

# 基于光纤传感技术的燃气管网泄漏预警系统研究

王 锋 周 秀 (西安秦华燃气集团有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 随着城市燃气供应网络的持续扩展, 管道老化、地质沉降和人为破坏等因素导致的燃气泄漏事故已成为重大公共安全隐患。传统检测手段在实时性、监测范围和抗干扰能力等方面存在显著局限, 难以满足现代城市管网全域监控的迫切需求。光纤传感技术凭借其本质安全、长距离监测和抗电磁干扰等独特优势, 为建立全天候、智能化的燃气管网安全预警体系提供了创新解决方案。本文立足光纤传感技术, 探索其在燃气管网泄漏预警系统中的应用优势, 进而探讨其实际应用, 以期推动城市燃气安全管理向数字化、智能化方向转型升级。

**关键词:** 光纤传感技术; 燃气管网; 泄漏预警; 分布式监测

中图分类号: TU996.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 022-0133-03

## Research on Gas Pipeline Leakage Early Warning System Based on Optical Fiber Sensing Technology

Wang Duo, Zhou Xiu (Xi'an Qinhua Gas Group Co., LTD., Xi'an Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** With the continuous expansion of the urban gas supply network, gas leakage accidents caused by factors such as pipeline aging, geological settlement and human damage have become major public safety hazards. Traditional detection methods have significant limitations in terms of real-time performance, monitoring range and anti-interference ability, and are difficult to meet the urgent needs of full-domain monitoring of modern urban pipe networks. Optical fiber sensing technology, with its unique advantages such as intrinsic safety, long-distance monitoring and anti-electromagnetic interference, provides an innovative solution for establishing an all-weather and intelligent safety early warning system for gas pipeline networks. Based on optical fiber sensing technology, this paper explores its application advantages in the gas pipeline leakage early warning system, and then discusses its practical application, with the expectation of promoting the transformation and upgrading of urban gas safety management towards digitalization and intelligence.

**Key words:** Optical Fiber Sensing technology Gas pipeline network Leakage early warning Distributed monitoring

城市地下燃气管网作为能源输送的动脉, 其安全运行直接关系民生保障与生态环境安全。近年来, 因泄漏引发的爆炸、中毒及温室气体排放问题频发, 暴露出传统点式检测技术在复杂管网环境中的适应性缺陷。尤其面对隐蔽性泄漏、微小渗漏及长距离管线的动态变化, 现有技术难以实现全生命周期、多维度的连续状态感知。光纤传感技术通过将光波介质与物理空间深度融合, 可突破传统电类传感器的空间分辨率限制, 形成覆盖管网全域的“神经感知网络”, 重构了泄漏信号的捕获与解析模式, 更为构建多尺度耦合的燃气安全防护体系开辟了新维度, 契合智慧城市基础设施数字化运维的演进趋势。

### 1 光纤传感技术概述

光纤传感技术是以光导纤维为信息载体, 通过检测光波在传输过程中受外界环境(如温度、应变、振动等)调制引起的参数变化, 实现物理量感知的新型监测技术。在燃气管网泄漏场景中, 泄漏引发的管道振动、气体扩散或温度异常等特征, 可对敷设于管壁或伴行光纤中的光信号产生扰动, 通过解调设备捕获并分析此类扰动信号, 即可重构泄漏事件的空间位置与强度信息<sup>[1]</sup>。

### 2 基于光纤传感技术的燃气管网泄漏预警系统的优势

#### 2.1 分布式全时域监测能力

光纤传感技术通过单根光纤即可实现长距离( $>50\text{km}$ )、高空间分辨率( $\leq 1\text{m}$ )的连续监测, 突破了传统点式传感器需密集布设的局限性。基于相位敏感型光时域反射( $\Phi$ -OTDR)的分布式声波传感技术, 可实时捕获管道沿线由泄漏引发的振动信号, 并通过时-空域信号关联算法精确定位泄漏点, 空间定位误差小于 $\pm 5\text{m}$ 。同时, 拉曼散射分布式温度传感可同步监测管道周边温度场异常变化, 形成振动-温度双物理量协同感知机制, 显著提升微小泄漏的早期识别率。

#### 2.2 高灵敏度与抗干扰特性

光纤传感系统对管道振动信号的检测灵敏度可达纳米级位移量, 可识别由 $0.1\text{MPa}$ 以下微泄漏引发的管道壁振动。其采用光波作为信息载体, 天然具备抗电磁干扰、防爆和耐腐蚀特性, 适用于高压变电站、雷区等复杂电磁环境下的燃气管网监测。此外, 通过自适应噪声抑制算法和模式识别技术, 可有效区分泄漏信号与施工振动、交通荷载等环境干扰, 实现信噪

比  $>20\text{dB}$  的高可靠性报警<sup>[2]</sup>。

### 2.3 多参量融合诊断能力

系统通过融合振动、温度、应变等多维度光纤传感数据，构建基于深度神经网络的泄漏特征提取模型。例如，结合 DAS 的振动频谱特征（0.1–1kHz 频段能量突变）与 DTS 的温度梯度异常（ $\Delta T > 0.5^\circ\text{C}/10\text{m}$ ），可建立泄漏事件的多参量联合判据，将误报率降低至 0.1 次 / 千公里 · 天以下。同时，光纤光栅阵列可嵌入管体关键节点，实时监测管道应力集中区域的微应变变化（精度  $\pm 1\mu\epsilon$ ），为泄漏风险评估提供力学状态参量，形成“声–热–力”多维感知的智能诊断体系。

## 3 光纤传感技术在燃气管网泄漏预警系统的应用

### 3.1 分布式声波传感的管道振动泄漏实时定位

随着城市地下燃气管网密度的持续增加，由第三方施工破坏、管材老化或地质沉降引发的泄漏风险已成为威胁公共安全的核心问题。传统振动监测手段因传感器布设密度不足、抗干扰能力弱等缺陷，难以满足长距离管线全时域动态监测需求。分布式声波传感技术基于光纤的物理特性，将整条管线转化为连续分布的振动感知单元，为泄漏事件的实时捕捉与精确定位提供了技术基础<sup>[3]</sup>。

DAS 系统采用相位敏感型光时域反射原理，通过激光脉冲在单模光纤内传播时产生的瑞利散射信号相位变化，解析管道沿线振动事件的时空特征。工程部署中，传感光纤沿燃气管线同沟敷设或紧贴管壁固定，确保机械振动信号的高效耦合。当管道发生气体泄漏时，高压燃气喷发引发的宽频振动波通过管壁传递至光纤，引起光纤局部区域的微应变扰动。系统硬件由窄线宽激光器、高速光电调制模块、环形器及高灵敏度探测器构成，结合边缘计算设备实现信号采集与处理的同步优化。

在信号处理层面，采用小波包分解算法对原始振动数据进行多尺度分析，提取与泄漏特征匹配的频带能量分布。此外，通过训练深度卷积神经网络模型，系统能够有效识别泄漏振动波形与交通荷载、机械施工等环境噪声的频谱差异，提升事件分类准确性。最后，定位算法基于振动波在光纤中的传播速度与时间延迟，结合管线地理信息系统坐标映射，完成泄漏点空间坐标的动态解算。

### 3.2 拉曼散射测温的微小渗漏早期识别

在复杂城市地下空间环境中，燃气管网微小渗漏的早期识别面临热扩散效应弱、环境干扰强等核心挑战。拉曼散射分布式温度传感技术通过建立高精度温度场动态模型，实现了对泄漏引发的局部热力学异常的捕获与解析，为地下管网安全监测提供了非侵入式

解决方案。DTS 系统的工程部署需针对燃气管网特性进行定制化设计。传感光纤采用铠装抗拉结构，沿管线外壁螺旋缠绕或平行敷设于管沟底部，确保与管道表面热交换效率达到最优。

系统采用双波长激光脉冲交替注入多模光纤，通过测量反斯托克斯与斯托克斯散射光的强度比，构建空间分辨率达 1m 的连续温度剖面。当甲烷气体从管道微孔渗漏时，绝热膨胀效应导致泄漏点周围形成直径 0.5–2m 的低温区，其温度梯度可达  $0.3\text{–}1.2^\circ\text{C}/\text{m}$ ，显著区别于自然土壤热传导形成的温度分布。硬件系统集成高稳定性脉冲激光源、双通道光子计数模块及抗辐射光纤链路。激光脉冲在传感光纤中传输时，每纳秒时间切片对应 0.1m 空间分辨率，后向拉曼散射光经窄带滤光片分离后，由超导纳米线单光子探测器实现单光子级信号捕获。为抑制土壤含水量变化引起的热噪声，系统嵌入自适应基线校正算法，实时补偿环境背景温度波动。

此外，温度场解析采用时空联合分析方法，基于移动窗口标准差算法，系统计算相邻 10m 区间内的温度离散度，当连续三个采样窗口的标准差异常值超过设定阈值，触发疑似泄漏报警。针对瞬态泄漏事件，引入长短时记忆网络对温度时间序列进行特征提取，通过训练实际泄漏场景的数据集，模型可识别持续 10 分钟以上、温降幅度  $> 0.2^\circ\text{C}$  的渗漏模式<sup>[4]</sup>。最后，系统构建泄漏点温度扩散模型，结合管道压力、管径参数与土壤热导率数据，通过有限元仿真反演泄漏源位置。对于稳态泄漏，温度异常区域呈现椭圆形分布，其长轴方向与气体扩散路径一致；系统利用 Hough 变换检测温度等值线几何特征，结合 GIS 坐标映射实现亚米级定位精度。

### 3.3 光纤光栅阵列的管道应力集中监测

随着城市燃气管网规模不断扩大和地下空间开发日益密集，管道因地质沉降、机械载荷或施工扰动引发的应力集中问题已成为泄漏防控的核心挑战。光纤光栅阵列技术通过高精度、分布式应变测量能力，构建起覆盖管网全生命周期的应力监测体系，在工程实践中展现出独特的技术价值。

在具体部署中，光纤光栅传感器以定制化封装工艺植入燃气管道的防护层与管壁之间，沿管线轴向每隔 10–20m 设置监测节点，形成连续的空间感知阵列。每个传感单元通过波长解调技术，可实时捕捉管道表面  $0.5\text{–}2\mu\epsilon$  量级的细微应变变化，其灵敏度相当于监测到管道直径发生百万分之一的形变。施工过程中，技术人员采用热熔焊接工艺将传感器与管道表面耦合，确保在  $-40^\circ\text{C}$  至  $120^\circ\text{C}$  环境温度下仍能保持

稳定的应变传递效率。

实际运行的系统架构分为三层：前端由抗电磁干扰的铠装光缆连接传感器阵列，中继站部署边缘计算单元完成原始信号预处理，中心平台则通过机器学习算法解析应变分布图谱。当某段管道出现应力异常时，系统不仅能定位应力集中点的精确位置（定位误差  $\pm 0.5\text{m}$ ），还可通过应变梯度分析判断应力来源，例如区分是地基不均匀沉降导致的持续载荷，还是瞬时机械冲击引发的动态应力。这种区分能力为应急处置提供了关键决策依据。相较于传统点式传感器，光纤光栅阵列的连续监测特性有效解决了盲区问题。其每公里超过 50 个测量点的采样密度，可完整呈现管道应力传导路径，特别适用于弯头、焊缝、穿越段等应力敏感区域的三维力学状态评估。

### 3.4 多模光纤传感网络协同诊断与泄漏等级评估

多模光纤传感网络通过异构传感器数据融合与智能决策算法，构建振动-温度-应变多参量协同诊断体系，能够有效实现泄漏事件的全要素解析与风险等级量化评估。该系统采用分层式数据融合架构，底层感知层由分布式声波传感光纤、拉曼测温光纤及光纤光栅阵列组成，分别沿管线轴向、环向及关键节点布设。分布式声波传感光纤以 200Hz 采样率捕获 0.1-5kHz 振动频谱，DTS 光纤每 10s 更新全线温度场分布，光纤及光纤光栅阵列以 100Hz 频率监测 80 个预设点位的微应变变化。传输层通过时分/波分复用技术，将异构数据流整合至边缘计算节点，时间戳同步精度  $\leq 1\text{ms}$ ，确保多源数据的时空对齐。

在系统构建中，涵盖管网拓扑结构、材料属性及流体动力学参数的三维虚拟映射，实时接收多模传感数据并执行物理场耦合仿真。当某管段振动能量、温降梯度与应变累积量同步超过设定阈值时，触发多参量联合诊断流程。振动信号经小波包分解提取 50-800Hz 特征频段能量值，温度场采用移动窗口标准差算法识别局部低温异常区，应变数据通过主成分分析筛选敏感模态分量。三者的时空关联特征输入图卷积网络，基于管网拓扑结构构建节点一边关系矩阵，输出泄漏概率置信度<sup>[5]</sup>。

### 3.5 城市复杂环境下的抗干扰监测系统部署

在燃气泄漏多物理场耦合监测场景中，传统单维度数据分析难以揭示泄漏事件的多尺度关联特征。多模光纤传感网络通过构建时空关联的知识图谱与因果推理引擎，能够实现泄漏事件的跨模态协同诊断与风险量化评估，推动管网安全管理从“单一报警”向“智能决策”跃迁。知识图谱构建以管网拓扑本体为核心，集成分布式声波传感的振动波形特征、拉曼测温的温

度梯度分布、光纤光栅阵列的应变演化曲线三类异构数据流。系统定义 12 类实体与 28 种关系，通过图嵌入算法将传感器时序数据映射为高维向量空间，建立泄漏特征与管网结构的语义化关联。例如，某管段 DAS 信号在 200-400Hz 频段的能量突增，若同步检测到下游 3m 处 DTS 温降梯度达  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，且相邻 FBG 监测点环向应变增量超过  $200\mu\epsilon$ ，则触发“机械损伤-泄漏扩散”事件链推理。

因果推理引擎采用动态贝叶斯网络架构，分三层解析泄漏演化机制：物理层融合波导方程与热传导模型，计算振动波传播路径与温度场扩散范围；数据层通过时序对齐算法匹配多传感器事件戳，提取跨模态因果特征（振动-温降滞后时间）；决策层构建泄漏等级模糊推理树，输入参数包含振动能量积分温降持续时间及应变累积速率，输出五级风险指数。最后，系统将管网抽象为图结构（节点=管段，边=连接关系），通过消息传递机制聚合多跳邻居传感器特征，定位异常传播路径的初始激发点。

## 4 结束语

光纤传感技术通过分布式声波定位、温度场解析及应力集中监测等多维度感知手段，构建了燃气管网泄漏预警的智能化防护体系。其高灵敏度、抗干扰与多参量融合特性，显著提升了微小泄漏的早期识别率与定位精度，为城市燃气安全提供了全天候、全时域的监测保障。随着数字孪生与人工智能技术的深度融合，未来光纤传感系统将进一步优化泄漏风险评估模型，推动燃气管网安全管理向预测性维护与自适应决策方向演进，为智慧城市基础设施的韧性提升注入新动能。

## 参考文献：

- [1] 毛宁宁. 城市燃气管网运行重大安全隐患分析与防范对策研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(04):73-75.
- [2] 韦育强, 夏怡, 尹生开, 等. 燃气泄漏智能感知技术在城市燃气管网安全运行中的应用 [J]. 低碳世界, 2025, 15(02):52-54.
- [3] 李晓虎. 基于 PKS 软件的燃气输配管网安全运行系统设计 [J]. 自动化应用, 2025, 66(02):265-267.
- [4] 宫园园, 王仲禹, 黄培健, 等. 城市燃气管网在线仿真系统开发与应用 [J]. 煤气与热力, 2024, 44(12):42-46.
- [5] 侯龙飞, 李润婉, 朱丽榕, 等. 燃气管网泄漏对危化企业的风险研究 [J]. 科学技术创新, 2021(13):63-65.

## 作者简介：

王铎（1994-），男，汉族，内蒙古包头人，大学本科，助理工程师，研究方向：燃气工程。