

天然气管道智能巡检技术发展现状与趋势

刘天玮（山东港华燃气集团有限公司，山东 济南 250000）

黄从坤（山东济华润昌燃气有限公司，山东 聊城 252100）

摘要：天然气管道作为能源输送的“生命线”，其安全运行对国家能源战略和社会稳定至关重要。传统人工巡检存在效率低、风险高、数据滞后等问题，而智能巡检技术通过融合物联网、无人机、大数据分析等前沿技术，实现了管道状态的实时感知、精准诊断与智能决策。本文系统梳理了智能巡检技术的发展现状，包括无人机巡检、机器人检测、光纤传感、物联网监测等核心技术，分析了其在管道泄漏检测、腐蚀评估、第三方施工预警等场景的应用案例，并结合 5G、AI、数字孪生等技术趋势，展望了未来智能巡检的发展方向。

关键词：天然气管道；智能巡检；物联网；无人机；大数据分析；数字孪生

中图分类号：TE832；TP274+.4 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)029-0010-03

Development Status and Trends of Intelligent Inspection Technology for Natural Gas Pipelines

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

Huang Congkun (Shandong Jihua Runchang Gas Co., Ltd., Liaocheng Shandong 252100, China)

Abstract: Natural gas transportation pipeline is the lifeline of energy transmission. Its safe operation plays an important role in national energy strategy and social stability. Classical pipeline inspection methods are characterized as low efficiency, high risk, and data lag. While intelligent pipeline inspection technology combines current advanced technologies including the Internet of Thing, drone, big data analysis, for real-time perception, accurate diagnosis, and intelligent decision-making on the condition of pipelines. This paper reviews systematically the situation of current intelligent inspection technology development, including the intelligent technologies key points of unmanned aerial vehicle inspection, robot detection, fiber optic sensing and Internet of Things monitoring. It has studied its application scenarios in pipeline pipeline leak detection, third-party construction alerting, corrosion detection, and integrated with 5G AI. The future direction of digital twins, and others technology has given foresight to the future development trend of intelligent detection.

Keywords: natural gas pipeline; Intelligent inspection; Internet of Things; UAV; Big data analysis; Digital twin

1 智能巡检技术发展现状

1.1 无人机巡检技术

无人机巡检是通过搭载高清相机、红外热成像相机、激光甲烷探测相机等完成管道沿线的快速扫描及数据采集。例如云南昆仑燃气结合 8K 云台相机、5 镜头相机在昆明西支线实施千寻翼 X4 无人机作业，完成了 40km 的管道三维建模，预警第三方施工作业 10 余起。新昌试点项目通过优化 4G/5G 网络，实现 13km 管道无人机巡检视频回传，检测精度 PPB 级。

无人机巡检具有不受地形影响，对于山区、河网等难以到达的区域巡检及时的优点，但具有续航距离短、天气敏感等缺点，将来需要增强无人机电池及避障算法，配合卫星遥感信息进行数据融合。

1.2 机器人巡检技术

目前管道机器人主要有轮式、履带式、爬行式等形态，可以搭载超声、电磁超声、漏磁等传感器对管道内壁进行精检测。例如掌桥科研的基于 TRIZ 方法设计的管道腐蚀检测装置，通过 8 轮定位驱动结构、

滑块变径结构实现不同管径管道的高效检测。连云港新奥燃气引进的 PPB 级超高精度激光巡检车，车顶泵吸装置实时测算甲烷浓度，每日可巡查 50–80km，检测效率是人工的 250%。

自主导航、多模态感知和边缘计算等是机器人巡检的核心技术，例如防爆巡检机器人基于 SLAM 算法构建的厘米级地图、声纹分析和红外热成像等，实现设备故障提前 72h 预警。

1.3 物联网与传感器技术

采用物联网技术，布设智能传感器网络实时采集管道的压力、温度、流量等参数，达到对管道状态动态监控，如 FIFISIM 物联的物联网方案通过边缘计算网关对采集数据的实时性分析，可提前发现管道堵塞、泄漏等隐患；深圳燃气建立的 5G 管道泄漏灾害预警平台采用毫米波雷达穿透泡沫层，对液位进行监测，精度为 $\pm 1\text{mm}$ 。

高灵敏度和小型化。MIT 开发的纳米尺寸的甲烷气体传感器能实现管道覆盖检测，量子重力传感器利

用原子干涉测量技术可开展深层地下探测。

1.4 大数据与 AI 分析技术

大数据分析通过历史巡检数据、环境数据、设备运行数据等数据收集构建管道健康的评估模型，比如国家管网集团通过 10 万+ 设备参数样本建立数字孪生模型，提前 72h 实现法兰渗漏、轴承磨损等故障预警，杭州天然气公司 AI 智能监控，通过对施工地现场的机械设备动作识别第三方施工风险等。

2 智能巡检技术应用案例

2.1 第三方施工预警

云南省昆燃公司积极应用无人机与地面人工的双重巡检方法对昆明西支线进行巡查。无人机可以高空俯视、视角广，在较短时间内对大面积空间进行快速扫描，在短时间内能够明确危点隐患准确位置。在一次巡线时无人机发现了管道边上有疑似施工的迹象，巡线人员立即安排人工巡线到该地区进行检查。巡线人员进行排查发现后及时消除了多起管道开挖的隐患，有效防范了机械开挖造成的管道破坏，有效保护了管道的安全使用。

作为杭州天然气公司的另一个做法是，通过引进 AI 智能监控系统，加大了安全防控力度。相关摄像头密布于工程施工现场，能即时精准分析施工现场情况，当挖掘机在场地作业长时间不动时，系统内置智能算法便会马上报警预警，自动报警，从根源上消灭了安全风险，为保护天然气管道的安全上了一道“智能保险箱”。

2.2 泄漏检测与定位

深圳燃气在 5G 应用技术发展背景下推出的管道泄漏灾害预警平台，搭载激光甲烷探测仪及压力传感器，一旦出现管道泄漏，通过灵敏的感知预警功能，可在 10s 内识别出泄漏点的具体位置。以往通常需要 30min 的处置时间，运用该平台后，其处理时间压缩到了 5min，整体的应急处理效率有了很大提升，可以有效降低险情风险。

淮北华润燃气则引进了检测车，是采用的高精准检测车，车上搭载的探测技术是 PPB 级激光检测技术，其灵敏度非常高，在 139km 的长度管道上，精准核实及处理出 2 处漏气点，特别是在老旧城区中，管网较为复杂的情况下，该检测车起到很大作用，为老旧城区的燃气安全供应提供保障。

2.3 腐蚀与缺陷评估

掌桥研发的腐蚀检测装置综合了超声技术和漏磁，实现了对管道壁厚几乎测量 100%（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ），对杭电化项目管道潜在风险提前发现，每年节约维检修费用 300 万余元，保障项目运营稳定和经济效益。

北斗时空智能油气管道智慧桩，通过 GNSS 毫米级位移检测技术，变成敏锐的“哨兵”，无间断监测地质情况，24h 对可能危及管道安全的地质灾害进行预警，在四川乐山示范区开展智慧桩，成功发现 6 个地灾隐患点，为管道运行安全提供可靠保障。

3 技术发展趋势

3.1 空天地一体化巡检

接下来，智能巡检会将卫星遥感、无人机、地面机器人和地理传感器等先进科技手段充分利用起来，打造“空天地”一体化全方位感知、立体化的监测网络。

“空”，能够利用卫星遥感能够监测距离地面 100km 以上，用宏观、高效的方式、对天然气管道沿线的非常大区域进行、进行定期、巡回、监测、发现地形地貌、局部、变化以及周边环境问题；“天”，可以利用无人机它能够克服地形的复杂和到达很困难、很复杂的地区，然后在非常低的高度、对管道设施高分辨率的图像是有效获取，提供给地面获取非常好的图片、对管道本体以及地面附属物、地面设施、周边环境进行近距离的观测；“地”，它沿着管道的铺设进行自主导航，在行驶的过程中通过搭载的不同的先进传感器对管道的运行、工况的关键参数的自动检测；

“空”是指地理传感器它巧妙地放在管道的周围土壤地下，检测管道周边是否漏出、腐蚀等。

例如数筒科技打造的空天地一体化应用方案，利用、把卫星遥感的地表获取的宏观的地理信息、把无人机拍摄的一些高清图片以及、物联网所获取的物联网的数据进行高速的、高度的收集和汇总，利用先进技术的算法进行人工智能算法的一些处理，达到了对管道周边地形的变化精准地识别目的。使得天然气管道巡护效率大大提高，而且准确率、精准性也得到了有效的提升，能够对天然气管道在安全稳定运行起到很好的保护。

3.2 5G 与边缘计算赋能

5G 技术通过低延时高带宽的优势大大增强了无人机巡检的应用，极大地提高了无人机巡检视频的回传、远端精准操控。例如新昌的无人机巡检项目通过当地对 4G/5G 基站的深度优化，解决山区地形复杂、信号难以覆盖的困难，实现之前信号最薄弱的山区也都全面覆盖了。针对视频回传，视频清晰度较以往增加了整整 3 倍，为巡检人员提供更为清晰、精准的现场画面，大幅提升巡检准确性与可靠性。边缘计算也使数据处理环节下沉到了设备端，大大降低数据的传输时间，将决策周期大大地缩短。例如华为 AirEngine8760 实际应用于化工厂区时，采用边缘计算后，能够实现在 100m 时延的保障下，小于 20ms 时延的通讯效果，使

数据的计算和分析在设备端就可以迅速完成，相应的决策完成时间就会大大缩短，可以为化工厂区这样的高安全性和极强响应性要求提供了坚实的科技保障。

3.3 数字孪生与AI深度融合

智能方法中最具有颠覆意义的手段是数字孪生技术，它的应用主要是对数字空间和物理空间之间的相关要素进行动态交互式的数据集成，在天然气管道巡护方面，即对所有管道数据进行数据集成和采集，制作高真实感的数字化管道三维模型，实现对管道实际物理形式的准确表达，以及管道的实时运行状态，并且也可以对潜在的故障场景进行模拟，比如通过星图金能三维数字孪生平台的3D模型高效集成SCADA(数据采集与监视控制系统)的数据，利用数据分析以及可视化技术，将站场的设备运行映射成动态映射。

能够让维修人员快速发现设备异常，对于设备的维护起到了大幅提高其故障率50%的效果，降低了管道的故障停机时间。另一方面是算法为数字孪生模型的优化注入了动力，比如泄漏扩散模型预测算法是基于超过10万的样本训练得出泄漏扩散的预测模型，通过利用数据进行深度学习和大数据分析技术对管道内的压力、流速等参数进行在线分析监测，能够在3天之前对管道中存在的泄漏缺陷进行预报，提高管道安全运营水平。

3.4 量子传感与脑机接口探索

新型量子传感技术是未来深层地质结构检测中的有力工具。例如英国的国家物理实验室研制的一款新型量子重力传感器灵敏度高，可以有效地探测到埋藏于地下管道所出现的异常，哪怕仅有毫米级的变形，在地下管道异常出现时进行异常预警。脑机交互技术同样也是巡检领域极具创新的交互方式。南开大学针对脑机交互技术的研究，将脑机接口技术用于医学领域，帮助脊髓损伤患者只需要用意念就能用机器人进行简单的动作，将来如果应用于管道巡检，巡检人员同样可以通过这样的设备更好地用于巡检机器人，从而更好地交互设备，达到巡检效率的提升。

4 结论与展望

智慧巡检技术是一种基于物联网、无人航空器(无人机)、大数据云处理等技术创新发展起来的用于天然气管道巡线的技术。目前，智慧巡检正在逐渐减少、替代以往的人为巡检方式，快速向智慧化、无人化转型，在实现智慧化过程中，还需要奋力攻克以下技术难题。

4.1 信息多元融合

卫星信息能从宏观上获取管道地理资料，无人机

可在近距离范围获取管道的管体和相关环境照片信息，而管道的各种传感器也能实时在线测得管道内部压力、温度等相关数据信息。我们可以有效设计一种快速有效融合多种数据信息的技术系统，将这些海量信息进行集成和有效整合处理，通过强大的数据挖掘和处理算法实现对管道运行数据的精确诊断，全面掌握管道的运行状态。

4.2 自主决策功能

通过强化学习训练算法，以即时获取的管道运行信息、环境动态及之前巡检经历生成最优巡检路线和巡检任务；并在遇到管道漏液、邻近施工干扰等危险情况下，快速做出自主决策、应对策略等，提高巡检效率及规避风险的能力。

4.3 低成本

量子传感器超高灵敏度的特点可能将成为管道巡检的一次革新；针对微传感器进行设计迭代与优化，降低更便利的分布式部署实现。促进此类新技术、新设备、新产品的商业化，自芯片级到模块级再到系统级，逐步降低产品的生产成本，使智能巡检产品的性价比更高、应用更广。

4.4 相关标准和政策

智能巡检技术推广应用需完善的支撑标准体系。相关行业应组织相关单位和科研院所等制定包括设备性能、信息采集与处理标准、巡检业务流程等在内的技术标准，同时，政府应当加紧建立完善数据安全和信息隐私方面的法律法规，规定好数据采集、存储、传输、利用等环节安全和监管要求，以形成智能巡检技术发展的良好政策环境。

相信在以上这些技术的不断发展与进步之下，管道智能化巡检必将会是天然气管道安全运维的主要手段，并为国家能源安全的维护贡献一份自己的力量，也为智慧城市建设中的天然气使用提供安全平稳的保证。

参考文献：

- [1] 田明亮. 基于无人机的山区天然气管道智能巡检系统设计与应用[J]. 化工管理, 2023, (01): 135-137.
- [2] 乔治, 杨迪, 黄东江. 智能巡检系统在天然气净化厂的应用探讨[J]. 化工管理, 2018(14).
- [3] 龚俊. 天然气管道自动化控制技术研究[J]. 中国石油石化, 2016(S2).
- [4] 卢建明. 长输天然气管道特殊地段无人机智能巡检技术研究[J]. 中国新通信, 2018(22).
- [5] 梁晓龙. 数字天然气管道的建设与管理初探[J]. 石油工业技术监督, 2010(02).