

分布式光纤传感技术在大牛地气田 管线泄漏监测中的应用

陈荣耀

(中石化华北油气分公司, 陕西 榆林 719000)

摘 要 大牛地气田前期管道监测采用“音波管道泄漏检测仪”进行振动报警, 误报率较高, 目前现场主要采取人工巡检方式, 未建立完善、可靠的泄漏定位系统。随着气田开发的深入, 下古气藏已逐步成为产能接替的主要阵地, 建设适用于大牛地气田的管道泄漏监测系统, 实现管道异常状态实时检测, 快速确定泄漏位置, 具有重要的意义。通过利用分布式光纤传感技术对重点采气、外输管线进行温感和振感监测, 在 2、3 号脱硫站组建“大牛地重点集输管线泄漏监测系统”, 实际投用效果良好, 系统的建立和投运为降低下古气藏开发风险提供了技术支撑。

关键词 泄漏检测; 分布式光纤传感技术; 光纤拉曼 (Raman) 散射; Φ -OTDR 相敏光时域反射仪

中图分类号: TE973.92; TN247

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.027

0 引言

大牛地气田地面集输采用“气井中低压集气, 集气站一次增压, 处理站集中脱水二次增压”为主体的集输工艺。管辖集输管道 6 条总长 230.2 千米, 采气管线约 1 600 条总长 4 100 千米, 前期利用“音波管道泄漏检测仪”进行振动报警, 误报率较高, 效果不佳。气田油气管道所处区域大, 局部地形复杂, 人工巡检难度大, 传统的巡检方式效率低下且无法进行 24 小时监控。随着管道使用时间增长, 特别是下古含硫化氢气藏开发, 管道事故发生概率大幅增加, 危害当地居民的人身财产安全。利用与管道同沟敷设的振动光纤、感温光纤以及音波泄漏监控等手段, 实现管线运行状态实时监控, 及时发现管线泄漏、管线破坏等异常信息, 并及时发现位置信息, 提高管线管理效率, 保障管线安全运行, 具有重要的现实意义。

1 天然气管道泄漏监测定位技术

光纤管道泄漏监测定位法是一种应用光缆对长输天然气管道泄漏进行监测定位的方法, 利用光缆对管道中的温度、压力等传输的变化进行测试。光纤工作频带宽, 动态范围大, 适合于大范围远距离组网和遥测遥控, 是一种优良的低损耗传输线; 在一定条件下, 光纤特别容易接受被测量或场地加载, 是一种优良的敏感元件; 光纤本身电绝缘、体积小、易弯曲、抗电

磁干扰、抗辐射、耐压、耐腐蚀, 特别适合于易燃、易爆、空间狭窄及强电磁干扰等恶劣环境^[1]。

光纤管道安全预警技术使用通信光缆作为检测介质, 与管道同沟敷设, 实现连续, 实时油气管道监测。当发生异常作业、施工、自然事故导致的异常振动、温度变化等时, 实时预警并定位^[2]。分布式光纤温度应力变化监测系统是利用光纤作为传感器, 实时测量被测媒介温度应力变化并提供报警信息以及数据存储的综合监控系统^[3]。分布式光纤预警系统选取井口到脱硫站必要管线及脱硫站外输管线, 进行分布式光纤振动预警与感温泄漏监测系统及 AI 识别^[4]。

光纤传感管道泄漏监测技术具备以下技术特点: 光波不易受到外界电磁信号的干扰, 也不会形成电磁干扰, 能够被各类光探测器件高效感应, 可便捷实现光电与电光之间的相互转换, 便于与成熟配套的电子设备、计算系统适配和对接。大牛地气田采气管线同沟铺设光纤具备光纤传感监测的基础条件, 结合光纤管道泄漏监测技术特点, 采用该技术开展管线泄漏监测试验。

2 泄漏监测系统建设部署

2.1 应用原理

与监测管输管线同沟敷设的光缆, 是泄漏监测系统的监测介质, 光缆中的一芯光纤用于振动传感, 另

作者简介: 陈荣耀 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 油气开发。

一芯光纤用于感温传感。当外界有挖掘或发生管道介质泄漏时,光缆会随之振动或降温,通过光纤捕获振动信号,系统通过算法对采集的光缆振动信号解析,智能识别施工、泄漏事故、泄漏点位。

2.2 系统部署

在脱硫站机房系统,针对性开发并部署光纤振动监测与光纤感温监测系统。系统实时显示各条天然气管线各处、各区域振动情况和温度值,通过显示颜色进行区分,并将每隔固定时间采集的相关信息记录振动情况和温度的变化。第一时间感知外部入侵造成的异常扰动,并通过大数据和人工智能技术进行准确识别和定位,第一时间进行告警和信息上报。服务器统一部署在厂区生产指挥中心,利用内网传输,便于厂、区、站各层级用户及时监控查询报警信息,便于采取相应措施。

2.2.1 数据采集层

分布式光纤预警主机安装在站内,采用模块化设计,沿线振动信号转换成传感信号并处理,实现事件的分析、识别和定位,并上传到分布式光纤预警主机。

2.2.2 数据汇聚层

光纤预警主机负责实时接收光缆在线监测过程中产生的各类运行状态数据及预警相关信息,通过内置算法对数据进行解析、判别与综合分析处理,及时在界面上直观展示各类告警信息,同时将处理后的有效数据统一上传至平台,实现数据的集中管理与远程监控。

2.2.3 数据平台层

可视化综合管理平台集成分布式光纤预警系统、分布式光纤传感 AI 工具箱、图表管理、GIS 定位和运行监控管理等功能。

2.2.4 终端展示层

在厂级生产指挥中心部署监控系统展示界面。在采气管理区和站场中控机房部署管线泄漏监测系统终端,在现场发生风险事件或者泄漏事件的时候,在系统界面电子地图中快速定位报警事件发生的地点,并且发出系统报警。

2.2.5 软件开发测试

软件开发测试根据项目需求定制开发,按项目计划、需求评审、设计评审、代码规范检查开展。按照系统成果提交计划编写系统相关文档、用户手册,在项目试用上线形成测试项目管理方式,由项目组和软件质量保证小组审核文档的完整性,确保系统交付质量。在系统试运行过程中,开展平台日常巡检,上线试运行的过程中涉及功能性的修改、新增功能、更新

相关接口等情况时,管控组评估工作量以及对试运行系统的影响,制定工作方案。

2.3 系统架构

2.3.1 光纤路由普查标定地图建模

按照数据采集模板,根据数据收集需求,由属地提供路由数据,将采集的数据导入系统中,及时采购项目所需检测主机和服务器等硬件设备,为软硬件部署提供保障。

2.3.2 振动传感器配置

以光纤作为传感器,采用光纤瑞利散射原理,通过承载物传至光缆振动,引起干涉光相位的线性变化(Φ -OTDR),主机采集该位置不同时刻的干涉信号,经数据降噪处理后,提取时频特征,并实时更新完善系统样本数据库,从而识别事件状况,判断外部干扰类型、干扰等级和震源距离。

2.3.3 温度传感器配置

以光纤作为传感器,采用光纤拉曼(Raman)散射效应对温度敏感的特性,当管线泄漏出现温度变化时,通过平台算法分析,识别泄漏未知和信息^[5]。

2.3.4 系统架构配置

系统架构配置包括系统感知层、传输接入层、系统数据层、平台服务层和展示层配置。(1)系统感知层:通过分布式光纤振动、感温监控主机实时监控管线温度、振动、声纹等信号,对不同的行为提取多个维度的特征参量,报警阈值可根据环境配置,监测的物理量参数阈值可以分区域灵活设置。(2)传输接入层:利用通信光缆本体做通信数据回传载体,实现通信本体化,保证数据传输稳定性。(3)系统数据层:采用自组织神经网络技术,针对光纤监测预警系统应用需求,建立数据库进行特征提取,实现对外界入侵的有效识别,如设防区域的施工、挖掘,大型机械以及可能威胁光纤承载物的破坏行为等。(4)平台服务层:通过基础应用服务支撑应用系统,接口服务实现接口对接,机器学习算法保证系统的报警准确率。(5)平台展示层:系统应用层通过算法分析对现场信号收集,实现报警推送展示包括报警状态、报警地理位置、事件类型、报警时间等。报警数据在终端服务器上永久保存。

2.4 监测主机部署

天然气管道泄漏监测系统跟光纤振动监测主机和光纤测温监测主机对接,放在统一机房。总体设计四层架构,数据采集层由光纤振动监测与温度监测设备组成,数据汇聚层由交换机组成,数据解析层(应用服务)放置一台服务器。

2.4.1 测温主机对接

测温主机作为测温系统核心设备,是实现光电信号转换与信息综合处理的核心单元,负责全系统信号采集、数据处理、分析研判、超温告警以及网络数据传输等关键任务。设备主要由光频发生器、开关电源等模块组成。温度异常变化可通过分布式光纤测温技术精准捕捉,系统需要在温度分辨率、定位精度及响应速度上均具备良好性能。

2.4.2 振动主机对接

振动主机是测振系统核心设备,基于分布式光纤振动传感技术,对管道外力破坏与介质泄漏情况进行实时监测。通过持续采集光缆沿线环境的振动信号,精准判定异常事件发生位置,对外力破坏风险进行分级评估,为管道安全防护提供可靠依据。

3 泄漏监测系统算法提升

产生告警所依赖的振动事件的累加逻辑调整:事件叠加机制由 5 分钟加长到 15 分钟,解决振动事件不叠加导致无法出报警的问题。

3.1 阈值设置和报警机制优化

(1)事件判断频率调整 2 分钟调整为 30 秒一次。(2)事件产生配置调整:振动阈值从 15 db 调整为 8 db。

(3)产生告警所依赖的振动事件的累加逻辑调整:事件叠加机制由 5 分钟加长到 15 分钟,解决振动事件不叠加导致无法出报警的问题。

3.2 调整阈值设置和报警机制算法训练优化

(1)数据模型采集:在试运行期间对数据进行分析,采集现场确认后施工类型,车辆路过(误告)还是植树等,进行数据标注。(2)数据标注更新:将标注后的数据导入数据中心进行更新。(3)算法优化训练:通过对数据中心的数据定期训练后,将施工事件与误告干扰事件区分度提高,同时对现场的环境干扰特征进行识别,最终分析的结果与事件吻合度更高。

(4)训练结果验证:通过重复上述告警确认,数据导入和数据训练,可持续提高识别的准确率,降低误告率、漏告率。

3.3 光缆防区设置

根据采集的光缆路由,每两个设施点间建立一个防区;根据每个防区的不同环境特征,从振动幅度、振动发生概率、振动频次等方面过滤振动波形,设定预警门限,实现光缆的分布式预警,排除相关干扰因素。(1)安静区:环境安静,发生外破风险的振动较为明显,门限设置为低级。(2)路口和桥梁:车辆产生的振动

较多,设置门限为中级。(3)工地:高频高幅度的振动较多,门限需设置为高级。

4 泄漏监测系统应用效果

4.1 人工测试情况

组织技术人员在现场进行了人工振动测试、温度测试、系统学习能力测试,测试情况如下:(1)人工振动测试:西干线 5 200 m 处,模拟机械进行人工敲击,敲击持续 90 s,平台发出告警,说明连续规律振动会引起系统出现机械告警。(2)人工温度测试:站内使用光缆盘测试,通过水浴方式加热光缆盘,系统发出温升告警,告警距离与温度正确,说明温度变化或温度突变会引起系统出现测温告警。(3)借助现场施工学习能力测试:现场进行抽氮气作业,出现告警后采集该告警模型。系统对采集的告警模型进行学习,确认此类振动为误告警。

4.2 实际案例

泄漏监测系统试运行期间,系统产生振动异常告警,经巡视发现为养牛场地施工导致报警,证实了系统的可用性。

5 结束语

利用分布式光纤传感技术对重点管线进行温感和振感监测,在大牛地气田中的应用效果良好。泄漏监测系统实现了特殊情况下异常位置的实时监测和实时告警,有效降低了气田下古气藏开发风险,目前报警准确率为 63.79%。对于管线自动泄漏监测不足的部分,通过培训监管、人工干预、数据分析优化等方面加强人工巡检,实现人机互补,保证准确率。对历史数据进行分析,提取有关管道泄漏的特征,以优化监测算法和预警模型,提高监测准确性和效率。

参考文献:

- [1] 李建伟.分布式光纤传感技术在长输管道中的应用.中国仪器仪表,2025(12):53-56.
- [2] 党争光.长输天然气管道泄漏监测定位方法应用[J].技术研究,2022,29(07):61-63.
- [3] 邱志刚.分布式光纤传感技术在温度测量中的应用与进展[J].激光杂志,2025,46(12):12-20.
- [4] 魏辉龙.分布式光纤传感检测技术在锦州某油田的应用[J].电子制作,2025,33(24):108-110.
- [5] 张雨佳.基于时分复用的多路任意时间整形前端系统[J].中国激光,2024,51(23):31-41.