

# 油气管道泄漏检测技术的选择和应用

蔡晓龙<sup>1\*</sup>, 刘永军<sup>2</sup>, 董晓琪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

<sup>2</sup>中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

Email: \*812301746@qq.com

收稿日期: 2021年5月24日; 录用日期: 2021年6月21日; 发布日期: 2021年6月28日

---

## 摘 要

油气管道一旦发生泄漏, 极易引发火灾和爆炸事故, 造成人员伤亡和财产损失。因此, 研究油气长输管道的泄漏检测技术, 并选取适合的方法具有一定的现实意义。从硬件与软件的角度可将泄漏检测方法分为外部法检测(硬件)和内部检测法(软件)。通过对常用的基于分布式光纤传感技术、负压波技术和实时瞬态模型技术的泄漏检测方法进行了论述, 详细分析各种技术的优缺点, 并归纳总结了选取技术时的考虑因素, 推荐采用光纤传感技术作为新建管道项目泄漏检测系统的首选。文章结论可为油气管道泄漏检测系统建设提供技术支持和参考。

## 关键词

泄漏检测, 光纤传感, 负压波, 实时瞬态模型

---

---

\*通信作者。

# Selection and Application of Leak Detection Technology for Oil and Gas Pipelines

Xiaolong Cai<sup>1\*</sup>, Yongjun Liu<sup>2</sup>, Xiaoqi Dong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. (International), Langfang Hebei

<sup>2</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, CPPE, Langfang Hebei

Email: \*812301746@qq.com

Received: May 24<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Once oil and gas pipeline leakage occurs, it is easy to cause fire and explosion accidents, causing casualties and property losses. Therefore, it is of practical significance to study the leak detection technology of oil and gas long-distance pipeline and select suitable methods. From the perspective of hardware and software, leakage detection methods can be divided into external detection (hardware) and internal detection (software). With discussing the commonly used leakage detection methods based on distributed optical fiber sensing technology, negative pressure wave technology and real-time transient model technology, the advantages and disadvantages of various technologies are analyzed in detail, and the factors that should be considered when selecting technologies are summarized, and the fiber optic sensing technology is recommended as the first choice of leakage detection system for new pipeline projects. The conclusion of this paper can provide technical support and reference for the construction of oil and gas pipeline leak detection system.

## Keywords

Leak Detection, Fiber Optic Sensing, Negative Pressure Wave, Real-Time Transient Model

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

管道运输因为它的经济性和安全性，现在被应用的越来越广泛，随着管道技术的快速发展，管道运输已成为世界第五大运输工具[1]。由于油气输送管道介质具有易燃易爆特性，一旦发生泄漏，极易引发火灾和爆炸等事故，造成人员伤亡、财产损失和环境污染，因此对油气管道的泄漏点进行准确定位是管道安全运行的前提条件，各个国家的科技工作都非常重视管道的泄漏检测技术。

## 2. 管道泄漏检测系统技术

经过相关的数据统计发现，发生管道泄漏事故的主要原因是由于人为破坏、防腐层失效、阴极保护度降低、内腐蚀严重等问题导致的穿孔泄漏。管道泄漏检测技术是多学科多领域的知识融合，目前已经

从最简单的人工巡线检测发展到复杂的数值模拟计算[2]。

检测管道泄漏有不同的技术可供选择,也有不同的分类方法,按照基于硬件与软件的检测法分为内检测部法和外部检测法两类。内部法即基于管道内部参数计算的检测方法,使用仪器来监测内部管道参数(压力、流量、温度等)作为输入,通过一定的算法从而推断出管道泄漏。外部法即基于管道外部的检测方法,例如传统的线路巡检和基于光纤传感的泄漏检测。

内部检测法是通过连续监测压力、温度、流量、声速、粘度、密度或其他管道参数的状态,根据这些参数的变化量,通过特定的软件算法推断是否发生泄漏。主要的基于内部的方法有:负压波法、实时瞬态模型法、统计分析法、压力/流量的监测和分析法、体积平衡法、质量平衡法、线平衡法等。

外部检测法是基于通过各种传感设备或电缆对泄漏介质所造成的管道外部环境参数改变的物理检测方法。主要的外部检测法有:光纤传感技术、声波检测法、碳氢化合物蒸汽或液体感应管、红外摄像机等。

其中基于分布式光纤传感技术、负压波技术和实时瞬态模型技术的泄漏检测系统是在长输油气管道中常用且效果比较好的技术手段。

### 3. 技术对比

#### 3.1. 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术是将光纤本体作为传感器,通过与解调仪连接对光纤中传输激光的各项属性进行实时分析,从而对外界信号进行监控。当管道周围地理环境中出现滑坡等地质灾害或管道发生泄漏,光纤会因拉扯而发生变形或者内部二氧化硅的密度因温度而发生变化,由此带来光化,应变、温度等中间参数的变化得以直观的在波形图上得到体现。通过对波形图的分析 and 判断,现场管理人员得以及时了解发生事件的类型、强度以及位置,以便及时反应和处理。

根据光纤中传播的背向散射光的分布,见图1[3]。将基于散射式的光纤传感技术分为拉曼散射、瑞利散射、布里渊散射以及部分基于干涉或其它类型的产品。

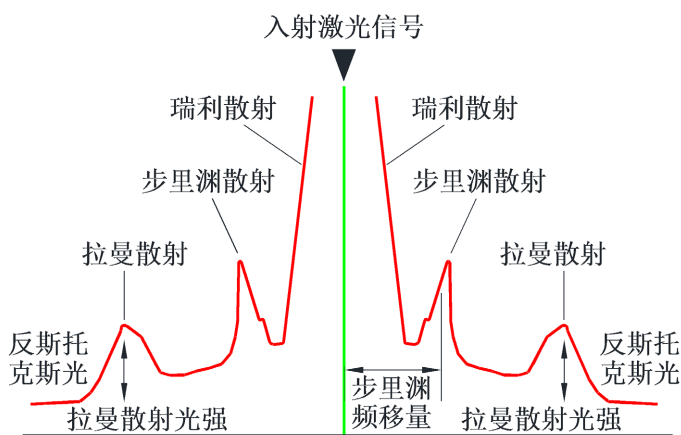


Figure 1. The distribution of backscattered light in optical fibers  
图1. 光纤传播的背向散射光的分布

在拉曼散射、瑞利散射、布里渊散射这三种分布式传感技术中,系统配置是相似的。激光光源用来向传感光纤发射信号光脉冲。当光脉冲沿着光纤的长度传播时,少量的信号被瑞利、布里渊或拉曼散射效应反向散射。背向散射光被过滤为特定波长,经过分析以确定温度或应变。

分布式光纤传感技术适用于管道同沟敷设光缆的情况。需进一步根据具体管道内流体介质类别(气体或液体)、管道口径、是否其它探测的内容(如入侵、地灾等)合理设计光缆与管道的相对位置。

分布式光纤传感技术的优点包括: 1) 利用与管道同沟敷设的光缆用于泄漏检测可以降低成本; 2) 定位精度高; 灵敏度高, 对小的泄漏更敏感; 3) 传感光缆抗电磁干扰和外界震动干扰能力强, 高绝缘性好; 4) 抗电磁干扰、安全可靠; 5) 不受管道内流体性质的变化影响; 6) 不受管道运行状态的影响。

分布式光纤传感技术的缺点有: 1) 是基于外部条件的检测方法, 受外部条件制约, 光缆中断会影响泄漏检测系统中断; 2) 可能无法检测到渐进式泄漏; 3) 无法预测泄漏的大小; 4) 尤其是当流体温度接近环境温度时不易探测, 因此有些输油管道不太适用; 5) 对于没有光缆的已有管道来说, 需要敷设光缆, 费用昂贵、难度大。

### 3.2. 负压波技术

这项技术基于对管道负压的测量。当管道发生泄漏时, 释放处的压力下降。这种负压波从释放点以波动的形式向上下游两个方向传播, 可以被两端或沿管道的高精度压力变送器感知。

对负压的检测与确认是负压波技术的基础, 因此需在管道两侧一定的位置安装高灵敏度和高精度的压力变送器。变送器连续测量管路压力的波动, 见图 2, 将迅速的压力降低和恢复信息上传给监控设备。通过来自所有监测站点的数据变化分析, 以确定是否启动泄漏检测警报, 同时利用该负压波到达上下游的时间差可以确定泄漏点的具体位置。

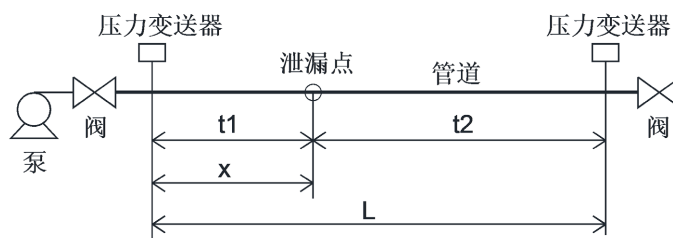


Figure 2. Schematic diagram of negative pressure wave method  
图 2. 负压波法示意图

负压波技术优点包括: 1) 利用压力变送器进行测量, 成本费用低; 2) 检测速度快; 3) 能够比较准确的定位的泄漏位置; 4) 对流体性质(如粘度和密度)极不敏感; 5) 不受外部环境条件影响; 6) 比较容易发现打孔盗油。

负压波技术缺点包括:

1) 适合用于液体管道的泄漏检测, 不推荐用于天然气管道。根据管道中气体流动的流体剖面, 由于管道泄漏而产生的声波不能在天然气管道中长距离传播, 负压波在输气管道中会迅速衰减, 并且泄漏产生的压力波幅值往往接近正常水平的管道噪声。根据 2012 年 12 月发布的《管道与危险物质安全管理局(美国运输部)泄漏检测研究报告》, 负压波法不适用于天然气管道。

2) 负压波技术可以检测突然发生的泄漏或由于管道损坏造成的泄漏。该技术对渐进式泄漏的检测能力较差, 因为在渐进式泄漏中不会产生特定的声波。

3) 受仪表精度和响应时间影响非常大。用于压力测量的传感器需要有很快的响应时间非常高的采样率。须经常校准仪表, 否则可能会导致系统出现错误。仪表故障会导致无法检测到泄漏。

4) 受噪音影响, 压力传感器很难精确的检测到负压波突降点, 时间差计算精度有待提高。

5) 正常的操作, 例如调节阀门、启停泵等都会引起负压波, 造成误报警。

### 3.3. 实时瞬态模型技术

实时瞬态模型技术基于水力模拟的实时模拟流体流动、压力和温度的模型,依据动量守恒计算、能量守恒计算和大量的流动方程将模拟结果与测量数据(压力和流量)进行比较判断出管道是否泄漏。

为了设计特定管道的实时瞬态模型,需要了解管道的配置,包括管道的物理参数(管长、管径、壁厚、管道构成、路由拓扑、路线走向、粗糙度、泵、阀门、设备位置等)及流体物性(精确的体积模量、黏度、密度等) [4]。

实时瞬态模型可以用于几种方法检测泄漏,最常见的两种方法是:

1) 偏差分析法:将 SCADA 系统的测量值与实时瞬态模型的计算值进行比较。如果差值超过预先确定的阈值,则会产生泄漏警报。

2) 模型补偿量平衡法:采用实时瞬态模型实时计算库存量。库存量更改用于纠正数量不平衡。如果补偿的不平衡超过预定的阈值,则会产生泄漏警报。

相对于其他方法,实时瞬态模型的优势在于它能够模拟所有的动态流体特性(流量、压力、温度),并考虑到广泛配置的物理管道特性(长度、直径、厚度等)以及产品特性(密度、粘度等)。

实时瞬态模型的优点有:1) 有完整的流体动力学特性,如流量,压力和温度等建模;2) 通常依托于现有的仪表和 SCADA 系统,安装成本相对较低;3) 可以测量泄漏的体积和位置;4) 适用于瞬态工况;5) 在提高模型配置的准确性后,误报率更低。

实时瞬态模型的缺点包括:1) 现场仪表(压力、流量、温度)的任何故障或缺陷都将降低其性能,使其容易出现误报;2) 算法比较复杂,需要大量的关于管道、设备和流体的数据,而有时这些数据的获取比较困难;3) 运操作和维护都需要较专业的知识和技能;4) 对流体特性,特别是粘度和密度较敏感;5) 泄漏位置识别的准确性不是很好,取决于现场仪表在管道上的位置。需要经常校准流量和压力仪表。

### 3.4. 技术的选择标准

管道泄漏检测系统的选择主要依据五个主要因素:

1) 灵敏度。灵敏度定义为系统能够检测到的泄漏大小的综合度量,以及在发生这种大小的泄漏时系统发出警报所需的时间。

2) 精确度。精确度是与泄漏流量、总容积损失、泄漏位置等估计参数相关的泄漏检测系统性能的度量。

3) 可靠性。可靠性是对泄漏检测系统对管道可能存在的泄漏做出准确判断的能力的度量。

4) 稳健性。稳健性是对泄漏检测系统在管道运行条件不断变化的情况下继续发挥作用并提供有用信息的能力的一种衡量。

5) 投资成本。包括建成一套完成的泄漏检测系统所需的系统设备、材料的采购和施工的费用。

评估过程中也应适当考虑的其他次要因素包括:泄漏大小、泄漏检测时间、兼容性、适用性、数据资源可获得性、易用性、可访问性、安全性等。

## 4. 结论和建议

管道泄漏检测系统对于管道安全运行至关重要,需要根据管道实际情况选择合适的泄漏检测技术。负压波技术和实时瞬态模型都可以依托现有的仪器仪表,综合成本较低,其中负压波技术建议用于天然气管道。光纤传感技术不但能够检测管道泄漏,还可以用于探测第三方入侵、地层运动(如滑坡、崩塌、沉降及其它地质灾害)、季节变化对周围土壤影响、土壤侵蚀迹象、管道智能清管器位置追踪等。

分布式光纤传感技术具有监测距离长、定位精度高、灵敏度高、安装施工方便等优点,是未来天然

气管道相关安全监测技术(包括泄漏检测技术)的主要发展方向之一。光纤通信已经是新建油气管道项目的主用通信方式,新建管道项目都会与管道同沟敷设光缆,大大降低了光纤传感泄漏检测的建设成本。所以建议新建管道项目将基于分布式光纤传感技术的泄漏检测系统作为首选。

### 参考文献

- [1] 宋志俊, 马永明, 章玮, 等. 管道泄漏检测技术在安塞油田的应用[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(12): 49-51.
- [2] 黄晓波, 李旭海, 姜旭宋, 等. 输气管道泄漏检测技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(10): 17-20.
- [3] 纪健, 李玉星, 纪杰, 等. 基于光纤传感的管道泄漏检测技术对比[J]. 油气储运, 2018, 37(4): 368-377.
- [4] 王立坤, 王洪超, 熊敏, 等. 长距离输油管道泄漏监测技术分析及其研究建议[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1198-1201.