Research on Intelligent Production and Operation Models for Oil Fields in the Context of Digital Transformation

Lijun Li Liang Zhao

Changqing Oilfield Fifth Oil Production Plant, Xi'an, Shaanxi, 710200, China

Abstract

Traditional oil fields rely on manual inspections and experience-based scheduling, making them ill-equipped to cope with low oil prices and the pressures of increasing reserves and production. This paper proposes an integrated intelligent production model based on digital transformation, combining the "end-edge-pipe-cloud-application" architecture with the "human-machine-environment-management" framework. It details implementation approaches for subsystems including data sensing, AI-driven regulation, predictive warning systems, and digital twin decision-making, supported by empirical studies conducted at the Changqing Oilfield Fifth Oil Production Plant demonstration zone. Results demonstrate that this model significantly reduces operational costs and energy consumption per ton of oil produced, while enhancing per capita management well density and anomaly response speed. Key supporting technologies are identified across three dimensions: data governance, algorithm integration, and industrial control security, providing replicable practical references for intelligent transformation in similar oilfields.

Keywords

digital transformation; smart oilfield; production operation model; data-driven; changqing oilfield; unmanned operation

数字化转型背景下油田智能生产运行模式研究

李利君 赵亮

长庆油田第五采油厂，中国·陕西 西安 710200

摘要

传统油田依赖人工巡检和经验调度，难适应低油价与增储上产压力。本文基于数字化转型，构建“端–边–管–云–用”与“人–机–环–管”融合的智能生产模式。着重对数据感知、AI调控、预测预警以及数字孪生决策等子系统的实现途径进行了阐述，并且依靠长庆油田采油五厂示范区来开展实证工作。研究的结果显示，这种模式能够明显地降低吨油操作成本以及能耗，提高人均管井数量以及异常响应的速度。最后从数据治理、算法融合以及工控安全这三个方面提炼出了关键的保障技术，为同类型的油田智能化转型提供了可以重复使用的实践方面的参考依据。

关键词

数字化转型；智能油田；生产运行模式；数据驱动；长庆油田；无人值守

1 引言

在国内的情况里，大多数的油田已经进入到高含水开发的阶段，传统的依靠人工进行巡检以及固定班次的生产组织模式，很难在降低成本提高效益以及安全生产这两大核心目标之间达成平衡。数字化的转型给油田运行的体系进行重构提供了技术方面的契机，然而现有的研究多数是集中在单一的设备或者局部的环节开展智能化的升级，缺乏对于采油、集输、注水整个流程协同运作的模式开展系统性的探索。本文把长庆油田采油五厂智能示范区当作实证的对象，构建了一套涵盖感知、调控、预警以及决策的智能生产运行模式，并且阐述了它的关键技术途径，希望能够为同类型油田的智能化升级提供理论依据以及实践方面的参照。

【作者简介】李利君（1986–），男，中国山西吕梁人，本科，工程师，从事采油工程研究。

2 数字化转型下油田智能生产运行模式构建

2.1 模式构建的总体框架

构建智能生产模式需技术与业务双维度推进,技术层采用“端–边–管–云–用”端为感知终端，边做近场处理，管

混合组网云提供底座与算力用承载优化决策。在业务层面，打破传统采油、集输、注水各个环节分开管理的状况，围绕“人－机－环－管”这四个要素开展一体化设计，让操作人员、工艺设备、作业环境以及管理流程形成闭环联动。这个框架的核心特点是用数据流来贯穿物理生产流程，把原本分散的巡检、调控、维护等职能整合成为连续性的智能决策链条，实现从单点自动化向全系统协同优化的转变。

2.2 数据驱动的智能感知与采集子系统

智能感知替代人工巡检获取实时连续数据，井筒部署多参数传感器采集载荷、扭矩、电流、振动及温压经边缘计算判别工况。集输采用非插入式三相计量、腐蚀探头与声波泄漏检测，构建干支线监测网络。在注水这个环节，重点去监控各注水井的注入量、泵压以及水质指标，通过智能流量调节阀来实现单井精准配注操作。采集到的数据要遵循统一的时间戳以及空间坐标基准，经过边缘端去噪以及压缩之后上传到云端，确保数据质量能够满足后续分析以及建模的需求。

2.3 基于AI的智能调控与优化子系统

智能调控基于采集数据，用机器学习与优化算法替代经验决策。抽油机井通过LSTM产量预测模型，结合电价与液面规律优化间抽时间降低无效能耗。集输管网建立水力热力模拟器，以泵站能耗最小为目标求解并滚动修正调度指令。在注水方面把注采井组看作整体单元，利用强化学习方法拟合注水量以及对应采油井响应之间的延迟关系，动态调整配注方案，抑制注入水的无效循环。所有优化指令均通过自动控制系统下达至现场执行机构，形成“感知—分析—决策—执行”的快速闭环系统。

2.4 预测预警与健康管理子系统

预测预警体系推动维护模式从被动维修朝着主动预防的方向转变。针对泵、压缩机等关键的设备，采集振动、温度、压力等多维的运行特征，通过分类算法构建健康评估的模型，结合剩余寿命的预测输出精准的维护窗口。集输管线采用负压波与流量平衡双判据法，精确地计算泄漏的位置以及当量直径，有效地降低误报的比率。此外，该子系统还包含对井口出砂、结蜡、水合物生成等异常工况的模式识别库，一旦检测到特征匹配就触发分级预警，同步推送处理预案到移动终端，大幅缩短异常响应的延迟时间。

2.5 协同决策与数字孪生运行平台

协同决策平台是智能生产中枢，基于数字孪生构建虚拟运行环境。平台整合实时数据与历史操作记录，还原井筒、管网及站场状态。操作人员可在孪生界面上开展“如果—怎么办”推演，模拟停输影响或评估策略能耗辅助选择最优方案。平台同时把生产指挥中心和各作业区之间的信息壁垒打通，将每日的生产计划、设备维保安排以及异常处置记录进行统一的归档处理，从而形成可以追溯的协同日志。通过这个平台，原本需要多个部门反复进行协调的复杂调度问题，能够在一张图上完成多方的会商以及指令的下达，明显提升生产运行的联动效率。

3 油田智能生产运行模式的实现路径与关键技术

3.1 数据治理与信息模型

全油田数据治理体系是智能生产模式落地的核心保障，它的目标是把采油、集输、注水等环节分散的异构数据，转化为统一的、可信的、可计算的信息资产。数据治理的工作需要从源头管控方面着手，针对井口采集的设备、站场控制的系统和人工录入的报表这三类数据的来源，分别地去明确采集的频次、精度的标准以及校验的规则，从而去消除因为仪表漂移或者人为操作失误所造成的数据失真的问题。在存储环节，设计时序数据库和关系数据库混合存取的架构，时序库承载高频监测数据来满足快速查询的需求，关系库管理设备台账、维保记录等结构化信息。在此基础之上建立油田生产信息模型，这个模型以井、管线、站场、设备作为实体节点，以压力、温度、流量、状态作为属性维度，以上下游衔接关系作为边，形成能够被计算机理解的全景数据图谱。信息模型同时规定了各实体之间的关联规则，例如某口采油井应当归属于哪个计量站、其产出液汇入哪条干线，这些语义关系的明确定义为后续的智能分析以及孪生建模提供了结构化基础。

3.2 算法模型库的建立

算法模型库按机理与数据融合路线建设。机理模型基于流体力学等基本方程，针对抽油机、管网等进行物理建模，在剧烈工况下保持稳定外推能力。数据驱动模型则是依靠油田所积累起来的历史运行记录，采用梯度提升树去捕捉非线性的工况映射关系，或者运用时序卷积网络来提取传感器序列当中的退化特征。两类模型的融合是在三个层面来进行的，首先是利用机理模型生成模拟数据从而扩充训练样本，以此缓解油田标注数据比较稀疏的问题。其次是把机理模型的残差当作数据驱动模型的输入特征，让后者集中精力去拟合物理方程没有办法描述的局部偏差。最后是在预测输出阶段设置加权投票的机制，按照当前工况和训练样本集的相似度动态地分配两类模型的置信权重。整个算法库采用模块化的方式进行封装，每个模型独立去完成像产量预测、工况识别、能耗寻优等特定的任务，这样便于现场工程师按照需求来调用并且进行迭代更新。

3.3 工业控制系统安全防护

油田生产转为远程操控后，工控安全成关键。传统专用网物理隔离被数字化转型打破，云端分析与指令下达带来病毒入侵及非授权访问等新风险。针对这一挑战，构建基于零信任架构的纵深防御体系，它的核心理念是“从不信任、始终验证”，不再对内外网络边界进行区分。具体的措施包含在每一台控制器前端部署工业防火墙，基于白名单机制放行符合预设协议特征的指令报文。对远程访问会话强制实施双因素认证，并且记录全部的操作日志以便进行审计。在关键回路上设置入侵检测探针，利用协议深度解析技术识别针对施耐德、罗克韦尔等主流控制器型号的恶意载荷。除此之外建立离线备份和应急切换机制当检

测到重大网络攻击的时候，能够在分钟级把控制权切换回本地手动模式，确保油田生产不会因为安全事件而全面停止运行。

4 案例分析：以长庆油田采油五厂智能生产示范区为例

4.1 案例背景与示范区概况

长庆油田采油五厂位于鄂尔多斯盆地属低渗、低压、低丰度区域，单井产量低于2吨/日。传统驻站值守需大量人力2020年用工近2500人，管理油井超3800口，人均不足1.6口劳动生产率较低。与此同时老化的设备出现故障的概率一年比一年高，因为管线发生泄漏以及设备出现异常情况所造成的非计划停井的次数平均每年超过600次，严重地影响到了开发的效益。为了把这一困局给破解，长庆油田在2021年把这个厂列为智能化转型的先行示范区域，依靠集团公司统一建设的工业物联网平台，开展从感知层一直到决策层的全链条的改造工作。示范区域覆盖了姬塬油田的核心区块，包含有9座联合站、23座接转站以及1400多口生产井，目标是通过3年的建设达成百万吨产量规模的无人值守以及智能调控。

4.2 智能生产运行模式的具体实践

在感知层建设的这一方面，采油五厂对示范区域内所有的油井都加装了载荷以及位移传感器，把抽油机的电机更换成具备远程调参功能的变频驱动装置，每一口井的数据刷新的频率达到了秒级。在集输管线上每隔2公里就部署一台多声波泄漏监测仪，和站场的压力变送器联动从而构成泄漏定位的网络。调控层引入基于长短时记忆网络的间抽优化模型，对低产井（日产液低于1.5吨）一口井一口井地计算启停的周期，经过现场的验证能够把单井每天消耗的电量从128度降低到79度。注水的环节采用强化学习配注算法，把注采井组当作智能体，系统每天自动生成各个注水井的配注量并且下发到智能流量阀，配注合格的比率从改造之前的76%提升到93%。决策层建成数字孪生运行平台，把姬塬油田的地面管网以及地下井网统一映射到三维可视化的界面，调度人员可以在平台上模拟外输泵切换或者管线放空等操作，提前评估压力波动的范围。组织架构同时进行调整，原来的人工巡检班组转变为中控室远程监控专员，现场仅仅保留应急抢修的队伍，全厂累计减少一线操作岗位430个。

4.3 应用效果评估

截止到2023年的年底的时候，示范区的吨油操作成本和改造之前相比较之下下降了17.3%，一年的时间节约了1860万千瓦时的电量。管线出现泄漏情况的平均定位时间从140分钟缩短到了12分钟，原油的损失减少了大概620吨。在设备维护这一方面，依靠振动频谱分析所建立起来的故障预测模型提前14天发出了预警，预警的内容是3台外输泵的轴承出现失效的情况，这样就避免了因为突发停泵情况而引发的干线凝管事故。管理效益体现出来的情况是人均管理井的数量从1.6口提升到了6.8口，中控室单班能够同时对400多口井的运行状态进行监控，现场进行巡检的频次从每天2次降低为每个星期3次。然而在实际实践的过程当中还是暴露出了一些问题，一部分老旧的井场在供电方面的稳定程度不够，这就导致无线传感器在雷雨季节的时候频繁出现掉线的情况。算法模型对于新投产的井的适应能力比较差，需要累积至少15天的数据之后才能够给出可靠的优化方面的建议。中控室的操作人员对于异常报警进行处理的时候仍然依赖电话一级一级地进行汇报，没有完全实现预案自动推送以及处置形成闭环。这些问题显示出来，智能生产模式的技术系统以及管理流程还需要持续不断地进行迭代才能够达到设计所预期的效果。

5 结语

本文围绕数字化转型背景之下油田生产运行模式的重构问题，从架构设计、关键技术一直到实践案例开展了系统的研究工作。构建的“端－边－管－云－用”五层技术体系以及“人－机－环－管”业务架构，为低渗透油田从人工经验驱动转变为数据智能驱动提供了可行的路径。长庆油田采油五厂的实证结果显示，该模式在提升人均管井数、降低吨油操作成本以及节电降耗方面成效十分显著。然而智能生产并非是一次性的技术替代，而是持续迭代的组织变革过程。后续研究可以在算法模型的跨区块迁移能力、异常工况之下的自主决策机制以及人机协同的操作规程再造等方向进一步深入开展。

参考文献

[1] 李俊超.大庆油田生产站场数智化建设实践[J].油气田地面工程,2024,43(11):86-91.

[2] 熊立为.以物联网技术驱动数字油田建设的建议[J].信息系统工程,2024,(2):93-96.

[3] 聂晓炜.智能油田关键技术研究现状与发展趋势[J].油气地质与采收率,2022,29(3):68-79.