

# 智能监测技术在管线施工安全管理中的应用

苏晓文 (武威中石油昆仑燃气有限公司, 甘肃 武威 733000)

**摘要:** 本文以城镇燃气工程管线施工安全为研究对象, 对施工过程中存在的风险因素以及动态变化规律展开研究。在此基础上建立起了以“感知-传输-分析-决策”为架构的智能化监测技术体系。实现了从以前依靠人工经验判断到如今借助数据驱动的管理模式转变, 大幅度提高了安全监管效率以及工程质量保障水平。

**关键词:** 智能监测技术; 管线施工安全管理; 应用

**中图分类号:** TP391.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0110-03

## The Application of Intelligent Monitoring Technology in Pipeline Construction Safety Management

Su Xiaowen (Wuwei PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd, Wuwei Gansu 733000, China)

**Abstract:** This article takes the construction safety of urban gas engineering pipelines as the research object, and conducts research on the risk factors and dynamic changes that exist during the construction process. On this basis, an intelligent monitoring technology system based on the architecture of “perception transmission analysis decision” has been established. The transformation from relying on manual experience to relying on data-driven management mode has been achieved, greatly improving the efficiency of safety supervision and the level of engineering quality assurance.

**Keywords:** intelligent monitoring technology; Pipeline construction safety management; application

城镇燃气是城市能源的重要组成, 城镇燃气的管线施工安全同城市的稳定运行、居民生命财产安全密切相关。但是城镇燃气管线施工环境复杂, 存在多种安全风险, 比如管线破坏、气体泄漏、设备故障、违规操作等等。风险种类繁多, 变化莫测, 给施工安全管理造成很大困难。智能技术发展之后, 智能监测技术给城镇燃气管线施工安全管理提供新的解决思路。构建智能监测技术体系之后, 可以做到对施工全过程要素的实时感知、数据传输与处理、风险分析和决策等一系列智能化操作, 进一步提高施工安全水平, 减少事故发生率, 保证城镇燃气相关工作顺利进行。因此研究智能监测技术在城镇燃气施工安全方面有很重要的意义。

### 1 城镇燃气管线施工安全风险分析

城镇燃气管线施工安全风险呈现多样化特点, 可归结为三类主要类型:

**管线破坏隐患:** 包括前期资料缺失、标识不明或者操作失误导致的第三方误挖事件; 早期铺设的管道因为材料老化、接口松弛、地质沉降等因素影响, 在外部干扰下很容易发生泄漏事故。此类泄漏的情况比较隐蔽, 常规巡检不能提前发现。

**环境威胁:** 由于天然气的易燃易爆性及作业场地受限造成的。动火作业时气体聚集会形成爆炸性混合物, 而且地下气体扩散加重了危险; 封闭空间内未检测通风就施工作业, 易引发缺氧窒息等严重后果。

**设备运行和人为因素风险,** 机械设备故障, 挖掘

机没有及时的维护保养就会出现问題, 未经批准擅自进行动火作业, 或者进入危险区域没有采取任何防护措施等, 都是重要的安全隐患诱发因素。

城镇燃气管线工程施工的时候潜在风险具有动态演进的特征。开挖环节中, 管线破损和地质突变造成的安全隐患是主要的表现形式; 焊接工序中动火作业的安全管理以及易燃介质泄漏控制问题比较突出; 回填阶段管体密实度不够、接口密封性能差等问题要重点关注。

城市高密度交通区车辆振动加快地下管网老化, 疏浚不当增加防护功能失效的可能性; 人口密集区流动性增强, 非法入侵事件出现的概率也随之上升。此时, 创建起全生命周期里融合多种感知技术的智能化监测平台, 并且可以做到精确预警, 就显得十分关键和必要。

### 2 智能监测技术体系构建

#### 2.1 多源数据采集层: 全维度感知施工风险

数据采集层为智能监测打下基础, 利用在管线、环境、设备、人员处设置的多类型传感器网络来实现对其实时状态的感知, 给风险分析提供原始数据。

管线状态监测采用 DFS, 沿燃气管线敷设光缆, 通过光纤背向散射效应对管线的应变和温度进行监测。检测到的光波相位变化能及时察觉管线因土壤沉降、第三方施工挤压或者内部压力波动而产生的形变, 从而提前警报断裂危险, 异常温升也能大致判定泄漏所在及规模。长距离、抗电磁干扰、耐腐蚀的特性,

使其适合于在城镇复杂的地下环境中做长期监测。

气体环境监测，在施工区域设置电化学传感器、红外传感器，形成气体浓度立体监测网。电化学传感器用催化燃烧反应来检测甲烷浓度，动火作业区域使用可燃气体泄漏预警；红外传感器依靠气体分子吸收光谱原理，对密闭空间中的氧气含量进行实时监测，防止出现缺氧窒息事故。结合温湿度、风速等环境参数，用算法修正后的读数能提高检测的准确性。

设备状态监测，对施工机械、燃气设备安装振动传感器、电流传感器。振动监测用三轴加速度传感器捕捉设备运行过程中产生的振动特征，再配合频谱分析技术识别机械设备存在的问题；电流监测实时追踪设备电机电流变化，判定是否存在过载运转或者电气短路故障等情况。

人员定位监测采用 UWB（超宽带）定位技术，给工作人员佩戴带有标签的设备，在基站附近布置基站，实现厘米级的精确定位。在动火区、管沟等存在较大安全隐患的地方设置电子围栏，如果有人未经许可擅自进入，就会触发报警信号，防止事故的发生。另外该技术还具有应急救援的功能，如果发生事故可以快速定位被困人员，还可以追踪行为轨迹，记录每个人的活动路径以及停留时间，分析是否存在违规操作或者长时间待在危险环境中等情况。

## 2.2 数据传输与处理层：高效可靠的信息通道

施工环境中的数据传输会遇到地下空间信号衰减、众多设备并发通信等复杂情况，严重影响现场信息交流效率，给工程进度和安全监管带来不良影响。本方案采用无线通信技术和边缘计算架构，实现低延时、高可靠的数据传输，并且具有本地智能处理的能力。

地面部分使用 5G 和 LoRa 混合组网的方式，一方面利用 5G 网络高速率、大带宽的特点，满足监控终端和无人机高清视频流及大量传感数据实时回传的需求，另一方面在深埋管道、阀门井等存在屏蔽现象、隐蔽性较强的场所设置 LoRa 终端节点，利用其远距离覆盖的优势，保证传感器数据稳定发送，延长设备工作时间，降低维护成本。

在施工场地周围安装边缘计算设备，对原始数据进行初步的预处理，并做基本的分析。在此期间，展开数据清洗程序，剔除噪声干扰，修正异常值，改善数据质量，为之后的深入挖掘工作提供可靠的支持。系统对于甲烷浓度超标等突发状况可以立即启动本地报警模块，提高应急反应速度，保证安全防护措施能够及时有效的实施。用轻量化风险评定算法预测设备故障和管道形变等的发生概率，既可以减轻云端的运

算负担又可以提高整体的运作效率。

利用无线通信技术的特点优势，结合无线通信技术所具有的优势特点，形成了边缘化架构方案设计方法，在建筑工地应用实践中效果突出，形成高效稳定的网络通讯体系，有力推动整个工程领域数字化转型进程。伴随着技术的不断发展，方案功能越来越完善，在建筑施工领域中为安全保证、品质改善提供更强大的技术支撑。其适应性强，可以灵活应对不同工程项目需求的变化，未来前景广阔，可以推广到更多的地方，助力建筑业快速实现数字化转型。

## 2.3 智能分析与决策层：数据驱动的风险主动防控

本层利用人工智能算法以及可视化平台实现风险智能预测、分等级预警、决策支持等功能，使得安全管理由原来的被动应对转变为现在主动防控。

风险预测，用长短期记忆网络（LSTM）处理时间序列数据，创建管线泄漏、设备故障等风险预测模型。把管线应变，气体浓度，设备振动，历史事故记录等当作输入特征，来预测接下来 24 - 72h 里出现风险的大概概率和大概位置，从而给施工计划的调整给予依据。迁移学习技术，用其他项目数据对预训练模型进行训练，减少本地化适配时间。

风险分级预警，结合阈值报警和趋势预测，形成“红 - 橙 - 黄 - 蓝”四级警报。当甲烷浓度超过爆炸下限（LEL）的 20%、管线应变超过设计承受力的 70% 等情形出现时，立刻触发最高等级警报；对于未达阈值但快速上升的数据，先发出预警，让有关人员能及时介入。

创建 BIM（建筑信息模型）施工安全监控平台，把三维场景同监测数据融合起来，在 BIM 模型里实时动态标注管线状况，气体浓度，设备方位，人员分布等信息，清楚显示风险热点区域。可以按照时间轴回放施工过程中有关的数据，方便事故调查、责任追究。该平台有风险处置预案库，对不同预警类型给出相应的应急处理方法，比如关闭阀门、疏散人群等，大大提高了决策速度，给城镇燃气施工安全保障提供全方位智能化支持。

## 3 智能监测技术在燃气管线施工中的核心应用场景

### 3.1 施工前风险预判：前置化风险防控

施工前的风险预判，对降低事故发生率起到重要的作用。智能监测技术用数据驱动、智能识别功能来对施工区域的风险进行精确评估并可视化展示。

一方面，整合以前燃气施工事故记录（管线破坏点、泄漏原因、事故后果等），利用 GIS 技术绘制出施工区域不同区块的“风险热力图”，按照各类事故

发生频次和严重程度将其分为高危、中危和低危三个等级。其中红色表示第三方施工单位活动频繁、地质情况复杂、老旧管线老化严重的地方，称之为“高危地带”。

当新录入的数据或者管线改造消息加入时，可以立刻对相应的版块进行更新，为正在制定当前施工方案的人员提供一个动态的参考依据，使其对作业路线进行调整，避开高危区域，采取更多的防护措施，例如增加管线标示牌的数量，增加监控装置的数量等。

另一方面，由于缺少详细的旧城区管线档案资料，造成地下管网结构错综复杂，采用 GIS 地图与 AI 图像识别相结合的方式准确找到。把过去的地质探测报告、卫星拍摄的照片等所有相关图纸材料导入 GIS 平台，在三维立体构造下完成地底网络模型的搭建。利用无人机从空中俯瞰的角度或者地面摄像头拍摄的地表图像画面，用深度学习算法识别井盖、标识桩等信息特征，修正原有管线位置偏差问题。最后，在整个施工计划安排期间，预先设定好挖掘机、打桩机等机械设备的实际操作范围，输入到该软件中，由其自行检测是否存在可能引发误挖的地方，提前予以规避。

### 3.2 施工中动态管控：实时化风险干预

施工期间动态控制要涵盖管线、气体排放、人员出入、设备运转等主要方面，用物联网技术进行全过程实时监测。依靠智能算法来创建阈值预警模型以及行为轨迹分析系统，从而及时发现潜在的风险并快速应对。

**管道保护：**在开挖区域周围布置分布式光纤传感（DFS）或者应变计网络，连续跟踪应力变化走向。当土壤发生扰动或者受到机械挤压，局部应力超过设计承载力的 60% 的时候，就会自动发出警报，并且把消息传递给施工单位以及监管平台。同时根据以往的数据来预测未来 24h 内的应力波动情况，给支护策略的改进提供参考。

**气体泄漏：**采用电化学传感器阵列结合扩散模型进行精确定位，采用多源浓度梯度算法结合风速、温度等因子找到漏点，误差  $\pm 5m$ 。之后用 CFD 仿真模拟来剖析甲烷的空间分布情况，划定危险区域，给出应急处置方法。

**违规操作行为检测：**依靠 UWB 定位技术以及计算机视觉的方法来实现可视化监督。在作业现场设置摄像头来收集图像信息，来判断工人是否按照规定戴上了防护装备（气体报警器、安全帽等）。不符合要求的时候，立即发出声光提示并记录异常事件。对重要的管控区域设置电子围栏，防止非授权进入。一旦有人非法闯入，立即启动应急预案，向有关人员发送

警示信息。

### 3.3 施工后质量评估：数据化验收保障

施工结束后，质量评判的重点在于管线完整性、焊接工艺和回填密实度这三个方面。利用智能监测系统当中的无损检测技术、传感网络平台来实现评价结果的客观化、量化。

**焊接品质检验：**用声发射传感器采集材料内部缺陷引起的弹性波信号，通过频谱分析法得到振动特性参数（峰值频率），从而判断出裂纹或者气泡等具体缺陷的种类。按照这些缺陷的严重程度来生成详细的品质报告，把不合格的焊缝位置标记出来，然后启动修补程序。

**回填密实度监控：**用安置在土层表面的压力传感器来实时监测压实的情况。压实率低于设计标准值的 90% 时发出警报，根据以往的数据资料和土壤力学模型来预估下沉的危险性，作为后期养护工作参考。

通过应用场景的落地，使智能监测技术把燃气施工安全管控模式从原来的“人工经验”导向转变为现在的“数据智能”导向，提高燃气施工风险防控水平以及工程质量的可靠程度。

## 4 结束语

智能监测技术在城镇燃气管线工程安全管理方面的应用，给传统管理模式的弊端提供革新途径。通过建立多级智能化观测体系，实现施工全过程中对安全危险的即时发现和动态报警，并采取相应的干预措施加以控制。从事前排查隐患、中间阶段过程监督、到最后的质量评定，贯穿于项目全生命周期各个环节之中，给工地操作提供全方位的安全保障。大大提升了风险应对能力，明显降低了事故发生的概率，有效改善了工程质量稳定性，促进了行业向数字化方向发展。随着科技的发展，智能检测装置将会在提高城市能源供应可靠度上起到更重要的作用，助力区域可持续发展的目标得以实现。

### 参考文献：

- [1] 冯淼, 江兆尧. 基于 AI 的智能建造安全监测与预警研究 [J]. 中国建设信息化, 2025, (08): 70-73.
- [2] 金鹏举. 智能化监测在水利工程施工安全管理中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (07): 181-183.
- [3] 闫静雯, 李伟, 王毅, 等. 深基坑施工安全智能监控系统应用研究 [J]. 低温建筑技术, 2025, 47(05): 62-65.
- [4] 张庆, 周小函. 智能监测技术在施工现场安全文明管理中的应用 [J]. 安家, 2022(1): 226-228.
- [5] 张锐. 地下管线智能化监测技术在地铁施工中的应用 [J]. 城市住宅, 2021, 28(1): 3-3.