

The application of artificial intelligence technology in optimizing the fracturing parameters for shale gas development

Li Ma

Urumqi Vocational University, Urumqi, Xinjiang, 830002, China

Abstract

The efficient development of shale gas resources is mainly supported by the engineering implementation of hydraulic fracturing technology. The optimization design of fracturing construction parameters is the core link to control the production increase effect of the reservoir and improve the economic benefits of development. This paper systematically reviews and explains the research progress and engineering application paths of artificial intelligence technologies such as machine learning and deep learning in the optimization design of shale gas fracturing construction parameters. By constructing an integrated data set and combining an intelligent optimization framework, the overall construction plan is optimized. The research shows that the integration application of artificial intelligence technologies can significantly improve the scientific nature of the fracturing design scheme. At the same time, it can effectively reduce the comprehensive cost of shale gas development and increase the production of individual wells. This study provides a new technical paradigm for the efficient development and intelligent mining of shale gas resources.

Keywords

Artificial Intelligence; Shale Gas; Hydraulic Fracturing; Parameter Optimization

人工智能技术在页岩气开发压裂参数优化中的应用

马丽

乌鲁木齐职业大学, 中国·新疆 乌鲁木齐 830002

摘要

页岩气资源的高效开发以水力压裂技术的工程化落地为核心支撑, 而压裂施工参数的优化设计则是把控储层增产效果、提升开发经济效益的核心环节。本文系统梳理并阐释了机器学习、深度学习等人工智能技术在页岩气压裂施工参数优化设计中的研究进展与工程应用路径。通过构建整合数据集, 结合智能优化框架, 完成整体施工方案的优化设计。研究表明, 人工智能技术的融合应用可显著提升压裂设计方案的科学性, 在有效降低页岩气开发综合成本的同时实现单井产量的提升, 此次研究为页岩气资源的高效开发与智能化开采提供了全新的技术范式。

关键词

人工智能; 页岩气; 水力压裂; 参数优化

1 技术背景与挑战

页岩气属重要非常规天然气资源, 其商业化开发以水平井钻井工艺与大规模水力压裂技术为核心支撑^[1]。水力压裂作业通过向储层地层注入高压压裂流体, 使储层形成复杂裂缝网络, 以此显著扩大页岩气渗流面积、提升储层导流能力。压裂改造效果受多维度参数综合调控, 其中地质参数涵盖脆性指数、地应力场分布、天然裂隙发育程度、有机质含量等, 工程参数包含压裂液类型及注入体积、支撑剂类型及加注量、施工排量、簇间距、压裂段数等, 各参数间存在高度复杂的非线性耦合作用关系。传统压裂参数优化方法主要依托数值模拟手段与统计学导向的经验模型开展。数值模拟

方法虽可一定程度揭示压裂作用机理, 却存在计算成本居高不下的问题, 且其计算精度高度依赖于地下复杂地质条件的精准表征, 而该表征过程通常存在显著不确定性, 经验模型则受样本规模与数据质量双重制约, 模型泛化能力不足, 无法适配不同地质区块的储层特征差异。如何高效挖掘此类数据中蕴藏的价值信息, 实现数据驱动模式下压裂参数的实时优化与自适应调控, 已成为现阶段页岩气开发领域亟待解决的实际需求与核心技术挑战。人工智能技术凭借其卓越的数据处理、模式识别及复杂非线性关系映射能力, 为应对这一核心挑战提供了极具应用潜力的技术解决方案。

2 人工智能技术概述及其适用性

人工智能作为一门综合性技术科学, 其研究与开发核心围绕模拟、拓展并延伸人类智能的相关理论、方法、技术体系及工程应用系统展开。在页岩气储层压裂参数优化的工

【作者简介】马丽(1986-), 女, 回族, 中国青海民和人, 硕士, 中级专业十级, 从事机械工程, 智能制造研究。

程应用领域，该技术体系中得到核心落地应用的分支主要为机器学习与深度学习两大方向。

2.1 机器学习

机器学习是一门实现计算机系统依托数据自主完成学习过程并实现性能迭代优化，而非依赖显性编程指令的技术科学。在页岩气压裂参数优化领域，得到规模化应用的机器学习算法主要划分为监督学习算法、无监督学习算法、强化学习。监督学习算法包含了回归算法、树集成算法，无监督学习算法包含了聚类算法、降维算法^[2]。强化学习核心为智能体通过与作业环境的动态交互，依据交互过程中获取的奖惩信号持续迭代学习，进而生成最优决策策略。

2.2 深度学习

深度学习作为机器学习的重要分支，依托由多层非线性变换模块构建的复杂结构化神经网络对数据开展高层特征抽象提取，该技术在时空序列、图像等非结构化数据的处理分析中具备独特的技术优势。人工智能技术在页岩气压裂参数优化领域的工程适用性主要体现在三方面，即能够从海量开发历史数据中自主学习并挖掘“地质-工程-生产”全链条的复杂内在关联规律，能够对工程现场实时采集的数据进行快速处理与深度分析，为现场施工决策提供即时技术支持，能够依托智能优化算法，在高维庞大的参数空间中高效搜索全局最优解或近似全局最优解，其优化能力突破了传统

试错法与人工经验判断的应用局限。

3 压裂优化数据基础与特征工程

高质量的标准化数据集是人工智能模型实现工程化落地应用的核心基础，面向压裂参数优化场景构建的人工智能模型，需对下述多类数据开展系统性整合。

3.1 数据来源与类型

页岩气压裂优化多源数据分类及作用如表1所示。地质与地球物理数据涵盖三维地震数据解释所得的储层构造特征、地质属性体，测井资料解算获取的岩石力学参数、脆性指数、矿物组成、有机碳含量、孔隙度、渗透率估算值，地应力场的方向判定与大小量化的解释成果。工程设计与施工数据包含井身结构轨迹、压裂段及射孔簇的布设位置设计参数，各压裂段/射孔簇对应的压裂液类型、总注入液量、支撑剂类型、总加注砂量、平均施工排量，由井口压力、套压组成的施工压力动态曲线，以及段塞式、连续式等加砂施工工艺方案。裂缝监测数据涉及微地震监测技术采集的裂缝发育高度、延伸长度、展布方位及裂缝网络复杂性指数，DAS/DTS 光纤监测手段获取的储层产气剖面特征、裂缝扩展过程的均匀性表征信息。生产动态数据包含压裂井的早期生产试井数据、日度/月度产气量与产水量、井底流压监测数据、累计产气量及累计产水量等生产动态指标。

表1 页岩气压裂优化多源数据分类及作用

数据类别	具体数据内容	主要作用
地质与地球物理数据	三维地震数据、测井资料、地应力方向与大小	刻画储层非均质性，评估可压裂性，为压裂设计提供地质依据
工程设计与施工数据	井身轨迹、压裂段/簇位置、压裂液类型与体积、支撑剂类型与用量、施工排量、压力曲线、加砂程序	记录实际施工参数，作为优化分析的输入变量，评估施工效果
裂缝监测数据	微地震监测、DAS/DTS 光纤监测	评价压裂裂缝实际形态与发育情况，验证设计效果，为优化提供反馈
生产动态数据	初始产量、月度/日度产气量、产水量、井底流压、累计产量	评估压裂效果，作为优化模型的训练标签

3.2 特征工程

原始数据需经系统化预处理与特征工程重构后，方可作为有效输入数据接入模型训练流程，该环节的核心处理步骤主要包含数据清洗、数据标准化、特征构建、特征选择四类^[3]。数据清洗针对数据集内的缺失值开展补全或剔除处理，同时对施工压力异常尖峰等异常值进行精准识别与校正处理，保障数据基础质量。数据标准化对不同量纲、不同数量级的原始数据实施统一尺度转换，消除量纲与数量级差异带来的分析偏差，提升模型的训练收敛效率。特征构建从原始数据中挖掘并衍生出具备明确工程物理意义的特征变量，具体实施方式包括从施工压力动态曲线中提取净压力、压力导数、停泵压力等特征参数，计算砂液比、比能等综合工程特征指标。特征选择运用相关系数分析、树模型特征重要性量化评分、递归特征消除等技术方法，从全量特征集中筛选

出对180天累计产量等目标变量存在显著影响的特征子集，以此实现模型复杂度的合理降低，同时有效抑制模型过拟合现象的发生。

4 基于人工智能的压裂参数优化模型构建与应用路径

人工智能技术在页岩气压裂参数优化领域的工程化应用，普遍遵循以“数据准备-模型构建-优化决策”为核心的技术实施路径，且能够实现从基于离线历史数据的模型学习，向依托在线实时数据的动态优化的技术演进。

4.1 产能预测模型构建

该环节为压裂参数优化的前置核心步骤，核心目标是构建高精度代理模型，实现基于给定压裂施工参数与储层地质条件的产能快速预测。模型选型方面，针对以结构化表格数据为主要输入类型的数据集，梯度提升决策树系列算法展

现出优异的拟合与预测性能,针对包含施工曲线类时间序列、沿水平井筒地质参数变化类空间序列的复合型数据集,可采用长短期记忆网络或卷积神经网络与全连接层相融合的混合模型架构。模型训练与验证将整体数据集按既定规则划分训练集、验证集与测试集,以训练集完成模型的基础训练,依托验证集开展学习率、树深度、网络层数等超参数的调优优化,通过测试集实现对模型泛化能力的定量评估。该过程中常用的模型性能评估指标包括均方误差、平均绝对百分比误差、决定系数等。

4.2 参数敏感性分析与全局优化

在已构建的高可靠性产能预测模型基础上,开展压裂参数的专项优化分析工作。敏感性分析方面,依托完成训练的产能预测模型,采用控制变量法调整单一输入参数,其余参数取均值或典型工程值,通过观测产能输出结果的变化规律,绘制单因素敏感性特征曲线。更为系统的分析方法为采用基于方差分解的全局敏感性分析手段,对各参数独立作用及参数间耦合交互作用对产能不确定性的贡献程度进行定量化表征。参数优化方面,将产能预测模型作为核心目标函数,在单段最大注液量、设备施工排量上限、经济成本阈值等既定工程约束条件下,借助智能优化算法搜寻可使净现值、累计产量等目标函数实现最大化的压裂参数最优组合。传统优化算法包含了如遗传算法、粒子群优化算法等,可直接对代理模型实施优化求解,该类算法的核心优势为无需依赖梯度信息,且能有效处理离散型变量与复杂工程约束条件。贝叶斯优化算法更适用于目标函数求解计算成本较高的应用场景,其通过构建目标函数的概率模型,以最少的函数评估次数完成全局最优解的精准搜寻。图1流程图展示了从数据到优化设计的应用路径。

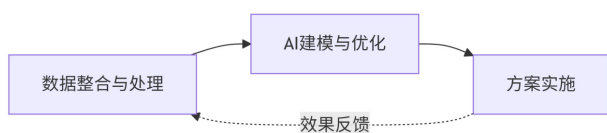


图1 人工智能驱动的页岩气压裂参数优化工作流程图

5 应用案例分析

人工智能技术在北美页岩气开发领域已迈入实质性工程应用阶段,诸多行业领先的油气服务企业与开发作业主体均发布了相关工程应用成功案例。二叠纪盆地某区块基于机器学习的压裂设计优化,该开发作业主体归集了300余口已完钻井的全维度数据集,涵盖储层地质属性、完井施工参数及时长不低于12个月的生产动态数据。依托XGBoost算法构建了180天累计产量预测模型,该模型在测试集上的决定系数 R^2 值达到0.85及以上。经特征重要性量化分析可知,在该区块现有地质条件下,簇间距与单段注液量为影响储层

早期产能的核心工程参数,其影响权重甚至超过了多项传统认知中具有关键作用的地质因素。以该产量预测模型为技术基础,该作业主体采用遗传算法开展新区块钻井的压裂参数优化设计,将簇间距由原设计的约60英尺优化为35~45英尺的区间范围,同时完成液砂比的适配性调整。该优化方案落地实施后,优化井的早期产能较邻井历史平均产能提升15%~25%,且单位英尺完井成本保持基本稳定。

6 优化效果

综合分析来看,人工智能技术在页岩气储层压裂参数优化领域的工程应用,已显现出多维度的正向应用成效。提升决策科学性方面,已实现从依托有限工程经验的定性决策,向基于全量数据挖掘分析的量化决策转变,大幅降低了决策过程中的主观人为偏差提升增产效果与综合经济效益方面,借助压裂参数的智能优化设计,在同等甚至更低的开发成本投入下,实现单井产能的有效提升,显著增强了页岩气开发项目的经济可行性与收益水平。加快技术学习迭代进程方面,可从历史开发的成功与失败案例中快速挖掘提炼核心工程规律,将成熟的最优工程实践快速复制推广至新区块、新钻井的开发作业中,大幅缩短了现场工程的技术学习周期。推动压裂作业智能化发展方面,为压裂施工全流程的实时监测、工况诊断与参数自适应调控构建了坚实的算法理论与技术基础。

7 结语

人工智能技术为页岩气开发领域的压裂参数优化难题,构建了高效的全数据驱动式技术解决方案。此次研究,通过对地质、工程、生产全维度大数据的一体化集成处理,结合机器学习与深度学习算法的工程化落地应用,能够高效搭建高精度的产能预测代理模型,深度解析压裂参数的敏感性特征,同时实现压裂参数的全局智能寻优与优化设计。经验证,该技术体系可显著提升储层压裂改造效果,同时增强页岩气开发项目的综合经济效益。未来,伴随油气开发数据体系的持续完善、可解释人工智能与地质工程物理模型的深度融合,以及实时优化技术的迭代升级,人工智能技术必将成为页岩气乃至其他非常规油气资源高效开发、智能化开采的核心驱动力量,推动油气工业向更高水平的精准化、智能化发展新阶段稳步迈进。

参考文献

- [1] 许晓男,乔通,张玥,等.人工智能技术在油气开发压裂场景中的应用[J].中外能源,2025,30(11):62-66.
- [2] 何希鹏,蔡潇,高玉巧,等.页岩气勘探开发实验技术研究进展与发展方向[J].天然气工业,2024,44(07):12-26.
- [3] 邓涵文.数据驱动的页岩气压裂产能潜力评价及参数优化研究[D].中国石油大学(北京),2022.