

智能压裂技术研究与发展

周锐¹ 余延波² 杨应强³

1 西部钻探定向井技术服务公司 2 西部钻探井下作业公司 3 新疆油田公司采气一厂

DOI:10.32629/etd.v6i5.16890

[摘要] 在新一轮科技革命和产业变革中,新一代信息技术如大数据、云计算、物联网和人工智能等正逐渐成为关键力量。中国石油天然气集团有限公司发布了《数字化、智能化发展指导意见》,明确提出到“十四五”末,初步建成“数字中国石油”。在这一背景下,智能压裂技术逐渐成为石油工程领域的关键技术,基于此,本文详细阐述了智能压裂技术的发展现状、技术体系架构、技术攻关进展以及未来发展方向。通过深入分析各方面内容,展示了智能压裂技术在提高压裂效率、优化压裂效果、实现数字化转型等方面的重要意义和潜力,同时也指出了当前面临的挑战及相应的解决策略,为智能压裂技术的进一步发展提供了全面的理论支持和实践指导。

[关键词] 智能压裂; 技术体系; 数字化转型

中图分类号: P231.5 **文献标识码:** A

Research and Prospect of Intelligent Fracturing Technology

Rui Zhou¹ Yanbo Yu² Yingqiang Yang³

1 Directional Drilling Technology Service Company, Western Drilling Engineering Co., Ltd.

2 Downhole Operation Company, Western Drilling Engineering Co., Ltd.

3 No.1 Gas Production Plant, Xinjiang Oilfield Company

[Abstract] In the new round of technological revolution and industrial transformation, a new generation of information technologies such as big data, cloud computing, the Internet of Things and artificial intelligence have gradually become key forces. China National Petroleum Corporation (CNPC) has issued the Guiding Opinions on Digital and Intelligent Development, clearly proposing to initially build a "Digital CNPC" by the end of the 14th Five-Year Plan period. Against this background, intelligent fracturing technology has gradually become a key technology in the oil engineering field. This paper elaborates on the development status, technical system architecture, technical research progress and future development direction of intelligent fracturing technology. Through in-depth analysis of various aspects, it demonstrates the important significance and potential of intelligent fracturing technology in improving fracturing efficiency, optimizing fracturing effect and realizing digital transformation. At the same time, it points out the current challenges and corresponding solutions, providing comprehensive theoretical support and practical guidance for the further development of intelligent fracturing technology.

[Key words] intelligent fracturing; technical system; digital transformation

引言

随着全球能源需求的增长和对油气资源开采效率的要求不断提高,压裂技术作为油气增产的关键手段,正经历着从传统模式向智能化方向的深刻变革。智能压裂技术借助大数据、云计算、物联网、人工智能等新一代信息技术,实现了压裂设计、施工及评价的全生命周期优化,成为推动油气行业可持续发展的重要力量。中国石油天然气集团有限公司下属相关单位积极响应行业趋势,致力于智能压裂技术的研发与应用,为提高我国油

气勘探开发水平做出了重要贡献。

1 智能压裂整体发展现状

智能压裂是基于地质工程一体化理念,将多种信息技术综合应用于压裂全生命周期的技术集成。其目的是提高压裂各环节的科学性、可控性与精准性,实现增产降本。通过数据处理与人工智能,能实时监测、优化参数与预测效果,为油气田开发提供智能方案。

国外在该领域领先,已达到智能压裂3.0阶段。例如,哈里伯

表1 国内外智能压裂差距对比

项目	国内	国外	结论
地面自动化控制	已开展小规模试验	成熟并大规模使用	略有差距
井下实时感知	监测技术精度还有差距, 应用较少, 未能实现实时解释评价	监测技术精度高, 可实现连续监测、实时解释评价	存在差距
远程技术支持	初步建立了远程技术支持平台, 但功能仍需完善	云端平台功能完善, 可实时支撑现场决策和远程操控	存在差距
机器学习、大数据分析、大模型等人工智能应用方面	尚处于应用方法研究探索阶段	在甜点智能识别、压裂参数优化、施工智能决策等方面研究走在前列, 并规模应用	差距较大
地面地下联动	地面地下互动以人工为主	地面地下互动实现自动控制为主, 人工为辅	差距较大
现场自主决策	现场决策缺少软件及云端支持	现场软件功能完善, 云端算力强大	差距较大

顿于2018年推出全球首个智能压裂系统Prodigi, 实现地面装置自动化控制; 2020年又推出SmartFleet智能压裂系统, 集成多项关键装备与技术, 提升了作业速度、产量并降低了井下复杂情况。斯伦贝谢研发的StimCommander压裂泵车自动化智能排量和压力控制系统, 使压裂泵实现完全自动化, 提高了泵的工作效率和可靠性。

中国石油天然气集团有限公司在智能压裂方面取得了一定进展, 与装备企业合作有了地面主体装备集成联动控制能力, 在监测技术方面形成系列, 还建立了信息化工作平台与数字化队伍, 但与国外比, 在地面自动化控制、井下实时感知、远程技术支持和人工智能应用等方面仍存差距, 见表1。

2 智能压裂技术体系架构

智能压裂技术体系架构含云端智能支持与井场智能操控两部分。云端借助压裂数据库、大模型等平台, 运用大数据等技术, 存储、分析数据并构建模型与决策支持, 为井场精准指引。井场智能操控负责设备控制、工况感知、决策执行与数据交互, 通过地面、井下、中枢决策及交互通信系统, 保障施工安全高效。该架构实现云端与现场、地面与地下、实施与决策的一体化, 达成从数据采集至决策执行的全流程智能化, 提升压裂作业的科学性、可控性与高效性, 有力推动智能压裂技术的发展与应用, 见图1。

3 智能压裂技术进展

近年来智能压裂技术发展迅速。云端智能支持体系中, 数据

库丰富、大模型建立、平台功能增强。井场智能操控体系里, 地面控制系统更自动化与远程化, 井下感知多元化, 中枢决策系统借算法优化决策, 交互通讯系统保障信息交互。整个智能压裂系统协同性提升, 施工更智能可控, 有力推动其实际应用发展。

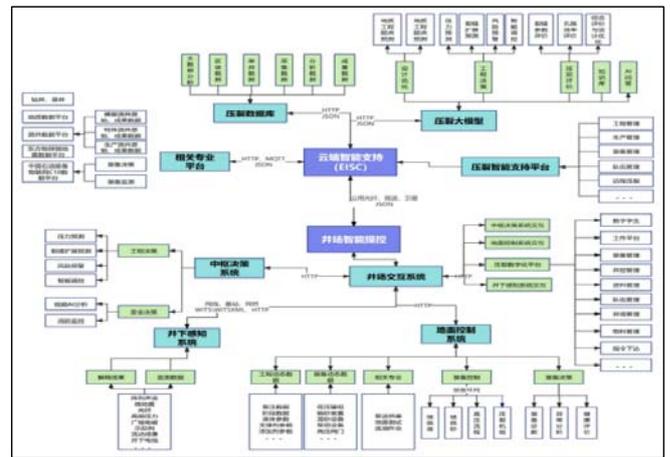


图1 智能压裂技术体系架构

3.1 云端智能支持技术体系

云端智能支持技术体系涵盖压裂数据库、大模型与支持平台。它整合多类压裂数据予以结构化处理, 挖掘构建知识库并建立大模型, 形成多个功能模块及专家系统, 达成全流程数智化, 且依托现有平台持续优化建设, 助力智能压裂发展。

3.1.1 压裂数据库

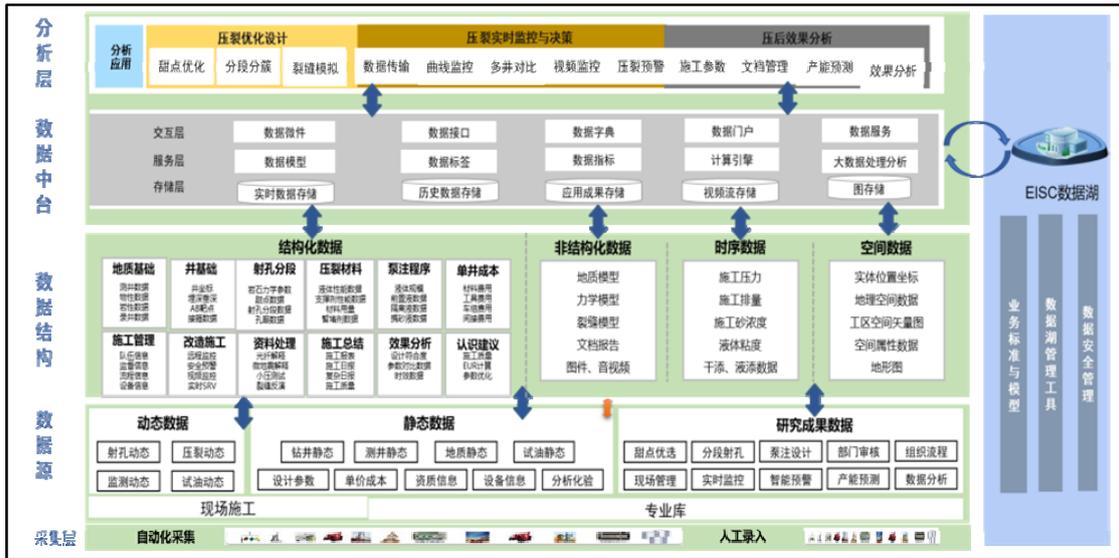


图2 数据架构

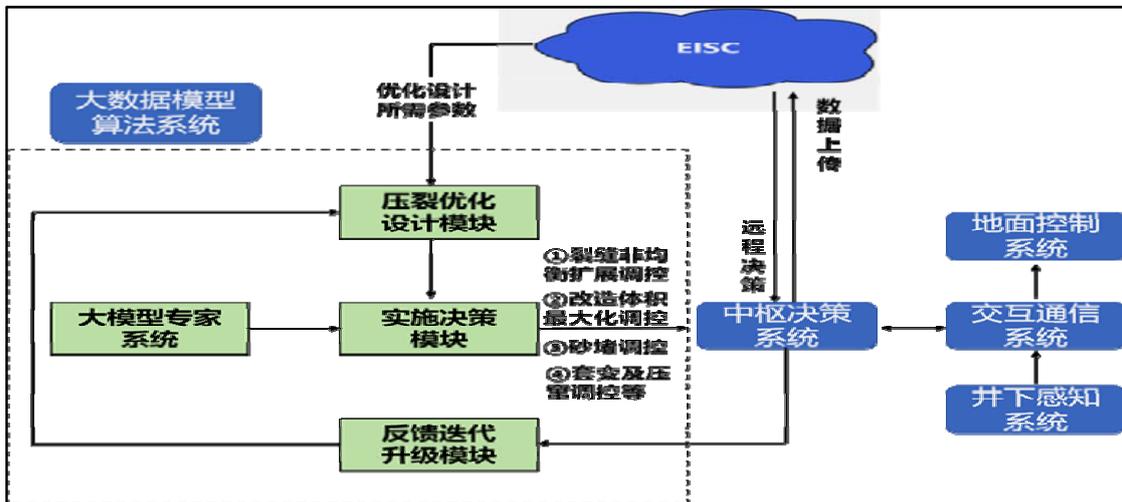


图3 大数据模型算法系统流程图

依据地质工程一体化压裂多方面关键数据需求构建数据库,以达成标准、数据、存储、访问等多项目标,为大数据分析及上层应用助力。借助现场数据采集软硬件,依据标准化流程与转换模板,完成海量数据处理,迅速建成压裂数据库,见图2。

搭建数据挖掘引擎处理压裂数据,先进行分类与标签化,依据业务数据特性选择模型、制作模板,运用自动化算法研发六大类挖掘法,即分类预测、回归预测、聚类分析等。通过这些举措挖掘压裂数据,旨在提升数据资产利用率,为相关业务提供更精准有效的数据支持与决策依据。

3.1.2 压裂大模型

大数据模型算法系统分为四个模块:压裂优化设计模块聚焦地质工程双甜点等多方面评价与参数优化;实施决策模块助力中枢系统实时决策;反馈迭代升级模块负责总体评价并更新

模型;大模型专家系统则为实施决策提供专业策略支撑,见图3。

压裂优化设计模块利用三维油气藏地质模型及钻录测、施工、监测等数据,建立地质工程双甜点综合评价、多尺度缝网参数智能优化、多尺度缝网压裂参数优化模型,基于现场数据代入模型,得到压裂优化设计参数,见图4。

实施决策模块基于地质参数,实时施工、监测等数据,建立多源数据融合裂缝实时反演、压裂参数实时决策及调控、压裂施工过程安全质量评价模型,得到安全施工参数界限,实现云端和现场的协同决策,反馈迭代升级模块基于新井地质、工程、生产数据样本,更新地质工程双甜点综合评价、裂缝扩展、产能预测、多目标优化、砂堵预警、套变压窜模型,迭代升级智能压裂大模型,优化多尺度缝网压裂、施工、材料等参数。大模型专家系统是结合压裂专业经验、最佳处理措施等数据,建立策略支

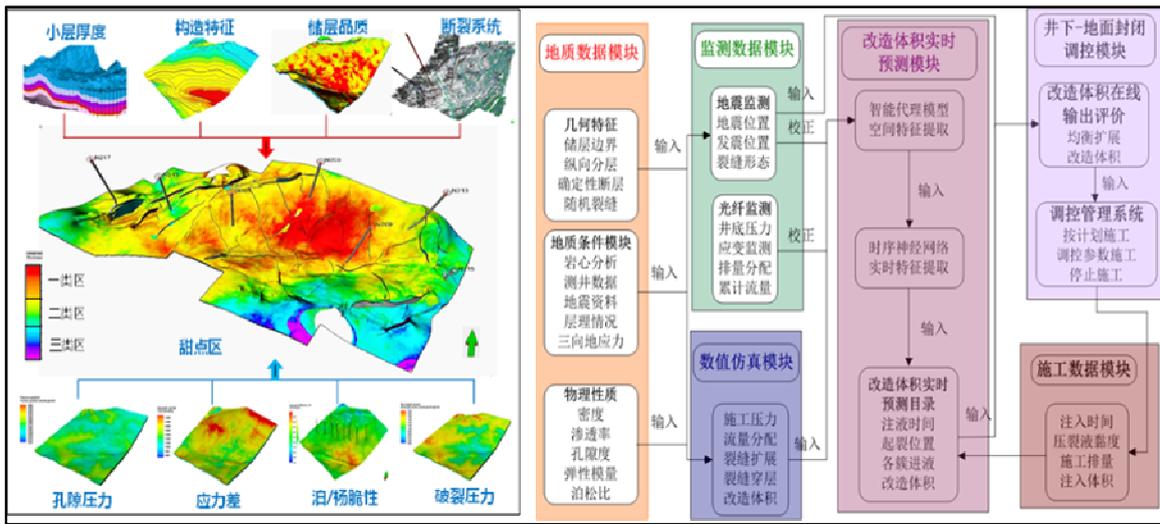


图4 集成地质工程-实时反馈-多目标优化一体化参数优化流程图

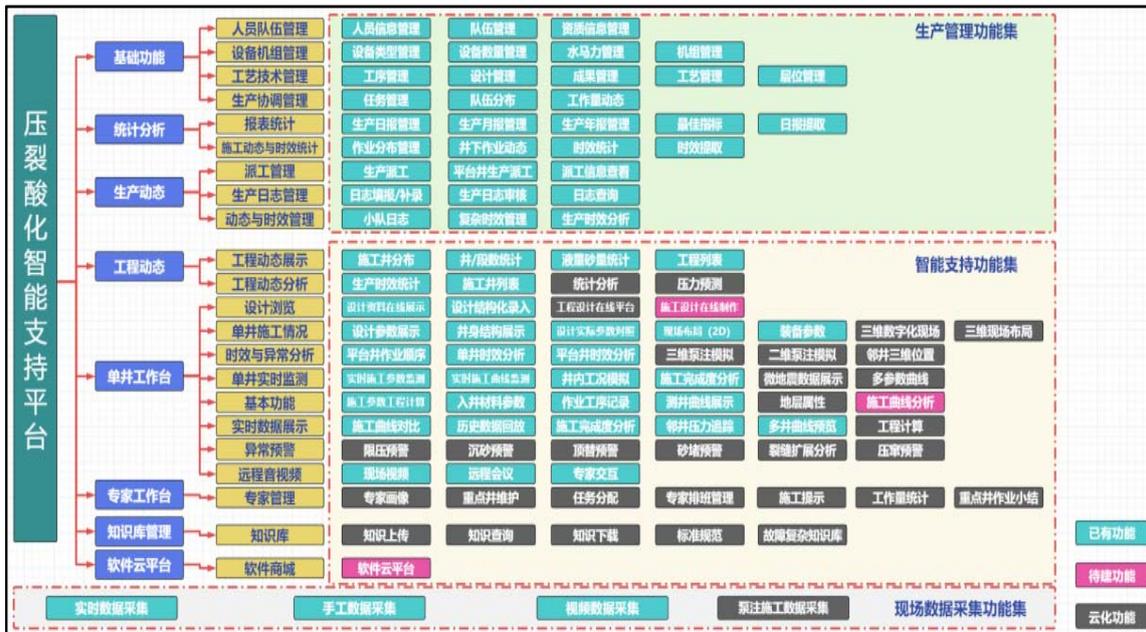


图5 压裂酸化智能支撑平台功能示意图

持、信息互动,为实施决策提供专家决策策略。依托EISC2.0建设,持续完善压裂智能支持平台建设,构建“总部、企业、现场”三级技术支撑体系,将人员、设备、工程、生产管理、生产工程动态、施工统计分析、单井作业全流程多方实施共享,共同支撑,见图5。

3.2井场智能操控技术体系

井场智能操控技术含四大系统:地面控制系统促装备协同与智能监测、井下感知系统借技术探裂缝与工况、中枢决策系统依数据智能调控、交互通信系统保数据交互。各系统协同合作,提升压裂智能化水平,提升施工效率与安全,助力智能压裂

技术进步。

3.2.1地面控制系统

地面控制系统包含装备控制模块、装备健康评价模块、安全管理模块、装备全生命周期管理平台、数据交互模块等五大模块,实现压裂装备一键操控、实时健康评价、风险在线感知、数据同步交互等功能。

装备控制系统主要包含低压集群控制模块、泵组智能调配模块、地面流程控制模块、集群控制模块、测井桥射模块五大模块,实现压裂作业自动供砂供液、排量智能分配升降、作业流程一键切换、作业参数一键导入等功能,见图6。

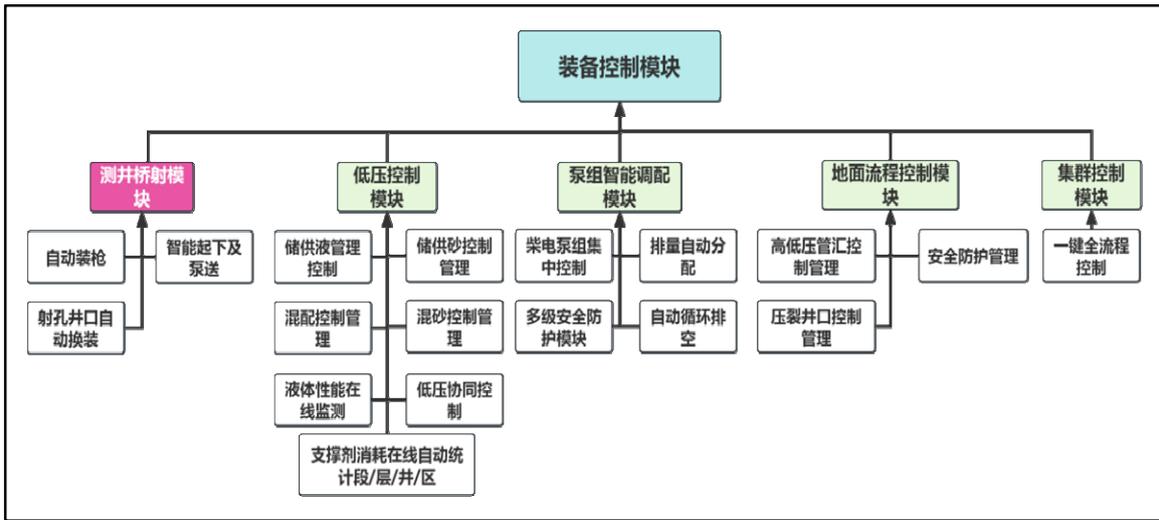


图6 装备控制系统工作流程图

装备健康评价系统主要包含核心部件健康度评价、装备健康度评价两大功能模块, 主要实现对现场核心压裂装备及关键核心部位总体健康情况作出整体评价, 保障现场压裂装备的平稳运行。安全管理系统包含消防安全管理、装备安全管理、安全生产管理等三大模块, 主要通过摄像头、传感器、执行器以及各类智能算法, 实现作业现场各类风险主动识别、告警、防护等功能。数据交互系统包含装备运行标准交互协议、物联网网络管理、作业现场数字孪生、运行数据集中展示、作业流程展示、人机交互等关键模块, 主要实现关键数据集中展示、实时数据自动交互、云端平台互通互联等功能, 见图7。

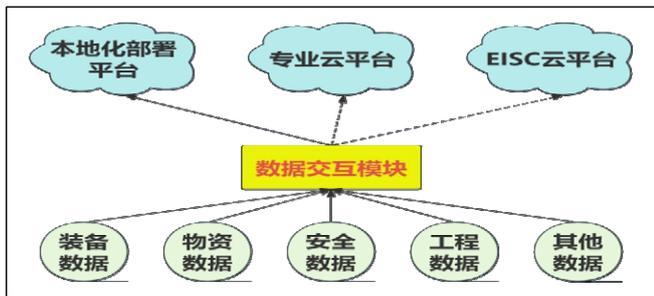


图7 数据交互系统工作流程图

装备全生命周期管理平台主要包括井场数据综合展示, 设备管理、物资管理, 模型构建管理, 数据统计及分析, 网关及相关系统配置管理, 以实现对现场各装备运转情况、物资消耗情况的在线管理。

3.2.2 井下感知系统

井下感知系统分为压中感知模块和压后感知模块。压中感知模块通过数字孪生及智能平台, 实时监测裂缝参数, 指导决策系统的压裂安全高效施工; 压后感知模块基于单井压裂效果综合评估, 支撑区块压裂方案优化, 见图8。

压中感知模块旨在使压裂人工缝网实时可视化, 利用先进

系统处理解释, 助力中枢决策保障施工。压后感知模块以综合评价射孔、压裂效率为追求, 确定关键参数, 给出区块优化建议, 优化油藏模型, 提升单井EUR预估精准度。

3.2.3 中枢决策系统

中枢决策系统有三个关键模块: 压前智能优化模块构建结构化压裂设计; 压中智能决策预测模块提供施工实时操控手段; 压后智能评价诊断模块给出下一阶段建议与总体评价。在保障安全前提下, 优化施工效果, 为后续压裂施工提供指引, 见图9。

压前智能优化模块主要是通过对三维油气藏地质模型及钻井测录数据分析, 得到地质工程甜点、压前套变预警分析及压前经济评价, 综合以上信息并基于理论模型与大数据模型双驱动的压裂参数优化设计模型, 最终得到压裂设计。

压中智能决策预测模块是以提高EUR为最终目标, 通过相关数据的监测, 对裂缝状态、孔簇状态等压裂参数进行实时评估, 在保证设计符合率与工程安全的前提下, 对施工参数进行实时调整。

压后智能评价诊断模块是对孔簇开启率、缝网体积、产能进行综合评价, 结合压-焖-排参数智能优化分析, 对下一阶段施工进行建议, 并能形成本井结构化改造总结, 存入数据湖中, 为后续压裂设计及施工提供指导, 见图10。

4 智能压裂未来发展趋势

技术智能化程度不断提高。参数优化智能化, 借助大数据分析、机器学习和人工智能算法, 依据地质数据、岩石特性、储层信息等多源数据, 自动确定最佳压裂液类型、用量、注入压力、排量等参数, 以实现理想压裂效果。实时监测与反馈智能化, 利用先进传感器技术和物联网, 实时监测压裂过程关键数据, 并根据实时数据自动调整压裂参数, 应对井下情况变化, 确保作业安全高效。感知诊断与预测智能化结合人工智能等信息技术, 井下感知技术更精准快速, 实现对压裂缝网实时预测、系统感知诊断, 以及对施工安全和质量风险超前预测。

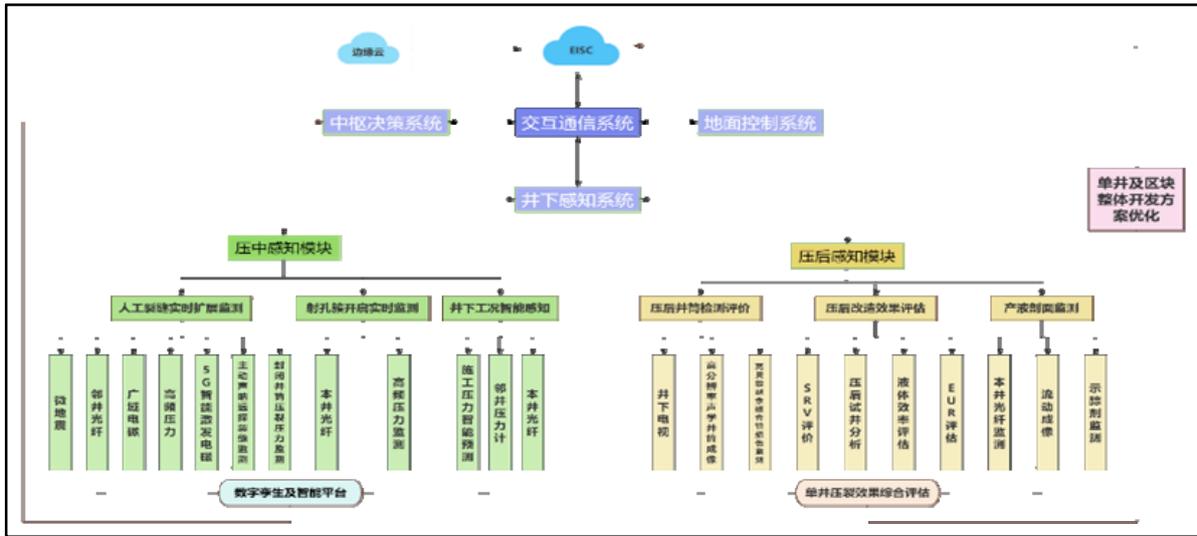


图8 井下感知系统工作流程图

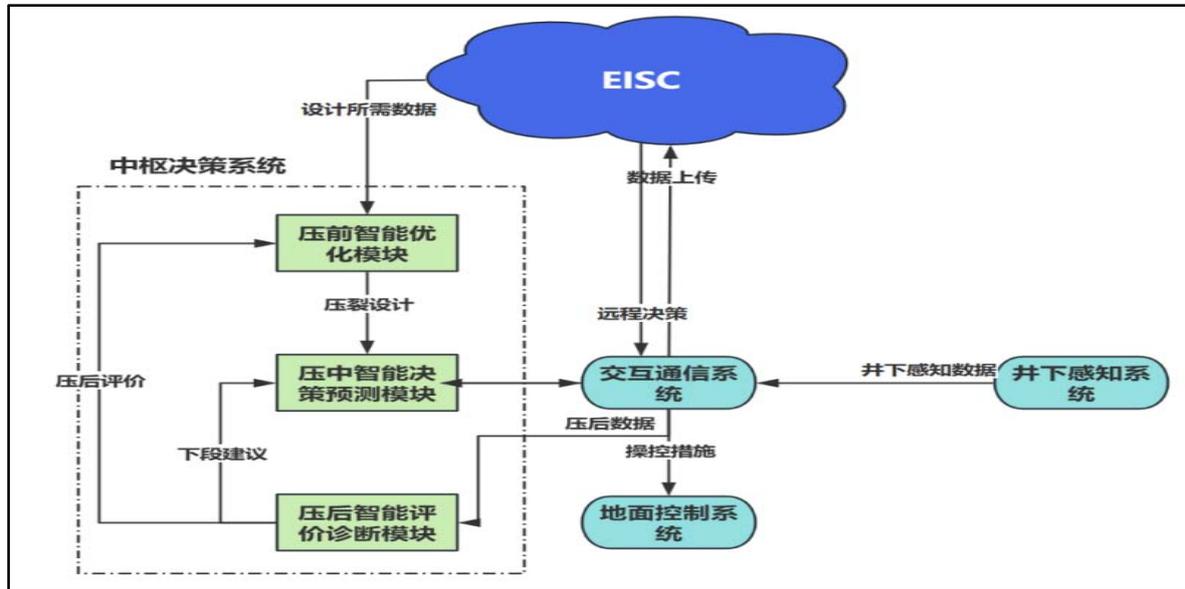


图9 中枢决策系统流程图

与其他技术融合更加紧密。与人工智能技术深度融合,人工智能在智能压裂中作用愈发重要,用于压裂效果评估、储层智能描述、压裂方案智能设计等方面。通过对大量压裂和地质数据学习分析,为作业提供科学合理决策支持。与数字孪生技术结合,数字孪生技术为智能压裂提供虚拟试验环境,工程师可在实际作业前模拟验证压裂方案。通过建立压裂井数字孪生模型,实时监测分析压裂过程参数和效果,优化压裂方案,提高作业成功率。与纳米技术结合,纳米技术在压裂液、支撑剂等方面应用深入。

压裂设备更加自动化与智能化。压裂设备自动化,压裂设备更多实现自动化操作,减少人工干预,将泵送决策程序数字化,实现压裂作业自主执行。压裂设备电动化,电驱压裂适应环保要

求,有利于实现设备自动化、智能化和远程操控。压裂设备智能化,全流程自动化操作,设备能根据施工参数自动调节运行状态;借助物联网技术,实现远程监控,预测设备故障并给出预警和维护建议。

由单平台向多平台规模化、集群化应用。决策平台算力更强,基于GPU的模拟技术取代传统基于CPU的模拟技术,在地质建模、压前分析、压裂模拟、产能模拟、实时决策与优化等方面,处理海量计算任务的精度和效率提高。规模化压裂作业,智能压裂技术能对同一平台多口井、多个压裂作业点集中管理和协同控制。集群化智能压裂,多个平台智能压裂系统连接,通过集群化管理实现资源共享、信息互通和协同作业,提升压裂作业效率和效果。

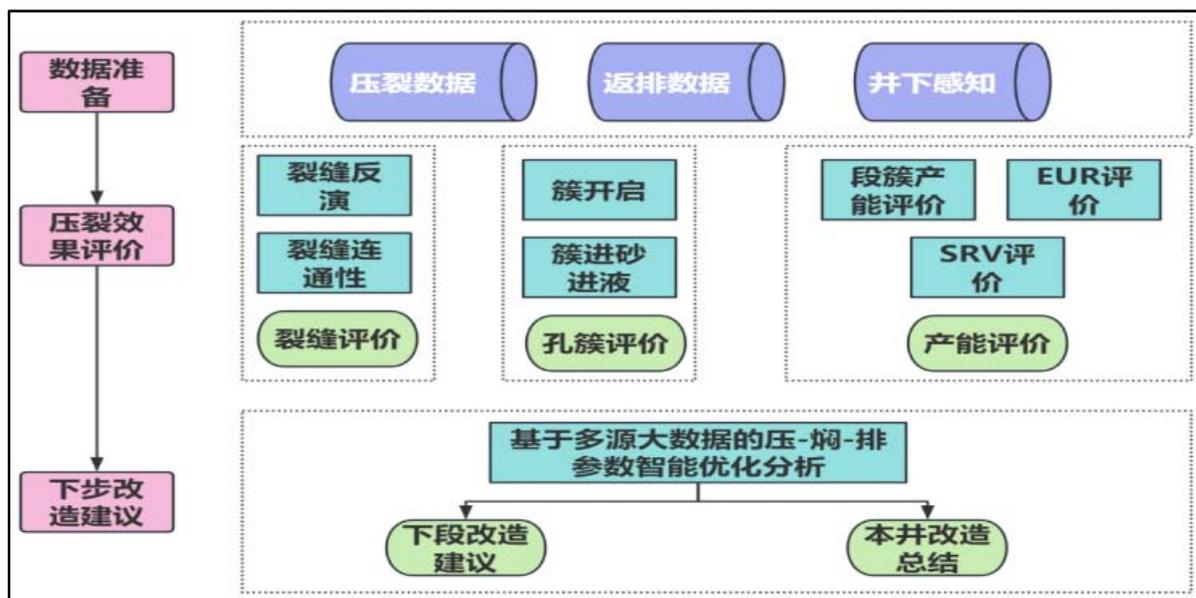


图 10 压后智能评价诊断模块流程图

5 结论

(1) 智能压裂整体发展现状方面, 国外处于领先地位, 已达到智能压裂3.0阶段, 国内虽取得一定进展, 但在地面自动化控制、井下实时感知、远程技术支持和人工智能应用等方面与国外存在差距, 仍有较大发展空间。

(2) 智能压裂技术进展方面, 云端智能支持技术体系和井场智能操控技术体系不断发展完善, 数据库丰富、大模型建立、平台功能增强, 地面、井下、中枢决策及交互通信系统协同性提升, 有力推动了智能压裂技术的实际应用发展。

(3) 智能压裂未来发展趋势方面, 技术智能化程度将持续提高, 实现参数优化、实时监测与反馈、感知诊断与预测的智能化; 与人工智能、数字孪生、纳米技术等融合更加紧密; 压裂设备向自动化、电动化、智能化发展, 且由单平台向多平台规模化、集群化应用转变, 这将进一步提升压裂作业效率和效果, 推动油气行业发展。

[参考文献]

[1]郭建春,张宇,曾凡辉,等.非常规油气储层智能压裂技术研究进展与展望[J].天然气工业,2024,44(09):13-26.
 [2]盛茂,田守增,朱丹丹,等.压裂泵注智能决策系统设计理念与路径探讨[J].天然气工业,2024,44(09):108-113.
 [3]蒋廷学.人工智能在水力压裂中的应用前景展望[J/OL].世界石油工业,1-13[2025-11-17].

作者简介:

周锐(1994--),男,汉族,陕西丹凤县人,本科,中级工程师,研究方向: 钻井工程。

余延波(1995--),男,汉族,陕西西乡县人,本科,中级工程师,研究方向: 油气田开发。

杨应强(1994--),男,汉族,陕西宝鸡市人,本科,工程师,研究方向: 天然气开发工程。