

管道检测机器人的 SLAM 导航与 AI 缺陷识别研究

杜欣阳 单超颖 庄园富 陈永康 杨 洋

沈阳城市建设学院信息与控制工程学院 辽宁 沈阳 110167

【摘要】：针对传统人工油气管道检测存在安全风险高、效率低、结果易受干扰等问题，本研究设计了一款基于 SLAM 导航与 AI 缺陷识别的管道检测机器人。硬件上以 Jetson Nano 为主控，集成深感相机、激光雷达、自适应变径机构等模块，构建自主移动平台；软件采用 SLAM 技术实现管道内定位与建图，结合 YOLOv8 模型完成缺陷实时识别，并通过多传感器融合提升检测精度。机器人具备自主导航、智能缺陷识别、精准定位及实时数据回传预警功能，可适应不同管径管道，降低智能检测门槛，为油气管道高效安全检测提供技术支撑。

【关键词】：检测机器人；SLAM；缺陷识别

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.094

油气管道作为运输油气资源的主要方式之一，我国目前已经形成“四大战略通道+五纵五横”的干线管网格局。

石油气是工业与居民生活关键能源，含丙烷、丁烷等烃类且易燃易爆，其生产、储存、运输及使用全链条需精准检测以保公共安全、提能源效率。传统人工检测弊端显著，人员在高危环境作业安全受胁，且效率低、难覆盖大规模管道，结果易受人为影响。引入机器人检测可降本减专业人员依赖、保安全，简化版 SLAM 与 YOLO 缺陷识别结合研究，能降智能检测门槛，为复杂管道检测打基础。

管道机器人是专为管道内部作业设计的设备，可在人类难以抵达的管道环境中完成检测、维修等任务，广泛应用于石油、天然气等行业的管道系统，极大提升了作业效率与安全性。

SLAM 算法的核心在于通过机器人的传感器数据估计其在环境中的位置，同时构建环境地图算法框架^[1]如图 1 所示。

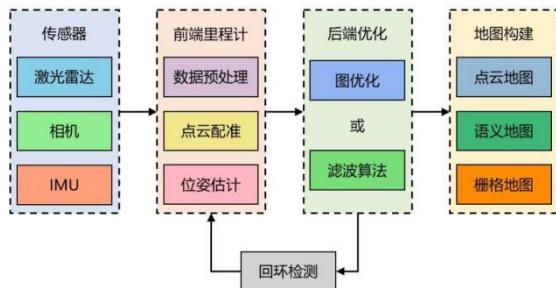


图 1 算法框架

YOLO 缺陷识别则是利用机器学习、深度学习等算法，对

管道相关数据进行分析，从而识别出裂缝、腐蚀等缺陷，提高检测的准确性。

综上所述，整合现代科技工具和信息技术，可以实现更高效、安全的管道检测保护。这不仅能提高管道维保效率，还能推动社会进步和发展。

1 硬件设计

本项目机器人系统的硬件核心在于构建一个集感知、决策、执行为一体的自主移动平台，其主控、传感与驱动模块共同协作，完成在复杂管道环境下的检测任务。

(1) 主控模块。采用 Jetson Nano 作为核心主控单元，这是一款性能强大的嵌入式人工智能计算设备。其优势在于搭载了四核 ARM Cortex-A57 CPU 和 128 核 NVIDIA Maxwell 架构 GPU，能够在本机高效运行复杂的计算机视觉和深度学习模型，为机器人的实时环境感知与自主决策提供算力基础，如图 2 所示。



图 2 Jetson Nano 主控单元

(2) 环境感知与导航模块。管道内部为弱 GPS 信号的非结构化环境，机器人需依靠自身传感器实现定位与建图。我们

作者简介：杜欣阳（2004 年 10 月——）；男；主要研究领域为智能控制算法。

单超颖（1986 年 7 月——）；女；主要研究领域为智能控制算法。

庄园富（2005 年 7 月——）；男；主要研究领域为智能控制算法。

陈永康（2004 年 5 月——）；男；主要研究领域为智能控制算法。

杨洋（2006 年 8 月——）；女；主要研究领域为智能控制算法。

沈阳城市建设学院大学生创新创业项目：“基于人工智能技术的管道检测及定位机器人”。编号：202513208066。

采用深感相机与激光雷达相结合的多源传感方案。深感相机提供丰富的视觉和深度信息，用于障碍物识别与初步定位；激光雷达则提供精确的距离数据，与 IMU（惯性测量单元）数据融合，通过 SLAM 算法构建管道内部地图并实现高精度的实时定位^[2]。

(3) 运动驱动模块。该模块是机器人的“双腿”，负责在管道内可靠行进。采用高性能直流减速电机，配备高精度编码器用于测速和里程计算。电机驱动板接收来自 Jetson Nano 的指令，精确控制各轮足的转速与转向，使机器人具备前进、后退、转弯等能力，并能适应管道内轻微的坡度与弯道。

(4) 管道自适应变径机构。针对不同管径的检测需求，机器人通过电机控制支撑臂的张开与收缩，使驱动轮足始终能紧贴管道内壁，提供足够的牵引力和稳定性，确保机器人能在一定直径范围内的管道中通行无阻，如图 3 所示。

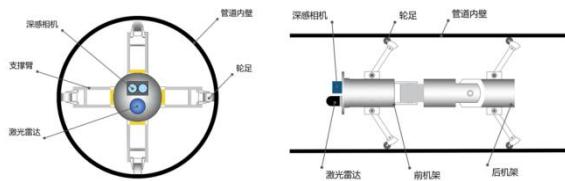


图 3 管道机器人结构

(5) 管道缺陷识别模块。运用基于深度学习的目标检测算法 YOLOv8 对管道内部状态进行实时分析。该模块以前置深感相机为“眼睛”，如图 3 所示。以 Jetson Nano 的 GPU 为“大脑”，持续检测管道内壁的腐蚀、裂纹、凹陷等缺陷。一旦识别到缺陷，系统将自动标注并记录其图像与位置信息。

(6) 电源管理与通信模块。采用高能量密度的锂聚合物电池组为整个系统供电，配备电源管理电路（PMIC）实现电压转换、充放电保护与电量监控。通信方面，机器人通过 5GHz Wi-Fi 模块与地面控制终端建立高速、低延迟的数据链路，实时回传视频流、传感器数据及报警信息。

(7) 辅助照明。在机器人四周集成高亮度、低功耗的 LED 补光灯，为应对管道内黑暗环境，保证图像数据采集质量。

(8) 数据记录与接口模块。机器人内置高容量固态硬盘（SSD），用于本地存储高清检测视频与原始数据，作为后续分析的依据。系统预留丰富的扩展接口，如图 2 所示，可便捷集成如甲烷浓度传感器、声学探伤仪等专用设备，以适应多样化的检测需求。

2 软件系统设计

(1) 采用 SLAM 技术完成机器人在管道内的自主定位与地图构建。这种方式主要是利用了传感器的实时数据与算法估计相结合的方法——即时定位与地图构建。其操作流程包括通过激光雷达和深感相机采集环境信息，并实时估算机器人自身的位姿，同时逐步构建出管道内部的高精度地图，如图 4 所示，

为路径规划和缺陷定位提供基础。

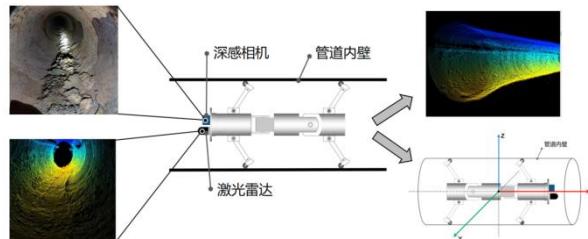


图 4 机器人在管道内的操作流程图

(2) YOLOv8 模型采用单阶段目标检测的方法来完成管道缺陷的实时识别。我们将其理解为对图像进行网格划分，每个网格预测多个边界框并直接给出分类概率，再通过非极大值抑制（NMS）筛选出最终的缺陷检测结果，这种方法实现了速度与精度的良好平衡，满足机器人实时处理的需求^[3]，如图 5 所示。

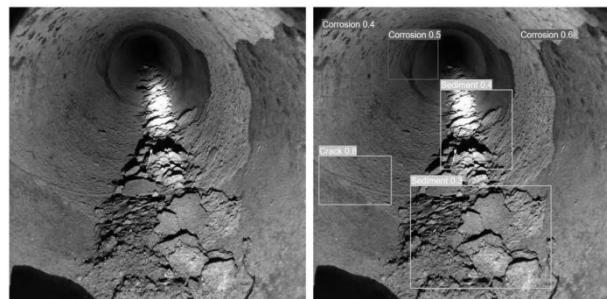


图 5 YOLO 模型检测

(3) 采用多传感器数据融合技术。多传感器数据融合是一项综合处理多源信息的技术，能够将不同传感器的数据进行互补与校验，以获得更可靠、更精确的环境感知和缺陷定位结果。该技术与单一传感器技术的不同点在于它能够有效克服单一传感器的局限性和不确定性，提升机器人在昏暗、纹理单一或具有油污的管道环境下的缺陷定位准确性与导航定位稳定性^[4]。

3 功能简介

(1) 自主导航与建图功能。当机器人进入管道后，其搭载的激光雷达与深感相机会即刻启动，对管道内部环境进行连续扫描。通过 SLAM 技术，机器人能够在弱 GPS 信号的管道环境中实时计算自身位置，并同步构建出用于导航的高精度地图。这项功能使得机器人能够自主规划路径，有效规避障碍物，并精准记录下每一处检测点的位置信息，为后续的维护工作提供精确坐标。

(2) 管道缺陷智能识别功能。管道缺陷的自动识别，作为系统的核心功能，基于先进的深度学习模型。机器人前行过程中，深感相机会持续采集管道内壁的视频流。采集到的图像数据被实时传送至主控模块，由预训练的 YOLOv8 目标检测模

型进行分析。该模型能够迅速识别出图像中的腐蚀、裂纹、凹陷等多种缺陷类型，并自动用边界框标注出来，如图5所示。系统会将这些缺陷图像、类型及其精确的位置信息一同记录保存，生成详细的检测报告。

(3) 缺陷定位与数据关联功能。为实现缺陷位置的精确定位，我们采用了多传感器融合的定位方案。该方案将激光雷达的里程计数据、惯性测量单元(IMU)的姿态数据以及视觉特征进行深度融合处理，有效克服了在长直管道、弯道等复杂环境下单一传感器的累积误差。通过这种技术，即使是在弱GPS信号的管道内部，系统也能将每一个识别出的缺陷与一个绝对坐标相关联，确保地面维护人员能够根据报告快速找到缺陷点^[5]。

(4) 实时数据回传与预警功能。机器人巡检过程中，所有的关键数据，包括实时视频流、已识别的缺陷快照、设备自身状态及高精度定位信息，都会通过高速无线通信模块传输至

地面控制中心。控制中心的软件界面会实时显示机器人的行进轨迹和检测结果。一旦系统识别到重大缺陷(如严重腐蚀或结构性裂纹)，会立即触发自动预警机制，在控制界面进行弹窗和声音报警，提醒工作人员重点关注，从而实现对管道安全隐患的早发现、早处置。

4 结语

本研究通过软硬件协同设计，成功实现管道检测机器人的SLAM自主导航与YOLOv8缺陷识别，有效解决了传统人工检测的痛点，提升了油气管道检测的安全性、效率与准确性。多传感器融合技术的应用，增强了机器人在复杂管道环境中的适应性与可靠性。后续可进一步优化SLAM算法以提升长距离管道定位精度，改进YOLOv8模型以拓展缺陷识别种类，同时探索机器人与管道维修功能的集成，推动油气管道检测与维护技术向更智能、更高效方向发展。

参考文献：

- [1] 朱磊,张潇文,张楠. 基于SLAM的矿井移动机器人定位算法[J].金属矿山,2025,(05):272-277.
- [2] 杨威,武星,楼佩煌,等.基于激光雷达和IMU的移动机器人融合定位方法研究[J].机械设计与制造工程,2024,53(06):55-60.
- [3] 吴德华,陈礼洪,黄淑萍,等.基于改进YOLOv8s的排水管道缺陷检测算法[J/OL].软件导刊,1-6[2025-09-28].
- [4] 谭静.管道内部缺陷定位的多传感器数据融合研究[D].西南石油大学,2016.
- [5] 徐和武.基于多模态传感信息融合的管道缺陷检测研究[D].电子科技大学,2022.