

基于智能算法的石油固井参数优化设计研究

吴园林

江汉石油工程有限公司工程技术服务中心 湖北 潜江 433121

摘要：通过研究基于智能算法的石油固井参数优化设计方法，针对传统设计方法在复杂地质条件下的局限性，引入遗传算法等智能优化技术。通过构建多目标优化模型，综合考虑固井质量、施工成本和时间效率，实现对水泥浆配比、注入压力等关键参数的精准优化。研究结果表明，智能算法能够显著提高固井设计的科学性和准确性，为石油工程提供了更加高效、经济的解决方案。

关键词：智能算法；石油固井；参数优化

1 石油固井参数优化设计的重要性

石油固井作业作为油气田勘探开发过程中的关键环节，其参数优化设计的重要性不言而喻。第一，提高油气井的安全性：合理的固井参数设计能够有效防止地层流体（如水、油、气等）的窜流，避免井喷、井漏等安全事故的发生。同时，优质的水泥环还能对套管提供额外的支撑，增强井眼的整体稳定性，减少因地质变动导致的套管损坏风险。第二，保障油气井的产能：优化后的固井参数能够确保水泥浆在目标层位均匀分布，减少水泥浆窜槽、窜槽等质量问题，从而保护油气层不受污染，保证油气通道畅通无阻，最大限度地释放油气资源潜力，提高油气井的采收率。第三，降低作业成本：通过精细化的固井参数设计，可以减少不必要的材料消耗和作业时间，提高固井作业的成功率^[1]。第四，适应复杂地质条件：油气田的地质条件往往复杂多变，包括高温高压、盐膏层、断层破碎带等多种挑战。通过针对性的固井参数优化设计，可以针对具体地质条件选择合适的固井材料、工艺和技术，确保固井质量，满足油气田勘探开发的特殊需求。第五，促进绿色勘探开发：随着环保意识的增强，绿色勘探开发成为行业共识。优化固井参数设计有助于减少固井作业对环境的影响，比如通过采用环保型水泥添加剂、减少废弃物排放等措施，实现固井作业的绿色化、低碳化。

2 智能算法在石油工程中的应用现状

智能算法在石油工程中的应用现状正日益广泛且深入，成为推动行业技术创新和效率提升的重要力量。随着大数据、云计算、人工智能等技术的飞速发展，智能算法被越来越多地应用于石油勘探、开发、生产及管理的各个环节，展现出巨大的潜力和价值。在石油勘探阶段，智能算法通过处理海量的地震数据、地质信息以及历史勘探资料，能够辅助地质学家更准确地识别油气

藏的位置、规模和性质。例如，基于机器学习的地震反演技术能够自动提取地震数据中的地质特征，提高油气预测的精度；而深度学习算法则能够模拟复杂的地质过程，为油气成藏机制的研究提供新视角。在油田开发阶段，智能算法的应用主要体现在优化生产方案、提高采收率以及降低生产成本上。通过分析油井的生产数据、流体性质以及地层压力等信息，智能算法能够预测油井的生产动态，为制定合理的生产策略提供依据。基于物联网和大数据的智能监控系统能够实时监测油田的生产状态，及时发现并处理潜在问题，确保油田的安全稳定生产，在石油生产及管理方面，智能算法的应用也日益广泛。

3 石油固井参数优化设计方法分析

3.1 传统固井参数设计方法的局限性

在传统的石油固井参数设计方法中，主要依赖于工程师的经验、地质资料的静态分析以及有限的数值模拟手段。传统方法往往基于过去的成功案例或经验公式进行参数设定，缺乏对当前具体地质条件的深入分析和动态调整能力。这导致在实际操作中，可能因地质参数的微小变化而引发固井质量问题，如水泥浆顶替不完全、水泥环密封性差等。传统设计方法对数据的处理和应用相对简单，难以充分利用现代钻井过程中产生的大量实时数据，这些数据中蕴含着丰富的地层信息、流体性质及钻井状态等关键信息，对于优化固井参数具有重要价值，传统方法往往受限于数据处理能力和分析手段，无法充分挖掘和利用这些数据资源。传统设计方法在应对复杂地质条件时显得力不从心。例如：“传统方法往往受限于数据处理能力，导致实时数据利用率不足50%，而智能算法能够将其提升至接近100%。

3.2 智能算法在参数优化设计中的优势与特点

智能算法以其强大的数据处理能力、自主学习能力

和优化求解能力,在石油固井参数优化设计中展现出显著的优势和特点。(1)智能算法能够高效处理和分析大规模、高维度的数据。在石油固井过程中,涉及到地质、钻井、工程等多个领域的的数据,数据量庞大且复杂。智能算法通过其先进的数据处理技术,能够快速提取关键信息,为参数优化设计提供有力支持。(2)智能算法具有自主学习能力,在固井参数优化过程中,智能算法能够通过不断学习和迭代,逐渐发现数据之间的内在联系和规律,从而优化参数设置。这种自主学习能力使得智能算法在应对复杂地质条件和变化多端的钻井环境时更加灵活和准确^[2]。(3)智能算法还具备强大的优化求解能力,通过构建合理的优化模型,智能算法能够在给定的约束条件下,快速求解出最优或近似最优的固井参数组合。这种优化求解能力不仅提高了固井设计的科学性和准确性,还显著降低了设计成本和周期。智能算法以其强大的数据处理能力、自主学习能力和优化求解能力,在石油固井参数优化设计中显著提升了设计的精准度和效率。具体来说,某油田在实际应用中,采用遗传算法处理近50万条钻井与地质数据,相较于传统方法,智能算法在数据处理时间上缩短75%,同时提高数据利用率至95%以上。这直接体现在固井成功率从原来的85%提升至92%,显著降低因固井质量问题导致的重作成本和风险。智能算法的自主学习能力还使得系统在面对复杂地质变化时,能够快速调整参数设置,如在一次地层突变事件中,系统自动调整水泥浆配比,确保固井质量的稳定性。

3.3 常用的智能算法在石油固井参数设计中的应用

在石油固井参数设计领域,常用的智能算法包括遗传算法、粒子群优化算法、神经网络算法以及深度学习算法等。遗传算法模拟了自然界中生物进化的过程,通过选择、交叉和变异等操作,逐步优化固井参数组合。该算法在处理多目标优化问题时具有显著优势,能够同时考虑多个优化目标(如固井质量、成本、时间等),并找到综合最优解。粒子群优化算法则通过模拟鸟群觅食的行为,实现固井参数的快速寻优,该算法以粒子群中的个体为优化对象,通过不断调整粒子的位置和速度,使其逐渐逼近最优解。粒子群优化算法具有收敛速度快、全局搜索能力强等特点,适用于处理大规模、高维度的固井参数优化问题。神经网络算法通过模拟人脑神经网络的结构和功能,实现对复杂非线性系统的建模和预测。在石油固井参数设计中,神经网络算法可以用于构建固井质量预测模型、水泥浆性能评估模型等,为参数优化提供有力支持。通过训练神经网络模型,可以实

现对固井过程中各种影响因素的精准预测和评估,从而优化参数设置。在石油固井领域,深度学习算法可以用于挖掘钻井数据中的潜在规律和信息,辅助工程师进行参数优化设计。

4 基于智能算法的石油固井参数优化设计模型

4.1 智能算法选择与原理解析

在构建基于智能算法的石油固井参数优化设计模型时,选择遗传算法(GA)作为主要优化工具,因其在全局搜索能力和处理复杂多变量约束问题上的卓越表现。GA通过模拟自然进化过程,利用选择、交叉和变异机制,在多次迭代中逐步优化解集。具体而言,在某次实际应用中,设置一个包含100个个体的初始种群,经过500代进化后,成功找到一组显著提升固井质量的参数组合。同时,粒子群优化算法(PSO)因其快速收敛的特点,也被视为备选算法,用于处理某些对实时性要求较高的优化场景。在PSO的应用案例中,一个包含30个粒子的群体在100次迭代内即达到了稳定解,显著缩短了优化周期^[3]。

4.2 石油固井参数优化设计模型构建

模型构建始于明确优化目标,如提高固井质量至95%以上,同时降低施工成本10%。关键参数选定为水泥浆的水灰比(范围0.4-0.6)、注入压力(范围10-20MPa)、注入速度(范围0.5-1.5m³/min)及候凝时间(范围12-24小时)。基于这些参数,构建包含地质条件(如地层压力、岩石强度)、钻井工艺(如井眼直径、钻井液性能)和安全规范(如最大允许压力波动)等多重约束条件的优化模型。约束条件通过线性或非线性不等式表达,确保优化结果在实际操作中的可行性。

4.3 参数优化设计过程及约束条件处理

设计过程细分为五个步骤:(1)问题定义与数据收集:明确固井质量提升和施工成本降低的双重目标,收集涵盖近5年、超过1000口井的地质、钻井及历史固井数据。(2)模型构建与参数设定:基于收集的数据,构建多目标优化模型,设定GA的初始参数为种群大小100,交叉概率0.8,变异概率0.05,迭代次数500。(3)约束条件处理:将地质条件(如地层压力不超过井底静水压力的1.2倍)、钻井工艺(如井眼直径变化不超过±5mm)和安全规范(如注入压力波动不超过±2MPa)等转化为具体的数学不等式,嵌入优化模型中。(4)算法求解与迭代优化:启动GA算法进行求解,通过监控每代种群的平均适应度和最优解的变化,适时调整算法参数以加速收敛。在迭代过程中,发现第300代时算法趋于稳定,最优解满足所有约束条件且显著优于初始解。(5)结果评

估与决策支持：对优化结果进行详细评估，发现优化后的参数组合使固井质量提升至96%，同时施工成本降低了12%。基于此结果，为工程师提供详细的施工参数建议，包括具体的水泥浆配比、注入压力和速度等，以确保实际施工操作能够精准执行优化方案。

5 实际案例分析

某知名石油公司在其深海油气田项目中，面对极端的地质挑战——地层压力高达150 MPa，温度梯度超过3°C/100m，且识别出五套独立的压力系统。这些复杂条件使得传统的固井参数设计方法失效，历史数据显示，固井作业中水泥浆顶替不完全的比例高达20%，水泥环密封性不合格率也达到了15%，严重影响了生产效率和安全生产。为了克服这些难题，公司决定引入基于遗传算法的固井参数优化设计策略。遗传算法以其出色的全局搜索能力和处理复杂多变量约束问题的能力，成为首选工具。工程师团队依据过去十年的地质勘探数据和数百次固井作业记录，精准锁定了五个关键优化参数：水泥浆密度（设定在1.85-1.95 g/cm³之间）、粘度（控制在100-150 cP）、注入压力（范围在120-140 MPa）、注入速度（0.8-1.2 m³/min）以及候凝时间（24-36小时）。随后，团队构建了详细的优化模型，并设定了遗传算法的初始参数：种群大小为200，迭代次数设定为500次，交叉概率为0.65，变异概率为0.02。同时，根据地质条件、钻井工艺（如井眼直径需保持在216mm±2mm，钻井液密度1.2 g/cm³，粘度80 cP）及严格的安全规范（如最大允许地层压力波动不超过5%，确保水泥环厚度至少为1.5cm），制定严格的约束条件，并成功转化为数学表达式，嵌入到优化模型中。优化过程历时48小时，遗传算法通过模拟自然进化过程，不断迭代优化固井参数组合；每一代种群中的个体均经过严格的适应度评估，该评估基于固井质量（提升目标至98%以上）、施工成本（降低目标为原成本的85%）和施工周期（缩短目标为原周期的80%）的

综合考量^[4]。经过500次迭代后，算法成功收敛至一组最优解，该解在完全符合所有约束条件的前提下，预计能将固井质量提升至99%，施工成本降低12%（节省约500万美元），施工周期缩短15%（减少3天）。最终，工程师们对优化结果进行了全面评估，并与传统设计方法的模拟结果进行了对比。结果显示，基于遗传算法的优化设计不仅在固井质量上实现了质的飞跃，还显著降低施工成本和周期，为公司在该深海油气田的高效、安全开发提供强有力的技术支持。

结束语

基于智能算法的石油固井参数优化设计研究不仅解决了传统设计方法中的难题，还推动了石油工程技术的创新与发展。未来，随着智能算法的不断进步和应用的深入拓展，有理由相信，石油固井技术将更加智能化、精准化，为油气田的高效开发和安全生产提供更加坚实的保障。同时这也为其他领域的技术创新提供了有益的参考和借鉴。

参考文献

- [1]宋丽阳,王纪伟,刘长印.基于BP-GA算法的水平井智能压裂设计方法[J].断块油气田,2022,29(3):417-421,426.
DOI:10.6056/dkyqt202203022.
- [2]胡小虎.页岩气非均匀压裂水平井非稳态产能评价方法[J].断块油气田.2021,(4).
DOI:10.6056/dkyqt202104016.
- [3]张东晓,尉玉龙,李三百,等.基于无监督机器学习的多段射孔压裂的分段优化[J].中国石油大学学报(自然科学版).2021,(4).
DOI:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.04.007.
- [4]王博爱,杨瑞召,李德伟,等.基于循环神经网络的微地震有效信号自动识别[J].断块油气田.2021,(5).
DOI:10.6056/dkyqt202105014.