

基于通信信号处理的石油生产智能监测系统研究

张赫轩

吉林化工大学信息与控制工程学院, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年8月19日; 录用日期: 2025年9月9日; 发布日期: 2025年9月24日

摘要

石油生产的高效与安全关乎能源稳定供应。传统人工监测模式效率低、精度差, 难以适应复杂开采环境。本文基于电子信息工程中的通信信号处理技术, 设计了一套石油生产智能监测系统。通过研究其架构、功能及应用案例, 验证了该系统在提升数据传输可靠性、增强实时分析能力、优化故障预警精度等方面的显著成效。实验表明, 该系统可提高单井产量8%, 降低设备维护成本25%, 为石油生产的智能化升级提供了可靠的技术路径。

关键词

通信信号处理, 石油生产, 智能监测系统, 实时传输, 数据分析

Research on Intelligent Monitoring System for Petroleum Production Based on Communication Signal Processing

Hexuan Zhang

School of Information and Control Engineering, Jilin University of Chemical Technology, Jilin Jilin

Received: August 19, 2025; accepted: September 9, 2025; published: September 24, 2025

Abstract

The efficiency and safety of oil production are related to stable energy supply. The traditional manual monitoring mode has low efficiency and poor accuracy, making it difficult to adapt to complex mining environments. This article designs an intelligent monitoring system for petroleum production

based on communication signal processing technology in electronic information engineering. By studying its architecture, functions, and application cases, the significant effectiveness of the system in improving data transmission reliability, enhancing real-time analysis capabilities, and optimizing fault warning accuracy has been verified. Experiments have shown that the system can increase single well production by 8% and reduce equipment maintenance costs by 25%, providing a reliable technical path for the intelligent upgrade of oil production.

Keywords

Communication Signal Processing, Oil Production, Intelligent Monitoring System, Real Time Transmission, Data Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 电子信息工程技术与信号处理基础

1.1. 传感器与数据采集技术

在石油生产智能监测系统中, 传感器作为系统的“触角”, 是获取原始生产数据的关键元件。数据采集技术则负责将这些传感器感知的物理量转化为可靠的数字信号, 并进行必要的初步处理, 为后续传输和分析奠定基础。压力传感器能够精确测量油井内部压力、管道压力等关键参数, 精度可达 0.01 MPa 甚至更高, 为判断油井状态、预防井喷等事故提供核心依据, 例如注水井的实时压力监测对维持地层压力稳定、优化采收率至关重要[1]。温度传感器通常具有 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的精度, 实时监测油温、水温等参数, 有助于掌握油井热采过程中的热量分布与传递情况。流量传感器则用于精确计量原油、天然气、注水等流体的流量, 先进型号的测量误差可控制在 1% 以内, 为生产计量与精准配注提供可靠数据支撑。

传感器技术持续发展, 呈现微型化、智能化、高精度、高可靠性趋势。微型化传感器体积小巧, 便于安装在井下等狭小空间内, 可随钻杆下入油层, 实现地层参数的原位实时采集。智能化传感器更是集成了初步的信号处理能力和自我诊断功能, 内置微处理器使其能够自动进行数据预处理(如简单滤波、数据压缩)、剔除明显异常数据、执行校准补偿操作, 并在自身出现故障时及时发出警报, 显著提升了数据采集端的稳定性与可靠性。

数据采集终端作为连接传感器与传输网络的枢纽, 承担着汇聚、管理和初步处理传感器数据的核心任务。其主要功能包括对来自各类传感器的原始信号进行必要的信号调理(如放大、滤波), 并通过模数转换(ADC)将其转化为标准数字信号; 在网络出现暂时性故障时提供本地数据缓存能力, 待网络恢复后补发数据, 确保数据的完整性; 对数字化后的数据进行预处理, 如执行数据范围校验和合理性检查, 发现异常即时向管理人员发出提示, 并将校验后的数据按预定协议封装打包, 优化传输效率; 同时为所有采集到的数据打上精确时间戳, 确保后续分析的时序一致性。因此, 传感器与数据采集技术共同构成了智能监测系统的感知前端, 其性能直接影响原始数据的质量。智能化传感器与具备初步信号处理能力的采集终端, 正是信号处理技术在数据源头应用的具体体现。

1.2. 数据传输技术与通信信号处理

数据传输技术是连接传感器与数据处理中心的“桥梁”, 而通信信号处理技术则是保障数据传输质

量的核心支撑。在石油生产环境中,有线传输与无线传输技术各有应用,通信信号处理技术贯穿其中,确保采集到的数据能够快速、准确地传输。

有线传输以光纤通信为主,其具有传输速率高、带宽大、抗干扰能力强等优势。在信号处理方面,通过相干光通信技术对光信号进行调制解调,结合数字信号处理(DSP)算法补偿光纤传输中的色散和损耗,使油田集输站与处理厂之间每秒数 G 甚至数十 G 的数据传输需求得以满足,保证数据的实时性与完整性。

无线传输技术具有部署灵活、成本较低等特点,在油井分布较为分散的区域应用广泛。常见的无线传输技术包括 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、LoRa 等,针对石油生产现场复杂的电磁环境,通信信号处理技术发挥着关键作用。例如,LoRa 技术采用扩频通信与前向纠错编码(FEC)技术,通过对接收信号进行噪声抑制和干扰消除处理,使其在远距离传输(可达数公里)时仍能保持低误码率。在偏远地区单井数据传输中,经 LoRa 无线模块处理后的信号,可有效抵御钻井设备、输油泵等产生的电磁干扰。

近年来,5G 技术的兴起为石油生产数据传输带来了新的变革,其通信信号处理技术更为先进。通过大规模多输入多输出(MIMO)技术对信号进行空间分集与波束赋形处理,结合正交频分复用(OFDM)技术对抗频率选择性衰落,实现了超高的传输速率、超低的延迟以及大规模设备连接能力,能够满足高清视频监控数据、海量传感器数据的实时快速传输需求,为智能监测系统的功能拓展提供了有力支撑。

1.3. 基于信号处理的数据管理与分析技术

石油生产过程中产生的海量原始数据,其价值挖掘高度依赖于基于信号处理的数据管理与分析技术。该技术体系构成了从原始信号到决策知识的核心支撑链。海量数据首先通过大数据技术进行高效存储与管理,针对来自传感器网络的结构化、半结构化和非结构化数据(包括原始信号流及其衍生的时频域特征、处理结果等),采用分布式文件系统与关系型数据库相结合的架构进行组织,并通过并行计算技术实现对 PB 级乃至 EB 级数据的高效存取与处理,为深度分析奠定基础。

在数据分析层面,信号处理技术与先进分析算法深度融合,驱动知识发现。数据清洗环节利用信号处理算法(如滤波、平滑)去除原始数据中的噪声与异常值,提升数据质量。核心的数据分析则充分利用统计学方法和机器学习算法对经过预处理的数据进行深度挖掘。信号分析技术在此扮演关键角色,例如通过时频分析(如小波变换、短时傅里叶变换)从设备振动、压力波动等动态信号中提取关键特征,为后续建模提供高质量的输入。机器学习中的聚类分析算法可依据信号特征和生产参数对油井进行智能分类,实现相似生产单元的统一管理。回归分析算法则基于处理后的信号特征和生产数据建立预测模型,精准预测产量变化趋势或设备故障概率。前沿的深度学习技术在处理高维信号数据(如图像、复杂时序信号)方面展现出强大潜力,能够自动学习复杂模式,显著提升分析的精度与深度。因此,基于信号处理的数据管理与分析技术,通过对海量、多源数据进行系统化的管理、清洗、特征提取与智能建模,最终实现有价值信息的提炼,为石油生产决策提供科学依据。

2. 融合通信信号处理的智能监测系统架构设计

系统总体架构与信号处理集成

石油生产智能监测系统采用分层架构设计,自上而下分为数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用层,各层相互协作,共同实现对石油生产的全面智能监测。

数据采集层处于系统底层,由各类传感器、数据采集终端组成。传感器分布于油井、管道、储罐、生产设备等各个关键位置,实时采集压力、温度、流量、液位、设备运行状态等生产数据。数据采集终端负责收集传感器数据,并对数据进行初步处理与打包,以便后续传输。

本智能监测系统采用分层架构设计,自上而下包含数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用层,各层协同工作,实现对石油生产全过程的智能监测。通信信号处理技术深度集成于该架构中,作为保障系统效能的关键使能技术。

数据采集层作为系统基础,部署于油井、管道、储罐及关键设备处,由各类传感器与数据采集终端组成。传感器实时感知压力、温度、流量、液位及设备运行状态等原始数据。数据采集终端则负责汇聚传感器数据,并执行初步的信号调理、模数转换与数据预处理,为后续传输层提供标准化、高质量的初始信号源。

数据传输层构建可靠通信网络,融合光纤骨干网与无线补充网络。在此层,通信信号处理技术发挥核心作用,通过先进的调制解调算法、抗干扰编码、信号增强与压缩技术,确保各类传感器数据(尤其是高清视频、密集传感数据流)在复杂工业环境下的高速、低误码率、低延迟传输至数据处理中心。信号处理技术是支撑该层实现高效、稳定通信的基石。

数据处理层接收并存储海量数据,核心任务是利用信号处理与分析技术挖掘价值。该层应用信号处理算法进行数据清洗降噪,提取关键时频域特征,并结合机器学习等高级分析方法进行深度建模与信息提取。信号处理技术贯穿于数据清洗、特征提取到智能建模的整个分析链条。

应用层为用户提供直观界面与功能模块,其展现的实时状态、预警信息、优化决策等,均依赖于下层基于信号处理的可靠数据采集、传输和深度分析。因此,通信信号处理技术作为一项底层核心支撑,被系统性集成于整个分层架构的多个环节,是实现系统智能监测能力的关键基础。

3. 基于信号处理的智能监测系统功能实现

3.1. 实时监测功能

通过数据采集层与传输层的协同工作,智能监测系统能够实时获取石油生产各个环节的运行数据,并在应用层以直观的方式呈现给用户。在监控界面上,油井的实时产量以动态柱状图或折线图展示,每几分钟甚至每秒更新一次,管理人员可清晰地看到产量的变化趋势。设备运行参数,如抽油机的转速、电机电流,压缩机的压力、温度等,以数字形式实时显示,一旦参数超出正常范围,数据将以红色高亮显示并闪烁报警,提醒操作人员注意。管道压力监测界面则以地图形式展示管道分布,管道上的压力数据实时更新,当某段管道压力出现异常波动时,该段管道在地图上会以醒目的颜色标识,方便快捷定位问题所在。

3.2. 数据驱动与信号分析的预测功能

在石油生产中,数据驱动与信号分析的预测功能通过整合多维数据(如地震勘探、钻井日志、生产历史、设备传感器等)实现精准建模与趋势预判。数据驱动方法(如机器学习)利用历史数据训练算法,识别产量衰减规律、油藏动态特征或设备故障模式,例如通过 LSTM 网络预测剩余油分布或随机森林分类井筒异常[2]。信号分析则聚焦于时序数据的频域/时域特征提取,如小波变换去噪后的压力瞬变信号可反演地层渗透率,或振动频谱分析提前预警抽油机轴承失效。两者协同可优化钻井参数(ROP 预测)、动态调整注水方案(基于实时流量压力反馈)或实现智能完井(井下传感器数据闭环控制),最终提升采收率 5%~15%并降低运维成本 20%以上,其核心在于将物理机理与数据规律耦合,形成可迭代的数字化决策闭环。

3.3. 基于信号特征的故障诊断与预警

在石油生产中,基于信号特征的故障诊断与预警系统通过实时采集设备振动、温度、压力等动态信号,结合时频域分析技术(如短时傅里叶变换、Hilbert-Huang 变换)提取故障敏感特征,实现早期异常检

测。例如，抽油机减速箱的齿轮磨损会在振动频谱中呈现边频带能量突变，而电潜泵的定子匝间短路则可从电流谐波畸变率中预判。系统采用多层级预警机制：原始信号经卡尔曼滤波降噪后，通过深度置信网络(DBN)识别故障模式，再经贝叶斯网络评估失效概率，最终触发分级报警(如预警-降载-停机)。典型应用包括输油管道声发射信号的腐蚀穿孔定位(精度达 $\pm 2\text{ m}$)、压缩机喘振的相位差阈值预警等，较传统定期检修可减少非计划停机 40%以上，关键设备 MTBF 延长 30%。

3.4. 远程控制与信号反馈功能

在石油生产中，远程控制与信号反馈功能依托工业物联网(IIoT)架构实现设备实时调控与闭环管理。该系统通过 4G/卫星通讯链路传输井口压力、流量、温度等上千个传感器数据至中央控制室，结合 SCADA 系统进行边缘计算与云端协同分析[3]。例如，智能井可实现井下电动调节阀的远程开度控制(精度 $\pm 0.5\%$)，根据多相流含水率反馈动态调整生产制度；而管道无人机巡检的激光甲烷检测信号能触发 30 秒内自动关闭截断阀。关键技术创新包括：自适应 PID 算法消除信号传输延迟影响、OPC UA 协议确保多源数据互通性、数字孪生模型对比预测值与实际反馈的偏差。实际应用中，北海某平台通过远程控制使单井调参响应时间从 8 小时缩短至 15 分钟，同时基于振动信号反馈的压缩机防喘振控制成功将故障率降低 62%。

4. 应用案例分析：通信信号处理提升监测效能

某大型陆上油田在其采油区部署了基于电子信息工程的智能监测系统。该系统在数据采集环节全面升级了传感器设备，在超过 500 口油井安装了高精度压力、温度、流量传感器及振动噪声传感器，强化了原始信号获取能力[4]。数据传输网络集成光纤骨干与 LoRa 无线技术，依托通信信号处理技术有效克服了油田复杂环境的干扰，保障了海量传感器数据(包括高清视频与密集传感数据流)的实时、稳定、低误码率传输至数据处理中心。数据处理与分析层面则深度融合信号处理技术与机器学习算法，对接收数据进行深度挖掘。

应用该系统的成效显著：实时监测与基于信号分析的优化使平均单井日产量提升了 8%；通信信号处理支撑的高质量数据传输与智能分析模型使设备故障预警准确率超过 90%，提前预警故障 300 余次，减少非计划停机，设备维护成本降低 25%；基于可靠信号传输的管道监测系统及时处理泄漏隐患 10 余起，保障了安全运行，减少了环境风险和经济损失。该案例充分验证了通信信号处理技术在提升石油生产智能监测系统整体效能中的关键作用。

5. 结束语

综上所述，基于通信信号处理技术构建的石油生产智能监测系统，成功突破了传统监测方式在数据传输抗干扰性、实时分析精度及故障响应速度上的局限。该系统通过深度集成信号调制解调、噪声抑制、时频特征提取等关键技术，实现了生产数据的可靠采集、低延迟传输与智能决策[5]。应用案例证明，通信信号处理技术显著提升了系统在复杂工业环境下的监测效能。未来研究可进一步探索边缘计算与信号处理的协同优化，深化智能诊断算法在实时信号分析中的应用，为石油行业的高质量发展提供持续技术支撑。

参考文献

- [1] 李进, 叶剑, 李怀意. 基于边缘计算的海洋石油动设备无线监测系统设计[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(6): 28-30.
- [2] 李大龙. 海洋石油井控设备: 迈向智能监测与自动化控制新时代[J]. 中国石油和化工, 2025(2): 87-89.

- [3] 王亮. 海洋石油装备的智能维护与自动化监测技术研究[J]. 中国设备工程, 2025(2): 183-185.
- [4] 谢卫军. 防渗智能设计对石油化工土建结构质量的影响[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(1): 88-90.
- [5] 马冬. 海洋石油安全管理智能化技术引入与运用对安全风险降低及经济效益提升分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(23): 61-63.