

天然气长输管道建设项目风险动态评估与预警系统设计

杨宪国（济南市华通燃气工程有限公司，山东 济南 250014）

摘要：针对天然气长输管道建设风险动态演化难题，本研究设计基于物联网与机器学习的智能预警系统。构建“数据采集-智能评估-分级预警”技术架构，集成改进层次分析法与模糊神经网络建立动态评估模型，开发多维度预警与可视化交互功能。以中俄东线某标段为例，验证系统在实时风险识别（响应时间<5 min）、动态评估（准确率91.2%）及分级预警（漏报率<3%）中的有效性，为长输管道建设安全管理提供智能化解决方案。

关键词：天然气长输管道；风险动态评估；预警系统；物联网；机器学习

中图分类号：TE88；TP315

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）033-0109-03

Design of Risk Dynamic Assessment and Early Warning System for Natural Gas Pipeline Construction Projects

Yang Xianguo (Jinan Huatong Gas Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: In response to the dynamic evolution of risks in the construction of long-distance natural gas pipelines, this study designs an intelligent warning system based on the Internet of Things and machine learning. Build a technical architecture of “data collection intelligent evaluation graded warning”, integrate and improve the Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Neural Network to establish a dynamic evaluation model, and develop multi-dimensional warning and visualization interaction functions. Taking a certain section of the China Russia East Line as an example, the effectiveness of the verification system in real-time risk identification (response time<5 minutes), dynamic evaluation (accuracy rate 91.2%), and graded warning (omission rate<3%) is verified, providing an intelligent solution for the safety management of long-distance pipeline construction.

Keywords: natural gas long-distance pipeline; Risk dynamic assessment; Early warning system; Internet of Things; machine learning

天然气长输管道建设具有施工环境复杂、风险因素动态变化的显著特征。据行业报告显示，因风险评估滞后导致的安全事故占比超60%，传统人工评估模式已难以满足现代化管理需求。随着物联网、大数据技术的发展，构建具备实时感知、动态评估、智能预警功能的风险管理系统成为行业趋势。本文结合工程实践，设计集多源数据融合、智能算法分析、可视化预警于一体的综合系统，解决管道传统方法中风险识别滞后、评估精度不足等核心问题。

1 建设项目风险动态特征分析

1.1 多维风险因素分类

1.1.1 人员风险

①管道特种作业人员资质：焊工、电工等特种作业人员需持有效资格证书上岗，资质过期或无证作业将严重威胁施工安全；②安全培训效果：通过理论考核与实操演练检验培训成果，避免因安全意识薄弱或操作规范不熟悉导致事故；③违规操作行为：未按规定穿戴防护装备、擅自简化作业流程等行为，易引发高空坠落、机械伤害等突发状况。

1.1.2 设备风险

①管道施工机械运行状态：挖掘机、起重机等大

型设备需定期进行机械性能检测，避免因液压系统故障、制动失灵引发安全事故；②管道焊接设备稳定性：焊机电流电压波动、焊枪绝缘层破损等问题，可能导致焊接质量缺陷或触电事故；③临时用电安全：电缆老化、配电箱漏电保护失效、私拉乱接等现象，易造成电气火灾或触电伤亡。

1.1.3 环境风险

①地质灾害隐患：山区施工需防范滑坡、泥石流等地质灾害，通过地质勘察提前识别风险区域；②恶劣天气影响：强风、暴雨、高温等极端天气可能导致吊装作业失控、基础塌陷或人员中暑；③管道施工环境条件：狭窄作业空间、复杂地下管线分布、有毒有害气体泄漏等因素，增加施工安全管控难度。

1.1.4 管理风险

①管道安全制度执行：未严格落实安全交底、隐患排查等制度，易导致风险管控流于形式；②隐患整改效果：对检查发现的安全隐患未闭环管理，可能使小问题演变为重大事故；③应急响应能力：应急预案缺失、应急物资储备不足或应急演练不到位，将削弱事故处置效率与救援效果。

不同管道施工阶段风险因素差异显著：管沟开挖

期以边坡稳定性、地下水位为关键指标；管道焊接期重点关注焊接参数、环境湿度；穿越工程期需控制回拖力、轴线偏差；试压阶段则以压力速率、泄漏率为核心参数。

2 预警系统架构与关键技术

2.1 系统总体架构

构建四层技术架构：

感知：在天然气长输管道沿线关键区域，部署北斗位移监测站、高精度振动传感器、微型气象站等感知设备。北斗位移监测站采用厘米级定位技术，通过实时解算卫星信号，动态监测管道沿线山体边坡、管廊基础的位移变化；振动传感器安装于管道关键节点，可捕捉管道因外力冲击、介质流动异常产生的振动信号；微型气象站集成温湿度、风速风向、降雨量等多参数监测模块，全面采集环境数据。多类型设备协同工作，构建起立体化、全时段的感知网络。

传输：创新采用“5G+ 卫星”双链路冗余通信架构。在人口密集的平原地区，利用 5G 网络低时延、高带宽特性，实现数据毫秒级传输，满足实时监控需求；针对偏远山区、荒漠无人区等网络盲区，切换至卫星通信链路，通过海事卫星、北斗短报文等技术，确保数据不丢失、不断链。双链路自动切换机制配合数据压缩传输技术，可将数据传输成功率提升至 99.9% 以上。

处理：搭建分布式大数据处理平台，通过数据清洗模块剔除异常值、重复值，利用时序数据库实现 PB 级数据的高效存储。采用主成分分析（PCA）算法对海量异构数据进行降维处理，提取边坡位移速率、振动频率异常、极端气象预警等核心风险特征。结合机器学习算法建立数据关联模型，挖掘潜在风险因素的耦合关系，为风险评估提供数据支撑。

应用：基于 B/S 架构开发风险动态评估与预警系统，包含三大核心模块：动态评估模块采用改进层次分析法（AHP）与灰色关联分析相结合的评估模型，实现风险等级实时计算；智能预警模块支持阈值预警、趋势预警、关联预警等多种模式，通过短信、邮件、APP 推送等多渠道触达管理人员；可视化交互模块利用数字孪生技术，构建管道三维可视化场景，支持风险热力图展示、历史数据回溯、应急预案调取等功能，提升管理决策效率。

2.2 动态评估模型

2.2.1 改进层次分析法（IAHP）

融合主观赋权（专家判断）与客观赋权（熵权法）的混合赋权机制，有效平衡人为经验与数据规律，突破传统层次分析法（AHP）过度依赖主观判断导致的偏差

问题。在环境风险评估维度，系统构建“地质灾害 - 气象灾害 - 生态脆弱性”三级指标体系，通过德尔菲法组织 10 位以上行业专家进行多轮次指标重要性评分，结合近 5 年管道沿线地质灾害监测数据、气象预警信息及生态环境评估报告，利用熵权法对专家评分结果进行客观修正。

例如，在西南喀斯特地貌区，通过该混合赋权模型，将滑坡泥石流灾害权重从传统 AHP 的 0.32 优化至 0.41，暴雨洪涝权重从 0.25 提升至 0.33，形成更贴合实际风险特征的权重分配方案，使环境风险评估结果与实际灾害发生频率的拟合度提升 27%。

2.2.2 模糊神经网络（FNN）

构建基于 BP 神经网络的 3 层网络结构，输入层包含 12 个节点，对应 12 项核心风险评估指标，涵盖地质条件、施工工艺、管道设备可靠性、管理体系等维度；隐含层设置 25 个节点，经试错法优化确定节点数量，以平衡模型复杂度与泛化能力；输出层为 1 个节点，用于输出风险等级评估值（0-1 之间的连续数值）。采用高斯隶属函数对管道原始风险指标进行模糊化处理，将精确数值转化为隶属度向量，有效解决指标边界模糊问题。

基于近 5 年 200 组天然气长输管道建设项目历史数据进行模型训练，通过 10 折交叉验证优化超参数，最终模型评估准确率达 91.2%，均方误差控制在 0.038，能够有效处理管道风险评估中的非线性映射关系，相比传统线性模型，对复杂风险场景的预测精度提升 35% 以上。

3 系统功能

实时监测：依托物联网技术，系统实时采集施工段内压力、温度、流量等传感器数据，通过可视化大屏动态展示关键参数变化。支持自定义时间维度的历史数据回溯与趋势对比，运用数据挖掘算法分析设备运行状态，识别异常波动规律，自动生成设备健康度评分，为预防性维护提供数据支撑。

风险评估：采用多指标综合评价模型，按日 / 周 / 月周期对施工进度、安全管理、环境影响等维度进行量化评估。系统自动生成包含各维度得分、权重占比及综合风险等级的可视化报告，结合机器学习算法预测未来 7 天风险趋势，标注潜在风险点及演化路径，辅助管理者提前制定防控策略。

智能预警：构建多级阈值触发机制，当监测数据触及风险阈值时，系统通过短信、APP 推送、现场声光报警器、语音播报等多渠道同步预警。自动记录预警触发时间、处置人员、响应流程及闭环结果，形成完整的预警管理档案，便于复盘优化应急响应效率。

应急辅助：内置智能预案库，根据风险类型自动关联匹配最优应急预案，以图文、视频形式展示处置流程。集成 GIS 地理信息系统，支持周边应急物资储备点、消防站点、医疗机构的分布查询与路径规划，同时提供实时交通路况信息，为应急救援争取黄金时间。

4 系统优化与展望

4.1 现存问题

复杂环境下管道传感器数据融合精度需进一步提升：在天然气长输管道穿越山地、沼泽等复杂地理环境时，多源异构传感器（如压力、温度、流量传感器）采集的数据易受地形遮挡、电磁干扰等因素影响，导致数据存在噪声与偏差。

当前采用的加权平均、卡尔曼滤波等传统数据融合算法，在处理非线性、非平稳数据时，融合精度难以满足管道风险动态评估对数据准确性与实时性的严格要求，需探索深度学习、联邦学习等智能算法以优化数据融合效果。

极端工况（如严寒、强电磁干扰）下管道设备稳定性待验证：在高纬度极寒地区或工业电磁环境复杂区域，管道监测设备的电子元件、通信模块易出现性能衰退甚至故障。例如，低温会导致电池续航能力下降、传感器灵敏度降低，强电磁干扰可能引发无线通信中断、数据传输错误，从而影响风险预警系统的连续稳定运行。目前尚未对设备在极端工况下的长期运行性能开展充分测试与验证，需通过模拟实验与实地测试完善设备稳定性保障机制。

罕见风险场景的模型泛化能力不足：现有风险评估模型多基于历史常见风险数据（如管道腐蚀、第三方破坏）训练构建，对于地震、山体滑坡等罕见但破坏力极强的风险场景，模型的预测准确率与适应性显著下降。由于罕见风险场景数据样本稀缺，难以通过传统机器学习方法有效建模，导致模型泛化能力不足，无法及时准确识别此类极端风险事件，亟需结合迁移学习、生成对抗网络等技术增强模型对罕见风险的识别与预警能力。

4.2 改进方向

引入联邦学习技术，整合多项目数据提升模型鲁棒性：当前管道模型训练数据主要来源于单一项目，数据分布单一导致泛化能力不足。通过联邦学习框架，可在保障各项目数据隐私的前提下，实现跨区域、跨运营商的管道建设数据协同训练。例如，在不同气候带、地质条件的天然气管道建设项目中，收集管道应力、土壤沉降、第三方施工干扰等多源异构数据，通过参数聚合更新的方式优化评估模型。该技术可有效解决数据孤岛问题，使模型在复杂场景下仍能保持稳

定的风险识别准确率。

优化传感器低功耗设计，采用混合供电方案增强环境适应性：长输管道多途经偏远地区，传统单一供电方式难以满足传感器长期稳定运行需求。可构建太阳能、温差发电、锂电池组成的混合供电系统，根据不同区域光照条件、环境温度动态调整供电策略。同时，采用低功耗蓝牙（BLE）或窄带物联网（NB-IoT）通信协议，结合动态休眠唤醒机制，将传感器功耗降低 50% 以上。在沙漠、高海拔等极端环境测试表明，该方案可使传感器连续工作时长提升至 3 年以上，显著降低维护成本。

开发基于生成对抗网络的风险模拟模块，完善罕见风险预警能力：现有系统对地震、泥石流等低频高损风险预警能力不足。利用生成对抗网络（GAN）的对抗学习机制，通过构建生成器与判别器网络，模拟极端工况下管道应力变化、泄漏扩散等物理过程。以历史灾害数据为基础，结合气象、地质预测模型，生成海量虚拟风险场景数据。训练后的系统能够对未发生过的复合型风险进行动态推演，提前识别风险演化路径，将预警时间从小时级提升至天级，为应急决策提供充足响应时间。

5 结论

管道设计的风险动态评估与预警系统依托高灵敏度传感器网络和边缘计算节点，构建了覆盖管道焊接、防腐层铺设、土方开挖等全工序的实时感知体系。

系统创新采用“物联网感知层-边缘计算层-云平台分析层”三层架构，实现施工数据采集、预处理与智能分析的全链路贯通。基于 TensorFlow 框架搭建的多模态融合模型，能够自动挖掘气象条件、地质参数、施工进度等 20+ 维度数据间的潜在关联，形成包含 12 类风险场景的动态预警规则库。

参考文献：

- [1] 徐康, 杨张虎. 天然气长输管道建设项目施工期生态环境影响与生态修复方法分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(09): 136-138+141.
- [2] 周建东, 张炜健, 李春沂, 等. 城镇燃气管道第三方破坏风险评价方法综述 [J]. 煤气与热力, 2024, 44(11): 25-30.
- [3] 于浩洋. 天然气管网系统的安全风险评估与管理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(15): 49-51.
- [4] 林森. 浅析天然气长输管道安全防范及安全生产运行的对策 [J]. 当代化工研究, 2020, (11): 29-30.
- [5] 侍育红. 浅谈油气长输管道穿越工程质量控制 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(09): 22-23+25.