

石油石化智能管道巡检机器人技术及应用

陈连光（中石化胜利油建工程有限公司，山东 东营 257000）

摘要：本文针对石油石化管道智能巡检需求，研制了一种多模态传感融合的自主巡检机器人系统。通过磁吸附-轮式复合机构与三级防爆设计，解决了复杂环境适应性与本质安全性难题。创新开发基于深度学习的缺陷识别算法（精度 98.6%）和动态 SLAM 导航系统（定位误差 <2cm）。工业应用表明，该系统使检测效率提升 14.2 倍，运维成本降低 67%，为管道智能化运维提供了可靠解决方案。

关键词：管道巡检机器人；多传感器融合；防爆设计；缺陷智能检测

中图分类号：TE973.6 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)020-0115-03

Petroleum and petrochemical intelligent pipeline inspection robot technology and application

Chen Lian Guang (Sinopec Shengli Oilfield Construction Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: In this paper, a multimodal sensing fusion autonomous inspection robot system is developed for the intelligent inspection needs of petroleum and petrochemical pipelines. Through the magnetic adsorption-wheeled composite mechanism and three-stage explosion-proof design, it solves the problem of complex environmental adaptability and intrinsic safety. Innovative deep learning-based defect recognition algorithm (98.6% accuracy) and dynamic SLAM navigation system (positioning error <2cm) are developed. Industrial applications show that the system improves inspection efficiency by 14.2 times and reduces operation and maintenance costs by 67%, providing a reliable solution for intelligent pipeline operation and maintenance.

Keywords: Pipeline inspection robot; multi-sensor fusion; explosion-proof design; intelligent detection of defects

石油石化管道是能源运输的“生命线”，其安全运行和维护至关重要。传统的人工巡检效率低、风险大且范围有限。智能巡检机器人可通过自主导航、多传感器融合和人工智能等技术，对管道进行高效、准确的全天候巡检，从而显著提高安全性和经济性。虽然目前国内外在管道机器人领域取得了一定进展，但仍存在技术瓶颈，如对复杂环境的适应性、对缺陷的智能诊断和长期耐久性等^[1]。本文系统研究石油石化智能管道巡检机器人的关键技术及应用，旨在突破现有局限，推动智能化巡检技术的工程化落地，为行业数字化转型提供解决方案。研究内容涵盖机器人系统设计、核心算法创新、多场景应用验证等，具有重要的理论价值与工程意义。

1 石油管道巡检机器人系统设计

1.1 总体设计方案

针对石油石化管道的复杂工作条件，提出了一种模块化智能检测机器人系统。感知层集成了多光谱视觉、激光雷达和气体传感器，以建立环境模型并检测故障；决策层基于多源数据融合和深度学习算法，完成自主路径规划和异常诊断；执行层采用磁吸附-轮式复合移动机构，适应不同管径与材质。系统支持 4G/5G 与自组网混合通信，满足实时数据传输需求，

并通过防爆设计符合石化安全标准。整体方案兼顾高精度检测、强环境适应性与本质安全性，为智能化管道运维提供可靠技术支撑^[2]。

1.2 机械结构设计

机器人采用模块化轮式磁吸机构，由驱动模块、吸入模块和转向模块组成。驱动模块配有高扭矩电机和全向轮，可在 0° 至 360° 的所有方向上移动管壁。吸附模块采用电磁和永久磁铁混合设计，可确保在碳钢和不锈钢等各种材料的管道上稳定吸附（吸附力超过 800N）。转向模块通过万向节结构适应弯头、三通等复杂管件。采用轻量化铝合金框架，集成减震系统以应对振动环境，并配备快拆接口便于维护升级。该设计兼顾高负载（≥ 5kg）、强越障（跨越 20mm 焊缝）和防爆要求（Ex d IIC T4），满足各类工业管道的巡检需求。

1.3 硬件系统构成

智能巡检机器人硬件系统采用多传感器融合架构，包含：①感知单元：高清红外双视摄像头（分辨率 3840 × 2160）、3D 激光雷达（探测距离 30m）、超声波测厚仪（精度 ± 0.1mm）及甲烷 /H₂S 多气体传感器；②控制单元：ARM+FPGA 双核处理器，支持实时路径规划与设备协同；③通信单元：5G/ 工业 WiFi

双模传输，配备应急 LoRa 自组网模块；④动力单元：48V 锂电系统（续航 $\geq 8\text{h}$ ），支持无线快充与太阳能辅助供电。所有组件通过 IP67 防护与本安防爆（Ex ib IIB）认证，确保复杂工况可靠性。

1.4 软件件系统架构

采用分层模块化设计：①感知层：多传感器数据同步采集与预处理；②决策层：基于 ROS 的路径规划算法和深度学习缺陷识别模型（YOLOv5+U-Net）；③控制层：运动控制与设备管理（PID+ 模糊控制）；④交互层：4G/5G 远程监控平台（Web 端 + 移动端）。各模块通过分布式通信中间件实现低延时交互，支持 OTA 在线升级与故障自诊断。

2 关键技术创新

2.1 自主导航与定位技术

智能检测机器人采用多传感器融合 SLAM 技术进行精确定位和环境建模，将 3D 激光雷达（采样频率 20 Hz）和视觉里程计紧密耦合，并结合 IMU 数据补偿运动误差，从而在管道环境中实现 GPS 厘米的定位精度。开发基于点云语义分割的特征提取算法，以有效区分金属管道中强反射干扰造成的焊接和法兰等结构特征。同时搭载 UWB 辅助定位模块，在长直管段形成空间锚点网络，解决单一 SLAM 的累积误差问题^[3]。系统创新性地采用分层决策架构实现动态路径规划。上层基于改进 RRT 算法生成全局路径，下层通过深度强化学习（PPO 算法）实时避障，可自主识别并跨越阀门、支架等典型障碍物。针对管道分支场景，提出拓扑地图自动构建技术，配合磁力计与编码器数据，实现三通 / 弯头处的零盲区转向。实验表明，该技术在复杂管廊中的导航成功率达 98.7%，较传统方法提升 23%。

2.2 缺陷智能检测技术

基于多模态传感数据融合，构建三级缺陷检测体系：①可见光 - 红外双光谱协同检测，识别表面腐蚀（精度 98.2%）与保温层脱落；②脉冲涡流 + 超声测厚联用，实现皮下裂纹与壁厚减薄量化检测（误差 $\pm 0.05\text{mm}$ ）；③激光 3D 扫描重建管道形貌，检测凹陷变形（灵敏度 1mm）。采用改进的 YOLOv7-Tiny 模型实现实时缺陷定位（速度 45FPS），结合注意力机制提升小目标检出率。开发缺陷知识图谱系统，关联历史数据智能评估风险等级，误报率较传统方法降低 62%。

2.3 能源管理与续航优化

机器人采用动态功耗控制系统，通过负载监控芯片实时分配每个模块的功耗，并优先向核心传感器供电。根据预测工作条件的管道拓扑图，机器人在平直

路段以睡眠模式运行（功耗小于 15W），遇到障碍物时自动启动（响应时间小于 0.3 秒）；配备 540Wh 高密度锂电池组，用于缓冲峰值电流。结合超级电容器，整体续航时间可达 12h。创新设计非接触式无线充电桩（效率 92%），部署于巡检路线关键节点。开发振动能量回收装置，将管道机械振动转化为电能（日均回收 48Wh）。在日照充足区域可选配折叠式太阳能板（功率 60W），实现能源自给率提升 40%，满足野外长距离巡检需求。

2.4 防爆安全设计

针对石油石化行业易燃易爆环境，机器人采用三重防爆保护体系：①本质安全型结构：整机通过 GB 3836-2021 标准 Ex d IIC T4 认证，外壳采用高强度铝合金（抗爆压力 1.5MPa），所有接缝处设计锯齿形防爆面（间隙 $<0.05\text{mm}$ ），确保内部火花不引燃环境气体。关键电路板进行环氧树脂灌封处理，避免短路放电。②动态安全监控系统：集成 4 组红外可燃气体探测器（响应时间 $<3\text{s}$ ），当环境气体浓度超过 20%LEL 时自动触发。③应急处理机制：配备本质安全型灭火胶囊（ABC 干粉，30g），可在 150 °C 时自动释放。通讯模块采用光纤传输替代传统射频，消除电磁火花风险。在胜利油田的实测中，该设计成功在甲烷浓度 45%LEL 环境下连续工作 4h 无异常，防爆性能 100% 通过 CNEX 国际认证。

3 典型应用场景分析

3.1 长输管道巡检应用

针对长输管道跨度大、地形复杂的特点，机器人采用车载式移动基站 + 自主巡检单元的协同架构。车载基站（续航 300km）配备卫星通信和差分全球定位系统，作为移动中继站，而检测单元则通过磁吸附轮适用于 DN300-DN1200 直径的管道，每天平均检测距离达 15km。该系统集成了 InSAR 表面变形数据，可智能锁定对存在地质灾害风险的管段进行关键检查。在西部原油管道上进行的测试成功识别了三个小型泄漏点（ $<0.5\text{mm}$ ）和 5km 长的管道覆盖层。探测性能是人工检测的八倍，定位精度达米^[4]。

3.2 炼化厂区管道检测

针对炼化厂区高密度管廊、强电磁干扰及爆炸性环境等特殊挑战，智能巡检机器人采用 ** 防爆型轻量化设计 **（整机重量 $<10\text{kg}$ ），通过 ATEX 认证（Ex d IIC T4）。创新性开发三维立体导航系统，结合 2D 激光雷达（抗干扰型号）与鱼眼相机，在纵横交错的管架中实现亚分米级定位（误差 $<5\text{cm}$ ）。采用模块化检测臂设计，可灵活搭载：①高灵敏度电化学传感器（H₂S 检测限 0.1ppm）；②微波介电测厚仪（非接

触式，精度 $\pm 0.03\text{mm}$ ；③红外热像仪（温差灵敏度 0.05°C ）。

在广东某石化企业应用中，机器人成功在管廊间距仅 40cm 的狭窄空间完成自主巡检，准确识别出法兰密封失效（甲烷浓度超限）及 3 处保温层下腐蚀（面积 $>10\text{cm}^2$ ）。通过数字孪生平台实时映射检测数据，使厂区管道异常响应时间从 72h 缩短至 2h ，防爆安全性 100% 符合 GB 3836 标准。

3.3 海底管道巡检应用

针对海底管道高压、强腐蚀及能见度低等特殊挑战，智能巡检机器人采用耐压舱体设计（工作深度 300m ）与多推进器矢量控制系统，适应复杂海流环境（抗流能力 ≥ 3 节）。集成侧扫声呐（分辨率 5mm ）、漏磁检测器（缺陷识别率 $\geq 95\%$ ）及阴极保护电位传感器，可同步检测管道腐蚀、悬跨及涂层破损。通过光纤微缆实现实时数据传输（延迟 $<200\text{ms}$ ），并配备应急浮标定位装置。在南海某气田应用中，机器人成功定位 12 处管体凹陷（最大深度 8.2mm ）及 3 处锚害损伤，检测效率较 ROV 提升 5 倍。

创新采用自主充电坞站技术，通过水下对接机构实现无线充电（效率 88% ），单次作业覆盖 50km 管段。结合 AUV 群协同作业模式，构建三维管道健康图谱。2023 年渤海管道检测实践表明，该系统将检测成本降低至传统有人深潜的 17% ，数据完整率达 99.3% ，为海底管道完整性管理提供了革命性技术手段。

4 应用效果评估与验证

为系统评估智能巡检机器人的实际性能，研究团队在 3 类典型场景（长输管道、炼化厂区、海底管道）开展了为期 18 个月的工程验证，累计检测里程超过 $2,300\text{km}$ ，采集数据样本逾 15 万组。

4.1 检测精度验证

对比人工检测与机器人检测结果（以 API 570 标准为基准）：①腐蚀缺陷识别：机器人检出率 98.6% （人工为 85.3% ），误报率仅 1.2% （人工达 8.7% ），尤其对 $<2\text{mm}$ 的微裂纹识别优势显著（检出率 91.5% vs 人工 43.2% ）；②几何变形检测：激光 3D 重建测量精度达 $\pm 0.12\text{mm}$ （人工卡尺测量 $\pm 0.5\text{mm}$ ）；③气体泄漏定位：甲烷溯源灵敏度 $0.25\text{ppm}/\text{m}$ （较传统嗅探仪提升 10 倍）。

4.2 效率与经济性分析

①检测时效：日均检测里程达 8.5km （人工巡检 0.6km ），综合效率提升 14.2 倍；②成本对比：单公里检测成本降至 $\text{¥}320$ （传统方式 $\text{¥}2,150$ ），三年运维周期可节约费用 67% ；③数据价值：构建的管道数字孪生体，使维修决策时间缩短 82%（从平均 72h 降至 13h ）。

4.3 可靠性测试

①极端环境适应：在 $-45^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 温度范围、98% 湿度及 8 级风况下，系统故障率 <0.8 次 / 千公里；②防爆性能：通过 300 次模拟爆炸测试（按 GB 3836.1-2021 标准），未引发次生灾害；③续航表现：实际工况下平均续航 9.3h （标称值 8h ），能源回收系统贡献额外 19% 电量。

4.4 工业现场验证

在中俄东线天然气管道某标段的应用中，机器人连续工作 137 天，发现：①B 型套筒焊缝缺陷 12 处（其中 4 处为人工漏检）；②第三方施工损伤 7 处（最小损伤面积 2.3cm^2 ）；③三百阴极保护失效点 3 处（电位差 $>300\text{mV}$ ）。该案例使管道公司年维护成本降低 $\text{¥}2.7$ 亿元，并避免 2 起潜在泄漏事故。所有数据均通过 ASME B31.8 标准验证，误差带控制在 $\pm 1.5\%$ 以内，证实技术方案的工程适用性。

5 结论

本文通过研究适用于石油石化管道的智能巡检机器人系统，结合多模态传感融合与自主导航决策技术，实现复杂环境下管道缺陷的精准识别（平均检出率 98.6% ）与高效巡检（效率提升 14.2 倍）。创新性提出的磁吸附 - 轮式复合机构与三级防爆体系，解决了传统设备在易燃易爆环境中的适应性难题，经工程验证可使运维成本降低 67% 。

未来重点突破三个方向：①开发管道数字孪生系统，实现检测数据与寿命预测模型的实时交互；②构建群体机器人协同网络，通过 5G+ 边缘计算实现百公里级管道全域监控；③探索氢能源动力系统，进一步提升极端环境续航能力。该技术将为油气管道智能化转型提供核心装备支撑，推动行业安全标准升级。

参考文献：

- [1] 张晓轩. 石油石化企业智能巡检机器人的使用现状与对策 [J]. 中国管理信息化, 2022, 25(19):222-225.
- [2] 张卓. 石油化工厂区智能巡检技术研究 [J]. 无线互联科技, 2024, 21(06):29-31.
- [3] 徐亚菲, 郑安, 姜鑫, 等. 油气化工行业智能巡检方案设计及应用 [J]. 中国石油和化工, 2024, (08):82-84.
- [4] 向抒林, 陈炜, 程伟, 等. 石油化工储罐区巡检机器人研究现状与展望 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2024, 41(06):1-8.
- [5] 柳洁, 许敏敏, 李锐, 等. 智能巡检机器人在气田的研发与应用 [C]// 第十五届宁夏青年科学家论坛石化专题论坛论文集. 2019.