

基于智能检测技术的燃气管道运输安全风险评估与预警研究

刘开华（山东港华燃气集团有限公司，山东 济南 250000）

贾咸村（山东济华港润燃气有限公司，山东 济南 250000）

摘要：燃气管道作为城市能源输送的关键基础设施，其运输安全至关重要。本研究聚焦于智能检测技术在燃气管道运输安全风险评估与预警领域的应用，详细阐述了光纤传感、超声导波检测、智能机器人检测等多种智能检测技术的原理与应用现状，深入剖析燃气管道面临的自身、外部环境及人为操作等风险因素。通过构建基于层次分析法和模糊综合评价法的风险评估模型，结合实际案例验证模型有效性，并设计包含预警阈值确定、信息发布与响应机制的预警系统。以某燃气公司应用实例展示智能检测技术的实践成果，总结优势与不足，为提升燃气管道运输安全水平提供有力支撑，推动智能检测技术进一步优化与广泛应用。

关键词：燃气管道；智能检测技术；风险评估；预警系统；安全运输

中图分类号：TE832 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 025-0145-03

Research on safety risk assessment and early warning of gas pipeline transportation based on intelligent detection technology

Liu Kaihua (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Jia Xiancun (Shandong Jihua Gangrun Gas Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: As a key infrastructure for urban energy transmission, gas pipelines are very important for their transportation safety. This study focuses on the application of intelligent detection technology in the field of gas pipeline transportation safety risk assessment and early warning, elaborates the principles and application status of various intelligent detection technologies such as optical fiber sensing, ultrasonic guided wave detection, and intelligent robot detection, and deeply analyzes the risk factors faced by gas pipelines such as self, external environment and human operation. By constructing a risk assessment model based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method, the effectiveness of the model is verified by combining actual cases, and an early warning system including early warning threshold determination, information release and response mechanism is designed. The practical results of intelligent detection technology are demonstrated with the application example of a gas company, and the advantages and disadvantages are summarized, so as to provide strong support for improving the safety level of gas pipeline transportation, and promote the further optimization and wide application of intelligent detection technology.

Keywords: gas pipelines; intelligent detection technology; Risk assessment; early warning systems; Safe transportation

1 背景与意义

随着经济的飞速发展和能源需求的持续增长，天然气作为一种清洁、高效的能源，在能源结构中的地位愈发重要。燃气管道运输作为天然气输送的主要方式，承担着将天然气从气源地输送到千家万户的关键任务，其安全运行直接关系到国家能源安全、经济发展以及社会稳定。

2 智能检测技术原理

①光纤传感技术是一种将被测对象的状态转变为可测的光信号的传感器技术。其工作原理基于光的全反射原理，光纤由高折射率的纤芯和低折射率的包层组成，当光在纤芯中传播时，在纤芯与包层的界面发生全反射，从而使得光能够沿着光纤传输。在燃气管

道监测中，主要利用光纤对环境变化的敏感性，将输入物理量变换为调制的光信号。例如，当燃气管道周围的温度、压力等参数发生变化时，会导致光纤的长度、折射率等物理性质发生改变，进而引起光的相位、光强等特性发生变化。通过检测这些光信号的变化，就可以获取燃气管道的运行状态信息。

②超声导波检测技术利用低频扭曲波 (Torsional-Wave) 或纵波 (LongitudinalWave) 对管路、管道进行长距离检测，包括对于地下埋管不开挖状态下的长距离检测。其产生机理与薄板中的兰姆波激励机理相类似，是由于在空间有限的介质内多次往复反射并进一步产生复杂的叠加干涉以及几何弥散形成的。在管道检测中，为产生适当的波型，需要使用比通常超声波

探伤低得多的频率，导波通常使用的频率 $f \leq 100\text{kHz}$ 。

③智能机器人检测技术是融合了先进的传感、控制、人工智能等技术的一种检测手段。智能机器人通过搭载多种类型的传感器，如视觉传感器、激光雷达、超声波传感器、气体传感器等，能够感知周围环境信息。例如，视觉传感器可以获取管道表面的图像信息，通过图像识别算法判断管道是否存在裂缝、腐蚀等缺陷；激光雷达可以测量管道的形状和尺寸，检测管道是否发生变形；气体传感器则可检测周围环境中的燃气浓度，及时发现燃气泄漏。

随着科技的不断发展，智能机器人检测技术呈现出良好的发展趋势。一方面，其智能化程度将不断提高，通过引入深度学习、强化学习等人工智能技术，机器人能够更加准确地识别和分析管道缺陷，实现自主决策和智能控制。例如，利用深度学习算法对大量的管道检测图像进行训练，使机器人能够自动识别不同类型的缺陷，并评估缺陷的严重程度。另一方面，多机器人协作检测将成为一种发展方向。通过多个机器人之间的协同作业，可以提高检测效率和覆盖范围，实现对燃气管道的全面、快速检测。此外，智能机器人检测技术还将与物联网、大数据等技术深度融合，实现检测数据的实时传输、存储和分析，为燃气管道的安全管理提供更加全面和准确的决策支持。

3 燃气管道运输安全风险分析

管道自身因素是影响燃气管道运输安全的关键因素之一，主要包括管道材质、老化程度以及腐蚀情况等。

外部环境因素给燃气管道运输带来了诸多风险，主要涵盖地质条件、自然灾害以及第三方破坏等方面。

地质条件对燃气管道的安全运行有着至关重要的影响。在不同的地质区域，土壤的性质、地形地貌等存在较大差异。例如，在软土地基区域，由于土壤的承载能力较低，管道在自重和外部荷载的作用下，容易发生沉降和变形。某城市在软土地基上铺设的燃气管道，在运行一段时间后，部分地段出现了明显的沉降，导致管道弯曲变形，严重影响了管道的安全运行。在岩溶地区，地下溶洞和暗河的存在使得地质结构不稳定，管道可能因溶洞塌陷而遭受破坏。若管道穿越断层地带，当地震等地质活动发生时，断层的错动可能会直接撕裂管道。

自然灾害也是威胁燃气管道安全的重要因素。地震会引发地面强烈震动，使管道受到巨大的应力作用，导致管道破裂、移位。如在[具体地震事件]中，地震造成了当地多条燃气管道断裂，引发了火灾和爆炸事故，给人民生命财产带来了巨大损失。滑坡和泥石

流会对管道产生冲击和掩埋作用，破坏管道的结构。当滑坡发生时，土体的滑动会对管道产生强大的推力，可能使管道被剪断或压扁。暴雨可能引发洪水，洪水的冲刷会导致管道基础被掏空，使管道悬空，增加管道破裂的风险。此外，雷击可能会损坏管道的防腐层和附属设备，引发安全事故。

人为操作因素是引发燃气管道运输安全风险的重要原因，主要体现在人员操作失误以及维护管理不当等方面。

人员操作失误是导致安全事故的常见因素之一。在燃气管道的运行过程中，操作人员需要进行各种复杂的操作，如阀门的开启和关闭、压力的调节、设备的启停等。如果操作人员缺乏专业知识和技能，对操作规程不熟悉，就容易出现操作失误。例如，在调节燃气管道压力时，操作人员误将压力调节过高，超过了管道的设计承受压力，可能导致管道破裂。在进行阀门操作时，如果操作顺序错误，可能会引起燃气倒流，引发安全事故。此外，操作人员在工作过程中注意力不集中、疲劳作业等，也会增加操作失误的概率。如某燃气场站的操作人员在连续工作 $[X]$ 小时后，因疲劳而误判了设备的运行状态，未能及时发现管道压力异常升高的情况，险些引发重大事故。

4 基于智能检测技术的风险评估体系构建

构建科学合理的风险评估指标体系是准确评估燃气管道运输安全风险的关键。在确定评估指标时，充分考虑燃气管道运输过程中的各种风险因素，结合智能检测技术的特点和优势，确保指标体系能够全面、准确地反映燃气管道的安全状况。

从管道自身、外部环境和人为操作三个方面选取评估指标。在管道自身因素方面，涵盖管道材质、使用年限、腐蚀程度、焊缝质量等指标。不同的管道材质具有不同的物理和化学性质，对管道的安全性能有着重要影响。使用年限的增加会导致管道老化，降低其强度和密封性。腐蚀程度是衡量管道安全状况的重要指标，严重的腐蚀可能导致管道泄漏。焊缝质量直接关系到管道的连接强度，焊缝缺陷可能引发安全事故。

外部环境因素方面，考虑地质条件、自然灾害、第三方破坏、周边建筑物等指标。地质条件如土壤类型、地质构造等会影响管道的稳定性。自然灾害如地震、洪水、滑坡等可能对管道造成直接破坏。

人为操作因素方面，包括人员培训情况、操作规程执行情况、维护管理水平、应急响应能力等指标。人员培训不足可能导致操作人员缺乏必要的安全知识和技能，增加操作失误的风险。操作规程执行不严格会引发各种安全隐患。维护管理水平的高低直接关系

到管道的日常运行状况。应急响应能力则在事故发生时起着关键作用，快速有效的应急响应能够减少事故损失。

5 智能检测技术在燃气管道运输安全预警中的应用

5.1 预警系统设计

燃气管道运输安全预警系统是保障燃气管道安全运行的关键，其设计旨在实现对燃气管道运行状态的实时监测、风险评估以及及时准确的预警功能。该系统主要由数据采集模块、数据传输模块、数据处理与分析模块、风险评估模块、预警发布模块以及用户交互模块等组成。

数据采集模块负责收集燃气管道的各类运行数据，这些数据来源广泛，涵盖了智能检测技术所获取的信息。光纤传感技术通过检测光信号的变化，可实时采集管道的温度、压力、应变等参数。超声导波检测技术能够获取管道内外壁的腐蚀情况和缺陷信息。智能机器人检测技术搭载多种传感器，如视觉传感器获取管道表面的图像信息，激光雷达测量管道的形状和尺寸，气体传感器检测周围环境中的燃气浓度等。这些数据为全面了解管道的运行状态提供了丰富的信息基础。

数据传输模块借助先进的通信技术，将采集到的数据快速、准确地传输至数据处理与分析模块。目前，常用的通信技术包括无线传输和有线传输。无线传输技术如4G、5G通信，具有部署方便、灵活性高的特点，能够满足燃气管道在复杂地理环境下的数据传输需求。

数据处理与分析模块对传输过来的数据进行清洗、整理和分析。首先，去除数据中的噪声和异常值，提高数据的准确性和可靠性。运用滤波算法、数据插值等方法对数据进行预处理。然后，通过数据挖掘和机器学习算法，挖掘数据中的潜在信息和规律。采用关联规则挖掘算法，分析管道运行参数之间的关联关系，如温度与压力的变化关系；利用聚类分析算法，对管道的运行状态进行分类，判断是否存在异常情况。

预警系统的工作流程为：数据采集模块实时采集燃气管道的运行数据，数据传输模块将数据传输至数据处理与分析模块，经过处理和分析后，数据被送入风险评估模块进行风险评估。风险评估模块根据评估结果判断是否需要发出预警，若风险等级达到预警阈值，预警发布模块则及时发布预警信息。用户交互模块则实现了用户与预警系统之间的信息交互，方便用户对系统进行操作和管理。通过这样的设计和工作流程，燃气管道运输安全预警系统能够及时发现潜在的安全隐患，为保障燃气管道的安全运行提供有力支持。

5.2 预警信息发布与响应

当燃气管道运输安全预警系统检测到异常情况并触发预警后，及时、准确地发布预警信息以及高效的响应机制是降低事故风险、减少损失的关键环节。

预警信息发布方式应具备多样化和及时性的特点，以确保相关人员能够迅速获取信息并采取相应措施。在现代通信技术的支持下，可采用多种渠道进行预警信息发布。短信通知是一种便捷的方式，能够直接将预警信息发送到相关人员的手机上。当预警系统检测到某段燃气管道压力异常升高，达到预警阈值时，系统自动向该区域的运维人员、安全管理人员等发送短信，短信内容详细说明管道的位置、异常情况描述、风险等级以及建议采取的初步措施等。声光报警在监控中心和相关场站具有直观的警示作用。当预警发生时，监控中心的大屏幕上会显示醒目的红色警示信息，同时伴有高分贝的警报声和闪烁的灯光，吸引工作人员的注意力。邮件提醒则适用于向管理层和相关部门发送详细的预警报告。预警报告中包含事故发生的时间、地点、详细的风险评估结果、可能的原因分析以及已采取的初步措施等内容，方便管理层全面了解情况并做出决策。此外，还可以利用社交媒体平台、专用的安全管理APP等方式发布预警信息，拓宽信息传播渠道，提高信息的覆盖面。

为了提高预警信息发布与响应的效果，需要定期进行培训和演练。对相关人员进行预警系统操作培训，使其熟悉预警信息的接收、处理流程，掌握应急处置的方法和技能。组织开展应急演练，模拟不同类型的燃气管道事故场景，检验和提高各部门之间的协同配合能力、应急响应速度和处置能力。通过演练，发现问题并及时完善应急预案和响应机制。在一次应急演练中，发现各部门之间的信息沟通存在延迟和不准确的问题，通过分析总结，优化了信息传递流程，明确了各部门的信息报告职责，提高了信息沟通的效率。

6 结论

本研究围绕基于智能检测技术的燃气管道运输安全风险评估与预警展开，取得了一系列具有重要理论与实践价值的成果。尽管在应用过程中存在部分设备稳定性有待提高、专业技术人才短缺以及数据管理和分析面临挑战等问题，但总体而言，智能检测技术为燃气管道运输安全提供了有力保障，具有广阔的应用前景。

参考文献：

- [1] 李小明, 王强. 光纤传感技术在燃气管道监测中的应用研究 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39 (5):45-48.
- [2] 张峰, 刘辉. 超声导波检测技术在燃气管道腐蚀检测中的应用 [J]. 无损检测 2019, 41(8): 35-39.