

# 采油工程井筒工况智能监测技术研发

韩大鹏 文武 阿不都卡德尔·麦麦提 王强 杨乾涛

新疆油田公司准东采油厂 新疆 阜康 831511

**【摘要】**：井筒是采油工程的重要组成部分，其工作状态的稳定与否，将直接影响到油田开发效率、生产安全和经济效益，但由于井下高温高压、强腐蚀、复杂流体等特殊条件使得现有监测方法面临着单点监测局限、响应滞后、故障辨识精度低、数据利用率低等问题，很难适应现代采油工程精细化、智能化监测需求。文章以井筒工况智能监测为切入点，围绕井下状态信息的智能感知与传递与智能分析、监测系统的集成与测试等关键科学问题展开研究。通过对传感参数的选择，研制分布式光纤传感、MEMS微型传感阵列和特种传感器件，建立多源参量传感系统，打破常规监测手段对井筒状态进行全面、实时、精确的监测和智能诊断。

**【关键词】**：采油工程；井筒；智能监测技术

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.015

石油是世界上最主要的一种能源来源，其稳定供给对于保障我国的能源安全和国民经济的可持续发展具有十分重大的意义。井筒是油气井与地表油气藏之间的重要纽带，担负着原油提升、地层能量传导、井下设备支撑等重要作用，其运行状态包含温度、压力、流体性质、管柱操作和设备运行状态等诸多方面，且受地质、开采技术、井下环境等多种因素的共同作用，呈现出复杂、动态和不确定性的特点。围绕井筒状态智能监控的关键难点问题展开研究。项目研究成果可为提高油田开采安全和开采效率、减少维护费用，促进油田开采技术向数字化、智能化方向发展，为提高油田高质量发展奠定技术基础。

## 1 采油工程井筒工况特性与监测需求分析

### 1.1 采油工程井筒工况核心特性

采油工程受地质条件、开采技术和井下环境等因素的共同作用，井下作业条件具有明显的复杂和动态特征。在井筒构造特征上，各立井井筒构造存在明显差别，传统立井井眼竖向布置简单，适合于浅层常规油气藏的开采；我国一些深埋于3000 m以上的深井，其井眼构造非常复杂，为了保证井眼的稳定性，需要在其上布置多个分层的套管，并且需要具有良好的抗高温抗压能力；水平井井筒为水平向外扩展，其水平段长可达数千千米，其布置方式必须与井下轨道相适应，且容易产生套管阻力偏大等问题<sup>[1]</sup>。

在工作状态方面，井底温度、压力和流体参数随着开采进度而发生了动态的改变，在浅井处温度（40-80℃，压力小于30 MPa），而当井底温度升高到150℃，压力超过100 MPa时，流体参数中的含水率和黏度随着开采的位置发生了改变。在深海、海洋和非常规油气藏等领域，由于温度高、压力大，套管内的腐蚀介质容易引起管柱的损坏，进而降低其使用寿命。

### 1.2 井筒工况监测需求分析

根据采油工程开发的具体要求，井筒工况监测需要满足功能、性能和工程要求三个主要要求。在功能要求上，需要对井下的各种参数进行实时监控，准确地把握工作状态的动态变

化；具有较强的故障检测能力，能够迅速识别出套管的腐蚀和砂堵等特征。通过对运行状态的变化进行趋势预报，并与预警机构相结合，对其进行实时的警示，并对其进行遥控，形成“传感—分析—实施”的闭环。在性能指标方面，对监测的精度要求比较高，基于光纤传感技术的新型智能传感器，测量精度可以达到±0.1℃，测量的气压测量精度可以达到0.01MPa<sup>[2]</sup>。该方案具有良好的抗干扰能力，能够适应高温、高压、腐蚀等恶劣条件，具有良好的应用前景。从工程要求来看，监控系统必须与现有的生产PLC和RTU控制系统相适应，以防止重复施工。

## 2 采油工程井筒工况智能感知技术

### 2.1 确定核心监测参数

以“重点参数优先，次要参数为辅”为基本准则，对关键参数进行优选，以保证监控结果能够充分体现井下作业状况。最重要的是井筒的压力和温度，这两个因素直接影响着管柱的受力状况、渗流特征和开采效果，也是判定油井是否正常的关健基础。其次是含水、粘性和组分等的流动参量，它们的改变与原油生产品质和储层的开采状况密切相关。三是管柱的状况指标，包括振动、应变和腐蚀等，它与井筒的安全生产密切相关，可以防止管柱的断管和泄漏等重大事故；最终得到了潜油电泵电流和光杆扭矩等装置的工作状态，为今后的维修工作奠定了基础。针对不同类型的井型、储层类型和工作条件的复杂性，确定每个监控参数的定量评价标准，保证监控结果的科学和实用。

### 2.2 感知传感器的研发与选型

面向井筒环境下的全局监控要求，研究基于光纤传感DTS/DAS的井下实时监控系系统，以实现对井下复杂工况的实时监控。以掺铒光纤为敏感材料，通过对激光器的激发和接收等环节的设计，调节激光器的脉宽到10 ns，使测温精度提高到0.1℃，空间分辨达到0.1 m，从而达到全井眼全井段的温度分布监控，见图1。利用相位敏感的时间域反射法采集管柱振动、流体流

动等声波信息，实现 5-1000 Hz 的频谱响应，实现对管柱微弱振动和早期砂堵塞早期流体反常流动的辨识<sup>[3]</sup>。以微机电系统（MEMS）为基础，微尺度敏感阵列选择和封装工艺，解决多物理量同时获取和井下平稳工作的问题。选择高精度的六维 MEMS 传感器，集成陀螺仪和加速度计等部件，实现静止和动态精度 0.05° 和 0.01 g 的精密位姿检测；同时集成温度、压力和湿度等微型传感器，构成多参量传感器阵列。

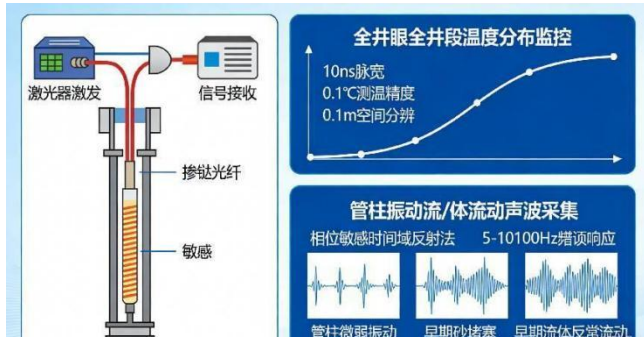


图 1 井筒光纤传感器

### 3 井筒工况数据传输与智能分析技术研发

#### 3.1 井下一地面传输体系结构的设计

建立“终端—边缘—云”三层传输体系结构，明晰各个层次的职能分工和协作机理，以达到高效传输、快速处理和统一调度的目的。该系统由传感器阵列和数据采集模块构成，用于对多个数据进行采集，并对数据进行预处理，筛选出显著的异常数据，减少数据的传递。利用 ARM+GPU 异构运算平台，结合 EKuiper 等边缘运算程序，对数据进行局部存储、实时分析和紧急处理，防止因数据传递延时造成的错误扩展<sup>[4]</sup>。云计算在油田监测中心进行了部署，构建了企业级的 EMQX 企业集群，完成了数据的集中存储、全局分析、可视化展示和远程调节。通过“井下无线短程通讯+有缆宽频载波”相结合的双模备份传送模式，在井下使用 ZigBee-HART 混联网络，以达到近 500 米的短间距采集，与井下复杂轨道相适应。在地表部分，以光纤为主要的传输模式，以无线 4 G/5 G 为后备模式，在光缆发生失效的情况下，可以实现无线传送，从而保证了通信的正常进行。在通信协议的优化上，针对 Wi-Fi6 E 井眼特定的通信协议，进行架构上的调整，降低资料的重复，并与 Modbus、MQTT 等行业规范进行兼容，以达到与已有设备的无缝连接。比如长庆石油局已部署的“雪亮 2”光缆接入网，采用智能化的通信技术，将 485 终端和 SCADA 系统进行毫秒级的实时通信，为 15000 个物联网节点提供了可靠的数据传输。

#### 3.2 多源信息的融合方法研究与开发

针对采油工程井下多源异构数据（光纤、传感器、地质、开采等），构建基于“语义鸿沟”的多维数据融合方法。将主成分分析（PCA）嵌入方法进行改进，实现不同维度、不同类

别的数据在相同的属性上进行映射，并利用图神经网络进行数据之间的时间—空间相关性分析，解决温度、压力等连续参量与管柱失效等离散参量的有效融合问题。将所建立的方法应用于胜利油田的泥页岩井监控中，将 DTS 温度数据、DAS 振动数据和开采数据进行有机结合，对其进行精确辨识，将单个数据辨识精度提高 15%，为以后的工作状态分析提供高品质数据支持。通过对各工作状态参数的提取、筛选和优化，建立多维特性参数集合，为状态辨识和故障诊断的研究奠定基础。通过对井下多个多源信息的综合分析，获取 200 多个特征参量，如：温度梯度突变点、压力脉动频谱、管柱应变能密度、流体含水率变化率、潜油电泵的电流谐波等。以井下套管的腐蚀失效为对象，通过对腐蚀区温度差异、压力波动幅度、流体腐蚀性组分含量等 8 个关键指标进行分析，建立相应的表征子集，实现对复杂工况下的准确辨识，为油田井下的井下腐蚀诊断提供准确的特征支持，并将其应用于石油天然气的现场监控中，将其快速准确地辨识出来，提高系统的辨识效率<sup>[5]</sup>。将 LSTM 神经网络和贝叶斯网络等方法相结合，通过对半空间地 N 的融合建模，提高数据的融合和分析精度，并构造出最优前和最优后的比较表，以最直接的方式展示最优的结果，优化前后对比见表 1。

表 1 融合模型优化前后对比

指标	优化前	优化后
融合准确率	90.2%	98.5%
响应时间（单位：ms）	520	280
抗噪声能力	较弱（噪声 ≥5dB 失效）	较强（噪声 ≤10dB 正常工作）

#### 3.3 工况智能识别与诊断技术

利用 YOLOv8、CNN 等算法对其进行修正和训练，建立套管腐蚀、管柱疲劳、砂堵和漏失等典型故障的智能辨识方法。通过对 YOLOv8 算法的轻量级改善，对网络结构进行了优化，降低了卷积的数目，提高了模型的运算能力，使其能够适应边缘层的计算能力<sup>[6]</sup>。进一步完善卷积神经网络的学习方法，提高缺陷的特征抽取性能，提高微小缺陷的识别精度。通过对 10000 多个井下失效样品（包括套管腐蚀、砂堵等 6 种）的数据进行训练和检验，实现模型的辨识精度 ≥92%，辨识反应速度 ≤100 ms，漏检率 ≤1.5%。结合井下历史资料和现场监控资料，建立 LSTM 工作状态演变趋势预报模型。例如采集 50 口井（含常规井、深井、水平井）5 年来的井历史数据，包括监测参数、故障记录和生产数据，并将其归一化，通过对数据归一化，实现对模型参数的最优、隐藏层数目和网络的学习速率的调节，

提高预报的准确性。该方法能够对72 h后的井筒关键参数进行预报,预报精度在5%以内,其中压力和温度参数的预报精度在3%以内。将此方法用于胜利油田塔河地区的一口油井,通过36 h的预报,对井底压力的突然降低进行了预报,并提出了相应的预防对策,从而防止了砂堵塞,挽回了80多万元的经济损失;在中国石油大学(北京)克拉玛依分校的有关研究中,利用相似的预报方法,对卡钻事故进行了高达97%的预报准确率和1%的误报率,证明了该方法的正确性。

### 3.4 智能监测系统软件研发

井筒工况的智能化软件系统需要进行模块化的研究,以保证其与硬件的有效配合,使其能够更好地进行井下状态监测,从而达到智能化、便捷化的目的。在“一井一档”的基础上,建立了一套完整的数据库,将各井的监测参数、施工记录、维护记录、故障数据等多种类型的数据进行集成,并对数据进行统一的存放和分级,使数据的数据更加规范和规范。同时,还发展了基于井号、时间、参数类型等多种状态的数据查询和溯源,实现对任何时间段的工作状态和运行情况的追踪,为工作状态分析、故障诊断和工艺改进等工作奠定基础。通过对井下温度、压力等核心参数的图形、曲线等进行图形和曲线的显示,

可以将参数的动态变化规律直接显示出来。在此基础上,将井筒的3D建模与监控信息进行耦合,对井筒应力场、流体流动状态和装置工作状态进行动态映射,使工作人员能够更好地把握井筒的总体状态。建立“青-黄-橙色-红色”四个级别的警报系统,依据各指标的异常程度设置相应的警报阈值,当出现异常时,将相应级别的警报信息推送给相应的终端。将专家规则和智能算法相结合,根据危险程度的不同,实现有目标的突发事件的应对策略,确定突发事件的处理过程和关键环节,为突发事件的发生和发展起到重要的作用。

## 4 结语

采油工程井筒工况智能监测技术研发面向不同井型和油藏的具体工作要求,开展井下多源参数智能感知、数据传递与智能分析、监测系统集成与校验等关键科学问题的研究,建立一套兼具先进性、实用性和经济性的井下智能监测方法,实现预定研究目的,获得一批有工程实用意义的研究成果。未来还需要通过融合AI大模型和油井历史等大数据,改进其对复杂条件的适应性,增强监测技术对复杂条件的适应性,进而提高其诊断和发展趋势的准确性。

### 参考文献:

- [1] 贾德利,王治,孙福超,等.分层注水井筒通讯技术进展及展望[J].石油学报,2025,46(12):2410-2426.
- [2] 王冯凡,马泽宇,谢科龙.采油工程在油田开发中的问题与作用[J].石化技术,2025,32(02):218-220.
- [3] 李勇锋,马喜超,石祖宽,等.单井筒井下助流注水及电潜泵采油工艺技术研究与应用[J].石化技术,2024,31(12):6-8.
- [4] 陈福祿,李枫,刘彩玉,等.抽油机采油井筒内气液分离器数值模拟研究[J].化工机械,2023,50(05):685-691.
- [5] 彭瑞强,徐靖文,张恒,等.无杆采油井筒用防垢剂性能研究与应用[J].当代化工,2023,52(03):726-729.
- [6] 闫敏辉.采油井筒工艺技术的应用与思考[J].石化技术,2021,28(01):76-77.