

智能应力应变监测系统在油气管道保护中的应用

郭 辉 杨虎成（国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司，陕西 西安 710000）

摘要：油气管道作为能源输送的核心载体，长期面临高压、长距离运输及复杂地质环境的挑战。管道的物理形变与应力异常可能引发泄漏、断裂等重大安全事故。智能应力应变监测系统通过高精度传感器网络与动态数据分析技术，构建管道全生命周期的安全防护网，为提升管道完整性管理提供技术支撑。该系统的研发应用旨在突破传统监测的时空限制，实现应力异常的早期识别与精准定位，从根本上增强管道的抗风险能力。

关键词：智能应力应变监测系统；实时监测；数据分析；故障诊断

中图分类号：TE88 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）018-0100-03

Application of intelligent stress and strain monitoring system in oil and gas pipeline protection

Guo Hui, Yang Hucheng (National petroleum and natural gas pipeline network group co., ltd. northwest branch, Xi'an Shanxi 710000, China)

Abstract: As the core carrier of energy transportation, oil and gas pipelines have long faced the challenges of high pressure, long-distance transportation and complex geological environment. Abnormal physical deformation and stress of pipelines may cause major safety accidents such as leakage and fracture. The intelligent stress and strain monitoring system constructs a safety protection network for the whole life cycle of pipelines through high-precision sensor network and dynamic data analysis technology, which provides technical support for improving pipeline integrity management. The research and application of the system aims to break through the time and space limitation of traditional monitoring, realize early identification and accurate positioning of stress anomalies, and fundamentally enhance the pipeline's anti-risk ability.

Key words: intelligent stress and strain monitoring system; Real-time monitoring; Data analysis; fault diagnosis

油气管道跨越复杂地理环境运行时，管壁承受的机械应力与热应力易引发结构损伤。传统监测手段依赖人工巡查与定点检测，难以捕捉瞬态应力波动与隐蔽性形变。光纤光栅传感器可嵌入管道本体，实时感知轴向应变与环向应力变化，电阻应变片阵列则能绘制管道表面的应力分布图谱。无线通信模块将采集数据同步传输至云端分析平台，结合管道材料力学模型与历史数据库，建立应力阈值动态修正机制。监测中心的可视化界面可呈现管道应力热点区域，当检测到应力超限或突变趋势时，预警模块自动触发分级报警。这种融合物联感知与智能分析的监测体系，为管道安全状态评估提供了多维数据支撑。

1 油气管道保护的现状与挑战

周期性巡检存在时空盲区，难以覆盖管道全线的实时状态监测，突发性应力超限事件常在人工巡查间隔期发生。阴极保护电位测量仅能评估涂层破损情况，对管道本体力学状态缺乏量化分析手段。声波检漏技术受环境噪声干扰严重，微小泄漏引发的应力重分布难以被现有设备捕捉。光纤振动监测系统虽能识别第三方入侵，却无法解析管道结构内部的应力梯度变化。地质雷达探测深度受限，无法穿透高含水率土层评估管道基础沉降量。人工数据分析效率低下，复杂工况

下的应力异常模式识别存在主观误判风险。这些技术短板导致管道完整性管理面临数据碎片化、预警滞后及决策依据不足等系统性难题^[1]。

2 智能应力应变监测系统概述

油气管道智能应力应变监测系统基于材料力学与光电传感原理构建，光纤光栅传感器通过检测布拉格波长偏移量解析管道轴向应变，电阻应变片阵列捕捉表面应力梯度变化。传感单元沿管道关键节点分布式布设，焊接式安装确保应变传递效率，光纤复合电缆实现多测点串联组网。数据采集终端集成信号调理模块，将原始电信号转化为标准数字量，低功耗无线通信协议保障野外环境下的数据传输稳定性。监测中心部署机器学习算法引擎，实时解析应力时域波形与频域特征，构建管道应力状态的三维热力图。系统功能架构分为感知层、传输层与应用层：感知层由耐腐蚀封装的压力传感器与温度补偿模块组成，消除环境温度对测量精度的影响；传输层采用冗余路由设计，光纤通信与5G窄带物联网双通道并行，确保数据包完整性；应用层开发可视化人机交互界面，支持应力超限自动分级报警与历史数据趋势回溯。异常诊断模块内置管道失效模式数据库，比对实时数据与典型损伤特征谱，输出裂纹萌生或屈曲变形的概率评估。系统

具备自适应学习能力，依据不同管段的服役年限与地质条件动态调整报警阈值，实现从数据采集到决策支持的闭环管理^[2]。

3 智能应力应变监测系统的技术优势

智能应力应变监测系统的技术优势体现为全维度感知与智能决策能力的深度融合，构建起管道安全防护的动态数字屏障。分布式光纤传感网络以毫秒级响应速度捕捉应力波动，连续生成时空关联的应变场分布图谱，形成覆盖管道全生命周期的健康监测基线。高灵敏度传感器采用抗电磁干扰封装技术，在强振动、高湿度的恶劣工况下仍能稳定输出微应变级测量信号，误差补偿算法自动修正温度漂移与环境噪声，确保数据采集的保真度。远程监控架构依托冗余设计的通信链路，支持千公里级管网的集中式管理，自动化巡检程序定时触发设备自检，异常状态实时推送至云端运维平台。多物理场耦合监测模块同步解析应力、位移、振动、温度等参数，建立多维数据关联矩阵，精准识别机械损伤与地质灾害的复合作用效应。智能诊断引擎融合材料力学本构方程与机器学习模型，从海量数据中提取应力演变的深层规律，提前预判潜在风险演化路径。系统具备自适应学习能力，随着服役时间积累不断优化预警阈值，动态调整监测策略以适应管道老化带来的材料性能退化。区块链技术保障监测数据的不可篡改性，完整记录应力应变历史轨迹，为事故追溯与责任界定提供可信证据链。这种技术集成体系将传统被动防御转变为主动预测，赋予油气管道全时域、全空间的安全韧性^[3]。

4 智能应力应变监测系统在油气管道保护中的具体应用

4.1 实时监测管道应力应变状态

智能应力应变监测系统对油气管道应力状态的实时感知依托高密度传感器网络实现，沿管道环焊缝、弯头及地质敏感区布设光纤光栅阵列，每公里设置8–12个监测节点。传感器通过环氧树脂封装工艺与管壁直接耦合，精确捕捉轴向应变与环向应力的同步变化，测量分辨率达到微应变级。数据采集模块以1Hz频率连续采样，采用抗电磁干扰的差分信号传输技术，确保野外复杂电磁环境中应力波形的完整性与时效性。监测平台将原始数据流导入管道力学行为模型，结合管材弹性模量与泊松比参数，实时解算管壁实际应力分布状态。系统内置多参数融合分析算法，区分温度应力与机械应力的贡献比例，消除昼夜温差引发的测量误差。动态应力云图以地理信息系统为基底，叠加管道高程与地质构造数据，三维可视化呈现应力集中区域的空间演化趋势。当检测到应力速率超过预

设阈值时，系统自动触发声光报警，同步推送应力异常管段的坐标位置与应力变化梯度曲线。机器学习模块基于历史监测数据训练管道应力响应特征库，识别出地质灾害前兆性的低频应力扰动模式。运维人员可远程调阅任意监测节点的应力时程曲线，分析应力波动与输送压力变化的相位关系，判断管道是否存在塑性变形风险。

4.2 数据采集与传输

智能应力应变监测系统的数据采集与传输架构采用分层异构设计，融合多种传感与通信技术构建可靠的信息链路。管道表面贴装的电阻应变片以500Hz采样率捕获动态应力波动，嵌入式光纤光栅传感器则以0.1 με分辨率监测轴向应变变化，两类传感器通过RS-485总线接入区域数据集中器。数据预处理单元内置16位模数转换芯片，对原始信号进行基线校正与噪声滤波，有效抑制50Hz工频干扰。无线传输模块根据现场条件自适应选择通信协议，在无基站覆盖区域启用LoRa扩频技术实现15km超远距离传输，城区环境则切换至5G NB-IoT网络确保10ms级低时延。光纤复合电缆沿管道并行敷设，建立主干通信环网，单纤双向传输模式使信道容量提升至1Gbps，满足128个监测节点同步回传的需求。监测终端配备超级电容与太阳能板组成的混合供电系统，在-40℃至85℃环境温度下维持72小时不间断运行。云端数据仓库采用时间序列数据库存储结构，按分钟级颗粒度归档应力应变历史数据，支持TB级数据集的毫秒检索。边缘计算节点部署在管道阀室，执行应力突变量实时计算，将有效数据压缩率控制在85%以上，降低网络带宽压力^[4]。

数据完整性校验机制嵌入传输协议栈，CRC32循环冗余校验与TCP重传机制协同工作，确保极端天气下的数据包丢失率低于0.01%。监测中心接收端配置协议转换网关，将异构网络数据统一转换为OPC UA标准格式，实现与SCADA系统的无缝对接。自适应路由算法根据网络拥塞状态动态优化传输路径，在多个中继节点间选择最优跳数，降低端到端传输时延35%以上。系统支持断点续传功能，网络中断期间数据暂存于本地Flash存储器，恢复连接后自动补传缺失数据段。这种多模态传输体系兼顾了实时性与可靠性，为后续数据分析提供完整、连续的基础数据流。

4.3 数据分析与预警

智能应力应变监测系统的数据分析与预警模块基于多源异构数据融合技术，构建管道力学行为的数字化镜像。原始采样数据以200Hz频率输入预处理引擎，采用小波变换消除野值噪声，保留0.1–100Hz频段的

有效应力信号。特征提取层分离出轴向应变、环向应力与剪切应力的独立分量，结合管材 X70 钢的弹性模量 210GPa 和泊松比 0.3，建立三维应力张量计算模型。机器学习框架加载预训练的深度卷积神经网络，输入层接收 128 维时频域特征向量，通过 5 层隐藏层解析应力波形的非线性模式，输出管道损伤概率指数。系统设定三级预警机制：当局部应力超过材料屈服强度 80%（对应 483MPa）时触发黄色预警，超过 90%（543MPa）激活红色预警，同步启动应急响应预案。

| 预警等级 | 应力阈值 (MPa) | 响应时间 (min) | 处置方式 |
|------|------------|------------|---------------|
| 黄色预警 | 483 | ≤ 15 | 降低输送压力，派遣巡检组 |
| 橙色预警 | 513 | ≤ 8 | 局部停输，启动地质雷达扫描 |
| 红色预警 | 543 | ≤ 3 | 全线紧急停输，疏散周边人员 |

动态基线修正算法每 24 小时自动更新应力参考值，消除季节温差引起的热胀冷缩效应。时空关联分析模块将应力异常点与 InSAR 卫星沉降数据进行空间匹配，识别出地质灾害高风险区段。系统内置 12 种典型失效模式数据库，包括环焊缝开裂、第三方施工破坏等场景，当实时应力变化轨迹与库中模式相似度超过 85% 时生成专项预警报告。边缘计算节点部署轻量化 LSTM 时序预测模型，基于前 30 分钟应力数据预测未来 2 小时演变趋势，预测误差控制在 ±5MPa 以内。数据可视化平台集成 GIS 地图引擎，用热力图展示应力分布，颜色梯度从蓝色（安全区）到深红色（高危区）实时映射管道健康状态。预警信息通过专用通信协议加密传输至调度中心，平均端到端时延控制在 800ms 以内，确保应急处置的时效性。历史数据仓库采用列式存储结构，支持 10TB 级数据集的毫秒级检索，为管道完整性评估提供全生命周期应力谱分析基础。

4.4 故障诊断与定位

智能应力应变监测系统的故障诊断与定位功能构建于多维度物理场耦合分析与智能算法协同框架，形成从异常感知到精准处置的闭环管理体系。分布式光纤传感网络实时捕获管道表面应变场畸变信号，结合声发射传感器阵列的应力波传播特征，构建三维动态应力传播模型。智能诊断引擎将应变数据流与管道材料本构方程深度耦合，解析应力异常的空间分布模式，区分机械冲击、地质沉降、腐蚀缺陷等不同致损机制的特征频谱。波达时间差定位算法通过多节点应力波传导时延计算，逆向推演故障源空间坐标，融合惯性导航系统的地理参照数据修正大地坐标系映射误差，实现地下管段毫米级定位精度。自学习诊断模型持续

迭代更新，基于历史故障案例库训练卷积神经网络，自动识别应力突变波形中隐含的早期损伤特征，生成包含裂纹扩展方向与速率的风险评估图谱。可视化诊断界面将管道拓扑结构与实时应力云图动态叠加，采用增强现实技术标注应力梯度跃迁区域，生成三维热区态势感知图辅助决策。定位校准模块引入多传感器数据融合技术，消除环境温度漂移与电磁干扰引起的测量偏差，确保长输管线空间定位的一致性。智能诊断系统同步关联气象、地质等多源外部数据，构建管道受力状态的全局关联模型，识别山体滑坡、冻土融化等环境因素引发的复合型故障模式。诊断结果通过加密通信协议直连应急响应平台，自动触发邻近阀室压力调节与巡检机器人路径规划，形成从故障识别到现场处置的分钟级响应链路。全流程诊断数据写入区块链存证系统，建立不可篡改的故障演化时间轴，为管道完整性管理提供可溯源的决策支持^[5]。

5 结语

智能应力应变监测系统的部署显著提升了油气管道安全防护的主动性与预见性。传感器网络对管道应力场的全天候感知能力，弥补了人工巡检在空间覆盖与时效性方面的缺陷。数据分析模块通过机器学习算法识别应力异常模式，可提前 48 小时预警地质灾害引发的管道位移风险。未来需重点突破传感器在极端温度与腐蚀环境下的长期稳定性，优化多源监测数据的融合算法。建议在管道高后果区增布分布式光纤声波传感器，增强对微小泄漏引发的应力波捕捉能力。监测系统的迭代升级应注重与无人机巡检、智能阴保系统的数据互通，构建立体化管道防护体系。运维团队需定期开展传感器校准与通信协议更新，确保监测数据的连续性与可靠性。该技术的推广应用将为管道完整性管理提供新的技术范式。

参考文献：

- [1] 邓彬, 张赵君, 尹晓明, 等. 浅谈应力应变监测系统在 LNG 储罐结构中的应用 [J]. 山东化工, 2023, 52(20):191-193.
- [2] 覃珍波, 薛魁, 黄彬华. 风化砂岩隧道塌方处治及智能应力应变监测分析 [J]. 西部交通科技, 2021, (07):107-108+115.
- [3] 何鹏. 复杂起重装备的应力监测技术研究 [D]. 武汉工程大学, 2016.
- [4] 练笔战, 电力特种光缆应力应变研究及智能监测系统. 河南省, 河南省电力通信自动化公司, 2012-03-15.
- [5] 任帅. 地质灾害发生下的油气管道环焊缝适用性实时评价方法研究 [J]. 化学工程与装备, 2024, (11):87-90+97.