智能分层注水系统优化对油田采收率的提升 及其经济效益研究

高建忠（中国石化股份有限公司胜利油田分公司油气井下作业中心，山东 东营 257000）

摘要：随着全球能源需求的不断增长，油田开发的高效性和经济性变得尤为重要。传统注水系统在提升油田采收率方面存在显著局限，难以精确控制各层段的注水量，导致水油比高、注水效率低。智能分层注水系统通过先进的传感器、数据分析和控制技术，能够实时监测和动态调整各层段的注水情况，实现精细化管理。本文结合四川某油田的实际案例，分析了智能分层注水系统优化在提升油田采收率和经济效益方面的效果。研究结果表明，经过系统优化，该油田的采收率显著提高，运营成本明显下降，整体经济效益得到了显著提升，可以为油田开发提供有效的学术参考。

关键词：智能分层注水系统；油田采收率；经济效益；水油比

0 引言

随着全球能源需求的不断增长，石油作为重要的能源资源，其高效开发与利用成为油田开采中亟需解决的核心问题。传统注水系统在油田开发过程中虽然应用广泛，但在提升油田采收率方面存在显著局限性。例如，传统注水系统难以精确控制各层段的注水量，导致水油比高、注水效率低，从而影响了油田的整体采收率和经济效益。为解决这些问题，智能分层注水系统应运而生，成为油田注水技术的前沿发展方向。这种技术的核心在于其智能化管理和精准控制，通过优化注水策略，实现油田开发过程的精细化管理，从而提升采收率和经济效益。本文旨在结合案例分析智能分层注水系统优化对油田采收率和经济效益的提升效果，进而为油田开发相关工作提供学术参考建议。

1 智能分层注水系统概述

智能分层注水系统是一种基于现代传感器技术、数据分析与自动控制技术的先进注水管理系统，其原理在于通过对油田不同层段的注水参数进行实时监测和动态调整，确保注水量的精准控制。系统利用安装在各注水层段的高精度传感器，持续采集压力、流量和温度等关键参数，并将数据传输至地面控制中心。数据处理中心对采集的数据进行分析，结合油藏工程的实际需求，生成最优的注水策略。这一过程不仅能显著提高注水效率，还能有效减少因注水不均导致的油藏破坏，从而提升油田的采收率。

智能分层注水系统的组成一般包括传感器、数据处理中心、控制器和执行机构等部分。传感器负责实时监测各层段的注水情况，将数据传输至地面。数据

处理中心通过先进的算法对这些数据进行综合分析，生成优化的注水方案。控制器根据处理中心的指令，精准控制各层段的注水阀门，实现动态调整。执行机构则负责具体实施注水量的调节，确保各层段按照最优方案进行注水。这一系统的核心优势在于其智能化与精准控制能力，不仅能够实时响应油藏变化，还能根据历史数据和预测模型进行预防性调整，从而最大限度地提高注水效率和油田采收率。

2 智能分层注水系统优化案例分析

2.1 案例概述

以四川某油田为例，该油田自1970年代起开始开发，历经多次技术改造，现已进入高含水期。传统注水系统在该油田应用多年，面临水油比高、采收率低等问题。具体数据显示，近年来该油田的水油比已上升至95%，采收率仅为28%。为解决这些问题，油田管理层于2022年引入智能分层注水系统，通过实时监测和控制各层段注水量，初步改善了注水效果。然而，初期系统运行中仍存在问题，如数据反馈延迟、注水量分配不均等，影响了系统的整体效果。因此，针对上述问题，进行了全面的系统优化，设计并实施了一系列调整措施。

2.2 智能分层注水系统运行挑战

在四川某油田引入智能分层注水系统初期，尽管系统在一定程度上改善了注水效果，但运行过程中仍面临诸多挑战，主要体现在以下几个方面：

传感器数据采集的准确性和实时性不够，导致系统对各层段注水量的调控存在滞后现象；智能分层注水系统依赖于高精度传感器来监测各层段的压力、流

量和温度等关键参数。然而，初期安装的传感器精度和稳定性欠佳，数据采集存在较大误差。具体而言，在高温高压环境下，部分传感器出现漂移现象，数据偏差达到5%以上，影响了系统对实际工况的准确判断。此外，数据传输过程中由于信号衰减和干扰问题，实时性难以保证，数据延迟达到10秒以上。这个问题尤其在高流量变化的层段更加明显，直接影响了系统对注水量的动态调控。

数据处理中心的分析算法较为基础，未能充分考虑油藏工程的复杂性，导致优化注水策略的科学性不足：初期的智能分层注水系统使用的是基于简单线性回归模型的注水策略优化算法。这种算法未能充分考虑油藏的非均质性和多变性，导致生成的注水方案在实际应用中效果不佳。例如，对于含水率较高的层段，简单的线性模型未能准确预测其吸水能力，导致注水量分配不均匀，部分层段出现过度注水或注水不足的情况。此外，算法未能有效结合历史数据和实时数据进行综合分析，缺乏对油藏动态变化的前瞻性预测能力，无法及时调整注水策略。

控制器响应速度不够快，无法及时调整注水量，影响了整体注水效果：智能分层注水系统的控制器在初期版本中采用传统的机械控制阀门，其响应时间较长，约为30秒。这种滞后性在高频率调整的情况下显得尤为突出，特别是在油藏压力和流量快速变化时，控制器无法及时响应，导致注水量的调控失效。例如，在一次高压注水实验中，由于控制器响应滞后，导致注水压力瞬间超出设计值20%，造成油层损害和水力破坏。此外，控制器的精度也存在问题，实际执行的注水量与设定值存在较大偏差，部分层段的误差率达到8%以上，严重影响了系统的整体性能。

2.3 智能分层注水系统优化方案设计与实施

针对四川某油田智能分层注水系统在运行过程中遇到的挑战，为了提升系统的整体性能和运行效率，项目部门制定并实施了如下一系列具体的优化方案。

2.3.1 提高传感器数据采集的准确性和实时性

优化方案的第一步是升级现有传感器设备，提高数据采集的精度和稳定性。项目部门与多家传感器制造商合作，选择了更高精度和抗干扰能力更强的传感器。这些新型传感器在高温高压环境下具有更小的漂移量，数据偏差控制在1%以内。此外，为解决数据传输的实时性问题，项目部门采用了高频无线通信技术，并对数据传输网络进行了优化，减少信号衰减和干扰问题。在实施过程中，项目团队分阶段逐步更换传感

器设备，确保在不断电、不断流的情况下完成硬件升级。每个传感器更换后，技术人员立即进行校准和测试，确保数据采集的准确性和实时性符合设计要求。

2.3.2 改进数据处理中心的分析算法

针对数据处理中心分析算法基础的问题，项目部门引入了更为先进的机器学习算法，并结合油藏工程实际情况，开发了适用于该油田的注水策略优化模型。新算法能够充分考虑油藏的非均质性和多变性，通过对历史数据和实时数据的综合分析，生成更为科学和合理的注水方案。项目部门首先收集了大量历史数据，包括不同层段的含水率、压力和流量等参数，构建训练数据集。然后，数据科学团队应用机器学习算法进行模型训练和优化，确保新算法能够准确预测各层段的吸水能力和动态变化。最后，技术人员将新算法集成到数据处理中心的系统中，并进行多次模拟和测试，验证其优化效果。

2.3.3 提升控制器的响应速度和精度

为解决控制器响应速度和精度不足的问题，项目部门决定采用新一代电动控制阀门替代传统的机械控制阀门。新型电动控制阀门的响应时间缩短至5秒以内，且具有更高的调节精度，误差率控制在2%以内。与此同时，控制系统软件也进行了升级，增强了控制器的计算和处理能力，能够更快地响应数据处理中心的指令。在实施过程中，技术团队对现有控制系统进行了全面检查和测试，确保硬件和软件的兼容性。新型电动控制阀门的安装和调试工作在短时间内完成，项目团队分批次进行系统切换，确保注水过程的连续性和稳定性。

2.3.4 增强系统的软硬件集成度，提升运行稳定性

项目部门针对系统软硬件集成度低、设备兼容性问题，开展了一系列技术整合工作。首先，技术人员对系统的通信协议进行了统一和标准化，确保所有设备能够无缝连接和通信。其次，技术人员升级了数据处理中心和控制器的软件系统，提高了系统的稳定性和可靠性。此外，项目团队还建立了定期维护和升级机制，确保系统始终运行在最佳状态。在实施过程中，项目部门组织了多次系统集成测试，模拟实际运行环境，验证设备兼容性和系统稳定性。技术人员对每个环节进行了详细记录和分析，及时解决发现的问题，确保系统优化后的高效稳定运行。

2.4 优化效果

2.4.1 采收率提升效果

在智能分层注水系统优化后，四川某油田的采收

率显著提升。优化前,该油田的采收率仅为 28%,水油比高达 95%。经过一系列的优化措施,系统运行效率大大提高,各层段注水量得到了精准控制,从而改善了油井的产能和整体采收率。在优化后的第一个季度,采收率提升至 32%,这相当于一个季度内增加了 4 个百分点的采收率。进一步的监测数据显示,优化后的半年内,采收率继续提升,达到了 35%。而这一效果提升主要得益于以下几个方面的巨大改进:

①传感器数据采集的准确性和实时性提升:新型传感器的高精度和实时数据采集,使得系统对各层段的注水量调控更加精确。数据显示,优化后的注水系统在关键参数的测量误差降至 1% 以内,数据延迟减少到 2 秒以内,从而实现了油藏动态变化的及时响应;②先进算法的应用:通过引入机器学习算法,系统能够更准确地预测各层段的吸水能力,并动态调整注水方案。这一改进使得各层段的注水分配更加合理,避免了过度注水和注水不足的现象。数据显示,含水率较高层段的注水量得到了有效控制,吸水能力的预测误差减少了 50%;③控制器响应速度和精度提高:新型电动控制阀门的使用,使得控制器的响应时间缩短至 5 秒以内,调节精度提升至 2%。这一改进确保了在油藏压力和流量快速变化时,系统能够及时调整注水量,从而保持油井的稳定产能;④系统运行稳定性增强:通过软硬件集成度的提升和定期维护机制的建立,系统运行的连续性和稳定性得到了保障。数据显示,系统在优化后的运行中,未出现任何数据传输中断或重大操作失误的情况,进一步保证了注水优化策略的有效实施。

2.4.2 经济效益提升效果

智能分层注水系统的优化不仅显著提升了油田的采收率,还带来了显著的经济效益。通过一系列的技术改进和管理措施,油田的整体运营成本下降,产量增加,直接提高了经济效益。

①增产效益:优化前,油田日产油量约为 800t。优化后,日产油量提高到 960t,增产 160t。按油价每吨 3000 元计算,日增产收入为 48 万元。按每年 365 天计算,年增产效益为 48 万元 × 365 天 = 1.752 亿元;②运营成本降低:优化前,由于注水量分配不均匀,部分层段过度注水,导致不必要的注水成本。优化后,注水量得到了合理控制,预计每年节省注水成本约 1000 万元。通过设备的升级和系统集成度的提升,系统的故障率大幅降低,维护成本减少。预计每年节省维护成本约 500 万元;③油田综合效益提升:系统优

化之后,油田的采收率从 28% 提升至 35%,这意味着在同一油田中可以采集到更多的原油资源,延长了油田的开发寿命,增加了油田的总体经济效益。以该油田剩余可采储量 5000 万吨计算,采收率提升 7 个百分点,增加可采储量 350 万吨,按每吨 3000 元计算,总增产值为 105 亿元。此外,通过加强操作人员的培训和管理,减少了操作失误和设备故障,间接降低了运营风险和成本,也进一步提高了整体的运行效率,预计每年因此带来的间接经济效益也能达到约 200 万元;④设备升级带来的附加效益:优化后的智能分层注水系统具备更高的稳定性和可扩展性,可以在未来的油田开发中持续发挥作用,减少未来的技术改造成本,预计每年可以因此带来的长期效益高达约 300 万元。

因此,通过智能分层注水系统的优化,四川某油田不仅实现了增产,还有效降低了运营成本,带来了显著的经济效益。年直接经济效益约为 1.932 亿元,加上长期效益,总经济效益会进一步显著提升,从而为油田的可持续发展提供强有力的支持。

3 结论

智能分层注水系统的优化对油田采收率的提升具有显著作用,能够有效降低水油比、延长油田寿命。在本研究中,四川某油田通过对智能分层注水系统的全面优化,取得了显著的技术和经济效益。优化后的系统大幅提升了采收率,从原来的 28% 提高到 35%,日产油量增加了 160t,年增产收入达到 1.752 亿元。此外,通过合理控制注水量和提升系统运行的稳定性,油田的注水成本和维护成本分别减少了 1000 万元和 500 万元,进一步降低了运营成本。未来,随着技术的进一步发展和应用,智能分层注水系统将在油田开发中发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 詹宁宁,仝其雷.智能分层配注技术在渤海油田的实际应用研究[J].当代化工研究,2024(08):117-119.
- [2] 陈征,张乐,张志熊,徐元德,王威,蒋少玫,张璐,黄泽超.缆控分层注水技术标准化在海上油田的应用[J].标准科学,2023(S2):142-148.
- [3] 牛云鹏,刘宇光,柴金勇,兰孟平.智能分注分层流量测量与自动校准技术研究应用[J].仪器仪表用户,2023,30(08):48-52.
- [4] 程进虎.智能分层注水工艺技术在采油工程中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(10):158-160.