

# 基于光纤传感的超临界二氧化碳管道泄漏定位 与定量监测方法研究

陆月 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 超临界二氧化碳管道作为碳捕集利用与封存技术中重要的传输载体, 而泄漏监测则是确保管道安全稳定运行的关键。本文提出依托光纤传感针对管道泄漏进行定位以及定量监测方法, 此方法借助对管道表面光纤合理优化布设、构建管道泄漏传感响应模型, 达成对管道泄漏点精确无误定位以及对泄漏量精准的定量评估。这种方法高度契合超临界二氧化碳管道介质特点以及复杂工作状况, 为管道在整个生命周期内的安全监测给予高效的技术途径。

**关键词:** 光纤传感; 超临界二氧化碳管道; 泄漏定位; 定量监测

**中图分类号:** TE88; TH815 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0154-03

## Research on Leakage Localization and Quantitative Monitoring Methods for Supercritical Carbon Dioxide Pipelines Based on Optical Fiber Sensing

Lu Yue (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** Supercritical carbon dioxide pipelines serve as critical transmission carriers in carbon capture, utilization, and storage technology, with leakage monitoring being essential for ensuring the safe and stable operation of pipelines. This paper proposes a method for the localization and quantitative monitoring of pipeline leaks based on optical fiber sensing. By optimizing the layout of optical fibers on the pipeline surface and constructing a sensing response model for pipeline leakage, this method achieves precise localization of leak points and accurate quantitative assessment of leakage volume. The approach is highly compatible with the characteristics of the supercritical carbon dioxide medium and the complex working conditions of pipelines, providing an efficient technical solution for safety monitoring throughout the pipeline's lifecycle.

**Keywords:** optical fiber sensing; supercritical carbon dioxide pipeline; leakage localization; quantitative monitoring

超临界二氧化碳管道在全球能源转型与碳减排战略中处于核心位置, 其安全且稳定运行状况直接影响着碳捕集利用与封存工程的总体效能。管道身为高压介质输送的关键载体, 一旦发生泄漏, 不但会致使大量资源遭受损耗, 而且可能带来环境破坏以及安全风险, 构建高效且可靠的管道泄漏监测体系成为该行业的核心需求。光纤传感技术拥有抗干扰性能强、响应速度快、能够进行分布式覆盖等优势, 契合长距离管道的监测要求。本文着重关注超临界二氧化碳管道的运行特性情况, 深度剖析光纤传感于管道泄漏监测中的作用原理机制, 优化管道与传感系统适配设计、监测方法构建以及数据处理流程, 其目的在于达成对管道全长度范围、全天候时段、高精度标准泄漏定位以及定量监测, 为管道安全运行维护给予可靠的技术支撑。

### 1 超临界二氧化碳管道泄漏光纤传感监测机理

#### 1.1 管道泄漏的传感信号响应特性

当超临界二氧化碳管道发生泄漏情况时, 原本处于高压状态介质会在极短的瞬间被释放, 这一过程会引发管道内部的压力急剧下降、温度出现突然的变

化, 泄漏产生的气流会对管道的壁面形成冲击并导致振动。这些物理方面的变化会借助管道壁面迅速地传递到铺设在管道上的光纤传感器, 光纤传感系统能够敏锐地感知到管道表面出现的温度不稳定波动、应力和应变的改变以及周围介质在折射率上存在的差异情况, 将这些物理量所产生的变化转化成为光信号的相位出现偏移、光的强度发生衰减或者频率产生漂移的现象。管道表面不同区域的信号特征会因泄漏位置的不同而出现差异, 而泄漏量的大小会直接对信号变化的幅值以及速率产生影响, 管道的直管段、接口处以及弯管段, 其泄漏信号的响应规律有着显著的区别, 这些特征为精准定位管道泄漏点以及定量评估管道泄漏情况提供了关键依据。光纤传感器具备对管道微小形变和温度变化高度灵敏的特性, 保证能够迅速捕捉到泄漏信号并准确识别, 为后续开展监测分析工作奠定了基础。管道泄漏的传感信号响应特性, 对超临界二氧化碳管道工程开展以及管道的使用有极大的积极作用。

#### 1.2 光纤传感与管道结构的适配原理

超临界二氧化碳管道的材质特性、管径规格、埋

深条件以及敷设环境等要素,会直接对光纤传感信号的传输效率和监测精度产生影响,光纤传感系统必须与管道结构达成深度适配。针对管道不同部位所具备的结构特点,采取差异化的光纤布设方法,在管道的直管段可采用螺旋缠绕亦或是平行粘贴的方式来固定光纤,以此保证传感信号能够在管道长度方向实现均匀采集,同时增强光纤和管道壁面的贴合程度,进而提高信号传递的效率。在管道弯管段要通过对光纤曲率半径进行优化、加密传感点的间距,防止管道弯曲变形给光纤带来机械损伤,同时对弯管处的信号衰减进行补偿,确保有效捕捉泄漏信号。在管道阀门接口等关键部位,采用多维度光纤环绕布设方式,加强对管道应力集中区域的监测覆盖范围。光纤传感与管道结构的适配原理与管道结构的精确匹配布置方案,极大地展现了光纤传感分布式监测长处,达成了对管道整个区域毫无遗漏的监测覆盖,确保在不同工作状况下管道泄漏监测的稳固性和可信度。

## 2 管道泄漏定位与定量监测方法构建

### 2.1 管道泄漏定位的光纤传感实现路径

管道泄漏定位工作将光纤传感所具备的分布式监测特性当作核心要素,将光时域反射(OTDR)技术的长处与光频域反射(OFR)技术优点相结合,搭建与超临界二氧化碳管道相适配的定位模型。通过向铺设在管道表面的光纤内部注入稳定不变的探测光信号,一旦管道出现泄漏状况,泄漏点位置管道物理状态改变会使得光纤产生局部损耗或者反射现象,凭借光信号在泄漏点处的反射特点以及散射特性,获取光信号的传输时间差值、幅值的变动情况以及相位的偏移数据。将光纤于管道上的实际铺设长度以及光信号在光纤中的传播速度进行结合,借助算法开展计算,进而得到泄漏点与监测起始点之间的距离,对泄漏位置作出初步判定。鉴于超临界二氧化碳管道具有长度偏长、信号容易遭受环境干扰的状况,引入管道的地理信息数据,将定位所得结果同管道的实际铺设路线、转弯位置、接口分布等相关信息加以整合,对定位误差予以修正。与此同时,管道泄漏定位的光纤传感实现路径,能够优化光信号的调制方式以及放大技术,使信号抗干扰能力得到提升,保证长距离管道泄漏定位的精度能够被控制在合理的区间内,达成对管道泄漏点的准确锁定,及时对管道泄漏点进行修复和处理,确保超临界二氧化碳管道的使用质量和效果。

### 2.2 管道泄漏定量监测的参数校准方法

管道泄漏定量监测将泄漏量和传感信号特征参数的相关性当作核心要点,借助实验标定以及理论建模构建定量评估的模型。首先在模拟管道实验平台中,

依据实际超临界二氧化碳管道的管径、压力、温度等相关参数,搭建与工程实际状况相契合的实验环境,在管道不同位置处设置规格各异的泄漏口,对不同泄漏量的泄漏情形进行模拟,采集各个场景下相应的光纤传感信号数据,进而构建泄漏量和光信号幅值变化、频率偏移量、相位变化率等特征参数的对应关系数据库。其次凭借数据库中数量庞大的数据,运用数值拟合以及机器学习的算法搭建管道泄漏定量监测的模型,确定传感信号特征参数和泄漏量二者间的数学联系。在实际的工程运用中,将管道实时运行的参数(例如介质的压力、温度、流速)以及环境参数结合起来,对定量模型开展动态的校准工作,排除工况改变以及环境干扰给定量结果带来的影响。最后采用管道泄漏定量监测的参数校准方法,能够达成对管道泄漏量的实时且精确的定量评估,给管道泄漏应急处理提供准确的数据支持,帮助运维人员迅速制定处理方案,确保处理方案的全面性和可行性,将完善的处理防范落实到实际当中,保障管道泄漏应急处理的质量。

## 3 管道泄漏监测系统优化设计与实践适配

### 3.1 管道光纤传感监测系统的硬件配置

管道光纤传感监测系统的硬件配置应当充分契合超临界二氧化碳管道的运行要求,以终端处理平台、数据采集单元、信号解调模块以及光纤传感器为核心,搭建高效且稳定的监测硬件架构。光纤传感器选取具备耐高压、耐高温、抗腐蚀特性的特殊光纤,以此保证在管道高温高压的工作环境中能够长时间稳定地运转,并且拥有高灵敏度的特质,察觉管道细微的泄漏信号波动。信号解调模块运用高精度的解调手段,增强对微弱光信号的解析本事,精确提取光强、频率、相位等重要特征参数;数据采集单元拥有高速数据传输和大容量存储的性能,可以实时捕捉并且保存管道泄漏过程中的动态信号数据,防止数据出现丢失的情况;终端处理平台整合了可视化、数据处理、分析及预警等功能,能够迅速处理传感数据,进而输出定量数据、泄漏定位结果以及预警讯息。与此同时,管道光纤传感监测系统具备配置冗余设计以及故障自诊断的功能,在对管道开展监测工作期间,一旦发生传感器出现故障,或者信号传输出现中断等状况,管道光纤传感监测系统可以迅速地故障发生的位置进行确定,并且转换至备用的监测通道,以此确保管道监测工作持续进行以及监测结果可靠程度。

### 3.2 管道监测数据的处理与优化方法

管道监测数据处理质量会直接对泄漏监测的精准度产生影响,所以搭建科学且高效的数据处理流程。对于在管道运行期间,因环境温度改变、振动干扰等

因素而生成噪声信号,运用小波变换以及自适应滤波技术来开展降噪作业,去除无关的干扰信号,让管道泄漏所产生的特征信号更为凸显。借助提取光信号的幅值变化比率、频率偏移数值、相位累计变动等关键的特征参数,构建出多维度的特征向量,从而提高管道泄漏信号和干扰信号间的区分程度,增强泄漏识别的精确性。

引入多传感器数据融合技术,将管道不同位置的传感数据、管道实时的运行参数以及历史监测数据结合起来,开展多源信息的综合分析判断,降低单一传感器的监测误差,提高管道泄漏定位以及定量结果的可靠程度。与此同时,通过对管道监测数据进行处理,对处理方法进行优化,构建数据质量评估体系,针对采集到的有关管道监测的数据展开实时性的校验工作,剔除异常的数据,以此保证数据具备完整与准确的特性,为管道泄漏监测工作提供具有较高质量的数据支持。

#### 4 管道泄漏监测方法的实践应用与效能验证

##### 4.1 模拟管道实验中的应用验证

在超临界二氧化碳模拟管道实验平台中,对所提出的监测方法展开全方位的应用验证。实验管道是按照实际的工程标准搭建的,其管径选取了较为常用的DN300规格,管道的压力、温度等运行参数和实际的超临界二氧化碳管道是相同的,在管道的直管段、阀门接口处以及弯管段分别设置了泄漏模拟装置,以此模拟具有不同泄漏量(0.1~1.0m<sup>3</sup>/h)的泄漏状况。在管道表面依据优化后的布设方案敷设光纤传感系统,收集各个泄漏场景下的传感信号数据,运用本文所提出来定位以及定量方法开展分析处理工作。验证结果表明,模拟管道实验中的应用验证方法能够在3s之内迅速对管道泄漏事件作出响应,将泄漏点定位的误差控制在±0.8m的范围内,让泄漏量定量评估的误差不超出4.5%,在管道不同部位、不同泄漏量的场景中,该方法均展现出稳定的监测精准度,充分证实了方法准确性、时效性以及可靠性。

##### 4.2 工程场景中的适配性与实用性

从实际超临界二氧化碳管道工程的运行特性出发,深入剖析监测方法的适配度与实用性。此方法所运用的光纤传感系统拥有出色的抗腐蚀能力、耐高温性能以及良好的环境适应能力,能够在管道埋于地下、置于水下、暴露于露天等多样且复杂的敷设环境中正常工作,光纤材料质地轻盈,便于敷设,不会对管道的正常运转产生干扰。监测系统采用分布式设计,能够达成对长距离管道的统筹监测,无需在管道沿线大量增设监测站点,极大降低了工程建设以及运维方面

的成本;该系统能够迅速输出泄漏定位及定量结果,为管道泄漏的应急处理争取充裕的时间,减少因泄漏而导致的资源损耗、环境损害以及安全隐患。另外,监测系统能够和管道运维管理平台实现无间隙对接,达成监测数据的即时共享、远程控制管理以及历史情况追溯,帮助运维工作人员全方位了解管道的运行状况,提高管道运维的智能程度,给超临界二氧化碳管道工程的大规模应用提供了有力的支撑,增强超临界二氧化碳管道工程的适配性与实用性。

#### 5 结论

依托光纤传感的超临界二氧化碳管道泄漏定位和定量监测办法,借助深度探寻管道泄漏时传感信号的响应特征,搭建与管道构造深度契合的监测架构、科学且高效的定位和定量举措以及精确数据分析流程,达成了对管道泄漏点位迅速定位和泄漏量的即时定量评估。此办法充分施展了光纤传感技术所具备的分布式、灵敏度高、抗干扰能力强等长处,与超临界二氧化碳管道的运行工况以及结构特性完美契合,在模拟管道实验中以及工程场景适配分析中,呈现出较高精准度、时效性和实用性。其应用可切实增强管道泄漏监测的效率以及精度,为超临界二氧化碳管道达成安全且稳定的运行状况给予值得信赖的保障,这对于促使碳捕集利用与封存技术向规模化方向发展具备关键意义。在未来,进一步地对光纤传感材料性能以及数据处理算法加以优化,将人工智能技术结合起来,达成对管道泄漏的智能化预先判断以及自适应监测,持断地提高管道监测智能化程度,为管道全生命周期的安全管理提供全面的技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 吴全,沈珏新,杜小均,李育天,张景昕,艾勇.超临界二氧化碳运输中的增压问题分析[J].油气与新能源,2022.
- [2] 赵德材,秦政,刘惠民.超临界二氧化碳布雷顿发电系统热力循环分析[J].能源与节能,2018(06):2-6.
- [3] 郭秀丽.东方1-1气田CO<sub>2</sub>储存与输送方案优化分析[D].东营:中国石油大学(华东),2009:1-120.
- [4] 陈兵,崔维刚,郭焕焕,等.风速对超临界-密相二氧化碳泄漏扩散特性的影响[J].科学技术与工程,2019,19(34):144-149.
- [5] 黄雯旭.超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环参数分析[D].中国科学技术大学,2018.
- [6] 李敏,李玉星,刘翠伟,等.超临界CO<sub>2</sub>管道泄漏减压波及温降特性实验研究[J].油气储运,2020,39(8):854-861.