲区,为各类决策提供统一、可信的事实依据。同时,基于精准模型分析形成的生产方案,也可以更科学地维持单井产能,延缓产量递减趋势。其中,精准的油藏动态描述与故障诊断能力,可以让作业团队对风险进行提前规划并优化干预措施,从而显著减少不必要的修井、测试等作业频次,直接降低生产维护与操作成本。这种从“粗放式”到“精

准化”的管理转变,可以让整个项目的生产效益得到显著的提升。

4.2 实时优化调控有效提高最终采收率

决策与执行层闭环智能的实现,可以为提高采收率提供强有力的技术手段。其中,实时优化算法可以根据油藏动态变化,持续计算出最优的注采参数调整方案。智能调控设备则能将这些方案转化为对井下流体的精确控制,实现对驱替过程的动态、精细化管理。这种持续的优化调整,可以使注入流体的驱油效率更高,也可以更有效地动用不同区域的剩余油,从而在油田开发后期仍然能够提升原油采出程度。这就可以直接增加可采储量,创造巨大的长期核心价值。

4.3 智能化运营降低人力依赖并提升安全水平

系统化的智能转型,可以从根本上改变传统的油田生产模式。而自动化监测与控制系统的广泛部署,则能够将人员从重复性的现场巡检和常规操作中,全面解放出来,使人力资源得以向更高价值的技术分析与管理岗位进行转移。智能系统所具备的实时风险感知与预警能力,结合预设的自动处置程序,更是可以大幅降低因人为失误或响应延迟问题,导致的安全事故概率,并减少可能带来的损失。由此所带来的生产系统稳定性与安全水平的全面提升,可以构成油田长期可持续运营的重要基础。

5 结语

智能油田油藏动态调控是行业发展的必然趋势。面对数据、模型、决策与系统层面的各种现实挑战,项目方需要进一步构建坚实数据基座、发展高保真认知能力、实现闭环智能控制、健全保障体系,系统推进整体的调控方案优化与升级。这一过程不仅能提升油田开发的技术水平,更将释放可观的经济效益,推动油气产业向更高效、更安全、更可持续的未来迈进。

参考文献:

- [1] 刘合,姚尚林,李欣,苏健.智慧油田建设的思考与设计原则[J].工程研究——跨学科视野中的工程,2025,17(02):243-258.
- [2] 邓培清.智能油田建设面临的难点分析及对策思考[J].石化技术,2024,31(03):314-315+228.
- [3] 杨浩.数字油田物联网智能管控平台研发与应用[J].物联网技术,2025,15(12):66-69+73.
- [4] 王峰,李相方,刘鹏程,等.基于数据驱动与机理融合的油藏生产动态实时优化方法[J].石油学报,2022,43(11):1621-1632.
- [5] 孙金声,刘伟,葛党科,等.智能油田物联网关键技术及系统构建[J].石油钻探技术,2024,52(1):1-9.