

## 基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统建设

郑伟

中国石化东北油气分公司, 吉林 长春 130000

**[摘要]**针对天然气管道运行过程中的泄漏、第三方入侵预警问题,本次研究引入了分布式光纤声波监测技术,首先从监测原理、系统构成及参数指标等角度出发,对其监测技术原理进行分析,以我国某管道为例,从设备安装、管道标定、设备运行等角度出发,开展基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统建设研究,最后,开展应用效果分析,为保障天然气管道的运行安全奠定基础。研究表明:基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统建设涉及设备安装、管道标定、设备运行等多个环节,设备的安装工作涉及设备布置、光纤熔接以及尾纤处理等内容,在管道标定的过程中,需要工作人员在管道沿线每个标志桩、测试桩以及转角桩位置处进行敲击,设备运行的过程中需要将分布式光纤声波监测软件系统并入企业网络和统一的管理平台中;基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统在应用的过程中可以产生较大的经济效益和社会效益。

**[关键词]**天然气管道;分布式光纤声波监测技术;预警系统;技术原理;系统建设

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15323

中图分类号: TN253

文献标识码: A

### Construction of Natural Gas Pipeline Early Warning System Based on Distributed Fiber Optic Acoustic Monitoring Technology

ZHENG Wei

Northeast Oil & Gas Branch of Sinopec, Changchun, Jilin, 130000, China

**Abstract:** In response to the problems of leakage and third-party intrusion warning during the operation of natural gas pipelines, this study introduces distributed fiber optic acoustic monitoring technology. Firstly, the monitoring technology principle is analyzed from the perspectives of monitoring principle, system composition, and parameter indicators. Taking a certain pipeline in China as an example, the construction of a natural gas pipeline warning system based on distributed fiber optic acoustic monitoring technology is studied from the perspectives of equipment installation, pipeline calibration, and equipment operation. Finally, the application effect is analyzed to lay the foundation for ensuring the safe operation of natural gas pipelines. Research has shown that the construction of a natural gas pipeline early warning system based on distributed fiber optic acoustic monitoring technology involves multiple aspects such as equipment installation, pipeline calibration, and equipment operation. The installation of equipment involves equipment layout, fiber fusion, and tail fiber processing. During the pipeline calibration process, personnel need to knock on each marker post, test post, and corner post along the pipeline. The distributed fiber optic acoustic monitoring software system needs to be integrated into the enterprise network and unified management platform during equipment operation; The natural gas pipeline early warning system based on distributed fiber optic acoustic monitoring technology can generate significant economic and social benefits in the application process.

**Keywords:** natural gas pipeline; distributed fiber optic acoustic monitoring technology; early warning system; technical principles; system construction

### 引言

天然气作为清洁高效的能源,其管道运输已成为能源输送的主要方式,但是,管道在长期运行过程中易受外部破坏、腐蚀泄漏、机械损伤及非法侵入等多种风险的影响,严重威胁管道的安全性和稳定性,为降低安全事故的发生率,提高管道运行的实时监测能力,构建高效和精准的天然气管道预警系统至关重要。近年来,分布式光纤声波监测技术(DAS)因其高灵敏度、长距离覆盖能力和实时在线监测的优势,在管道安全监测领域得到了广泛关注<sup>[1]</sup>。该技术基于光纤本身作为传感介质,通过瑞利散射原理感知外界声波信号的微小扰动,实现对管道周围环境变化的

实时监测<sup>[2]</sup>。相比传统的点式监测方法,DAS具备无源、抗电磁干扰、连续分布式监测等显著优势,能够对外部施工侵扰、第三方破坏、泄漏、地质灾害等潜在风险进行早期预警,从而提高管道安全防护水平。

### 1 分布式光纤声波监测技术原理分析

#### 1.1 监测原理

DAS是一种基于光纤本征散射特性的传感技术,主要依赖于光纤内部的瑞利散射效应。当光脉冲在光纤中传播时,光纤内部的微观不均匀性会导致部分光被散射回光源端,其中瑞利散射信号对环境扰动极为敏感。当外界产生声波、振动或其他机械应力作用在光纤上时,会引起光纤的微小形变,

使得散射光信号的相位、频率或强度发生变化。通过解调这些信号的变化，DAS 能够实现对沿光纤全长范围内的振动信号监测，并准确识别振动的来源和特征<sup>[3]</sup>。这种技术的核心优势在于其分布式特性，即利用一根普通通信光纤即可构建连续的传感网络，无需在管道沿线布设大量的离散式传感器，从而实现大范围、实时、高灵敏度的监测。

DAS 系统的实现主要依赖于相干探测和相位解调技术。激光脉冲通过光纤传输时，回波信号经过干涉分析，可用于解析振动的空间位置及特性。现代 DAS 系统通常采用相干光时域反射技术，通过高频率激光脉冲照射光纤并记录回波信号的相位变化，结合先进的信号处理算法，可有效过滤环境噪声，提高信号识别能力。这使得 DAS 技术能够精准检测管道周围的机械扰动，如第三方施工、车辆行驶、人员入侵、泄漏等，从而为天然气管道的安全预警提供有力支持<sup>[4]</sup>。

### 1.2 系统构成及参数指标

分布式光纤声波监测系统的核心组件包括处理主机、单模光纤和服务器，它们协同工作，实现对天然气管道的实时监测与预警。其中，处理主机是整个系统的控制与分析核心，负责完成激光发射、信号采集、数据解析和处理等关键功能，处理主机通过相干探测技术向光纤发送高频激光脉冲，并接收沿光纤散射回来的信号，分析信号的相位、频率和强度变化，从而获取沿管道的振动信息<sup>[5]</sup>。该设备结合先进的信号处理算法，能够精准定位振动源的位置，并识别不同类型的振动模式。

单模光纤是系统的传感介质，其作用类似于连续分布的传感器，在天然气管道沿线，通常会敷设光缆用于通讯，而分布式光纤声波监测系统仅需使用其中的一根光纤即可实现大范围、连续的监测。单模光纤能够感知外界振动对其造成的微小形变，并通过瑞利散射反馈信号变化，进而传输至处理主机进行解析。由于光纤本身具有抗电磁干扰、无源运行、寿命长等特点，相较于传统的点式传感器，其维护成本更低，且适用于长距离、大规模管道的实时监测。

服务器是系统的数据存储与远程监控中心，主要负责管道泄漏情况的实时监控、报警及应急处置功能，服务器与处理主机相连，接收处理主机传输的振动数据，并结合历史数据、地理信息系统等进行智能分析，进一步提高预警的准确性。服务器还能与远程监控系统集成，实现云端数据存储、远程访问和多终端监控，使运维人员能够随时随地掌握管道运行状态<sup>[6]</sup>。

本次在开展基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统建设过程中，DAS 的技术参数指标如下表 1 所示。

表 1 DAS 技术参数指标表

| 序号 | 内容      | 参数                  |
|----|---------|---------------------|
| 1  | 主机测量距离  | 单通道 50km, 双通道 100km |
| 2  | 测量原理    | 声波                  |
| 3  | 光功率损耗预算 | ≥12.5db             |

| 序号 | 内容                  | 参数  |
|----|---------------------|---|
| 4  | 采样分辨率               | 0.67m   |
| 5  | 采样频率                | 1~20KHZ   |
| 6  | 更新速率                | <1S   |
| 7  | 响应时间                | 2 分钟  |
| 8  | 通讯接口                | 100M 以太网接口/RJ45   |
| 9  | 主机工作电压              | AC220V, 50Hz  |
| 10 | 定位精度                | ±10m  |
| 11 | 光学接口                | E-2000  |
| 12 | 工作环境温度              | 5℃~+40℃   |
| 13 | 探测范围                | 人工作业/破坏性事件，可监测半径 R≥5m   |
| 14 |                     | 机械作业事件，可监测半径 R≥10m  |
| 15 |                     | 管道泄漏事件，可监测半径 R≥3m   |
| 16 | 多目标探测功能             | 具备  |
| 17 | 断纤报警功能              | 具备  |
| 18 | 振动信号展示              | 展示振动信号的频率、脉冲间隔、脉冲持续时间、脉冲上升速度、脉冲下降速度、脉冲中位数、脉冲高度、事件宽度、事件能量、事件持续时间、事件周期性、事件速度、事件加速度等信息 |
| 19 | 事件识别准确率             | 准确率≥95%   |
| 20 | 漏报率                 | 全周期：漏报率≤2%  |
| 21 | 误报率                 | 全周期：≤2 次/天  |
| 22 | 报警推送                | 短信、系统平台   |
| 23 | 设备功率                | 700 瓦，最大峰值 1500 瓦   |
| 24 | 供电                  | AC220V±10%，50Hz±5%；   |
| 24 | 机架式安装，主机可兼容单端口监测功能。 |   |

## 2 基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统建设

### 2.1 设备安装

在预警系统建设过程中，设备安装是确保系统稳定运行的关键环节，首先，DAS 设备需要通过货车运输至场站，并按照机房布线规范进行电源线路的铺设，确保设备电源连接至机柜间的 UPS 电源出口，以保证供电的稳定性。电源接线必须由具备资质的专业电工操作，严格按照安全规范执行，包括导线的选型、布线规范及颜色标识等，确保电路系统安全可靠。在接线前，需要进行电源断电检查，并做好安全警示标志。所有导线连接点均需压接牢固，防止绝缘破损、线芯外露或松动现象，以保证电路长期稳定运行。

光缆部分的安装需要严格控制损耗，确保光纤信号传输的高效性和稳定性，光缆敷设时，应遵循弯曲半径要求，以避免损耗增加，同时控制熔接点的数量，确保无接续光缆长度不低于 3km。光纤接续主要采用熔接方式，并尽可能减少插入损耗，使单点熔接损耗控制在 0.05dB 以内。光纤损耗测试是确保系统性能的重要步骤，通过分段测试长管道和平管道沿线的光缆损耗情况，筛选出损耗最小、

质量最优的光芯作为 DAS 监测光纤。对于损耗较大的光缆段,需要修复后再熔接,保证整体光纤链路畅通无阻。光缆头端接入光纤配线架,实现信号的连接与分配,而尾端则安装室外光缆接续盒,以降低信号反射并增强抗干扰能力。安装完成后,光缆需埋入地下以提供物理保护,若现场条件受限,可将尾端光纤盘绕成 3mm 直径的光圈,减少损耗并优化光信号传输质量。

## 2.2 管道标定

在管道预警系统建设过程中,线路标定是确保系统精确定位异常事件的关键步骤,标定工作主要依托 GIS 数据,对光纤与管道的空间位置进行精确匹配,提高预警系统的准确性和可靠性。在设备安装完成后,需根据用户提供的 GIS 坐标,对光纤沿线位置进行标定,并确保其与管道的实际位置对应。按照设计要求,对管道的每个转角桩进行详细的 GIS 坐标测量和记录,确保整个管道监测范围内的地理信息完整无误。标定完成后,需开展模拟报警实验,以验证系统的报警精度和响应能力。模拟测试可通过在不同管道位置制造可控振动信号,观察系统是否能够精确定位并触发预警。实验过程中,需对比系统检测位置与实际振动发生位置,确保误差控制在合理范围内,并调整算法参数以优化系统性能。

## 2.3 设备运行

在设备运行阶段,在信息中心机房内部署高性能服务器,并搭建综合管理平台,实现油气管道泄漏监测与防护功能。该平台充分利用企业现有的网络资源,并与企业统一认证系统无缝对接,确保数据安全性和管理效率。作为系统的指挥与监控中枢,该平台支持远程访问和集中管理,便于运维人员随时掌握管道状态<sup>[7]</sup>。分布式光纤声波监测系统 DAS 作为独立子系统,通过 TCP/IP 协议与其他平台组件交互,并集成至勘探开发业务平台,以网站挂接方式新增 DAS 菜单,用户可通过身份认证登录,获得个性化操作体验。

设备安装调试完成后,系统进入试运行阶段,以检验长期运行的稳定性、可靠性和应用效果。在试运行过程中,针对不同地理环境、埋深及潜在风险区域,开展模式识别优化测试,包括人工挖掘、机械挖掘和气体泄漏三类事件的标定。通过现场实验采集振动及声波信号,并设定振动范围、时间、能量及频率等参数,初步建立各类事件的报警阈值。最终,将所有测试数据封装成振动信号识别模型,并植入系统平台,同时引入二次滤波功能,以提升误报过滤能力和报警精度。

## 3 预警效果分析

基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统建设,不仅在经济效益方面具有显著价值,同时也带来了深远的社会效益。首先,该系统能够实时监测管道周围的环境变化,精准识别潜在风险,有效减少安全事故的发生,避免因泄漏和非法施工等因素造成的经济损失,每次事故的避免可节约约 200 万元的经济损失。该系统显著提高了管道的安全防护水平,能够迅速识别损伤位置,缩

短维修响应时间,提升管道运行的可靠性,确保能源输送的高效稳定<sup>[8]</sup>。管道泄漏往往会对生态环境造成严重污染,而该系统的应用可降低管道泄漏风险,减少有害物质对土壤和水源的污染,推动绿色环保发展。

在社会效益方面,该系统的应用能够提升长输管道的智能化水平,使管道管理更加高效、安全,符合行业先进标准,推动企业向智慧化运维方向发展。通过分布式光纤监测系统,能够实现对管道的全方位监测,提前预警非法入侵和泄漏事件,保障管道安全运行,保护居民生命财产安全。系统的实时远程监控功能减少了对人工巡检的依赖,实现了从传统的被动响应模式向主动预防模式的转变,提高了突发事件的处置效率。同时,系统的应用有助于企业管网管理模式的升级,提升整体安全防范能力,为国家能源安全提供更有力的保障,促进经济的稳定发展,并营造和谐、安全社会环境。

## 4 结论

本研究围绕基于分布式光纤声波监测技术的天然气管道预警系统建设展开,分析了其监测原理、系统构成及应用价值,并以实际工程为例,探讨了设备安装、管道标定及运行测试等关键环节。研究表明,该系统能够实现对管道沿线的全方位、实时监测,具有较高的灵敏度和精度,为天然气管道的安全运行提供了可靠的技术支持。通过优化光纤布设、信号处理及模式识别,系统有效提升了对非法入侵、机械施工及泄漏事件的预警能力,显著降低了事故发生的风险。

### [参考文献]

- [1]王洪超,马云宾,李淑娟,等.基于光纤声波传感器的管道泄漏监测技术研究[J].山东工业技术,2024(5):40-45.
  - [2]冼峰.基于分布式光纤声波传感技术的管道泄漏探测应用[J].净水技术,2024,43(8):154-159.
  - [3]曹鹏涛,韦义师,李轶,等.基于分布式光纤声波传感技术(DAS)的地下管道、隧道侵入监测方法研究[J].物探化探计算技术,2025,47(1):104-116.
  - [4]王子恒,景洪.分布式光纤声波传感的管道泄漏监测指标分析[J].中国仪器仪表,2021(8):61-65.
  - [5]张丽,周巍.集输管道分布式光纤声波泄漏监测系统的设计与试验[J].油气田地面工程,2021,40(8):57-64.
  - [6]纪然然,宛立君,吴梦实.分布式光纤声波传感技术在PCCP管道监测中的应用[J].声学与电子工程,2021(2):15-20.
  - [7]林融冰,曾祥方,包丰,等.基于分布式光纤声波传感技术的管道侵入识别与定位[J].油气储运,2021,40(5):545-553.
  - [8]王辰,刘庆文,陈典,等.基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J].光学学报,2019,39(10):119-125.
- 作者简介:郑伟(1993.9—),男,汉族,黑龙江庆安人,本科,专业:油气储运工程,工程师,研究方向长输管道及输气场站。