

基于分布式光纤的致密气田集输管道智能监测预警系统研究

杨宇光¹ 张明明¹ 刘金海² 李强¹ 石伟光¹

(1. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100015)

(2. 中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司, 天津 300452)

摘要: 临兴区块致密气田集输管网周边地表环境复杂, 极易发生管道失效泄漏事故。提出了一种基于相位光时域反射计技术(φ -OTDR)的致密气田集输管道分布式光纤智能监测预警方法, 研究了振动信号的检测原理、处理方法、监测及定位原理, 建立了致密气田集输管道智能监测预警系统。室内及现场测试结果表明, 本系统能够良好还原外界振动信号、有效识别异常状况, 为致密气管道的安全运行提供了有力保障, 具有较高的实用价值和广泛的应用前景。

关键词: 智能预警; 致密气; φ -OTDR; 分布式光纤

1 概述

致密气是指存在于页岩层的非常规天然气资源, 我国致密气层气储量丰富, 是天然气增储上产的重要领域。中海油致密气产区位于鄂尔多斯盆地边缘, 工区地表环境以及管输介质和生产工况较为复杂, 极易出现管道腐蚀、第三方损坏、地质灾害等引发管道失效泄漏的事件发生, 一旦发现和管控不及时, 很可能引发火灾、爆炸等重大危害事故的发生, 从而给公司造成较大的经济损失和恶劣的社会影响。

结合致密气田工区地表环境及实际工况, 采取将光纤振动监测技术与软件分析相结合的方式, 构建一套致密气田集输管道智能监测与预警系统, 实现管道异常状况在线监测、实施预警与精准定位, 将管道异常事件的发生消灭在萌芽阶段, 有效保障致密气田集输管网的安全、稳定、高效运行。

2 致密气管道分布式光纤智能监测技术

2.1 分布式光纤振动信号检测原理

选用基于相位敏感光时域反射技术(Φ -OTDR)的分布式光纤传感系统构建致密气田集输管网智能监测预警系统。

该系统使用超窄线宽激光器作为传感光源, 对外界扰动具有很高的灵敏度, 能够高效识别并定位致密气区管网异常事件。

2.2 分布式光纤振动监测信号处理方法

致密气田集输管道沿线地质环境复杂、社会活动

频繁, 管道沿线有梁、坎、沟、河流、山坡、公路、铁路等, 直接采集到的信号中包含有用信息与噪声, 会对特征提取造成一定程度的干扰, 一方面加大了系统信号处理压力, 增加识别难度; 另一方面会造成振动检测的误判, 降低系统识别报警准确率。

2.2.1 信号数据归一化

通过对所得到的信号数据分析, 特征向量的数量级并不在同一数量级上, 这会对处理特征向量产生很大的困难, 将数据统一在合理范围内极为重要。利用转换公式(1), 将所有数据同一规划到[0, 1]范围内。

$$x' = (x - \min) / (\max - \min) \quad (1)$$

2.2.2 信号移动平均及差分处理

信号移动平均技术是将一段时间内的数据分离成有序的数据组, 通过算数平均得到平均后的数据信号, 移动平均的信号处理是一种对将信号平滑处理的方法。假设在相同时间间隔内提取N条后向瑞利散射信号, 产生一个信号集, 移动平均次数设为M, 通过式进行移动平均处理。

$$R_i = \frac{r_i + r_{1+i} + r_{2+i} + \dots + r_{i+M-1}}{M} = \frac{1}{M} \sum_{k=i}^{i+M-1} r_k, k \in [1, N], i \in [1, N-M+1] \quad (2)$$

通过式(2)得到平均后的后向瑞利散射曲线信号集:

$$R=\{R_1, R_2, R_3, \dots, R_i, \dots, R_m\}$$

移动差分信号处理的目的是将信号突变部分提取出来。选择 R_i 作为移动差分的参考曲线，通过 $\Delta R_i=R_i-R_i$ 对平均后的信号集进行移动差分处理得到差分后信号数据集：

$$\Delta R=\{\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \dots, \Delta R_i, \dots, \Delta R_m\}。$$

2.3 分布式光纤振动监测及定位原理

2.3.1 分布式光纤振动监测原理

相位敏感光时域反射技术 (Φ -OTDR) 利用光沿光纤传播的过程中会产生后向瑞利散射，当光纤某点受到外界泄漏干扰时，该点就会发生弹光效应，改变光纤纤芯的折射率，继而散射光的光强也由于干涉的作用发生变化，散射光强随着传播距离的延长而衰减，且在一定条件下传播距离正比于时间。

设光纤长为 l ，入射光的中心波长为 λ ，光纤折射率为 n ，则相位：

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} nl$$

当光纤受扰动时，光的相位变化为：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (l\Delta n + n\Delta l) \quad (3)$$

式中：

光纤长度改变量 $\Delta l = \varepsilon l$ ，

其中 ε 表示光纤的纵向应变张量，由于相位被调制发生改变，则相应的光电探测器所测得的电流也会发生改变。

假设第 n 个散射点受到扰动，则干扰前后的电流变化为：

$$\Delta I = \infty 2E_s^2 \sum_{i=1}^{i-1} \sum_{j=1}^b p_i p_j \cos[\phi_{ij} - \cos(\phi_{ij} - \cos(\phi_{ij} + \Delta\phi))] \quad (4)$$

综合式 (3) 和式 (4) 可知，根据相位变化就可以计算出瑞利散射相干光强变化，从而得到相应的泄漏或振动信息。

2.3.2 分布式光纤振动定位原理

在分布式光纤振动系统中，通过计算扰动发生位置处脉冲光在光纤中往返的时间，即可实现对位置的定位，脉冲光在光纤中的往返时间为 t 与扰动发生位置距光纤入射端的距离为 l 其关系为：

$$l=ct/2n_f \quad (5)$$

式中：

c 为真空中的光速，

n_f 为光纤纤芯折射率。

3 致密气密管道智能监测预警系统开发

3.1 系统整体设计

利用 Φ -OTDR 技术设计一套针对于致密气田集输管道的智能监测预警系统，达到实时监测、精准定位、及时报警的效果。该预警系统结构如图 1 所示，系统中包括了窄线宽激光器、脉冲调制解调器、放大器以及信号采集与处理模块等。

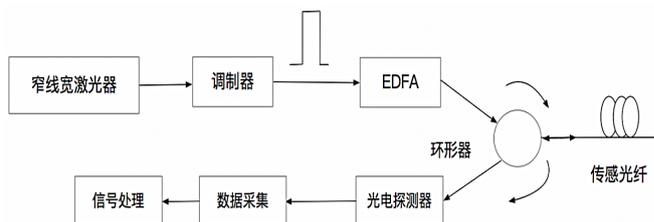


图 1 预警系统结构图

光纤振动预警系统总体技术架构由数据采集层、网络传输层、处理分析层、功能应用层以及展现层构成。

其中数据采集层由分布式光纤振动主机构成，主机采用基于相位敏感光时域反射 (Φ -OTDR) 的分布式光纤振动传感技术实现，其结构简单、灵敏度高、可同时对多点振动进行检测和定位，对微弱振动事件仍具有较好的检测效果。

3.2 软件系统及功能

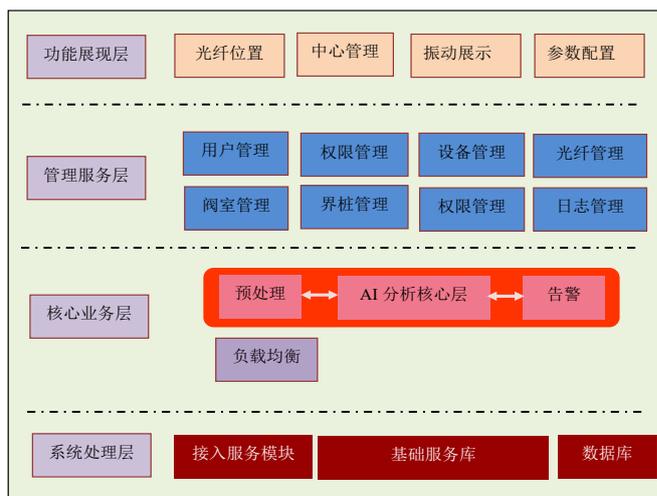


图 2 监测预警系统功能组成

基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动预警系统主要

包括设备管理、报警列表、统计列表、温度记录、报警弹窗等功能模块,实现事件监控与预警,包含了管线周边地图、光纤线路、振动测温曲线、报警列表、报警数量统计等信息板块。页采用GIS与空间技术将地图、光纤线路信息等进行融合展示,通过鼠标滚动可以查看详细的地理信息,系统功能组成如图2所示。

4 致密气管道智能监测预警系统测试

4.1 室内测试

为了对智能监测预警系统的泄漏振动预警性能进行评估,开展光纤监测室内测试,通过将若干匝光纤(约10m长)缠绕在PZT压电陶瓷环上,在PZT上施加电压信号来模拟对管道运行造成影响的异常状况。

在PZT上加载频率为40Hz、100Hz的方波信号来模拟振动,可以观测到12587.5m处出现尖峰,表明此处有振动,与PZT压电陶瓷实际位置12585m偏差仅为2.5m。通过室内验证试验表明系统对不同频段的振动都能灵敏感应并精确定位。

4.2 现场测试

现场测试主要包括了机械挖掘作业测试、人工挖掘测试以及管道泄漏测试,经过现场调研以及勘测,筛选临兴4#集气站辖区的一段相对完整的集输管道光缆作为测试对象,管线光缆长度为7.789km,光缆型号为GYFTA53-48B1单模光缆,光缆套在硅芯管内,埋于管道斜下方30cm左右,光缆埋深2.5m。

机械挖掘测试监测到挖掘振动波形如图3所示,挖掘机挖掘造成的振动强度大,振动幅度值在100左右,且振动强度保持幅度值波动较小的趋势;挖掘机振动定位距离在3747~3756m区间,与现场测试位置(即距离临兴4#集气站3.8km左右)吻合。

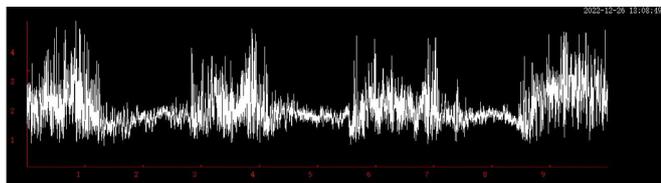


图3 监测系统显示的挖掘机挖掘振动波形

人工挖掘振动波形如图4所示,从数据上分析,人工挖掘振动强度弱,振动幅度值在10左右,且振动强度存在快速减弱的趋势,人工挖掘定位距离在3751~3755m,与现场测试位置(即距离临兴4#集气站3.8km左右)吻合。

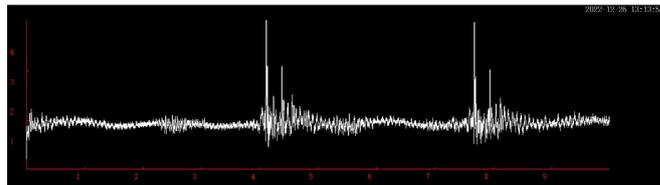


图4 监测系统显示的人工挖掘振动波形

在进行管道泄漏测试时,使用空压机模拟泄漏压力,气体泄漏振动波形密集,随着气体泄漏量的增大,振动幅度的幅值也在增强。泄漏挖掘定位距离在3788~3792m,与现场测试位置(即距离临兴4#集气站3.8km左右)吻合。

通过模拟测试及现场测试,智能监测预警系统能够有效识别出对管道运行造成危害的异常状况,具备较高的灵敏度、分析能力及定位精度。

5 结论

本文提出了一种基于 Φ -OTDR的致密气田管道分布式光纤智能监测预警系统,采用数据归一化、移动平均及差分处理方法对监测信号进行处理,使用机器学习算法训练得到光纤振动信号分类器。室内模拟及现场测试表明,系统能够精确定位管道异常点位置,准确识别异常情况并报警,降低了管道运营与维护成本,为企业达到了提质增效的目的,保障了致密气田集输管道的安全性。

参考文献:

- [1] 季寿宏. 基于 φ -OTDR的分布式光纤预警系统设计及应用[J]. 煤气与热力, 2020,40(05):9-14+44-45.
- [2] 杨健. 分布式光纤振动预警技术在城市燃气管网保护中的应用[C]. 2019年燃气安全交流研讨会论文集暨“大来杯”第五届全国城镇燃气安全与服务状况调研活动调研报告, 2019:146-149.
- [3] 郝尚青, 刘建, 崔振伟, 杨传江. 基于光纤传感与智能识别的管道安全预警技术[J]. 石油规划设计, 2017, 28(02):38-42+53-54.
- [4] 孙洁, 李松, 刘凯蕾, 徐鸣伟. 油气管道安全预警技术现状[J]. 油气储运, 2016,35(09):1023-1026.
- [5] 安阳, 靳世久, 冯欣, 封皓, 曾周末. 基于相干瑞利散射的管道安全光纤预警系统[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015,48(01):70-75.
- [6] 王全国, 贺帅斌, 党文义. 油气管道安全预警技术性能评估研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013,9(01):98-102.