

化工管道全面检验与泄漏监测预警技术集成分析

刘耀畅（湖南省特种设备检验检测研究院娄底分院，湖南 娄底 417000）

摘要：化工管道的安全运行、效率提升以及成本降低有着至关重要的意义，对此本文聚焦化工管道全面检验与泄漏监测预警技术集成这一主题，先了解常用的全面检验及泄漏监测预警技术，进而以光纤监测技术为例深入探究并详细阐述其技术原理、设备构成、关键指标等内容，同时结合具体案例分析其在实际化工管道中的应用部署以及运行效果等情况，再探讨它与全面检验工作流程的协同配合方式，通过这样的协同配合形成的技术集成能够展现出诸多优势效益。

关键词：化工管道；全面检验；泄漏监测预警；技术集成；光纤监测技术

中图分类号：TQ055.8 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)026-0163-03

Comprehensive Inspection of Chemical Pipelines and Integrated Analysis of Leakage Monitoring and Early Warning Technologies

Liu Yaochang(Hunan Special Equipment Inspection and Testing Institute Loudi Branch, Loudi Hunan 417000, China)

Abstract: The safe operation, efficiency improvement, and cost reduction of chemical pipelines are of paramount importance. This paper focuses on the integration of comprehensive inspection and leakage monitoring and early warning technologies for chemical pipelines. First, it examines commonly used comprehensive inspection and leakage monitoring and early warning technologies. Then, it takes fiber optic monitoring technology as an example to delve into its technical principles, equipment composition, key indicators, and other details. Additionally, it combines specific case studies to elaborate on its practical application, deployment, and operational effectiveness in chemical pipelines. Furthermore, the paper explores how this technology synergizes with the workflow of comprehensive inspections. The resulting technological integration demonstrates numerous advantages and benefits.

Keywords: chemical pipelines; comprehensive inspection; leakage monitoring and early warning; technology integration; fiber optic monitoring technology

化工管道在化工生产领域起着输送各类介质的关键作用，但其长期运行会面临诸如腐蚀、磨损等诸多安全隐患，一旦发生泄漏便会造成生产中断、资源浪费，甚至可能引发严重的安全事故与环境污染问题。虽有从阶段性检测角度保障安全的全面检验以及从实时监控角度保障安全的泄漏监测预警技术，然而这两者各自存在不足，而二者的集成应用能够弥补这些不足并进而形成更完善的管道安全防护体系，故对化工管道全面检验与泄漏监测预警技术集成应用展开深入分析有着重要的现实意义。

1 化工管道全面检验与泄漏监测预警常用技术概述

要保障化工管道安全运行，需要运用多种技术进行全面检验与泄漏监测预警。在全面检验方面，要检测管道内部缺陷同时还不能损伤管道，无损检测技术应用广泛，像超声检测，由于其利用超声波反射原理，所以能检测内部缺陷且不损伤管道，而射线检测凭借自身优势可直观呈现管道内部结构，进而精准发现问题^[1]。在泄漏监测预警技术中，要对管道是否泄漏进行判断，基于传感器的监测很常用，例如压力传感器，

它能够感知压力变化，可据此判断是否泄漏，气体传感器能检测泄漏出的特定气体，从而发挥相应作用^[2]。还有光纤监测技术，光纤对温度、应变等变化较为敏感，利用这一特性能够及时发现泄漏迹象，进而保障化工管道安全运行^[3]。

2 技术要点详细阐述——以光纤监测技术为例

2.1 技术原理

光纤监测技术是基于光纤对物理量敏感这一特性来实现泄漏监测预警的，且光纤自身对温度、应变等微小变化能够敏锐感知，所以当化工管道发生泄漏时，周围环境的温度、应力分布会改变，进而致使光纤随之产生相应的物理量变化，像出现局部温度异常升高或者因介质泄漏冲击导致应变改变等情况^[4]。而要将光纤产生的这些物理量变化转化为可测的光信号变化，得通过光纤传感器来进行转化，之后要对转化后的光信号进行收集并传输至后台分析处理系统，便需要借助配套的数据采集与传输设备来完成此项工作。后台分析处理系统要准确判断是否发生泄漏并进而发出预警，其依据预设的阈值等判定条件，对收集到的光信号进行分析，最终实现准确判断是否发生泄漏，

进而发出预警^[5]。

2.2 技术设备与系统构成

光纤传感器常用的有光纤光栅传感器等，其波长精度可达皮米级别，故而能够精准感知微小的温度、应变变化，例如在温度传感方面，其具备这样的高精度特性，分辨率便可达到0.1℃甚至更高，对应变的测量精度也能达到微应变级别，进而保障对管道细微异常的捕捉能力。而数据采集与传输设备的数据采集频率要依据实际需求来确定，要确保不漏掉快速变化的数据，其采集频率多在每秒数次到数十次不等，像一些关键管道就可设置为每秒10次以上，同时需要保障采集到的数据能够快速、稳定地传输至后台，多采用光纤通信方式，且这种方式的传输速率能达到千兆级别。由于后台分析处理及预警系统需要及时判断管道是否出现泄漏情况并发出预警信号提示相关人员处理，所以其具备强大的数据分析运算能力，凭借这一能力可在数秒内对采集的数据进行对比分析，依据设定的阈值来判断是否泄漏，一旦判定泄漏，就能在1分钟内发出准确的预警信号。

2.3 技术关键指标与性能参数

光纤监测技术凭借高精度的光纤传感器能够敏锐感知微小泄漏检测，因此当管道出现每分钟泄漏量低至几毫升的情况时，它便可捕捉到因泄漏引发的温度、应变细微变化，进而实现早期预警，从而在灵敏度方面有着出色表现。在正常工况下该光纤监测技术有着良好的响应机制，从泄漏发生到发出预警信号，一般可控制在数秒至几十秒内，就像在一些小型化工管道试验场景中，平均响应时间能达到10秒左右，这样就能快速告知运维人员采取相应措施，使得其在响应时间方面达到了较好的水平，再加上通过对大量实际监测数据进行分析验证，光纤监测技术有着可靠的运行保障，其准确率可高达95%以上，误报率能控制在5%以内，同时具备良好的稳定性，故而在复杂的化工环境中，它可连续稳定运行数月甚至数年。而且传感器的使用寿命通常也能达到数年，在此期间能够持续精准地监测管道状态，进而为化工管道的安全运行提供可靠的技术支撑，在准确性与可靠性方面展现出了重要价值。

3 案例分析

3.1 案例背景介绍

中石化某大型炼油厂内存在一条输送原油的化工管道，其管道直径为800mm，总长度约3km，有着1.2兆帕的设计运行压力且输送温度维持在40℃左右，加之该管道自投入使用已超10年，是炼油厂原油输送的关键环节，每日输送原油量可达5000m³，对整个炼

油生产流程的稳定运行起着至关重要的作用。同时长时间运行使得管道面临腐蚀、磨损等潜在风险，并且所处环境较为复杂，周边存在诸多生产设备与管廊，一旦发生泄漏，便会造成本油浪费、停产损失，甚至可能引发严重的安全事故与环境污染问题，所以该厂为保障这条作为原油输送关键环节的化工管道的运行安全，决定引入先进的泄漏监测预警技术对其进行重点监测。

3.2 光纤监测技术在案例中的应用部署

直径800mm、长度约3km的原油输送管道至关重要，对其沿程采取了科学合理的光纤传感器铺设方式。原油一旦泄漏至管道外表面，热量传递会使顶部温度出现异常波动，因此沿着管道顶部每隔10m均匀铺设光纤光栅传感器以重点监测因原油泄漏可能导致的温度变化。管道长期受自身重力以及原油重力影响，若出现泄漏冲刷等情况，底部的应变会率先发生改变，故而沿着管道底部同样每隔10m均匀铺设传感器着重关注应变情况，且两侧的传感器可同时兼顾温度和应变的细微变化，能作为补充监测点进一步提升监测的全面性，所以沿着管道两侧也每隔10m进行传感器的铺设，通过这样的方式形成了全方位的监测网络。而管道的弯头、阀门连接点以及不同管段的焊接处等关键部位结构特殊、应力集中，属于发生泄漏的高风险区域，为更精准地捕捉到可能出现的异常状况，便在这些部位适当加密光纤传感器的铺设密度，将间距缩小至5m，例如在弯头处，原油流动方向改变产生的冲击力易对管道造成局部损伤，加密了传感器才使得哪怕是极其微小的、应变变化幅度在几微应变的情况下也能被及时监测到，同时要确保能够及时捕捉到原油输送过程中管道随时可能出现的突发泄漏情况并考虑到管道的运行特点，将数据采集频率设置为每秒5次。

炼油厂存在复杂的电磁环境以及有长距离传输需求，而光纤通信方式抗干扰能力强，所以选用这种方式来传输采集到的数据，且其传输速率可达千兆级别，以此保障数据可以稳定、快速地从铺设在管道上的传感器传输至后台分析处理系统。由于后台分析处理系统需要根据该原油管道的设计运行压力1.2MPa、输送温度40℃左右等参数来准确判断管道是否出现异常，设定了与之适配的预警阈值，比如，当温度传感器监测到管道局部温度相较于正常运行温度40℃上升或下降超过3℃时，或者应变传感器检测到应变变化超过10微应变且持续一定时长，系统便判定可能存在泄漏情况，进而随即发出预警信号。最后炼油厂可能出现临时电力故障等突发情况，为确保在这种情况下整个

光纤监测系统仍能持续正常运行，不间断地对这条原油输送管道进行监测，保障其安全稳定运行，避免因管道泄漏引发的原油浪费、停产以及安全事故和环境污染等严重后果，整个光纤监测系统的供电采用了冗余设计，配备了不间断电源。

3.3 实际运行效果与监测数据分析

光纤监测技术依靠在化工管道上部署光纤传感器来实时采集温度、应变等数据，并将这些数据传输至后台分析系统后依据预设阈值判断管道状态，在正常运行时，若数据处于合理波动区间内表明管道处于正常状态，一旦出现泄漏等异常情况相关数据就会超出正常范围进而触发预警。从表1可知，在正常运行阶段管道顶部温度基本稳定在39.8℃~40.2℃区间，底部应变在4~6微应变范围波动，此情况符合原油输送管道在设计运行参数下的正常状态，这便表明光纤监测系统能够稳定且准确地采集管道常规运行数据。从表2可知，模拟微小泄漏情况时，原油泄漏改变了管道周边的温度场和应力分布，致使管道顶部温度明显上升，超出正常温度区间达到43.5℃及以上，底部应变也大幅增加至15微应变以上，而光纤监测系统预设了温度变化超过3℃、应变变化超过10微应变的预警阈值，且管道的温度和应变变化达到了预警阈值的要求，所以光纤监测系统能够敏锐捕捉到这些变化并及时触发预警，从而体现出光纤监测技术在实际应用中对管道泄漏监测的有效性和及时性，进而能为化工管道安全运营提供有力保障。

表1 管道正常运行时数据（部分时段示例）

采集时间	管道顶部温度(℃)	管道底部应变(微应变)
0:00	39.8	5
0:10	40.2	6
0:20	40.1	4

表2 模拟微小泄漏时数据（部分时段示例）

采集时间	管道顶部温度(℃)	管道底部应变(微应变)
1:00	43.5	15
1:10	44.2	18
1:20	43.8	16

4 技术集成的探讨

光纤监测技术能够长时间对管道温度、应变等数据进行监测分析，其收集的数据在制定全面检验计划时能起到关键参考作用，因此可通过这些数据精准定位出管道在日常运行中数据波动较为频繁或出现异常变化的部位，并将之作为全面检验时的重点关注区域，进而有针对性地安排诸如超声检测、理化性能检测等更深入的检验项目，使得全面检验更具靶向性，从而避免以往无差别、大范围检验导致的资源浪费情况。常规的化工管道全面检验周期往往几年才有一次，而

在此期间光纤监测技术可实时、持续地采集数据，一旦监测到疑似泄漏或者管道状态异常的数据就能及时反馈给运维人员，所以运维人员可提前介入检查，判断是否需要临时调整全面检验的时间节点或者增加一些专项检验项目，以此实现二者在时间维度上的有效互补。再加上单独依靠全面检验存在时间滞后性，对于两次检验间隔期间突发的泄漏隐患难以及时发现，而光纤监测技术能实时监测，且结合全面检验对管道内部结构、材质性能等的深度检测能形成从外到内、从实时到阶段性的全方位防护，故而二者集成后大大降低了管道泄漏事故发生的概率，从提升管道安全性角度来看有着显著积极作用。以往缺乏实时监测技术时，为确保安全可能会频繁开展预防性维护工作，致使成本颇高，而有了光纤监测与全面检验的集成，能够精准定位问题所在，减少不必要的维护操作，还可根据实际监测情况合理安排全面检验的频次和项目，避免过度检验带来的资源浪费，所以二者集成后能够实现维护成本的有效控制，在降低维护成本方面发挥重要作用。光纤监测技术与全面检验技术集成后既能提升管道安全性，又能降低维护成本，相较于单独使用这两种技术更为完善、全面，形成了“1+1>2”的效果，其为化工管道的安全、稳定、高效运行筑牢了坚实的保障。

5 总结

各类全面检验技术能深度剖析管道内在状况以及不同的泄漏监测预警技术可实时捕捉异常，所以对化工管道全面检验与泄漏监测预警技术集成进行多方面分析是很有必要的，而以光纤监测技术为例的应用案例展现出了实际效果及价值，且二者集成后在协同配合方面相得益彰，既能提升管道安全保障水平又能在成本控制等方面发挥积极作用，这就使得化工管道全面检验与泄漏监测预警技术集成有着重要意义，未来应当进一步优化相关技术，进而推动其在化工行业更广泛且高效地应用。

参考文献：

- [1] 王李帅. 石油化工压力管道安装技术及质量控制[J]. 石化技术, 2025, 32(04):122-124.
- [2] 余诚. 化工压力容器管道检验中的裂纹问题分析[J]. 石化技术, 2025, 32(04):311-313.
- [3] 杨梦柳. 化工压力管道检验常见问题及改进对策[J]. 石化技术, 2025, 32(04):314-316.
- [4] 翟洪洪. 化工工程中设备及管道布置的技术研究[J]. 天津化工, 2025, 39(02):162-164.
- [5] 马越. 石油化工管道施工质量管理与效果评估方法研究[J]. 石化技术, 2025, 32(03):333-335.