

智能管道建设下的天然气管道完整性管理

韩宝强

(国家石油天然气管网集团有限公司西气东输分公司苏浙沪输气分公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 天然气管道属于高压长输管道, 任何泄漏或破裂都可能造成严重的安全事故, 智能管道技术能够实时监测管道运行状态, 提前发现潜在风险, 从而减少事故发生的概率, 提高管道的安全性。本次研究将结合智能化技术, 首先对天然气管道完整性管理的理论基础进行介绍, 对智能管道关键技术进行分析, 最后, 开展智能管道建设下的天然气管道完整性管理研究, 为推动天然气管道管理领域的进一步发展奠定基础。

关键词: 智能管道; 天然气管道; 完整性管理; 理论基础; 关键技术

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 013-0149-03

Integrity Management of Natural Gas Pipelines under Smart Pipeline Construction

Han Baoqiang

(State Pipeline Group Company Limited, -to-Eastern Gas Transmission Branch, Su-Zhe-Hu Transmission Branch, Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: Natural gas pipelines belong to high-pressure long-distance pipelines, and any leakage or rupture may cause serious safety accidents. Smart pipeline technology can monitor the operation state of the pipeline in real time, detect potential risks in advance, and thus reduce the probability of accidents and improve the safety of the pipeline. This study combines intelligent technology, first of all, to introduce the theoretical basis of integrity management of natural gas pipelines, analyze the key technology of smart pipelines, and finally, to conduct research on integrity management of natural gas pipelines under smart pipeline construction, so as to lay a foundation for promoting the further development of the field of natural gas pipeline management.

Keywords: Smart pipeline; Natural gas pipeline; Integrity management; Theoretical basis; Key technology

天然气作为一种清洁且高效的能源, 在全球能源结构转型和碳中和目标背景下, 其需求持续增长, 长输天然气管道是天然气运输的关键基础设施, 其安全性和高效性直接关系到国家能源安全和经济发展。随着信息技术和人工智能和大数据分析等前沿技术的快速发展, 管道行业逐步向智能化和数字化方向转型, 智能管道建设成为管道管理的重要发展趋势^[1]。智能管道技术为天然气管道完整性管理提供了新的解决方案, 通过智能传感和在线监测等手段, 可以实现对管道健康状态的实时感知、智能预警和精准维护, 大幅提升管道的安全性和运营效率。本次研究将结合天然气管道完整性管理的基本概念以及智能管道的关键技术, 开展智能管道建设下的天然气管道完整性管理研究, 为推动管道行业的数字化转型和高质量发展奠定基础。

1 天然气管道完整性管理的理论基础

1.1 管道完整性管理的定义与内涵

管道完整性管理是指通过系统化的方法和程序, 对管道系统进行全生命周期的风险识别和控制, 以确保管道安全和可靠运行的管理体系, 其核心目标是防止管道失效事故的发生, 延长管道使用寿命, 并最大

化管道资产价值。完整性管理不仅包括对管道物理状态的管理, 还涵盖了组织结构以及信息系统等多方面内容。从国际油气行业发展来看, 完整性管理已经从最初的单纯技术措施, 逐步发展为一种系统化和标准化的管理方法, 成为现代管道运营企业确保安全生产的核心理念和基本准则^[2]。

管道完整性管理的内涵主要体现在全面性、系统性、动态性、预防性四个方面, 全面性是指完整性管理覆盖管道全生命周期, 包括设计直至报废的各个阶段, 系统性表现为将管道视为一个整体系统, 综合考虑材料和管理因素等多元影响因素, 动态性体现在完整性管理是一个持续改进的过程, 需要不断根据新的检测数据和外部环境变化进行风险再评估和管理措施调整, 预防性强调通过主动识别和评估潜在风险, 采取预防措施降低风险发生概率, 从被动应对转变为积极预防^[3]。在智能管道建设背景下, 完整性管理正融合大数据和人工智能等先进技术, 形成更加精准且智能的管理模式, 为管道安全运行提供更加可靠的保障。

1.2 完整性管理体系构成要素

完整性管理体系是一个多维度和多层次的综合体系, 其核心构成要素包括组织架构和持续改进多个关

键部分。组织架构是完整性管理体系的基础保障，需要建立专门的完整性管理团队，明确各级人员的职责与权限，确保管理体系有效运行。技术支持则是完整性管理的关键支撑，管理流程是完整性管理的实施路径，主要包括风险识别和绩效评价等环节，形成闭环管理模式^[4]。数据系统是完整性管理的信息中枢，负责数据采集和分析，为决策提供科学依据，持续改进机制则确保完整性管理体系能够适应环境变化和技术进步，不断优化管理效果。

从功能层面看，完整性管理体系的要素可进一步细分为目标设定和绩效监测等多个功能模块，目标设定模块负责确定完整性管理的具体目标和指标，风险管理模块是完整性管理的核心，通过对管道系统的威胁因素进行识别和评估，确定管道各段的风险等级。检测评估模块负责实施在线监测和专项检查等活动，评估管道实际状态，维修干预模块根据风险评估和检测结果，制定并实施相应的维修和改造计划，绩效监测模块则通过关键绩效指标的收集与分析，评价完整性管理体系的有效性，并为改进提供依据。在智能管道建设背景下，这些要素之间通过数字化平台实现高度集成和协同，形成以数据为驱动和以风险为导向的现代化完整性管理体系，显著提升管道运营的安全性和可靠性^[3]。

2 智能管道关键技术分析

2.1 智能传感与监测技术

智能传感与监测技术是智能管道建设的基础性支撑技术，其核心在于实现管道状态的实时和全面感知，为完整性管理提供可靠的数据基础。随着物联网和通信技术的快速发展，智能传感技术在天然气管道监测中呈现出多样化和智能化的发展趋势，目前应用于管道监测的智能传感器主要包括压力传感器和温度传感器等多种类型的传感器。这些传感器通过不同的物理或化学原理，可实时捕捉管道运行参数和环境变化，特别是新型分布式光纤传感技术，能够沿管道长距离实现温度和声波的连续监测，在泄漏检测和第三方入侵识别等方面展现出显著优势。

在监测系统架构方面，现代智能管道监测技术已从传统的单点监测发展为全线监测与局部重点监测相结合的多层次监测体系。其中，管道SCADA系统作为管道运行的神经中枢，实现对关键参数的实时监控，分布式光纤监测系统则作为神经网络，可实现管道全线的温度和应变监测。而智能无线传感器网络则以其低功耗和自组织的特点，在重点区域形成密集监测网络。

近年来基于机器人技术的智能检测设备已经取得

了重要进展，智能清管器已能够集成多种检测技术，在管道内部实现腐蚀和变形等缺陷的高精度检测。同时，无人机和卫星遥感等外部监测技术也被广泛应用于管道廊道监测，有效识别第三方活动和地质灾害风险。这些智能传感与监测技术不仅大幅提升了管道状态感知的精度与覆盖面，还通过故障自诊断和数据自校正等功能提高了监测系统的可靠性，为管道完整性管理从基于时间向基于状态转变提供了技术基础，显著增强了管道安全风险的预见性和管控精准性。

2.2 人工智能与机器学习在管道评估中的应用

人工智能与机器学习技术正日益成为天然气管道完整性评估的强大工具，为传统评估方法注入了新的活力和精准度，这些技术通过对海量历史运行数据和检测数据的深度挖掘，能够识别复杂的非线性关系和潜在模式，从而实现管道状态评估和剩余寿命估算的智能化。在缺陷识别领域，深度学习算法特别是卷积神经网络已被广泛应用于管道内检测数据的自动分析，能够快速准确地识别和分类腐蚀和变形等多种缺陷类型，大幅提升检测效率和准确率。基于深度学习的图像识别技术可以从磁通漏和超声波检测数据中自动提取缺陷特征，不仅降低了人工判读的主观性，还能发现人工难以识别的早期缺陷，为管道风险的早期预警提供了可能。

在风险评估方面，机器学习算法如支持向量机和梯度提升树等被用于构建管道失效概率预测模型，通过整合材料特性和历史事故数据，实现对管道风险的精准评估，特别是基于贝叶斯网络的概率风险评估方法，能够有效处理管道系统中的不确定性因素，提供更为合理的风险评估结果。在预测性维护领域，时间序列分析和长短期记忆网络等深度学习技术被应用于关键设备的状态监测和故障预测，通过对传感器数据的实时分析，能够提前识别设备性能退化趋势，预测潜在故障，从而实现从被动维修向主动维护的转变。

3 智能管道建设下的天然气管道完整性管理

3.1 数据采集与处理系统

数据采集与处理系统是智能管道完整性管理的核心基础设施，其构建质量直接决定了管道完整性管理的有效性和智能化水平。该系统主要由数据采集层、数据传输层、数据存储层、数据处理层和数据应用层五个层次构成，形成一个完整的数据流转闭环。在数据采集层面，系统整合了多元化的数据源，包括SCADA系统实时采集的压力和流量等运行参数数据，分布式光纤传感网络监测的温度场和声场数据，智能清管器检测的内腐蚀和变形等缺陷数据，GIS系统记录的地理信息和环境数据。这些数据通过边缘计算设

备进行初步处理后，通过工业以太网和无线网络等多种通信方式，实现数据的安全和实时传输到数据中心。在数据存储方面，系统采用分布式数据库架构，结合关系型数据库与非关系型数据库，建立结构化数据与非结构化数据的统一存储平台，并通过数据湖技术实现海量原始数据的低成本存储和灵活调用。

数据处理是系统的核心环节，主要包括数据清洗和数据可视化等多个关键步骤，数据清洗环节通过异常值检测和噪声过滤等技术，确保数据质量，数据集成环节则通过建立统一的数据模型和元数据管理，实现不同来源和不同格式数据的有效融合。数据挖掘环节应用统计分析和深度学习等算法，从海量数据中提取有价值的信息和规律，数据可视化环节则通过二维图表和虚拟现实等技术，将复杂的数据分析结果转化为直观可理解的视觉呈现。

3.2 预警与风险评估模块

预警与风险评估模块的主要功能是通过对多源数据综合分析，实现对管道风险的系统化评估和预警，为管道安全运行提供科学决策支持。从架构设计角度，预警与风险评估模块主要包括威胁识别和预警响应等多个关键功能单元，威胁识别单元基于管道数据采集系统提供的实时监测数据，结合历史事故案例库和专家知识库，对管道系统可能面临的各类威胁进行识别和量化，后果分析单元则通过流体动力学模拟和GIS空间分析等技术，评估管道一旦失效可能导致的环境影响和经济损失等后果。

风险计算单元综合威胁识别和后果分析的结果，计算管道各段的风险值，风险分级单元根据风险计算结果，结合企业风险容忍度，将管道风险分为多个不同等级，并进行可视化展示。预警响应单元则根据风险等级和预警阈值，及时发出不同级别的预警信息，并提供相应的处置建议。

该模块充分利用了人工智能与大数据技术进行风险管理评估，基于历史数据构建各类威胁的机器学习预测模型，采用随机森林算法预测腐蚀失效概率，使用卷积神经网络识别管道裂纹风险，应用时空序列分析预测地质灾害对管道的影响等。通过贝叶斯网络建立多因素耦合的概率风险评估模型，能够动态更新各风险因素间的关联性，使风险评估更加符合实际情况。

3.3 决策支持系统设计

决策支持系统的功能是将复杂的监测数据和风险评估结果转化为明确的管理决策建议，为管道运营管理提供科学和高效的决策依据。从系统架构来看，智能管道决策支持系统主要由知识库子系统和人

机交互界面等多个部分组成，知识库子系统是系统的基础，包含管道设计规范和案例库等多类知识资源，模型库子系统集成了管道失效模型和检修优化模型等多种分析模型。方法库子系统则提供多种决策分析方法，推理引擎是系统的核心，通过融合规则推理和模型推理等多种推理机制，形成综合决策建议，人机交互界面则通过直观的可视化展示和交互操作，实现管理者与系统的高效沟通。

智能化是现代决策支持系统的显著特征，首先，系统采用知识图谱技术构建管道领域知识网络，实现知识的结构化表达和智能检索。其次，通过深度强化学习算法训练决策模型，使系统能够从历史决策中不断学习和优化。同时，引入情景推演技术，对决策方案进行多情景模拟与评估，预测不同决策可能导致的结果。最后，通过数字孪生技术构建虚拟管道环境，实现决策方案的可视化演示和验证，系统还具备自适应能力，能够根据决策效果反馈不断调整决策模型，提高决策准确性。在系统实施方面，采用分层和分布式架构，实现从管道基层到企业决策层的垂直贯通，并通过移动终端实现决策信息的及时传递和远程操作。同时，系统设置严格的权限管理和操作审计机制，确保关键决策的安全性和可追溯性。

4 结论

综上所述，传统管道管理方式往往依赖定期巡检和人工维护，存在信息滞后和成本高的问题，智能管道技术可以通过物联网和人工智能等手段，实现管道的数字化管理，提高运行效率，优化资源配置，降低运维成本。同时，管道完整性管理的核心目标是确保管道结构的长期稳定性，智能管道技术能够提供精确的腐蚀监测和剩余寿命评估，从而指导精准维护，避免过度维修或因检测不及时而导致的灾难性失效，延长管道服役寿命。

参考文献：

- [1] 史大明. 天然气管道完整性管理建设与关键技术分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(17):73-75.
- [2] 董志, 齐钊. 天然气管道完整性管理建设及关键技术[J]. 化工管理, 2024, (06):76-78.
- [3] 董绍华, 袁士义, 张来斌, 等. 长输油气管道安全与完整性管理技术发展战略研究[J]. 石油科学通报, 2022, 7(03):435-446.
- [4] 董绍华, 柳成浩, 于博鹏, 张云轩. 中国油气管道完整性管理 20 年回顾与发展建议[J]. 油气储运, 2020, 39(03):241-261.
- [5] 杨宇华. 浅谈城镇天然气管道完整性管理系统平台建设[J]. 安全与健康, 2014, (08):43-44.